

# 論文 コンクリート表面に強化層を設けた CFSS 接着補強法に関する RC 床版張出部の耐疲労性評価

文屋 遼太郎\*1・一瀬 八洋\*2・小塚 規行\*3・阿部 忠\*4

**要旨:** 本研究は RC 床版を梁状に模擬し、予備載荷による疲労劣化を与えた供試体の張出部上面に補修・補強を行い、定点疲労載荷試験によって耐疲労性を評価したものである。補修方法は、エポキシ樹脂プライマーを母材コンクリートに生じたマイクロクラックへ充填させ、さらにコンクリート表面のセメント水和組織へ面的に浸透させることによって実施した。補強方法は、供試体上面にエポキシ樹脂接着剤および超速硬セメントモルタルにより、CFSS を接着することによって実施した。その結果、補修・補強前を想定した無補強供試体と比較して、17.5 倍の等価繰り返し回数が得られ、耐疲労性を向上させることを確認した。

**キーワード:** RC 床版張出部, CFSS 上面接着工法, 表面強化層, 耐疲労性

## 1. はじめに

橋梁部材の中で特に損傷が著しいのは RC 床版であり、大型車両の繰り返し走行による疲労劣化により、ひび割れ損傷が生じている<sup>1)</sup>。積雪寒冷地では凍害、あるいは凍結防止剤の散布による凍害と塩害の複合作用により、床版上面に融解水の滞水が特に地覆部から張出部に滞留し、通行車両の繰り返し荷重によってスケーリングや砂利化がしやすい状況にある。さらに、RC 床版上面の補修の際や舗装切削の際にも、アスファルト舗装のブレーカーはつり作業によって生じたマイクロクラックが新たに生じる懸念があり、脆弱となった床版上面を補修することが重要と考えられている<sup>2),3)</sup>。一方で床版上面での補強方法では交通規制が必要であることから、床版上面補強の連続繊維シート接着法では、超速硬セメントモルタルを用いた補強法がある<sup>4)</sup>。しかし、エポキシ樹脂プライマーを床版上面のマイクロクラックなどの脆弱部、さらにセメント水和組織に浸透させ硬化する補強方法の実施から、現場での樹脂含浸作業が不要で施工性の優れた連続繊維ストランドシート(CFSS)接着による補強まで、連続作業で実施した際の耐疲労性まで明らかになっていないのが現状である。

そこで本研究では、予備載荷として無補強時に繰り返し荷重を与えることで疲労劣化させた供試体に、ブレーカーはつりによって床版上面の補強範囲を撤去した後、発生したマイクロクラックへ浸透するのみならず、床版上面に表面強化層を面的に形成するエポキシ樹脂プライマーを塗布する。その後、同供試体に CFSS をエポキシ樹脂接着剤および超速硬セメントモルタルによる補強を連続的に実施し、定点繰り返し荷重を作用させることで、耐疲労性を検証した。

## 2. 接着強度試験

### 2.1 試験概要

圧縮強度が 21N/mm<sup>2</sup>、最大粗骨材径が 25mm、および普通ポルトランドセメントを用いた、長さ 1,800×幅 900mm、高さ 400mm のコンクリートブロックの上面に、深さ 15mm、長さ 450×幅 600mm の範囲を 2 箇所、同条件にてブレーカーはつりにより、マイクロクラックを発生させた。Case1 供試体ではエポキシ樹脂プライマーを 0.5kg/m<sup>2</sup> 塗布し、連続施工で CFSS 接着用のエポキシ樹脂を 0.7kg/m<sup>2</sup> 塗布した。その後、エポキシ樹脂のパテで不陸修正を行い、40×40mm の鋼製治具を設置した。Case2 供試体はプライマー塗布を行わず、エポキシ樹脂接着剤およびパテによる不陸修正、鋼製治具の接着を Case1 と同様に行った。ここで接着強度試験概要を図-1 に示す。その後、7 日後に鋼製治具の四方に、ディスクサンダーで母材位置まで切れ込みを入れ、建研式引張接着試験を Case1, Case2 でそれぞれ n=9 ずつ行った。表-1 にプライマーと接着樹脂の物性値を示す。

表-1 使用材料物性値

プライマー	種別	エポキシ樹脂
	粘度	150mPa・s/25°C
	圧縮強度	96.0N/mm <sup>2</sup>
	曲げ強度	64.8 N/mm <sup>2</sup>
	引張せん断強度	15.2 N/mm <sup>2</sup>
接着樹脂	種別	エポキシ樹脂
	圧縮強度	108 N/mm <sup>2</sup>
	曲げ強度	57.5 N/mm <sup>2</sup>
	引張せん断強度	17.3 N/mm <sup>2</sup>

\*1 日鉄ケミカル&マテリアル (株) コンポジット事業部コンポジット開発部 (正会員)

\*2 鹿島道路 (株) 工事部維持・更新プロジェクト室 室長

\*3 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 研究所長 (正会員)

\*4 日本大学 名誉教授 (正会員)



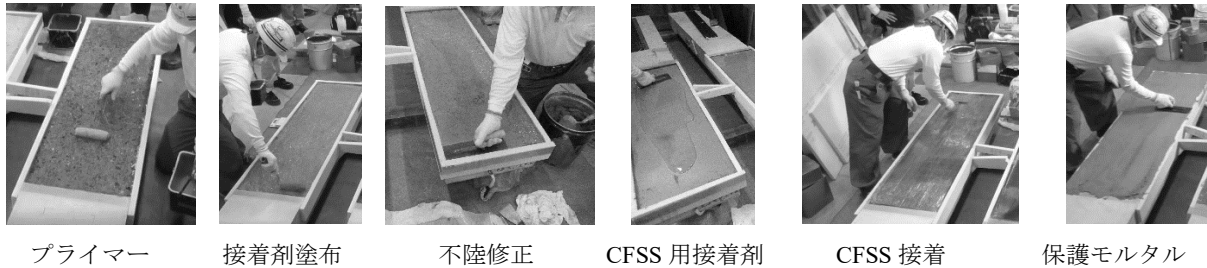


写真-1 梁供試体の補修・補強状況

### 3.2 補修・補強材料

張出部の床版上面には表-1 に示す、エポキシ樹脂プライマーおよびエポキシ樹脂接着剤、および3時間でコンクリートの圧縮強度  $24\text{N/mm}^2$  を満たす、高強度ビニロン繊維を混入させた超速硬セメントモルタルを使用し、補強材には目付量が  $600\text{g/m}^2$  の中弾性型の CFSS を用いた。床版下面には、ハンチを除く支間部に目付量  $600\text{g/m}^2$  の高強度型 CFSS を使用した。ここで供試体に使用した超速硬セメントモルタル、CFSS、床版下面の CFSS 接着用のエポキシ樹脂接着剤の物性値を表-3 に示す。

### 3.3 供試体の補修・補強方法

本試験の供試体は、張出部が無補強の供試体を2体作製し、RC-O-1、RC-O-2 とする。張出部を無補強の状態ですべての予備荷重を行い、補修・補強を行った供試体を1体作製し RC-E-1 とする。予備荷重を実施せず、無損傷状態で張出部の補強を行った供試体を1体作製し、RC-J-1 とする。張出部の補強範囲は負曲げモーメントの影響範囲に床版厚  $190\text{mm}$  を加えた値、すなわち張出端部位置から  $1,384\text{mm}$  とした。なお、供試体下面の支間部はすべての供試体で荷重試験前に CFSS 接着を同条件にて行った。

#### (1) 補修・補強供試体—供試体上面張出部

補修・補強供試体である RC-E-1 は予備荷重後に、補強範囲を深さ  $15\text{mm}$  となるようにはり落とした後、ビシャンハンマーで打撃を与えた。その後、表-1 に示すプライマーを  $0.5\text{kg/m}^2$ 、接着剤を  $0.7\text{kg/mm}^2$  となるように塗布し、超速硬セメントモルタルで不陸修正を行った後、 $3.0\text{kg/m}^2$  の接着剤にて CFSS を接着し、元の断面高さまで、超速硬セメントモルタルにて高さ仕上げを行うまで連続的に施工した。補修・補強状況を写真-1 に示す。RC-J-1 は床版上面張出部の補強範囲をあらかじめ  $15\text{mm}$  低く母材コンクリートを作製し、ディスクサンダーによるケレン後、RC-E-1 の作製方法から補修工程であるプライマー塗布工程を除いた方法で補強を行った。

#### (2) 供試体下面—支間部

ディスクサンダーで表面処理を行い、エポキシ樹脂接着剤を CFSS が1層あたり  $3.0\text{kg/m}^2$  となるよう塗布を行い、CFSS を2層接着させた。

表-3 梁供試体補強材料

モルタル	セメントの種類	超速硬セメント
	圧縮強度(3h)	$31.1\text{N/mm}^2$
	圧縮強度(28d)	$52.8\text{N/mm}^2$
CFSS 張出部	繊維種類	中弾性型炭素繊維
	繊維目付量	$600\text{g/m}^2$
	引張強度	$4,370\text{N/mm}^2$
	引張弾性率	$427\text{kN/mm}^2$
CFSS 支間部	繊維種類	高強度型炭素繊維
	繊維目付量	$600\text{g/m}^2$
	引張強度	$4,330\text{N/mm}^2$
	引張弾性率	$266\text{kN/mm}^2$
CFSS 支間部 接着樹脂	種別	エポキシ樹脂
	圧縮強度	$108\text{N/mm}^2$
	曲げ強度	$57.5\text{N/mm}^2$
	引張せん断強度	$17.3\text{N/mm}^2$

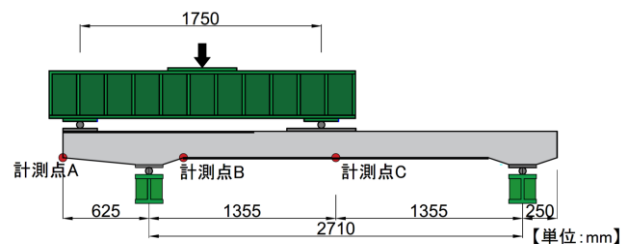


図-4 荷重位置とたわみ測定位置

## 4. 梁供試体試験方法および等価繰返し回数

### 4.1 試験方法

本試験の荷重位置およびたわみ測定位置を図-4 に示す。荷重は道示の T 荷重間隔である  $1,750\text{mm}^{\text{7)}$  とし、 $500 \times 200\text{mm}$  および端部に  $200 \times 200\text{mm}$  の厚さ  $22\text{mm}$  の鋼製荷重版を設けた。RC-O-1 は供試体の破壊まで静的荷重試験を行い、RC-O-2、RC-E-1、RC-J-1 については定点疲労荷重試験を行った。定点疲労試験における荷重条件は道示規定の死荷重・衝撃を考慮した B 活荷重相当となる  $120\text{kN}$  を初期値とし、5万回ごとに  $20\text{kN}$  ずつ増加させ、 $160\text{kN}$  以降では15万回ごとに荷重を  $20\text{kN}$  増加させた。

#### 4.2 等価繰り返し回数

本定点疲労荷重試験は段階荷重荷重としたことから、等価繰り返し回数を算出して耐疲労性を評価する。等価繰り返し回数は、マイナー則に従うと仮定すれば、式(1)で与えられる。基準荷重を死荷重、道示 B 活荷重に値する初期荷重の 120kN とする。また、式(1)における S-N 曲線の傾きの絶対値の逆数は、供試体が疲労破壊するまで実施した定点疲労試験<sup>8)</sup>を参考にし、11.2 を適用した。

$$N_{eq} = \sum_{i=0}^n (P_i/P)^m \times N_i \quad (1)$$

ここで、 $N_{eq}$ : 等価繰り返し回数(回)、 $P_i$ : 載荷荷重(kN)、 $P$ : 基準荷重(=120kN)、 $N_i$ : 実験疲労回数(回)、 $m$ : S-N 曲線の傾きの絶対値の逆数。

#### 5. 試験結果および等価繰り返し回数

##### 5.1 静的載荷試験

供試体張出部上面が無補強の供試体 RC-O-1 に対して、供試体の破壊まで漸増荷重を与えた。荷重とたわみの関係を図-5 に、破壊状況を図-7 それぞれ示す。

張出部の計測点 A、および支間中央の計測点 C では、荷重が 80kN を超えた付近にて、鉛直下向きのたわみの増加割合が変化し、荷重が 170kN を超えた付近でさらにたわみの増加割合が変化した。張出側のハンチ部である計測点 B では 170kN までおよそ線形的なたわみが鉛直上向きに増加し、その後は増加割合が変化し、たわみの増加が大きくなった。

供試体は載荷荷重が 262kN にて、張出側の載荷版付近から支点に向かって、せん断破壊が生じることで破壊に至った。張出部の上面では負の曲げモーメントにより、支間部の下面では正の曲げモーメントによりそれぞれ曲げひび割れが発生した。また、張出側ハンチの隅角部に向かって上縁方向からひび割れが貫通した。

##### 5.2 等価繰り返し回数

定点疲労試験における破壊形態、および基準荷重である 120kN の等価繰り返し回数を表-4 に示す。張出部の補強を実施しなかった無補強供試体である RC-O-2 は  $2.41 \times 10^7$  回、予備載荷後に補修・補強した RC-E-1 は  $4.21 \times 10^8$  回、予備載荷を与えず、補強を行った RC-J-1 は  $7.17 \times 10^8$  回であった。RC-O-2 の等価繰り返し回数と比較すると、RC-E-1 では 17.5 倍、RC-J-1 では 29.8 倍となり、CFSS 接着補強による耐疲労効果が得られた。

##### 5.3 たわみと繰り返し回数の関係

本試験における初期荷重 120kN における、各計測点のたわみと等価繰り返し回数の関係を図-6 に示す。なお、鉛直下向きのたわみを正、鉛直上向きのたわみを負の符号としている。

###### (1) 計測点 A

図-6 に示すよう計測点 A の初期たわみは、RC-O-2、

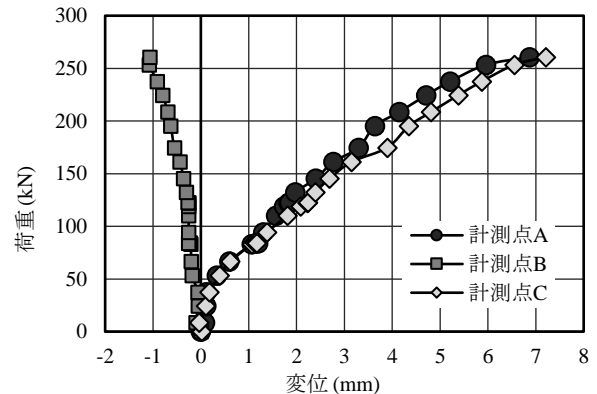


図-5 荷重とたわみの関係

表-4 定点疲労供試体の等価繰り返し回数と破壊形態

供試体	等価繰り返し回数	回数比	破壊形態
RC-O-2	24,090,070	1.0	張出部曲げ破壊
RC-E-1	421,067,501	17.5	支間部せん断破壊
RC-J-1	717,215,903	29.8	支間部せん断破壊

RC-J-1 にてそれぞれ 1.76mm、0.89mm であり、CFSS 接着による補強効果により、たわみを補強前の 49% に抑制した。RC-O-1 では  $1.6 \times 10^6$  回程度からたわみが増大する傾向にあった。  $1.6 \times 10^6$  回のタイミングで補強を行った RC-E-1 における補強直後のたわみは 1.21mm であった。RC-J-1 の同じ繰り返し回数におけるたわみは 1.22mm であったことから、予備載荷による疲労損傷を受けた場合においても、本方法による補修・補強効果は疲労損傷与えなかった供試体 RC-J-1 と同等のたわみ抑制効果を確認した。補強後における RC-E-1 と RC-O-1 は、  $1.0 \times 10^8$  回程度までは、ほぼ同じ推移でたわみが増加傾向にあったが、以降はたわみの増加が RC-E-1 で早期に現れた。破壊直前のたわみは 2.35mm であり、予備載荷終了時の 2.58mm より小さいたわみで供試体の破壊に至った。

###### (2) 計測点 B

図-6 に示すよう計測点 B の初期たわみは、RC-O-2 にて -0.23mm、RC-E-1 にて -0.22mm、RC-J-1 にて -0.22mm と大きな差異は確認されなかった。しかし、予備載荷を終了し、補強直前の RC-E-1 のたわみは -0.45mm、同じ等価繰り返し回数の RC-J-1 では -0.32mm であり、補強の有無によって疲労損傷によるたわみに差異が生じた。予備載荷後の RC-E-1 の補強直後のたわみは -0.21mm となり、初期たわみとおよそ同等までたわみが抑制され、その後は、繰り返し回数の増加と共にたわみが増加した。破壊時のたわみは RC-O-2 では -0.95mm、RC-E-1 では -0.52mm、RC-J-1 では -0.71mm であり、CFSS による補強によってたわみが抑制された。

### (3) 計測点 C

計測点 C の初期たわみは、RC-E-1 では 2.17mm、RC-J-1 では 2.38mm であった。予備載荷終了時、補強前の RC-E-1 では 3.40mm、RC-J-1 では 2.86mm であり、同じ等価繰り返し回数における RC-O-1 のたわみは 3.86mm であった。張出部の CFSS 補強による剛性が供試体全体に作用し、支間中央のたわみも抑制されたと考える。補強直後の RC-E-1 のたわみは 2.83mm となり、RC-J-1 と同等となり、張出部の CFSS 接着による補強により、供試体の剛性が向上されたと考える。等価繰り返し回数が  $2.0 \times 10^7$  程度までのたわみは、RC-E-1 と RC-O-1 にて同推移であったが、これ以降は RC-E-1 のたわみが増加した。破壊時のたわみは、RC-O-2 で 4.68mm、RC-E-1 で 11.67mm、RC-J-1 で 5.85mm であった。

### 5.4 破壊状況

定点疲労試験における供試体 3 体の破壊状況を図-7 にそれぞれ示す。

#### (1) RC-O-2

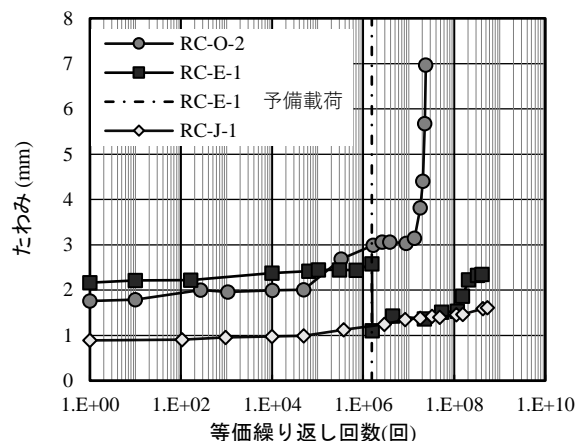
供試体側面からの観察では、供試体 RC-O-2 の張出部上面は負の曲げモーメントにより、曲げひび割れが 6 本発生した。さらに、張出側載荷版付近の曲げひび割れは支点ベースプレート近傍まで進展し、圧縮側コンクリートに微細な破壊が発生した。これに加え、同条件供試体である RC-O-1 の静的載荷試験では張出部のせん断破壊で供試体が破壊したことから、本供試体は張出部の曲げ疲労破壊に至ったと判断した。また、破壊時に張出側載荷版近傍に水平ひび割れが発生し、支間側の曲げひび割れはハンチ隅角部まで進展し、破壊回数直前で貫通した。

#### (2) RC-E-1

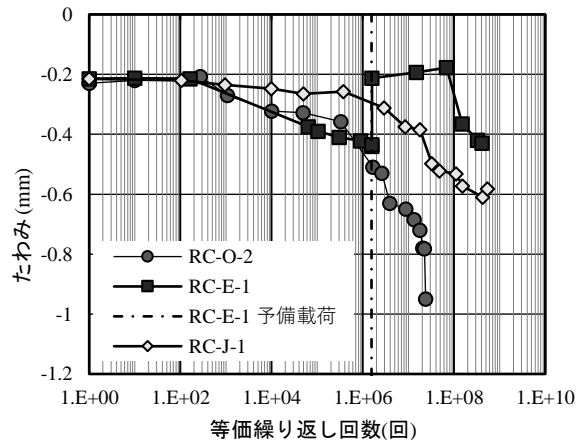
予備載荷時に供試体 RC-E-1 の張出部上面に 2 本の曲げひび割れが生じた。除荷時に計測したひび割れ幅は、端部側から 0.20mm、0.25mm であることから、土木学会による劣化過程<sup>9)</sup>では加速期前期、国土交通省の橋梁定期点検要領<sup>10)</sup>による劣化過程は、早期措置段階に相当すると考えられる。張出部の補強後は比較的小さい曲げひび割れが増加した。ハンチ隅角部まで進展した曲げひび割れが貫通し、支間側載荷版付近でせん断破壊した。破壊後も張出部、支間部の CFSS 接着部である補強部に浮きや剥離は無く、良好な附着性能が確認された。CFSS 接着による曲げ補強により、破壊モードが無補強供試体の曲げ破壊からせん断破壊となったと考えられる。

#### (3) RC-J-1

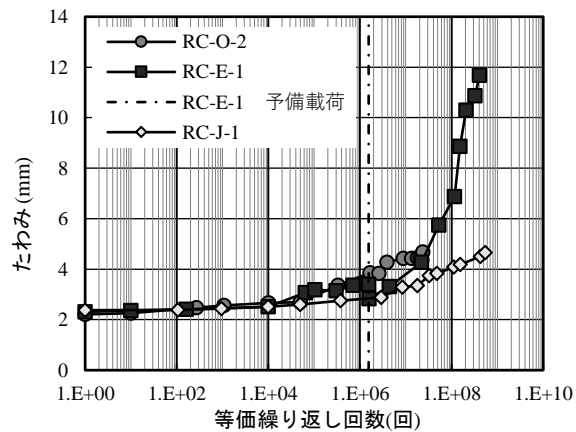
CFSS 接着により、補強後の張出部上面は曲げひび割れが分散し発生している。繰り返し載荷回数の増加によって、ハンチ位置の上面からのひび割れ本数が増加および進展し、ハンチ隅角部まで貫通した後、支間側の載荷版位置でせん断破壊した。同じくせん断破壊に至った



(1) 計測点 A



(2) 計測点 B



(3) 計測点 C

図-6 たわみと等価繰り返し回数の関係

RC-E-1 よりも、等価繰り返し回数は RC-E-1 の 1.7 倍となった。これは RC-E-1 では予備載荷により、支間部のたわみが大きくなり、支間側載荷版の左側に作用荷重が集中した為と推察する。破壊位置はどちらも支間部のせん断破壊であるため、張出部劣化へのエポキシ樹脂プライマーの補強効果を耐疲労性の比率として示すことは出来なかった。また供試体の破壊後においても、張出部、支間部の補強部の浮きや剥離はそれぞれ発生せず、良好な附着性能が確認された。

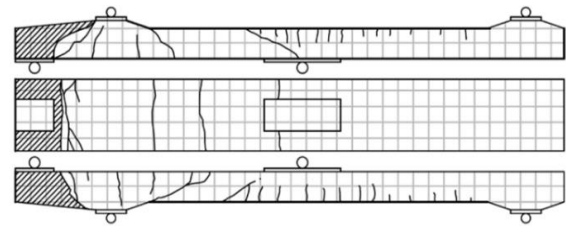
## 6. まとめ

本研究は、表面強化層を形成するエポキシ樹脂プライマーによる補修と、超速硬セメントモルタルによるCFSS接着による補修・補強を連続的に行った場合の付着試験および定点疲労載荷試験を行った。本試験によって得られた知見を以下に示す。

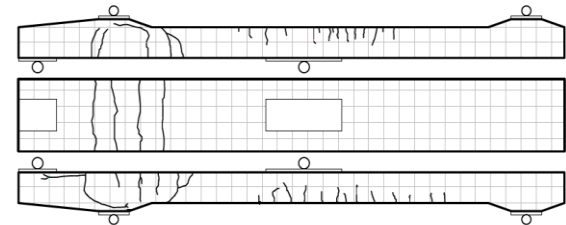
- (1) ブレーカーによるはつり作業によって、表面にマイクロクラックが発生した母材コンクリートでは、エポキシ樹脂プライマーがマイクロクラックとセメント水和組織へ浸透し硬化することで、コンクリート表面に深さ 0.4mm 程度の表面強化層が形成され、エポキシ樹脂プライマーを使用しない場合と比較し、接着試験による破壊強度が約 17% 向上した。
- (2) 劣化過程が加速期前期に相当する、ひび割れ幅 0.25mm 程度が発生した張出部上面へ、エポキシ樹脂プライマーにて表面強化層を形成し CFSS 接着を施工することで、破壊位置および破壊形態が無補強供試体の張出部の曲げ破壊から、支間部のせん断破壊に変化し、張出部の耐疲労性は支間部の耐疲労性以上まで向上することが確認された。なお、等価繰り返し回数は、供試体の破壊位置が異なるものの、無補強供試体の 17.5 倍まで向上した。
- (3) 劣化過程が加速期前期の損傷に、エポキシ樹脂プライマーにて表面強化層を形成し、CFSS 接着による補強を行った供試体と、無損傷状態で補強を行った供試体の張出部のたわみは、どちらも載荷初期は 1.0mm 程度、破壊直前で 2.0mm 程度の値であり、無補強供試体と比較し CFSS 接着を施工することで半分程度にたわみが抑制された。
- (4) 本試験では予備載荷の有無に関係なく、張出部および支間部の CFSS 接着部は破壊まで、各々の界面で浮きや剥離が発生せず、良好な付着性能を確認した。

## 参考文献

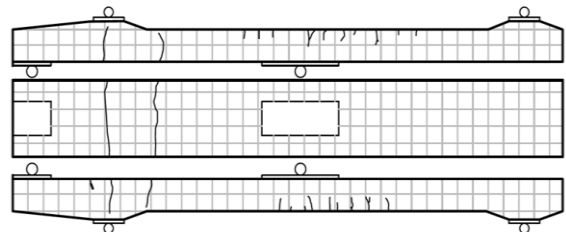
- 1) 国土交通省：国土技術製作総合研究所 資料第 1075 号，平成 30 年度道路橋に関するデータ集，2019
- 2) 渡邊 晋也ほか：コンクリート打ち継ぎ面の内部に生じた脆弱部および細部ひび割れの補修方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1600-1605，2012
- 3) 伊藤 清志ほか：2 タイプの接着剤を塗布した RC 床版上面補修法の耐疲労性の評価および施工技術，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp2131-2136，2013
- 4) 小森 篤也ほか：張出部を有する RC 床版の CFSS 接着方法に関する耐疲労性の評価，コンクリート工学



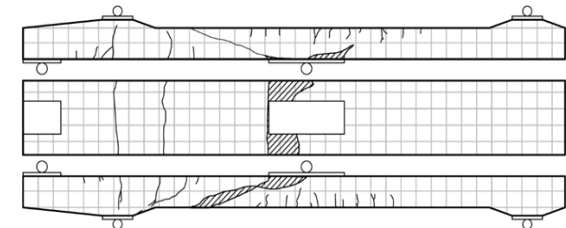
(1) 破壊状況 RC-0-1



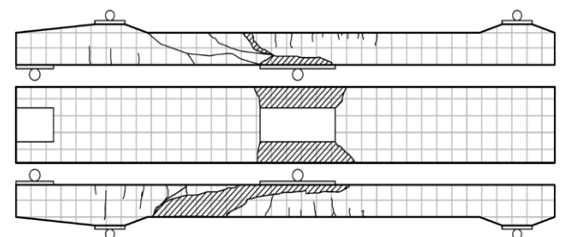
(2) 破壊状況 RC-0-2



(3) 破壊状況 RC-E-1 予備載荷終了時



(4) 破壊状況 RC-E-1 破壊時



(5) 破壊状況 RC-J-1

図-7 各供試体の破壊状況

論文集，Vol.35，No.2，pp.1309-1314，2013

- 5) 日本道路協会：鋼道路橋示方書・同解説，1964
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1971
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017
- 8) 松井 繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学学位論文，pp.301，1985
- 9) 土木学会：維持管理マニュアル，2020
- 10) 国土交通省 道路局：橋梁定期点検要領，2019