

普通セメントを用いたSFRC上面補強における鋼床版のたわみおよびひずみの低減効果に関する研究

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

鋼床版は大型自動車の過積載によりデッキプレートで負曲げによる局部変形が生じ、それに伴いデッキプレート貫通き裂や溶接ビード貫通き裂の疲労き裂などの疲労き裂が発生している¹⁾。疲労き裂の補修補強法にはストップホールやデッキプレートあて板補強が施されているが、いずれも応急補修であることから早期に再き裂の発生が懸念される。そこで、恒久的な補強法としてデッキプレート上面に高耐久型エポキシ樹脂接着剤を塗布し、鋼繊維を配合させた鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRC)上面補強が施されている。たとえば、高速道路などの重交通路線では8時間程度で解放することから、SFRCの要求性能は道路橋示方書・同解説(以下、道示)²⁾に規定するコンクリートの圧縮強度が材齢3時間で 24N/mm^2 以上を確保することとし、そのために超速硬セメントが用いられている。しかし、超速硬セメントは可使時間が30分程度と短く高度な施工技術を有するのに加え、材料単価が高価のために施工費用が高額となる。

そこで本研究では、要求性能を材齢36時間で圧縮強度 24N/mm^2 以上を確保するために普通セメントに低収縮型早強性混和材と鋼繊維を配合させたSFRCを用いた接着剤塗布型上面補強における補強効果および耐疲労性の評価を行う。実験供試体は鋼床版上面にSFRCを40mm補強し(以下、接着剤塗布型SFRC上面補強とする)を用いて輪荷重走行試験を行ない、デッキプレートおよびUリブ間のデッキプレート、Uリブ下面のたわみを動的に計測し、接着剤塗布型SFRC上面補強法におけるたわみおよびひずみの低減効果について検証した。

2. 鋼床版の疲労損傷

鋼床版のデッキプレート疲労き裂とUリブ溶接部の貫通き裂を図-1に示す。鋼床版のデッキプレートは12mm厚でUリブや横リブで補剛した構造である。そのため、大型車両の走行によりデッキプレートでは局部変形が生じ、Uリブとデッキプレートの

溶接部やUリブと横リブの交差する溶接部などで、金属疲労によるき裂が発生し、デッキ貫通き裂と溶接ビード貫通き裂に分類される。デッキ貫通き裂に対する補修方法としては厚さ12mmの鋼板を高力ボルトで接合する方法が用いられているが、き裂が再度進展する可能性も考えられる。本研究では、橋梁の長寿命化を目的とし、実橋梁をモデル化した供試体を製作し、輪荷重走行試験機を用いて輪荷重走行疲労試験を行い疲労損傷を与えた後、デッキプレート上面接着剤塗布型SFRC上面補強を施しSFRCによるたわみおよびひずみの低減効果を検証した。

3. 供試体概要

3.1 使用材料

(1)鋼材 現在、最も疲労損傷を受けている鋼床版の鋼材はSS400材であることから、本実験で鋼床版を構成する鋼材にはSS400材を用いる。鋼材の材料特性値は降伏強度 341N/mm^2 、引張強度 462N/mm^2 、ヤング係数は 200kN/mm^2 である。

(2)SFRC 高速道路などの重交通路線では8時間程度で交通解放しなくてはならないため3時間で道示に準拠する圧縮強度 24.0N/mm^2 以上を發揮する超速硬セメントを用いたSFRC上面補強が施されているが、一般国道などでは7日程度交通規制が可能であることから、超速硬セメントを必要としない。そこで、本研究では、超速硬セメントに代わり普通セメントを用い、低収縮型早強性混和材と長さ30mmの鋼繊維を1.27Vol.%を配合させた。SFRCの示方配合を表-1に示す。

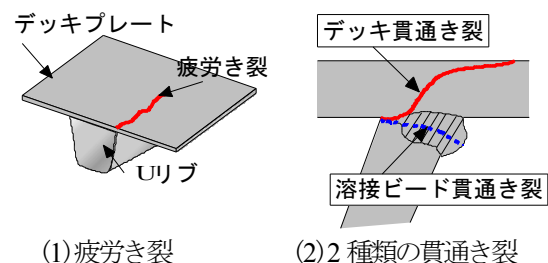


図-1 鋼床版の疲労損傷状況

Study on An Effect of Decrease of Local Deflection and Strain for SFRC Reinforcement Method with Ordinary Portland Cement on the Orthotropic Steel Deck Plate

Hiroyuki NOGUCHI, Tadashi ABE, Yutaka KAWAI, Yatsuhiko ICHINOSE, Takeshi YAMASHITA

表一 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

表一 2 高耐久型エポキシ樹脂接着剤の材料特性値

項目		実測値	試験方法
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 N/mm ²	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
コンクリート 付着強さ		3.7 N/mm ²	JIS K 6909

(3) 防錆剤および接着剤 実施工においては、鋼床版デッキプレート上面を研掃後に、直ちに SFRC を打設しない場合がある。そのため、一旦、デッキプレート全面に防錆剤を塗布し、後日、防錆剤上面に接着剤を平均1.0mm 厚で塗布する。用いた高耐久型エポキシ樹脂接着剤(以下、接着剤とする)の材料特性値を表一 2 に示す。

3.2 供試体寸法

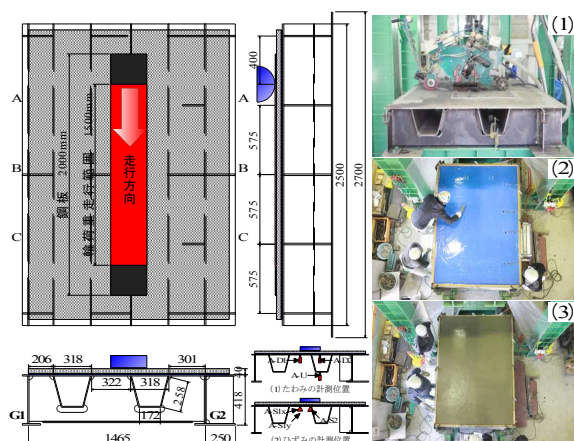
鋼床版を構成する鋼材の寸法は、デッキプレートは幅1,765mm、全長2,500mm、厚さ12mmを用いる。また、U リブは幅318mm、高さ250mm、厚さ8mmを用いる。主げたはI形断面で主げた間隔は1,465mmである。主げたG1から206mmの位置に、主げたG2から301mmの位置にU リブ端を接合した。また横リブは軸方向の鋼床版中央にI形、端部の横リブは支間中央から1,150mmに設けた。ここに、鋼床版の供試体寸法を図一 2 に示す。

3.3 接着剤塗布型SFRC上面補強手順

鋼床版の接着剤塗布型 SFRC 上面補強法は「橋梁補修設計マニュアル」⁹⁾に準拠した補強法で供試体を製作した、補強手順を図一 3 に示す。輪荷重走行試験機で40,000回走行させ疲労損傷を与えたが、疲労試験後に目視による疲労き裂は検出されなかった。デッキプレート上面に SFRC との接着性を高めるためにショットブラストによる表面研掃(1種ケレン相当)を行い(図一 3(1))、防錆剤を塗布する。養生後、接着剤を平均厚1.0mmで塗布し(図一 3(2))、直後に SFRC を混練し、厚さ40mmで打設し養生を行う(図一 3(3))。

4. 実験方法

4.1 建研式引張試験



図一 2 供試体寸法

図一 3 補強手順

鋼床版と SFRC 上面補強との界面の付着強度を確認するために、建研式引張試験を行い、補強後の付着強度を計測する。また SFRC 上面補強における付着強度の基準は1.0N/mm²以上⁹⁾が条件とされている。実験方法は SFRC 上面に電動ドリルを設置し、φ100mm で鋼床版デッキプレートの位置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。接着剤が硬化したのち、油圧式接着力試験機を用いて、載荷速度1.0N/cm²/sec で引張試験を実施する。付着試験方法における強度の算定は式(1)として与えられている。

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

4.2 輪荷重走行疲労試験および動的計測方法 輪荷重走行実験は、図一 2、4 に示すように横リブ I から400mmの位置でデッキプレート上面を軸方向1,500mmを1往復ごとに荷重を増加する段階荷重載荷とする。荷重は10kNから100kNまで10kNごとに増加させる。計測は、走行開始から走行終了までの1往復を動的に計測する。その後、鋼床版上面に荷重50kNを載荷し、4万回の輪荷重走行疲労実験を行なう。補強前輪荷重走行疲労実験終了後、40mm厚で接着剤塗布型 SFRC 上面補強を施す。補強後の輪荷重走行実験も荷重は10kNから150kNまで10kNごとに増加させる。計測は、走行開始から走行終了までの1往復を動的に計測し、鋼床版の補強前後をたわみおよびひずみの変動範囲を比較し、たわみの低減効果およびひずみの低減効果を検証する。

5. 結果および考察

5.1 SFRCの圧縮強度および引張強度

(1) SFRCの圧縮強度 本実験に用いる SFRC は材齢36時間で圧縮強度は平均33.2N/mm²を確保し、材齢7日で56.6N/mm²を確保していることから道示が規定する基準を満たしている。

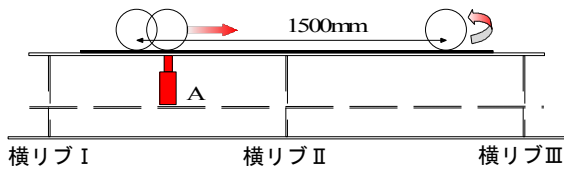


図-4 輪荷重走行範囲

(2) 建研式引張試験 A 断面の付着強度の平均は 2.59N/mm^2 である。よって、鋼床版上面に接着剤を塗布することで界面の付着強度が十分確保されている。

5.2 たわみと走行時刻の関係

鋼床版の輪荷重走行試験により著しく変形している断面 A のデッキプレートおよび U リブ下面のたわみを計測する。断面 A のたわみ計測点は載荷輪直下のデッキプレート U リブ間下(A-D1)、デッキプレート U リブ内(A-D2)、U リブ下面(A-U)とし、たわみと走行時刻の関係を図-5 に示す。時刻歴 1.1sec 付近は計測点 A を通過し、時刻歴 5.0sec 付近は横リブ III 側すなわち折り返し位置に対応する。その後、輪荷重が折り返し時刻歴 8.8sec 付近で再度計測点 A を通過し、時刻歴 10.0sec で元の位置となる。なお、鋼床版の補強前後のたわみを最小値、最大値の変動範囲を考察したたわみの低減効果について考察する。

(1) デッキプレート A-D1 A-D1 のたわみと走行時刻の関係を図-5(1)に示す。未補強鋼床版の最小たわみは 0.44mm 、最大たわみは 1.38mm であり、たわみの変動範囲は 0.94mm である。補強後の最小たわみは 0.23mm 、最大たわみは 0.72mm であり、たわみの変動範囲は 0.49mm である。補強前後を比べると最大たわみおよび変動範囲ともに SFRC により 48%低減している。A-D1 は輪荷重が走行する位置であることから変形量も大きいですが、SFRC 上面補強することにより最大たわみおよびたわみの変動範囲が大幅に低減する結果が得られた。

(2) U リブ内デッキプレート A-D2 A-D2 のたわみと走行時刻の関係を図-5(2)に示す。未補強鋼床版の最小たわみは -0.19mm 、最大たわみは 0.82mm であり、たわみの変動範囲は絶対値をとり 1.01mm である。補強後の最小たわみは -0.14mm 、最大たわみは 0.08mm であり、たわみの変動範囲は絶対値をとり 0.22mm である。補強前後を比べると最大たわみおよび変動範囲は SFRC により 90%、78%と大幅に低減している。この位置は正負のたわみが発生していることから金属疲労によるき裂が発生する可能性が高いと考えられる。しかし、SFRC 上面補強することにより正負のたわみは発生するものの変動範囲と最大たわみが大幅に低減される結果が得られた。

(3) U リブ下面 A-U A-U のたわみと走行時刻の関係を図-5(3)に示す。未補強鋼床版の最小たわみは 0.41mm 、最大たわみは 0.98mm であり、たわみの変動範囲は 0.57mm である。補強後の最小たわみは 0.26mm 、最大たわみは 0.72mm であり、たわみの変動範囲は 0.46mm である。補強前後を比較すると最大たわみおよび変動範囲は SFRC により 26%、19%低減している。補強前は A-U の最大たわみは 0.98mm 、同位置の A-D2 の最大たわみは 0.82mm と差異はあるものの大きく変形していることが確認されるが、補強後は A-U の最大たわみ 0.72mm に対して A-D2 は 0.08mm とたわみが大幅に低減し変形が抑制されている結果が得られた。

5.3 ひずみと走行時刻の関係

断面 A のひずみの計測位置は、たわみ、交番応力の発生による疲労損傷の可能性が高いと考えられる輪荷重直下および U リブの接合部付近のデッキプレートとする。計測位置はデッキプレートの載荷輪直下の橋軸直角方向(A-S1x)、橋軸方向(A-S1y)、輪荷重直下(A-S2)とし、ひずみと走行時刻の関係を図-6 に示す。鋼床版の補強前後のひずみを最小値、最大値の変動範囲を考察しひずみの低減効果について考察する。

(1) A-S1x A-S1x のひずみと走行時刻の関係を図-6(1)に示す。未補強鋼床版の最小ひずみは 6.3×10^6 、最大ひずみは 251.5×10^6 であり、ひずみの変動範囲は 245.2×10^6 である。補強後の最小ひずみは 9.9×10^6 、最大ひずみは 105.9×10^6 であり、ひずみの変動範囲は 96.0×10^6 である。補強前後を比べると最大ひずみおよび変動範囲は 62%、58%低減している。未補強鋼床版測定点 A-S1x 上を通過する際に局部応力が発生しているが、SFRC 上面補強を施すことにより局部応力は抑制され SFRC 材による低減効果が確認された。

(2) A-S1y A-S1y のひずみと走行時刻の関係を図-6(2)に示す。未補強鋼床版の最小ひずみは -94.6×10^6 、最大ひずみは 130.7×10^6 であり、ひずみの変動範囲は絶対値をとって 225.3×10^6 である。補強後の最小ひずみは -33.8×10^6 、最大ひずみは 72.5×10^6 であり、ひずみの変動範囲は 106.3×10^6 である。補強前後を比較するとひずみの変動範囲は 53%低減している。また、応力の交番が確認され交番応力による疲労裂が発生しやすいと考えられる。SFRC 上面補強を実施することにより交番応力は発生するものひずみの変動範囲が低減し SFRC 材による応力低減効果が確認された。

(3) A-S2 A-S2 のひずみと走行時刻の関係を図-6

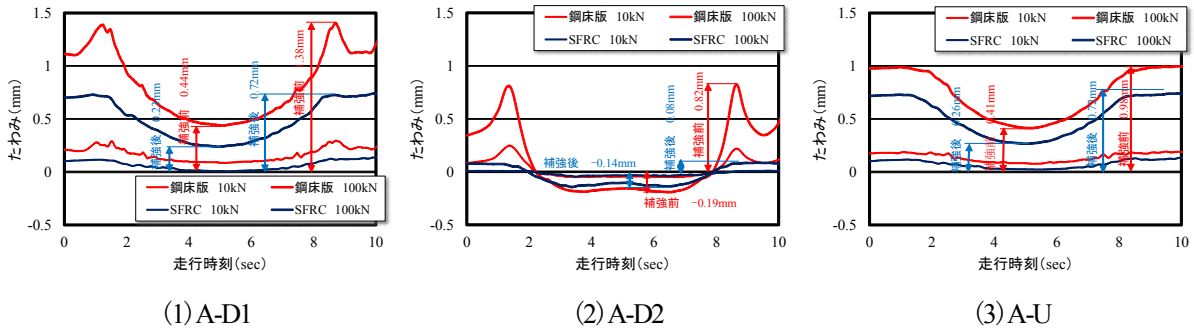


図-5 たわみと走行時刻の関係

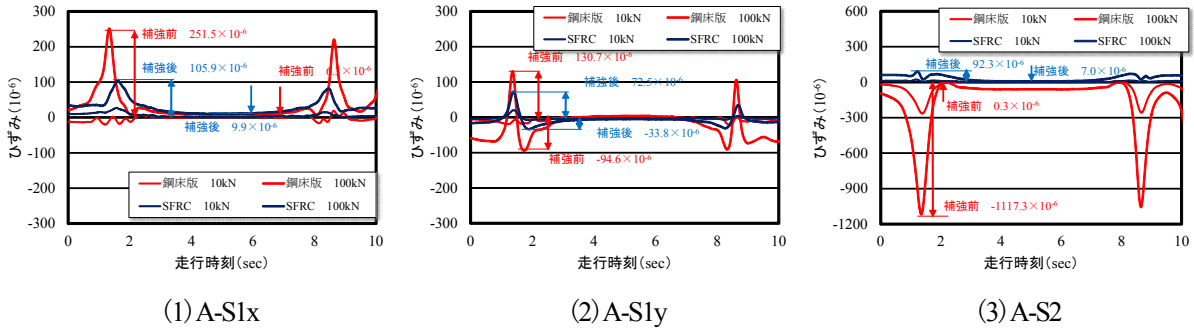


図-6 ひずみと走行時刻の関係

(3)に示す。未補強鋼床版の最小ひずみは -1117.3×10^6 、最大ひずみは 0.3×10^6 であり、ひずみの変動範囲は絶対値をとって 1117.6×10^6 である。補強後の最小ひずみは 7.0×10^6 、最大ひずみは 92.3×10^6 であり、ひずみの変動範囲は 85.3×10^6 である。補強前後を比較するとひずみの変動範囲は92%低減している。A-S2は載荷輪直下であるため未補強鋼床版のとき計測点を通過する際局所的にひずみが増加していることが確認され、局部応力の繰り返しによる貫通き裂の発生が考えられる。しかし、SFRC上面補強を実施することにより局部応力が大幅に抑制される結果が得られた。

6. まとめ

(1)本実験から、提案するSFRC材は材齢36時間で圧縮強度 33.2N/mm^2 となり道示に準拠した基準強度を有する。建研式引張試験の結果、引張強度 2.59N/mm^2 と基準の 1.0N/mm^2 以上を満たし付着力が十分に満たしていることから鋼床版の上面補強材として実用性があるといえる。

(2)未補強鋼床版と接着剤塗布型SFRC上面補強を施した供試体のたわみの変動範囲を比べると48%、72%、19%、最大たわみも48%、90%、26%抑制されている。また、同様にひずみの変動範囲を比べると58%、53%、92%と大幅に抑制されていることから提案するSFRC材によるたわみおよびひずみの低減効果が有効であることが評価出来る。

(3)輪荷重が作用した場合、Uリブ内のデッキプレー

トやUリブ間のデッキプレート、デッキプレートとUリブ溶接部付近では局部変形およびたわみの交番、局部応力、交番応力が発生していることから貫通き裂が発生し易い位置である。しかし、接着剤塗布型SFRC上面補強を施すことによりたわみ変動量およびひずみの変動量が低減されることからき裂の発生が抑制されると考えられる。

「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，(2010)
- 2)日本道路橋会：道路橋示方書・同解説I，II，III，(2002)
- 3)野口博之，阿部忠，川井豊，一瀬八洋，山下雄史：超早強SFRC上面補強法における鋼床版のたわみ低減効果に関する研究，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，I-20，pp.39-40，(2014.9)
- 4)(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)
- 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)一，共同研究報告書，第395号，(2009.10)