

CFS補強RC床版の補強効果および耐疲労性に関する実験解析

日大生産工(院)○元 燦豪 日大生産工 阿部 忠 日大生産工 木田哲量
日大生産工 澤野 利章 新日鉄マテリアルズ(株)小森篤也

1. はじめに

近年、地方公共団体では、支間 15m 以上の橋梁を対象として、『道路橋長寿命化修繕計画(以下、長寿命化修繕計画とする)』が実施されている。これによると、橋梁の構成部材の中で最も損傷が著しいのは RC 床版である。とくに、S30 年代に建設された RC 床版は、設計荷重、床版厚、鉄筋量など H14 年改訂の道路橋示方書・同解説(以下、道示とする)¹⁾の基準と比較して著しく違いがあることから、H14 年改訂の道示の規定に対応できる補強対策を講じる必要がある。長寿命化修繕計画における耐荷力性能および耐疲労性能の低下が著しい RC 床版の性能回復を図るための補修・補強法の 1 つとして軽量かつ施工性に優れている炭素繊維シート(以下、CFS とする)底面接着補強法がある²⁾。そこで本研究では、RC 床版の補強対策の一環として、RC 床版の底面に CFS を接着補強した RC 床版供試体(以下、CFS 補強 RC 床版とする)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。また、輪荷重走行疲労実験から得た等価走行回数から S-N 曲線による 1 次補強後の耐疲労性の評価および D-N 曲線式を適用して算出した補強等価走行回数から、CFS 補強した RC 床版の破壊時期および再補修時期を推定する。

2. 供試体概要

2.1 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 5mm 以下の砕砂、5mm ～ 20mm の砕石を使用した。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は RC 床版および CFS 補強 RC 床版ともに 35N/mm^2 である。鉄筋は SD295A、D10 を使用した。その降伏強度および引張強度は、RC 床版供試体でそれぞれ 370N/mm^2 、 511N/mm^2 であり、CFS 補強用 RC 床版供試体でそれぞれ 368N/mm^2 、 516N/mm^2 である。また、本実験に用いる CFS は、目付量 200g/m^2 、設計厚 0.111mm の連続繊維シートであり、プライマー、CFS 用の接着剤を用いた。CFS の引張強度は $4,420\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数は 235kN/mm^2 である。

2.2 供試体寸法および鉄筋の配置 本実験における供試体は、道示 II¹⁾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 2,000 台以上を想定して決定し、その 1/2 モデルの等方性版にした。供試体寸法は、全長 1,470mm、支間 1,200mm、設計厚 130mm である。また、

鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角および軸方向に D10 を 100mm 間隔で配置し、有効高さはそれぞれ 105mm、95mm とする。圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。ここで、供試体寸法および鉄筋配置を図-1に示す。また、供試体名称は RC 床版供試体を RC-1,2、CFS 補強 RC 床版を RC-C-1,2 とする。

3. 輪荷重による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 輪荷重による走行疲労実験は、輪荷重を供試体中央から $\pm 450\text{mm}$ の範囲で連続走行させる実験である。基準荷重は、本実験の車輪幅が 250mm であることから、道示 I¹⁾に規定する活荷重の 1/2 に安全率 1.2 を考慮した 60kN とする。したがって、RC 床版供試体および CFS 補強 RC 床版供試体の初期荷重はいずれも 60kN として走行を開始した。実験方法は、2 万回走行ごとに荷重を 20kN ずつ増加させ、荷重 100kN 以降は 2 万回走行ごとに荷重を 10kN ずつ増加する。たわみは、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 等価走行回数 走行疲労実験は 2 万回ごとに荷重を

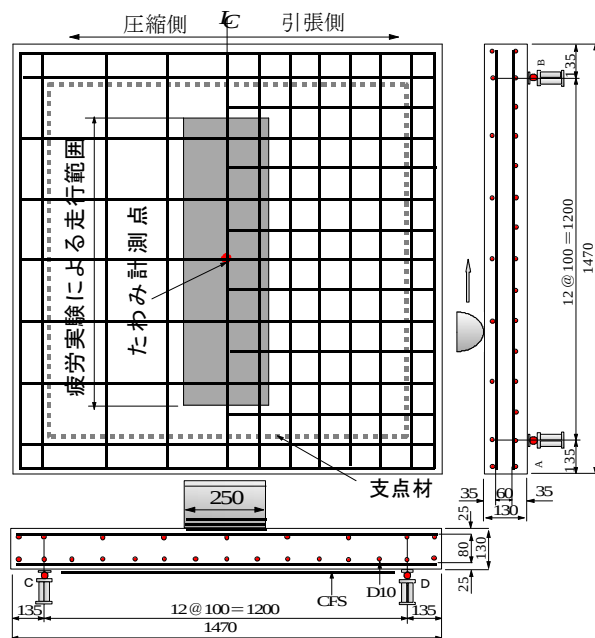


図-1 供試体寸法および鉄筋の配置

Experimental analysis on reinforcement effect and fatigue resistance of RC slab reinforced with CFS

by

Chanho WON, Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA,
Toshiaki SAWANO and Atsuya KOMORI

増加させたことから、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)となる。式(1)に適用する 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³⁾の傾きの逆数である 12.7 を適用する。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (p_i/p)^m \times n_i \quad (1)$$

ここで、 N_{eq} ：等価走行回数(回)、 P_i ：载荷荷重(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. 結果および考察

4.1 等価走行回数(N_{eq}) 本実験における RC 床版および CFS 補強 RC 床版の輪荷重走行疲労実験における等価走行回数を表-1に示す。RC 床版供試体 RC-1、RC-2 の等価走行回数の平均は 7.938×10^6 回である。よって、RC 床版供試体の平均等価走行回数を基準として CFS 補強 RC 床版の補強効果および耐疲労性を評価するものとする。CFS 補強 RC 床版 RC.C-1、RC.C-2 の等価走行回数の平均は 148.255×10^6 回である。これを RC-1、RC-2 の平均等価走行回数と比較すると 18.7 倍となった。

4.2 たわみと等価走行回数の関係 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。供試体 RC-1、RC-2 は等価走行回数の増加に伴いたわみも増加し、たわみが 3.0mm、すなわち、床版支間 L の $1/400$ に達した付近からたわみが急激に増加し破壊に至った。破壊時の RC-1、RC-2 のたわみはそれぞれ 6.86mm、7.31mm である。また、CFS 補強 RC 床版 RC.C-1、RC.C-2 のたわみはそれぞれ 3.12mm、3.50mm を超えた後の増加が著しくなり、破壊時のたわみはそれぞれ 5.80mm、5.60mm である。よって、RC 床版供試体においては、たわみが支間 L の $1/400$ を超えた付近から急激に増加したことから、RC 床版はこの付近から補修・補強の対策を講じる必要があり、また、CFS 補強 RC 床版においてもこの時点で再補修の対策を講じる必要があると考えられる。

5. 劣化たわみによる性能低下曲線

CFS 補強 RC 床版の補強等価走行回数の算定は、松井らによる S39 年、S43 年道示の基準による設計された RC 床版(以下、39RC 床版、43RC 床版とする)を対象とした輪荷重走行疲労実験から評価された S-N 曲線式の傾きの逆数 $m=12.7$ を適用した等価走行回数(式(1))を、CFS 補強 RC 床版供試体に対する輪荷重走行疲労実験によるたわみと等価走行回数の関係から、たわみの増加に対する劣化値および種々の劣化係数を適用して補正する。本実験は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)等価走行回数(N_{eq}) (以下、D-N 曲線とする)式を得て、式(1)より算定された走行回数ごとの等価走行回数 N_{eq} に乗じる。

表-1 等価走行回数

供試体	合計等価走行回数	平均等価走行回数	走行回数比
RC-1	7,347,542	7,938,918	—
RC-2	8,530,293		
RC.C-1	163,326,950	148,255,704	18.7
RC.C-2	133,184,458		

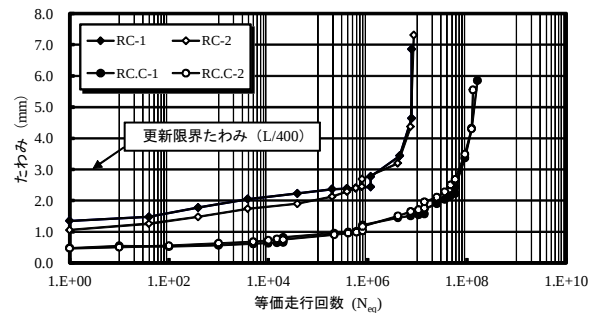


図-2 たわみと等価走行回数の関係

5.1 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_{Di})は、走行回数ごとに計測した実験たわみ(δ_i)から、本実験における走行回数の初期たわみ(δ_1)を引いたたわみ、すなわち性能低下たわみ $\delta_{Di} = (\delta_i - \delta_1)$ とする。基準たわみ $\delta_0 (=0\text{mm})$ から性能低下たわみ(δ_{Di})を引いたものを等価走行回数ごとに最大たわみ(δ_{max})で除して無次元化した値を劣化値($D_{\delta i}$)と定義し、走行回数ごとのたわみによる劣化値($D_{\delta i}$)は、式(2)として与える。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。

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

5.2 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(N_{eq})の関係を図-3に示す。CFS 補強における D-N 曲線は、性能低下たわみ(δ_{Di})および性能低下の概念に基づき、たわみが支間 L の $1/400$ までの走行回数ごとの劣化値($D_{\delta i}$)と RC 床版の等価走行回数(式(1))の関係から、劣化係数 D_{Di} を等価走行回数 $N_{eq i}$ との対数近似式として定義した。なお、CFS 補強 RC 床版の耐荷力は、一般に 1.1~1.3 倍向上することから等価走行回数の初期値を 1.1 とする。よって、D-N 曲線は式(3)として与えられる。

$$D_{Di} = -0.0541 \log N_{eq i} + 1.1 \quad (3)$$

5.3 性能低下曲線を適用した補強等価走行回数 疲労劣化を受けた RC 床版を CFS 補強した場合の D-N 曲線および種々の劣化係数を適用した CFS 補強 RC 床版の補強等価走行回数($N_{D0 \cdot eq}$)は式(4)として与える。

$$N_{D0 \cdot eq} = \sum_{i=1}^n N_{eq i} \times D_{Di} \times D_C \times D_S \times D_E \quad (4)$$

ここで、 $N_{eq i}$ ：実験走行回数ごとの等価走行回数(式(1))、

D_{Di} : CFS 補強における劣化係数、 D_c : 湿潤状態におけるコンクリート劣化係数($=0.70$)、 D_s : 使用鉄筋係数($=f_{yd} \cdot s/rf_{ys} \cdot s_d$)、 D_E : 建設地域の環境条件による係数($=1.0$)

5.4 等価走行回数および補強等価走行回数 CFS 補強した 39RC 床版に D-N 曲線式による劣化係数、湿潤状態の影響によるコンクリートの劣化係数および使用鉄筋(丸鋼、異形)に対する補正係数を適用した補強等価走行回数を表-2に示す。表-2より、CFS 補強した 39RC 床版の補強等価走行回数は 54.381×10^6 回となり、無補強 RC 床版の 6.8 倍であった。乾燥状態における CFS 補強 RC 床版の等価走行回数と比較すると 63%低下している。また、CFS 補強した 43RC 床版の補強等価走行回数は 68.266×10^6 回となり、無補強 RC 床版の 8.6 倍であった。乾燥状態における CFS 補強 RC 床版の等価走行回数と比較すると 54%低下している。

6. RC床版およびCFS補強RC床版の耐疲労性

6.1 RC床版のS-N線図 RC 床版に関する耐疲労性能の評価方法には、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、横軸を等価走行回数 N とした S-N 曲線を提案している。松井らによる RC 床版の S-N 曲線式は式(5)として与えられている。

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

ここで、 P : 基準荷重(kN)、 P_{sx} : 押抜きせん断耐力(kN)、 N : 走行回数

6.2 RC床版およびCFS補強RC床版の押抜きせん断耐力

松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線式には、はり幅 B を考慮した押し抜きせん断耐力 P_{sx} が適用されている。なお、本実験における RC 床版の場合の押し抜きせん断耐力 P は式(6)として与えている³⁾。

(1) RC床版

$$P_{sx} = 2B\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m \quad (6)$$

$$B = b + 2d_d$$

$$\tau_{smax} = 0.252f_c - 0.00251f_c^2 \quad (6.1)$$

$$\sigma_{tmax} = 0.269f_c^{2/3} \quad (6.2)$$

ここで、 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(mm)、 d_d : 配力筋の有効高さ(mm)、 τ_{smax} : コンクリートのせん断強度(N/mm^2)、 σ_{tmax} : コンクリートの引張強度(N/mm^2)、 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

表-2 補強等価走行回数

供試体	合計補強等価走行回数	平均補強等価走行回数	走行回数比
RC-1	7,347,542	7,938,918	—
RC-2	8,530,293		
RC.C-1 (39RCslab) (43RCslab)	59,711,463	39RCslab	39RCslab
	74,956,943	54,381,581	6.8
RC.C-2 (39RCslab) (43RCslab)	49,051,699	43RCslab	43RCslab
	61,575,538	68,266,241	8.6

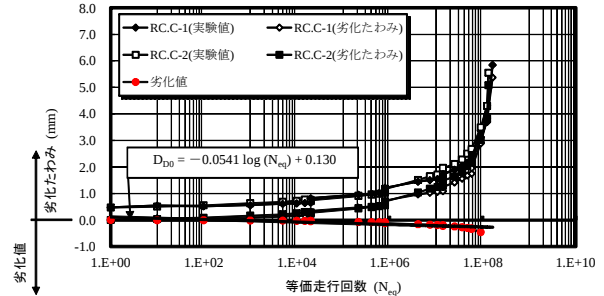


図-3 たわみによる劣化値と等価走行回数の関係

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。コンクリートのせん断強度 τ_{smax} およびコンクリートの引張強度 σ_{tmax} は使用コンクリートの圧縮強度を適用して式(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力は、118.4kN となる。

(2)CFS補強RC床版⁴⁾ CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐力は RC 床版が分担する押抜きせん断耐力と CFS 補強が分担する押抜きせん断耐力との和である。

CFS 補強が分担する 1 層目および 2 層目の耐力は CFS の引張強度に軸方向および軸直角方向の、それぞれの低減係数を適用して算出し、両者を合計したものが CFS が分担する補強耐力となる。よって、CFS を 2 層補強した場合に CFS が分担する押抜きせん断耐力 $V_{cp,CFS}$ は式(7)として与えられる。

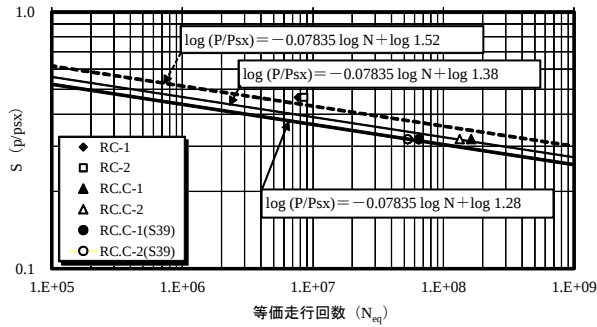
$$\begin{aligned} V_{cp,CFS} &= \{(b+2H)t_1 \cdot f_{y,cf} \cdot \beta_{cf,L1}\} \sin \theta \\ &\quad + \{(a+2H)t_2 \cdot f_{y,cf} \cdot \beta_{cf,L2}\} \sin \theta \quad (7) \\ \beta_{cf,L1} &= 0.0651t_1^{-0.663} \\ \beta_{cf,L2} &= 0.0651t_2^{-0.663} \end{aligned}$$

ここで、 $f_{y,cf}$: CFS の引張強度($= 4420N/mm^2$)、 t_1 、 t_2 : CFS の厚さ($= 0.111mm$)、 $\beta_{cf,L1}$ 、 $\beta_{cf,L2}$: 軸直角方向および軸方向の CFS 低減係数、 θ : 破壊傾斜角($= 45^\circ$)

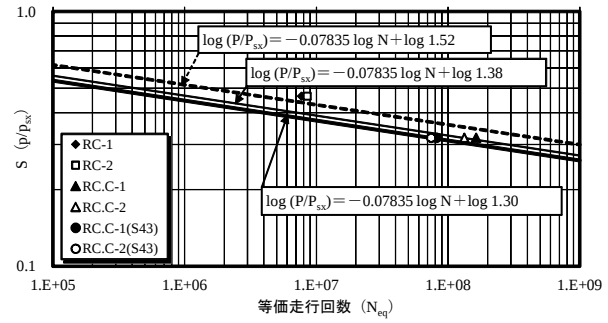
よって、走行荷重が作用する CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐力 $V_{cp,R,C}$ は式(8)として与えられる。

$$V_{cp,R,C} = P_{sx} + V_{cp,CFS} \quad (8)$$

式(8)で算出した CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐力 $V_{cp,R,C}$ は、188.1kN となる。



(1) 39RC床版



(2) 43RC床版

図-4 RC床版およびCFS補強RC床版のS-N曲線

6.3 RC床版、CFS補強RC床版のS-N曲線

(1) RC床版 H14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S39年改訂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された式である。よって、基準荷重Pは、S39年の改定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))を考慮すると55.2kNとなる。したがって、押抜きせん断耐荷力 P_{sx} は118.4kNとなり、縦軸のS値(=P/ P_{sx})は0.465となる。ここで、RC床版供試体の縦軸のS値と等価走行回数 N_{eq} の関係を図-4に示す。これによると、松井らが提案するS-N曲線式(式(5))をわずかに上回っている。これは、本RC床版供試体はH14年改訂の道示の基準に準拠し、その1/2モデルとして製作したものであり、これに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 P_{sx} を適用して評価したためである。

(2) CFS補強RC床版 CFS補強RC床版の押抜きせん断耐荷力は式(8)から算出すると188.1kNであり、基準荷重60kNの場合の縦軸のS値は0.319となる。そこで、D-N曲線による劣化値および各種劣化係数を適用した場合の補強等価走行回数 $N_{D0 \cdot eq}$ とSとの関係を示し、松井式の傾きに平行移動させたS-N曲線式を求めた。ここで、Sと等価走行回数 $N_{D0 \cdot eq}$ の関係を、既存RC床版が39RC床版の場合を図-4(1)、43RC床版の場合を図-4(2)に示す。これらより、CFS補強RC床版の等価走行回数式(1)から得たS-N曲線を式(9)、本提案するD-N曲線および各種劣化要因を考慮したCFS補強RC床版のS-N曲線をS39床版およびS43床版で、それぞれを式(10)、(11)として与えられる。

1) CFS補強RC床版のS-N曲線(乾燥状態)

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.38 \quad (9)$$

2) 各種劣化要因を考慮した場合のS-N曲線

$$S39 \text{ 床版} : \log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.28 \quad (10)$$

$$S43 \text{ 床版} : \log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.30 \quad (11)$$

RC床版の疲労寿命の推定は、松井らが提案するS-N曲

線式(5)に、RC床版の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} および長寿命化修繕計画におけるRC床版の劣化過程に基づいた累積損傷度(進展期： $\delta_D = 0.2 \sim 0.5$ 、加速期： $\delta_D = 0.5 \sim 0.75$)⁵⁾を適用した破壊走行回数 N_f を算定して、寿命の推定が行われている。すなわち、破壊走行回数 N_f および更新走行回数 N_D の算定は式(12)として与えられる。

$$N_f = N_D = [10^{(\log(S) - \log(P/P_{sx}))/D}] D_{\delta} \quad (12)$$

ここで、S：S-N曲線におけるS値、D：S-N曲線の傾き(=0.07835)、 D_{δ} ：累積損傷度

以上より、RC床版の疲労寿命を推定する場合は、破壊等価走行回数を算定し、これに累積損傷度を乗じ、1日1方向あたりの計画交通量で除することで疲労寿命の推定が可能となる。

7. まとめ

- ①等価走行回数は、CFS補強することにより、RC床版に比べ18.7倍となり補強効果があると考えられる。また、たわみが床版支間Lの1/400付近から急激に増加したことから、これを目安に再補修・補強を検討する必要があると考えられる。
- ②CFS補強RC床版の補強等価走行回数は、無補強RC床版に比べ39RC床版と43RC床版がそれぞれ6.8倍、8.6倍となり、等価走行回数と比較するとそれぞれ63%、54%低下した。
- ③実橋床版の疲労寿命の推定を行う場合は、RC床版のS-N曲線式(式(2))およびCFS補強床版のS-N曲線式(式(10))および破壊走行回数式(式(12))に累積損傷度Dを乗じることにより、二次補修時期の推定が可能となる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I, II, III(2004)。
- 2) 土木研究所：炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案), コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告(III)(1999)。
- 3) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理, 森北出版(2007)。
- 4) 澤野利章ほか：CFS補強RC床版の補強効果および押抜きせん断耐荷力評価式、材料, Vol.56 No.10, pp.42-49(2007)。
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋の計画的な管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム(BMS)(2009)。