

第三世代の道路橋 RC 床版上面増厚工法の開発と施工事例

日本大学大学院 生産工学研究科	学生会員	○伊藤 清志
日本大学 生産工学部	正会員	阿部 忠
鹿島道路(株) 営業本部技術営業部	正会員	西島 克治
鹿島道路(株) 関西支店兵庫営業所		椎屋 三郎

1. はじめに

近年、社会インフラの維持修繕において長寿命化と経済性を伴う計画が求められ、検討されている。道路橋の長寿命化計画では、特に損傷が顕著である RC 床版の劣化損傷については長期耐久性のある維持補修技術の確立が必要とされている。本研究では、道路橋 RC 床版の上面補修専用として新たに開発した繊維補強モルタルと、その付着面となる既設 RC 床版上面損傷部の取壊し面に潜在するマイクロクラックの補強をはかる浸透性プライマー、および接着接合型上面増厚工法として既の実績のある打継用高耐久型エポキシ樹脂接着剤を併用した既設床版の部分補修工法を開発し、輪荷重走行疲労試験により耐久性を評価し、さらにその床版補修技術を接着剤塗布型床版上面増厚補強工法に応用させ、第三世代の道路橋 RC 床版上面増厚補強工法として実現場における施工性について検証した。

2. 道路橋 RC 床版補修に求められる性能

部分損傷箇所の薄層補修では、従来工法は劣化損傷した箇所を人力によるハツリで除去し、超速硬性無収縮モルタル(以下、補修材 URCM とする)や超速硬コンクリートなどのセメント系材料で補修されている。しかし、補修後に再損傷が繰り返される事例もあり、補修材とその付着状態についての改善が必要と考えられる。再損傷の発生要因としては、交通車輛により繰返される輪荷重により補修材と既設床版の弾性係数の違いから付着界面のはく離やひびわれの発生が考えられる。一方、疲労や凍害・塩害などにより劣化、脆弱化した損傷部位のハツリ時にブレーカ作業により発生すると考えられるマイクロクラックが、補修材と既設床版との付着切れや劣化の進展などに影響していると考えられる。また、補修材には防水プライマーとの付着強度が道路橋床版防水便覧¹⁾に規定され、 0.6N/mm^2 以上の確保が必要である。そこで、弾性係数を既設床版と同程度とし、更に防水プライマーとの付着を確保した床版補修専用の補修材と、マイクロクラックに自然浸透による充填が図れる低粘度のプライマーの塗布により付着界面の健全化を図り、更にフレッシュコンクリート打継用高耐久型エポキシ樹脂接着剤を重ねて塗布することで補修材と既設床版を確実に接着接合させることが求められる。

3. 補修材の特性値

3.1 補修材の配合

基礎検討として安藤ら²⁾は、RC 床版上面の部分補修に用いる専用補修材として超速硬性繊維補強ポリマーセメントモルタルを開発し、性能試験を実施した。この研究では、弾性係数を従来の補修材 URCM に比して、既設 RC 床版と同程度となるように抑えることを目標とした。その結果、初期強度発現性が材齢 24 時間で 27.2N/mm^2 となり、日々交通規制をおこなう実作業時間が 7 時間以内となる維持補修工事に用いるのには初期強度発現が劣る結果となった。そこで、この配合を改良した新たな超速硬繊維補強セメントモルタル(Ultra Fiber Reinforced Cement Mortar(以下、補修材 UFRCM とする))を開発した。補修材 UFRCM は超速硬セメントを主成分とした細骨材と粉末減水剤などをプレミックスし、薄層補修におけるひび割れ抑制を目的とした繊維長 12mm の高強度ポリビニルアルコール繊維(以下、PVA 繊維)を添加する。各配合を表-1 に併記する。

3.2 硬化時間と圧縮強度

硬化時間ごとの圧縮強度ならびに材齢 28 日における静弾性係数を表-2 に示す。補修材 URCM の材齢 2 時

キーワード 浸透性プライマー、高耐久型エポキシ樹脂接着剤、床版上面補修、床版増厚補強

連絡先 〒112-8566 東京都文京区後楽 1 丁目 7 番 27 号 鹿島道路(株)生産技術本部技術部 TEL 03-5802-8014

間の圧縮強度は 25.1N/mm^2 となり、道路橋示方書・同解説³⁾

(以下、道示とする) に規定されている圧縮強度 24N/mm^2 を満足するが硬化時間が 25 分と短く作業性に劣る。一方、補修材 UFRCM の始発時間は 35 分、終結時間は 45 分となり、補修材 URCM に比して施工時間を確保でき、初期強度の発現も材齢 2 時間の圧縮強度 19.1N/mm^2 、3 時間では 24.5N/mm^2 となり、道示に規定される圧縮強度 24N/mm^2 を材齢 3 時間で満足している。また、割れに対する抵抗性を示す静弾性係数は、補修 URCM の 43.7N/mm^2 に比して補修材 UFRCM は 55% の 23.8N/mm^2 となり、既設 RC 床版とほぼ同等と考えられる。

3.3 乾燥収縮率

乾燥収縮率は、モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法 (JIS A 1129) に準拠して行う。試験体は恒温室 ($23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) で補修材を型枠 ($40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$) に打込み、24 時間後に脱型枠し、相対湿度 $60 \pm 5\%$ で静置、材齢ごとに乾燥収縮率を測定する。図-1 に示すとおり補修材 URCM の乾燥収縮率は、材齢ごとに材齢 3 日 -3.9×10^{-4} 、材齢 7 日 -4.9×10^{-4} 、材齢 14 日 -6.3×10^{-4} 、材齢 28 日 -7.5×10^{-4} である。これに比して補修材 UFRCM は材齢 3 日 -0.4×10^{-4} 、材齢 7 日 -1.4×10^{-4} 、材齢 14 日 -2.3×10^{-4} 、材齢 28 日 -3.3×10^{-4} となり、大幅に小さいことが確認され、ひび割れ抵抗性を有すると考えられる。

3.4 補修材 UFRCM と防水プライマーの付着性

橋面防水工では床版上面に防水材との付着性を確保するために防水プライマーが塗布される。このプライマーとの付着阻害となる成分が補修材に含まれていないことを確認する。補修材 UFRCM と 5 タイプのプライマーとの付着強度とプライマーの種別、成分を表-3 に示す。試験体は、JIS A 6909 に準拠し、コンクリート平板の上面をケレン後に厚さ 10mm で補修材 UFRCM を打込み、2 時間経過後に防水プライマーを塗布し、材齢 3 時間、48 時間、240 時間に付着強度を測定し、すべてのプライマーにおいて接着性が良好であることを確認する。実験結果を表-4 に示す。なお、プライマーの硬化不良については、目視および指触により確認する。

4. 浸透性プライマーと打継用接着剤との併用による効果・検証

1990 年代に道路橋 RC 床版の補強工法として RC 床版上面に SFRC を打継ぐ床版上面増厚工法が開発され⁴⁾、多くの施工がされている。しかし、一部の SFRC 上面増厚補強後の床版に付着界面の剥離が確認されている。この改善工法として筆者らは、既設床版の上面を研掃後にフレッシュコンクリート打継用の高耐久型エポキシ樹脂接着剤を塗布する“接着接合型 SFRC 上面増厚補強法”を新たな増厚補強工法として提案⁵⁾し、その耐疲労性が評価され^{6), 7), 8), 9)}、実施工も行われている。この高耐久型エポキシ樹脂接着剤の性能を表-5 に示す。一方、残された課題としてマイクロクラックの存在があり、維持補修工事では、ポットホールの人力によるハツリ後に補修材を直接打込んでいるのが現状である。そこで、床版の部分補修を対象とし、マイクロクラックに自然浸透により充填される低粘度の接着剤として浸透性プライマーを開発する。開発における要求性能とし

表-1 補修材の配合

補修材名	配合 (kg/m ³)				水結合材比 (％)
	プレミックス粉体		繊維	水	
	結合材	骨材その他			
URCM	938	938	—	338	36
UFRCM	618	1232	5	278	45

表-2 補修材の物性値

試験項目		UFRCM	URCM
凝結時間	始発	35min.	17min.
	終結	45min.	25min.
圧縮強度	2時間	19.1N/mm^2	25.1N/mm^2
	3時間	24.5N/mm^2	45.2N/mm^2
	4時間	27.0N/mm^2	52.3N/mm^2
	28日	49.9N/mm^2	62.3N/mm^2
	静弾性係数	23.8kN/mm^2	43.7kN/mm^2

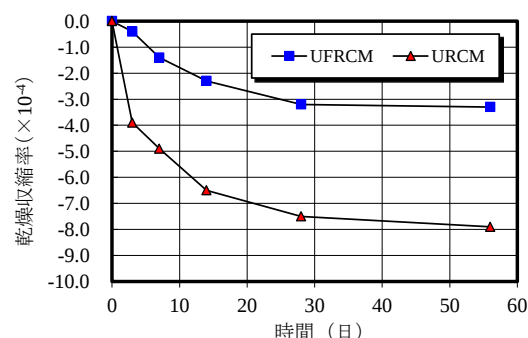


図-1 乾燥収縮率と時間の関係

表-3 防水プライマーの種別

No.	プライマー種別	主要成分
A	一般汎用プライマー	ゴム瀝青物系
B	速乾性プライマー	溶剤型エラストマー系
C	高機能防水用プライマー(A)	アクリル系
D	高機能防水用プライマー(B)	変性ポリドリアミン系
E	浸透系床版防水用プライマー	変性アクリル系

表-4 防水プライマーとの付着強度

No.	材齢3時間	材齢48時間	材齢10日
A	1.08N/mm^2	2.28N/mm^2	2.31N/mm^2
B	1.21N/mm^2	2.29N/mm^2	2.34N/mm^2
C	1.99N/mm^2	2.83N/mm^2	5.86N/mm^2
D	2.08N/mm^2	2.16N/mm^2	2.64N/mm^2
E	1.84N/mm^2	2.58N/mm^2	3.10N/mm^2

ては、切削機やブレーカによる打撃により既設床版に潜在する 0.05mm 以下のマイクロクラックに対して塗布のみで自然浸透し、重ね塗りとする打継用高耐久型エポキシ接着剤と一体化して既設床版との付着強度を確保できることである。この浸透性プライマーの物性値を表－6に、浸透性プライマーの充填状況を写真－1 示す。写真－1 は指触確認で緩みが無く、目視においても異常の認められないハツリ面に、エポキシ用蛍光塗料を主剤の 2%程度添加した浸透性プライマーを刷毛で塗布し、硬化後に切断したものである。写真－1(1)では何ら異常のない切断面であるが、ブラックライトを照射した写真－1(2)では、マイクロクラックに浸透性プライマーが充填されていることが観察できる。また、この浸透性プライマー塗布後に打継用の高耐久型エポキシ樹脂接着剤を重ね塗りしてから補修材を打込む補修工法の付着強度を建研式引張試験機により検証する。この際、基材となるコンクリート平板は補修箇所を想定し、電動チップperで全面が一様となるようにチップングを入念におこない、擬似的にマイクロクラックが発生した床版の状態とし、厚さ 10mm で補修材 URCM と補修材 UFRFCM の 2 種類と接着剤の有無の条件も含めた 4 タイプについて確認する。試験結果を表－7に示す。補修材 URCM, 補修材 UFRFCM のいずれにしても接着剤(浸透性プライマー+高耐久型エポキシ樹脂接着剤の併用)を用いることで、付着力が増していることが確認される。

5. 輪荷重走行疲労試験による補修効果の検証・評価

5.1 実験概要

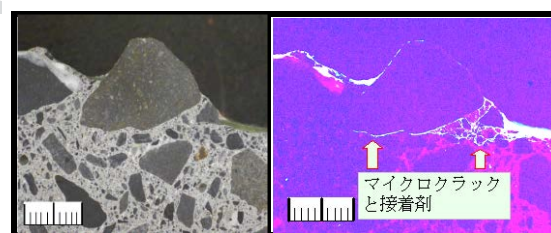
本実験では、RC 床版供試体と同一寸法を有する補修用床版に予備載荷として床版たわみが床版支間 L の 1/400(活荷重たわみの場合 L/800 とする) に達した 35,000 回の輪荷重走行疲労を与える。これは道路橋 RC 床版の予防保全型維持管理計画における補修・補強時期として損傷が軽微な段階、すなわち劣化過程が進展期に相当する。この後、荷重輪が走行する位置(幅 300mm×長さ 1,000mm)より大きい範囲(幅 600mm×1,000mm)を電動ピックにより深さ 18mm で一様にハツリ取り、補修面とした。このハツリ深さは、実際の施工深さ 30mm(上側鉄筋の上部までの補修を想定)を 3/5 モデルより 18mm とする。ハツリ面は実現場を想定して研掃を実施せず、塵埃のみを清掃後に浸透性プライマー(0.5kg/m²)を塗布し、速やかに打継用高耐久型エポキシ樹脂接着剤(0.9kg/m²)を重ね塗り後、補修材 UFRFCM を打込み補修した床版供試体と未補修の RC 床版供試体を輪荷重走行疲労実験により破壊時における等価走行回数

表－5 高耐久型エポキシ樹脂接着剤

項目	性状と物性	備考
外観	主剤 白色ペースト状	異物混入無し
	硬化剤 青色液状	異物混入無し
混合比(主剤:硬化剤)	5:1	重量比
硬化物比重圧縮強さ	1.40±0.20	JIS K 7112
圧縮強さ	50N/mm ² 以上	JIS K 7181
圧縮弾性係数	1000N/mm ² 以上	JIS K 7181
曲げ強さ	35N/mm ² 以上	JIS K 7171
引張せん断強さ	10N/mm ² 以上	JIS K 6850
コンクリート付着強さ	1.6N/mm ² 以上または母材破壊	JIS K 6909

表－6 浸透性プライマーの物性値

項目	測定値	備考
圧縮強さ	104.4N/mm ²	JIS K 7181
圧縮弾性係数	3172N/mm ²	JIS K 7181
曲げ強さ	92.8N/mm ²	JIS K 7171
引張せん断強さ	58.2N/mm ²	JIS K 6850

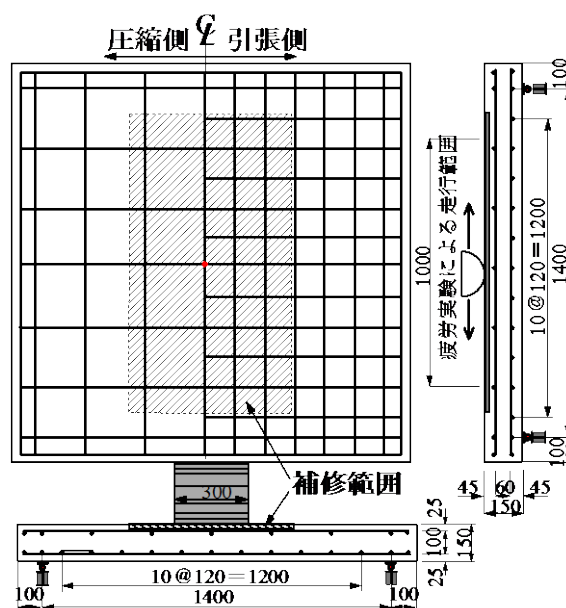


(1) 蛍光灯照射 (2) ブラックライト照射

写真－1 浸透性プライマー充填(1mm/目盛)

表－7 建研式引張試験による付着強度

補修材	接着剤	付着強度 (N/mm ²)	破断位置
URCM	無し	0.99	界面
	有り	1.92	母材
UFRFCM	無し	1.65	母材
	有り	2.33	母材



図－2 床版供試体

から補強効果および耐疲労性を評価する。

5.2 RC 床版供試体および補修供試体

RC 床版供試体および補修供試体の寸法は道示に準拠し、3/5 モデルとし、図－2 に示す。RC 床版供試体の寸法は全長 1,600mm、支間 1,400mm、床版厚 150mm、鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置する。その有効高さは、それぞれ 125mm、105mm である。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置する。

5.3 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、床版供試体の輪荷重走行面に幅 300mm、厚さ 3.2mm の鋼板を設置し、その上面を幅 300mm の荷重輪を軸方向に 1,000mm の範囲で繰返し走行させる実験である。輪荷重の初期荷重は 100kN から開始し、20,000 回走行ごとに荷重を 20kN ずつ増加する段階荷重载荷とする。また、輪荷重走行 1、10、100、1,000、5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとに、床版中央における全体たわみを計測する。

5.4 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

輪荷重走行疲労実験において、20,000 回ごとに荷重を増加する段階荷重载荷としたことから等価走行回数を算出して耐疲労性を評価する。等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(1)で与えられる。なお、基準荷重 P は道示に規定する活荷重の 3/5 に安全率 1.2 を考慮した 72kN ($=100 \times 3/5 \times 1.2$) として等価走行回数を算出する。S-N 曲線の傾きの逆数 m の絶対値には、松井らが提案する 12.7 を適用する^{10), 11)}。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i / P)^m \times n_i \quad (1)$$

P_i : 载荷荷重 (kN), P : 基準荷重 ($=72\text{kN}$), n_i : 実験走行回数 (回), m : S-N 曲線の傾きの逆数 ($=12.7$)

5.5 実験結果および考察

5.5.1 等価走行回数

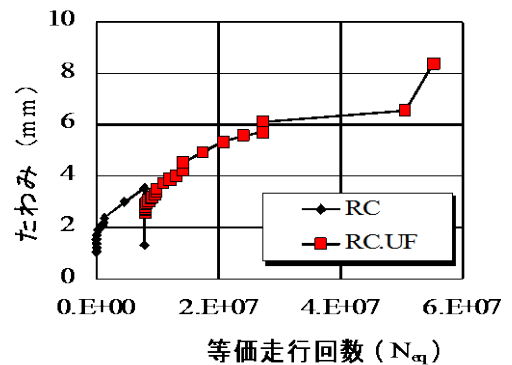
RC 床版供試体の破壊時の等価走行回数は 14.391×10^6 回であり、これを基準として補修効果を評価する。補修床版供試体は疲労損傷（加速期（前期））に相当する等価走行回数 7.865×10^6 回（たわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点）までの疲労試験を行い、その後、補修材 UFRCM を用いた接着剤塗布型上面補修を施し、輪荷重疲労試験を実施する。本実験では、防水工が完全に機能している条件として乾燥状態による輪荷重走行実験とする。補修後の等価走行回数は 47.349×10^6 回であり、破壊時の累積等価走行回数は 55.215×10^6 回となり、RC 床版供試体の 3.84 倍の補強効果が得られた。RC 床版および補修 RC 床版の等価走行回数を表－8 に示す。

5.5.2 たわみと等価走行回数 および 損傷状況

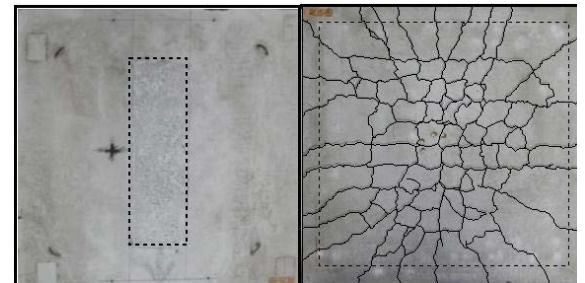
RC 床版供試体および補修床版供試体のたわみと等価走行回数の関係を図－3、補修床版供試体の予備载荷（等価走行回数 7.865×10^6 回）終了時の損傷状況を写真－2、破壊時の損傷状況を写真－3 に示す。予備载荷後のたわみは 3.5mm、残留たわみは 1.29mm、損傷状況は上面ではほとんど見られず、下面に 2 方向のひび割れ

表－8 等価走行回数

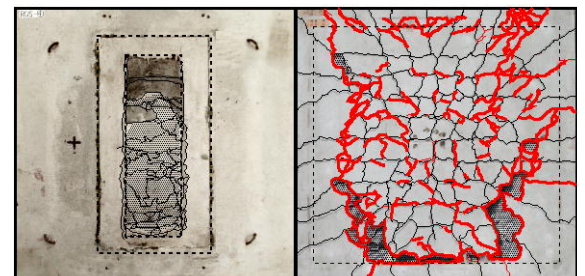
供試体	RC床版	補修後の等価走行回数	等価走行回数の合計	補修効果
RC	14,391,598	—	14,391,598	
RC.UF	7,865,598	47,349,889	55,215,487	3.84



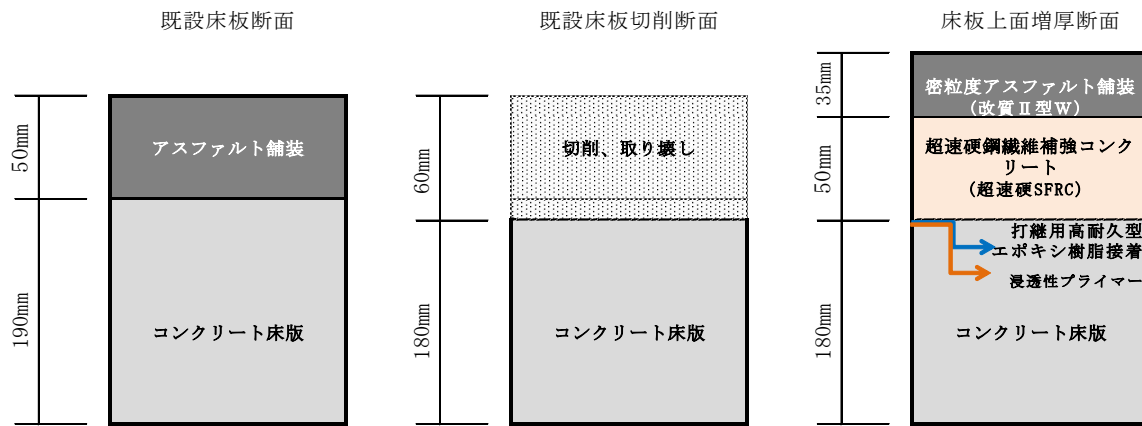
図－3 たわみと等価走行回数



上面 下面
写真－2 損傷状況（予備载荷終了時）



上面 下面
写真－3 補修供試体の損傷状況（破壊時）



図－4 施工断面

が発生し、劣化過程は進展期に相当する。ここで輪荷重走行位置を中心として 600mm×1,000mm、深さ 18mm を電動ブレーカでハツリ、UFRCM で補修後に輪荷重走行疲労試験を継続する。この補修床版供試体の破壊時の等価走行回数の累積は 55.215×10^6 回、たわみが 8.39mm であり、RC 床版供試体の 3.84 倍の補強効果となる。また、破壊時の損傷状況は、床版上面では補修面の走行位置にスケーリングが認められるが、はく離は見られない。一方、床版下面では輪荷重から 45 度の底面にはく離が見られ、破壊は押抜きせん断破壊である。

5.5.3 実験結果のまとめ

本提案する補修材 UFRCM を用いて接着剤塗布型上面補修した供試体は、床版上面に防水工を施した場合を想定した走行面が乾燥状態では未補修の RC 床版供試体に比して 3.84 倍となり、本実験における提案工法の耐疲労性が確認された。また、本実験では床版に部分損傷が発生し、補修を実施する状態を再現するため、RC 床版供試体の累積損傷度が加速期(前期)に相当する疲労損傷を与えてから上面補修を行い、また、マイクロクラックなどの微細な損傷が残されたハツリ面においても、浸透性プライマーと打継用高耐久型エポキシ樹脂接着剤を併用することで既設床版と補修材の付着界面が強固に一体化し、さらに、補修材に添加され分散された繊維長 12mm の PVA 繊維の靱性により、耐久性を向上させる結果が得られたと考えられる。

6. 床版上面増厚補強工法への適用事例

A 橋は昭和 40 年前半に供用された港湾部に位置する鋼橋で、一日の交通量が一方方向で 10,000～12,000 台、大型車はコンテナを積載した大型車などが一方方向 2,000～2,400 台である。一方、床版厚さは 190mm と薄く、近年ではアスファルト舗装のひび割れやポットホール、床版の部分補修を含む維持補修が繰り返されていた。そこで、浸透性プライマーと打継ぎ用の高耐久型エポキシ樹脂接着剤を併用塗布後に超速硬 SFRC を打込むという新たな接着剤塗布型床版上面増厚工法により床版耐力を向上させる補強工法が採用された(図－4)。施工は 2 月～3 月の冬期に、本線および取付け部(進入路)の幅員 22.0m×延長 29.5m×2 スパンを昼夜間連続 96 時間集中工事として実施した。施工フローは、既設アスファルト舗装の剥ぎ取り後に既設床版を 10mm 厚で全面切削し、テストハンマーを用いた叩き検査により脆弱化した箇所を特定して断面修復を先行した。断面修復工は特定した損傷範囲を電動ブレーカによりハツリ(写真－4(a)(b))、清掃後に浸透性プライマーを 0.9kg/m^2 以上(写真－4(c))、打継用高耐久型エポキシ樹脂接着剤を 0.5kg/m^2 (写真－4(d))の塗布量で周囲の立ち上がり部も含めて塗り重ねてから速やかに超速硬コンクリートを打込み、入念に締固める(写真－4(e))。養生工は防災シートにエアキャップを貼り付けた二重シートによる封緘養生とした(写真－4(f))。断面修復の養生終了後に断面修復を実施した箇所を含める床版上面をショットブラストによる研掃(投射密度 150kg/m^2)を行い、浸透性プライマーを 0.9kg/m^2 で塗布後(写真－5(a))に打継用高耐久型エポキシ樹脂接着剤を 0.5kg/m^2 (写真－5(b))でムラなく塗り重ねる。この際、プライマーと打継用高耐久型エポキシ樹脂接着剤の塗布は、施工時の気温なども考慮して可使時間以内に超速硬 SFRC が打込み完了となるように打込み作業に先行して行う。超速硬 SFRC の敷均しと締固めは Co フニッシャにより行い(写真－5(c))、養生工は寒中養生として防災シートにエアキャ

ップを貼り付けた二重シートを用いた封緘養生とする(写真-5(d)). 養生終了後の床版上面増厚補強の上面には防水工を行い, アスファルト舗装による表層工を実施する.

7. まとめ

本研究では, 補修後の再補修が繰り返される床版上面における部分補修の耐久性向上を図るため, 新たな技術としてマイクロクラックを補強する浸透性プライマーと床版補修に適した床版補修専用の補修材を開発し, 輪荷重走行疲労実験により補修効果を確認した. また, 従来の道路橋 RC 床版上面増厚補強工法における打継面の剥離に起因する再損傷事例に対する確実な新旧コンクリートの一体化を図る新たな床版増厚補強技術として開発した接着接合による床版増厚補強工法に, この床版補修技術を応用させた第三世代の道路橋 RC 床版上面増厚工法を提案し, 実現場における適用性を確認した. 実施工での取り扱いや作業性は良好であり, 今後は供用後における経過観察を行うと共に, 更に本工法について改良・改善を図り, 道路橋 RC 床版の長寿命化対策としての補修技術向上の一助としたい.

参考文献

- (1) 日本道路協会: 道路橋床版防水便覧, pp35、2007.
- (2) 安藤重弘, 榊原弘幸, 小林哲夫, 山下雄史, 伊藤清志, 小森篤也, 阿部忠: 道路橋 RC 床版の補修材料の性状について, 第 44 回日本大学生産工学部学術講演会, 講演会資料 pp13-16, 2011.
- (3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I, II, III, 2002.
- (4) (財)高速道路調査会: 上面増厚工法設計施工マニュアル, 1995.
- (5) 児玉孝喜, 西元央, 鎌田修, 福手勤: フレッシュコンクリートの接着接合における接着剤成分が耐久性に及ぼす影響に関する研究, セメントコンクリート論文集, No.63, pp546-553, 2009.
- (6) 土木学会: 道路橋床版の維持管理マニュアル, 土木学会鋼構造委員会, 道路橋床版維持管理 小委員会, 2012.
- (7) 阿部忠, 木田哲量, 水口和彦, 児玉孝喜: SFRC 上面増厚補強 RC 床版の輪荷重走行疲労実験による S-N 曲線式の提案, 構造工学論文集, Vol.58A. pp1156-1165, 2012.
- (8) 伊藤清志, 阿部忠, 児玉孝喜, 山下雄史, 一瀬八洋: 乾燥・湿潤状態で接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強法の耐疲労性の評価, 構造工学論文集, Vol.58A, pp1178-1188, 2012.
- (9) 阿部忠, 鈴木寛久, 貴志豊, 野本克己: RC 床版の SFRC 上面増厚補強法における接着剤が耐疲労性に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.59A. pp1084-1091, 2013.
- (10) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 桑北出版, 2007.
- (11) 川井豊, 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子: 道路橋 RC 床版の S-N 曲線に関する一考察, 土木学会第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp263-268, 2012.



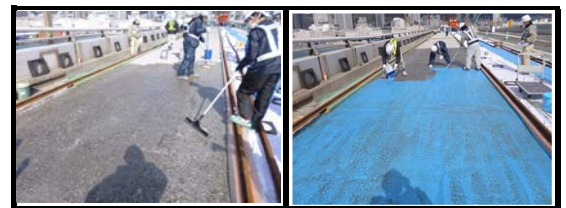
(a) 部分損傷のハツリ (b) ハツリ・清掃完了



(c) 浸透性プライマー塗布 (d) 打継接着剤塗布



(e) 超速硬 SFRC 打込み (f) 封緘養生
写真-5 断面修復施工状況



(a) 浸透性プライマー塗布 (b) 打継接着剤塗布



(c) 超速硬 SFRC 打込み (d) 封緘養生
写真-6 増厚補強施工状況