

## Uリブ鋼床版の疲労強度改善のための

### 有効な補修・補強工法およびその補強範囲に関する研究

#### STUDY ON REINFORCEMENT AND ITS AREA FOR IMPROVEMENT OF FATIGUE STRENGTH OF THE ORTHOTROPIC STEEL BRIDGE DECK STRUCTURE

橋梁工学分野 本多 克行  
Bridge Engineering Katsuyuki HONDA

Uリブ鋼床版では、数多くの疲労損傷事例が報告されているが、有効な補修・補強工法およびその補強範囲は不明確である。本研究では、デッキ・Uリブ溶接部に対して当て板工法の補修・補強効果を、横リブ交差部に対してUリブ切断工法の補強構造の改良を検討した。その結果、当て板工法ではルート部の最小主応力が低減され、橋軸方向補強範囲によって補強効果が異なることが分かった。また、Uリブ切断工法では、デッキ・横リブ溶接部の曲げによる応力集中を低減できた。

Many fatigue cracks are found in orthotropic steel deck with trough ribs. However, effective reinforcement method and its area for fatigue cracks are unclear. Firstly, the patching method is examined for the rib-to-deck joints. Secondly, improved reinforcement structure against Cutting Weld Bead Method was investigated for the trough rib-to-transverse rib joints. Result of applying patching method, the minimum principal stress of weld root was reduced, and the reinforcement effect varied depending on its area in the longitudinal direction. In the Cutting Weld Bead Method, stress concentration due to bending of the deck plate-to-transverse rib joints was reduced.

#### 1. はじめに

本研究で対象とする縦リブ形式にUリブを用いた鋼床版では、数多くの疲労損傷事例が報告されており、原因究明や対策についての検討が行われている。代表的な2つの都市内高速道路の閉断面リブを用いた鋼床版にて発見された約7000件の疲労き裂を発生箇所ごとに分類すると、デッキプレートとUリブの溶接部（以下、デッキ・Uリブ溶接部）の疲労き裂が占める割合が全体の18.4%、Uリブと横リブの交差部（以下、横リブ交差部）の疲労き裂が占める割合が全体の39.1%であり、多くの割合を占めている<sup>1)</sup>。したがって、Uリブ鋼床版を健全な状態で長期間供用する上で、デッキ・Uリブ溶接部および横リブ交差部における疲労き裂の対策が重要であると考えられる。これらの疲労き裂に対する補修・補強工法として、デッキ・Uリブ溶接部では、当て板を施す工法などが検討されているが、有効な補修・補強工法およびき裂長さに対する補強範囲は確立されていない。また、このような背景から、著者らはデッキとUリブの溶接接合を当て板ボルト接合に改造する工法（以下、Uリブ切断工法）についての検討を行ってきたが、デッキプレートと横リブ

の溶接部（以下、デッキ・横リブ溶接部）から生じる疲労き裂に対しては補強効果が小さく、補強構造の改良が必要な状況である<sup>2)</sup>。

本研究では、現場載荷試験およびFEM解析によって、デッキ・Uリブ溶接部の疲労き裂に対する当て板補修・補強効果の検討および橋軸方向に対する補強範囲の検討を行う。また、Uリブ切断工法における横リブ交差部の疲労き裂に対する補強構造の改良を検討する。さらに、主桁間隔が大きい橋梁では、主桁間隔および橋梁全体としての挙動が疲労き裂に影響を与える可能性が考えられることから、主桁間隔が疲労き裂に与える影響についても検討する。

#### 2. 上面当て板工法の補強効果に関する検討

##### 2.1 補強構造

デッキ・Uリブ溶接部の予防保全を目的に、12mm厚のデッキプレート上面へ6mm厚の鋼板当て板を実施する。橋軸直角方向の補強範囲は、Uリブを覆うように500mmとし、橋軸方向の補強範囲は予防保全効果を大きくするために、横リブ支間3,650mmに対し3,640mmとした。補強工法を図-1に示す。また、Uリブ厚は8mmである。

## 2.2 現場載荷試験

対象橋梁(以下, A 橋)にて交通量が少ない夜間に, 計測箇所である下り第2車線, 第3車線を通行止めにした現場載荷試験を行った. 荷重車は総重量を約 200kN となるように調整したトラックを用いた. 載荷位置は, 橋軸直角方向には, 図-2 に示すように各車線において 250mm ずつずらした a, b および c の合計 6 つのラインを, 橋軸方向には, 7 つの断面を設けた. 荷重車は時速 2km 程度で各ライン上を走行し, 前輪, 後前輪および後後輪の各車軸が載荷断面上に設置されたことを確認したのち 30 秒以上停止した. ひずみは走行および停止中に約 0.15Hz で計測を行った. ひずみゲージは図-3 に示すように, デッキ・U リブ溶接部の止端部から 5mm の位置に貼り付けた. ゲージ長は 3mm であり, 橋軸方向の貼り付け位置は横リブ支間中央とした.

## 2.3 FEM 解析

汎用構造解析ソフト Abaqus/Standard 2016<sup>3)</sup>により 3次元弾性解析を行った. 解析モデルを図-4 に示す. 3章で示す主桁間隔の影響の検討結果を参考に, 解析の対象範囲は, 橋軸方向に横リブ 1 支間, 橋軸直角方向に U リブ 4 本分とした. 使用要素は, 着目溶接部周辺となる U リブ 2 本分を 8 節点ソリッド要素, その他を 4 節点シェル要素としてモデル化した. 材料特性は, ヤング率を  $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ , ポアソン比を 0.3 とした. 高力ボルトは, 文献 4) を参考に, 図-5 に示すボルト軸力による接触圧が作用する範囲の節点を結合することでモデル化を行った. その他の接触面には, 接触, すべり, および離間を考慮できる接触境界を設定し, 静止摩擦係数は 0.4 とした. なお, アスファルト舗装は, 高温時の剛性低下を考慮してモデル化を行っていない.

荷重は現場載荷試験に用いたトラックの後前輪を再現したダブルタイヤとし, その大きさは 28.3kN とした. 載荷位置は, 橋軸直角方向には着目溶接部をまたぐ位置とし, 橋軸方向には横リブ支間中央とした.

## 2.4 上面当て板工法の検討結果および考察

現場載荷試験における応力は, 計測されたひずみ値にヤング率 ( $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$  と仮定) を乗じて求め, 各ライン載荷中に発生した最大応力と最小応力の差を応力範囲とした. 現場載荷試験の補強前後の橋軸直角方向応力範囲を図-6 に示す. 橋軸直角方向の応力範囲は, デッキプレートでは, 最小で 51.3% 低減したが, U リブでは, 最大で 33.4% 増加し,  $40.3 \text{N/mm}^2$  となった.

FEM 解析における着目要素を図-7 に示す. ルート部の着目要素はデッキ側を DR, U リブ側を UR とし, 要素サイズを  $0.1 \text{mm} \times 0.1 \text{mm} \times 0.1 \text{mm}$  とした. 溶接脚長は 6mm, 溶け込みは 75% とした. 現場載荷試験におけるゲージ貼り付け位置である, 溶接止端部から 5mm 離れた位置(ゲージ部)の DTG および UTG も着目要素

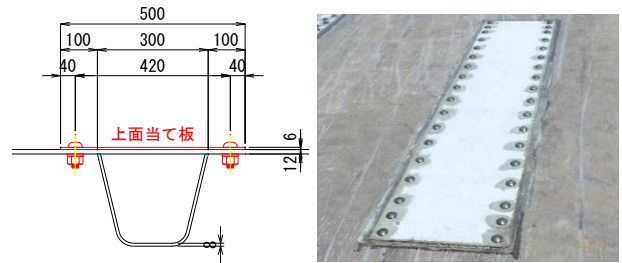


図-1 上面当て板補強工法 (単位: mm)

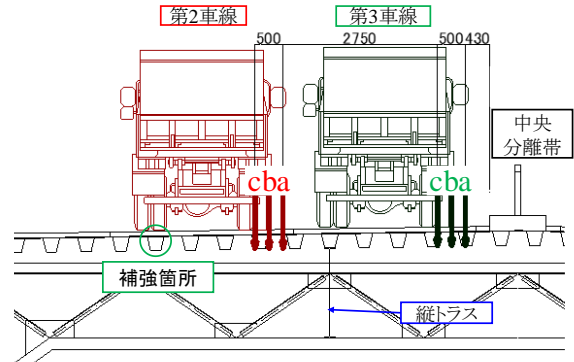


図-2 載荷位置 (断面図, 単位: mm)

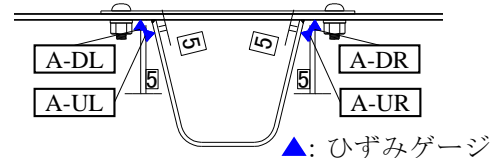


図-3 ひずみゲージ貼り付け位置 (単位: mm)

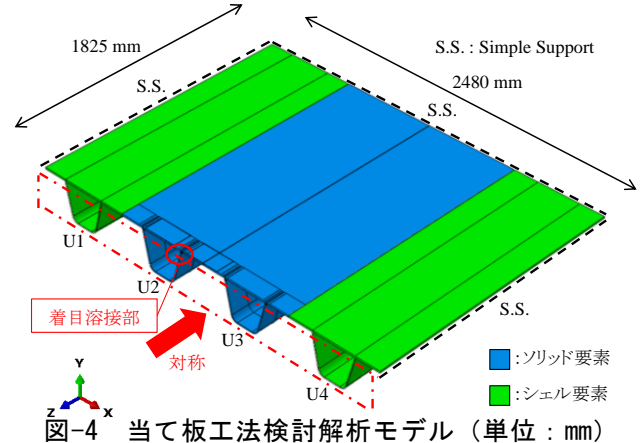


図-4 当て板工法検討解析モデル (単位: mm)

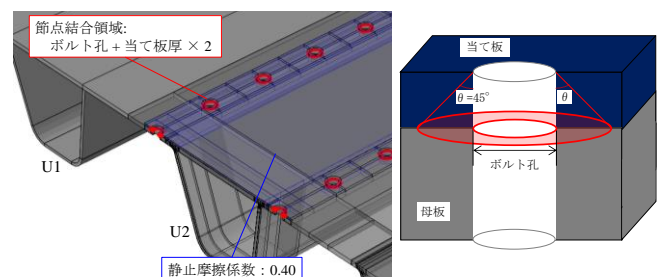


図-5 接触条件およびボルトのモデル化

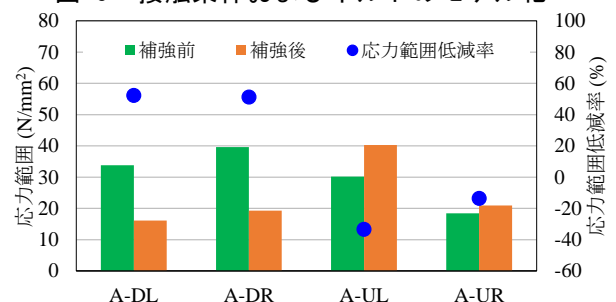


図-6 現場載荷試験の橋軸直角方向応力範囲

とした。また、応力は着目要素の積分点から算出している。なお、Uリブのコーナーとデッキプレート下面間には接触境界を導入していない。FEM解析における最小主応力を図-8に示す。補強前の最小主応力は、デッキ側ルート部で $-213.0\text{N/mm}^2$ であったが、デッキ上面に厚さ6mmの当て板をすることで $-175.2\text{N/mm}^2$ となり、17.7%低減した。Uリブ側ルート部の最小主応力も $-22.7\text{N/mm}^2$ から $-9.5\text{N/mm}^2$ まで58.0%低減した。一方で、ゲージ部の主応力はUリブ側で増加した。

現場载荷試験およびFEM解析のゲージ部における補強前後の比較を図-9に示す。FEM解析におけるデッキプレートの補強後応力は、 $-44.2\text{N/mm}^2$ から $-40.1\text{N/mm}^2$ まで9.1%低減した。一方、Uリブの応力は、 $-9.4\text{N/mm}^2$ から $-11.6\text{N/mm}^2$ まで23.6%増加した。したがって、FEM解析は現場载荷試験と同じ傾向であるが、応力低減率は異なった。これは、舗装のモデル化を省略したこと、現場载荷試験とFEM解析の载荷位置に誤差が生じていたことなどが考えられる。また、図-10より、上面当て板によって、デッキプレートの局所的なたわみは小さくなったが、Uリブ側のゲージ部付近でUリブの曲げ変形は大きくなった。これらの結果より、デッキの局所的なたわみが抑制されることで、疲労き裂の起点となるルート部の応力は低減されており、デッキ厚が12mmへの厚さ6mmの上面当て板は補強効果があると考えられる。

### 3. 主桁間隔が疲労き裂に与える影響に関する検討

#### 3.1 主桁間隔の影響を検討する解析モデル

解析モデルを図-11に示す。グローバルモデルは、4節点シェル要素を用いてA橋の側径間をモデル化しており、構造諸元および材料特性は2章と同様である。着目箇所要素のサイズは $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ とした。境界条件は、箱桁下フランジのエッジを単純支持とした。サブモデルは8節点ソリッド要素を用いて橋軸方向に3,350mm、橋軸直角方向にUリブ2本分をモデル化した。境界条件は、Abaqus/Standard 2016<sup>3)</sup>でサポートされているシェルからソリッドへのサブモデリング境界条件をデッキプレートおよびUリブの境界面に与えた。

#### 3.2 着目箇所

着目箇所は図-12に示すように、支間中央の第1、第2および第3車線とした。着目溶接部はデッキ・Uリブ溶接部とし、着目箇所の横リブ支間中央におけるデッキ側およびUリブ側のそれぞれを対象とした。なお、A橋に合わせて、第3車線はUリブ間隔310mmとし、第1および第2車線は320mmとした。

#### 3.3 影響面の作成

影響面は文献5)を参考に、ミューラー・ブレスロウの原理を応用し、着目点 $k$ における軸方向力 $P_k$ のみが作用し得ないように仮想した(スリットを有する)図

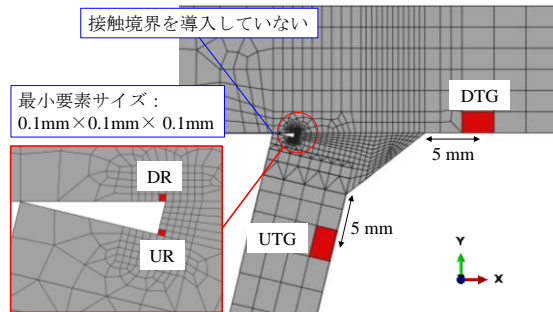


図-7 着目要素

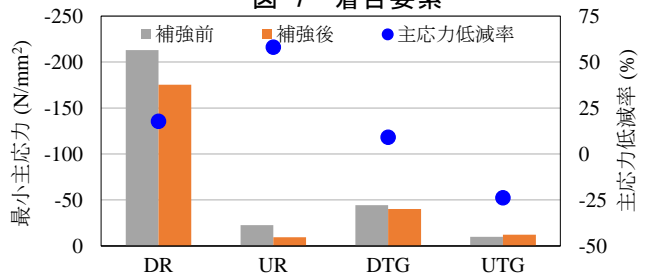


図-8 FEM解析による最小主応力

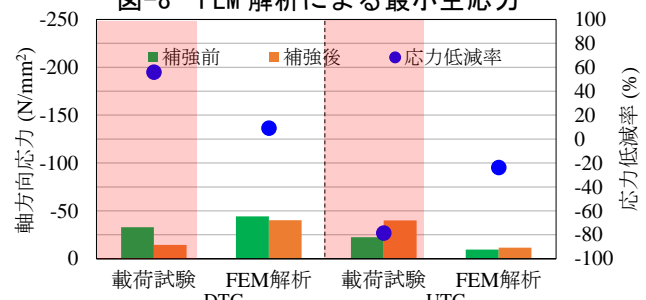


図-9 現場载荷試験とFEM解析との比較

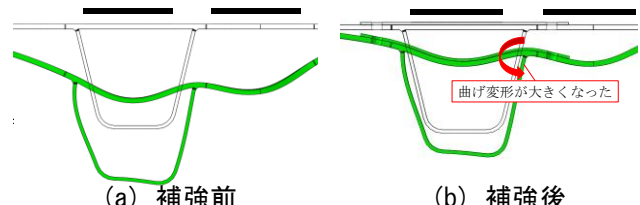


図-10 補強前後の変形図 (変形倍率: 200倍)

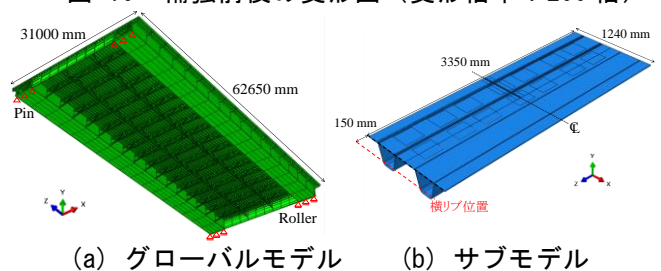


図-11 主桁間隔の影響を検討する解析モデル

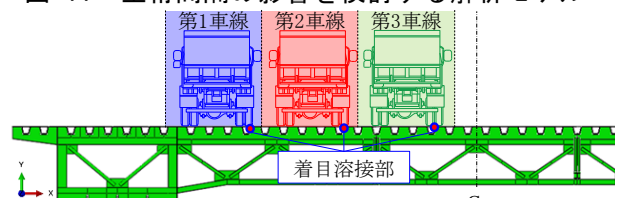


図-12 着目箇所

図-13(a)のような構造物に対して、以下の式(1)によって作成した。

$$N_{yk} = W_n / (U_{yk1} - U_{yk2}) \quad (1)$$

グローバルモデルの図-13(b)に示す着目節点の溶接線直角方向断面力の影響面を作成した。着目節点の位置はデッキプレートとUリブの境界から11mmとした。

なお、グローバルモデルでは溶接線のモデル化は行っていない。着目節点には、作成する影響面の断面力のみ不連続となる条件を与えた。

第1車線のUリブの溶接線直角方向断面力の影響面を図-14に示す。影響範囲は非常に狭く、着目節点直上である横リブ支間中央付近で大きくなった。また、第1~3車線および支間中央と端部においてその影響範囲は同形状であった。

### 3.4 移動荷重の载荷

移動荷重は、現場载荷試験で用いた荷重車を再現し、前輪が54.4kN、後前輪が77.2kN、後後輪が56.6kNの合計188.2kNとした。荷重の橋軸方向载荷位置は、図-15(a)のように右側のダブルタイヤが着目溶接部をまたぐ位置とし、橋軸方向には、着目断面の手前の横リブ上を起点として横リブ1支間を荷重が通り過ぎるように15ステップ载荷した。

### 3.5 解析結果および考察

着目要素は2章と同様に、ルート部およびゲージ部の応力とした。トラック荷重移動载荷時における支間中央第1車線の発生応力を図-16に示す。ルート部応力は、デッキ側では最小主応力が卓越し、最大で-275.8N/mm<sup>2</sup>となった。一方で、Uリブ側では最大主応力が卓越し、最大で153N/mm<sup>2</sup>となった。ゲージ部応力は、前輪が着目断面上に载荷された場合にデッキ側、Uリブ側ともに圧縮が大きくなり、デッキ側で-65.5N/mm<sup>2</sup>(DTG)、Uリブ側で-47.2N/mm<sup>2</sup>(UTG)となった。トラック荷重移動载荷時の応力範囲を表-1に示す。ルート部、ゲージ部ともに第1車線および第2車線の応力範囲は等しくなった。また、第1車線と比較した第3車線の応力範囲の変化率は-3.7%と小さくなった。第3車線の応力範囲が第1車線および第2車線より小さくなった理由としては、Uリブ間隔が10mm小さいことが影響していると考えられ、支間中央において主桁間隔がデッキ・Uリブ溶接部の疲労き裂に与える影響はないと考えられる。したがって、デッキ・Uリブ溶接部の応力集中を検討する際は、橋軸方向範囲を横リブ1支間、橋軸直角方向範囲をUリブ3~4本とした従来通りのモデル化範囲で十分であると考えられる。

## 4. 当て板補強の補強範囲に関する検討

### 4.1 補強範囲を検討する解析モデル

解析モデルは図-4と同形状の横リブ1支間、Uリブ4本分とした。補強構造を図-17に示す。使用要素は、橋軸方向に対して横リブ支間中央の1,000mm、および橋軸直角方向に対してU2およびU3の半分の範囲を8節点ソリッド要素、その他を4節点シェル要素としてモデル化した。境界条件は、周辺単純支持とした。材料特性およびボルトのモデル化方法は2章と同様である。疲労き裂は、Abaqus/Standard 2016<sup>3)</sup>でサポートされ

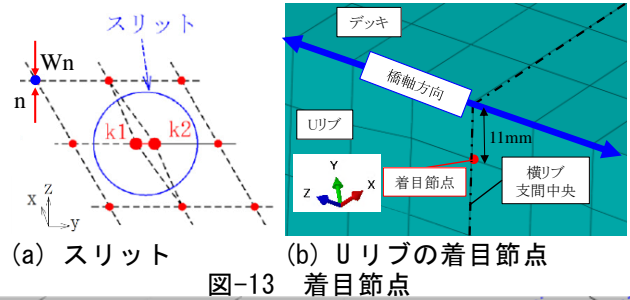


図-13 着目節点

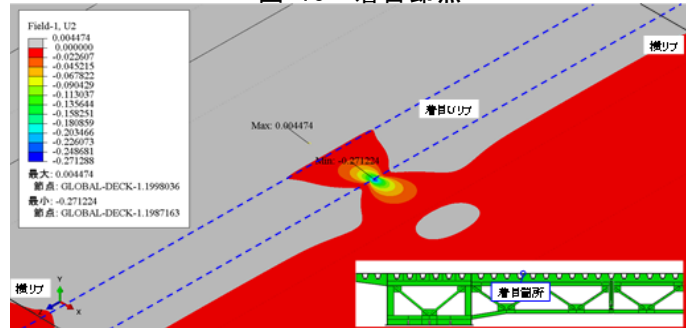
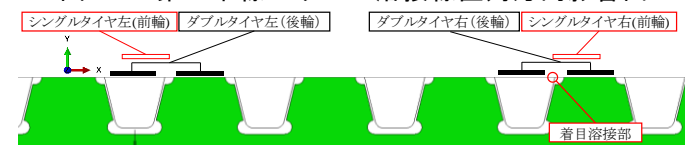
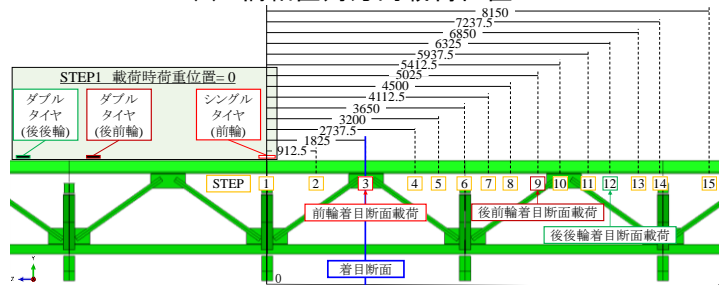


図-14 第1車線Uリブの溶接線直角方向影響面



(a) 橋軸直角方向载荷位置



(b) 橋軸方向载荷位置

図-15 载荷位置 (単位: mm)

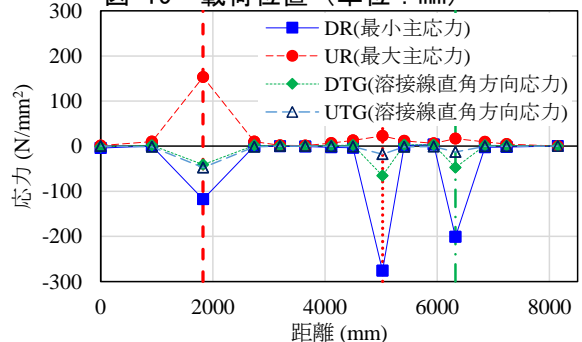


図-16 移動载荷による発生応力

表-1 応力範囲

橋軸方向	橋軸直角方向	DR				
		最小主応力(N/mm <sup>2</sup> )			変化率(%)	
		MAX	MIN	MAX-MIN	MIN	MAX-MIN
支間中央	第1車線	3.4	-275.8	279.2	0.0	0.0
	第2車線	3.4	-275.8	279.2	0.0	0.0
	第3車線	3.3	-271.8	275.1	-1.5	-1.5

ている継ぎ目を使用し、内部サーフェイスに分離可能な重複節点を定義することで、図-18に示すデッキ・Uリブ溶接部のビード貫通き裂およびデッキ貫通き裂をモデル化した。着目要素は、横リブ支間中央から橋軸方向に150mm離れた荷重载荷箇所の疲労き裂先端のルート部まわりの4要素とし、デッキ貫通き裂の場合



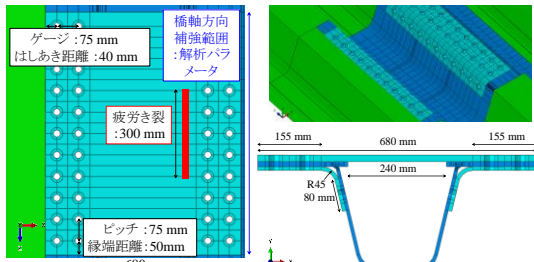
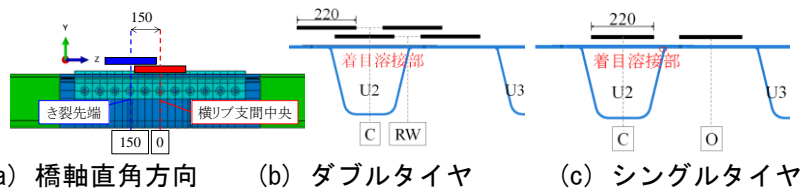
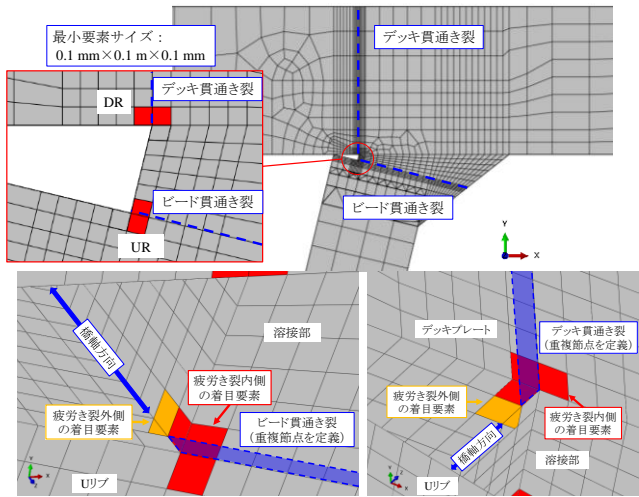


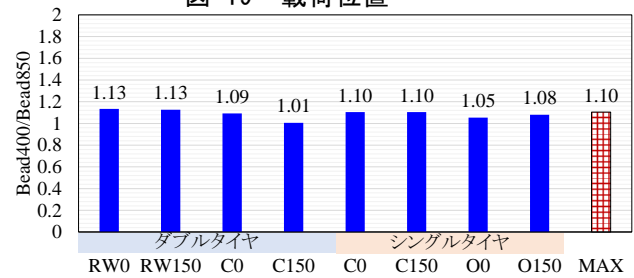
図-17 デッキ・Uリブ溶接部の補強構造



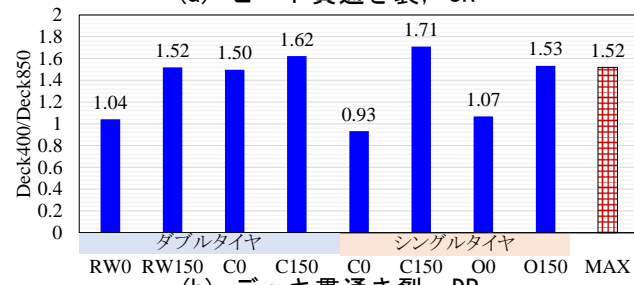
(a) 橋軸直角方向 (b) ダブルタイヤ (c) シングルタイヤ  
図-19 荷重位置



(a) ビード貫通き裂 (b) デッキ貫通き裂  
図-18 再現した疲労き裂および着目要素



(a) ビード貫通き裂, UR



(b) デッキ貫通き裂, DR  
図-20 ルート部最小主応力の比

はデッキ側ルート部(DR), ビード貫通き裂場合はUリブ側ルート部(UR)を評価する. なお, 溶接部のモデル化方法および最小メッシュサイズは2章と同様である. また, 実際の疲労き裂では, ストップホールによる対策を取ることが考えられるが, 本検討ではモデル化を省略した.

#### 4.2 解析ケース

解析ケースは, ビード貫通き裂およびデッキ貫通き裂を再現し, 橋軸方向に850mmおよび400mmの疲労き裂を再現した4ケースとした. 荷重は, ダブルタイヤを100kN, シングルタイヤを50kNとし, 図-19に示す位置に荷重した.

#### 4.3 補強範囲の検討結果

疲労き裂先端では, 溶接ルート部と母材との接合部が曲線ではなく, 疲労き裂によって隣接する要素と分離するため, 弾性理論上応力特異点となり応力は無限大となるが, 比較検討は可能であると考えられる. 400mmの当て板補強モデルと850mmの当て板補強モデルにおける, ルート部最小主応力の絶対値の比を図-20に示す. このとき, 数値が1より大きければ, 補強範囲850mmの最小主応力の方が大きくなる. ビード貫通き裂の場合, 補強範囲400mmの最小主応力の最大値は, 補強範囲850mmの1.1倍となり, 差はほとんどないと考えられる. 一方で, デッキ貫通き裂の場合, 補強範囲400mmの最小主応力の最大値は, 補強範囲850mmの1.5倍となり, 橋軸方向補強範囲がデッキプレートの曲げ変形の拘束に影響を与えられ

る. 仮に, 応力範囲が1.5倍となった場合は, 疲労寿命は1/4~1/3倍になるため, 橋軸方向補強範囲は, デッキ貫通き裂において重要であると考えられる.

### 5. Uリブ切断工法の構造改良に関する検討

#### 5.1 Uリブ切断工法の補強構造検討モデル

Uリブ切断工法における横リブ交差部の現状の補強構造では, デッキ・横リブ溶接部の一部に切断線を入れ, 図-21に示す鋳鉄製当て板(以下, 交差部当て板)を横リブの両面からボルト接合し, デッキ側をメタルタッチとしてデッキプレートをサポートしている. 解析モデルはデッキをUリブ3本, 横リブ3本で補剛する鋼床版とした. デッキの板厚は12mm, Uリブの板厚は6mm, 横リブの板厚は10mmである. 現状構造ではデッキ・横リブ溶接部に対する補強効果が小さいため, デッキプレートの曲げ変形に起因する応力集中を抑えることを目的に, 図-22に示す解析ケースを検討した. 着目部位は真ん中のUリブの左側溶接部とし, 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. ボルトのモデル化方法および当て板の接触条件は2章と同様である. 鋳鉄製当て板およびモルタルの材料特性を表-2に示す.

荷重は50kNのシングルタイヤとし, 荷重位置は着目横リブ上のUリブ内とした.

#### 5.2 改良モデルの解析結果

着目要素を図-23に, デッキ・横リブ溶接部における溶接線直角方向応力を図-24に, スリットにおける最大主応力を図-25にそれぞれ示す. なお, 図中には

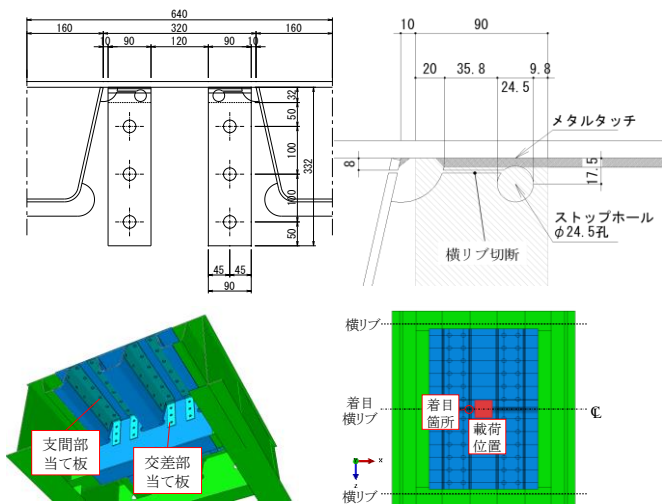


図-21 Uリブ切断工法の補強構造

無補強構造(ORG), 従来補強構造(FCD)の結果も示した。交差部当て板の頂部接触長さを変更した R15 および R30 では、デッキ・横リブ溶接部にて ORG 以上の曲げ応力が生じた。また、着目横リブ上のデッキ・Uリブ溶接部を切断しなかった DUC においても ORG 以上の曲げ応力が発生した。一方で、着目横リブ付近の Uリブ内にモルタルを充填した MRT では、デッキプレートの曲げ変形が抑えられ、デッキ・横リブまわし溶接部の曲げ応力は  $5.4\text{N/mm}^2$  となり、FCD より 98.2% 減少した。しかし、モルタルによって Uリブが面外に変形することで、スリットの Uリブ側止端部の最大主応力が  $20.4\text{N/mm}^2$  となり、135.6% 増加した。

## 6. 結論およびまとめ

本研究では、現場荷重試験および FEM 解析により、Uリブ鋼床版の有効な補修・補強工法および補強範囲について検討した。以下に得られた結論をまとめる。

- (1) デッキ・Uリブ溶接部の予防保全を目的に、12mm のデッキ上面に 6mm の当て板を行った結果、現場荷重試験より、デッキプレートの橋軸直角方向の応力範囲は、51.3% 低減し、Uリブの応力範囲は 33.4% 増加した。また、FEM 解析より、ルート部の最小主応力がデッキ側で 17.7%、Uリブ側で 58.0% 低減した。
- (2) 主桁間隔が 20m の A 橋を対象に荷重位置をパラメータとした FEM 解析を実施した結果、主桁間隔がデッキ・Uリブ溶接部の疲労き裂に与える影響はなく、デッキ・Uリブ溶接部の応力集中を検討する際は、橋軸方向範囲を横リブ 1 支間、橋軸直角方向範囲を Uリブ 3~4 本とした従来通りのモデル化範囲で十分であると考えられる。
- (3) デッキ・Uリブ溶接部に発生した 300mm の疲労き裂に対して、当て板補強範囲をき裂長さの 2.8 倍および 1.3 倍としたき裂先端の最小主応力の比は、ビード貫通き裂で 1.1、デッキ貫通き裂で 1.5

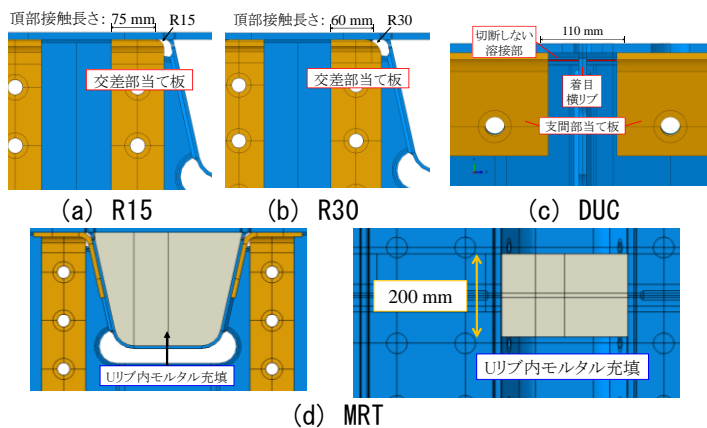
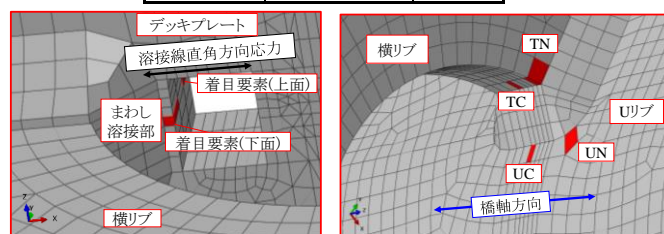


図-22 解析ケース

表-2 鋳鉄およびモルタルの材料特性

部材	ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
鋳鉄製当て板	170,000	0.3
モルタル	28,500	0.167



(a) デッキ・横リブ溶接部 (b) スリット

図-23 着目要素

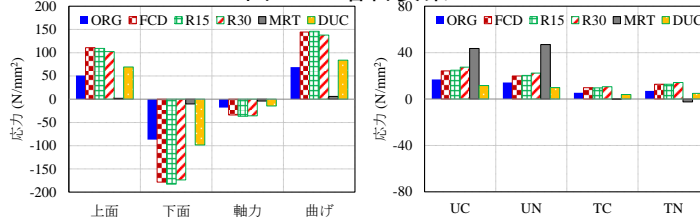


図-24 デッキ・横リブ溶接部の溶接線直角方向応力

図-25 スリットの最大主応力

となった。これより、橋軸方向補強範囲は疲労き裂の発生したデッキプレートの曲げ変形の拘束に影響を与えられと考えられる。

- (4) Uリブ切断工法に、横リブ交差部付近の Uリブ内へのモルタル充填を併用することでデッキプレートの曲げ変形が抑えられ、デッキ・横リブまわし溶接部の曲げ応力は従来工法の 98.2% 低減されたが、モルタルにより Uリブが面外に変形することでスリットの Uリブ側止端部の最小主応力が 135.6% 増加した。

今後の課題として、Uリブ切断工法の補強構造のさらなる改良、き裂長さの違いにおける適切な補強範囲の検討などが挙げられる。

## 参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会鋼構造委員会：鋼床版の疲労[2010年改訂版]，丸善出版株式会社，2010.12.
- 2) 森下弘大，山口隆司，田畑晶子，八ツ元仁，松下裕明，奥村学：Uリブ鋼床版横リブ交差部における下面からの補修補強工法に関する実験的研究，平成30年度土木学会全国大会第73回年次学術講演会，1-370，2018.8.
- 3) SIMULIA：Abaqus analysis user's manual version 2016，2016.
- 4) 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.
- 5) 古市亨，松井繁之，佐光浩継：ミューラー・プレスロウの原理を応用した3次元立体 FEM 解析による影響面作成と疲労の一考察，土木学会論文集 A，Vol. 65，No. 4，pp.949-954，2009.11.