

## (15) 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

赤江 信哉<sup>1</sup>・大垣 賀津雄<sup>2</sup>・石田 学<sup>3</sup>・鈴木 永之<sup>4</sup>・PHAM NGOC VINH<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 (〒285-0802 千葉県佐倉市大作2-4-2)

E-mail: shinya-akae@taiheiyo-m.co.jp

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>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

<sup>5</sup>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き裂の進展が発生している。このような状況の中で、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リブ間に設置するCFRP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。本研究では、Uリブ内への軽量樹脂モルタル充填施工に関して、供用状態を想定して、重交通荷重相当の定点繰返し載荷を行いながら樹脂の2次注入を行い、エポキシ樹脂の硬化段階における荷重載荷の影響の確認を行った。

**Key Words:** Steel deck plate, Lightweight resin mortar, Reinforcements, Fixed-point Loading Test

### 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リブ溶接部から疲労き裂が多数発生している<sup>1)</sup>。このような疲労損傷の対策はSFRC舗装工法が標準的な工法として行われているが、都市内高速道路は重交通区間が多く、鋼床版上面からの補強は、交通規制を要するため社会的影響が大きい。また下面からの工法としては、鋼板当て板工法等が行われているが、Uリブ内部の補強工法については十分な対策が得られていない状況にある。そこで現在、図-1に示す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<sup>2)</sup>。

本研究対象としている工法は、Uリブ内部に軽量樹脂モルタルを充填する工法により、鋼床版下面から、デッキプレートUリブ溶接部の応力を低減するものである。本補強工法は、車線を考慮して輪荷重走行の多い位置のみ、部分的な補強ができるため合理的かつ経済的な工法となっている。なお、Uリブ内部は軽量樹脂モルタルを

専用ポンプで充填後、Uリブに充填した軽量樹脂モルタルをデッキプレート下面に密着させるため、エポキシ樹脂の2次注入を行っている。

本研究では、Uリブ内への軽量樹脂モルタル充填施工に関して、供用状態を想定した確認が必要であるとの観点から、重交通荷重を想定した定点繰返し載荷を行いながらエポキシ樹脂の2次注入施工を行い、エポキシ樹脂の硬化段階における荷重載荷の影響を確認した。さらにエポキシ樹脂2次注入前後の静的載荷試験結果とFEM解析結果との比較を行い、その補強効果の有無を確認している。

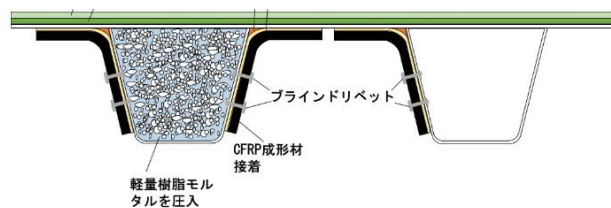


図-1 鋼床版下面からの補強工法

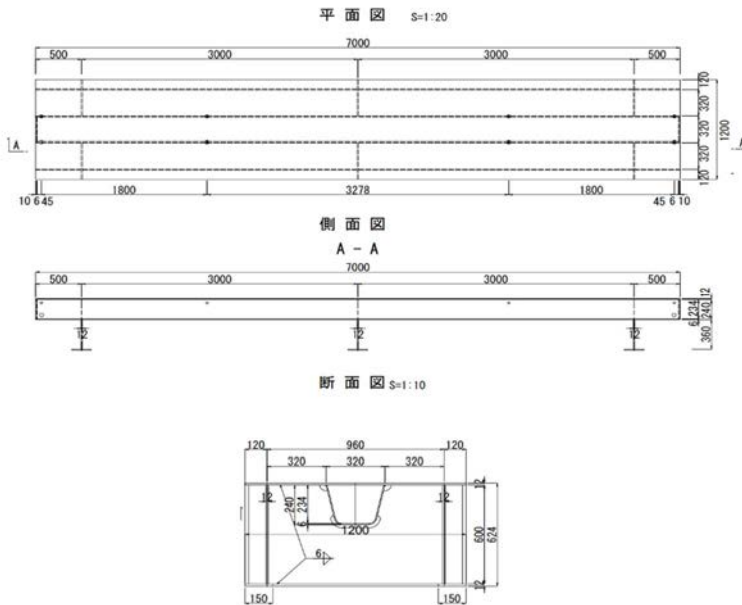


図-2 鋼床版試験供試体の概略図

## 2. 試験概要

### (1) 試験供試体

製作した鋼床版試験供試体の概略図を図-2 に示す。試験供試体は 7m の U リブ 1 本と横リブ 3 箇所を有しており、実橋と同様にデッキ厚 12 mm で製作されている。横リブは供試体橋軸方向に 3000mm 間隔で設け、U リブのサイズは 320×240×6mm、供試体の材質は SM400 である。U リブと横リブ交差部については、デッキプレート下面の U リブ溶接部には横リブにスカラップを、U リブ下側にはスリットを設けた。リブ溶接部の溶込み量は、実橋のデータを参考に 40% 溶込みを目標として製作している。

### (2) 軽量樹脂モルタル充填施工

表-1 に軽量樹脂モルタルの材料特性を示す。U リブ充填に使用した軽量樹脂モルタルは、古くから各種構造物や建築資材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て用いており、特殊エポキシ樹脂で硬化させたものである。密度は約 1.1kg/L と軽量であり、圧縮強度は約 30N/mm<sup>2</sup> である。

図-3 に軽量樹脂モルタル施工フローを示す。本試験における軽量樹脂モルタルの 7m U リブへの施工は、実橋への施工を想定しており、初めにエポキシ樹脂とパーライトをハンドミキサーで練混ぜ、軽量樹脂モルタルの密度を一定にするため、ポンプ循環を約 3 分間実施し、図-4 に示す U リブ下端に設けた注入孔から充填を行った。ポンプ循環することにより、人工軽量骨材の一部が潰れ、

表-1 軽量樹脂モルタルの材料特性

項目	養生期間	試験値
フロー値	-	185mm
圧縮強度	(28 日)	28.5 N/mm <sup>2</sup>
硬化体密度	(28 日)	1.1kg/L
割裂引張強度	(28 日)	4.7 N/mm <sup>2</sup>

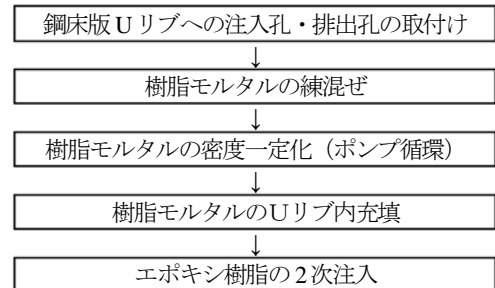


図-3 軽量樹脂モルタル施工フロー



図-4 樹脂モルタルの充填状況

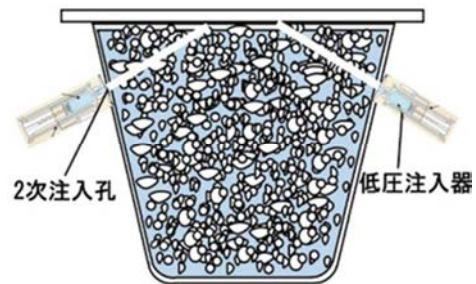
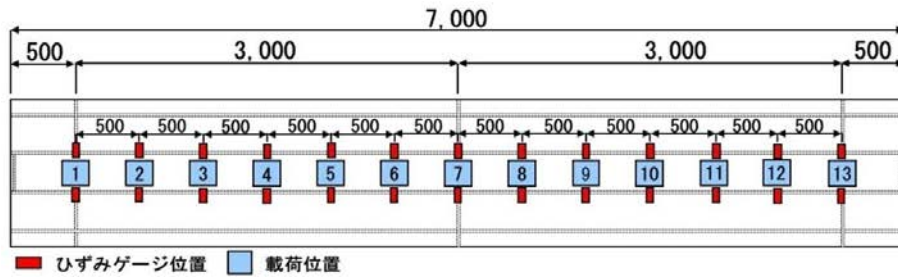


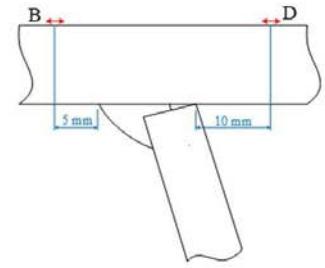
図-5 エポキシ樹脂の 2 次注入施工法



図-6 エポキシ樹脂の 2 次注入施工状況



a) 静的載荷位置



b) ひずみゲージ測定位置

図-7 載荷位置およびゲージ位置

密度が練混ぜ後の0.9から1.1に変化して安定する。充填ポンプの圧送速度は最大吐出量の20%(10L/分)程度の低速としている。充填開始後、Uリブに設けた8か所のエア抜き孔から、軽量樹脂モルタルを約20秒間オーバーフローさせ充填を終了する。なお、試験時の注入孔はφ44、エア抜き孔はφ28である。

### (3) エポキシ樹脂2次注入

軽量樹脂モルタル硬化後、デッキプレート下面に生じた樹脂モルタルの隙間を充填するためにエポキシ樹脂の2次注入を実施した。注入は一般的にコンクリートのひび割れ注入用低圧注入器を用いた。施工は図-5に示す2次注入孔を、鉄鋼ドリルを用いて2300mm間隔でUリブ両端に設けた。注入はUリブの端部から順に行い、注入したエポキシ樹脂が隣の孔から漏出するのを確認したら、その孔に新たに低圧注入器を取付け、同様の操作を行った。最後にすべての低圧注入器にゴムを取付け加圧した(図-6参照)。なお、2次注入で用いたエポキシ樹脂は、軽量樹脂モルタルで使用したものと同様の樹脂である。

### (4) 静的載荷試験

エポキシ樹脂の注入による軽量樹脂モルタルの補強効果を確認するために、供試体上面に計13点の載荷点を設けた。図-7に載荷位置およびひずみゲージ位置を示す。ひずみゲージは載荷点近傍のUリブ溶接部デッキ上面に貼り付けており、Uリブ溶接部外側計測位置Bの左右をLB, RBとし、Uリブ溶接部内側計測位置Dの左右をLD, RDとした。供試体を載荷台上に多点支持状態にして、13点の各位置における静的載荷試験により補強効果の確認を行った(図-8参照)。載荷荷重は道路橋示方書<sup>9)</sup>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の寸法で載荷を行い、2次注入前後でのひずみを計測することで、補強効果の有無を確認した。

### (5) 繰返し載荷試験

厳しい道路使用状況を想定して図-9に示す6m支間中

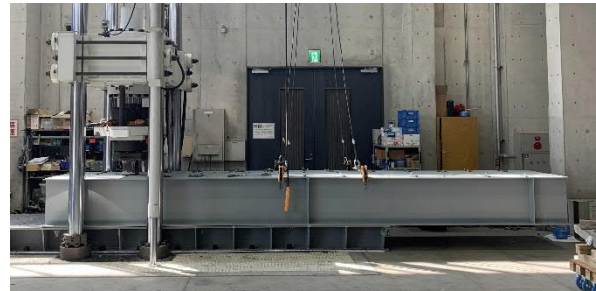


図-8 静的載荷状況



図-9 繰返し載荷状況

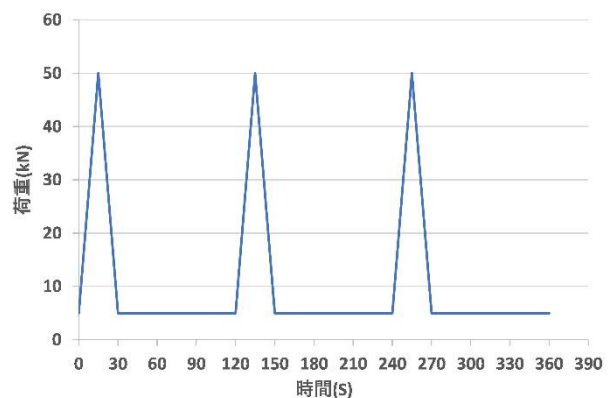


図-10 繰返し載荷サイクル

中央の載荷位置7において、図-10に示す通り5kNから50kNの繰返し荷重を与えながら、エポキシ樹脂の2次注入施工を実施した。本試験期間は1週間で、エポキシ樹脂注入開始から48時間までは約2分おきの繰返し載荷とし、48時間経過後3日間は6時間おきに1回、その後の2日間は12時間おきに1回の載荷を行った。

## (6) FEM解析概要

解析モデル概要を表-2に示す。今回の試験で用いた鋼床版供試体と同じ寸法の解析モデルを用いて FEM 解析を実施することにより、試験と解析の応力低減効果を比較した。

FEM 解析は、汎用構造解析ソフト DIANA を使用し、横リブ、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構成している。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。分布荷重 (50kN/(200x200)=1.25N/mm<sup>2</sup>) で解析を実施した (図-11 参照)。

表-2 解析モデル概要

部材	板厚 (mm)	要素	材料	メッシュサイズ
縦桁	12	8 節点 シェル要素 (CQ40S)	弾性体 ( $E_s=2 \times 10^5$ MPa)	一般部分 (20mm)
下フランジ	12			
横リブ	12			
Uリブ	6	20 節点 ソリッド要素 (CHX60)	弾性体 ( $E=1000$ MPa)	溶接部の最 小メッシュ サイズは 0.25mm
デッキプレート	12			
Uリブ溶接部	2.4※			
樹脂モルタル	-			

注) ※はUリブ板厚6mmの40%溶込みとした。

## 3. 試験結果と FEM 解析の比較

### (1) 残留ひずみ補正

図-12 に荷重位置 7 における補正前の定点繰返し荷重試験によるひずみ挙動を示す。同図は、5kN 時～50kN 時のひずみを繰返し計測している。48 時間の定点繰返し荷重において、5kN～50kN の繰返し荷重を加え続けたことにより、同図の黒点線から黒実線に 5kN 時のひずみが増加し、樹脂モルタル硬化の影響による残留ひずみが生じた。その量は鋼床版デッキプレート上面で約 150 $\mu$  以下であり、問題となるような残留ひずみではなかった。また、静的荷重による純粋なひずみを求めるために、以下の計算により残留ひずみを補正した。

荷重荷重範囲  $P$  は 5kN～50kN の繰返し荷重のため、以下の通りになる。

$$P = P_{max} - P_{min} \quad (1)$$

ここに、 $P_{max} = 50\text{kN}$ 、 $P_{min} = 5\text{kN}$  である。

また、荷重範囲に対するひずみ範囲  $\varepsilon$  は、50kN 時のひずみと 5kN 時のひずみから以下の通りとなる。

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_{max} = 50\text{kN}$  時のひずみ、 $\varepsilon_{min} = 5\text{kN}$  時のひずみである。

また、今回の繰返し荷重は 5kN～50kN の範囲で荷重しており、残留ひずみを補正するにあたり 0kN～50kN の荷重範囲にする必要がある。したがって、範囲補正のための補正係数  $k$  は、5kN～50kN のひずみ範囲  $\varepsilon$  から求める。

$$k = 50\text{kN} / (P_{max} - P_{min}) \quad (3)$$

以上から、補正係数  $k$  と荷重範囲  $P$  に対するひずみ範囲から補正後のひずみ範囲  $\varepsilon$  は以下の通りとなる。

$$\varepsilon \times k = (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \times 50\text{kN} / (P_{max} - P_{min}) \quad (4)$$

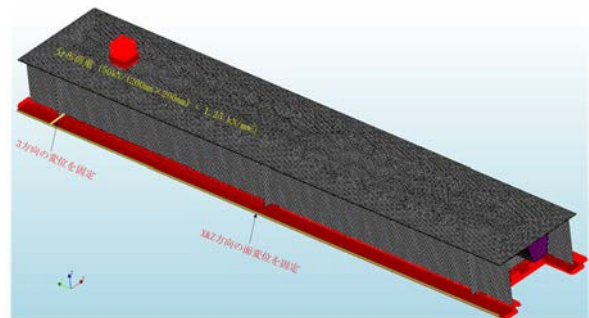


図-11 解析モデル

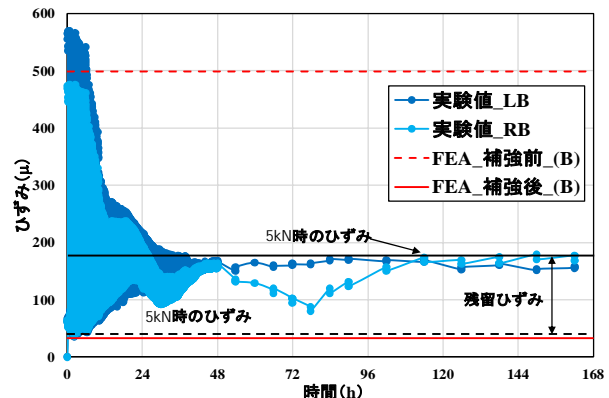


図-12 定点繰返し荷重試験によるひずみ挙動

### (2) ひずみ挙動

図-13 に残留ひずみ補正後の定点繰返し荷重のひずみ挙動を示す。同図より、注入開始 6 時間後からひずみが減少しはじめ、約 6～24 時間後にかけて最もひずみが低下しており、エポキシ樹脂の硬化が進行していることがわかる。また 48 時間後には解析値と同程度までひずみが低下していることから、エポキシ樹脂がデッキプレート下面に生じた樹脂モルタルとの隙間に確実に充填し、補強効果を発揮していると考えられる。

### (3) 静的荷重試験と FEM 解析の比較

図-14 に 2 次注入施工前後での静的荷重試験結果を示す。荷重試験により荷重位置 1～13 における補強前後の

ひずみは、エポキシ樹脂が十分に充填され場合の解析値と同程度まで減少しており、7mU リブのどの位置においても2次注入後は補強効果があることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究は鋼床版下面からの補強方法として、軽量樹脂モルタル充填をUリブに充填した後に、厳しい車輛走行状況下を想定した2分おきの定点繰返し载荷中にエポキシ樹脂の2次注入実施して、補強効果が得られるかを確認するため载荷試験を実施した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

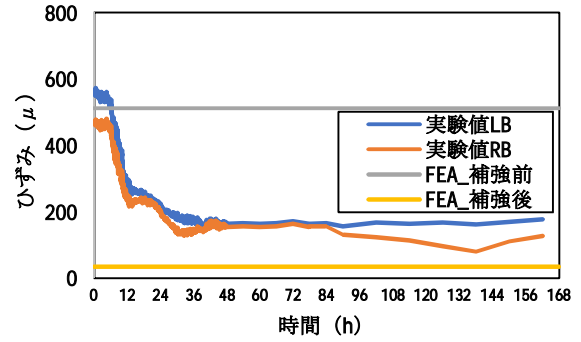
- (1) 樹脂の2次注入後、約6~24時間後にかけて最もひずみが低下しており、約48時間後には解析値と同程度までひずみが減少し、十分な補強効果を発揮することが確認できた。したがって、振動や変形が激しい供用下においても、本補強工法の施工が可能であると考えられる。
- (2) 樹脂の2次注入孔の間隔は2300mmでも結果的に補強効果が確認でき、注入孔の間隔を延長させることが可能であることがわかった。
- (3) 樹脂モルタル硬化の影響により残留ひずみが生じた。その量は鋼床版デッキプレート上面で約 150 $\mu$  以下であり、問題となるような残留ひずみではないことがわかった。
- (4) 樹脂の2次注入施工前後での静的载荷試験結果から、载荷位置 1~13 における補強前後のひずみは、エポキシ樹脂が十分に充填され場合の解析値と同程度まで減少しており、7mU リブのどの位置においても2次注入後は補強効果があることがわかった。

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。

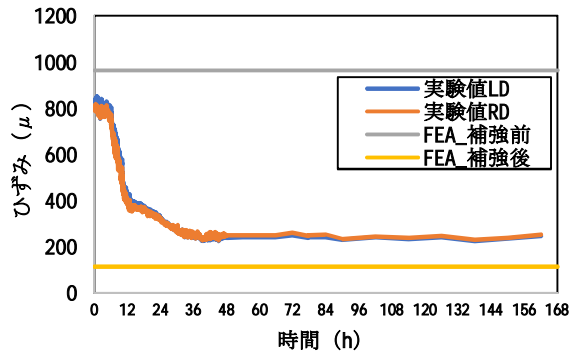
謝辞：本研究の実験に際しては、研究当時ものつくり大学学生の杉山一輝氏にご協力いただきましたことを感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労〔2010年改訂〕，鋼構造シリーズ19，2010。
- 2) 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。
- 3) 安田翼，大垣賀津雄，PHAM NGOC VINH，秀熊佑哉，櫻井

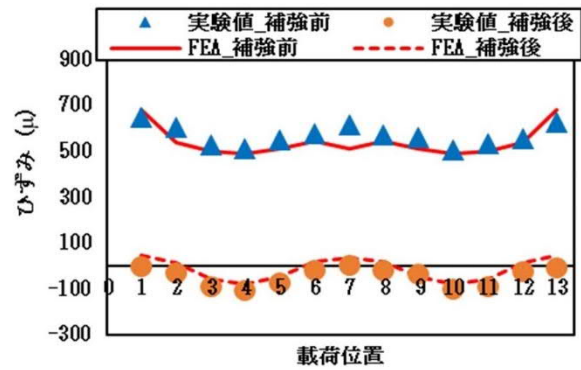


a)ゲージ位置 B

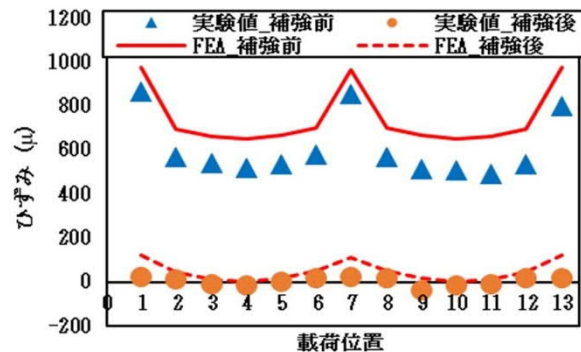


b)ゲージ位置 D

図-13 残留ひずみ補正後の定点繰返し载荷ひずみ



a)ゲージ位置 B



b)ゲージ位置 D

図-14 静的载荷試験と FEM 解析ひずみ比較

- 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, 2017.

(Received August 25, 2023)

## FILLING CONSTRUCTION TEST OF LIGHTWEIGHT RESIN MORTAR INTO THE U-RIB OF STEEL DECK BRIDGE ASSUMING SERVICE TRAFFIC CONDITIONS

Shinya AKAE, Kazuo OHGAKI, Manabu ISHIDA, Noriyuki SUZUKI  
and Ngoc Vinh PHAM

In the fatigue damage of the steel deck, cracks propagated from the U-rib weld. To prevent such damage, CFRP molding material placed between the U-ribs and lightweight resin mortar filled in the U-ribs were used as a reinforcement method from the underside of the steel deck slab bridge assuming a heavy traffic route. We are considering a reinforcement method.

In this study, regarding the filling of lightweight resin mortar into the U-ribs, the secondary injection of resin was performed while performing a fixed-point load equivalent to a heavy traffic load, assuming a service condition. From this test result, the effect of loading during the curing stage of epoxy resin was confirmed.