

RC 床版上面増厚補強法の疲労耐久性評価に関する研究

日大生産工(PD)○高野真希子 日大生産工 阿部 忠 日大生産工 木田哲量
日鉄コンポジット(株)小森篤也 日鉄コンポジット(株)小林 朗

1 はじめに

高速道路橋の落橋が橋梁の耐荷力劣化問題として大きく報道されるなど、高度経済成長期に建設された橋梁の多くが架設後 50 年を経過し、老朽化による更新時期を迎えている。これを受け、国土交通省は、橋梁長寿命化修繕計画策定事業により、従来の対処療法的な修繕及び架替えから、予防的な修繕及び長寿命化修繕計画に基づく架替えへ政策転換を図っている。これに基づき、地方公共団体は、地域の道路網の安全性・信頼性を確保することを目的に、支間 15m 以上の橋梁を対象に劣化調査を実施した。その結果、50%近くの橋梁で補修・補強対策が必要となっている。とくに、RC 床版は劣化が著しく、経年劣化した RC 床版の長寿命化を図るための補修・補強法および維持管理手法の構築が急務となっている。そこで本研究は、RC 床版の補修・補強方法の 1 つである SFRC 上面増厚工法を施した RC 床版を用いて、SFRC 上面増厚工法の耐疲労性を評価し、橋梁の維持管理における長寿命化対策の一助とすることを目的とした。

2 実橋における床版の損傷事例

実橋における床版の損傷事例を写真 1 に示す。写真 1(1)は、積雪寒冷地域の RC 床版であり、塩害と凍害を受けたことにより上面にスケーリングや砂利化が生じ、鉄筋が露出している。この床版の RC 床版とアスファルト舗装との界面には、雨水の浸入に対する予防保全がなされていない。写真 1(2)は、大型車両の重荷重を直接受けた疲労劣化によるひび割れである。写真 1(3)は、約 46 年間供用されたトラス橋の RC 床版である。この RC 床版は、架設 23 年後に SFRC 上面増厚補強を施しているが、RC 床版と増厚部の界面にはく離が生じるなどの損傷がみられる。以上のように、RC 床版の劣化は年々増加しており、早期に補修・補強対策を行う必要があり、道路橋床版の長寿命化を図るための補修・補強法の確立は急務となっている。

3 供試体の作製

3.1 供試体寸法および鉄筋配置

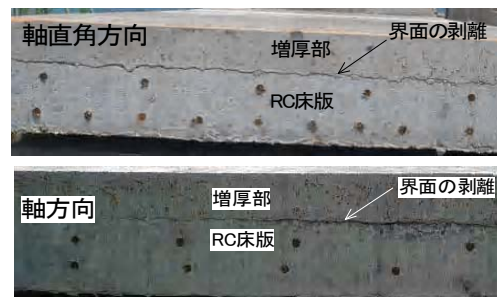
RC 床版供試体は、浮き上がり防止を設けない 4



(1) 表面のスケーリング



(2) 下面ひび割れ



(3) 増厚界面のはく離

写真 1 実橋損傷事例

辺単純支持とする。供試体寸法は、道路橋示方書・同解説¹⁾(以下、道示)の規定より、床版支間 2400mm、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・増厚 RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置を図 1 に示す。

3.2 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最大寸法 20mm の粗骨材を使用し、その圧縮強度は 35N/mm^2 である。鉄筋は SD295A、D10 を使用し、その降伏強度 370N/mm^2 、引張強度 511N/mm^2 である。SFRC のセメントには、超速硬セメントを使用し、最大寸法 15mm の粗骨材、長さ 30mm の鋼繊維を混入率 1.27Vol.% (100kg/m^3) で配合した。材齢 3 時間後の圧縮強度は 26.9N/mm^2 であり、設計基準強度を満たしている。また、既存の RC 床版と増厚部の界面は早期にはく離する事例があること踏まえ、SFRC 増厚層界面に高耐久型エポキシ樹脂系接着剤を塗布して付着力を高めた。さらに、高性能連続強化繊維を樹脂に含浸させ一体形成した軽量・薄型な炭素繊維強

Fatigue Resistance Evaluation on RC Slab Overlaid with the SFRC Determined by

Makiko TAKANO, Tetsukazu KIDA, Tadashi ABE,
Atsuya KOMORI and Akira KOBAYASHI

化プラスチック（CFRP）格子筋を SFRC 増厚層に配置してひび割れの抑制効果を高めた。CFRP 格子筋の寸法を図 1 に併記した。

3.3 SFRC 上面増厚供試体の作製

SFRC 上面増厚工法は、既設 RC 床版と SFRC 増厚部を一体化させて曲げ耐力の向上を図るものである²⁾。しかし、従来の増厚工法では、既存 RC 床版部と増厚部との界面が早期にはく離し、床版構造としての一体性が失われ、早いもので 10 年程度で再補修および補強を必要とする事例もある^{3), 4)}。したがって、既存 RC 床版と増厚部の界面のはく離防止および疲労耐久性の確保のために、本研究では、増厚界面に接着剤の塗布および CFRP 格子筋を配置する。SFRC 上面増厚施工法は、初めに、コンクリート表面を 10mm 切削する。次に、付着性を高めるために、ショットブラスト研掃機により投射密度 150kg/m² で研掃して表面を仕上げる。その後、直接に全面増厚する供試体には SFRC を直接 40mm 増厚する。接着剤を塗布する供試体には接着剤を 1cm 厚で塗布後、SFRC を増厚する。CFRP 格子筋を配置する供試体には接着剤を塗布した 10mm 上縁に CFRP 格子筋を配置し、SFRC を増厚する。また、交通規制上、車線ごとに増厚する実施工を考慮して打継目を設けた供試体は、3 時間後に残り片側を同様な手順で施工する。SFRC のセメントには超速硬セメントを使用していることから、材齢 3 時間で設計圧縮強度を得られる特長がある。SFRC 上面増供試体を図 1 に併記した。ここで、SFRC を全面に直接増厚した供試体を SFRC-1、打継目を設けた供試体を SFRC-2、RC 床版と SFRC 上面増厚界面に接着剤を塗布し全面増

厚した供試体を SFRC-A1、打継目を設けた供試体を SFRC-A2、RC 床版と SFRC 上面増厚界面に接着剤および CFRP 格子筋を併用して全面増厚した供試体を SFRC-AC1、SFRC-AC2 と称する。

4 走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、RC 床版および SFRC 上面増厚補強 RC 床版ともに床版中央から両支点方向に 450mm の範囲で輪荷重を繰返し走行させる実験である。荷重は、2 万回走行ごとに 20kN、100kN 以降は 10kN ずつ増加させる。基準荷重は、実橋床版の 1/2 モデルとしたことから、設計活荷重 50kN に安全率 1.2 を考慮した 60kN となる。

4.1 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

輪荷重走行疲労実験では、階段状荷重漸増載荷としたことから、等価走行回数を算出して疲労耐久性を評価する。等価走行回数はマイナー則⁵⁾に従い、式(1)で与える。現状においては、補強後は健全な状態に回復したとみなして健全な RC 床版と同等な耐疲労性を有しているとして取り扱われていることから、補強された RC 床版の耐疲労性の評価は、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線⁶⁾の傾きの逆数を適用する。

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

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 ：RC 床版の S-N 曲線の傾きの逆数(=12.7)

5 実験結果および考察

5.1 等価走行回数

式(1)より算出した等価走行回数を表 1 に示す。RC 床版と比較すると、増厚したことにより等価走行回数が増加している。とくに、接着剤と CFRP 格子筋を併用した上面増厚 RC 床版供試体 SFRC-AC1 の等価走行回数は、RC 床版 RC-1,2 の 47 倍、接着剤のみを用いた上面増厚 RC 床版供試体 SFRC-A1 の 4.5 倍となり、等価走行回数が増加している。これは、接着剤による合成效果と CFRP 格子筋によるひび割れ抑制および応力分担効果により、耐疲労性が向上したものである。したがって、接着剤と CFRP 格子筋を併用することにより等価走行回数が増加し、耐疲労性に優れていることが検証された。

5.2 たわみと等価走行回数の関係

RC 床版供試体中央におけるたわみと等価走行回数の関係を図 2 に示す。RC 床版供試体 RC-1, 2 は、ともに等価走行回数の増加に伴ってたわみもわずかに増加し、3mm (≒ L/400, L：床版支間)を超えた附近からたわみが急激に増加している。

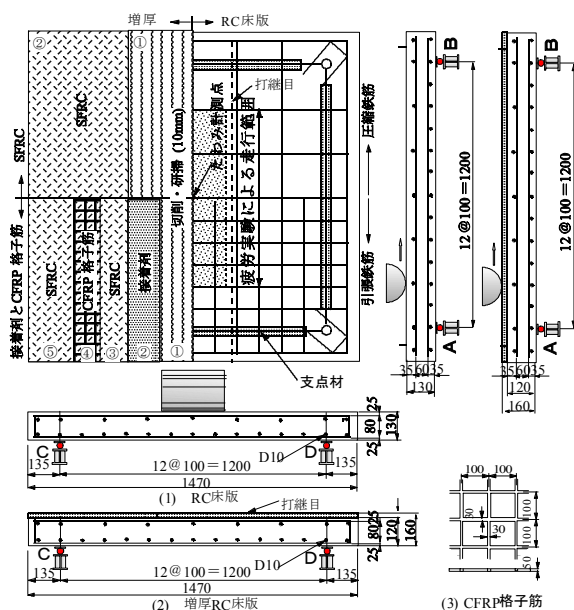


図 1 供試体寸法および鉄筋配置

SFRC を床版上面に直接増厚した供試体 SFRC-1 は、RC 床版同様にたわみが $L/400$ を超えた付近から増加が著しくなり、等価走行回数 47.100×10^7 回を超えた後、急激にたわみが増加した。供試体 SFRC-2 は、たわみが $L/400$ を超えた後も、等価走行回数 14.700×10^6 回まで線形的に増加し、その後の荷重増加で急激にたわみが増加し、破壊に至っている。接着剤を塗布後に増厚した供試体 SFRC-A1 は、等価走行回数が 4.710×10^6 回を超えてもたわみの増加は微小であり、等価走行回数 23.710×10^7 回後であるたわみが 3.5mm ($\cong L/350$) を超えた付近から急激にたわみが増加した。打継目を設けた供試体 SFRC-A2 は、等価走行回数が 14.700×10^6 回付近までは供試体 SFRC-A1 とほぼ同様な挙動を示すが、等価走行回数が 330×10^6 回で、たわみが $L/350$ を超えると急激にたわみが増加した。接着剤と CFRP 格子筋を併用した供試体 SFRC-AC1 は、供試体 SFRC-A1 とほぼ同様な挙動を示している。打継目を設けた供試体 SFRC-AC2 も SFRC-A2 とほぼ同様な挙動となるが、供試体 SFRC-A2 は終局後もたわみが増加した。SFRC 上面増厚 RC 床版供試体に比して、接着剤と CFRP 格子筋を併用した RC 床版供試体である供試体 SFRC-AC1、供試体 SFRC-AC2 とともに等価走行回数の増加においても急激なたわみの増加も見られない。なお、接着剤を塗布した供試体に比して、接着剤と CFRP 格子筋を併用した供試体は、本実験において限界値であると仮定したたわみ値 $L/400$ を超えた後のたわみの抑制が顕著となった。したがって、接着剤と CFRP 格子筋を上面増厚に併用することでたわみの増加が抑制され、等価走行回数も向上していることが検証された。なお、たわみが $L/400$ 付近においては鉄筋は降伏しておらず弾性限度内であることから、補修時期はたわみが $L/400$ に達した頃が妥当であると考えられる。

5.3 RC床版およびCFS補強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、はりが並べられた状態、すなわちはり状化となる。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、輪荷重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荷力 P_{sx} で除して無次元化した S を縦軸としている⁶⁾。ここで、松井らが提案するはり状化した RC 床版の S-N 曲線を図 8 として示し、RC 床版の S-N 曲線式は式(2)として与えられている。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (2)$$

表 1 等価走行回数

供試体	等価走行回数 (回)	平均等価走行回数 (回)	走行回数比
RC-1	6.963×10^6	7.155×10^6	—
RC-2	7.347×10^6		
SFRC-1	73.976×10^6	73.976×10^6	10.3
SFRC-2	200.472×10^6	200.472×10^6	28.0
SFRC-A1	261.284×10^6	261.284×10^6	36.5
SFRC-A2	416.047×10^6	416.047×10^6	58.1
SFRC-AC1	333.112×10^6	333.112×10^6	46.6
SFRC-AC2	501.703×10^6	501.703×10^6	70.1

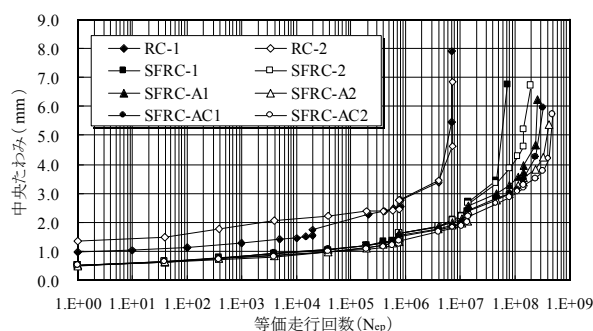


図 2 たわみと等価走行回数の関係

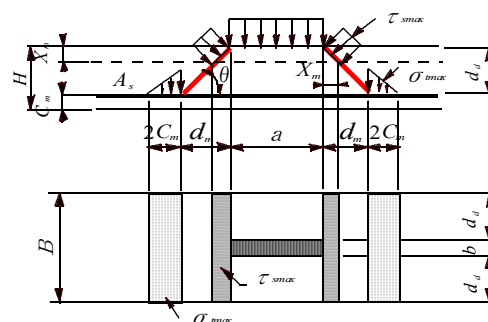


図 3 RC床版のはり幅を考慮した押抜きせん断力学モデル

ここに、 P : 基準荷重、 P_{sx} : はり幅 B の押抜きせん断耐力、 N : 繰返し回数

(2) RC床版の押抜きせん断耐荷力

松井らは、はり幅を考慮した押し抜きせん断力学モデルを図 3 のように提案し、押し抜きせん断耐荷力式を式(3)として与えている⁷⁾。この押し抜きせん断耐荷力式は、大阪大学のクランク式鉄輪の実験結果に基づく実験式であり、輪荷重走行によって発生する主鉄筋の貫通ひび割れによって形成されるはり状化された幅 B のせん断耐荷力を算定する式としている。なお、はり幅 B は載荷ブロック走行方向の幅 b が下側配筋鉄筋の有効高さ d_a まで 45° で分布するものとして与えられている。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{s \max} \cdot X_m + \sigma_{t \max} \cdot C_m) \quad (3)$$

$$B = b + 2d_a$$

$$\tau_{s \max} = 0.252f_c - 0.00251f_c^2$$

$$\sigma_{t \max} = 0.269f_c^{2/3}$$

ここで、 B ：はりの幅(mm)， b ：輪荷重の軸方向の辺長， 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， d_d ：配力筋の有効高さ， $\tau_{s\max}$ ：コンクリートのせん断強度(N/mm²)， $\sigma_{t\max}$ ：コンクリートの引張強度(N/mm²)， f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

式(3)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。また、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、SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体は、既存 RC 床版が 120mm，上面増厚が 40mm であり、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。なお、RC 床版供試体の圧縮強度は 2 体の平均圧縮強度とした。SFRC の圧縮強度は、コンクリート床版部と同様の圧縮強度を適用する。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、SFRC 上面増厚補強 RC 床版は 154.0kN となった。

(3) RC床版, SFRC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 SFRC 上面増厚 RC 床版の S-N の関係を図 4 に示す。

RC 床版は、図 4 に示すように、縦軸の S は 0.513 となり、横軸の N_p は表 1 に示す等価走行回数を適用すると、昭和 39 年の設計基準⁹⁾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、本供試体は平成 8 年の道示Ⅱ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。

SFRC 上面増厚 RC 床版、接着剤を塗布した SFRC 上面増厚 RC 床版および接着剤と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚 RC 床版の S は 0.389 となり、各々の等価走行回数 N_p を適用した場合、全ての SFRC 増厚供試体において松井式を上回り、耐疲労性が得られた。したがって、現在実施されている各都道府県の橋梁の長寿命化対策における道路橋 RC 床版の補強法には、SFRC 上面増厚補強法は有効な補修・補強法である。

5 まとめ

① RC 床版の等価走行回数に比して、上面増厚することにより耐疲労性が向上した。さらに、接着剤と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚 RC 床版供試体は、接着剤による合成効果と CFRP 格子筋による応力分担効果により、耐疲労性がより向上した。

②たわみと等価走行回数の関係では、SFRC 上面

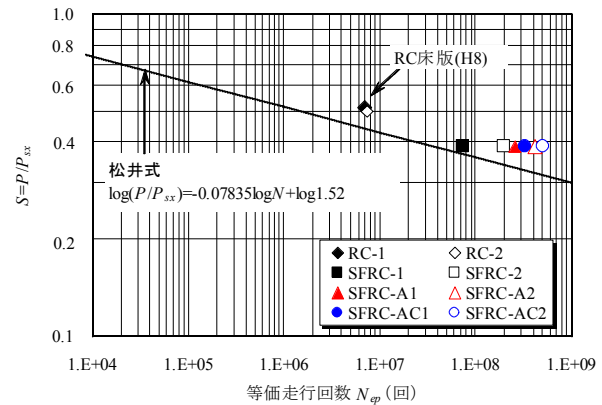


図 4 RC 床版供試体および SFRC 上面増厚 RC 床版の S-N 曲線

増厚 RC 床版、接着剤を塗布した SFRC 上面増厚 RC 床版および接着剤と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚 RC 床版供試体ともに床版支間の 1/400、本供試体の場合は 3mm 附近からたわみの増加が著しくなる。また、この附近での鉄筋ひずみは軸直角方向および軸方向ともに弾性限度内であることから、RC 床版はたわみが床版支間 L の 1/400 に達した状況で補修・補強対策の検討が必要である。また、SFRC 上面増厚 RC 床版は、この時点で 2 次補修を施す必要があると考えられる。

③ SFRC 上面増厚 RC 床版、接着剤を塗布した SFRC 上面増厚 RC 床版および接着剤と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚 RC 床版供試体ともに、松井式の S-N 曲線を上回り、耐疲労性が得られたことから、橋梁の寿命化対策における道路橋 RC 床版の補強には、SFRC 上面増厚補強法は有効な補修・補強法であると言える。

参考文献

- 1) 日本道路橋会，道路橋示方書・同解説Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，(2004)
- 2) 財) 高速道路調査会，上面増厚工法設計施工マニュアル，(1995)
- 3) 西川和廣，SFRC による鋼床版舗装—鋼とコンクリートの新しい関係—，橋梁と基礎，(2005)，pp.84-87
- 4) 児玉孝喜，ほか，供用下における SFRC による鋼床版の疲労対策，橋梁と基礎，(2006)，pp.30-385)
- 5) 土木学会，道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，(社) 土木学会/鋼構造委員会，(2004)
- 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) 前田幸雄，松井繁之，鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集，第 348 号，V-1，(1984)，pp.133-141
- 8) 日本道路橋会：鋼道路橋設計示方書，(1964)