

論文・報告

KM リフト工法による疲労き裂抑制対策

～支圧接合用高力ボルトを用いた当て板補強工法の開発～

Repair Method for Fatigue Cracks on Top Edge of Vertical Stiffener Using Bearing-type Bolts

長坂 康史 *1
NAGASAKA Yasushi

三浦 誠也 *2
MIURA Seiya

丹羽 健介 *2
NIWA Kensuke

金田 和樹 *3
KANEDA Kazuki

川原 桂史 *4
KAWAHARA Keiji

鋼床版デッキプレートに有する鋼橋の典型的な損傷の1つに、垂直補強材の上端部における疲労き裂がある。この部分の補修対策として、溶接止端部処理（グラインダー、ピーニング）を用いて溶接部自体の疲労強度を回復させる方法、半円切欠きや上端部切断除去により補剛材上端部のディテールを改良する方法、垂直補剛材の上端部に当て板を設け、溶接部に生じる作用力をバイパス構造にて低減させる方法などが挙げられる。本研究は芝浦工業大学・穴見教授とMKエンジニアリング㈱との共同研究により、L字型の当て板を使用した新たなバイパス補修工法（以降、KM リフト工法と呼ぶ）として、特別な使用機材を用いない効率的で効果的な疲労亀裂の修復に着目して開発を実施した。本工法の主な特徴は、支圧接合用高力ボルトを使用してL字型の当て板（以降、KM リフトと呼ぶ）をリフトアップさせ、鋼床版から当て板を介して垂直補剛材に応力を伝達させる構造である。本稿では、考案したKM リフト工法の適用性を評価するため、静的試験と疲労試験の結果、および施工法の概要を報告する。

キーワード：当て板補強、鋼床版垂直補剛材、疲労き裂、支圧接合用ボルト

1. はじめに

鋼床版デッキプレートと垂直補剛材上端との溶接部では、図1に示すような疲労き裂が多く報告されている¹⁾。このき裂はデッキプレートの変形を垂直補剛材が拘束することにより、垂直補剛材とデッキプレートの回し溶接部から発生するものであり、過度に進展するとデッキプレートの陥没を生じる可能性もある。

鋼床版垂直補剛材のき裂に対する補修・補強対策として、これまでに様々な方法が提案されており、①溶接止端部処理では、グラインダーによるき裂除去やICR^{2),3)}やUIT⁴⁾によるピーニング処理にてき裂を閉じ、溶接部の疲労強度を回復させる方法、②垂直補剛材上端部に半円切欠き⁵⁾や上端部切断除去により補剛材上端部のディテールを改良する方法、③垂直補剛材の上端部に当て板を設け、溶接部に生じる作用力をバイパス構造にて低減させる方法（従来工法）などが挙げられる。

従来工法は、当て板をデッキプレートにボルト等で締め付ける作業があるため、舗装撤去・再敷設の作業が必要となる。そこで、デッキプレート下面から確実に当て板をデッキプレートに密着させられる工法が求められ、ジャッキを使った当て板のリフトアップ⁶⁾や、テーパ

カラーを用いてボルト挿入時に当て板をリフトアップする方法⁷⁾など、幾つか提案されている。しかし、当て板をリフトアップさせるには特殊部材や使用機材を必要とし、かつ当て板によりき裂を覆ってしまうため、対策後のき裂状態と補修効果の確認が難しいという問題が挙げられる。そこで本研究では、該当箇所の疲労き裂抑制対策として、簡便かつ特別な機材を用いない施工性能、補強効果の検証に基づく耐久性能を有し、かつ補強後の維持管理性を確保する新たな当て板によるリフトアップ工法（KM リフト工法）を考案した。本稿では、KM リフト工法の実用に配慮した構造概要、および実験に基づく検証結果について報告するものである。

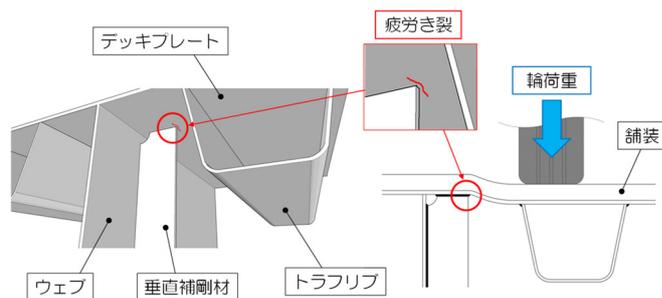


図1 鋼床版垂直補剛材上端部の疲労き裂

*1 川田工業㈱鋼構造事業部保全推進室 課長

*2 川田工業㈱北陸事業部富山工場生産技術課

*3 川田工業㈱北陸事業部富山工場品質管理課

*4 川田工業㈱鋼構造事業部四国工場橋梁技術課 課長

2. 提案する当て板補強構造

KM リフト工法は、鋼床版の垂直補剛材上端に生じる疲労き裂に対し、既往研究に示された当て板のリフトアップ工法（ジャッキアップ、テーパーカラー使用）と比べ、短時間の作業で容易に施工ができる特徴を有している。そのポイントとして、図2に示すように垂直補剛材側と補強材側に設けたボルト孔間にわずかなズラシ量 d を設け、ボルト孔に支圧接合用高力ボルトを打ち込むことで、補強材をリフトアップすることにある。鋼床版に KM リフトを密着させることで、溶接部に生じる作用力を低減させる新たな応力伝達機構が成立する。この結果、溶接部に生じる応力が抑えられ、き裂の進展が抑制される。

また、KM リフトの構造は、図3に示すように L 形鋼の両サイドへ鉛直力を伝達するリブを設け、補剛材側にはき裂の発生源となる回し溶接部を囲むように開口を設けている。これにより、垂直補剛材の止端部において、より確実な補強効果（応力低減効果）を発揮することができ、かつ開口部より補強後のき裂状況の確認が可能となる。

なお、施工時には既設部材の変形やリフト本体の出来形により、デッキプレートとの隙間が生じる可能性もあることから、当て板フランジ面には表1に示すアクリル系樹脂接着剤（以下、接触性向上剤）を塗布した後に当て板を設置する方法を採用した。

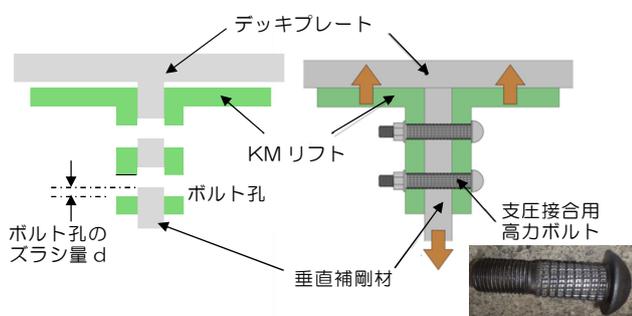


図2 支圧接合用高力ボルトによるリフトアップ機構

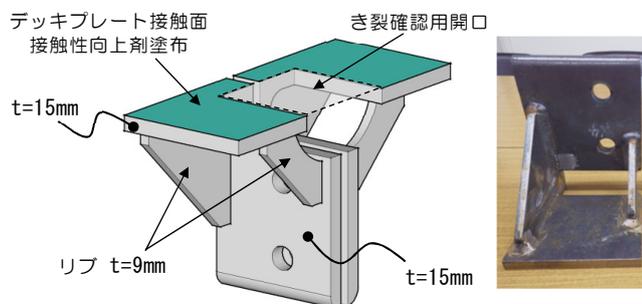


図3 KM リフト（補強材）構造外観図

表1 アクリル系樹脂接着剤の材料特性

主成分	変性アクリル樹脂 (硬化剤含有と促進剤含有の2液タイプ)
可使用時間 (25°C)	25分
硬化時間 (25°C)	50分
引張特性	引張強さ9.8N/mm ² , 引張伸び48%
塗布方法	1~2mm程度の厚さで当て板上面に平滑に塗布。当て板リフトアップ時に樹脂が当て板からはみ出ることを確認

3. 静的載荷試験による検証

KM リフト工法による応力低減効果の検討とボルト孔のズラシ量の設定を目的に静的載荷試験を実施した。試験は図4に示す試験体（鋼材 SM490A）を用いた。ボルト孔のズラシ量 d は 1.0mm, 1.5mm の 2 ケースを設定し、左側の補剛材に $d=1.0\text{mm}$ タイプ、右側に $d=1.5\text{mm}$ タイプの KM リフトを配置した。載荷ケースはデッキプレートの中央載荷 L_{case1} 、補剛材溶接部直上の載荷 $L_{\text{case2-1}}$ ($d=1.0\text{mm}$)、 $L_{\text{case2-2}}$ ($d=1.5\text{mm}$) とし、載荷荷重は、文献4)を参考に、貼付したひずみゲージの補強前載荷試験の計測値 1000~1200 μ 程度となるように L_{case1} で 20kN, L_{case2} で 60kN に設定している。なお、KM リフトの垂直補剛材からの張出量はき裂部分の確認用開口と支圧応力の伝達に配慮して、ここでは 60mm に設定している。

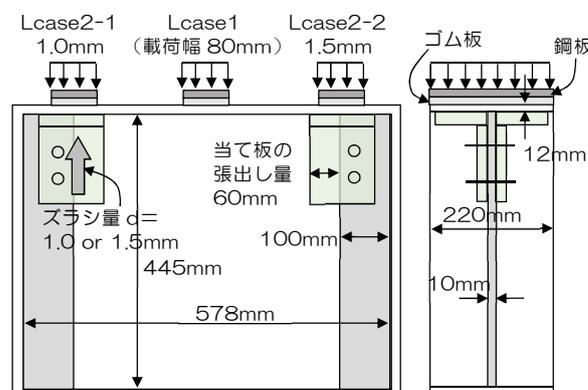


図4 静的載荷試験体

図5にボルト孔の切削方法を示す。垂直補剛材の孔明けは治具に設置された鉛直突起 PL とデッキプレートの2箇所位置合せを行える専用の治具を用い、アトラ（磁気ボール盤）により当て揉みにて孔明けを実施することで孔明け精度を確保する工夫を行った。写真1に KM リフトの設置状況を示す。デッキプレートとの接触面には先に示した接触性向上剤を用いることで、出来形に応じた部材隙間を埋めるためのフィラープレート等を必要としない簡易な構造である。

また、デッキプレートと垂直補剛材の回し溶接部付近での応力低減効果を確認する目的で、回し溶接止端部か

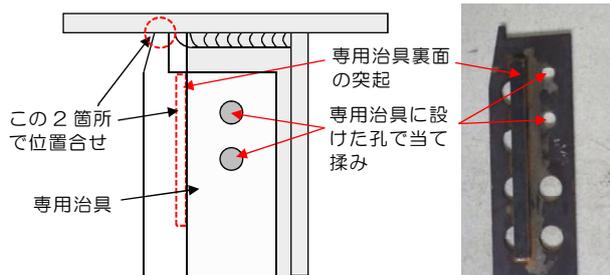
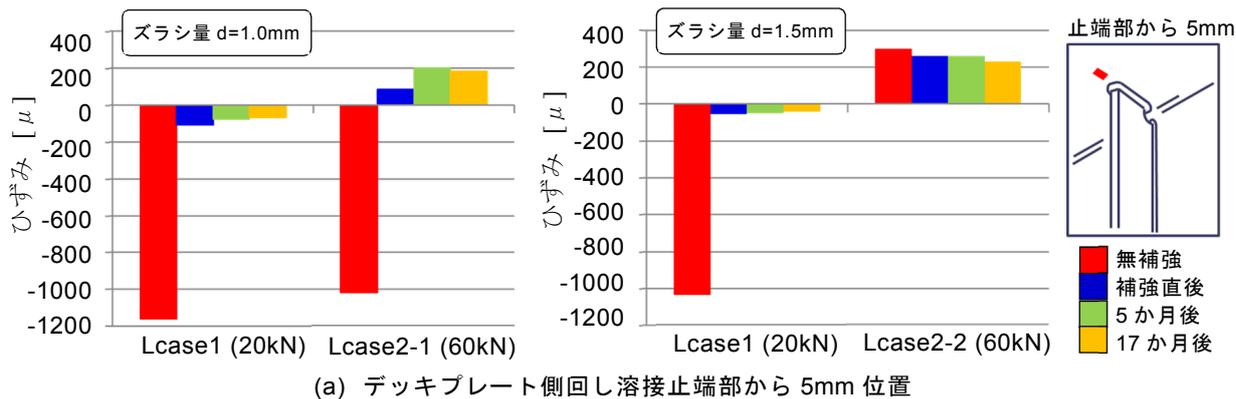


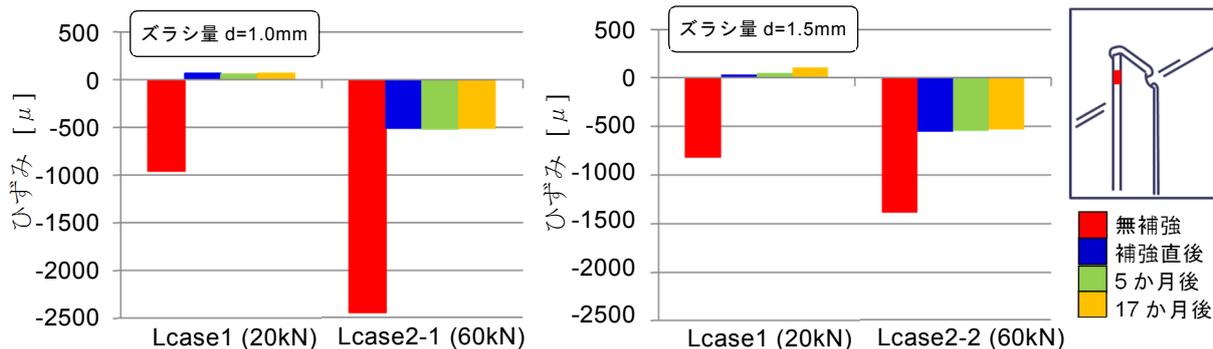
図5 ボルト孔の切削方法（専用治具使用）



写真1 KM リフト設置状況



(a) デッキプレート側回し溶接止端部から 5mm 位置



(b) 垂直補剛材側回し溶接止端部から 5mm 位置

図6 補強の有無によるひずみの低減効果

ら 5mm のデッキプレート位置および垂直補剛材コバ面に単軸のひずみゲージ（ゲージ長 1mm）を貼付し、補強前後のひずみの変化を測定した。図 6 に静的荷重試験の結果として、ひずみ値の推移を示す。図 6(a)にデッキプレート側のひずみ値、図 6(b)に垂直補剛材コバ面のひずみ値を示し、補強効果の持続性の確認を目的として、補強後に室内保管を行い、5ヶ月後と17ヶ月後にも静的荷重試験を実施している。

デッキプレート中央荷重 Lcase1 では、デッキプレート側、垂直補剛材コバ面ともに無補強時に比べて補強後のひずみ値は微小であり、90%程度以上のひずみ低減効果が得られた。また、ブラシ量 $d=1.0\text{mm}$ と 1.5mm の違いにおいて、ひずみ低減効果に大きな差異は見られなかった。

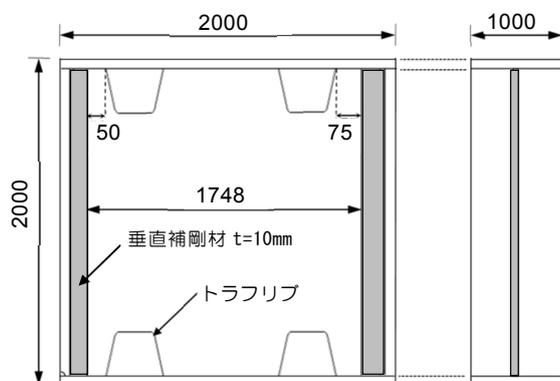
垂直補剛材直上の荷重ケース Lcase2-1 では、デッキ

プレート側で無補強時に 1000μ 程度の圧縮ひずみが計測されているものの、補強後には大きなひずみ低下が確認でき、引張領域に転じている。Lcase2-2 では無補強時に引張ひずみが生じているものの、補強後の発生ひずみに大きな変化は見られなかった。無補強時における Lcase2-1 で圧縮、Lcase2-2 で引張と発生領域が異なる要因として、垂直補剛材とデッキプレートの溶接によりデッキプレート厚が急変する位置であり、その付近を中心とした荷重ケースであるため、補剛材端部との相対的な位置関係における若干のずれにより荷重の分担が異なったものと考えられる。しかし、KM リフトでの補強により、荷重付近全体を剛な構造に転じることで、補強後のひずみ値は引張領域において差異が生じず、いずれも 200μ 程度の比較的小さい値であることから、補強効果が期待される構造と考えられる。

一方、垂直補剛材コバ面では、無補強時の発生ひずみが case2-1 と Lcase2-2 で異なるため、ひずみ低減率を両者で比較はできないものの、両載荷ともにひずみは大きく低減しており、補強後のひずみも概ね同等の値であることから、補強による応力伝達のバイパス効果が有効に機能していると考えられる。

なお、デッキプレートおよび垂直補剛材コバ面ともに、補強後 5 ヶ月後、17 ヶ月後の載荷試験においても、概ね補強直後のひずみ値と同等であり、補強部材設置後の補強効果の持続性において影響がないものと判断される。

実橋では補強部位に縦リブが近接していることや横断・縦断勾配を含めた補強部位の変形など、ボルトの打ち込みが難しい施工条件も考えられる。従って、ボルト孔のズラシ量 d は当て板をリフトアップが可能となる範囲において、極力小さいことが望ましい。そこで、図 7 に示すような垂直補剛材上端にトラフリップが近接する大型の試験体を製作し、施工試験を実施した。その結果、ズラシ量 $d=1.0\text{mm}$, 1.5mm では共にボルトの打ち込みは難しい場合があり、ボルトが入らない・ボルトが曲がるなどの施工面での問題が生じる結果となった。従って、ズラシ量 $d=0.8\text{mm}$ に減じて再度施工試験を行い、施工可能なことと KM リフトに過剰な応力が生じていない状態を確認し、疲労試験以降の検討では $d=0.8\text{mm}$ を用いて検証を行うこととした。



(a) 実構造を考慮した施工試験体



垂直補剛材との隙間発生 施工時に大きな変形を伴うボルト

(b) 正しくリフトアップできなかった例

図 7 実物大試験体による施工試験

4. 疲労試験による検証

繰返し荷重下における KM リフト工法の補強効果の持続性、および疲労き裂に適用した場合の当て板補強後の

き裂挙動を確認する目的として、図 8 に示す試験体を用いて疲労試験を行った。疲労試験は 2 体の試験体に載荷梁を渡し、2 体同時に上下で試験を実施することで、計 8 箇所の垂直補剛材における検証を同時に行える試験方法としている。

疲労試験は、油圧サーボ試験機（荷力能力 $\pm 980\text{kN}$ ）を用い、最小荷重を 10kN に固定して行った。載荷範囲は $200 \times 200\text{mm}$ とし、載荷範囲の中心が垂直補剛材端部から 200mm の位置になるように設置した。載荷初期は最大荷重を 60kN （荷重範囲 50kN ）とし、き裂の発生状況に応じて最大荷重を増加させ、き裂の発生後、ある程度進展した段階において補強を施した。当て板の張出し量は、前章で示す実構造でのトラフリップと垂直補剛材が近接している状態に配慮して 40mm に設定した。

疲労試験の開始後、3 箇所の補剛材位置（No.1-UL, No.1-UR, No.2-UR）の溶接部から疲労き裂が発生し、順次補強を施した。最終的には載荷 557 万回（荷重範囲

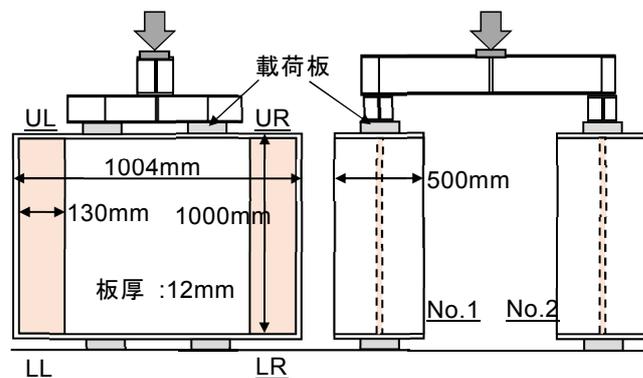
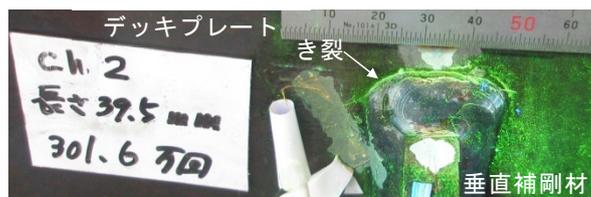


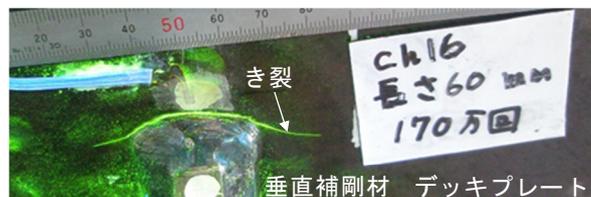
図 8 疲労試験のセットアップ



(a) 補剛材 No.1-UL



(b) 補剛材 No.1-UR



(c) 補剛材 No.2-UR

写真 2 補強直前の疲労き裂の状況

表 2 疲労試験結果（ひずみは全てひずみ範囲）

(a) 疲労き裂が発生した補剛材

補剛材No	開始時ひずみ(ΔP=50kN)		補強時荷重範囲	補強時き裂長さ	試験終了時 き裂長さ	備考
	デッキプレート側	補剛材側				
No.1-UL	-679 μ	-610 μ	ΔP=70kN	39.5mm	39.5mm	き裂先端ひずみゲージ
No.1-UR	-733 μ	-835 μ	ΔP=70kN	28mm	28mm	き裂先端クラックゲージ
No.2-UR	-849 μ	-935 μ	ΔP=60kN	60mm	60mm	き裂先端ひずみゲージ

(b) 疲労き裂が発生しなかった補剛材

補剛材No	開始時ひずみ(ΔP=50kN)		補強前ひずみ (ΔP=80kNでの実験値/ΔP=120kNに換算値A)		補強直後B/試験終了時ひずみC (ΔP=120kN)	
	デッキプレート側	補剛材側	デッキプレート側	補剛材側	デッキプレート側	補剛材側
No.1-LL	-563 μ	-756 μ	-1007/-1511 μ	-1269/-1904 μ	-267 / -304 μ	16 / 14 μ
No.1-LR	-649 μ	-694 μ	-1057/-1586 μ	-1125/-1688 μ	-167 / -241 μ	52 / 56 μ
No.2-UL	-652 μ	-772 μ	-1076/-1614 μ	-1203/-1805 μ	-414 / -280 μ	29 / 65 μ
No.2-LL	-559 μ	-636 μ	-996/-1494 μ	-1050/-1575 μ	-83 / -109 μ	7 / 11 μ
No.2-LR	-653 μ	-733 μ	-830/-1245 μ	-1013/-1520 μ	-118 / -161 μ	76 / 88 μ

※本文中の疲労き裂が発生していない補剛材の補強によるひずみ低減率は1-(B/AまたはC/Aの絶対値)×100%と定義

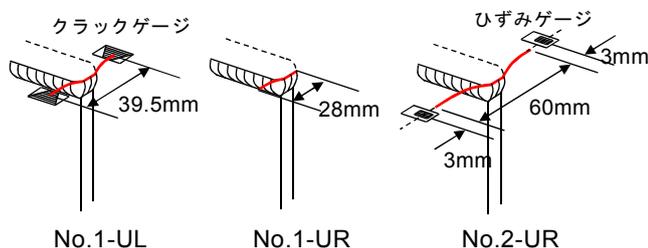


図 9 き裂先端のひずみゲージ・クラックゲージ

80kN)で、き裂の発生していない補剛材も全て補強し、最大荷重を130kNとして200万回載荷した後、疲労試験を終了した。

補強直前における3箇所での疲労き裂状態を写真2に示す。No.1-ULおよびNo.2-URのき裂は、き裂先端が両側とも母材に進展している状態であり、No.1-URのき裂先端の片側は止端部に留まっている状態であった。KMリフトでの補強はき裂先端に特別な処理(ストップホールなど)を設けず、直接当て板を施す方法としている。No.2-URの補強時(載荷170万回)には、補修前・補強時・補強後のき裂先端におけるひずみ挙動の把握を目的として、き裂先端から3mmの位置に単軸ひずみゲージを貼付した。また、No.1-ULの補強時(載荷301.6万回)には、き裂進展の確認を目的として、き裂先端位置にクラックゲージを貼付した。表2に疲労試験の結果を、図9にき裂先端に施した各ゲージの貼付状況を示す。

まず、疲労試験中のき裂発生補剛材において、予め設置した溶接止端部から5mm位置でのひずみ変化を図10に示す。載荷初期のひずみは各補剛材で異なるが、補強後は概ね同様の傾向を示している。特に、単独で補強を行ったNo.2-URのひずみは補強後、しばらくは若干のひずみ値増大が確認できるものの、その後、載荷荷重の増大に伴い、概ね一定の値に推移している。図11にNo.2-URのき裂先端5mm位置に貼付したひずみゲージ(赤・青)、

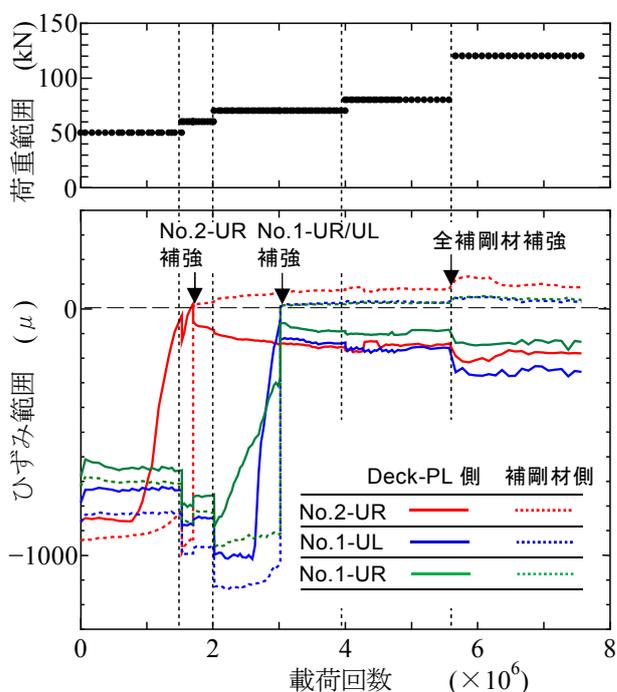


図 10 き裂発生位置でのひずみ変化

およびNo.1-ULのき裂先端位置に貼付したクラックゲージ(緑・橙)の変化を示す。き裂先端のひずみは、補強前には-1000μ程度発生していたが、補強直後の静的試験では、ほとんど発生しておらず、大きな応力の低減効果が得られたものと判断できる。また、No.1-ULのき裂先端に貼付したクラックゲージの値はほとんど変化しておらず、表2(a)に示す通り、No.1-UR、およびNo.2-URのき裂に対して、補強後の表面方向のき裂の進展は見られなかった。

次に、載荷557万回(荷重範囲ΔP=80kN)において、き裂未発生5箇所に対しても当て板補強を行った。疲労試験中の溶接止端部から5mm位置でのひずみ変化を示した図12、および表2(b)の補強前後のひずみ値にも示

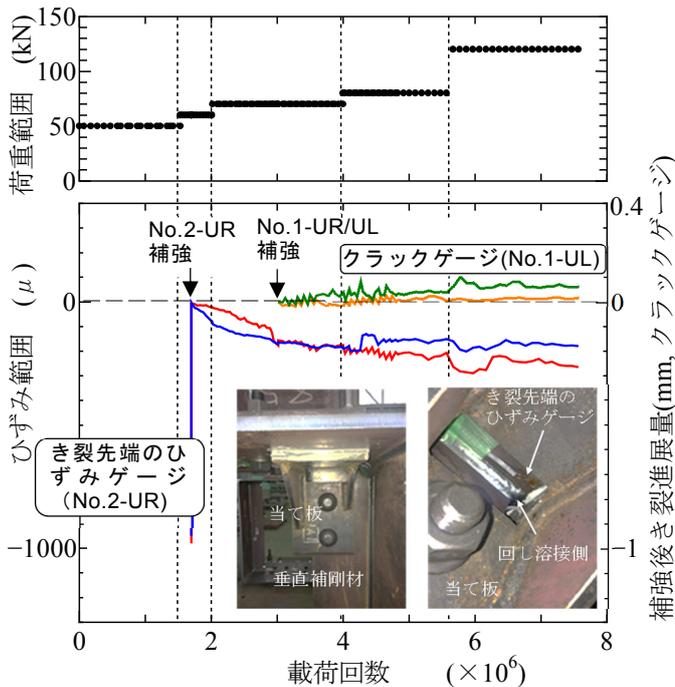


図 11 き裂先端のひずみ・クラックゲージの変化

される通り、全ての補剛材位置において当て板による引張応力が生じ、ひずみ値は 1000 μ 程度プラス側に転じている。これは、KM リフトの設置により当て板がリフトアップされ、デッキプレートを押上げている状態を示している。補強によるひずみ低減率は 74%~94%、補強後 200 万回の荷重 (荷重範囲 $\Delta P=120\text{kN}$) 後でも 80%~93% の大きなひずみ低減効果が得られ、補強効果とその持続性も確保できることがわかった。

5. おわりに

本研究では、鋼床版デッキプレートと垂直補剛材上端との溶接部で生じる疲労き裂に対し、簡便かつ特別な使用機材を用いない新たな当て板によるリフトアップ工法として、KM リフト工法の開発を実施した。各種検討 (施工試験, 静的試験, 疲労試験) の結果、応力低減効果と疲労き裂の進展抑制効果、および各効果の持続性について、実用に値する評価が得られたものと考え。今後は、実際に生じている疲労き裂部位への適用を推進させ、実証での評価を進めると共に、他の疲労き裂部位への応用を求め、研究開発を進めることとする。なお、本構造と施工法については、2018 年 8 月に特許第 6386616 号として取得済である。

最後に、本報告は芝浦工業大学・穴見教授に執筆頂いた構造工学論文集 No.65A⁸⁾を編集したものである。また、開発に当っては穴見教授および研究室の学生、MK エンジニアリング株式会社の皆様に多大なるご指導とご協力を賜りましたこと、ここに感謝の意を表します。

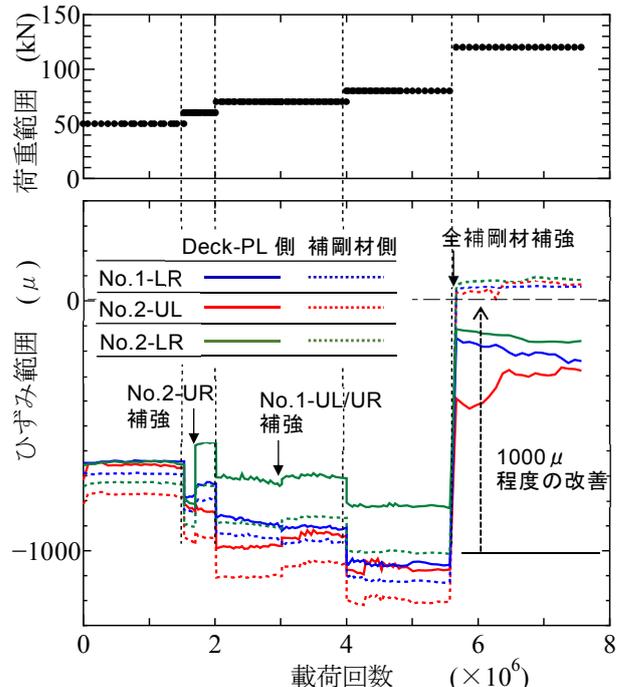


図 12 溶接止端部のひずみ変化 (き裂なし)

参考文献

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労, 2010
- 2) 松本理佐, 石川敏之, 塚本成昭, 栗津裕太, 河野広隆：鋼床版の垂直補剛材溶接部のき裂を対象とした各種補強法の効果の比較に関する研究, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No-1, pp.192-205, 2016.
- 3) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎：垂直補剛材上端に発生した疲労き裂への ICR 処理, 土木学会中部支部研究発表会, I-20, 2010.
- 4) 大住圭太：鋼床版垂直スチフナー上端溶接部に生じる疲労き裂の発生・進展性状と補修方法に関する研究：法政大学博士論文, 2016.
- 5) 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 巻, 第 62 号, pp.35-46, 2009.
- 6) 八木貴之, 江崎正浩, 村越潤, 梁取直樹, 宇井崇：鋼床版垂直補剛材回し溶接部の疲労損傷に対する補修方法とその効果, 土木学会第 63 回年次学術講演概要集, I-209, pp.407-408, 2008.
- 7) 石川誠, 江崎正浩, 村越潤, 有馬敬育：鋼床版デッキプレートと主桁ウェブ垂直補剛材溶接部の疲労損傷補修・補強構造検討, 第 61 回土木学会年次学術講演概要集, I-541, pp.1079-1080, 2006.
- 8) 穴見健吾, 竹淵敏郎, 米山徹, 長坂康史, 木ノ本剛：支圧接合用高力ボルトを用いた鋼床版垂直補剛材上端の当て板補修, 構造工学論文集 Vol.65A, pp.533-543, 2019.3.