

鋼床版構造の耐久性向上に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：構造物研究グループ

研究担当者：村越潤，木ノ本剛，原田英明

【要旨】

我が国の鋼道路橋は約 5 万 8 千橋（橋長 15m 以上）を数えるが、近年、重交通路線に位置する橋梁や長期供用された橋梁等において、疲労損傷事例が顕在化しつつある。特に損傷の報告が多い鋼床版橋梁の構造に関しては、緊急性の高い部位に関する検討が進められてきたが、その他の損傷が報告される部位に関する検討は未着手となっており、更なる耐久性の向上のために疲労損傷が報告されている部位の構造詳細について耐久性の検証と向上を図ることが重要と考えられる。本研究では、鋼床版において疲労損傷が顕在化しつつある部位で、かつ、疲労耐久性が必ずしも明確でない部位を対象として、疲労試験・数値解析により耐久性の検証と構造ディテール改善策の提案を行うことを目的としている。本年度は、閉断面縦リブと横リブの交差部に設けられるスリット溶接部に発生する疲労損傷に着目し、スリット部の応力性状の把握を目的として解析による検討を行った。

キーワード：鋼道路橋，疲労き裂，鋼床版，閉断面縦リブ，横リブ

1. はじめに

我が国の鋼道路橋は約 5 万 8 千橋（橋長 15m 以上）を数えるが、近年、重交通路線に位置する橋梁や長期供用された橋梁等において、疲労損傷事例が顕在化しつつある。特に損傷の報告が多い鋼床版橋梁の構造に関しては、緊急性の高い部位に関する検討が進められてきたが、その他の損傷が報告される部位に関する検討は未着手となっており、更なる耐久性の向上のために疲労損傷が報告されている部位の構造詳細について耐久性の検証と向上を図ることが重要と考えられる。本研究では、鋼床版において疲労損傷が顕在化しつつある部位で、かつ、疲労耐久性が必ずしも明確でない部位を対象として、疲労試験・数値解析により耐久性の検証と構造ディテール改善策の提案を行うことを目的としている。本年度は、閉断面縦リブと横リブの交差部に設けられるスリット溶接部に発生する疲労損傷に着目し、スリット部の応力性状の把握を目的として解析による検討を行った。

2. 研究の背景と既往の研究

2.1 研究の背景

「鋼道路橋の疲労設計指針」¹⁾（以下、疲労指針と称する）では、鋼床版について、適用範囲を限定したうえで、疲労耐久性が確保できる細部構造等の構造詳細に関する事項を規定している。これらの規定は、過去の疲労試験等による検討事例において、疲労耐久性に優れると確認された構造詳細を採用したものとなっている。

しかし、疲労指針発刊以降にも、既設鋼床版の類似の

細部構造において疲労損傷の報告例は増えており、耐久性の検討と向上を図ることが重要と考えられる。

本研究では、閉断面縦リブが交差する横リブに設けられたスリット溶接部、垂直補剛材とデッキプレート溶接部を対象とし、疲労耐久性の把握とその向上を目的とした検討を行う。本年度は、閉断面縦リブと横リブ交差部のスリット溶接部の応力性状の把握、局部応力を低減し疲労耐久性の向上を図るスリット形状の提案を目的とし、解析的な検討を実施した。

2.2 既往の検討

鋼床版の縦リブと横リブの交差部では、縦リブが横リブのウェブによってその連続性が断たれる構造とすると疲労強度上の問題があることから縦リブを連続させることが一般的であり、縦リブからのせん断力を横リブに確実に伝えるために、縦リブと横リブは溶接で接合される²⁾。このため、横リブウェブには縦リブを貫通させるためのスリットが必要となる。スリットの形状は横リブウェブの断面欠損、スリット部の疲労強度、溶接施工性等を考慮して検討が行われ、過去には国、道路会社毎に異なる標準形状を採用していたが、疲労指針において標準的な形状が示され、統一されている。

疲労指針で示された形状は、それ以前の疲労試験等により確認された疲労耐久性に優れる構造詳細の一つとして定められており、図-1 に示すような形状について疲労試験や解析による検討³⁾⁷⁾が実施されている。しかしながら、これらの検討では荷重載荷位置は横リブ直上としており、主に横リブの面内変形に着目した試験となつて

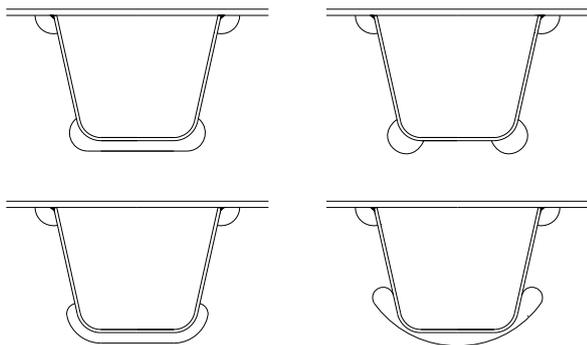


図-1 既往の検討における縦リブ形状

いる。

三木⁸⁾らは車両移動時の横リブの面外変形の影響を確認するために鋼床版パネルの試験体を用いた載荷試験を行い、縦リブと横リブ交差部のスリット及び上部スカラップ周りの応力影響面を求め、スリット部では曲げ応力成分が膜応力成分よりも大きくなること、膜応力および面外曲げ応力成分の最大値は横リブ位置から離れた位置で生じることを示している。また、交差部のスリット形状について、首都高速道路などで採用されていた形状と本州四国連絡橋で採用されていた形状を比較しており、面内曲げに対しては本州四国連絡橋で採用されていた形状の方が応力は低いものの、面外曲げ成分に関してはほぼ同程度の応力が生じるという結果を得ている。しかし、着目している応力は横リブウェブ面の応力であり、縦リブ側の応力性状については明らかにされていない。このように、疲労指針で示されたスリット形状は、主に横リブウェブの応力集中を小さくすることに着目して検討されたものと考えられる。

勝俣^{9) 10)}らは合理化鋼床版における縦リブと横リブ交差部の局部応力特性を解析、実大試験体による載荷試験により検討している。荷重を縦リブ腹板上に載荷した場合に、現場添接部において縦リブ内に設置させるダイヤフラム（以下、密閉ダイヤフラムと称する）が無い場合にはUリブがせん断変形し横リブ側で応力集中が卓越すること、密閉ダイヤフラムがある場合には、縦リブの形状が保持されるため縦リブが回転変形し、横リブとの交差部では自由端である縦リブ下面の水平方向の変形を溶接部が拘束することにより縦リブ側止端部に大きな板曲げによる局部応力が生じることを確認し、疲労試験により損傷を再現した。また、スリット形状や交差部の縦リブ内に設けるダイヤフラム形状の検討を行っており、縦リブ下面をL形鋼により横リブに固定した構造が発生

応力を大幅に低減できることを確認している。この検討では、縦リブ側止端から発生する損傷が主に縦リブの変形に起因することを示唆している。

最近の都市内高速道路における点検結果から、閉断面縦リブの鋼床版に発見された疲労損傷を対象として行った集計¹¹⁾では、縦リブと横リブ交差部のスリットの損傷が最も多く、この部位のき裂について分類整理した結果^{12) 13)}によると、縦リブ側止端のき裂の発生数が多いこと、密閉ダイヤフラムに近接する交差部の損傷が多いことなどが報告されている。また、損傷の報告を受けて、既設橋梁の損傷原因の究明や補修検討^{14)~20)}などが数多く実施されるとともに、新設橋梁においてもスリット部の局部応力を低減するための構造詳細に関する検討²¹⁾が実施されている。

海外においても、縦リブと横リブ交差部に関する検討は数多く実施されており、Fisher²²⁾、²³⁾らはWilliamsburg橋の鋼床版化に際して、実大試験体による疲労試験を実施し、ダイヤフラムと縦リブの交差部において縦リブ内に設けられるバルクヘッドと縦リブ、ダイヤフラムと縦リブの溶接詳細が交差部の疲労強度に与える影響を検討している。また、Bronx-Whitestone橋の鋼床版化の検討では、ダイヤフラムと縦リブ交差部において、バルクヘッドから縦リブ内補剛材への置き換え、ウェブ切り上げ高さの増加、ダイヤフラムと縦リブの完全溶込み溶接による接合などのディテールを採用し、実大試験体を用いた疲労試験により疲労き裂が発生しないことを確認している。

上述のように縦リブと横リブ交差部のスリット形状に関しては数多くの検討が実施されている。しかしながら、検討の多くは特定の橋梁を対象とした解析や橋梁の一部を模擬した試験体での検討であり、縦リブ支間、横リブ断面などの鋼床版諸元が変化した際の応力性状への影響については論じられていない。一方、既設橋梁や新設橋梁を問わず、鋼床版諸元は設計計算や構造細目により決まるため一定とはならない、このため鋼床版諸元がスリットまわし溶接部の応力性状に与える影響を把握することは、この部位の疲労耐久性向上を検討するうえで重要と考えられる。本研究では試設計された鋼床版橋梁を基準モデルとし、縦リブ支間、横リブ剛性、板厚をパラメータとした有限要素解析を実施し、まわし溶接部の応力性状を把握する。また、局部応力の低減が可能なスリット形状について解析的に検討し、小型疲労試験および輪荷重走行試験機を用いた実大試験体の疲労試験を行い疲労耐久性の検証を行う。

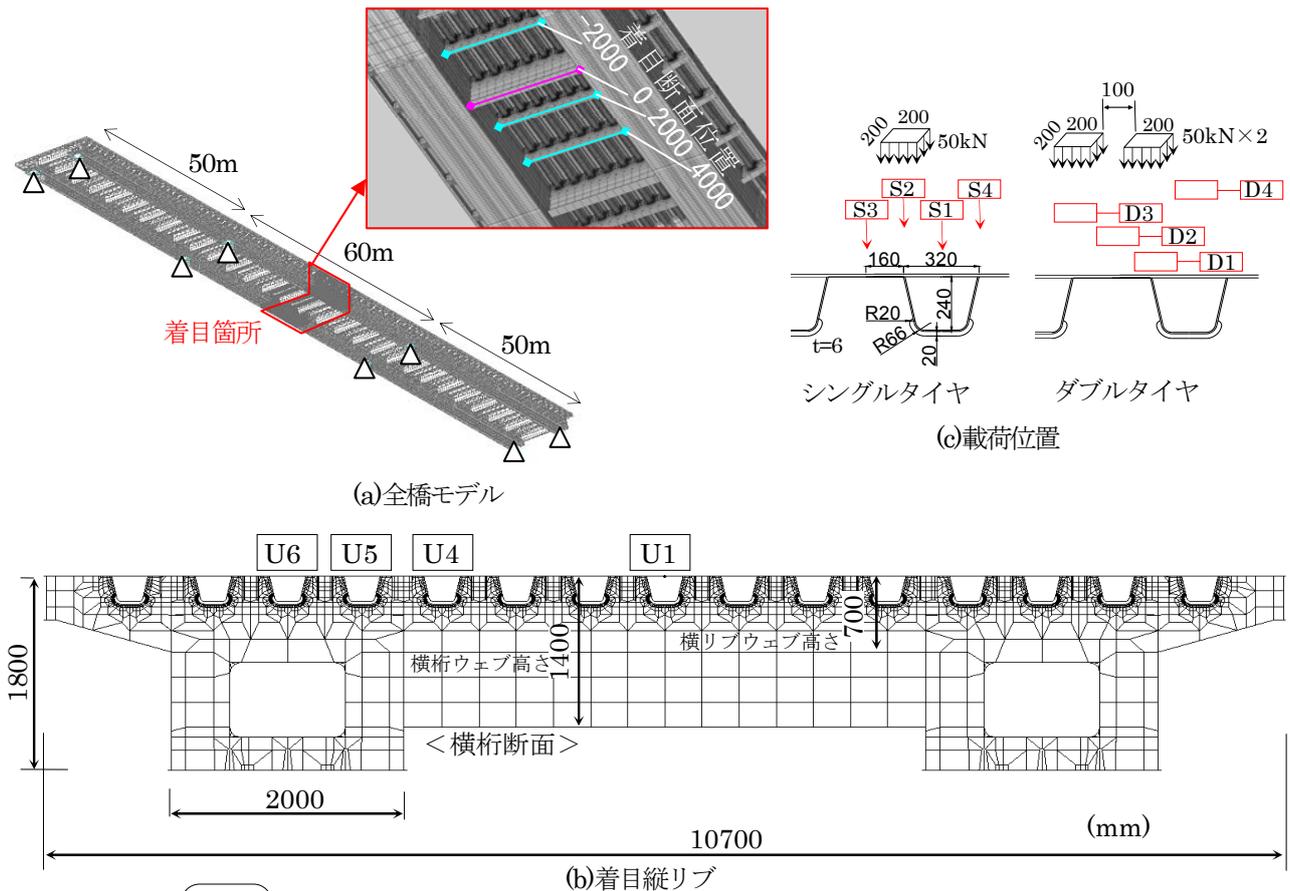


図-3 要素分割図と着目縦リブと着目位置

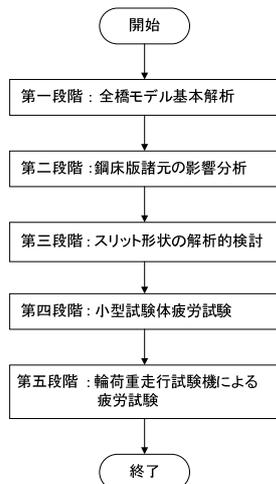


図-2 検討フロー

表-1 検討した鋼床版諸元

シリーズNo. (構造諸元)	デッキ プレート厚 (mm)	縦リブ厚 (mm)	ウェブ 高さ(mm)	縦リブ 支間長 (mm)	着目 縦リブ	橋軸直角 載荷位置
1 (基準モデル)	12	6	横リブ:700 横桁:1400	2000	U1 U4 U5 U6	S1 S2 S3* S4
2 (板厚)	12 16	6 8	横リブ:700 横桁:1400	2000	U4 U6	S1 S2 S3* S4
3 (縦リブ支間長)	12	6	横リブ:700 横桁:1400	2000 2500 3000	U4 U6	S2
4 (横リブウェブ高さ)	12	6	横リブ:360,500 横桁:1400	2000	U1	S1 S2 S3

*U4リブを対象とした際のS3載荷はU1リブ方向へ移動させた縦リブ間とする。

3. 検討概要

3.1 検討フロー

閉断面縦リブと横リブ交差部のスリット部の疲労耐久性の把握および向上のための検討フローを図-2に示す。

検討の第一段階では、橋梁全体をモデル化し、着目縦リブや輪荷重載荷位置を種々変化させた解析を行い、スリット部の応力性状を確認する。第二段階では、鋼床版諸元の違いによる影響を確認するために、デッキプレート及び縦リブの板厚、縦リブ支間、横リブ剛性を変化させた解析を行い、応力性状の変化を確認する。これらの

全橋モデルでの解析結果を踏まえ、第三段階ではスリット部の局部応力に影響を及ぼす因子を整理するとともに、局部応力の低減を図るようなスリット形状を解析的に検討する。次に、局部応力の主たる要因となる変形を再現できる小型試験体について検討し、疲労指針に示されたスリット形状と第三段階で検討したスリット形状について疲労試験により疲労強度の確認を行う。最後に、実大の鋼床版パネルを模擬した試験体を製作し、輪荷重走行試験機による疲労試験を行い、スリット溶接部の疲労耐久性および形状改良の効果について検証を行う。なお、

本年度は図-2の第三段階までの検討を実施した。

3.2 解析モデル, 荷重ケース

3.2.1 解析モデル

解析モデルは標準的な支間構成の3径間連続鋼床版箱桁橋(2車線)について試設計により断面寸法を決定し、橋梁全体をシェル要素でモデル化した全橋モデル(図-3)とした。閉断面縦リブは日本鋼構造協会規格のU-320×240×6-40とし、交差部のスリット形状は疲労指針に示された形状とした。橋軸方向の着目位置は中央径間の支間中央の横桁および横リブ位置とし、その前後の横リブまでの合計縦リブ3支間を詳細な要素分割とした。要素の最小寸法はスリットまわし溶接部近傍で5×5mmであり、解析全体の要素数は約427,000、節点数は約420,000である。

このモデルを基準モデルとし、鋼床版諸元がスリット溶接部に与える影響を把握するために、板厚、縦リブ支間、横リブウェブ高さを変化させたモデルを作成した(表-1)。ただし、鋼床版諸元の変更に伴う主桁や横桁の断面寸法、板厚の見直しは行っていない。

また、着目するスリットまわし溶接部の局所的な応力集中を評価するためには、溶接部の影響を適切に考慮するためにソリッド要素を用いた解析が必要となる。そのため、一部の解析では全体モデルのうち着目箇所をソリッド要素にてモデル化し解析を行う。シェル要素とソリッド要素の結合は着目箇所の局所応力に影響が生じない位置で行った。ソリッド要素部分の最小要素寸法は0.1×0.1×0.1mm程度であり、溶接部の脚長6mm、止端半径1mm、フランク角135度とした。

なお、今回の解析では道路橋示方書に準じ舗装による荷重分布を考慮しないこととし、舗装のモデル化は行っていない。解析における材料定数は道路橋示方書を参考に、鋼材の弾性係数を $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比を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。

3.2.2 荷重ケース

基準モデルでは、載荷荷重にシングルタイヤおよびダブルタイヤによる載荷を想定した。シングルタイヤでは50kNの荷重を200mm×200mmの載荷範囲に等分布荷重として与え、ダブルタイヤでは、シングルタイヤを横断方向に100mmの間隔をおいて2つ並べて100kNの荷重を等分布荷重として与えた。

着目する縦リブは図-3(b)に示す、主桁間中央(U1)、主桁ウェブ近傍(U4, U5)、主桁内中央の縦リブ(U6)とし、着目する縦リブに対する荷重載荷位置は図-3(c)

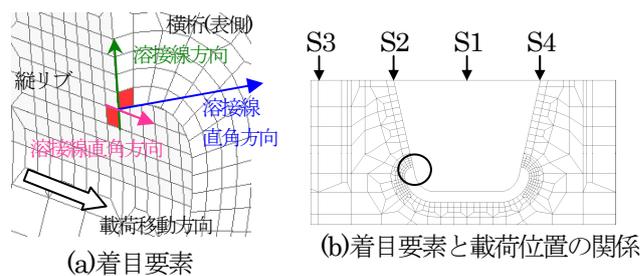


図-4 着目要素と載荷位置の関係

に示す、縦リブ中心(S1)、縦リブウェブ直上(S2, S4)、縦リブ間中央(S3)である。

橋軸方向の載荷位置は着目する横桁及び横リブに対して、前方の縦リブ2支間、後方の縦リブ1支間上に縦リブ支間の1/10の間隔で載荷位置を移動した影響線載荷とした。

4 解析結果

4.1 基準モデルの解析結果

4.1.1 影響線と発生応力範囲

基準モデルでは図-4(a)に示す縦リブと横リブの接合部下端の縦リブ側、横桁側要素の溶接線方向および溶接線直角方向応力の要素応力値の影響線を求め、載荷荷重位置、縦リブ位置がスリット部の応力性状に及ぼす影響を考察する。なお、着目要素に対する載荷位置の関係は図-4(b)に示す通りとする。

(1) 縦リブ側影響線

縦リブ側の影響線を、載荷荷重位置ごとにまとめて図-5に示す。ここでは、横桁との交差部のスリットに着目し、U1, U6縦リブに関してはスリットの左側のみに着目し、U4, U5縦リブはスリットの左右に着目し、それぞれをL, Rの添え字にて区別する。また、表裏面の応力から膜応力成分、曲げ応力成分に分解した影響線をあわせて示す。

影響線は縦リブ位置に関わらず、S1~S3載荷では外面の溶接線方向、内面の溶接線直角方向の応力が卓越するのに対し、S4載荷では溶接線方向、溶接線直角方向の応力はほぼ同じ影響線を示し、内外面の発生応力も同程度となる。また、いずれの載荷荷重位置においても膜応力成分は溶接線方向では正の、溶接線直角方向では負の値をとり、ともに横桁近傍で最大もしくは最小値を示す。一方、曲げ応力成分は載荷荷重位置、応力方向に関わらず卓越する応力成分と同様な影響線となり、載荷位置ごとに異なる曲げ応力成分がスリット部の応力性状に大き

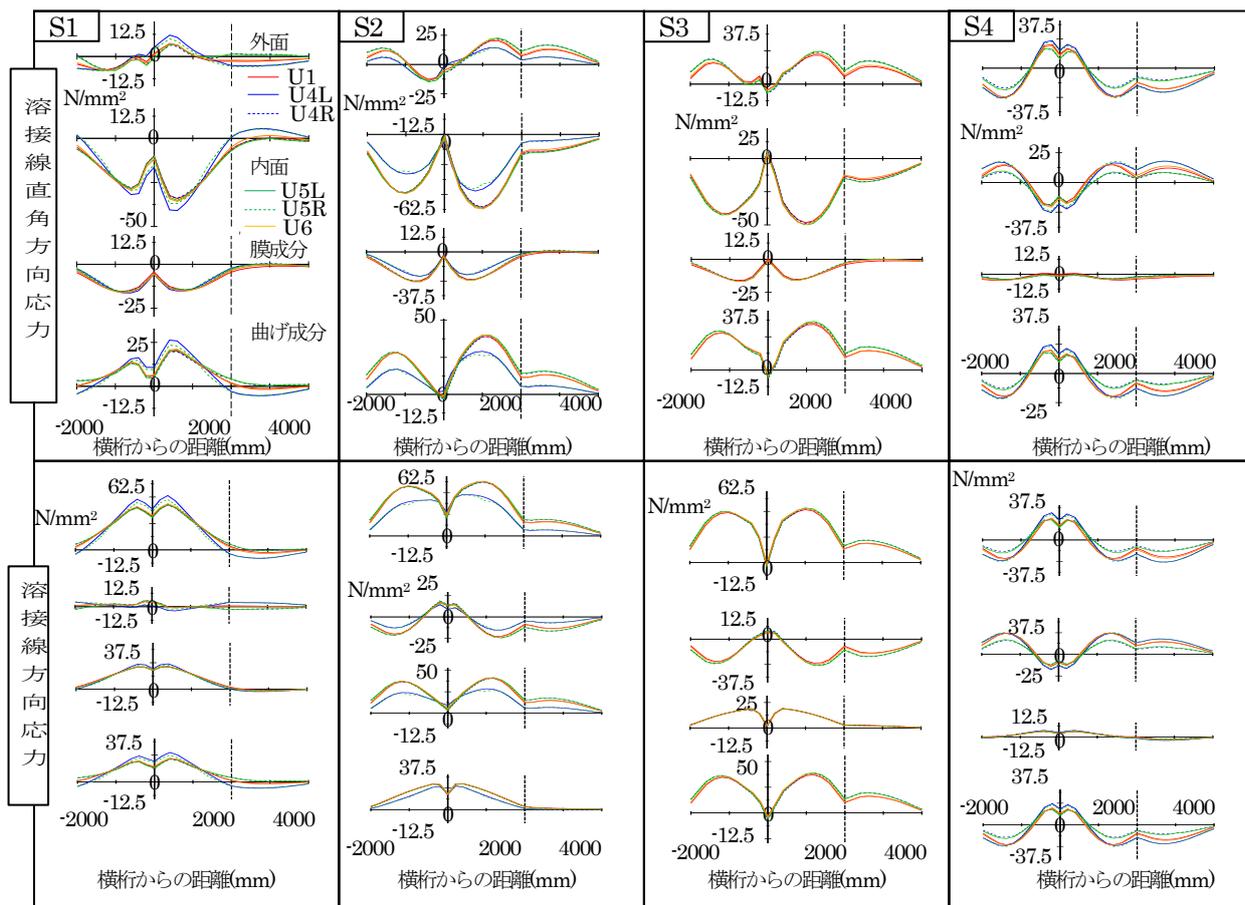


図-5 縦リブ側影響線 (S1~S4 荷重)

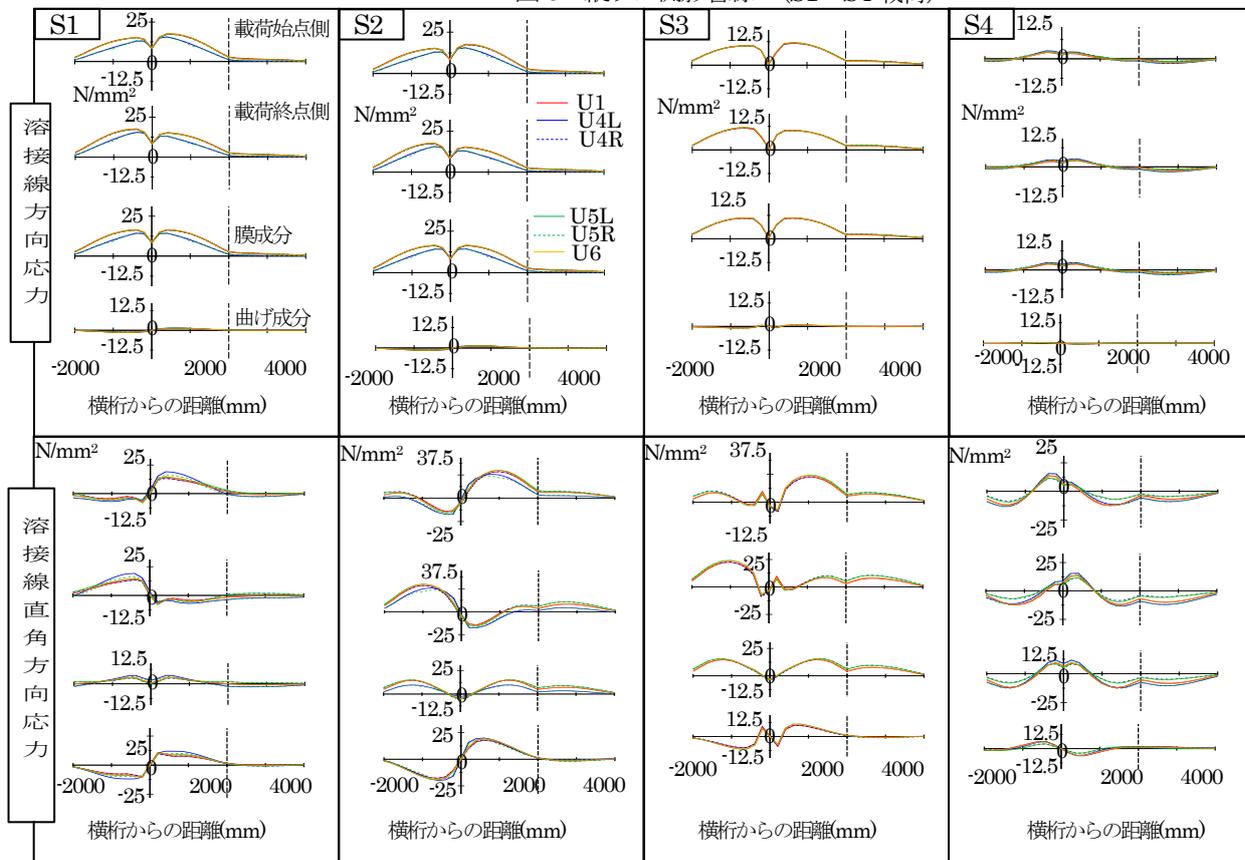


図-6 横桁側影響線 (S1~S4 荷重)

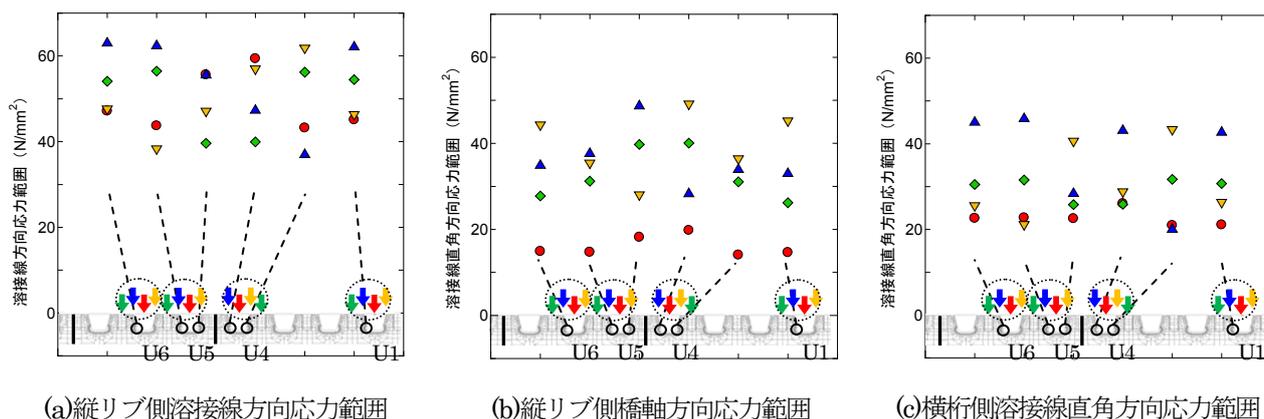


図-7 载荷荷重位置および着目縦リブと発生応力範囲の関係

な影響を及ぼすと考えられる。なお、主桁近傍のU4L, U5Rでは主桁ウェブが隣接する影響により発生応力の最大値、最小値に、他の縦リブと比較して明確な差が生じる。

(2) 横桁側影響線

横桁側の要素応力の影響線を、载荷荷重位置ごとにまとめて図-6に示す。溶接線方向の影響線はいずれの载荷位置においても曲げ応力成分が小さく、膜応力成分が卓越する。発生応力は横リブ近傍で最大値を示し、隣接横リブ位置ではほぼゼロとなり、隣接支間の影響は小さい。

溶接線直角方向の影響線の膜応力成分は横桁位置前後で対称な形状となり、縦リブ側要素の外側の溶接線方向応力の影響線と同様な形状となる。一方、曲げ応力成分は横桁位置前後の载荷で正負が反転した影響線形状となり、横桁近傍で最大値、最小値を示す。このため、外面応力の影響線は载荷位置で形状が異なるとともに、横桁前後の载荷で非対称な影響線形状となる。

(3) 発生応力範囲

縦リブと横リブ交差部の疲労損傷に影響があると考えられる縦リブの外面側の溶接線方向応力および溶接線直角方向応力、横リブの溶接線直角方向応力について、影響線载荷により得られる発生応力範囲と载荷荷重位置、縦リブ位置の関係を図-7に示す。なお、発生応力の算出にあたり、発生応力の最大値と最小値の正負が同一の場合には、車両の影響がない状態の発生応力を0として、両者のうち絶対値の大きな値を発生応力範囲とした。

縦リブ側では溶接線方向の応力範囲が溶接線直角方向の1.5倍程度となっており、まわし溶接部の溶接止端からの疲労き裂発生の可能性が高い。溶接線方向の応力は、着目位置の縦リブウェブの直上载荷であるS2载荷で最も大きくなる傾向にあるが、主桁ウェブ近傍のU4L, U5Rでは主桁ウェブの影響により、S1载荷が最も大きく、そ

の次にS4载荷となるが、応力範囲の大きさはU1, U6リブなどと比較すると若干小さい。

横桁側の溶接線直角方向の応力範囲の载荷位置との関係は、U4L, U5Rを除いては縦リブ側の溶接線方向と同じであり、縦リブ側の曲げ応力成分と横リブ側の膜応力成分の影響線形状が同様であったことから、発生応力が同一の要因によることが考えられる。なお、応力範囲の大きさは縦リブ側の溶接線直角方向応力と同程度である。

4. 1. 2 変形挙動

図-8にU1縦リブのS1~S3载荷に関して、縦リブ外面の溶接線方向応力が最大値となる载荷時の変形図を示す。

縦リブの変形は交差部で拘束されるが、S1载荷では拘束されていないスリット部の縦リブは鉛直下方に沈み込む変形となり、横桁との交差部下端から縦リブが内側に曲がる。この変形が、縦リブの溶接線方向の影響線でみられた曲げ応力成分に対応すると考えられる。また、横桁位置の下面の変形図から横桁位置で縦リブは隣接支間に押し出されて横桁ウェブが面外に曲げられており、横桁側要素の溶接線直角方向の曲げ応力成分に対応する変形と考えられる。

S2载荷, S3载荷ではS1载荷時の鉛直下方への変形に加えて、縦リブに対して偏心载荷されることにより縦リブは荷重载荷側に水平変位を生じるが横桁との交差部では縦リブを拘束することにより偏心载荷により生じたねじりモーメントが作用し、拘束されていないスリット下部は水平方向に変位を生じることになる、この結果として交差部の载荷側は縦リブが横桁ウェブを引張るように変形し、非载荷側では縦リブが横桁ウェブ側に押し込まれるように変形する。このため、スリットの左右で縦リブの溶接線方向の曲げ応力成分と横桁側要素の溶接線直

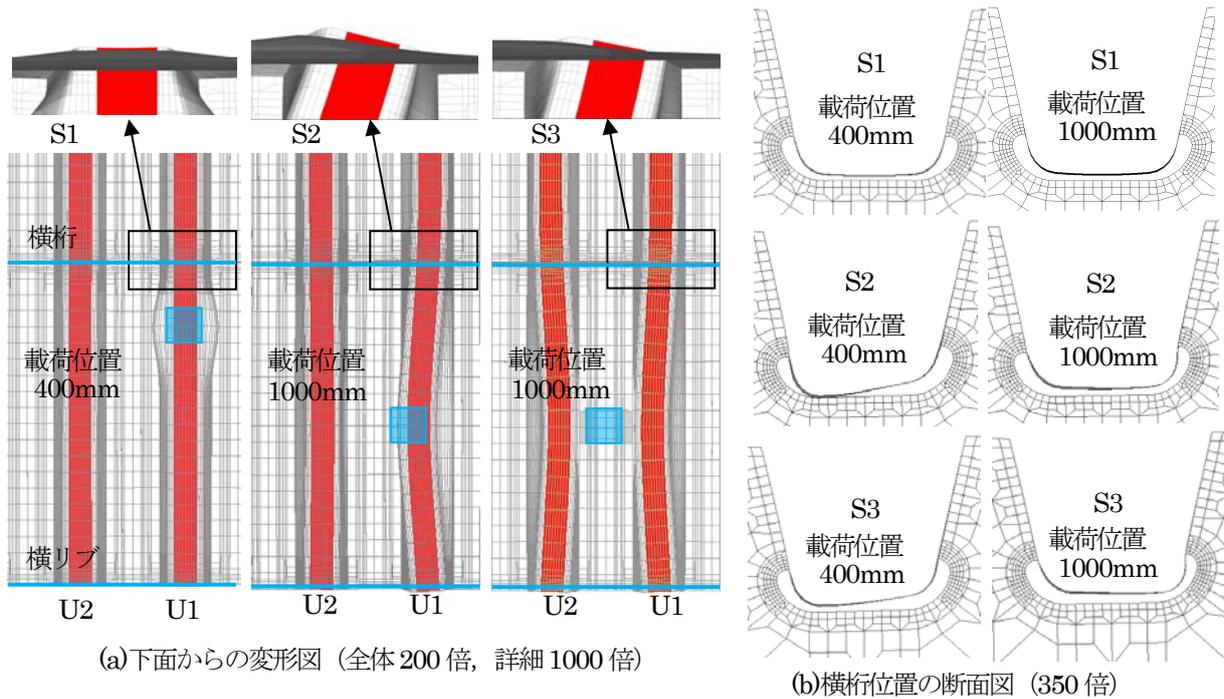


図-8 U1 縦リブ変形図

角方向の膜応力成分はそれぞれ正負が異なる値となる。横桁位置の下面の変形図より、荷重が載荷される側の縦リブウェブは隣接支間側に押し出されるが、反対側の縦リブウェブは載荷側に引張られる。その結果として、スリットの左右で横リブ側要素の溶接線直角方向の曲げ応力成分はそれぞれ正負が異なる値となる。

主桁ウェブに隣接する U4 縦リブに対して載荷荷重位置を S1 とし横桁から橋軸方向に 400, 1000, 2,800mm 離れて載荷した際の、横桁断面位置の変形図を図-9 に示す。U4 縦リブは主桁ウェブが近接するため、主桁ウェブを支点として鋼床版が片持ち梁のように変形し、縦リブは回転変形を生じる。このため、縦リブに対して偏心載荷された S2 載荷時と同様の挙動を示し、U4L 側と U4R 側で発生応力に差が生じる。このように、主桁ウェブ近傍では縦リブの変形が主桁ウェブに拘束される影響を受け、交差部の応力性状に影響を及ぼしていることがわかる。

4. 1. 3 ダブルタイヤ載荷とシングルタイヤ載荷の比較

載荷荷重の中心をシングルタイヤ載荷と同じとし、ダブルタイヤ載荷による解析を U1, U4, U6 縦リブについて実施した。いずれの載荷ケースにおいても、荷重載荷中心が同じであればシングルタイヤ載荷とダブルタイヤ載荷で影響線形状の変化は小さい(図-11)。ダブルタイヤ載荷と同じような載荷状態をシングルタイヤ載荷の組合せで表現すると、図-10 に示すようになるが、この場合

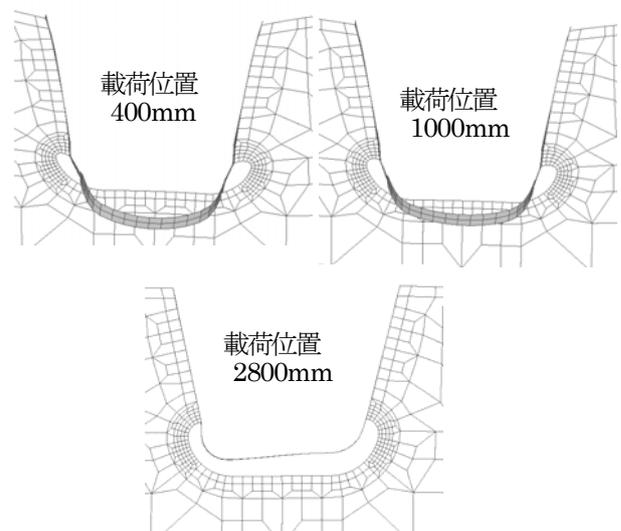


図-9 U4 リブ・S1 載荷時の横桁断面変形図

両者の相違は、ダブルタイヤ載荷では隣接するタイヤ間の隙間は 100mm であるが、シングルタイヤ載荷の組合せでは 120mm となる。両者より得られる影響線を比較した結果の例を図-11 に示す。図からわかるように、両者の差異は非常に小さく、シングルタイヤ載荷の解析結果より、ダブルタイヤ載荷の場合の発生応力等を予測することが可能といえる。

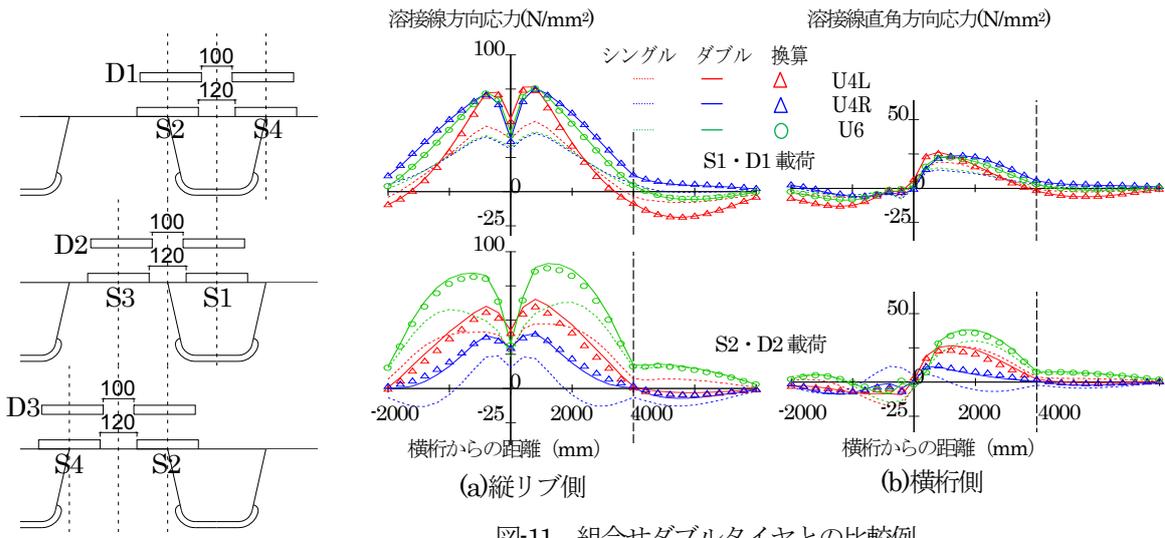


図-10 シングルタイヤの組合せとダブルタイヤ荷重の比較

4. 1. 4 ソリッド要素による詳細解析結果

シェル・ソリッド要素混合モデルを用いた解析を、シェル要素による解析で発生応力が大きくなった荷重位置に対して実施した、荷重ケースは荷重荷重位置 S1, S2, S3 のそれぞれに対し、着目横桁からの橋軸方向の距離 400, 1000, 2800mm の位置の合計 9 ケースとした。

図-12 は U1 縦リブの S2 荷重時の横桁断面位置での縦リブ下部の周方向応力についてシェル要素とソリッド要素の解析結果を比較したものである。まわし溶接部の影響を受けないと考えられる縦リブ R 部より縦リブ中心側では両者の値は良く一致しており、シェル・ソリッド要素混合モデルにおいてシェル要素とソリッド要素の結合が問題なく行われていると判断できる。

図-13 に U1 縦リブの荷重位置毎の最大主応力, 最小主応力のコンター図, ベクトル図を示す。縦リブ側溶接止端はまわし溶接部で全般的に最大主応力, 最小主応力が卓越しており、それぞれ卓越する最大主応力の方向は S4 荷重を除いては、溶接線に対してほぼ直角となっており、主応力値を用いた発生応力範囲の大小で、荷重位置毎の疲労に対する厳しさを評価することが可能と考えられる。また、横桁側止端部では横桁ウェブの面外曲げにより角部に高い応力集中が生じていることがわかる。この位置での主応力方向は溶接線に対して 30°程度は傾いているが、疲労に対する厳しさを評価するうえでは安全側の評価となるため、縦リブ側止端同様に主応力値を用いて評価を行うこととする。

表-2 にシェル・ソリッド要素混合モデルを用いた解析により算出された縦リブ側、横桁側の要素の最大主応力

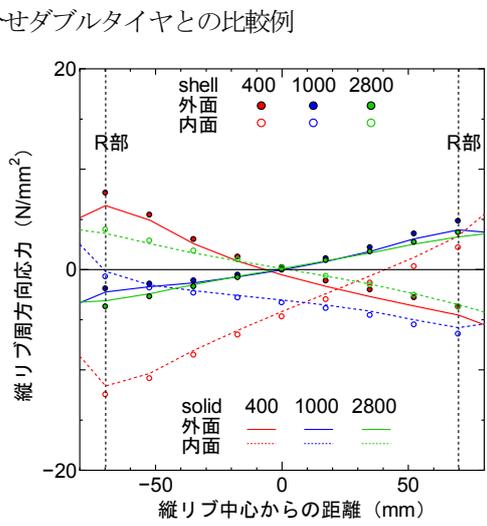


図-11 組合せダブルタイヤとの比較例

値, 最小主応力値, 両者の差から求まる応力範囲, 最大主応力方向の溶接線に対する角度を示す。なお、それぞれ抽出した要素は、応力集中が認められる溶接止端部の溶接線に対して直角方向に近い主応力値の差が最も大きくなる要素としている。この際、横桁前後における荷重の対称性から、荷重位置 -400, -1000, -2800 の際の発生応力の分布は、荷重位置 400, 1000, 2800 の発生応力の分布が横桁ウェブ板厚中心位置を軸に対称となるものとして応力範囲を算出している。主応力の絶対値は縦リブ側の方が大きいですが、応力範囲では横桁側止端の方が大きくなることがわかる。これは、荷重が横桁を通過することで横桁の面外曲げの方向が反転するため、横桁側止端部の荷重側と非荷重側の角部の応力の正負が反転し、応力範囲としては大きくなるためである。図-13 のコンター図から縦リブ側止端の応力集中は溶接止端部の広い範囲に及んでいるのに対し、横桁側止端の応力集中は局所的であり、このような影響がどの程度疲労き裂の発生、

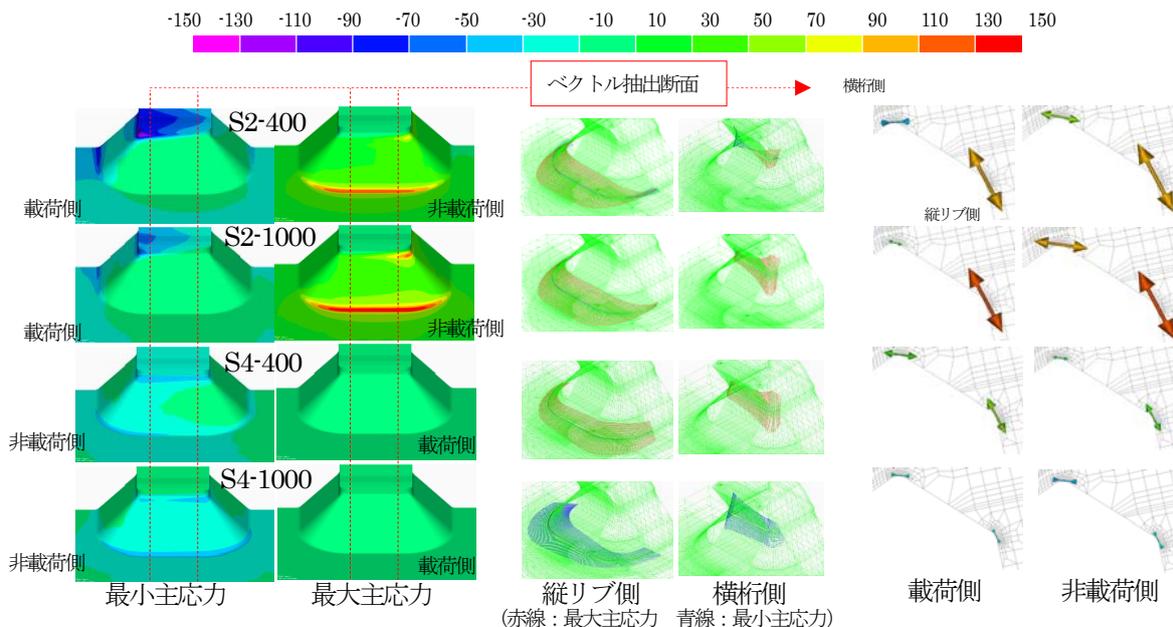


図-13 コンター図とベクトル図

表-2 要素における主応力と主応力範囲

縦リブ側	要素	最大側の主応力値				最小側の主応力値				応力範囲
		主応力値 (N/mm ²)		最大主応力方向が溶接線となす角度	溶接線方向位置	主応力値 (N/mm ²)		最大主応力方向が溶接線となす角度	溶接線方向位置	
		最大主応力	最小主応力			最大主応力	最小主応力			
S1	99.0	4.3	110	400	-0.2	-4.2	109	-2800	103	
S2	133.6	6.0	110	1000	33.3	1.5	20	-2800	134	
S3	110.8	5.1	110	1000	37.0	1.7	20	-2800	111	
S4	65.7	2.8	42	400	-1.5	-34.2	48	-2800	100	
横桁側	S1	29.1	-12.4	-12	-400	7.6	-66.9	30	400	96
	S2	65.6	2.2	2	-1000	-1.3	-127.9	24	400	194
	S3	52.2	1.4	1	-1000	6.9	-62.9	30	400	115
	S4	47.3	1.8	2	-400	-1.6	-43.5	164	1000	91

※最小側の主応力値が正の値をとる場合は、0として応力範囲を算出

表-3 シェルモデルとソリッドモデルの比較

縦リブ側	橋軸直角方向位置	橋軸方向位置	溶接線方向応力 (N/mm ²)		ソリッド/シェル	溶接線直角方向応力 (N/mm ²)		ソリッド/シェル
			ソリッド	シェル		ソリッド	シェル	
			S1	400		77.4	40.2	
	1000	51.3	29.0	1.8	37.2	10.5	3.6	
	2800	-4.3	-2.3	1.8	-2.9	-0.5	6.4	
S2	400	88.0	48.3	1.8	-94.4	-14.0	6.7	
	1000	108.1	62.1	1.7	98.3	28.6	3.4	
	2800	26.6	16.6	1.6	29.9	8.3	3.6	
S3	400	68.2	37.9	1.8	48.4	11.6	4.2	
	1000	90.3	51.7	1.7	81.6	22.6	3.6	
	2800	30.1	18.5	1.6	28.9	7.9	3.7	
S4	400	46.3	21.8	2.1	49.2	13.8	3.6	
	1000	-24.4	-13.4	1.8	-42.1	-11.5	3.7	
	2800	-32.8	-20.1	1.6	-34.8	-9.8	3.6	

※ソリッドによる結果は絶対値が最大となる応力

進展に影響を及ぼすかは不明であるが、横桁側止端からもき裂が発生する危険性があると考えられる。

シェル要素とシェル・ソリッド要素混合モデルによる解析結果を比較して表-3に示す。縦リブ側と横桁側でシェル要素の結果に対するソリッド要素の結果の比率は異なるが、荷重位置毎の比率は差異が比較的小さく、シェル要素での解析で発生応力の大小の相対的な比較は可能と考えられる。そのため、以降の解析ではシェル要素での解析を基本とする。

4.2 鋼床版諸元がスリット部応力性状に及ぼす影響

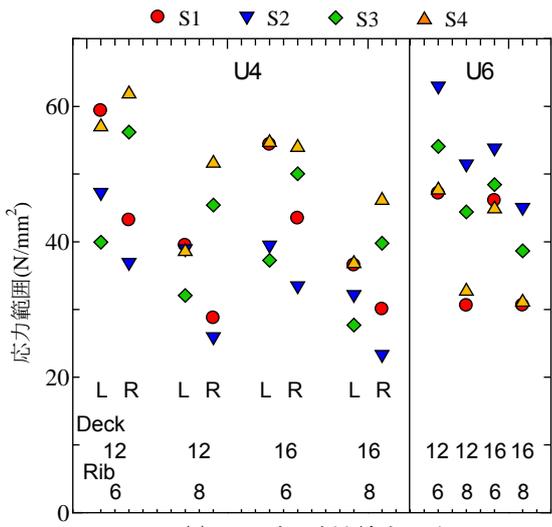
4.2.1 板厚の影響

平成24年の道路橋示方書では、大型車が通過する直下のデッキプレートの最小板厚が12mmから16mmへと変更された。このデッキプレート厚変化の影響を、標準的な縦リブ厚である6mmと8mmの違いによる影響とあわせて検討した。なお、着目する要素は基準モデルと同じである。

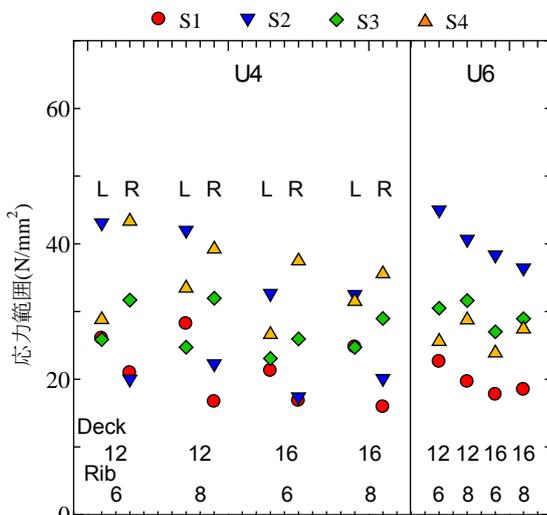
板厚の変化により、溶接線方向応力、溶接線直角方向応力の最大値、最小値に変化は生じるものの、影響線形

状はほぼ変化がないため、ここでは板厚の影響を応力範囲の変化で評価する。板厚変更時の応力範囲の変化は図-14の通りであるが、縦リブ側の応力範囲に着目すると、デッキプレートを12mmから16mmに増厚することで、応力範囲は増厚前に対し0.84~1.05倍となる。同様に、同一のデッキプレート厚に対して縦リブ厚を増加した場合は、0.65~0.84倍となり、縦リブ増厚の方が応力範囲の低減に効果があるといえる。なお、U4Rではデッキプレートの増厚により応力範囲が増加しているが、これはデッキプレートの増厚により主桁ウェブを支点とした片持ち梁としてのたわみが減少することで、横桁スリット位置での縦リブの水平変位が低減し、U4Rに作用していた圧縮応力が低減された結果と考えられる。

一方、横桁側要素に着目すると、デッキプレートを増厚することにより応力範囲は0.76~1.00倍となり、縦リブ側要素と同様に低減するが、同一のデッキプレート厚に対して縦リブ厚を増加した場合は0.80~1.18倍となり、



(a)縦リブ側溶接線方向応力



(b)横桁側溶接線直角方向応力

図-14 板厚による応力範囲の変化

荷重位置によっては応力範囲が増加する。応力範囲が増加する原因は図-15に示す影響線図からわかるように、縦リブ厚の増加により、横桁側の膜応力成分が増加し発生応力の最大値、最小値に変化が生じたことが原因である。しかし、応力範囲が最も大きくなる荷重ケースでは応力範囲は0.85~1.00倍程度と改善されており、全般的には板厚の増加により、横桁側の応力範囲についても低減されると考えることができる。

4.2.2 縦リブ支間長の影響

縦リブ支間長を2500mm, 3000mmと増加した際の荷重荷重位置S1, S2の影響線を縦リブ支間長が2000mmの結果と合わせて図-16に示す。なお、図中の横軸は縦リブ支間長で無次元化している。

S1荷重に関しては縦リブ位置、荷重に関わらず、縦リブ支間長は影響線及び発生応力にほぼ影響を与えていな

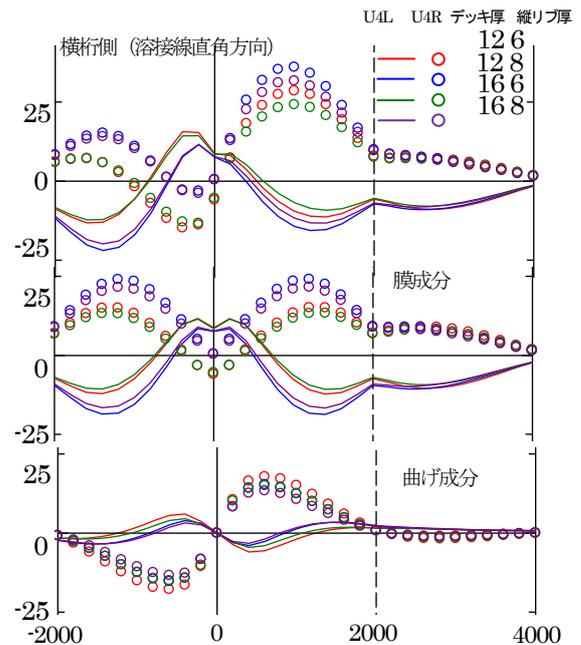


図-15 U4リブS2荷重時の横桁側要素の影響線

いことがわかる。一方、S2荷重では縦リブ支間長が長くなることにより縦リブ側、横桁側ともに影響線形状に変化はないものの発生応力が大きくなる。膜応力成分と曲げ応力成分に分解した影響線から、曲げ応力成分が縦リブ支間長に比例して増加し、発生応力の増加に寄与していることがわかる。これは縦リブ支間長が長くなると縦リブのたわみ、および偏心荷重による水平変位が増大し、その結果、横桁位置に生じるねじりモーメント、スリット部の縦リブ水平変位が大きくなるためと考えられる。なお、U4Lに着目した場合、S2荷重で曲げ応力成分の増加はほとんどみられない、これは主桁ウェブに荷重位置が近く、主桁ウェブにより縦リブのたわみが拘束されるためと考えられる。

縦リブ支間長ごとの発生応力範囲を表-4にまとめて示す。縦リブ支間の増加によるS2~S4荷重時の応力範囲の増加は顕著であり、縦リブ支間長はスリット部の疲労耐久性に大きな影響を及ぼすことがわかる。

4.2.3 横リブウェブ高さの影響

横リブウェブ高さがスリット部の疲労強度に与える影響については主に面内荷重による荷重試験や解析により検討されており、疲労指針においても横リブスリット部の疲労強度向上には、横リブ面内および面外剛性を高めることが有効であり、横リブウェブ高さ600~700mm程度以上で必要な面内剛性が確保されるとしている。横リブ面内剛性がスリット部の応力性状に及ぼす影響を把握するために、面内剛性が異なる横桁、横リブ、およびウェブ高さを500mm, 360mmとした横リブのスリット部

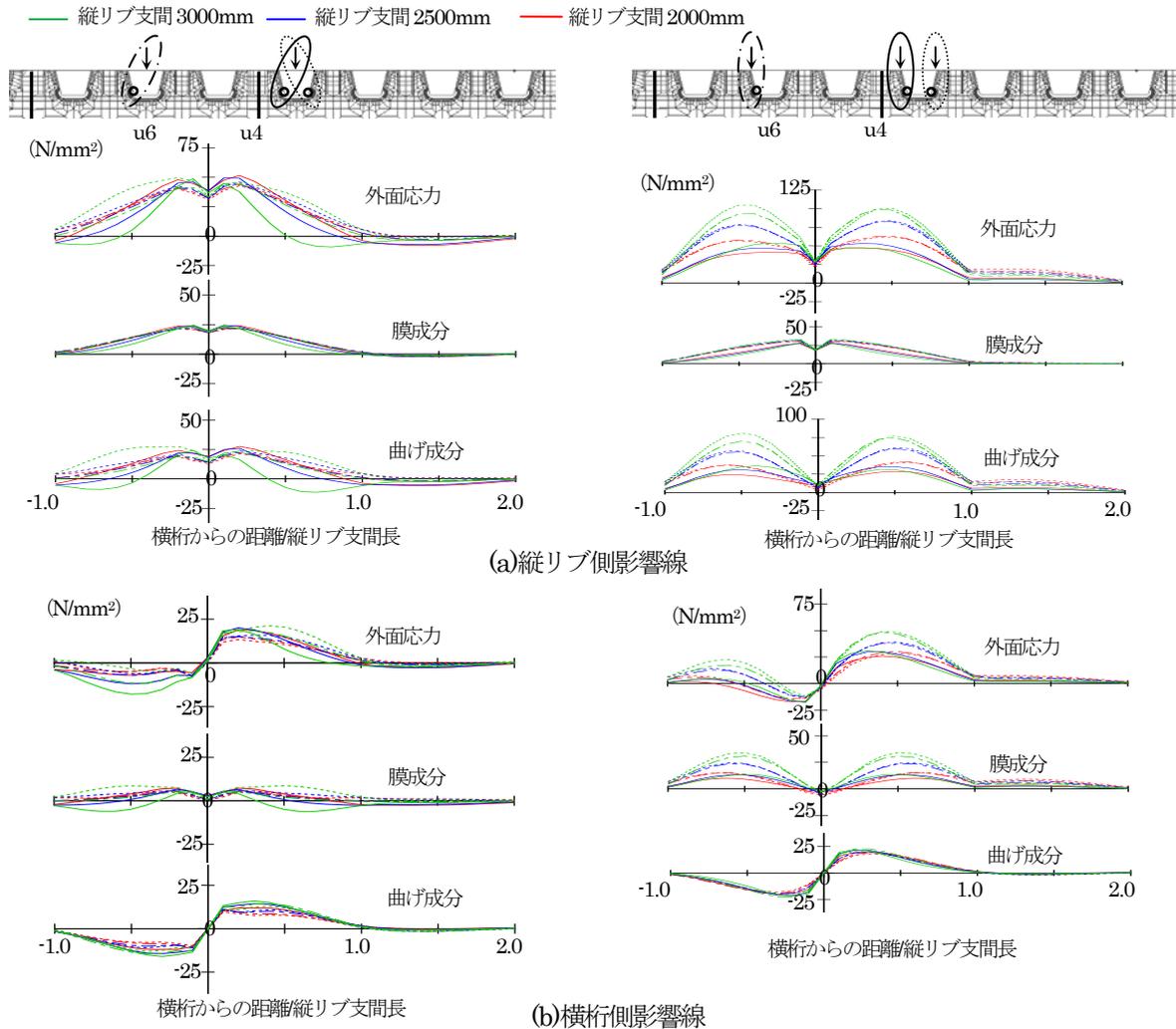


図-16 縦リブ支間長の変化による影響線の変化 (左 : S1 載荷, 右 : S2 載荷)

表-4 縦リブ支間長による応力範囲の変化

縦リブ 支間長 (mm)	縦リブ側の応力範囲(N/mm ²)											
	S1載荷			S2載荷			S3載荷			S4載荷		
	U4L	U4R	U6	U4L	U4R	U6	U4L	U4R	U6	U4L	U4R	U6
2000	59.4	43.2	47.2	47.3	61.9	63.0	39.9	56.2	54.1	57.0	37.0	47.6
2500	56.5	46.3	46.8	53.1	83.9	82.5	56.5	74.6	73.0	70.7	43.0	62.2
3000	57.8	51.0	48.6	53.5	104.7	99.6	73.9	93.5	89.6	88.0	43.2	72.9

縦リブ 支間長 (mm)	横桁側の応力範囲(N/mm ²)											
	S1載荷			S2載荷			S3載荷			S4載荷		
	U4L	U4R	U6	U4L	U4R	U6	U4L	U4R	U6	U4L	U4R	U6
2000	26.1	21.0	22.6	43.1	43.3	45.0	25.9	31.7	30.5	28.8	20.0	25.6
2500	32.0	23.3	22.5	47.6	52.7	50.8	31.8	35.7	35.2	39.1	24.6	35.1
3000	37.0	27.3	29.9	48.6	61.0	61.6	39.9	43.1	42.4	49.3	26.8	43.7

について検討を行った。なお、ここではU1 縦リブを検討の対象とした。

図-17 に横桁位置と隣接する横リブ位置での影響線を示す。S1 載荷では横リブ面内剛性の変化による発生応力や影響線形状の変化はほとんど認められない。S2~S4 載荷では、横リブウェブ高さが700mmと500mmの比較では両者の相違はわずかであるが、ウェブ高さが360mmまで小さくなると横桁位置での発生応力の増加、横リブ

近傍載荷時の横リブ位置の発生応力に顕著な差が生じる。これは横リブ面内剛性の低下により、横リブによる荷重分配が低下するとともに縦リブの変形が増加したためと考えられる。図-18 に横リブ直上載荷時の変形を応力コンターとあわせて示すが、縦リブによる横リブウェブの断面欠損によりスリット下部でのせん断変形が顕著となりスリットR部の応力集中が広がるとともに、載荷側では縦リブウェブを押し込むような変形が生じている。こ

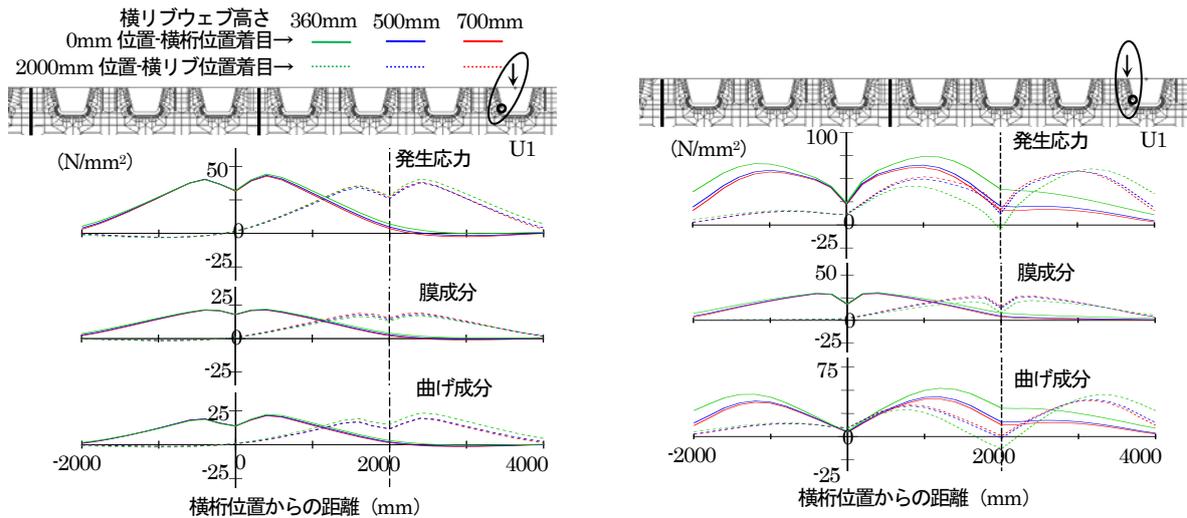


図-17 横リブウェブ高さの影響 (左 : S1 载荷, 右 : S2 载荷 縦リブ側要素)

の変形が横リブ直上载荷時にスリット部の縦リブに面外曲げ応力が生じさせていると考えられる。

以上のように、横リブ面内剛性が著しく低下すると、横リブ位置だけでなく横桁位置の応力集中も増加し、スリット部の疲労耐久性を低下させる要因になるといえる。

5 疲労耐久性向上のための構造詳細 (スリット形状) に関する検討

5.1 検討の概要

4. の解析結果を踏まえ、ここでは縦リブと横リブ交差部のスリット溶接部の疲労耐久性向上を図るための構造詳細について検討を行う。具体的にはスリット形状について、パラメトリックな解析を行い、各種の形状変更による影響を分析することでスリット形状の最適化を図る。

図-19 にスリット形状検討の基本モデルを示す。この形状は横方向部材側の溶接止端部の応力集中を母材部に移行させる、縦リブとの溶接長を現行形状と同程度確保する、スリット部を切上げることにより曲げ応力の低減を図る、まわし溶接部の施工性を向上するという点を考慮して決定した。この形状を基本とし、断面欠損の影響、溶接長の影響、切上げ高さの影響について検討した。

検討は形状変更により発生応力範囲に及ぼす影響が大きく、支間長の増加による影響も大きい曲げ応力成分を低減することが効果的であると考え、S2 载荷時の応力低減効果に着目する。解析はシェル要素による解析を基本とし、縦リブ側要素の溶接線方向応力の応力低減効果で評価を行う。

5.2 断面欠損の影響

基本モデルに対して断面欠損の影響を確認するために、

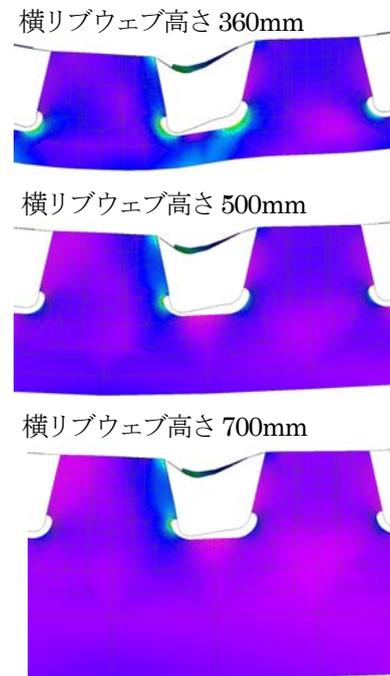


図-18 横リブ高さ変化による変形図の比較 (U1S2 载荷時, 変形図 300 倍, mises 応力)

ウェブの断面欠損を可能な範囲で小さくした形状 (図-20(a)), スリット幅を広げた形状 (図-20(b)), 縦リブとの隙間を大きくした形状 (図-20(c)) の 3 種類の形状の影響線を比較した (図-21)。断面欠損による影響は比較的小さく、図-20(a), 図-20(b) の形状ではわずかに最大応力が上昇する。なお、基本モデルを含めて現行形状と比較して横桁近傍载荷時の発生応力が上昇し、支間中央付近より隣接横リブ側では発生応力が現行モデルを下回る結果となっている。これは、膜応力成分と曲げ応力成分に分解した結果からわかるように、横桁近傍载荷時の曲げ応力成分が増加したことが原因といえる。

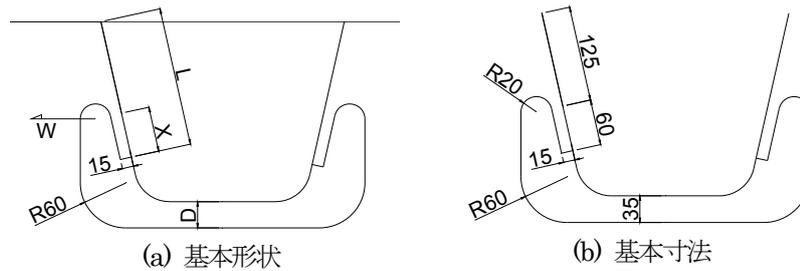


図-19 スリット基本形状

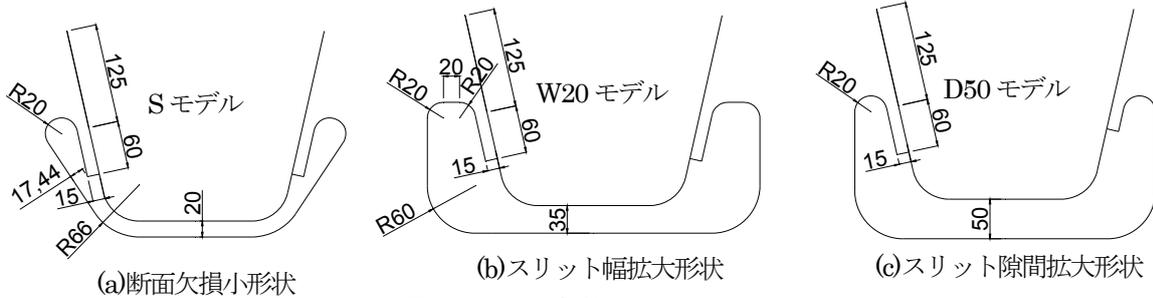


図-20 断面欠損検討スリット形状

5. 3 溶接長の影響

縦リブと横桁の溶接長の影響を、基本モデルに対して、溶接長 L を 155, 170, 200mm と変化させた場合の影響線を比較することで確認する。図-22 からわかるように、溶接長が発生応力に及ぼす影響は大きく、溶接長の増加により膜応力成分、曲げ応力成分がともに低下することがわかる。このことから、縦リブと横方向部材の溶接長を可能な限り確保することが重要といえる。

5. 4 切上げ高さ影響

スリットの切上げ高さの影響を、溶接長 $L=200\text{mm}$ と場合の影響線を比較することで確認する。図-23 からわかるように、切上げ高さを大きくすることで横桁近傍載し、切上げ高さ x を 20, 45, 75, 120mm と変化させた荷時の曲げ応力は大きくなるものの、隣接横桁に向かうにしたがって曲げ応力は小さくなる。図-24 に横桁から 200mm、1000mm 位置に载荷した際の変形図を比較して示すが、切上げ高さを大きくすることで、縦リブの鉛直方向の変形が増加しており、その結果として曲げ応力が増加したものと考えられる。一方、支間中央側に载荷された際に生じるスリット部の縦リブの水平方向変形に対しては、切上げ高さを大きくすることで、横リブウェブによる拘束が低減され曲げ応力が緩和される。

5. 5 スリット形状の提案

5.2~5.4のパラメトリックな解析結果より、スリット形状に縦リブと横リブの溶接長さを確保しつつ、切上げ高さを横桁近傍载荷時と支間中央载荷時の発生応力が同

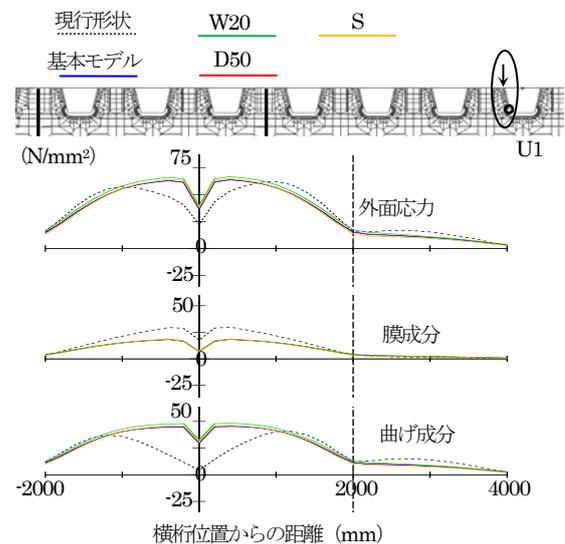


図 21 断面欠損の影響

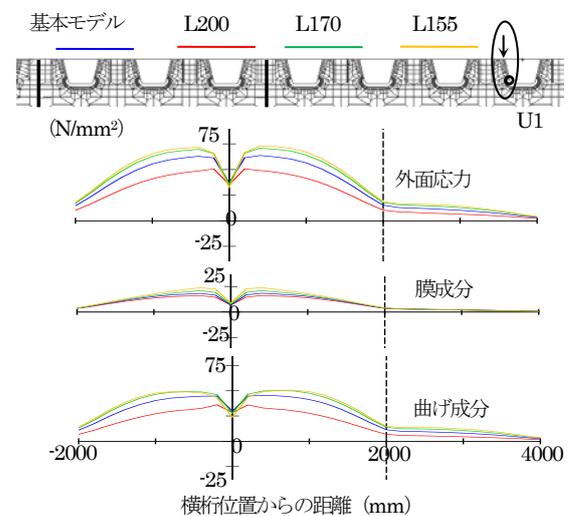


図 22 溶接長の影響

程度となるように調整し、更に溶接部の施工性に配慮した形状を採用することで、疲労耐久性の向上を図ることが可能と考えられる。4.2で検討したように、スリット溶接部の応力性状に鋼床版諸元が及ぼす影響は小さくはないが、疲労指針の適用範囲内で最適なスリット形状の提案を行う。具体的には、疲労指針の適用範囲内で最も発生応力が厳しくなると考えられる縦リブ支間長 2500mm に対する最適形状を提案する。

縦リブ支間を 2,500mm とした解析モデルに対し 5.1.3 と同様に切上げ高さ x を 20, 75, 120mm と変化させた解析を行い、切上げ高さに対する支間中央荷重時の曲げ応力低減率を求め、横桁近傍荷重時と支間中央荷重時の発生応力が同程度となる高さを計算すると、切り上げ高さは 68mm となるため、 $x=70\text{mm}$ とした形状とし、現行形状と提案形状の影響線の比較を行うと図-25 となる。スリットの形状の改良により、S2 荷重時の最大発生応力は約 65.4%に低減され十分な効果があることが確認できる。

6 まとめ

本年度は有限要素解析により閉断面縦リブと横リブ交差部の応力性状の把握、および疲労耐久性の向上を図るスリット形状について解析的な検討を実施した。今後は、解析による検討を進めるとともに、疲労試験による疲労耐久性の把握および検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，平成 14 年 3 月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，昭和 48 年 2 月
- 3) 藤原稔，西川和廣，滝沢晃，小田訓男：鋼床版横リブの静的荷重試験および疲労試験，土木研究所資料第 2643 号，1988. 7
- 4) 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，Vol.37A，pp.1151-1162，1991.3
- 5) 国広昌史，迫田治行，公江茂樹，二瓶寛太：閉断面縦リブを有する鋼床版の疲労実験，川崎重工技報，No.92，1986.4
- 6) 北原俊夫，檜垣孝二，和田三夫，渡辺昇：鋼床版の横リブ設計法の研究，住友重機械技報，Vol.36，No.106，1988.4
- 7) 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，Vol.37A，pp.1169-1179，1991.2
- 8) 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，pp.127-137，1995.7

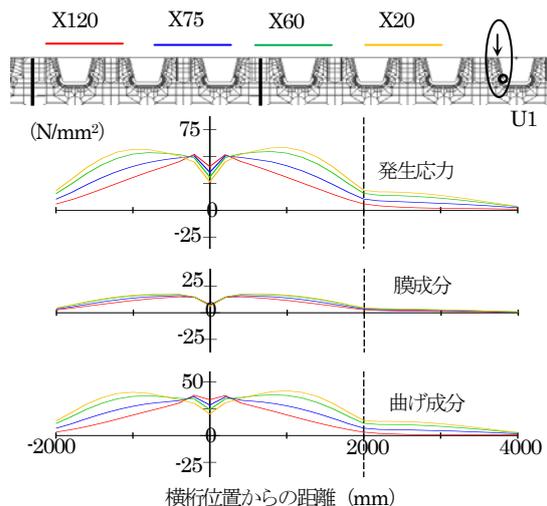


図-23 切上げ高さの影響

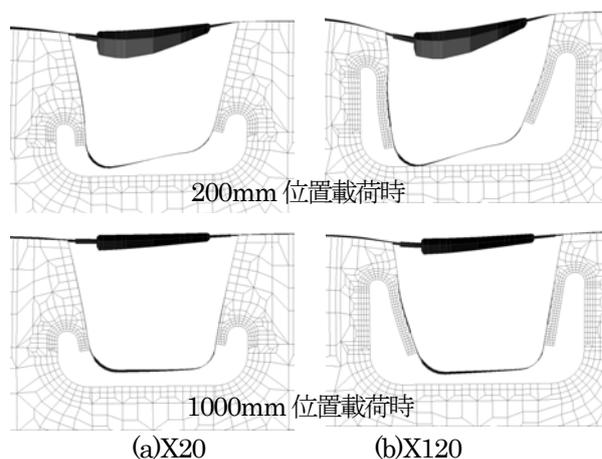


図-24 切上げ高さによる断面変形 (280 倍)

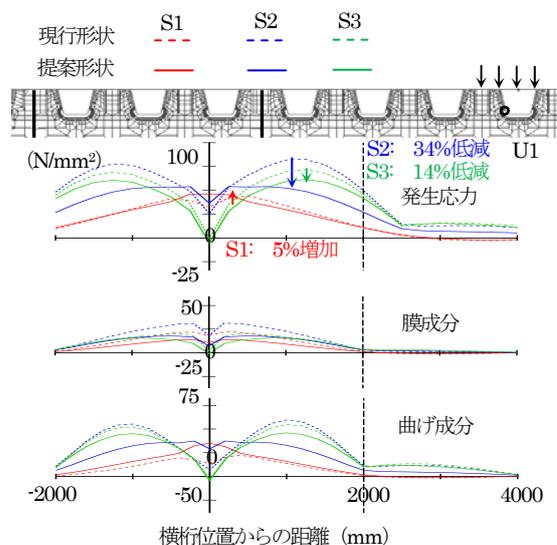


図-25 現行形状と提案形状の影響線

- 9) 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
- 10) 勝俣盛, 小笠原照夫, 町田文孝, 溝江慶久: 合理化鋼床版におけるUリブ・横桁交差部の構造に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1233-1240, 2000.3
- 11) 土木学会鋼構造シリーズ 19: 鋼床版の疲労(2010年改訂版), 平成22年12月
- 12) 高田佳彦, 平野敏彦, 坂野昌弘, 松井繁之: 阪神高速道路における鋼床版の疲労損傷と要因分析の検討, 第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.253-258, 2006.7
- 13) 山本泰幹, 御嶽讓, 木村真二, 林暢彦, 栗原康行: Uリブ鋼床版の横リブ交差部の疲労耐久性向上に関する検討, 鋼構造年次論文報告集, 第15巻, pp.301-308, 2007.11
- 14) 夏秋義広, 坂野昌弘, 高田佳彦, 平野敏彦, 瓦林誠: 鋼床版のUリブと横リブ交差部の疲労き裂に着目したFEM解析による対策検討, 土木学会第61回年次学術講演会, I-563, 2006.9
- 15) 平野敏彦, 高田佳彦, 松井繁之, 坂野昌弘: 鋼床版のUリブと横リブ交差部の疲労き裂に着目した移動輪荷重試験報告, 土木学会第61回年次学術講演会, I-564, 2006.9
- 16) 服部雅史, 大西弘志, 高田佳彦, 青木康素, 松井繁之: 鋼床版のUリブと横リブ交差部の疲労損傷対策と輪荷重走行試験, 鋼構造年次論文報告集, 第15巻, pp.431-438, 2007.11
- 17) 石川誠, 溝江慶久, 江崎正浩, 村越潤, 梁取直樹: 鋼床版のトラフリブ-横リブ交差部に発生した疲労き裂に対する補修・補強検討, 土木学会第62回年次学術講演会, I-002, 2007.9
- 18) 嶋田修, 溝江慶久, 村越潤, 梁取直樹, 石澤俊希: 鋼床版Uリブ-横リブ交差部に発生する疲労き裂の補修・補強対策に関する試験報告, 土木学会第64回年次学術講演会, I-137, 2009.9
- 19) 加藤啓都, 判治剛, 館石和雄, 崔誠珉, 平山繁之: 鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力挙動に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会, I-288, 2012.9
- 20) 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: Uリブ鋼床版の横リブ交差部構造の検討, 土木学会第67回年次学術講演会, I-289, 2012.9
- 21) 森永真朗, 磯上和良, 千葉照男, 三木千壽: 東京港臨海大橋(仮称)における技術開発とコスト縮減 第3回 上部構造の検討(2), 橋梁と基礎, Vol.42, No.10, 2008.10
- 22) Paul A. Tsakopoulos, John W.Fisher: Full-Scale Fatigue Tests of Steel Orthotropic Decks for the Williamsburg Bridge, Journal of Bridge Engineering, ASCE, Vol8, No.5, pp.323-333, 2003.9
- 23) Paul A. Tsakopoulos, John W.Fisher: Fatigue Performance and Design Refinements of Steel Orthotropic Deck Panels Based on Full-Scale Laboratory Tests, Steel Structures Vol.5, pp.211-223, 2005

RESEARCH ON FATIGUE DURABILITY IMPROVEMENT OF ORTHOTROPIC STEEL DECK

Abstract : Recently, serious fatigue damages have been observed increasingly on steel highway bridges where severe traffic condition. Intensive research on fatigue-resistant structural detail against serious damages have been conducted, however research on other fatigue-prone structural detail where fatigue damages reported were still remained. The aim of this research is to examine fatigue durability of damaged structural details and propose improved structural details based on fatigue testing and analytical studies. In FY2012, analytical studies were conducted to clarify stress behaviors around slit area at connections between crossbeam and longitudinal closed rib.

Key words : orthotropic steel decks, fatigue durability improvement, crossbeam, longitudinal close rib