

論文

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

安田翼*, 大垣賀津雄**, VINH PHAM NGOC***, 秀熊佑哉****, 櫻井俊太****, 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)

**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)

***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)

****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)

*****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)

近年, 重交通路線を中心に鋼床版の疲労き裂が報告されている. 日々の交通量と積載荷重の増加によって, 1980年代半ばより鋼床版の損傷事例が報告され始めた. 疲労き裂は, デッキプレート U リブ溶接部に発生した場合に, デッキを貫通するケースがあり, 車両走行に影響を及ぼすことがある. 鋼床版疲労耐久性向上を目的として, U リブ溶接部に CFRP 成形材を接着することを検討している. CFRP 成形材と鋼材の間の接着方法をパラメータとして, 疲労によるはく離に着目し振動疲労試験を実施した.

キーワード: 鋼床版, U リブ, CFRP 成形材, 補強, 接着, 振動疲労試験

1. はじめに

コンクリート床版に比べて軽量であり, 工場製作による一定の品質が確保できることから, 鋼床版は都市内高架橋や長大橋の床版として広く用いられてきている. 近年, その鋼床版が重交通路線を中心に, 疲労き裂の発生が報告されている^{1),2)}. 鋼床版デッキプレートの疲労き裂は, U リブ溶接部からの車両交通荷重によるき裂進展によるものであり, その予防保全や補強を目的に鋼繊維補強コンクリート SFRC による上面からの舗装対策工法が行われている. しかしながら, 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 と呼ぶ)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長を有する. また, 鋼材の当て板工法のようにボルト孔を開ける必要がないこと等, 施工においても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. このような状況の中で, 近年, 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³⁾や, FRP 接着による鋼構造物の補修・補強指針(案)⁴⁾等が発刊され, 実用化の段階にある.

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は, 未解明な部分がある. 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^{5),6)}による長期接着特性を明らかにした. 本研究では, 接着部の疲労耐久性を確保するため, 鋼材と CFRP 成形材の間に挿入する高伸度弾性パテ材^{3),4),7)}を適用しており, その施工範囲等をパラメータとしている⁸⁾.

2. 試験概要

2.1 試験供試体

試験供試体は, 図-1 に示す通り, 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

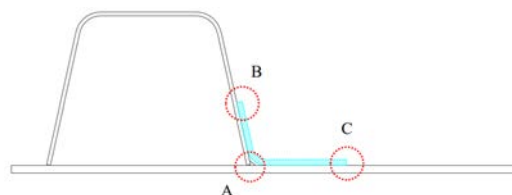


図-1 試験供試体と疲労はく離の着目点

る場合をモデル化したものである。実橋と同様にデッキ厚は 12mm, U リブのサイズは 320×1240×6mm であり, 材質 SM400 である。デッキプレート U リブ溶接部を CFRP 成形材で補強したものである。

2.2 ひずみ計測位置

振動疲労試験における CFRP 成形材のはく離着目箇所を図-1 に示す。着目点は, U リブ溶接部と FRP 成形材の両端部の 3 箇所として, それぞれの箇所に生じる最大と最小応力度を FEM 解析により求め, その応力範囲で振動疲労試験を実施した。また, 各試験体の寸法やひずみゲージ計測位置を図-2 に示す。各ケースとも動的なひずみ計測点は 8 点として, それぞれの着目点を中心に長さ 1mm のひずみゲージを貼付けた。

2.3 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。同図からわかるように, 試験体の U リブ部等を固定して片持ち板状態で振動を与える。その際に, 偏心錘を回転させ加振力を与えており, 逆 L 字

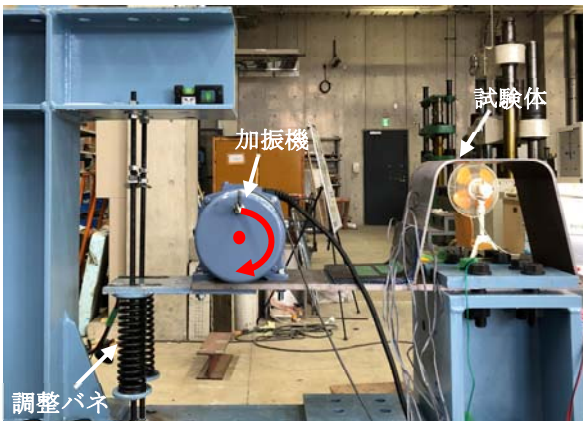


図-3 振動疲労試験装置

表-1 供試体パラメータ

ケース	供試体 (着目点)	FRP	パテ材	
CASE1	パターン A (U リブ溶接部)	L 型	なし	
CASE2			デッキのみ有	
CASE3			U リブのみ有※	
CASE4			全長に有	
CASE5	パターン B (U リブ側端部)	L 型	なし	
CASE6			デッキのみ有	
CASE7			U リブのみ有※	
CASE8			全長に有	
CASE9	パターン C (デッキ側端部)	平板	なし	
CASE10			デッキ	成形材側
CASE11			のみ有	鋼材側

注) ※印は試験を中止した。

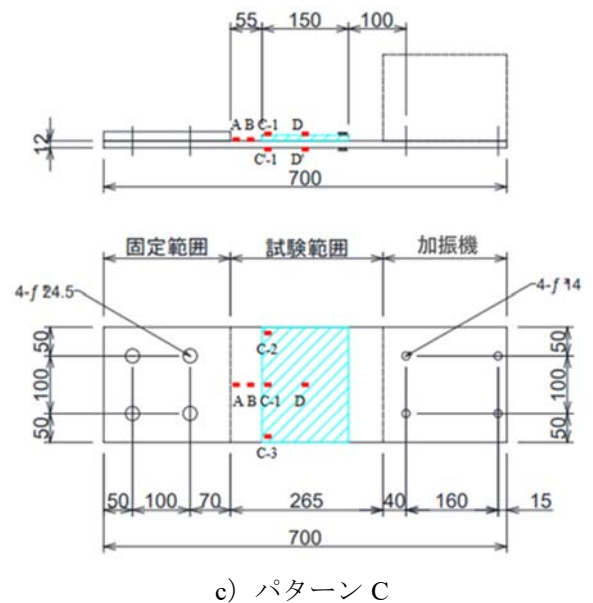
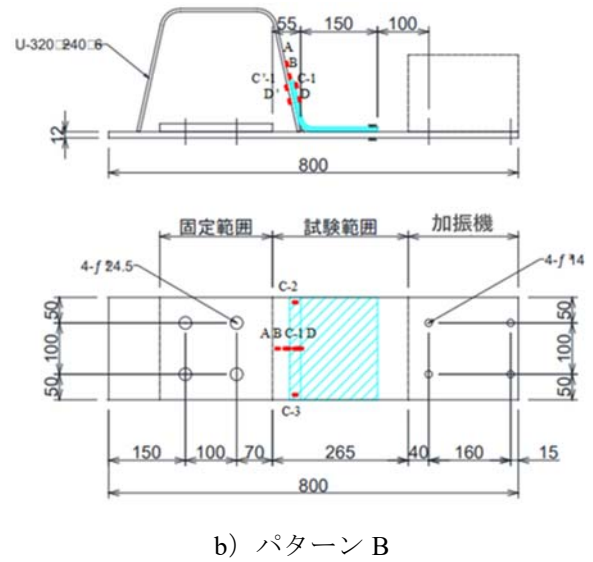
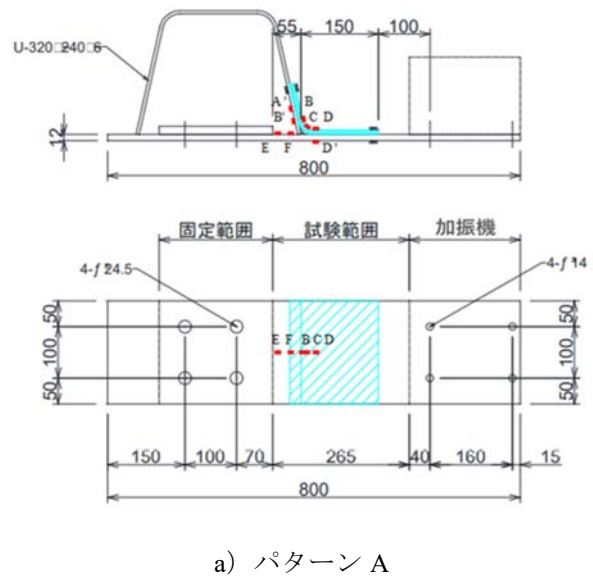


図-2 試験供試体とゲージ位置

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すこ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R=0（片振り）で試験を実施している。振動疲労試験における試験体パラメータを表-1に示す。

2.4 ひずみ調整方法

試験に際しては、試験体に貼り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、調整バネによりその発生ひずみをFEM解析から得られた目標値に近づける。各着目点位置は溶接ビード近傍や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。そこで片持ち板試験体に生じる応力分布が線形であり、鋼床版FEM解析モデルにおける着目点もほぼ線形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計測し、ひずみの変化を記録している。

2.5 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、橋軸直行方向（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度方向を積層させた直交異方性材とした。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、引抜き成形により製作している。表-2に示す通り、直交異方性は繊維長手方向（L方向）、繊維直行方向（T方向）、厚さ方向（Z方向）の物性がそれぞれ異なり、CFRP成形材に使用した材料特性を示している。

CFRP成形材の繊維長手（90度）方向の弾性係数は $1.63 \times 10^5 \text{MPa}$ で鋼材とほぼ同等であり、厚さはUリブよりやや厚い9mmに成形している。比重は2.0で軽量であり、引張強度は2,400MPaと強靱な部材である。

表-2 CFRP成形材に使用した材料の諸元

強化繊維種類	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/mm^3)	設計厚さ (mm)
炭素繊維 Carbon XN60	640,000	20,600	28,700	660	2.1	0.314
ガラス繊維 Glass E	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/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 使用樹脂材料の基本性能

項目	高伸度弾性パテ用プライマー FP-UL1	高伸度弾性パテ FU-Z	耐熱型エポキシ樹脂接着剤 FB-E9S	
材質	ウレタン樹脂	ポリウレタ樹脂	エポキシ樹脂	
引張強度	-	11N/mm ²	—	
引張弾性係数	—	74N/mm ²	—	
引張伸び	—	300%以上，500%未満	—	
圧縮強度	—	—	103N/mm ²	
圧縮弾性係数	—	—	2,690N/mm ²	
引張せん断強度	-	—	9.8N/mm ² 以上	
鋼材接着強度	1.5N/mm ²	7.4N/mm ²	20.8N/mm ²	
ガラス転移点温度	70℃以上	-15℃以下	70℃以上	
適用温度 (℃)	5-35	5-35	15-35	5-20
可使時間 (分)	-	25	40	15
硬化時間 (時間)	0.5	6	3.5	2.5
主剤：硬化剤 (重量比)	1：1	1：3	4：1	
性状	溶剤系	無溶剤系	無溶剤系	

2.6 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高伸度弾性パテ材の基本性能を表-3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#100のサンドペーパーで粗く仕上げ、接着表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ている。その後、必要箇所に高伸度弾性パテ材を塗布し、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準備した。

3. 解析概要

3.1 FEM解析

今回の解析では、荷重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A、B、Cの発生応力を評価した。解析モデルを図-4に示す。

本解析は汎用非線形FEMソフトであるDIANAを使用し、表-4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、エポキシ樹脂と高伸度弾性パテ材を20節点ソリッド要素でモデル化している。

ここで、CFRP成形材の構成は、外側に2.51mm、内側に5.66mmの炭素繊維層（橋軸直角方向の弾性係数 1.63×10^5 MPa）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 MPa）のハイブリッド部材であり、それぞれをソリッド要素でモデル化している。

解析での荷重位置と応力評価位置を図-5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-6で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描いている。

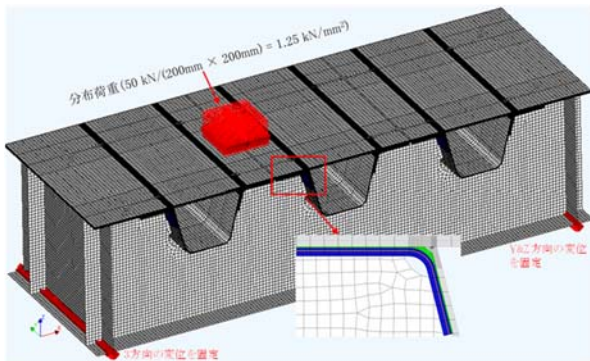


図-4 CFRP成形材による補強鋼床版解析モデル

表-4 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 シェル要素 (CQ40S)	弾性体 $E_s = 2 \times 10^5$ MPa
下フランジ	12		
横リブ	9		
Uリブ	6		
デッキプレート	12		
Uリブ溶接部	2.4	20 節点 ソリッド要素 (CHX60)	CFRP 成形材の構成 CF 外/GF/CF 内 2.51 / 1.02 / 5.66 mm CF = 1.63×10^5 MPa GF = 0.205×10^5 MPa
CFRP 成形材	—		
エポキシ樹脂層	0.5		
高伸度弾性パテ材	1		E = 2500 MPa
			E = 80 MPa

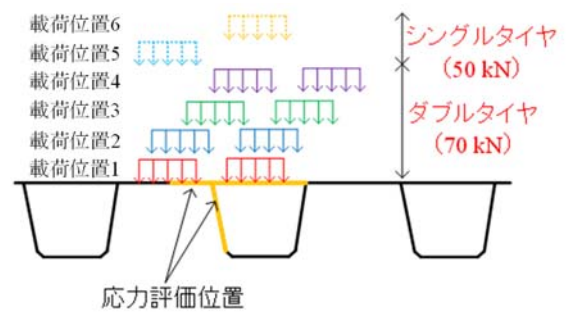


図-5 荷重位置と応力評価領域

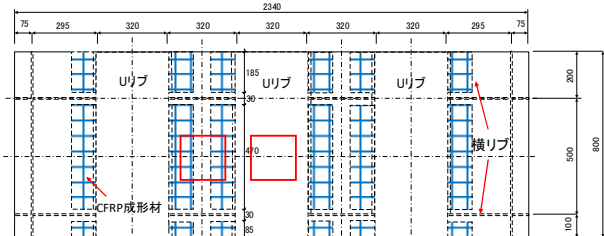


図-6 CFRP成形材による補強位置

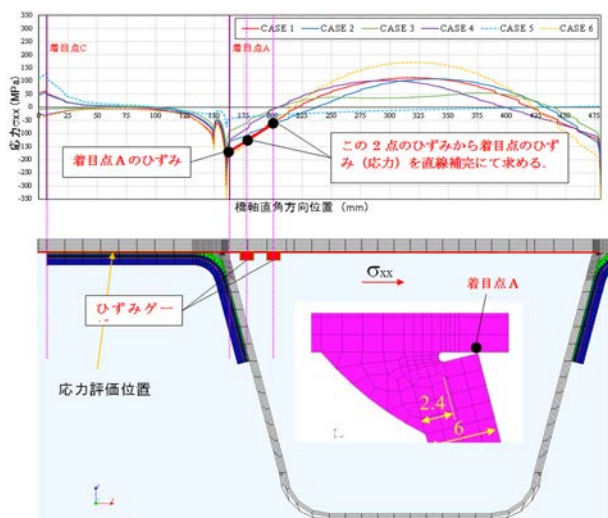


図-7 着目点の応力評価方法

表-5 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

着目点	補強仕様		荷重位置						最小 応力 σ_{\max}	最大 応力 σ_{\min}	応力範囲	応力比	試験値		
	ケース	パテ材	1	2	3	4	5	6							
A	無補強		-197	-173	-101	-89	-129	-145	-197	0	197	$-\infty$	—		
	補強有	CASE1	なし	-168	-133	-96	-130	-44	-189	-189	0	189	$-\infty$	154	
		CASE2	デッキのみ有	-174	-141	-96	-121	-62	-180	-180	0	180	$-\infty$	196	
		CASE3	Uリブのみ有	-170	-134	-96	-129	-47	-188	-188	0	188	$-\infty$	—	
		CASE4	全面に有	-178	-148	-96	-110	-80	-167	-167	0	167	$-\infty$	182	
B	無補強		-18	-21	-12	4	-36	13	-36	13	49	-2.77	—		
	補強有	CASE5	なし	-27	-29	-12	8	-53	16	-53	16	69	-3.31	68	
		CASE6	デッキのみ有	-27	-32	-10	18	-67	30	-67	30	97	-2.23	70	
		CASE7	Uリブのみ有	-22	-23	-11	5	-41	11	-41	11	52	-3.73	—	
		CASE8	全面に有	-25	-29	-11	12	-57	22	-57	22	79	-2.59	56	
C	無補強		105	92	4	-21	181	-30	-30	181	211	-0.17	—		
	補強有	CASE9	なし	62	57	-8	-32	127	-40	-40	127	167	-0.31	114	
		CASE10	デッキのみ有	成形材側	73	66	-2	-21	132	-27	-27	132	159	-0.20	136
		CASE11		鋼材側	73	66	-2	-21	132	-27	-27	132	159	-0.20	137

3.2 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-7にまとめて示す。各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-5に各供試体をモデル化したケースの最小・最大応力度，応力範囲等を示した。この応力範囲を振動疲労試験における目標値とした。

4. 試験結果

図-8~10に振動疲労試験による応力範囲計測結果を示す。それぞれ、荷重回数 200 万回を目標に試験を行っている。図-8のパターン A (R 部着目) では、CASE4 の全面に高伸度弾性パテ材を塗布したケースで約 80 万回においてデッキ貫通き裂が発生した。

図-9に示すパターン B (Uリブ側端部着目) では、すべてのケースではく離は見られず、200 万回までほとんど変化がなかった。

図-10に示すパターン C (デッキ側端部着目) のでは、高伸度弾性パテ材無しの CASE9 場合、1 万回未満ではく離が発生した。このことからデッキ側に高伸度弾性パテ材が無いとはく離が生じることが分かった。以上のことから、デッキ側に高伸度弾性パテ材を設けていない CASE3 と CASE7 の試験

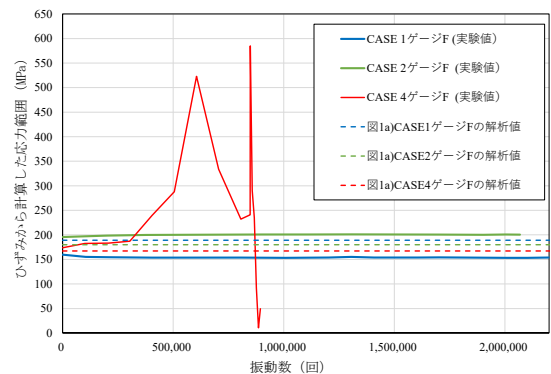


図-8 振動疲労試験応力範囲 (パターン A)

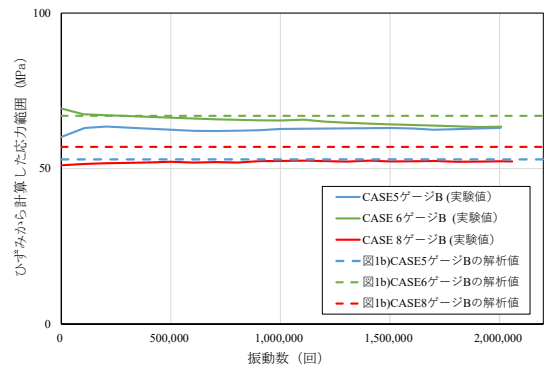


図-9 振動疲労試験応力範囲 (パターン B)

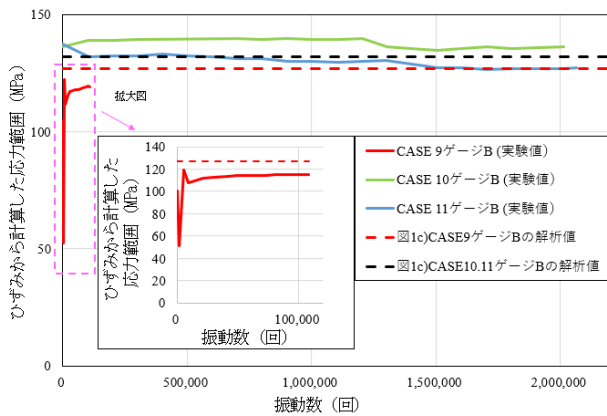
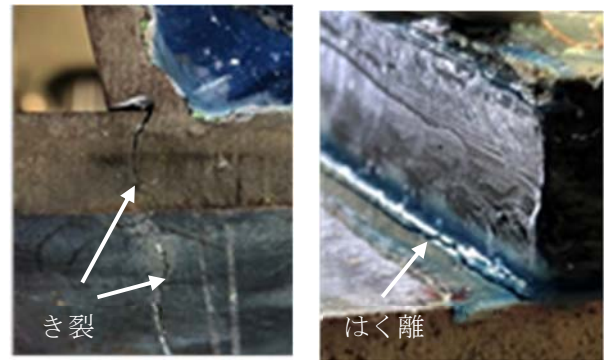


図-10 振動疲労試験応力範囲 (パターンC)



a) CASE4
b) CASE9
図-11 各 CASE の試験後の状態

を中止している。

図-11 にこれらの振動疲労試験後の状態を示す。このようなき裂やはく離が生じた理由については、検討が不十分である。今回実施した FEM 解析は試験条件を設定するための発生応力を確認するために実施したものであり、高伸度弾性パテ材のはく離や鋼材の疲労という観点での照査まで至っていない。これらについては、より詳細な検討を行う必要がある。

5. 結論

U リブを有する鋼床版の CFRP 成形材による補強する工法を対象に、U リブを有する試験体の U リブ溶接部、U リブ側 CFRP 設置端部、およびデッキ側 CFRP 設置端部に着目して、高伸度弾性パテ材設置位置をパラメータとした振動疲労試験を行った。本研究結果得られた知見は以下のとおりである。

- (1)CFRP 成形材による U リブ溶接部の補強では、成形材貼付け部全体に高伸度弾性パテ材の使用した場合、補強効果が小さくデッキ貫通亀裂等の疲労破壊が生じる可能性がある。
- (2)CFRP 成形材の U リブ側端部においては、エポキシ樹脂による直接接着でもはく離は見られなかった。
- (2)CFRP 成形材のデッキ側端部において、エポキシ樹脂で直接貼付けたケースでは、早期にはく離が生じた。このような補強では、成形材のはく離防止として、デッキ側に高伸度弾性パテ材の使用が必要であることが確認できた。

今後の課題としては、デッキ側に高伸度弾性パテ材を適用した場合に応力低減効果が低下するので、CFRP 成形材の端部から極力短い範囲の適用を想定した振動疲労試験を行うことである。また、FEM 解

析による U リブ溶接部に生じる応力の低減効果等を明らかにすることである。

謝辞

本試験を遂行するに際して、関西大学・石川敏之教授から、ご指導頂きましたことを深く感謝いたします。

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) (株)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，2013.10
- 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 09，2018.7
- 5) 山田健太郎，小藺江朋堯，小塩達也：垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのす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.
- 7) 西野晶弘，大垣賀津雄，秀熊佑哉，宮下剛，奥山雄介，小森篤也：鋼材と CFRP の接着強度に関する実験的研究，第 13 回複合構造の活用に関するシンポジウム，pp.257-262，2019.11
- 8) 大垣賀津雄，Pham Ngoc Vinh，安田翼，秀熊佑哉，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実験，第 77 回土木学会年次学術講演会，2022.9

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)