

(13) 鋼床版下面からの樹脂モルタルとCFRP成形材による補強効果確認実験

安田 翼¹・大垣 賀津雄²・秀熊 祐哉³
石田 学⁴・鈴木 永之⁵・PHAM NGOC VINH⁶

¹学生会員 ものづくり大学大学院 ものづくり学研究所 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)

E-mail: b01812172@iot.ac.jp

²正会員 工博 ものづくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

³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

⁴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

⁵正会員 株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング (研究当時: 東日本高速道路(株) 関東支社)
(〒116-0014 東京都荒川区東日暮里5-7-18) E-mail: n.suzuki.tf@e-nexco.co.jp

⁷非会員 The University of Danang-University of Science and Technology, Vietnam, Faculty of Civil Engineering

Email: pnvinh@dut.udn.vn

鋼床版の疲労損傷の中で、Uリブ溶接部を起点とする疲労き裂の進展が発生している。このような疲労損傷の対策として、SFRC舗装の施工が標準的な工法として行われているが、これらの工法は車線規制が必要となり渋滞発生の原因となる。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工法として、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成形材を用いた補強工法を検討している。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、それらによる補強効果の確認を行った。また、グースアスファルト舗装と同等の熱を与え、熱影響を受けた場合の性能の変化を確認した。

Key Words : Steel Deck, U-rivs, CFRP Molding Materials, Reinforcement, Adhesion, Vibration

1. はじめに

現在、都市内高速道路の鋼床版橋梁において、Uリブ溶接部からデッキプレート等に疲労き裂の進展が多数発生している。鋼床版の疲労き裂を放置すると、道路としての機能低下につながる。このような疲労き裂の対策としてSFRC舗装の施工が標準的な工法として行われているが、これらの工法は車線規制が必要となり渋滞発生の原因となる。そこで、疲労き裂抑制対策として、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のUリブ溶接部の局部応力低減工法を検討している(図-1参照)。本補強対策工法に関して、筆者らは補強効果の有効性を既往の研究において検証している¹⁾。したがって、今後実用化に向けた検討として、実橋に適用した際

に想定される道路環境やアスファルト施工等の影響についての検討を行なう必要がある。特にグースアスファルトは施工時に高い流動性を有しており、デッキプレート表面に添接部や溶接接合部等の凹凸のある場合でも適応できる材料であること、また変形追従性と防水性に優れ

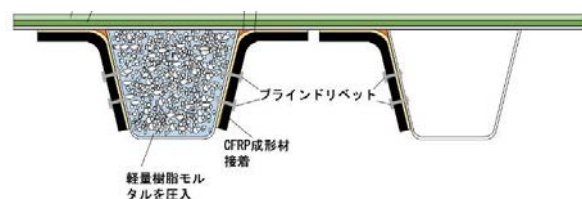


図-1 鋼床版下面からの補強工法

ていることから、鋼床版橋の基層舗装に多く施工されている。しかしながら、グースアスファルトは打設時に200°C以上の高温となるため、本補強工法における軽量樹脂モルタルやCFRP成形材に使用している樹脂材料への影響が懸念される。そこで本研究では、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成形材貼付けによる補強効果の確認を行った。さらに、3本のUリブを有する鋼床版供試体に、グースアスファルト舗装と同等の熱を与え、この熱影響を与える前後に静的載荷実験を行って、補強効果の変動を確認した。

2. 補強材料

(1) 軽量樹脂モルタル

表-1に軽量樹脂モルタルの材料特性を示す。軽量樹脂モルタルは、古くから各種構造物に用いられてきた人工軽量骨材であるパーライトを粒度調整し、特殊エポキシ樹脂で硬化させたものである。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-3929 μであった。このような樹脂モルタルの1次充填は、ハンドミキサーを用いて樹脂とパーライトを練混ぜた後、密度を安定化させる目的で軽量樹脂モルタルをスクイズポンプを用いて圧送速度45L/分で3分間循環させて密度を安定させ、Uリブ下面に設けた充填孔からポンプで充填を行う²⁾。練混ぜ開始から約1時間で3本のUリブへの充填を完了している(図-2参照)。

軽量樹脂モルタル充填後、7日間の養生を行い強度増進後に樹脂の2次注入を実施している。注入間隔はUリブ橋軸方向両端(約600mm間隔)4箇所を孔をあけ、片側から注入したエポキシ樹脂が先端側から排出したら注入を終了する。3本のUリブへの2次注入時間は約90分であった。また、2次注入に使用したエポキシ樹脂は1次充填の樹脂モルタル練混ぜに用いた樹脂と同様のものである(図-3参照)。

(2) CFRP成形材

CFRP成形材は炭素繊維シートが積層された引抜成形部材であり、成形後の比重2.0と軽量で腐食しない特性を有した材料である。またCFRP成形材の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³⁾⁴⁾。

図-4にCFRP成形材による補強構造、表-2にCFRP成形材に使用した材料の諸元、表-3にCFRP成形材の積層構成および設計値を示す。図-4に示す通りはく離防止対策

として塗布するポリウレアパテの範囲を、デッキ面全体から施工範囲を50mmまで狭くしている⁵⁾。CFRP成形材の端部ではく離防止のためにポリウレアパテを鋼材とCFRP成形材の層間に塗布するが、この範囲を狭くすることによりCFRP成形材の補強効果を向上させることができる。また、グースアスファルト施工時の熱影響の範囲を狭くすることにも繋がる。CFRP成形材の施工は、接着箇所のケレンおよびプライマーの塗布の下地処理後、ポリウレアパテの塗布を行い、エポキシ樹脂によりCFRP成形材を押し付けるようにして接着している。その後、マグネットボルトで仮固定を行い、さらに脱落防止措置としてブラインドリベットを施工している¹⁾。

表-1 軽量樹脂モルタルの材料諸元

項目	養生期間	値
収縮量 (μ)	-	-3929
圧縮強度 (N/mm ²)	(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-2 樹脂モルタルの充填状況

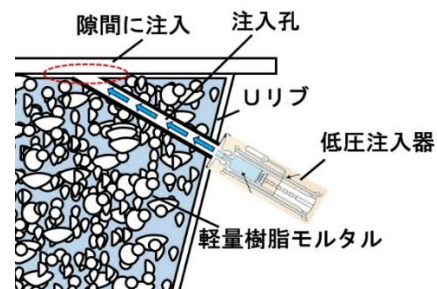


図-3 2次注入施工法

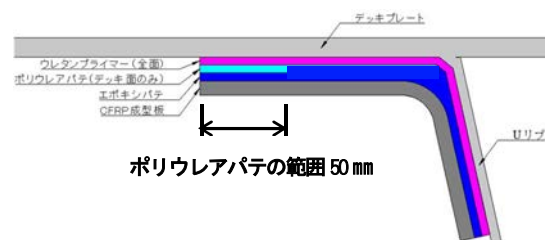


図-4 CFRP成形材による補強構造

表-2 CFRP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 Efl (MPa)	繊維直交方向の弾性係数 Eft (MPa)	繊維のせん断弾性係数 GfLT (MPa)	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 Em (MPa)	樹脂のせん断弾性係数 Gm (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-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 Vf (%)	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

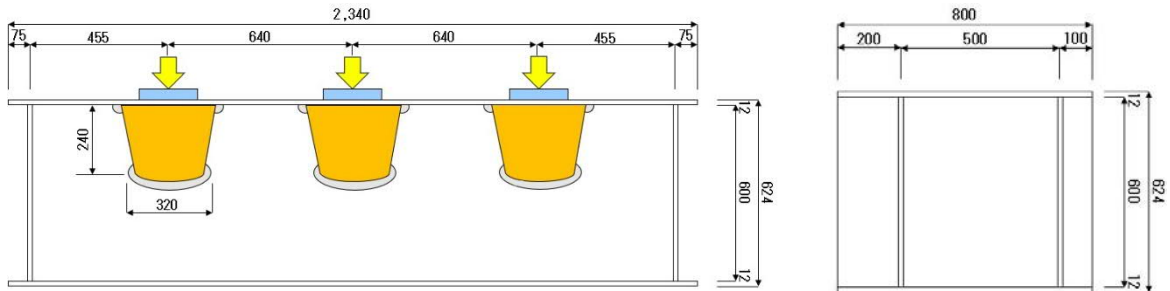


図-5 実験供試体

3. 実験方法

製作した鋼床版実験供試体を図-5を示す。供試体は、Uリブ3本を有する鋼床版とした。横リブは供試体橋軸方向の両端に500mm間隔で設け、実橋と同様にデッキ厚は12mm，Uリブのサイズは320×240×6mm，供試体の材質はSM400である。Uリブ溶接部の溶込み量は、実橋のデータを参考にUリブ板厚の40%としている。

本実験は、CFRP成形材と軽量樹脂モルタルの施工前後の静的荷重実験により、補強効果を確認した。また、グースアスファルト施工時と同程度の熱を加えた後も静的荷重を行い、熱影響の有無等の確認を行っている。したがって、静的荷重実験は無補強状態、軽量樹脂モルタル充填後、2次注入後、CFRP成形材取付後、およびグースアスファルト相当の加熱後に実施した。

本補強対策工法は、鋼床版デッキプレートとUリブ溶接部のルート部に発生する局部応力を低減させるものであるが、この応力は鋼床版上の荷重位置により変化し、

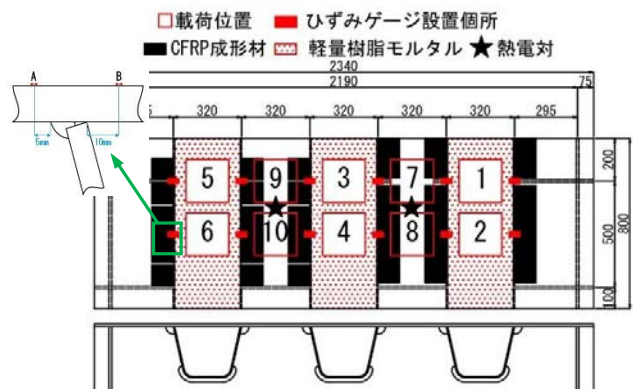


図-6 荷重位置およびゲージ位置

Uリブ間の荷重に対してはCFRP成形材が、Uリブ直上の荷重に対してはUリブ内に充填した軽量樹脂モルタルが応力低減に寄与する。また鋼床版橋軸方向には横リブ位置により、横リブ交差部と横リブのない一般部でも応力性状が異なる。したがって、図-6に示す通り本実験での

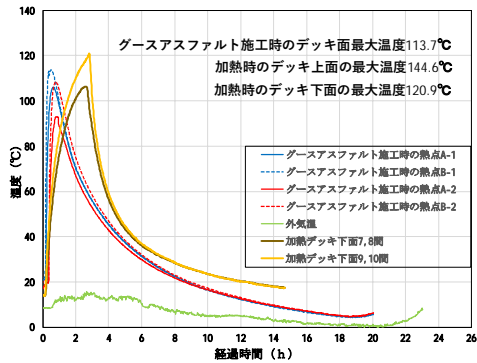


図-7 グースアスファルト打設時の熱履歴

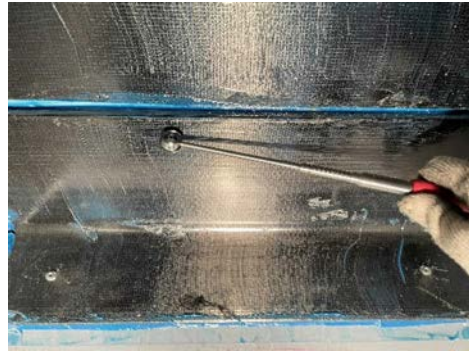


図-8 打音検査の状況

荷重はこれらを組み合わせ、Uリブ間、Uリブ直上、横リブ交差部、一般部の4つのパラメータでその位置を変えて行っている。同図にはひずみゲージ位置も示している。

また、加熱は図-7に示すようにグースアスファルト打設と同様の温度となるように、デッキ上面から加熱している。既往の研究⁷⁾でグースアスファルト施工時の熱履歴を計測しており、このデータを参考に加熱している。最初、電熱ヒーターを用いて加熱を行ったが、70°Cまでしか温度が上昇しなかったため、シリコンラバーヒーターを使用して再度120°Cまで加熱を行っている。

また、供試体加熱後に、CFRP成形材のはく離を確認するため図-8に示す打音検査実施した。打音検査は打診棒で衝撃を加え、発生する音の変化から供試体に貼付けたCFRP成形材接着部のはく離を確認した。その結果からはCFRP成形材のはく離は確認できなかった。

荷重荷重は道路橋示方書⁷⁾のT荷重250kNを想定した大型車の後輪荷重50kNを、シングルタイヤ相当の設置面200×200mmの寸法で荷重を行い、上述の各タイミングでひずみを計測した。荷重状況を図-9に示す。



図-9 荷重状況

表-4 解析モデル概要

部材	板厚 (mm)	要素	ヤング係数 (MPa)	メッシュサイズ
補剛材	12	8 節点曲げシェル要素 (CQ40S)	$E_s = 2 \times 10^5$	一般的な部材 (15mm)
下フランジ	12			
3面 CFRP 成形材を接着する範囲以外の横リブ	12			
Uリブ	6	20 節点ソリッド要素 (CHX60)	異方特性	溶接部 (最小メッシュサイズを0.25とした)
デッキプレート	12			
Uリブ溶接部	2.4※			
CFRP 成形材	0.5			
エポキシ樹脂層	0.5			
高伸度弾性パテ層	1			
軽量樹脂モルタル	-	1000		

注) ※はUリブ板厚6mmの40%溶込みとした。

4. 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して FEM 解析を実施した。特に、デッキ進展き裂の起点と推定される Uリブ溶接ルート部に着目した。

解析モデルの概要は表-4 に、解析モデルを図-10 に示す。解析は汎用 FEM 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、溶接部の最小部分を 0.25mm とした。また CFRP 成形材の弾性係数は、XYZ 方向に 163000N/mm^2 、ポアソン比は $\nu=0.3$ とし、分布荷重 ($50\text{kN}/(200 \times 200) = 1.25\text{N/mm}^2$) で解析を実施した。

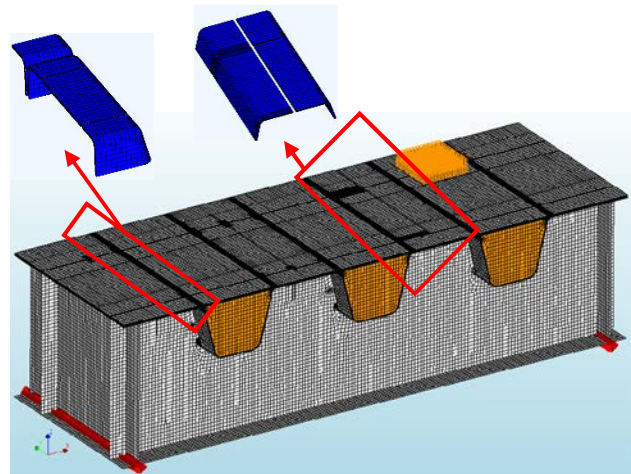


図-10 解析モデル

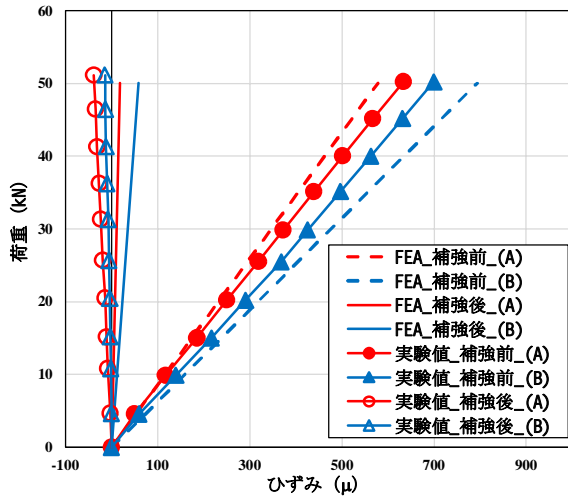


図-11 載荷位置1

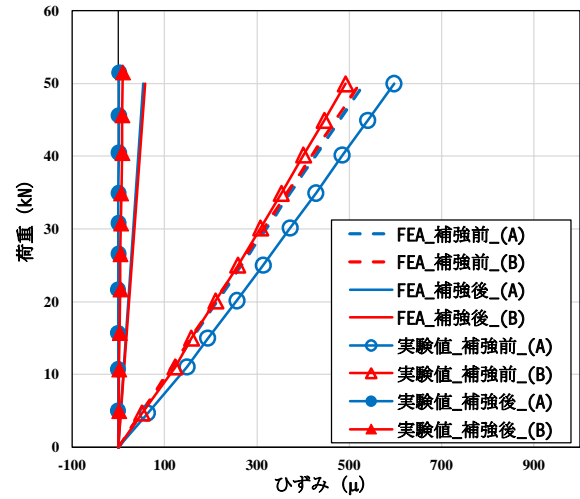


図-12 載荷位置2

5. 実験とFEM解析の比較

(1) 補強効果

図-11～14に載荷実験およびFEM解析による補強前後のひずみを示す。ここで、補強後は樹脂モルタルの2次注入とCFRP成形材設置完了後としており、各種載荷時のひずみの挙動を比較・考察する。

図-11の載荷位置1 (Uリブ直上の横リブ交差部) において、50kN 載荷時のひずみ実験値は、補強前 A, B(633 μ , 699 μ), 補強後 A, B(-38 μ , -15 μ)であり、それぞれのひずみ値が大幅に減少していることがわかる。

図-12の載荷位置2 (Uリブ直上の一般部) におけるひずみの実験値は、補強前 A, B(597 μ , 491 μ), 補強後 A, B(2 μ , 10 μ)であり、それぞれのひずみ値が大幅に減少している。これらの載荷位置1と2の結果から、実験値と解析値の傾向が良く一致しており、弾性的な挙動が伺える。またUリブへの軽量樹脂モルタル充填補強が、各位置載荷時におけるUリブ溶接部にかかる応力を大幅に低減していることがわかる。

図-13の載荷位置7 (Uリブ間の横リブ交差部) におけるひずみの実験値は、補強前 A, B(4 μ , -6 μ), 補強後 A, B(13 μ , -0.8 μ)であり、Uリブ間のデッキプレートは横リブで支持されているという鋼床版の構造により、溶接部にかかる応力は極めて小さい位置である。

図-14の載荷位置8 (Uリブ間の一般部) におけるひずみの実験値は、補強前 A, B(581 μ , 481 μ), 補強後 A, B(392 μ , 200 μ)であり、それぞれひずみが半減している。また概ね実験値と解析値の傾向が一致しており、弾性的な挙動が伺える。載荷位置8の結果から、CFRP成形材接着補強が、載荷時におけるUリブ溶接部にかかる応力を低減していることがわかる。

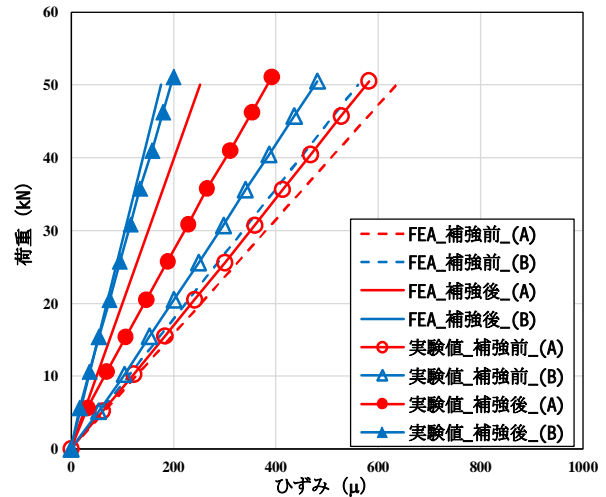


図-13 載荷位置7

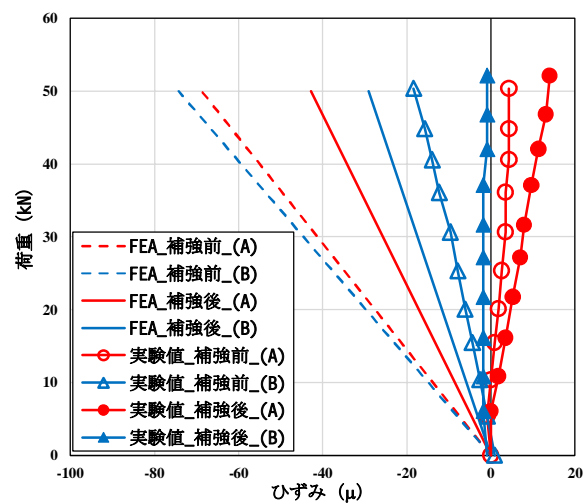
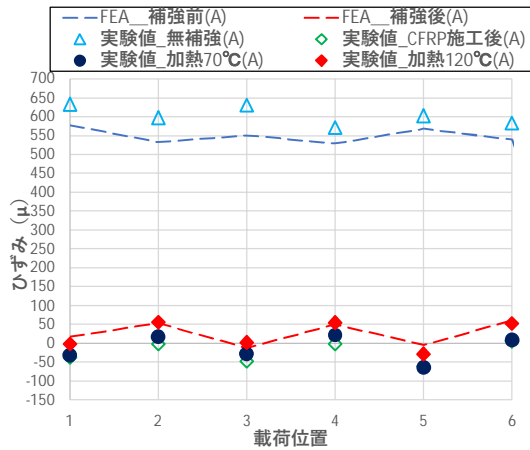
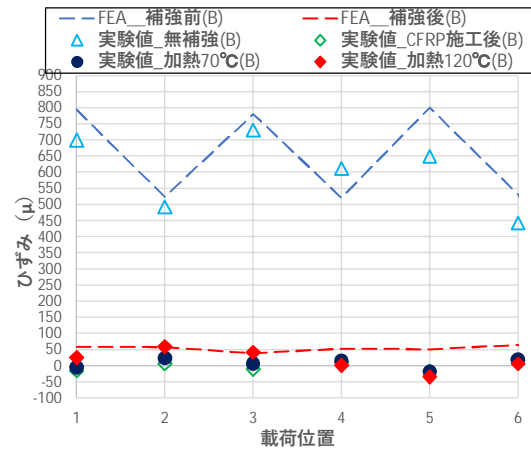


図-14 載荷位置8

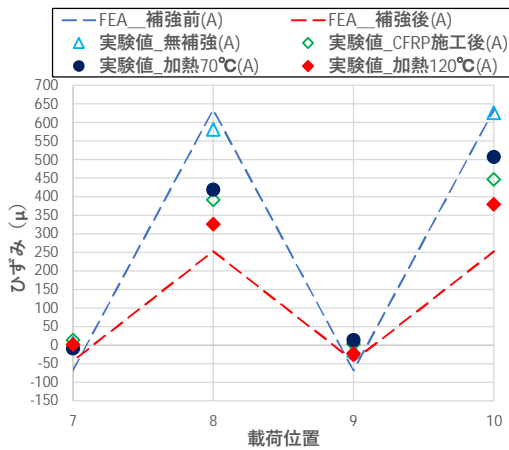


(a)ゲージ位置 A

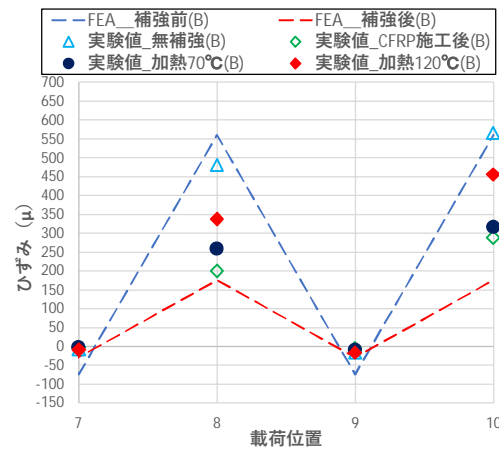


(b)ゲージ位置 B

図-15 Uリブ直上載荷の50kN 載荷時のひずみ (載荷位置 1~6)



(a)ゲージ位置 A



(b)ゲージ位置 B

図-16 Uリブ直上載荷の50kN 載荷時のひずみ (載荷位置 7~10)

(2) 熱影響

図-15, 16に50kN載荷時の各種補強段階におけるひずみ比較を示す。図-15よりUリブ直上載荷 (載荷位置1~6) に関しては、加熱後も補強効果を維持しており、Uリブ直上載荷時の補強効果に対する熱影響はないと考えられる。

一方で、図-16よりUリブ間の一般部載荷 (載荷位置 8,10) に関しては、加熱後の静的載荷においてゲージBのひずみが上昇しており、逆にゲージAのひずみが減少している。若干の熱影響があることを確認したが、問題となる変動ではないと考えられる。また、補強後については、FEM解析によるひずみ値よりも実験のひずみが若干大きい、この部分の補強効果は元々少ないといえる。

6. まとめ

本研究は鋼床版の3本Uリブを有する供試体に、軽量樹脂モルタル充填をUリブに充填し、CFRP成形材をUリブ間に施工した後に、補強効果が得られるかを確認するため載荷試験を実施した。これらの補強前後の静的載荷実験とFEM解析を比較した。さらに、鋼床版デッキプレート上面にグースアスファルト舗装と同等の加熱を行い、静的載荷試験で補強効果の変化を確認した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) Uリブ直上の横リブ交差部において、50kN載荷時のひずみ実験値は、補強後に大幅に減少することがわかった。
- (2) Uリブ直上の一般部において、50kN載荷時のひずみ実験値は、補強後に大幅に減少することがわかった。
- (3) これらの(1),(2)の載荷実験結果は FEM 解析値の傾向とよく一致しており、弾性的な挙動が伺える。

- (4) Uリブ間の一般部において、50kN 載荷時のひずみ実験値は、補強後に半減することがわかった。
- (5) Uリブ直上載荷に関しては、加熱後も補強効果を維持しており、熱影響はないと考えられる。
- (6) 一方で、Uリブ間の一般部載荷に関しては、加熱後にゲージ B のひずみが上昇しており、逆にゲージ A のひずみが減少している。若干の熱影響があることを確認したが、問題となる変動ではない。

以上のことを踏まえて、今後の課題としては、移動輪荷重走行試験により、長期供用による補強効果の変動を調査することと、合理的な施工方法を検討して、現場における試験施工を行うことである。

謝辞：本研究の実験に際しては、研究当時ものつくり大学学生の渡邊健也氏、藤本陸氏にご協力いただきましたことを感謝致します。

参考文献

1) 渡邊健也, 大垣賀津雄, PHAM NGOC VINH, 秀熊佑哉, 石

田学, 紫桃孝一郎: 鋼床版橋下面からの CFRP 成形材および軽量樹脂モルタルによる補強効果に関する研究, 土木学会第 12 回道路橋床版シンポジウム論文集, 2022.

- 2) 赤江信哉, 石田学, 大垣賀津雄, PHAM NGOC VINH, 藤田直博, 紫桃孝一郎: 鋼床版橋Uリブにおける軽量樹脂モルタル充填施工と補強効果に関する研究, 土木学会第 12 回道路橋床版シンポジウム論文集, 2022.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 櫻井俊太, 大垣賀津雄, PHAM NGOC VINH, 秀熊佑哉, 紫桃孝一郎: 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, 土木学会第 12 回道路橋床版シンポジウム論文集, 2022.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, 2017.

(Received August 25, 2023)

STUDY ON VIBRATION FATIGUE TEST OF ADHESIVE PART REINFORCED WITH CFRP MOLDED MATERIAL ON U-RIB SIDE AND BACK OF DECK UNDER STEEL DECK BRIDGE

Tsubasa YASUDA, Kazuo OHGAKI, Yuya HIDEKUMA
Manabu ISHIDA, Noriyuki SUZUKI and Ngoc Vinh PHAM

Among the fatigue damage of the steel deck, crack propagation originating from the U-rib weld occurs. Various measures such as the SFRC pavement method have been taken to deal with such fatigue damage.

Under these circumstances, as a reinforcement method from the underside of the steel deck slab bridge, assuming a heavy traffic section, the reinforcing effect of filling the U-ribs with lightweight resin mortar and installing CFRP moldings between the U-ribs. A static loading test was carried out to investigate whether there would be an effect when the pavement was subjected to heat equivalent to that of goose asphalt pavement.