

RC床版下面増厚補強における寿命予測に関する研究

日大生産工（院） ○永井幸太 日大生産工 阿部忠 日大生産工（院） 小森篤也

1. はじめに

近年、道路橋の維持管理に関する問題が顕在化しており、点検要領の見直しや補修補強対策が施されている¹⁾。RC床版では、進展期から加速期（前期）の損傷を受けた床版の補強対策の1例として、鉄筋やCFRP格子筋を用いた下面増厚補強法が実施されている¹⁾。しかし、下面増厚補強法における補強後の再劣化時期の推定や健全度に関する研究はあまり行われていないのが現状である。

そこで、本研究ではCFRP格子筋を配置し下面増厚補強した供試体に対し、走行荷重実験を行い、CFRP格子筋を配置した下面増厚補強法における耐荷力性能を評価し、さらに走行疲労実験から得られた等価走行回数との関係から既往の研究によるRC床版のS-N曲線式との整合性を評価する。また、増厚界面に接着剤を塗布しCFRP格子筋を配置した下面増厚補強供試体も同様に評価し、再補修時期の推定を行う。

2. 供試体概要

2.1 使用材料

(1) RC床版供試体

RC床版には、普通ポルトランドセメントと5mm以下の砕砂および5mm～20mmの碎石を使用した。床版コンクリートの示方配合を表-1に示す。鉄筋にはSD295A、D10を用いる。ここで、RC床版供試体の材料特性値を表-2に示す。

(2) 下面増厚補強床版供試体

下面増厚補強床版に使用するRC床版は前項に示したRC床版と同様の材料で製作した。また、増厚材には繊維混合ポリマーセメントモルタル（以下、PCMと称す）を使用する。本実験に使用したPCMの配合および実験時の圧縮強度を表-3に示す。次に、下面増厚補強法の引張補強材には、CFRP格子筋を用いる。CFRP格子筋は積層構造となっているため厚さが4.2mmと鉄筋を格子状に配置した場合と比較すると、鉄筋の1/2以下の厚さとなり、増厚層を薄くすることが可能となる。

表-1 RC床版示方配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	配合表 (kg/m ³)				
				C	W	S	G	Ad
8.0±2.5	2.0±1.0	39.0	40.0	403	158	726	1094	4.0

表-2 RC床版材料特性値

コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋(SD295A)			
	使用 鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (kN/mm ²)
35	D10	368	516	200

表-3 PCM材料特性値

圧縮強度 (N/mm ²)	水結合比 (%)	単位量 (kg/m ³)	
		プレミックス粉体	水
44.3	32	1,860	595

表-4 CFRP材料特性値

断面寸法 (mm)	網目寸法 (mm)	引張強度 (N/mm ²)	引張剛性 (kN・m)
4.2	50	1,902	36.3

表-5 プライマーおよび接着剤の性能

材料	試験体厚 (mm)	接着荷重 (N)	接着応力 (N/mm ²)	変位量 (mm)
プライマー	75.0	5,119	2.61	0.64
接着剤	75.0	4,671	2.38	0.47

よって、死荷重が軽減される。ここで、CFRP格子筋の材料特性値を表-4に示す。

(3) 増厚界面処理

RC床版供試体とPCMの付着性を高めるために、増厚界面にプライマー塗布などの界面処理が行われている。本供試体には、増厚界面にアクリルエマルジョン系プライマーを塗布した。また、増厚界面の早期はく離による再劣化の問題を防止するために、上面増厚補強法で実績のあるエポキシ樹脂接着剤（以下、接着剤と称す）を用いた下面増厚補強法を行う。本供試体に用いたプライマーおよび接着剤の性能を表-5に示す。

2.2 供試体寸法

本実験で使用する供試体は、2002年改定の道路橋示方書・同解説²⁾（以下、道示と称す）に準拠して、設計を行い、その1/2モデルとした。

(1) RC床版供試体

RC床版および下面増厚補強床版に使用す

A study on the life prediction of RC slabs reinforced under surface thickness increase method.

Kohta NAGAI and Tadashi ABE and Atsuya KOMORI

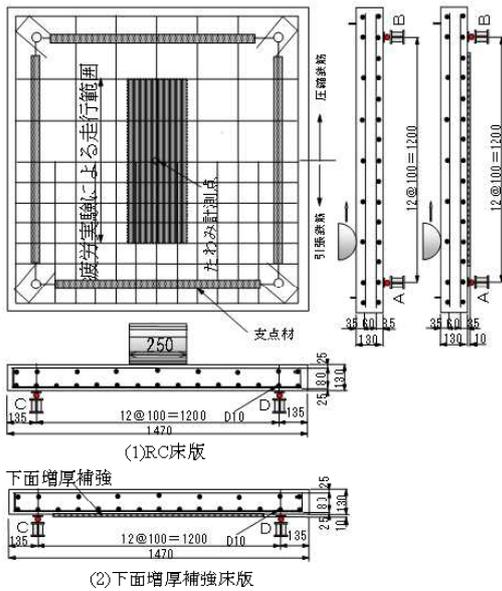


図-1 供試体寸法および鉄筋配置
 供試体の寸法は、全長 1,470mm、支間 1,200mm、床版厚 130mm とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張鉄筋を 100mm 間隔で配置し、圧縮鉄筋は引張鉄筋の 1/2 を配置した。ここで、無補強 RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置を図-1 (1) に示す。

(2) 下面増厚補強床版供試体

下面増厚補強床版供試体の寸法および鉄筋配置を図-1 (2) に示す。

2.3 補強方法

本実験における下面増厚補強法は、FRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修・補強設計・施工マニュアル (案)³⁾ に準拠し製作する。

RC 床版供試体下面部は劣化を想定し、1,100mm×1,100mm×15mm を箱抜きし、ディスクサンダーにより研掃を行う。その後、PCM の付着性を高める目的として、プライマーおよび接着剤を塗布し、CFRP を配置し PCM 吹付け工法によって 25mm 増厚を行った。増厚後の床版全厚を 140mm とした。

本実験では、3 体の無補強 RC 床版と 4 体の下面増厚補強床版を作成した。各供試体の諸元を表-6 に示す。

3. 実験方法

3.1 走行荷重実験

CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法の寿命予測において S-N 曲線式の提案が必要となる。阿部ら⁴⁾は輪荷重を一走行ごとに荷重増加し、一往復維持した最大荷重を走行荷重が作用する場合の最大耐荷力とした。

本実験において、既往の研究で使用した RC

表-6 供試体諸元

供試体	界面処理	補強材	実験方法
RC-1R	無補強	—	走行荷重実験
RC-2R	無補強	—	
RC-CR	プライマー	CFRP格子筋	
RC-C.AR	接着材	CFRP格子筋	走行疲労実験
RC-1	無補強	—	
RC-C	プライマー	CFRP格子筋	
RC-C.A	接着材	CFRP格子筋	

床版供試体 2 体、プライマーおよび接着材を塗布し CFRP 格子筋を配置して、下面増厚補強を行った供試体をそれぞれ 1 体ずつ作成し、輪荷重走行試験を行い、最大耐荷力を検証する。走行荷重実験は、荷重を載荷させ輪荷重を床版中央 900mm の範囲に 1 走行させ、床版中央で、停止させたわみを計測する。荷重は 1 走行 10kN ずつ増加する段階荷重載荷とする。

3.2 走行疲労実験

(1) 実験方法

RC 床版および下面増厚補強床版の耐疲労性の評価は実験走行回数より求められる等価走行回数を比較し行う。実験における荷重条件は、初期荷重を 80kN とし、20,000 回走行ごとに荷重を増加させる段階荷重載荷とする。たわみの計測は、床版中央にて車輪を停止させ 1、10、100、1,000、5,000 回走行ごとに計測し、それ以降は 5,000 回ごとに計測を行う。

(2) 等価走行回数

本実験は段階状載荷としたことから、マイナー則に従うと仮定すると、等価走行回数 N_{eq} は式 (1) で与えられる。式 (1) に適用する S-N 曲線の傾きの逆数 m には松井ら⁵⁾が提案する 12.7 を用いる。

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

ここで、 N_{eq} : 等価走行回数 (回)、 P_i : 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)

3.3 S-N曲線

(1) RC 床版の S-N 曲線

RC 床版の寿命予測には S-N 曲線が用いられる。松井らは 1964 年改定の道示によって設計された RC 床版を用いて輪荷重走行疲労試験を行いその結果より式 (2) を提案している。また、阿部ら⁶⁾は 1996 年改訂の道示によって設計された RC 床版に対して輪荷重走行疲労実験を行い式 (3) を提案している。松井らが提案する S-N 曲線⁵⁾ :

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

阿部らが提案する S-N 曲線⁶⁾

$$\log (P/P_{sx}) = -0.06417 \log N + \log 0.996 \quad (3)$$

ここで、P：基準荷重、 P_{sx} ：はり幅 B の押抜きせん断耐荷力 (kN)、N：繰返し回数 (回)

(2) 下面増厚補強補強法の S-N 曲線

走行荷重実験の結果より求められた、押抜きせん断耐荷力 P_{sx} を用いて、S-N 曲線における S 値を算出する。S 値は式 (4) として与えられる。

$$S = P/P_{sx} \quad (4)$$

ここで、P：基準荷重、 P_{sx} ：押抜きせん断耐荷力 (kN)

S-N 曲線の縦軸 S に用いる基準荷重 P は 60kN とする。N 値は輪荷重走行疲労実験により求められた等価走行回数 N_{eq} を用いる。

また、松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数 m は 12.7、阿部らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数 m は 15.58 である。

3. 4 疲労損傷度

玉越ら⁷⁾は、疲労損傷度 D ($= N/N_f$ 、N：繰返し回数、 N_f ：破壊に至る繰返し回数) を評価している。健全度区部 (健全度 I (潜伏期)：0～0.1、II (潜伏期)：0.1～0.2、III (進展期)：0.2～0.5、IV (加速期)：0.5～0.8、V (劣化期)：0.8～1.0) を設定し、破壊走行回数に乗じて、健全度を評価している。一方、阿部らの既往の研究⁸⁾によるとたわみが床版支間 L の 1/400 に達した付近で補強対策をする必要があると提案されている。そこで、本実験では RC 床版のたわみが 3mm となる等価走行回数を、前後のたわみと等価走行回数の関係から補間法により算出し、この時点の等価走行回数と破壊時の等価走行回数の比から RC 床版および下面増厚補強床版の健全度評価を行う。

4 実験結果

4.1 走行荷重実験

本実験における荷重とたわみの関係を図-2 に示す。供試体 RC-R1 の最大耐荷力は 170.7kN、RC-R2 の最大耐荷力は 166.2kN となり、平均耐荷力は 168.4kN であった。次に、プライマーを塗布して CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.R の最大耐荷力は 184.4kN である。RC 床版供試体に比して 1.07 倍の耐荷力性能を有している。また、接着剤を塗布し、CFRP 格子筋を配置した供試体は RC-C.A-R の最大耐荷力は 205.0kN であり、供試体 RC-R と比較し 1.2 倍の耐荷力性能を有している。CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強法による最大耐荷力を押抜きせん断耐荷力 P_{sx} とする。

4.2 走行疲労実験

本実験における無補強 RC 床版供試体および

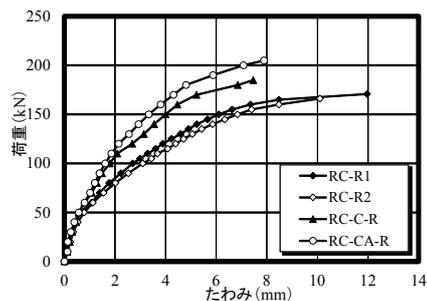


図-2 荷重とたわみの関係

下面増厚補強床版供試体の等価走行回数を表-7 に示す。供試体 RC-1 の等価走行回数 7.34×10^6 回を基準とし耐疲労性の評価を行う。プライマーを塗布した供試体 RC-C の等価走行回数 27.99×10^6 回で 3.8 倍となった。接着剤を塗布した供試体 RC-C.A の等価走行回数 141.10×10^6 回で 19.2 倍、供試体 RC-C の 5.0 倍の等価走行回数を得られた。これらの結果から、接着剤を塗布した供試体はたわみの大幅な低減が見られた。

4.3 健全度評価

(1) RC 床版供試体

RC 床版供試体 RC-1 のたわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 1.98×10^6 回である。破壊時の等価走行回数は 7.34×10^6 回であるたわみが 3mm に達した時点の疲労損傷度は 0.27 ($= 1.98 \times 10^6 / 7.34 \times 10^6$) となり、進展期に相当する損傷である。

(2) 下面増厚補強床版供試体

供試体 RC-C たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 13.91×10^6 回であり、破壊時の等価走行回数は 27.99×10^6 回である。たわみが 3mm に達した時点の疲労損傷度は 0.50 であり、進展期に相当する損傷である。供試体 RC-C.A のたわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 62.30×10^6 回であり、 141.10×10^6 回である。たわみが 3mm に達した時点での累積損傷度は 0.44 であり進展期に相当する損傷である。以上より、供試体 RC-C.A は RC-C と比較し、たわみの増加が抑制され、耐疲労性が向上している。床版支間 L の 1/400 を越えると、たわみの増加が著しくなり、押抜きせん断破壊に至っている。劣化過程は進展期から加速期 (前期) に達する前に、次期の補強対策の検討が必要になると考えられる。

ここで、本実験における RC 床版供試体および下面増厚補強供試体の 3mm 時の等価走行回数と破壊時の等価走行回数を表-7 に示す。

4.4 CFRP 格子筋下面増厚補強法の S-N 曲線

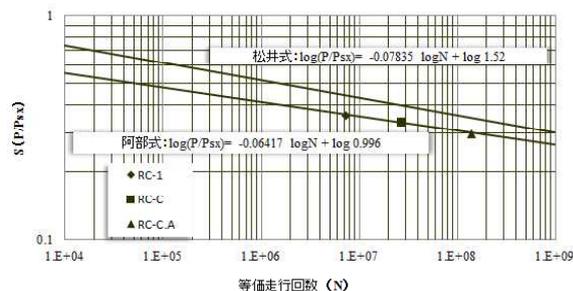
走行荷重実験によって求められた、S 値 (60/

表－7 等価走行回数および健全度区分

供試体	3mm時等価 走行回数	回数比	破壊等価走行回 数	回数比	疲労損傷 度 D	健全度区分
RC-1	1,980,000	—	7,347,504	—	0.27	進展期
RC-C	13,912,840	7.0	27,996,469	3.8	0.50	進展期
RC-C.A	62,300,000	31.5	141,107,332	19.2	0.44	進展期

表－8 S 値および N 値

供試体	最大耐力 P _{SX} (kN)	基準荷重 P(kN)	S値 (P/P _{SX})	N値 (等価走行回数)
RC-1	168.4	60	0.365	7,347,504
RC-C	184.4	60	0.325	27,996,469
RC-C.A	205.0	60	0.293	141,107,332



図－3 RC 床版および下面増厚床版の S-N 曲線
実験値) および、走行疲労実験によって算出
した等価走行回数 N 値を表－8 に示す。

以上より、CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法における S-N 曲線図を図－3 に示す。供試体 RC-1 は阿部らが提案する 1996 年改定の道示に準拠し設計を行った RC 床版を用いて評価された S-N 曲線状にプロットされている。また、供試体 RC-C および接着剤を塗布した供試体 RC-C.A も同様に阿部らが提案する S-N 曲線上にプロットされている。

これらの結果から、CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法および接着剤を塗布し CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法は、阿部らの提案する S-N 曲線式(3)の適用が可能である。

5. まとめ

(1) 下面増厚補強法の引張補強材に、炭素繊維を一体形成した CFRP 格子筋を配置することによって、無補強 RC 床版の 3.8 倍の等価走行回数が得られ耐疲労性が向上した。

(2) 増厚界面にエポキシ樹脂接着剤を塗布し、CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法は、無補強 RC 床版の 19.2 倍の等価走行回数
が得られ大幅な耐疲労性が得られ、たわみの

増加も抑制されている。

(3) 疲労損傷度から算出される健全度評価においては増厚界面にプライマーおよび接着剤を塗り CFRP 格子筋を配置した 2 種類の供試体共に共にたわみが 3mm 時の健全度は進展期となっており、この時点で次期の補強対策の検討が必要となると考えられる。

(4) CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強法における寿命予測や健全度評価に用いる S-N 曲線は、文献(6)に示される S-N 曲線が適用可能である。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル、2012.6.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I、II、III、2002.
- 3) FRP グリッド研究会：CFRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修・補強設計・施工マニュアル(案)、2001.4.
- 4) 阿部忠ほか：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐力評価 式に関する研究、構造工学論文集、Vol.53A、pp. 199-207、2007.
- 5) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版、2007.10.
- 6) 阿部忠、木田哲量、高野真希子、川井豊：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐力および耐疲労性の評価、土木学会論文集 A1、pp.39-54、2011.3.
- 7) 玉越隆史ほか：道路橋の計画的管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム(BMS)、国土交通省国土技術政策総合研究所(2009)
- 8) 阿部忠ほか：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 Vol.56A、pp.1270-1281、2010.3.