

上面補修を施した RC 床版の耐疲労性の評価

日大生産工（院） ○今野堯祥 日大生産工 阿部 忠
鹿島道路（株）伊藤清志 住友大阪セメント（株）大野 晃

1. はじめに

道路橋 RC 床版は、橋梁部材の中でも損傷が著しい部材のひとつであり、高度経済成長期に建設された道路橋などの老朽化した橋梁の維持管理が重要な課題となっている。RC 床版の損傷は、交通量の増加や大型車両の繰返し走行などの疲労損傷が主たる原因である。また、積雪寒冷地では、上記以外に凍害や融雪剤の散布による複合劣化により、損傷が著しい。その損傷状況は、床版上面に融解水や雨水が滞水し、スケーリングや砂利化などの上面損傷が確認されている。上面損傷は床版上面にアスファルト舗装が舗設されていることから、目視点検での発見が難しく、舗装の打ち換え時や舗装にポットホールが確認された時点で、事後的な補修や補強などの対策が実施されてきた。そこで予防保全型維持管理計画¹⁾では、損傷が軽微な段階で補修・補強を繰り返す、補修サイクルが計画されている。また、RC 床版の上面補修には、超速硬無収縮モルタルや超速硬コンクリートなどのセメント系材料が用いられているが、薄層補修においては早期に割れやひび割れ、補修界面のはく離などの再損傷が生じている。そこで、床版上面の薄層補修に適した補修材や補修技術の開発が急務となっている。

そこで、本研究では RC 床版上面補修材と補修界面に接着剤を塗布した補修法を提案し、耐疲労性の評価を行う。また、補修サイクルにおける RC 床版の耐疲労性の評価も併せて行い、RC 床版の維持管理対策の一助としたい。

2. 供試体概要

2.1 RC床版

本実験供試体は、2002 年の道路橋示方書・同解説（以下、道示とする）²⁾に準拠し、その 3/5 モデルとする。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 JIS A 5005 に規定された砕石 2005 と砕砂を使用した。RC 床版コンクリート配合および材料特性値を表 1、2 に示す。

2.2 補修材料

超速硬無収縮モルタル（以下、URCM とする）は、材令 3 時間の圧縮強度は 45.2N/mm^2 であり、道示に規定されているコンクリート設計基準強度 24N/mm^2 を材令 3 時間で十分に満たす材料である。次に、RC 床版上面補修材として提案されている超速硬繊維補強セメ

表1 RC床版コンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤(ml) 高性能 減水剤
			セメント	水	細骨材	粗骨材	
8.0 ±2.5	53.0	45.0	302	160	803	1019	4.0

表2 材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD295A, D13)		
		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	377	511	200

表3 補修材URCM、UFRCMの配合

項目	単位量(kg/m ³)				水結合比 (%)
	プレミックス粉体		繊維	水	
	結合剤	その他			
URCM	938	912	—	338	36
UFRCM48	618	1,212	5	296	48
UFRCM45	618	1,212	5	278	45

表4 接着剤の材料試験結果

項目	測定値	備考
外観	主剤 白色ペースト状 硬化剤 青色液状	異物混入なし
混合比(主剤：硬化剤)	5：1	重量比
硬化物比重	1.42N/mm^2	JIS K 7112
圧縮強さ	102.88N/mm^2	JIS K 7181
圧縮弾性係数	3976.4N/mm^2	JIS K 7181
曲げ強さ	41.16N/mm^2	JIS K 7171
引張せん断強さ	14.86N/mm^2 以上	JIS K 6850
コンクリート 付着強さ	3.7N/mm^2 または母材破壊	JIS K 6909

ントモルタル（以下、UFRCM とする）は初期強度発現性の異なる 2 タイプとし、UFRCM48（材令 3 時間で 17.3N/mm^2 、12 時間で 24.4N/mm^2 ）と UFRCM45（材令 3 時間で 24.5N/mm^2 ）を用いた。なお、各補修材の配合条件を表 3 に示す。また、UFRCM を用いた補修法では、RC 床版と UFRCM の付着界面に高耐久型エポキシ樹脂接着剤（以下、接着剤）を用いた。接着剤の材料試験結果を表 4 に示す。

2.3 供試体名称

供試体名称は、次の通りである。URCM を用いて補修した供試体を RC.U36 と称す。また、UFRCM48 を用いて補修した供試体を RC.UF48 と称す。また、UFRCM45 を用いて補修した供試体は 2 体製作し、RC.UF45-1、RC.UF45-2 と称す。そして、補修効果の比較を行うための無補修供試体を RC と称す。

2.4 供試体寸法および鉄筋配置

供試体寸法は全長 1,600×1,600mm、床版支間 1,400mm、

Evaluate of fatigue resistance on repair material to upper surface damaged RC-slabs
Takayoshi KONNO, Tadashi ABE, Kiyoshi ITO and Akira ONO

床版厚 150mm、主鉄筋および配力筋は D13 を 120mm 間隔で配置し、有効高さはそれぞれ 125mm、105mm である。供試体寸法および鉄筋配置を図 1 に示す。

2.5 補修範囲

走行面中央部を幅 600mm、長さ 1,200mm 深さ 18mm の範囲を切削し、その範囲内を補修する。また、道路橋 RC 床版は、アスファルト舗装から浸透した雨水や融解水が床版上面に滞水し、湿潤状態であることから、本実験供試体は水張り状態で輪荷重走行疲労実験を行うこととする。補修および水張り範囲を図 1 に併記する。

2.6 補修方法

URCM による補修方法は、RC 床版供試体上面を 18mm 切削し、直接 URCM により元の厚さまで補修する。次に、UFRCM による補修でも、同様に 18mm 切削後、接着剤を塗布し、UFRCM を打ち込み補修する。

3. 実験方法

本実験は輪荷重走行疲労実験を行い、RC 床版供試体のたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点で上面補修を施し、再度疲労実験を行い、再損傷に対しても補修後の疲労実験におけるたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点で再補修を行った。このようなサイクルを再々補修まで施し、再々補修後は橋面防水工を施した場合を想定し乾燥状態で破壊に至るまで疲労実験を行った。なお、RC.UF45-2 のみ補修は 1 度とし、湿潤状態の影響を考察するため乾燥状態で破壊に至るまで実験を行った。荷重条件は初期荷重 100kN で 2 万回走行し、その後は 2 万回走行ごとに 20kN ずつ増加させる段階荷重载荷とした。また、等価走行回数を算定して補修効果を検証する。等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式[1]として与えられる。また、S-N 曲線の傾きの逆数 m には 12.7 を適用する³⁾。

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

ここで、 N_{eq} ：等価走行回数（回）、 P_i ：載荷荷重（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）

4. 実験結果および考察

4.1 等価走行回数

本実験における等価走行回数を表5に示す。

(1) RC 床版供試体（RC）

RC の破壊時の等価走行回数は 14.39×10^6 回である。この等価走行回数を基準に耐疲労性を評価する。

(2) URCM を用いた供試体（RC.U36）

RC 床版のたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の等価走行回数は 7.865×10^6 回である。ここで、1 次補修を行い疲労実験を実施した。再損傷の判定は補修材のはく離や輪荷重走行試験機が走行不能とな

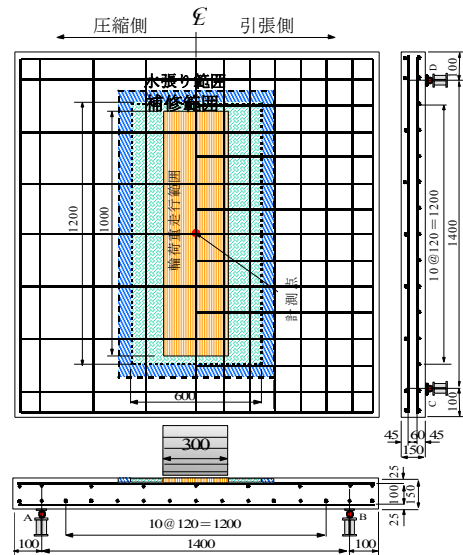


図1 供試体寸法および鉄筋配置

った時点とする。この時点の等価走行回数は 1.685×10^6 回である。1 次補修における等価走行回数の合計は 9.551×10^6 回であった。次に 2 次補修も再度疲労実験を行い、床版上面の損傷が著しくなった時点で走行を停止した。2 次補修における等価走行回数は 1.621×10^6 回であった。ここで 3 次補修を施し、乾燥状態で供試体が押抜きせん断破壊するまで疲労実験を行った。累積等価走行回数は 21.665×10^6 回であり、RC の 1.51 倍の補修効果が得られた。

(3) UFRCM48 を用いた供試体（RC.UF48）

RC.U36 と同様に等価走行回数 7.865×10^6 回まで疲労実験を行い、疲労損傷を与えた後に、1 次補修として UFRCM を用いた接着剤塗布型補修を行い、疲労実験を実施した。再損傷が生じた等価走行回数は 2.160×10^6 回であり、RC.U36 の 1.30 倍の補修効果が得られた。この時点の等価走行回数の合計は 11.026×10^6 回であった。2 次補修における等価走行回数は 2.010×10^6 回であり、RC.U36 の 1.20 倍である。また、累積等価走行回数は 12.036×10^6 回であった。3 次補修後の走行は乾燥状態で実験を行った。等価走行回数は 10.045×10^6 回であり、従来の補修の供試体 RC.U36 とほぼ同等となった。累積等価走行回数は 22.081×10^6 回であり、RC の 1.53 倍である。

(4) UFRCM45 を用いた供試体（RC.UF45-1）

等価走行回数 7.865×10^6 回まで疲労実験を行い、疲労損傷を与え、1 次補修後の等価走行回数は 3.685×10^6 回であり、RC.U36 の 2.20 倍の補修効果が得られた。この時点の等価走行回数の合計は 11.551×10^6 回であった。次に 2 次補修における等価走行回数は 3.250×10^6 回であり、RC.U36 の 2.01 倍である。また、累積等価走行回数は 14.80×10^6 回であり、RC の 1.02 倍である、この時点で RC 床版供試体を上回る等価走行回数が得られた。3 次補修後の等価走行回数は

表5 等価走行回数および補修効果

供試体	RC床版 (乾燥状態)	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	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	累積等価 走行回数	補修 効果
RC	14,391,598	—	—	—	—	—	—	—	—	14,391,598	—
RC.U36	7,865,598	1,685,974	—	1,621,127	—	10,493,077	—	13,800,178	—	21,665,776	1.51
RC.UF48	7,865,598	2,160,639	1.30	2,010,198	1.20	10,045,337	0.96	14,216,174	1.00	22,081,772	1.53
RC.UF45-1	7,865,598	3,685,775	2.20	3,250,670	2.01	42,350,384	4.04	49,286,829	3.60	57,152,427	3.97
RC.UF45-2	7,865,598	47,349,889(乾燥)	28.08	—	—	—	—	47,349,889	3.43	55,215,487	3.84

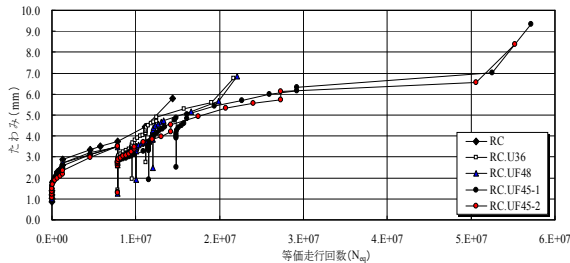


図2 たわみと等価走行回数の関係

42.35×10⁶ 回であり、累積等価走行回数は 57.152×10⁶ 回となり、RC の 3.97 倍の補強効果が得られた。

(5) UFRCM45 を用いた供試体 (乾燥状態、RC.UF45-2)

等価走行回数 7.865×10⁶ 回まで疲労実験を行い、疲労損傷を与え、UFRCM45 を用いて接着剤塗布型上面補修を施し、疲労実験を実施した。実験は、防水工が完全に機能している場合を想定し、乾燥状態で疲労実験を行った。補修後の等価走行回数は 47.349×10⁶ 回であり、RC.U36 の 3.43 倍の補修効果となった。破壊時の累積等価走行回数は 55.215×10⁶ 回であり、RC の 3.84 倍、RC.U36 の 2.55 倍の補強効果が得られ、床版上面に防水工を確実に施すことで耐疲労性が大幅に向上する結果となった。

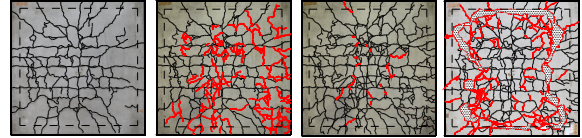
4.2 たわみと等価走行回数の関係

(1) RC 床版供試体 (RC)

RC は図 2 に示すように、たわみが床版支間 L の 1/400、すなわち 3.5mm を超えた付近からたわみの増加が著しくなっている。床版支間 L の 1/400 に達した時点の等価走行回数は 5.77×10⁶ 回である。その後の走行を繰り返すことにより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。

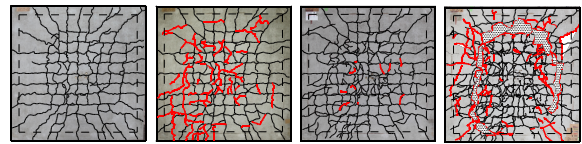
(2) URCM を用いた供試体 (RC.U36)

RC 床版のたわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点で実験を中断し、その時点の残留たわみは 1.42mm である。1 次補修後の等価走行回数は 9.551×10⁶ 回でたわみが 3.44mm、残留たわみは 1.96mm である。さらに 2 次補修を実施後に再劣化が生じるまで疲労実験を実施した。再損傷における等価走行回数は 11.172×10⁶ 回であり累積たわみが 4.10mm、残留たわみが 2.74mm である。本来はこの時点でたわみが床版支間 L の 1/300 を超えていることから、2 次補修後は、たわみの増加を抑制するための補強対策が必要となる。そこで 3 次補修後は乾燥状態で疲労実験を実施した。破壊時の累積等価走行回数は 21.655×10⁶ 回であり、累積た



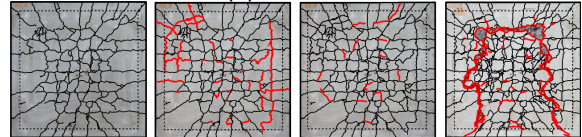
1) 無補修時 2) 1次補修 3) 2次補修 4) 3次補修

(1) RC.U36



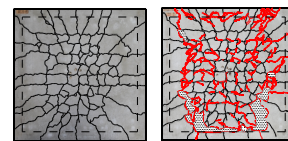
1) 無補修時 2) 1次補修 3) 2次補修 4) 3次補修

(2) RC.UF48



1) 無補修時 2) 1次補修 3) 2次補修 4) 3次補修

(3) RC.UF45-1



1) 無補修時 2) 1次補修

(4) RC.UF45-2

図3 床版下面の損傷状況

わみは 6.75mm である。このように湿潤状態での実験に比して乾燥状態ではたわみの増加が抑制されていることから、補修時には橋面防水工が必須となる。

(3) UFRCM48 を用いた供試体 (RC.UF48)

RC.UF48 はたわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点で実験を中断した。この時点の残留たわみは 1.25mm である。ここで 1 次補修を施し、疲労実験を実施した。再損傷が生じた時点の等価走行回数は 10.026×10⁶ 回であり、累積たわみが 3.43mm、残留たわみは 1.91mm である。ここで、2 次補修し、再度疲労実験を実施した。2 次補修後の再々損傷が発生した時点の等価走行回数は 12.036×10⁶ 回、累積たわみは 3.85mm、残留たわみが 2.48mm である。3 次補修後の破壊時の等価走行回数は 22.081×10⁶ 回、累積たわみは 6.86mm である。

(4) UFRCM45 を用いた供試体 (RC.UF45-1)

RC.UF45-1 のたわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点の残留たわみは 1.31mm である。ここで 1 次補修

を施し、疲労実験を実施した。再損傷が生じた時点の等価走行回数は 11.551×10^6 回であり、累積たわみは 3.39mm、残留たわみは 1.90mm である。ここで、2 次補修を施し、再度疲労実験を実施した。2 次補修後の再々損傷が発生した時点の等価走行回数は 14.802×10^6 回、累積たわみは 4.85mm、残留たわみは 2.53mm である。3 次補修後の破壊時の等価走行回数は 57.152×10^6 回、累積たわみは 9.33mm である。

(5) UFRM45 を用いた供試体 (乾燥状態、RC.UF45-2)

RC.UF45-2 のたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の残留たわみは 1.29mm である。ここで 1 次補修を施し、乾燥状態で疲労実験を実施した。乾燥状態で走行疲労実験を実施したことからのたわみの増加は抑制されている。破壊時の等価走行回数は 55.215×10^6 回、累積たわみは 8.40mm である。よって、補修床版後は橋面防水工を施すことで耐疲労性が大幅に向上する結果となった。

4.3 損傷状況

床版下面の損傷状況を図 3 に示す。最終的な破壊モードは、全供試体とも押抜きせん断破壊となった。

(1) RC 床版供試体 (RC)

RC は破壊するまで輪荷重走行疲労実験を実施した。破壊時のひび割れ状況は鉄筋配置付近に 2 方向のひび割れが発生すると同時に輪荷重載荷位置から 45 度底面にダウエル効果によるはく離が発生した。破壊は輪荷重走行時に押抜きせん断破壊となった。

(2) URCM を用いた供試体 (RC.U36)

たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点、等価走行回数 7.865×10^6 回の時点のひび割れ状況は図 3 (1)1) に示すように 0.2mm 以下のひび割れが 2 方向に発生している。1 次補修後の疲労実験により損傷がみられた時点、累積等価走行回数 9.551×10^6 回におけるひび割れ状況は図 3 (1)2) に示すように新たなひび割れが伸展している。2 次補修後の累積等価走行回数 11.172×10^6 回では新たなひび割れが発生するものの 1 次補修に比して発生は少ない。破壊時の損傷状況は輪荷重載荷位置から 45 度底面にダウエル効果の影響によるはく離が見られる。破壊は押抜きせん断破壊となった。

(3) UFRM48 を用いた供試体 (RC.UF48)

疲労損傷を与えた等価走行回数 7.865×10^6 回の時点のひび割れ状況は、図 3 (1)1) に示すように 0.2mm 以下のひび割れが 2 方向に発生している。1 次補修を施し、再損傷が発生した時点、累積等価走行回数 10.026×10^6 回におけるひび割れ状況は図 3 (1)2) に示すようにひび割れが伸展している。2 次補修後の累積等価走行回数 12.006×10^6 回では新たなひび割れが発生している。

(4) UFRM45 を用いた供試体 (RC.UF45-1)

疲労損傷を与えた等価走行回数 7.865×10^6 回の時点のひび割れ状況は、図 3 (3)1) に示すように 2 方向に

発生している。1 次補修を行い、再損傷が発生した時点の累積等価走行回数は 11.551×10^6 回であり、RC.U36 に比して 1.20 倍の等価走行回数である。また、補修後のひび割れも抑制されている。2 次補修後のひび割れ状況は図 3 (3)3) に示すよう累積等価走行回数は 14.802×10^6 回であり、RC.U36 および RC.UF48 のそれぞれ 1.32、1.22 倍であるが、ひび割れの伸展が抑制されている。

(5) UFRM45 を用いた供試体 (乾燥状態、RC.UF45-2)

等価走行回数 7.865×10^6 回の時点のひび割れ状況は、図 3 (4)1) に示すように 2 方向に発生している。破壊時の等価走行回数は 55.215×10^6 回、1 回の補修ながら湿潤状態で実験をした RC.UF45-1 の 0.9 倍であり、図 3 (4)2) の示すようにひび割れも抑制されている。

以上より、補修材として開発された UFRM および接着剤塗布型上面補修法は、接着剤の効果により RC 床版と補修材との一体性が確保され、ひび割れの進展が抑制されている。

5. まとめ

① RC 床版の上面損傷に用いられている補修材 URCM および補修法では、3 次補修において RC 床版供試体の破壊時の等価走行回数に比して 1.51 倍となった。また、本提案する補修材 UFRM48 を用いた接着剤塗布型上面補修においては 1.53 倍となった。一方、補修材 UFRM45 を用いた補修法では RC 床版供試体の 3.97 倍、3.84 倍 (乾燥状態) の補修効果が得られた。

② 本実験は RC 床版に疲労損傷を与えた後に上面補修を 3 次補修まで行ったものである。従来の補修材 URCM を用いた床版の損傷メカニズムは、界面で早期にはく離し、水の浸入が見られた。また、補修材 UFRM48、45 は輪荷重走行による上面損傷が見られるが、界面のはく離は見られなかった。

③ 本実験では 3 次まで補修を行ったが、たわみと等価走行回数の関係においては、補修サイクルごとの走行による残留たわみが累積され、輪荷重走行による変形が大きくなり、補修サイクル毎に等価走行回数が減少することから、補修は 2 次までとし、それ以降は、たわみの増加を抑制するための下面および上面からの補強対策が必要となる。

④ 本提案する補修材 UFRM48、45 は補修対象橋梁の交通量、施工条件等から選択し、補修法は補修界面に接着剤を塗布することで耐疲労性が向上する結果となった。なお、寿命向上のためには橋面防水工が必須となる。

「参考文献」

- 1) 千葉県県土整備部道路環境課企画調整室：千葉県橋梁長寿命化修繕計画 (案)，(2010)
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，(2002)
- 3) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，(2007)