

一次・二次補強における道路橋 RC 床版の耐疲労性の研究

日大生産工[院] ○勝呂翔平 日大生産工 阿部 忠 日大生産工[院] 元 燦豪
鹿島道路(株) 伊藤清志 新日鉄マテリアルズ(株) 小森篤也

1. はじめに

近年、老朽化した橋梁の増大に対応するために、従来の事後的な修繕及び架替えから、予防的な修繕及び架替えへと政策転換を図る目的で道路橋長寿命化修繕計画が実施された。この計画では RC 床版を 100 年間維持するための補強対策、すなわち二次補強までの対策が立案されているが、一次補強および二次補強法における耐疲労性の評価や劣化予測が明らかにされていない状況で二次補強対策が計画されている。

そこで本研究では、RC 床版に疲労劣化を与え、一次補強として鋼繊維補強コンクリートによる上面増厚補強法(以下、SFRC 上面増厚補強と称す)、二次補強として連続炭素繊維シートによる下面接着補強法(以下、CFS 下面接着補強と称す)した供試体と、一次補強に CFS 下面接着補強、二次補強に SFRC 上面増厚補強した供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、一次・二次補強における耐疲労性を検証し、RC 床版の補強対策の一助とする。

2. 使用材料

2. 1 RC床版

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、5mm ~ 20mm の砕石を使用し、鉄筋は SD295A、D13 を使用した。コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-1 に示す。

2. 2 鋼繊維補強コンクリート (SFRC)

上面増厚コンクリートには、SFRC を用いた。SFRC の設計基準強度は、材齢 3 時間で 24N/mm^2 とした。その配合条件は、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。供試体を用いた SFRC の圧縮強度は、増厚後の材齢 3 時間で 24.5N/mm^2 である。また、SFRC と RC 床版との界面には付着性を高めるために高耐久性エポキシ系接着剤(以下、接着剤と称す)を用いた。接着剤の材料特性値は、圧縮強さ 102.8N/mm^2 、曲げ強さ 41.1N/mm^2 、付着強さ 3.7N/mm^2 である。SFRC の配合条件を表-2 に示す。

2. 3 炭素繊維シート (CFS)

本実験に用いる CFS には目付量 200g/m^2 、設計厚

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋(SD295A)		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
RC-1	30	370	511	200
RC.C-1				
RC-S-C	35			
RC-C-S				

表-2 SFRCの配合表

スランブ (cm)	W/C (%)	S/a	単位量(kg/m^3)				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	鋼繊維
6.5±1.5	40	51	430	170	851	858	100

表-3 CFSの材料特性値

名称	目付量 (g/m^2)	設計厚 (mm)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
CFS	200	0.111	4420	235

0.111mm の連続繊維シートおよびプライマー、CFS 専用の接着剤を用いた。ここで CFS の材料特性値を表-3 に示す。

3. 供試体概要

3. 1 供試体寸法

(1)RC床版供試体寸法 本実験に用いる RC 床版供試体は平成 14 年改訂の道路橋示方書・同解説¹⁾(以下、道示と称する)の設計基準に基づいて設計し、その 3/5 モデルとした。供試体寸法は全長 1,600mm、支間 1,400mm、床版厚 150mm とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の主鉄筋および配力筋に D13 を 120mm 間隔で配置した。また、圧縮側には引張側の鉄筋量の 1/2 を配置した。有効高さは、軸直角方向および軸方向それぞれ 125mm、112mm とした。ここで、供試体寸法および鉄筋配置を図-1(1)に示し、供試体名を RC-1 とする。

(2)CFS下面接着補強床版供試体寸法 未損傷 RC 床版下面に CFS を接着補強する供試体は、RC 床版供試体の支点間内 1300mm×1300mm の範囲に CFS を軸直角方向および軸方向に各 1 層接着補強した。CFS 下面接着補強を行う RC 床版供試体の寸法は図-1(1)に示す RC-1 と同一である。ここで、供試体記号を RC-C-1 とする。

Study on the fatigue resistance of the RC slab in primary and secondary reinforcement
by
Shohei SUGURO, Tadashi ABE, Chanho WON
Kiyoshi ITO and Atsuya KOMORI

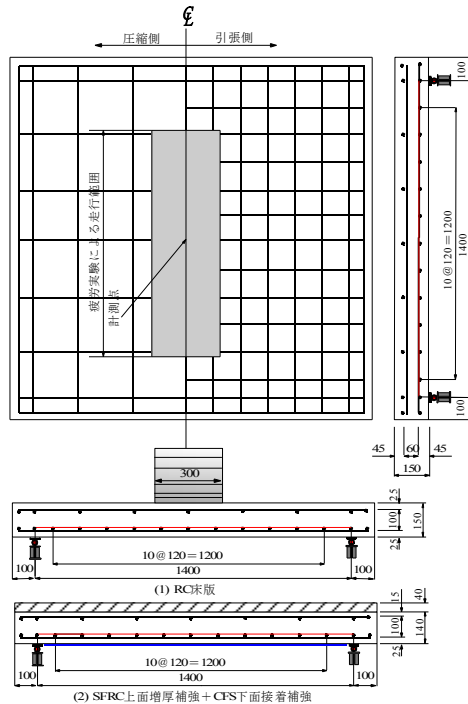


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

(3) 一次、二次補強床版供試体 疲労劣化を与えた RC 床版における、一次・二次補強として SFRC 上面増厚補強法と CFS 下面接着補強を用いた。供試体寸法は RC-1 と同一である。また、SFRC 上面増厚補強は床版上面を 10mm 切削し、SFRC を 40mm 打設するため、増厚後の供試体全厚は 180mm である。ここで、一次補強に SFRC 上面増厚補強法、二次補強に CFS 下面接着補強を用いた供試体の記号を RC-S-C、一次補強に CFS 下面接着補強、二次補強に SFRC 上面増厚補強法を用いた供試体の記号を RC-C-S とする。ここで、一次・二次補強後の供試体寸法を図-1 (2) に示す。

3. 2 供試体補強方法

(1) SFRC 上面増厚補強法 SFRC 上面増厚補強法は、床版上面を 10mm 切削し、ショットブラストを用いて研掃した。その後、接着剤を平均厚さ 1mm で塗布し、SFRC を 40mm 打設した。

(2) CFS 下面接着補強法 CFS 下面接着補強法は床版下面の不陸を修正し、プライマーを塗布した後、接着剤を塗布し、CFS を軸直角方向および軸方向に各 1 層貼り付けした。また、プライマーと CFS を 1 層および 2 層貼り付けた後、それぞれ 12 時間養生を行った。

4. 実験方法および等価走行回数

4. 1 輪荷重による走行疲労実験

走行疲労実験は、全ての床版において床版中央から両支点方向に幅 300mm の車輪を ± 500mm の範囲で輪荷重を繰り返し走行させる実験である。計測は輪荷重走行 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとにたわみを計測する。

(1) RC 床版供試体 RC 床版供試体の初期荷重 100kN から走行を開始し、2 万回走行ごとに荷重を 20kN ずつ増加した。また、等価走行回数を算出し、RC 床版の等価走行回数を基準に RC-C-1 と RC-S-C および RC-C-S の耐疲労性を評価する。

(2) CFS 下面接着補強床版供試体 供試体 RC-C-1 においては初期荷重 100kN から 140kN までは 2 万回走行ごとに 20kN ずつ増加し、140kN 以降は 10kN ずつ増加した。また、供試体 RC-C-1 は補強等価走行回数から耐疲労性を評価する。

(3) 一次、二次補強床版供試体 一次・二次補強を施す RC 床版供試体に疲労劣化を与えるために輪荷重走行疲労実験を行った。荷重条件は初期荷重 100kN で 2 万回走行した後、荷重を 20kN 増加させ、たわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点で走行を中断し、荷重除荷時の残留たわみを計測する。次に、一次補強(SFRC 上面増厚補強もしくは CFS 下面接着補強)を施し、輪荷重走行疲労実験を行った。荷重条件は初期荷重 100kN で 2 万回走行ごとに荷重を 20kN 増加させ、140kN 以降は 2 万回走行ごとに荷重を 10kN 増加させ、たわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点で走行を中断し、荷重除荷時の残留たわみを計測する。その後、二次補強(CFS 下面接着補強もしくは SFRC 上面増厚補強)を施し、再度、走行を行う。荷重は 100kN から 2 万回走行ごとに 20kN ずつ増加させ、供試体が破壊するまで走行と荷重増加を繰り返し行う。なお、床版のたわみが床版支間 L の 1/400 付近からたわみの増加が著しくなり破壊に至ることから、たわみが床版支間 L の 1/400 に達した付近で補強対策を講じる時期として提案されている²⁾。

4. 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、式[1]、[2]における S-N 曲線の傾きの逆数 m には松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数 12.7 を適用する³⁾。次に、疲労損傷による D-N 曲線から得られた低減係数および湿潤状態におけるコンクリート劣化係数等を考慮した補強等価走行回数 $N_{D0 \cdot eq}$ は式[2]として与えられる⁴⁾。

1) RC 床版の等価走行回数

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

2) 補強床版の補強等価走行回数

$$N_{D0 \cdot eq} = \sum_{i=1}^n (N_{eqi} \cdot D_{bi} \cdot D_c \cdot D_s \cdot D_E) \quad [2]$$

$$N_{eqi} = (P_i / P)^{m \times n_i} \quad [2.1]$$

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)、 N_{eqi} ：実験走行回数ごとの等価走行回数(式 2.1)、 D_{bi} ：接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強床版の劣化係数($D_{bi}=-0.0716\log N_{eqi}+1.1$)、CFS 下面接着補強床版の劣化係数($D_{bi}=-0.0541\log N_{eqi}+1.1$)、 D_c ：湿潤状態におけるコンクリート劣化係数(=0.70)、 D_s ：使用鉄筋係数($=f_{yd}\cdot s_R/f_{yd}\cdot s_D$)、 D_E ：環境条件による係数(=1.0)

5. 実験結果および考察

5. 1 等価走行回数

RC 床版の等価走行回数(式[1])を表-4 に示す。また、1964 年の設計基準に基づいた未損傷 RC 床版に CFS 下面接着補強した供試体および一次・二次補強した床版供試体の補強等価走行回数(式[2])を表-4 に併記する。

(1) 供試体 RC-1 および RC.C-1 供試体 RC-1 の破壊時の等価走行回数(式[1])は 14.39×10^6 回である。供試体 RC.C-1 の補強等価走行回数(式[2])は 96.76×10^6 回であり、供試体 RC-1 の 6.72 倍の補強効果が得られた。

(2) 供試体 RC-S-C 供試体 RC-S-C の一次・二次補強後の実験それぞれの補強等価走行回数を算定する。まず、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 9.17×10^6 回である。次に、一次補強として SFRC 上面増厚補強を行い、供試体のたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の補強等価走行回数は 85.06×10^6 回である。さらに、二次補強として CFS 下面接着補強を行い、破壊時の補強等価走行回数は $1,926.81\times 10^6$ 回である。また、供試体 RC-S-C の累積補強等価走行回数は $2,021.06\times 10^6$ 回であり、RC 床版供試体の 140.43 倍の補強効果が得られた。

(3) 供試体 RC-C-S 供試体 RC-C-S は、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 9.17×10^6 回である。次に、一次補強に CFS 下面接着補強した場合の補強等価走行回数は 83.19×10^6 回、二次補強に SFRC 上面増厚補強し、破壊時の補強等価走行回数は $1,754.58\times 10^6$ 回である。供試体 RC-C-S の累積補強等価走行回数は $1,846.95\times 10^6$ 回であり、供試体 RC-1 の 128.34 倍の補強効果が得られた。

5. 2 たわみと補強等価走行回数の関係

RC 床版供試体 RC-1 のたわみと等価走行回数の関係および供試体 RC.C-1 と供試体 RC-S-C、RC-C-S のたわみと補強等価走行回数の関係について図-2 に示す。

(1) 供試体 RC-1 および RC.C-1 供試体 RC-1 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。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 3.44×10^6 回であり、破壊時のたわみは 5.8mm である。次に、供試体 RC.C-1

表-4 等価走行回数および補強等価走行回数

供試体	等価走行回数および補強等価走行回数(回)				等価走行回数比
	破壊時 および $L/400$	一次補強 $L/400$	二次補強 破壊時	合計	
RC-1	14,391,598			14,391,598	-
RC.C-1	96,760,362			96,760,362	6.72
RC-S-C	9,179,338	85,068,523	1,926,812,900	2,021,060,761	140.43
RC-C-S	9,179,338	83,192,410	1,754,582,687	1,846,954,435	128.34

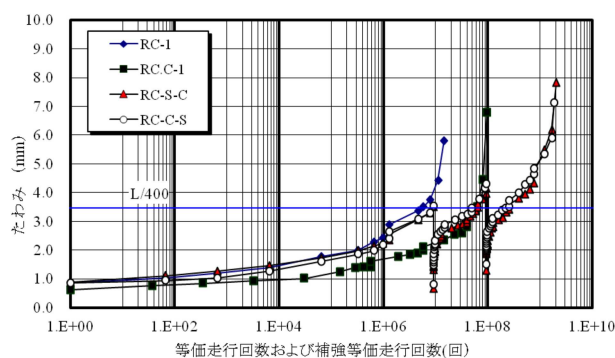


図-2 たわみと補強等価走行回数の関係

においてもたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した付近からたわみが急激に増加している。床版支間 L の $1/400$ に達した時点の補強等価走行回数は 37.20×10^6 回であり、供試体 RC-1 の等価走行回数に比して 10.81 倍の補強効果が得られた。また、破壊時のたわみは 6.8mm である。

(2) 供試体 RC-S-C RC 床版のたわみが床版支間 L の $1/400$ に達するまで走行を行い、この時点での荷重除荷時の残留たわみは 0.66mm である。ここで一次補強として SFRC 上面増厚補強を施し、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達するまで走行を行った。この時点での荷重除荷時の残留たわみは 0.62mm である。その後、二次補強として CFS 下面接着補強を施し、再度、走行を行った。二次補強における破壊時のたわみは 6.54mm となった。また、累積たわみは 7.82mm である。

(3) 供試体 RC-C-S RC 床版供試体のたわみが床版支間 L の $1/400$ 付近に達した時の荷重除荷時の残留たわみは 0.80mm である。ここで、一次補強として CFS 下面接着補強を行い、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達するまで走行を行った。この時点での残留たわみは 0.70mm である。その後、二次補強として SFRC 上面増厚補強を施し、再度、走行を行った。供試体 RC-C-S の破壊時のたわみは 5.64mm であり、累積たわみは 7.14mm である。

5. 3 破壊状況

供試体 RC-1 および供試体 RC.C-1 の破壊形状、また、一次・二次補強床版 RC-S-C および RC-C-S の破壊状況を図-3 に示す。

(1) 供試体 RC-1 および RC.C-1 供試体 RC-1 のひび割れ状況は図-3(1)に示すように、主鉄

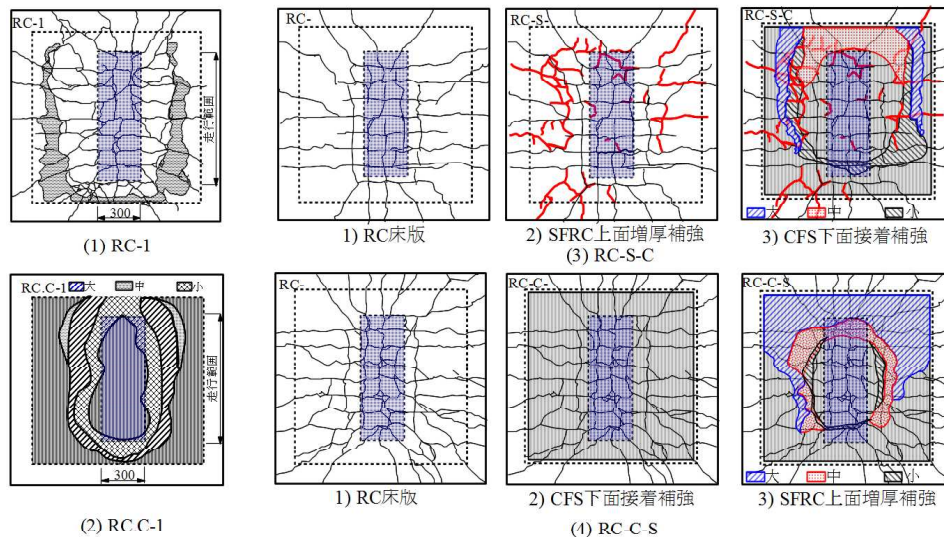


図-3 RC床版およびCFS下面接着補強床版、一次・二次補強床版の破壊形状

筋および配筋の配置位置に2方向ひび割れが発生し、格子状を形成している。破壊状況は、輪荷重の接地面から約45度の傾斜角で押抜かれておりダウエル効果の及ぼす範囲で剥離している。破壊モードは輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。次に、供試体RC.C-1は図-3(2)に示すようにダウエル効果の及ぼす範囲でCFSの剥離が著しく、その周辺でやや剥離が見られる。しかし、押抜きせん断破壊に伴うCFSの破断は見られない。

(2) 供試体RC-S-C 供試体RC-S-Cのたわみが床版支間Lの1/400に達した時点のひび割れ状況は図-3(3)1)に示すように、鉄筋配置位置に2方向のひび割れが発生している。ここで一次補強としてSFRC上面増厚補強を施し、補強後のひび割れ状況は図-3(3)2)に示すように、新たなひび割れが発生している。その後、二次補強としてCFS下面接着補強を施した。破壊時のCFSの剥離状況は図-3(3)3)に示すように、広範囲にわたってCFSが剥離している。破壊は輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。なお、CFSの破断は見られない。

(3) 供試体RC-C-S 供試体RC-C-Sのたわみが床版支間Lの1/400に達した時点でのひび割れは状況は図-3(4)1)に示すように、2方向のひび割れが発生し、供試体RC-S-Cと比較するとやや多くひび割れが発生している。ここで、一次補強としてCFS下面接着補強を施し、補強後の損傷状況は図-3(4)2)に示すように、CFSを全面に接着補強していることからひび割れの確認は出来ないものの、CFSの剥離は全く見られない。次に、二次補強としてSFRC上面増厚補強を施した。供試体RC-C-Sの破壊時のCFSの剥離状況は図-3(4)3)に示すように、広範囲にわたってCFSが剥離しているものの、

CFSの破断は全く見られない。

6. まとめ

(1) 供試体RC-1の等価走行回数と供試体RC.C-1の等価走行回数を比較するとRC.C-1が6.7倍の耐疲労性が向上した。

(2) 一次補強にSFRC上面増厚補強し、二次補強にCFS下面接着補強した供試体RC-S-Cの累積補強等価走行回数はRC-1の等価走行回数の140.43倍、一次補強にCFS下面接着補強し、二次補強にSFRC上面増厚補強した供試体RC-C-Sの累積補強等価走行回数は128.34倍となった。したがって、一次・二次補強を施すことにより耐疲労性が向上した。

(3) 本研究においては走行疲労実験におけるRC床版および一次補強におけるたわみが床版支間Lの1/400に達するまで走行を行い、二次補強を施し、また、残留たわみを初期値として一次・二次補強を行った。各供試体の破壊時のたわみはRC-1が5.8mm、RC-C-Sが6.8mmであり、一次・二次補強を施した供試体RC-S-Cおよび供試体RC-C-Sのそれぞれの累積たわみは7.82mm、7.14mmである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ (2004)
- 2) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 河合豊：道路橋RC床版の押抜きせん断耐力および耐疲労性の評価、土木学会論文集A1, pp39-54 (2011)
- 3) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理 森北出版, 2007.
- 4) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 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)