

上面増厚補強したRC床版の耐疲労性の評価法について

[第56回構造工学シンポジウム論文賞 土木部門 (土木学会) 「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」平成22年4月30日]

日大生産工 ○阿部 忠, 木田哲量, 日大生産工 (PD) 高野真希子
新日鉄マテリアルズ (株) 小森篤也, 鹿島道路 (株) 児玉孝喜

1. 論文賞受賞の経緯

構造工学論文賞は, 日本学術会議, 土木学会, 日本建築学会共催による構造工学論文集 (土木部門) に掲載され, かつ構造工学シンポジウムにおいて講演を行った論文のうち, 「構造工学における学術, 技術の発展に寄与し, 独創性と将来性に富むと認められた評価の高い論文に授与されるものである」と定められている。

第 56 回構造工学シンポジウム論文賞は, 選考対象論文の 2% が受賞対象となる。受賞論文の選考は, 3名の査読委員の点数の合計が 15 点以上 (最大 18 点) で, 構造工学シンポジウムの部門座長および他部門の主査 (または副主査) から構成される 2 名の採点との合計が高い順に 6 編が選考された。なお, 第 56 回構造工学シンポジウムは, 4 月 24, 25 日に, 東京工業大学で開催され, 6 編の論文の著者に対して, 4 月 30 日付けで土木学会から表彰された。

2. 研究背景

道路橋 RC 床版は大型車両の走行による疲労劣化や積雪寒冷地域では凍結防止剤の散布による塩害と凍害を受け, RC 床版の劣化が急速に進んでいる。これらの RC 床版の劣化に対する補強法には, 鋼繊維を混入したコンクリート (以下, 鋼繊維補強コンクリート: SFRC とする) を用いた SFRC 上面増厚補強法が採用されている。本研究は, SFRC 上面増厚補強した RC 床版の輪荷重走行疲労実験において, 松井ら¹⁾が提案する S-N 曲線の傾きの逆数 $m = 12.7$ を適用した RC 床版の等価走行回数に, たわみの増加に伴う低減係数, コンクリート材の低減係数, 設計基準に対する補正係数を適用して, SFRC 上面増厚補強した RC 床版の劣化予測や残存寿命を評価し, 道路橋 RC 床版の長寿命化対策および維持・管理手法の一助としたものである。

3. 供試体材料・寸法および等価走行回数

(1) 供試体材料

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 の粗骨材を使用した。また, 鉄筋は SD295A, D10 を使用した。次に, 上面増厚コンクリートには, SFRC を用いた。SFRC

の設計基準強度は, 材齢 3 時間で 24N/mm^2 とした。次に, SFRC と RC 床版との界面には付着性を高めるために接着剤および接着剤と連続繊維を樹脂で格子状に一体成型した CFRP 格子筋を用いた。

(2) 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体の床版厚は, 道路橋示方書・同解説 (以下, 道示とする。)²⁾の規定に基づいて, 大型自動車の 1 日 1 方向あたりの計画交通量 2000 台以上を想定して決定し, その 1/2 モデルとした。耐疲労性を評価する場合の基準となる RC 床版の供試体の寸法は, 支間長 1200mm, 供試体の張出し部 135mm の全長 1470mm 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。

SFRC 上面増厚補強した 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, 床版全厚は 160mm を目標とした。有効高は, それぞれ 135mm, 125mm である。供試体の寸法・鉄筋の配置・上面増厚に関する寸法を図-1に示す。

(3) 等価走行回数算定式

本実験における輪荷重走行疲労実験は, 2 万回ご

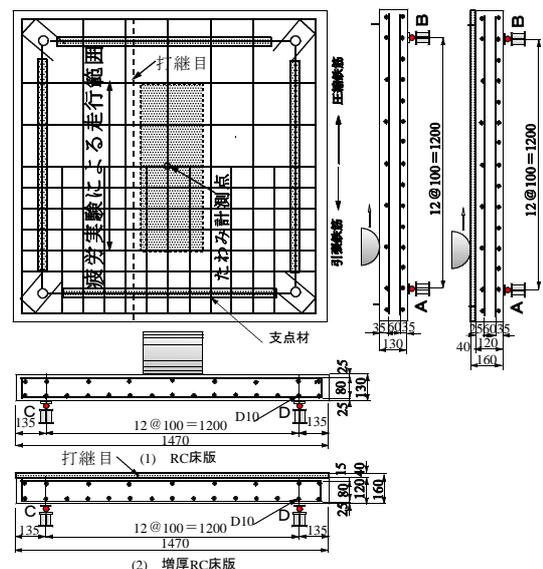


図-1 RC 床版および SFRC 上面増厚供試体寸法

とに荷重を増加する段階荷重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)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 の一定荷重載荷として等価走行回数を算出する。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 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¹⁾。

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

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 ）

5. 等価走行階数の算定結果

本実験における RC 床版、SFRC 上面増厚 RC 床版の等価走行回数の算定結果を表 1 に示す。

RC 床版供試体等価走行回数は、式(1)より算出した結果、供試体 RC-1, 2 でそれぞれ 6.96×10^6 回 7.34×10^6 回である。よって、RC 床版供試体の平均等価走行回数は 7.15×10^6 回である。また、SFRC を全面増厚補強した RC 床版供試体の等価走行回数は、RC.S-1, 2 で、それぞれ、 167.18×10^6 、 261.28×10^6 回である。次に、接着剤を塗布し全面増厚した供試体 RC.S-A1, A2 の等価走行階数は、それぞれ 333.11×10^6 回、 501.70×10^6 回である。接着剤と CFRP 格子筋を併用して全面増厚した供試体 RC.S-CA1, CA2 の等価走行回数は、それぞれ 333.11×10^6 回、 501.70×10^6 回である。

RC 床版供試体の等価走行回数と比較すると、SFRC 上面増厚した供試体は 10.3 倍～ 70.1 倍の耐疲労性が評価され、長寿命化修繕計画においては、以後補強対策を講じる必要は無い結果となる。そこで、本実験は乾燥状態で行ったことから、湿潤状態による劣化係数および各種要因による劣化係数を考慮する必要がある。

6. 劣化たわみによる性能低下曲線の定義

本研究では、等価走行回数ごとのたわみの増加値を劣化値とし、劣化値と等価走行回数の関係から対数近似による性能低下曲線、すなわち劣化 (Damage) ー等価走行回数 (N_{ep}) (以下、D-N 曲線) 式を得て、各走行回数ごとに算出した等価走行回数 N_{epi} に乗じるものとする。

(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_0) は、各走行回数ごとに計測した実験たわみ (δ_i) から、本実験におけ

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	6,962,254	7,155,596	—
RC-2	7,348,160		
RC.S-1	73,975,689	73,975,689	10.3
RC.S-2	167,183,533	167,183,533	23.4
RC.S-A1	261,284,425	261,284,425	36.5
RC.S-A2	416,046,812	416,046,812	58.1
RC.S-CA1	333,112,120	333,112,120	46.6
RC.S-CA2	501,703,086	501,703,086	70.1

る初期荷重のたわみ (δ_0) を除いたたわみ (= $\delta_i - \delta_0$) とする。したがって、初期劣化たわみを 0mm とする。劣化値は、SFRC 全面増厚した場合の各等価走行回数ごとのたわみの平均値を最大たわみ (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 SFRC 上面増厚補強法における再補修・補強時期を想定したたわみを床版支間 L の $1/400$ まで評価するものとする。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。

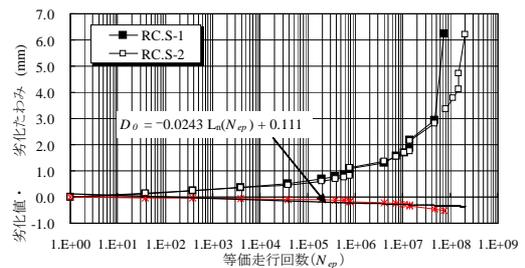
$$D_{\delta i} = (\delta_i - \delta_0) / \delta_{\max} \quad (2)$$

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

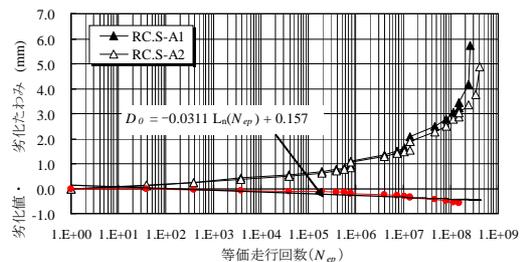
(2) D-N曲線

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-2に示す。

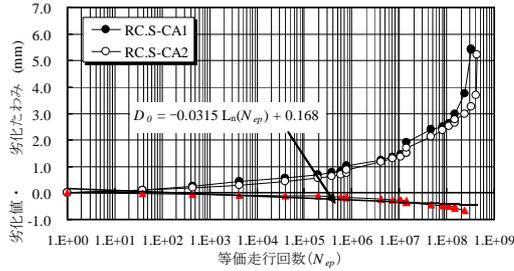
SFRC 上面増厚補強法における劣化たわみ ($\delta_{\delta i}$)



(1) 従来型の SFRC 上面増厚供試体



(2) 接着剤を用いた SFRC 上面増厚供試体



(3) 接着剤と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚供試体
図-2 劣化たわみ・劣化値と等価走行回数との関係

および性能低下の概念に基づいて、再補修時期を想定した補強後の RC 床版のたわみが支間 L の $1/400$ までの各走行回数ごとの劣化値 (D_{0i}) と RC 床版の等価走行回数 (式(1)) の関係から等価走行回数を関数とする対数近似式として $D-N$ 曲線式を得た。よって、各 SFRC 上面増厚補強法における $D-N$ 曲線は式(3.1)～(3.3)として与える。

1) SFRC 上面増厚補強

$$D_{0i} = -0.0243 L_n N_{epi} + 0.111 \quad (3.1)$$

2) 接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強

$$D_{0i} = -0.0311 L_n N_{epi} + 0.157 \quad (3.2)$$

3) 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強

$$D_{0i} = -0.0315 L_n N_{epi} + 0.168 \quad (3.3)$$

ここに、 D_{0i} : たわみによる等価走行回数ごとの劣化係数、 N_{epi} : 等価走行回数 (式(1))

7. 性能低下曲線を適用した等価走行回数

(1) たわみによる劣化係数 : D_{0i}

等価走行回数の増加に伴う、性能低下を示す指標として $D-N$ 曲線式(3.1)～式(3.3)を提案した。一般的に劣化した RC 床版を種々の補強法により補強した場合は、健全な RC 床版の耐荷力と同等以上の効果が得られるとして耐疲労性が評価されている。例えば、RC 床版を補強した場合の耐荷力は、一般的に $1.1 \sim 1.3$ 倍向上している。そこで $D-N$ 曲線式(3.1)～式(3.3)における、それぞれの初期値は、SFRC 上面増厚工法において、耐荷力の向上を期待する補強法の場合の初期値を $D_1 = 1.1$ 、耐荷力の向上を期待しない補修法の場合を $D_1 = 1.0$ として与える。よって、式(3.1)～式(3.3)の $D-N$ 曲線の傾きに補修・補強法における初期値 D_1 を適用すると $D-N$ 曲線は式(4.1)～式(4.3)となる。

1) SFRC 上面増厚補強

$$D_{0i} = -0.0243 L_n N_{epi} + D_1 \quad (4.1)$$

2) 接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強

$$D_{0i} = -0.0311 L_n N_{epi} + D_1 \quad (4.2)$$

3) 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強

$$D_{0i} = -0.0315 L_n N_{epi} + D_1 \quad (4.3)$$

(2) コンクリート材料の低減係数 : D_c

本実験は、乾燥状態でやっているが、実橋は常に雨水の影響を受けていることから湿潤時を想定したコンクリートの劣化状態を考慮する必要がある。Raithby, K.D.³⁾らや RILEM Committee⁴⁾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。よって、湿潤時におけるコンクリート材料の低減係数を $D_c = 0.70$ とする。

(3) 環境条件による低減係数 (塩害) : D_E

道路橋 RC 床版は、海岸線では飛来塩分、寒冷地では凍結防止剤散布による塩害が生じ、鉄筋に錆が発生し、耐荷力が低下している。筆者ら⁵⁾は、応力履歴した RC 床版に凍結防止剤散布と暴露試験を実施し、輪荷重走行実験を行った。その結果、残存耐荷力は塩害作用を受けない RC 床版に比して 25% 耐荷力が低下する結果となった。そこで、塩害作用を受けた RC 床版の低減係数 (塩害) として $D_E = 0.75$ とする。なお、塩害作用を受けない床版については考慮する必要がない。また、凍害の影響を受けた場合の低減係数は、今後の課題とする。

(4) 道路橋示方書の改訂による補正係数 : D_s

本供試体は新示方書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) の設計基準と新示方書 (平成 8 年以降) 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) が使用されている。そこで、旧示方書と現行示方書で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。よって、鉄筋の補正係数は式(5)となる。

$$D_s = f_{yd-SR} / f_{yd-SD} \quad (5)$$

ここに、 f_{yd-SR} : 丸鋼の降伏強度 ($= 235\text{N/mm}^2$)、 f_{yd-SD} : 異形棒鋼の降伏強度 ($= 295\text{N/mm}^2$)

(5) $D-N$ 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 SFRC により上面増厚した場合の $D-N$ 曲線および種々の劣化係数を適用した SFRC 上面増厚補強した RC 床版の等価走行回数は、式(6)として与えられる。

$$N_{D0-ep} = \sum_{i=1}^n (N_{epi} \cdot D_{0i} \cdot D_c \cdot D_E \cdot D_s) \quad (6)$$

ここで、 N_{D0-ep} : SFRC 上面増厚補強法 RC 床版の等価走行回数、 N_{epi} : 等価走行回数 (式(1))、 D_{0i} : SFRC 上面増厚補強法における劣化係数、 D_c : 湿潤時にお

表2 SFRC上面増厚補強したRC床版の等価走行回数(昭和39年設計基準)

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	6,962,254	7,155,596	—
RC-2	7,348,160		
RC.S-1	27,213,281	27,213,281	3.8
RC.S-2	52,713,843	52,713,843	7.4
RC.S-A1	72,448,554	72,448,554	10.1
RC.S-A2	112,004,426	112,004,426	15.7
RC.S-CA1	88,950,512	88,950,512	12.4
RC.S-CA2	113,151,093	113,151,093	15.8

るコンクリート材料の低減係数(= 0.70), D_E : 環境条件による低減係数(塩害作用を受けた場合: = 0.75, なお, 本実験では環境条件による低減係数を 1.0 とする), D_s : 使用鉄筋係数(= f_{yd-sr} / f_{yd-sd})

松井らが提案した逆数 $m = 12.7$ を適用した RC 床版の等価走行回数(式(1))と D-N 曲線および種々の劣化係数を適用した SFRC 上面増厚補強した RC 床版の等価走行回数(式(6))と比較すると, SFRC 上面増厚補強床版は式(1)より算出した等価走行階数の 34%, 接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強床版は 27%, 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強床版は 25%となった. 実橋 RC 床版の耐疲労性の評価においては, 本提案する等価走行回数(式(6))に, 環境条件による低減係数を適用する必要があると考えられる.

以上より, SFRC 上面増厚補強した RC 床版の疲労寿命の推定には, 本提案した D-N 曲線, 湿潤時におけるコンクリート材料の低減係数 D_c , 環境条件による低減係数 D_E , 使用鉄筋係数 D_s を松井らが提案する S-N 曲線式に適用することで長寿命化修繕計画における破壊走行回数 N_f が算定が可能となる.

8. まとめ

① S-N 曲線の傾きの逆数 $m = 12.7$ を適用した RC 床版の等価走行回数から SFRC 上面増厚補強した RC 床版の耐疲労性を評価すると SFRC 上面増厚補強, 接着剤の塗布, および接着剤と CFRP 格子筋を用いた SFRC 上面増厚補強法を施した RC 床版は再補修・補強が必要ない結果となる. しかし, 従来型の SFRC 上面増厚補強した RC 床版は, 約 10 年前後で再補修を施している. これらのことから, 現行設計基準に基づいて設計された RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行った場合は, RC 床版の等価走行回数を補正する必要がある.

② 輪荷重走行疲労実験におけるたわみと等価走行回数との関係より, 等価走行回数の増加に伴うたわみの

増加を再補修・補強時期の予測とする床版支間 L の $1/400$ 付近までのたわみによる劣化値と RC 床版の等価走行回数との関係から D-N 曲線式を提案した. この D-N 曲線式および種々の低減係数を, 松井らが提案する S-N 曲線から算出された RC 床版の等価走行破壊回数 N_f に適用することが橋梁 RC 床版の長寿命化対策における疲労寿命算定法の 1 つとなるものと考えられる.

③ 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材料の低減係数および示方書の違いによる補正係数を適用した等価走行回数は, 昭和 39 年代の設計基準を適用した場合, RC 床版の等価走行回数に比して, 従来型の SFRC 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, 実橋の補強 RC 床版の寿命年数とほぼ同等となった. また, 増厚界面に接着剤を塗布した場合は 8.7 倍から 12.7 倍, 接着剤と CFRP 格子筋を併用した場合が 12.2 倍から 15.2 倍となり, 現実的となった.

④ SFRC 上面増厚補強した RC 床版を用いて乾燥状態で輪荷重走行疲労実験を行い, 補強後の耐疲労性を評価する場合は, 松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数を適用した等価走行回数に D-N 曲線から得た劣化係数, 湿潤期を想定したコンクリート材料の低減係数, 環境条件による低減係数, 設計基準に対する鉄筋の補正係数を適用した等価走行回数を用いることで上面増厚補強に対する耐疲労性の評価法とする.

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) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, (2007).
- 3) 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).
- 4) RILEM Committee 36-RDL.: Long term random dynamic loading of concrete structures., Materials and Structures, 17(9), RILEM, 1-28. (1984)
- 5) 水口和彦, 阿部忠, 木田哲量, 大竹淳一郎: 走行振動荷重による応力履歴と塩害作用を受けた RC 床版の耐荷力の低下に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 62, pp.357-364, (2009).
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書(維持管理編), (2002).