

旧銚子大橋RC床版の各種補強による耐疲労性の評価

高野真希子(日大生産工・P.D.)・阿部 忠・木田哲量(日大生産工・教授)
 斉藤 誠(新日鉄マテリアルズ(株))・児玉孝喜(鹿島道路(株))

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RC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

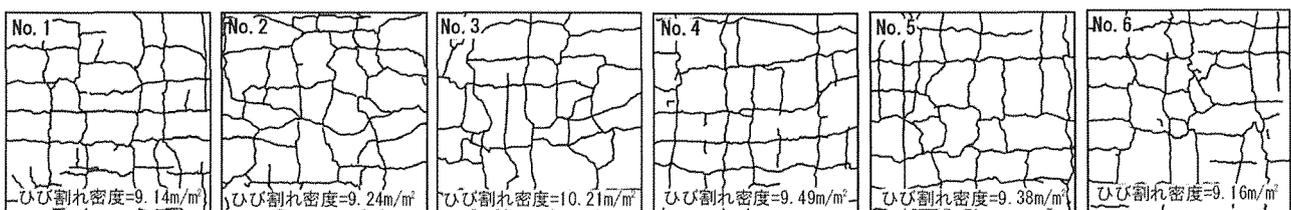
2007年打換補修RC床版2体(No.1, 2)と、1985年SFRC上面増厚RC床版4体(No.3～6)の下面のひび割れ状況を検証するとともに割れ密度を測定した。ここで、本実験に用いる供試体下面のひび割れ損傷状況を図1に示す。なお、同図にひび割れ密度を併記した。2007年打換補修RC床版No.1, 2の下面には塩害防止対策としてポリマーセメントが、1985年SFRC上面増厚RC床版供試体No.3～6にはアクリルゴム系の塩害防止塗料が塗布されていたため、塩害防止塗膜をサンダーで除去後、ひび割れ状態を診断したが、ひび割れ密度による診断ではいずれも加速期²⁾に相当する床版である。

(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φ50mm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/mm²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/mm²の1.6倍である。また、SFRCの平均圧縮強度は60.7N/mm²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と考えられる。

(3) 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床版における上面から5mm位置での塩化物イオン濃度は6.2kg/m³、上面から100mmの圧縮鉄筋付近では1.3kg/m³、上面から190mmの引張鉄筋付近では3.6kg/m³検出された。次に、1985年SFRC上面増厚RC床版における上面から80mmの増厚界面付近での塩化物イオン濃度は2.4kg/m³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/m³を超えている付近で確認された。



(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

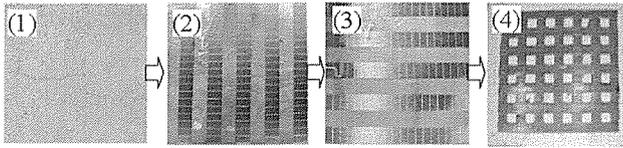


図3 CFSS下面接着補強の施工手順

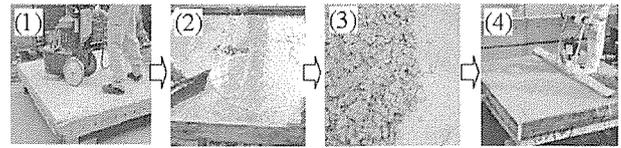


図4 SFRC上面増厚補強法

的として SFRC 上面増厚補強された。この 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 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 床版に新たに SFRC 上面増厚補強を行う（以下、SFRC 上面増厚補強 RC 床版とする）。さらに、SFRC 上面増厚補強 RC 床版下面に CFSS を格子状に接着補強する（以下、SFRC・CFSS 補強 RC 床版とする）。

3.3.1 SFRC 上面増厚補強 RC 床版

1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版の SFRC 上面増厚を撤去し、既存の RC 床版に新たに SFRC 上面増厚補強を行う。既存 RC 床版部の厚さは 140mm であるが、1985 年 SFRC 上面増厚部と RC 床版部の界面は、上面からの雨水の堆積により土砂化し、塩化物イオン濃度も鋼材腐食発錆限界濃度 1.2kg/m^3 を超えている。そこで、既存 RC 床版の上面かぶりを 10mm 切削して、新たに 50mm の上面増厚補強を行う。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 2 と同様とした。また、1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版は、1995 年および 2007 年に SFRC 部の一部打ち換えが行われている。また、著者らの既往の研究より、接着材を用いた SFRC 上面増厚 RC 床版は従来型の SFRC 上面増厚に比して高い接着効果が得られ、耐疲労性は大幅に向上する結果を得ている⁹⁾。したがって、旧銚子大橋の上面増厚補強においては増厚界面の付着性能を向上させるために接着材を用いた SFRC 上面増厚法を行うこととする。

(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 (1.27vol.%) で配合した。本供試体に用いた SFRC の実験時における (材齢 110 日) 圧縮強度は 66.2N/mm^2 である。また、SFRC と RC 床版との界面には付着性を高めるためにエポキシ系樹脂接着材を用いた。接着材の材料特性値は、圧縮強さが 50N/mm^2 、曲げ強さが 35N/mm^2 、付着強さは 1.6N/mm^2 である。

(2) 施工方法

SFRC 上面増厚再補強法の施工手順を図 4 に示す。SFRC 上面増厚補強は上面増厚工法設計施工マニュアル⁹⁾に準拠して施工した。1985 年 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 床版部は凹凸に切削されていた。そこで、RC 床版部の切削されたコンクリート表面を大型のサンダーで平滑に仕上げ (図 4, (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、エポキシ系の接着材を厚さ 1mm で塗布する (図 4, (2))。その後、SFRC をジェットモビル車により混練して 50mm 打設し (図 4, (3))、十分な締め固めをして表面仕上げをした (図 4, (4))。供試体の床版全厚は 180mm を目標とした。SFRC 上面増厚補強 RC 床版の記号を RC-S とする。

3.3.2 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

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りに、鋼製の車輪 (幅 300mm) 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再現するものである。走行振動試験装置を使用した実験状況を図 5 に示す。

(2) 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 $\pm 450\text{mm}$ の範囲 (900mm) に輪荷重を連続走行させる実験である。これは、本供試体の支間が 1400mm であるが、床版厚が 180mm であり、荷重が 45 度に分布することを考慮したものである。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、補強供試体は補強により耐荷力および耐疲労性の向上が期待できることから、初期荷重は 100kN とし、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。

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

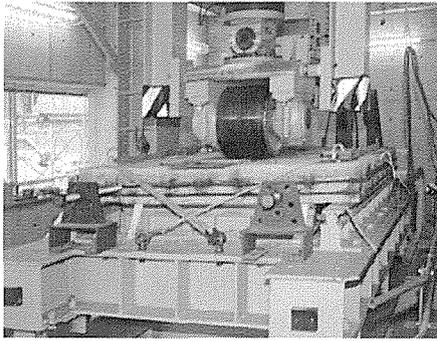


図5 実験状況

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%とした 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。

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

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）

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、初期荷重 80kN、荷重 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 RC.S1 の等価走行回数を基準に補強後の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、初期荷重 100kN、荷重 120kN、140kN で各 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 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、下面に曲げ変形を拘束するために CFSS 接着補強することで、耐疲労性が大幅に向上する結果となった。

(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-S1 は、初期荷重 100kN、荷重 120kN、140kN、150kN で各 2 万回走行させた。その後、供試体 RC-S1 は荷重 160kN

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		

で 1,951 回、供試体 RC-S2 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 RC.S1 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.C1 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 RC-S.C1 は荷重 170kN で 3,800 回、供試体 RC-S.C2 は荷重 170kN で 1,001 回走行して破壊した。平均等価走行回数は 57,004,746 回となり、供試体 RC.S1 と比較して 149.0 倍となった。また、供試体 RC-S 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、さらに耐疲労性の向上が図られた。

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6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 のたわみと等価走行回数関係は図6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、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

CFSS 下面補強 RC 床版供試体 RC.S-C1 は、2007年打換補修 RC 床版供試体下面に 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、2007年打換補修床版供試体と比較すると荷重 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）走行時のたわみは 1.4mm で供試

体 RC.S1 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 1/400 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 上面増厚補強 RC 床版

SFRC 上面増厚補強 RC 床版供試体 RC-S1, 2 は、供試体 RC.S-C1 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、CFSS 下面補強 RC 床版とほぼ同様な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) SFRC・CFSS 補強 RC 床版

SFRC・CFSS 補強 RC 床版供試体 RC-S.C1 の荷重 100kN 時の初期たわみは 0.7mm である。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緩やかに増加し、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 RC-S.C2 も供試体 RC-S.C1 とほぼ同様な増加傾向を示している。

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は、いずれも現行

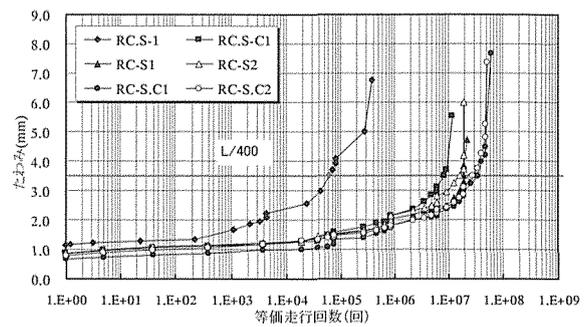


図6 たわみと等価走行回数

道示に規定する活荷重が作用した場合においても、たわみの増加が抑制され、等価走行回数が増加していることから、耐疲労性が評価された。

5.3 破壊状況

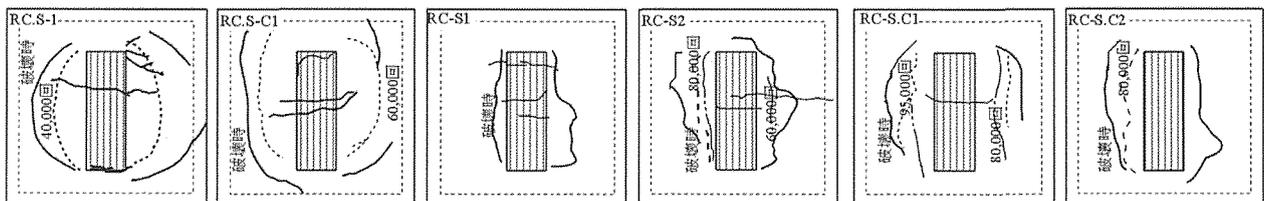
輪荷重走行疲労実験における各供試体の破壊状況を図7に示す。なお、上面の SFRC のはく離は、各計測回数ごとに上面からの打音法により確認した。破壊時ははく離状況を波線で示す。

(1) 2007年打換補修 RC 床版

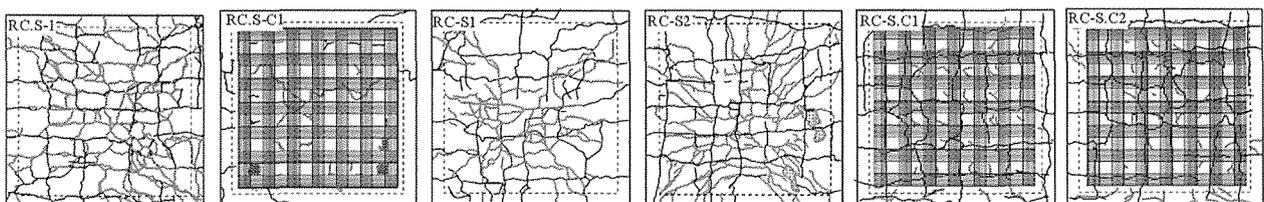
供試体 RC.S1 の上面のはく離状況は、荷重増加と走行回数を繰り返すことにより界面のはく離が進展している。走行回数 4 万回 (等価走行回数 80,716 回) で、はく離は床版中央から左右 30cm の範囲まで広がっており、この時点のたわみは 3.9mm である。その後の走行によりはく離は進展し、破壊時、すなわち走行回数 47,816 回 (等価走行回数 382,508 回) では、はく離は広範囲に及んでいる。次に、下面のひび割れ状況は、軸直角方向および軸方方向に格子状に発生し、輪荷重走行位置から 45 度の下面のコンクリートのはく離している。破壊は、SFRC 増厚界面のはく離が進展し、断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。

(2) CFSS 下面補強 RC 床版

供試体 RC.S-C の上面のはく離状況は、荷重増加と走行回数を繰り返すことにより、界面ではく離が



(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7 破壊状況

進展している。しかし、供試体 RC-S1 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はく離も抑制されている。走行回数 6 万回（等価走行回数 6,318,646 回）でははく離の範囲は、床版中央から左右 35cm の範囲に広がっている。その時点でのたわみは 3mm である。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 68,583 回（等価走行回数 11,956,558 回）では、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 RC-S1 に比して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抜きせん断破壊となったが、CFSS の破断はみられない。

(3) SFRC 上面増厚補強 RC 床版

SFRC 上面増厚再補強 RC 床版供試体 RC-S1 の上面の破壊状況は、増厚界面に接着材を塗布して SFRC 上面増厚したことにより、界面のはく離はほとんど確認されない。供試体 RC-S1 の破壊時におけるはく離の範囲は床版中央から左右 20cm の範囲に及んでいるが、接着材を塗布しない供試体 RC-S1 に比してはく離範囲は縮小している。次に、供試体 RC-S2 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 付近にはく離している。その時点でのたわみは 3.8mm である。破壊時では、はく離は床版中央から 30cm 付近に及んでいるものの供試体 RC-S1 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。

(4) SFRC・CFSS 補強 RC 床版

SFRC 上面増厚再補強 RC 床版供試体 RC-S.C1 の上面の破壊状況は、荷重 150kN で 2 万回走行付近（等価走行回数 19,456,694 回）まで増厚界面のはく離は見られない。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、接着材の効果により、耐疲労性も大幅に向上した。供試体 RC-S.C2 も同様な傾向を示す。また、下面のひび割れ状況は、供試体 RC-S.C1、2 とともに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 のはく離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 RC-S1 に比してはく離範囲は大幅に抑制されている。

6. まとめ

(1) 劣化診断においては、RC 床版下面には、0.1 ～ 0.2mm 程度のひび割れが 2 方向に発生し、ひび割れ密度は 9.1 ～ 10.2m/m²、塩化物イオン濃度は鋼材腐食発錆限界濃度 1.2kg/m³ を超えており、劣化過程は加速期に相当する。

(2) 2007 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、余寿命はほとんど見られない。

(3) 2007 年打換補修 RC 床版の残存等価走行回数に比して、2007 年打換補修 RC 床版下面に CFSS 接着補強した供試体は 31.3 倍、1985 年に SFRC 上面増厚した RC 床版の SFRC 部を撤去して新たに SFRC 上面増厚再補強した RC 床版供試体は 54.7 倍、新たに 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 149 倍となり、補強対策を講じることにより、劣化床版であっても長寿命化が図られた。

(5) 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 RC 床版は、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。

(6) 破壊状況は、2007 年打換補修 RC 床版では、SFRC 部と RC 床版界面で輪荷重走行によりはく離が広範囲に進展して耐疲労性は評価されないが、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、増厚界面のはく離の進展が抑制されて耐疲労性が評価された。また、接着材を塗布して上面増厚したことから、はく離が進展せず、耐疲労性が向上した。

(7) RC 床版の長寿命化修繕計画における劣化床版の補強対策においては、劣化診断を正確に行い、とくに既存 RC 床版コンクリートの圧縮強度が現行道示に規定する設計基準強度が確保できていることが重要である。また、補強後の点検要領の確立が重要である。

謝辞：旧銚子大橋の床版を実験材料として提供して下さいました、千葉県海匝地域整備センター銚子事務所に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：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)
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III(2004)
- 4) 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)
- 5) Makiko TAKANO etc.: 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)
- 6) 高野真希子ほか：CFRP 格子筋を用いて上面増厚補強した RC 床版の疲労特性、セメント・コンクリート論文集 No.63, pp.530-537(2009)
- 7) 財団法人 高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル(1995)
- 8) 松井繁之：道路橋床版、森北出版(2007)