

CFS・CFSS補強したRC床版の補強効果に関する研究

日大生産工(院)○元 燦豪 日大生産工 阿部 忠 日大生産工 木田哲量
日大生産工 徐 銘謙 新日鉄マテリアルズ(株)小森篤也

1. はじめに

高度経済成長期に建設された橋梁の多くが、一般的な橋梁の寿命といわれる架設後 50 年を経過し、老朽化による更新時期を迎えている。とくに、橋梁部材の 1 つである RC 床版は、材料の経年劣化や大型車両の繰返し作用による疲労劣化などにより、ひび割れ損傷が生じ、耐荷力性能および耐疲労性が低下している。このような状況において、橋梁を適切に維持管理していくために、劣化した橋梁の延命化を図るための補修・補強法の構築は急務となっている。RC 床版の劣化に対する補強法に、ひび割れの抑制や耐疲労性の向上が図られ、軽量かつ施工性に優れている炭素繊維シート（以下、CFS とする）を用いた底面接着工法がある。この CFS 補強法は、多くの研究成果から耐疲労性が評価され、実橋床版の補強法として既に採用されている^{1),2)}。また最近では、CFS 補強法と同様に高引張力を有し、同様な補強効果が得られる炭素繊維ストランドシート（以下、CFSS とする）が新たな補強材として開発されている。しかし、CFSS 補強法は輪荷重走行による耐疲労性の検証は行われていないのが現状である。そこで本研究では、RC 床版底面に CFS および CFSS を接着補強した供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を評価する。

2. 道路橋RC床版の損傷状況

道路橋 RC 床版の破損状況の一例を写真-1に示す。橋梁点検結果によると、RC 床版は橋梁部材の中で最も損傷が多い部材である。写真-1(1)は、重車両交通の多い地域の RC 床版であり、とくに損傷の著しい伸縮継手付近で、2 方向のひび割れが発生している。また、ひび割れ損傷部位に、伸縮継手から漏水した雨水の浸透により、遊離石灰が沈着している。写真-1(2)は、積雪寒冷地域の RC 床版で、融雪剤の散布による塩害と夜間の凍害による複合劣化を受けた RC 床版である。その底面には 2 方向のひび割れの発生と遊離石灰も多く見られる。また、2 方向のひび割れ状況と遊離石灰の沈着状況からすると、コンクリートの圧縮強度



(1) 疲労損傷 (2) 塩害・凍害による劣化
写真-1 道路橋RC床版の破損状況の一例

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

コンクリート	鉄筋(SD295A)			
	使用鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
圧縮強度 (N/mm ²)				
30	D13	370	511	200

表-2 CFSおよびCFSSの材料特性

補強材料名	目付量 (g/m ²)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
CFS	200	0.111	4,420	235
CFSS	600	0.333	3,400	245

の低下が懸念される。これらの 2 方向のひび割れが発生している RC 床版の補修・補強には、たわみの抑制効果、耐荷力および疲労性能の向上が図られる炭素繊維シート、アラミド繊維シートなどによる補強法が採用されている。

3. 使用材料・供試体寸法および補強方法

3.1 使用材料

RC 床版供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ～ 20mm の砕石(JIS-A5005)を使用した。コンクリートの圧縮強度は 30N/mm² である。鉄筋は SD295A、D13 を使用した。ここで、実験時におけ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。次に、CFS は、目付量 200g/m²、設計厚さ 0.111mm を使用した。新 FRP 材料である CFSS は、樹脂を含浸・硬化させた FRP ストランドをすだれ状に加工した材料である。本供試体には、目付量 600g/m²、設計厚さ 0.333mm を用いた。CFS および CFSS の材料特性を表-2に示す。

Study on reinforced effects of RC slab improved with CFS and CFSS

by

Chanho WON, Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA,
Ming-Chien HSU and Atsuya KOMORI

3.2 供試体寸法および鉄筋配置

RC 床版供試体は、浮き上がり防止を設けない 4 辺単純支持とする。本実験に使用した供試体寸法は、道路橋示方書・同解説³⁾(以下、道示とする)に規定する活荷重に基づいて、大型自動車の 1 日 1 方向あたりの計画交通量 2000 台以上を想定して決定した。供試体は、道示に規定する T 活荷重分布幅 500mm に対して、本実験装置の輪荷重幅が 300mm であることから、3/5 モデル (= 300/500) とした。よって、供試体寸法は、全長 1600mm、支間 1400mm、床版厚 150mm とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張主鉄筋に D13 を 120mm 間隔で配置し、有効高は 125mm とした。また、配力筋も主鉄筋と同様に 120mm 間隔で配置し、有効高を 105mm とした。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。ここで、RC 床版の寸法および鉄筋配置を図-1に示す。

3.3 補強方法

大型車両の交通量の増大や重交通の影響によりひび割れ損傷などの劣化損傷が発生して耐疲労性が低下している道路橋 RC 床版の延命化対策には、コンクリート材料による上面増厚補強法、鋼板底面接着補強法や CFS 接着法などが実施されている。鋼板底面接着補強法は、床版下面全体が鋼板に覆われているため、床版上面から浸入した水が、床版と鋼板の間に溜まりやすい構造となり、劣化が促進されて抜け落ちる事故が報告されている⁴⁾。また最近では、交通止めを必要とせず、軽量で施工性に優れ、錆が発生しない CFS 接着工法が広く採用されている。しかし、この CFS 接着工法は、鋼板底面接着補強法と同様に CFS を床版下面全体に接着して補強するため、補強後の床版内の滞水、また、損傷の確認が困難であるため、補強後の維持管理が行いにくいという問題がある。これらの弱点を解決するために、新しい FRP 材料である CFSS および炭素繊維強化プラスチック格子筋（以下、CFRP 格子筋とする）が開発されている。しかし、これらの新 FRP 材料による床版補修・補強法に対する設計基準や耐疲労性の検証は行われていないのが現状である。したがって本研究では、橋梁の長寿命化対策の観点から、道路橋 RC 床版の補修・補強法として、従来型の CFS 接着方法と新材料である CFSS を用いて格子構造とした底面接着工法の耐荷力性能、耐疲労性を評価することとする。ここで、CFS および CFSS の底面接着補強法の施工手順を図-2、図-3に示す。

(1)CFS補強方法：CFS 補強方法は、まず、RC 床版供試体の底面の不純物を除去し、コンクリートサンダーで研磨して平滑に仕上げる（図-2①）。次

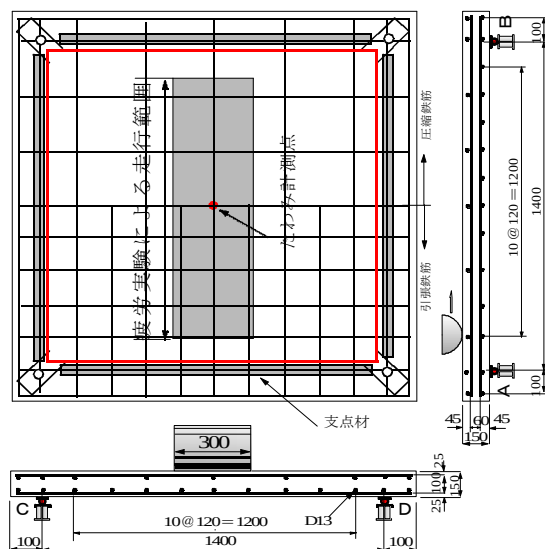


図-1 RC床版の寸法および鉄筋配置

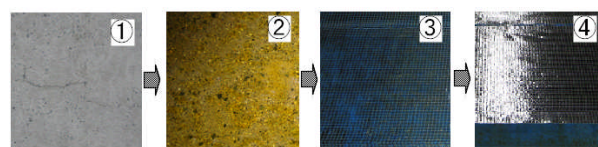


図-2 CFS補強方法

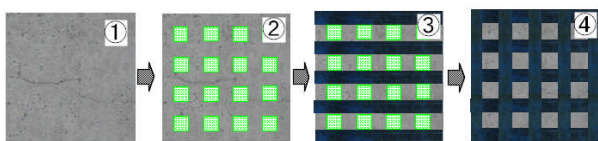


図-3 CFSS格子貼補強方法

に、表面の多少の凹凸への不純物や気泡の混入による付着力の低下を生じさせずにコンクリートと CFS の付着性を高めるために、表面仕上げ後プライマーを塗布含浸させ 24 時間養生を行う（図-2②）。その後、幅 500mm の CFS をエポキシ含浸樹脂で軸直角方向に全面接着し、24 時間養生を行う（図-2③）。同様に軸方向に 2 層目を接着し、24 時間養生を行う（図-2④）。ここで、CFS 補強した供試体名称を RC-CFS とする。

(2)CFSS格子貼補強方法：CFS 補強方法は、施工が容易であり、死荷重を増加させずに床版の耐力が向上する利点がある反面、補強後の床版と CFS 界面の滞水の除去や損傷の確認が困難であるため、補強後の維持管理が行いにくいという問題がある。そこで本研究は、このような実施工における問題を解決すべく、補強後の維持管理が行い易いように、格子状に接着可能な新しい FRP 補強材料である CFSS を選定した。また、CFS 補強法は、表面処理後プライマーを含浸養生させるが、CFSS 接着補強法は、プライマー処理が不要であり、コンクリートの表面処理後、CFSS を直接接着することか

ら CFS 補強法に比して優れた施工性を有している。本研究では、CFSS を格子状に接着する（以下、CFSS 格子貼補強とする）ことから、床版内の雨水の排水および事後点検が容易となるなどの利点がある。本実験における CFSS の設計量は、CFS を軸直角方向および軸方向の支間内全面に各 1 層接着した場合と同量とする。よって、CFSS 格子貼補強の RC 床版は、目付量 600g/m² の CFSS を長さ 1300mm、幅 50mm で 100mm 間隔に軸直角方向および軸方向に格子状に接着する。

CFSS 格子貼補強法は、CFS 補強方法と同様に、まず、RC 床版底面をコンクリートサンダーで研磨し、平滑に仕上げる（図-3①）。次に、床版底面に CFSS を格子状に接着することから、接着以外の面にマスキングテープを接着する（図-3②）。その後、接着剤塗布し、CFSS を 100mm 間隔で軸直角方向に仮止めし、すだれ状の空間部からエポキシ系樹脂接着剤を浸透させながら接着して 24 時間養生を行う（図-3③）。その後、軸方向に CFSS を接着して格子状を形成する（図-3④）。ここで、CFSS 補強した供試体名称を RC-CFSS とする。

4. 実験方法および等価走行回数

4.1 実験方法

輪荷重走行による疲労実験（以下、走行疲労実験とする）は、輪荷重（輪荷重幅 300mm）を供試体中央から ±500mm の範囲を連続走行させる実験である。本実験に用いる走行疲労実験装置の車輪幅が 300mm であることから、道示に規定する活荷重 100kN の 3/5 である 60kN に安全率 1.2 を考慮して基準荷重を 72kN とする。走行疲労実験における荷重は 100kN、120kN で、それぞれ 20,000 回走行する。荷重を 120kN 載荷以降は、20,000 回走行ごとに荷重を 10kN ずつ増加し、供試体が破壊するまで荷重の増加と走行を繰り返す。なお、計測はマイナー則に従い、1、10、100、1,000 回とし、その後は 5,000 回ごとにたわみ、ひずみを計測する。

4.2 等価走行回数の算出方法

走行疲労実験では、2 万回走行ごとに荷重を増加させることから、基準荷重と実験荷重および実験走行回数の関係から等価走行回数 N_{ep} を算出して耐疲労性を評価する。輪荷重走行による等価走行回数 N_{ep} 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)に適用する S-N 曲線の傾きの逆数 m には、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線の傾きの逆数 12.7⁹⁾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} ：等価繰返し走行回数（回）、 P_i ：載

表-3 等価走行回数

供試体	合計等価走行回数	平均等価走行回数	走行回数比
RC15-1	6,880,950	9,059,787	—
RC15-2	11,238,623		
RC15-CFS	258,139,512	258,139,512	28.5
RC15-CFSS-1	302,190,221	324,127,243	35.8
RC15-CFSS-2	346,064,264		

荷荷重（kN）、 P ：基準荷重（72kN）、 n_i ：実験走行回数（回）、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数（=12.7）

よって、本実験における RC 床版の等価走行回数（ N_{ep} ）を基準に、CFS 補強および CFSS 格子貼補強 RC 床版の耐疲労性を評価する。

5. 実験結果および考察

5.1 等価走行回数

式(1)より算出した RC 床版、CFS 補強および CFSS 格子貼補強 RC 床版の等価走行回数 N_{ep} を表-3に示す。供試体 RC-15 の平均等価走行回数 N_{ep} は 9,059,787 回である。この RC 床版の等価走行回数 N_{ep} を基準に CFS 補強および CFSS 格子貼補強法における補強効果および耐疲労性を評価する。CFS 補強 RC 床版供試体 RC15-CFS の等価走行回数は 258,139,512 回となり、RC 床版の 28.5 倍となった。また、CFSS 格子貼補強 RC 床版供試体 RC15-CFSS の平均等価走行回数は 324,127,243 回となり、RC 床版の 35.8 倍の耐疲労性が得られた。CFS 補強 RC 床版供試体と CFSS 格子貼補強 RC 床版供試体の平均等価走行回数と比較すると、CFSS 格子貼補強 RC 床版供試体が 1.3 倍耐疲労性が向上する結果となった。したがって、CFSS 格子貼補強法においても CFS 補強法と同等以上の等価走行回数が増加し、耐疲労性向上に優れている補強法であることが検証された。

5.2 破壊形状

本実験における RC 床版の破壊時のひび割れ形状および CFS、CFSS のはく離形状の一例を図-4に示す。なお、CFS のはく離は打音法による検査を行い、はく離を大中小の3段階で判断した。

RC 床版供試体 RC15 のひび割れは図-4(1)に示すように、軸直角方向、軸直方向ともに鉄筋配置位置に発生し、格子状を形成している。また、荷重載荷位置から 45 度の底面ははく離している。

CFS 補強 RC 床版供試体 RC15-CFS は図-4(2)に示すように、輪荷重接地面から 45 度底面、すなわち、RC 床版のダウエル効果が及ぼす範囲で、軸方向にはく離が生じている。この範囲以外においては CFS とコンクリートの付着効果が発揮され、破

壊時においてもはく離は見られない。

次に、CFSS 格子貼補強 RC 床版供試体 RC15-CFSS は、図-4(3)に示すように、ダウエル効果の及ぼす範囲にひび割れが見られる。なお、破壊時には、CFS および CFSS とともに破断は見られない。また、CFSS は格子状に接着したことから、格子間からひび割れの目視点検が可能となった。

5.3 たわみと等価走行回数の関係

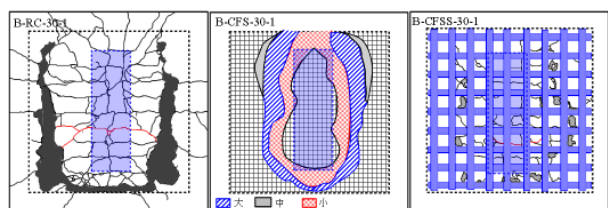
RC 床版供試体中央におけるたわみと等価走行回数¹⁾の関係を図-5に示す。RC 床版供試体 RC15-1 は、荷重 100kN 載荷時の初期たわみは、0.87mm であり、荷重を 120kN(等価走行回数 1.29×10^6 回)に増加した時点のたわみは 3.0mm 程度である。その後、たわみが 3.7mm(等価走行回数 4.58×10^6 回)に達した後急激にたわみが増加して破壊に至り、破壊時のたわみは 6.3mm であった。供試体 RC15-2 も同様な増加傾向を示し、破壊時のたわみは 5.4mm であった。次に、CFS 補強 RC 床版供試体 RC15-CFS の荷重 100kN 載荷時の初期たわみは 0.82mm であり、荷重を 120kN に増加した時点のたわみは 1.6mm であった。荷重を 140kN(等価走行回数 14.43×10^6 回)に増加した時点のたわみは 2.2mm であり、同じ荷重を載荷した RC 床版供試体 RC15 のたわみに比して 1/2 程度であり、たわみが抑制されている。また、荷重を 150kN(等価走行回数 107.50×10^6 回)に増加した時点のたわみは 3.0mm 程度である。その後、たわみが 3.5mm に達した後急激にたわみが増加して破壊に至り、破壊時のたわみは 6.7mm であった。

次に、CFSS 格子貼補強 RC 床版供試体 RC15-CFSS-1 の荷重 100kN 載荷時の初期たわみは、0.62mm であり、荷重を 120kN(等価走行回数 1.29×10^6 回)に増加した時点のたわみは 1.4mm であり、同じ大きさの荷重の RC 床版供試体 RC15 のたわみの 1/2 程度である。また、荷重を 140kN に増加した時点のたわみは 2.0mm、荷重を 150kN に増加した時点のたわみは 2.6mm、荷重を 160kN(等価走行回数 275.13×10^6 回)に増加した時点のたわみは 3.5mm 程度である。その後、たわみが 3.6mm に達した後急激にたわみが増加して破壊に至り、破壊時のたわみは 4.2mm であった。供試体 RC15-CFSS-2 も同様な増加傾向を示し、破壊時のたわみは 5.4mm であった。

したがって、CFS 補強および CFSS 格子貼補強を施すことにより、無補強の RC 床版に比してたわみが大幅に抑制され、耐疲労性も大幅に向上している。

6. まとめ

①等価走行回数は、無補強の RC 床版供試体に比



(1) RC15

(2) RC15-CFS

(3) RC15-CFSS

図-4 破壊形状

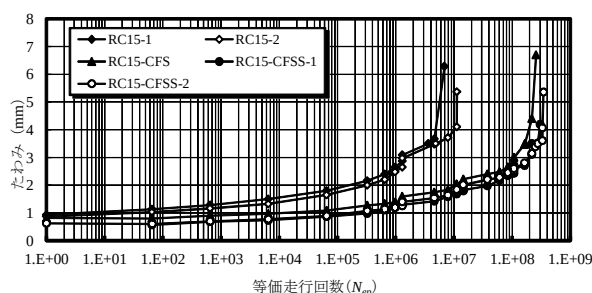


図-5 たわみと等価走行回数

して CFS 補強および CFSS 格子貼補強 RC 床版供試体ともに上回った。また、CFS 補強供試体に比して CFSS 格子貼補強供試体は、1.2 ~ 1.3 倍となった。したがって、CFS 補強および CFSS 格子貼補強することにより等価走行回数が増加し、耐疲労性を向上させる有効な補強法であることが検証された。

② CFS 補強および CFSS 格子貼補強することによりひび割れが抑制され、等価走行回数も増加した。なお、CFSS を格子状に接着したことから、格子間からひび割れの目視点検が可能となった。

③たわみと等価走行回数の関係では、CFS 補強および CFSS 格子貼補強することによりたわみの増加が抑制されたことから補強効果が認められる。したがって、CFS および CFSS 補強法は有効な補修・補強法であると言える。

参考文献

- 1)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）
- 2)小林朗、蔡華堅、松井繁之：コンクリート工学年次論文集 27 巻 2 号：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、pp.1513-1518, 2005
- 3)日本道路橋会、道路橋示方書・同解説Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ(2004)
- 4)日経コンストラクション、2010.5.28
- 5)松井繁之、道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版(2007)