

SFRC 上面増厚・CFSS 下面補強およびせん断筋補強した劣化 RC 床版の耐疲労性

日大生産工(院) ○山下順平 日大生産工 阿部 忠
中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) 高野真希子 鹿島道路(株) 児玉孝喜

1. はじめに

近年、道路橋 RC 床版は大型車両の繰り返し走行により疲労劣化が進行し、補修・補強法の確立が急務となっている。そのため、道路橋 RC 床版の補強技術については多くの研究機関により研究が進められ、既に一次補強対策が実施されている¹⁾。しかし、再劣化に対する二次補強法における耐疲労性の評価に関する研究はあまり行われていないのが現状である。そこで筆者らは、二次補強法として接着剤を用いた鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC とする)上面増厚補強と炭素繊維ストランドシート(以下、CFSS とする)下面補強を併用した RC 床版の耐疲労性の評価を行ってきた。その結果、耐疲労性は大幅に向上するが、上・下面からの補強により既設 RC 床版部は脆性的なせん断破壊を呈することが判明した²⁾。そこで本研究では、47 年間供用された旧銚子大橋の劣化 RC 床版を用いて、増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚補強した RC 床版および増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚補強と CFSS 下面接着補強を併用した RC 床版、さらにそれらの補強法に加え、RC 床版の脆性的なせん断破壊を防止するためにせん断補強筋を配置させた補強法³⁾を取り入れた RC 床版を用いて、それぞれ輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を評価した。

2. 劣化 RC 床版供試体概要

2.1 劣化 RC 床版補修履歴

旧銚子大橋の RC 床版は、1956 年の鋼道路橋設計示方書⁴⁾の基準で設計された床版である。建設当時の設計荷重は 80kN であり、床版厚さは 160mm である。旧銚子大橋 RC 床版の補修・補強歴は供用開始から 23 年後の 1985 年に、耐荷力性能および耐疲労性の向上のために、RC 床版の上面を 10mm 切削し、70mm の SFRC 上面増厚補強が施され、床版厚は 220mm である。ここで、劣化 RC 床版下面のひび割れ状況を図1に示す。床版下面は、全体的に 2 方向ひび割れが発生し、ひび割れ密度は $9\text{m/m}^2 \sim 10\text{m/m}^2$ である。また、SFRC 上面増厚部は一部剥離しており、劣化過程は加速期(後期)から劣化期に相当する床版である。

表1 RC床版の材料特性値

コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)		引張強度 (N/mm^2)		弾性係数 (kN/mm^2)	
	主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋
38.2	298	287	418	402	200	

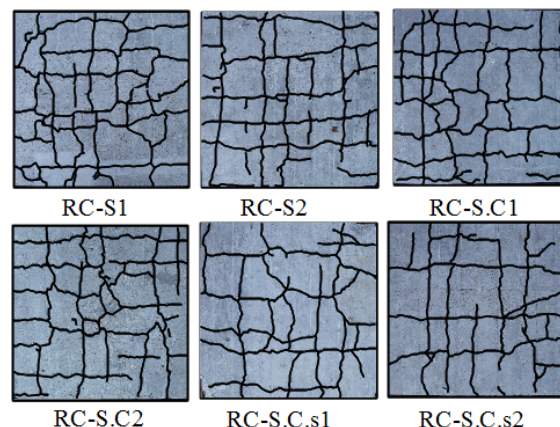


図1 床版下面のひび割れ状況

2.2 劣化 RC 床版の材料特性値

旧銚子大橋 RC 床版のコンクリートの圧縮強度は 38.2N/mm^2 であり、2004 年改訂の道路橋示方書・同解説(以下、道示とする)⁵⁾に規定する設計基準強度 24N/mm^2 の 1.6 倍である。また、SFRC による増厚部の平均圧縮強度は 60.7N/mm^2 である。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。

2.3 供試体寸法

供試体寸法は、撤去時の床版寸法から橋軸直角方向および橋軸方向ともに $1,600\text{mm} \times 1,600\text{mm}$ の正方形版に切断した。床版支間は $1,400\text{mm}$ とする。また、鉄筋には SR235 が使用されており、引張側の主鉄筋は 120mm 間隔、圧縮鉄筋は $1/2$ の鉄筋量が配置されている。配力筋は引張側および圧縮側ともに $200\text{mm} \sim 230\text{mm}$ 間隔で配置されている。本供試体は旧 SFRC 上面増厚部を撤去し、既設 RC 床版を 10mm 切削し、接着剤を塗布し、 40mm の再 SFRC 上面増厚を行う。よって、床版厚は 180mm となる。劣化 RC 床版寸法

Fatigue Resistance of deteriorated RC slabs with Shear reinforcement

SFRC overlay and CFSS under adhesion

by

Jyunpei YAMASHITA, Tadashi ABE, Makiko TAKANO and Takayoshi KODAMA

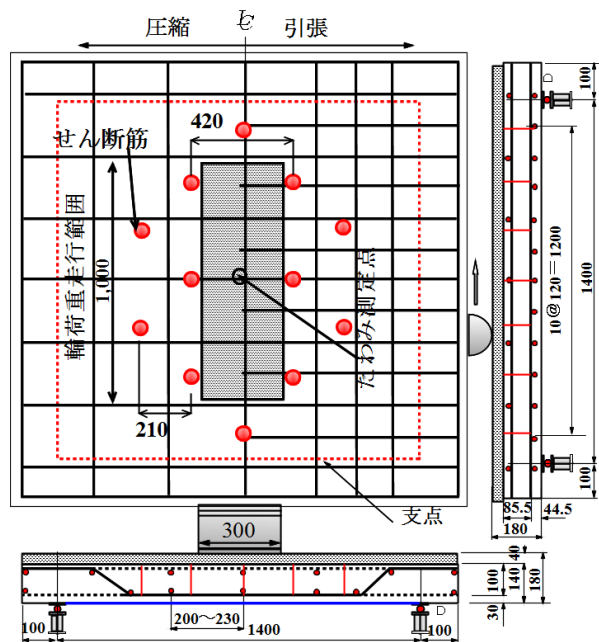


図2 劣化RC床版寸法および鉄筋の配置

および鉄筋配置を図 2 に示す。ここで、道示に基づいて製作した RC 床版供試体を RC.1 とする。

3. 使用材料および補強施工手順

3.1 SFRC上面増厚補強法

(1) SFRC上面増厚補強材料

再 SFRC 上面増厚補強する材料である SFRC の設計基準強度は、材齢 3 時間で 24N/mm^2 を目標に、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 (12.7vol%) で配合した。本実験に用いる SFRC の施工 3 時間後の圧縮強度は 26.0N/mm^2 、実験時 (110 日) の圧縮強度は 66.2N/mm^2 である。ここで、SFRC の配合表を表 2 に示す。また、旧銚子大橋 RC 床版の再 SFRC 上面増厚補強には増厚界面の付着性を高めるために、エポキシ樹脂接着剤 (以下、接着剤とする) を用いた。接着剤の材料特性値は、圧縮強さが 102.88N/mm^2 、曲げ強さが 41.16N/mm^2 、コンクリートの付着強さは 3.7N/mm^2 である。

(2) SFRC上面増厚補強の施工手順

SFRC 上面増厚補強法の施工手順を図 3 に示す。まず、旧 SFRC 上面増厚部を除去する。次に、コンクリート表面を大型サンダーで平滑に仕上げ (図 3 (1))、付着性を高めるためにショットブラスト研掃機を用いて投射密度 150kg/m^2 で表面仕上げした。その後、既設 RC 床版と SFRC 上面増厚との界面のはく離を抑制する目的で接着剤を平均厚 1.0mm で塗布し、(図 3 (2))。その後、SFRC を 40mm 増厚して (図 3 (3)) 表面仕上げをした (図 3 (4))。供試体の床版全厚は 180mm を目標とした。ここで、増厚界面に接着剤を塗

表2 SFRCの配合表

スラブ (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	39.5	51.2	430	170	851	858	100

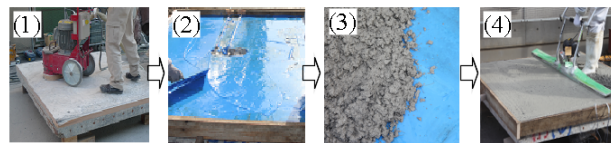


図3 SFRC上面増厚施工手順

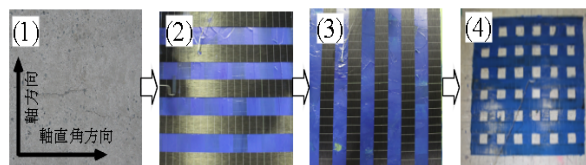


図4 CFSS下面補強の施工手順

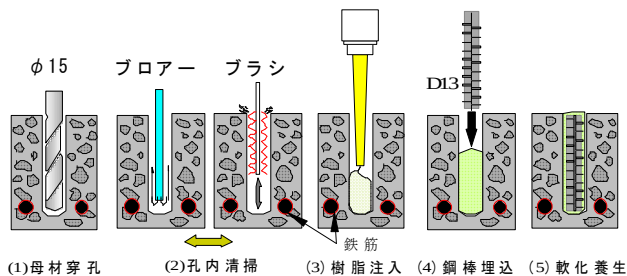


図5 せん断筋補強法

布し、再 SFRC 上面増厚補強した RC 床版供試体を RC-S1, 2 とする。

3.2 CFSS下面補強法

(1) CFSS下面補強材料

供試体に用いる CFSS は、目付量 600g/m^2 、厚さ 0.333mm の CFSS を使用した。CFSS の引張強度は $4,310\text{N/mm}^2$ である。接着剤には、CFSS 専用のエポキシ系樹脂接着剤を使用した。

(2) CFSS下面補強の施工手順

CFSS 下面補強の施工手順を図 4 に示す。RC 床版供試体の接着範囲である床版支間内の下面をサンダーで平滑に仕上げる (図 4 (1))。次に、RC 床版の下面に CFSS を格子状に接着する以外の面、すなわち格子間にマスキングテープにより接着面以外を保護する。その後、軸方向に CFSS を 100mm 間隔で軸直角方向に仮止めし、すだれ状の空間部から CFSS 専用の接着剤を浸透させる。 (図 4, (2))。その後、軸方向に CFSS を接着して格子状を形成させた (図 4 (3), (4))。ここで、再 SFRC 上面増厚補強および CFSS 下面補強した RC 床版供試体を RC-S.C1, 2 とする。

3.3 せん断筋補強方法

せん断筋補強の施工手順を図 5 に示す。まず最初に、ドリル $\phi 15\text{mm}$ で床版の穿孔を行う (図 5

(1)). 次に、ブローアとブラシを用いて孔内清掃をし (図 5, (2)), コア内にエポキシ樹脂接着剤を注入する (図 5 (3)). そして、鉄筋 D13 を深さ 150mm で挿入し (図 5 (4)), 軟化養生とした (図 5 (5)). また、せん断補強筋は床版中央から位置 210mm の間隔で千鳥配置とし、図 2 に併記した。ここで、再 SFRC 上面増厚補強および CFSS 下面接着補強した RC 床版にせん断補強筋を挿入した供試体を RC-S.C.s1, 2 とする。

4. 実験方法

4.1 輪荷重走行疲労実験

輪荷重走行疲労実験は、床版中央から ±500mm の範囲 (1,000mm) に輪荷重を連続走行させる実験である。荷重載荷方法は、100kN から 140kN まで 20,000 回走行ごとに 20kN ずつ増加させ、140kN 以降は各 20,000 回走行ごとに荷重を 10kN ずつ増加する段階荷重とした。たわみの計測は 1, 10, 100, 1000, 5000 回および 5000 回以降は 5000 回走行ごとに行う。

4.2 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

本実験における走行疲労実験は、20,000 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。基準荷重は活荷重 100kN のモデル化による 3/5 を乗じ、衝撃係数と安全率 1.5 を考慮し、90kN とする。また、松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数 m には 12.7 を適用する⁶⁾。

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

ここで、 N_{eq} : 等価走行回数 (回)、 P_i : 載荷荷重 (kN)、 P : 基準荷重 (= 90kN)、 n_i : 実験走行回数 (回)、 m : S-N 曲線の傾きの逆数 (= 12.7)

5. 実験結果および考察

5.1 実験等価走行回数

本実験における等価走行回数を表 3 に示す。平成 14 年改訂の道示に準拠して製作した RC 床版供試体 RC.1 の等価走行回数は 14.391×10^6 回となり、RC.1 を基準に耐疲労性を評価する。増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚補強した供試体 RC-S1 は、荷重 160kN で 1,951 回、供試体 RC-S2 は荷重 160kN で 101 回走行して破壊した。等価走行回数は、増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚補強した供試体 RC-S1,2 は、それぞれ 22.365×10^6 回、 19.456×10^6 回であり、平均等価走行回数は 20.911×10^6 回となり、供試体 RC.1 に比して 1.45 倍である。したがって、増厚界面に接着剤を塗布することにより、増厚界面のはく離が抑制され、耐疲労性の

表3 等価走行回数

供試体	等価走行回数 (Neq)	平均等価走行回数 (Neq)	等価走行回数比
RC.1	14,391,597	14,391,597	-
RC-S1	22,365,409	20,911,051	1.45
RC-S2	19,456,694		
RC-S.C1	61,512,389	57,004,747	4.0
RC-S.C2	52,497,104		
RC-S.C.s1	194,612,297	207,255,674	14.40
RC-S.C.s2	219,899,051		

向上が図られた。また、増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚補強および CFSS 下面補強した供試体 RC-S.C1 は荷重 170kN で 3,800 回、供試体 RC-S.C2 は荷重 170kN で 1,001 回走行して破壊した。等価走行回数は、増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚補強および CFSS 下面補強した供試体は、RC-S.C1,2 それぞれ 61.512×10^6 回、 52.497×10^6 回であり、平均等価走行回数は 57.004×10^6 回となり、供試体 RC.1 に比して 4.0 倍となった。また、増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚補強した供試体 RC-S の平均等価走行回数を比較すると約 3 倍の補強効果が得られた。したがって、SFRC 上面増厚補強法において増厚界面に接着剤を塗布して再補強する工法と、曲げ引張強度を高める CFSS 下面補強を併用することで、さらに耐疲労性の向上が確認された。破壊は輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となり、同時に一部の CFSS がはく離している。破壊モードは供試体 RC.1, RC-S, RC-S.C はともに輪荷重の走行位置から 45 度で押抜きせん断破壊を呈している。一方、増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚および CFSS 下面補強にせん断筋補強した供試体 RC-S.C.s1,2 の等価走行回数は、 194.612×10^6 回、 219.899×10^6 回である。平均等価走行回数は 207.255×10^6 回となり、供試体 RC.1 の平均等価走行回数に比して 14.4 倍となった。走行荷重の繰り返しにより SFRC 上面増厚部の損傷が著しくなったことから、実験を終了した。なお、せん断筋を配置することで 45 度分布の応力による脆性的な破壊が抑制され、耐疲労性が向上する結果となった。

5.2 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 6 に示す。供試体 RC.1 は等価走行回数の増加に伴いたわみも増加し、たわみが 3.5mm、すなわち、床版支間 L の 1/400 に達した付近 (等価走行回数 5.75×10^6 回) からたわみの増加が著しく、破壊時のたわみは 6.7mm である。増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚補強した供試体 RC-S1,

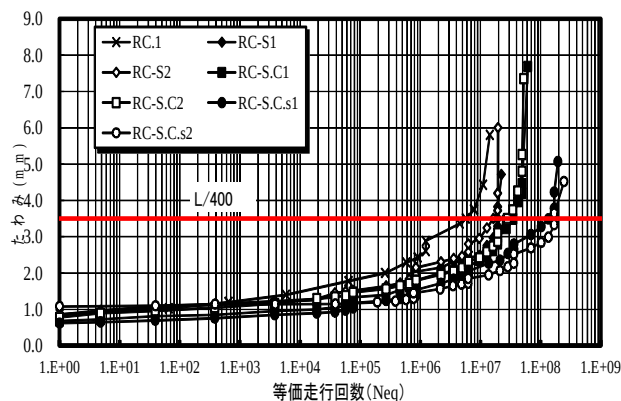


図6 たわみと等価走行回数

2 は、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した付近（等価走行回数 19.457×10^6 回， 16.390×10^6 回）からたわみが急激に増加し、破壊に至った。破壊時のたわみは供試体 RC-S1 は 5.7mm，供試体 RC-S2 は 6.0mm である。なお、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した付近の等価走行回数を比較すると、供試体 RC.1 に比して供試体 RC-S1 は 3.38 倍、供試体 RC-S2 は 2.85 倍となった。したがって、供試体 RC-S はたわみの増加が抑制され、耐疲労性が向上した。次に、増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚および CFSS 下面補強した供試体 RC-S.C1，2 はともに RC-S1，2 とほぼ同様なたわみの増加傾向が見られ、荷重と走行回数の増加によりたわみは緩やかに増加し、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した付近（等価走行回数 34.7×10^6 回， 28.18×10^6 回）からたわみが急激に増加し、破壊時のたわみは供試体 RC-S.C1 は 7.68mm，供試体 RC-S.C2 は 7.35mm である。なお、たわみが床版支間 L の $1/400$ 付近の等価走行回数を比較すると、供試体 RC.1 に比して供試体 RC-S.C1 は 6.03 倍、供試体 RC-S.C2 は 4.90 倍となり耐疲労性が向上した。次に、増厚界面に接着剤を塗布し、再 SFRC 上面増厚補強および CFSS 下面補強、さらにせん断筋補強した供試体 RC-S.C.s1，2 は、荷重と走行回数の増加によりたわみは緩やかに増加し、せん断領域に鉄筋を挿入したことによりたわみの増加はさらに抑制された。たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した付近（等価走行回数 135.954×10^6 回， 169.172×10^6 回）からたわみが急激に増加し、破壊時のたわみは供試体 RC-S.C.s1 は 5.07mm，供試体 RC-S.C.s2 は 4.52mm である。なお、たわみが床版支間 L の $1/400$ 付近の等価走行回数を比較すると、供試体 RC.1 に比して供試体 RC-S.C.s1 は 23.64 倍、供試体 RC-S.C.s2 は 29.42 倍となり耐疲労性が向上した。せん断筋補強を行うことにより脆性的なせん断破

壊を抑制し、たわみの増加が抑制されたことより、耐疲労性が大幅に向上した。また、RC 床版部の全ての供試体において床版支間 L の $1/400$ を超えた付近からたわみが急激に増加することから、たわみが床版支間 L の $1/400$ を超えた付近で再補修・補強を施す必要があると考える。

6. まとめ

①劣化床版に対して接着剤を用いた再 SFRC 上面増厚補強を施した供試体は、道示に準拠して制作した RC 床版供試体に比して等価走行回数が 1.45 倍、また接着剤を用いた再 SFRC 上面増厚補強および CFSS 下面補強を施した供試体は 4.0 倍となり耐疲労性が向上した。また、せん断補強筋を併用した供試体は 14.40 倍となり、せん断補強筋を配置することで押抜きせん断破壊が抑制され、効果が期待できる。

②たわみと等価走行回数の関係では、CFSS 下面補強および増厚界面に接着剤を用いた再 SFRC 上面増厚補強およびせん断筋補強することにより、たわみが大幅に抑制されて等価走行回数も増加し、耐疲労性が向上した。また、たわみが 3.5mm すなわち床版支間 L の $1/400$ に達した付近の等価走行回数を比較すると、供試体 RC.1 に比して供試体 RC-S，RC-S.C，RC-S.C.r は、3.1 倍、5.4 倍、26.5 倍となり、増厚界面に接着剤を用いた再 SFRC 上面増厚補強および CFSS 下面補強、せん断筋補強をすることにより耐疲労性が向上した。そして、床版支間 L のたわみの増加傾向から判断すると、全ての供試体においてたわみが床版支間 L の $1/400$ を超えた付近で次期補修を施す必要があると考える。

参考文献

- 1)独立行政法人 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）
- 2)高野真希子，阿部忠，木田哲量，小森篤也，児玉孝喜，小川洋二：47 年供用した RC 床版の CFSS 下面補強および SFRC 上面増厚補強による耐疲労性，構造工学論文集，Vol. 57A，pp. 1286-1296(2011.3)
- 3)阿部忠，木田哲量，高野真希子，加藤清志，澤野利章：炭素繊維シート補強と鉄筋コア・アンカー型補強を併用した鉄筋コンクリートはりの補強効果，日本大学生産工学部研究報告，第 37 巻，第 2 号，pp.1-9（2004）
- 4)日本道路協会：鋼道路橋設計示方書(1956)
- 5)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ、2004
- 6)松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版(2007)。