

## 戦-22 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（道路整備勘定）

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：構造物研究グループ（橋梁）

研究担当者：村越潤、梁取直樹、宇井崇

### 【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、新設の鋼床版橋梁における予防策の 1 つになりうると考えられる。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、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

鋼床版において、デッキプレートと U リブとの溶接の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）の発生事例が報告されている。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。

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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>を実施している。

本研究は、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、疲労に配慮した構造ディテールの検討を行うものである。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<sup>3)</sup>、この局所的な板曲げを防ぐには鋼床版の板曲げ剛度を増加させることが効果的と考えられる。このため、デッキプレート厚を 16mm、19mm とした場合の疲労耐久性向上効果について、実大試験体を用いた輪荷重走行試験と FEM 解析により検討した。

平成 19 年度は、8mm 厚 U リブ側での 400 万回の輪荷重走行試験を実施した。また、過年度に試験を実施した 6mm 厚 U リブ側の溶接部をコア抜きし、き裂発生状況と超音波探傷試験（以下、UT）結果との対比を行った。

### 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。

「鋼道路橋の疲労設計指針」（日本道路協会、平成 14 年）<sup>4)</sup>に従い、試験体のデッキプレートと U リブとの溶接の溶込み量が 75%以上になるように製作した。溶接は自動溶接機を用いており、同様の溶接条件において実施した溶接施工試験において溶込み量 75%以上を確保できることを確認している。

#### 2.2 試験方法

##### (1) 載荷方法

図-1に示した試験体の 6mm 厚 U リブ側と 8mm 厚 U リブ側とで、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（独）土木研究所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。

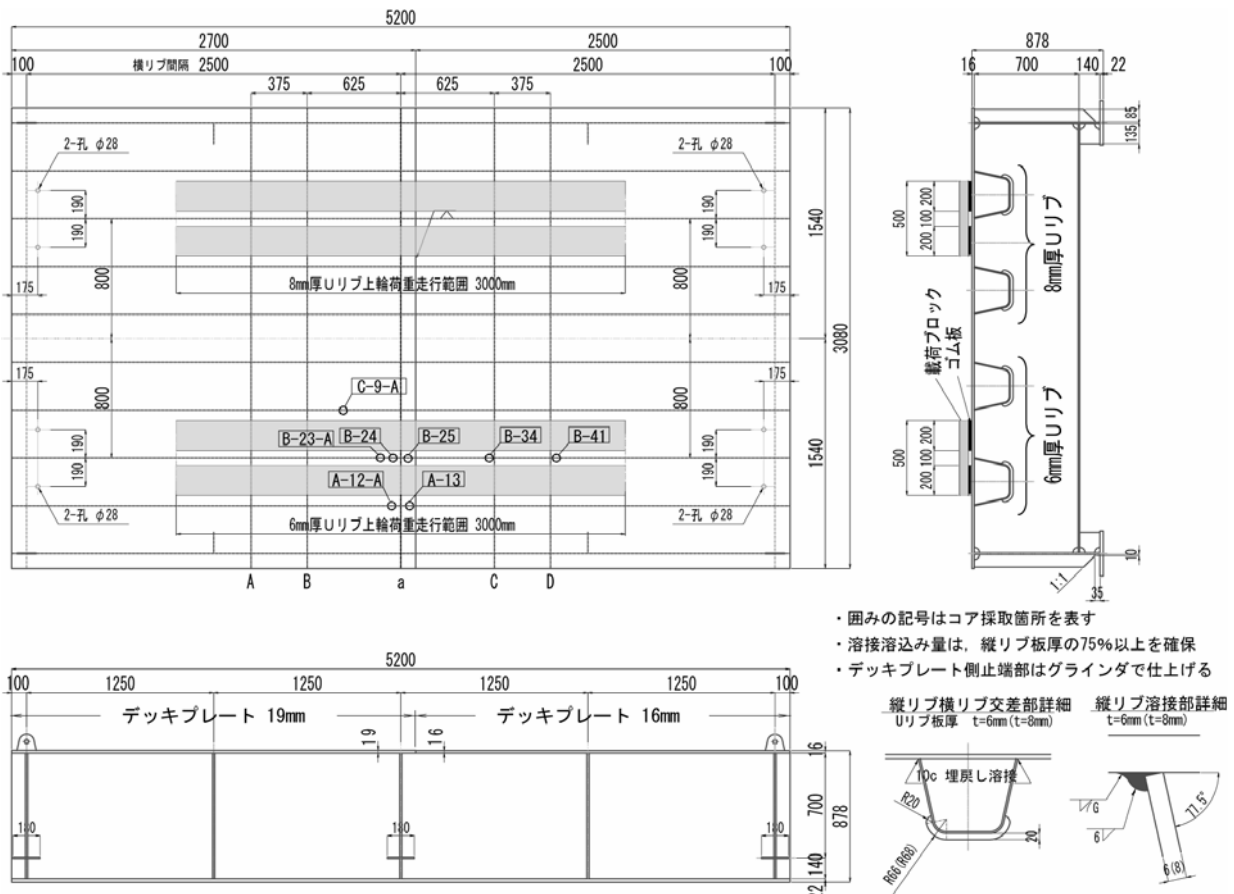


図-1 試験体図面



図-2 着目溶接線近傍のひずみゲージ配置

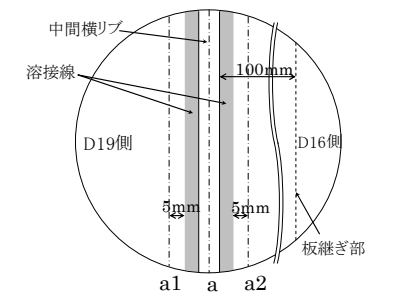


図-3 Uリブと横リブとの交差部

輪荷重は、既往の車重計測結果<sup>5)</sup>や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。载荷は、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、鋼製载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。橋軸方向の载荷範囲は 3m とし、载荷速度は約 15rpm で繰返し载荷した。

## (2) 着目溶接部近傍のひずみゲージ配置

図-1の A、B、a、C、D 断面における、着目溶接部近傍のひずみゲージ貼付位置を図-2に示す。着目溶接ビードの止端から 5mm、40mm 等の位置にゲージ長 1mm の一軸ゲージを橋軸直角方向に貼付した。なお、a



写真-1 輪荷重走行試験の状況

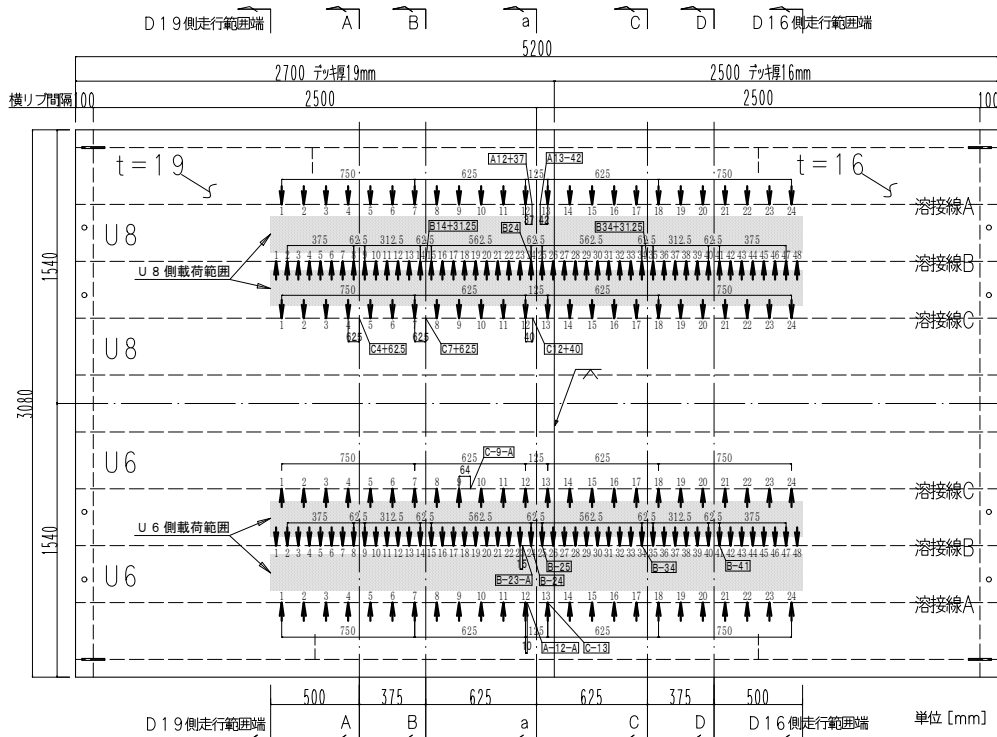


図-4 UTの測点番号とコア採取箇所

断面は、Uリブと横リブとの交差部であるため、図-2のUリブ外側の①、②、⑥、⑦等のゲージは、図-3に示すa1、a2断面の位置に貼付した。a1、a2断面は、デッキプレートと中間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。a1、a2断面上では横リブウェブ上のデッキプレートの曲げにより橋軸方向成分ひずみが生じるものと考えられるが、A、B断面等一般部の橋軸直角方向ひずみと比較可能なように、これらの断面上でも橋軸直角方向に1軸ゲージを貼付した。

### (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ことから、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、試験後はコア抜き（破壊試験）により直接確認することとした。

#### 1) 溶接部近傍のひずみの動的計測

荷重位置によるひずみの変化を把握するため、動的計測により影響線を作成した。後述の静的計測では橋軸方向の荷重位置に限られるため、輪荷重を走行させながらデジタルデータレコーダ（DDR）を用いて、ほぼ連続的なひずみ変化を計測した。輪荷重走行前に実施し、対象ゲージは、図-2におけるA、B、C、D断面の①、⑤、

⑥等とした。

#### 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の変化を把握するため、6mm厚Uリブ側ではほぼ25万回毎に、8mm厚Uリブ側ではほぼ100万回毎に、輪荷重走行を止めて静的荷重試験を実施した。計測対象は、全てのひずみゲージと変位計とした。荷重位置は、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ステップで荷重した。

#### 3) き裂の超音波探傷

静的荷重試験と同回数時に、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および探傷箇所を図-4に示す。荷重直下の溶接線B、主桁側の溶接線A、試験体中心側の溶接線Cを対象とした。探傷は主にデッキプレート下面側から行うこととし、あらかじめ探触子の先端位置を

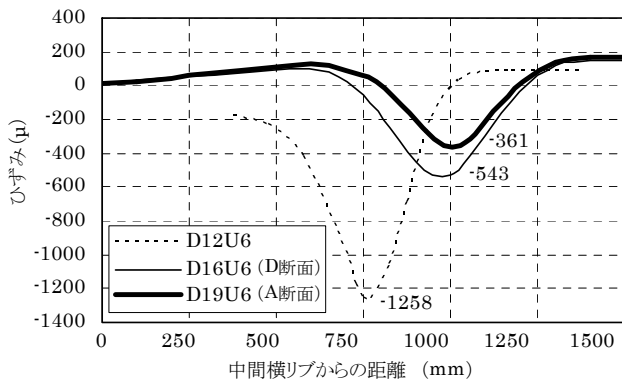


図-5 動的計測による影響線(デッキ止端5mm)

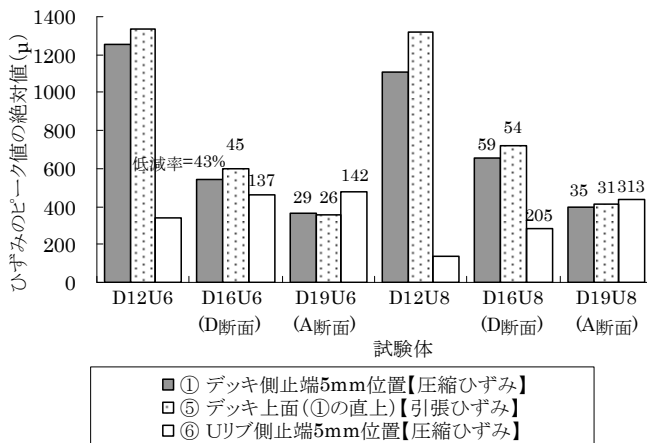


図-6 動的計測によるひずみ最大値

合わせるための基準線をデッキプレート下面側に引いた。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压するなど、労力を要し連続探傷に不向きなため、溶接線 B は 65mm 間隔、溶接線 A および C 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。

探傷試験時は、輪荷重は基本的に載荷していない。6mm 厚 U リブ側の試験中の 104 万回時と 300 万回時のみ輪荷重を走行させながら UT を実施した。

### 2.3 試験結果

#### (1) 動的計測

以後、試験対象をデッキプレート厚と U リブ厚を用いて DOUO と表す。また、ここでは D16U6 の D 断面、D19U6 の A 断面、および過年度に実施した D12U6 の中間横リブから約 750mm 位置に貼付したゲージの結果を示す。

図-5には、6mm 厚 U リブ側の動的計測により得られたデッキ側止端 5mm 位置 (図-2の①) のひずみの

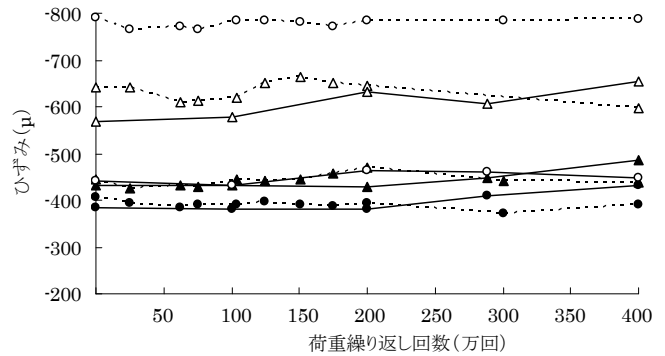


図-7 静的載荷試験による一般部のひずみ推移

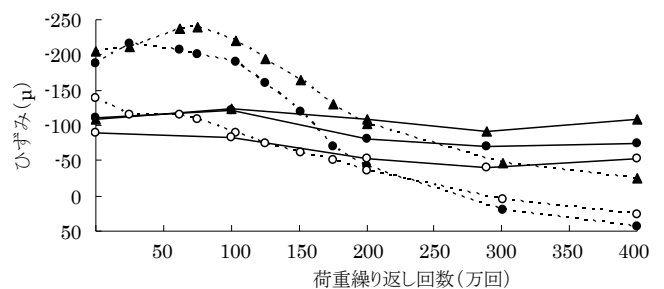


図-8 静的載荷試験による交差部のひずみ推移

影響線を示す。これによれば、ピーク値は、輪荷重が計測位置の直上に載荷されたときに生じており、デッキプレートが厚くなるほどひずみのピークの絶対値が小さくなる事が分かる。

次に、デッキ側止端 5mm 位置 (図-2の①)、デッキ上面 (図-2の⑤)、および U リブ側止端 5mm 位置 (図-2の⑥) のひずみのピーク値について整理した結果を図-6に示す。図-5と同様に、ゲージを貼付した着目断面のほぼ直上に載荷したときにピーク値が得られている。図中には、6mm 厚 U リブ側、8mm 厚 U リブ側それぞれで D12U6 あるいは D12U8 に対する応力の比 (低減率) を併せて示す。き裂が発生するルート部の応力と相関性が高いデッキプレート面①のひずみに着目すると、デッキプレートの厚板化によりひずみが大きく低下しており、D16 では 40~60%程度、D19 では 30%程度となっている。一方、U リブウェブ面⑥ではデッキプレートの厚板化によりひずみが増加したが、値は①と⑤と比べると小さいか、極端に大きくはならないことが確認された。

表-1 コア MT でのき裂深さと UT 結果

コア採取位置		コア抜き結果		UT結果 (400万回載荷後)	
		き裂深さ (mm)		エコー高 (%)	
		若番側	老番側	表面SH波法	クリーピング波法
交差部 近傍	A-12-A	0	12.5	25	336
	A-13	12	0	38	69
	B-23-A	11	14	31	98
	B-24	14.5	14.5	実施せず	実施せず
	B-25	13.5	3.5	検出せず	55
一般部	B-34	0	0	7	17
	B-41	0	0	10	22
	C-9-A	0	0	7	26

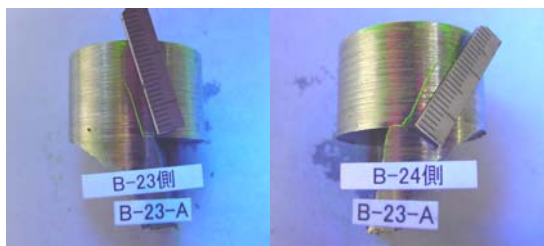


写真-2 コア(B-23-A)の MT 結果

(2) 静的計測

静的計測により得られた一般部のデッキプレート側止端 5mm 位置 (図-2 の①) のひずみの走行回数による推移を図-7 に示す。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、一般部では載荷回数によらずほぼ一定のひずみを保っていることが確認できる。

一方、U リブと横リブの交差部における U リブ溶接近傍のひずみには変化が見られる。図-8 に、a1、a2 断面の U リブ外側のデッキ側止端 5mm 位置 (図-2 の①)、および a 断面の U リブウェブから 40mm 内側のデッキプレート下面 (図-2 の③) のひずみを示す。この部位は、デッキプレートが横リブウェブで支持された部分と、U リブ上で支持されない部分の境にあたる。D19U6 におけるこの部位のひずみは、U リブ外側では試験開始時に約 200 $\mu$  で、a1 断面では 25 万回、a2 断面では 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。内側のひずみは試験開始時に -138 $\mu$  であったが、400 万回の載荷を通して緩やかに低下している。後述するように、D19U6 の交差部近傍で、デッキ進展き裂が生じていることが輪荷重走行試験後のコア抜きにより確認されており、ひずみの低下はき裂の発生および進展によるものと考えられる。

D19U8 の当該箇所のひずみは試験開始当初に外側で -100 $\mu$ 、内側で 89 $\mu$  であった。ひずみは載荷回数と共に緩やかに低下し、400 万回時では外側で 90 $\mu$ 、内側で 53 $\mu$

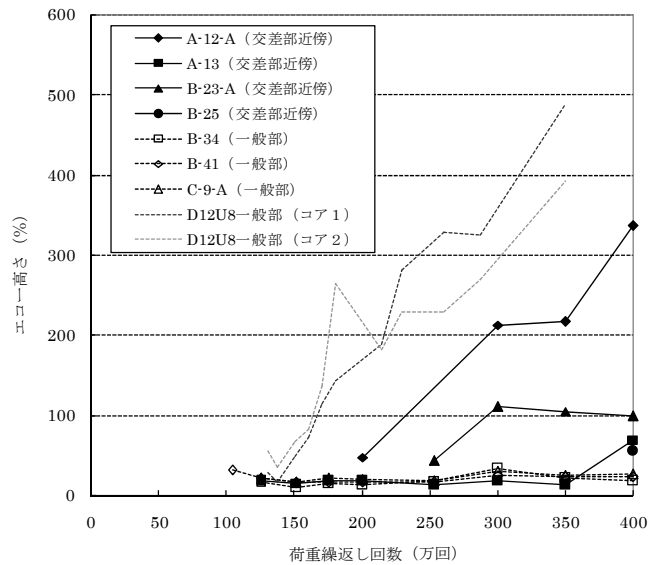


図-9 溶接線Bにおける一般部と交差部のエコー高さの変化(クリーピング波法)

となった。U8 側は今後コア採取を行ってき裂の有無を観察し、上記ひずみとの関係を考察する。

(3) コア採取によるき裂計測と超音波探傷結果

1) D19U6 および D16U6

6mm 厚 U リブ側については 400 万回の輪荷重走行を行った後、UT でエコーの高かった箇所について、図-4 に示す 8 箇所から直径 32mm のコアを採取し、側面を磁粉探傷試験 (以下、MT) することにより、コア側面のき裂の有無、深さを計測した。結果を表-1 に示す。同表には、コア中心位置を探傷した 400 万回時の UT 結果も示す。

交差部の 5 個のコア A-12-A、A13、B-23-A、B-24、B-25 ではルート部からき裂が発生し、写真-2 に示すように、デッキプレート板厚方向に斜めに進展していた。交差部のデッキプレート厚 19mm に対し、き裂深さは板厚方向に最大で 14.5mm であった。UT 結果は図-9 にクリーピング波法のエコーを示すように、溶接線 A の交差部では 200 万回時より、溶接線 B の交差部では 250 万回時よりエコーが高くなり、400 万回時にはコア採取位置で 55~336% のエコー高さになった。表面 SH 波法では 400 万回時に 25~38% である。

一般部の 3 個のコア B-34、B-41、C-9-A にき裂は見られなかった。図-9 に示すように、一般部のコア抜き位置においては、400 万回を通して、エコーの上昇は見られなかった。

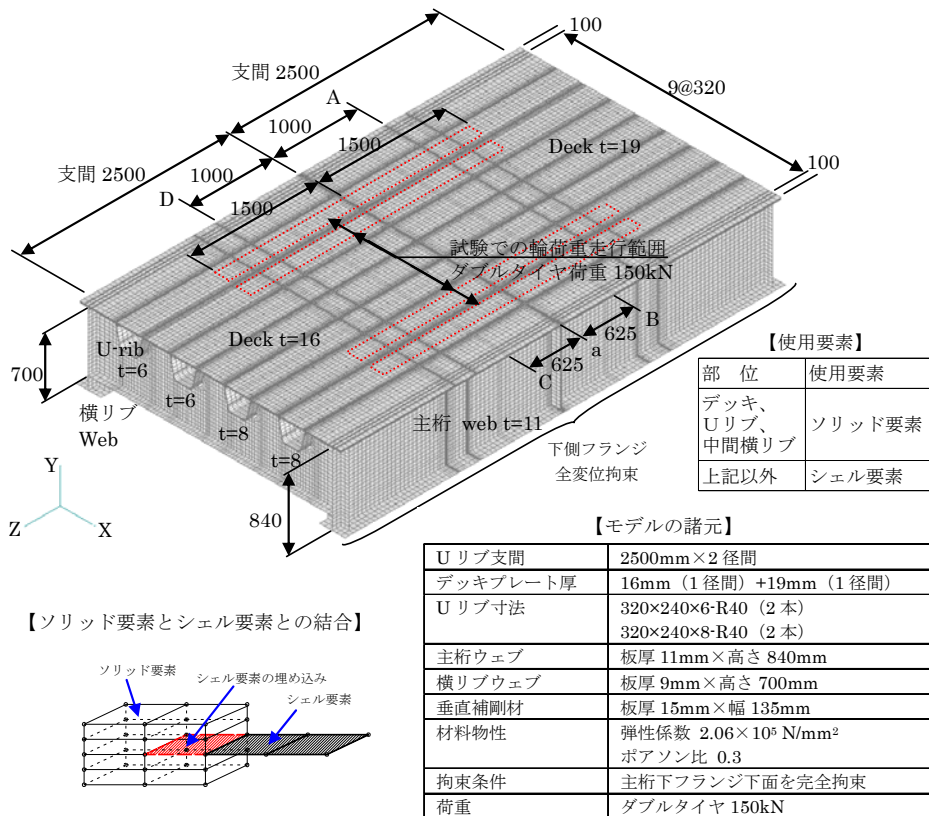


図-10 解析モデルの諸元および要素分割

## 2) D19U8 および D16U8

8mm 厚Uリブ側については、400 万回の輪荷重走行を行った時点であり、コアの採取はまだ行っていない。今後、図-4に示す 8 箇所で行う予定としているが、ここでは UT 結果のみを示す。溶接線 A および B の U リブと横リブ交差点近傍でエコーが検出され、400 万回時に表面 SH 波法では溶接線 A で 150%、B で 190%、クリーピング波法では溶接線 A で 150%、B で 220%となった。溶接線 C の交差点ではエコーは検出されていない。また一般部では溶接線 A,B,C いずれもエコーは検出されておらず、き裂の発生・進展の傾向はUリブ厚 6mm 側と同様と推測される。

## 3) D12U8

過年度には従来型の 12mm 厚のデッキプレートを用いる鋼床版実大試験体を用いて輪荷重走行試験を行っている。走行範囲は U リブ一般部のみである。図-9に示すように D12U8 では 100 万回程度からエコーが急増加し、350 万回時には数百%に上昇した。400 万回走行後にエコーの高かった 3 箇所からコアを採取したところ、各々にルート部からのデッキ進展き裂が確認され、最大のき裂深さが 6mm であった。

## 3. FEM 解析

き裂発生部位の局部応力に与えるデッキ厚等の構造諸元の影響の把握および実橋における疲労環境の厳しさの把握のために、当該局部応力と相関性の高い溶接近傍の応力（参照応力）の把握を主目的として、試験体を対象とした FEM 解析を行った。平成 18 年度は、Uリブ溶接ルート部の応力とデッキ側止端 5mm 位置（図-2の①）の応力の相関関係について検討し、デッキ側止端 5mm 位置の応力がルート部の参照応力となり得ることを示した。平成 19 年度は、輪荷重走行試験に用いた試験体を対象に、載荷試験結果との比較、およびデッキプレート厚や U リブ厚によるひずみ性状の違いを解析により検討した。ここでは、D16U6 および D19U6 に着目し、まず載荷試験結果と解析結果とを比較し、FEM 解析の妥当性を検討した結果を示す。

FEM 解析に用いたモデルを図-10に示す。載荷荷重および載荷位置は、輪荷重走行試験の荷重条件にあわせた。すなわち、載荷荷重はダブルタイヤをモデル化し、1 タイヤ 75kN とし、合計で 150kN とした。また、1 タイヤ当たり 200mm×200mm の載荷面を考慮し、等分布面荷重としてダブルタイヤが U リブのウェブを跨ぐ位置に載荷した。

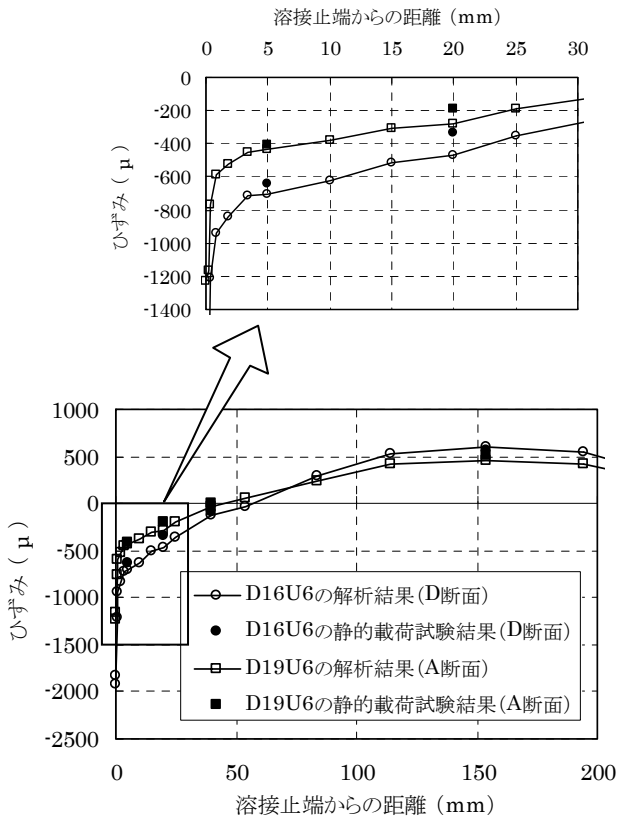


図-11 支間中央におけるUリブ間デッキ下面のひずみの比較

6mm厚Uリブ上に载荷した場合のUリブ間のデッキプレート下面の橋軸直角方向のひずみの解析結果を、[図-11](#)に示す。载荷位置は19mm厚デッキプレート上のA断面、16mmデッキプレート上のD断面直上である。解析値はひずみゲージによる計測値と概ね一致している。

载荷位置を橋軸方向に移動させて解析し、動的計測および静的载荷試験によるひずみの計測値と比較した。D19U6におけるデッキ側止端5mm位置([図-2](#)の①)でのひずみを[図-12](#)に影響線として示す。解析値は動的計測および静的载荷試験結果と概ね一致している。

これらの結果より、FEM解析によってデッキプレートを厚くした鋼床版の応力を比較的精度よく解析できることが確認された。き裂起点のルート部についても、鋼床版の構造諸元に対する局所応力の相対的な変化については評価できると考えられる。

#### 4. おわりに

16mmおよび19mm厚のデッキプレートを有する鋼床版試験体を用いて、8mm厚Uリブ上での輪荷重走行試験を実施し、400万回载荷した。また、平成18年度に輪荷重走行試験した6mm厚Uリブ部分からコアを採

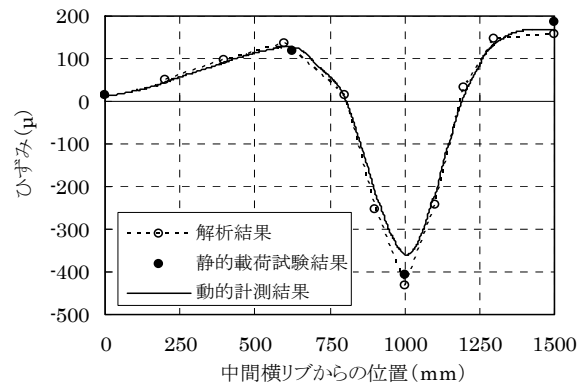


図-12 D19U6におけるデッキ側止端5mm位置のひずみの影響線

取し、き裂の状況を確認した。その結果、き裂は中間横リブとの交差部近傍に生じたが、一般部には生じないことが確認された。過年度に実施した12mm厚デッキプレートを有する鋼床版試験体の輪荷重走行試験では一般部でデッキ進展き裂が発生しており、一般部についてはデッキプレートの厚板化による疲労耐久性の向上が確認された。また、交差部については、12mm厚デッキプレートを有する鋼床版の評価との対比が必要である。

FEM解析では、本モデル化手法によってデッキプレートを厚板化した鋼床版の応力を比較的精度よく再現できることが確認できた。

今後、疲労試験結果によるデッキ厚とき裂の発生・進展性状の詳細比較、载荷回数と実橋での供用条件との対応付け、FEM解析による構造諸元の影響分析を行っていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 有馬, 村越: 輪荷重走行試験による鋼床版デッキプレート進展き裂の再現, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2006.9.
- 2) たとえば, 松下, 齊藤, 村越, 有馬: き裂を有する鋼床版の当て板補強に関する解析的検討, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2006.9.
- 3) 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ーデッキプレート内進展き裂を対象としてー, 第5回道路橋床版に関するシンポジウム論文集, 2006.7.
- 4) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.3.
- 5) 藤原, 岩崎, 田中: 限界状態設計法における設計活荷重に関する検討, 土木研究所資料第2539号, 1988.1.

## RESEARCH ON FATIGUE DESIGN OF ORTHOTROPIC STEEL DECK

**Abstract** : In order to improve fatigue design criteria of orthotropic steel deck, the effect of deck plate thickness was examined in wheel running test using a real size specimen that has combinations of 16mm and 19 mm thickness deck plate and 6mm and 8mm thickness trough rib. Dynamic loading test result shows that strains at 5mm point from toe of deck plate-trough rib weld were reduced to be 43% in D16U6, and 29% in D19U6 compared to D12U6 (DXUY; X for deck plate thickness, Y for trough rib thickness). And the series of static loading tests and ultrasonic tests were conducted periodically during 4 million times loading for D16U6, D19U6, D16U8, and D19U8. Test results indicate that changes of strain in the static loading tests and height of echo in the ultrasonic tests are useful to detect initiations and propagations of fatigue crack at intersection of trough rib and transverse rib. Other than transverse rib intersection, no cracks were observed in samples taken from deck plate-trough rib weld of the specimen. Analytical strains derived from 3D FE model are consistent with measured strains in dynamic and static loading tests.

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