3-13

橋梁長寿命化修繕計画における RC 床版の補強対策
－千葉県旧銚子大橋の補強法における長寿命化対策－

日大生産工(PD) ○高野真希子　　日大生産工　阿部 忠
日大生産工　木田哲量　　千葉県県土整備部　富沢茂司

１．はじめに

本研究は，1962 年に建設され，補修・補強を施しながら 2009 年までの 47 年間供用された旧銚子大橋（トラス橋）の RC 床版を用いて，劣化した RC 床版の補修・補強法における補強効果および耐疲労性を評価するものである。劣化した RC 床版供試体には，1985 年に鋼繊維補強コンクリート（SFRC）上面増厚された RC 床版と 2007 年に SFRC 部を一部打換補修した RC 床版を用いる。この 2 種類の RC 床版に対して，下面に炭素繊維ストランドシート（CFSS）接着補強および SFRC 上面増厚部を撤去して新たに SFRC 上面増厚補強を行い，RC 床版の残存等価走行回数および補強後の等価走行回数を評価し，長寿命化修繕計画における劣化床版の補強対策の一助とした。

２．旧銚子大橋の補修・補強歴および劣化診断

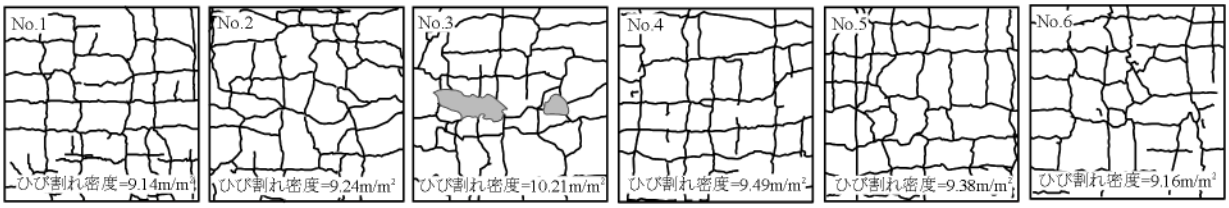
2.1　旧銚子大橋の補修・補強歴

本実験に用いる RC 床版供試体は，47 年間供用され，2009 年に撤去された旧銚子大橋の RC 床版である。旧銚子大橋の RC 床版は，1956 年改訂の鋼道路橋設計示方書[1]に基づいて設計され，当初の床版厚は 160mm であった。この RC 床版の補修・補強歴は，供用開始から 23 年後の 1985 年に，耐荷力性能および疲労性能の向上を目的として，RC 床版の上面を 10mm ～ 20mm 切削し，70mm ～ 80mm の SFRC 上面増厚補強が施され，床版全厚は 220mm であった。その後，上面の一部にひび割れ損傷や増厚界面でのはく離が見られ，2007 年に一部打換補修が行われた。そこで，本実験に用いる供試体は 2007 年に SFRC で一部打換補修された RC 床版（以下，2007 年打換補修 RC 床版とする）を 2 体（No.1，2），さらに，1985 年に SFRC 上面増厚した RC 床版（以下，1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版とする）を 4 体（No.3 ～ 6）である。

2.2　旧銚子大橋の劣化診断

(1) ひび割れ密度：2007 年打換補修 RC 床版 2 体（No.1，2）と，1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版 4 体（No.3 ～ 6）の下面のひび割れ状況の検証およびひび割れ密度を測定した。ここで，本実験に用いる供試体下面のひび割れ損傷状況を図1に示す。なお，同図にひび割れ密度を併記した。2007 年打換補修 RC 床版 No.1，2 の下面には塩害防止対策としてポリマーセメントが，1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版供試体 No.3 ～ 6 にはアクリルゴム系の塩害防止塗料が塗布されていたため，塩害防止塗膜をサンダーで除去後，ひび割れ状態を診断したが，ひび割れ密度による診断ではいずれも加速期[2]に相当する床版である。

(2) RCおよびSFRCの圧縮強度：2007 年打換補修 RC 床版および 1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版のコンクリートからφ 50mm の小径コアを採取して，SFRC および RC 部のコンクリートの圧縮試験を行った。その結果，RC 部の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）[3]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。したがって，47 年間供用された RC 床版のコンクリートおよび SFRC は圧縮強度から評価すると十分に補強が可能である。



(1)No.1　(2)No.2　(3)No.3　(4)No.4　(5)No.5　(6)No.6

図１　旧銚子大橋 RC 床版における撤去時のひび割れ状況

Study on rehabilitation of RC slab in order to extend life cycle bridges
-Reinforcement method in Chiba prefecture old Choshi Ohashi's measures of extend life cycle of bridges-

by

Makiko TAKANO, Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA and Shigeji TOMIZAWA

⑶コンクリートの塩化物イオン濃度と鉄筋の腐食状況：2007 年打換補修 RC 床版は，上面から 5mm 位置の塩化物イオン濃度は 6.2kg/m^3，上面から 100mm の圧縮鉄筋付近では 1.3kg/m^3，上面から 190mm の引張鉄筋付近では 3.6kg/m^3 の塩化物イオン濃度が検出された。次に，1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版は，上面から 80mm の増厚界面付近での塩化物イオン濃度は 2.4kg/m^3 であり，鋼材腐食発錆限界濃度を超えている。また，鉄筋の発錆状況は，RC 床版部の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発錆限界濃度 1.2kg/m^3 を超えている付近で確認された。

以上より，ひび割れ密度およびコンクリート中の塩化物イオン濃度，鉄筋の発錆状況から判断した場合，健全度評価では加速期に相当する。しかし，千葉県が実施している橋梁長寿命化修繕計画における管理水準は 100 年を目標としていることから，2 次，3 次補修・補強法の修繕計画が必要である。

3．供試体の材料・寸法および補強方法

3.1　旧銚子大橋RC床版の寸法および材料

旧銚子大橋の RC 床版は，1956 年改訂の道示の基準で設計されており，設計活荷重は 80kN である。床組構成は縦げたが 3 径間で，支間 1,900mm，床版厚 160mm であった。1985 年に RC 床版上面を 20mm 平均で切削し，80mm の SFRC で上面増厚補強されているが，RC 床版の厚さには多少のバラツキが見られる。鉄筋には SR235 を使用し，主鉄筋はφ 16mm が 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。また，配力筋はφ 13mm を引張側および圧縮側ともに 220mm ～ 240mm 間隔で配置されている。供試体寸法は，床版撤去時に軸直角方向 1,600mm，軸方向 2,000mm に切断されたことから，床版支間を 1,400mm とする。ここで，基本とする供試体の寸法および鉄筋の配置を図2に示す。コンクリート材料には，普通ポルトランドセメントと 5mm 以下の細骨材，最大 20mm の粗骨材が使用されている。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。

3.2　2007年打換補修RC床版

2007 年打換補修 RC 床版は，床版寸法 1600mm，床版支間 400mm の RC 床版を車輪幅 300mm に合わせてモデル化したことから，床版全厚を 180mm とした。

⑴2007年打換補修RC床版の残存耐力：2007 年打換補修 RC 床版は，既存の RC 床版により輪荷重走行疲労実験を行い，残存等価走行回数を評価する。2007 年打換補修床版供試体の記号を RC.S1 とする。

⑵CFSS下面補強RC床版：2007 年打換補修 RC 床版は，劣化過程は加速期に相当するため，耐荷力性能と疲労性能の向上を図るために，下面に CFSS 下面接着補強し，残存等価走行回数と比較して補強効果を検証する。CFSS 補強法は，一度に多くの繊維を施工でき，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となる。また，CFSS は格子状に貼り付けが可能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。現状におけるは鉄筋の材料特性値は，現行道示の基準（降伏強度 235N/mm^2，引張強度 390N/mm^2）を満足しているものの，降伏強度および引張強度はいずれも低下している。したがって，供試体に用いる CFSS は，目付量 600g/m^2，厚さ 0.333mm，引張強度 3,400N/mm^2，引張弾性率 2.45×10^{5}N/mm^2 であり，CFSS の炭素繊維剛性 EA は，41（E：引張弾性率 2.45×10^{5}N/mm^2，A：断面積 0.167×10^{-6}mm^2）である。また，接着材には CFSS 接着専用のエポキシ系樹脂接着材を使用した。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 RC.S-C1 とする。

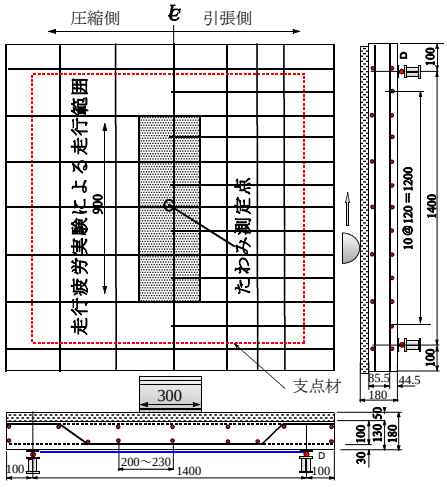


図 2　供試体寸法および鉄筋配置

表1　供試体の材料特性および寸法

供試体	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	鉄筋 SR235　主鉄筋：φ16　配力筋：φ13					
		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
No.1～No.6	38.2	298	287	418	402	200	200

3.3　1985年SFRC上面増厚RC床版

1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版は，全ての供試体で 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 SFRC 上面増厚部を撤去し，RC 床版に新たに SFRC 上面増厚補強を行う。さらに，下面に CFSS を格子状に接着補強する。

⑴SFRC上面増厚補強RC床版：SFRC 上面増厚を撤去し，RC 床版に新たに SFRC 上面増厚補強を行う。床版厚は 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2と同様と

した。また，著者らは既往の研究で接着材を塗布した SFRC 上面増厚 RC 床版の耐疲労性を検証し，高い接着効果が得られ，耐疲労性が大幅に向上する評価を得ている[4]。したがって，増厚界面には付着性能を向上させるために接着材を用いることとする。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（1.27vol.%）で配合した。実験時における（材齢 110 日）SFRC の圧縮強度は 66.2N/mm^2 である。また，接着材の材料特性値は，圧縮強さ 50N/mm^2，曲げ強さ 35N/mm^2，付着強さ 1.6N/mm^2 である。SFRC 上面増厚補強は上面増厚工法設計施工マニュアル[5]に準拠した。SFRC 上面増厚補強 RC 床版の記号を RC-S とする。

(2)SFRC・CFSS補強RC床版：SFRC 上面増厚補強 RC 床版の下面に CFSS を格子状に接着補強する。SFRC 上面増厚補強 RC 床版の下面補強に使用する CFSS の材料および施工方法は，CFSS 下面補強 RC 床版の仕様と同様とする。SFRC・CFSS 補強 RC 床版の供試体記号を RC-S.C とする。

4．実験方法および等価走行回数

(1)輪荷重走行による走行疲労実験方法：輪荷重走行疲労実験は，床版中央から ±450mm の範囲（900mm）に輪荷重を連続走行させる。荷重載荷方法は，2007 年打換補修 RC 床版供試体の初期荷重は 80kN，その他の供試体は初期荷重 100kN で 2 万回走行し，140kN までは荷重を 20kN ずつ増加させ，140kN 以降は各 2 万回走行ごとに荷重を 10kN ずつ増加する段階状荷重とした。たわみの計測は，1，10，100，1,000，5,000 回，5,000 回以降は 5,000 回走行ごとに行う。

(2)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，式(1)における基準荷重 P は，2004 年改訂道示の活荷重 100kN に衝撃係数と安全率を考慮した 150kN に対し，本実験装置の車輪幅は 300mm であって道示に規定する輪荷重幅の 60％であることから，活荷重 150kN の 60％として 90kN とする。本研究は RC 床版の疲労寿命と実用性を検証することから，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]。

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

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

表2　等価走行回数

供試体	等価走行回数(N_{ep})	平均等価走行回数（N_{ep}）	等価走行回数比
RC.S1	382,508	382,508	—
RC.S-C1	11,956,558	11,956,558	31.3
RC-S1	22,365,409	20,911,051	54.7
RC-S2	19,456,694		
RC-S.C1	61,512,389	57,004,746	149.0
RC-S.C2	52,497,103		

5．実験結果および考察

5.1　輪荷重走行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2に示す。

(1)2007年打換補修RC床版：2007 年打換補修 RC 床版供試体 RC.S1 は，荷重 80kN，100kN で各 2 万回走行し，荷重 120kN で 7,816 回走行後に破壊した。こ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 2007 年打換補修 RC 床版供試体 RC.S1 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RC床版：CFSS 下面補強 RC 床版供試体 RC.S-C1 は，荷重 100kN，120kN，140kN で各 2 万回走行し，荷重 150kN で 9,186 回走行後に破壊し，等価走行回数は 11,956,558 回である。供試体 RC.S1 の等価走行回数と比較すると 31.3 倍の耐疲労性が評価された。したがって，劣化した SFRC 上面増厚補強床版においても，曲げ変形を拘束するために CFSS により下面接着補強することで，耐疲労性が大幅に向上した。

(3)SFRC上面増厚補強RC床版：SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体 RC-S は，荷重 100kN，120kN，140kN，150kN で各 2 万回走行し，供試体 RC-S1 は荷重 160kN で 1,951 回，供試体 RC-S2 は荷重 160kN で 101 回走行後に破壊に至り，平均等価走行回数は 20,911,051 回である。供試体 RC.S1 の等価走行回数と比較すると 54.7 倍である。したがって，SFRC 上面増厚補強法において増厚界面に接着材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，2 次，3 次補強法には有効的な工法であるといえる。

(4)SFRC・CFSS補強RC床版：SFRC・CFSS 補強 RC 床版供試体 RC-S.C は，荷重 100kN，120kN，140kN，150kN，160kN で，各 2 万回走行し，供試体 RC-S.C1 は荷重 170kN で 3,800 回，供試体 RC-S.C2 は荷重 170kN で 1,001 回走行後に破壊に至り，平均等価走行回数は 57,004,746 回である。供試体 RC.S1 の等価走行回数と比較すると 149 倍である。したがって，SFRC 上面増厚補強法において増厚界面に接着材を塗布して再補強する工法と，曲げ引張強度を高める目的で CFSS を格子状に接着することで，さらに耐疲労性が向上が図られた。

以上より，47 年間供用されて塩害と疲労劣化を受

けた RC 床版においても，① 2007 年打換補修 RC 床版に CFSS 下面接着補強した場合，② 1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版の SFRC 上面増厚部を撤去し，10mm 切削し，増厚界面に接着材を塗布して付着効果を高めて SFRC 上面増厚補強した場合，③ 1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版増厚界面に接着材を塗布して付着効果を高めた SFRC 上面増厚補強と下面に CFSS 接着補強と併用した補強法を施すことにより，いずれにおいても，現行道示に規定する活荷重に対応する耐疲労性が認められた。

5.2 たわみと等価走行回数の関係

床版中央における引張主鉄筋のたわみと等価走行回数の関係を図3に示す。

⑴2007年打換補修RC床版：荷重 80kN 載荷時の初期たわみは 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，さらに荷重を 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。

⑵CFSS下面補強RC床版：荷重 100kN 載荷時の初期たわみは 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 RC.S1 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 万回走行時（等価走行回数 76,235）のたわみは 1.4mm であり，2007 年打換補修 RC 床版供試体の 35 %程度であり，CFSS 下面接着による補強効果が得られている。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，破壊時のたわみは 5.5mm である。

⑶SFRC上面増厚補強RC床版：荷重 100kN 載荷時の初期たわみは 0.8mm，荷重 100kN で 2 万回走行時（等価走行回数 76,235 回）のたわみは 1.5mm であり，その後の荷重と走行回数の増加に伴ってたわみは緩やかに増加し，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 回を超えた頃からたわみが急激に増加した。破壊時のたわみは 5.7mm である。

⑷SFRC・CFSS補強RC床版：荷重 100kN 載荷時の初期たわみは 0.7mm，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，その後の荷重と走行回数の増加によりたわみは緩やかに増加し，荷重 150kN で 2 万回走行（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頃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。

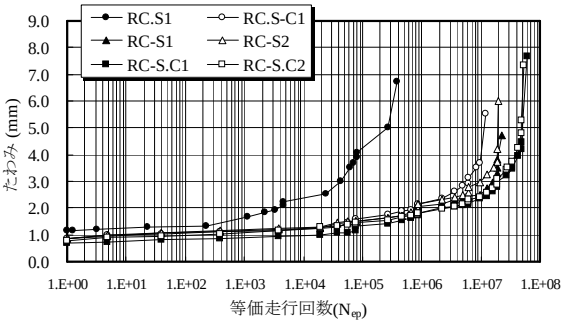


図 3　たわみと等価走行回数

６．まとめ

⑴劣化診断によると，RC 床版下面には 0.2mm 程度のひび割れが 2 方向に発生し，ひび割れ密度での健全度評価は加速期に相当する。また，塩化物イオン濃度は，鋼材腐食発錆限界濃度 1.2kg/m^3 を超えており，鉄筋の発錆も見られる。なお，コンクリートの圧縮強度は 38.2N/mm^2 であり，現行道示に規定されるコンクリートの設計基準強度が確保されている。

⑵2007 年打換補修 RC 床版の残存等価走行回数は 2004 年改訂の道示に準拠した RC 床版の 50 %となり，2007 年に床版打換されているが，増厚界面のはく離が先行して破壊に至っている。したがって，2007 年打換補修 RC 床版の余寿命はほとんど見られない。

⑶2007 年打換補修 RC 床版下面に CFSS 接着補強した供試体は，2007 年打換補修 RC 床版の残存等価走行回数の 31.3 倍となった。したがって CFSS 接着補強により延命効果が図られた。また，1985 年に SFRC 上面増厚した RC 床版の SFRC 部を撤去し，新たに SFRC 上面増厚再補強した RC 床版供試体は，残存等価走行回数の約 55 倍，SFRC 上面増厚再補強と CFSS 下面接着補強を併用した RC 床版は，残存等価走行回数の約 149 倍となった。したがって，接着材を塗布して新たに SFRC 上面増厚補強とさらに CFSS 下面接着補強を併用して補強対策を講じることにより，劣化 RC 床版であっても長寿命化が図られた。

⑷たわみと等価走行回数の関係より，CFSS 下面補強および SFRC 上面増厚再補強したことにより，2007 年打換補修 RC 床版に比して，大幅にたわみの増加が抑制されており，補強効果が検証された。

参考文献：1)日本道路橋会：鋼道路橋設計示方書(1956) 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：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)－(2009) 3) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ(2004) 4)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) 5)(財)高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル(1995) 6)松井繁之：道路橋床版，森北出版(2007)