

第4章 輪荷重走行試験（供試体B）

4.1 概要

デッキプレートの厚板化による U リブ溶接部の疲労耐久性の向上効果を確認するため、実大供試体を用いた輪荷重走行試験を実施した。独立行政法人土木研究所（以下、土研）が担当したのは、19mm 厚（以下、D19）、16mm 厚（以下、D16）のデッキプレートを有する U リブ 2 径間分の供試体 1 体を用いた輪荷重走行試験である。デッキプレートには、6mm 厚（以下、U6）と 8mm 厚（以下、U8）の U リブが 2 本ずつ計 4 本溶接されており、試験は載荷位置を 2 箇所として、D16U6、D16U8、D19U6、および D19U8（以後、供試体中の着目箇所をデッキプレート厚と U リブ厚を用いて「DOUO」と表す。）の 4 種類の組合せに対して行った。

また、供試体に対して 3 次元 FEM 解析を実施し、試験結果との比較を行うとともに、デッキプレート厚の影響について検討した。

本章では、これらの試験結果と解析結果をまとめる。

4.2 供試体

図-4.2.1 に供試体の概略図を、図-4.2.2 に供試体の寸法形状を示す。輪荷重走行試験機のフレーム内側間隔 5.3m に入るように、供試体は U リブ支間 2,500mm で 2 径間とした。片側径間のデッキプレート厚を 16mm とし、もう一方を 19mm とし、同時に輪荷重を載荷できるようにした。デッキプレートの突合せ溶接は横リブ位置より 100mm ずらした位置とし、下面を合わせた。また、U リブ厚の影響を検討するため、8mm 厚と 6mm 厚の U リブを 2 本ずつ計 4 本設置した。使用した鋼種は SM490Y 材である。

本供試体のディテールは、「道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編」(日本道路協会,平成14年)¹⁾及び「鋼道路橋の疲労設計指針」(日本道路協会,平成14年)²⁾に従った。すなわち、U リブと横リブの交差部では、U リブの縦方向溶接を連続させ、コーナーカット部を埋め戻し、スカラップは指針に示されている形状とした。デッキプレートと U リブとの溶接の溶込み量についても指針に基づき 75%以上を目標として製作した。U リブの開先形状は、図-4.2.3 に示すように、U6 では自然開先、U8 ではこぼ面を 2mm 残し、47.5°の開先を設けた。溶接は多電極の自動溶接機を用いており、溶接施工試験によって、同様の溶接条件で溶込み量 75%以上が確保できることを確認した。なお、組立溶接は道示Ⅱ鋼橋編に従って 1 カ所の長さを 80mm とし、半自動溶接で行った。組立溶接がき裂発生に影響を及ぼすことも考えられたため、図-4.2.4 に示すように溶接位置を記録した。

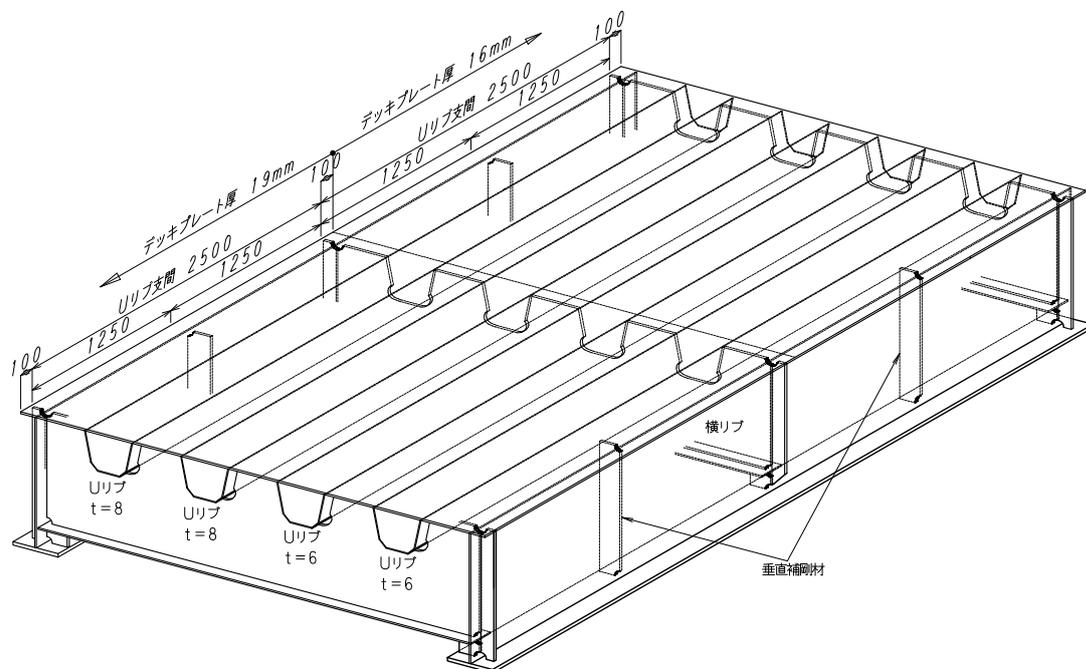


図-4.2.1 供試体の概略図

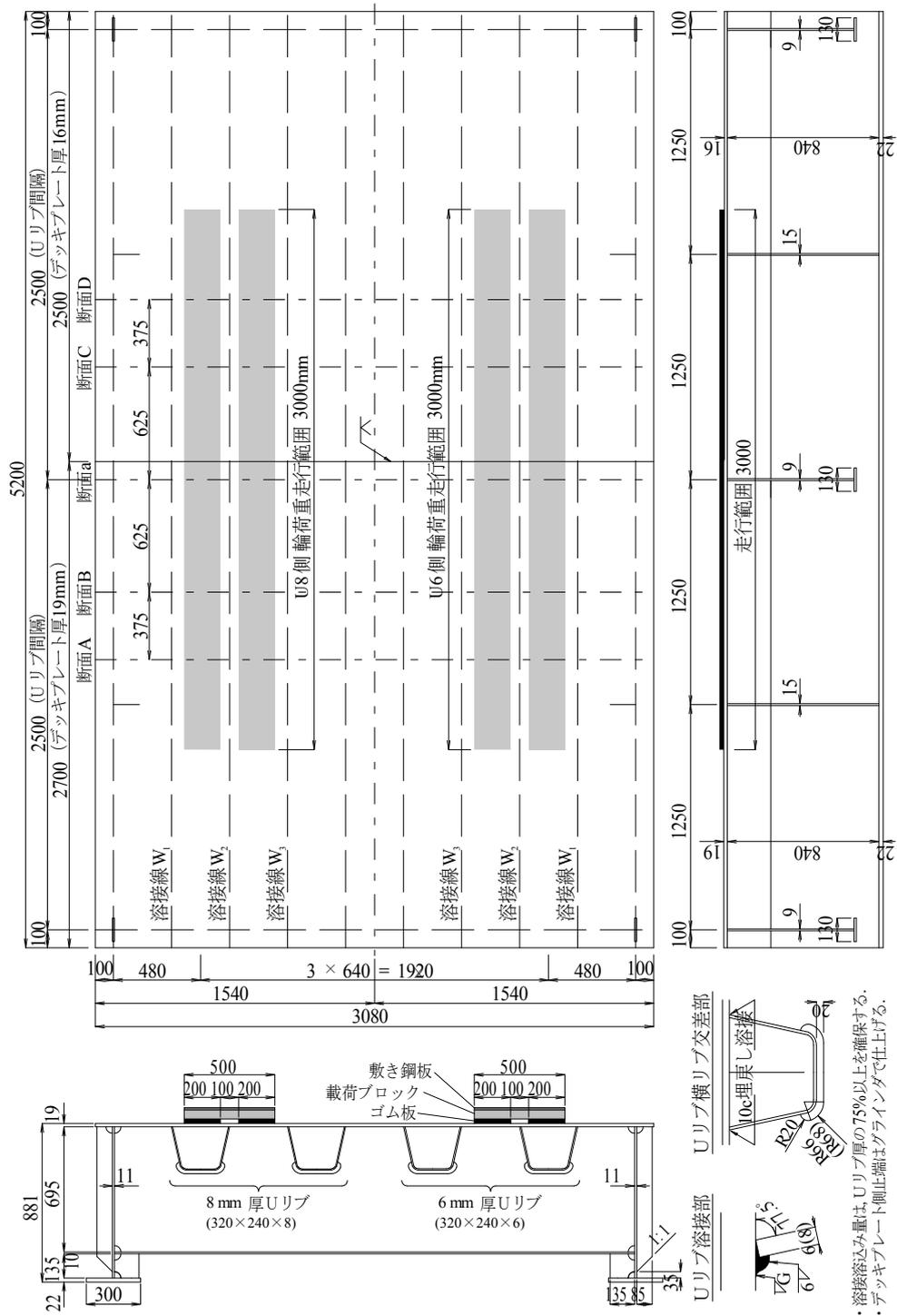


図-4.2.2 供試体の寸法形状

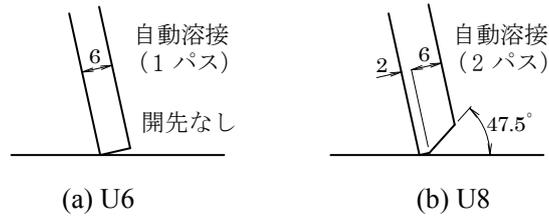


図-4.2.3 デッキプレートとUリブとの溶接部における開先形状

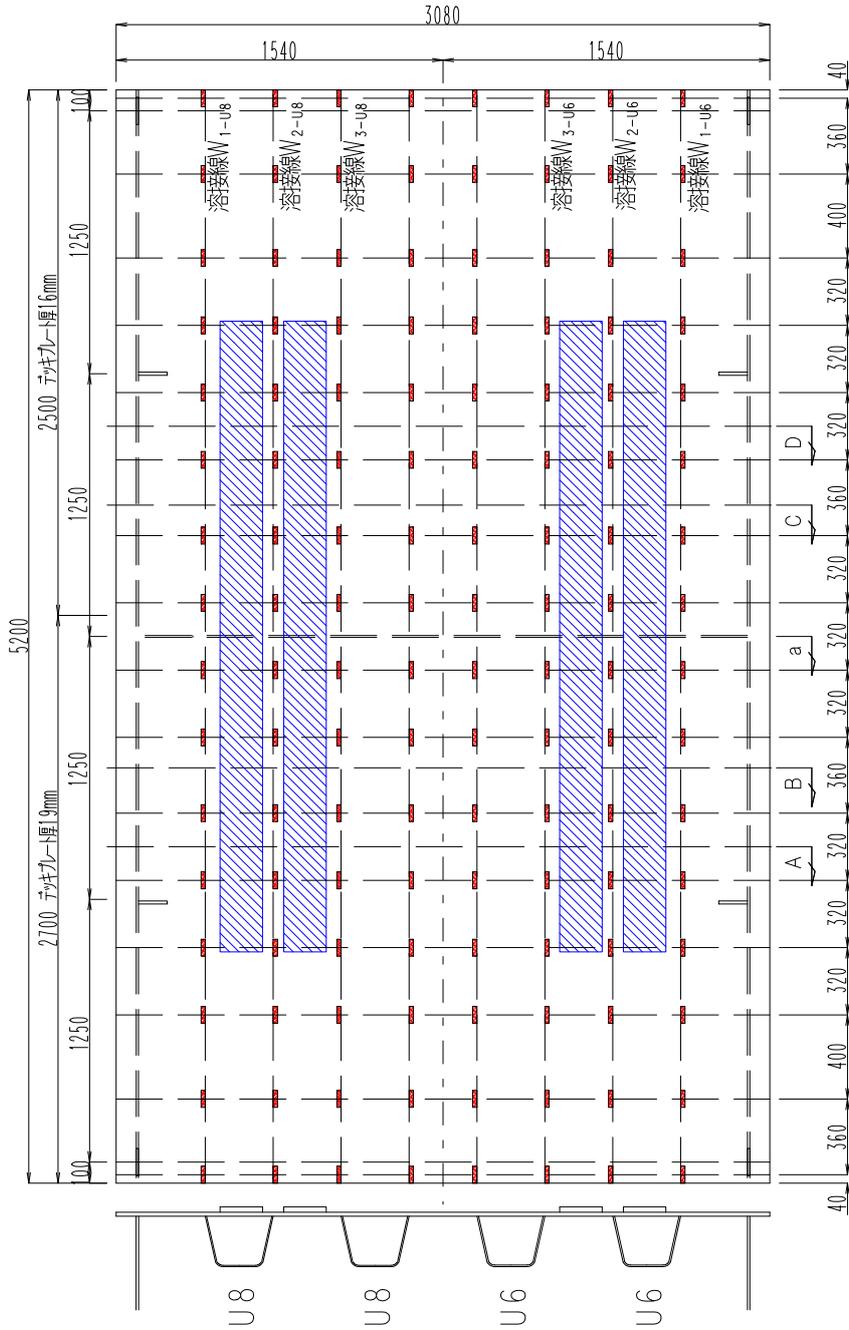


図-4.2.4 組立溶接位置

4.3 試験方法

4.3.1 試験装置

試験には土木研究所の所有する輪荷重走行試験機を使用した。表-4.3.1 に主要諸元，写真-4.3.1 に全景を示す。

表-4.3.1 輪荷重走行試験機の主要諸元

項 目			仕 様	
寸 法	試験機	フレーム	高さ	約 5m
			長さ	約 8m
		フライホイール	直径	3.5m
			重さ	10 t
	走行車輪	鉄輪 1	$\phi 700 \times$ 幅500mm (供試体幅=2,800mm用)	
		鉄輪 2	$\phi 700 \times$ 幅300mm (供試体幅=2,300mm用)	
		ゴムタイヤ	9.00-R20-14PR 相当 (ダブルタイヤ)	
供試体	最大寸法	長さ	4,500mm	
		幅	3,000mm	
		厚さ	350mm	
性 能	駆動部	走行範囲	± 0.5 , ± 1.0 , ± 1.25 , ± 1.5 m	
		最大回転速度	59.8 , 42.3 , 37.8 , 34.7rpm (ゴムタイヤ装着の際は 5rpm)	
	載荷部	最大載荷力	走行時	50tf (490kN)
			停止時	100tf (981kN)
		最大スローク		200mm



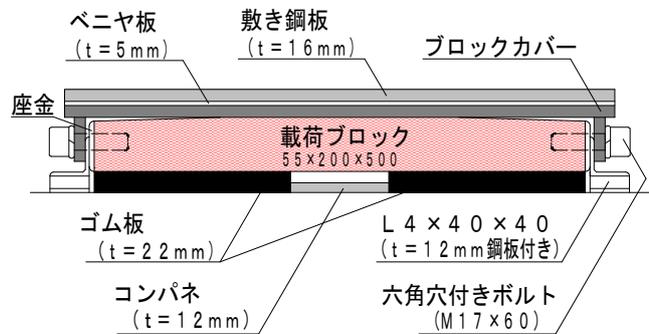
写真-4.3.1 輪荷重走行試験状況

4.3.2 載荷方法

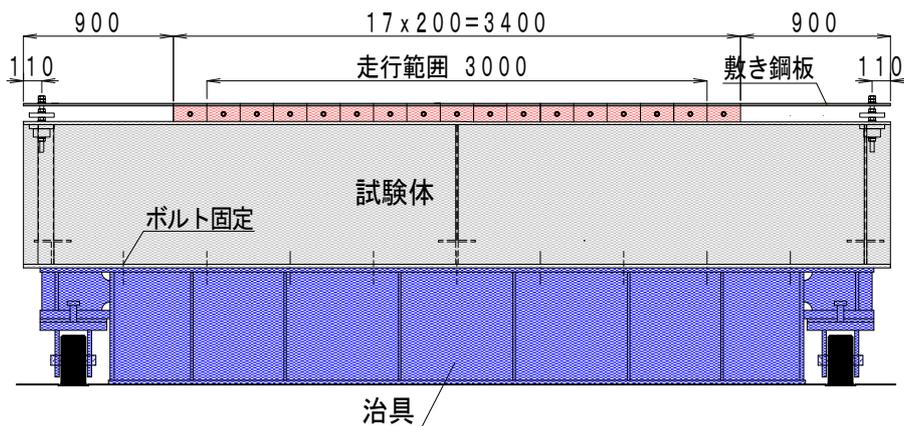
本試験では、図-4.2.2 に示した供試体の U6 側と U8 側で、それぞれ 400 万回の輪荷重走行試験を行った。輪荷重の橋軸方向の走行範囲は、装置の限界から 3000mm とした。また、載荷速度は約 15rpm (約 4.3 万回/日) とした。輪荷重は、ダブルタイヤが U リブ溶接線直上を挟み込む状態を模して、鋼製載荷ブロックの下に厚さ 22mm、幅 200mm のゴム板 2 枚を、図-4.2.2 に示すように 100mm 離して置いた。写真-4.3.2 に走行試験時の載荷状況を示す。実橋におけるゴムタイヤによる荷重分散効果を考慮して、図-4.3.1 に示すよう鉄輪とデッキプレートとの間に、敷き鋼板、ベニヤ板、載荷ブロック、ゴム板を設置している。写真-4.3.3 に本載荷板の設置順序を示す。荷重の大きさは、既往の活荷重実態調査(S59 年度)において計測された最大軸重 298kN⁴⁾を参考に輪荷重 150kN とした。



写真-4.3.2 載荷状況



(a) 載荷法の概要



(b) 載荷ブロックの設置

図-4.3.1 載荷法の詳細図



(a) ステップ1: ゴム板, コンパネ, アングルの設置



(b) ステップ2: 载荷ブロック, ブロックカバーの設置



(c) ステップ3: ベニヤ板, 敷き鋼板の設置

写真-4.3.3 载荷板の設置順序

4.3.3 ひずみゲージと変位計の設置

図-4.3.2 にひずみゲージおよび変位計の設置位置を示す。平面図における断面 A, B は D19 側、断面 C, D は D16 側の U リブ支間である。横リブと U リブの交差部では、横リブ位置を断面 a とし、デッキプレートと横リブの溶接止端から D19 側および D16 側に 5mm 離れた位置をそれぞれ断面 a1 および断面 a2 とした。

図-4.3.3 に主要なひずみゲージの設置位置を示す。ひずみゲージ①は、デッキプレート側止端のひずみ性状を把握するため、デッキ側止端から 5mm 位置に設置した。同位置のひずみは 3 次元 FEM 解析によればルート部ひずみとの相関性が高い結果となっている。ひずみゲージ②は、デッキプレートの板曲げを確認するためにひずみゲージ①の直上のデッキプレート上面に設置した。ひずみゲージ③は、U リブ側面の溶接止端のひずみ性状を把握するため、U リブ側止端から 5mm 位置に設置した。ひずみゲージ④および⑤は、U リブ溶接前に、U リブ内部に設置しており、溶接時の熱による損傷を防ぐために耐熱型のひずみゲージを用いた。

U リブと横リブの交差部の断面 a においては、図-4.3.3 (b) に示すように横リブがあるため、ひずみゲージ④のみを設置した。また、デッキプレートと横リブの溶接止端から 5mm 離れた断面 a1, a2 では、ひずみゲージ①と③を設置した。

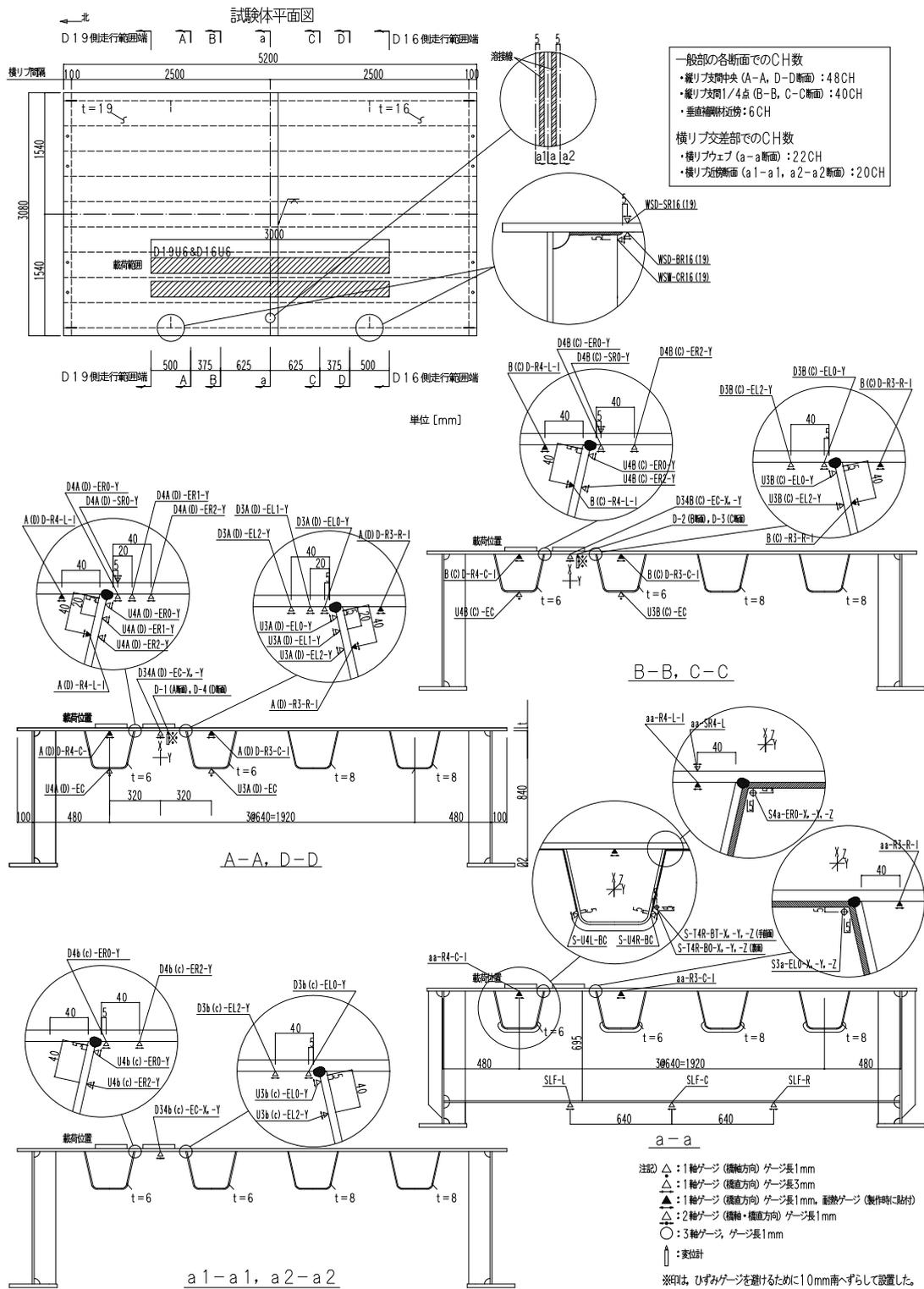


図-4.3.2 ひずみゲージ等設置位置 (1/2) : U6 側荷重時

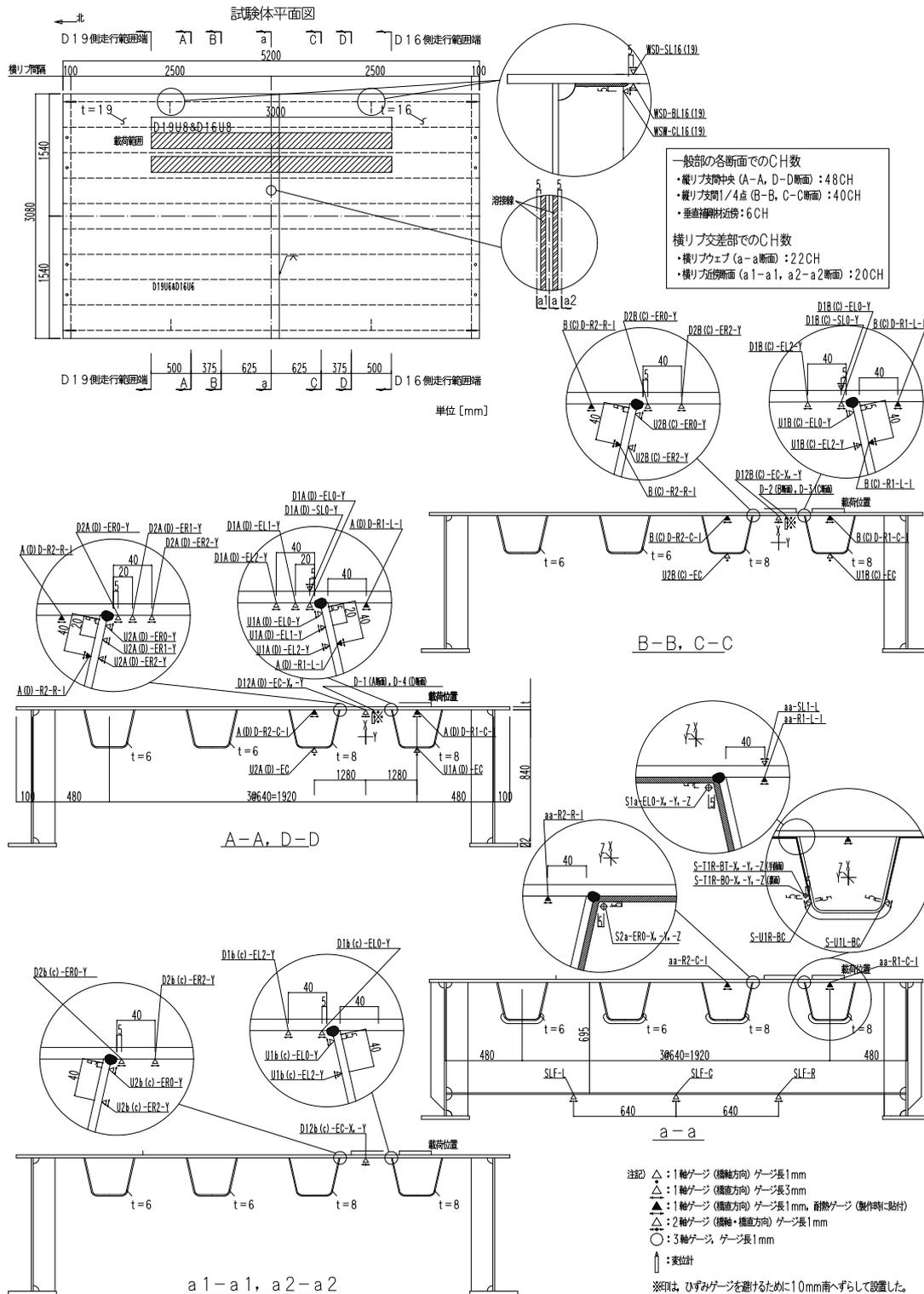
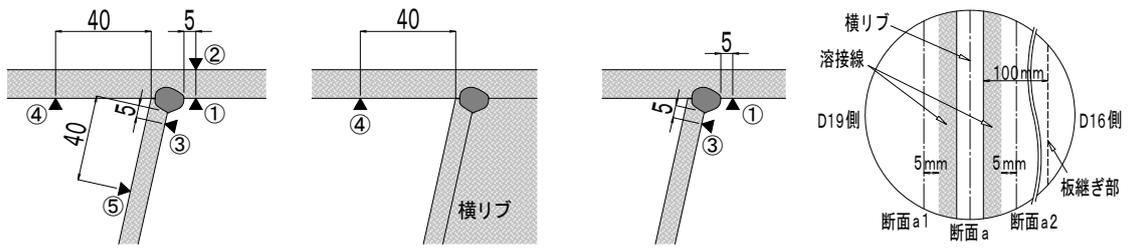


図-4.3.2 ひずみゲージ等設置位置 (2/2) : U8 側載荷時



(a) 断面 A, B, C, D (b) 断面 a (c) 断面 a1, a2 (d) 交差部平面図

図-4.3.3 着目溶接線近傍における主要なひずみゲージ

4.3.4 計測方法

表-4.3.2 に計測内容一覧を示す。以下に各計測の概要を述べる。

(1) 事前計測

i) 静的計測による載荷方法の影響調査

本試験では、図-4.3.2 に示したようにダブルタイヤを模して、敷き鋼板+載荷ブロック+22mm ゴム板を介して、鉄輪の荷重を供試体に伝達している。試験での載荷方法と実荷重との関係を把握するため、下記の4ケースの載荷方法について静的載荷試験を実施し主要なひずみ（図-4.3.4 のひずみゲージ①，②，③）を計測した。

- ケース a : 本試験（鉄輪載荷，敷き鋼板，載荷ブロック，22mm ゴム板の組合せ）
- ケース b : ゴムタイヤ（ダブルタイヤ）
- ケース c : ゴム板1枚（鉄輪載荷，載荷ブロック，22mm ゴム板の組合せ）
- ケース d : ゴム板2枚（鉄輪載荷，載荷ブロック，22mm ゴム板×2の組合せ）

載荷は、デッキプレート厚の違いが比較できるように、D19側の断面AとD16側の断面DにおいてU6側で実施した。ケースa, c, dの荷重は、0, 50, 100, 125, 150, 125, 100, 50, 0kNの9ステップで、ケースbでは、0, 50, 0kNの3ステップとした。

また、断面DのU6側では、超低圧型感圧紙を用いて各ケースの接地圧分布を計測した。この時の載荷荷重は50kNとし、2分間継続載荷した。ただし、走行試験で用いたケースaでは、走行試験と同様に150kNでの計測も行った。

ii) 移動載荷時のひずみ計測

疲労試験前に、低速で鉄輪を走行させて、主要な部位のひずみを動的に計測し、影響線を作成した。本計測における輪荷重は150kN、載荷速度は1rpm、データ取得のサンプリング周波数は20Hzとし、ノイズを除去するため100Hz以上の計測値を除去するローパスフィルタ処理を施した。ひずみ計測位置は、一般部（断面A, B, C, D）におけるデッキプレートとUリブの溶接部近傍（図-4.3.3のひずみゲージ①，②，③）、垂直補剛材上端部の溶接部近傍、および交差部（断面a）の下スリットの溶接部近傍とした。なお、本報告ではデッキプレートとUリブの溶接部近傍の結果に着目する。

(2) 輪荷重走行試験時の計測

i) 動的計測

輪荷重走行中の疲労き裂の発生・進展を調査するため、主要な部位のひずみについて5分間の最大・最小値を記録した。計測位置は、一般部（断面A, B, C, D）のデッキプレートとUリブの溶接線近傍（図-4.3.3のひずみゲージ①，②，③）、交差部（断面a）の下スリット、および断面A, Dの鉛直変位とした。サンプリング周波数は20Hzとした。ノ

イズを除去するために、変位に対しては100Hz以上、ひずみに対しては30Hz以上の計測値を除去するローパスフィルタ処理を施した。

ii) 静的計測

輪荷重走行試験の前後、およびU6側で200万回まで25万回毎、200万回以降に100万回毎、U8側で100万回毎に実施した。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、断面A、B、a、C、D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。

表-4.3.2 計測内容一覧

計測項目		試験時期	試験内容	
事前計測	静的計測による 載荷方法の影響調査	U6側の走行試験と U8側の走行試験の間	下記の4ケースの載荷方法について静的載荷試験を実施して主要部位のひずみを計測し、本試験での載荷方法とゴムタイヤとの違いを確認した。 (a) 本試験: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 (c) ゴム板1枚:載荷ブロック+ゴム板(1枚、厚さ22mm) (d) ゴム板2枚:載荷ブロック+ゴム板(2枚、厚さ44mm)	
	接地圧分布の計測	U6側の走行試験前	感圧紙により、各載荷方法の接地圧分布を計測した。	
	移動載荷時のひずみ計測	各走行試験前	主要部位の応力範囲を把握するため、輪荷重を走行させながら、主要部位のひずみを連続的に計測して影響線を確認した。	
輪荷重走行試験時計測	動的計測	0~400万回	き裂の発生・進展挙動を把握するため、輪荷重走行試験中の主要部位のひずみを連続的に計測し、5分間毎の最大・最小値を記録した。	
	静的計測	U6側: 25万回毎(200万回まで) 100万回毎(200万回以降) U8側: 100万回毎	試験体全体の疲労損傷状態を確認するため、定期的に走行試験を停止して静的載荷試験を実施し、設置した全てのゲージと変位計で計測を行った。載荷位置は、走行範囲の両端と断面A、B、a、C、Dとした。	
	超音波探傷試験	U6側: 25万回毎(200万回まで) 50万回毎(200万回以降) U8側: 50万回毎	目視では観察不可能なルート部での疲労き裂の発生・進展を検出するため、クリーピング波法、表面SH波法、70°斜角法による超音波探傷試験を実施した。70°斜角法は、クリーピング波法、表面SH波法で、高いエコーが検出された箇所に対してのみ行った。 なお、探傷技術者の技量や感度調整法の影響を把握するため、試験前にき裂深さが既知の小型試験体を用いて、探傷結果とき裂深さの相関性を確認した。	
事後計測	き裂の状態調査	デッキプレートの コア抜き調査	各走行試験終了後	試験体からコアを採取し、磁粉探傷試験によりき裂進展状況を確認した。
		横リブ交差部の 切り出し調査	全走行試験終了後	着目交差部を試験体から切り出し、き裂発生部を液体窒素により割り、その破面からき裂進展状況を確認した。
	溶接部の磁粉探傷 (Uリブ側止端)	全走行試験終了後	Uリブ側面に発生した止端き裂の発生範囲を確認するため、磁粉探傷試験を実施した。	

iii) 超音波探傷試験

a) 計測方法

試験中にデッキ進展き裂の挙動を調査するため、クリーピング波法、表面 SH 波法および 70° 斜角法による超音波探傷試験を行った。表-4.3.3 に本試験で用いた探触子と感度調整に用いた標準試験片を示す。いずれの探傷法も、同じ裂を対象とした場合の標準的な感度調整方法が確立されていないため、以下の方法により感度調整を行った。

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%になるよう設定する。記録としては、U6 側で路程長 15.5mm～24.5mm、U8 側で路程長 17.5mm～26.5mm の範囲をき裂の判別対象範囲とし、その範囲内の最大エコー高さを読み取る。

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%になるよう調整後、6dB 感度を高めて設定する。記録としては、U6 側で路程長 25.5mm～34.5mm、U8 側で路程長 27.5mm～36.5mm の範囲をき裂の判別対象範囲とし、その範囲内の最大エコー高さを読み取る。

70° 斜角法： JISZ3060 に従い、標準試験片 STB-A2 の直径 4mm、深さ 4mm の孔からのエコー高さを 80%に設定する。なお、70° 斜角法では端部エコー法を用いて、き裂深さを測定した。

本試験におけるクリーピング波法および表面 SH 波法による探傷は、輪荷重走行試験の前後、および U6 側で 200 万回まで 25 万回毎、200 万回以降に 50 万回毎、U8 側で 50 万回毎に実施した。70° 斜角法は、クリーピング波法あるいは表面 SH 波法でき裂発生が予測される程度のエコーが検出された場合に実施し、き裂深さを計測した。探傷時の載荷状態は基本的に無載荷としたが、D16U6 および D19U6 の 104 万回時と 300 万回時では、輪荷重の有無がエコー高さに与える影響を調査するため、輪荷重を走行させながら実施した。

計測対象の溶接線は、荷重直下の溶接線 W₂、主桁側の溶接線 W₁、および供試体中心側の溶接線 W₃とした（図-4.3.4 参照）。ただし、クリーピング波法では走行範囲全長にわたって探傷したが、表面 SH 波法では連続探傷に不向きなため、図-4.3.4 に示すように溶接線 W₁および W₃では約 125mm 間隔、溶接線 W₂では約 62.5mm 間隔で探傷した。また、本試験ではデッキプレート下面側から探傷することとし、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側に引いた。クリーピング波法の基準線は、デッキプレート下面と U リブ外面の交点から 10mm 位置とし、表面 SH 波法の基準線は 20mm 位置とした。本試験の超音波探傷は、U6 側を X 社、U8 側を Y 社（供試

体 A(3 章)の超音波探傷試験を担当) が実施した。

b) き裂深さが既知の小型供試体の計測

計測前に、き裂深さが既知の小型供試体を用いて、き裂深さと各探傷結果との関係を確認した。

写真-4.3.4 に小型供試体の例を示す。感度調整方法として、X 社では本供試体に適用した前述の方法を用い、Y 社では本供試体に適用した方法および供試体 A に適用した方法を用いた。

図-4.3.5～4.3.7 に各社の試験結果を示す。図中には、一次回帰式および相関係数を示した。クリーピング波法および表面 SH 波法では、本供試体での感度調整法を用いた X 社と Y 社の結果を比べると、エコー高さとき裂深さの相関性に大きな差はなく、いずれも概ね良好な相関性が得られた。供試体 A での感度調整法を用いた Y 社の結果は、本供試体での感度調整法を用いた結果に比べると、相関性が若干低いものの、概ね良好な相関性が得られた。端部エコー法による 70° 斜角法では、すべてのケースにおいてき裂深さの推定値と実き裂深さの相関性が高いことが確認できた。なお、70° 斜角法では、一回反射による検出を基本としたが、X 社では直射によって検出したケースがあり、その内の 6 つのデータでデッキプレート裏面をき裂として誤検出していた。そこで、図中の一次回帰式や相関係数の計算では、誤検出の 6 つのデータを除いている。

(3) 事後計測

i) き裂の状態調査

a) デッキプレートのコア抜き調査

超音波探傷試験でエコーが高い箇所や静的計測によりひずみが大きく変化した箇所を主な対象として、走行試験の終了後に径 40mm のドリルを用いてコアを採取し、磁粉探傷試験、破面観察によりき裂深さを計測した。

b) 横リブ交差部の切り出し調査

コア抜き調査の結果、U リブと横リブの交差部にデッキ進展貫通き裂が確認されたため、き裂の範囲や形状を確認するため、写真-4.3.5 に示すように着目溶接線上の交差部をガス切断により切り出し、破面観察を行った。

表-4.3.3 探触子と標準試験片

探傷法	探触子	感度調整用の標準試験片
クリーピング波法	5C10×5LAD90	STB-A1
表面SH波法	5M5×5HA90	STB-A2
70°斜角法	5C10×10A70 (7549)	STB-A2

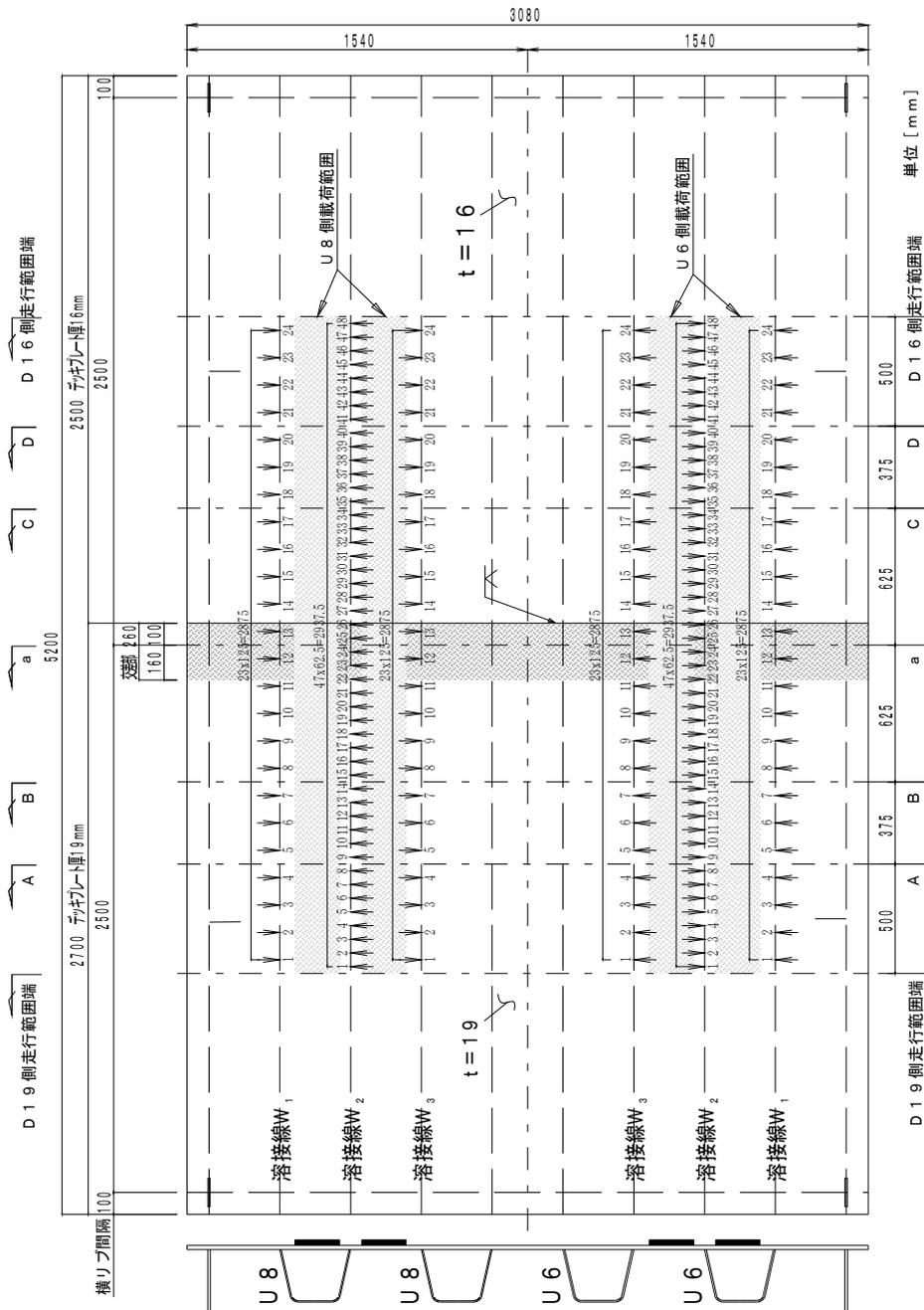


図-4.3.4 超音波探傷試験による計測位置



写真-4.3.4 超音波探傷試験の精度確認に用いた小型供試体の例



写真-4.3.5 横リブ交差部の切り出し調査の様子 (U8側)

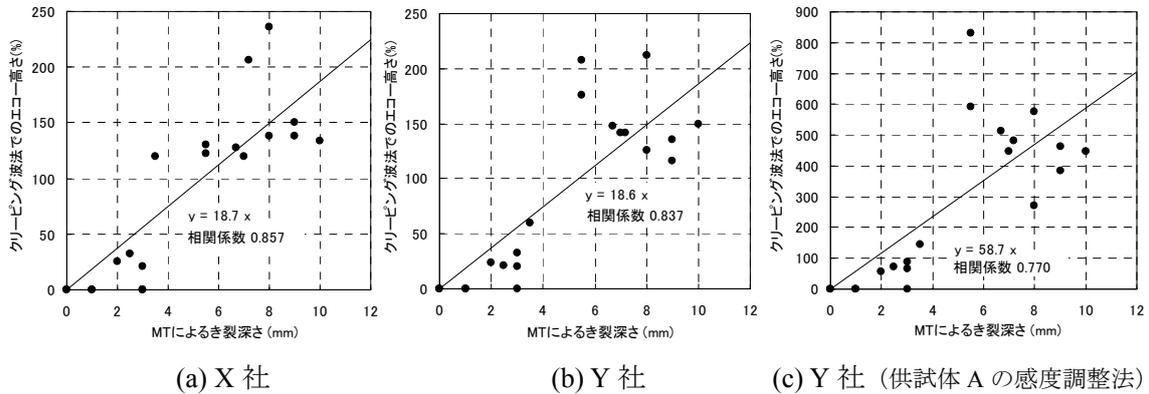


図-4.3.5 クリーピング波法による超音波探傷試験結果とき裂深さの関係

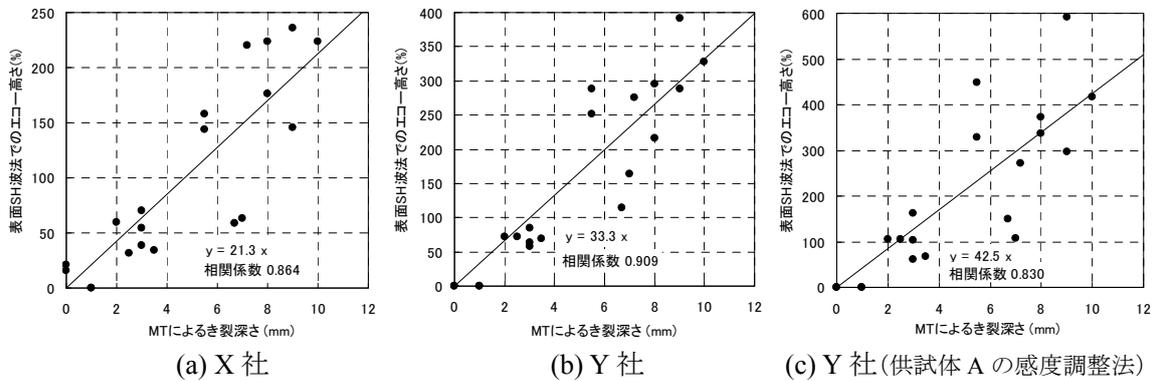


図-4.3.6 表面 SH 波法による超音波探傷試験結果とき裂深さの関係

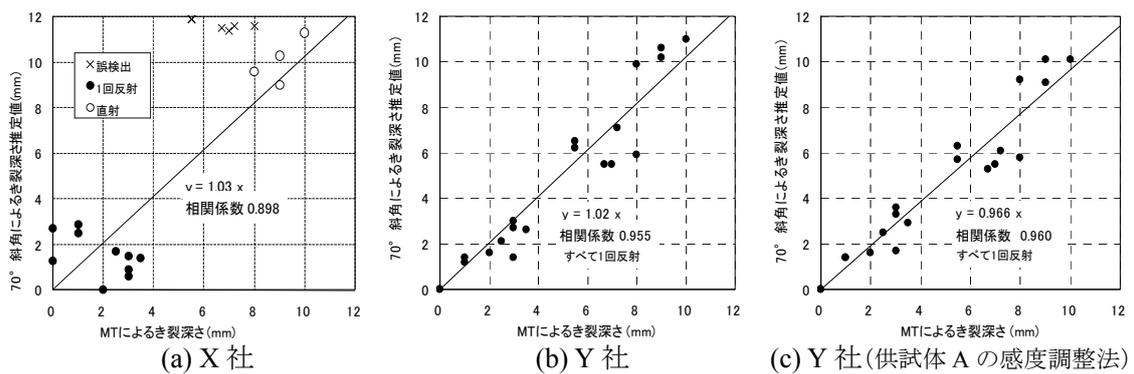


図-4.3.7 70° 斜角法（端部エコー法）による超音波探傷試験結果とき裂深さの関係

4.4 試験結果

4.4.1 事前計測

(1) 静的計測による載荷方法の影響調査

以下の4つの載荷ケースについて、U6側の走行試験終了後に断面Aおよび断面Dにおいて静的載荷試験を実施し、ひずみを計測した。

ケース a : 本試験（鉄輪載荷，敷き鋼板，載荷ブロック，ゴム板 22mm の組合せ）

ケース b : ゴムタイヤ（ダブルタイヤ）

ケース c : ゴム板 1 枚（鉄輪載荷，載荷ブロック，ゴム板 22mm の組合せ）

ケース d : ゴム板 2 枚（鉄輪載荷，載荷ブロック，ゴム板 22mm×2 の組合せ）

また、断面DのU6側において、超低圧型感圧紙により接地圧分布を実施した。表-4.4.1に各ケースの計測条件を示す。

図-4.4.1に断面A、Dにおける静的載荷試験時のひずみの計測結果を示す。なお、断面Dのデッキプレート上面のひずみは、ひずみゲージの剥がれにより除外した。断面Aにおけるひずみゲージ①および②（デッキプレートの下面と上面）では、本試験で用いた載荷方法でのひずみ絶対値が最も小さく、他の3ケースが同程度であった。また、ゴムタイヤのケースは、50kNまでの載荷であるが、荷重を増加させた場合、敷き鋼板を使用しないケースc、dと同じ挙動を示すと推測される。この傾向は、断面Dの試験結果でも確認できる。一方、Uリブ側止端のひずみゲージ③では、断面Dのケースc（ゴム板1枚）を除けば、載荷方法の違いによる差はほとんどない。

ひずみゲージ①および②におけるケースaと他のケースのひずみの違いは、ケースaで用いた敷き鋼板による橋軸方向の荷重分散の影響と考えられる。表-4.4.2に、ルート部応力と相関性の高いひずみゲージ①のひずみについて、150kN載荷時のケースaとケースcとのひずみ比率を示す。これより、ゴムタイヤ載荷時のひずみは、本試験の載荷方法（ケースa）により得られるひずみの約1.35倍となっている。

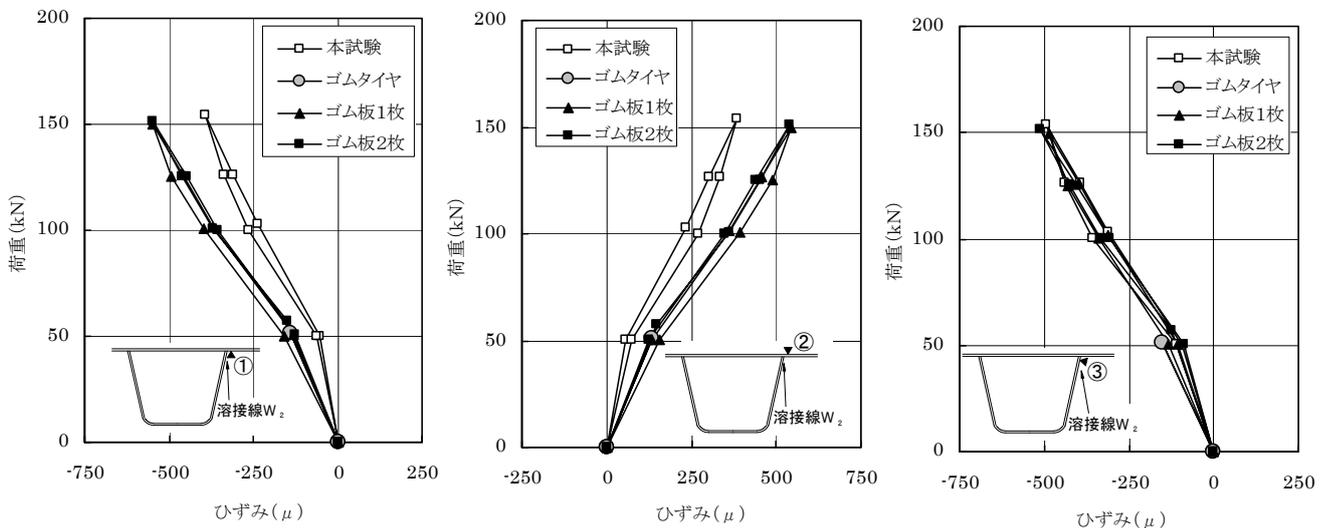
写真-4.4.1に接地圧分布計測時の状況を、写真-4.4.2に計測結果を示す。ケースaの150kN載荷時の結果は他のケースよりも橋軸方向に分布する傾向がみられ、接地圧分布計測からも敷き鋼板による橋軸方向の荷重分散と考えられる。

表-4.4.1 計測条件

载荷方法		ケース a(本载荷)	ケース b	ケース c	ケース d
载荷輪		鉄輪		ゴムタイヤ	鉄輪
介在物		敷き鋼板、载荷ブロック、ゴム板1枚		なし	载荷ブロック、ゴム板1枚
静的载荷試験時	実施箇所	断面A、DにおけるU6側			
	荷重(kN)	0→50→100→125→150 →125→100→50→0	0→50→0	0→50→100→125→150 →125→100→50→0	
接地圧分布計測時	実施箇所	断面DにおけるU6側			
	荷重(kN)	150	50	50	50
	気温(°C)	23	12	26	25
	湿度(%)	80	78	66	66

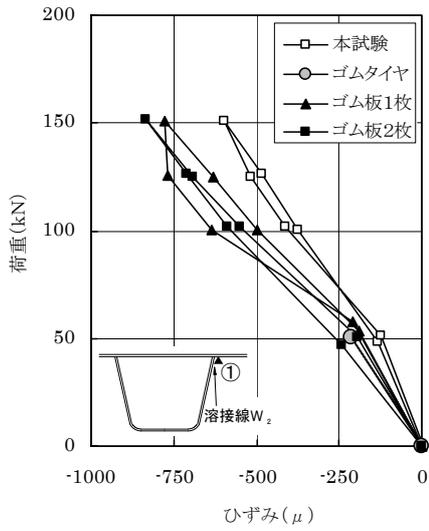
表-4.4.2 ひずみゲージ①における本試験ケースとゴム板1枚ケースのひずみ比率
(敷き鋼板の影響)

	150kN载荷時のひずみ		比率	
	a. 本試験 (敷き鋼板使用)	c. ゴム板1枚	c / a	平均
断面A (D19U6)	-392	-548	1.398	1.35
断面D (D16U6)	-597	-777	1.302	

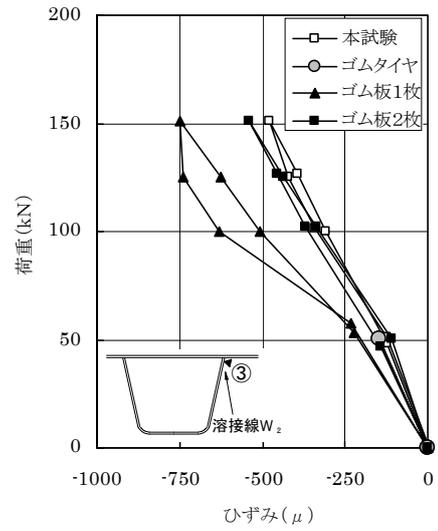


i) デッキプレート側止端 5mm ii) デッキプレート上面 iii) Uリブ側止端 5mm

(a) 断面 A (D19側) 载荷時の計測ひずみ



i) デッキプレート側止端 5mm



ii) Uリブ側止端 5mm

(b) 断面 D (D16 側) 載荷時の計測ひずみ

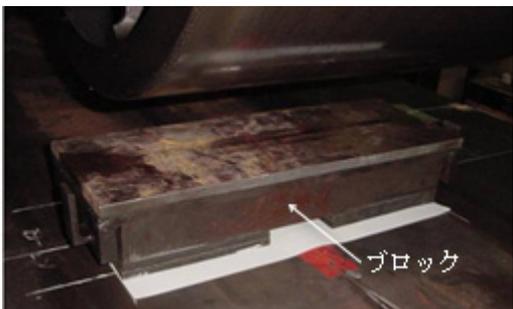
図-4.4.1 載荷時の計測ひずみ



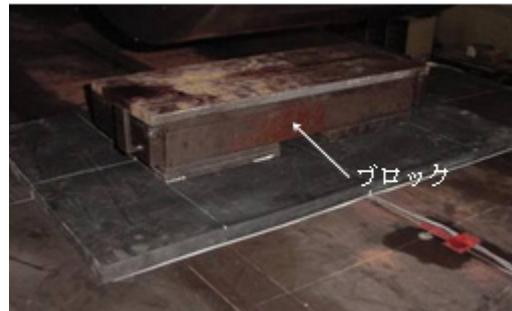
ケース a : 本試験



ケース b : ゴムタイヤ

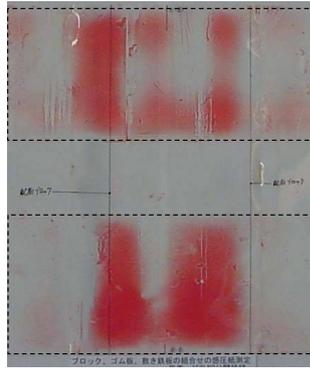
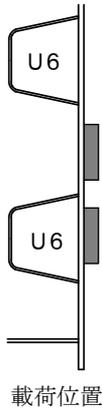


ケース c : ゴム 1 枚



ケース d : ゴム 2 枚

写真-4.4.1 感圧紙による接地圧分布の測定状況



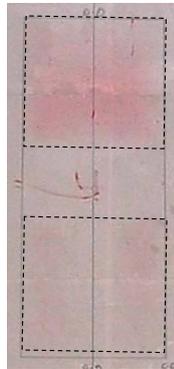
ケース a :
本試験 (150kN)



ケース a :
本試験 (50kN)



ケース b :
ゴムタイヤ (50kN)



ケース c :
ゴム 1 枚 (50kN)



ケース d :
ゴム 2 枚 (50kN)

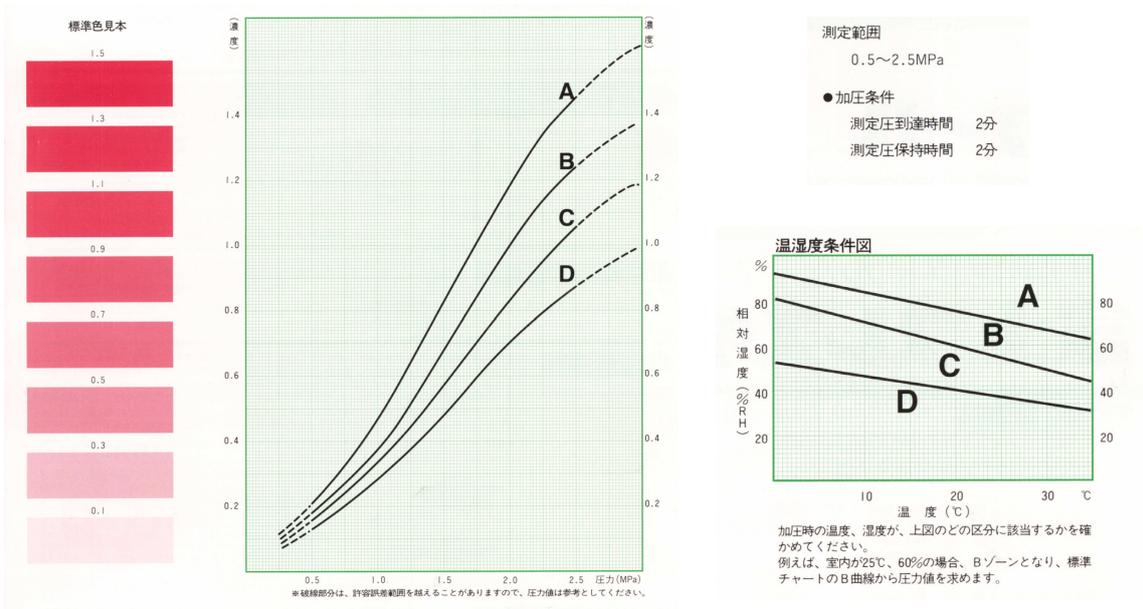


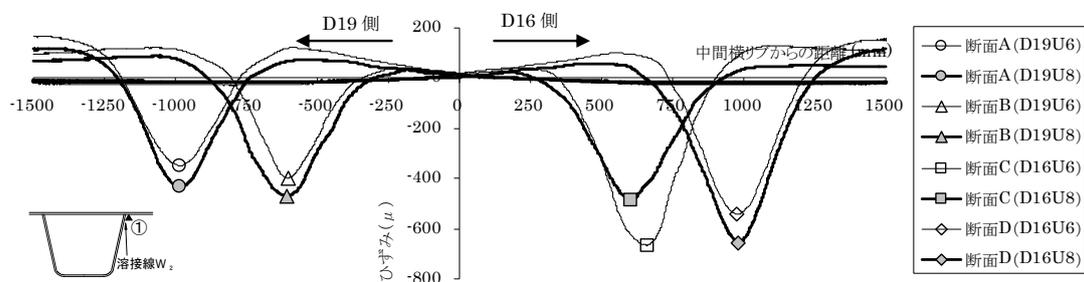
写真-4.4.2 感圧紙の試験結果 (すべて下側が主桁側)

(2) 動的計測による影響線の計測

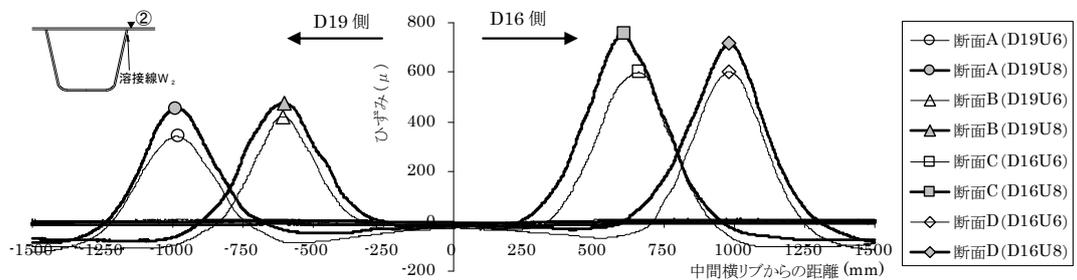
表-4.4.3 に輪荷重走行試験前に実施した動的計測によって得られたひずみの最大値, 最小値, および変動範囲を, 図-4.4.2 に動的計測結果 (影響線) を示す。

表-4.4.3 ひずみの最大値, 最小値, および変動範囲

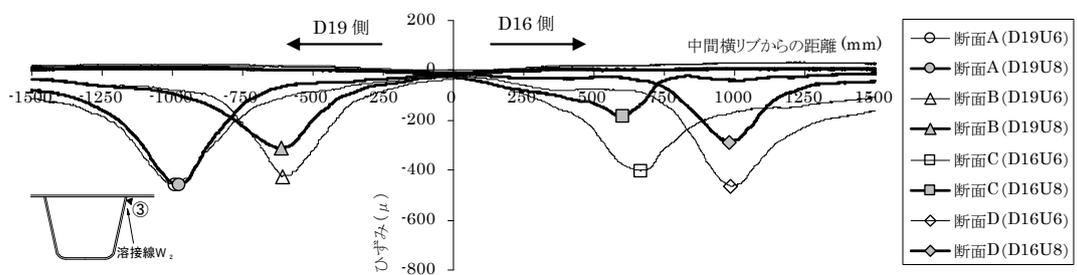
		ゲージ①: デッキプレート下面			ゲージ②: デッキプレート上面			ゲージ③: Uリブ側面		
		最大値	最小値	変動範囲	最大値	最小値	変動範囲	最大値	最小値	変動範囲
D19U6	断面A	167	-349	516	343	-123	466	31	-459	491
	断面B	121	-398	520	423	-111	534	33	-427	460
D19U8	断面A	119	-432	551	456	-87	543	9	-461	470
	断面B	88	-469	558	475	-78	553	7	-313	321
D16U6	断面C	130	-667	797	600	-103	704	21	-403	424
	断面D	155	-543	698	603	-115	718	24	-465	490
D16U8	断面C	52	-487	538	756	-75	831	13	-183	196
	断面D	117	-656	773	717	-84	801	9	-287	295



(a) デッキプレート側止端 5mm 位置 (ひずみゲージ①)



(b) デッキプレート上面のひずみ (ひずみゲージ②)



(c) Uリブ側止端 5mm 位置 (ひずみゲージ③)

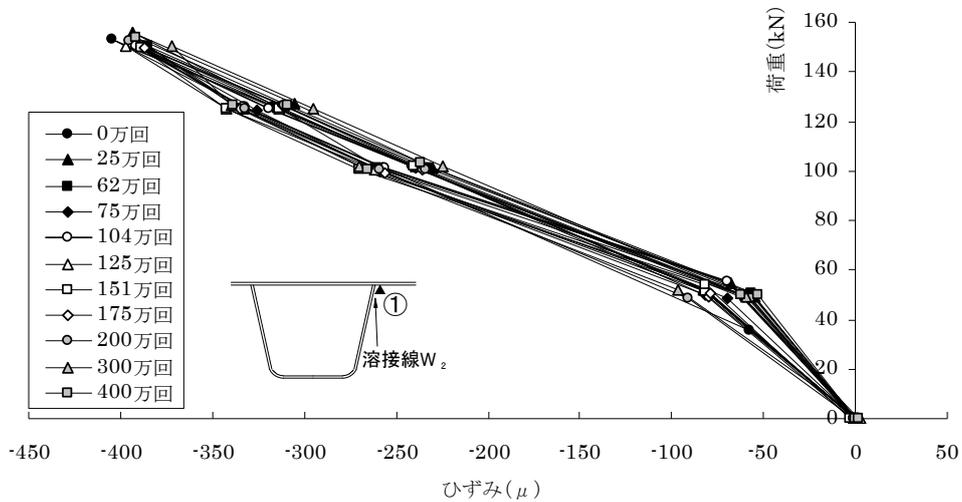
図-4.4.2 影響線の計測結果

4.4.2 輪荷重走行試験

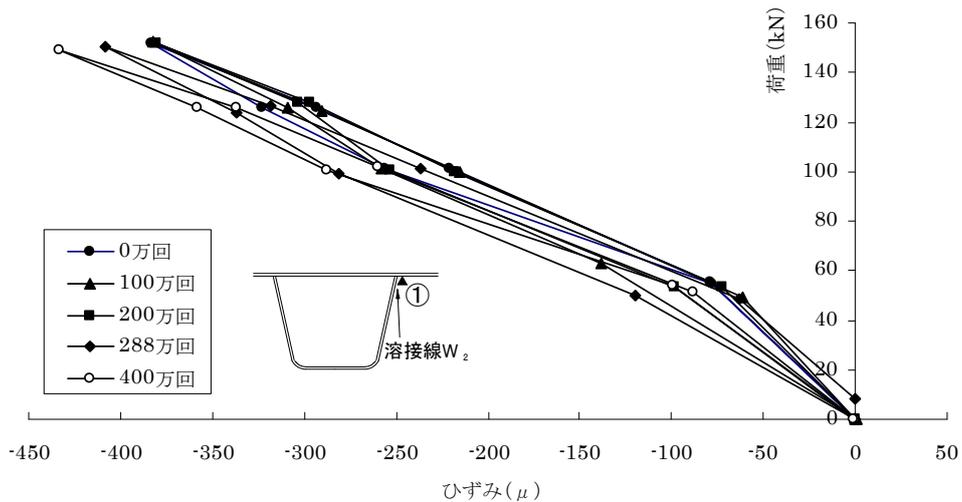
(1) 静的計測

図-4.4.3 に輪荷重走行試験中の静的載荷試験時の各部のひずみ計測結果を示す。主要なひずみについて 150kN 載荷時の値から 0kN 時の値を引き、載荷回数ごとにひずみ変化を整理した。

図-4.4.4 に U6 側、図-4.4.5 に U8 側の主要なひずみの変化を示す。U6 側、U8 側ともに、ひずみゲージ①、④の交差部（断面 a1, a2）のひずみが載荷回数の増加とともに徐々に変化した。交差部では、デッキプレート進展き裂の発生が確認されており、ひずみ変化はデッキプレート進展き裂の発生・進展による影響と考えられる。その他、U8 側では、断面 A, B のひずみゲージ③', ⑤'のひずみが増加している。これらの位置では、U リブウェブを貫通する U リブ側止端からのき裂が試験後に確認されており、その影響と考えられる。



(a) U6 側 (D19U6, 断面 A)



(b) U8 側 (D19U8, 断面 A)

図-4.4.3 静的載荷試験結果の例（デッキプレート側止端 5mm 位置-ひずみゲージ①-）

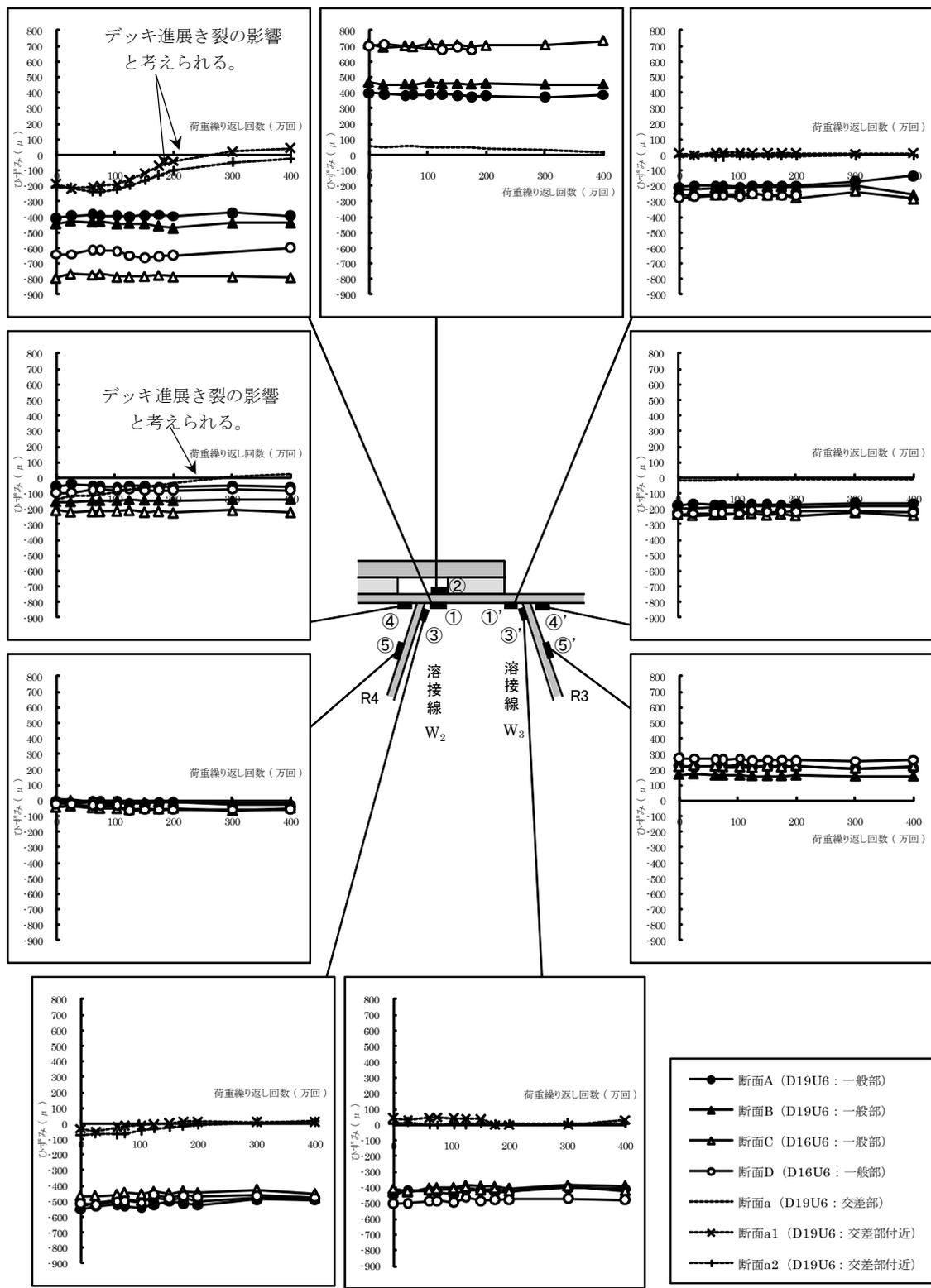


図-4.4.4 U6 側の静的载荷試験における各部のひずみの推移

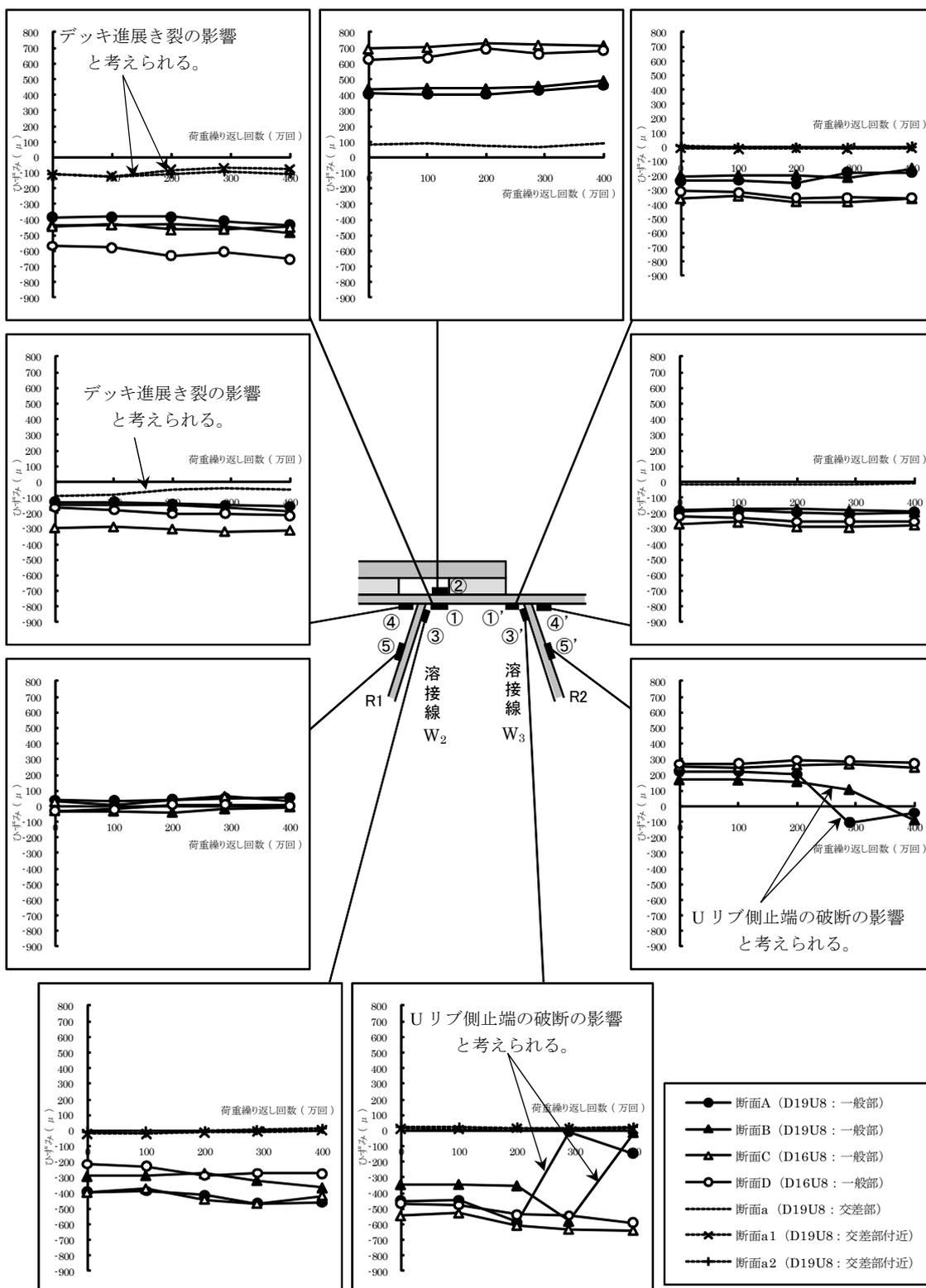


図-4.4.5 U8側の静的載荷試験における各部のひずみの推移

(2) 超音波探傷試験

図-4.4.6 に、U6 側の溶接線 W_2 の測点 41 における 400 万回走行試験終了後の超音波探傷試験（以下、UT）による A スコープ画像の例を示す。図の縦軸は、エコー値を 2 倍に拡大して表示している。

図-4.4.7 に、それぞれ U6 側、U8 側における 400 万回走行試験終了後のクリーピング波法によるエコー高さの分布を示す。図中の測点の間隔は、溶接線 W_1 および W_3 では 125mm、溶接線 W_2 では 62.5mm である。U6 側においては、一般部で 20% 程度のエコー高さが検出され、交差部では溶接線 W_1 と W_2 で 100% を超える高いエコー高さが検出された。なお、104 万回と 300 万回において、輪荷重を走行させながら UT を実施したが、無載荷状態の値に比べ、エコー高さは若干大きくなるものの、前後の計測結果と比較して顕著なエコー高さの違いは見られなかった。U8 側では、溶接線 W_1 と W_2 の交差部のみでエコー高さが検出された。

図-4.4.8 に試験中のエコー高さの変化を示す。エコー高さは、交差部と一般部に分けて、それぞれの最大値を用いて整理している。エコー高さが検出されなかった U6 側の溶接線 W_3 の交差部、U8 側の全溶接線の一般部、および溶接線 W_3 の交差部は省略した（図-4.4.7 参照）。一般部では、試験終了時までエコー高さの変化が見られず、き裂は生じなかったと考えられる。一方、交差部では U6 側、U8 側ともに、溶接線 W_1 と W_2 において 150~250 万回程度からエコー高さが増加しており、载荷回数の増加とともにき裂が進展したと考えられる。

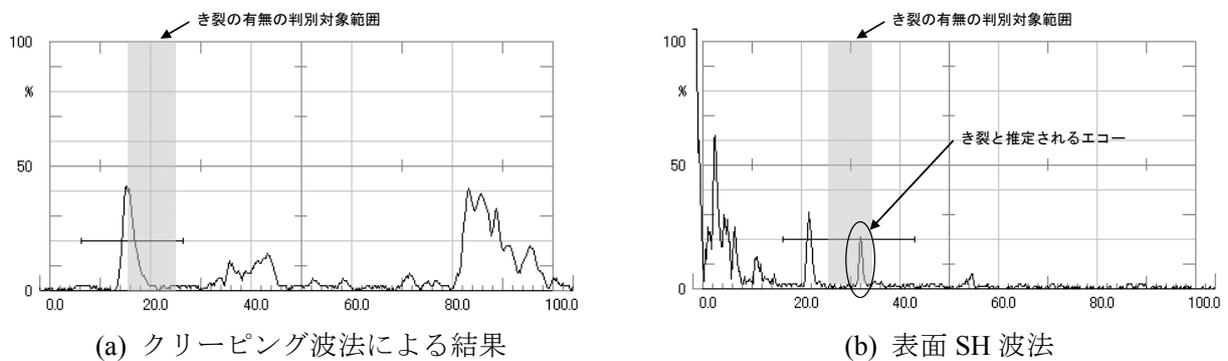
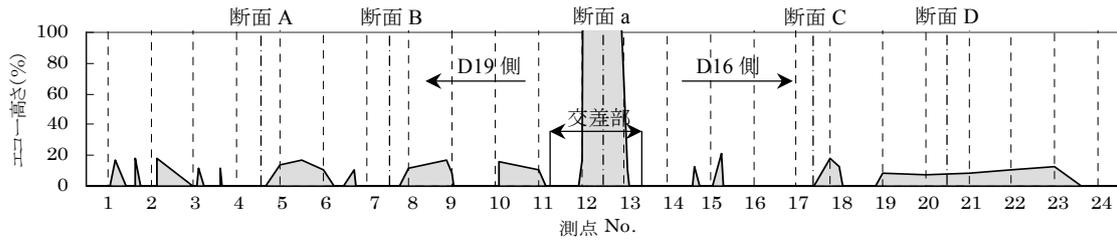
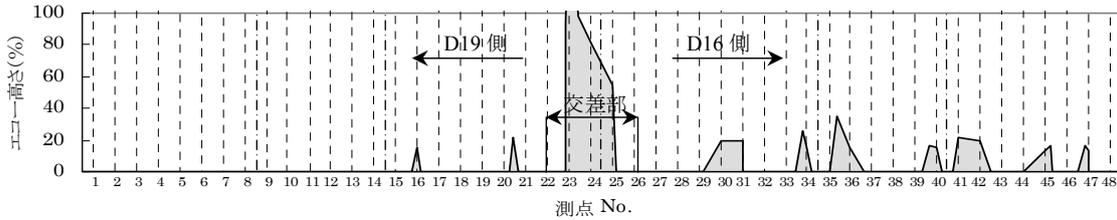


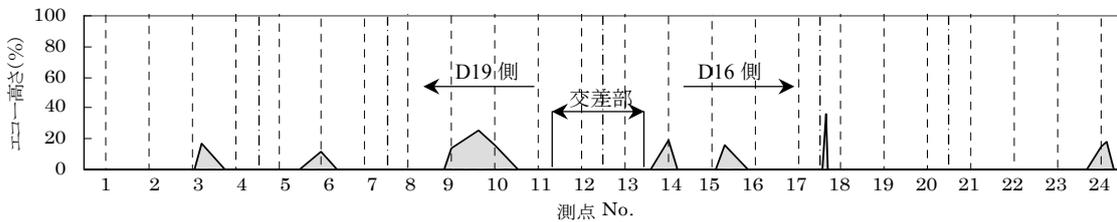
図-4.4.6 デッキプレート下面からの A スコープ画像の例
(U6 側溶接線 W_2 の測点 41 における試験終了後)



i) 溶接線 W₁

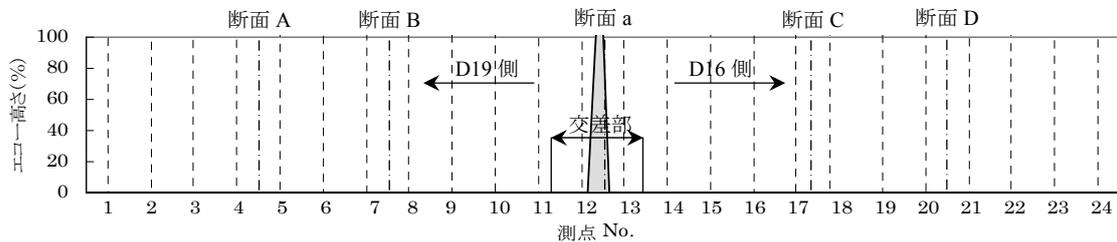


ii) 溶接線 W₂

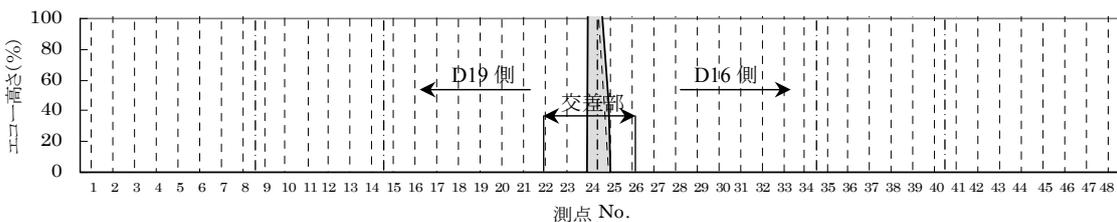


iii) 溶接線 W₃

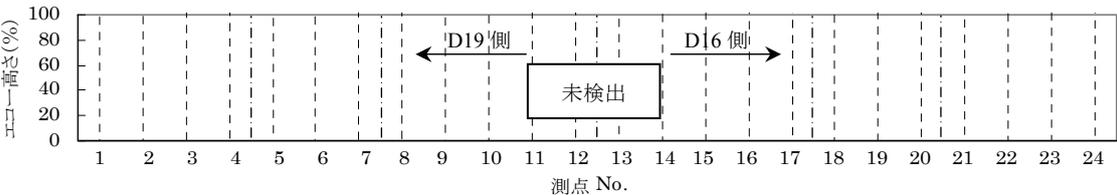
(a) U6 側



i) 溶接線 W₁



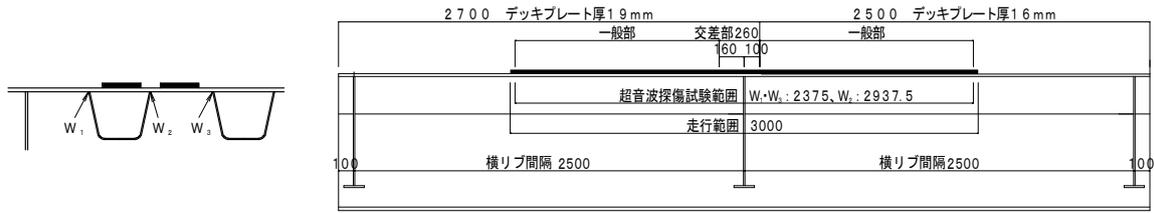
ii) 溶接線 W₂



iii) 溶接線 W₃

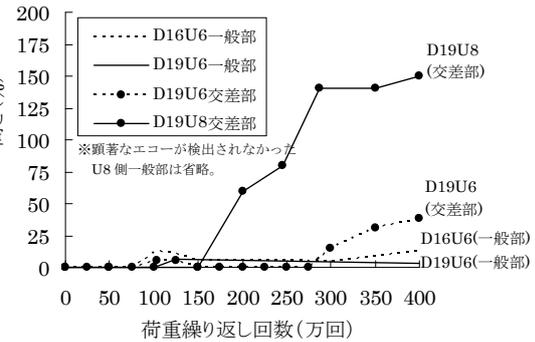
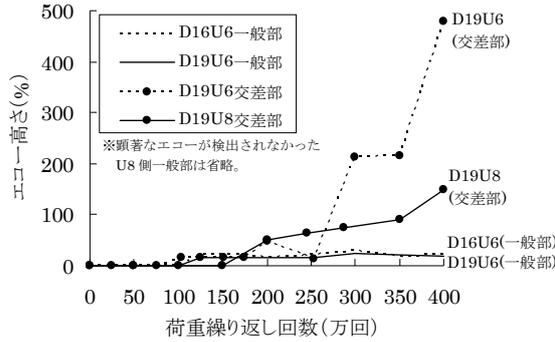
(b) U8 側

図-4.4.7 400万回走行後のクリーピング波法によるエコー高さの分布



探傷溶接線

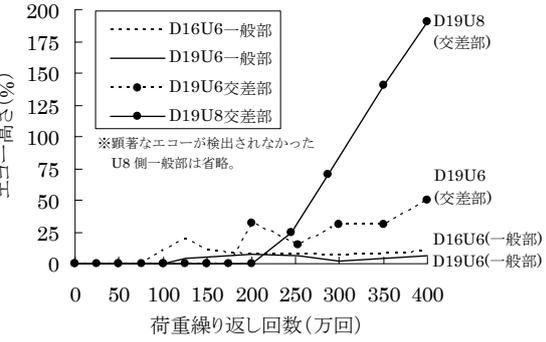
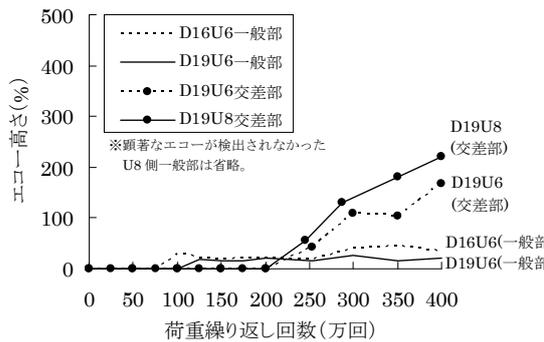
探傷範囲



(i) クリーピング波法

(ii) 表面SH波法

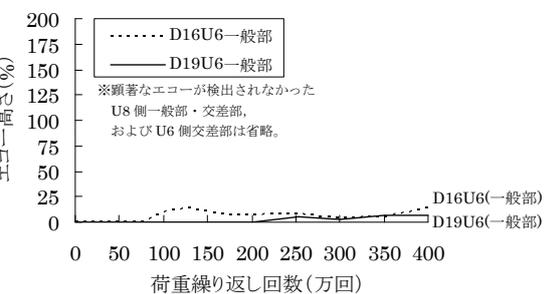
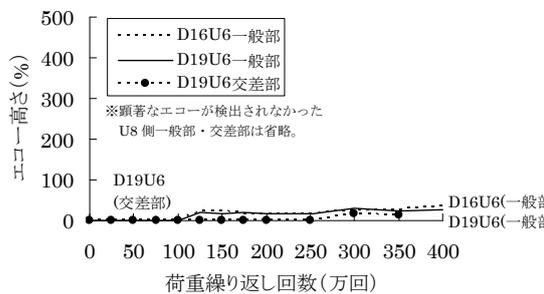
(a) 溶接線 W₁



(i) クリーピング波法

(ii) 表面SH波法

(b) 溶接線 W₂



(i) クリーピング波法

(ii) 表面SH波法

(c) 溶接線 W₃

図-4.4.8 一般部および交差部におけるエコー高さの変化

4.4.3 事後計測

(1) デッキプレートのコア抜き調査

図-4.4.9 にコア抜き位置を示す。コアの名称は、溶接線と UT 時の計測番号で表している。U6 側では交差部近傍 5 箇所、一般部 3 箇所の計 8 箇所、U8 側では交差部近傍 5 箇所、一般部 4 箇所の計 9 箇所でコアを抜いた。表-4.4.4 に MT によるき裂深さ（直線長さを含む）および UT の結果を示す。また、写真-4.4.3 と写真-4.4.4 にそれぞれ U6 側と U8 側の MT の状況を示す。

U6 側において、交差部近傍の W_1 12+10（コア抜き位置は溶接線 W_1 の No.12 から 10mm 交差部側の位置）、 W_1 13、 W_2 23+15、 W_2 24、および W_2 25 の 5 つのコアでは、ルート部からき裂が確認され、斜め上方に進展していた。一方、一般部から採取した W_2 34、 W_2 41、および W_3 9+64 では、き裂は確認できなかった。写真-4.4.5 に、左右のき裂深さに差のある W_1 12+10、 W_2 25 のコアの破面状況を示す。疲労き裂は横リブウェブ位置を中心に半楕円状に進展している。写真-4.4.6 に、コアの左右でき裂深さがほぼ同じであった W_2 23+15、 W_2 24 を縦割りし、マクロ試験を行った結果を示す。縦割りした断面においても、左右と同程度のき裂深さであった。

U8 側においては、交差部近傍の W_1 12+37、 W_1 13-42、および W_2 24 の 3 つのコアで、ルート部からき裂が発生し、斜め上方に進展していたが、 W_1 12 および W_3 12+40 ではき裂が確認できなかった。一方、一般部では、採取した 4 つのすべてのコアで、ルート部から発生するき裂は確認できなかった。しかしながら、 W_3 4+62.5 および W_3 7+62.5 では、U リブ側の溶接止端部から発生したき裂が、U リブを貫通していた。交差部近傍のき裂が確認された 3 つのコアの破面の状況と、き裂面に沿って割った結果を写真-4.4.7 に示す。また、同写真には、U リブ側端から貫通き裂が確認された 2 つのコアの破面の状況を示す。

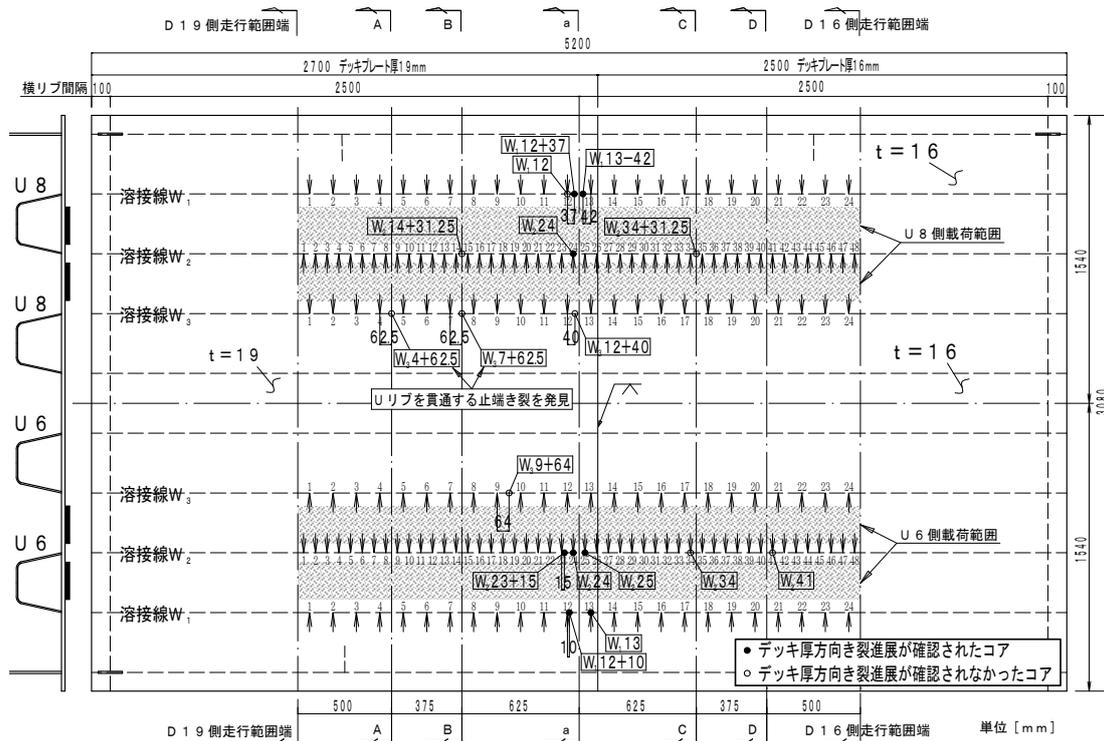
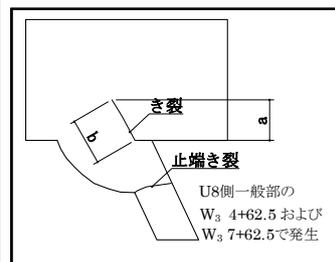


図-4.4.9 コア抜き位置

表-4.4.4 コアのMT結果

コア採取位置		コア抜き結果 (mm)				UT結果 (400万回載荷後)		
		若番側		老番側		エコー高 (%)		
		a	b	a	b	クレーピング波法	表面SH波法	
U6側	交差部 近傍	W ₁ 12+10	0	0	12.5	16.5	336	25
		W ₁ 13	12	15	0	0	69	38
		W ₂ 23+15	11	11	14	16	104*2	31*2
		W ₂ 24	14.5	18	14.5	20.5	実施せず	実施せず
	一般部	W ₂ 25	13.5	18	3.5	3	55	検出せず
		W ₂ 34	0	0	0	0	17	7
		W ₂ 41	0	0	0	0	22	10
W ₃ 9+64	0	0	0	0	29*3	3*3		
U8側	交差部 近傍	W ₁ 12	0	0	0	0	検出せず	検出せず
		W ₁ 12+37	7.5	9.5	13.3	16	90	150
		W ₁ 13-42	13	15	0	0	150	70
		W ₂ 24	0	0	8	8.5	220	190
	一般部	W ₃ 12+40	0	0	0	0	検出せず	検出せず
		W ₂ 14+31.25	0	0	0	0	検出せず	検出せず
		W ₂ 34+31.25	0	0	0	0	検出せず	検出せず
		W ₃ 4+62.5*1	0	0	0	0	検出せず	検出せず
		W ₃ 7+62.5*1	0	0	0	0	検出せず	検出せず



a=き裂深さ
b=き裂直線長さ(ルート部を除く)
単位: mm

*1: U8側一般部のW₃ 4+62.5およびW₃ 7+62.5では、Uリブを貫通する止端き裂を確認した。
*2: U6側のW₂ 23+15では、400万回時に計測していないため、350万回時の値を示す。
*3: U6側のW₃ 9+64では、400万回時および350万回時の計測を実施していないため、300万回時の値を示す。

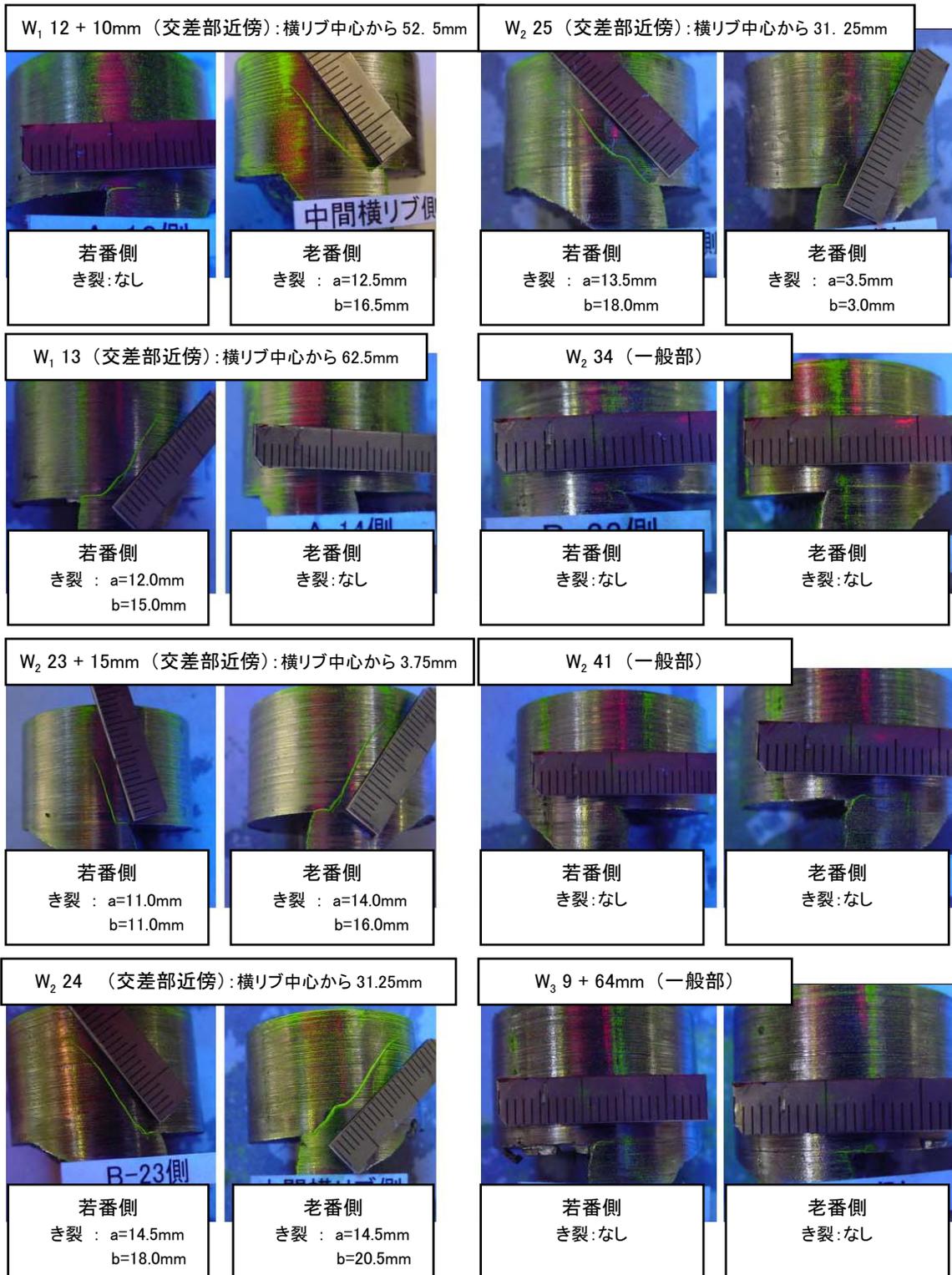


写真-4.4.3 U6 側でのコア抜き結果

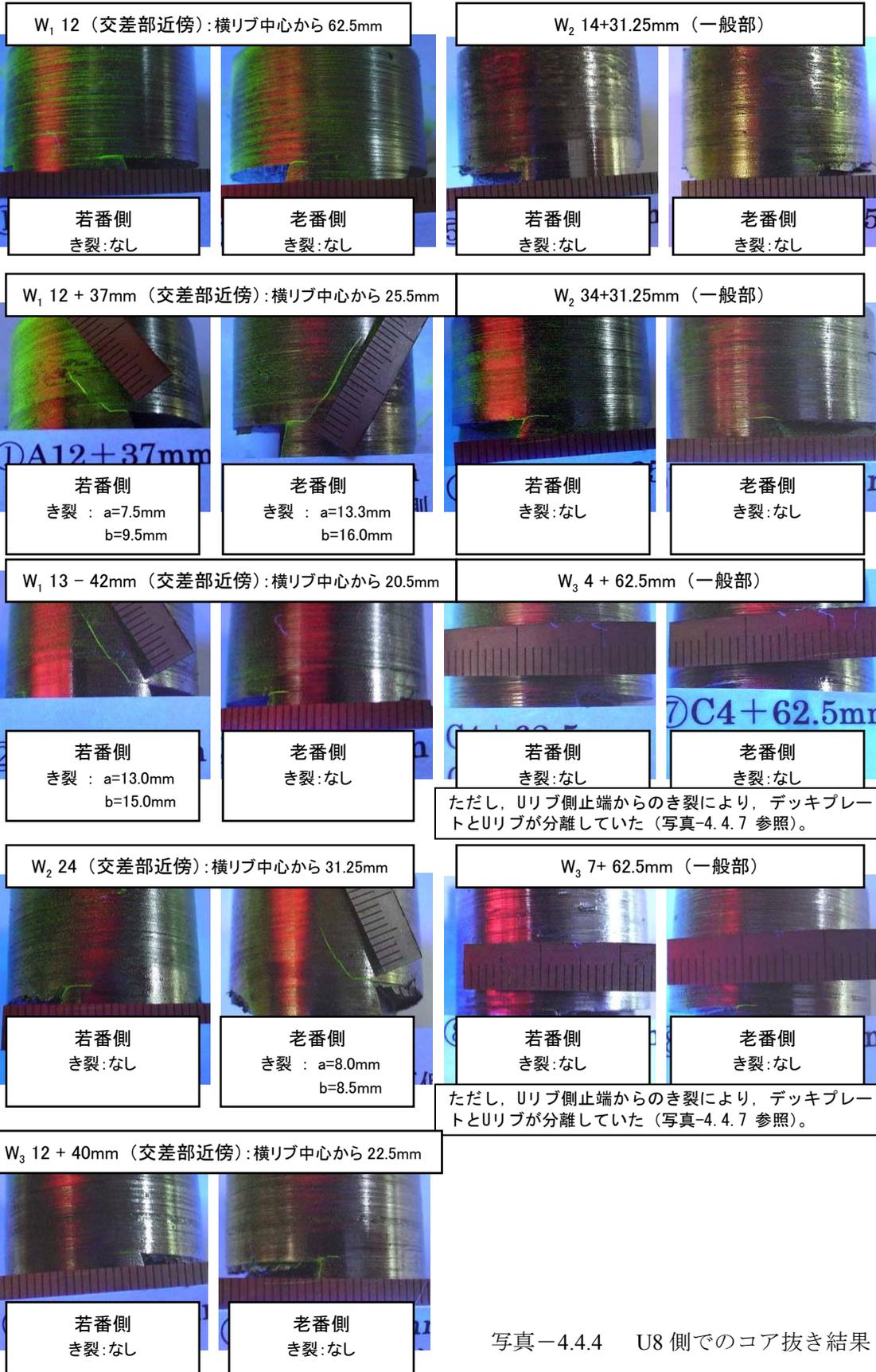
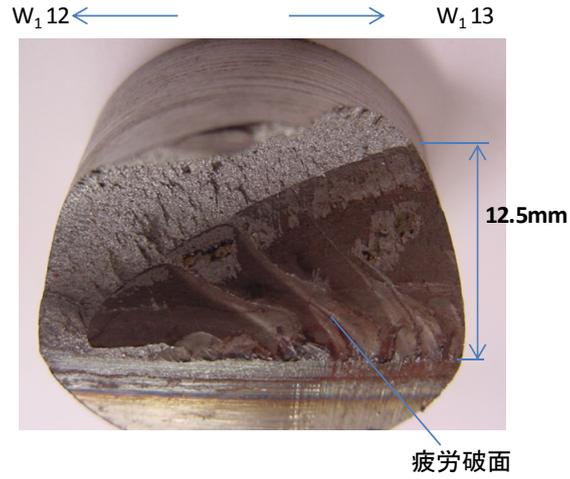
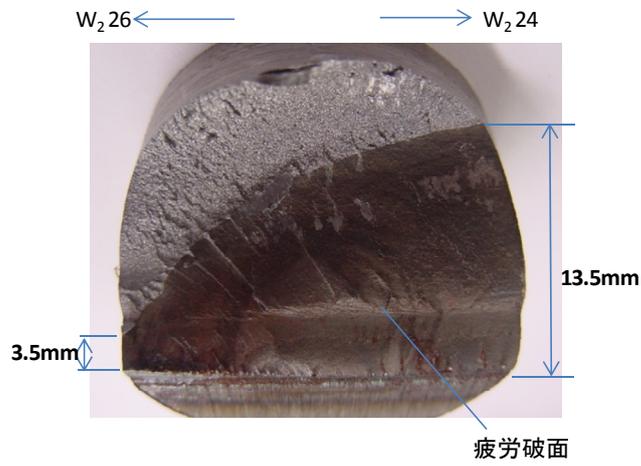


写真-4.4.4 U8 側でのコア抜き結果

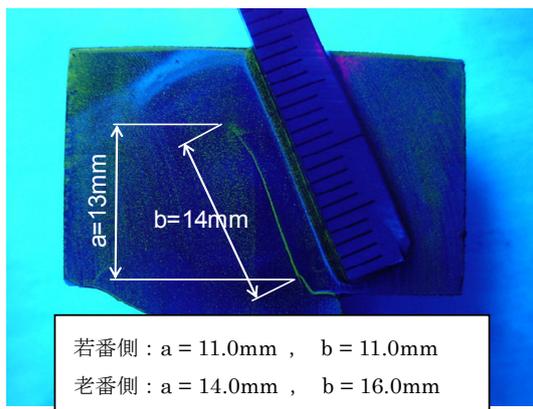


(a) W₁ 12 + 10mm (横リブ中心から 52.5mm)

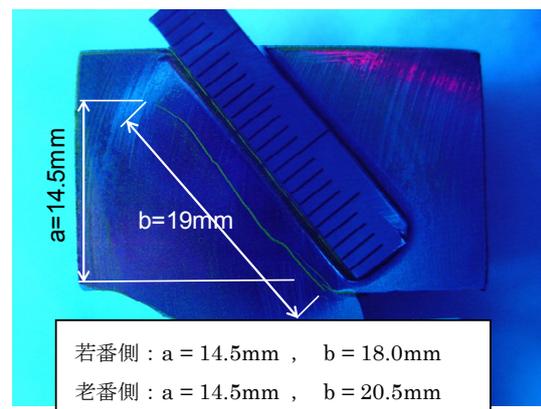


(b) W₂ 25 (横リブ中心から 31.25mm)

写真-4.4.5 U6 側の破面写真

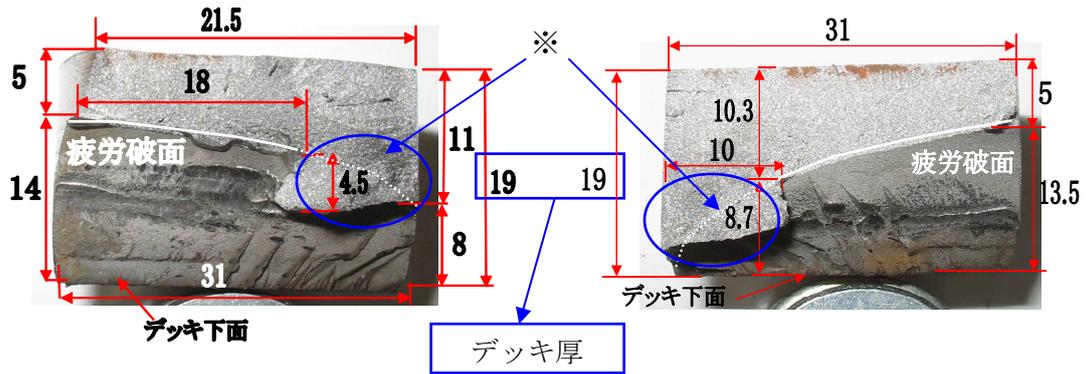


(a) W₂ 23 + 15mm (横リブ中心から 93.75mm)

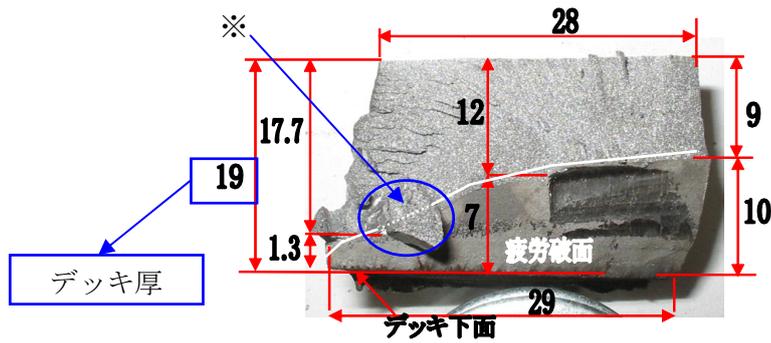


(b) W₂ 24 (横リブ中心から 31.25mm)

写真-4.4.6 U6 側のコア抜き結果

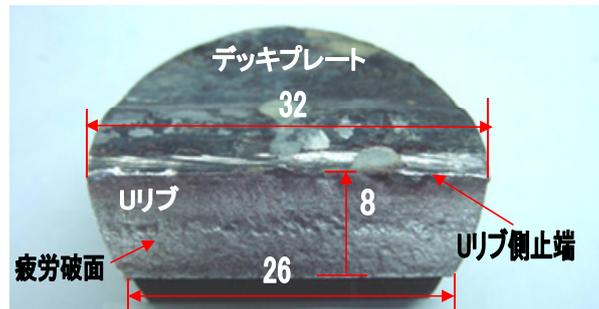


(a) W_1 12+37mm (横リブ中心から 25.5mm) (b) W_1 13-42mm (横リブ中心から 20.5mm)

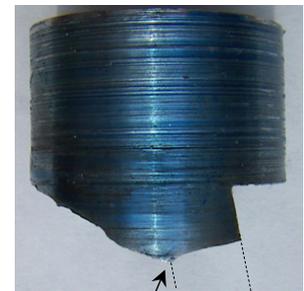


※ 破壊時に破面の一部が疲労破面の上に被さって残った箇所

(c) W_2 24 (横リブ中心から 31.25mm)



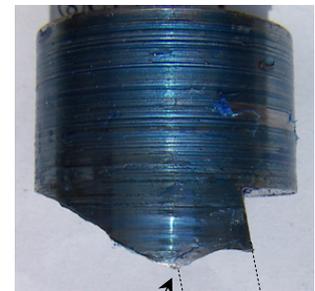
(d) W_3 4+62.5mm



Uリブ側止端



(e) W_3 7+62.5mm



Uリブ側止端

写真-4.4.7 U8側の破面写真

(2) リブ交差部の切り出し調査

図-4.4.10 に交差部の切り出し、調査位置を示す。写真-4.4.8 に破面観察の結果を示す。

本調査結果およびコア抜き調査結果によれば、U6 側と U8 側の溶接線 W_1 , W_2 では、交差部にき裂が発生しているものの、溶接線 W_3 ではき裂が発生していなかった。

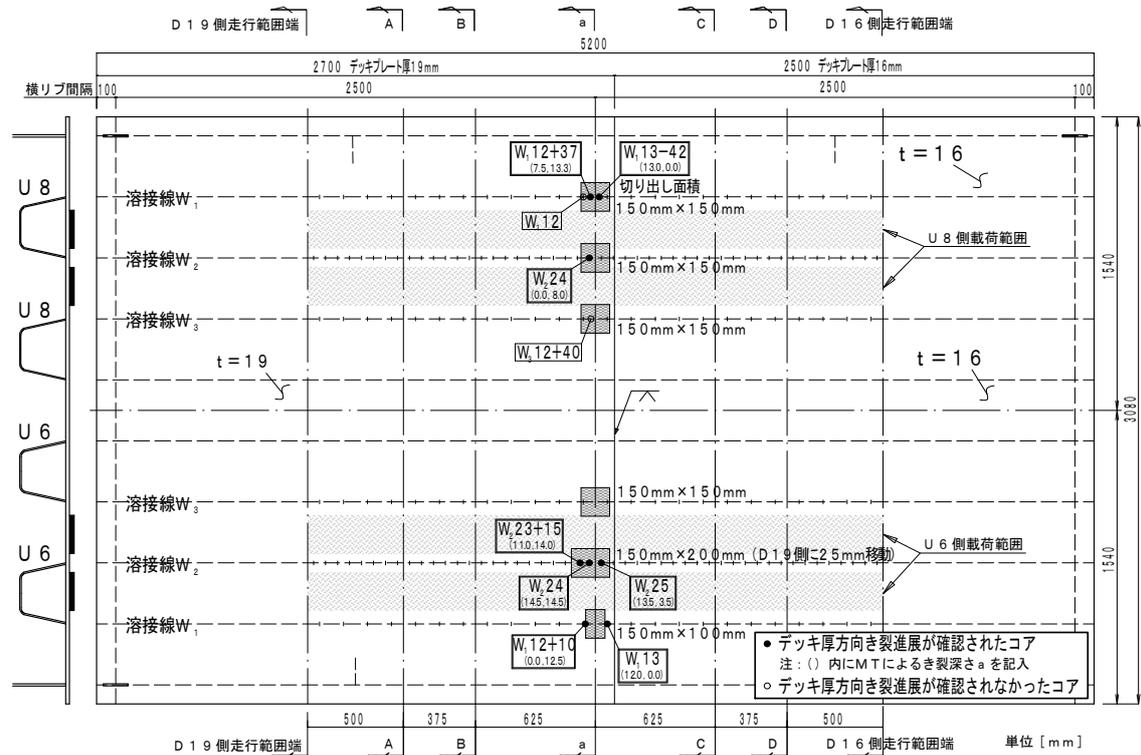
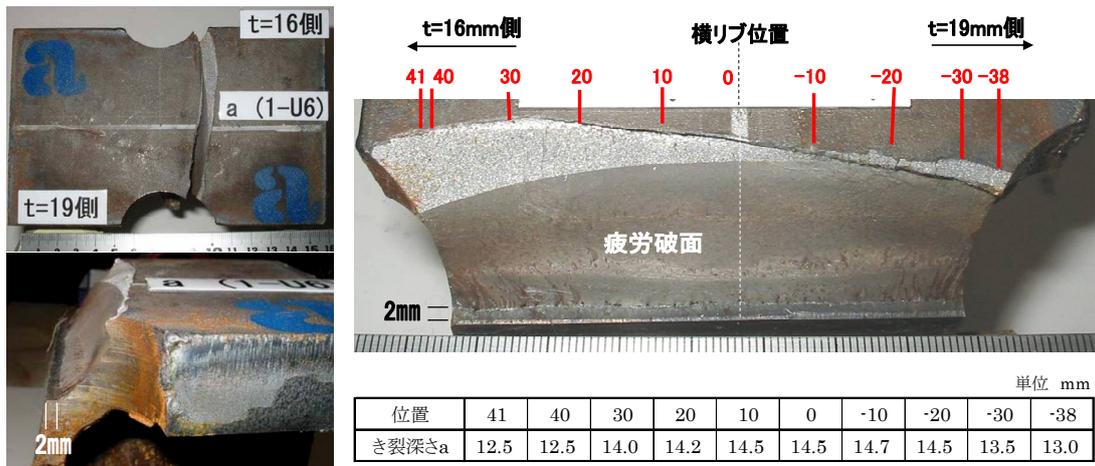
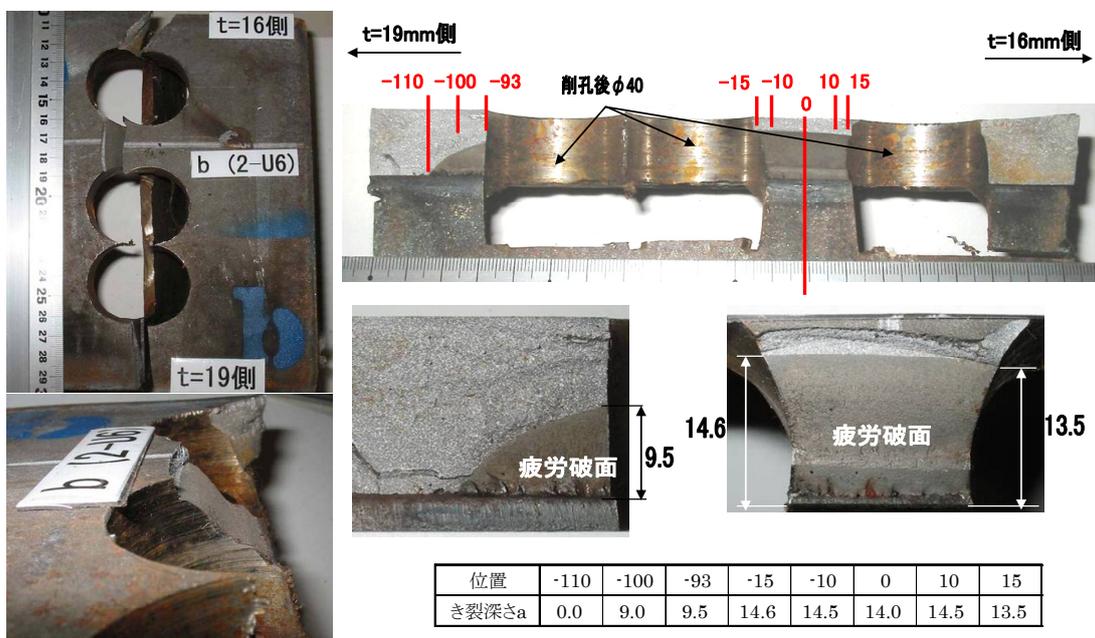


図-4.4.10 切り出し調査位置



(a) U6側 溶接線 W_1

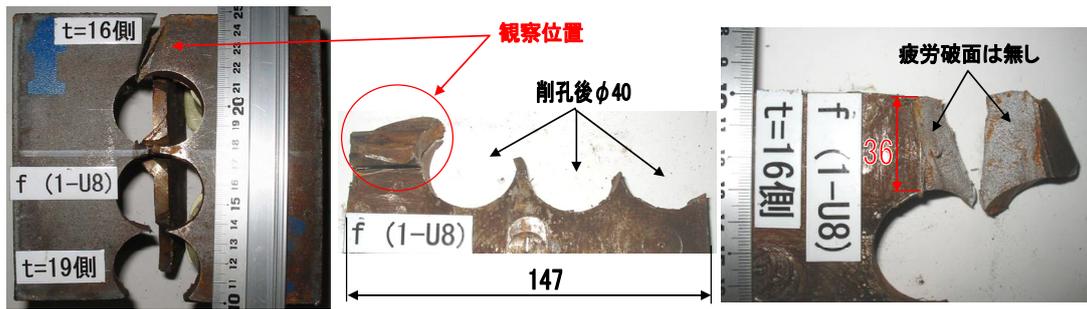


(b) U6側 溶接線 W_2

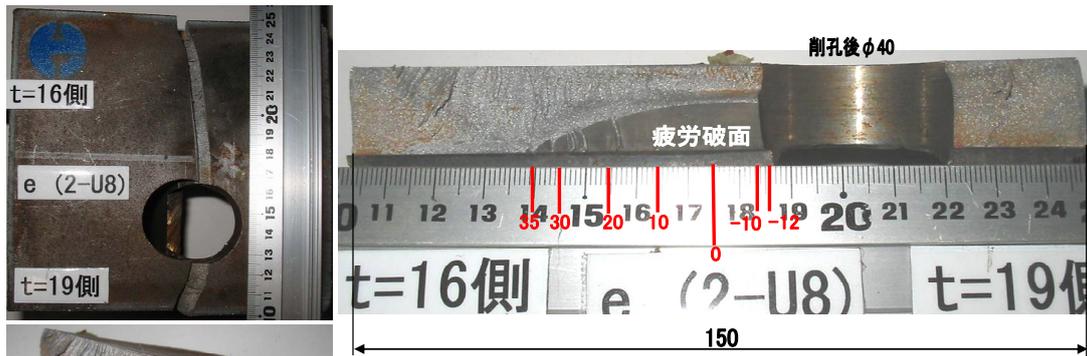


(c) U6側 溶接線 W_3

写真-4.4.8 切り出し調査による破面の状況 (その1: U6側)



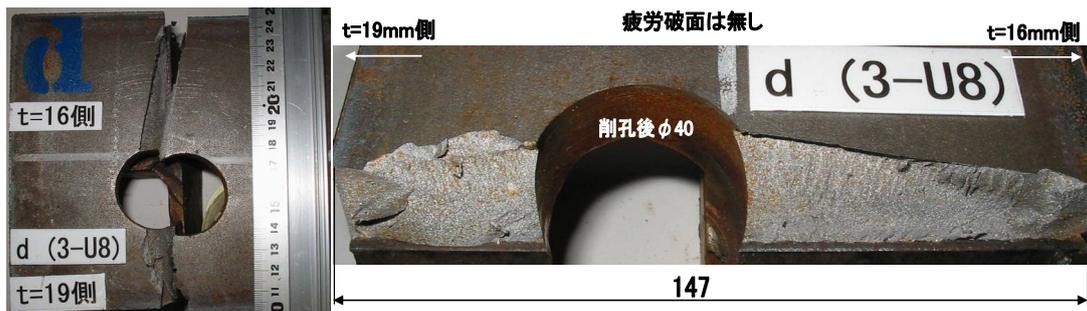
(d) U8側 溶接線 W₁



単位 mm

位置	35	30	20	10	0	-10	-12
き裂深さa	1.0	3.0	6.5	9.0	9.5	9.7	9.7

(e) U8側 溶接線 W₂

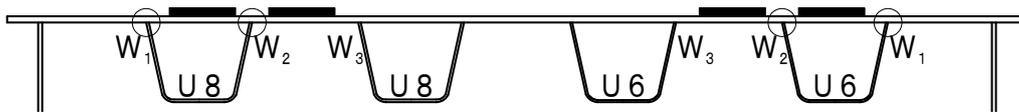


(f) U8側 溶接線 W₃

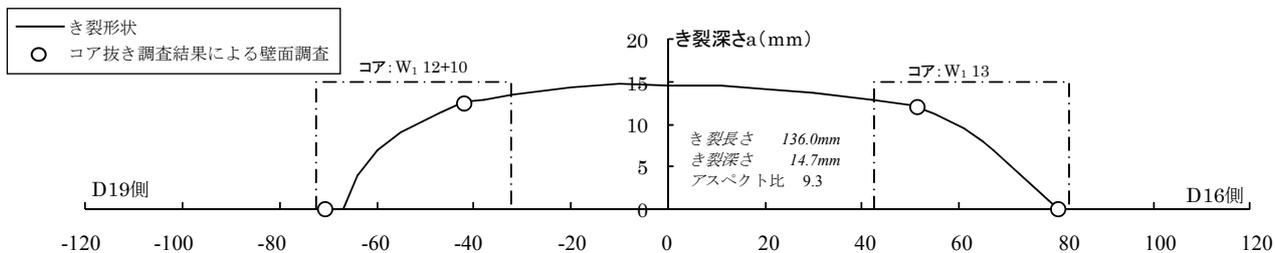
写真-4.4.8 切り出し調査による破面の状況 (その2 : U8側)

(3) 交差部のき裂の形状と進展挙動

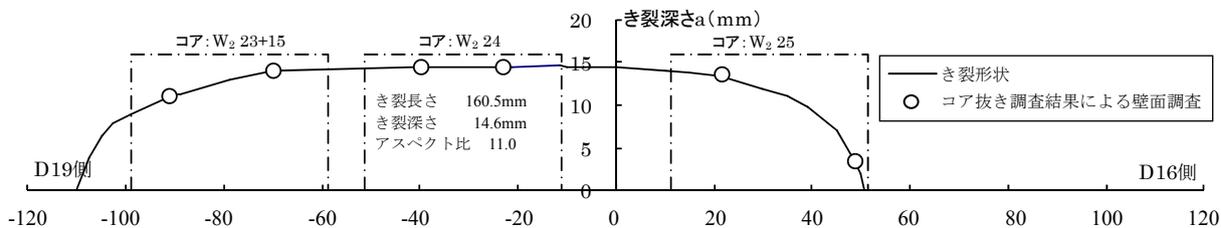
図-4.4.11 に、切り出し調査およびコア抜き調査の結果から横リブ交差部におけるき裂形状を整理した結果（デッキプレート面に垂直方向に投影した深さ）を示す。図中の実線は切り出し調査の結果を示し、破線はコア抜き調査の結果から推定したき裂の形状を示している。交差部に発生したき裂は、横リブウェブを挟んで半楕円状に進展している。アスペクト比（横リブ位置でのき裂長さ／き裂深さ）は、U6 側が約 10、U8 側が約 6.5 であった。なお、き裂深さおよび長さは、U8 側に比べ U6 側が大きい。



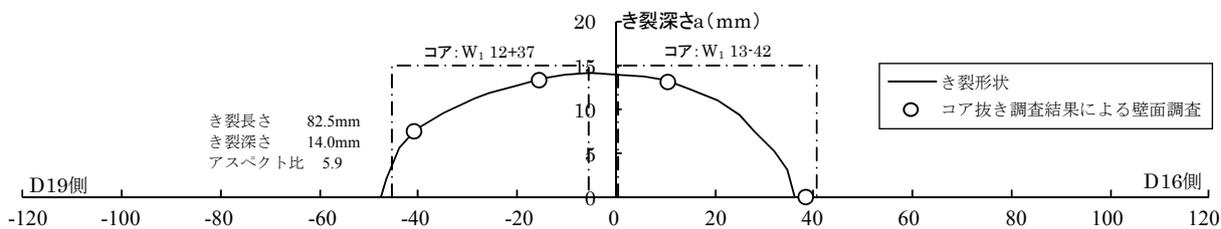
着目溶接線



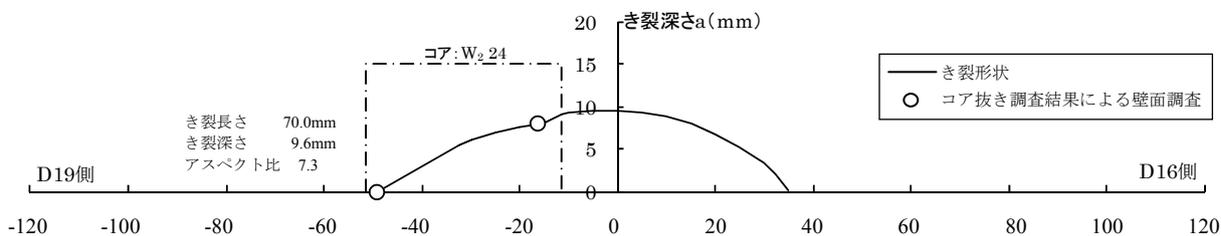
(a) U6側 溶接線 W₁



(b) U6側 溶接線 W₂



(c) U8側 溶接線 W₁



(d) U8側 溶接線 W₂

図-4.4.11 交差部のき裂形状

4.5 FEM 解析

4.5.1 検討概要

デッキプレートの厚板化による疲労耐久性の向上効果を解析的に検討するため、輪荷重走行試験で用いた供試体を対象とした FEM 解析を実施した。検討に先立って、解析モデルの妥当性を確認するため、解析結果と載荷試験結果の比較を行った。解析では、本試験で用いた供試体のモデルの他に、デッキプレート厚を変えたモデルを作成し、着目部位（ルート部、デッキプレート側止端 5mm 位置、および U リブ側止端 5mm 位置）について、デッキプレート厚と部位毎のひずみの関係を検討した。

4.5.2 解析モデル

(1) 基本解析モデル

図-4.5.1 に解析モデルを示す。解析モデルは、基本的に輪荷重走行試験で用いた試験体と同じ形状であるが、デッキプレート厚を 12, 14, 16, 19mm と一定板厚とした 4 つのモデルも追加した。本モデルでは、横リブ交差部の断面 a と、U リブ支間部の断面 A, D（中間横リブから 1000mm）に着目して要素分割を行った。デッキプレート、U リブ、中間横リブにはソリッド要素を、主桁、端横リブ、垂直補剛材にはシェル要素を用いた。ソリッド要素とシェル要素の結合部については、シェル要素をソリッド要素側に 1 要素分埋め込むこととした。

荷重ケースは、ダブルタイヤ載荷とシングルタイヤ載荷の 2 ケースとした。載荷位置は輪荷重走行試験での載荷位置を基本とした。解析モデルの妥当性の確認および橋軸方向の載荷位置の影響検討では、輪荷重走行試験と同じ範囲（横リブ位置を中心に-3000~3000mm）に載荷した。橋軸直角方向の載荷位置の影響検討では、6mm 厚 U リブのルート部に着目して検討を実施し、顕著な応力が生じると考えられる範囲に載荷した（図-4.5.1 参照）。なお、橋軸直角方向の載荷位置の検討に用いたモデルでは、載荷幅を一定に保つため、デッキプレート上面の要素寸法を若干変更した。

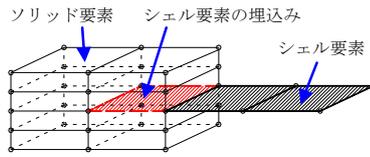
(2) デッキプレート-U リブ溶接部近傍の要素分割

図-4.5.2 にデッキプレート-U リブ溶接部近傍の要素分割を示す。すみ肉溶接の脚長は 6mm、溶接の溶け込み量は U リブ厚 6mm（あるいは 8mm）に対して 75%に相当する 4.5mm（あるいは 6mm）とした。溶接ルート部の要素サイズは最小で $0.2 \times 0.2 \times 0.5\text{mm}$ とした。ルート部における U リブとデッキプレートの接点は二重節点とした。なお、溶接ルート部とデッキ側止端部におけるひずみの相関関係の検討には、図中の着目要素の横断方向の要素ひずみと着目節点の横断方向の節点ひずみを比較した。

【使用要素】

部 位	使用要素
デッキ、 Uリブ、 中間横リブ	ソリッド要素
上記以外	シェル要素

【ソリッド要素とシェル要素との結合】



【モデルの諸元】

デッキプレート厚	12、14、16、19mm
Uリブ支間	2500mm×2径間
Uリブ寸法	320×240×6×R40 (2本) 320×240×8×R40 (2本)
主桁ウェブ	板厚 11mm×高さ 840mm
横リブウェブ	板厚 9mm×高さ 700mm
垂直補剛材	板厚 15mm×幅 135mm
材料物性	弾性係数 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ポアソン比 0.3
拘束条件	主桁下フランジ下面を完全拘束
荷重	ダブルタイヤ 150kN シングルタイヤ 75kN

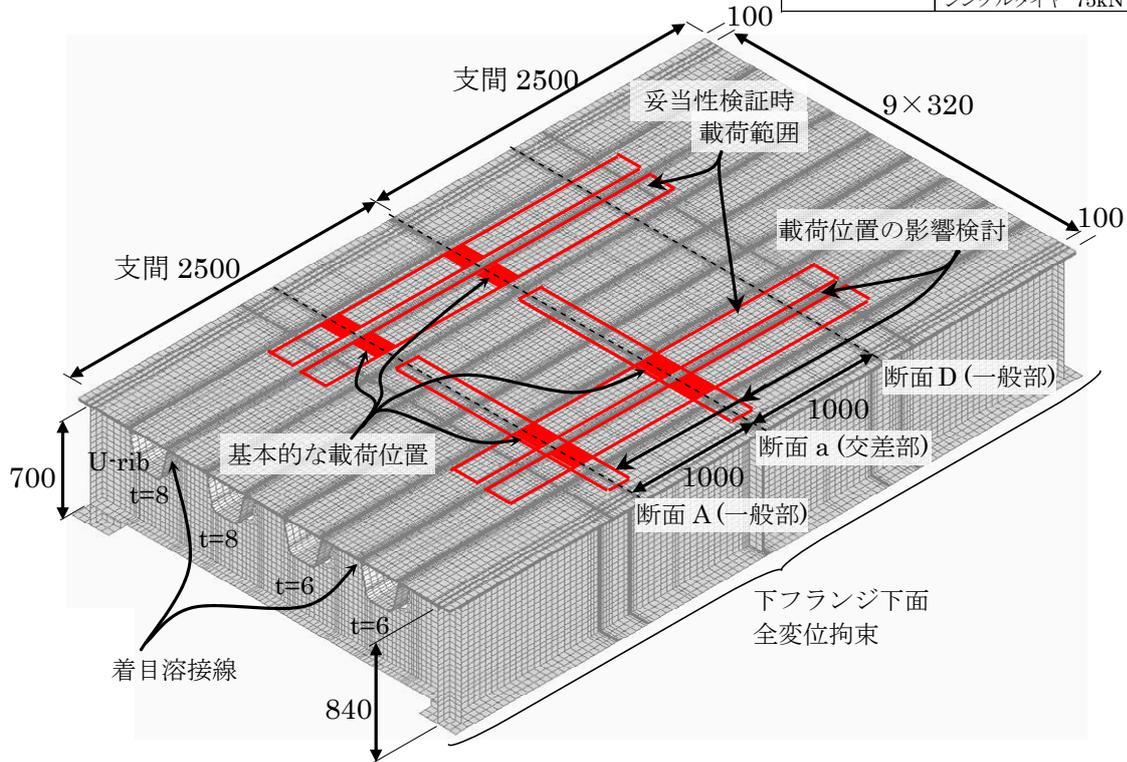


図-4.5.1 解析モデル，使用要素，モデルの諸元等

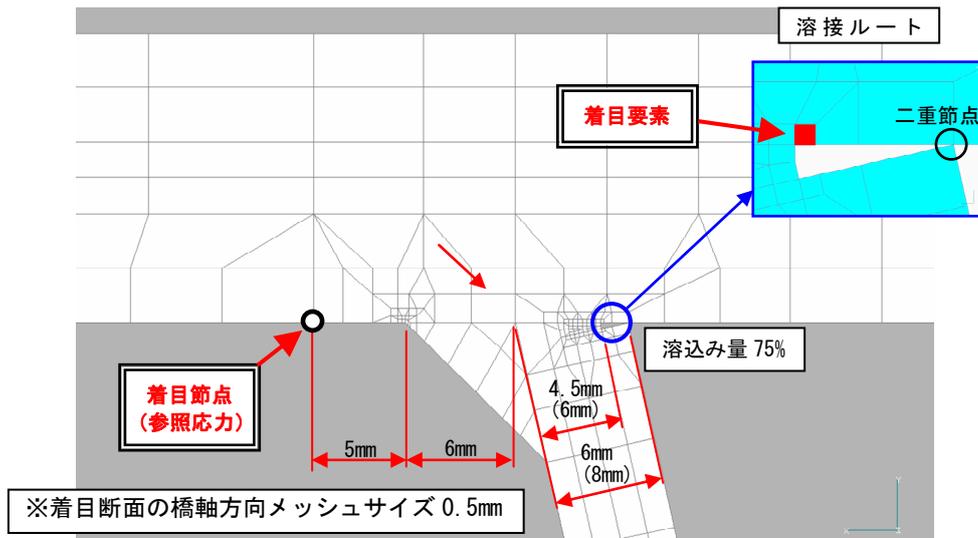


図-4.5.2 溶接部近傍の要素分割と着目要素

(3) 載荷荷重および境界条件

図-4.5.3 に載荷荷重および断面内の載荷位置を示す。ダブルタイヤ載荷では、輪荷重走行試験の荷重条件にあわせて、大型車の中・後輪のダブルタイヤを想定して輪重 150kN、1 タイヤ分の荷重 75kN を 200mm×200mm の載荷面に等分布載荷した。2 つの分布荷重の間隔は 100mm とした。シングルタイヤ載荷では、輪重 75kN とし、200mm×200mm の載荷面に等分布載荷した。橋軸直角方向の載荷位置は、ダブルタイヤ載荷では輪荷重走行試験と同様にUリブのウェブを跨ぐ位置とし、シングルタイヤ載荷ではダブルタイヤの U リブ内側の荷重位置と一致させた。橋軸直角方向の載荷位置の検討では、図-4.5.3(c)の載荷位置を基準に 50mm ピッチで横断方向に移動載荷した。

境界条件としては、主桁下フランジ下面の全変位を拘束した。なお、輪荷重走行試験では鋼製の載荷ブロック、敷き鋼板、ゴム板を介して載荷しているが、本解析ではデッキプレート面に直接載荷した。

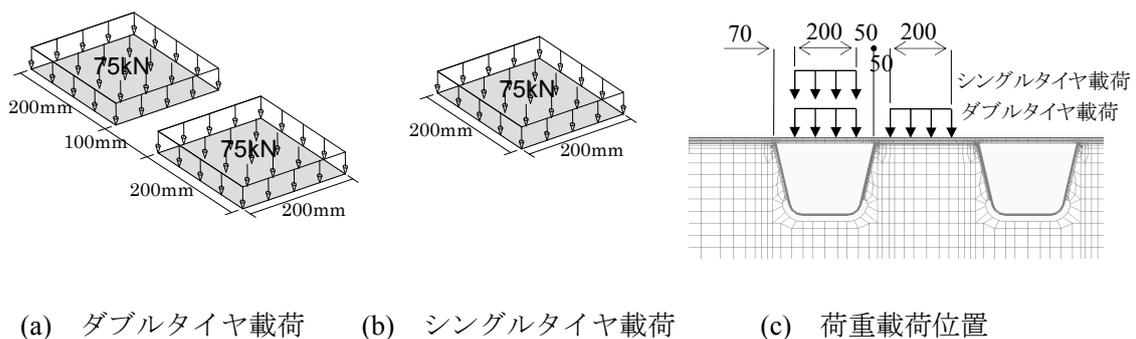


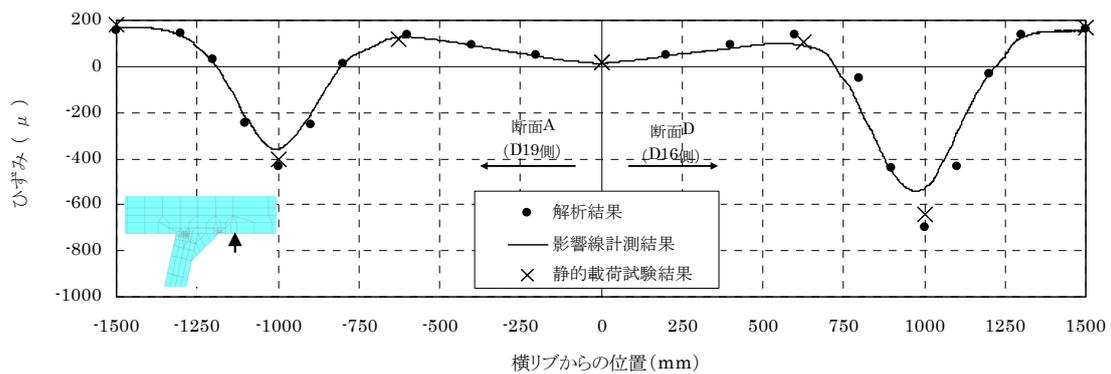
図-4.5.3 載荷荷重および載荷位置

4.5.3 解析結果

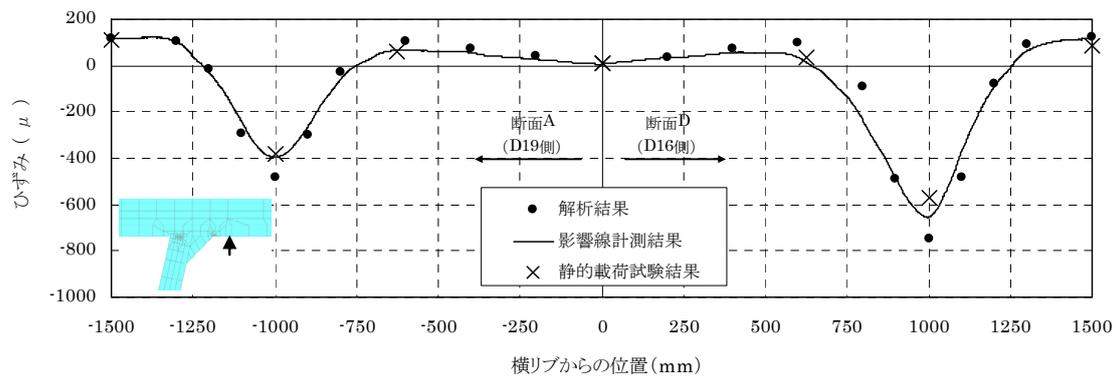
(1) 解析結果と実験結果の比較

i) 輪荷重移動時のひずみ挙動

図-4.5.4～図-4.5.6に、輪荷重走行試験の試験体モデルを用いて輪荷重を橋軸方向に移動させたときの断面A、Dのひずみを示す。図中には走行試験前の影響線計測と静的載荷試験の結果も併せて示す。中間横リブ位置を原点として左側（マイナス側）にD19側の結果を、右側（プラス側）にD16側の結果を示している。静的載荷試験結果は影響線計測結果と概ね一致しているが、着目断面直上（±1000mm位置）に載荷したときに差が大きくなる傾向がみられる。試験ではデッキプレート上に載荷ブロック、敷き鋼板、ゴム板を設置しているが、解析モデルではデッキプレート上に直接載荷しており、この載荷方法の違いが直上載荷時の場合に現れているものと考えられる。また、解析モデルでは脚長を6mmとしているのに対し、実際の試験体では脚長が10mm程度あり、Uリブの表面からの位置が試験体と解析モデルで若干異なることも一要因と考えられる。

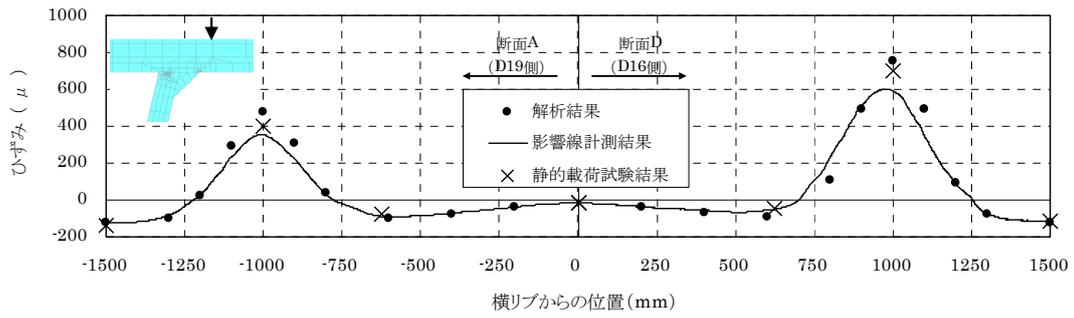


(a) U6側

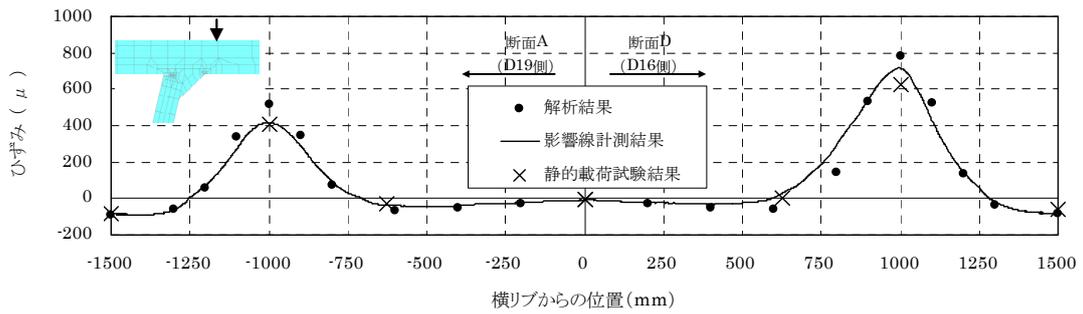


(b) U8側

図-4.5.4 デッキ下面のデッキプレート側止端5mm位置（ゲージ①位置）のひずみ

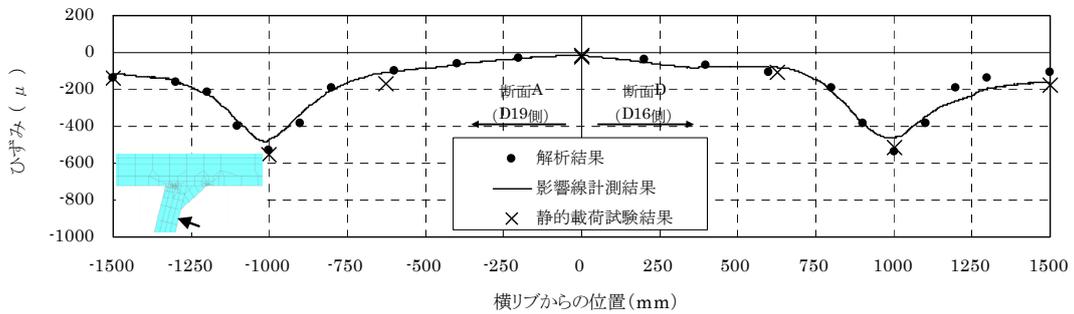


(a) U6 側

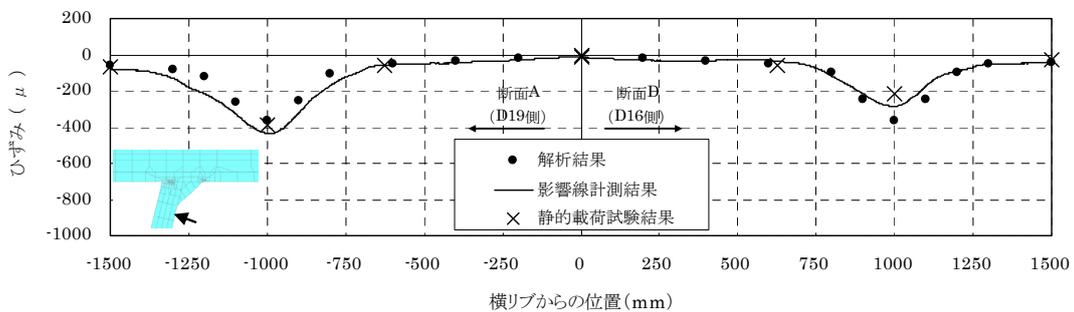


(b) U8 側

図-4.5.5 デッキ上面のデッキ側止端 5mm 位置 (ゲージ②位置) の直上のひずみ



(a) U6 側

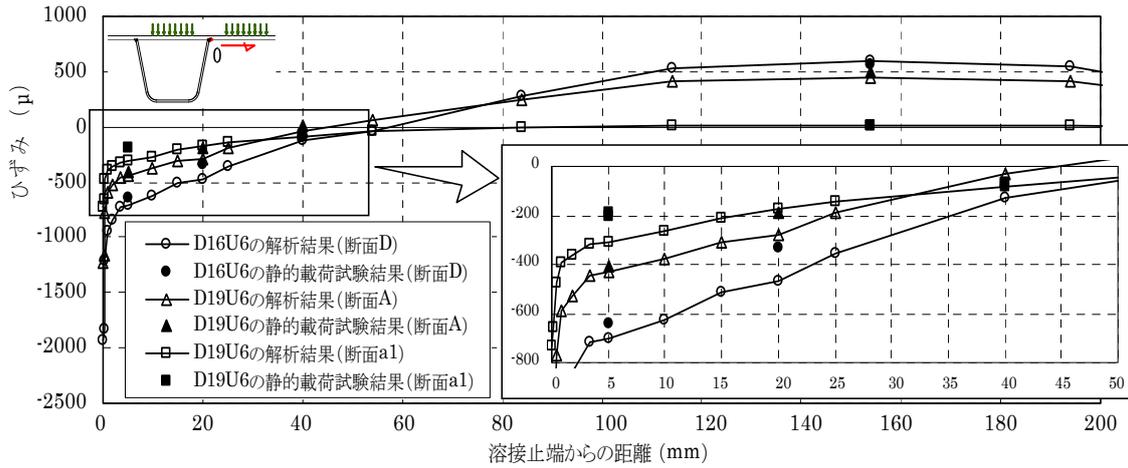


(b) U8 側

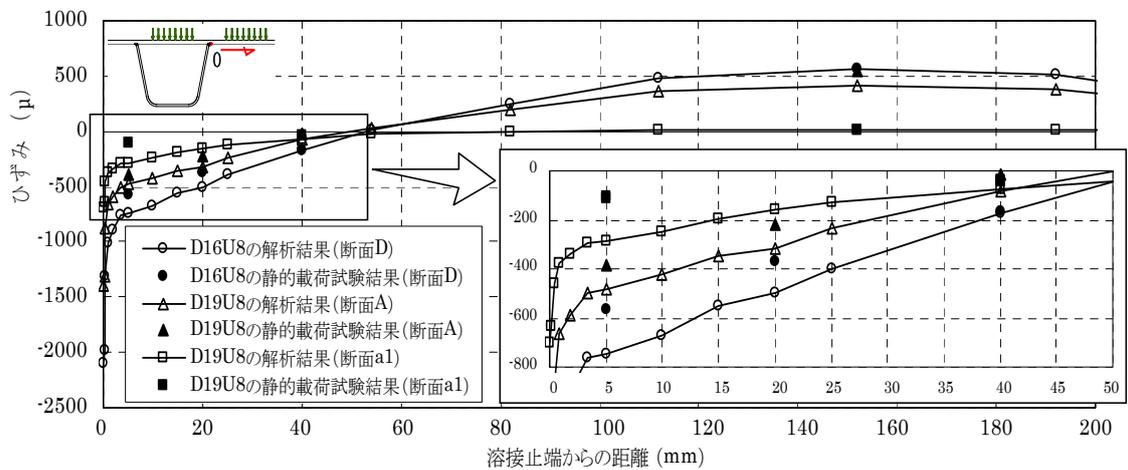
図-4.5.6 Uリブ側止端 5mm 位置 (ゲージ③位置) のひずみ

ii) 直上載荷時の溶接線近傍のひずみ分布

図-4.5.7, 図-4.5.8に, 断面 A, D, a1 に直上載荷した場合のひずみ分布を示す。図中には走行試験前の静的載荷試験結果も併せて示す。解析結果は, 試験結果の傾向と概ね一致している。解析結果と試験結果の差は, i) で述べたように, 試験体と解析モデルでの載荷方法や構造細部の相違によるものと考えられる。

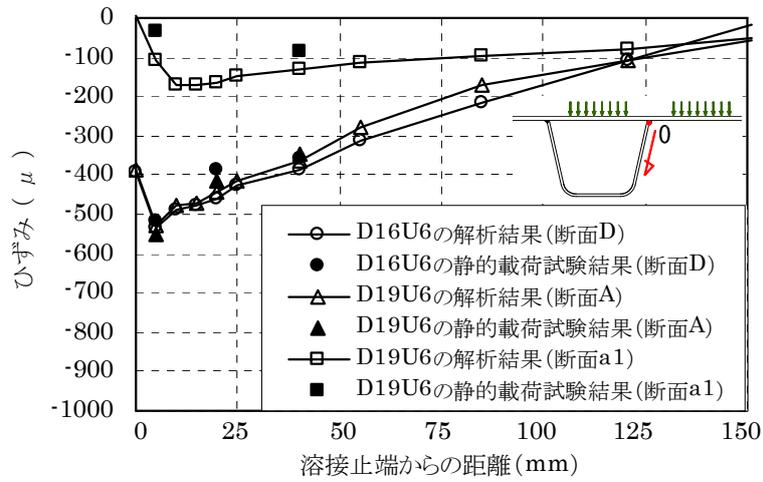


(a) U6 側

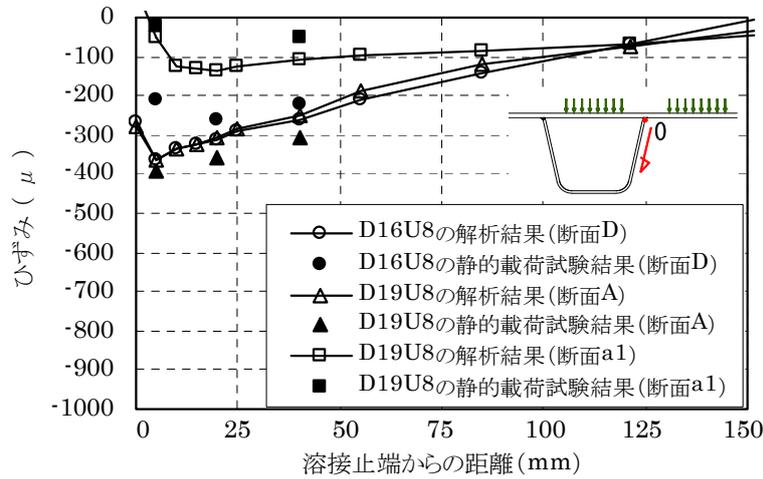


(b) U8 側

図-4.5.7 U リブ間デッキプレート下面のひずみ分布



(a) U6 側



(b) U8 側

図-4.5.8 Uリブ側面のひずみ分布

(2) デッキプレートの板厚増加の効果

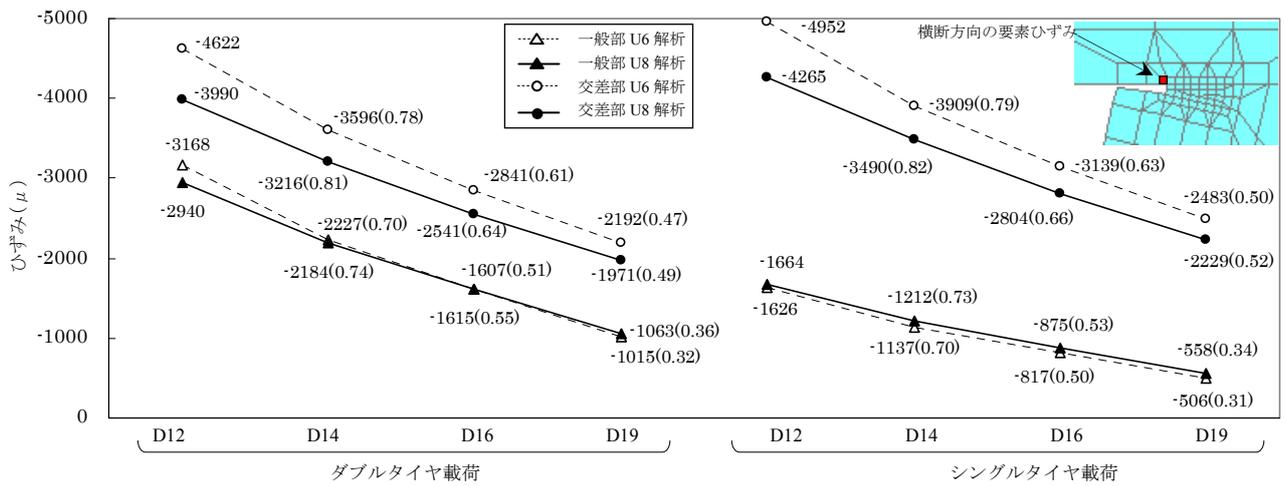
i) ルート部とデッキプレート側止端 5mm 位置のひずみ

図-4.5.9 に、直上載荷時のルート部 (図-4.5.2 参照)、デッキプレート側・U リブ側止端 5mm 位置の橋軸直角方向ひずみについて、デッキプレート厚を変化させた場合の解析結果を示す。図中には走行試験前の静的載荷試験結果も示す。また、ルート部については D12 のひずみに対する比を括弧内に示す。解析値は、試験でひずみを計測した箇所を対象として整理しており、一般部では断面 A の値であり、交差部では横リブ溶接線のデッキプレート側止端から 5mm 離れた位置 (図-4.3.4 の断面 a) の値である。なお、交差部における試験結果は、断面 a1 と断面 a2 の平均値とした。

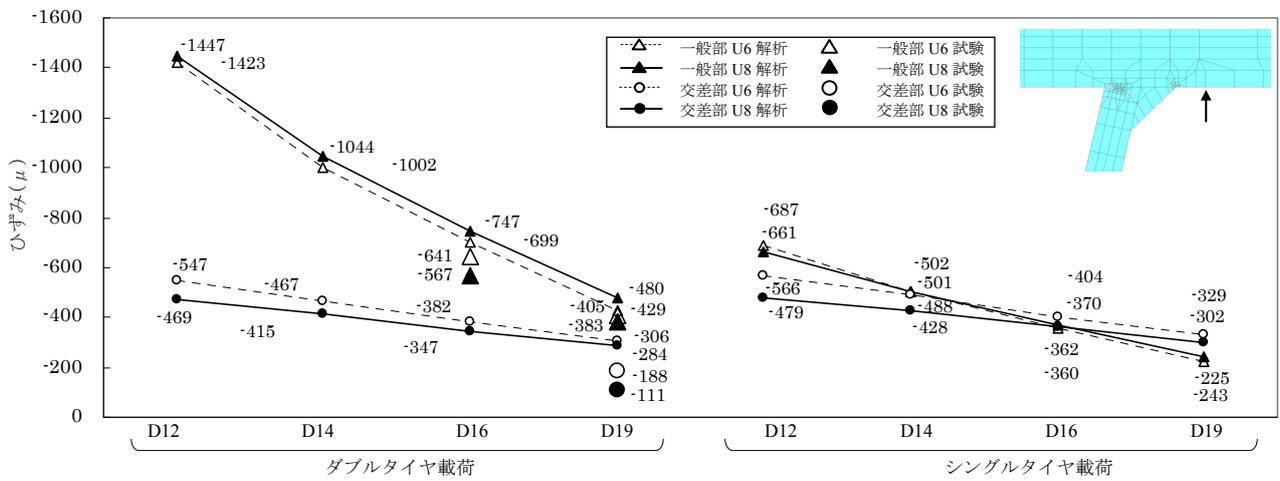
ルート部およびデッキプレート側止端 5mm 位置では、デッキプレートの厚板化によりひずみ絶対値が小さくなっている。一方、U リブ側止端 5mm 位置では交差部のひずみは小さいが、一般部ではダブルタイヤ載荷時にはデッキプレート厚の影響を受けずにほぼ一定の圧縮ひずみが発生しており、シングルタイヤ載荷時にはデッキプレートの厚板化により引張から圧縮に変化している。この原因として、一般部において、ダブルタイヤ載荷時に対して、シングルタイヤ載荷時に曲げ変形が相対的に大きくなるため、デッキプレート厚が薄い場合に U リブ側面の曲げ引張ひずみが卓越したものと考えられる (後述の表-4.5.1 参照)。

一般部と交差部を比較すると、ルート部では交差部の方がひずみが大きく、デッキプレート側・U リブ側止端 5mm 位置では、デッキプレート側止端 5mm 位置の D19 でのシングルタイヤ載荷時を除き、一般部の方がひずみが大きい。U6 と U8 の解析結果を比較すると、デッキプレート厚によるひずみの変化傾向は同じであり、ひずみの値にも大きな差がないことが確認できる。なお、解析結果と試験結果とで差が生じている部分がみられるが、この原因としては (1) で述べたように、試験体と解析モデルにおける載荷方法や構造細部の相違が考えられる。

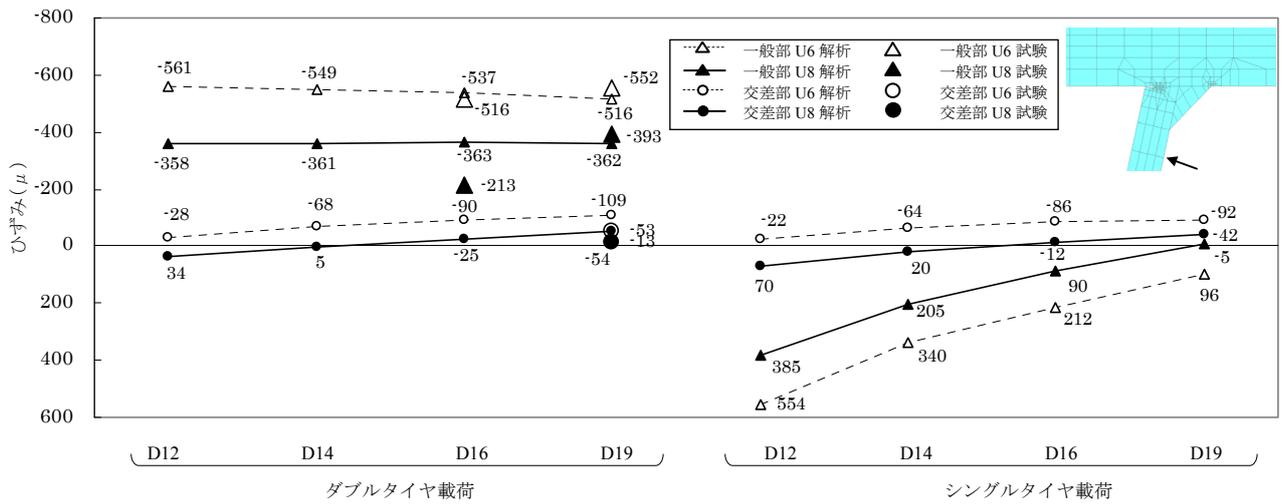
ルート部とデッキプレート側止端 5mm 位置では、デッキプレートの厚板化によりひずみが同様に小さくなる傾向がみられ、相関性がみられる。そこで、ルート部とデッキプレート側止端 5mm 位置のひずみ比を、図-4.5.10 に示すとおり整理した。一般部のひずみ比は、デッキプレート厚、U リブ厚、および載荷方法によらず 2.0~2.5 程度でほぼ一定である。交差部のひずみ比は、U リブ厚および載荷方法の影響をほとんど受けないが、デッキプレート厚が増加するとともに減少する傾向にある。



デッキプレート厚と荷重方法
(a) ルート部



(b) デッキプレート側止端 5mm 位置



(c) U リブ側止端 5mm 位置

図-4.5.9 デッキプレートの厚板化の効果

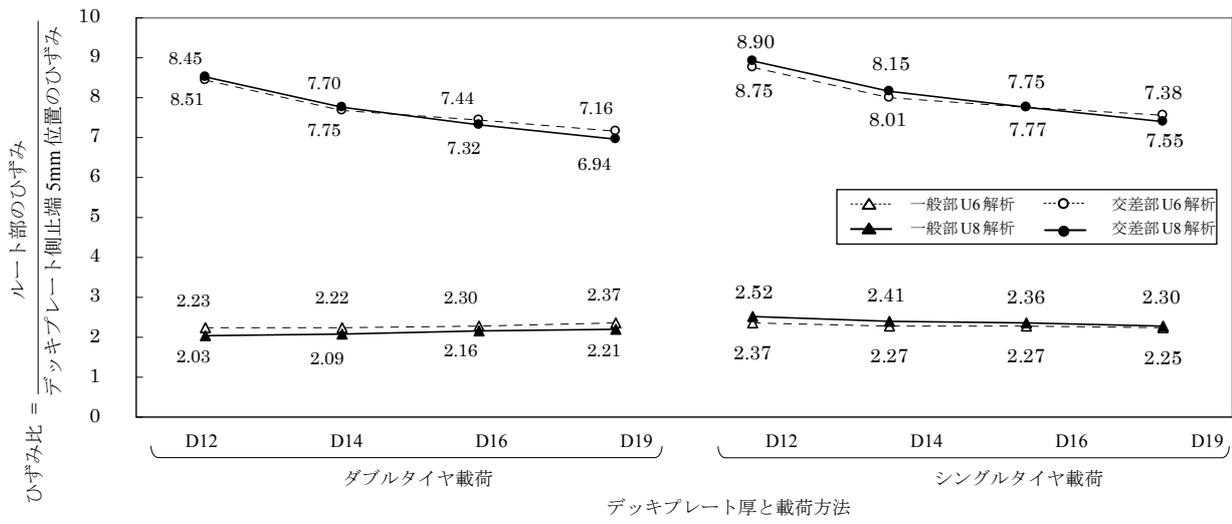


図-4.5.10 ルート部とデッキプレート側止端 5mm 位置のひずみ比

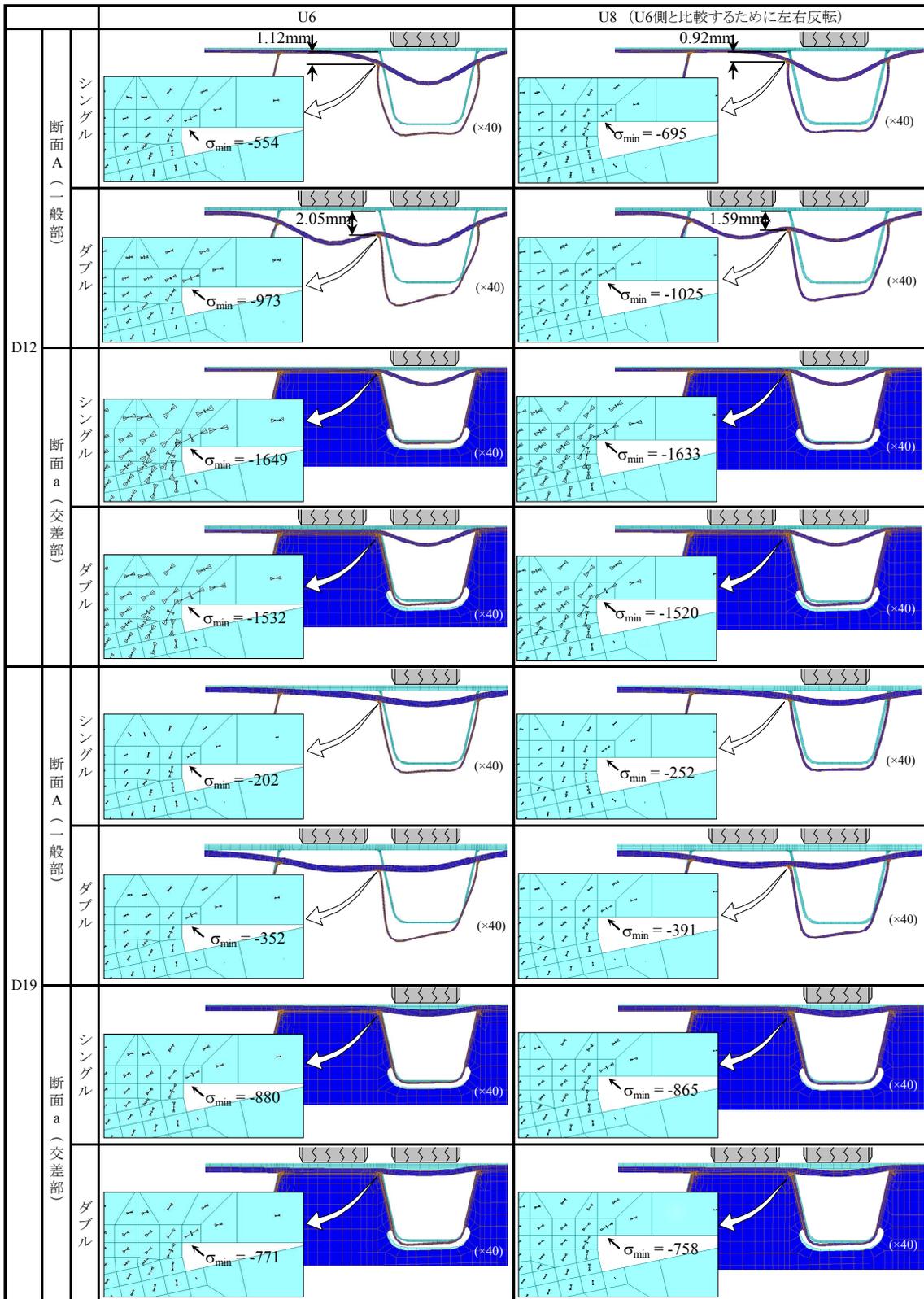
ii) デッキプレートとUリブの変形挙動とルート部の応力状態

表-4.5.1 に、デッキプレート厚 12, 19mm のモデルを対象に、変形図と主応力ベクトル図を整理した結果を示す。デッキプレートの厚板化により変形が小さくなり、最小主応力も小さくなることを確認できる。また、着目要素ではほぼ水平の圧縮応力が生じており、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い。全体の変形モードは、シングルタイヤ載荷でUリブが面外に変形する形状に、ダブルタイヤ載荷でUリブがねじれる形状になっており、デッキプレート厚が異なる場合にも同様の変形モードであることが確認できる。一般部におけるダブルタイヤ載荷とシングルタイヤ載荷を比較すると、ダブルタイヤ載荷ではUリブ外側の荷重によって着目要素付近のデッキプレートに局部的に大きな曲げ変形が発生しており、このためシングルタイヤ載荷に比べて最小主応力が大きくなると考えられる。一方、交差部においては、ダブルタイヤ載荷ではUリブ外側の荷重により着目要素が下方向に変形するため、シングルタイヤ載荷よりもデッキプレートの局部的な曲げ変形が小さくなり、最小主応力が小さくなると考えられる。

図-4.5.11 に、デッキプレート厚ごとにルート部の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。デッキプレートの厚板化により最小主応力が低減しており、D12 での最小主応力に対する低減比率は、図-4.5.9 (a)に示したひずみの低減比率と同程度である。ルート部の最小主応力は一般部に比べて交差部の方が大きく、また、一般部ではダブルタイヤ載荷、交差部ではシングルタイヤ載荷が厳しくなることが確認できる。

図-4.5.12 に線形累積被害則（べき乗指数 $m=3$ ）が成立すると仮定した場合の、D12 に対する損傷度の相対比較を行った結果を示す。図-4.5.11 における比の逆数を 3 乗して整理したものである。D12 に対する損傷度は、Uリブ厚や載荷方法にかかわらず、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 倍程度である。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遅くすることができるかと推察される。

表-4.5.1 デッキプレート厚 12, 19mm の変形図と主応力ベクトル図



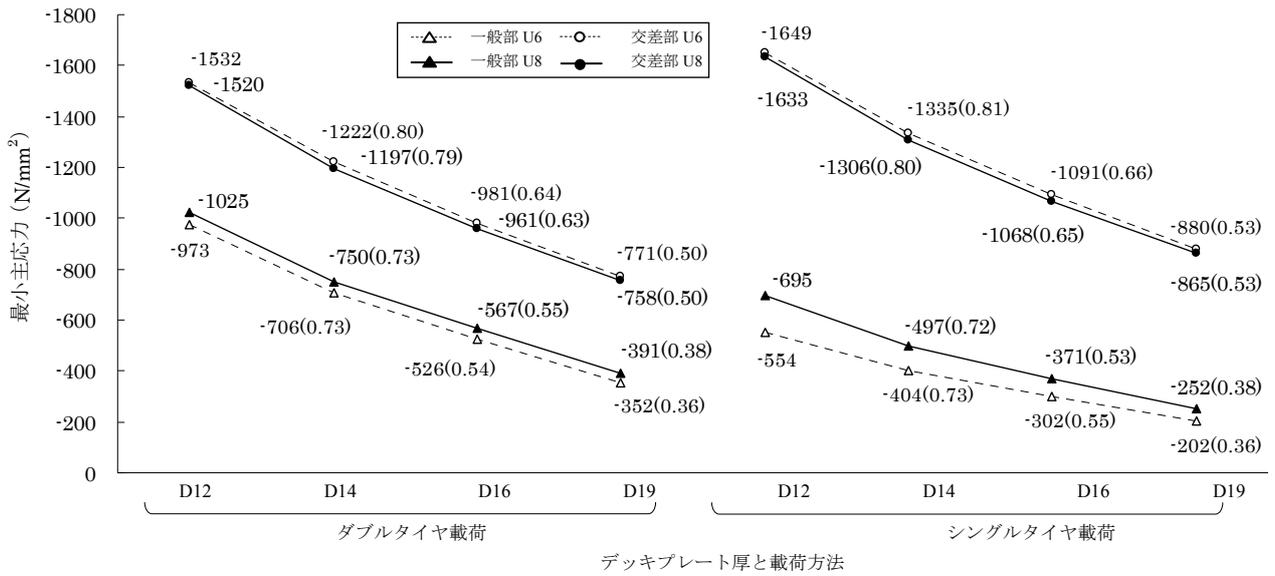


図-4.5.11 デッキプレート厚板化の効果 (ルート部の最小主応力)

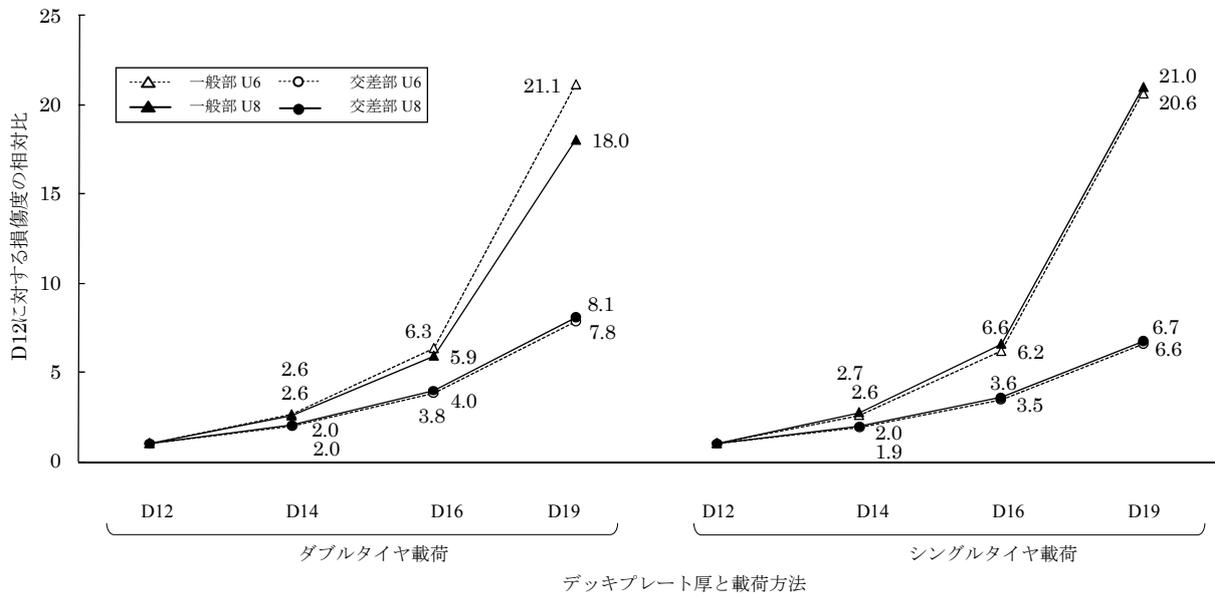


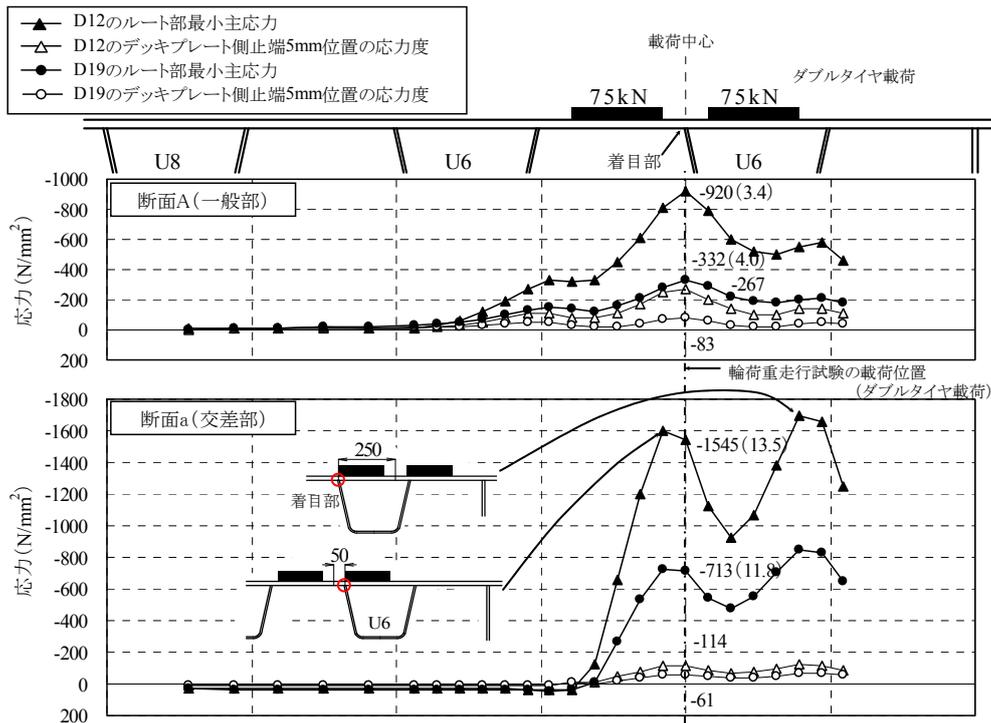
図-4.5.12 解析結果による疲労耐久性の相対比較

iii) 輪荷重の橋軸直角方向移動時におけるルート部の最小主応力

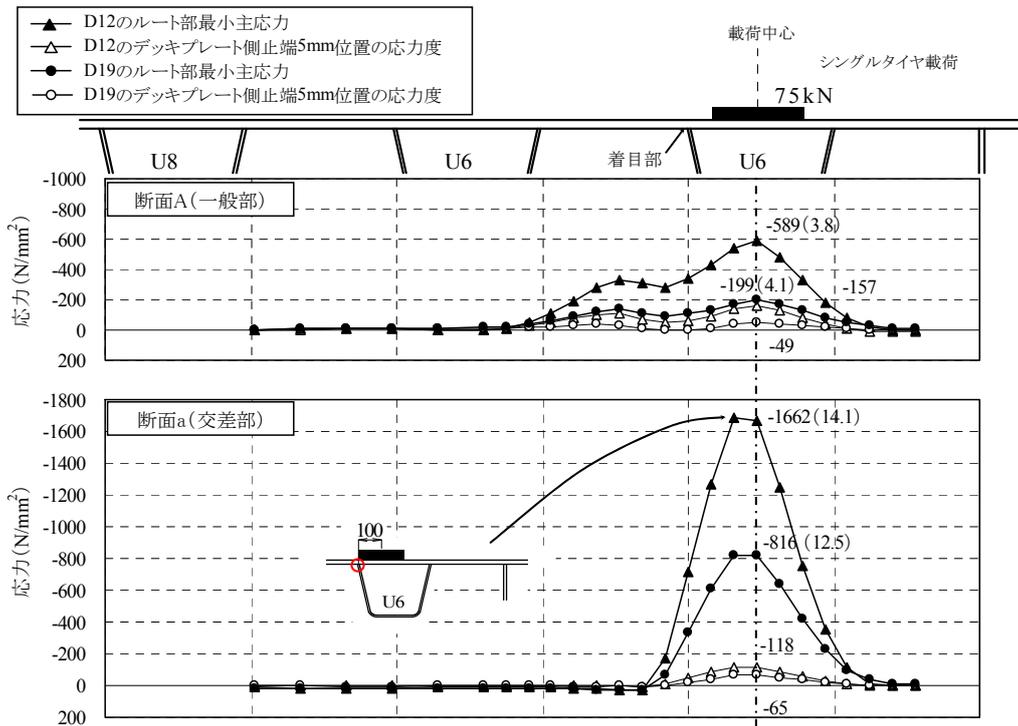
デッキプレート厚 12, 14, 16, および 19mm のモデルを対象に, U リブ厚 6mm 側のデッキプレートと U リブの溶接部に着目して, ダブルタイヤ載荷およびシングルタイヤ載荷を橋軸直角方向に移動させた解析を実施した。図-4.5.13 にデッキプレート厚 12, 19mm の断面 A (一般部) および断面 a (交差部) におけるルート部の最小主応力とデッキプレート側止端 5mm 位置の横断方向ひずみにヤング係数 ($2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$) を乗じて算出した応力度について整理した結果を示す。図中では, 最小主応力とデッキプレート側止端 5mm 位置の応力度の比率を括弧内に示した。なお, 交差部のデッキプレート側止端 5mm 位置の横断方向ひずみは, デッキプレートと横リブの溶接部の横リブ側止端から橋軸方向に 5mm 離れた断面 a1 (図-4.3.4 参照) における値を用いた。

図-4.5.13(a)に示すように, ダブルタイヤ載荷において最小主応力が大きくなる載荷位置は, 一般部ではダブルタイヤが U リブウェブを跨ぐ位置であり, 交差部では着目部の反対側の U リブウェブを跨ぎ, U リブ内側の荷重の縁が着目部の U リブウェブと一致する載荷位置であった。交差部では, 輪荷重走行試験で用いた載荷位置 (着目部を U リブウェブを跨ぐ載荷状態) でも, 前述の載荷位置よりは若干小さいものの, 大きな最小主応力が発生することが確認できる。デッキプレート側止端 5mm 位置の応力は, ルート部の最小主応力の性状と同様の傾向にある。輪荷重走行試験で用いた載荷位置での最小主応力とデッキプレート側止端 5mm 位置の応力の比率は, 一般部の D12 で 3.4 倍, D19 で 4.0 倍, 交差部の D12 で 13.5 倍, D19 で 11.8 倍であった。

図-4.5.13(b)に示すように, シングルタイヤ載荷において最小主応力が大きくなる載荷位置は, 一般部では U リブウェブのほぼ中央であり, 交差部では中央より着目部側に若干ずれた載荷位置であった。交差部では, 載荷荷重が半分にもかかわらず, ダブルタイヤ載荷時よりも大きな最小主応力が発生している。デッキプレート側止端 5mm 位置の応力は, ルート部の最小主応力の性状と同様の傾向にある。U リブウェブのほぼ中央に載荷したケースでの最小主応力とデッキプレート側止端 5mm 位置の応力の比率は, 一般部の D12 で 3.8 倍, D19 で 4.1 倍, 交差部の D12 で 14.1 倍, D19 で 12.5 倍であった。



(a) ダブルタイヤ載荷



(b) シングルタイヤ載荷

図-4.5.13 輪荷重を橋軸直角方向に移動させた時の最小主応力とデッキプレート側止端5mm位置の応力

4.6 第4章のまとめ

本章では、デッキ進展き裂の発生・進展抑制に対する、デッキプレートの厚板化の効果を検討するため、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供試体を用いて、輪荷重走行試験（輪荷重：150kN，載荷回数：400 万回）を実施するとともに、同供試体を対象として有限要素解析を実施した。以下に、本章で得られた主な結果をまとめる。

- (1) 輪荷重走行試験の結果、横リブ交差部にデッキ進展き裂がルート部から発生した。交差部のデッキプレート厚は 19mm であり、き裂は U リブ厚 6mm と 8mm の両方で発見された。超音波探傷試験の結果より、いずれのき裂も載荷回数が 150～250 万回程度で発生したものと推測される。

試験終了後の破面観察により、U リブ厚 6mm 側のき裂は深さ 14.6mm，長さ 156mm，U リブ厚 8mm 側のき裂は深さ 9.7mm，長さ 70mm に達していた。一方、交差部以外の部位（一般部：デッキプレート厚 16mm、19mm）にはき裂は発生しなかった。

- (2) 供試体モデルに対する FEM 解析により、デッキプレートの厚板化によるルート部の最小応力の比較を行った。その結果、板厚 12mm に対する板厚 14mm，16mm，19mm の応力比率（U6、U8 に対して、デッキプレート厚ごとに平均化した値）は、一般部ではそれぞれ約 73%，約 54%，約 37% に、横リブ交差部では、それぞれ約 80%，約 65%，約 52% に低減することが確認された。また、ルート部の最小応力について、U リブ厚 6mm と 8mm の場合では大きな差は見られなかった。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，平成 14 年 3 月
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，平成 14 年 3 月
- 3) 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，平成 18 年 7 月
- 4) 建設省：昭和 59 年度交通量常時観測調査報告書，昭和 61 年 3 月