

旧銚子大橋 RC 床版を供試体とした SFRC 上面増厚補強と 炭素繊維ストランドシート下面補強による耐疲労性の実験研究

Fatigue resistance of the former Choshi ohashi bridge RC slabs with SFRC overlay and CFSS adhesion

山下順平*, 阿部忠**, 木田哲量***, 高野真希子****
Jyunpei Yamashita, Tadashi Abe, Tetsukazu Kida, Makiko Takano

*日本大学院 生産工学研究科土木工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

** 博 (工), 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)

***工博, 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)

****中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) 土木技術部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 1-23-7)

The former ChoshiOhashi Bridge was constructed in 1962 and totally damaged in 2009 for serving over 49 years as Roadway Bridge. By comparison, the remaining number of equivalent cycles for the RC slab partly recast with concrete in 2007 had reinforced with CFSS at the bottom was 30 times larger. In addition, the remaining number of equivalent cycles of RC slab with the top overlaid with SFRC in 1985 had reinforced with CFSS at the bottom was 50 times larger. Therefore, the method of reinforcing RC slab bottom with CFSS and overlaying the slab top with SFRC had proven to be an effective secondary method for reinforcing RC slabs as increasing the service life cycles of the Roadway bridges.

Key Words: RC slab, SFRC overlay, CFSS reinforcement Wheel running fatigue testing

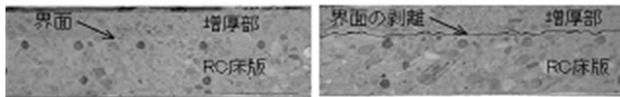
キーワード: RC 床版, SFRC 上面増厚補強, CFSS 下面補強, 輪荷重走行疲労実験

1. はじめに

近年、道路橋 RC 床版の劣化が急速に進み、社会問題化していることから、地方公共団体では 15m 以上の橋梁を対象とした点検が実施され、その補修・補強対策が計画されている。特に、1950 年代から 1960 年代に建設された道路橋の RC 床版は、設計基準の変遷に伴う床版厚や鉄筋量の不足や交通量の増大、さらには過積載などにより疲労寿命が低下している。よって、これらの年代に建設された道路橋 RC 床版の長寿命化を図るために補修・補強法および維持管理手法の確立が急務となっている。RC 床版の劣化損傷に対する補強法として、ひび割れの抑制や耐疲労性の向上を目的とした炭素繊維シートを用いた下面接着補強法がある¹⁾。さらに近年では、格子状に接着することから補強後の目視点検や床版上面から浸透した雨水の排水が可能となった炭素繊維ストランドシート下面格子接着補強法（以下、CFSS 下面補強）が研究されている²⁾。また、上面劣化に対する補強法には鋼繊維補強コンクリートを用いた上面増厚補

強法（以下、SFRC 上面増厚補強法）がある³⁾⁴⁾⁵⁾。これらの補強法は、一次補強法としての耐疲労性は評価されているが、劣化 RC 床版を用いた二次補強法についての耐疲労性の評価に関する実験研究はあまり行われていないのが現状である。しかし、地方公共団体が実施している道路橋長寿命化修繕計画においては 100 年間維持させるためには二次、三次補強を取り入れた修繕計画が検討されている。したがって、一次補強後の再劣化した RC 床版の二次補修・補強についての検討が必要となる。

そこで本研究では、1962 年に建設され 2009 年までの 47 年間供用された旧銚子大橋から撤去した RC 床版を用いて、長寿命化を図るために CFSS 下面補強および SFRC 上面増厚補強による補修・補強を行い、耐疲労性を評価する。旧銚子大橋 RC 床版は、1985 年に一次補強として SFRC 上面増厚補強が施され、その後、一部の床版が増厚界面ではなく離が生じたために 2007 年に打換補修されている。実験に用いる供試体は 1985 年に一次補強された RC 床版、および 2007 年に再補修された RC 床版の 2 タイプを用いて、二次補強法として SFRC 上面増厚補強



(1) 2007 年打換補修 RC 床版 (2) 1985 年 SFRC 上面増厚補強 RC 床版
写真-1

および SFRC 上面増厚補強と CFSS 下面補強を用いて補強を行い、補強した RC 床版の耐疲労性を評価し、長寿命化修繕計画における RC 床版の補修・補強法の確立の一助とする。

2. 旧銚子大橋 RC 床版の概要

2.1 旧銚子大橋の補修・補強歴

旧銚子大橋の RC 床版は、1956 年改訂の道示⁶⁾の基準で設計され、施工は旧道路公団によるものである。建設当時の設計荷重は 80kN であり、床版厚さは 160mm である。旧銚子大橋 RC 床版の補修・補強歴として、供用開始から 23 年後の 1985 年に、耐荷力性能および耐疲労性の向上のために、RC 床版の上面を 10~20mm 切削し、70mm~80mm の SFRC 上面増厚補強が施され、床版厚は 220mm であった（以下、1985 年 SFRC 上面増厚補強 RC 床版とする）。また、2007 年には増厚界面ではなく離が生じたことから、2007 年に一部打換補修が行われた（以下、2007 年打換補修 RC 床版とする）。ここで、撤去時の RC 床版の切断面を写真-1 に示す。2007 年打換補修 RC 床版供試体は、一部打換補修された床版であることから増厚界面ではなく離は見られない。次に、1985 年 SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体は、増厚界面が完全にはく離している。

2.2 RC 床版および SFRC 上面増厚のコンクリート圧縮強度

2007 年打換補修 RC 床版および 1985 年 SFRC 上面増厚補強 RC 床版のコンクリートから $\phi 50\text{mm}$ のコアを採取して、RC 床版部および SFRC 上面増厚部の圧縮試験を行った。その結果、コンクリートの平均圧縮強度は 38.2N/mm^2 であり、2004 年改訂の道路橋示方書・同解説（以下、道示とする）⁷⁾に規定する設計基準強度 24N/mm^2 の 1.6 倍である。また、SFRC の平均圧縮強度は 60.7N/mm^2 である。

3. 供試体概要および補強方法

3.1 旧銚子大橋供試体の寸法および使用鉄筋

供試体寸法は、撤去時の床版寸法を考慮して、橋軸直角方向および橋軸方向ともに $1,600\text{mm} \times 1,600\text{mm}$ の正方形版とし、床版支間は両方向ともに $1,400\text{mm}$ とする。ここで、RC 床版供試体の寸法および鉄筋の配置を図-1 に示す。また、鉄筋には SR235 を使用し主鉄筋は 120mm 間隔、圧縮鉄筋は引張主鉄筋の $1/2$ の鉄筋量が配置されている。配力筋は引張側および圧縮側ともに $200\text{mm} \sim 230\text{mm}$

表-1 コンクリート・鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)		引張強度 (N/mm^2)		弾性係数 (kN/mm^2)	
		主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋
	38.2	298	287	418	402	200	

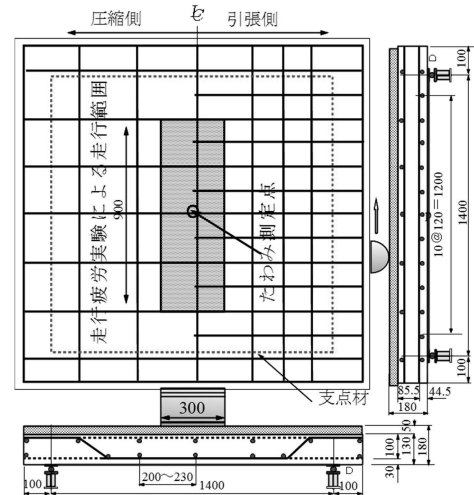


図-1 供試体寸法および鉄筋の配置

間隔で配置されている。2007 年打換補修 RC 床版は、打換後 3 年程度供用された床版である。床版寸法が 1600mm 、床版支間が 1400mm の RC 床版を車輪幅 300mm に合わせてモデル化したことから、連続版の最小寸法と SFRC 上面増厚部の最小骨材寸法と施工厚さを考慮して、SFRC 上面増厚部を 40mm 切削し、床版厚 180mm とした。また、切出し部の鉄筋頭部の付着力を確保するために鉄筋頭部の付着力を確保するために鉄筋頭部を溶接加工した。ここで、コンクリート・鉄筋の材料特性値を表-1 に示す。

3.2 補強方法および補強材料

(1) 2007 年打換補修 RC 床版

2007 年打換補修 RC 床版を基準に輪荷重走行疲労実験を行い、等価走行回数を評価する。ここで、2007 年打換補修 RC 床版供試体の記号を No.1 とする。

(2) CFSS 下面補強 RC 床版

2007 年打換補修 RC 床版の劣化過程は加速期に相当するため、耐荷力性能および耐疲労性能の向上を目的に、この RC 床版下面に CFSS 下面接着補強し、2007 年打換補修 RC 床版の残存等価走行回数と比較して補強効果を検証する。ここで、2007 年打換補修 RC 床版下面に CFSS を格子状に接着補強した供試体の記号を No.2 とする。

1) CFSS 補強材料

通常の RC 床版下面補強では⁸⁾、CFS を軸直角方向および軸方向全面に接着補強する方法が従来採用されており、施工実績も多い。しかし、CFS を下面全面に接着補強した場合は、床版上面からの雨水の浸透により CFS 接着界面に滞水して接着剤の劣化が加速され、さらには補強後の橋梁点検におけるひび割れ進展の確認が困難である。これに対して CFSS は格子状に貼り付けが可能

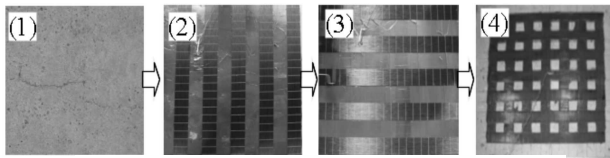


図-2 CFSS 下面接着補強の施工手順

であることから格子間からの雨水の排水や目視点検が可能である。また、同時に広範囲に施工でき、CFS 補強におけるプライマー処理およびそれに伴う養生が不要であることから施工の省力化になる。これは、CFRP スtrandを用いるため、炭素繊維への樹脂含浸工程が不要である。そこで、今回の実験では、CFSS の繊維量を CFS の繊維量と同量として接着補強した。1 層当たりの繊維量が比較して多く、格子貼りで施工が可能である。2007 年打換補修 RC 床版下面には CFSS を格子状に接着補強する。供試体に用いる CFSS は、目付量 600g/m^2 、厚さ 0.333mm とした。この場合の CFSS の炭素繊維剛性 EA は、 41 (E :引張弾性率 $2.45 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, A :断面積 $0.167 \times 10^{-6} \text{mm}^2$) である。なお、CFSS の引張強度 $3,400 \text{N/mm}^2$ 、引張弾性 $2.45 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ である。また、接着剤には、CFSS 接着専用のエポキシ系樹脂接着剤を使用した。

2) CFSS 下面補強の施工手順

CFSS 下面接着補強の施工手順を図-2 に示す。CFSS 下面補強法は、2007 年打換補修 RC 床版供試体の接着範囲である床版支間内の下面をサンダーで平滑に仕上げる (図-2, (1))。次に、接着面以外を保護して専用のエポキシ樹脂系接着剤を塗布し、床版支間端部 50mm の位置より幅 100mm 間隔の CFSS を軸直角方向に 100mm 間隔で配置して接着する (図-2, (2))。その後、軸方向も同様に接着して格子状を形成する (図-2, (3), (4))。

(3) SFRC 上面増厚再補強 RC 床版

1985 年 SFRC 上面増厚補強 RC 床版は、全ての供試体で既存 RC 床版と SFRC 上面増厚界面が完全にはく離していた。そこで 1985 年 SFRC 上面増厚補強 RC 床版に対する補強対策は、SFRC 上面増厚を撤去し、既存の RC 床版に増厚界面の合成を高めるために接着剤を塗布し、新たに SFRC 上面増厚補強を行う (以下、SFRC 上面再増厚補強 RC 床版とする)。床版厚は、2007 年打換補修 RC 床版と同様に 180mm を目標とし、SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置間隔は、図-1 と同様とした。ここで、SFRC 上面増厚再補強 RC 床版供試体の記号を No.3,4 とする。

1) SFRC 上面増厚補強材料

新たに SFRC 上面増厚補強する SFRC の設計基準強度は、材齢 3 時間で 24N/mm^2 を目標に、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 ($12.7 \text{vol}\%$) で配合した。本供試体 SFRC の圧縮強度は、上面増厚施工後の養生 3 時間で 26N/mm^2 、試験開始時 (114 日後) で 66.2N/mm^2 である。ここで、SFRC の配合表を表-2 に示す。また、増厚補強された床版が数年程度

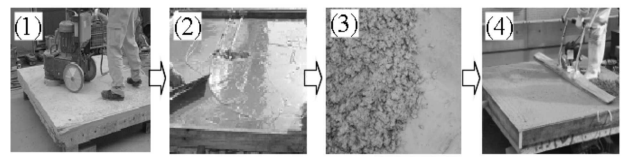


図-3 SFRC 上面増厚補強の施工手順

表-2 SFRC 配合表

スランプ (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

の早期の段階で、打継ぎ界面ではなく離損傷が生じる場合があり、増厚補強された床版の補強効果の信頼性が損なわれている。また、筆者らは SFRC 上面増厚補強における耐疲労性を回復させるために増厚界面に接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強した RC 床版の耐疲労性を評価した。その結果、従来型の SFRC 上面増厚補強に比して 3.5 倍以上の寿命が延びている。³⁾ そこで、旧銚子大橋 RC 床版の再補強には増厚界面の付着性を高めるために、高耐久型エポキシ樹脂接着剤を用いた。接着剤の材料特性値は、圧縮強さが 102.88N/mm^2 、曲げ強さが 41.16N/mm^2 、コンクリートの付着強さは 3.7N/mm^2 である。

2) SFRC 上面増厚補強の施工手順

SFRC 上面増厚補強法の施工手順を図-3 に示す。旧 SFRC 上面増厚部は、RC 床版コンクリートと SFRC との付着性を高めるために、RC 床版部凹凸に切削されていた。そこで、コンクリート表面を大型のサンダーで平滑に仕上げ (図-3 (1))、付着性を高めるためにショットブラスト研掃機を用いて投射密度 150kg/m^2 で表面仕上げした。次に、エポキシ系の接着剤を厚さ 1mm で塗布する (図-3 (2))。その後、ジェットモーター車により混練した SFRC を 50mm 増厚して (図-3 (3)) 表面仕上げをした (図-3 (3))。供試体の床版全厚は 180mm を目標とした。

(4) CFSS・SFRC 併用補強 RC 床版

二次補強した場合を想定し、1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版に対して SFRC 上面増厚補強と CFSS 下面補強を併用した補強を施した。施工手順はそれぞれ供試体 No.2、No.3,4 と同様とする。ここで、CFSS・SFRC 併用補強 RC 床版供試体の記号を No.5,6 とする。

4. 実験方法

4.1 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

本実験に用いた走行振動疲労試験装置は、鋼製の反力フレームのほかに、鋼製の車輪 (幅 30cm) と油圧式の振動疲労試験機 (500kN) を固定し、供試体を設置した台車をモーターとクランクアームにより水平方向へ往復運動させて荷重の走行状態を実現するものである。走行実験装置を写真-2 に示す。



写真-2 輪荷重走行疲労実験装置

(2) 輪荷重走行疲労実験

輪荷重走行疲労実験は、床版中央から±500mm の範囲 (1000mm) に輪荷重を連続走行させる実験である。これは、本供試体の支間は 1400mm、床版厚が 180mm であるが、荷重が 45 度に分布することを考慮して荷重の分布が橋軸方向および橋軸直角方向ともに支間内に収束する条件を満たす物である。また、支持条件は橋軸直角方向を単純支持とし、軸方向は弾性支持とした。荷重載荷方法は、100kN から 140kN まで 2 万回走行ごとに 20kN ずつ増加させ、140kN 以降は各 2 万回走行ごとに荷重を 10kN ずつ増加する段階荷重とした。たわみの計測は 1、10、100、1000、5000 回および 5000 回以降は 5000 回走行ごとに行う。

4.2 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

本実験における走行疲労実験は、2 万回ごとに荷重を増加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、輪荷重の設置幅 (300mm) が道示 I に規定する T 荷重設置幅 (500mm) の 3/5 であることから、基準荷重は活荷重 100kN に衝撃係数と安全率を考慮した 1.5 を加えた 150kN の 3/5 の 90kN とする。また、松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数 m には 12.7 を適用する⁹⁾。

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

ここで、 N_{eq} ：等価走行回数 (回)、 P_i ：載荷荷重 (kN)、 P ：基準荷重 (=90kN)、 n_i ：実験走行回数 (回)、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数 (=12.7)

5. 実験結果および考察

5.1 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

本実験における実験走行回数および式 (1) より算出した等価走行回数を表-3 に示す。

(1) 2007 年打換補修 RC 床版供試体 (No. 1)

供試体 No.1 は、2007 年に SFRC 上面増厚再補強後、約 3 年間供用した後に撤去された RC 床版である。本実験では、初期荷重 80kN、100kN で各 2 万回走行し、荷重 120kN で 7,816 回走行して破壊となった。この供試体の等価走行回数を式

(1) より算出すると 382,508 回である。この供試体 No.1 の等価走行回数を基準に耐疲労性を評価する。

(2) CFSS 下面補強供試体 (No. 2)

供試体 No.2 下面に CFSS を軸直角方向および軸方向に格子状に接着することで耐荷力および耐疲労性が向上することから、輪荷重走行疲労実験では初期荷重を 100kN として 2 万回走行し、その後、荷重 120kN、140kN で、それぞれ 2 万回走行した。その後、荷重 150kN で 9,186 回走行して破壊となり、等価走行回数は 11,956,558 回である。供試体 No.1 の残存等価走行回数と比較すると 31.3 倍となり、CFSS 下面補強することにより耐疲労性が大幅に向上した。したがって、従来型の SFRC 上面増厚した RC 床版を CFSS 補強することで、延命が可能となった。

(3) SFRC 上面増厚再補強 RC 床版供試体 (No. 3, 4)

供試体 No.3,4 は、SFRC 上面増厚補強においても耐荷力と耐疲労性が向上が期待できることから、CFSS 下面補強した供試体と同様に、初期荷重を 100kN とし、120kN、140kN で各 2 万回走行させ、その後、荷重 150kN で 2 万回走行した。供試体 No.3 は、荷重 160kN で 1,951 回、供試体 No.4 は荷重 160kN で 101 回走行して破壊した。平均等価走行回数は 20,911,051 回となり、供試体 No.1 と比較して 54.7 倍となった。したがって、SFRC 上面増厚補強法において増厚界面に接着剤を塗布して再補強する工法は、破壊時付近まで界面がはく離することがなく、耐疲労性が向上することから、二次、三次補強法として有効な工法である。

(4) CFSS・SFRC 併用補強 RC 床版供試体 (No. 5, 6)

供試体 No.5 は、初期荷重 100kN、荷重 120kN、140kN、150kN、160kN で各 2 万回走行させた。その後、供試体 No.5 は荷重 170kN で 3,800 回、供試体 No.6 は荷重 170kN で 1,001 回走行して破壊した。平均等価走行回数は 57,004,746 回となり、2007 年打換補修 RC 床版供試体と比較して 149.0 倍となった。また、SFRC 上面増厚再補強 RC 床版供試体と比較すると約 3 倍の補強効果が得られた。したがって、SFRC 上面増厚補強法において増厚界面に接着剤を塗布して再補強する工法と、曲げ引張強度を高める CFSS を格子状に接着を併

表-3 等価走行回数

供試体	走行回数	荷重および等価走行回数							合計等価走行回数	平均等価走行回数比	破壊モード
		80kN	100kN	120kN	140kN	150kN	160kN	170kN			
No.1	実験走行回数	20,000	20,000	7,816					382,508	—	押抜きせん断破壊
	等価走行回数	4,482	76,235	301,791							
No.2	実験走行回数		20,000	20,000		9,186			11,956,558	31.3	押抜きせん断破壊
	等価走行回数		76,235	772,278	5,470,133	5,637,912					
No.3	実験走行回数		20,000	20,000		20,000	1,951		22,365,409	54.7	押抜きせん断破壊
	等価走行回数		76,235	772,278	5,470,133	13,138,048	20,000				
No.4	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	20,000	101		19,456,694	54.7	押抜きせん断破壊
	等価走行回数		76,235	772,278	5,470,133	13,138,048	150,579				
No.5	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	3,800	61,512,389	149.0	押抜きせん断破壊
	等価走行回数		76,235	772,278	5,470,133	13,138,048	29,819,175	12,236,521			
No.6	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	1,001	52,497,103	149.0	押抜きせん断破壊
	等価走行回数		76,235	772,278	5,470,133	13,138,048	29,819,175	3,221,236			

用することで、さらに耐疲労性の向上が図られた。

5.2 たわみと等価走行回数の関係

たわみと等価走行回数の関係を図-4 に示す。

(1) 2007 年打換補修 RC 床版供試体 (No. 1)

供試体 No.1 のたわみと等価走行回数の関係は図-4 より、荷重 80kN 時の初期たわみは 1.1mm であり、その後走行回数 2 万回(等価走行回数 4,482 回)で 2.1mm に増加し、荷重を 100kN に増加した後からたわみの増加が著しくなり、2 万回走行後(等価走行回数 80,716 回)のたわみは 3.9mm である。荷重を 120kN に増加した後はたわみの増加が著しくなり、走行回数 7,816 回(等価走行回数 382,508 回)で破壊となり、そのたわみは 6.7mm である。

(2) CFSS 下面補強 RC 床版供試体 (No. 2)

供試体 No.2 に CFSS を格子状に接着補強したことから荷重 100kN 時の初期たわみは 0.8mm であり、現行道示に準拠した RC 床版の初期たわみとほぼ同等である。また、供試体 No.1 と比較すると荷重 100kN にもかかわらず 75%程度であり、この時点で CFSS 下面接着による補強効果が得られている。荷重 100kN で 2 万回(等価走行回数 76,235)の走行時ではたわみは 1.4mm で供試体 No.1 の 35%程度である。その後、荷重を 150kN に増加させた付近からたわみの増加が著しくなり、支間 L の 1/400⁵⁾を超えた付近から急激に増加し、破壊時のたわみは 5.5mm である。

(3) SFRC 上面増厚再補強 RC 床版供試体 (No. 3, 4)

供試体 No.3,4 は供試体 No.2 と同様に荷重 100kN 時の初期たわみは 0.8mm、荷重 100kN で 2 万回(等価走行回数 76,235 回)走行時のたわみは 1.5mm であり、供試体 No.2 とほぼ同様な増加傾向を示している。その後の荷重を 160kN に増加して走行した付近、すなわち等価走行回数 19,456,694 回を超えた付近からたわみが急激に増加し、最大たわみは 5.7mm である。

(4) CFSS・SFRC 併用補強 RC 床版供試体 (No. 5, 6)

SFRC 上面増厚再補強および CFSS 下面補強 RC 床版供試体 No.5 の荷重 100kN 時の初期たわみは 0.7mm で

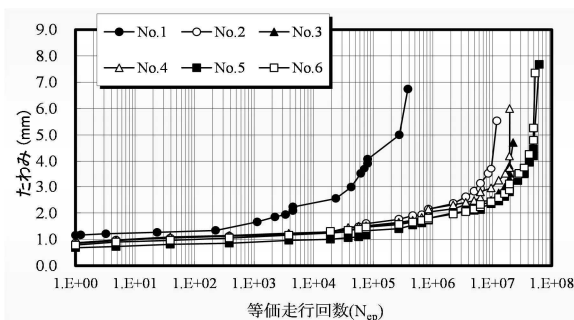


図-4 たわみと等価走行回数の関係

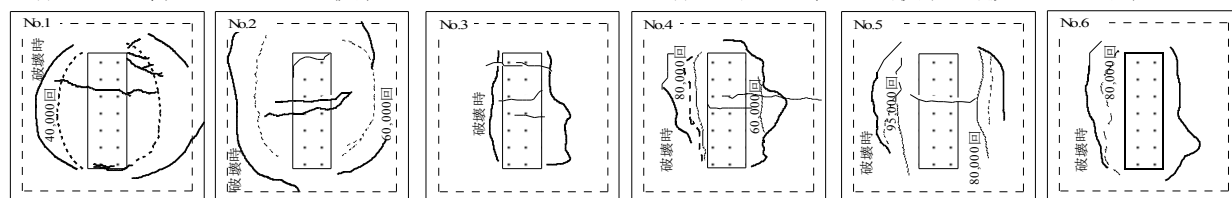
ある。荷重 100kN で 2 万回(等価走行回数 76,235 回)走行後のたわみは 1.4mm であり、CFSS 下面補強 RC 床版とほぼ同程度の増加傾向を示している。その後の荷重と走行回数の増加によりたわみは穏やかに増加し、荷重 150kN で 2 万回(等価走行回数 19,456,693 回)を超えた付近のたわみは 2.8mm である。荷重を 160kN に増加して走行開始した付近からたわみが急激に増加し、破壊時のたわみは 7.6mm である。供試体 No.6 も供試体 No.5 とほぼ同様な増加傾向を示している。

5.3 破壊状況

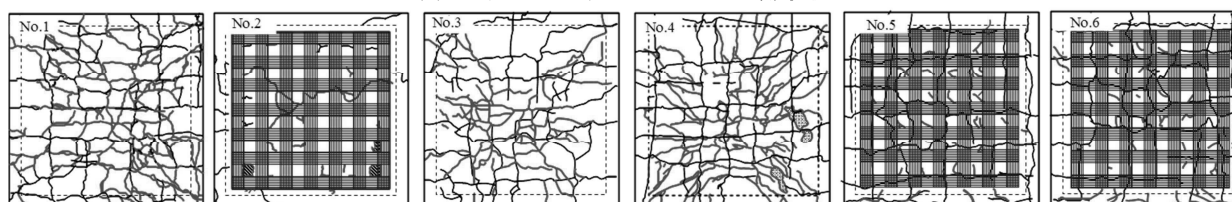
輪荷重走行疲労実験における各供試体の破壊状況を図-5 に示す。なお、界面のはく離は、各計測回数ごとに上面からの打音により確認した。破壊時のはく離状況は、破線で示す。

(1) 2007 年打換補修 RC 床版供試体 (No. 1)

供試体 No.1 の上面の破壊状況は荷重増加と走行回数を繰り返すことによりはく離が進展している。走行回数とはく離の関係は、走行回数 4 万回(等価走行回数 80,716 回)で、界面のはく離は床版中央から左右 30cm の範囲まで広がっている。その後、走行を繰り返すことによりはく離は進展し、破壊時、すなわち走行回数 47,816 回(等価走行回数 382,508 回)では、はく離は広範囲に及んでいる。次に、下面のひび割れ状況は、軸直角方向および軸方方向に格子状にひび割れが発生し、輪荷重走行位置から 45 度の角度で下面は、はく離している。破壊は、SFRC 増厚界面のはく離が進展し、断面の一体性が失われ、RC 床版部が押抜きせん断破壊となった。



(1) 上面のひび割れおよびはく離状況



(2) 下面のひび割れ状況

図-5 破壊状況

(2) CFSS 下面補強 RC 床版供試体 (No. 2)

No.2 の上面の破壊状況は、荷重増加と走行回数を繰り返すことにより、SFRC 上面増厚部と RC 床版部の界面ではなく離れが進展している。しかし、供試体 No.1 と比較すると、下面に CFSS を格子状に接着したことから下面のひび割れが抑制され、曲げ変形に抵抗して増厚界面の離れも抑制されている。走行回数 6 万回 (等価走行回数 6,318,646 回) ではなく離れの範囲は、床版中央から左右 35cm の範囲に広がっている。その後、走行を繰り返すことにより界面の離れは進展し、破壊時、すなわち走行回数 68,583 回 (等価走行回数 11,956,558 回) では、界面の離れは広範囲に及んでいる。また、破壊時の下面のひび割れ状況は、供試体 No.1 に比してひび割れの進展が大幅に抑制されている。破壊時には、CFSS とコンクリートが付着した状態で破壊となっている。なお、CFSS の破断はみられない。破壊モードは押抜きせん断破壊となった。

(3) SFRC 上面増厚再補強 RC 床版供試体 (No. 3, 4)

供試体 No.3 の上面の破壊状況は、増厚界面の付着性を高めるために接着剤を塗布して SFRC 上面増厚したことにより、界面の離れはほとんど確認されない。供試体 No.3 の破壊時における離れの範囲は床版中央から左右 20cm の範囲に及んでいる。しかし、接着剤を塗布しない従来型で増厚されている供試体 No.1 に比して接着剤による付着効果によりはく離範囲は縮小している。次に、供試体 No.4 は、走行回数 8 万回 (等価走行回数 19,456,694 回) で、床版中央から左右 20cm 付近は、はく離している。破壊時には、界面の離れは床版中央から 30cm 付近に及んでいるものの 2007 年打換補修 RC 床版に比して大幅に縮小されている。また、下面のひび割れ状況は、新たなひび割れが軸直角方向および軸方向に発生している。なお、破壊モードは押抜きせん断破壊となった。

(4) CFSS・SFRC 併用補強 RC 床版供試体 (No. 5, 6)

供試体 No.5 の上面の破壊状況は、増厚界面に接着剤を塗布して合成効果を高めた SFRC 上面増厚補強と CFSS 下面補強を併用したことにより、荷重 150kN で 2 万回走行付近 (等価走行回数 19,456,694 回) まで界面の離れは見られない。その後、荷重を 160kN に増加させた走行後からはく離し始めた。しかし、接着剤の効果により、耐疲労性も大幅に向上した。また、下面のひび割れ状況は、新たなひび割れが軸直角方向および軸方向に発生している。破壊モードは押抜きせん断破壊となった。次に、供試体 No.6 の上面の破壊状況は、供試体 No.5 と同様である。なお、界面の離れ状況は、荷重 140kN で 15,000 回走行付近 (等価走行回数 4,950,907 回) からはく離が生じ始め、その後の走行回数の増加および荷重増加によりはく離範囲が広がっている。下面のひび割れ状況は、新たなひび割れが軸直角方向および軸方向に発生して押抜きせん断破壊となった。なお、一部に CFSS の離れは見られるものの破断は見られない。しかし、等価走行回数の増加にかかわらず、供試体 No.1 に比して界面の離れ範囲は大幅に抑制されている。

6. まとめ

①47 年間供用された旧銚子大橋の RC 床版の残存寿命はほとんどみられない。この供試体の等価走行回数に比して CFSS を下面に格子貼り補強した場合は 31.3 倍となり、たわみの増加が抑制され、耐疲労性は向上した。次に、既存 RC 床版上面を再度切削して、接着剤を塗布し、新たに SFRC 上面増厚再補強した供試体は 54.7 倍となり耐疲労性が向上し、CFSS 格子貼り補強 RC 床版に比して 1.74 倍となった。また、CFSS を下面に格子貼り補強および SFRC 上面増厚再補強した場合は 147.0 倍となり、さらに耐疲労性が向上し、補強することで延命化が図られた。

②たわみと等価走行回数の関係より、補強当時のたわみの増加にはほとんど差はみられないものの、全ての供試体において等価走行回数の増加により、たわみが支間 L の 1/400 を超えた付近からたわみの増加が著しくなって破壊に至った。したがって、次期補修は、たわみが床版支間 L の 1/400 付近であると考えられる。

③破壊状況は、47 年間供用された旧銚子大橋の RC 床版に CFSS 下面補強した供試体は、下面に CFSS を格子状に接着補強したことにより、たわみの増加が抑制され、増厚界面の離れは抑制されて耐疲労性が認められた。また、既存 RC 床版上面を再度切削して、接着剤を塗布し、新たに SFRC 上面増厚再補強した供試体は、増厚界面に接着剤を塗布したことにより、はく離が進展せず、耐疲労性が向上した。また、CFSS 下面補強および SFRC 上面増厚再補強を併用した場合は大幅に増厚界面の離れが抑制され、ひび割れの進展が大幅に抑制された。

参考文献

- 1) 小林明:炭素繊維シート格子接着工法により補強した RC 床版の疲労耐久性,コンクリート工学年次論文集,Vol.27,No.2 pp.1513-1518, 2005.
- 2) Makiko TAKANO et al. : Fatigue characteristics of CFS-reinforced RC slabs sustaining running vibration loads and running constant loads, Theoretical and Applied Mechanics Japan, vol.58 pp.31-39 (2009)
- 3) 道路橋補修・補強編集委員会:道路橋補修・補強事例集 pp.86-89
- 4) (財)高速道路調査会:上面増厚工法設計施工マニュアル(1995)
- 5) 高野真希子ほか:輪荷重走行疲労実験における RC 床版 SFRC 上面増厚補強法の耐疲労性,構造工学論文集 Vol. 56A, pp.1259-1269, 2010.
- 6) 日本道路協会:鋼道路橋設計示方書, 1956
- 7) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I・II・III, 2004
- 8) 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)
- 9) 松井繁之:道路橋床版設計・施工と維持管理,森北出版,(2007)