

Uリブ鋼床版垂直補剛材上端部に対する下面からの疲労対策

RETROFITTING METHOD FROM THE UNDERSIDE AGAINST FATIGUE CRACKING AT THE UPPER END OF VERTICAL STIFFENERS IN ORTHOTROPIC STEEL DECK

○坂本 千洋*¹ 小西 日出幸*² 奥村 信太郎*³ 坂野 昌弘*⁴

Chihiro SAKAMOTO*¹ Hideyuki KONISHI*² Shintaro OKUMURA*³ Masahiro SAKANO*⁴

ABSTRACT In this study, we propose the retrofitting method from the underside against fatigue cracking at the upper end of vertical stiffeners in orthotropic steel deck. It is angle steel reinforcement using thread rolling screw (TRS). The effectiveness the retrofitting method is experimentally investigated through fatigue tests using a large specimen with two trough ribs. As a result, the retrofitting method can reduce the local stress concentration at the crack initiation point to about one-third to two-fifth of that before reinforcement, and can prevent fatigue cracking perfectly.

Keywords Uリブ鋼床版, 垂直補剛材, 疲労試験, スレッドローリングスクリュー, 補強工法
Orthotropic steel deck, Vertical stiffener, Fatigue test, Thread rolling screw, Retrofitting method

1. はじめに

鋼床版構造は、軽量化と工期短縮の面で有利であるが、疲労耐久性が課題となっている。そのため、「鋼床版の疲労耐久性向上に関する研究プロジェクト」が平成29年度から検討を進めている[1~4]。また、実際にUリブ鋼床版橋においては、垂直補剛材上端部での疲労き裂の発生事例が増加している[5]。

RC床版橋では、垂直補剛材上端部に対する支圧接合型のワンサイドボルト (TRS (Thread Rolling Screw)) を用いた交通規制が不要な下面からの疲労対策効果について実験的に確認されており[6]、すでに実橋にも適用されている[6]。しかしながら、鋼床版橋の垂直補剛材上端部についてはTRSを用

いた疲労対策を試みられた事例はない。

本報では、鋼床版橋の垂直補剛材上端部の疲労損傷に着目し、半円切欠き工法[7]に代わるTRSを用いた補強工法[6]を適用して、補強前後の応力分布と疲労寿命を比較することによって補強工法の効果を検証することを目的とする。

2. 方法

2.1 試験体及び応力計測位置

試験体の寸法と形状、載荷位置を図-1に示す。試験体はUリブ2本、横リブ3本、主桁2本を有する実物大試験体である。鋼材は実橋で用いられているものと同等のグレードを用いた。また、上フランジ下面と補剛材上端の間にはギャップを2mm設けて溶接した。試験部は、A断面とC断面の計2か所とした。

図-2に応力計測位置を示す。A載荷側では垂直補剛材上端部コバ面のすみ肉溶接止端から下に5mm程度の位置と、デッキ下面のすみ肉溶接止端から水平に5mm程度の位置にゲージ長1mmの1軸ひずみゲージを貼付した。C載荷側では、垂直補剛材コバ面とデッキ下面に加え、垂直補剛材コバ直上のデッキ上面にもゲージ長1mmの1軸ひずみゲージを貼付した。

き裂の発生と進展は、ひずみゲージにより推定し、磁粉探傷試験 (MT) により確認した。

* 非会員

建設コンサルタンツ協会 (日建設計シビル)
(〒541-0054大阪市中央区南本町3-6-14)

** 非会員

博士 (工学) 日本橋梁建設協会
(〒550-0005大阪府大阪市西区西本町1-8-2)

*** 非会員

国土交通省 近畿地方整備局
(〒540-858大阪市中央区大手前1-5-44)

**** 第2種正会員

工博 関西大学 環境都市工学部 教授
(〒564-8680大阪府吹田市山手町3-3-35)

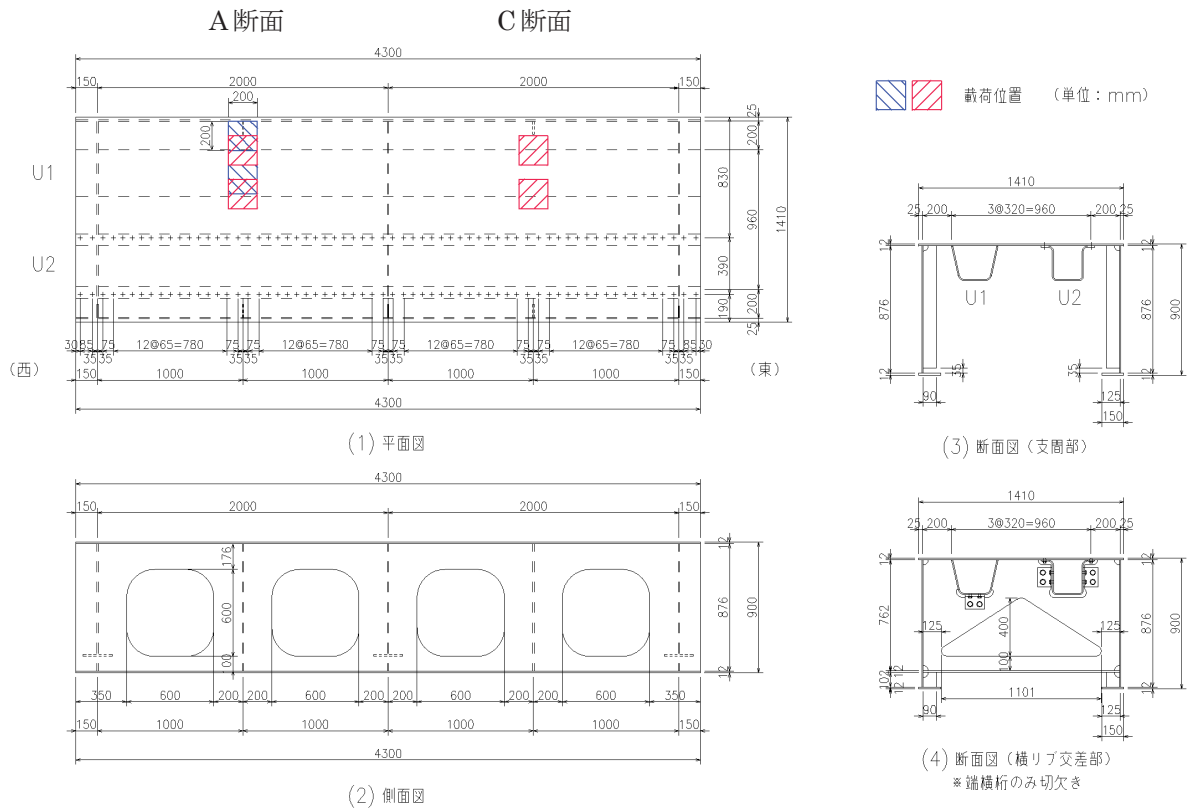


図-1 試験体の寸法と形状, 載荷位置

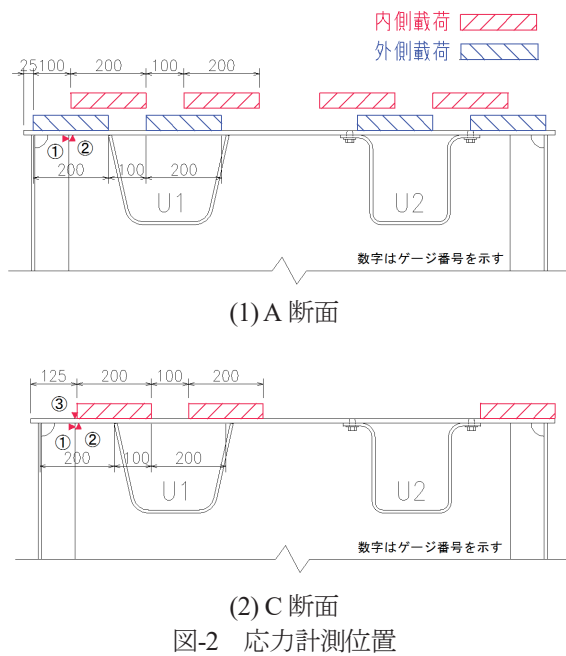


図-2 応力計測位置



写真-1 載荷状況

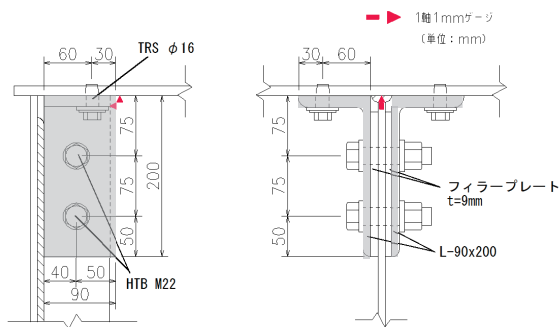


図-3 当て板補強構造詳細

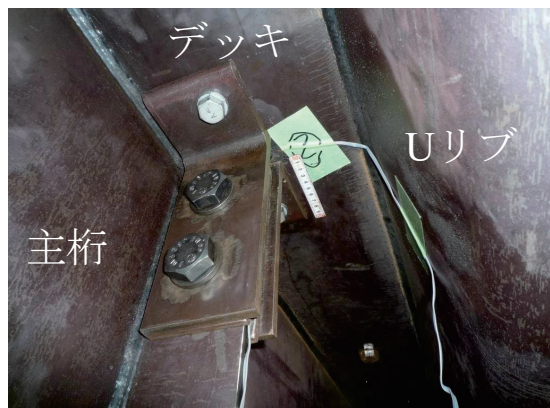


写真-2 当て板補強

2.2 荷重方法

写真-1 に荷重状況を示す。荷重にはダブルタイヤ 2 輪を模擬したゴム板 (200mm×200mm×40mm) を 4 枚用い、A 断面では、図-1 と図-2 a) に示すように外側と内側の 2 ケースで静的荷重試験を行った。疲労試験は内側荷重で行い、繰り返し速度は 2~3Hz とした。C 断面では、はじめは内側荷重を行い、途中で U2 側の U リブの損傷が確認されたため、U1 側のみダブルタイヤを模擬したゴム板を用い、図-2 b) に示すように U2 側は補剛材直上に荷重した。荷重範囲は A 断面では 260kN (最小荷重 20kN)、C 断面では、はじめは 260kN で途中から 200kN (最小荷重 20kN) とした。

2.3 疲労対策

図-3、写真-2 に当て板補強構造詳細を示す。予防保全対策では、き裂が発生していない状態で TRS を用いた当て板補強工法を適用した。この工法は RC 床版直下の垂直補剛材に対して使用したものと同一のものであり[6]、TRS でアングル材をデッキプレート下面に押し付けた後、HTB で補剛材に固定することにより、アングル材に荷重を分担させ、補剛材上端部にかかる荷重を低減する工法である。

表-1 疲労試験ステップ

ステップ	A 断面	
	目的	対策
1	き裂再現	—
2	事後保全対策効果の検証	き裂削除＋当て板補強

ステップ	C 断面		
	目的	対策	
1	予防保全対策効果の検証	当て板補強	
2	き裂再現	—	
3	(1)	き裂削除＋当て板補強	
	(2)	事後保全対策効果の検証	き裂削除のみ
	(3)	き裂削除＋当て板補強	

事後保全対策では、発生したき裂に対して、バークライナーを用いて削り込みを行い、き裂を削除したのち、TRS を用いた当て板補強を施した。

表-1 に疲労試験ステップを示す。A 断面は、ステップ 1 で対策なしでき裂の再現を行い、ステップ 2 では、ステップ 1 で発生したき裂を削除し、TRS を用いたアングル材工法を施して事後保全対策を施した。C 断面側では、ステップ 1 で TRS を用いたアングル材工法による予防保全対策を施し、ステップ 2 で当て板補強を外し、き裂の再現を行った。ステップ 3 では、ステップ 2 で発生したき裂を削除し、TRS を用いたアングル材工法を施して事後保全対策を施した。その後、当て板補強による事後保全対策効果が確認できたので、ステップ 3 の(2)で当て板を取り外してき裂削除のみでの事後保全対策効果の検証を行い、補剛材側から発生したき裂がビードを横切ってデッキに進展したので、それらを削除し、ステップ 3 の(3)で再び当て板を取り付けて疲労試験を続行した。

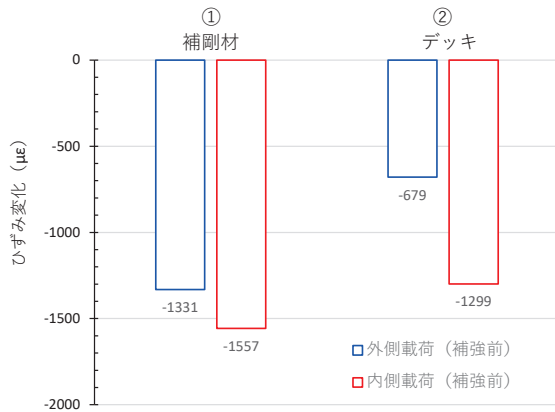


図-4 静的載荷試験結果 (A 載荷側)

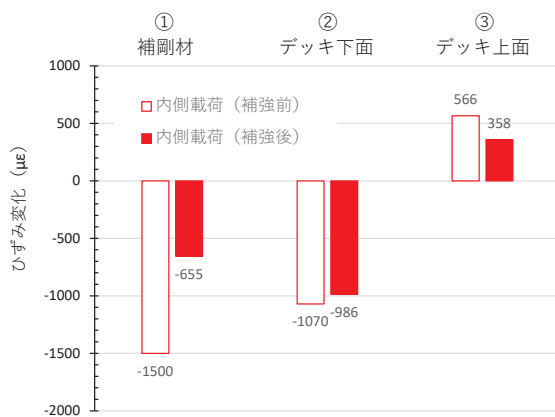


図-5 静的載荷試験結果 (C 載荷側)

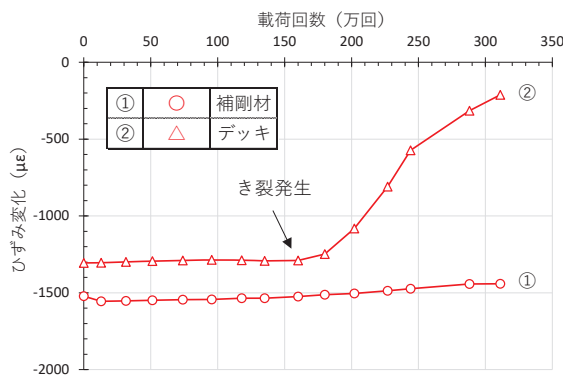


図-6 疲労試験中のひずみ変化
(A 断面, ステップ 1)

3. 静的載荷試験結果

図-4 に A 断面の静的載荷試験結果を示す。外側載荷では補剛材側 (①) で-1330 μ , デッキ側 (②) で-680 μ 程度であったひずみが, 内側載荷では①が-1560 μ , ②が-1300 μ と 1.2~1.9 倍程度大きくなっており, 内側載荷の方が外側載荷よりも大きいことが確認された。このことから, 内側載荷で疲労試験を行った。

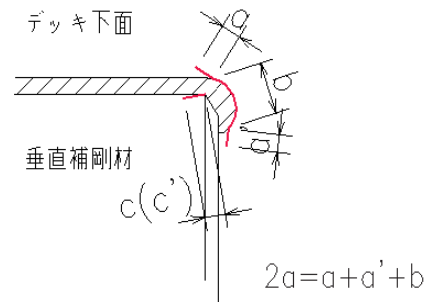


図-7 き裂長さの定義

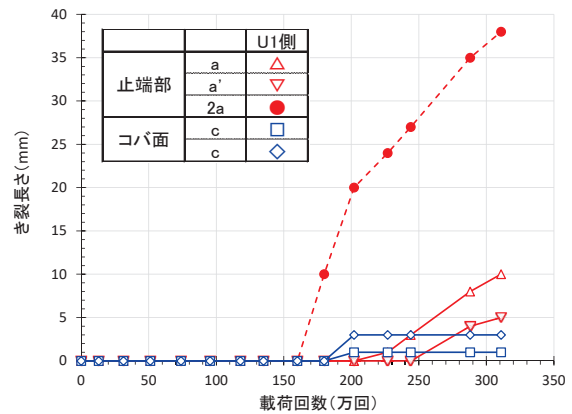


図-8 疲労試験中のき裂長さ (A 断面)

図-5 に C 断面の静的載荷試験結果を示す。当て板補強を施した結果, 垂直補剛材側の①のひずみは-1500 μ から-650 μ と 2/5 に減少した。なお, デッキ側の②③のひずみはデッキ下面で-1100 μ から-1000 μ と, デッキ上面で 600 μ から 400 μ と 1~3 割程度しか減少していないが, これはアングル材の幅が 90mm と補剛材幅と同じであり, 補剛材端部と当て板端部が 10mm 程度しか離れておらず, ゲージ位置が当て板端部に近いためと考えられる。

4. 疲労試験結果

4.1 A 断面

4.1.1 ステップ 1: き裂の再現

図-6 に A 載荷側の疲労試験中のひずみ変化 (最大荷重時と最小荷重時のひずみの差) を, 図-7 にき裂長さの定義を, そして図-8 に A 載荷側の疲労試験中のき裂長さを示す。補強を施さなかった U1 側デッキ下面の②では 160 万回以降でひずみ変化が急激に減少し, 180 万回でデッキ側と補剛材側の溶接止端部にき裂の発生が (写真-3), 227 万回でデッキ側の止端部から母材部に亀裂の進展が確認された。その後, 疲労試験を続行し, 写真-4 に示すようにデッキ母材に 38mm 程度き裂が進展したところで試験を終了した。

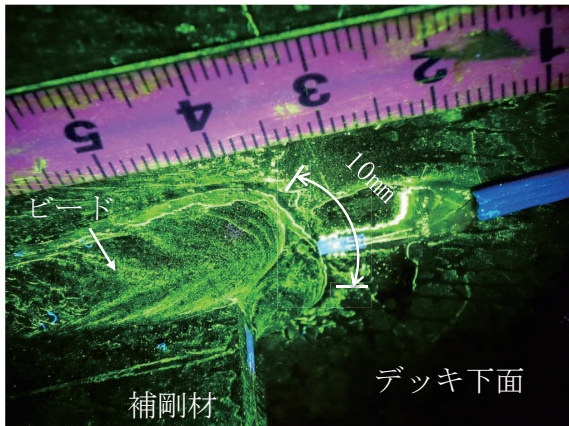


写真-3 A断面ステップ2, き裂発生時
(載荷回数 N=180 万回)



写真-6 A断面ステップ2,
事後保全対策 (その1) の施工状況

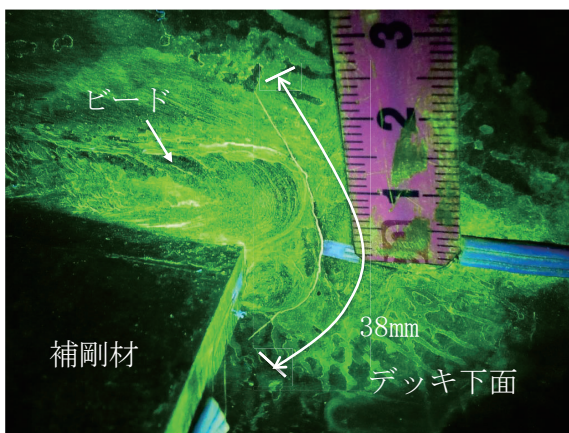


写真-4 A断面ステップ1, き裂再現終了時
(載荷回数 N=311 万回)

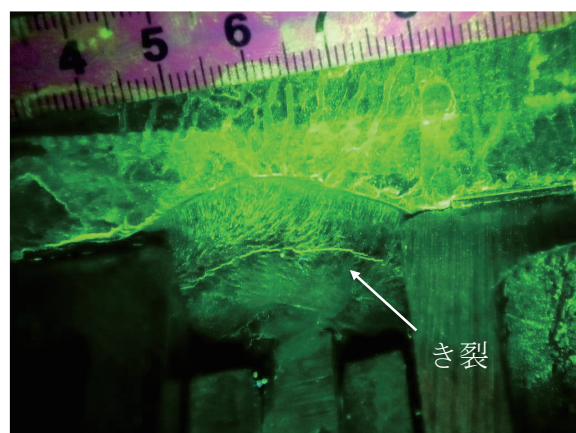


写真-7 A断面ステップ2, 再発したき裂
(載荷回数 N=464 万回(事後保全対策後 153 万回))

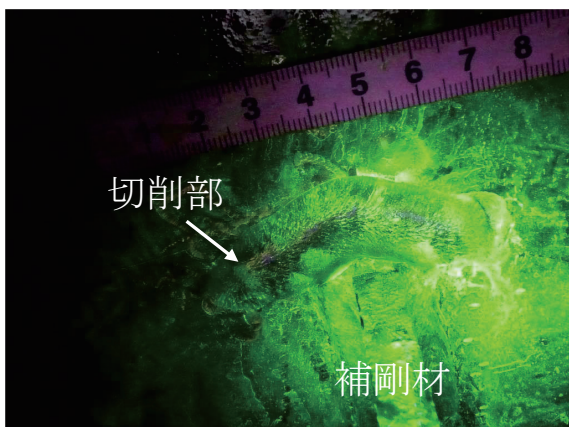


写真-5 A断面ステップ2, き裂切削後

写真-7に示す通り、削り込み部からき裂の再発が確認された。最終的に、事後保全対策施工後 207 万回まで載荷した時点で載荷梁を移動しデッキ上面を確認した結果、デッキ上面で 70mm 程度のき裂が確認され、下面のき裂長さが 40mm 程度であることから曲げ引張によりデッキ上面に生じたき裂がデッキ下面に進展したものと推定される (写真-8)。

以上より、削り込み部が当て板から外れる場合にはき裂が再発するため、当て板のサイズを、削り込み部を覆うように大きくすることが必要である。

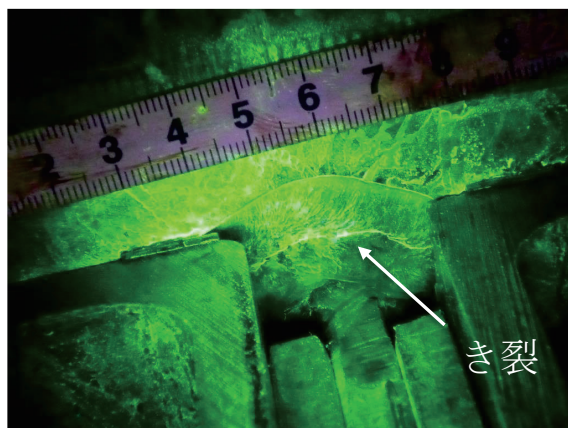
4.1.2 ステップ2：事後保全効果の検証(その1)

写真-5,6 に事後保全対策の施工状況を示す。前項の実験より、デッキ母材まで進展させたき裂に対して、バークライナーを用いて最大深さ 8mm、幅 15mm、長さ 55mm 程度まで削り込んでき裂を削除し、TRS を用いた当て板補強を施した。その後、150 万回程度繰り返し載荷を行ったところ、

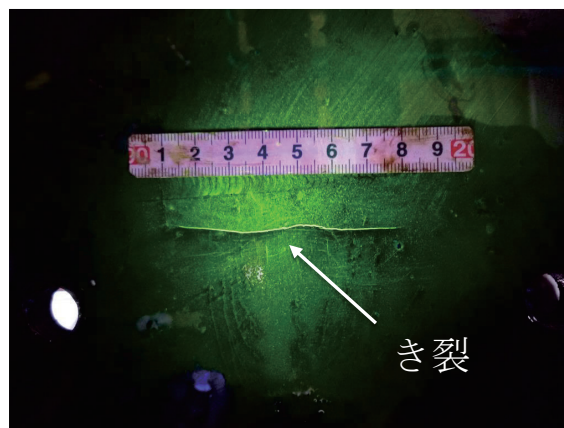
4.2 C 断面

4.2.1 ステップ1：予防保全効果の検証

図-9 に C 載荷側の疲労試験中のひずみ変化を示す。当て板補強を施した状態で 330 万回程度繰り返し載荷を行ったが、ひずみは変化せず、き裂の発生は確認されなかった。



a) 補剛材上端



b) デッキ上面

写真-8 A 断面ステップ 2, 試験終了時のき裂
(荷重回数 N=578 万回(事後保全対策後 207 万回))

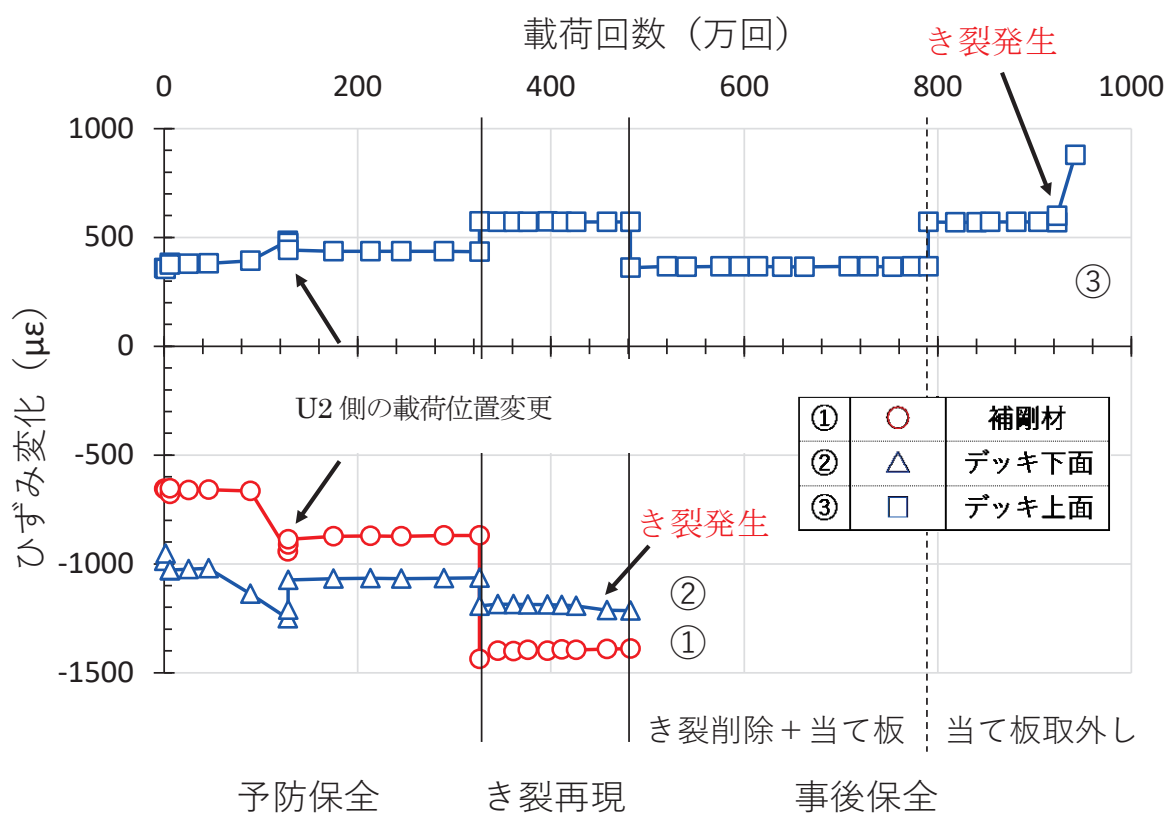


図-9 疲労試験中のひずみ変化 (C 断面)

4.2.2 ステップ 2 : き裂の再現

その後、当て板を取り外してき裂の再現を試みた結果、130 万回程度荷重した時点でデッキ及び垂直補剛材の溶接止端部からき裂の発生が確認された(写真-9)。その後、き裂が止端部に留まっている状態で試験を終了した。ステップ 1 ではき裂は発生しなかったことから、TRS を用いた当て板補強を施すことで、疲労き裂の発生を予防できる効果があることが検証された。

4.2.3 ステップ 3 (1) : 事後保全効果の検証(その 2)

写真-10~12 に事後保全対策の施工状況を示す。前項の実験より、溶接止端部にとどまっているき裂に対して、バークラインダーを用いて深さ 3mm、幅 15mm、長さ 35mm 程度まで切削してき裂を削除し、TRS を用いた当て板補強を施した。その後、300 万回程度繰り返し荷重を行ったがひずみは変化せず、き裂の再発は確認されなかった。

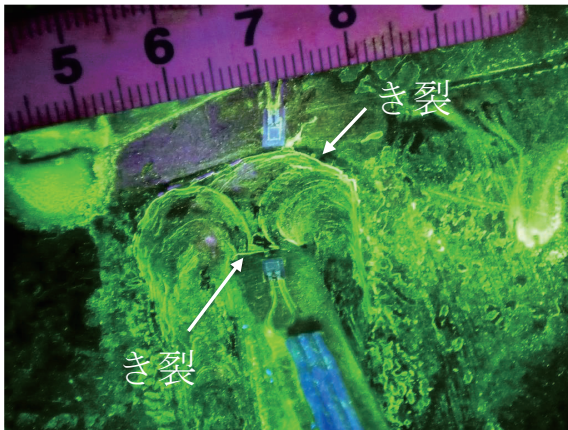


写真-9 C断面ステップ2, き裂発生時
(載荷回数 N=460 万回(き裂再現 134 万回))

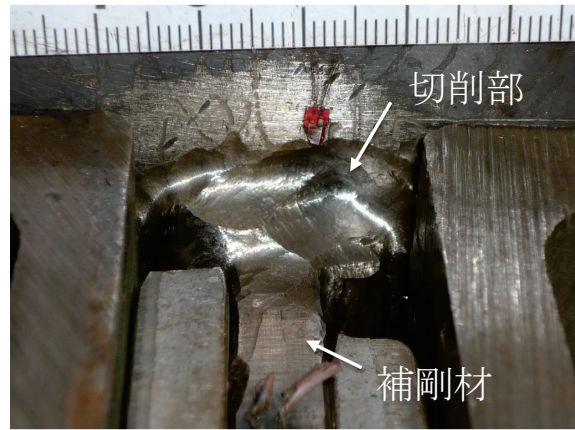


写真-12 C断面ステップ3(1),
事後保全対策(その2)の施工状況



写真-10 C断面ステップ3(1),
バークラインダーを用いた切削状況

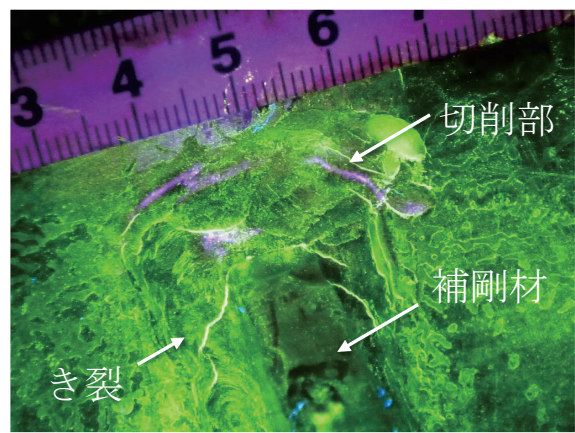


写真-13 C断面ステップ3(2),
切削部から再発したき裂
(載荷回数 N=923 万回
(事後保全当て板無し 133 万回))

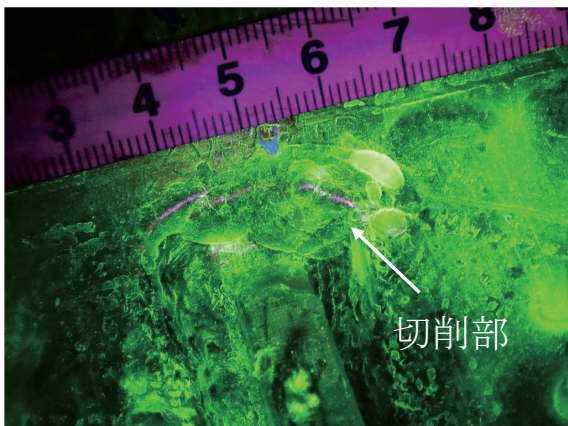


写真-11 C断面ステップ3(1), き裂切削後

以上より、溶接止端部にとどまっているき裂に対し、き裂を削除し、TRSを用いた当て板補強を施すことで、き裂の再発を防止できることが検証された。

4.2.4 ステップ3(2)：事後保全効果の検証(その3)

次に、削り込みによるき裂削除のみの効果を検証するために、当て板を取り外して疲労試験を続行したところ、130万回程度載荷した時点で補剛材側にき裂が発生した(写真-13)。その後、疲労試験を続行したところ、454万回載荷した時点で写真-14に示す通り、き裂はビードを斜めに横切ってデッキへ進展した。

4.2.5 ステップ3(2)：事後保全効果の検証(その4)

その後、再度削り込みを行い(写真-15)、当て板を取りつけて疲労試験を継続したところ、き裂の再発は確認されなかった。以上より、補剛材側の止端から発生し、ビードを横切ってデッキへ進展したき裂に対しては、補剛材幅と同程度のアンクル材により、再発を防止できることが検証された。

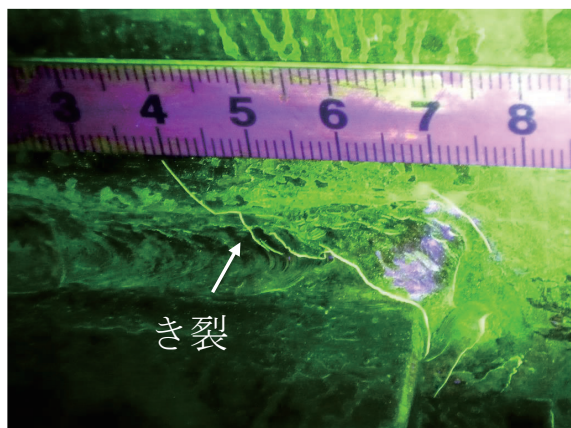


写真-14 C断面ステップ3(2),
デッキに進展したビードき裂
(载荷回数 N=1244 万回
(事後保全当て板無し 454 万回))

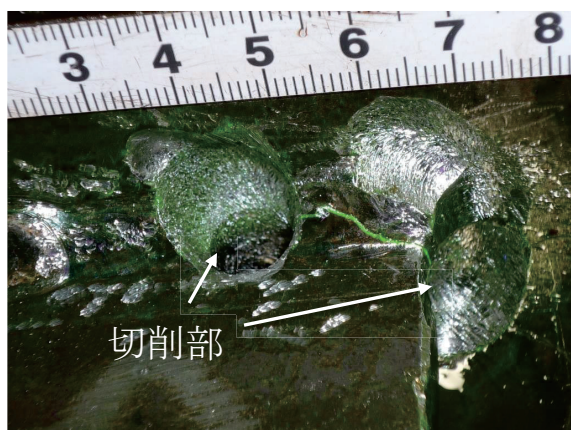


写真-15 C断面ステップ3(3), き裂切削後

また、予防保全と事後保全対策の疲労試験終了後に TRS と TRS 孔を確認したが、特に変状は認められなかった。なお、TRS 孔は繰り返し使用した。

5. 結論

鋼床版橋の垂直補剛材上端部の疲労損傷に着目し、TRS を用いた補強工法を適用して、補強前後の応力分布と疲労寿命を比較することによって補強工法の効果を検証した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

(1) 静的载荷試験結果

- TRS を用いて下面から当て板補強を施すことにより、垂直補剛材コバ面に生じる応力を $1/3 \sim 2/5$ に低減できることが確認された。

(2) 疲労試験結果

- TRS を用いた当て板補強を施さない場合、130

～160 万回程度の繰り返し载荷で垂直補剛材上端部の溶接止端部から疲労き裂が発生したが、補強を施した場合には 330 万回载荷してもき裂が発生しなかったことから、予防保全効果が検証された。

- デッキ側の止端部から発生し、デッキ母材から 38mm 程度進展したき裂に対しては、削り込みによる削除部を覆うような大きさのアンクル材が必要である。
- デッキ側の溶接止端から発生し、止端部にとどまっている比較的短いき裂、および補剛材の溶接止端から発生し、ビードを横切ってデッキに進展したき裂に対しては、削り込みによるき裂の削除と、補剛材幅程度のアンクル材により、き裂の再発を防止できることが検証された。
- 予防保全と事後保全対策の疲労試験終了後に TRS と TRS 孔を確認したが、TRS、TRS 孔ともに特に変状は認められなかった。

謝辞

本研究を行うにあたり、新都市社会技術融合創造研究会の「鋼床版の疲労耐久性向上に関する研究プロジェクト」のメンバーには貴重なご助言をいただき、また、関西大学学部4年生の白石祐一氏には実験にご協力いただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 坂野昌弘：鋼橋の疲労耐久性向上に関する研究プロジェクト（その2），土木学会第74回年次学術講演会，2019。
- [2] Luiza H. Ichinose，國年滋行，坂野昌弘：実橋における鋼床版Uリブ・横リブ交差部の補強効果の検証，土木学会第74回年次学術講演会，2019。
- [3] 田辺篤史，松本理佐，國年滋行，坂野昌弘：既設鋼床版のUリブ横リブ交差部に対するアンクル補強の解析的検討，土木学会第74回年次学術講演会，2019。
- [4] 坂本千洋，小西日出幸，奥村信太郎，坂野昌弘：Uリブ鋼床版垂直補剛材上端部の疲労損傷に対する対策効果の実験的検討，土木学会第74回年次学術講演会，2019。
- [5] 阪神高速道路株式会社：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策（三訂版），2012。

- [6] 坂本千洋, 坂野昌弘, 小西日出幸, 小山雅弘 :
対傾構取付け垂直補剛材上端部の疲労対策に
関する実験的検討, 鋼構造論文集, 第 25 卷,
第 100 号, pp.1~14, 2018.
- [7] 高田佳彦, 川上順子, 酒井優二, 坂野昌弘 :
半円切欠きを用いた既設鋼床版橋主桁垂直補
剛材上端溶接部の疲労対策, 鋼構造論文集, 第
16 卷, 第 62 号, pp.35~46, 2009.
- [8] 鈴木博之 : スレッドローリングねじで接合さ
れた継手の強度に関する実験的研究, 構造工学
論文集 Vol.61A, pp.614-626, 2015.3.
- [9] 溝上義昭, 森山彰, 小林義弘, 坂野昌弘 : U
リブ鋼床版ビード貫通亀裂に対する下面補修
工法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.2,
pp.456-472, 2017.