

# 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

Repair with splice plate for fatigue crack at vertical stiffener of orthotropic steel deck using bearing type bolt

穴見健吾†, 竹渕敏郎\*, 米山徹\*\*, 長坂康史\*\*\*, 木ノ本剛\*\*\*\*

Kengo Anami, Toshiro Takebuchi, Toru Yoneyama, Yasushi Nagasaka, Takeshi Kinomoto

†博 (工), 芝浦工業大学, 工学部土木工学科教授 (〒135-8564 東京都江東区豊洲 3-7-5)

\*MK エンジニアリング株式会社 (〒154-0012 東京都世田谷区駒沢 2-16-1-6F)

\*\*川田工業株式会社 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

\*\*\*川田工業株式会社 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

\*\*\*\*修 (工), 首都高速道路株式会社 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関 1-4-1)

One of the typical fatigue cracks in orthotropic steel deck is observed at the top end of vertical stiffener. This study investigates the repair and retrofit for those fatigue cracking with the newly developed method with L-shaped splice plate. The main characteristics of this method are followings: (1) bearing type bolt is used for lifting up L-shaped splice plate, (2) detail of L-shape splice plate itself is modified to facilitate the maintenance process and also to guarantee the effectiveness of this application. This paper reports the results of static test, filed test and fatigue tests conducted for evaluating the applicability of the proposed method.

*Key Words: repair with splice plate, vertical stiffener, fatigue, bearing-type bolt*

キーワード: 当て板補強, 鋼床版垂直補剛材, 疲労, 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に図-1に示すような疲労き裂が多く報告されている<sup>1)</sup>。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。

この鋼床版垂直補剛材のき裂に対する補修・補強対策として、これまで様々な方法が提案されているが、大別すると以下ようになる。

一つ目として、溶接止端部処理(グラインダーやピーニング)を用いて溶接部自体の疲労強度を向上する方法が挙げられる。き裂が発生している場合についてはICR処理<sup>2)3)</sup>やUIT処理<sup>4)5)</sup>を用いてき裂を閉じることにより延命化する方法の検討も行われている。

二つ目として、垂直補剛材上端部近傍に半円弧を設け、応力の流れを改善し止端部の応力を低減する半円切欠き工法<sup>6)7)</sup>や、補剛材上端を切断除去し、き裂発生箇所自体

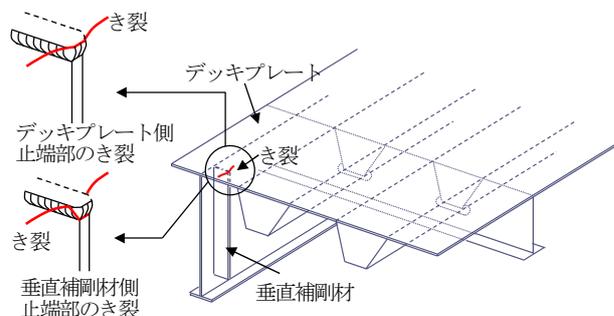


図-1 鋼床版垂直補剛材上端部のき裂

を除去する方法<sup>8)</sup>など補剛材上端部のディテールを改善する方法が挙げられる。この方法では、応力集中部位が回し溶接部から別の位置(前者では半円弧位置、後者では切断部端部や首溶接部)に移る可能性もあり、それらの位置に対する疲労の検討・対策が必要となり、例えば垂直補剛材上端の切断後にデッキプレートと垂直補剛材の間にL形部材やリブ付きL型部材を設置するような事例もある<sup>9)</sup>。また、き裂が発生している場合には別途そのき裂に対する対策も必要となる。

最後に本研究でも対象とする補強方法のように、垂直補剛材上端部に対して当て板を設け、溶接部に作用する

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: anami@sic.shibaura-it.ac.jp

力のバイパスとして作用させることにより、回し溶接部の応力を低減させる方法が挙げられる。この方法では、デッキプレート上の舗装の撤去・再敷設作業が必要であることや補強後の舗装の耐久性を考慮すると、デッキプレート下面からの施工で確実に当て板をデッキプレートに密着させることが必要となる。デッキプレート下面からの施工で当て板をデッキプレートに密着させる方法として、ジャッキを使った当て板のリフトアップ<sup>10)</sup>や、テーパー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<sup>11)</sup>など、種々の方法が提案・検討されている。一方で、当て板は一般的には山形鋼形状の部材が取り付けられるため、き裂が発生している場合には、当て板のためにそのき裂が再進展しているか等の補強効果を確認することが難しいという問題も挙げられる。

本研究では、鋼床版垂直補剛材上端部の疲労き裂に対する補修・補強対策として当て板工法に着目し、施工性（簡便かつ特別な使用機材を用いない）、効果の耐久性、および補強後の維持管理性の観点から、新しい当て板形状と、当て板のデッキへの密着性を確保するための新しいリフトアップ方法を提案し、その効果を静的載荷試験・疲労試験および実橋梁での適用試験により検討した。

## 2. 提案する当て板補強

本工法では、当て板のリフトアップのための特別な機材を必要とせず現場での作業を簡略化させること、更には補強効果の耐久性を向上させることを目的として、図-2 に示すように垂直補剛材表裏両面に当て板を設置し、支圧接合用高力ボルトを補強部に打ち込むことにより当て板がリフトアップされる工法を提案している。ここでは当て板および垂直補剛材のボルト孔を所定のずらし量  $d$  だけずらして設けることにより、そこに支圧接合用高力ボルトを打ち込むことで、当て板がデッキプレート方向にリフトアップされる（垂直補剛材は下方に引っ張られる状態となる）。本研究ではボルト孔は直径 23.5mm、支圧接合用高力ボルトは B10T、M22 を使用している。位置をずらしたボルト孔に、確実にボルトを打ち込むためには、ずらし量を含めた精度の良い削孔位置の特定が必要であるが、本研究では専用治具を開発してボルト孔あけを行った。使用したボルトは、施工時もしくは供用時に当て板が回転しないようにボルト本数を2本とし、図-2 に示すように2つのボルト孔ともにずらし量を設け、そこに2本のボルトを同時に打ち込むという施工手法を採用している。

一般的に垂直補剛材上端部への当て板には山形鋼形状のものが用いられることが多いが、この当て板形状について次に検討を行った。図-3 に本研究で行った静的試験に用いた試験体の形状・寸法を示す。デッキプレートに相当するフランジの板厚は 12mm であり、垂直補剛材厚は 10mm としている。図-4 に、Type-A 試験体（供試鋼材

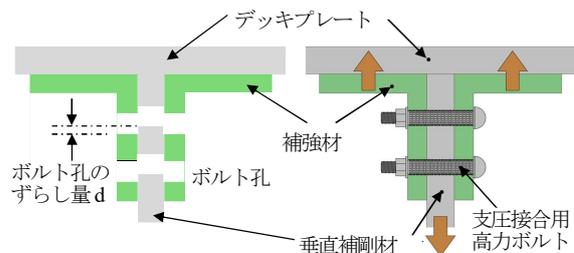


図-2 支圧接合用高力ボルトを用いたリフトアップ

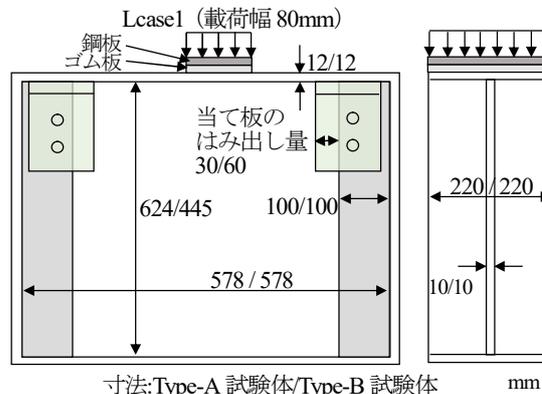


図-3 静的載荷試験体



図-4 不等辺山形鋼を用いた補強

SM400) に対して、不等辺不等厚山形鋼 (200×90) を当て板として用い、本工法によりリフトアップした状況を示す。ここでは溶接部の干渉を避けるためにフランジ側にフィラープレートおよび孔ずらし用のアルミプレート(板厚 1mm)を設け、ボルト孔のずらし量  $d$  を 1mm とし、当て板の垂直補剛材からののはみ出し量を 30mm とし、図中に示す 2 か所に施工を行っている。図-3 に示す試験体中央フランジ上に載荷する Lcase1 の場合、回し溶接部フランジ側止端部から 5mm 位置で 25%、50%のひずみ低減、補剛材こば面で垂直補剛材側止端部から 5mm 位置で 75%、95%程度のひずみ低減が得られ大きなひずみ低減効果が得られるものの、ばらつきが大きい結果となった<sup>12)</sup>。当て板のフランジとの接触状況を図-4 に示すが、フランジ・フィラー・当て板は外部からの可視範囲では隙間なく密着している場合と回し溶接部近傍では密着しているものの、そこから離れた当て板端部の位置では隙間があるケースも見られた。後述するが、このよう

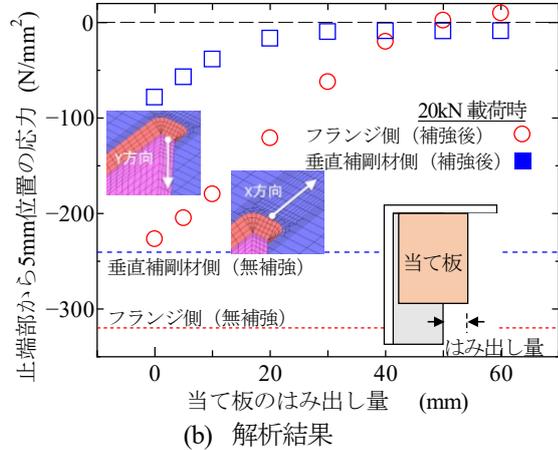
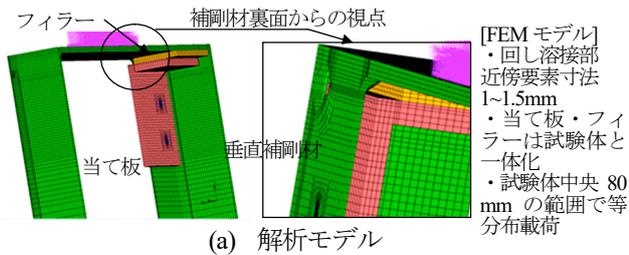


図-5 当て板のはみだし量と止端部近傍応力の関係

な隙間が見られるケースでも垂直補剛材上端回し溶接部の大きな応力低減効果は見られるものの、このような隙間は防錆上の問題を引き起こす可能性もある。この原因として、当て板をリフトアップするときに、フランジ（や当て板）が変形することや、当て板とフィラーの間、フィラーとフランジの間と2つの接触面があることなどが考えられる。本工法ではフィラーを設けずに溶接部の干渉を防ぐ方法を検討するとともに、当て板とフランジの間に表-1に示すアクリル系の樹脂を塗布した後、当て板を設置する方法を採用した。

鋼床版垂直補剛材上端部では、補剛材回し溶接部前面に荷重されるような場合に大きな圧縮応力が発生する。そのような荷重状態の場合に回し溶接部の応力を当て板により低減するためには、当て板を補剛材回し溶接部よりも前面にはみ出させる必要がある。図-5にType-A試験体をモデル化し、FEM解析より求めたフランジ側および補剛材こば面側の溶接止端部から5mm位置の応力と当て板のはみ出し量の関係を示すが、当て板を垂直補剛材回し溶接部より前まで延長するに伴い、各止端部近傍の応力が減少している。図-4に示した静的試験では、当て板のはみ出し量を30mmとしているが、当て板が垂直補剛材からはみ出している場合、当て板内部の止端位置の観察が困難であり、ある程度き裂が存在している場合には、先端が当て板に隠されて補強後の視認が不可能になる。このような溶接部の干渉および補強部位の補強後の維持管理に関する通常の山形鋼形状の当て板の持つ問題点を改善することを目的として、図-6に示すように山形鋼の屈曲部を切り欠いた構造を採用した。当て板の屈曲部を切り欠くことによる当て板の剛性の低下に対する対策として当て板を切り欠く前に、当て板両端にリ

表-1 当て板とフランジの間に用いた樹脂

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）
可使時間（25℃）	25分
硬化時間（25℃）	50分
引張特性	引張強さ 9.8N/mm <sup>2</sup> 、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

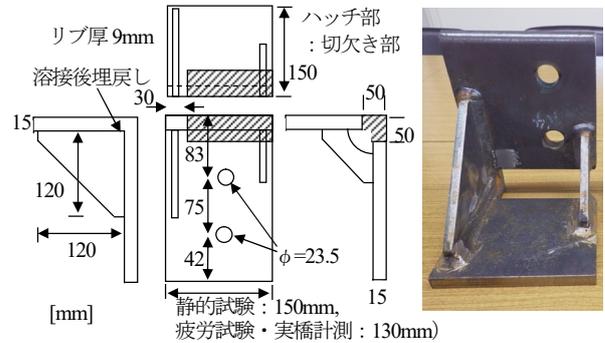


図-6 提案当て板構造

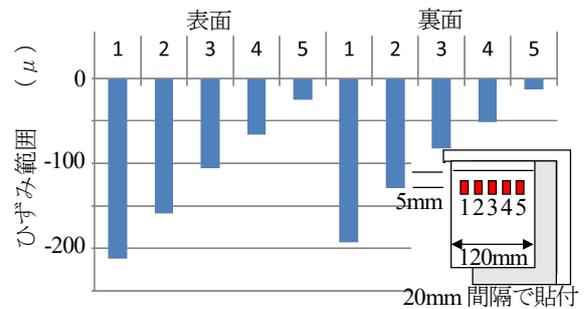


図-7 当て板のひずみ分布 (Type-A: Lcase-1)

ブを取り付けた。このリブは、図-7に示すType-A試験体の補強後Lcase1荷重で当て板上で測定されたひずみ分布に示されるように、垂直補剛材前面に力が作用した場合に、回し溶接部の応力低減に最も寄与する垂直補剛材からはみ出した部分の剛性を上げることも目的としている。リブは当て板上面とは完全溶込み溶接で取付け、その当て板の補剛材に取り付く部位とはすみ肉溶接で取り付けている。

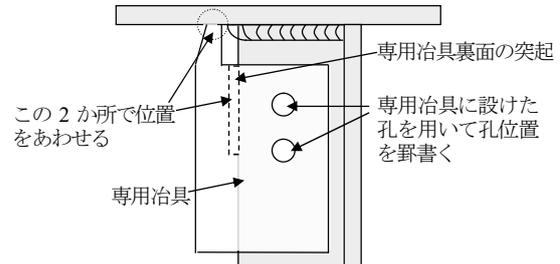
### 3. 静的試験による検証

本工法による応力の低減効果の確認を目的に静的荷重試験を行った。図-3に示すType-Bの試験体（供試鋼材SM490）をここでは用いた。2つの垂直補剛材上端を同時に補強することとし、それぞれのボルト孔のずらし量は1mmおよび1.5mmとした。当て板の垂直補剛材こば面からののはみだし量は60mmである。図-8にボルト孔位置野書き方法の概略と補強後の当て板設置状況を示す（補強状況は第5章を参照）。垂直補剛材の孔位置の野書きは、図-8(a)に示すような専用器具を用いてフランジ下面と垂直補剛材こば面を利用して行っている。各補剛材

のフランジ側および補剛材側の回し溶接止端部から5mmの位置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-9に示すように、本研究では垂直補剛材上端端部（回し溶接部）の疲労現象の大きな要因と考えられる垂直補剛材前方のデッキプレートの変形により回し溶接部に大きな圧縮応力が作用する場合の当て板による応力低減効果を検討することを目的として、荷重ケースはフランジ中央荷重Lcase1、それぞれの補剛材の回し溶接部直上荷重（Lcase2-1mm, Lcase2-1.5mm）とし、それぞれの荷重荷重は、文献5)を参考に、貼付したひずみゲージの補強前荷重試験の計測値1000~1200 $\mu$ 程度となるように設定した。なお、補強前、補強後（アクリル系樹脂硬化後）およびリフトアップ力の低下やアクリル系樹脂の変性などによる補強効果の持続性への影響を確認することを目的として、補強後室内残置し5か月後および17か月後に静的荷重を行っている。

図-10に静的荷重試験結果を示す。なお、Lcase2-1mm荷重では無補強での荷重時に、垂直補剛材こば面側で降伏ひずみを超える値が計測され、それ以後の無補強時の荷重は40kN荷重とし、補強以後は60kN荷重としている。従って、Lcase2-1mmの無補強時の値は40kN荷重の計測値を60kNに換算（1.5倍=60kN/40kN）して示したものである。フランジ中央荷重Lcase-1では、フランジ側、補剛材こば面ともに90%程度以上のひずみ低減効果が見られた。またずらし量dが1.0mmの場合と1.5mmの間にひずみ低減効果に大きな差異は見られなかった。補剛

材直上荷重では、Lcase2-1.5mmにおいて、無補強時にフランジ側に引張りひずみが計測され、補強後も発生ひずみに大きな変化は見られなかった。Lcase2-1mmの場合にはフランジ面では無補強時に圧縮のひずみが計測され、補



(a) ボルト孔位置野書き方法の概要



(b) 当て板設置後

図-8 提案当て板設置状況

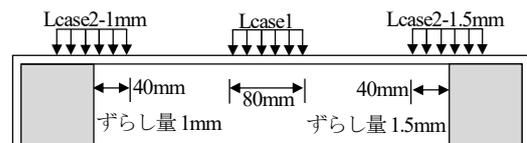
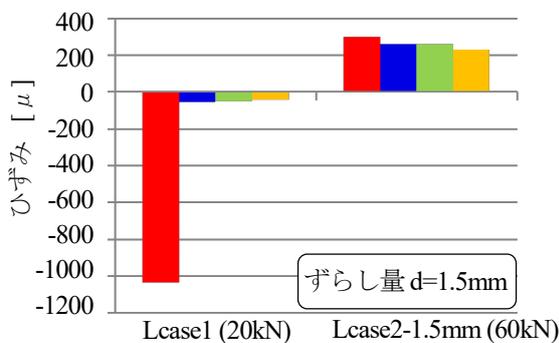
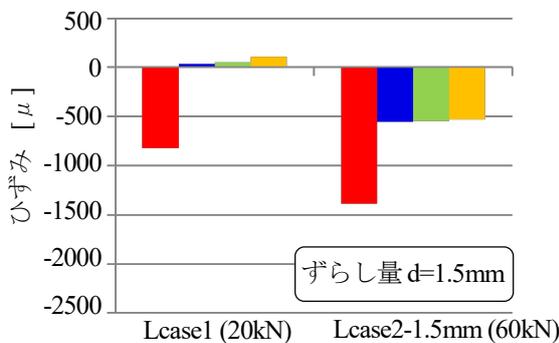
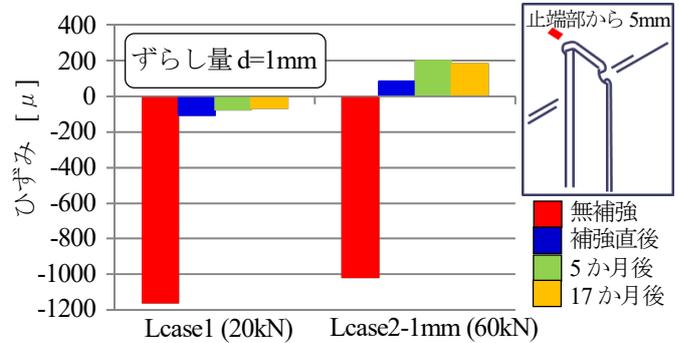


図-9 静的荷重ケース



(a) フランジ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

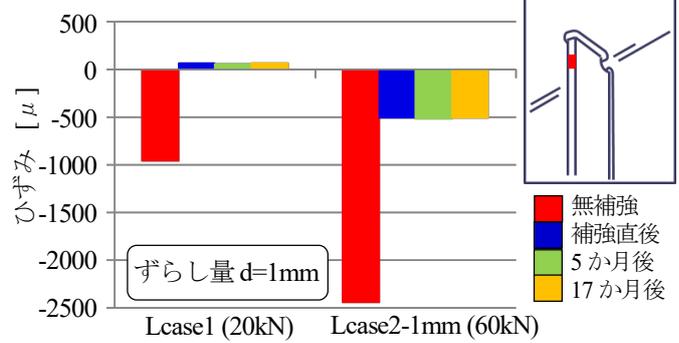


図-10 当て板によるひずみの低減効果

強により大きなひずみ低下が確認でき、また補強後は Lcase2-1.5mm と同等の引張ひずみが計測されている。この両者の载荷で無補強時のフランジのひずみが引張、圧縮と大きく異なっている原因は、本载荷ケース Lcase-2 がフランジの剛性が急変する垂直補剛材端部を中心とした载荷であり、補剛材端部との相対的な位置関係の若干のずれにより荷重の分担が異なったためと考えられるが、補強時には载荷部位全体を補強材により剛にしていることにより、ひずみに差異が生じなかったものと考えられる。垂直補剛材こば面では、無補強時の発生ひずみが Lcase2-1mm と Lcase2-1.5mm で大きく異なるためにひずみ低減率を両者で比較はできないが、両载荷ともにひずみは大きく低減しており、また補強後のひずみも概ね同等の値であった。また、フランジおよび垂直補剛材こば面ともに、補強後 5 か月後および 17 か月後においても概ね補強直後とひずみの値は同等であった。

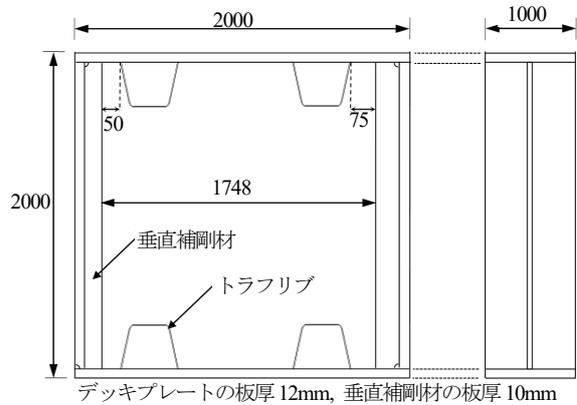
静的試験ではボルト孔のずらし量  $d$  が 1mm の場合と 1.5mm の場合のフランジ側、垂直補剛材側止端部から 5mm 位置のひずみは補強後では概ね同じであり、密着性を確保することができれば補強後のひずみはずらし量  $d$  に依存しないと考えられる。一方で、本工法ではボルト挿入による当て板のリフトアップによりフランジ側、垂直補剛材側止端部近傍に表-2 に示すように引張の予ひずみを与えることになる。また、実橋では補強部位に縦リブが近接していること、横断・縦断勾配を含めた補強部位の変形など施工においてボルトの打ち込みが本静的試験体における施工よりも難しい場合も考えられる。従って、ボルトのずらし量  $d$  は当て板をリフトアップできる範囲で小さいことが望ましい。そこで、本研究では図-11 に示す垂直補剛材上端に近接するようにトラフリップを設けた大型の試験体を製作し施工試験を行った。その結果、ずらし量  $d=1.0\text{mm}$ 、 $1.5\text{mm}$  ではボルトの打ち込みが難しい（ボルトが入らない・ボルトが曲がる）場合が見られた。そこで、ずらし量を  $d=0.8\text{mm}$  に減じ、再度施工試験を行った結果、施工が可能であったことから、以下の検討ではずらし量  $d=0.8\text{mm}$  を採用し、ずらし量を変更した効果も含めて疲労試験により検討を行うこととした。

#### 4. 疲労試験による検証

繰返し荷重下における本工法の補強効果の持続性および、疲労き裂がある場合に本工法を適用した場合の、当て板下でのき裂の挙動を確認することを目的として、図-12 に示す試験体を用いて疲労試験を行った。疲労試験は 2 体の試験体を同時に試験し、計 8 か所の垂直補剛材を同時に試験している。垂直補剛材上下端部回し溶接部のフランジ側・垂直補剛材側の止端部から 5mm 位置にひずみゲージを貼付している。疲労試験時に、必ずしもこの 8 か所の位置でバランス良くひずみが計測されている訳ではなく、また各部位の補強が同時に行われておら

表-2 補強時に発生するひずみ

	ずらし量 1mm	ずらし量 1.5mm
フランジ側	測定失敗	446 $\mu$
垂直補剛材側	432 $\mu$	903 $\mu$
フランジ側・垂直補剛材側ともに止端部から 5mm		



(a) 施工試験試験体



当て板が垂直補剛材から離れる 施工時に曲がったボルト

(b) 正しくリフトアップできなかった例

図-11 実物大試験体による施工試験

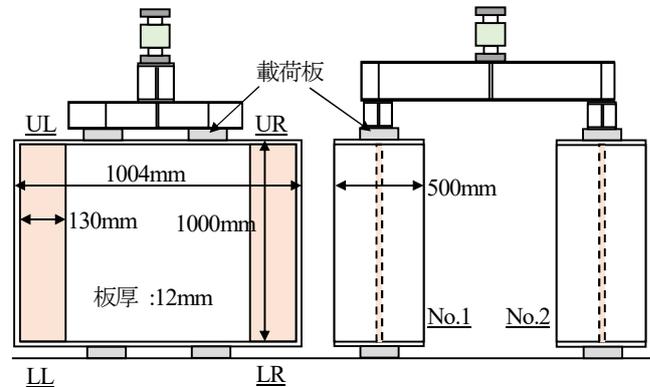


図-12 疲労試験のセットアップ

ず、補強部位の補強が他部位のひずみに影響を少なからず影響を及ぼしている可能性があるが、貼付しているひずみゲージで計測されるひずみ範囲を用いて疲労試験結果を整理することにした。疲労試験は、鷺ノ宮製作所製の油圧サーボ試験機（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。载荷範囲は  $200 \times 200\text{mm}$  とし、载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。载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し、き裂が発生し、ある程度進展した段階で補強を行った。当て板のはみ出し量は、5 章で示す実橋梁での適用試験の対象部位のように、トラフリップが垂直補剛材に近接している場合を考慮して 40mm とした。はみ

表-3 疲労試験結果 (ひずみは全てひずみ範囲)

疲労き裂が発生した補剛材						
補剛材 No	開始時ひずみ ( $\Delta P=50kN$ )		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 (BM: 補強前ピーチマーク試験)
	フランジ側	補剛材側				
No.1-UL	-679 $\mu$	-610 $\mu$	$\Delta P=70kN$	39.5mm	39.5mm	き裂先端ひずみゲージ
No.1-UR	-733 $\mu$	-835 $\mu$	$\Delta P=70kN$	28mm	28mm	き裂先端クラックゲージ
No.2-UR	-849 $\mu$	-935 $\mu$	$\Delta P=60kN$	60mm	60mm	き裂先端ひずみゲージ・BM
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 ( $\Delta P=50kN$ )		補強時前ひずみ ( $\Delta P=80kN$ での実験値/ $\Delta P=120kN$ に換算値 A)		補強直後 B/試験終了時ひずみ C ( $\Delta P=120kN$ )	
	フランジ側	補剛材側	フランジ側	補剛材側	フランジ側	補剛材側
No.1-LL	-563 $\mu$	-756 $\mu$	-1007/-1511 $\mu$	-1269/-1904 $\mu$	-267/-304 $\mu$	16 / 14 $\mu$
No.1-LR	-649 $\mu$	-694 $\mu$	-1057/-1586 $\mu$	-1125/-1688 $\mu$	-167 / -241 $\mu$	52 / 56 $\mu$
No.2-UL	-652 $\mu$	-772 $\mu$	-1076/-1614 $\mu$	-1203/-1805 $\mu$	-414 / -280 $\mu$	29 / 65 $\mu$
No.2-LL	-559 $\mu$	-636 $\mu$	-996/-1494 $\mu$	-1050/-1575 $\mu$	-83 / -109 $\mu$	7 / 11 $\mu$
No.2-LR	-653 $\mu$	-733 $\mu$	-830/-1245 $\mu$	-1013/-1520 $\mu$	-118 / -161 $\mu$	76 / 88 $\mu$

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  $1 - (B/A \text{ または } C/A \text{ の絶対値}) \times 100\%$  と定義



図-13 補強直前の疲労き裂の状況

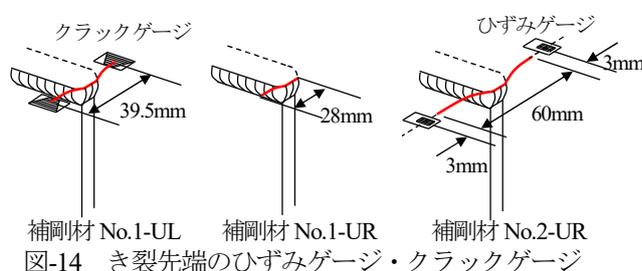


図-14 き裂先端のひずみゲージ・クラックゲージ



図-15 補強状況 (No.2-UR)

出し量を 40mm とした場合でも図-5 に示すように十分なひずみ低減効果が得られると考えられたが、その効果を本疲労試験により確認することとした。最終的には 3 か所の補剛材から疲労き裂が発生したが、荷重 557 万回 (荷重範囲 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 200 万回荷重した後、疲労試験を終了した。表-3 に疲労試験結果をまとめる。ここでは各補剛材位置に名称を付けており、例えば No.1-UL は図-12 に示す No.1 試験体の左側補剛材(L)の上端部側(U)であることを示している。なお、補強は疲労試験の最小荷重である 10kN を荷重している状態で行い、補強後は概ね半日後に静的試験および疲労試験を開始している。

#### 4.1 き裂の発生した垂直補剛材への適用

疲労き裂は補剛材 No.1-UL, No.1-UR, No.2-UR の 3 か所のフランジ側止端部から発生した。補強直前の各き裂を図-13 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るが、No.1-UR のき裂は先端の片側は母材に若干進展しているものの、他方は止端部に留まっている状態で補強を行っている。補強はストップホールなどをき裂先端に設けずに直接当て板を施すという形式で行った。図-14 および表-3 に示すように、No.2-UR の補強時(荷重 170 万回)には、補修前・補強時・補強後のき裂先端のひずみ挙動を把握することを目的として、き裂先端 3mm 位置にき裂先端直角方向に単軸ひずみゲージを貼付するとともに、補強前にピーチマーク試験 (最小荷重を通常荷重範囲の

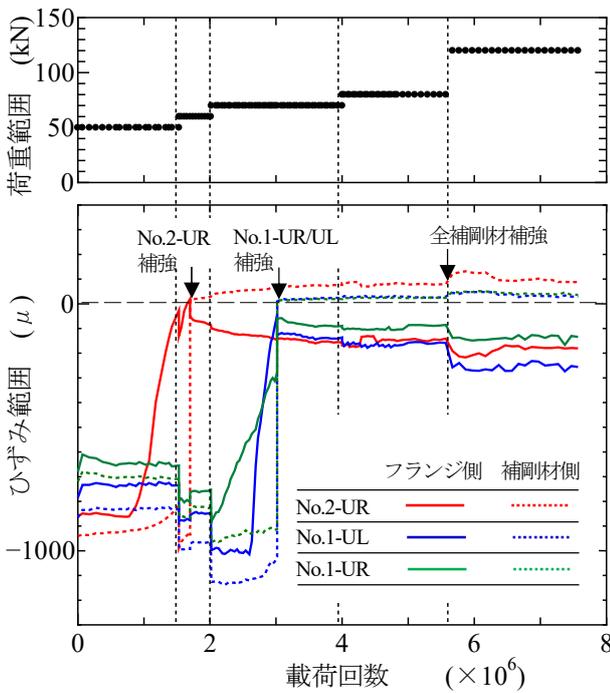
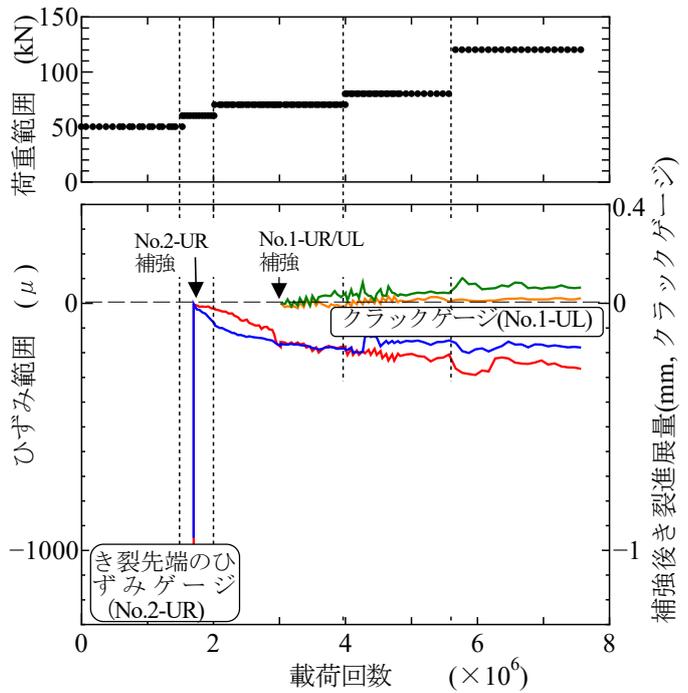
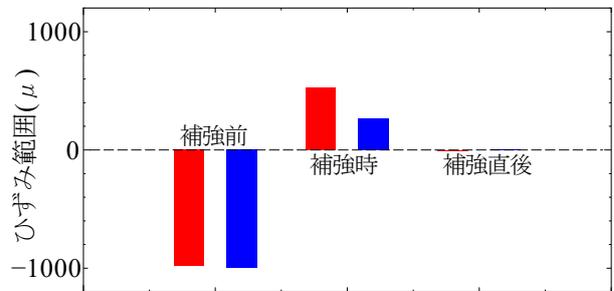


図-16 き裂発生位置のひずみ変化

平均荷重とした)を実施し、No.1-ULの補強時(載荷301.6万回)にはき裂の進展を直接確認すること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。補強後の補強材の写真を図-15に示す。疲労試験中の各補剛材のフランジ側、補剛材側止端部から5mm位置のひずみ範囲の変化を図-16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位置のひずみゲージは補強後しばらくの間ひずみの若干の増大が見られるが、その後は載荷荷重の増大に伴い、補強後のひずみは上昇しているものの、概ね一定の値となっている。同様に、図-17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)、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)の値の変化を示す。なお、同図(b)には、No.2-URのき裂先端5mm位置に貼付したひずみゲージの値について、補強直前の静的試験( $\Delta P=60\text{kN}$ )時のひずみ範囲、補強時にボルト打ち込み・締付けによって生じたひずみ、および補強直後の静的試験( $\Delta P=60\text{kN}$ )時のひずみ範囲を棒グラフ(赤・青)により示している。き裂先端のひずみは、本工法では当て板をリフトアップするために、補強時に $528\mu$ および $268\mu$ の引張ひずみが測定された。補強前には $1000\mu$ 程度のひずみが発生していたが、補強直後の静的試験では、ほとんどひずみが発生しておらず、き裂先端においても大きなひずみ低減効果が得られることが分かる。しかし、図-16に示した補強部位(No.2-UR位置)の回し溶接止端部近傍のひずみゲージの変化と同様に、補強後しばらくの間、き裂先端のひずみが上昇しているが、その後は概ね一定の値になっている。このNo.2-UR位置のき裂先端のひずみの変化傾向は、No.2-URの垂直補剛材回し溶



(a) き裂先端のひずみゲージ・クラックゲージの変化



(b) 補強時のき裂先端のひずみゲージ(No.2-UR)の変化

図-17 き裂先端のゲージの変化

接近傍のひずみゲージの変化傾向(図-16)とほぼ同等であり、また図-19に後述するNo.2-UR補強時からNo.1-UL/UR補強時までのき裂の発生していない垂直補剛材のひずみ変化も同様に見られていることから、き裂の進展によるものではなく、No.2-UR単独箇所の補強による荷重バランスの変化や繰返し載荷に対する当て板の試験体へのなじみの問題などが考えられるが、詳細については更に検討が必要である。補剛材No.1-ULに発生したき裂の先端に貼付したクラックゲージの値は図-17に示すように、ほとんど変化しておらず、補強後の表面方向のき裂の進展は見られなかった。補剛材No.1-UR、およびNo.2-URのき裂に対しても、疲労試験後に磁粉探傷によるき裂先端位置の確認を行ったが、両き裂ともに表面方向のき裂の進展は見られなかった。図-18に疲労試験後に観察した疲労破面を示す。全てのき裂は補剛材の上側に潜り込むように進展した。補剛材No.2-URでは、補強直前にビーチマーク試験を行ったが、破面上には明瞭なビーチマークは残されておらず、補強後のき裂の板厚方向への進展は確認されなかった。前述のように表面方向へのき裂の進展も観察されておらず、本実験では、本

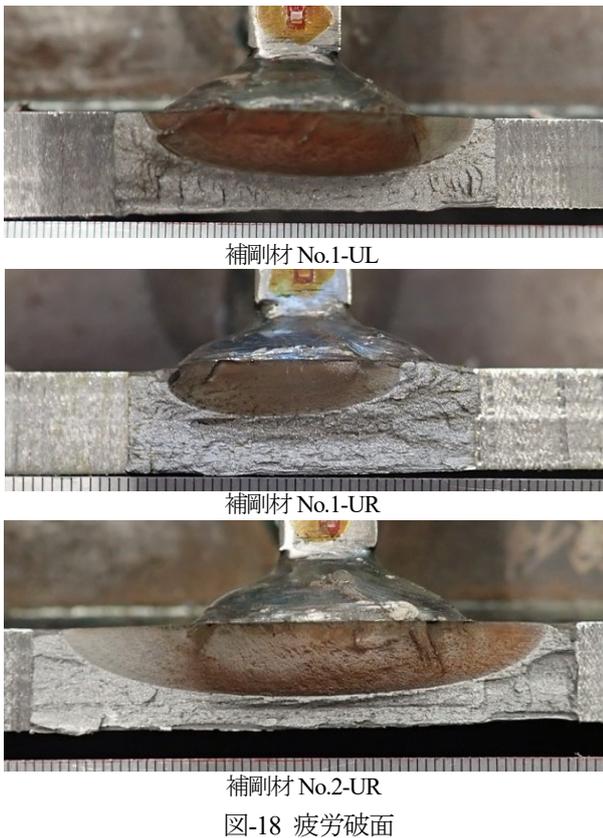


図-18 疲労破面

当て板工法によりき裂の進展を防止できたといえる。

#### 4.2 き裂の発生していない垂直補剛材への適用

載荷 557 万回 (荷重範囲  $\Delta P=80\text{kN}$ ) において、き裂未発生 の 5 か所の補剛材に対して当て板補強を行った。補強時に生じたフランジ側および補剛材側の回し溶接止端部から 5mm 位置のひずみを表 4 に示す。元々の試験体の変形や施工順序の影響や、補強工法の施工精度などによりフランジ側、補剛材側ともにばらつきがあるものの、全ての補剛材で大きな引張ひずみが測定されており、当て板がリフトアップされ、フランジを押し上げていることが確認できる。補強前には補強後の荷重範囲 ( $\Delta P=120\text{kN}$ ) での計測は行っていないため、補強前の計測値を 1.5 倍 ( $120\text{kN}/80\text{kN}$ ) して、フランジ側および補剛材側回し溶接止端部から 5mm 位置の補強によるひずみ低減効果を考察する。表 3 にひずみの計測値を示しているが、フランジ側では補強直後に 74%~94%、補強後 200 万回の載荷 (荷重範囲  $\Delta P=120\text{kN}$ ) 後では 80%~93% と大きなひずみ低減効果が得られている。この中で、補強時のフランジ側のひずみ導入量の小さな No.1-LL、No.2-UL では、フランジ側のひずみ低減率は補強直後で 82% と 74%、試験終了時で 80% と 83% であり他の補剛材と比較するとひずみの低減効果が若干小さなものとなっている。一方で補剛材側では、全ての補剛材で補強直後および疲労試験終了時に、補強により 95% 以上の非常に大きなひずみ低減効果が得られている。表 3 に示すように、このひずみの低減効果は、補強直後と試験終了時で

表 4 当て板補強により導入されたひずみ

補剛材	フランジ側	補剛材側
No.1-LL	141 $\mu$	1020 $\mu$
No.1-LR	501 $\mu$	1319 $\mu$
No.2-UL	161 $\mu$	916 $\mu$
No.2-LL	303 $\mu$	1242 $\mu$
No.2-LR	215 $\mu$	1030 $\mu$

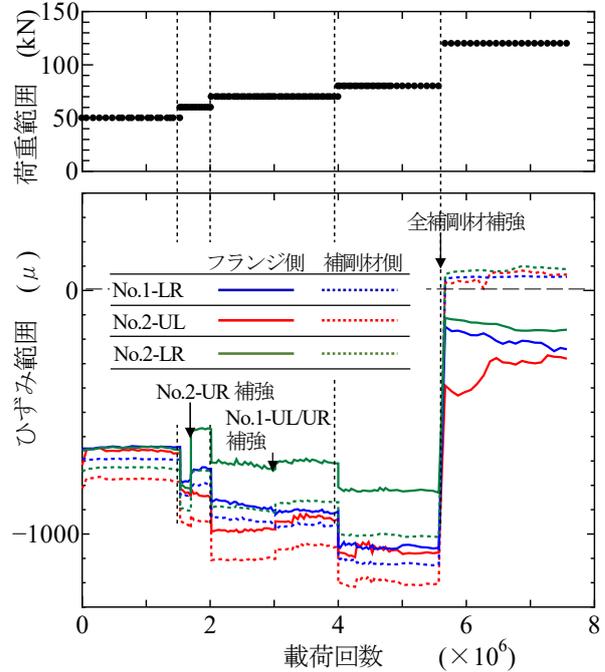


図-19 補強部位のひずみ変化 (き裂なし)

は差異が見られている部位もある。その中で差異が大きい補剛材を例にとり、図-19 に疲労試験中のひずみ範囲の変化を示した。補強直後 (557 万回載荷時) しばらくの間ひずみ範囲が変化し、その後はその変化は小さくなっている。載荷最後の 100 万回 (657 万回~757 万回載荷) におけるひずみの変化は試験終了時のひずみ値の 1~10% 程度であり、補強前のひずみ値 ( $\Delta P=120\text{kN}$  への換算値) と比較して最大で 2% 程度であった。このひずみ変化の原因は、当て板の試験体へのなじみや、補強後の荷重バランスの変化などが考えられるが、今後検討が必要である。

本章で示した疲労試験による検討では、前章の静的載荷試験で補強後試験体を残置し 5 か月、17 か月後に載荷した場合と異なり、き裂の有無に関わらず、繰返し載荷に伴い補強後に補強部位のひずみ範囲が変化し、その後その変化が小さくなる傾向が見られた。図-19 に示すように、補強以前に他のき裂の発生した補剛材を補強した直後にひずみ範囲が変化している補剛材 (例えば図中の No.2-UR 補強後のフランジ側のひずみ範囲) もあり、補強後にひずみ範囲が変化した原因は明確ではない。しかし、その変化は補強によるひずみ範囲の低減程度と比較して小さく、繰返し載荷下でも補強により大きなひずみの低減が得られること、またき裂が存在している場合 (き裂長さ 28mm, 39.5mm, 60mm) でも、き裂の進展を防



図-21 施工対象補剛材と当て板補強状況

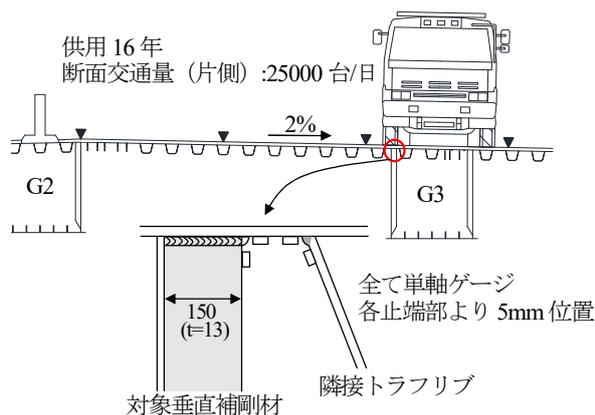


図-20 対象垂直補剛材とひずみゲージ位置

止できることを示す結果が得られた。なお、疲労試験終了時に当て板を撤去し、当て板および補剛材のボルト孔や当て板の溶接部近傍、およびボルトを磁探探傷により観察し、き裂の発生等の損傷がないことを確認している。

## 5. 実橋梁における適用試験

静的載荷試験、疲労試験により本当て板工法により垂直補剛材上端部のひずみを大きく低減できることを示した。本章では、実鋼床版橋梁において供用下で本工法を垂直補剛材に適用し、ひずみの低減効果を検討した。対象橋梁は都市内高速道路の鋼床版桁橋である。垂直補剛材上端部の疲労損傷が報告されている橋梁であるが、本試験では疲労き裂が発生していない垂直補剛材1箇所を施工対象とした。対象とした垂直補剛材とレーン位置の関係を図-20に示す。補強に際し事前に対象の垂直補剛材設置位置近傍のデッキプレートの縦断および横断勾配を測定し、測定結果に合わせて当て板上面の機械加工を行った。対象箇所は、トラフリブとデッキプレートの溶接止端部と垂直補剛材の回し溶接部止端部の距離は図-21に示すように45mm程度であり、前章の疲労試験と同様に、当て板の補剛材端からのみ出し量は40mm、ボルト孔のずらし量dは0.8mmとした。

図-21に施工状況を示す。施工は橋梁の通常供用下で行った。施工は、垂直補剛材と当て板が接する面のみ塗膜を除去し、デッキプレート面の塗膜は除去せずに行っ

表-5 実橋 72 時間計測結果 (N/mm<sup>2</sup>)

		補強前	補強後 1	補強後 2
垂直補剛材回し溶接止端部から 5mm 位置				
デッキプレート側	$\Delta \sigma_{max}$	72	8	23
	$\Delta \sigma_{eq}$	12	3	5
垂直補剛材側	$\Delta \sigma_{max}$	110	7	10
	$\Delta \sigma_{eq}$	20	3	3
デッキプレート-トラフリブ溶接止端部から 5mm 位置				
デッキプレート側	$\Delta \sigma_{max}$	33	19	72
	$\Delta \sigma_{eq}$	6	4	12
トラフリブ側	$\Delta \sigma_{max}$	57	34	62
	$\Delta \sigma_{eq}$	12	9	14
補修後 1: 2017 年 11 月      補強後 2: 2018 年 7 月 $\Delta \sigma_{max}$ : 最大応力範囲, $\Delta \sigma_{eq}$ : 等価応力範囲				

た。施工手順は、①精度の良い孔あけ位置の野書きができる専用野書き治具を用いた補剛材への野書きおよび孔あけ後、②当て板にアクリル系樹脂を塗布し、③当て板を補剛材に万力を用いて設置し、ボルトをハンマーで打込んで当て板をリフトアップさせた後、ボルトを締め付けて完了となり、市販の孔あけ器具以外の特別な機材を用いていない。現場での総施工時間（事前調査および当て板の製作・機械加工は含まず）は1時間程度であり、第4章で用いた疲労試験体に対する施工時間（20分程度/1か所）を考慮すると今後現場での作業時間は更に短縮できるものと考えられる。当て板補強完了時の目視による観察では、当て板と垂直補剛材の間にすき間は観察されず、また当て板上面とデッキプレート間にはアクリル系樹脂が塗布されていることもあり、すき間は観察されなかった。図-20に示すように、本適用試験においても、他の試験と同様に、垂直補剛材回し溶接部のデッキプレート側止端部および垂直補剛材側止端部から5mm位置にひずみゲージを貼付していることに加え、近接トラフリブのデッキプレート溶接止端部からデッキプレート側およびトラフリブ側5mm位置にひずみゲージを貼付している。補強前および補強後の72時間計測（補強前2017年9月、補強後2017年11月および2018年7月）により、補強による応力低減効果の確認を行った。表-5に各測定により得られた垂直補剛材回し溶接部近傍の最大応力範囲と等価応力範囲を示す。補強後の測定結果を比較すると、第1回目の測定（11月）と比較して第

2回目の測定(7月)の測定結果は特にデッキプレート側止端部において、最大応力範囲および等価応力範囲に応力上昇がみられた。これは、測定時期の違いによる舗装剛性の差異の影響も考えられ、補強効果の持続性の検討のために、今後継続的な測定による検証が必要であると言える。補修前の測定(9月)と補強後第2回目の測定(7月)を比較すると、最大応力範囲では補強によりデッキプレート側では補強前の68%減に、垂直補剛材側では90%減と大きな応力低減効果が得られており、測定値は小さいものの等価応力範囲ではデッキプレート側で58%減、垂直補剛材側では85%減であり、本適用実験により実橋梁における供用下の施工においても大きな補強効果が得られることが確認された。一方で、表-5に示すようにトラフリブとデッキプレート溶接部近傍に貼付したひずみゲージの測定値を補修前(9月)と補強後2回目の測定(7月)を比較すると、トラフリブ側止端部から5mm位置では若干の応力上昇となっているが、当て板とデッキプレートの接触面の端部位置とはほぼ一致しているデッキプレート側止端部から5mm位置では、非常に大きく応力が上昇している。そのため、本工法の実用化に向けて、特に垂直補剛材とトラフリブが近接する場合の、トラフリブとデッキプレート溶接部(止端部およびルート部)の疲労耐久性への影響について明らかにしていくことが必要である。

## 6. まとめ

本研究では、疲労き裂の報告の多い、鋼床版垂直補剛材上端部の当て板補強について、大きな応力低減効果を得ること、および簡便かつ特別な施工機材を必要としないといった施工性、補強後の応力低減効果の持続性、維持管理性を考慮し、支柱接合用高力ボルトを用いたリフトアップ工法および新しい当て板構造を提案し、その効果を、静的載荷試験、疲労試験および実橋梁における適用試験により検討し、以下の結論を得た。

- (1) 静的載荷試験により、垂直補剛材上端部の応力を補強により大きく低減させることを確認した。特に、無補強時に大きな圧縮応力を生じる試験体中央載荷では、補強により無補強時と比較して90%程度以上の応力の低減が得られた。その効果はリフトアップのためのボルトのずらし量 $d$ には大きく依存せず、また補強後17か月後の静的試験でも同程度の応力低減効果が得られた。
- (2) 疲労試験によりフランジ側止端部から発生した疲労き裂に対して本工法を適用した結果、き裂先端の応力を大きく低減し、疲労き裂の進展を防止することができた。き裂未発生の垂直補剛材上端(5箇所)においても、補強後200万回載荷後にフランジ側で80~93%、補剛材側で90%以上と大きく応力低減することができた。

- (3) 実橋梁における適用性試験により、供用下における本当て板工法の施工性および垂直補剛材上端における大きな応力低減効果(例えば最大応力範囲で比較すると、補修前測定(9月)と補強後第2回目の測定(7月)でデッキプレート側で68%、垂直補剛材側で90%減少)を確認した。但し、近接トラフリブ溶接止端部近傍で大きな応力上昇も測定されており、実用化に向けて近接するトラフリブとデッキプレート溶接部への影響について検討する必要がある。

本工法により大きく垂直補剛材上端部の応力を低減できること、またデッキプレート側(疲労実験ではフランジ側)疲労き裂の進展を防止できる可能性を示したが、今後、実橋梁での効果の持続性や施工性改善(品質確保のための安定的に精度の高い孔あけ方法、ボルト孔のずらし量や縦断勾配・横断勾配に対する適応方法など)、当て板自体の耐久性、現在プロセス管理としている品質管理手法についても検討していくとともに、近接するトラフリブとデッキプレートの溶接部への影響について検討していく予定である。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、デンカ株式会社藤間誠司様には、多くのご助言だけでなく、アクリル系樹脂のご提供を頂いた。また、本研究で行った多くの実験には、芝浦工業大学の川上貴広君(研究当時)・佐々木沙織君にご協力頂いた。ここに記し謝意を表します。

## 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, 粟津裕太, 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) 上坂健一郎, 時田英夫, 森猛, 浅子雅行, 富永智徳, 島貫広志：UITによる面外ガセット疲労強度向上対策, 第73回土木学会年次学術講演概要集, I-147, pp.293-294, 2018.
- 5) 大住圭太：鋼床版垂直スティ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.
- 6) 山田健太郎, 小藪江朋亮, 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, 第14巻, 第55号, pp.1-8, 2007.
- 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巻, 第62号, pp.35-46, 2009.

- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 森猛, 原田英明, 大住圭太, 平山繁幸: 鋼床版垂直ステイフナ溶接部に生じる疲労き裂の補修・補強方法: 鋼構造論文集, 第 18 巻, 第 69 号, pp.51-59, 2011.
- 11) 公門和樹, 森猛, 田中雅人, 宮原幸春, 小芝明弘: 鋼床版垂直ステイフナーすみ肉溶接部の疲労を考慮した補強方法, 第 60 回土木学会年次学術講演概要集, I-501, pp.999-1000, 2005.
- 12) 川上貴広, 穴見健吾, 竹渕敏郎, 本江聡: 支圧接合用高力ボルトを用いた鋼床版垂直補剛材上端部の当て板補強, 第 45 回土木学会関東支部技術発表会, I-47, 2018.

(2018 年 9 月 21 日受付)

(2019 年 2 月 1 日受理)