CFRP成形材と軽量樹脂モルタルにより 下面補強した鋼床版の疲労耐久性に関する研究

小林 駿¹・大垣 賀津雄²・中村 太一³・安田 翼⁴・ 秀熊 佑哉⁵・石田 学⁶・菊地 新平⁷・SYLL AMADOU SAKHIR⁸

¹学生会員 ものつくり大学大学院 ものつくり学研究科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地) E-mail: b02012062@iot.ac.jp

²正会員 ものつくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地) E-mail: ohgaki@iot.ac.jp (Corresponding Author)

³東日本高速道路株式会社 関東支社 (〒330-0854 埼玉県さいたま市大宮区桜木町1-11-20) E-mail: t.nakamura.ao@e-nexco.co.jp

⁴首都高技術株式会社(研究当時,ものつくり大学)(〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-10-11) E-mail: t.yasuda@shutoko-eng.jp

⁵正会員 日鉄ケミカル&マテリアル(株) コンポジット事業部 (〒103-0027 東京都中央区日本橋1-13-1) E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

⁶正会員 太平洋マテリアル株式会社 営業本部 (〒114-0014 東京都北区田端6-1-1) E-mail: manabu-ishida@taiheiyo-m.co.jp

⁷正会員 施工総合技術研究所 研究第2部 (〒417-0801 静岡県富士市大渕3154) E-mail: kikuchi_s@cmi.or.jp

⁸正会員 東京科学大学助教 環境・社会理工学院(〒152-8550東京都目黒区大岡山2-12-1) E-mail: syll.a.aa@m.titech.ac.jp

近年,都市内高速道路の重要交通網に採用されている鋼床版橋梁において,デッキプレートのUリブ溶 接部を起点とした疲労き裂が多数発生している.現在,その対策工事では渋滞による社会的影響が大きい. そこで鋼床版下面からUリブ内に充填する軽量樹脂モルタルと,Uリブ間に貼付ける CFRP 成形材による 下面補強法を検討している.この工法に対する補強効果の有用性は確認できている.本研究は3本のUリ ブを有する鋼床版供試体に対して,Uリブ内への軽量樹脂モルタル充填と樹脂の2次注入,およびUリブ 間内への CFRP 成形材貼付けを行い,それらによる補強後の性能の確認を行った.また,移動輪荷重走行 実験による,疲労き裂に対する進展抑制効果,長期供用時における補強効果を確認した.

Key Words: steel deck plate, fatigue crack, CFRP molded material, lightweight resin mortar, reinforcement

1. はじめに

近年,都市内高速道路の重交通路線における鋼床版橋 梁において,Uリブ溶接部を起点とする疲労き裂が多数 発生している.日々の交通量と積載荷重の増加により, 1980年代半ばより鋼床版の疲労き裂が報告され始めてい る.鋼床版の疲労き裂を放置すると,道路として機能低 下につながるため,疲労損傷の予防保全対策として,ア スファルト舗装の基層を鋼繊維補強コンクリート(以下, SFRCと記す)に置き換える工法が標準的に実施されて いる.しかしながら、このような工法は車線規制が必要 となるため、交通渋滞による経済損失が大きくなる.

したがって、重交通区間を想定した鋼床版下面からの 補強方法が求められており、これまで、鋼板接合と軽量 モルタルを用いた補強工法が開発されている^{1,2)}.本研 究では、さらなる軽量化と施工性を求めて、図-1に示す ような U リブ 間に設置する炭素繊維強化ポリマー(以 下、CFRP と記す)成形材と、U リブ内に充填する軽量 樹脂モルタルを用いた補強工法を検討している.本補強 対策工法については、補強の施工性と補強効果の有効性



は確認済みである³. そのため今後実用化に向けた検討 として,実橋に適用した際に想定される長期供用下にお ける補強効果の変動の調査を行うため,移動輪荷重走行 実験を行った.

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体を図-2に示す.供試体は横リブ3本,Uリ ブ3本を有する長さ6mの実寸大鋼床版橋の部分モデル とした.実橋と同様にデッキプレートの板厚を12mm, Uリブの寸法を320mm×240mm×6mm,Uリブ間隔を 640mmとした.供試体の材質はSM400である.Uリブ 溶接部は75%の溶け込みを確保して,ビード貫通き裂 が生じにくく,デッキ貫通き裂が生じる可能性がある構 造とした.

(2) 実験装置と載荷方法

本実験は移動輪荷重走行試験機を用いて行う.図-3 に試験機外観を示す.同図に移動輪荷重実験の走行範囲 を図4に示す.補強前後の移動輪荷重走行実験は、同図 に示す載荷位置で実施する.タンデム軸のダブルタイヤ を有する載荷台車が、3mの範囲を毎分6往復する仕様 である.本試験機は屋外に設置されている.移動輪荷重 走行範囲は同図に示す緑色の範囲であり、赤線の範囲 1.6mは、載荷台車が1往復する間に4輪が通過する範囲 となり、中央の横リブから対象になるように載荷するも のとする.なお、以降に示す載荷回数は、1往復で4回 走行するとして計算した回数を表している.

デッキプレート貫通き裂に着目しているため、ダブル タイヤの中心がUリブ溶接部を跨ぐ載荷位置とした.ダ ブルタイヤ1組の荷重は、道路橋示方書⁴⁰の後輪荷重 50kNに衝撃の影響(衝撃係数0.4)を加えた70kNとし た.載荷台車はタンデム軸であるため、合計重量は 70kNの2倍の140kNとなる.実験に用いた大型車のゴム タイヤは外形1060mm、空気E8kg/cm²である.鋼床版上 面に舗装を行わずに、直接ゴムタイヤ走行の移動輪荷重 を走行させている.走行速度は低速であるが衝撃も40% 見込んでいるので、実際の大型車両走行と同等以上の過 酷な実験を行っているものと考えられる.



(3) 実験フロー

図-5に本実験のフローチャートを示す.現在供用後約30年が経過している都市内高速道路の鋼床版橋では, すでにいくつかの疲労き裂が生じていると考えられるため,本実験においても着目部に予き裂を発生させるために,無補強時に50万回走行(125万往復)の移動輪荷重 走行実験を実施した.その後,補強を行った後,200万 回走行(50万往復)の移動輪荷重走行実験を実施した. また,静的載荷試験は50万回走行ごとに1回の頻度で行い,Uリブの溶接部のひずみ変化を観察した.さらに, 各静的載荷後にデッキ上面から超音波探傷試験を行い, 溶接部からのき裂進展の有無や状況を確認した.

(4) 静的載荷測定項目および測定位置

静的載荷実験の測定項目は次の通りである.

- ・U リブとデッキプレート溶接部近傍の橋軸直角方向ひ ずみ
- ・Uリブ下面の橋軸方向のひずみ



図-5 移動輪荷重走行試験フロー



・鋼床版の温度

・Uリブとデッキプレートのたわみ計測

このうち、ひずみゲージの計測位置を図-6 に示す. 補強前後および50万回(12.5万往復)毎に静的載荷実験 を実施する.その際に4箇所の着目部における発生ひず みを測定する.着目断面は供試体中央の横リブ交差部、 Uリブ支間1/2と1/4点とする.ひずみゲージはゲージ長 Immのものを使用し、デッキ上面およびUリブ側面、 CFRP成形材上面のひずみ変化をそれぞれ確認している.

ひずみ計測は、載荷台車の繰り返し走行を一時停止し、 除荷した状態でイニシャル値を取った後、それぞれの着 目断面載荷位置まで試験機の車輪を移動して、停止させ た状態で行った.そのため、輪荷重が走行することによ る振動などの動的な影響は実験値に含まれていない.

3. 補強方法

(1) 軽量樹脂モルタルの充填

予き裂導入実験実施後、デッキ下面からUリブ内に軽 量樹脂モルタルを充填する. 軽量樹脂モルタルは古くか ら建築材料として用いられてきた人工軽量骨材であるパ ーライトを用い、特殊エポキシ樹脂で硬化させたもので ある. その材料諸元を表-1に示す. 材料特性は実験値を 記載しており、硬化体密度は 1.1 kg/L, 圧縮強度 28.5 N/mm², 収縮量は-3929μである.

軽量樹脂モルタルの充填施工フローを図-7に示す.鋼 床版 U リブ下面に軽量樹脂モルタルの注入孔を穿孔し、

衣-1	軽 重倒加	モルタ	ルの杯	樎兀

+=101=+4

項目	養生期間	値
収縮量(µ)	-	-3929
圧縮強度(N/mm²)	(28日)	28.5
硬化体密度(kg/L)	(28日)	1.1
割裂引張強度(N/mm ²)	(28日)	4.7



図-6 ひずみゲージ設置位置

注入管(ニップル)を挿入して溶接し、ボールバルブを 取り付ける. 床版Uリブ側面に軽量樹脂モルタルの排出 口を設ける.排出口は、注入孔側と排出側端部の各両側 面上部に取付ける. 排出管は鋼床版の下面直下からエア ーが排出可能な切り欠きを設けて排出管の先端を床版下 面に密着させて取付ける. 軽量樹脂モルタルは密度を安 定化させるためにスクイズポンプで循環させる⁵. 軽量 樹脂モルタルの充填作業は、箱桁内を想定した小型ポン プを用いた. 軽量樹脂モルタルの充填完了の判断は, 設 置した排出孔モルタルの漏出を目視確認することで行っ た.樹脂モルタル硬化後、図-8に示すように注入用孔を 削孔し,低圧注入器にて樹脂の2次注入を行い,自己収 縮による隙間を無くしたの.2次注入から2日目以降に文 献 7)に示す方法を用いて、U下面から上面に向けて超音 波探傷試験等による充填度合いの確認を行い、充填不良 の有無を確認した. その後、樹脂モルタル排出ロや2次 注入用治具をグラインダーで撤去して完了となる.

(2) CFRP 成形材の貼付け

次に、Uリブ間に図-9に示す CFRP 成形材の貼付けを 行う. 材料諸元を表-2に、積層構成と設計値を表-3に示 す. 本試験で用いた CFRP 成形材は、上下外側に炭素繊 維シートを配置し、内側にガラス繊維シートを積層した 引抜き成形部材であり、ハイブリッドFRP成形材である. ここで、CFRP 成形材の構成は、外側に 2.51mm、内側に 5.56mm の炭素繊維層(橋軸直角方向の弾性係数 1.63×10⁵N/mm²)があり、その間にガラス繊維層(橋軸 直角方向の弾性係数 0.205×10⁵ N/mm²) である. ガラス繊 維シートを積層した理由は、成形材の材料費低減のため

注入部穿孔
ニップル溶接,ボールバルブ取付け
スクイズポンプにより1次注入
•
一週間養生
\bullet
2次注入
+
非破壊検査

図-7 軽量樹脂モルタルの充填施工フロー



図-8 2次注入施工法



図-9 CFRP 成形材による補強工法

繊維シートの 種類	繊維方向の 弾性係数 <i>E_fr</i> (N/mm ²)	繊維直交方向の 弾性係数 せ. <i>E_{fr}</i> (N/mm ²) <i>G</i>		繊維の せん断弾性係数 <i>G_{fLT}</i> (N/mm ²) 目付 (N/mm ²)		密度 (g/cm ³)	設計厚 (mm)
炭素繊維	640,000	20,600		28,700	660	2.1	0.314
ガラス繊維	70,000	70,000	70,000 26,923		660	2.6	0.254
マトリックス樹脂の種類		樹脂の弾性係 <i>Em</i> (N/mm ²)	樹脂の弾性係数 <i>E_m</i> (N/mm ²) 樹脂のせん <i>G_m</i> (N/m		府単性係数 密 nm ²) (g/		ڈ ع)
主剤: CBZ,硬化剤: MEKパーオキサ イド促進剤:コバルト		3,700	3,700 1		1	1.13	
ポリウレアパラ	67		-		-		

表-2 CFRP 成形材に使用した材料諸元

表-3 CFRP 成形材の積層構成および設計値

層番号	繊維種 (目付)	繊維配向角(度)	設計繊維 含有率 V _f (%)	設計板厚 (mm)	橋軸方向 弾性係数 (N/mm ²)	橋軸直角方向 弾性係数 (Nmm ²)
1~4	炭素繊維 (660)	90 (橋軸直交方向) 2層	65.0	0.483×4層	2.14×10 ⁵	2.14×10 ⁵
	(000)	0(懎軸方向) 2 層				
5 12	ガラス繊維	90 4層	(5.0	0.200~0 屋	2.06×10 ⁴	2.64×104
5~15	(660)	0 5層	0.00	0.390~9)音	3.00^10	2.04~10
14 21	炭素繊維	0 4層	(5.0	0.492~9 屋	2 14~105	2 14~105
14~21	(660)	90 4層	65.0	0.403^0/冒	2.14^10	2.14^10
計	CF[90/012/G]	F190/014/GF1011/CF10/901221層	65.0	9.314	1.45×10 ⁵	1.44×10 ⁵

である.本論文では主たる材料が炭素繊維であることか ら、CFRP成形材と記載している.成形後の比重は20と 軽量であり、腐食しない特性を有した材料である.また、 CFRP成形材による補強工法はエポキシ樹脂により容易 に構造物に接着施工が可能であり、特殊技能を必要とし ない工法であるので、近年土木構造物への適用が増加し ている^{&9}.CFRP成形材は主として橋軸直角方向に繊維 シートを積層した引抜き成形材である^{ID}.CFRP成形材 の貼付け補強構造を図-9に示たとおりである^{ID}.鋼床版 実験供試体へのCFRP成形材の配置は、図-2に示した通 り、Uリブ3本の両側6ラインで、横リブで分断されて 合計12本となる.CFRP成形材の端部が、横リブにほぼ 接するように接着した.

CFRP 成形材の供試体への施工方法は以下の通りであ る. CFRP を貼付けるデッキ下面と U リブ側面の鋼材部 分に2種ケレンを行い、その後に接着性をよくするため のウレタンプライマー途布する.1時間以上養生後、鋼 床版デッキ面の CFRP 成形材先端接着部 50mm の範囲に 表-2 に示したポリウレアパテを塗布する. この際に, lm ごとに使用重量を計測して塗布厚さを管理する. そ して、鋼床版側接着面と CFRP 成形材に表-2 に示した 2 液混合型のエポキシ樹脂を塗り、鋼床版Uリブ溶接部の 入隅部にエポキシ樹脂を盛る. 鋼床版に CFRP 成形材を 押し当てて樹脂を縁端から押し出しながら接着する. そ の後、デッキ裏面と磁力で仮固定できるマグネットボル トで, CFRP 成形材を抑える. FRP 上から U リブまで貫 通孔をあけ、異種金属間接触腐食を避けるため、スチー ル(亜鉛メッキ) 製ブラインドリベット (JIS B 0147: 2004) を打ち込む.

4. 実験結果および解析結果

(1) 予き裂の導入

着目部に予き裂を発生させるため,無補強時に 50 万 回走行の移動輪荷重走行実験を実施した.き裂の有無は, OLYMPUS 社製 OMNISCAN SX フェーズドアレイ超音波 探傷装置にて,図-10 に示すようにデッキ上部から斜角 探傷検査を行った.この非破壊検査を実施した位置を図 -11 に示す.橋軸方向へのき裂範囲を確認するために横 リブ交差部から左右に 10mm ずつ計 10点の計測を行い, 横リブ交差部に発生したき裂の大きさを確認した.長さ 約 80mm で最大深さ 5mm 弱のき裂が発生した.図-12に 補強前の予き裂と補強後の 200 万回走行完了時のき裂深 さを示す.同図から 200 万回の走行後のき裂の深さは, 横リブ交差部から40mm の位置で減少しているようにみ えるが,これは橋軸方向の計測位置誤差や計測機器の精 度が考えられる.この図-12 に示す結果からは,ほとん ど拡大していないといえる.横リブ交差部以外の一般部 では,超音波探傷試験結果から,き裂は発生していない ことも確認している.

(2) FEM 解析

本補強対策工による発生応力を評価することを目的と



図-10 フェーズドアレイ超音波探傷





図-12 き裂の深さ

表-4 FEM解析モデルの概要

部材	板厚 (mm)	要素	材料
補剛材	12	8節点曲げ	
下フランジ	12	シェル要素	
横リブ	9	(CQ4OS)	弹性体
Uリブ	6		$E_S = 2.00 \times 10^5 \text{N/mm}^2$
デッキプレート	12		
Uリブ溶接部	75%		
CFRP成形材	_	20 節点 ソリッド要素 (CHX60)	CFRP 成形材の構成 CF 外/GF/CF 2.51/1.02/5.66 mm CF=1.63×10 ⁶ N/mm ² GF=0.205×10 ⁶ N/mm ²
エポキシ樹脂層	0.5		E=2500 N/mm ²
ポリウレアパテ	1		E=80 N/mm ²

して, FEM 解析を実施した.表4 に解析モデルの概要 を,図-13 に解析モデル図を示す.解析は汎用構造 FEM 解析ソフト DIANA を使用し、横リブと下フランジを8 節点シェル要素で、その他のデッキプレート、Uリブ、 樹脂モルタル部を 20節点ソリッド要素でモデル化を行 った. メッシュサイズは、一般的な部材を約15mm、溶 接ルート部で最小0.25mmとした. なお、図-12に示した 予き裂についてはモデル化を行わず、き裂のない鋼床版 の補強前と補強後をモデル化している.横リブ交差部周 辺で、局所的なひずみ分布に影響を与えるものの、補強 後の全体的な変形挙動に与える影響は少ないものと判断 した. モデル化における荷重載荷位置は図-14 に示すと おり、タイヤの設置面を写し取り、そのデータから載荷 幅等を決定した.実験と同様にダブルタイヤはUリブ溶 接部を跨ぐ位置とした. 図-13 に示すように、載荷位置 1は一般部(1/2点)であり、載荷位置2は横リブ交差部と して、それぞれ解析を行った.

図-15 に補強前後の鋼床版デッキ上面のミーゼス応力 分布を示す. 同図より補強後に, デッキ上面の応力が大 幅に低減できていることがわかる.

(3) 補強前後の比較

図-16, 17 に着目している U リブとデッキプレートの FEM 解析による変形図を示す. それぞれ一般部(西断 面 1/2 点)と横リブ交差部載荷における補強前と補強後 を比較している. 同図には横リブ下面の実験による変位 と解析値を比較した.

一般部載荷における変形モードは、ダブルタイヤ載荷 でUリブがねじれるような断面変形が生じていることが わかるが、補強後の断面変形は大幅に少なくなっている. 図-13 に示した U リブ溶接ルート部の着目点におけるミ ーゼス応力は、補強前で 450N/mm² あったものが、補強 後に 93N/mm²まで低減できていることがわかる.

また、横リブ交差部載荷における変形は、横リブがあ るのでUリブ間の変形は生じていない、一方、Uリブ直 上は輪荷重の影響を受けデッキのたわみが生じていたが、 樹脂モルタル充填補強の効果により、その変形が減少す ることがわかる.Uリブ溶接ルート部のミーゼス応力は、 補強前で 590N/mm² あったものが、補強後に 69N/mm²ま で低減できていることがわかる.





文献 3)の実験結果には、Uリブ直上載荷のケースでは Uリブ内に充填した軽量樹脂モルタルの補強により、板 曲げ変形の拘束効果が大きく、U リブ間に載荷したケー スでは CFRP 成形材接着による補強効果が大きいことを 示している. 今回の実験や解析では、U リブ溶接部を跨 いだダブルタイヤによる載荷状態であり、これら両者の 補強効果を合わせて確認している.

(4) 200 万回走行後の結果

表-5に静的載荷によるUリブ溶接部近傍のひずみ計測 結果と FEM 解析の結果を示す. 健全時, 予き裂後, 補 強後,50万回ごとの結果をそれぞれ示している.なお, () 内の数値は補強前のひずみ量に対する増減の比率 を示している. また, 図-18, 19 に横リブ交差部におけ る、各段階のひずみ実験値の推移と荷重-ひずみの関係



(a)無補強時

図-17 横リブ交差部における変形図

衣-5 谷均階にわける(パタみ実験)	表-5	各段階におけるひずみ実験値
---------------------------	-----	---------------

載荷位置	ゲージ 位置	補強前	補強前 FEM	予き裂後	補強後	補強後 FEM	100万回	200万回
一般部	А	726 (+100)	608(+83)	734(+101)	210(+29)	160(+22)	211 (+29)	202 (+28)
(西断面 1/2)	В	724 (+100)	655(+91)	735 (+102)	186 (+26)	125(+17)	191 (+26)	164 (+23)
一般部	А	320(+100)	-	331(+104)	211(+66)	-	206(+64)	203(+63)
(西断面 1/4)	В	712(+100)	-	715(+100)	197(+28)	-	196(+27)	168(+24)
一般部	А	328(+100)	-	341(+104)	192(+59)	-	191(+58)	176(+53)
(東断面 1/4)	В	726(+100)	-	732(+101)	217(+30)	-	220(+30)	192(+26)
	А	289 (+100)	270(+93)	205 (+71)	-50(-17)	51(+18)	-61 (-21)	-62(-22)
横リブ交差部	В	498 (+100)	521(+105)	329 (+66)	-12(-2)	30(+6)	-19(-4)	-34(-7)
	С	-404(+100)	-333(+82)	-221(+55)	-12(+3)	-59(+15)	-7(+2)	-9(+2)
	D	200(+100)	136(+68)	152(+76)	57(+28)	0.34(+0)	59(+29)	44(+22)

注)表中のひずみ値は(×10%)の値である.また、()内数値は、補強前を+100%とした場合の比率(%)を示す.

を示す. また, 図-20, 21 に一般部におけるひずみの測 定結果を示す.

これらの結果より、補強後に、一般部ではひずみが 30%程度に、横リブ交差部では20%以下に低下している. FEM 解析との比較では一般部でよく一致しているが、 横リブ交差部では実験の引張から圧縮に変化している. これは FEM 解析において、予き裂をモデル化しておら ず、実験では横リブ交差部におけるデッキの板曲げ剛性 が局所的に低下していることが原因であると考えられる. この点については、き裂を考慮した FEM 解析を行って、 別途検討を行なう必要がある.ただし、実験や FEM に おけるひずみ値が30%程度以下に低下しており、き裂が 進展するほどの応力ではないレベルまで補強効果がみら れているといえる.

測定位置は載荷台車のダブルタイヤの中間を測定して いる.即ちUリブの溶接ビート直上のデッキ上面である. なお、ひずみゲージ A 点は U リブ間直上側、ひずみゲ ージ B 点は U リブの内側直上に配置してある.図-20 よ り、一般部のゲージ計測点 A,Bのひずみは補強前で700µ 前後あったものが、補強後には 200µ 以下に低下してお







り,100 万回および 200 万回走行後においても,補強後 からのひずみ変動はほとんどないことがわかった.

図-19, 21 では補強前に比較的大きなひずみが生じて いたB点のひずみを代表して掲載している. 無補強時に Uリブ内側にあるデッキのひずみが大きかったのに対し, 補強後は大幅にひずみが減少している. このひずみが大 幅に減少していることから, CFRP 成形材と軽量樹脂モ ルタルによる補強効果を確認できる. さらに移動輪荷重 による載荷回数が増加しても,補強効果が維持されてい ることがわかる. 横リブの無い一般部においても長期耐 久性を確認できた.

図-22 に橋軸直角方向に着目したデッキ上面応力分布 の FEM 解析値と実験測定値を示す. 横軸の着目点から の距離は,溶接ビードルート位置をゼロとしたものであ る. これらの値は, FEM では予き裂のない無補強と補 強後の値であり,実験値は予き裂前の無補強状態と与き 裂後の補強直後の実験値である. 補強後は断面全体の応 力が低下していることがグラフからわかる.

また,実験値と解析値がよく一致している. 図-23 に 橋軸方向に着目したデッキ上面応力分布を示す. 図内に



図-19 横リブ交差部 B 点の荷重-ひずみの関係



図-21 一般部(西断面 1/2)B 点の荷重-ひずみの関係



は補強前後の FEM 解析値と補強前後の実験値を示して いる.この図からも補強の前後で大きく応力が低減され ていることや, FEM 解析値と実験値がよく一致してい ることがわかる.

なお、モルタル注入孔やFRPを添接するためのブラインドリベット部周辺の応力については、補強後の FEM 解析で応力がほとんど生じていないことを確認している.

横リブ交差部以外の一般部では,超音波探傷試験結果 から,き裂は発生していないと考えられる.さらに,図 -12 に示した補強前の予き裂と補強後の 200 万回走行完 了時のき裂深さからも,本補強により,横リブ交差部の き裂進展がないことがわかった.一般部の超音波探傷試 験の結果から,新たなき裂は生じていないことも確認し ている.

また,超音波探傷検査によりデッキと軽量樹脂モルタ ル部の隙間の発生も生じていないことや,打音検査によ り CFRP 成形材のはく離も生じていないことも確認した. さらに実験後Uリブおよびデッキを解体し中身の粉砕化 や、CFRP 成形材の剥落や浮きがないことも確認した. 以上の、移動輪荷重走行実験の結果から、Uリブ溶接部 近傍のひずみの増加、横リブ交差部予き裂部分のき裂拡 大、新たなき裂の発生、および補強部の劣化等が生じな かったといえる.

5. まとめ

軽量樹脂モルタルおよび CFRP 成形材による鋼床版下 面から補強工法に関して,実物大の鋼床版供試体による 移動輪荷重走行実験および FEM 解析を行った.本研究 で得られた知見は以下の通りである.

(1) FEM 解析結果から,一般部載荷における変形モー ドは,補強前にUリブがねじれるような断面変形が 生じるが,補強後の断面変形は大幅に少なくなる. U リブ溶接ルート部のミーゼス応力は、補強後に 20%まで低減できていることがわかった.

- (2) 横リブ交差部載荷における変形は、横リブがあるのでUリブ間の変形は生じていないが、Uリブ直上は輪荷重の影響を受けデッキのたわみが生じる。樹脂 モルタル充填補強の効果により、その変形が減少し、 Uリブ溶接ルート部のミーゼス応力は、補強後に 12%まで軽減できていることがわかった。
- (3) 静的載荷時のひずみ実験値は、補強後に、一般部で は30%程度に、横リブ交差部では20%以下に低下し ている. FEM 解析との比較では一般部でよく一致 している.
- (4) 長期耐久性に関しては、200万回走行後時点でも、 補強後のひずみの変動も見られず、本補強工法の長 期供用化の有効性が伺える結果であった。
- (5) 無補強時の 50 万回走行により,横リブ交差部に長 さ約 80mm,最大深さ 5mm の予き裂を生じさせたの ち本補強の施工を行った.その後 200 万回走行完了 時にき裂の拡大は見られなかった.このことから, 深さ 5mm 程度のデッキ貫通型き裂が生じている状 態でも本補強工法が有効であるといえる.
- (6) 移動輪荷重走行実験により,軽量樹脂モルタルおよび CFRP 成形材自体や,デッキプレートとの界面にはく離や粉砕化等の大きな劣化がないことを確認し,本工法が十分な耐久性を有することが示された.

上述の通り、本工法の補強効果と長期供用化の耐久性 があることが確認できた. 今後の課題としては、現場に おける合理的な施工方法を検討し、試験施工を行うこと が考えられる.

謝辞:本実験に際して,株式会社 ADEKA,フクビ化学株式会社の関係各位,研究当時ものつくり大学の宇津味泰成氏に協力いただきました.心より感謝致します.

REFERENCES

- 高田佳彦,坂野晶弘:交通規制を必要としない既設 鋼床版の疲労損傷対策に関する検討,土木学会論文 集 A1, Vol. 67, No. 1, 2011. [Takada, Y. and Sakano, M.: Examination of methods for retrofitting existing orthotropic steel decks without need for traffic restriction, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers* A1, Vol. 67, No. 1, 2011.]
- 丹波寛夫,木村聡,山口隆司,杉山裕樹,田畑晶子, 高田佳彦:既設鋼床版に対する下面補強工法である 鋼板補強モルタル充填併用工法の構造合理化の検討, 構造工学論文集, Vol. 59A, 2013. [Tamba, Y., Kimura, S., Yamaguchi, T., Sugiyama, H., Tabata, A. and Takada, Y.: Structural rationalization of the undersurface retrofitting method with splice plates and mortar-filling into the trough ribs for existing orthotropic steel decks, *Journal of*

Structural Engineering, Vol. 59A, 2013.]

- 安田翼,大垣賀津雄,秀熊祐哉,石田学,鈴木永之, VINH PHAM NGOC:鋼床版下面からの軽量樹脂モ ルタルと CFRP 成形材による補強効果に関する確認 実験,土木学会論文集,Vol. 80, No. 14, 2024. [Yasuda, T., Ohgaki, K., Hidekuma, Y., Isida, M., Suzuki, N. and Pham, N. V.: Experimental study on reinforcement by lightweight resin mortar and CFRP molding material form under the steel deck slab, *Transaction of the Japan Society* of Civil Engineers, Vol. 80, No. 14, 2024.]
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説,I共通編, 2017. [Japan Road Association: Dorokyo-shihosyo & Doukaisetsu, I Kyoutsu-hen, 2017.]
- 5) 渡邊健也,大垣賀津雄,赤江信哉,石田学,鈴木永 之,高鍋雅則:鋼床版 U リブ内への樹脂モルタル充 填施工における品質検査法に関する研究,土木学会 第 15回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2023. [Watanabe, T., Ohgaki, K., Akae, S., Isida, M., Suzuki, N. and Takanabe, M.: Research on quality inspection methods for filling resin mortar into steel deck U ribs, *Proceedings of the 15th Symposium on Research and Application of Hybrid and Composite Structures, JSCE*, 2023.]
- 赤江信哉,大垣賀津雄,石田学,鈴木永之,PHAM NGOC VINH:供用下を想定した軽量樹脂モルタル の鋼床版Uリブへの充填施工試験,土木学会第15回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム,2023. [Akae, S., Ohgaki, K., Isida, M., Suzuki, N. and Pham, N. V.: Construction test of filling lightweight resin mortar into U-rib of steel deck assuming service use, *Proceedings of the 15th Symposium on Research and Application of Hybrid and Composite Structures, JSCE*, 2023.]
- 渡邊健也,大垣賀津雄,赤江信哉,石田学,鈴木永 之,高鍋雅則:鋼床版 U リブ内への樹脂モルタル充 填施工における品質検査法に関する研究,土木学会 第 15回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2023. [Watanabe, T., Ohgaki, K., Akae, S., Isida, M., Suzuki, N. and Takanabe, M.: Research on quality inspection methods for filling resin mortar into steel deck U ribs, *Proceedings of the 15th Symposium on Research and Application of Hybrid and Composite Structures, JSCE*, 2023.]
- 高速道路総合技術研究所:炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法設計・施工マニュアル,
 2013. [Nippon Expressway Research Institute: Design and Installation Manual for Upgrading of Steel Structures with the Use of Carbon Fiber Sheets, Tokyo: NERI, 2013.]
- 2) 土木学会: FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案), 複合構造シリーズ 09, 2018. [Japan Society of Civil Engineers: Guidelines for Repair and Strengthening of Structures Using Externally Bonded FRP, Composite Structure Series 09, 2018.]
- 10) 安田翼, 大垣賀津雄, PHAM NGOC VINH, 秀熊祐哉, 櫻井俊太,紫桃孝一郎:鋼床版 U リブ溶接部補強の ための CFRP 成形材接着部の疲労強度確認試験,土 木学会第 12 回道路橋床版シンポジウム論文集, 2022. [Yasuda, T., Ohgaki, K., Pham, N. V., Suzuki, N., Pham, N. V., Hidekuma, Y., Sakurai, S. and Sitou, K.: Fatigue strength confirmation test of CFRP molded material bonded part for reinforcing steel deck U rib welding part, *Proceedings of the 12th Symposium on Decks of Highway*

Bridge, JSCE, 2022.]

 櫻井俊太,大垣賀津雄,秀熊祐哉,鈴木永之, PHAM NGOC VINH,安田翼:鋼床版Uリブ間を補強 した CFRP 成形材接着部の振動疲労実験,土木学会 第15回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2023. [Sakurai, S., Ohgaki K., Hidekuma, Y., Suzuki, N., Pham, N. V. and Yasuda, T.: Vibration fatigue experiment of CFRP molded material bonded part reinforced between steel deck U ribs, *Proceedings of the 15th Symposium on Research and Application of Hybrid and Composite Structures, JSCE*, 2023.]

> (Received December 5, 2024) (Accepted March 19, 2025)

STUDY ON FATIGUE DURABILITY OF STEEL DECK REINFORCED FROM UNDERSIDE WITH CFRP MOLDINGS AND LIGHTWEIGHT RESIN MORTAR

Hayao KOBAYASHI, Kazuo OHGAKI, Taichi NAKAMURA, Tsubasa YASUDA, Yuya HIDEKUMA, Manabu ISHIDA, Shinpei KIKUCHI and Syll AMADOU SAKHIR

During fatigue damage to the steel deck, fatigue cracks propagate starting from the U-rib welds. As a countermeasure against such fatigue damage, SFRC pavement construction is a standard construction method. However, lane regulation is required and causes traffic congestion. Therefore, we are considering a reinforcement method using lightweight resin mortar filled in the U-ribs and CFRP molded material pasted between the U-ribs as a reinforcement method from the bottom of the steel deck slab. In this study, we performed a steel deck specimen with three U-ribs, filled the U-ribs with lightweight resin mortar, secondary injection of resin, and pasted CFRP molding material between the U-ribs. The reinforcement effect and durability were confirmed through the moving wheel trucking test.