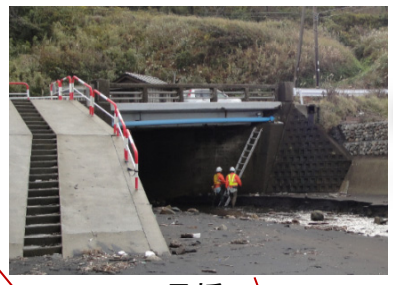
CAESARの臨床研究事例


能生大橋


旭橋


長橋


植苗橋


相見川海浜橋


桜橋


普代水門管理橋


倉谷橋


銚子大橋


津波橋


神戸橋


佐野橋


伊良部大橋


辺野喜橋

CAESAR

独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター

CAESAR 臨床研究事例　目　次

CAESAR における臨床研究 …… 1

旭橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価） …… 2
銚子大橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価） …… 3
銚子大橋（劣化部材の耐荷性能の確認－その１－） …… 4
銚子大橋（劣化部材の耐荷性能の確認－その２－） …… 5
長橋（劣化部材の耐荷性能の確認、補強効果の検証） …… 6
能生大橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価） …… 7
能生大橋（塩害劣化した橋梁の解体調査） …… 8
能生大橋（塩害劣化した耐震補強部材の耐荷性能の検証） …… 9
桜橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価） …… 10
神戸橋（補強効果の検証、劣化原因の調査） …… 11
倉谷橋（劣化部材の耐荷性能の確認） …… 12
津波橋（落橋した橋梁の解体調査） …… 13
辺野喜橋（監視技術の適用性検討） …… 14
相見川海浜橋（劣化部材の耐荷性能の確認） …… 15
相見川海浜橋（PC 鋼材の付着特性に着目した耐荷性能の確認） …… 16
普代水門管理橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価） …… 17
中川橋側道橋（橋軸方向ひび割れが生じた PC 撤去桁の載荷試験） …… 18

鋼床版疲労き裂の非破壊調査法の開発 …… 19
超音波を利用した鋼床版 U リブ内滞水調査法の開発 …… 20
ポストテンション PC 橋のグラウト充填調査 …… 21
ポストテンション PC 橋のグラウト充填調査（植苗橋） …… 22
沖縄県離島架橋での臨床研究（新設橋） …… 23
沖縄県離島架橋での臨床研究（既設橋） …… 24
アルカリ骨材反応で劣化した橋梁の調査 …… 25
RC 床版の舗装損傷先行型疲労損傷の調査 …… 26
非破壊検査技術の適用性調査（鋼板接着で補修された RC 床版） …… 27
軸方向ひび割れが発生したプレストレストコンクリート橋の調査 …… 28
古い年代の鋼材の材料・強度特性調査 …… 29
RC 橋脚の発錆限界塩化物イオン濃度に関する調査 …… 30
塗膜を有する溶接部における疲労性状に関する検討 *Revised* …… 31
撤去 RC 床版を用いた路面からの水の浸透に関する調査 …… 32
鋼道路橋桁端部の腐食に対する応急復旧に関する調査 …… 33
既設コンクリート道路橋桁端部の腐食環境調査 *New* …… 34
コンクリート橋桁端部用排水装置の開発 *New* …… 35
塗装を剥がさずに鋼部材のひずみを測定できる磁気式ひずみ計 *New* …… 36

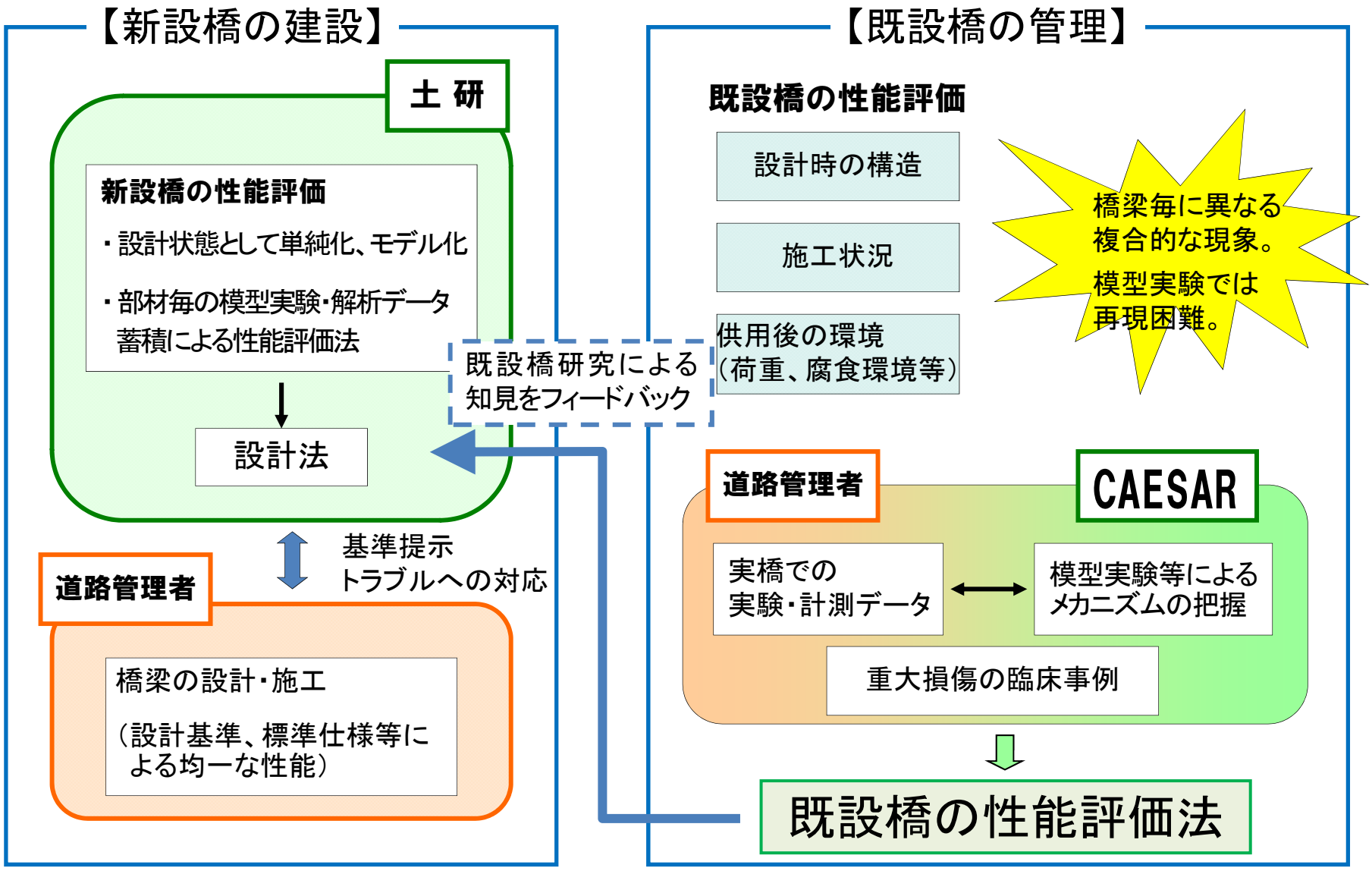
CAESAR 臨床研究に関する文献リスト …… 37

CAESARにおける臨床研究

土木研究所では、これまでも、既設橋の耐荷力評価や載荷試験、撤去部材の調査を行ってきましたが、近年の計画的保全技術の開発や安全管理に関する保全技術の開発をより一層促進するため、これまで以上に、実橋での調査、研究（CAESARがいうところの臨床研究）が重要であり、幅広く実施していく必要があります。

実際の橋梁の性能は、設計時の構造、施工の状況、供用後の周辺環境・荷重条件によって大きく異なります。模型実験におけるメカニズムの解明だけでなく、実橋において、特に損傷を受けた橋梁について、その性能を評価する手法の開発が非常に重要となっています。また、これらの既設橋の性能評価で得られた知見は、新しい橋梁の設計にも活かされます。

既設橋の管理技術の開発には、臨床研究が不可欠



謝　辞

各橋梁の管理者の方をはじめ、CAESARの臨床研究にご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

表紙の説明

地図上の記号は、CAESARがこれまでに臨床研究の対象とした橋の位置を示します。撤去された部材の一部は、つくばの撤去部材保管施設（右写真）などに搬入して、臨床研究における試験、調査や、維持管理技術の研修に役立てています。



旭橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価）

■橋梁諸元

橋梁名	旭橋
路線，地名	一般国道452号，北海道芦別市
橋梁形式	鋼3径間連続非合成I桁橋
橋長	82.7m
支間長	24.6m+32.8m+24.6m
竣工年	昭和28年(1953年)

■橋梁概観

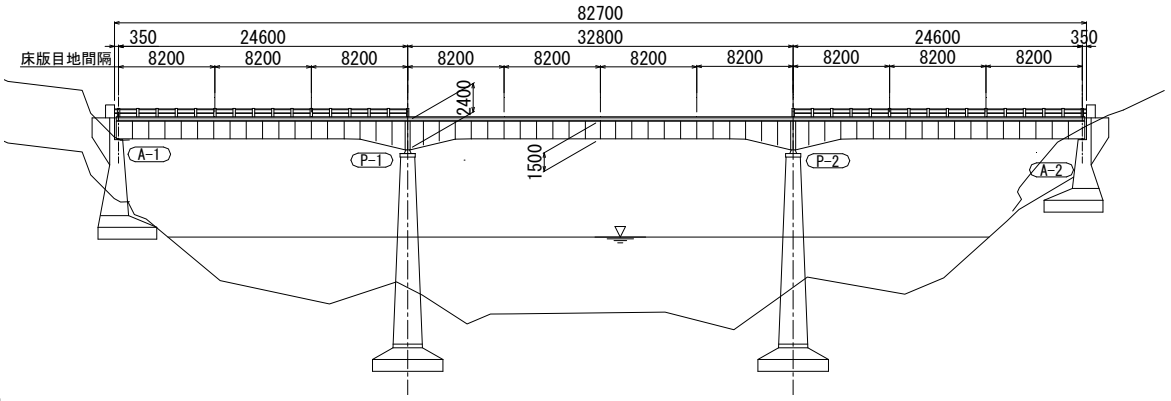




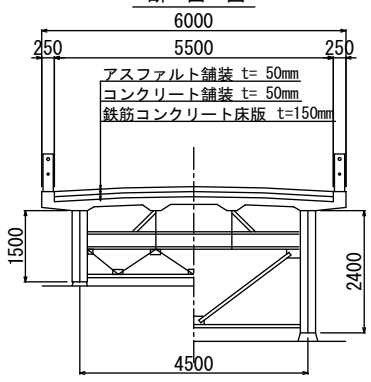
床版目地の漏水、遊離石灰

49年間供用，2主桁，
約8m間隔に床版
目地，劣化

■一般図



断　面　図



■研究概要

≪研究目的≫
鋼橋の大半を占める鋼I桁橋のうち、構造的特徴（床版目地、2主桁、非合成）を有する鋼I桁橋（49年供用）の全体挙動の把握と構造解析モデルの検討

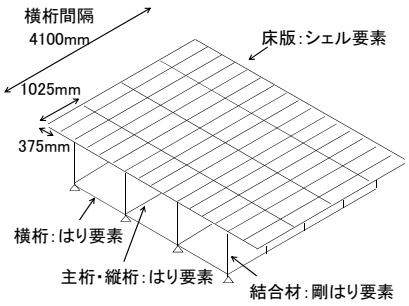
≪調査内容≫
・荷重車を用いた現地載荷試験
・その他（材料強度試験、非破壊検査技術の適用性調査）

＜解析モデル＞

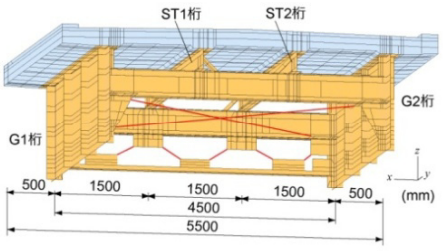
◆格子モデル（非合成、合成）
主桁・縦桁・横桁：はり要素

◆FEMモデル
主桁・縦桁・横桁：はり要素
床版：シェル要素

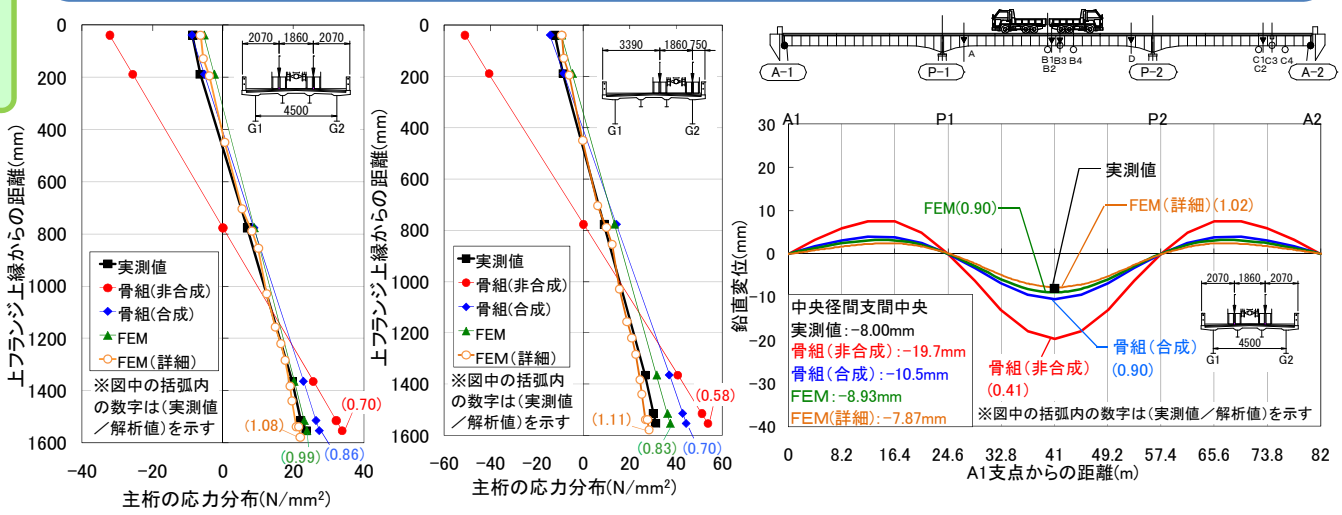
◆FEMモデル（詳細モデル）
主桁・縦桁・横桁：シェル要素
対傾構：はり要素
床版・橋脚：ソリッド要素※室蘭工大と連携



FEMモデル



FEMモデル（詳細モデル）



構造解析と載荷試験結果との比較

・実橋の計測結果（ひずみ，変位，振動特性）と解析結果との比較により、全体挙動を把握（概ね合成桁に近い挙動）。

・活荷重応答を概ね再現できる解析モデルを把握。
　・実橋計測において、床版と鋼桁間の相対変位は，荷重車の載荷・除荷に対して弾性的な挙動を示すものの、床版の目地をモデル化せず，完全合成を仮定したFEMモデルで概ね挙動を再現できることを確認した。



荷重車を用いた現地載荷試験



人力加振による振動試験



コンクリートの非破壊検査技術の
適用性調査（超音波伝播速度測定）

関連資料　・土研資料，4175号，2010.7.　・鋼構造シンポジウム2010　2010.10. pp.431～436　・構造工学論文集，Vol.56A　2010.3. pp.710～721
・コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第9巻，　2009.10. pp.45～50

銚子大橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価）

■橋梁諸元

橋梁名	銚子大橋
路線，地名	国道124 号，銚子市，神栖市
橋梁形式	鋼5径間ゲルバートラス桁
橋長	407m(トラス部のみ)
支間長	64.6m+85.6m+107m+85.6m+64.6m
竣工年	昭和37年(1962年)

■橋梁概観

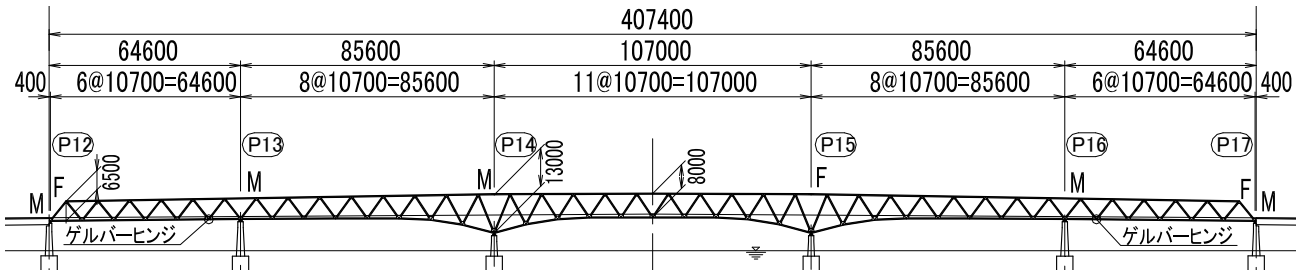


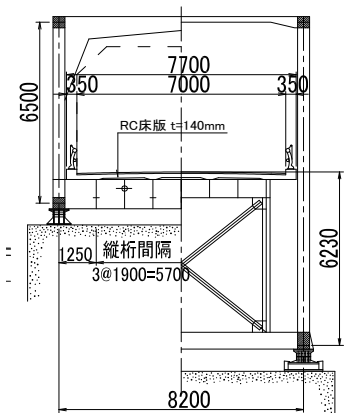


トラス格点部の腐食

47年供用，各所に著しい腐食損傷

■一般図





■研究概要

≪研究目的≫
腐食劣化の生じた鋼トラス橋を対象とした橋全体系の耐荷性能評価のためのモデル化手法の開発

≪調査内容≫
・荷重車を用いた現地載荷試験



格点部載荷



影響線載



ひずみゲージ貼付状況

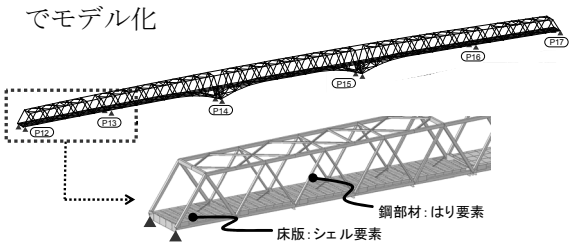
＜載荷試験の実施状況＞

・活荷重応答を概ね再現できる解析モデルを把握。
  ・主構部材の軸方向応力による挙動に関しては、はり要素を主体とした解析モデルで概ね再現できること、主構部材が破断していない状況では、腐食欠損の状況が各主構部材の断面力分担に及ぼす影響は小さいことを把握した。

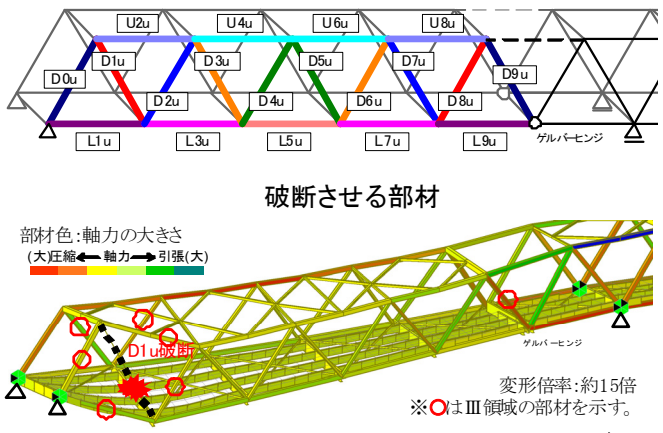
・橋全体系への影響を考慮した各部材の耐荷性能の評価方法の提示。
  ・鋼トラス橋の斜材破断事例を例に、現行基準に対する耐荷性能評価と、一主構部材が破断した場合のその他の主構部材の状態への影響に基づく耐荷性能評価を組み合わせることにより、各部材の破壊時の相対的な影響度をわかりやすく評価する方法を示した。

＜解析モデル＞

床版をシェル要素、その他部材をはり要素でモデル化

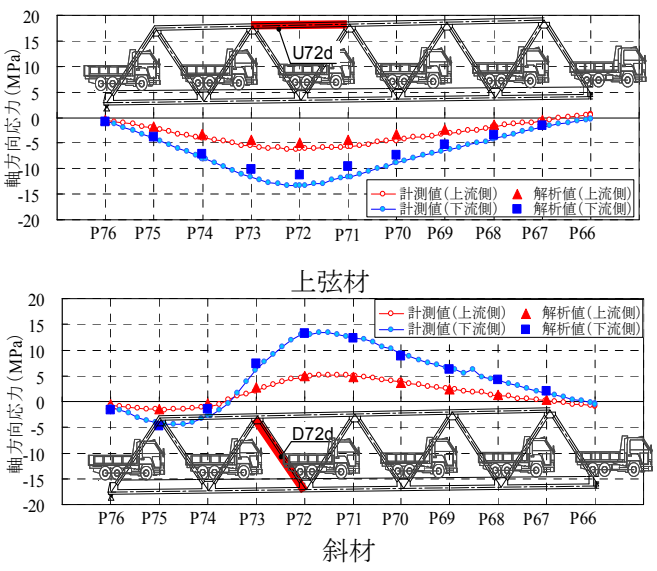


床版と縦桁間や格点部の結合条件，腐食条件等をパラメータとした解析を実施し，これらの影響を把握

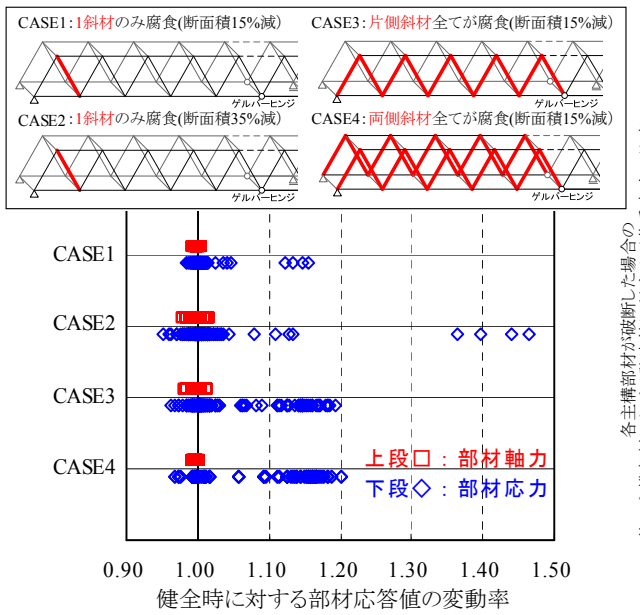


破断させる部材

変形倍率：約15倍
※○はⅢ領域の部材を示す。

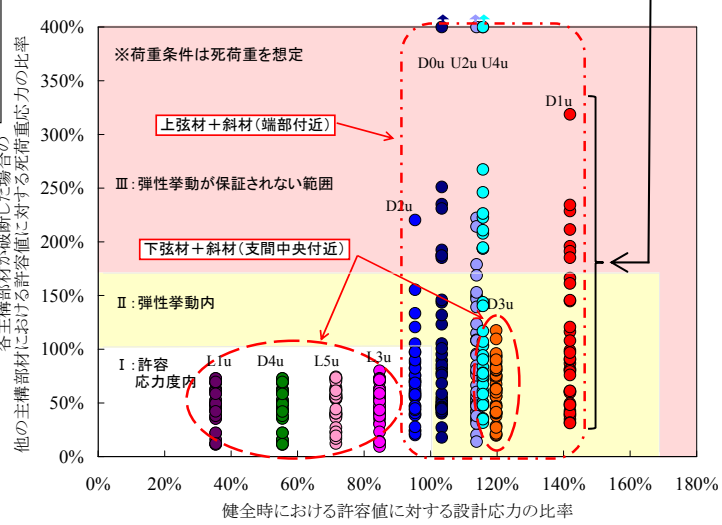


荷重車影響線載荷時の主構部材の応力



主構部材の腐食の影響

D1u破断時の変形状況の例



各主構部材の状態の評価例

関連資料　・土木技術資料，2011.2.

銚子大橋（劣化部材の耐荷性能の確認－その1－）

■橋梁諸元

橋梁名	銚子大橋
路線，地名	国道124 号，銚子市，神栖市
橋梁形式	鋼5径間ゲルバートラス桁
橋長	407m(トラス部のみ)
支間長	64.6m+85.6m+107m+85.6m+64.6m
竣工年	昭和37年(1962年)

■研究概要

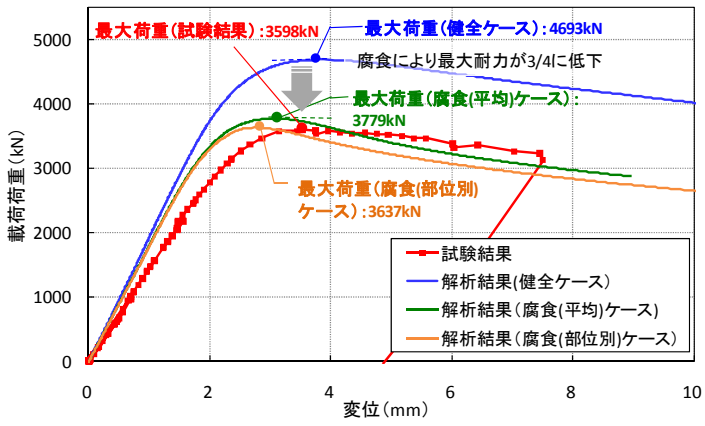
≪研究目的≫
腐食劣化の生じた鋼トラス橋を対象とした腐食部材の残存耐荷性能評価手法の開発

≪調査内容≫
・撤去格点部の腐食量計測、載荷試験

・載荷試験により残存耐荷力と破壊性状を把握。
　・対象試験体は、ガセットの斜材先端部と自由端に面外変形が進行し最大耐力に達した。

・健全時及び腐食をモデル化したFEM解析を行い腐食による耐力低下の程度やモデル化手法の違いが耐荷力評価に与える影響を把握。

・試験及び解析結果、既往の試験データとの比較分析を行い、格点部の圧縮耐荷力を概ね推定できる実用的な評価式を提示。



＜荷重-載荷点変位曲線(試験・解析結果の比較)＞

＜解析モデル＞

鋼部材(試験体及び載荷治具)をシェル要素、リベット接合部を線形バネ要素でモデル化

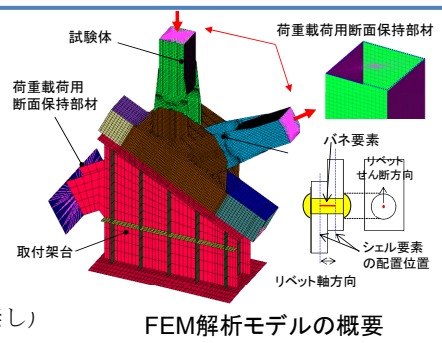
＜解析ケース＞

◆健全ケース
：竣工時の条件（腐食無し）

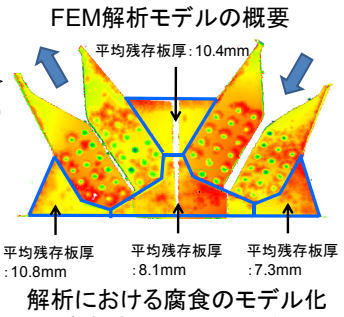
◆腐食(平均)ケース:
：ガセット全面の平均残存板厚を考慮（元厚12㎜に対して9.2㎜）

◆腐食(部位別)ケース
：ガセットの腐食をより詳細にモデル化（４つの部位の平均残存板厚を考慮）

（腐食を考慮した2ケースの斜材の腐食量は共通）



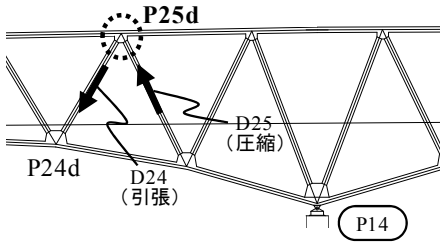
FEM解析モデルの概要



解析における腐食のモデル化
(腐食(部位別)ケースの例)

■対象橋梁と試験体

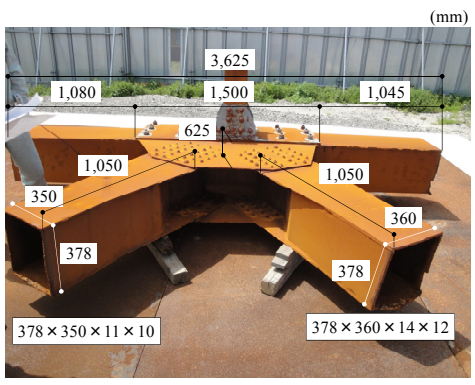




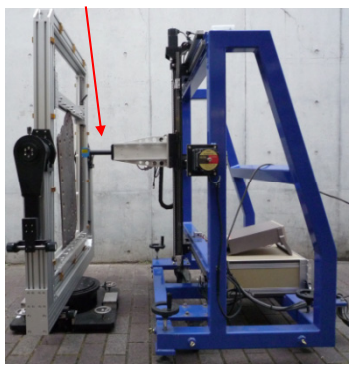
試験体採取位置



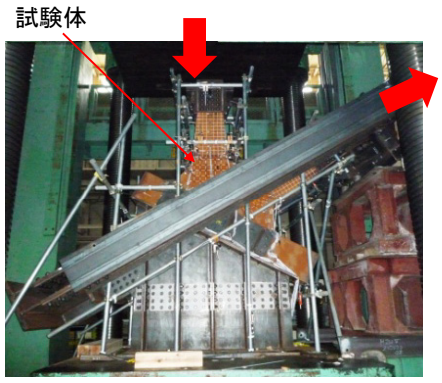
塗膜除去前



＜トラス格点部の試験体＞　塗膜除後



腐食形状計測装置



試験体及び試験治具の設置状況



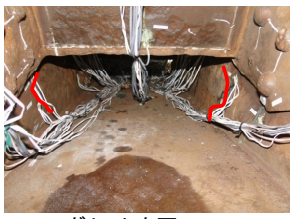
30MN試験機による公開試験の状況

＜試験機及び試験実施状況＞





ガセット外側自由端



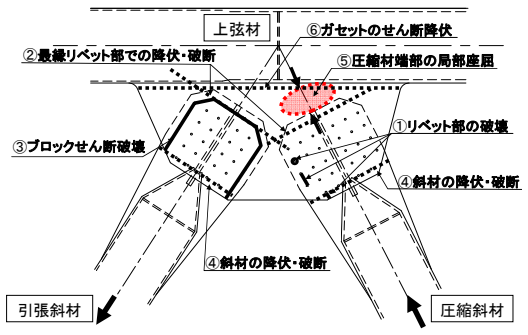
ガセット内面

＜試験体の破壊性状＞

＜耐荷力評価式の検討＞

・米国FHWAのリベット接合されたトラス格点部の耐荷力評価のガイダンス等を参考にすると格点部の破壊性状として右図が想定される。

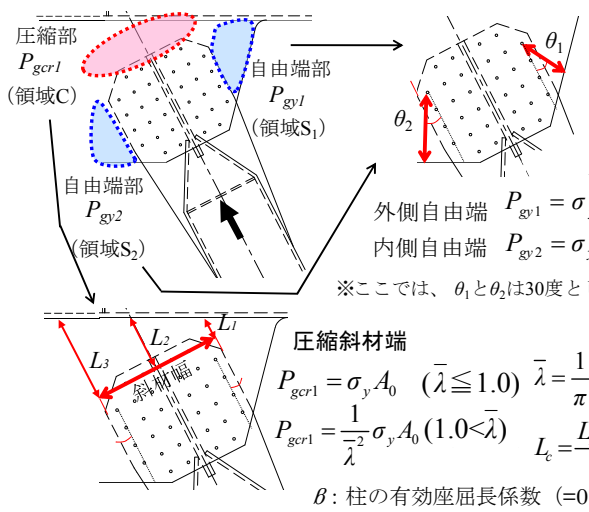
・それぞれの破壊に対して耐荷力を試算した場合、相対的に⑤の場合が厳しい状況になる傾向があり、かつ、腐食劣化の生じやすい箇所でもあるため、特に圧縮力を受ける場合のガセットの耐荷力評価式について検討を実施。



格点部において想定される破壊性状

耐荷力評価式：

$P_{max} = P_{gcr1}$(圧縮斜材端) + P_{gy1}(外側自由端) + P_{gy2}(内側自由端)



外側自由端　$P_{gy1} = \sigma_y A_1 \sin\theta_1$

内側自由端　$P_{gy2} = \sigma_y A_2 \sin\theta_2$

※ここでは、θ_1とθ_2は30度としている。

圧縮斜材端

$P_{gcr1} = \sigma_y A_0 \quad (\bar{\lambda} \leqq 1.0)$

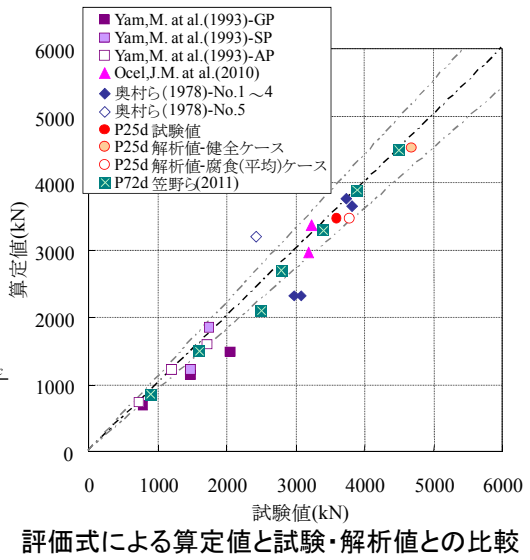
$P_{gcr1} = \frac{1}{\bar{\lambda}^2} \sigma_y A_0 \quad (1.0 < \bar{\lambda})$

$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \cdot \frac{\beta L_c}{r_s}$

$L_c = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3}$

β：柱の有効座屈長係数（=0.65）

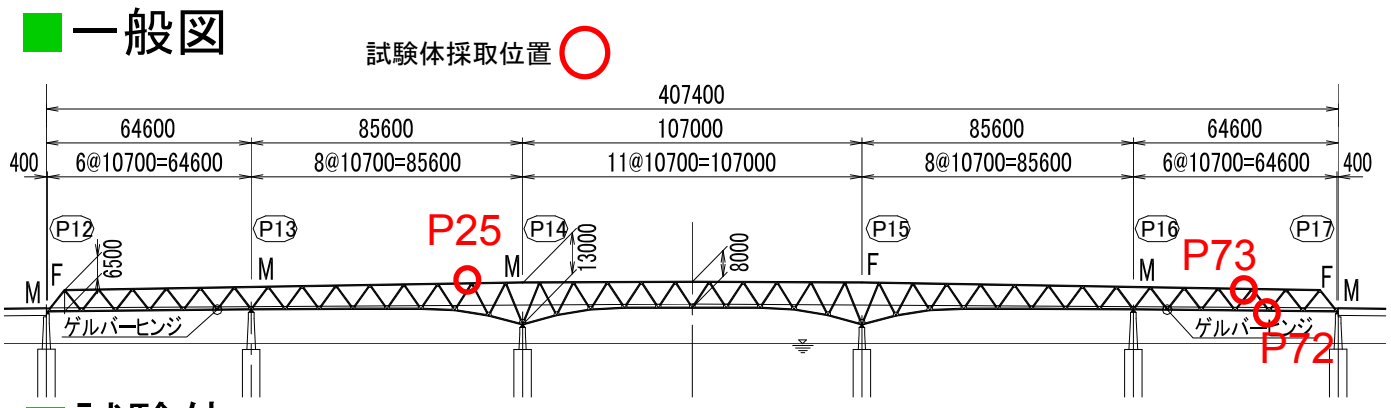
耐荷力評価式(試案)



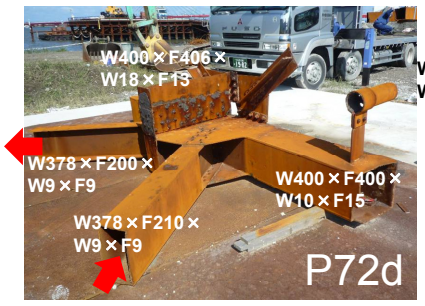
評価式による算定値と試験・解析値との比較

銚子大橋（劣化部材の耐荷性能の確認－その2－）

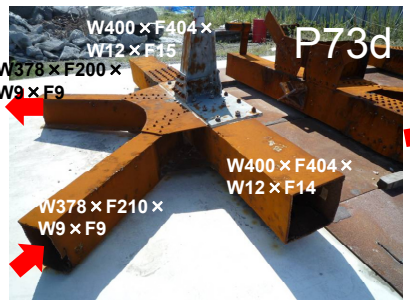
■一般図



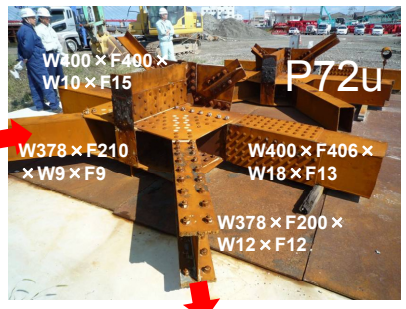
■試験体



下弦材格点部（d: 下流側）



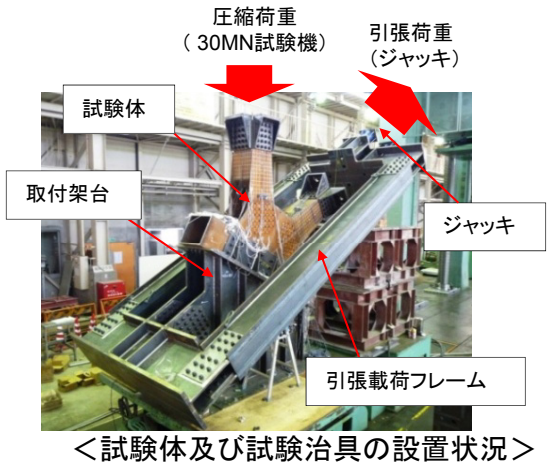
上弦材格点部（d: 下流側）



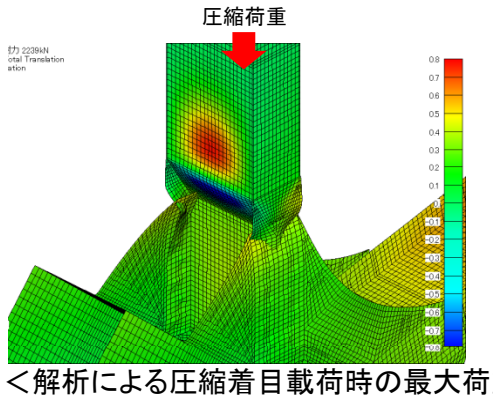
下弦材補強格点部（u: 上流側）

■研究概要

トラス橋の撤去部材から切り出した3体の格点部（P73d，P72d，P72u）を用いて，その腐食量計測，圧縮・引張載荷試験及び弾塑性有限変位解析を行い，破壊性状及び残存耐荷力を把握するとともに残存耐荷力評価手法を検討。



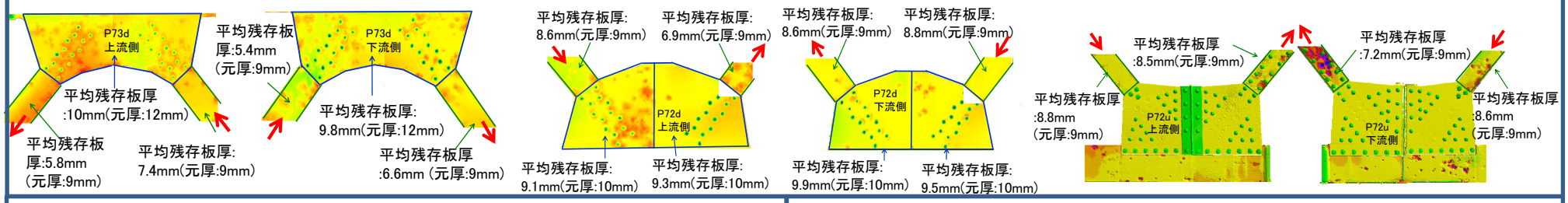
＜試験体及び試験治具の設置状況＞



＜解析による圧縮着目載荷時の最大荷重状態における変形図（P73d）＞

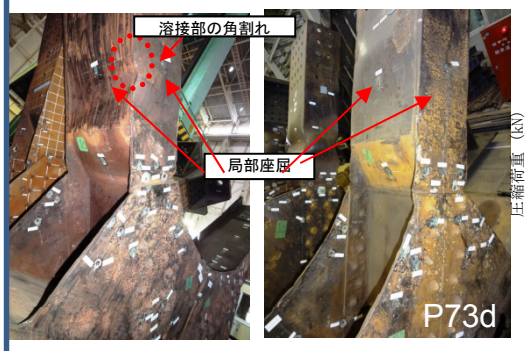
●腐食量計測結果と平均残存板厚

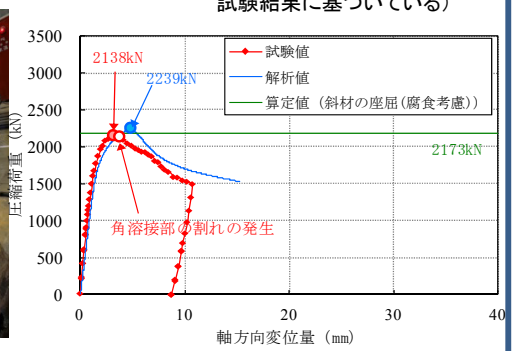
（いずれの試験体も斜材ウェブは腐食が軽微であることから減肉なしとている。）

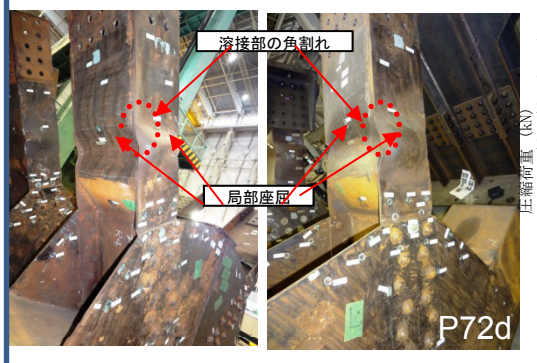


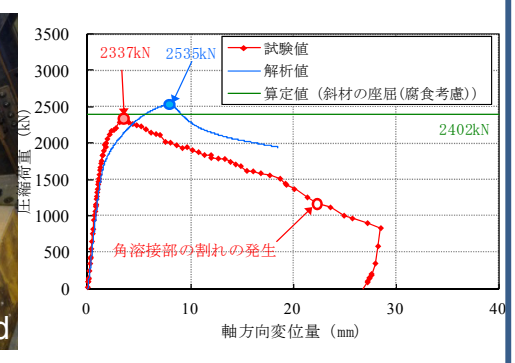
●圧縮着目載荷の試験結果

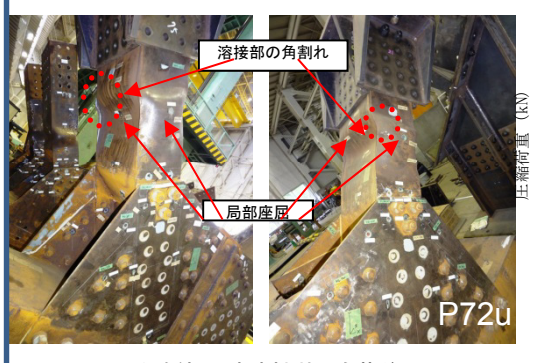
（部材の材料特性は、材料引張試験結果に基づいている）

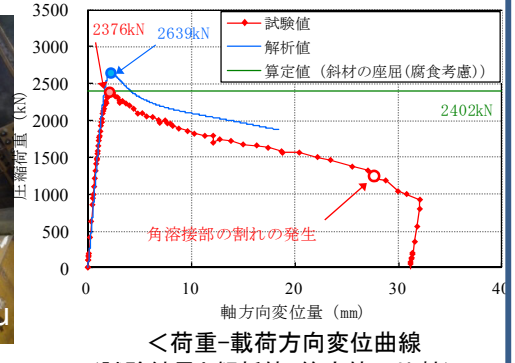












＜試験体の破壊性状（除荷後）＞

＜荷重-載荷方向変位曲線（試験結果と解析値・算定値の比較）＞

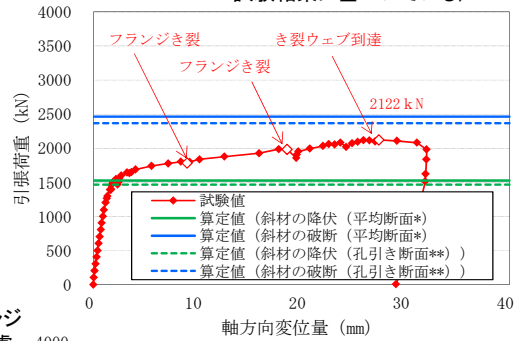
・3体ともに、斜材（矩形断面）のウェブ面の局部座屈（両縁支持板の座屈）により最大荷重に達した。
・変位量増加後に角割れが発生した（角割れによる急激な荷重低下は見られなかった。）。

（解析値、算定値は検討途中であり、今後変わる可能性がある）

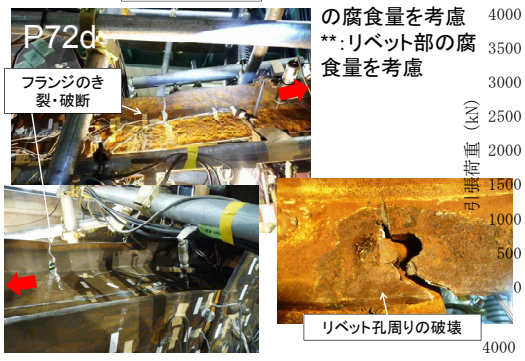
●引張着目載荷の試験結果

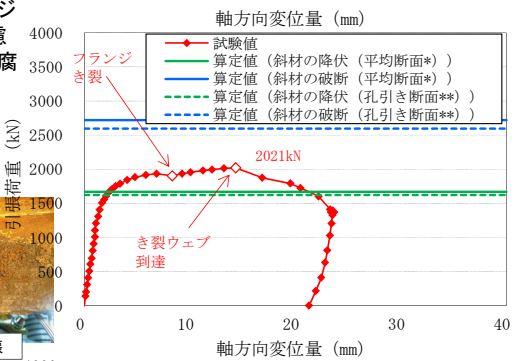
（部材の材料特性は、材料引張試験結果に基づいている）



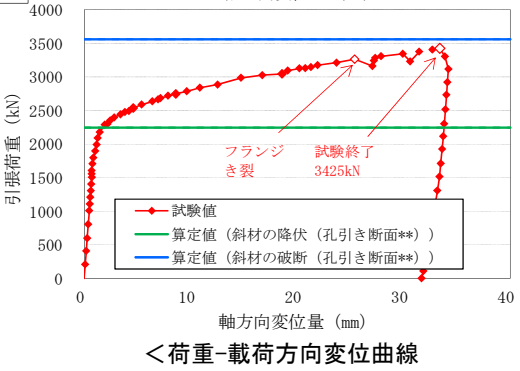


*：斜材のフランジの腐食量を考慮
**：リベット部の腐食量を考慮









＜試験体の破壊性状（除荷時）＞

＜荷重-載荷方向変位曲線（試験結果と算定値の比較）＞

・3体ともに、斜材フランジ縁の腐食減肉部分等の複数箇所からき裂が発生し、徐々に進展していった。また、載荷途中では、リベット孔部分からもき裂が発生した。
・P73d、P72dでは、フランジに発生した亀裂がウェブに到達した時点で最大荷重となった。ウェブに到達したき裂を含む断面は、斜材の中の最小断面と考えられる。
・荷重－変位関係の勾配の変化点（荷重）は、腐食量計測による平均断面積と降伏点から算出した荷重値と概ね一致している。

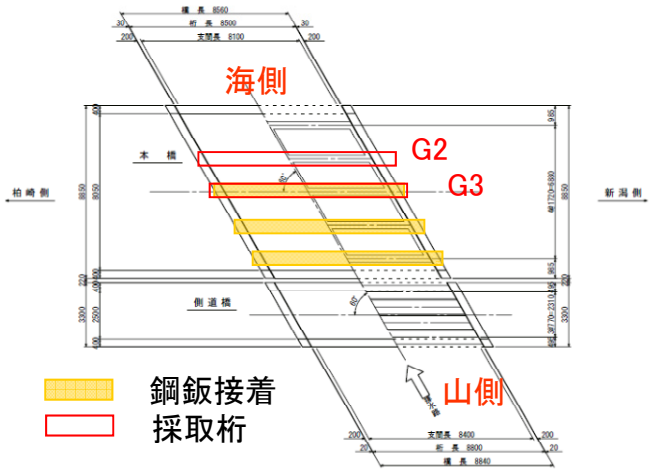
（算定値は検討途中であり、今後変わる可能性がある）

長橋（劣化部材の耐荷性能の確認、補強効果の検証）

■橋梁諸元

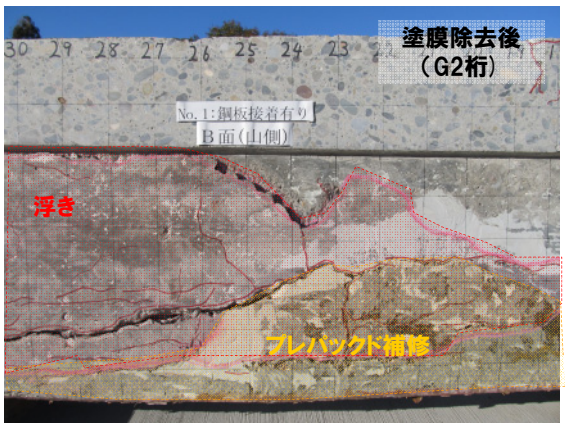
橋梁名	長(おさ)橋
路線，地名	国道352号，新潟県柏崎市
橋梁形式	単純RCT桁橋
橋長	8.56m
支間長	8.1m
竣工年	昭和40年(1965年) 45年経過

■一般図



■橋梁概観・損傷状態









◇プレパックド断面修復・鋼板接着・表面保護するも、再劣化
◇LCCの比較により撤去
◇鋼材位置塩化物イオン量：5.7kg/m^3

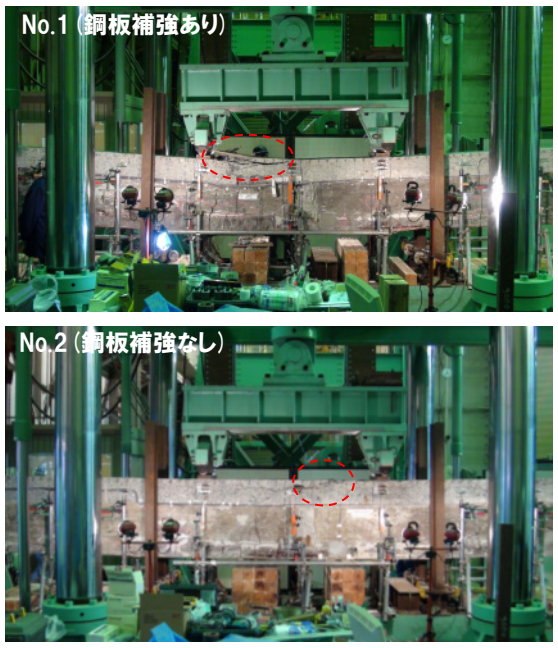
■研究概要

≪研究目的≫
塩害により劣化し、複数回の補修履歴を有するRC桁の耐荷力評価

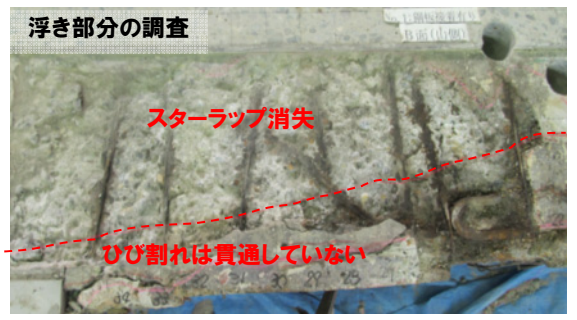
≪調査内容≫
載荷試験、解体調査

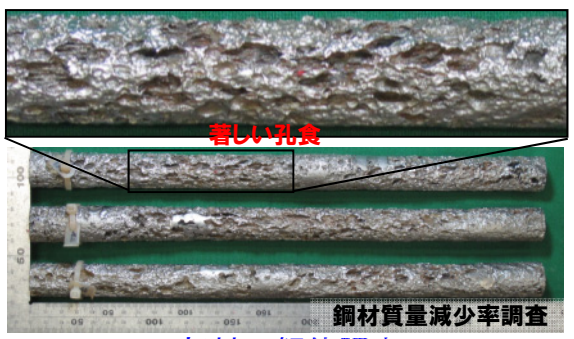
主桁（鋼板補強桁：No.1、無補強桁No.2）の載荷試験を実施。載荷試験後、コンクリートの物性、鋼材の物性・腐食量、塩分量、アルカリシリカ反応、配筋等を解体調査により確認を行い、鋼板、プレパックド補修の効果、腐食の影響を把握する。

・鋼板接着に耐荷力増加の効果がない
　→鋼板の接着方法に問題
・プレパックド、鋼板に剛性を高める効果



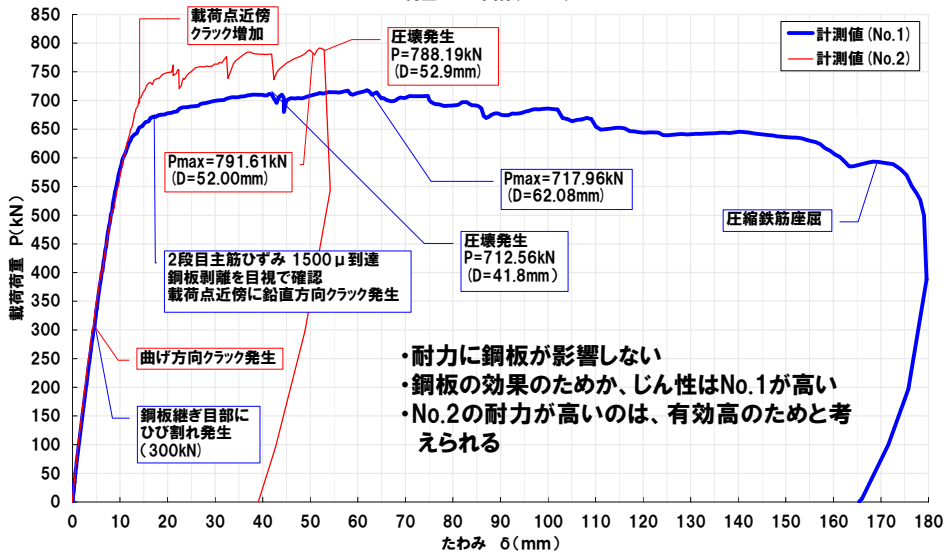
載荷試験後の破壊状況





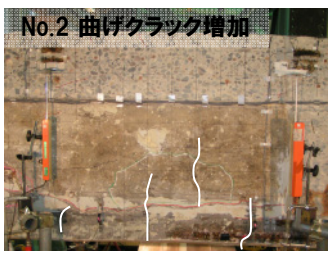
部材の解体調査

荷重たわみ曲線（P－δ）

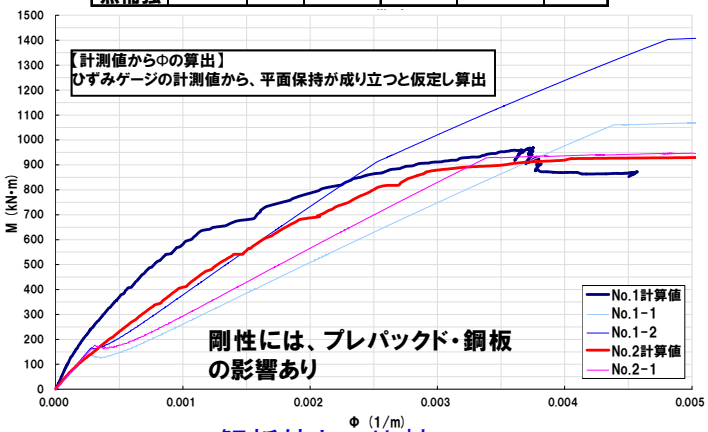


荷重ーたわみ





試験体	検討ケース	鋼板	腐食率(%)	計測値(kN)	計算値(kN)	比率
No.1 鋼板補	No.1-1	無視	7.47	717.9	819.1	0.88
	No.1-2	考慮	7.47		1071.9	0.67
No.2 無補強	No.2-1	なし	4.13	791.5	726.1	1.09



解析値との比較

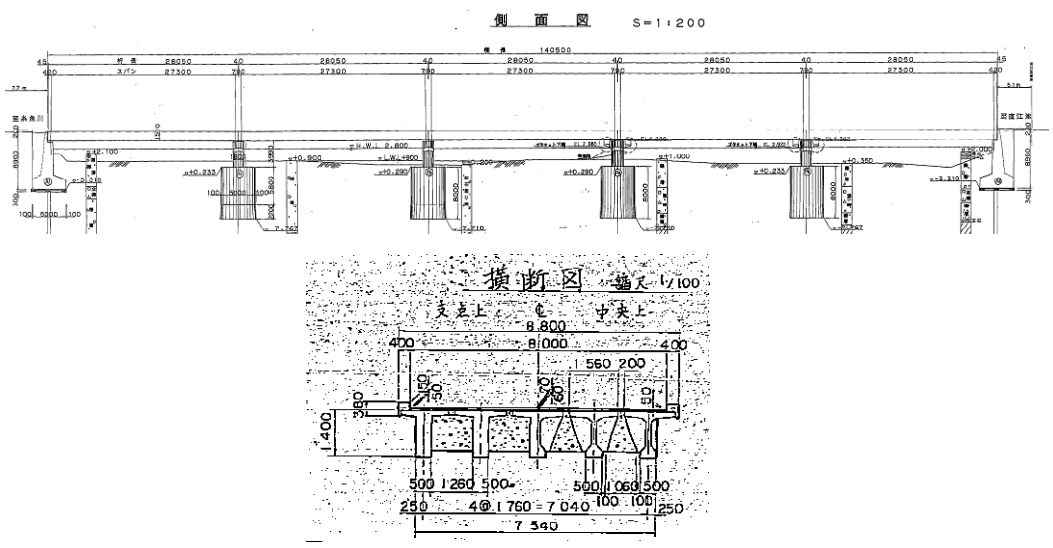
関連資料　・コンクリート工学，pp.23-30，49-12，2011.　・土研資料，4233号，2012.8.

能生大橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価）

■橋梁諸元

橋梁名	能生（のう）大橋
路線，地名	一般国道8号，新潟県糸魚川市
橋梁形式	単純PC桁橋（5径間）
橋長	141.0m
支間長	28.1m×5
竣工年	昭和41年(1966年)

■一般図



■橋梁概観





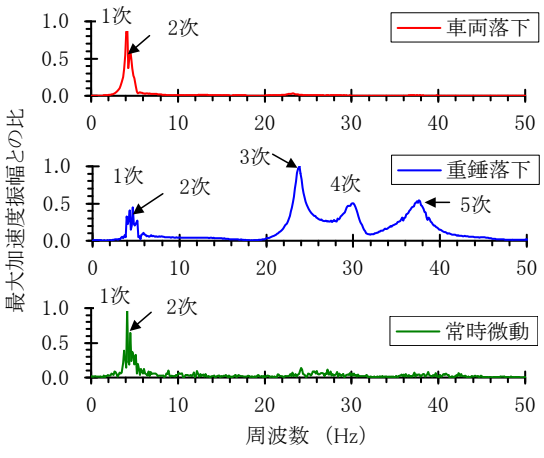
■研究概要

≪研究目的≫
塩害劣化により、鋼材腐食やひび割れの生じたPC桁の動的特性の変化を確認

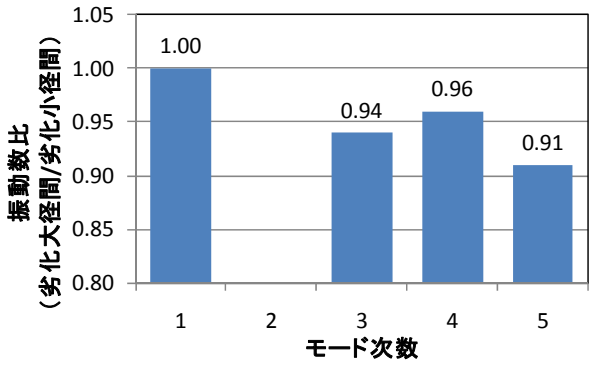
≪調査内容≫
現地動的特性確認試験
解体調査

撤去前に、車両落下法、重錘落下法などにより、動的特性を確認

・劣化が激しい径間で、高次振動モードの振動数が低下することを確認



加振法毎のスペクトル



劣化の大きい第1径間と劣化の小さい第2径間の振動数の比率（重錘落下法）

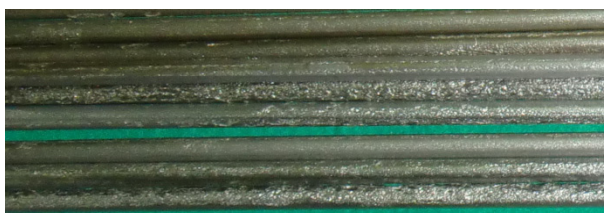


車両落下法



重錘落下法





撤去桁下桁の解体調査
PC鋼線の腐食による断面減少の状況

関連資料　・「プレストレストコンクリート道路橋の振動計測（一般国道8号能生大橋）」北野他，土木学会全国大会，2011.9.

※（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究に基づき実施

能生大橋（塩害劣化した橋梁の解体調査）

■橋梁諸元

橋梁名	能生（のう）大橋
路線，地名	一般国道8号，新潟県糸魚川市
橋梁形式	単純PC桁橋（5径間）
橋長	141.0m
支間長	28.1m×5
竣工年	昭和41年(1966年)

■橋梁概観



■研究概要

≪研究目的≫
塩害劣化コンクリート橋の外的損傷と、内部鋼材腐食度の関係性の把握

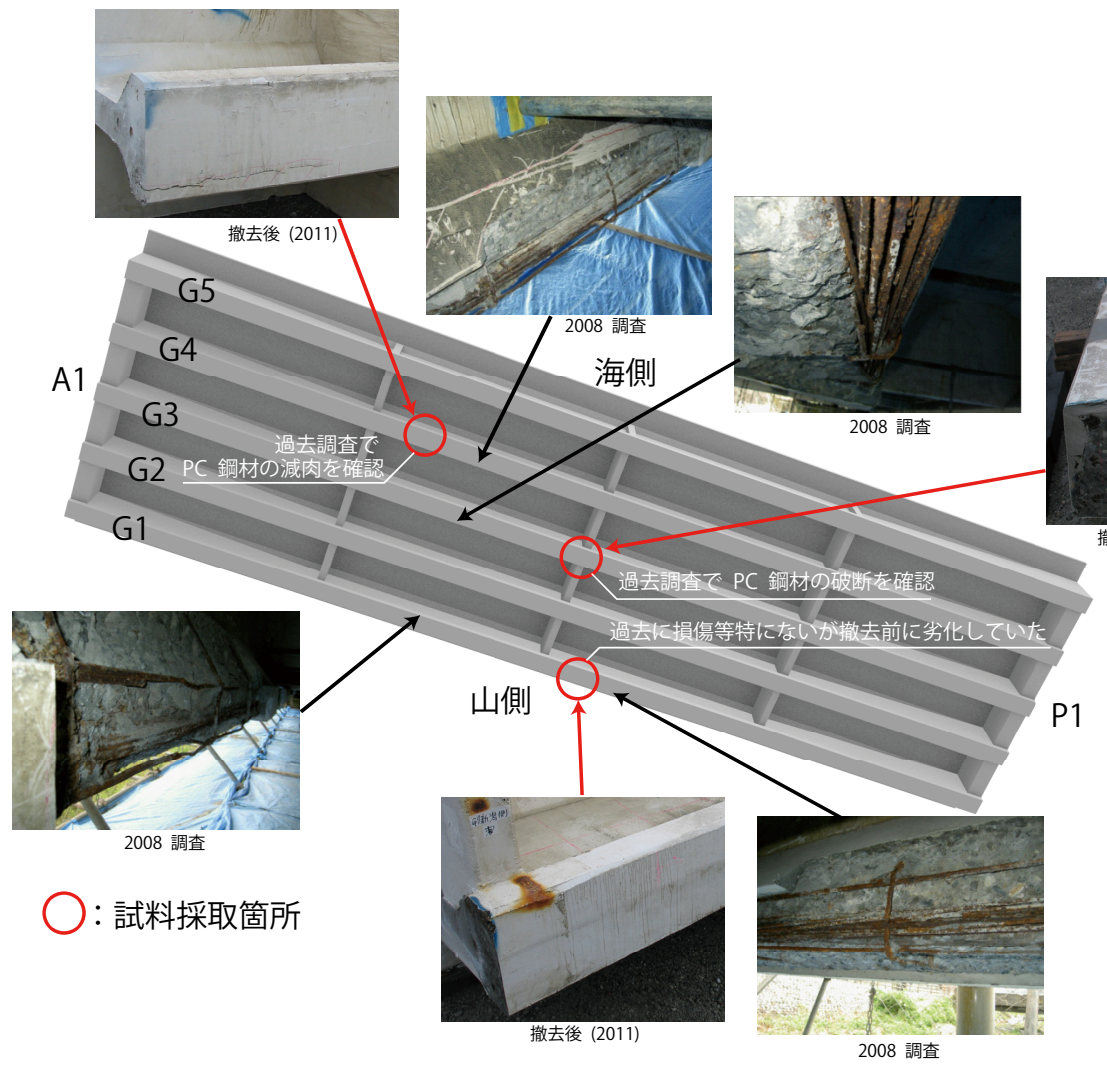
≪調査内容≫
解体調査、鋼材腐食量計測

撤去した桁を解体し、内部鋼材の腐食度を質量減少率として計測

破断の確認されたようなケーブルでは高い腐食率を示す一方、近傍の他のケーブルでは腐食率はそれほど高くはない。



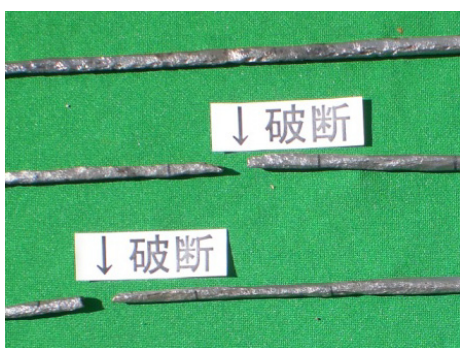
解体調査状況



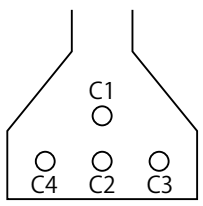
過去の損傷状況と試料採取箇所（第1径間）※図は下から見上げた状態



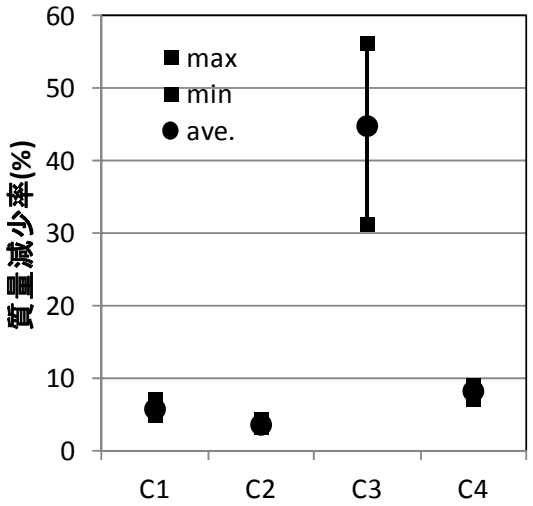
除錆前（G3-C3）



除錆後（G3-C3）

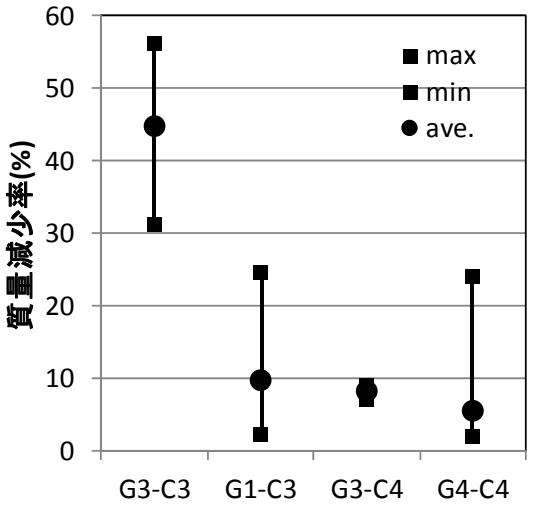


PCケーブル配置



G3のケーブル毎の質量減少率

過去に破断が確認されたC3で平均45%、その他のケーブルは平均10%以下



桁の損傷と質量減少率

過去に破断が確認されたG3-C3以外は平均10%程度

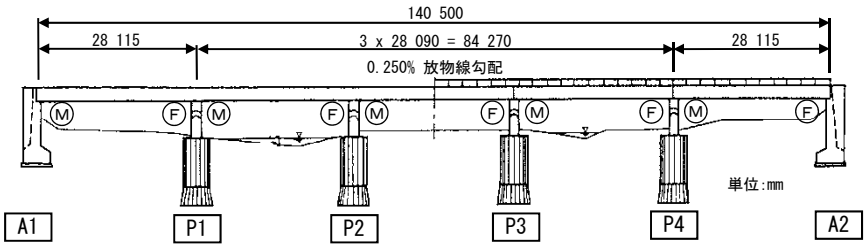
能生大橋（塩害劣化した耐震補強部材の耐荷性能の検証）

■橋梁諸元

橋梁名	能生（のう）大橋
路線，地名	一般国道8号，新潟県糸魚川市
橋梁形式	単純PC桁橋（5径間），T型RC橋脚
橋長	140.050 (m)
支間長	28.115 + 3 x 28.090 + 28.115 (m)
竣工年	昭和41年(1966年)

■橋梁全景





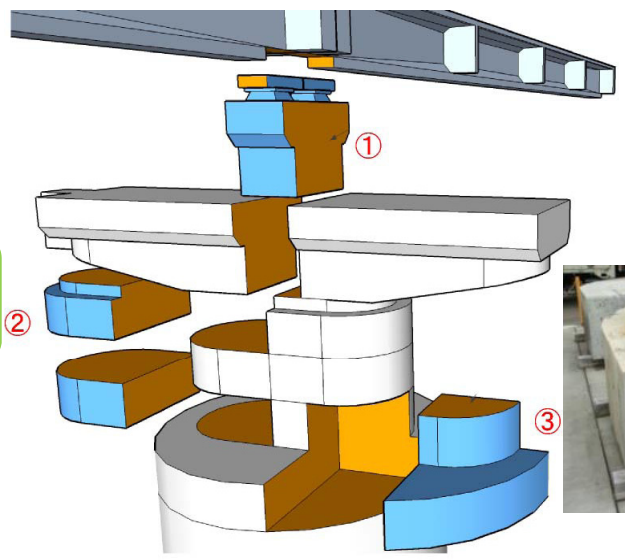
■研究概要

≪研究目的≫
塩害劣化したRC橋脚の縁端拡幅部およびRC巻立て部における耐荷性能・補強効果の持続性の検証

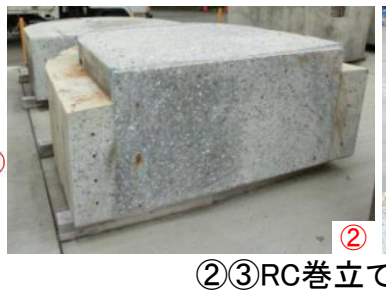
≪調査内容≫
外観調査，塩分含有量調査，耐荷力試験

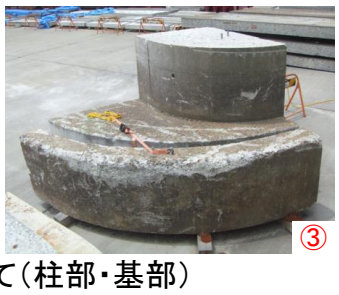
縁端拡幅部およびRC巻立て部ともに計算上必要な耐荷力を有しており，耐震補強効果の一定の持続性が検証された。

■採取部材(P4橋脚)





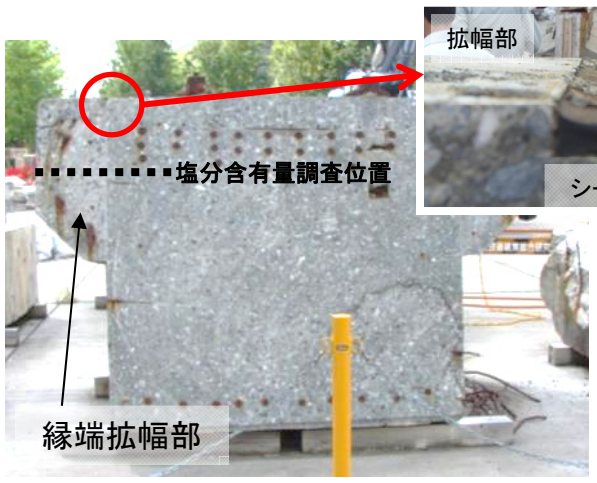




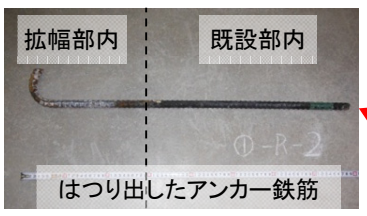
①横梁縁端拡幅部
（1978年施工・約33年経過）

②③RC巻立て（柱部・基部）
（2005年施工・約7年経過）

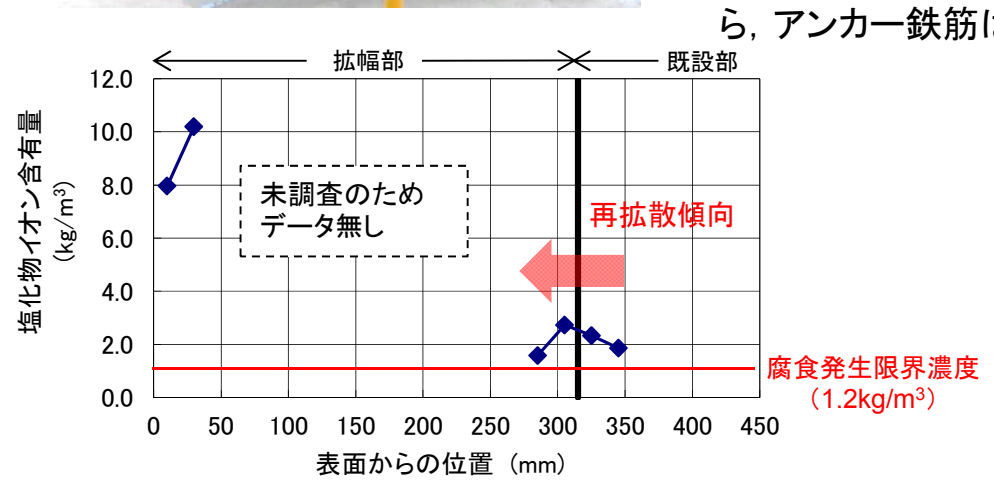
■縁端拡幅部の外観・塩分含有量調査





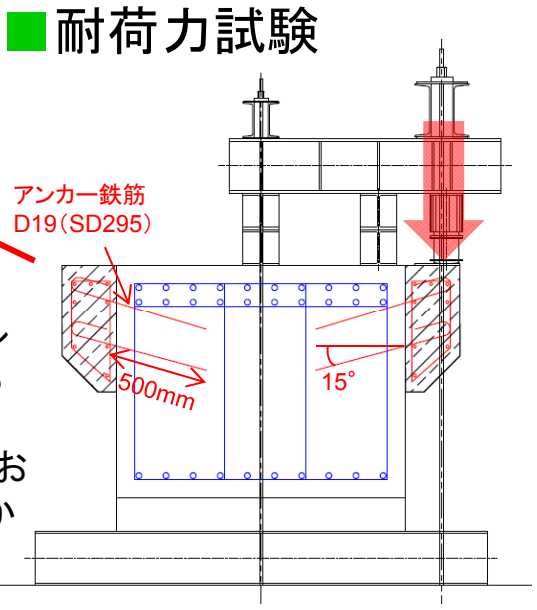


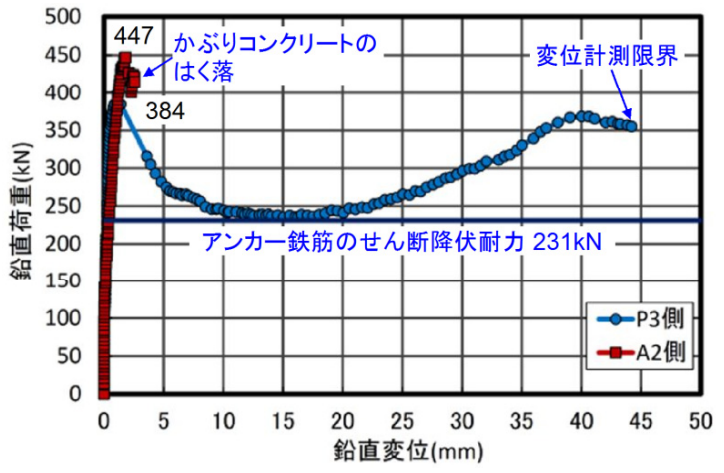
- ✓ 既設部と縁端拡幅部の境界上面にシールが施され，このシールに機能低下をもたらすような損傷はなかった。
- ✓ アンカー鉄筋が15°の角度で施工されており，グラウトの充填状況も良好だったことから，アンカー鉄筋は健全な状態であった。



- ✓ 拡幅部の表面付近，拡幅部と既設部の境界部において，腐食発生限界濃度を超える塩分濃度となっていた。
- ✓ 既設部から拡幅部への再拡散傾向が見られた。

■耐荷力試験





- ✓ P3側，A3側ともにアンカー鉄筋の計算上のせん断降伏耐力を上回った。

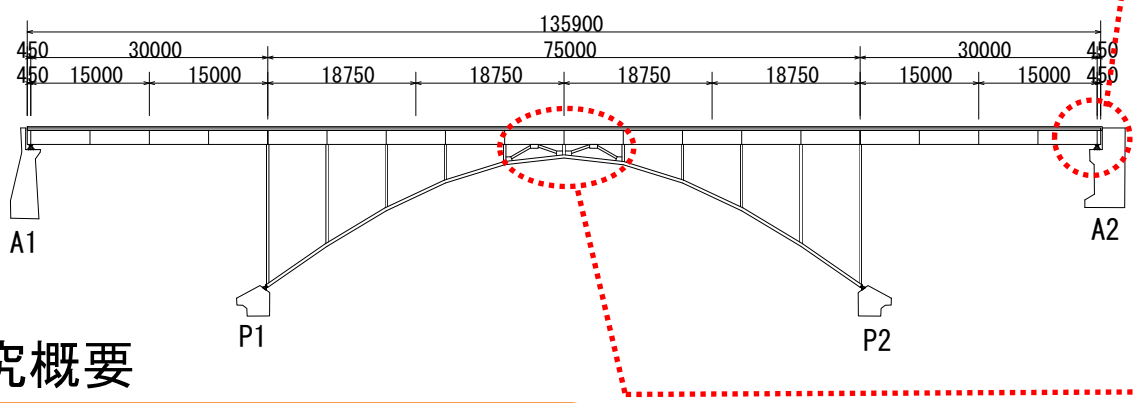
関連資料 ・「長期間塩害環境下に曝されたRC橋脚の耐震補強部材の耐荷特性」
第16回 性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，2013.7.

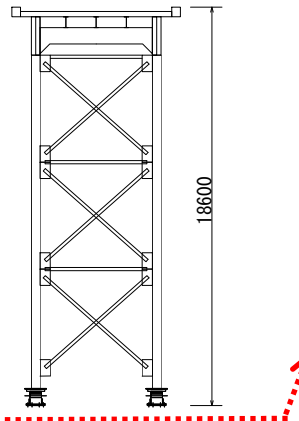
桜橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価）

■橋梁諸元

橋梁名	桜橋
路線，地名	国道8号，福井県南越前町
橋梁形式	鋼上路式アーチ橋
橋長	135m
支間長	30.0m+75.0m+30.0m
竣工年	昭和38年(1963年)

■一般図





■橋梁概観



46年間供用，疲労・腐食損傷に対し補強対策を実施



橋面上



桁端部のあて板補強とゴム支承への取り替え



アーチクラウン部の斜材増設

■研究概要

≪研究目的≫
長期間供用され損傷・補修履歴のある鋼上路アーチ橋の全体挙動の把握と、構造解析モデルの検討

≪調査内容≫
・荷重車を用いた現地載荷試験
・起振機による振動試験、常時微動計測



荷重車を用いた静的載荷試験



荷重車を用いた走行試験



起振機による振動試験

＜載荷試験の実施状況＞

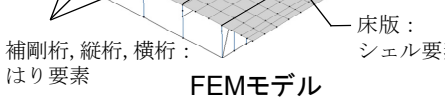
・実橋の挙動計測結果及び解析結果との比較により全体挙動を把握（床版と補剛桁の合成挙動等を確認）。
・活荷重応答を概ね再現できる解析モデルを把握。
　・全体挙動（変位や主構造の応力度）については，FEMモデルで概ね再現。ガセットの応力度評価は詳細FEMモデルが望ましいことを確認。
・振動試験の結果により振動特性（固有振動数や減衰等）を把握。

＜解析モデル（活荷重応答）＞

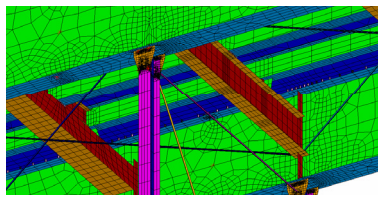
◆FEMモデル
床版：シェル要素
その他部材：はり要素
→ ・FEM（補強後・合成）ケース
・FEM（補強後・非合成）ケース
・FEM（補強前・合成）ケース
※補強後：斜材増設等の補強を考慮
※※合成：床版と桁との合成挙動を考慮

◆詳細FEMモデル
横構・対傾構：はり要素
その他部材：シェル要素
→ ・詳細FEM（補強後・合成）

FEMモデルを用いて、床版と補剛桁との合成・非合成、補強前後等をパラメータに応答値の違いを検討。あわせて、ほぼ全ての部材をシェル要素で詳細にモデル化した詳細FEM解析結果と比較。



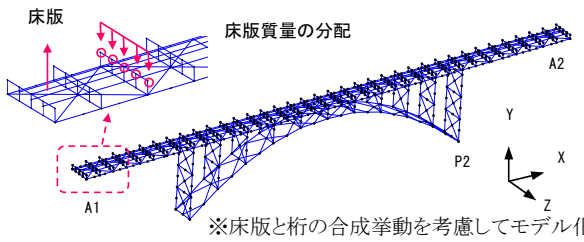
FEMモデル



詳細FEMモデル

＜解析モデル（振動特性）＞

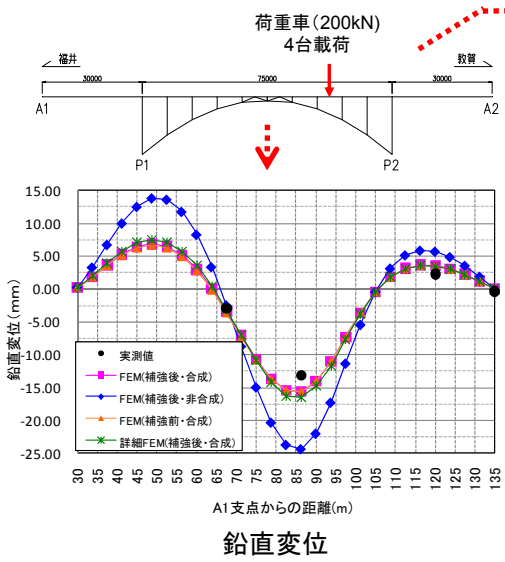
部材をはり要素でモデル化（床版は1本のはりでモデル化）



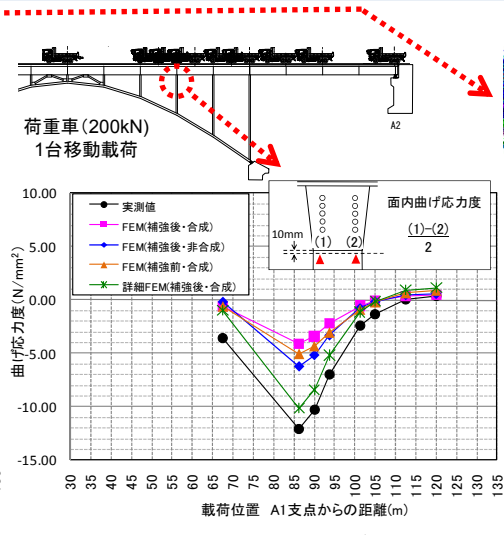
※床版と桁の合成挙動を考慮してモデル化

解析の次数	振動数（Hz）	
	起振機による試験結果	解析結果
1	1.18	1.385

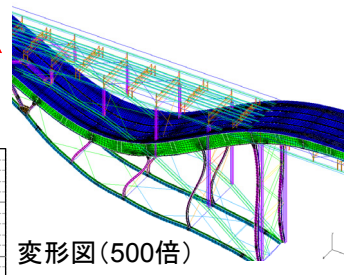
＜試験及び解析結果の比較＞



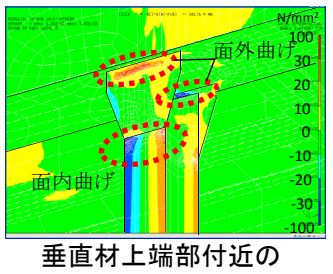
鉛直変位



垂直材上端部の面内曲げ応力度



変形図（500倍）



垂直材上端部付近の直応力度コンター図

＜載荷試験及び解析結果の比較＞

関連資料　・土研資料4207号

神戸橋（補強効果の検証、劣化原因の調査）

■橋梁諸元

橋梁名	神戸(ごうど)橋
路線，地名	松本環状高家線，長野県松本市
橋梁形式	単純RC桁橋(一部PC橋)
橋長	127m
支間長	8@10m (RC桁部)+2@21m
竣工年	昭和10年(1935年)

■橋梁概観



■研究概要

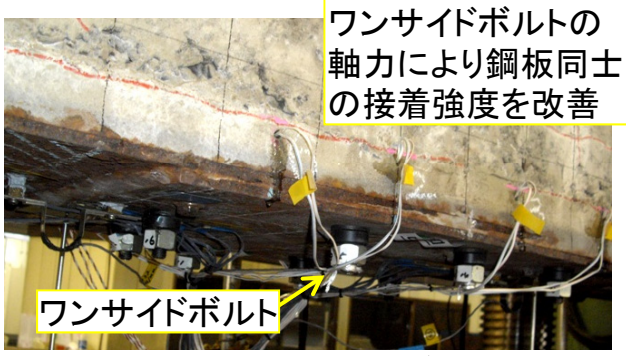
≪研究目的≫
鉄筋コンクリート主桁の鋼板接着の効果を確認するとともに，著しい劣化が耐荷力に及ぼす影響を把握する。また，劣化原因の調査を行う。

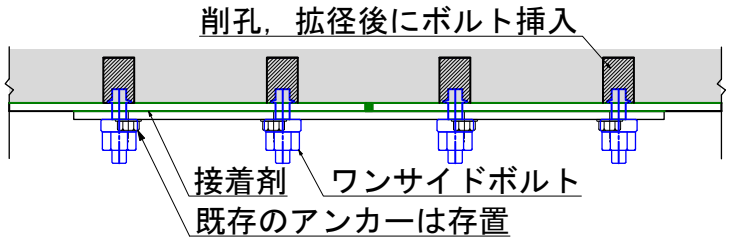
≪調査内容≫
載荷試験による耐荷力確認
材料諸元と劣化に関する解体調査

平成22年度主桁2体の載荷試験結果
・補強鋼板継手の破壊により鋼板接着の補強効果が発揮されなかった。
・劣化により，RC桁の曲げ耐荷力が計算値の90%に低下していた。

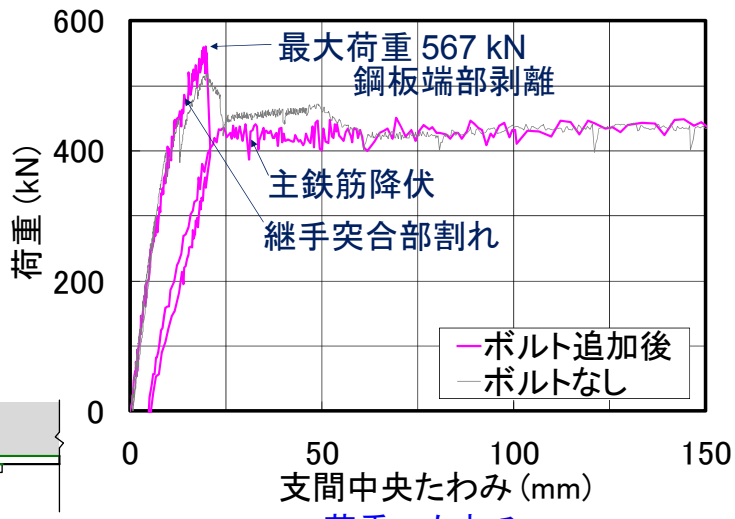
平成24年度主桁2体の載荷試験結果
・補強鋼板継手のボルト補強により，1～2割程度の耐力改善が見られた。
・補強鋼板端部の剥離破壊が生じた。

劣化の状況と原因等は，継続調査中

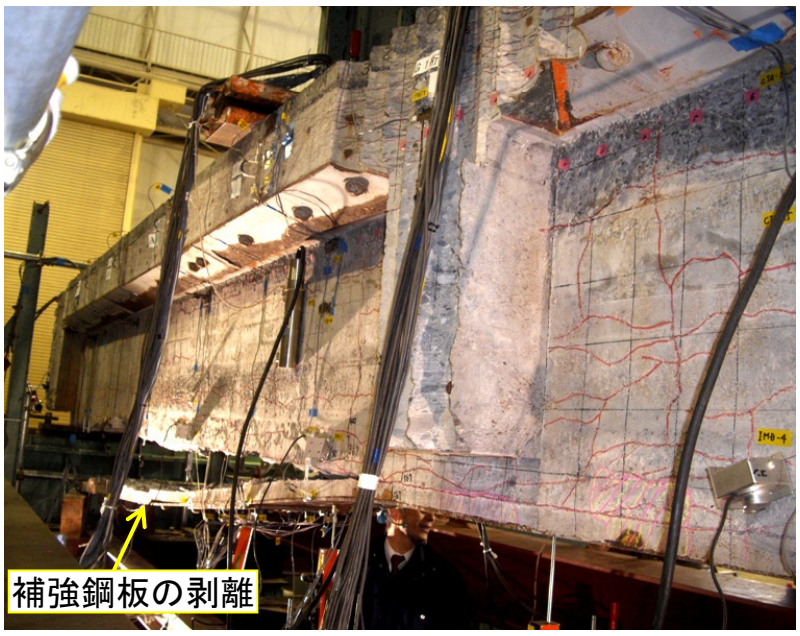




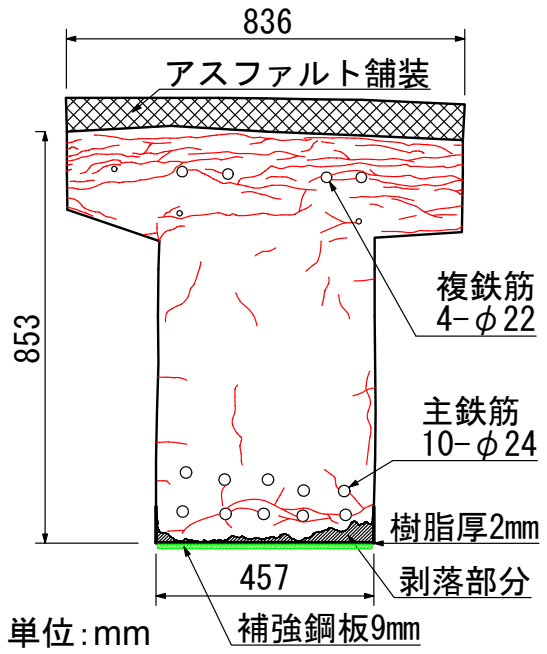
補強鋼板継手のボルトによる補強



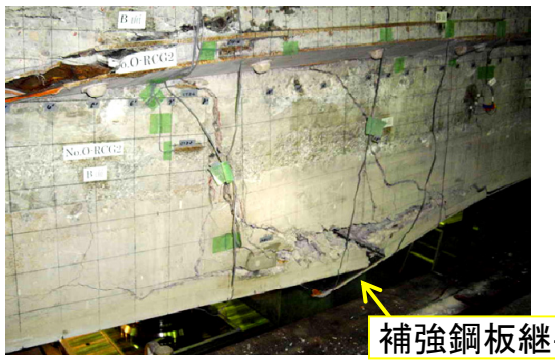
荷重－たわみ
第7径間G1桁(ボルト追加)と
第7径間G2桁(ボルトなし)の比較



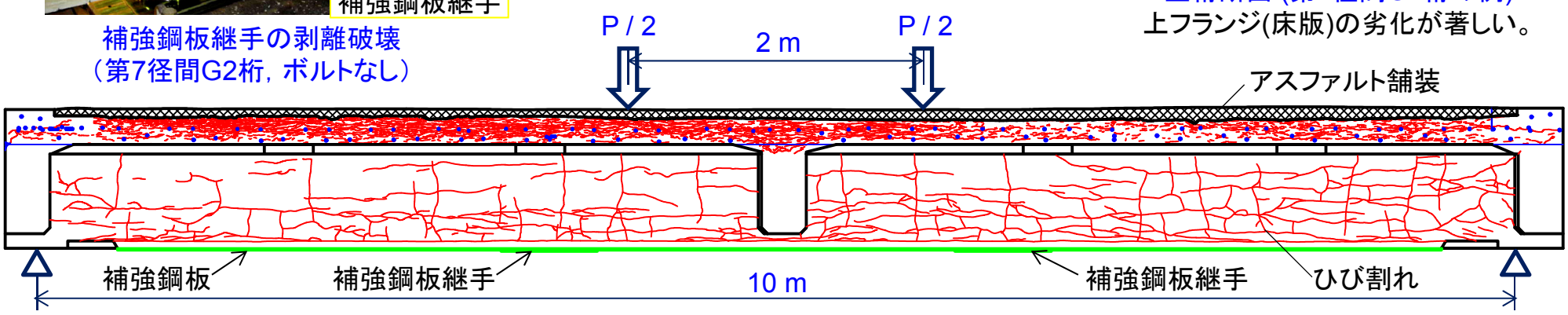
補強鋼板が端部から剥離破壊した状況
（第7径間G1桁，ボルト追加）



主桁断面 (第7径間G1桁の例)
上フランジ(床版)の劣化が著しい。



補強鋼板継手の剥離破壊
（第7径間G2桁，ボルトなし）



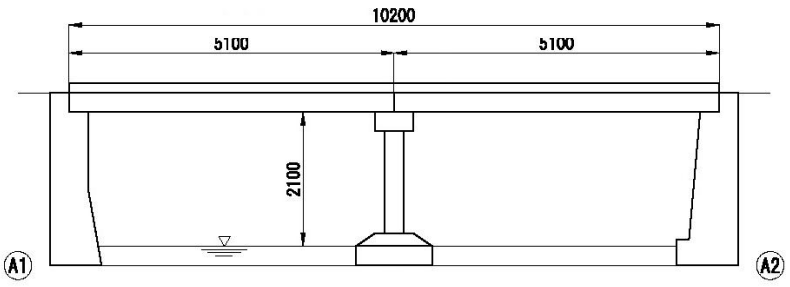
載荷方法と主桁の劣化によるひび割れ（第7径間G1桁の例）

関連資料 ・吉田ほか：土木学会全国大会Ⅴ，p.377～378，2011.9. ・飯塚ほか：土木学会全国大会Ⅰ，p.685～686，2012.9.
・吉田ほか：土木学会全国大会Ⅴ，p.359～360，2013.9. ・吉田ほか：JCI年次論文集，p.1207～1212，2014.7.

倉谷橋（劣化部材の耐荷性能の確認）

■橋梁諸元

橋梁名	倉谷橋
路線，地名	市道，島根県江津市
橋梁形式	RC床版橋
橋長	10.2m
支間長	2@5.1m
竣工年	昭和34年(1959年)



一般図

■橋梁概観





床版下面の剥離



主筋の腐食

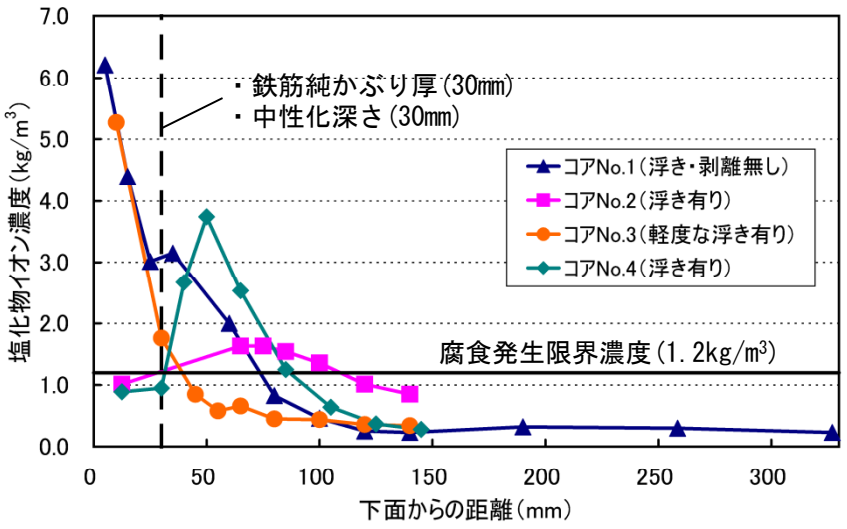
■研究概要

≪研究目的≫
塩害により、鋼材、コンクリートに損傷の生じた床版桁の耐荷力の確認

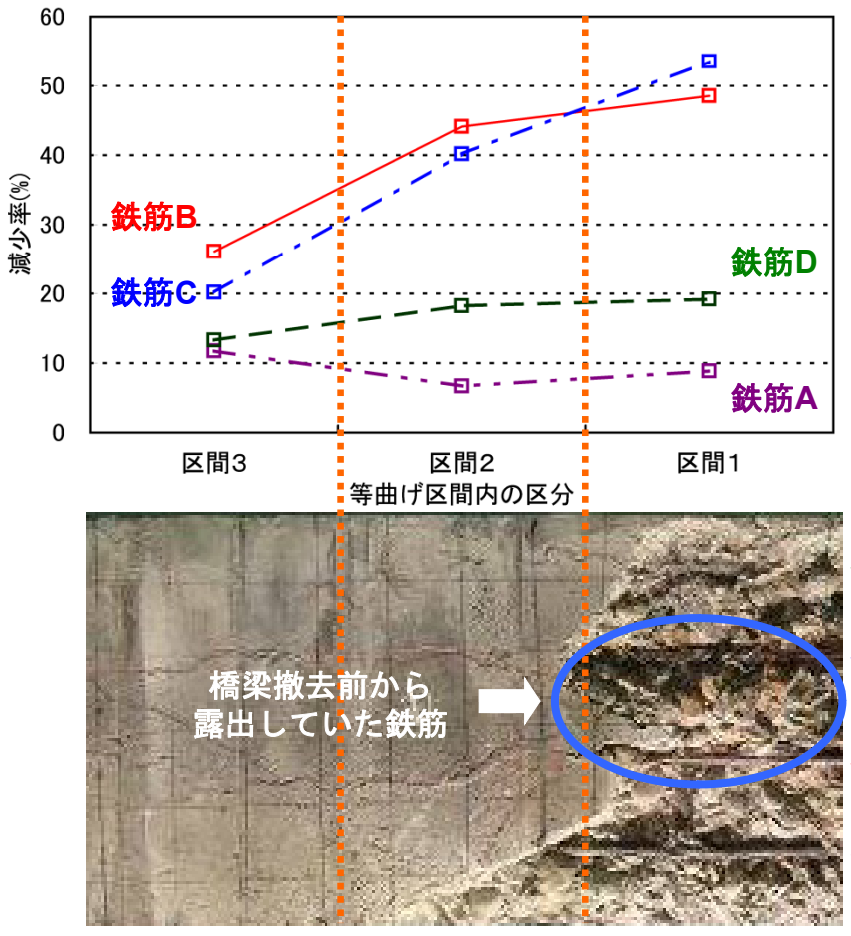
≪調査内容≫
載荷試験による耐荷力確認
コンクリートおよび鉄筋の劣化調査

塩害損傷を受けたRC床版の耐荷力を確認するため載荷試験を実施。劣化調査による腐食鉄筋の断面積に注目した耐荷力算出を行い、載荷試験結果との耐荷力評価を実施。

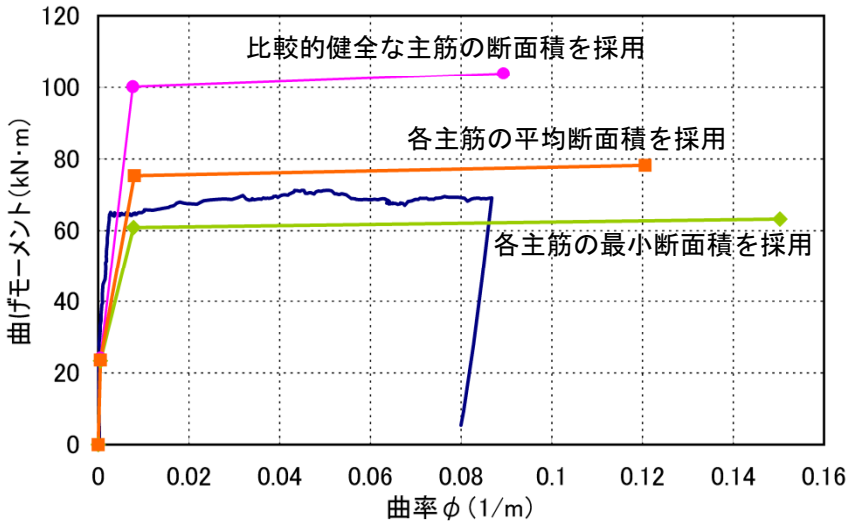
・鉄筋付近では、塩化物イオン濃度は概ね腐食発生限界濃度と同程度かそれ以上であった。
・主筋は最大45%の断面減少があった。
・浮きがあってもかぶりが残存していれば断面積の減少が抑制される。（鉄筋A、D）
・健全体を想定した耐荷力の68%程度であった。
・各主筋の最小断面積による計算が安全側の評価となった。



塩化物イオン濃度分布



主筋の平均断面減少率と床版下面の相関



主桁の劣化によるひび割れ

関連資料　・土木技術資料，2011.2.　・土研資料，4234号，2012.8.

津波橋（落橋した橋梁の解体調査）

■橋梁諸元

橋梁名	津波（つは）橋
路線，地名	旧国道58号，沖縄県大宜味村
橋梁形式	RCT桁橋（3主桁）
橋長	10.2m
支間長	9.4m
竣工年	昭和6年(1931年)

■橋梁概観



落橋前



落橋後

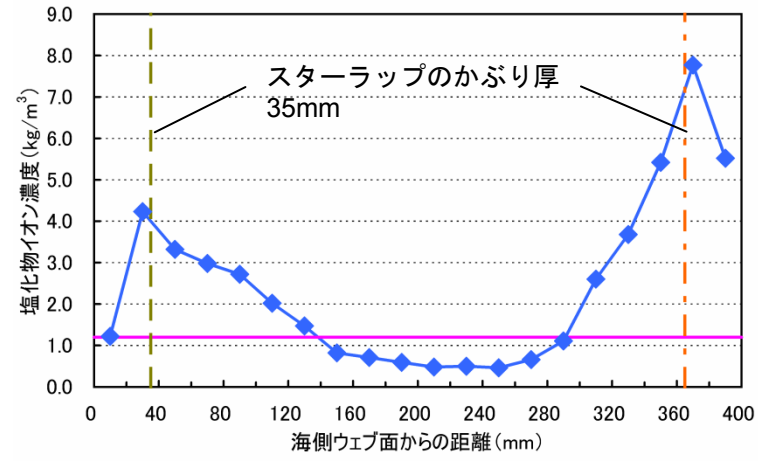
■研究概要

≪研究目的≫
古い年代に建設され、長期間に渡り塩害環境にさらされて落橋に至った橋梁の材料物性、劣化度の把握

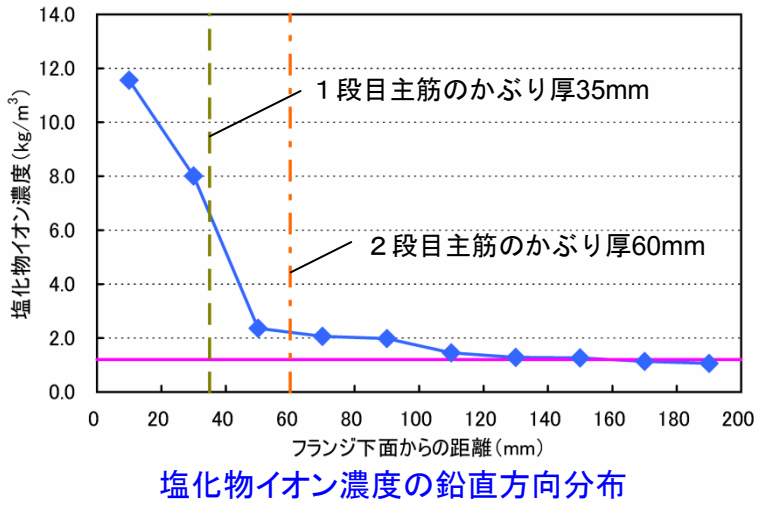
≪調査内容≫
塩害により落橋した桁部材の材料調査
（コンクリートおよび鉄筋の物性、塩化物イオン濃度）

落橋に至った桁に残る鉄筋の材料調査を実施。RC構造物の耐力に大きく影響する鉄筋の断面減少を把握する。

・海側の外桁では内側ウェブ面の方が塩化物イオン濃度が高い。
・鉛直方向の塩化物イオン濃度は1段目鉄筋付近と2段目鉄筋で差が大きい。
・桁内部の塩化物イオン濃度は表面から150mm程度で腐食発生限界濃度（1.2kg/m^3）以下となった。
・1段目の鉄筋はほとんど消失していた。
・2段目の鉄筋はかぶり残存箇所ではほぼ健全な断面。
・断面減少率は露出部では著しかった。



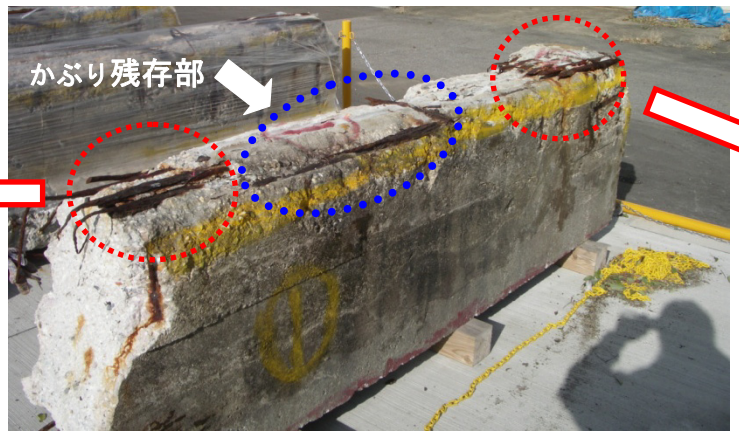
塩化物イオン濃度の水平方向分布



塩化物イオン濃度の鉛直方向分布



露出した鉄筋



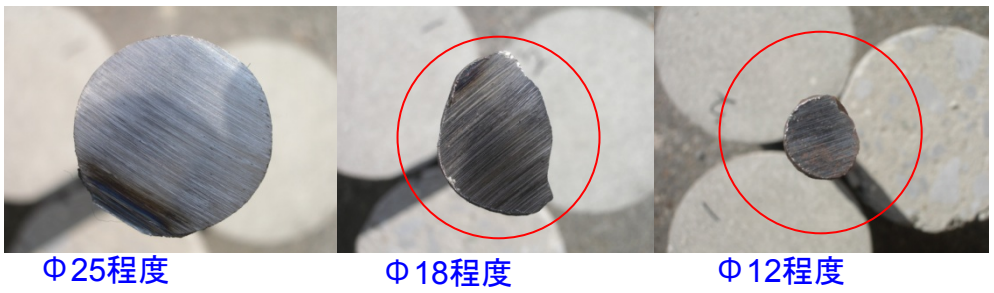
解体調査用撤去桁



支承部の鉄筋



除錆前後の鉄筋状況



Φ25程度
比較的健全な鉄筋

Φ18程度
断面減少率49%

Φ12程度
断面減少率77%

辺野喜橋（監視技術の適用性検討）

■橋梁諸元

橋梁名	辺野喜(べのき)橋
路線，地名	辺野喜辺奈原支線，沖縄県国頭村
橋梁形式	鋼単純合成桁橋
橋長	35m
支間長	35m
竣工年	昭和56年(1981年)

■橋梁概観

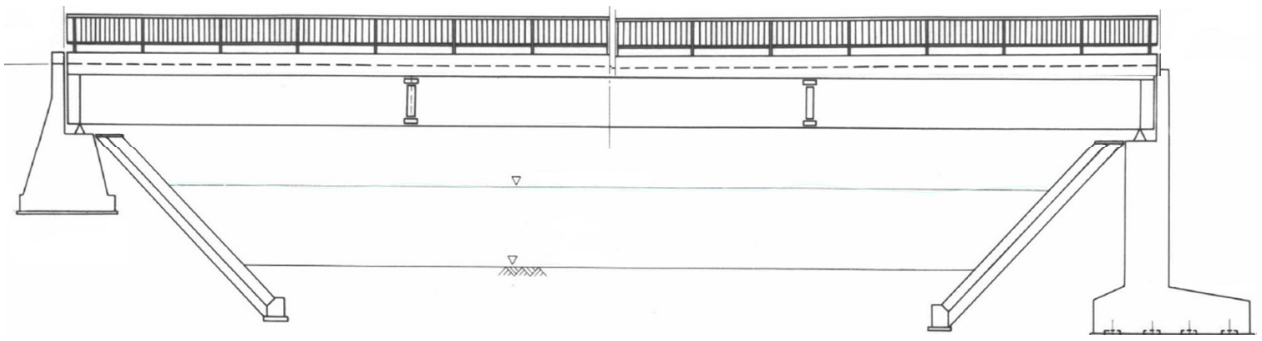






約23年間供用、各所に著しい腐食損傷のため、2004年に全面通行止、2009年に崩落

■一般図



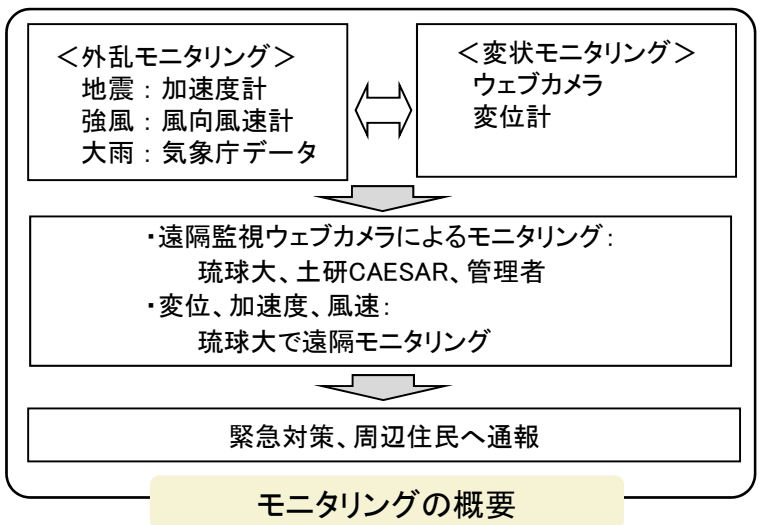
■研究概要

≪研究目的≫
崩落過程に係る挙動把握と、汎用技術による実用的な計測技術の仕様検討・課題抽出

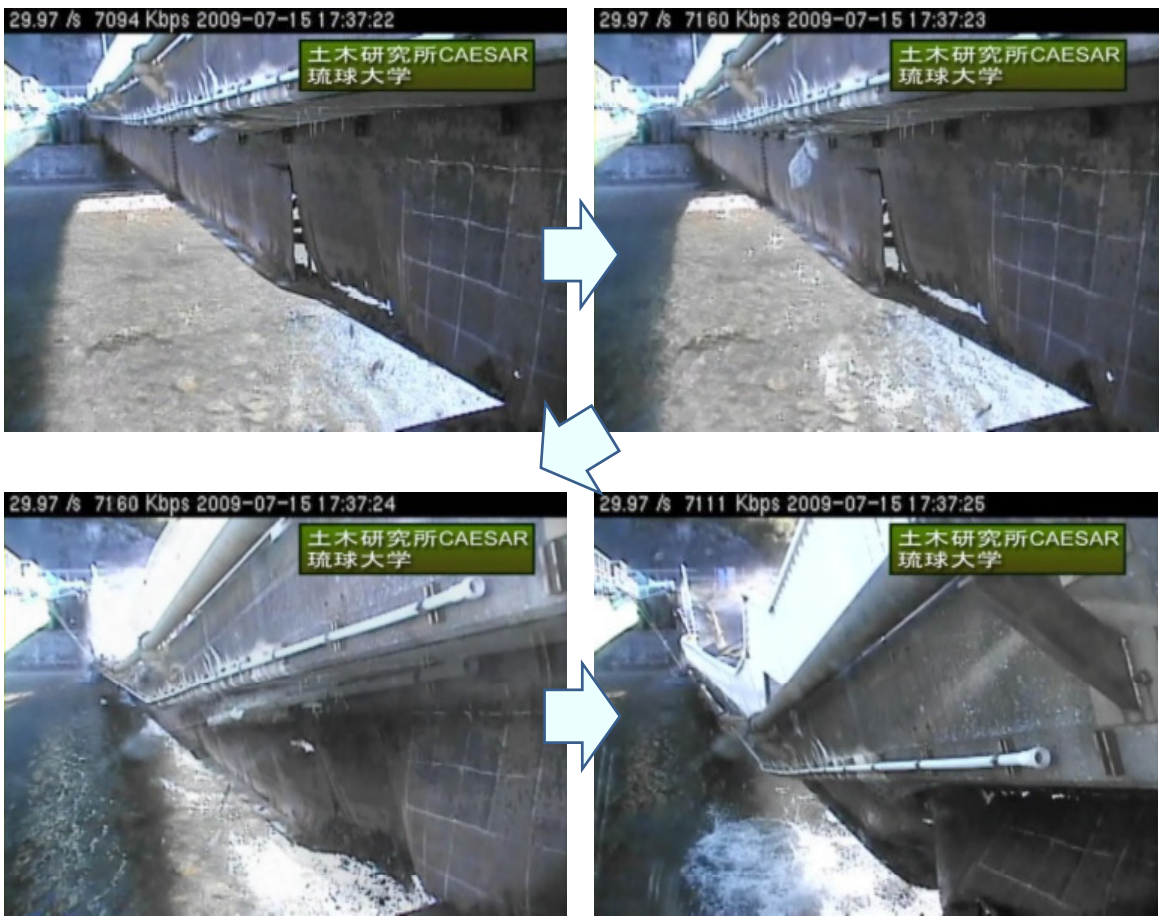
≪調査内容≫
・遠隔監視ウェブカメラ等による連続計測

著しい損傷が発生しており、地震、強風、常時微動等の外乱により、予定されていた撤去前に崩壊する可能性があったため、管理者、琉球大、土研の3者によるリアルタイムモニタリングを実施。

・崩壊3週間前の集中豪雨時の変状進行を即座に情報共有し，崩落時の事前対応を実施
・モニタリングの試行により、技術面・運用面の課題を抽出（計測設置場所の確保と計測環境、地域に応じた情報通信の方法、環境条件に対応したセンサ機器の仕様）



モニタリングの概要



崩落の瞬間のカメラ画像







崩落後の状況

関連資料　・橋梁と基礎，2009.11.

相見川海浜橋（劣化部材の耐荷性能の確認）

■橋梁諸元

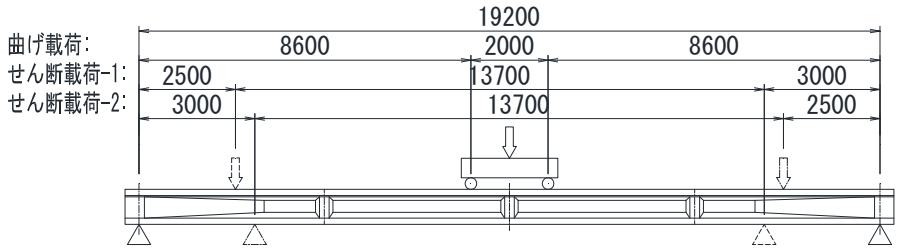
橋梁名	相見川（あいみがわ）海浜橋
路線，地名	能登海浜自転車道，石川県羽咋市
橋梁形式	単純ポストテンションPCT桁橋×2連
橋長	44.0m
支間長	19.2m＋23.24m
竣工年	昭和47年(1972年)

■研究概要

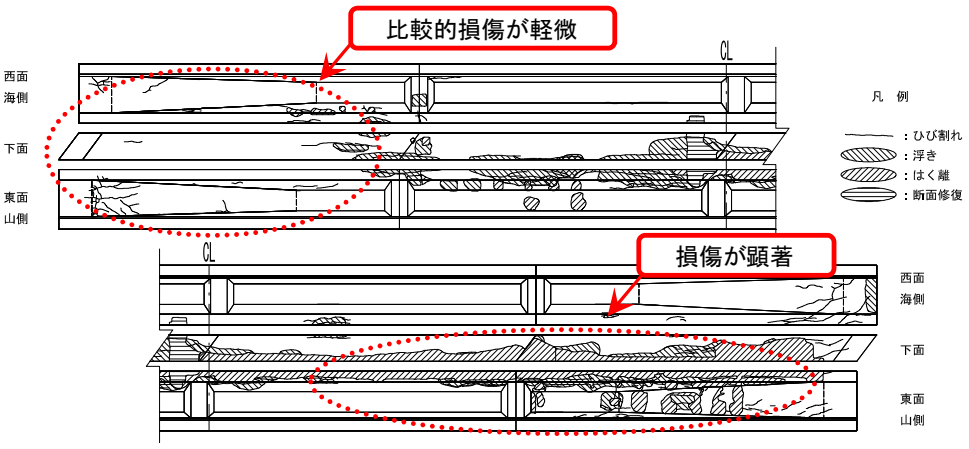
≪研究目的≫
塩害により、コンクリートおよび鋼材に損傷の生じたポストテンションPC桁の耐荷力の確認

≪調査内容≫
・グラウト充填調査
・載荷試験による耐荷力の確認
・その他（材料強度試験，非破壊検査技術の適用性）

・グラウト充填状況は，一部充填不足が確認されたが，比較的良好。
・曲げひび割れ発生荷重から推定した残存プレストレスは，部位により異なり，外観の損傷の程度とプレストレスの低下量やせん断ひび割れ発生荷重にある程度相関が認められた。
・振動特性について，高次振動モードにて損傷を検出できる可能性がある。
・光学的全視野計測にて，面的なひずみ挙動の計測やひび割れとの相関を確認。
・桁端部を切断し，付着のみが寄与している状態で載荷試験を実施し，耐荷力に与える影響を確認予定。



載荷試験方法



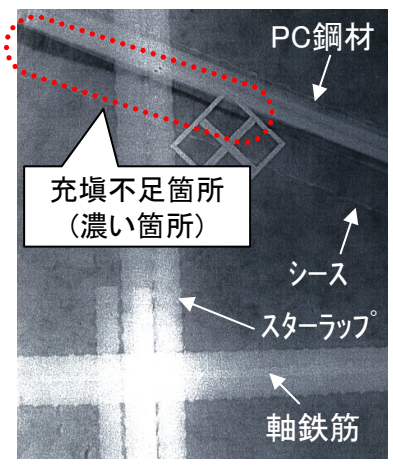
載荷試験前の損傷状況

■橋梁概観・損傷状態

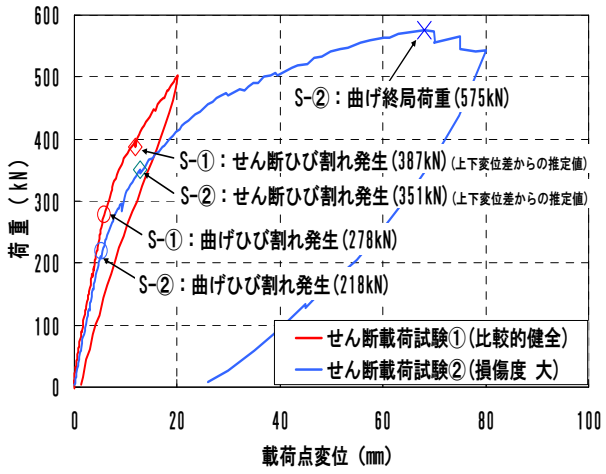




◇塩害による鉄筋腐食により剥落し，全体的に断面損傷
◇詳細調査(H21)により，PC鋼材の素線破断（8本のうち2本）を確認
◇LCCの比較により撤去



X線透過法によるグラウト充填確認



荷重－変位（せん断載荷試験）

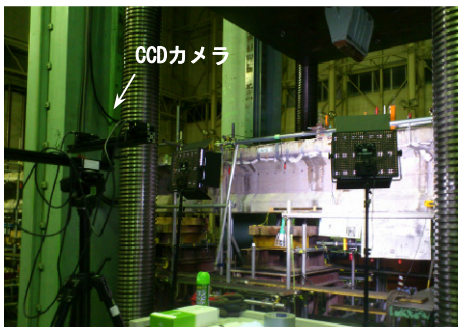
曲げひび割れ発生荷重から推定したプレストレス減少量と表面損傷度

	プレストレス(kN) ※			表面損傷度
	健全（計算値）	実験値	減少率	
曲げ載荷	1568	1188	24%	27%
せん断載荷①	958	906	5%	0%
せん断載荷②	970	738	24%	22%

※プレストレス量は各曲げひび割れ発生位置における推定値



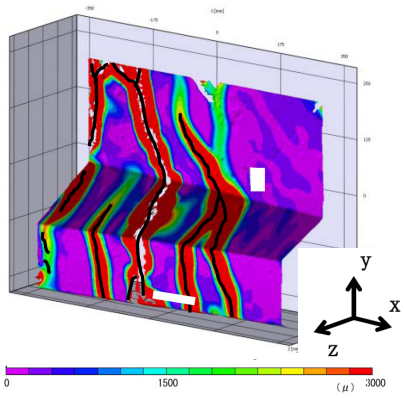
振動計測（砂袋による加振）



光学的全視野計測

振動計測結果（せん断載荷試験①）

モード次数	載荷試験	固有振動数（Hz）	
		常時微動	衝撃加振
1	前	6.694	6.378
	後	6.458	6.353
	比率	**0.95**	**1.00**
2	前	21.301	21.276
	後	21.130	21.047
	比率	**0.99**	**0.99**
3	前	判定不能	57.363
	後	判定不能	52.953
	比率	－	**0.92**



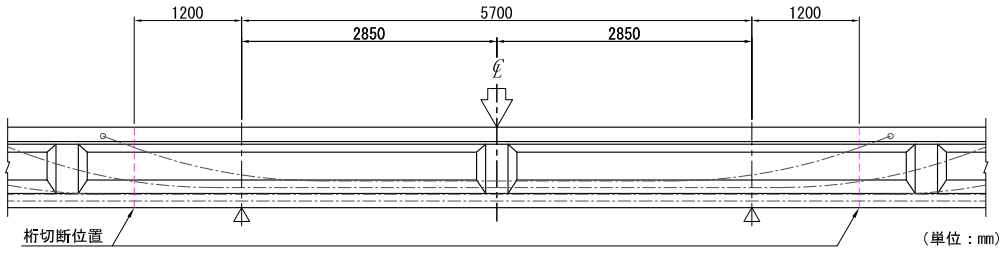
全視野計測によるひずみ分布
（黒線は載荷時のひび割れ）

関連資料　・「塩害を受けたポストテンションPCT桁の曲げせん断耐荷性状に関する載荷試験」松沢他，土木学会全国大会，2012.9.

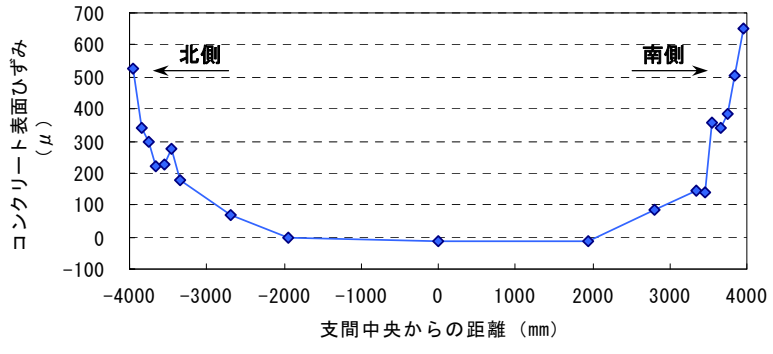
相見川海浜橋（PC鋼材の付着特性に着目した耐荷性能の確認）

■橋梁諸元

橋梁名	相見川（あいみがわ）海浜橋
路線，地名	能登海浜自転車道，石川県羽咋市
橋梁形式	単純ポストテンションPCT桁橋×2連
橋長	44.0m
支間長	19.2m＋23.24m
竣工年	昭和47年(1972年)



載荷試験方法



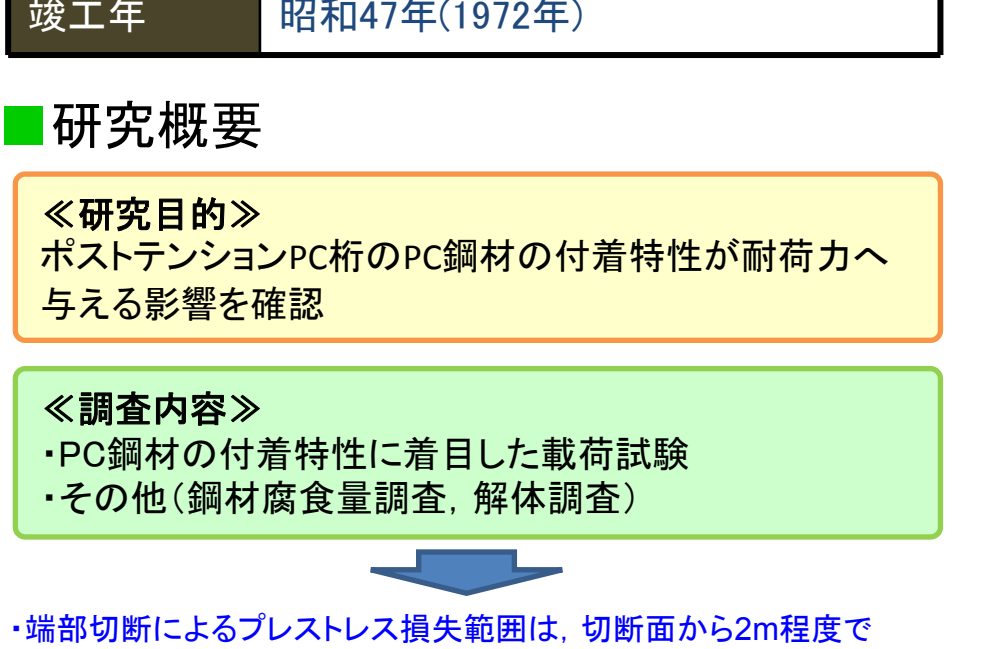
切断直後における桁下縁のコンクリート表面ひずみの挙動

■研究概要

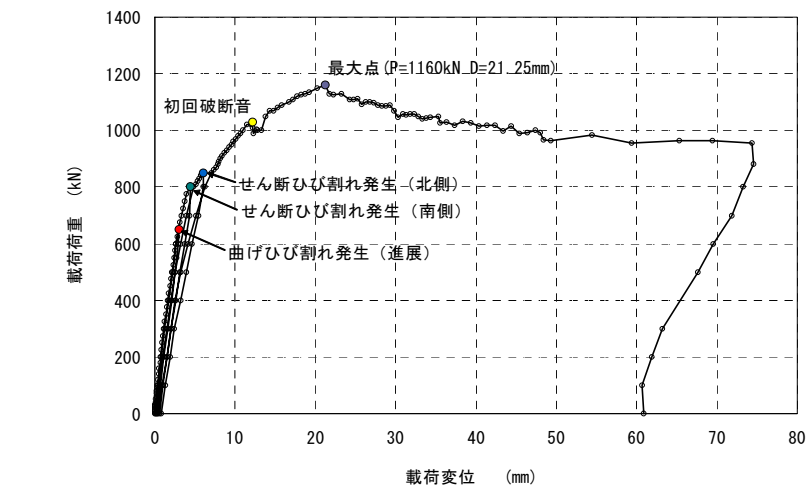
≪研究目的≫
ポストテンションPC桁のPC鋼材の付着特性が耐荷力へ与える影響を確認

≪調査内容≫
・PC鋼材の付着特性に着目した載荷試験
・その他（鋼材腐食量調査，解体調査）

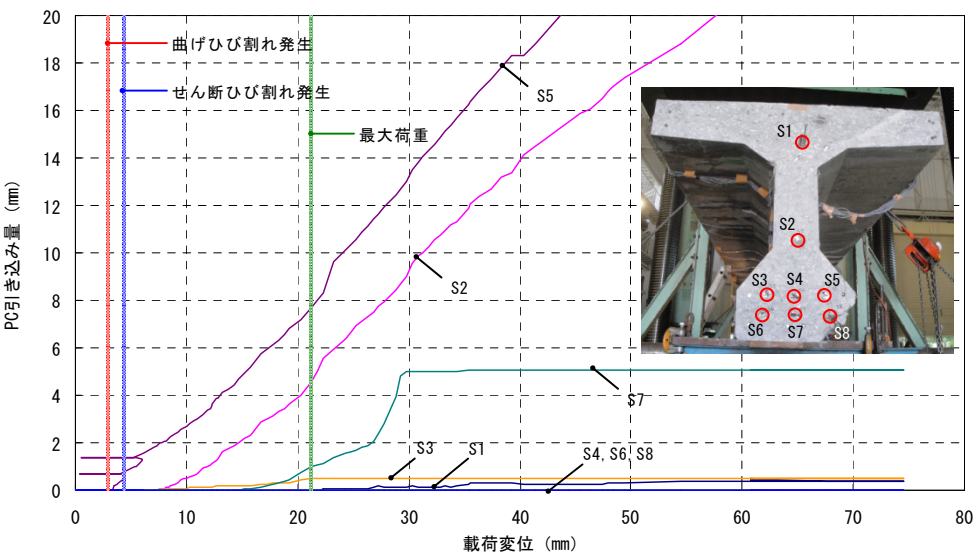
・端部切断によるプレストレス損失範囲は，切断面から2m程度で支間中央部におけるプレストレスの損失は生じない
・曲げひび割れ発生荷重までは桁端部のPC鋼材の引き込みは確認されず，付着によりプレストレスが確保されていた
・耐荷力の概略評価
　曲げひび割れ発生荷重およびせん断ひび割れ発生荷重：
　　推定したプレストレス減少率を鋼材の断面減少率と仮定し評価
　最大荷重：PC鋼材の実断面減少率を用い，引き込みが生じたPC鋼材から算出される曲げ破壊耐力を低減することで評価



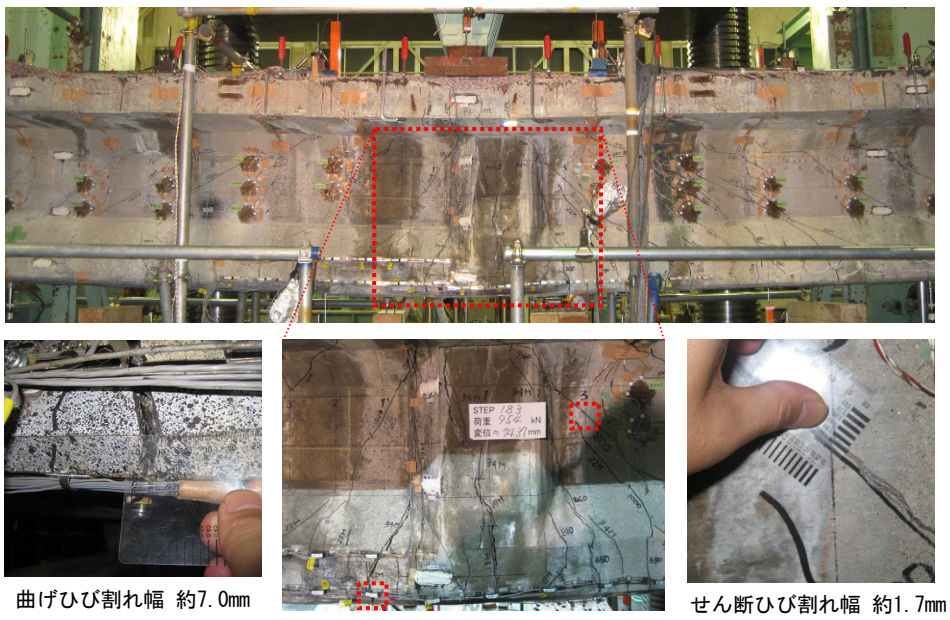
載荷試験時における端部PC鋼材の引き込み量（南側）



荷重－変位曲線（載荷点位置）



端部PC鋼材の引き込み状況（載荷試験前後）



載荷試験状況（最大変位時）

実験値と計算値の比較

	計算値 P_{cal} (kN)		実験値 P_{exp} (kN)	比率※2,※3 (P_{exp} /P_{cal})
	健全時	鋼材減少※1，※3		
曲げひび割れ発生荷重	785	622	650	0.83 (1.05)
せん断ひび割れ発生荷重	812	762	800	0.98 (1.05)
最大荷重（曲げ破壊）	1,733	1,360 <1,131>	1,160	0.67 (0.85) <1.03>

※1 桁切断前の曲げ載荷試験にて確認したプレストレス減少率を鋼材減少率と仮定した計算値
※2（ ）内は鋼材断面減少を仮定した計算値との比率を示す。
※3＜ ＞内は実際に計測したPC鋼材の断面減少率を用い，付着切れしたPC鋼材から算出された曲げ破壊耐力を50%に低減した値
（実断面減少率：PC1～PC4；腐食無，PC5；0.9%，PC6；2.7%，PC7；7.4%，PC8；全素線破断）

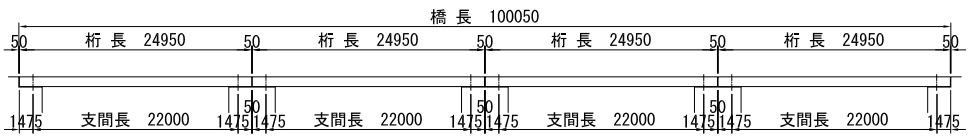
関連資料　・プレストレストコンクリート，pp68-73，55-3，2013

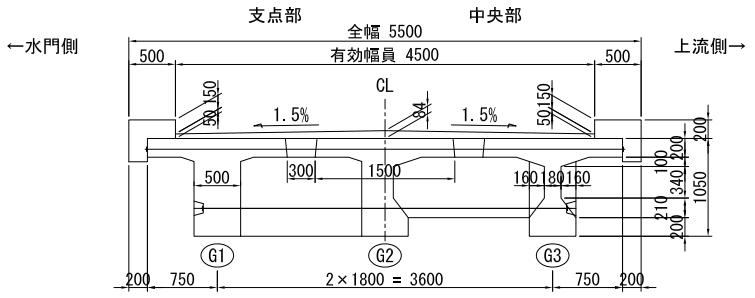
普代水門管理橋（損傷を有する橋梁の全体挙動評価）

■橋梁諸元

橋梁名	普代水門管理橋
地名	岩手県下閉伊（しもへい）郡普代村
橋梁形式	単純ポストテンションPCT桁橋×4連
橋長	100.05m
支間長	22.0m×4
竣工年	昭和59年(1984年) 27年経過

■一般図





■研究概要

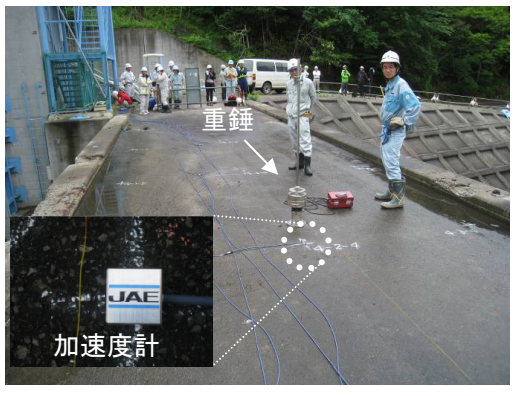
≪研究目的≫
津波により被災し，ひび割れの生じたPC桁の振動特性の変化を確認

≪調査内容≫
・重錘落下法による振動試験
・その他（材料強度試験，非破壊検査技術の適用性）

各径間の各主桁上にて重錘落下法により，振動特性を確認

・健全時の解析値（梁モデル）に対して，第3径間にて2～3割程度，第4径間にて1～2割程度の振動数の低下を確認
・第3径間の曲げ2次の低下度が曲げ1次および3次に比べ小さいのは，損傷位置が振動モードの節に該当するためと推測
・第4径間において，高次振動モードにて振動数の低下が顕著
・各主桁上の振動数にて若干差異が確認され，概ね残留曲率の大小関係との相関を確認


重錘落下法による加振



計器設置状況

■橋梁概観・損傷状態

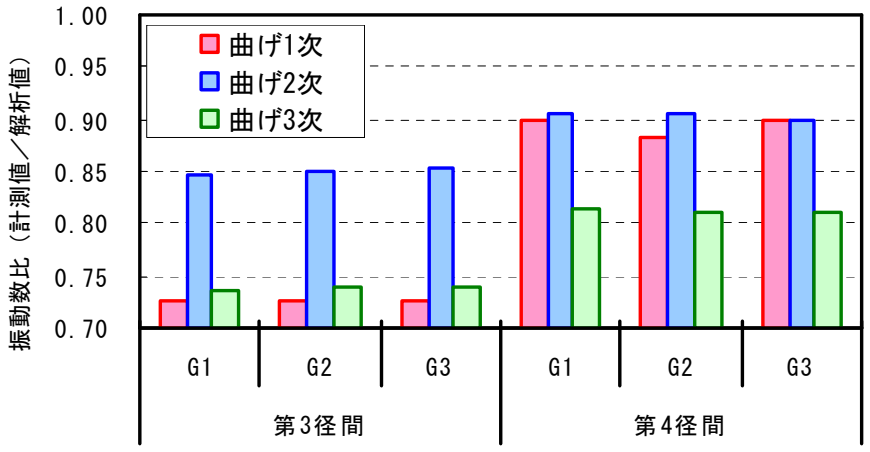






3径間目の損傷状況

◇津波の越流により，4径間のうち2径間が落橋
◇落橋していない径間のうち，3径間目の損傷が顕著



健全時の解析値に対する固有振動数比（振動モード：曲げ）【速報値】
（解析値（梁モデル）：1次 4.22Hz，2次 16.88Hz，3次 37.98Hz）

【CAESARメンテナンス技術交流会メンバーへのフィールド提供】



振動計測（かけや打撃による加振）
（愛媛大学）



弾性波速度測定（橋軸方向）
（(社) iTECS技術協会）


光波測量器によるひび割れ計測
（関西工事測量（株））


デジタルカメラによるひび割れ計測
（首都高技術（株））

関連資料 ・「MEMS 型加速度計によるプレストレスコンクリート橋の振動測定」富岡他，土木学会全国大会，2013.9

中川橋側道橋（橋軸方向ひび割れが生じたPC撤去桁の載荷試験）

■橋梁概要

橋梁名	中川橋側道（なかがわばしそくどう）橋
路線，地名	国道8号，富山県高岡市
橋梁形式	単純PCプレテン床版橋（3径間）
橋長	33.54m
支間長	9.97m+9.97m+13.5m
竣工年	昭和52年(1977年)

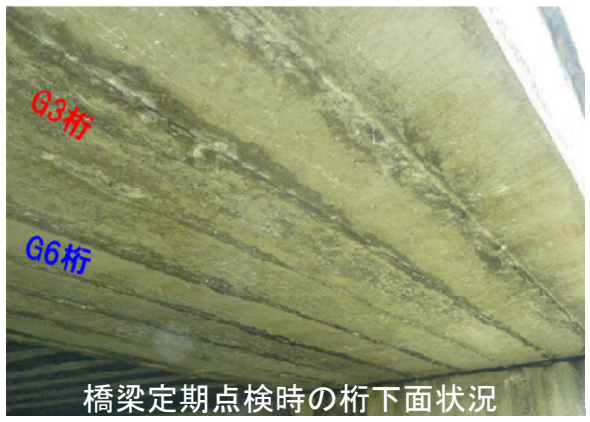
■橋梁概観



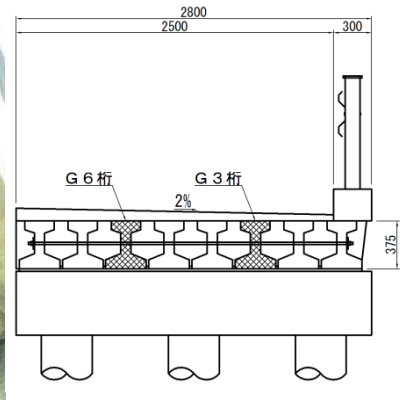
■研究概要

≪研究目的≫
桁下面に橋軸方向ひび割れが生じたＰＣ撤去桁にて、ひび割れ性状の違いによる耐荷性能の違いを確認

≪調査内容≫
- ひび割れ性状の異なる２本の撤去桁を活用した曲げ載荷試験
- 解体調査および材料強度試験

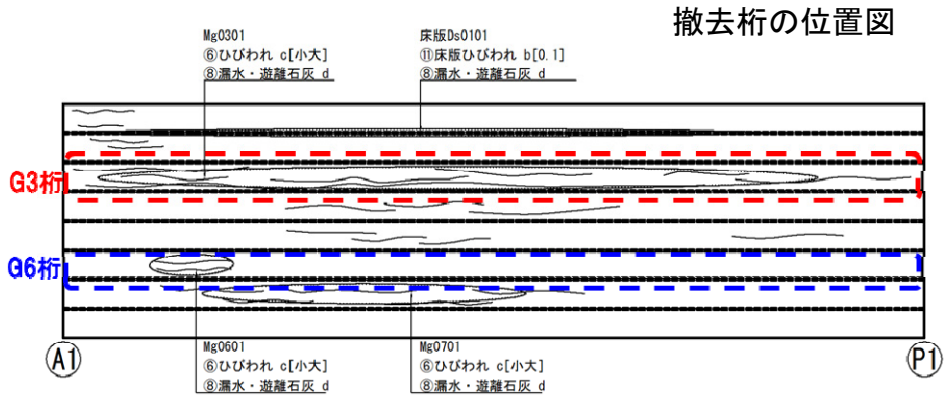


橋梁定期点検時の桁下面状況

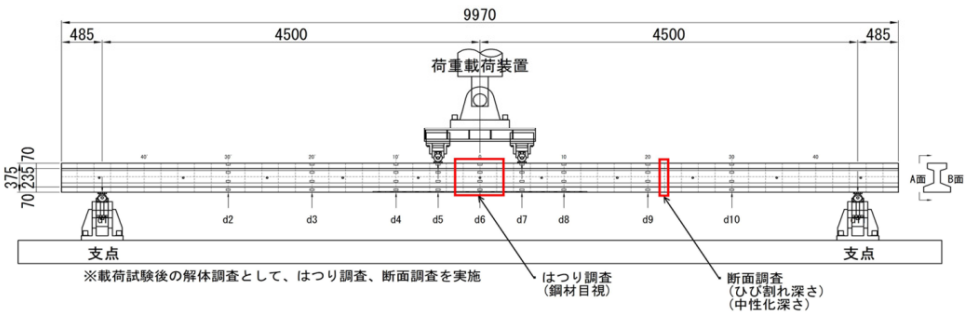


撤去桁の位置図

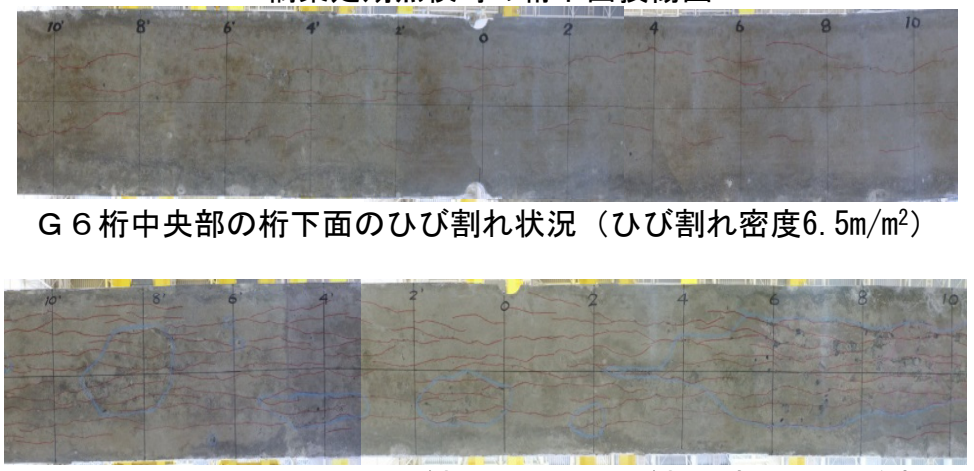
- 橋軸方向ひび割れの深さおよび中性化深さはPC鋼材まで達していなかった。
- PC鋼材の付着切れや鋼材破断は、認められなかった。
- 今回の橋軸方向ひび割れ程度の違いでは、耐力には違いは認められず、低下も認められなかった。



橋梁定期点検時の桁下面損傷図

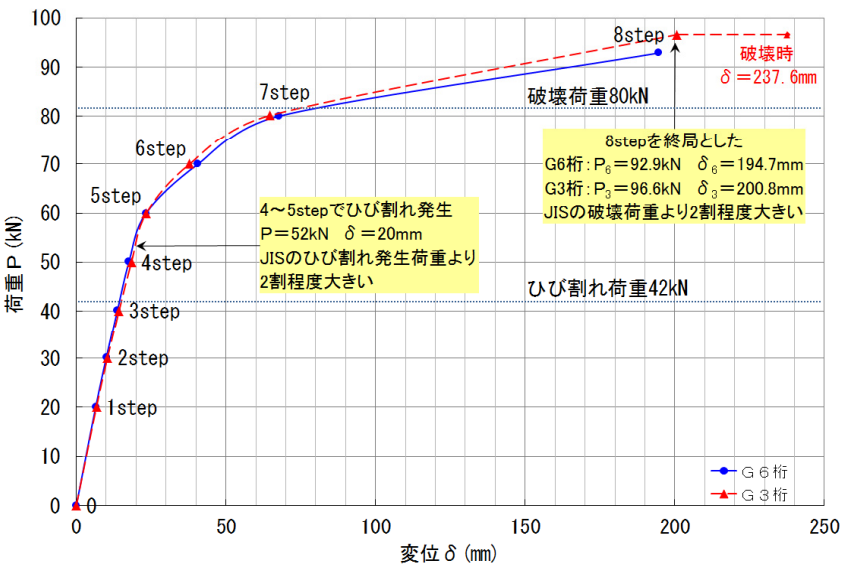


曲げ載荷試験の概要および解体調査位置

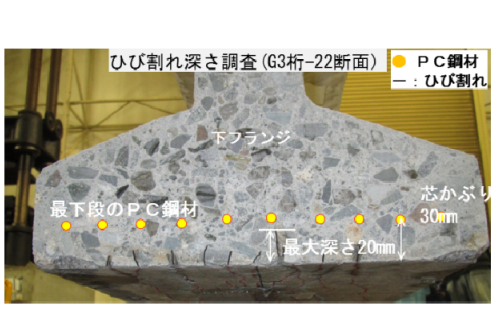


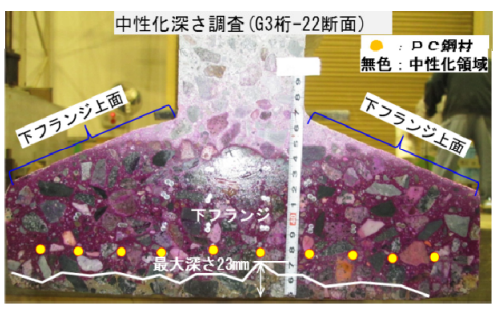
Ｇ６桁中央部の桁下面のひび割れ状況（ひび割れ密度6.5m/m²）

Ｇ３桁中央部の桁下面のひび割れ状況（ひび割れ密度25.3m/m²）



曲げ載荷試験結果（荷重-変位）





桁切断面状況
ひび割れ深さは鋼材よりも手前、中性化はひび割れ密な箇所で進行
鋼材の付着切れや破断は認められない

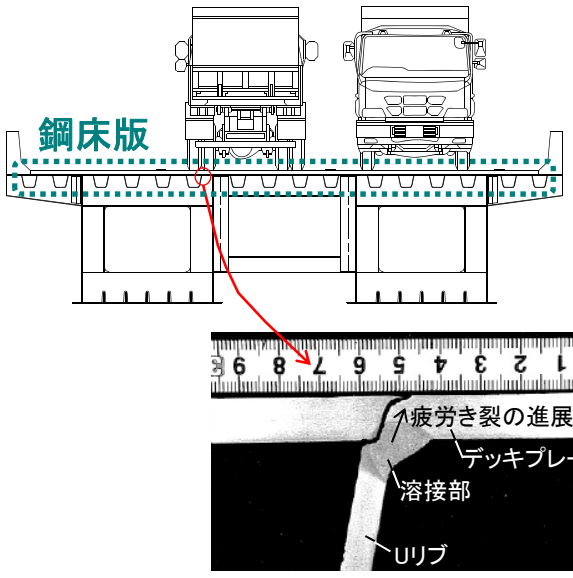
関連資料・「橋軸方向ひび割れが生じたプレストレストコンクリート撤去桁の載荷試験」第22回PCシンポジウム，2013.10.

鋼床版疲労き裂の非破壊調査法の開発

■背景

重交通の鋼床版橋に**目視困難な部位の疲労き裂**の発生。進展すると、路面陥没など**第三者被害**につながるおそれ

・安全に管理し、適切な対策の実施には、き裂を早期に確実に見つけることが重要
・**信頼性と作業性**を備えた非破壊技術は未確立



鋼床版橋の断面構成とき裂の模式図


路面陥没の事例



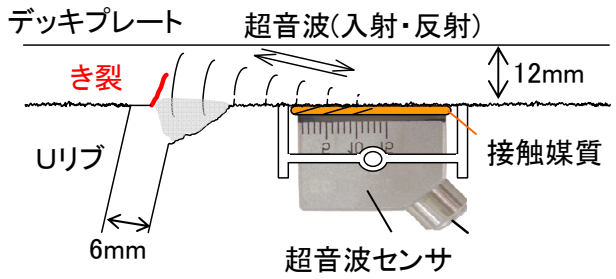
鋼床版表面のき裂

■研究概要

○非破壊調査法の開発

・**塗装の影響の補正**が可能であり、**初期段階の小さなき裂の検出**が可能な技術を開発

菱電湘南エレクトロニクス(株)および三菱電機(株)と共同研究(平成18年度～19年度)を実施



超音波センサによるき裂検出模式図


超音波センサ

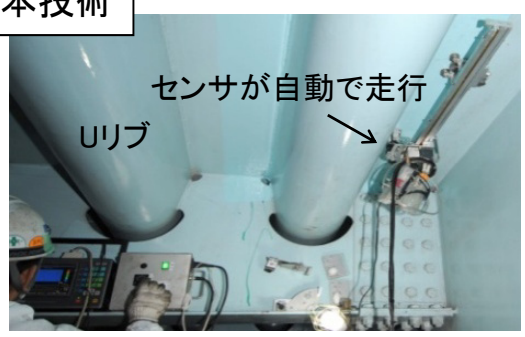
従来技術との比較

	従来技術(70度斜角探触子)	本技術
信頼性	・塗装の影響の補正が**困難** ・技術者の**技量差の影響あり**	・塗装の影響の補正が**可能** ・技量差による**き裂の誤検出を排除**
精度	深さ**6mm**以上のき裂の有無を検出	深さ**3mm**以上のき裂の有無を検出
作業性	**手動**探傷 (作業性・信頼性に課題あり) 溶接長**最大約120m/日**	**自動**探傷 (探傷結果を位置情報とともに自動記録) 溶接長**最大約80m/日**

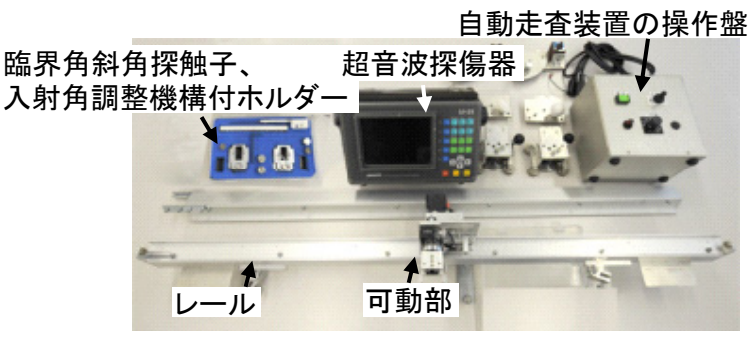
従来技術



本技術



探傷状況(従来技術と本技術)

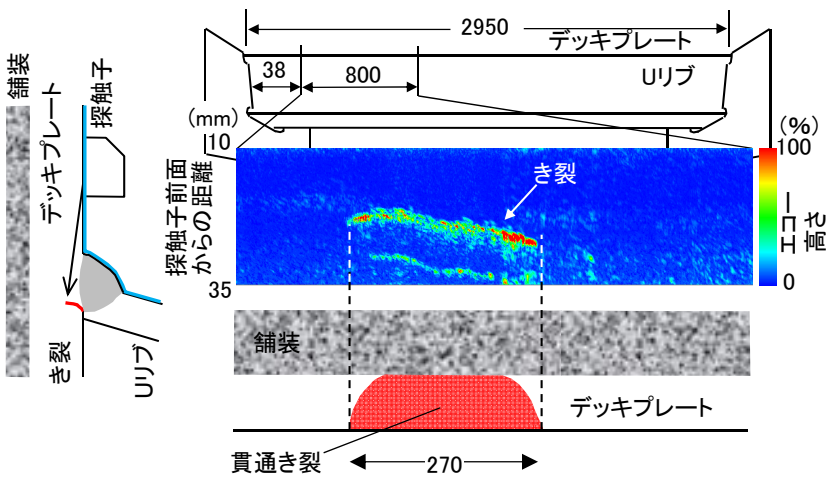


開発した自動探傷装置

■現場での適用実績(試行を除く)

実橋名	建設年次	走査方式	調査長(m)	き裂検出の有無
SK橋	H4	手動+自動	422.0	有
K橋	S53	自動	62.4	有
SW橋(下り側)	S53	手動+自動	28.0	有
ST橋	S54	手動+自動	132.0	有
M橋(山側)	S57	手動+自動	121.0	有
T橋	S54	自動	193.0	有※
I橋	S55	自動	25.3	有※
SJ橋	S56	自動	109.5	無
M橋(海側)	H1	自動	465.5	有
SW橋(上り側)	S53	自動	28.0	無
NK橋	H12	自動	155.6	無

※ デッキプレート貫通き裂の有無は、舗装を剥がして磁粉探傷試験(MT)により確認
注) 点検、詳細調査により、き裂発生が報告されている、もしくは疑われている鋼床版橋を対象として調査範囲を限定して実施



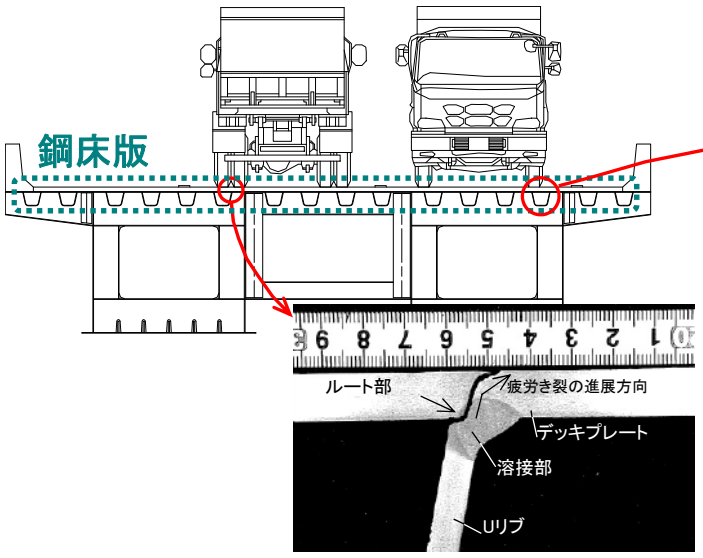
実橋の探傷結果の例

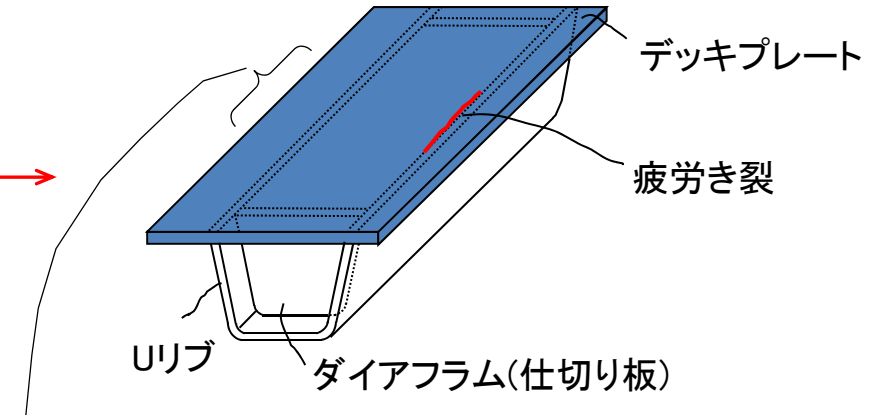
関連資料 ・土研資料, 第4138号, 鋼床版デッキプレート進展き裂の調査のための超音波探傷マニュアル(案), 2009.3.
・共同研究報告書, 第452号, 鋼床版デッキプレート進展き裂の調査のための超音波探傷法に関する共同研究報告書, 2013.5.

超音波を利用した鋼床版Uリブ内滞水調査法の開発

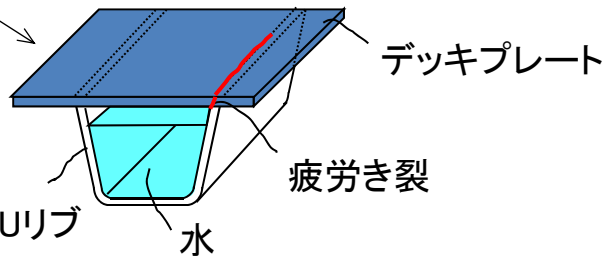
■背景

○ 重交通路線の鋼床版橋において、U型リブの溶接部からデッキプレートに進展するき裂の報告事例あり。
○ 目視では確認困難な部位に発生しており、緊急対応の必要な貫通き裂を発見するための調査技術が必要。
○ き裂がデッキ表面を貫通した場合に、路面から雨水がUリブ内に浸入・滞水することに着目。
なお、貫通き裂の発生している鋼床版については、将来的に貫通き裂となり得るデッキ進展き裂の発生状況の確認も必要。





※現場架設のブロック毎に密閉構造とするため、ダイアフラム(仕切り板)が設置。路面から貫通き裂を通してUリブ内に浸入した雨水がダイアフラム間に滞水。





デッキ貫通き裂から浸入したUリブ内堆積物



デッキ貫通き裂から浸入した雨水がUリブの疲労き裂から漏水

Uリブ内滞水調査法(超音波探傷技術)
き裂の進展を間接的に把握する技術として、新しい調査法を提案

■研究概要

○非破壊調査法の開発

・Uリブ内滞水を調査することにより間接的に貫通き裂の発生を検出。

・Uリブ内に滞水した雨水の有無によってUリブを伝わる超音波が弱まる(減衰)することを利用した調査方法を提案
・Uリブの塗装を除去せずに高い性能で検出できる方法を提案

数mm程度 ※以上の深さの滞水を確実に検出

菱電湘南エレクトロニクス(株)および三菱電機(株)と共同研究(平成23年度～24年度)を実施
(※ 現在、詳細を検討中)

○現場での適用性の調査

・調査時間は、1箇所当たり約5秒。
・滞水の有無の調査と同時に深さの計測が可能(調査限界水深約数mm程度※)。

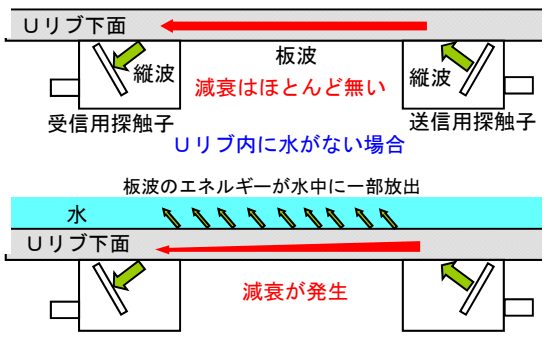
・超音波パルス反射法による厚さ測定方法(多重エコー方式等)では、Uリブ表面の塗装がエコーに及ぼす影響により誤検出の可能性あり。
・赤外線サーモグラフィ法は、日照条件・調査時刻、水の深さ、被調査物の表面汚れや粗さ、放射率、放射角度等の影響により、計測の制約や検出性能に限界あり。



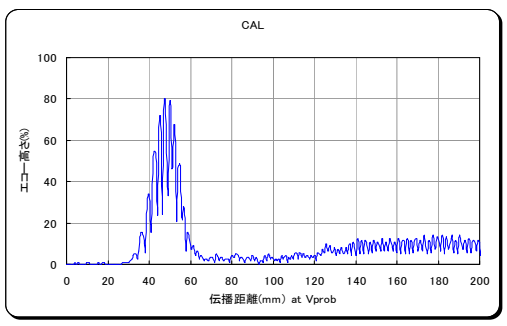
開発した超音波装置



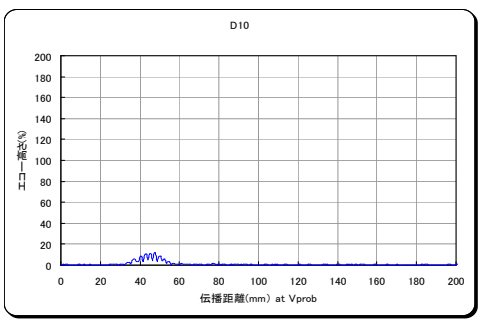
現場における適用事例



<板波透過法の原理>
対向させたセンサ(探触子)の間のUリブ内に超音波(板波)を伝搬させ、超音波の振幅の大きさの変化により裏面の滞水を判定する。背面が水の場合、板波の振幅の大きさは、探触子間隔に比例して著しく減衰する。



Uリブ内水なし



Uリブ内水あり

Uリブ底面を透過させた超音波の振幅の変化によりUリブ内滞水を調査

ポストテンションPC橋のグラウト充塡調査

■橋梁諸元

橋梁名	佐野橋	能生（のう）大橋	羽咋川（はくいがわ） 海浜橋	T橋
路線 地名	特15号線 兵庫県丹波市	国道8号 新潟県糸井川市	能登海浜自転車道線 石川県羽咋市	北海道
橋梁形式	単純T桁橋	単純T桁橋	単純T桁橋	PC中空床版橋
橋長	117.7m	136.5m	90.0m	28.7m
支間長	5@22.8m	5@27.3m	3@29.2m	28.7m
竣工年	昭和40年(1965年)	昭和41年(1966年)	昭和47年(1972年)	昭和53年(1978年)
橋梁外観				

■研究概要

≪研究目的≫
部材の一体化、鋼材の防錆に重要な役割を果たすグラウト充塡の実態を確認

≪調査内容≫
ポストテンションPC橋のグラウト充塡状況の調査

ポステンPC桁のグラウトが充塡されていない箇所の鋼材が腐食している事例が報告されている。この現状を把握するため桁切断面よりグラウト充塡状況を調査した。

・調査箇所の90%はグラウトの充塡が良好
・上縁定着ケーブルでウェブ内に充塡不足が見られた。
・充塡不足箇所の鋼材腐食は見られなかった。



桁切断面の調査状況

橋梁	佐野橋	能生大橋	羽咋（はくい）川海浜橋	T橋
充塡状況一例	 充塡不足（ウェブ）	 充塡不足（ウェブ）	 充塡不足（ウェブ）	 充塡不足
充塡不足 調査箇所	20/342 (5.8%)	2/64 (3.1%)	9/145 (6.2%)	1/16 (6.3%)

調査結果一覧

関連資料　・第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.443-448，2012.10.

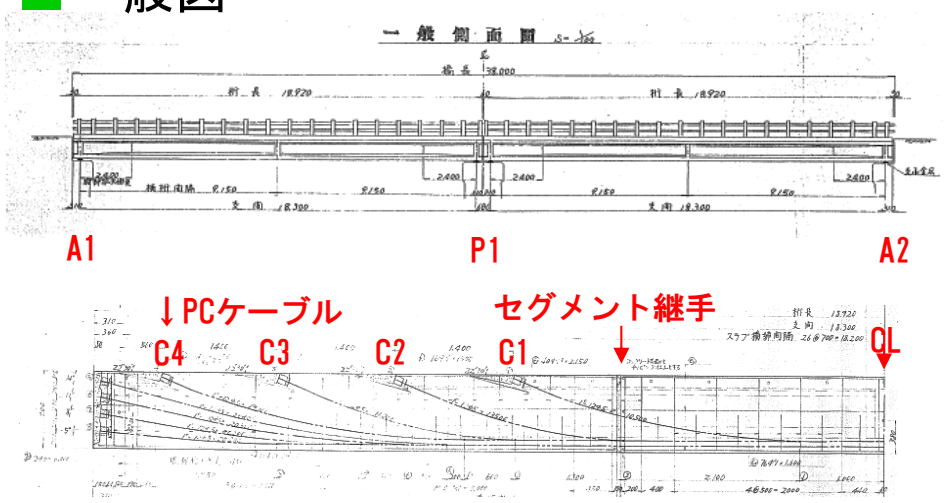
※（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会との協力協定に基づき実施

ポストテンションPC橋のグラウト充塡調査（植苗橋）

■橋梁諸元

橋梁名	植苗橋
路線，地名	植苗停車場道線， 北海道苫小牧市
橋梁形式	2径間単純T桁橋
橋長	38.0m
支間長	18.3m＋18.3m
竣工年	昭和36年(1961年)

■一般図



■研究概要

≪研究目的≫

特徴的なひび割れと遊離石灰の外観を有する橋梁上部構造のグラウト充塡状況の確認

≪調査内容≫

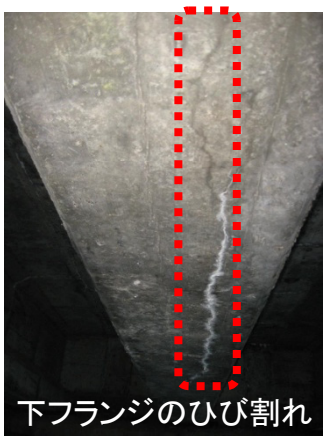
土木研究所に搬入した第1径間G2桁及びG5桁により

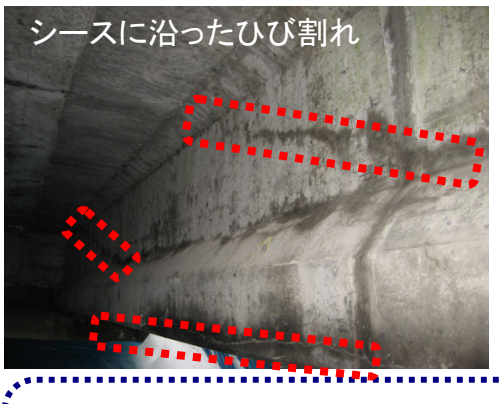
・非破壊検査によるグラウト充塡調査
　※CAESARメンテナンス技術交流会会員の協力により実施

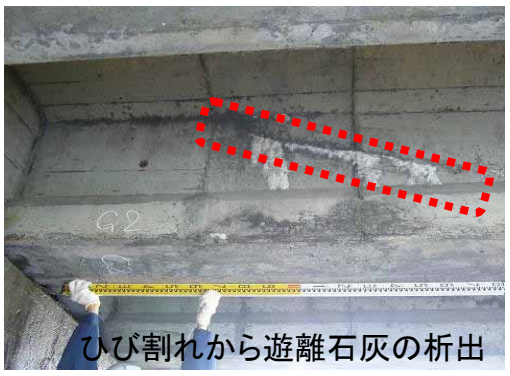
・切断，コア採取によるグラウト充塡調査
　※(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会との協力協定に基づき実施

■橋梁概観・損傷状態

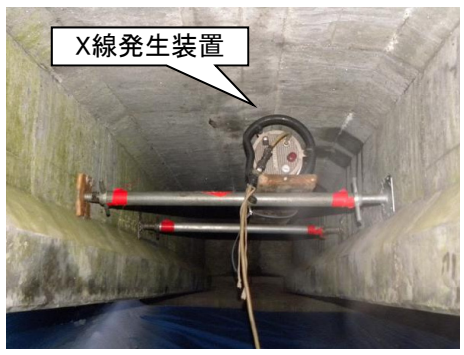



下フランジのひび割れ

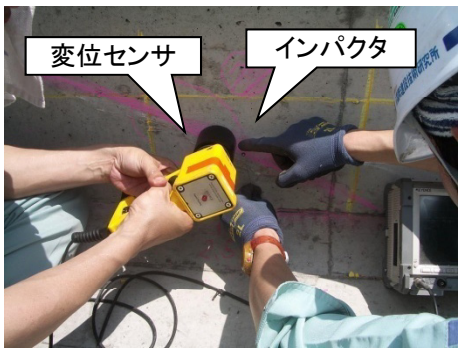

シースに沿ったひび割れ


ひび割れから遊離石灰の析出

◇ウェブにシースに沿ったひび割れと遊離石灰が発生
◇下フランジ下面に軸方向ひび割れが発生
◇一部鉄筋が露出・腐食
◇幅員拡幅に伴う架替えにより撤去



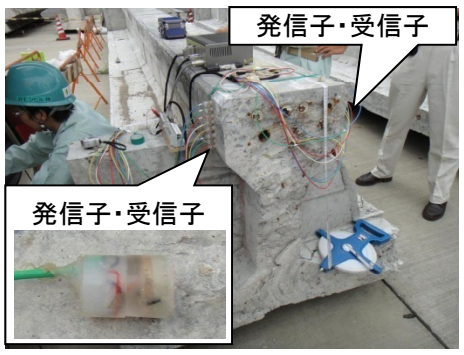
X線法（現地計測）



衝撃弾性波法（インパクトエコー）



広帯域超音波法

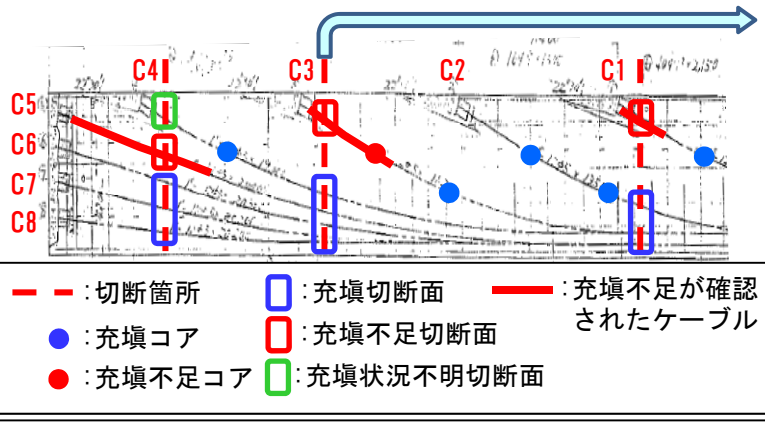


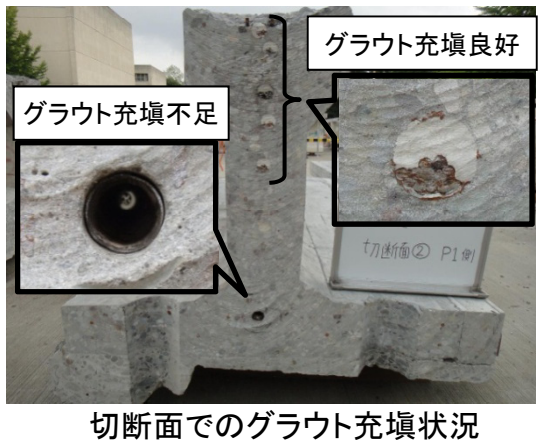
音響トモグラフィ法

○調査結果の例
・上縁定着部付近に一部グラウト充塡不足が存在


乾式ワイヤーソーによる切断


乾式コア採取





切断面でのグラウト充塡状況
（桁は天地逆に設置）

関連資料　・「グラウト充塡状況が既設PC橋の外観変状に及ぼす影響」第22回PCシンポジウム，2013.10.

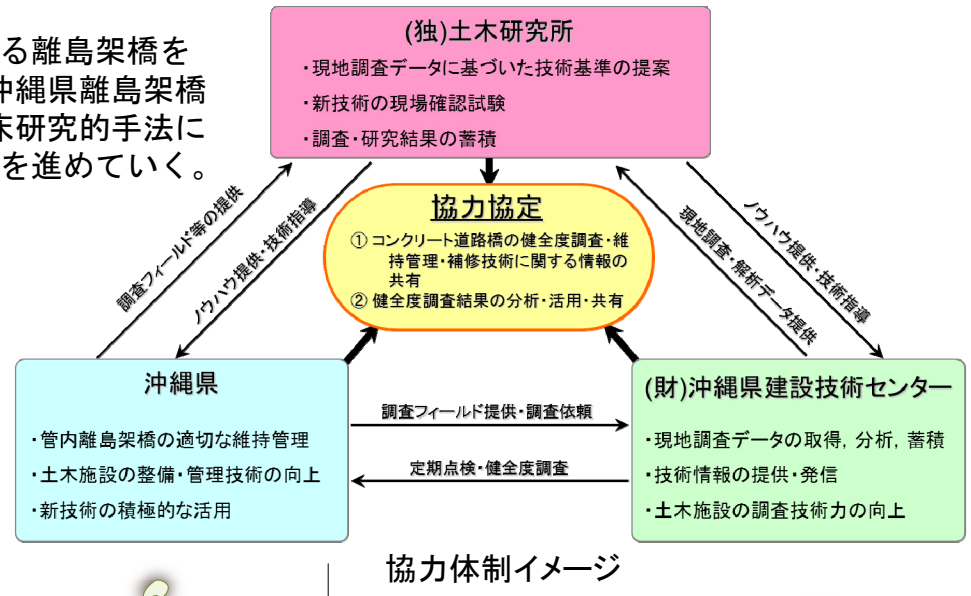
沖縄県離島架橋での臨床研究（新設橋）

■研究目的・概要

非常に厳しい自然環境である沖縄において、沖縄県が整備・管理する離島架橋を100年余供用するための維持管理手法・技術基準の確立を目指し、「沖縄県離島架橋100年耐久性検証プロジェクト」を開始。実際の離島架橋を用い、臨床研究的手法により研究を進めている。これにより、塩害橋の予防診断手法の高度化を進めていく。



協力協定締結式の様子



協力体制イメージ

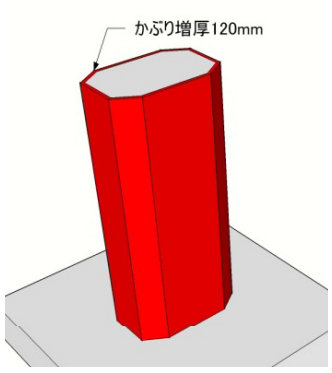
■新設橋を用いた臨床研究

材料物性の変化、コンクリート中への塩分の浸透、鋼材の腐食などを長期的に計測できるように、新設橋の建設時に計測環境を整備。

■伊良部大橋



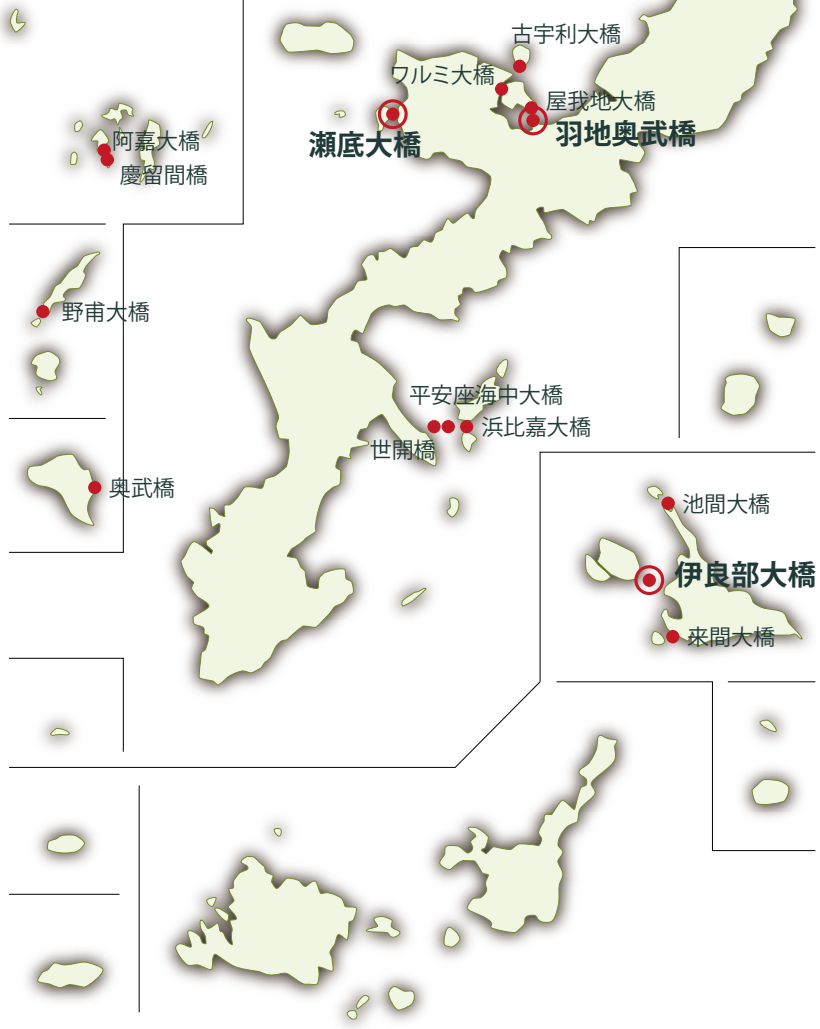
現在建設中の伊良部大橋



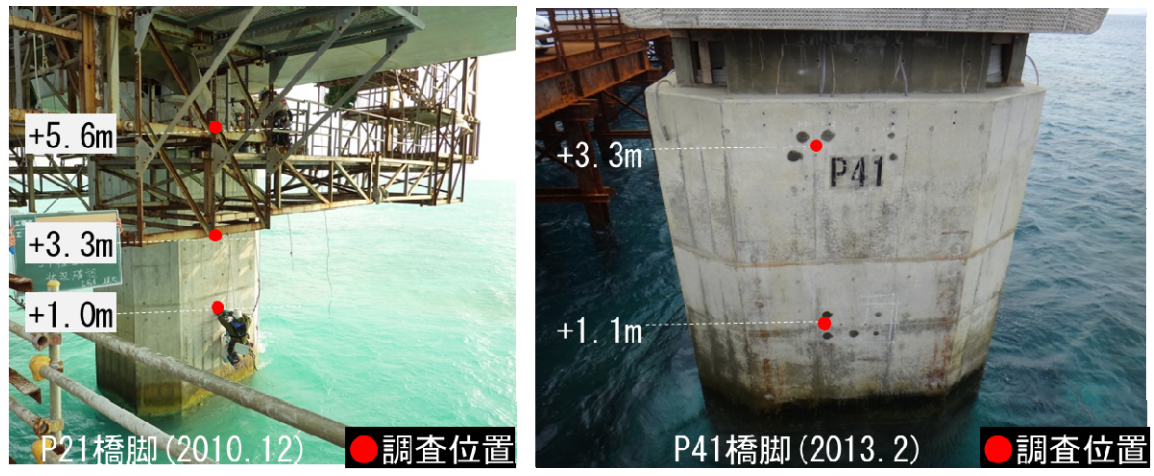
将来のサンプリング用
にかぶりを厚くした橋脚

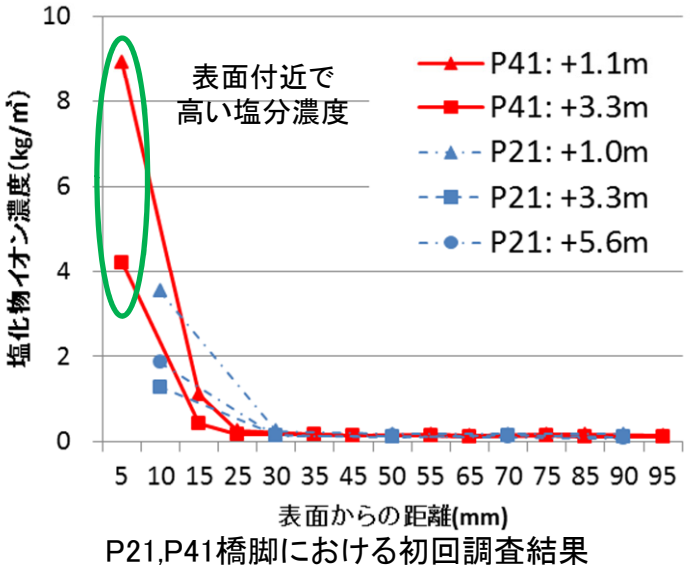


現地暴露供試体(181体)
実際の下部工に使ったコンクリートと
同じ材料・同じ配合



沖縄県に架設された（架設中の）離島架橋





P21,P41橋脚における初回調査結果

関連資料　・土木技術資料，2011.2　・土木研究所資料，　第4235号，2012.8

沖縄県離島架橋での臨床研究（既設橋）

■既設橋を用いた臨床研究

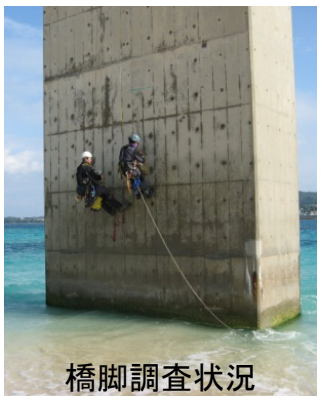
既設橋梁の劣化状態などに関するデータの集積と分析

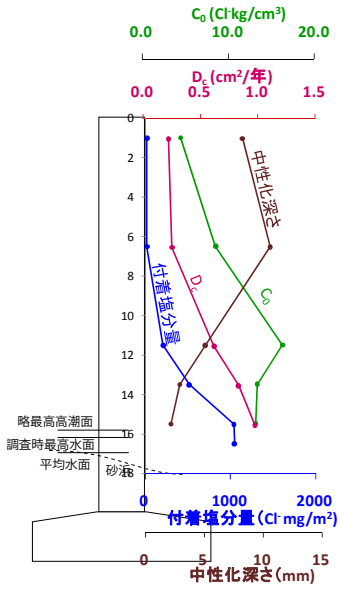
■瀬底大橋

既設橋脚内の塩分濃度などの高さ方向等の分布、鋼材の腐食状況などを調査



瀬底大橋

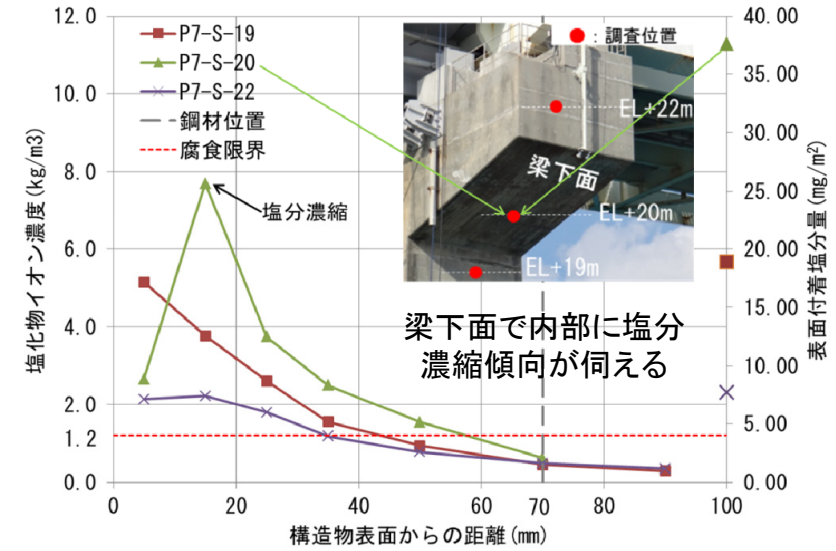




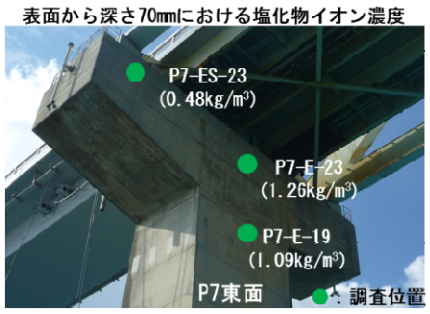
橋脚の塩分分布



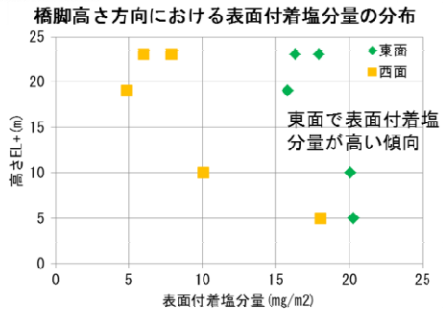
橋脚高さ方向に付着塩分量は低下するが中性化深さは進行する傾向
H･W･L付近では鋼材腐食にともなう広範囲のコンクリート表面のうきが認められた



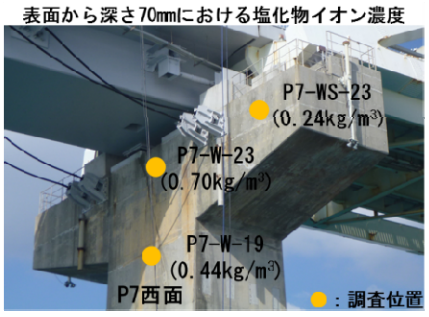
表面から深さ70mmにおける塩化物イオン濃度



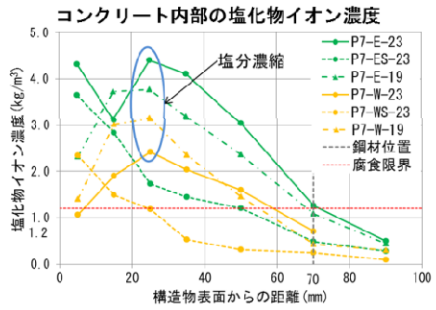
橋脚高さ方向における表面付着塩分量の分布



表面から深さ70mmにおける塩化物イオン濃度



コンクリート内部の塩化物イオン濃度



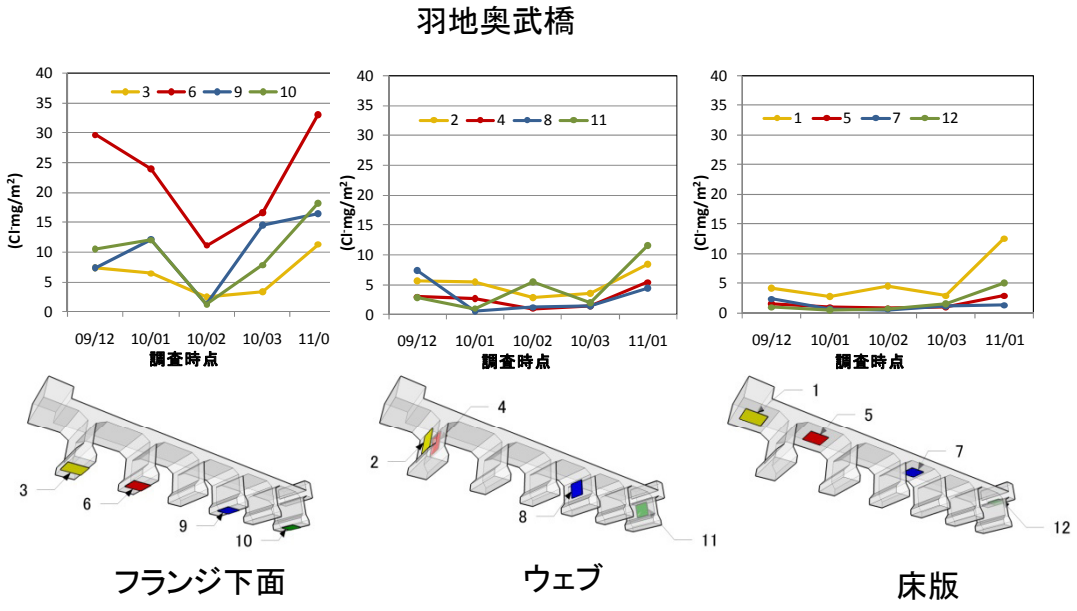
橋脚梁部においては、調査箇所における表面付着塩分量および内部塩分の分布に違いが認められた

■羽地奥武橋ほか

表面に付着した塩分の橋梁部位毎の違いを調査



羽地奥武橋

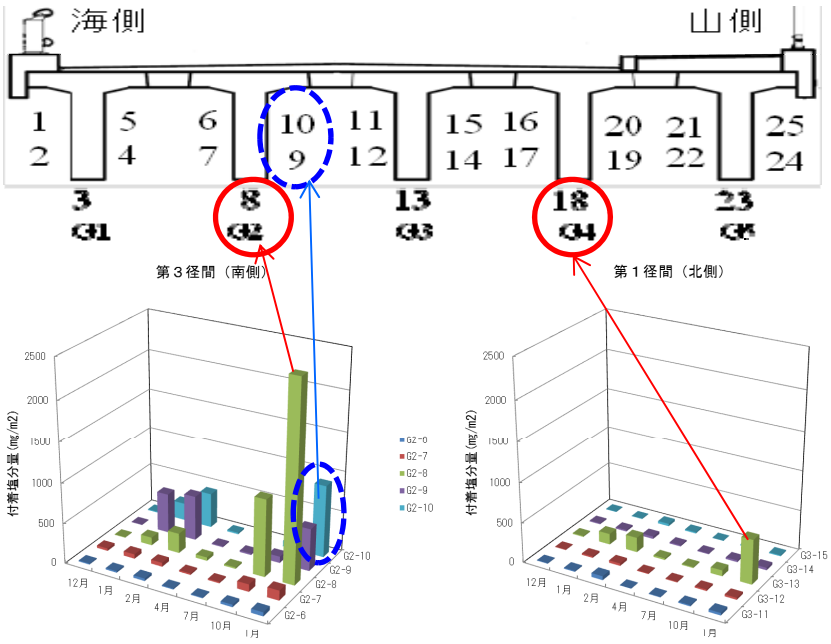


付着塩分量は橋梁部位毎で違いが認められた

■結橋

調査時期および調査箇所における付着塩分量の違いに着目した
定期的に表面に付着した塩分量を調査





付着塩分は時期により増減し、部位毎にも違いが認められた

関連資料　･「厳しい環境下の海中橋脚における塩害調査」花井他，材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度に関するシンポジウム，2012.7

アルカリ骨材反応で劣化した橋梁の調査

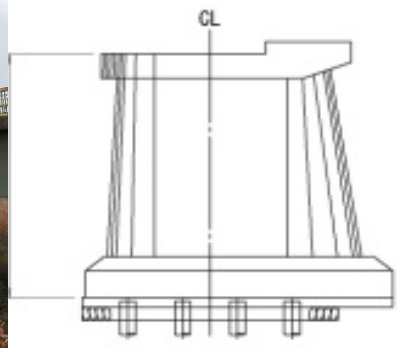
■橋梁諸元

橋梁名	K橋
橋梁形式	単純鋼合成箱桁橋(5径間)
橋長	258m
支間長	51.6m×5
竣工年	昭和39年(1964年)

■橋梁概観・損傷状態



橋梁全景



P1橋脚



橋脚はり部(歩道橋側)



アルカリ骨材反応によるゲルの滲出

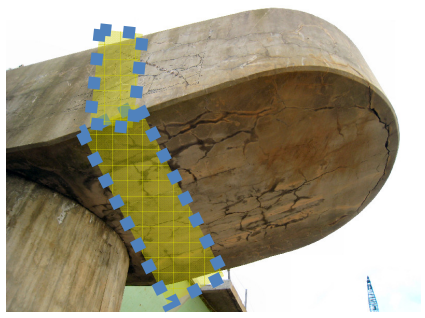
■研究概要

≪研究目的≫
ASR劣化の程度を弾性波(超音波)伝播速度の測定で把握可能か検討

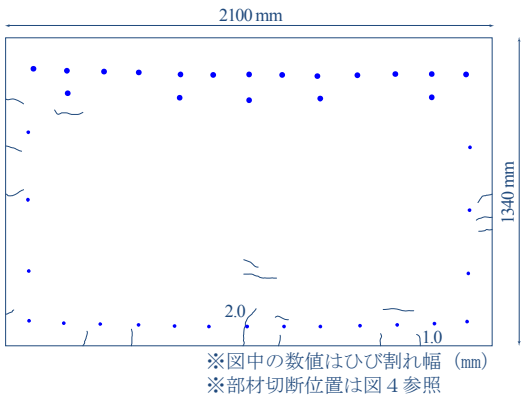
≪調査内容≫
弾性波伝播速度測定
ひび割れが顕著な部位のはつり調査

・表面のひび割れ幅は大きいが，連続したひび割れは概ねかぶりの範囲にとどまった。
・ただし、内部も弾性波伝播速度が低下することを確認
・ひび割れ幅が特に大きい部位は配筋のディティールが適切でなかった

厚さ300mmの
部位を切り出し

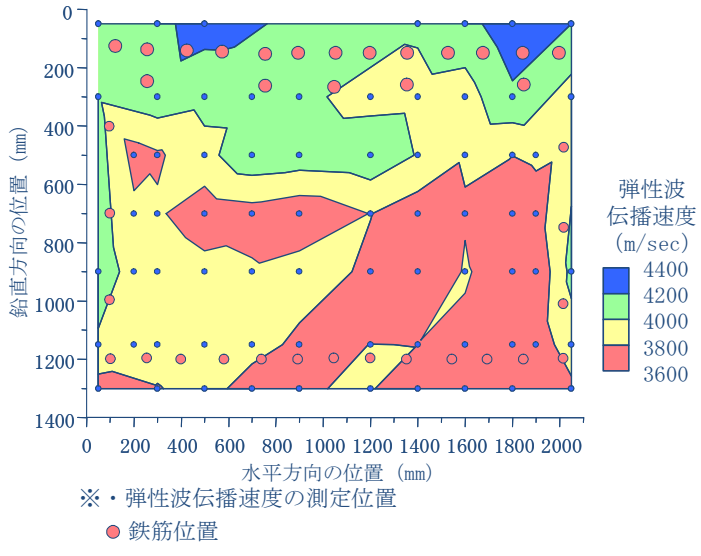






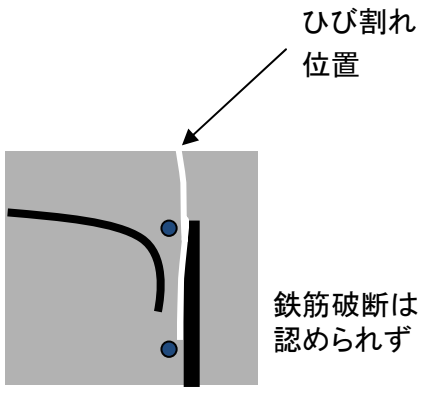
※図中の数値はひび割れ幅 (mm)
※部材切断位置は図４参照

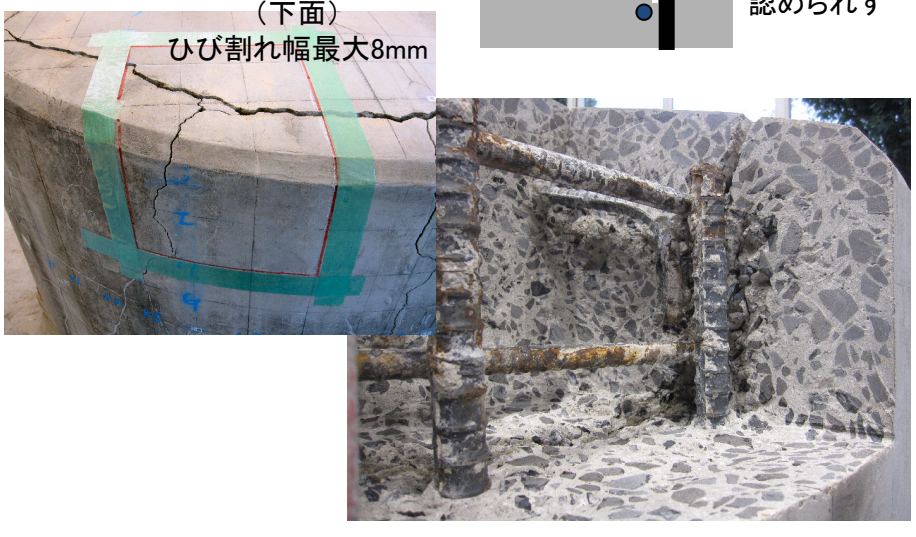
ひび割れ図



※・弾性波伝播速度の測定位置
● 鉄筋位置

弾性波伝播速度の分布





ひび割れが顕著な部位のはつり調査

関連資料 ・「ASRで劣化した実橋部材を用いた超音波法の適用性に関する検討」古賀他，日本非破壊検査協会平成23年度春期講演大会講演概要集，2011.5.

RC床版の舗装損傷先行型疲労損傷の調査

■橋梁諸元

橋梁名	S橋
路線，地名	国道4号，福島県白河市
橋梁形式	単純合成鈑桁橋
橋長	160m
支間長	5@31.5m
竣工年	昭和31年(1956年)

■研究概要

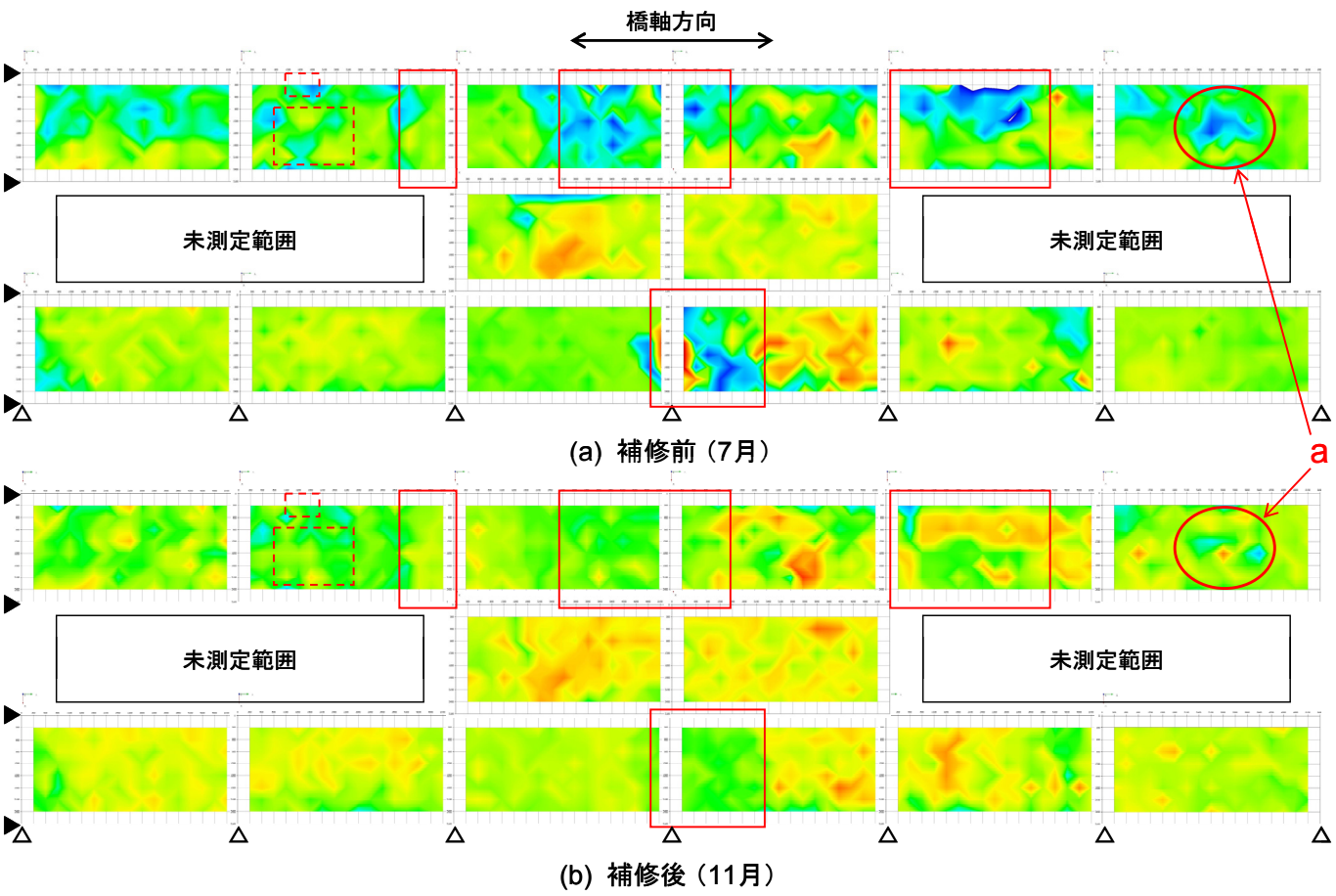
≪研究目的≫
RC床版の疲労損傷が局部的に発生する事例の原因を調査する。

≪調査内容≫
床版下面の状況と橋面アスファルト舗装の経過観察
撤去部材を用いた材料諸元や水分の浸透性に関する調査

床版と舗装の経過観察の結果
・舗装のひび割れ箇所で，床版下面の漏水が確認された
・舗装全面打換え後，RC床版の含水状態が改善された
撤去部材の調査は継続調査中

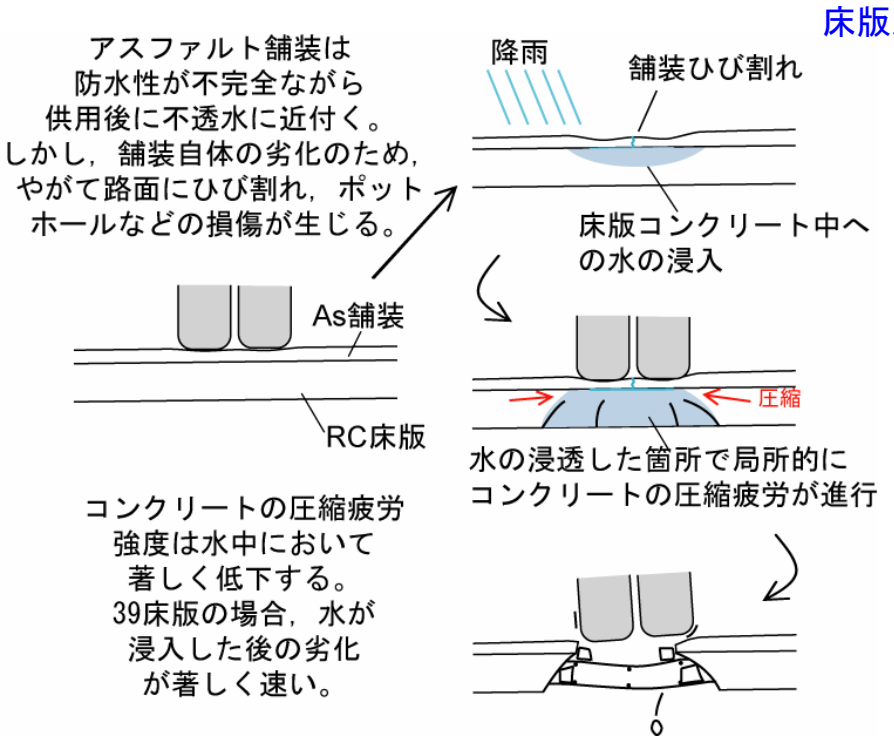
■橋梁概観 （補修前の路面）





□:床版部分打換え範囲、□:床版上面パッチング範囲　▲:主桁位置(3@2.7m)、△:対傾構位置(6@5.25m)
注 1) 含水分布は上からの透視図で示す。青が濃いほど(橙、黄、緑、青の順に)、水分が多いことを示す。
2) 8月に、床版部分打換え、床版上面の剥離箇所パッチング、防水層設置、全面舗装打換えが行われた。

床版及び舗装の補修前後における床版コンクリート下面の含水分布



舗装損傷先行型のRC床版の疲労イメージ



a点における橋面舗装と床版下面の変化
1月の写真は事務所提供

関連資料 ・橋梁と基礎，2008.11-12. ・土木技術資料，2011.2.

非破壊検査技術の適用性調査（鋼板接着で補修されたRC床版）

■橋梁諸元

橋梁名	神戸（ごうど）橋
路線，地名	松本環状高塚線，長野県松本市
橋梁形式	単純RC桁橋（一部PC橋）
橋長	127m
支間長	8@10m（RC桁部）＋2@21m
竣工年	昭和10年(1935年)

■橋梁概観





床版の抜け落ち

■調査概要

≪調査目的≫
鋼板接着により補修されたRC床版の劣化に対する非破壊検査技術の適用性確認

≪調査内容≫
・鉄筋コンクリート部材に用いられている各種非破壊検査を用い、床版等を測定
・撤去時に床版を切断し、劣化状況を調査

・床版コンクリートに多数の層状のひび割れが発生。一部は土砂化。
・著しく劣化している部位は、電磁波レーダ法、超音波法により把握可能。

解体調査：CAESAR

床版切出し → 解体調査（協力：長野県）



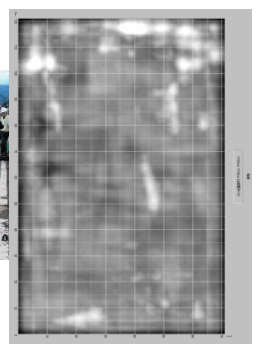
適用性確認

床版非破壊検査：日本非破壊検査工業会

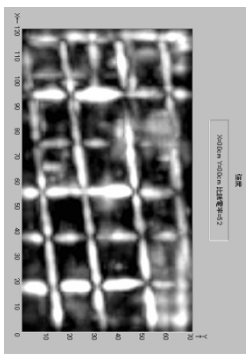
電磁波レーダ法



調査状況



不明瞭なデータ例

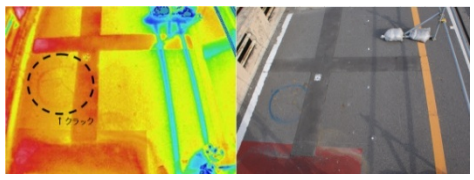


明瞭なデータ例

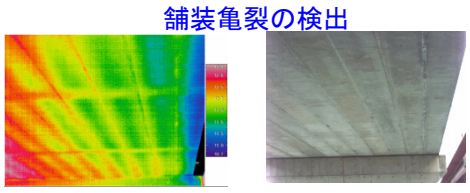
赤外線サーモグラフィ法



調査状況



舗装亀裂の検出

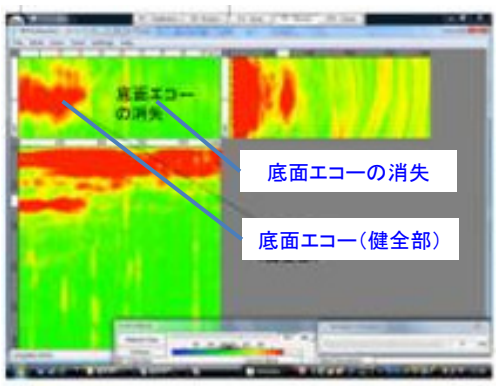


PC桁の中空部

超音波法



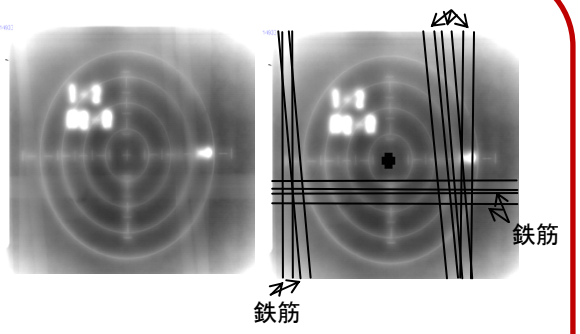
調査状況



エックス線法



調査状況

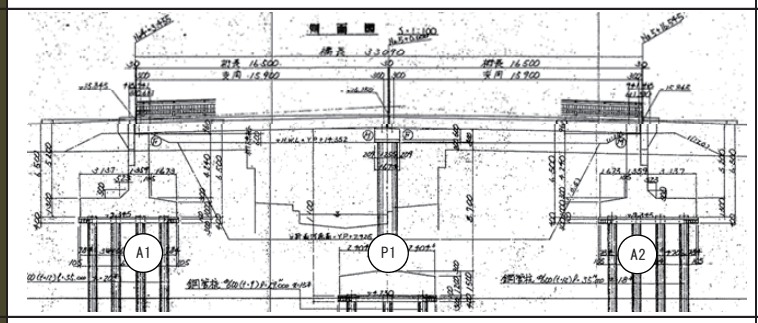
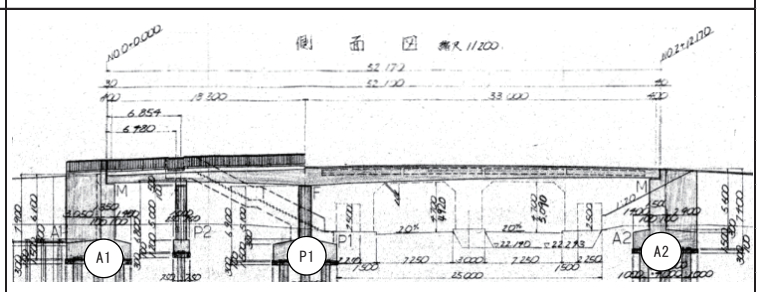
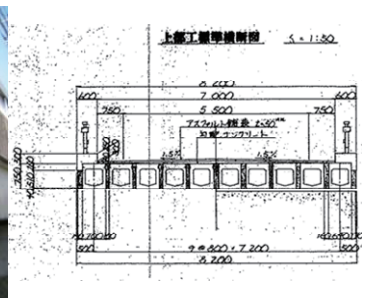
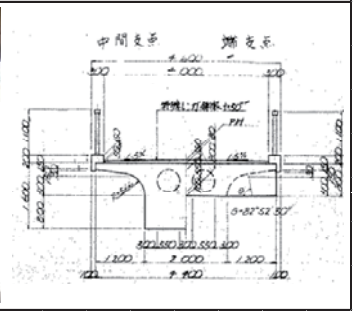


エックス線写真
電圧　300kV　照射時間　6分
部材厚　65mmAs＋170mmRC＋6mm鋼板

関連資料　・第7回日本非破壊検査工業会技術討論会討論概要集，2011.7.

軸方向ひび割れが発生したプレストレストコンクリート橋の調査

■橋梁概要

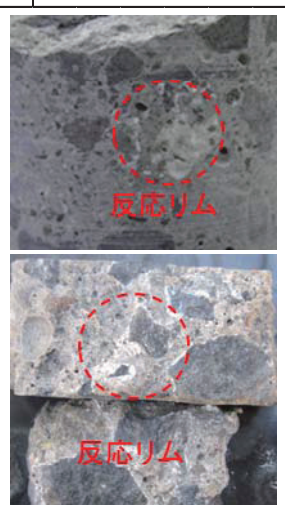
橋梁名	A　橋	B　橋（歩道橋）
路線名	市　道	市　道
交差条件	河　川	県　道
橋長	33.09m（支間長 2×15.9m）	52.10m（支間長 18.3+33.0m）
橋梁形式	単純PCプレテン中空床版橋(2連)	2径間連続PCポステン中空床版橋
竣工年	1983年11月　（供用29年）	1980年5月　（供用32年）
構造図		
桁側面写真 断面図	 	 

■研究概要

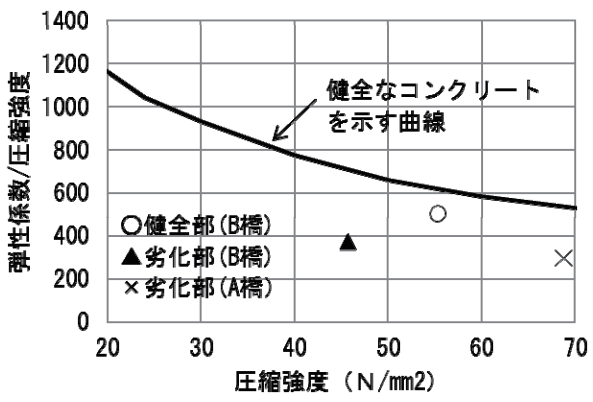
≪研究目的≫
軸方向ひび割れが発生したPC桁について，ひび割れ性状とひび割れが構造に及ぼす影響を確認

≪調査内容≫

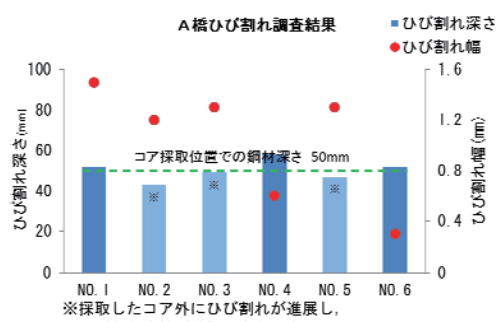
調査項目	A橋	B橋
ひび割れ位置･幅･深さ	目視，クラックスケール，コア削孔箇所にて棒状スキャナ	
圧縮強度/静弾性係数	コア採取による圧縮強度試験	
ASR調査	コア表面の目視調査	
	SEMによる反応性骨材観察，EDSによる構成元素の定性分析	
静的載荷試験	荷重車両による静的載荷	

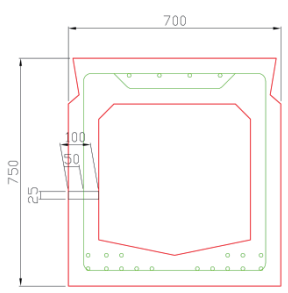


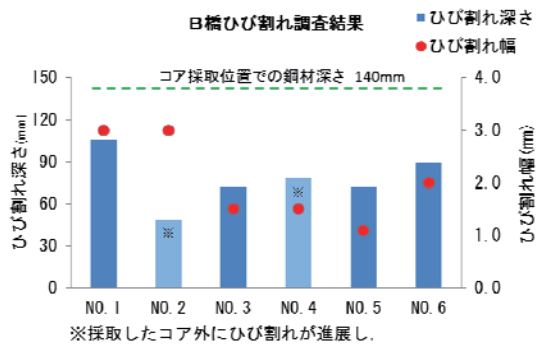
コア表面（上：A橋，下：B橋）

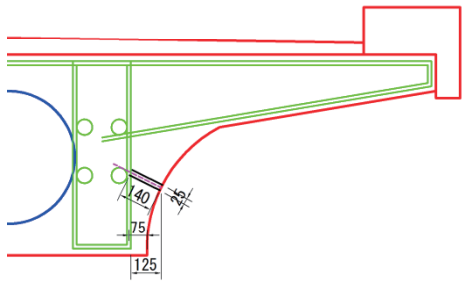


圧縮強度-静弾性係数







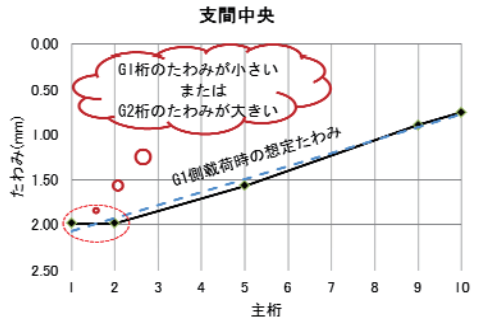


A橋ひび割れ調査結果と配筋概要図

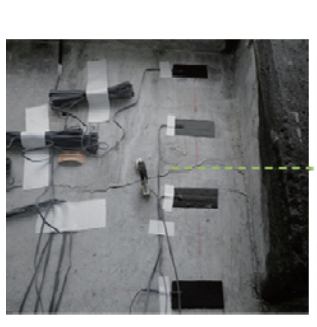
B橋ひび割れ調査結果と配筋概要図

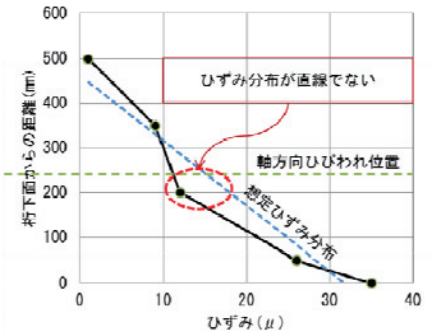


A橋載荷試験状況



橋軸直角方向たわみ分布





G1桁側面ひずみ分布

- 軸方向ひび割れの深さは，概ねせん断補強鉄筋程度で，部材を貫通したひび割れまでは至っていない。
- 骨材周辺の滲出物や静弾性係数の低下より，ひび割れの発生原因としては，ASRが考えられる。
- 載荷試験よりG1桁とG2桁の劣化による微妙な違いが計測された。ただし，載荷重量範囲内においては，橋梁全体系として大きな剛性低下までは至っていない。

関連資料　･「軸方向ひび割れが発生したプレストレストコンクリート橋の調査（その1･その2）」土木学会全国大会，2012.9.

古い年代の鋼材の材料・強度特性調査

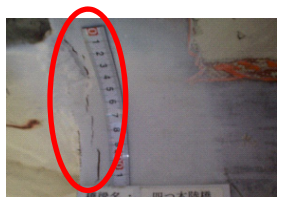
■研究背景・目的

・古い年代に建設された橋梁に用いられている鋼材は、現在の鋼材と異なる面があり、既設橋の診断や補修時において材料強度特性に配慮が必要。

・重交通路線では疲労による鋼主桁の破断事例が報告されており、重大損傷を未然に防ぐために、既設橋の鋼材特性を踏まえた疲労損傷に対する維持管理手法の構築が必要。

⇒古い年代の鋼材の材料・強度特性の把握と、これに基づく疲労損傷に対する緊急性判断の目安となる指標の検討。





鋼製ブラケット溶接時に割れが発生

＜鋼製橋脚の現場溶接時におけるラメラテアの発生事例＞





主桁ウェブ溶接部より1mを超えるき裂

＜鋼I桁橋の主桁におけるき裂の発生事例＞

■調査内容

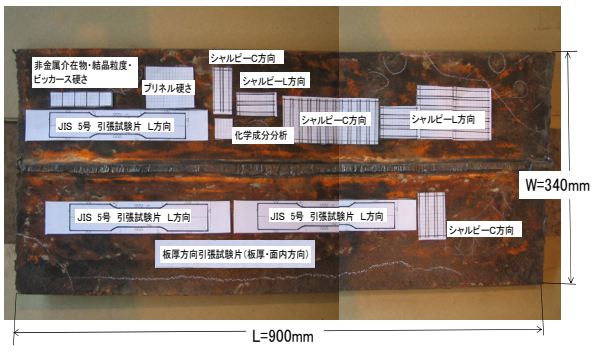
・古い年代に建設された鋼橋の撤去部材を基に、各種材料試験を実施

◇調査対象
大正10年代～昭和50年代の撤去橋梁部材（15橋,17鋼材）を年代毎に選定

◇調査項目
静的強度（引張試験，板厚方向引張試験）
破壊靭性値（CTOD試験，シャルピー試験）
化学成分分析等



＜試験片を採取した撤去橋梁例＞



＜試験片の切り出し状況＞

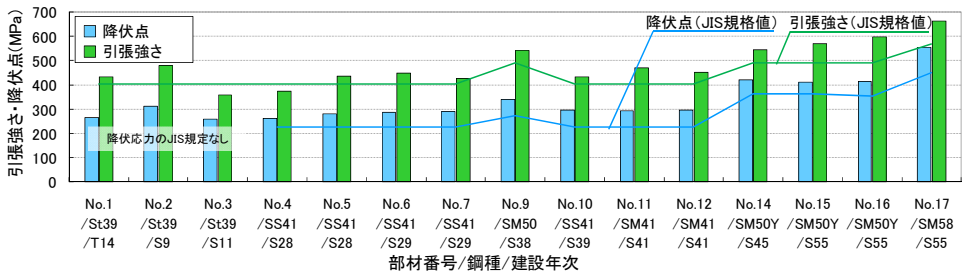
■調査結果

・既設鋼材の材料・強度特性の基礎データ の把握、蓄積（年代毎の傾向，診断・補修 補強時の留意事項の把握）

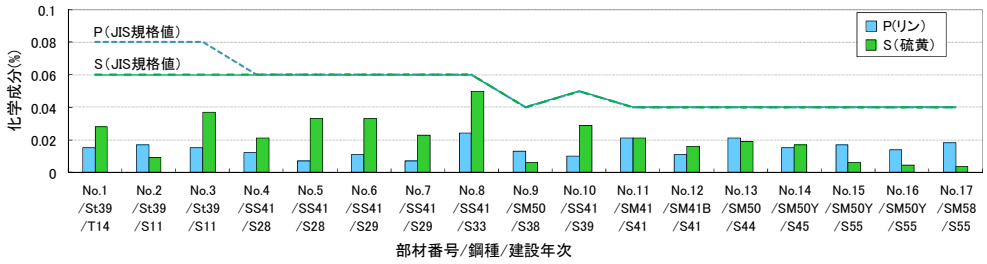
・化学成分や機械的性質（引張強さや降伏 点等）JIS規格は概ね満足するものの、板厚方向の強度特性（絞り値）が極端に低い鋼材が存在

⇒補修溶接の適用困難

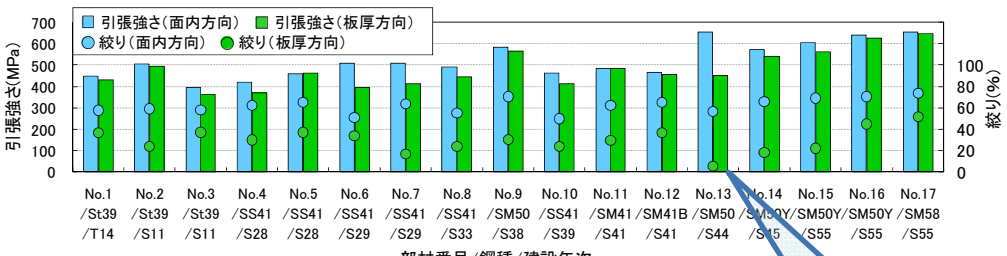
引張試験結果



化学成分分析結果



板厚方向引張試験結果

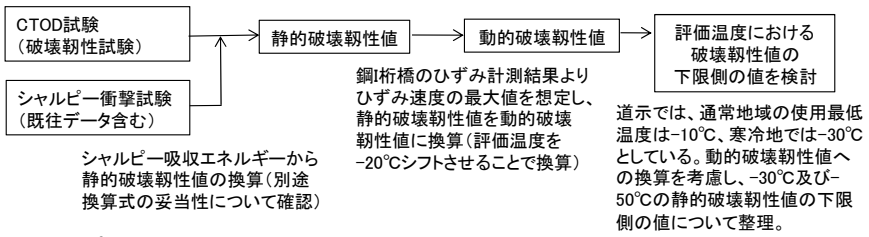


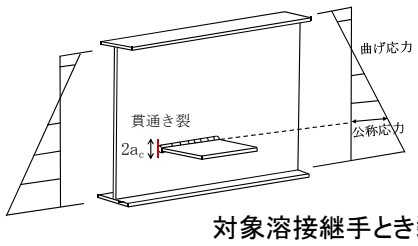
■限界き裂長の検討

・破壊靭性値（き裂に対する材料抵抗値）の検討
・CTOD試験の結果と、シャルピー衝撃試験結果（既往のデータ含む）から推定した値を基に下限側の値を整理

・鋼I桁橋の面外ガセット溶接継手を対象に、実橋 の交通条件や環境条件の中で、き裂が脆性破壊に移行する可能性のある限界長さ（限界き裂長）を試算
⇒点検における主桁継手のき裂の早期発見・対処の重要性

＜破壊靭性値の検討フロー＞

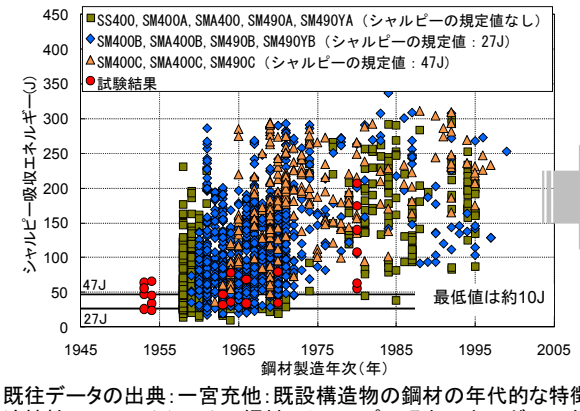




対象溶接継手とき裂

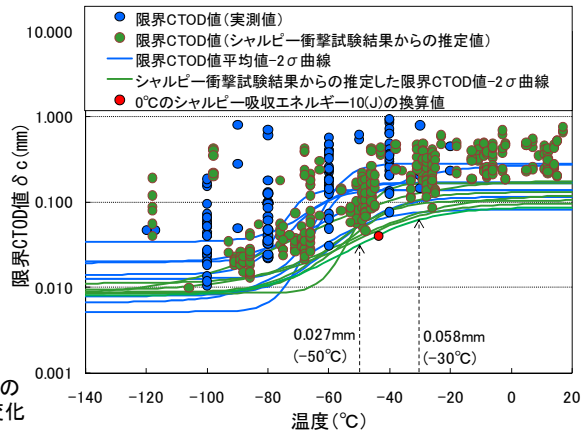
作用応力は，面外ガセット溶接継手位置を考慮して下フランジ位置の許容応力度（＝保証降伏点/約1.7）の90%と仮定

＜シャルピー衝撃試験結果＞
（既往文献データ(4757データ)も活用）

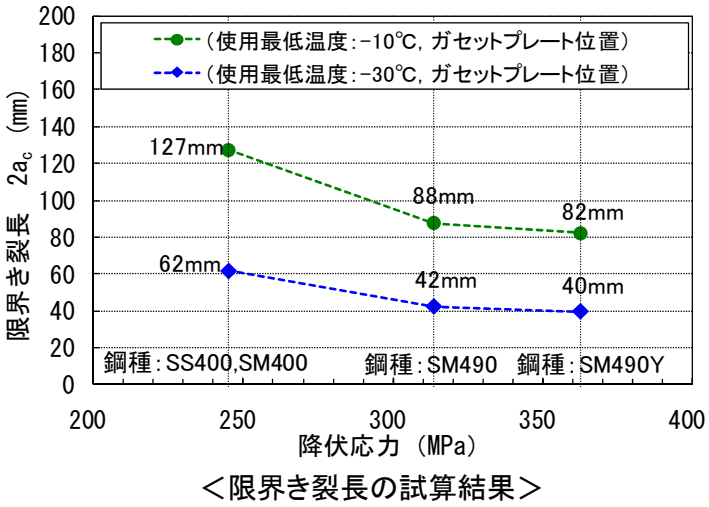


シャルピー値をCTOD値に換算

＜CTOD試験結果＞



既往データの出典：一宮充他：既設構造物の鋼材の年代的な特徴とその溶接性について（その2）－鋼材のシャルピー吸収エネルギーの年代変化－，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，I-485，2003.9.



＜限界き裂長の試算結果＞

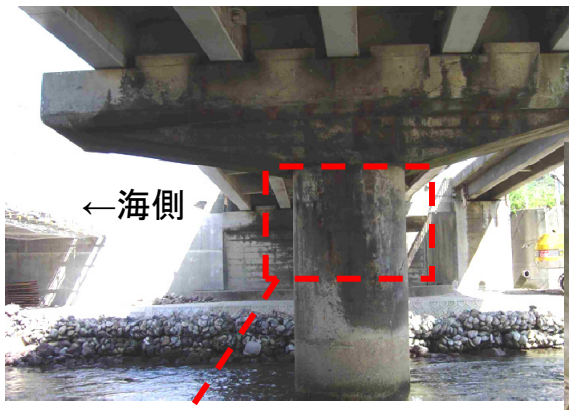
関連資料 ・鋼構造論文集 第19巻 第73号 2012.3. pp.53～64

RC橋脚の発錆限界塩化物イオン濃度に関する調査

■橋梁諸元

橋梁名	旧温海川橋
路線，地名	国道7号，山形県鶴岡市
橋梁形式	単純ポストテンションPC橋
橋長	70m
支間長	3@23.3m
竣工年	昭和46年(1971年)

■橋梁概観 （調査対象の橋脚）



撤去直前の状況
（供用後34年）

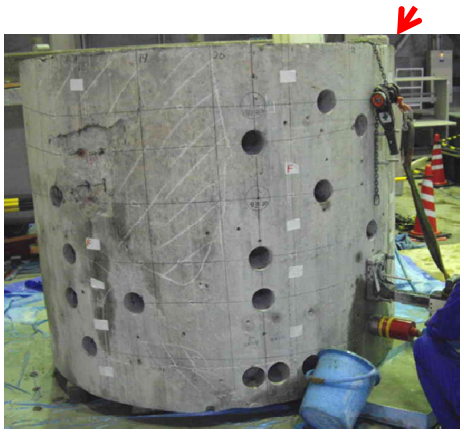


■調査概要

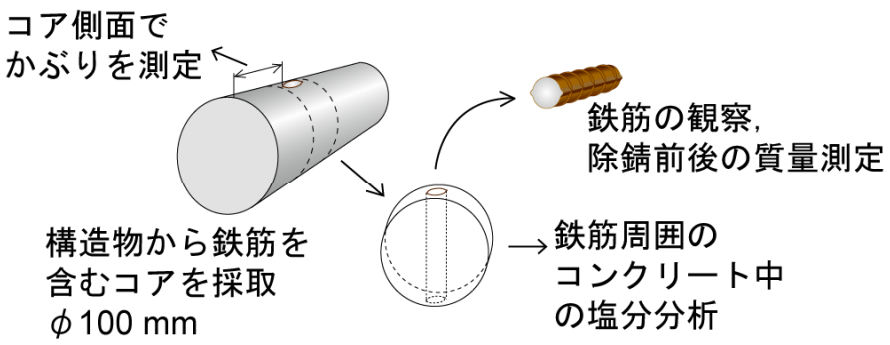
≪調査目的≫
RC橋脚は上部構造に比べてかぶりが厚いことが多く，その場合に発錆限界塩化物イオン濃度が大きいと言われることから，実証データの蓄積を行う。

≪調査内容≫
塩害を受けた橋脚の四方八方から，鉄筋が中心となるようにコアを採取して，個々の鉄筋の周囲のコンクリート中の塩化物イオン濃度，かぶり，鉄筋の腐食程度を測定する。

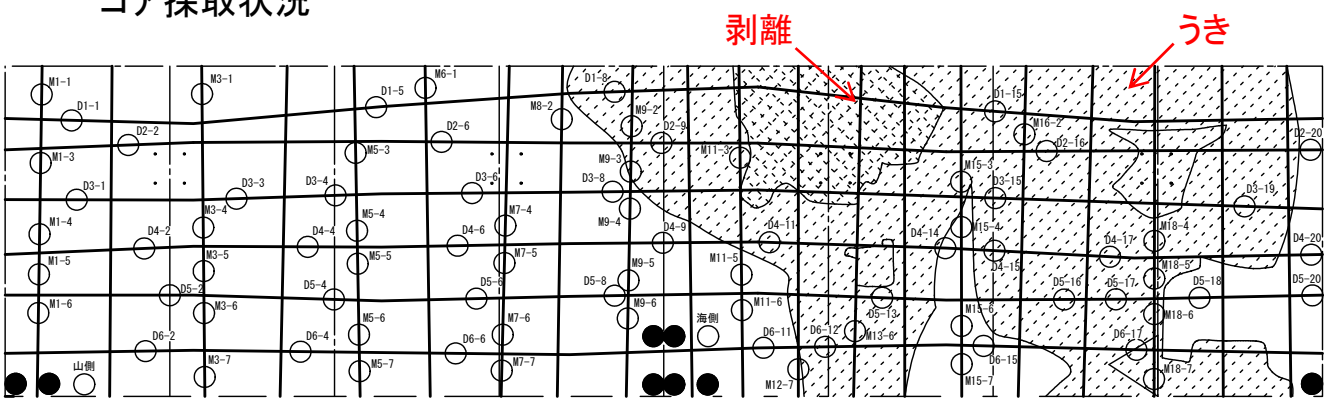
・同程度の塩化物イオン濃度であっても，かぶりの違いによって，腐食の程度が異なる，という結果が得られた。



コア採取状況



試料採取の概要



橋脚の配筋，浮きとコアを採取した位置（柱側面の展開図）



採取したコア

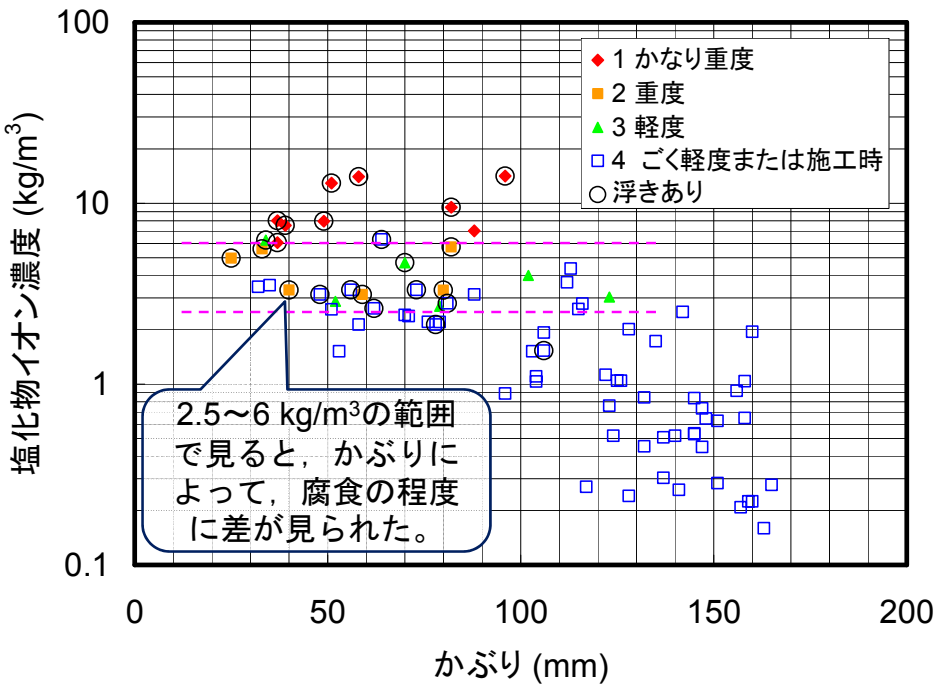


錆落とし前

錆落とし後の鉄筋



撤去橋脚の鉄筋の腐食程度



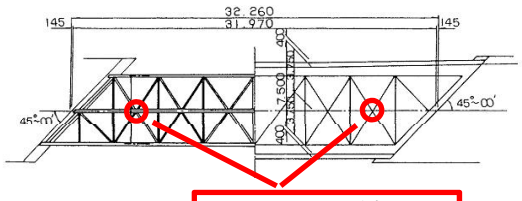
撤去橋脚のコア抜き調査結果
(鉄筋周囲の塩化物イオン濃度，かぶりと鉄筋の腐食状況の関係)

関連資料 ・プレストレストコンクリート，2010.2.

塗膜を有する溶接部における疲労性状に関する検討

■橋梁概観

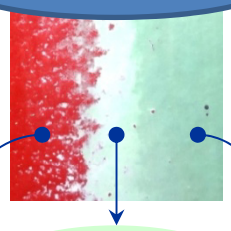




※T橋，鋼単純合成鈑桁橋（設計荷重TL-20）
橋長（支間長）;32.26m　竣工年;昭和43年（1968年）

上塗り塗装表面までの塗膜厚：178μm
（疲労き裂発生面のガセットこば面から20mm離れた位置近傍の20点平均）

塗膜の仕様



塩化ゴム
中塗り塗料

エポキシ樹脂
下塗り塗料

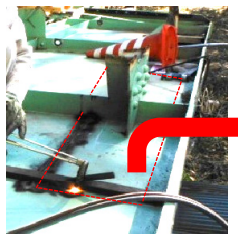
塩化ゴム
上塗り塗料

下塗り*1：114μm　　中塗り+上塗り*2：64μm

*1中・上塗り塗料をアセトンを用いて剥がして計測（10点平均）
*2塗装表面までの塗膜厚と下塗り塗膜厚との差

＜疲労試験条件＞
荷重範囲190kN
（公称応力範囲　約82MPa）
試験速度　2.5Hz

ガセット部切り出し



引張疲労試験



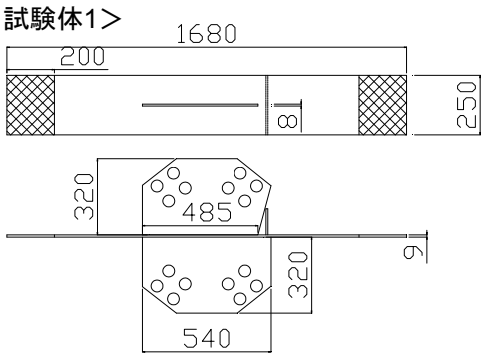
■研究概要

≪研究目的≫
き裂内服時の塗膜割れとき裂との関係性と既設橋梁の面外ガセット溶接部の疲労強度の確認

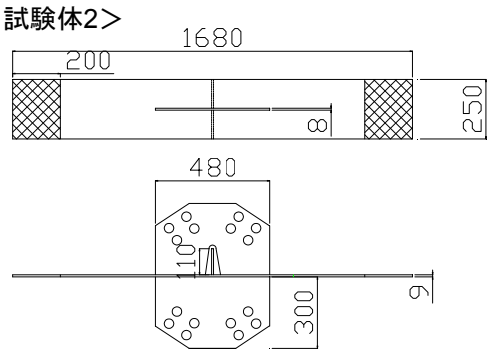
≪調査内容≫
面外ガセット部を対象とした疲労試験
塗膜割れとき裂長さの観察（ビーチマーク試験，磁粉探傷試験（MT））

・対象とした既設橋梁の面外ガセット溶接継手部の疲労強度は，基準とされている等級よりも高い結果であった．
・疲労き裂と塗膜割れを目視により判断することは難しく，MTの対象箇所によっても，塗膜割れ内に磁粉が溜まり，判断できない場合がある．
・母板側止端を起点とした疲労き裂が発生することを推測していたが，実験ではガセット側止端を起点としてき裂が発生した．そのため，ガセット側止端部の塗膜割れにも注意が必要．

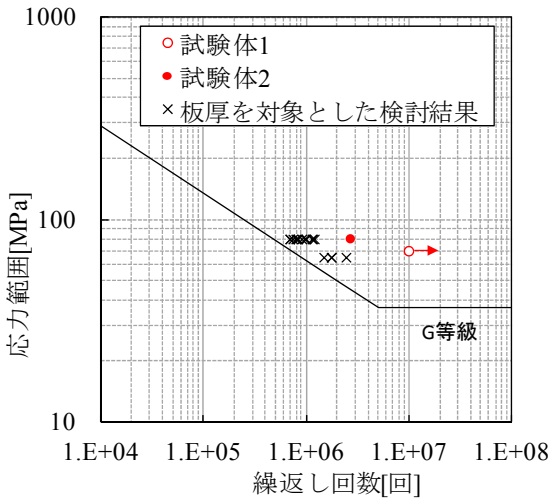
＜試験体1＞



＜試験体2＞

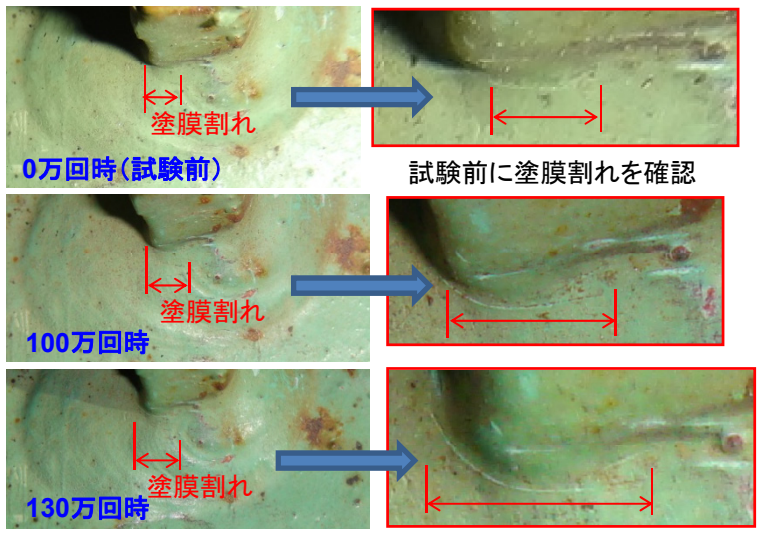


応力範囲と繰返し回数の関係

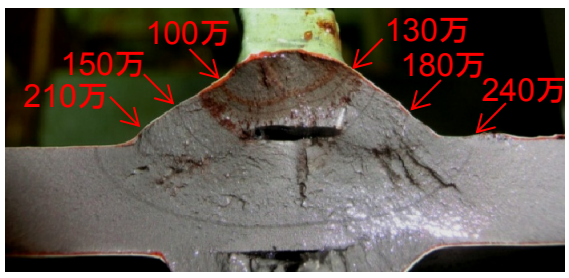


試験体1は1000万回の繰返し荷重においても疲労き裂は確認されなかった．
道路橋示方書では疲労強度等級をG等級としているが，対象とした既設溶接部ではG等級以上を確保している．

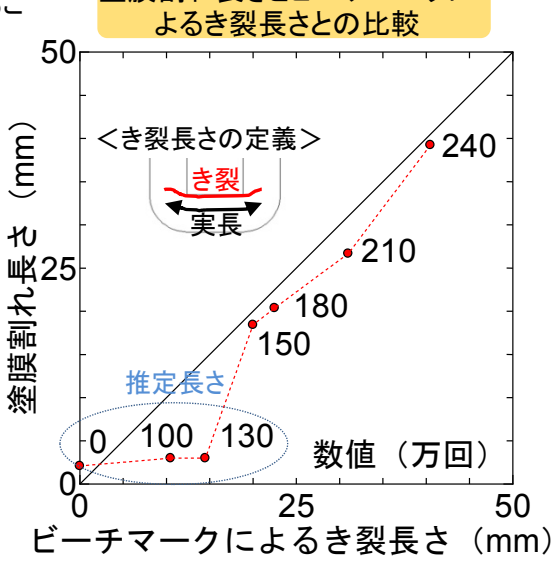
＜疲労試験中の塗膜割れ状況＞
・試験体2の破断側溶接部

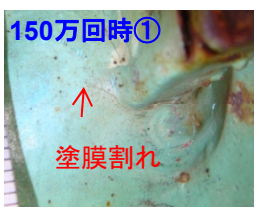


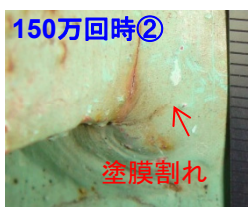
＜ビーチマーク試験＞
100万、130万、150万、180万、210万、240万回時に上限荷重一定の荷重範囲を1/2としたビーチマーク試験を実施
・ガセット側溶接止端を起点として疲労き裂が発生していることを確認



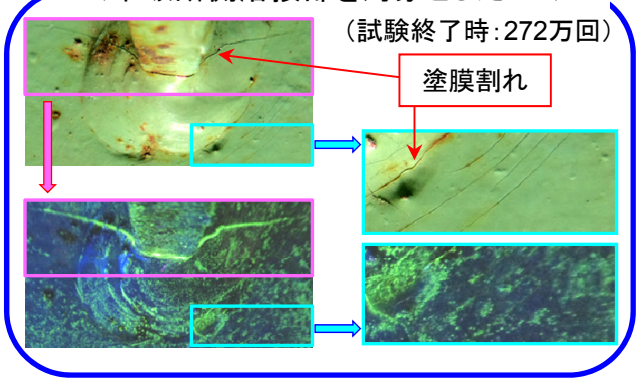
塗膜割れ長さとビーチマークによるき裂長さとの比較

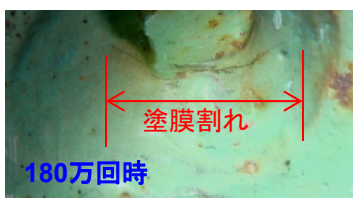




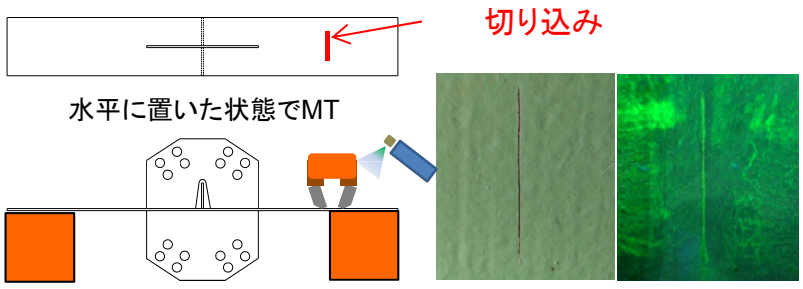


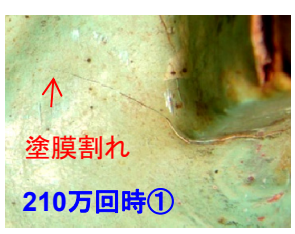
＜未破断側溶接部を対象としたMT＞
（試験終了時：272万回）

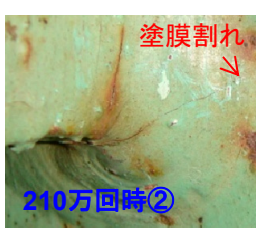


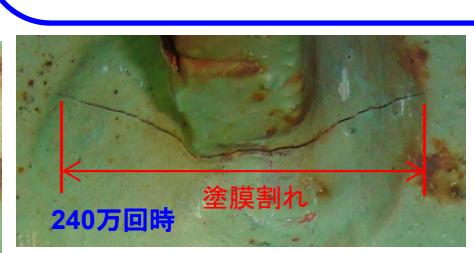


＜塗膜割れをカッターで模擬した場合のMT結果＞
磁粉が切り込みに溜まると，疲労き裂との判断が難しい．









撤去RC床版を用いた路面からの水の浸透に関する調査

■橋梁諸元

橋梁名	K橋
路線，地名	国道9号，島根県出雲市
橋梁形式	単純鋼合成箱桁橋
橋長	258m
支間長	5@51.6m
竣工年	昭和39年(1964年)

■調査概要

≪調査目的≫
RC床版中への水の浸透は，床版の疲労損傷や塩害などを引き起こす(あるいは促進する)ことから，その浸透過程と調査方法を把握する。

≪調査内容≫
水張り試験を行い，打継目の影響を含めて，床版下面の含水状態を経時的に調査

・アスファルト(As)舗装の有無が，水の浸透に大きく影響すること，特にAs舗装のない打継目の漏水は水張り開始直後に生じることを確認
・水分計による測定結果は，既設橋の調査結果と合わせて報告予定

As舗装あり

As舗装なし

水張り後3カ月目，打継目の内部
舗装あり側は，舗装の微粒分で黒い部分が多かった。舗装なし側は，微粒分が洗われていた。

■橋梁概観 （撤去前の路面と床版下面）




床版の顕著な劣化は見られなかった

撤去床版の提供



打継目側面



撤去RC床版の水張り試験
(1枚の床版を2分割した)

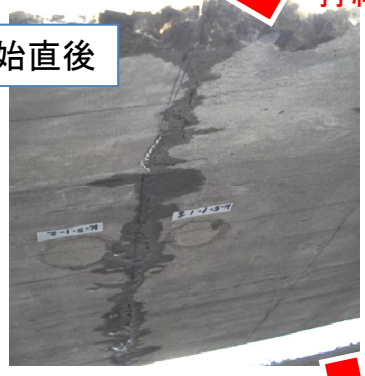


下面の打継目付近

舗装あり側は，顕著な漏水が見られず，3箇月後もほとんど外観の変化が見られなかった。

水張り開始直後

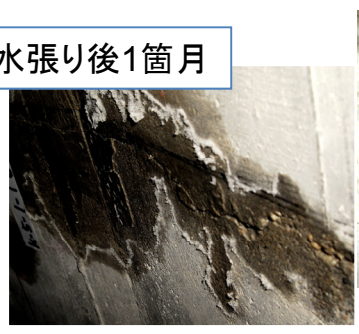
水張り直後に打継目から漏水




打継目直下の水たまり

漏水は徐々に減少して，1箇月後には水たまりが見られなかった。

水張り後1箇月



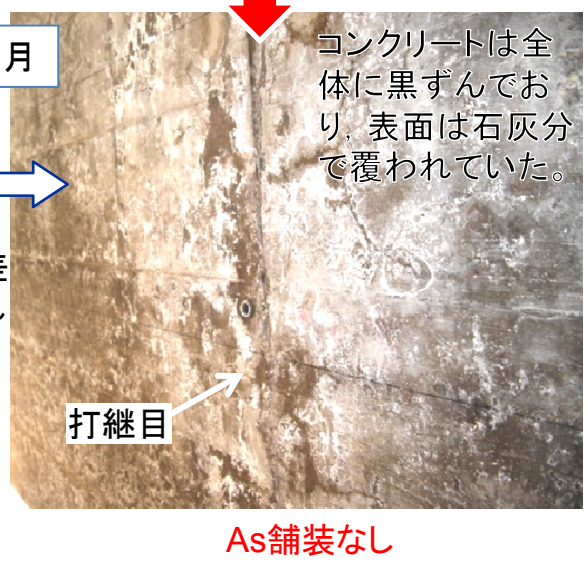


水張り後3箇月



As舗装あり

3箇月で顕著な差が見られた。



コンクリートは全体に黒ずんでおり，表面は石灰分で覆われていた。
As舗装なし

関連資料 ・土木技術資料，pp.52-53，2012.7.

鋼道路橋桁端部の腐食に対する応急復旧に関する調査

■橋梁諸元

橋梁名	ST橋
橋梁形式	単純鋼合成桁橋
橋長	230m
支間長	7@32.1m
竣工年	昭和45年(1970年)

■橋梁概観



■調査概要

≪調査目的≫

鋼橋桁端部の著しい腐食断面欠損に対する，応急復旧としての当て板補強方法の効果を検証する。

腐食箇所の補修・補強として現場で適用されている，ボルト接着継手の設計施工法の確立に向けた検討の一つとして実施している。

≪調査内容≫

実橋において当て板補強の試験施工を行い，その当て板補強の自動車荷重に対する補強効果を確認するため，荷重車の走行載荷試験及び24時間応力頻度計測を行った。

経時変化，地震の影響，本復旧の方法等について，調査継続中。

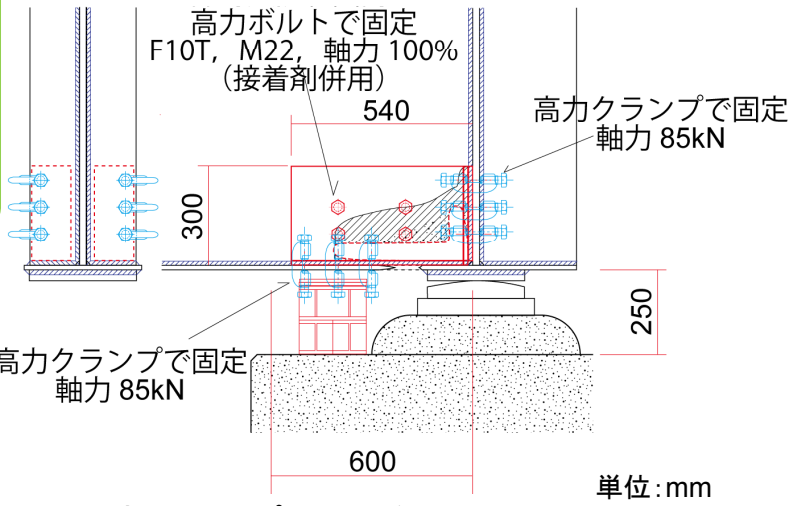
・当て板施工後の断面欠損部のひずみは，施工前に比べ大幅に減少した。
・ボルト本数が比較的少なく，仮設用の高力クランプを併用した当て板固定であっても，自動車荷重に対する補強効果があることを確認した。



20トン荷重車走行時のひずみ(με)

	A点	B点	C点 支間¼点
当て板前	-705	368	64
当て板後	-52	24	61

注) A，B点は断面欠損部，C点は支間1/4点の下フランジ下面，負号(-)は圧縮側を示す。

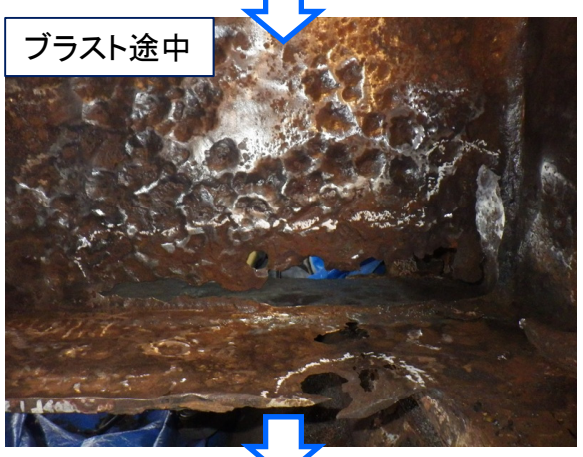


高力クランプの性能確認を含めて検討中。

施工フロー

①	主桁(当て板接合面)のブラスト処理	
②	当て板の部分加工	
③	主桁の断面欠損形状の整形	
④	ボルト孔の削孔	2.5日
⑤	樹脂(接着剤)の塗布	
⑥	当て板の接着	
⑦	仮固定，養生	1日
⑧	ボルト等の締付け	0.5日
⑨	補強部及び周囲の塗装	







ホールソー，グラインダによる断面欠損部の加工



関連資料 ・土木研究所資料，第4142号，2010.3. ・飯塚ほか，土木学会全国大会，Ⅰ，pp.703-704，2013.9.
・土木技術資料，56巻4号，pp.40-45，2014.4.

既設コンクリート道路橋桁端部の腐食環境調査

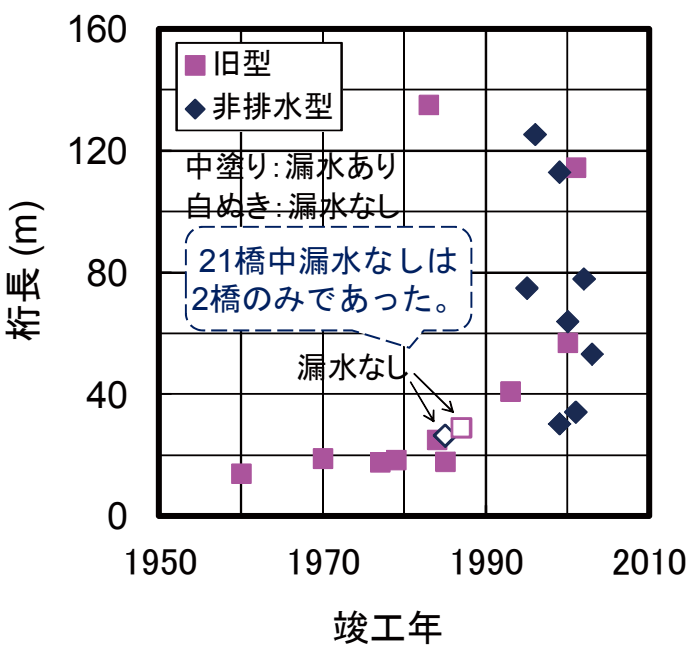
■調査概要

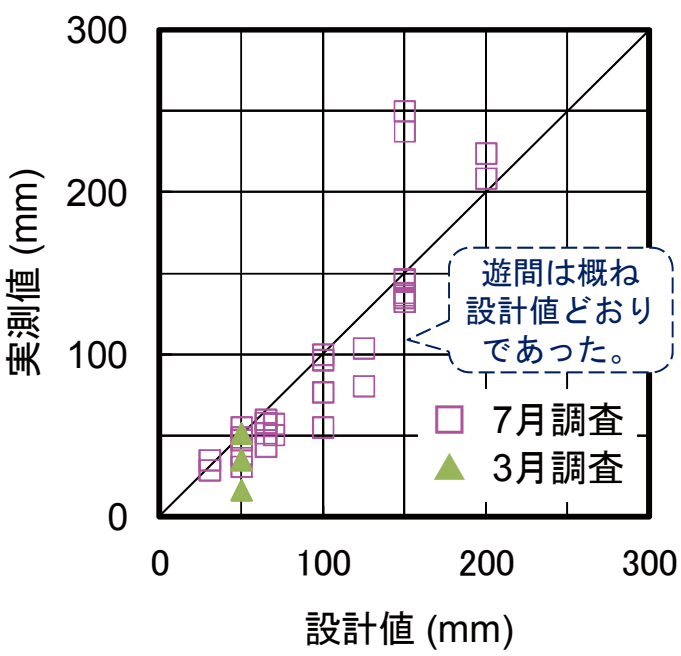
≪調査目的≫
既設コンクリート道路橋桁端部の腐食環境の改善に向けて，桁端部のディテール，漏水状況を含めた，実橋の桁端部の現状把握を行う。開発中の桁端部用排水装置の試験施工の対象橋選定を兼ねて，現地調査を行った。

≪調査内容≫
遊間長が50～200mm，かつ比較的一般的な構造のコンクリート道路橋21橋の桁端部に着目して，漏水の有無，実遊間長などを調査した。

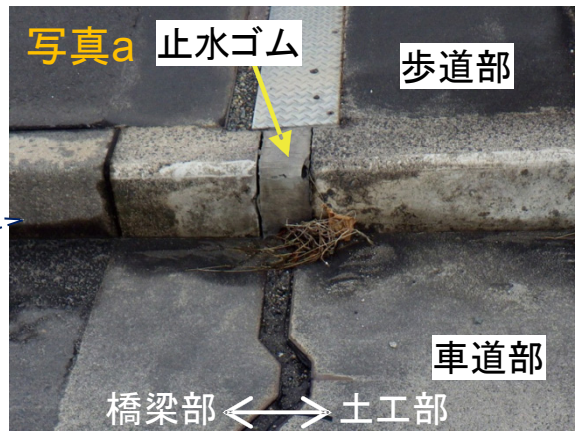
・調査した21橋の範囲では，伸縮装置の旧型，非排水型を問わず，伸縮装置からと考えられる漏水事例が多く見られた。

■調査対象とした橋と遊間長





■桁端部の漏水状況と付着塩分量調査



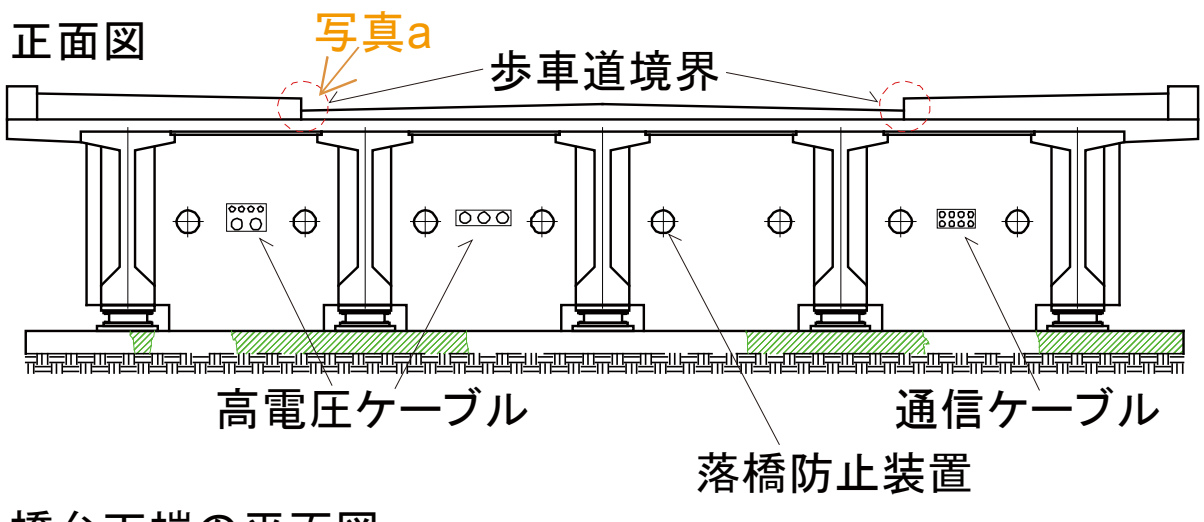
非排水型の伸縮装置でも，歩車道境界で不連続の場合がある。

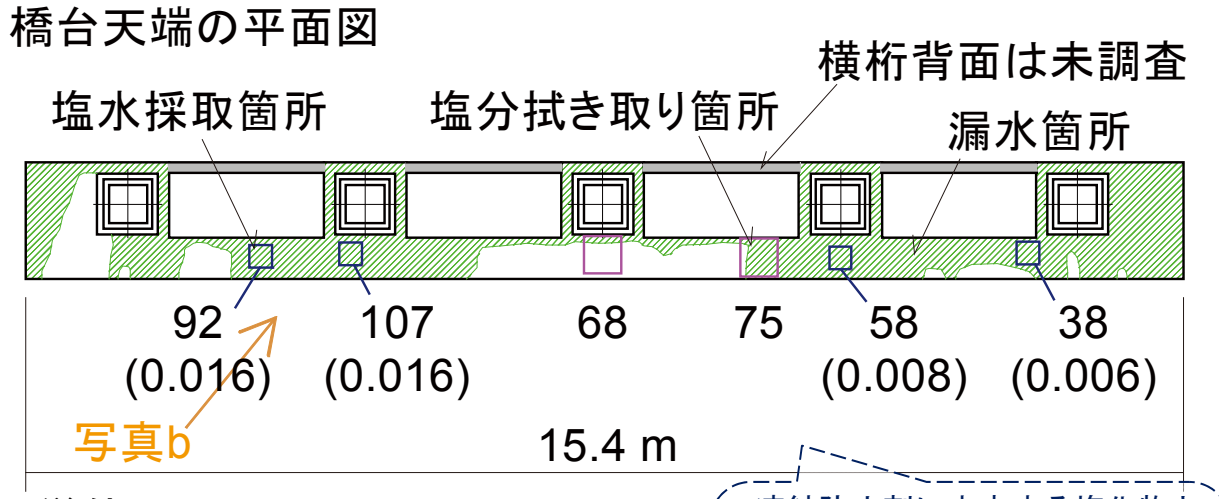




歩車道境界(写真a)の直下付近に見られた漏水







単位：Cl^- mg/m^2
括弧内は水たまりの塩分濃度 (%)

凍結防止剤に由来する塩化物と考えられる。
cf. 沿岸部の著しい塩害を受けたコンクリート橋の調査事例では，主桁下面における付着塩分量が100～200 mg/m^{2}のオーダーであった。

CAESARと，東拓工業(株)，(株)ビービーエムそれぞれとの共同調査による。

関連資料　・日本道路会議，2013.10.

コンクリート橋桁端部用排水装置の開発

■概要

≪目的≫
コンクリート道路橋桁端部の漏水による塩害等の著しい劣化を予防するため，伸縮装置からの漏水対策が必要
予防保全のため，「できるだけ多くの橋で，かつできるだけ早期に，コンクリート橋桁端部の腐食環境を改善する手法」の開発が必要

≪内容≫
遊間の狭いコンクリート道路橋を対象に，桁端部用排水装置を試作して，実橋で試験施工を実施
漏水，付着塩分等の経過観察，適宜，装置や施工法を修正

・ポリエチレン製，ゴム製，2種類の排水装置の開発のほか，遊間の発砲スチロールの除去技術，内部の調査技術等を開発中

■コンクリート道路橋桁端部の劣化事例



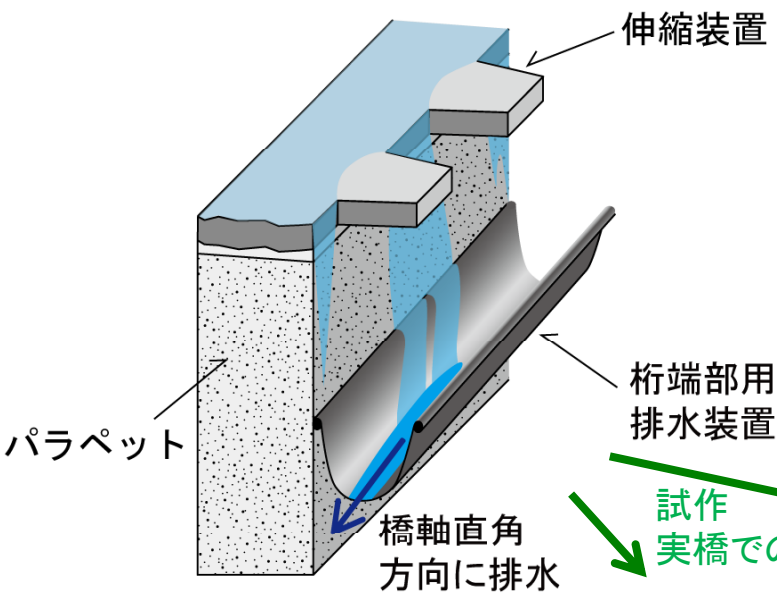
路面からの塩水により，PC箱桁の桁端部や橋台・橋脚に著しい塩害が生じる



塩水はコンクリートの凍害を著しく促進する

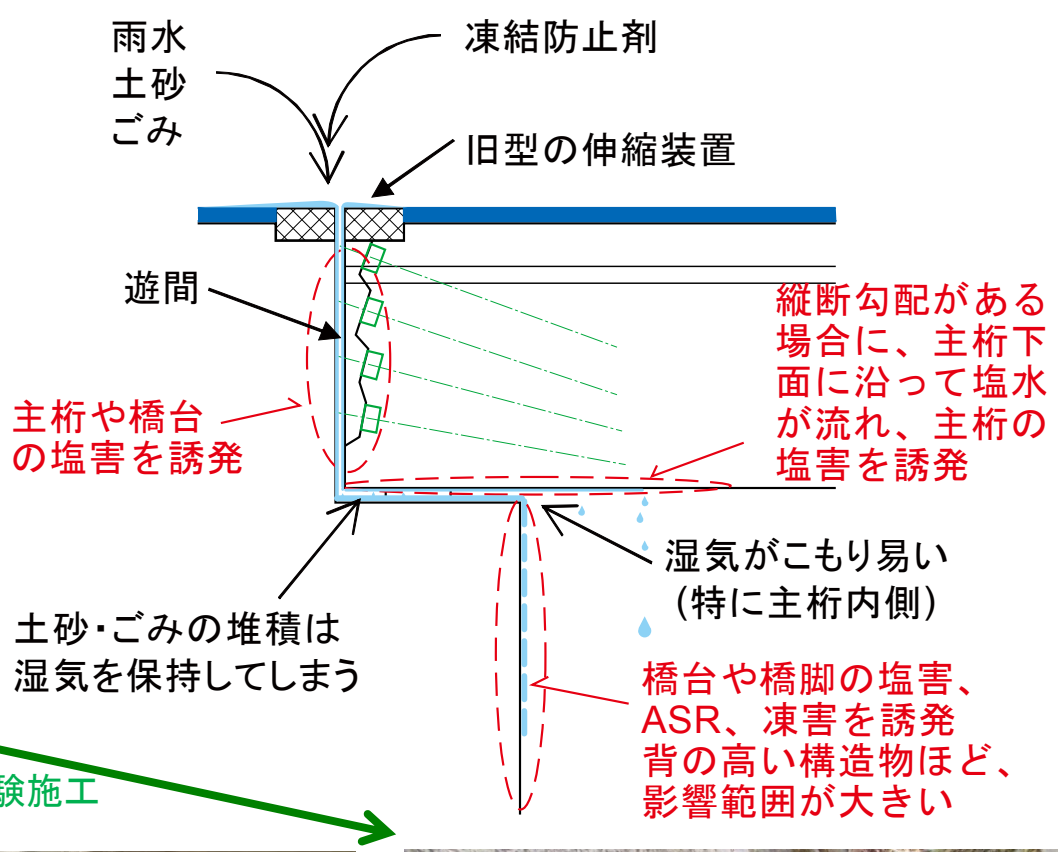
これらの劣化が凍結防止剤の散布量と散布期間に概ね依存すると考えると，ある時期を過ぎると多くの橋に路線単位で急激に発生することが懸念される。

■具体策の提案



桁端部用の排水装置とは，既設橋の側面から遊間に樋状のものを挿入して，伸縮装置を通じて流れる路面の水を受けて，橋の側面に排水するものを想定している。

■コンクリート道路橋桁端部の腐食環境



試作
実橋での試験施工





CAESARと，東拓工業(株)，(株)ビービーエムそれぞれとの共同開発による。

関連資料　・土木技術資料，pp.29-34，2013.11.

塗装を剥がさずに鋼部材のひずみを測定できる磁気式ひずみ計

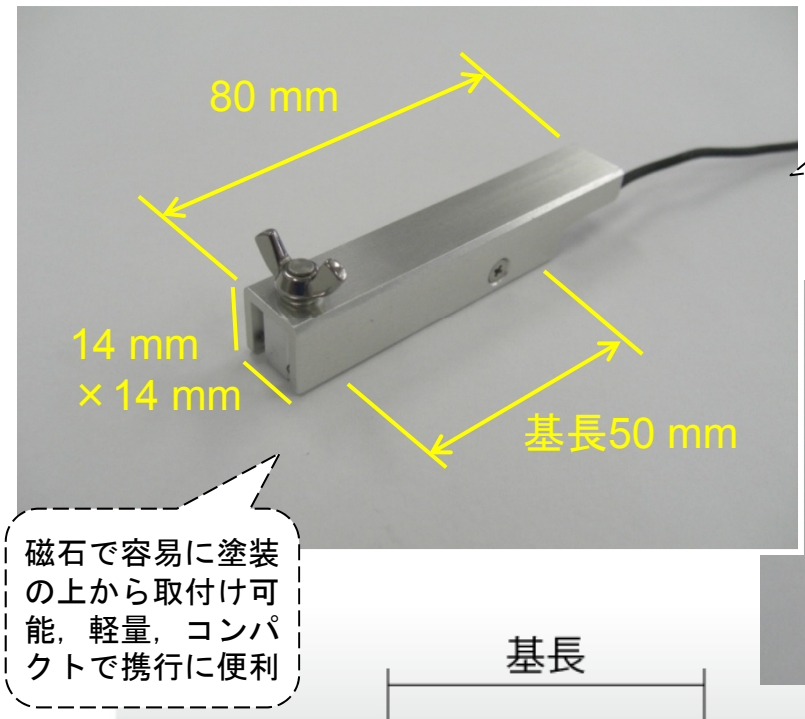
■概要

≪目的≫
鋼道路橋のひずみを測定する際，従来，塗装を剥がしてひずみゲージを張り付ける。その後の再塗装の手間を省くため，あるいは防食の弱点としないため，塗装を剥がすことなく，より簡便に測定したいというニーズがある。

≪内容≫
磁気式ひずみ計の試作を用いて，実橋における測定を行うとともに，撤去された部材を用いて，既設橋の塗膜の影響について調査

・ホール効果を利用して，軽量，コンパクトで取扱いが容易な磁気式ひずみ計を開発
・自己温度補償機能を追加，またさらなる小型化を実現
・塗装や塗装面の状態の影響についてさらに検討中

■磁気式ひずみ計

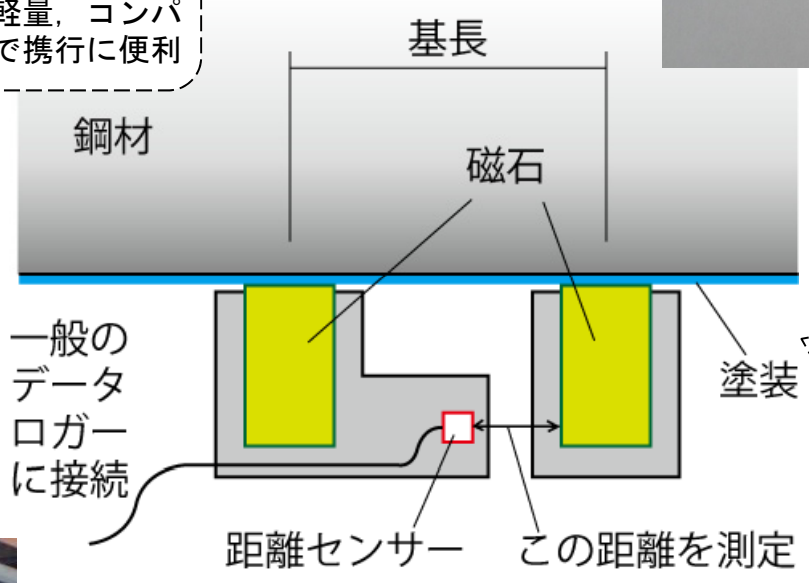


蝶ねじを締めると標点間距離が定まり，緩めると測定可能な状態となる。

磁石で容易に塗装の上から取付け可能，軽量，コンパクトで携行に便利



ケースの内部。通常ケースを外すことなく使用する。

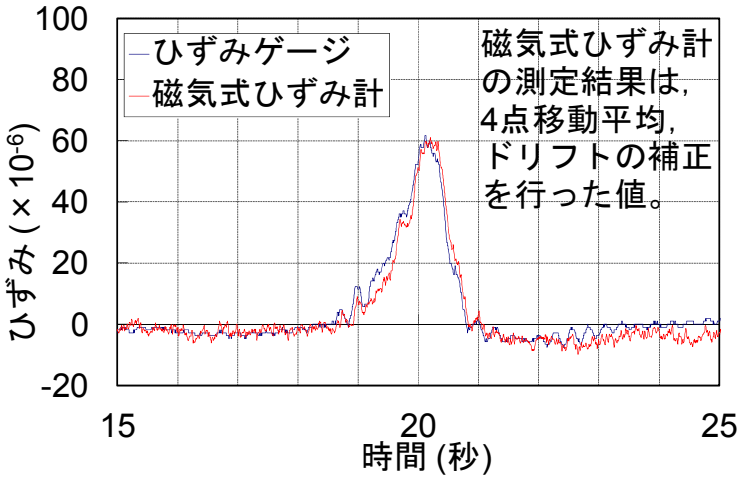


既往の，塗装の上からひずみゲージを押し付けて測定する摩擦型ひずみゲージは，センサー部が傷付いたり，劣化したりするのに対して，磁気式ひずみ計はそういう心配のない，丈夫な構造となっています。

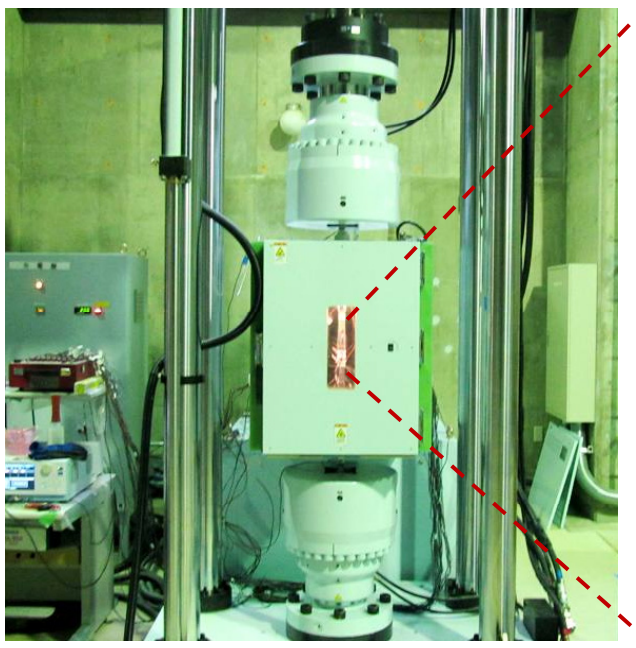
■実橋での測定例



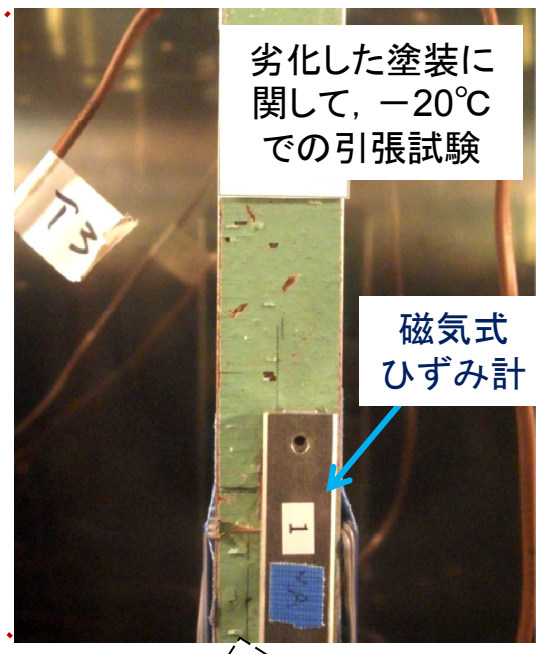
現地で，磁気式ひずみ計を，簡単に設置して，携帯データロガーを用いて，その場でひずみを計測しています。



■塗装の状態や温度の影響に関する試験



温度変化によると考えられるドリフトが見られたが，ひずみの変化はよく捉えられた。これを踏まえて，自己温度補償機能を考案して，機器に改良を加えた。



供用44年の撤去された鋼桁下フランジから切り出された鋼材，実際の塗膜を利用(塗替え後27年)

CAESARと(株)東京測器研究所の共同開発による。

関連資料　・土木技術資料，p.49，2013.12.

CAESAR臨床研究に関する文献リスト

P2-1) 村越潤ほか：構造工学論文集，56A，pp.710-721，2010.3.

P2-2) 村越潤ほか：土木研究所資料，4175号，2010.7.

P2-3) 小室雅人ほか：鋼構造年次論文報告集，第18巻，(社)日本鋼構造協会，pp.431-436, 2010.11.

P2-4) 古賀裕久ほか：コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.9，pp.45-50，2009.10.

P3~5-1) Kasano, H. et al., International Journal of Steel Structures, 12(3), pp. 381-389, Sep. 2012.

P3~5-2) Murakoshi, J. et al., Proc. of 27th US-Japan Bridge Engineering Workshop, Nov. 2011.

P3~5-3) Sawada, M. et al., Proc. of 28th US-Japan Bridge Engineering Workshop, Oct. 2012.

P3~5-4) 村越潤ほか：共同研究報告書，429号，2012.1.

P3~5-5) 野上邦栄ほか：構造工学論文集，58A，pp.679-691，2012.3.

P3~5-6) 村越潤ほか：構造工学論文集，59A，pp.736-746，2013.3.

P3~5-7) 村越潤ほか：構造工学論文集，59A，pp.156-168，2013.3.

P3~5-8) 山沢哲也ほか：構造工学論文集，59A，pp.143-155，2013.3.

P6-1) 花井拓ほか：コンクリート工学，pp.23-30，49-12，2011.

P6-2) 木村嘉富ほか：土木研究所資料，4233号，2012.8.

P7-1) 北野勇一ほか：土木学会年講，V，pp.297-298，2011.9.

P9-1) 榎本武雄ほか：第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.457-464，2013.

P10-1) 村越潤，星隈順一ほか：土木研究所資料，4207号，2011.10.

P11-1) 吉田英二ほか：土木学会年講，V，pp.377-378，2011.9.

P11-2) 飯塚拓英ほか：土木学会年講，I，pp.685-686，2012.9.

P11-3) 吉田英二ほか：土木学会年講，V，pp.359-360，2013.9.

P11-4) Tanaka, Y. et al., Proc. of 27th US-Japan Bridge Engineering Workshop, pp.171-184, Nov. 2011.

P11-5) 吉田英二ほか：コンクリート工学年次論文集，36-2，pp.1207-1212，2014.7.

P12-1) 木村嘉富ほか：土木研究所資料，4234号，2012.8.

P14-1) 下里哲弘ほか：橋梁と基礎，pp.55-60，2009.11.

P14-2) 下里哲弘ほか：土木技術資料，pp.14-17，2011.2.

P15-1) 松沢政和ほか：土木学会年講，V，pp.523-524，2012.9.

P15-2) 出水享ほか：第4回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集，pp.50-58，2012.10.

P16-2) 松沢政和ほか：プレストレストコンクリート，55-3，pp.68-73，2013.

P17-1) 富岡昭浩ほか：土木学会年講，CS6，pp.13-14，2013.9.

P17-2) 松沢政和ほか：第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2013. 掲載予定

P18-1) 青柳聖ほか：第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2013. 掲載予定

P19-1) 村越潤ほか：土木研究所資料，4138号，2009.3.

P19-2) 村越潤ほか：共同研究報告書，452号，2013.5.

P22-1) 小林崇ほか：第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.443-448，2012.10.

P23-1) 木村嘉富ほか：土木研究所資料，4235号，2012.8.

P24-1) 花井拓ほか：材料劣化が生じるｺﾝｸﾘｰﾄ構造物の維持管理優先度に関するｼﾝﾎﾟｼﾞｳﾑ講演概要集，pp.347-354，2012.7.

P25-1) 古賀裕久ほか：日本非破壊検査協会，平成23年度春期講演大会講演概要集，pp.93-96，2011.5.

P26-1) 田中良樹ほか：橋梁と基礎，2008.11～12.

P26-2) 田中良樹，村越潤：土木技術資料，pp. 22-27，2011.2.

P28-1) 関慎一郎，中島道浩ほか：土木学会年講，V，pp.107-110，2012.9.

P29-1) 村越潤，澤田守：鋼構造論文集，Vol.19，第73号，pp.53-64, 2012.3.

P29-2) 澤田守ほか：土木学会年講，I，pp.1223-1224, 2009.9.

P30-1) 木村嘉富，田中良樹：プレストレストコンクリート，52-2，pp.43-48，2010.

P32-1) 田中良樹ほか：土木技術資料，pp. 52-53，2012.7.

P33-1) 村越潤ほか：土木研究所資料，4142号，2010.3.

P33-2) 飯塚拓英ほか：土木学会年講，I，pp.703-704，2013.9.

P33-3) 田中良樹ほか：土木技術資料，pp. 40-45，2014.4.

P34-1) 田中良樹ほか：日本道路会議，No.5021，2013.10.

P35-1) 村越潤ほか：土木技術資料，pp. 29-34，2013.11.

P36-1) 村越潤ほか：土木技術資料，pp. 49，2013.12.

注） 文献番号のP**は，関連するページを示します。
土木学会年講：土木学会年次学術講演会概要集
共同研究報告書：土木研究所共同研究報告書

CAESARの土木研究所資料及び共同研究報告書はCAESARホームページでご覧いただけます。
http://www.pwri.go.jp/caesar/profile/04-02.html



独立行政法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)
http://www.pwri.go.jp/caesar/

305-8516
茨城県つくば市南原 1-6
電話　029-879-6773
FAX　029-879-6739
e-mail　caesar@pwri.go.jp

2014.8