

道路橋RC床版上面の損傷に適応させた薄層補修工法の研究

鹿島道路(株) ○伊藤清志 山下雄史 加形 護
住友大阪セメント(株) 大野 晃 日大生産工 阿部 忠

1. はじめに(背景と目的)

近年、高度経済成長期に建設された道路橋は、一般に橋梁寿命とされる建設後50年を経過する橋梁が年々増加することが予想され、この対応として平成16年から橋梁点検が開始された。この調査から橋梁部材の中で損傷が著しいのは道路橋RC床版であることが明らかになった。主な原因は交通量の増大による疲労により2方向のひび割れの発生や防水工が施されていないRC床版は舗装との界面に雨水が滞水し、これによって床版上面の骨材の露出やスケールリングが生じている。特に、積雪寒冷地域のRC床版は凍害の影響により床版上面のスケールリングや骨材化へと進行している。これらの損傷に対する維持管理は、橋梁点検要領(案)に示されるRC床版の損傷度から評価される劣化過程の進展期で部分補修、加速期前後で上面や下面から補強が検討され、劣化期を迎えた床版は床版架替や部分打換補強が検討されている。しかし、床版上面の損傷に対する点検は困難であることから、現状ではアスファルト舗装の打替えが生じた時点で防水工や床版上面補修工が施されている。しかし、アスファルト舗装にポットホールが生じた時点では床版上面の損傷は加速期相当に進行しており、橋梁点検における早期の発見が重要となる¹⁾²⁾³⁾。一方、床版上面の補修には、超速硬性無収縮モルタルやメチルメタクリレート(MMA)樹脂、エポキシ樹脂系の補修材が用いられているが⁴⁾、取扱いの簡便さや価格等より超速硬性無収縮モルタルがより多く用いられている。しかし、この超速硬性無収縮モルタルの本来の使用目的は、橋梁の支承を橋座から高さ調整した隙間に充填する沓座モルタルに用いるものである。そこで本研究では、RC床版の上面補修材として開発した超速硬性繊維補強ポリマーセメントモルタル(以下、UFPCM)と、ひび割れに浸透して強度を高めるために開発した低粘度浸透性接着剤とフレッシュコンクリートとの打継ぎ専用接着剤⁵⁾(以下、高耐久型接着剤)との組合せによる部分補修材を用いてモデル化した道路橋RC床版供試体を用い、輪荷重疲労走行試験を行って、補強効果および耐疲労性を検証した。

2. 使用材料

2.1 RC供試体材料

RC床版供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと5mm以下の砕砂および5mm～20mmの砕石を使用した。供試体の鉄筋にはSD295A、D13を用いた。実験時におけるコンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-1に示す。

2.2 供試体寸法

RC床版供試体寸法は、本実験装置の輪荷重幅(幅 300 mm)が道路橋示方書に規定する輪荷重設置幅(500 mm)の3/5であることから供試体寸法も3/5モデルとした。よって、全長1,600mm、支間1,400mm、床版厚150mmである。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張主鉄筋にD13を120mm間隔で配置し、有効高は125mmである。また、圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置した。RC床版の寸法および鉄筋配置を図-1に示す。

2.3 補修材料

RC床版の補修材に一般的に使用されている超速硬性無収縮モルタルと、今回提案する初期強度の異なる2種類のUFPCMを用いて耐疲労性について比較検討を行った。RC-Iは超速硬性無収縮モルタル、RC-IIは圧縮強度20N/mm²以上(材齢6時間)のUFPCM(タイプI)、RC-IIIは圧縮強度24N/mm²(材齢4時間)UFPCM(タイプII)とする。実験に用いた材料の特性を表-2、UFPCMの配合を表-3に示す。また、今回の実験では、既設RC床版が輪荷重の走行により発生する微細なひび割れや損傷個所に浸透させるための低粘度浸透性接着剤と高耐久型接着剤を併用して既設RC床版とUFPCMの一体化についても検証した。各々の接着剤の物性については表-4ならびに表-5に示す。

3. 供試体の作製

3.1 一面せん断試験

低粘度浸透型接着剤の付着性状を評価するために、付着強さの検証手法の一つである付着界面の水平方向の単せん断、すなわち一面せん断試験を実施した。母材側はφ50mm、高さ100mmの供試体を早強コンクリートで作製し、養生後に高さ50mmで切断して二分割した。この切断面を付着面(打継面)として鋼製割型枠に組込み、打継ぎ条件として土木用高耐久型エポキシ樹脂接着剤のみ、低粘度浸透型エポキシ樹脂接着剤との組合せあるいは接着剤無しの条件でUFPCM(タイプII)を打継いで供試体を作製した。

3.2 輪荷重走行疲労実験

3.2.1 実験の目的

道路橋RC床版の補修材料に求められる要求性能確認のため、作業性、可使時間、交通解放までの養生時間と初期養生における強度(圧縮)とひびわれ抵抗性と、湿潤環境における輪荷重走行疲労試験における耐疲労性の検証を行った。なお、実験ではRC床版の補修後の輪荷重走行疲労実験は、湿潤状態を想定した水張り状態および乾燥状態で実験を行い、湿潤状態における補修効果および補修効果の低減率を検証した。

Studies on the repair method on damaged part of concrete bridge slabs upper surface.

Kiyoshi ITO, Takeshi YAMASHITA, Mamoru KAGATA, Akira OHNO, and Tadashi ABE

3.2.2 RC床版の進展期相当の応力履歴実験

実橋RC床版の補修は損傷が軽微な段階、すなわち劣化過程が進展期前後で検討されている。阿部らは、RC床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、補強時期の推定として床版たわみが床版支間Lの1/400に達した時点、すなわち進展期から加速期前期に補修・補強を施す時期として提案している⁷⁾。そこで本実験に用いるRC床版供試体の劣化過程は進展期、すなわち2方向のひび割れを発生させた後に上面補修を行った。応力履歴に関する実験は、輪荷重を連続走行させる実験、すなわち輪荷重走行疲労実験を行うものとした。輪荷重が走行する位置(幅0.3m×長さ1.0m)の範囲を荷重100kNで20,000回走行し、その後荷重を20kN増加して走行させ、たわみが3.5mm(床版支間Lの1/400)に達した時点で走行を停止した。この時点でRC床版下面には2方向のひび割れが発生し、この状態でRC床版の上面補修を行った。

3.2.3 RC床版の補修方法

進展期相当のひび割れ発生後は、床版上面に幅60cm×長さ100cmの範囲を小型の切削機と電動ピックを併用して切削し、研削機により仕上げた。小規模の床版補修工事ではショットブラストによる研削が実施されていない現状を踏まえて、今回は掃除機による吸引清掃のみとした。切削深さは、3/5モデルより18mmとした。補修状況を写真-1～3に示す。

3.2.4 接着剤の塗布および補修材の打込み

研削を行わない小規模の床版補修工事を想定し、床版上面に発生した微細なクラックに浸透させる目的で低粘度浸透型接着剤を塗布し、次に含浸させた接着剤の可使時間内に土木用高耐久型エポキシ樹脂接着剤を重ねて塗布した。接着剤の施工状況を写真-4および写真-5に示す。

3.2.5 補修材の打込み

補修材の製造はハンドミキサーを用いて攪拌混合し、打込みはパイプレータを用いず左官仕上げとした。施工状況を写真-6に示す。

3.2.6 実験方法

輪荷重走行疲労実験方法は、RC床版の進展期相当の応力履歴実験と同様に、床版中央から軸方向に100cmの範囲とした。

進展期相当のひび割れ損傷を与えたRC床版の上面補修した供試体は、荷重100kNで30,000回走行し、その後は荷重110kNで走行させる段階荷重載荷とした。また、供試体RC-IおよびRC-II、RC-III-1は走行面に9時間の水張りを行い、湿潤状態として実験を行った。3次補修後については補修部分に防水工が施された場合を想定し、床版上面を乾燥状態で実験を実施した。特に3次補修を行う場合の供試体底面は加速期相当のひび割れが発生していた。次に、供試体RC-III-2では、一次補修後に防水工が施された場合を想定し、床版上面を乾燥状態で実験を行い、荷重は100kNで30,000回走行後に20kN増加し、20,000回走行毎に20kN増加させるものとした。たわみの計測は1、10、100、1,000回とし、その後は5,000回毎に実施した。なお、本実験では輪荷重が走行不良となった場合に再補修を行い、RC床版供試体が押抜きせん断破壊に至った場合に実験を終了した。

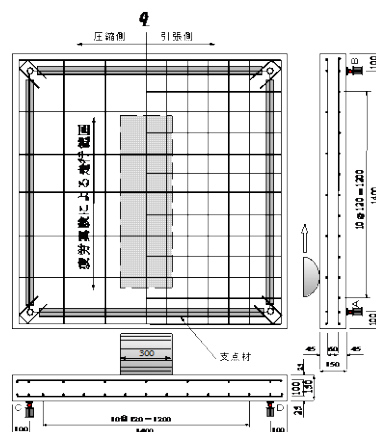


図-1 RC床版供試体寸法

表-1 RC供試体 材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋(SD295A, D10)		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
RC床版	35.0	370	511	200

表-2 UFGPCM 目標とする圧縮強度と材齢

項目	圧縮強度/材齢	備考
開発品 タイプ-1	20N/mm ² 以上/6時間	こて仕上げ性改善
開発品 タイプ-2	24N/mm ² 以上/4時間	強度発現改善
一般的な従来タイプ	24N/mm ² 以上/3時間	グラウト状

表-3 UFGPCM 配合表

項目	配合(kg/m ³)		
	プレミックスバグー	ビニロン短繊維	水
開発品 タイプ-1	1850	5	296
開発品 タイプ-2	1850	5	278
従来品	1850	0	338

表-4 低粘度浸透性接着剤(測定値)

項目	測定値(平均)
引張強度	58.2N/mm ²
曲げ強度	92.8N/mm ²
圧縮強度	104.4N/mm ²
圧縮弾性率	3172N/mm ²

表-5 土木用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
	硬化剤	青色液状
混合比(主剤:硬化剤)		5:1
硬化物比重圧縮強さ		1.40±0.20
圧縮強さ		50N/mm ² 以上
圧縮弾性係数		1000N/mm ² 以上
曲げ強さ		35N/mm ² 以上
引張せん断強さ		10N/mm ² 以上
コンクリート付着強さ		1.6N/mm ² 以上または母材破壊

3.2.7 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験は、輪荷重を供試体中央から±50cmの範囲を連続走行させ、荷重100kNを初期荷重として走行毎に荷重を増加させる段階荷重載荷とする輪荷重走行疲労実験を行うことから、耐疲労性の評価は等価走行回数を算出して耐疲労性を評価した。等価走行回数はマイナー則に従うと仮定すると式(1)として与えられる。なお、式(1)における基準荷重Pは設計活荷重の3/5に安全率1.2を考慮した72kNの一定荷重載荷として等価走行回数を算出した⁸⁾。また、等価走行回数式(1)に示すS-N曲線の傾きの逆数mは、松井らが提案するS-N曲線の傾きの逆数

12.7⁹⁾を適用する。

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

ここで、 N_{eq} : 等価走行回数 (回), P_i : 载荷荷重 (kN), P : 基準荷重 (=72kN), n_i : 実験走行回数 (回), m : S-N曲線の傾きの逆数 (=12.7)⁹⁾

4. 実験結果

4.1 一面せん断試験結果

輪荷重走行疲労試験に先立ち確認を行った一面せん断試験結果を表-6に示す。本試験では補修を専用とするUFPCMの付着特性と、新たな試みとして低粘度浸透型接着剤の付着特性の確認を目的とし、UFPCM(タイプⅡ)についてのみ接着剤の有無と組合せの異なる3条件について実施した。接着剤を用いた場合は、ほぼ研磨された付着面に対しても、低粘度浸透型接着剤が有効的に機能し、微細なひび割れに対して浸透し、補強効果があると推察される結果となった。

4.2 等価走行回数と破壊形状

UFPCM(タイプⅠおよびⅡ)を用いて補修したRC床版供試体の耐疲労性の評価については、供試体RCおよび供試体RC-Ⅰ(超速硬性無収縮モルタル)の等価走行回数を基準とした。式(1)より算出した各供試体の等価走行回数を表-7に示す。

4.2.1 RC床版

RC床版供試体の等価走行回数は14,391,598回であり、破壊は走行中に押抜きせん断破壊となった。この等価走行回数を基準に各補修した供試体の耐疲労性を評価した。

4.2.2 1次補修

従来から一般的な工法である供試体RC-Ⅰ(超速硬性無収縮モルタル)は等価走行回数1,685,974回であり、損傷状況は補修界面が全面はく離し、軸直角方向にひび割れが発生している。また、湿潤状態で実験を行ったことから走行面のセメント成分が溶出し、走行不能となった。一方、6時間後の圧縮強度が20N/mm²のUFPCM(タイプⅠ)と低粘度浸透型接着剤と高耐久型エポキシ樹脂接着剤を併用して補修した供試体RC-Ⅱの等価走行回数は2,160,639回となり、走行面のセメント成分の溶出による上面損傷により走行停止した。しかし、補修界面のはく離は確認されなかった。この供試体RC-Ⅱは従来型の補修材を用いた供試体RC-Ⅰの1.3倍の補強効果が得られた。また、RC-Ⅱと同様に接着剤を塗布してからUFPCMを打込んだ供試体RC-Ⅲ-1は3,685,775回となり、供試体RC-Ⅱと同様な損傷状況であるが、従来型で補修し供試体RC-Ⅰの2.2倍の補強効果が得られた。次に、1次補修後に橋面防水工を施した場合を想定して、乾燥状態で疲労実験を行った供試体RC-Ⅲ-2の等価走行回数は81,286,995回となり、RC床版が破壊に至るまで補修材に損傷は見られず、湿潤状態で実験を行った供試体RC-Ⅰの22.1倍の補強効果が得られた。

4.2.3 2次補修

1次補修の輪荷重走行試験終了後に補修材を除去し、1次補修と同じ補修方法で2次補修を行い、湿潤状態で走行試験を行った。この結果、供試体RC-Ⅰと供試体RC-Ⅱ(UFPCM(タイプⅠ))の等価走行回数を比較



写真-1 切削状況



写真-2 ハツリ状況



写真-3 研削状況



写真-4 低粘度浸透接着剤

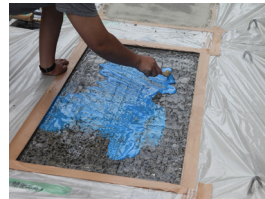


写真-5 高耐久型接着剤



写真-6 補修材打込み

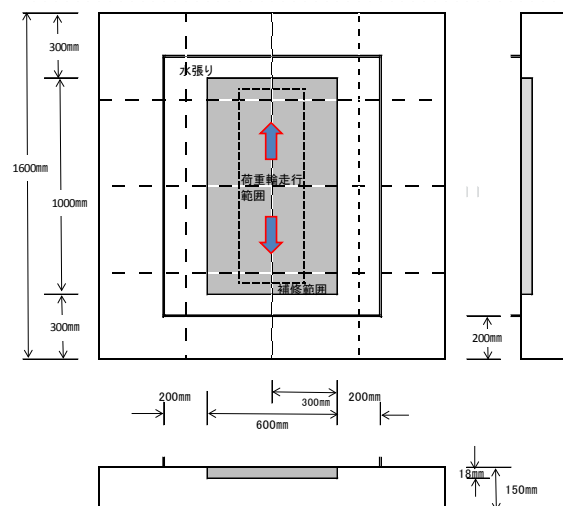


図-2 供試体補修範囲と水張り条件

表-6 一面せん断試験結果

補修材	付着界面の条件		
	低粘度浸透+高耐久接着剤	高耐久接着剤のみ	接着剤なし
タイプⅡ	7.35N/cm ²	5.75N/cm ²	4.18N/cm ²
従来品	—	—	4.36N/cm ²

すると供試体RC-Ⅱは1.2倍、供試体RC-Ⅲ-1(UFPCM(タイプⅡ))では2.0倍の補強効果が得られている。この段階での補修材を用いた2次補修後の補強効果は8%程度低下している。これは既設RC床版の変形量が大きくなったことによるものと考えられる。

4.2.4 3次補修

3次補修では、全ての供試体は乾燥状態で実験を行い供試体RC-Ⅱ、RC-Ⅲがそれぞれ10,045,337回、42,350,384回であった。乾燥状態では供試体RC-Ⅰが6.5倍、供試体RC-Ⅱが5.0倍、供試体RC-Ⅲが13倍となった。このことより、補修後に橋面防水工を確実に施工することでRC床版の延命化を図ることが出来ると考えられる。

表-7 等価走行回数

供試体	RC床版	1次補修(湿潤状態)		2次補修(湿潤状態)		3次補修(乾燥状態)		補修合計		3次補修までの合計	
		等価走行回数	補修効果	等価走行回数	補修効果	等価走行回数	補修効果	等価走行回数	補修効果	等価走行回数	補修効果
RC	14,391,598	—	—	—	—	—	—	—	—	14,391,598	—
RC-I	7,865,598	1,685,974	—	1,621,127	—	10,493,077	—	13,800,178	—	21,665,776	1.5
RC-II	7,865,598	2,160,639	1.3	2,010,198	1.2	10,045,337	1.0	14,216,174	1.0	22,081,772	1.5
RC-III-1	7,865,598	3,685,775	2.2	3,250,670	2.0	42,350,384	4.0	49,286,829	3.6	57,152,427	4.0
RC-III-2	7,865,598	81,286,995(乾燥)	22.1	—	—	—	1.9	81,286,995	1.6	89,152,593	6.2

4.2.5 合計等価走行回数

未補修のRC床版供試体の等価走行回数とRC-Iを比較すると1.5倍、供試体RC-II、IIIがそれぞれ1.5倍と4.0倍となる。供試体RC-Iと供試体RC-II(UFPCM(タイプI))が同等な等価走行回数となったが、これはUFPCMのタイプIとタイプIIとの強度(圧縮)の差によるものであり、今後の課題としてUFPCM(タイプI)は材齢6時間の圧縮強度を24N/mm²以上に改善する必要があると考えられる。次に、供試体RC-III-2(UFPCM(タイプII))の乾燥状態で実験では6強効果が得られたことから、橋面防水工の必要性も明らかになった。

4.3 たわみと等価走行回数

供試体RCは、たわみが床版支間Lの1/400を超えた付近からたわみの増加が著しくなり、破壊時のたわみは5.8mmである。次に、補修を行った供試体は走行回数7,865,589回でひび割れ損傷を与えた。この時点のたわみは供試体RC-Iが3.3mm、荷重除荷時の残留たわみが1.4mmである。また、供試体RC-II、RC-III-1、RC-III-2がそれぞれ3.5mm(最大)－1.25mm(残留)、3.5mm(最大)－1.1mm(残留)、3.35mm(最大)－1.3mm(残留)であり、この状態で補修を施した。湿潤状態で実験を行った試験体RC-Iのたわみは1次補修後の等価走行回数1,685,974回、たわみ3.4mm(最大)－1.9mm(残留)、2次補修後は等価走行回数1,621,127回、たわみ4.1mm(最大)－2.7mm(残留)であり、3次補修後の破壊時の等価走行回数21,665,776回でたわみ6.7mmである。供試体RC-IIは1次補修後の等価走行回数2,160,639回、たわみ3.4mm(最大)－1.9mm(残留)、2次補修後は等価走行回数2,010,198回、たわみ3.8mm(最大)－2.4mm(残留)、3次補修後の破壊時の等価走行回数22,081,772回、たわみ6.9mmである。供試体RC-III-1は、1次補修後の等価走行回数3,685,775回、たわみ3.3mm(最大)－1.8mm(残留)、2次補修後は等価走行回数3,250,670回、たわみ4.8mm(最大)－2.5mm(残留)、3次補修後の破壊時の等価走行回数57,152,427回、たわみ9.49mmである。よって、補修材の圧縮強度の差により、疲労寿命が延びている。次に、乾燥状態で実験を行った供試体RC-III-2は1次補修後の輪荷重走行試験において補修材からセメント成分の溶出は無く、RC床版が押し抜きせん断破壊に至まで補修効果が得られている。破壊時の等価走行回数89,152,593回、たわみ8.1mmである。

5. まとめ

湿潤環境という極めて厳しい条件では、UFPCMは強度(圧縮)の違いが耐久性に影響することが確認できた。しかし、UFPCMタイプIIとタイプIII-1の供試体上面の車輪走

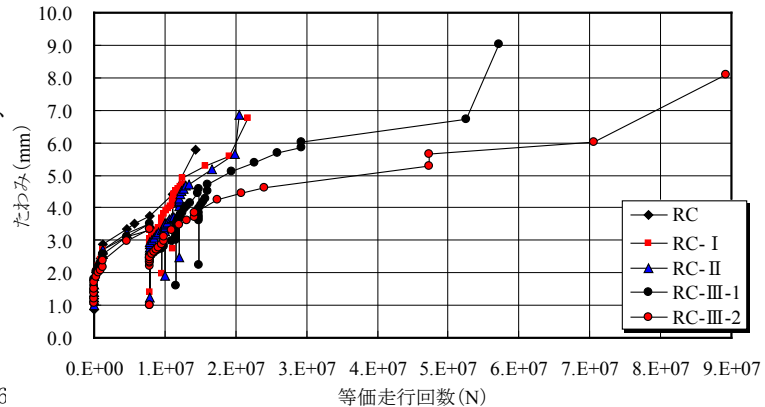


図-3 たわみと等価走行回数の関係

行面周辺にひび割れやはく離は認められなかったが、従来工法であるRC-Iでは早期にはく離が認められ、橋軸直角方向のひび割れが確認された。これはUFPCMに配合されたビニロン短繊維と再乳化型粉末樹脂が有効に機能すると共に、低粘度浸透型接着剤と高耐久型エポキシ樹脂との組合せにより供試体と一体化しているためと考えられる。現場への適用では、都市部など早期交通解放を目的とし、設計強度24N/mm²以上(材齢4時間)のUFPCM(タイプII)と低粘度浸透型接着剤と高耐久型エポキシ接着剤との組合せを用い、更に確実な防水工が必要であると考えられる。

「参考文献」

- 1) 後藤昭彦：既設コンクリート床版における上面部分補修部の変状要因に関する一考察、土木学会第67回年次学術講演会、V-273、平成24年。
- 2) 瀬谷千恵ほか：コンクリート床版における変状箇所の推定に関する一検討、土木学会第67回年次学術講演会、I-592、平成24年。
- 3) 澤松俊寿：舗装・防水層・床板からなる構造体の凍結融解抵抗性に関する一検討、土木学会第67回年次学術講演会、I-592、平成24年。
- 4) 土木学会：道路橋床版の要求性能と維持管理技術(2008)
- 5) 児玉孝喜ほか：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、2009。
- 6) 阿部忠ら：道路橋RC床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関する研究、構造工学論文集、Vol. 53A、2007。
- 7) 阿部忠ら：輪荷重走行疲労実験におけるRC床版上面増厚補修法の耐疲労性の評価法、構造工学論文集、Vol. 56A、pp. 1270-1281、2010。
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I、II、III、2004。
- 9) 松井繁之：道路橋床板 設計・施工と維持管理、森北出版、2007。