論文 張出部を有するRC床版のCFSS接着補強法に関する耐疲労性の評価

小森篤也^{*1}•阿部忠^{*2}•水口和彦^{*3}•岩崎正二^{*4}

要旨:本研究は, RC 床版張出部に CFSS を上面接着補強した場合の耐疲労性を評価したものである。実験 では,塩害・凍害を受け供用 33 年で撤去された,張出部を有する実橋 RC 床版を供試体として用いた。補 修・補強法は,劣化部を除去した後,断面補修したのみの供試体と上面張出部と床版下面に補強した供試体 の2 種類を製作し,定点疲労実験を行った。補強した供試体は断面補修のみの供試体に対して 4.1 倍の等価 繰返し回数が得られ,そのたわみを比較すると CFSS 接着補強することでたわみの増加が 30 %抑制される。 したがって,張出部を CFSS 補強することで耐疲労性を向上させることを確認した。 キーワード:張出 RC 床版, CFSS 上面接着工法,補強効果,耐疲労性

1. はじめに

道路橋部材の中で,損傷が著しいのはRC 床版である。 その損傷状況は、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¹⁾。また,積雪寒冷 地域では凍害²⁾によるスケーリングや砂利化,さらには 凍結防止剤による塩害と凍害による複合劣化や塩害によ る鉄筋発錆および断面欠損が見られる³⁾。とくに、地覆 から床版張出部にかけては床版表面に雨水や塩水が滞水 しやすく,ひびわれから床版コンクリート内部に浸入し、 凍害と大型車両の繰り返し走行による疲労とが複合され、 スケーリングや砂利化が発生しやすい環境にある。

張出部付近の補強法にて,連続繊維シート(CFS)を 用いた上面接着補強法は,エポキシ樹脂,メチルメタク リレート(MMA)樹脂を用いた補強法が実施されている。 しかし,CFS 上面接着補強法においては,接着剤の硬化 養生の関係から数日程度の交通規制期間が必要となるこ とが多い。また,速硬化性を有するMMA 樹脂施工の場 合においても8 時間規制では10㎡程度の施工量であり, 施工速度に限界がある。そこで,施工の合理化,施工時 間の短縮を図る材料として超速硬セメントモルタルを用 いた連続繊維ストランドシート(CFSS)接着補強法が提 案されている。しかし,RC 床版の張出部にCFSS での 上面補強を行うにあたり,補強効果および耐疲労性の検 証が行われていないのが現状である。

そこで本研究は、大型車両の通行による疲労劣化と塩 害・凍害の複合劣化を受け、供用33 年で撤去されたRC 床版を用いて、張出部の上面および床版支間内にCFSS で補強した供試体を用いて定点疲労試験を行い、等価繰 返し回数を求めCFSS 上面接着補強法における耐疲労性 を評価し、等価走行回数とたわみおよび、破壊状況から その補強効果について検証する。

2. 疲労劣化と塩害・凍害を受けたRC床版の損傷状況

本研究では、塩害・凍害の複合劣化を受けた岩手県の 国道106 号線に建設された単純上路式トラス橋RC 床版 を実験に用いた。施工前の損傷状況を写真-1,2に示す。 この道路橋RC 床版は,昭和50 年に建設され平成21 年 に撤去された床版であり、供用年数は33 年である。積 雪寒冷地域のRC 床版は、車両の走行によるひび割れが 床版支間方向に発生し、貫通ひび割れとなる。また、積 雪寒冷地では床版上面側には微細なひび割れが発生し, 床版上面から雨水や融雪剤を含む水がこれらのひび割れ から侵入し、床版コンクリートはひび割れのすり磨き現 象により、劣化が促進される。貫通ひび割れに侵入した 水は、遊離石灰となり、床版下面に沈着する(写真-1 (1))。また、冬季には融雪剤を含む水が、微細なひび割 れや,貫通ひび割れから浸入し,凍害と塩害による複合 劣化となる。とくに,張出部付近は滞水域となりやすく, 最も凍害による損傷が著しい(写真-1(2))。

次に,積雪寒冷地域のRC 床版の劣化過程および損傷 状況を**写真-2**に示す。積雪寒冷地域の塩害・凍害を受 けたRC 床版の劣化過程は,まず,凍害により床版コン クリート上面(あるいは地覆)にポップアウトが発生す る。次に,車両の走行と塩害・凍害を繰り返すことによ りコンクリート表面がスケーリングし,骨材が露出する

(写真-2(1))。また、床版下面には遊離石灰が発生し、 複合劣化によりコンクリートの圧縮強度が低下すること もある。その後の走行と凍害の繰り返しによりスケーリ ングが進行し、鉄筋が露出する(写真-2(2))。この時 点で、橋梁点検要領⁴⁾に示される損傷区分は加速期後期 から劣化期に相当する⁵⁾。さらに、車両走行と塩害・凍 害を繰り返すことにより砂利化し、その範囲は上縁鉄筋 の下側までとなり(写真-2(3))、下面には遊離石灰が

*1 日本大学大学院 生産工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)
*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博(工)(正会員)
*3 日本大学 生産工学部土木工学科助教 博(工)(正会員)
*4 岩手大学 工学部社会環境工学科教授 工博



沈着する。また,鉄筋は塩害により断面欠損が生じている。さらに,車両走行と塩害・凍害を繰り返すことにより砂利化し,その範囲は上縁鉄筋の下側までとなり(写 真-2(3)),下面には遊離石灰が沈着する。また,鉄筋 は塩害により断面欠損が生じている(写真-1(2))。

以上のように,積雪寒冷地域に建設された道路橋RC 床版は,大型車両の疲労損傷に加え,塩害・凍害の複合 劣化を受け,張出部ではスケーリングのみならず床版引 張側鉄筋の断面欠損もあることから,**写真-1**,2に示す, 張出部の補修・補強法を施す必要があるものが多い。

3. 供試体材料および供試体寸法

3.1 供試体概要

本実験に用いる供試体は、凍害塩害の影響を受けた実 橋床版を切断して用いた。本実験に用いた供試体のコン クリートは、普通ポルトランドセメントと最大寸法 25mm の骨材が使用されていた。実験時における既設床 版コンクリートの圧縮強度平均は31.1N/mm²であり、鉄 筋はD19 が使用されていた。

本供試体の支間は2,450mm であり、床版厚は190mm である。張出部を525mm である。補修後の平均厚は 200mm とし、供試体の幅は500mm とする。よって今回 の補強材は10mm の厚みで施工された。次に、鉄筋は 軸直角方向および軸方向ともにD19mm を軸直角方向お よび軸方向ともに125mm 間隔で配置されており、軸方 向筋の配置間隔はかなりばらつきがある。ここで、供試 体寸法および鉄筋の配置を図-1に示す。

3.2 補修·補強材料

RC 床版のスケーリングした上面の補修材には3 時間 で道路橋示方書・同解説(以下,道示とする)⁸⁰に規定さ れるコンクリートの設計基準強度24N/mm²を満足させ るために,超速硬セメントモルタルを用いた。また,張 出部および床版支間内には,施工速度の向上が見込ま れる,樹脂を含浸・硬化させた炭素繊維強化プラスチッ クをすだれ状に加工したCFSS を用いた⁶⁰⁷。CFSS は, 目付量600g/m²の中弾性型炭素繊維ストランドシートで あり,専用のエポキシ樹脂系の接着剤を用いた。ここで, 本,供試体に用いた超速硬セメントモルタル,CFSS,接 着剤の物性値を表-1に示す。



表-1 補修・補強材料の物性値

モルタル	セメントの種類	超速硬セメント		
	圧縮強度(3時間)	24.0N/mm ²		
	圧縮強度(28日)	56.0N/mm ²		
	ハンドリングタイム	21分		
	フロー値 (J14ロート)	8.5秒		
CFSS	繊維種類	中弾性型炭素繊維		
	繊維目付	600g/m ²		
	引張強度	3,260N/mm ²		
	引張弾性率	390N/mm ²		
	設計厚	0.333mm		
接着剤	種別	エポキシ樹脂		
	圧縮強度	92N/mm ²		
	曲げ強度	65Nmm ²		
	引張せん断強度	19.5N/mm ²		
	付着強度	2.8N/mm ²		



3.3 劣化RC床版の損傷状況および補修・補強方法

本実験に用いる供試体の損傷状況および補修・補強後の状態を図-2,3に示す。

補修床版供試体RC.O-1,2 の損傷状況は図-2,3に示 すように,張出部のコンクリートはスケーリングし,一 部に鉄筋露出と20 %程度の鉄筋断面欠損が見られる。 なお,本実験には断面補修のみを行った床版,補強床版 を,それぞれ2 体ずつ製作した。また,補修床版供試体 の名称をRC.O-1, RC.O-2, CFSS 補強床版供試体の名称 をRC.O-C1, RC.O-C2 とする。

(1)補修床版

補修床版RC.O-1 の損傷状況は、図-2(1),2)および 図-2(2),2)に示すように、張出部付近のコンクリート はスケーリングし、鉄筋が露出している。鉄筋は塩害に より錆びの発生と断面欠損がみられる。また、床版下面



(1) RC. 0-C1

図-3 補修補強床版供試体

(2) RC. 0-C2

損傷状況は図-2(1),3)および図-3(2),3)に示すよう に、床版支間内には格子状のひび割れが発生し、遊離石 灰の沈着が見られる。したがって、床版全体としては劣 化期に相当する床版であると判断される。この床版の供 試体の補修法は、RC 床版上面全体を切削機で切削し、 とくに凍害によるスケーリングや砂利化の著しい個所 は、高圧水洗で脆弱したコンクリートを除去し、その後、 超速硬セメントモルタルで元の厚さまで修復する。補修 後の床版上面の状況を図-2(1),1)および図-2(2),1) に示す。

(2)補強床版

補強床版の損傷状況は図-3(1),2)および(2),2)に 示すように,張出部の上面はスケーリングし,鉄筋が露 出している。また,床版下面には二方向のひび割れが発 生し,遊離石化の沈着も著しい。この床版供試体の補強 法は,上面全体を切削機で切削し,スケーリングや砂利 化による脆弱したコンクリートを高圧水洗で除去する。

張出部の補強は,負のモーメントの影響を受ける範囲, すなわち張出部端部から 1,200mm の範囲に適用した。 床版上面の補強法は,脆弱したコンクリートを除去した 後,専用接着剤を塗布し,CFSS を全面接着しその上 に,超速硬セメントモルタルで元の厚さまで補修した(図 -3(1),1)および図-3(2),1))。さらに,床版支間内 は図-3(1),3)および図-3(2),3)に示すように,2方 向のひび割れが発生している。そこで,床版下面の補強 法は,まず,床版下面をディスクサンダーで表面処理し, 幅 100mm の CFSS を格子状に接着補強した(図-3(1), 4)および 図-3(2),4))に示す。

4. 定点疲労実験および等価走行回数

4.1 実験方法

本実験の荷重載荷位置を図-1および図-4に示す。 荷重は,道示⁸に準拠して 500×200mm 載荷板と端部に は 200×200mm の載荷板を設け,道示⁸⁾に示す T 荷重間 隔 1,750mm とする。

供試体 RC.O-1,2 の荷重条件は、全荷重 150kN (=75kN +75kN) を初期値とし、200 万回ごとに 50kN ずつ増加 した。200kN 以降は 20kN 増加した。また、供試体 RC.O-C1,2 は、初期荷重 150kN とし、200 万回ごとに 50kN 増加した。次に、本実験のたわみの計測位置は図



図−4 実験概要

-4に示すように4箇所とする。

4.2 等価繰り返し回数

定点疲労実験は、200 万回ごとに荷重を増加する段階 荷重載荷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 従うと仮定すると式(1)で与えられる。本供試体寸法は 幅 500mm であり、1/2 モデルである。よって、荷重は道 示に規定する衝撃を含む荷重に安全率を考慮した 150kN の 1/2 である 75kN を基準荷重とする。また、式(1) に おける S-N 曲線の傾きの逆数 m には、RC 床版の疲労実 験における S-N 曲線の傾きの逆数 11.2 を適用する⁹。な お、定点疲労実験における G-N 曲線式の傾きの逆数で ある。

$$Neq = \sum_{i=1}^{n} (Pi/P)^m \times Ni$$
⁽¹⁾

ここで、N_{eq}:等価繰り返し回数(回), Pi:載荷荷重(kN), P: 基準荷重(=75kN), Ni:実験疲労回数(回), m:S-N 曲線の傾きの逆数。

5. 結果および等価繰返し回数

5.1 等価繰返し回数

定点疲労実験における破壊までの等価繰返し回数を表 -2に示す。

超速硬セメントモルタルで上面補修のみ行った供試体 RC.O-1の等価繰返し回数は81.33×10⁶回,供試体RC.O-2 は 134.65×10⁶回であり,等価繰り返し回数の平均は 107.99×10⁶回である。

次に, 張出部上面を CFSS 補強および下面に CFSS を 格子状に接着補強した供試体 RC.O-C1, C1 の等価繰り返 し回数は, それぞれ 595.56×10⁶回, 296.38×10⁶回であり, その平均等価繰り返し回数は 445.97×10⁶回である。補修 のみを施した供試体 RC.O-1, 2 の平均等価繰返し回数と 供試体 RC.O-C1, 2 の平均等価繰り返し回数との比較を 行うと, CFSS 補強した供試体が 4.1 倍の延命効果が得ら れる結果となった。

表-2 等価繰返し回数

供試体	等価繰返し回 数	平均等価繰返 し回数	等価走行 回数比
RC.O-1	81,330,803	107 005 266	
RC.O-2	134,659,728	107,995,200	
RC.O-C1	595,566,383	145 076 550	4.1
RC.O-C2	296,386,718	445,970,550	4.1

5.2 たわみと等価繰り返し回数の関係

本実験における各計測点のたわみと等価繰返し回数との関係を図-5に示す。

(1) 計測点 (a)

計測点(a)のたわみと等価繰り返し回数の関係は,図-5(1)より,補修床版の初期たわみは,供試体 RC.O-1,2 で,それぞれ 0.8mm, 0.7mm である。これに比して,補 強床版供試体の初期たわみは供試体 RC.O-1,2で,それ ぞれ 0.6mm, 0.4mm であり,補強床版供試体のたわみが 減少している。補修床版供試体 RC.O-1,2のたわみは等 価繰り返し回数 37.1×10⁶回付近からたわみの増加が大き くなり,破壊時のたわみは,それぞれ 3.8mm,4.1mm で ある。次に,補強床版供試体 RC.O-C1,C2 は,等価繰り 返し回数の増加に伴い,僅かにたわみが増加している。 破壊時のたわみは,それぞれ 2.2mm,2.1mm である。補 修床版供試体と比較して,CFSS にて下面補強したこと によりたわみの増加が抑制されている。

(2) 計測点 (b)

計測点(b)は床版支間中央付近のたわみである。図-5(2)より、補修床版供試体の初期たわみは供試体 RC.O-1, 2 でそれぞれ 2.6mm, 2.5mm である。これに対 して、補強床版供試体の初期たわみは供試体 RC.O-1,2 で、それぞれ 0.8mm、0.9mm となり、補強床版のたわみ は CFSS の補強効果により減少している。補修床版は供 試体 RC.O-1, 2 のたわみは等価繰り返し回数 17.0×10⁶回 付近からたわみの増加が著しくなり,破壊時のたわみは, それぞれ 17.0mm, 15.0mm である。次に, 補強床版供試 体 RC.O-C1 は、等価繰り返し回数の増加とともに緩やか に増加し、等価繰り返し回数 418.5×10⁶ 回付近からたわ みの増加が著しくなり,破壊時のたわみは 10.7mm であ る。また, RC.O-C2 は, 等価繰り返し回数 113.2×10⁶回 付近からたわみの増加が著しくなっている。破壊時のた わみは 9.8mm である。したがって、補修床版のたわみの 増加に対して補強床版のたわみの増加は下面に施工した CFSS の補強効果により、抑制されている。

(3) 計測点 (c)

計測点(c)は張出側ハンチのたわみである。図-5(3)より,補修床版供試体の初期たわみは供試体 RC.O-1,2で, それぞれ 0.7mm, 0.6mm である。これに比して,補強床 版供試体の初期たわみは供試体 RC.O-1,2で,それぞれ



図-5 たわみと等価走行回数の関係

0.49mm, 0.50mm であり,補強床版の初期たわみがやや 下回っている。補修床版は供試体 RC.O-1 は,等価繰り 返し回数 12.0×10⁶回付近からたわみが減少しはじめ,等 価繰り返し回数 42.1×10⁶回付近から負のたわみとなった。 破壊時のたわみは,それぞれ-2.6mm, -3.2mm である。

また,補強床版供試体 RC.O-C1 は,等価繰り返し回数 2.0×10⁶回付近からたわみが減少しはじめ,等価繰り返し 回数 296.3×10⁶回付近から負のたわみとなり,破 壊時のたわみは-1.52mm である。また,供試体 RC.O-C2

は47.1×10⁶回付近から負のたわみとなり、破壊時のたわ みは-0.75mmである。したがって、補修床版のたわみの 増加に対して床版上・下面に CFSS にて補強したことか ら支間中央の曲げ剛性の低下を抑え、負のたわみの増加 が抑制されている。

(4) 計測点(d)

計測点(d)は、張り出し部の端部のたわみである。たわ みと等価繰り返し回数の関係は図-5(4)に示すように、 補修床版供試体の初期たわみは供試体 RC.O-1, 2 でそれ ぞれ 0.70mm, 0.60mm である。これに比して、補強床版 供試体の初期たわみは供試体 RC.O-1, 2 で, それぞれ 0.1mm, 0.02mm であり, 負の曲げ領域に CFSS 補強した ことから端部のたわみの増加が大幅に減少している。補 修床版は供試体 RC.O-1,2のたわみは等価繰り返し回数 47.1×10⁶回付近からたわみの増加が著しくなり、破壊時 のたわみは、それぞれ 7.4mm、10.1mm である。次に、 補強床版供試体 RC.O-C1 は, 等価繰り返し回数の増加と ともに緩やかに増加している。479.5×10⁶回付近からたわ みの増加が著しくなり、破壊時のたわみは 5.7mm であ る。また, RC.O-C2は, 等価繰り返し回数 47.1×10⁶回付 近からたわみの増加が著しくなっている。破壊時のたわ みは 5.3mm である。したがって、補修床版のたわみの増 加に対して補強床版のたわみの増加は負の曲げ領域に CFSS 補強したことにより貼り出し部のたわみが大幅に 抑制されている。

5.3 破壊状況

(1) 補修床版の破壊状況

定点疲労実験における補修床版供試体および CFSS 上 面および下面接着補強した供試体の破壊状況を図-6,7 に示す。

供試体 RC.O-1,2は,従来からの断面補修に使用され ている超速硬セメントモルタルで補修した。供試体 RC.O-1 は図-6(1)に示すように負の曲げモーメントの 影響により床版上面に曲げひび割れが発生している。ま た,下面ハンチの隅角部から上縁方向にもひび割れが発 生し,荷重の繰り返しによりこのひび割れが貫通してい る。破壊時は,ハンチの隅角部に発生したひび割れの貫 通と荷重載荷位置では約45度のひび割れが発生し,引張 鉄筋かぶりコンクリートはダウエル作用の影響によりは く離している。

次に、供試体 RC.O-2 においても図-6(2)に示すよう に、負の曲げモーメントの影響により床版上面にひび割 れが発生し、その後の繰り返し荷重によりハンチの隅角 部からひび割れが発生している。破壊時には、上面のひ び割れとハンチ部からのひび割れが貫通ひび割れとなる と同時に荷重載荷位置から左支点方向の上縁鉄筋に沿っ たひび割れが発生している。また載荷位置下面には曲げ



ひび割れが発生している。なお,水平ひび割れは,融雪 剤の散布による塩害影響の鉄筋の発錆により,水平ひび 割れが発生したものである。

(2) 補強床版の破壊状況

供試体 RC.O-C1 の破壊状況は,図-7(1)に示すよう に、CFSS にて補強したことから、負の領域にはひび割 れの発生は見られない。ひび割れの発生はハンチの隅角 部から上縁方向に発生している。破壊は、張出部の上面 と床版支間の下面に CFSS を接着補強したことから曲げ 抵抗が大きくなり、荷重載荷位置とハンチ部を結ぶせん 断破壊となった。破壊は 0.2mm 以上の貫通ひび割れが発 生時点で破壊と見なし、実験を終了した。供試体 RC.O-C2 の破壊状況も供試体 RC.O-C1 と同様にせん断破壊とな った。なお、本実験供試体は幅 500mm の供試体を用い たことからせん断破壊を呈したが、本来は板構造である ことから、曲げ破壊へ移行するものと考えられる。

6. まとめ

- (1)新材料である CFSS と, 超速硬セメントモルタル, 専 用接着剤を用いた上面接着補強法は, 従来の CFS 上面 接着補強法に比して, 施工が容易であるとともに, 施 工後の養生時間が大幅に短縮されたことから施工の 合理化・省力化が図られた。
- (2) RC 床版の張出部に CFSS を接着補強した供試体の

定点疲労実験を行った結果,従来の超速硬セメントモ ルタルで補修したのみの供試体と比較し,4.1 倍の等価 繰返し回数が得られた。

したがって,張出部の補強法には CFSS 上面接着補強 および床版下面に CFSS 格子接着補強することで,劣 化期を迎えた RC 床版の補強法として耐疲労性の向上 が確認された。

- (3) 張出部上面および床版支間内下面に CFSS 接着補強 を施すことで、補修のみ施した供試体に比して、支間 中央、ハンチ部付近のたわみが大幅に抑制され、耐疲 労性の向上が確認された。
- (4)補修のみ施した供試体は,負の曲げ領域に発生したひび割れと、ハンチの隅角部から発生したひび割れが、 貫通し、また床版中央付近でも45度のひび割れが発生し、破壊に至っている。これに対してCFSS接着補強した供試体は、張出部や床版下面にCFSSで補強したことから曲げ抵抗が向上し、せん断破壊となった。
- (5)本研究では,床版と断面修復用超速硬セメントモルタ ル, CFSS と超速硬セメントモルタル,各々の界面に エポキシ樹脂接着剤を用いており,破壊まで,各々の 界面の剥離が疲労試験においても発生しなかったこ とも,耐疲労性及び,たわみ抑制の向上に効果的であ ることが確認された。

参考文献

- 山田健太郎:重交通下における鋼床版の疲労損傷, 土木学会第10回鋼構造と橋梁に関するシンポジウム,2007.8
- 小野貴之 ほか:積雪寒冷地における RC 床版の疲労 耐久性向上について,構造工学論文集, Vol.55A, pp.1432-1441,2009.4
- 出戸秀明 ほか:積雪寒冷地の塩化物供給を考慮した RC 床版余寿命診断技術の提案,構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 1227-1238, 2010.4
- 4) 国土交通省:橋梁点検要領(案), 2004.3
- 5) 玉越隆史,大久保雅憲,渡辺陽太: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),国土交通省国土技術政策総合研究所,2009.3
- 6)高野真希子ほか:47年供用した RC 床版の CFSS 下面 補強および SFRC 上面増厚補強による耐疲労性,構 造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1286-1296, 2011.3
- 元燦豪ほか: CFS・CFSS 補強した RC 床版の補強効 果および耐疲労性,構造工学論文集, Vol.58A, pp.1189-1196, 2012.3
- 8) 道路橋示方書·同解説Ⅰ,Ⅲ,Ⅲ,日本道路協会,2002.3
- 9) 道路橋床版の要求性能と維持管理技術,土木学会,pp. 99-100,2008.6