

鋼床版の疲労耐久性に関する損傷対策手法の提案

Retrofitting for ECC-strengthened orthotropic steel bridge deck damaged by fatigue loading

三田村浩*¹, 平石剛紀*², 林川俊郎*³, 松井繁之*⁴,
Hiroshi Mitamura, Masanori Hiraishi, Toshiro Hayashikawa, Shigeyuki Matsui

*¹ 土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム (〒060-0031, 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

*² 鹿島技術研究所 土木構造・材料グループ (〒182-0035, 東京都調布市飛田給 2-19-1)

*³ 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628, 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

*⁴ 大阪工業大学 (〒573-0196, 大阪府枚方市北山 1 丁目 79-1)

On the Mihara Bridge, highly ductile engineered cementitious composite (ECC) was used on the thin-surface deckplate to provide high fatigue resistance of the orthotropic steel bridge deck. As fragmentation of ECC into blocks and slip between the pavement and ECC, fatigue tests with wheel running machine were conducted to identify damage mechanism and propose retrofitting methods. In this study, the mechanism of fragmentation of ECC was estimated based on the test results, and the validity of a retrofitting method was verified and the method was applied at the site.

Key words: steel bridge deck, ECC, hydraulic pressure, wheel tracking test, aramid fiber seat

1. はじめに

北海道江別市に位置し、石狩川を跨ぐ美原大橋（以下、本橋梁）は、3 径間連続鋼斜張橋（主橋梁部）および 3 径間連続鋼床版箱桁（側橋梁部）で構成される長大橋梁（972.7m）である。本橋梁の設計は、S63 年の実施計画から H2 年に主桁・主塔の風洞実験を経て、H5 年と H8 年の道路橋示方書に基づき設計が行われた。一方、近年、鋼床版の疲労損傷が多発¹⁾したことを受け、H14 年に鋼道路橋の疲労設計指針²⁾が発刊されており、旧示方書に基づき設計・施工を実施した本橋梁においても、道央圏連絡道路として物流の大動脈であることから、鋼床版の疲労損傷対策を講じる必要があると判断された。そこで、H16 年度に、本橋梁の橋面舗装工事として、鋼床版の上面に優れた引張性能を有する高靱性繊維補強セメント複合材料（Engineered Cementitious Composite；以下、ECC）にて増厚する ECC 上面増厚工法（以下、本工法）が試験フィールド工事として採用された。

しかし、本橋梁の供用後 6 ヶ月程度を経過した時点において、橋面に ECC のブロック化および舗装すべりの 2 つの損傷が顕在化した。そこで、著者らは、これら損傷メカニズムの究明および対策工法の提案を目的として、現地調査および各種実験を実施した。本文では、主に ECC のブロック化による損傷を対象として、実験結果に基づき損傷メカニズムについて推定するとともに、提案した対策工法の妥当性を検証し現場に適用した結果について報告する。

2. 工法概要および損傷経緯

2.1 工法概要

図-1 に本工法の概要を示す。本工法は、既往の研究成果により、一般的な環境下（滞水していない環境）

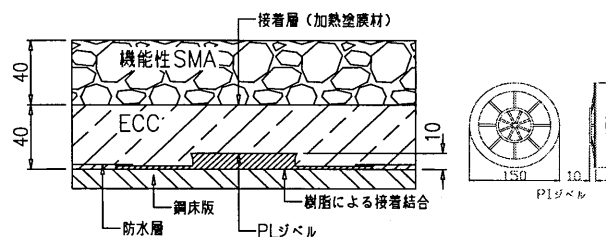


図-1 本工法の概要

においてその補強効果および疲労耐久性が確認されている³⁾。本橋梁は、舗装部分の計画高さが鋼床版上面より 80mm と決定されていたことから、自動車の走行性に配慮した最小舗装厚さを 40mm 程度と考え、ECC に置換できる残りの厚さを 40mm で検討した。また、舗装は上面に排水性を考慮した機能性 SMA（砕石マスタック混合物）である。

ECC と鋼床版のずれ止めには、薄層でも設置が可能なプレート型ジベル（以下、PL ジベル）を適用した。PL ジベルの材質は、耐久性と耐荷性を考慮して高強度繊維強化プラスチックとし、鋼床版との接着にはアクリル系樹脂を用いた。ECC のひび割れ幅抑制機能により、デッキプレート界面で ECC に付着切れが発生した場合でも、PL ジベルを介して ECC と鋼床版の間でせん断伝達および剥離抵抗が可能であり、U リブや主桁直上などの輪荷重による面外変形の影響が大きい箇所においても合成効果が期待できるものである。なお、鋼床版表面は、防錆の目的で PL ジベルを設置しない部分に対して、ポリウレタ樹脂による防水層を設けている。

2.2 損傷経緯

本橋梁は、片側 2 車線に路肩がある直線橋で、縦断勾配が 0.6%、横断勾配が 2.0% の鋼床版上面に ECC 補強材料を用いた上面増厚工法の施工を行ったが、供



写真-1 橋面損傷状況

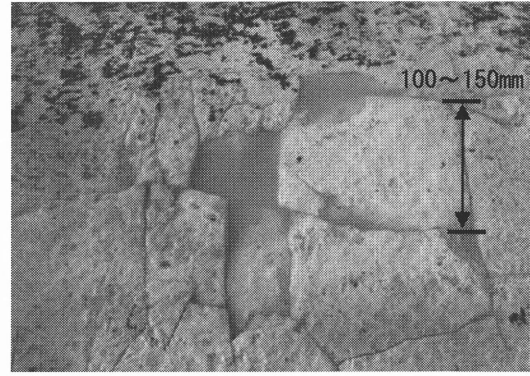


写真-2 ECCのブロック化

用半年後、舗装の表面に写真-1に示すような、ECCのモルタル分と思われる湧出痕が確認された。損傷箇所は、走行車線の左側車輪位置で橋軸方向に点々と発生していた。また、写真-2に示すように、損傷内部の状況は舗装表面が乾いているにも関わらず、内部に滞水が確認されブロック状にひび割れていた。なお、橋軸直角方向の滞水範囲および損傷範囲を図-2に示すが、ECCのブロック化現象は、滞水範囲と関係があると考えられた。

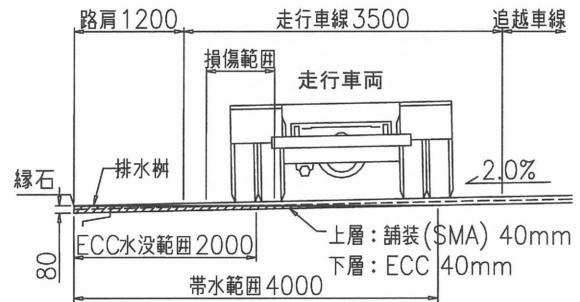


図-2 床版断面図

3. 損傷メカニズムの検討

3.1 試験概要

本工法は、これまでに様々な検討が実施されており、凍結融解を含む一般的な環境下における疲労耐久性能は確認されている。しかし、本橋梁で発生した損傷現象は、完全水没下の環境条件でECCと鋼床版の間に作用する水の圧力が影響していると考えられたことから、これらを模擬した完全水没下での輪荷重疲労載荷試験を実施することとした。試験は、水の環境条件を実橋で損傷が見られた走行車線の左側車輪位置と同様に、水面をECC上面1cmの高さに設定した。試験中は、防水層と鋼床版の間に発生する間隙水圧を測定し、完全水没下での輪荷重による疲労耐久性について検討した。

試験体概要を図-3に示す。試験体は主桁支間3m、橋軸直角方向2.7m、鋼床版厚さ12mm、ECC厚さ40mm、防水層の塗膜2mmである。試験体の周囲は、水を溜めるための鋼枠を設置した。載荷の支持条件は、四隅に長さ150mm丸鋼を用いた4点単純支持とした。走行ラインは実橋と同じくUリブ間に橋軸直角方向中央とし、輪荷重は直径500mm、幅300mmの鉄輪が試験体の中央から前後1mを毎分24往復するよう設定した。

載荷荷重は、法定軸重の片側車輪荷重50kNに衝撃を考慮して1.4を掛けた70kNを基本として、既往の実験³⁾と比較するため、基本荷重の1.2倍および1.4倍の84kNおよび98kN、それぞれ70万回と30万回の載荷と設定した。

3.2 試験結果

輪荷重走行疲労試験結果を図-4および図-5に示す。活荷重による橋軸直角方向のひずみは、載荷回数

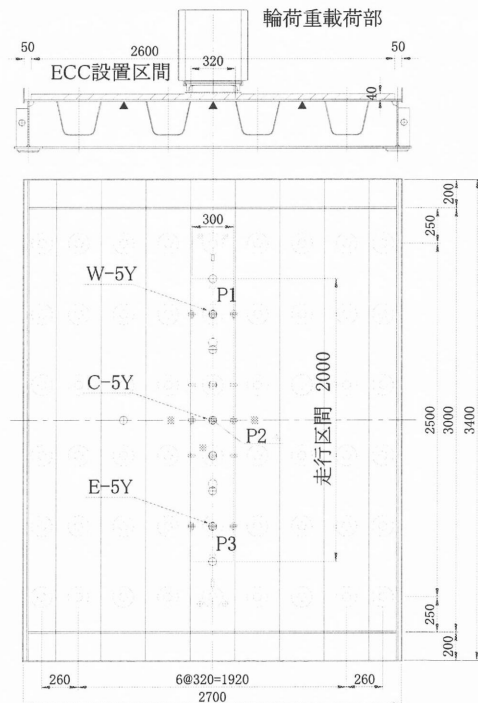


図-3 試験体概要図

が増えるごとに徐々に増加した。70万回以降は載荷荷重の増加によって比例的にひずみが増大したのち、鋼床版のひずみ(応力)が急速に増加した。水圧は84kNでの載荷状態では安定していたものの、98kNの荷重で急激に増大した。また、試験時には写真-3に示すように、荷重載荷位置近傍のひび割れから、水の噴出しも確認された。

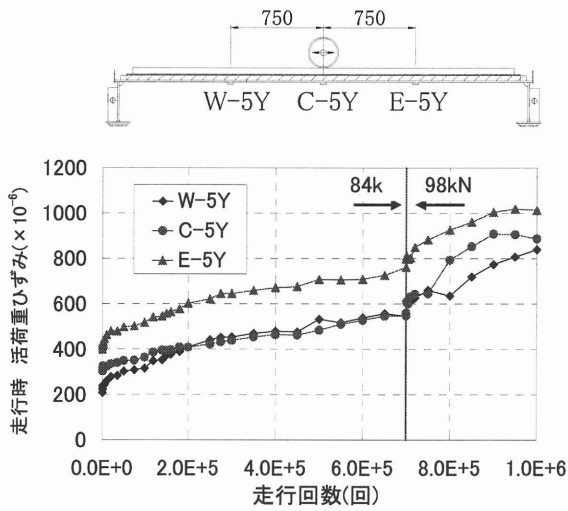


図-4 鋼床版下面の橋軸直角方向ひずみ変化

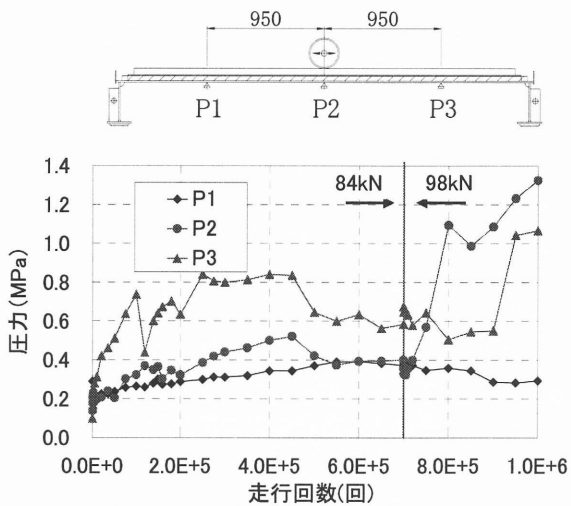


図-5 ECC 下面の圧力変化

輪荷重走行疲労試験概要を図-6 に、動的圧水測定結果および荷重位置を図-7 に示す。荷重装置の移動速度は、図-6 に示す半径 1m の円盤が回転し、荷重装置を毎分 24 回往復させていることを考慮すると、中央部付近で最大約 9km/h となる。図-7 の測定結果は、荷重車輪位置と測定された水圧の経時変化図である。荷重装置が速度最大となる中央 (P2) において、瞬間最大 1.3MPa 程度の圧力が計測された。これは、繰り返し荷重を受けることにより ECC と防水層の間に滞水した間隙水が輪荷重によって高水圧を発生させているものと考えられた。

また、本橋梁の不具合が起こっている走行車線の左側車輪位置において、輪荷重走行疲労試験と同様に動的圧水測定を実施した結果を図-8 に示す。水圧測定時のデータは、橋面にダンプトラック (前 1 軸、後 2 軸) が通過した時のデータである。波形の山の間隔 (約 0.27sec) と車軸間隔 (1-2 軸間、約 3.5m) より、ダンプトラックの速度は約 50km/h 程度と推定されたが、一般車であるため荷重は不明である。図-8 より、測定された水圧は最大で 0.8MPa であり、この値は、実験

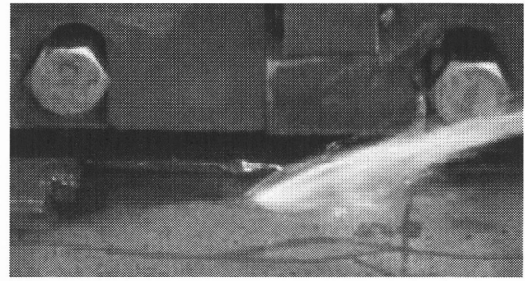


写真-3 ECC 表面からの水の噴出

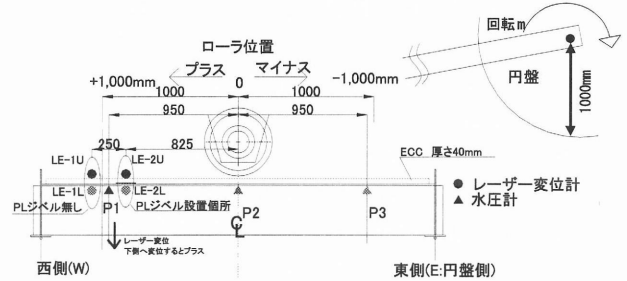


図-6 輪荷重走行試験概要図

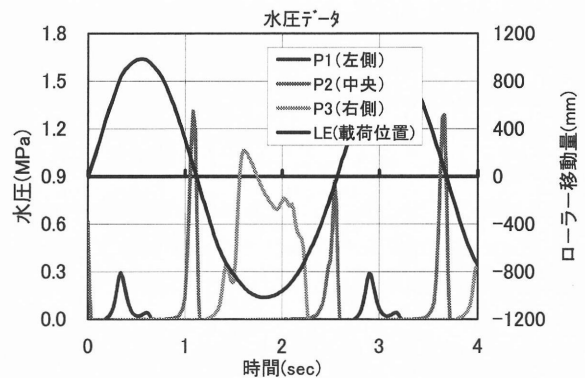


図-7 動的水圧測定結果

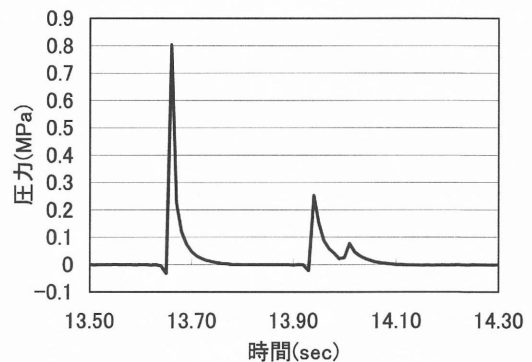


図-8 実橋での水圧測定結果

で測定された水圧よりは小さいものの、実験と同じように実橋においても瞬間的に想定していなかった大きな水圧が発生していることが確認された。

さらに、水圧の上昇を抑制するために、ECC と防水層の界面にドレーンを設置した試験体の輪荷重走行疲労試験における水圧の測定結果を図-9 に示す。なお、図-9 には、ドレーンを設けない試験体の結果も併記した。ドレーンを設けない試験体では、荷重を 98kN に上げた 70 万回程度から急激に圧力の上昇が見られ

たのに対し、ドレーンを設けた試験体では、荷重を98kNに上げた後も水圧の急激な上昇は見られず、排水機能を設けることが水圧低減に大きく効果があることが確認された。

以上より、本構造においてECC上面までを完全に水没させ、荷重の作用範囲近傍を密閉させた状態では、高い間隙水圧が発生することが確認された。これらの計測された水圧は、ECCを破壊させるに十分な水圧であり、実橋では、この水圧の影響により写真-1,2に示すように比較的早期に損傷が生じたものと考えられた。

4. 対策工法の提案および効果確認

4.1 対策工法

損傷メカニズムの検討において、鋼床版とECC間に浸入した水の間隙水圧が原因と推定された。これを受け、本橋梁の補修対策として、以下に示す3項目を提案した。

- ①ECC下面に浸入する水を少なくするために、舗装を水密性に優れた細密粒度ギャップアスファルトに変更する。
- ②ECC下面に水が浸入した場合でも、水圧の上昇を抑制するために、鋼床版に排水ドレーンを設ける。
- ③ECC下面に水が浸入した場合にECCのブロック化が懸念される箇所（ひび割れ発生箇所や輪荷重走行位置など）には、ECC上面にアラミド繊維シートをアクリル系樹脂により貼付け補強する。

ここでは、③で提案した工法の効果確認実験の結果について示す。

4.2 アラミド繊維シートの補強効果の確認

アラミド繊維シートの補強効果の確認を目的として、定点疲労載荷試験および輪荷重走行試験を実施した。

(1-1) 定点疲労載荷試験概要

事前検討として図-10に示すように、輪荷重走行試験で確認された水圧1.3MPaが生じた場合でも、ECCに発生する見掛けの曲げ応力を曲げ破壊レベルよりも低い値とするためには、ECC施工厚を50mm以上確保する必要がある。しかし、本橋梁では、舗装施工厚を確保するためECCの厚さを増やすことが出来ず、アラミド繊維シートの補強によって曲げ耐力を向上させる方法を選定することとした。適用するアラミド繊維シート1枚の引張耐力をECCの厚さに換算すると16mmに相当することから、本補強を用いることで、ECCの施工厚50mm以上が確保され、所定の引張耐力が付与できるものと推定される。この補強効果を確認するために、ECC表面に水が滞水した状態での定点載荷疲労試験を実施した。試験体は、図-11に示すように幅200mm、長さ1640mmとし、ECCにひび割れが生じた状態を模擬するため、ECCには約1mm幅のスリットを計5箇所設けた。ECC上面には、アクリル系樹脂によりアラミド繊維シートを樹脂含浸させており、スリット部分（ひび割れ

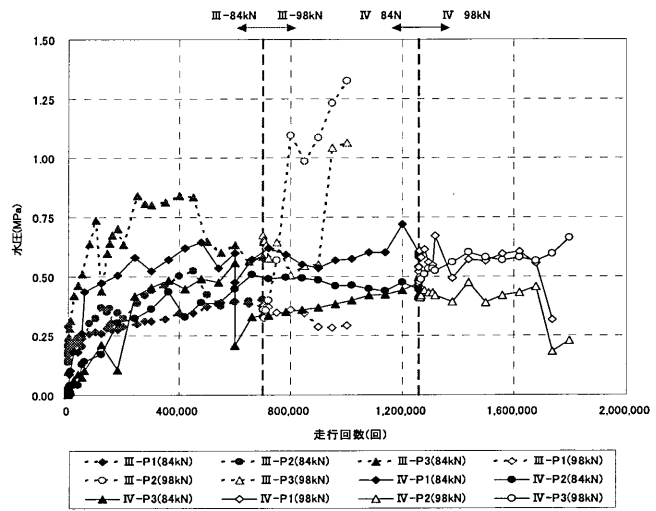


図-9 水圧の推移

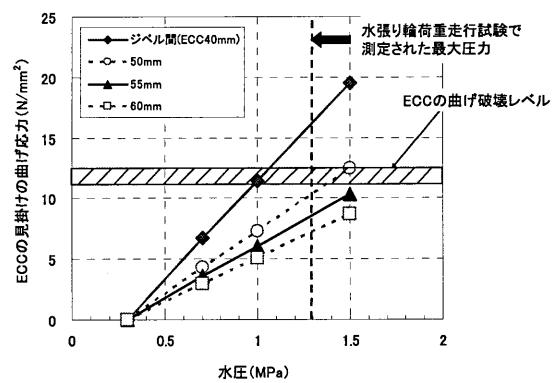


図-10 水圧と施工厚を変えたECCに発生する見掛けの曲げ応力の関係

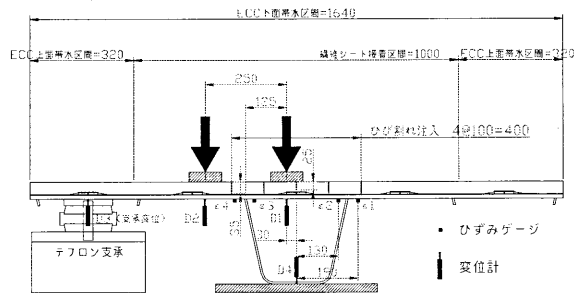


図-11 アラミド繊維シートの補強効果確認試験概要

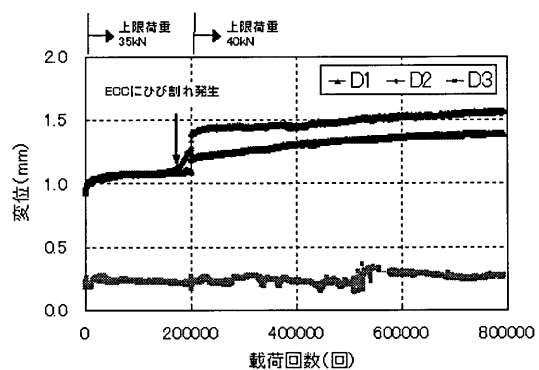


図-12 アラミド繊維シートの補強効果確認試験結果

部分)は、アクリル系樹脂により、充填された状態となっている。

載荷荷重は、鋼床版疲労の支配的要因の1つであるダンプロックのダブルタイヤがUリブ近傍に作用した状態を想定して、ダブルタイヤ1組を対象に、試験体の奥行き長さ200mmを考慮して設定した。試験は、ECCの下面全周囲と試験区間のECC表面に鋼材および防水テープによる枠を作製し、ECC表面に水が滞水した状態で実施した。疲労試験の載荷要領は、下限荷重を1kNで固定し、上限荷重を35kNで20万回、40kNで60万回、合計80万回の疲労載荷とした。

(1-2) 定点疲労載荷試験結果

図-12に試験結果を示す。載荷回数16万回近傍で変位が増加しているが、これはECCのスリット部分(ひび割れ部分)の樹脂充填部分で再びひび割れが発生したことによるものである。その後は再びひび割れ部分を含む変位・ひずみに大きな変化はなく、疲労試験終了後の目視調査においても、繊維シートの損傷およびECCに過大なひび割れの発生等は認められなかった。

(2-1) 水張輪荷重走行疲労試験概要

定点疲労載荷試験結果を踏まえて、移動荷重によるアラミド繊維シートの補強効果を確認するため、ECC表面に水が滞水した状態での輪荷重走行疲労試験を実施した。試験体は実橋と同じ舗装を有する構造で製作した。表-1に載荷要領を示す。ステップ1~3まで水張り条件で216万回、その後、舗装を撤去し実橋と同じ程度のひび割れを設ける目的で予備載荷を行った(ステップ4~5)。最終のステップ6でECC上面にアラミド繊維シート補強を実施した後、水張り条件下で再度疲労載荷試験を実施した。

(2-2) 水張輪荷重走行疲労試験結果

ステップ4~6の走行時の最大ひずみデータを図-13に示す。ステップ4,5はアラミド無し(9.5万回載荷)、ステップ6はアラミド有り(102万回載荷)でも荷重は98kNである。

アラミド繊維シート接着後におけるひずみについては、若干のばらつきは認められるものの、接着前のひずみと同等であった。一方、アラミド繊維シートを張り付けた後の疲労回数が91万回程度で、中央部分のひずみ(SC-5Y)が急激に増加し輪荷重の移動範囲に沿った橋軸方向のひび割れが確認された。この結果を用いて、実橋における疲労回数200万回/100年相当を評価する換算輪荷重は92kNと試算される。また、この荷重は、本橋梁の設計荷重50kNに衝撃係数(1.4倍)を加えた70kNを大きく上回る荷重であり、設計荷重より1.8倍程度以上の輪荷重の繰り返しにおいても疲労耐久性が確保できるものと判断された。

ステップ	載荷輪の種類	荷重(kN)	載荷回数(万回)	備考
1	As-タイヤ	70	30	大阪工大・水張り
2	As-タイヤ	98,130	120,20	以下寒地研・水張り
3	ECC-タイヤ	98,130	10,36	・水張り
4	ECC-鉄輪	98,130	2,5.5	予備載荷・水張り
5	ECC-鉄輪	98	2	・水張り
6	ECC-鉄輪	98	102	アラミド補強・水張り

表-1 載荷要領

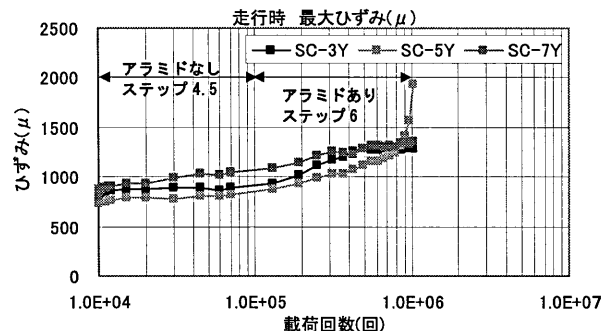


図-13 最大ひずみの計測結果(ステップ4,5,6)

5. 実工事への適用

本橋梁では、07年度において図-14に示す主橋梁部の橋面補修工事を実施した。主橋梁では、ECCと舗装の界面すべりが全面的に発生しており、その他走行車線歩道側の輪荷重走行位置に部分的にECCのブロック化した箇所が認められた。07年度補修工事では、ECCの損傷レベルおよび補修位置に応じた検討結果に基づき、3つの補修工法を採用した。表-2にそれぞれの補修工法の概要と補修数量を示す。工法Aは、ECCが健全である部分が対象であり、舗装すべりの改善を目的とした対策工法である。工法Aでは、水密性の確保を目的としてアスファルト混合物を細密粒度ギャップアスファルトに変更し、また、水密性確保、せん断抵抗改善を目的としてアスファルト混合物の厚さを40mmから50mmに変更した。さらに、舗装とECCの接着性改善およびECCの水密性確保を目的として、研掃および樹脂含浸によりECCの表面を改善した(写真-4)。

工法Bは、ECCに小規模な損傷が認められる箇所および今後損傷の進展が懸念される輪荷重走行位置を対象とし、既設ECCの補強を目的とした対策工法である。アラミド繊維シート施工状況を写真-5に示す。

工法Cは、ECCがブロック化している箇所を対象であり、工法Bを併用して、既設ECCの打ち替えを目的とした対策工法である。早強ECCの打設状況を写真-6に示す。さらに、対策工法A, B, Cにより、補修を実施した場合でも、鋼床版とECC間への水の浸入を完全に止めることは難しいと考えられるため、滞水しやすい歩道側外側線の外側に8m間隔で鋼床版に別途取り付け排水孔に誘導する鋼製の排水ドレーンを設置した(写真-7)。

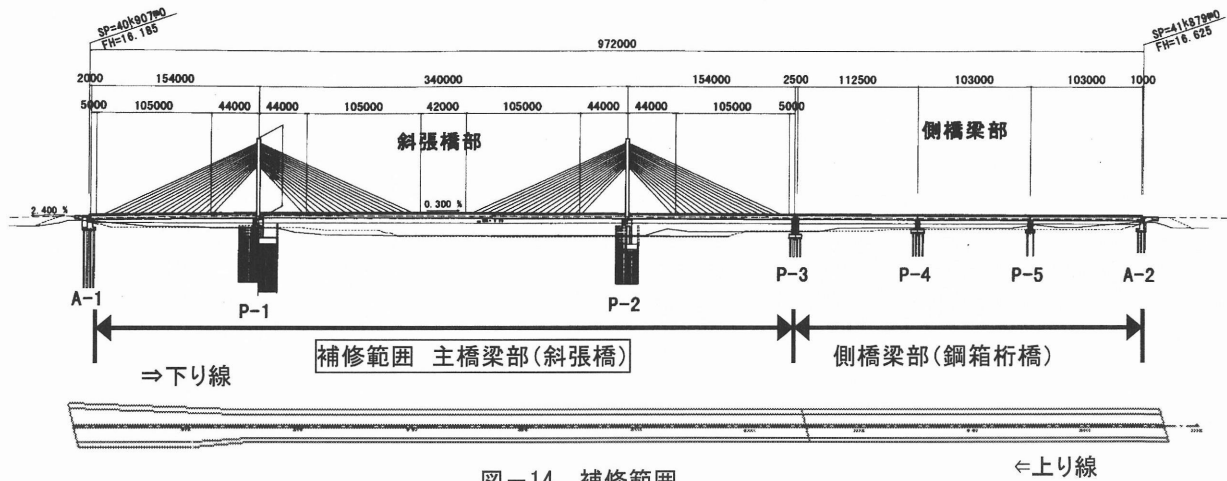


図-14 補修範囲

6. まとめ

ECC を用いた上面増厚工法を採用した美原大橋で生じた損傷のうち、ECC のブロック化を対象として、損傷メカニズムの推定、対策工法の妥当性検証を経て現場適用を行った。以下に所見をまとめる。

(1) 本工法において、ECC 上面までを完全に水没させ荷重の作用範囲近傍を密閉させた状態では、高い間隙水圧が発生することが確認された。この水圧により ECC が短期間で損傷し、その後の輪荷重の繰返しによって、ブロック化したものと考えられた。

(2) 対策工法として提案した、水の浸透を抑制する水密性に優れた細密粒度ギャップアスファルトの敷設、排水性を向上させる排水ドレーンの設置、ECC を補強するアラミド繊維シートの貼り付けはともに ECC の損傷の軽減または損傷後の補強対策として、有効であることが確認された。

なお、本橋梁の対策工法に関しては、鋼構造、コンクリート構造、舗装構造、床版構造の専門家により構成される対策検討委員会を立ち上げ検討を実施している。今後は、側橋梁部の補修対策の検討も踏まえ、補修箇所を追跡調査を行い、効果の確認を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 構造委員会鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労，土木学会論文集，第 410/I-12，pp. 25-35，1989.
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，pp. 43-55，2002.
- 3) 三田村浩，須田久美子，福田一郎，今野久志，松井繁之：高靱性繊維補強セメント複合材料による鋼床版上面増厚補強に関する研究，土木学会論文集 E，Vol. 62，No. 2，pp. 356-375，2006.05.
- 4) 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案）：土木学会，コンクリートライブラリー127.

表-2 補修工法の概要


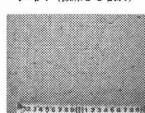



工法	A 工法	B 工法	C 工法
数量	800m ²	5600m ²	300m ²
	総計 13900m ²		
施工フロー	①アスファルト撤去 ↓ ②ECC表面切削研掃 ↓ ③ECC表面補強材塗布 ↓ ④接着剤塗布 ↓ ⑤細密粒度ギャップアスファルト敷設 40mm-50mm	①アスファルト撤去 ↓ ②ECC表面切削研掃 ↓ ③ECC表面補強材塗布 ↓ ④アラミド繊維シート貼付け（補強） ↓ ⑤接着剤塗布 ↓ ⑥細密粒度ギャップアスファルト敷設 40mm-50mm	①アスファルト撤去 ↓ ②ECC撤去 ↓ ③早強ECC打設 ↓ ④ECC表面切削研掃 ↓ ⑤ECC表面補強材塗布 ↓ ⑥接着剤塗布 ↓ ⑦細密粒度ギャップアスファルト敷設 40mm-50mm
適用損傷レベル/補修位置	I ⁺ #0 (損傷なし)  I ⁺ #1 (微細ひび割れ) 	I ⁺ #2 (小規模な損傷および輪荷重走行位置) 	I ⁺ #3 (ブロック化)  



写真-4 ECC 表面の研掃



写真-5 アラミド繊維シートの接着



写真-6 早強 ECC の打設

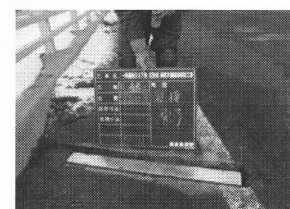


写真-7 ドレーン設置状況