

論文

鋼床版 U リブ-横リブ交差部スリットまわし溶接部の 局部応力性状に関する解析的検討

原田 英明*, 村越 潤**, 平野 秀一***, 木ノ本 剛****

*博 (工), (独) 土木研究所, 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
 **博 (工), (独) 土木研究所, 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
 *** 修 (工), (独) 土木研究所, 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
 ****修 (工), 首都高速道路 (株), 保全交通部 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1-4-1)

交通条件の厳しい一部の鋼床版橋において、輪荷重直下の溶接各部に疲労損傷が報告されている。損傷事例の中には、き裂の発見されている構造詳細が、現行の構造詳細と類似の構造も見られており、疲労耐久性の向上の観点から、現行構造の耐久性の評価と必要に応じて耐久性の高い構造詳細の検討が重要と考えられる。本論文では、類似の構造事例として U リブと横リブの交差部のスリットまわし溶接部に着目し、橋全体系の FEM 解析を行い同溶接部の局部応力性状について検討を行った。その結果、着目する交差部と主構造との位置関係、鋼床版の構造諸元及び輪荷重の載荷位置等のパラメータが局部応力に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：鋼床版、疲労き裂、横リブ交差部、FEM 解析

1. はじめに

鋼床版に関しては、平成 14 年に「鋼道路橋の疲労設計指針」(日本道路協会)¹⁾(以下、疲労指針)が発刊されてから、同指針に従い疲労に配慮した構造詳細が適用されてきた。一方で、疲労指針以前に設計された、重交通路線に位置する一部の鋼床版橋では、輪荷重直下において溶接各部に疲労損傷が顕在化してきている。

これらの疲労き裂のうち、デッキプレート(以下、デッキ)と U リブの片側溶接部からデッキ内に進展するき裂²⁾については、原因究明や対策検討のための調査研究³⁾が行われ、平成 24 年に改定された道路橋示方書において、デッキ厚の厚板化(12mm から 16mm に見直し)が図られている。鋼床版に関しては、溶接各部の損傷実態や将来のき裂発生可能性の懸念を踏まえると、引き続き疲労耐久性の高い構造詳細についての検討を行っていくことが重要と考えられる。

本論文では、U リブと横リブ等の交差するスリットのまわし溶接部において、U リブ側溶接止端に発生しているき裂に着目し、橋全体系の FEM 解析を行い同部位の局部応力性状について検討を行った。なお、U リブ側溶接止端のき裂については、これまでにその発生原因^{4),5)}や補修効果⁶⁾、構造改良^{5),7)}に関する種々の調査研究が行われている。ここでは、橋全体系の挙動の影響も考慮

した上で、着目する交差部と主構造との位置関係、鋼床版の構造諸元(U リブ厚・デッキ厚、縦リブ支間長、横リブウェブ高さ等)及び輪荷重の載荷位置が同部位の局部応力に及ぼす影響について検討を行った。

2. 解析方法

2.1 検討対象と解析モデル

解析対象は、3 径間連続鋼床版箱桁橋(片側 1 車線)とした。図-1 に対象とした橋の解析モデルを示す。試設計により断面寸法を決定し、橋全体をシェル要素(4 節点線形シェル要素)でモデル化した。

U リブは日本鋼構造協会規格の U-320×240×6-40(幅員方向 320mm、高さ 240mm、板厚 6mm、冷間曲げ加工半径 40mm)とし、交差部のスリット形状は疲労指針に示される形状とした。なお、鋼床版上には 80mm 程度のアスファルト舗装が敷設されるが、夏季には剛性⁸⁾を期待できないことから、本解析では舗装のモデル化を行っていない。

モデル化にあたって、着目する交差部の横リブ断面とその前後の横リブ断面を含む合計 U リブ 3 支間について、詳細に要素分割を行った(図中(a),(b))。要素の最小寸法はスリットまわし溶接部近傍で 5×5mm(図 3 の着目要素を参照)であり、モデル全体の要素数は約 427,000、節点

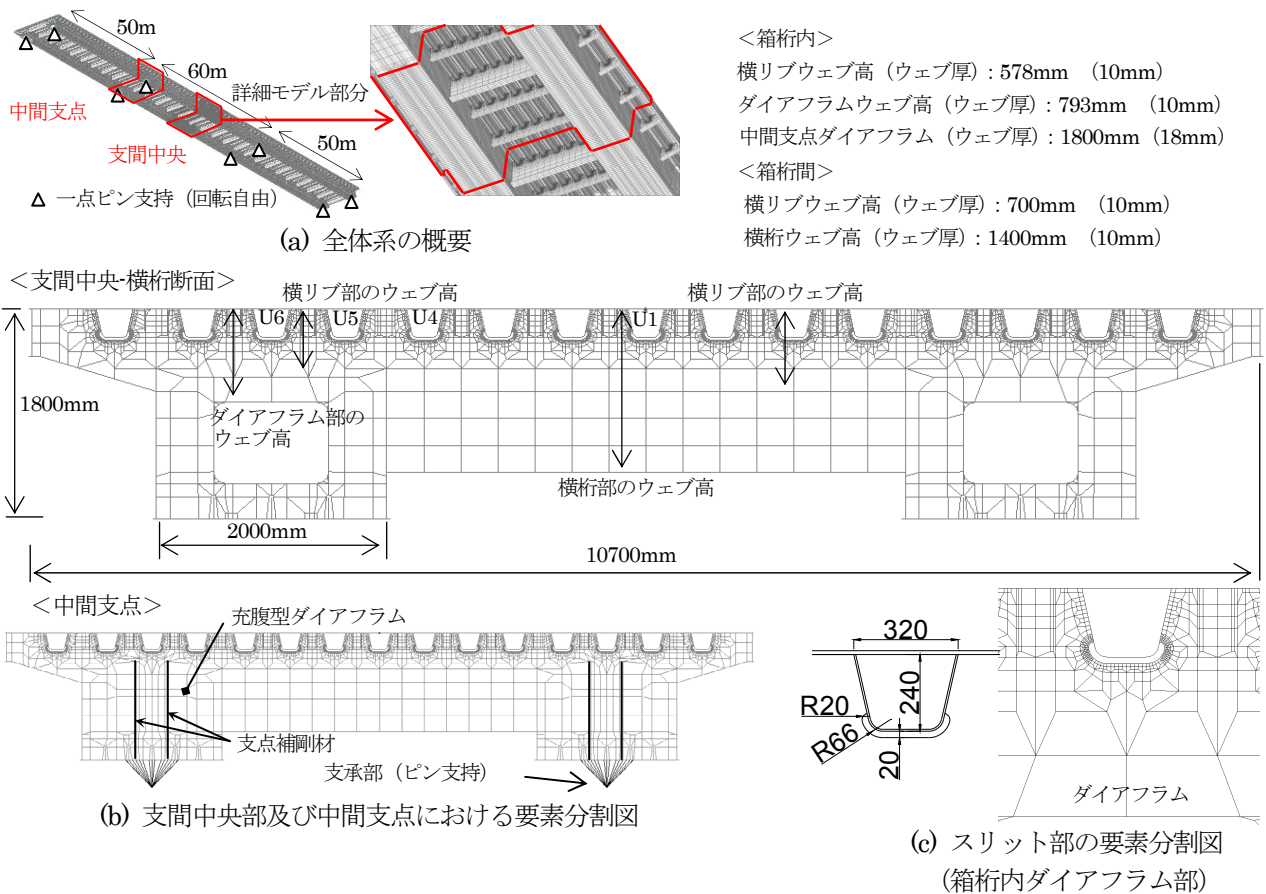


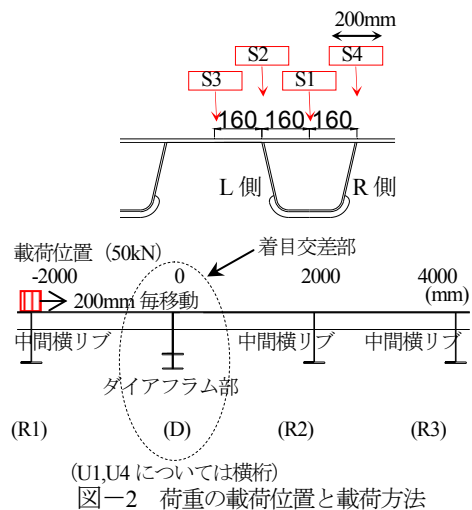
図-1 対象とした鋼床版箱桁断面の解析モデル

数は約 420,000 である。なお、解析値は、要素寸法により影響を受けると考えられるが、本検討では、着目部のモデル化を同一とし、各種パラメータを変えた場合の相対比較による評価を行うものである(表-1を参照)。そのため、Uリブの板厚 (6mm) 程度の要素寸法とした。鋼材の弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3 とした。解析は、汎用有限要素解析コード NX.NASTRAN により行った。

2.2 着目交差部と荷重方法

着目する交差部は、図-1中の箱桁内の中央のリブ U6 とダイアフラムのウェブ (以下、横リブ) との交差部 (橋軸方向は中央径間の支間中央) を基本とした。その上で、橋軸直角方向と橋軸方向の着目位置による影響を把握するため、橋軸直角方向では U1 (桁間中央) と U4, U5 (主桁ウェブ近傍) における支間中央の交差部を対象とした。橋軸方向では、充腹型のダイアフラムを有する中間支点上の交差部を対象とした。なお、支点では下フランジから支承高さ分だけ離れた位置に節点を設置し、その節点と接地面とを剛棒 (梁要素) で連結させている。支承条件は回転自由のピン支持とした。

図-2 に荷重の荷重位置と荷重方法を示す。シングルタイヤの荷重面積を考慮して $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ の荷重範囲 (等分布荷重) とし、荷重荷重は 50kN とした。なお、



ダブルタイヤによる荷重は、シングルタイヤの組合せで再現できるため、ここではシングルタイヤによる検討とした。橋軸直角方向の荷重位置は、車線位置にかかわらず、着目 Uリブに対して、S1 (Uリブ中心)、S2, S4 (Uリブウェブ直上)、S3 (Uリブ間中央) の 4 ケースとした。なお、既往の研究事例^{4)~7)}を踏まえて、支間内での局部応力性状に対し Uリブの偏芯荷重の影響が大きいことが確認されていることから、この 4 ケースを対象とした。また、ここでは橋軸方向には、着目する横リブに対して、前方の縦リブ 2 支間、後方の縦リブ 1 支間上に支

表-1 解析モデルの概要

解析モデル	解析パラメータ					着目位置	解析ケース数	
	デッキプレート厚 (mm)	Uリブ厚 (mm)	縦リブ支間長 (mm)	横リブウェブ高さ (mm)	着目断面			
1	12	6	2000	700	支間中央	U1, U4 U5, U6 (※U6は基本ケース)	S1, S2 S3, S4	16
2			2500			U6	S1, S2	
3			3000	U1		S1, S2	2	
4			500	U1		S1, S2	2	
5	16	8	2000	700	中間支点	U6	S1, S2	8
6							S3, S4	8
7							S3, S4	8
8							S2	1

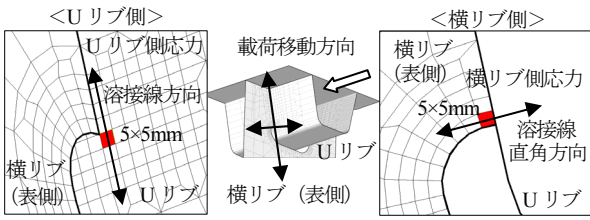


図-3 着目要素と着目応力 (応力範囲) の方向

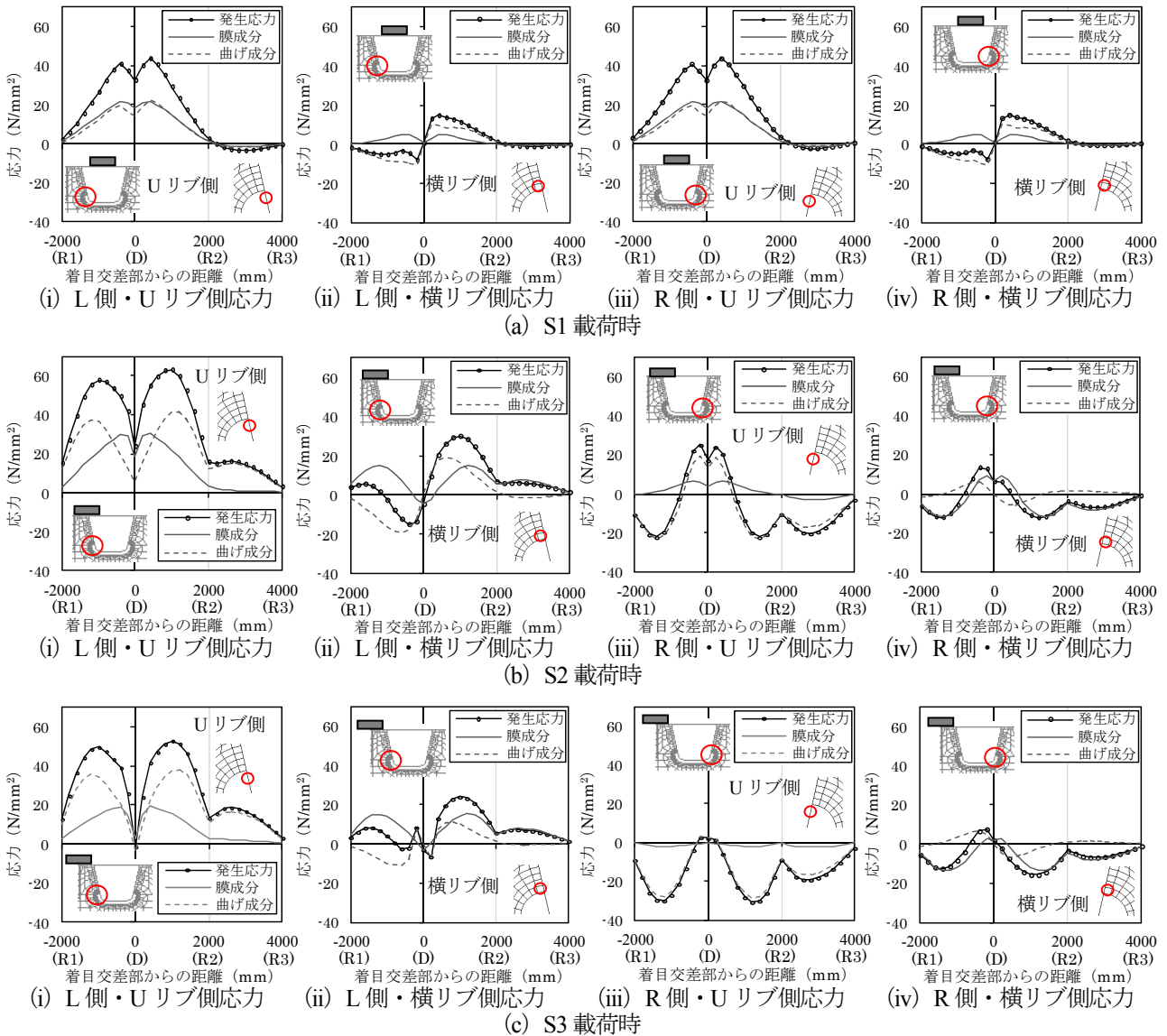


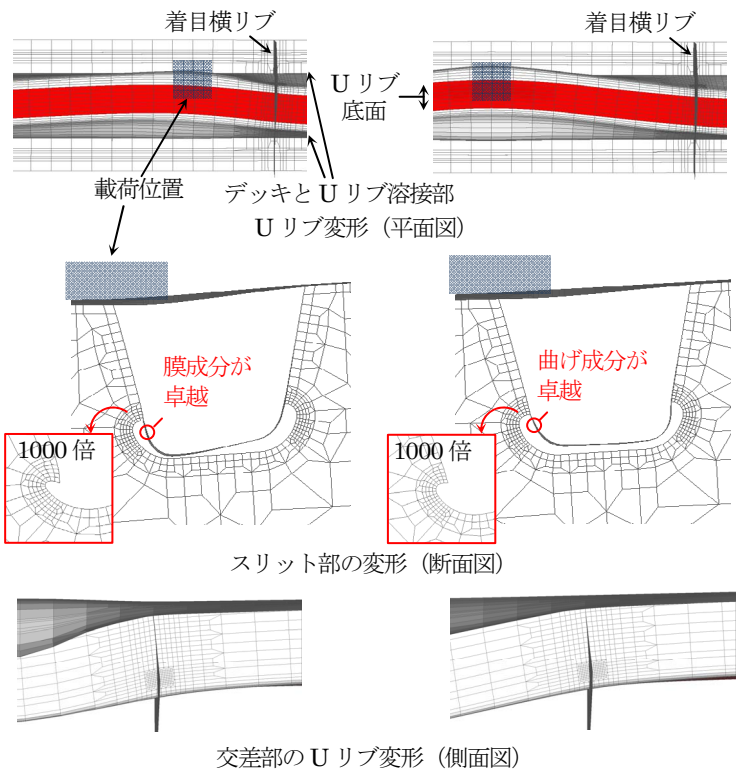
図-4 基本ケース (解析モデル1のU6着目) における橋軸方向荷側への応力変動

間の1/10の間隔で荷位置を移動させ荷した。

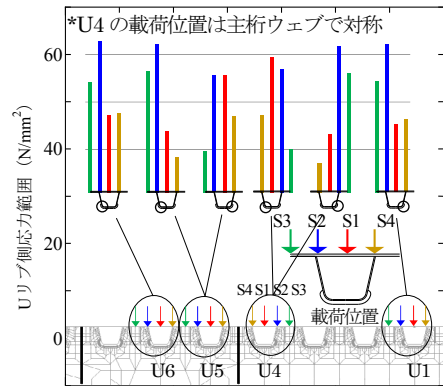
2.3 まわし溶接部の着目要素・応力

図-3 にスリットまわし溶接部における着目した要素と応力 (応力範囲) の方向を示す。実橋でのき裂の発生

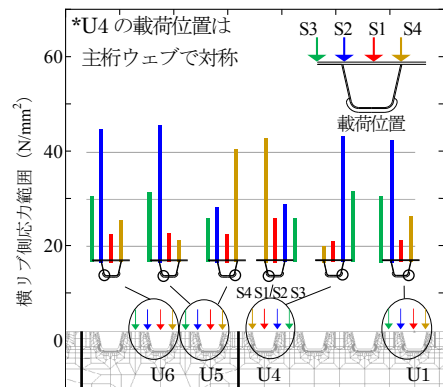
状況を考慮して、き裂進展と直角方向の応力として、ここではUリブ側止端で溶接線方向の応力 (以下、Uリブ側応力)、横リブ側止端で溶接線直角方向の応力 (以下、横リブ側応力) に着目した。また、Uリブの着目要素の応力からそれぞれ曲げ成分 ((外面側応力+内面側応力)/2)



(a) 400mm 位置載荷 (b) 1000mm 位置載荷
 図-5 基本ケース (U6 着目) における S2 載荷時の Uリブ変形図



(a) Uリブ側応力範囲



(b) 横リブ側応力範囲

図-6 着目 Uリブにおける応力範囲

と膜成分 ((外面側応力+内面側応力)/2) を算出した. なお, 着目交差部のスリットまわし溶接部はスリットの左右に存在するため, これをL側とR側と区別する.

2. 4 解析パラメータと解析ケース

表-1 に, 各解析モデルにおける鋼床版の構造諸元パラメータ, 着目 Uリブと載荷位置をまとめる. 現行の構造詳細を基本に, 既設の構造詳細との比較分析も考慮しパラメータを設定した. ここで, 解析モデル1のU6 (箱桁内で両側に Uリブが隣接) に着目するケースを基本ケースと呼ぶ.

横リブウェブ高さは, 過去の実績調査⁹⁾ を参考に設定した. なお, 鋼床版の構造諸元の変更に対して, 主桁や横リブの構造諸元の変更は行っていない.

3. 載荷位置別のスリットまわし溶接部の応力性状

3. 1 輪荷重移動に伴う応力性状

図-4 に基本ケース (解析モデル1のU6 着目) における S1,S2,S3 載荷時の横リブとの交差部の応力性状を示す. Uリブ側応力は, S2 載荷時の載荷直下側の溶接部 (L側) において最大となっている (図(b)(i)参照). 内訳として, 膜成分については交差部近傍(約400mm位置)に載荷された時に最大となり, 曲げ成分については, Uリブ支間中

央付近 (約 1000mm 位置) において最大となる. 偏芯載荷となる S2 と S3 載荷時には, 概ね同様の応力性状を示している.

膜成分の応力性状は, 横リブを支点とした場合の反力の影響線形状に類似しており, 横リブ近傍で大きくなる傾向にある. 横リブ直上では横リブにより荷重が分散するため応力は低下する傾向にある. 一方, 曲げ成分は, 偏芯載荷により支間載荷に対して Uリブが水平移動し, ねじれてつぶれるように変形するが, この変形が横リブ位置で拘束されることにより発生する. このため Uリブの変形の大きくなる支間中央付近において大きくなる傾向にある. 横リブ側応力も, 同じ載荷位置で最大となっている. また, 横リブをはさんで正負交番しており, Uリブの変形に伴って横リブウェブが面外方向に変形しているものと推測される.

図-5 に S2 載荷時 (図-1(b)(i)) の U6 の膜成分と曲げ成分が最大となる位置に載荷した場合の交差部の変形状況を示す. 文献 5), 6) において述べられているように 400mm と 1000mm 位置載荷では共に曲げ成分と膜成分を伴うが, 両者の比率は異なっている. S2 載荷では Uリブに対する偏芯載荷の影響により, Uリブには鉛直下方への変形と荷重載荷側に水平変位を生じるが横リブとの交差部では Uリブを拘束することによりねじられるような変形が生じ, 拘束されていないスリット下部には水

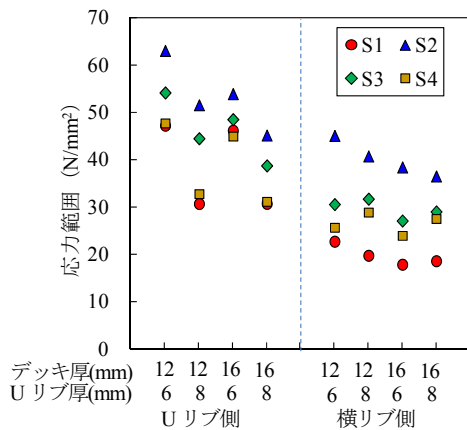


図-7 基本ケース (U6 着目) におけるデッキ厚/Uリブ厚諸元別の応力範囲

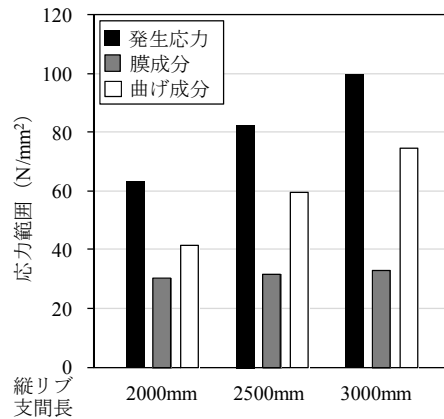


図-8 基本ケース (U6 着目) における縦リブ支間長のUリブ側応力の最大値

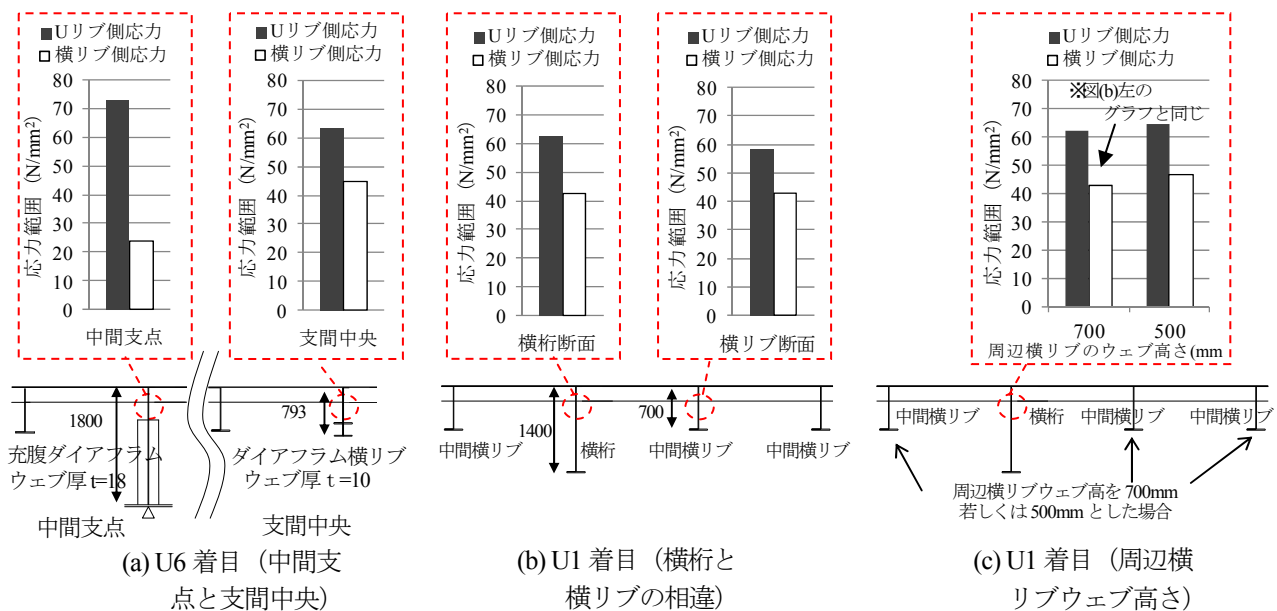


図-9 S2 載荷時における着目Uリブ (L側) のUリブ側応力範囲

平方向に変位を生じることになる。この結果、載荷側のスリットまわし溶接部ではUリブが横リブウェブを引張るように変形し、非載荷側ではUリブが横リブウェブ側に押し込まれるように変形する。このため、スリットの左右でUリブ側応力の曲げ成分と横リブ側応力の膜成分はそれぞれ正負が異なる値となる。

3. 2 着目Uリブの幅員方向位置の影響

図-6に支間中央におけるUリブ (U1, U4, U5, U6) 交差部のL側とR側の橋軸方向の移動載荷時の応力範囲を載荷位置別に示す。Uリブ側応力の変動では、載荷位置に対し差がみられるものの、変動応力の傾向は同じであった。なお、図-2で示した範囲内に荷重を載荷しているため、応力値の最大と最小が同一符号である場合は、絶対値が低い応力を0として応力範囲を算出した。Uリブ側応力範囲に着目すると、概ね、図-1と同様に偏芯載荷時の直下のスリットまわし溶接部 (S2 載荷時のL側

もしくはS4 載荷時のR側) で大きくなっている。また、各Uリブでの最大の応力範囲に着目すると、各Uリブ位置での応力範囲はU6 着目と同程度であった。ただし、主桁ウェブ近傍位置 (U4L, U5R) ではS1 載荷時においても大きくなっている。

4. 鋼床版の構造諸元の応力性状への影響

4. 1 デッキとUリブの諸元 (板厚) の影響

図-7に基本ケース (U6 着目) における応力範囲とデッキ厚/Uリブ厚諸元 (板厚) の関係を示す。Uリブ側と横リブ側ともに増厚による応力低減が見られる。最も応力範囲が大きいS2 載荷に着目した場合、Uリブ側応力範囲は、同一Uリブ厚に対してデッキ厚を12mmから16mmに増厚することにより0.85~0.88倍、同一デッキ厚に対してUリブ厚を6mmから8mmに増厚することにより0.82~0.84倍となっている。Uリブ位置と載荷位置によって低

減効果は異なるもののデッキ厚とUリブ厚の増厚はスリットまわし溶接部の応力範囲の低減に効果があると考えられる。また、横リブ側でも増厚による低減効果がみられた。

4. 2 縦リブ支間長の影響

図-8に基本ケース(解析モデル1のU6着目)におけるS2載荷時の横リブとの交差部のUリブ側応力範囲と、膜成分及び曲げ成分の応力範囲を示す。支間長が増加するにつれてUリブ側応力範囲は基本ケースに対して1.58倍に増加する。3.1に膜成分の特徴を示したが、支間長の増加に対して膜成分は変化せずに曲げ成分のみが増加していることがわかる。これは、支間長の増加に伴い、Uリブのたわみ、および偏芯載荷による水平変位が増大し、その結果、横リブ位置による拘束に伴う曲げ成分が大きくなることによる。

4. 3 Uリブと交差する部材の諸元(剛性)の影響

図-9にS2載荷を対象としたU6に対して支間中央と中間支点の交差部に着目した応力範囲の比較(解析モデル1と8)と、U1に対して横桁と中間横リブでの応力性状の相違、横リブの諸元を変えた場合の応力範囲の比較(解析モデル1と4)の結果を示す。図(a)より、交差部材の面内・面外剛性が高い中間支点(充腹ダイアフラム)の方が応力範囲は1.16倍に大きくなっている。図(b)より横桁と隣接する中間横リブと比較を行っているが、横桁での応力範囲に対して中間横リブでの応力範囲は、0.93倍程度と小さくなる傾向である。また、図(c)のUリブ側に着目すると、周辺の横リブのウェブ高が小さくなることでUリブの変形が大きくなり、応力範囲は1.10倍と大きくなる傾向にある。

5 まとめ

Uリブと横リブ等の交差するスリットのまわし溶接部(主にUリブ側止端)のき裂に着目し、橋梁全体系のFEM解析を行い、着目する交差部と主構造との位置関係、鋼床版の構造諸元(Uリブ厚・デッキ厚、縦リブ支間長、横リブウェブ高さ等)及び輪荷重の載荷位置が同部位の局部応力性状に及ぼす影響について検討を行った。主な結果を以下にまとめる。

1) Uリブ側止端のき裂の発生に直接影響するUリブ側応力は、基本ケース(U6着目)に対して、S2載荷時の載荷直下側のスリットまわし溶接部(L側)において最大となった。また、曲げ成分が卓越しており、Uリブ支間中央付近(約1000mm位置)載荷時に最大となった。応力の最大値は、Uリブの変形に伴うUリブウェブの面外曲げ変形が横リブとの交差部において拘

束されることにより生じていた。

- 2) 着目Uリブの幅員方向の位置により、Uリブ側応力範囲に関しては、U6位置で最大となるものの、その程度は、基本ケース(U6着目)と同程度であった。
- 3) デッキ厚(12mm,16mm)、Uリブ厚(6mm,8mm)の増厚により、Uリブ側応力範囲に関して、基本ケース(デッキ板厚12mm、Uリブ厚6mm)に対して、それぞれ0.85~0.88倍、0.82~0.84倍の応力低減が見られた。
- 4) 支間長(2000,2500,3000mm)の増加によりUリブ側の応力範囲に関して、基本ケース(支間長2000mm)に対して3000mmでは、1.58倍の増加が見られた。また、着目交差部に関して、横部材の面内・面外剛性が増加する場合に交差部での拘束度合いが高くなり、応力範囲は増加する傾向が見られた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3.
- 2) 土木学会鋼構造シリーズ19：鋼床版の疲労(2010年改訂版)，2010.12.
- 3) 村越潤，梁取直樹，石澤俊希，遠山直樹，小菅匠：鋼床版デッキプレート進展き裂に対するデッキプレート増厚の効果に関する検討，鋼構造論文集，第19巻第75号，pp.55-66，2012.9.
- 4) 勝俣盛，小笠原照夫，町田文孝，川瀬篤志，溝江慶久：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，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1241-1252，1999.3.
- 5) 判治剛，加藤啓都，舘石和雄，崔誠珉，平山繁幸：閉断面リブを有する鋼床版の横リブスリット部の局部応力特性，構造工学論文集，Vol.59A，2013.3.
- 6) (独)土木研究所，川田工業(株)：鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究(その5)報告書，共同研究報告書，整理番号405号，2010.1.
- 7) 杉山裕樹，田畑晶子，春日井俊博，石井博典，井口進，清川昇悟，池末和隆：鋼床版のUリブ-横リブ交差部における下側スリット部の疲労耐久性向上構造の検討，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.1，pp.18-30，2014.2.
- 8) 井口進，石井博典，石垣勉，前野裕文，鷺見高典，山田健太郎：舗装性状を考慮した鋼床版デッキプレートとUリブ溶接部の疲労耐久性の評価，土木学会論文集A，Vol.66，No.1，pp.79-91，2010.2.
- 9) 中井博，鈴木巖，北田俊行，古田富保：トラフリブを有する鋼床版の実績調査，橋梁と基礎，Vol.24，No.10，pp.47-55，1990.10.