

合理化鋼床版のUリブ・横桁交差部の局部応力特性について

Local Stress of Trapezoidal Ribs to Floor Beams Joint in Rational Orthotropic Steel Decks

勝俣 盛*, 小笠原 照夫**, 町田 文孝***, 川瀬 篤志****, 溝江 慶久****

Mori KATSUMATA, Teruo OGASAWARA, Fumitaka MACHIDA, Atsushi KAWASE and Yoshihisa MIZOE

- * 川田工業株式会社 技術開発本部 技術研究室, 主任 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)
 ** 川田工業株式会社 技術開発本部 技術研究室, 係長 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)
 *** 川田工業株式会社 技術開発本部 技術研究室, 主幹 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)
 **** 工修 川田工業株式会社 技術開発本部 技術研究室 (〒114-8562 東京都北区滝野川1-3-11)

The authors tried to clarify the stress characteristic of the joint between trapezoidal ribs and floor beams in rational orthotropic steel decks which were composed by the thickened deck plate and the enlarged size ribs in order to reduce the cost of fabrication. From the results of static loading tests and fatigue tests used the full-scale test specimen of rational orthotropic steel deck, the large local stress, which reduced remarkably the fatigue strength, occurred at the toe of rib side of boxing weld in joint. It was found that such large local stress was occurred owing to the out-of-plane deformation of rib web plate from the results of FEM analysis carried out for investigate the cause. As the preventive measures against the large local stress, it was confirmed that the out-of-plane deformation of rib web plate and the local stress of weld toe could be reduced by the brief improvement of joint details such as restricted the deformation of the bottom flange of trapezoidal rib in the floor beam intersection.

Key words : rationalized design, orthotropic steel deck, out-of-plane deformation, local stress

1. まえがき

従来より、長大橋梁や都市高架橋の床版構造には、主として死荷重の軽減と施工期間の短縮を図るため、鋼床版構造が数多く採用されてきた。しかしながら、鋼床版は比較的薄い鋼板を溶接によって接合するため、各部に生じる応力の流れが複雑であり、さらに車両荷重を直接支持する構造であることから、疲労損傷を被りやすい形式と言える。

鋼床版の疲労損傷に関しては、これまでの事例を整理することにより弱点となる部位がある程度明らかにされ、その原因究明や構造ディテールの改善もなされてきている^{1)~3)}。特に、縦リブと横リブあるいは横桁が交差するスリット部は、まわし溶接部の横リブ側止端やスリットR部から疲労亀裂の発生する事例が報告されており、疲労上もっとも弱点になりやすい部位の一つとされている。近年では、横リブ間隔を広げ溶接延長を低減できるU型の閉断面縦リブ(以下、Uリブと称する)の使用が主流となっており、その際の板厚は道路橋示方書⁴⁾に規定された最小板厚を使用する例が多い。一方、そのスリット形状は各管理団体ごとに異なっており^{5)~8)}、溶接の施工性および横リブあるいは横桁の面内力に対してR部の応力集中が小さくなるように

それぞれ配慮したものと思われる^{9)~13)}。しかしながら、この部位に発生する疲労亀裂の事例が多数報告されるのにもない、これらの亀裂の発生原因が前述の面内力による応力集中だけでは説明が難しくなってきた。

この問題に対して、横リブまたは横桁の面内変形による面内力だけではなく、Uリブの曲げ変形にともなう横リブまたは横桁ウェブの面外曲げによる局部変形が疲労亀裂の原因になっていることがわかり^{14)~16)}、その後、この面外変形挙動にともなう局部応力の特性やその低減方法などに関する研究が盛んに実施されるようになってきた^{17)~22)}。

著者らが提案する合理化鋼床版は、デッキプレートに厚板を採用すると同時に、Uリブ断面を大型化することによって、横リブを省略する構造である。これにより、構造が簡略化され、部材数、材片数ならびに溶接延長の低減も図れることから、従来と同程度の鋼重で経済的な床版を製作することが可能になる。また、厚板化や断面の大型化により鋼床版としての全体剛性が増加するため、公称応力が小さくなることから全体的な耐久性は従来型鋼床版に比べ向上するものと推測される。さらに、Uリブ自体の断面性能が向上することによりUリブ支間を伸ばすことができ、鋼床版中央でのたわみ量は増加するにも関わらず横桁交差

構成部材 [※]		寸法(mm)
デッキプレート	板厚	19
Uリブ	断面	450×330×8-40R
	間隔	450
	支間	5000
主桁	断面	Web-Pl: 1800×10 Flg-Pl: 300×12
	間隔	4500
	支間	5000
横桁	断面	Web-Pl: 1500×10 Flg-Pl: 250×12
	断面	450×330×10

b) Uリブ断面 c) スリット形状

部でのＵリブのたわみ角は小さくなることから、従来型鋼床版で生じていたような変位誘起による疲労損傷を抑制する効果が期待できる。しかしながら、Ｕリブの板厚が従来と同等であることから、Ｕリブ断面内の変形は従来型に比べ大きくなることが考えられ、これを起因として横桁交差部での疲労損傷の発生が懸念された。

接合にて試験室内で組立てた。なお、各Uリブの高力ボルト継ぎ手部にはUリブ内に密閉ダイヤフラムD1, D2を設けている。鋼材は全て SM400A 材を使用した。

Uリブが横桁位置を支点とする連続梁の挙動を示すように、主桁と横桁交差部の全6箇所を10mm厚のゴム板を介して鋼製架台に高力ボルトで固定した。

図-2a)に示すように、載荷は荷重を10tfとし、500×200mmの載荷面に等分布となるように25mm厚の鋼板と10mm厚のゴム板を介し、ジャーナルジャッキを用いて行った。

載荷位置は、U3リブセンターを橋軸直角方向（X方向）の原点として、 $X=-202.5 \sim +202.5\text{cm}$ の間を22.5cm間隔で移動載荷させ、また橋軸方向（Z方向）にはC2横桁位置を $Z=0$ として、 $Z=-250 \sim +250\text{cm}$ の間をUリブ支間の1/2点、1/4点およびC2横桁から25cm、50cmの位置、ならびに密閉ダイヤフラム直上をそれぞれ載荷することとした。

なお、本文では載荷名称を図-2b)に示すように、対象Uリブの中央載荷のとき添え字C、E側の腹板上載荷のとき添え字E、W側の腹板上載荷のとき添え字WをUリブ名称の

2.1. 靜的載荷試驗

試験体は、実構造の挙動を評価するため、縦12m、横5.6m、高さ1.8mの実物大相当とした。形状寸法を図-1に、構造諸元を表-1に各々示す。主な特徴は、デッキプレートの板厚を従来の12mmから19mmに増厚し、Uリブを大型化していることである。また、Uリブと横桁が交差する部位のスリット形状は、R部に応力が集中しないように考慮し、溶接の作業性から図のようなディテールとした。

b) 載荷名称 (U3 リブの場合)

圖-2 載荷方法

後に付加して表記する。また、隣接するUリブ間の中央載荷のときにはUリブ名称を並記する。

(4) 測定位置

既往の研究によれば、まわし溶接横桁側の止端を起点とした疲労亀裂の発生事例が多数報告されており、実橋においてもその発生が確認されている。また、スリットの曲率変化部も横リブあるいは横桁直上載荷時に面内・面外力により応力値が大きくなる部位であり、ノッチなどを起点とした疲労亀裂の発生が懸念される。そこで、本研究ではU3リブとC2横桁が交差する部位に着目することとして、測定位置は図-3に示すように溶接止端部近傍と曲率変化部とした。図中のH軸およびV軸はひずみゲージの主軸方向を表し、x軸およびy軸はコバ面の接線方向を主軸とする局所座標系である。

交差部の横桁側止端部（図中①、③；止端から5mm）、スリット形状の曲率が83Rから35Rに変化する点近傍（図中②、④；端から5mm）には3軸のひずみゲージ（ゲージ長1mm）を同位置の表裏面に貼付し、主応力の大きさと向きを調査すると共に、表裏のひずみ値の差分から膜応力成分 σ_M と面外曲げ応力成分 σ_B に分解できるようにした。また、Uリブ側の止端部（図中⑤、⑥；第2番目の素子が止端から5mm）には、応力集中ゲージ（ゲージ長1mm×単軸5素子）を貼付し、止端側から2番目の素子の測定値を局部応力として整理した。

なお、横桁はC1横桁からC2横桁を視準する方向を板表面と定義し、表面をF、裏面をBと表記する。

2.2. 測定結果

(1) 横桁側止端部および曲率変化部

横桁側止端部の主ひずみの方向は、載荷位置によって異なるため、測定点①、③の影響線を比較するうえで主応力値を用いるとその方向が問題となる。そこで、既存橋梁では溶接止端部を起点に疲労亀裂が発生する場合があることを考慮し、その原因となる亀裂に直交する応力はほぼH軸方向の応力 σ_H に相当することから、それを用いて整理することとした。また、測定点②、④の曲率変化部の場合、載荷位置を橋軸方向に移動しても主ひずみの方向がほぼ一定であり、疲労亀裂の発生原因となるコバ面の接線方向の応力は最小主応力 σ_{Min} とみなせることから、この応力を用いて整理することとした。

C2横桁からC3横桁へ向かって50cmの位置にある密閉ダイヤフラムD1直上において、X方向に移動載荷させた際の

測定点①、③の影響線図を図-4a)、横桁直上を同様に移動載荷させた際の測定点②、④の影響線図を図-5a)に示す。また、U3リブのW側の腹板直上をZ方向に移動載荷した結果を図-4b)、図-5b)に各々示す。

図-4a)から、測定点①、③の σ_H は、Uリブの腹板直上載荷時に最大となり、載荷位置が $X=0$ に近づくにしたがってその値は急激に減少し、引張応力から圧縮応力へと反転することがわかる。また、表裏の測定値の差分が極めて小さいことから、この部位の発生応力は膜応力が支配的である。ここで、測定点①と③の最大値が大きく異なっているが、構造が対称であるにも関わらずU3C載荷時の値が一致していないことから、ゲージの貼付位置または貼付角度が若干ずれているものと判断した。一方、図-5a)から、測定点②、④の σ_{Min} は、Uリブの腹板直上載荷時に最小となり、他の腹板に荷重が跨ると極端に小さくなることから影響線長が極めて短いことがわかる。

次に図-4b)から、荷重が載荷されているUリブ腹板側の測定点③の σ_H は $Z=-250\sim 0$ cm間で③-F、Bに差があることから、板曲げが生じている。しかし、密閉ダイヤフラムが存在する $Z=0\sim +250$ cm間ではその差は無く、膜応力が支配的であった。また図-5b)から、曲率変化部の σ_{Min} の最小値は、荷重が載荷されているUリブ腹板側の測定点④で生じており、このとき測定点②の応力は非常に小さかった。

さらに、横桁側止端部は密閉ダイヤフラム近傍でUリブの腹板直上に載荷される場合に最も厳しい応力が発生し、曲率変化点では同じく腹板上に載荷される場合であるが、橋軸方向の位置は継手部とは逆に一般部のところとなっていた。

これらの結果から、合理化鋼床版は膜応力成分が卓越し、従来の鋼床版で問題とされているUリブのたわみ変形にともなう横桁ウェブの局部的な面外曲げ変形は極めて小さいと判断した。

(2) Uリブ側止端部

測定点⑤、⑥は図-6b)に示すようにU3E、U3CおよびU3W上をZ方向に移動載荷したとき、同等の測定結果が得られたことから、ここでは測定点⑥についてのみ考察する。また、図-6a)はC2横桁直上およびそれをはさんだ50cm、250cmの位置においてX方向に移動載荷させた時の測定点⑥の影響線を5本重ねたものである。

図-6a)から、Uリブ側止端の鉛直方向応力 σ_y は、 $Z=+50$ cmのとき以外では、およそ $-500\sim +500$ kgf/cm²の範

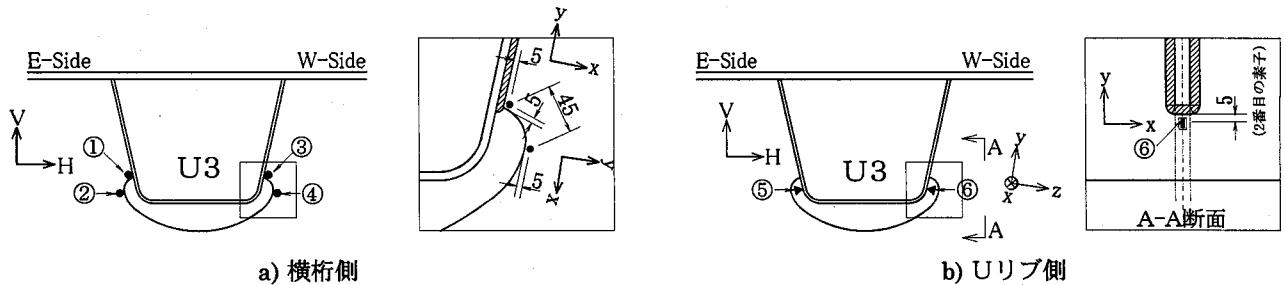
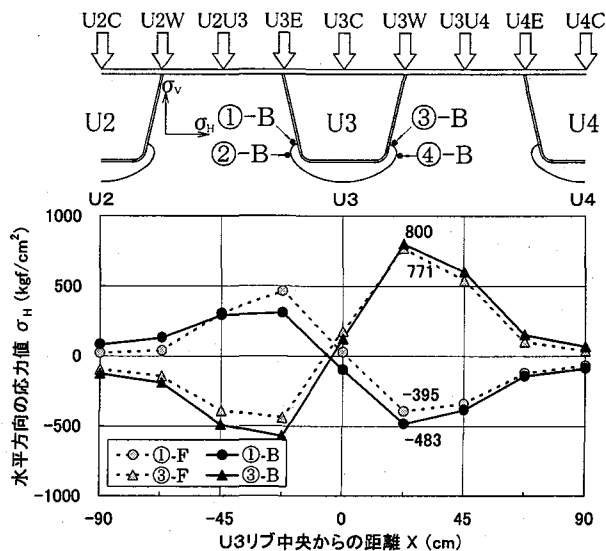
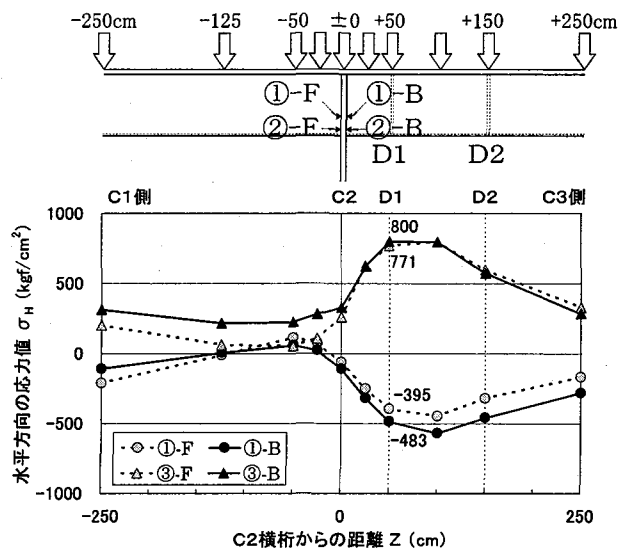


図-3 横桁側のひずみゲージ貼付位置

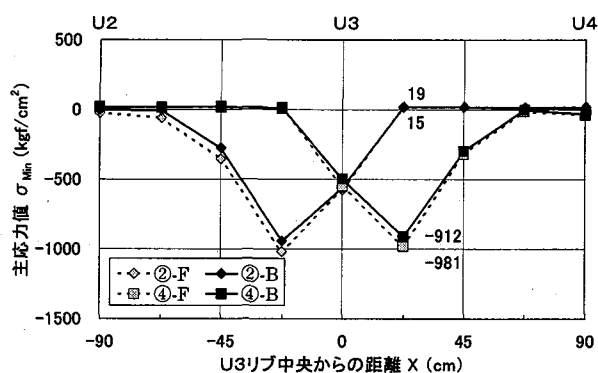


a) 橋軸直角方向 (Z=+50cm)

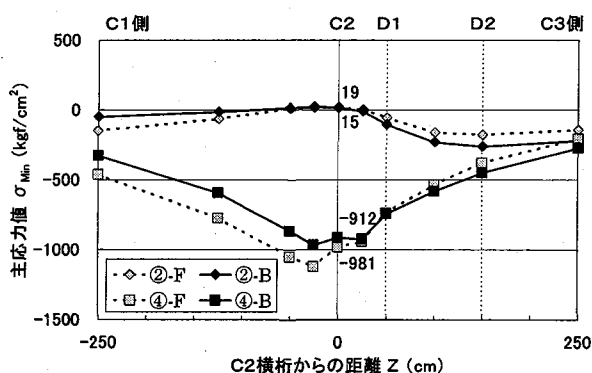


b) 橋軸方向 (U3W)

図-4 横桁側止端部の σ_H の影響線

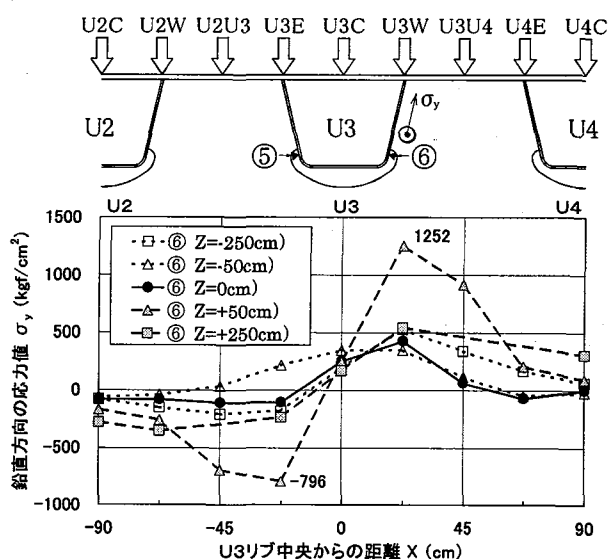


a) 橋軸直角方向 (Z=±0cm)

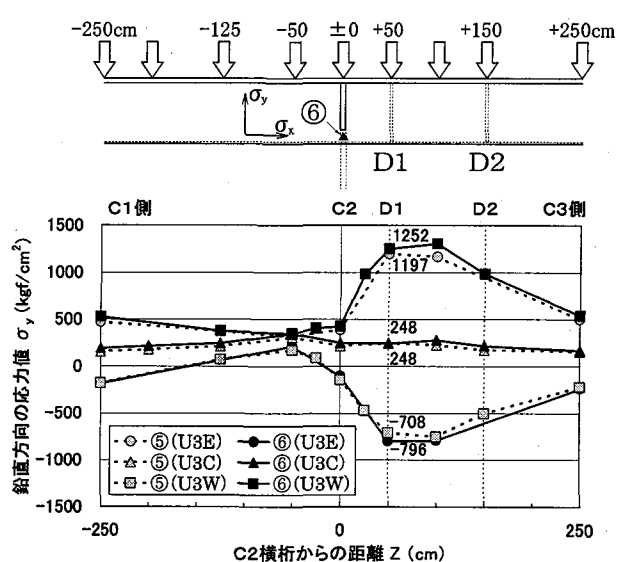


b) 橋軸方向 (U3W)

図-5 曲率変化部の σ_{Min} の影響線



a) 橋軸直角方向 (Z=-250 ~ +250cm)



b) 橋軸方向 (U3W)

図-6 Uリブ側止端部の σ_y の影響線

囲内に収まっており、大きな差異は認められない。

図-6b)から、Z=+50cm付近で、U3E 載荷では最小値を、U3W 載荷では最大値となることから、密閉ダイヤフラムの影響が顕著に現れていることがわかる。

また、発生応力の最大値は横桁側止端部の結果と比較し、約1.6倍になっていることから、横桁側よりもUリブ側の方が応力集中の程度が著しい。

2.3. 繰返し載荷試験

静的載荷試験終了後、図-7に示したCase-1～4について、それぞれ荷重振幅 28tf の 200 万回繰返し載荷試験を順次行った。

この結果、Uリブと横桁交差部では、静的載荷試験で大きな局部応力が生じたUリブ側の止端部においてのみ、写真-1a)に示すような疲労亀裂が発生した。なお、C2横桁とU2リブの交差部に生じた疲労亀裂は、溶接止端から5mmの位置に貼付したゲージ長1mmのひずみゲージを用いて等価応力範囲 $\Delta \sigma_e$ で整理すると、亀裂長さ 30mm の時点で $\Delta \sigma_e = 74\text{MPa}$ 、総繰返し回数 563 万回であった。

後述の確認試験終了後、写真-1a)に示した疲労亀裂の破面を観察した結果、亀裂は腹板を貫通していた。また、ピーチマークが付いていないことから、Case-4の載荷時に初めて発生したと推察できる。一方、破面を橋軸方向から視準すると円弧を描いており、このことから亀裂は膜作用によってではなく、板の面外曲げによって伸展したと推定できる(写真-1b), c)。

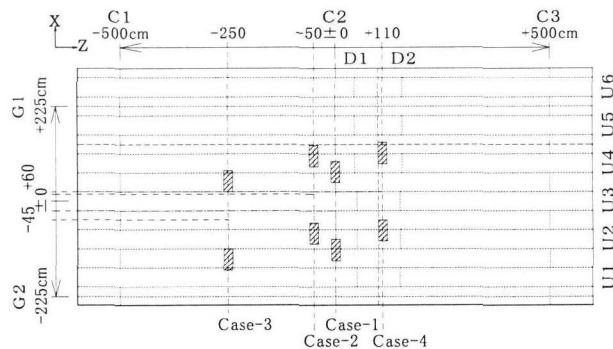


図-7 載荷ケース

3. FEMによる応力解析

3.1. 概要

従来型鋼床版では、Uリブ支間2mの場合、横桁から橋軸方向に50cm程度離れた部位に載荷したとき、Uリブのたわみ変形に起因して横リブウェブが面外に変形し、交差部には極めて大きな応力が集中することが報告されている。しかし、合理化鋼床版では、本研究の過程で密閉ダイヤフラム上に載荷する場合の方が、より厳しい状態になることが明らかとなった。

そこで、問題となる応力集中を低減できるディテールを立体FEM解析により比較検討することによって、応力集中の程度を抑制できる構造の提案を試みた。解析には、汎用構造解析プログラム MSC/NASTRAN for Windows (Ver.2.1.1) を用いている。

(1) 解析モデル

解析モデルは、一般部には5自由度のシェル要素を用い、またフランジや補剛材には、6自由度の梁要素を用いて図-8のようにモデル化した(総節点数: 8006)。

ここでは、U3リブとC2横桁交差部のG1桁側に着目して整理することとして、図-9に着目部の要素分割と要素番号を示す。要素サイズは、Uリブ側を5×5mmの正方形とし、スリット周りを同程度(要素の面積は約7%増)とした。要素の大きさが異なるので、一概に比較することはできないが、定性的に比較するには問題ない程度の大きさと考えた。

なお、試験体のモデル化を簡略にするため、以下のように処理している。

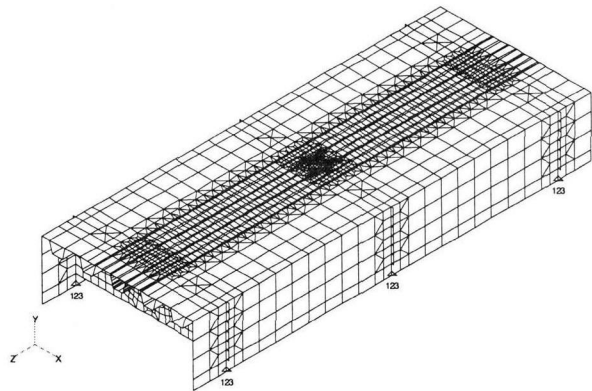
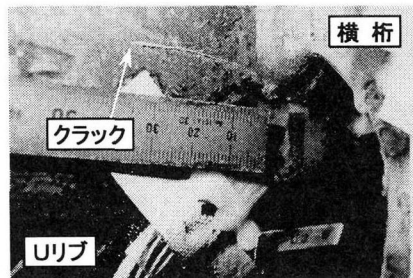
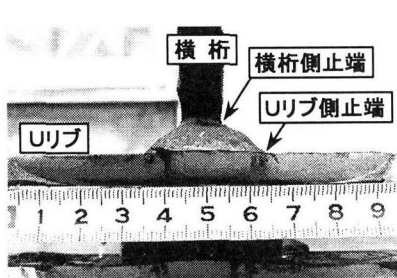


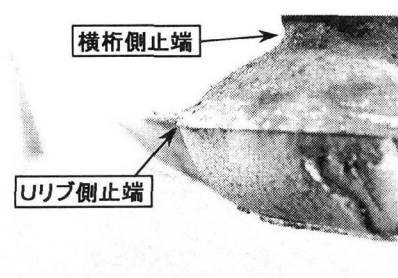
図-8 解析モデル



a) C2横桁とU2リブのW側交差部



b) 鉛直方向より視準
写真-1 疲労亀裂



c) 橋軸方向より視準

- ・G1側の横桁張出し部はモデル化しない。
- ・溶接ビードはモデル化しない。
- ・添接板はモデル化しない。
- ・ハンドホールはモデル化しない。
- ・スクラップはモデル化しない。

(2)境界条件

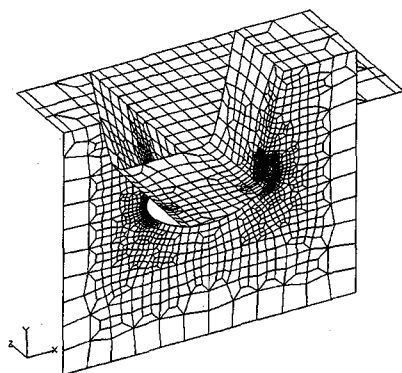
図-8中の△印で示すように、主桁と横桁が交差する部位の直下に支点を設け、X、YおよびZ軸方向の自由度を拘束した。

(3)荷重条件

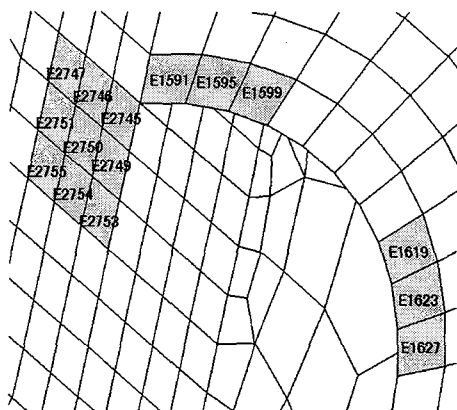
荷重は、14tfを500×200mmの範囲で等分布に載荷した。なお、舗装厚による荷重分散効果とデッキプレートの板曲げ変形に伴う2次応力は考慮しない。

(4)解析ケース

解析ケースは、U3リブのW側に着目していることから、静的載荷試験の結果と比較できるようにU3C、U3WおよびU3U4載荷を橋軸方向に50cm間隔で移動載荷する。

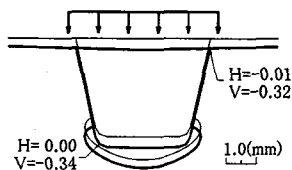


a) 要素分割

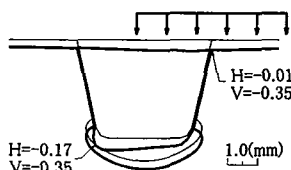


b) 要素番号

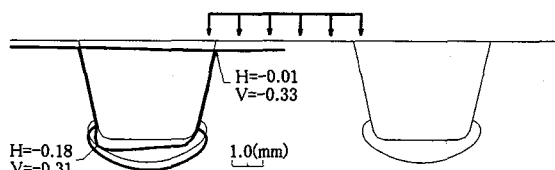
図-9 C2横桁とU3リブの交差部



a) U3C(X=0cm)



b) U3W(X=+22.5cm)



c) U3U4(X=+45.0cm)

図-10 交差部の変形挙動

3.2. 解析結果

(1)変形挙動

Z=+50cmの位置で橋軸直角方向に移動載荷させた際のC2横桁交差部での面内変形の状況を荷重ケース毎に図-10に示す。いずれの載荷ケースも、荷重直下のU3リブ腹板の鉛直たわみは0.3mm程度であるが、U3W、U3U4載荷時にはUリブ底板の変位がU2側に約0.2mmとなることがわかる。この時、止端部付近のUリブ腹板は面外曲げ変形しており、前述の繰返し載荷試験の際に発生した疲労亀裂の主因と一致している。

(2)応力特性

測定点③に相当する要素E1591の解析値 σ_x 、 σ_y を膜応力成分 σ_M と曲げ応力成分 σ_B に分解した結果を図-11に示す。図-11a)より、接線方向(局所座標系のx軸方向)の σ_M は、U3C載荷時には密閉ダイヤフラムの影響が認められないが、U3W、U3U4載荷時にはその影響が顕著に現れている。しかし、U3WとU3U4載荷時では、ほとんど差異が認められない。同様に σ_B は、C2横桁を跨ぐことによって正負が反転しており、移動載荷によるウェブの局所的な面外曲げが確認できるがその値は載荷ケースによらず、 $\pm 200\text{kgf/cm}^2$ 程度である。

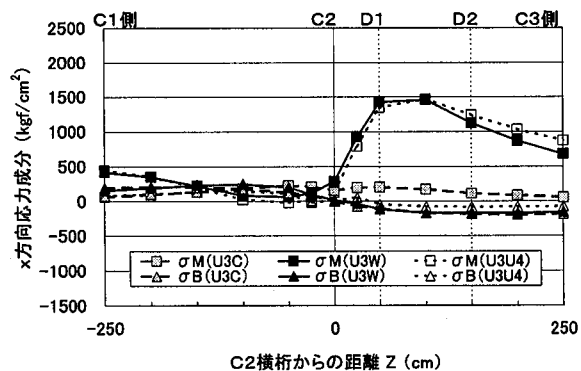
図-11b)より、法線方向(局所座標系のy軸方向)の σ_M 値は、密閉ダイヤフラムの影響が認められるものの、その値は比較的小さい。また、 σ_B は各載荷ケースとも密閉ダイヤフラムの影響が認められない。

同様に図-12に測定点⑥に相当する要素E2745の結果を示す。ここでも、偏載の影響が顕著に現れていることが確認できる。図-12a)より、 σ_M は、橋軸方向(局所座標系のx軸方向)では圧縮領域にあるが、鉛直方向(局所座標系のy軸方向)では引張領域となる。また、 σ_B は、橋軸方向、鉛直方向ともその傾向はよく似ており、最大値は鉛直方向の方が若干大きい。

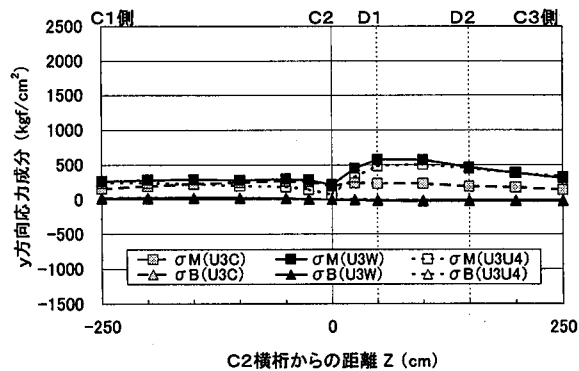
以上より、荷重をUリブに偏載された際、横桁側の応力は接線方向の σ_M が支配的となり、またUリブ側の応力は鉛直方向の σ_B が支配的であることが確認できたことから、静的載荷試験の結果を再現できているものと考えられる。

次に、局部変形の影響範囲をみるため、U3W載荷時の結果について、Uリブと横桁の交点から3つの要素を取り出し、スリット部の σ_x を σ_M と σ_B に分解した結果を図-13に、Uリブ側の σ_y を分解した結果を図-14に示す。

図-13a)からスリット部の接線方向の σ_M は、止端部では大きな引張力が作用しているが、止端から離れるにしたがって減少し、曲率変化点近傍では差異が認められなくなる。また、図-13b)から σ_B は、いずれの要素も小さな値で

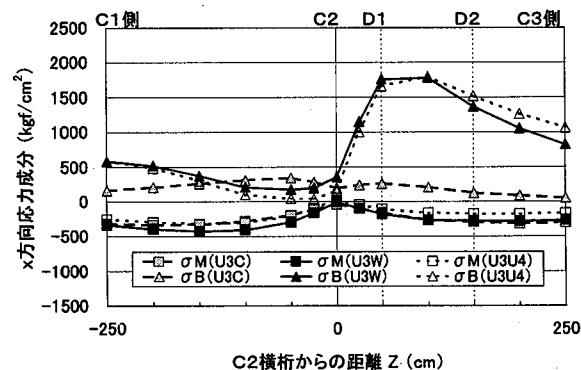


a) 接線方向の応力成分

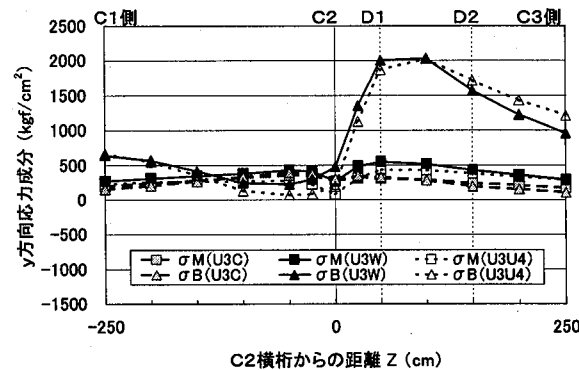


b) 法線方向応力の応力成分

図-11 横桁側の応力成分の影響線 (E1591)

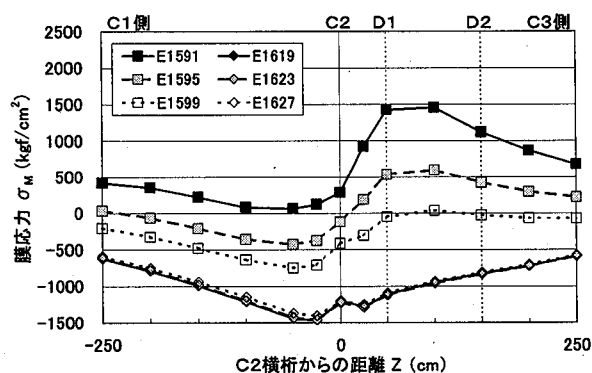


a) 橋軸方向の応力成分

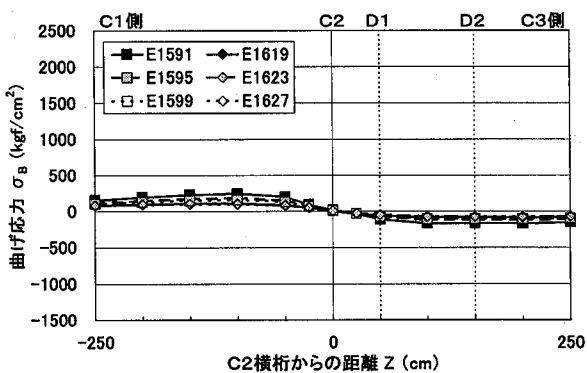


b) 鉛直方向の応力成分

図-12 Uリブ側の応力成分の影響線 (E2745)

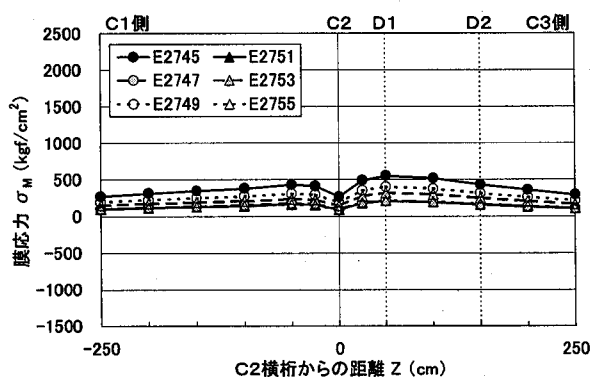


a) 接線方向の σ_M

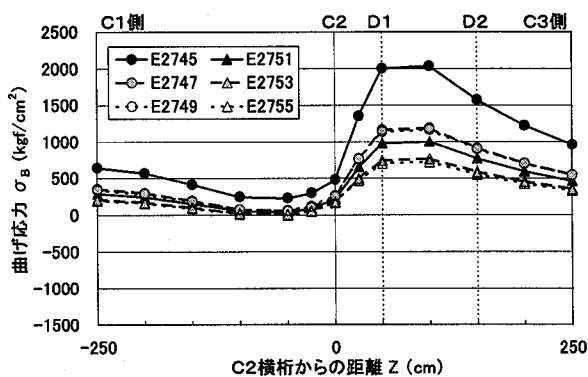


b) 接線方向の σ_B

図-13 スリット部の応力成分の影響線 (U3W)



a) 鉛直方向の σ_M



b) 鉛直方向の σ_B

図-14 Uリブ側の応力成分の影響線 (U3W)

実験結果と傾向がよく一致しており、疲労亀裂の発生因子としての影響が極めて小さいと考えられる。

図-14a)から、 σ_M は、止端からの距離によらず、ほぼ同程度の値であるとともに、密閉ダイヤフラムの影響がほとんど認められない。また、図-14b)から σ_B は、応力の増分が最も大きく局部変形による曲げであることがわかる。前述の疲労亀裂の原因をUリブ側止端部の局部曲げ変形にともなう応力集中とする仮定と一致しており、FEM解析からも写真-1c)に示した亀裂の主因が明らかとなった。

図-15に $Z=+50\text{cm}$ で $X=-45\sim+45\text{cm}$ に荷重を移動载荷させたときの、要素E2745、E2749の最大主応力 σ_{Max} （荷重強度10tf）の変動を示す。図-6a)と比較すると、 σ_{Max} が最大となるのは、Uリブ腹板直上でないことがわかる。実験では、移動载荷の間隔がFEM解析と異なるため、ピークを完全に掴みきれていない可能性があるが、 σ_{Max} と解析値の σ_y は同程度の値であることから、载荷ケースのU3Wで整理しても問題ないと判断した。

なお、解析値が測定値より大きな値を示しているが、解析ではこの部位のまわし溶接のビード止端形状を考慮していないことや、シェル要素を用いてモデル化したことがあげられる。

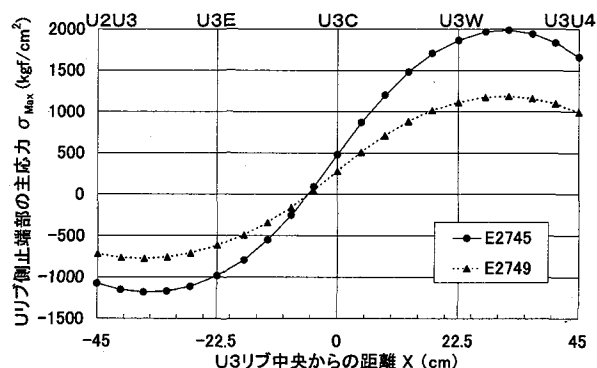


図-15 Uリブ側の σ_{Max} の影響線($Z=+50\text{cm}$)

3.4. 応力集中を誘発する原因の推定とその対策法

測定値と解析値の結果から、Uリブ側止端部の鉛直方向の応力集中が、密閉ダイヤフラム上に偏載したときに著しいことが明らかとなった。この原因は、ダイヤフラムにより载荷直下でUリブの変形が拘束されるため、Uリブが回転変形することによって、横桁交差部においてUリブの底板が橋軸直角方向に移動し、腹板の止端部で面外曲げが生じているためである。したがって、この部位に発生する疲労亀裂を抑制するためには、この局部曲げを低減できる対策を施さなければならない。

4. FEM解析による構造詳細の比較検討

4.1. 構造詳細

Uリブ腹板の面外曲げを抑制するディテールを検討するため、試験体をモデル化したModel-1を基準として比較モデルをModel-2～11のように考案し各モデルの形状寸法と

その特徴を表-2に示す。また、交差部以外に構造変更を行ったモデルは名称の後ろにa～eの枝番を付加することで区別する。参考として、継手部に密閉ダイヤフラムがないモデル(Model-0)についても応力を算出した。

4.2. 比較結果

Uリブと横桁が交差する部位の要素について、各モデルの横桁側接線方向の σ_x 、Uリブ側鉛直方向の σ_y が最大値を示す载荷ケース時の応力値を σ_M 、 σ_B に分解し、Model-1の値を基準とした時の比率も合わせて図-16に示す。この結果から、Model-8、10以外のモデルは横桁側の σ_x よりもUリブ側の σ_y が相対的に大きな値を示し、Uリブ腹板が弱点と成りうるディテールであると言える。また、いずれのモデルも、横桁側は膜応力成分が、Uリブ側は曲げ応力成分が支配的であることが確認できた。

なお、Model-0はUリブ支間の中央に载荷した際に最大となり、その値をModel-1と比較してみるといずれの成分も約60%である。このことから、密閉ダイヤフラムの局部変形特性に与える影響は大きいことがわかった。

これらの結果から、問題となるUリブ側の曲げ応力を抑制する効果が認められるのは、Model-6～8およびModel-10と11であると考えられる。

そこで、これらのモデルが橋軸方向への移動载荷に与える影響を比較する目的で、それぞれ σ_M 、 σ_B に分解した結果を図-17に示す。

この結果、最も曲げ応力の低減効果が認められるのは交差部においてUリブの底板をダイヤフラムと接合するか直接横桁に接合することによって、橋軸直角方向への変形を拘束するモデルであることがわかった。また、止端位置をデッキプレート側に上げる方法やUリブの増厚は、単独で扱うよりも他のディテールと組み合わせることによって、更なる効果が期待できる。一方、スリット形状の変更や密閉ダイヤフラム位置を横桁から離す方法、デッキプレートや横桁の増厚は、大幅な応力低減には繋がらないと言える。

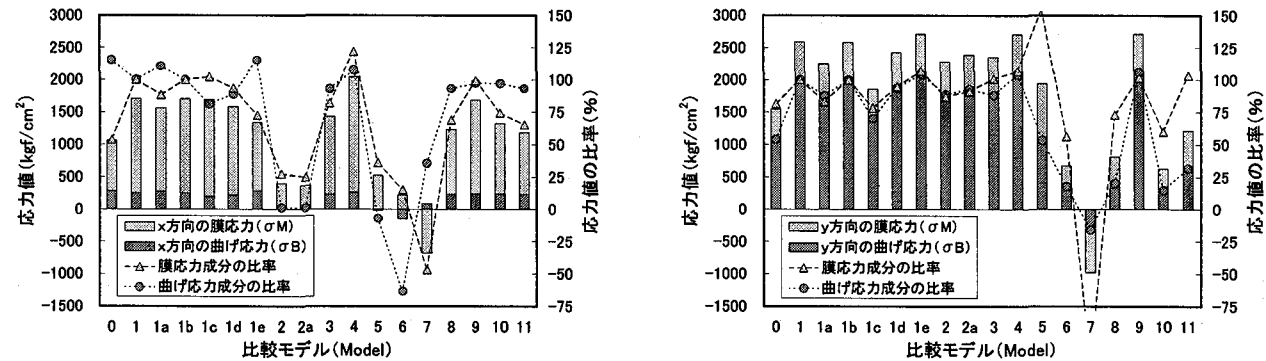
したがって、交差部のディテール変更のみで、大幅な応力低減効果を期待するのであれば、Uリブの底板を拘束する方法が効果的である。また、実構造の製作精度を鑑みると、Uリブと横桁をすみ肉溶接にて接合する場合、Model-7、8および10は高精度なUリブの冷間加工と横桁の切削が要求されることとなる。一方、Model-6は加工精度が要求されるものの、冷間加工部の入熱を回避でき、またModel-11は交差部に挿入するダイヤフラムの板厚を増厚するか、すみ肉溶接のサイズを上げることで対処できるものと考えられる。そこで、Model-11の採用が適当であると考えた。

別途、Model-11の結果を図-18に示す。Model-1の結果である図-13、14と比較すると、接線方向の曲げ応力や鉛直方向の膜応力成分はほとんど変化していない。一方、疲労亀裂の発生因子と考えられる鉛直方向の曲げ応力は約3割に低下し、接線方向の膜応力も確実に減少している。また、密閉ダイヤフラム直上に载荷する場合でも、急激な応力の変動が認められなくなった。

表-2 比較モデル

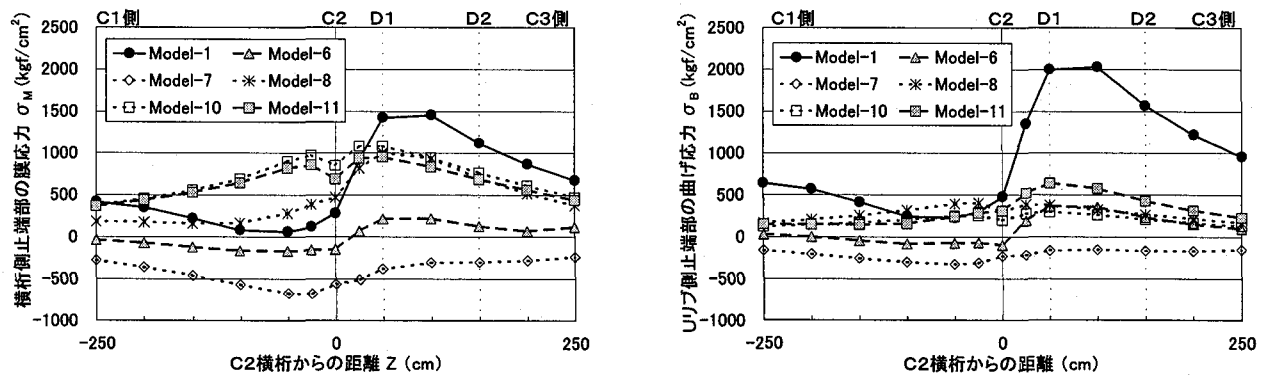
Model-0	Model-1	Model-2	Model-3	Model-4	Model-5
密閉ダイヤ省略	基準モデル (試験体)	西ドイツの鉄道橋を 参考	止端位置を 20mm上げ	止端位置を 20mm下げ	止端位置を 150mm上げ
Model-6	Model-7	Model-8	Model-9	Model-10	Model-11
横桁と底板を接合	スリット省略	小型ダイヤフラムの 設置	AASHTOを参考	ダイヤフラムを 設置	ダイヤフラムを 設置 (スカルップを設ける)

- ・ Model-1a : 密閉ダイヤの位置をZ=+50, +150→+200, +300cmに変更
 - ・ Model-1b : 密閉ダイヤの板厚をt=10→8mmに変更
 - ・ Model-1c : Uリブの板厚をt=8→10mmに変更
 - ・ Model-1d : デッキプレートの板厚をt=19→22.2mmに変更
 - ・ Model-1e : 横桁構成をWeb;1500×10, Flg;250×12→Web;1200×15, Flg;360×16に変更
 - ・ Model-2a : 横桁ウェブの板厚をt=10→12mmに変更
- (注) 実施工を考慮し、ダイヤフラムとデッキプレートは接合しない。



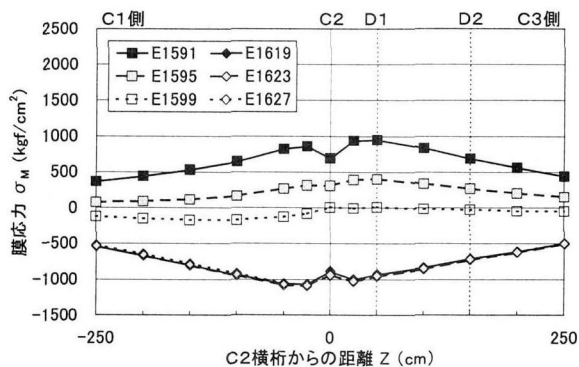
a) 横桁側の接線方向の σ_x b) Uリブ側の接線方向の σ_y

図-16 最大発生応力の比較

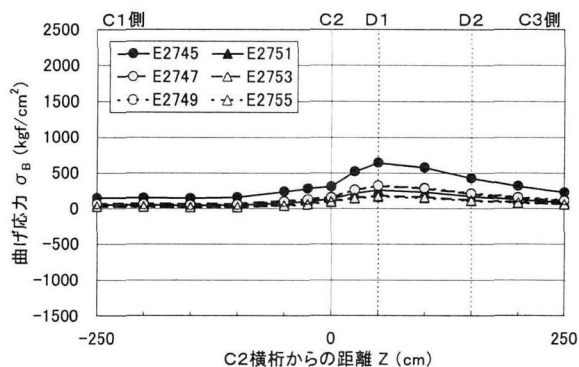


a) 横桁側の接線方向の σ_M b) Uリブ側の鉛直方向の σ_B

図-17 応力成分の影響線



a) スリット部の接線方向の σ_M



b) Uリブ側の接線方向の σ_B

図-18 応力成分の影響線(Model-11)

5. 構造改良後の確認試験

5.1. 概要

FEM解析の結果を踏まえ、既存の試験体で対応することができるModel-11について、その有効性を確認するため静的載荷試験を実施し応力変動を調査した。なお着目部は、繰返し載荷試験終了後の非破壊試験の結果、健全であると判断したU3リブとC2横桁の交差部とし、ダイヤフラムを設置する構造改良を施した(図-19)。

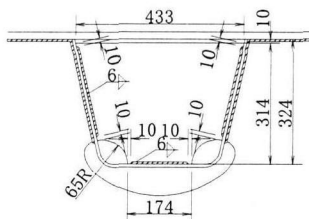


図-19 構造改良

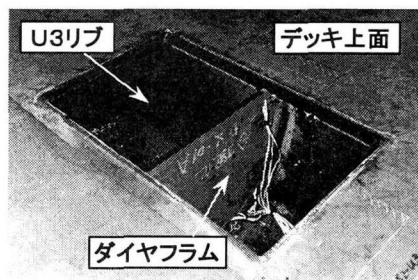


写真-2 ダイヤフラムの設置

5.2. 試験体の製作

デッキプレート上面に400×800mmの開口部を設け、そこからダイヤフラムを挿入し、6mmのすみ肉溶接で設置した(写真-2)。この時、外側のまわし溶接とのラップを避けるため、内側は全周溶接とするのではなく、端部から10mm程度のところで溶接を止めている。

5.3. 確認試験の結果

確認試験として、 $Z=+50\text{cm}$ となる位置上橋軸直角方向にU3C～U4Cまでの移動載荷と、U3C上を橋軸方向に $Z=-250\sim+250\text{cm}$ まで移動載荷する確認試験を実施した。その結果を図-20～22に示す。ダイヤフラムを設置する前の図-4～6と比較してみると、測定点③の σ_H は800kgf/cm²から418kgf/cm²になり、約50%の低減効果が認められた。スリット部の測定点④でも912kgf/cm²から517kgf/cm²に低減されている。一方、問題とされるUリブ側止端の σ_y は、1252kgf/cm²から601kgf/cm²となり、半分以上に抑えられることが確認できた。

解析結果では、横桁側の要素E1591が1315kgf/cm²から1001kgf/cm²に、またUリブ側の要素E2745が2555kgf/cm²から626kgf/cm²にそれぞれ低減している。

なお、板の表裏で測定値が異なっているが、ダイヤフラムを設置するうえで、溶接熱によって不良となったひずみゲージを貼付し直したため、測定位置が多少異なるものと思われる。

6. まとめ

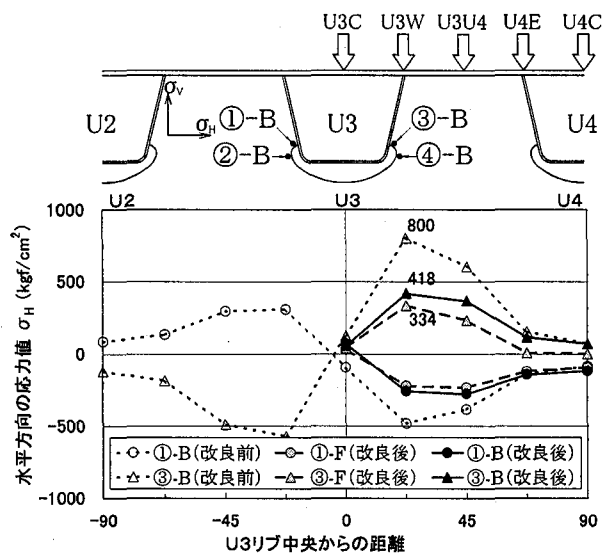
本研究では、合理化鋼床版のUリブと横桁が交差する部位に設けられたスリット周りの局部応力特性を明らかにする目的で、実物大の試験体を用いた載荷試験と立体FEM解析を実施した。その結果、以下のことが判明した。

(1) Uリブの密閉ダイヤフラム位置に荷重を偏載すると、まわし溶接部のUリブ腹板側止端部に著しい応力集中が生じる。繰返し載荷試験の結果、この部位の横桁側ではなくUリブ側に疲労亀裂が発生した。

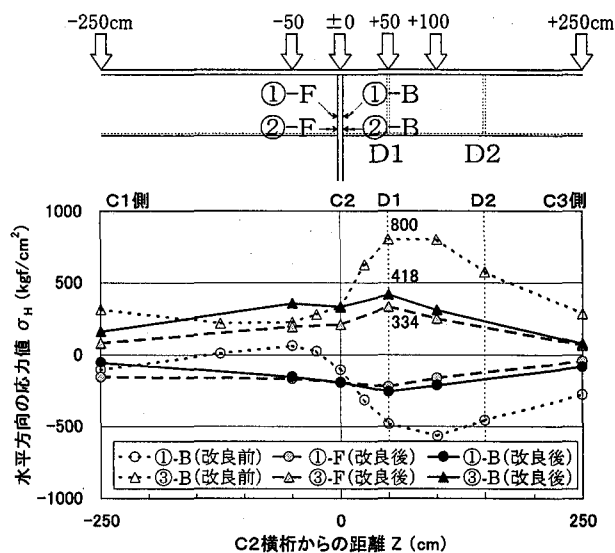
(2) Uリブ腹板側止端部に生じた著しい応力集中の原因を調べるためFEM解析を実施した。この結果、Uリブ腹板に荷重載荷された場合、Uリブの形状を保持させるダイヤフラムが無いとUリブはせん断変形し、横桁との交差部では横桁側の局部応力がUリブ側に比べ大きくなる。しかしながら、Uリブ継手側に存在する密閉ダイヤフラムのような形状を保持する拘束材があると、Uリブはせん断変形ではなく回転変形する。この回転変形が横桁との交差部で拘束される際、自由端であるUリブ底板は水平方向に変形しようとするが、横桁との溶接によって拘束されるため、拘束されているUリブ腹板側止端部で大きな板曲げによる局部応力を生じさせる結果となった。

(3) 合理化鋼床版の横桁ウェブの面外曲げ応力は、膜応力に比較して極めて小さな値となった。これより、従来型鋼床版では疲労損傷の原因とされたUリブのたわみ変形による横リブまたは横桁ウェブの面外変形による応力集中は合理化鋼床版の場合小さいと考えられる。

(4) 合理化鋼床版のようにUリブの断面変形が大きいのに

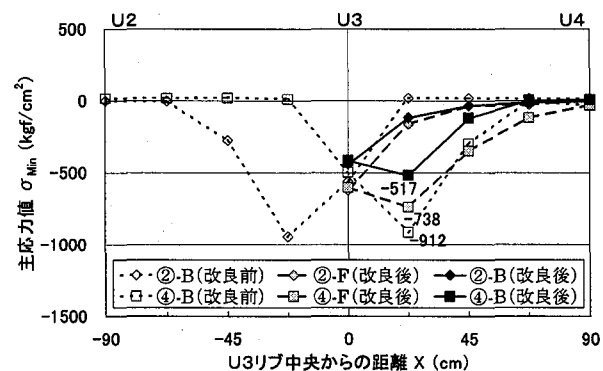


a) 橋軸直角方向 (Z=+50cm)

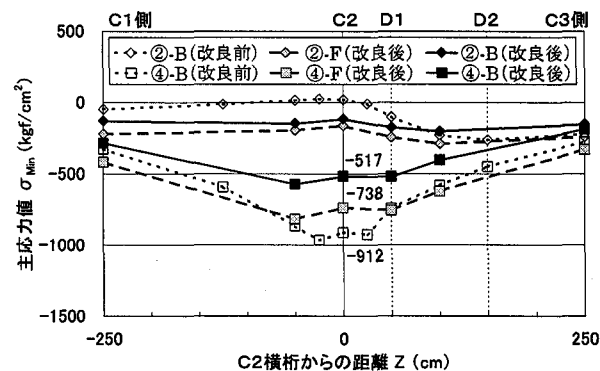


b) 橋軸方向 (U3W)

図-20 横桁側止端部の σ_H の影響線

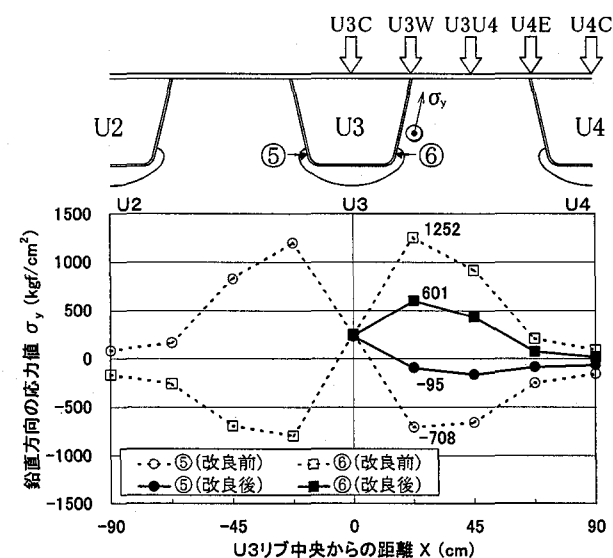


a) 橋軸直角方向 (Z=+50cm)

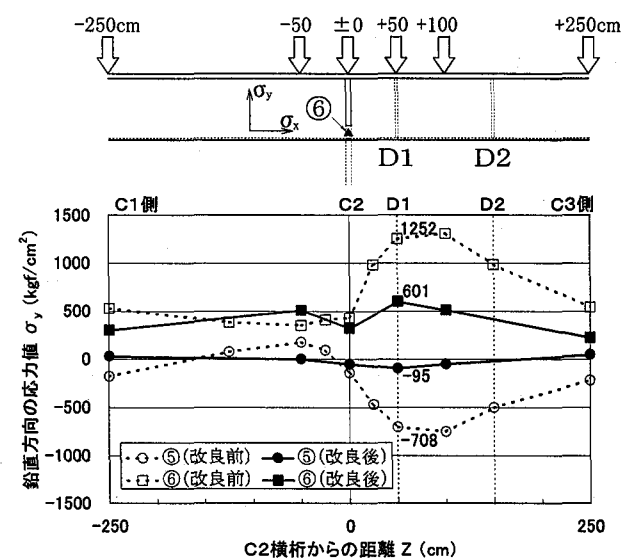


b) 橋軸方向 (U3W)

図-21 曲率変化部の σ_{Min} の影響線



a) 橋軸直角方向 (Z=+50cm)



b) 橋軸方向 (U3W)

図-22 Uリブ側止端部の σ_y の影響線

対し、その変形がダイヤフラムにより拘束を受けて交差部のUリブ腹板側溶接止端で大きな面外曲げ応力を生じさせるような場合の応力低減方法についてFEM解析を用いて検討した。この結果、Model-2~4のようにスリット形状を変更する方法やダイヤフラム位置の変更およびデッキプレート厚や横桁ウェブ板厚の増加などによる方法では疲労損傷を防ぐような応力の低減効果は見込めなかった。疲労損傷を防ぐ応力の低減は、Uリブ底板の変形を拘束するように横桁との交差部位置のUリブ内にダイヤフラムなどの拘束板を挿入するか、Uリブ底板と横桁ウェブを接合する方法によって期待できるものと推測された。

(5) 実験によりUリブ内にダイヤフラムを設置して応力の低減効果を確認した結果、まわし溶接部のUリブ腹板側、横桁ウェブ側ともに約50%に低減できることがわかった。

(6) Uリブ内にダイヤフラムを設置する方法は、Uリブが貫通していることによる横桁ウェブの断面欠損を大きく減少させ、横桁のせん断変形により生じていた交差部での応力成分を低減することが可能となる。しかしながら、Uリブ内にダイヤフラムを設置する方法は、疲労強度が低い荷重伝達型リブ十字継手になるため、疲労に関する安全性について応力測定や疲労試験によって確認しなければならないと考えられる。ただし、従来と同じように断面欠損した状態で、ダイヤフラムは底板の変形が抑えられればよいとした場合、充腹のダイヤフラム構造ではなく、主桁作用力なるべく伝達しないような柔なダイヤフラムの採用が可能となる。

(7) Uリブ底板と横桁ウェブを接合する方法は、国広ら⁹⁾によって従来型の鋼床版で検討されているが、疲労強度は一般的なスリットと同程度しかなく、耐久性の向上を図るうえでは、スリット形状などの溶接ディテールに関する詳細な検討が必要になる。合理化鋼床版の場合は、さらにUリブの変形が大きいことから、Uリブの変形にともなう交差部での、面外・面内変形による局部応力についても詳細に検討する必要がある。

7. あとがき

本研究は、合理化鋼床版のUリブと横桁が交差する部位に設けられたスリット周りの局部応力特性を明らかにする目的で、載荷試験とFEM解析を行った。結果として、局部応力の発生メカニズムを明らかにするとともに、その局部応力の低減方法を提案したが、継手の疲労強度や製作性については今後の課題としており、さらに研究を進めていく所存である。特に面外曲げが支配的となる継手の疲労強度に関する研究報告は少なく、今後詳細な検討が必要であると考えている。

謝 辞

本研究を取りまとめるにあたり、日本道路公団・合理化鋼床版の検討会の委員の方々には数々の有益なご助言とご指導をいただきました。ここに、深く感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 土木学会: 鋼床版の疲労, 鋼構造シリーズ4, 1990. 9.
- 2) 日本道路協会: 鋼橋の疲労, 1997. 5.
- 3) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993. 4.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 1996. 12.
- 5) 首都高速道路公団: 鋼構造物標準図集, 1994. 2.
- 6) 阪神高速道路公団: 鋼構造物標準図集, 1991. 4.
- 7) 名古屋高速道路公社: 鋼構造物標準図集, 1996. 4.
- 8) 本州四国連絡橋公団: 鋼床版設計要領・同解説, 1989. 4.
- 9) 国広昌史, 迫田治行, 公江茂樹, 仁瓶寛太: 閉断面縦リブを有する鋼床版の疲労実験, 川崎重工技報, 92号, pp78-86, 1986. 4.
- 10) 北原俊男, 檜垣孝二, 和田三夫, 渡辺 昇: 鋼床版の横リブ設計法の研究(その1), 住友重機械技報, Vol. 36, No. 106, pp77-83, 1988. 4.
- 11) 藤原 稔, 村越 潤, 田中良樹: 鋼床版横リブのスリット周辺部の疲労強度, 構造工学論文集, No. 37A, pp1151-1162, 1991. 3.
- 12) 鈴木 巖, 加賀山泰一, 尾下里治, 岩崎雅紀, 堀川浩甫: 鋼床版横リブの設計手法と疲労試験, 構造工学論文集, No. 37A, pp1169-1179, 1991. 3.
- 13) R. Wolchuk: Secondary stresses in closed orthotropic deck ribs at floor beams, journal of structural engineering, Vol. 118, No. 2, pp582-595, 1992. 2.
- 14) 三木千壽, 館石和雄, 高木千太郎: 鋼床版縦リブ・横リブ交差部の応力実測とその分析, 構造工学論文集, No. 37A, pp1163-1168, 1991. 3.
- 15) 館石和雄, 竹之内博行, 三木千壽: 鋼橋部材交差部に生じる局部応力の発生メカニズムと要因分析, 土木学会論文集, No. 507/ I -30, pp109-119, 1995. 1.
- 16) 三木千壽, 館石和雄, 奥川淳志, 藤井裕司: 鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力と疲労強度, 土木学会論文集, No. 519/ I -32, pp127-137, 1995. 7.
- 17) 大橋治一, 藤井裕司, 三木千壽, 小野秀一, 村越 潤: 鋼床版の現場継手部近傍の局部応力と変形挙動, 土木学会論文集, No. 556/ I -38, pp65-76, 1997. 1.
- 18) 村瀬左太美, 大橋治一, 梁取直樹: 合理化鋼床版の横リブ面外挙動に関する考察, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第I部, I-A295, 1997. 9.
- 19) 勝俣 盛, 藤田敏明, 町田文孝, 一井延朗, 吉家賢吾: これからの鋼床版, 川田技報, Vol. 17, pp100-103, 1998. 1.
- 20) 小笠原照夫, 勝俣 盛, 町田文孝, 川瀬篤志, 溝江慶久, 吉家賢吾: 合理化鋼床版構造のUリブ変形挙動, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第I部, I-A198, 1998年9月
- 21) 溝江慶久, 川瀬篤志, 町田文孝, 小笠原照夫, 勝俣 盛, 吉家賢吾: 合理化鋼床版構造のUリブ・横桁交差部の局部応力(その1), 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第I部, I-A200, 1998. 9.
- 22) 川瀬篤志, 溝江慶久, 町田文孝, 小笠原照夫, 勝俣 盛, 吉家賢吾: 合理化鋼床版構造のUリブ・横桁交差部の局部応力(その2), 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第I部, I-A201, 1998. 9.

(1998年9月18日受付)