

Uリブ鋼床版下面補修工法の施工精度および品質が

補強効果に与える影響に関する研究

STUDY ON STRENGTHENING EFFECTS OF A FABRICATION ACCURACY AND ITS QUALITY IN CASE OF RETROFITTING TO AN ORTHOTROPIC STEEL DECK WITH TROUGH RIBS

橋梁工学分野 森下 弘大

Bridge Engineering Kota MORISHITA

Uリブ鋼床版下面からの補強工法として、Uウェブを切断し当て板するUリブ切断工法を提案している。本研究では、Uリブ切断工法の合理的な補強範囲および当て板の不陸が補強効果に与える影響をFEM解析により検討し、FEM解析および実大載荷試験によって、横リブ交差部の補強構造を提案した。その結果、合理的な補強範囲の決定方法を提案し、不陸がボルトピッチ程なら補強効果への影響は小さく、交差部の提案構造は想定されるき裂に対して補強効果を有することがわかった。As a counter measure for fatigue cracks in orthotropic steel deck with trough ribs, Cutting Weld Bead Method is proposed. In this study, FE-analysis was carried out to clarify a rational range of reinforcement and influence of irregular on effect of reinforcement. Further, a detail of reinforcing in longitudinal to transverse rib connection was investigated by static loading test and FE-analysis. As a result, decision process of rational range of reinforcement was proposed. The influence of irregular in surface was found to be small. Proposed detail of reinforcing in longitudinal to transverse rib connection is to be effective for fatigue cracks which are assumed.

1. はじめに

Uリブ鋼床版の疲労損傷の内、**図-1**に示すデッキプレート（以下、「デッキ」）-Uリブ溶接部から生じる疲労き裂は、鋼床版の床組機能を損ね、交通荷重の支持機能を低下させるだけでなく、舗装の損傷を誘発し、車両の走行にも影響を及ぼす恐れがある。

著者らは、デッキとUリブの溶接接合を**図-2**に示すような剛性の高い当て板ボルト接合に改造するUリブ切断工法を提案している¹⁾。本工法には、**図-3**に示す鋳鉄製当て板とねじ付きスタッドおよび高力ワンスайдボルトを用いている。これまでに静的載荷試験および疲労試験、そしてFEM解析が実施され、本工法の効果および適用可能性について検討を進めてきた。しかし、本工法を実橋に適用するにあたっては、適切な補強範囲の検討が必要となる。また、実橋が有する溶接による初期不整、縦断・横断勾配は、実施されてきたFEM解析でモデル化されておらず、不整による施工誤差が補強効果に与える影響について検討が不足している。また、従来の横リブ交差部の補強構造²⁾は設置にライナープレートを要し、施工性に課題がある。

本研究では、Uリブ切断工法の実橋への適用に向けて、施工誤差やその品質が補強効果に与える影響を明らかにし、工法の構造詳細を提案することを目的とする。そこで、FEM解析により横断方向の輪荷重位置と補強効果の関係を検討した。また、当て板接合面の不陸に着目し、その範囲が補強効果に与える影響について検討した。そして、静的載荷試験およびFEM解析により、横リブ交差部に生じる疲労き裂に効果的な補強構造を検討した。

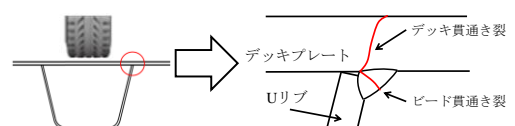


図-1 デッキとUリブ溶接部の疲労き裂

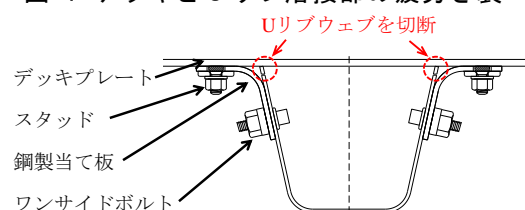


図-2 ビード切断工法

2. U リブ鋼床版下面補修工法の補強範囲に関する解析的検討

2.1 検討対象および解析モデル

汎用構造解析ソフト abaqus6.14³⁾により 3次元弾性解析を行った。解析モデルは、**図-4(a)**に示す 1/2モデルとした。着目部位は、**図-4(b)**に示す補強範囲の境界周辺の溶接部 (L, R, RR) とし、その周辺を 8 節点ソリッド要素で、その他を 4 節点シェル要素でモデル化した。また、解析モデルは**表-1**に示すように補強範囲を変化させた ORG (無補強), FCD-bs (補強の境界が U3-U4 間), FCD-os (補強の境界が U3 内) の計 3 個とした。デッキ板厚 $t_d=12\text{mm}$, U リブ板厚 $t_u=6\text{mm}$, U リブ高さ $h_u=240\text{mm}$, U リブ間隔 $w_u=320\text{mm}$ とした。

最小要素辺長は文献 4) を参考に、 0.1mm とした。ボルトのモデル化は文献 5) を参考に、母材と当て板のボルト孔周辺を節点結合による剛結とした。ソリッド要素部におけるデッキと当て板の接触面には、すべりや離間を考慮できる接触境界を定義し、静止摩擦係数は 0.40 とした。シェル要素部におけるデッキと当て板の接触面は節点結合による剛結とした。鋼材のヤング率は一般的な材料定数として $200,000\text{N/mm}^2$, 鋳鉄材のヤング率は $170,000\text{N/mm}^2$, ポアソン比は鋼材および鋳鉄材ともに 0.3 とした。

2.2 解析ケース

解析ケースは解析モデルと載荷荷重を組み合わせた計 6 ケースとした。載荷荷重はシングルタイヤを想定した LS およびダブルタイヤを想定した LW の 2 種類とし、載荷範囲 ($200\text{mm} \times 200\text{mm}$) 1 カ所あたり 50kN を載荷している。載荷位置は**図-5**に示すように、横リブ支間中央において LS および LW を橋軸直角方向に 160mm 間隔で移動させている。

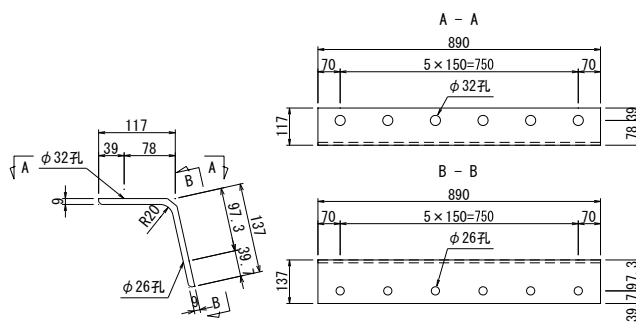
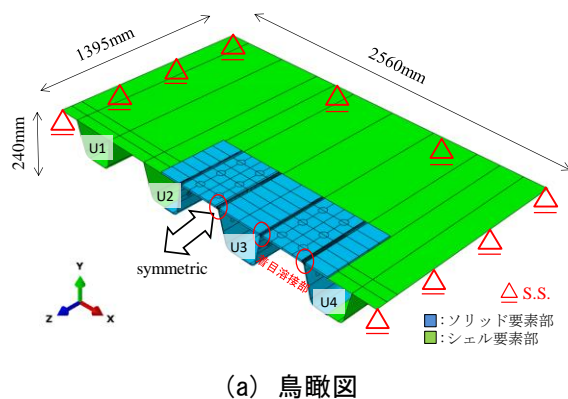
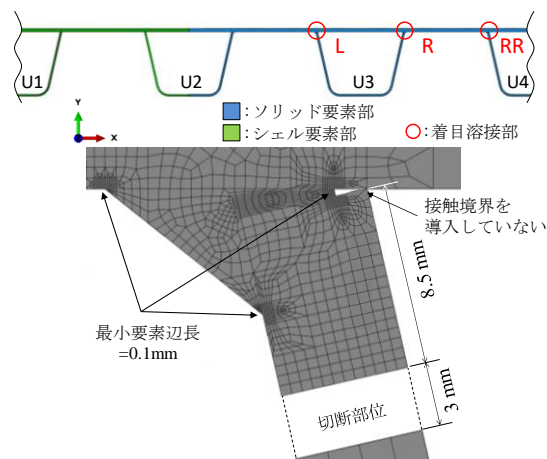


図-3 鋳鉄製当て板 (単位:mm)



(a) 鳥瞰図



(b) 着目溶接部とその要素分割の状況

図-4 解析モデル

表-1 解析モデル

解析モデル	補強対象Uリブ	補強状況	着目溶接部の補強状況	
ORG	-		L	無補強
			R	無補強
			RR	無補強
FCD-bs	U2, U3		L	補強
			R	補強
			RR	無補強
FCD-os	U2, U3 (片側)		L	補強
			R	無補強
			-	-

2.3 解析結果と考察

図-6 に主応力の評価に用いる要素および LS 载荷時の着目要素 L における最大主応力の影響線を示す。

図より、着目溶接部 L が補強範囲内にある FCD-os の影響線形状は、着目溶接部 L が同じく補強範囲内にある FCD-bs のそれに比較的一致している。また、ORG と FCD-bs および FCD-os を比較すると、補強によってデッキと U リブの溶接部に生じる応力集中が低減されていることがわかる。

また、着目溶接部 R が補強範囲外にある FCD-os の影響線形状は、着目溶接部 R が無補強である ORG のそれに比較的一致している。また、着目溶接部 RR についても、補強範囲の境界を U リブ間とした FCS-bs の影響線形状は、ORG のそれに比較的一致している。また、着目溶接部に生じる最小主応力および LW を载荷したケースについても同様の傾向が見られ、補強範囲の境界の位置によらず、当て板によって補強されている溶接部は補強時の応答を示し、当て板によって補強されていない溶接部は無補強時の応答を示している。

2.4 補強範囲

本工法を実橋へ適用する際の補強範囲決定のプロセスおよび補強範囲の一例を図-7 に示す。補強範囲は、車両走行頻度分布およびその位置を基準に決定すればよく、図-7(a) に示すように、車両走行頻度分布の情報の有無、累積疲労損傷比および疲労寿命の計算の可否によって3種類に区分することを想定している。ここで、それぞれの補強範囲の境界の位置は、図-8 に示すように、車両走行位置を基準に、その輪荷重に最も近い溶接部までとすればよい。車両走行位置の情報が無い場合は、レーンマークを基準に決定すればよい。図-7(a) に示す補強範囲①および②は比較的簡易な検討で決定できる補強範囲であるが、鋼重および工期に課題があり、図-7(b) に示す補強範囲③は、車両走行頻度分布の情報が有り、累積疲労損傷比および疲労寿命の計算が可能な場合の補強範囲を示しており、補強範囲を最も縮小できている。この場合、鋼重低減および工期短縮が図れる。

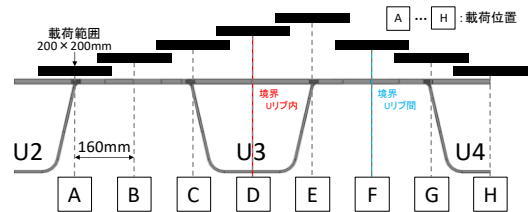
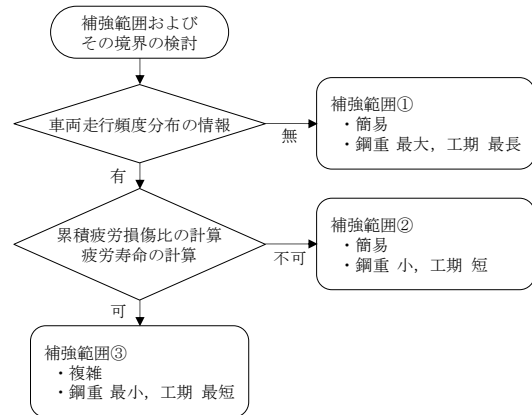
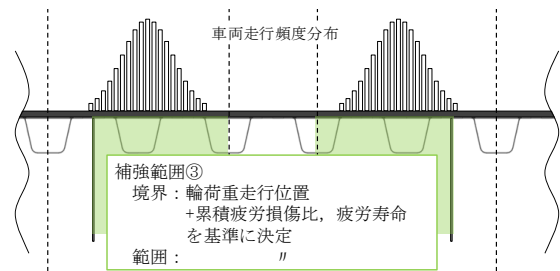


図-5 荷重载荷位置 (LS)



(a) 補強範囲決定のプロセス



(b) 補強範囲

図-7 補強範囲決定のプロセスおよび補強範囲の一例

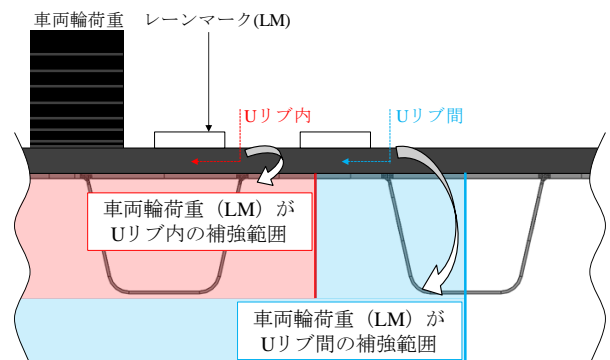


図-8 補強範囲の境界決定方法の概念図

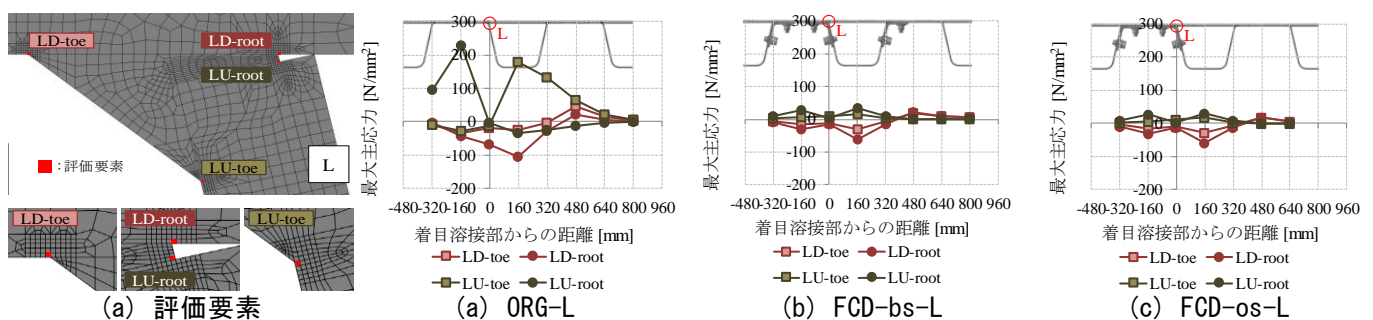


図-6 着目溶接部の最大主応力の影響線

3. 初期不陸に起因する不陸が下面補修工法の補強効果に与える影響に関する検討

3.1 解析モデル

汎用構造解析ソフト Abaqus/Standard 6.14³⁾により 3次元弾性解析を行った。解析モデルは図-9に示すUリブ3本を有する鋼床版の部分モデルとした。支間中央のU1-U2間およびU2-U3間に設置する当て板の接合面を着目部位とし、着目部位周辺を8節点ソリッド要素で、その他を4節点シェル要素でモデル化した。ボルトのモデル化方法、材料特性および着目している不陸以外の接触境界の定義方法は2.1節と同様である。

不陸は、それを想定する範囲に前述の接触境界を導入せず、接触面をボルトによる節点結合のみとすることでモデル化した。接触面に接触境界を導入しないことによって、それぞれの要素が貫入するようになっており、接合面において摩擦による荷重伝達を行わないようにモデル化している。

3.2 解析ケース

解析ケースを表-2に示す。当て板の形状が図-3に示すようにL字形であるため、橋軸方向の初期たわみによる不陸が最も生じやすいと考えられる。そこで、本解析におけるパラメータは表-2および図-10に示す不陸の橋軸方向の長さとした。

載荷荷重は、図-11に示すようにシングルタイヤを想定した50kNとし、Uリブ内に載荷するLAおよびUリブ間に載荷するLBの2つとした。なお、載荷範囲はW:200mm, L:200mmとした。図には、荷重載荷位置と不陸を想定している範囲の関係も併せて示す。

3.3 解析結果と考察

LA-2載荷時に評価要素に生じる主応力を図-12に示す。なお、評価要素の位置する断面はIR-50, 150, 350についてのみ、不陸を想定している範囲端部の断面の内、主応力の値が大きい方の断面としており、ORGは載荷している断面とした。また、図に示す主応力はD-toe, D-root, U-rootが最小主応力を示しており、U-toeでは引張応力が卓越していたため、最大主応力を示している。また、LA-1はLA-2と同様の傾向であったため、LA-2に着目して考察する。

図より、不陸の橋軸方向の範囲が大きくなるほど応力は増加する傾向にある。また、D-toeは着目部位近傍に当て板の隅角部があるため、構造的応力集中が大きくなり、全てのケースで無補強以上の応力が生じている。D-rootは不陸の橋軸方向の範囲が350mmになると無補強以上の応力が生じている。これは、不陸の範囲が大きくなるにつれて、デッキの支点となる当て板もしくはスタッドの距離が大きくなるためと考えられる。

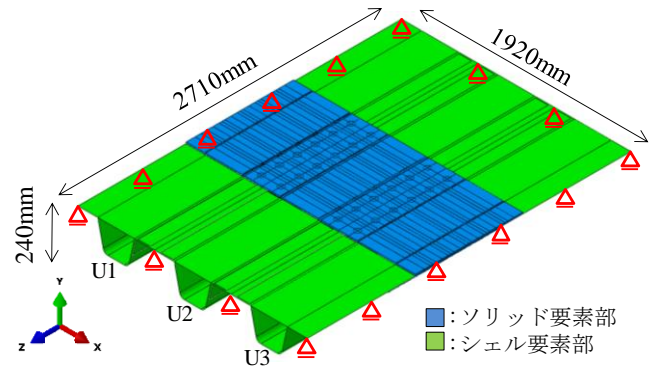


図-9 解析モデル

表-2 解析ケース

ケース	載荷荷重	不陸定義範囲		備考
		橋軸方向	当て板 ^{※1}	
ORG	LA, LB	-	-	無補強
IR-all	LA, LB	890	U1R, U2L U2R, U3L	不陸を想定する範囲に接触境界を定義せず、その橋軸方向長さをパラメータとしている。
IR-50-LA	LA	50	U2L, U2R	
IR-50-LB	LB	50	U1R, U2L	
IR-150-LA	LA	150	U2L, U2R	
IR-150-LB	LB	150	U1R, U2L	
IR-350-LA	LA	350	U2L, U2R	
IR-350-LB	LB	350	U1R, U2L	

※1 UOR, UOLはそのUリブの右側もしくは左側を示す。

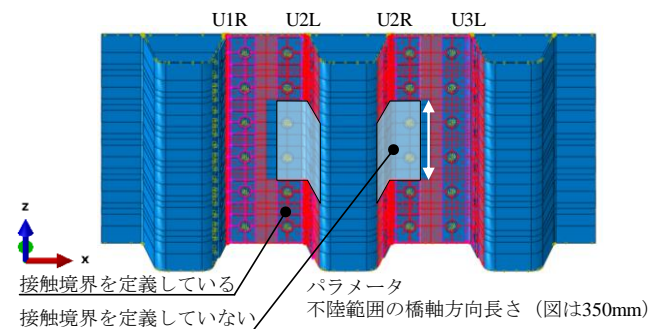


図-10 不陸の想定範囲 (LA)

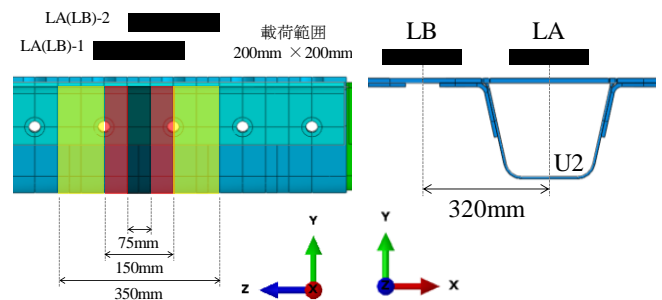


図-11 荷重載荷位置

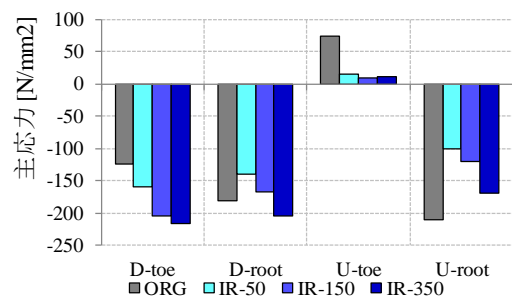
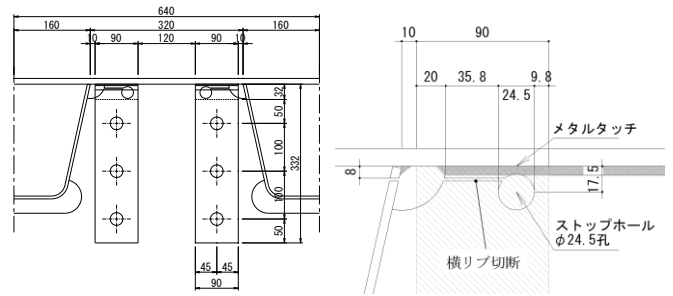


図-12 溶接部の主応力

4. 横リブ交差部の補強構造に関する検討

4.1 補強構造

図-13 に示す提案構造は、U リブ切断工法の適用によって生じるデッキ-横リブ溶接部の板曲げを緩和することを目的に、図-13(b) に示すようにデッキ-横リブ溶接部近傍に切断線を入れ、図-14 に示す鋳鉄製当て板（以下、交差部当て板）を図-13(a) に示すように横リブの両面から添接してデッキを支持するものである。交差部当て板は横リブ側をボルト接合とし、デッキ側をメタルタッチとしている。



(a) 補強部位

(b) 切断位置

図-13 交差部の補強構造詳細

4.2 静的载荷試験

試験体を図-15 に示す。試験体はデッキを U リブ 3 本、横リブ 3 本で補剛する鋼床版とした。試験体は 1 体とし、補強した試験体（以下、FCD）は試験後の無補強の試験体（以下、ORG）を補強したものとする。デッキの板厚は 12mm、U リブの板厚は 6mm、横リブ厚は 10mm である。

荷重はシングルタイヤを模して、試験機と試験体の間にゴム板（W:200mm L:200mm t:40mm）を挿入して载荷する。荷重の大きさは 50kN とした。载荷位置は図-15 に示すように、着目部している溶接部に最大の応力が生じる位置とした。なお、横リブの LT を载荷している面を L 側としその反対を N 側という。

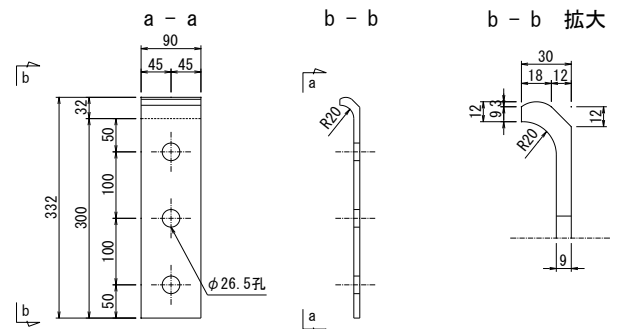


図-14 交差部用当て板

4.3 FEM 解析

汎用構造解析ソフト Abaqus/Standard 6.14³⁾により 3次元弾性解析を行った。解析モデルは図-16 に示すように試験体と同じ寸法とした。着目部位は U2 左側の溶接部とし、着目部位周辺を 8 節点ソリッド要素で、その他を 4 節点シェル要素でモデル化した。着目溶接部は最小要素辺長をゲージ長と同じ長さとなるように分割した。ボルトのモデル化方法、材料特性および着目している不陸以外の接触境界の定義方法は 2.1 節と同様である。

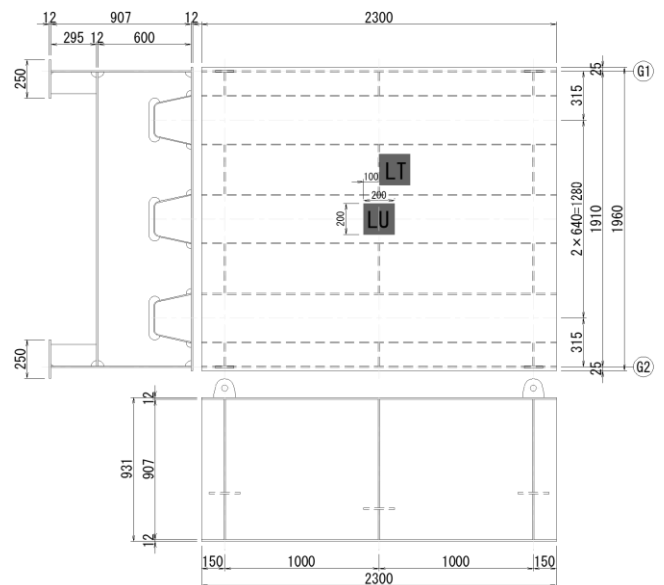


図-15 試験体および载荷位置

4.4 結果と考察

4.4.1 デッキの橋軸直角方向応力分布

LT 载荷時のデッキプレート上下面の橋軸直角方向応力分布を図-17 に示す。図より、解析結果は実験結果と一致しており、補強によってデッキ-U リブ溶接部に生じる応力が低減されている。特に、LT 载荷時の補強効果が高く、当該位置に生じる応力を最大 67% 低減している。これは、文献 2) と同様に、U リブを切断することで発生応力の最大値が生じる箇所がデッキ-U リブ溶接部直上からデッキを支持する交差部当て板の材端直上へ変化したためと考えられる。

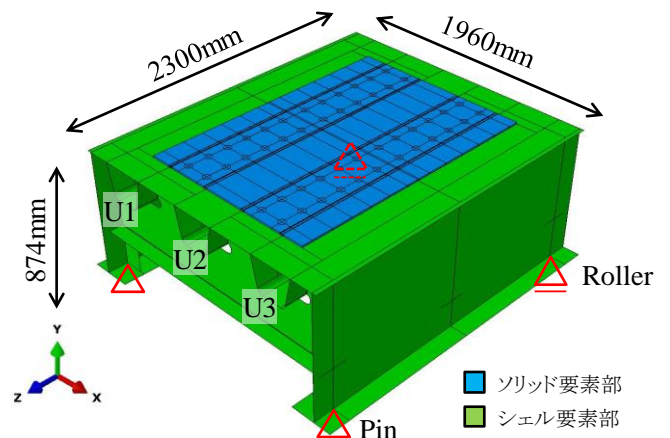


図-16 解析モデル

4.4.2 溶接部に生じる局所応力

LU 載荷時のスカラップ上側のデッキ-横リブ溶接部の発生応力を図-18 に示す。図にはデッキの上下面に貼付した2枚のひずみゲージの計測結果に加え、それらの和および差を2で除した軸力成分および曲げ成分を示す。なお、図中の×印は計測不可であったことを示す。試験結果は止端部より5mm位置の計測結果を、解析結果は試験と同位置の要素の積分点における値を用いている。

ORG は解析結果と実験結果とで一致している。一方、FCD では試験においてまわし溶接部近傍に 150N/mm^2 の応力が生じており、補強効果は低いと考えられる。

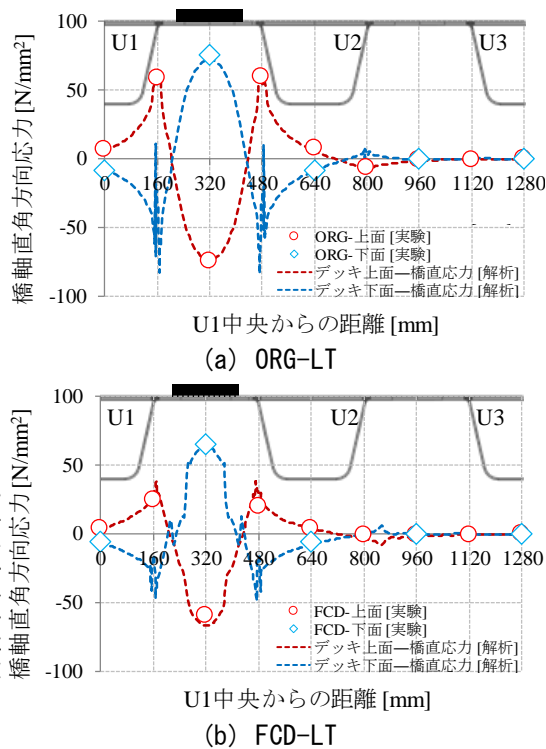


図-17 デッキの橋軸直角方向応力分布

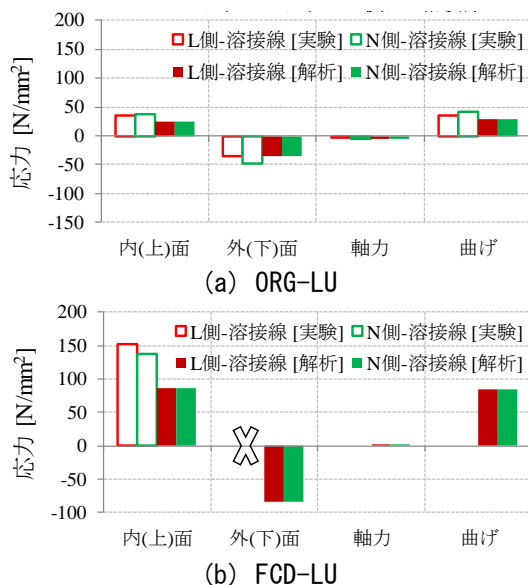


図-18 スカラップ上側の発生応力

また、解析結果と差があるが、これは当て板のメタルタッチ時の作用力を解析ではモデル化していないことによるものと考えられる。また、他の溶接部に関しては、補強することにより発生応力が低減されていた。

5. 結論およびまとめ

本研究では、FEM 解析により補強範囲および当て板の不陸の影響について検討した。また、FEM 解析および実大載荷試験により横リブ交差部の補強構造を提案した。以下に得られた結論をまとめる。

- 1) 補強範囲の境界がその周辺の溶接部の局所応力に与える影響は小さく、補強対象とした溶接部では補強効果が得られ、周囲の無補強部に影響を及ぼさないことがわかった。
- 2) Uリブ切断工法の補強範囲の境界は車両走行位置を基に決定すればよく、車両走行頻度分布の情報、累積疲労損傷比および疲労寿命の算出により、補強量を削減できる決定方法を提案した。
- 3) デッキ-Uリブ溶接部に生じる局所応力について、無補強以上の応力が生じたのは不陸の範囲が350mmのケースのみであった。したがって、当て板接合面における不陸の範囲は150mm以下として管理を行うのが適していると考えられる。
- 4) 横リブ交差部の提案補強構造について、デッキの発生応力については低減効果があることがわかった。また、スカラップ下側およびスリットに生じる疲労き裂に対しては補強効果があるが、スカラップ上側のデッキ側止端部から生じるき裂に対しては補強効果が低く、補強構造の改善が必要である。

今後の課題として、交差部当て板の形状改良や実際に不整を有する試験体での試験、その試験結果と解析結果の整合性に関する検討が挙げられる。

参考文献

- 1) 田畑晶子, 青木康素, 小野秀一, 山口隆司: Uリブ鋼床版のスタッドを用いた補強方法の提案, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, I-466, pp.931-932, 2014.9.
- 2) 森下弘大, 山口隆司, 田畑晶子, 松下裕明, 奥村学, 竹内正一: Uリブ鋼床版横リブ交差部における下面補修補強工法に関する解析的研究, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, I-042, pp.83-84, 2017.9.
- 3) SIMULIA: Abaqus 6.14 Documentation Collection, 2014.
- 4) 田畑晶子, 青木康素, 服部雅史, 大西弘志, 松井繁之: Uリブ内面モルタル充填による既設鋼床版の疲労耐久性向上検討, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1356-1369, 2010.3.
- 5) 社団法人日本鋼構造協会: 高力ボルト接合技術の現状と課題, pp.69-78, 2013.3