

論文

道路橋床版におけるサイクル補強法の耐疲労性

勝呂翔平*¹ 阿部 忠*²

(一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒 417-0801 静岡県富士市大淵 3154)
 博(工学), 日本大学教授, 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

要旨：本研究は，劣化した RC 床版に対して交通規制が容易な場合を想定し，1 次補強として SFRC 上面増厚補強および 2 次補強に CFS 下面接着補強した供試体と，規制が困難な場合を想定した 1 次補強に CFS 下面接着補強および 2 次補強に SFRC 上面増厚補強した供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い，耐疲労性を評価した．その結果，RC 床版の損傷が進展期相当に達した時点で 1 次，2 次補強を行うことで，無補強 RC 床版に比して，それぞれ 140，128 倍の補強効果が得られた．したがって，劣化した RC 床版においては，上面および下面を 2 サイクルまでの補強対策を講じることで大幅な延命化となるものの考えられる．
 キーワード：RC 床版，耐疲労性，維持管理

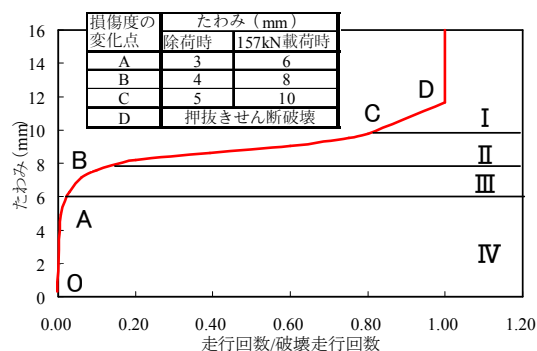
1. はじめに

道路橋は従来の事後保全型維持管理から 100 年間維持するための予防保全型維持管理へと移行されている¹⁾．橋梁部材のなかで最も損傷が著しい RC 床版においても長寿命化を図るために数回の補強サイクルが計画されている．しかし，RC 床版を数回のサイクルで補強した場合の補強対策や補強サイクルごとの損傷状況および耐疲労性の評価は明らかにされていないのが現状である．

そこで本研究では，RC 床版の 1 次補強として鋼繊維補強コンクリートによる上面増厚補強法(以下，SFRC 上面増厚補強とする)，再劣化に対する 2 次補強として炭素繊維シートによる下面接着補強法(以下，CFS 下面接着補強とする)を施した供試体と，1 次補強に CFS 下面接着補強，2 次補強に SFRC 上面増厚補強した 2 種類の供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い，1 次・2 次補強に対する耐疲労性を検証し，RC 床版の予防保全型維持管理計画立案の一助とする．

2. 補強床版の耐疲労性

予防保全型維持管理計画では，進展期相当で 1 次補強対策を講じ，再度，損傷状況が進展期に達した時点での 2 次補強対策が計画されている．筆者らは RC 床版を用いた輪荷重走行疲労実験によるたわみと等価走行回数/破壊走行回数の関係からたわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点から付近からたわみの増加が著しくなり破壊に至ることから，たわみが床版支間 L の 1/400 に達した付近が補強対策を講じる時期として提案している^{2), 3)}．一方，中谷らは⁴⁾，1964 年改訂道示に準拠して作製した RC 床版供試体に対して

図-1 たわみと走行回数/破壊走行回数の関係⁴⁾

輪荷重走行疲労実験を行い，たわみと走行回数/破壊走行回数の関係について図-1 として報告している．これによると，各損傷グレードと実験たわみの関係は，損傷グレード I はたわみが 10mm に達した時点であり，床版支間 L の 1/250 である．次に損傷グレード II は床版支間 L の 1/313，損傷グレード III が床版支間 L の 1/417 である．なお，図-2 に示す損傷グレード I は土木学会が示す劣化過程が劣化期，損傷グレード II は加速期，損傷グレード III は進展期，損傷グレード IV は潜伏期に相当するものである．したがって，床版たわみが床版支間 L の 1/400 に達する時期，すなわち損傷グレード III，劣化過程が進展期相当は，筆者らが提案する補強時期とほぼ近似している．したがって，筆者らが提案する床版たわみが床版支間 L の 1/400 付近で補強対策を講じることが，妥当であると考えられる．よって，本実験においても RC 床版および一次補強後におけるたわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点で補強対策を講じるものとする．

3. 使用材料および供試体寸法

3.1 使用材料

(1) RC床版供試体

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。また、鉄筋には SD295A D13 を使用した。コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-1 に示す。

(2) SFRC上面増厚補強材および接着剤

SFRC の配合は、材齢 3 時間後の設計基準強度を 24N/mm^2 とすることからセメントには超速硬セメントを用い、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 で配合する。SFRC の配合条件を表-2 に示す。SFRC の材齢 3 時間の圧縮強度は 24.5N/mm^2 である。次に、SFRC と RC 床版との増厚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）を用いる。

(3) 炭素繊維シート(CFS)

本実験に用いる CFS は、目付量 202g/m^2 、設計厚 0.111mm の炭素繊維シートおよびプライマー、CFS 接着用の接着剤を用いた。ここで、CFS の材料特性値を表-3 に示す。

3.2 供試体の種類および寸法・鉄筋配置

(1) 床版供試体

本供試体の寸法は 2002 年改訂の道示⁵⁾に準拠し、その 3/5 モデルとした。ここで、RC 床版供試体の寸法を図-2(1)に示す。RC 床版供試体の寸法は全長 1,600mm、支間 1,400mm、床版厚 150mm、鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置した。その有効高さは、それぞれ 125mm, 112mm とした。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。RC 床版供試体の記号を RC とする。

(2) RC床版+SFRC上面増厚補強+CFS下面接着補強

RC 床版に疲労損傷を与え、1 次補強に SFRC 上面増厚補強、2 次補強に CFS 下面接着補強を行う。ここで、概略寸法および床版厚を図-3(1)に示す。まず、既設 RC 床版供試体の上面かぶりを 10mm 切削し、研掃した後、SFRC を 40mm 増厚する。増厚後の床版全厚は 180mm である。次に、2 次補強法は、SFRC 上面増厚補強した RC 床版供試体の下面の支点間内 $1,300\text{mm} \times 1,300\text{mm}$ に CFS を軸直角方向および軸方向に各 1 層接着補強する。供試体記号を RC-S-C とする。

(3) RC床版+CFS下面接着補強+SFRC上面増厚補強

RC 床版に疲労損傷を与え、1 次補強に CFS 下面接着補強、2 次補強に SFRC 上面増厚補強を施す。供試体全厚は RC-S-C と同様である。ここで、概略寸法および床版厚を図-3(2)に示す。供試体記号を RC-C-S とする。

表-1 RC 床版材料の特性値

供試体	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)	ヤング係数 (kN/mm^2)
RC	30.0	D13	365	513	200
RC-S-C	35.0				
RC-C-S					

表-2 SFRC の配合

スラブ (cm)	W/C (%)	s/a	単位量 (kg/m^3)				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	鋼繊維
6.5 ± 1.5	39.5	51.2	430	170	851	858	100.0

表-3 CFS の材料特性値

補強材料名	目付量 (g/m^2)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
CFS	202	0.111	4420	235

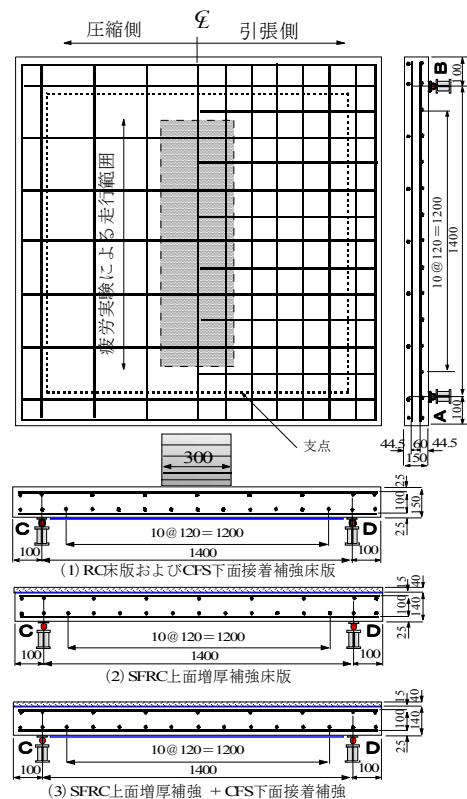


図-2 供試体寸法および鉄筋配置

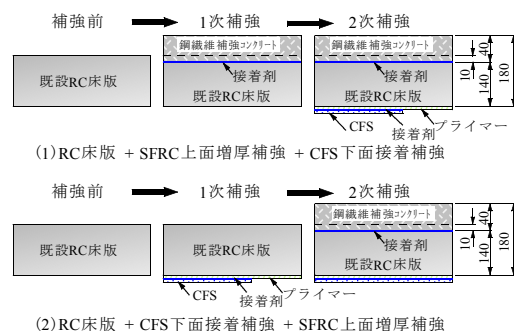


図-3 1次・2次補強床版

3.3 供試体の作製方法

(1) SFRC上面増厚補強床版供試体

SFRC 上面増厚補強法は、既設 RC 床版の上面を切削・研掃後に SFRC を直接上面増厚する施工法が一般的であるが、本実験では接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強を採用する。なお、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強法は、上面増厚工法設計施工マニュアル⁹⁾に準拠して製作する。製作方法は、RC 床版供試体の上面を 10mm 切削し、ショットブラストを用いて研掃後、接着剤を平均厚 1mm で塗布し、直ちに SFRC を打設する。

(2) CFS下面接着補強RC床版供試体

CFS 下面接着補強法は、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)⁷⁾に準拠して製作する。製作方法は、RC 床版供試体の下面をコンクリーサンダーで研磨して平滑に仕上げた後、CFS の付着性を高めるためにプライマーを塗布含浸させる。プライマーの 12 時間養生後、幅 500mm の CFS をエポキシ含浸樹脂で軸直角方向に全面接着する。12 時間養生後、同様に、軸方向に 2 層目を接着する。

4. 輪荷重走行疲労実験方法および等価走行回数

4.1 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は、RC 床版、1 次・2 次補強床版ともに幅 300mm の輪荷重を軸方向に 1,000mm の範囲を繰返し走行させる実験である。計測は輪荷重走行 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとにたわみを計測する。

(1) RC床版供試体

RC 床版供試体の輪荷重走行疲労実験は初期荷重 100kN から走行を開始し、2 万回走行ごとに荷重を 20kN ずつ増加する段階荷重载荷とする。RC 床版供試体の耐疲労性の評価は等価走行回数を算出し、RC 床版の等価走行回数を基準に補強床版の耐疲労性を評価する。

(2) 1次, 2次補強床版供試体

RC 床版に応力履歴を与える実験では荷重 100kN で 2 万回走行した後、荷重を 20kN 増加させ活荷重たわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点で走行を中断する。その後、1 次補強を行い、荷重 100kN から 140kN までは 2 万回走行ごとに 20kN ずつ荷重増加を行い、140kN 以降は 10kN ずつ荷重を増加させ、再度活荷重たわみが L/400 に達するまで輪荷重走行疲労実験を行う。次に、再損傷した RC 床版に 2 次補強を施し、荷重 100kN から 2 万回走行ごとに 20kN ずつ荷重増加させ破壊に至るまで走行と荷重の増加を行う。

4.2 走行疲労実験における等価走行回数

本実験における輪荷重走行疲労実験は、2 万回走行

ごとに荷重を増加する段階荷重载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、S-N 曲線の傾きの逆数 m には松井らが提案する 12.7 を適用する^{8), 9)}。また、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強床版および CFS 下面接着補強床版における等価走行回数の算定式は、筆者ら^{2), 3)}が提案する疲労損傷による D-N 曲線から得られた低減係数³⁾および湿潤状態におけるコンクリート劣化係数^{10), 11)}を考慮した補強等価走行回数 N_{D0-eq} を式(2)から算定する。

1) RC 床版の等価走行回数

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

2) SFRC・CFS 補強床版の補強等価走行回数

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

$$N_{eqi} = (P_i/P)^{m \times n_i} \quad (2.1)$$

接着剤塗布型 SFRC 上面補強床版の劣化係数²⁾

$$D_{Di} = -0.0716 \log N_{eqi} + 1.1 \quad (2.2)$$

CFS 下面接着補強床版の劣化係数³⁾ :

$$D_{Di} = -0.0541 \log N_{eqi} + 1.1 \quad (2.3)$$

ここで、 P_i : 載荷荷重 (kN), P : 基準荷重 (= 72kN), n_i : 実験走行回数 (回), m : S-N 曲線の傾きの逆数 (= 12.7), N_{eqi} : 実験走行回数ごとの等価走行回数(式(2.1)), D_{Di} : D-N 曲線(式(2.2), 式(2.3)), D_C : 湿潤状態におけるコンクリート劣化係数 (= 0.70)^{10), 11)}, D_S : 使用鉄筋係数 (= f_{yd-SR} / f_{yd-SD} , f_{yd-SR} : 丸鋼の降伏強度, f_{yd-SD} : 異形棒鋼の降伏強度), D_E : 環境条件による係数 (= 1.0)

5. 実験結果および考察

5.1 等価走行回数

RC 床版の等価走行回数(式(1))および 1 次・2 次補強した床版供試体の補強等価走行回数(式(2))を表-4に示す。

(1) RC床版供試体 (RC)

RC 床版供試体 RC の破壊時の等価走行回数は 14.39×10^6 回である。この等価走行回数を基準に 1 次・2 次補強床版の補強効果および耐疲労性を評価する。

(2) 1次, 2次補強床版供試体 (RC-S-C)

供試体 RC-S-C は荷重 120kN で走行中にたわみが支間 L の 1/400 に達し、その時点の等価走行回数は 9.17×10^6 回である。ここで、1 次補強として接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強後、再度たわみが床版支間 L

表-4 等価走行回数および補強等価走行回数

供試体	等価走行回数および補強等価走行回数			等価走行回数 および補強等価 走行回数の合計	補強効果
	RC床版	一次補強床版	二次補強床版 (破壊)		
RC	14,390,941	(破壊)		14,390,941	—
RC-S-C	9,179,338	(1/400)	1,926,285,815	2,021,385,478	140.5
RC-C-S	9,179,338	(1/400)	1,754,582,687	1,846,954,435	128.3

の 1/400 に達した時点での走行荷重は 150kN であり、補強等価走行回数は 85.92×10^6 回である。ここで、再劣化に対する 2 次補強として CFS 下面接着補強を施し、輪荷重走行疲労実験を行い、破壊時の補強等価走行回数は $1,926.28 \times 10^6$ 回である。したがって、RC 床版の疲労損傷に対する補強および再劣化に対する再補強を施した破壊時までの累積補強等価走行回数は $2,021.30 \times 10^6$ 回である。累積補強等価走行回数と RC 床版供試体の等価走行回数を比較すると、損傷が軽微なうちに補強することで RC 床版の 140.49 倍の補強効果が得られた。

(3) 1次、2次補強床版供試体 (RC-C-S)

供試体 RC-C-S は荷重は 120kN で走行中にたわみが床版支間 L の 1/400 に達し、この時点の等価走行回数は 9.17×10^6 回である。この時点で、1 次補強に CFS 下面接着補強を施し、再度、補強床版のたわみが支間 L の 1/400 に達した時点で 2 次補強を行う。補強後の実験では荷重 150kN で走行中にたわみ L/400 に達した。この時点の補強等価走行回数は 83.19×10^6 回である。再劣化に対する 2 次補強として接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強を施した破壊時までの累積補強等価走行回数は $1,754.58 \times 10^6$ 回である。よって、供試体 RC-C-S の累積補強等価走行回数は $1,846.95 \times 10^6$ 回であり、RC

床版供試体の 128.34 倍の補強効果が得られた。

以上より、RC 床版の疲労損傷が床版支間 L の 1/400 に達した時点、すなわち劣化過程が進展期程度で 1 次補強を施し、再劣化に対しても進展期から加速期(前期)の時点で 2 次補強を施すことで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。

5.2 補強時のたわみとひび割れ損傷の関係

RC 床版の疲労損傷に対する補強対策は、一般的に損傷が進展期から加速期(前期)で実施している¹⁾。一方、阿部ら^{2), 3)}は床版たわみが床版支間 L の 1/400 に達した付近で補強対策を講じるように提案している。本実験では、補強時期の推定としてたわみが床版支間 L の 1/400 付近に達した時点で、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強および CFS 下面接着補強を施すこととする。ここで、RC 床版たわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点のたわみと補強等価走行回数の関係、補強後の再劣化におけるたわみと補強等価走行回数の関係およびひび割れ状況を図-4, 5 に示す。

(1) 1次、2次補強床版供試体 (RC-S-C)

供試体 RC-S-C のたわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点のたわみと等価走行回数の関係は図-4(1)に示すが、たわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点の

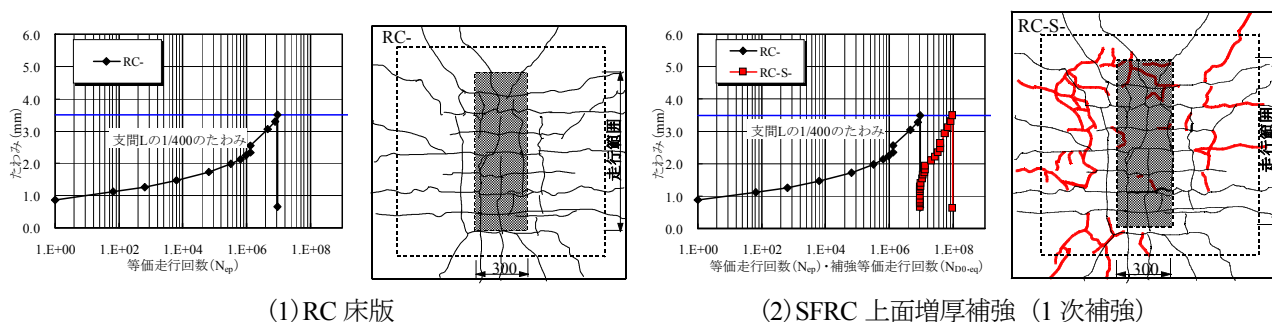


図-4 1次、2次補強床版供試体 (RC-S-C)

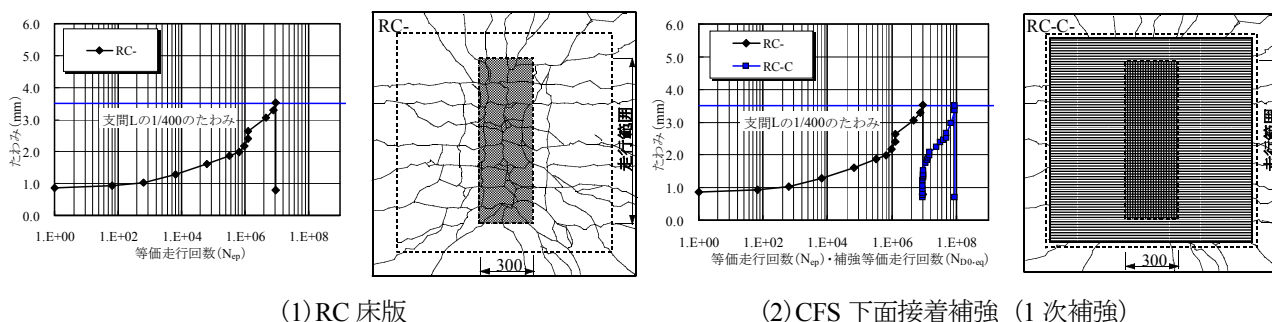
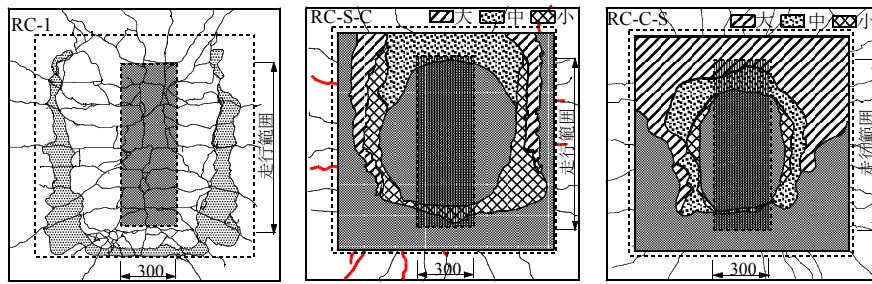


図-5 1次、2次補強床版供試体 (RC-C-S)



(1) RC 床版 (RC) (2) 2次補強床版 (RC-S-C) (3) 2次補強床版 (RC-C-S)

図-6 破壊状況

等価走行回数は 9.17×10^6 回である。この時点のひび割れ損傷は2方向のひび割れが発生し、劣化過程は進展期に相当する損傷である。ここで、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強を施し、再度、輪荷重疲労実験を実施した。再劣化時のたわみと等価走行回数の関係は図-4(2)に示すように、たわみが床版支間 L の $1/400$ の時点の等価走行回数は 85.06×10^6 回であり、ひび割れ損傷は2方向のひび割れの範囲が広がっている。ここで、再劣化に対する2次補強として CFS 下面接着補強を施し、破壊するまで輪荷重走行実験を実施する。

(2) 1次、2次補強床版供試体 (RC-C-S)

供試体 RC-C-S のたわみと等価走行回数の関係は図-5(1)に示すように、たわみが床版支間 L の $1/400$ 付近での等価走行回数は 9.17×10^6 回、たわみは 3.53mm であり、わずかに供試体 RC-S-C を上回っている。この時点のひび割れ状況は2方向のひび割れが発生し、劣化過程は進展期に相当する。供試体 RC-S-C と比較するとひび割れがやや多く発生している。ここで、ひび割れ損傷に対する1次補強として CFS 下面接着補強を施し、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達するまで輪荷重走行疲労実験を行った。たわみと補強等価走行回数の関係は図-5(2)に示すように再びたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の補強等価走行回数は 83.19×10^6 回である。再損傷の状況は CFS を全面接着補強したことから損傷状況の確認はできない。よって、打音法により CFC のはく離状況を確認した結果、はく離は全く見られない。この時点で、再劣化に対する2次補強対策として接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強を施し輪荷重走行疲労実験を破壊するまで実施した。

5.3 破壊状況

RC 床版および1次、2次補強床版の破壊状況を図-6に示す。

(1) RC床版

RC 床版供試体のひび割れ状況は図-6(1)に示すように、2方向ひび割れが発生し格子状を形成している。破壊は輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。

(2) 1次、2次補強床版供試体 (RC-S-C)

供試体 RC-S-C における破壊時のひび割れ状況は図

6(2)に示すように、RC 床版のダウエル効果の影響を受ける範囲で CFS のはく離が著しい。破壊は押抜きせん断破壊と同時に CFS がはく離破壊している。なお、CFS の破断は見られない。

(3) 1次、2次補強床版供試体 (RC-C-S)

供試体 RC-C-S の破壊時の損傷状況は図-6(3)に示すように2次補強した供試体 RC-S-C と同様に押抜きせん断破壊と同時に CFS のはく離破壊となっている。本実験では CFS 全面接着補強したことから目視によるひび割れの確認ができない結果となった。

5.4 たわみと等価走行回数の関係

本実験におけるたわみと等価走行回数の関係を図-7に示す。疲労損傷度 D と劣化過程の関係について玉越ら¹²⁾は、疲労破壊に至る走行回数と N_f と累積される荷重の走行回数 N_b の比を疲労損傷度 $D (= N_b/N_f)$ とし、劣化過程が潜伏期の範囲を $D = 0.1 \sim 0.2$ 、進展期が $D = 0.2 \sim 0.5$ 、加速期 $D = 0.5 \sim 0.8$ 、劣化期が $D = 0.8 \sim 1.0$ として区分している。そこで、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の等価走行回数から累積損傷度 D を算定し、劣化過程を示す。

(1) RC床版

RC 床版供試体は図-7に示すように、たわみが床版支間 L の $1/400$ 、すなわち 3.5mm を超えた付近の等価走行回数は 5.77×10^6 回である。破壊時のたわみは 5.8mm である。ここで、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の等価走行回数と破壊時の等価走行回数との比、すなわち疲労損傷度 D は 0.40 であり、進展期に相当する損傷である。

(2) 1次、2次補強床版供試体 (RC-S-C)

供試体 RC-S-C のたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時点の等価走行回数は 9.17×10^6 回、荷重除荷時の残留たわみは 0.66mm であり、これを1次補強における初期値とする。1次補強後の残留たわみは 0.62mm であり、累積たわみは 1.28mm である。ここで、再損傷に対する2次補強として CFS 下面接着補強を施して破壊するまで輪荷重走行疲労実験を行った。2次補強後における破壊時のたわみは補強等価走行回数 1926.81×10^6 回で 6.54mm である。この累積残留たわみ

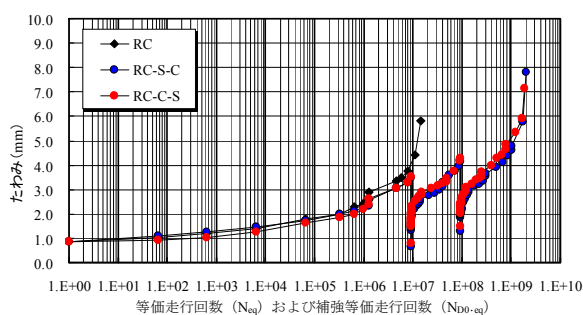


図-7 たわみと等価走行回数の関係

を初期値として 2 次補強におけるたわみを累積すると補強等価走行回数 2021.06×10^6 回で 7.82mm である。

(3) 1次、2次補強床版供試体 (RC-C-S)

RC 床版供試体のたわみ $L/400$ に達した付近の等価走行回数は 9.17×10^6 回であり、荷重除荷時の残留たわみ 0.80mm である。ここで、1 次補強として CFS 下面接着補強を行い、たわみ $L/400$ に達した時点の補強等価走行回数は 83.19×10^6 回、残留たわみは 0.70mm である。その後、2 次補強として接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強を施し、たわみ $L/400$ に達した時点では等価走行回数 1754.58×10^6 回でたわみが 5.64mm である。残留たわみが 0.80mm、1 次補強後の残留たわみが 0.70mm で累積残留たわみが 1.50mm であることから、2 次補強におけるたわみを累積すると補強等価走行回数 1846.95×10^6 回で 7.14mm である。

6. まとめ

本研究は道路橋 RC 床版を予防保全型維持管理計画において 1 次、2 次補強を施した場合の耐疲労性を評価した結果、以下が判明した。

(1) 1 次補強に SFRC 上面増厚、2 次補強に CFS 下面接着補強した供試体の累積等価走行回数は RC 床版の等価走行回数に比して 140.5 倍、1 次補強に CFS 下面接着補強、2 次補強に SFRC 上面増厚補強した供試体の累積等価走行回数は 128.3 倍となった。したがって、RC 床版の劣化過程が進展期から加速期程度で補強対策を講じることで延命化が図れるものと考えられる。なお、等価走行回数の算定において、本実験では雨水による湿潤劣化係数などの各種劣化回数を適用して算定したが、さらには塩害や凍害等の建設地域の環境等を考慮した劣化係数の適用が必要である。

(2) RC 床版の疲労損傷におけるたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時期の疲労損傷度 D は 0.40 であり、劣化過程は進展期に相当する。また、再劣化に対する補強後の劣化過程は加速期 (前期) に相当する。事後保全では損傷が顕在化した時期、すなわち加速期 (後期) から劣化期に掛けて取替も含めた大規模な補強対策を講じている。これに対して予防保全型維持管理計画で

は床版たわみが $L/400$ に達した時期を目安に補強対策を講じることで延命化が図られる結果となった。なお、実橋においてのたわみの計測は、補強対策後のモニタリングが必要となる。

(3) 道路橋寿命化修繕計画における RC 床版の修繕計画には、交通規制が容易な場合や床版上面にスケーリングなどの損傷が発生している場合には 1 次補強を接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強、2 次補強に CFS 下面接着補強を行い、交通規制が困難な場合は 1 次補強に CFS 下面接着補強、2 次補強に接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強対策を計画することを提案する。

参考文献

- 1) 千葉県県土整備部道路環境課企画調整室：千葉県橋梁長寿命化修繕計画 (案), 2010.
- 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, Vol. 56A, pp. 1270-1281, 2010.
- 3) 元 燦豪, 阿部 忠, 木田哲量, 高野真希子, 小森篤也：CFS・CFSS 補強した RC 床版の補強効果および耐疲労性, 構造工学論文集, Vol. 58A, pp. 1189-1196 (2012.3)
- 4) 中谷昌一, 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸, 宮崎和彦, 川間重一, 松尾伸二：道路橋 RC 床版の疲労耐久性に関する試験, 国総研資料 No.28, 2002.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III (2002)
- 6) (財) 高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル (1995)
- 7) 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).
- 8) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版 (2007)
- 9) 川井豊, 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子：道路橋 RC 床版の S-N 曲線に関する一考察, 第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.263-274, 2012.
- 10) 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).
- 11) RILEM Committee 36-RDL. : Long term random dynamic loading of concrete structures. Materials and Structures, 17(9), RILEM, 1-28 (1984)
- 12) 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)