

論文

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

渡邊健也*, 大垣賀津雄**, PHAM NGOC VINH***, 秀熊佑哉****, 石田学*****, 紫桃孝一郎*****

*ものづくり大学大学院, ものづくり学研究科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)

**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 番地)

***工博, 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)

****工修, 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社, コンポジット事業部 (〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1)

*****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)

*****東日本高速道路株式会社, 関東支社建設事業部 (〒330-0854 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 リブ溶接部を起点とするき裂の進展が発生している. このような疲労損傷の対策は SFRC 舗装工法など種々講じられている. 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. 本補強工法を適用する前後の静的載荷実験および FEM 解析により, その補強効果の確認を行った.
キーワード: 鋼床版, CFRP, 樹脂モルタル, 補強

1. はじめに

近年, 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¹⁾. 鋼床版の疲労損傷の中で, U リブ溶接部に発生するき裂を放置すると, 進展して道路としての機能低下につながる²⁾. 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必要がある. 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, 重交通区間が多く, 交通規制を要する鋼床版上面からの対策は社会的影響が大きい. また下面からの工法としては, TIG 溶接+当て板工法が行われているが, 補修を前提としたものであり応力改善を目的とした予防保全対策として十分ではない.

そこで本研究対象としている工法は, 図-1 に示す通り, U リブ外面側はデッキプレートと U リブ溶接部を含むコーナー部に CFRP 成形材を接着する工法, および U リブ内部に軽量樹脂モルタルを充填する工法の 2 つの技術を組み合わせることにより, 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工法である. なお, U リブ内部は軽量樹脂モルタル充填後, デッキプレートと密着させるためエポキシ樹脂 2 次注入を行っている. 本補強工法は, 車線を考慮して輪荷重のかかる位置のみ, 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.

本研究では, 鋼床版下面からの補強工法に関して, 補強前後の静的載荷実験および FEM 解析により応力改善効果の有効性について検証を行った.

2. 実験方法

2.1 実験供試体

製作した鋼床版実験供試体の概略図を図-2 に示す. 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 リブと横リブ交差部については, デッキプレート下面にはスカラップを, U リ

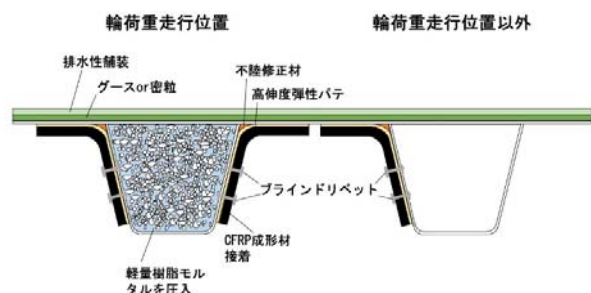


図-1 鋼床版下面からの補強工法

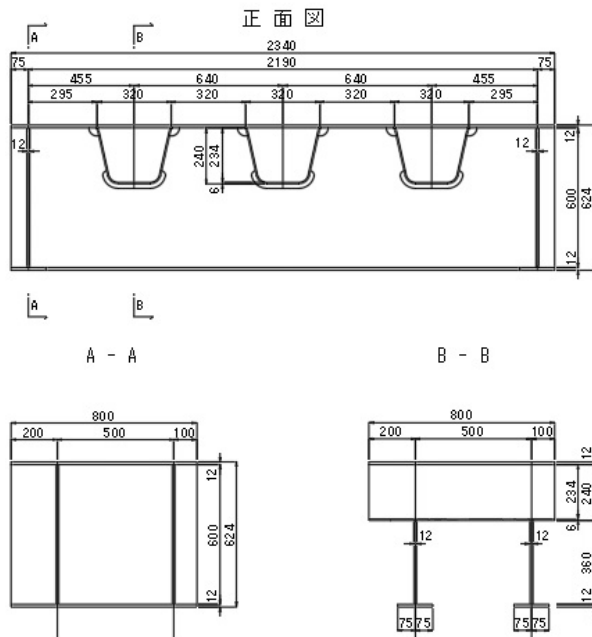


図-2 供試体の寸法形状

ブ下側にはスリットを設けた。またUリブ溶接部の溶込み量は、実橋のデータを参考に40%溶込みとしている。

2.2 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。比重約1.1、圧縮強度約30N/mm²である。

図-3 に軽量樹脂モルタル施工フローを示す。軽量樹脂モルタル施工工程は、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り混ぜ、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 に示すダイヤフラム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、比重が練り混ぜ後の0.9から1.1に変化して安定する。圧入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。注入開始後、ダイヤフラムに設けた上端の4つのエア抜き孔から、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、実験時の注入孔φ44、エア抜口φ28である。

軽量樹脂モルタル硬化後、鋼床版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次注入を実施する。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具(ボンドシリンダー)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250mm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、その孔に新たにボンドシリンダーを取付ける(図-6 参照)。

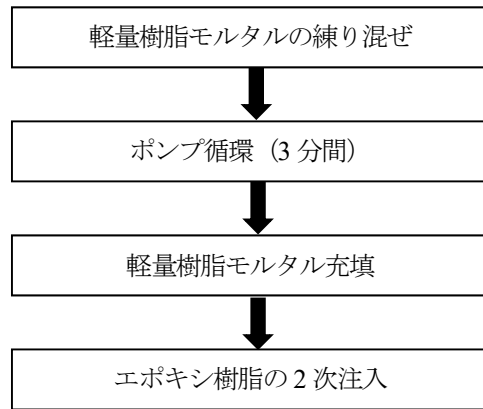


図-3 軽量樹脂モルタル施工フロー

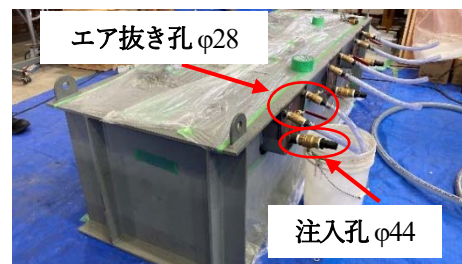


図-4 実験供試体

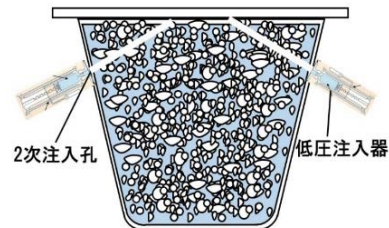


図-5 2次注入施工法

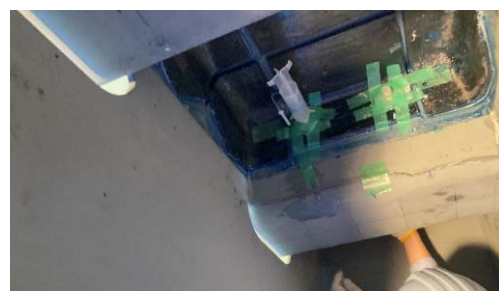


図-6 2次注入施工状況

表-1 軽量樹脂モルタルの材料特性

項目	養生期間	値
引き抜きフロー(mm)	-	185
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

2.3 CFRP 成形材施工

CFRP 補強工法は、近年土木構造物への適用が増加している CFRP 成形材は、高弾性炭素繊維シートを積層して成形した CFRP 部材であり比重 2.0 と軽量で、腐食しない特性を有しており、鋼構造物へ容易に接着できるため、鋼床版に溶接熱、ボルト孔等による影響を与えず、特殊技能を必要としない工法である。

図-7 に CFRP 成形材の接着状況、表-1 に FRP 成形材に使用した材料の諸元、表-2 に CFRP 成形材の積層構成および設計値を示す。将来のコストダウンを想定して引抜き成形方法を用いており、引抜き方向と直角方向の炭素繊維を多く配置しているため、製作が困難な面があり、繊維シートの形状や厚さなどの検討を行っている。また、CFRP 成形材の補強量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よう、積層内部にガラス繊維を配置し炭素繊維で挟んだハイブリッド積層構造としており、FEM 解析にて曲げ剛性等の性能が確保できることを確認している³⁾。

図-8 に CFRP 成形材の施工フロー、図-9 に CFRP 成形材施工状況を示す。CFRP 成形材の施工は、始めに供試体 CFRP 接着部にケレンを行い、U リブの溶接部は、エポキシ樹脂不陸修正材により R 仕上げを行う。デッキ裏面には、鋼材素地を出して高伸度弾性パテ材を塗布することで、局所変形部の接着性と変形への追従性を確保している。その後、鋼床版と CFRP の両面にエポキシ樹脂を塗り接着を行う。最後に、U リブと CFRP 成形材をブラインドリベットで固定することにより、脱落に対してフェールセーフな構造としている。

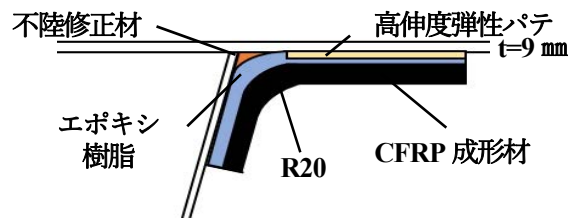


図-7 CFRP 成形材接着状況

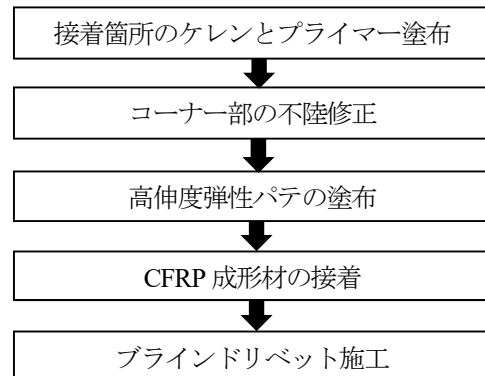


図-8 CFRP 成形材施工フロー

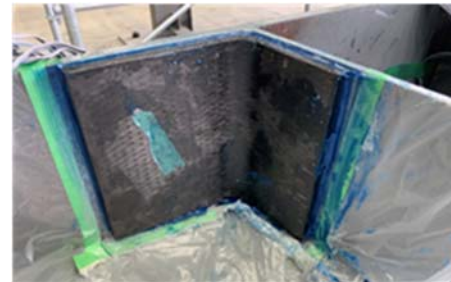


図-9 CFRP 成形材施工状況

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 _{fL} (MPa)	繊維直交方向の弾性係数 E _{fT} (MPa)	繊維のせん断弾性係数 G _{fLT} (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 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: コバレット		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	2.14×105	2.14×105
		0 (橋軸方向) 2層				
5-13	ガラス繊維 (660)	90 4層	65.0	0.390×9層	3.06×104	2.64×104
		0 5層				
14-21	炭素繊維 (660)	0 4層	65.0	0.483×8層	2.14×105	2.14×105
		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	1.45×105	1.44×105

2.4 静的載荷実験

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、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。従って実験での載荷位置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 つのパラメータで位置を変え載荷を行った。図-10 に載荷位置およびゲージ位置を示す。

載荷荷重は、道路橋示方書⁴⁾の T 荷重を参考に、250kN を想定した大型車の後輪輪重 50kN をシングルタイヤ 200×200mm の実態を考慮した載荷を行い、補強前後でひずみを計測した。載荷位置およびゲージ位置は同図に示す通りである。載荷状況を図-11 に示す。

3. FEM 解析と実験結果

3.1 FEM 解析

本補強対策工法による発生応力の低減を評価することを目的として FEM 解析を実施した。特に、デッキ進展き裂およびビード進展き裂の起点と推定されるデッキと U リブ溶接ルート部に着目した。

解析モデル化の概要は表-4 に、解析モデルおよびルート部の詳細は図-12 に示す。

解析は汎用 FEM 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/mm²、ポアソン比は $\nu=0.3$ とし、分布荷重(50kN/(200x200)=1.25N/mm²)で解析を実施した。

3.2 実験値と解析結果

図-13~16 に実験値および解析値による補強前後のひずみを示す。ここでは各種載荷時のひずみの挙動を比較・考察する。

図-13 の載荷位置 1(U リブ直上-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(536 μ , 946 μ)、補強後 A, B(20 μ , 65 μ)であり、それぞれ 96%、93%とひずみが減少している。また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。

図-14 の載荷位置 2(U リブ直上の一般部)においてひずみの実験値は、補強前 A, B(566 μ , 823 μ)、補強後 A, B(75 μ , 54 μ)であり、それぞれ 87%、93%とひずみが減少している。また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。載荷位置 1, 2 の結果から、U

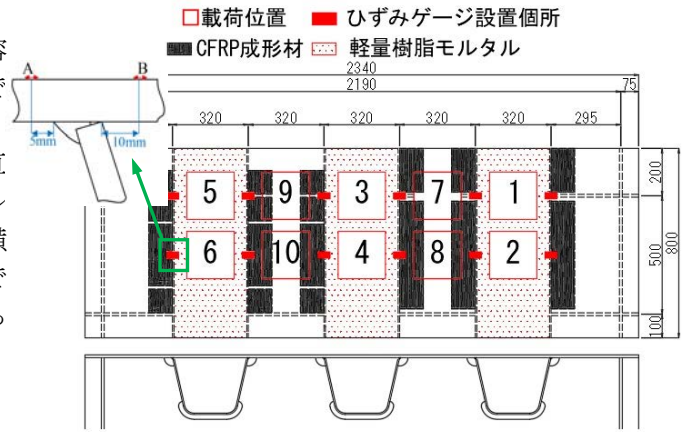


図-10 供試体載荷位置,ゲージ位置



図-11 載荷状況

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 0.25mm とした)
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			
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% 溶け込みとした。

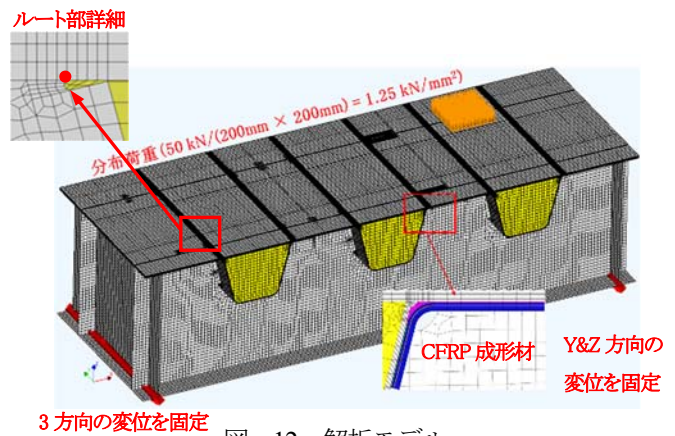


図-12 解析モデル

リブへの軽量樹脂モルタル充填補強が、各位置荷重時における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-15 の荷重位置 7(Uリブ間の横リブ交差部)においてひずみの実験値は、補強前 A,B(18 μ ,31 μ)、補強後 A,B(2 μ ,18 μ)であり、鋼床版の構造上、溶接部にかかる応力が極めて小さい位置であるが、ひずみの減少が見られた。

図-16 の荷重位置 8(Uリブ間の一般部)においてひずみの実験値は、補強前 A,B(700 μ ,517 μ)、補強後 A,B(283 μ ,301 μ)であり、それぞれ60%、42%ひずみが減少している。また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。

荷重位置 7,8 の結果から、CFRP 成形材接着補強が、各位置荷重時における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。また各種荷重位置における実験値と解析値のひずみが一致していることから、FEM 解析における解析モデルの妥当性が伺える。

図-17,18 に各種荷重位置におけるひずみ減少率の実験結果を示す。グラフの荷重位置 1~6 は、軽量樹脂モルタルの充填により補強効果の得られる荷重位置であり、ひずみの減少率は概ね90%以上であり高い補強効果があることがわかった。また荷重位置 7~10 は、CFRP 成形材の接着により補強効果の得られる荷重位置である。荷重位置 7,9 は鋼床版の構造上、溶接部にかかる応力が極めて小さい位置である。荷重位置 8,10 のひずみ減少率は、荷重位置 8 で A,B(60%,42%)、荷重位置 10 で A,B(46%,52%)と十分な補強効果があることがわかった。これらの結果により、各位置で40%~90%のひずみの減少が見られ、本補強対策工の有効性が高いと考えられる。

3.3 溶接ルート部の応力分布

図-19 にデッキ進展き裂およびビード進展き裂起点位置のミーゼス応力分布の解析結果を示す。グラフの赤丸印はデッキ進展き裂におけるミーゼス応力評価位置であり、青丸印はビード進展き裂におけるミーゼス応力評価位置である。

図-19a)より、本補強対策工によりUリブ直上荷重時にルート部のミーゼス応力が87%低下し、ビード進展き裂の起点位置のミーゼス応力が81%低下した。また、図-19b)よりUリブ間荷重時にルート部のミーゼス応力が66%低下しており、ビード進展き裂起点位置のミーゼス応力が69%減少した。以上のことから、本補強対策工に、十分な補強効果があることを確認できた。

4. まとめ

鋼床版の下面からの軽量樹脂モルタルとCFRP成形材による補強工法について、実験及び解析により鋼床版疲労き裂に対する補強対策としての効果を確認した。

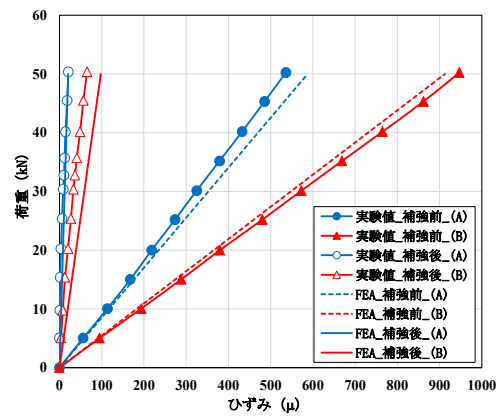


図-13 荷重位置 1

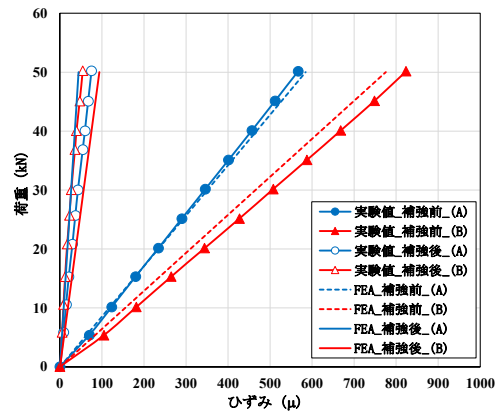


図-14 荷重位置 2

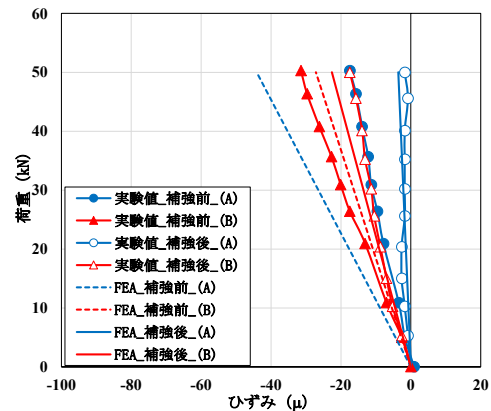


図-15 荷重位置 7

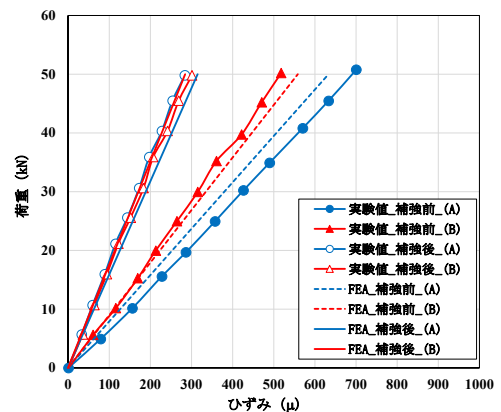


図-16 荷重位置 8

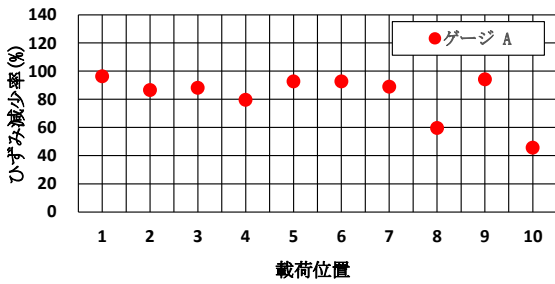


図-17 各種荷位置のひずみ減少率(ゲージ A)

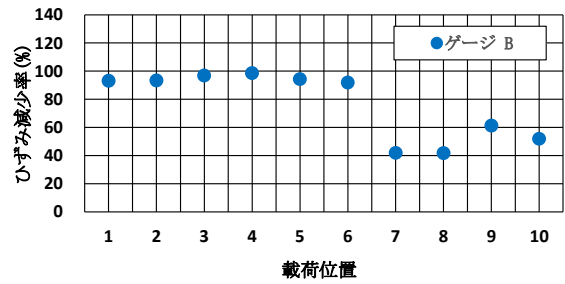
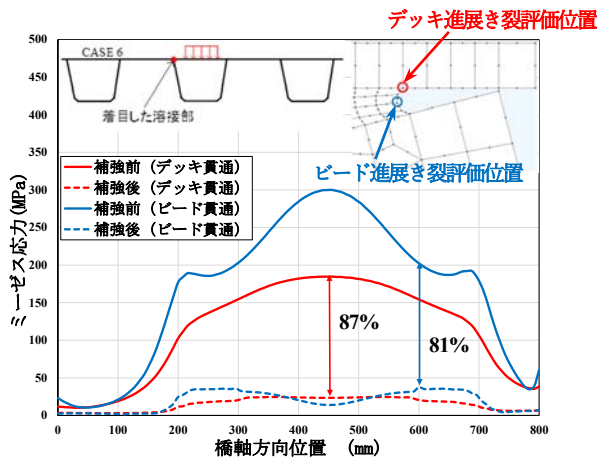
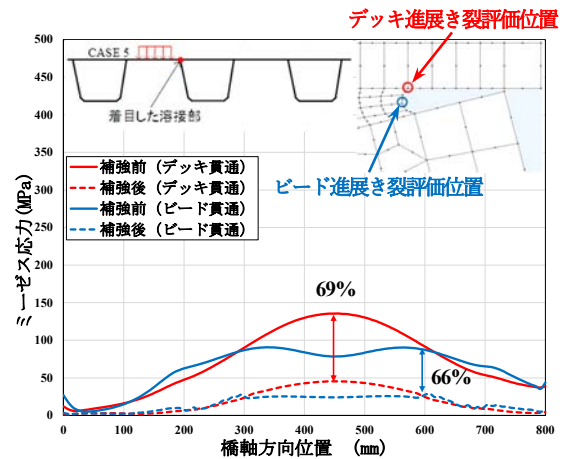


図-18 各種荷時のひずみ減少率(ゲージ B)



a)U リブ直上荷



b)U リブ間荷

図-19 ルート部の発生応力解析結果

本対策工鋼床版に本補強対策工をすることにより、Uリブ溶接ルート部の応力が低減されることがわかった。またこれは、Uリブ直上荷で約80%、Uリブ間荷で約65%以上であり、現在標準的な工法として使用されているSFRC舗装と同程度の補強効果があることがわかった。従って本補強工法は、疲労き裂の発生や進展の抑制効果が期待できる。

今後の課題は以下のとおりである

- (1) 樹脂モルタルの充填施工の際、デッキ下面に隙間があると補強効果が著しく低下するため、非破壊検査による施工精度の確認方法を確立する。
- (2) 鋼床版上舗装打換え時において、グースアスファルト施工時の熱は200°Cと高温なため、補強対策工への熱影響の確認を検討する予定である。
- (3) 移動輪荷重走行試験を行い、疲労破壊が進行しないことを確認する。

謝辞

本研究の実施に際して、ものづくり大学橋梁・構造研究室の増渕悠希さん他、協力いただいた皆様に心より感謝いたします。

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) 日名誠太，平野秀一：首都高速道路における鋼床版の疲労損傷と対策，橋梁と基礎，2020.8
- 3) 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，第12回道路橋床版シンポジウム，2022.10 [掲載予定]
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017.11
- 5) 渡邊健也，大垣賀津雄，PHAMNGOC VINH，増渕悠希，紫桃孝一郎，石田学，赤江信哉，秀熊佑哉，櫻井俊太：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77回年次学術講演会，2022.9 [掲載予定]
- 6) 平山繁幸，村野益巳，村越潤，窪田光作，高橋晃浩，入江健夫：既設鋼床版橋梁におけるデッキ貫通型き裂の進展に関する検討，構造工学論文集 Vol.64A，2018.3

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)