

低収縮 SFRC を用いた鋼床版補強法の耐疲労性の評価および施工技術

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) 児玉 孝喜

1. はじめに

道路橋鋼床版はデッキプレートに 12mm の鋼板を用いた薄板溶接構造であることから交通量の多い路線では車両の繰り返し走行による局部性状が発生し、溶接ルート部を起点にデッキ貫通き裂、ビード貫通き裂が発生している¹⁾。き裂が多数発生していることから 2012 年改訂の道路橋示方書・同解説²⁾（以下、道示とする）ではデッキプレートの最小板厚を 16mm とし、2017 年改訂の道示³⁾では疲労耐久性を考慮した設計となっている。

一方、貫通き裂が発生した鋼床版の補修補強法として高速道路では超速硬セメントを使用した鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRC とする）とエポキシ系接着剤（以下、接着剤とする）を併用した接着剤塗布型 SFRC 補強法⁴⁾が適用されている。しかし、超速硬セメントは 3 時間でコンクリートの設計基準強度 24N/mm² 以上を確保できる材料のため可使時間が 20 分程度と短いことから高度な施工技術を要する。また、地方自治体が管理する橋梁では片側交互通行や長期間の交通規制が可能であることから短時間で強度発現を有する超速硬セメントを用いる必要がない。阿部ら⁵⁾は一定時間の交通規制が可能な橋梁における SFRC 補強法として、早強・普通ポルトランドセメント（以下、早強・普通セメントとする）に早強成分と収縮低減成分を有する混和材（以下、低収縮型早強性混和材とする）を添加した低収縮 SFRC を提案し、提案する補強材を用いた鋼床版補強法によるデッキプレートのたわみ低減効果について検証し、その有用性を実証した。

そこで本研究は、早強・普通セメントに低収縮型早強性混和材を添加させた低収縮 SFRC を用いて接着剤塗布型 SFRC 補強を施した鋼床版の耐疲労性および応力の低減効果を検証する。また、低収縮 SFRC を適用した実橋梁の接着剤塗布型 SFRC 補強の施工計画について検証し、その実用性を検証した。

2. 供試体概要

2.1 使用材料

(1) 鋼材 鋼床版を構成する鋼材には、一般鋼板などが適用されている。本研究では、鋼床版を構成する鋼材として SS400 を用いる。なお、鋼材の材料特性値はミルシートより、降伏強度 341N/mm² が、引張強

表－1 低収縮SFRCの示方配合

	W/B (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						S.P (%)
			W	C	S	G	SF	AD	
早強セメント	38	57.9	174	358	936	686	100	100	1.4
普通セメント				358	937	686	100	100	1.2

表－2 低収縮SFRCの材料特性値

試験項目		早強セメント	普通セメント
凝結時間 (min)	始発	535	565
	終結	645	700
圧縮強度 (N/mm ²)	12時間	2.09	1.56
	24時間	36.1	24.6
	30時間	44.4	31.9
	36時間	50.6	36.8
	4日	69.8	60.1
静弾性係数 (kN/mm ²)	24時間	23.4	21.1
	30時間	25.6	23.7
	36時間	26.6	23.8
	4日	33.1	31.8

度が 462N/mm²、ヤング係数が 200kN/mm² である。

(2) 低収縮SFRC 低収縮 SFRC の材料の要求性能は材齢 36 時間でコンクリートの圧縮強度 30N/mm² を確保できる配合とする。低収縮 SFRC の配合は早強または普通セメントに低収縮型早強性混和材を添加させ、最大骨材寸法 15mm の粗骨材、最大骨材寸法 5mm の細骨材、長さ 30mm、φ0.62mm の両端フック型鋼繊維を 1.27Vol.% で配合する。ここで、低収縮 SFRC の示方配合を表－1、材料特性値を表－2に示す。早強または普通セメントを用いた低収縮 SFRC は材料の要求性能を十分に満たす材料である。

(3) 防錆剤および接着剤 鋼床版はデッキプレートの研掃後に損傷状況の調査・診断を行い、き裂発生箇所のあて板などの補修を施すため研掃を行ってから数日後に SFRC 補強を施すことからデッキプレート表面に錆の発生が懸念される。本実験では、デッキプレートの表面に発生する錆を防止するために防錆剤を用いる。ここで、防錆剤の材料特性値を表－3に示す。

デッキプレートと SFRC との界面では、輪荷重の繰り返し走行によって界面で曲げやせん断が発生し、界面でののはく離の発生が懸念される。そこで、鋼床版 SFRC 補強ではデッキプレートと SFRC の一体性を高めるために接着剤が適用されている。本実験では、一体性を確保するために接着剤を用いる。ここで、接着剤の材料特性値を表－4に示す。

Construction Technology and Evaluation of Fatigue Durability of Orthotropic steel decks Reinforcing Method by Low Shrinkage SFRC

Hiroyuki NOGUCHI, Tadashi ABE, Yutaka KAWAI, Yatsuhiro ICHINOSE and Takayoshi KODAMA

表－3 防錆剤の材料特性値

項目	実測値	備考
外観	主剤 灰色液状	異物混入なし
	硬化剤 褐色液状	異物混入なし
塗膜の外観	灰色	目視
混合比（主剤：硬化剤）	2：1	重量比
混合粘度	50mPa・s以下	JIS K7112
塗膜乾燥時間	4時間以内	ドライングレコーダー
引張せん断強さ	10 N/mm ² 以上	JIS K6850

表－4 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 または母材破壊	JIS K6909

2.2 供試体寸法

鋼床版供試体は実橋梁をモデル化し、デッキプレートは幅 1,765mm、長さ 2,500mm、厚さ 12mm の鋼板を用いる。U リブには幅 318mm、高さ 250mm、厚さ 8mm を用いる。主桁は I 形断面とし、主桁間隔は 1,465mm とする。ここで、供試体寸法を図－1に示す。

2.3 補強手順

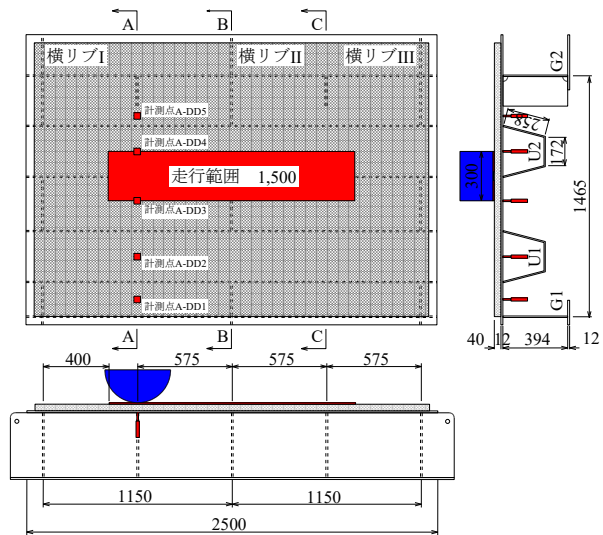
鋼床版の接着剤塗布型 SFRC 補強は「橋梁補修設計マニュアル」⁹⁾に準拠し、供試体を施工する。

デッキプレート表面の不純物を除去してデッキプレートと SFRC 接着性を確保するためにショットブラスト（投射密度 150kg/m²：1 種ケレン相当）による研掃を行う。次に、デッキプレート表面の発錆を防止するために防錆剤を塗布量 0.3kg/m² で塗布する。防錆剤が養生後、接着剤を塗布量 1.4kg/m²（塗布厚平均 1.0mm）で塗布し、直ちに SFRC を練混ぜて SFRC を 40mm 厚で打込み、表面仕上げ・養生を行い疲労実験を開始する。

3. 実験概要

3.1 輪荷重走行疲労実験

輪荷重走行疲労実験は、図－1に示す横リブ I から 400mm の位置を起点に橋軸方向に 1,500mm の範囲を繰り返し走行させる。鋼床版供試体は、荷重 50kN で 40,000 回走行させる。早強セメントを用いた低収縮 SFRC で補強を施した鋼床版供試体は鋼構造の疲労寿命推定として適用されている 200 万回疲労強度⁷⁾となるように繰り返し走行させる。荷重 50kN で 20,000 回、荷重 100kN で 40,000 回、150kN で 62,000 回走行させる。次に、普通セメントを用いた低収縮 SFRC で補強を施した鋼床版供試体は荷重 50kN で 40,000 回、荷重 100kN、120kN、140kN、150kN でそれぞれ 20,000 回走行させる。なお、供試体ごとに疲労実験終了後、荷重 100kN で 1 往復させデッキプレートのたわみを計



図－1 供試体寸法

測する。

3.2 等価走行回数

SFRC の寿命評価について、水越ら⁸⁾は SFRC の疲労ひび割れの進展状況を考慮した生存確率 95%の S-N 曲線式(1)を提案している。

$$S = -0.0969 \log N + 1.0279 \quad (1)$$

ここに、 S ：上限応力比（＝作用最大曲げ応力/静的曲げ強度）、 N ：繰返し回数

式(1)における S-N 曲線式は上限応力比であることから S-N 曲線式の傾き（＝0.0969）の逆数の絶対値は $m=10.3$ である。

本実験は段階状荷重載荷としたことから等価走行回数を算出し、SFRC の耐疲労性を評価する。水越らが提案する S-N 曲線式(1)は片対数式で与えられていることからマイナー則に従うと仮定すると式(2)が与えられる。式(2)における基準荷重は 2012 年改訂の道示に規定する B 活荷重に安全率 1.2 を考慮する。本実験装置の車輪幅 300mm と道示に規定する T 荷重幅 500mm の比から 72kN（＝100×1.2×3/5）とする。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n [10^{(S_0 - S_i)/(1/m)}] \times n_i \quad (2)$$

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

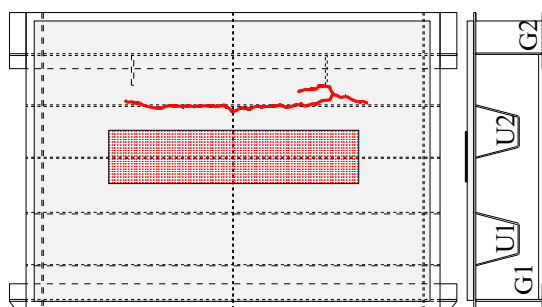
ここに、 N_{eq} ：等価走行回数、 P_i ：載荷荷重（kN）、 P ：基準荷重（＝72kN）、 S_0 ：上限応力比、 n_i ：実験走行回数、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値（＝10.3）

4. 実験結果

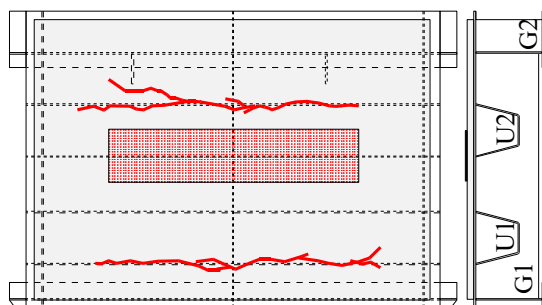
4.1 等価走行回数および損傷状況

早強セメントを用いた低収縮 SFRC および普通セメントを用いた低収縮 SFRC で補強した鋼床版供試体の等価走行回数はそれぞれ 330.422×10^6 回、 146.287×10^6 回である。

疲労実験終了後の SFRC の損傷状況を図－2に示す。

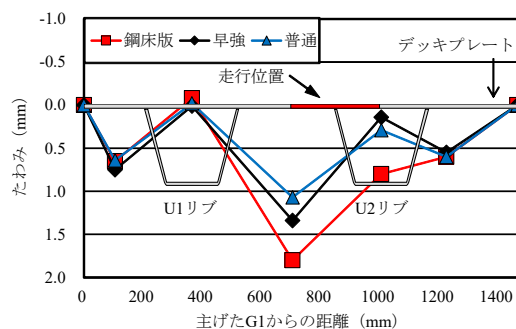


(1) 早強セメントを用いた低収縮SFRC

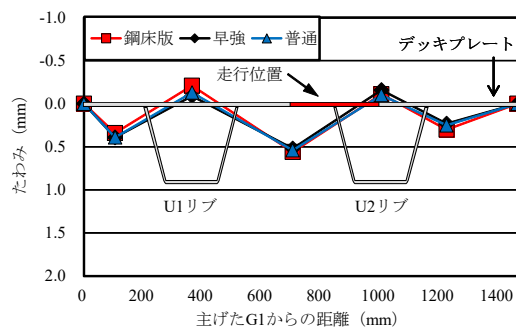


(2) 普通セメントを用いた低収縮SFRC

図-2 疲労実験終了後の損傷状況



(1) A断面に輪荷重が載荷時



(2) C断面に輪荷重が載荷時

図-3 橋軸直角方向のデッキプレートの変形状態

表-5 A断面およびC断面に載荷した橋軸直角方向デッキプレートのたわみ

供試体 \ 計測点	A断面に載荷時のたわみ (mm)					C断面に載荷時のたわみ (mm)				
	A-DD1	A-DD2	A-DD3	A-DD4	A-DD5	A-DD1	A-DD2	A-DD3	A-DD4	A-DD5
鋼床版	0.65	-0.08	1.80	0.80	0.60	0.34	-0.21	0.56	-0.11	0.30
低収縮SFRC (早強)	0.75	0.01	1.34	0.14	0.55	0.39	-0.09	0.52	-0.16	0.23
低収縮SFRC (普通)	0.64	-0.02	1.07	0.29	0.60	0.39	-0.13	0.54	-0.10	0.25

両供試体ともに主桁側の U リブ溶接線上に沿ってひび割れ幅 0.05mm 程度のひび割れが伸展している。これは輪荷重の走行時に発生する U リブ内デッキプレートの局所変形・交番変形に加えて U リブのねじれにより主桁側 U リブ溶接線付近に応力集中が発生したためと考えられる。ひび割れが発生したもののひび割れの発生位置は主桁側の U リブ溶接線上のみとなっており載荷輪直下でのひび割れや摩耗が確認されないことから低収縮 SFRC の耐疲労性が評価され、鋼床版の耐疲労性の向上に寄与できるものと考えられる。

4.2 デッキプレートの変形状態

本実験におけるデッキプレートの変形状態を図-3、計測結果を表-5に示す。なお、たわみの計測位置を図-1に併記する。

(1) A断面に載荷時 A 断面に輪荷重が載荷した場合の鋼床版供試体デッキプレートの変形状態は図-3(1)に示すように載荷輪直下の変形が著しい。早強または普通セメントを用いた低収縮 SFRC で補強した鋼床版は載荷輪直下である計測点 A-DD3 および計測点 A-DD4 においてデッキプレートのたわみがそれぞれ平均 33%, 73%低減する結果が得られた。一方、走行範囲外では鋼床版供試体および低収縮 SFRC で補強した鋼床版ではたわみが補強前後で変動が確認されな

った。これは、鋼床版の構造特徴として荷重の分布範囲が狭いため、SFRC による剛性の向上が載荷輪直下のみに顕著に表れるためと考えられる。

(2) C断面に載荷時 C 断面に輪荷重が載荷した場合のデッキプレートの変形状態は図-3(2)に示すように計測点 A-DD2 (U1 リブ内) および計測点 A-DD4 (U2 リブ内) ではデッキプレートに負のたわみが発生している。これは、輪荷重が横リブ II を通過する際に横リブを支点とした負曲げが発生するため、横リブ通過後および C 断面に到達した際に A 断面では負のたわみが発生し、たわみの交番が発生することから U リブ溶接部の上にき裂が発生しやすくなる。補強後もたわみの交番が発生するもののたわみの変動範囲が大幅に低減することからき裂の発生を抑制できるものと考えられる。また、補強前後でデッキプレートの変形は同じ変形挙動を示している。これは、荷重の分布範囲が狭く SFRC による剛性の向上が局所的なため輪荷重が横リブ II や C 断面上に作用した場合の影響を受けにくいためと考えられる。

5. 実橋梁鋼床版における施工計画

低収縮 SFRC は材齢 36 時間でコンクリートの圧縮強度 30N/mm² 以上確保できる材料である。また、従

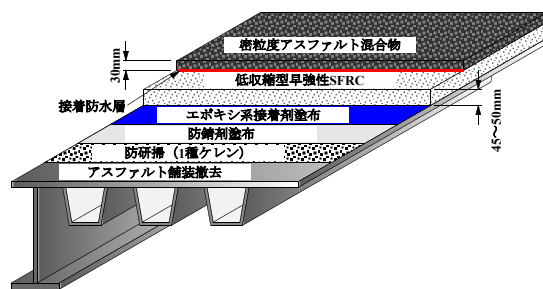


図-4 実橋梁鋼床版における断面構成

来の超速硬セメントと比較して安価であることからコストの縮減が期待できる材料でもある。ここで、低収縮 SFRC を用いた実橋梁鋼床版補強法を施す際の断面構成を図-4、施工計画を図-5に示す。

既設アスファルト舗装（以下、舗装とする）の撤去に先立ち、舗装厚を電磁波レーダ法で調査する。次に、既設舗装を撤去し、鋼床版の損傷状況を調査・診断することからデッキプレート上面に残留した舗装材や防水層を除去するために2種ケレン相当の研掃を施す。調査・診断後、き裂発生箇所をあて板補強などの補修し、ショットブラストによる研掃（1種ケレン相当）を施す。デッキプレートの研掃後には発錆を防止するために防錆剤を塗布量 0.3kg/m^2 で塗布する。養生後、接着剤を塗布量 1.4kg/m^2 で塗布し、接着剤の最小塗布厚が 0.5mm 以上であることをウェットゲージを用いて塗布量を管理する。

低収縮 SFRC の製造時に品質のバラツキが生じないように、プラントに専任の品質管理者を配置して出荷時の品質確認および出荷時間の管理をアジテータ車1台ごとに行う。運搬はアジテータ車を用い、現場到着時には、品質確認を行い管理基準に満たしているコンクリートのみファイバーボールが発生しないように鋼繊維の分散を良好とするために $\phi 0.62\text{mm}$ 、長さ 30mm の鋼繊維を混入量 $1.27\text{Vol.}\%$ で鋼繊維をエア圧送投入機でアジテータ車に投入する。ここで、施工時における鋼繊維投入後の SFRC の配合条件におけるスランブは $6.5 \pm 1.5\text{cm}$ 、空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ 、塩化物イオン量 0.30kg/m^3 、コンクリートの温度 35°C 以下となるように基準値内で管理する。練混ぜ後、低収縮 SFRC を $45 \sim 50\text{mm}$ となるようにコンクリートの締固め、封緘養生を行う。また、環境温度に応じて給熱マット養生を併用する。さらに、鋼床版とデッキプレートの付着強度の検証として引張試験用の供試体を製作して建研式引張試験を実施し、基準値⁹⁾ 1.0N/mm^2 を確保できることを検証する。

6. まとめ

- (1) 低収縮 SFRC は U リブ溶接線上にひび割れ幅 0.05mm のひび割れが発生するものの走行範囲内にひび割れや摩耗が見られないことから SFRC の



図-5 施工計画

耐疲労性が評価され、低収縮 SFRC を用いた鋼床版補強法は鋼床版の耐疲労性を大幅に向上させるものと考えられる。

- (2) 輪荷重の走行によりデッキプレートでは局部性状が発生し、溶接接合部を起点にき裂が発生しやすいと考えられる。接着剤塗布 SFRC 補強を施すことで剛性の向上し、デッキプレートに発生する局部性状が抑制され、デッキプレートの全体変形に移行し、き裂の発生を抑制できると考えられる。
- (3) 低収縮 SFRC を用いた鋼床版補強法は、提案する施工計画に準拠することで高品質、高性能な施工が可能となる。また、低収縮 SFRC は鋼床版の補強材として劣化した鋼床版の補強効果が併せて得られることから鋼床版全体の延命化に繋がる。

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，2010.12
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, 2012.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, 2017.11
- 4) 児玉孝喜ほか：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.1249-1258, 2010.3
- 5) 阿部忠ほか：普通セメントに低収縮型早強性混和材を配合した SFRC 舗装による鋼床版の応力低減効果，土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.2, pp.47-62, 2015.5
- 6) (一社)建設コンサルタンツ協会近畿支部公共土木施設の維持管理に関する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
- 7) 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.5
- 8) 水越睦視ほか：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, pp.199-204, 2000.7
- 9) (独)土木研究所ほか：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 4) 報告書—SFRC の基本物性と接着材接合部における強度特性に関する検討—，共同研究報告書，整理番号第 413 号，2011.2