

## 繊維シートによる RC 床版の補強設計法に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 29

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：玉越隆史、田中良樹、村井啓太

### 【要旨】

既設道路橋の RC 床版の疲労に対する補強として、軽さや施工性で有利な繊維シート補強の適用事例が多く見られる。しかし、繊維シート補強された RC 床版の疲労損傷機構は必ずしも十分に解明されていないため、類似の RC 床版であってもシートの積層数が異なる場合が見られる。本研究では、繊維シート補強された RC 床版の疲労損傷機構をより明確にするとともに、繊維シートによる RC 床版の性能照査型補強設計法を提案するため、繊維シート補強された RC 床版供試体を用いた輪荷重走行試験及び繊維シートとコンクリートの付着に関する試験等を実施した。その結果、補強前のコンクリートのひび割れが著しい場合でも、ひび割れ樹脂注入を施した上でシート接着することで、版としての挙動を回復できること、また、補強設計として、繊維シートによる補強効果の照査及びシートの剥離に関する照査だけでなく、シートの破断に関する照査も必要であることがわかった。本課題で得られた知見は、シートとコンクリートの複合構造の性能評価法の検討において活用していく。

キーワード：RC 床版、連続繊維シート、炭素繊維、アラミド繊維、補強、剥離、(シート)の破断

### 1. はじめに

日本におけるこれまでの鉄筋コンクリート(RC)床版の主たる損傷は、大型車の繰返し载荷による疲労損傷であり、ひび割れの発生・進展、最終的には路面の抜け落ちに至る、という過程をたどる<sup>1)</sup>。鋼道路橋の維持管理において、RC 床版の補修・補強は鋼材の腐食や疲労の対策に並んで大きな割合を占めている<sup>2)</sup>。1993 年の車両制限令及び設計自動車荷重の 25 トンへの改正に伴い、損傷度の高い既設床版を中心に補修・補強が進められてきているが、近年の道路橋と比較して、RC 床版の疲労耐久性が相対的に低い傾向にある昭和 30～40 年代(1955～1974 年)の橋は、鋼道路橋約 6 万橋のうちの 1/3 近くを占めており、未補強で供用されているものも少なくない。

RC 床版の補強対策には、鋼板接着、上面増厚、連続繊維シート補強等の各種工法がある<sup>2),3)</sup>。1990 年代に、RC 床版の疲労耐久性を輪荷重走行試験により評価する方法が考案され<sup>4),5)</sup>、新旧の補強工法の評価が行われた<sup>6),7)</sup>。そのうち、連続繊維シートによる補強工法は死荷重や施工性の面で利点がある。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の共同研究(1996～1998 年)において、炭素繊維シート補強された RC 床版の輪荷重走行試験が実施され、補強仕様(シートの積層数として全面 2 層

貼りを推奨)を含む設計・施工指針(案)が提案された<sup>7)</sup>。これらを背景に、1990 年代後半以降、炭素繊維シート補強の事例が増加している。しかし、繊維シート補強された RC 床版の損傷機構は必ずしも明確にされていないため、類似の RC 床版であっても異なる補強仕様が適用される事例が見られる。一方、補強後の維持管理を考慮した格子貼り(写真-1)や施工性の改善等に配慮した他の連続繊維補強材が開発され普及している。RC 床版の耐久性向上(補強の信頼性確保)の観点から、それらの新しい材料にも対応可能な、かつより合理的な繊維シート接着工法による補強設計法を確立する必要がある。



写真-1 格子状シート接着による RC 床版の補強事例

表-1 シート補強された RC 床版の輪荷重走行試験の主な試験条件と走行回数

供試体	シートの貼付	コンクリート圧縮強度 <sup>3)</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	目標変位 <sup>4)</sup> (mm)	養生載荷開始時期	補強前 目標変位まで 147kN, 15rpm (回)	養生載荷 <sup>5)</sup> 68kN, 5rpm (回)	補強後 147kN, 15rpm (回)	荷重増加後 196kN, 15rpm (回)	走行初期の シート損傷	備考
CF1	格子	22.7	—	2 時間後	—	100,000	385,000	89,000	あり	
CF2	格子	20.7	10	2 時間後	1,610,000	185,000	1,100,000	—	あり	
CF3	格子	25.4	8	2 時間後	385,000	189,000	385,000	208,000	あり	
CF4	主鉄筋	27.0	8	2 時間後	220,000	98,000	294,000	78,664	あり	
CF5	配力鉄筋	24.7	8	2 時間後	40,963	98,000	41,000	73,251	あり	
CF6	格子	26.3	10	3 日後	65,017	100,000	385,000	47,400	なし	ひび割れ注入
CF7	主鉄筋	24.4	8	1 日後	450,000	175,000	252,000	—	あり	
D19	無(比較用)	24.8	—	—	123,000	—	—	—	—	主鉄筋 D19
D22	無(比較用)	26.9	—	—	627,000	—	—	—	—	主鉄筋 D22

注 1) シートの施工期間中の平均温度、2) 5 本の平均値、3) 3 本の平均値、4) 載荷時の床版中央たわみ、5) 一般用は 7 日間、冬用は 14 日間  
 シートの種類：高弾性型炭素繊維シート、300g/m<sup>2</sup>、1 層/方向、引張強度：2100~3030N/mm<sup>2</sup>、弾性係数：668~726×10<sup>3</sup>N/mm<sup>2</sup>  
 シートの貼付のうち、「主鉄筋」は主鉄筋方向のみ、「配力鉄筋」は配力鉄筋方向のみにシートを貼り付けた。  
 養生載荷開始時期のうち格子貼りについては、最後に施工した配力鉄筋方向のシートについて記載した。供試体 CF1~7 の引張主鉄筋は D16。

本研究では、平成 25~29 年度にかけて、繊維シート補強された RC 床版の輪荷重走行試験をはじめ、シートとコンクリートの付着に関する試験及びシート単体の強度特性に関する試験を実施した。本文では、研究の概要と主な結果について述べる。

## 2. 研究の概要

輪荷重走行載荷を受ける RC 床版に連続繊維シート接着による補強を施す場合、その補強効果は、シートと RC 床版が一体であることを前提として、合成構造としての性能評価を行う必要がある。ただし、その性能を確保するためには、一体であること、すなわち所要の性能を果たす前にシートが剥離しないことを照査する必要がある。これらの点を検討するため、次の試験を実施した。後述するように、本研究における輪荷重走行試験において、シートの破断が多数発生したことから<sup>8)</sup>、その観点でもデータ整理を行うとともに、シートの破断に関連するシートのはり試験や引張疲労試験を追加した。

- (1) シート補強による RC 床版の補強効果
  - a) シート補強された RC 床版の輪荷重走行試験
- (2) シートの付着性状と剥離限界
  - a) シートとコンクリートの付着試験
  - b) シート補強された RC はりの静的曲げ載荷試験及び疲労試験 (HS シリーズ)
  - c) シート補強された RC 部材の静的引張試験
  - d) 樹脂のせん断弾性係数の測定 (樹脂の引張試験、平板ねじり試験)
- (3) シートの破断限界
  - a) シート補強された RC はりの静的曲げ載荷試験及び疲労試験 (HE シリーズ)
  - b) シート単体の引張疲労試験

## 3. 主な結果

### 3.1 シート補強による RC 床版の補強効果

これまでの RC 床版の輪荷重走行試験<sup>9),10)</sup>において、昭和 39 年の道路橋示方書で設計された RC 床版 (以下、39 床版) の場合、疲労損傷過程として、破壊までの走行回数のうち比較的早い段階で、引張主鉄筋のひずみ挙動が、版としての曲げ挙動から、

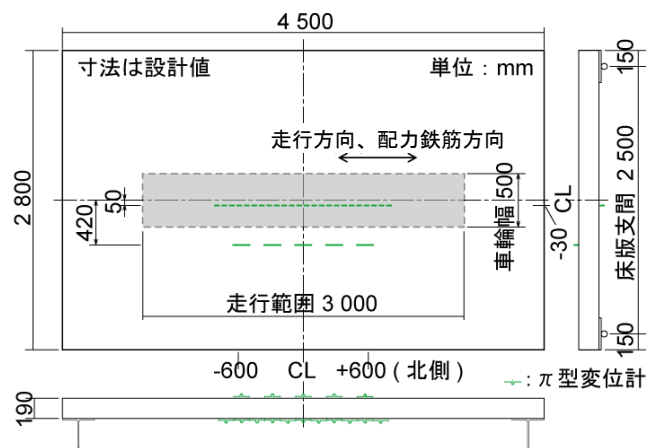


図-1 RC 床版供試体の形状寸法

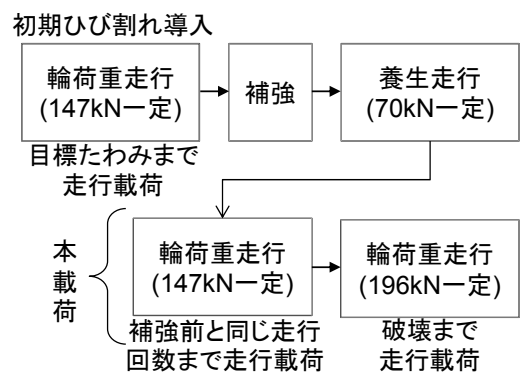


図-2 輪荷重走行試験の載荷荷重と走行回数

主鉄筋方向に概ね均等なタイドアーチのタイのような挙動に移行することがわかった。また、39床版のように配力鉄筋量が少ない場合、配力鉄筋方向の挙動が、版から膜の挙動に近づく傾向があることがわかった。これらの結果を踏まえて、本研究では、輪荷重走行の繰返しによって、一旦、版の挙動が失われていた39床版に、連続繊維シートを接着することで元の版の挙動を回復できるか、また、主鉄筋方向、配力鉄筋方向それぞれの連続繊維シートがどのように補強に貢献するかを確認するため、表-1に示す床版供試体の輪荷重走行試験を実施した。図-1、2に供試体の形状寸法と載荷方法を示す。シート補強は、近年、施工事例が増加している格子貼りとし、また床版の補強として効率がよいと考えられる高弾塑性型炭素繊維シートを用いた。格子貼りは、写真-1のように、補強後のコンクリート監視及び滞水防止のために隙間を開けて貼る方法である。

その結果、これまでの輪荷重走行試験では見られなかった、床版下面に接着されたシートのたるみや破断が発生した(写真-2~3)<sup>8)</sup>。格子状にシート接着した供試体CF1~3では、シートのたるみや破断は、抜け落ちに伴うシート破断を除くと、配力鉄筋方向シートで、床版下面のコンクリートのひび割れを跨ぐ箇所に発生した。また、シート補強された床版の抜け落ちは、いずれもシートのたるみや破断が生じた箇所付近で発生した。シートのたるみや破断のうち早期に発生したものの多くは、RC床版の初期ひび割れが著しいにもかかわらず、シート施工の2時間後に走行載荷を開始したことが要因であったと考えられる。しかし、シート施工から走行載荷まで1日開けた場合でも、シートの部分的な破断が見られたことから、必ずしもすべてが養生時間によるとは限らないと考えられる。

図-3に、輪荷重走行試験における床版中央の引張主鉄筋ひずみを示す。図中、版理論による計算値も示す。養生時間の影響はあったが、主鉄筋方向のシートに損傷が見られなかった供試体の結果では、シート補強によって、主鉄筋のひずみを半分程度に抑制する効果が見られたが、版の挙動が十分に回復するには至らなかった(図-3(a))。養生時間を3日とした供試体CF6では、初期ひび割れの程度を厳しい状態とした上で、シート施工前にコンクリートのひび割れにエポキシ樹脂を注入することとした。この樹脂注入を施した場合、シート補強によって版の挙動が回復することを確認した(図-3(b))。



写真-2 CF1のシート破断

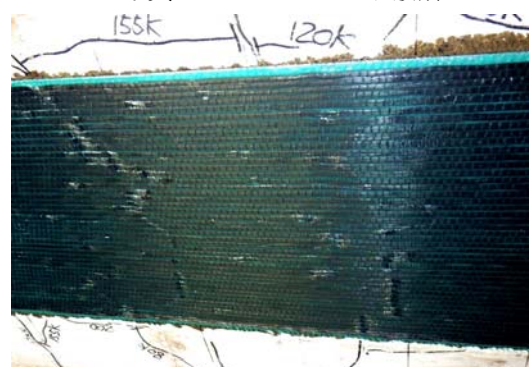


写真-3 CF4のシートの初期損傷

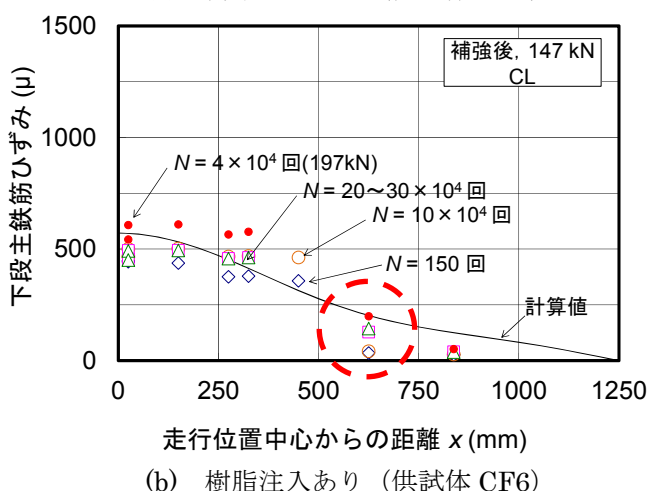
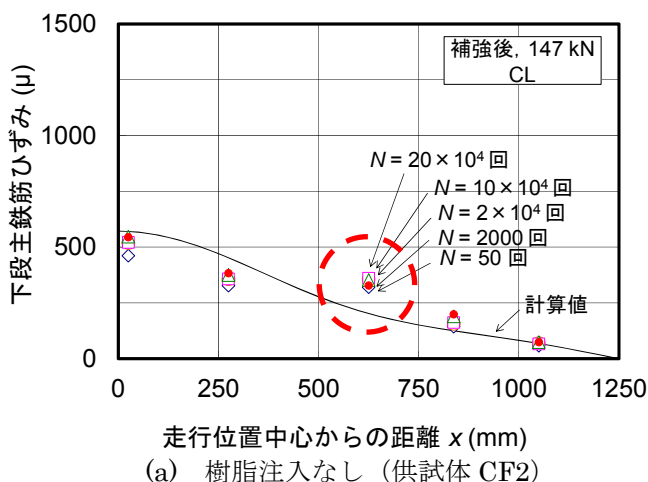


図-3 輪荷重走行試験の結果(補強後、床版中央主鉄筋方向のひずみ分布、計算値は版理論による)



### 3.2 シートの付着性状と剥離限界

既往のシート補強に関する研究では、コンクリートに貼り付けたシート端部から剥離が生じる事例やコンクリートのひび割れ付近を起点にシートの剥離が生じる事例が報告されている。いずれも急激に補強効果を喪失する事例が含まれることから、はり試験を中心に、シートの付着・剥離に関する多くの研究が行われている。このことから、輪荷重走行試験と並行して、はり試験によるシートの付着・剥離に関する検討を行うこととした。

#### (1) シートとコンクリートの付着試験

輪荷重走行試験や後述のはり試験に用いるシート補強材を対象に、JSCE-E 543 によるシートとコンクリートの付着試験を行った。供試体は、高弾性型炭素繊維シート<sup>1)</sup>の 1~3 層及び高強度型炭素繊維シート<sup>2)</sup>の 1~4 層について、それぞれ 1 体ずつとした。コンクリートの圧縮強度は  $33\text{N/mm}^2$  であった。写真-4 に、付着試験におけるシートの剥離状況を示す。高強度型の場合は、いずれも同写真に示すようなシートの剥離が確認できた。図-4 に、付着試験で得られた高強度型炭素繊維シートの剥離限界時のシートのひずみ（剥離限界ひずみ）を、既往の土木学会式<sup>3)</sup>による値と比較して示す。ただし、計算に用いる界面剥離破壊エネルギー  $G_f$  は、既往の試験結果<sup>4)</sup>に基づき  $0.83$  とした。付着試験における剥離限界ひずみは、計算値と概ねよく一致する傾向が確認できた。既に知られるように、シート層数が増加するに従って剥離限界ひずみが低下することがわかる。

一方、高弾性型の場合はいずれもシートの破断が生じたため、明確な剥離限界は確認できなかった。既往の試験<sup>5)</sup>でも、高強度型では剥離が認められ、高弾性型では破断が先行した事例が報告されており、本検討においても同様の傾向が見られた。

#### (2) シート補強された RC はりの静的曲げ載荷試験及び疲労試験

図-5 に供試体の形状寸法と載荷方法を示す。RC 床版を想定していることから、同試験に用いた床版供試体の配筋鉄筋を想定した有効高さとした。また、床版供試体下面におけるコンクリートの曲げひび割れを模して、シート接着前のはり供試体に曲げひび割れを導入することとした。表-2 に、はり試験の種類と数量を示す。補強材には、高弾性型及び高強度型の炭素繊維シートを用いた。高弾性型を用いた HE シリーズでは、シート層数と主鉄筋量をパラメータとして、それぞれ 1 体の静的載荷試験と 3 体



写真-4 付着試験におけるシートの剥離状況

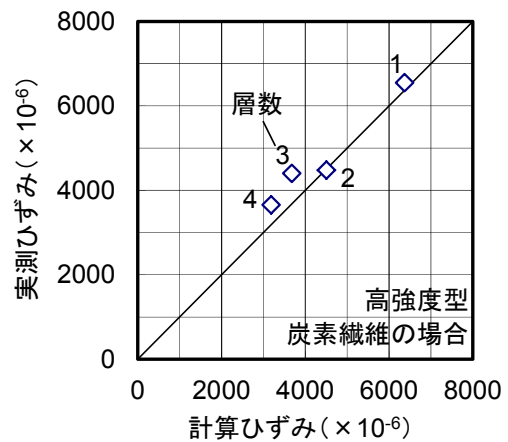


図-4 付着試験で得られた高強度型炭素繊維シートの剥離限界ひずみ（土木学会式との比較）

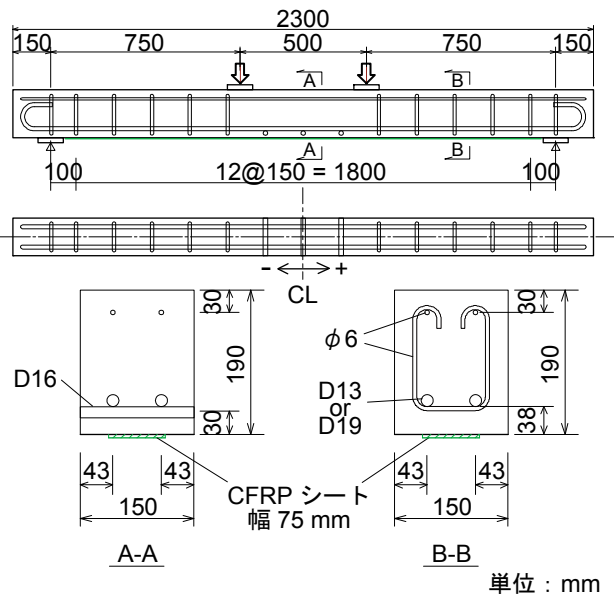


図-5 シート補強された RC はり供試体の配筋と形状寸法及び載荷方法

表-2 シート補強された RC はり供試体の種類及び数量

供試体	主鉄筋	シートの種類	シート補強の層数	数量 (体)	
				静的荷重試験	疲労試験
HE119-1~4	2-D19	高弾性型	1	1	3
HE219-1~4			2	1	3
HE319-1~4			3	1	3
HE213-1~4	2-D13	高強度型	2	1	3
HS119-1	1		1	—	
HS219-1	2		1	—	
HS319-1	3		1	—	
HS419-1~5			4	1	4

注) いずれも炭素繊維を使用、1層当たり目付量 300g/m<sup>2</sup>

表-3 シートの引張試験結果

シートの種類	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	破断時ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )
高弾性型	2570	722	3530
高強度型	4790	247	19400

注) JSCE E541 による。いずれも目付量 300g/m<sup>2</sup>、1層

の疲労試験を行った。高強度型を用いた HS シリーズでは、シート層数をパラメータとして、それぞれ 1 体の静的荷重試験を行い、4 層の場合のみ、4 体の疲労試験を行った。表-3 に、使用した補強材の引張強度特性を示す。コンクリートの圧縮強度は、HE で 35N/mm<sup>2</sup>、HS で 33N/mm<sup>2</sup>であった。

表-4 に、HS シリーズの載荷荷重と試験結果の一覧を示す。写真-5 に、はり試験におけるシートの剥離状況の一例を示す。破壊形態は、シート層数や荷重条件によって、シートの剥離の開始位置、発生条件が異なり、コンクリートの圧壊との相互関係によって、さまざまな様相を示した。図-6 に、HS シリーズのシート 1 層の場合について、シート下面及び鉄筋のひずみ分布を示す。この供試体の場合、シートの剥離が発生する前に、コンクリートの圧壊が発生した。同図の例では、鉄筋降伏後にシートのひずみが急増して、83kN 時でシートの最大ひずみは既に 10000×10<sup>-6</sup> に概ね達していた。前掲の図-4 に示した付着試験の結果では、シート 1 層の場合、剥離限界ひずみは 6500×10<sup>-6</sup>であったことから、曲げ区間の大部分が計算上の剥離限界ひずみに達していたが、この区間のシートに明確な剥離が見られなかった。

(HE シリーズの結果は後述)

### (3) シート補強された RC 部材の静的引張試験

シート補強された RC 部材におけるコンクリートと鉄筋の付着性状及びコンクリートとシートの付着性状の相互作用の状況を把握するため、図-7 に示す

表-4 HS シリーズの載荷荷重と試験結果

試験種類	シート層数	最大荷重または上限荷重 (kN)	下限荷重 (kN)	上限荷重時鉄筋ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )	破壊時繰返し数 (万回)	破壊形態
静的	1層	94	—	—	—	圧壊
	2層	103	—	—	—	圧壊後剥離
	3層	109	—	—	—	圧壊後剥離
	4層	111	—	—	—	端部せん断
疲労	4層	80	31	1800	97	端部からせん断ひび割れ →せん断区間剥離
	4層	85	20	2000	8.9	せん断区間剥離 →端部剥離
	4層	80	5	1800	14	北側載荷点付近から剥離
	4層	70	22	1485	117	北側載荷点付近から剥離

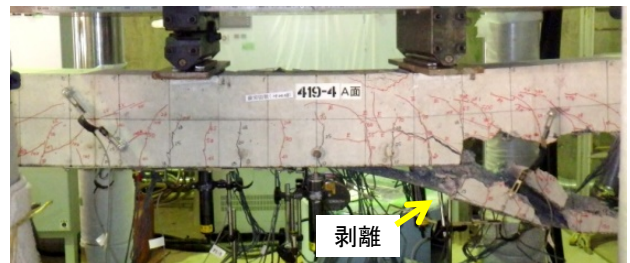


写真-5 はり試験におけるシートの剥離状況 (一例)

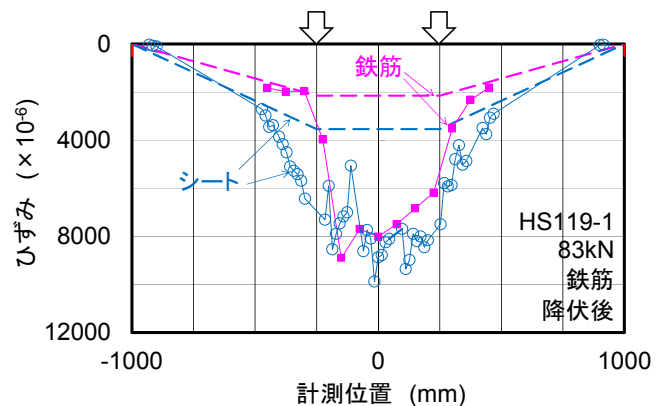


図-6 シート下面及び鉄筋のひずみ分布 (HS シリーズのシート 1 層の場合)

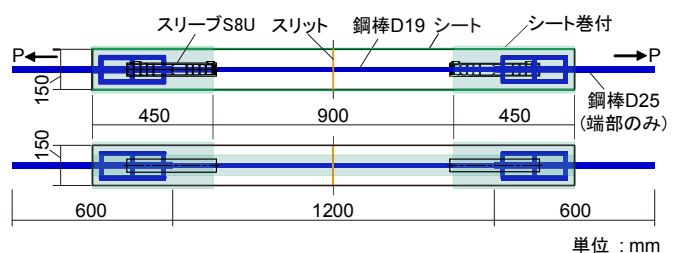


図-7 シート補強された RC 部材の静的引張試験に用いる供試体の形状寸法

表-5 シート補強された RC 部材の静的引張試験の試験ケース

供試体	半割鉄筋	シート補強材
A	あり	アラミド繊維
C	あり	高強度型炭素繊維
RC	あり	なし
N	なし	高強度型炭素繊維

表-6 シートの引張試験結果

シートの種類	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	破断時ひずみ (×10 <sup>-6</sup> )
アラミド	1830	102	17600
炭素	3840	239	16200

注) JSCE E541による。いずれも目付量 600g/m<sup>2</sup>、1層

シート補強された RC 部材供試体の静的引張試験を実施した。表-5 に、試験ケースを示す。この試験では、アラミド繊維シートと高強度型炭素繊維シートの 2 種類のシート補強材を用いた。また、鉄筋はコンクリートとの付着にひずみゲージの影響が生じないように、半割にした鉄筋の内側にひずみゲージを貼り付けた。比較用のシート補強のない供試体 RC と、半割鉄筋の影響を確認するため普通鉄筋を用いた供試体 N も用意した。表-6 にシートの引張強度特性を示す。コンクリートの圧縮強度は 24N/mm<sup>2</sup>、鉄筋の降伏点は 383N/mm<sup>2</sup>、同降伏ひずみは 1990 × 10<sup>-6</sup>であった。

写真-6 に、シート補強された RC 部材の静的引張試験の状況 (供試体 A の例) を示す。この段階では、150kN を超えて、鉄筋が明らかに降伏した後であり、スリット近傍に多数のひび割れが見られた。図-8 に、供試体 A について、静的引張試験におけるシート及び鉄筋のひずみ分布を示す。図中の鉄筋の計算ひずみは、鉄筋のみで引張荷重を負担したときの鉄筋のひずみを示す。この荷重段階では、±275mm 付近にコンクリートのひび割れが発生した後であるが、鉄筋はまだ降伏していない。スリットやひび割れ付近では、シートのひずみが鉄筋ひずみより大きく、ひび割れとスリットの間の区間では、逆にシートの方のひずみの方が鉄筋よりも小さい傾向が見られた。

**(4) 樹脂のせん断弾性係数の測定 (樹脂の引張試験、平板ねじり試験)**

シート補強材のマトリックスである含浸樹脂のせん断弾性係数は、シートとコンクリートの付着性状を把握する上で必要となる指標であると考えられるが、その性能試験はシート補強材の一般の品質検査

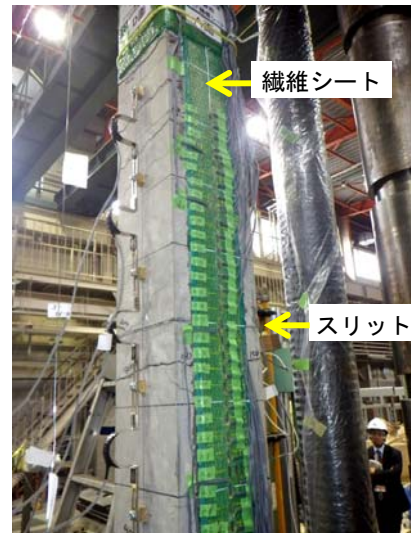


写真-6 シート補強された RC 部材の静的引張試験 (アラミド繊維シートの例)

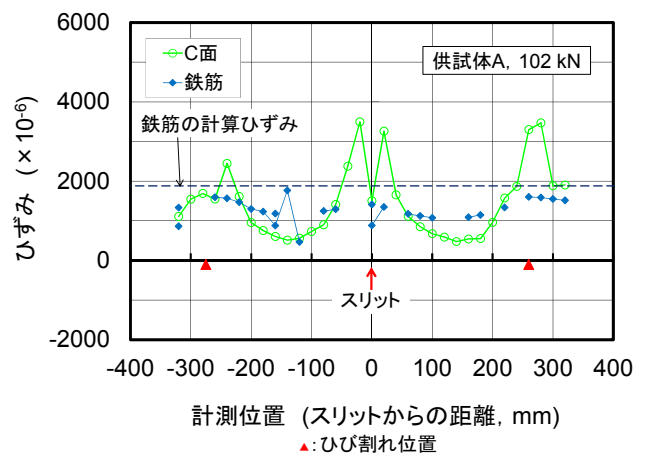


図-8 静的引張試験におけるシート及び鉄筋のひずみ分布 (供試体 A の例)

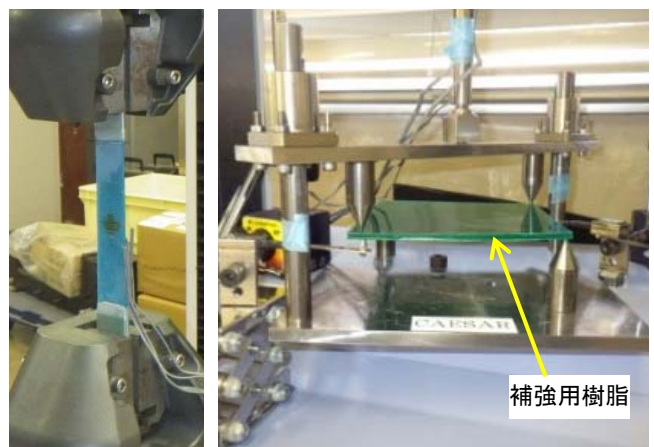


写真-7 樹脂のせん断弾性係数の測定 (左: 帯板引張試験、右: 平板ねじり試験)



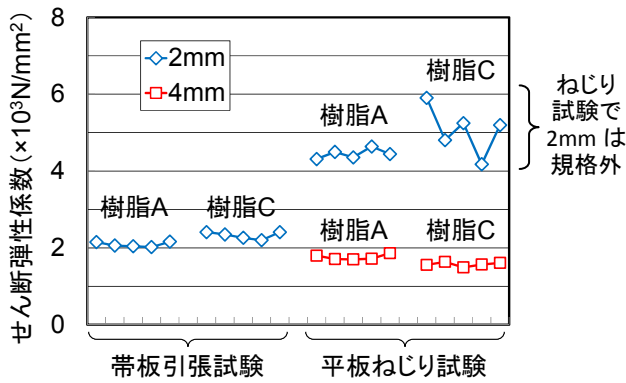


図-9 シート補強に用いる含浸樹脂のせん断弾性係数測定結果の例

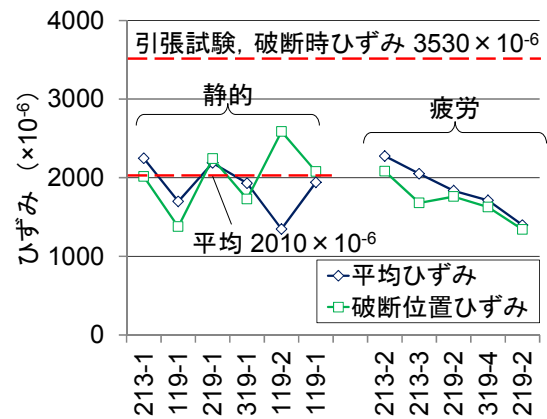


図-10 シート破断時のシートの限界ひずみ (HE シリーズ)

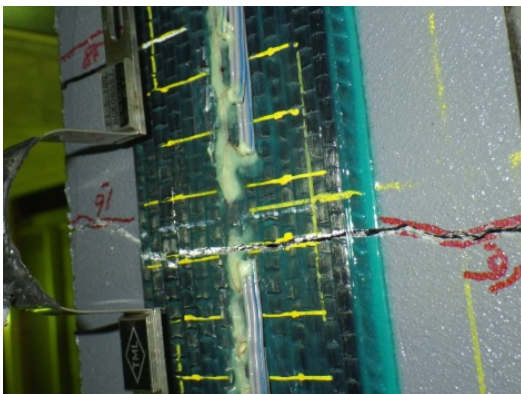
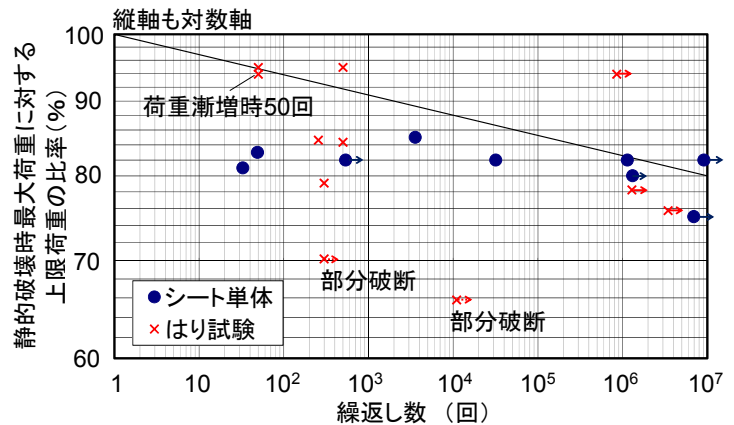


写真-8 はり試験で見られたシートの破断状況



注) S-N 線は、 $10^7$  回時に 80%とした場合<sup>13), 14)</sup>。

図-11 シート単体疲労試験及びはり試験におけるシート破断に関する S-N 図

項目には含まれていない。樹脂のせん断弾性係数の測定方法としては、樹脂の引張試験において軸方向及び軸直角方向のひずみからポアソン比とせん断弾性係数を算出する方法、樹脂の平板ねじり試験により測定する方法などがあるが、それぞれの測定精度は明確でない。このことから、複数の試験方法を用いて、樹脂のせん断弾性係数を測定することを試みた。そのうち、帯板引張試験は、樹脂厚 2mm×幅 25mm の断面とした。平板ねじり試験は、JIS K 7021 に従って 150mm×150mm×樹脂厚 4mm とした試験片と、樹脂厚を規格外の 2mm とした試験片を用意した。樹脂の種類は、前述のシート補強された RC 部材の静的引張試験に用いたシート補強材と同一ロットの樹脂を用いた。アラミド繊維用を樹脂 A、炭素繊維用を樹脂 C として表す。

写真-7 に、せん断弾性係数を測定するために実施した、樹脂単体の帯板引張試験及び平板ねじり試験の状況を示す。これらの試験から得られたせん断弾性係数を図-9 に示す。試験方法によって、樹脂 A と樹脂 C のせん断弾性係数の大小関係が逆になっていた。また、平板ねじり試験では、規格外ではあるが、

樹脂厚を 2mm とした場合は、4mm の場合に比べて値が著しく異なっていた。

### 3.3 シートの破断限界

前述の輪荷重走行試験において、走行载荷中にシートの破断が確認された。シートの破断の原因として、補強前の RC 床版の損傷程度、シート養生中の载荷開始時期、抜け落ちに伴う過大な変形に加えて、コンクリートの曲げひび割れ付近におけるシートの疲労破断が考えられる。これを踏まえて、コンクリートの曲げひび割れにおけるシートの破断について、以下の試験を追加して行った。

#### (1) シート補強された RC はりの静的曲げ载荷試験及び疲労試験 (HE シリーズの結果)<sup>12)</sup>

試験方法については、3.2(2)に示したとおりである。そのうち、高弾性型炭素繊維シートを用いた HE シリーズでは、層数に関係なくシートの破断が多数発生した (16 体中 11 体で発生)。写真-8 に、

はり試験で見られたシートの破断状況を示す。コンクリートのひび割れ付近でシートの破断が見られた。シート層数の少ない供試体では、複数個所でシートの破断が見られた。図-10 に、シート破断時のシートの限界ひずみを示す。シート単体の引張試験では、破断時のひずみが  $3530 \times 10^{-6}$  であったが、はり下面に接着したシートの場合は、ばらつきが大きい、平均で  $2010 \times 10^{-6}$  で、シート単体の引張試験の 60% 程度のひずみで破断していた。

疲労試験においてもシート破断が見られたが、シート破断はいずれも比較的早い段階で発生していたことから、図-10 に示したとおり、破断時のシートひずみは静的載荷試験のばらつきの範囲にあった。しかし、疲労試験における破断時のシートひずみは、静的載荷試験で得られた平均  $2010 \times 10^{-6}$  を顕著に超えるものはなかったことから、繰返し数が少ない中でも繰返し載荷による引張限界ひずみの若干の低下があったと推察される。なお、静的載荷、繰返し載荷ともに、シート層数がシート破断時のひずみに及ぼす明確な影響は見られなかった。

## (2) シート単体の引張疲労試験

はり試験 HE シリーズの材料試験に用いたものと同じシート単体の供試体 9 体を用いて、引張疲労試験を行った。疲労試験は、サイン波、5Hz、応力比 0.1 とした。上限荷重は、静的引張強度の 75~85% とした。すべての供試体について、シートの破断または数百万回まで繰返し載荷する予定であったが、9 本のうち 4 本は不慮の試験機の動作停止によって途中で供試体に高い圧縮が加わり座屈した。そのため、それらの試験片の打ち切り回数が一定でなかった。

図-11 にシート単体の疲労試験結果を示す。縦軸は静的載荷試験におけるシート破断荷重に対する疲労試験時上限荷重の比率とした。横軸はシート破断までの繰返し数とした。同図には、はり試験 HE シリーズのシート破断に関する結果を併せて示す。ただし、座屈により中断した結果は矢印を付して示す。参考として、 $10^7$  回時疲労強度を 80% とした場合<sup>13)</sup>、<sup>14)</sup> の S-N 線を示す。既往の CFRP 材の疲労試験結果では、縦軸が 80% 以上の範囲に集中していて、かつ同じ荷重レベルでも繰返し数が大きくばらつく事例が多くみられる<sup>15)</sup>。シート単体の疲労試験及びはりの疲労試験ともに、S-N 図の元となる静的載荷試験の結果を含めて、ばらつきが大きいものの、シートに作用する引張応力度の上限値が引張強さの 82%

であっても約  $10^7$  回まで破断が見られなかったシート単体の試験片を含めて、図-11 中の S-N 線に近い結果が得られており、既往の CFRP 材の疲労試験結果と同様の傾向が見られた。

## 4. まとめ

本研究で得られた主な結果をまとめると次のとおりである。

- (1) RC 床版の損傷が著しい場合、シート補強だけでは版としての挙動回復が不十分であった。シート補強前にひび割れ注入を行うことで、シート補強で版の挙動を回復できることがわかった。
- (2) コンクリートとシートの付着試験では、剥離限界に及ぼす層数の影響を既往の算定式で評価できることを確認した。しかし、曲げ部材下面へ接着したシートの剥離限界は、その算定式をそのまま適用できないことがわかった。
- (3) コンクリートのひび割れ部でシート破断が先行する場面があることがわかった。本検討の範囲では、シート破断時の限界ひずみが、材料試験時の値の 6 割程度と、著しく低かった。
- (4) 設計法の提案には至らなかったが、シート補強の設計において、シートの補強効果の照査、シートの剥離の照査だけでなく、シートの破断に対する照査も行う必要があることがわかった。
- (5) コンクリートとシートの付着特性を考慮する上で必要となる、樹脂のせん断弾性係数の評価試験法として、樹脂単体の帯板の引張試験や平板ねじり試験が適用し得ると考えられるが、測定結果のばらつきや試験法間の差が見られることから、さらに検討を行う必要がある。

## 5. おわりに

本研究では、当初に予期していなかったシート破断が多数生じたことによって、シート破断に関する検討を新たな検討項目に追加したことから設計法の検討が遅れた。今後、さまざまなシート材料、樹脂材料を対象とした、シートとコンクリートの複合構造の性能評価法の検討を行う予定であり、本課題で得られた知見はそれらの課題においても活用していく。

## 参考文献

- 1) 国広哲男：道路橋床版の問題点、橋梁と基礎、2-7、pp. 1-5、1968.7.



- 2) 西川和廣、村越潤、山本悟司、杉山純：活荷重による橋梁上部構造の損傷と対策、土木技術資料、34-8、pp. 58-65、1992.
- 3) 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、95-3、pp. 25-32、1995.3.
- 4) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、pp. 627-632、1987.
- 5) 内田賢一、西川和廣、神田昌幸：既設 RC 床版の健全度評価手法に関する実験的検討、土木学会第 55 回年次学術講演会、pp. 516-517、2000.
- 6) 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、pp. 25-32、2000.11.
- 7) 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)一、共同研究報告書第 235 号、1999.12.
- 8) 村越潤、田中良樹、吉田英二、新藤竹文、近藤富士夫：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、土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集、I、pp. 425-426、2015.
- 9) 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、30-3、pp. 907-912、2008.
- 10) 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、30-3、pp.913-918、2008.
- 11) 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、2010.7.
- 12) 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、63A、pp. 999-1012、2017.3.
- 13) 新版 FRP 入門、(社)強化プラスチック協会、1987.9.
- 14) FRP 橋梁―技術とその展望―、構造工学シリーズ 14、土木学会、2004.1.
- 15) Harris, B. ed. : *Fatigue in Composites*, Woodhead Pub. Ltd., Cambridge, England, 2003.

RESEARCH ON DESIGN METHOD FOR STRENGTHENING CONCRETE BRIDGE DECKS WITH EXTERNALLY-BONDED FRP SHEETS

Research Period : FY2013-2017

Research Group : Bridge and Structural

Engineering Research Group

Authors : TAMAKOSHI Takashi, TANAKA Yoshiki and MURAI Keita

Abstract :

A strengthening method with externally-bonded FRP sheets having the advantages of light weight and easy installation is often applied to existing concrete bridge decks suffering from fatigue in Japan. Nevertheless, because the mechanisms of fatigue deterioration of the concrete decks strengthened with the FRP sheets have not been sufficiently identified, the differences in the amount of the sheets were made even among the decks with similar conditions. The research program has been carried out in order to identify the mechanisms and to provide the performance-based design specifications for strengthening the concrete bridge decks with the FRP sheets. From the results, it was found that even after a concrete deck was significantly deteriorated by cyclic moving wheel load, the behavior as an elastic slab could be retrieved when sheet bonding followed epoxy injection, and that the design for strengthening the concrete decks by using the sheet bonding requires not only the performance as composite structures and the performance against the debonding of the sheets but also the performance against the rupture of the sheets. The findings might be useful for a new research project concerning performance evaluation method for composite structures consisting of concrete and FRP.

Key words : concrete deck, continuous fiber sheet, carbon fiber, aramid fiber, strengthening, debonding, rupture (of fiber sheet)