

超緻密高強度繊維補強コンクリートによる 床版補修工事について

常岡 信希¹

¹京都府 中丹東土木事務所 道路計画室 (〒623-0012 京都府綾部市川糸町丁島 10-2)

松島橋は供用後 55 年が経過し、床版に損傷が確認されたため、主な劣化因子の一つである表面水の遮断と床版強度の向上を目的とする超緻密高強度繊維補強コンクリートを使用した補修を行い、その効果を載荷試験及び FEM 解析により検証した結果について報告するものである。

キーワード コンクリート床版補修、合成桁、たわみ、FEM 解析

1 はじめに

主要地方道舞鶴野原高浜線は、京都府舞鶴市の東舞鶴中心街を起点とし、大浦半島を周回し、福井県大飯郡高浜町に至る全長 22.9km の路線である。図 1 に示すとおり周辺には海上自衛隊、火力発電所及び工業団地等があり通勤車両や大型車が多い状況である。(H27 センサス交通量 11,403 台/24hr)



図 1 位置図

松島橋の橋梁一般図及び諸元は図 2 及び表 1 のとおりであり、本橋は左岸下流側バチ部及び歩道部を後付けて拡幅している。

表 1 橋梁諸元

橋長	49.8m (支間長 L=24.125m×2 連)
幅員構成	車道 9.75m + 片歩道 2.0m
竣工年	本線 1962 年 (建設後 55 年経過) 拡幅 1982 年 (建設後 35 年経過)
適用示方書	本線 鋼道路橋の合成桁設計施工指針 (昭和 34 年) 拡幅 道路橋示方書 (昭和 55 年)
活荷重	本線 不明 拡幅 TL-20 (1 等橋)
上部工形式	本線 単純合成桁 拡幅 A1-P1 単純非合成箱桁 P1-A2 単純合成桁
下部工形式	重力式橋台、パイルベント橋台・橋脚
斜角	62° 00' 00"

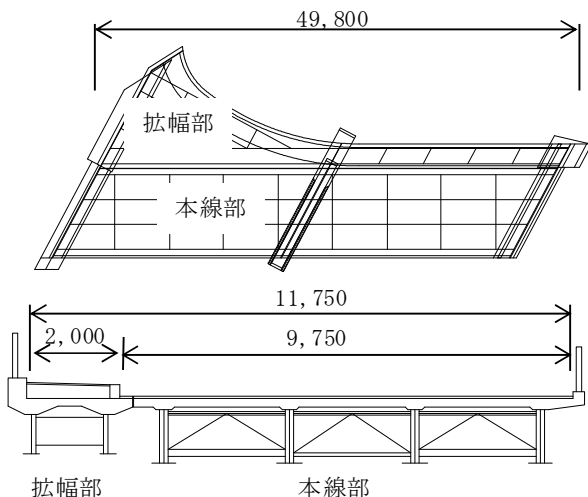


図 2 橋梁一般図

2 事業概要

(1) 現状

本橋の現状は、橋面には舗装のクラック及びポットホール等が確認され(写真 1)、その都度部分補修を繰り返しており、また床版下面には遊離石灰(錆び汁はなし、写真 2)が生じていることから床版の劣化が懸念され抜本的な補修を検討することとした。



写真 1 舗装損傷状況



写真 2 床版下面状況

(2) 健全性評価

補修前の床版の健全性を確認するため、コア採取によりコンクリートの各種試験を実施した結果を表2に示す。

表2 床版の現況調査結果

調査項目	調査結果
床版はつり	被り51mm、部分的な錆
圧縮強度	33N/mm ² (3箇所平均値)
中性化	24mm(被り以内)
塩分含有量	1.2kg/m ³ (主鉄筋位置)

この結果、いずれの試験結果からも緊急性を有する致命的な変状は認められなかった。

次に、床版及び主桁各部材について平成24年道路橋示方書に基づき設計荷重B活荷重として応力照査を実施した結果、コンクリート及び鉄筋双方、並びに桁各部材において耐力不足となった。

(3) 補修工法

対策工法の選定に当たり、本橋は、重要度が高い路線であり、重交通路線であることから、将来的に補修を繰り返す工法ではなく、恒久的な対策が必要と判断した。ここで恒久対策とは顕在化する変状箇所を補修するだけでなく、内在する劣化要因や外的要因の排除を図りおよそ10年以上にわたり補修効果を期待するレベルと位置付けられている¹⁾。

また、単なる補修のみに留まらず現状の大型車交通量に対応するため一定の補強が図られることを主な選定要素とした(表3)。

表3 対策工法比較表

工法	補修	補強		本工法
	切削OL	炭素繊維補強+切削OL	上面増厚+防水	
内容	橋面防水のみで床版未補修	橋面防水+床版下面に炭素繊維補強	床版を10cm増厚+鉄筋増量	特殊コンのみで防水層不要
経済性	安価	高価	最も高価	高価
課題	強度不足未解消	床版コンの強度不足	死荷重増に伴い主桁+基礎の補強必要	死荷重増なく床版強度向上

比較選定の結果、補強に伴う死荷重増加がなく、かつ確実な防水効果が得られ、早期に交通開放可能なことから本工法を採用することとなった。

なお、超緻密高強度繊維補強コンクリート(以下「特殊コン」)の材料特性は表4に示すとおりであり、特徴としては、早期に高強度が得られ、緻密構造であることにより劣化因子の侵入を抑制できることである。

表4 特殊コンクリート材料特性

圧縮強度	130N/mm ² ($\sigma_{24h}=100N/mm^2$)
ヤング係数	40kN/mm ²
透気係数	$0.001 \times 10^{-16}m$ 以下
水結合比	20%程度
構成材料	セメント、結合材(シカフーム等) 水、骨材(砂、鋼粉末)、鋼繊維

(4) 本工法の概要

本工法の作業フローを図3に示す。まず橋面舗装(t=5cm)を通常の切削機により切削し、床版表面2cmをウォータージェット工法(WJ)によりはつり取った後、特殊コンクリートを打設し、舗装を復旧するものである。なお床版はつりにWJを用いた理由は、アスファルト切削により床版表面に脆弱部が生じた場合、特殊コンクリート打設時に悪影響を及ぼすことを避けるためである。また特殊コンクリート厚の打設厚については、必要最小厚1cmを確保することから、施工時の不陸を考慮し、2cmとすることとし、施工後、その効果を検証することとした。本工法の施工断面図を図4に示す。

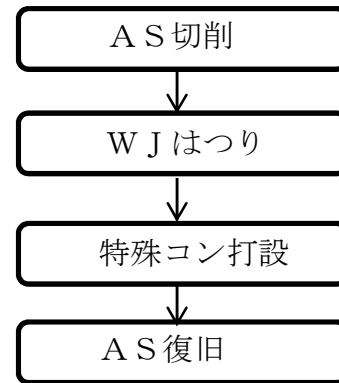


図3 補修作業フロー

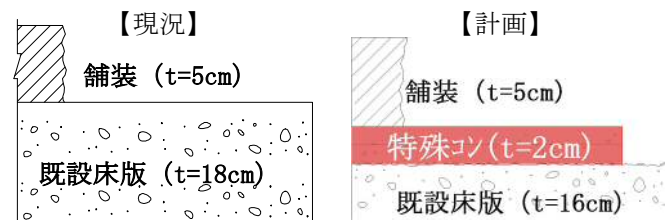


図4 補修前後の断面図

(5) 施工状況

a) AS切削

舗装切削後の床版表面の状況については、床版の抜け落ちを伴う損傷はなかったが、舗装修繕箇所等においては、床版表面のコンクリートが一部土砂化していることが確認された(写真3)。また、過去の切削等舗装補修時によるものと思われるアスファルト成分が広範囲に付着していた(写真4)。



写真3 床版土砂化状況



写真4 AS切削後の床版表面

b) WJはつり

WJ工法は、ブレーカー等による打撃工法とは異なり、高圧水によりコンクリート中のセメントモルタル分を破壊し、撤去することから作業時の振動が

少なく、床版への悪影響を軽減することが可能である²⁾ (写真5)。

はつり後の床版表面の状況は写真6に示すとおりであり、ほぼ全橋面にわたって高圧水の噴射跡が残留することから、全体的にコンクリート強度が低く、劣化している状況が確認された。



写真5 WJはつり状況 写真6 はつり後の床版表面

c) 特殊コンクリート打設

特殊コンクリートの標準配合は表5に示すとおりであり、少ない水によりセメントとシリカフェーム等とを結合させ、これら結合材が反応後の容積比で90%以上を占めることにより強固で緻密な構造となるものである。

製造及び打設に当たっては、写真7～10に示すとおり近隣の作業ヤードにプラントを設営し、プレミックスセメント等の各材料を専用のミキサーにより練混ぜることとした。品質管理については、圧縮強度、スランプフロー及び空気量とし、試験練り結果等に基づき管理値を設定した。

また、敷き均しについては、コテ仕上げ・養生シート設置の一連の作業が効率的に実施できるよう専用の機械を用いた。

なお、本コンクリートは、材料分離抵抗性に優れるが、手で持ち運べるほどの高粘性であるため、練混ぜ及び敷き均しそれぞれで専用の機器が必要となる。

表5 特殊コンクリート標準配合表

設計強度 (N/mm ²)	水結合比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		ミックスセメント	水	鋼繊維	銅ウール	混和剤
130	21	1750以上	250~300	150以上	150以上	40~50



写真7～10 特殊コンクリートの製造及び打設状況

また、特殊コンクリートは、 σ_{24h} 強度が100N/mm²以上となり、2車線確保しながら次段階の作業に移



写真11 特殊コンクリート打設完了状況

行する必要があることから打設日の翌日には交通開放することとした。打設完了後の交通開放状況を写真11に示す

d) 舗装

特殊コンクリート打設完了後、舗装界面における所要せん断強度(0.15N/mm²以上³⁾)を確保する必要があるため通常の乳剤ではなく専用の接着材を特殊コンクリート表面に塗布すると共に、舗装内に浸透した表面水を適切に排水させるため地覆付近に排水管(φ12)を設置した(写真12)。なお、舗装材には、水による剥離抵抗性に優れた改質Ⅲ型-W相当品を使用した。



写真12 舗装接着材塗布状況

3 載荷試験

(1) 試験概要

本工法による特殊コンクリートの効果を検証するため補修前後に総重量25t程度の定荷重車両(トラッククレーン)を走行させ、床版のたわみ、主桁のひずみ及び床版下面ひび割れ幅を計測する載荷試験を実施した。

(2) 試験方法

載荷試験による計測箇所及び内容は以下のとおりとした。

- 床版
 - 補修前後の床版の剛性の変化を把握するため床版下面のたわみ量を計測。
- 主桁
 - 補修前後の主桁の荷重配分状況を把握するため上下フランジ及びウエブのひずみを計測。
- 床版下面
 - 車両走行時の床版下面ひび割れ幅等の挙動を確認することにより床版の劣化状況を把握するため床版下面にクラックゲージを設置。

なお、計測箇所及び計器設置状況を図5及び写真13に示す



写真13 計器設置状況

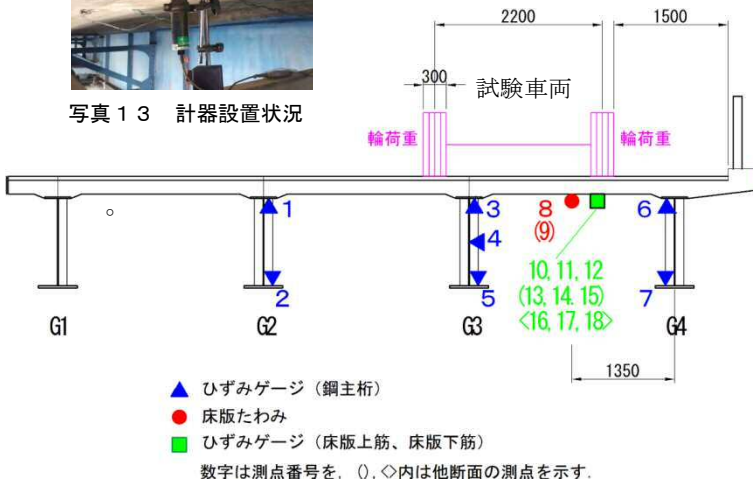


図5 計測機器設置位置

(3) 試験結果

a) 床版たわみ

補修前後の床版たわみの変化については図6に示すとおりであり、補修前のたわみが-1.37mmであったのに対し、補修後には-0.745mmとなり約46%低減された。

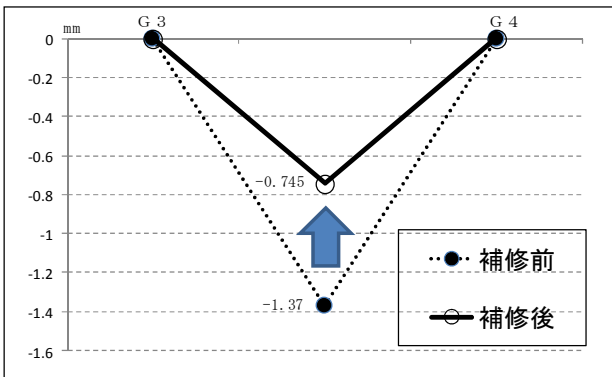


図6 補修前後の床版たわみ

b) 主桁のひずみ

同様にG3桁のひずみの変化について図7に示す。

下フランジに着目すると補修前後のひずみが 107μ から 94μ となり約10%程度軽減された。また中立軸においては、上フランジからの距離が補修前550mmに対し補修後は305mmになったことから245mm中立軸が上昇したことになる。これは、補修前に主桁に働いていた圧縮力が補修後の床版剛性が増加したことにより軽減されたことを意味しており、合成桁本来の機能を一部回復したものと判断される。

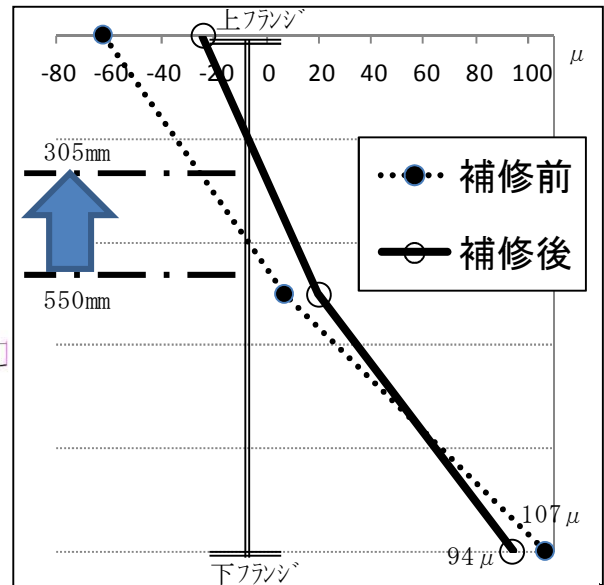


図7 補修前後のG3桁のひずみ

c) 床版下面のひび割れ

定荷重車両を走行させた時の補修前後の床版下面ひび割れ幅の変化について、図8に示す。図中の縦軸は、ひび割れはば(mm)、横軸は走行時間(秒)である。

図より補修前後のひび割れ開閉量(図の振幅高さ)が0.084mmから0.055mmとなり35%軽減された。

このことから、特殊コンクリートと既設床版が一体化されたことにより床版の上下動が抑制されたものと判断される。また補修前には0点へ戻り切らずに生じていた残留変位が改善されている。一般的に床版の劣化が進行するとひび割れ挙動が走行前の値に戻らず残留変位として表れることから、補修前の床版劣化状況がある程度改善されたものと推測される。

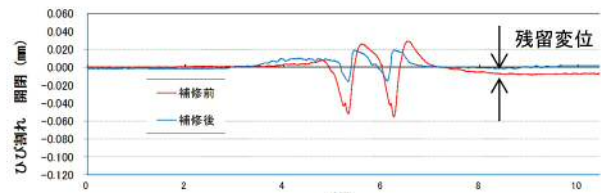


図8 補修前後の床版下面ひび割れ幅

4 FEM解析

(1) 解析概要

载荷試験の理論的検証を行うため、3次元立体FEMモデルによる静的線形解析を行った。本モデルの概念図は図9に示すとおりであり、床版をソリッド要素、主桁をシェル要素、対傾構をビーム要素とした。

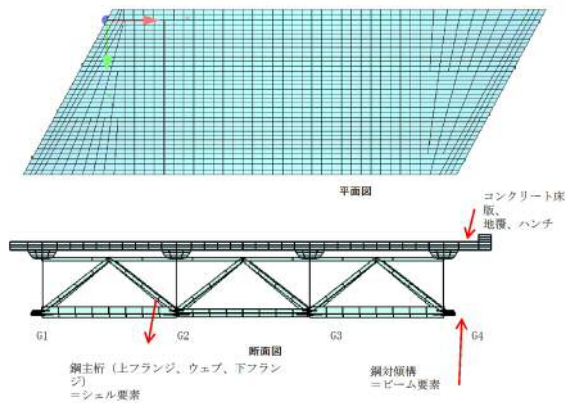


図9 FEM解析モデル概要図

解析に使用する外力は載荷試験の定荷重車両輪荷重とし、床版たわみと主桁ひずみを評価項目とした。

また、床版の劣化状況を検証するため以下の3つのケースを想定し、解析を行った⁴⁾。

①床版の全断面有効 (FEM解析1)

供用開始時の床版にひび割れの全く存在しない健全な状態を想定し、全断面が有効としてモデル化した (補修コンは考慮せず)。

②床版の引張側コンクリート無視 (FEM解析2)

活荷重によるたわみが引張側コンクリート無視となるまで劣化した状態 (劣化度 I と定義) を想定し、全断面有効とした①の状態から弾性係数を低減したモデルとした。

③床版のせん断抵抗低下 (FEM解析3)

本橋は補修前の床版たわみが大きく、また床版下面に格子状のひび割れが発生し、遊離石灰が認められており、載荷試験によるひび割れ幅の測定 (補修前) においても残留変位が生じていることから、曲げモーメントによる劣化に加え、せん断抵抗力が低下していることを想定したモデルとした (劣化度 II と定義)。

上記3ケースにおいて設定した各係数値を表6に示す。

表6 FEM解析設定値

床版条件	単位N/mm ²		
	FEM解析1 全断面有効 (健全)	FEM解析2 劣化度 I (引張側C ₀ 無視 →曲げによる劣化)	FEM解析3 劣化度 II (劣化度 I + せん断 による劣化)
弾性係数			
鉄筋	205.000	205.000	205.000
既設コン	20.000	9.000	9.000
補修コン	-(補修なし)	40.000	40.000
せん断弾性係数			
既設コン	8.696	3.913	783
補修コン	-(補修なし)	16.667	16.667

(2) 解析結果

a) 補修前

補修前のたわみ実測値と解析値の比較を図10に示す。

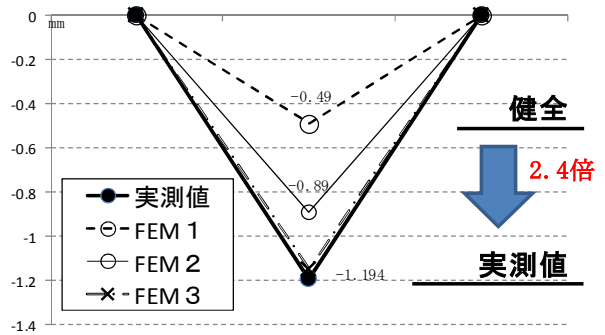


図10 補修前の床版たわみ (測点9)

実測値では、-1.194mmであったのに対し、FEM 1～3の解析値はそれぞれ-0.49、-0.89、-1.15mmとなり、FEM解析3の結果が最も実測に近い値となった。このことから、床版の全断面有効の健全状態に比べ実測値は2.4倍のたわみであり、補修前の床版は、曲げによる劣化状態よりも進行していたことが推測される。

b) 補修後

補修後のたわみ実測値と解析値の比較を図11に示す。

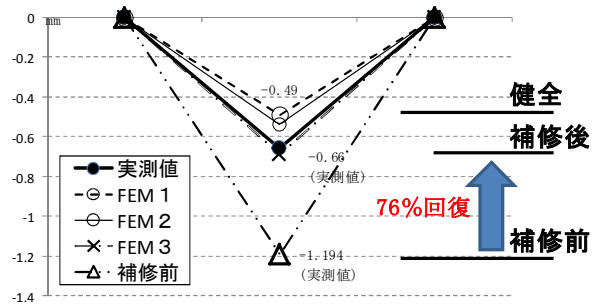


図11 補修後の床版たわみ (測点9)

実測値では、-0.66mmであったのに対し、FEM 2及び3の解析値はそれぞれ-0.54及び0.69mmとなり、補修後においてもFEM解析3の結果が最も実測に近い値となった。このことから、せん断抵抗が低下している劣化状況であっても本工法により改善が図られ、床版の全断面有効の健全状態 (FEM解析1) の76%程度まで回復したことが示された。

5 結論

本工法による効果について載荷試験及びFEM解析により実測及び理論的に検証した結果は以下のとおりである。

- 補修前のたわみは床版全断面が健全な状態に比べ2.4倍であり、劣化が進行していたが、補修後は76%まで回復した。
- 補修の前後で、主桁の中立軸が200mm程度上昇し、既設床版と特殊コンクリートが一体化され劣化していた床版が合成床版としての本来の機能を一部回復できた。

- ・床版下面のひび割れ幅が改善され、補修前の残留変位が減少したことから、本工法により床版の劣化状況が改善された。
- ・FEM解析の結果より、補修前の床版の劣化は曲げによる劣化のみでなく、せん断による劣化状態まで進行していたが、補修後の解析値は実測値と整合し、本工法により床版の耐力が改善されたことが理論的に実証された。

6 考察

載荷試験及びFEM解析により検証した補修前の床版劣化状況について、既設床版表面の状態（WJはつり後）は写真4に示すとおりであり、アスファルトが広範囲に付着しており、これらは悪影響を及ぼすため特殊コンクリート打設前に写真14に示すとおり全て撤去した。

本工法の検証結果から付着アスファルト部分が床版コンクリートとしての機能を果たしていなかったこと、ほぼ全面にわたり床版表面が脆弱であったこと及び一部で土砂化するほど劣化していたこと等によりたわみが大きかったことが考えられる。

なお、この付着アスファルトについては、過年度に実施した切削等による舗装補修時のものと推定される。



写真14 付着 AS 撤去状況

以上のことより、特に特に維持管理の観点から今回工事で確認された知見は以下のとおりである。

- ・橋面舗装修繕が繰り返される場合、床版が土砂化している可能性がある。
- ・床版下面に遊離石灰を伴うクラックがある場合、表面の劣化が進行している可能性がある。
- ・橋面舗装修繕時には、特にAS取壊し時に床版表面を損傷させないよう留意する必要がある。
- ・床版の劣化は、水分により加速されることから、排水対策が重要。

謝辞：本工事及び検証を実施するに当たり、松井繁之大阪大学名誉教授に多大なるご助言を賜りましたことを深く感謝致します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '17、2017.2
- 2) 日本ウォータージェット施工協会：ウォータージェット工法 計画・施工の手引き、2009.3
- 3) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、2007.3
- 4) 松井、前田：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案 土木学会論文報告集、第 374 号、1986