

戦-24 鋼床版の疲労設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：村越潤、梁取直樹

【要旨】

既設の鋼床版において、デッキプレートと U リブの溶接ルート部を起点としてデッキプレート方向に進展するき裂の発生事例が報告されている。このき裂の発生メカニズムについては、デッキプレートの局所的な板曲げによる溶接ルート部での高い応力集中が主な原因と考えられており、デッキプレートを厚くして板曲げ剛性を増加させることが、疲労耐久性の向上に効果的と考えられる。本研究では、鋼床版デッキプレートと U リブの溶接部近傍の応力性状に着目し、輪荷重走行試験および FEM 解析を実施して、現行の鋼床版設計における構造ディテールの見直しの必要性、予防策としてのデッキプレート厚板化による疲労耐久性向上効果について検討した。

キーワード：鋼床版、疲労、設計、輪荷重走行試験、解析

1. はじめに

鋼床版では、デッキプレートと U リブとの溶接ルート部を起点としてデッキプレート板厚方向に進展する疲労き裂（以下、デッキ進展き裂）が確認されている。このき裂は、進展初期に外観目視で発見することはできず、貫通した場合には舗装の損傷や路面陥没により車両交通に支障をきたすおそれがある。また、き裂発生部の構造は現行の U リブ鋼床版にほぼ共通の構造ディテールであることから、疲労耐久性を確保するうえで現状構造の適否や構造の改善策の検討が必要である。

平成 16 年度から 17 年度にかけて、旧橋梁チームでは、このき裂の発生メカニズムおよび原因究明のために、12mm 厚のデッキプレートを有する実大試験体を用いた輪荷重走行試験を実施し、き裂の発生・進展を再現している¹⁾。また、既設の鋼床版の疲労耐久性向上のために種々の補修・補強工法の検討²⁾を実施している。

本研究では、新設の鋼床版を対象に、デッキ進展き裂の発生を予防するという観点から、構造ディテールの見直しの必要性、および疲労に配慮した構造ディテールについて検討を行った。デッキ進展き裂は、溶接部近傍での局所的な板曲げにともなう応力集中が主な原因であることが指摘されており¹⁾、この局所的な板曲げを防ぐには鋼床版の板曲げ剛性を増加させることが効果的と考えられる。このため、デッキプレートを通常より厚く 16、19mm とした実大試験体を用いて輪荷重走行試験を実施し、ひずみ挙動を計測するとともに超音波探傷試験（以下、UT）によりき裂の進展挙動を計測した。試験後に

は、ひずみ変化が著しかった部位や UT において高いエコー反応があった部位を対象に、コア抜き調査や横リブ交差部の部分切り出し調査を実施し、き裂の深さや範囲を直接確認した。また、試験体においては、着目するルート部のひずみを直接計測できないため、本試験体をモデル化した FEM 解析を実施した。解析では、解析結果と試験結果との比較により解析モデルの妥当性を検証するとともに、デッキプレート厚を 12、14、16 および 19mm と変化させた解析を行い、デッキプレートの厚板化によるルート部の局部応力に対する低減効果を検討した。さらに、既存の他機関における輪荷重走行試験結果も用いて、デッキプレートの厚板化によるデッキ進展き裂の抑制効果について検討した。

なお、本研究においては、国土技術政策総合研究所、（社）日本橋梁建設協会との共同研究「損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する共同研究」（平成 18 年～20 年度）を実施している。

2. 輪荷重走行試験

2.1 試験体

試験体を図-1に示す。U リブ支間 2,500mm で 2 径間とし、片側径間のデッキプレート厚を 16mm、もう一方を 19mm とし、同時に試験できるようにした。また U リブ厚による違いを確認できるように、8mm 厚と 6mm 厚の U リブを 2 本ずつ計 4 本配置した。使用鋼材は SM490Y である。詳細構造や製作方法は、「鋼道路橋の疲労設計指針」（日本道路協会、平成 14 年）³⁾ に従っ

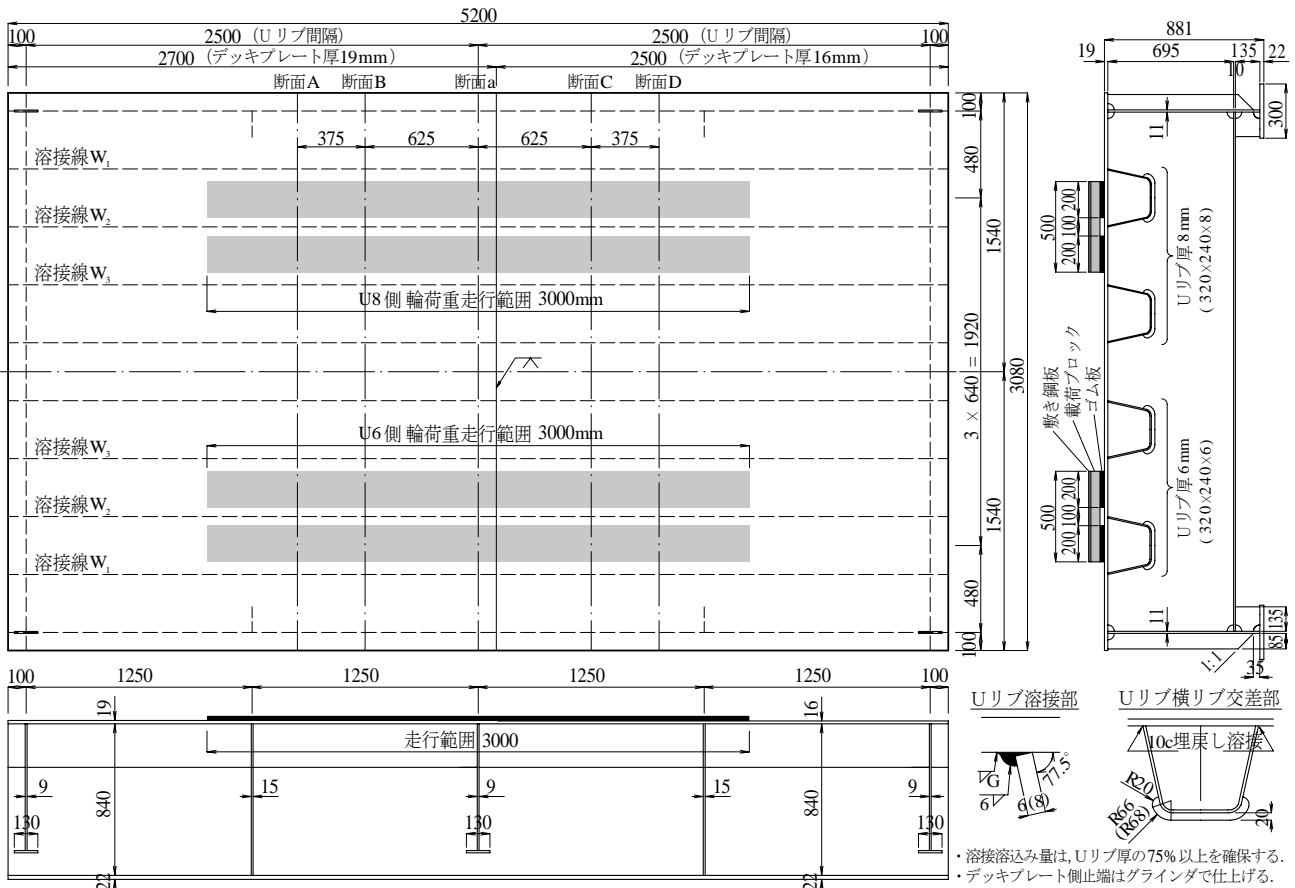


図-1 試験体図面

ており、Uリブと横リブとの交差部では上側スカラップを埋戻し、デッキプレートとUリブの溶接部ではUリブ厚の75%以上の溶込み量を確保している。開先形状は、6mm厚Uリブでは自然開先、8mm厚Uリブではこぼ面を2mm残し、47.5°の開先を設けた。なお、溶接は自動溶接機を用いてガスシールドアーク溶接 (Ar:80%、CO₂:20%) を行っており、同様の溶接条件で実施した溶接施工試験において、溶込み量がUリブ厚の75%以上になることを確認している。以後、試験対象をデッキプレート厚とUリブ厚を用いてDO、UOあるいはDOUOと略して表す。また、Uリブ支間を一般部、Uリブと横リブが交差する部分を交差部と呼ぶ。

2.2 試験方法

(1) 荷重方法

図-1に示した試験体のU6側とU8側とで、それぞれ400万回の輪荷重走行試験を実施した。輪荷重走行試験機は土研所有の輪荷重走行試験機2号機(黄色)を使用した。試験状況を写真-1に示す。

輪荷重は、鋼床版の設計活荷重140kN(T荷重に衝撃を考慮)を参考に150kNとした。荷重は、ダブルタイヤがUリブ溶接線直上を挟み込む状態を模して、鋼製載



写真-1 輪荷重走行試験の状況

荷ブロックの下に厚さ22mm、幅200mmのゴム板2枚を100mm離して置いた。橋軸方向の荷重範囲は3mとし、荷重速度は約15rpmで繰返し荷重した。

(2) 着目溶接部近傍のひずみゲージ配置

図-2に、断面A、B、a、C、Dにおける着目溶接部近傍の主要なひずみゲージの貼付位置を示す。着目溶接ビードの止端から5mmの位置にゲージ長1mmの一軸ゲージを橋軸直角方向に貼付した。なお、断面aは交差

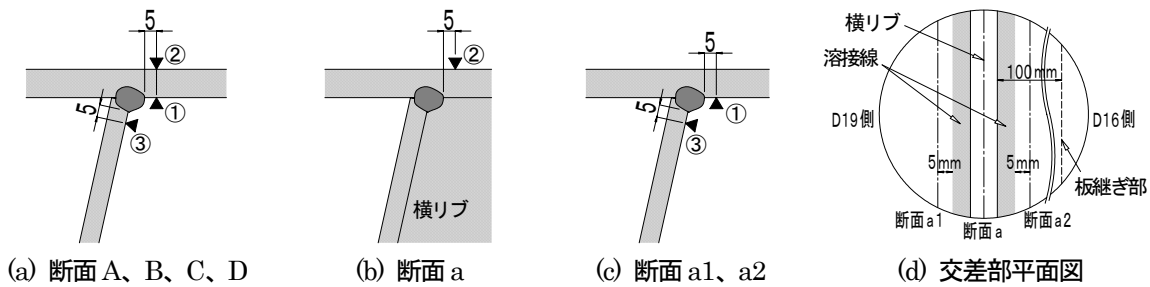


図-2 着目溶接線近傍の主要なひずみゲージの貼付位置

部であるため、U リブ外側の①、③のゲージは、図-2 (d)に示す断面 a1、a2 の位置に貼付した。断面 a1、a2 は、デッキプレートと横リブの溶接止端から、それぞれ D19 側、D16 側に 5mm 位置の断面である。

(3) き裂進展挙動の計測

本試験の主目的は、輪荷重下におけるき裂の発生・進展挙動の把握である。しかしながら、対象とするき裂は直接目視では確認困難な部位に発生するため、以下のとおり、試験中は各種計測を行うことにより間接的に捉えることとした。

1) 溶接部近傍のひずみの動的計測

ひずみ変化を把握するため、一般部の断面 A、B、C、D のゲージ①、②、③について動的計測を実施し、5 分間の最大・最小ひずみを記録した。

2) 溶接部近傍のひずみの静的計測

走行回数によるひずみ変化を把握するため、U6 側ではほぼ 25 万回毎に、U8 側ではほぼ 100 万回毎に、輪荷重走行を止めて静的載荷試験を実施した。計測対象は、全てのひずみゲージと変位計とした。載荷位置は、走行範囲の両端、A、B、a、C、D 断面の計 7 点とし、荷重は 0、50、100、125、150、125、100、50、0kN の 9 ステップで載荷した。

3) き裂の超音波探傷

静的載荷試験と同回数時に、表面 SH 波法とクリーピング波法による UT を行った。感度調整は、標準的な方法がないため、下記の方法によった。

- ・ 表面 SH 波法：標準試験片 STB-A2 の直径 4mm、深さ 4mm の孔の縁から 40mm の位置に探触子の先端を置き、エコー高さが 50%になるよう調整した後、6dB 感度を高めて設定
- ・ クリーピング波法：標準試験片 STB-A1 の幅 0.5mm、深さ 2mm のスリットから 18mm の位置に探触子の先端を置き、エコー高さが 50%になるように設定

探傷対象とした溶接線は、荷重直下の溶接線 W₂、主桁側の溶接線 W₁、試験体中心側の溶接線 W₃である (図

-1 参照)。探傷はデッキプレート下面から行うこととし、あらかじめ探触子の先端位置を合わせるための基準線をデッキプレート下面に引いた。デッキプレート下面と U リブ外面の交点から 20mm 位置を表面 SH 波法の基準線とし、10mm 位置をクリーピング波法の基準線とした。表面 SH 波法はエコーが安定するまで探触子を指で強く圧するなど、労力を要し連続探傷に不向きなため、溶接線 W₂は 65mm 間隔、溶接線 W₁および W₃では 125mm 間隔で測点を指定した。クリーピング波法は走行範囲全長にわたって探傷した。探傷時には、基本的に輪荷重を載荷していないが、U6 側の 104 万回時と 300 万回時のみ輪荷重を走行させながら UT を行った。

(4) 試験終了後のき裂発生状況の調査

1) デッキプレートのコア抜き調査

輪荷重走行試験後に、静的計測によりひずみが大きく変化した箇所や UT により高いエコーが検出された箇所を主な対象として、き裂の発生状況を直接確認するため、コア抜き調査を実施した。コアは、径 40mm のドリルを用いて採取し、磁粉探傷試験 (以下、MT) によりコア側面のき裂深さを計測した。また、き裂が確認されたコアについては、マクロ試験や、き裂面に沿って割り、破面観察を実施した。

2) 横リブ交差部の切り出し調査

コア抜き調査の結果、デッキ進展き裂は、U リブと横リブとの交差部のみで発生していることを確認した。そこで、交差部におけるき裂の範囲や形状を確認する目的で、交差部を切り出し、破面の観察を行った。

(5) その他の計測

1) 載荷方法の影響調査

鉄輪、敷き鋼板、載荷ブロックおよびゴム板を用いた本試験での載荷方法と実交通でのゴムタイヤ載荷との違いが着目溶接部近傍の応力性状に及ぼす影響を調査するため、断面 A、D の U6 側で静的載荷試験を実施した。載荷方法は以下に示す 4 ケースとした。

- (a) 鉄輪+敷き鋼板+載荷ブロック+ゴム板 (1 枚)
- (b) ゴムタイヤ (ダブルタイヤ)

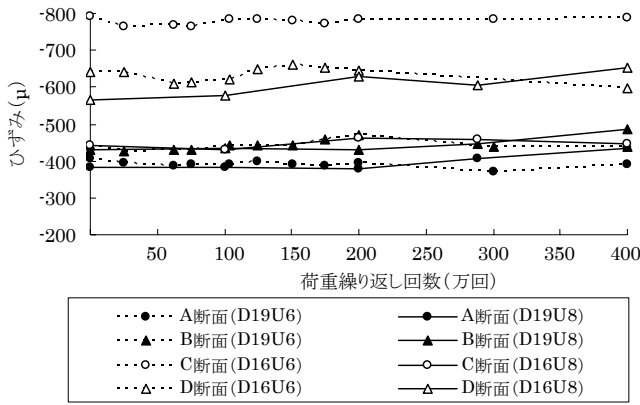


図-4 静的載荷試験による一般部のひずみ推移

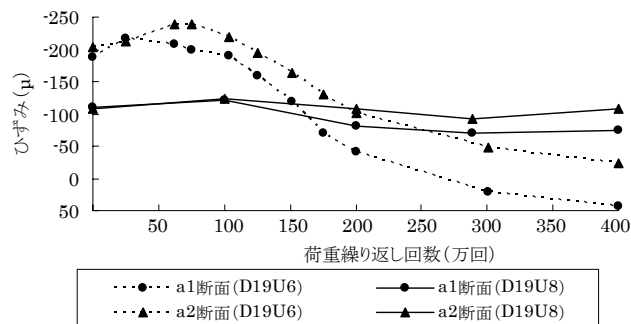


図-5 静的載荷試験による交差部のひずみ推移

(c) 鉄輪+載荷ブロック+ゴム板 (1枚、厚さ22mm)
 (d) 鉄輪+載荷ブロック+ゴム板 (2枚、厚さ44mm)
 荷重はゴムタイヤを除いて、0、50、100、125、150、125、100、50、0kNの9ステップで載荷した。ゴムタイヤでの載荷は、荷重が制限されるため、0、50、0kNとした。

2) 影響線の計測

FEM解析結果と比較する目的で、輪荷重走行試験前に無損傷状態での影響線を計測した。計測対象は、断面A、B、C、Dのゲージ①、②、③であり、動的計測により連続的なひずみ変化を測定した。計測は、鉄輪を1rpmで走行させた状態で行った。

2.3 試験結果

(1) 動的計測

一般部(断面A、B、C、D)においてひずみの動的計測を行った結果、ひずみ変動範囲は、どの計測位置においても輪荷重走行試験中に大きな変化はなかった。

(2) 静的計測

図-4に、一般部におけるゲージ①の静的計測結果の推移を示す。図中のひずみ値は着目断面の直上に150kNを載荷した時の値である。図より、一般部のひずみは輪荷重走行試験中にほとんど変化しないことが確認できる。

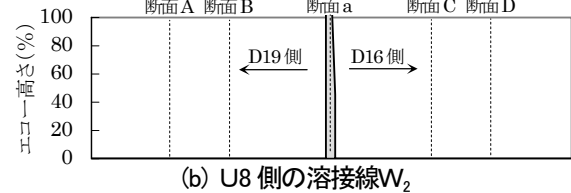
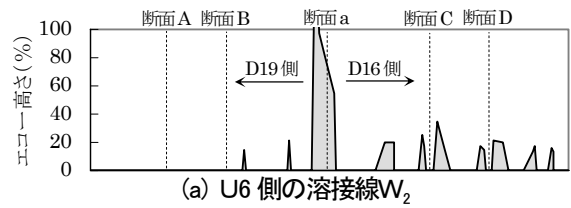


図-6 クリーピング波法によるエコー高さ分布

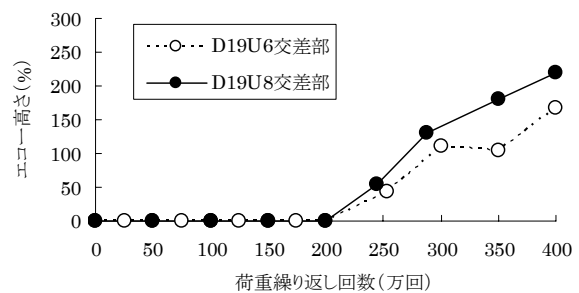


図-7 溶接線W₂の交差部におけるクリーピング波法によるエコー高さ推移

図-5に、交差部(図-2に示す断面a1、a2)におけるゲージ①の静的計測結果の推移を示す。D19U6のひずみは、試験開始時に約-200μで、断面a1では25万回、断面a2では75万回でピークとなり、ともに75万回以降大きく低下した。D19U8のひずみは、試験開始当初に-100μであり、載荷回数とともに緩やかに低下し、400万回時では-90μとなった。後述するように、交差部近傍では、デッキ進展き裂の発生が確認されており、ひずみの低下はき裂の発生・進展によるものと考えられる。

(3) 超音波探傷

図-6に、溶接線W₂における輪荷重走行試験後のクリーピング波法によるエコー高さの分布を示す。図に示すように、U6側、U8側ともに交差部(断面a)で高いエコーが検出された。

図-7に、溶接線W₂の交差部におけるクリーピング波法によるエコー高さの推移を示す。U6側、U8側ともに載荷回数が250万回程度から増加が始まり、載荷回数の増加とともに高くなることを確認できる。一般部では、エコー値が小さく、顕著な変化も見られなかった。

溶接線W₁では、溶接線W₂と同様の結果が得られたが、溶接線W₃では、一般部および交差部において高い

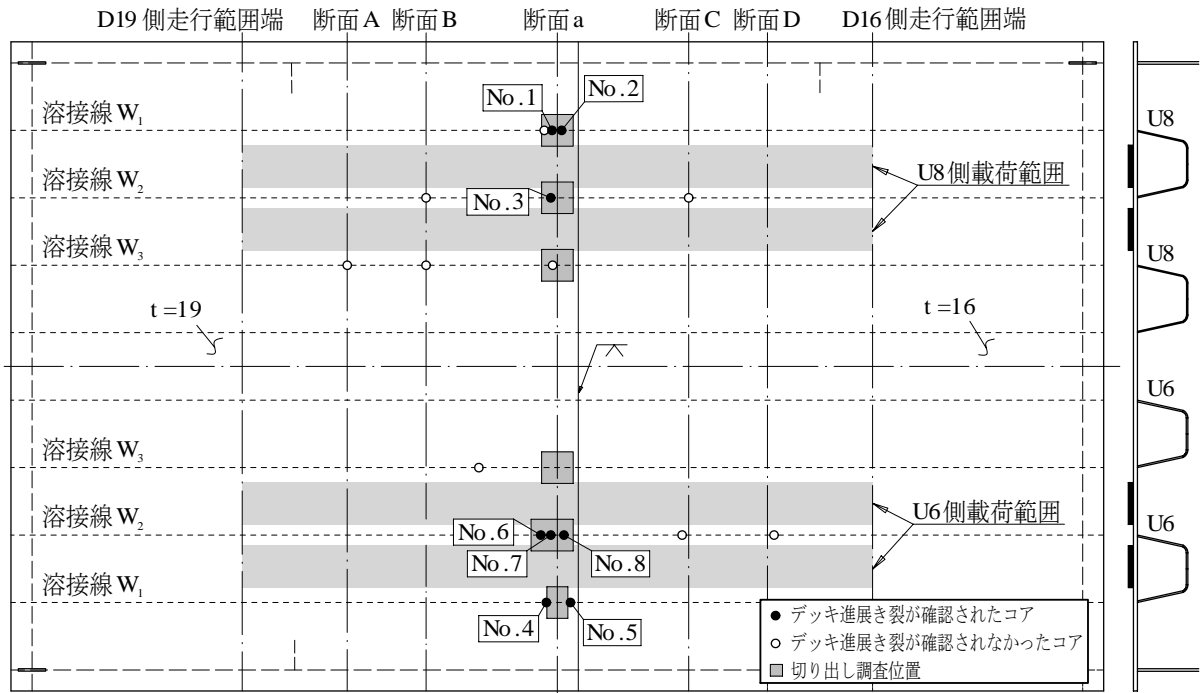


図-8 コア抜き調査位置と切り出し調査位置

表-1 コアのMTによるき裂深さ

コア抜き位置		コア抜き結果		備考
		き裂深さ (mm)		
		D19側	D16側	
U8側 交差部	No.1	7.5	13.3	
	No.2	13	0	
	No.3	0	8	
U6側 交差部	No.4	0	12.5	
	No.5	12	0	
	No.6	11	14	
	No.7	14.5	14.5	
	No.8	13.5	3.5	

エコーは検出されなかった。

(4) 試験終了後のき裂発生状況の調査

1) デッキプレートのコア抜き調査

図-8にコア抜き位置を示す。図中の黒丸はデッキ進展き裂が確認されたコアの位置であり、白丸はデッキ進展き裂が確認されなかったコアの位置である。デッキ進展き裂は、U6側、U8側ともに溶接線 W₁、W₂の横リブ交差部で確認された。

表-1に、き裂が確認されたコアについて、コア側面のデッキプレートの厚さ方向のき裂深さをMTにより計測した結果を示す。写真-2に、U6側のコア No.7におけるマクロ試験の結果を示す。き裂がデッキプレート板厚方向に斜めに進展していることが確認できる。写真-3に、コア No.4 をき裂面に沿って割った結果を示す。コアの左右で疲労破面の高さが異なることが確認できる。

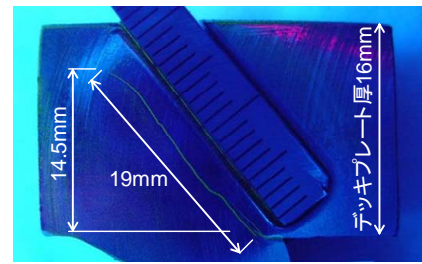


写真-2 コア No.7のマクロ試験結果

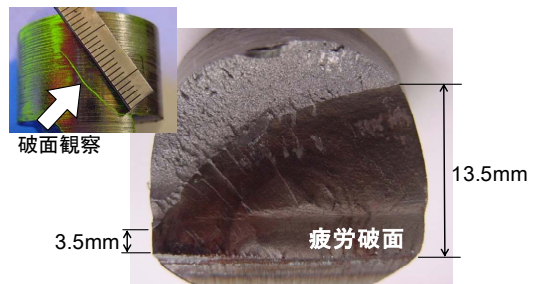


写真-3 コア No.4の破面観察結果

2) 横リブ交差部の切り出し調査

切り出し調査の実施位置を図-8に示す。破面観察の結果、疲労き裂は、U6側、U8側ともに溶接線 W₁、W₂で確認されたものの、溶接線 W₃では確認できなかった。

図-9に切り出し調査およびコア抜き調査の結果から交差部におけるき裂の形状を整理した結果を示す。図中の実線は切り出し調査の結果を示し、破線はコア抜き調査の結果から推定したき裂形状を示している。図より、

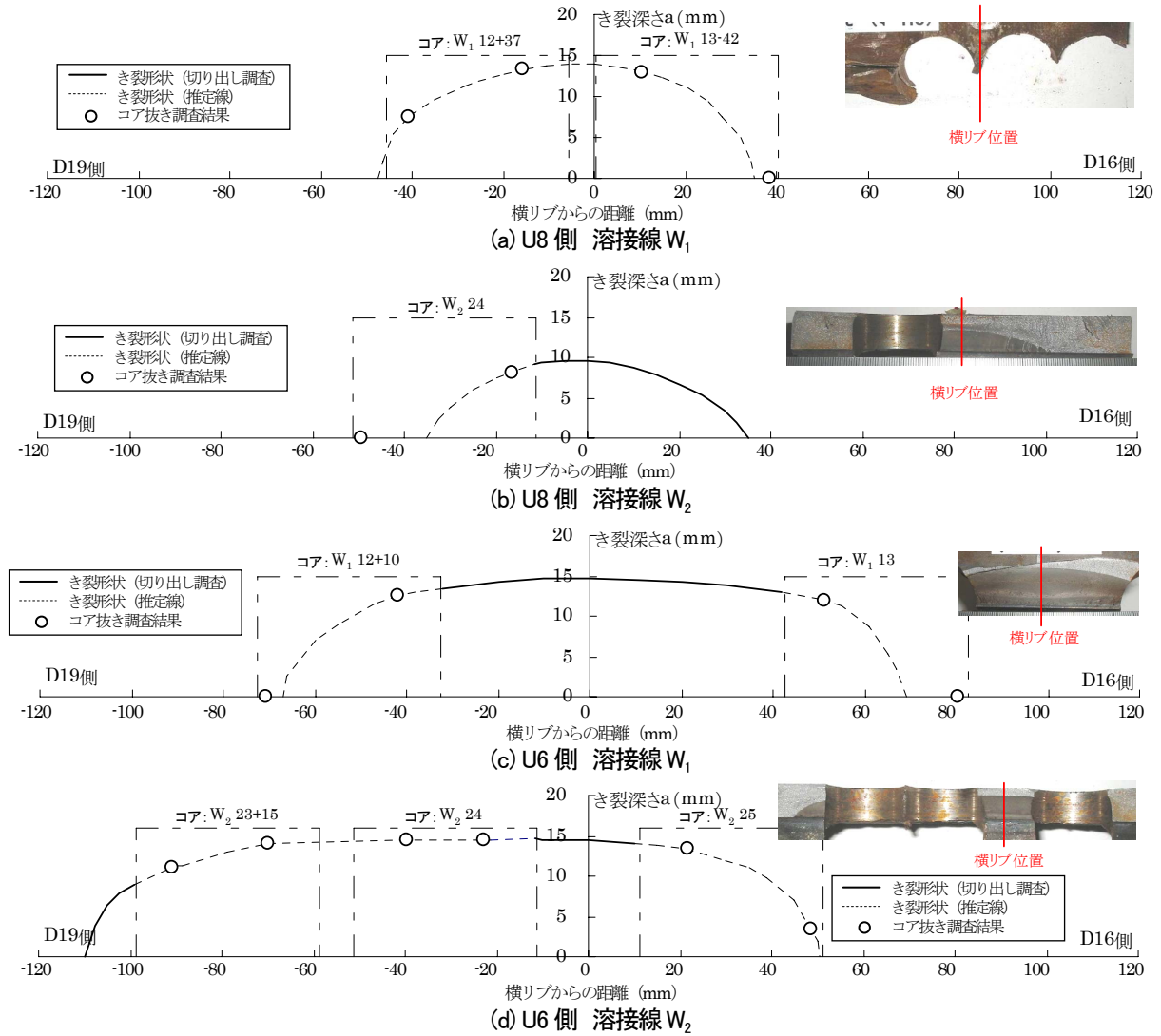
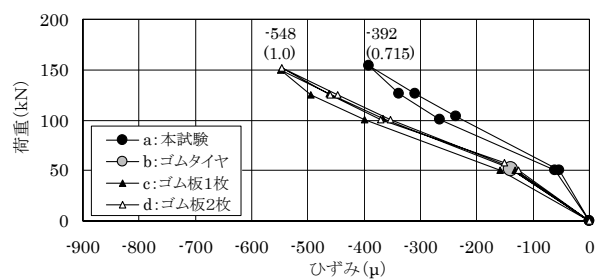


図-9 横リブ交差部のき裂形状

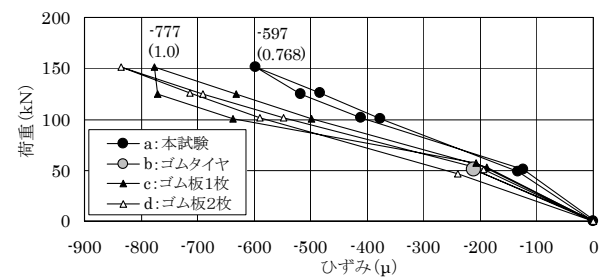
き裂の形状は横リブを中心に半楕円状であることが確認できる。すなわち、本試験におけるデッキ進展き裂は、横リブ位置から発生し、デッキプレートの厚さ方向に対しては写真-2に示すように斜め方向に、橋軸方向に対しては半楕円状に進展したと考えられる。

(5) 荷重方法の影響調査

図-10に、断面A、Dのゲージ①におけるひずみの計測結果を示す。断面A、Dともに本試験で用いた荷重方法のケースaでのひずみが最も小さく、他の3ケースが同程度であった。ケースaと他の3ケースの違いは敷き鋼板の有無であり、敷き鋼板を有するケースaでは、橋軸方向の荷重分散が生じていると考えられる。ゴムタイヤ荷重のケースbは50kNまでであるが、ゴム板1枚のケースcと同様の傾向がみられる。そこで、ルート部のひずみと相関性の高いゲージ①のひずみについて、ケースaとケースcの結果を用いて荷重分散の影響を評価



(a) 断面A (D19U6)



(b) 断面D (D16U6)

図-10 荷重方法の影響調査

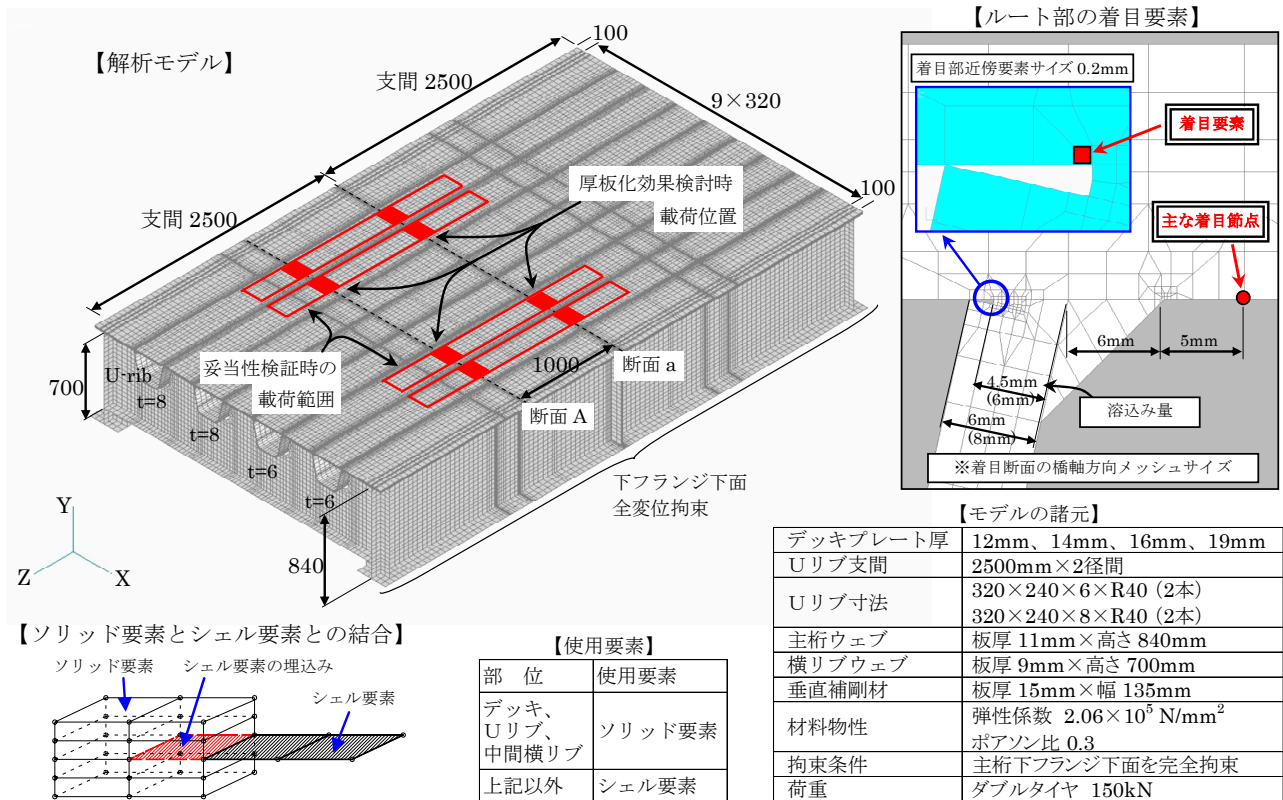


図-11 解析モデルの諸元および要素分割

すると、本試験での荷重方法によるひずみは、ゴムタイヤ荷重のひずみの約0.74倍と考えられる。

3. FEM 解析

3.1 解析モデル

FEM 解析に用いたモデルは、図-11に示すように、輪荷重走行試験に用いた試験体の構造寸法とあわせており、デッキプレート厚のみを12、14、16、および19mmと変化させた。荷重も輪荷重走行試験と同様に、ダブルタイヤが U リブウェブを跨ぐ位置に荷重した。輪重は150kN とし、1 タイヤ分の荷重 75kN を 200mm×200mm の荷重面に等分布で作用させた。荷重位置は、断面 A (一般部) および断面 a (交差部) の U6 側と U8 側の4箇所である。デッキプレートと U リブの溶接部は、すみ肉の脚長を 6mm とし、溶け込み量は 75%とした。本検討におけるルート部の着目要素の要素寸法は、0.2×0.2×0.5mm とした。また、モデル妥当性を検証する際には、図中の着目節点の橋軸直角方向の直ひずみを用いた。なお、FEM 解析においては要素分割の影響に留意する必要があるため、着目要素の周辺の要素寸法を若干変化させて解析を実施したところ、着目要素に発生する最小主応力の変化は 1%以内であることを確認している。

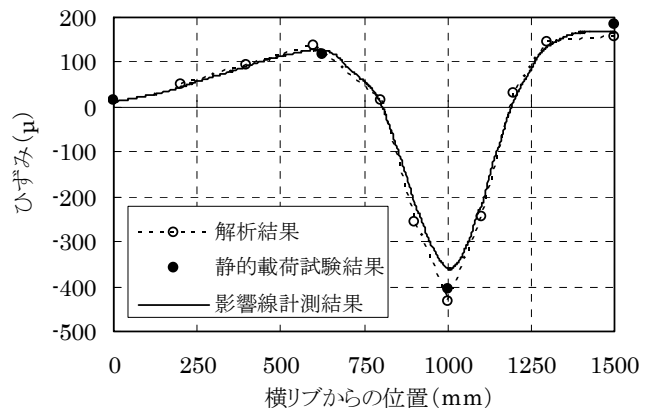


図-12 D19U6におけるデッキ側止端5mm位置のひずみの影響線

3.2 解析結果

(1) 解析モデルの妥当性の検証

以下に示す2つの解析結果と試験結果の比較により解析モデルの妥当性を確認した。

1) 輪荷重移動時のひずみ挙動

図-12に、D19U6を対象として、輪荷重を橋軸方向に移動させた時の断面Aでの着目節点ひずみの解析結果を示す。図中には、影響線測定および静的荷重試験(輪荷重走行試験前)におけるゲージ①での測定結果も示す。解析結果と測定結果は、直上荷重時に若干の差が見られるものの、概ね一致していることが確認できる。

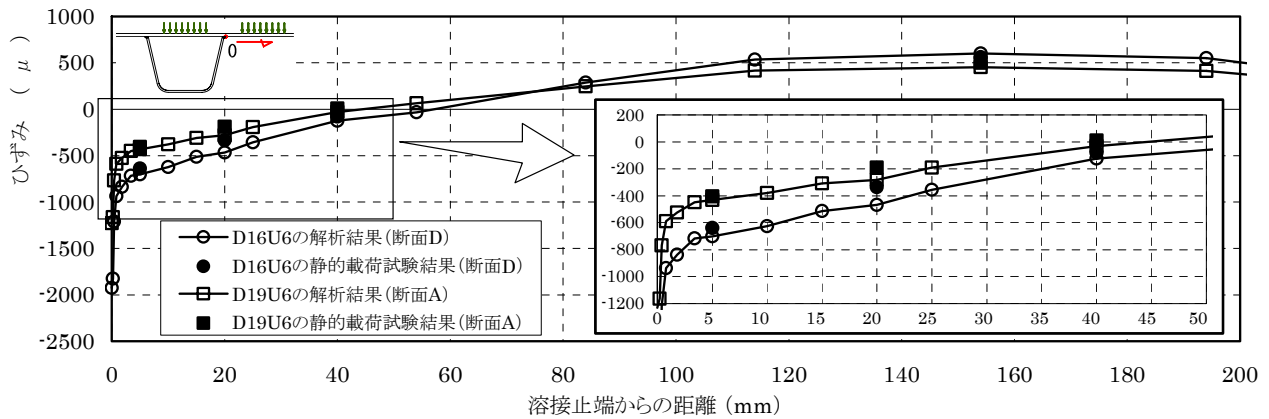


図-13 D19U6 および D16U6 におけるデッキプレート下面での橋軸直角方向ひずみ分布

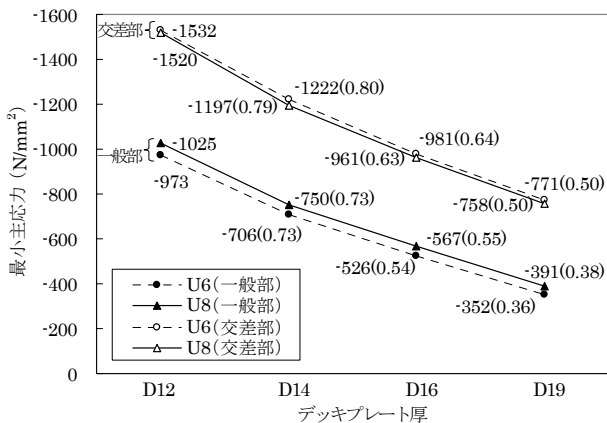


図-14 解析結果(デッキプレート厚と最小主応力の関係)

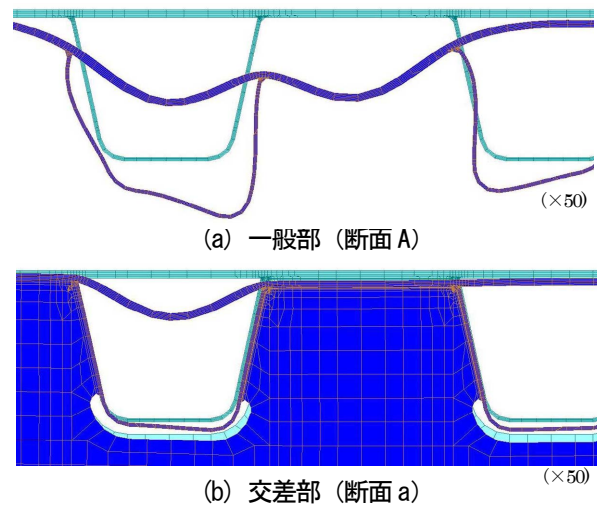


図-15 一般部と交差部の変形図(D12U6)

2) 直上荷重時の溶接線近傍のひずみ分布

図-13に、D19U6 および D16U6 を対象として、断面Aで直上荷重した時のデッキプレート下面での橋軸直角方向ひずみ分布の解析結果を示す。図中には、輪荷重走行試験前に実施した静的荷重試験の結果もプロットしており、図-2で示したゲージ以外の結果も用いている。解析結果は、測定結果の傾向と概ね一致していることが確認できる。

(2) デッキプレート厚板化の効果

着目するルート部では、直上荷重時にデッキプレートの局所的な負曲げにより圧縮応力が生じるため、絶対値としては、最大主応力よりも最小主応力の方が大きくなる。図-14に、デッキプレート厚ごとに最小主応力を整理した結果を示す。図中では、D12の発生応力に対する比率を括弧内に示した。デッキプレートを厚板化することで、ルート部の応力が大きく低減することが確認できる。Uリブ厚についてU6とU8を比較すると、交差部ではほぼ同じであるが、一般部ではU6よりもU8の主応力の絶対値が若干大きい。図-15に一例としてD12U6における一般部と交差部の変形図の比較を示す。一般部では、Uリブとデッキプレートが一体的に変形し

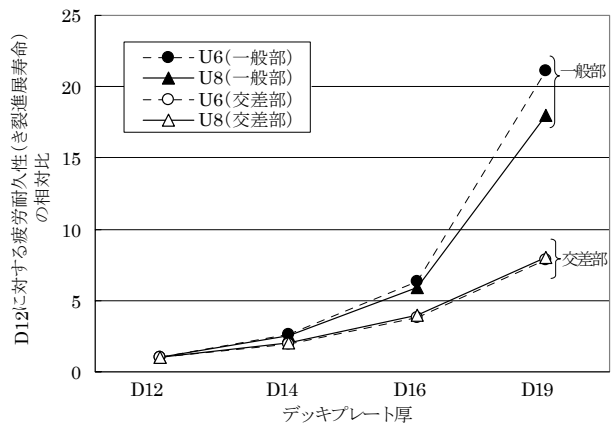


図-16 解析結果による疲労耐久性の相対比較

ており、局部応力はUリブ剛性の影響を受けることになる。一方、交差部では、横リブにより支持されているため、局部応力はUリブの剛性の影響をほとんど受けずに、主にUリブ内でのデッキプレート部分の面外曲げの影響を受けることになる。

FEM 解析結果に線形累積被害則 (べき乗指数 $m=3$) を適用することにより、D12に対する疲労耐久性 (き裂

表-2 本試験および既往の輪荷重走行試験の概要

		本研究 試験体						既往の実験									
試験実施機関		(独)土木研究所						D		K		S				H	
対象部位		一般部	一般部	交差部 スカップ無	一般部	一般部	交差部 スカップ有	一般部	一般部	一般部	一般部	一般部	交差部 スカップ有	一般部	交差部 スカップ有	一般部	
供試体	サイズ	D16U6	D19U6	D19U6	D16U8	D19U8	D19U8	D12U6	D12U8	D12U8	D14U6	D12U8	D12U8	D12U8	D12U8	D12U6	
	鋼種	SM490Y						SM490Y		SM490		デッキプレート:SM490Y Uリブ:SM490		不明		SM490	
	Uリブ寸法(mm)	320×240						320×240		320×240		310×230		310×230		320×240	
	Uリブ間隔(mm)	640						640		640		620		620		570	
	横リブ間隔(mm)	2,500						2,750		2,500		2,750		2,750		2,400 + 1,181	
載荷方法	載荷荷重(kN)	150						150		118		69		69		118	
	載荷輪	鉄輪						鉄輪		鉄輪		ゴムタイヤ		ゴムタイヤ		鉄輪	
	載荷幅(mm)	2×200 間隔100 (ダブルタイヤ模擬)						2×200 間隔100 (ダブルタイヤ模擬)		2×175 間隔150 (ダブルタイヤ模擬)		ダブルタイヤ (ケンデム輪)		ダブルタイヤ (ケンデム輪)		面積計 300×120 (ダブルタイヤ模擬)	
デッキプレートとUリブの溶接方法	溶接方法	自走CO ₂ アーク溶接 1層			自走CO ₂ アーク溶接 2層			自走CO ₂ アーク溶接 1層	自走CO ₂ アーク溶接 2層	自走CO ₂ アーク溶接 2層	1層:自走CO ₂ アーク溶接 2層:手棒溶接		-		-		
	開先	無			47.5°			無	35°	45°	45°		-		-		
	溶け込み	75%						75%		75%		50%		50%		25%~30%	
	止端処理	グラインダ						グラインダ		未処理		-		-		-	
デッキプレート側止端5mm位置の応力度(N/mm ²)	最大値	33	31	2	24	23	1	18	17	29	31	8 ^{※1}	0	データ無	データ無	データ無	
	最小値	-70	-109	-41	-86	-131	-24	-267	-268	-239	-133	-165 ^{※1}	-73 ^{※1}	データ無	データ無	データ無	
	応力範囲	103	140	43	110	155	25	285	285	267	163	173 ^{※1}	73 ^{※1}	データ無	データ無	データ無	
試験終了時載荷回数(万回)	400	400	400	400	400	400	414	189	300	300	292	584 (貫通時545)	400	400	96		
試験終了後のき裂の確認状況	き裂深さ(mm)	未発生	未発生	14.6	未発生	未発生	9.7	未発生	6.3	6.9	7.0	9.0	12.0 (貫通)	発生したが、未計測	未発生	5.0	
	き裂長さ(mm)			156			70		120	380	550	87	531 (貫通時524)			140	
ダブルタイヤ換算載荷荷重(kN) ^{※2}	111						111		87		69		69		87		
100kN換算した試験終了時載荷回数(万回) ^{※3}	549	549	549	549	549	549	568	259	200	200	96	192 (貫通時179)	131	131	64		
参考文献							1)		4)		5), 6)		7)		8)		

注記 1) 首都高速道路(株)では、ひずみ計測位置がデッキプレート側止端5mm位置ではなかったため、有限要素解析により比率を求め、試験結果を補正した。

注記 2) ダブルタイヤ換算載荷荷重では、鉄輪での載荷荷重に対して0.74の補正係数を考慮した(載荷方法の比較試験結果より)。

注記 3) 100kN換算した試験終了回数 = (ダブルタイヤ換算載荷荷重³ / 100³) × 試験終了時載荷回数

進展寿命)の相対比較を行った結果を図-16に示す。すなわち、図-14における比の逆数を3乗したものに相当する。D12に対して、一般部ではD14で2.5倍程度、D16で6倍程度、D19で20倍程度に、交差部ではD14で2倍程度、D16で4倍程度、D19で8倍程度になった。なお、既設の鋼床版橋梁ではD12が一般的に使用されており、重交通路線の供用後20年程度が経過した鋼床版橋梁の一部において、デッキ貫通き裂が発見されているが、解析結果によればデッキプレートの厚板化によりき裂の進展を確実に遅くできると考えられる。疲労耐久性の向上効果および経済性を考慮すると、輪荷重直下においてはデッキプレート厚16mm以上とするのが適当と思われる。Uリブ厚については、交差部ではU6に比べてU8の発生応力が若干小さいが、一般にU8はU6よりも溶着金属量が多くなり、開先を設け2パスによる溶接が多いため、施工品質の確保や残留応力に留意する必要がある。

4. 既往の輪荷重走行試験結果との比較

表-2に、本試験および既往の研究^{5~10)}における輪荷

重走行試験について、試験内容を整理した結果を示す。いずれの試験も、デッキ進展き裂に着目しており、Uリブウェブをダブルタイヤが挟み込む載荷方法としている。表中のダブルタイヤ換算荷重とは、鉄輪での載荷荷重をダブルタイヤでの載荷荷重に換算したものであり、鉄輪載荷時の敷き鋼板による橋軸方向の荷重分散効果に配慮したものである。本研究では、2.3(5)の図-10に示したように、鉄輪載荷とダブルタイヤ載荷を比較し、デッキプレート側止端5mm位置のひずみ比が0.74となることを確認している。そこで、鉄輪での載荷荷重にこの比を乗じてダブルタイヤ換算荷重を算出した。100kN換算した試験終了時載荷回数とは、各試験の載荷荷重を100kNに換算した場合の試験終了時の載荷回数であり、ここでは線形累積被害則(べき乗指数m=3)が成立するものと仮定して算出した(表の注記3)参照)。その他の表中のデータは文献から引用した。なお、試験実施機関Sの試験体における交差部を除く試験結果は、き裂がデッキプレートを貫通する前に試験を終了していることから、ここでは試験終了時の載荷回数と終了後に確認されたき裂深さの関係を調べることにした。

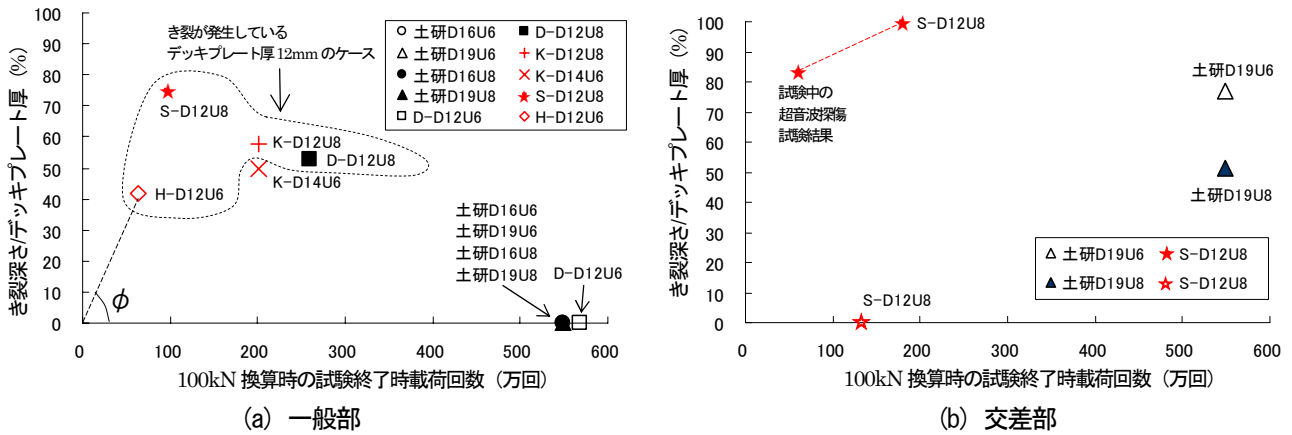


図-17 デッキプレート厚に対するき裂深さと100kN換算時の試験終了時載荷回数との関係

図-17に、100kN換算した試験終了時載荷回数とデッキプレート厚に対する試験終了時のき裂深さの関係を示す。図中のプロットと原点を結んだ線の角度 ϕ は試験中のき裂の平均的な進展速度を表していることになる。

図-18に、デッキプレート厚ごとに平均き裂進展速度 ϕ を整理した結果を示す。一般部、交差部ともにデッキプレートが厚くなるにつれて、進展速度が遅くなる傾向がみられる。なお、各試験体におけるき裂の発生・進展性のばらつきの要因としては、構造寸法、溶接方法、あるいは荷重方法等が考えられるが、今回の検討では特定できなかった。

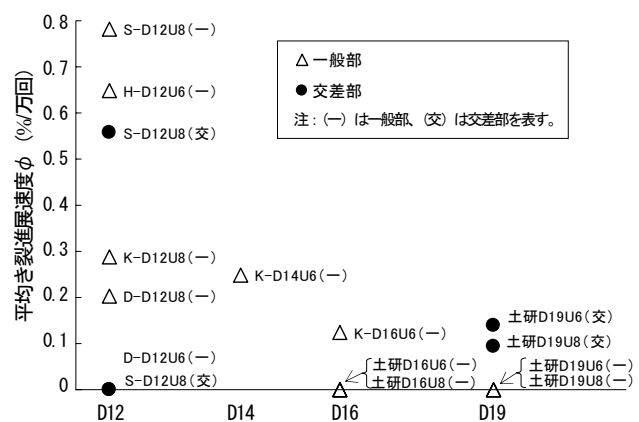


図-18 デッキプレート厚と平均き裂進展速度の関係

5. まとめ

本研究では、新設の鋼床版の構造ディテールの見直しの必要性、予防策としてのデッキプレート厚板化による疲労耐久性向上効果について検討するため、デッキプレート厚16、19mmとUリブ厚6、8mmを組み合わせた実大鋼床版試験体を用いて、輪荷重走行試験（輪荷重：150kN、載荷回数：400万回）を実施した。試験中のき裂の進展挙動を把握するため、定期的に走行試験を停止させ静的荷重試験および超音波探傷試験を実施するとともに、試験終了後に破面観察によりき裂の進展状況を確認した。また、同試験体を対象として厚板化の効果を確認するためにFEM解析を実施した。

輪荷重走行試験では、デッキプレート厚19mmの横リブ交差部で横リブ位置を中心とする半楕円状のデッキ進展き裂が確認された。試験終了後の破面観察によると、U6側のき裂は深さ14.6mm、長さ156mm、U8側のき裂は深さ9.7mm、長さ70mmであった。一方、一般部では、き裂は発見されなかった。また、本研究および既往の試験結果を用いて、き裂の進展性状の検討を行った結果、デッキプレートの厚板化によるき裂進展の抑制効

果を確認した。

FEM解析では、デッキプレート厚12、14、16および19mmのモデルについて解析を実施し、デッキプレートの厚板化によりき裂発生に関係すると考えられるルート部の局所応力が低減することを確認した。また、線形累積被害則（べき乗指数 $m=3$ ）を適用して疲労耐久性の相対比較を行ったところ、デッキプレート厚12mmに対して、一般部では14mmで2.5倍程度、16mmで6倍程度、19mmで20倍程度に、交差部では14mmで2倍程度、16mmで4倍程度、19mmで8倍程度であった。

最後に、本研究における輪荷重走行試験の結果によれば、デッキプレートを厚板化しても交差部においてき裂の発生を完全に防ぐことができなかったが、少なくとも厚板化によりき裂の進展速度が明らかに遅くなる傾向がみられ、疲労耐久性の向上が期待できることを確認した。

参考文献

- 1) 村越, 有馬: 鋼床版における最近の疲労損傷事例と対策に関する検討—デッキプレート内進展き裂を対象として—, 第5

回道路橋床版に関するシンポジウム論文集, 2006.7.

- 2) 村越 潤, 梁取 直樹, 宇井 崇: 鋼床版の疲労損傷と補修・補強技術に関する検討, 第 10 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 2007.8.
- 3) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.3.
- 4) 川畑, 井口, 廣中, 鈴木, 齋藤: 鋼床版のデッキプレートと縦リブ溶接部を対象とした移動輪荷重載荷試験, 第 5 回道路橋床版に関するシンポジウム論文集, 2006.7.
- 5) 首都高速道路公団, (財)首都高速道路技術センター: 首都高速道路の鋼構造物の点検・補修・補強に関する調査研究(平成 16 年度) 報告書, 2005.3.
- 6) 下里, 神木, 稲葉, 富田, 小野: 鋼床版の移動輪荷重疲労試験, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, 2005.9.
- 7) 首都高速道路株式会社, (財)首都高速道路技術センター: 首都高速道路の鋼構造物の点検・補修・補強に関する調査研究(平成 18 年度) 報告書, 2006
- 8) 高田, 平野, 坂野, 松井: 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 5 回道路橋床版に関するシンポジウム論文集, 2006.7.

RESEARCH ON FATIGUE DESIGN OF ORTHOTROPIC STEEL DECK

Abstract : In this research, the effect of thickness of deck plate was examined in order to improve fatigue durability of orthotropic steel deck. Fatigue crack at weld root of trough ribs are thought to be caused by stress concentration due to local bending of deck plate on the weld. Thicker deck plate is expected to reduce local bending and to be a preventative method for orthotropic steel deck bridges against fatigue.

The test specimen of this research had combinations of 16mm and 19 mm thickness deck plates and 6mm and 8mm thickness trough ribs. Wheel running tests with 4 million times loading were conducted on each parts of the deck. After the tests, the crack propagations from weld root were observed by sampling test. There are cracks only at the intersection of trough ribs and transverse ribs, but no crack initiations between transverse ribs. 3D FE Analysis was also conducted in order to examine the effect of thickness of deck plates, and it was clarified that as deck plate becomes thicker, local stress at weld root becomes smaller. In the comparisons of wheel running test results between this research and other organizations, it was confirmed that the crack propagation was delayed by using the thicker deck plate.

Key words : orthotropic steel decks, fatigue, design, wheel trucking test, ultrasonic test, FEM