

## U リブ鋼床版の疲労耐久性向上のための構造改良

阪神高速道路株式会社技術部技術開発課

田畑 晶子

阪神高速道路株式会社建設事業本部建設技術課

杉山 裕樹

### 要 旨

既設 U リブ鋼床版の U リブと横リブ交差部の下側スリット部には疲労によるき裂損傷が多く報告されている。当該部位に生じる疲労き裂の対策として様々な構造検討が行われてきたが、製作性・疲労耐久性の両面に配慮した構造の確立には至っていない。そこで本研究では、スリットの形状のみを変化させて疲労き裂の発生原因となる応力集中を低減させる構造について検討を行い、シェル要素によるパラメトリック FEM 解析や、溶接部をモデル化した詳細な FEM 解析により、き裂発生部位の応力集中を約 75%低減できる改良構造を提案した。さらに、実物大供試体を用いた疲労試験を実施し、標準構造と比較して提案する改良構造の疲労耐久性が著しく向上することを確認した。

キーワード： U リブ鋼床版，横リブ交差部，回し溶接部，疲労き裂，スリット形状

### はじめに

閉断面リブ(以下、U リブという)を有する鋼床版では、デッキプレートと U リブの溶接部、垂直補剛材とデッキプレートの溶接部、U リブと横リブの溶接部などに多くの疲労き裂が発生している。なかでも、U リブと横リブ交差部(以下、交差部という)の溶接部のき裂の発生割合は、全体のき裂発生量の 4 割を占める。このうち、上側スカラップ周りに発生するき裂に対しては、スカラップを設けず、かつデッキプレート板厚を 16mm 以上とするのが標準となっている<sup>1)</sup>。一方で、下側スリット部に発生する損傷は、U リブ側溶接止端部を起点として発生するタイプ、横リブ側溶接止端部を起点として発生するタイプ、横リブスリット母材を起点として発生するタイプがあるが、U リブ側溶接止端部を起点として発生するタイプが最も多い(図-1)。

交差部に発生する疲労き裂の対策として様々な

検討が行われ、疲労耐久性に配慮された下側スリット部の構造は、国内では東京ゲートブリッジで採用された構造や合理化鋼床版の構造が挙げられる。東京ゲートブリッジでは、スリット形状をデッキプレート方向に深く切り上げ、加えて U リブに内リブを取り付けることで、回し溶接部の応力集中を内リブに分散させている<sup>2)</sup>。また、合理化鋼床版では、U リブ底面と横リブを溶接で接合し拘束範囲を広くして回し溶接部の応力集中を低減させている<sup>3)</sup>。しかし、これらの構造は、内リブと密閉ダイヤの目違いの管理や U リブ底面とのルートギャップの管理など、標準構造と比べて製作の手間や品質管理項目が多くなる。つまり、標準構造と同等の製作性を有し、かつ疲労耐久性の高い構造の確立が望まれる。

本研究では、下側スリットの形状の変更のみで応力集中を低減し、高い疲労耐久性を有する構造の確立を目的とした。まず、荷重載荷位置やスリットの形状寸法などをパラメータとして、シェル

要素を用いたパラメトリック FEM 解析を行い、疲労き裂を発生させる原因を確認した上で、疲労き裂発生部位の応力集中を低減させる下側スリット形状について検討した。つぎに、検討された形状について溶接形状をモデル化したソリッド要素解析を行い、スリット周辺の応力性状を詳細に調査した。さらに、標準構造と改良構造の実大模型を用いた疲労試験を実施し、両者の疲労耐久性の比較を行った。

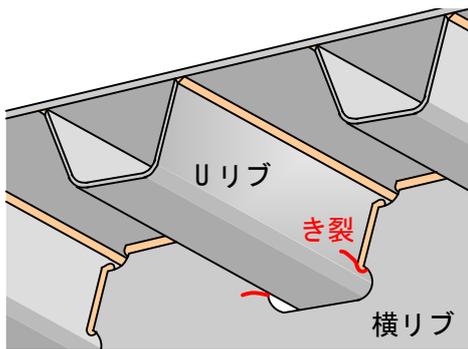


図-1 交差部の疲労損傷事例

## 1. FEM 解析による横リブ交差部の構造検討

### 1-1 解析概要

解析対象は、図-2 に示す横リブ間隔を 2.5m とした 2 パネルに U リブ (320mm×240mm×6mm) を 4 本配置した部分モデルとした。支間中央に配置した横リブスリット部の U リブと横リブとの回し溶接止端部 (A 点:U リブ側および B 点:横リブ側) を主な着目点とした。当該箇所には生じる疲労き裂への影響が大きい密閉ダイヤフラム (以下、密閉ダイヤという) の位置は標準図を参考にして、横リブから支間中央側へ 460mm とした。デッキプレートの板厚は道路橋示方書<sup>15)</sup>に従い 16mm とした。横リブの構造は図-2 中に示すスリット形状を標準とし、改良構造の検討を行った。載荷荷重はダブルタイヤ 1 輪を模擬し、2-200mm×200mm の載荷面積に 100kN とした。載荷位置は橋軸直角方向 7 ケース、橋軸方向 6 ケースとした (図-2, 図-3)。解析に使用したソフトウェアは MSC. Marc 2010 である。検討の手順として、まずシェル要素解析を用いた概略検討に

より改良構造を決定し、その後、決定された改良構造および標準構造を対象とした詳細なソリッド要素解析を行い、応力低減効果を評価した。

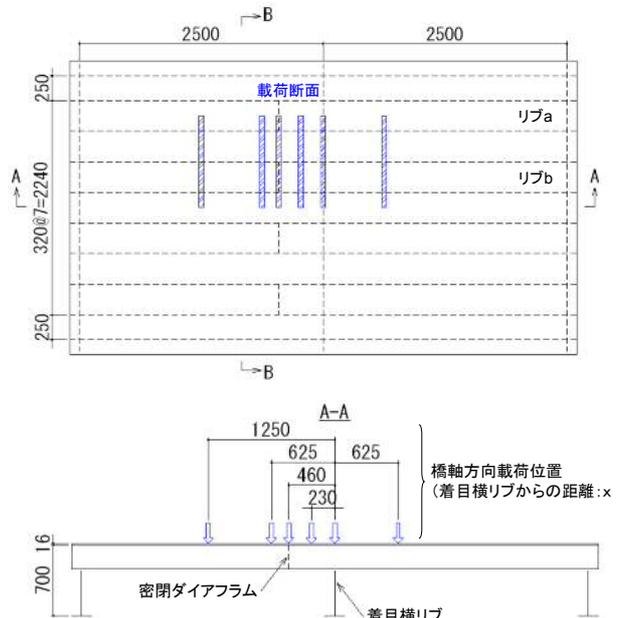


図-2 解析対象と橋軸方向載荷位置

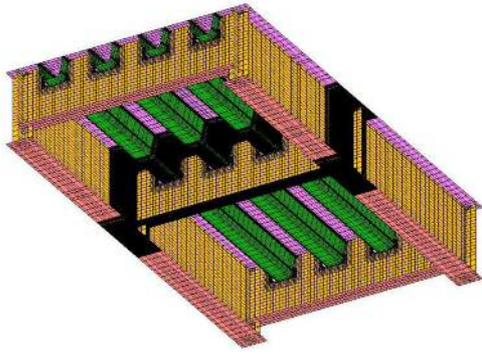


図-3 橋軸直角方向載荷位置と載荷面寸法

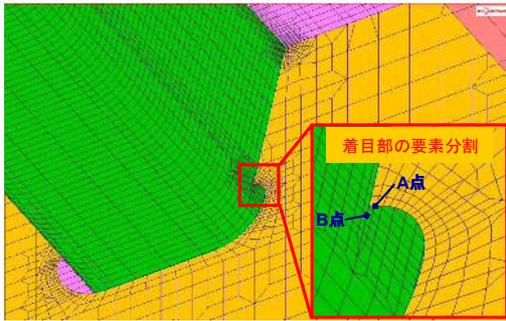
### 1-2 シェル要素による解析

シェル要素解析におけるモデル図を図-4 に示す。解析は弾性解析とし、着目部の要素サイズは約 2.0mm である。着目部の応力の抽出位置は U リブと横リブの交点の特異点の 1 つ手前の節点である。

標準構造において着目部の主応力の最大値が発生した載荷位置(横リブ支間 1/4 : x=625mm)でのリブ 1 左側の回し溶接部における橋軸直角方向影響線を図-5 に示す。着目点 A 点および B 点ともにケース 5 載荷において最大値が発生している。その値は A 点で 457N/mm<sup>2</sup>, B 点で 213N/mm<sup>2</sup> であり、U リブ側溶接止端部の応力が大きい結果となった。



( i ) モデル全体



( ii ) 交差部詳細図

図-4 シェル要素の解析モデル

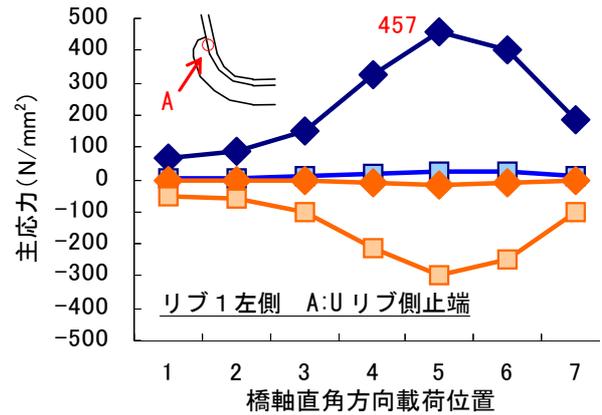
図-6 には標準構造の変形図を示す。密閉ダイヤ近傍の U リブ間に荷重が载荷されることで生じるねじり力によって、オイルキャニング変形（U リブ側壁の歪み）が生じ、この変形が横リブにより拘束されて着目部に大きな応力集中が生じている。

改良構造は、回し溶接部付近の応力集中を緩和するとともにせん断力の伝達を期待する平行部を設けることで溶接部の発生応力を低減させる構造とした。この構造なら標準構造と比べても工数が増えず、製作が比較的容易である。

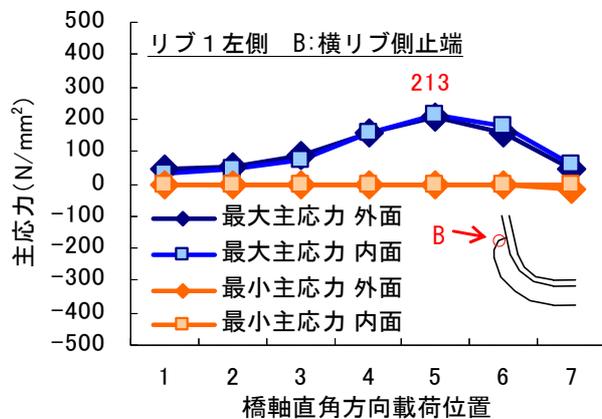
検討パラメータは、図-7 に示すように平行部の長さ（Y1）、平行部の幅（Y2）、半円切欠き径（Y3）とした。Y1=52mm、Y2=10mm、Y3=R30mm を基準として、U リブ回し溶接部の発生応力を各パラメータ間で比較した結果を図-8 に示す。Y1 が大きいほど、Y2 が小さいほど、応力は低減する傾向にある。また、Y3 の影響は比較的小さいことがわかった。

これらの結果を踏まえ、U リブと横リブ溶接部のせん断耐力の照査結果から許容される最大値と

して Y1=65mm、製作上の問題から Y2=15mm、断面欠損を最小にするため Y3=R20mm を決定し、これらの形状パラメータをもって改良構造とした。図-9 には、改良構造のシェルモデル解析における変形図および応力コンター図を示す。同図より、改良構造の応力集中が生じる部位は、回し溶接部と平行部の 2 箇所に分かれ、それぞれ 232 N/mm<sup>2</sup>、227 N/mm<sup>2</sup> である。標準構造の U リブ回し溶接部の応力（A 部、457N/mm<sup>2</sup>）に比べ、約 50% に低減し、疲労耐久性の向上が期待できる。また、変形図からは、U リブのオイルキャニング変形に対する横リブによる拘束が緩和され、これが着目部の応力低減に寄与していると考えられる。一方で、半円部の母材には新たな応力集中が発生しているが、その値は標準構造の溶接部に発生した最大値の半分程度である。



( i ) U リブ側止端部



( ii ) 横リブ側止端部

図-5 下側スリット回し溶接部の主応力発生状況

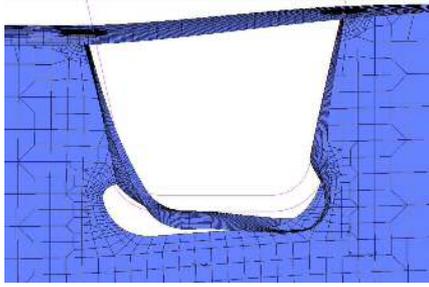


図-6 標準構造の変形図（変形倍率：200倍）

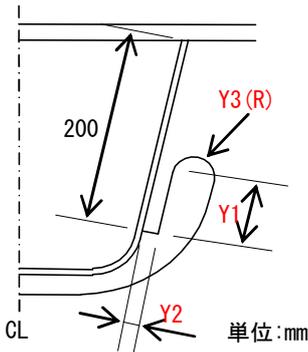


図-7 改良構造と形状パラメータ

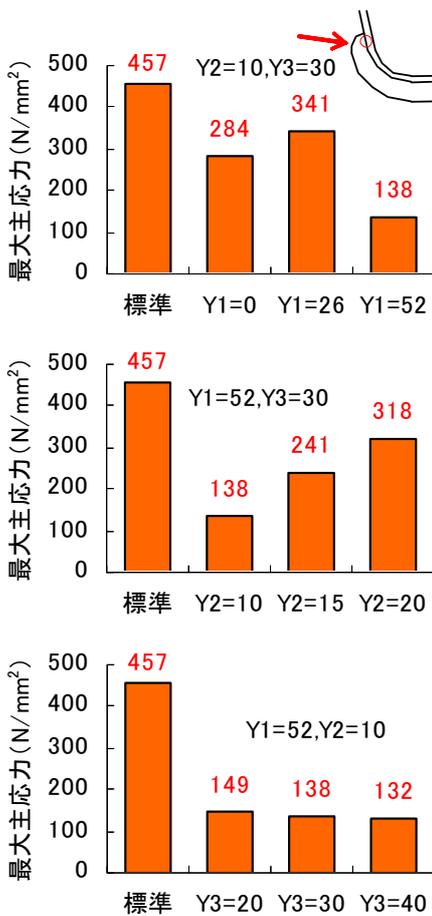


図-8 Uリブ回し溶接部応力の比較

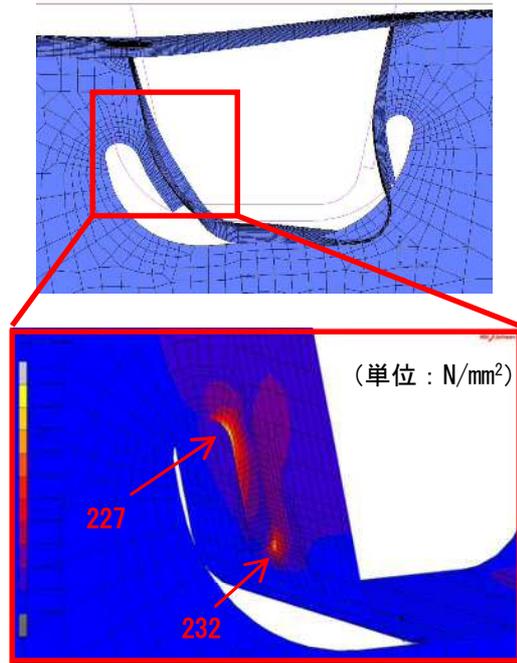


図-9 改良構造の変形図及び主応力コンター図  
（変形倍率：200倍）

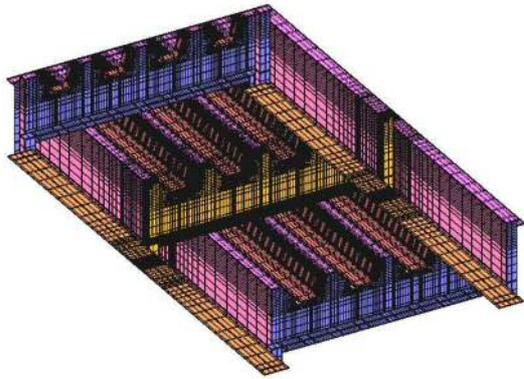
### 1-3 ソリッド要素による解析

改良構造による疲労耐久性の向上効果をさらに詳細に調べることを目的として、ソリッド要素を用いて溶接部までモデル化した FEM 解析を実施する。ソリッド要素解析のモデル図を図-10 に示す。溶接部は脚長 6mm でモデル化した。着目部周辺の最小要素サイズは約 0.2mm であり、要素数は約 50 万要素である。

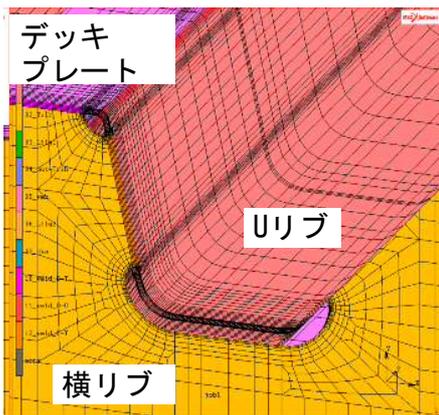
解析結果を図-11 に示す。载荷位置は前章と同じである。着目部の最大主応力は標準構造が 392N/mm<sup>2</sup> であるのに対し、改良構造では 99N/mm<sup>2</sup> となり約 75%低減する。一方で、改良構造では半円部の母材に 168N/mm<sup>2</sup> の比較的大きな応力が発生する。この理由は、改良構造では変形を分散させ、細幅部材の母材に応力集中点を移行させたためであるが、構造全体としての疲労耐久性は向上しているものと考えられる。この点については、後述の疲労試験で確認するものとする。

図-12 には、対象溶接部近傍のピーク応力、及び応力分布から算出した溶接止端部のホットスポット応力(以下、HSS という)を示す。HSS の評価は、応力集中部から 0.4t 及び 1.0t 離れた節点の

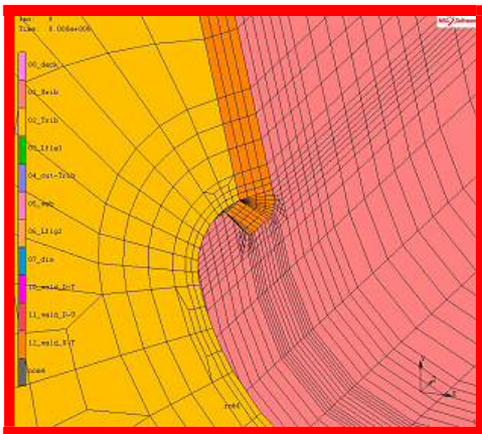
応力を外挿して求めた<sup>15)</sup>。HSS 応力は、標準構造が  $261\text{N/mm}^2$  に対して、改良構造は  $61\text{N/mm}^2$  である。HSS で評価しても傾向はピーク応力と同等となり、改良構造とすることで HSS を約 77%低減することが確認できた。



( i ) モデル全体

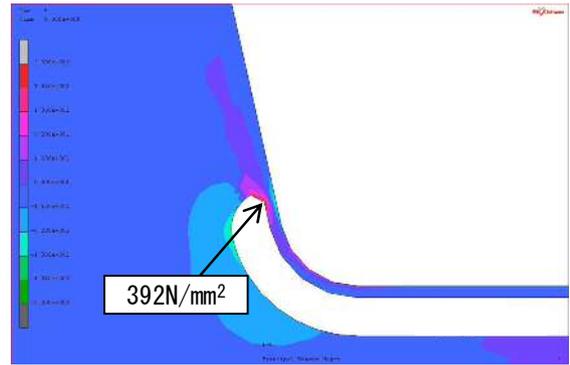


( ii ) 横リブ交差部

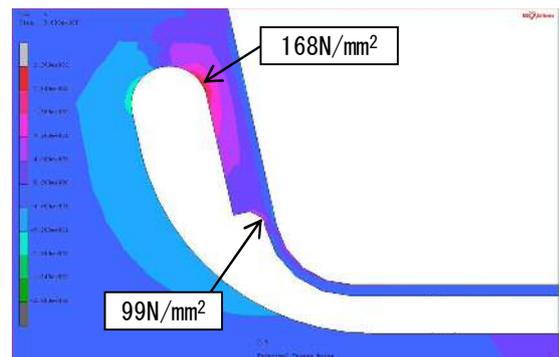


( iii ) 溶接部詳細

図-10 ソリッド要素の解析モデル



( i ) 標準構造



( ii ) 改良構造

図-11 ソリッド要素での詳細解析結果

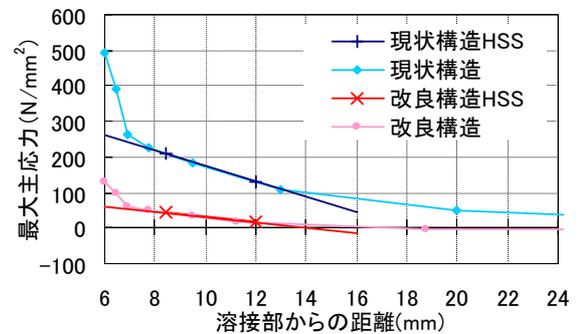


図-12 Uリブ回し溶接部近傍の応力分布

## 2. 疲労試験による疲労耐久性の評価

### 2-1 実験方法

疲労試験に用いる供試体は U リブ 2 本、横リブ 3 本、主桁 2 本を有する実大模型とし、下側スリットの構造詳細が標準構造と改良構造である 2 タイプを 1 体ずつ製作した。図-13 に供試体の寸法を示す。供試体は荷重装置の制限から前章の解析モデルよりも小型化しているが、ソリッド要素による FEM 解析により着目部の応力や変形形状に有意差がないことを予め確認して形状を決定し

た。本供試体は実橋と同様の方法で製作するため、デッキプレートと U リブを他電極のガスシールドアーク溶接し、ウェブ及び下フランジを溶接したパネルを立体組にして製作した。また、密閉ダイヤが下側スリット部の応力性状に大きな影響を与えることが明らかなため、密閉ダイヤを設置するために、現場継手部を設けて、デッキプレートはサブマージアーク溶接で接合し、U リブとウェブと下フランジはボルト接合した。荷重は 200kN 油圧サーボ式疲労試験機で行い、荷重荷重は下限 20kN, 上限 160kN 荷重範囲を 140 kN とした。荷重位置は着目部の応力が最大となる位置とした (図-13)。荷重面は、ダブルタイヤを模擬した 200×200mm のゴム板 2 枚を使用した。

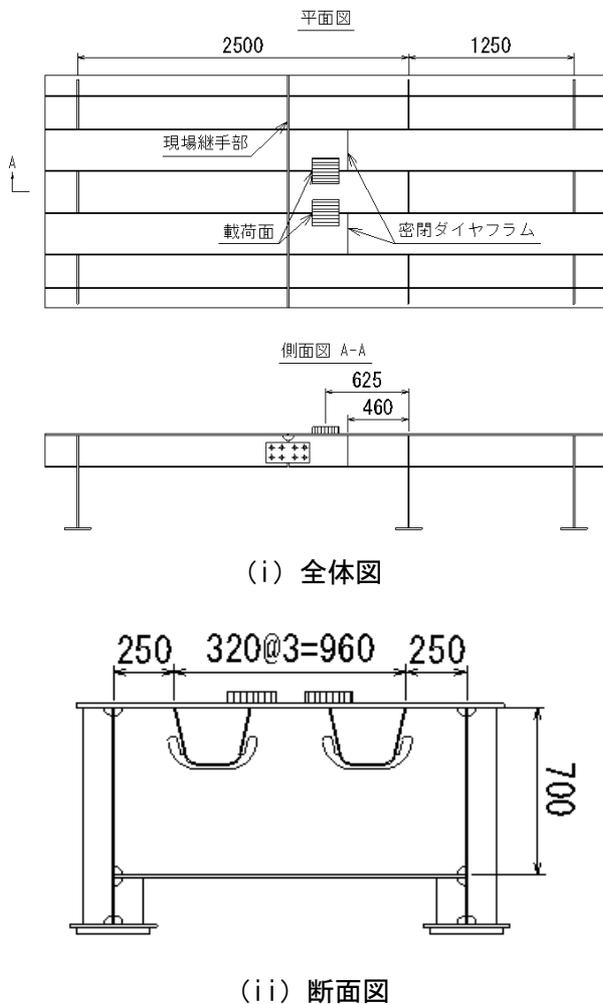


図-13 改良構造の供試体

実験状況の写真を図-14 に示す。疲労試験中に実施するき裂の有無の確認は、静的荷重試験で得られるひずみゲージ計測値の変化、磁粉探傷試験および目視による検査で行った。

図-15 には、横リブ交差部のひずみゲージの貼付け位置を示す。ひずみゲージは、リブ 1 ではゲージ長 1mm の単軸 5 連の応力集中ゲージを、リブ 2 では、簡素化してゲージ長 1mm の単軸ゲージを使用した。



図-14 実験状況

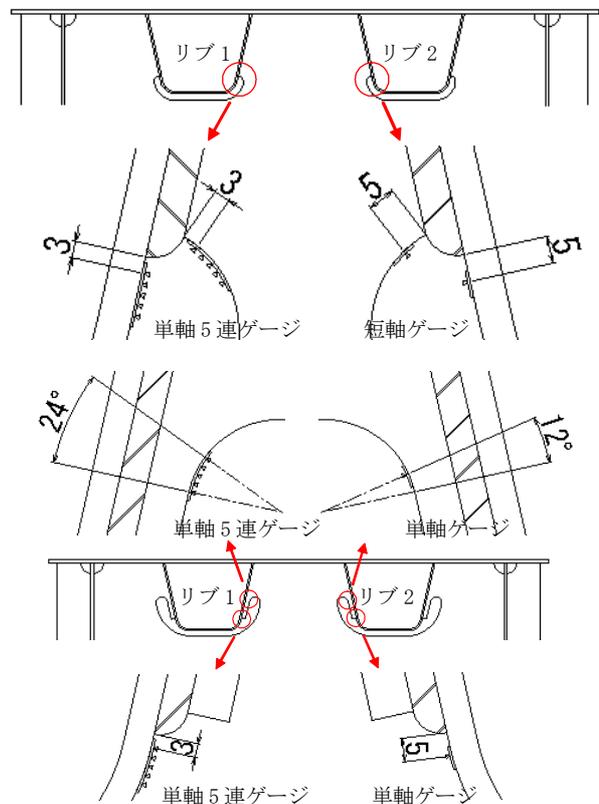
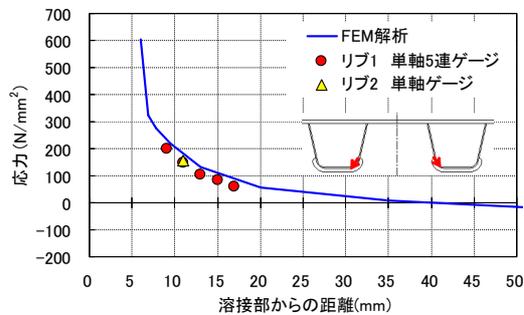


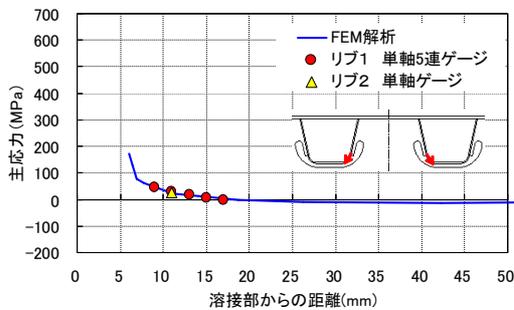
図-15 ひずみゲージの貼り付け位置

## 2-2 静的載荷試験結果

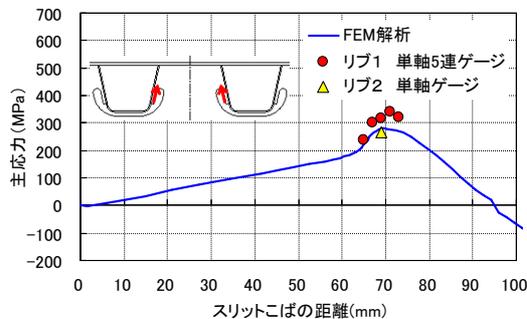
図-16には、載荷荷重 140kN 時の横リブ交差部の発生応力を示す。同図より、標準構造での最大応力は、回し溶接止端部に最も近い 5 連ゲージで発生し、応力値は  $199\text{N/mm}^2$  である。また、回し溶接止端部からの同距離での計測値は良く一致し、解析が本試験を良く再現できている。改良構造の回し溶接止端部の最大の応力は  $44\text{N/mm}^2$  であり、標準構造の計測結果と比較して 78% 低減し、FEM 解析の低減効果とほぼ一致した。改良構造では細幅部の母材で  $342\text{N/mm}^2$  の局部応力が発生し、応力集中が母材側に移行した。



(i) 標準構造 Uリブ側



(ii) 改良構造 Uリブ側



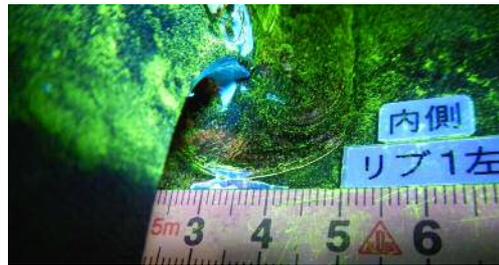
(iii) 改良構造 下側スリットこば側

図-16 静的載荷試験結果

## 2-3 疲労試験結果

標準構造は繰返し載荷回数 10 万回で静的載荷試験を実施すると、Uリブ側のひずみ計測値が疲労試験開始前より約 50% 低下した。そのため、磁粉探傷試験で調査したところ図-17 に示すように、回し溶接の止端に沿って疲労き裂が発生した。

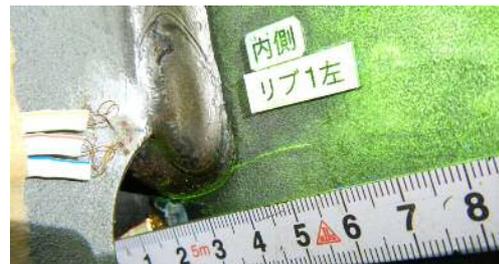
その後、疲労き裂は回し溶接止端から母材方向へ進展し、載荷回数 100 万回で Uリブ板厚を貫通した。一方で、改良構造は繰返し載荷回数が 400 万回に達しても疲労き裂は発生しなかった。



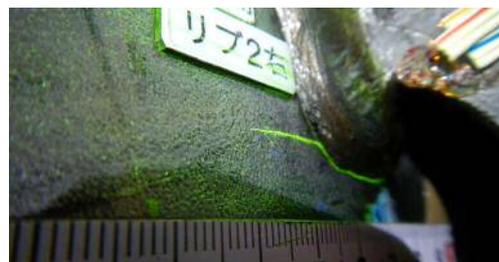
(i) 載荷回数 10 万回でリブ 1 に発生したき裂



(ii) 載荷回数 10 万回でリブ 2 に発生したき裂



(iii) 載荷回数 100 万回のリブ 1 のき裂進展状況



(iv) 載荷回数 100 万回のリブ 2 のき裂進展状況

図-17 疲労試験結果

以上の検討を踏まえ、提案する改良構造は、Uリブ回し溶接部に発生する応力集中を疲労強度が高い平行部に分担させることで、回し溶接部からの疲労き裂の発生を抑制し、構造全体で疲労耐久性を向上できることを確認した。

### 3. 結論

Uリブ鋼床版の交差部を対象として疲労耐久性が向上できる改良スリット形状を FEM 解析で検討し、疲労試験で検証した。以下に結論を述べる。

- (1) 密閉ダイヤ近傍の Uリブ間に荷重を偏心载荷すると、Uリブにねじりが生じて Uリブ底面が水平方向に移動し、それを拘束する横リブの回し溶接部 Uリブ側に応力集中が生じる。疲労試験の結果、当該部位に疲労き裂が発生した。
- (2) 提案する改良スリット形状は、部材の追加や溶接箇所を増加をせずに横リブの下側スリットの形状の変更のみで応力集中を低減する。横リブに半円の切欠き部を設け、Uリブと切欠きの間にリブの働きを期待する細幅部材を設ける。
- (3) 実物大模型による疲労試験を実施し、標準構

造が载荷回数 10 万回で疲労き裂が発生したのに対して、改良構造は 400 万回に達してもき裂が発生せず、標準構造に比べて疲労耐久性が著しく向上することが検証できた。

謝辞：本稿は「疲労耐久性の高い鋼床版交差部構造に関する研究」において株式会社横河ブリッジとの共同研究成果の一部をまとめたものである。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，pp.507-514，2012.
- 2) 森永真朗，磯上知良，千葉照男，三木千壽：東京湾臨海大橋(仮称)における技術開発とコスト縮減 第3回上部工の構造検討(2)，橋梁と基礎，Vol.42-10，PP.40-45，2008.
- 3) 日本道路公団名古屋建設局：合理化鋼床版設計施工指針(案)，2000.

## GEOMETRIC IMPROVEMENT FOR INCREASED FATIGUE RESISTANCE AROUND THE CUTOUTS IN RIBS OF ORTHOTROPIC STEEL DECKS

Akiko TABATA and Hiroki SUGIYAMA

There have been many reports of fatigue crack damage in existing orthotropic steel decks with U-shaped ribs at around the lower cutouts in the transverse ribs where they intersect with the U-shaped ribs. Although various alternative cutout details have been examined, no definite proposals have been made taking both ease of fabrication and fatigue strength into account. This study examined fatigue resistance around the cutouts in geometry refinement through a series of finite element analyses with shell and solid elements. With the proposed cutout shape, local stress concentration which was causative of fatigue cracking was reduced by approximately 75% as compared to the current shape. In addition, fatigue test using a full-scale proto-type panel demonstrated that fatigue resistance with the improved cutouts was significantly higher than that with the conventional cutouts.

田畑 晶子



阪神高速道路株式会社  
技術部技術開発課  
Akiko Tabata

杉山 裕樹



阪神高速道路株式会社  
建設事業本部建設技術課  
Hiroki Sugiyama