

継手部を有する鋼板格子筋を用いた RC 床版の SFRC 上面増厚補強法における耐疲労性の評価

日大生産工(院) ○中島博敬 日大生産工(非常勤) 阿部忠
JFE シンビル(株) 塩田啓介 吉岡泰邦 有菌和樹

1. はじめに

道路橋 RC 床版は、大型車両の繰り返し走行による疲労劣化が生じるとともに、積雪寒冷地域では、凍結防止剤の散布による塩害および冬期間に凍害による床版上面コンクリートの土砂化や鉄筋の腐食によって断面欠損が生じるなど、疲労損傷を受ける RC 床版に比して劣化の進行が顕著となっている¹⁾。損傷を受けた RC 床版に対しては、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 上面増厚補強法が実施されている²⁾。鉄筋の断面欠損が生じている床版に対しては補強材として、施工の合理化や省力化が図れる鋼板格子筋が開発され、RC 構造物の増厚補強法の補強筋として有用性が評価されている³⁾⁴⁾。一方、実施工においては補強筋の応力伝達を確保するために継手構造が必要となるが継手部は構造の弱点となりやすい。また、増厚層内に補強筋の継手構造を設けた補強法に関する評価は、検証例が少なく行われていないのが現状である。

そこで本研究では、SFRC 上面増厚補強内に継手部を有する鋼板格子筋を配置した供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を評価する。

2. 供試体概要

2.1 使用材料

(1) RC床版 RC 床版のコンクリートには、普通セメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ~ 20mm の砕石を使用した。また、鉄筋は SD295A, D10 を使用した。ここで、RC 床版に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-1に示す。RC 床版は 2 回に分けて製作したことから、実験時におけるコンクリートの圧縮強度は 35.0N/mm²、38.2N/mm² となった。

(2) 上面増厚補強材 上面増厚補強材には交通規制による経済損失を考慮して 3 時間でコンクリートの圧縮強度 24N/mm² 以上を確保できる配合条件とした。配合条件は、超速硬セメントと最大寸法 15mm の粗骨材およびφ 0.6mm、長さ 30mm の両端フック型の鋼繊維を混入量 1.27vol.%(100kg/m³)で配合した。ここで、SFRC の配合条件を表-2に示す。SFRC の圧縮強度は 3 時間で 26.9N/mm² であり、実験時の圧縮強度は 52N/mm² である。

(3) 鋼板格子筋 鋼板格子筋には展張格子筋と格子鋼板筋の 2 種類が製作されている。本実験供試体には展張格子筋を用いる。展張格子筋には材質 SS400 相当の厚さ 4.5mm の縞鋼板または一般鋼板を用い、格子間寸法を 75×75mm、幅 4.0mm となるようにレーザでスリットを挿

表-1 RC床版の材料特性値

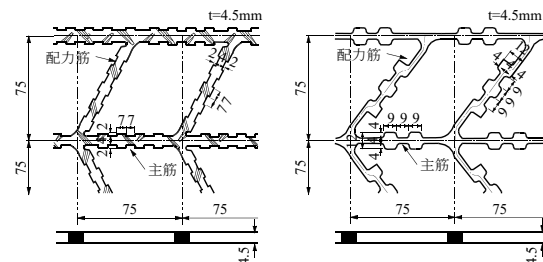
供試体	コンクリートの 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD295A,D10)		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
RC35	35.0	345	447	200
RC38	38.2	345	447	200

表-2 SFRCの配合条件

スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)					S.P (%)
			W	C	S	G	SF	
8.0±2.5	39.5	51.2	170	430	851	858	100	2.0

表-3 鋼板格子筋の材料特性値

補強材の種類	断面寸法 (mm)	格子 間隔 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
鋼板格子筋A	4.5×4.0	75	327	430	200
鋼板格子筋B	4.5×4.0	75	294	468	200



(1) 鋼板格子筋A

(2) 鋼板格子筋B

図-1 展張格子筋の寸法および形状

入し、展張加工を施す。ここで、鋼板格子筋の材料特性値を表-3、展張格子筋の寸法を図-1に示す。展張格子筋には突起を設けて付着力を高める構造とし、2 種類の突起形状を用いた。展張格子筋 A は図-1(1)に示すように 2mm の突起を 7mm ごとに設けた突起形状である。展張格子筋 B は図-1(2)に示すように付着性を確保するために 4.0mm の突起を 9mm 間隔で 2 カ所設けた。

(4) 付着用接着剤 従来の SFRC 上面増厚補強法は、供用後車両の繰り返し走行によって早期に界面ではなく離が生じ、再補修が施された事例がある。そこで、阿部ら²⁾は切削・研掃後、付着性を高めるためにエポキシ系接着剤を塗布して SFRC 上面増厚補強する接着剤塗布型上面増厚補強法を提案し、耐疲労性の向上が確認されている。本実験では、SFRC と RC 床版の一体性を高めるために高耐久型エポキシ樹脂系接着剤 (付着用接着剤) を用いる。ここで、付着用接着剤の材料特性値を表-4に示す。

2.2 供試体寸法

(1) RC床版供試体 供試体は道路橋示方書・同解説(道

Evaluation of Fatigue Durability by SFRC Upper Surface Thickness Increasing Method of RC Slab Using Metal Grid within Joint Structure

Hiroataka NAKAJIMA, Tadashi ABE, Keisuke SHIOTA, Yasukuni YOSHIOKA and Kazuki ARIZONO

表-4 付着用接着剤の材料特性値

項目	測定値	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 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 以上	JIS K 6850
コンクリート 付着強さ	3.7 N/mm ² または母材破壊	JIS K 6909

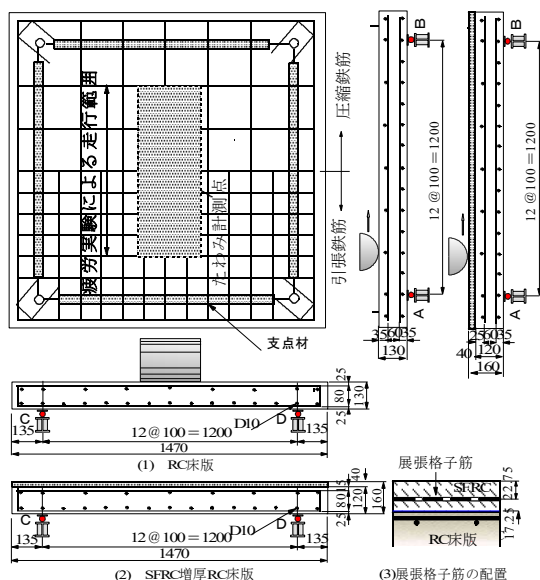


図-2 供試体寸法および鉄筋配置

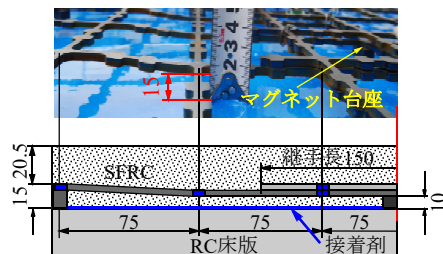


図-3 継手構造および寸法

示) IP³⁾の規定に準拠し、1/2 モデルとした。したがって、支間長 1,200mm、全長 1,470mm、床版厚 130mm である。鉄筋は引張側の軸直角方向および軸方向に D10 を 100mm 間隔で配置し、有効高さをそれぞれ 105mm、95mm とする。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。ここで、供試体寸法を図-2(1)に示す。なお、コンクリートの圧縮強度が 35N/mm² の供試体を RC35、圧縮強度 38.2N/mm² の供試体を RC38 とする。

(2) SFRC上面増厚補強したRC床版供試体 増厚層内に鋼板格子筋を配置し SFRC 上面増厚補強を施した供試体は、RC 床版上面を 10mm 切削および研掃し、既設床版から 15mm の位置に鋼板格子筋を配置して SFRC を 40mm 打設した床版厚 160mm の正方形版とする。なお、床版支間および全長は基準となる RC 床版供試体と同様とする。ここで、増厚層内に鋼板格子筋を配置し SFRC

上面増厚補強を施した RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置を図-2(2)、上面増厚に関する寸法を図-2(3)に示す。

2.3 増厚層内に補強筋を配置したSFRC上面増厚補強手順

増厚層内に鋼板格子筋を配置した SFRC 上面増厚補強の施工手順は上面増厚工法設計施工マニュアル⁶⁾に準拠して製作する。

(1) SFRC上面増厚補強 SFRC 上面増厚補強は、RC 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。切削後、既設 RC 床版と SFRC の付着性能の向上させるために、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。その後、鋼板格子筋 A を配置して SFRC を 40mm で増厚補強し、表面仕上げを施して養生する。ここで、鋼板格子筋 A を用いた供試体を RC38-EG と称する。

(2) 接着剤塗布型SFRC上面増厚補強 鋼板格子筋 A または鋼板格子筋 B を増厚層内に配置した接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強は SFRC 上面増厚補強と同様に既設 RC 床版上面を切削・研掃後、RC 床版上面に付着用接着剤をリシガンや刷毛を用いて平均 1.0mm 厚で塗布する。接着剤塗布後直ちに 15mm のマグネット台座を鋼板格子筋に接着および床版上面に配置する。なお、鋼板格子筋 B は軸方向床版支間中央で重ね継手構造とする。ここで、継手部の構造を図-3に示す。図-3に示すように継手部は折り曲げ加工が施された鋼板格子筋 B を既設床版から 10mm の位置に配置し、その上に継手長 150mm で鋼板格子筋 B を配置した重ね継手とする。接着剤塗布および鋼板格子筋配置後直ちに SFRC を 40mm 増厚補強し、表面仕上げを施す。ここで、鋼板格子筋 A を用いた供試体を RC38-EG.A、鋼板格子筋 B を用いた供試体を RC35-EGw.A とする。

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 RC 床版供試体および SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体ともに床版の支間中央から ±450mm の範囲で輪荷重を繰り返し走行させる。実験方法は、初期荷重を 80kN として 20,000 回ごとに荷重を 20kN ずつ増加させる段階荷重載荷とし、破壊あるいは走行不能に至るまで走行させる。

3.2 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験による等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(1)で与えられる。なお、本実験はモデル化した供試体であることから式(1)における基準荷重 P_0 は 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 曲線の傾きの逆数の絶対値 m には松井ら⁷⁾が提案する S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 $m=12.7$ 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、 P_i : 載荷荷重 (kN)、 P_0

：基準荷重（=60kN）， n_i ：実験走行回数， m ：S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値（=12.7）

4. 実験結果

4.1 等価走行回数

本実験における等価走行回数を表-5に示す。

(1) RC床版供試体 供試体 RC35 および RC38 の等価走行回数はそれぞれ 8.52×10^6 回， 11.15×10^6 回であり，圧縮強度が 3N/mm^2 異なることで 1.3 倍の等価走行回数が得られている。上面増厚補強を施した供試体の耐疲労性の評価は圧縮強度が同一である供試体の等価走行回数を基準に評価する。

(2) 鋼板格子筋Aを配置した供試体 供試体 RC38-EG および RC38-EG.A の等価走行回数はそれぞれ 561.74×10^6 回， $1,023.622 \times 10^6$ 回となり，供試体 RC38 と比して等価走行回数が 50.4 倍，93.9 倍に向上する結果となった。また，付着用接着剤の塗布により一体性が高まり，接着剤を塗布していない供試体 RC38-EG の等価走行回数と比較してそれぞれ 1.82 倍に向上する結果となった。

(3) 鋼板格子筋Bを配置した供試体 供試体 RC35-EGw.A の等価走行回数は 688.993×10^6 回となり，供試体 RC35 と比較して等価走行回数が 80.8 倍に向上する結果となった。しかし，圧縮強度が異なる供試体 RC38-EG.A と比較して等価走行回数が低下している。これは，既設 RC 床版の圧縮強度が 3N/mm^2 異なるため既設 RC 床版の耐久性に差異が生じたためと考えられる。

以上より，荷重条件が最も過酷な床版支間中央に補強筋の継手構造を設けた上面増厚補強法は大幅な等価走行回数の向上が確認されることから継手部構造は弱点とならず耐疲労性が評価できる。

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-4に示す。阿部らは RC 床版における輪荷重走行疲労実験の結果からたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した付近を補強策を講じる必要があると提案している。本研究では，たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した際の等価走行回数を補間法より算出し，補強効果を検証する。

(1) RC床版供試体 供試体 RC35 および RC38 の初期たわみはそれぞれ 0.97mm ， 1.19mm であり，輪荷重の繰り返し走行および荷重増加によってたわみが増加している。たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の等価走行回数はそれぞれ 2.77×10^6 回， 3.80×10^6 回である。その後，走行によりたわみが急激に増加し破壊に至った。

(2) 鋼板格子筋Aを配置した供試体 供試体 RC38-EG および RC38-EG.A の初期たわみはそれぞれ 0.44mm ， 0.44mm であり，輪荷重の繰り返し走行によりたわみが増加している。たわみ 3mm に達した時点の等価走行回数はそれぞれ 147.01×10^6 回， 447.00×10^6 回であり，供試体 RC38 と比較して 38.59 倍，117.6 倍の補強効果が得られた。また，供試体 RC38-EG と比較して 2.97 倍の補強効果が得られ，接着剤の効果により一体性が確保され耐疲

表-5 等価走行回数

供試体	等価走行回数	走行回数比
RC35	8,523,300	
RC38	11,150,778	
RC38-EG	561,740,448	50.4
RC38-EG.A	1,023,622,673	91.8
RC35-EGw.A	688,993,714	80.8

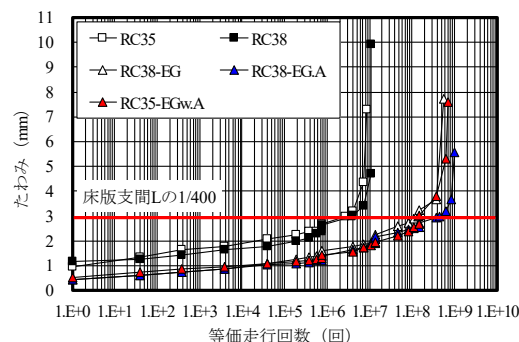


図-4 たわみと等価走行回数の関係

労性の向上が図られる。その後，たわみが 3.5mm を超えた付近からたわみの増加が大きくなり，輪荷重の走行による破壊に至っている。

(3) 鋼板格子筋Bを配置した供試体 供試体 RC35-EGw.A の初期たわみは 0.53mm であり，供試体 RC38-EG.A と同様の増加傾向を示している。たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の等価走行回数は 147.03×10^6 回であり，供試体 RC35 と比較して 53.1 倍の補強効果が得られた。その後，たわみが 3.5mm を超えた付近から大幅に増加し，破壊に至った。

以上より，増厚層内に鋼板格子筋を配置した接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強法は曲げ剛性が向上することでたわみの増加が大幅に抑制され，維持管理の目安となる床版支間 L の $1/400$ に達した際の等価走行回数が向上していることから十分な補強効果を有する補強法である。

4.3 鉄筋ひずみと等価走行回数の関係

本実験における主鉄筋のひずみと等価走行回数の関係を図-5に示す。なお，主鉄筋の降伏ひずみは表-1に示す材料特性値より 1725×10^{-6} とする。降伏ひずみに達した際の等価走行回数を補間法より算出し評価する。

(1) RC床版供試体 供試体 RC35 および RC38 の主鉄筋の初期ひずみはそれぞれ 297×10^{-6} ， 357×10^{-6} であり，輪荷重の繰り返しおよび荷重増加に伴いひずみは増加している。降伏ひずみに達した際の等価走行回数はそれぞれ 5.88×10^6 回， 8.90×10^6 回である。その後，両供試体ともに床版支間 L の $1/400$ を超えた付近からひずみの増加が著しくなり破壊に至った。

(2) 鋼板格子筋Aを配置した供試体 供試体 RC38-EG および RC38-EG.A の主鉄筋の初期ひずみはそれぞれ 257×10^{-6} ， 159×10^{-6} であり，輪荷重の繰り返し走行および荷重の増加に伴いひずみが増加している。降伏ひずみに達した際の等価走行回数はそれぞれ 90.9×10^6 回， 726.00

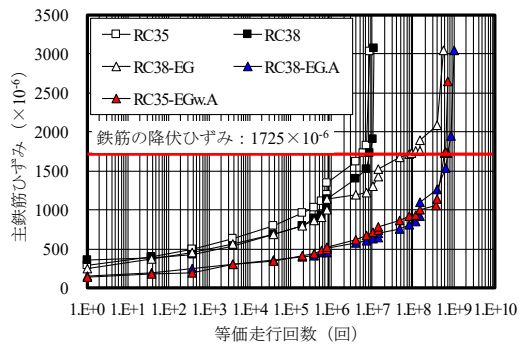


図-5 主鉄筋ひずみと等価走行回数の関係

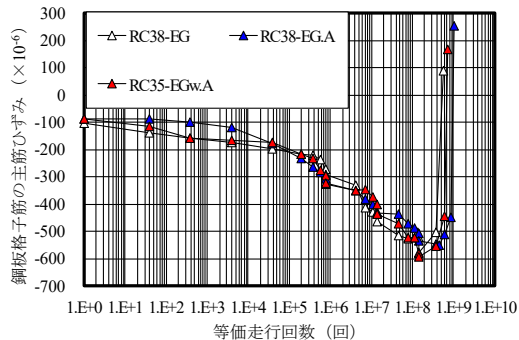


図-6 鋼板格子筋ひずみと等価走行回数の関係

×10⁶ 回であり、供試体 RC38 と比較して 10.2 倍、81.6 倍の補強効果が得られた。

(3) 鋼板格子筋Bを配置した供試体 供試体 RC35-EGw.A の初期ひずみは 144×10⁻⁶ であり、供試体 RC38-EGA と同様に輪荷重の繰り返し走行および荷重の増加によりひずみが増加している。降伏ひずみに達した時点の等価走行回数は 598.00×10⁶ 回であり、供試体 RC35 と比較して 101.70 倍の補強効果が得られた。

以上より、鋼板格子筋と接着剤を併用した SFRC 上面増厚補強法は降伏ひずみに達する等価走行回数が大幅に増大していることから、十分な補強効果が得られる。また、鋼板格子筋の重ね継手を用いた補強法においてもひずみの増加が抑制されている。

4.4 鋼板格子筋ひずみと等価走行回数の関係

本実験における主鉄筋のひずみと等価走行回数の関係を図-6に示す。

(1) 鋼板格子筋Aを配置した供試体 供試体 RC38-EG および RC38-EGA の鋼板格子筋 A の初期ひずみはそれぞれ -102×10⁻⁶、-97×10⁻⁶ であり、輪荷重の繰り返し走行と荷重の増加によりひずみは圧縮領域に増加している。その後、等価走行回数 147.036×10⁶ 回、447.000×10⁶ 回でひずみが -579×10⁻⁶、-549×10⁻⁶ に達し、主鉄筋ひずみが降伏に至った付近からひずみが引張領域に増加していき、鋼板格子筋 A のひずみが 0×10⁻⁶ に達したい時点の等価走行回数はそれぞれ 434.000×10⁶ 回、958.500×10⁶ 回である。

(2) 鋼板格子筋Bを配置した供試体 供試体 RC35-EGw.A の初期ひずみは -87×10⁻⁶ であり、輪荷重の繰

り返し走行および荷重の増加に伴いひずみが圧縮領域に増加し、等価走行回数 147.036×10⁶ 回で圧縮ひずみの最大に達した。その後、主鉄筋ひずみが降伏に至ってから引張領域に著しく増加し、鋼板格子筋 B のひずみが 0×10⁻⁶ に達したい時点の等価走行回数は 693.100×10⁶ 回である。

以上より、圧縮域に配置された鋼板格子筋のひずみは荷重増加および輪荷重走行が繰り返すことで、圧縮領域に増加するものの主鉄筋のひずみが降伏する付近から圧縮ひずみが引張ひずみへと移行し、ひずみが 0×10⁻⁶ に達した付近から増厚界面ではなく離が進行されたものと考えられる。

5. まとめ

- (1) 鋼板格子筋と接着剤を併用した SFRC 上面増厚補強法は界面での一体性が向上し、等価走行回数が大幅に向上することから RC 床版の耐疲労性の向上を図れる工法として有用である。床版支間中央付近に補強筋継手構造を設けた上面増厚補強法は全面に補強筋を配置した工法と比較して等価走行回数が低下するものの十分な等価走行回数の向上が確認され、耐疲労性が評価できる。
- (2) たわみと等価走行回数の関係より、増厚層内に鋼板格子筋を配置した SFRC 上面増厚補強法は曲げ剛性の向上によりたわみの増加が抑制される結果となった。また、維持管理の目安である床版支間 L の 1/400 に達した等価走行回数より十分な補強効果を有している。
- (3) ひずみと等価走行回数の関係より、鋼板格子筋を配置した SFRC 上面増厚補強法はたわみが 3.5mm を超えた付近から主鉄筋ひずみが著しく増加している。鋼板格子筋のひずみにおいては圧縮領域に配置していることから圧縮ひずみが増加するものの主鉄筋が降伏ひずみを超えた付近から引張領域にひずみの増加が移行する。圧縮領域から引張領域に移行していることから増厚界面ではなく離の発生が推察される。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル，2012.6
- 2) 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
- 3) 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，Vol.69，No.1，pp.634-641，2016.3
- 4) 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.1250-1260，2016.3
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，1994
- 6) (財)高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル，1995.11
- 7) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007