

論文

鋼床版橋下面からの CFRP 成形材による補強に関する施工試験と解析の比較

櫻井俊太*, 大垣賀津雄**, Pham Ngoc Vinh***, 秀熊佑哉****, 紫桃孝一郎*****

*日鉄ケミカル&マテリアル株式会社, コンポジット事業部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋 1-13-1)

**工博, ものつくり大学教授, 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市大字前谷 333)

***工博, ものつくり大学特任講師, 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市大字前谷 333)

****日鉄ケミカル&マテリアル株式会社, コンポジット事業部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋 1-13-1)

*****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)

現在, 鋼床版デッキプレート等に疲労き裂が多数発生している. 著者らは, 車線規制が不要な鋼床版下面からの疲労き裂予防保全対策として, CFRP 成形材を接着することにより, 鋼床版デッキプレート-Uリブ溶接部の局部応力低減を図る補強工法を提案した. そこで, 本工法の交通開放下での施工による適用性を確認するため, 定点繰り返し载荷をしながら CFRP 成形材を接着した場合に, 本工法の補強効果が発揮されるかを確認した. その結果, 繰り返し荷重下であっても溶接部近傍の鋼材の応力低減が確認され, 交通開放下での施工で, 本工法が適用できることが確認された.

キーワード: 鋼床版, CFRP, 樹脂接着, 補強

1. はじめに

現在, 鋼床版を有する橋梁において, 鋼床版デッキプレート等に疲労き裂が多数発生していることが報告されている¹⁾. このような疲労き裂対策としては, TIG 溶接+当て板補修^{2), 3)}と SFRC (鋼繊維補強コンクリート) 舗装の施工⁴⁾を標準的な工法として実施しているが, これらの工法は, 溶接施工が上向きになり品質の確保が難しい点, 母材の削孔が必要な点, 死荷重の増加が大きい点などの問題点がある. さらには, 舗装施工時は車線規制が必要であり, 渋滞による社会的影響が大きい. また, 増加し続ける鋼床版の疲労き裂の発生を抑制するため, 疲労き裂が確認できていない鋼床版に対しては, 予防保全対策として鋼床版の疲労耐久性を向上させる補強工法を実施していく必要がある. 特に, 渋滞の発生を抑制するため, 車線規制が不要な下面からの疲労き裂発生の抑制対策が求められている. 近年, 土木構造物に使用されるようになった炭素繊維強化プラスチック (以下, CFRP と呼ぶ) は, 軽量で高強度であり, 腐食しないという特徴を有しており, 鋼構造物にも容易に接着接合できるため, 溶接等の特殊技能者を要しない工法であるといえる.

著者らは, 車線規制が不要な鋼床版下面からの予防保全対策として, CFRP 成形材接着で鋼床版デッキプレート Uリブ溶接部の局部応力低減を図る補強工法を提案した. 図-1 に本工法の概要図を示す. 本研究では, CFRP 成形材の接着にはく離を抑制する効果を有するポリウレ

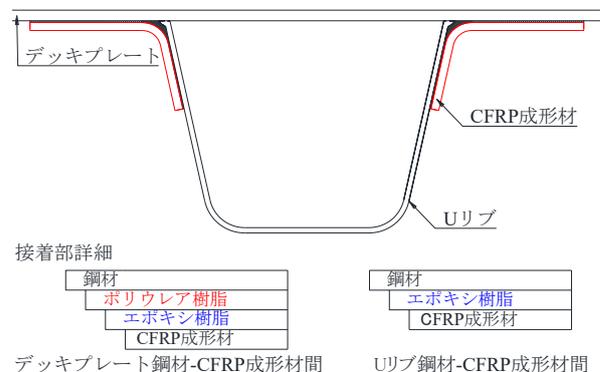


図-1 本工法の概要図

アパテを用いる^{5), 6)}. しかし, ポリウレアパテの塗布範囲が大きいと補強効果低減やコストが増加する. そこで, ポリウレアパテの塗布範囲を最適化するために, ポリウレアパテの塗布位置をパラメータとして, 鋼床版モデルを用いた FEM 解析による検討を行った.

さらに, 本工法は交通開放下での施工を前提としており, 交通開放下の鋼床版に本工法を施工する際は, 鋼床版に交通荷重による繰り返し応力が生じる. そこで本工法の現場における適用性を確認するために, 実際の鋼床版を模した供試体の Uリブ間に交通荷重を模擬した定点繰り返し载荷を行いながら, Uリブ間のデッキ下面に CFRP 成形材を接着し, CFRP 成形材による補強効果と樹

表-1 FRP 成形材に使用した材料の諸元

繊維シートの種類	繊維方向の 弾性係数 E_L (N/mm ²)	繊維直交方向の 弾性係数 E_T (N/mm ²)	繊維の せん断弾性係数 G_{LT} (N/mm ²)	目付 (g/m 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	26,923	660	2.6	0.254
マトリックス樹脂の種類		樹脂の弾性係数 E_m (MPa)	樹脂のせん断弾性係数 G_m (MPa)	密度 (g/cm ³)		
主剤：CBZ，硬化剤：MEK パーオキシサイド 促進剤：コバルト		3,700	1,321	1.13		

表-2 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 (N/mm 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
		0 (橋軸方向) 2層				
5~13	ガラス繊維 (660)	90 4層	65.0	0.390×9層	3.06×10 ⁴	2.64×10 ⁴
		0 5層				
14~21	炭素繊維 (660)	0 4層	65.0	0.483×8層	2.14×10 ⁵	2.14×10 ⁵
		90 4層				
計	CF[90/0] ₂ /GF[90/0] ₄ /GF[0] ₁ /CF[0/90] ₂	21層	65.0	9.314	1.45×10 ⁵	1.44×10 ⁵

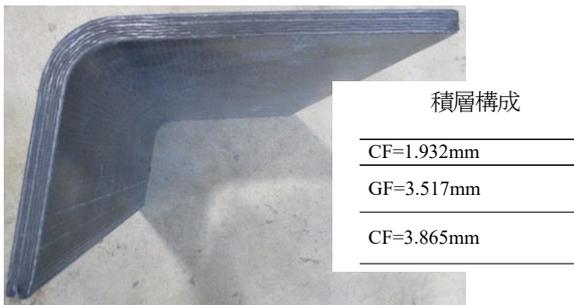


写真-1 CFRP 成形材

脂硬化段階に交通荷重を受けることによる影響を把握することを目的とした試験を行った。

2. 本工法の概要および使用材料

2.1 本工法の概要

本工法は疲労き裂が発生していない個所に適用する予防保全対策工法であり、図-1 に示すように鋼床版デッキプレート U リブ溶接部を含むコーナー部に CFRP 成形材を接着して固定する工法である。本工法は下面からのみの施工で適用できるため、施工中の交通規制は不要である。また、CFRP 成形材は鋼材と比較すると軽量であり、人力で容易に運搬、施工ができ、特殊な機材や能力を必要としない。そのうえ、樹脂による接着であるため、ボルト孔等の母材への損傷を与えずに施工することが可能である。そのため、標準的に用いられる当て板工法と比較し施工性に優れているといえる。

表-3 接着樹脂の材料特性値

樹脂	項目	単位	試験値
エポキシ樹脂	圧縮強度	N/mm ²	103
	圧縮弾性係数	N/mm ²	2,690
	鋼材接着強度	N/mm ²	20.8
ポリウレタ樹脂	引張強度	N/mm ²	11
	引張弾性係数	N/mm ²	74
	鋼材接着強度	N/mm ²	7.4

2.2 CFRP 成形材

使用材料と積層構成はそれぞれ表-1, 2 に示す。今回使用した CFRP 成形材は橋軸方向と橋軸直角方向に高弾性炭素繊維シートを積層することとし、コスト低減を考慮し内部に炭素繊維と比較し安価であるガラス繊維シートを、外側に剛性の大きい炭素繊維シート配置したハイブリッド成形材としての配置設計を行った。このように中立軸から離れた位置に剛性の大きい炭素繊維シートを配置することにより、効率良く低コストで曲げ剛性の高い CFRP 成形材を製作できる。本試験では当て板工法において標準的に用いられる板厚 9mm 鋼板と同等の補強効果を得られることを補強目標とし、板厚 9mm 鋼板相当の曲げ剛性となるようにシートの積層数を決定した。ここで、本試験に用いた CFRP 成形材を写真-1 に示す。

本工法で用いた CFRP 成形材は引抜き成形法により製作した。本成形法は、ハンドレイアップ成形法等の他の成形法に比べ、大量生産性に優れるため、製作コストを低減できる成形法である。

2.3 接着樹脂材料

表-3 にエポキシ樹脂およびポリウレタ樹脂の材料特

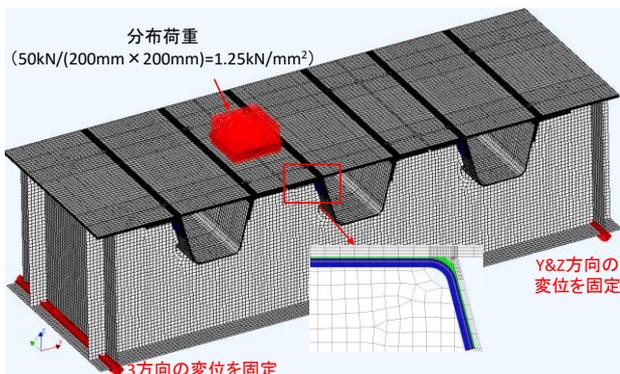


図-2 鋼床版のFEM解析モデル概要図

表-4 鋼床版供試体の各材料モデル概要

部材	板厚 (mm)	要素	材料 (線形)
補剛材	12	8 節 曲げシェ ル要素	$E_s=2.0 \times 10^5$ N/mm ²
下フランジ	12		
横リブ	9		
Uリブ	6		
デッキ プレート	12		
Uリブ溶接部	2.4		
CFRP 成形材	-	20 節 ソリッド 要素	$E_{cf}=1.63 \times 10^5$ N/mm ² $E_{gf}=2.05 \times 10^4$ N/mm ²
エポキシ樹脂層	0.5		$E=2,500$ N/mm ²
ポリウレアパテ 層	1.0		$E=80$ N/mm ²

性値を示す。本工法で用いた接着樹脂は「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」⁷⁾に準拠してエポキシ樹脂および、CFRP 成形材-母材鋼板間のはく離を抑制するため、高伸度弾性パテ材としてポリウレア樹脂（以下、ポリウレアパテと呼ぶ）を使用した。

3. FEM 解析によるポリウレアパテ塗布範囲の決定

本工法に用いたポリウレアパテは炭素繊維シート等の接着に用いると炭素繊維シートのはく離を抑制する効果を有するが、接着界面にせん断力が生じた場合、ポリウレアパテが変形することによるせん断遅れ効果により、炭素繊維への応力伝達効率が低下するため、補強効率が低下することが報告されている^{5), 6)}。

そこで、本項では、補強効率を高め、かつCFRP 成形材がはく離しない接着方法を求めるために、ポリウレアパテの塗布箇所（デッキ面のみ、Uリブ面のみ、全面）をパラメータとした FEM 解析検討を行い、ポリウレアパテの塗布範囲の最適化を行った。

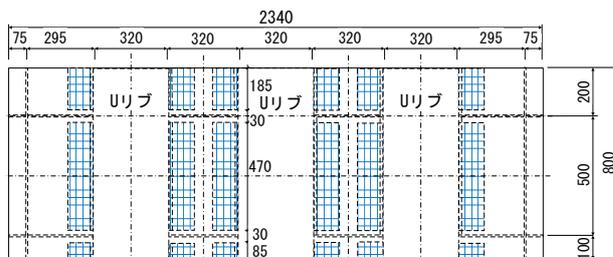


図-3 CFRP 成形材による鋼床版モデルの補強図面

表-5 解析パラメーター一覧

CASE	ポリウレアパテ		備考
	デッキ面	Uリブ面	
CASE1	-	-	無補強
CASE2	無	無	パテ無
CASE3	有	無	デッキ面のみ
CASE4	無	有	Uリブ面のみ
CASE5	有	有	全面

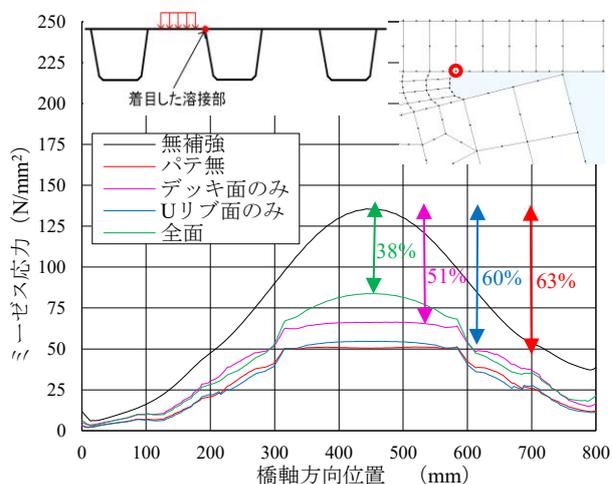


図-4 溶接部のミーゼス応力分布解析結果

3.1 解析概要

図-2 に本解析で使用した解析モデルを、図-3 にCFRP 成形材による鋼床版モデルの補強図面を示す。本解析では、橋軸方向に長さ 800mm、横リブ間隔は 500mm とし、Uリブを 3 本有する鋼床版モデルとして解析モデルを作成した。表-4 に本解析モデルの各材料モデルの概要を示す。CFRP 成形材の弾性係数は E_f を 50% として算出した値である。

今回は溶接ビード付近の応力状態を確認するため、デッキプレート、UリブおよびCFRP 成形材はソリッド要素でモデル化し、デッキプレートとUリブの溶接部の溶け込み量は実橋梁の溶け込み量を調査した結果から 40% と設定した。その他の部材は解析簡略化のためシェル要素でモデル化した。拘束条件は、一方の補剛材を 3 方向支持、もう一方の補剛材を橋軸方向および鉛直方向の 2 方向を支持した。

荷重の大きさは道路橋示方書に示される交通荷重の設

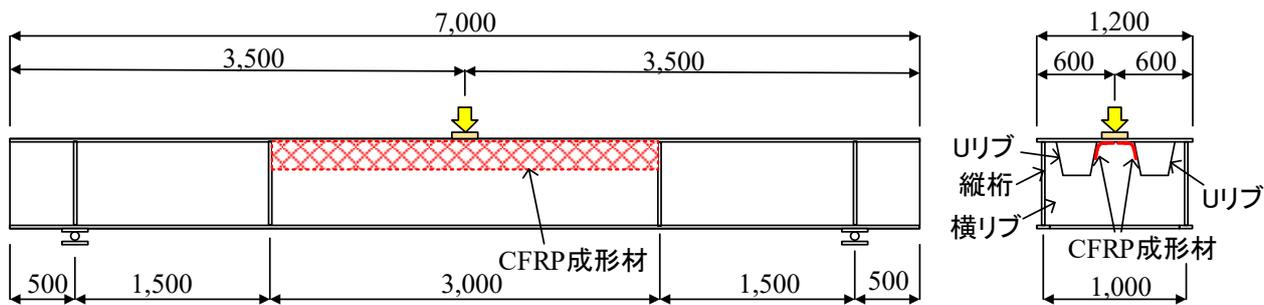


図-5 CFRP 成形材による鋼床版実寸大供試体 (単位 mm)



写真-2 試験状況

計値である $200 \times 200 \text{ mm}$ の範囲に 50 kN の分布荷重を載荷し、荷重位置は CFRP 成形材が最も抵抗できる載荷位置である一般部の U リブ間とした。表-5 に本研究で実施した解析パラメータ一覧を示す。本研究では補強の有無、ポリウレアパテの塗布範囲をパラメータとして 5 水準の解析を行った。

3.2 解析結果

図-4 に FEM 解析から得られた溶接部のミーゼス応力分布図を示す。本結果の注目箇所はデッキ進展き裂やビード進展き裂の起点となる溶け込みのルート端部である。そこで同図に示す通り、デッキプレートの下面にあたる節点部分を評価のための代表点と考え、そこに生じているミーゼス応力を出力した。

同図より、本工法で補強した場合、無補強と比較し溶け込み部分の応力が $38 \sim 63\%$ 低減する補強効果があることが解析により確認された。また、ポリウレアパテを全面に塗布した場合は溶接部の応力低減率が 38% と最も補強効率が悪い結果となったため、本解析結果からポリウレアパテの塗布範囲はデッキ面のみもしくは U リブ面のみが合理的と考えられる。

また、ポリウレアの塗布範囲を減らすことによって CFRP 成形材のはく離が生じるかを確認するため、U リブ供試体における接着部の疲労強度確認試験を行った⁸⁾。その結果、U リブ面にのみポリウレアパテを塗布した供試体は、デッキ面の端部から CFRP 成形材のはく離が生じた。一方、デッキ面にのみポリウレアパテを塗布した供試体ははく離が生じず、溶接部付近のき裂も生じなかった。

したがって、FEM 解析結果および接着部の疲労強度確認試験からポリウレアパテの塗布範囲はデッキ面のみが

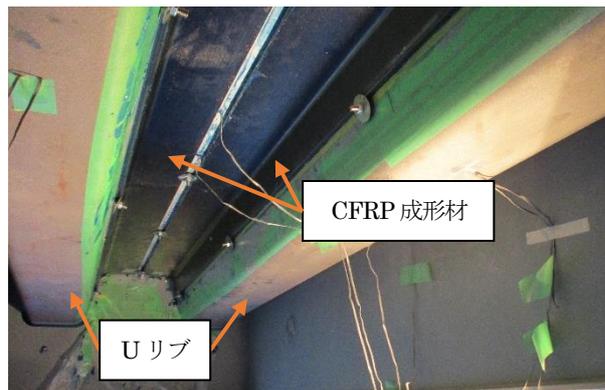


写真-3 CFRP 成形材施工後の状況

最適であると判断し、以降の検討を行った。

4. 実寸大鋼床版による施工試験

本工法において、CFRP 成形材の接着に用いるエポキシ樹脂は 2 液性エポキシ樹脂であり、主剤と硬化剤を混合してから硬化完了するまでに $3 \sim 7$ 日程度の時間を要する。

本工法では施工時に交通規制を行わないことを前提としているため、施工中および樹脂硬化段階で接着樹脂に交通荷重による応力が生じる。そのため、交通荷重下で本工法を適用した際の補強効果への影響を実験および FEM 解析により確認した。

4.1 試験概要

図-5 に本供試体の概要を示す。本供試体は実際の鋼床版で施工することを想定し、中央の横リブ間隔を $3,000 \text{ mm}$ とし、橋軸方向に長さ $3,000 \text{ mm}$ の CFRP 成形材を接着した。施工後 2 日間 (48 時間) 供用状態を再現したような荷重載荷状態とするため、 6 m 支間中央に約 2 分毎に 50 kN の定点繰返し載荷を行いながら、CFRP 成形材の接着施工を行い、樹脂硬化までの段階における U リブ溶接部近傍のひずみを測定した。その後 4 日間は、12 時間毎に載荷を行い、FEM 解析結果と同様の補強効果が得られるか検証した。ここで、写真-2, 3 に試験状況および CFRP 成形材施工後の状況を示す。

表-6 実寸大供試体の各材料モデル概要

部材	板厚 (mm)	要素	材料 (線形)
縦桁	12	8 節点 曲げシェ ル要素	$E_s=2.0 \times 10^5$ N/mm ²
下フランジ	12		
横リブ	12	20 節点 ソリッド 要素	$E_{cf}=2.13 \times 10^5$ N/mm ² $E_{gf}=2.80 \times 10^4$ N/mm ² $E=2,500$ N/mm ²
Uリブ	6		
デッキプレート	12		
Uリブ溶接部	2.4		
CFRP 成形材	-		
エポキシ樹脂層	0.5		
ポリウレアパテ 層	1.0		$E=80$ N/mm ²

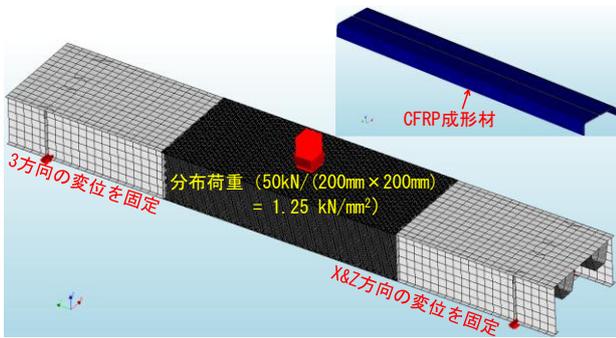


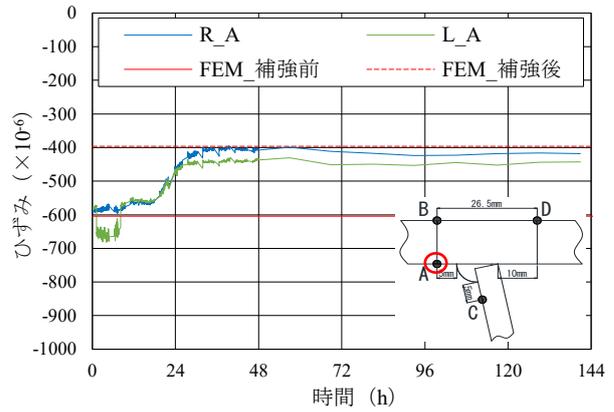
図-6 実寸大供試体の FEM 解析モデル

4.2 解析概要

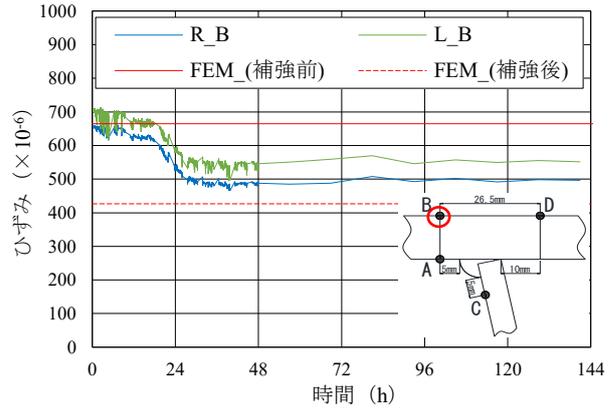
解析対象は、図-5 に示した鋼床版実寸大供試体と同様とした。解析モデルの概要とメッシュ形状を、表-6 と図-6 に示す。CFRP 成形材の弾性係数は実際の板厚から算出した値である。本解析では、鋼床版実寸大供試体のフルモデルを用いて FEM 解析を実施することにより、得られた実験結果と応力低減効果を比較した。補剛材、下フランジは8節点シェル要素で、その他の横リブ、デッキプレート、Uリブおよびその溶接部は20節点ソリッド要素で構成した。鋼材料は弾性体 ($E_s=2.0 \times 10^5$ N/mm²) とし、メッシュサイズは一般的な部材を約15mm、溶接ルート部の最小メッシュサイズを0.25mmとした。また、ポアソン比は ($\nu=0.3$) とし、分布荷重 ($50\text{kN}/(200 \times 200)=1.25\text{N}/\text{mm}^2$) で解析を行った。

4.3 試験結果および考察

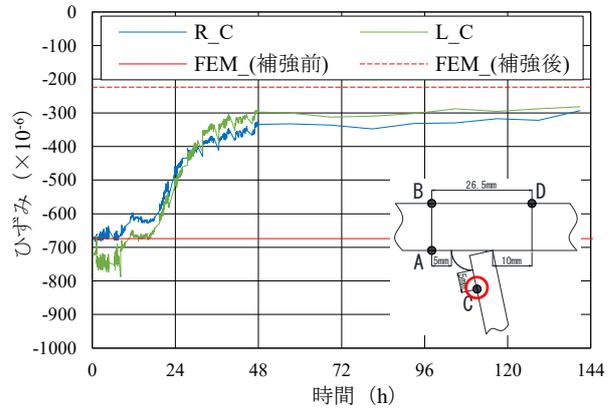
図-7 に 50kN 載荷時の応力ピーク包絡線を示す。また、各図中に Uリブ溶接部近傍のひずみゲージの設置位置図を示す。ひずみは着目点に最も大きな応力が発生する横リブ間中央の値である。図中の実験値は載荷位置の右側 (R) と左側 (L) の Uリブ溶接部の値であり、実線は補強前、破線は補強後の解析結果を示し、ひずみ計測点 A~D 位置での実験結果と比較した。同図より、0 時



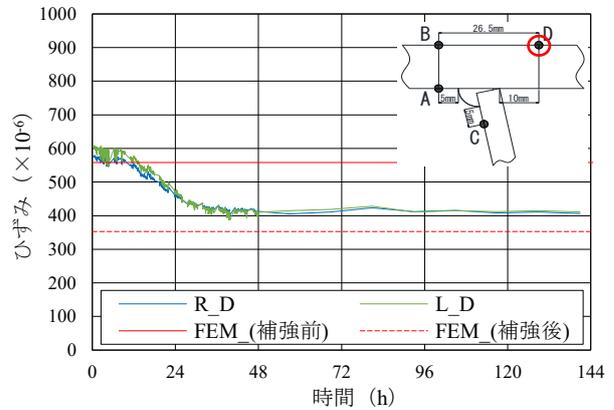
(a) A 点ひずみ



(b) B 点ひずみ



(c) C 点ひずみ



(d) D 点ひずみ

図-7 溶接部近傍のひずみ変化の包絡線

間～12 時間の間で鋼材における応力低減の効果は小さいが、12 時間～30 時間の間で接着樹脂の硬化に伴い鋼材の応力低減効果が徐々に発揮された。そして、約 30 時間後には接着樹脂が硬化し、各点におけるひずみは、それ以降、概ね一定に推移した。したがって、接着樹脂硬化途中に定点繰り返し载荷を受ける場合においても、施工から約 30 時間後には接着樹脂が硬化し、U リブ溶接部近傍の鋼材の応力低減効果が発揮されることが確認された。

接着樹脂硬化（約 48 時間）以降、A 点では解析結果と同様の補強効果が現れているが、B～D 点では実験値のひずみ（絶対値）が解析結果より $50\sim 100\times 10^{-6}$ 程度大きいことが確認された。これは各点、無補強時の解析結果が 0 時間における実験値のひずみ（絶対値）より小さいため、補強後の解析結果についても CFRP 成形材による補強効果を過大評価している可能性があることが考えられる。ここで、表-7 に鋼材ひずみ低減量の実験値と解析値の比較を示す。各測定点における鋼材ひずみ（RL 平均値）の最大値と最小値の差と解析結果における補強前のひずみと補強後のひずみの差をまとめた。同表より、鋼材のひずみ低減量の実験値と解析値と比較すると、B 点においては実験値が解析値を 14% 下回り、他点と比較して差が大きかったが、A、C、D 点では実験値と解析値の差が 5% 以内となり、概ね解析通りの鋼材ひずみ低減量であることが確認された。

本試験では、载荷実験中において、3～6 時間おきに、油圧オイルの温度上昇により、3000kN 载荷試験機が非常停止する現象が生じた。この復旧には約 1～2 時間が必要であり、その間、装置のクロスヘッド部分の質量約 2 トンが試験体に载荷された状態となった。そのため、試験機の停止により鋼床版が変形した状態で接着樹脂の硬化が進んだことが、補強後の実験値の鋼材ひずみ（絶対値）が解析値より大きかった原因の一つとして考えられる。

以上から、供用中の鋼床版においても、交通荷重がある状態で本工法を適用した場合においても、概ね解析通りの補強効果が得られ、U リブ溶接部近傍の疲労き裂の発生を抑制できると考えられる。

5. まとめ

鋼床版下面からの CFRP 成形材による補強工法について、FEM 解析によるポリウレアパテ塗布範囲の最適化および実寸大供試体による施工試験から本工法の現場適用性の確認を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 鋼床版解析モデルにおいて、ポリウレアパテ塗布範囲をパラメータとした FEM 解析結果および接着部の疲労強度確認試験からポリウレアパテの塗布範囲はデッキ面のみが最適であると判断した。
- (2) 実寸大鋼床版による施工試験の結果から、繰り返し荷重を载荷しながら本工法を適用した場合においても、施工から約 30 時間後には接着樹脂が硬化し、U リブ溶

表-7 鋼材ひずみ低減量の実験値と解析値の比較

測定点		A	B	C	D
ひずみ 測定値 (RL 平均)	MAX (絶対値)	633	686	726	594
	MIN (絶対値)	414	481	288	395
	MAX-MIN	219	205	439	199
解析値	補強前-補強後	208	238	451	205
実験値/解析値		1.05	0.86	0.97	0.97

接部近傍の鋼材の応力低減効果が発揮されることが確認された。

- (3) また、施工直後および樹脂硬化後の U リブ溶接部近傍のひずみ低減量の実験値は解析値と概ね一致したため、供用中の鋼床版においても、車線規制を行わず、交通荷重がある状態で本工法を適用した場合においても、概ね解析通りの補強効果が得られ、U リブ溶接部近傍の疲労き裂の発生を抑制できると考えられる。

今後は本工法の効果について、本工法で補強された鋼床版の疲労耐久性や耐用年数の評価が必要である。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労[2010 年改訂版]，鋼構造シリーズ 19，2010.12
- 2) 川上順子，高田佳彦，坂野昌弘：鋼床版の疲労損傷に対する溶接を用いた補修補強工法に関する検討，鋼構造年次論文報告集，第 15 巻，pp.371-376，2007.11.
- 3) 溝上義昭，森山彰，小林義弘，坂野昌弘：U リブビード貫通亀裂に対する下面補強工法の提案，土木学会論文集 A1，vol.73，No.2，456-472，2017.
- 4) 児玉孝喜，緑川和由，玉越隆史，村越潤，山本洋司，一瀬八洋，大田孝二：大平高架橋の鋼床版における SFRC 舗装によるひずみ低減効果，第 6 回道路橋床版委員会，2008
- 5) 石川敏之，大倉一郎，西田貴裕，横田季彦，斉藤誠：CFRP 板付着端近傍への低弾性接着剤の使用によるはく離せん断応力の低減，構造工学論文集，Vol.54A，p.842-849，2008.
- 6) 若林大，宮下剛，奥山雄介，秀熊佑哉，小林朗，小出宜央，堀本歴，長井正嗣：高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案，土木学会論文集 F4，Vol.71，No.1，pp.44-63，2015.
- 7) 東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）：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，2020.
- 8) 安田翼，大垣賀津雄，Vinh PHAM NGOC，秀熊佑哉，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強度試験，第 12 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，2022.10

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)