

論文

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

赤江信哉*, 石田学**, 大垣賀津雄***, PHAM NGOC VINH****, 藤田直博*****, 紫桃孝一郎*****

*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)

**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)

***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 番地)

****ものづくり大学特任講師 技能工芸学部建設学科(〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)

*****株式会社 ADEKA 研究開発本部 機能高分子開発研究所(〒346-0101 埼玉県久喜市菖蒲町昭和沼 20)

*****東日本高速道路株式会社関東支社 建設事業部(〒330-0854 埼玉県さいたま市大宮区桜木町 1-11-20)

鋼床版の疲労損傷の中で、U リブ溶接部から進展する疲労き裂は、鋼床版橋の機能低下に繋がるものであり、その対策が求められている。本研究では鋼床版 U リブ内への軽量樹脂モルタル充填を行い、鋼床版デッキプレート U リブ溶接部の局部応力低減工法を検討した。充填する軽量樹脂モルタルの配合設計や充填方法をパラメーターとし、鋼製箱供試体により充填性状の確認を行った。そして、実寸大 U リブ供試体を用いて定点載荷状態における軽量樹脂モルタルの充填，加えて樹脂の 2 次注入を行い，その効果を載荷実験と FEM 解析との比較で確認した。

キーワード：鋼床版，樹脂モルタル，補強，疲労

1. はじめに

鋼床版を有する橋梁において、鋼床版デッキプレート等の疲労き裂が多数発生している¹⁾。現在、疲労き裂対策として、鋼繊維補強コンクリート舗装の施工を標準的な対策工法として実施しているが、これらの施工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の抑制対策が求められている。

ところで近年、コンクリート充填鋼管の充填材料として、人工軽量骨材であるパーライトを粒度調整し特殊なエポキシ樹脂で硬化させた軽量樹脂モルタルの研究が行われている²⁾。この軽量樹脂モルタルは、特殊なエポキシ樹脂により良好な硬化特性を付与できることが報告されている。

そこで、鋼床版デッキプレートの U リブ溶接部における局部応力を低減し、この部分の疲労耐久性を向上させるために、車線の輪荷重位置を考慮して、車輛走行が多い位置の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技術および U

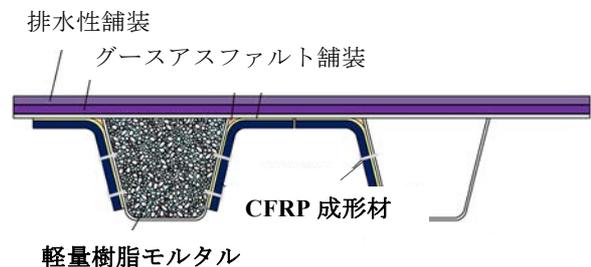


図-1 既設鋼床版の下面からの補強工法

リブ内部に軽量樹脂モルタルを充填する技術を組み合わせた新たな工法を検討している³⁾。

本研究では、U リブ内部に充填する軽量樹脂モルタルの基本配合設計を構築するため、配合や充填方法をパラメーターとし、硬化特性および充填性状の確認試験を行っている⁴⁾。その中から選定した配合の軽量樹脂モルタルを実寸大スケールの U リブを用いて、隙間を生じさせずに充填可能であるか充填性について確認を行っている。また、充填不十分な箇所が発生した場合、補修が可能であるか等を検討するために同様のエポキシ樹脂による 2 次注入試験を行い、その施工性や性能を確認している。最後に実寸大 U リブ供試体に軽量樹脂モルタル充填および樹脂 2 次注入を行い、定点載荷実験を行い補強効果の有無を FEM 解析との比較で確認している。

表-1 使用材料

材料	種類
結合材 (エポキシ樹脂)	主剤
	硬化剤Type-A
	硬化剤Type-B(遅延型)
骨材	軽量骨材Type-A (かさ密度: 0.2g/cm ³)
	軽量骨材Type-B (かさ密度: 0.6g/cm ³)
混和剤	消泡剤

表-2 試験水準

試験水準 No.	モルタル配合(g)						充填方法 ポンプ 循環
	主剤	硬化剤	硬化剤	軽量骨材	軽量骨材	消泡剤	
		Type-A	Type-B	Type-A	Type-B		
0	-	-	-	-	-	-	-
1	100	43	-	20	80	0.3	なし
2		-	39	20	80	1.2	なし
3		43	-	20	80	0.3	あり
4		-	39	20	80	0.3	あり
5		43	-	20	80	1.2	あり

2. 軽量樹脂モルタル配合設計

本研究における軽量樹脂モルタルは、以下の性能が必要であると考え、配合設計した。

- ①U リブ内を隙間なく充填できる充填性
- ②死荷重増加を最小限に留めるだけの軽量性
- ③補強効果を得るための硬化性状

2.1 実験概要

(1) 使用材料および実験水準

本実験に使用する材料を表-1 に示す。結合材にはエポキシ樹脂、骨材にはかさ密度の異なる 2 種類の人工軽量骨材、混和剤に消泡剤を使用し、モルタルの配合設計を行った。実験水準を表-2 に示す。水準 No.0 をモルタル充填なしの供試体とし、エポキシ樹脂の主剤の量と 2 種類の軽量骨材配合を固定して、水準 No.1~6 ではモルタルの配合設計(硬化剤の種類、消泡剤量)および充填方法(材料の密度が安定するまで圧送を行うポンプ循環の有無)をパラメーターとした。

(2) 実験方法

充填モルタルの硬化性状は、 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 供試体の密度、圧縮強度、ヤング係数について測定した。充填性状の確認は、鋼製箱への載荷試験で確認した。鋼製箱供試体は、材質 SM400、上鋼板厚 6mm、サイズ $320 \times 320 \times 320\text{mm}$ とし、下部に注入口($\phi 32\text{mm}$)、上部に排出口($\phi 20\text{mm}$)を設置した。軽量樹脂モルタルを充填し硬化した鋼製箱供試体を 25kN の荷重で載荷実験を行った。載荷実験状況について図-2、計測位置について図-3 に示す。供試体上面の 4 辺中央内側にひずみゲージ A~D を貼付けて、応力低減状況を確認した。

(3) 解析モデル

発生応力の低減効果を評価するため、FEM 解析を実施した。解析ソフトは DIANA を使用し、モルタル、鋼板、溶接部を 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、一般的な部分を約 10mm、上面鋼板は板厚を 4 層に分割した。



図-2 載荷実験状況

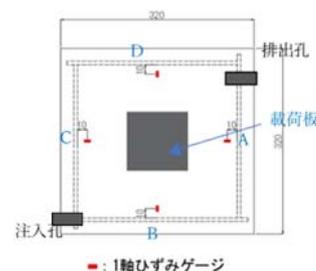


図-3 平面図ひずみゲージ貼付位置

2.2 実験結果

(1) 軽量樹脂モルタル硬化性状

軽量樹脂モルタルの硬化性状について、図-4 および 5 に示す。何れの水準も密度が $1 \sim 1.2\text{g/cm}^3$ と非常に軽いにもかかわらず、圧縮強度が 30N/mm^2 以上であり、且つヤング係数が $2 \sim 4\text{kN/mm}^2$ と非常に低いことがわかる。これは、軽量骨材によるモルタル重量の軽量化およびエポキシ樹脂によるモルタルの低弾性化によるものと考えられる。低弾性化により鋼床版 U リブ部の輪荷重による局部変形等に対する追従性が得られるものと想定している。また同図から、密度が増加するに従い、圧縮強度、ヤング係数ともに増加する傾向が確認できる。密度の増加は、消泡剤の増量(No.2, 5)やポンプ循環(No.3, 4)を行ったことが要因であり、これは人工軽量骨材の内部空隙へのエポキシ樹脂の浸透や、練混ぜによるモルタル内に存在するエアが取り除かれたためと考えられる。

(2) 載荷実験結果

載荷実験の結果を図-6 に示すとともに、FEM 解析結果との比較を行った。水準 No.0(充填なし)は FEM 解析と載荷実験結果が一致している。モルタル充填した水準 No.1 および No.3 は初期の載荷段階では充填なしの FEM 解析と一致しているが、途中から勾配が変化して充填後の FEM 解析の傾きに近くなっている。これは上面鋼板界面付近のモルタル最上部の微小なエアの介在などにより、載荷初期に充填による補強効果が不十分であることが考えられる。

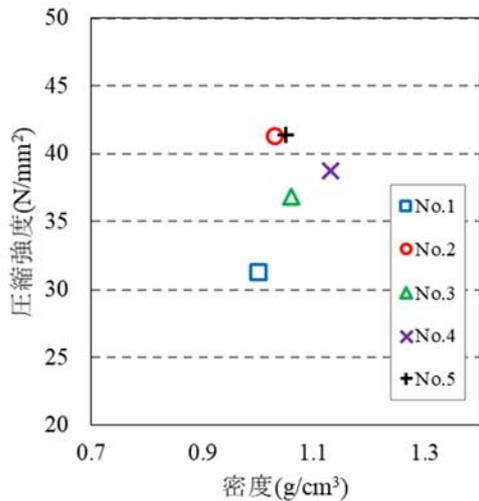


図-4 圧縮強度試験結果

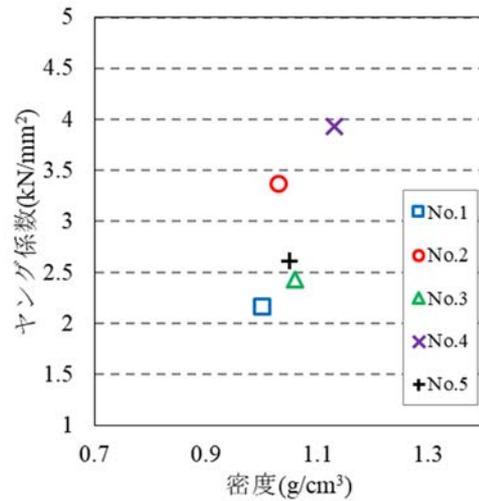


図-5 ヤング係数試験結果

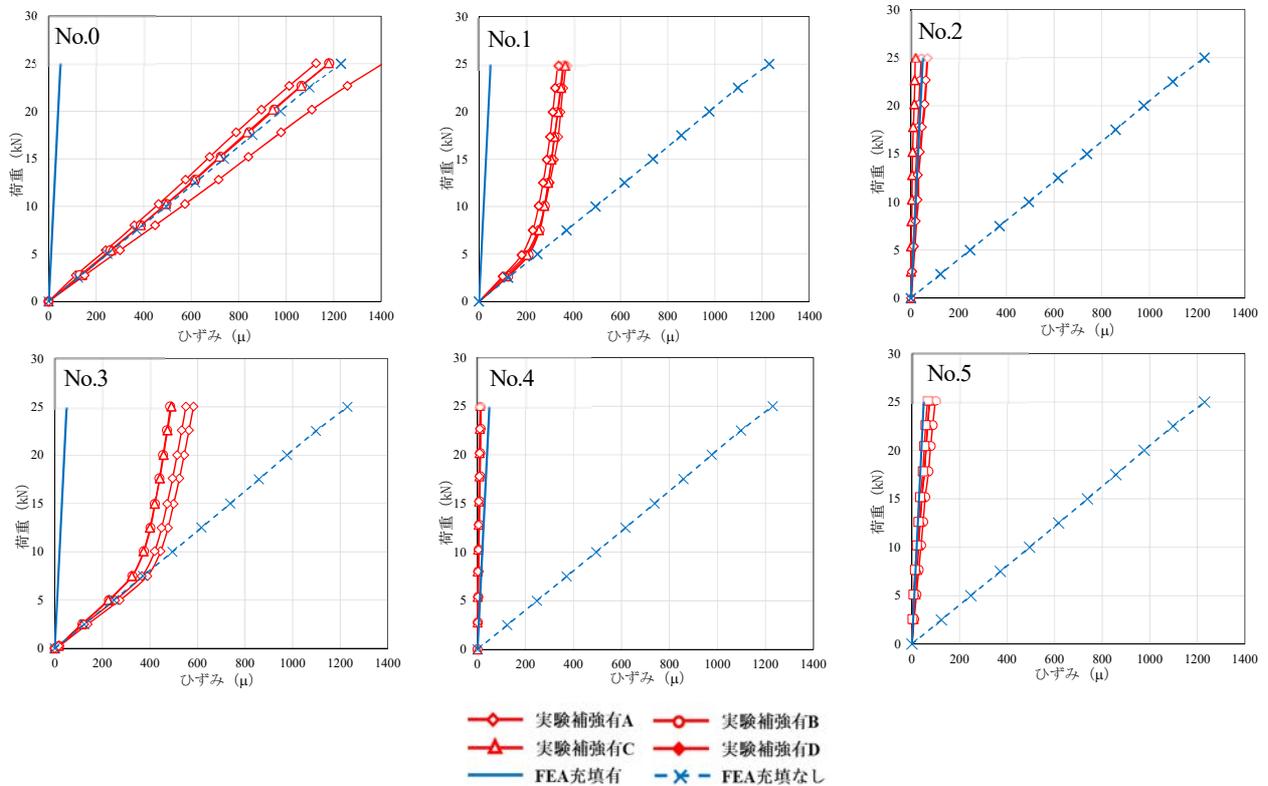


図-6 載荷実験結果

一方、水準No2, No.4およびNo.5ではFEM解析結果とほぼ一致し、充填効果が確認できた。また、図-7のように水準No.5供試体の上鋼板を取り除き、充填状況を確認したところ上面まで軽量樹脂モルタルが充填されることが確認できた。このことから消泡剤や充填方法(ポンプ循環)が充填効果の向上に影響を与えたと考えられる。

以上のことから、軽量樹脂モルタルの配合設計を検討した結果、消泡剤やポンプ循環は軽量樹脂モルタルの充填性に大きな影響を与えることがわかり、試験水準No.5(消泡剤1.2%とし、充填方法はポンプ循環あり)を基本と考えて施工することとした。

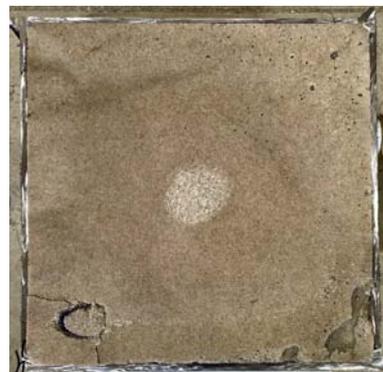


図-7 充填状況(水準No.5)

3. 実寸大Uリブへの軽量樹脂モルタルの適用性評価

3.1 可視化Uリブへの充填実験

(1) 実験概要

前章で検討した配合の軽量樹脂モルタルをポンプ循環させたうえで実寸大Uリブの充填性を確認するため、軸方向に長い6mのUリブを有する鋼床版模型において、デッキ部に透明なアクリル板を設置して可視化充填実験を行った。実験供試体は図-8に示す通りであり、Uリブのサイズは幅320×高さ240mm、材厚6mmである。軽量樹脂モルタルの充填孔はUリブ端部の下部に1箇所設け、排出孔はUリブ両端部の両側面上部およびUリブ中央部の両側面上部の計6箇所設けた。

軽量樹脂モルタルは、1バッチあたりの練混ぜ量を25L(ポンプ循環終了の密度で算定)とした。そして、ポンプ循環では3バッチ分の軽量樹脂モルタルをホッパーに投入し、圧送速度50L/分で2分間実施した。ポンプ循環工程やポンプ移し替え工程に伴う軽量樹脂モルタル供給遅れによって軽量樹脂モルタルが途切れないように、圧送速度を5L/分程度の低速としてUリブ内部に軽量樹脂モルタルを充填した。

軽量樹脂モルタルの充填において、デッキプレート下面に空隙などの充填不十分な箇所が生じた場合を想定し、軽量樹脂モルタルで使用したものと同様のエポキシ樹脂を低圧注入し、軽量樹脂モルタルとUリブの間隙を無くすことができるか確認した。注入作業は、軽量樹脂モルタル充填後7日間の養生を行い、軽量樹脂モルタルの強度が増進した段階で行うこととした。

エポキシ樹脂の注入は、低圧注入器具を適用した。Uリブ側面上端部への穿孔は、ドリルのビット径をφ5mmとし、Uリブ鋼板および樹脂モルタルを貫通させてデッキ下端まで斜め上方に穿孔を行った。穿孔位置は座金がデッキとUリブの溶接部に干渉しない位置を選定した。穿孔が完了したら、注入用座金の中心と穿孔位置を合わせてエポキシ樹脂で接着した。そして、ボンドシリンダーをUリブ端部の注入座金に取り付け、シリンダーのピストンを手で押して注入した。2次注入の状況が確認できるように、エポキシ樹脂をブルーに着色した。

(2) 実験結果

可視化Uリブに軽量樹脂モルタルを充填したところ、Uリブ内部でレベリングすることなく、ある程度傾斜を保ったまま6m出口側端部まで到達した。その間、充填孔側から徐々にデッキ(アクリル板)下面に軽量樹脂モルタルが到達していき、6m出口側端部にモルタルが接して10分経過した段階で全ての箇所のデッキ下面まで材料が到達した。アクリル板越しに確認した軽量樹脂モルタルの充填状況は、6m出口側端部付近の状態が相対的に良かったものの、全体的にエアだまりが生じることが分かった。充填状況の一例を図-9および10に示す(エアだまりは赤色部)。エアだまりが生じてしまった要因としては、排出孔が6箇所しか設置していなかったため、エアを外へ抜ききることができなかったことが要因の一つと考えられる。

Uリブ上面のエアだまりなど充填不十分となってしまった箇所についてエポキシ樹脂による2次注入を行ったところ、手で押して注入する作業を連続して行うことで問題なくUリブ上面全面に注入することができた。また、2次注入の作業自体は比較的容易なものであった。図-11に示すように、最後シリンダーに加圧ゴムを取り付けることで、注入孔からのエポキシ樹脂の漏れを防止した。図-12では2次注入試験状況を示している。



図-8 可視化Uリブ供試体



図-9 充填状況(出口側端部)

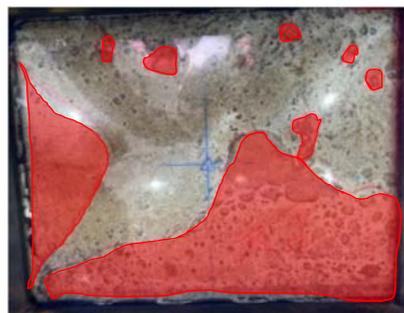


図-10 充填状況(中央付近)



図-11 低圧注入器具



図-12 2次注入状況

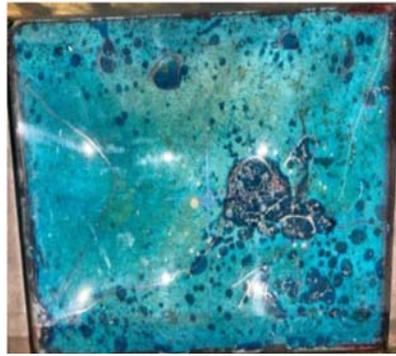


図-13 2次注入状況(硬化前)



図-14 2次注入状況(硬化後)

供試体中央付近の充填状況の一例を図-13 および 14 に示す。2次注入直後と1週間後の状況はほとんど差異がなく、アクリル板に密着した状態であった。このことから、Uリブ上面に空隙などの充填不十分な箇所を生じさせても補修することが可能であることがわかった。

3.2 荷重状態における施工実験

(1) 実験概要

実寸大 U リブ荷重実験状況を図-15 に示す。U リブのサイズが 320×240mm、材厚 6mm である長さ 7000mm の供試体を用いて繰り返し荷重を行いながら、モルタル充填を行った。厳しい供用状態を再現したような荷重荷重状態とするため、図-15 に示す通り、荷重点は支間長 6m の中央（横リブ交差部）とし、2 分毎に U リブ直上において接地面 200×200mm で 50kN の繰り返し荷重を行いながら、軽量樹脂モルタルの充填を行った。モルタルが硬化するまでの段階において、2 日間 2 分毎に 50kN の繰り返し荷重を行い、その後 12 時間おきに 50kN の荷重を行った。その間、荷重点近傍の U リブ溶接部デッキ上面のひずみを測定した。ひずみ計測位置を図-16 に示す。

前章より、エポキシ樹脂の 2 次注入がデッキプレート下面の空隙部の補修に有用であることが確認できたことにより、軽量樹脂モルタルの充填した供試体について荷重実験後に同様な 2 次注入を行った。この際の 2 次注入では実寸大 U リブ供試体を繰り返し荷重せずに注入を行った。

軽量樹脂モルタル充填後、およびエポキシ樹脂 2 次注入後の補強効果の軸方向分布を確認するため、図-17 に示す通り、500mm 間隔で計 13 箇所の荷重位置に対して、接地面 200×200mm で荷重荷重 50kN の荷重を行った。

(2) 実験結果

荷重実験による応力低減効果を確認するため、FEM 解析を実施した。解析ソフトは DIANA を使用し、縦桁、下フランジ、横リブを 8 節点曲げシェル要素とし、エポキシ樹脂、モルタル、U リブ、デッキプレート、溶接部

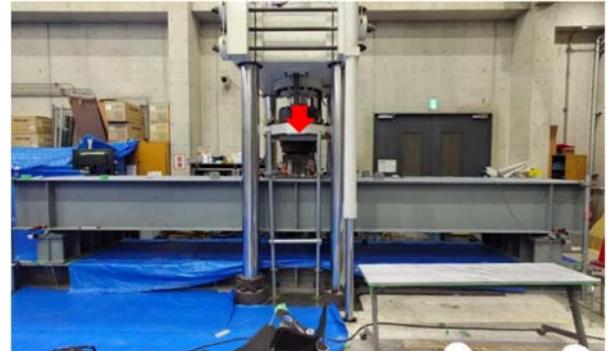


図-15 実寸大 U リブ荷重実験

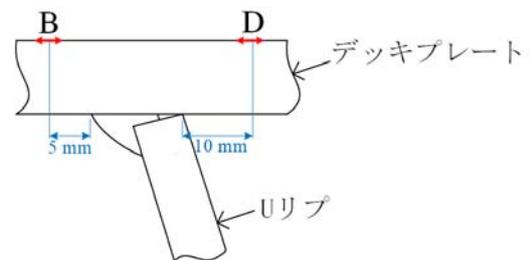


図-16 ひずみ計測位置

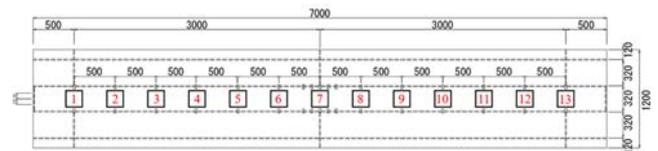
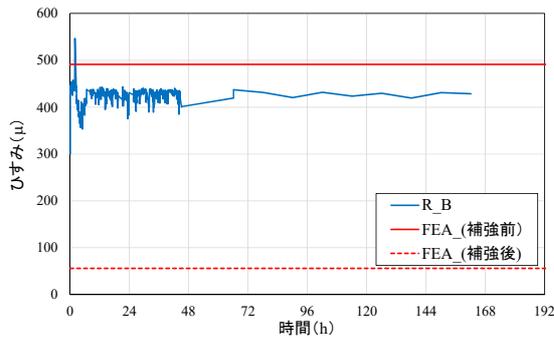


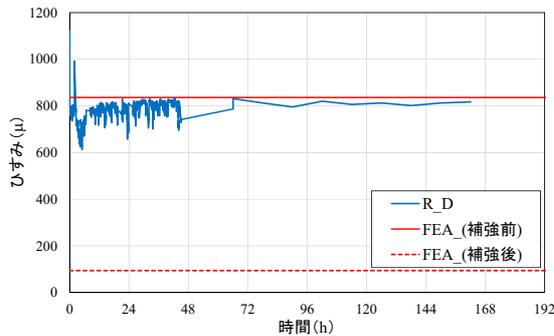
図-17 荷重荷重位置

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 20mm、溶接部を 0.25mm とした。

軽量樹脂モルタル充填施工開始からの計測位置 B,D における実験結果を図-18 に示す。同図の縦軸に 50kN 荷重時の各計測位置のひずみを、横軸に充填施工時の経過時間をプロットしたものである。同図中の赤の実線は補強前の FEM 解析値を、赤の破線は補強後の FEM 解析値を示している。同図より、施工初期において過荷重による一時的なひずみの増大を招いてしまったものの、その後は設定通りの繰り返し荷重を行っており、充填後のひずみは充填前のひずみ解析値に近く、1 週間後もひず



(a)計測位置 B



(b)計測位置 D

図-18 充填施工時の繰返し載荷実験結果

みの減少が見られなかったことから、補強効果は十分発揮されていないことがわかった。これはデッキプレート下面に空隙があり、繰返し載荷によってその空隙が軸方向に広がったことが考えられる。

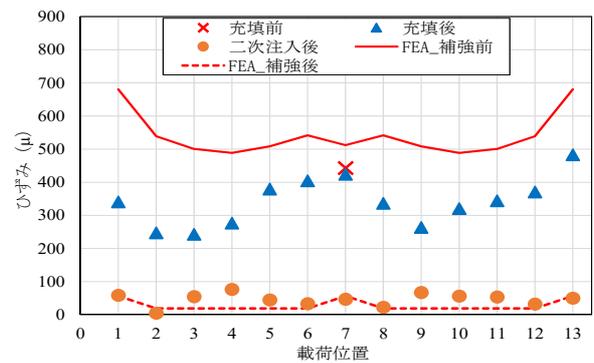
エポキシ樹脂 2 次注入後の実寸大 U リブ供試体について、13 箇所の載荷位置近傍の図-16 に示した計測位置 B,D のひずみ計測結果と FEM 解析結果を図-19 に示す。

軽量樹脂モルタル充填後の載荷実験による補強効果の軸方向分布は、何れの測定箇所でも充填前後の解析値の間にあり補強効果が十分であるとはいえない。一方、2 次注入を行うことで 13 箇所全ての測定箇所でのひずみが大幅に減少し、モルタル充填されている状態の解析値に近づいており、補強効果が現れていることがわかった。

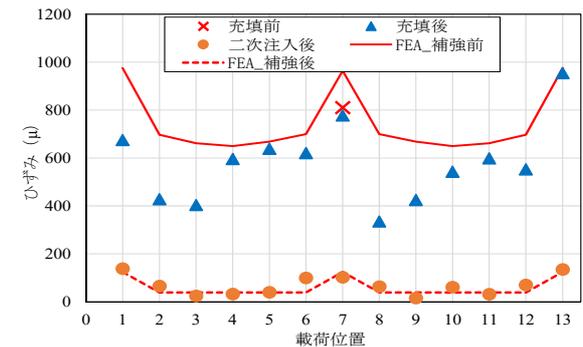
4. まとめ

本実験より、以下のことが分かった。

- (1) 軽量樹脂モルタルの配合設計において、消泡剤および充填方法（ポンプ循環）の工夫で、軽量樹脂モルタル内に存在するエアが取り除かれ密度、圧縮強度およびヤング係数が増加することを確認した。また、消泡剤量の最適化およびポンプ循環が軽量樹脂モルタルの充填性に影響を与えていることがわかった。
- (2) 実寸大 U リブにおいて軽量樹脂モルタルを充填した際、わずかな空隙が生じてしまう恐れがあるものの、エポキシ樹脂の 2 次注入を行うことで空隙部分を確実になくすことが可能であることがわかった。
- (3) 軽量樹脂モルタルによる鋼床版橋の補強工法はエポ



(a)計測位置 B



(b)計測位置 D

図-19 施工後の載荷実験による補強効果軸方向分布

キシ樹脂の 2 次注入と組み合わせることで確実な補強効果が得られることがわかった。

今後の課題として、以下が挙げられる。

- ・繰返し載荷を行いながら、2 次注入施工を実施しても、補強効果が得られるかどうかの確認
- ・樹脂モルタルを充填し樹脂の 2 次注入後に、定点荷重載荷を行っても粉砕化等の劣化が生じないことの確認
- ・U リブ内に軽量樹脂モルタルを充填し、U リブ間に CFRP 成形材を接着した併用状態での移動輪荷重走行試験による耐久性の確認

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) 渡邊，増淵，大垣，PHAM，紫桃，石田，赤江，秀熊，櫻井：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，第 77 回年次学術講演会，2022.9 掲載予定
- 3) 赤江，石田，大垣：各種充填材料を用いた CFT の中心圧縮強度特性に関する実験研究，第 75 回年次学術講演会，2020.9
- 4) 赤江，石田，藤田，石川，大垣，PHAM，落合，紫桃：軽量樹脂モルタルによる鋼製箱への充填性に関する実験的研究，第 77 回年次学術講演会，2022.9 掲載予定
(2022 年 7 月 8 日受付)
(2022 年 9 月 9 日受理)