

早強セメントを用いた低収縮型SFRCによる鋼床版補強法のたわみ低減効果

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 児玉 孝喜

1. はじめに

道路橋鋼床版は厚さ 12mm のデッキプレート縦リブ・横リブなどの補剛材で溶接接合した薄板構造である。大型車両の混入率の高い道路橋鋼床版は車両の繰り返し走行により発生する局部性状が生じやすく、局部性状が繰り返し生じることで溶接ルート部を起点にデッキ貫通き裂および溶接ビード貫通き裂の発生が数多く報告されている¹⁾。

貫通き裂・疲労き裂が生じた鋼床版の維持管理策として 3 時間で道路橋示方書・同解説²⁾に準拠するコンクリートの設計基準強度を確保できる超速硬セメントを用いた鋼繊維補強コンクリート (SFRC) を使用し剛性を高め鋼床版に発生する局部性状を抑制させる接着剤塗布型 SFRC 補強法³⁾が採用されている。しかし、超速硬セメントは凝結時間および可使時間が短いため高度な施工技術が求められる。一方、地方公共団体が管理する橋梁では片側交互通行や一定期間継続などの交通規制が可能となることから超速硬を用いる必要がない。筆者らはこのような交通規制が数日間普通セメントに収縮低減成分と早強性成分を有する混和材 (低収縮型早強性混和材) を添加させた SFRC を提案し、鋼床版の補強材としてのその有用性を実証した⁴⁾。しかし、SFRC 打設時において環境温度が低い場合、セメントの強度発現性が低下することから低温下での強度発現性が確保できる配合が求められる。

そこで本研究は、低温下での強度発現性が確保できる早強セメントに低収縮型早強性混和材を添加させた SFRC を提案し、SFRC の材料性能を検証する。また、提案する SFRC を用いて接着剤塗布型 SFRC 上面補強を鋼床版に施し、輪荷重走行疲労実験を行い、たわみの低減効果についても検証する。なお、既往の研究である普通セメントに低収縮型早強性混和材を添加させた SFRC を用いて上面補強した鋼床版と比較して考察を行う。

2. 供試体概要

2.1 使用材料

(1) 鋼材 1980 年代に道路橋鋼床版には SS400 が用いられているため本実験では SS400 を用いる。SS400 の材料特性値はミルシートより降伏強度が 341N/mm^2 、引張強度が 462N/mm^2 、ヤング係数が 200kN/mm^2 である。

(2) SFRC 長期間交通規制が可能となる道路橋鋼床版は既設舗装の撤去後にき裂発生箇所の調査や補修補強が実施されることから 3 時間でコンクリートの設計基準強度を確保できる超速硬セメントを用いる必要がないと考えられる。そこで筆者らは超速硬セメントを用いた SFRC に替わる材料として 36 時間でコンクリート圧縮強度 30N/mm^2 を確保できる配合とする。普通セメントに低収縮型早強性混和材を添加させ、最大寸法 15mm の粗骨材、最大寸法 5mm の砕砂、 $\phi 0.62\text{mm}$ 、長さ 30mm の両端フック型鋼繊維を混入率 1.27Vol.%で配合する。一方、環境温度が低い場合はセメントの強度発現性が低下する。そこで本研究は、早強セメントに低収縮型早強性混和材を添加させ、最大寸法 15mm の粗骨材、最大寸法 5mm の砕砂、 $\phi 0.62\text{mm}$ 、長さ 30mm の両端フック型鋼繊維を混入率 1.27Vol.%で配合する。ここで、普通セメントおよび早強セメントを用いた SFRC の示方配合を表-1に併記する。

(3) 接着剤および防錆剤 鋼床版と SFRC との界面では輪荷重の繰り返し走行により曲げや曲げに伴うずれ、すなわちせん断の影響によるはく離の発生が懸念される。鋼床版と SFRC との一体性を確保するために補強界面にはエポキシ系接着剤が適用されている。本研究では、高耐久型エポキシ系樹脂接着剤 (接着剤) を用いる。ここに、接着剤の材料特性値を表-2に示す。また、鋼床版の補修・補強を施す時に片側交互通行や一定期間継続した交通規制が可能な路線では研掃工後にき裂の進展調査やあて板補修が施されることから SFRC を打設するま

表-1 各セメントを用いたSFRCの示方配合

セメントの種類	スランブ (cm)	W/B (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						S.P (%)	備考
				W	C	S	G	SF	AD		
普通セメント	6.5±1.5	38	57.9	174	358	937	686	100	100	1.2	
					358	937	686	—	100	1.2	凝結試験用
早強セメント	6.5±1.5				358	936	686	100	100	1.4	
					358	936	686	—	100	1.4	凝結試験用

W:水, C:セメント, S:砕砂, G:粗骨材, SF:鋼繊維, AD:低収縮型早強性混和材, S.P:高性能AE減水剤

Decreasing Effect Of Deflection in Reinforcement Method for Steel Plate Deck Applied Low-Shrinkage SFRC Using High-Early-Strength Cement

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

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 または母材破壊	JIS K6909

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	
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

でに研掃面に錆が発生する。錆の発生を防止するために研掃工後、防錆剤が用いられる。本研究では、接着剤との付着性が確保できる高耐久・耐水耐熱性エポキシ樹脂プライマー（防錆剤）を用いる。ここに、防錆剤の材料特性値を表－3に示す。

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。主げたは I 形断面とし、主げた間隔は 1,465mm とする。ここで、供試体の寸法を図－1に示す。

2.3 接着剤塗布型SFRC上面補強法

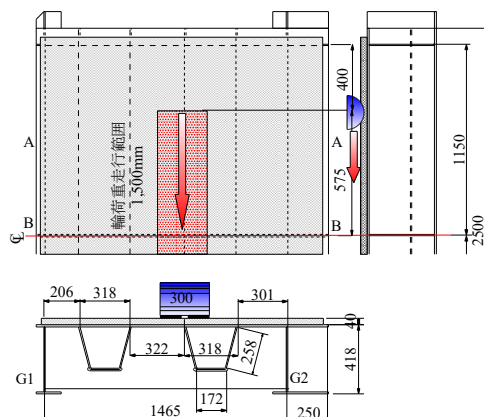
鋼床版の SFRC 補強は「橋梁の補修設計マニュアル」⁹⁾ に準拠した補強法で製作する。

製作手順は、荷重 50kN で 40,000 回走行させ鋼床版に応力履歴を与える。応力履歴を与えた後に鋼床版の目視による点検を行う。次に、鋼床版上の油分や異物除去し、デッキプレートと SFRC との接着性を確保するためにショットブラストによる研掃（投射密度 150kg/m²：1 種ケレン相当）を行う。研掃後、デッキプレート上の発錆を防止するために防錆剤を塗布する。防錆剤の乾燥後、接着剤を厚さ 1.0mm で塗布し、直ちに SFRC を混練し、厚さ 40mm で打込み、表面仕上げを行う。

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の走行範囲は、横リブから 400mm の位置を起点に橋軸方向に 1,500mm 走行させ、元の位置まで走行させる。鋼床版は荷重 50kN で 40,000 回走行させ、たわみを計測する。また、40,000 回走行後に荷重 100kN で 1 往復させたわみを動的に計測する。次に早強セメントに早強性混和材を添加させ、接着剤塗布型 SFRC 補強した鋼床版の疲労強度の推定には 200 万回疲労強度⁹⁾が用いられていることから早強セメントを用いて接着



図－1 供試体寸法

剤塗布型 SFRC 補強した鋼床版は 200 万回疲労強度となるように荷重 50kN で 20,000 回、荷重 100kN で 40,000 回、荷重 150kN で 62,000 回走行させ、疲労実験終了後に荷重 100kN で 1 往復させたわみを動的に計測する。なお、既往の研究である普通セメントを用いて接着剤塗布型 SFRC 補強した鋼床版は段階状荷重載荷として荷重 50kN で 40,000 回、荷重 100kN、120kN、140kN、150kN でそれぞれ 20,000 回走行させ、疲労実験終了後に荷重 100kN で 1 往復させたわみを動的に計測する。

3.2 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⁷⁾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主げた直上とする。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付着強度を算出には式[1]を用いる。

$$\text{付着強度(N/mm}^2\text{)} = \frac{\text{－接着荷重(N)} / \text{接着面積(mm}^2\text{)}}{[1]}$$

3.3 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[2]を提案している。

$$S = -0.0969 \log N + 1.0279 \quad [2]$$

ただし、S：上限応力比（＝作用最大曲げ応力/静的曲げ強度）

輪荷重走行疲労実験は荷重を段階状荷重載荷としたことから等価走行回数を算定し、SFRC の耐疲労性を評価する。SFRC の耐疲労性の評価には、水越らが提案する式[2]は片対数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式[3]が与えられる。式[2]の S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値には $m=10.3$ とする。式[3]におけ

表-4 SFRCの材料特性値

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

表-5 圧縮強度が30N/mm²に

達する材齢と環境温度

圧縮強度が30N/mm ² に達する材齢					
環境温度 (°C)	5	10	15	20	30
普通セメント (h)	72	48	36	30	20
早強セメント (h)	48	30	24	20	—

表-6 等価走行回数

供試体	走行回数	荷重					等価走行回数 合計
		50 kN	100 kN	120 kN	140 kN	150 kN	
普通セメント	実験走行回数	40,000	20,000	20,000	20,000	20,000	—
	等価走行回数	3,544	439,168	3,909,040	35,631,164	106,304,095	146,287,011
早強セメント	実験走行回数	20,000	40,000	—	—	62,000	—
	等価走行回数	1,772	878,335	—	—	329,542,695	330,422,802

る基準荷重は 2012 年改定の道示に規定する B 活荷重に安全率 1.2 を考慮する。また、本試験装置に用いた車輪幅が 300mm と道示に規定する T 活荷重幅 500mm の比から基準荷重 P を 72kN ($=100 \times 1.2 \times 300/500$) とする。なお、本実験では SFRC の静的曲げ強度が得られていないことから上限応力比 S_{SFRC} の算定には、基準荷重載荷時の応力が許容応力度 ($=\text{SFRC}$ の静的強度の $1/3$) 相当と仮定し、載荷荷重を基準荷重で除する。

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

$$S = (1/3) \times (P/P)$$

ただし、 N_{eq} : 等価走行回数 (回)、 P_i : 載荷荷重 (kN)、 P : 基準荷重 ($=72\text{kN}$)、 S_{SFRC} : 上限応力比 ($=$ 作用最大曲げ応力/静的曲げ強度)、 n_i : 実験走行回数 (回)、 m : S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 ($=10.3$)

4. 実験結果および考察

4.1 材料特性

(1) 圧縮強度 本実験における SFRC の材料特性を表-4に示す。普通セメントを用いた SFRC は、材齢 36 時間でコンクリートの圧縮強度が 36.8N/mm^2 と材料の要求性能である 36 時間でコンクリートの圧縮強度 30N/mm^2 を確保できる。また、凝結時間も長時間確保できることから施工性に優れた材料である。それに対して、早強セメントを用いた SFRC の材齢 36 時間で圧縮強度が 50.6N/mm^2 と材料の要求性能を十分に満足する。また、凝結時間も普通セメントを用いた SFRC より短いものの十分に凝結時間が確保され施工性に優れている。

(2) 環境温度による強度発現性 普通セメントおよび早強セメントに低収縮型早強性混和材を添加した SFRC は打込み時の環境温度により圧縮強度の強度発現性は異なる。普通セメントおよび早強セメントを用いた SFRC の環境温度と強度の発現性を表-5に示す。

普通セメントを用いた SFRC は環境温度が 20°C の場合は 28 時間で圧縮強度が 30N/mm^2 に達するが、環境温度が 10°C 、 5°C の場合それぞれ 48 時間、75 時間と環境温度が 10°C 以下となる場合、強度発現性が遅延する。一方、早強セメントを用いた SFRC の場合、環境温度が 20°C



(1) 普通セメント (2) 早強セメント

図-2 建研式引張試験による界面の破壊状況

$^\circ\text{C}$ で圧縮強度が 30N/mm^2 に達する時間が 20 時間、環境温度が 10°C 、 5°C の場合はそれぞれ 30 時間、48 時間と普通セメントを用いた SFRC と比較して圧縮強度が 30N/mm^2 に達する時間が短く強度発現性が確認される。

(3) 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。普通セメントに低収縮型早強性混和材を添加させた SFRC および普通セメントに低収縮型早強性混和材を添加させた SFRC の付着強度はそれぞれ 2.59N/mm^2 、 2.16 と N/mm^2 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 $3 \sim 5\text{mm}$ 程度の母材コンクリートである。

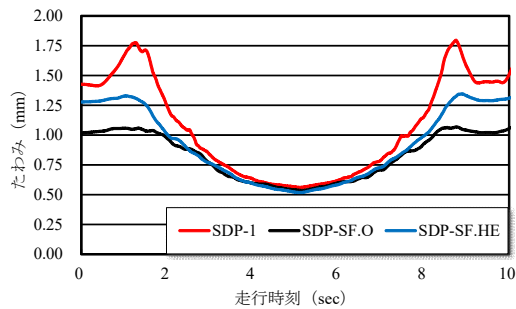
4.2 等価走行回数

本実験における等価走行回数を表-6に示す。早強セメントおよび普通セメントに低収縮型早強性混和材を配合した SFRC を用いた接着剤塗布型 SFRC 上面補強の場合の等価走行回数は、水越らが提案する SFRC の S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 $m=10.3$ を適用した場合の等価走行回数はそれぞれ 330.42×10^6 回、 146.28×10^6 回である。

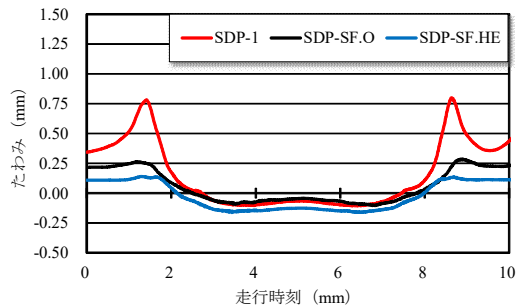
4.3 たわみと走行時刻の関係

本実験におけるたわみと走行時刻の関係を図-3に示す。

(1) 計測A-DD 計測点 A-DD におけるたわみと走行時刻の関係を図-3(1)に示す。計測点 A-DD は U1 リブ、U2 リブ間の載荷輪直下であり無補強鋼床版は輪荷重の走行による変形が大きく荷重 50kN で 40,000 回走行後荷重 100kN で 1 往復した際の最大たわみは 1.80mm 、最小たわみが 0.56mm であり、たわみの変動範囲が 1.24mm である。この値を基準にたわみの低減効果について検証する。既往の研究である普通セメントを用いて補強した鋼床版は荷重 150kN で 20,000 回走行後 (等価走行回数 146.287×10^6 回) に荷重を 100kN に増加させ 1 往復させた



(1) 計測点A-DD



(2) 計測点A-DU

図-3 たわみと走行時刻の関係

場合、最大たわみは 1.06mm、最小たわみが 0.54mm、たわみの変動範囲が 0.53mm であり、無補強鋼床版と比してたわみが 57%低減する。それに対して、早強セメントを用い補強した鋼床版は荷重 150kN で 62,000 回走行後（等価走行回数 330.422×10^6 回）に荷重 100kN で 1 往復させたときの最大たわみは 1.35mm、最小たわみが 0.52mm、たわみの変動範囲が 0.83mm と無補強鋼床版と比してたわみが 33%低減する。

(2) 計測点A-DU 計測点 A-DU におけるたわみと走行時刻の関係を図-2(2)に示す。計測点 A-DU は載荷輪直下の U2 リブ内デッキプレートであり輪荷重の走行による変形が大きい。無補強鋼床版は荷重 50kN で 40,000 回走行後に荷重を 100kN に増加させ 1 往復させた場合、無補強鋼床版の最大たわみは 0.80mm、最小たわみが -0.11mm であり、たわみの変動範囲が 0.91mm である。計測点 A-DD と同様に輪荷重が計測点を通過する前後で急激なたわみの増減が確認される。また、輪荷重が横リブ II を通過する付近で負のたわみが発生、すなわちたわみの交番および交番応力が発生している。たわみの交番および交番応力が繰り返し作用することにより溶接ルート部を起点にデッキプレートや U リブに疲労き裂の発生、進展する。普通セメントを用いて補強した鋼床版は等価走行回数 146.287×10^6 回走行後に荷重 100kN で 1 往復させたときの最大たわみは 0.29mm、最小たわみが -0.10mm、たわみの変動範囲が 0.39mm と供試体 SDP-1 に対してたわみの変動範囲が 57%低減する結果となった。それに対して、早強セメントを用い補強した鋼床版は荷重 150kN で等価走行回数 330.422×10^6 回走行後に荷重 100kN で 1 往復させたときの最大たわみは 0.14mm、最小たわみが -

0.16mm、たわみの変動範囲が 0.30mm と無補強鋼床版に対してたわみの変動範囲が 67%低減する結果となった。

5. まとめ

- (1) 早強セメントに低収縮型早強性混和材を添加させた SFRC は材齢 36 時間でコンクリートの圧縮強度 50.6N/mm^2 と材料の要求性能を十分に満足し、凝結時間も十分に確保できることから施工性に優れ、施工精度が向上できるものと考えられる。また、環境温度が 10°C でも 30 時間でコンクリートの圧縮強度 30N/mm^2 を確保できることから既往の研究である普通セメントに低収縮型早強性混和材を添加させた SFRC と比して強度発現が確保できる材料である。
- (2) 界面に接着剤を塗布することにより早強セメントを用いた SFRC の付着強度が 2.16N/mm^2 であり基準の付着強度 1.0N/mm^2 以上を確保でき、SFRC 側で引張破壊となっていることから鋼床版と SFRC との一体性が確保されている
- (3) 早強セメントに低収縮型早強性混和材を添加させた SFRC を用い上面補強を施すことによりたわみの変動範囲が大幅に低減し、輪荷重の繰り返し走行により発生するデッキプレートの局所的な変形やたわみの交番が抑制されき裂の発生・進展を抑制できるものと考えられる。また、既往の研究である普通セメントに低収縮型早強性混和材を添加させた SFRC を用い上面補強した場合と比較して同等のたわみ低減効果が得られた。

参考文献

- 1)土木学会：鋼構造シリーズ 19 鋼床版の疲労 2010 年改定, 2010。
- 2)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, 2012。
- 3)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 Vol.56A, pp.1249-1258, 2010.3
- 4)野口博之ほか：早強・普通セメントに低収縮型早強性混和材を配合した鋼床版 SFRC 舗装における応力低減効果および耐疲労性の評価, 構造工学論文集 Vol.62A, pp.1226-1239, 2016.3
- 5)(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
- 6)日本道路協会：鋼橋の疲労, 1997。
- 7)(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 2・3・4) 報告書ー 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)ー, 共同研究報告書, 第 395 号, 2009.10。
- 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