論文 普通セメントを用いたSFRCによる鋼床版上面補強法の補強効果 および応力低減効果

野口 博之*1·阿部 忠*2·山下 雄史*3·一瀬 八洋*3

要旨:本研究は、鋼床版の上面補強材として普通セメントに低収縮型早強性混和材を配合した SFRC を提案し、提案する SFRC 材を用いた接着剤塗布型上面補強法における補強効果およびたわみ・ひずみの低減効果について検証した。その結果、提案する SFRC は材齢 36 時間で圧縮強度 30N/mm² が確保でき、道示が規定する設計基準強度を十分満足する特性値である。また、接着剤塗布型 SFRC 上面補強法は、デッキプレート、U リブのたわみ・ひずみの増加が大幅に抑制された。したがって、提案する SFRC および接着剤塗布型 SFRC 上面補強は、鋼床版の補強材および補強法として実用的であると言える。

キーワード:鋼床版,接着剤塗布型 SFRC 上面補強,局部変形,応力低減効果

1. はじめに

近年,1980年代に建設された道路橋鋼床版は大型車両の繰り返し走行によりデッキプレートや U リブの溶接位置にき裂などの疲労損傷が生じている "。1980年代の鋼床版のデッキプレートには板厚12mm,U リブには6~8mmの薄肉鋼板が用いられ,RC 床版と比較して軽量であるが剛性が低いために大型車両の繰り返し走行により,疲労き裂が発生している。これらの疲労き裂などの損傷に対する補修・補強方法にはストップホール,高力ボルトで鋼板を接合させるためにあて板補強法が用いられていた。しかし,補修箇所の再劣化やき裂の進展が見られることから,曲げ剛性を高める補強対策としてデッキプレート上面にエポキシ樹脂接着剤を塗布し,超速硬セメントに鋼繊維を配合したコンクリート(以下,SFRCとする)で上面補強が行われ,高速道路や重交通路線の鋼床版の補強法として採用されている。

高速道路や重交通路線に用いる SFRC 材の要求性能は、材齢3時間で道路橋示方書・同解説²⁾(以下,道示とする)に規定するコンクリートの設計基準強度が24N/mm²以上確保するものとし、そのために超速硬セメントが用いられている。しかし、超速硬セメントを用いた場合は、材料が高価であると同時に可使時間が30分程度と短いことから、熟練した高度な施工技術が要求される。一方、数日間の交通規制が可能な一般国道や地方自治体が管理する道路橋の鋼床版およびRC床版の補強材には超速硬セメントは必要としない。

そこで、本研究では超速硬セメントに変わる材料とし 普通セメントに低収縮型早強性混和材および鋼繊維を配 合させ、材齢 36 時間でコンクリートの圧縮強度が 30N/mm²以上確保できる SFRC 材を提案し、鋼床版の補 強材としての実用性を検証する。また、輪荷重走行実験を行いデッキプレートと横リブのたわみ、載荷輪直下の溶接止端部付近のひずみを動的に計測し、接着剤塗布型SFRC上面補強におけるたわみとひずみの低減効果および補強効果について検証した。

2. 供試体概要および補強法

2.1 使用材料

(1) 鋼材

1980 年代に建設された鋼床版には SS400 材が使用されていた。よって、本供試体には SS400 材を用いた。 SS400 の材料特性値は、ミルシートより、降伏強度は 341N/mm^2 、引張強度は 462N/mm^2 、ヤング係数は 200kN/mm^2 である。

(2) SFRC材

高速道路の鋼床版の上面補強材には、材齢3時間でコンクリートの圧縮強度が道示に規定する圧縮強度が 24.0N/mm²以上確保するために、超速硬セメントに鋼繊維を配合したSFRC材が使用されている。しかし、超速硬セメントを使用したSFRC材は、高価であると同時に、可使時間が短いことから高度な施工技術が必要となる。一方、一般国道や地方自治体が管理する道路橋では数日間の交通規制が可能な場合は超速硬セメントを用いる必要はないと考えられる。そこで、本研究では比較的に安価で、常時入手が可能な普通セメントを用いて、速硬セメントを用いたSFRCと同等な性能となるSFRCを提案する。

よって、普通セメントに 15mm 以下の粗骨材、5mm 以下の砕砂、そして低収縮型早強性混和材と長さ 30mm の鋼繊維を 1.27Vol.%で配合した。ここに、SFRC の示

^{*1}日本大学大学院 生産工学研究科土木工学専攻 博士前期課程(学生会員)

^{*2} 日本大学 生産工学部土木工学学科教授 博(工)(正会員)

^{*3} 鹿島道路(株) 生産技術本部技術部

表-1 SFRCの示方配合

W/C	s/a		単位重量(kg/m³)						
(%)	(%)	W	С	S	G	SF	AD	(%)	
38	57.9	174	358	936	686	100	100	1.5	

注記

W: x, C: セメント, S: 細骨材, 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

W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率

表-2 接着剤の材料特性値

項		実測値	備考
外観	主剤	白色ペースト状	異物混入
クト観	硬化剤	青色液状	なし
混合比(主剤	」: 硬化剤)	5:1	重量比
硬化物	1比重	1.42	JIS K 7112
圧縮!	強さ	102.88 N/mm ²	JIS K 7181
圧縮弾	性係数	3976.4 N/mm ²	JIS K 7181
曲げ	強さ	41.16 N/mm ²	JIS K 7171
引張せん	断強さ	14.86 N/mm ²	JIS K 6850
コンク 付着5		3.7 N/mm ²	JIS K 6909

方配合を表-1に示す。

(3) 防錆剤および接着剤

鋼床版のデッキプレートと SFRC と一体性を高めるために高耐久型エポキシ樹脂接着剤(以下,接着剤とする)を塗布する。本実験に用いた接着剤の材料特性値を表-2に示す。

2.2 供試体寸法

鋼床版を構成する鋼材の寸法は、主げたは I 形断面とし、主げた間隔を 1,465mm とする。横リブ間を 2,300mm とする。ここで、鋼床版の供試体寸法を図-1に示す。デッキプレートは図-1に示すように幅 1,765mm、全長 2,500mm、厚さ 12mm を用い、U リブには幅 318mm、高さ 250mm、厚さ 8mm を用いた。U リブは主げた G1 から 206mm の位置、また G2 げたから 301mm の位置に接合する。横リブは軸方向の支間中央に I 形とし、端部の横リブは支間中央から 1,150mm 位置とし、弾性変形を考慮して厚さ 8mm の腹板のみとする。

2.3 補強手順

鋼床版の SFRC 上面補強法は「橋梁補修設計マニュアル」"に準拠した補強法で供試体を作成した。補強前の鋼床版には輪荷重走行疲労実験よる 40,000 回走行の疲労損傷を与えた。その後、デッキプレート上面にショットブラスト(1 種ケレン相当)による表面研掃を行い、防錆剤を塗布する。その後、接着剤を 1.0mm 厚で塗布し、SFRC を混練し 40mm 厚で打設し、養生を行う。

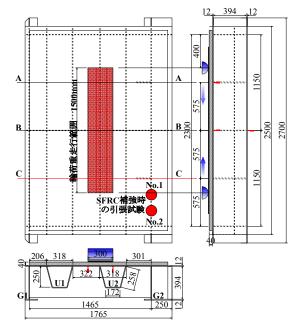


図-1 供試体寸法図





(1) 鋼床版の疲労実験 (40,000回)

(2) 接着剤塗布型SFRC補 強後の疲労実験

写真-1 鋼床版およびSFRC補強後の疲労実験

3. 実験方法

3.1 輪荷重走行実験および等価走行回数

鋼床版および SFRC 上面補強における補強効果およびたわみ・ひずみの低減効果については輪荷重走行疲労実験より検証する。ここで、疲労実験の状況を**写真-1**に示す。本実験装置の車輪幅 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

補強前の鋼床版は横リブIから 400mm の位置を起点に軸方向に 1,500mm の範囲を連続走行させた。輪荷重走行疲労実験における走行範囲を図ー1に併記した。鋼床版の疲労実験は、荷重 50kN で 40,000 回走行させ疲労損傷を与えた。疲労実験終了後、荷重 100kN で 1 走行させたわみおよびひずみを動的に計測を行い、荷重100kN 時のたわみおよびひずみを基準にたわみ・ひずみの低減効果を検証した。

(2) 接着剤塗布型SFRC上面補強供試体

鋼床版と SFRC との界面の付着強度を確認するために 疲労試験前に建研式引張試験を実施する。建研式引張試

表-3 実験走行回数および等価走行回数

Ī	供試体		S-N曲線の傾きの	甘淮北壬	荷重	50kN	100kN	120kN	140kN	150kN	等価走行
			逆数	基準荷重	実験走行回数	40,000	20,000	20,000	20,000	20,000	回数
	鋼床板		m=3.0 (両対数)	50kN	等価走行回数	40,000					40,000
ſ	鋼床版および	鋼床板	m=3.0 (両対数)	50kN	等価走行回数	40,000	160,000	276,480	439,040	540,000	1,455,520
	SFRC上面補強	SFRC	m=10.3(片対数)	72kN	等価走行回数	3,544	439,168	3,909,040	35,631,164	106,304,095	146,287,011

験の計測位置を図-1に併記した。輪荷重の走行疲労実験の荷重条件は 50kN で 40,000 回, 100kN, 120kN, 140kN, 150kN で, それぞれ 20,000 回走行させた。実験におけるたわみ・ひずみの測定は, 走行中の変位を計測するために, それぞれの疲労実験後に荷重 100kN で 1 走行させて動的に計測を行った。

(3) 等価走行回数

鋼床版に SFRC 補強した場合の S-N 曲線式は提案されていない。そこで本研究では、鋼床版の輪荷重走行試験における等価走行回数は鋼床版の S-N 曲線式より算定する。よって、鋼床版の S-N 曲線式 4は式(1)(両対数)として与えられている。

$$\log S = -0.3258 \log N + \log 8.308$$
 (1)
ここで、 $S: 応力$, $N: 繰り返し回数$

輪荷重走行による等価走行回数 N_{eq} は、マイナー則に従うと仮定すると、式(2)が与えられる。なお、式(2)における P_i は載荷荷重であり、P の基準荷重は 50kN とする。また、式(1)における S-N 曲線の傾きの逆数 m=3.0である 50 。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^{n} (P_i / P)^m \times n_i$$
 (2)

ここで, n::実験走行回数(回)

次に、鋼床版にコンクリート補強した場合の等価走行回数の算定には、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線式の傾きの逆数 m=12.7 を式(2)に適用した研究成果が見られる。しかし、この逆数を式(2)に適用して等価走行回数を算定すると、現状の寿命と大きな差異が生じる結果となる。そこで、本研究における SFRC 補強後の鋼床版の等価走行回数の算定には、水越ら 7 が提案する 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(3)(片対数)を適用する。なお、S は上限応力比(%)(= 100× 作用最大曲げ応力/静的曲げ強度)である。

$$S = -9.69 \log N + 102.79 \tag{3}$$

よって、S-N 曲線の傾き(-0.0969)の逆数の絶対値は m=10.3 である。よって、水越ら 7 が提案する式(3) より、マイナー則に従うと仮定すると式(4)として与えられる。なお、式(4)における P_i は載荷荷重 (kN)、P は基準荷重であり、本供試体は実寸法の 3/5 モデルであることから活荷重(=100kN)と安全率(=1.2)を考慮した 72kN($=100 \times 3/5 \times 1.2$)とする。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^{n} \left[10^{(S_i \cdot S_0)/m} \right] \times n_i$$
 (4)

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

ここで、 S₀: 上限応力度 (SFRC の静的強度の 1/3 (= 0.333) とする。

4. 結果および考察

4.1 SFRCの圧縮強度および引張強度

(1) 圧縮強度

本供試体に使用した SFRC は材齢 36 時間で圧縮強度 が 33.2N/mm², 材齢 7 日が 56.6N/mm² である。よって, 本材料の要求性能である材齢 36 時間で 30.0N/mm² を満足する結果が得られた。

(2) 引張強度

鋼床版と SFRC との一体性を検証するために疲労試験 前に主げた G2 の直上 (図-1) から ϕ 100mm のコアより建研式引張試験 8 を実施した。建研式引張試験による付着強度は平均 2.59N/mm^2 であった。破壊面はコンクリート母材で破壊されている。

4.2 走行回数および等価走行回数

本実験における走行回数および等価走行回数を**表-3** に示す。

(1) 鋼床版

補強前の鋼床版の疲労実験は、荷重 50kN で 40,000 回の走行を行った。基準荷重 50kN とし、S-N 曲線の傾きの逆数 m=3 を式(2)に適用すると等価走行回数は 40,000 回走行である。なお、SFRC 補強後の鋼床版のみの等価走行回数は 1.455×10^6 回となる。

(2) 接着剤塗布型SFRC上面補強

本提案する普通セメントを用いた SFRC 上面補強後の等価走行回数は、生存確率 95%の S-N 曲線の傾きの逆数 m = 10.3 を式(4)に適用すると 146.287×10⁶ 回である。よって、鋼床版に SFRC 舗装後の等価走行回数から寿命を推定すると、本提案する補強材および補強法は、耐疲労性が十分に確保されているといえる。なお、輪荷重走行疲労実験は、荷重 50kN で 40,000 回から 150kN で 20,000 回走行後において、SFRC 上面には 0.05mm を超えるひび割れの発生や補強界面でのはく離は見られないことから、実験を終了した。一方、松井らが提案する RC床版の S-N 曲線の傾きの逆数 m = 12.7 を式(2)に適用した場合の等価走行回数は 330.98×10⁶ 回となり、水越ら

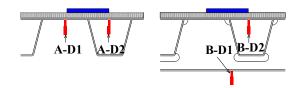


図-2 たわみ計測位置

が提案式を用いた場合の 2.26 倍となり、耐用年数を算 定すると数百年が予想される。

以上より、本提案する SFRC 材および補強法における 等価走行回数が 146.287×10⁶ 回であり、この時点では 0.2mm を超えるひび割れや界面のはく離が見られないことから、鋼床版の補強材および接着剤塗布型 SFRC 補強法は実用的であると言える。

4.3 たわみと走行時刻の関係

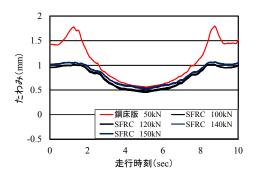
鋼床版の損傷および輪荷重走行疲労実験において変形 量が最も大きい断面 A と横リブが接合されている断面 B で計測する。ここで、たわみの計測位置を $\mathbf{Z}-\mathbf{Z}$ 、た わみと走行時刻の関係を図-3に示す。図-3に示す断面 Aのたわみと走行時刻の関係は、走行時刻 0 sce は、輪 荷重のスタート位置、すなわち図-1に示す横リブから 400mm の位置である。走行時刻 1.5sec 付近が断面 A の 計測位置を通過し, 走行時刻 5.0sec が折り返し位置で ある。また、8.5sec が計測位置となる。次に、断面Bは 2.5sec が断面 B を通過する位置で, 5.0sec が折り返し位 置となる。たわみの考察は、鋼床版について荷重 50kN で 40,000 回走行後, SFRC 上面補強後については荷重 150kN で 20,000 回走行後, すなわち等価走行回数 146.287×10⁶ 回後に、それぞれ荷重 100kN で 1 往復走行 したたわみと走行時刻の関係から考察する。また、図ー 3に示すたわみと走行時刻の関係から各計測点の補強前 後のたわみの最大値、最小値および変動範囲を表-4に 示す。

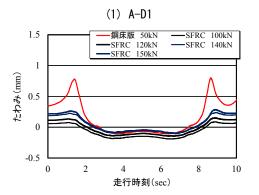
(1) 計測点A-D1

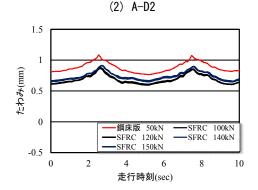
計測点 A-D1 はデッキプレート下面(図-3(1))であり、表-4より、未補強鋼床版の最大たわみと最小たわみの差すなわちたわみの変動範囲は 1.23mm である。計測点 A-D1 を通過する付近でたわみが局部的に増加していることから、荷重通過前後で局部変形が著しい。一方、SFRC 上面補強後のたわみの変動範囲は 0.52mm であり、補強前と比較するとたわみの変動範囲が 58%低減し、局部変形が抑制されている。

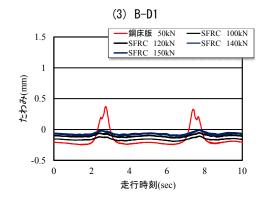
(2) 計測点A-D2

計測点 A-D2 は U リブ内のデッキプレート下面 (図-3(2)) である。表-4より、未補強の鋼床版のたわみの変動範囲は 0.91mm であり、補強前は局部変形やたわみの交番が見られる。よって、デッキプレート上面および









(4) B-D2 図-3 たわみと走行時刻の関係

表-4 各計測点のたわみの動的計測結果

	鋼床片	反:単位((mm)	SFRC: 単位 (mm)			
	最大値 最小値 変動範囲		最大値	最小値	変動範囲		
A-D1	1.80	0.57	1.23	1.06	0.54	0.52	
A-D2	0.80	-0.11	0.91	0.28	-0.10	0.38	
B-D1	1.08	0.76	0.32	0.87	0.67	0.20	
B-D2	0.36	-0.24	0.60	-0.01	-0.11	0.10	

溶接箇所には疲労き裂が発生し易いものと考えられる。 一方、SFRC 上面補強後のたわみの変動範囲は 0.38mm であり、補強前と比較するとたわみの変動範囲が 58% 低減されている。また、たわみの交番が発生するものの 局部変形が抑制され全体変形に移行する結果が得られ た。

(3) 計測点B-D1

計測点 B-D1 は床版の軸方向中央の横リブ下縁のたわみ(図-3(3))である。表-4より、未補強の鋼床版のたわみの変動範囲は 0.32mm である。一方、SFRC 上面補強後のたわみの変動範囲は 0.20mm である。この位置は A-D1 と同様に載荷輪直下であるが、接着剤塗布型 SFRC 上面補強することで曲げ剛性が高まり、たわみの変動範囲が 38%低減され、局部変形が抑制されている。

(4) 計測点B-D2

計測点 B-D2 は U リブ間のデッキプレートのたわみ (図-3(4)) である。表-4より、未補強の鋼床版のたわみの変動範囲は 0.60mm であり、SFRC 上面補強後のたわみの変動範囲は 0.10mm である。計測点 B-D2 のデッキプレートと横リブが溶接されていることから曲げ剛性が高まり、計測点 A-D2 に比較して抑制されている。たわみの変動範囲は、接着剤塗布型 SFRC 上面補強することで 83%低減されている。また、補強前のデッキプレートには正・負の交番が発生しているが、補強後は全体たわみへと移行されている。よって、疲労き裂の発生は抑制されるものと考えられる。

4.4 ひずみと走行時刻の関係

断面 A および断面 B のひずみの計測位置は図-4に示すように、断面 A は U2 リブの溶接止端部から 5mm の デッキプレート (A-S1) と U2 リブの溶接止端部から 5mm の U2 リブ (A-S2) とする。また、断面 B は U2 リブの溶接止端部から 5mm のデッキプレート (B-S1) と U2 リブと横リブの溶接止端部から 5mm の横リブ (B-S2(x, y)) とした。ここで、断面 A および断面 B のひずみと走行時刻の関係を図-5, 6に示す。なお、1 走行におけるひずみと走行時刻の関係はたわみと同様に計測を行った。また、各計測点における補強前後のひずみの最大値、最小値および変動範囲を表-5, 6に示す。

(1) 断面A

計測点 A-S1, A-S2 における等価走行回数 146.287×10^6 回後の荷重 100kN で一走行した場合のひずみの変動範囲は $\mathbf{Z} - \mathbf{Z}$ は $\mathbf{Z} - \mathbf{Z}$ ものでする。 $\mathbf{Z} - \mathbf{Z}$ また、 $\mathbf{Z} - \mathbf{Z}$ もの変動範囲を比較すると $\mathbf{Z} - \mathbf{Z}$ を $\mathbf{Z} - \mathbf{Z}$ が発生することからデッキプレートと $\mathbf{Z} - \mathbf{Z}$ リブ溶接箇所

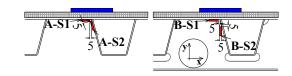
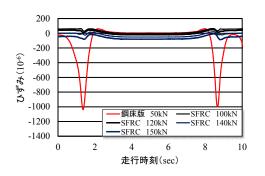
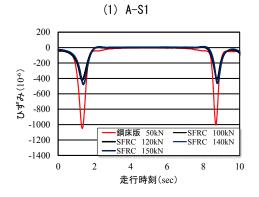


図-4 ひずみ計測位置





(2) A-S2 図-5 断面Aのひずみと走行時刻の関係

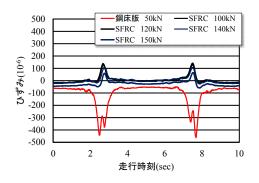
表-5 ひずみの動的計測結果(断面A)

	鋼床片	反:単位(10 ⁻⁶)	SFRC: 単位 (10 ⁻⁶)			
	最大値	最小値	変動範囲	最大値	最小値	変動範囲	
A-S1	62.0	-1,038.0	1,100.0	-7.5	-87.5	80.0	
A-S2	-4.7	-1,050.2	1,045.5	12.7	-468.6	481.3	

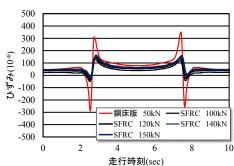
に疲労き裂が発生するとものと考えられる。しかし、接着剤塗布型 SFRC 上面補強することでひずみの増加が抑制される結果が得られた。

(2) 断面B

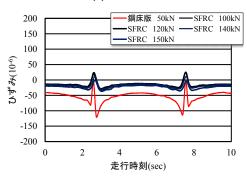
計測点 B-S1, B-S2 (x, y) のひずみの変動範囲は図 -6および表-6より、それぞれ 449.2×10°、641.5×10°、117.3×10° である。一方、SFRC 上面補強後のひずみの変動範囲はそれぞれ 116.2×10°、171.1×10°、34.6×10° であり補強前のひずみの変動範囲を比較すると、それぞれ 74%、73%、71%低減されている。補強前の鋼床版は計測点を輪荷重が通過することにより交番ひずみが発生することから、U リブと横リブとの溶接部で疲労き裂が発生し易いと考えられる。SFRC 上面補強を施すことにより交番ひずみは発生するもののひずみの変動範囲は低減



(1) B-S1



(2) B-S2x



(3) B-S2y

図-6 ひずみと走行時刻の関係 (断面B)

表-6 ひずみの動的計測結果(断面B)

1		鋼床片	<u> </u>	10 ⁻⁶)	SFRC: 単位 (10 ⁻⁶)			
		最大値	最小値	変動範囲	最大値	最小値	変動範囲	
	B-S1	-13.4	-462.6	449.2	56.9	-59.3	116.2	
	B-S2x	351.6	-289.9	641.5	163.0	-8.1	171.1	
	B-S2y	-3.5	-120.8	117.3	-1.5	-36.1	34.6	

され交番応力が抑制される結果が得られた。

5. まとめ

(1) 材齢 36 時間でコンクリートの圧縮強度が平均 33.2N/mm² と道示に規定する要求性能を満たし、建研式 引張試験の結果から鋼床版と SFRC との界面での付着強度は平均 2.59N/mm² と基準となる 1.0N/mm² 以上が確保

された。破壊はコンクリート母材で破壊されていること から終局時まで一体性が確保され、耐疲労性の向上が図 られたことから実用性がある。

(2) 本実験は乾燥状態で,等価走行回数は 146.287×10⁶ 回で終了したが,この時点で SFRC 補強部には 0.2mm を超えるひび割れや摩耗が見られないことから,超速硬セメントを用いた SFRC と同等な材料であると同時に,接着剤の効果により走行面範囲にはく離が見られないことから,鋼床版の補強材および補強法として実用的であると考えられる。

(3)接着剤塗布型 SFRC 上面補強を施すことにより断面 A と断面 B のデッキプレートのたわみの変動範囲が低減され、デッキプレートおよび U リブ、横リブひずみの変動範囲においても大幅に低減されていることから SFRC 材による補強効果が評価できる。

(4) 輪荷重が各断面の計測点を通過する際,デッキプレートでは局部変形,Uリブ内は正・負のたわみが発生し易く,デッキプレートはひずみが局部的に増加,Uリブと横リブとの溶接部付近ではひずみが交番することにより局部応力,交番応力が発生し疲労き裂が発生し易いと考えられる。しかし,接着剤塗布型 SFRC 上面補強を施すことにより局部変形,たわみの交番,局部応力,交番応力が抑制され疲労き裂の発生が大幅に減少すると考えられる。

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],2012.12
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書·同解説 I, II, 2012.3
- 3) (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研究委員会道路分科会橋梁 WG②(補修・補強):2. 橋梁補修設計マニュアル(案),2012.7
- 4) 後藤浩二:溶接継手の疲労強度,溶接学会,溶接学会誌, Vol.78, No.7, pp.45-49, 2009
- 5) 日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例 [2012年改訂版], 2012.6
- 6) 松井繁之:道路橋床版 設計・施工と維持管理,森 北出版,2007
- 7) 水越睦視,松井繁之,東山浩士,内田美生:SFRC の曲げ疲労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
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編], 表面被覆材の付着強さ試験方法(JSCE-K 531-1999), pp. 308-310, 2005