

メタルグリッドを用いた接着剤塗布型SFRC上面増厚補強の耐疲労性の評価

(株)新屋コンサルタント ○中島 博敬 日大生産工 阿部 忠 水口 和彦
日大生産工(院) 野口 博之 JFE シビル(株) 塩田 啓介 吉岡 泰邦

1. はじめに

現在、供用されている橋梁の多くは高度成長期に建設され 50 年以上経過し、その維持管理が重要な課題となっている¹⁾。RC 床版は疲労劣化に加え、積雪寒冷地域では、床版上面のかぶりコンクリートの土砂化などの損傷を受けている。

床版上面の損傷に対する補強対策として、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) を用いた上面増厚補強法が適用されている²⁾。また、車両の繰り返し走行によって増厚部と既設 RC 床版との界面ではなく離が生じていることから、増厚界面のはく離の発生を防止し、一体性を確保する補強法として、界面にエポキシ系樹脂接着剤を塗布した接着剤塗布型上面増厚補強法³⁾が提案され、実施工に適用されている。一方、鉄筋量が不足している RC 床版には、鉄筋を格子状に配置した鉄筋配置型 SFRC 上面増厚補強法が採用されている。しかし、鉄筋を格子状に配置することから交差部が鉄筋径の 2 倍となり SFRC の増厚層が高くなることで死荷重の増大が懸念される。鉄筋に替わる補強筋としてグリッドメタルが開発され、RC の増厚補強⁴⁾、RC 床版の下面増厚補強⁵⁾に適用され、補強効果および耐疲労性が評価されている。

そこで本研究は、RC 床版の上面増厚補強法として増厚界面に接着剤を塗布しグリッドメタルを配置した接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強を施し、輪荷重走行疲労実験を行い、補強効果および耐疲労性の評価を検証する。

2. 供試体概要

2.1 使用材料

(1) RC床版 RC 床版供試体のコンクリートには普通ポルトランドセメントと 5mm ～ 20mm の碎石、5mm 以下の砕砂を使用する。配合条件は表-1に示す。また、鉄筋には SD295A, D10 を使用する。RC 床版に使用したコンクリートの材料特性値および鉄筋の材料特性値を表-2に示す。

(2) 上面増厚補強材 上面増厚補強材に用いるコンクリートには SFRC を適用する。SFRC の要求性能は、補修・補強対策において交通規制による経済損失を考慮して 8 時間程度に交通開放できる

表-1 コンクリートの示方配合

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)
			C	W	S	G	
8.0 ±2.5	53.0	45.0	302	160	803	1019	4.0

表-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD295A D10)		
	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
38	345	447	200

表-3 SFRCの示方配合

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (C×%)
			C	W	S	G	SF	
8.0 ±2.5	39.5	51.2	430	170	851	858	100	2.0

材料とし、道路橋示方書・同解説⁶⁾ (道示) に規定されているコンクリートの設計基準強度 24N/mm²を確保できる配合とする。SFRC には 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に最大寸法 15mm の碎石、φ0.6mm、長さ 30mm の両端フック型鋼繊維を混入率 1.27Vol.% (100kg/m³) で配合した。ここで、SFRC の示方配合を表-3に示す。なお、SFRC の圧縮強度は材齢 3 時間で 26.9N/mm²である。

(3) 補強筋

1) ワイヤメッシュ 本実験では、鉄筋と同等の材料特性を有するワイヤメッシュを用い、φ 5mm、断面積 19.6mm²、格子間隔を 75mm とする。ワイヤメッシュの格子形状および寸法を図-1、材料特性値を表-4、引張剛性を表-5に示す。

2) グリッドメタル グリッドメタルは SS400 相当の縞鋼板を用い、鋼板をワイヤメッシュと同等の格子間隔となるように直接レーザで格子状に切断加工する。断面積も同等となるように板厚 4.5mm、幅 4.0mm とし、断面積 18mm² とする。ここで、格子鋼板筋の格子形状・寸法を図-1、材料特性値を表-4、引張剛性を表-5に併記する。

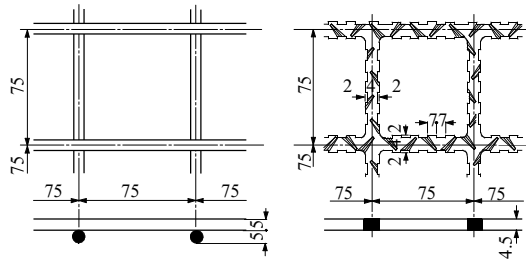
(4) 接着剤 既設 RC 床版と SFRC との一体性を確保するために高耐久型エポキシ系樹脂接着剤 (接着剤) を増厚界面に塗布する。ここで、接着剤の材料特性値を表-6に示す。

2.2 供試体寸法

(1) RC床版供試体 RC 床版供試体の寸法は、

Evaluation of Fatigue Durability of Applied Adhesive SFRC Upper Surface Thickness Reinforcement Using Grid Metal

Hiroataka NAKAJIMA, Tadashi ABE, Kazuhiko MINAKUCHI, Hiroyuki NOGUCHI,
Keisuke SHIOTA and Yasukuni YOSHIOKA



(1) ワイヤメッシュ (2) グリッドメタル

図-1 補強筋の形状および寸法

表-4 補強筋の材料特性値

補強材の種類	格子間隔 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
ワイヤメッシュ	75	—	592	200
格子鋼板筋	75	338	425	200

表-5 補強筋の引張剛性

補強材の種類	弾性係数 (kN/mm ²)	断面積 (mm ²)	本数/1m	引張剛性 (kN・mm)
ワイヤメッシュ	200	19.63	13.3	52.22
格子鋼板筋	200	18.00	13.3	47.88

表-6 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 硬化剤 青色液状	異物混入なし
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

2002 年改定の道示に基づき床版支間 2,400mm, 1 日 1 方向あたりの大型車両の計画交通量を 2,000 台と以上として設計し, その 1/2 モデルとする. したがって, 床版支間 1,200mm, 全長 1,470mm, 床版厚 130mm とする. 鉄筋は複鉄筋配置とし, 引張側鉄筋には D10 を 100mm 間隔で配置し, 有効高さは 105mm とする. また, 圧縮側鉄筋には引張側鉄筋量の 1/2 を配置する. ここで, RC 床版供試体の供試体寸法および鉄筋配置を図-2(1)に示す. なお, 供試体名称を RC-1 とする.

(2) 上面増厚補強供試体 SFRC 上面増厚補強供試体は, RC 床版の上面を 10mm 切削し, 界面から 10mm の位置に補強筋を配置する. その後, SFRC を 40mm 打設し, 床版全厚を 160mm とする. ここで, 接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強供試体供試体寸法および鉄筋配置を図-2(2)に示す. なお, ワイヤメッシュおよびグリッドメタルを配置した供試体をそれぞれ RC-W, RC-SG とする.

(3) 接着剤塗布型上面増厚補強供試体 接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強供試体は, RC 床版の上面を 10mm 切削し, 界面から 10mm の位置にグリッドメタルを配置し, 接着剤を 1.0mm 厚で塗布する. その後, SFRC を 40mm 打設し, 床版全厚を 160mm とする. ここで, 接着剤塗布型 SFRC 上面

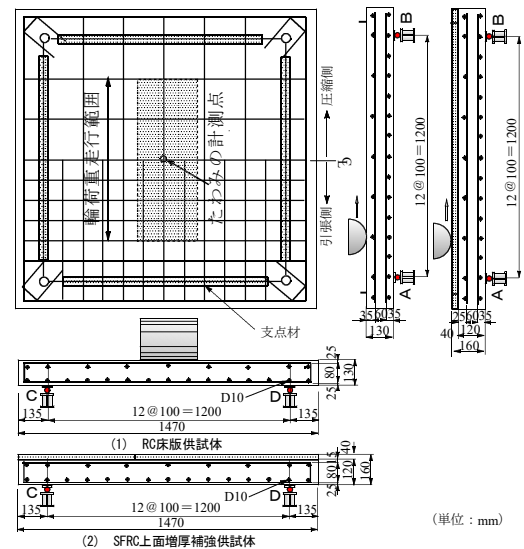


図-2 供試体寸法および鉄筋配置

増厚補強供試体供試体寸法および鉄筋配置を図-2(2)に併記する. なお, 接着剤とグリッドメタルを配置した供試体を RC-SG.A とする.

2.3 SFRC上面増厚補強法

引張補強筋を配置した従来型および接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強を施した供試体は, 上面増厚工法設計施工マニュアル²⁾に準拠し製作する.

従来の SFRC 上面増厚補強は床版上面のかぶりコンクリートを切削機を用いて 10mm 切削する. 既設 RC 床版と SFRC との一体性を高めるために切削面をショットブラスト研掃機を用いて投射密度 150kg/m² で表面処理を施す. 界面から 10mm の位置にグリッドメタルを配置する. その後, SFRC を混練し, 床版上面に 40mm 厚で打設・表面仕上げする.

次に, 接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強は従来型と同様に床版上面のかぶりコンクリートを 10mm 切削し, 切削面をショットブラスト研掃機を用いて表面処理を施す. 界面から 10mm の位置にグリッドメタルを配置し, 接着剤を 1.0mm 厚で塗布する. その後, SFRC を混練し, 床版上面に 40mm 厚で打設・表面仕上げする.

3. 実験概要

3.1 実験方法

輪荷重走行疲労実験は, RC 床版および SFRC 上面増厚補強床版ともに床版中央から ±450mm の範囲を輪荷重による繰り返し走行させる. 初期走行荷重は 80kN とし, 走行回数が 20,000 回ごとに荷重を増加させ破壊するまで行う.

3.2 等価走行回数

本実験における輪荷重走行疲労実験は, 20,000 回ごとに荷重を増加する段階荷重増荷とすることから等価走行回数を算出して耐疲労性を評価する.

表-7 等価走行回数

供試体		荷 重				等価走行 回数合計	回数比
		80 kN	100 kN	120 kN	140 kN		
RC-1	実験走行回数	20,000	15,800			11,150,778	—
	等価走行回数	772,239	10,378,539				
RC-W	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	8,950	568,810,074	51.0
	等価走行回数	772,239	13,137,391	133,079,433	421,821,011		
RC-SG	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	8,300	538,175,028	48.3
	等価走行回数	772,239	13,137,391	133,079,433	391,185,966		
RC-SG.A	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	19,100	1,047,188,092	93.9
	等価走行回数	772,239	13,137,391	133,079,433	900,199,030		

等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(1)で与えられる。なお、式(1)における基準荷重 P は設計活荷重の 1/2 に安全率 1.2 を考慮した 60kN として等価走行回数を算出する。また、式(1)における S-N 曲線の傾きの逆数 m は、松井ら⁷⁾の提案による S-N 曲式の傾きの逆数は $m = 12.7$ を適用する。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i / P_0)^m \times n_i \quad (1)$$

ここで、 N_{eq} ：等価走行回数（回）、 P_i ：載荷荷重（kN）、 P_0 ：基準荷重（=60kN）、 n_i ：実験走行回数（回）、 m ：S-N 曲線式の傾きの逆数（=12.7）

4. 実験結果および考察

4.1 等価走行回数

本実験における等価走行回数を表-7に示す。

(1) RC床版供試体 RC 床版供試体 RC-1 の等価走行回数は 11.15×10^6 回であり、供試体 RC-1 の等価走行回数を基準に耐疲労性を検証する。

(2) 上面増厚補強供試体 増厚界面にワイヤーメッシュおよびグリッドメタルを配置した供試体 RC-W、供試体 RC-SG の等価走行回数はそれぞれ 568.81×10^6 回、 538.17×10^6 であり、供試体 RC-1 と比較して 51.0 倍、48.3 倍の等価走行回数を得られている。また、ワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W の等価走行回数と比較し、グリッドメタルを配置した供試体 RC-SG の等価走行回数は 94% と低下しているが、これは引張剛性の差によりものと考えられる。

(3) 接着剤塗布型上面増厚補強供試体 グリッドメタルと接着剤を併用した供試体 RC-SG.A の等価走行回数は 1047.18×10^6 回であり、供試体 RC-1 と比較して 93.9 倍の等価走行回数を得られている。また、界面に接着剤を塗布することにより等価走行回数が 1.94 倍に向上する結果となった。

以上より、メタルグリッドを配置した SFRC 上面増厚補強はワイヤーメッシュを配置した SFRC 上面増厚補強と同等の等価走行回数を得られたことから耐疲労性が評価できる。また、接着剤を併用することにより一体性が向上し、耐疲労性の向上に寄与する。

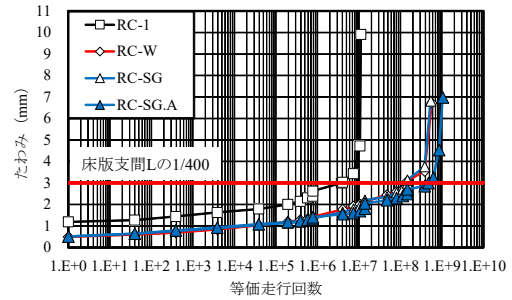


図-3 たわみと等価走行回数の関係

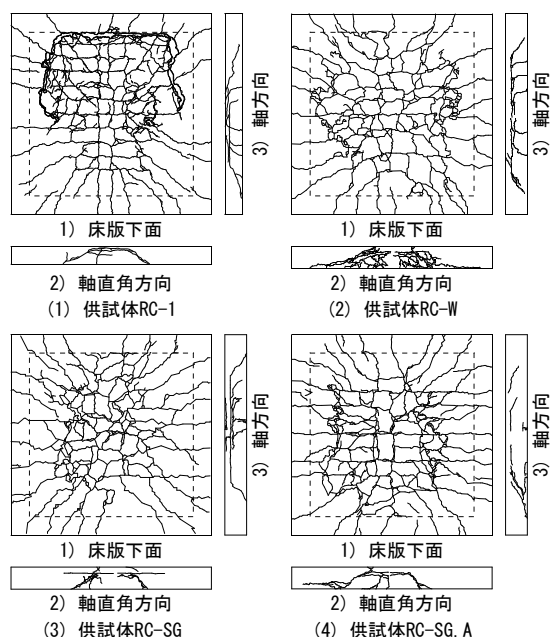
4.2 たわみと等価走行回数の関係

本実験におけるたわみと等価走行回数の関係を図-3に示す。

(1) RC床版供試体 供試体 RC-1 は初期荷重載荷時のたわみが 1.19mm である。輪荷重の繰り返し走行によりたわみが線形的に増加し、床版支間 L の 1/400 を超えた付近からたわみが急激に増加し、その後輪荷重の走行により破壊に至っている。阿部ら³⁾はたわみが床版支間 L の 1/400 も達した付近で補強対策を施す必要があると提案している。そこで本研究では、床版支間 L の 1/400 すなわちたわみが 3mm に達した時の等価走行回数を補完法で算出し、補強効果を検証する。RC 床版供試体のたわみ 3mm に達した時点の等価走行回数は 3.80×10^6 回である。

(2) 上面増厚補強供試体 増厚層内にワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W の初期たわみは 0.49mm であり、輪荷重の繰り返し走行に伴いたわみが線形的に増加している。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 147.02×10^6 回であり、供試体 RC-1 と比較して 38.6 倍の補強効果が得られている。その後、3.5mm を超えた付近からたわみが急激に増加し、輪荷重の走行により破壊に至っている。次に、増厚層内にグリッドメタルを配置した供試体 RC-SG の初期たわみは 0.52mm であり、輪荷重の繰り返し走行に伴いたわみが線形的に増加している。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 147.01×10^6 回であり、供試体 RC-1 と比較して 38.6 倍の補強効果が得られている。その後、3.5mm を超えた付近からたわみが急激に増加し、輪荷重の走行により破壊に至っている。

(3) 接着剤塗布型上面増厚補強供試体 接着剤



図－4 破壊状況

を併用した供試体 RC-SG.A の初期たわみは 0.44mm であり、輪荷重の繰り返し走行に伴いたわみが線形的に増加している。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 473.00×10^6 回であり、供試体 RC-1 と比較して 124.5 倍の補強効果が得られている。また、接着剤を塗布することにより一体性が確保され、供試体 RC-SG と比較して 3.22 倍の補強効果が得られ、耐疲労性の向上が評価される。その後、3.5mm を超えた付近からたわみが急激に増加し、輪荷重の走行により破壊に至っている。

以上より、増厚層内に補強筋を配置することにより曲げ剛性が向上し、たわみの増加が抑制され耐疲労性が向上する結果となった。また、接着剤を併用することで既設 RC 床版との一体性が確保され耐疲労性の向上に寄与すると考えられる。

4.3 破壊状況

本実験における破壊状況を図－4に示す。

(1) RC床版供試体 供試体 RC-1 の床版下面の破壊状況は輪荷重の繰り返し走行により橋軸方向および橋軸直角方向の引張鉄筋に沿って 2 方向ひび割れが生じ、格子状を形成している。破壊は押抜きせん断破壊であり、ダウエル効果が及ぼす範囲でかぶりコンクリートのはく離が確認される。

(2) 上面増厚補強供試体 増厚層内にワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W および増厚層内にグリッドメタルを配置した供試体 RC-SG の床版下面はともに供試体 RC-1 と同様に 2 方向ひび割れが発生し、格子状を形成している。また、ダウエル効果が及ぼす範囲でかぶりコンクリートのはく離が確認される。次に、切断面の破壊状況は押抜きせん断破壊に伴うせん断ひび割れが発生し、広

範囲で増厚界面ではなく離が見られる。破壊は輪荷重走行中の押抜きせん断破壊である。

(3) 接着剤塗布型上面増厚補強供試体 接着剤を併用した供試体 RC-SG.A の床版下面は供試体 RC-1 と同様に 2 方向ひび割れが発生し、格子状を形成している。破壊は輪荷重走行中の押抜きせん断破壊である。次に、切断面の破壊状況は押抜きせん断破壊に伴い増厚界面ではなく離が見られる。

以上より、増厚界面に接着剤を塗布すること終局時まで離が抑制され一体性が確保され、耐疲労性が大幅に向上する結果となった。

5. まとめ

(1) 等価走行回数より、グリッドメタルを配置した上面増厚補強はワイヤーメッシュを配置した上面増厚補強と同等の等価走行回数を得られていることから耐疲労性が評価される。また、接着剤を塗布することで等価走行回数が 1.94 倍となり耐疲労性が向上する結果となった。

(2) たわみと等価走行回数の関係より、増厚層内に補強筋を配置することで曲げ剛性が向上し、たわみの増加を抑制され耐疲労性が向上する結果となった。また、接着剤とグリッドメタルを併用することにより付着性が十分に確保されたたわみの増加が抑制されている。

(3) 破壊状況より、等価走行回数が異なるものの床版下面の破壊状況はほぼ同一であり、押抜きせん断破壊に至った。また、界面に接着剤を塗布することによりはく離が抑制され、耐疲労性が大幅に向上する結果となった。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ 27 道路橋床版の維持管理マニュアル 2016, 2016.11
- 2) (社)高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル, 1995.
- 3) 阿部忠ほか：輪荷重走行疲労実験における RC 床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法，構造工学論文集，Vol. 56A, pp.1270-1281, 2010.3
- 4) 阿部忠ほか：2 タイプの鋼板格子筋を用いた RC はりの PCM 増厚補強における補強効果の検証，セメント・コンクリート論文集，No.69, No.1, pp.634-641, 2016.3
- 5) 水口和彦ほか：鋼板格子筋を用いた下面増厚補強 RC 床版における耐疲労性の評価，構造工学論文集，Vol.62A, pp.1250-1260, 2016.03
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III, 2002.
- 7) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.