

普通セメントと低収縮型早強性混和材を配合したSFRC材による 鋼床版上面補強の耐疲労性および応力低減効果

日大生産工(院) ○野口 博之 日大生産工 阿部 忠 日大生産工(非常勤) 川井 豊
鹿島道路(株) 一瀬 八洋 鹿島道路(株) 山下 雄史

1. はじめに

道路橋鋼床版はデッキプレートや U リブ、横リブなどを溶接した薄板構造であるためコンクリート系床版と比して軽量であることから長大橋や高架橋に用いられている。しかし、剛性が低いため大型車両や過積載の繰返し走行によって局部変形や局部応力が発生し易くデッキプレートや溶接部などに疲労き裂が発生している¹⁾。

一方、既設鋼床版の疲労損傷に対する補修補強対策には鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRC）を用い、デッキプレートにエポキシ系接着剤を塗布した鋼床版上面補強法が実施されている²⁾。

本研究は、道路橋鋼床版の恒久的な補強対策として疲労実験を行った鋼床版に普通セメントと低収縮型早強性混和材を配合した SFRC 材を提案し、提案した SFRC 材を用いた接着剤塗布型 SFRC 上面補強を施し耐疲労性および応力低減効果を検証した。

2. 鋼床版の補修・補強対策

疲労き裂が発生している既設鋼床版では橋梁の長寿命化を目的とした補修・補強対策が施されている。鋼床版の補修対策としてストップホールやあて板補強が施されている。しかし、ストップホールやあて板補強は緊急補修として施されていることから早期にき裂の再進展の可能性がある。そこで、鋼床版と SFRC 材との一体性を確保するためにエポキシ系接着剤を塗布した接着剤塗布型 SFRC 上面補強が施されている。また、交通規制による経済損失などを考慮するとセメントには 3 時間でコンクリートの設計基準強度³⁾を有する超速硬セメントを用いた SFRC 材が用いられている。しかし、超速硬セメントは高価な材料で施工費用が高額になるのに加え、凝結時間が 20 分と短いため熟練の高度な施工技術を必要とする。

そこで本研究では、超速硬セメントに替わる材料として普通セメントに早強成分と収縮低減成分を有する低収縮型早強性混和材と鋼繊維を配合した SFRC 材を提案し、接着剤塗布型 SFRC 上面補強を施し走行疲労実験を行い SFRC 材によるたわ

表－1 SFRCの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)						S.P (%)
		W	C	S	G	SF	AD	
38	57.9	174	358	936	686	100	100	1.5

表－2 接着剤の材料特性値

項目	実測値	備考
外観	主剤 白色ペースト状	異物混入なし
	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	1.42	JIS K7112
圧縮強さ	102.88 N/mm ²	JIS K7181
圧縮弾性係数	3976.4 N/mm ²	JIS K7181
曲げ強さ	41.16 N/mm ²	JIS K7171
引張せん断強さ	14.86 N/mm ²	JIS K6850
コンクリート付着強さ	3.7 N/mm ²	JIS K6909

み・ひずみの低減効果および SFRC 材の耐疲労性の評価を行う。

3. 供試体概要

3.1 使用材料

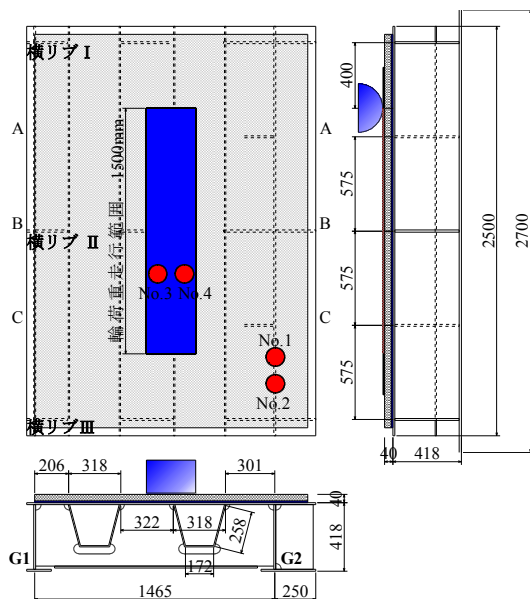
(1) 鋼材 道路橋鋼床版を構成する鋼材には SS400 が多く使用されており、車両の繰返し走行により疲労き裂や貫通き裂などの疲労損傷を受けている。そのため本研究では、鋼床版を構成する鋼材には SS400 を用いる。鋼材の材料特性値はミルシートより降伏強度 341N/mm²、引張強度 462N/mm²、ヤング係数 200kN/mm² とする。

(2) SFRC 提案する SFRC 材には、コンクリートの圧縮強度が 36 時間で 30N/mm² を確保できる配合とし、普通セメントに低収縮型早強性混和材と φ0.6mm、長さ 30mm の鋼繊維を 1.27Vol.%で配合する。ここで、提案する SFRC 材の示方配合を表－1 に示す。また、コンクリートの圧縮強度は材齢 36 時間で 33.2N/mm²、材齢 7 日で 56.6N/mm² 有する。

(3) 防錆剤および接着剤 実橋梁ではデッキプレートを研掃後すぐに SFRC を打設しない場合があることから発錆を防止するために防錆剤を塗布する。実験では、実施工を想定しデッキプレートを研掃後、防錆剤を塗布する。また、鋼床版と SFRC との一体性を確保するために高耐久型エポキシ樹脂接着剤（以下、接着剤）を塗布する。ここで、

Evaluation of Fatigue Resistance and Decreasing Effect of Stress of Upper Surface Reinforcement in Steel Deck Using SFRC Material with Ordinary Cement and Low Shrinkage Type Mixture Material

Hiroyuki NOGUCHI, Tadashi ABE, Yutaka KAWAI, Yatsuhiro ICHINOSE and Takeshi YAMASHIYA



図－1 供試体寸法

接着剤の材料特性値を表－2 に示す。

3. 2 供試体寸法

本実験に用いる供試体には、道示に準拠しデッキ厚 12mm で幅 1,765mm、長さ 2,500mm のデッキプレート、U リブには幅 318mm、高さ 250mm、厚さ 8mm の鋼板を用いる。U リブは主げた G1 から 206mm の位置に、主げた G2 から 301mm の位置に接合する。また、主桁間隔は 1,465mm、横リブ間は 1,150mm とする。ここで、鋼床版の供試体寸法を図－1 に示す。

3. 3 補強手順

接着剤塗布型 SFRC 上面補強の補強手順は「橋梁補修設計マニュアル（案）」⁴⁾に準拠した補強法で供試体を製作する。

無補強の鋼床版に輪荷重走行疲労実験で 40,000 回走行させ疲労損傷を与えた。その後、デッキプレートと SFRC の付着性を高めるためにショットブラストによる研掃（1 種ケレン相当）を行う。次に、実橋梁では研掃後に SFRC 打設するまでに期間が空くことから発錆を防止するために防錆剤を塗布する。養生後、接着剤を 1.0mm 厚で塗布し、直ちに SFRC を混練し 40mm 厚で打設し、養生する。

4. 実験概要

4. 1 実験方法

鋼床版および接着剤塗布型 SFRC 上面補強におけるたわみ・ひずみの低減効果について輪荷重走行疲労実験より検証する。本実験装置は車輪幅 300mm、直径 450mm であり、道示に規定する車輪幅の 3/5 モデルである。

(1) 鋼床版 横リブ I から 400mm の位置を起点に、1,500mm の範囲を連続走行させた。鋼床版の

輪荷重走行疲労実験は荷重 50kN で 40,000 回走行させる。疲労実験終了後、荷重 100kN で 1 走行を動的に計測したたわみ・ひずみを基準にたわみ・ひずみの低減効果を検証する。

(2) 接着剤塗布型 SFRC 上面補強鋼床版 鋼床版に 40,000 回走行の疲労損傷を与えた後、デッキプレートを研掃し接着剤を塗布して SFRC を打設する。養生後、輪荷重走行疲労実験を行う。輪荷重走行疲労実験は、無補強の鋼床版と同様に荷重 50kN で 40,000 回走行し、その後荷重 100kN、120kN、140kN、150kN でそれぞれ 20,000 回走行させる。たわみ・ひずみの低減効果は各荷重毎の疲労実験後に、荷重 100kN で 1 走行を動的に計測したたわみ・ひずみを比較し、低減効果を検証する。

4. 2 建研式引張試験

輪荷重が繰り返し走行することで既存床版と増厚部との界面ではく離が生じることから既存床版に接着剤を塗布する。本実験では、鋼床版と SFRC 材の界面の付着性を検証するために建研式引張試験⁵⁾を行い、SFRC 上面補強後の付着強度を計測する。建研式引張試験の計測位置は図－1 に示すように輪荷重走行疲労実験前は G2 主げた直上の 2 箇所（No.1, No.2）、疲労実験後は荷重条件が最も過酷な載荷輪直下の 2 箇所（No.3, No.4）とする。試験方法は、SFRC 上面に電動ドリルを設置し、φ100mm でデッキプレートまで切り込みを入れる。次に、コアの上面に接着剤を塗布し、鋼製治具を圧着し、養生を行う。接着剤が硬化した後に、油圧式接着力試験機を用いて、載荷速度 1.0N/cm²/sec で実施する。建研式引張試験による引張強度を算出には式 [1] を用いる。

$$\begin{aligned} \text{引張強度 (N/mm}^2\text{)} \\ = \text{接着荷重 (N)} / \text{接着面積 (mm}^2\text{)} \end{aligned} \quad [1]$$

4. 3 等価走行回数

(1) SFRC 上面補強における S-N 曲線式 SFRC 疲労寿命について、水越ら⁶⁾は SFRC の疲労ひび割れを進展状況を考慮した生存確率 95% の S-N 曲線式 [2] を提案している。

$$S = -9.69 \log N + 102.79 \quad [2]$$

ここに S : 上限応力比 (=100×作用最大曲げ応力/静的曲げ強度)

N : 繰返し回数

式 [2] における S-N 曲線式は上限応力比 (%) であることから S-N 曲線の傾き ($M=-0.0969$) の逆数の絶対値は $m=10.3$ である。

(2) 等価走行回数 SFRC 上面補強における等価走行回数 N_{eq} の算定には、水越らが提案する式 [2] より、マイナー則に従うと仮定すると片対数であることから式 [3] が与えられる。よって、S-N 曲線の傾き逆数の絶対値 $m=10.3$ を適用する。なお、

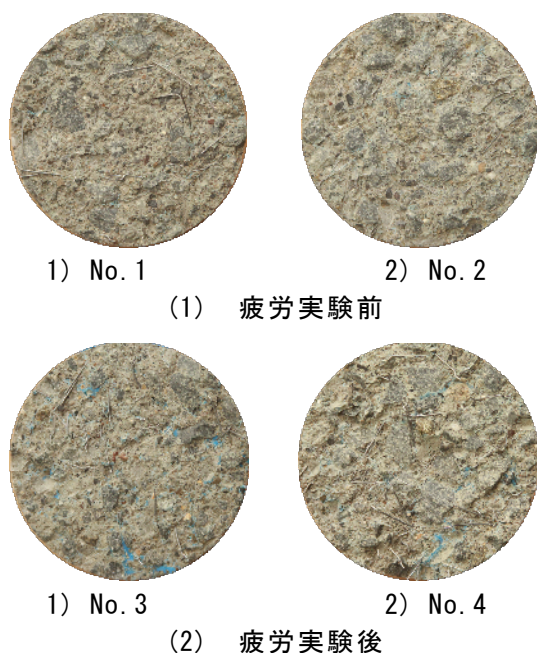


図-2 建研式引張試験の破壊状況

基準荷重 P_0 は道示の規定である B 活荷重に安全率 1.2 を考慮して 72kN とする。また、上限応力比 S_0 の算定には、載荷荷重 P_i を基準荷重 $P_0=72\text{kN}$ で除して、その 1/3 とする。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n [10^{(S_i - S_0)/(1/m)}] \times n_i \quad [3]$$

$$S_i = 1/3 \times (P_i / P_0)$$

ここに N_{eq} : 等価走行回数 (回)

P_i : 載荷荷重 (kN)

P_0 : 基準荷重 (= 72kN)

S_0 : 上限応力度 (SFRC の静的強度の 1/3 (= 0.333) と考える)

n_i : 実験走行回数 (回)

m : S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 (= 10.3)

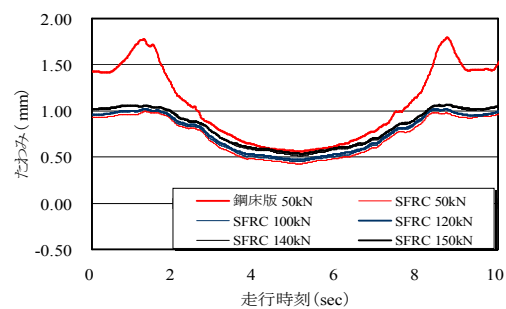
5. 結果および考察

5. 1 等価走行回数

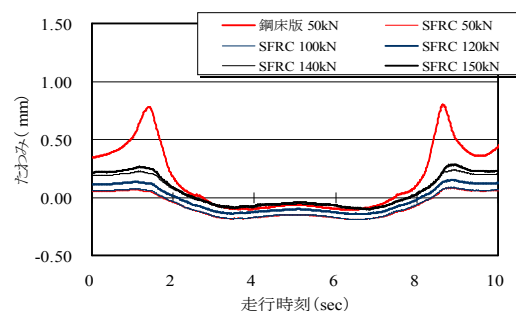
接着剤塗布型 SFRC 上面補強した鋼床版の等価走行回数は式 [3] より 146.287×10^6 回である。SFRC 上に発生したひび割れは U リブ上に沿って進展していることが確認された。したがって、U リブ溶接部付近に高い応力が発生することから U リブ溶接部付近に疲労き裂が進展し易いと考えられる。ひび割れは発生するもののひび割れ幅が 0.05mm を超えるひび割れや貫通ひび割れは見られない。また、デッキプレートおよび溶接部に疲労き裂は見られなかった。

5. 2 建研式引張試験による付着強度

建研式引張試験による界面の破壊状況を図-2 に示す。疲労実験前の付着強度は平均 2.59N/mm^2



(1) 計測点A-DD1



(2) 計測点A-DD2

図-3 たわみと走行時刻の関係

であり付着強度の基準 1.0N/mm^2 が確保されている。破壊位置は接着層から 3 ~ 5mm 程度の母材コンクリートである。一方、疲労実験終了後の付着強度は平均 1.71N/mm^2 であり、疲労前と比較し 34% 低下しているが、基準値を確保される結果が得られた。破壊位置は接着層から 3 ~ 5mm 程度の母材コンクリートである。

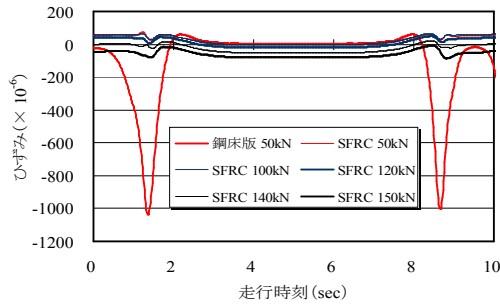
以上より接着剤を塗布することで SFRC 母材で破断しはく離は見られないことから終局時まで一体性が確保されている。

5. 3 たわみと走行時刻の関係

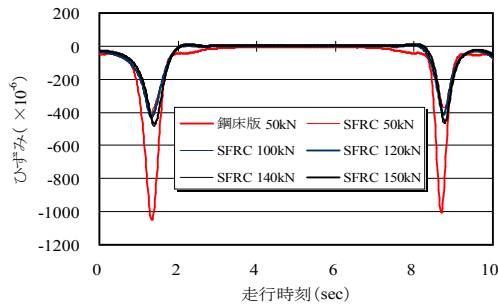
たわみの計測位置は輪荷重による変形が著しいと考えられる載荷輪直下の U リブ間のデッキプレート (A-DD1), U リブ内のデッキプレート (A-DD2) とした。たわみと走行時刻の関係を図-3 に示す。

(1) 計測点A-DD1 疲労実験後に荷重 100kN で走行時の無補強の鋼床版の最大たわみは 1.80mm, 最小たわみは 0.57mm であり、たわみの変動範囲 (以下、変動範囲) は 1.23mm である。一方、疲労実験後の接着剤塗布型 SFRC 上面補強後の鋼床版の最大たわみは 1.06mm, 最小たわみは 0.54mm であり、変動範囲は 0.52mm である。補強前後で最大たわみおよび変動範囲を比較するとそれぞれ 41% 低減, 58%抑制する結果が得られた。

(2) 計測点A-DD2 無補強の鋼床版の最大たわみは 0.80mm, 最小たわみは -0.11mm であり、変動範囲は 0.91mm である。疲労実験後の補強後の鋼床版は最大たわみ 0.28mm, 最小たわみ -0.10mm であり、変動範囲が 0.38mm である。補強前と変動範囲を



(1) 計測点A-SD



(2) 計測点A-SU

図-4 ひずみと走行時刻の関係

比較すると 58%抑制される結果が得られた。

以上より、無補強の鋼床版は局部変形や正負のたわみが繰返し発生することで疲労き裂が発生し易くなる。しかし、補強することでたわみを抑制し、局部変形から全体変形に移行している。

5. 4 ひずみと走行時刻の関係

ひずみの計測位置は局部変形、局部応力および交番応力の発生による疲労損傷が著しいと考えられる載荷輪直下の U リブ溶接止端部付近とする。U2 リブ溶接止端部から 5mm の位置のデッキプレート (A-SD)、U リブ溶接止端部から 5mm の位置の U リブ (A-SU) とする。ひずみと走行時刻の関係を図-4 に示す。

(1) 計測点A-SD 疲労実験後に荷重 100kN で走行時の無補強の鋼床版の最大ひずみは 62×10^{-6} 、最小ひずみは -1038×10^{-6} であり、変動範囲は 1100×10^{-6} である。一方、疲労実験後の補強後の鋼床版の最大ひずみは -8×10^{-6} 、最小ひずみは -88×10^{-6} であり、変動範囲は 80×10^{-6} である。補強前後で変動範囲を比較するとそれぞれ 93%抑制する結果が得られた。

(2) 計測点A-SU 疲労実験後に荷重 100kN で走行時の無補強の鋼床版の最大ひずみは -5×10^{-6} 、最小ひずみは -1050×10^{-6} であり、変動範囲は -1045×10^{-6} である。一方、疲労実験後の補強後の鋼床版の最大ひずみは 13×10^{-6} 、最小ひずみは -469×10^{-6} であり、変動範囲は 482×10^{-6} である。補強前後で変動範囲を比較するとそれぞれ 58%抑制する結果が得られた。

以上より、鋼床版は輪荷重が繰返し走行すると

局部応力・交番応力が発生し易く、早期にデッキプレートや U リブ、溶接部に貫通き裂および疲労き裂が進展するが、補強することでひずみが大幅に抑制し局部性状が抑制されることで、き裂の進展を抑制できると考えられる。

6. まとめ

- (1) 等価走行回数が 146.287×10^6 回走行しても SFRC の上面には U リブ溶接部上に 0.05mm 程度のひび割れは発生するものの貫通ひび割れは見られないことから SFRC 材の耐疲労性が評価できる。
- (2) 鋼床版上面に接着剤を塗布した場合の建研式引張試験による付着強度は平均 2.59 N/mm^2 確保された。疲労実験終了後の走行面の付着強度は平均 1.71 N/mm^2 と実験前に比して 34%低減しているが付着強度の基準 1.0 N/mm^2 以上を確保している。また、SFRC 側で引張破壊している。よって本実験の走行範囲内では界面のはく離は見られず終局時まで一体性が確保されている。
- (3) 無補強の鋼床版はたわみ・ひずみの変動が著しく、繰返し走行することで疲労き裂が発生し易いが、接着剤塗布型 SFRC 上面補強を行うことによりたわみ・ひずみが大幅に低減し、局部変形および局部応力を抑制し全体変形に移行していることから疲労き裂の発生が抑制されることがえられる。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ 19 鋼床版の疲労 2010 年改訂版，2010
- 2) 児玉孝喜，一瀬八洋，加形護，大田孝二，新延泰生：実橋における鋼床版 SFRC 舗装によるひずみ低減効果，構造工学論文集 Vol.56A，pp.1249-1257，2010
- 3) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，2002
- 4) (社)建設コンサルタント協会近畿支部公共土木施設の維持管理に関する研究委員会道路分科会橋梁 WG ② (補修・補強)：2. 橋梁補修設計マニュアル (案)，2012.7.
- 5) 独立行政法人土木研究所，(株)横河ブリッジ，(株)NIPPO，鹿島道路(株)，大成ロテック(株)：鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究 (その 2・3・4) 報告書— SFRC 舗装した既設鋼床版の補強に関する設計・施工マニュアル(案) —，共同研究報告書，第 395 号，2009.10.
- 6) 水越陸視，松井繁之，東山浩士，内田美生：SFRC の曲げひび割れ進展寿命の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，p.199-204，2000