連続繊維補強されたRC床版の耐久性評価 に関する共同研究報告書(IV)

-連続繊維シートの中間剥離とRC 床版の補強設計-

令和4年9月

国立研究開発法人土木研究所 一般社団法人繊維補修補強協会

Copyright © (2022) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I. この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

連続繊維補強されたRC床版の耐久性評価 に関する共同研究報告書(IV)

-連続繊維シートの中間剥離とRC 床版の補強設計-

国立研究開発法人土木研究所 一般社団法人繊維補修補強協会

要旨

本共同研究では、連続繊維シートを用いた床版補強の限界状態設計法の確立に向けて、繊維や樹脂の物性の影響を含めた、コンクリートと連続繊維シートの付着特性とその評価法について検討を行った。その一環として、連続繊維シートを接着した鉄筋コンクリートはりの破壊形態の一つである、ひび割れを起点に発生する中間剥離の発生機構とそれに及ぼす連続繊維シートの物性の影響を明らかにするため、12 体のはり試験と 10 体のせん断付着試験を実施した。その結果、中間剥離が発生する過程を詳細に把握するとともに、中間剥離発生時の連続繊維シートの限界ひずみを把握した。また、含浸樹脂の物性によってはその限界ひずみに大きく影響することを明らかにした。本文では、これらの試験結果を報告するとともに、中間剥離の特徴と評価法について考察を行い、補強設計における中間剥離の照査方法を提案する。また、それらの結果及び既往の研究を踏まえて、RC 床版の連続繊維シートを用いた補強の設計法(骨子案)を提示する。

キーワード:連続繊維シート、含浸樹脂、中間剥離、三角ひび割れ、剥離指数、付着疲労、ガラス転移点

共同研究者名簿(平成29年度~30年度)

国立研究開発法人土木研究所

構造物メンテナンス研究センター

上席研究員 玉越 隆史 (平成30年7月まで)

上席研究員 上仙 靖 (平成30年7月より)

主任研究員 田中 良樹

研究員 佐藤 歩 (平成29年6月まで)

研究員 村井 啓太 (平成29年7月から)

交流研究員 澁谷 敦

交流研究員 藤本 圭太郎 (平成29年5月より30年4月まで)

交流研究員 山本 健太郎 (平成30年5月より)

交流研究員 樋口 祐治 (平成30年4月より)

一般社団法人 繊維補修補強協会

RC床版共同研究委員会

委員長 野村 敏雄 株式会社大林組

委員長補佐 佐々木 一成 株式会社大林組

副委員長・炭素繊維シートグループ責任者

新藤 竹文 大成建設株式会社

副委員長・アラミド繊維シートグループ責任者

藤原 保久 三井住友建設株式会社

炭素繊維シートグループ委員

早川 智浩 株式会社大林組

太田 弘次 株式会社オリエンタルコンサルタンツ

新井 崇裕 鹿島建設株式会社

久保 昌史 清水建設株式会社

滝本 和志 清水建設株式会社

小倉 浩則 ショーボンド建設株式会社

並木 渉 株式会社 長大

小林 雅明 株式会社 長大

松井 孝洋 東レ株式会社

近藤 富士夫 東レ株式会社 (平成29年7月より)

小林 朗 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

立石 晶洋 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

久部 修弘 三菱ケミカルインフラテック株式会社

(平成30年3月まで)

山内 征一郎 三菱ケミカルインフラテック株式会社

(平成30年4月より)

長谷川 泰聰 三菱ケミカルインフラテック株式会社

青柳 聖 八千代エンジニヤリング株式会社

アラミド繊維シートグループ委員

篠崎 裕生 三井住友建設株式会社

三上 浩 三井住友建設株式会社

中井 裕司 前田工繊株式会社

大久保 誠 前田工繊株式会社

岡村 脩平 帝人株式会社

吉本 大士 帝人株式会社 (平成30年3月まで)

梶原 大資 帝人株式会社 (平成30年4月より)

倉方 裕史 帝人株式会社

宮内 理治 東レ・デュポン株式会社

(平成30年3月まで)

岡田 泰一 東レ・デュポン株式会社

(平成30年4月より)

菊池 美穂 東レ・デュポン株式会社

(平成30年3月まで)

廣瀬 めぐみ 東レ・デュポン株式会社

(平成30年4月より)

近藤 真一 ファイベックス株式会社

石井 裕二 ファイベックス株式会社

井之上 賢一 ファイベックス株式会社

事務局長 井部 博

積水化学工業株式会社 刈茅 孝一

吉田 博次

中尾 亮介

共同研究者名簿(令和元年度~令和2年度)

国立研究開発法人 土木研究所

構造物メンテナンス研究センター

上席研究員 上仙 靖

総括主任研究員 田中 良樹

研究員 村井 啓太 (令和元年6月まで)

交流研究員 山本 健太郎 (平成31年4月まで)

一般社団法人 繊維補修補強協会

RC 床版共同研究委員会

委員長 野村 敏雄 株式会社大林組

委員長補佐 佐々木 一成 株式会社大林組

副委員長・炭素繊維シートグループ責任者

新藤 竹文 大成建設株式会社

副委員長・アラミド繊維シートグループ責任者

藤原 保久 三井住友建設株式会社

炭素繊維シートグループ委員

早川 智浩 株式会社大林組

太田 弘次 株式会社オリエンタルコンサルタンツ

新井 崇裕 鹿島建設株式会社

久保 昌史 清水建設株式会社

滝本 和志 清水建設株式会社

小倉 浩則 ショーボンド建設株式会社

並木 渉 株式会社 長大

川原 将 株式会社 長大

松井 孝洋 東レ株式会社

村井 彰児 東レ株式会社

角倉 浩平 東レ株式会社 (令和元年9月より)

立石 晶洋 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

櫻井 俊太 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社

(令和元年7月より)

山内 征一郎 三菱ケミカルインフラテック株式会社

長谷川 泰聰 三菱ケミカルインフラテック株式会社

齋藤 信人 三菱ケミカルインフラテック株式会社

(令和元年9月より)

青柳 聖 八千代エンジニヤリング株式会社

(令和元年7月まで)

渡辺 遼 八千代エンジニヤリング株式会社

(令和元年8月より)

アラミド繊維シートグループ委員

篠崎 裕生 三井住友建設株式会社

三上 浩 三井住友建設株式会社

野並 優二 三井住友建設株式会社(令和元年9月より)

中井 裕司 前田工繊株式会社

大久保 誠 前田工繊株式会社

岡村 脩平 帝人株式会社

倉方 裕史 帝人株式会社

川口 武 帝人株式会社

山田 洋輔 東レ・デュポン株式会社

斎藤 祐亮 東レ・デュポン株式会社

(令和2年3月まで)

松井 宏之 東レ・デュポン株式会社

(令和2年4月より)

石井 裕二 ファイベックス株式会社

茄子川 治 ファイベックス株式会社

井之上 賢一 ファイベックス株式会社

事務局長 井部 博

目 次

1. はじめに	
2. 既往の研究	
3. はり試験	1
3.1 試験方法	1
3.2 試験結果	32
3.2.1 計算値の算出	
3.2.2 荷重-変位関係,破壊状況	
3.2.3 ひずみ分布及び破壊過程	4
3.2.4 連続繊維シートの面外変位	69
4. せん断付着試験	8
4.1 概要	8
4.2 試験方法	8
4.2.1 供試体及び載荷方法	8
4.2.2 試験の水準	83
4.3 試験結果	82
4.3.1 開口変位と荷重の関係	82
4.3.2 ひずみ分布と付着応力度分布,及び τ - S の関係	89
4.4 τ-S関係の同定	90
4.4.1 これまでの研究例	90
4.4.2 試験誤差を修正した τ - S 関係	9
4.4.3 試験結果の評価	9
4.5 まとめ	100
5. FEM 解析 ·····	10
5.1 FEM モデルにおける要素寸法と引張軟化特性の影響	10
5.1.1 解析モデル	10
5.1.2 材料特性	102
5.1.3 載荷方法	100
5.1.4 解析結果	100
5.2 炭素繊維シートで補強したはりの FEM 解析結果	110
5.3 アラミド繊維シートで補強したはりの FEM 解析結果	124
5.4 含浸樹脂の物性を変化させた供試体の FEM 解析結果	130
5.5 まとめと今後の課題	
6. はり試験の挙動における連続繊維シートの弾性係数	
6.1 概要	133

6.2 荷重-変位関係	136
6.3 平面保持と中立軸	141
6.4 降伏曲げモーメント $M_{\!\scriptscriptstyle y}$ と破壊抵抗曲げモーメント $M_{\!\scriptscriptstyle u}$	154
6.5 まとめ	156
7. 中間剥離の過程と含浸樹脂の影響	157
7.1 中間剥離の過程	157
7.2 中間剥離の予兆となる三角ひび割れの発生	164
7.3 各因子が中間剥離の過程に及ぼす影響	190
7.4 中間剥離と含浸樹脂の物性	193
7.5 剥離曲げモーメントと部分剥離曲げモーメントの推定	199
7.5.1 ファイバーモデルによるはりの荷重-変位関係の予測	199
7.5.2 はりの荷重一変位関係における試験値と計算値の比較	200
7.5.3 剥離曲げモーメント予測式の構築	203
7.5.4 剥離曲げモーメント予測式の妥当性	205
7.5.5 部分剥離曲げモーメント予測式	208
7.6 既往の知見再考	210
8. 中間剥離の照査方法(案)	212
8.1 照査の対象とする事象	212
8.2 三角ひび割れに対する照査	213
8.3 部分剥離に対する照査	214
8.3.1 概要	214
8.3.2 降伏曲げモーメントの特性値	214
8.3.3 部分剥離曲げモーメントの特性値	215
8.3.4 限界状態 1 の照査方法	215
8.3.5 限界状態 3 の照査方法	215
8.3.6 RC 床版の補強設計への適用と課題	216
8.4 繰返し走行荷重を受ける RC 床版における連続繊維シートの付着疲労に対する照査法の検討	218
8.5 含浸樹脂の物性の規定	222
9. 道路橋 RC 床版の連続繊維シートを用いた補強の設計法(骨子案)	223
10. まとめ	227
参考文献	230
付属資料	239
付属資料1 含浸樹脂の配合に関する事前検討	241
付属資料2 はり試験のひずみデータ	253
付属資料3 ビデオによる中間剥離の観察	339
付属資料 4 既往の文献におけるはり試験データ	399

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 床版の疲労損傷は、国内の厳しい交通実態や環境条件を反映して道路橋の主たる損傷要因の一つである。疲労損傷に対する補強法として、連続繊維シートを RC 床版下面に接着することによる工法がある。同工法は、床版に限らず、コンクリート構造物の補修・補強において、軽さや施工性で有利な点から既に多く利用され、主要な工法の一つになっている。しかし、RC 床版に適用する同工法は、複数の設計方法が用いられているため、概ね同じ条件の床版であっても使用する繊維や樹脂の種類、及び補強量に大きな相違が生じる場合がある。また、連続繊維シートに使用される材料、断面構成等の仕様は多種多様なものが提案されているが、いずれも JIS の材料規格がなく、また信頼性を確保するための適切な品質管理方法や補強効果の評価法が必ずしも明確でない。本共同研究では、国内外の研究や土木研究所のこれまでの検討結果を含めた既往の知見に基づき、連続繊維シートで補強された RC 床版の耐荷機構について検討するとともに、個々の補強材の機械的性質について調査検討を行う。

連続繊維シートで補強された RC 部材の軸引張試験をはじめ、これまで同補強工法に関する多くの研究が行われ、連続繊維シートとコンクリートの付着の評価法、設計法も既に提案されている $^{(0)\lambda(z)(1)}$. しかし、その付着に関する繊維や樹脂の物性あるいはそれらの組合せの下での物性の評価法はまだ必ずしも明確にされていない。これらの点を踏まえて、本共同研究では床版補強の限界状態設計法確立に向けて、繊維や樹脂の物性の影響を含めた、連続繊維シートとコンクリートの付着特性とその評価法について検討を行った。これまでに、本共同研究の報告書(I)で連続繊維シート及びそれを構成するエポキシ樹脂のせん断弾性係数に関する検討結果を、同報告書(II)で連続繊維シート付着挙動への汎用 FEM 解析の適用性について、軸引張を受ける部材を対象として検討した結果をそれぞれ報告した $^{(1)}$. また、同報告書(III)では、実橋における連続繊維シートの挙動や損傷事例の調査結果を報告した $^{(1)}$.

軸引張を受ける部材における連続繊維シートの剥離限界は、土木学会の照査法を用いても比較的よく把握することができる。しかし、床版のように曲げを受ける部材における連続繊維シートの剥離限界は、同照査法では必ずしも適切に評価できない 5). また、はり供試体を用いた曲げ試験では、連続繊維シートに直接関連する破壊形態として、a)連続繊維シート端部からの剥離(以下、端部剥離という)、b)曲げひび割れなどの下面のひび割れを起点した剥離(以下、中間剥離という)、及びc)連続繊維シートの破断がある 6.9). これらのうち、本共同研究では、まだ明確でない部分が多いと考えられる連続繊維シートの中間剥離を対象として、上記の繊維や樹脂の物性の影響を検討することとした.

この点について、2019~2020年にかけて12体のはり試験と10体のせん断付着試験を実施した。その結果、中間 剥離が発生する過程を詳細に把握するとともに、中間剥離発生時の連続繊維シートの限界ひずみを把握した。また、 含浸樹脂の物性によってはその限界ひずみに大きく影響することを明らかにした。 本文では、これらの試験結果を報告するとともに、中間剥離の特徴と評価法について考察を行い、補強設計における中間剥離の照査方法を提案する。また、それらの結果及び既往の研究を踏まえて、RC 床版の連続繊維シートを用いた補強の設計法(骨子案)を提示する。

2. 既往の研究

(1) RC 床版の疲労耐久性に及ぼす連続繊維シートの付着疲労の影響

旧建設省土木研究所と炭素繊維補修・補強工法技術研究会が実施した共同研究(以下,旧共研という)の中で,層数の異なる炭素繊維シートを下面に接着したRC 床版の輪荷重走行試験が実施された「1)4).このとき,補強量を1層当り300g/m²目付として,主鉄筋方向1層と配力鉄筋方向1層とした場合(以下,1層×1層と記す),同様に2層×2層,3層×3層,4層×4層とした場合というように,供試体ごとに層数を変化させて輪荷重走行試験を実施した結果,補強量が2層×2層の場合に最も疲労耐久性が高く,概ね現行の道路橋示方書で設計された無補強RC床版(H8床版)に相当するレベルまで改善されることが分かった。図-2.1.1に,その輪荷重走行試験の結果を示す4).補強量を2層×2層より多くしても高い効果が得られ難かった理由として,図-2.1.2の模式図に示すように,連続繊維シートの付着疲労の影響が挙げられた「1).補強量が3層×3層,4層×4層の場合に、2層×2層の場合に比べて断面性能は向上したが,輪荷重走行の下で,ひび割れ付近における連続繊維シートの付着疲労の影響が先行したために,疲労耐久性は逆に低下したと推察している193)

旧共研の輪荷重走行試験における破壊形態については、本共同研究(以下、本共研という)の報告書(III)で追加資料を含めて再整理した 5. 図-2.1.3 に、旧共研の輪荷重走行試験における、試験後の供試体の切断面を 2 層×2 層と 4 層×4 層の場合を例に示す。参考として、補強されていない RC 床版の場合、及び鋼板接着補強した場合、上面増厚補強した場合についても示した。2 層×2 層、4 層×4 層いずれの場合も、切断面でみたときの破壊形態は補強されていない RC 床版に類似しており、輪荷重走行幅の両端付近から下面に向かって拡がるような斜めひび割れが見られた(上面につながるひび割れは抜け落ち直前に生じる)。しかし、報告書(III)で述べたように、繰返し走行載荷中における被補強 RC 部材の劣化伸展との関係が明確でないので、a) RC 部材の劣化が走行繰返し載荷によって先行して連続繊維シートの剥離が見られ始めたのか、逆に b) 連続繊維シートの剥離が生じ始めたために、RC 部材の劣化が早まったのか、明確には確認できない。上記のとおり、3 層×3 層以上の層数の場合に付着疲労の影響が強くなった可能性がある旨が記されており1)、ここでいう b)に近いパターンで連続繊維シートの剥離が先行して抜け落ちに至ったと推察される。

(2) 下面接着補強された RC はりの曲げ試験と破壊形態

RC はりの下面に補強材を接着して補強する工法は、1960年代後半から見られ、1980年代までは鋼板を下面に接着したRC はりについて、載荷試験や解析による研究が行われた^{例えばら,7)}. 1990年代に入り、FRP 板や連続繊維シートを下面に接着したRC はりの研究が行われるようになった^{例えば8)}. これらを含む既往の研究を踏まえて、曲げを受ける下面接着補強されたRC はりの破壊形態が明らかにされている ^{9,11)}. そのうち図-2.1.4に、下面に補強材が接着されたRC はり特有の破壊形態を模式図で示す。補強の程度、供試体のディテール、載荷条件によっては、補強されていないRC はりと同様に、コンクリートの圧壊や降伏後のコンクリートの圧壊、あるいはせん断破壊が先行して生じるほか、補強材の剥離や破断が先行して補強効果を失う場合がある。また、補強材の剥離には、補強材端部から剥離する端部剥離と、構造的なひび割れを起点に剥離する中

間剥離がある.

(3) 中間剥離と端部剥離

図-2.1.4(a), (b)に示すように、鋼板や FRP 板で下面接着補強された RC はりの曲げ試験を行うと、補強材端部を起点に RC はりのせん断破壊が生じる場合と端部剥離が生じる場合がある。端部剥離については、端部付近のはり下面のコンクリートに作用する主応力がコンクリートの引張限界を超えると破壊が生じると考えられており、Roberts らの理論解がや近似式 $^{12)}$ をベースとして、いくつかの照査方法が提案されている $^{(0)}$ に元 一方、連続繊維シートを用いた下面接着補強が研究され始めて以降、図-2.1.4(c)に示すように、曲げひび割れや曲げせん断ひび割れを起点として補強材の剥離が伸展する中間剥離の事例が報告されている $^{(0)}$ に、これまでの研究事例では、例えば、はり試験で見られる中間剥離がせん断付着試験における剥離と同様に考え、せん断付着試験の結果に基づく剥離推定式に類似する式により照査する方法が提案されている $^{(0)}$ しかし、はり下面に接着された連続繊維シートの中間剥離における付着せん断応力 τ と相対すべり変位 S の関係が、せん断付着試験の場合における τ - S 関係と異なっているといわれている $^{(4)}$.

(4) 中間剥離のメカニズムと特徴

岸,三上らは,中間剥離(彼らはピーリングとしている)の発生について,概ね次のように説明されている $^{15)}$. 載荷点付近,せん断スパン内の曲げひび割れの下端付近に斜めひび割れが発生して(RC はりの斜め引張破壊,せん断破壊とは異なる),はり側面で見ると,その斜めひび割れ,曲げひび割れ及び連続繊維シートで囲まれた三角形のブロックが形成される。さらに荷重を増すと,そのブロックが回転することによって,連続繊維シートが面外に押し出されるようになって,その動きとともに連続繊維シートの剥離が生じる.剥離破壊の際,一部の区間では,連続繊維シートに付着しているかぶりコンクリートごと剥落することが示されている.また彼らは,試験の結果を踏まえて,降伏曲げモーメント M_y の終局曲げモーメント M_u に対する比 M_y/M_u が 0.7以下の場合に,ピーリングが生じやすくなることを明らかにしている.

Garden ら ¹⁶は、CFRP 板を接着した RC はりの載荷試験を行い、曲げせん断ひび割れと RC はり下縁の間に小さいひび割れ(Tributary crack)が発生して、三角形を形成すること、この三角ブロック(Triangular piece)に偶力が作用して、回転が生じた後に破壊に至ることが報告されている。曲げせん断ひび割れのため、小さいひび割れの発生位置がその載荷点側であり、曲げひび割れの場合にその支点側に発生するのと異なるが、その後の三角ブロック形成やその回転が補強材の剥離に影響する点で岸、三上らの中間剥離のパターンと概ね共通している。

(5) 中間剥離事例と供試体のディテール

中間剥離を研究するための載荷試験を行うため、他の破壊形態よりも中間剥離を先行させる必要がある. 本共研では、国内における既往の研究で中間剥離が見られた研究として、呉ら 17 、佐藤ら 18 、岸、三上ら 19 の事例を抽出して、その際のRCはりのディテールや補強材の仕様を整理した。表-2.1.1に、中間剥離が見られたはり曲げ試験における供試体の諸元の例を示す。

(6) 連続繊維シートで補強されたはりの挙動に関する解析事例

下面に鋼板接着された RC はりの鉄筋降伏までの挙動は、従来の RC 構造の計算と同様に、鋼板の断面積 を適宜換算して断面定数に加えることでよく表される 20). 連続繊維シートが接着された RC はりについては、 鋼板接着の場合と同様に連続繊維シートの換算断面積を考慮する場合と 21), 連続繊維シートの効果をある程度低減する場合がある (例えば、Okeil らの計算では連続繊維シートの応力ーひずみ関係の傾きを $0.9\,E_f$ としている 22). E_f : 連続繊維シートの弾性係数). これらの違いは、連続繊維シートの材料特性による影響や、ひずみの測定技術の影響などによって、連続繊維シートの効果の評価が揺らぐところが残されている可能性がある.

連続繊維シートが下面に接着された RC はりの鉄筋降伏後を含む挙動は、RC はりのファイバーモデルによる計算方法に、連続繊維シートも平面保持が成立すると仮定してその断面積を加えることでよく表される 22). 引張を受ける連続繊維シートを接着した RC 部材の FEM 解析では、シートの付着性状を表す τ - S 関係のモデルが導入されており、連続繊維シートの効果と剥離挙動が再現されている 23). このとき、 τ - S 関係のモデルは、せん断付着試験の結果から検討することも試みられている 14). また、そのような FEM 解析においては、コンクリートの構成則のうち引張軟化の程度が、シート層数によって影響を受けることが報告されている 23). 前述のとおり、森川ら 14)は、下面に連続繊維シートを接着した RC 部材のはり試験とともに FEM 解析を実施した結果、せん断付着試験で得られた τ - S 関係のモデルをそのままはりの解析に適用することはできないとしている。このため、換算係数を導入してはりの解析用に修正した τ - S 関係のモデルを用いる方法を示した.

(7) 連続繊維シートの端部剥離に関する解析

Roberts と Haji-Kazemi は、鋼板端部の挙動を含む、鋼板接着補強された RC はり全体の挙動について理論解を導いている ⁷⁾. まず Stage 1 では、被補強材と補強材の境界面の適合性から、一般部の理論解を導出する. また Stage 2 では、補強材端部特有の挙動を弾性床上のはり理論を適用して表し、Stage 1 の結果と重ね合わせることで、補強材端部付近を含む、はり全体の挙動を表現している。また、既往の解析や試験結果との比較から理論解の妥当性を例示している。なお、Stage 1 では、接着剤層の法線方向のばねと軸方向に並行なせん断ばねを考慮し、Stage 2 では、接着剤層の法線方向のばねのみを考慮している。法線方向のばね剛性には樹脂の弾性係数が、せん断ばね剛性には樹脂のせん断弾性係数がそれぞれ関わると考えられている。

特に、鋼板や FRP 板で下面接着補強された RC はりの載荷試験では、補強材の端部剥離が最大荷重に直接関わることから、その評価法を研究する事例が多く見られる $^{\text{例えば 13}}$). その際に Roberts らの理論解あるいは近似解を引用して、あるいは境界条件を修正して、端部剥離の照査法が提案されている。こうした文献に基づき、AASHTO の指針では、次式 $2.1.1\sim3$ により、端部剥離に対する照査が規定されている 26).

$$f_{peel} \leq 0.065 f_c^{0.5}$$
 (2.1.1)

$$f_{peel} = \tau_{av} \left[\left(\frac{3E_a}{E_{frp}} \right) \frac{t_{frp}}{t_a} \right]^{\frac{1}{4}}$$
 (2.1.2)

$$\tau_{av} = \left[V_u + \left(\frac{G_a}{E_{frp} t_{frp} t_a} \right)^{\frac{1}{2}} M_u \right] \frac{t_{frp} (h - y)}{I_T}$$
(2.1.3)

ここに, E_a :接着剤の弾性係数

t_{fip} : FRP 補強材の厚さ

ta :接着剤の厚さ

V_u:補強材端部位置に作用するせん断力

Ga:接着剤のせん断弾性係数

 M_u :補強材端部位置に作用する曲げモーメント

h :被補強部材の高さ

y : 換算断面における中立軸位置(上縁からの距離, コンクリートの引張無視)

 I_T : 等価 FRP 換算断面の断面二次モーメント(コンクリートの引張無視)

 f_{peel} : FRP とコンクリート界面における (FRP 端部からの) 剥離限界応力度

 f_c :コンクリートの圧縮強度

τ_{cv}:式2.1.3 により算定されるせん断応力度

 E_{fip} : FRP 補強材の弾性係数

(8) 中間剥離に関する既往の照査方法

土木学会で 2000 年に取りまとめられたコンクリートライブラリー101「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」(以下,JSCE101 という) $^{27)}$ では,連続繊維シートに作用する引張応力度の最大値が式 2.1.4 を満足する場合,剥離が生じないと判定することとしている.この式は,一般部における連続繊維シートとコンクリートの界面のせん断剥離を対象として, τ -S 関係から連続繊維シートの剥離の照査方法として示されている.

$$\sigma_f \le \sqrt{\frac{2G_f E_f}{n_f t_f}} \tag{2.1.4}$$

ここに、 σ_f : 部材中の最大曲げモーメントによる曲げひび割れ位置での

連続繊維シートの応力(N/mm²)

nf:連続繊維シートの積層数

 E_f :連続繊維シートの弾性係数(N/mm^2)

tr: 連続繊維シートの1層当りの厚さ (mm)

 G_f : 連続繊維シートとコンクリートの界面剥離破壊エネルギー (N/mm)

この式のうち,連続繊維シートとコンクリートの界面剥離破壊エネルギー G_f の値は,連続繊維シートとコンクリートのせん断付着試験(JSCE-E 543)により求めることとしている 27)。試験によらない場合,安全側の値として G_f の値に 0.5 N/mm を用いてよいとしている 27)。

また,式 2.1.4 の照査で剥離が生じると判定された場合における剥離を考慮した耐力の照査法が示されている. このうち,中間剥離に対しては,連続繊維シートに作用する引張応力度の差の最大値が式 2.1.5 を満足するときの耐力としてよいとしている ²⁷⁾.

$$\Delta \sigma_f \le \sqrt{\frac{2G_f E_f}{n_f t_f}} \tag{2.1.5}$$

ここに、 $\Delta \sigma_f$:最大曲げモーメントによる曲げひび割れ位置と周辺ひび割れ位置の 連続繊維シートに作用する引張応力の差の最大値 (N/mm^2)

なお, JSCE101 では、連続繊維シートの端部剥離の明確な照査法は示されていない.

米国コンクリート工学会(ACI)で 2008 年にまとめられた,「コンクリート構造物を補強するために接着される FRP システムの設計施工指針」(以下,ACI 指針) $^{28)}$ では,連続繊維シート(wet layup systems)だけでなく.FRP 板や FRP ロッドを含む,FRP システムによる接着補強を対象としている.ACI 指針では,Tengらの研究 $^{10),29)}$ を参照して FRP システムの中間剥離に対する照査として,次式が示されている.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c'}{n_f E_f t_f}} \le 0.9 \varepsilon_{fu}$$
 (2.1.6)

ここに、 ϵ_{fd} : 剥離限界ひずみ

 ϵ_{fu} :設計破断ひずみ

 $f_{c'}$: コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

Teng ら $^{10)}$ は、Yuan らのせん断付着試験を対象とした理論解 $^{30)}$ を基に、既往の中間剥離のはり試験結果を用いてキャリブレーションを行い、次式を提案している。Teng らは応力度で提案しているが、ここでは E_f で除してひずみ換算の式で表す。

$$\varepsilon_{fd} = 0.48 \beta_p \beta_L \sqrt{\frac{\sqrt{f_c'}}{n_f E_f t_f}}$$
 (2.1.7)

ここに、 β_p : コンクリート部材幅に対する連続繊維シートの幅の比に関する補正係数 連続繊維シートの幅がコンクリート部材幅の 1/2 のとき $\beta_p = 1$.

 β_L : 全付着長が定着長より短い場合の補正係数 十分な付着長が確保されているとき β_L = 1.

注) せん断付着試験に対しては、式 2.1.7 の係数 0.48 を 0.427 としていた 31).

Teng らは式 2.1.7 を求めるにあたって、剥離の照査を考える上でのせん断付着試験とはり試験の違いについて次の項目を挙げている.

- 1) せん断付着試験では、曲げ変形や主鉄筋がない。
- 2) 複数のひび割れが存在する場合, その相互作用はせん断付着試験では示されない.
- 3) ひび割れを有するはりの曲げ解析で平面保持の仮定が用いられるが、中間剥離が生じた場合に 曲げひび割れ付近の FRP 板の応力は明らかにその仮定の下での値と乖離する.

その翌年、Teng らは、平方根の中に f_c の平方根がないものを別途提案している²⁹⁾.

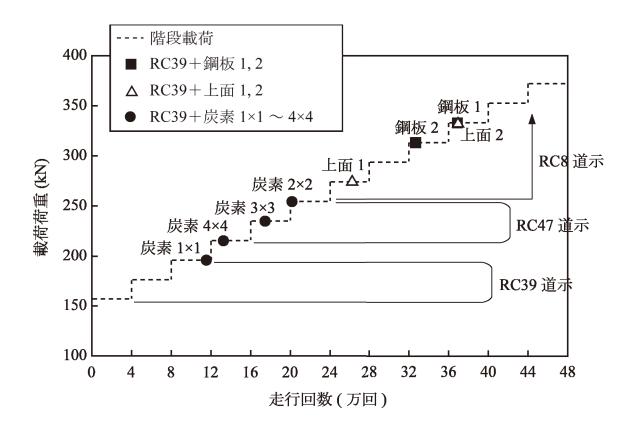


図-2.1.1 旧共研における補強後の RC 床版の階段載荷による輪荷重走行試験結果 4)

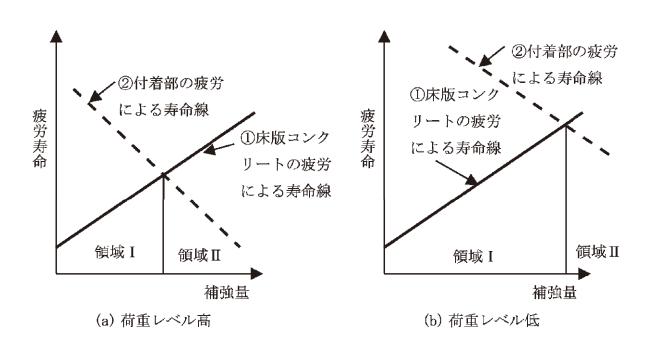
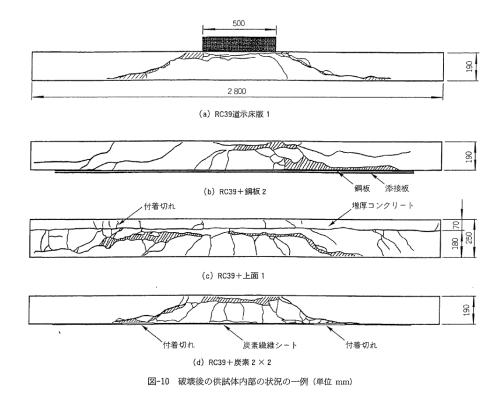
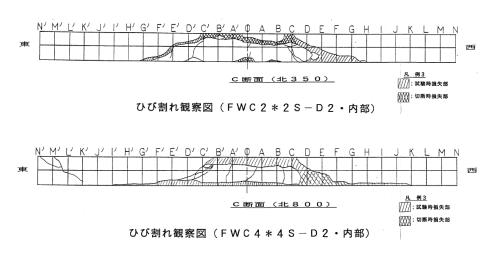


図-2.1.2 補強量と疲労寿命の概念図1)



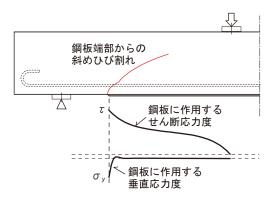
(a) 炭素繊維シート全面2層貼りの場合における破壊事例 (他の条件における結果と対比して示す⁴⁾)



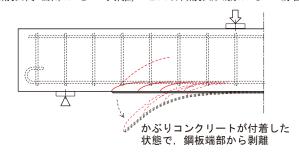
注)K-K'の範囲が連続繊維シートを接着していた部分で、4層×4層の場合にKのところまで剥離が生じていたことを示している。両端のK-N,K'-N'の範囲は、単純支持上の幅300mmの載荷板(鋼板)があった部分で、連続繊維シートは載荷板の手前まで接着されていた。

(b) 炭素繊維シート全面 2 層貼り (上図) と 4 層貼り (下図) の破壊事例の比較

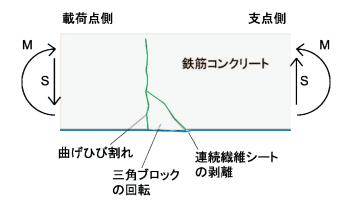
図-2.1.3 下面接着補強された RC 床版の破壊形態



(a) 補強材端部からの剥離, せん断補強鉄筋がない場合



(b) 補強材端部からの剥離, せん断補強鉄筋がある場合



(c) 曲げひび割れを起点とした中間剥離

- 注 1) 図(a)における補強板の端部付近に発生するせん断応力及び垂直応力の分布は Roberts の近似解 ¹²⁾による.
 - 2) 補強の程度,供試体のディテール,載荷条件によっては,補強されていないRCはりと同様の破壊形態で終局に至る場合もある.

図-2.1.4 下面に補強材が接着された RC はりの破壊形態(模式図)

表-2.1.1 中間剥離が見られたはり曲げ試験における供試体の諸元の例

ı												ľ				
	No.	桁高	有効高	桁幅	主鉄	複鉄筋	スター	コンクリート	主鉄筋の	\\ \'_\	\\ \'\	含浸樹脂	太嗣	載荷方法	破壞形態*1	参考
		Ч	p	9	競		ブップ	压縮強度 fc	降伏点方	断面積 4	弹性係数 氐	弹性係数	1			文献
		(mm)	(mm)	(mm)				(N/mm^2)	(N/mm^2)	(mm^2)	$(\times 10^3 \text{ N/mm}^2) \left E_a (\text{N/mm}^2) \right \text{ (mm)}$	$E_a (N/\text{mm}^2)$	(mm)			
	1	200	160	150	2-D16	2-D13	ϕ 10, ctc80	43.5	360	2×0.11×150	230	3430	1800	1 点載荷	曲げひび割れから剥離	17)
	RC-1	200	160	150	150 2-D16	2-D13	I	30.2	360	$1 \times 0.111 \times b_f$	230	3430	1800	1 点載荷	曲げせん断ひび割れか	17)
_															ら剥離	
	RC-2	200	160	150	2-D16	2-D13	I	30.2	360	$1 \times 0.111 \times b_f$	230	3430	1800	1 点載荷	ll.	17)
	RCS-1	200	160	150	2-D16	2-D13	D6, ctc200	43.5	360	$2\times0.111\times b_f$	230	3430	1800	1 点載荷	曲げひび割れから剥離	17)
佐藤ら	SP-C1	200	165	200	2-D13	2-D13 2-D10 * ²	(D10) *3	35 *4	370	$1\times0.167\times b_f$	236	不明	1800	2点載荷	載荷点から約150mm	18)
															離れた位置から剥離	
	SP-C2	200	165	200	2-D13	200 2-D13 2-D10 * ²	(D10) *3	35 *4	370	$2\times0.167\times b_f$	236	不明	1800	2 点載荷	J)	18)
	A1-R7-1	250	210	150	150 2-D13	2-D13	D10, ctc100	35 *4	382	1×0.286×130	131	不明	3400	2 点載荷	ピーリング剥離	15)
의 기 기	SC-S	250	210	200	2-D19	2-D19	D10, ctc100	32.4	382	1×0.333×200	245	不明	3000	1 点載荷	ピーリング剥離	19)
ı																

** 目標値を示す. *3 支点の外のみに配置. *2 推定. *1 いずれも降伏後に剥離した.

3. はり試験

3.1 試験方法

(1) 供試体

前掲の表-2.1.1 に示した既往の研究で中間剥離が見られた供試体諸元を参考として、かつ M_y/M_u が概ね 0.7 以下となるように供試体の基本形状寸法や配筋、補強量等の試験パラメータを設定した。しかしながら、本試験では、なお中間剥離が生じることの確証を得るため、まず主鉄筋比や桁高さ及び連続繊維シートの層数の異なる 5 体の供試体について、想定どおりに中間剥離が生じることを確認することとした。その結果、後述するように、これらの供試体の諸元とした場合に、いずれも中間剥離が生じることを確認した。

図-3.1.1 に供試体の諸元を示す。また、表-3.1.1 に供試体の種類を示す。数量はそれぞれ 1 体とした。被補強部材の RC はりは、鉄筋比、コンクリート強度、有効高(桁高)をパラメータとした。また、補強材である連続繊維シートは、繊維の種類、シート層数、含浸樹脂の配合(樹脂の弾性係数・せん断弾性係数)をパラメータとした。前述のとおり、いずれの供試体においても中間剥離を発生させるため、連続繊維シートを接着した状態で M_y/M_u ができるだけ 0.7 以下となるようにした。また、有効高が小さいと中間剥離が生じる前にコンクリート上縁の圧壊が先行する可能性が高くなることから、有効高 210mm、桁高 250mm を標準とした。含浸樹脂の物性をパラメータとするため、ここでは各メーカーが推奨する主剤と硬化剤の配合割合 2:1 を、あえて変更することによった。配合は、次項で述べるとおり事前の検討を経てはり試験に臨んだ。その際、コンクリートとの付着強度が得られること、はり供試体に施工できることを前提として、主として、含浸樹脂のせん断弾性係数を低下させる方向で、できるだけ大きく変化させられる範囲の配合とした。

表-3.1.2 に、コンクリートの配合及び打設記録を示す.表-3.1.3 に、コンクリートの圧縮強度及び割裂引張強度を示す.表-3.1.4 に、使用した鉄筋の引張試験結果を示す.

連続繊維シートの諸元と施工時の温度、湿度を表-3.1.5 に示す。連続繊維の種類は、高強度型炭素繊維とアラミド1の2種類とした。表-3.1.6 に、連続繊維シートの引張試験結果を示す。炭素繊維シートは、幅25mm×厚さ 0.111mm×層数の試験片を用いて JIS A 1191 (A 法) により行った。また、アラミド繊維シートは、幅22.7mm×厚さ 0.193mm の試験片を用いて JIS A 1191 (B 法) により行った。引張試験では、シートの両面で軸方向ひずみをひずみゲージを用いて測定したので、各面の破断時ひずみも併せて示した。

含浸樹脂の配合を変更した連続繊維シートの場合,ガラス転移点が低くなる傾向が見られ,はり試験時の温度では想定した以上に樹脂が柔らかくなっていた可能性があることから,はり試験後に,はり試験時と同等の気温において,連続繊維シートの引張試験を再度行った.通常の配合の場合は,鋼材用のひずみゲージを用いても連続繊維シートのひずみを適切に測定できると考えられるが,樹脂の物性が大きく変化した場合に,ひずみゲージによる測定の妥当性が分かりにくかったことから,鋼材用のひずみゲージのほかにプラスチック用のひずみゲージも用いるとともに,伸び計によるひずみ測定も行った.図-3.1.2に引張試験の試験片と計測装置の設置状況を,図-3.1.3にひずみゲージの貼付け位置を,図-3.1.4に試験状況をそれぞれ示す.それらの結果を表-3.1.7に示す.表中には,鋼材用のひずみゲージによる弾性係数,プラスチック用のひず

みゲージによる弾性係数,伸び計によるひずみ測定による弾性係数を示した.測定方法によって,弾性係数 が大きく異なる場合が見られた.この点については6章で検討する.

はり下面全体に、コンクリート面の目荒らし、プライマーまでの処理を行った後、図-3.1.1 に示したとおり、RC はりの下面に、はり幅と同程度の幅の連続繊維シートを貼り付けた. 図-3.1.5 に RC 部材への連続繊維シートの施工状況を示す. この試験シリーズでは、一部の供試体で含浸樹脂の物性を変える際に、施工時の含浸樹脂の粘度が極端に低くなることが予想されたため、12 体共通で、下向きに施工することとした. 連続繊維シートの端部剥離を抑えるためには、連続繊維シートの端部をできるだけ支承に近い位置にするのがよいが、粘度の低い含浸樹脂が連続繊維シートの端部付近である程度拡がってしまうことを想定して、連続繊維シートの端部を支承鋼板から 30mm 離した(後掲図-3.1.12(a)). 供試体 A113fc20 を除き、コンクリート打設後 14 日以上で連続繊維シートを施工し、その後、1 体目の試験開始までの養生期間が 12 日以上であった. 供試体 A113fc20 は、コンクリートの強度発現が小さいうちに載荷することから、コンクリート打設後 6 日で連続繊維シートを施工し、試験開始までの養生期間が 5 日であった.

参考として、表-3.1.8 に、ひずみ等の計算値を算出する際に用いる各供試体の中立軸位置(計算値)と断面二次モーメントを示す。連続繊維シートで補強された RC はりの降伏時の中立軸位置と断面二次モーメントの計算 ¹⁾は 6.4 で示す。

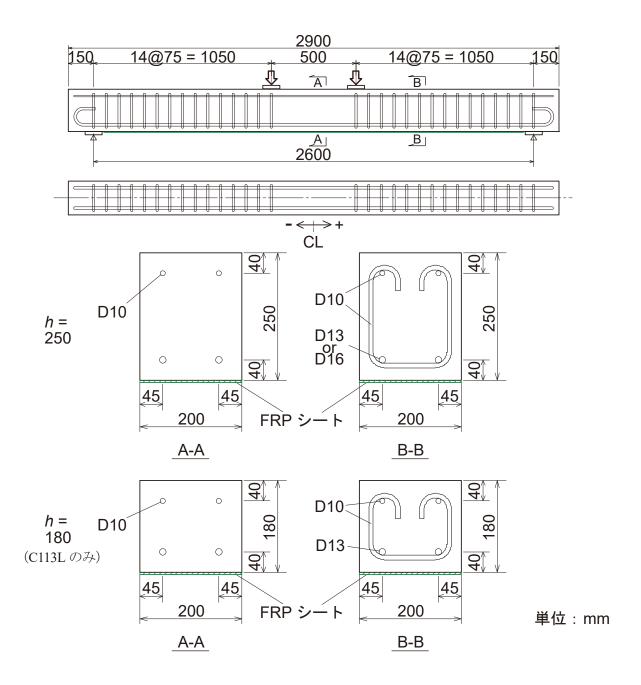


図-3.1.1 シート補強された RC はり供試体の配筋と形状寸法及び載荷方法

表-3.1.1 シート補強された RC はり供試体の種類 (数量は各1体)

	有効	とさい		ΔH- ///>	連続維	繊シー	<u> </u>	7	ンクリート	16/16	加速形能	試験時温度
供試体名	高さ (mm)	桁高さ (mm)	主鉄筋	鉄筋比 (%)	繊維種類	層数 (層)	樹脂 配合	配合	圧縮強度 fc'(N/mm²)	M _y /M _u (試験前)	破壊形態 (試験後)	及び湿度 (℃,%)
C116	210	250	2-D16	0.95	炭素	1	2:1	1	34.7	0.74	中間剥離	20, 69
C113L	140	180	2-D13	0.91	炭素	1	2:1	1	34.7	0.71	中間剥離	20, 68
C113	210	250	2-D13	0.6	炭素	1	2:1	1	34.7	0.69	中間剥離	19, 57
C213	210	250	2-D13	0.6	炭素	2	2:1	1	34.7	0.56	中間剥離	20, 46
C313	210	250	2-D13	0.6	炭素	3	2:1	1	34.7	0.52	中間剥離	22, 56
C113e1	210	250	2-D13	0.6	炭素	1	2:1.4	2	29.4	0.55	中間剥離	26, 62
C113e3	210	250	2-D13	0.6	炭素	1	2:1.65	2	29.4	0.55	シート破断	27, 61
A113	210	250	2-D13	0.6	アラミド	1	2:1	2	29.4	0.49	中間剥離	27, 68
A113e1	210	250	2-D13	0.6	アラミド	1	2:1.55	2	29.4	0.49	シート破断	28, 56
A113e3	210	250	2-D13	0.6	アラミド	1	2:1.7	2	29.4	0.49	中間剥離*	28, 52
A113fc20	210	250	2-D13	0.6	アラミド	1	2:1	3	21.5	0.57	中間剥離	28, 61
A113fc40	210	250	2-D13	0.6	アラミド	1	2:1	4	40.5	0.45	中間剥離	24, 73

注) コンクリートの配合 1~4 は表-3.1.2 に示す. * 樹脂凝集破壊. M_{y} : 降伏曲げモーメント, M_{u} : 終局曲げモーメント.

表-3.1.2 コンクリートの配合及び打設記録

配合	目標強度	W/C	空気量	s/a		単位	量 (kg	g/m ³)		SL
园区,马,	(N/mm^2)	(%)	(%)	(%)	W	С	S	G	AE	(cm)
1	30	56.3	4.5	45.1	161	286	827	1027	2.86	8.5
2	30	56.3	4.2	45.5	158	281	255	1027	2.81	8.0
3	18	66.3	4.0	47.0	161	243	266	1011	2.43	8.5
4	50	38.6	4.0	37.5	176	456	187	1056	4.56	9.0

セメント:普通ポルトランドセメント, AE: AE 減水剤 粗骨材の最大寸法: 20mm

表-3.1.3 コンクリートの圧縮及び割裂引張強度試験結果

配合	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm²)	弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)	ポアソ ン比	割裂引 張強度 (N/mm²)	備考
1	28	33.5	23.9	0.15	2.3	
	43	34.7	24.5	0.16	2.7	試験時
2	25	29.4	24.0	0.17	2.7	開始時
	28	29.4	24.7	0.19	2.4	
	33	28.8	24.1	0.17	2.9	終了時
	平均	29.2	24.3	0.17	2.7	
3	15	21.5	21.7	0.18	2.0	
4	28	40.5	26.1	0.18	3.1	· ·

注) 各材齢の試験結果は3本の平均値

表-3.1.4 鉄筋の引張試験結果

		2 3.1.1	F2 4/4/4 . 3	1324 40001111	
Phase #	配合	鉄筋	降伏点	降伏ひずみ	引張強さ
試験年		亚大月刀	(N/mm^2)	$(\times 10^{-6})$	(N/mm^2)
DI 1	1	D10	346	1830	470
Phase 1		D13	348	1760	495
2019		D16	332	1710	488
Phase 2	2,3,4	D10	361	1890	497
2020		D13	349	1830	496

いずれも SD295, 3 本の平均値

表-3.1.5 連続繊維シートの諸元,施工時温度,湿度

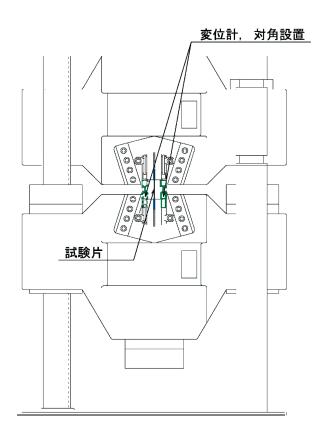
連続繊維 シートの 種類	連続繊維の種類	含浸樹脂 の種類 ¹⁾	はり試験時 シート幅 (mm)	付着引張試験 時シート幅 (mm)	材料試験時 シート幅 (mm)	1層当たり 繊維目付量 (g/m²)	1層当たり 設計厚さ (mm)	施工時 ²⁾ 温度,湿度
炭素	高強度型炭素	2 液性エポキシ樹脂	200	50	25	200	0.111	26~29 °C 49~60 % 25~26 °C * 69~71 % *
アラミド	アラミ ド1	2 液性エポキシ樹脂	197	47.9	13.3	280	0.193	25~26 °C 69~71 %

- 1) それぞれの連続繊維に用いられている含浸樹脂を使用
- 2) シート施工期間中, Phase 1 は 2019 年 9 月, Phase 2 は 2020 年 6 月に施工
- */t, C113e1, C113e3

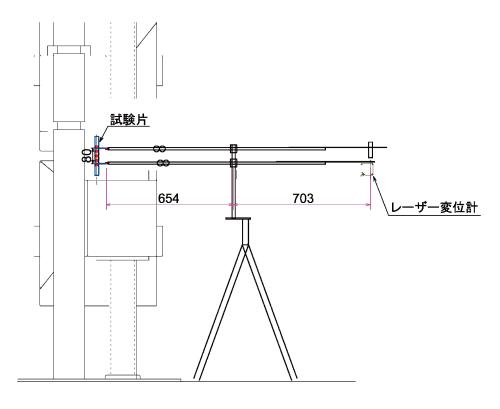
表-3.1.6 連続繊維シートの引張試験結果

はり供試体	層 数 (層)	含浸樹脂配合	引張強度 (N/mm²)	弹性係数 (×10³ N/mm²)	破断時ひずみ (×10 ⁻⁶)	ポアソ ン比	ガラス 転移点 <i>Tg</i> (℃)	試験 時温 度 (°C)
C116, C113L C113	1	2:1	4100	252	16000	0.34	54	25
C213	2	2:1	3880	255	14800	0.34	54	24
C313	3	2:1	4180	257	15800	0.36	54	24
C113e1	1	2:1.4	4030	286	14600	0.29	34	26
C113e3	1	2:1.65	3060	390	8780	0.47	24	26
A113, A113fc20, A113fc40	1	2:1	3460	132	25900	_	58	27
A113e1	1	2:1.55	3170	170	17400	_	18	27
A113e3	1	2:1.7	2920	191	14300	_	11	27

注)炭素繊維シートは、幅 $25 \text{mm} \times \mathbb{P}$ $\stackrel{?}{=}$ 0.111 $\text{mm} \times \mathbb{P}$ の試験片を用いて JIS A 1191 (A 法) により行った. アラミド繊維シートは、幅 $22.7 \text{mm} \times \mathbb{P}$ $\stackrel{?}{=}$ 0.193mm の試験片を用いて JIS A 1191 (B 法) により行った. 試験片 $\stackrel{?}{=}$ 本の結果による. 試験時温度は材料試験時の室温を示す. 弾性係数及びひずみは、いずれも鋼材用ひずみゲージによる.

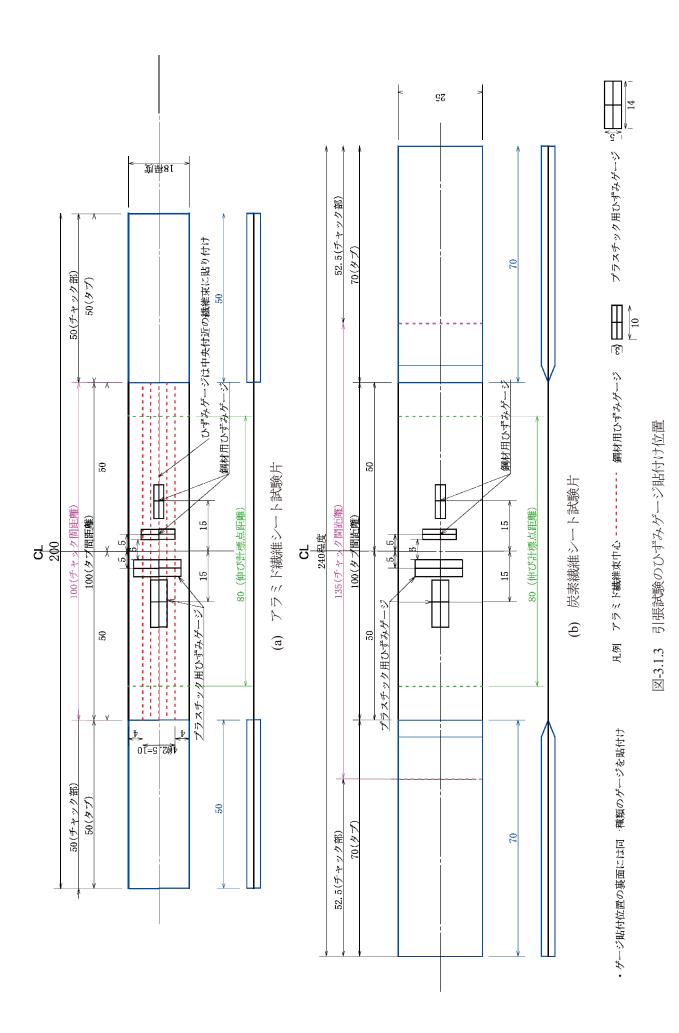


(a) 変位計設置位置(正面図)



(b) 伸び計設置位置(側面図)

図-3.1.2 引張試験の試験片と計測装置

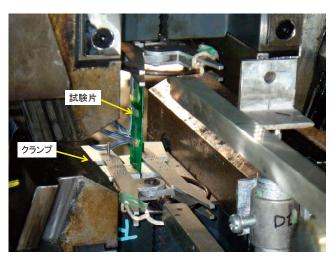


-17-





(a) 引張試験と伸び計の設置



(b) 伸び計の試験片つかみ部



(c) チャック間の変位測定用の変位計(補足用)

図-3.1.4 連続繊維シートの材料引張試験 (はり試験と同等の温度下で再試験)

表-3.1.7	連続繊維シー	トの引張試験	再試験結果
4x = J, I, /	1 11 N/I N/IX/NH: ~	1 マン・ハール 中心が大。	

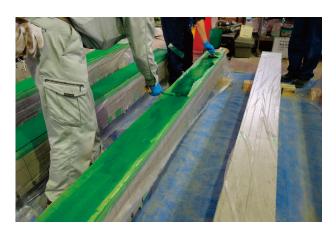
はり供試体	試験片数	含浸樹脂 配合	引張強度 (N/mm²)	測定方法	静弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)	破断時 ひずみ (×10 ⁻⁶)	ガラス 転移点 Tg (℃)	試験時 温度,湿度 (℃,%)
				S	256	17200		
C113e1	3	2:1.4	4380	P	246	17900	54	27, 54
				D	195	21600		
				S	295	13500		
C113e3	4	2:1.65	3570	P	245	15400	24	27, 55
				D	195	20800		
				S	138	19300		
A113	5	2:1	3420	P	134	19900	34	26, 57
				D	103	33900		
				S	150	18700		
A113e1	5	2:1.55	3090	P	119	24400	18	27, 56
				D	86.5	34600		
				S	175	15800		
A113e3	5	2:1.7	3010	P	118	17900	11	27, 57
		7 D 7 D 7 D 7 L 1		D	85.5	32900		

注)表-3.1.6と同様の試験片を用いた.

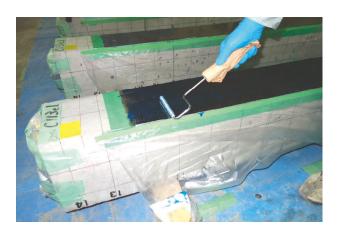
試験時温度,湿度は材料試験時の室内の気温と湿度を示す.

測定方法の記号はそれぞれ次のとおり.

S:鋼材用ひずみゲージによる測定, P:プラスチック用ひずみゲージによる測定, D:伸び計による測定



(a) アラミド繊維シートの含浸樹脂の施工



(b) 炭素繊維シートの含浸樹脂の施工

図-3.1.5 供試体の連続繊維シートの施工状況

表-3.1.8 RC 計算における降伏時の中立軸位置と断面二次モーメント

供試体名	中立軸位置 (上縁からの距離, mm)	断面二次モーメント (×10 ⁷ mm ⁴)			
C116	68.4	9.49			
C113L	46.5	2.89			
C113	58.1	6.96			
C213	61.0	7.82			
C313	63.7	8.66			
C113e1	58.2	6.99			
C113e3	58.2	6.99			
A113	58.0	6.92			
A113e1	57.7	6.85			
A113e3	57.7	6.84			
A113fc20	60.5	7.59			
A113fc40	56.4	6.53			

注)計算方法は6.4で示す.文献 10 による.ただし, E_s/E_c は実測値を用いた場合.これらの計算に用いた連続繊維シートの弾性係数 E_f は,表-3.1.6に示す値.ただし,再試験を行った場合は表-3.1.7に記載の測定方法Pの値を用いた.

(2) 含浸樹脂の物性

樹脂の物性が補強効果に与える影響を検討するため、含浸樹脂の配合をあえて変えることにより、その物性を変化させることとした。配合を決めるにあたっては、事前試験として、樹脂単体の引張試験、圧縮試験、連続繊維シートの引張試験、コンクリートとの接着試験を行った。事前試験の詳細は付属資料1に示す。表-3.1.9 に偏配合としたものを含め、はり試験、せん断付着試験に用いた含浸樹脂の引張試験結果を示す。e3 配合は、標準配合のせん断弾性係数の25%、e1 配合はその中間の60%を目標にそれぞれ決定した。

変化させた含浸樹脂は、コンクリートとの付着強度が得られること、はり供試体に施工できること、FRP としての引張強度、弾性係数が確認できるものであることを前提として、主として、含浸樹脂のせん断弾性係数を低下させる方向で検討した。事前試験より、いずれの含浸樹脂においても、せん断弾性係数は、各メーカーが推奨する主剤と硬化剤の配合割合 2:1 から硬化剤の添加量を増加させることで低下することを確認した。炭素繊維シートの場合、主剤と硬化剤の配合を 2:1.7 とすると、炭素繊維と樹脂の付着が悪いことにより、樹脂が炭素繊維に追従せず、また、ひずみゲージのベース材が相対的に硬いために含浸樹脂の変形に追従できず、ひずみゲージを接着している表面ではひずみが適切に計測されない事象が確認されたため、配合を 2:1.65 とした。

コンクリートとの接着試験において、アラミド繊維シートでは配合 2:1.7 とした場合に、樹脂層と連続繊維層の界面での剥がれが一部で確認されたが、いずれの配合もコンクリートの引張強度以上の付着強度を有していることが確認できた。

はり試験後,偏配合のものを含め,試験に用いた含浸樹脂のガラス転移点を測定した.ガラス転移点の測定は,はり供試体と同条件にて作製した FRP 引張試験片から各配合の含浸樹脂サンプルをとり,示差走査熱量計(DSC)を用いて実施した.FRP 引張試験片は,載荷日から測定までの期間,冷凍庫で保管し主剤と硬化剤の反応が進まないよう配慮した.測定は,同一試料に対して 2 サイクル実施しており,開始温度から+10 $^{\circ}$ / min で $120\sim200$ $^{\circ}$ Cまで昇温し,その後-30 $^{\circ}$ C/min で冷却を 1 サイクルとした.測定開始温度は,ガラス転移点との差が小さいと安定して測定できない場合があるため,-30 $^{\circ}$ C以下に設定している.1 サイクル目の結果が試験時のガラス転移点を表し,2 サイクル目の結果が未反応であった主剤と硬化剤の反応が進行した後のガラス転移点を表す.表-3.1.9 では,主として 1 サイクル目の結果を示す.

含浸樹脂 の種類	含浸樹脂配合 主剤:硬化剤		引張強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)			弾性係数 mm²)	ガラス 転移点 <i>Tg</i> (℃)
炭素用	CF	2:1	69.5	4090	0.37	1490	(-)	54
	CFe1	2:1.4	43.8	2750	0.36	1010	(0.68)	34
	CFe3	2:1.65	12.4	1020	0.39	366	(0.25)	24
アラミド用	AF	2:1	32.6	2550	0.41	903		34 [58]
	AFe1	2:1.55	15.1	1340	0.34	500	(0.55)	18
	AFe3	2:1.7	4.6	537	0.20	224	(0.25)	11

表-3.1.9 含浸樹脂の引張試験結果及びガラス転移点

- 2) () 内数値は標準配合 2:1 の結果に対する比を示す.
- 3) [] 内数値は2サイクル目の結果を参考として示す.

注 1) 引張試験は JIS K 7161 により行った。 ただし、 せん断弾性係数は共同研究報告書 $(I)^{2}$ に示す 測定方法によった。

(3) 連続繊維シートとコンクリートの引張接着試験結果

連続繊維シートとコンクリートの引張接着試験(案)(JSCE-E 545:2013)に従って試験を行った.パラメータと試験結果を表-3.1.10及び図-3.1.6に示す.一部の付着強度を除いて5点の測定値で評価している. 樹脂の配合を変更して弾性係数を小さくした供試体は異常値が多く含まれる傾向を示している. 異常値は平均値の算定で除外した.

全ての試験で、図-3.1.7 に示すように、破壊は母材のコンクリート内で生じた。樹脂の引張強度は、コンクリートの引張強度の 2~20 倍を有しており、破壊は界面もしくはコンクリートで生じるが、本試験では、全てコンクリート内で生じた。図-3.1.8~9 に、コンクリートの圧縮強度及び引張強度と付着強度の関係を示す。コンクリートの圧縮強度が約 30 N/mm² の場合は、ほとんど同じ付着強度であった。母材コンクリート強度の変化に伴い、付着強度は対応して変化した。

純引張状態の引張接着試験では、コンクリートの強度が支配要因となり、樹脂の弾性係数や引張強度の低下による影響は必ずしも評価できないが、本試験シリーズで含浸樹脂の弾性係数を変化させるために樹脂の配合を変えた範囲では、いずれもコンクリートの引張強度以上の付着強度が得られることを確認した.

表-3.1.10 供試体名,使用材料と引張付着強度

供試体名	コンクリート			連続繊維シート				樹脂			
	圧縮強度	弾性 係数	割裂 引張 強度	種類	引張 強度	弾性 係数	厚さ	引張 強度	弾性 係数	ポアソ ン比	付着強度
	f'_c	E_c	f_{ct}	繊維名 ×層数	f _{fu}	E_f	t f	fau	E_a		fbond
	N/mm ²	$\times 10^3$ N/mm ²	N/mm ²		N/mm ²	$\times 10^3$ N/mm ²	mm	N/mm ²	$\times 10^3$ N/mm ²	v_a	N/mm ²
C1	34.7	24.5	2.7	C200×1	4000	255	0.111	69.50	4.10	0.37	3.19
C2	34.7	24.5	2.7	C200×2	4000	255	0.222	69.50	4.10	0.37	3.22
C3	34.7	24.5	2.7	C200×3	4000	255	0.333	69.50	4.10	0.37	3.35
C1e1	29.4	24.3	2.6	C200×1	4000	255	0.111	43.80	2.75	0.36	3.12
C1e3	29.4	24.3	2.6	C200×1	4000	255	0.111	12.40	1.02	0.39	3.01
A1fc20	21.5	21.7	2.0	A40×1	3460	132	0.193	32.60	2.60	0.41	2.14
A1	29.4	24.3	2.6	A40×1	3460	132	0.193	32.60	2.60	0.41	3.08
A1fc40	40.5	26.1	3.1	A40×1	3460	132	0.193	32.60	2.60	0.41	3.96
Alel	29.4	24.3	2.6	A40×1	3460	132	0.193	15.10	1.00	0.34	3.06
A1e3	29.4	24.3	2.6	A40×1	3460	132	0.193	4.60	0.58	0.20	2.72

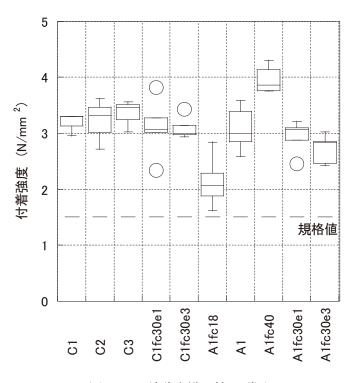


図-3.1.6 試験水準の箱ひげ図

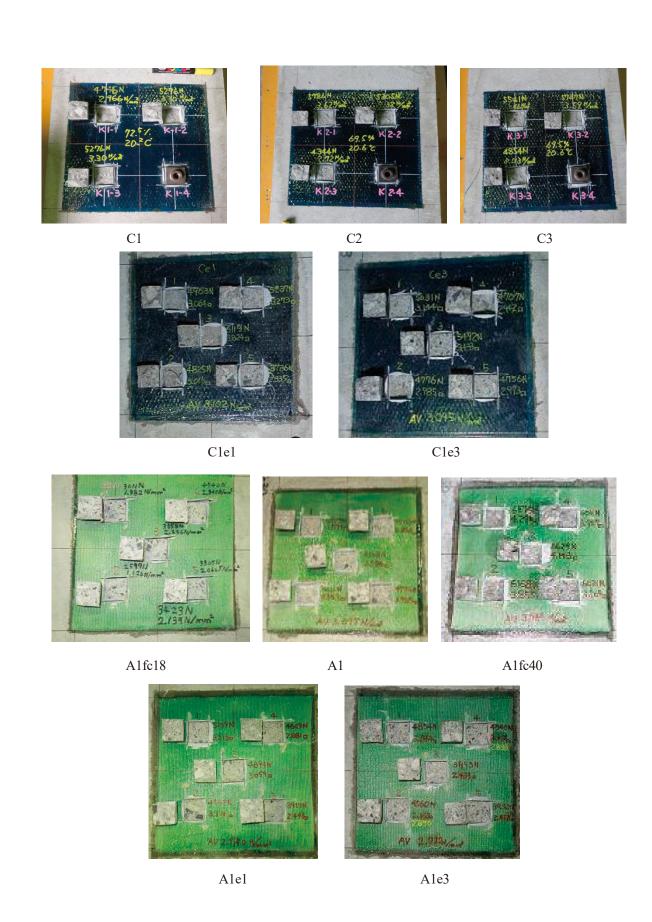


図-3.1.7 供試体の破壊状況

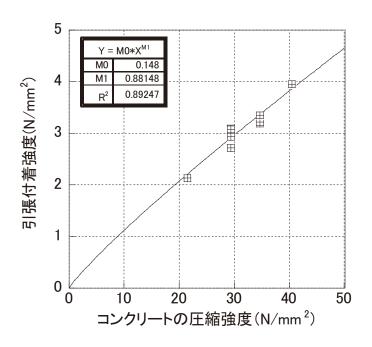


図-3.1.8 圧縮強度と付着強度の関係

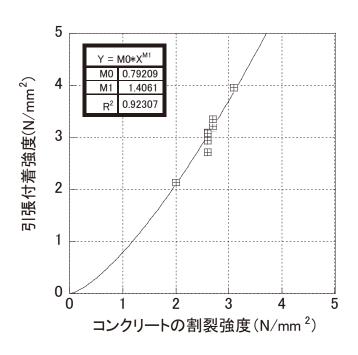


図-3.1.9 割裂引張強度と付着強度の関係

(4) 載荷及び測定

はり試験は、図-3.1.1 に示したとおり、いずれも単純支持、2 点載荷で行った。図-3.1.10~11 に、試験状況を示す。はり試験の載荷点及び支点における鋼板の大きさは、支間方向に 100mm とし、板厚は 12mm とした。はり試験は、連続繊維シートの剥離または破断が生じるまで載荷点の変位を漸増させて、荷重を加えた。試験中、コンクリートの曲げひび割れがある程度発生した時点及び主鉄筋の降伏点付近で、一旦除荷を行った。

図-3.1.12 に、計測機器の設置位置を示す.載荷試験中、荷重、たわみ、鉄筋の軸方向ひずみ、シートの軸方向ひずみ、コンクリート上縁の軸方向ひずみ及びパイ型変位計を用いたはり下面の軸方向の平均ひずみを測定した.また、せん断スパンに生じる斜めひび割れの発生時期を確認するため、側面(A面側のみ)にパイ型変位計を斜めに設置した.鉄筋、連続繊維シートのひずみゲージのゲージ長は 5mm とし、コンクリートのひずみゲージのゲージ長は 60mm とした.パイ型変位計は、すべて基長 150mm として配置した.

以上に加えて、連続繊維シートの面外変位を把握するため、軸方向に走査可能なレーザー変位計を設置した. 載荷中、試験機の変位を保持したままで、レーザー変位計を約 100 mm の範囲で走査して連続繊維シートの表面形状を測定した. 2019 年に試行的に実施して、測定の起点を確認しにくい場合が見られた. このことから、2020 年の試験時には、レーザー変位計の測定範囲の測定開始点及び終了点に、マーカーとなる突起物を試験前に予め設置した(図-3.1.11(a)~(c)). また、2020 年の試験時は、2019 年の結果を踏まえて、レーザー変位計の測定範囲を載荷点側に寄せた. 図-3.1.13 に、A113 を例にして、レーザー変位計による測定のタイミングの例を示す. 載荷試験の途中で、任意に荷重を止めてレーザー変位計を走査して測定した.

また,2020年に実施したはり試験では、剥離の過程で生じる斜めひび割れの発生時期を確認するため、下面近傍のはり側面(A面側のみ)にひずみゲージを設置した(図-3.1.11(a),(b)). 図-3.1.14に、斜めひび割れ監視用のひずみゲージの設置位置を示す. この設置は、コンクリートひずみを測ることが主たる目的ではないので、パイゲージよりもコンパクトな、かつ通常よりもゲージ長が短いひずみゲージを用いることとし、ひび割れ発生そのものにできるだけ影響しない範囲で、ひび割れ発生位置にできるだけ近い位置となるようにした.

以上のすべてのデータについて、デジタルデータレコーダを用いて 100 Hz で連続測定を行った.

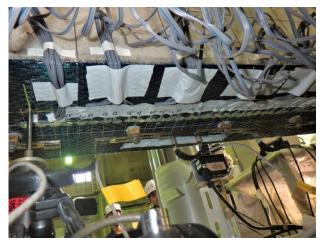
さらに、ひび割れや剥離の発生時期をできるだけ目視でも把握できるように、はり側面(A面のみ)のビデオ撮影を行い、試験中だけでなく、試験後にもそれらの各事象の発生時期の確認を行った。2019年の試験では、荷重や変位の記録は音声のみであったが、2020年の試験時は、画面に試験機の荷重と支間中央の変位を明確に確認できるようにした。



(a) 載荷状況



(b) 載荷点付近



(c) 下面のひずみゲージとパイ型変位計

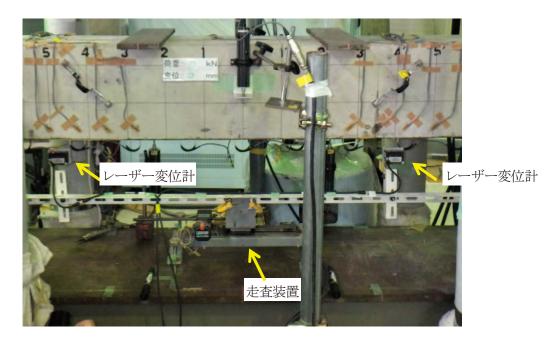


(d) シート端部付近のひずみゲージ

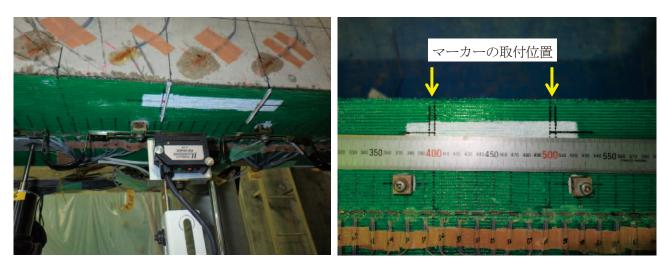


(e) 側面のパイ型変位計とレーザー変位計

図-3.1.10 2019年の試験状況

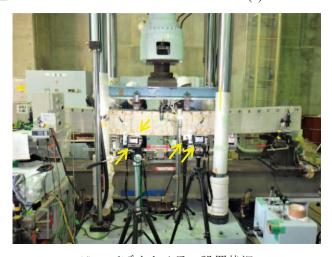


(a) レーザー変位計と側面のひずみゲージの設置状況



(b) 測定位置のマーカー

(c) マーカーの取付位置



(d) ビデオカメラの設置状況

図-3.1.11 2020年の試験状況(主な変更点)

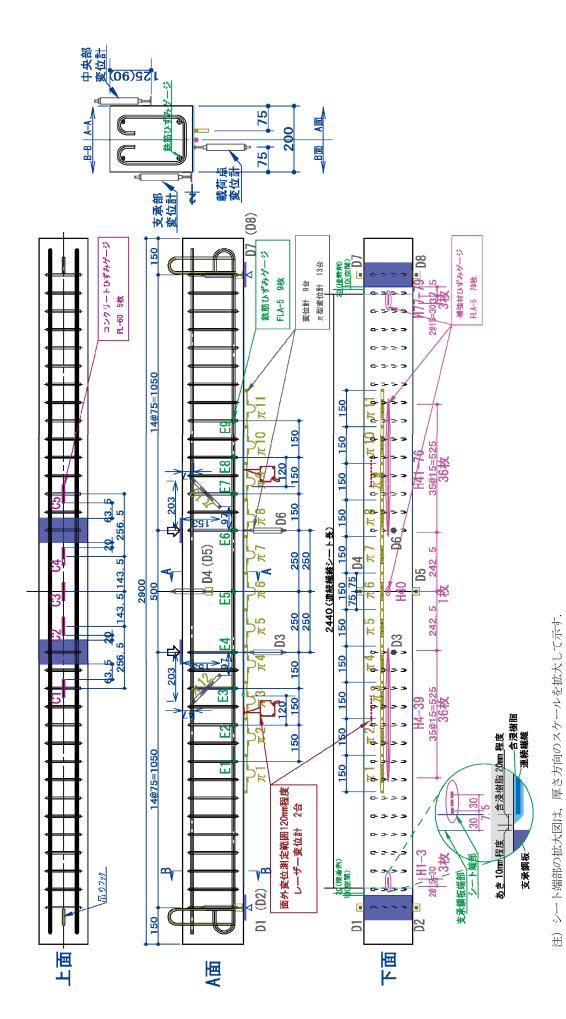
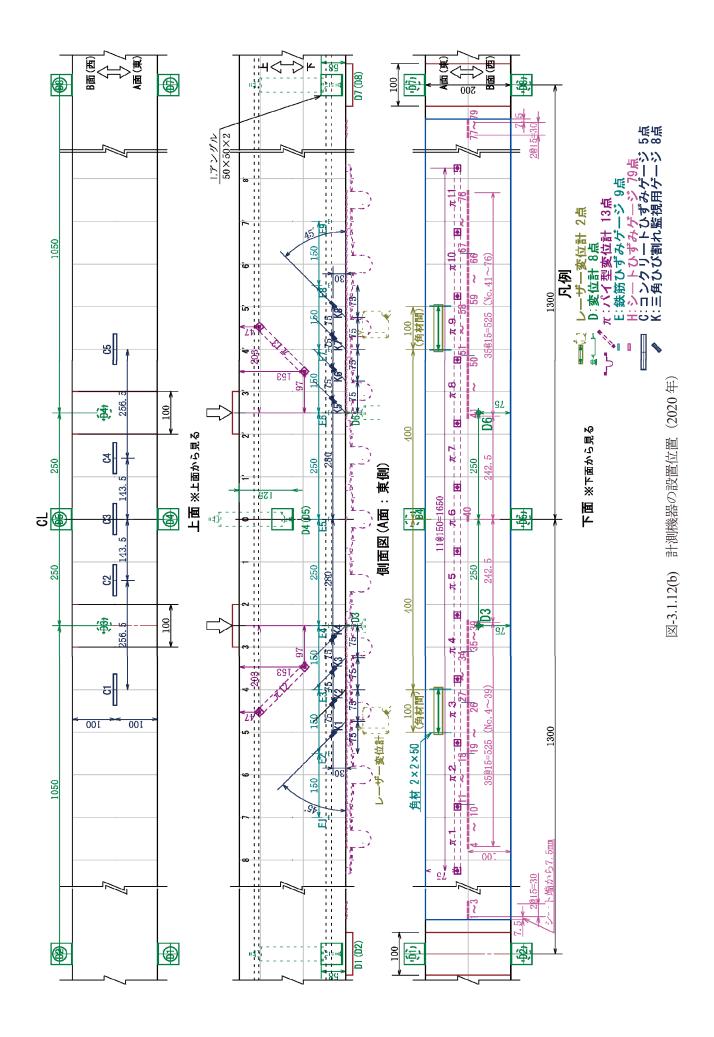
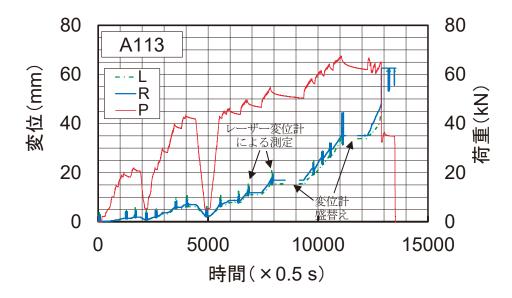


図-3.1.12(a) 計測機器の設置位置 (2019年)





注) L:A面から見て左側のレーザー変位計による変位,R:同右側の変位,P:荷重

図-3.1.13 レーザー変位計による測定のタイミング (供試体 A113 の例)

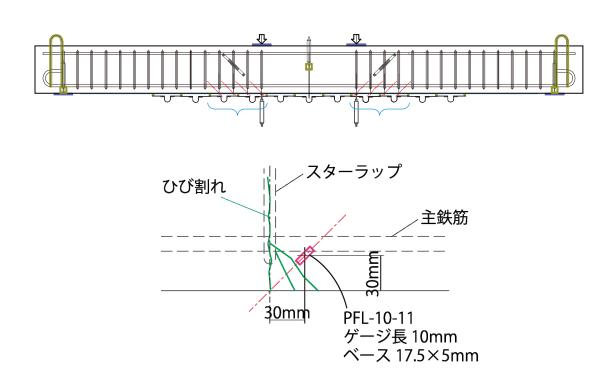


図-3.1.14 斜めひび割れ監視用のひずみゲージの設置位置(2020年試験時のみ)

3.2 試験結果

3.2.1 計算値の算出

本節に示す計算値は、7.5 で述べるファイバーモデルによる計算結果である.この計算において、連続繊維 シートの剥離を表す構成則は入れていないので、計算上の破壊形態はコンクリートの圧壊または連続繊維 シートの破断であった.

3.2.2 荷重-変位関係,破壊状況

(1) 鉄筋量, はり高さの影響 (C113L, C116, C113)

C113L, C116, C113 の荷重-変位関係を図-3.2.1, 鉄筋降伏荷重,最大荷重,最大荷重時変位の実験値を表-3.2.1,破壊状況を図-3.2.2 にそれぞれ示す。連続繊維シートの剥離は 3 体すべてせん断スパン内,載荷点近傍の曲げひび割れ付近を起点に,支点側に向かって連続繊維シートの端部まで達し,耐力の大きな低下を伴い,破壊に至った。剥離後の連続繊維シートにコンクリート表層が付着する母材破壊が認められた。C116,C113 では,端部まで剥離したと同時に等曲げ区間のかぶりコンクリートも連続繊維シートに付着した状態で剥離した.

この3体の破壊状況はすべて連続繊維シートの中間剥離であったが、 M_y/M_u が最も小さい C113 の RC の諸元が、樹脂の物性、補強量、コンクリート強度をパラメータとして変化させた場合においても破壊形態の変化がもっとも小さい(すなわち中間剥離が生じる可能性が高い)と考え、 C113 の RC の諸元を基本として、以降の試験(Phase 2)も実施することとした。実際、これらの3体と同時期に、補強量を変えた C213、C313も試験を行い、中間剥離が生じたことからも、同 RC 諸元が妥当であると判断した。

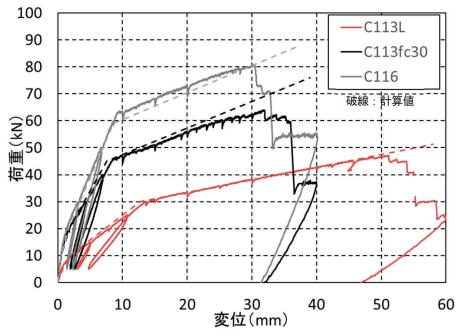
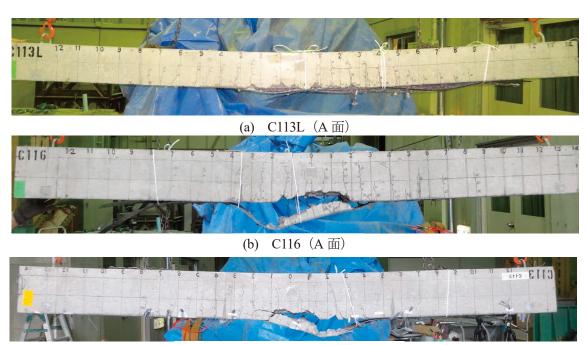


図-3.2.1 荷重-変位関係 (C113L, C116, C113)

表-3.2.1 実験結果 (C113L, C116, C113)

	はり断面 H×B (mm)	主鉄筋	鉄筋降 伏荷重 (kN)	最大 荷重 (kN)	最大荷重 時変位 (mm)	破壊状況
C113L	180×200	D13	30 (30.0)	47.1 (51.0)	51.0 (57.3)	シート剥離 (コンクリート圧壊)
C116	250×200	D16	63 (59.0)	80.7 (87.7)	30.4 (37.2)	シート剥離 (コンクリート圧壊)
C113	230×200	D13	43 (45.0)	64.0 (45.0)	31.8 (38.9)	シート剥離 (シート破断)

(): 計算値または計算上の破壊形態.



(c) C113 (B面,写真左右反転) 図-3.2.2 破壊状況

(2) 補強量の影響 (C113, C213, C313)

炭素繊維シートの層数をパラメータとした C113 (CF1 層), C213 (CF2 層), C313 (CF3 層)の荷重-変位 関係を図-3.2.3、実験結果を表-3.2.2、破壊状況を図-3.2.4 にそれぞれ示す。コンクリートのひび割れ発生後、補強層数に応じて供試体の剛性が増加し、最大荷重も増加した。最大荷重時の変位は、C113 の供試体が31.8mmと大きく、C213、C313 は変位約 24mmでほぼ同等であった。破壊時の状況は、C213、C313 とも前述の C113 と同様に、連続繊維シートの中間剥離であり、せん断スパン内、載荷点近傍の曲げひび割れ付近から支点側に剥離が伸展し、コンクリート表層が連続繊維シートに付着する母材破壊を伴うものであった。C113、C213 は最大荷重後、剥離が支点側に徐々に伸展したが、C313 は最大荷重時に一気に端部まで剥離が伸展して破壊に至った。

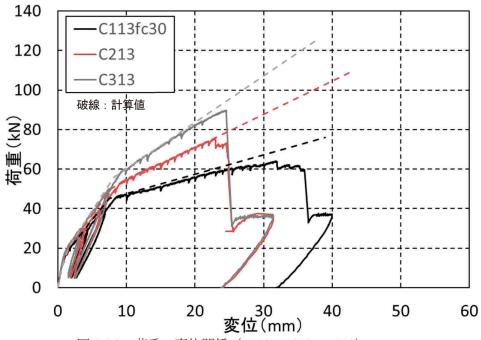


図-3.2.3 荷重-変位関係(C113, C213, C313)

表-3.2.2 実験結果 (C113, C213, C313)

	補強仕様	鉄筋降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	破壊状況
C113	CF1 層	43 (45.0)	64.0 (45.0)	31.8 (38.9)	シート剥離 (シート破断)
C213	CF2 層	53 (50.4)	75.1 (108.9)	22.9 (42.7)	シート剥離 (コンクリート圧壊)
C313	CF3 層	60 (55.7)	89.8 (125.3)	24.6 (37.8)	シート剥離 (コンクリート圧壊)

():計算値または計算上の破壊形態.



(a) C113 (B面,写真左右反転)



(b) C213 (A 面)



(c) C313 (A面)

図-3.2.4 破壊状況

(3) 連続繊維シートの種類による影響(C113, A113)

連続繊維の材質が異なる C113 (炭素繊維シート), A113 (アラミド繊維シート)の荷重-変位関係を図-3.2.5, 実験結果を表-3.2.3, 破壊状況を図-3.2.6 にそれぞれ示す. C113 に比べ, A113 の方が最大荷重, 最大荷重時の変位が大きかった. 1 体ずつの比較であるが, これらの違いには, 繊維種類の違いと使用樹脂の弾性係数が低いことが影響している可能性があると考えられる. A113 の破壊形態は, C113 と変わらず, 連続繊維シートの中間剥離であり, せん断スパン内, 載荷点近傍の曲げひび割れ付近から剥離が発生し, 端部に剥離が伸展する過程を経た. 剥離後の連続繊維シートにはコンクリート表層が付着する母材破壊が見られた.

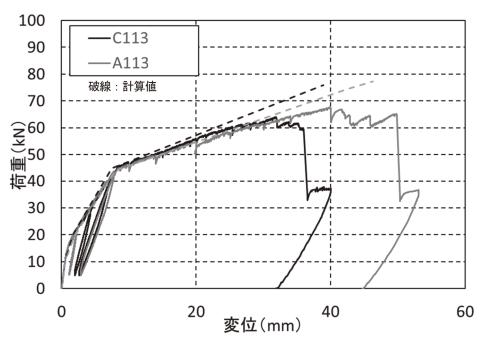


図-3.2.5 荷重-変位関係(C113, A113)

表-3.2.3 実験結果(C113, A113)

	補強仕様	使用樹脂	鉄筋降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	破壊状況
C113	CF1 層	CF	43 (45.0)	64.0 (45.0)	31.8 (38.9)	シート剥離 (シート破断)
A113	AF1 層	AF	44 (44.2)	67.6 (77.3)	39.9 (46.3)	シート剥離 (コンクリート圧壊)

(): 計算値または計算上の破壊形態.



(a) C113 破壊状況 (B面,写真左右反転)



(b) A113 (A面) 図-3.2.6 破壊状況

(4) コンクリート強度の影響 (A113fc20, A113, A113fc40)

コンクリート強度をパラメータとした A113fc20, A113, A113fc40 の荷重-変位関係を図-3.2.7, 実験結果を表-3.2.4, 破壊状況を図-3.2.8 にそれぞれ示す。A113fc20 においては, ひび割れ発生荷重, 降伏荷重ともに低下しておりコンクリート強度の影響が確認された。しかし, A113fc40 においては, A113 とほぼ同等の荷重-変位関係となっており, コンクリート強度の影響は確認されなかった。最大荷重時の変位はコンクリート強度が低いほど大きい結果となった。

A113fc20, A113fc40 の破壊状況は A113 と同様に連続繊維シートの中間剥離であり、せん断スパン内、載荷点近傍の曲げひび割れ付近から剥離が発生し、端部まで剥離が伸展する過程を経た. 剥離後の連続繊維シートにコンクリート表層が付着する母材破壊であった. ただし、A113fc40 では端部まで剥離した後のかぶりコンクリートの損傷が比較的軽微であった.

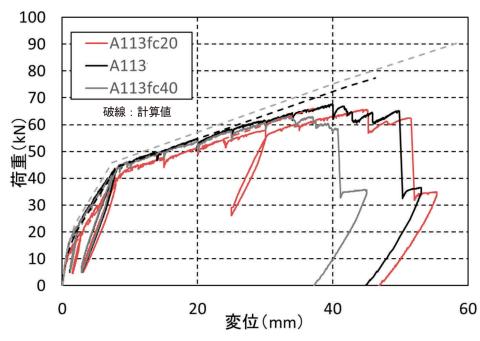


図-3.2.7 荷重-変位関係 (A113fc20, A113, A113fc40)

表-3.2.4 実験結果 (A113fc20, A113, A113fc40)

	コンクリート 強度 (N/mm²)	鉄筋降伏 荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時 変位 (mm)	破壊状況
A113fc20	21.5	41 (41.9)	65.6 (66.5)	45.0 (37.7)	シート剥離 (コンクリート圧壊)
A113	29.4	44 (44.2)	67.6 (77.3)	39.9 (46.3)	シート剥離 (コンクリート圧壊)
A113fc40	40.5	42 (45.9)	63.1 (90.3)	33.4 (58.3)	シート剥離 (コンクリート圧壊)

(): 計算値または計算上の破壊形態.



(a) A113fc20 (A面)



(b) A113 (A面)



(c) A113fc40 (A面) 図-3.2.8 破壊状況

(5) 樹脂の影響 (C113, C113e1, C113e3, A113, A113e1, A113e3)

C113, C113e1, C113e3, A113, A113e1, A113e3 の荷重-変位関係を図-3.2.9, 実験結果を表-3.2.5, 破壊状況を図-3.2.10(a)~(f)にそれぞれ示す.

C113 シリーズでは荷重-変位関係の剛性に大きな変化は見られなかった. C113e1 では C113 と同様に連続 繊維シートの中間剥離が生じた. 一方, C113e3 は, 等曲げ区間での炭素繊維シートの破断により破壊し, 最 大荷重, 最大荷重時変位も低下した. 繊維間のせん断伝達力の低下により, 炭素繊維シートの引張強度が低 下したことが要因として考えられる.

A113 シリーズでは、A113e1、A113e3 の鉄筋降伏以後の部材剛性の低下が見られた.しかし、A113e1、A113e3 では A113 に比べ最大荷重、最大荷重時変位の顕著な増加が見られた.図-3.2.10(g)~(i)に、A113、A113e1、A113e3 の破壊後の下面の状況を対比して示す。A113e1 では等曲げ区間で連続繊維シートの破断が生じた。A113e3 では、せん断スパン内、載荷点近傍の曲げひび割れ付近から連続繊維シートの中間剥離が発生し、端部まで剥離が伸展して破壊に至った。A113e3 では、他の供試体で見られた中間剥離と異なり、剥離後のコンクリート下面に樹脂が付着しており、アラミド繊維シートにはコンクリートの付着がほとんどなく、樹脂層の凝集破壊による剥離であった。これらの最大荷重、最大荷重時変位の増加や破壊形態の変化は、偏配合の樹脂の物性によって付着が改善された一方で、界面のせん断伝達力の低下や連続繊維シートの引張強度の低下、弾性係数の低下が生じたことなどが要因として考えられる。

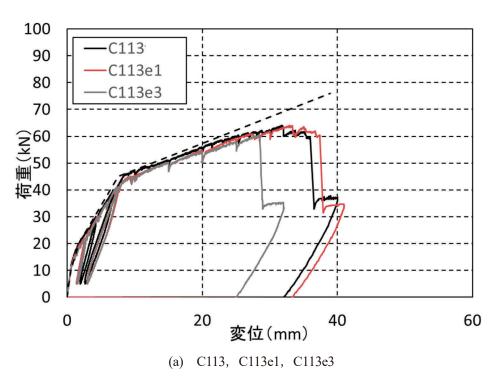
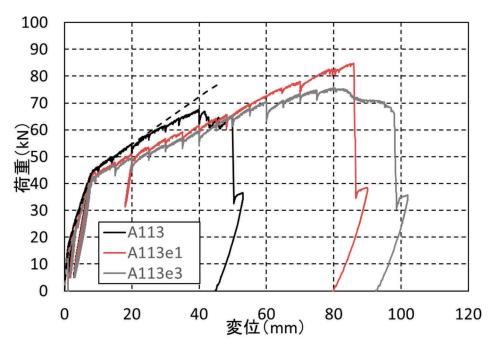


図-3.2.9 荷重一変位関係



注)図(a)と横軸のスケールが異なる.

(b) A113, A113e1, A113e3 図-3.2.9 荷重-変位関係(続き)

表-3.2.5 実験結果 (C113, C113e1, C113e3, A113, A113e1, A113e3)

	補強 仕様	使用 樹脂	鉄筋降伏 荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時 変位 (mm)	破壊状況
C113	CF1 層	CF	43 (45.0)	64.0 (45.0)	31.8 (38.9)	シート剥離 (シート破断)
C113e1	CF1 層	CFe1	42	64.0	33.3	シート剥離
C113e3	CF1 層	CFe3	41	60.6	28.5	シート破断
A113	AF1 層	AF	44 (44.2)	67.6 (77.3)	39.9 (46.3)	シート剥離 (コンクリート圧壊)
A113e1	AF1 層	AFe1	42	84.7	85.8	シート破断
A113e3	AF1 層	AFe3	41	75.6	80.1	樹脂層の凝集破壊を 伴うシート剥離

(): 計算値または計算上の破壊形態.



(a) C113 (B面,写真左右反転)



(b) C113e1 (A面)



(c) C113e3 (A面)



(d) A113 (A面)



(e) A113e1 (A面)



(f) A113e3 (A 面)

図-3.2.10 破壊状況





(g) A113 連続繊維シートの剥離, 母材破壊



(h) A113el 連続繊維シートの破断





(i) A113e3 連続繊維シートの剥離, 樹脂層の凝集破壊

図-3.2.10 破壊状況 (続き)

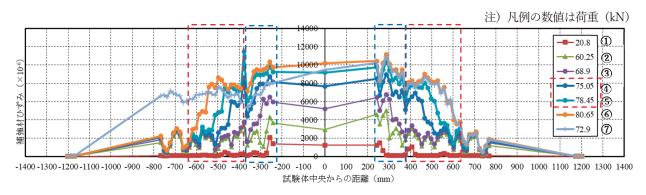
3.2.3 ひずみ分布及び破壊過程

(1) ひずみ分布の計測状況及び結果の整理方法

本研究では、連続繊維シートの剥離の要因、伸展過程を確認するために、ひずみゲージを15mm ピッチで貼りつけ、図-3.2.11(a)に示すひずみ分布、付着応力分布を得た。既往の研究では50mm 以上のピッチで貼り付けられることが多く、部材の曲げ試験においてこれほど密にひずみゲージを貼りつけた既往の検討はほとんどない。加えて、100Hz の高速で測定されたデータも少ない。本研究で得られたひずみ分布から、曲げひび割れの発生、曲げひび割れから斜めに発生するブロック化のひび割れ、剥離に至るまでの付着応力の挙動を確認した。参考として、図-3.2.11(b)に、パイ型変位計によるひずみ分布をひずみゲージによるひずみ分布と対比して示す。3.1(2)で示したように偏配合の供試体のうちC113e3、A113e1、A113e3 はパイ型変位計で測定したひずみに対し、ひずみゲージの値が明らかに低かったことから(本項(2)の10)~12))、本項におけるひずみ分布の検討からは除外した。

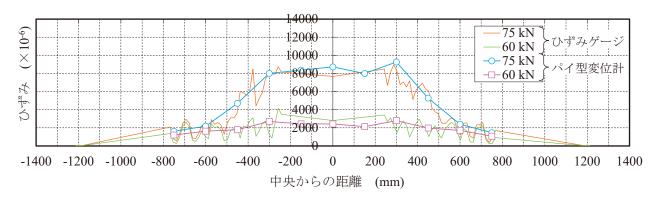
図-3.2.11 に示す供試体 C116 のひずみ分布を例に、ひずみ分布で観察された主な現象を以下に記す.

- ①~②:曲げひび割れに応じひずみが増加する.
 - ③:鉄筋降伏に伴い純曲げ区間と載荷点近傍(位置±250~400mm)のシートひずみが増加する.小さい 斜めひび割れが増えるなどして、ひび割れ間隔が密になりはじめ、曲げひび割れ位置付近の隣り合 うひずみの差(すなわち、その差と比例する付着応力の傾向を表す)が一部減少する.
- ④~⑤: ③と同様にひずみ差が減少する. 荷重の増加に伴い, 範囲が徐々に拡がり, 位置±400~500mm において隣り合うひずみの差(付着応力)が支点側にシフトする. 位置±250~400mm の間にはひずみの差(付着応力)がシフトしない位置があり, シート付着が保たれている区間があると推定される.
 - ⑥:荷重ピーク.位置±400~600mmのひずみ差(付着応力)がさらに支点側にシフトする.位置±250~400mmの間にはひずみの差(付着応力)がシフトしない位置がある.
 - ⑦: ポストピーク. -400~-700mm の区間のひずみがほぼ一定となり、シートが剥離したことを示す. 位置±250~400mm の間にはひずみの差(付着応力)がシフトしない位置があり、剥離は概ね-400mm より支点側で発生している.



(a) ひずみゲージによる結果

図-3.2.11 連続繊維シートのひずみ分布(C116の例)



(b) パイ型変位計による結果

図-3.2.11 連続繊維シートのひずみ分布(C116の例,続き)

本項ではまず、ひずみ分布及び隣り合うひずみの差から算出される付着応力について着目し、剥離に至る ひずみと付着応力を示しておく.付着応力とその位置の算出は、式 3.2.1、式 3.2.2 により、任意の荷重ステッ プにおけるひずみ分布、隣り合うひずみゲージの値から算出される付着応力として算出した.付着応力の正 負は載荷点から支点に向けひずみが低下する勾配を正となるように算出した.つまり、ひび割れの支点側が 正、載荷点側が負となるようにした.

$$\tau_m = \frac{(\varepsilon_n - \varepsilon_{n+1}) \cdot E_f \cdot t_f}{s} \tag{3.2.1}$$

$$x_m = \frac{(x_n + x_{n+1})}{2} \tag{3.2.2}$$

ここで, τ_m:付着応力 (N/mm²)

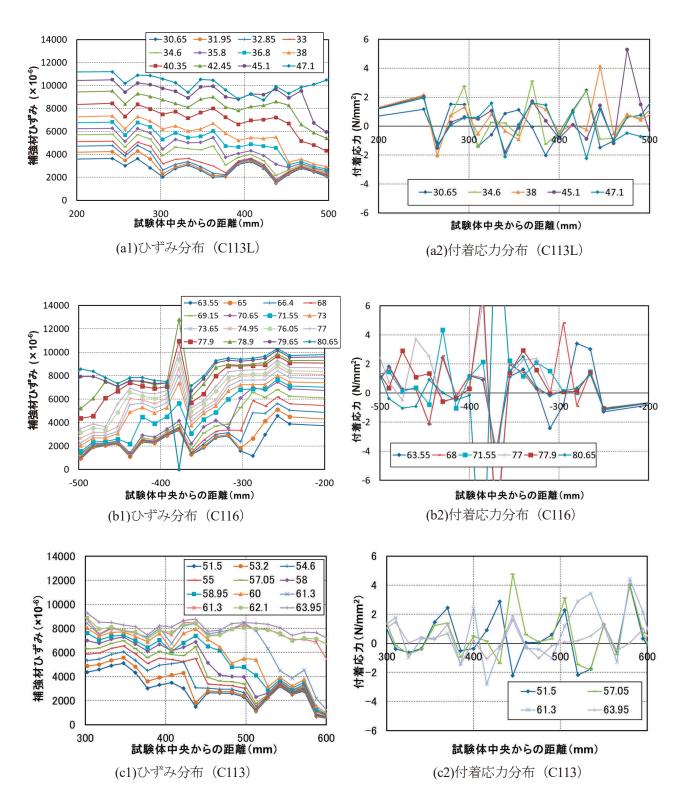
ε_n: ひずみ測定値

 E_f : 連続繊維シートの弾性係数 (N/mm^2)

tf: 連続繊維シートの設計厚さ(mm)

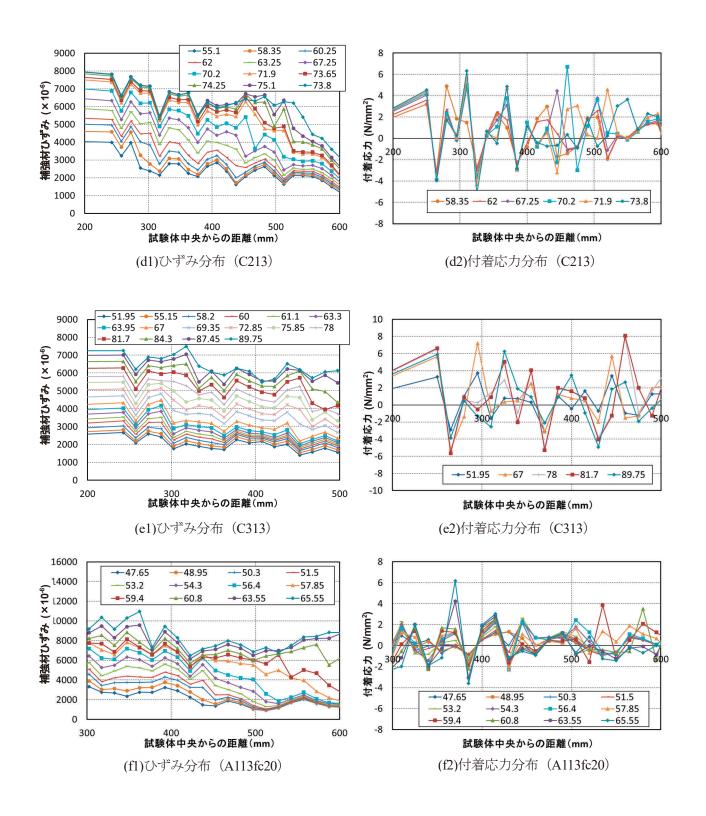
s: ひずみゲージの貼付けピッチ (=15mm)

図-3.2.12 に各供試体の任意の荷重ステップのひずみ分布及び付着応力分布を示す. 詳細は巻末の付属資料 2 に示す.



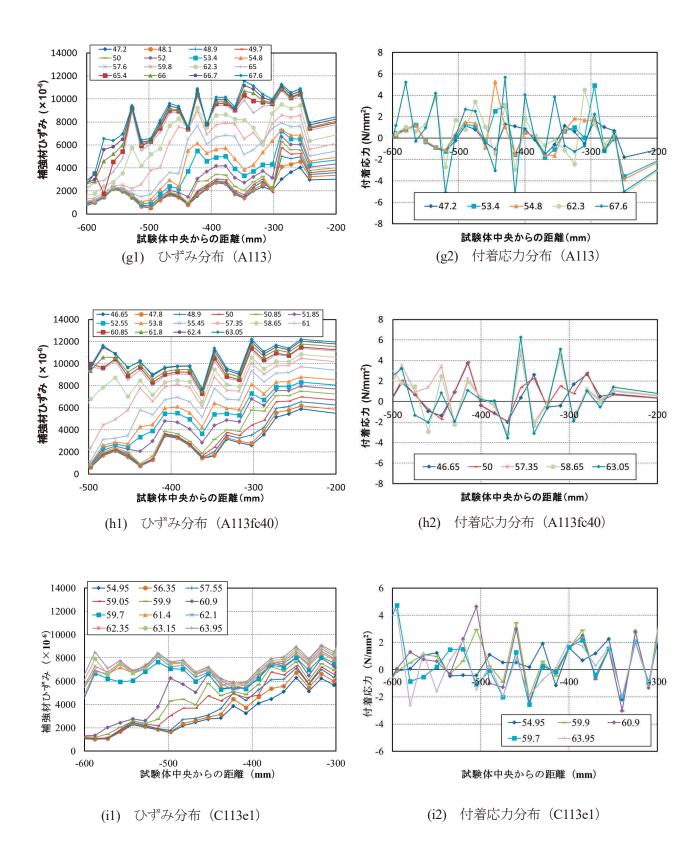
注) 凡例の数値はいずれも荷重(kN)を示す.

図-3.2.12 各供試体のひずみ分布及び付着応力分布



注)凡例の数値はいずれも荷重(kN)を示す.

図-3.2.12 各供試体のひずみ分布及び付着応力分布(つづき)



注) 凡例の数値はいずれも荷重(kN)を示す. 図-3.2.12 各供試体のひずみ分布及び付着応力分布(つづき)

(2) ブロック化発生位置及び初期剥離発生

最終的に剥離が観察された位置近傍の荷重ー付着応力関係では、曲げひび割れ発生後、付着応力の緩やかな増加が見られた。その後、荷重増加とともに付着応力が徐々に大きくなる現象が見られ、付着応力のピーク発生以後は支点側の隣の測定点で付着応力が増加した。隣の測定点の付着応力のピークとともに、元の測定点の付着応力はほぼ 0 まで低下した。これを支点側に向かって測定範囲の端部まで繰り返す挙動が見られた。

加えて、付着応力がほぼ 0 まで低下した位置近傍にはブロック化のひび割れも観察された。任意の位置の 支点側の付着応力の増加とその後の低下は、連続繊維シートの剥離を示していると考えられる。このことに 着目し、下記の条件でブロック化や連続繊維シートの初期剥離と推定することとした。

- ・最終的に剥離したせん断スパンであること.
- ・付着応力のピークが隣接する算出位置の支点側に連続して発生していること.
- ・付着応力が低下し、ほぼ0となった位置で、隣接する支点側の算出位置の付着応力のピーク時.
- ・ブロック化: ひび割れ図から曲げひび割れに隣接するひび割れで曲げひび割れにつながるもの. 一部, つながらないものの隣接する斜めのひび割れもブロック化とした.
- ・初期剥離:曲げひび割れに隣接するひび割れが無く、ピークを迎えた後、付着応力が低下する箇所.

各供試体の当該範囲の荷重一付着応力関係,ひび割れ図による判断を 1)~9)の中で示す。荷重一付着応力関係の凡例は式 3.2.2 により算出した測定点(算出位置)を示す。荷重一付着応力関係上のブロック化発生時とひび割れ図のブロック化位置を同じ赤塗りの矢印,荷重一付着応力関係上の初期剥離時を白塗りの矢印で示した。なお,ブロック化の位置とブロック化時,初期剥離時のひずみ,付着応力,付着力は後掲の表-3.2.6~7 にまとめて示す。

1) C116

剥離した側の試験体中央からの位置-415~-475mm 近傍の荷重-付着応力関係を図-3.2.13 (i), ひずみ分布を(ii), 付着応力分布を(iii), 荷重-変位関係と付着応力ピークの関係を(iv), ひび割れ図を図-3.2.14 に示す. (i)より, 位置-415mm では付着応力の明確なピークが無く, それより支点側の位置のピークが荷重 70kN 以上で荷重の増加とともに順次発生していることから位置-430mm の付着応力がほぼ 0 となったときブロック化, 剥離が発生したと考えられる. 図-3.2.14 に 73kN で確認されたブロック化のひび割れがあることから, 位置-430mm (75.1kN) の付着応力の低下は, ブロック化であったと考えられる. その後, 図(i), (iii)より位置-445mm, 位置-460mm の付着のピークが荷重の増加に応じて発生しており, シートの剥離が順次発生したと考えられる. 図(iv)からはほぼ線形な計算値に対し,実験値はブロック化発生近傍から変位が増加する傾向にあり,ひび割れ近傍の付着応力が低下し,部材の変形が大きくなっていると考えられる.

2) C113L

C116 と同様に測定結果を図-3.2.15(i)~(iv)及び図-3.2.16 に示す. (i), (iii)に荷重増加による付着応力のピーク移動が観察され、図-3.2.16 にブロック化ひび割れが確認できることから位置 430mm、荷重 38.1kN(変位 30mm)をブロック化発生、初期剥離は位置 445mm、荷重 42.4kN(変位 30.0mm)とした.

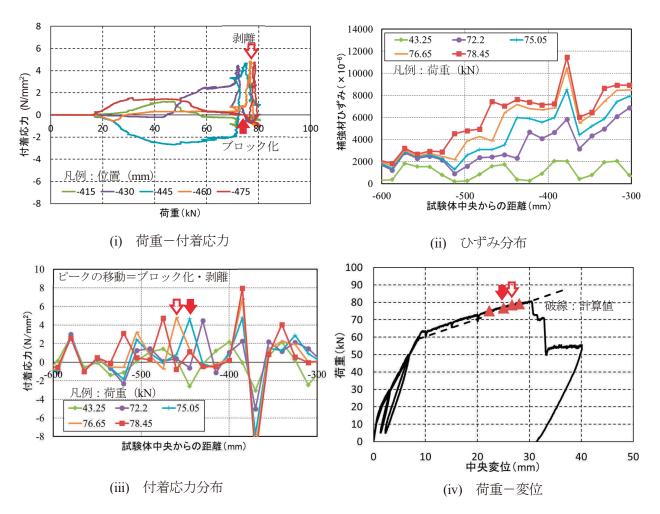


図-3.2.13 C116 測定結果

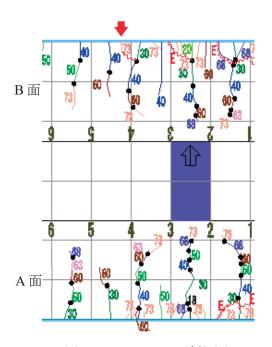


図-3.2.14 C116 ひび割れ図

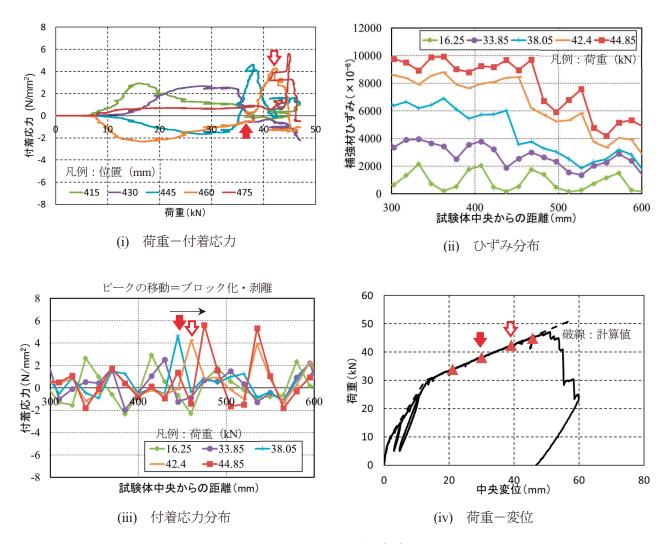


図-3.2.15 C113L 測定結果

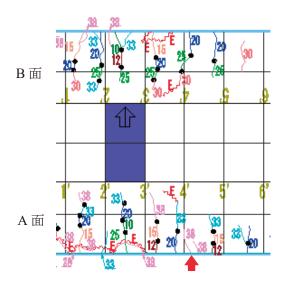


図-3.2.16 C113L ひび割れ図

3) C113

図-3.2.17 に C113 の測定結果を、図-3.2.18 に C113 のひび割れ図を示す。図-3.2.17(i)、(iii)に荷重増加による付着応力ピーク移動が観察され、図-3.2.18 にブロック化ひび割れが確認できることから位置 430mm、荷重 53.9kN(変位 18mm)をブロック化発生とした。また、初期剥離の位置は、位置 445mm の付着応力がピーク後 0 まで低下しなかったが、位置 460mm、位置 475mm が荷重の増加とともに付着応力が 0 となったことから、460mm の付着応力が 0 となった荷重 59.2kN(変位 25.4mm)を初期剥離とした。

図-3.2.17 (iv)においてもブロック化、初期剥離によると考えられる変位の増加が見られた.

4) C213

図-3.2.19 に C213 の測定結果を、図-3.2.20 に C213 のひび割れ図を示す。図-3.2.19(i)、(iii)に荷重増加による付着応力のピーク移動が観察され、図-3.2.20 にブロック化ひび割れが確認できることから位置 430mm、荷重 53.9kN(変位 18mm)をブロック化発生とした。また、初期剥離の位置は、位置 445mm の付着応力がピーク後 0 まで低下しなかったが、位置 460mm、位置 475mm が荷重の増加とともに付着応力が 0 となったことから、460mm の付着応力が 0 となった荷重 59.2kN(変位 25.4mm)を初期剥離とした。

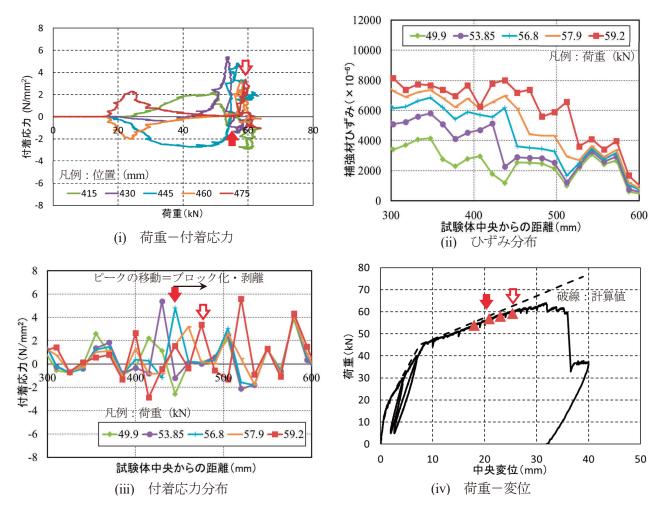
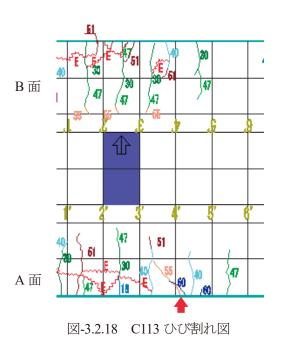


図-3.2.17 C113 測定結果



-54-

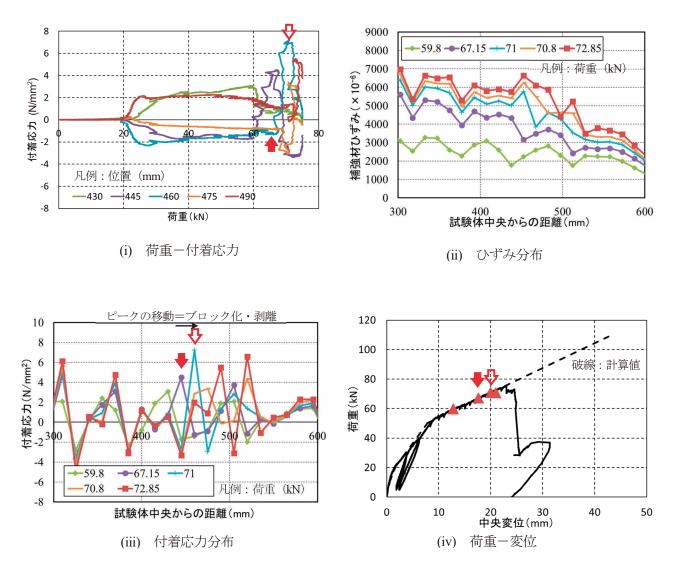
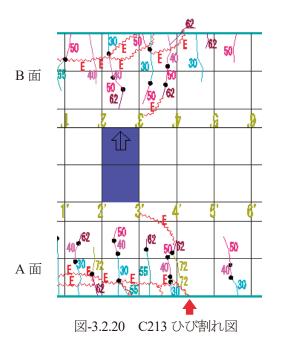


図-3.2.19 C213 測定結果



5) C313

図-3.2.21 に C313 の測定結果を,図-3.2.22 に C313 のひび割れ図を示す。図-3.2.21(i),(iii)に荷重増加による付着応力のピーク移動が観察され,図-3.2.22 にブロック化ひび割れが確認できることから位置 445mm,荷重 83.7kN(変位 20.8mm)をブロック化発生とした。また,初期剥離の位置は,位置 460mm の付着応力がピーク後 0 まで低下しなかったが,位置 475mm が荷重の増加とともに付着応力が 0 となったことから,475mm の付着応力が 0 となった荷重 88.1kN(変位 23.3mm)を初期剥離とした。

図-3.2.21(iv)においてもブロック化、初期剥離によると考えられる変位の増加が見られた.

6) C113e1

図-3.2.23 に C113e1 の測定結果を、図-3.2.24 に C113e1 のひび割れ図を示す。図-3.2.24 より位置-430mm ~-500mm の範囲に大きなブロック化と見られるひび割れがあった。そのため、430、445mm の付着応力が 0 となった点をブロック化発生とした。そのときの荷重は 58.8kN(変位 24.6mm)であった。初期剥離は、図-3.2.23(iii)の-500mm 付近の付着応力ピークの移動が対象と考えられる。位置-520mm にピークが見られ たときに-505mm の値が低下したことから、初期剥離は-505mm で見られ、発生荷重を 60.9kN(変位 27.5mm) とした。図-3.2.23(iv)においてもブロック化、初期剥離によると考えられる変位の増加が見られた。

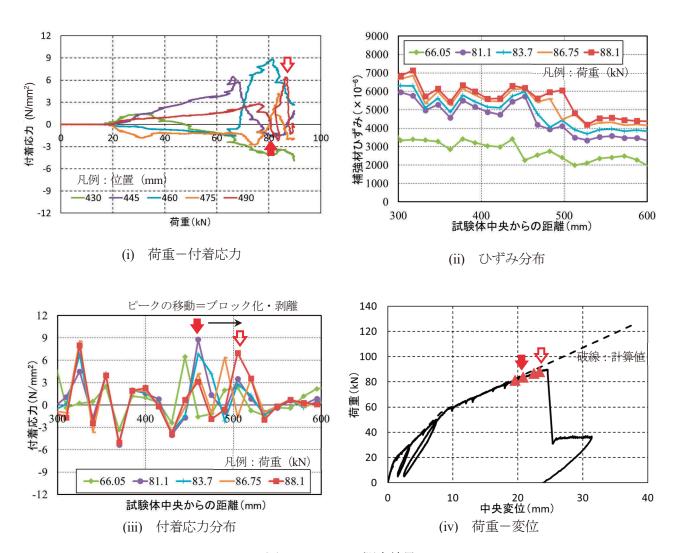
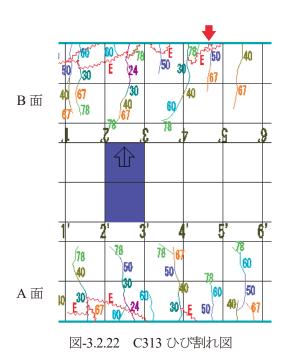


図-3.2.21 C313 測定結果



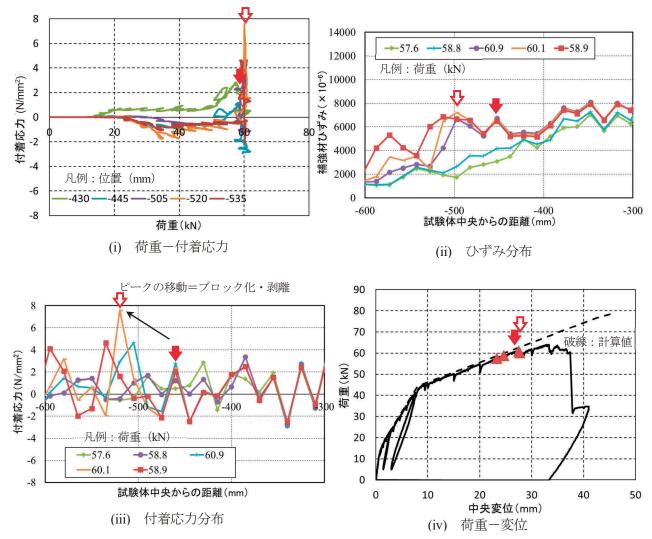
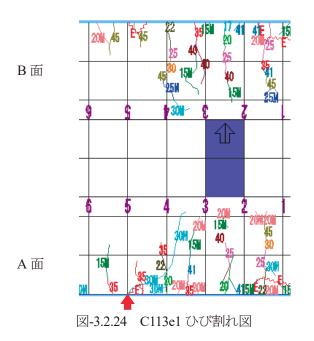


図-3.2.23 C113e1 測定結果



7) A113fc20

図-3.2.25 に A113fc20 の測定結果を,図-3.2.26 に A113fc20 のひび割れ図を示す.図-3.2.26 より位置 500mm にブロック化のひび割れが発生し、図-3.2.25(iii)の位置 500mm の付着応力のピークは小さいもののピークが支点側に推移していることから、500mm 位置がブロック化、初期剥離の起点と考えられる.ブロック化は 505mm 位置のピークとし、荷重 56.3kN(変位 27.5mm)であった. 初期剥離は荷重 59.5kN(33.7mm)とした.図-3.2.25(iv)においてもブロック化、初期剥離によると考えられる変位の増加が見られた.

8) A113

図-3.2.27 に A113 の測定結果を、図-3.2.28 に A113 のひび割れ図を示す。位置 370mm の付着応力の低下と、以後、位置 385、400mm で付着応力の増加が見られるため、位置 370mm をブロック化、位置 385mm を初期剥離とした。ブロック化は荷重 56.7kN(変位 23.0mm)であった。初期剥離は位置 400mm のピークとし、荷重 61.0kN(変位 29.6mm)であった。図-3.2.28(iv)においてもブロック化、初期剥離によると考えられる変位の増加が見られた。

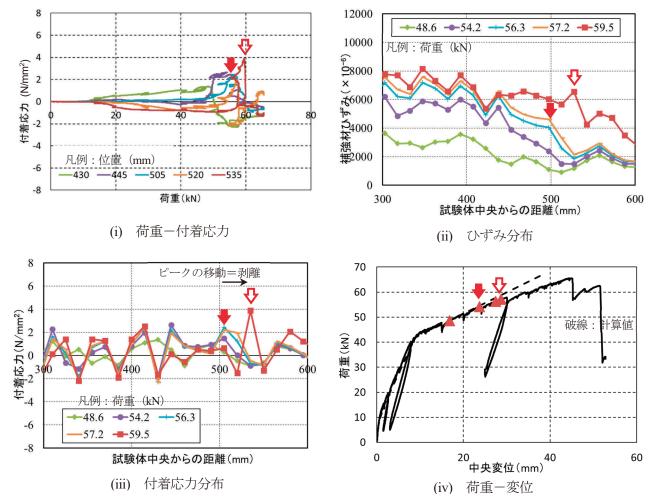
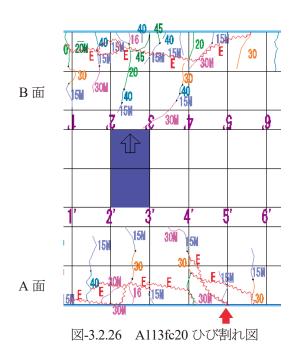


図-3.2.25 A113fc20 測定結果



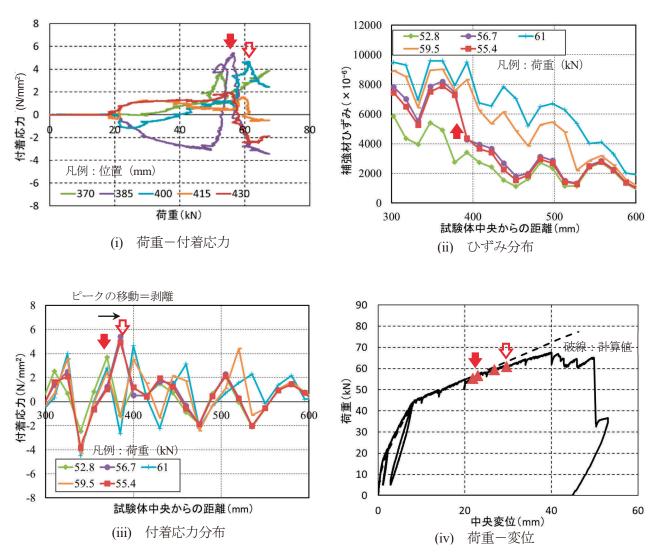
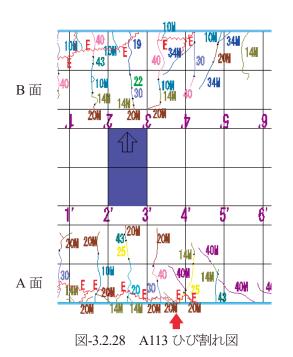


図-3.2.27 A113 測定結果



9) A113fc40

図-3.2.29 に A113fc40 の測定結果を,図-3.2.30 に A113fc40 のひび割れ図を示す.位置 505,520mm のピーク時に位置 490mm の付着応力が低下していることから,位置 490mm がブロック化したと考えられる.ブロック時の荷重は 59.3kN (変位 28.5mm) であった.初期剥離は 520mm の付着応力が低下した位置 535mm のピークとした.荷重は 62.5kN (変位 32.6mm) であった.

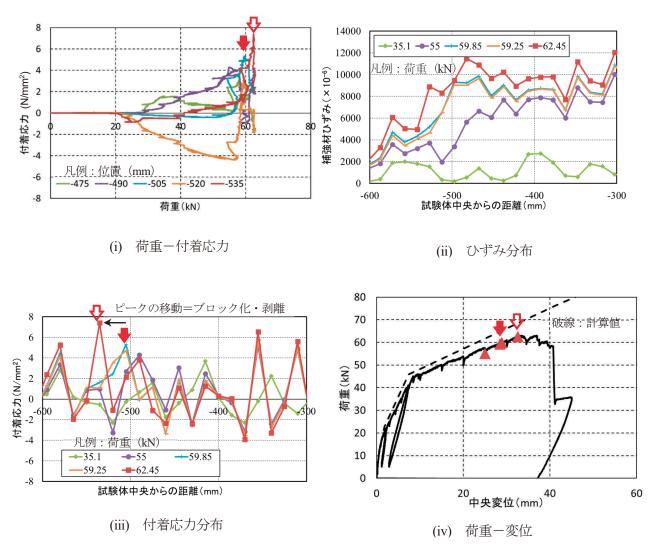
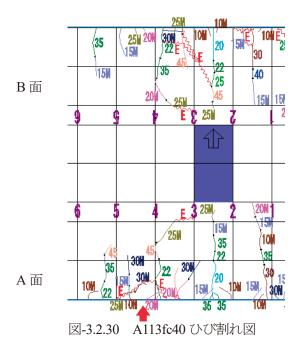
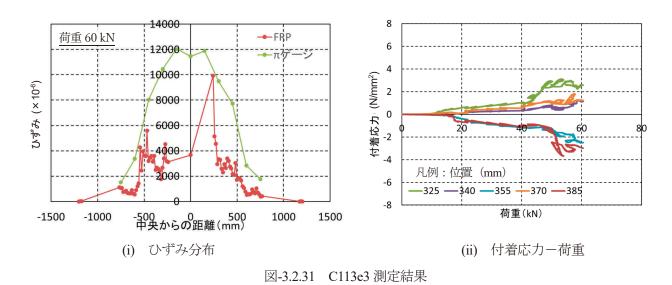


図-3.2.29 A113fc40 測定結果



10) C113e3

図-3.2.31(i)に最大荷重近くのひずみゲージとパイ型変位計によるひずみ分布,図-3.2.31 (ii)に付着応力-荷重関係を示す.ひずみゲージの値とパイ型変位計から算出されるひずみの値を比較すると大きく異なっており,ひずみゲージの値が不確かであったと推測される.また,荷重の増加とともに付着応力の増加は見られるものの,他の供試体と比較して,付着応力の低下や,隣の測定位置への推移などは観察されなかった.



11) A113e1

図-3.2.32(i)に最大荷重近くのひずみゲージとパイ型変位計のひずみ分布,図-3.2.32(ii)に付着応力-荷重関係を示す。C113e3と同様にひずみゲージの測定値とパイ型変位計によるひずみとの乖離が見られ、ひずみゲージの測定値の精度に問題があったことが推定される。精度の問題はあるものの、荷重付着応力の関係からは、56.7kN時に位置325の付着応力が0近くまで低下し、位置340mmの位置の付着応力がピークとなったことから、荷重56.7kNで初期剥離が生じた可能性があると考えられる。

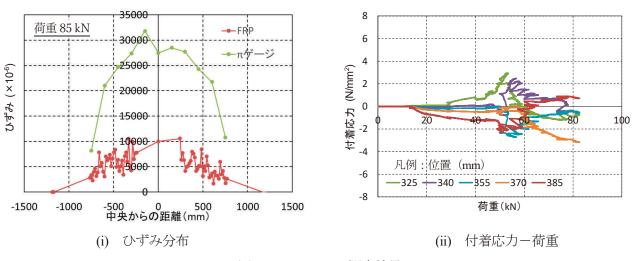
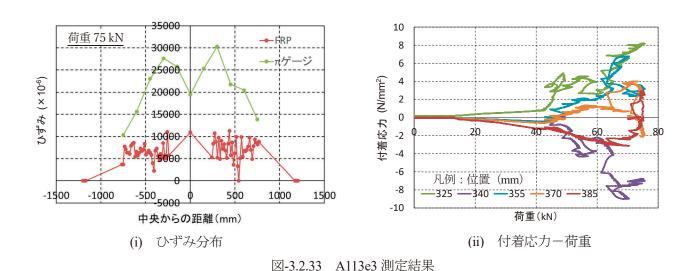


図-3.2.32 A113e1 測定結果

12) A113e3

図-3.2.33(i)に最大荷重近くのひずみゲージとパイ型変位計によるひずみ分布,図-3.2.33 (ii)に付着応力-荷重関係を示す。C113e3 と同様にひずみゲージの測定値とパイ型変位計によるひずみとの乖離が見られ,ひずみゲージの測定値の精度に問題があったことが推定される。ゲージ精度の問題はあるものの,付着応力ー荷重関係からは,位置355,370,385mmの付着応力のピークが荷重増加とともに観察された。72.0kN時に位置370mmの付着応力がピークとなったことから,荷重72.0kNで初期剥離が生じた可能性があると考えられる。実験中の観察からは荷重70kN,位置400~500mmで浮きが観察されており,ひずみゲージにより一部の剥離はとらえられたと考えられる。



(3) ブロック化の形成時の状況と推定要因

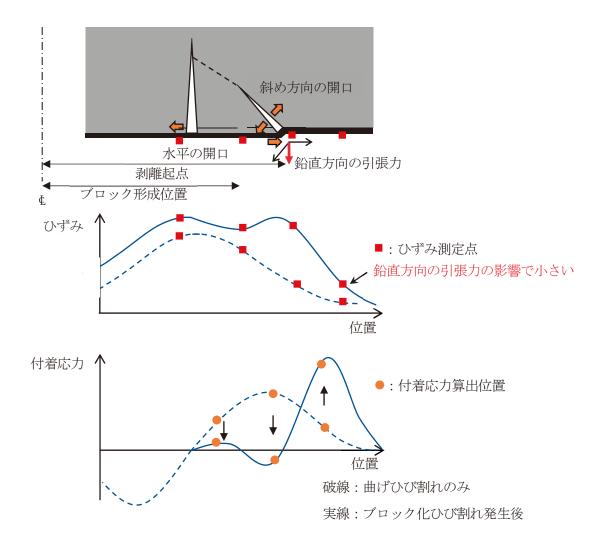
図-3.2.34 に、ブロック化形成の状況と推定要因を示す.

- 1) ブロック化や初期剥離以前の曲げひび割れ発生による付着応力は概ね 3N/mm² 以下であり、付着応力の増加や明確なピークは見られない。曲げひび割れが近接する場合、ひび割れ中間点では、左右のひび割れにより引張力が発生し、中間点でもひずみが増加することから、付着応力の増加は大きくないと考えられる 3,40.
- 2) 鉄筋降伏以後, ブロック化のひび割れが観察された. ブロック化の発生要因としては, 次の a), b)が 考えられる.
 - a) ブロック化発生位置のコンクリート下縁の引張応力がひび割れ発生応力に達している.
 - b) シートの引張力とコンクリートのせん断抵抗が釣り合う位置と方向に発生する. ブロック化のひび割れはせん断スパンだけでなく、シートひずみの高い等曲げ区間などでも観察されたことからコンクリートに発生する引張応力、シートの引張力に影響を受けると推定される.
- 3) 付着応力増加の要因として、ブロック化のひび割れを跨いで曲げひび割れ側は、曲げひび割れによるひずみが平準化する影響とブロック化のひび割れによりひずみが大きくなるが、反対側は鉛直方向、下方へのシートの変形が発生するため、鉛直方向の分力が水平方向へ応力伝達しないことによりひずみが大きくならないことが要因と推定される.

本実験ではせん断区間でのブロック化ひび割れを起点にシートの剥離が観察された. せん断区間の コンクリートのせん断応力場の方の鉛直変形が大きくなるものと推定する.

- 4) 付着応力は荷重増加とともにピークを迎えた後、隣接する位置の付着応力の増加とともに徐々に低下する傾向にある. ピーク後の付着応力は、荷重の増加とともに徐々に低下する傾向があり、斜めひび割れも徐々に伸展しているものと思われる.
- 5) 前項(2)の 1)~9)で確認したブロック化が形成されたと考えられる時の位置,荷重,ひずみ,付着応力度,付着力の一覧を表-3.2.6 に示す.ブロック化位置のひずみは,4000~9000×10⁻⁶の範囲でブロック化のひび割れが発生する傾向にある.
- 6) 前項(2)の 1)~9)で確認した初期剥離が形成されたと考えられる時の位置,荷重,ひずみ,付着応力度,付着力の一覧を表-3.2.7 に示す.初期剥離位置の剥離時のひずみは,5700~9600×10⁻⁶の範囲であった.初期剥離発生時の付着応力度は3.4~7.4 N/mm²の範囲であった.それらの値はせん断付着試験の付着応力すべり関係の最大付着強度の範囲に比較的近い結果であった.
- 7) 最大荷重時における等曲げ区間のひずみ 5 点の平均値を表-3.2.8 に, せん断付着試験結果の最大荷重 時のひずみと併せて示す. すべての供試体でせん断付着試験結果の最大荷重時のひずみに比べ, 同等 以上であった. せん断付着試験から得られる最大荷重時のひずみを用いて部材の設計をすると安全側 には評価できると考えられる.

以上の点を踏まえて、7章でさらに検討を行う.



- 注1) 斜め方向の開口(ひび割れ)は、7章の「三角ひび割れ」と同義である。
 - 2) 本節においてブロック形成位置は三角ブロックの中心を示す。(7章のブロック形成の起点となった曲げひび割れ位置と異なる。)

図-3.2.34 連続繊維シートのひずみとひび割れ観察から推測されるブロック化形成の状況

表-3.2.6 ブロック化形成時状況

供試体	ブロック形成位置 (はり中央 CL からの距離)	荷重 kN	中央 5 点 ひずみ平均 ×10 ⁻⁶	ブロック化 ひずみ ×10-6	付着 応力度 N/mm²	付着力 kN
C116	-430mm, ブロック化あり	75.1	7940	5990	4.67	16.4
C113L	430mm, 小ピッチひび割れ	38.1	7030	6040	4.64	13.9
C113	430mm, ブロック化あり	53.9	7190	5130	5.40	16.2
C213	430mm, ブロック化あり	67.2	5930	4350	4.49	15.6
C313	445mm, ブロック化あり	81.1	5650	5740	8.80	30.5
C113e1	-445mm, ブロック化あり	58.8	8060	4170	-	-
A113fc20	505mm, ブロック化あり	56.3	7890	4040	2.45	11.9
A113	370mm, ブロック化あり	56.7	6890	8200	5.42	23.1
A113fc40	-505mm, ブロック化あり	59.3	10000	9030	4.74	31.5

注) ブロック形成位置は、起点となった曲げひび割れと三角ひび割れ下端の中央付近を表す.

表-3.2.7 初期剥離

供試体	剥離起点 (はり中央 CL からの 距離)	荷重 kN	中央 5 点 ひずみ平均 ×10 ⁻⁶	剥離時 ひずみ ×10-6	付着 応力度 N/mm²	付着力 kN
C116	-460mm	78.5	9140	7450	4.75	15.0
C113L	445mm	42.4	8960	6040	4.64	13.9
C113	460mm	59.2	9410	7380	3.37	10.1
C213	445mm	71.0	6660	5770	7.24	21.7
C313	460mm	86.8	6350	6150	4.21	12.6
C113e1	-490mm	60.9	8880	6690	4.66	22.7
A113fc20	520mm	59.5	8900	6550	3.88	11.6
A113	385mm	61.0	8470	9580	4.66	15.1
A113fc40	-520mm	62.5	11100	8890	7.40	22.2

表-3.2.8 最大荷重時のひずみ

供試体	荷重 kN	曲げ試験 中央 5 点ひずみ平均 ×10 ⁻⁶	せん断付着試験 最大荷重時ひずみ ×10 ⁻⁶		
C116	80.7	9800			
C113L	47.1	11200	8370		
C113	64.0	10400			
C213	75.1	7410	5780		
C313	89.8	6740	6550		
C113e1	64.0	9750	9040		
A113fc20	65.6	11300	8200		
A113	67.6	10800	9600		
A113fc40	63.1	11200	9000		

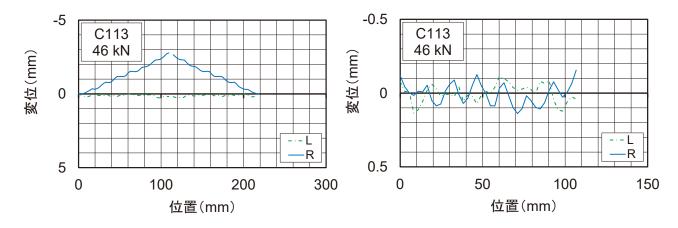
3.2.4 連続繊維シートの面外変位

前掲の図-3.1.13 に示した供試体 A113 のレーザー変位計による測定結果のうち、連続繊維シートの面外変位測定としてのデータを抽出したものが図-3.2.35(b)である. 供試体 A113 は、2020 年に試験したもので、レーザー変位計の走査範囲に目印となる突起を設置した. 一方、突起を設けていなかった 2019 年の測定例としてC113 の結果を同図(a)に示す. これらの図のうち、それぞれ左側の図は、載荷によるはりのたわみによる傾きが見られる. このデータを回帰して傾き補正した後の図が右側の図である. よって、縦軸の変位は絶対変位を示すものではなく相対変位であり、剥離前の結果の大部分は連続繊維シート表面の形状を表す. これらの図に基づき、各荷重間の相対変位を図-3.2.36~42 に示す. 図中、赤線で示す「差分」が各荷重間の相対変位を表す. はりのたわみが大きくなるにつれて、レーザー変位計の容量を超えるので、中央変位で 20 mm ごとに (一部 25mm) レーザー変位計を盛り替えた. このため、盛替え時にレーザー変位計の位置が微妙にずれるため、相対変位がみかけ上、大きくなり、これらのデータを参照することができないが、今後の測定の参考として示す.

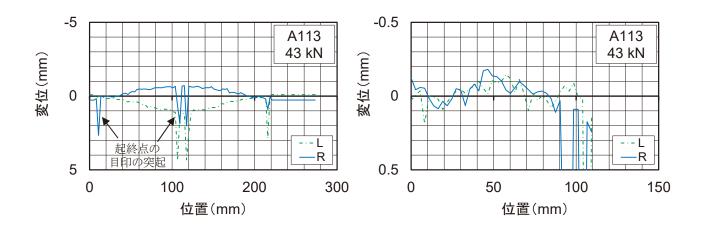
レーザー変位計による測定は、測定範囲が左右それぞれ 100mm 程度であり、かつ図-3.1.13 に示したように荷重ステップもごく限られたタイミングで測定したことから、データで捉えられたと考えられる事象はごく限られた。図-3.2.43 に、斜めひび割れ発生時について、供試体 A113fc20、A113fc40 及び C113e3 のビデオ画像から抽出した画像と併せて、斜めひび割れ監視用ひずみゲージによるひずみデータ、及びレーザー変位計による連続繊維シートの面外変位の変化を示す。ゲージ長 10mm のひずみゲージによる測定結果は、実現象の動きを知る上での参考データであり、物理量としては極性を知る程度のものである。これらの結果より、曲げひび割れ近傍に発生した小さい斜めひび割れ(7 章以降の三角ひび割れ)の発生によって、その斜めひび割れの下端付近で、連続繊維シートが 0.1mm 程度、下方に押し下げられるような変化が見られた。

同様に、図-3.2.44 に三角ブロック形成時について、供試体 A113e1 と A113e3 それぞれの画像と、ひずみデータ及び面外変位の変化を示す。供試体 A113e1 の挙動はよくわからなかったが、供試体 A113e3 では、三角ブロックの載荷点側(写真左側)の面外変位はマイナス側に、支点側はプラス側に変化しており、三角ブロックが回転する動きを捉えられている可能性があると考えられる。その変化量は、プラス側、マイナス側ともに 0.1mm 程度であった。

また同様に、図-3.2.45 に部分剥離発生時について、供試体 A113 の画像と、ひずみデータ及び面外変位の変化を示す。この事例において部分剥離の挙動は複雑であるが、それぞれのひび割れ先端は連続繊維シートを下方に押し下げる動きが見られる。部分剥離したと思われる右下図の 40~60 mm の範囲は相対的にはマイナス側に動いていた。



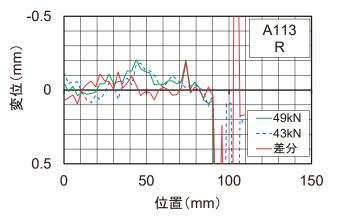
(a) 2019年の試験時

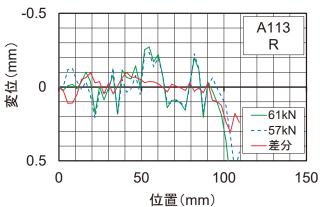


(b) 2020年の試験時

左図:走査の起点付近をゼロとした場合,右図:はりのたわみによる傾きを補正した場合注1) L:A面から見て左側のレーザー変位計による変位,R:同右側の変位注2) 本来,L側とR側それぞれの変位は極性が逆で対称となるが,はりやレーザー変位計のわずかな傾きの影響でいずれかに偏っている場合がある.

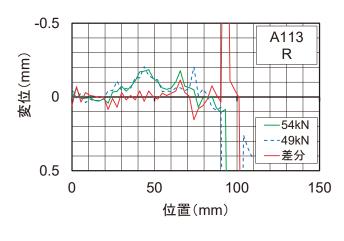
図-3.2.35 レーザー変位計による測定結果の例

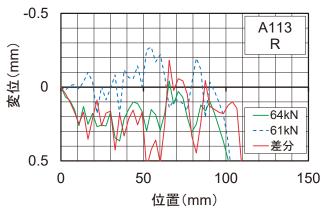




(a) 43 kN から 49 kN の間における変化

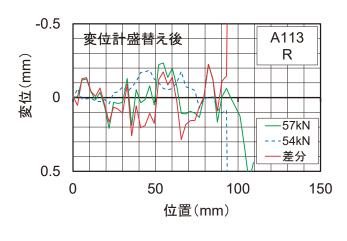


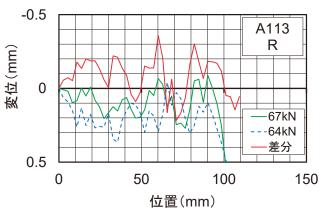




(b) 49 kN から 54 kN の間における変化



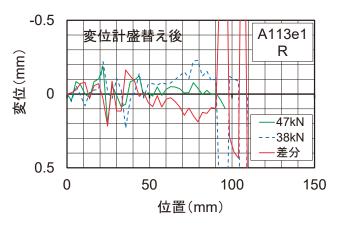


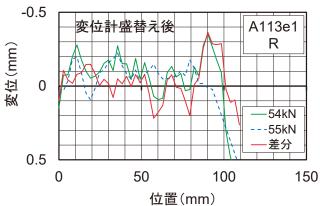


(c) 54 kN から 57 kN の間における変化

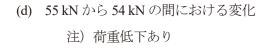
(f) 64 kN から 67 kN の間における変化

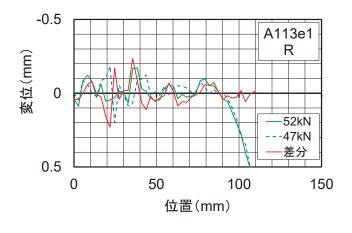
注)変位は全体変位ではない. +側が下がる方向を示す. 図-3.2.36 レーザー変位計による測定結果(供試体 A113, R側)

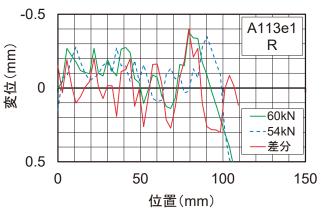




(a) 38 kN から 47 kN の間における変化

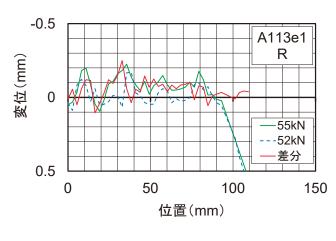


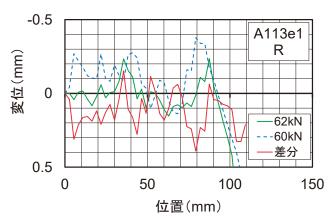




(b) 47 kN から 52 kN の間における変化



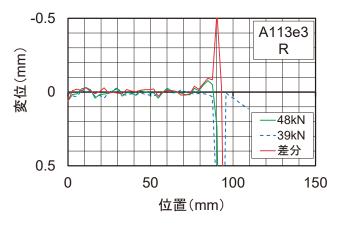


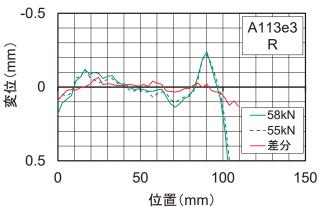


(c) 52 kN から 55 kN の間における変化

(f) 60 kN から 62 kN の間における変化

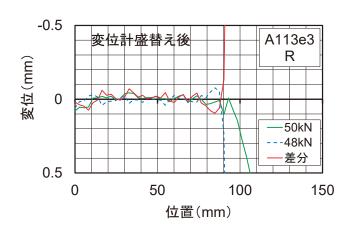
注)変位は全体変位ではない、+側が下がる方向を示す. 図-3.2.37 レーザー変位計による測定結果(供試体 A113e1, R 側)

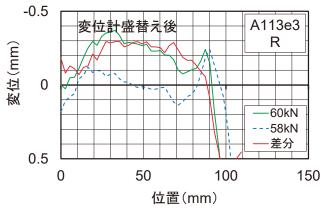




(a) 39 kN から 48 kN の間における変化

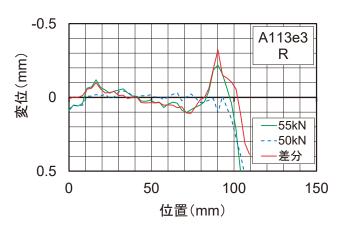


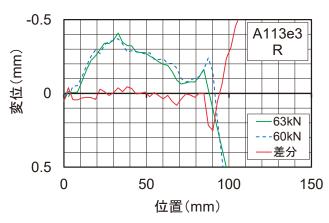




(b) 48 kN から 50 kN の間における変化



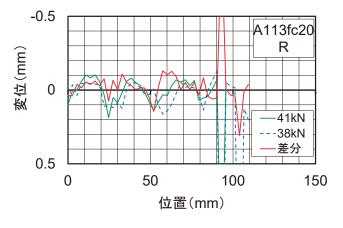


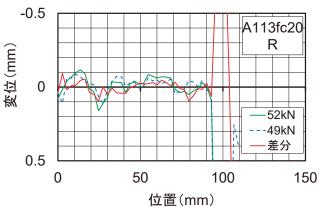


(c) 50 kN から 55 kN の間における変化

(f) 60 kN から 63 kN の間における変化

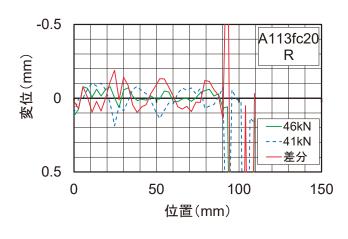
注)変位は全体変位ではない. +側が下がる方向を示す. 図-3.2.38 レーザー変位計による測定結果(供試体 A113e3, R 側)

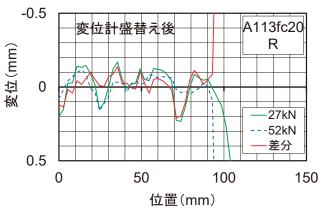




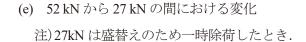
(a) 38 kN から 41 kN の間における変化

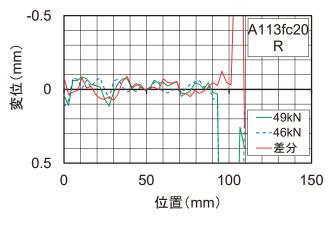


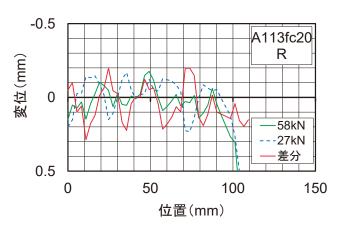




(b) 41 kN から 46 kN の間における変化





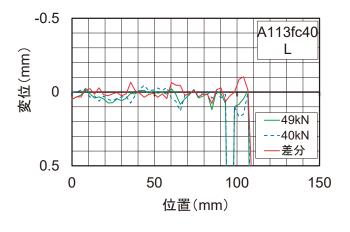


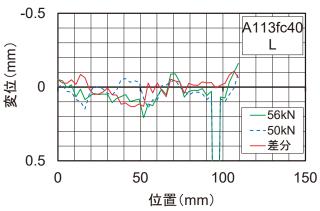
(c) 46 kN から 49 kN の間における変化

(f) 27 kN から 58 kN の間における変化

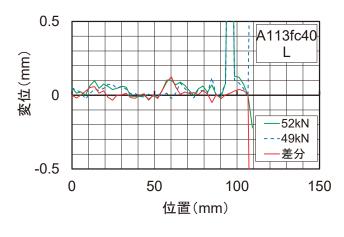
注)変位は全体変位ではない、+側が下がる方向を示す.

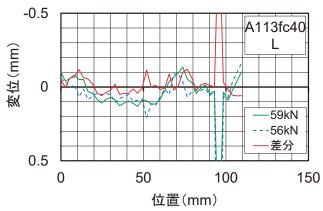
図-3.2.39 レーザー変位計による測定結果(供試体 A113fc20, R側)



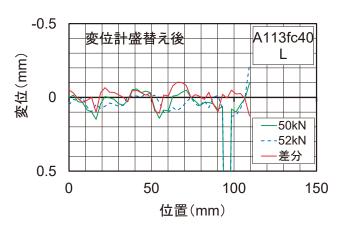


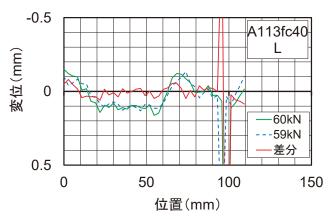
- (a) 40 kN から 49 kN の間における変化
- (d) 50 kN から 56 kN の間における変化





- (b) 49 kN から 52 kN の間における変化
- (e) 56 kN から 59 kN の間における変化



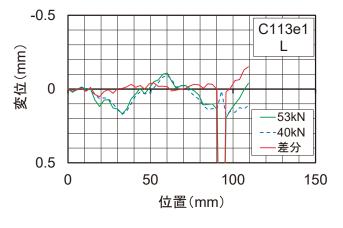


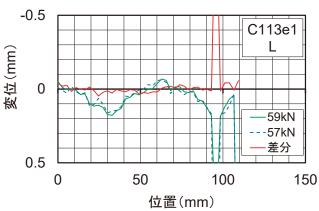
- (c) 52 kN から 50 kN の間における変化
- (f) 59 kN から 60 kN の間における変化

注) 荷重低下あり

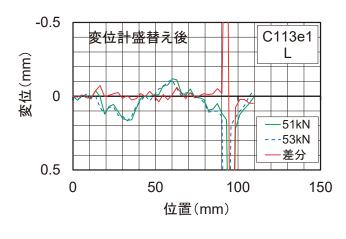
注)変位は全体変位ではない、+側が下がる方向を示す.

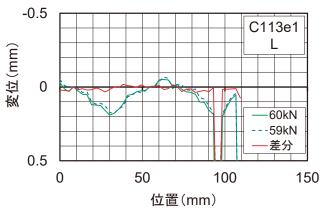
図-3.2.40 レーザー変位計による測定結果(供試体 A113fc40, L側)



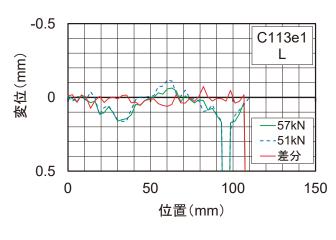


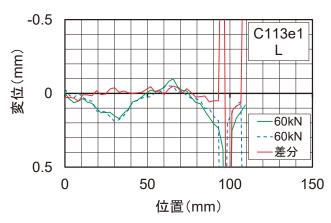
- (a) 40 kN から 53 kN の間における変化
- (d) 57 kN から 59 kN の間における変化





- (b) 53 kN から 51 kN の間における変化注)荷重低下あり
- (e) 59 kN から 60 kN の間における変化

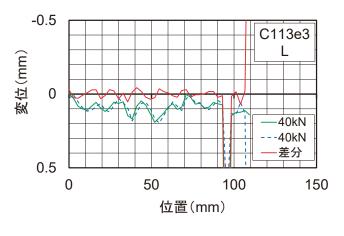


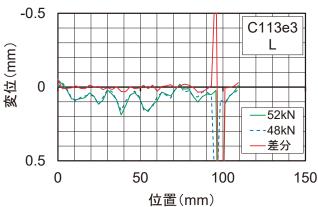


- (c) 51 kN から 57 kN の間における変化
- (f) 60.5 kN から 59.9 kN の間における変化注) 荷重低下あり

注)変位は全体変位ではない、+側が下がる方向を示す.

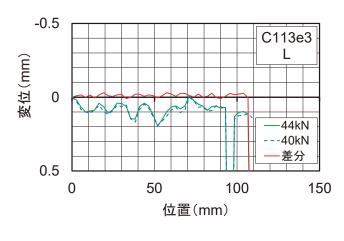
図-3.2.41 レーザー変位計による測定結果(供試体 C113e1, L 側)

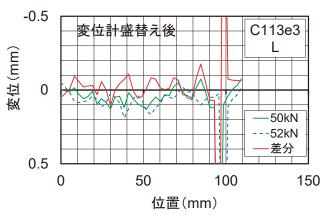




(a) 39.9 kN から 40.2 kN の間における変化

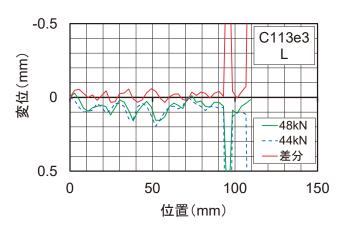


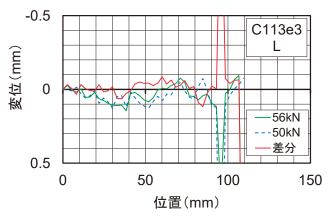




(b) 40 kN から 44 kN の間における変化

(e) 52 kN から 50 kN の間における変化注) 荷重低下あり

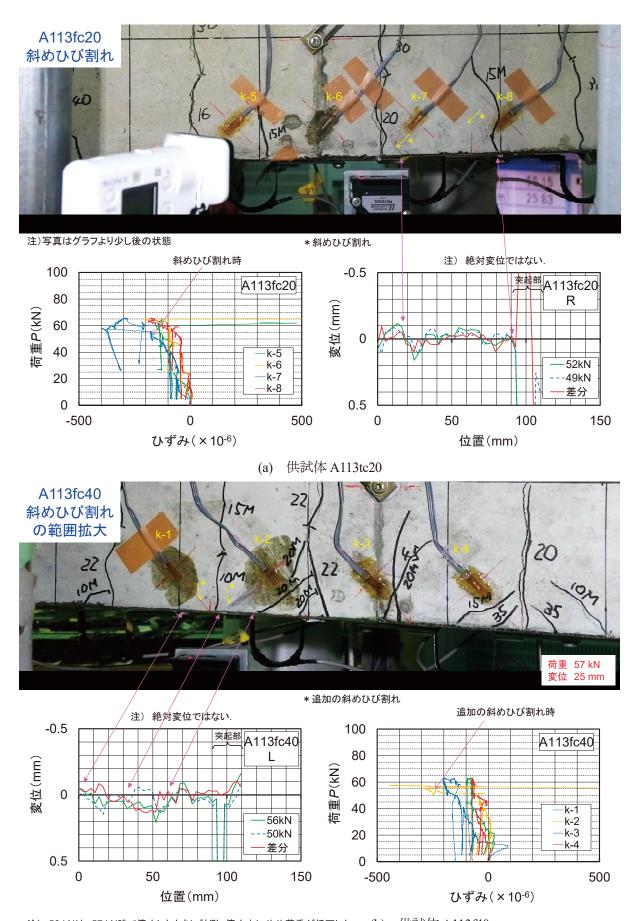




(c) 44 kN から 48 kN の間における変化

(f) 50 kN から 56 kN の間における変化

注)変位は全体変位ではない. +側が下がる方向を示す. -3.2.42 レーザー変位計による測定結果(供試体 C113e3, L側)



注) 56 kNは, 57 kN時で停止したときに計測, 停止中にやや荷重が低下した. (b) 供試体 A113f40 図-3.2.43 斜めひび割れ発生時の斜めひび割れ監視用ひずみゲージとレーザー変位計の測定結果

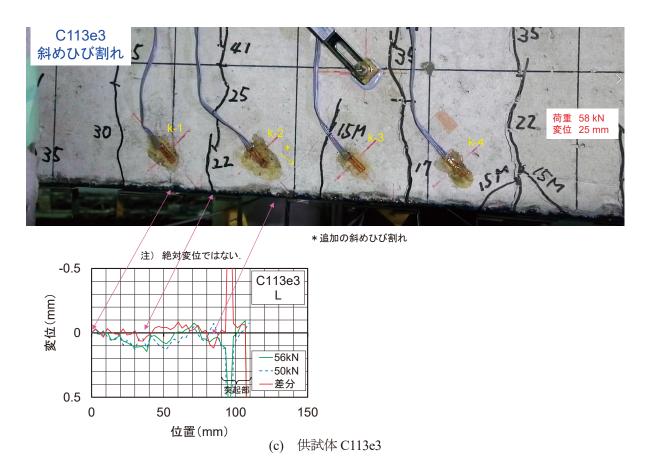
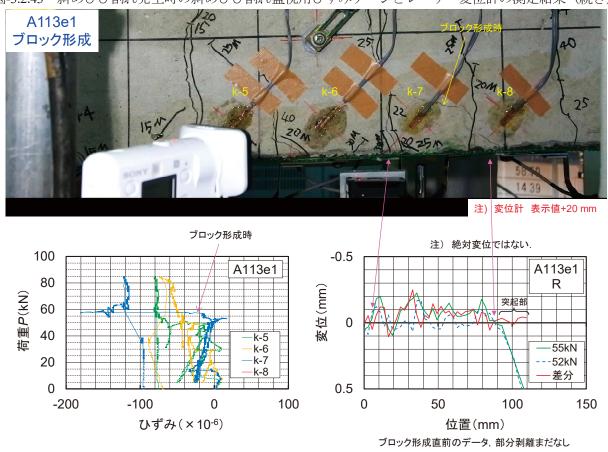


図-3.2.43 斜めひび割れ発生時の斜めひび割れ監視用ひずみゲージとレーザー変位計の測定結果(続き)



(a) 供試体 A113el 図-3.2.44 三角ブロック形成時の斜めひび割れ監視用ひずみゲージとレーザー変位計の測定結果

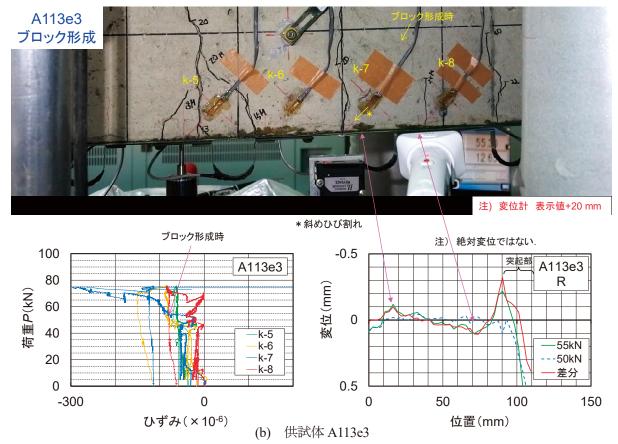


図-3.2.44 三角ブロック形成時の斜めひび割れ監視用ひずみゲージとレーザー変位計の測定結果(続き)

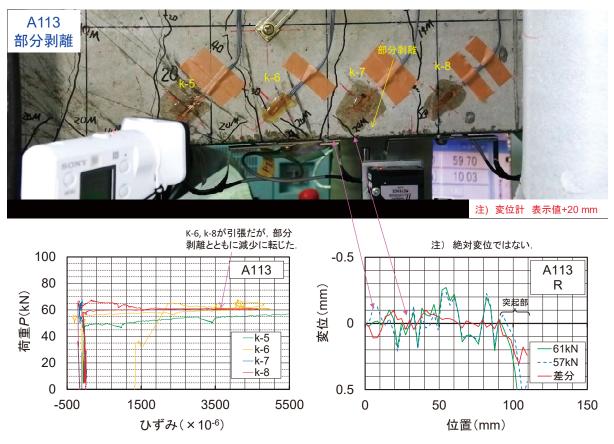


図-3.2.45 部分剥離発生時の斜めひび割れ監視用ひずみゲージとレーザー変位計の測定結果(供試体 A113)

4. せん断付着試験

4.1 概要

本章は、連続繊維シートを接着したはりの曲げ試験に用いた試験水準に合わせて、連続繊維シートとコンクリートのせん断付着特性を把握することを目的として実施した。試験方法は、土木学会によって規定された「連続繊維シートとコンクリートの付着試験方法(案)(JSCE-E 543-2013)」「に従った。供試体の製作は、はり供試体と同時に行い、それぞれの試験水準のコンクリートは同じバッチのフレッシュコンクリートを用いた。また、連続繊維シートも、それぞれ同じ材料を、同じ日、同じ場所で施工した。よって、材料試験データは、はり供試体と共通である。本章では、せん断付着試験の試験結果を、コンクリートと連続繊維シートの相対すべりとせん断付着応力度の関係でもって評価した。

相対すべりとせん断付着応力度の関係は、両者の局所的な乱れによって安定した関係を得ることが難しいので、過去の研究に基づき、両者の関係の定量化を試みた。相対すべりとせん断付着応力度の関係を指数型関数でカーブフィットすることにより、工学的に適切な評価関係を得ることができた。その結果、相対すべりとせん断付着応力度の関係に、コンクリートの強度及び繊維の種類の影響は小さいこと、連続繊維シートの引張剛性と接着樹脂の弾性係数の変動によりこの関係は大きく変化することが分かった。

なお、せん断付着試験においても、偏配合の含浸樹脂を用いた供試体のうち供試体 Cle3 は、含浸樹脂の柔らかさに応じた適切なひずみ測定ができなかったと思われる結果が見られたが、参考のため、ひずみデータを用いた結果も他の供試体と同様に示す。

4.2 試験方法

4.2.1 供試体及び載荷方法

せん断付着試験は、「連続繊維シートとコンクリートの付着試験方法(案)(JSCE-543-2013)」「のB型供試体を参考にして、実施した、供試体の詳細を図-4.2.1に示す、供試体は、100×100mmの断面で全長は670mmとし、コンクリートの接着面はサンダーケレンを行った、連続繊維シートの全長は580mmで、ノッチより試験区間側に350mm、固定区間側に200mm、ノッチ部に離型性フィルムを20mm配置して、含浸樹脂で接着した、連続繊維シートの幅は、炭素繊維シートが50.0mm、アラミド繊維シートが47.9mmである。アラミド繊維シートは収束した繊維束で構成されているために、連続繊維シートの幅は繊維束幅の倍数になるので、端数が生じる。ひずみゲージは、ノッチ部センターから15mm間隔で両側にそれぞれ24枚配置した。ノッチ部の開口変位は変位計で測定した。載荷は、室内で、変位制御で載荷した(図-4.2.2)、載荷速度は0.3mm/分とした。計測は100Hzの動的計測を行った。なお、供試体数は試験水準に対して各1体、計10体とした。

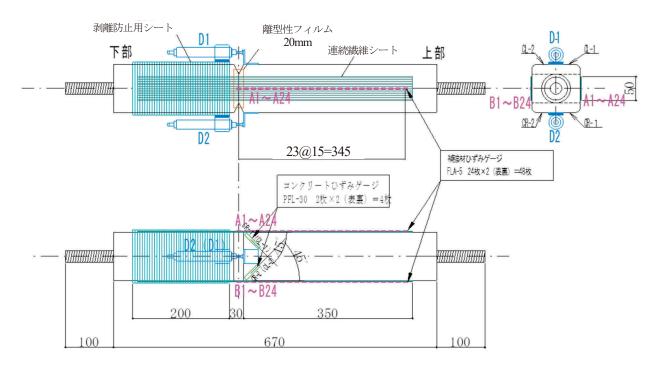


図-4.2.1 供試体の寸法と計測システムの配置



図-4.2.2 試験の状況

4.2.2 試験の水準

試験の水準は、はり試験と概ね同様で、連続繊維シートの種類、連続繊維シートの引張剛性、コンクリートの強度、含浸接着剤の弾性係数(せん断弾性係数)とした。表-4.2.1 に供試体の記号と試験水準の一覧を示す。最初の文字の [A, C] が繊維の種類で、アラミド繊維もしくは炭素繊維を示す。2文字目の数字 [1] ~ [3] は、連続繊維シートの積層数で、1層から3層を示す。[fc20]、[fc40] は、コンクリートの圧縮強度のグレードで、無記述は標準の30N/mm²を示す。配合は前掲表-3.1.2 に示した。[e1]、[e3] は、含浸樹脂の弾性係数のグレードで、それぞれの連続繊維シートで使用されている標準配合の含浸樹脂の弾性係数に対して、それぞれ約60%、25%に変化させた含浸樹脂を示す(前掲図-3.1.9)。

連続繊維シートに関しては、アラミド繊維シートはアラミド1繊維シートの40tf/m級を、炭素繊維シートは高強度型炭素繊維シートの200g/m²目付を用いた。コンクリートの打設時期は、はり試験の実施日に材齢28日以上となるようにした。ただし、A1fc20に関しては、材齢を調節して目標強度を得た。

含浸樹脂は、それぞれの連続繊維シートの標準に使用する樹脂に対して、弾性係数を低下させた.その手法は、エポキシ樹脂の決められた主剤と硬化剤の比率(2:1)に対して、硬化剤の割合を増加させることにより調整した.炭素繊維シートの場合、標準樹脂の弾性係数 $4100~N/mm^2$ に対して 67% と 25% に、アラミド繊維シートの場合、標準樹脂の弾性係数 $2600~N/mm^2$ に対して 52% と 21% となった.この配合の変更によって、エポキシ樹脂のガラス転移点 T_g も低下することとなった.用いたエポキシ樹脂の T_g の測定値を前掲表-3.1.9 に示した.測定値は 6 月上旬における約 2 週間の硬化反応が進行した時点における T_g である.なお、本章における計算で用いる連続繊維シートの弾性係数は、各連続繊維シートに用いられる含浸樹脂の種類(配合)ごとに一定とした.

表-4.2.1 供試体名と使用材料

	ž	コンクリー	-		連続	繊維シート				含浸樹脂			
供試体名	圧縮強度 f_c N/mm 2	弹性係数 E_c $\times 10^3$ N/mm ²	割裂引張 強度 f _i N/mm ²	種類×層 数	引張強度 f _{fu} N/mm ²	弾性係数 <i>E_f</i> ×10 ³ N/mm ²	厚さ ty mm	幅 <i>b_f</i> mm	引張強度 f _a N/mm ²	弾性係数 E_a $\times 10^3$ N/mm ²	ポアソン 比v		
C1	34.7	24.5	2.7	C200×1	4000	255	0.111	50.0	69.5	4.10	0.37		
C2	34.7	24.5	2.7	C200×2	4000	255	0.222	50.0	69.5	4.10	0.37		
C3	34.7	24.5	2.7	C200×3	4000	255	0.333	50.0	69.5	4.10	0.37		
C1e1	29.4	24.3	2.6	C200×1	4000	255	0.111	50.0	43.8	2.75	0.36		
C1e3	29.4	24.3	2.6	C200×1	4000	255	0.111	50.0	12.4	1.02	0.39		
A1	29.4	24.3	2.6	A40×1	3460	132	0.193	47.9	32.6	2.60	0.41		
A1e1	29.4	24.3	2.6	A40×1	3460	132	0.193	47.9	15.1	1.34	0.34		
A1e3	29.4	24.3	2.6	A40×1	3460	132	0.193	47.9	4.6	0.54	0.20		
A1fc20	21.5	21.7	2.0	A40×1	3460	132	0.193	47.9	32.6	2.60	0.41		
A1fc40	40.5	26.1	3.1	A40×1	3460	132	0.193	47.9	32.6	2.60	0.41		

4.3 試験結果

4.3.1 開口変位と荷重の関係

試験結果を表 4.3.1 に示す.最大荷重時シート応力は,最大荷重の 1/2 を連続繊維シートの断面積で除した値である.最大ひずみは最大荷重時にノッチ部で計測された両面の平均ひずみである.破壊形式では,母材破壊はコンクリート表層でのコンクリートの破壊,シート破断は剥離の前における連続繊維シートの破断,凝集破壊は連続繊維シートとコンクリートの間の樹脂層内での破壊を意味する.界面剥離破壊エネルギー G_F は式 4.3.1で,せん断付着強度 $\frac{1}{2}$ は式 $\frac{1}{2}$ は式 $\frac{1}{2}$ に式 $\frac{1}{2}$ に式 $\frac{1}{2}$ に $\frac{1}{2}$ に

$$G_f = \frac{P_{\text{max}}^2}{8b^2 \cdot E_f \cdot t_f} \tag{4.3.1}$$

$$\overline{\tau}_u = \frac{P_{\text{max}}}{2b \cdot L_e} \tag{4.3.2}$$

ここに、 P_{max} : 最大荷重、b: 連続繊維シートの幅、 E_f : 連続繊維シートの弾性係数、 t_f : 連続繊維シートの厚さ、 L_e : 有効付着長

表-4.3.1 試験結果の一覧

荷重	ひび割れ 荷重	最大荷重	最大荷重時 シート応力度	最大シート ひずみ	加速形士	界面剥離 破壊エネル	せん断付着 強度* ²
供試体名	P_{cr}	Pmax	O _{s max}	Es max	破壊形式	ギー*1 G _f	$\overline{\tau}_{u}$
	kN	kN	N/mm ²	×10 ⁻⁶		N/mm	N/mm ²
C1	13.1	20.8	1870	8370	剥離(母材破壊)	0.76	2.60
C2	13.2	25.4	1140	5780	剥離(母材破壊)	0.57	3.18
С3	13.1	33.6	1010	6550	剥離(母材破壊)	0.66	4.20
C1e1	14.4	19.7	1780	9040	剥離(母材破壊)*3	0.69	2.46
C1e3	13.4	24.5	2210	6490	シート破断	(1.06)	(3.06)
A1	12.1	17.9	967	9600	剥離(母材破壊)	0.68	2.33
A1e1	12.1	39.2	2120	19700	剥離(凝集破壊)	3.28	5.11
A1e3	14.7	29.9	1620	17000	剥離(凝集破壊)	1.91	3.90
A1fc20	10.0	17.9	967	8200	剥離(母材破壊)	0.68	2.33
A1fc40	11.9	20.0	1080	9000	剥離(母材破壊)	0.85	2.61

 $^{*^1}G_f$ は最大荷重による. 括弧内は破断のため参考として示す. $*^2$ この表では有効付着長を L_e =80mm と仮定.

試験時の室内温度は、 $24\sim25$ ℃、平均で25℃であった.

^{*3}連続繊維シートの幅 1/6の範囲はシート破断.

表-4.3.1 より、炭素繊維シートを用いた供試体において、引張剛性を大きくするに従い、最大荷重、せん断付着強度は大きくなったが、連続繊維シートの負担する引張応力度は小さくなった。アラミド繊維シートを用いた供試体において、コンクリートの圧縮強度による最大荷重、界面剥離破壊エネルギー、せん断付着強度の変動は少なかった。

図-4.3.1(a)に最大荷重時の連続繊維シートの引張強度 (ここでは保証強度)に対する寄与率を示す.本試験方法 で付着特性を評価すると,連続繊維シートを1層とした場 合は,コンクリート強度にかかわらず,引張強度の50%程 度で剥離する.連続繊維シートの接着枚数を増すことによ り引張剛性を大きくすると,引張強度に対する割合は減少 する.一方,含浸樹脂の弾性係数を小さくすることにより 引張強度に対する割合は増加する傾向であった.

図4.3.1(b)に最大ひずみを最大応力から弾性係数を用いて 算出したひずみに対する割合を示す.含浸樹脂の弾性係数 を小さくしたグループは、割合が小さくなる傾向にある. 特に Cle3 は割合が 0.4 と著しく小さく、ひずみが正当に計 測されていない可能性がある. これは、対象樹脂に対して 適正なひずみゲージが用いられていない可能性が高い.

図-4.3.2 に供試体の破壊性状を示す. 偏配合の含浸樹脂

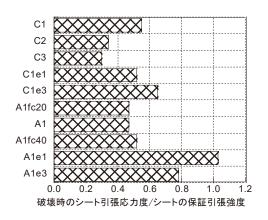


図-4.3.1(a) 最大荷重時のシートの寄与率

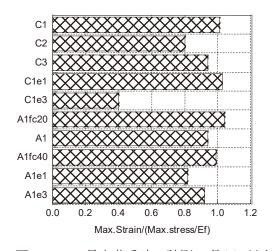


図-4.3.1(b) 最大荷重時の計測ひずみに対する荷重から算出したひずみに対する割合

を用いた場合を除き、すべての供試体において、破壊モードは、連続繊維シートにコンクリートが付着しており、コンクリート表層部の母材破壊であった。含浸樹脂の弾性係数を小さくすることによる破壊性状や特性への影響は、顕著に表れた。炭素繊維シートでは、一部で連続繊維シートの破断が観測された。アラミド繊維シートでは、含浸樹脂の弾性係数を小さくすることにより破壊モードが含浸樹脂内の凝集破壊に変化し、さらに、最大荷重、界面剥離破壊エネルギー、平均付着強度、連続繊維シートの負担する引張応力度のすべての指標が大きくなった。

開口変位は、連続繊維シートとコンクリート部材の相対すべりのほか、離型フィルムの設置された連続繊維シートの自由伸び、連続繊維シートの定着側の相対すべり、ノッチ部のコンクリートの弾性変形の影響(コンクリートが完全に割れるまで)が含まれるので注意が必要である。しかし、供試体に全体の変形の様子を簡便に表すので、図-4.3.3 に開口変位と荷重の関係を示す。図(a)、(c)に示す連続繊維シートの引張剛性やコンクリート強度をパラメータとした供試体では、開口変位が 2mm 程度で母材破壊を伴う剥離が生じた。一方、図(b)、(d)に示す含浸樹脂の弾性係数をパラメータにした供試体では、破壊時の変形量が大きくなっている。特に、アラミド繊維シートを用いた供試体では、破壊荷重と最大荷重以降の変位も大きくなり、靱性

能に富んだ特性を示している。含浸樹脂の特性を変化させることにより、連続繊維シートとコンクリートの付着特性に変化を与えやすいことが分かった。また、用いる繊維との相性もあると考えられる。

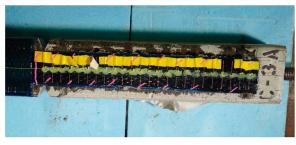
図-4.3.2(h)に示すように、アラミド繊維シートに用いる樹脂の弾性係数を小さくした供試体は樹脂層内の 凝集破壊が生じることにより、コンクリート表層の引張破壊を防ぎ、破壊荷重を向上させている。これは、 樹脂の弾性係数が小さくなるに従って実際の付着長が長くなり、コンクリートへの局所的な応力集中を防ぎ、 コンクリートの破壊を未然に防止していると思われる。なお、すべての供試体においてノッチ部以外にもひ び割れが生じて、連続繊維シートのひずみ分布やせん断付着応力度の分布にもその影響が見られた。



(a) C1



(b) C2



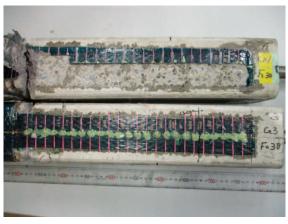
(c) C3



(f) A1



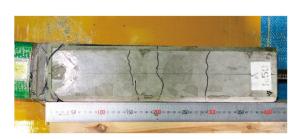
(h) A1,A1e1とA1e3のシート面



(d) Clel(上)と Cle3(下)のシート面



(e) Cle1とCle3のシートのない面

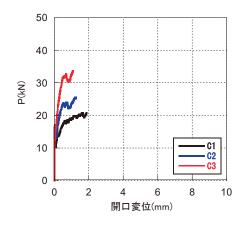


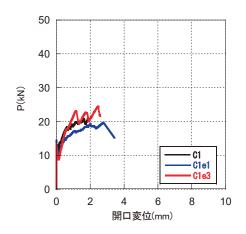
(g) A1fc40



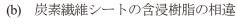
(i) A1,A1e1 と A1e3 のシートのない面

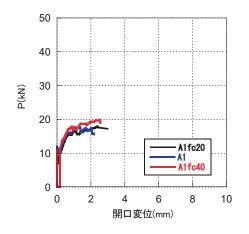
図-4.3.2 破壊後の写真

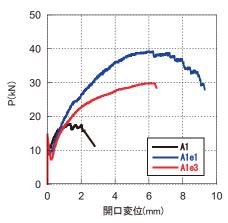




(a) 炭素繊維シートの引張剛性の相違







(c) アラミド繊維シートのコンクリート強度の相違

(d) アラミド繊維シートの含浸樹脂の相違

図-4.3.3 試験水準による開口変位と荷重の関係の差異

4.3.2 ひずみ分布と付着応力度分布,及びτ-Sの関係

図-4.3.4~13 に,すべての供試体における剥離側について,図(a)に連続繊維シート表面のひずみの分布,図(b)にせん断付着応力度の分布,図(c)に相対すべりとせん断付着応力度の関係をそれぞれ示す.連続繊維シートとコンクリートの界面に生じるせん断付着応力度 τ_{fc} は,隣り合うひずみゲージによるひずみの差分をとることにより算定できる $^{2)4}$. ここでは,式 4.3.3 のとおり算定位置の前後のひずみを用いて中央差分により算定した.

$$\tau_{fc} = \frac{t_f \cdot E_f \cdot \left(\varepsilon_{f,i+1} - \varepsilon_{f,i-1}\right)}{2 \cdot \Delta L} \tag{4.3.3}$$

ここに、 t_f : 連続繊維シートの厚さ、 E_f : 連続繊維シートの弾性係数、

 ϵ_{fi} : 実測ひずみ, ΔL : ひずみゲージの設置間隔

加力点側のシート端を不動点と仮定し、不動点よりひずみを測点間隔 15mm で積分することにより式 4.3.4 で相対すべり S_{fc} を得ることができる $^{2)4}$. 図(c)には、任意の荷重における同一測点の相対すべりとせん断付着応力度の分布を示した.

$$S_{fc} = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{f,i} \cdot \Delta L \tag{4.3.4}$$

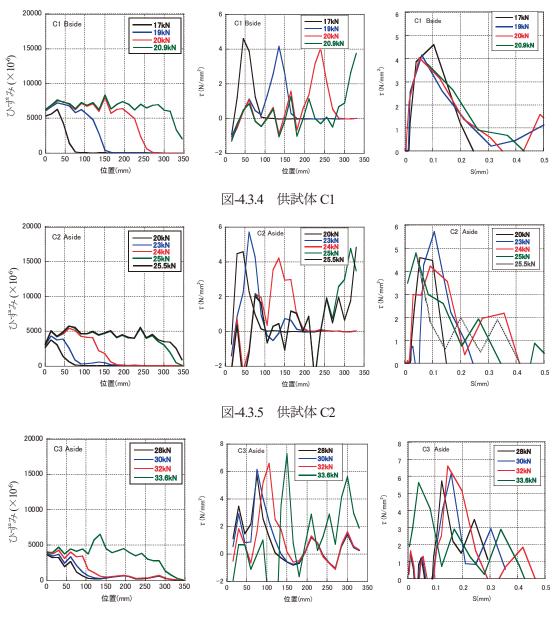
図(c)に示した相対すべりとせん断付着応力度の関係を、式 4.3.5 のとおり数値積分することにより、連続繊維シートとコンクリートの付着すべりエネルギーUを試験から求める.

$$U = \sum_{i=1}^{n} \tau_i \cdot \Delta S_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} \tau_i \cdot \left(S_{i+1} - S_{i-1} \right)$$
 (4.3.5)

ここに、 τ_i 、 S_i : それぞれ各点 i における τ_k 、 S_k

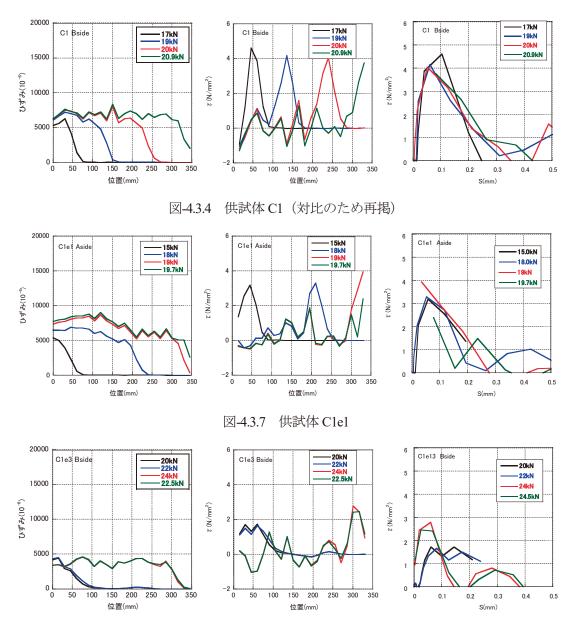
炭素繊維シートを用いて引張剛性をパラメータとしたシリーズを図4.3.4~6 に示す。引張剛性が大きくなるに従って、連続繊維シート表面ひずみは小さくなり、最大せん断付着応力度 τ_{max} が僅かに大きくなり、最大せん断付着応力度が生じる時点の相対すべり S_{max} が 0.05~0.1mm の範囲で生じている。

ひずみ分布を見ると、付着が切れた範囲では、摩擦などによる局所的な乱れが観察でき、試験の精度を低下させていることがわかる。例えば、図-4.3.4(b)を見ると、18kN程度まで徐々に剥離が生じ100mmの位置まで初期の有効付着長であったことがわかる。以後、順次荷重の増分に従い、付着区間が端部に移行している。荷重の増分は剥離区間の摩擦などにより生じていると考えられる。界面剥離破壊エネルギーは0.6~0.9N/mmである(後掲表-4.3.2 にまとめて示す)。



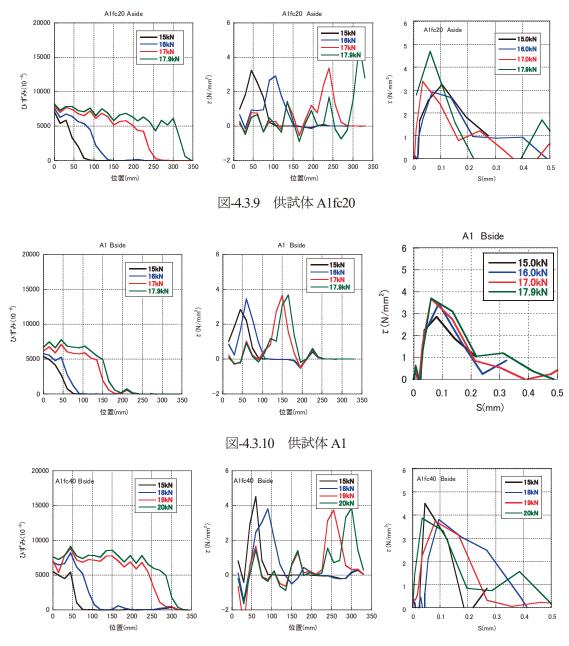
(a) 連続繊維シート表面のひずみ (b) せん断付着応力度の分布 (c) 相対すべりとせん断付着応力度 図-4.3.6 供試体 C3

炭素繊維シートを用いて含浸樹脂の弾性係数を低下させたシリーズを図-4.3.7~8に示す. Clel は、連続繊維シートのうち、幅 1/6 の範囲が破断によって終局に至った. ひずみ分布を見ると、最大荷重時には荷重端 (345mm 位置) でひずみが生じており、連続繊維シートがこの時点で定着部を喪失しかけていたことがわかる. 一方、Cle3 は、参考として示したものであり、他に比較して破壊荷重が大きいにもかかわらず、1/2 程度の小さなひずみしか観測されていない. 樹脂が柔らかくなるに従い、最大せん断付着応力度は小さくなり、相対すべり量は大きくなっている. この理由は、本項末で後述するように、ひずみ計測が適正に行われていない可能性もある.



(a) 連続繊維シート表面のひずみ (b) せん断付着応力度の分布 (c) 相対すべりとせん断付着応力度 図-4.3.8 供試体 C1e3 (参考値)

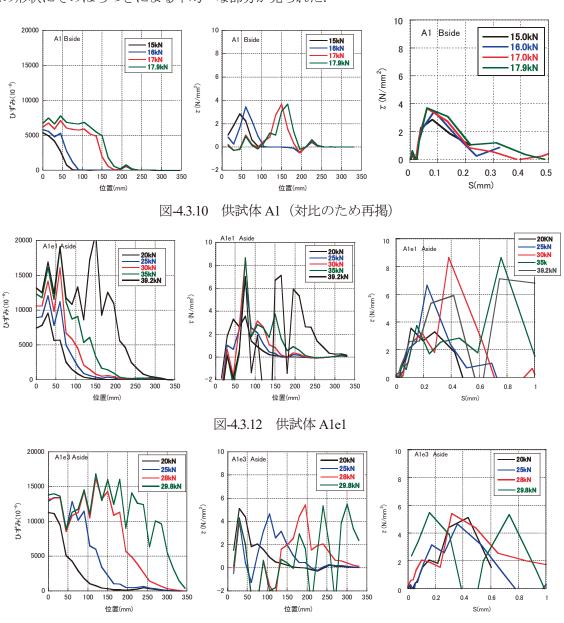
アラミド繊維シートを用いてコンクリートの強度をパラメータとしたシリーズを図 $4.3.9\sim11$ に示す. コンクリートの強度が大きくなるに従い,表面ひずみが $5000\sim9000\times10^6$ の範囲で,最大せん断応力度が $3\sim5N/mm^2$ の範囲で,界面剥離破壊エネルギーも $0.7\sim1.1N/mm$ 範囲で大きくなる傾向がある. しかし,コンクリート強度による明確な差異は見られなかった.



(a) 連続繊維シート表面のひずみ (b) せん断付着応力度の分布 (c) 相対すべりとせん断付着応力度 図-4.3.11 供試体 A1fc40

アラミド繊維シートを用いて含浸樹脂の弾性係数を低下させたシリーズを図 $4.3.12\sim13$ に示す。樹脂の弾性係数が低下するに従い、連続繊維シートのひずみは大きくなり、標準供試体の3 倍程度のひずみが観測された。供試体 Ale1, Ale3 とも樹脂層内の凝集破壊で終局を迎えた。Ale1, Ale3 は偏配合としたことで弾性係数だけでなく、強度特性も低下していた上に、試験時温度 23° Cに比べて含浸樹脂の T_g がかなり小さかったことから、凝集破壊が生じたと推察される。特徴的なことは、最大せん断付着応力度の発生する最大相対すべり S_{max} が大きくなっていることである。それに伴い界面剥離破壊エネルギーが $3\sim5$ N/mm と標準配合の供試体 Al の $4\sim7$ 倍になっている。既往の研究^{例えば5)}から推察されるように、含浸樹脂の弾性係数の低下は、付着特性の向上を見せている。

ここまでに示した図-4.3.4~13 のひずみ分布には、粗骨材の影響などによる局所的なばらつきが見られ、 τ - S 関係の形状にそのばらつきによる不均一な部分が見られた.



(a) 連続繊維シート表面のひずみ (b) せん断付着応力度の分布 (c) 相対すべりとせん断付着応力度 図-4.3.13 供試体 A1e3

表-4.3.2 に破壊形式と図-4.3.4~13 に示したひずみ分布から推定した最大せん断付着応力度 τ_{max} , その時点の相対すべり S_{max} , 及び界面剥離破壊エネルギー G_f を示す。また、図-4.3.14 に各供試体の破壊に至るまでの付着すべりエネルギーの推移を示している。図(a)に炭素繊維シートを用いた供試体、図(b), (c)にアラミド繊維シートを用いた供試体を示している。これらの試験の範囲では、各供試体とも剥離破壊に至るまで付着すべりエネルギーが概ね直線的に増加する傾向が見られた。図(c)に示すように、アラミド繊維シートを用い、樹脂の弾性係数を小さくした供試体 Alel、Ale3 の付着すべりエネルギーとその最大値である界面剥離破壊エネルギーは他に比較して、非常に大きくなっている。

表4.3.2 破壊形式と最大せん断付着応力度、相対すべり及び界面剥離破壊エネルギー

供試体名	mb latered D	最大荷重	最大せん断 付着応力度	相対すべり	界面剥離破壊 エネルギー* ²
	破壊形式	P_{max}	τ_{max}	Smax	G_{f}
		kN	N/mm ²	mm	N/mm
C1	剥離(母材破壊)	20.8	4.6	0.10	0.85
C2	剥離(母材破壊)	25.4	5.7	0.11	0.64
С3	剥離(母材破壊)	33.6	6.6	0.15	0.92
C1e1	剥離(母材破壊)*1	19.7	4.0	0.03	1.08
C1e3	シート破断	24.5	(1.7)	(0.06)	(0.33)
A1	剥離(母材破壊)	17.9	3.7	0.06	0.71
Alel	剥離(凝集破壊)	39.2	8.7	0.38	5.44
A1e3	剥離(凝集破壊)	29.9	5.5	0.16	3.15
A1fc20	剥離(母材破壊)	17.9	4.7	0.06	0.87
A1fc40	剥離(母材破壊)	20.0	5.8	0.11	1.09

^{*1}連続繊維シートの幅 1/6 の範囲はシート破断. $*2G_f$ はひずみ測定値による. カッコ内数値は、ひずみ測定が適切にできなかったので、参考値として示す.

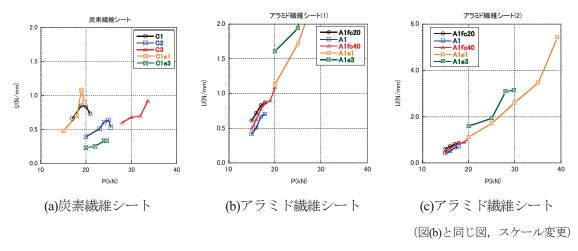
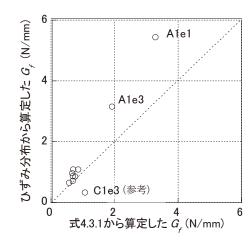


図-4.3.14 各供試体の荷重と付着すべりエネルギーの関係

界面剥離破壊エネルギーについて、式4.3.1から算出された値とひずみ分布から算出された値を図4.3.15で比較している. ひずみ分布から求めた界面剥離破壊エネルギーは、供試体 Alel、Ale3、Cle3 を除き、荷重から求めた界面剥離破壊エネルギーとほぼ一致することが確認できる. 供試体 Alel、Ale3 は、ひずみ分布から求めた界面剥離破壊エネルギーが、最大荷重から求めた界面剥離破壊エネルギーよりも大きい結果であった. これらは、供試体 Al よりも大きな耐力を有し、それに従い計測されたひずみも大きくなっている. 供試体 Alel、Ale3 では、Al のような母材コンクリートにおける破壊が生じず、含浸樹脂内での凝集破壊が生じた. 図4.3.15 より、これら 2 体の供試体はいずれも、ひずみ分布から算定される最大荷重 Pmx よりも小さい荷重で凝集破壊が生じていたことがわかる. 凝集破壊はコンクリートと連続繊維シートの間の樹脂層の強度特性に依存すると考えられる. 偏配合の樹脂を用いた供試体 Alel、Ale3 では、樹脂層のせん断弾性係数の低下に伴い付着性能が大きく改善された一方で、コンクリートの表層を破壊させるに足る樹脂層のせん断強度が得られず、樹脂層の凝集破壊の先行に至ったと考えられる. 供試体 Cle3 の結果は、連続繊維シートの破断が先行したことから、図4.3.15 の斜め破線より左側にプロットされるはずであるが、むしろ右側にプロットされており、含浸樹脂の柔らかさに応じたひずみ測定が適切でなく、本来のひずみ分布を過少に測定した可能性が高いと考える.

式4.3.2から算出されたせん断付着応力度とひずみ分布から推定された最大せん断付着応力度を図-4.3.16で比較している. 仮定は次の 2 点である. ①式 4.3.2 のせん断付着応力度の算出には有効付着長を 80mm とした. ②ひずみ分布による最大せん断付着応力度の概ね 1/3~1/2 が平均せん断付着応力度になる(ここでは 1/2 と仮定). 図より,式 4.3.2 から算出した値の方が大きい供試体については,有効付着長が 80mm より長い可能性がある.



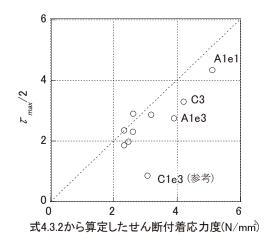


図-4.3.15 界面剥離破壊エネルギーの比較

図-4.3.16 せん断付着応力度の比較

注) 供試体 Cle3 は連続繊維シートの破断で終局に至った. ここでは参考値として示す.

4.4 τ-S関係の同定

4.4.1 これまでの研究例

付着応力と相対すべりの関係は、弾性比例型、完全弾塑性型、引張軟化型が提案されている。金久保ら りは、試験で得られた荷重と有効付着長の数分の一の間隔で計測したひずみの分布の関係から、式 4.4.1 に示す Popovics 式で回帰することを提案している。この提案に従えば、局所的なひずみの乱れを取除いた付着応力と相対すべりの関係を得ることができる。金久保らはコンクリート部材が引張応力状態になる供試体を用いて検討している。式 4.4.1 を用いて、本試験の A1 供試体のデータを用いて回帰した結果が図 4.4.1 である。結果 $\alpha=2.7$ を得た。

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,\text{max}}} = \frac{S}{S_{\text{max}}} \frac{\alpha}{\left((\alpha - 1) + \left(S/S_{\text{max}}\right)^{\alpha}\right)}$$
 (4.4.1)
ここに、 $\tau_{b,\text{max}}$:最大付着応力 S_{max} : $\tau_{b,\text{max}}$ 時のすべり α : 定数

Dai ら [®]は、式 4.4.2 の指数関数を用いて、連続繊維シートのローカルな表面ひずみと相対すべりの関係を回帰することを提案している。特徴的なことは 1 か所の相対すべりとその場所のひずみを計測することにより、数学的に部材全体の付着応力と相対すべりの関係を得ることができることにある。Dai らは、コンクリート部材が圧縮応力状態になる供試体を用いて検討している。式 4.4.2 を用いて、本試験の A1 供試体のデータを用いて回帰した結果が図 4.4.2 である。本試験では純粋な相対すべりを計測していないので、計測されたひずみのデータを積分することにより、任意の点の相対すべりとひずみを得た。

$$\varepsilon = A \cdot (1 - \exp(-B \cdot S)) \tag{4.4.2}$$

$$\tau = A^2 \cdot B \cdot E_f \cdot t_f \cdot \exp(-B \cdot S) \cdot (1 - \exp(-B \cdot S))$$
(4.4.3)

$$G_f = \frac{1}{2}A^2 \cdot E_f \cdot t_f \tag{4.4.4}$$

$$P_{\text{max}} = b_f \cdot E_f \cdot t_f \cdot A \tag{4.4.5}$$

$$S_{max} = \ln 2/B \tag{4.4.6}$$

$$\tau_{\text{max}} = 0.5 \cdot B \cdot G_f \tag{4.4.7}$$

ここに、 t_f : 連続繊維シートの厚さ、 E_f : 連続繊維シートの弾性係数、A,B: 定数

 ε : 任意の位置の連続繊維シートのひずみ、S: 相対すべり、 τ : せん断応力度、

 P_{max} : 最大荷重*, τ_{max} : 最大せん断応力度, G_f : 界面剥離破壊エネルギー

*) ここでの Pmax は式 4.3.1 の 1/2 に相当.

表-4.4.1 に式 4.4.2 で回帰した結果と式 4.4.3~7 を用いて算出した計算値を示す. 計算値は、試験値に対してひずみの最大値を表すAは正当に評価されているが、変形性能を示すBが大きな変形を表す小さな値が示されている. τ_{max} が過少に、 S_{max} が過大に評価されている. その結果、図-4.4.3 に示す付着応力と相対すべりの関係において、式 4.4.3 は試験結果を正当に評価できていない. この原因は、本試験がコンクリートに引張応力が生じ、ひび割れが発生しているために、計測されたひずみにひび割れの影響が含まれているためと考える.

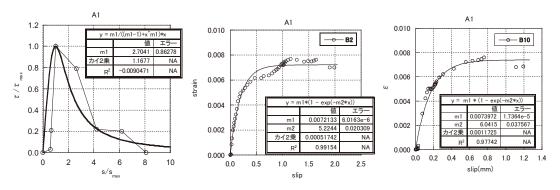


図-4.4.1 式 4.4.1 の回帰結果

図-4.4.2 式 4.4.2 の回帰結果

表-4.4.1 式 4.4.2 で回帰した結果

供試体 ゲージ No.	fc N/mm²	E_{JG} $ imes 10^3 N/mm$	A -	<i>B</i> 1/mm	G _f	\mathbb{R}^2	τ _{max} N/mm ²	S _{max}	P _{max,exp} (実験値) kN	P _{max,fit} (回帰値) kN	P _{max,fit} /P _{max,exp}
A1 B2	29.4	25.5	0.00721	5.22	0.663	0.99	1.73	0.133	17.9	17.6	0.98
A1 B10	29.4	25.5	0.00740	6.04	0.697	0.98	2.11	0.115	17.9	18.1	1.01
C1 B2	34.7	28.3	0.00705	3.73	0.703	0.93	1.31	0.186	20.8	19.1	0.92

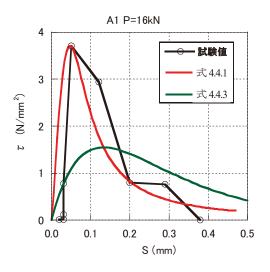


図-4.4.3 回帰結果と試験値の比較(A1の例)

4.4.2 試験誤差を修正した τ-S関係

式 4.4.2 は、ある点の相対すべりと連続繊維シートのひずみを用いて定数 A、B を回帰し、A と B を用いてせん断付着の様々な特性値を算定することができる。用いる相対すべりの試験値にコンクリート部材のひび割れなどによる変形量が含まれると、適正な値を得られないことが前項で分かった。本項では、表 4.4.1 に示される前項で得た P_{max} (実験値)と式 4.4.5 で A を、式 4.4.4 に A を代入して G_f を、 τ_{max} (実験値)とその G_f を用いて B を逆算して τ - S 関係を推定することとした。その際、式 4.4.6 より S_{max} も得られる。結果を図 4.4.4 及び表 4.4.2 に示す。また、図 4.4.5 に S_{max} の回帰値と試験値の比較を示す。試験値と計算値の整合性は、優れているとは言いがたいが、計算値は τ - S 関係を理想化して表現していると考えられる。

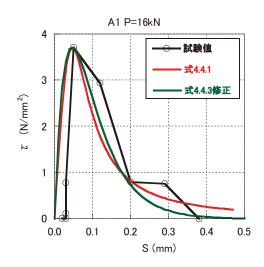


図-4.4.4 修正した回帰式と試験値の比較

 G_f G_f S_{max} S_{max} P_{max} τ_{max} $E_{f}t_{f}$ В A(式 4.4.4) (式 4.4.6) (Exp.) (Exp.) (Exp.) (Exp.) 備考 供試体 $\times 10^3 N/mm$ N/mm N/mm² kN 1/mm N/mm mm mm 0.0073 0.76 0.85 C1 28.3 12.1 0.06 0.10 4.6 20.8 C2 56.6 0.004520.1 0.57 0.64 0.03 0.11 5.7 25.4 C3 84.9 0.0040 19.9 0.66 0.96 0.05 0.15 6.6 33.6 0.03 28.3 0.0070 0.69 1.08 0.06 4.0 19.7 C1e1 11.5 1/6 破断 C1e3 28.3 0.0087 1.06 0.33 0.22 0.06 1.7 破断 3.2 24.5 A1 25.5 0.007310.8 0.69 0.71 0.06 0.06 3.7 17.9 25.5 0.0161 3.29 5.44 0.13 0.38 8.7 39.2 凝集破壊 A1e1 5.3 25.5 0.16 5.5 凝集破壊 A1e3 0.0122 5.8 1.91 3.15 0.12 29.9 4.7 A1fc20 25.5 0.0073 13.7 0.69 0.87 0.05 0.06 17.9 A1fc40 0.86 1.09 0.05 0.11 5.8 20.0 25.5 0.0082 13.6

表-4.4.2 試験値を用いて式 4.4.2 の定数を決定した場合

注) Cle3のイタリック数値は参考値として示す.

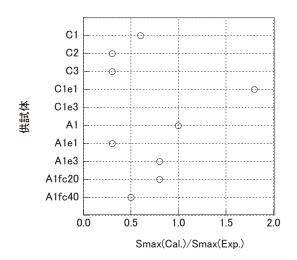


図-4.4.5 Smorの回帰値と実験値の比較

4.4.3 試験結果の評価

算定した結果に基づき、式 4.4.2 で表現される τ - S 関係を図 -4.4.6 に示す。含浸樹脂の弾性係数の影響を除いた場合、 S_{max} (Fit.)は 0.05mm 前後に存在し、含浸樹脂の弾性係数を小さくすると S_{max} (Fit.)は大きくなる傾向を示している。吉澤の試験結果では S_{max} (Fit.)が $0.05\sim0.2$ mm 程度の範囲であったとされており 3)、ここでの結果もその範囲にあったことがわかる。含浸樹脂の弾性係数の影響に比べると、連続繊維シートの剛性やコンクリートの強度が S_{max} (Fit.)に及ぼす影響は軽微であり、明確な傾向は分からなかった。連続繊維シートと含浸樹脂には、最適な組合せが存在する可能性がある。今後の研究の課題である。

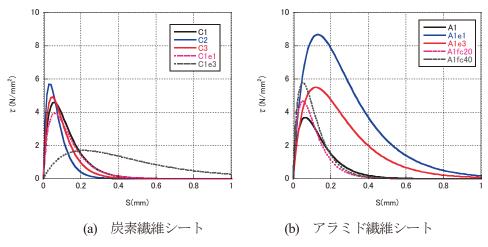


図-4.4.6 式 4.4.2 で表現した τ-S関係 注) Cle3 は参考として示す.

4.5 まとめ

はり試験に用いた連続繊維シートとコンクリートのせん断付着特性を把握するために、連続繊維シートの 種類、連続繊維シートの引張剛性、母材コンクリートの圧縮強度、含浸樹脂の弾性係数を試験水準とするせ ん断付着試験を土木学会の試験方法(案)に従い行った、得られた結果を以下に示す。

- 1) 含浸樹脂が標準配合の場合で、連続繊維シートの破断耐力が同等の補強量であれば、炭素繊維シートとアラミド繊維シートのせん断付着特性に大きな相違はなかった.
- 2) 連続繊維シートの引張剛性を大きくすると、せん断付着強度は増大する傾向を示すが、連続繊維シートの負担する応力度は減少する.
- 3) 母材のコンクリートの圧縮強度を変化させることによる, せん断付着強度, 界面剥離破壊エネルギーに 及ぼす影響は軽微であった.
- 4) 連続繊維シートと母材コンクリートを接着する含浸樹脂の主剤と硬化剤の割合を操作することにより弾性係数を低下させると、付着特性に変化が生じた.特にアラミド繊維シートでは、偏配合とした供試体 Alel、Ale3 の場合、標準配合の Al と比べて、最大せん断付着応力度とその時点のすべり量が大きくなり、それに従い、界面剥離破壊エネルギーも著しく増大した.
- 5) 計測した連続繊維シートのひずみの値は、骨材などの局所的な乱れの影響を受けて、測定誤差を含んだせん断付着応力度と相対すべりの関係を得ることになる。そこで、Dai ら ⁶の方法に基づきひずみー相対すべりの関係を指数型の回帰式を用いて表すことにより、試験結果の評価を試みた。これにより、試験結果からせん断付着応力度と相対すべりの関係を得るのに、同方法が有効であることが確認できた。

5. FEM 解析

本章では、3章の連続繊維シートで補強したはりの曲げ試験に対して、非線形 2 次元 FEM 解析を実施しり、はりの挙動や連続繊維シートの剥離性状などの検証を行った。FEM 解析における各部材のモデル化の手法や材料構成則は、報告書(II)2の一軸引張試験に対して実施した FEM 解析と同様とした。ただし、曲げを受ける RC はり下面に接着された連続繊維シートの剥離を再現するためには、要素サイズを小さくする必要があるとされる文献が見られる 3)。この点について、事前に確認することとした。供試体サイズの違いなどを考慮し、要素寸法と引張軟化特性の影響について、炭素繊維シートで補強した供試体 C113 を例にパラメータ解析により検討した。そして、その結果を踏まえた解析モデルを用いて、他の供試体の解析を実施し、はりの挙動や連続繊維シートの剥離性状を検討した。なお、解析に使用したソフトは、DIANA10.2(DIANA FEA 社)である。

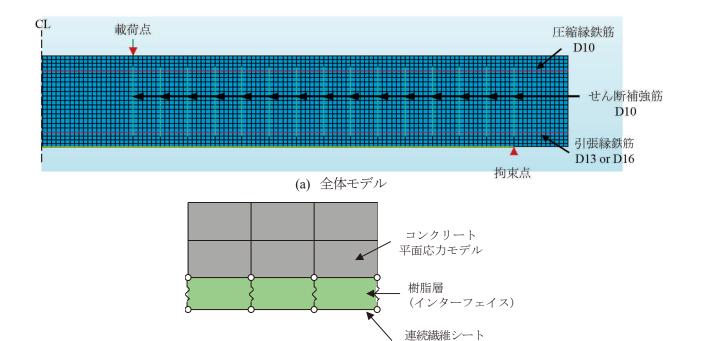
本章で実施した内容は以下の通りである.

- ・FEM モデルにおける要素寸法と引張軟化特性の影響を炭素繊維シート補強はり C113 で検証(5.1節)
- ・炭素繊維シートで補強したはりの FEM 解析結果 (5.2 節)
- ・アラミド繊維シートで補強したはりの FEM 解析結果 (5.3 節)
- ・含浸樹脂の特性を変化させた補強はりの FEM 解析結果 (5.4 節)

5.1 FEM モデルにおける要素寸法と引張軟化特性の影響

5.1.1 解析モデル

解析モデルを図-5.1.1 に示す. コンクリートは、4 節点の平面要素でモデル化し、鉄筋は DIANA に予め組み込まれている埋込み鉄筋要素を用いた. 連続繊維シートは、はり要素を用いてモデル化し、コンクリートと連続繊維シートの間に含浸樹脂を模擬したインターフェース要素を設定した. インターフェース要素の厚さは、コンクリート下面から連続繊維シート中心までの距離とし、連続繊維シートの層数に応じて変化させた. 例えば、炭素繊維シート 1,2,3 層の場合、インターフェース要素の厚さをそれぞれ 0.268,0.536,0.805mmとした. 図に示している解析モデルは、1 要素の寸法が 12.5mm のものである. はりは、左右対称であるが、解析では全体をモデル化している.



(b) コンクリートー樹脂界面概念 図-5.1.1 解析モデル

はりモデル

5.1.2 材料特性

(1) コンクリート

コンクリートの材料特性一覧を表-5.1.1 に示す。コンクリートの圧縮側の構成則は、図-5.1.2 に示すように 放物線モデルを用いた。引張側の構成則として設定した引張軟化特性は、その形状が解析の終局状態に影響 を与えることを考慮し、図-5.1.3 に示す 2 直線で軟化を表現した JSCE モデル $^{4,5)}$ と曲線で表現した Hordjik の モデル 6 の 2 種類で解析を実施した。圧縮破壊エネルギー及び引張破壊エネルギーは以下の式で算出している。また、コンクリートのモデルは分散ひび割れモデルとし、主応力直角方向にひび割れ軸が変化する回転 モデルとした。

引張破壊エネルギー:
$$G_{ft} = \frac{1}{100} \times (d_{max})^{1/3} \times f_c^{\prime 1/3}$$
 (5.1.1)

圧縮破壊エネルギー:
$$G_{fc} = 8.77 \times f_c^{\prime 1/2}$$
 (5.1.2)

ここに,

 G_{ft} : コンクリートの引張破壊エネルギー(N/mm)

dmax: コンクリートの粗骨材最大寸法(mm)

 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

 G_{fc} : コンクリートの圧縮破壊エネルギー(N/mm)

表-5.1.1 コンクリートの材料特性一覧

弹性係数 (N/mm²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	引張破壊エネルギー (N/mm)	圧縮破壊エネルギー (N/mm)
24450	0.158	34.7	2.7	20	0.086	61.82

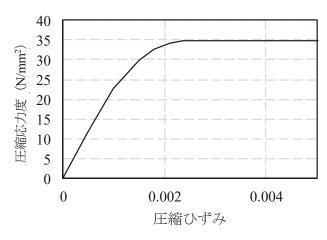


図-5.1.2 コンクリート圧縮側構成則

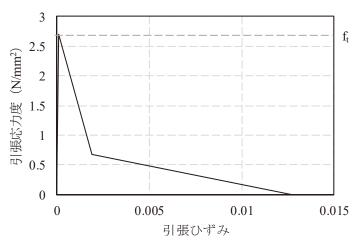


図-5.1.3(a) コンクリート引張側構成則(JSCE モデル)

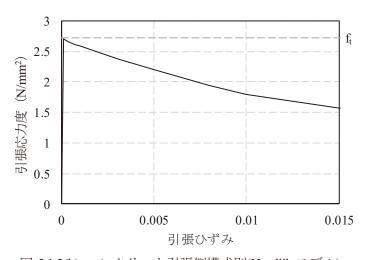


図-5.1.3(b) コンクリート引張側構成則(Hordjik モデル)

(2) 鉄筋

鉄筋の弾性係数及び降伏強度は表-5.1.2 に示す材料試験結果を使用し、2 直線で図-5.1.4(a)のようにモデル化した。第二勾配は $E_s/100$ とした。鉄筋とコンクリートの付着すべり関係には、図-5.1.4(b)のとおり島らが提案している式 5.1.3 のモデルを適用した 7.

付着応力ーすべり関係:
$$\tau_d = 0.9 \times f_c^{\frac{2}{3}} \times (1 - e^{-40 \times \left(\frac{s}{d}\right)^{0.6}})$$
 (5.1.3)

ここに,

τ_d:鉄筋軸に沿った各点における局所付着応力(N/mm²)

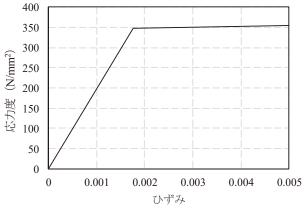
 $f_{c'}$: コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

s :検討する点における鉄筋とコンクリートの相対変位(mm)

d : 鉄筋の直径

表-5.1.2 使用鉄筋の材料特性一覧

	公称断面積	公称周長	公称直径	弾性係数	ポアソン比	降伏強度
種類	As	1	d	E_s	ν_{s}	f_{sy}
	(mm ²)	(mm)	(mm)	(N/mm ²)		(N/mm ²)
SD345 D10	71.33	30	9.53			346
SD345 D13	126.7	40	12.7	1.92×10^5	0.3	348
SD345 D16	198.6	50	15.9			332



12 10 (元mm/N) 6 (元mm/N) 6

(a) 鉄筋引張側構成則

(b) 付着すべり関係構成則

図-5.1.4 鉄筋及び付着すべり関係の構成則

(3) 連続繊維シート

表-5.1.3 に連続繊維シートの材料特性値を示す。連続繊維シートの応力-ひずみ関係を図-5.1.5 に、樹脂層のせん断相対変位とせん断応力度の関係を図-5.1.6 に示す。樹脂層の最大せん断応力度は、文献 80 を参考に 17 N/mm² として、樹脂層のせん断弾性係数は JIS K7161 に準拠した試験により、 1100 N/mm² とした 90 . なお、図-5.1.6 は、連続繊維シートの層数が 3 層の例を示す。

層数	厚み (mm)	幅 (mm)	面積 (mm²)	弹性係数 (N/mm²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm²)
1層	0.111		22.2			
2層	0.222	200	44.4	236000	0.28	4169
3層	0.333		66.6			1

表-5.1.3 連続繊維シートの材料特性値(炭素繊維シート)

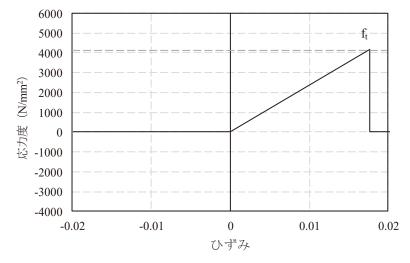


図-5.1.5 炭素繊維シートの材料特性値

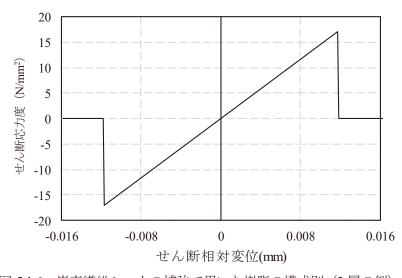


図-5.1.6 炭素繊維シートの補強で用いた樹脂の構成則(3層の例)

5.1.3 載荷方法

載荷は、変位制御による増分解析とし、収束計算には、最も一般的な Newton-Raphson 法を採用した. また、収束の判定には、エネルギー法を採用し、収束誤差は 0.0001 とした.

5.1.4 解析結果

(1) 荷重-変位関係

図-5.1.7 に、炭素繊維シートを 1 層貼りつけた供試体(供試体 C113)で、要素サイズを 5mm、12.5mm、25mm と変化させた場合(引張軟化曲線は JSCE)及び要素サイズが 12.5mm で引張軟化曲線を Hordjik モデルにしたものの荷重一変位関係を示す。図の(b)は鉄筋降伏付近までの変位 15mm までを拡大して表示したものである。解析結果は、鉄筋が降伏してはりの剛性が変化する付近と、その後変形が増大していく挙動は概ね実験値と良く一致している。実験結果では、鉄筋降伏後に剛性はほぼ一定のまま、ある時点で連続繊維シートが剥離して耐力を失うが、解析ではある荷重以上になるとはりの剛性が少しずつ低下する傾向を示した。その後、荷重が急激に低下している点では、実験と同様に連続繊維シートの剥離が支点付近まで伸展していた。剥離の詳細については次項で詳述する。

要素寸法については、いずれも鉄筋降伏前後の挙動は変わらないが、実験値と乖離し始める荷重が、要素寸法が小さくなると低下する傾向が見られた。図-5.1.7(b)で、曲げひび割れが発生する付近の挙動について比較すると、ひび割れ発生荷重はいずれの要素寸法でも大きく変わらないが、要素が小さくなるとひび割れに伴うはりの剛性低下が遅れる傾向にあった。その影響は5mmのケースが最も大きく、12.5mmと25mmで大きな差異はなかった。

引張軟化特性の違いが与える影響については、要素寸法 12.5mm で比較した. Hordjik モデルでは、JSCE モデルに比べて剥離が起こりにくくなり、はりの剛性が低下しつつも大きく変形する結果となった. Hordjik モデルは、比較的大きな引張ひずみまで引張応力が残存するため、ひび割れが分散することで剥離が抑制されるものと考えられる.

要素寸法を 12.5mm とし、引張破壊エネルギー及び圧縮破壊エネルギーを式 5.1.1~2 を用いて算出することにより、すべてのケースで耐荷挙動を精度良く再現できること、最大荷重を安全側に評価できることが分かったため、後述するひび割れ性状の考察と合わせて、解析では要素寸法 12.5mm と JSCE 軟化特性を標準とすることとした.

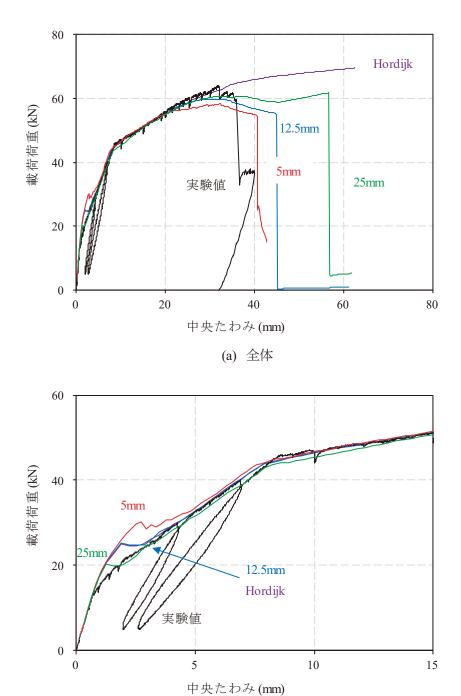


図-5.1.7 要素サイズ及び引張構成則による影響

(b) 鉄筋降伏近傍

(2) ひび割れ性状

図-5.1.8 に実験結果と併せてひび割れ性状を示す. FEM 解析結果は、引張軟化曲線に JSCE モデルを用いたモデルを基本に、要素サイズを変化させた 3 種類の結果を示した. なお、解析結果は、ひび割れ幅 0.01mm以上に限定している. 実験と最も一致していたものは、要素寸法が 12.5mm であった. 要素寸法 25mm では実験結果よりもひび割れが広い範囲に分散する. また、5mm では局所化する傾向にあった.

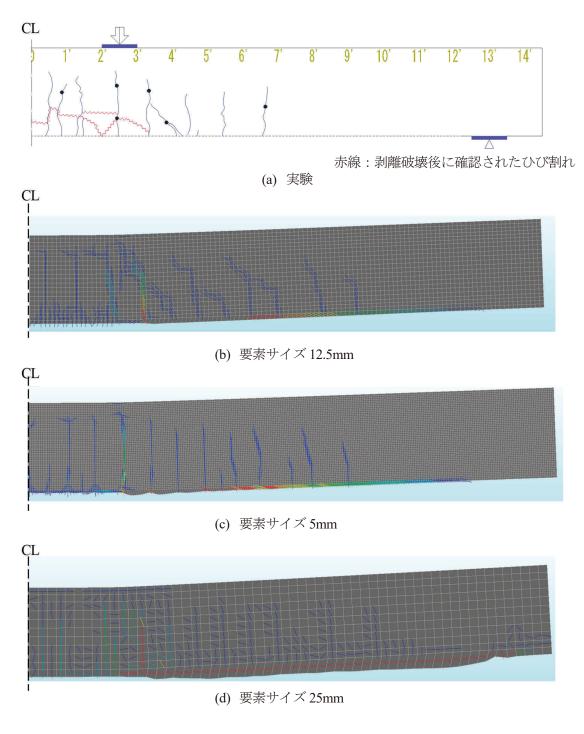


図-5.1.8 要素サイズによるひび割れ性状の違い

(3) 要素寸法及び引張軟化特性のまとめ

本節では、連続繊維シート補強したはりの曲げ試験の FEM 解析結果に与える要素寸法及びコンクリートの引張軟化特性の影響を検証した。要素寸法の影響について、実験と最も良い一致を示したのは、12.5mm のものであった。要素寸法 25mm では実験結果よりもひび割れが広い範囲に分散する。また、5mm では局所化する傾向にあった。コンクリートの引張軟化特性について、JSCE モデル及び Hordjik モデルを用いて検討した結果、Hordjik モデルでは、比較的大きな引張ひずみまで引張応力が残存するため、ひび割れが分散し易くなり、連続繊維シートとの界面の局所変形が抑制されるとともに、剥離が抑制され、実験値に比べて高い荷重と大きな変位を示す傾向にあった。

これらの結果に鑑み、要素サイズは 12.5mm、コンクリートの引張軟化曲線には JSCE モデルを用いて、以降の解析検討を進めることとした.

5.2 炭素繊維シートで補強したはりの FEM 解析結果

(1) 荷重-変位関係

図-5.2.1~図-5.2.4 に炭素繊維シートの 2 層貼りの供試体 C213, 3 層貼りの供試体 C313, 引張縁に配置した 鉄筋を D16 に変更した供試体 C116 及び断面形状を変えた供試体 C113L の荷重ー変位関係を示す.

実験ではいずれの供試体も、せん断スパン内の載荷点に近い位置のひび割れを起点に連続繊維シートが剥離し始め、支点付近まで剥離が伸展して荷重が大きく低下した。解析結果は、鉄筋が降伏してはりの剛性が変化する付近とその後しばらくの間のたわみ挙動が実験値と良く一致している。実験は、鉄筋降伏後のはりの剛性がほぼ一定のまま保持された後、ある時点で連続繊維シートが剥離して耐力を失うが、解析ではある荷重以上になるとはりの剛性が少しずつ低下し、最大荷重を示した後も一定の耐力を保持していた。

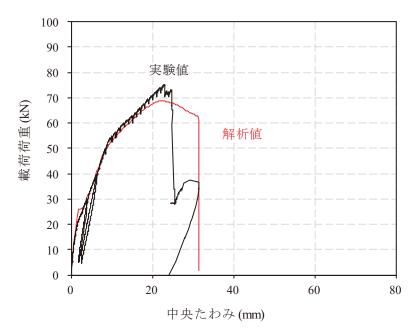


図-5.2.1 荷重-変位関係 (C213)

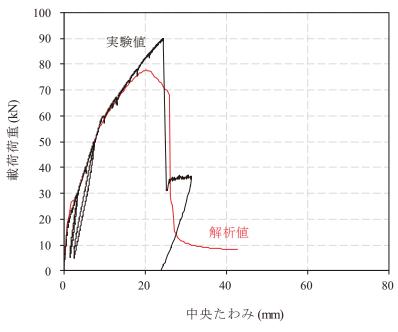


図-5.2.2 荷重-変位関係 (C313)

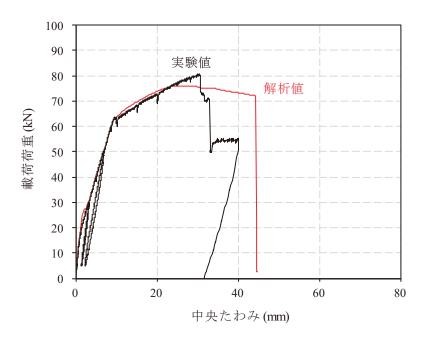


図-5.2.3 荷重-変位関係 (C116)

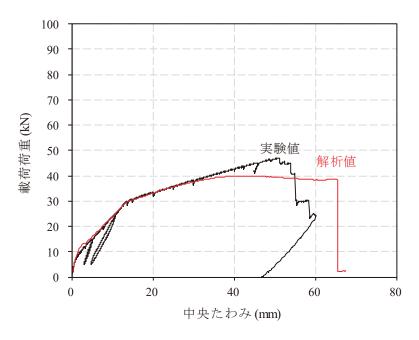


図-5.2.4 荷重-変位関係 (C113L)

(2) ひび割れ性状

はり試験では、曲げひび割れが先行して発生し、新たなひび割れが生じなくなると、載荷点に近い曲げひび割れにおいてそのひび割れ間のかぶり部分に斜め方向のひび割れが発生した。これは、いずれの供試体も鉄筋降伏後に見られ、比較的早い段階で生じるものも見られた。前述 3.2.3(3)のとおり、このひび割れは、曲げひび割れを跨ぐ連続繊維シートの引張力が増大し、曲げひび割れ間のかぶりコンクリートに水平方向のせん断力が作用することにより生じたと考えられる。斜め方向のひび割れの先端は、引張鉄筋の位置付近まで達し三角形状のブロック(以下、三角ブロック)となっていた。ビデオ映像による観察の結果、この三角ブロックが回転することで連続繊維シートの接着面に段差が生じて連続繊維シートが剥がれる様子が観察された。すなわち、前述のとおり 10)、図-5.2.5 に示すように、三角ブロックが赤矢印の方向に回転し、それにより生じる段差を起点として連続繊維シートが剥離していくと考えられる。三角ブロックは、載荷点付近で数か所発生し、それらが連なって剥離が伸展する様子も確認できた。

図-5.2.6~図-5.2.9 に、ひび割れ図の比較を示す.解析においては、曲げひび割れの起点近くにひび割れが分散して発生する傾向が見られたが、分散ひび割れであるため明確な三角ブロックを形成することはない.解析では、P-6 の関係において実験値との乖離が大きくなる付近から、連続繊維シートに接するコンクリート要素の破壊が始まり、その領域が徐々に支点方向に伸展して破壊していく様子が確認できた.すなわち、はりの一番下のコンクリート要素が連続繊維シートの引張力に起因する水平方向の力に抵抗できず破壊が伸展していくと考えられる.実験において、剥離した連続繊維シートを観察すると、連続繊維シートの端部付近では界面できれいに剥がれ、その他の部分では、コンクリートが連続繊維シートに付着して残っていたが、供試体 A113e3 を除き、含浸樹脂が破壊している部分はなかった.

ここでの解析は、分散ひび割れモデルを用いているため実験で明らかになった三角ブロックの作用による 剥離は明確には再現できないものの、下面付近のコンクリートに斜めひび割れを引き起こすような斜め方向 の主応力が作用する様子が認められた。また、はり下方に向かって、連続繊維シートの面外変位が生じる様 子が認められた。

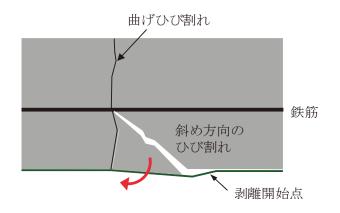
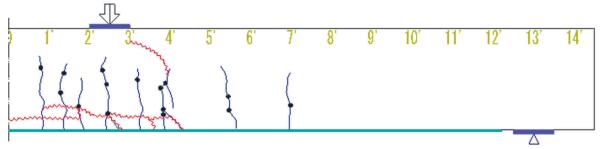


図-5.2.5 三角ブロックによる剥離の概念図



赤線:剥離破壊後に確認されたひび割れ

(a) 実験

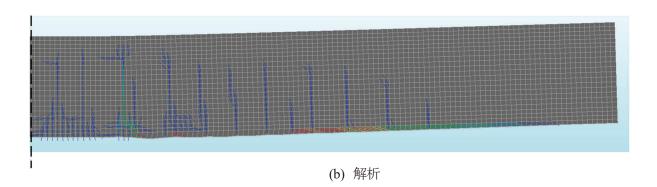
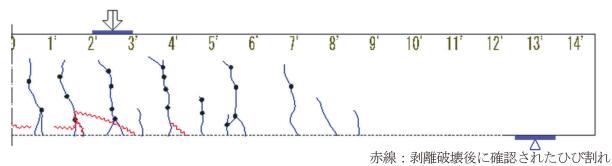


図-5.2.6 ひび割れ図(C213)



(a) 実験

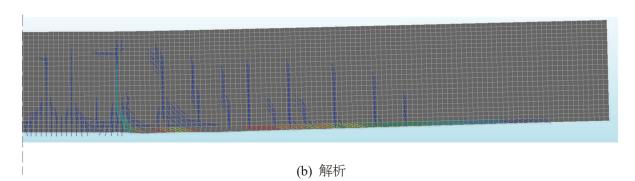
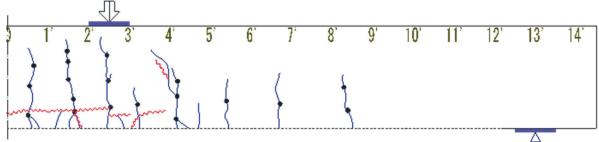


図-5.2.7 ひび割れ図(C313)



赤線:剥離破壊後に確認されたひび割れ

(a) 実験

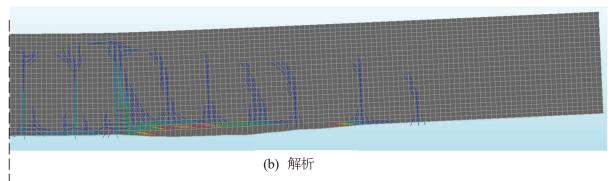
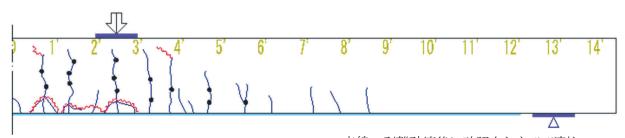


図-5.2.8 ひび割れ図(C116)



赤線:剥離破壊後に確認されたひび割れ

(a) 実験

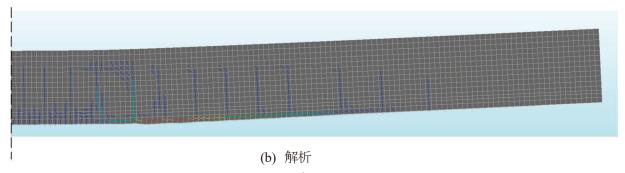


図-5.2.9 ひび割れ図(C113L)

(3) 連続繊維シートのひずみ分布

連続繊維シートのひずみ分布を図-5.2.10~図-5.2.13 に示す. 実験データは、解析における各段階の荷重に相当する時点での結果を示している. 図に示した荷重段階は、鉄筋降伏時と荷重変位関係において実験との乖離が始まる変位(乖離時)及び終局時である. 解析における終局時とは、最大荷重を示した時点とした. C213 は C113 と同様の傾向であった. 解析における鉄筋降伏時の連続繊維シートのひずみ分布は、実験と概ね同様の傾向であった. 連続繊維シートの層数が 3 層である C313 は、連続繊維シート自体の剛性が大きいため、連続繊維シートのひずみに与えるひび割れの影響が小さく、他の解析結果のようにひずみが波打つ程度が小さい. この傾向は、実験値も同様である. 乖離時においても、連続繊維シートのひずみの挙動に関して、いずれも実験と解析は概ね良く一致しており、はりの挙動を良く表現できていると考える.

一方,終局時においては、両者で差が見られた.実験値はひずみの勾配が比較的立っており、連続繊維シート1層の場合、せん断スパンにおけるひずみ勾配は乖離時とほぼ一致している.すなわちこの図で比較する限り、連続繊維シートとコンクリートの付着が終局時でも良好であることを示している.連続繊維シート3層の C313でも、載荷点付近で若干ひずみ勾配の低下が見られるがその外側では付着が良好である.それに対して解析では、載荷点付近から剥離が進行してひずみ勾配が低下している領域が拡大する様子が確認できる(C113, C313, C113L).実験結果と比べて、終局時に荷重一変位関係が異なっていたのは、解析では連続繊維シートの剥離の開始が早く、剥離後すぐに耐力を失うことなく、抵抗したためと考えられる. C116については荷重一変位関係においても比較的差異が小さかったので、ひずみ分布も両者は良く一致していた.

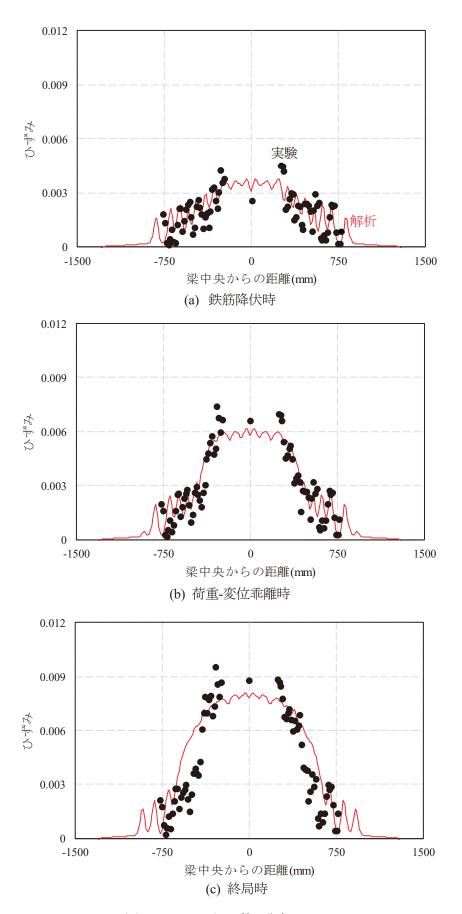


図-5.2.10 シートひずみ分布(C113)

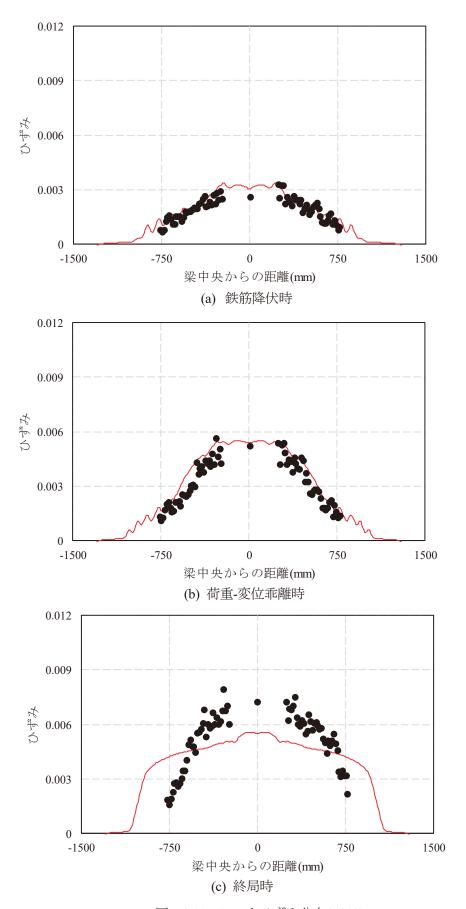


図-5.2.11 シートひずみ分布(C313)

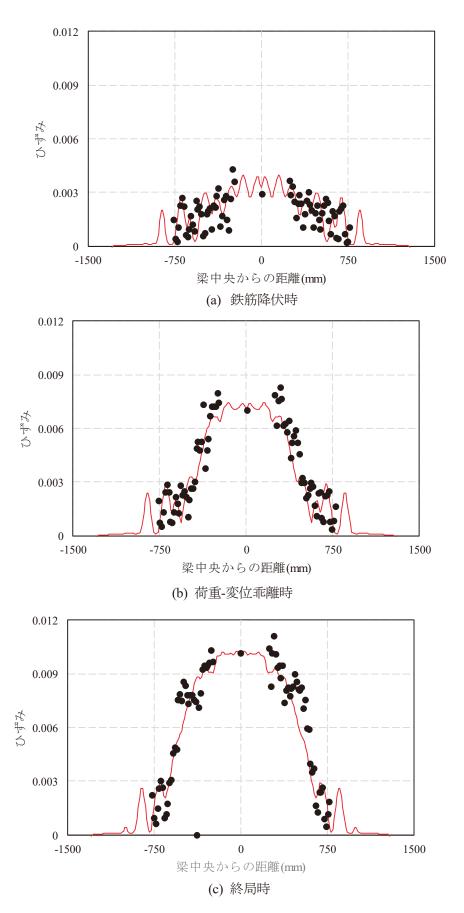


図-5.2.12 シートひずみ分布(C116)

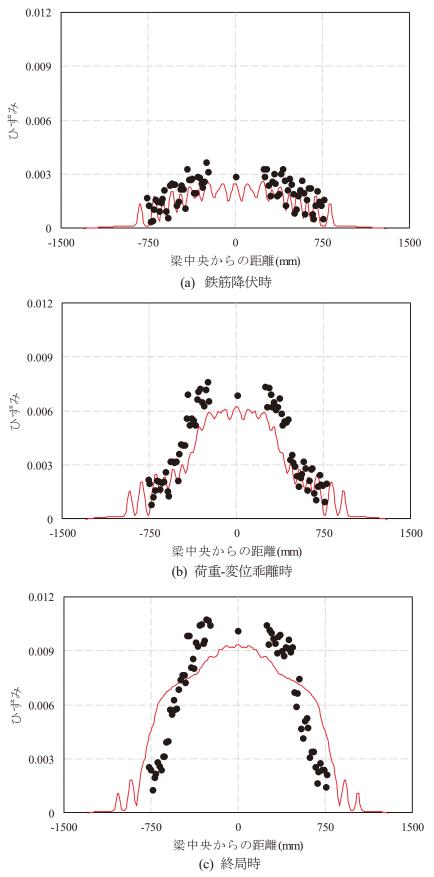


図-5.2.13 シートひずみ分布(C113L)

(4) 連続繊維シートのひずみと付着応力度の変化

図-5.2.14 は、鉄筋降伏時の連続繊維シートのひずみ分布を、図-5.2.15 は解析におけるひび割れ発生状況を示している。横軸は、はり端からの距離を示しており、1450mm を中央として左右対称の分布となる。ひずみは、ひび割れの位置でそれぞれピークを示しており、赤丸を付けたものは、載荷点に近い側から4か所のひび割れの位置になる。鉄筋降伏時点では、ひび割れは定常状態(新たなひび割れが生じず、既存のひび割れの幅が増加している状態)になっており、この位置での連続繊維シートのひずみとひび割れ前後の連続繊維シートの付着応力度について考察する。

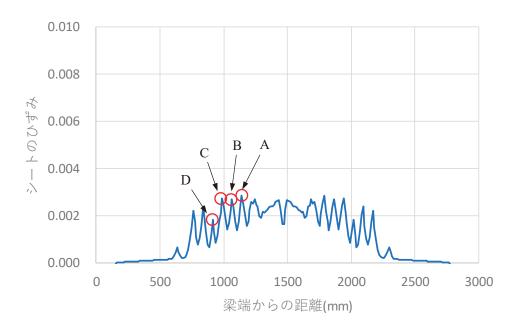


図-5.2.14 連続繊維シートのひずみ分布(C113)

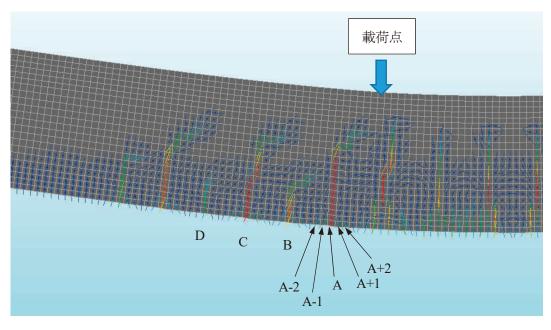
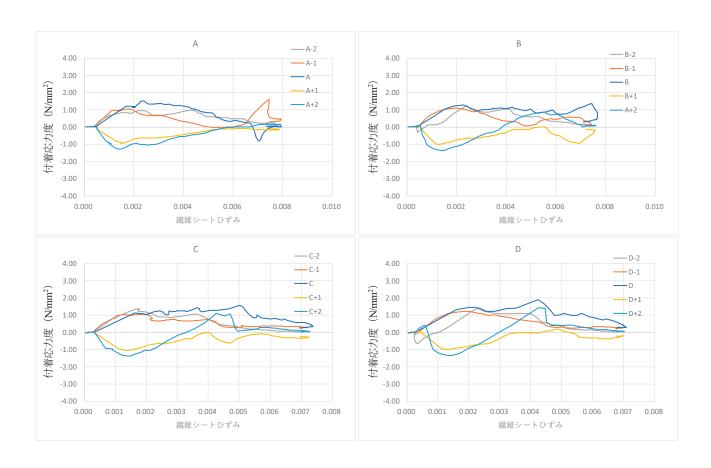


図-5.2.15 FEM 解析モデルにおけるひび割れ図(C113, 鉄筋降伏付近)

図-5.2.16 は、A~D のそれぞれのひび割れ位置における、ひび割れ近傍の連続繊維シートのひずみと付着 応力度の関係を示したものである. 凡例は、図-5.2.15 に示すように、ひび割れ位置を中心としてその前後の 要素の位置を示しており、それぞれの位置で付着応力度を計算した. 付着応力度は、隣り合う要素のひずみ 差を基に計算しているが、右から左の値を差し引いた値を用いているので、ひび割れより左の要素では付着 応力度が正の値で、右の要素では負の値で推移することになる.

図より、いずれのひび割れ位置においても、概ね 2000×10^6 (図中では 0.002)で付着応力度のピークを示し、その後徐々に低下する傾向が見られた。この傾向は、報告書(II) 2)における一軸引張試験の FEM 解析と同様の傾向であり、はり供試体においても同様の連続繊維シートの剥離挙動を示していると考えられる。



注) ひび割れ位置では付着応力度がゼロとなるが、これらの図においては、 例えば、凡例の A は要素 A と要素 A-1 のひずみ差による付着応力度を表す。

図-5.2.16 FEM 解析モデルにおけるひび割れ図(C113, 鉄筋降伏付近)

- (5) 炭素繊維シートで補強したはりの FEM 解析結果のまとめ 炭素繊維シートで曲げ補強したはりの耐荷挙動と連続繊維シートの剥離性状の検討を目的とし, FEM 解析 を実施した. 本検討で得られた知見は以下のとおりである.
- 1) 荷重-変位関係における,鉄筋降伏荷重やその時の変位,鉄筋降伏以降のはりの剛性の変化とその挙動 を FEM 解析は概ね良好に再現できる.
- 2) 実験は、鉄筋降伏後のはりの剛性がほぼ一定のまま保持された後、ある時点で連続繊維シートが剥離して耐力を失うが、解析ではある荷重以上になるとはりの剛性が少しずつ低下し、実験値との乖離が生じ始める.
- 3) 連続繊維シートの剥離は、曲げひび割れ間で形成される三角ブロックが回転することにより連続繊維シートの接着面に段差が生じ、それが起点となって発生することを供試体の詳細な観察で確認している. FEM 解析は分散ひび割れモデルを採用しているため、この三角ブロックを明確に再現することはできなかったが、曲げひび割れの発生間隔や伸展の状況及び三角ブロック付近における斜めひび割れを発生させるような斜め方向の主応力の傾向は実験結果と良く一致していた.
- 4) 解析における鉄筋降伏時の連続繊維シートのひずみ分布は、実験と概ね同様の傾向であり、良く再現できている. 鉄筋降伏後から連続繊維シートの剥離が伸展して行く付近では、解析の方が早く剥離が生じる傾向があり、実験結果の最大荷重付近でのひずみ性状に両者の差異が見られた.

5.3 アラミド繊維シートで補強したはりの FEM 解析結果

解析対象とした供試体の一覧を表-5.3.1 に示す. アラミド繊維シートを接着した供試体は,連続繊維シートの層数は1層とし,コンクリート強度を29.4N/mm², 21.5N/mm², 40.5N/mm²と変化させた.

連続繊維シート コンクリート 圧縮強度 弹性係数 引張強度 引張強度 弾性係数 試験体名 厚さ E_c 種類×層数 f_c f_t ffu E_f (N/mm^2) (N/mm^2) (N/mm^2) (N/mm^2) (N/mm^2) (mm) 21.5 2.17×10^4 2.0 A113fc20 29.4 2.43×10⁴ 2.6 $A40 \times 1$ 3460 13.2×10^4 0.193 A113 40.5 3.1 2.61×10^4 A113fc40

表-5.3.1 供試体名及びパラメータ

解析モデル及び材料特性値は、炭素繊維シート供試体で検討したモデルを参考にして決定した. アラミド繊維シート及び樹脂層部分の材料構成則を、図-5.3.1 及び図-5.3.2 に示す.

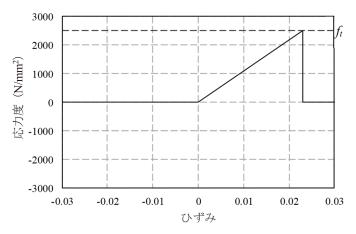


図-5.3.1 アラミド繊維シートの構成則

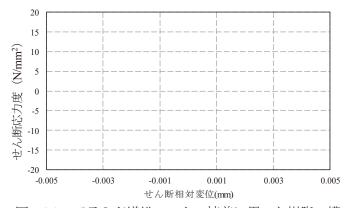


図-5.3.2 アラミド繊維シートの接着に用いた樹脂の構成則

(1) 荷重-変位関係

図-5.3.3~図-5.3.5 に荷重-変位関係を示す. A113 及び A113fc20 では、解析の方が比較的早く剥離が生じて荷重の増加が緩やかになっている. これは、炭素繊維シートの場合と比べても剥離が早い傾向であった. 荷重-変位関係において、A113fc40 の解析結果は実験結果と乖離するまでは実験結果と良く一致していた.

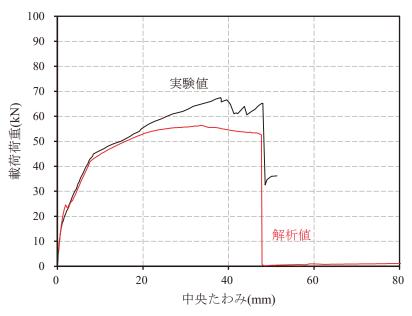


図-5.3.3 荷重-変位関係(A113)

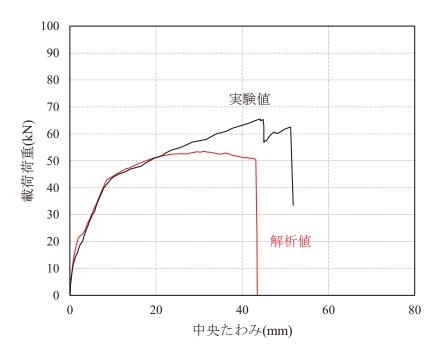


図-5.3.4 荷重-変位関係(A113fc20)

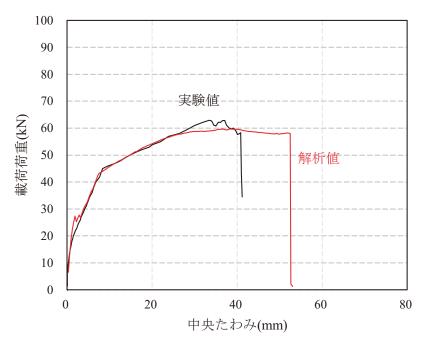
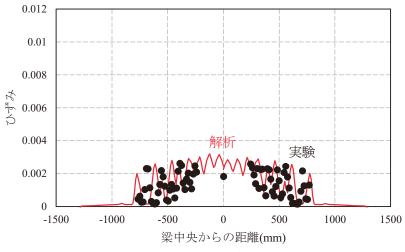


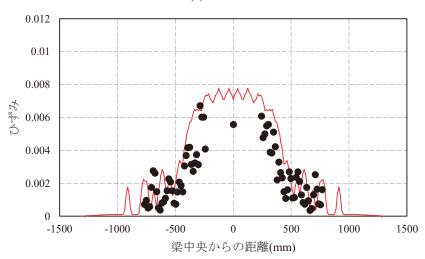
図-5.3.5 荷重-変位関係(A113fc40)

(2) 連続繊維シートのひずみ分布

A113 及び A113fc40 の連続繊維シートのひずみ分布比較結果を図-5.3.6 及び図-5.3.7 に示す. 鉄筋降伏付近においては、A113 及び A113fc40 ともに実験値と解析値は良く一致していた. しかし、荷重一変位関係において乖離が生じ始める段階で、解析では連続繊維シートのひずみが一様(ひび割れによる波打つひずみ変化が目立たない状態)になり始めており、剥離が生じ始めていることが確認されたが、実験においては連続繊維シートのひずみからは、剥離によるひずみの挙動の変化は確認されなかった.



(a) 鉄筋降伏時



(b) 荷重-変位乖離時

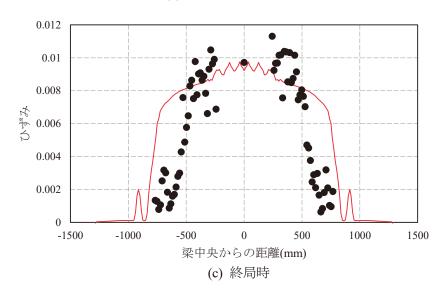
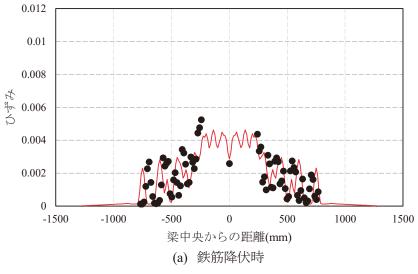
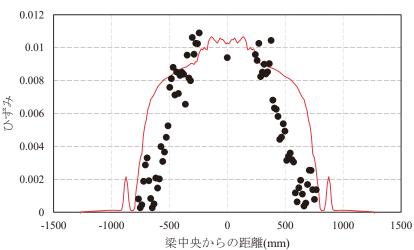
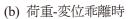


図-5.3.6 連続繊維シートのひずみ分布(A113)







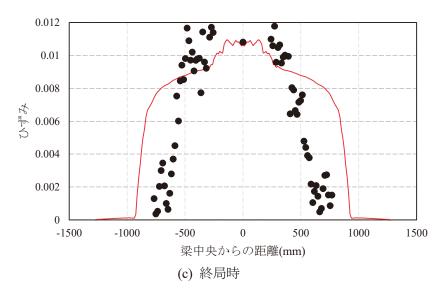


図-5.3.7 連続繊維シートのひずみ分布(A113fc40)

5.4 含浸樹脂の物性を変化させた供試体の FEM 解析結果

(1) 含浸樹脂の材料特性

含浸樹脂の物性が補強効果に与える影響を検証するため、含浸樹脂の物性を変化させた供試体を対象に、解析を実施した.変化させた含浸樹脂は、メーカーが推奨する主剤と硬化剤の配合割合 2:1 から、硬化剤の添加量を増加させることにより、せん断弾性係数を低下するようにしたものである (3.1(2)).解析は、炭素繊維シートで補強したはりで、含浸樹脂の特性を変えた 2 ケースとした.各含浸樹脂の材料試験結果を表5.4.1 に、設定したせん断相対変位とせん断応力度の関係を図-5.4.1 に示す。樹脂のせん断相対変位とせん断応力度の関係は、C113 で設定した特性を基準に、表-5.4.1 に示す含浸樹脂の引張強度と弾性係数の比で変化させた.

せん断弾性係数 引張強度 弹性係数 含浸樹脂配合 含浸樹脂の種類 ポアソン比 主剤:硬化剤 (N/mm^2) (N/mm^2) (N/mm^2) (%) 1492 C113 2:1 69.5 4088 0.37 炭素用 2:1.4 43.8 2750 1011 0.36 68 C113e1 2:1.65 12.4 1017 0.39 366 25 C113e3

表-5.4.1 樹脂の材料特性

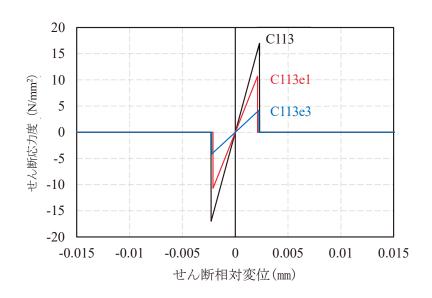


図-5.4.1 炭素繊維シート接着に用いた樹脂の材料構成則

(2) 荷重-変位関係

図-5.4.2 に荷重一変位関係を示す. 前項(1)に従って含浸樹脂の特性を変えた範囲では、鉄筋降伏からそれ以降の変位増加が著しくなる部分についてはほとんど違いが見られなかった. 既往の研究では、含浸樹脂の弾性係数が低下するほど付着が改善され、連続繊維シートの剥離が生じ難いとされるが、FEMでは、連続繊維シートの剥離が始まり、荷重が徐々に低下する時点の変位については、含浸樹脂の性能が落ちるほど小さくなった. はり試験では、供試体 C113e3 が連続繊維シートの破断で終局に至ったことから、供試体 C113 や C113e1 よりも荷重ピーク時の変位が小さかった. FEMでは C113e3 の試験で見られた連続繊維シートの破断を再現できていない. この破壊形態の相違については、図-5.4.2での FEM の計算結果と試験結果の比較において、注意する必要がある.

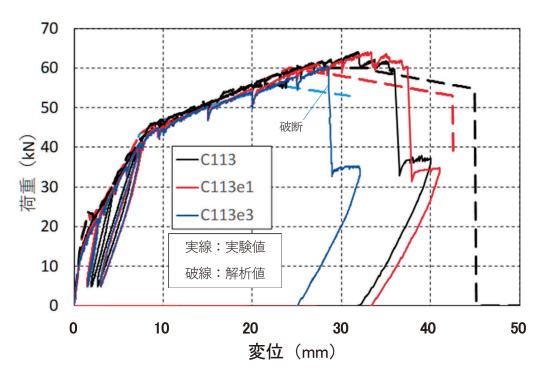


図-5.4.2 含浸樹脂の物性を変化させた場合のはり中央たわみと荷重の関係

5.5 まとめと今後の課題

FEM の解析において、連続繊維シートを接着したことによって、はり下端付近のコンクリートに三角ひび割れが生じるような斜め方向の主ひずみが発生すること、その付近で連続繊維シートを下方に押し下げる変位が生じることが確認できた。少なくとも試験結果と乖離するまでの挙動は、荷重-変位関係や連続繊維シートのひずみ分布においてよく表せていたと考えられる。

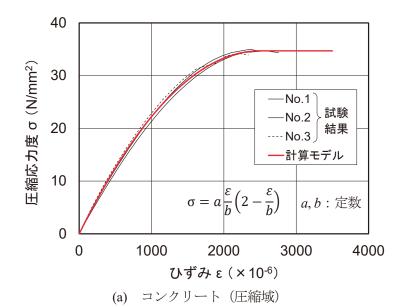
はり試験の FEM より得られた荷重一変位関係では、いずれの供試体モデルにおいても、鉄筋降伏後もある程度までは試験結果と概ね一致していたが、試験結果よりも早い段階で荷重のピークとなり、その後、徐々に荷重が低下する傾向であった.一方、3 章や6 章に示したファイバーモデルによる計算では、剥離破壊の構成則を入れておらず、またせん断ひび割れの影響も考慮していないことから、そのような荷重ピークは見られていない.はり試験において、荷重が高い段階で、はりにせん断ひび割れが生じていたが、そのせん断ひび割れ発生後も、せん断ひび割れ後の変形を考慮していないファイバーモデルの計算結果と同様にさらに直線的に荷重が増加する傾向が見られた.はりのせん断ひび割れは FEM でも再現できていたが、その後の連続繊維シートで補強された RC はりの剛性(主鉄筋やせん断補強鉄筋が広範囲に降伏した後の剛性)を確保する上で、せん断補強鉄筋のダウエル作用による働きを FEM でうまく表現できていなかった可能性があると考えられる.実務で必ずしも影響する領域での課題ではないが、計算技術としては、今後、この点について確認する必要がある.

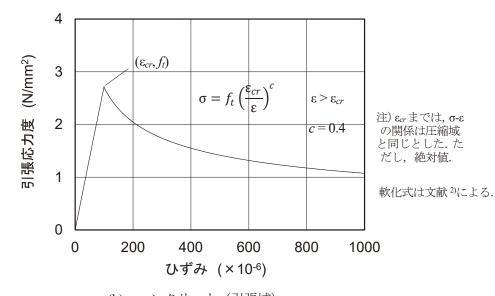
6. はり試験の挙動における連続繊維シートの弾性係数

6.1 概要

前掲 3.2.2 の荷重一変位関係の図からもわかるように、鉄筋降伏後の勾配は、連続繊維シートの引張剛性 Ephrに応じて、大きくなる傾向がある。表-3.1.6 や表-3.1.7 に示した連続繊維シートの材料引張試験で得られた弾性係数のうち、特にガラス転移点の低い偏配合の含浸樹脂を用いた結果については、材料引張試験時とはり試験時の温度差の影響を受けて、はり試験時の値と異なる可能性があり、引張試験の測定方法によっても影響を受けていた。このことから、本章では、はり供試体の荷重一変位関係、平面保持と中立軸位置について、2 種類の弾性係数を用いたファイバーモデルによる計算値と比較することにより、はり試験当日における連続繊維シートの弾性係数がどの程度であったかを確認する。なお、7.5 で示すファイバーモデルによる計算では、無筋領域の影響を考慮している。本検討においてその点を考慮したところ、鉄筋の降伏までの荷重一変位の関係には若干の影響が見られたが、ここで着目する鉄筋降伏後の荷重一変位関係における傾きの検討にはほとんど影響しないことを確認した。無筋領域の影響を考慮する際には、コンクリートの引張軟化式の係数 c を 0.25 とすると、荷重一変位関係が試験結果とより一致する傾向が見られたが、鉄筋降伏までの中立軸の変化はむしろ試験結果から大きく乖離する結果であった。無筋領域とみなす範囲と、連続繊維シートをはり下面に接着した場合の係数 c の設定については今後の課題である。

図-6.1.1 に、本章で用いたファイバーモデルにおける材料モデルの例を示す。また、具体の弾性係数等の材料諸元は、表-6.1.1 に示す値をそれぞれ用いた。連続繊維シートの材料引張試験の再試験を実施した供試体については、表-3.1.7 に示したプラスチック用ひずみゲージで測定した連続繊維シートの弾性係数(測定方法 P) $E_f(P)$ と伸び計による弾性係数(測定方法 D) $E_f(D)$ の 2 種類とした。また、両者の比 $E_f(D)$ / $E_f(P)$ は概ね 0.8 であったことから、他の供試体については、 $1.0\,E_f$ と $0.8\,E_f$ の 2 種類とした(E_f は表-3.1.6 に示した連続繊維シートの弾性係数)。ファイバーモデルによる計算では、平面保持の仮定の下で、断面分割法によりM- ϕ を求めた後、はりの曲率分布を算出し、モールの定理(弾性荷重法、The Area-Moment Method I)を利用して支間中央のたわみを算出した。





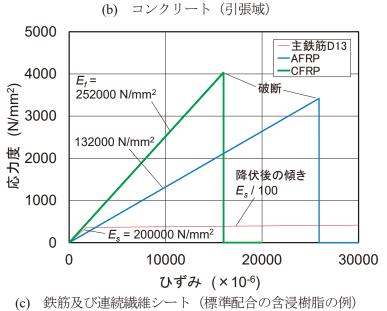


図-6.1.1 ファイバーモデルの計算に用いた材料モデルの例

表-6.1.1 コンクリート、連続繊維シートの応力ひずみ関係の入力パラメータ

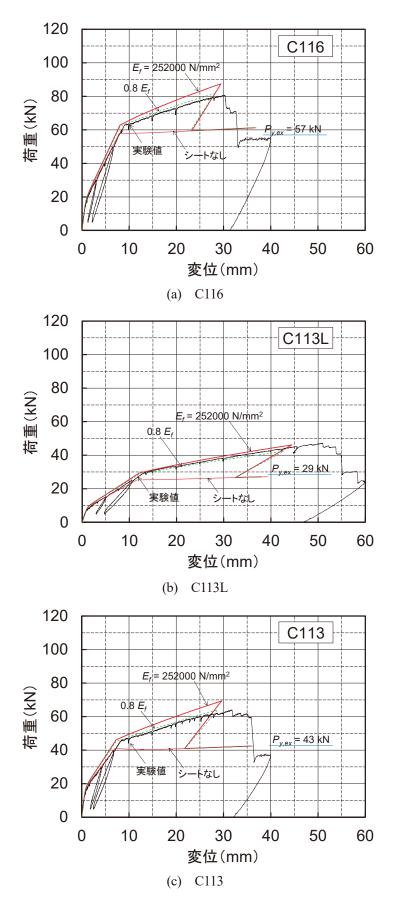
		コンク	リート		連続繊維シート							
供試体	圧縮	関連	引張	関連	E_f	$0.8E_f$	€ _{fiu}	材料試験				
,	$a = f'_c$ (N/mm ²)	<i>b</i> (×10 ⁻³)	f_t (N/mm ²)	<i>Ecr</i> (−)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(-)	での Efu (一)				
C116	34.7	2.5	2.7	0.000100	252000	201600	0.012 (0.75)	0.016				
C113L	34.7	2.5	2.7	0.000100	252000	201600	0.012 (0.75)	0.016				
C113	34.7	2.5	2.7	0.000100	252000	201600	0.012 (0.75)	0.016				
C213	34.7	2.5	2.7	0.000100	255000	204000	0.010 (0.68)	0.0148				
C313	34.7	2.5	2.7	0.000100	257000	205600	0.008 (0.51)	0.0158				
C113e1	29.4	2.2	2.6	0.000100	246000	195000	0.012 (0.82)	0.0146				
C113e3	29.4	2.2	2.6	0.000100	245000	195000	0.012 (1.37)	0.00878				
A113	29.4	2.2	2.6	0.000100	134000	103000	0.019 (0.73)	0.0259				
A113e1	29.4	2.2	2.6	0.000100	119000	86500	0.019 (1.09)	0.0174				
A113e3	29.4	2.2	2.6	0.000100	118000	85500	0.019 (1.33)	0.0143				
A113fc20	21.5	1.8	2.0	0.000086	134000	103000	0.019 (0.73)	0.0259				
A113fc40	52.0	3.6	3.1	0.000109	134000	103000	0.019 (0.73)	0.0259				

注 1) $0.8E_f$ の欄は、表-3.1.7 の測定方法 D の結果を示し、同表にない場合は $0.8 \times E_f$ を示す.

²⁾ 材料試験での ϵ_{fu} は表-3.1.6の実測値を示す。計算に用いた ϵ_{fu} ははり試験前に仮の値として設定した。ここでは荷重一変位関係における降伏後の傾きの比較を主とするので、実測値での再計算はしていない。 ϵ_{fu} の欄の括弧内は材料試験結果に対する比を示す。

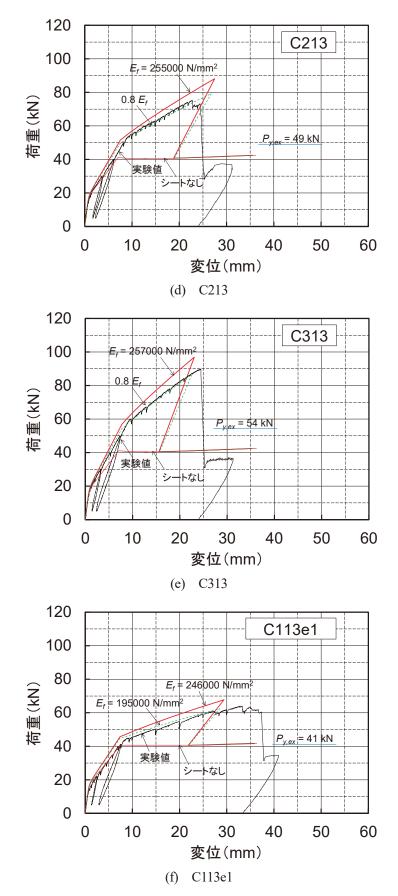
6.2 荷重-変位関係

図-6.2.1 に、荷重一変位関係について、試験で得られた結果とともに、ファイバーモデルによる計算結果を示す。各図中には、2 種類の連続繊維シートの弾性係数による結果をそれぞれ示した。いずれの供試体も、従来の試験結果と同様に、主鉄筋の降伏とともに、荷重一変位関係の勾配が明確に小さくなることが認められる。例えば、供試体 C113 や A113 では、荷重が $40\sim50\,\mathrm{kN}$ の間で生じた勾配の変化をいう。主鉄筋の降伏後における荷重一変位の勾配を、以下、降伏後の勾配という。材料引張試験の再試験を行った供試体 C113e1、C113e3、A113、A113e1、A113e3 の降伏後の勾配は、伸び計による弾性係数 $E_f(D)$ で計算した方(図中、緑破線で示す)が、プラスチック用ひずみゲージで測定した弾性係数 $E_f(P)$ で計算した結果(同赤太線)よりも、試験結果に近い傾向が見られた。また、それ以外の供試体の降伏後の勾配は、 $0.8E_f$ で計算した結果の方(図中、緑破線で示す)が、試験結果に近い傾向が見られた。



注)変位限界は試験前の仮の εfu による.

図-6.2.1 荷重-変位関係における降伏後の勾配と連続繊維シートの弾性係数



注)変位限界は試験前の仮の ε_{fu}による.

図-6.2.1 荷重-変位関係における降伏後の勾配と連続繊維シートの弾性係数(続き)

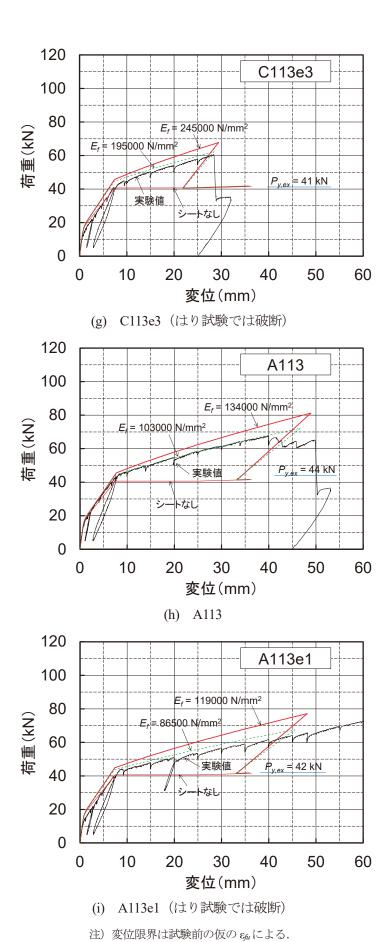
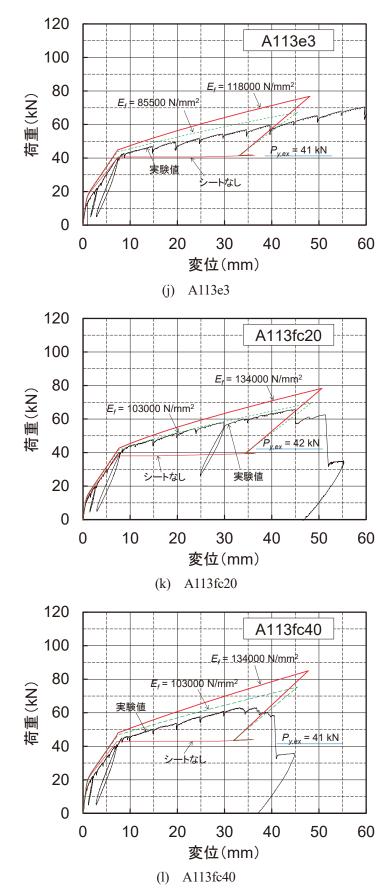


図-6.2.1 荷重-変位関係における降伏後の勾配と連続繊維シートの弾性係数(続き)



注)変位限界は試験前の仮の ϵ_{fu} による.

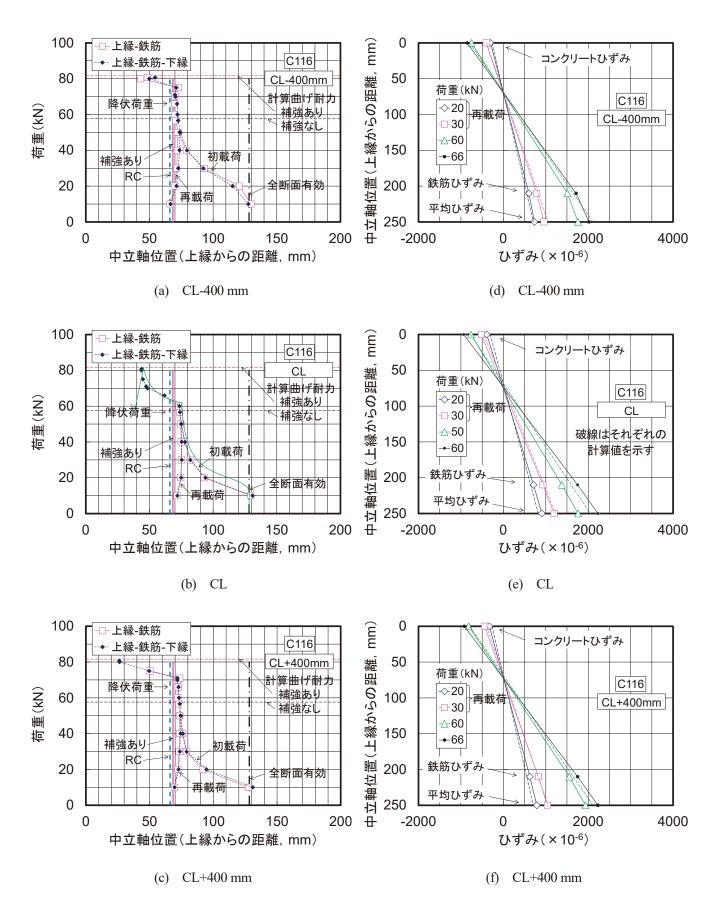
図-6.2.1 荷重-変位関係における降伏後の勾配と連続繊維シートの弾性係数(続き)

6.3 平面保持と中立軸

図-6.3.1~12 に、各供試体の荷重の増加に伴う中立軸位置の変化と、鉛直方向ひずみ分布の例を示す、そ れぞれについて, 支間中央 (CL) における測定結果と CL ±400mm の位置における測定結果を示す. 中立 軸位置の測定結果(左図)は、各断面におけるコンクリート上縁のひずみゲージによるひずみと、主鉄筋の ひずみゲージによるひずみの2点から算出したもの(図中,「上縁-鉄筋」と記す)と,パイゲージによる 変位から換算した下縁の平均ひずみを加えて、相関関係から算出したもの(図中、「上縁ー鉄筋ー下縁」と 記す)を,記号を変えて示す.ただし,「上縁-鉄筋-下縁」の結果のうち,降伏後の場合は鉄筋のデータ を除いた. パイ型変位計を固定するためのコマの高さによって平均ひずみに影響が生じることから, 文献 ³⁾と同様に高さ補正を行った.また,パイ型変位計の設置位置中心(CL±450mm)が,上縁のコンクリート のひずみゲージ位置及び鉄筋のひずみゲージ位置(いずれもCL ±400mm)と若干異なることから、曲げモー メント分布に応じて線形補正することとし、CL±400mmの中立軸については、パイ型変位計の平均ひずみ に 900 / 850 を乗じた. また, 図中には, 全断面有効時及び RC 計算による中立軸位置を, 連続繊維シート の有無の両方について示す. 測定で得られた中立軸位置は, 主鉄筋が降伏するまでは, RC 計算による中立 軸位置と同等か,やや大きい結果であったことが分かる.多くの場合,「上縁ー鉄筋」と「上縁ー鉄筋ー下 縁」が比較的よく一致しており、連続繊維シートのひずみを含めて、平面保持が概ねよく保たれていたこと を示している. 初期載荷時は、曲げひび割れの発生、伸展とともに、中立軸位置が上縁に近付く挙動を示す が、一旦除荷した後の再載荷時には、低い荷重から主鉄筋の降伏までほとんど変化せずに、RC計算による 中立軸位置で概ねよく表せていた.

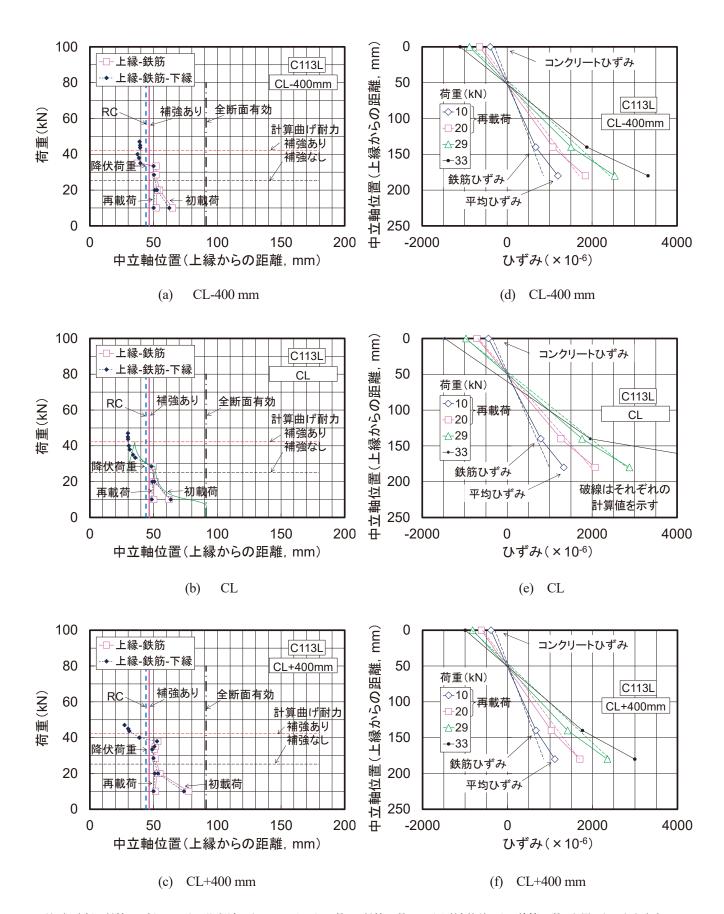
図(b)には、6.2 で計算したファイバーモデルによる計算で得られた中立軸位置の変化も示した。この計算によれば、主鉄筋の降伏以降は、中立軸位置が急上昇する傾向にある。「上縁ー鉄筋ー下縁」の測定結果(上述のとおり降伏後は鉄筋データを除く)では、計算結果と概ね同様の傾向を示すことが分かった。

鉛直ひずみ分布を示した図(d)~(f)では、主鉄筋の降伏までの結果について、それぞれ RC 計算による計算値をそれぞれ破線で示した。鉄筋降伏までは、実測ひずみ分布と計算値が概ね同等か、計算値よりもやや小さい傾向にあった。



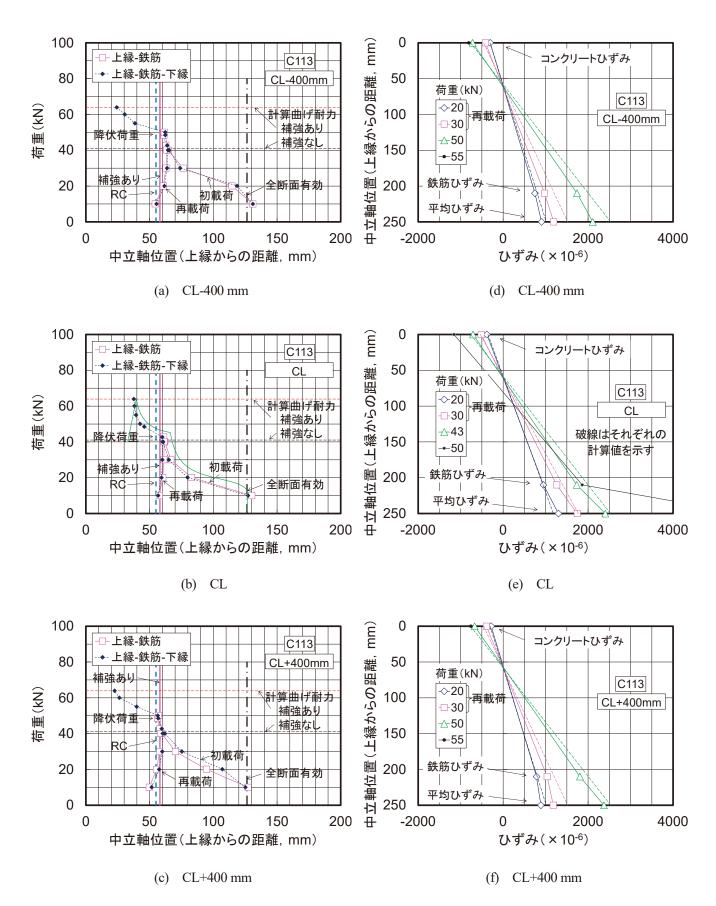
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、0.8 Eで計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.1 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体C116



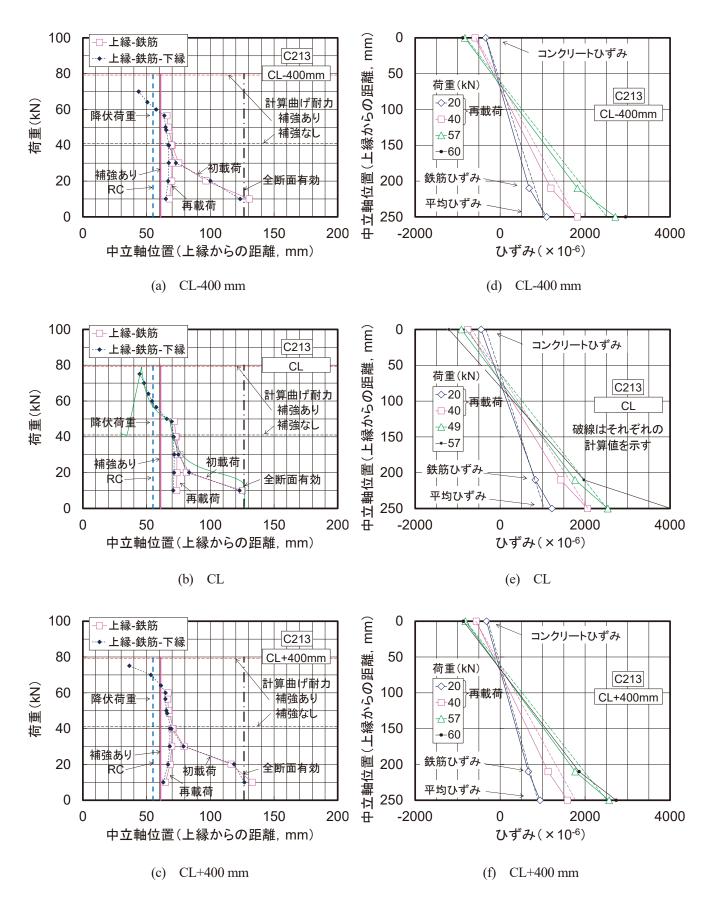
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、 $0.8 E_f$ で計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.2 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体 C113L



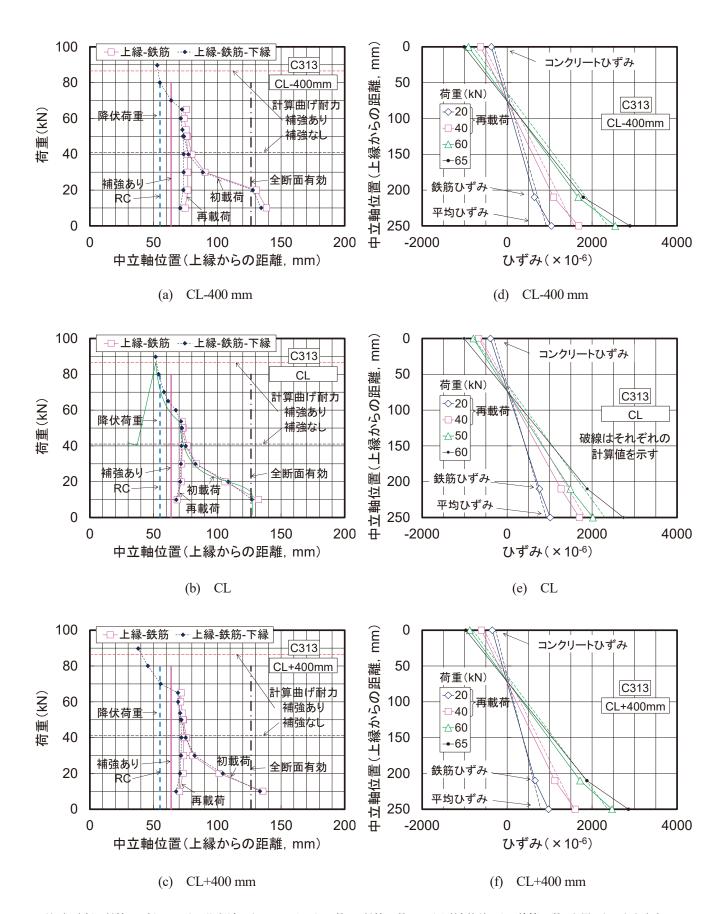
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、0.8 Eで計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.3 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体C113



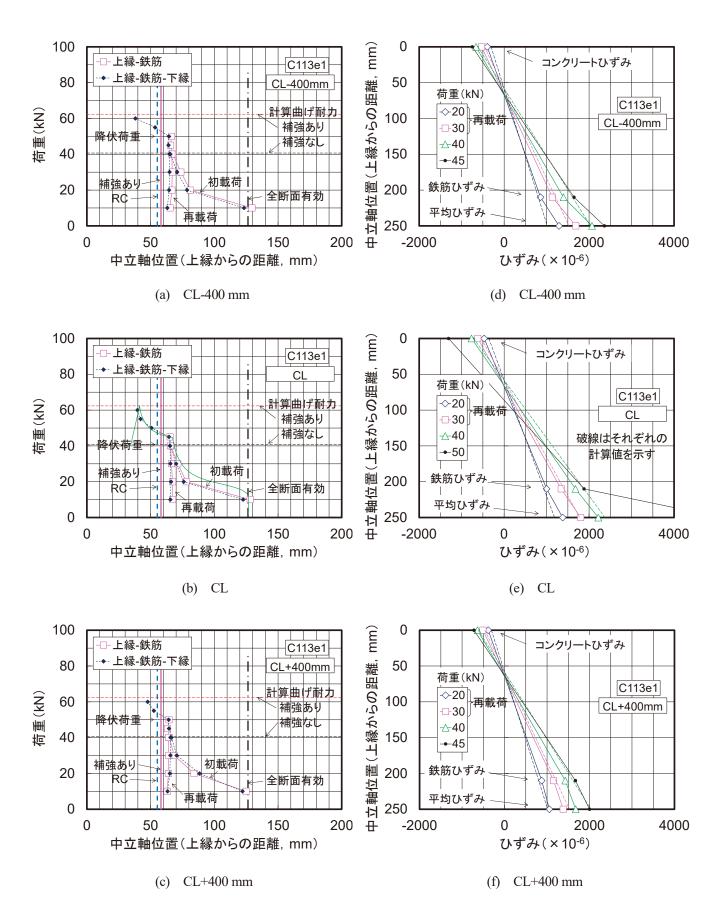
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、0.8 Eで計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.4 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体 C213



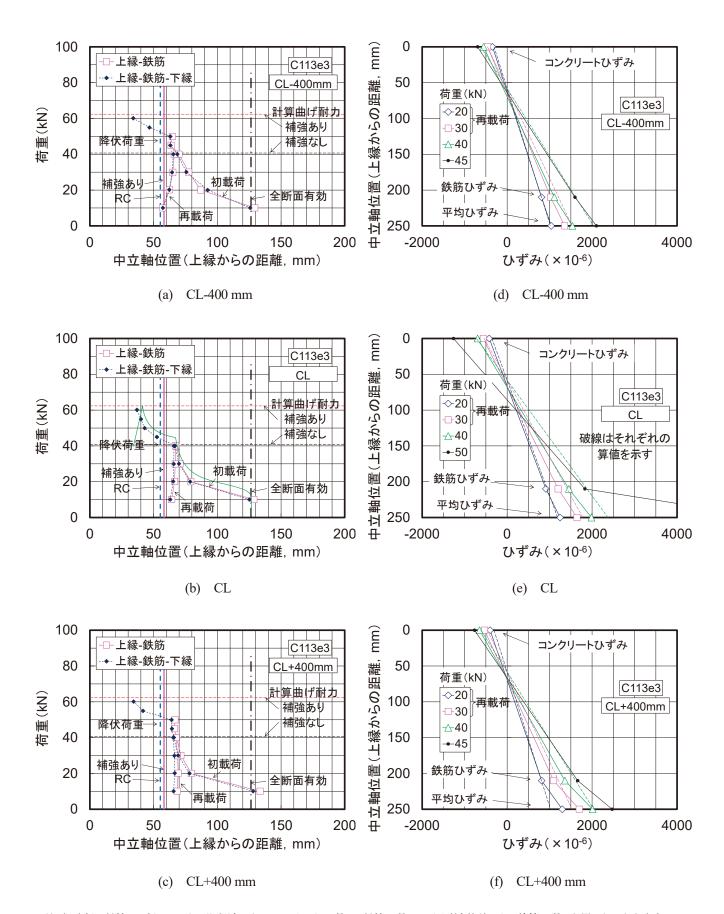
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、 $0.8 E_f$ で計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.5 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体C313



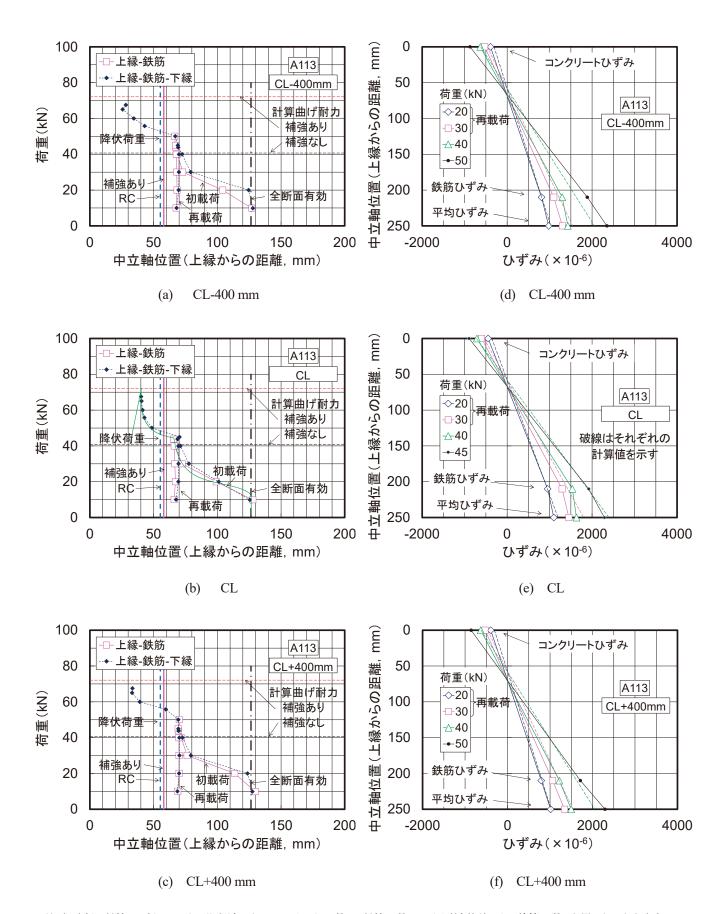
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、0.8 Eで計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.6 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体C113e1



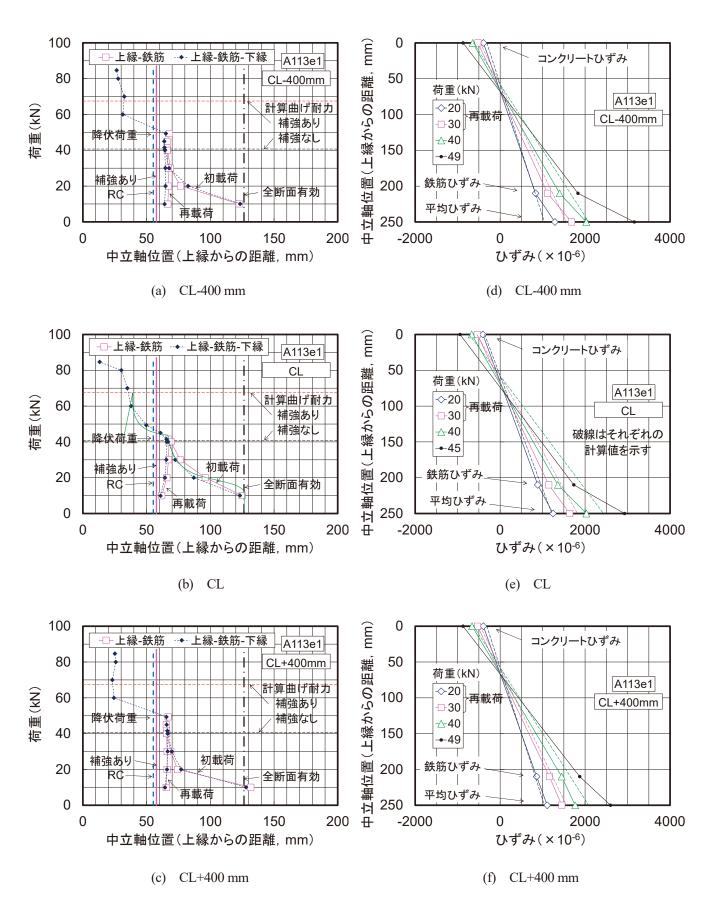
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、 $0.8 E_f$ で計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.7 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体C113e3



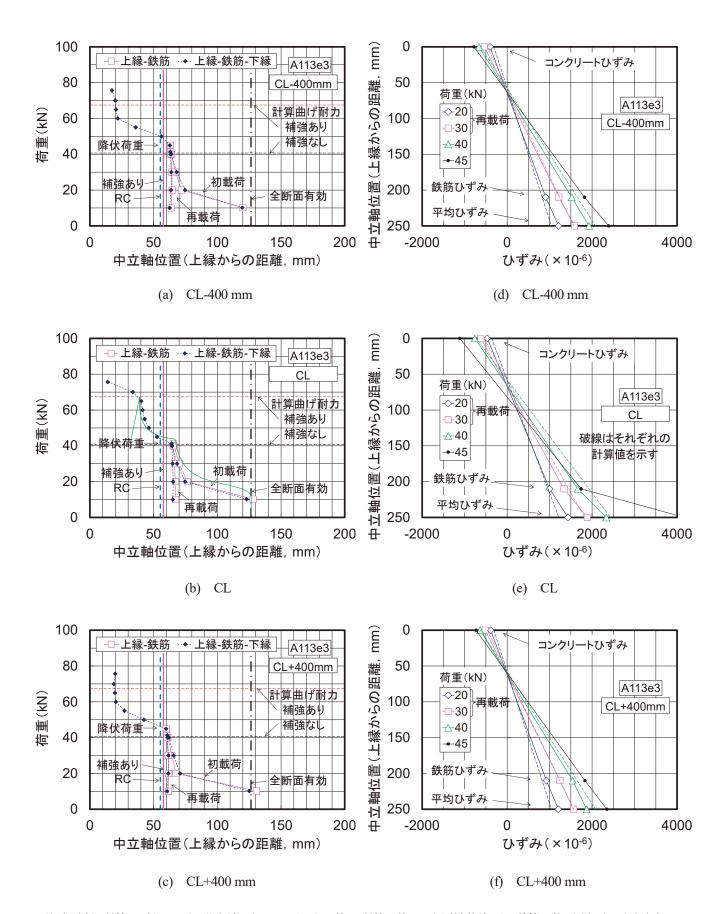
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、 $0.8 E_f$ で計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.8 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体 A113



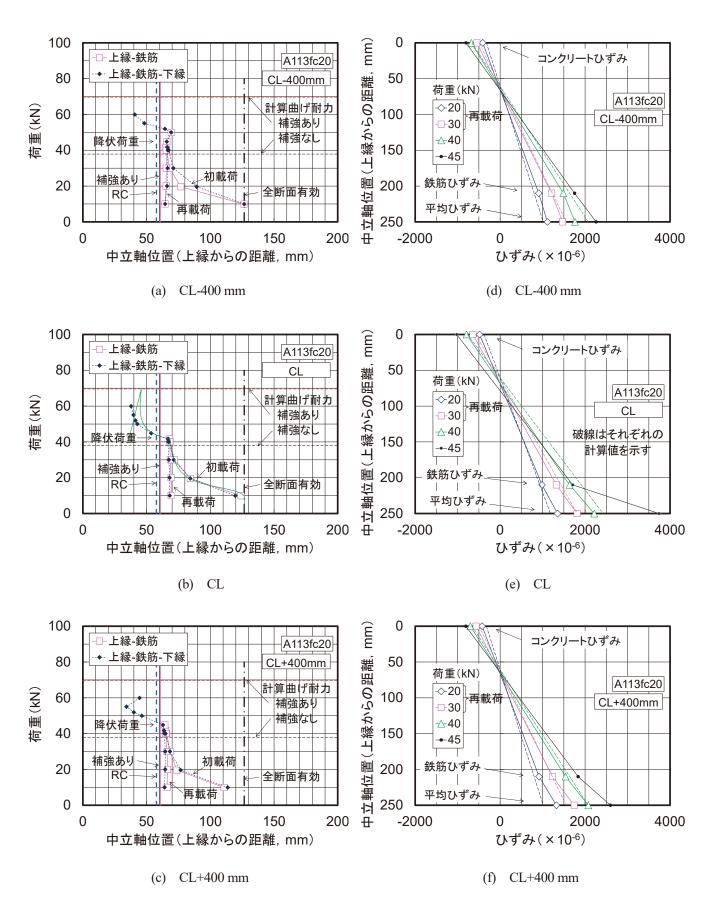
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、0.8 Eで計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.9 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体 A113e1



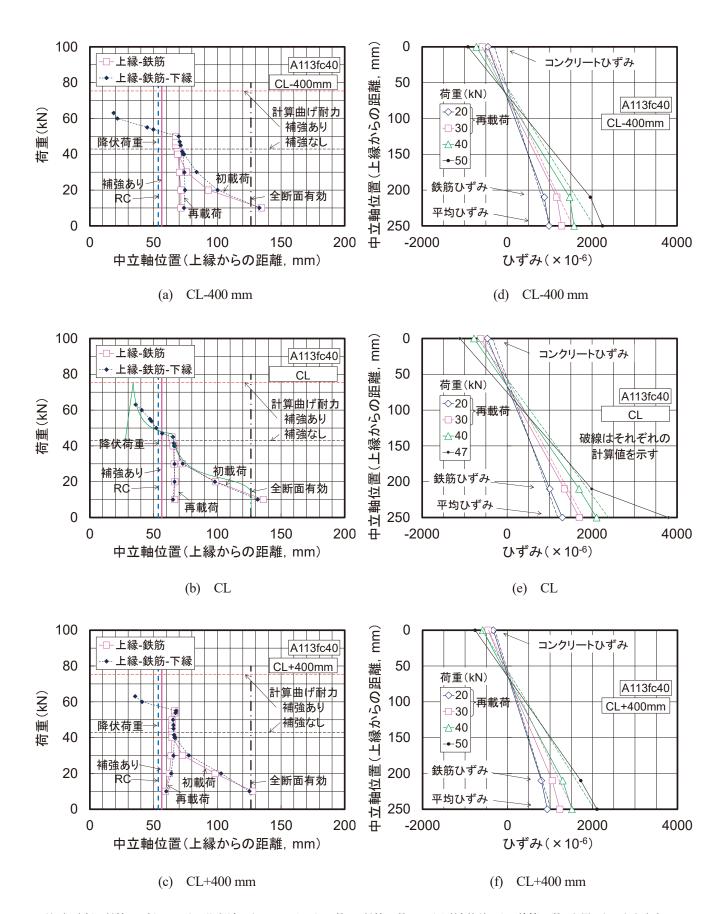
注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、 $0.8 E_f$ で計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.10 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体 A113e3



注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、0.8 Eで計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.11 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体 A113fc20



注 1) 上縁、鉄筋、下縁は、それぞれ測定したコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、パイ型変位計による換算ひずみを用いたことを表す。 注 2) 図(b)の緑線は、 $0.8 E_f$ で計算したファイバーモデルによる計算値を示す。

図-6.3.12 中立軸位置の変化(左)と鉛直方向ひずみ分布(右),供試体 A113fc40

6.4 降伏曲げモーメント M_v と破壊抵抗曲げモーメント M_u

連続繊維シートを下面に接着した矩形断面 RC はりの降伏曲げモーメント M_y は、ひび割れ後を想定して、RC はりと同様に、次の式により、降伏時の中立軸及び断面二次モーメントを求め、主鉄筋降伏時の曲げモーメント M_y を算定する 4 . これらは、平面保持の仮定が成立し、コンクリートの引張負担を無視した場合である.

$$x_{sv} = (-A_1 + (A_1^2 + 2bB_1)^{0.5})/b \tag{6.4.1}$$

 $A_1 = nA_s + nA_s' + n_f A_f$

 $B_1 = nA_s d + nA_s' d' + n'A_t h$

$$I_c = (b x_{sv}^3)/3 + nA_s (d - x_{sv})^2 + n A_s' (d' - x_{sv})^2 + n'A_f (h - x_{sv})^2$$
(6.4.2)

$$M_{v} = (f_{v}/n) I_{c}/(d - x_{sv})$$
(6.4.3)

ここに,

xsv:連続繊維シートを接着した矩形断面 RC 部材の下段鉄筋降伏時の中立軸位置(上縁からの距離)

b : 矩形断面 RC 部材の幅

n:鉄筋とコンクリートの弾性係数比 (= E_s/E_c)

n': 連続繊維シートとコンクリートの弾性係数比 (= E_{ℓ}/E_{c})

As:下段鉄筋の断面積

As': 上段鉄筋の断面積

 A_f : 連続繊維シートの断面積 (= $n_f t_f b_f$)

d : 上縁から下段鉄筋までの距離(連続繊維シート接着前の RC はりの有効高さ)

d': 上縁から上段鉄筋までの距離

h : はり高さ

 I_c :連続繊維シートを接着した矩形断面 RC 部材の断面二次モーメント(コンクリート換算)

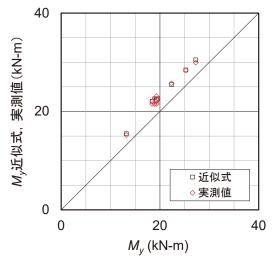
fv: 下段鉄筋の降伏点

nf:連続繊維シートの層数

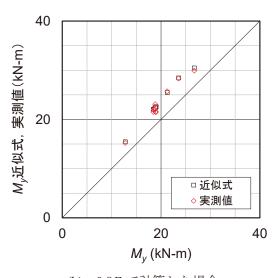
tf:連続繊維シートの1層当り設計厚さ

bf: 連続繊維シートの幅

図-6.4.1 に、本試験シリーズのはり供試体の降伏曲げモーメントについて、式 6.4.3 による計算値を実測値と比較して示す。式 6.4.3 による計算値は、コンクリートの引張負担を無視した分、実測値の約 85%程度であった。 M_y の計算において、偏配合のものを含めて、含浸樹脂の物性の違いによる顕著な乖離はほとんど見られなかった。



(a) 1.0Efで計算した場合



(b) 0.8*E_f*で計算した場合

縦軸:後掲の近似式 7.5.2 による近似値、鉄筋の降伏をひずみゲージにより確認したときの実測値、 横軸:式 6.4.3 による計算値.

図-6.4.1 はり供試体の降伏曲げモーメントの計算値と実測値の比較

連続繊維シートの中間剥離や破断が生じず、圧壊に至る場合の矩形断面 RC はりの破壊抵抗曲げモーメント M_u は、RC はりと同様に、次のとおり算定する.

コンクリート上縁の圧壊時における中立軸の位置 x_u (上縁からの距離) を力のつり合いにより算定する.

$$x_u = (-B_2 + (B_2^2 - 4A_2C_2)^{0.5}) / 2A_2$$
(6.4.4)

 $A_2 = 0.85 f_c' \beta b$

 $B_2 = (A_s'E_s + A_fE_f) \varepsilon_{cu'} - A_s f_v$

 $C_2 = -(A_s'E_s d' + A_fE_f h) \varepsilon_{cu'}$

ここに,

 $f_{c'}$:コンクリートの圧縮強度

E_f:連続繊維シートの弾性係数

 $\varepsilon_{cu'}$: コンクリートの圧縮限界ひずみ (ここでは絶対値)

 $\beta = 0.8$

 M_u は、モーメントのつり合いから算定する.

$$M_u = C_c'(1 - \beta/2) x_u + C_s'(x_u - d') + T_s(d - x_u) + T_f(h - x_u)$$
(6.4.5)

 $C_c' = 0.85 f_c' \beta x_u b$

 $C_s' = A_s' E_s \, \varepsilon_{cu}' (x_u - d') / x_u$

 $T_s = A_s f_v$

 $T_f = A_f E_f \varepsilon_{cu} (h - x_u) / x_u$

本試験シリーズでは,連続繊維シートの中間剥離または破断により破壊したため,式 6.4.5 による破壊抵抗曲げモーメント M_u の比較はできない.ただし,供試体 A113e3 は,圧壊の兆候が見られたので,参考までに比較しておくと,連続繊維シートの弾性係数を $0.8E_f$ とした場合,式 6.4.5 による破壊抵抗曲げモーメント M_u が 32 kN-m に対して,試験で圧壊の兆候が見られた時の曲げモーメントは 36 kN-m であった.

6.5 まとめ

主鉄筋の降伏後の荷重一変位の勾配より、はり試験における連続繊維シートの弾性係数は、周囲の温度等の影響により、材料引張試験の結果で得られた弾性係数の 0.8 倍程度であった可能性があると考えられる. この傾向は、材料試験の再試験を行った 5 体の連続繊維シートだけでなく、他の供試体の連続繊維シートも同様の傾向が見られた.

7. 中間剥離の過程と含浸樹脂の影響

7.1 中間剥離の過程

本章では、3.2.3(3)で述べた中間剥離の発生機構について、ビデオ観察の結果と対比して検討する.

- 2 章で述べたとおり、岸、三上らはこれまでの研究で、中間剥離(ピーリング)の特徴として、以下の点を挙げている¹⁾.
 - a) せん断スパンにおける曲げひび割れを起点とした中間剥離は、載荷点から主鉄筋降伏先端までの範囲 においてかぶりコンクリートがブロック化した後、(そのブロックが回転するような動きを伴い)下面 に接着された連続繊維シートを下方に押し下げる力が作用することによる(ピーリング作用)
 - b) 上記 a)から推察されるとおり、中間剥離は主鉄筋がある程度降伏した後に発生する
 - c) 連続繊維シートで補強されたコンクリートは $00 M_y/M_u$ が約0.7以下で剥離破壊型となる(このときの M_y/M_u は断面分割法による)
 - d) 中間剥離は純曲げ区間では発生しない

ただし、項目 c)の M_u は、連続繊維シートの破断前に上縁コンクリートの圧壊で決まる場合の計算値であり、剥離の影響を含まない。

これらの知見を踏まえて、本研究におけるほとんどのはり供試体は、 M_y/M_u が概ね 0.7 以下となるように設計した(表-3.1.1). 試験では、概ね想定したとおりに中間剥離を発生させることができた。また、中間剥離の初期の状態である部分剥離は、いずれの供試体においても、その部分剥離発生位置付近の鉄筋が降伏した後に発生した。

表-7.1.1 に、中間剥離の発生過程の概要を示す。既往の研究で述べられているように、中間剥離は、近傍の主鉄筋降伏後に、連続繊維シートに近接するコンクリートがブロック化することと関連していた。既往の文献では、かぶり内のコンクリートのブロック化を意図していると思われるが、ここでは、かぶり内に限定せず、全剥離前に形成された三角形のブロックを対象として三角ブロックという。はり試験では、そのブロック発生の前段で生じる連続繊維シート近傍の斜めひび割れを観察するとともに、その後のブロック化の傾向、中間剥離の開始点である部分剥離との関係を観察した。一般に知られる RC はりの斜めひび割れと区別するため、本報告書では、以下、その連続繊維シート近傍で生じる斜めひび割れを三角ひび割れという。表-7.1.2 に、中間剥離の過程に着目して、はり試験のビデオ観察による結果一覧を示す。表-7.1.2 のうち、部分剥離発生荷重と三角ブロック形成時荷重について、3.2 で示したひずみ変化による結果と比較するため、図-7.1.1 にそれらの比較図を示す。両者の結果は概ね一致しており、ひずみ変化による判定方法、ビデオ観察の双方が概ね妥当であったことが分かる。

以下, 表-7.1.2 の結果について補足する.

(1) 三角ひび割れ

三角ひび割れは、連続繊維シートが存在することによって、せん断スパン内の曲げひび割れを起点として、 連続繊維シートに近接するコンクリートに発生する。三角ひび割れ発生時において、三角ひび割れ近傍の鉄 筋ひずみはほとんどの場合に既に降伏に達していた。表-7.1.2 において三角ひび割れの発生位置は、起点となった曲げひび割れの位置を支間中央 CL からの距離で示した。これより、三角ひび割れの発生位置は CL+250~530 mm, 載荷点直下からせん断スパン側に 280 mm までの範囲であった。また、供試体によっては、一つの曲げひび割れを起点として、複数の三角ひび割れが発生することがあった。なお、鉄筋降伏前に類似の小さい斜めひび割れが見られたが、はりの片側側面に発生した軽微なもので、はり幅にわたって三角ブロックを形成するものではなかった。

(2) 三角ブロック形成

表-7.1.2 には、三角ブロック形成時の荷重、変位、付近の鉄筋ひずみ及び形成の起点となった曲げひび割れの位置を示した。また、三角ブロックは複数箇所で形成される場合があることから、その伸展の過程の一つとして、形成された位置を発生順に示した。また、三角ブロックの高さも示した。

三角ブロックは、三角ひび割れが伸展して、曲げひび割れと三角ひび割れがつながることで形成される三角状のコンクリートのブロックである。三角ブロックは近傍の主鉄筋が降伏した後に形成された。三角ブロックの大きさは、かぶり内に収まるものは少なく、多くの場合、その上部の頂点が主鉄筋位置よりも高い位置に見られた。大きい三角ブロックの場合は、起点となった曲げひび割れの支点側隣の曲げひび割れを交差して三角ひび割れが発生していた。

なお、三角ひび割れが途中で角度を変えて、ブロックの形状が三角形ではないものが見られた。これらは、はりのせん断ひび割れや主鉄筋に沿った軽微な割裂が三角ひび割れと組み合わさって形成された可能性があると考えられる。ただし、はりのせん断による斜めひび割れの発生荷重よりも小さい荷重で三角ひび割れが生じていた。条件によっては、連続繊維シートに関連する三角ひび割れの発生とともに、はりのせん断破壊を誘発した可能性がある。はり供試体では、試験の目的上、せん断スパンにせん断補強鉄筋を配置していたが、せん断補強鉄筋がなければ、いくつかの供試体はせん断破壊に至る可能性があったと考えられる。

(3) 部分剥離

はり試験では、完全に連続繊維シートが剥離する前に、せん断スパンの載荷点に近い箇所で、部分的な剥離が発生した。この部分剥離は、三角ひび割れを起点にして、供試体 A113e3 を除き、連続繊維シートを接着したコンクリートの表面付近でのコンクリートの破壊により生じ始めた。図-7.1.2 に、部分剥離発生荷重をブロック形成時荷重と比較して示す。図中には、ひずみ変化による結果とビデオ観察による結果を記号を変えて示す。ひずみ変化による結果によれば、部分剥離は、すべての供試体において、三角ブロック形成後に発生していた。一方、ビデオによる観察では、ひずみ変化による結果と比べてばらつきがやや大きかった。初期の部分剥離を目視で明確に捉えることが難しい傾向にあることを考慮する必要がある。

最初の部分剥離に関連した三角ひび割れの起点となった曲げひび割れの位置は CL+250~410 mm, 平均で CL+375mm であった. 最初の部分剥離の発生位置は CL+350~550 mm, 載荷点から 100~200 mm 程度であった. 部分剥離の発生後は, 荷重の増加とともに支点側に向かって剥離が急速に伸展した. 載荷点から離れた 位置で部分剥離が生じ始めることが多かったが, その中には, 支点に向かって伸展するだけでなく, 載荷点 付近にも新たに部分剥離が発生して(やはり三角ひび割れから支点側に発生した), 最初の部分剥離とつながった. なお, 一つの曲げひび割れに対して複数の三角ひび割れが発生した箇所は, その後, 部分剥離の起

点となった.

(4) 全剥離

はり試験において、連続繊維シートに部分剥離が見られてからも荷重がさらに増加する事例が多かった。連続繊維シートの剥離に対してはりに作用するせん断力が支配的に影響するのであれば、部分剥離後、直ちに支点付近までの全剥離が生じるはずである。しかし、そうならなかったのは、主として部分剥離の開始がはりに作用する曲げモーメントと関連していると考えられ、荷重の増加とともに剥離が生じる領域が支点付近に拡がっていくものと考えられる。また、多くの場合、部分剥離が生じても直ちに荷重が低下せず、荷重の増加に耐えられたのは、連続繊維シートの力の伝達が保持されていたことと、連続繊維シートが下面に接着されていたため、部分剥離後も中立軸からの距離(あるいは圧縮合力と引張合力のアーム長)をほぼ一定に保持できていたことが有効に働いたためと考えられる。なお、正負交番の曲げが作用する場合には、これらの力の伝達やアーム長の保持は早期に失われるものと推察される。

(5) 水平ひび割れ

はり試験では、三角ひび割れから連続繊維シートの剥離が発生したが、供試体 C113e1、A113fc20では、異形鉄筋に沿った割裂によると考えられる水平のひび割れも見られた。

参考として、巻末の付属資料3に、各供試体のビデオから抽出した画像を用いて、破壊までの過程を示す。

表-7.1.1 中間剥離の発生過程

主な過程	現象補足	主な発生理由	発生時の状態	想定される 樹脂の影響
o) 曲げひび割れ 剥離位置付近		曲げモーメント増 加に伴うコンク リートひずみ増加	せん断スパンは弾 性挙動の範囲	なし
a) 主鉄筋降伏 剥離開始位置近傍 での降伏		曲げモーメント増 加に伴う鉄筋ひず み増加	RC 計算または断 面分割法で推定	樹脂の物性低下と ともに,発生がや や早まる
b) 三角ひび割れ せん断スパン内, シートに近接して 発生	・同じ起点となる曲げひび割れに対して、複数の三角ひび割れが生じることがある。・小さい三角ひび割れから大きいものに伸展する場合と、大きい三角ひび割れから小さいものに伸展する場合がある。	曲げひび割れ位置 でのシート引張力 の増加に伴うコン クリートのひび割 れ*1	純曲げ区間付近の 主鉄筋の降伏後 断面分割法で推定	樹脂の物性低下と とと ともに、主鉄筋 、主鉄筋 、主鉄筋 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、
c) 三角ブロック形成		b)が曲げひび割れ まで伸展して形成 される	はり全体の挙動と 局部的な力のつり 合い	樹脂の物性低下と ともに、発生時期 が遅延する場合が ある
d) シート部分剥離	・三角ブロック回転を伴う場合あり ・同じ起点となる曲げひび割れに対し て、複数の三角ひび割れが生じた場 合は、その三角ひび割れに関連して 発生する傾向がある ・部分剥離発生後は、支点に向かって 剥離が伸展する. 載荷点側にも追加 発生し、支点に向かって伸展の後、 先の剥離とつながって剥離範囲を拡 大する場合がある.	シート近傍のコン クリート表面付近 の破壊 c)とともに明確に 確認できるように なる*2	c)と同期する場合 が多かった. ただ し,b)とともに発生 する場合もあっ た.	樹脂の物性低下と ともに,発生時期 が遅延する場合が ある
e) シート全剥離		部分剥離のシート 端部への伸展に伴 う全剥離		樹脂の物性低下と ともに,発生時期 が遅延する場合が ある

^{*1)} 付着試験時に見られるものと類似 (7.2節).

^{*2)} 三角ブロックが明確に形成される前に発生するものも見られた.

表-7.1.2 中間剥離の過程に着目したはり試験の結果一覧

g:三角ひび割れの重層化

			主鉄筋降		鉄筋	5降伏		=		「割れ(/	(\)	-		「割れ(カ	7)			三	角ブロッ	ック形成(ビデオ)				部分剥削		ピー	力吐	Д э	.11 卤化	シート	. 石中 FE	せん断ひ	び割れ荷重
Phase #		破壊側	伏ひずみ	曲げ	区間	載荷点が	ら150 mm		(ビデオ)			(ビデオ)				初期ブ	ロック化		伸展	ブロック高さ		(ビデオ)			C > 147		全剥離			141001	RC	シートあり	
試験年	供試体	破壊側 (観察側)	ϵ_{sy}	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	ϵ_{s}	位置	荷重	変位	ϵ_{s}	位置	荷重	変位	ϵ_{s}	位置	甲胺	位置	高さ	荷重	変位	位置	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	$2V_c$	$2V_{c+f}$
			×10 ⁻⁶	kN	mm	kN	mm	kN	mm	×10 ⁻⁶	×100 mm	kN	mm	×10 ⁻⁶	×100 mm	kN	mm	×10 ⁻⁶	×100 mm	×100 mm	×100 mm	mm	kN	mm	×100 mm	kN	mm	kN	mm	kN	mm	kN	kN
	C116	左	1710	57	8.0	66	13	60	15	1790	3.8	71	17	1860	2.5	73	20	2020	2.5	3.8g→2.5g	2.5	30	80	(29)	2.5	81	30	71	33	_	_	82	84
D1 1	C113L	右	1760	29	13	33	21	38	29	1990	2.5, 3.8	43	40	1830	3.8	46	48	4920	3.8	2.5,3.8g→3.3,4.8	3.8	75	45	(45)	3.8	47	51	30	58	_	_	54	57
Phase 1 2019	C113	右	1760	43	7.8	49	12	_	_	_	_	54	19	1930	3.3	57	22	2060	3.3	3.3→2.5	3.3	110	59	24	3.3	64	32	59	36	_	_	70	74
2019	C213	右	1760	49	8.1	57	11	55**	10	1700	2.5	64	16	2000	3.9	72	21	2420	3.9	2.5→3.9→3.2	3.9	110	71	(20)	3.9	75	23	59	25	_	_	70	77
	C313	右	1760	54	8.3	61	11	67	13	1960	5.3	78	18	1950	2.6, 3.9	84	21	8190	5.3	5.3g→2.6,3.9g	3.9, 5.3	50, 65	84	21	3.9, 5.3	90	24	87	25	_	_	70	80
	C113e1	左	1830	41	7.9	50	16	55	20	1910	3.4	61	28	1820	4	61	28	1820	4	3.4→4g	4	75	63	33	4	64	33	59	37	_	_	67	70
	C113e3	中(左)	1830	41	7.8	53	18	50	15	1780	2.5	57	24	1890	3.1	60	29	1890	3.1	2.5→3.1	3.1	100	_	_	_	61	29	_	_	60	29	67	70
D1 0	A113	右	1830	44	8.1	56	22	54	19	1810	3.4	60	30	1830	3.4	54	20	1800	3.4	3.4g→3.9→4.8	3.4	110	60	30	3.4, 3.9	68	39	65	50	_	_	67	70
Phase 2 2020	A113e1	中(右)	1830	42	8.0	48	16	50	18	1850	3.1	50	21	1810	2.5	63	45	4140	4.1	3.1→4.1g,4.7	2.5, 4.1	100, 70	82	81	4.1	85	86	_	_	85	86	67	69
2020	A113e3	右	1830	41	8.2	45	13	_	_	_	_	47	18	1900	2.6	54	29	6130	4	2.6→4g→5.6	4	140	64	51	4	76	80	65	98	_	_	67	69
	A113fc20	右	1830	41	8.6	47	14	52	21	(1850)	4	56	27	(3460)	4	59	34	(7310)	4	2.5,4→5.6	2.5, 4	110	60	35	4	66	44	63	52	_	_	59	61
	A113fc40	左	1830	41	7.7	47	12	35**	5.6	1170	2.5	54	20	(1880)	3.9	54	20	(1880)	3.9	2.5→3.3,3.9	3.9	55	60	29	3.9	63	33	58	41	_	_	74	75

- 注 1) 破壊側はA面から見た場合の左右のせん断スパンで破壊した側を示す。そのうち、括弧は破壊が中央であったがビデオ観察した側を示す。
- 注 2) 三角ひび割れはせん断区間に発生したものに限る.
- 注3) ε_s は三角ひび割れ、三角ブロック形成について、載荷点から支点側に150mm離れた位置におけるひずみを示す. いずれも破壊側または観察した側の値. ただし、括弧内はひずみゲージの欠損が生じたため、反対側の同等の位置におけるひずみゲージの値を参考に示す.
- 注 4) V_c の計算に用いる A_s に連続繊維シートの鋼材換算断面を含む.
- 注 5) それぞれの変位は各事象発生時の支間中央の変位を示す.
- 注 6) Phase 1における部分剥離の変位は、ビデオの音声による. ただし、括弧内数値は荷重-変位による.
- 注7) それぞれの発生位置は、起点となった曲げひび割れの位置で表す.

表-7.1.2A 中間剥離の過程に着目したはり試験の結果一覧の補足

載荷点から150mm位置 E3 or E7の鋼材ひずみ

ピーク後の荷重低下あり

											/_																						
			主鉄筋降		鉄筋	5降伏] 3		が割れ(力	\) /	3		が割れ(フ	t)			Ξ	角ブロッ	ク形成(ビデオ)				部分剥削		ピー	力吐	全录	-11 ESIE	シート	五世林氏	せん断ひ	び割れ荷重
Phase #		破壊側	伏ひずみ	曲げ	区間	載荷点か	6150 mm		(ビ	デオ)_			(E	デオ)			初期ブ	ロック化		伸展	ブロッ	ク高さ		(ビデオ)		グロ	土米	小角比	>-I	*4区四	RC	シートあり
試験年	供試体	破壊側 (観察側)	ϵ_{sy}	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	ϵ_s	位置	荷重	変位	ϵ_s	位置	荷重	変位	ϵ_s	位置	1	位置	高さ	荷重	変位	位置	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位	$2V_c$	$2V_{c+f}$
			×10 ⁻⁶	kN	mm	kN	mm	kN	mm	×10 ⁻⁶	×100 mm	kN	mm	×10 ⁻⁶	×100 mm	kN	mm	×10 ⁻⁶	×100 mm	×100 mm	×100 mm	mm	kN	mm	×100 mm	kN	mm	kN	mm	kN	mm	kN	kN
	C116	左	1710	57	8.0	66	13	60	15	1790	3.8	71	17	1860	2.5	73	20	2020	2.5	3.8g→2.5g	2.5	30	80	(29)	2.5	81	30	71	33	-	_	82	84
	C113L	右	1760	29	13	33	21	38	29	1990	2.5, 3.8	\43	40	1830	3.8	46	48	4920	3.8	2.5,3.8g→3.3,4.8	3.8	75	45	(45)	3.8	47	51	30	58	_	_	54	57
Phase 1 2019	C113	右	1760	43	7.8	49	12	_	_	_	_	54	19	1930	3.3	57	22	2060	3.3	3.3→2.5	3.3	110	59	24	3.3	64	32	59	36	_	_	70	74
2017	C213	右	1760	49	8.1	57	11	55**	10	1700	2.5	64	16	2000	3.9	72	21	2420	3.9	2.5→3.9→3.2	3.9	110	71	(20)	3.9	75	23	59	25	-	-	70	77
	C313	右	1760	54	8.3	61	11	67	13	1960	5.3	78	18	1950	2.6, 3.9	84	21	8190	5.3	5.3g→2.6,3.9g	3.9, 5.3	50, 65	84	21	3.9, 5.3	90	24	87	25	-	-	70	80
	C113e1	左	1830	41	7.9	50	16	55	20	1910	3.4	61	28	1820	4	61	28	1820	4	3.4→4g	4	75	63	33	4	64	33	59	37	-	-	67	70
	C113e3	中(左)	1830	41	7.8	53	18	50	15	1780	2.5	57	24	1890	3.1	60	29	1890	3.1	2.5→3.1	3.1	100	_	_	_	61	29	_	_	60	29	67	70
	A113	右	1830	44	8.1	56	22	54	19	1810	3.4	60	30	1830	3.4	54	20	1800	3.4	3.4g→3.9→4.8	3.4	110	60	30	3.4, 3.9	68	39	65	50	-	-	67	70
Phase 2 2020	A113e1	中(右)	1830	42	8.0	48	16	50	18	1850	3.1	50	21	1810	2.5	63	45	4140	4.1	3.1→4.1g,4.7	2.5, 4.1	100, 70	82	81	4.1	85	86	-	_	85	86	67	69
2020	A113e3	右	1830	41	8.2	45	13	-	-	_	_	47	18	1900	2.6	54	29	6130	4	2.6→4g→5.6	4	140	64	51	4	76	80	65	98	-	-	67	69
	A113fc20	右	1830	41	8.6	47	14	52	21	(1850)	4	56	27	(3460)	4	59	34	(7310)	4	2.5,4→5.6	2.5, 4	110	60	35	4	66	44	63	52	_	-	59	61
	A113fc40	左	1830	41	7.7	47	12	35**	5.6	1170	2.5	54	20	(1880)	3.9	54	20	(1880)	3.9	2.5 - 3.3,3.9	3.9	55	60	29	3.9	63	33	58	41	-	-	74	75

注 1) 破壊側はA面から見た場合の左右のせん断スパンで破壊した側を示す. そのうち, 括弧は破壊が中央であったがビデオ観察した側を示す.

g:三角ひび割れの重層化

注 2) 三角ひび割れはせん断区間に発生したものに限る.

注3) ε_s は三角ひび割れ,三角ブロック形成について,載荷点から支点側に150mm離れた位置におけるひずみを示す. いずれも破壊側または観察した側の値. ただし,括弧内はひずみゲージの欠損が生じたため,反対側の同等の位置におけるひずみゲージの値を参考に示す.

- 注 4) V_c の計算に用いる A_s に連続繊維シートの鋼材換算断面を含む.
- 注 5) それぞれの変位は各事象発生時の支間中央の変位を示す.
- 注 6) Phase 1における部分剥離の変位は、ビデオの音声による. ただし、括弧内数値は荷重-変位による.
- 注7) それぞれの発生位置は、起点となった曲げひび割れの位置で表す.

小さい三角ひび割れは,その後, 2.5の位置でも68kNで発生した. 大きい三角ひび割れは,その後,4.1の位置でも58 kNで発生した.

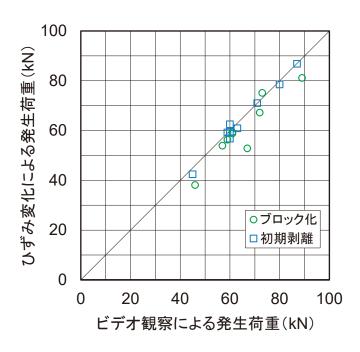


図-7.1.1 三角ブロック形成時荷重及び部分剥離発生荷重に関する ひずみ変化による結果とビデオ観察による結果の比較

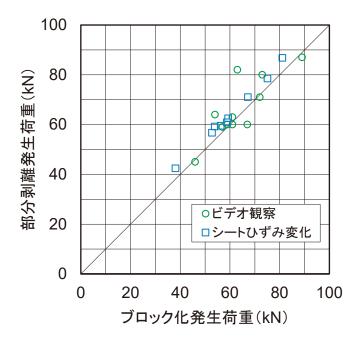
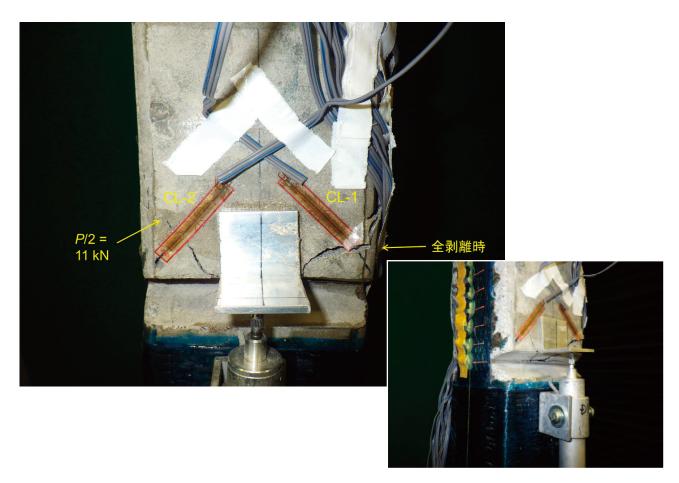


図-7.1.2 部分剥離発生荷重と三角ブロック形成時荷重の比較 (データは図-7.1.1 と同じ)

7.2 中間剥離の予兆となる三角ひび割れの発生

(1) せん断付着試験における斜めひび割れ

曲げひび割れ付近で、主鉄筋と連続繊維シートの間のコンクリートに発生する三角ひび割れの発生につい て考える. せん断付着試験においても、図-7.2.1 に示すとおり、ノッチ部付近に、これに類似する斜めひび 割れが発生していたので、まずせん断付着試験で見られた斜めひび割れについて整理しておく.表-7.2.1 に、 せん断付着試験におけるコンクリートのひび割れ発生時の作用応力度を示す. せん断付着試験では,まずノッ チ部にひび割れが発生した後、さらに荷重が増加すると、次に斜めひび割れが見られる. ノッチ部のひび割 れ発生荷重は、面積 A_n が $60 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の断面に引張力が軸方向に作用するとして計算した。斜めひび割 れ発生荷重は、図-7.2.2 に示すように、斜めひび割れと直交する方向に作用する最大引張主応力度 σιが、連 続繊維シートと鋼棒の間に純せん断が作用すると仮定したときにおけるせん断応力度 τ と等しいと考える. そのせん断応力度 τは、ひび割れ発生荷重時のシートに作用する張力を、連続繊維シートの付着面積(付着 長と幅)で除した値とした. 付着長はひずみ分布より読み取った値を示す. 同表の値に基づき, 図-7.2.3 に せん断付着試験におけるコンクリートのひび割れ発生時作用応力度 σ₁とコンクリートの引張強度 f_tの関係を 示す. 図中, ノッチ部のひび割れ発生時と斜めひび割れ発生時の作用応力度を, それぞれ記号を変えて示す. σ_1 と f_i は概ね1対1の関係にあり、ノッチ部のひび割れ、斜めひび割れともに、コンクリートの引張強度に 相当する主応力が作用して発生したと考えられる。斜めひび割れ発生時の作用応力度はコンクリートの引張 強度よりやや大きい傾向であった、鉄筋と連続繊維シートの間のせん断がかかる範囲は、側面から見えない 部分であり,ひび割れ発生の確認がやや遅れて(あるいは連続繊維シートのない部分のコンクリートにより, 実際にひび割れ発生がやや遅れて),ひび割れ発生時の荷重を高く評価してしまう可能性がある. また, 付着 長の精度が、15 mm 間隔で貼り付けたひずみゲージによるひずみ分布から読み取っているため、やや粗い傾 向にあると考えられる.



(a) C3 D1 側



(b) A1fc20 D1側

図-7.2.1 せん断付着試験で見られたコンクリートのひび割れ

表-7.2.1 せん断付着試験におけるコンクリートのひび割れ発生時作用応力度

	1	ッチ部	斜めて	ひび割れ	コンクリート	付着長
供試体	発生荷重 P/2 (kN)	ひび割れ応力度 P/A _n (N/mm²)	発生荷重 P/2 (kN)	ひび割れ応力度 <i>P/A_b</i> (N/mm ²)	引張強度 f _t (N/mm²)	(mm)
C1	6.6	2.43	8.4	2.80	2.7	60
C2	6.6	3.13	_	_	2.7	60
C3	6.6	2.43	11	3.67	2.7	60
C1e1	7.2	2.62	7.25	3.22	2.6	45
C1e3	6.7	2.47	11.6	2.58	2.6	90
A1	6.1	2.21	_	_	2.6	45
A1e1	6.1	2.32	12.5	2.78	2.6	90
A1e3	7.4	2.40	_	_	2.6	120
A1fc20	5.0	1.84	7	2.33	2	60
A1fc40	6.0	2.07	8.5	3.78	3.1	45

- 注 1) ノッチ部のひび割れの発生荷重は変位、ひずみゲージ及びビデオ撮影の結果による.
 - 2) 斜めひび割れの発生荷重は斜めひび割れ監視用ひずみゲージの結果による.
 - 3) 付着長は連続繊維シートの実測ひずみ分布からひずみ変化の区間を読み取った.

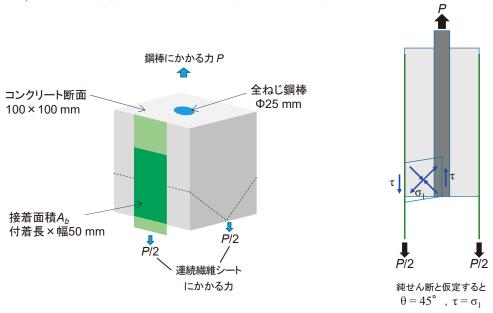


図-7.2.2 せん断付着試験におけるコンクリートのひび割れ発生時作用応力度の考え方(仮定)

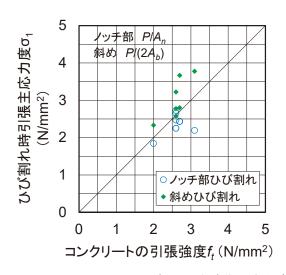


図-7.2.3 せん断付着試験におけるコンクリートのひび割れ発生時作用応力度とコンクリートの引張強度

(2) はり試験における部分剥離の起点となる三角ひび割れ

表-7.2.2 に、はり試験におけるコンクリートの三角ひび割れ発生時の付着応力度 τ_b 及び三角ひび割れの起点となった曲げひび割れ位置における連続繊維シートの実測ひずみを示す。付着応力度 τ_b の算出に用いた連続繊維シートの弾性係数は、6 章の検討結果を踏まえて、供試体 C113e1、C113e3、A113、A113e1、A113e3 については再試験結果の $E_f(D)$ 、それ以外の供試体は $0.8\,E_f$ とした(以下, $E_f(D)$ を含め $0.8\,E_f$ と表す)。ここで対象とした三角ひび割れは、せん断スパン内で見られたものであり、前掲の表-7.1.2 に示したものである。そのうち、初期に三角ブロックが形成された箇所の三角ひび割れを対象とした。図-7.2.4 に示すように、ここでは、はり試験の場合もせん断付着試験と同様に、対象位置付近の主鉄筋が降伏した後に、曲げひび割れ近傍の連続繊維シートと主鉄筋の間に純せん断に近い作用が生じ得ると仮定する。ただし、せん断付着試験では2面に連続繊維シートを貼り付けて、鋼棒に対して対称となるため、連続繊維シートと鋼棒の間に斜めひび割れが見られたが、はりでは、場合によっては主鉄筋の上方まで三角ひび割れが生じており、RC 部材の上方部分と連続繊維シートの間に純せん断に近い作用が生じていたと考えられる。

せん断付着試験と異なり、曲げひび割れを主鉄筋が貫通しているが、純曲げ区間からこの位置まで降伏域が達した後は、主鉄筋のひずみが急増するため、せん断付着試験に近い状態になり得ると考えられる.表-7.2.2 には、主鉄筋が降伏するときに作用しているであろう連続繊維シートのひずみを、平面保持が成立している前提で算定して、鉄筋降伏時ひずみとして示した。また、三角ひび割れ時の連続繊維シートのひずみは、その起点となった曲げひび割れ位置に生じていたひずみとし、具体には、その曲げひび割れ位置周辺の2点の連続繊維シートの実測ひずみを平均した値とした。ただし、供試体C113e3、A113e1、A113e3 の三角ひび割れ時の連続繊維シートのひずみは、パイ型変位計による平均ひずみを用いた。その際、6章と同様に、高さ補正³、位置補正を行って求めた値を用いた。多くの供試体では、三角ひび割れ時の連続繊維シートのひずみは鉄筋降伏時における連続繊維シートのひずみよりもかなり大きく、鉄筋が降伏しても直ちに三角ひび割れが発生していない。連続繊維シートの母数を3層とした供試体C313は、三角ひび割れ時ひずみが鉄筋降伏時ひずみと同等であり、曲げひび割れ位置の鉄筋が降伏した直後に三角ひび割れが発生したことが分かる。2層とした供試体C213も、C313ほどではないが、C113よりは三角ひび割れ時ひずみが鉄筋降伏時ひずみに近い傾向を示した。事例は少ないが、連続繊維シートの剛性が高いほど、三角ひび割れ時ひずみが鉄筋降伏時ひずみに近い傾向を示した。事例は少ないが、連続繊維シートの剛性が高いほど、三角ひび割れ時ひずみが鉄筋降伏時ひずみに近くなり、鉄筋降伏に敏感になる可能性があると推察される。

表-7.2.2 に基づき, 図-7.2.5 に, はり試験におけるコンクリートの三角ひび割れ発生時作用応力度(図-7.2.4(b) の σ_l) とコンクリートの引張強度の関係を示す。 せん断付着試験に比べてばらつきがあるものの,供試体 All3el 及び All3e3 を除くと,はり試験の結果も,せん断付着試験と概ね同様に σ_l の推定で三角ひび割れ発生を次式に基づき評価できる可能性があると考えられる.

$$\sigma_1 = T_f/(b_f L) = A_f E_f \varepsilon_{f,cr} / (b_f L) = t_f E_f \varepsilon_{f,cr} / L \tag{7.2.1}$$

すなわち,三角ひび割れ発生時の連続繊維シートのひずみ ε_{fc}は,次式で表すことができると考えられる.

$$\varepsilon_{f,cr} = f_t L/(t_f E_f) \tag{7.2.2}$$

材料引張試験再試験の結果を考慮して計算しても、供試体 A113e1 及び A113e3 の σ₁ は、他に比べてなお小さい傾向であった。これについては、7.4 節でさらに検討する。

部分剥離をもたらす三角ひび割れが主鉄筋の降伏や曲げひび割れ位置における連続繊維シートの張力に依存するのであれば、すべての供試体において、載荷点直下がその起点となるはずであるが、供試体 C116 を除き、載荷点から $0.3d\sim1.3d$ (d:RC の有効高さ、起点となる曲げひび割れまでの距離)離れた位置で発生する場合が多く見られた。純曲げ区間でも、三角ひび割れは発生するが、部分剥離の起点にはなりにくく (7.6 節)、載荷点直下の三角ひび割れも、概ね同様の理由で部分剥離の起点になりにくい傾向にあると考えられる。

表-7.2.2 はり試験におけるコンクリートの三角ひび割れ発生時付着応力度

	鉄	筋					j	車続繊	維シート					コンク
供試体	降伏 ひず み	中立軸らの離	中立軸らの距離	鉄降けず	弾性 係数	厚さ	断面積	付着長	対象曲 げひび 割れ位 置	三 り 割 ず 動 重	三角ひ び割れ 時ひず み	張力	付着応力度	リート 引張強 度
	ϵ_{sy}	<i>ys</i>	Уf	€f,y	E_f	t f	A_f	L	X	P_{scr}	€f,cr	T_f	$\tau_b (=\sigma_1)$	f_t
	×10 ⁻⁶	mm	mm	×10 ⁻⁶	N/mm ²	mm	mm ²	mm	×100mm	kN	×10 ⁻⁶	kN	N/mm ²	N/mm ²
C116	1710	142	182	2190	201600	0.111	22.2	60	-2.5	68	5920	26.5	2.21	2.7
C113L	1760	93	133	2520	201600	0.111	22.2	60	3.8	38	5530	24.7	2.06	2.7
C113	1760	152	192	2220	201600	0.111	22.2	60	3.3	54	5450	24.4	2.03	2.7
C213	1760	149	189	2230	204000	0.222	44.4	60	3.9	64	3540	32.0	2.67	2.7
C313	1760	146	186	2240	205600	0.333	66.6	60	5.3	67	2220	30.4	2.54	2.7
C113e1	1830	152	192	2310	195000	0.111	22.2	45	-4.0	61	6010	26.0	2.89	2.6
C113e3	1830	152	192	2310	195000	0.111	22.2	90	-3.1	57	8800*	38.1	2.12	2.6
A113	1830	152	192	2310	103000	0.193	38.0	45	3.4	54	5280	21.0	2.37	2.6
A113e1	1830	152	192	2310	86500	0.193	38.0	90	4.1	58	8700*	29.1	1.64	2.6
A113e3	1830	152	192	2310	85500	0.193	38.0	120	4.0	54	10420*	34.4	1.45	2.6
A113fc20	1830	149	189	2320	105600	0.193	38.0	60	4.0	52	5000	20.4	1.73	2.0
A113fc40	1830	154	194	2310	105600	0.193	38.0	45	-3.9	54	6240	25.4	2.87	3.1

- 注 1) 対象曲げひび割れ位置は支間中央からの距離を示す. A 面から見て右側をプラスで表す.
 - 2) 三角ひび割れ時ひずみは、三角ひび割れが発生した荷重において、対象となる曲げひび割れ位置に作用していた 連続繊維シートの実測ひずみを示す. 近傍2点の平均値を用いた.
 - 3) $y_f = y_s + 40$, $\varepsilon_{f,y} = \varepsilon_{sy} y_f/y_s$, $T_f = \varepsilon_{f,cr} E_f A_f$, $\tau_b = T_f/b_f L (= \sigma_1)$, ただし, b_f : 連続繊維シートの幅

 - 4) $x, P_{scr}, \varepsilon_{fcr}$ ははり試験結果を示す. 5) 付着長はせん断付着試験の結果に基づく.
 - 6) 全供試体の E_f は再試験結果または $0.8E_f$ とした。7) 厚さ t_f = 層数 $\times 1$ 層当り設計厚さ。
 - 8) 数値に添付した「*」は、パイ型変位計による平均ひずみを高さ補正、位置補正を行って求めた値を示す.

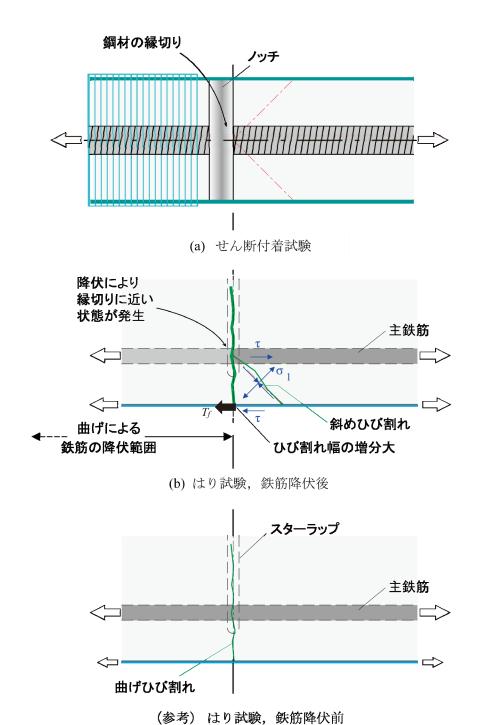
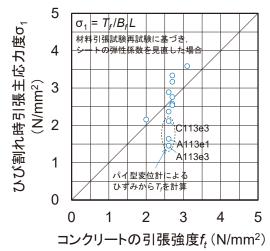
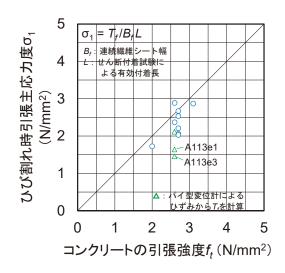


図-7.2.4 はり試験におけるコンクリートの斜めひび割れ(三角ひび割れ)発生時の 作用応力度の考え方(仮定)



(a) 再試験した5体のみ,連続繊維シートの弾性係数を見直した場合



(b) 全供試体の E_f を再試験結果,または $0.8E_f$ とした場合

注)供試体 C113e3, A113e1, A113e3 の σ_l 計算時の連続繊維シートのひずみは、パイ型変位計による平均ひずみを高さ補正、位置補正を行って求めた値を用いた.

図-7.2.5 はり試験におけるコンクリートの三角ひび割れ発生時作用応力度と コンクリートの引張強度の関係

(3) はり試験における付着長

前項の検討では、部分剥離の起点となる曲げひび割れと三角ひび割れの間隔(発生時における付着長に相当すると想定した)が、せん断付着試験で得られた付着長と同じであると仮定した。しかし、少なくとも主鉄筋の降伏前の状態では、曲げひび割れ間で付着界面に生じるせん断応力度分布の中に、極性が逆転する点(ここではゼロポイント m という、後で示す図-7.2.8(a)に概念図を添付する)が存在する。軸引張の場合 ^{3),4)}、片方のひび割れ位置における連続繊維シートの張力に対して寄与する付着の範囲は、そのひび割れからゼロポイント m までの間に限られると考えられる。軸引張試験の FEM 解析では(他の文献も)、ゼロポイント m は、ひび割れ間の概ね中央に位置していた。この点について、はり試験でも同様であるかを確かめる。

図-7.2.6、表-7.2.3 に、はり試験の各供試体において、三角ブロック形成に関わった曲げひび割れ付近のひび割れ間隔を示す。また、この曲げひび割れの両隣の曲げひび割れとの間隔も表-7.2.3 に示す。曲げひび割れと三角ひび割れの発生位置の間隔が、曲げひび割れ間隔の 1/2 よりも大きいものが見られた。なかには、供試体 C113e1、A113e1 などのように、曲げひび割れと三角ひび割れの発生位置の間隔が、曲げひび割れ間隔よりも大きいものが見られた。

曲げひび割れ間の連続繊維シートとコンクリートの界面のせん断応力度分布より(例えば,後掲図-7.2.8(a)),両ひび割れ位置の連続繊維シートに引張力が作用して、その引張力が曲げひび割れ間に囲まれたコンクリート下縁に両側から作用することが確認できる。図-7.2.4(b)に示したとおり、主鉄筋が載荷点に近い側から部分的に降伏すると、降伏した側の曲げひび割れ位置の連続繊維シートに作用する引張力が他方のまだ鉄筋降伏していない側よりもかなり大きくなると考えられる。後掲図-7.2.8(a-2)の例では、隣り合う曲げひび割れ位置で、鉄筋降伏後に、連続繊維シートのひずみ差が大きくなり、載荷点側の曲げひび割れ位置の方が 1.5 倍に増加した。その後も 2 倍程度に増加しながら、ひずみ分布が変化した。これらの影響から、はりのせん断スパンにおけるゼロポイント m は、曲げひび割れ間の 1/2 よりも支点側になる傾向がある。以下の検討では、その位置を曲げひび割れ間の 3/4 の位置(1/2 より支点寄り)であると仮定する。

仮に、付着長が三角ひび割れ発生後もゼロポイント m に依存するとして、支点側隣の曲げひび割れまでの間隔 L_{cr} の 1/2 かせん断付着試験から得られた付着長 L の小さい方の値を付着長とした場合、図-7.2.5 は図-7.2.7(a)のようになる。図-7.2.7(a)では、図-7.2.5 のように三角ひび割れ発生時の引張応力度 σ_1 とコンクリートの引張強度 f_i が概ね一致する傾向が、かなり弱い結果となった。同様に、付着長を L_{cr} の 3/4 かL の小さい方の値とした場合は、図-7.2.7(b)に示す結果となり、 L_{cr} の 1/2 とするよりは σ_1 と f_i の関係が改善された。

ところで、はり試験の結果をみると、せん断スパン内のゼロポイント m の位置が、三角ひび割れの伸展とともに変化する場合があった。図-7.2.8 に、供試体 A113 を例に、部分剥離の起点となった曲げひび割れ付近のひずみ分布と、それに基づく界面のせん断応力度分布を、供試体側面の写真と対比して示す。図中には、側面で確認した曲げひび割れの位置を赤破線で示す。また、三角ひび割れの発生位置(支点側先端)を赤三角の記号で示す。図-7.2.8(a)より、部分剥離の起点となった三角ひび割れの発生前は、曲げひび割れの位置が、せん断応力度が負から正に変化する際の零となる位置、ゼロポイント n と概ね一致していた(他方のせん断スパンでは正負が逆)。ただし、曲げひび割れは必ずしも幅方向に真っ直ぐでないため、側面で確認した曲げひび割れの位置と連続繊維シートのひずみゲージから推定される位置との間に、若干の差が生じ得る場合が

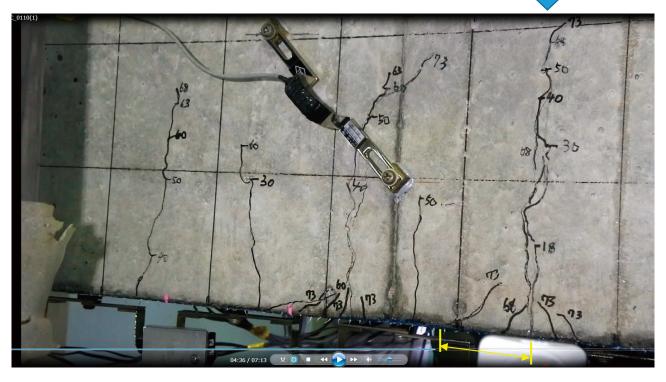
ある. そして、せん断応力度が正から負に変化する際の零となる位置がゼロポイント m である. 同図(b)より、まず CL+360mm で小さい三角ひび割れ a が発生すると、CL+390mm の曲げひび割れ位置で正側のせん断応力度が発生しており、三角ひび割れ発生後に、CL+390mm の曲げひび割れが一旦閉じる動きをしていた可能性がある. 同図(d)より、三角ひび割れ a の近くにさらに CL+385mm の三角ひび割れ b が発生した. これらの複数の三角ひび割れとともに、同図(c)に示すように CL+345~395mm の曲げひび割れ間のひずみが下に凸の分布となっており、連続繊維シートが下方にやや押し出されるような状態となっていた可能性がある. その際、計算上では、広い範囲で正のせん断応力度となっていた. 同図(d)より、その後、三角ひび割れ b の位置がゼロポイント n に変化していた. また、三角ひび割れ c は、CL+345mm の曲げひび割れまで、CL+395mm の曲げひび割れを跨いで伸展した. このことは、三角ひび割れ c から載荷点側に、CL+395mm の曲げひび割れを跨いで伸展した. このことは、三角ひび割れ c から載荷点側に、CL+395mm の曲げひび割れを跨いで伸展した. このことは、三角ひび割れ c から載荷点側に、CL+395mm の曲がひび割れを跨いだ範囲で付着に抵抗していた可能性があると考えられる. その範囲は、せん断付着試験から得られた付着長と同等以上であった. 同図(e)より、三角ひび割れ c から支点側に向けて部分剥離 p が発生した.

曲げひび割れを跨いで三角ひび割れが伸展したり、曲げひび割れがゼロポイントnでなくなったりしたのは、新たに発生する三角ひび割れとともに、一部の曲げひび割れが閉じるような挙動をしていたと推察される。これに関して、参考に、図-7.2.9 に供試体 A113 を例に、曲げひび割れ位置である CL+345mm、CL+395mm におけるせん断応力度の変化を示す。また、その間、CL+360mmの位置に生じた三角ひび割れ b についても同様の図を示す。横軸は、それぞれ 2 点のひずみデータからせん断応力度を算出して、さらに位置について線形補間した。ひび割れ位置と完全に一致しているわけではないと思われ、曲げひび割れ後もゼロとはならなかった。その CL+345~395mm の間に三角ひび割れが発生するとともに、せん断応力度に大きい変化が生じていた。曲げひび割れ位置であっても、常にゼロポイントnとは限らず、周囲のひび割れ発生の影響を受けて、せん断応力度が増減する傾向が認められた。

以上より、付着長が曲げひび割れ間隔の 1/2 よりも大きい場合における付着長の範囲におけるコンクリートや連続繊維シートの挙動は一様でなく、複数の三角ひび割れが発生するとなお複雑になる傾向がある. 少なくとも、はりの曲げ試験のように、主鉄筋の降伏域と未降伏域の境界が明確に生じる場合に、連続繊維シートの付着の定着部としてひび割れを跨いで抵抗することがあり得ると考えられる.

報告書(II) 4)に示したような RC の軸引張試験では、コンクリートの複数のひび割れ位置で同時に降伏し始めること、降伏後に新たなひび割れが発生しても、その位置でも直ちに軸方向鉄筋が降伏することから、はりの曲げ試験やせん断付着試験のように、片方に連続繊維シートを引っ張る状態にはなり得ないと考えられる。三角ひび割れで形成される三角ブロックの大きさがせん断付着試験より大きくなっていたのは、せん断付着試験では鋼棒を挟んで2面対称で連続繊維シートが配置されているため、かぶりを超えた範囲で同一方向の引張主応力が生じないのに対して、はり試験では、はり断面の釣り合いの下で、付着長に応じて、かぶり内だけでなく主鉄筋位置を超える領域でも概ね同じ方向の引張主応力が起こり得るためと考えられる。この主鉄筋位置を超える領域で概ね同じ方向(斜め約 45°)の引張主応力が起こる現象は、5章の FEM の結果、例えば図-5.2.7 などにおいても認められた。



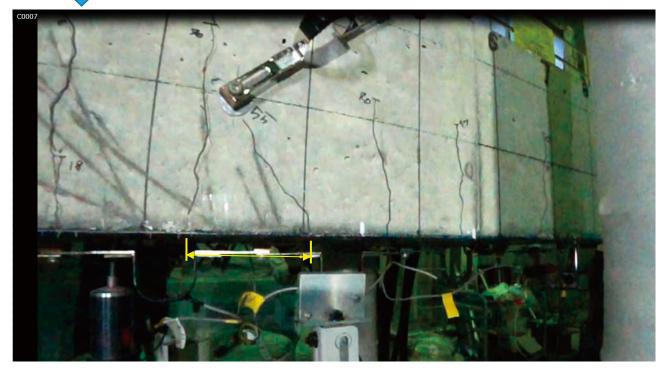


(a) 供試体 C116, P = 80.7 kN, $\delta = 30.5$ mm, $L_{ex} = 60$ mm

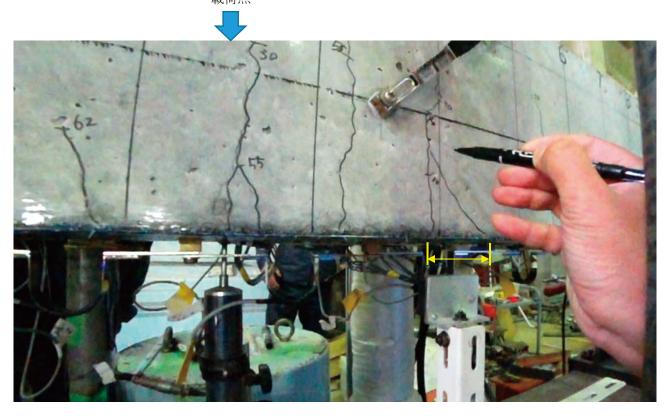
載荷点 注)この図における P, 8 は、撮影時の荷重と支間中央変位を示す、以下、同様。 33 38 85 38 20 38 12 20 38 12 20

(b) 供試体 C113L, P=43 kN, $\delta=40$ mm, $L_{ex}=60$ mm 図-7.2.6 対象とした三角ひび割れ先端と曲げひび割れの距離 L_{ex}

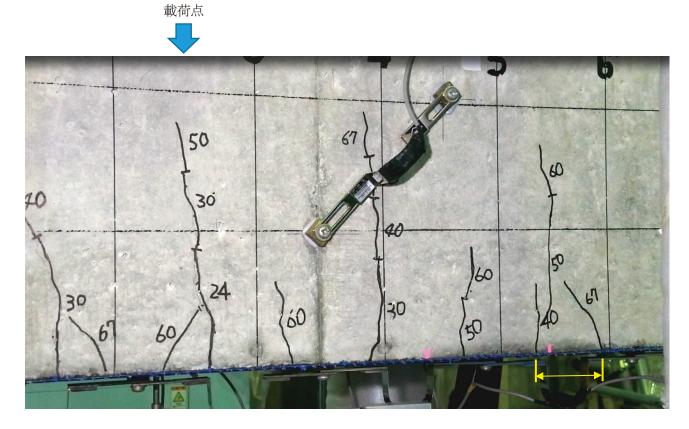




(c) 供試体 C113, P = 57 kN, $\delta = 21.6$ mm, $L_{ex} = 80$ mm 載荷点



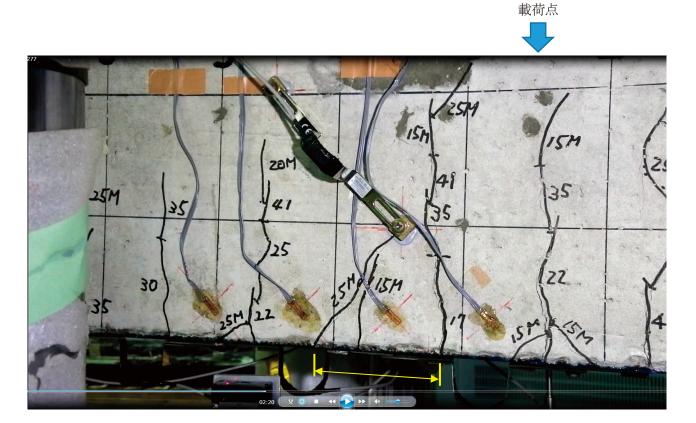
(d) 供試体 C213, P=72 kN, $\delta=21$ mm, $L_{ex}=70$ mm 図-7.2.6 対象とした三角ひび割れ先端と曲げひび割れの距離 L_{ex} (続き)



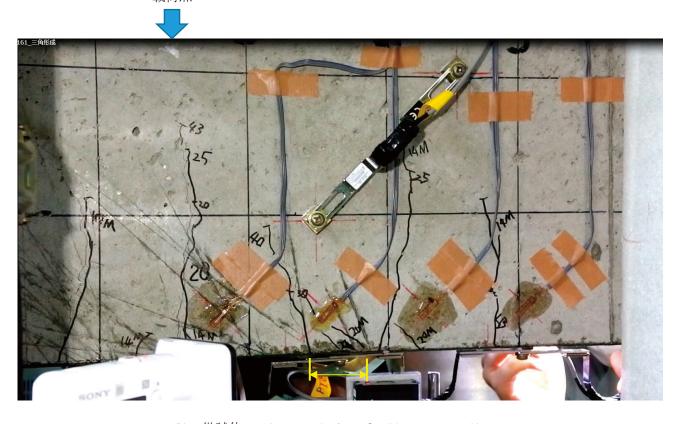
(e) 供試体 C313, P = 67 kN, $\delta = 13$ mm, $L_{ex} = 60$ mm



(f) 供試体 C113e1, P=61.8 kN, $\delta=30$ mm, $L_{ex}=110$ mm 図-7.2.6 対象とした三角ひび割れ先端と曲げひび割れの距離 L_{ex} (続き)

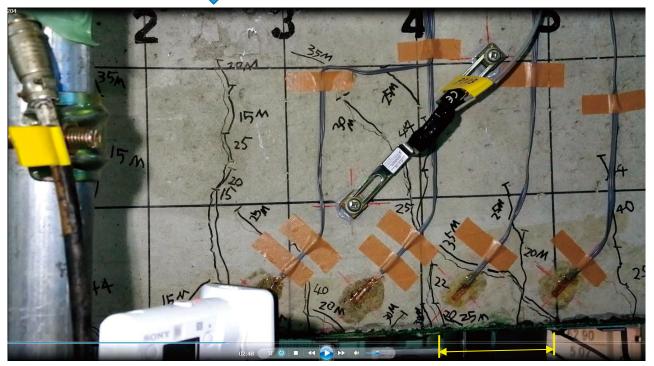


(g) 供試体 C113e3, P = 60.3 kN, $\delta = 28.5$ mm, $L_{ex} = 100$ mm 載荷点

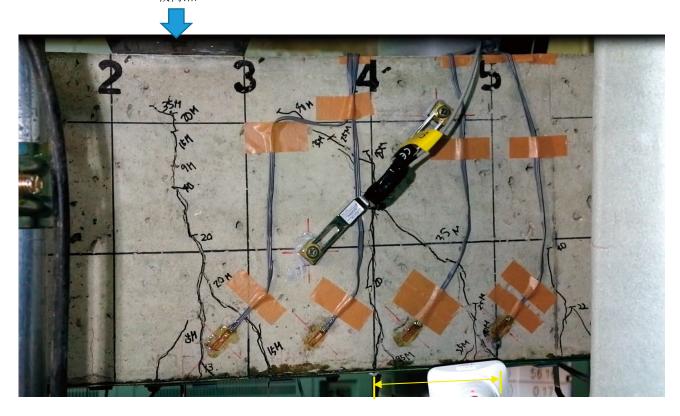


(h) 供試体 A113, P=54.5 kN, $\delta=20$ mm, $L_{ex}=40$ mm 図-7.2.6 対象とした三角ひび割れ先端と曲げひび割れの距離 L_{ex} (続き)





(i) 供試体 A113e1, P=63 kN, $\delta=45$ mm, $L_{ex}=90$ mm 載荷点

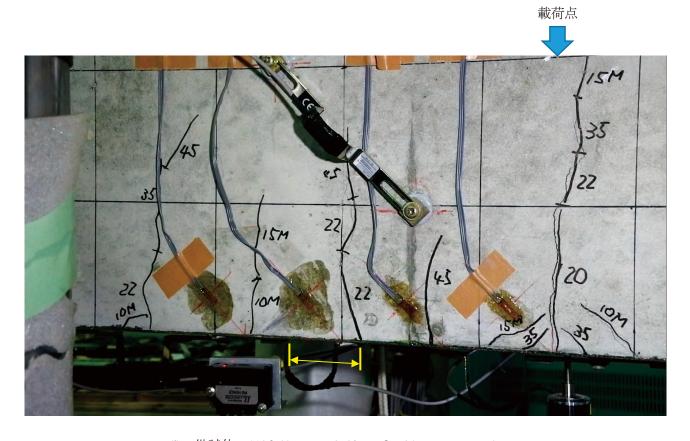


(j) 供試体 A113e3, P=56 kN, $\delta=40$ mm, $L_{ex}=105$ mm 図-7.2.6 対象とした三角ひび割れ先端と曲げひび割れの距離 L_{ex} (続き)





(k) 供試体 A113fc20,P = 59 kN, $\delta = 33.5$ mm, $L_{ex} = 105$ mm



(l) 供試体 A113fc40, P=53.6 kN, $\delta=20$ mm, $L_{ex}=50$ mm 図-7.2.6 対象とした三角ひび割れ先端と曲げひび割れの距離 L_{ex} (続き)

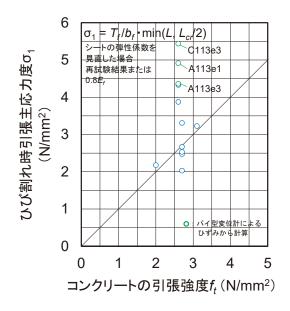
表-7.2.3 はり試験における三角ブロック形成に関わった曲げひび割れ付近のひび割れ間隔

(単位:mm)

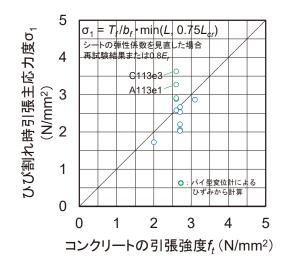
	曲げひび割れ位置 (×100)		曲げひび割れ間隔		支点側				
供試体	載荷点側	三角ひび割 れの起点と なった曲げ ひび割れ	支点側	載荷点側	支点側	世げひび 割れ間隔 ×1/2	付着長 <i>L</i>	$\min(L, L_{cr}/2)$	はり試験 実測値 <i>Lex</i>
C116	-1.4	-2.5	-3.3	110	80	40	60	40	60
C113L	3.3	3.8	4.8	50	100	50	60	50	60
C113	2.55	3.3	4.7	75	140	70	60	60	80
C213	3.2	3.9	5.6	70	170	85	60	60	70
C313	4.7	5.3	7.1	60	180	90	60	60	60
C113e1	-3.4	-4	-4.6	60	60	30	45	30	110
C113e3	-2.4	-3.1	-3.8	70	70	35	90	35	100
A113	2.6	3.4	3.95	80	55	28	45	28	40
A113e1	3.1	4.1	4.7	100	60	30	90	30	90
A113e3	3.2	4	4.8	80	80	40	120	40	105
A113fc20	3.05	4	4.95	95	95	47.5	60	47.5	105
A113fc40	-3.35	-3.9	-4.7	55	80	40	45	40	50
平均値	_	_	_	75.4	97.5	_	_	_	_

L: せん断付着試験のひずみ分布から得られた付着長

 L_{ex} : はり試験から得られた三角ひび割れの起点となった曲げひび割れと三角ひび割れ発生位置の間隔

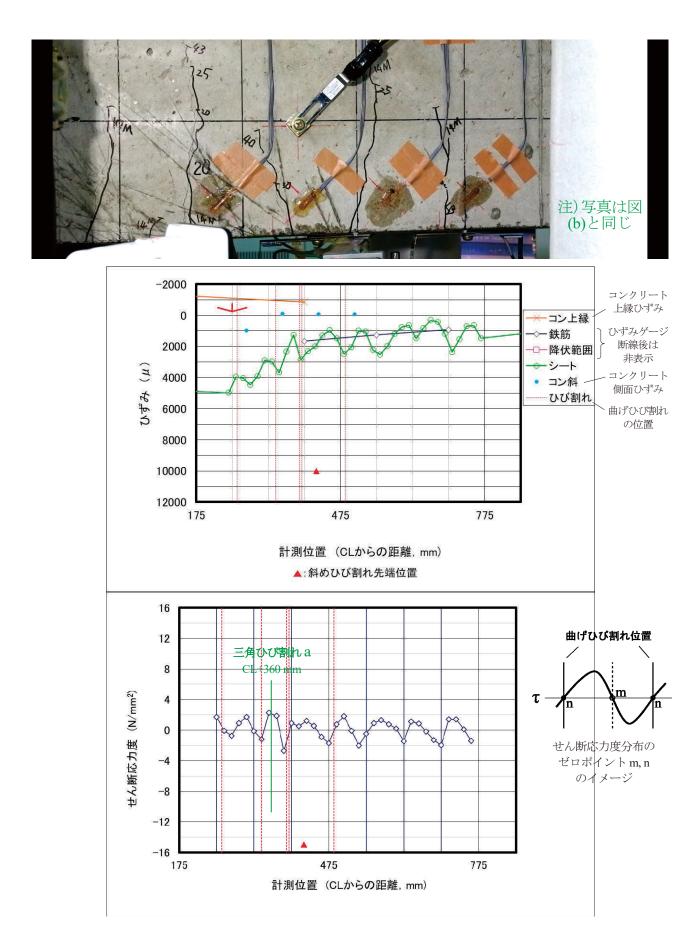


(a) 図-7.2.5(b)の L を支点側曲げひび割れ間隔の 1/2 とした場合



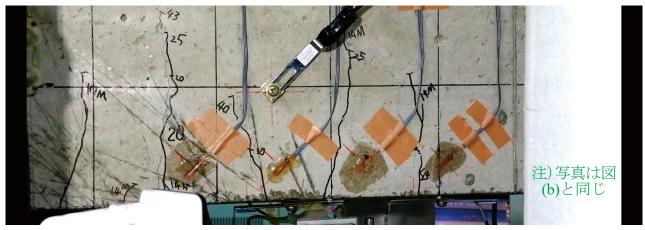
(b) 図-7.2.5(b)の L を支点側曲げひび割れ間隔の 3/4 とした場合

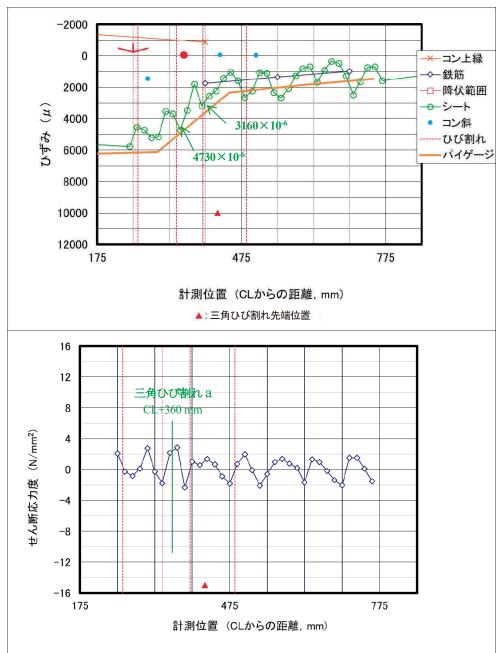
図-7.2.7 はり試験の部分剥離の起点となった三角ひび割れ発生がゼロポイントの影響を受けると仮定した場合における、コンクリートの三角ひび割れ発生時作用応力度とコンクリートの引張強度の関係



(a) ID:7441, 48 kN $(P_{max} = 49.7 \text{ kN})$, 14.2 mm ※ひび割れ a 発生前

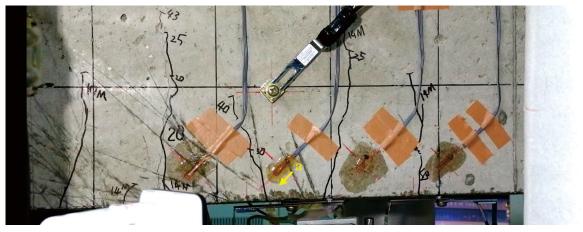
図-7.2.8 三角ひび害い過程(上:ひび害い、中:連続機能シートひずみ分布、下:せん断応力度分布)、A113

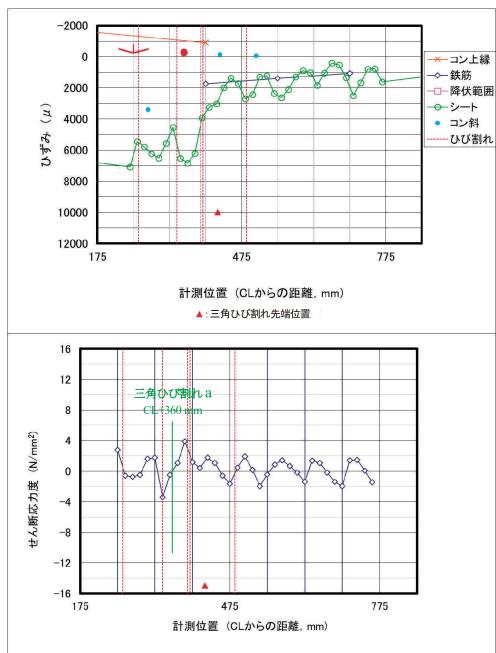




(a-2) ID: 7586, 51 kN (P_{max} = 51.3 kN), 16.1 mm ※ひび割れ a 発生前

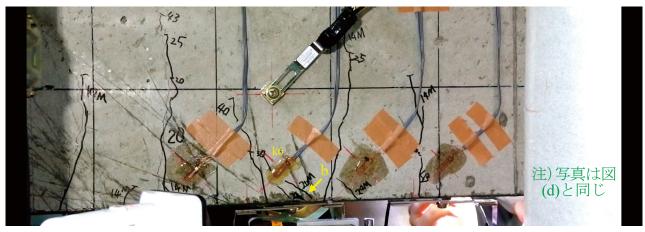
図-7.2.8 三角ひび害い過程(上:ひび害い、中:連続機能シートひずみ分布、下:せん断応力度分布)、A113(続き)

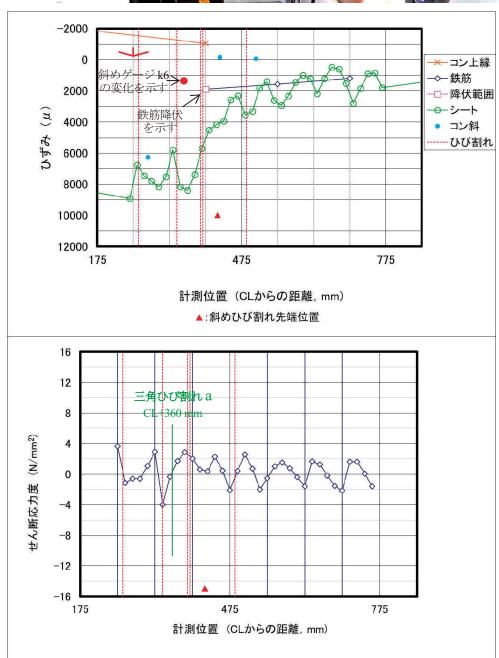




(b) ID:8921, 51 kN $(P_{max} = 54.8 \text{ kN})$, 20.0 mm

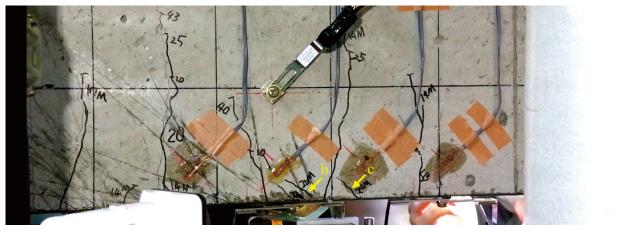
図-7.2.8 三角ひび害い過程(上:ひび害い、中:連続機能シートひずみ分布、下:せん断応力度分布)、A113(続き)

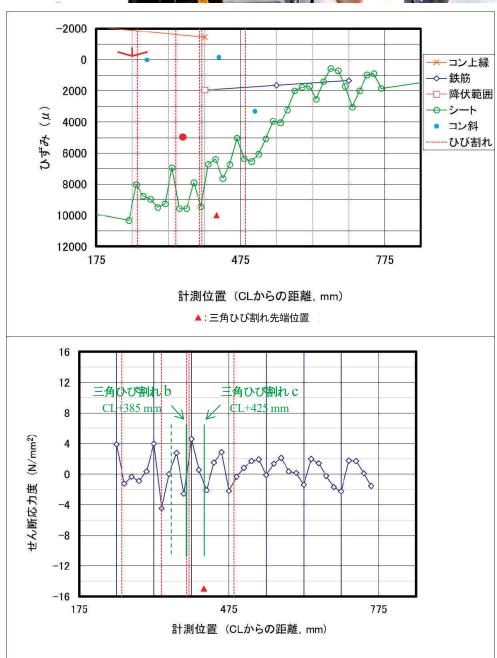




(c) ID:9650, 57 kN (P_{max} = 57.8 kN), 24.1 mm ※ひび割れb発生前

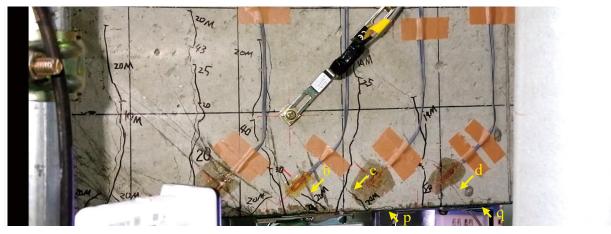
図-7.2.8 三角ひび害い過程(上:ひび害い、中:連続機能シートひずみ分布、下:せん断応力度分布)、A113(続き)

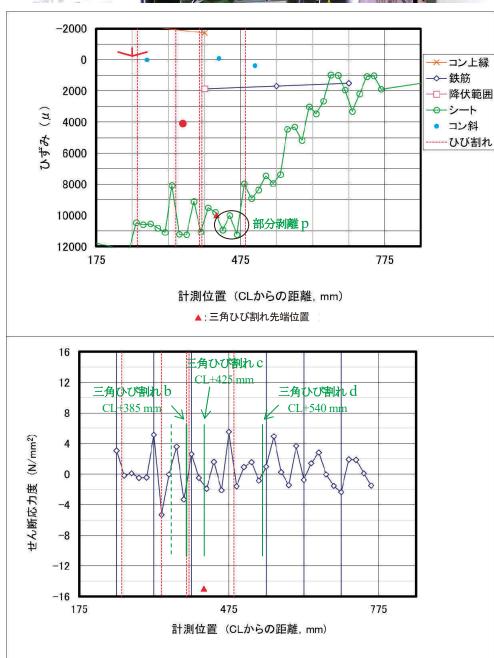




(d) ID:10101, 61 kN ($P_{max} = 61.3 \text{ kN}$), 29.4 mm

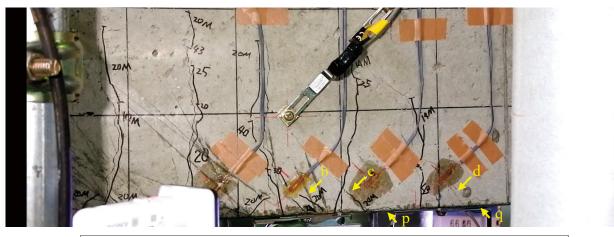
図-7.2.8 三角ひび害い過程(上:ひび害い、中:連続繊維シートひずみ分布、下:せん断応力度分布)、A113(続き)

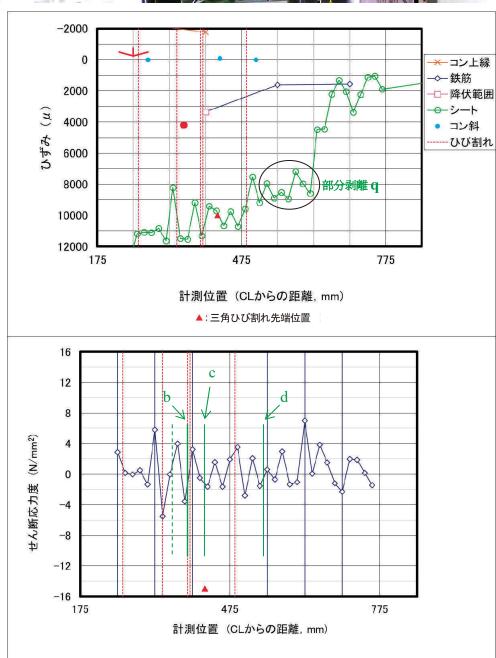




(e) ID:10901, 66 kN ($P_{max} = 65.9 \text{ kN}$), 37.5 mm

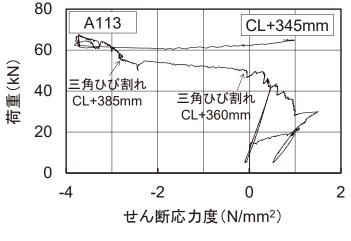
図-7.2.8 三角ひび害い過程(上:ひび害い、中:連続繊維シートひずみ分布、下:せん断応力度分布)、A113(続き)



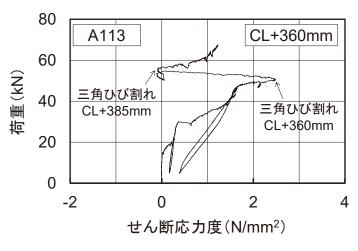


(f) ID:11181, 65 kN $(P_{max} = 67.6 \text{ kN})$, 40.0 mm

図-7.2.8 三角ひび害い過程(上:ひび害い、中:連続繊維シートひずみ分布、下:せん断応力度分布)、A113(続き)



(a) CL+345 mm



(b) CL+360 mm

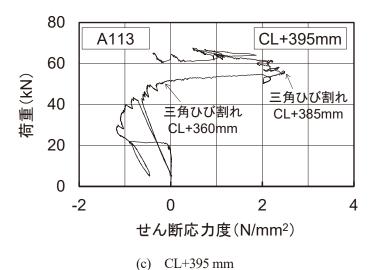


図-7.2.9 CL+345~395 mm におけるせん断応力度の変化 (A113) (せん断応力度はいずれも線形補間した)

7.3 各因子が中間剥離の過程に及ぼす影響

図-7.3.1 に,まず全供試体について,部分剥離近傍の鉄筋が降伏した荷重(図中の近傍降伏),三角ひび割れ発生荷重,三角ブロック発生荷重,部分剥離発生荷重,最大荷重を純曲げ区間の鉄筋降伏荷重に対する比で示す.同様に,連続繊維シートを主鉄筋換算して計算した主鉄筋比によるコンクリートのせん断ひび割れ発生荷重の計算値 $2V_{c+f}$ も参考として示す.例えば C313 や A113fc20 など,荷重が $2V_{c+f}$ を超えてから発生している事象は,本試験ではせん断スパンにせん断補強鉄筋を設けたことで確認できたことを表していると考えられる.

(1) 主鉄筋量, 桁高さの影響

主鉄筋量が異なる C116 と C113 について、部分剥離発生荷重の純曲げ区間降伏荷重に対する比は、いずれも 1.4 程度で、本試験の範囲では顕著な差が見られなかった。一方、桁高さが異なる C113L の部分剥離発生荷重の純曲げ区間降伏荷重に対する比は 1.6 程度で、C113 の 1.4 程度に比べて大きい値であった。

(2) コンクリート圧縮強度の影響

図-7.3.1 から C113 とコンクリートの圧縮強度が異なる C113fc20, C113fc40 の結果を抜粋して, 図-7.3.2 に示す. 本試験の範囲では, 部分剥離発生荷重に関して, コンクリート圧縮強度による顕著な差が見られなかった.

(3) 繊維の影響

図-7.3.2 には、それぞれ標準の含浸樹脂を用いた、炭素繊維シートの供試体 C113 とアラミド繊維シートの供試体 A113 の結果も示す。炭素繊維シートの実コンクリート圧縮強度の方がアラミド繊維シートの場合よりも若干大きかったが、純曲げ区間の鉄筋降伏後から部分剥離近傍の鉄筋降伏までの荷重の差はアラミド繊維シートの場合の方が大きい傾向が見られた。また、それに応じて、三角ひび割れ発生や三角ブロック形成までの荷重も炭素繊維シートの場合に比べて大きい傾向が見られた。しかし、部分剥離の発生は、炭素繊維シート、アラミド繊維シートともに同程度の荷重で見られた。

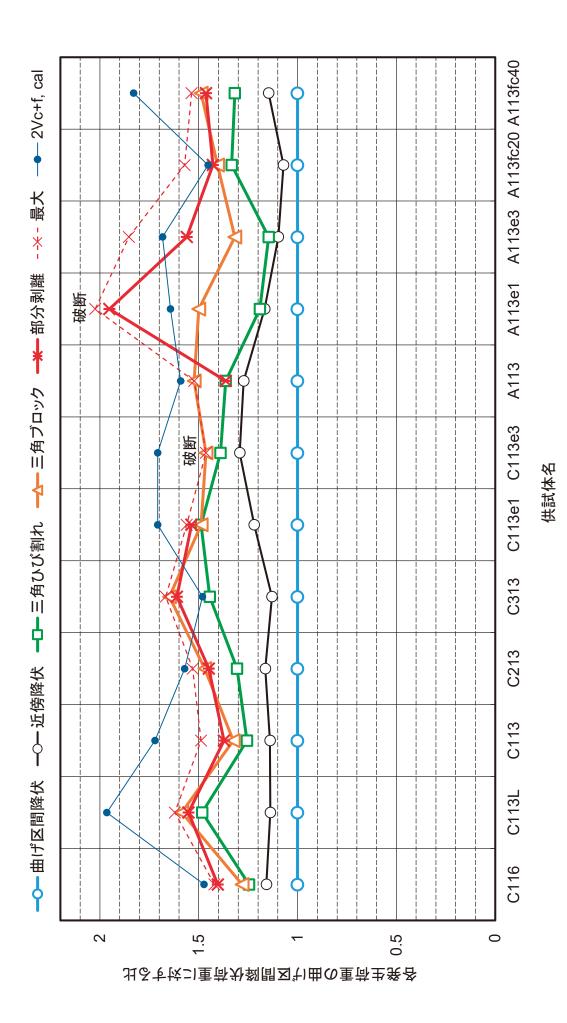


図-7.3.1 中間剥離の過程における各荷重及び最大荷重(純曲げ区間の鉄筋降伏荷重に対する比で表す)

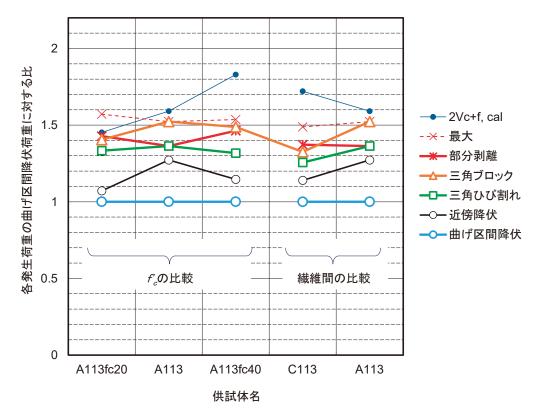


図-7.3.2 中間剥離の過程に及ぼすコンクリート強度の影響及び繊維の影響 (純曲げ区間の鉄筋降伏荷重に対する比で表す, 図-7.3.1 から抜粋)

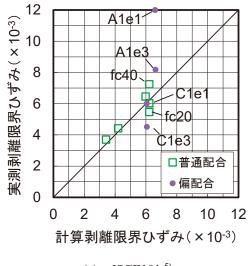
7.4 中間剥離と含浸樹脂の物性

(1) せん断付着試験の結果

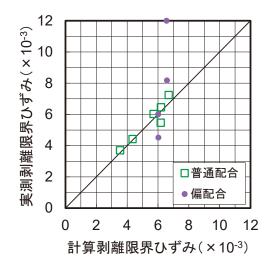
前掲の表-7.1.1 には、想定される中間剥離の各過程に及ぼす含浸樹脂の物性の影響も併せて示した. はり試験では、炭素繊維シートを用いた C113, C113e1, C113e3 において、またアラミド繊維シートを用いた A113, A113e1, A113e3 において、それぞれ含浸樹脂の物性を変えており、e1、e3 の順に弾性係数、せん断弾性係数が低下する樹脂を用いた. これら 6 体の中では、C113 のみ、コンクリートの強度が他に比べてやや高いものであった. 含浸樹脂の物性が低下するほど、主鉄筋の降伏荷重及び三角ひび割れの発生荷重がやや低下する傾向が見られた. 一方、部分剥離の発生荷重は、含浸樹脂の物性が C113e1 の場合に大きくなる傾向が見られたが、C113e3 は部分剥離が生じる前に炭素繊維シートが破断し、A113e3 は部分剥離の発生荷重が A113e1よりも低下した.

含浸樹脂の物性が連続繊維シートの中間剥離に影響を及ぼすことは、同様の材料を用いて行ったせん断付着試験でも認められた(A113e1 と A1e1 の 1 種類のみ破壊形態の違いあり)。図-7.4.1(a)に、せん断付着試験における連続繊維シートの実測剥離限界ひずみを、JSCE101 の式(式 2.1.4 に基づく、G/は 0.5 とした)5/による推定値と比較して示す。標準配合の含浸樹脂の結果のうち、コンクリートの圧縮強度が 30~35 N/mm²での結果は JSCE101 の式で概ねよく表される。しかし、同式では、コンクリート側の物性の影響や含浸樹脂の配合を変えたことによる影響を考慮していないため、それぞれの物性の変化に応じて、実験値が計算値から若干乖離する傾向が見られた。同様に、図-7.4.1(b)に、既往の研究における推定値との比較を示す。Chenと Teng の推定式(式 2.1.7 の係数を 0.427 とした式)6/は、コンクリートの強度特性も考慮されていることから、実験値と比較的よく合う傾向が見られた。しかし、含浸樹脂の物性の影響は考慮されていないため、その影響はまったく表せていなかった。これらの推定式では、連続繊維シートの厚さと弾性係数を考慮しているが、それだけでは含浸樹脂の影響までは表すことができなかった。このことから、剥離限界ひずみは、連続繊維シートとコンクリートの界面における含浸樹脂の弾性係数やせん断弾性係数によって影響を受けると考えられる。

参考として、図-7.4.2 に、せん断付着試験の結果について、Chen と Teng の式 6 による有効付着長の計算値を実験結果と比較して示す。偏配合の樹脂を用いた結果を除いても、層数が 2 層、3 層となるに従って実験値から大きく乖離する傾向が見られた。また、図-7.4.3 に、 $\varepsilon_{f,ab}$ 算定式の比較から得られた推定 G_f の比較を行った。Chen と Teng の式と JSCE101 の式の違いは、式の比較だけで言えば、JSCE101 の式中における G_f の部分が Chen と Teng の式では $0.091f_c^{0.5}$ で表されていることに相当するが、図-7.4.3 より、 $0.091f_c^{0.5}$ を 0.5 一定と仮定しても顕著な影響はないようである。

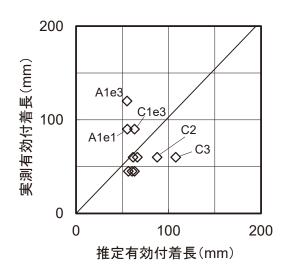


(a) JSCE101 5)



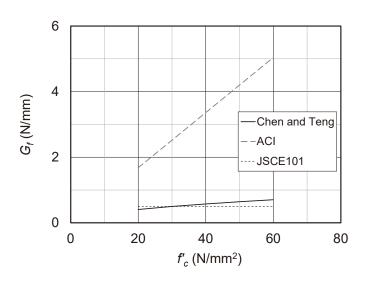
(b) Chen と Teng(係数 0.427) $^{6)}$

図-7.4.1 せん断付着試験の剥離限界ひずみに関する計算値との比較



注) 0.8 E で計算した場合.

図-7.4.2 せん断付着試験における Chen と Teng の式 6 による有効付着長(計算値)と実験結果の比較



注)Chen と Teng 6 , ACI 7 は、JSCE 101 5の式中の 6 に相当する項から換算した値.

ただし、ACIの式ははりの中間剥離を対象とした式.

図-7.4.3 $\epsilon_{f,db}$ 式の比較から得られた推定 G_f の比較

(2) はり試験の結果

図-7.4.4 に、三角ひび割れ発生時の連続繊維シートのひずみ $\varepsilon_{f,cr}$ (実験値)と剥離限界ひずみ $\varepsilon_{f,db}$ (計算値)の関係を示す.ここでは、せん断付着試験の結果を比較的よく表していた JSCE101 及び Chen と Teng の剥離限界ひずみの算定式 5,60 をそれぞれ用いた.それぞれ両対数軸上での相関関係も示す.偏配合の含浸樹脂を用いた場合の結果も含めて、いずれの算定式を用いても、両者は両対数軸上でよい相関を示しており、三角ひび割れ発生時の連続繊維シートのひずみ $\varepsilon_{f,cr}$ は、剥離限界ひずみ $\varepsilon_{f,db}$ と放物線の関係にあることが分かる.これらを踏まえて、図-7.4.5 に、それぞれの剥離限界ひずみを用いた三角ひび割れ発生時の連続繊維シートのひずみ $\varepsilon_{f,cr}$ の計算値を実験値と比較して示す.三角ひび割れ発生時の連続繊維シートのひずみ $\varepsilon_{f,cr}$ の計算値は、実験値を概ねよく表している.剥離限界ひずみの算定式はいずれの場合もよい相関が得られているが、以下の検討では、JSCE101 の剥離限界ひずみに基づく三角ひび割れ発生時の連続繊維シートのひずみ $\varepsilon_{f,cr}$ を次式で表す.

$$\varepsilon_{f,cr} = 140 \ \varepsilon_{f,db}^2 \tag{7.4.1}$$

JSCE101 の剥離限界ひずみ $\epsilon_{f,db}$ の算定式 5 は式 2 1.4 に基づき、次のとおり表される.

$$\varepsilon_{f,db} = \sqrt{\frac{2G_f}{t_f E_f}} \tag{7.4.2}$$

連続繊維シートのひずみ

Ef: 連続繊維シートの弾性係数

 t_f : 連続繊維シートの厚さ $(n_f \times 1 \text{ 層当りの厚さ})$

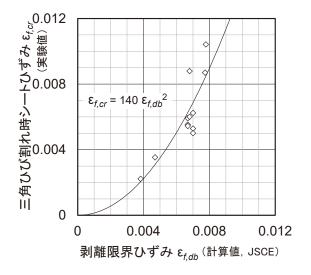
nf:連続繊維シートの積層数

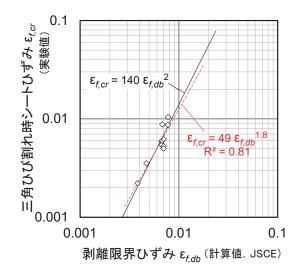
Gf: 連続繊維シートとコンクリートの界面剥離破壊エネルギー

注) これ以降, 式 2.1.4 のうち t_f は n_f を含む総厚さとして再定義する.

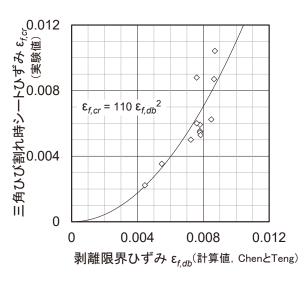
式 7.4.2 を式 7.4.1 に代入すると、次式のとおりとなる.

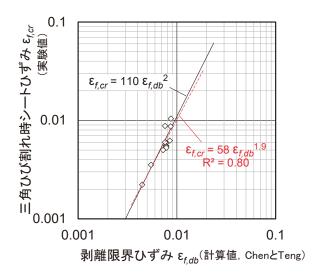
$$\varepsilon_{f,cr} = 280 \ G_f/(t_f E_f) \tag{7.4.3}$$





(a) JSCE101 ⁵⁾による剥離限界ひずみ

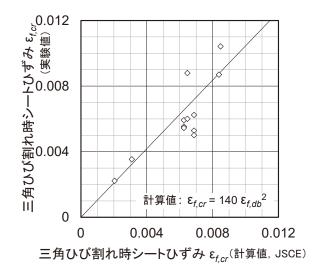




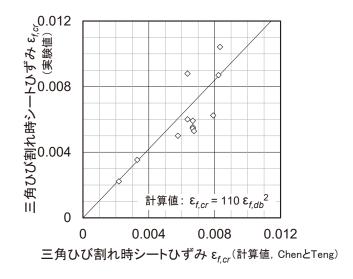
(b) Chen と Teng ⁶による剥離限界ひずみ

注) それぞれの右図は両対数軸での相関関係を示す. 各計算値は 0.8Efを用いた場合.

図-7.4.4 三角ひび割れ発生時の連続繊維シートのひずみ $\epsilon_{f,cr}$ (実験値)と 剥離限界ひずみ $\epsilon_{f,db}$ (計算値)の関係



(a) JSCE101 ⁵⁾による剥離限界ひずみに基づく計算値



- (b) Chen と $Teng^6$ による剥離限界ひずみに基づく計算値
 - 注) 各計算値は 0.8Efを用いた場合.

図-7.4.5 三角ひび割れ発生時の連続繊維シートのひずみ $\epsilon_{f,cr}$ の計算値と実験値の比較

7.5 剥離曲げモーメントと部分剥離曲げモーメントの推定

7.5.1 ファイバーモデルによるはりの荷重-変位関係の予測

ファイバーモデルを用いて、連続繊維シートで曲げ補強したはりの荷重一変位の関係を算定する(構成則、入力値は6章の計算と異なる).連続繊維シートの構成則は、図-7.5.1 に示すような弾性係数と引張強度で表現される線形な関係を用いる。コンクリート及び鉄筋の構成則は、コンクリート標準示方書の設計編⁸「10編 非線形有限要素解析による性能照査」に示されているものを原則用いる。コンクリートの圧縮側及び引張側の構成則を、それぞれ図-7.5.2 と図-7.5.3 に示す。鉄筋の構成則は、図-7.5.4 に示すものを用いる。ただし、同示方書における式解2.3.10 では降伏荷重を過少に評価することから式7.5.1 に変更した。過少評価の理由は、連続繊維シートを接着したはりの曲げ載荷の場合、ひび割れが細かく分散し、鉄筋に生じる平均応力が均一化されるために、平均降伏応力が鉄筋単体の降伏強度まで上昇するためと考える。

$$\overline{f_y} = f_y$$
 (7.5.1)
ここに、 $\overline{f_y}$: 平均降伏応力、 f_y : 鉄筋単体の降伏強度

ファイバーモデルは、ひずみの平面保持の仮定の下に、中立軸を断面内の力の釣合う深さとして、収束計算で求める.この時、コンクリートの圧縮側を30分割、引張側は、無筋部とRC部で構成され、RC部は引張鉄筋の上下にかぶり分を高さとし、無筋部は引張側の中立軸からRC部までの部分とした.無筋部とRC部は、それぞれ30分割されている.連続繊維シートは、はりの最下縁に位置している.

断面計算は、コンクリートのひび割れ発生時と引張ひずみの軟化 開始時、鉄筋の平均降伏ひずみ時と平均ひずみ硬化開始時、コンク リートの圧縮破壊時、連続繊維シートの破断時で行った. なお、計 算では全ての安全係数を 1.0 とした.

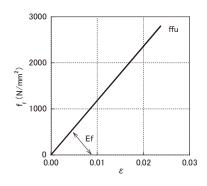


図-7.5.1 連続繊維シートの構成則

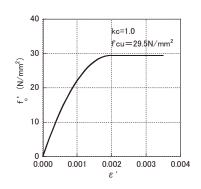


図-7.5.2 コンクリート圧縮側構成則

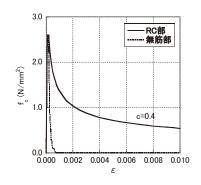


図-7.5.3 コンクリート引張側構成則

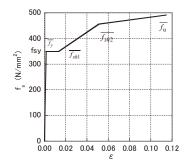


図-7.5.4 鉄筋の構成則

7.5.2 はりの荷重-変位関係における試験値と計算値の比較

図-7.5.5 に、はり試験の試験値と計算値を示す。連続繊維シートで曲げ補強されたはりの荷重一変位の関係は、試験値と計算値は同図(f)を除いてよく一致している。特に、降伏荷重と降伏変位は良く一致している。図(f)の e3 は、含浸樹脂の弾性係数を極めて小さくした結果、樹脂がゴムのような性状を示し、連続繊維シートがアンボンド状態になり、支間中央部のひずみが連続繊維の破断ひずみに極めて近い値まで耐えることができたため、大きな変位を示したと考えられる。

ファイバーモデルを解くことは収束計算を必要とするので、ここでは簡便な解法で降伏曲げモーメント M_y を推測する方法を示しておく。この解法は、既往の RC 計算に関する知見 9 を参考に、中立軸を(3/8)d (d: 有 効高さ) に固定している。式 7.5.2 で想定している応力状態は、ファイバーモデルにおける鉄筋降伏時の状態を近似している。

$$M_{y} = \frac{7}{8}d\left(A_{s} \cdot f_{sy} + 2 \cdot C \cdot b \cdot f_{ct}\right) + \left(D - \frac{1}{8}d\right)A_{f} \cdot \varepsilon_{sy} \cdot \frac{\left(D - \frac{3}{8} \cdot d\right)}{\frac{5}{8} \cdot d}E_{f}$$
(7.5.2)

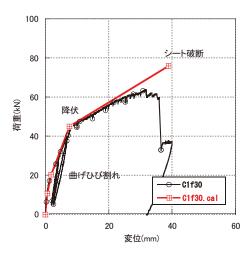
D: はり高さ(mm), d:有効高さ(mm), C: 主鉄筋のかぶり(mm), b: はり幅 (mm)

 A_s :鉄筋の断面積(mm²), f_{sv} :鉄筋の降伏強度(N/mm²), ϵ_{sv} : 鉄筋の降伏ひずみ (一)

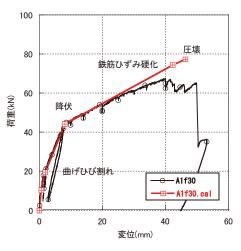
 A_f :シートの断面積(mm^2), E_f :連続繊維シートの弾性係数($\operatorname{N/mm}^2$)

 f_{ci} : 鉄筋降伏時のRCコンクリートの負担する引張応力 ここでは1.2(N/mm²)

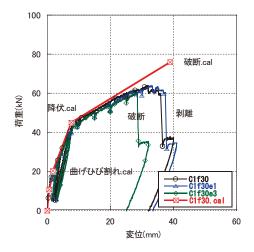
ファイバーモデルと簡易式 7.5.2 で求めた降伏曲げモーメントの比較を図-7.5.6 に示す. 両データのよい一致を示している.



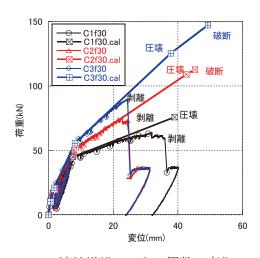
(a) 炭素繊維シート補強の基準試験体



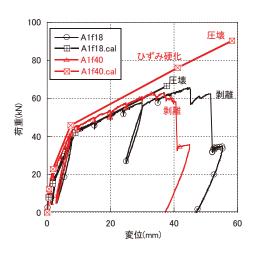
(c) アラミド繊維シート補強の基準試験体



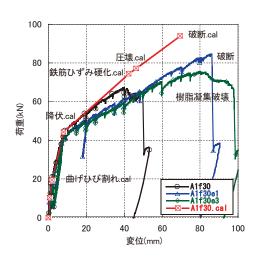
(e) 炭素繊維シートで樹脂の弾性係数の変化



(b) 連続繊維シートの層数の変化



(d) コンクリートの強度の変化



(f) アラミド繊維シートで樹脂の弾性係数の変化

図-7.5.5 はり試験の荷重-変位関係における試験値と計算値の比較

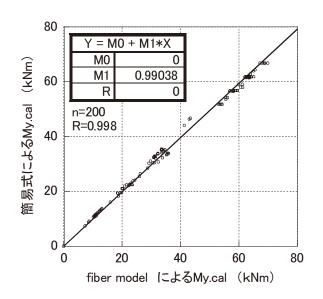


図-7.5.6 ファイバーモデルと簡易式による降伏曲げモーメントの比較 (付属資料4の既往のはり試験例を対象に計算)

7.5.3 剥離曲げモーメント予測式の構築

本試験のパラメータの範囲内で得られた最大曲げモーメントと前項のファイバーモデルから得られた降伏 曲げモーメントの間で、重相関回帰を行う、パラメータは式7.5.3~5のように仮定した、計算降伏曲げモー メント $M_{y,cal}$ と観測された最大曲げモーメント M_u の関係を図-7.5.7 に示す。 両者の比 $M_u/M_{y,cal}$ は $1.3\sim1.9$ 程 度である. なお, 供試体 C113e3 は連続繊維シートが十分な引張性能を発揮せずに破断したので回帰データ から削除した.

$$\alpha = \frac{A_f \cdot E_f}{A_s \cdot E_s}$$

$$\beta = \frac{f'_c}{30}$$

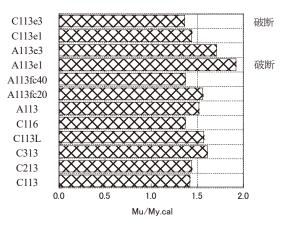
$$\gamma = \frac{E_a}{E_f}$$

$$(7.5.4)$$

$$\beta = \frac{f_c'}{30} \tag{7.5.4}$$

$$\gamma = \frac{E_a}{E_f} \tag{7.5.5}$$

ここに, E_a : 含浸樹脂の弾性係数(JIS K7161-1,2 による) $^{10)}$



計算降伏荷重と最大荷重の分布

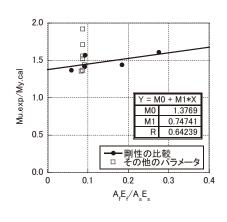


図-7.5.8 αの分布

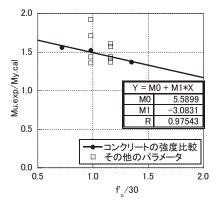


図-7.5.9 βの分布

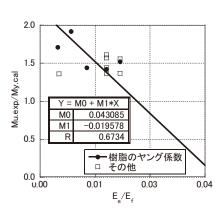


図-7.5.10 γの分布

重相関回帰は、式 7.5.6 と式 7.5.8 に示す線形型と指数型で行った。それぞれの回帰統計を示す。決定係数 R^2 (表中の重決定 R2) は 0.6 弱であり、あまり精度はよくない。

$$Mu = (2.25 + 0.60 \cdot \alpha - 0.36 \cdot \beta - 19.7 \cdot \gamma) My.cal$$
 (7.5.6)

回帰統計				
重相関 R	0.748766			
重決定 R2	0.560650			
補正 R2	0.372357			
標準誤差	0.129931			
観測数	11			

分散分析表					
	自由度	変動	分散	観測された 分散比	有意 F
回帰	3	0.150801	0.050267	2.977544	0.106008
残差	7	0.118174	0.016882		
合計	10	0.268975			

$$\log\left(\frac{Mu}{My.cal}\right) = \log\left(a \cdot \alpha^{n1} \cdot \beta^{n2} \cdot \gamma^{n3}\right)$$
$$= \left(\log a + n1\log \alpha + n2\log \beta + n3\log \gamma\right) \tag{7.5.7}$$

$$Mu = 1.02 \cdot \alpha^{0.066} \cdot \beta^{-0.22} \cdot \gamma^{-0.133} \quad My.cal$$
 (7.5.8)

回帰	回帰統計				
重相関 R	0.76119				
重決定 R2	0.57941				
補正 R2	0.39916				
標準誤差	0.03432				
観測数	11				

分散分析表					
	自由度	変動	分散	観測された 分散比	有意 F
回帰	3	0.01136	0.00379	3.21446	0.09201
残差	7	0.00824	0.00118		
合計	10	0.01960			

式 7.5.6 と式 7.5.8 の予測状態を図-7.5.11 に示す. 次項で式 7.5.8 を予測式として, その精度を検証する.

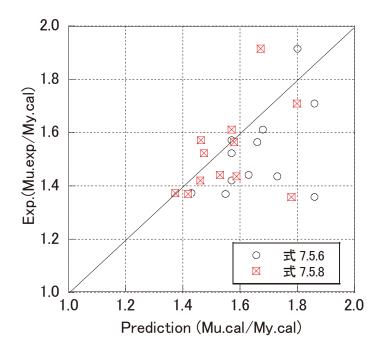


図-7.5.11 予測式と実験値の関係

7.5.4 剥離曲げモーメント予測式の妥当性

3 章で示したはり試験結果と既往の 20 の文献 $^{11)-30)}$ から、連続繊維シートで曲げ補強したはりの試験結果 204 例から連続繊維シートが中間剥離したと推定される 96 例を選択し、前項で提案した実験式 7.5.8 の精度 を検証する。参考として、用いた既往の試験データを巻末の付属資料 4 に示す。これらの補強前の RC はりは、有効高さが $^{110}\sim210$ mm、せん断スパン比が $^{2.5}\sim5.5$ 、鉄筋比が $^{0.6}\sim1.8$ %であった。なお、収集した実験例には、使用した含浸樹脂の弾性係数が示されていないものが多くあったので、示されていない場合は、本試験の標準的な炭素繊維シートやアラミド繊維シートに用いられた樹脂と同等の弾性係数とした。

実験式の構築に用いたデータと検証に用いたデータの関連を、それぞれのパラメータに関して図-7.5.12~7.5.15 に示す。実験式の構築に用いたデータは、検証の範囲をある程度網羅していることが分かる。図-7.5.15 で、横軸を $M_{y,cal}$ に対する $M_{u,exp}/M_{y,cal}$ の回帰式をみると、切片 1.36 でほぼ無相関に分布していることが分かる。つまり、 $M_{u,exp}$ は凡そ $M_{v,cal}$ の 1.36 倍ともいえる。

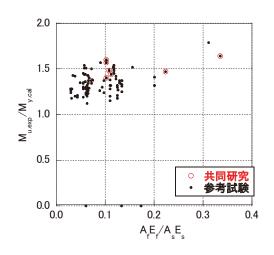


図-7.5.12 A₆E_f/A_sE_sの分布

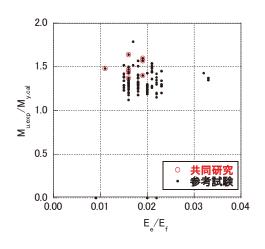


図-7.5.14 E_e/E_fの分布

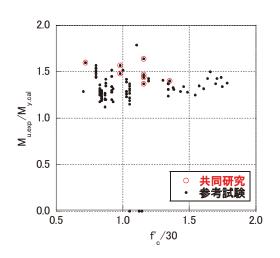


図-7.5.13 f'c/30の分布

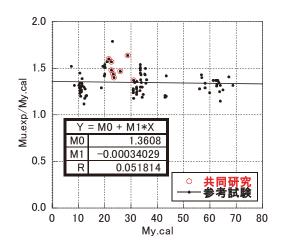


図-7.5.15 My.cal の分布

図-7.5.16 に実験式と検証に用いた試験値の関係を示す. 試験値は実験式 7.5.8 から得られた予測値の約 94%で、相関係数 R=0.99 の高い整合性を有していることが分かる. したがって、実験式は、式 7.5.9 のように書き換えられる.

せん断スパン比が剥離曲げモーメントに及ぼす影響を図-7.5.17 に示す. 図より, はり曲げ試験における連続繊維シートの剥離曲げモーメントと計算降伏曲げモーメントの比率に対して, せん断スパン比 a/d は, 強い影響を与えていない. ただし, ここでのデータには, せん断補強鉄筋を含む供試体の結果が多く含まれており, せん断スパン比の影響は精査が必要である.

図-7.5.18 の左側がアラミド繊維シート、右側が炭素繊維シートを用いた試験結果で、計算降伏曲げモーメント M_y 、計算圧縮破壊曲げモーメント M_{cu} 、計算連続繊維シート破断曲げモーメント M_{fu} を試験で得られた連続繊維シートの剥離による最大曲げモーメント M_{max} をもって除した値をプロットしている。それぞれの平均値は、0.75、1.02、1.25 となった。最大曲げモーメントの平均値は、降伏曲げモーメントの 1.3 倍、圧壊曲げモーメントの 1.0 倍、連続繊維シート破断曲げモーメントの 0.8 倍になる。アラミド繊維シートの供試体は連続繊維シートの剥離前に圧壊曲げモーメントに達し、炭素繊維シートの供試体は圧壊曲げモーメント以下で連続繊維シートが剥離する傾向が示された。

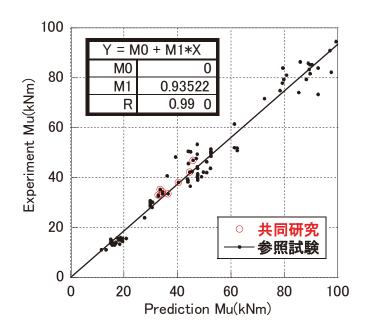


図-7.5.16 実験式 7.5.8 の精度

$$Mu = 0.95 \cdot \alpha^{0.066} \cdot \beta^{-0.22} \cdot \gamma^{-0.133} My.cal$$
 (7.5.9)

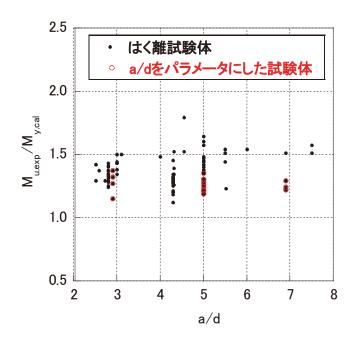


図-7.5.17 せん断スパン比と a/d の関係

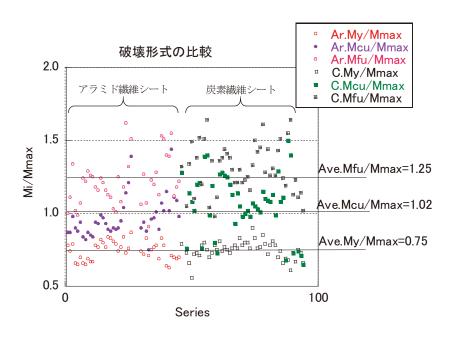


図-7.5.18 各破壊形式に対する計算曲げモーメントと 試験で得られた連続繊維シートの剥離による最大曲げモーメントの関係

7.5.5 部分剥離曲げモーメント予測式

前項までは、実験で得られた最大曲げモーメントを剥離曲げモーメントとして検討したが、本試験シリーズでは剥離が開始する曲げモーメント(部分剥離曲げモーメント)を同定した(ここでは 3.2 節の値を用いる). 本項では、前項で行なった最大曲げモーメントに対しての重回帰を、同様の手順を用いてこの部分剥離に対して行った. 得られた回帰式を式 7.5.10 に示す.

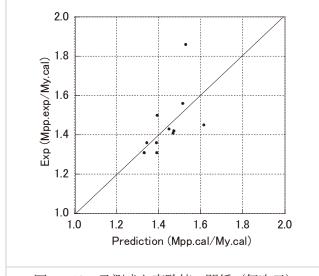
$$M_{pp} = 1.13 \cdot \alpha^{0.078} \cdot \beta^{-0.134} \cdot \gamma^{-0.100} \cdot M_{y.cal}$$
 (7.5.10)

部分剥離曲げモーメントは、参考とした文献には示されていないので、精度の照査は出来ない。最大曲げモーメントは予測値の94%であったので、部分剥離式も94%とすると、式7.5.11となる。

$$M_{pp} = 1.06 \cdot \alpha^{0.078} \cdot \beta^{-0.134} \cdot \gamma^{-0.100} \cdot M_{y.cal}$$
 (7.5.11)

回帰統計				
重相関 R	0.592857			
重決定 R2	0.3514794			
補正 R2	0.073542			
標準誤差	0.0414813			
観測数	11			

分散分析表					
	自由度	変動	分散	観測された 分散比	有意 F
回帰	3	0.006528	0.002176	1.2645993	0.3577565
残差	7	0.0120449	0.0017207		
合計	10	0.0185729			



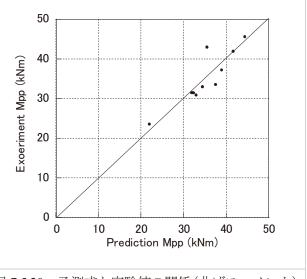


図-7.5.19 予測式と実験値の関係 (無次元)

図-7.5.20 予測式と実験値の関係(曲げモーメント)

ここで、連続繊維シートで補強されたはりの部分剥離を限界状態3と想定した場合、設計式の提案を行う. 実験で得られた剥離曲げモーメントを横軸に、予測式7.5.8で得られた剥離曲げモーメントと予測式7.5.11で得られた部分剥離曲げモーメントの比較図と実験値に対する回帰式を図-7.5.21に示す。多くの実験データで検証されている式7.5.8を基本式として、部分剥離曲げモーメントの推定式を次式のように定義する.

$$Mp = 0.92 \cdot \alpha^{0.066} \cdot \beta^{-0.22} \cdot \gamma^{-0.133} My.cal$$
 (7.5.12)

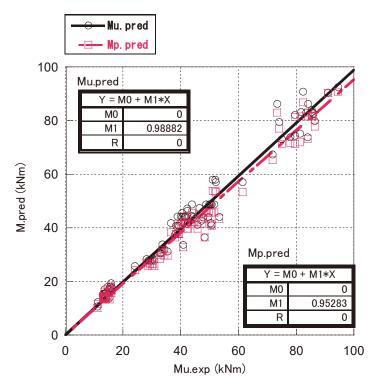


図-7.5.21 剥離曲げモーメントと予測される部分剥離曲げモーメントの比較

7.6 既往の知見再考

既往の研究において、なぜ、7.1 節に示した a)~d)の結果が得られたかについて再確認する.

(1) ブロック化の理由

曲げひび割れ位置での主鉄筋の降伏とともに、その近くの連続繊維シートと主鉄筋の間のコンクリートに 斜め約45°の引張主応力が働く可能性がある。その主応力度がコンクリートの引張強度を超えると、三角ひ び割れが発生すると考えられる。その三角ひび割れが伸展してその三角ひび割れの起点となった曲げひび割 れにつながり、三角ブロックが形成される。

曲げひび割れ位置の連続繊維シートに作用していた引張力によって、さらに三角ブロックが載荷点側に引き寄せられ、三角ひび割れの位置付近のコンクリート(三角ブロックの対面)がその引張力に抵抗するようになる。その際、三角ブロックの先端が連続繊維シートを押し下げる動きをするため、その位置から部分剥離が発生しやすくなる。その挙動の中で、三角ブロックが回転する動きを見せる場合があると考えられる。

本章ではこれらの現象を再確認した上で、その起点となる三角ひび割れの発生機構とその発生ひずみの推 定方法を新たに提示した.

(2) 中間剥離が鉄筋降伏後に発生する理由

前項のとおり、三角ひび割れの発生は、その位置の鉄筋が降伏することで、連続繊維シートと鉄筋の間に 斜め約45°の引張主応力が強く働くためとすると、はりの静的曲げ載荷で生じる中間剥離は、主鉄筋の降伏 後に発生するはずである。

(3) M_v/M_uが約 0.7 以下で剥離破壊型となる理由

岸,三上らの研究 $^{1)}$ で, M_{o}/M_{u} が約 0.7 以下の場合に中間剥離が発生する傾向があることが示された. 言い換えると,純曲げ区間の曲げモーメントが概ね $1.4\,M_{o}$ を超えても圧壊が生じない場合に,連続繊維シートの部分剥離が先行して発生したと考えられる。本試験シリーズにおいても,その点を踏まえて,ほとんどの供試体が M_{o}/M_{u} が概ね 0.7 以下となるように設計され,実際に大部分の供試体で中間剥離が生じた.図-7.3.1 に示したとおり,部分剥離は M_{o} の平均 1.55 倍で発生しており,最低値は 1.36 倍であった。また,その前兆となる三角ひび割れは M_{o} の平均 1.33 倍で発生していた。連続繊維シートの部分剥離がせん断スパンで主鉄筋がある程度降伏した後に発生することから,純曲げ区間で主鉄筋が降伏した後,早期に圧壊が生じると,連続繊維シートの部分剥離に至らない場合があると考えられる。この点から,指標 M_{o}/M_{u} は,主鉄筋降伏後から圧壊までのマージンを表すことで,連続繊維シートの中間剥離の判定と関わりを持っている。

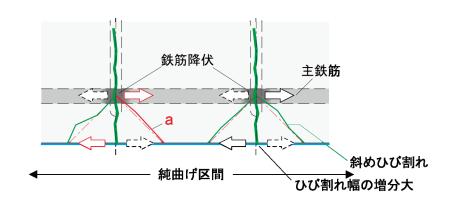
(4) 純曲げ区間では中間剥離が発生しない理由

岸,三上らは,純曲げ区間で連続繊維シートをあえて接着させなかった場合であっても,はりとしての挙動に変化は見られなかったと報告している¹⁾.また,純曲げ区間の曲げひび割れによって連続繊維シートとコンクリートの界面ひび割れが伸展する一面せん断的な剥離現象は生じていないとしている¹⁾.

本試験シリーズでは、純曲げ区間の曲げひび割れ近傍でも、連続繊維シートに近いコンクリートに三角ひび割れが発生していた。図-7.6.1 に示すように、純曲げ区間で主鉄筋が降伏し始めるのは曲げひび割れ位置からと考えられ、降伏開始時に鉄筋の降伏域と未降伏域が共存すると考えられる。このときに、図-7.2.4(b)で示した状況に近い応力状態が、一時的に純曲げ区間で発生する可能性がある。図-7.6.1 の赤矢印の力に対

して三角ひび割れ a が発生するイメージである. 純曲げ区間では、曲げひび割れに対して概ね対称な三角ひび割れが発生していた. 純曲げ区間においても、ひび割れ位置での降伏開始時においては、曲げひび割れ位置で、連続繊維シートに作用する引張力と、未降伏域の主鉄筋を主体とした RC 部材(本節では主鉄筋側という)に作用する逆方向の引張力が生じていたと考えられる.

しかし、せん断スパンと同様の三角ひび割れがむしろせん断スパンよりも早期に発生したにもかかわらず、それを起点に部分剥離が発生することはなかった。純曲げ区間での主鉄筋の降伏は、上記のとおり曲げひび割れ近傍から発生するが、等曲げモーメントが作用していることから、荷重増とともに比較的早期に純曲げ区間全体に主鉄筋の降伏域が拡がると考えられる。純曲げ区間全体に主鉄筋の降伏域が拡がって以降は、荷重増とともに連続繊維シートの引張力が増加するが、主鉄筋側に作用する引張力はほとんど増加しないことから、降伏直後に比べて主鉄筋側と連続繊維シートの間に生じるせん断応力がほとんど増加しないと考えられる。この点が、界面ひび割れが伸展する一面せん断的な剥離現象が生じない理由であり、純曲げ区間を起点とした中間剥離が発生しにくい理由であると考えられる。



はり試験、純曲げ区間の鉄筋降伏開始時

図-7.6.1 純曲げ区間のコンクリートの三角ひび割れ(概念図)

8. 中間剥離の照査方法(案)

8.1 照査の対象とする事象

7章の検討を踏まえて、表-8.1.1 に、中間剥離の照査の対象と各照査方法を示す。本共同研究で実施したはり試験の結果より、曲げを受ける RC はりの下面に接着された連続繊維シートが中間剥離で破壊する際、破壊の予兆として、主鉄筋の降伏、三角ひび割れ発生、三角ブロックの形成があり、その後に部分的な剥離が生じることが分かった。中間剥離が生じたはり供試体では、部分剥離が支点付近まで広範囲に拡がった後、最大荷重に至った。これらの現象のうち、三角ひび割れ発生の照査は、中間剥離の限界状態を示すことができるとともに、それ以降の現象に比べると、7章で述べた機構に基づく推定方法で良好に照査することができると考えられる。ただし、全剥離に対して、比較的小さい荷重での照査であり、安全余裕をなお残した領域での照査である。一方、部分剥離や全剥離の推定は、いずれも重回帰による実験式を提案した。はり試験の最大荷重で表した全剥離は、広範囲に部分剥離が拡がった状態であり、降伏後の挙動を考慮した安全余裕を考える際の根拠として把握しておく必要がある。

本章 8.2~8.3 で、三角ひび割れと部分剥離・全剥離を対象に、照査方法(案)を示す。また、8.4 で繰返し 走行荷重を受ける RC 床版における連続繊維シートの付着疲労に対する照査法について述べる。

表-8.1.1 中間剥離の照査の対象と各照査方法

照査の着目点	照査方法	利点	課題
近傍主鉄筋の	弾性計算	分かりやすい	中間剥離の概念はほぼ伝わらない.
降伏		計算しやすい	シート物性、樹脂物性はほぼ関係なし
三角ひび割れ	式 7.4.3	中間剥離の発生	比較的新しい材料についてはせん断付着試験が必要.
(ブロック化	(式 8.2.2)	機構の説明につ	
につながる)		ながる	
ブロック化	_	中間剥離の発生	現時点では推定方法がない.
		機構の説明につ	三角ひび割れの伸展を評価するには FEM が必要.
		ながる	
部分剥離	回帰式	計算しやすい	適用範囲が既存の試験条件の範囲に限定される.
	式 7.5.12	中間剥離を評価	
		できる	
全剥離	回帰式	計算しやすい	適用範囲が既存の試験条件の範囲に限定される.
(最大荷重)	式 7.5.9	実耐力を活かせ	全剥離までに広範囲に剥離が伸展しており、その状態を設計に考慮
		る	することの妥当性を説明する必要がある.

8.2 三角ひび割れに対する照査

曲げを受ける RC 部材の下面に連続繊維シートを接着した場合の三角ひび割れに対する照査は、式 8.2.1 に基づき、連続繊維シートの作用ひずみ ε_{fl} が、三角ひび割れ発生ひずみ ε_{fl} に以下であることを照査することによる方法が考えられる.

中間剥離の起点となる三角ひび割れは、せん断スパンで発生することが多いが、補強量が多い場合など、条件によっては載荷点直下付近で発生する場合があることから、照査の対象とする位置は、最大曲げモーメントの発生位置とするのがよいと考えられる。また、三角ひび割れは主鉄筋(床版では下段鉄筋)の降伏以降に発生するが、降伏後直ちに剥離に至るようなことを避けるためには、剥離に対する安全余裕 φ を確保した上での照査とするのがよいと考えられる。三角ひび割れ発生ひずみ ε_{fcr} の算定は、7.4 節の検討より、式 8.2.2 による。なお、三角ひび割れの発生について詳細に照査するには、ファイバーモデルを用いて、対象とする位置における鉄筋降伏後の作用ひずみを算定することが考えられる。

$$\varepsilon_{fd} < \phi \ \varepsilon_{f,cr}$$
 (8.2.1)

$$\varepsilon_{f,cr} = 280 G_f / (t_f E_f) \tag{8.2.2}$$

ここに,

ह्य : 設計荷重等により作用する連続繊維シートの軸方向ひずみ

ε_{fcr}: 三角ひび割れを発生させる連続繊維シートの軸方向ひずみ

 t_f :1方向の連続繊維シートの合計設計厚さ(層数 $n_f \times 1$ 層当り設計厚さ)

 E_f : 連続繊維シートの弾性係数(特性値に 0.8 を乗じた値、材料引張試験 JIS A 1191 による)

 G_f : 界面剥離破壊エネルギー(=0.5, または, せん断付着試験 JSCE-E 543 による)

8.3 部分剥離に対する照査

8.3.1 概要

荷重の作用によって、RC 部材に接着された連続繊維シートが剥離する場合がある.連続繊維シートの完全な剥離(全剥離)は、その補強効果を完全に喪失するので、補強された RC 部材の限界状態 3 に相当すると考えられる. 7 章では、完全な連続繊維シートの剥離の前に連続繊維シートの一部が剥離を開始することを部分剥離と定義した.本節ではこの部分剥離を対象にした照査法を提示するとともに、RC 床版の設計への適用と課題を述べる.

8.3.2 降伏曲げモーメントの特性値

7.5 節では、実験式を構築するために、コンクリート及び鉄筋の構成則はコンクリート標準示方書に示されているものを用いた。本節では、道路橋示方書 ¹⁾(以下、道示という)に準じる形で連続繊維シートをはり下面に接着補強した場合の部材の降伏曲げモーメントを、1)から7)の仮定に基づき算出する。

- 1) 維ひずみは中立軸からの距離に比例する.
- 2) コンクリートの引張強度を無視する.
- 3) コンクリートの応力度 ひずみ曲線は、圧縮応力度がコンクリートの設計基準強度の 2/3 以下となる範囲で、図-7.5.2 に示したものを k_c = 0.85 として用いる.
- 4) 鉄筋の応力度-ひずみ曲線は、弾性係数に従い鉄筋の降伏強度の特性値で軟化する完全バイリニア とする.
- 5) 連続繊維シートの応力度-ひずみ関係は、弾性係数に従い、連続繊維シートの引張強度の特性値で 破断する直線で表す.
- 6) 単位幅当りの矩形断面 RC はりを対象とする.
- 7) 鉄筋降伏時に中立軸が上縁から有効高さの3/8の位置にあるとする.

この仮定で算出される連続繊維シートで補強された RC はりの降伏曲げモーメントの特性値 M_{ysc} は,コンクリートの引張負担分を無視していることから,7.5 節で求めた降伏曲げモーメントより確実に小さくなる.つまり,限界状態の判定には安全側となる. M_{ysc} の具体的な算出方法には,ファイバーモデルや有限要素法があるが,ここでは前節の式 7.5.2 を,上記の仮定の下で修正した簡易式 8.3.1 を用いる.

$$M_{ysc} = \frac{7}{8}d \cdot A_s \cdot f_{sy} + \left(D - \frac{1}{8}d\right)A_f \cdot \varepsilon_{sy} \cdot \frac{\left(D - \frac{3}{8} \cdot d\right)}{\frac{5}{8} \cdot d}E_f$$
(8.3.1)

D: はり高さ(mm), d:有効高さ(mm),

 A_s :鉄筋の断面積(mm²), f_{sy} :鉄筋の降伏強度(N/mm²), ε_{sy} 鉄筋の降伏ひずみ

 A_f :シートの断面積(mm²), E_f : 連続繊維シートの弾性係数 (N/mm²)

8.3.3 部分剥離曲げモーメントの特性値

部分剥離曲げモーメント M_{psc} は、7.5 節に示した部分剥離曲げモーメントの実験式 7.5.12 と、上記の降伏曲げモーメントの特性値を組み合わせた次式で表す。

$$M_{psc} = 0.92 \cdot \alpha^{0.066} \cdot \beta^{-0.22} \cdot \gamma^{-0.133} \quad M_{ysc}$$

$$\Xi \Xi \iota \Xi, \quad \alpha = \frac{A_f \cdot E_f}{A_s \cdot E_s} \quad , \beta = \frac{f'_c}{30} \quad , \gamma = \frac{E_a}{E_f}$$
(8.3.2)

注) 記号はいずれも 7.5 節と同様.

8.3.4 限界状態1の照査方法

作用曲げモーメントが連続繊維シートを接着し補強した RC 部材の部材降伏に対する曲げモーメントの制限値 M_{vd} を満足する場合には、限界状態 1 を超えないとみなす。

$$M_{yd} = \xi_1 \cdot \Phi_y \cdot M_{ysc} \tag{8.3.3}$$

ここに、 M_{vd} :降伏に対する曲げモーメントの制限値

ξ₁:調査・解析係数

 Φ_v :抵抗係数

 M_{vsc} : 降伏曲げモーメントの特性値

8.3.5 限界状態3の照査方法

連続繊維シートを用いて補強した RC 部材の限界状態 3 は、連続繊維シートの剥離、連続繊維シートの破断、またはコンクリートの圧縮破壊で生じると考えられる。したがって、式 8.3.4 のとおり、それらの事象について算定し、最小の曲げモーメントを破壊抵抗曲げモーメントの特性値 M_{usc} とする。連続繊維シートの部分剥離曲げモーメント M_{psc} は式 8.3.2 を用いるものとする。連続繊維シートの破断曲げモーメント M_{fu} は、連続繊維シートの引張強度の特性値×0.5 を用いて算出する 2 . コンクリートの圧壊曲げモーメント M_{cu} は、コンクリートの負担する圧縮力が鉄筋の降伏耐力と連続繊維シートの引張力の合力とつり合った状態で、上縁のコンクリートのひずみが 0.35%に至った時の曲げモーメントとする。

$$M_{usc} = \min\left[M_{psc}, M_{fu}, M_{cu}\right] \tag{8.3.4}$$

作用曲げモーメントが連続繊維シートを接着し補強した RC 部材の部材破壊に対する曲げモーメント M_{ud} の制限値を満足する場合には、限界状態 3 を超えないとみなす。

$$M_{ud} = \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \Phi_u \cdot M_{usc} \tag{8.3.5}$$

ここに、 M_{ud} : 部材破壊に対する曲げモーメントの制限値

 ξ_1 :調査・解析係数

ち: 部材・構造係数

 Φ_u : 抵抗係数

8.3.6 RC 床版の補強設計への適用と課題

(1) 曲げモーメントに対する照査

図-8.3.1 に、連続繊維シートによる床版補強の設計フローのイメージを示す。このうち、曲げモーメントによる限界状態 1 の部材降伏に対する照査及び限界状態 3 の部材破壊に対する照査は、それぞれ式 8.3.3、式 8.3.5 を用いて行うことが想定される。その際、限界状態 1 の照査における床版に生じる作用曲げモーメント M_d は、次のとおり道示 10 による。

$$M_d = \gamma_{pL} \cdot \gamma_{qL} \cdot M_{TL} + \gamma_{pD} \cdot \gamma_{qD} \cdot M_{DL}$$

$$= 1.00 \times 1.25 \times M_{TL} + 1.00 \times 1.05 \times M_{DL}$$
(8.3.6)

ここに、 γ_{pi} :荷重の組合せ係数

 γ_{ai} :荷重係数

 M_{TI} : T 荷重による床版の単位幅(lm)あたりの曲げモーメント

 M_{DL} : 死荷重による床版の単位幅(1m)あたりの曲げモーメント

同様に、限界状態3の照査における床版に生じる作用曲げモーメントも式8.3.6のとおりである.

(2) 疲労に対する照査

道路橋のRC床版の設計では、これらの曲げモーメントによる照査とともに、疲労に対する照査が重要である。図-8.3.1 に示したとおり、道示のRC床版の設計に従うとすると、疲労に対する照査として、最小床版厚(せん断力に対する照査を兼ねる)の照査、鉄筋及びコンクリートそれぞれの応力度の制限値に対する照査が必要である。それに加えて連続繊維シートを用いた場合に特有の、連続繊維シートの破断に対する照査及び連続繊維シートの剥離に対する照査が必要である。

特に、連続繊維シートの剥離の疲労挙動を把握する上で、その静的挙動の把握が不可欠であることから、本報告書では静的挙動をあらためて詳細に検討した。しかし、7 章までの検討はもっぱら静的挙動に対するものであり、疲労の照査の検討には至っていない。連続繊維シートで補強した RC はり部材の曲げ疲労試験を実施した研究事例 ³⁾では、剥離の前に鉄筋の疲労破断が先行するため、鉄筋の疲労算定式を提示しており、連続繊維シートの剥離そのものの疲労照査には至っていない。

また、現行道示の RC 床版の設計では、RC 床版の厚さがその疲労耐久性を確保する上で重要であることから、所定の床版厚を確保することが疲労照査の項目に加えられている。また、せん断補強鉄筋を設けない RC 床版にとって、床版厚の確保が RC 床版のせん断力に対する照査を兼ねている。RC はりの下面に連続繊維シートを接着することで、中立軸位置を改善する効果や、軸方向鉄筋を補足することでせん断耐力を増加させる効果が期待されるが、本報告書の範囲ではこの点について精査するに至っていない。

これらの視点から RC 床版の疲労に対する照査法を検討するのは、今後の課題である. 次章では、RC 床版の疲労を検討する上で不可欠な、既往の輪荷重走行試験の結果に基づいて、上記とは違う視点から RC 床版の疲労に対する照査について検討を加える.

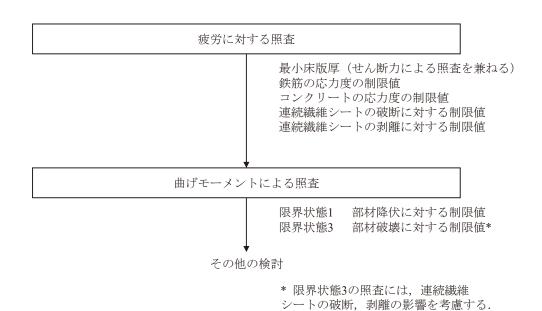


図-8.3.1 連続繊維シートによる RC 床版の補強の設計フロー (イメージ)

8.4 繰返し走行荷重を受ける RC 床版における連続繊維シートの付着疲労に対する照査法の検討

2 章で述べたとおり、輪荷重走行下において RC 床版の下面に接着された連続繊維シートが付着疲労により剥離する可能性があると考えられている 4). その発生時期(輪荷重の走行期間中のどの段階であったか)は必ずしも明確でない. はり試験では、側面から三角ひび割れの形成が目視(ビデオ観察)で確認できたが、輪荷重走行試験では、床版下面から三角ひび割れを確認することは容易でなく、三角ひび割れの概念を明確に意識していなければ発見がなお難しかったと考えられる.

昭和39年道示により設計されたRC床版(以下,39床版という.同様に,昭和47年,平成8年の場合もそれぞれ47床版,H8床版などという)の輪荷重走行試験では,走行回数とともにたわみや下面のひび割れ幅が増加するとともに、比較的早期にはり状化して,最後は抜け落ちに至る5.しかし,その疲労損傷の過程において主鉄筋,配力鉄筋ともに降伏は認められず,また,主鉄筋のひずみは版理論で推定される値から乖離して,床版支間方向の位置に関係なくある程度のひずみレベルで均一になる傾向が認められた6.77.この現象の理由として,はり状化とともに,主鉄筋方向の耐荷機構に変化が生じることを挙げている。連続繊維シートを下面に接着したRC床版の輪荷重走行試験においても,これらの傾向が認められている8.99.配力鉄筋が比較的少ない39床版の場合,配力鉄筋方向の曲げによるひび割れは主鉄筋に沿って発生する傾向が強く,走行繰返しによる劣化の中で主鉄筋とコンクリートの付着も徐々に劣化する傾向があると考えられる.

はり試験での連続繊維シートの中間剥離は、主鉄筋が降伏した後に生じるとされており(2章)、本試験シリーズでも同様であった。また、その理由は7.6で述べたとおりである。この点からすれば、RC 床版の鉄筋が降伏に達しないことから、RC 床版の下面に接着された連続繊維シートの中間剥離は一見起こり得ないように思われる。しかし、上記のとおり、輪荷重走行の繰返しの下で、床版下面のコンクリートのひび割れが増加する傾向にあり、パイ型変位計で測定された連続繊維シートの平均ひずみでは2000×10⁻⁶を超える領域に達することが示されている⁸⁾⁹⁾・輪荷重走行下のRC 床版では、このような状況下で、はり試験で見られた中間剥離と類似の現象が生じる可能性がある。鉄筋のひずみが均一化する過程において、その端部付近では、鉄筋と連続繊維シートの間に概ね純せん断に近い約45°の引張主応力が発生する可能性があると考え、以下ではその際に三角ひび割れが発生すると仮定する。それに加えて、旧共研⁴⁾で付着疲労とされていたことからも分かるように、本試験シリーズのはりの静的曲げ試験と異なり、道路橋RC 床版では中間剥離の伸展において繰返しの影響を受けるはずである。

以上を踏まえて、RC 床版下面に接着する連続繊維シートの中間剥離の照査は、三角ひび割れの推定式 8.2.2 を用いて行うとともに、既往の輪荷重走行試験結果とのキャリブレーションに基づきその閾値を検討する. 現行道示の床版の照査と同様に、主鉄筋方向、配力鉄筋方向それぞれについて、単位幅 1m の矩形断面 RC はりとして計算を行う。また、ここでは、全面貼りと仮定する。図-8.4.1 に、39 床版の下面に高強度型炭素繊維シートを接着した場合について、三角ひび割れ発生ひずみ $\varepsilon_{f,cr}$ (計算値) と目付量の関係を示す。ここでは、次式で求めた主鉄筋降伏時の連続繊維シートのひずみ(計算値)との比で表す。以下、この比 $\varepsilon_{f,c}$ / $\varepsilon_{f,cr}$ を剥離指数という。

$$\varepsilon_{fy} = \varepsilon_y (D - x_{sy})/(d - x_{sy}) \tag{8.4.1}$$

ここに,

 ε_v : 主鉄筋の降伏ひずみ (= σ_v/E_s)

D :床版厚さ

d : 有効高さ

 x_{sy} :連続繊維シートを接着したときの下段鉄筋降伏時の中立軸位置(上縁からの距離,式 6.4.1) 剥離指数 ε_{fy} / $\varepsilon_{f,cr}$ は目付量と直線関係が見られ,値が大きいほど三角ひび割れの発生が起こりやすい傾向を示す. 旧共研で行われた輪荷重走行試験では,高強度型炭素繊維シートを 1 方向当り 2 層(目付量 600g/m^2)とした場合に比べて同 3 層(目付量 900g/m^2)としたときの疲労耐久性の方が低かったことから,図-8.4.1(a) に基づき,剥離指数の閾値を 1.25 とすることを提案する.

$$\varepsilon_{fy}/\varepsilon_{f,cr} < 1.25 \tag{8.4.2}$$

旧共研の輪荷重走行試験の結果 4)は、連続繊維シートを接着した RC 床版の疲労耐久性を検証するための 貴重なデータであり、付着疲労の照査の根拠として現時点で最も適していると考える。この剥離指数は、旧 共研で示された輪荷重走行試験における付着疲労の影響の概念図(本文、図-2.1.2)において、疲労耐久性に 及ぼす付着疲労の影響を表す線に相当する(縦軸の指標が異なるため、上下反転)。これより補強材の付着疲 労に対する要求性能としては、三角ひび割れ発生時のひずみ $\epsilon_{f,cr}$ (計算値)を材料係数 γ_m (>1) で除した値 が $0.8\epsilon_{fr}$ 以上である必要がある。

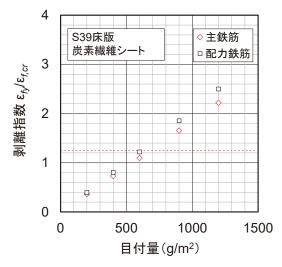
$$\varepsilon_{f,cr}/\gamma_{\rm m} > 0.8 \, \varepsilon_{fy}$$
 (8.4.3)

これらは JSCE101 の剥離限界ひずみに基づき, $G_f = 0.5$ とした場合である 10 . 今後,新たな補強材の性能を確認するため,JSCE-E 543 に従って,せん断付着試験により G_f を求め,0.5 以上が確保されている必要がある.

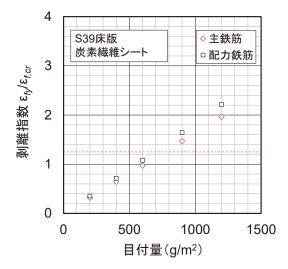
前掲の図-7.4.4~5 の結果より、アラミド繊維シートの場合も、剥離の特性を表す $\varepsilon_{f,cr}$ (計算値) は炭素繊維シートとともに実験値を概ねよく表していた。このことから、図-8.4.1 と同様に、図-8.4.2(a)に、アラミド繊維シートの場合について剥離指数と目付量の関係を示す。アラミド繊維シート(アラミド 1)の場合、目付量 830g/m^2 とすると剥離指数が 1.25 以下であり、主鉄筋方向、配力鉄筋方向ともに目付量 830g/m^2 が適切な補強量であると考えられる。上記の炭素繊維シート 2 層に相当するアラミド 1 の目付量が 830g/m^2 である。

図-8.4.2 には、47 床版の下面に連続繊維シートを接着した場合についても示す。47 床版では、剥離限界における目付量がやや小さい傾向にある。

31 床版よりも古い年代の床版について、昭和 12 年の RCT 桁橋の床版を例に、剥離指数と目付量の関係を図-8.4.2(c)、(f)に示す。この例では、配筋が分からず、非破壊調査による復元が行われていた。その結果では、版厚 150mm、主鉄筋、配力鉄筋とも ϕ 12mm、200mm ピッチと推定されていた。それに加えて、上下かぶりは 35mm、コンクリートの圧縮強度を 24N/mm² と仮定した。上段鉄筋も下段鉄筋と同じ配筋と仮定されていたので、上段鉄筋を下段鉄筋の 1/2 とした場合についても試算したが、剥離指数はほとんど同じであったことから、ここでは復元の例に従った。RC 床版が剥離指数 ϵ_{fi} / $\epsilon_{f,cr}$ < 1.25 の場合に連続繊維シートの剥離が先行すると仮定すると、昭和 31 年よりも古い年代の RC 床版においても、主鉄筋方向、配力鉄筋方向ともに 2 層を基本とするのがよい場合があることが分かる。なお、剥離指数は剥離発生に対する判定指標であり、H8 床版相当の疲労耐久性までの回復の可否を判定する指標ではない。

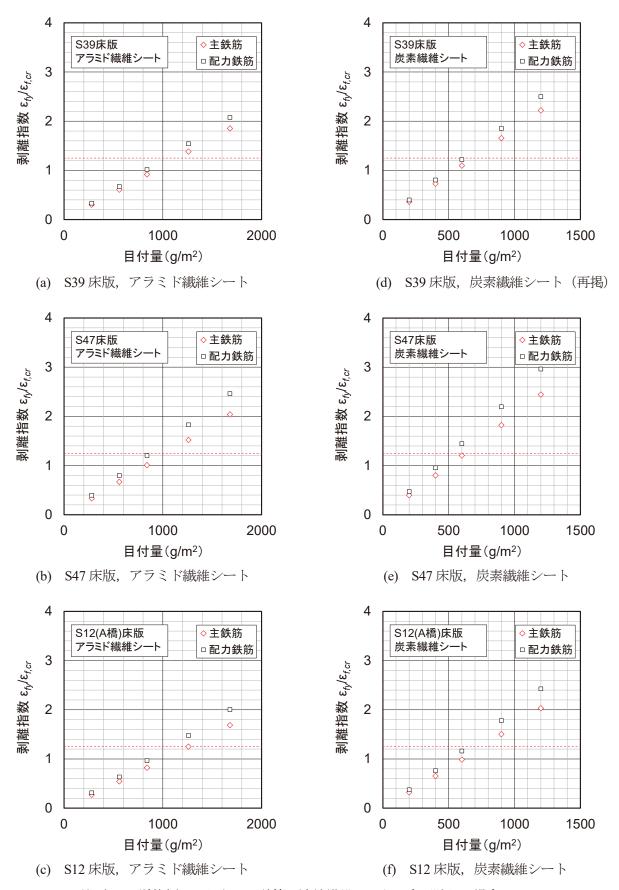


(a) JSCE101 (G_f = 0.5N/mm 一定) $^{10)}$ による $\epsilon_{f,cr}$ を用いた場合



(b) Chen と Teng $^{11)}$ による $\varepsilon_{f,cr}$ を用いた場合注) それぞれの $\varepsilon_{f,cr}$ は図-7.4.4 による.

図-8.4.1 39 床版下面に炭素繊維シートを接着した場合の剥離指数 $\epsilon_{fr}/\epsilon_{f,cr}$ (計算値)



注1) 1m 単位幅のはりとして計算. 連続繊維シートは全面貼りの場合.

注 2) S12 は, RCT 桁橋 (A 橋) の床版の例.

図-8.4.2 各年代を想定した RC 床版に連続繊維シートを接着した際の剥離指数の変化

8.5 含浸樹脂の物性の規定

はり試験やせん断付着試験の結果より、含浸樹脂の物性が剥離に影響することから、ただ繊維に含浸できて硬化し、コンクリートに接着できる樹脂であれば何でもよいというものではないことが分かった。また、図-7.4.4 に示したとおり、本試験シリーズで用いた含浸樹脂の範囲では、式 8.2.2 と 8.4.2 により、中間剥離に対する照査(三角ひび割れに対する照査)ができることが分かった。今回の試験で使用した材料では、含浸樹脂がメーカーで推奨する標準配合であれば、これらの式がその用をなすと考えられる。ここでは、本試験シリーズでアラミド繊維シート及び炭素繊維シートそれぞれに用いた含浸樹脂の物性を表-8.5.1 に記しておく。新たに開発する連続繊維シートなどについて中間剥離の照査を行うには、連続繊維の種類、含浸樹脂の種類ごとに JSCE-E 543 のせん断付着試験により、付着特性を表す Gfを求めるのがよいと考えられる。

今後,これらの強度特性の他,含浸樹脂のガラス転移点 T_g の最小値を規定する必要がある.道路橋床版を対象とした場合,夏季に路面温度が 50 $^{\circ}$ $^$

アラミド繊維シート用 炭素繊維シート用 物性 試験法, 測定法 引張強度 fau, N/mm² 32.6 69.5 JIS K 7161-1 弹性係数 E_a 、 N/mm² 2550 4090 JIS K 7161-1 せん断弾性係数 Ga, N/mm² 903 1490 JIS K 7161-1* JIS K 7161-1* ポアソン比 vg. 一 0.41 0.37 DSC による. ガラス転移点 T₂, ℃ 34 [58] 54 Ref. ASTM-E 1640

表-8.5.1 本試験シリーズで用いた含浸樹脂の物性一覧

注)偏配合のものを除く. [] 内数値は 2 サイクル目の結果を参考として示す. *) 引張試験におけるひずみ測定による 10 .

9. 道路橋 RC 床版の連続繊維シートを用いた補強の設計法(骨子案)

(1) 補強の基本

既設道路橋における RC 床版は、施工条件、環境条件、交通条件等によってさまざまな影響を受けている。また、補強しようとする時点までにさまざまな荷重履歴を受けて、下面に多くのひび割れが発生している場合がある。これらの状況に応じて補強後の疲労耐久性を評価し、補強量を設定することは難しい。確実に何年の耐久性を確保できると保証することが困難な事例が多いと考えられる。よって、既に顕著な劣化が見られる場合を除き、連続繊維シートによる RC 床版の補強は、所要の性能を明示できる連続繊維シートを用いて、その剥離、破断が早期に発生することがなければ、ある程度の補強効果が得られると考える。この点を踏まえて、31 道示以降の道路橋 RC 床版の連続繊維シートによる補強量は、旧共研の報告書 133に基づき、基本目付量(後述)の連続繊維シートで2層×2層を標準補強量とする。旧共研当時は、付着疲労の概念が必ずしも具体ではなかったが、本共研の中で、曲げを受ける RC 部材に連続繊維シートを接着したときの中間剥離の照査方法を明らかにするとともに、それに基づく剥離指数と目付量の直線関係を明らかにしたことで、旧共研における付着疲労の概念をより具体な指標で表すことができた。そして、RC 床版における初期損傷の影響、繰返しの影響、床版の特性の影響を含めた旧共研の輪荷重走行試験結果とのキャリブレーションを経て、剥離指数の具体の関値を得ることができると考える。

31 道示以前に設計された古い RC 床版など、被補強 RC 床版の断面構成、材料構成によっては、H8 床版相当の疲労耐久性までの回復が期待できない場合があるかもしれない。この場合も、上記のとおり RC 床版下面に接着された連続繊維シートは一定の補強効果はあると考えられるので、適正な目標補強量の設定が重要であり、付着疲労が先行するような過度な補強とならないように配慮する必要がある。部材に何らかの補強材を付加して補強する場合、補強材と被補強部材のバランスを考える必要があり、被補強部材の性能によって自ずと補強の限界があると考えておく必要がある。RC 床版の連続繊維シートによる補強で言えば、3 層、5 層、10 層と、単に連続繊維シートの補強効果の指標とされる $E_{p}A_{f}$ のみを考えて設計するようなことは避けるべきである。例え、H8 床版相当にはならなくとも、疲労耐久性の面で既存の状態から大きく改善できると考えるのがよい。

(2) 照査項目の構成と概略設計フロー

図-9.1.1 に、RC 床版の連続繊維シートによる補強の概略設計フロー(案)を示す.ここでは、主として補強材の種類と補強量の決定について示す.上述のとおり、連続繊維シートの標準補強量は基本目付量で2層×2層とする.基本目付量は、炭素繊維シート(高強度型)の場合、300 g/m²、アラミド繊維シート(アラミド 1)の場合、415 g/m²とする.主鉄筋方向、配力鉄筋方向の目付量は、現時点では同等とするのがよい.また、連続繊維シートの種類は、一方向に単一のものを用い、主鉄筋方向、配力鉄筋方向の連続繊維シートの組み合わせも、単一のものとするのがよい.複数の繊維を組み合わせたときの性能は明らかでなく、現時点で補強設計ができる状況にないと考える.これらは現場での煩雑さ等による施工ミスを避けるためにも必要である.

- 31 道示以前のRC床版を対象とする際の連続繊維シートを用いた補強の設計は、次の照査項目で構成する.
 - 1) 連続繊維シート接着後の鉄筋降伏の照査
 - 2) 連続繊維シートの破断の照査
 - 3) 連続繊維シートの剥離の照査

補強材の種類と補強量を決定した後は、指針案3に示されている設計、施工で必要な事項を検討する.

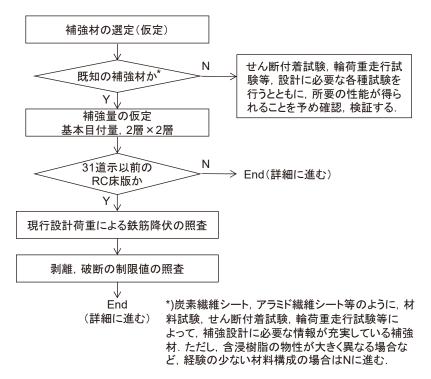


図-9.1.1 RC 床版の連続繊維シートによる補強の概略設計フロー (案) (主として、補強材の種類と補強量の決定)

(3) 連続繊維シート接着後の鉄筋降伏の照査

連続繊維シートの補強効果の照査として,まず,道示による設計曲げモーメントに対して,連続繊維シート接着後の断面で鉄筋の降伏が生じないことを照査する.主鉄筋方向,配力鉄筋方向ともに,式 $6.4.1\sim3$ (または式 8.3.1)により算定した連続繊維シート接着後の係数をかけた降伏曲げモーメント ϕM_y が道示による設計曲げモーメント M_d よりも大きいことを照査する.ここに, ϕ : 部分係数等.このときの設計曲げモーメント M_d は,死荷重と活荷重の両方の影響を含む.

(4) 連続繊維シートの破断の照査

上記(3)の照査において、連続繊維シートのひずみ $\epsilon_{f,Md}$ が引張限界ひずみを超えないことを照査する。破断に対する軸方向引張ひずみの制限値は、連続繊維シート自体の施工の影響、寸法効果の影響、及び疲労の影響を考慮して、次のとおりとする。

$$\varepsilon_{f,Md} < 0.5 \ \varepsilon_{fu}$$
 (9.1.1)

ここに,

 ε_{fu} :連続繊維シートの破断時ひずみの特性値($=\sigma_{fu}/E_{f}$, JIS A 1191 による)

式 9.1.1 における係数 0.5 は文献 40 を参考に定めたものであり,RC 床版の補強に適用する場合に限定した値である。床版支間が 4m を超える場合は,別途検討の上,さらに小さい係数を用いるのがよい。cf. ACI 50 ,AASHTO 60 では,炭素繊維シートに対して 0.55,アラミド繊維シートに対して 0.3.

(5) 連続繊維シートの剥離の照査

8.2 の検討を踏まえて、中間剥離について、上記(3)の照査で得られる連続繊維シートのひずみ $\epsilon_{f,Md}$ が三角 ひび割れ発生時のひずみ $\epsilon_{f,cr}$ を超えないことを照査する.

$$\varepsilon_{f,Md} < \varepsilon_{f,cr}$$
 (9.1.2)

$$\varepsilon_{f,cr} = 280 \ G_f/(t_f E_f) \tag{9.1.3}$$

ここに,

 $\epsilon_{f,cr}$: 三角ひび割れを発生させる連続繊維シートの軸方向ひずみ

 t_f :1方向の連続繊維シートの合計設計厚さ(層数 $n_f \times 1$ 層当り設計厚さ)

 E_f : 連続繊維シートの弾性係数(材料引張試験 JIS A 1191 による)

 G_f : 界面剥離破壊エネルギー (= 0.5, または, せん断付着試験 JSCE-E 543 による)

また、8.4 の検討を踏まえて、付着疲労の影響を考慮して、剥離指数が 1.25 以下となることを照査する. 具体には、補強材の要求性能として、次式のとおり、三角ひび割れ発生ひずみ $\epsilon_{f,cr}/\gamma_m$ が $0.8\epsilon_{f,r}$ 以上であることを照査する.

$$\varepsilon_{f,cr}/\gamma_{\rm m} > 0.8 \ \varepsilon_{fy}$$
 (9.1.4)

$$\varepsilon_{fy} = \varepsilon_{sy} (D - x_{sy})/(d - x_{sy}) \tag{9.1.5}$$

ここに.

 ε_{sy} :下段鉄筋の降伏ひずみ (= σ_{v}/E_{s})

γ_m: 材料係数 (>1)

D: RC 床版の版厚

d : 有効高さ

 x_{sv} : 連続繊維シートを接着したときの下段鉄筋降伏時の中立軸位置(上縁からの距離)(式 6.4.1) 7

前掲図-8.4.1 に、39 道示により設計された床版(以下、39 床版という)を対象に、床版下面に炭素繊維シートを接着した場合の剥離指数 $\varepsilon_{f,cu}/\varepsilon_{f,db}$ (計算値)を目付量との関係で示した。ここでは、39 床版を対象として実施された、旧共研の輪荷重走行試験の結果において、2 層×2 層(各方向の目付量 $600g/m^2$)の場合に比べて 3 層×3 層(同 $900g/m^2$)としたときの疲労耐久性の方が低かったとされる結果より、図中に示すとおり、 $\varepsilon_{f\!\!f}/\varepsilon_{f,cr}<1.25$ を閾値とした。この照査に用いる $\varepsilon_{f\!\!f}$ は、床版の断面性能を単位幅 1m 当りに換算した矩形断面 RC はりを仮定して、主鉄筋方向、配力鉄筋方向についてそれぞれ算定する。

31 道示以前のRC 床版の場合,設計資料や非破壊調査により配筋を確認した上で,主鉄筋方向,配力鉄筋方向の剥離指数をそれぞれ算定し,標準目付量で2層×2層としたときに剥離指数が1.25より大きい場合,目付量を1層×1層とするなど,剥離指数が1.25を超えない範囲で目付量を決定する.

(6) 比較的新しい補強材を用いた連続繊維シートによる補強の設計

比較的新しい補強材を用いる場合,その補強効果は,これまでと同様に実大の供試体による輪荷重走行試験やせん断付着試験などを別途実施して、上記(2)の項目 1)~3)に関わる基本性状を明らかにした上で、設計する必要がある。こうした点は一見従来と同様であるが、本章で要求性能を明確にしたことで、材料や工法の開発を行う際の目標や手順が分かりやすく、第三者への説明もしやすくなると考える。

10. まとめ

含浸樹脂の物性等をパラメータとした12体の連続繊維シートで補強されたはり供試体の曲げ載荷試験,及び同様の材料を用いた10体の供試体のせん断付着試験を行い、次の結果が得られた.

第3章 はり試験

- (1) 一般的な連続繊維シートを用いた場合に、連続繊維シートの中間剥離を再現することができた.
- (2) 含浸樹脂の弾性係数, せん断弾性係数が小さくなるように, 含浸樹脂の配合をあえて変更した偏配合の 供試体では, 連続繊維シートが破断に至ったり, 樹脂層の凝集破壊を起こしたりして, 破壊形態に大きく 影響する場合があることがわかった. ただし, 含浸樹脂の配合を変えたことに伴い, ガラス転移点も大き く低下したことによる影響も考えられるため, 含浸樹脂の弾性係数やせん断弾性係数の影響と区別しにく い面があった. また, 含浸樹脂のガラス転移点の低下に伴い, 一部の供試体では, ひずみの測定に影響が 生じた.
- (3) 連続繊維シートのひずみ測定結果より,連続繊維シートの初期剥離発生時の連続繊維シートのひずみ, 曲げひび割れ付近に見られる小さい斜めひび割れ(三角ひび割れ)の発生後に生じる三角ブロック形成時 の連続繊維シートのひずみを明らかにした.
- (4) 最大荷重時の等曲げ区間における連続繊維シートのひずみは、いずれの試験条件の場合も、せん断付着 試験における剥離発生時の連続繊維シートのひずみに比べ、同等以上であった.
- (5) 偏配合の供試体であっても、連続繊維シートの破断や含浸樹脂の凝集破壊に至る前に、中間剥離の兆候である三角ひび割れの発生が認められた.
- (6) はり試験中における連続繊維シートの面外変形を把握するため、走査可能なレーザー変位計による測定を任意のタイミングで行ったが、はりのたわみ増加に伴う変位計の盛替えの影響もあり、測定頻度が不足して、十分な観察はできなかった。観察できた範囲では、三角ひび割れ発生時や部分剥離発生時に 0.1 mm 程度の面外変形が生じていることを確認した.

第4章 せん断付着試験

はり試験に用いた連続繊維シートとコンクリートのせん断付着特性を把握するために、連続繊維シートの 種類、連続繊維シートの引張剛性、母材コンクリートの圧縮強度、含浸樹脂の弾性係数を試験水準とするせ ん断付着試験を土木学会の試験方法 JSCE-E 543 に従い行った.

- (1) 含浸樹脂が標準配合の場合で、連続繊維シートの破断耐力が同等の補強量であれば、炭素繊維シートとアラミド繊維シートのせん断付着特性に大きな相違はなかった.
- (2) 連続繊維シートの引張剛性を大きくすると、せん断付着強度は増大する傾向を示すが、連続繊維シートの負担する応力度は減少する.
- (3) 母材のコンクリートの圧縮強度を変化させることによる、せん断付着強度、界面剥離破壊エネルギーに

及ぼす影響は軽微であった.

- (4) 連続繊維シートと母材コンクリートを接着する含浸樹脂の主剤と硬化剤の割合を操作することにより 弾性係数を低下させると、付着特性に変化が生じた.特にアラミド繊維シートでは、偏配合とした供試体 Ale1、Ale3 の場合、標準配合の Al と比べて、最大せん断付着応力度とその時点のすべり量が大きくなり、 それに従い、界面剥離破壊エネルギーも著しく増大した.
- (5) 計測した連続繊維シートのひずみの値は、骨材などの局所的な乱れの影響を受けて、測定誤差を含んだせん断付着応力度と相対すべりの関係を得ることになる。そこで、Dai らの方法に基づきひずみー相対すべりの関係を指数型の回帰式を用いて表すことにより、試験結果の評価を試みた。これにより、試験結果からせん断付着応力度と相対すべりの関係を得るのに、同方法が有効であることが確認できた。

第5章 FEM解析

はり試験の2次元非線形FEMより得られた荷重-変位関係では、いずれの供試体モデルにおいても、鉄筋降伏後もある荷重レベルまでは試験結果と概ね一致していたが、試験結果よりも早い段階で荷重のピークとなり、その後、徐々に荷重が低下する傾向であった。少なくとも試験結果と乖離するまでの挙動は、荷重-変位関係や連続繊維シートのひずみ分布においてよく表せていたと考えられる。FEM解析において、連続繊維シートを接着したことによって、はり下端付近のコンクリートに三角ひび割れが生じるような斜め方向の主ひずみが発生すること、その付近で連続繊維シートを下方に押し下げる変位が生じることが確認できた。

第6章 はり試験の挙動における連続繊維シートの弾性係数

はり試験時の連続繊維シートの弾性係数は、当日の温度等の影響を受けて、材料試験結果と異なる可能性があることから、はり試験の結果に基づき、連続繊維シートの弾性係数を評価することを試みた。その結果、主鉄筋の降伏後の荷重一変位の勾配より、はり試験における連続繊維シートの弾性係数は、周囲の温度等の影響により、材料引張試験の結果で得られた弾性係数の 0.8 倍程度であった可能性があると考えられる。この傾向は、材料引張試験の再試験を行った 5 体の連続繊維シートだけでなく、他の供試体も概ね同様の傾向が見られた。

第7章 中間剥離の過程と含浸樹脂の影響

(1) はり試験のビデオ観察と連続繊維シートのひずみデータを分析して、RC はり下面に接着された連続繊維シートの中間剥離の過程を詳細に確認した。中間剥離の過程において、近傍の主鉄筋の降伏、曲げひび割れと連続繊維シートの近傍に発生するコンクリートの三角ひび割れの発生、そして従来から言われる、コンクリートの三角ブロックの形成が生じることを確認した。そして、三角ひび割れ(三角ブロック)を起点に連続繊維シートの部分剥離が発生して、さらにその剥離が支点付近まで広範囲に拡がり全剥離に至った。そのうち、連続繊維シートの剥離の予兆となる三角ひび割れの発生について、特徴を整理した上で、その発生機構を仮定し、三角ひび割れ発生ひずみの推定式を示した。また、三角ひび割れ発生ひずみ

の実測値が JSCE101 の算定式で得られる剥離限界ひずみの 2 乗とよい相関があることから、その相関式も 代替の推定式として提示した.

- (2) 三角ひび割れの発生以降に見られた連続繊維シートの部分剥離及び全剥離の発生荷重について検討を行った.全剥離発生荷重については、12 体のはり試験の結果に基づき重回帰分析により推定式を導出するとともに、その推定式について、既往の研究における 96 体の試験データを用いて検証を行い、高い推定精度が得られることを明らかにした。また、部分剥離発生荷重についても同様に、本研究シリーズによるデータに基づき重回帰分析により推定式を導出した。ただし、部分剥離発生荷重は、従来の試験結果で明示されていないことから、今後、検証データの充実が必要である。
- (3) 上記の三角ひび割れ発生ひずみの推定式は、含浸樹脂の物性もパラメータとしたはり試験のデータに基づくことから、連続繊維シートの剥離の照査においても、これらの物性の影響を考慮できると考えられる.

第8章 中間剥離の照査方法 (案)

第7章の検討結果を踏まえて、曲げを受ける RC 部材下面に接着された連続繊維シートの中間剥離の照査 方法について検討を行った.

- (1) RC はり部材の中間剥離の過程で見られる各事象に着目して、現行道示に基づく設計における照査方法 のイメージをそれぞれ提示した。
- (2) 繰返し走行荷重を受ける RC 床版における連続繊維シートの剥離照査法を得るため、三角ひび割れ発生 ひずみ $\epsilon_{f,cr}$ (回帰式に基づく計算値) と連続繊維シート接着後の RC 部材の降伏時における連続繊維シート 発生ひずみ $\epsilon_{f,c}$ (計算値) の比 $\epsilon_{f,c}/\epsilon_{f,cr}$ を剥離指数として、補強量との関係を示すとともに、旧共研における 輪荷重走行試験の結果と対比して、剥離判定の剥離指数の閾値を 1.25 とすることを提案した.
- (3) 含浸樹脂の物性を規定するには至らなかったので、偏配合を除き、本研究シリーズで用いた含浸樹脂の物性を示すとともに、ガラス転移点を含めて、含浸樹脂の物性として規定した方がよいと考えられる項目を提示した.

第9章 道路橋 RC 床版の連続繊維シートを用いた補強の設計法(骨子案)

以上の検討を踏まえて,道路橋 RC 床版の連続繊維シートを用いた補強の設計法について,骨子案を提示した.道路橋 RC 床版の疲労に対する連続繊維シートによる補強に関して,これまでの課題解決に向けて,旧共研の指針案に示されていた標準補強量 2 層×2 層のさまざまな含意を改めて追認するとともに,暗に示唆されていた付着疲労の概念を,本研究の新たな知見を踏まえて,照査式を伴う明確な要求性能として表した.それを含めて提示した骨子案は,今後,部分係数などを含め,照査法として設計技術資料に反映させるための議論が必要と考える.

参考文献

[1章]

- 1) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針,コンクリートライブラリー101,土木学会,2000.7.
- 2) 国立研究開発法人土木研究所,一般社団法人繊維補修補強協会,積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(I)ー連続繊維シートのせん断弾性係数の検討ー,共同研究報告書第522号,2021.3.
- 3) 国立研究開発法人土木研究所,一般社団法人繊維補修補強協会,積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(II) -連続繊維シート付着挙動の汎用 FEM 解析による検討-,共同研究報告書第 524 号,2021.3.
- 4) 国立研究開発法人土木研究所, 一般社団法人繊維補修補強協会, 積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(Ⅲ) 既設橋における連続繊維シートの挙動と損傷事例-, 共同研究報告書第 554 号, 2022.7.
- 5) 森川英典, 鴨谷知繁, 梶田宏行: 炭素繊維シート補強 RC はりのシートはく離特性の評価と分散ひび割れ型 FEM 解析への適用, 土木学会論文集, No. 802, pp. 15-31, 2005.
- 6) Sebastian, W. M.: Significance of Midspan Debonding Failure in FRP-Plated Concrete Beams, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp. 792-798, July 2001.
- 7) Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J. and Chen, J. F.: Intermediate Crack-Induced Debonding in RC Beams and Slabs, *Construction and Building Materials*, Vol. 17, No. 6-7, pp. 447-462, 2003.
- 8) ACI Committee 440: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute, 440.2R-08, 76 pp., 2008.
- 9) 田中良樹, 村越潤, 玉越隆史, 新藤竹文: 曲げを受ける鉄筋コンクリートに接着された CFRP シートの 破断, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 999-1012, 2017.3.

「2章]

- 1) 建設省土木研究所, 炭素繊維補修・補強工法技術研究会: コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(I) 炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究-, 共同研究報告書第220号, 1999.3.
- 2) 建設省土木研究所, 炭素繊維補修・補強工法技術研究会: コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(II) 炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究-, 共同研究報告書第230号, 1999.10.
- 3) 建設省土木研究所,炭素繊維補修・補強工法技術研究会:コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(III) -炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・

- 施工指針(案)-, 共同研究報告書第235号, 1999.12.
- 4) 松尾伸二,西川和廣,内田賢一,川間重一:既設鉄筋コンクリート床版の補修・補強に関する検討,橋 梁と基礎, Vol. 34, No. 11, pp.25-32, 2000.11.
- 5) 国立研究開発法人土木研究所,一般社団法人繊維補修補強協会,積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(Ⅲ) 既設橋における連続繊維シートの挙動と損傷事例-,共同研究報告書第 554 号,2022.7.(再掲)
- 6) Ladner, M., and Weder, Ch., *Concrete Structures with Bonded External Reinforcement*, EMPA Report No. 206, Dübendorf, 1981.
- 7) Roberts, T.M. and Haji-Kazemi, H.: Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates, *Proc. Inst. Civil Engineers*, Part 2, Vol. 87, No. 1, pp. 39-55, 1989.
- 8) Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu, L. and Connelly, G. M.: External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics, *ACI Structural J.*, Vol. 88, No. 4, pp. 490-500, July-Aug. 1991.
- 9) Sebastian, W. M.: Significance of Midspan Debonding Failure in FRP-Plated Concrete Beams, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp. 792-798, July 2001. (再掲)
- 10) Teng, J. G, Smith, S. T., Yao, J. and Chen, J. F.: Intermediate Crack-Induced Debonding in RC Beams and Slabs, Construction and Building Materials, Vol. 17, No. 6-7, pp. 447-462, 2003. (再掲)
- 11) ACI Committee 440: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute, 440.2R-08, 76 pp., 2008. (再掲)
- 12) Roberts, T. M.: Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams, *Structural Engineer*, 67(12), pp.229-233, 1989.
- 13) Tumialan, J. G., Belarbi, A., and Nanni, A.: *Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Composites:* Failure due to Concrete Cover Delamination, Center for Infrastructure Engineering Studies, 99-01, Department of Civil Engineering, Univ. of Missouri Rolla, March 1999.
- 14) 森川英典, 鴨谷知繁, 梶田宏行: 炭素繊維シート補強 RC はりのシートはく離特性の評価と分散ひび割れ型 FEM 解析への適用, 土木学会論文集, No. 802, pp. 15-31, 2005. (再掲)
- 15) 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683, pp. 47-64, 2001.
- 16) Garden, H.N., Quantrill, R.J., Hollaway, L.C., Thorne, A.M. and Parke, G.A.R.: An Experimental Study of the Anchorage Length of Carbon Fibre Composite Plates Used to Strengthen Reinforced Concrete Beams, Construction and Building Materials, Vol. 12, No. 4, pp. 203-219, 1998.
- 17) 呉智深, 松崎智優, 福沢公夫, 神田建: CFRP シート緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強 効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 641, pp. 153-165, 2000.2.
- 18) 佐藤靖彦, 伊藤智之, 小牧秀之, 前田敏也: 緩衝材を用いた炭素繊維シート補強 RC はりの曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 2, pp. 1375-1380, 2002.
- 19) 岸徳光, 栗橋祐介, 三上浩, 船木隆史: CFRP シート/ロッドを用いて曲げ補強した RC 梁の静的およ

- び衝撃荷重載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 2, pp. 709-714, 2018.
- 20) 太田実,相沢勇,百田国広,中村登喜雄:鋼板接着による鉄筋コンクリート床版補強に関する実験,土 木研究所資料第681号,85 pp.,1971.4.
- 21) 森成道,松井繁之,岩下藤紀,西川和廣:炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究,橋梁と基礎, Vol. 29, No. 3, pp. 25-32, 1995.3.
- 22) Okeil, A. M., El-Tawil, S. and Shahawy, M.: Short-Term Tensile Strength of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates for Flexural Strengthening of Concrete Girders, *ACI Structural J.*, Vol. 98, No. 4, pp. 470-478, July-Aug. 2001.
- 23) Ueda, T., Yamaguchi, R., Shoji, K. and Sato, Y.: Study on Behavior in Tension of Reinforced Concrete Members Strengthened by Carbon Fiber Sheet, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 6, No. 3, pp. 168-174, Aug. 2002.
- 24) Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L. P. and Jiang, J. J.: Intermediate Crack Debonding in FRP-Strengthened RC Beams: FE Analysis and Strength Model, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 11, No. 2, pp. 161-174, April 2007.
- 25) El-Tawil, S. and Okeil, A.: Design of Concrete Bridge Girders Strengthened with CFRP Laminates, Static Strength, Fatigue Behavior and Reliability, Final Report, University of Central Florida, 124 pp., July 2001.
- 26) Guide Specifications for Design of Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements, AASHTO, 2012.
- 27) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針,コンクリートライブラリー101,土木学会,2000.7. (再掲)
- 28) ACI Committee 440: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute, 440.2R-17, 112 pp., 2017.
- 29) Bilotta, A., Faella, C., Martinelli, E., and Nigro, E.: Design by Testing Procedure for Intermediate Debonding in EBR FRP Strengthened RC Beams, *Engineering Structures*, Vol. 46, pp. 147-154, Jan. 2013.
- 30) 袁鴻, 呉智深, 吉沢弘之: 外面接着された鋼板/連続繊維シートとコンクリートの界面せん断伝達に関する解析的検討, 土木学会論文集, No. 675, pp. 27-39, 2001.
- 31) Chen, J. F., and Teng, J.G.: Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp.784-791, July 2001.

[3章]

- 森成道,松井繁之,岩下藤紀,西川和廣:炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究,橋梁と基礎, Vol. 29, No. 3, pp. 25-32, 1995.3. (再掲)
- 2) 国立研究開発法人土木研究所,一般社団法人繊維補修補強協会,積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(I) -連続繊維シートのせん断弾性係数の検討-,共同研究報告書第522号,2021.3.(再掲)
- 3) 中井裕司, 大久保誠, 長谷川泰聰, 田中良樹: 連続繊維シートで補強した RC 部材の軸引張試験と FEM

- 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 1087-1092, 2020.
- 4) 国立研究開発法人土木研究所,一般社団法人繊維補修補強協会,積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(Ⅱ)ー連続繊維シート付着挙動の汎用 FEM 解析による検討ー,共同研究報告書第 524 号,2021.3.(再掲)

「4章]

- 1) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針,コンクリートライブラリー101,土木学会,2000.7.(再掲)
- 2) 上原子晶久,下村匠,丸山久一,西田浩之:連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析, 土木学会論文集, Vol. 634, pp. 197-208, 1999.11.
- 3) 吉澤弘之:連続繊維シートによるコンクリート構造物の複合補強効果の解明, 茨城大学学位論文, 2000.3.
- 4) 金久保利之,中場和正,吉田智基,吉澤弘之:連続繊維シートとコンクリートの局所付着応力一すべり 量関係の提案,コンクリート工学論文集,Vol. 12, No. 1, pp. 33-43, 2001.1.
- 5) 杉山裕樹, 森川英典, 小林秀惠, 中島潤一郎:接着樹脂の材質に着目した連続繊維補強 RC はりの付着 および耐荷性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 289-294, 2000.
- 6) Dai, J., Ueda, T. and Sato, Y.: Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No. 1, pp. 52-62, 2005.

「5章]

- 1) 野並優二,篠崎裕生,新藤竹文,田中良樹:非線形有限要素解析による炭素繊維シートにより補強した RC 梁部材の破壊機構に関する検討,コンクリート工学年次論文集,Vol. 42, No. 2, pp. 1099-1104, 2020.
- 2) 国立研究開発法人土木研究所,一般社団法人繊維補修補強協会,積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(II)ー連続繊維シート付着挙動の汎用 FEM 解析による検討ー,共同研究報告書第 524 号,2021.3.(再掲)
- 3) Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P., and Jiang, J.J.: Intermediate Crack Debonding in FRP-Strengthened RC Beams: FE Analysis and Strength Model, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 11, No. 2, pp. 161-174, 2007.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2017.
- 5) 前川宏一,安雪暉, 土屋智史: コンクリート構造物の破壊解析への応用, コンクリート工学, Vol. 37, No. 9, pp. 54-60, 1999.
- 6) Cornelissen, H.A.W., Hordijk, D. A., and Reinhardt, H.W.: Experimental Determination of Crack Softening Characteristics of Normalweight and Lightweight Concrete, *Heron*, Vol. 31, No. 2, pp. 45-56, 1986.
- 7) 島弘,周礼良,岡村甫:マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係,土木学会論文集,No. 378, pp. 165-174, 1987.
- 8) 張広鋒, 星隈順一, 堺淳一, 運上茂樹: 炭素繊維シートと鋼板を併用した RC 橋脚の耐震補強工法とそ

- の効果, 土木学会論文集 A1, Vol. 67, No. 2, pp. 430-445, 2011.
- 9) 国立研究開発法人土木研究所,一般社団法人繊維補修補強協会,積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(I) -連続繊維シートのせん断弾性係数の検討-,共同研究報告書第522号,2021.3.(再掲)
- 10) 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683, pp. 47-64, 2001. (再掲)

[6章]

- 1) Timoshenko, S.: *Strength of Materials, Part I: Elementally Theory and Problems*, third edition, D. Van Nostrand Co., Inc., New Jersey, 442 pp., 1956.
- 2) 岡村甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則,技報堂出版,1991.5.
- 3) 田中良樹, 村越潤, 玉越隆史, 新藤竹文: 曲げを受ける鉄筋コンクリートに接着された CFRP シートの 破断, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 999-1012, 2017.3. (再掲)
- 4) 森成道,松井繁之,岩下藤紀,西川和廣:炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究,橋梁と基礎, Vol. 29, No. 3, pp. 25-32, 1995.3. (再掲)

「7章]

- 岸徳光,三上浩,栗橋祐介:AFRPシートで曲げ補強したRC梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集,No. 683, pp. 47-64, 2001. (再掲)
- 2) 田中良樹, 村越潤, 玉越隆史, 新藤竹文: 曲げを受ける鉄筋コンクリートに接着された CFRP シートの 破断, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 999-1012, 2017.3. (再掲)
- 3) 中井裕司,大久保誠,長谷川泰聰,田中良樹:連続繊維シートで補強したRC 部材の軸引張試験とFEM 解析,コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 1087-1092, 2020. (再掲)
- 4) 国立研究開発法人土木研究所,一般社団法人繊維補修補強協会,積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(II) ー連続繊維シート付着挙動の汎用 FEM 解析による検討ー,共同研究報告書,第 524 号,2021.3.(再掲)
- 5) 例えば、連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、コンクリートライブラリー101、 土木学会、2000.7. (再掲)
- 6) Chen, J. F., and Teng, J.G.: Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp.784-791, July 2001. (再掲)
- 7) ACI Committee 440: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute, 440.2R-08, 76 pp., 2008. (再掲)
- 8) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編],2017.(再掲)
- 9) 例えば、岡田清:鉄筋コンクリート工学、朝倉土木工学講座8,朝倉書店、1972.11.
- 10) 国立研究開発法人土木研究所,一般社団法人繊維補修補強協会,積水化学工業株式会社:連続繊維補強

- された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(I) -連続繊維シートのせん断弾性係数の検討-,共同研究報告書第522号,2021.3.(再掲)
- 11) 岸徳光, 三上浩, 佐藤昌志, 松岡健一: FRP シートを接着した RC 梁の曲げ付着性状, コンクリート工 学年次論文報告集, Vol. 20, No. 1, pp. 515-520, 1998.
- 12) 三上浩, 岸徳光, 佐藤昌志, 栗橋祐介: FRP シートを接着した RC 梁の耐荷性状に与える接着範囲の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 1549-1554, 1999.
- 13) 栗橋祐介, 岸徳光, 三上浩, 松岡健一: RC 梁における載荷点間隔が FRP シートの曲げ付着性状に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 1555-1560, 1999.
- 14) 栗橋祐介, 岸徳光, 三上浩, 松岡健一: RC 梁に接着した FRP シートの曲げ付着特性に与えるシート補強量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 481-486, 2000.
- 15) 栗橋祐介, 岸徳光, 三上浩, 松岡健一: FRP シートの必要接着長に着目した曲げ補強 RC 梁の静載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 835-840, 2001.
- 16) 栗橋祐介, 岸徳光, 三上浩, 張広鋒: 引張剛性の等しい各種 FRP シートを接着した RC 梁の曲げ耐荷性 状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 2, pp. 1429-1434, 2002.
- 17) 栗橋祐介, 岸徳光, 三上浩, 澤田純之: FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離抑制法に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 1771-1776, 2003.
- 18) 澤田純之, 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁のシート必要接着長算定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp. 1789-1794, 2003.
- 19) 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介, 澤田純之: AFRP シート曲げ補強 RC 梁の破壊性状に及ぼすシート接着長の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 1615-1620, 2004.
- 20) 岸徳光, 三上浩, 田村富雄, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷挙動に及ぼす補強筋の剛性の 影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 1417-1422, 2005.
- 21) 高橋義裕, 佐藤靖彦, 前田敏也, 上田多門: 炭素繊維シートにより曲げ補強した鉄筋コンクリートはりの耐力及び変形, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 1611-1616, 1997.
- 22) 高橋義裕,秦地大,前田敏也,佐藤靖彦:炭素繊維シートで曲げ補強したはりの曲げ性状に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol. 20, No. 1, pp. 509-514, 1998.
- 23) 佐藤靖彦, 伊藤智之, 小牧秀之, 前田敏也: 緩衝材を用いた炭素繊維シート補強 RC はりの曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 2, pp. 1375-1380, 2002. (再掲)
- 24) 高橋義裕, 佐藤靖彦: 炭素繊維で曲げ補強した RC はりの耐力及び変形に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 2, pp. 1393-1398, 2002.
- 25) 高橋義裕, 佐藤靖彦: 初期荷重を受け CFRP 補強された RC 梁の曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 1699-1704, 2004.
- 26) 高橋義裕, 佐藤靖彦: CFRP シートで曲げ補強された RC はりの耐力及び変形に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 1423-1428, 2005.
- 27) 高橋義裕, 佐藤靖彦: CFRP シート長及び U 字補強が RC はりの曲げ補強効果に及ぼす影響, コンクリー

- 卜工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp. 1477-1482, 2007.
- 28) 吉田隆浩, 森川英典, 鴨谷知繁:接着界面条件を考慮した連続繊維シート補強 RC 部材の性能評価, アップグレードシンポジウム論文集, Vol. 2, pp. 73-80, 2002.
- 29) 森川英典, 鴨谷知繁, 梶田宏行: 炭素繊維シート補強 RC はりのシートはく離特性の評価と分散ひび割れ型 FEM 解析への適用, 土木学会論文集, No. 802, pp. 15-31, 2005.
- 30) 野々村佳哲,内藤勲,島多昭典:連続繊維シート補強した橋脚の維持管理に関する一提案,第 64 回北海道開発技術研究発表会論文,pp. 556-561, 2021.2.

[8章]

- 1) 道路橋示方書·同解説, I 共通編, 日本道路協会, 2017.
- 2) 田中良樹, 村越潤, 玉越隆史, 新藤竹文: 曲げを受ける鉄筋コンクリートに接着された CFRP シートの 破断, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 999-1012, 2017.3. (再掲)
- 3) Kim, Y. J. and Heffernan, P. J.: Fatigue Behavior of Externally Strengthened Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymers: State of the Art, *J. of Composites for Construction*, 12(3), pp.246-256, Jun 2008.
- 4) 建設省土木研究所,炭素繊維補修・補強工法技術研究会:コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(I) -炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究ー,共同研究報告書第220号,1999.3.(再掲)
- 5) 松井繁之: 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究,大阪大学博士論文,1984.11.
- 6) 長屋優子, 村越潤, 田中良樹: 繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する 検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 907-912, 2008.7.
- 7) 田中良樹, 村越潤, 長屋優子: 道路橋 RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりの剥離の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 913-918, 2008.7.
- 8) 田中良樹, 村越潤, 玉越隆史, 新藤竹文: 格子状に炭素繊維シート接着補強された RC 床版の輪荷重走 行下における破壊性状, 第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp. 77-82, 2016.11.
- 9) 田中良樹, 村越潤, 玉越隆史, 新藤竹文: RC 床版の主鉄筋方向挙動に及ぼす CFRP シート接着補強方向の影響, 第9回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp. 83-88, 2016.11.
- 10) 国立研究開発法人土木研究所, 一般社団法人繊維補修補強協会, 積水化学工業株式会社:連続繊維補強された RC 床版の耐久性評価に関する共同研究報告書(I) -連続繊維シートのせん断弾性係数の検討-, 共同研究報告書第 522 号, 2021.3. (再掲)

[9章]

- 1) 建設省土木研究所, 炭素繊維補修・補強工法技術研究会: コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(I) 炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究-, 共同研究報告書第 220 号, 1999.3. (再掲)
- 2) 建設省土木研究所,炭素繊維補修・補強工法技術研究会:コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅱ)-炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究ー,共同研究報告書第230号,1999.10.(再掲)
- 3) 建設省土木研究所, 炭素繊維補修・補強工法技術研究会: コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ) 炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案) , 共同研究報告書第 235 号, 1999.12. (再掲)
- 4) 田中良樹, 村越潤, 玉越隆史, 新藤竹文: 曲げを受ける鉄筋コンクリートに接着された CFRP シートの破断, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 999-1012, 2017.3. (再掲)
- 5) ACI Committee 440: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute, 440.2R-17, 112 pp., 2017. (再掲)
- 6) Guide Specifications for Design of Bonded FRP Systems for Repair and Strengthening of Concrete Bridge Elements, AASHTO, 2012. (再掲)
- 7) 森成道,松井繁之,岩下藤紀,西川和廣:炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究,橋梁 と基礎, Vol. 29, No. 3, pp. 25-32, 1995.3. (再掲)

付属資料

付属資料 1 含浸樹脂の配合に関する事前検討

付属資料1 含浸樹脂の配合に関する事前検討

1. 目的

せん断弾性係数の異なる樹脂を使用したはり曲げ試験を実施するため、せん断弾性係数の低い樹脂を簡易的に作り出すことを検討した. e3 配合は、標準配合のせん断弾性係数の 25%, e1 配合はその中間の 60%を目標にそれぞれ決定した.

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を以下に示す. 試験体一覧を付表-1.1 に示す. 本検討では主剤と硬化剤の比をパラメータとして 試験を行った.

・接着剤 : 炭素繊維用エポキシ樹脂含浸接着剤 FR-E3P (T)

:アラミド繊維用エポキシ樹脂含浸接着剤 FF-D90

・プライマー : エポキシ樹脂プライマー FP-NS (T)

:アラミド繊維用エポキシ樹脂含浸接着剤 FF-P10

・連続繊維シート: 高強度型炭素繊維シート 200g/m² (FTS-C1-20)

: アラミド 1 繊維シート 400kN/m, 280g/m² (FF-AW40)

付表-1.1 試験体一覧

(a) 炭素繊維シート

No.	配合比
1	主剤:硬化剤=2:1(標準)
2	主剤:硬化剤=2:1.4
3	主剤:硬化剤=2:1.5
4	主剤:硬化剤=2:1.7

(b) アラミド繊維シート

No.	配合比
1	主剤:硬化剤=2:1 (標準)
2	主剤:硬化剤=2:1.4
3	主剤:硬化剤=2:1.7

2.2 試験方法

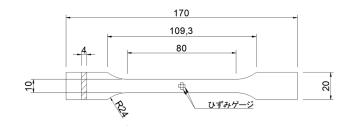
各試験の試験方法および強度の算出はそれぞれ以下の規格に準拠する. また, 付図-1.1, 付図-1.2, 付図-1.3 に引張試験, 圧縮試験, FRP 引張試験の試験体図を示す.

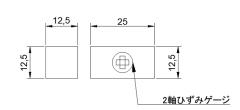
・接着試験: JSCE E 545 連続繊維シートとコンクリートとの接着試験方法

・ 引張強度 : JIS K 7161 プラスチックー引張特性の試験方法

・圧縮強度 : JIS K 7181 プラスチックー圧縮特性の試験方法

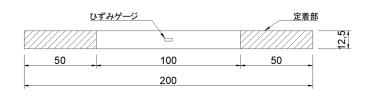
・FRP 引張強度 : JIS A 1191 コンクリート補強用連続繊維シートの引張試験方法





付図-1.1 樹脂引張試験体図(単位:mm)

付図-1.2 樹脂圧縮試験体図(単位:mm)



付図-1.3 FRP 引張試験体図(単位:mm)

2.3 試験手順

1) 試し練り

硬化後の状態を確認し、明らかに硬化しない、含浸しないなど施工に適さないものを排除するために実施した.

2) 接着試験

プライマー塗布後、炭素繊維シートを含浸樹脂で含浸接着し、建研式の接着試験体(JSCE E 545)を作製した、明らかに塗継ぎ性能の低下したもの、凝集破壊するものを排除することとした。

3) 物性確認試験

樹脂単体の引張試験 (JISK 7161-1), 圧縮試験 (JISK 7181) 及び共同研究報告書 (I) により強度, 伸び, ポアソン比, せん断弾性係数を確認し, せん断弾性係数が 25%, 60%程度のものを選定することとした. 最後に FRP としての引張試験 (JISA1191) を実施し, 引張強度, 弾性係数を確認した.

なお、事前試験では、いずれの試験も約23℃の室内で実施した.

3. 試験結果

3.1 試し練り

付表-1.2 に試験体 No.2~4 の試し練りの試験結果を示す. No.1 に関しては通常の混合比であり、硬化することは明らかであるため試し練りは実施しなかった.

今回の試し練りでは、すべての試験体で、硬化、含浸性ともに問題なかった。ただし、炭素繊維シート用 樹脂 No.4 に関しては、表面にややベタツキがあったため、主剤:硬化剤=2:1.7 が硬化する限界と考えられ る。そのため、主剤 2 に対する硬化剤の比が 1.7 以下で検討した。

付表-1.2 試し練り結果一覧

(a) 炭素繊維シート用樹脂

No.	主剤:硬化剤 (標準2:1)		硬化状況	含浸性	備考	
2	2	: 1.4		0	0	
3	2	2 : 1.5		0	0	
4	2	:	1.7	Δ	0	表面にややベタツキあり

(b) アラミド繊維シート用樹脂

No.	主剤:硬化剤 (標準2:1)		硬化状況	含浸性	備考	
2	2	2 : 1.4		0	0	
3	2	2 : 1.7		0	0	

3.2 接着試験

付表-1.3 に試験体 No.2~4 の建研式接着試験結果を示す. 試験体 No.1 に関しては既往の実験により母材破壊することは明らかであるため接着試験は実施しなかった. 付写真-1.1 に示すように, 炭素繊維シート用樹脂ではすべての試験体で母材破壊となったため十分な接着性能があることが確認できた. アラミド繊維シートの No.3 においては, 破断面に接着樹脂の一部が躯体側に残る破壊状況が確認された.

付表-1.3 建研式接着試験結果一覧

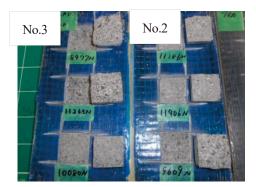
(a) 炭素繊維シート用樹脂

No	主剤:硬化剤	接着強度(N/mm²)		破壊状况	
No.	土角:似化剂	実測値	平均值	1奴泰仏仏	
		6.99		母材破壊	
2	2:1.4	7.44	6.81	母材破壊	
		6.01		母材破壊	
		5.61		母材破壊	
3	2:1.5	7.04	6.32	母材破壊	
		6.30		母材破壊	
	5.76			母材破壊	
4	2:1.7	5.33	5.69	母材破壊	
		5.98		母材破壊	

付表-1.3 建研式接着試験結果一覧(続き)

(b) アラミド繊維シート用樹脂

No	子刘,西 //刘	接着強度(N/mm²)		破壊状況
No.	主剤:硬化剤	実測値	平均值	1灰袋1人亿
		2.63		母材破壊
2	2:1.55	3.58	3.53	母材破壊
		3.85		母材破壊
		3.12		母材破壊
3	2:1.7	3.63	3.49	部分的にシート界面破壊
		3.73		部分的にシート界面破壊





付写真-1.1 建研式接着試験結果例 (左:炭素,右:アラミド)

3.3 物性試験

(1) 樹脂引張試験·圧縮試験

付表-1.4 に各試験の弾性係数の計算方法を示す. ポアソン比に関しては JIS 規格に計算範囲の記載がないため弾性係数と同様のひずみの範囲での平均として算出した. 付表-1.5 に炭素繊維シート用樹脂の各物性試験の結果を示す. 引張, 圧縮試験結果から, No.2 と No.4 が概ね目標値に近い弾性係数であった. 付表-1.6 に, アラミド繊維シート用樹脂の各物性試験の結果を示す. 樹脂引張試験の事前試験の結果より, No.2 と No.3 の中間の配合が概ね目標値に近い弾性係数になるため, 本試験には主剤硬化剤比 2:1.55 を採用した.

(2) FRP 引張試験

FRP 引張試験に関して、炭素・アラミドとも主剤・硬化剤の比を変えることによる引張強度の変化は小さかった。

炭素繊維の試験体 No.4 に関して、ひずみゲージを用いてひずみを測定し弾性係数を算出したが、試験体ご との弾性係数のばらつきが大きく、ひずみを正しく計測できなかった。そこで主剤硬化剤比を 2:1.65 とし た試験を実施した。本試験体はばらつきが小さく、標準配合と同程度の弾性係数であったため、ひずみを正 しく測定できたと考えられる. アラミド繊維シートの場合, その傾向は確認されず, いずれの配合においても物性を測定することが可能であった.

以上から、曲げ試験に用いる炭素繊維シート用樹脂の主剤硬化剤比は2:1.4 と2:1.65 に決定した.

付表-1.4 樹脂及び FRP の材料試験及び計算方法

JIS 規格番号	規格名称	試験項目	計算方法
JIS K 7161-1	プラスチックー引	弾性係数	$arepsilon_I = 0.05\%$ 及び $arepsilon_2 = 0.25\%$ のひずみ 2 点間に対応する応
	張特性の求め方		力/ひずみ曲線の傾き
JIS K 7181	プラスチック-圧	弾性係数	$arepsilon_I = 0.05\%$ 及び $arepsilon_2 = 0.25\%$ のひずみ 2 点間に対応する応
	縮特性の求め方		力/ひずみ曲線の傾き
JIS A 1191	コンクリート補強	弾性係数	荷重-ひずみ曲線から、最大引張荷重の20%と50%の
	用連続繊維シート		値を用いて,式(3)によって計算し,四捨五入して有効
	の引張試験方法		数字 3 けたに丸める
			$E = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \times A_S} \cdot \cdot \cdot (3)$
			ここに, E:ヤング係数 (N/mm²)
			△F:最大引張荷重の20%と50%における2点
			間の荷重の差(N)
			arDelta arepsilon: 最大引張荷重の $20%$ と $50%$ におけるひず
			みの差
			A_S : 試験片断面積(${ m mm}^2$)

付表-1.5 炭素繊維シート用樹脂の各物性試験の結果一覧

(a) 樹脂引張試験

NI.	主剤:硬化剤		引張強度	弾性係数	ポアソン	せん断弾性係数	
No.	(標準2:1)		(N/mm^2)	(N/mm^2)	比	(N/mm^2)	
1	2	:	1	62.4	3837	0.36	1415
2	2	:	1.4	43.6	2900	0.38	1057
3	2	:	1.5	34.3	2334	0.37	850
*	2	:	1.65	14.3	888	0.37	324
4	2	:	1.7	11.6	1251	0.53	409

(b) 樹脂圧縮試験

N	主剤:硬化剤		圧縮強度	弾性係数	ポアソン	せん断弾性係数	
No.	(標準2:1)		(N/mm ²)	(N/mm^2)	比	(N/mm^2)	
1	2	:	1	92.1	5325	0.38	1936
2	2	:	1.4	70.9	3428	0.41	1217
3	2	:	1.5	48.3	3564	0.37	1310
*	2	:	1.65	39.0	1176	0.49	394
4	2	:	1.7	18.2	2079	0.57	663

(c) FRP 引張試験

NI.	主	刹 :荷	更化剤	引張強度	弾性係数	備考	
No.	(標準2:1)		(標準 2:1) (N/mm²) (N/mm²)		(N/mm^2)	/用·芍	
1	2 : 1		1	3984	248000		
2	2	2 : 1.4		4422	250000		
*	2	:	1.65	4266	245000	No.4 が計測できなかったため追加	
4	2	:	1.7 3472		-	正しく計測できなかった	

付表-1.6 アラミド繊維シート用樹脂の各物性試験の結果一覧

(a) 樹脂引張試験

NI.	主剤:硬化剤		引張強度	弾性係数	ポアソン	せん断弾性係数	
No.	(標準2:1)		(N/mm^2)	(N/mm^2)	比	(N/mm^2)	
1	2	:	1	32.6	2546	0.41	903
2	2	:	1.4	32.5	2196	0.42	782
*	2	:	1.55	15.1	1338	0.34	500
3	2	:	1.7	4.6	579	0.20	224

^{*}本試験に採用した主剤硬化剤比

(b) 樹脂圧縮試験

N	主剤:硬化剤		圧縮強度	弾性係数	ポアソン	せん断弾性係数	
No.	(標準2:1)		(N/mm ²)	(N/mm^2)	比	(N/mm^2)	
1	2	:	1	72.9	2031	0.55	657
2	2	:	1.4	67.7	1935	0.50	649
*	2	:	1.55	_	_	_	_
3	2	:	1.7	34.6	1386	0.59	436

^{*}主剤硬化剤比2:1.55の圧縮試験は、未実施.

(c) FRP 引張試験

No	主剤:硬化剤		引張強度	弹性係数	備考	
No.	(標準2:1)		2:1)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	加持
1	2	:	1	2988	135000	
2	2	:	1.4	2924	137000	
*	2	:	1.55	_	_	No.3 で測定可能であったため事前試験を省略
3	2	:	1.7	3213	136000	

^{*}本試験に採用した主剤硬化剤比

4. ガラス転移点の測定結果

付写真-1.2 に示す示差走査熱量計 DSC7020 を用いて、本試験に使用した樹脂のガラス転移点 (T_g) の測定を行った。代表として炭素繊維シート用樹脂の結果の詳細を以下に示す。



付写真-1.2 示差走查熱量計 DSC7020

付表-1.7~8 に T_g 測定結果一覧,付図-1.4~6 に出力図を示す.試料ははり試験を行った日に FRP 引張試験 片から採取し,主剤-硬化剤の反応を止めるため,測定日まで冷蔵庫に保管した.図中の緑線は DSC 出力, 青線は DDSC 曲線であり,DDSC 曲線は DSC 曲線を微分して得られた曲線である.e1,e3 については,1 回目の測定の Cycle1 で T_g が得られなかったことから,温度履歴範囲を低く設定して測定を再度行った(付表-1.8).はり試験を行った日に FRP 引張試験片から採取した別の試料を用いて,2 回目の測定を行った.

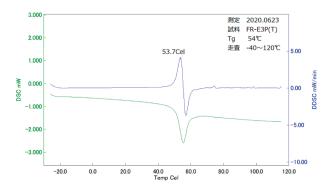
付表-1.7	T。測定結果一覧①	(温度履歴	-10°C→200°C	10°C/min)
13/4X-1./		(1001/文//发/iE	-10 C /200 C	10 C/IIIII/

試料	Cycle	Tg測定結果
標準配合 (2:1)	Cycle1	53.7
e1 (2:1.4)	Cycle1	-
	Cycle2	50.1
e3 (2:1.65)	Cycle1	-
	Cycle2	40.3

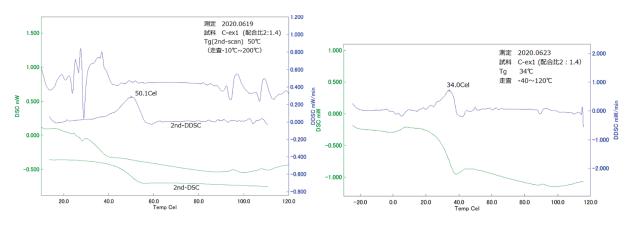
%Cycle1 では波形が安定せず, T_g が測定できなかったため,Cycle2 を行った.

付表-1.8 T_g 測定結果一覧②(温度履歴 -40℃→120℃ 10℃/min)

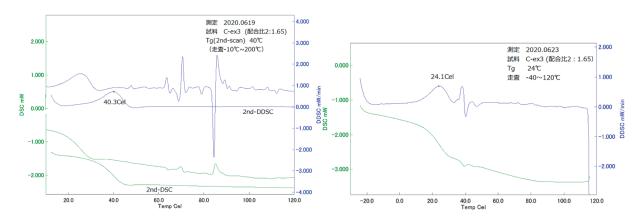
試料	Cycle	Tg 測定結果
e1 (2:1.4)	Cycle1	34.0
e3 (2:1.65)	Cycle1	24.1



付図-1.4 標準配合 (2:1) DSC 曲線



付図-1.5 e1 (2:1.4) DSC 曲線

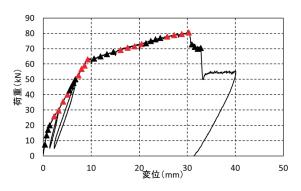


付図-1.6 e3 (2:1.65) DSC 曲線

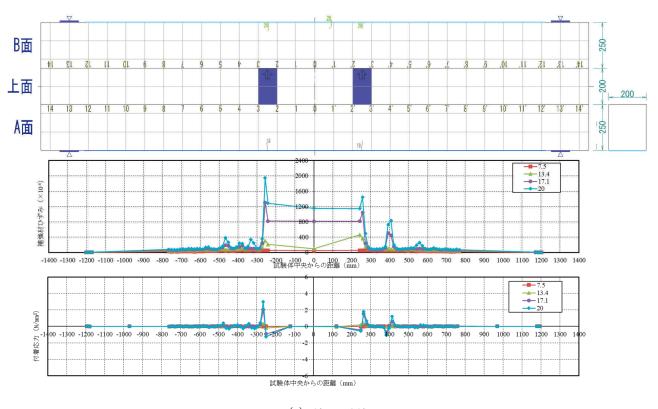
付属資料 2 はり試験のひずみデータ

はり試験の各供試体の荷重変位関係、ひび割れ図、繊維シートひずみ分布、付着応力図、 ひずみゲージとパイ型変位計による繊維シートひずみ一鉄筋のひずみ比較図を以下に示す。 ひび割れ図、繊維シートひずみ分布図、付着応力図は荷重変位関係図に黒▲と赤▲で示した 荷重値での測定値であり、繊維シートひずみ一鉄筋のひずみ比較図は、それぞれの範囲での 最大荷重値での測定値である。

付 2.1 C116 のデータ



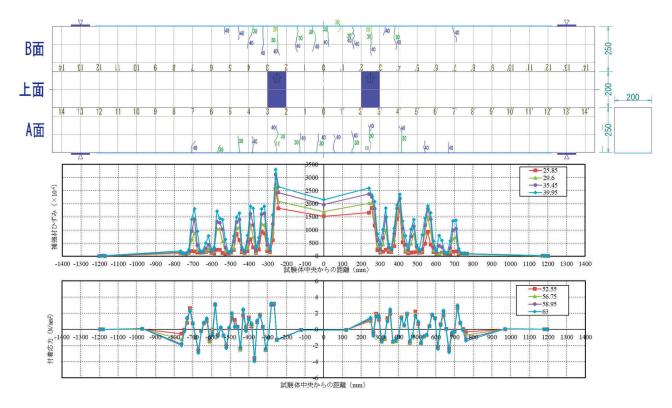
付図-2.1.1 C116 の荷重変位関係



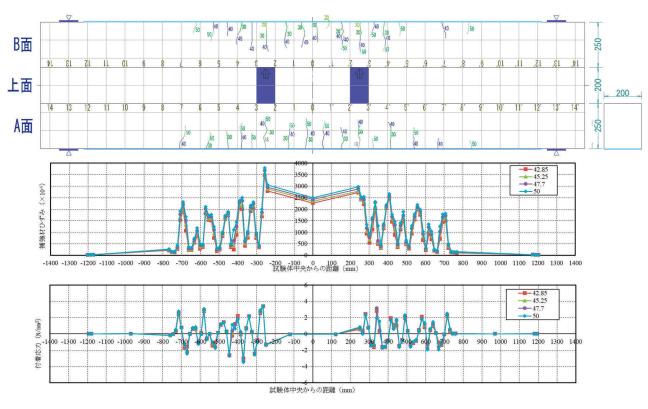
(a) 0kN-20kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.1.2 C116のひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図



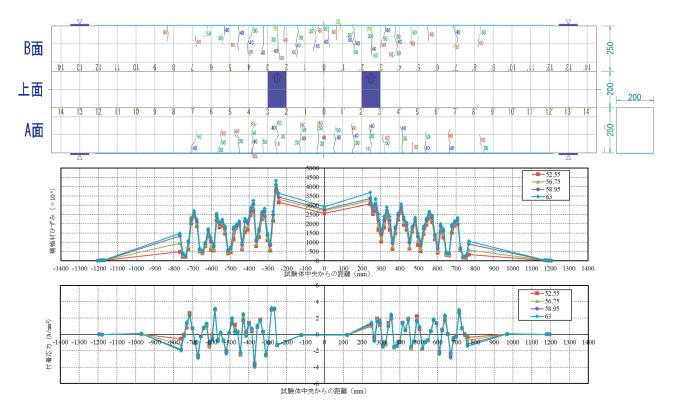




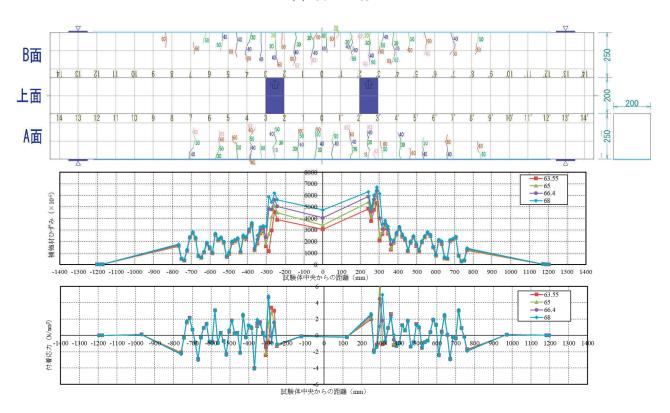
(c) 40kN - 50kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.1.2 C116 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



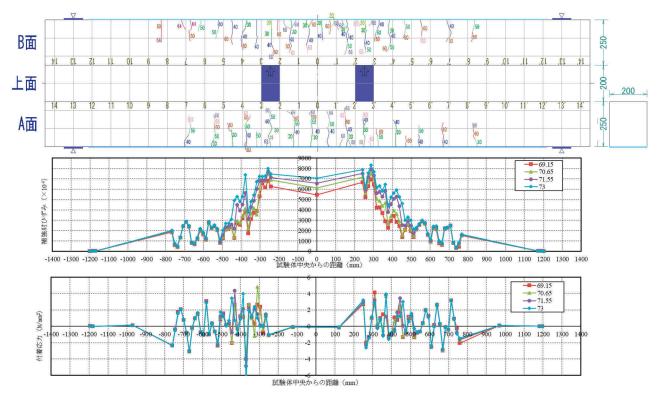
(d) 50kN - 63kN



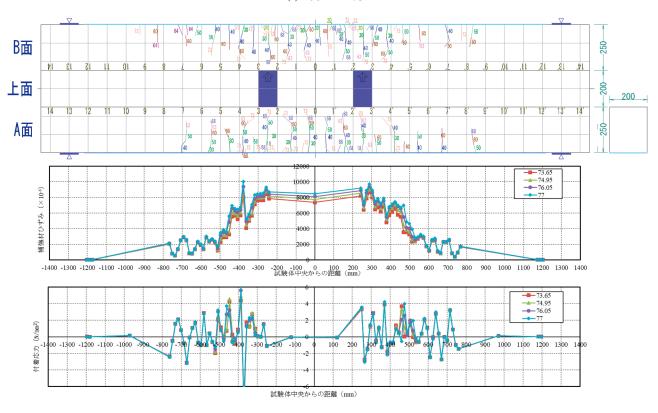
(e) 63kN-68kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.1.2 C116 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



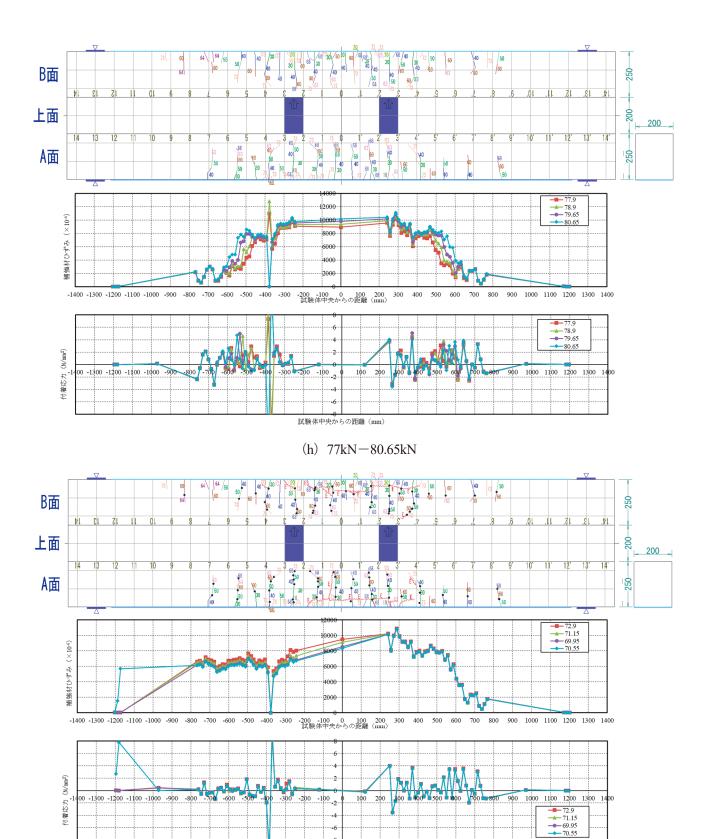




(g) 73kN - 77kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.1.2 C116 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

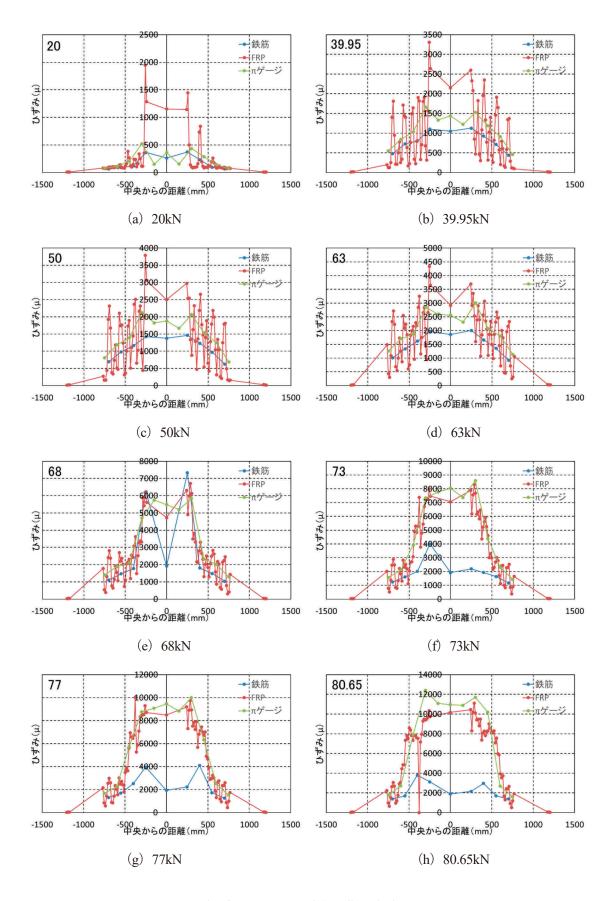


(i) ポストピーク

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

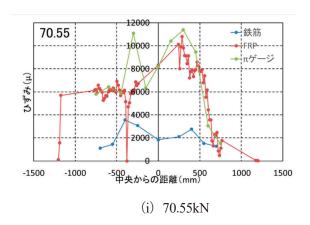
試験体中央からの距離(mm)

付図-2.1.2 C116 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



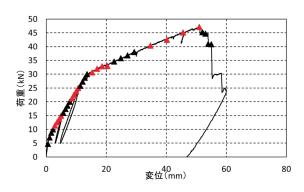
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.1.3 C116のひずみ分布比較図

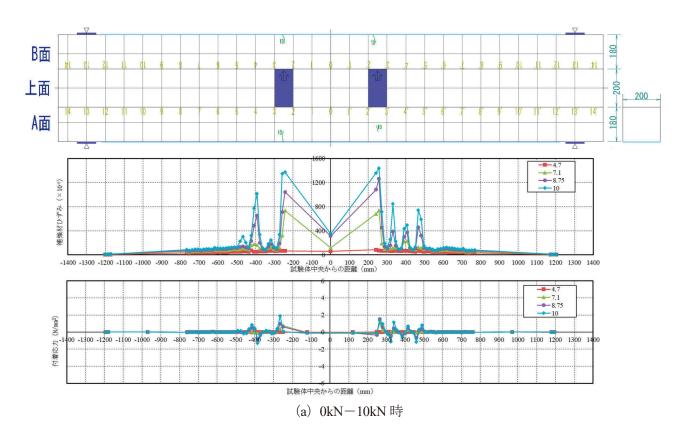


注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.1.3 C116のひずみ分布比較図(続き)

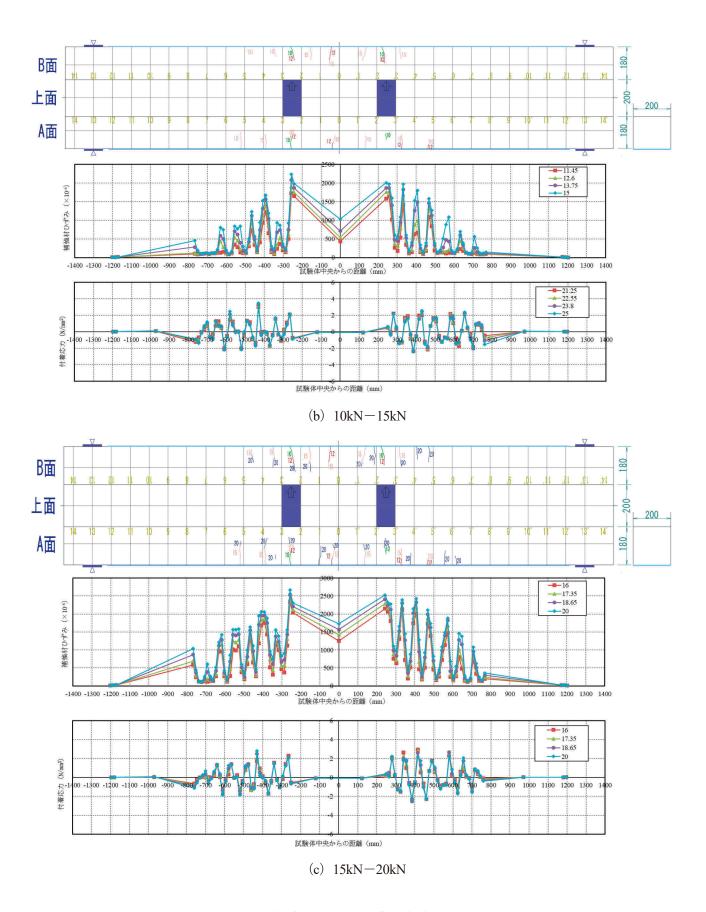


付図-2.2.1 C113L の荷重変位関係

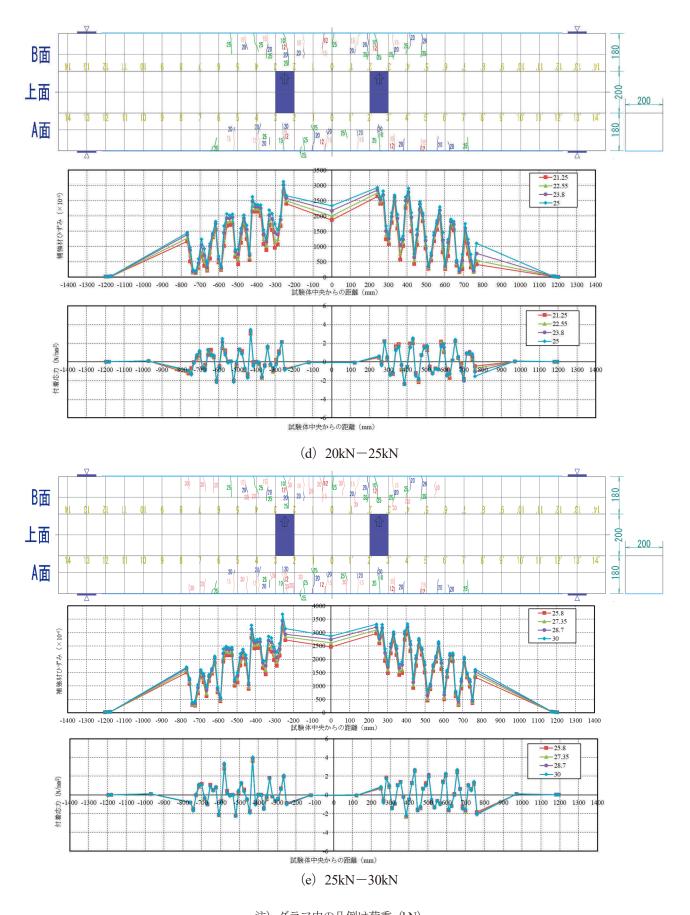


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

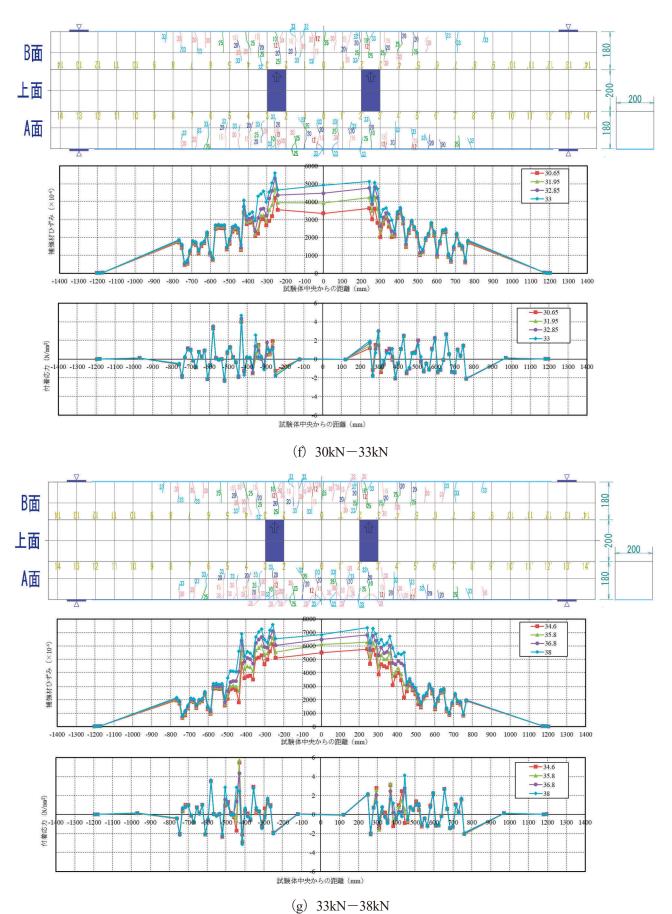
付図-2.2.2 C113Lのひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図



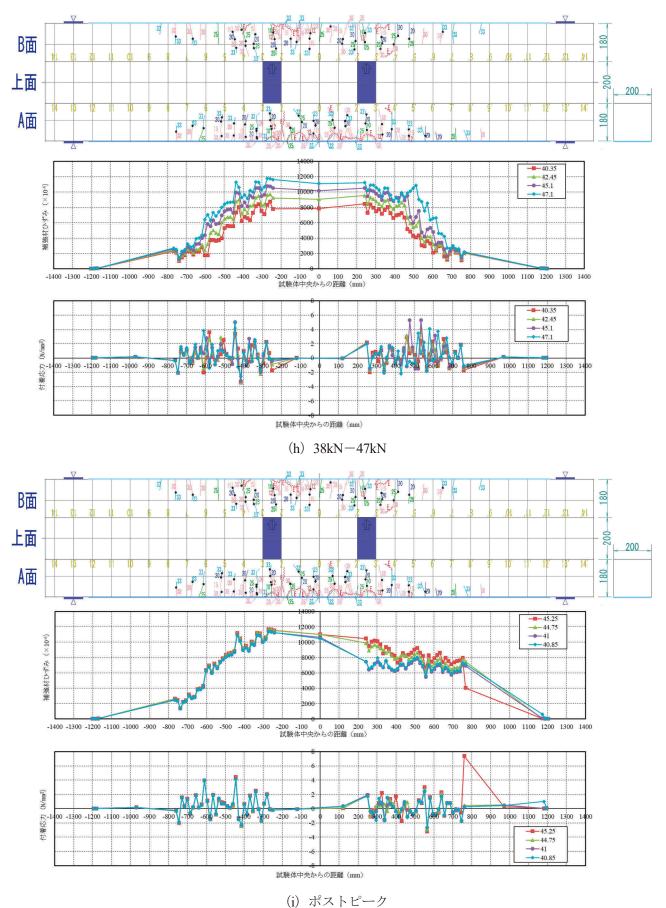
注)グラフ中の凡例は荷重 (kN). 付図-2.2.2 C113L のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



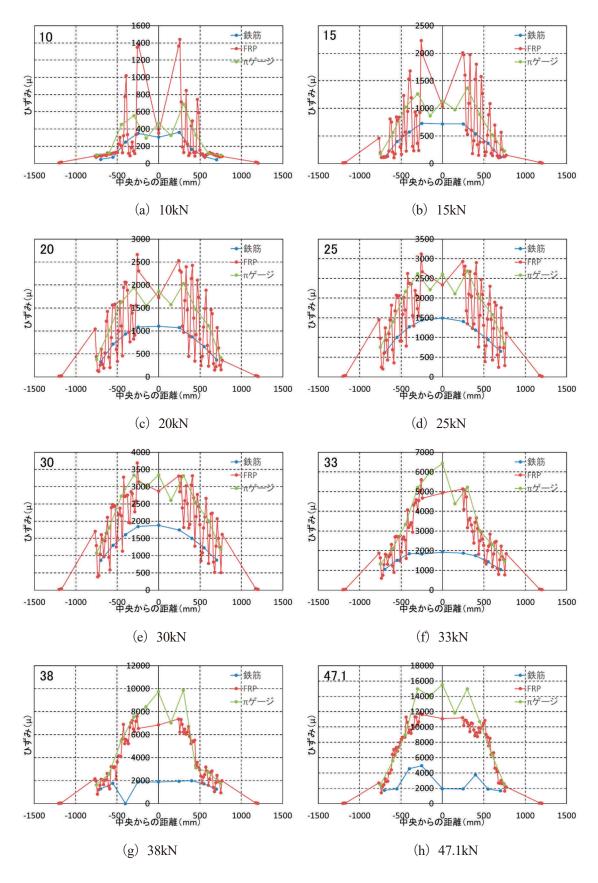
注)グラフ中の凡例は荷重 (kN). 付図-2.2.2 C113L のひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



注) グラフ中の凡例は荷重 (kN). 付図-2.2.2 C113L のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

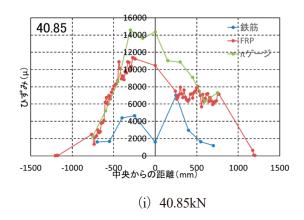


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN). 付図-2.2.2 C113L のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

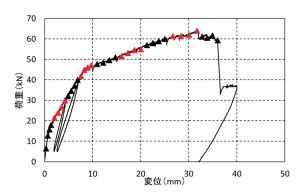
付図-2.2.3 C113L のひずみ分布比較図



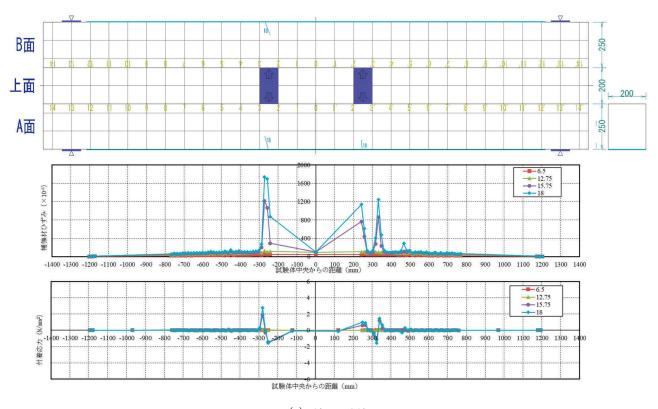
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.2.3 C113L のひずみ分布比較図 (続き)

付 2.3 C113 のデータ



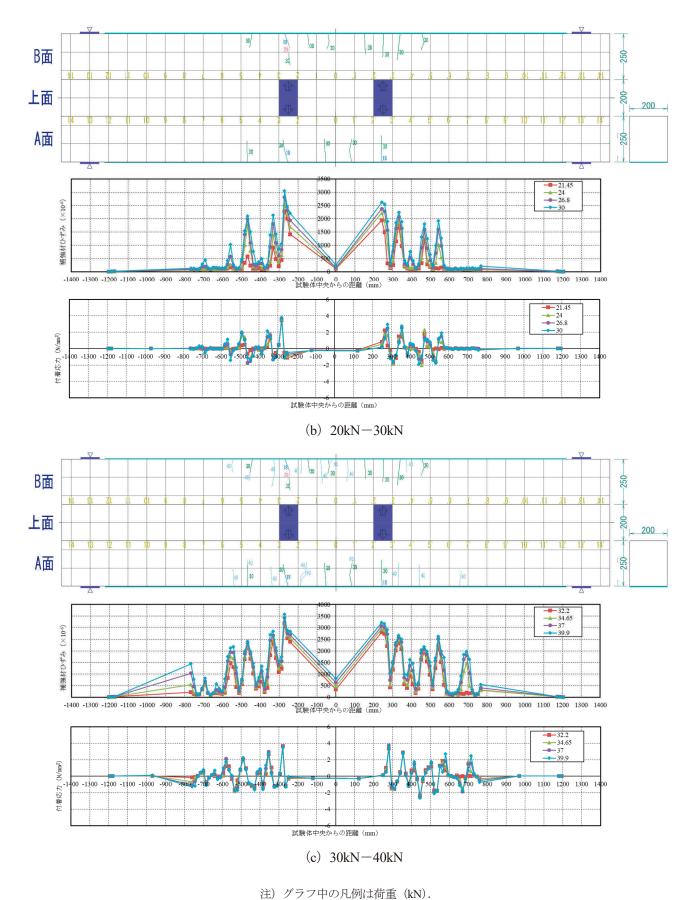
付図-2.3.1 C113 の荷重変位関係



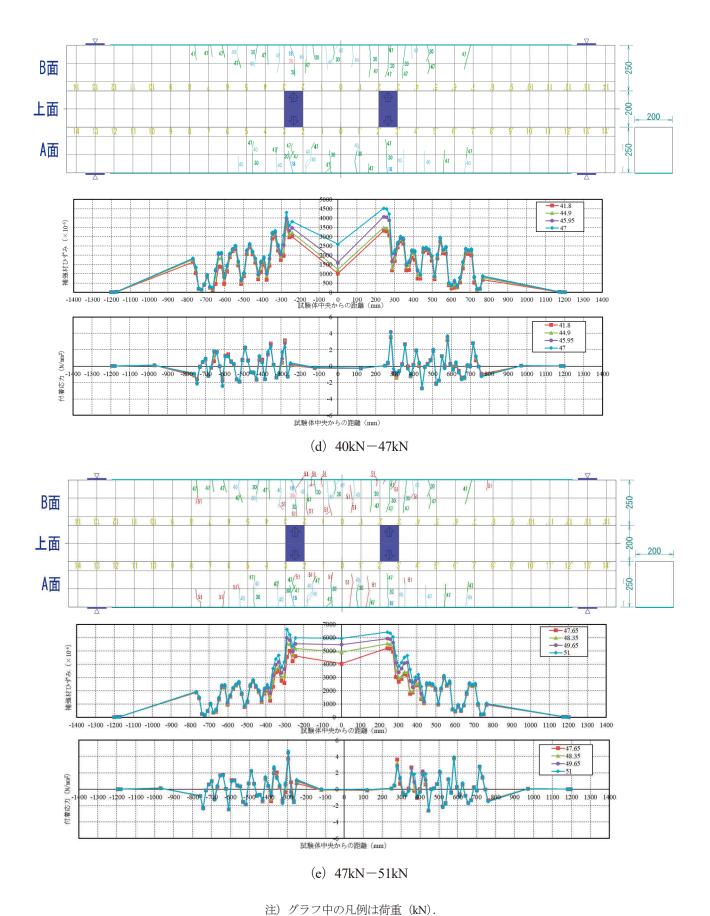
(a) 0kN-20kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

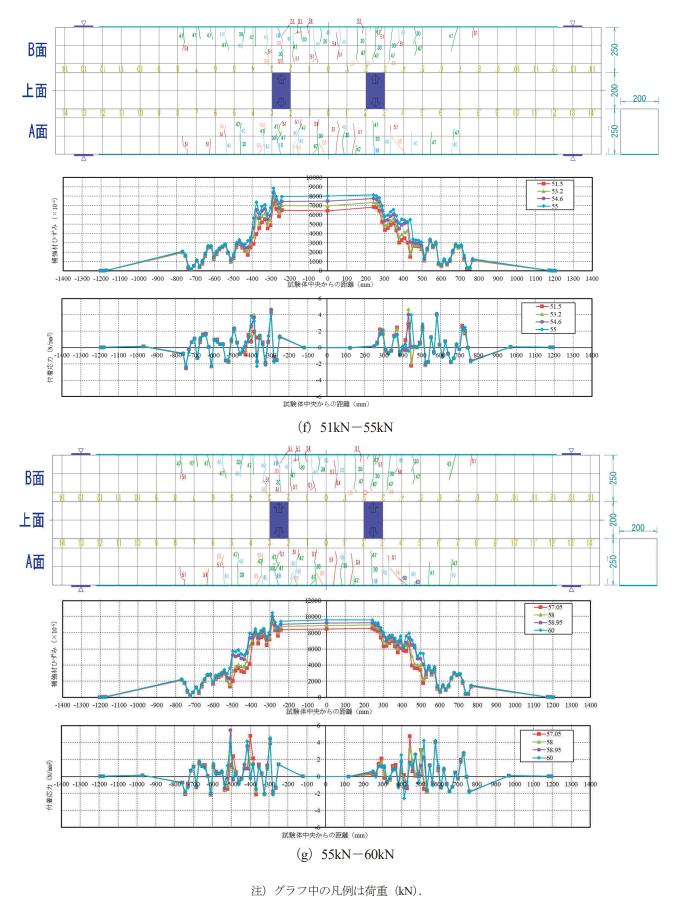
付図-2.3.2 C113のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図



付図-2.3.2 C113 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

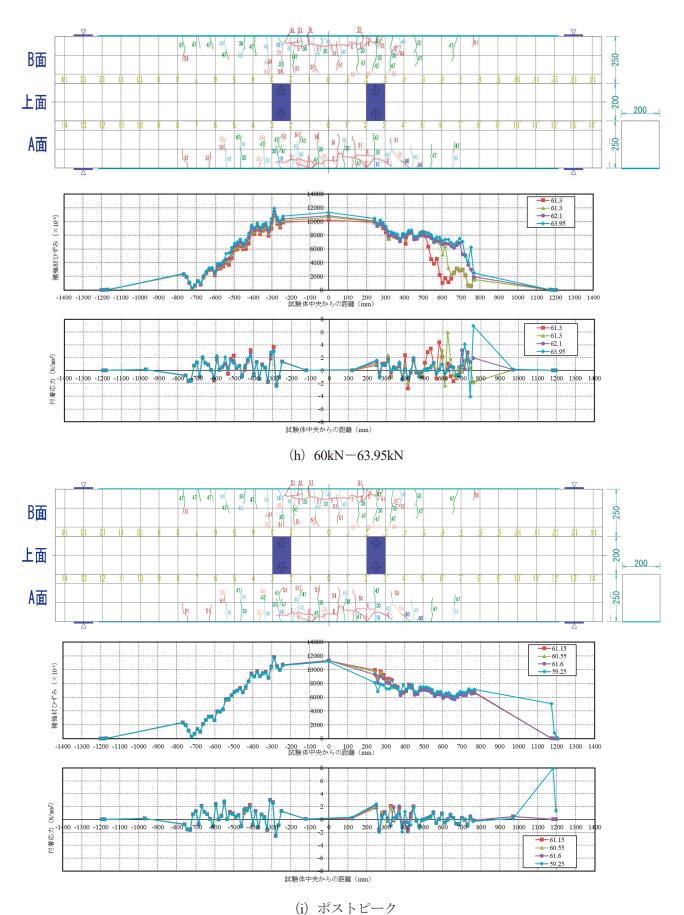


付図-2.3.2 C113 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図(続き)

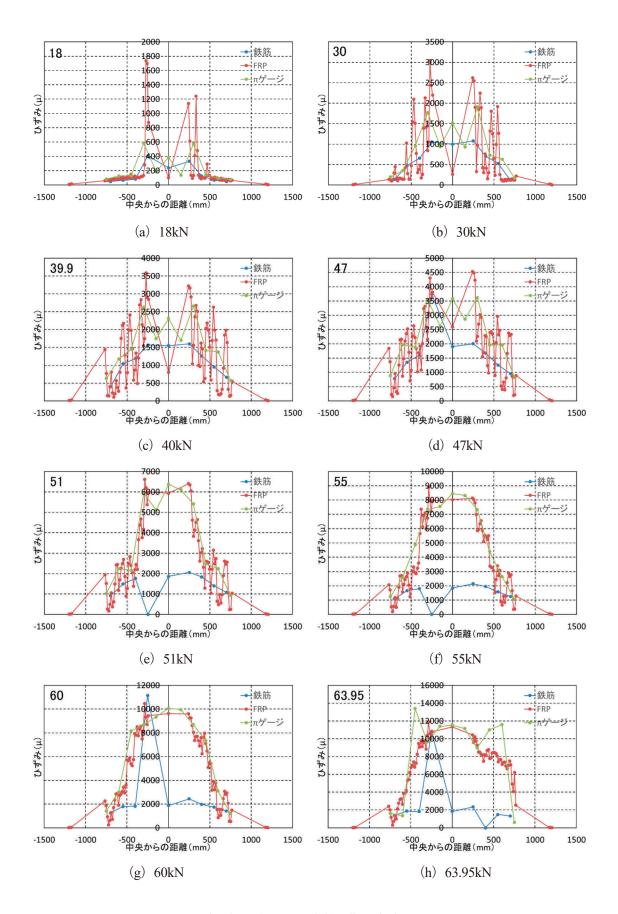


在)クラク中の元例は利里(KIN)

付図-2.3.2 C113 のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)

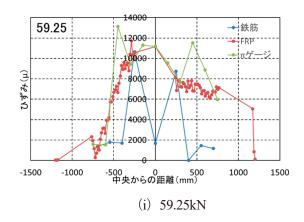


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN). 付図-2.3.2 C113 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

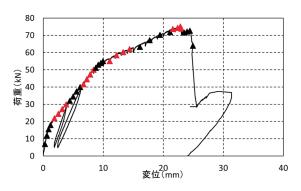
付図-2.3.3 C113 のひずみ分布比較図



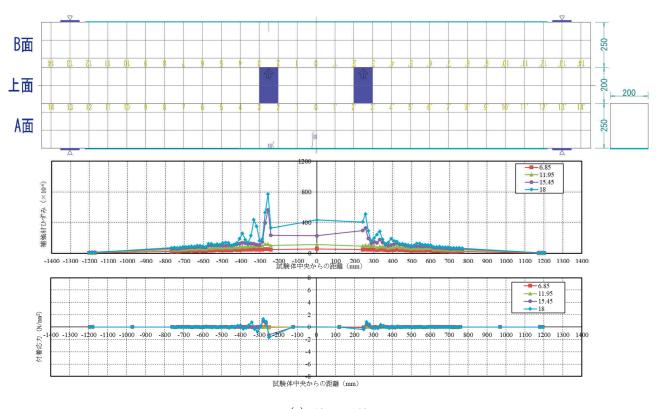
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.3.3 C113 のひずみ分布比較図 (続き)

付 2.4 C213 のデータ



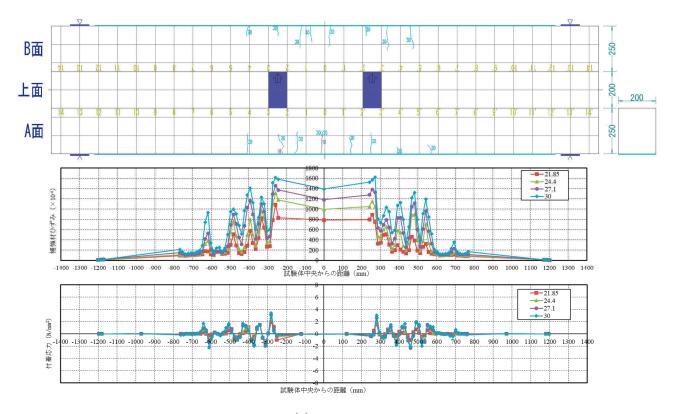
付図-2.4.1 C213 の荷重変位関係



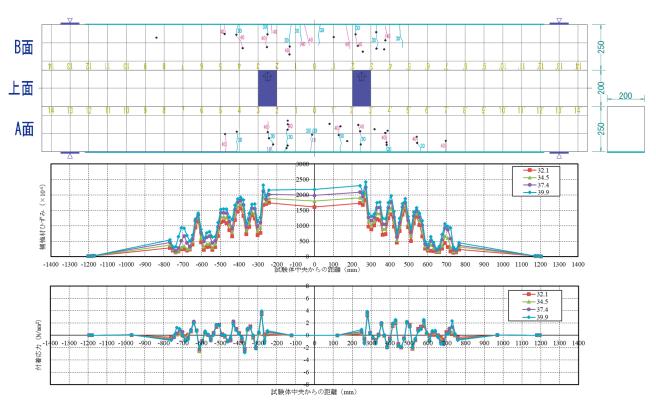
(a) 0kN - 18kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.4.2 C213 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図



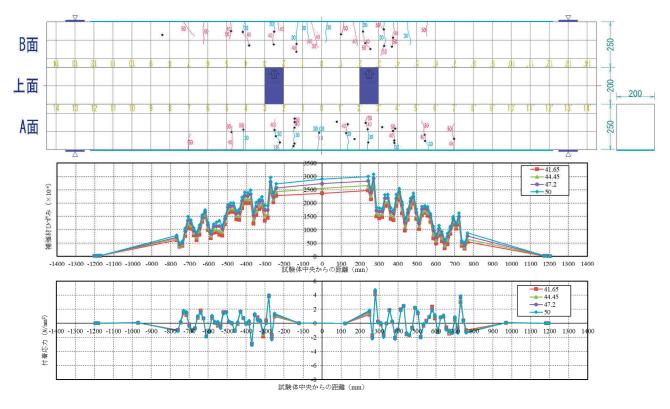
(b) 18kN-30kN



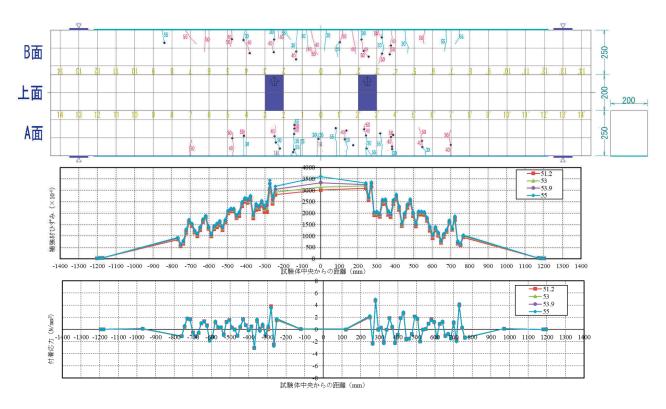
(c) 30kN-40kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.4.2 C213 のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



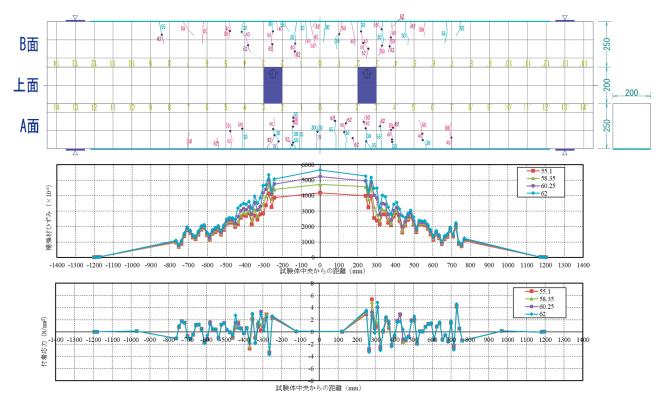
(d) 40kN - 50kN



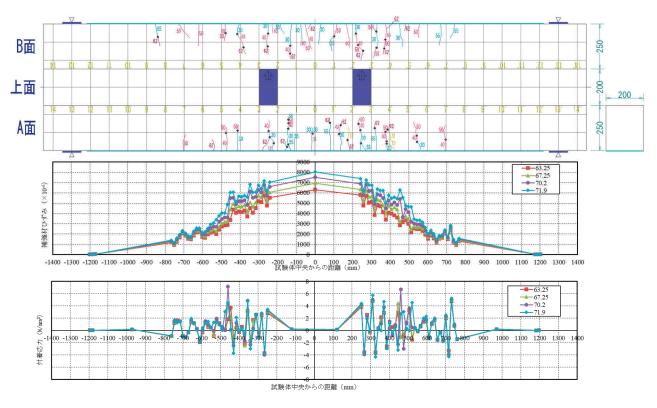
(e) 50kN - 55kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.4.2 C213 のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



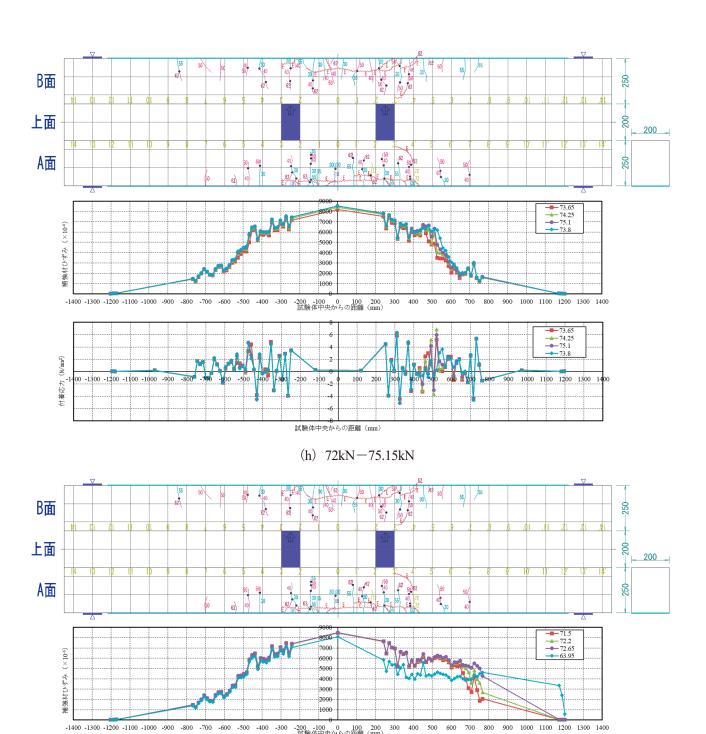




(g) 62kN-72kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

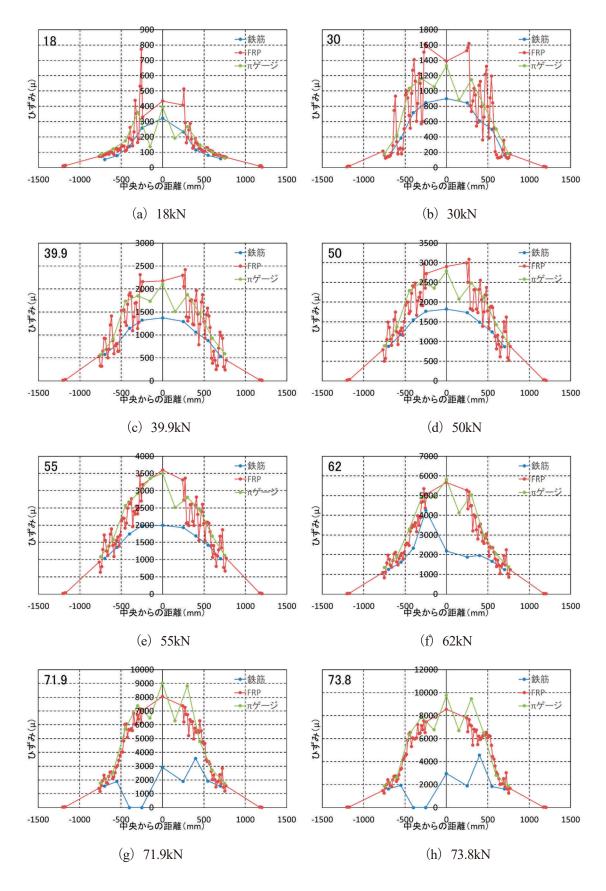
付図-2.4.2 C213 のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



(i) ポストピーク

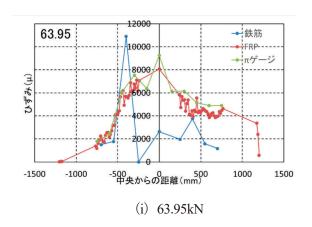
注)グラフ中の凡例は荷重(kN).

付図-2.4.2 C213 のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



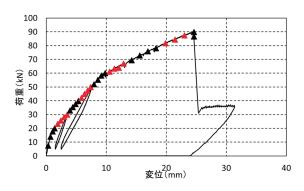
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.4.3 C213 のひずみ分布比較図

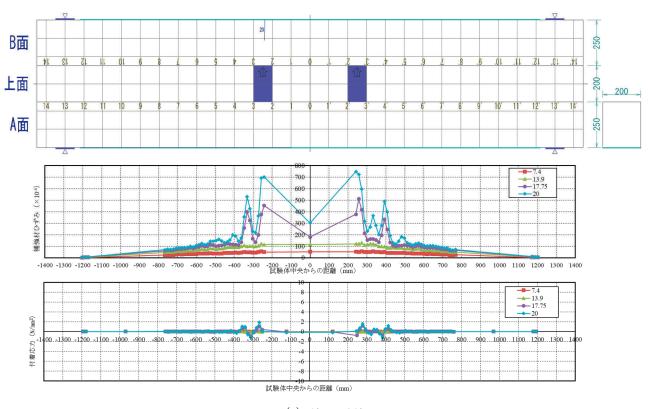


注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.4.3 C213のひずみ分布比較図 (続き)



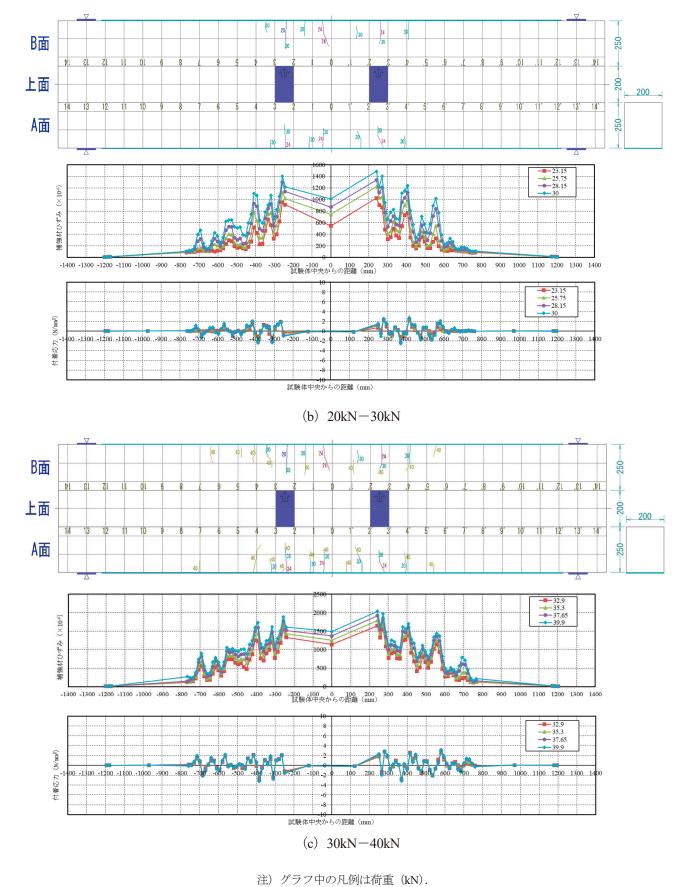
付図-2.5.1 C313 の荷重変位関係



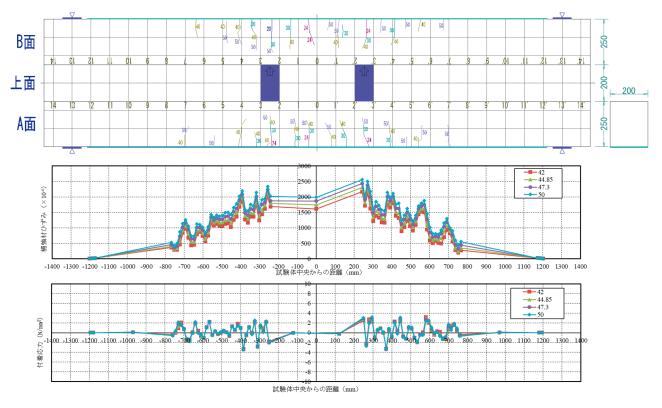
(a) 0kN-20kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

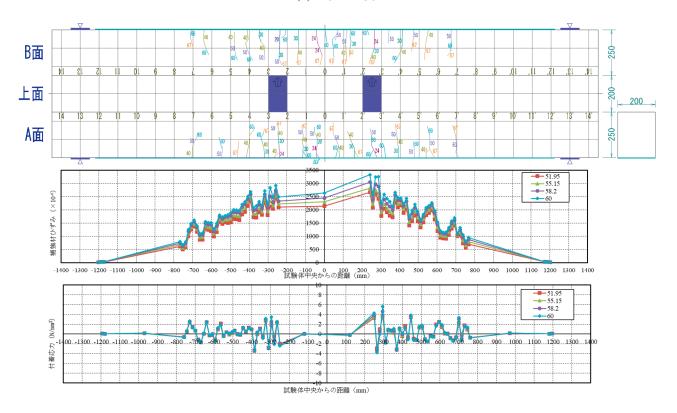
付図-2.5.2 C313のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図



付図-2.5.2 C313 のひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



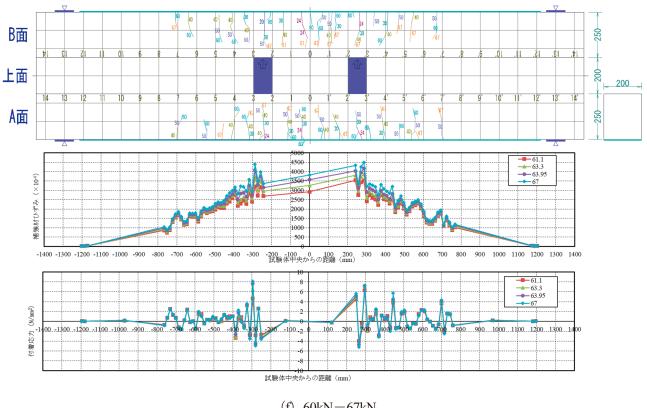




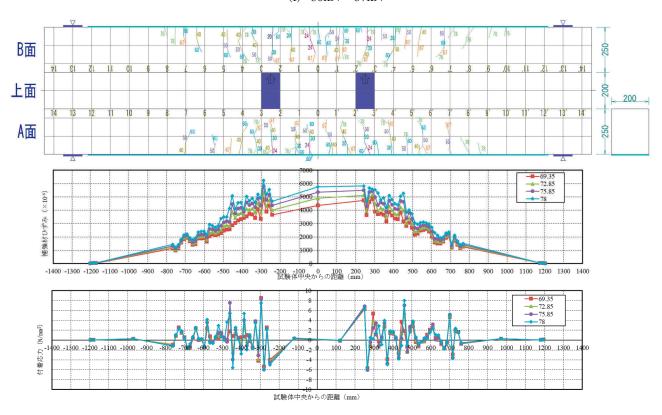
(e) 50kN - 60kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.5.2 C313 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



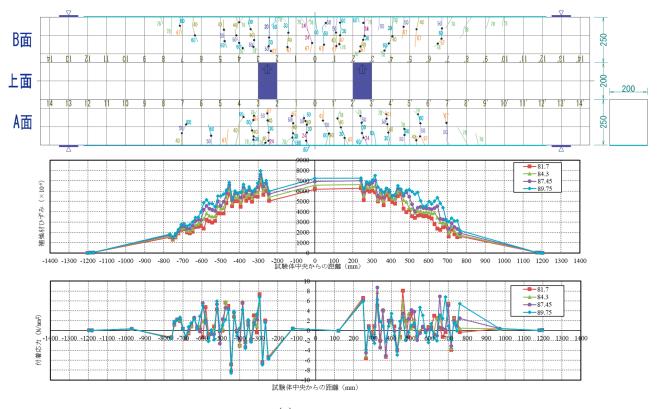




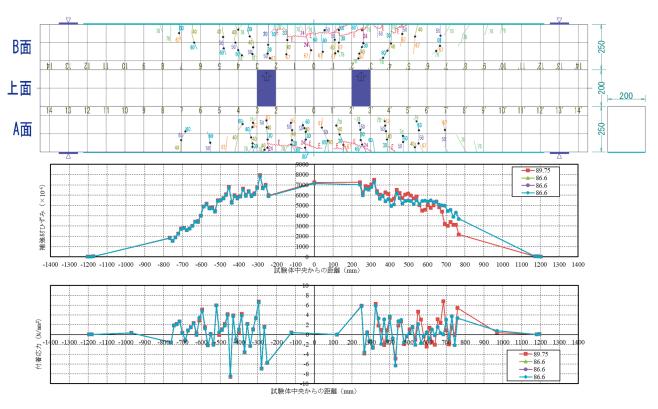
(g) 67kN-78kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.5.2 C313 のひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



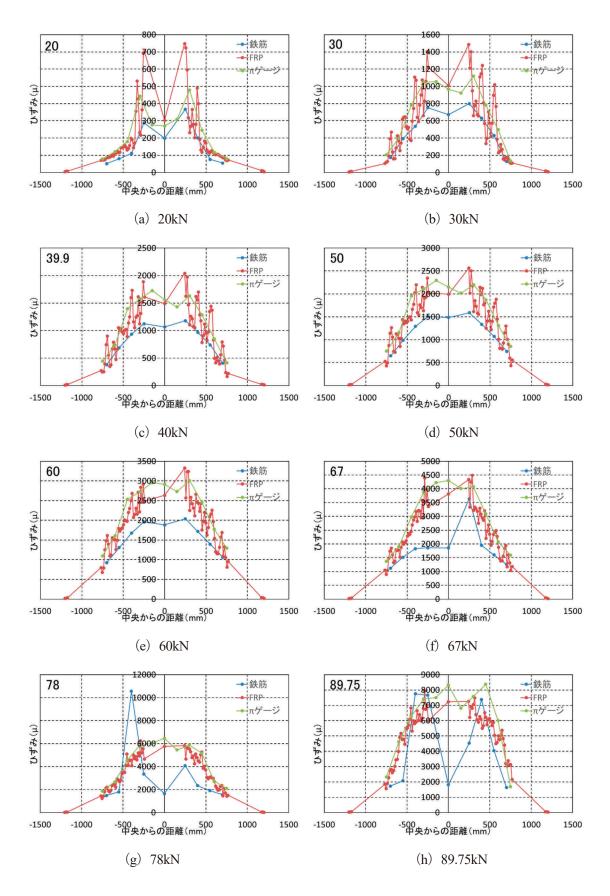




(i) ポストピーク

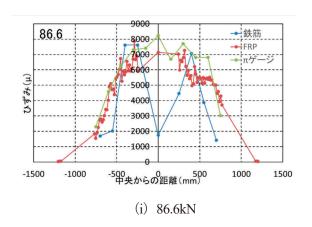
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.5.2 C313 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



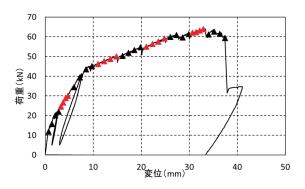
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.5.3 C313 のひずみ分布比較図

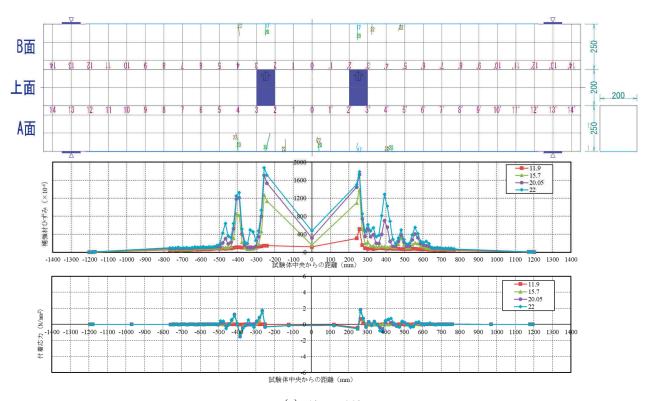


注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.5.3 C313 のひずみ分布比較図 (続き)



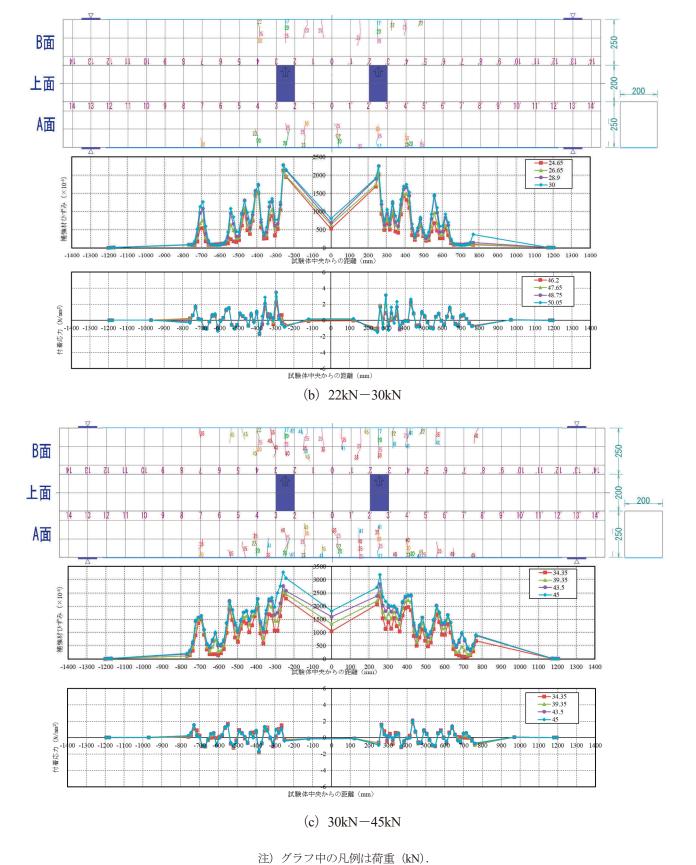
付図-2.6.1 C113e1 の荷重変位関係



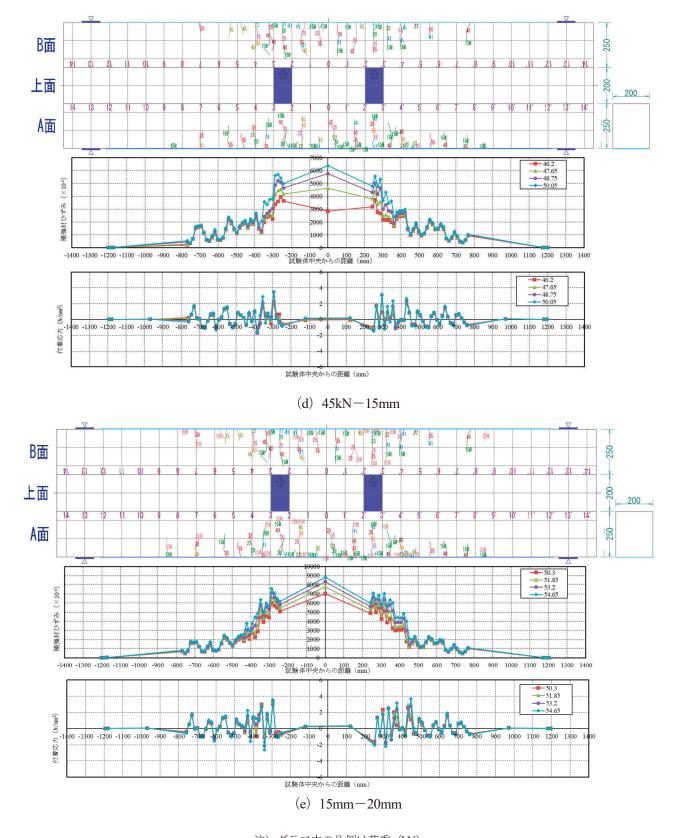
(a) 0kN-22kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

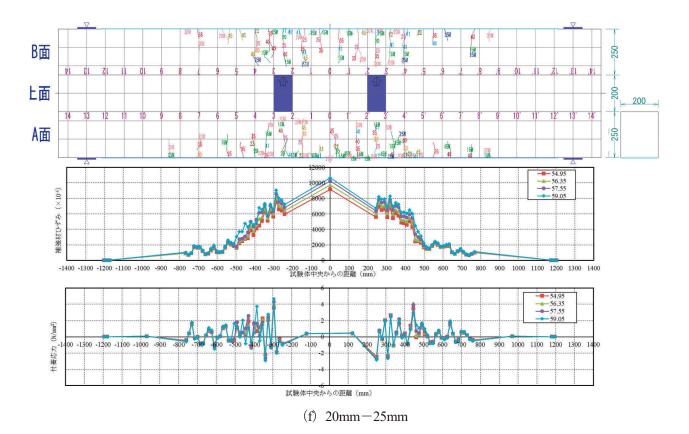
付図-2.6.2 C113e1のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図

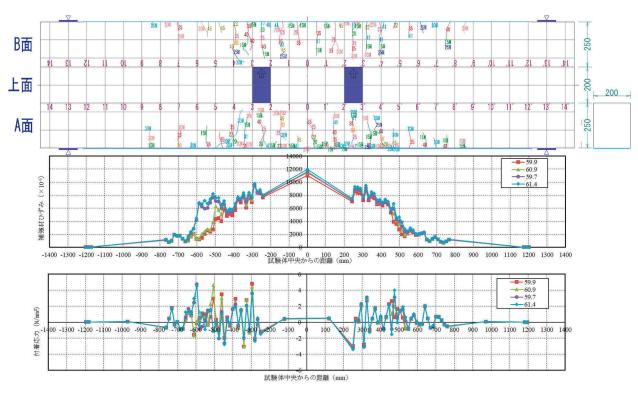


付図-2.6.2 C113e1 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



注) グラフ中の凡例は荷重 (kN). 付図-2.6.2 C113e1 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

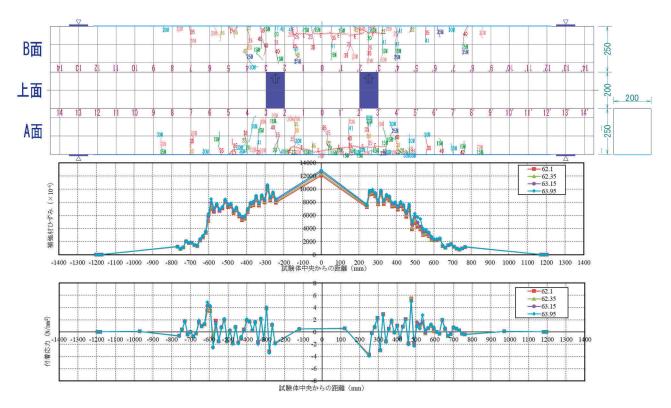




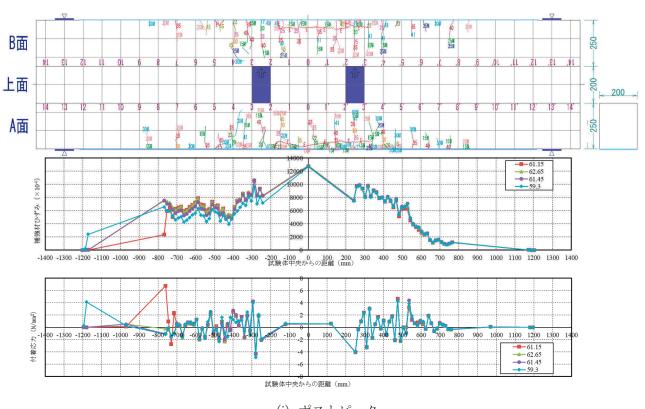
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

(g) 25mm-30mm

付図-2.6.2 C113e1のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



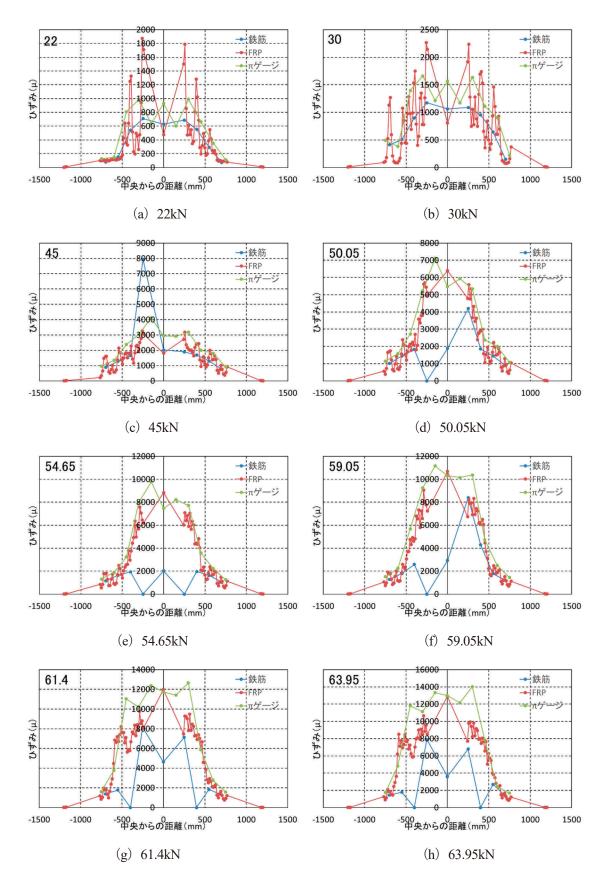
(h) 30mm - 63.95kN



(i) ポストピーク

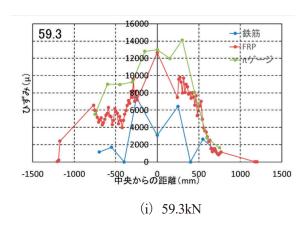
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.6.2 C113e1 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



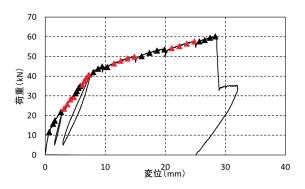
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.6.3 C113e1のひずみ分布比較図

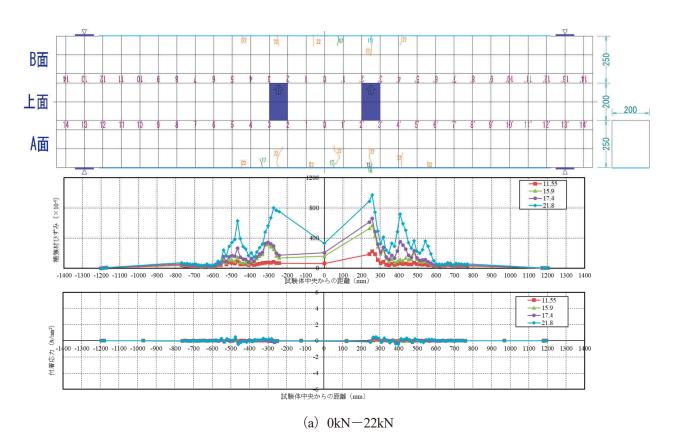


注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.6.3 C113e1のひずみ分布比較図(続き)

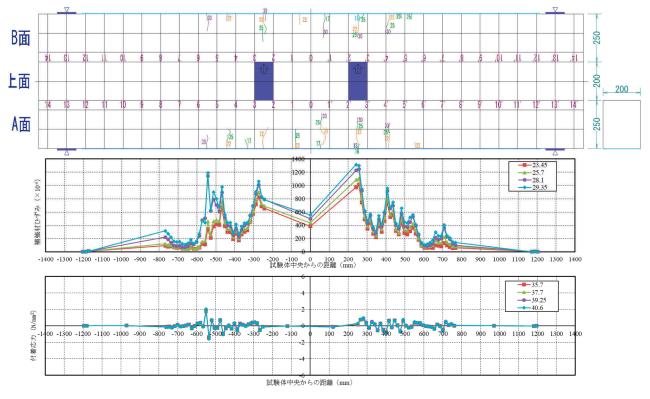


付図-2.7.1 C113e3 の荷重変位関係

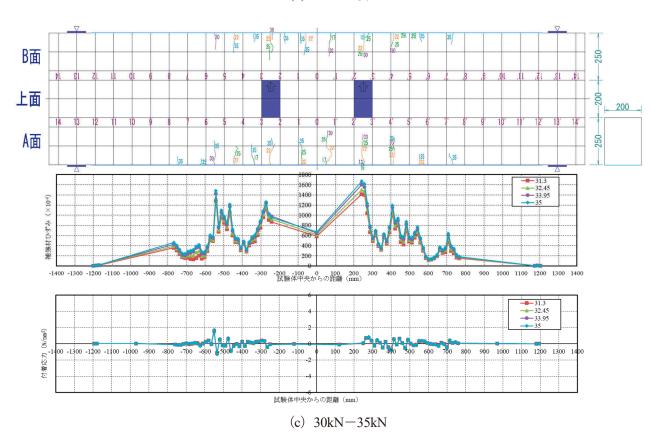


付図-2.7.2 C113e3 のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

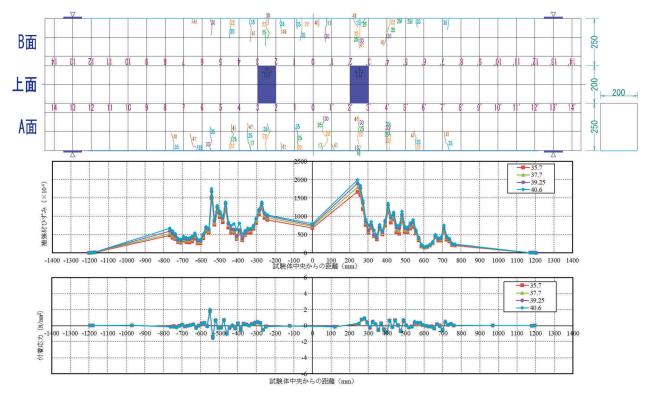




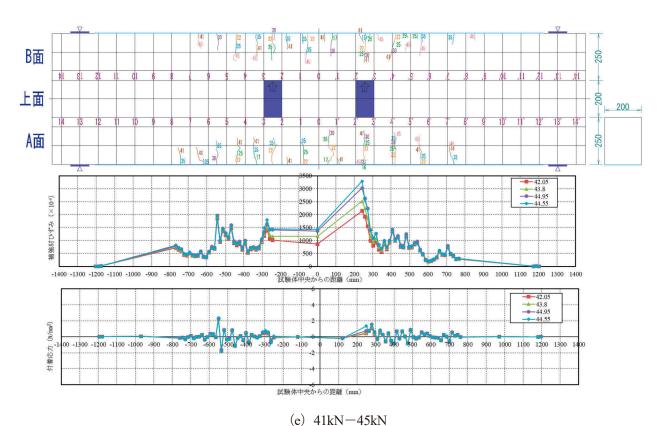


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.7.2 C113e3 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

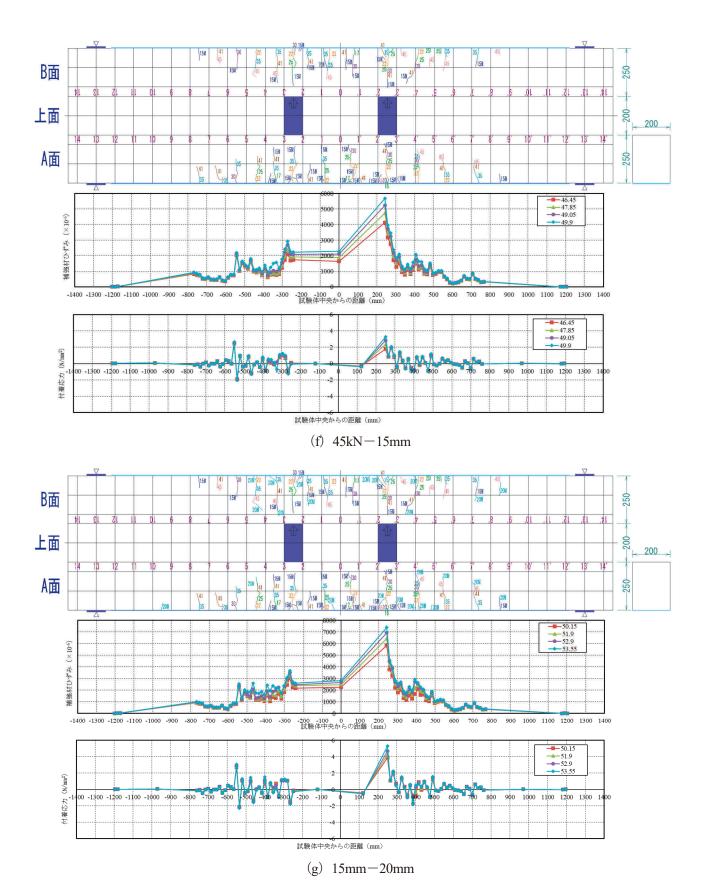


(d) 35kN-41kN



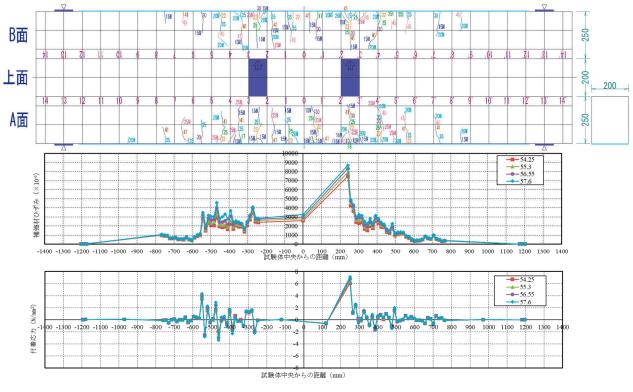
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

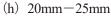
付図-2.7.2 C113e3 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

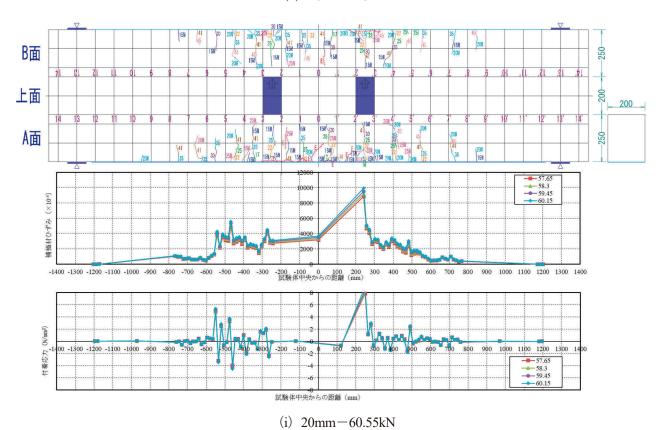


注)グラフ中の凡例は荷重(kN).

付図-2.7.2 C113e3 のひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

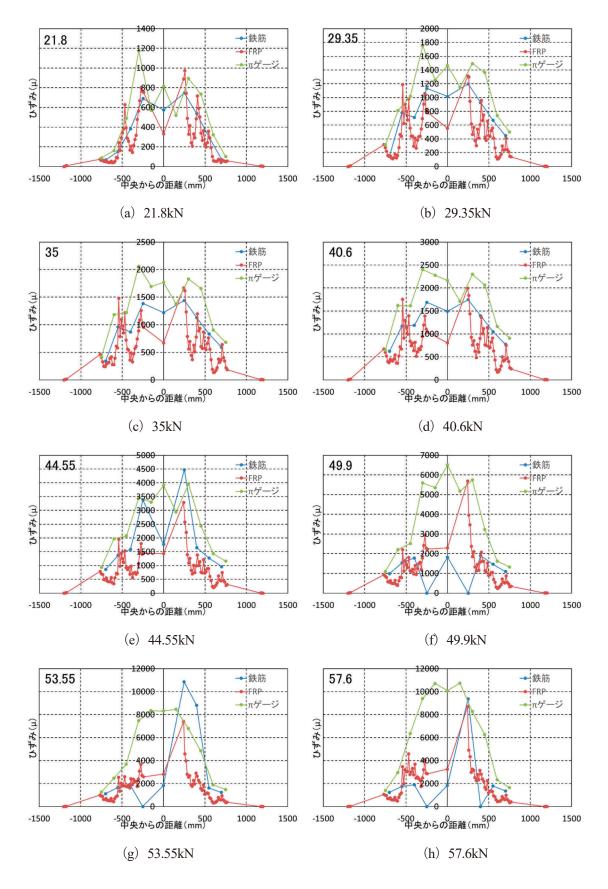




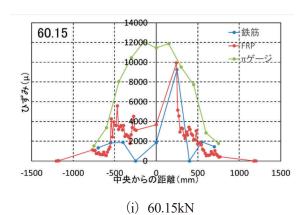


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.7.2 C113e3 のひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



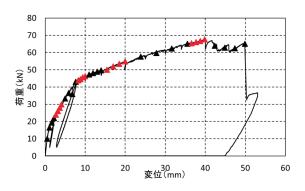
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN). 付図-2.7.3 C113e3 のひずみ分布図



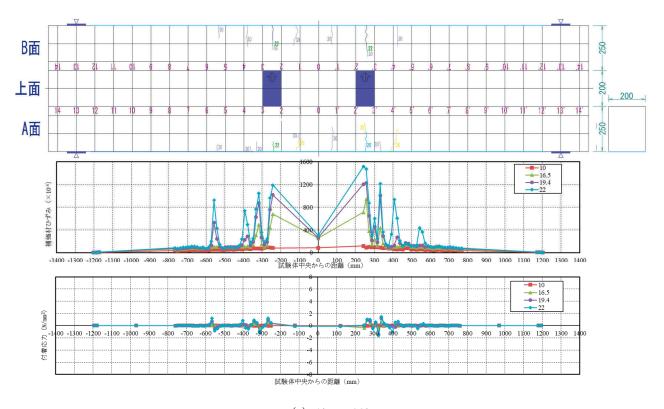
付図-2.7.3 C113e3 のひずみ分布比較図

注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.7.3 C113e3 のひずみ分布図 (続き)



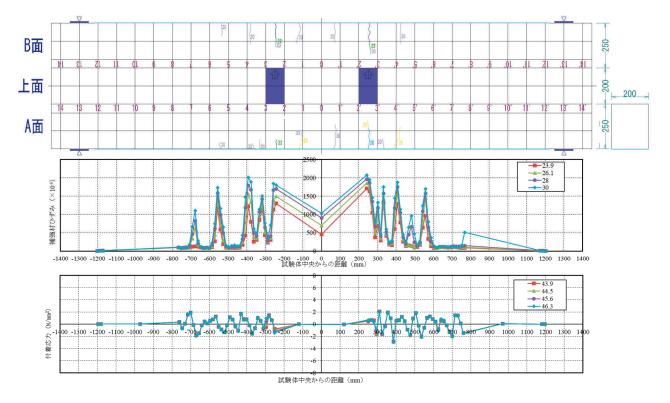
付図-2.8.1 A113 の荷重変位関係



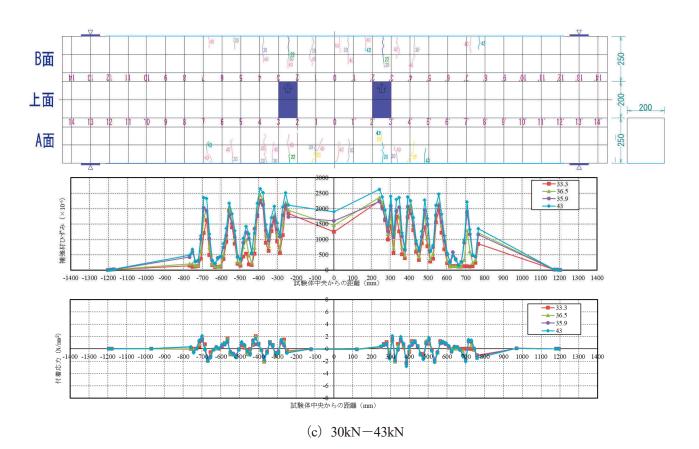
(a) 0kN-22kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.8.2 A113 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図

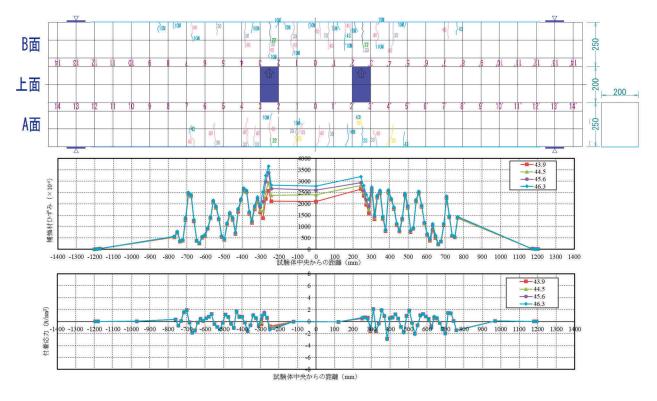


(b) 22kN-30kN

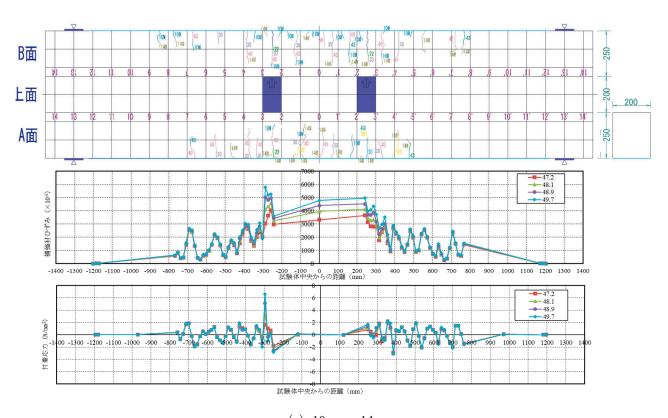


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.8.2 A113 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



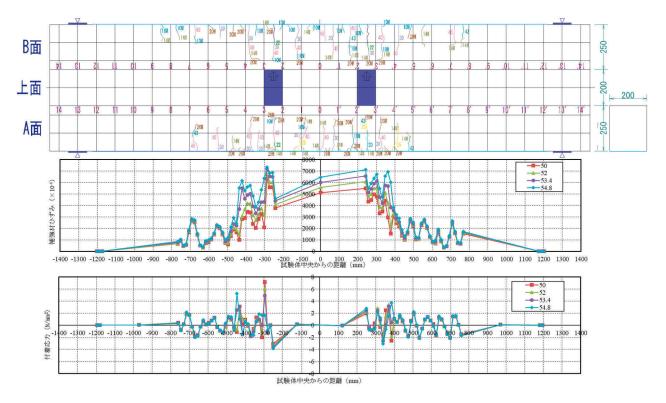
(d) 43kN-10mm



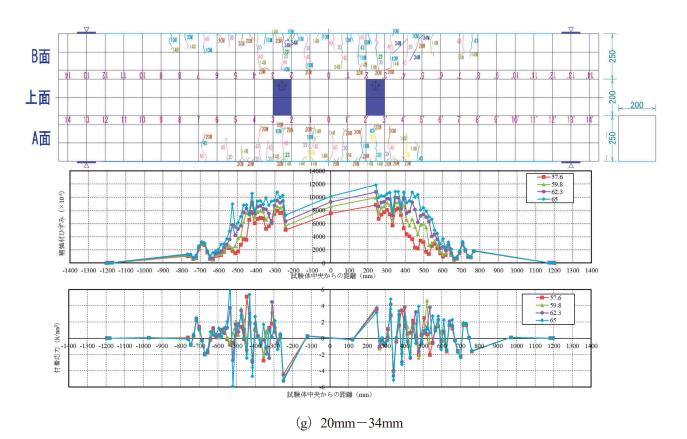
(e) 10 mm - 14 mm

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.8.2 A113 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

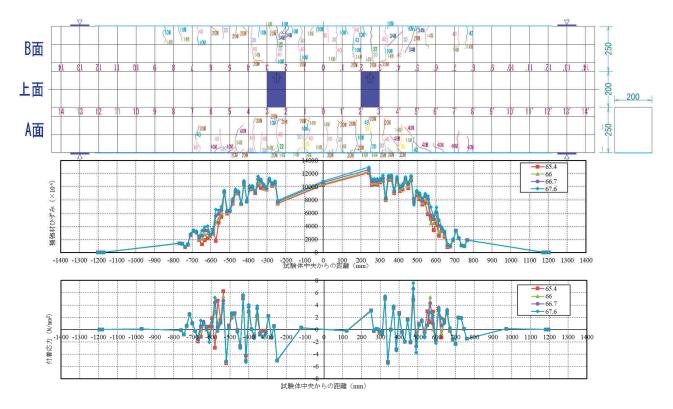


(f) 14mm-20mm

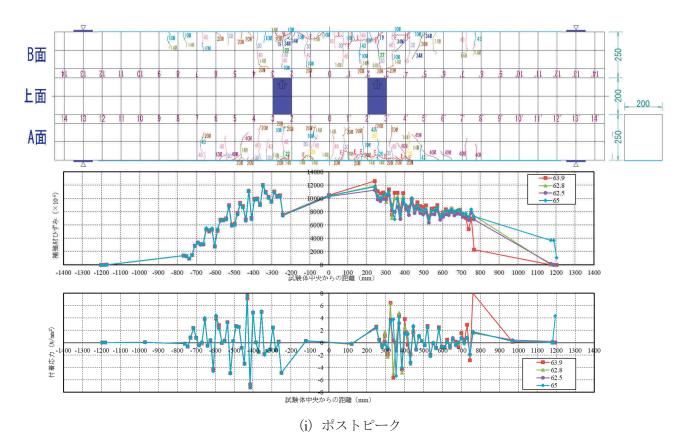


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.8.2 A113 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

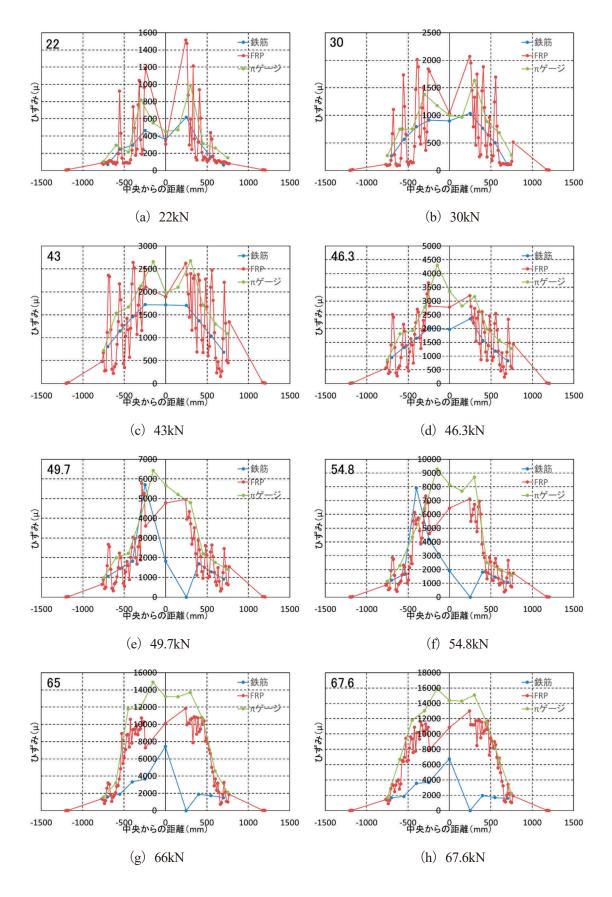


(h) 34mm - 67.6kN



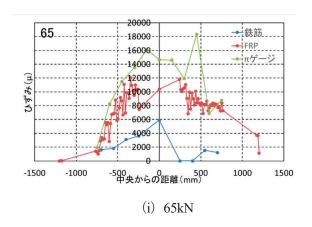
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.8.2 A113 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



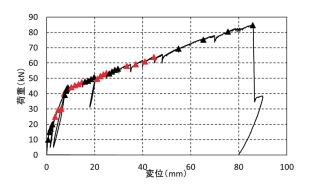
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.8.3 A113 のひずみ分布比較図

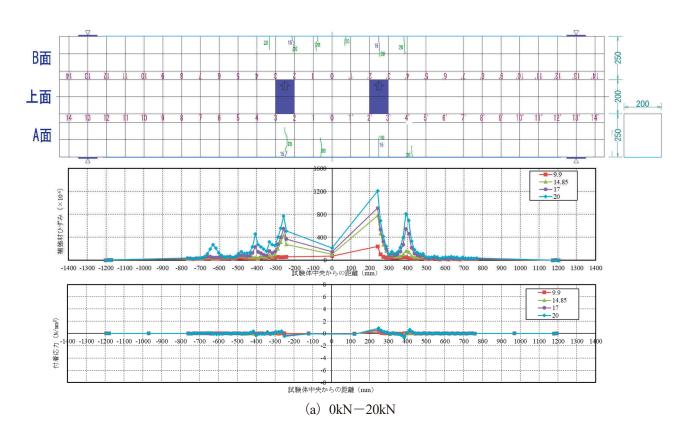


注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.8.3 A113 のひずみ分布比較図 (続き)

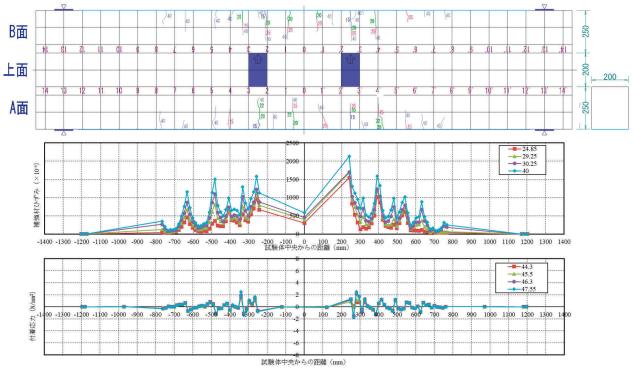


付図-2.9.1 A113el の荷重変位関係

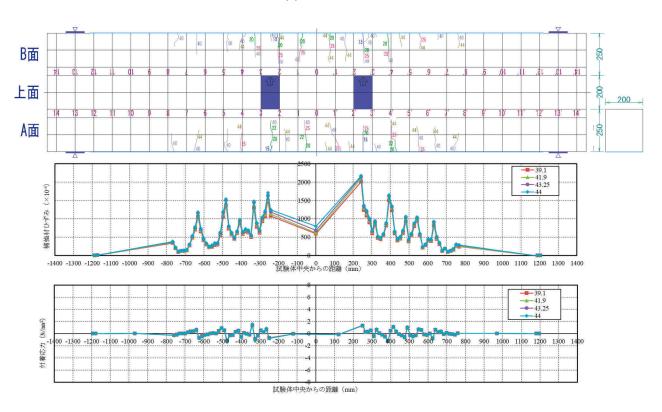


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.9.2 A113e1のひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図



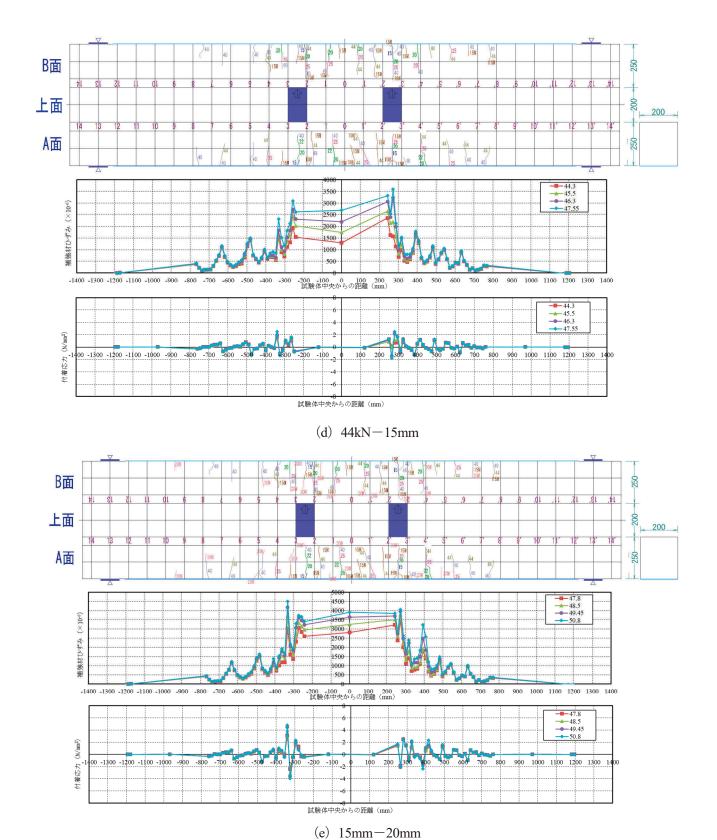




(c) 40kN-44kN

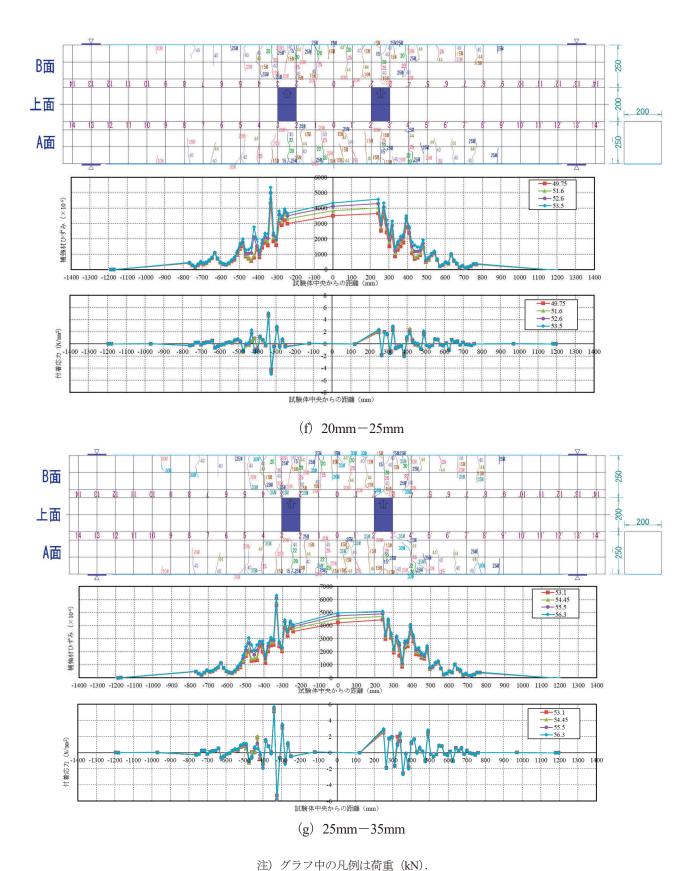
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.9.2 A113e1 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)

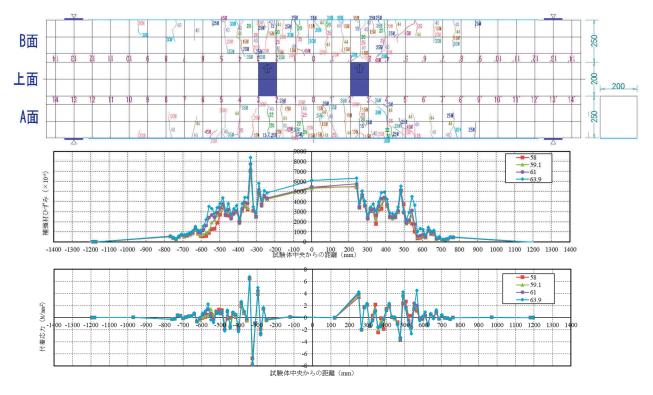


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

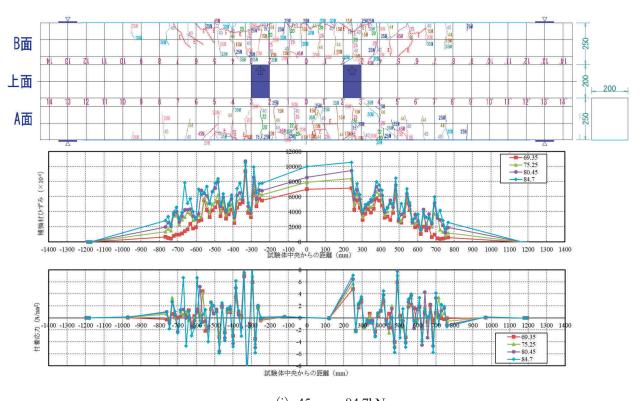
付図-2.9.2 A113e1 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



付図-2.9.2 A113e1 のひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



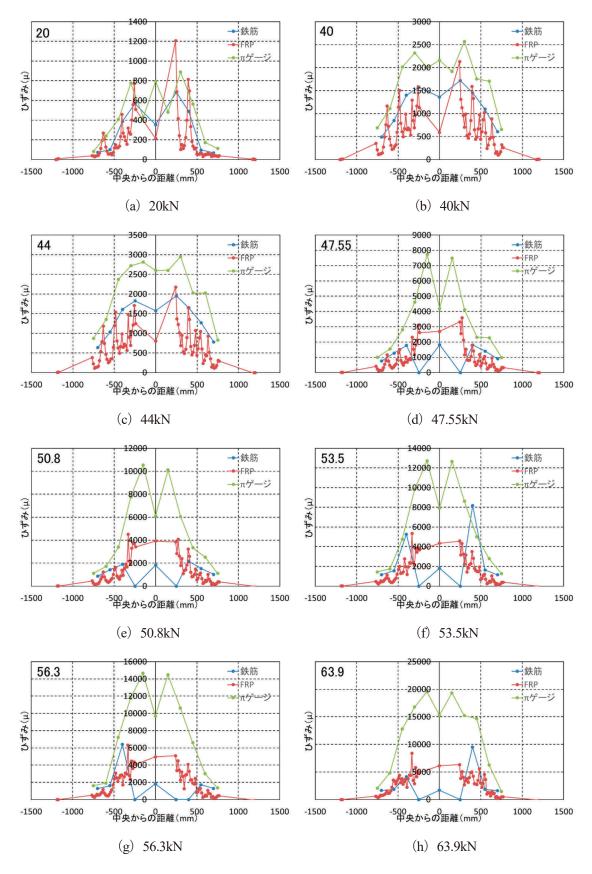
(h) 35mm-45mm



(i) 45mm-84.7kN

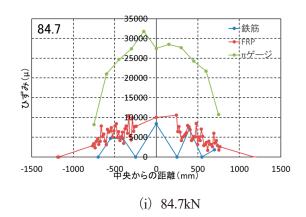
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.9.2 A113elのひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

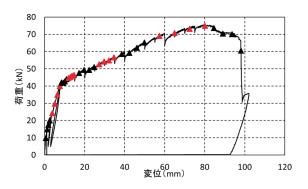
付図-2.9.3 A113el のひずみ分布比較図



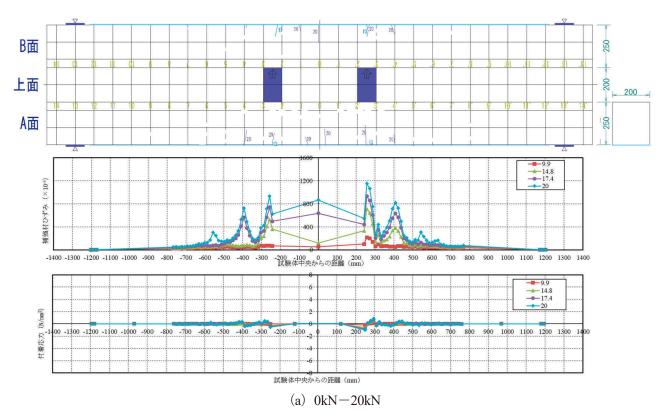
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.9.3 A113el のひずみ分布比較図 (続き)

付 2.10 A113e3 のデータ

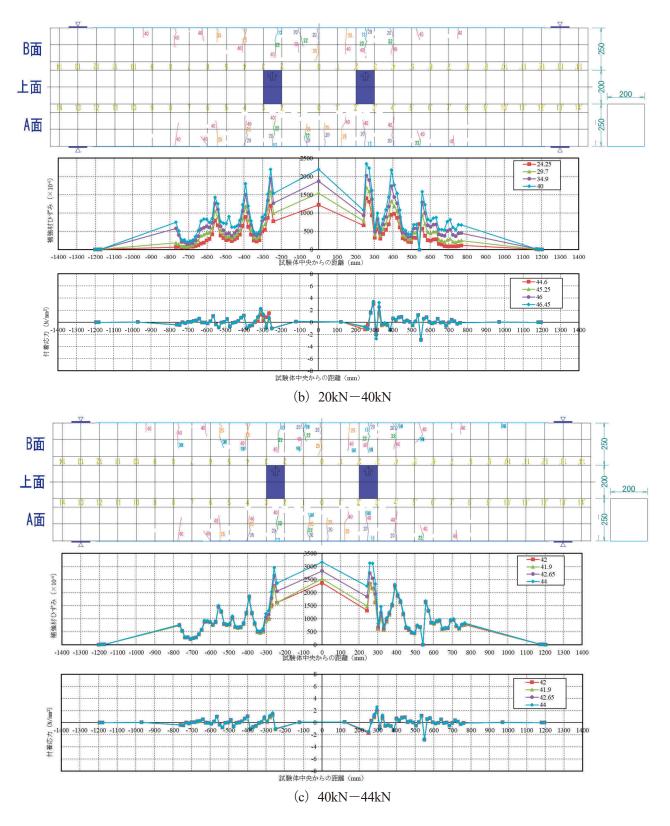


付図-2.10.1 A113e3 の荷重変位関係



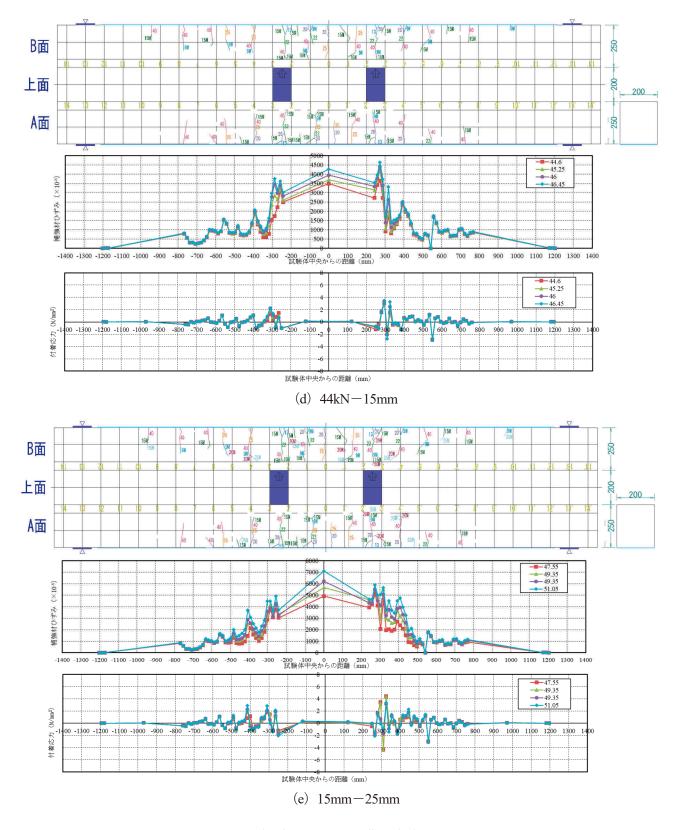
注) グラフ中の凡例は荷重(kN).

付図-2.10.2 A113e3のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図



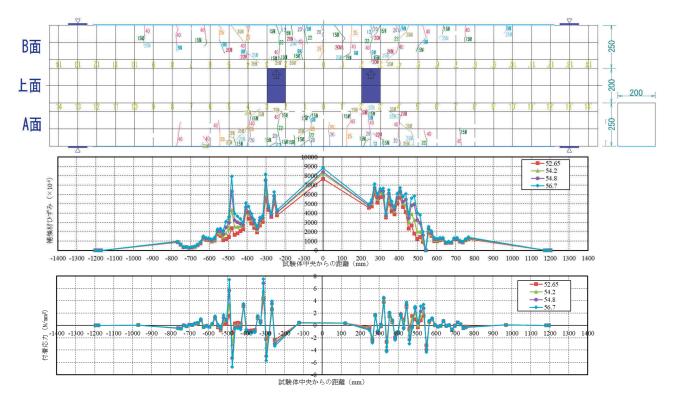
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.10.2 A113e3のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)

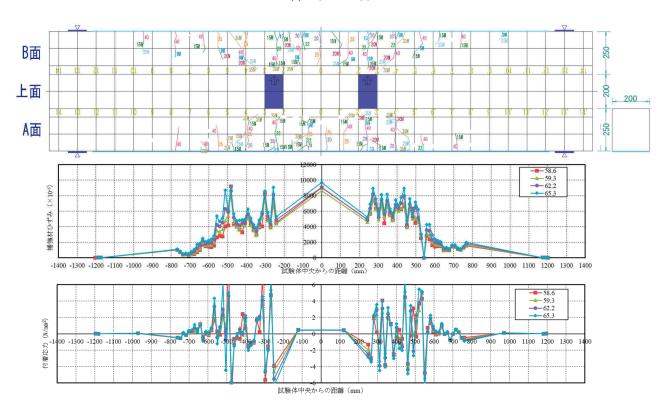


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.10.2 A113e3のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



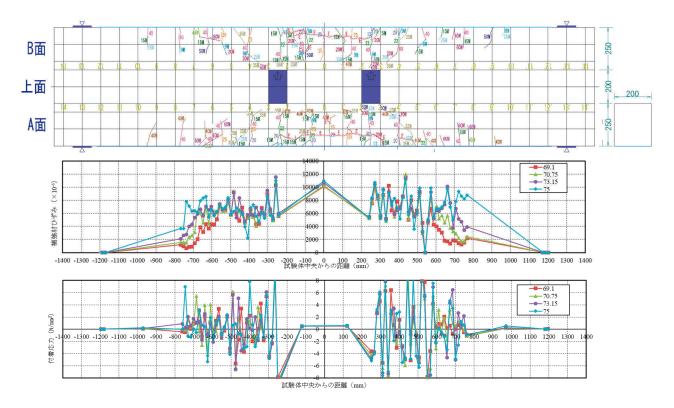
(f) 25mm-35mm



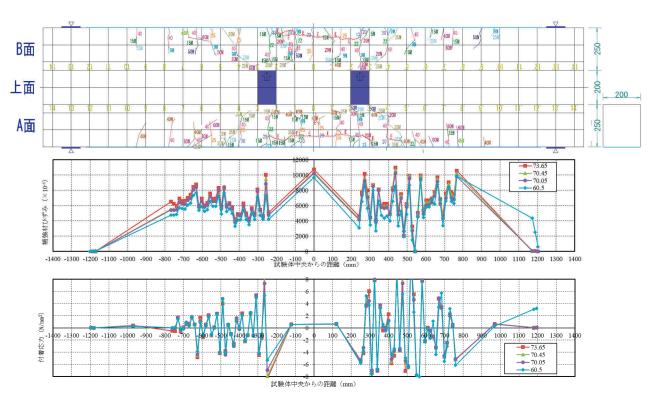
(g) 35mm-50mm

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.10.2 A113e3のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



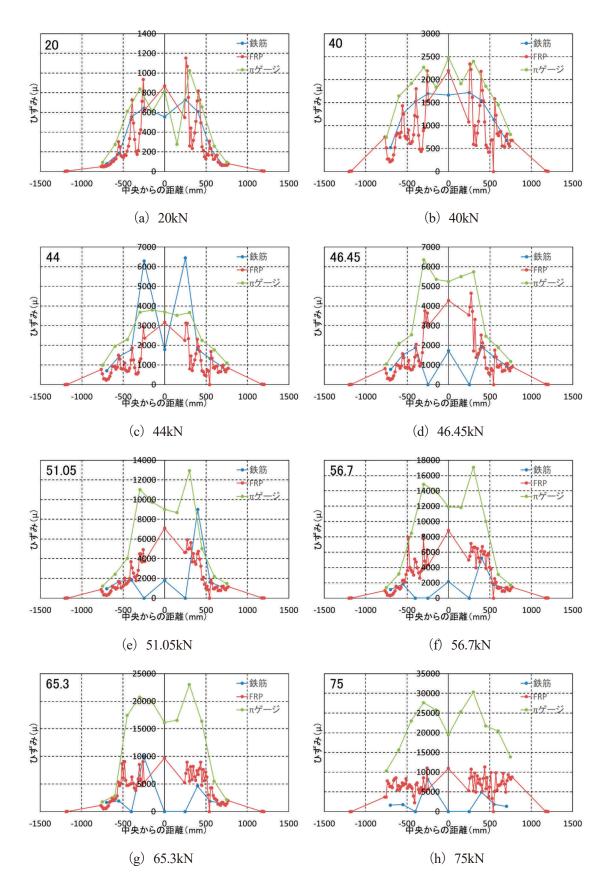
(h) 50 mm - 75.65 kN



(i) ポストピーク

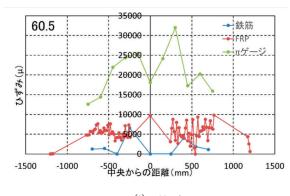
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.10.2 A113e3のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.10.3 A113e3 のひずみ分布比較図



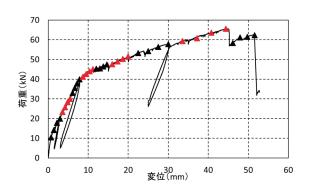
(i) 60.5kN

付図-2.12.3 A113e3 のひずみ分布比較図

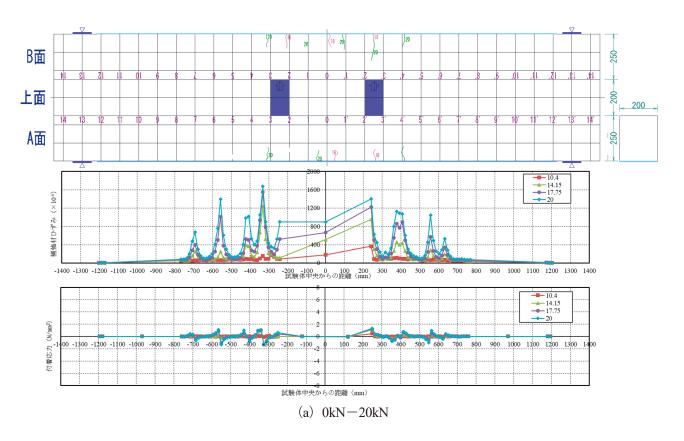
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.10.3 A113e3 のひずみ分布比較図 (続き)

付 2.11 A113fc20 のデータ

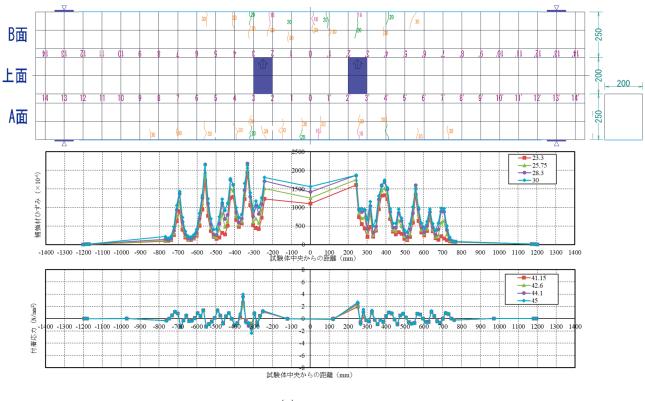


付図-2.11.1 A113fc20 の荷重変位関係

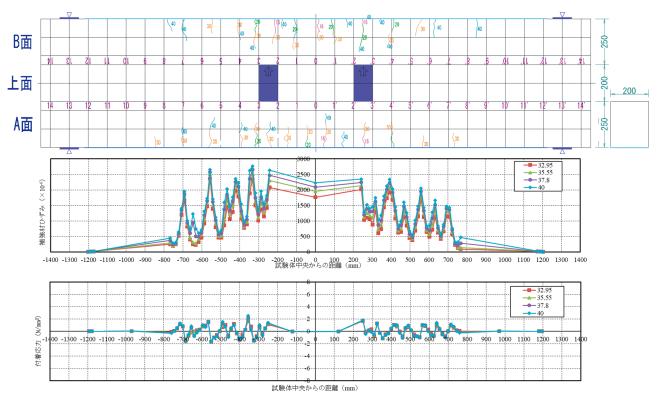


注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.11.2 A113fc20のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図



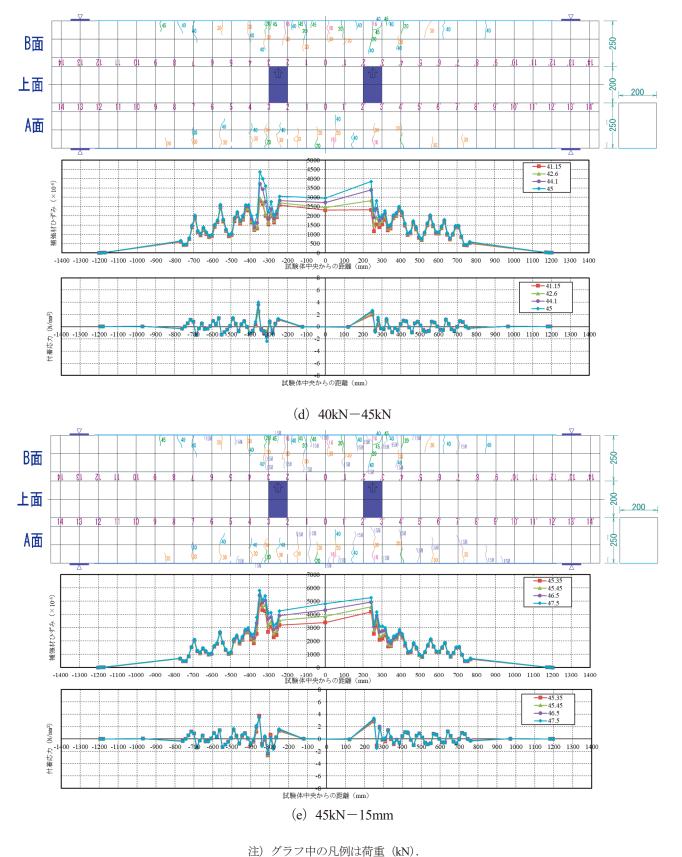




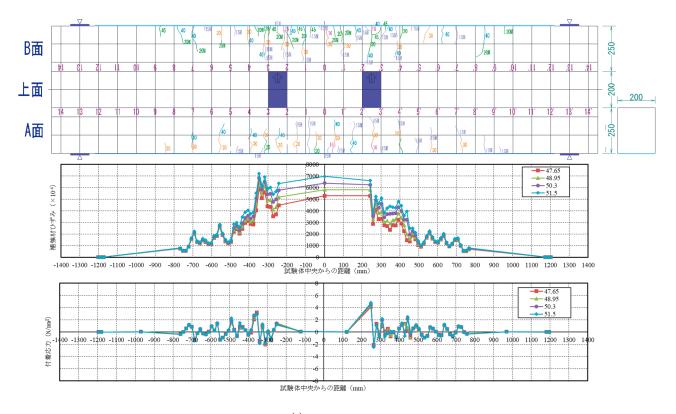
(c) 30kN-40kN

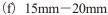
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

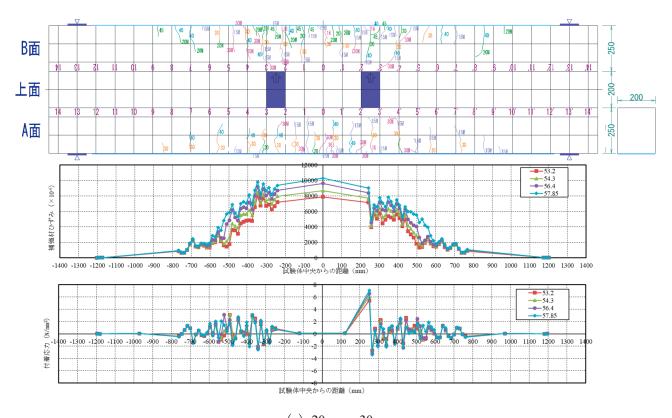
付図-2.11.2 A113fc20 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



付図-2.11.2 A113fc20 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



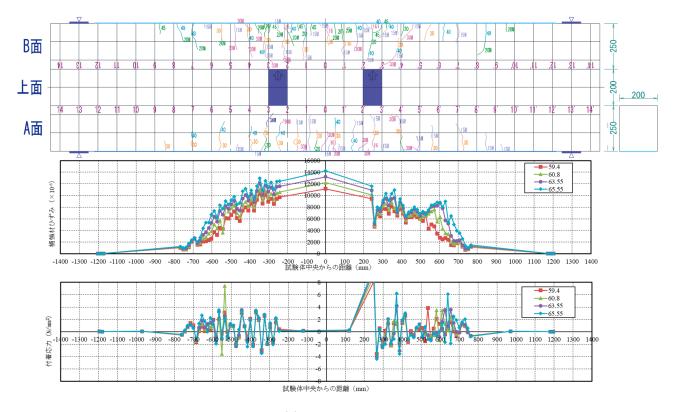




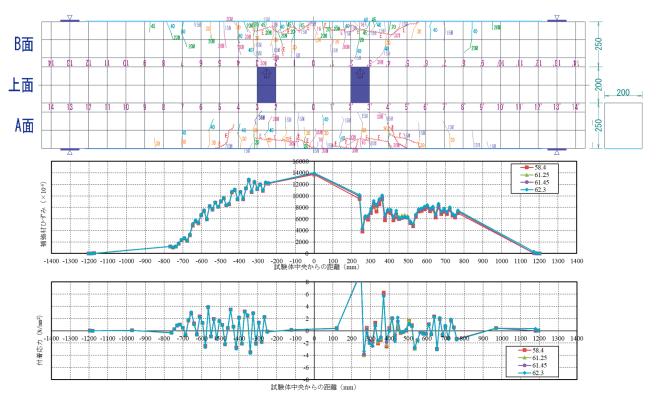
(g) 20mm-30mm

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.11.2 A113fc20のひび割れ図,ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



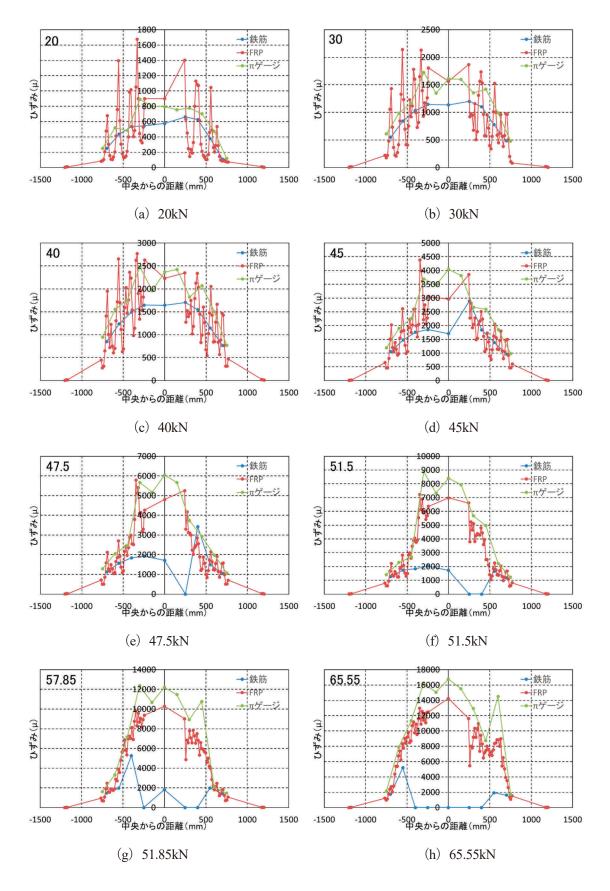
(h) 30mm - 65.55kN



(i) ポストピーク

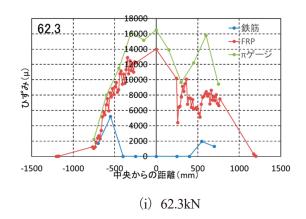
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.11.2 A113fc20のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

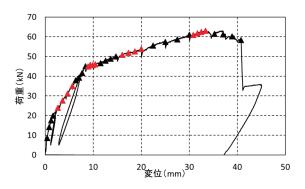
付図-2.11.3 A113fc20 のひずみ分布比較図



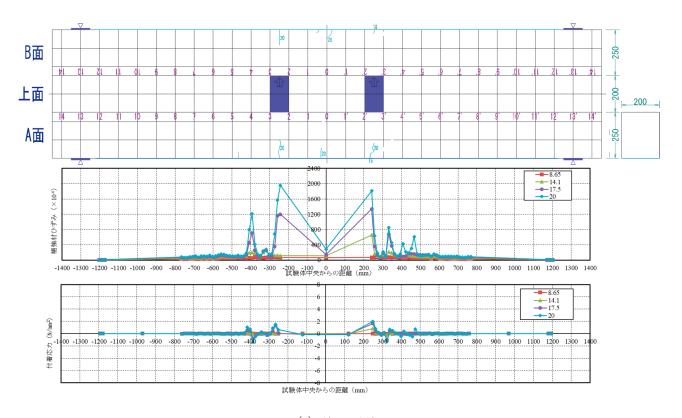
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.11.3 A113fc20 のひずみ分布比較図 (続き)

付 2.12 A113fc40 のデータ



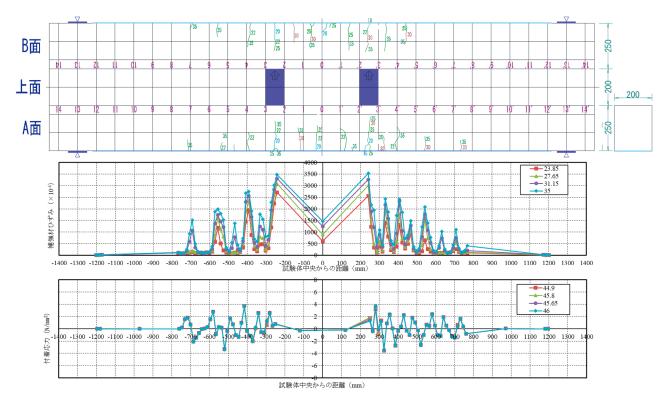
付図-2.12.1 A113fc40の荷重変位関係



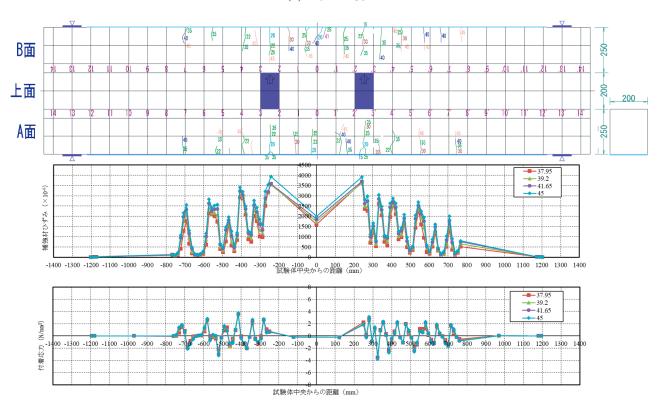
(a) 0kN-20kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.12.2 A113fc40のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図



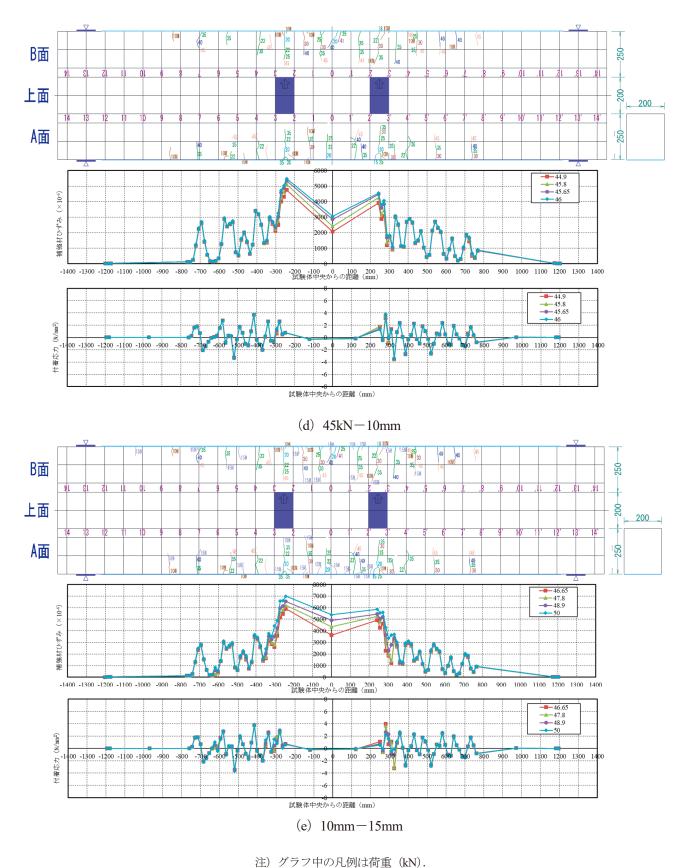
(b) 20kN-35kN



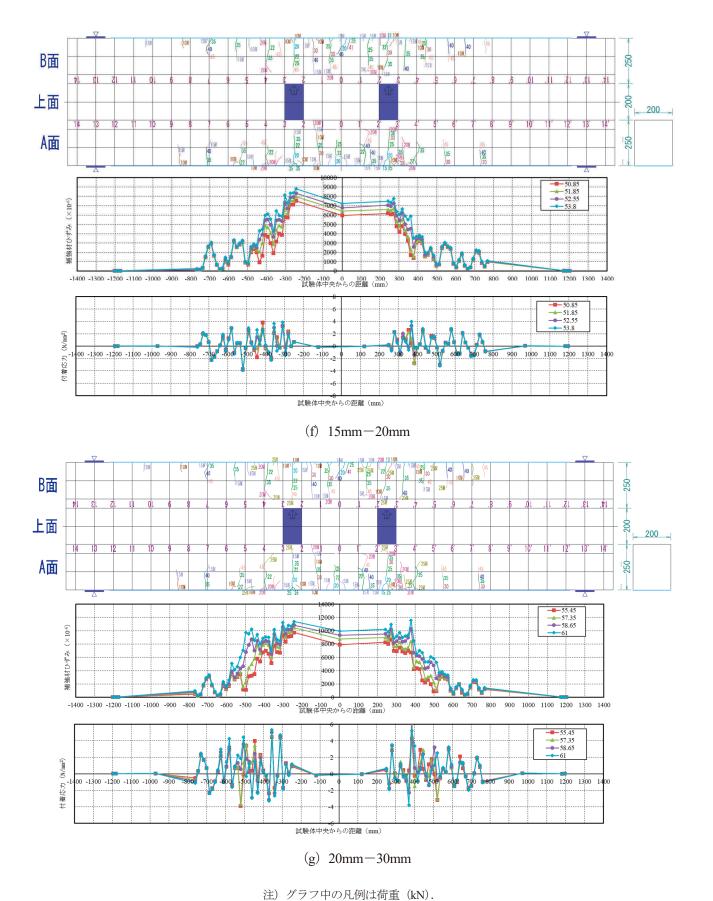
(c) 35kN-45kN

注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

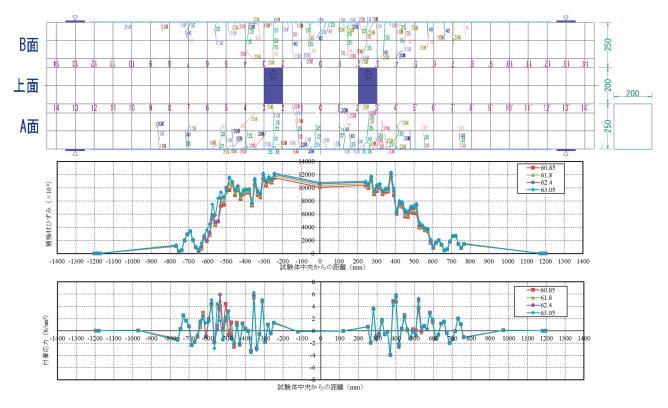
付図-2.12.2 A113fc40のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



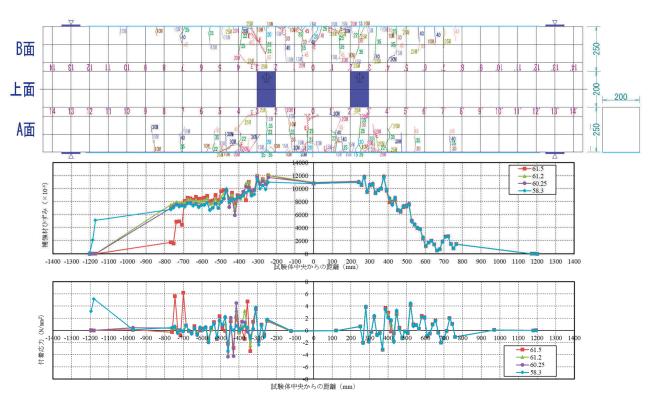
付図-2.12.2 A113fc40 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



付図-2.12.2 A113fc40 のひび割れ図, ひずみ分布図及び付着応力図 (続き)



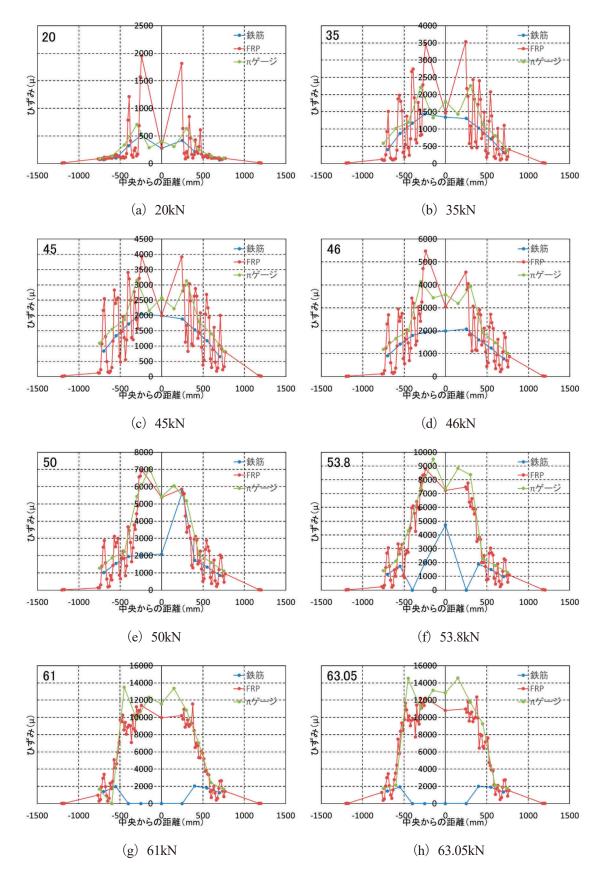
(h) 30mm - 63.05kN



(i) ポストピーク

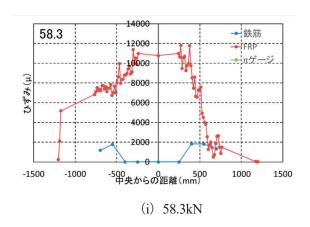
注) グラフ中の凡例は荷重 (kN).

付図-2.12.2 A113fc40のひび割れ図、ひずみ分布図及び付着応力図(続き)



注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.12.3 A113fc40 のひずみ分布比較図

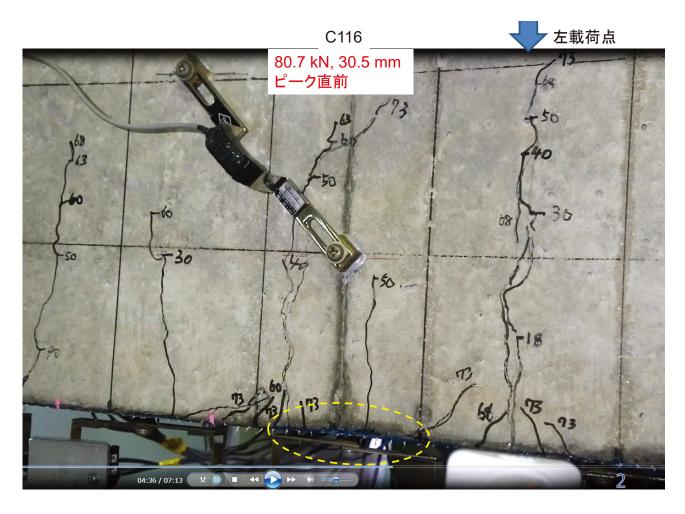


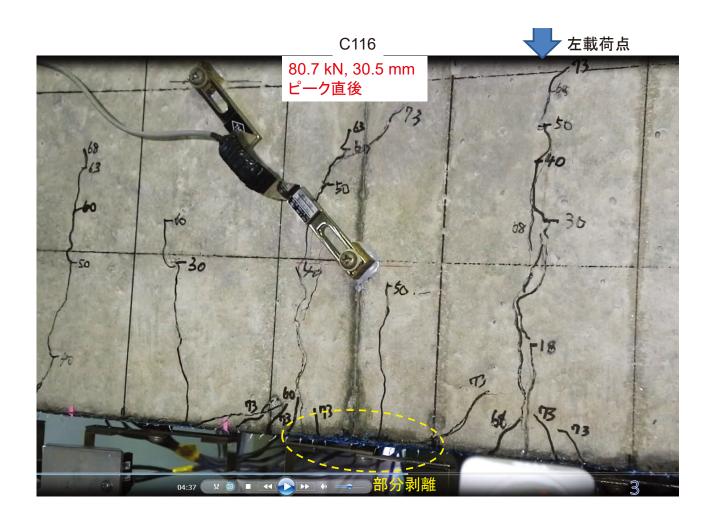
注) グラフ中の左上の数値は荷重 (kN).

付図-2.12.3 A113fc40のひずみ分布比較図(続き)

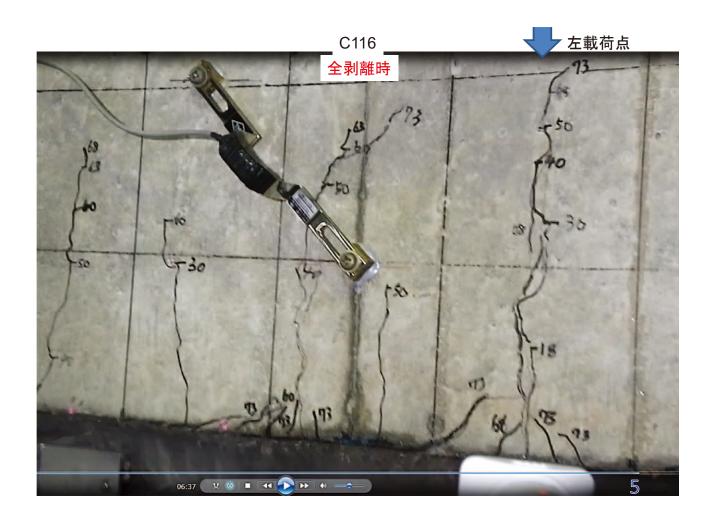
付属資料3 ビデオによる中間剥離の観察

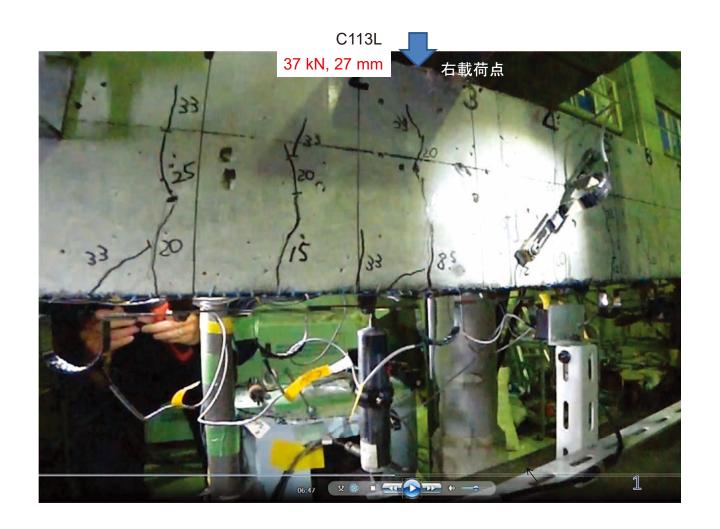








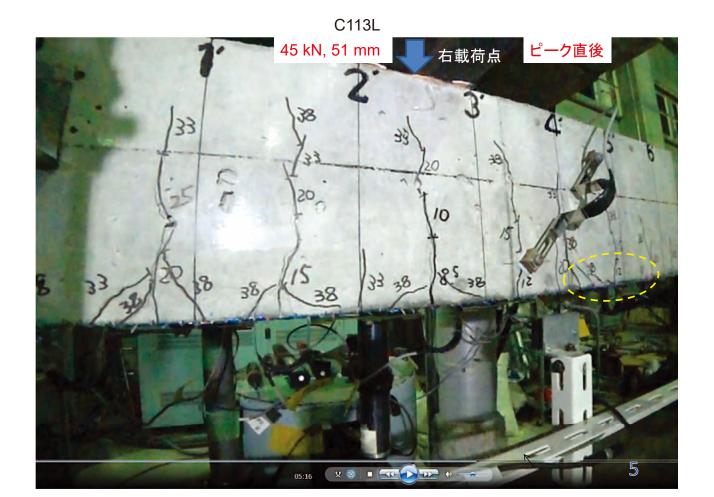


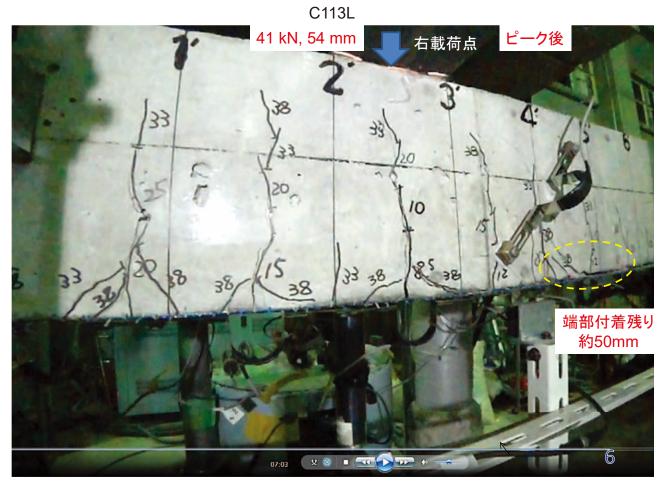






















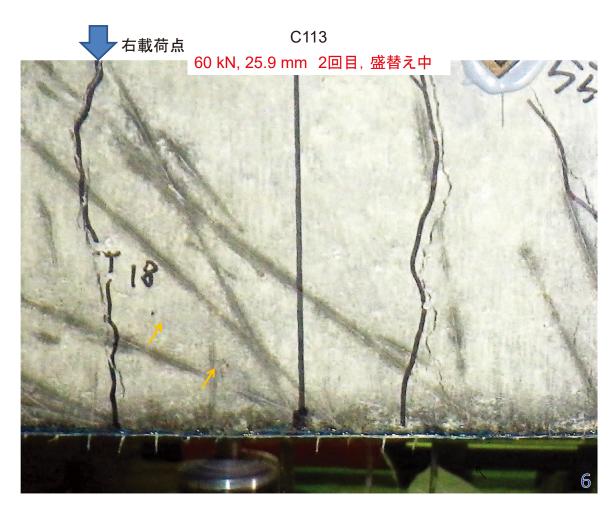


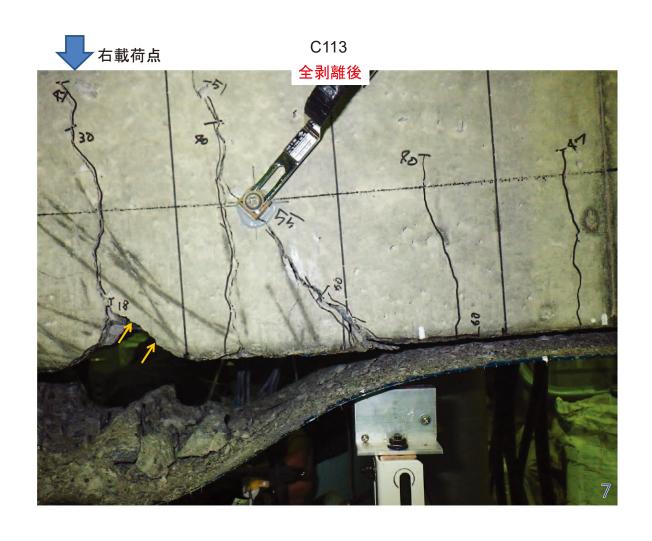


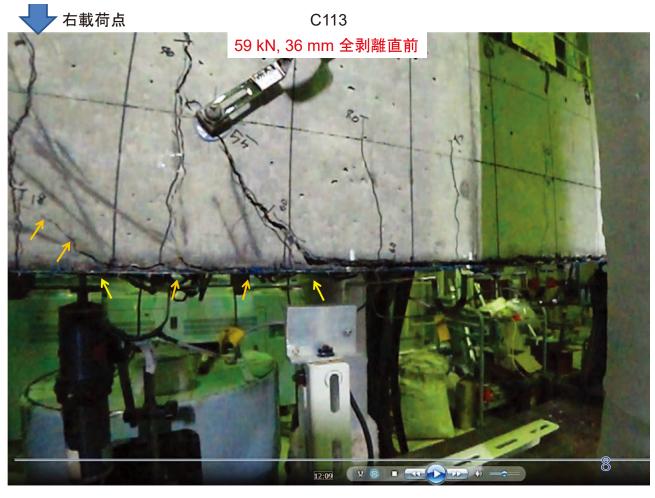


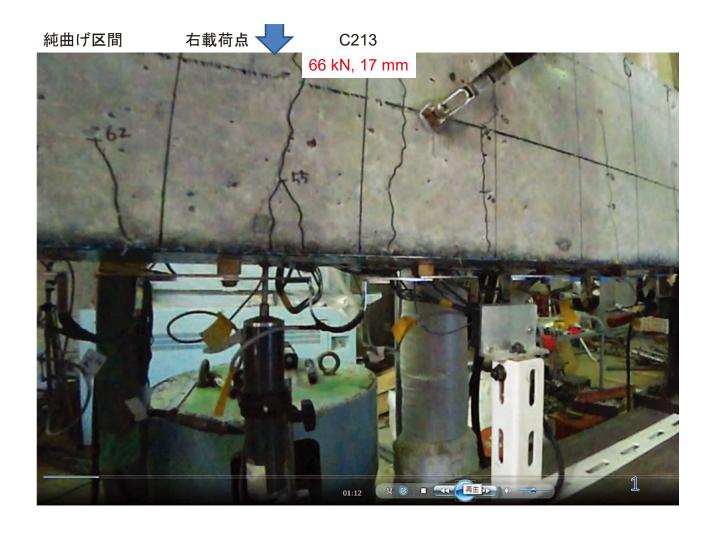
C113

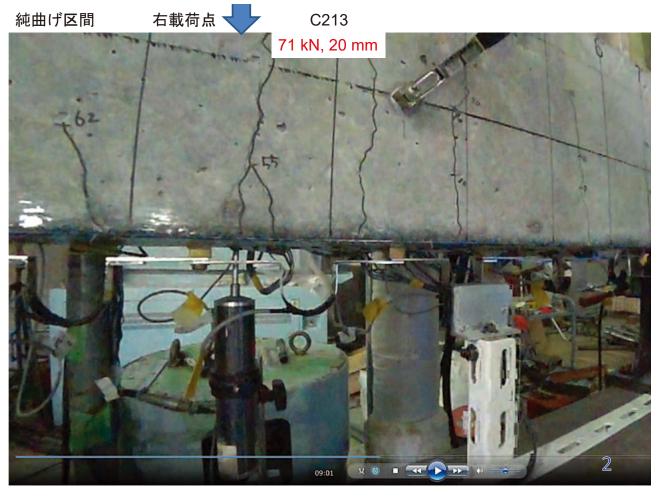




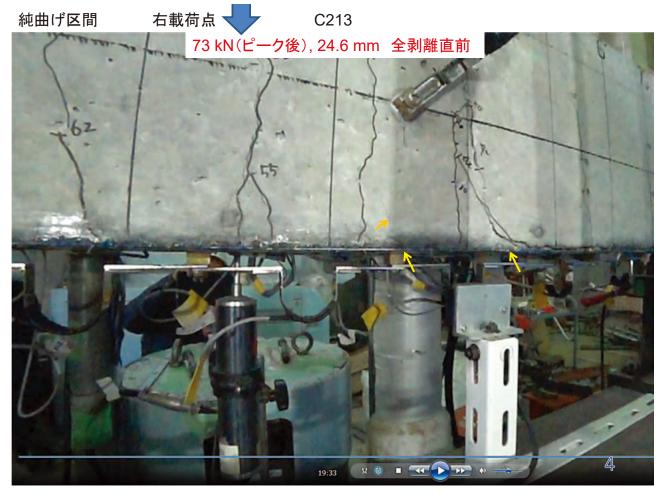




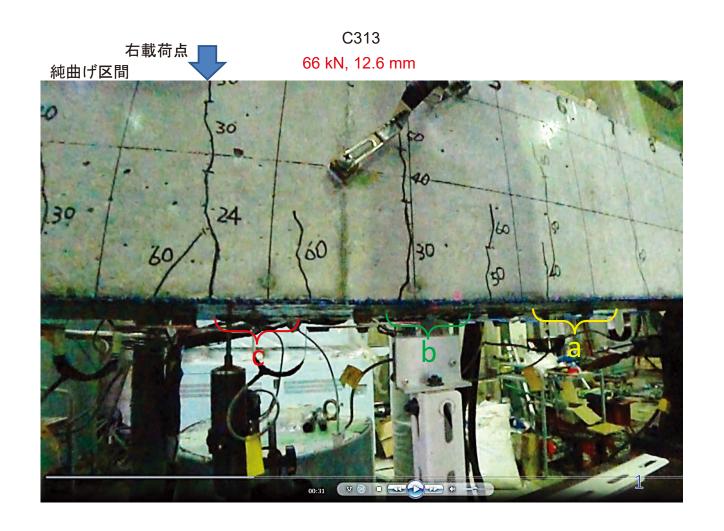






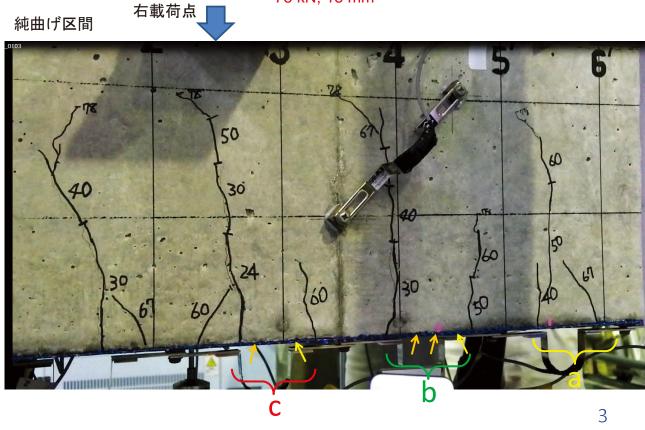


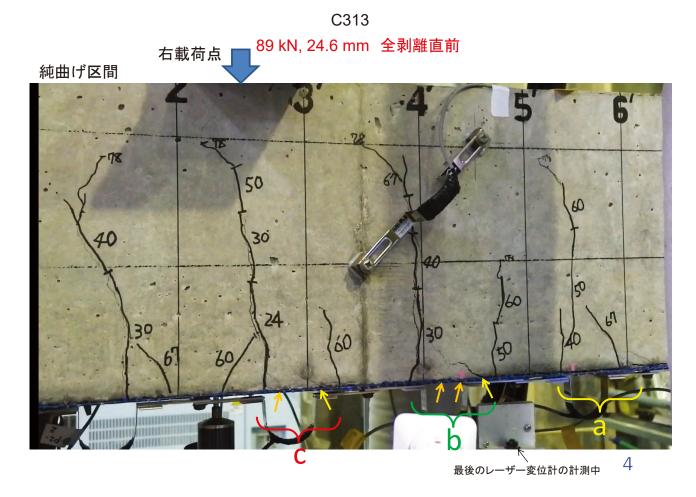




C313 67 kN, 13 mm 右載荷点 純曲げ区間 man and the

C313 78 kN, 18 mm







 C313

 全剥離直前

 純曲げ区間

C313 全剥離直後



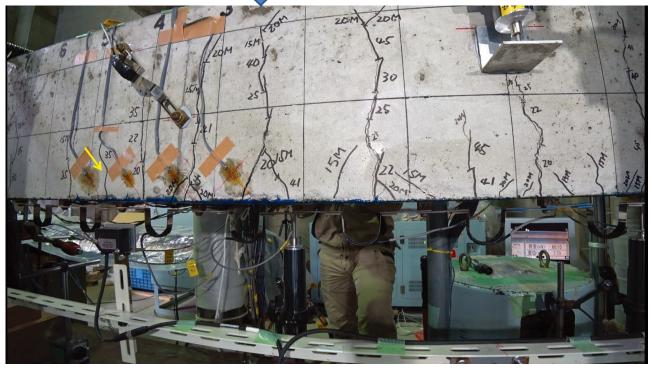








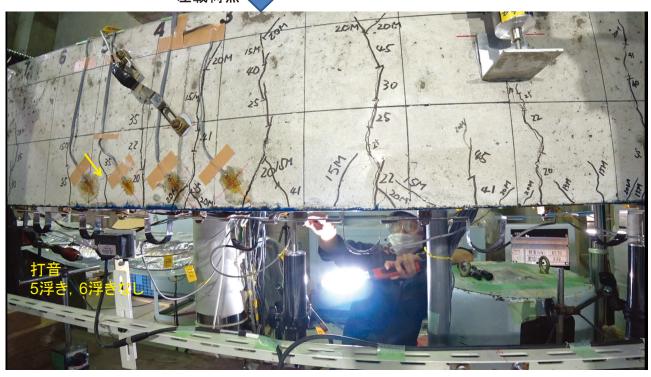
C113e1 左載荷点 60 kN, 27 mm



注) 変位計 表示值+20 mm

5

C113e1 左載荷点 61.7 kN, 30 mm



注) 変位計 表示值+20 mm

左載荷点

62.7 kN, 33.4 mm

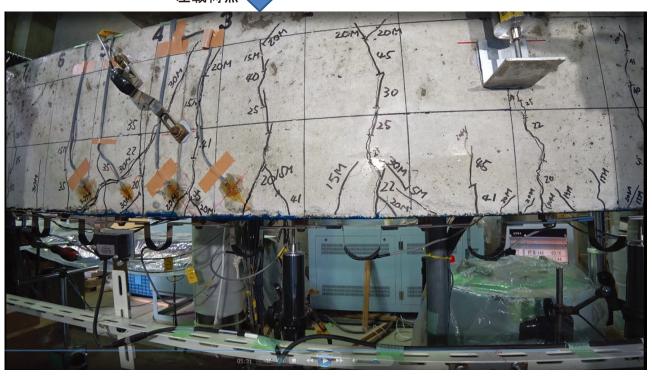


注) 変位計 表示值+20 mm

7



C113e1 _60 kN, 37 mm 剥離直前



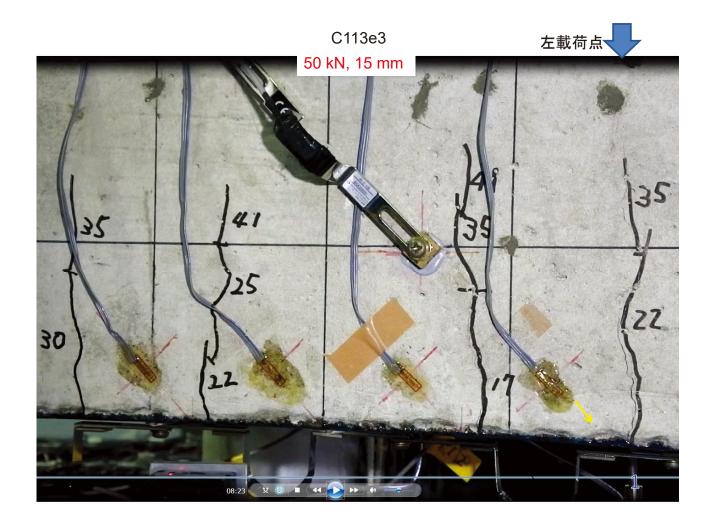
注) 変位計 表示值+20 mm

左載荷点

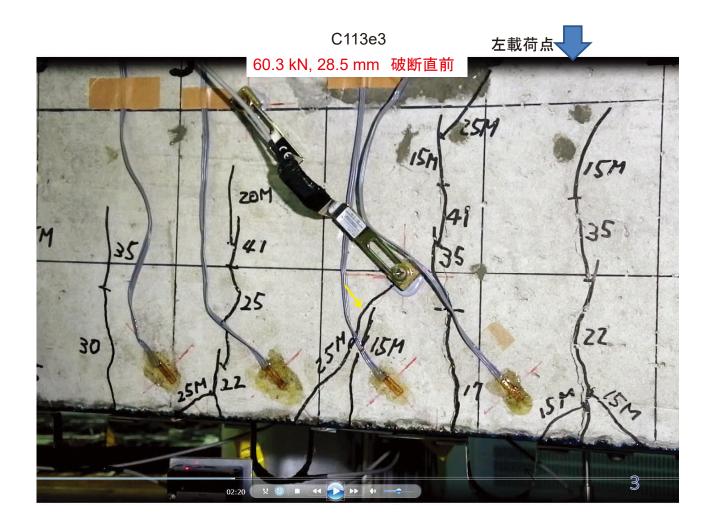
剥離直後



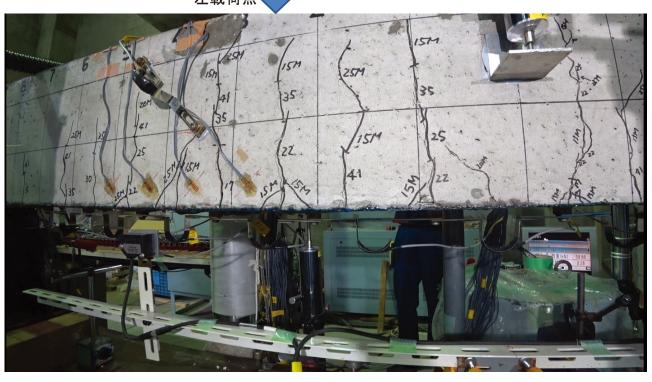
注) 変位計 表示值+20 mm







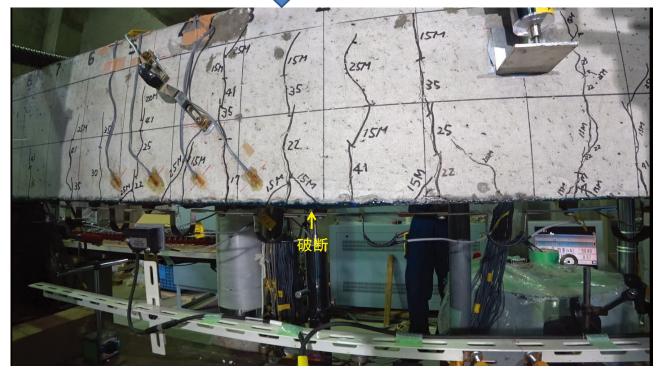
C113e3 左載荷点 60 kN, 28.5 mm 破断直前



注) 変位計 表示值+20 mm

C113e3





注) 変位計 表示值+20 mm

5

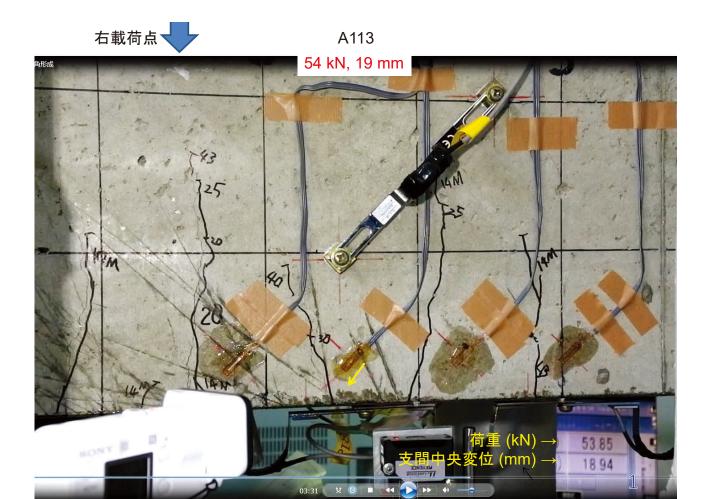
C113e3

左載荷点

破断



注) 変位計 表示值+20 mm





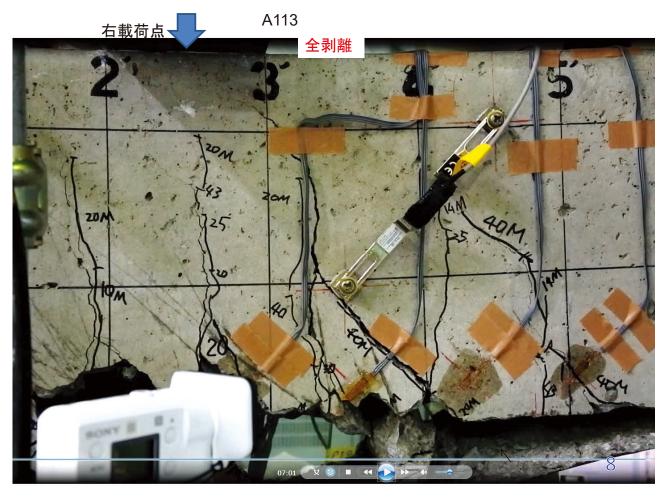


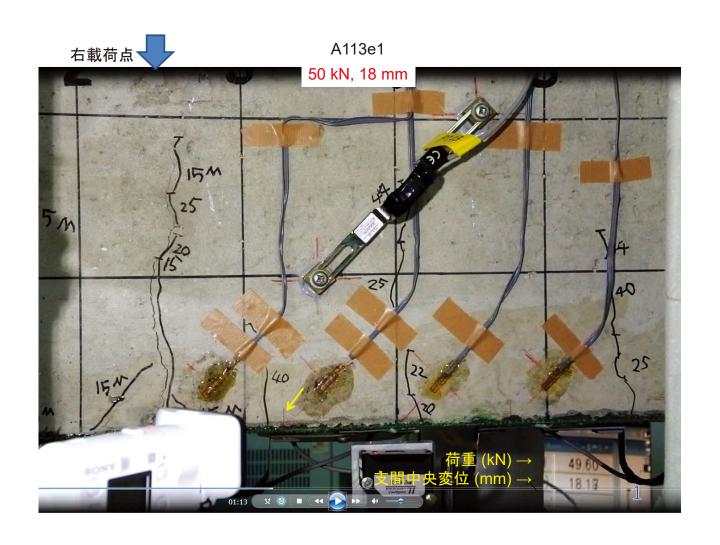




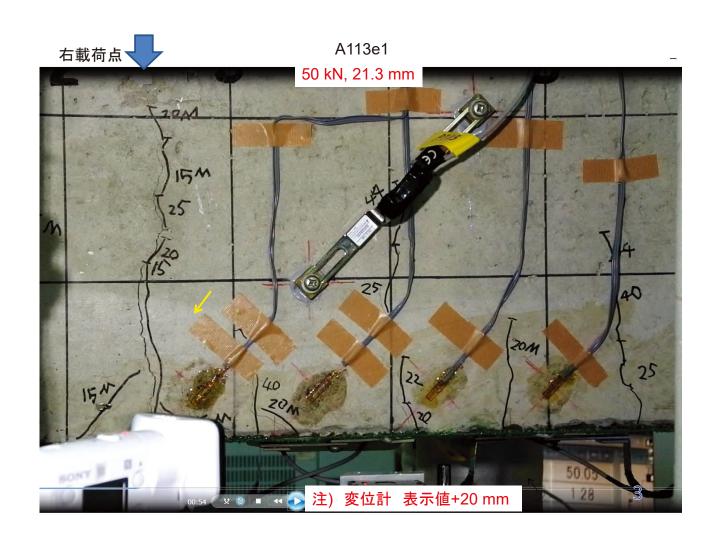
















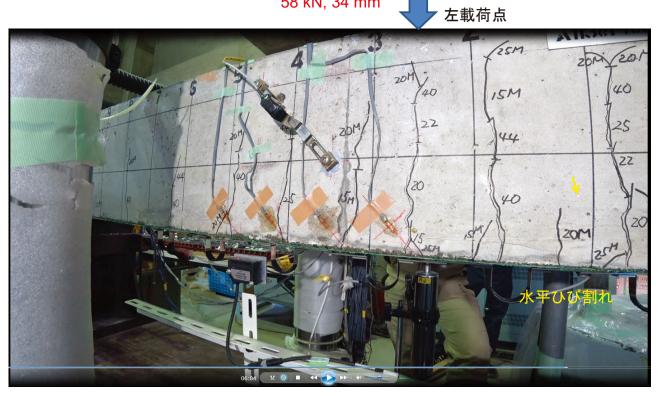
A113e1



A113e1



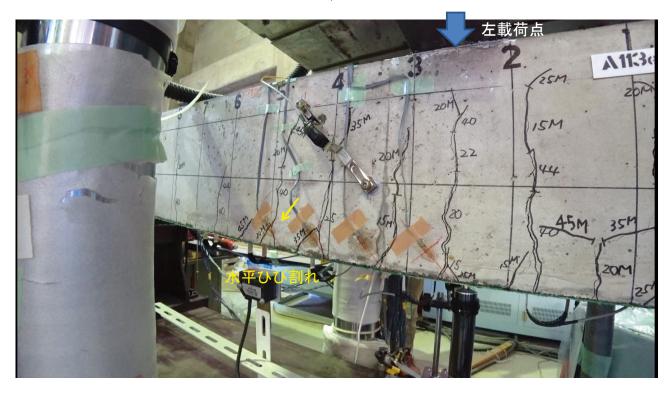
A113e1 58 kN, 34 mm



A113e1



A113e1 78 kN, 72 mm

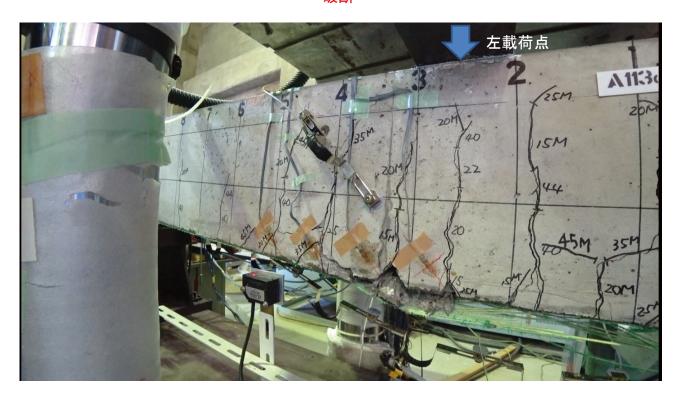


注) 荷重は荷重-変位データで確認.

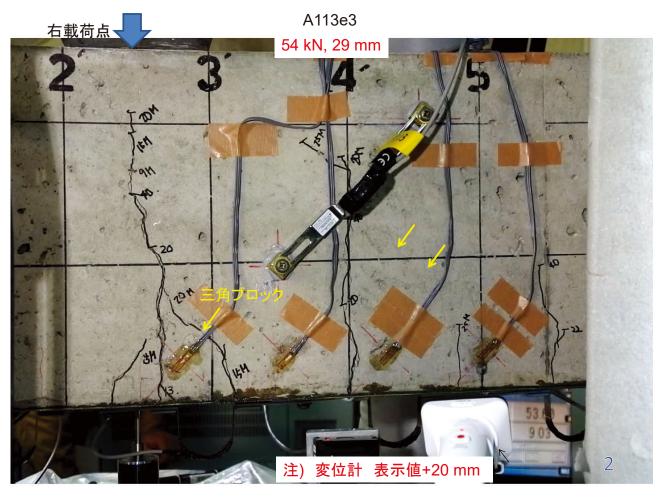
A113e1 84.5 kN, 85.5 mm 破断直前



A113e1 破断

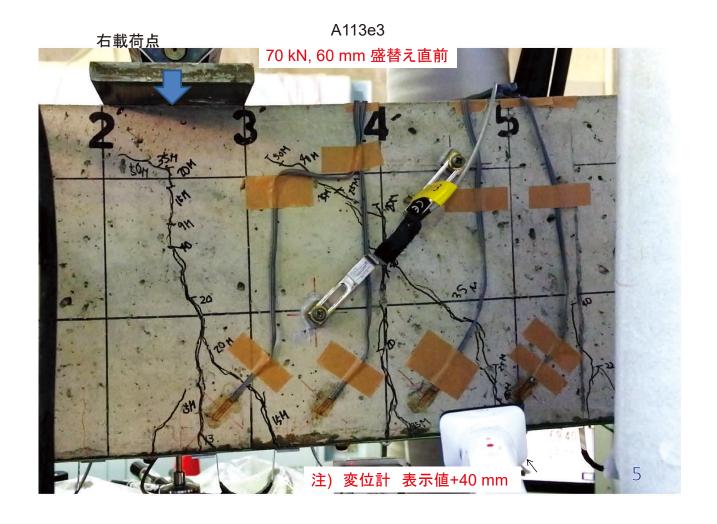








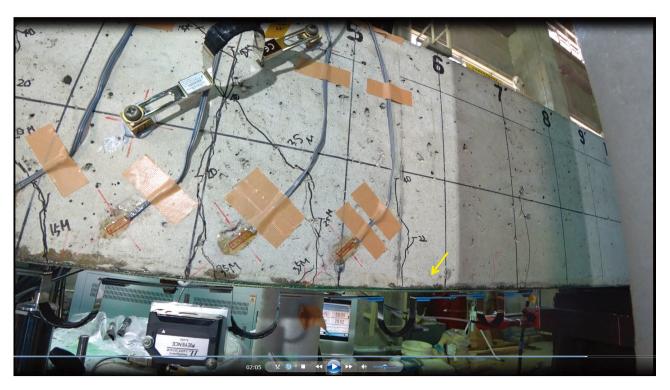


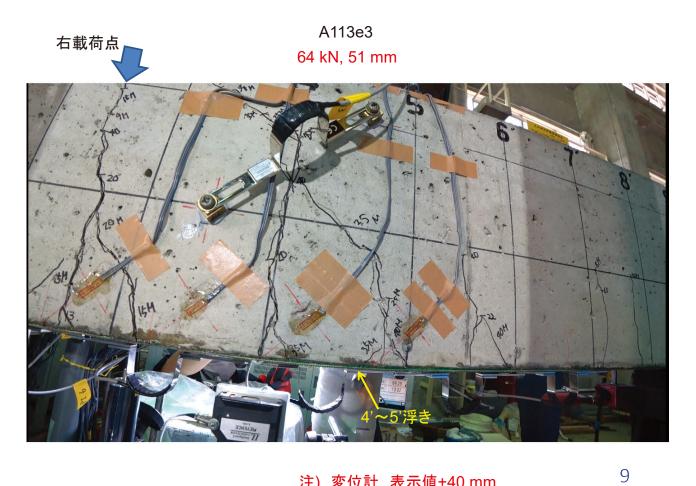






A113e3 56 kN, 40 mm 盛替え前





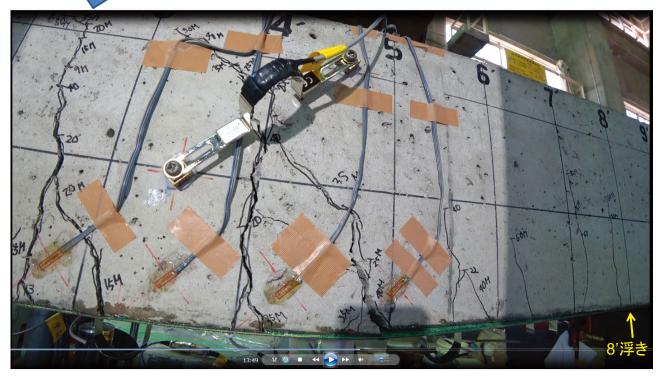
注) 変位計 表示值+40 mm

A113e3 右載荷点 70 kN, 64 mm

注) 変位計 表示值+60 mm

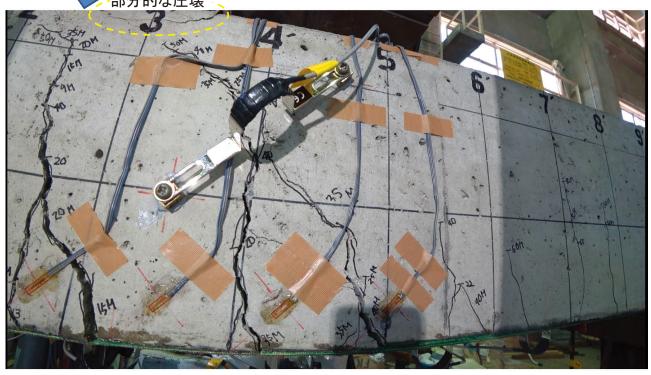
右載荷点

A113e3 75.2 kN, 82.5 mm ピーク荷重付近



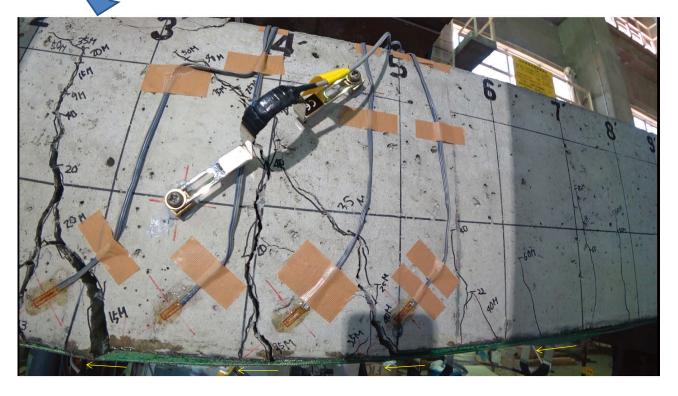
注) 変位計 表示值+60 mm





右載荷点

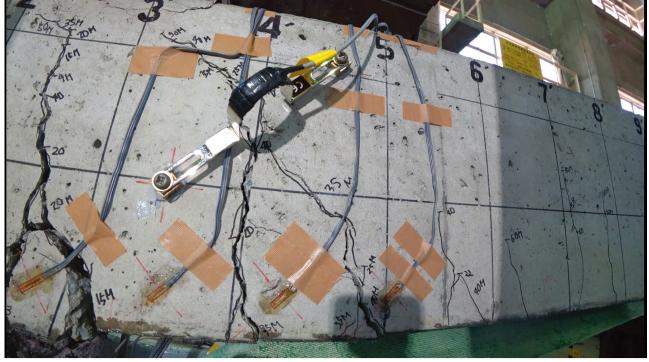
A113e3 $65 \rightarrow 30 \text{ kN}, 98 \text{ mm} \quad \mathbf{変位保持}, 荷重低下中, 剥離中$



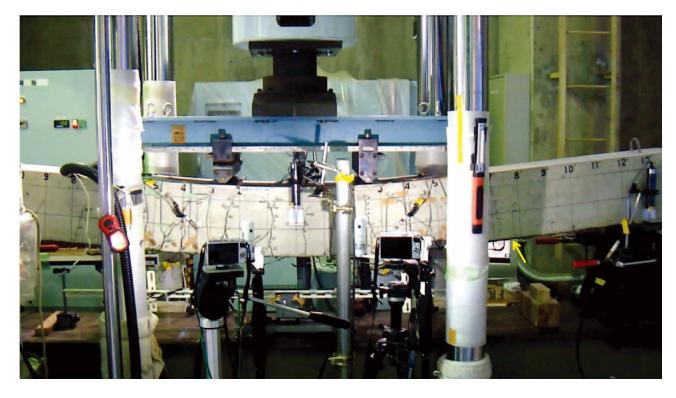
注) 変位ホールド中に剥離.



A113e3 30 kN, 99 mm 全剥離

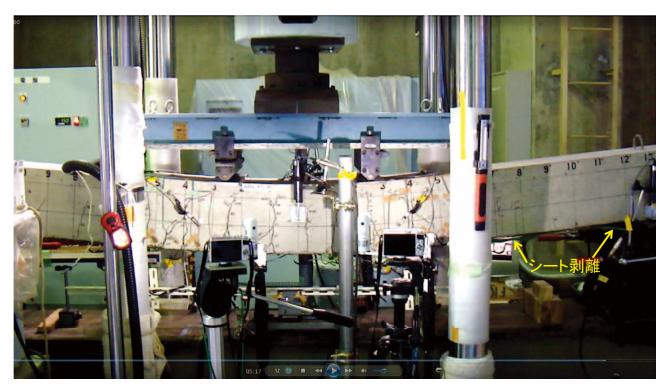


A113e3 47 kN, 98 mm 剥離中



注) 変位計 表示值+60 mm

A113e3 43 kN, 98 mm 剥離中



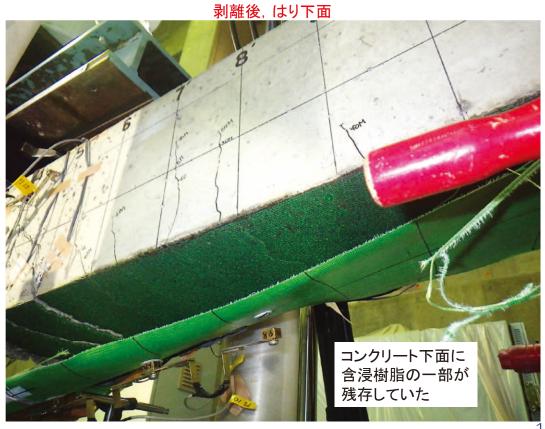
注) 変位計 表示值+60 mm

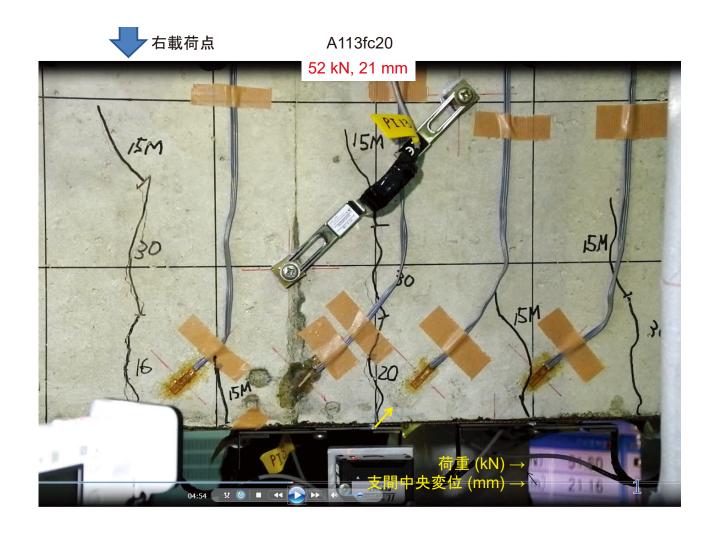
A113e3 30 kN, 99 mm 全剥離

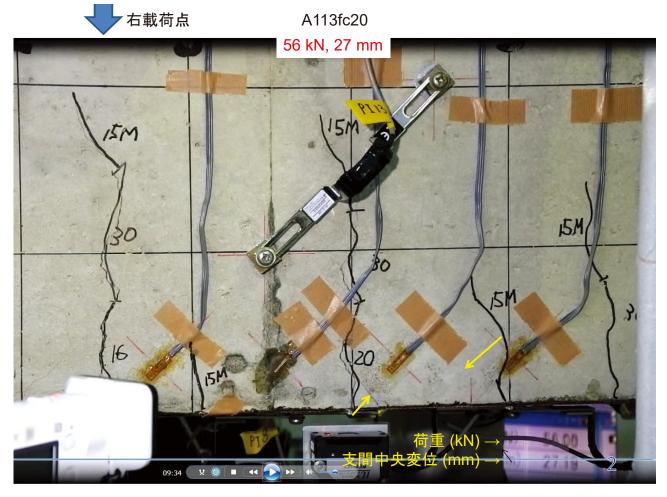


17

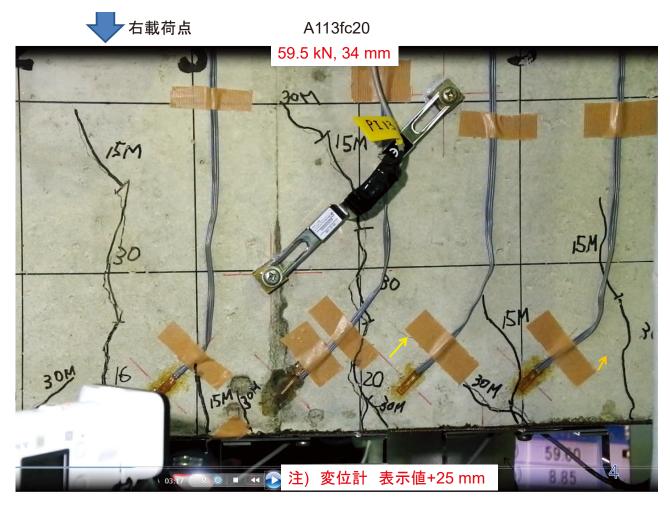
A113e3





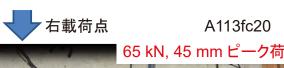




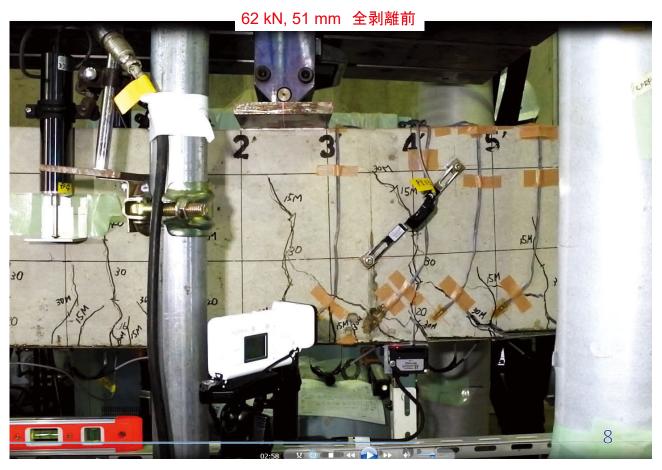




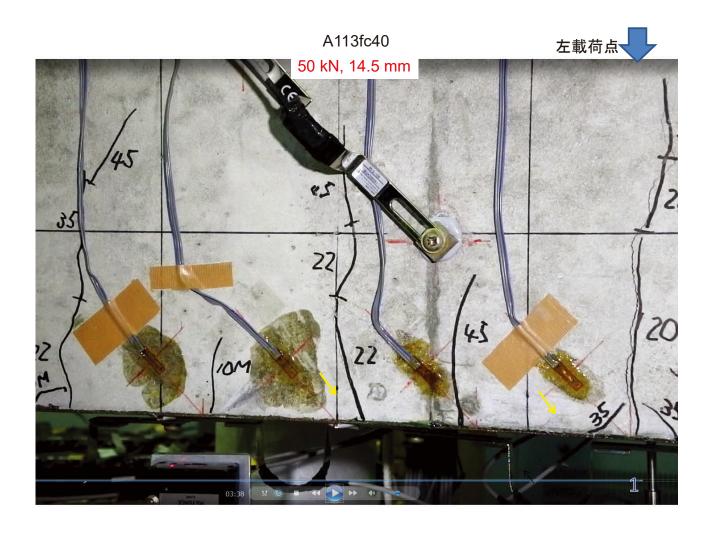


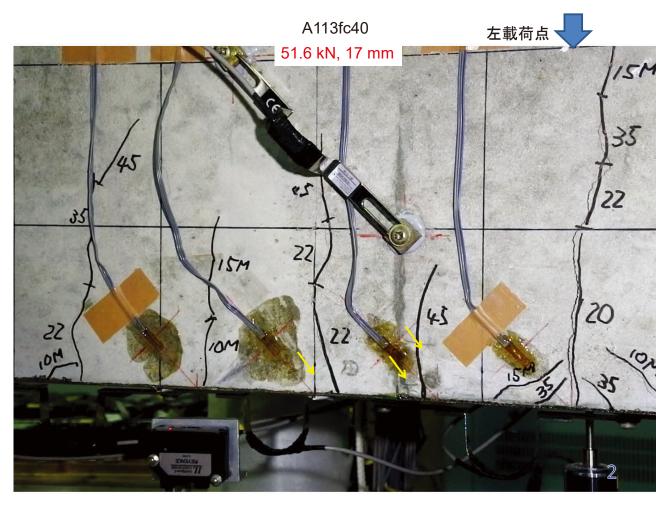


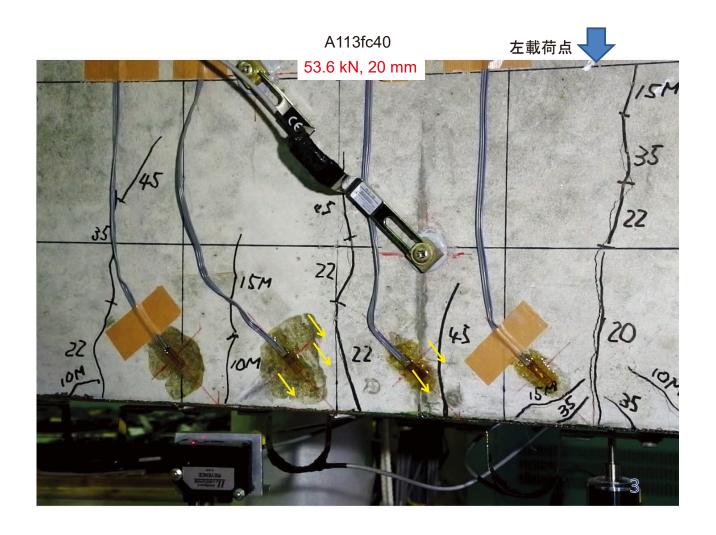










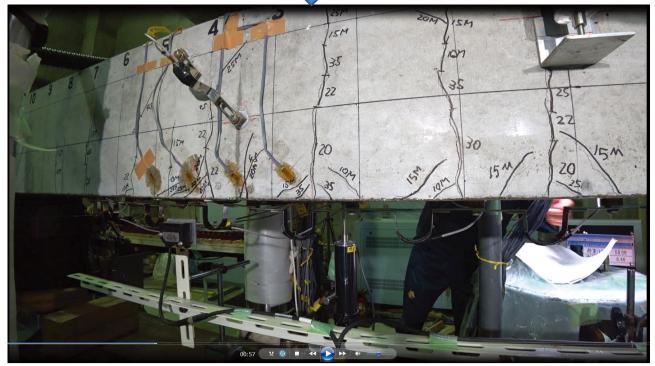








58 kN, 26.5 mm 左載荷点



注) 変位計 表示值+20 mm

7

A113fc40

左載荷点 59 kN, 28 mm



注) 変位計 表示值+20 mm

左載荷点 59.7 kN, 29 mm

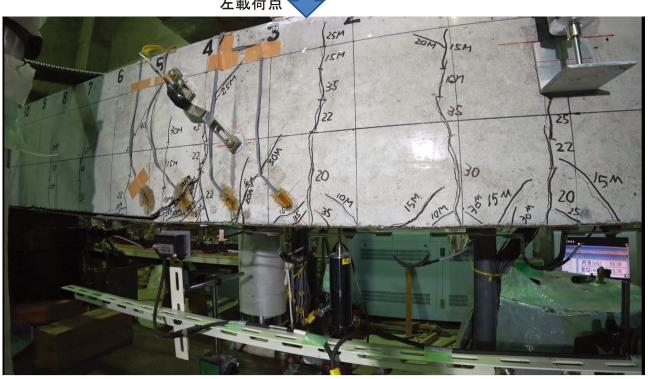


注) 変位計 表示值+20 mm

9

A113fc40

左載荷点 58 kN, 40.8 mm 全剥離直前



注) 変位計 表示值+20 mm





11

付属資料 4 既往の文献におけるはり試験データ

- 注1) 文献番号は、本文7章の文献番号を示す.
- 注2)破壊形態欄の凡例は次のとおり.

X:基準供試体, P:シート中間剥離, E:シート端部からの剥離, B:シート破断, C:圧縮破壊,

S: せん断破壊、G: 凝集破壊、U: U字補強有、側面補強有または緩衝材有

無	(*は7章の 比較対象 としたデータ)																																	
Ą	##		*	*	*	*	*	*				*				*		*	*		*						*		*		*		*	
試験結果	破壊荷. P.max (kN)	67.3	75.1	83.4	80.4	69.7	77.1	83.4	19.8	28.5	39.8	40.2	28.2	37.6	41.5	43.7	42.9	56.1	55.1	35.1	52.3	49.9	35.2	52.4	52.5	65.4	6.69	73.5	82.6	88.2	93.0	108	117	148
淮	被形態	×	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	X	S	В	Ь	S	В	В	Ь	X	Ь	Ь	×	Ь	В	X	В	В	С	Ь	С	Ь	C	Ь	С	Ь	С
	含浸樹脂 弹性係数 <i>E</i> 。 (×10 ³ N/mm²)	I	2.6	2.6	2.6	4.1	4.1	4.1	1	2.6	2.6	2.6	4.1	4.1	4.1	4.1	ı	2.6	4.1	I	2.6	4.1	_	2.6	4.1	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
	補強の 有無,種類	7%	メミミイ	メミビイ	メミミム	炭素	炭素	炭素	コギ	メミミエ	メミミム	メミビイ	炭素	炭素	炭素	炭素	7 %	メミミム	炭素	コギ	メミミム	炭素	7 <i>¥</i>	メミミエ	炭素	メミミム	アラミド	メミミム	アラミド	メミミム	アラミド	メミミム	メミミム	アラミド
林	引張強度 ff (N/mm²)	ı	2480	2480	2480	4070	4070	4070	1	2480	2480	2480	4070	4070	4070	4070	Ι	2480	4070	ı	2480	4070	1	2480	4070	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480
FRP補強材	弹性係数 E_f $(\times 10^3 \mathrm{N/mm}^2)$	I	126.51	126.51	126.51	230.46	230.46	230.46	1	126.51	126.51	126.51	230.46	230.46	230.46	230.46	1	126.51	230.46	ı	126.51	230.46	1	126.51	230.46	126.51	126.51	126.51	126.51	126.51	126.51	126.51	126.51	126.51
	断面積 A_f (mm ²)	ı	17.94	37.18	55.77	10.53	21.71	32.24	1	22.88	22.88	22.88	13.36	13.36	13.36	19.84	1	22.88	13.36	ı	22.88	13.36	1	22.88	13.36	37.18	74.36	37.18	74.36	37.18	74.36	37.18	74.36	37.18
	層数 n _f (層)	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	
	厚さ t _f (mm)	ı	0.138	0.286	0.429	0.081	0.167	0.248	1	0.286	0.286	0.286	0.167	0.167	0.167	0.248	ı	0.286	0.167	ı	0.286	0.167	1	0.286	0.167	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286
	計 (mm)	ı	130	130	130	130	130	130	1	08	08	08	08	08	08	08	-	08	08	1	08	08	-	08	08	130 (130	130 (130	130 (130	130	130	130
ロンフィート	圧縮強度 f_c (N/mm ²) (24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9	23.9
	降伏点 f_y (N/mm ²) (390	390	390	390	390	390	390	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	364	378	378	378	378	378	378	378	378	378
	鉄筋比 P (%)	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
鉄筋	鉄筋量 4s (mm²)	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2
	本 数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	鉄筋径	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D16								
	せん断 スペン比	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	6.9	6.9	0.9	0.9	5.0	5.0	4.0	4.0	3.1
	載荷点間隔	200	500	200	200	200	200	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	400	400	800	800	008	200	200	200	500	200	200	200	500	200
11 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	支間長 (mm)	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	2200	2200	2200	2600	2600	2600	3000	3000	3000	3400	3400	3000	3000	2600	2600	2200	2200	1800
RCはり諸元	(mm)	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
~	有效高 d (mm)	210	210	210	210	210	210	210	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	210	210	210	210	210	210	210	210	210
	(mm)	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	高さ ½ (mm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	供討体名	Z	A200	A415	A623	C145	C300	C445	N	A-35	A-70	A-140	C-35	C-70	C140	CT-140	B0-N	B0-A	B0-C	B40-N	B40-A	B40-C	B80-N	B80-A	B80-C	R7-1	R7-2	R6-1	R6-2	R5-1	R5-2	R4-1	R4-2	R3-1
	Š	0	1	2	3	4	S	9	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	59	30	31	32
	女	11)	11)	11)	11)	11)	11)	11)	12)	12)	12)	12)	12)	12)	12)	12)	13)	13)	13)	13)	13)	13)	13)	13)	13)	14)	14)	14)	14)	14)	14)	14)	14)	14)

華	(*は7草の 比較対象 としたデータ)																																	
	(3) 破壊荷重 日 P _{max} と (kN)	155 *	75.0	* 0.87	* 4.67	* 6.53	\$5.0 *	57.2 *	97.1	97.1 *	* 8.86	70.2	73.1 *	74.5 *	87.2 *	* 84.6	* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	* 9.08	165 *	160 *	140 *	157 *	134	120			53	9	73		62			
試験結果	破壊 破壊 形態 (Ь	, H	Р.	Ь	Ы	Ь	Ь	В	Ь	Ь	Э.	P .	P	Ь	Ь	, B	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	В	P	n	n	Ь	n	n	ш	P	ш	ш	В
	含浸樹脂 弹性係数 <i>E</i> 。 (×10 ³ N/mm ²)	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	4.1	2.6	2.6	2.6	4.1	4.1	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
	補強の 有無,種類	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	炭素	アラミド	アラミド	アラミド	炭素	炭素	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド						
 	引張強度 f_f (N/mm 2)	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2350	2060	2060	3400	2350	2060	2060	3400	2400	2060	2060	2060	2060	2060	2060	2480	2480	2480	2480	2480
FRP補強材	弹性係数 E_f $(\times 10^3 \mathrm{N/mm}^2)$	126.51	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	78.5	118	118	230	78.5	118	118	230	440	118	118	118	118	118	118	131	131	131	131	131
	断面積 A _f (mm²) (3	74.36	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	17.94	17.94	17.94	49.14	37.18	37.18	21.71	98.28	74.36	74.36	43.42	24.05	74.36	74.36	74.36	74.36	74.36	74.36	37.18	37.18	17.94	17.94	37.18
	層数	2	1	1	1	_	1	1	-	1	1	1	1	1	-	1	2	1	2	2	4	2	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	-1
	厚さ t _f (mm)	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.138	0.138	0.138	0.378	0.286	0.286	0.167	0.378	0.286	0.286	0.167	0.185	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.138	0.138	0.286
	世 世	130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 ((2	130 (130 (130 (9 (9	130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (130 (
ロンフィント	圧縮強度 f_c (N/mm ²) (23.9	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	34.3	34.3	34.3	34.3	34.3	34.3	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7
	降伏点 [5]	378	386	386	386	386	386	386	389	389	389	389	389	389	407	407	407	407	407	407	407	407	407	362	362	362	362	362	362	365	365	365	365	362
	鉄筋比 P (%)	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.82	1.82	1.82	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.80	08.0	08.0	0.80	08.0	0.80	1.26	1.26	1.26	1.26	1.54
鉄筋	鉄筋量 4s (mm²)	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	573.0	573.0	573.0	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	397.2	397.2	397.2	397.2	253.4
	本	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	鉄筋径	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D19	D19	D19	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D16	D16	D16	D16	D13
	せん断スペン比	3.1	5.0	5.0	5.0	6.9	6.9	6.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	3.1	3.1	3.1	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	9.5
	載荷点間隔	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	500	200	200	200	500	500	500	200	200	200	200	200	200	500	200	200	500
諸元	支間長 (mm)	1800	2600	2600	2600	3400	3400	3400	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	1800	1800	1800	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	2600
RCはり諸元	(mm)	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
M	有效高 <i>d</i> (mm)	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	360	360	360	360	360	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	110
	(mm)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	高さ (mm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	400	400	400	400	400	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	150
	供款体名	R3-2	S1-R5-1-0.5D	S1-R5-1-1.0D	S1-R5-1-2.0D	S1-R7-1-0.5D	S1-R7-1-1.0D	S1-R7-1-2.0D	S2-R5-1-0.5D	S2-R5-1-1.0D	S2-R5-1-2.0D	S1-R5-0.5-0.5D	S1-R5-0.5-1.5D	S1-R5-0.5-2.0D	A-AT	A-AK	A-AK-S	A-C1	B-AT	B-AK	B-AK-S	B-C1	B-C2	R3-N	R3-S	R3-U	R7-N	R7-S	R7-U	A1-6.9-0.16D	A1-6.9-0.56D	A2-6.6-0.02D	A2-6.9-0.42D	B1-9.5-0.35D
	Š.	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	99	57	28	59	09	61	62	63	49	65
	女	14)	15)	15)	15)	15)	15)	15)	15)	15)	15)	15)	15)	15)	16)	16)	16)	16)	16)	16)	16)	16)	16)	17)	17)	17)	17)	17)	17)	18)	18)	18)	18)	18)

編	(*は7章の 比較対象 としたデー タ)																																	
	100						4	2	5	2	2	1	1	9	0	0	0	3	1	1	4	1 *	* 9	1	*	*	8	* 0	0	-	2	6	7	1
試験結果	破壊荷 Pmax (kN)						134	125	115	102	102	95.1	95.1	87.6	81.0	81.0	73.0	56.	56.	52.	63.	81.1	88.	85.1	.66	117	193	240	240	141	142	139	157	44.1
ilia	() () () () () () () () () ()	Э	H	H	Э	Э	Э	Ш	Е	E	E	E	H	E	Ш	E	Э	E	E	E	×	Ь	Ь	×	Ь	Ь	×	Ь	n	×	n	U	U	×
	含浸樹脂 弹性係数 <i>E</i> 。 (×10 ³ N/mm ²)	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	I	2.6	2.6	Ι	2.6	2.6	I	4.1	4.1	ı	4.1	4.1	4.1	ı
	補強の 有無,種類	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	なし	アラミド	アラミド	なし	アラミド	アラミド	なし	炭素	炭素	なし	炭素	炭素	炭素	なし
¥	引張強度 f_f (N/mm 2)	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	2480	ı	2060	2060	ı	2060	2060	ı	3480	3480	ı	3480	3480	3480	1
FRP補強材	弹性係数 E_f $(\times 10^3 \text{N/mm}^2)$	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	131	ı	118	118	ı	118	118	ı	230	230	ı	230	230	230	ı
	断面積 A _f (mm²) (37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	37.18	ı	37.18	74.36	ı	37.18	37.18	1	33	33	ı	25.1	75.2	75.2	ı
	層数 n _f (層)	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	0	1	2	0	1	1	0	1	-1	0	-1	3	3	0
	厚さ f _f (mm)	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	1	0.286	0.286	1	0.286	0.286	1	0.165	0.165	ı	0.167	0.167	0.167	1
	向 (mm)	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	ı	130 (130	I	130	130	1	200	200	ı	150 (150	150	ı
ロンシャート	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	33.7	33.7	33.7	33.7	33.7	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	31.6	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	40.3	50.9	45.8	141.3	142.3	138.5	156.8	30.0
	降伏点 上 fy (N/mm²)	362	362	362	362	362	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	393	379	379	379	394	394	394	371	371	371	ı	ı	1	-	370
	鉄筋比 P (%) (1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.26	08.0	08.0	0.80	08.0	08.0	08.0	08.0	08.0	08.0	08.0	08.0	08.0	08.0	1.26	1.26	1.26	1.82	1.82	1.82	1.06	1.06	1.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77
鉄筋	鉄筋量 4s (mm²)	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	397.2	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	397.2	397.2	397.2	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	0.0	0.0	0.0	0.0	253.4
	本 数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	,	,	-	-	2
	鉄筋径	D13	D13	D13	D13	D13	D16	D13	D16	D16	D16	D19	D19	D19	D19	D19	D19	AFRPr	AFRPr	AFRPr	AFRPr	D13												
	せん断スペン比	9.5	8.6	9.8	7.7	7.7	3.1	3.1	3.1	3.1	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	6.9	6.9	6.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	2.6	2.6	2.6	2.9	2.9	2.9	2.9	4.6
	載荷点間隔	200	200	200	200	200	200	200	500	500	200	200	200	200	200	200	200	200	200	500	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	300
諸元	支間長 (mm)	2600	2400	2400	2200	2200	1800	1800	1800	1800	2200	2200	2200	2200	2600	2600	2600	3400	3400	3400	2600	2600	2600	2600	2600	2600	1600	1600	1600	1200	1200	1200	1200	1800
RCはり諸元	(mm)	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	200	200	200	150	150	150	150	200
R	有效高 d (mm)	110	110	110	110	110	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	270	270	270	170	170	170	170	165
	(mm)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	30	30	30	30	30	30	30	35
	高さ (mm)	150	150	150	150	150	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	300	300	300	200	200	200	200	200
	供討体名	B1-9.5-0.94D	B1-8.6-0.30D	B1-8.6-0.70D	B1-7.7-0.24D	B1-7.7-0.64D	R3-0.90D	R3-0.60D	R3-0.31D	R3-0.01D	R4-0.80D	R4-0.50D	R4-0.34D	R4-0.04D	R5-0.68D	R5-0.38D	R5-0.07D	R7-0.47D	R7-0.31D	R7-0.14D	RC1-N	RC1-S1	RC1-S2	RC2-N	RC2-S1	RC2-S2	No.1	No.2	No.3	F0	F1	F2	F3	SP-0
	Š.	99	29	89	69	70	7.1	72	73	74	75	9/	77	78	79	08	81	82	83	84	85	98	87	88	68	06	91	92	93	94	95	96	26	86
	文	18)	18)	18)	18)	18)	19)	19)	19)	19)	19)	19)	19)	19)	19)	(61	(61	19)	(61	19)	20)	20)	20)	20)	20)	20)	21)	21)	21)	22)	22)	22)	22)	23)

, to a	で後づ																																	
4 集	(*tz7=jaの 上戦対象 としたデータ) タ)	*		*					*	*	*									*	*	*											*	*
試験結果	破壊荷重 P _{max} (kN)	78.3	101	109	148	108	114	213	227	244	270	254	278	311	249	291	330	193	194	214	227	260	228	266	302	230	243	286	252	298	311	180	232	244
搖	破勝態	Ь	n	Ь	Ω	Е	Ω	Х	Ь	Ь	Ь	n	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	X	X	d	Ь	Ь	U	U	U	Ω	n	n	Ω	n	Ω	Х	ď	Ь
	含浸樹脂 弹性係数 <i>E</i> 。 (×10 ³ N/mm²)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	-	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	_	_	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	_	4.1	4.1
	補強の 有無,種類	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素	なし	炭素	つな	つな	炭素	コギ	炭素	炭素																			
林	引張強度 ff (N/mm²)	4120	4120	4120	4120	4120	4120	_	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	-	_	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	_	4340	4340
FRP補強材	弹性係数 E_f $(\times 10^3 \mathrm{N/mm}^2)$	236	236	236	236	236	236	1	230	230	230	230	230	230	230	230	230	ı	-	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	1	261	261
	断面積 A_f (mm ²)	33.4	33.4	8.99	8.99	100.2	100.2	1	33.4	8.99	100.2	33.4	8.99	100.2	33.4	8.99	100.2	ı	ı	33.4	8.99	100.2	33.4	8.99	100.2	33.4	8.99	100.2	33.4	8.99	100.2	ı	28.4	8.99
	層数 n _f (層)	-	1	2	2	ж	3	0	1	2	3	1	2	3	1	2	3	0	0	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	0	1	2
	厚さ t _f (mm)	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	1	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	ı	ı	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	1	0.167	0.167
	神 <i>b</i> (mm)	200	200	200	200	200	200	1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	1	ı	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	1	170	170
ロンントイート	圧縮強度 f_c (N/mm ²) (30.0	30.0	33.1	33.1	33.0	33.0	47.5	35.8	40.2	39.0	50.3	50.3	49.5	50.1	40.4	46.3	40.3	42.1	43.0	46.3	48.2	46.3	56.3	55.5	40.8	42.6	48.7	47.3	47.3	43.5	44.7	35.8	40.2
	降伏点 <i>f</i> _y (N/mm²)	370	370	370	370	370	370	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371
	鉄筋比 P (%)	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
鉄筋	鉄筋量 4s (mm²)	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0
	本数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	鉄筋径	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D19																										
	せん断スペン比	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
	載荷点間隔	300	300	300	300	300	300	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
12 星	支間長 (mm)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
RCはり諸元	(mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
R	有效高 d (mm)	165	165	165	165	165	165	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
	(mm)	35	35	35	35	35	35	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	高さ (mm)	200	200	200	200	200	200	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
	供討体名	SP-C1	SP-C1s	SP-C2	SP-C2s	SP-C3	SP-C3s	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	Α0	B1	B2
	Š	66	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131
	女大	23)	23)	23)	23)	23)	23)	24)	24)	24)	24)	24)	24)	24)	24)	24)	24)	25)	25)	25)	25)	25)	25)	25)	25)	25)	25)	25)	25)	25)	25)	26)	26)	26)

無	(*は7章の 上較対象 としたデータ)																																	
	 			*	*	*	*						*					*					*					*	*	*	*	*	*	*
試験結果	破壊荷] P _{max} (kN)	247	279	205	223	212	245	230	240	241	236	189	233	239	246	256	275	238	270	284	283	274	244	273	281	280	279	41.7	49.7	54.6	48.5	52.5	51.6	50.4
悄立	表 形 意	U	n	Ь	Ь	Ь	Ъ	n	U	n	U	X	Ь	n	n	U	n	Ь	n	n	n	n	Ь	U	Ω	U	n	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь
	含浸樹脂 弹性係数 <i>E</i> 。 (×10 ³ N/mm ²)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	-	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
	補強の 有無,種類	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素	炭米	炭素	炭素	炭素	炭素	なし	炭素	茨米	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素														
<u>‡</u>	引張強度 f_f (N/mm 2)	4340	4340	4340	4340	4340	4340	4340	4340	4340	4340	_	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	4510	4510	4510	4510	4510	4510	4510
FRP補強材	弹性係数 E_f $(\times 10^3 \mathrm{N/mm}^2)$	261	261	261	261	261	261	261	261	261	261	_	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	230	253	253	253	253	253	253	253
	断面積 A_f (mm ²)	28.4	8.99	14.2	28.4	42.6	8.99	14.2	28.4	42.6	8.99	-	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	8.99	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
	層数 n _f (層)	1	2	1	2	3	4	-	2	3	4	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	-	1	1
	厚さ f _f (mm)	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	ı	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167
	幅 <i>b_f</i> (mm)	170	170	85	85	85	85	85	85	85	85	1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	75	75	75	75	75	75	75
ロンシャート	圧縮強度 f_c (N/mm ²) (42.6	46.3	44.6	43.7	40.2	47.2	41.3	41.3	47.3	48.4	47.9	40.2	46.3	39.7	41.3	45.9	41.3	43.3	46.9	9.64	41.8	40.2	41.5	37.1	43.3	46.3	27.8	21.1	41.5	26.0	26.0	26.0	26.0
	降伏点 f_y (N/mm ²) (371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	371	419	333	329	340	348	348	340
	鉄筋比 F P (%) (1	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	92.0	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35
鉄筋	鉄筋量 4s (mm²)	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	573.0	142.7	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4
	教	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	鉄筋径	D19	D10	D13	D13	D13	D13	D13	D13																									
	せん野 スペン比	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
	載荷点間隔	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	120	120	120	120	120	120	120
11 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	太間長 (mm)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
RCはり諸元	(mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	150	150	150	150	150	150	150
Ā	有效高 <i>d</i> (mm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	125	125	125	125	125	125	125
	(ww)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	25	25	25	25	25	25	25
	高さ (mm)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	150	150	150	150	150	150	150
	供試体名	C1	C2	D1	D2	D3	D4	E1	E2	E3	E4	A00	B01	B02	B03	B04	B05	C06	C07	C08	C09	C10	D11	D12	D13	D14	D15	LH-C1 (D10)	LH-C1 (F20)	LH-C1 (F40)	LH-C1 (PR2)	LH-C1 (PT2)	HH-C1(PT2)	LH-C1
	Š	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164
	女	26)	26)	26)	26)	26)	26)	26)	26)	26)	26)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	27)	28)	28)	28)	28)	28)	28)	28)

華	(*は7章の 比較対象 としたデー タ)																																	
	100	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
試験結果	破壊荷 P max (kN)	49.4	50.0	58.5	56.4	58.4	54.2	52.4	52.5	50.5	56.9	57.4	59.7	40.6	49.6	58.7	80.2	37.8	89.2	104	56.4	41.1	129	159	165	178	168	169	161	80.7	47.1	64.0	75.1	8.68
船	表 影 意	Ь	Ь	Ь	Ъ	Ь	Ъ	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	X	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	X	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь	Ь
	含浸樹脂 弹性係数 <i>E</i> 。 (×10 ³ N/mm²)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	ı	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	ı	4.1	4.1	4.1	2.6	2.6	2.6	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
	補強の 有無,種類	炭素	炭素	炭素	炭素	茨米	茨素	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	アラミド	なし	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素	72 L	炭素	炭素	炭米	アラミド	アラミド	アラミド	炭素	炭素	炭素	炭素	炭素
本	引張強度 f _f (N/mm²)	3980	4510	4510	3980	4510	4510	2420	2240	2420	2420	2240	2420	ı	4600	4600	4600	4600	4600	4600	4600	4600	_	4323	4172	4690	2840	3136	3184	4000	4000	4000	4000	4000
FRP補強材	弹性係数 E_f $(\times 10^3 \text{N/mm}^2)$	253	253	253	253	253	253	115	115	115	115	115	115	ı	265	265	265	265	265	265	265	265	_	259	265	259	131	122	81	255	255	255	255	255
	断面積 A_f (mm ²)	12.5	12.5	25.1	25.1	25.1	25.1	24.3	24.3	24.3	24.3	48.6	48.6	ı	12.5	23.4	12.5	12.5	12.5	23.4	25.1	12.5	1	22.2	22.2	22.2	38.6	38.6	33.8	22.2	22.2	22.2	44.4	9.99
	層数 n _f (層)	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	0	1	1	1	1	1	1	2	1	0	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	2	3
	厚さ t _f (mm)	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	0.286	ı	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	_	0.111	0.111	0.111	0.193	0.193	0.169	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111
	耐 b _f (mm)	75 (75 (75 (75 (75 (75 (85 (85 (85 (85 (85 (85 (T	75 (140	75 (75 (75 (140 (75 (75 (_	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
ロンングイント	圧縮強度 f_c (N/mm ²) (24.8	26.0	26.0	24.8	24.8	27.8	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	26.9	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	30.8	27.5	27.5	50.0	52.4	53.5	49.7	51.2	52.2	49.1	34.7	34.7	34.7	34.7	34.7
	降伏点 f_y (N/mm ²) (313	383	383	333	352	356	329	340	333	329	383	371	290	320	320	320	320	320	320	320	345	393	393	393	393	393	393	393	332	348	348	348	348
	鉄筋比 M	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	0.79	0.79	1.35	0.76	66.0	66.0	66.0	66.0	0.99	0.99	0.99	0.95	0.91	09.0	09.0	09.0
鉄筋	鉄筋量 4 s (mm²)	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	142.7	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	253.4	253.4	253.4	253.4
	大 数	2	2	2	2	2	2	2	2	2 2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	鉄筋径	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D10	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D16	D13	D13	D13	D13													
	せん断スペン比倒	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	2.7	5.5	2.5	2.5	4.3	4.3	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	5.0	7.5	5.0	5.0	5.0
	載荷点間隔	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	400	400	400	400	400	400	400	200	200	500	500	200
器元	太間長 (mm)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	800	1500	1200	1200	1200	1200	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	2600	2600	2600	2600	2600
RCはり諸元	(mm)	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
2	有效高 d (mm)	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	215	215	125	125	200	200	200	200	200	200	200	210	140	210	210	210
	(ww) 6 %*¢	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	高 次 (mm)	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	240	240	150	150	240	240	240	240	240	240	240	250	180	250	250	250
	供討体名	LL-C1	HH-C1	LH-C2	LL-C2	НН-С2	H-C2	LH-A1	LL-A1	HH-A1	LH-A2	LL-A2	нн-А2	無補強	150-1200-75	150-1200-140	150-800-75	150-1500-75	240-1200-75	240-1200-140	150-1200-75-C2	150-1200-75-D10	無補強	CN	$_{ m CM}$	22	AIN	A1M	A2M	C116	C113L	C113	C213	C313
	Š	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197
	女	28)	28)	28)	28)	28)	28)	28)	28)	28)	28)	28)	28)	28)	29)	29)	29)	29)	29)	29)	29)	29)	30)	30)	30)	30)	30)	30)	30)	1	1	-	-	ı

									т
備考	(*は7章の 近較対象 としたデー タ)	*		*			*	*	
試験結果	破壊荷重 <i>P</i> _{max} (kN)	64.0	9.09	9.79	84.7	75.6	9:59	63.1	
紅	被接	Ь	В	Ь	В	Ð	ď	Ь	
	含浸樹脂 弹性係数 E_a $(\times 10^3 \mathrm{N/mm}^2)$	2.8	1.0	2.6	1.0	9.0	2.6	2.6	
	補強の 有無,種類	炭素	炭素	アラミド	アラミド	アラミド	メミムム	アラミド	
1村	引張強度 f_f (N/mm 2)	4383	3565	3415	3088	3010	3415	3415	
FRP補強材	弹性係数 E_f $(\times 10^3 \mathrm{N/mm}^2)$	246	245	134	119	118	134	134	
	断面積 A_f (mm ²)	22.2	22.2	38.6	38.6	38.6	38.6	38.6	
	層数 <i>fu</i> (層)	1	1	1	1	1	1	1	
	厚さ t _f (mm)	0.111	0.111	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	
	幅 b _f (mm)	200	200	200	200	200	200	200	
コンクリート	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	21.5	40.5	Ĭ
	降伏点 f _y (N/mm²)	349	349	349	349	349	349	349	
1	鉄筋比 P (%)	09.0	09.0	09.0	09.0	09.0	09.0	09.0]
鉄筋	鉄筋量 A_s (mm ²)	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	253.4	
	本数	2	2	2	2	2	2	2	
	鉄筋径	D13	D13	D13	D13	D13	D13	D13	
	せん断スパン比	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
	載荷点間隔	200	200	200	200	200	200	200	
諸元	支間長 (mm)	2600	2600	2600	2600	2600	2600	2600	
RCはり諸元	(mm) 壨	200	200	200	200	200	200	200	I
,	有效高 d (mm)	210	210	210	210	210	210	210	
	(ww) 4 % £	40	40	40	40	40	40	40	
	高さ (mm)	250	250	250	250	250	250	250	
	供討体名	C113e1	C113e3	A113	A113e1	A113e3	A113fc20	A113fc40	
	No.	198	199	200	201	202	203	204	
	女	ı	I	1	ı	1	I	1	

共同研究報告書 Cooperative Research Report of PWRI No. 555 September 2022

編集·発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754