

報告

超緻密高強度繊維補強コンクリートを用いた 床版上面補修による延命化対策

牧野大介*， 芹沢尚一**， 平栗一哉**， 東田典雅***， 赤尾駿太郎***， 三田村浩****

*J-ティフコム施工協会 委員 (〒001-0025 北海道札幌市北区北 25 条西 4-1-26)

**東日本高速道路 (〒224-0044 神奈川横浜市都筑区川向町 1047)

***ネクスコ東日本エンジニアリング (〒116-0014 東京都荒川区東日暮里 5-7-18)

****博(工), J-ティフコム施工協会 技術委員長 (〒001-0025 北海道札幌市北区北 25 条西 4-1-26)

高速道路橋の鉄道跨線区間の床版において、大規模補修までの延命化対策として、打ち抜きや全厚修復を必要としない超緻密高強度繊維補強コンクリート（以下、本材料）を用いた床版補修を実施した。夜間のみの交通規制時間の中で AS 舗装切削，WJ，床版補修，AS 舗装舗設までの全工程を行い、また、その補修効果の検証として載荷試験を行った。本稿では施工状況と載荷試験結果について解析結果とともに報告するものである¹⁾。

キーワード：床版補修，超緻密高強度繊維補強コンクリート，超早強硬化型，載荷試験

1. はじめに

横浜新道法泉高架橋は 1981 年 3 月に建設された橋長 171.05 m の PC 単純合成桁×4 連+鋼単純合成鉄桁+PC 単純合成桁×2 連の橋梁である。補修箇所は法泉高架橋（下り線）P4-P5 の径間長 45.80 m で 736 m²，JR 横須賀線および東海道本線を跨ぐ箇所にある（写真-1）。日交通量は 10～12 万台で、大型車混入率は約 2 割に達する。

点検の結果、大型車の増大に伴う疲労劣化によって、速やかな床版取替えが必要と判断されたが、鉄道跨線区間の床版であり、実施までに多大な時間を要することから、それまでの延命化対策として、高耐久性の本材料を採用した。



写真-1 法泉高架橋

2. 施工計画

本補修工事は、21 時から翌朝 4 時までの限定した施工時間となる中、AS 舗装切削，WJ，床版補修，AS 舗装舗設の全工程を実施するため、本材料の超早期硬化型を適用して、各工種の施工量および所要時間を考慮し、4 車線を施工ごとに車線規制して 20 回に分けて施工を行った（図-1）。本工法の施工手順及びタイムテーブルを図-2 に示す。

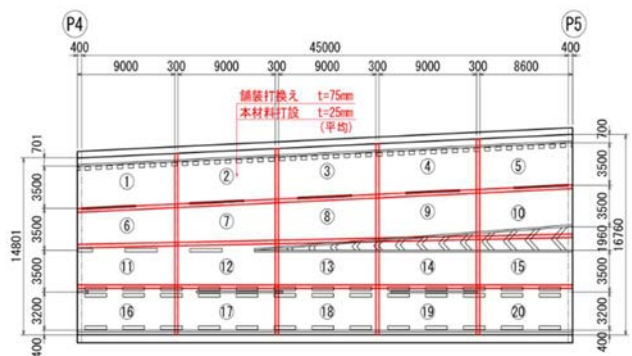


図-1 施工平面図

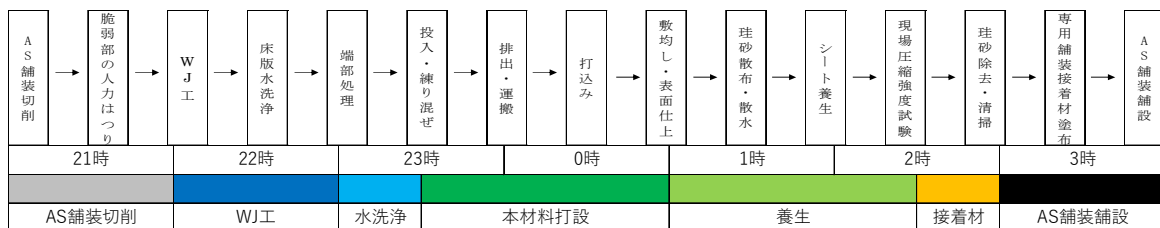


図-2 施工手順およびタイムテーブル

3. 本材料の特徴

本材料は、専用ミックスセメント、補強用鋼製メゾ繊維、補強用鋼製マイクロ繊維、専用混和剤および水で構成され（写真-2）、補強用繊維を 5.0 vol.%以上を混入した超緻密かつ高強度で流動性と材料分離抵抗性に優れたマトリックスを形成する。さらに、振動を与えないと流動化しないという特性を有するため、施工勾配の変化に対応可能な材料である。本材料は一般的なコンクリートの 5 倍以上の圧縮強度を有しており（図-3）、ダンベル型試験体による一軸引張強度も 3 倍程度の強度を有している。図-4 は本材料の引張応力-ひずみ関係を示したもので、高い引張強度とともに降伏後も強度が上昇するひずみ硬化域と、ピーク後に急激な強度低下を起こすことなくひずみが伸びるひずみ軟化域を有していることから一般的なコンクリートに比べエネルギー吸収能力が極めて高いことが分かる。本材料はその緻密性により水、炭酸ガス、塩化物イオン等の劣化因子を遮断するため（図-5）、床版の耐久性を向上させる効果が期待できると共に防水層は必要としない。本材料の特徴を以下に示す。

- ・圧縮強度（材齢 28 日）130 N/mm² 以上
- ・水および塩化物イオン等の劣化因子を遮断
- ・疲労耐久性および耐荷性の向上²⁾。
- ・水粉体比は 15 %程度で、鋼繊維混入率は 5.0 vol.%。
- ・常温シート養生で連続現場練りが可能。
- ・養生時間 1.5h~2h で 24 N/mm² を発現（超早強硬化型）。
- ・既設床版との付着強度は 2.7 N/mm²。

4. 施工

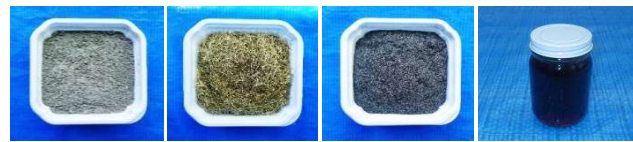
本材料の基本補修厚さは 20mm としている。しかし、本現場において脆弱部が少し厚かったために、補修厚さを 25mm に変更して施工した（図-6）。

4-1. 切削工

大型の舗装切削機により AS 舗装を切削する。床版全面の打音検査を行って浮きが確認された脆弱部は人力ピック等ではつることが重要である。その後、WJ で表面研削を行うが、飛散防止対策として噴射装置にバキュームを接続し、かつ防護シートで囲って安全を確保した（写真-3）。WJ を行うことで、床版表面のマイクロクラックや打音検査だけでは見つけられない脆弱部を確実に除去する。WJ 後は床版を水洗浄し、ガラやノロを高圧バキュームで吸い取る。この工程は本材料と既設コンクリートの一体性を確保するため特に重要な作業である。

4-2. 練混ぜ

本材料の練混ぜは、作業スペースが車線規制内になることから、車載型の専用ミキサを使用した（写真-4）。ミキサ積載車の前方にセメントフレコン積載車を配置し、



専用セメント メゾ繊維 マイクロ繊維 専用混和剤
写真-2 使用材料

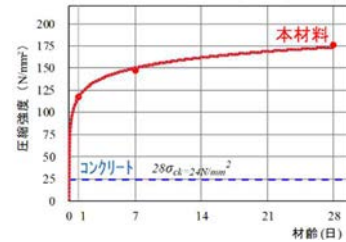


図-3 圧縮強度

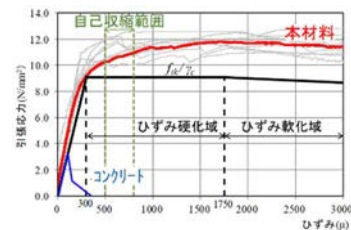
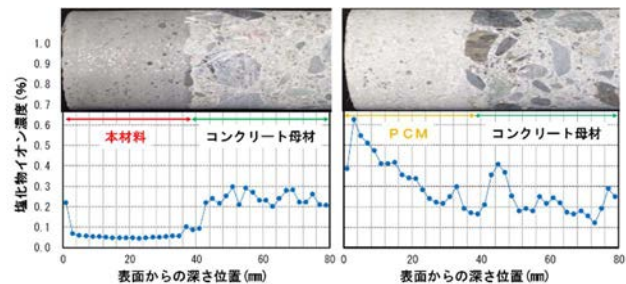


図-4 応力-歪曲線



（左：本材料，右：PCM）

図-5 塩化物浸透深さ結果（EPMA）

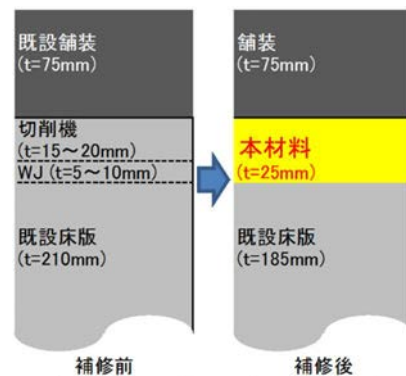


図-6 断面構成



写真-3 WJ 施工状況



写真-4 専用ミキサ

ユニッククレーンによって、ミキサ内に人力投入する。供給量は1回の練り混ぜで0.25 m³ 製造し、これを1夜間4～5セット製造する。

4-3. 敷均しおよび養生

一般的なRC床版補修では、打設面の乾燥養生やプライマ等を必要とするが、本材料の場合は、散水して打設面を十分に湿潤させることでドライアウトを防止する。ミキサから排出された材料は運搬車によって打設箇所まで運搬して打込む。

通常、本材料の敷均しに専用フィニッシャを用いるが、設置に時間を要するため、本現場では人力で敷均しをすることとした。その際、敷均し工具に起振機を付けて振動を励起することで、高粘性で材料分離抵抗性に優れる本材料の人力での敷均しを可能とした(写真-5)。左官による表面仕上げ後、珪砂を撒き、散水することで本材料の急激な表面乾燥を防止し、シートで覆って養生を行う(写真-6)。



写真-5 敷均し状況



写真-6 養生状況



写真-7 簡易圧縮試験機



写真-8 専用舗装接着剤

4-4. 専用舗装接着材およびAS舗装舗設

現場養生1.5時間経過後、現場で簡易圧縮試験機によるテストピースの強度を測定し、24 N/mm²以上の圧縮強度を確認して本材料の養生を終了する(写真-7)。

その後、養生用の余剰珪砂を研掃除去し、プライマおよび専用舗装接着材を塗布して(写真-8)、AS舗装舗設を行って1夜間の補修は完了となる。

5. 補修効果の検証

効果の検証は、補修前後で動的載荷試験、静的載荷試験により行った。計測項目および計測方法を表-1、計測位置および機器配置図を図-7に示す。鉄道交差部のため鉄道上空範囲外における床版上面の脆弱部および床版下面のひび割れからの漏水が顕著なパネルで計測を行った。ここで、目視で確認できる効果として、床版下面に発生していた漏水状況が、補修した2週間後には全くの乾燥状態になっていることが確認されている(写真-9, 10)。なお、載荷荷重は動的試験、静的試験ともに、総重量約20.8tの大型散水車を使用した。

表-1 各計測の項目・計測方法

| 試験区分 | 対象計測項目 | 計測方法 |
|--------|------------------------|----------------------------------|
| 動的載荷試験 | ひび割れ3方向成分(開閉、水平ずれ、段差) | ハイゲージ(開閉) カンチレバー型変位計(水平ずれ、段差) |
| 静的載荷試験 | 床版たわみ 縦桁ひずみ(上下フランジ) | 接触式変位計(床版たわみ) 箔ひずみゲージ(縦桁ひずみ) |

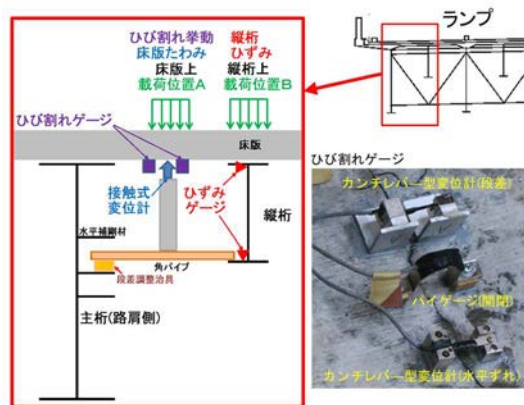


図-7 計測位置、機器配置



写真-9 補修前床版下面

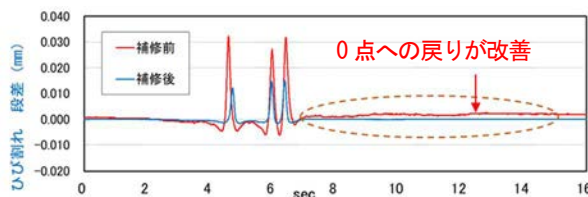


写真-10 補修後床版下面

6. 動的試験の結果

動的載荷試験では図-7に示す載荷位置Aに試験車を約20 km/hで走行させ、ひび割れの3方向成分挙動(段差・開閉・水平ずれ)を計測した。

図-8にひび割れ段差の計測結果の一例を示す。補修後の段差振幅は、補修前の43%と大きく軽減し、試験車通過後の0点への戻りも改善されている。開閉・水平ずれの挙動についても、補修前の約60%に軽減しており、ひび割れ3方向成分に対する補修の効果が確認できた。



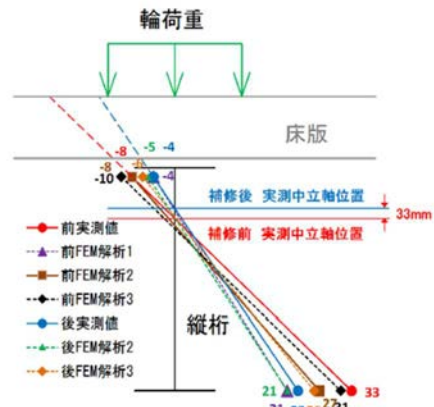
| 測点No. | 測点名 | 箇所 | 前後 | 最大 | 最小 | 振幅 | 単位 |
|-------|------|----|-----|--------|---------|--------|----|
| 5 | C1-Z | 段差 | 補修前 | 0.0324 | -0.0062 | 0.0386 | mm |
| | | | 補修後 | 0.0151 | -0.0016 | 0.0167 | |
| | | | 比率 | 47% | 26% | 43% | |

図-8 動的載荷試験でのひび割れ段差挙動

7. 静的試験の結果

静的載荷試験では図-7に示す載荷位置AおよびBに試験車を停止させ、縦桁ひずみと床版たわみを計測した。計測結果を図-9、図-10に示す。

補修後の縦桁下フランジひずみは、補修前の70% ($33\mu \rightarrow 23\mu$)となり、縦桁の中立軸は33mm程度上昇した。このことから、中立軸の位置から床版と縦桁の剛性が改善されていると類推できる。また、補修後の床版たわみは、補修前の39% ($-0.115\text{mm} \rightarrow -0.045\text{mm}$)となった。以上から本材料による補修効果が確認できた。



| | 条件 | ケース | U-FLG | L-FLG |
|-----|------------|---------|-------|-------|
| 補修前 | 補修前 載荷試験 | 実測値 | -8 | 33 |
| | 全断面有効 | 前FEM解析1 | -4 | 21 |
| | RC断面 | 前FEM解析2 | -8 | 27 |
| | RC断面+せん断劣化 | 前FEM解析3 | -10 | 31 |
| 補修後 | 補修後 載荷試験 | 実測値 | -4 | 23 |
| | RC断面+本材料 | 後FEM解析2 | -5 | 21 |
| | せん断劣化+本材料 | 後FEM解析3 | -6 | 26 |

図-9 縦桁ひずみの解析結果

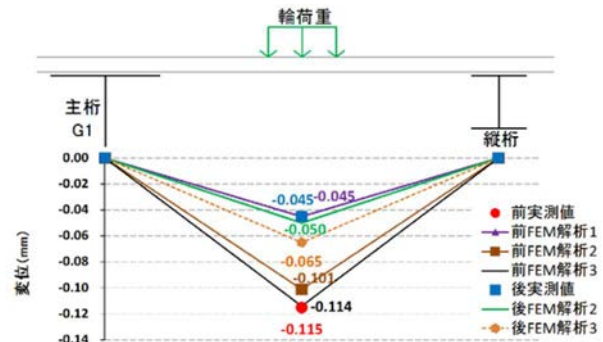
8. FEM 解析

載荷試験結果を理論値と比較するために、シェル要素(上下フランジ、ウェブ)、ソリッド要素(床版)、ビーム要素(対傾構)を用いた3次元 FEM モデルによる静的線形解析を行った。解析ケースを表-2に示す。

補修前の縦桁ひずみの実測値は、下フランジに着目すると、RC断面にせん断劣化を考慮した解析値に近い値であった。一方、補修後の実測値は全断面有効とした解析値およびRC断面に本材料を補修した場合の解析値に近い値となっている(図-9)。

床版たわみの実測値も同様に、補修前はRC断面にせん断劣化を考慮した解析値に近い値であり、補修後の実測値は全断面有効とした解析値およびRC断面に本材料を補修した場合の解析値に近い値となっている(図-10)。

このように、補修後の実測値が解析値を上回る結果となった要因としては、実施工厚が解析値より厚く、本材料のせん断弾性係数が解析に用いた値より大きいといった可能性が類推される。



| 条件 | 補修前 | | | |
|---------|--------------|---------------|--------------|------------------------|
| | 補修前 載荷試験 実測値 | 全断面有効 前FEM解析1 | RC断面 前FEM解析2 | RC断面 (せん断劣化考慮) 前FEM解析3 |
| ケース | -0.115 | -0.045 | -0.101 | -0.114 |
| 解析値/実測値 | - | 0.39 | 0.88 | 0.99 |

| 条件 | 補修後 | | | |
|---------|--------------|-------------------|--------------------|--|
| | 補修後 載荷試験 実測値 | RC断面 +本材料 後FEM解析2 | せん断劣化 +本材料 後FEM解析3 | |
| ケース | -0.045 | -0.050 | -0.065 | |
| 解析値/実測値 | 0.39 | 0.43 | 0.57 | |

図-10 床版たわみの解析結果

9. まとめ

本材料の超早期硬化型を用いることで1.5時間での交通開放を可能とした。また、本材料の遮水性を活かして床版防水工を省略したことや人力数均しにより1夜規制での床版補修施工を可能とした。ただし、悪天候による外気温の低下により所定強度までの硬化時間が2時間を要した日もあった。

本材料の補修後の性能の確認として、補修前に床版下面で見られていた漏水が補修後には全く見られなかった。また、載荷試験の結果より、本材料による補修効果を確認することができた。

今後は引き続き現地計測および遮水性能の確認を実施し、補修効果の持続性を検証していくとともに、施工方法としては、専用ミキサの大型化による日施工量の増加や自走式の専用フィニッシャの開発による作業の効率化に取り組んでいく。

表-2 解析ケース

| 解析ケース | 補修前 | | | 補修後 | |
|--------------|-----------------|----------------|-------------------|----------------|---------------------|
| | 前FEM解析1 | 前FEM解析2 | 前FEM解析3 | 後FEM解析2 | 後FEM解析3 |
| 床版解析条件 | 全断面有効 | RC断面 | RC断面 (せん断劣化考慮) | RC断面 +本材料 | RC断面 (せん断劣化考慮) +本材料 |
| 弾性係数: Es | 205,000 | 205,000 | 205,000 | 205,000 | 205,000 |
| Co弾性係数: Ec | 20,000 | 9,000 | 9,000 | 9,000 | 9,000 |
| せん断弾性係数: G | 8,696 | 3,913 | 783 | 3,913 | 783 |
| J-THF00M: EJ | - | - | - | 40,000 | 40,000 |
| J-THF00M: GJ | - | - | - | 16,667 | 16,667 |
| 備考 | ひび割れの無い健全な状態を判定 | ひび割れが進展した状態を判定 | せん断面破損性が低下した状態を判定 | ケース②の上層に本材料で補修 | ケース③の上層に本材料で補修 |

参考文献

- 1) 道路構造物ジャーナル NET, 現場を巡る一覧, 2019, 10
- 2) 三田村浩, 今井隆, 松井繁之: 道路橋床版補修に適する超緻密高強度繊維補強材料の開発, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015, 9

(2020年7月17日受付)