

劣化床板に対する床板打替と接着剤を用いた床板上面増厚の併用による耐疲労性評価

鹿島道路(株) 生産技術本部技術部	正会員	○伊藤 清志
日本大学 生産工学部	正会員	阿部 忠
(株)ケミカル工事 特殊工事グループ	正会員	尾崎 稔
新日鉄マテリアルズ(株) 社会資本材料事業部	正会員	小森 篤也
鹿島道路(株) 生産技術本部技術部	正会員	山下 雄史
鹿島道路(株) 生産技術本部技術部	正会員	一瀬 八洋

1. はじめに

鋼・合成構造標準示方書¹⁾によると橋梁の設計供用期間は経済的供用年数(原価償却資産としての経済的な寿命)と機能的供用年数(期待される機能を失う社会的な寿命)、そして物理的供用年数(構造物の性能低下による絶対的な寿命)の三要素から構成され、一般的に物理的性能がほかの二つを超えるように設計されている。現在の道路橋の設計基準では、設計供用期間は60年～100年とし、適切な維持管理を行うことを前提に100年に設定するのが一般的であるとされている。一方、現行の道路橋示方書以前の仕様(昭和39年の道路橋示方書など)で建設された道路橋床版では、供用開始後30数年で新床版に取替えられている事例がある。これらは首都圏部における交通量の増大と過積載車両の走行に起因する2方向ひび割れが発生する疲労劣化による損傷や、積雪寒冷地域における凍結防止剤の散布による塩害や凍害との複合劣化などにより早期に床版の劣化損傷が進んだと考えられる。道路橋コンクリート床版(以下、RC床版)の補強対策としては、既に鋼繊維補強コンクリート²⁾(以下、SFRC)と付着界面にフレッシュコンクリート打継専用エポキシ樹脂系接着剤³⁾(以下、接着剤)を用いた接着接合によるRC床版上面増厚補強工法や、床版下面に連続繊維シート(以下、CFS)を貼付けるCFS下面補強工法があり、その補強効果について報告されている^{4), 5)}。しかし、局所的な床版損傷に対する維持補修の一つとして、部分的な床版打替えによる補修と既設床版全面の上面増厚との組合せによる補修・補強工法についての耐久性や耐疲労性の評価した報告事例はない。そこで本研究では、実橋を模擬したRC床版を予備載荷により劣化した状態を再現してから、一次補強としてRC床版の下面をCFSで補強した補強効果を輪荷重走行疲労実験により評価すると共に、二次補強として押し抜きせん断破壊となり実験終了した供試体をさらに使用し、損傷部位をウォータージェット(以下、WJ)により切削・研掃してから、既存鉄筋を利用し、付着界面に接着剤を塗布した打替補修と接着剤を全面に塗布した上面増厚補強を併用した補修・補強について、輪荷重走行疲労実験により耐疲労性を評価し、再補修の時期についての検討を行った。

2. 使用材料

(1) RC床版供試体

実橋を模擬した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最大寸法20mmの粗骨材を使用した。また、鉄筋はSD295A、D10を使用した。コンクリートの圧縮強度は35N/mm²であった。使用したRC床版供試体の配合を表-1に、コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2に示す。

(2) 連続繊維シート(CFS)

疲労損傷を与えたRC床版の一次補強法として模擬床版供試体の下面補強に用いたCFSは、目付量202g/m²、設計厚0.111mmの高強度炭素繊維シートを専用のプライマーおよび接着剤を用い、橋軸方向および橋軸直角方向に各1層施工した。使用したCFSの材料規格値は引張強度が4,420N/mm²、ヤング係数は235kN/mm²である。実験に使用したCFSの性能を表-3に示す。

キーワード RC床版, ウォータージェット, 部分打替, 接着剤, 上面増厚補強, 耐疲労性

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

(3) 打替部のコンクリート

陥没箇所の打替コンクリートは超速硬セメントと最大寸法15mmの粗骨材、細骨材を用いて、

連続式のコンクリートモータールで製造した。設計基準強度は 24N/mm^2 （材齢3時間）とした。配合を表-4に示す。

(4) フレッシュコンクリート打継ぎ専用接着剤

陥没箇所の打替と上面増厚において、新旧のコンクリートの付着界面には付着性を高めるためにフレッシュコンクリート打継専用エポキシ樹脂系接着剤を用いた。接着剤の材料特性値は圧縮強さ 50N/mm^2 以上、曲げ強さ 35N/mm^2 以上、付着強さ 1.6N/mm^2 以上である。接着剤の仕様を表-5に示す。

(5) 増厚部のコンクリート

陥没箇所の打替後の上面増厚には超速硬セメントを使用したSFRCを用いた。同SFRCの設計基準強度は 24N/mm^2 （材齢3時間）、又配合条件は、超速硬セメントと最大寸法15mmの粗骨材および長さ30mmの鋼繊維を混入量 100kg/m^3 （1.27vol.%）とした。配合を表-6に示す。

3. 供試体寸法

実橋床板を模擬したRC床版供試体の寸法は平成14年改訂の道路橋示方書⁶⁾に準拠し、その1/2モデルとした。供試体の全長は1,470mm、支間1,200mm、床版厚130mm、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D10を100mm間隔で配置した。その有効高さは、それぞれ125mm、112mmとした。また、圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置した。供試体の形状・寸法を図-1に示す。

4. 補強供試体の制作方法と実験手順

(1) 予備荷重

本実験に用いるRC床版供試体は損傷を受け、補修時期を迎えたことを想定して荷重60kNで4万回の輪荷重走行を行い、2方向のひび割れを発生させた。輪荷重走行試験機を写真-1、RC床版の応力履歴時の損傷状況を図-2に示す。

(2) CFS下面補強（一次補強）

本実験におけるCFS下面補強は、設計・施工指針(案)⁷⁾に基づいて施工した。CFSは、目付量 200g/m^2 、設計厚0.111mmとし、接着範囲は供試体支間(1,200mm×1,200mm)の内側とし、1,100mm×1,100mmの範囲に接着した(図-3)。

施工手順は写真-2～5に示すように、最初にRC床版供試体の下面の不陸や脆弱部の除去を目的として、電動ディスクグラインダーに研削砥石を装着して平滑に研磨して仕上げる(写真-2)。次にRC床版供試体のコンクリート面とCFSとの付着性を高めるためにプライマーを塗布し、24時間の養生

表-1 模擬床版供試体のコンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a	単位量(kg/m ³)				高性能 減水剤
			セメント	水	細骨材	粗骨材	
8.0±2.5	39.2	40.0	403	158	726	1094	4.0

表-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

項目 供試体No.	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-1	35	368	568	200
RC-C	35	368	516	200
RC-N.C	32	368	516	200
RC-S	35	368	568	200
RC-S-A	35	368	568	200

表-4 打継部の超速硬コンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a	単位量(kg/m ³)					高性能 減水剤
			セメント	水	細骨材	粗骨材	鋼繊維	
12±2.0	38.0	42.1	455	173	712	1037	0.0	9.1

表-5 打継専用接着剤（土木用高耐久接着剤）の配合

項目	基準値	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	重量比
硬化物比重	1.4±0.2	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or母材破壊	JIS K 6909

表-6 打継部の超速硬 SFRC の配合

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a	単位量(kg/m ³)					高性能 減水剤
			セメント	水	細骨材	粗骨材	鋼繊維	
6.5±1.5	39.3	51.2	430	170	851	858	100.0	8.6

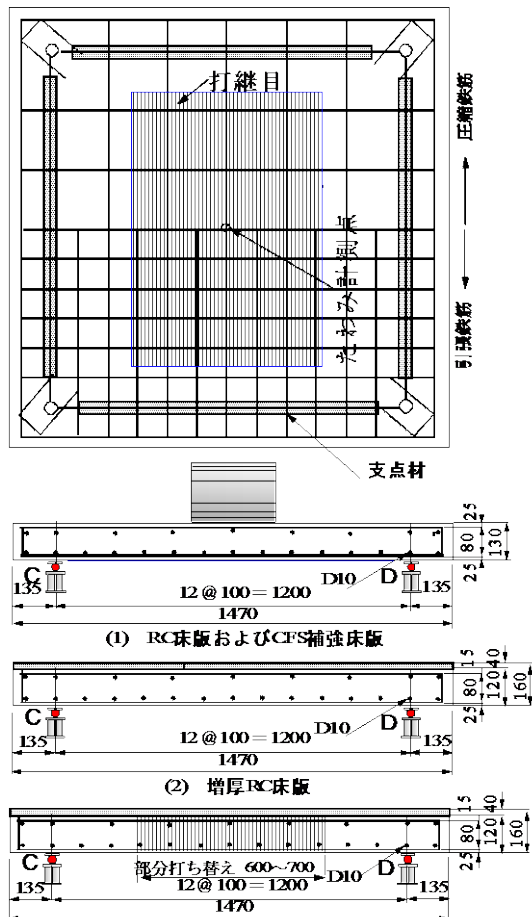


図-1 模擬床版供試体の寸法および鉄筋配置 (mm)

を行い(写真-3), その後に専用のエポキシ系含浸接着剤を塗布し, 幅500mmのCFSを一層目に橋軸直角方向に全面に接着し(写真-4), 24時間の養生後に同様に, 二層目として橋軸方向にCFSを接着し(写真-5), 24時間の養生を行った。

実験手順は, CFSの補強後に輪荷重走行疲労実験を最初に100kN, 次に120kNで各々2万回走行させ, その後は2万回走行ごとに10kN増加させるステップ载荷として押し抜きせん断破壊するまで荷重増加させて輪荷重走行疲労実験を行った。CFSは押し抜きせん断破壊まではく離しなかったが, はく離の状況はダウエル効果の影響を受ける範囲ではく離した。押し抜きせん断時のCFSのはく離状況を図-4に示す。

(3) ウォータージェットによる打ち抜き

二次補強を行う前処理として, 押し抜きせん断破壊によりはく離した供試体底面のCFSを撤去し, 押し抜きせん断破壊により損傷したコンクリート部位をWJにより切削・研掃した。実際の現場では, 超高圧水の噴射システムが組込まれたロボットを用いているが, 今回は小規模となるためハンドガンを用いた。実際の現場施工状況を写真-6, 7に示す。今回のWJの設定は水量16ℓ/min, 水圧200MPaとし, 損傷部および脆弱部のコンクリートを撤去した。施工状況を写真-8, 9に, 用いた超高圧ポンプを写真-10に示す。

(4) 打替工

WJ による打ち抜き後に送風機を用いて湿潤面を乾燥させてから床版底面に型枠を設置した(写真-11)。次に打替え箇所の内側側面に接着剤を塗布し(写真-12), 接着剤の打継ぎ可能な時間内に超速硬コンクリートを打込み(写真-13), 表面仕上げを行い(写真-14), 養生はポリエチレンシートにて覆い封緘養生とした。

(5) RC 床版上面増厚工 (二次補強)

二次補強として, 上面増厚補強を打替箇所を含めた床版上面に行った。増厚を行う前の研掃は, WJによる損傷部の切削・研掃時にRC床版付着界面全面をWJにより研掃を行い, 打替部のコンクリート上面についてはレイタンスを電動ディスクグラインダーによりケレン処理(写真-15)を行った。増厚に用いる超速硬SFRCはコンクリートモビル車にて製造し(写真-16), 接着剤を付着界面全面に塗布してから, 超速硬SFRCを $t=40\text{mm}$ の厚さで打込み(写真-17), 入念に締めてから表面仕上げを行った。超速硬SFRCの打込み後の初期養生は, ポリエチレンシートにて覆い, 封緘養生とした。

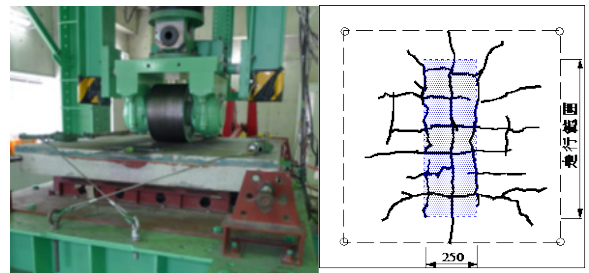


写真-1 輪荷重走行実験 図-2 予備载荷（ひび割れ）

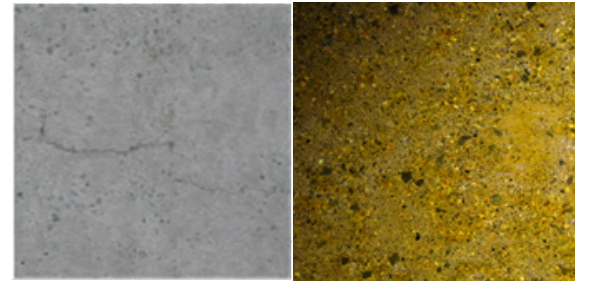


写真-2 表面研磨 写真-3 プライマー塗布

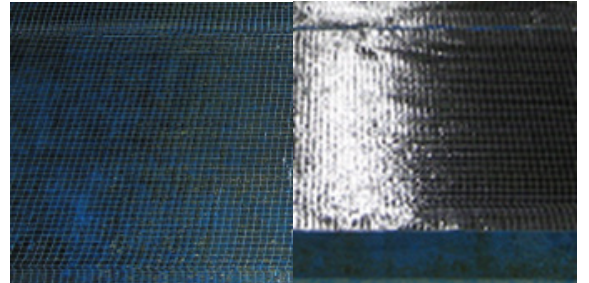


写真-4 1層目（橋軸直角） 写真-5 2層目（橋軸方向）

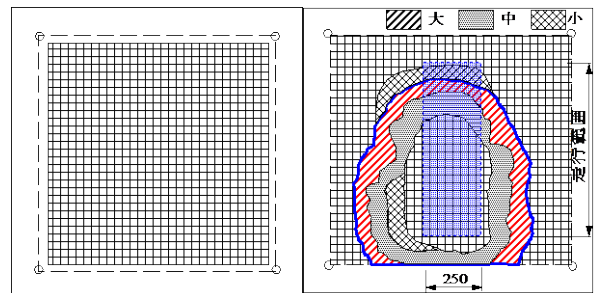


図-3 CFS 貼付け 図-4 CFS はく離状況



写真-6 WJ 打抜き（状況） 写真-7 WJ 打抜き（完了）



写真-8 WJ 打抜き（状況） 写真-9 WJ 打抜き（完了）

5. 輪荷重走行疲労実験方法と等価走行回数

(1) 実験方法

本実験は RC 床版供試体を用いて、輪荷重走行による疲労実験を行った。荷重は 100kN, 120kN で 2 万回走行し、その後は 2 万回走行ごとに 10kN ずつ増加させ、破壊するまで、荷重増加と走行を行った。

(2) 等価走行回数

本実験における走行疲労実験は、2 万回ごとに荷重を増加させた条件で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)で与えられる。なお、式(1)における S-N 曲線の傾きの逆数 12.7 を適用する^{8), 9)}。

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

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)とした。

6. 実験結果および考察

(1) 等価走行回数

RC 床版および RC 床版打替補強における等価走行回数を表-7 に示す。同一寸法を有する RC 床版 RC-1 では 8.52×10^6 回となり、CFS 下面補強を行った RC-C では 130.08×10^6 回となった。また、補修・補強の対象となる実橋の RC 床版を模擬し、予備載荷として 60kN で 4 万回の走行履歴を与えて二方向ひび割れを発生させてから CFS 下面補強した RC.N.C では、 111.99×10^6 回となり、十分な補強効果が確認された。また従来の RC 床版上面増厚工法により補強した RC.S-1 では、 60.85×10^6 回であるが、さらに付着界面全体に接着剤を塗布した接着接合型 RC 床版上面増厚工法を行った RC.S-A1 では 261.25×10^6 回となり、付着界面全体に接着剤を塗布することにより大幅に等価走行回数は増加している。そして、予備載荷後に CFS 下面補強を行ってから押し抜きせん断破壊に至った RC 床版を WJ により切削・研掃し、超速硬コンクリートにて打替えてから更に床版上面に接着剤を全面塗布して超速硬 SFRC にて増厚を行った RC.N.C-K では、 571.16×10^6 回であった。各施工条件の違いによる等価走行回数を、同一寸法を有する RC 床版 RC-1 を基準として等価走行回数比で比較すると、CFS 下面補強工法では RC-C が 15.3 倍、RC.N.C は 13.1 倍となる。また、上面増厚工法では RC.S-1 では 7.1 倍であるが、RC.S-A1 では 30.6 倍となる。そして、二次補修を想定した RC.N-S では 67.0 倍となる。

(2) たわみと等価走行回数の関係

たわみと等価走行回数の関係を図-5~7に示す。既往の報告からも RC 床版に対する輪荷重走行試験による疲労実験において、支間 L の 1/400 付近(今回の設定では 3mm)のたわみ量から急激に増加することが報告されているが¹⁰⁾、図-5の RC 床版と CFS 下面補強においても、RC 床版供試体はたわみが 3.0mm を超えた付近から増加が著しくなり、破壊に至っている。また、予備載荷として 4 万回走行時のたわみは 2.4mm で、荷重徐荷時の残留たわみは 0.8mm である。その後、CFS 補強した場合のたわみは、上記残留たわみを初期値とした。CFS 補強時のたわみにおいても同様に支間 L の 1/400 を超えた時点から増加が著しくなり、押し抜きせん断破壊時のたわみの最大値は 5.5mm である。図-6ではさらに RC 床版上面増厚工法(従来型および接着接合型)についても含めてまとめたものである。SFRC 上面増厚補強した床版供試体は、補強後のたわみが支間 L の 1/350 に達した付近からたわみの増加が大きくなっている。また、予備載荷として 4 万回走行の応力履歴を与えてから CFS 下面補強を行った後に押し抜きせん断破壊となった供試体の損傷個所を WJ で切削



写真-10 超高压ポンプ



写真-11 床版底面型枠設置

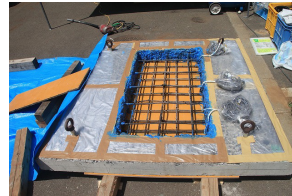


写真-12 接着剤塗布



写真-13 超速硬 Co 打込み



写真-14 打替部表面仕上げ



写真-15 打替部ケレン



写真-16 超速硬 Co 製造



写真-17 上面増厚工

表-7 等価走行回数

供試体		荷 重						等価走行回数 合計	等価走行回 数比
		60kN	80 kN	100 kN	110 kN	120 kN	130 kN	140 k N	
RC-1	実験走行回数		20,000	11,810					8,529,870
	等価走行回数		772,240	7,757,629					
RC-C	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	20,000	10,832			130,080,846
	等価走行回数	20,000	772,239	13,137,391	44,075,395	72,075,821			
RC-CD	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	20,000	8,114			111,995,351
	等価走行回数	20,000	772,239	13,137,391	44,075,395	53,990,326			
RC.S-1	実験走行回数	—	20,000	20,000	—	9,026	—	—	60,850,988
	等価走行回数	—	772,240	13,137,391	—	60,058,748	—	—	
RC.S-A1	実験走行回数	—	20,000	20,000	—	20,000	6,214	—	261,258,726
	等価走行回数	—	772,240	13,137,391	—	133,079,433	114,269,662	—	
RC.N.C-K	実験走行回数	—	20,000	20,000	—	20,000	—	8,114	571,166,617
	等価走行回数	—	772,240	13,137,391	—	133,079,433	—	424,177,553	

・研掃し、付着界面に接着剤を塗布して一体化を図った打替と更に接着剤で一体化させた上面増厚を併用したRC.N.C-Kにおいてもほぼ同様な傾向である。図-7では、想定される維持補修サイクルとして、既設RC床版の補修時期に接着剤を適用した上面増厚工法で補修・補強した場合(RC.1からRC.S.A1)と、一次補修としてCFS下面補強を行い、二次補修として損傷部の打替と上面増厚を併用した場合(RC.N.CからRC.N.C.K)についてとりまとめた。

(3) 破壊形状

RC床版および床版打替補強したRC床版の破壊状況を図-8に示す。RC床版供試体の破壊状況は図-8(1)に示すように、輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。一方、部分打替したRC床版は図-8(5)に示すように、RC床版供試体に比して床板厚が30mm厚いことや、既存RC床版と打替部ならびに上面増厚部が接着剤塗布により一体性が確保されていることから破壊分布範囲も広がっていると推察される。

7. まとめ

今回の実験では、RC 床版供試体の輪荷重走行範囲から底面に 45 度に位置する範囲の損傷を受けた断面のコンクリートを打替したが、陥没損傷した損傷部位を WJ で切削してから内側側面に接着剤を塗布しての超速硬コンクリートによる打替と、さらに接着剤を全面に塗布したSFRC 上面増厚補強を併用することで押抜きせん断耐荷力が向上し、耐疲労性が大幅に向上することが確認できた。この要因としては、新旧のコンクリートが付着界面に塗布した接着剤により一体化したことや、SFRC を 40mm の厚さで上面増厚を行ったことにより大幅に耐疲労性が向上する結果が得られたと考えられる。よって、旧示方書の基

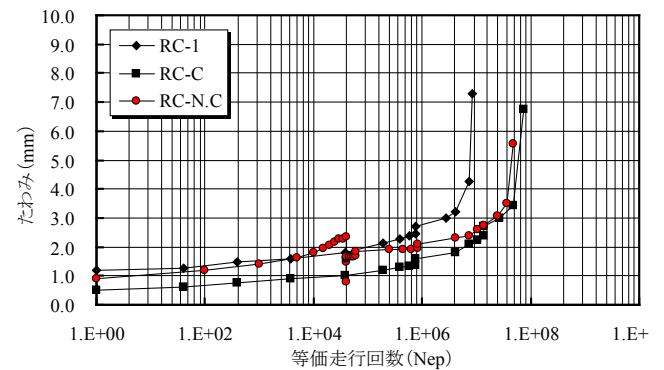
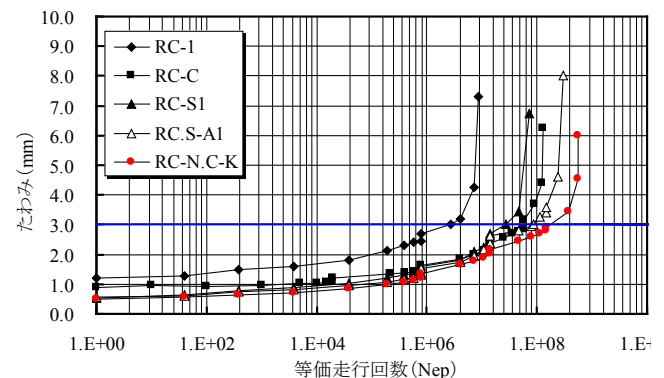
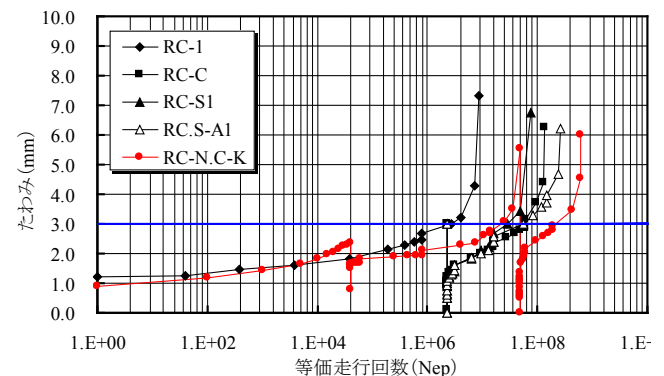


図-5 たわみと等価走行回数の関係 (CFS 下面補強)

図-6 たわみと等価走行回数の関係
(CFS 下面補強, 上面増厚および二次補修)図-7 たわみと等価走行回数の関係
(想定される維持補修サイクル)

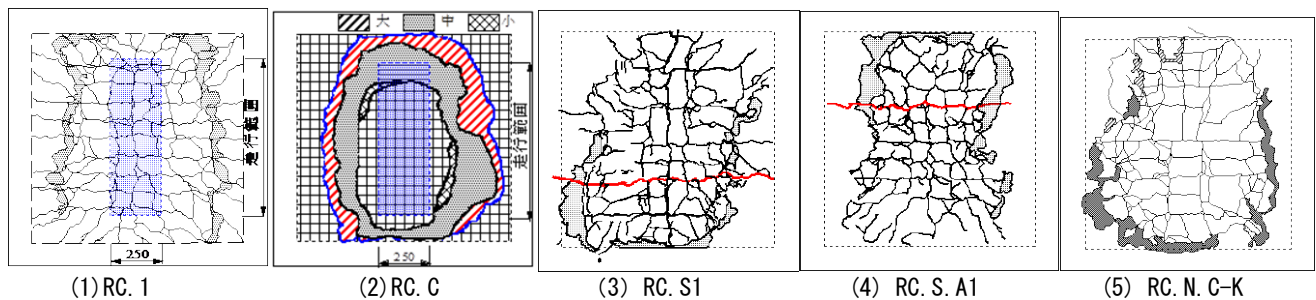


図-8 破壊状況

準により施工された RC 床版の維持補修工法として二次補修あるいは一次補修に、損傷個所の打替工と SFRC 上面増厚補強工を併用することで疲労寿命が向上し、橋梁床版の長寿命化に寄与する補修工法として実用的であることが立証された。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書〔総則編〕，土木学会，pp.10-11，2007
- 2) 内田賢一，西川和廣：既存道路橋床版の疲労耐久性に関する検討，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，土木学会，pp.37-42，1998.
- 3) 児玉孝喜，加形護，伴康夫，海老澤秀治，鈴木康範：SFRC舗装における鋼床版の疲労耐久性向上対策，第12回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.83-96.
- 4) 高野真希子，阿部忠，木田哲量，児玉孝喜：劣化 RC 床版の CFSS 底面補強および SFRC 上面増厚補強による耐疲労性、セメント・コンクリート論文集、No. 64、pp.507-514，2011.
- 5) 高野真希子，阿部忠，木田哲量，小森篤也：CFRP 格子筋を用いた RC 床版上面増厚補強法における疲労特性、セメント・コンクリート論文集、No. 63、pp.530-537，2010.
- 6) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，2004.
- 7) 土木研究所：炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)，コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告(III)，1999.
- 8) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.
- 9) 土木学会：道路橋床版の要求性能と維持管理技術，(社)土木学会 鋼構造委員会，pp.237-240，2009.
- 10) 阿部忠，木田哲量，高野真紀子，小森篤也，児玉孝喜：輪荷重走行疲労実験における RC 床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1270-1281，2010.