

論文

鋼床版垂直補剛材上端部の疲労耐久性向上法に関する実験的検討

白石祐一*, 田辺篤史**, 小西日出幸***, 狩野哲也****, 坂野昌弘*****

*関西大学,大学院理工学研究科都市システム工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

**博(工), 日建設計, 都市・社会基盤部門 (〒541-0054 大阪市中央区南本町 3-6-14)

***博(工), (一社) 日本橋梁建設協会 (〒550 0005 大阪府大阪市西区西本町 1-8-2)

**** (一社) 日本橋梁建設協会 (〒550 0005 大阪府大阪市西区西本町 1-8-2)

*****工博, 関西大学教授, 環境都市工学部都市システム工学科
(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

鋼床版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おり、疲労耐久性向上に関する一連の研究が行われてきた。本研究では損傷事例の多い垂直補剛材上端部を対象とし、既設構造に対しては補強アングル材の寸法の影響について、新設構造に対しては2種類の改良構造について、実物大の試験体を用いた静的および繰返し載荷試験により、疲労耐久性向上効果を検証した。

キーワード：鋼床版，補剛材上端部，疲労試験，フィレット構造

1. はじめに

鋼床版は、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おり、特に鋼床版の垂直補剛材上端部は疲労損傷が多く発生する箇所の一つである^{1),2)}。鋼道路橋の疲労設計指針では横リブや横桁の垂直補剛材に対して上端をデッキに溶接しない構造が推奨されているものの³⁾、鉛直方向の剛性が低下するほか、ギャップ部の面外変形によりウェブ側溶接止端部に疲労損傷が生じる可能性があるため^{4),5)}、主桁の垂直補剛材は適用範囲外となっている。筆者らは、鋼床版の疲労耐久性向上に関する一連の研究を実施し、垂直補剛材上端部の疲労強度改善手法を既設と新設の双方に対して提案している⁶⁾。

既設構造に対しては、小型のアングル材をデッキ下面にTRS (Thread Rolling Screw) を用いて押し付けた状態で、垂直補剛材に摩擦接合ボルトにより固定する補強工法を提案している⁷⁾。しかし、垂直補剛材上端部の疲労き裂に対して、亀裂発生を防止する予防保全効果と、補剛材側およびデッキ側の溶接止端部に生じた比較的小さいき裂に対する事後保全効果が確認されたものの、デッキ母材に進展した大きな亀裂に対しては効果が薄く、き裂を完全にカバーできるような補強材の大型化が望まれる。

また、新設構造に対しては、フィレット構造と半円切り欠き構造を提案し、FEM解析と疲労試験により検討を行った⁸⁾。その結果、両者とも溶接部に対する

応力低減効果があること、半円切り欠き構造よりもフィレット構造のほうがより高い疲労耐久性を有することを確認している。しかしながら、従来構造の載荷実験結果との比較は行っておらず、疲労耐久性の向上効果を定量的に評価できていなかった。

以上より、本研究では、大型のアングル材を用いた既設構造の疲労耐久性向上効果と、新設改良構造の疲労耐久性向上効果について、静的載荷実験及び疲労実験による検証を行った。

2. 実験方法

2.1 試験体

図-1に試験体の形状と寸法を示す。実橋(国道2号線浜手バイパス高架橋)と同様の構造ディテールを有する実物大の試験体であり、既設用と新設用の2体を製作した。既設用には従来構造の補剛材が2箇所、新設用には半円切欠き構造とフィレット構造が1箇所ずつ設置されている。補剛材上端部形状の影響のみを評価できる様に、新設用も既設と同じUリブとした点が既報⁸⁾とは異なっている。

着目部は供試体中央断面にある垂直補剛材の上端部の2ヵ所ずつである。

2.2 ひずみ計測位置

既設従来構造および新設改良構造の垂直補剛材上端部のひずみゲージ貼付位置を、図-2に示す。従来

構造はデッキ下面と垂直補剛材コバの2か所で、デッキ側は垂直補剛材の回し溶接の止端から水平に5mm離れた位置、垂直補剛材側はコバの中央で止端から下に5mmの位置に貼付している。改良構造のゲージ位置は、デッキ側は従来構造と同様の位置とし、コバ面は既報⁸⁾の結果を参考にFEM解析でひずみ応答が最大となった位置と疲労き裂の起点となった位置(半円切り欠き構造のみ)にとした。

2.3 既設構造に対する補強方法

図-3に補強アングル材の形状と寸法、ひずみゲージ貼り付け位置を示す。補強アングル材は小型、中型、大型の3種類で、小型・中型はL200x90x9x14、大型はL-300x90x11x16の不等辺不等厚山形鋼を切断して製作した。小型アングルの補剛材端部からの張り出し長は既報²⁾と同じ10mmとし、中型および大型は30mm延長した40mmとした。中型アングルは

小型アングルと同様に高さ200mm、大型アングルは高力ボルト3本で補剛材と接合できるように高さ300mmとした。

図中の赤で示した溶接止端近傍のゲージは前節で示したもので、補強による応力低減効果の検証に用いる。また、青で示したゲージはアングル端部の応力集中検討用に追加したゲージであり、アングル端から水平に5mm離れたデッキ下面2カ所に貼付した。

2.4 荷重方法

図-4に荷重実験における荷重位置を、図-5に荷重状況を示す。ダブルタイヤを模擬した2枚のゴム板(200mm×200mm×40mm)を100mm離して配置し、荷重梁を介して同時に荷重を行った。また、荷重は左右の補剛材位置でそれぞれ単独で実施した。荷重範囲は阪神高速道路における軸重計測データ⁹⁾を参考に130kNとした。

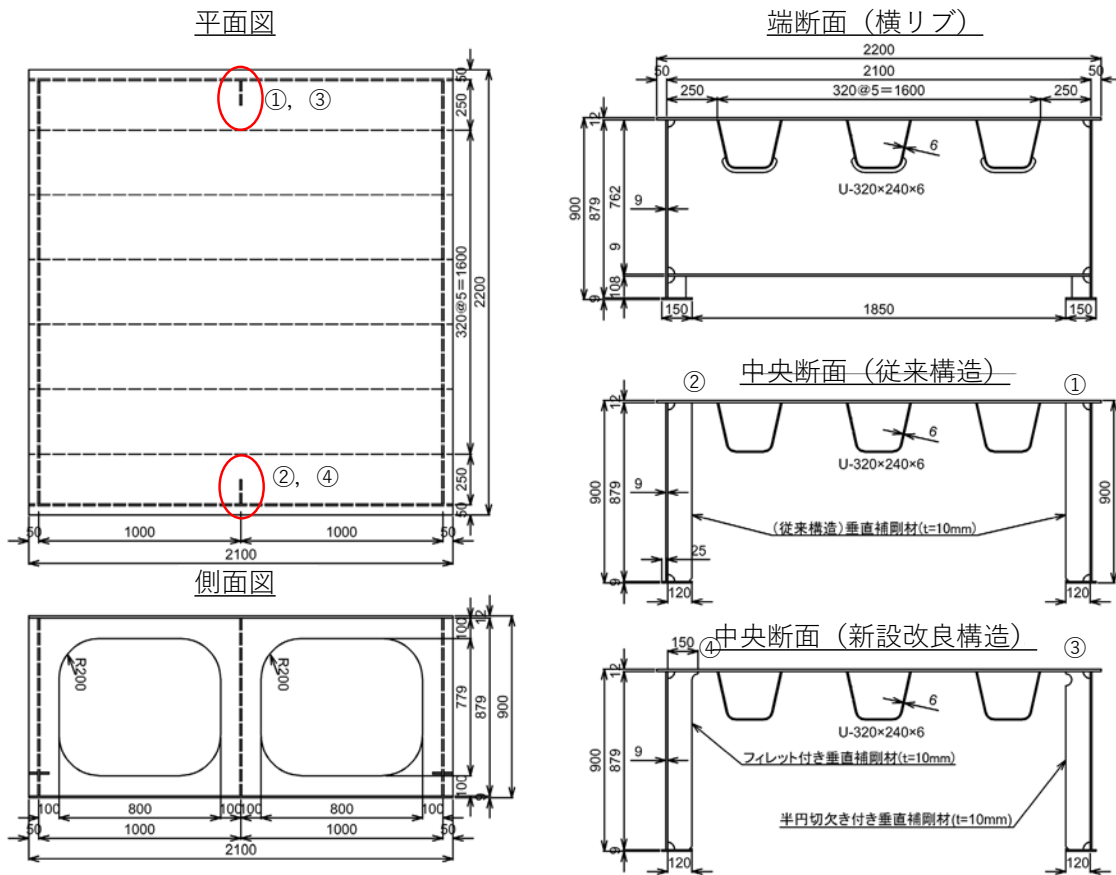


図-1 試験体

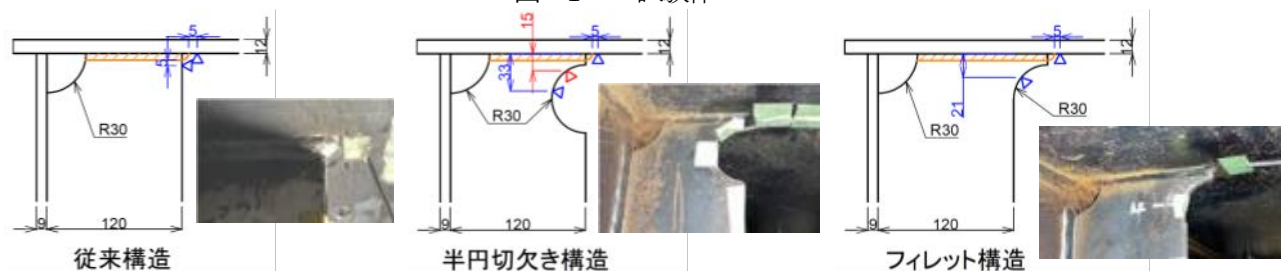
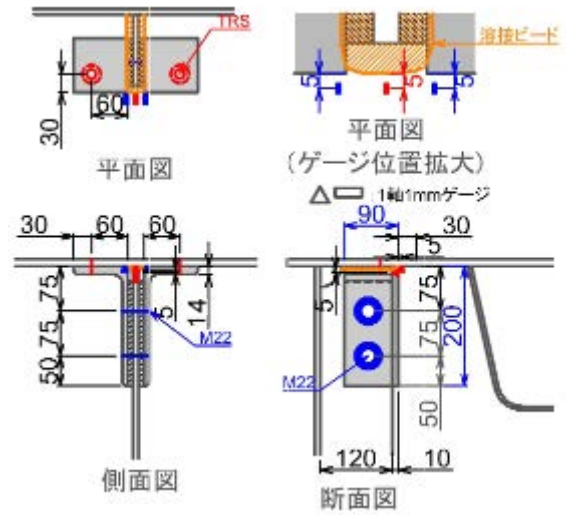


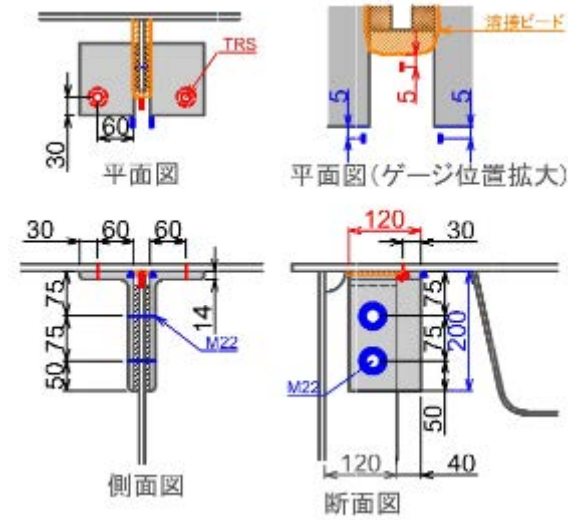
図-2 ひずみゲージ貼付位置(補剛材板厚はすべて10mm)



(a) 小型アングル (2-L200x90x9x14x90)



(b) 中型アングル(2-L200x90x9x14x120)



(c) 大型アングル (2-L300x90x11x16x120)

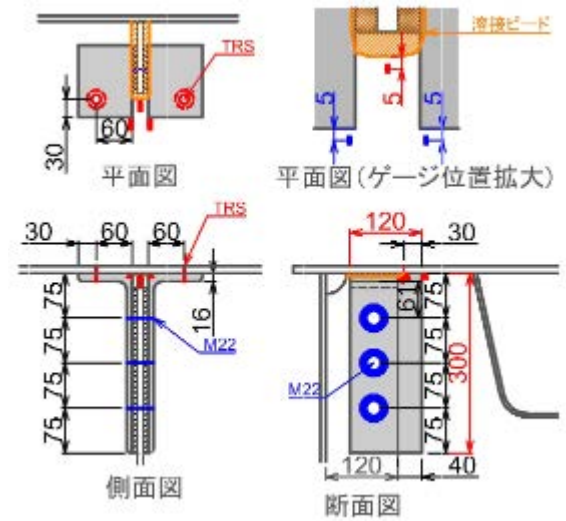
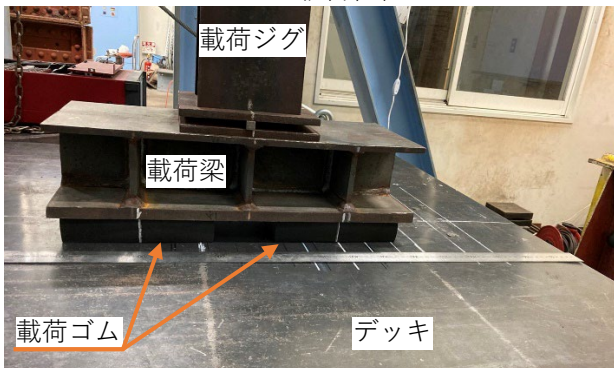
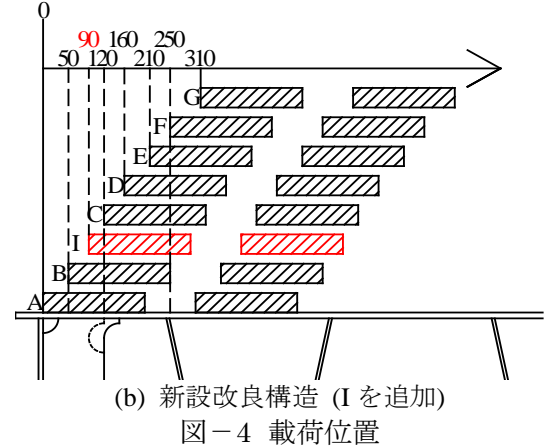
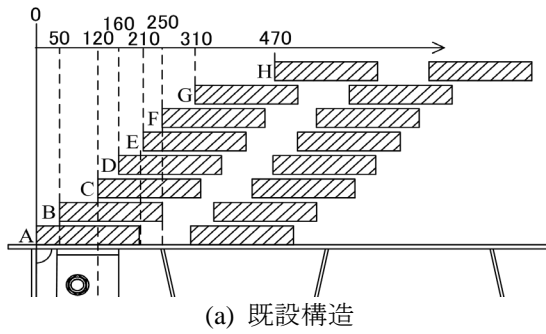


図-3 既設構造に対する補強アングル材の形状とひずみゲージ貼付位置



3. 静的荷重実験結果および考察

3.1 既設構造

既設構造に対しては、最大荷重時(150 kN)のひずみから最小荷重時(20 kN)のひずみを減じた「ひずみ差」を用いて補強による応力低減効果を確認した。

図-6に補強前後の溶接止端部のひずみ差の比較、図-7に補強前の溶接止端部と補強後のアングル端デッキ下面のひずみ差の比較を示す。補強前は図中のA~Eの5箇所、補強後はC~Hの6箇所で荷重した。補剛材側溶接止端部は、すべてのアングルでひずみ差の絶対値を補強前の半分以下に低減できている。デッキ側溶接止端部は、小型アングルではゲージ位置の関係でひずみ差の絶対値が大きく出ているが、中型、大型アングルではひずみ差の絶対値を2/3以下に低減できている。一方、アングル端部デッキ下面では溶接部よりも大きいひずみ差が計測されたが、補強前の溶接部に比べると小さい値であった。

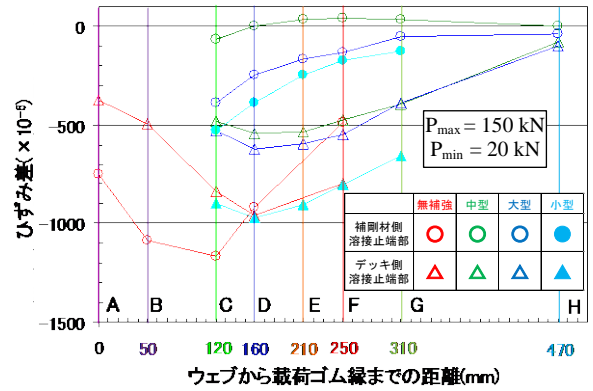


図-6 既設構造の補強前後の溶接止端部のひずみ差の比較

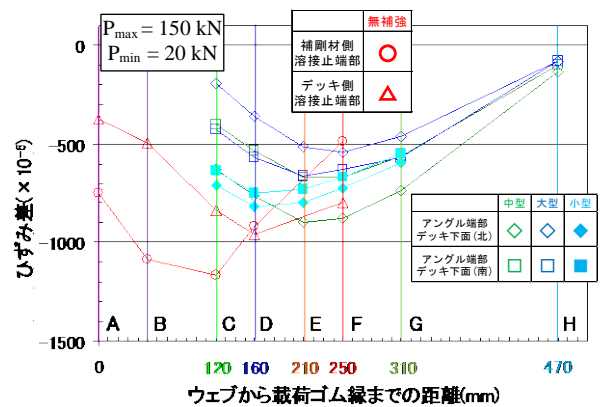


図-7 既設構造の補強前の溶接止端部と補強後のアングル端デッキ下面のひずみ差の比較

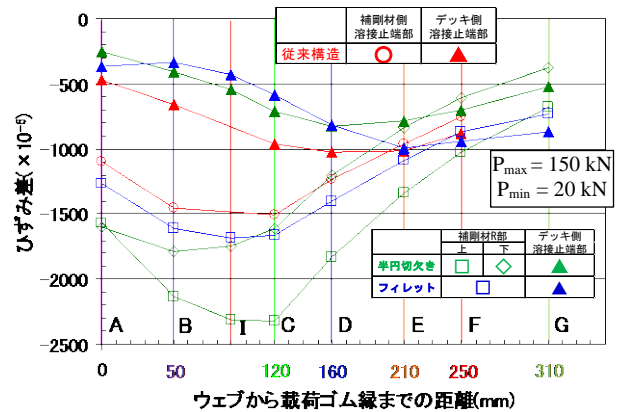


図-8 従来構造と改良構造のひずみ差の比較

3.2 新設改良構造

新設改良構造の評価にあたっては、従来構造は図-4中のA, B, D, E, F, Gの6箇所、改良構造はA~GとIの8箇所で荷重した。

図-8に従来構造と改良構造のひずみ差の比較を示す。デッキ側溶接止端部に着目すると、半円切り欠き構造では1~2割程度ひずみ差の絶対値が低減された。フィレット構造では、同程度のひずみ差であるものの、わずかながらひずみ差絶対値の最大値が低減していることが確認された。

補剛材のR部に着目すると、半円切り欠き構造に

においてひずみ差絶対値の最大値は切欠き上側のゲージ位置で計測され(緑□印), その大きさは従来構造の溶接止端部の1.5倍程度であった。なお、フィレット構造の母材R部では、従来構造の1割増程度のひずみ差が計測された。

4. 疲労試験による疲労耐久性向上効果の確認

既設構造に対する補強, 新設改良構造共にひずみ集中に対する改善効果を確認することができたので, それらが疲労耐久性に及ぼす影響について定量的に把握することを目的に疲労試験を実施した。

疲労き裂の検出には, 貼付したひずみゲージの値の変化とMT(磁粉探傷法)を用いた。

4.1 既設構造

既設構造に対しては, まずアングル補強を施して200万回繰り返し荷重を行い, 補強によるき裂発生抑制効果について確認した。試験部①には大型アングル, 試験部②には中型アングルを適用した。なお, デッキ側溶接止端とデッキ下面アングル補強部の2か所の着目位置で, それぞれ最も厳しい荷重位置が異なることを考慮し, 荷重位置を変えて疲労試験を2回実施した。その後, き裂発生抑制効果の確認のためアングル補強を取り外し, 補強無しの状態での疲労試験を行った。

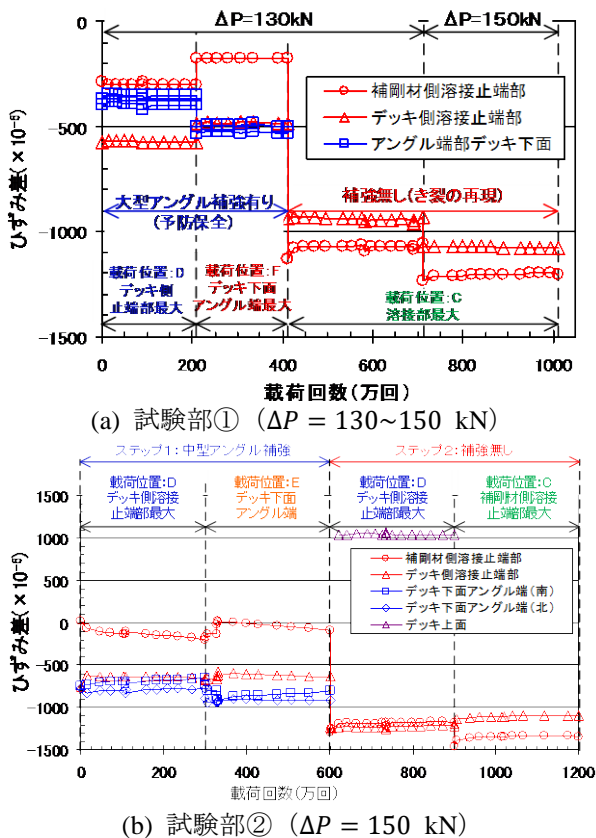


図-9 従来構造の疲労試験中のひずみ差の変化

図-9に疲労試験中のひずみ差の変化を示す。図中にはアングル補強の状態と荷重載荷位置の具体的な情報を合わせて示している。アングル補強を施した場合, 試験部①②共に, どの載荷位置でも疲労き裂発生は認められなかった。その後は, アングル材を取り外して無補強の状態としてき裂の再現を試みた。試験部①に対し, 荷重範囲130kNで300万回ほど載荷したが疲労き裂の発生が見られなかった。そのため, 荷重範囲を浜手バイパスで実施された応力計測¹⁰⁾より推定された最大輪重に対応する150kNに変更し, さらに300万回ほど載荷したが, 疲労き裂の発生は認められなかった。試験部②についてはアングル材補強取り外し後に荷重範囲150kNで載荷したが, この場合も疲労亀裂は発生しなかった。

無補強であっても疲労き裂の発生が認められなかったため, アングル補強によるき裂発生抑制効果については明確に確認することができなかったものの, 補強によりひずみ差が低減されていることから疲労耐久性は向上していると考えられる。

4.2 新設改良構造

新設改良構造については, 両改良構造ともに, 静的載荷試験で母材R部のひずみ差絶対値の最大値が計測された載荷位置とデッキ側溶接止端部でひずみ差絶対値の最大値が計測された載荷位置の両方で疲労試験を行った。

半円切り欠き構造およびフィレット構造の疲労試験中のひずみ差の変化を図-10に示す。既報^{7,8)}で疲労き裂が発生した繰返し回数を考慮して200万回まで繰返し載荷を行ったが, 母材R部, デッキ側溶接止端部ともに疲労き裂は発生しなかった。

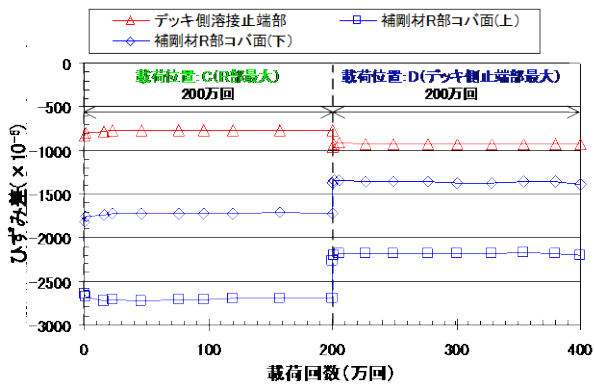
試験終了時の着目部に対してMTを行った状況を図-11に示す。半円切り欠き構造, フィレット構造ともに疲労き裂は認められなかった。

前述の通り, 既設従来構造において疲労き裂が発生していないことから, 疲労き裂発生抑制効果については明確に示すことができないものの, 溶接止端部のひずみ差は低減できていることから, 疲労耐久性は向上していると考えられる。

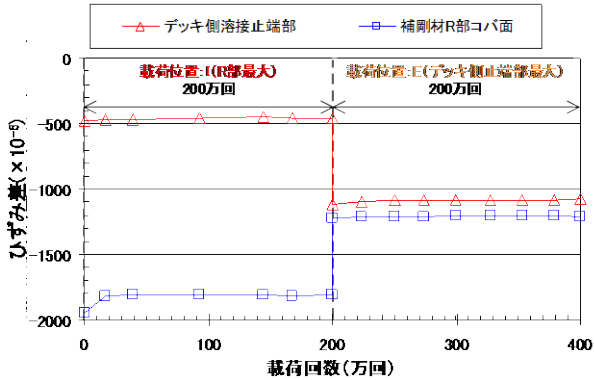
5. まとめ

本研究では, 既設および新設の鋼床版垂直補剛材上端部に対する疲労対策の疲労耐久性向上効果について, 実物大の疲労試験体の静的載荷実験と疲労試験により検証を行った。

既設構造に対しては, 3種類の大きさのアングル材による補強について比較検討を行った。静的載荷実験では, 中型と大型のアングル材ではほぼ同様の応

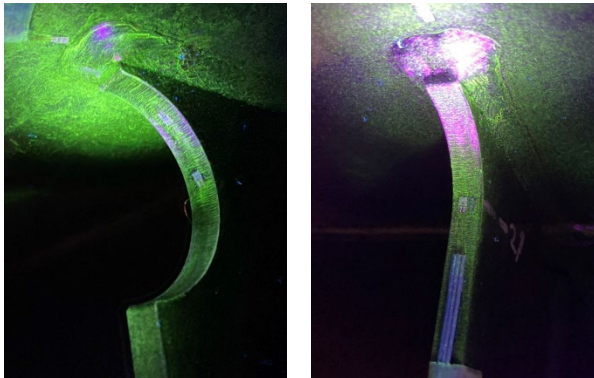


(a) 半円切り欠き構造 ($\Delta P = 150 \text{ kN}$)



(b) フィレット構造 ($\Delta P = 150 \text{ kN}$)

図-10改良構造の疲労試験中のひずみ差の変化



(a)半円切り欠き構造 (b)フィレット構造

図-11試験終了後の着目部のMT写真

力低減効果を確認できた。その後実施した疲労試験では、中型アングルと大型アングルを施した場合について、2か所の弱点箇所が発生ひずみが大い載荷位置についてそれぞれ繰り返し載荷を行い、どの補強、および載荷位置でも、溶接部およびアング材周辺で疲労き裂は発生しないことを確認した。

新設改良構造についても、半円切り欠き構造とフィレット構造について、既設構造と同様に静的載荷実験と疲労試験を行い、以下の知見を得ることができた。

- ①両改良構造ともに疲労き裂は発生せず、十分な疲労耐久性を有していた。

- ②デッキ側溶接止端部のひずみ差絶対値の最大値は、フィレット構造では既設と同程度であったが、半円切り欠き構造では1~2割低減した。

- ③補剛材R部のひずみ差絶対値の最大値は、既設の溶接止端部に比べて半円切り欠き構造で5割、フィレット構造で1割ほど増加したが、発生位置が母材部であり溶接部に比べて疲労強度が高いことから、疲労耐久性には問題がないものと考えられる。

- ④半円切り欠き構造では、既報⁹⁾の疲労試験で疲労き裂が発生した位置のひずみ差が、FEM解析で最大となったRの底部よりも厳しかった。

なお、今回の疲労試験では既報^{7),8)}とは異なり、半円切り欠き構造や従来構造であっても補剛材上端部に疲労き裂が発生しなかった。この原因として、試験体の横リブ間隔(縦リブ支間)が既報の2.8mに比べて2.0mと小さく、鋼床版のたわみが全体的に抑制されていることが影響した可能性が考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼橋の疲労, 1997.
- 2) 鋼構造委員会鋼床版の疲労改訂小委員会編：鋼床版の疲労[2010年改訂版], 土木学会, 2010.
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針, 丸善, 2002.
- 4) 南荘淳, 吉原聡, 時讓太, 石井博典, 坂野昌弘：鋼床版箱桁全体を対象とした応力性状の把握と疲労耐久性評価, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 773-780, 2003.
- 5) 内田大介, 齊藤史朗, 井口進, 村越潤：鋼床版垂直補剛材溶接部の局部応力に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp. 562-575, 2020.
- 6) 坂野昌弘：鋼床版の疲労耐久性向上に関する研究プロジェクト(その3), 第75回年次学術講演会, CS3-1, 2020.
- 7) 坂本, 小西, 奥村, 坂野：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, 鋼構造年次論文報告集, 第27巻, pp.815-823, 2019.
- 8) 田辺篤史, 白石祐一, 小西日出幸, 狩野哲也, 沼勝雄, 坂野昌弘：疲労耐久性の高い鋼床版垂直補剛材上端構造の提案, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.542-554, 2021.
- 9) 阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策, 2021.
- 10) Luiza H. Ichinose, 寺西陽一郎, 坂野昌弘：実橋での鋼床版補強構造の適用と応力計測による疲労耐久性の検証, 第75回年次学術講演会, CS3-04, 2020.

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)