

(17) 鋼床版Uリブ間を補強したCFRP成形材 接着部の振動疲労実験

櫻井 俊太¹・大垣 賀津雄²・秀熊 佑哉³
鈴木 永之⁴・PHAM NGOC VINH⁵・安田 翼⁶

¹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: sakurai.sh.msu@nscm.nipponsteel.com

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 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

⁵非会員 The University of Danang-University of Science and Technology, Vietnam, Faculty of Civil Engineering

Email: pnvinh@dut.udn.vn

⁶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

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に、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法を検討している。本研究は、下面からCFRP成形材を接着することにより補強した際に、どの程度の繰返し载荷によって接着部のはく離が発生するかを調査するため、Uリブ溶接部にCFRP成形材を接着して補強した部分模型試験体を用いて、振動疲労試験による長期接着特性を明らかにした。CFRP成形材の間のはく離防止を目的としたポリウレアパテ材の塗布範囲の最適化およびグースアスファルト打設時のポリウレアパテへの熱影響の検討を行った。

Key Words : steel deck, U-rivs, CFRP molding materials, reinforcement, adhesion, vibration fatigue test

1. はじめに

近年、重交通路線を中心に鋼床版の疲労き裂の発生が報告されている¹⁾。疲労き裂の予防保全や補強を目的に鋼繊維補強コンクリート (SFRC) による上面からの対策工法が行われている。しかし、路面の交通規制が必要なことから、重交通路線においては施工が困難な場合がある。

一方、炭素繊維強化ポリマー (以下、CFRPと記す) は鋼材に比べて軽量で同等以上の弾性係数を有する材料であり、腐食しないという特徴を有する。また、CFRP接着工法は鋼材にボルト孔を設ける必要がないこと、施工において大掛かりな機材を必要としないことから、近年、鋼構造物の補修・補強材料として注目されている。そこで著者らは、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³⁾。本工法において、鋼床版のUリブ溶接部周辺を下面からCFRP成形材を接着することにより補強した際に、どの程度の繰返し载荷によって接着部のはく離が発生するかの検討に関して、未解決な部分がある。以上を踏まえ、本研究では、Uリブ溶接部にCFRP成形材を接着して補強した部分模型試験体に対して、振動疲労試験⁴⁾、⁵⁾、⁶⁾による長期接着特性を明らかにした。

本研究では、CFRP成形材の貼付けに関して、鋼材とCFRP成形材の間のはく離防止を目的としたポリウレアパテ材 (以下、パテ材と記す) の塗布範囲の最適化およびグースアスファルト打設時のパテ材への熱影響の検討を行った。

2. 試験概要

(1) 試験供試体

CFRP成形材の補強断面を図-1に示す。試験体の寸法やひずみゲージ計測位置を図-2に示す。試験供試体は、輪荷重によってデッキプレート、Uリブに板曲げの応力が作用する場合をモデル化した供試体とした。実橋と同

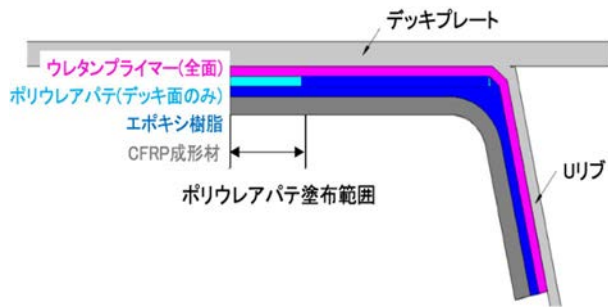


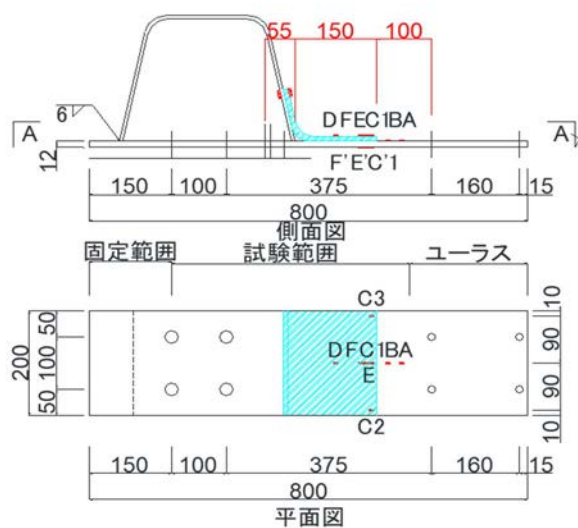
図-1 試験供試体と疲労はく離の着目点

様にデッキ厚は12mm、Uリブのサイズは320×240×6mm、材質SM400とした。デッキプレートUリブ溶接部をCFRP成形材で補強した。

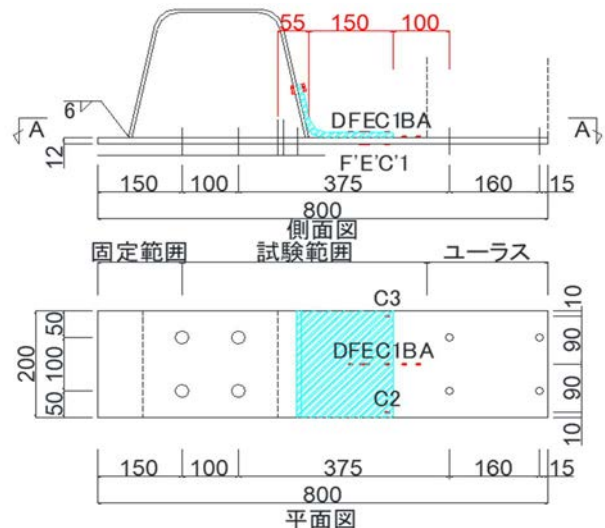
はく離の着目点は最も接着界面に応力が生じるデッキ側端部⁹⁾のみとし着目点に生じる最大、最小応力度をFEM解析により求め、その応力範囲で振動疲労実験を実施した。CFRP成形材の端部もしくはパテ材の境界面でCFRP成形材のはく離が発生したか確認するため、当該箇所付近のCFRP成形材表面にひずみゲージを貼付けた。

(2) 振動疲労試験方法

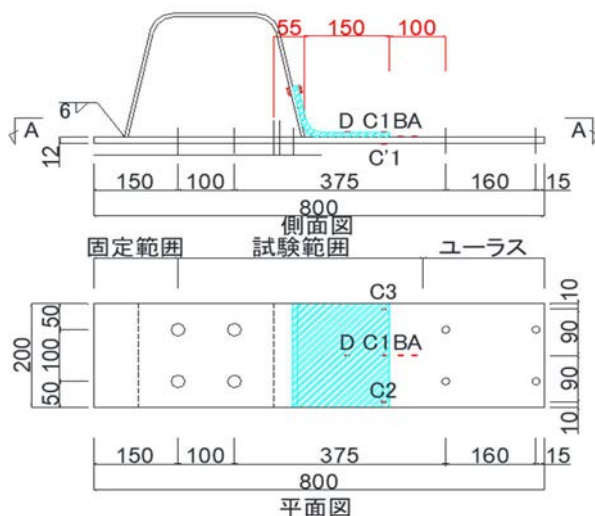
図-3に加振機を用いた振動疲労試験状況を示す。試験体のUリブ部等を固定して片持ち状態とし、加振機にて振動を与える。その際に、偏心錘を回転させ加振力を与えており、逆L字型の治具と試験体の間にコイル状の調整バネを取り付け、その調整バネで上方か下方に押しこ



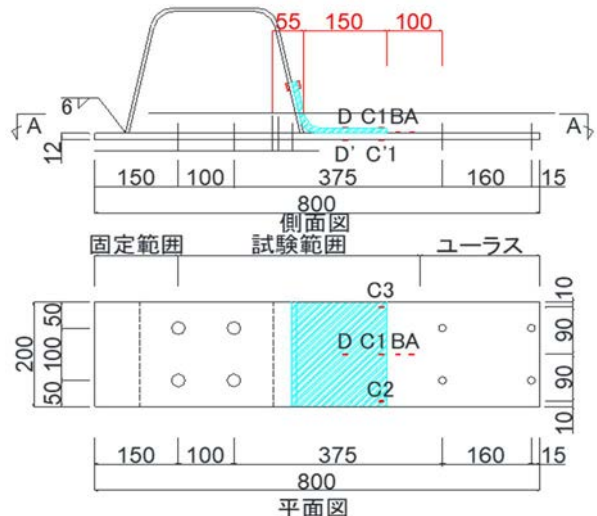
(a) No.2, No.3 25mm供試体



(b) No.4, No.5 50mm供試体



(c) No.6, No.7 75mm供試体



(d) No.8, No.9 150mm供試体

図-2 試験供試体とゲージ位置着目点（赤線がひずみゲージ）

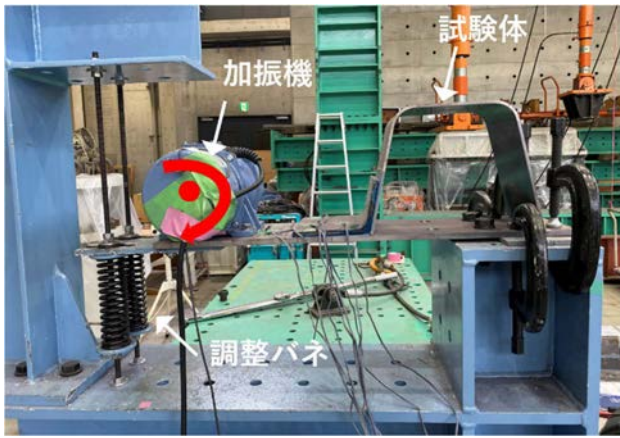


図-3 振動疲労試験装置



図-4 熱履歴試験の状況

とで試験体に静的な曲げ（予荷重）を与えて、片振り疲労試験を行うことが可能となる。本試験では、200万回を目標に片振りで試験を実施した⁴⁾。振動疲労試験における試験体パラメータを表-1に示す。また、パテ材の施工範囲が広いほど補強効果が減少すると考えられるので、本実験では表-1に示す通りパテ材の範囲を0～150mm間の5パターンにグースアスファルト舗装を想定した125°Cの熱履歴の有無を加えたパラメータとした。

(3) ひずみ調整方法

試験に際しては、試験体に貼付けたひずみゲージにより、発生するひずみを動的に観測し、調整バネにより発生ひずみをFEM解析から得られた目標値に近づけて試験を行った。着目点位置はCFRP成形材接着部の境界であるため、直接ひずみゲージを貼付けして発生するひずみや応力度を知ることができない。そこで後述する鋼床版モデルにおけるFEM解析から得られた応力分布をもとに、着目点付近で概ね直線分布のひずみが生じることから、ひずみゲージで計測可能な着目点近傍の2点の値より、着目点のひずみが目標値となることを確認して振動疲労試験を行い、試験終了まで継続的に動的なひずみを計測し、ひずみの変化を記録した。

表-1 供試体パラメータ

供試体 No.	パテ材の施工範囲 (mm)	熱履歴の有無	最小応力 δ_{min}	最大応力 δ_{max}
1	0 (デッキ無し)	-	-40	127
2	25	-	-30	106
3		○		
4	50	-	-28	110
5		○		
6	75	-	-27	118
7		○		
8	150 (デッキ側全長)	-	-27	132
9		○		

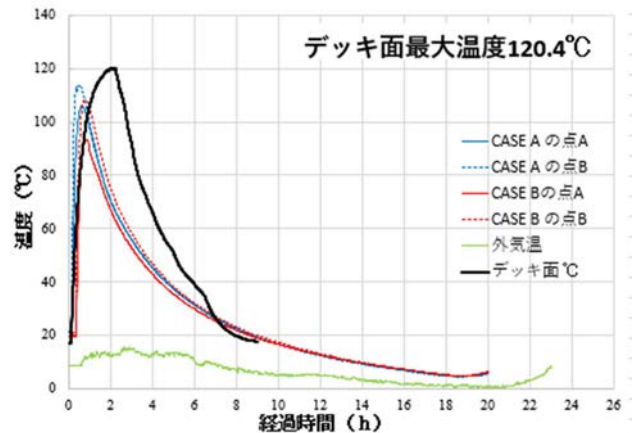


図-5 熱履歴の試験結果

(4) 熱履歴試験方法

供試体は図-4に示すような鋼板の片面にCFRP成形材を接着した試験体とし、CFRP成形材接着面のデッキ下面温度をグースアスファルト施工時に発生する温度と同様の約120°Cまで加熱した。温度履歴はグースアスファルト施工時のデッキ下面の温度履歴を模倣した形とし、120°Cまで加熱後、電熱ヒーターを徐々に遠ざけていき2時間後に60°C、4時間後に30°Cになるように冷却を行った。熱履歴計測結果を図-5に示す。

(5) 炭素繊維(CFRP)成形材

CFRP成形材の積層構成は、FEMによる検討から、橋軸直交方向（90度方向）だけでなく、橋軸方向（0度方向）にも剛性がある方が補強効果を得られるため90度方向と0度方向に積層したCFRP成形材とした。また、積層中央にガラス繊維を、表面付近に炭素繊維を積層し、引抜成形により製作した。CFRP成形材に使用した材料特性を表-2に、CFRP成形材の積層構成および設計値を表-3に示す。CFRP成形材の繊維長手（90度）方向の弾性係数は 1.63×10^5 MPaであり、設計厚さは9.314mmとして成形した。ここで、図-6にCFRP成形材を示す。

表-2 CFRP成形材に使用した材料の緒元

強化繊維種類	繊維方向の弾性係数 E_{LT} (N/mm ²)	繊維直交方向の弾性係数 E_{TT} (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/mm ³)	設計厚さ (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 (N/mm ²)	樹脂のせん断弾性係数 G_m (N/mm ²)	密度 (g/mm ³)		
主剤：CBZ，硬化剤：MEK パーオキサイド 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 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

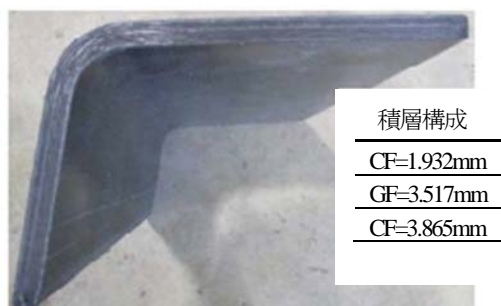


図-6 CFRP成形材

(6) 樹脂接着剤

接着接合に用いた樹脂接着剤は、2液混合型のエポキシ樹脂接着剤である。使用したエポキシ樹脂およびパテ材の材料特性値を表-4に示す。また本研究では、CFRP成形材の疲労はく離に対して、接着剤塗布面である鋼材およびCFRP成形材表面をサンドペーパーで粗く仕上げ、接着面の油分をアセトン溶剤で除去したあとプライマーを塗布した。その後、必要箇所にパテ材を塗布し、耐熱型エポキシ樹脂接着剤を使用し、CFRP成形材を鋼材に接着して試験体を作製した。

表-4 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
パテ材	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

3. 解析概要

(1) FEM解析

本解析では、載荷位置をパラメータとしたFEM解析検討を実施することにより、デッキプレートとUリブにおける着目点の発生応力を評価した。

図-7に解析モデルを、表-5に材料モデル一覧を示す。本解析は汎用非線形FEMソフトであるDIANAを使用し、同図に示す通り、下フランジ、横リブ、補剛材を8節点シェル要素で、Uリブ、デッキプレート、Uリブ溶接部、CFRP成形材、エポキシ樹脂とパテ材を20節点ソリッド要素でモデル化した。ここで、CFRP成形材の構成は、外側に2.51mm、内側に5.56mmの炭素繊維層（橋軸直角方向の弾性係数 1.63×10^5 N/mm²）があり、その間にガラス繊維層（橋軸直角方向の弾性係数 0.205×10^5 N/mm²）の

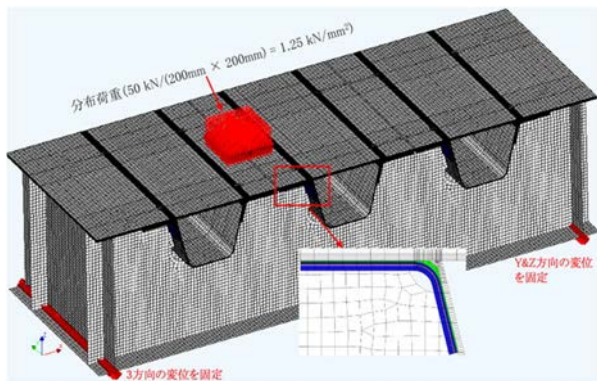


図-7 CFRP成形材による補強鋼床版解析モデル

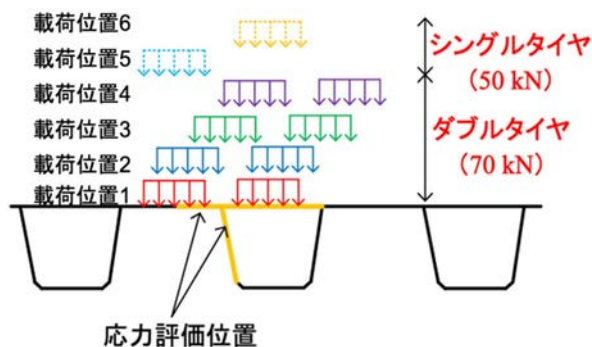


図-8 着目点の応力評価方法

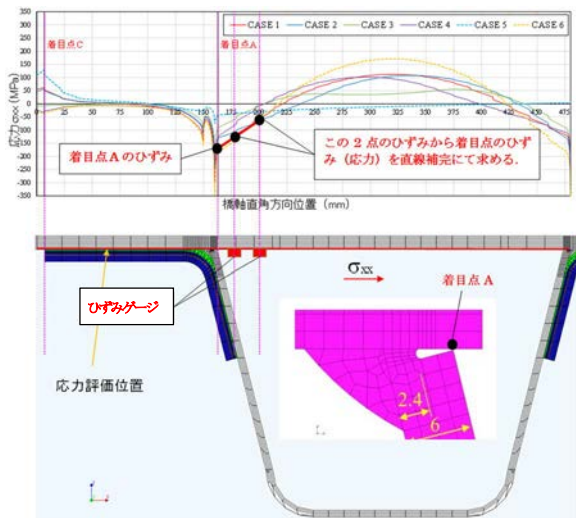


図-10 荷重位置と応力評価領域

ハイブリッド部材であり、それぞれソリッド要素でモデル化した。

解析での荷重位置と応力評価位置を図-8に示す。荷重荷重ケースはダブルタイヤ（70kN）が4ケースとシングルタイヤ（50kN）が2ケースである。図-9に解析モデルデッキ面の図にCFRP成形材設置位置および荷重荷重位置を示す。

表-5 解析モデルの概要

部材	板厚 (mm)	要素	材料
補剛材	12	8節点曲げ	弾性体 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
下フランジ	12	シェル要素	
横リブ	9	(CQ4OS)	
Uリブ	6		
デッキプレート	12		
Uリブ溶接部	24		
CFRP成形材	—	20節点ソリッド要素 (CHX60)	CFRP成形材の構成 CF外/GF/CF内 251/1.02/5.66 mm CF= $1.63 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$ GF= $2.05 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
エポキシ樹脂層	0.5		$E = 2,500 \text{ MPa}$
ポリウレタパテ材	1		$E = 80 \text{ MPa}$

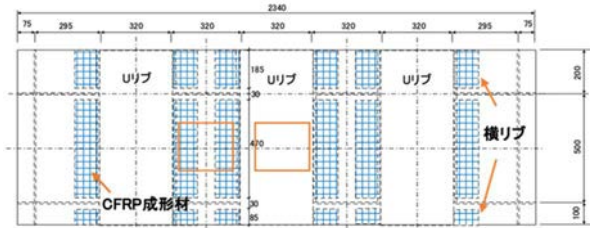


図-9 FRP成形材による補強位置

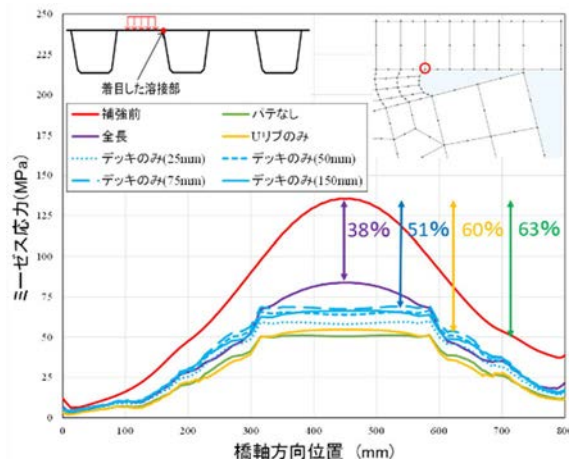


図-11 Uリブ溶接部でのミーゼス応力分布図

(2) 解析結果による振動疲労試験条件

FEM解析によりデッキ下面の橋軸直角方向応力を図-10にまとめて示す。着目位置での発生応力から応力範囲を設定し、振動疲労試験荷重条件を抽出した。表-6に各供試体をモデル化したケースの最小・最大応力度、応力範囲等を示す。この応力範囲を振動疲労試験における目標値とした。

なお、パテの施工範囲をパラメータとしたUリブ溶接部のミーゼス応力分布解析結果を図-11に示す。同図からパテ材の施工範囲が小さいほど、応力低減効果が高いことがわかる。

表-6 発生応力レベル

補強仕様		載荷位置						最小応力 σ_{max} (N/mm ²)	最大応力 σ_{min} (N/mm ²)	応力 範囲 (N/mm ²)	応力比	
		1	2	3	4	5	6					
無補強		105	92	4	-21	181	-30	-30	181	211	-0.17	
補強有	パテなし	62	57	-8	-32	127	-40	-40	127	167	-0.31	
	全面へのパテ	79	71	-1	-22	142	-29	-29	142	171	-0.20	
	Uリブ側のみパテ	67	62	-6	-33	136	-42	-42	136	178	-0.31	
	デッキ側のみ パテ	25mm	53	49	-6	-24	106	-30	-30	106	136	-0.28
		50mm	58	53	-5	-22	110	-28	-28	110	138	-0.25
75mm		64	58	-4	-21	118	-27	-27	118	145	-0.23	
150mm		73	66	-2	-21	132	-27	-27	132	159	-0.20	

4. 試験結果

表-7に振動疲労試験結果を示す。パテ材の施工範囲が50mm, 75mm, 150mmの試験体では熱の有無にかかわらずCFRP成形材のはく離が生じなかった。一方でパテ材なし試験体および25mm(熱なし)試験体でははく離が発生したため、CFRP成形材のはく離を発生させないためにはデッキ面端部25mmより広い範囲にパテ材が必要であるといえる。

供試体 No.1 (パテ材なし) の実験結果を図-12に示す。No.1の供試体は約1万回ではく離が発生したことから、パテ材は必須であることが確認できた。また、パテ材を施工した試験体 No.2~No.9 の実験結果を図-13に示す。同図 a) から、No.2では約150万回ではく離が発生したが、No.3の供試体ははく離が発生しなかった。このことから熱履歴を与えることによる付着への悪影響はないと考えられる。また、同図 b)~d)より、デッキ面端部50mmより広い範囲にパテ材を施工した場合は、はく離が発生しないことがわかった。

5. まとめ

鋼床版 U リブ溶接部を模擬した供試体において、CFRP成形材のデッキ面接着端部のはく離に着目し、グーラスファルト打設時を想定した熱履歴の有無、パテ材の接着範囲をパラメータとした振動疲労試験を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) CFRP成形材施工時にパテ材を使用しない供試体 No.1では、約1万回でCFRP成形材のはく離が発生した。
- (2) パテ材の施工範囲が25mmの供試体では、熱履歴あり試験体ではCFRP成形材のはく離が生じなかったが、熱履歴なし試験体では150万回でCFRP成形材のはく離が生じた。

表-7 振動疲労試験結果

No.	パテ材の 施工範囲 (mm)	熱履歴 の有無	応力 範囲 (N/mm ²)	試験 結果	実験値 (N/mm ²)	
					最小	最大
1	0	-	127	はく離	-2	125
2	25	-	106	はく離	-2	109
3		○		はく離なし	2	116
4	50	-	110	はく離なし	-12	113
5		○		はく離なし	-12	111
6	75	-	118	はく離なし	-5	107
7		○		はく離なし	-1.5	121
8	150	-	132	はく離なし	0.3	131
9	(デッキ 側全長)	○		はく離なし	11	131

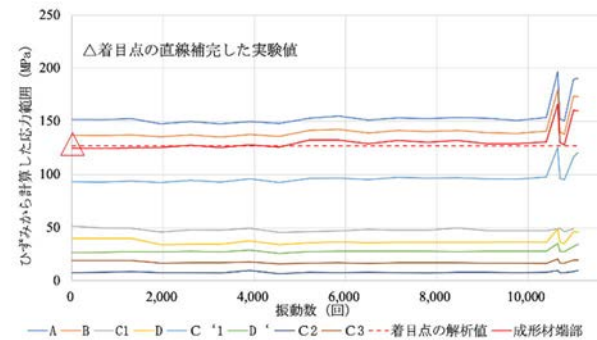


図-12 振動疲労試験応力範囲(パテ材なしNo.1)

- (3) パテ材の施工範囲が50mm以上の場合は熱履歴の有無に関わらず、200万回の振動載荷終了時点でCFRP成形材のはく離は確認されなかった。以上のことから、パテ材の施工範囲を50mmとすることで、補強効果の減少を最小限にして、疲労耐久性を向上することができると考えられる。

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藤井輝氏にご協力いただきましたことを感謝致します。

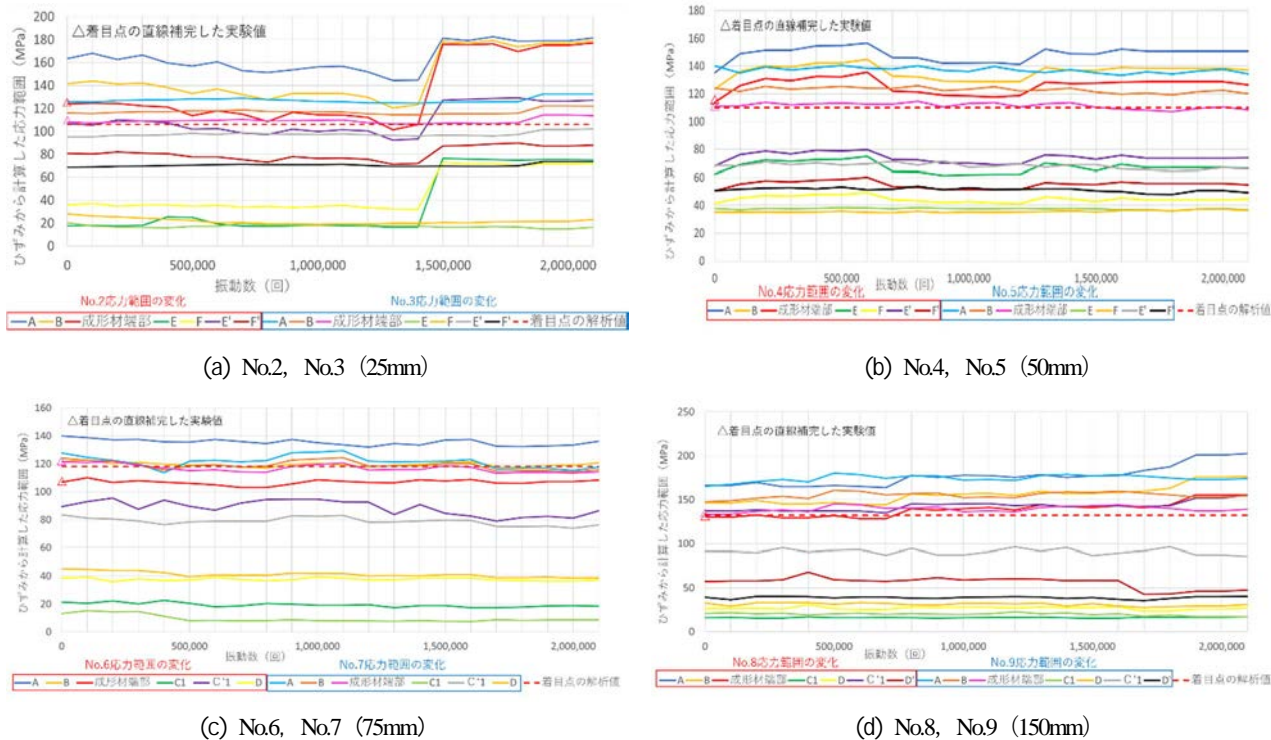


図-13 振動疲労試験応力範囲 (パテ材あり)

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.
- 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.
- 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.
- 4) 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.
- 5) 山田健太郎，小藺江朋亮，小塩達也：垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのみ肉溶接の曲げ疲労試験，鋼構造論文集，14巻，55号，pp.1-8，2007.
- 6) 山田健太郎，Ya Samol：Uリブすみ肉溶接のルートき裂を対象とした板曲げ疲労試験，構造工学論文集，vol.54A，pp.675-684，2008.

(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

Shunta SAKURAI, Kazuo OHGAKI, Yuya HIDEKUMA
Noriyuki SUZUKI, Ngoc Vinh PHAM and Tsubasa YASUDA

Among fatigue cracks in steel decks, fatigue crack propagation starting at the U-rib welds has been observed. To prevent such fatigue cracks, a reinforcement method from the underside of steel decks for heavy traffic sections is being investigated using CFRP molding material installed near the U-rib welds and lightweight resin mortar filled inside the U-ribs.

In this study, to investigate how much cyclic loading causes delamination of the bonded area when the CFRP molding material is bonded and reinforced from the underside the long-term bonding characteristics were clarified by vibration fatigue tests using a partial model specimen reinforced by bonding CFRP molding to the U-rib weldment. In addition, the application range of polyurea putty material was optimized to prevent delamination of the CFRP molding material, and the thermal effects on the polyurea putty during casting of goose asphalt were investigated.