

## SFRC・CFSS 補強した劣化 RC 床版の耐疲労性に関する実験解析

日大生産工(院) ○山下 順平 日大生産工 阿部 忠・木田 哲量  
日大生産工（研究員） 高野 真希子

## 1. はじめに

高度経済成長時期に建設された橋梁の多くが一般的な寿命 50 年～60 年といわれている時期を迎えている。橋梁の中で損傷が著しい部材は RC 床版であり、とくに大型車両の繰り返し走行による疲労損傷が顕在化している。これらのことから道路橋長寿命化修繕計画では、損傷や塩害などで劣化した RC 床版の補強として、下面に炭素繊維シート（CFS）接着補強法<sup>1) 2)</sup> および鋼繊維補強コンクリート（SFRC）上面増厚補強法<sup>3)</sup> が採用されている。そこで本研究では、47 年間供用されて 2009 年に取り壊した旧銚子大橋の RC 床版に、炭素繊維ストランドシート（CFSS）補強法、SFRC 上面増厚補強および SFRC 上面増厚補強と CFSS 下面接着補強を併用した補強法を施し輪荷重走行疲労実験を行い、等価走行回数から補強 RC 床版の耐疲労性を評価した。

## 2. 供試体概要

## 2.1 旧銚子大橋供試体概要

旧銚子大橋は 1956 年改訂の鋼道路橋設計示方書<sup>4)</sup>の基準で設計されており、設計活荷重は 80kN である。床組の縦げたが 3 径間連続で、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、床版全厚は 220mm となっていた。その後、1985 年に SFRC 上面増厚した一部にひび割れ損傷や増厚界面での離れが見られ、2007 年に部分打換補修が行われた。ここで、撤去時の RC 床版を写真-1 に

示すが、2007 年打換補修 RC 床版供試体（No.1, 2）は、RC 床版部と SFRC 部界面での離れは確認されていないが、1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版供試体（No.3～6）は界面が完全にはく離していた。そこで本研究における再 SFRC 増厚補強では、はく離防止のために増厚界面に接着剤を塗布する工法を採用した。

## 2.2 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  $\phi 50\text{mm}$  のコアを採取して、SFRC およびコンクリート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  $38.2\text{N/mm}^2$  であり、2004 年改訂の道路橋示方書・同解説（以下、道示とする）<sup>5)</sup> に規定する設計基準強度  $24\text{N/mm}^2$  の 1.6 倍である。また、SFRC の平均圧縮強度は  $60.7\text{N/mm}^2$  である。

## 3. 供試体の寸法および補強方法

## 3.1 供試体寸法

鉄筋に SR235 を使用し、主鉄筋は  $\phi 16\text{mm}$  が 120mm 間隔、圧縮鉄筋は引張鉄筋の 1/2 の鉄筋量が配置されている。また、配力筋は  $\phi 13\text{mm}$  を引張側および圧縮側ともに 200mm～230mm 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



(1) No. 1, 2

(2) No. 3～6

写真-1 撤去時の RC 床版

表-1 供試体の材料特性および寸法

| 供試体  | コンクリート<br>圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 鉄筋 SR235<br>主鉄筋: φ 16<br>配力筋: φ 13 |     |                              |     |                               |     | 設計<br>支間<br>(mm) | 床版<br>全厚<br>(mm) | RC<br>床版<br>(mm) | SFRC<br>厚さ<br>(mm) | 有効高           |               | 1m当たりの<br>鉄筋量                            |                                           |
|------|----------------------------------------|------------------------------------|-----|------------------------------|-----|-------------------------------|-----|------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------|---------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
|      |                                        | 降伏強度<br>(N/mm <sup>2</sup> )       |     | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |     | 弾性係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |     |                  |                  |                  |                    | 主鉄筋<br>(mm)   | 配力筋<br>(mm)   | 主鉄筋<br>A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> ) | 配力筋<br>A' <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> ) |
|      |                                        | 主鉄筋                                | 配力筋 | 主鉄筋                          | 配力筋 | 主鉄筋                           | 配力筋 |                  |                  |                  |                    |               |               |                                          |                                           |
| No.1 | 38.2                                   | 298                                | 287 | 418                          | 402 | 200                           | 200 | 1400             | 185              | 140              | 45                 | 108.0 (153.0) | 101.5 (146.5) | 1675                                     | 603                                       |
| No.2 | 38.2                                   |                                    |     |                              |     |                               |     | 1400             | 185              | 140              | 45                 | 108.0 (153.0) | 101.5 (146.5) | 1675                                     | 603                                       |
| No.3 | 38.2                                   |                                    |     |                              |     |                               |     | 1400             | 185              | 129              | 56                 | 94.0 (154.0)  | 87.5 (160.5)  | 1675                                     | 603                                       |
| No.4 | 38.2                                   |                                    |     |                              |     |                               |     | 1400             | 180              | 127              | 53                 | 96.0 (149.0)  | 89.5 (142.5)  | 1675                                     | 603                                       |
| No.5 | 38.2                                   |                                    |     |                              |     |                               |     | 1400             | 184              | 131              | 53                 | 101.0 (154.0) | 94.5 (147.5)  | 1675                                     | 603                                       |
| No.6 | 38.2                                   |                                    |     |                              |     |                               |     | 1400             | 185              | 135              | 50                 | 94.0 (144.0)  | 87.5 (137.5)  | 1675                                     | 603                                       |

## Fatigue resistance of deteriorated RC slab reinforced SFRC with CFS

Jyunpei YAMASHITA, Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA and Makiko TAKANO

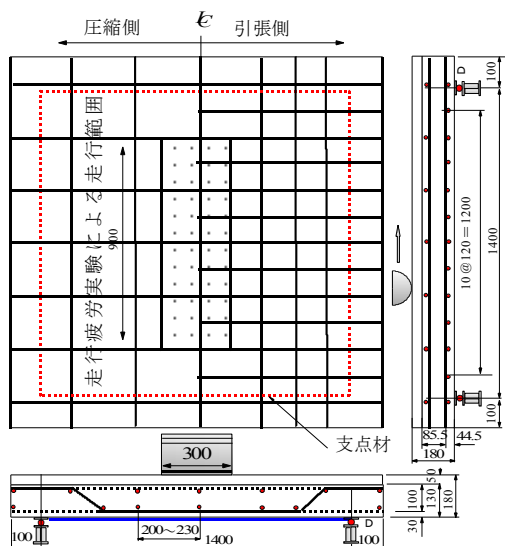


図-1 供試体鉄筋配置図

されたことから、床版全長を 1,600mm とし、床版支間を 1,400mm とする。ここで、コンクリートと鉄筋の材料特性値を表-1 に示す。また、基本とする供試体の寸法および鉄筋の配置を図-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、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 1,400mm 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。

#### (1) 2007 年打換補修 RC 床版の残存耐力

2007 年打換補修 RC 床版に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。

#### (2) CFSS 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、耐荷力性能および疲労性能を回復させるため、その下面に 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。

##### 1) CFSS 補強材料

本研究では、2007 年打換補修 RC 床版下面に CFSS を格子状に接着補強する。旧銚子大橋の鉄筋は塩害の影響を受けたために発錆が見られる。現時点では、鉄筋の材料特性値は現行道示の基準（降伏強度  $235\text{N/mm}^2$ 、引張強度  $390\text{N/mm}^2$ ）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  $600\text{g/m}^2$ 、厚さ  $0.333\text{mm}$  を用いた。またこの 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

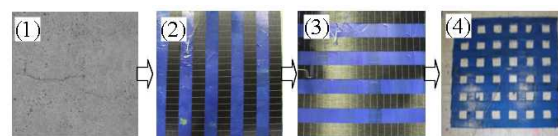


図-2 CFSS 下面接着補強の施工手順

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 下面接着補強の施工手順

CFSS 下面接着補強法の施工手順を図-2 に示す。CFSS 下面補強法は、まず 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おき、専用のエポキシ樹脂系接着剤を塗布し、幅 100mm の CFSS を軸直角方向に 100mm 間隔に配置して接着する（図-2, (2)）。その後、軸方向にも同様に接着して格子状を形成する（図-2, (3), (4)）。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。

### 3.3 1985 年 SFRC 上面増厚 RC 床版

旧銚子大橋の RC 床版は、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を回復させるために SFRC 上面増厚補強された。この RC 床版は、既存 RC 床版部と 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 床版に対する補強では、SFRC 上面増厚部を撤去し、既存の RC 床版に新たに SFRC 上面増厚補強を施した（以下、SFRC 上面増厚補強 RC 床版とする）。

#### (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 RC 床版に対して新たに SFRC 上面増厚補強を行う。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-1 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。そこで、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剤を用いた SFRC 上面増厚工法を行うこととする。

##### 1) SFRC 上面増厚補強材料

新たに SFRC 上面増厚補強に用いる SFRC の設計基準強度は、材齢 3 時間で  $24\text{N/mm}^2$  を目標

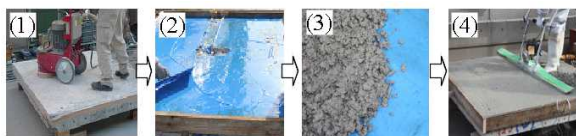


図-3 SFRC 施工手順

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  $100\text{kg}/\text{m}^3$  (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  $66.2\text{N}/\text{mm}^2$  である。また、SFRC と RC 床版との界面はエポキシ系樹脂接着とし、接着剤の材料特性値は圧縮強さが  $50\text{N}/\text{mm}^2$ 、曲げ強さが  $35\text{N}/\text{mm}^2$ 、付着強さは  $1.6\text{N}/\text{mm}^2$  である。

## 2) 施工方法

SFRC 上面増厚再補強法の施工手順を図-3 に示す。まず、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、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  $150\text{kg}/\text{m}^2$  で表面仕上げした (図-3, (1))。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、SFRC をジェットモーター車により混練して 50mm 打設し (図-3, (3))、十分な締め固めをして表面仕上げをした (図-3, (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。

## (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・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) 実験方法

輪荷重走行疲労実験では、輪荷重を床版中央から  $\pm 450\text{mm}$  の範囲 (900mm) で連続走行させる。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 ずつ増加させる段階状載荷とした。

### (2) 等価走行回数

本実験における走行疲労実験は、荷重を段階状載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)で与えられる。なお、S-N 曲線の傾きの逆数<sup>9)</sup>  $m$  には松井らが提案する 12.7 を適用する。

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

表-2 等価走行回数

| 供試体     | 等価走行回数 ( $N_{eq}$ ) | 平均等価走行回数 ( $N_{eq}$ ) | 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          |                       |         |

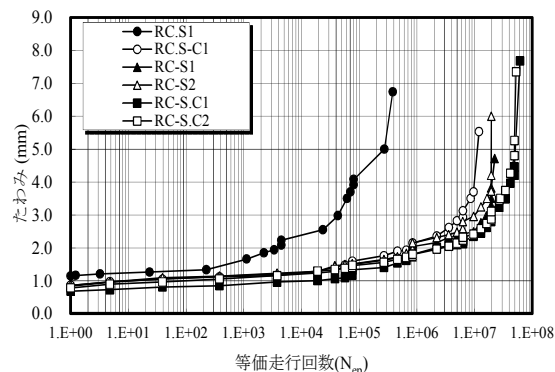


図-4 たわみと等価走行回数の関係

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. 結果および考察

### (1) 等価走行回数

式 (1) より算出した本実験における等価走行回数を表-2 に示す。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。供試体 RC-S-C1 は、供試体 RC.S1 に比して 31.3 倍耐疲労性が向上しており、劣化 RC 床版であっても下面に CFSS 接着補強することで耐疲労性が向上した。次に、供試体 RC-S1、RC-S2 および供試体 RC-S.C1、RC-S.C2 の平均等価走行回数は、供試体 RC.S1 に比してそれぞれ 54.7 倍、149.0 倍となった。また、供試体 RC-S1、RC-S2 の平均等価走行回数に比して SFRC 再増厚および CFSS 補強を施した供試体 RC-S.C1、RC-S.C2 は約 3 倍の補強効果が得られた。

### (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。供試体 RC.S1 は、荷重 80kN 時の初期たわみは 1.1mm であり、その後、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、等価走行回数 80,716 回のたわみは 3.9mm、荷重を 120kN に増加後の、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。供試体 RC-S-C1 は、荷重 100kN 時の初期たわみは 0.8mm であり、供試体 RC.S1 と比較すると荷重 100kN にもかかわらず 75% 程度のたわみであ

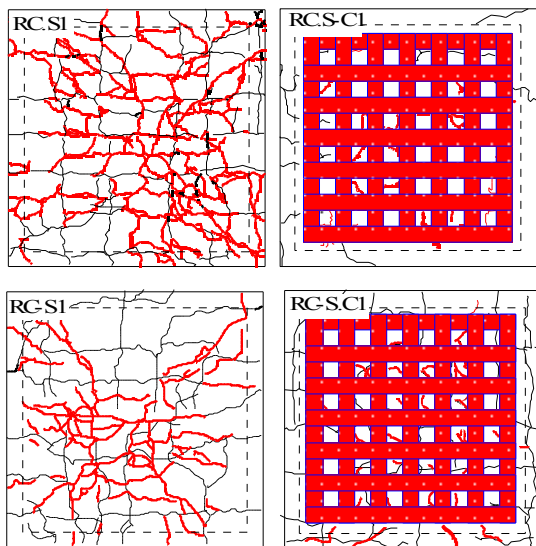


図-5 破壊形状

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 での等価走行回数 76,235 回走行時のたわみは 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、破壊時のたわみは 5.5mm である。次に、供試体 RC-S1、RC-S2 は、荷重 100kN 時の初期たわみは 0.8mm、荷重 100kN で等価走行回数 76,235 回走行時のたわみは 1.5mm であり、供試体 RC-S-C1 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 に増加後の等価走行回数 19,456,694 回を超えた付近からたわみが急激に増加し、破壊時のたわみは 5.7mm である。また、供試体 RC-S-C1、RC-S-C2 は、荷重 100kN 時の初期たわみは 0.7mm である。荷重 100kN で等価走行回数 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 に増加後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。

### (3) 破壊形状

本実験における各供試体の下面の破壊形状を図-5 に示す。供試体 RC-S1 は、界面のはく離が進展し、断面の一体性が失われて RC 床版部が押抜きせん断破壊となった。供試体 RC-S-C1 は、RC-S1 と比較すると CFSS の補強効果により下面のひび割れおよび界面のはく離が抑制されている。また、供試体 RC-S1 は、界面の接着剤による付着効果によりはく離範囲は縮小し、供試

体 RC-S-C1 は、再増厚および CFSS 補強により終局時付近まではく離は見られなかった。破壊モードは、全ての供試体において押抜きせん断破壊となった。

### 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。また、劣化 RC 床版下面に CFSS 格子貼り補強した場合は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、SFRC 上面増厚した供試体も耐疲労性が向上し、CFSS 格子貼り補強 RC 床版に比して 1.74 倍となった。また、SFRC 上面増厚補強と CFSS 格子貼り補強を併用した場合は、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、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、2007 年打換補修 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、増厚界面のはく離の進展が抑制されて耐疲労性が評価された。また、新たに SFRC 上面増厚した供試体は、増厚界面に接着剤を塗布したことから、はく離が進展せず、耐疲労性が向上した。

### 参考文献

- 1)独立行政法人 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）
- 2)Makiko TAKANO, Tadashi ABE, Tet-sukazu KIDA, Akira KOBAYASHI and Atsuya KOMORI : 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)（社）高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル、平成 7 年
- 4) 日本道路橋会：鋼道路橋設計示方書、1956
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ、2004
- 6) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理、森北出版、2007