

接着剤併用 CFRP 格子筋による SFRC 上面増厚 RC 床版の力学特性

日大生産工(院) ○根本 大 日本大学 阿部 忠 日本大学 木田哲量
鹿島道路(株) 児玉孝喜 新日鉄マテリアルズ(株) 小森篤也

1. はじめに

道路橋 RC 床版の補修・補強法の一つに鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を用いた上面増厚補強法がある¹⁾。SFRC 上面増厚補強法は 1985 年頃に採用された工法であり、耐荷力や耐疲労性についてはあまり評価されていないのが現状である。そこで本研究では、RC 床版の上面増厚工法の耐久性を向上させるために、RC 床版上面に SFRC 増厚補強した供試体を用いて走行疲労実験を行い耐疲労性を評価した。また、本実験より得られた等価走行回数にたわみによる劣化係数、材料の劣化係数を考慮した補強等価走行回数を得て、S-N 曲線を示し、耐疲労性を評価した。

2. 使用材料・供試体寸法および補強方法

(1)使用材料 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寸法 5mm 以下の砕砂および 5mm～20mm の砕石を使用した。その圧縮強度は 35N/mm^2 である。また、鉄筋は SD295A、D10 を使用した。その降伏強度、引張強度、ヤング係数はそれぞれ 370N/mm^2 、 511N/mm^2 、 200kN/mm^2 である。増厚部の SFRC には、超速硬セメントと寸法 5mm 以下の砕砂および 5mm～15mm の砕石および長さ 30mm の鋼繊維を混入量 100kg/m^3 で配合した。本供試体に用いた SFRC の圧縮強度は、上面増厚後の養生 3 時間で 26.9N/mm^2 である。また、SFRC と RC 床版部との界面の付着力を高めるために高耐久型エポキシ樹脂接着剤を使用した。さらに、ひび割れ後の剛性保持のために炭素繊維強化プラスチック(CFRP)格子筋を SFRC 増厚層に配置した。

(2)供試体寸法および鉄筋の配置 供試体寸法は、道路橋示方書・同解説(道示)³⁾の規定により、1 日 1 方向あたりの大型車両の計画交通量を 2000 台以上として設計し、その 1/2 モデルとした。RC 床版・上面増厚 RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置を図-1 に示す。上面増厚補強 RC 床版供試体は、厚さ 130mm の RC 床版上面を 10mm 切削し、その上に SFRC を 40mm 増厚し、床版全厚は 160mm を目標とした。

(3)上面増厚 RC 床版供試体の施工法 上面増厚 RC

床版の施工手順は、①コンクリート表面を実施工に用いる切削機で 10mm 切削する、②ショットブラスト研掃機を用いて表面を仕上げする、③SFRC を 40mm 増厚し、表面仕上げをする、である。また、上面増厚補強の場合は、大型車両の走行による疲労のために増厚面がはく離するなどの再損傷が生じている²⁾。そこで本研究では、RC 床版部と増厚界面に接着剤を塗布した。さらに、ひび割れ抑制および耐荷力性を維持する剛性を保持させるために SFRC 増厚内に CFRP 格子筋を配置した。ここで、RC 床版供試体を RC-1、2、従来通り増厚した供試体を RC.S-1、接着剤を塗布し増厚した供試体を RC.S-A1、接着剤と CFRP 格子筋を併用して増厚した供試体を RC.S-CA1 と称する。

3. 実験方法および等価走行回数

(1)輪荷重による走行疲労実験 走行疲労実験は、RC 床版および上面増厚 RC 床版ともに床版中央から $\pm 450\text{mm}$ の範囲に輪荷重(幅 250mm)を繰り返し走行させる実験である。荷重は、RC 床版は初期荷重 60kN から、上面増厚 RC 床版は 80kN から 120kN までは 2 万回走行ごとに 20kN ずつ増加させ、120kN

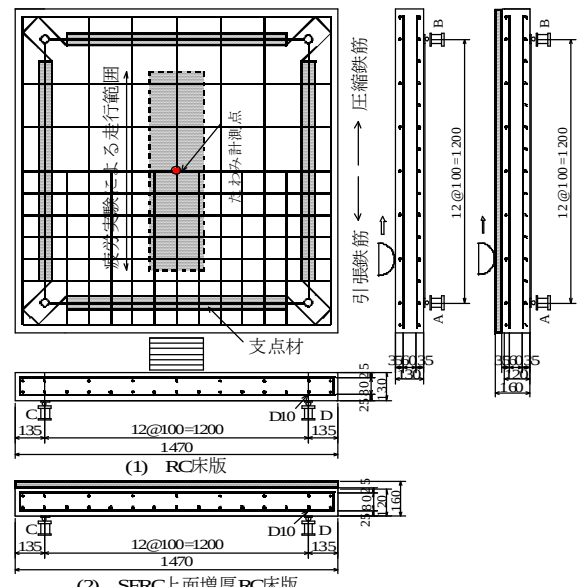


図-1 RC 床版・上面増厚 RC 床版供試体寸法および鉄筋配置

Mechanical Property of RC Slabs with SFRC Concrete Overlay by using Adhesive with CFRP Grid

by Dai NEMOTO,

Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA, Takayoshi KODAMA and Atsuya KOMORI

以降は2万回走行ごとに10kNずつ増加した。

(2)等価走行回数 本実験における走行疲労実験は、荷重を段階状載荷としたことから等価走行回数を算出して耐疲労性を評価する。等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(1)として与えられる。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とする。本研究はSFRC上面増厚補強法の耐疲労性の検証であることから、RC床版のS-N曲線を基準とする。したがって、S-N曲線の傾きの逆数 m には松井らが提案するS-N曲線の傾きの逆数12.7を適用する²⁾。

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

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

4. 実験結果および考察

(1)等価走行回数 式(1)より算出した本実験におけるRC床版、上面増厚RC床版の等価走行回数を表-1示す。RC床版供試体RC-1、2の平均等価走行回数は 7.15×10^6 回であり、従来型のSFRC上面増厚供試体RC.S-1の等価走行回数は 73.97×10^6 回である。また、接着剤を塗布して増厚した供試体RC.S-A1の等価走行回数は 261.28×10^6 回であり、接着剤とCFRP格子筋を併用して増厚した供試体RC.S-CA1の等価走行回数は 333.11×10^6 回である。

(2)たわみと等価走行回数 RC床版供試体および上面増厚RC床版供試体のたわみと等価走行回数の関係を図-2に示す。

1)RC床版 本実験におけるRC床版のたわみは3.0mmを超えた付近から急激に増加しており、供試体RC-1、2の破壊時のたわみは、それぞれ7.9mm、6.8mmである。

2)上面増厚供試体 上面増厚供試体RC.S-1は、たわみが3.0mm、すなわちRC床版の設計支間 L の1/400を超えた付近から増加が著しくなり、その後の走行と荷重増加により破壊に至っており、破壊時のたわみは6.7mmである。また、接着剤を塗布して増厚した供試体RC.S-A1および接着剤とCFRP格子筋を併用して増厚した供試体RC.S-CA1は、供試体RC.S-1に比して合成効果が向上し、たわみ3.5mm付近、すなわち床版の設計支間 L の1/350付近までは急激な増加はみられない。破壊時のたわみは、それぞれ6.2mm、5.9mmである。

5. 健全度評価におけるたわみと等価走行回数

(1)劣化たわみによる性能低下曲線(D-N曲線)

1)性能低下を示す劣化たわみ 性能低下を示す劣化たわみ(δ_D)は、各走行回数ごとに計測した実験た

表-1 等価走行回数

供試体	等価走行回数	平均等価走行回数	走行回数比
RC-1	6,963,265	7,155,596	—
RC-2	7,347,928		
RC.S-1	73,976,114	—	10.3
RC.S-A1	261,284,849	—	36.5
RC.S-CA1	333,112,545	—	46.6

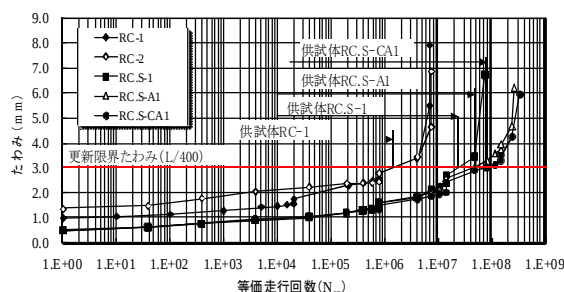


図-2 たわみと等価走行回数の関係

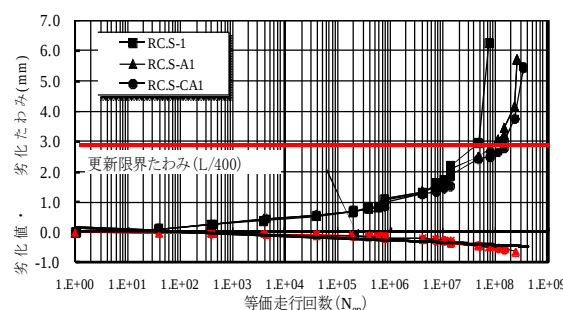


図-3 たわみによる劣化値と等価走行回数の関係

わみ(δ_i)から、本実験における初期荷重のたわみ(δ_0)を除いたたわみ($=\delta_i - \delta_0$)を最大たわみ(δ_{max})で除して無次元化した値を劣化値($D_{\delta i}$)とし、この劣化値と等価走行回数の関係から対数近似によるD-N曲線式を評価する。なお、たわみによる健全度評価は、各上面増厚補強法における再補修・補強時期を想定するためである。なお、たわみが床版支間 L の1/400までとする。よって、各走行回数ごとのたわみによる劣化値($D_{\delta i}$)は、式(2)として与えられる。

$$D_{\delta i} = (\delta_i - \delta_0) / \delta_{max} \quad (2)$$

ここで、 $D_{\delta i}$: 等価走行回数ごとのたわみによる劣化値、 δ_{Di} : 劣化たわみ(mm)、 δ_0 : 基準たわみ(=0.0mm)、 δ_{max} : 最大たわみ(mm)

2)D-N曲線 本実験におけるたわみによる劣化値($D_{\delta i}$)と等価走行回数の関係を図-3に示す。図-3より、上面増厚補強法におけるD-N曲線 D_0 は各上面増厚補強法ごとに等価走行回数が異なることからS-N曲線の傾きが異なる。この傾きに補強係数を考慮する。また、RC床版を補強した場合の耐荷力は、一般的に1.1~1.3倍向上している。そこで、各SFRC上面増厚補強法における補強係数は $D_1=1.1$ を適用する。よって、D-N曲線式より得られた各等価走行回数ごとの劣化係数は式(3.1)~(3.3)として与えられる。

1) 上面増厚補強法

$$D_{Di} = -0.0234 L_n N_{epi} + 1.10 \quad (3.1)$$

2) 接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強

$$D_{Di} = -0.0311 L_n N_{epi} + 1.10 \quad (3.2)$$

3) 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強

$$D_{Di} = -0.0315 L_n N_{epi} + 1.10 \quad (3.3)$$

ここで、 N_{epi} ：等価走行回数(回)(式(1))、 L_n ：自然対数(=log_e)

3) コンクリートの劣化係数および使用鉄筋による補正係数： D_c 本実験は、乾燥状態で行ったが、実橋は雨水の影響を受けることがあることから湿潤時を考慮したコンクリートの劣化状態を考慮する必要がある。既往の研究^{4,5)}によると、雨水の影響によるコンクリートの圧縮強度の低下は 30%程度とされていることから、湿潤時におけるコンクリートの劣化係数を $D_c=0.70$ とする。また、本供試体は現行示方書(平成 8 年以降)に基づいて設計した RC 床版であることから、旧示方書(昭和 39 年)の設計基準と現行示方書の設計基準に対する補正係数が必要となる。現行示方書では、鉄筋に異形棒鋼(SD)を使用し、旧示方書では丸鋼(SR)を使用するとされている。そこで、旧示方書の鉄筋と現行示方書の鉄筋の降伏強度が異なることから降伏強度比を鉄筋の補正係数 D_s とする。

4) D-N 曲線を適用した等価走行回数 疲労劣化を受けた RC 床版上面を増厚した場合の劣化係数を適用した等価走行回数は、式(4)として与えられる。

$$N_{D0\cdot ep} = \sum_{i=1}^n (N_{epi} \cdot D_{Di} \cdot D_c \cdot D_s) \quad (4)$$

ここで、 $N_{D0\cdot ep}$ ：SFRC 上面増厚補強法 RC 床版の等価走行回数(回)、 N_{epi} ：等価走行回数(回)(式(1))、 D_{Di} ：SFRC 上面増厚補強法における劣化係数、 D_c ：湿潤時におけるコンクリート劣化係数(=0.70)、 D_s ：使用鉄筋係数(= $f_{yd\cdot SR}/f_{yd\cdot SD}$)、 $f_{yd\cdot SR}$ ：丸鋼の降伏強度、 $f_{yd\cdot SD}$ ：異形棒鋼の降伏強度

(2) D-N 曲線・劣化条件を適用した等価走行回数

昭和 39 年代の設計基準により設計された RC 床版に上面増厚補強した場合のたわみによる D-N 曲線を適用した式による劣化係数、湿潤時の影響によるコンクリートの劣化係数および鉄筋に対する補正係数を適用した等価走行回数を式(4)より算出した結果を表-2 に示す。

1) 上面増厚補強 本提案の再補修・補強時期の床版たわみが床版支間 L の 1/400 とした場合、道示に規定する大型車両の 1 日 1 方向あたりの計画交通量を 2000 台とすると、上面増厚補強の場合は 36.7 年となった。これに対して、本提案の式(4)より算出し

表-2 劣化係数を適用した等価走行回数

供試体	平均等価走行回数	劣化係数を適用	
		等価走行回数	走行回数比
RC-1	7,155,596	—	—
RC-2			
RC.S-1	—	27,213,281	3.8
RC.S-A1	—	72,448,749	10.1
RC.S-CA1	—	88,950,512	12.4

た等価走行回数 $N_{D0\cdot ep}$ から疲労寿命を推定とすると 13.5 年となった。なお、昭和 48 年以降の道示の基準で設計された床版には異形棒鋼が使用されているので鉄筋の降伏強度 $f_{yd\cdot SD}$ は 295N/mm^2 であるとする、使用鉄筋係数は丸鋼の 1.255(= $f_{yd\cdot SD}/f_{yd\cdot SR}$)倍となり、17 年となる。

2) 接着剤を塗布した上面増厚供試体 接着剤を塗布した上面増厚補強法の場合は、本提案の補強後のたわみが床版支間 L の 1/400 に達した場合の等価走行回数 N_{D0} から算出した耐用年数は 72.9 年となった。これに対して、等価走行回数 $N_{D0\cdot ep}$ (式(4))から算出すると 26.7 年となった。また、昭和 48 年以降の道示の基準で設計された床版の場合は 33.5 年となる。

3) 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した上面増厚供試体 接着剤と CFRP 格子筋を併用した上面増厚補強法の場合は、補強後のたわみが床版支間 L の 1/400 に達した場合の等価走行回数から算出した耐用年数は 108.9 年となった。これに対して、等価走行回数 $N_{D0\cdot ep}$ (式(4))から算出すると 35.9 年となった。また、昭和 48 年以降の道示の基準で設計された床版の場合の耐用年数は 45 年となる。

6. RC 床版および上面増厚 RC 床版の耐疲労性

(1) RC 床版の S-N 線図 RC 床版に関する耐疲労性能評価方法には、S-N 曲線が用いられている。RC 床版は、輪荷重の走行により貫通ひび割れとなり、はり状化となる。そこで松井らは、はり状化した場合の押抜きせん断耐荷力 P_{SX} 評価式を提案し、走行疲労実験における最大作用荷重 P をはり状化した押抜きせん断耐力 P_{SX} で除して無次元化した S を縦軸としている²⁾。ここで、松井らが提案するはり状化した RC 床版の S-N 曲線は式(5)として与えられている。

$$\log(P/P_{SX}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (5)$$

$$P_{SX} = 2B(\tau_{\max} \cdot X_m + \sigma_{\max} \cdot C_m) \quad (6)$$

$$B = b + 2d_i$$

$$\tau_{\max} = 0.252fc - 0.00251fc^2 \quad (6.1)$$

$$\sigma_{\max} = 0.269fc^{2/3} \quad (6.2)$$

ここで、 N ：繰返し回数(回)、 B ：はりの幅(mm)、 a ：輪荷重の軸直角方向の辺長(mm)、 b ：輪荷重の軸方向の辺長(mm)、 X_m ：主鉄筋方向の中立軸の位

置(mm)、 C_m ：引張主鉄筋のかぶり(mm)、 d_d ：配力筋の有効高さ(mm)、 $\tau_{\max}$ ：コンクリートのせん断強度(N/mm^2)⁶⁾、 $\sigma_{\max}$ ：コンクリートの引張強度(N/mm^2)⁷⁾ f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

式(6)における輪荷重の軸直角方向の辺長 a は、輪荷重幅 250mm とし、破壊時における軸方向の辺長 b は 50mm である。RC 床版の場合の配力筋の有効高さ d_d は 95mm、引張主鉄筋のかぶり C_m は 25mm である。また、上面増厚補強 RC 床版供試体の全床版厚は 160mm である。したがって、RC 床版の場合の配力筋の有効高さ d_d は 125mm、引張主鉄筋のかぶり C_m は 25mm である。コンクリートのせん断強度 $\tau_{\max}$ およびコンクリートの引張強度 $\sigma_{\max}$ は、式(6.1)、(6.2)より算出した。よって、はり幅を考慮した RC 床版の押抜きせん断耐荷力は、供試体 RC-1 の場合が 117.0kN、供試体 RC-2 の場合は 120.4kN となる。また、上面増厚補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} は 154.0kN となった。

(2) RC 床版、上面増厚 RC 床版の S-N 曲線 本研究における RC 床版供試体および上面増厚 RC 床版供試体の S-N の関係を図-4 に示す。

1) RC 床版 RC 床版の場合は、図-4 に示すように、縦軸の $S(=P/P_{sx})$ は 0.513 となり、横軸の N は表-1 に示す等価走行回数 N_{eq} であるので、旧示方書を対象とした松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線を上回っている。これは、本供試体は現行示方書に基づいて設計した RC 床版供試体であり、また、本実験は乾燥状態で行ったためである。

2) 上面増厚供試体 上面増厚した RC 床版の S-N 曲線式における縦軸 $S(=P/P_{sx})$ は 0.389 である。この S 値と各劣化値を適用して算出した等価走行回数 $N_{D,eq}$ の関係から耐疲労性を評価すると、従来型の SFRC 上面増厚 RC 床版は松井らが提案する S-N 曲線式の線上にプロットされている。したがって、劣化した RC 床版に上面増厚補強をした場合は RC 床版と同等に評価できる。また、接着剤を塗布した上面増厚 RC 床版および接着剤と CFRP 格子筋を併用した上面増厚 RC 床版は松井式の値を上回っている。よって、増厚界面に接着剤を塗布、あるいは、接着剤と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強法は RC 床版の S-N 曲線の走行回数を大幅に上回ることから耐疲労性は高いと評価された。

7. まとめ

1) 走行疲労実験におけるたわみと等価走行回数の関係によると、再補修・補強時期の目安となるたわみが床版支間 L の $1/400$ 付近までとした場合のたわみによる劣化値と等価走行回数の関係から D-N 曲線式を提案し、D-N 曲線式から得た劣化係数および

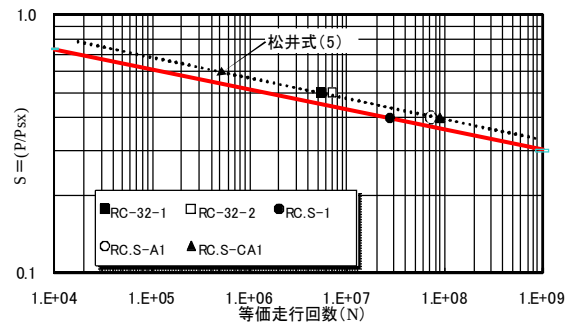


図-4 RC 床版および SFRC 上面増厚 RC 床版供試体の S-N 曲線

雨水の影響による材料の劣化係数を適用することで、実橋 RC 床版と同様に上面増厚補強した RC 床版の耐疲労性が評価される。

2) 上面増厚補強した RC 床版の走行疲労実験における等価走行回数に本提案の D-N 曲線による劣化係数および湿潤時のコンクリート劣化係数および使用鉄筋の違いによる補正係数を適用した等価走行回数は、RC 床版の等価走行回数に比して昭和 39 年代の設計基準を適用した場合は、従来型の上面増厚補強の等価走行回数は 2.9 倍から 5.2 倍となり、実橋の RC 床版を上面増厚補強した RC 床版の寿命年数とほぼ同等となった。

3) 輪荷重の繰り返し走行により、増厚界面が早期にはく離することから、増厚界面に接着剤を塗布および接着剤と CFRP 格子筋を配置して上面増厚した。その結果、接着剤を塗布することで 8.7 倍から 12.7 倍、接着剤と CFRP 格子筋を併用することで、12.2 倍から 15.2 倍の耐疲労性が得られた。

4) 従来型の上面増厚 RC 床版は松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線上に、接着剤を塗布および接着剤と CFRP 格子筋を配置して上面増厚 RC 床版は松井式を上回ったことから、耐疲労性が評価された。

参考文献：

- 1) (社)高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル、(1995)。
- 2) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理、森北出版、(2007)。
- 3) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 I、II、III、(2004)。
- 4) Raithby, K.D. and Galloway, J.W. : Effects of moisture condition, age, and rate of loading on fatigue of plain concrete." ACI publication SP 41-2, 15-34. (1974)。
- 5) RILEM Committee 36-RDL : Long term random dynamic loading of concrete structures, Materials and Structures, 17(9), RILEM, 1-28. (1984)。
- 6) 伊東茂富：コンクリート工学、森北出版、p. 75. (1972)。
- 7) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法、コンクリートセミナー4、共立出版、pp. 17-18. (1979)