ISSN 2186-5647

3-6

SFRC 上面増厚補強 RC 床版の耐疲労性に関する実験研究

日大生産工(院) ○岡崎 清也　日大生産工 阿部 忠　日大生産工 木田 哲量
鹿島道路(株) 児玉 孝喜　鹿島道路(株) 伊藤 清志

1. はじめに

近年、地方公共団体が管理する老朽化した橋梁の増加に対応するために、「道路橋長寿命化修繕計画」が実施された。これによると、道路橋の中で最も損傷が著しい部材は RC 床版であり、とくに 1964 年代に建設された RC 床版は H14 年改訂の道路橋示方書・同解説(以下、道示とする)[1]の基準と差異があり、H14 年改訂の道示の基準に則した補強対策を講じる必要がある。本研究は、橋梁長寿命化修繕計画における RC 床版の補強対策の一環として、RC 床版供試体に対する輪荷重走行疲労実験 [2]を行い、耐疲労性を評価する。また、長寿命化修繕計画においては建設後 100 年間を維持管理する計画が立案されていることから、一次補強後の耐疲労性の評価法および RC 床版の修繕計画における再補強時期の推定を行い、道路橋 RC 床版の長寿命化対策および維持・管理手法の一助とする。

2. 供試体概要および補強方法

2.1 使用材料　RC 床版部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 5 ～ 20mm の砕石を使用し、鉄筋は SD295A、D10 を使用し、上面増厚コンクリート部には、SFRC を用いた。SFRC の配合条件は超速硬セメントと最大寸法 15mm の粗骨材および長さ 30mm の鋼繊維を混入量 100kg/m^3 で配合した。圧縮強度は材齢 3 時間で 26.9N/mm^2 であり、28 日強度は 55.4 N/mm^2 である。また、SFRC と RC 床版の界面には付着性を高めるために高耐久型エポキシ系接着剤(以下、接着剤とする)[3]を使用し、その材料特性値である圧縮強さ、曲げ強さ、付着強さはそれぞれ 102.8N/mm^2、41.1N/mm^2 、3.7N/mm^2 である。なお、RC 床版および SFRC 上面増厚補強供試体の材料特性値を表-1 に示す。

2.2 供試体寸法および鉄筋の配置　RC 床版の供試体の寸法は、全長 1470mm、支間長 1200mm、張出し部 135mm の等方性版である。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。次に、SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体は、RC 床版上面を 10mm 切削し、その上に SFRC を 40mm 増厚した。よって、床版全厚は 160mm である。有効高は、それぞれ 135mm、125mm である。ここで、供試体寸法・鉄筋の配置および上面増厚に関する寸法を図-1に示す。

2.3 増厚供試体の施工方法　従来型の SFRC 上面増厚補強および増厚界面に接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強 RC 床版(以下、従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版とする)供試体の製作は、高速道路調査会「上面増厚工法設計施工マニュアル」[4]に準拠した。まず、従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体は、RC 床版上面を、切削機で 10mm 切削し、その後、付着性を高めるためにショットブラストを用いて投射密度 150kg/m^2 で表面を研掃した。その後、SFRC を 40mm 増厚した。この従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体の名称を RC.S-1、RC.S-2 とする。次に、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体では、基本的には従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版

表-1　材料特性

供試体	コンクリート圧縮強度（N/mm^2）			鉄筋（SD295A）			
	RC床版	SFRC		使用鉄筋	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
		材令	圧縮強度				
RC-1	35.0	―		D10	370	511	200
RC-2	35.0	―		D10	370	511	200
RC.S-1	35.0	3時間：	26.9	D10	370	511	200
RC.S-2	35.0	4日：	44.0	D10	370	511	200
RC.S-A1	35.0	7日：	51.6	D10	370	511	200
RC.S-A2	35.0	28日：	55.4	D10	370	511	200

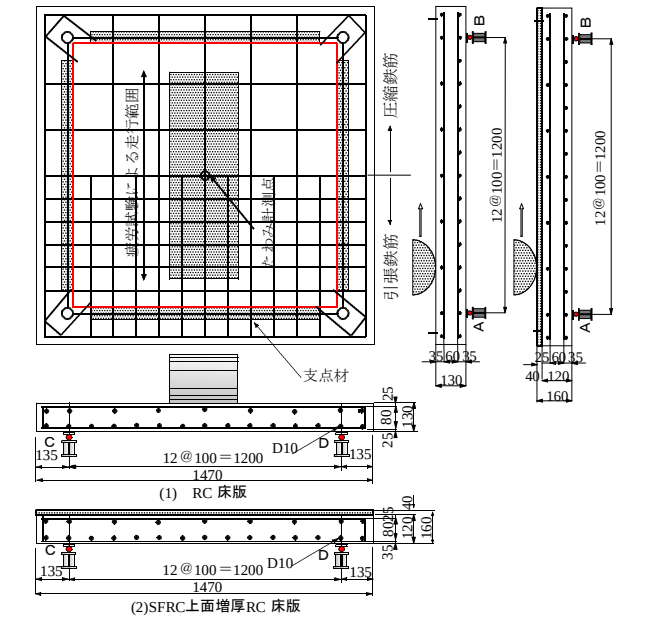


図-1　RC床版・上面増厚RC床版供試体の寸法

Experimental Study on Fatigue Resistance of RC Slab with Overlaying the SFRC.

By Seiya OKAZAKI
Tadashi ABE , Tetsukazu KIDA , Takayoshi KODAMA and Kiyoshi ITO

と同様であるが、図-1(2)に示すように、RC 床版と SFRC 上面増厚との界面に付着性を高めるために接着剤を厚さ 1mm 塗布し、直ちに SFRC を 40mm 増厚した。この接着剤を塗布した供試体の名称を RC.S-A1、RC.S-A2 とする。

3. 走行疲労実験および等価走行回数

3.1 輪荷重による走行疲労実験　輪荷重走行疲労実験は、RC 床版および SFRC 上面増厚 RC 床版ともに床版中央から両支点方向に ±450mm の範囲に輪荷重を繰返し走行させる実験である。初期荷重を 80kN とし、2 万回走行ごとに荷重を 20kN 増加し、荷重 120kN 以降は 2 万回走行ごとに荷重を 10kN ずつ増加する段階状載荷とした。計測は、輪荷重が 1、10、100、1,000、5,000 回走行および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとにたわみを計測する。走行平均速度は、1 走行 0.9m を 6.5sec で走行する 0.14m/s とした。

3.2 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は 2 万回ごとに荷重を増加させる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。S-N 曲線の傾きの逆数 *m* には、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線の傾きの逆数 12.7 を適用する [5]。また、疲労損傷による D-N 曲線による低減係数および湿潤状態におけるコンクリート劣化係数等 [6)7)]を考慮した補強等価走行回数 $N_{D0\cdot eq}$ は式(2)として与えられている。

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

$$N_{D0\cdot eq}=\sum_{i=1}^{n}(N_{epi}\cdot D_{Di}\cdot D_C\cdot D_S\cdot D_E) \qquad (2)$$

ここで、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)、N_{epi}：実験走行回数ごとの等価走行回数(式(1))、D_{Di}：SFRC 上面増厚補強法における 劣化係数(従来型 SFRC 上面増厚補強：D_{Di}=-0.0559 log N_{epi}+D_1、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強：D_{Di}=-0.0716 log N_{epi}+D_1)、D_C：湿潤状態におるコンクリート劣化係数(= 0.70)、D_S：使用鉄筋係数($=f_{yd\cdot SR}/f_{yd\cdot SD}$)、$D_E$：環境条件による係数(=1.0)

4. 実験結果および考察

1964 年代の設計基準により設計された RC 床版(以下、64 年床版とする)に従来型 SFRC 上面増厚補強および接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体に D-N 曲線式によ劣化係数、湿潤状態の影響によるコンクリートの劣化係数および設計基準で設計された鉄筋に対する補正係数を適用した補強等価走行回数を式(2)より算出した結果を表-2 に示す。また、たわみと補強等価走行回数との関係を図-2 に示す。

表-2　等価走行回数と補強等価走行回数

供試体		等価走行回数	平均等価走行回数	走行回数比
RC-1	—	7,347,542	7.93×10^6	—
RC-2	—	8,530,293		
RC.S-1	—	73,976,114	73.97×10^6	9.3
	補強等価走行回数(64床版)	27,213,281	27.21×10^6	3.4
RC.S-2	—	200,453,391	200.45×10^6	25.2
	補強等価走行回数(64床版)	71,038,991	71.03×10^6	8.9
RC.S-A1	—	261,284,425	261.28×10^6	32.9
	補強等価走行回数(64床版)	72,448,554	72.44×10^6	9.1
RC.S-A2	—	416,046,812	416.04×10^6	52.4
	補強等価走行回数(64床版)	112,004,426	112.00×10^6	14.1

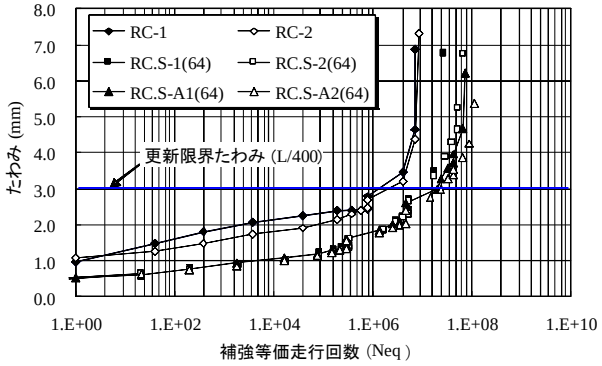


図-2　たわみと補強等価走行回数

4.1 等価走行回数および補強等価走行回数　RC 床版の等価走行回数 N_{ep} の平均は、7,938,918 回であり、この RC 床版の等価走行回数を基準に SFRC 上面増厚補強の耐疲労性を評価する。なお、この床版は 1994 年改訂の道示に準拠して製作した RC 床版である。従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版の供試体 RC.S-1 の等価走行回数は RC 床版の 9.3 倍であり、既存 RC 床版が 64 床版の場合の補強等価走行回数では 3.4 倍となる。また、供試体 RC.S-2 の場合は、それぞれ 25.2 倍、8.9 倍となる。

次に、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体 RC.S-A1,2 の等価走行回数は、それぞれ RC 床版の 32.9 倍、52.4 倍であり、また、補強等価走行回数は既存 RC 床版が 64 床版の場合、供試体 RC.S-A1,2 で、それぞれ RC 床版の 9.1 倍、14.1 倍である。

4.2 たわみと補強等価走行回数　従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版におけるたわみと補強等価走行回数の関係より、再補修・補強時期を推定した、補強後のたわみが床版支間 L の 1/400 に達した場合の補強等価走行回数は、64 年床版の場合では、供試体 RC.S-1、2 で、それぞれ 9.89×10^6 回、11.50×10^6 回である。 RC 床版のたわみが 1/400 に達した時の補強等価走行回数に比して、それぞれ 4.28 倍、4.98 倍となる。次に接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版では、補強後のたわみが床版支間 L の 1/400 に達した場合の補強等価走行回数は、64 年床版の場合において供試体 RC.S-A1、2 で、それぞれ $20{,}30\times10^6$ 回、$24{,}60\times10^6$ 回である。 RC 床版のたわみが 1/400 に達した時の等価走行回数に比して、それぞれ 8.78 倍、10.65 倍の補強効果が得られ

ている。

5. RC床版の押抜きせん断耐荷力

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} の評価式を提案し、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力 P_{sx} で除して無次元化した S を縦軸とし、等価走行回数 N を横軸とした S-N 曲線を提案している。すなわち、松井らが提案するはり状化した RC 床版の S-N 曲線は図-4 であり、RC 床版の S-N 曲線式は式(3)として与えられている [5]。また、はり幅を考慮した押し抜きせん断力学モデルを図-3 のように提案され、押し抜きせん断耐荷力式を式(4)として与えている [5]。

$$\log (P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (3)$$

$$P_{sx} = 2B(\tau_{s\,max} \cdot X_m + \sigma_{t\,max} \cdot C_m) \quad (4)$$

$$B = b + 2d_d$$

$$\tau_{s\,max} = 0.252 f'_c - 0.00251 f'^2_c \quad (5)$$

$$\sigma_{t\,max} = 0.269 f'^{2/3}_c \quad (6)$$

ここに、P：基準荷重、 N：走行回数、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/mm^2)、$\sigma_{t\,max}$：コンクリートの引張強度、f'_c：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

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、SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体は、既存 RC 床版の幅が 120mm、上面増厚が 40mm、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。よって、はり幅を考慮した RC 床版の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} は、118.4kN となる。なお、コンクリートのせん断強度 τ_{smax} [8]およびコンクリートの引張強度 σ_{tmax} は表-1 に示した材料特性値を適用した。

6. RC床版、SFRC上面増厚RC床版のS-N曲線

(1)RC 床版

1994 年改訂の道示の活荷重は 100kN であるが、松井らが提案する S-N 曲線は 1964 年代の道示に準拠して製作した RC 床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験から評価式である。よって、基準荷重 P は、1964 年改定の道示の設計活荷重は 80kN であり、これに衝撃係数 i(＝ 20/(50 ＋ L)、L：設計支間(m))を考慮し、その 1/2 とした 55.2kN となる。押抜きせん断耐荷力 P_{sx} は 118.4kN であり、S 値は 0.465 となる。ここで、RC 床版供試体の S と等価走行回数 N_{eq} の関係を図-4(1)、(2)に示す。その結果、松井らが提案する S-N 曲線式(3)をわずか上回っている。これは、本供試体は 1994 年改訂の道示の基準に準拠し、その 1/2 モデルとした供試体であり、これに松井らが提案するはり状化した押抜きせん断耐荷力 P_{sx} を適用して評価したためである。

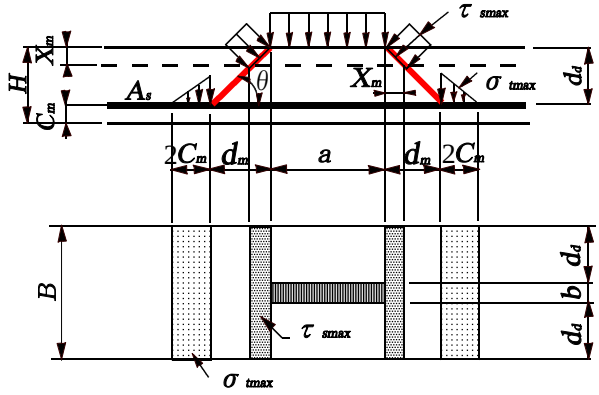
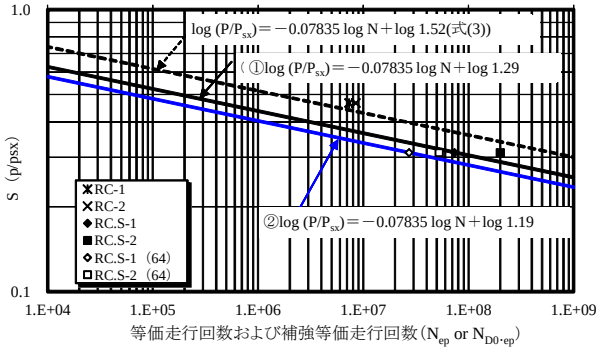


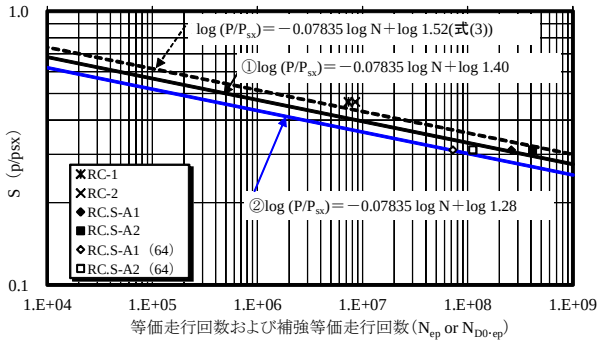
図-3　押し抜きせん断力学モデル

(2)SFRC 上面増厚補強 RC 床版

SFRC 上面増厚補強 RC 床版は、耐荷力性能の向上および耐疲労性の補強を目的としていることから、上面増厚された RC 床版厚は 160mm となり、SFRC 上面増厚補強した RC 床版の押抜きせん断耐荷力は 193.0kN となった。また、基準荷重については現行示方書の活荷重に対応させることから、1994 年道示の活荷重が作用した場合を想定し、その 1/2 とする。よって、基準荷重 P は 60kN とし、補強等価走行回数 $N_{D0\cdot eq}$ を適用した S-N 曲線式によって RC 床版の S-N 曲線を評価する。ここで、従来型 SFRC 上面増厚補強および接着剤塗布型 SFRC 上面増厚 RC 床版の S-N 曲線を図-4(1)、(2)に示す。図-4(1)、(2)に示す S-N 曲線式には、乾燥状態における輪荷重走行疲労実験における等価走行回数 N_{ep}、湿潤状態におけるコンクリートの強度低下および設計基準に伴う鉄筋の強度低下を考慮した補強等価走行回数を、それぞれプロットし、①乾燥状態(式(1))、②湿潤状態(式(2))から算定した補強等価走行回数の関係から補強 RC 床版の S-N 曲線を提案する。また、S-N 曲線の傾きは、道路橋長寿命化修繕計画で補強対策が必要とする RC 床版は 64 年床版が多いことから、松井らが提案された S-N 曲線の傾きすることとする。よって、SFRC 上面増厚補強における S-N 曲線式は、松井らによる S-N 曲線の傾きをスライドさせた S 値を得るものとする。その結果、従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版および接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版



(1)従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版



(2)接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版

図-4　S-N曲線

における S-N 曲線を式(7)~(10)として与える。

(1)従来型 SFRC 上面増厚補強

① $\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.29$ (7)

② $\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.19$ (8)

(2)接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強

① $\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.40$ (9)

② $\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.28$ (10)

6.1 破壊等価走行回数　破壊走行回数 N_f は式(9)として与えられる。、RC 床版の破壊走行回数 N_f、破壊補強走行回数 N_D は、S-N 曲線式の傾き(N)とそれぞれの縦軸 S 値を適用した式(11)が与えられている。

$$N_f = N_D = 10^{[\{\log(S) - \log(P/P_{sx})\}/D]} \quad (11)$$

ここで、N_f：破壊走行回数、N_D：破壊補強走行回数、S：S-N 曲線における縦軸の S 値、N：S-N 曲線の傾き(＝0.07835)、P：基準荷重(kN)、P_{sx}：押抜きせん断耐荷力(kN)

7．まとめ

①本提案の D-N 曲線による劣化係数および湿潤状態のコンクリート劣化係数および設計基準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乾燥状態の場合の従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版 RC.S-1、RC.S-2 の平均等価走行回数は 17.3 倍、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版 RC.S-A1、RC.S-A2 の場合は、42.7 倍となった。湿潤状態を想定した場合はそれぞれ、6.2 倍、11.6 倍となり、SFRC 上面増厚補強することで耐疲労性が大幅に向上した。

②走行疲労実験におけるたわみと等価走行回数の関係より、たわみが床版支間 L の 1/400 に達した付近を再補修時期とみなし、たわみが床版支間 L の 1/400 に達した時の等価走行回数および D-N 曲線式から得た劣化係数および雨水の影響による材料の劣化係数を適用して算出した補強等価走行回数の関係から、従来型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版および接着材塗布型 SFRC 上面増厚補強 RC 床版のそれぞれの S-N 曲線式を提案した。これによって、本提案の S-N 曲線式を用いて SFRC 上面増厚補強における再補修・補強時期の推定が可能となった。

③ SFRC 上面増厚補強した RC 床版を用いて走行疲労実験を行い、松井らが提案するはり状化した場合の押抜きせん断耐荷力を適用した S(=P/P_{sx})と各種の劣化係数を適用した等価走行回数 N による S-N 曲線における S を算出することで、道路橋長寿命化修繕計画において、再補修・補強対策を検討する資料が得られる。

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)阿部忠、木田哲量、高野真希子、小森篤也、児玉孝喜：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(日本学術会議・土木学会)、Vol. 56A, pp. 1270-1281(2010.3)
3)児玉孝喜、後藤和満、加形護、近藤充志：併用下における SFRC による鋼床版の疲労対策：橋梁と基礎、pp.30-38、(2006)
4)(社)高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル、(1995).
5) 松井繁之：道路橋床版　設計・施工と維持管理、森北出版、(2007).
6)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).
7)RILEM Committee 36-RDL.：Long term random dynamic loading of concrete structures.、Materials and Structures、 17(9)、 RILEM、 1-28.(1984)
8)阿部忠ほか：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関する研究，構造工学論文集，Vol. 53A，pp. 199-207(2007)