

国土技術政策総合研究所資料 共同研究報告書

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.608

September 2010

損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究

Research on structural improvements with damage evaluation
for orthotropic steel deck

国土交通省 国土技術政策総合研究所
独立行政法人 土木研究所
社団法人 日本橋梁建設協会

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land,Infrastructure,Transport and Tourism,Japan
Public Works Research Institute
Japan Association of Steel Bridge Construction

損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究

Research on structural improvements with damage evaluation
for orthotropic steel deck

国土交通省 国土技術政策総合研究所
独立行政法人 土木研究所
社団法人 日本橋梁建設協会

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan
Public Works Research Institute
Japan Association of Steel Bridge Construction

概要

我が国の道路橋の鋼床版の疲労設計は、「鋼道路橋の疲労設計指針」により標準的な設計方法が規定されている。しかし、トラフリブを有する鋼床版については複雑な細部構造を有する溶接集成構造であるとともに、舗装を介するのみで直接的に作用する輪荷重の強度や走行位置のばらつきも大きく、設計において計算応力を基にして疲労耐久性を適切に評価することが困難であり、かつその手法も確立されているとはいえない。一方、近年になって大型車交通量の多い路線の鋼床版においてデッキプレートを貫通するき裂が発見されはじめた。

そこで、本研究では、近年の疲労損傷状況を考慮し、疲労設計指針の適用範囲内で設計されるトラフリブを有する鋼床版に対して、これらの疲労き裂に対するより確実に耐久性が期待できる対策の確立を目的に、疲労耐久性に支配的な役割を果たすと考えられるトラフリブとデッキプレートの板厚に着目して、横桁交差部の部分供試体を用いた定点載荷疲労試験と実物大供試体を用いた輪荷重走行試験を実施し、これらの組合せ条件が鋼床版の疲労耐久性に及ぼす影響を観察した。

その結果、トラフリブを有する鋼床版の疲労耐久性に対してデッキプレートの板厚が大きな影響を与えることが分かった。また、近年の損傷事例がデッキプレート板厚 12mm の場合で生じている現状と本研究の実験結果から、デッキプレート板厚を 16mm 以上とすることで、同種の疲労損傷の発生リスクを低減できることが分かった。

Synopsis

Standard fatigue design method for orthotropic steel deck for highway bridges is provided in “Fatigue design manual for steel highway bridges” in Japan. However, for orthotropic steel decks with U-shaped rib, it is hard to verify the durability properly based on calculated stress since it have complicated welded structures and magnitudes of live loads and their location vary, and the design method has not been established. On the other hand, the crack which develops through the deck plate has begun to be detected recently.

Several kinds of fatigue tests were conducted with the combination of thickness of U-shaped rib and deck plate that is considered to have major role to durability against fatigue being paid attention in order to establish the countermeasure which ensures the durability against fatigue. The effects of these combinations to the durability against fatigue were observed.

It was found that the thickness of deck plate gives great effect to durability of orthotropic steel deck with U-shaped rib, and that 16mm or more of thickness of deck plate can reduce the risk of generation of same kind of fatigue damage from the results of these tests and the facts that recent damages are detected in the case of 12mm of thickness of deck plate.

Key Words : Fatigue, Orthotropic steel deck, U-shaped rib, Thickness of plates

共同研究参加機関および担当者名簿

(平成 22 年 1 月現在 順不同)

国土交通省 国土技術政策総合研究所
道路研究部 道路構造物管理研究室

玉越 隆史
大久保 雅憲
石尾 真理 (～平成 21 年 3 月)
池田 秀継 (平成 21 年 4 月～)
小沼 恵太郎 (平成 21 年 4 月～)

社団法人 日本橋梁建設協会

川畑 篤敬
内田 大介
井口 進
松下 裕明
宮下 敏
中西 崇
工藤 祐琢
森田 健司

独立行政法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター (CAESAR)

村越 潤
梁取 直樹
宇井 崇 (～平成 21 年 7 月)
石澤 俊希

執筆機関

まえがき	3 機関
第 1 章	3 機関
第 2 章	国土交通省 国土技術政策総合研究所
第 3 章	社団法人 日本橋梁建設協会
第 4 章	独立行政法人 土木研究所
第 5 章	3 機関
参考資料	3 機関

まえがき

近年、鋼道路橋において、過去より多く報告されてきた二次部材だけでなく主げたや鋼製橋脚の隅角部など主部材において交通荷重の影響が疑われる疲労損傷が多く報告されてきていた。将来の疲労損傷の拡大も懸念されることから、平成 13 年 12 月に改訂された「橋・高架の道路等に関する技術基準」（以下「道路橋示方書」という。）において、初めて鋼道路橋の設計にあたっては疲労設計を行うことが義務づけられた。そして鋼道路橋の特徴を踏まえた適切な疲労設計が行われるために、具体的な疲労設計に関する参考資料として「鋼道路橋の疲労設計指針 H14.3 (社)日本道路協会」（以下「疲労設計指針」という。）が合わせて発刊された。

疲労設計指針では、当時最新の知見に基づいて定量的な疲労設計の基本となる溶接継手の疲労強度、自動車荷重の繰り返しの影響の具体的な考慮方法、疲労耐久性の照査に用いる計算応力の算出が困難な部位に対する構造詳細による疲労耐久性確保策の例などが示された。ただし自動車荷重の繰り返しの影響を発生応力に基づいて定量的に考慮する方法の詳細はコンクリート床版を有する鋼橋の主げた関係などに限られ、鋼床版構造そのものについては当時最新の知見に基づいて疲労耐久性が満足される構造例として、デッキプレートや補剛リブの板厚や形式、スカラップ形状、溶接方法などの条件が示されている。

しかし、最近になって重交通路線において疲労設計指針における疲労耐久性が確保できるとされる条件に合致するトラフリブを有する鋼床版においてデッキプレートとトラフリブの縦方向溶接継手からデッキプレート内部を舗装のあるデッキプレート上表面に向かって進展するきれつを生じるものがあることが明らかになってきた。そのため本研究では、疲労設計指針に示されるトラフリブを有する鋼床版について疲労耐久性の向上策を検討するために疲労試験と数値解析による検討を行った。

鋼床版のトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手のように自動車荷重の移動につれて極めて複雑な応力状態の変化を生じる一方、片側からの部分溶け込み溶接によることからルート部などの溶接形状や品質を高い精度で安定的に制御することが困難な溶接継手では実発生応力の制御や特定は困難である。また、一般に溶接継手の疲労耐久性と関係づけられる公称応力のような計算応力を一概に定義することも困難である。そのためこれまでは疲労耐久性が確保されるとみなせる構造として、板厚寸法や溶接方法、スカラップ形状などの構造詳細をきめ細かく規定することが行われてきた。しかし疲労損傷の発生メカニズムと関連づけられない構造詳細による規定化では代替案の提案が困難であり、荷重条件に応じた合理的な対応も困難である。

このことから、平成 18 年から 3 カ年にわたり、国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人土木研究所、社団法人日本橋梁建設協会の 3 者で、鋼床版のトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手を対象に、複雑な応力状態と詳細な溶接品質に徒に左右されず、かつ疲労メカニズムをある程度反映させた疲労耐久性評価手法の確立に向けた検討を

行った。

具体的には、デッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせによってデッキプレートとトラフリブの縦方向溶接の疲労耐久性に密接に関係していると考えられる自動車荷重の荷重に伴うルート部近傍の局部応力の変化を代表できるものと考え、デッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせの異なる鋼床版に対して疲労試験（定点荷重試験及び輪荷重走行試験）を行うとともに数値解析結果との比較を行って疲労耐久性との関係について検討した。

目 次

まえがき

第 1 章 研究の概要

- 1.1 研究の背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1
- 1.2 研究の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-4

第 2 章 定点载荷疲労試験

- 2.1 概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
- 2.2 試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
 - 2.2.1 試験機・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
 - 2.2.2 供試体・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-2
 - 2.2.3 载荷方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-5
 - 2.2.4 き裂の確認方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-7
- 2.3 試験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-10
 - 2.3.1 き裂範囲の推定方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-10
 - 2.3.2 初期状態の推定・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-12
 - 2.3.3 UT によるき裂の発生と進展の推定・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-13
 - 2.3.4 破面調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-46
 - 2.3.5 破面観察結果と超音波探傷試験による推定結果の比較・・・・・・・・ 2-53
 - 2.3.6 ひずみの計測結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-57
 - 2.3.7 疲労試験結果のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-89
- 2.4 FEM 解析・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-90
 - 2.4.1 解析条件・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-90
 - 2.4.2 疲労試験開始前のひずみ計測結果と解析結果の比較・・・・・・・・ 2-90
 - 2.4.3 解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-92
- 2.5 第 2 章のまとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-94

第 3 章 輪荷重走行試験（供試体 A）

- 3.1 概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
- 3.2 試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
 - 3.2.1 試験機・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
 - 3.2.2 供試体・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-2

3.2.3	試験要領	3-2
3.2.4	計測項目	3-4
3.2.5	非破壊検査	3-4
3.2.6	コア抜き調査	3-5
3.3	試験結果	3-17
3.3.1	静的多点載荷結果	3-17
3.3.2	輪荷重走行試験結果	3-21
3.3.3	コア抜き調査結果	3-42
3.4	FEM 解析	3-53
3.4.1	検討概要	3-53
3.4.2	解析モデル	3-53
3.4.3	解析結果	3-55
3.4.4	構造パラメータと局部応力性状	3-58
3.5	第3章のまとめ	3-60
	【付録】鋼床版デッキプレート-Uリブ溶接部の超音波探傷検査要領	3-62

第4章 輪荷重走行試験（供試体B）

4.1	概要	4-1
4.2	供試体	4-2
4.3	試験方法	4-5
4.3.1	試験装置	4-5
4.3.2	載荷方法	4-6
4.3.3	ひずみゲージと変位計の設置	4-8
4.3.4	計測方法	4-12
4.4	試験結果	4-19
4.4.1	事前計測	4-19
4.4.2	輪荷重走行試験	4-24
4.4.3	事後計測	4-30
4.5	FEM 解析	4-41
4.5.1	検討概要	4-41
4.5.2	解析モデル	4-41
4.5.3	解析結果	4-44
4.6	第4章のまとめ	

第5章	まとめ	5-1
-----	-----	-----

【参考資料-1】 損傷橋梁の構造諸元

【参考資料-2】 トラフリブ鋼床版に関する諸外国の基準

【参考資料-3】 デッキプレート厚が鋼重に及ぼす影響の試算

第1章 研究の概要

1.1 研究の背景

道路橋では、死荷重の軽減による耐震性の向上や長スパン化の実現、架設費用の低減などの目的からコンクリート床版に比べて軽量にできる鋼床版が採用される場合が多くある。

島国である日本では、大都市や工業地域が海岸線に沿った狭い平地部に集中して発達しており、これらの地域を通る道路で重量車両である大型車の交通量が卓越して多いという特徴がある。一方、これらの海岸線沿いのほとんどの地域は、三角州や扇状地あるいは海上を埋め立てるなどによる軟弱な地盤からなるため、結果的にこれらの極めて重交通が支配的で疲労環境の厳しい条件にある幹線道路網に死荷重軽減の目的から鋼床版が多く採用されてきている。

図-1.1.1 に示すように、鋼床版は 1960 年代頃より採用数が増加してきたが、当初は補剛リブにバルブプレートや平型鋼などの開断面形式のものが多く用いられてきた。そして 1975 年頃からは加工や組み立て技術の進展もあり、鋼重の割に剛性が高く合理的とされる U 型断面の補剛リブ（以下「トラフリブ」という。）を用いた鋼床版が用いられるようになってきている。そして近年では断面変化部や曲線部などの特定の条件以外ではトラフリブで補剛された鋼床版を用いることが一般的となっている。

鋼床版の疲労損傷では、例えば補剛リブと横げたとの交差部のスカラップの周辺や、トラフリブとデッキの縦溶接継手部などこれまでも多くの種類のき裂の発生が報告されている（図-1.1.2）。そのため我が国で一般に適用される道路橋の設計基準である「橋・高架道路の技術基準」（以下「道路橋示方書」という。）においても疲労耐久性の確保を目的として種々の配慮がなされてきた。また 2002 年の改訂では、鋼橋では鋼床版に限らず疲労設計を行うことが定められ、鋼床版についても最新の知見に基づいて構造細目規定などの基準の見直しが行われるとともに、疲労設計の参考資料として「鋼道路橋の疲労設計指針 H14.3 (社)日本道路協会」（以下「疲労設計指針」という。）が示された。図-1.1.3 及び 4 に現在の道路橋示方書および疲労設計指針の主な記述を示す。

一方、2002 年頃より、トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手において従来より例のあるビード表面に開口するき裂とは異なり、ルート部から発生したき裂がデッキプレート内部をデッキプレート上表面に向けて進展するき裂（以下「デッキプレート貫通き裂」という。図-1.1.5 参照）が生じることのあることが明らかにされてきた。このき裂は最終的にはデッキプレートを貫通することから路面陥没や舗装の著しい劣化を生じさせる危険性があり供用安全性の観点からは深刻な悪影響が懸念される。一方、き裂が閉断面のトラフリブ内側からデッキプレート内部を進展することから鋼床版裏面からの目視による検出が困難であり、外観上には変状の徴候も見られない。そのため、現在のところ赤外線や超音波探傷手法などの非破壊検査技術によっても効率的かつ確実に検出することは困難となっ

ている。

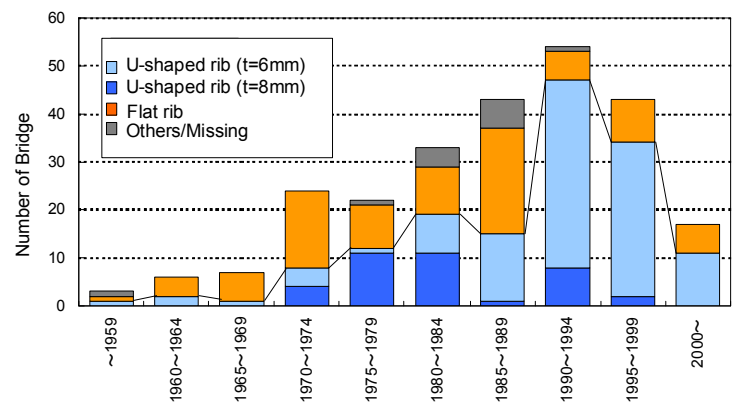


図-1.1.1 鋼床版の採用実績

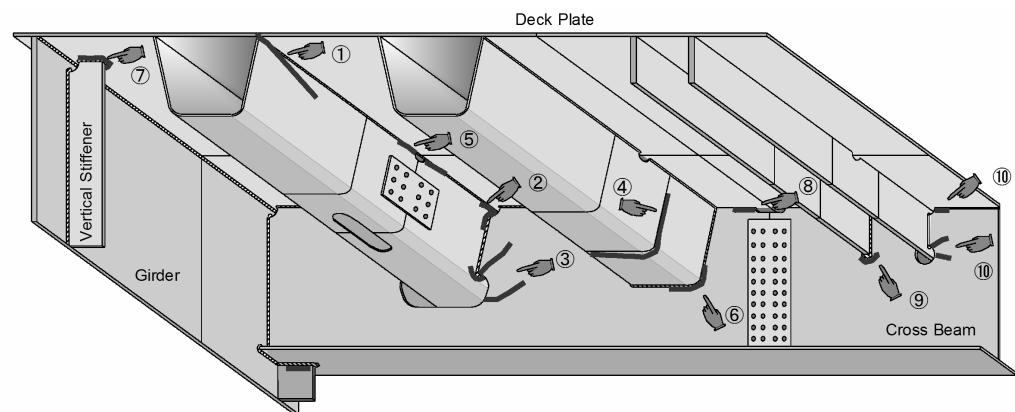


図-1.1.2 鋼床版の疲労損傷例

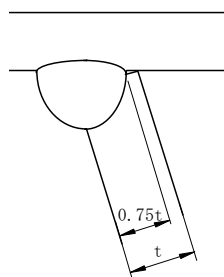
次の 1) から 3) までの条件を満足する鋼床版構造

- 1) 縦リブ支間 $L \leq 2.5\text{m}$
- 2) 縦リブが、バルブプレートリブ、平面リブまたは以下に示す閉断面リブ。

Diagram illustrating the cross-section of a closed-section rib structure. The diagram shows a top flange (デッキプレート厚) and a bottom flange (トラフリブ厚). The width of the top flange is 320mm. The height of the rib is 240mm または 260mm. The thickness of the top flange is $12\text{mm} \leq t_d \leq 16\text{mm}$. The thickness of the bottom flange is 6mm または 8mm.

- 3) デッキプレートの板厚 $12\text{mm} \leq t_d \leq 16\text{mm}$

図-1.1.3 疲労設計指針における鋼床版の適用の範囲



75%溶込み確保の溶接

図-1.1.4 閉断面リブとデッキプレートの溶接に対する規定（疲労設計指針）

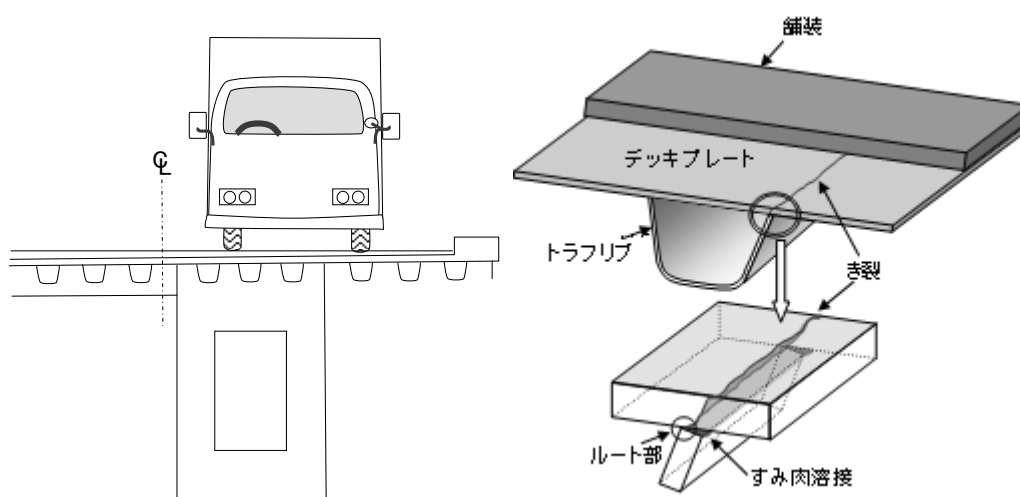


図-1.1.5 デッキプレート貫通き裂のイメージ

1.2 研究の概要

鋼部材の疲労現象には荷重の繰り返し载荷に伴う応力状態が支配的な影響を及ぼすと考えられており、疲労耐久性を評価するためには、着目部位の応力変動を適切に考慮する必要がある。しかし本研究で着目するトラフリブを有する鋼床版のデッキ貫通き裂で着目する鋼床版のデッキプレートとトラフリブの接合部の縦方向溶接継手部では、その形状や直上に輪荷重が移動载荷される影響から極めて複雑な応力変動が生じる。またデッキ貫通き裂の起点は部分溶け込み溶接のルート部と考えられるが、この部位の局所の応力状態は外観からある程度確認でき、かつ施工上もある程度制御が可能な溶接ビードのサイズや形状だけでなく、設計上の仮定によらず厳密な制御が困難な溶け込み深さやルート部の形状などにも大きく左右される。実橋における局所の応力状態の詳細を設計において高い精度で推定してこれを考慮したり、製作段階でそれらの設計上の仮定を満足するように溶接形状や品質を厳密に制御することは現実的でない。

そのため、本研究では、鋼床版のデッキプレート貫通き裂発生危険性の少ない鋼床版構造の確立に向けて、トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手の溶接品質について通常の施工方法と品質管理手法の範囲で生じうる程度の差異を考慮しても、確実に疲労耐久性の向上効果が期待できる支配的な条件を見出し、これにより疲労耐久性に優れる鋼床版構造の提案を行うことを目的とした。

研究では、自動車荷重の移動によって特に応力状態が複雑に変化することが想定されるトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手を対象として、デッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせとデッキプレート貫通き裂に対する疲労耐久性の関係について定点疲労試験、輪荷重走行試験、数値解析による検討を行った。

本研究の構成を以下に示す。

【第2章】 定点载荷疲労試験

鋼床版と横リブの交差部（以下、「交差部」と記す。）のトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手を対象として、デッキプレート板厚（12mm, 14mm, 16mm, 19mm）とトラフリブ板厚（6mm, 8mm）のそれぞれを変化させて組み合わせた部分供試体を作成し、定点载荷疲労試験を実施して各供試体のき裂発生・進展状況やひずみ計測結果を比較した。さらに、FEM 解析を実施した。

【第3章】 輪荷重走行試験（供試体 A）

横リブ間（以下、「一般部」と記す。）のトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手を対象として、デッキプレート板厚 16mm, U リブ板厚 6mm および 8mm の試験体の輪荷重走行試験を実施し、き裂発生・進展状況確認やひずみ計測を実施し過年度の結果と比較するとともに、FEM 解析により輪荷重载荷時の溶接ルート部の局部応力性状について検討

した。

【第4章】輪荷重走行試験（供試体B）

交差部及び一般部を含めた，デッキプレート板厚 16mm 及び 19mm，U リブ板厚 6mm 及び 8mm を組み合わせた試験体の輪荷重走行試験を実施し，き裂発生・進展状況確認やひずみ計測を実施するとともに，FEM 解析を実施し，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した。

【第5章】まとめ

2 章から 4 章までの検討結果をとりまとめた。

第2章 定点载荷疲労試験

2.1 概要

国土技術政策総合研究所では、自動車荷重の移動によって特に応力状態が複雑に変化することが想定される横リブの交差部のトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手を対象として、デッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせとデッキプレート貫通き裂に対する疲労耐久性の関係について定点疲労試験と数値解析による検討を行った。

2.2 試験方法

2.2.1 試験機

定点载荷試験機は、国土技術政策総合研究所内の試験機を使用した。試験機の概要は、図-2.2.1 のとおりである。

疲労試験機(60t/90t)	
■ 形 式	電気油圧式
■ 性 能	
荷 重	静的 ±90t、動的 ±60t
ストローク	±50mm (全100mm)
繰返し速度	0～12Hz
制 御 方 式	荷重、変位
波 形	正弦波、台形波、ランプ波 プログラム波
■ 供試体寸法	
引 張 試 験	丸材 1,800h×10～60φmm 平材 1,800h×5～50t×200w mm
圧 縮 試 験	1,800h×500l×500w mm

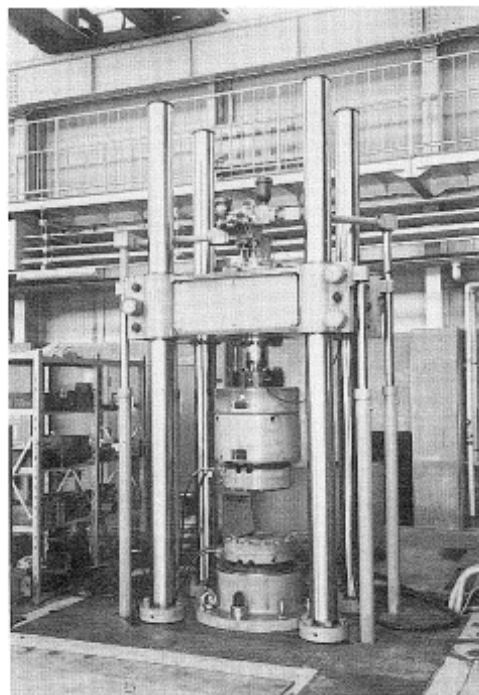


図-2.2.1 疲労試験機

2.2.2 供試体

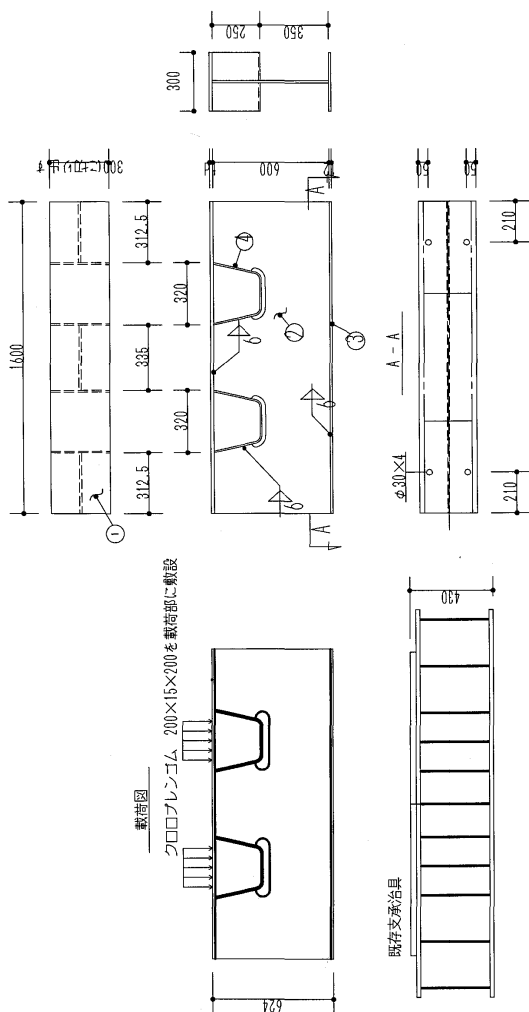
試験は表-2.2.1 に示すように、デッキプレート板厚を 12, 14, 16, 19mm, トラフリブの板厚を 6, 8mm としてこれらを組み合わせた横リブ交差部の鋼床版部分供試体への定点一定荷重振幅の疲労試験である。供試体の詳細は図-2.2.2 に示す。デッキプレートとトラフリブの縦方向溶接継手は、実橋の条件に近くなるようにパネルライン（自動溶接機）により溶接した。供試体形状については別途、連行載荷を受ける鋼床版パネルの FEM 解析を実施し、着目部直上に載荷された場合の応力状態が本供試体とほぼ同じであること、移動荷重による主応力方向の変動は小さいことを確認した。なお供試体はき裂の検出とゲージの添付のために無塗装である。

計測位置を図-2.2.3 に示す。ひずみゲージは、デッキプレート貫通き裂の起点となる可能性の高い横リブ交差部で横リブ中心から 5mm 離れた位置のデッキプレートおよびトラフリブに設置した。このとき既往の同種の実験と同様にデッキプレートとトラフリブの縦方向溶接のビード止端からの離れは 5mm と 40mm の 2 カ所を基本とした。

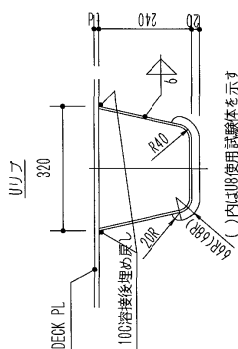
表-2.2.1 供試体の種類・条件

供試体名	デッキ厚 (mm)	Uリブ厚 (mm)
D12U6	12	6
D12U8	12	8
D14U6	14	6
D14U8	14	8
D16U6	16	6
D16U8	16	8
D19U8	19	6
D19U8	19	8

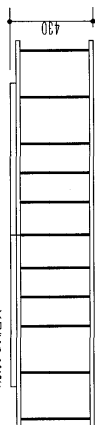
供試体構形図



縦リブ貫通部スカーラップ詳細



既存支保道具

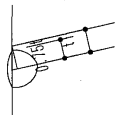


- ① 1-Deck PL 300x12x1600(SM490YA)
 - ② 1-Web PL 600x12x1600(SM490YA)
 - ③ 1-L.Flg 300x12x1600(SM490YA)
 - ④ 2-U.Rib 320x240x1x300(SM490YA)
- 2-クロロプレングム 200×15×200
φ30×4 孔明け
Deck PLはtφ18mmのもののみSM400A

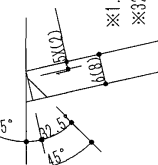
供試体No	t _d	t _r
D12U6	12	6
D12U8	12	8
D14U6	14	6
D16U6	16	6
D14U8	14	8
D16U8	16	8
D19U8	19	6
D14U6	19	8

75%以上の溶込みを確保のこと

リブ溶接詳細



リブ間差詳細



※1.5mm(2mm)残し
※32.5度開先(全量加工)デッキに対し45°

- 注) 1. デッキプレートとリブの溶接はパネルライン(自動溶接機)により実施すること。
2. 部材は全て無塗装とする。
3. デッキにリブを溶接后300mmに切り出す事。

図-2.2.2 供試体寸法

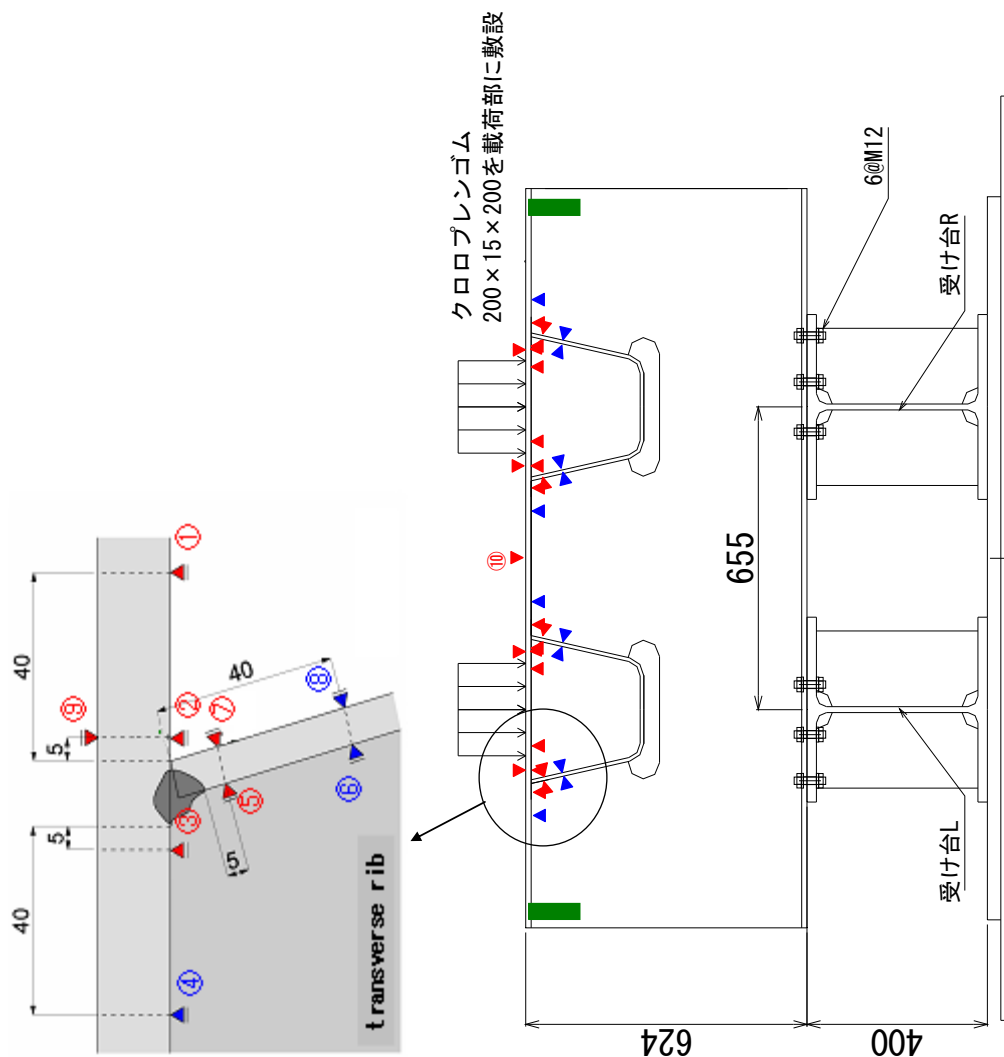


図-2.2.3 計測位置

目的：構造的な特性の違いを把握する
 載荷：シングルタイヤを想定。200×15×200の硬質ゴムを介して載荷する。
 亀裂発生後の断面観察方法：
 UTで認識した亀裂発生箇所のコアを抜き、観察する

設置するゲージの意味
 方針：輪荷重走行試験の測定箇所を参考に
 極力比較できる箇所を測定する。
 ひずみゲージは、いずれも橋軸直角方向とし、ゲージ長1mmとする。
 いずれも横桁の中心から橋軸方向に5mmずらした位置に貼付する。

▲ 貼り付けを優先するゲージ
 ① デッキ貫通き裂に対する感度が高い(輪荷重試験との比較)
 ② 溶接部の局部応力の測定(輪荷重試験との比較)
 ③ ⑤ ⑦ 溶接部の局部応力の測定
 ⑩ 輪荷重試験との比較用
 必要に応じて貼り付けを減ずるゲージ
 ▲ ④ デッキの応力の測定(輪荷重試験との比較)
 ⑥ トラフリップの応力の測定(輪荷重試験との比較)
 ⑧ 軸力と曲げの分離用
 変位計(4箇所)
 ■ 偏心していないかどうか確認するため

2.2.3 載荷方法

供試体の設置状況を図-2.2.4、写真-2.2.1 及び 2 に示す。載荷は、デッキプレート上面側から 2 本のトラフリップそれぞれの中心位置に大型車のシングルタイヤを想定した $200 \times 200\text{mm}$ の設置面を設定し、2 箇所同時に載荷した。なお、供試体はデッキプレート上面に舗装がないため鋼製の載荷板と供試体の間には写真-2.2.3 及び 4 に示す硬質ゴム（板厚 15mm）を設置した。

この試験方法では載荷重がゼロとなると載荷板と供試体に離間を生じた段階でひずみゲージの値が安定しなくなることが想定されることから、離間を生じないように最小載荷重を 10kN とし、最大載荷重は 110kN として正弦波に従う 100kN の荷重変化を与えた。載荷速度は試験監視体制とひずみゲージの応答の状況に応じて 1～9Hz の間で同じ供試体に対する一連の疲労試験の間も適宜変化させている。載荷条件の詳細を表-2.2.2 に示す。

なお、D12U6～D16U6 については、試験期間の都合上 50 万回で試験を一旦中断し、期間をおいて再開した際、試験再開後のひずみゲージの値が試験中断前とずれを生じたため、載荷状態を確認した上で値のずれを補正（試験再開時オフセット）して整理した。

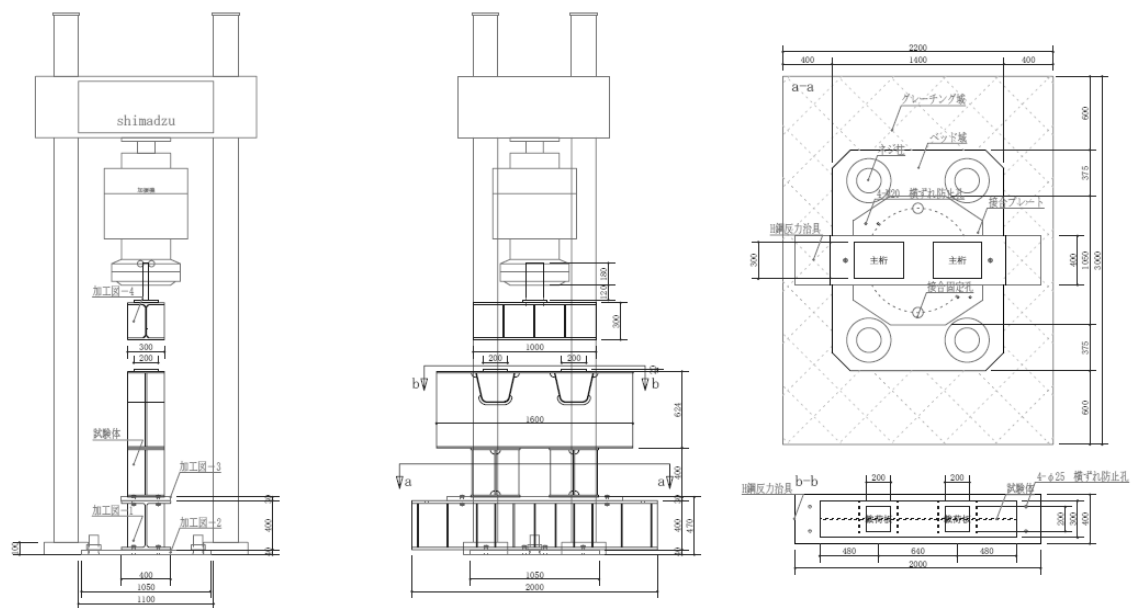


図-2.2.4 設置方法

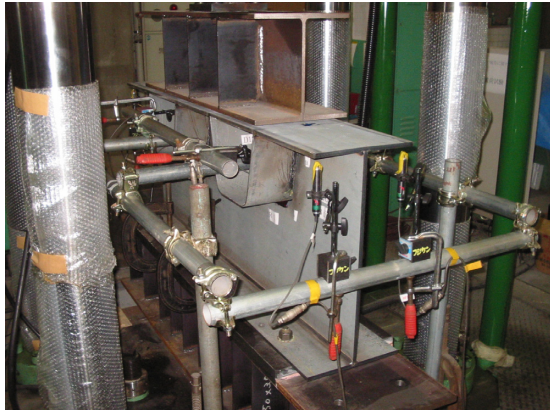


写真-2.2.1 供試体設置状況

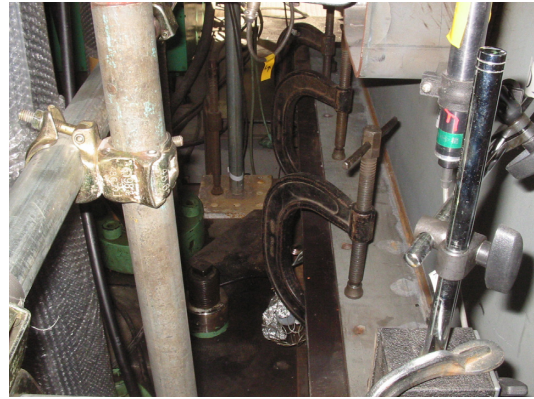


写真-2.2.2 治具との設置方法



写真-2.2.3 クロロプレンゴム仕様

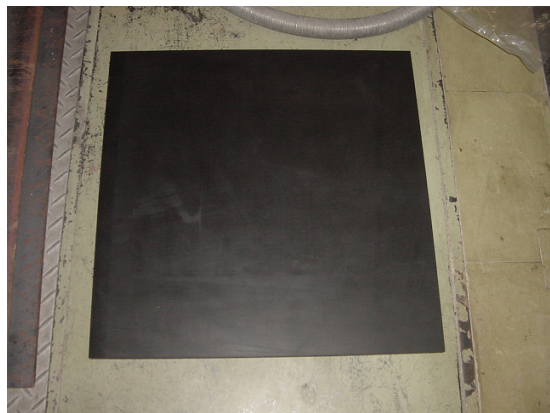


写真-2.2.4 クロロプレンゴム全景
(ゴム購入時 500mm×15mm×500mm)

表-2.2.2 試験条件

供試体名	定点繰返し載荷			試験再開時 オフセット 有無
	繰り返し荷重 (kN)	基準周波数 (Hz)	夜間周波数 (Hz)	
D12U6	10～110	4.0～4.3	0.9～1.1	有り
D12U8		5.3～6.2	1.5～2.0	有り
D14U6		6.5～6.6	2	有り
D14U8		7	1.0～1.2	有り
D16U6		7.5	1	有り
D16U8		5.0～8.0	1.0～2.0	無し
D19U6		9	1.0～1.5	無し
D19U8		9	1.5	無し

* オフセットとは試験中断期間の経時変化によるひずみゲージの値の変化を試験中断前のイニシャル値と整合するよう再開時点でのイニシャル値を補正した値を計測値とした。

2.2.4 き裂の確認方法

(1) 概要

本試験は、デッキプレート貫通き裂の発生を意図したものとなっており疲労試験中に目視や磁粉などの外観からの観察ではき裂の発生・進展を確認することが困難である。そのため載荷試験の実施中は、ひずみゲージの値の変化に注意することに加えて、超音波探傷試験を行ってき裂の発生と進展を推定した。また載荷試験終了後には、超音波探傷試験を行ったのち供試体を破壊して直接内部のき裂の状況を確認した。

(2) 超音波探傷試験

超音波探傷試験は、き裂の発生と進展の程度の推定を目的に、試験前の初期探傷、50 万回、100 万回、200 万回時に行った。

片側からの部分溶け込み溶接となっているトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手ではルート形状や位置が必ずしも一定でなく、超音波探傷試験はデッキプレート内部を上方に向かうき裂の有無の検出を最優先に 90° 縦波斜角探傷、SH（表面）波による探傷を行った。デッキプレート内部に向かう傷からのエコーが確認された後は、その範囲を特定できるように 70° の斜角による探傷を実施した。図-2.2.5 に探傷方法の概念図、写真-2.2.5 に探傷機の名称を示す。

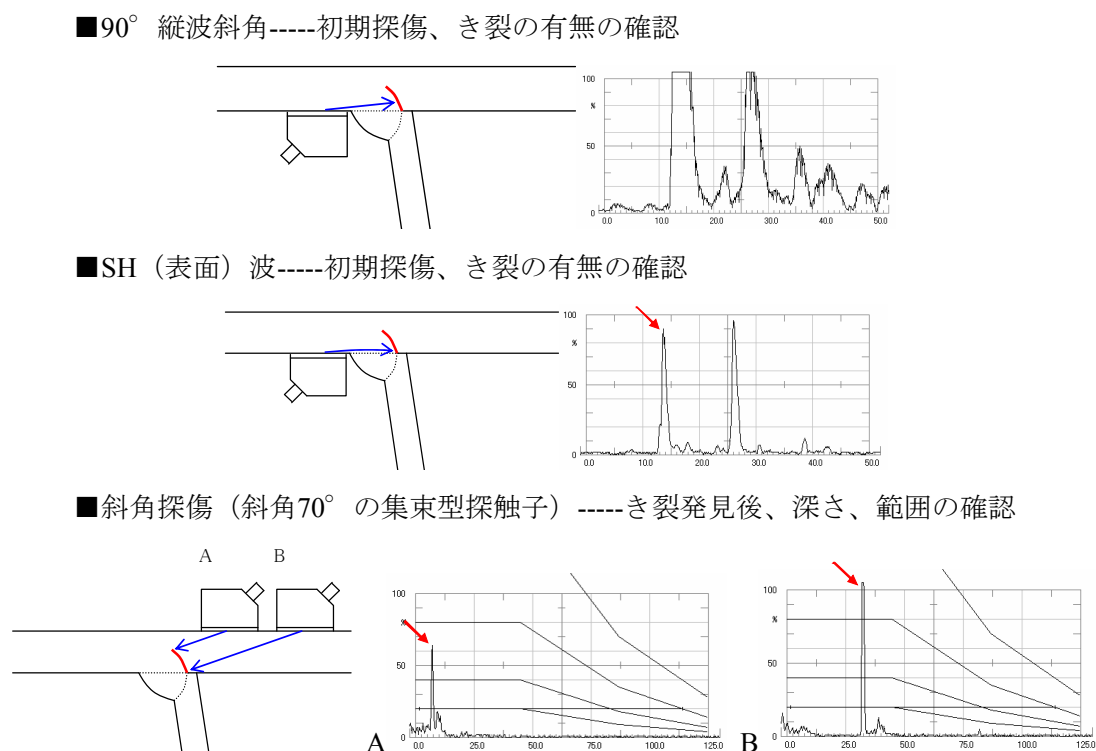


図-2.2.5 探傷方法と評価の概念図

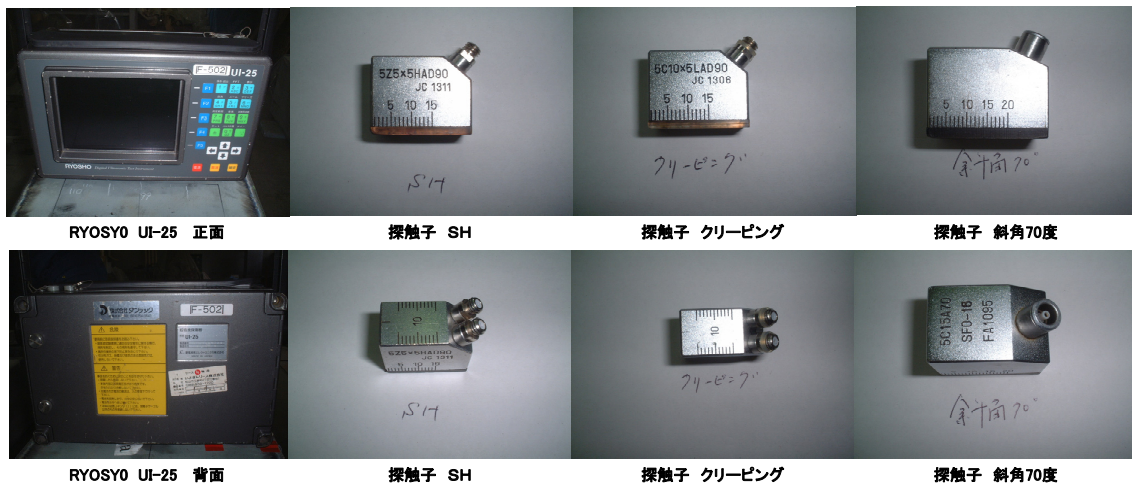


写真-2.2.5 超音波探傷機

(3) 破壊試験

供試体毎のき裂の進展状況の確認と超音波探傷によるき裂進展状態の推定精度の確認を目的に、所定の200万回の定点载荷試験後に、供試体を切断し液体窒素を用いて冷却してハンマーで低温脆性破壊させ、き裂の状況を確認した。切断状況を写真-2.2.6～10に示す。



写真-2.2.6 切断状況①（エンジンカッター作業）



写真-2.2.7 切断状況②



写真-2.2.8 切断状況③（切断終了試験片）



写真-2.2.9 切断状況④（液体窒素による冷却）



写真-2.2.10 切断状況⑤（低温脆性破壊）

（4） 静的载荷時のひずみの計測

き裂の発生・進展に伴って供試体の耐荷力機構に変化が生じることから同じ载荷状態に対するひずみゲージの値には変化が生じることが想定される。そのためき裂の発生と進展状況の推定のために、10 万回までは 5 千回ごと、以降は 10 万回ごとに 200 万回まで疲労試験の途中で静的载荷を行って各ひずみゲージの値を記録した。

2.3 試験結果

2.3.1 き裂範囲の推定方法

超音波探傷試験は、き裂の発生と進展の程度の推定を目的に、試験前の初期探傷、50 万回、100 万回、200 万回時に実施することを基本とした。推定き裂の範囲は、トラフリブとデッキプレートの縦方向溶接線方向（トラフリブ軸方向）長さを x ，トラフリブ軸に直交しデッキプレート面に平行な方向でトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接の推定ルート位置からき裂先端までの距離を y ，デッキプレート面直交方向にデッキプレート下面からき裂先端位置までの距離（高さ）を z ，と定義して比較した。推定き裂範囲の定義を図-2.3.1 に示す。

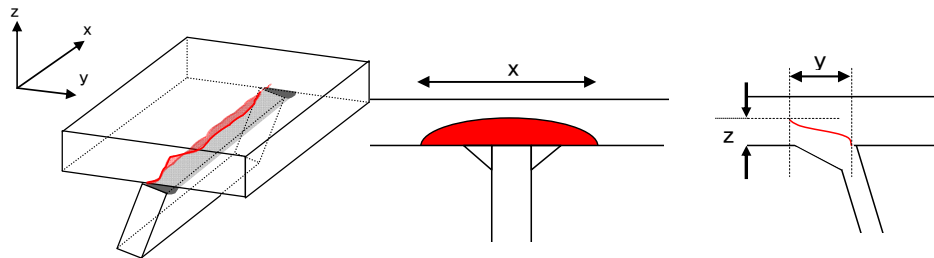


図-2.3.1 き裂の方向の定義

デッキプレート貫通き裂は、起点位置と進展方向、き裂範囲の形状が必ずしも同じ傾向とまらないため、定義したき裂推定範囲から「き裂面積 A 」を式(2.3.1)また「き裂の道のり L 」を式(2.3.2)のように定義して比較に用いる。

$$A(\text{き裂の面積}) = \frac{(\text{き裂の範囲 } x) \times \sqrt{(\text{き裂の範囲 } y)^2 + (\text{き裂の範囲 } z)^2}}{2} \quad (2.3.1)$$

$$L(\text{き裂の道のり}) = \sqrt{y^2 + z^2} \quad (2.3.2)$$

き裂範囲の推定では図-2.3.2 に示すように供試体のトラフリブのウェブ位置に対応する $a \sim d$ の 4 測線で超音波探傷試験を実施した。なお、初期状態での溶け込み深さを推定するために各供試体の $a \sim d$ の各測線で横リブ位置から 20mm, 100mm 離れた位置(図-2.3.2 中の 1, 2, 3) でデッキプレート側及び U リブ側の脚長を測定し、図-2.3.3 に示す方法で溶接状態を推定した。

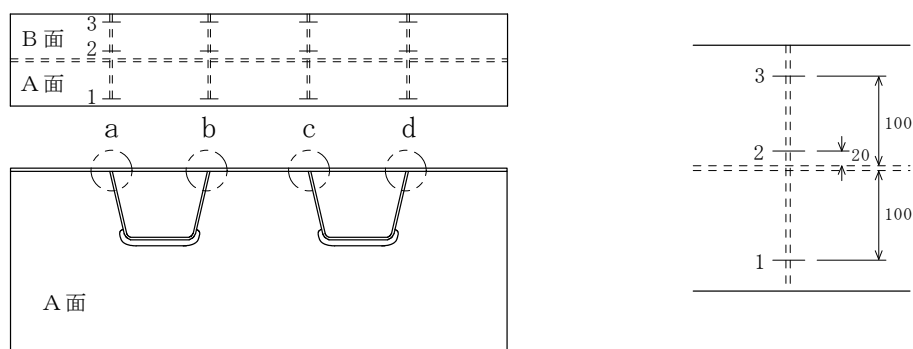


図-2.3.2 超音波探傷試験の対象位置

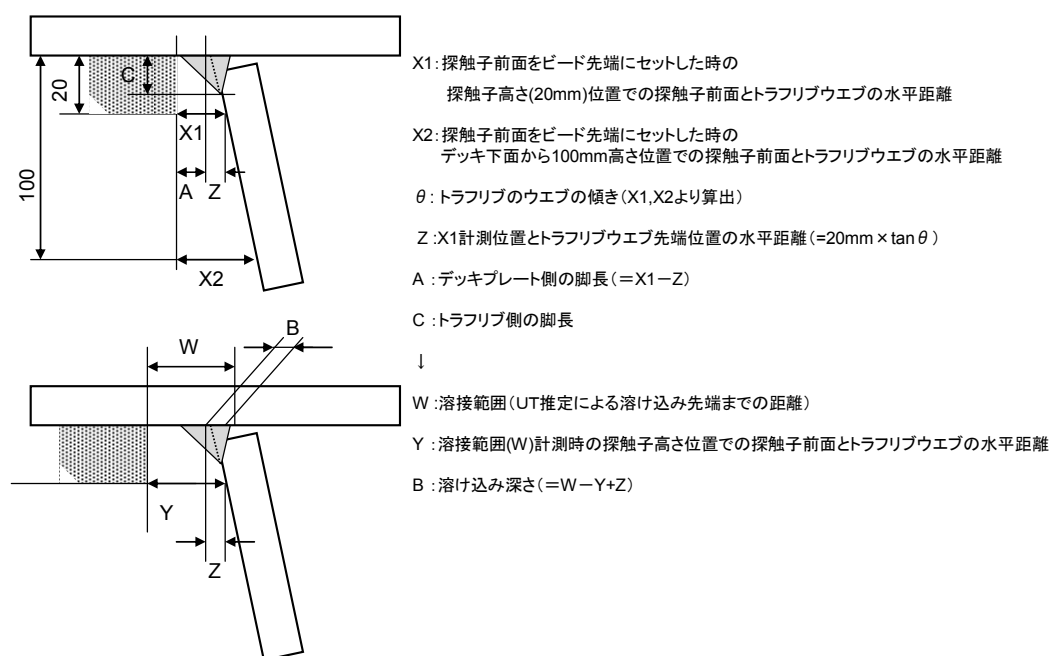


図-2.3.3 溶接状態の推定方法と記号の定義

2.3.2 初期状態の推定

疲労試験に先立って行った供試体の溶接部のスケールによる形状計測と超音波探傷試験の結果から推定した初期の溶接状態を表-2.3.1 及び表-2.3.2 に示す。

表-2.3.1 初期状態の計測によるデッキプレート側の脚長 (A : mm)

測定位置	D12U6	D12U8	D14U6	D14U8	D16U6	D16U8	D19U6	D19U8
a-1	7.3	6.7	7.8	7.7	8.2	6.2	7.4	7.4
a-2	7.1	6.5	6.9	7	9	6.2	6.9	6.7
a-3	7.4	6.1	7.3	7.6	9.2	6.3	6.8	7.5
b-1	7.6	8	5.9	9	9.1	9.1	8.8	7.6
b-2	8	8.1	6	8.8	8.5	7.4	9	7.5
b-3	8.1	8.6	7	8.7	8.5	8.3	9.3	7.8
c-1	8	9	8.2	7.7	9	7.8	7.8	8.3
c-2	7.9	7.8	8.3	7.5	8.2	7.5	7.1	6.2
c-3	8	8.7	8.3	8.2	8.3	7.4	7.1	6.2
d-1	7.4	8.2	6	8.2	7.7	6.7	8.1	8.1
d-2	8.1	7.2	5.9	7.2	8.2	6.9	7.6	7.4
d-3	9.3	7.4	5.4	8.4	8	8.3	9	7.3

表-2.3.2 初期状態の計測によるトラフ側の脚長 (C : mm)

測定位置	D12U6	D12U8	D14U6	D14U8	D16U6	D16U8	D19U6	D19U8
a-1	8.1	9.3	9.7	8.9	9	10.1	7.1	10.0
a-2	7.9	9.1	6.9	7.8	9.6	9.3	9.4	12.8
a-3	7.8	8.9	7.8	7.9	9.2	11.4	10.8	10.6
b-1	8.1	8.3	8	9.8	8.2	12.1	9.6	10.5
b-2	8.2	8.2	9.5	8.4	8.9	9.1	10.1	11.8
b-3	7.9	8.1	8	8	9.5	9.1	9.4	11.5
c-1	8.3	10.4	8.2	10.6	8.9	9.5	11.5	11.8
c-2	7.8	7.6	7.6	8.2	9.4	10.3	9.7	10.4
c-3	7.2	9.8	7.8	7.4	8.9	10	10.8	12.3
d-1	8.5	9	7.9	8.5	10	10.2	9.9	10.9
d-2	8.8	8.5	9.5	10.2	9	10.4	9.6	9.8
d-3	8.8	8.5	8.3	9.6	9.8	12.3	10.3	9.2

各初期状態の概要を図-2.3.4 に示す。

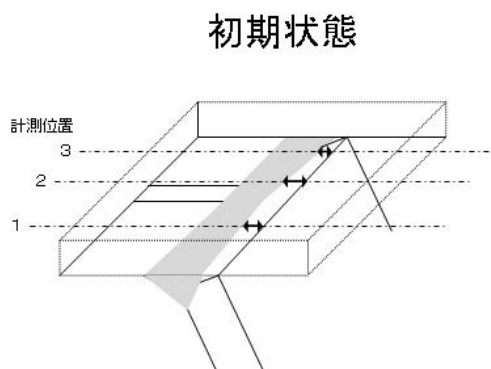


図-2.3.4 初期状態の概要

2.3.3 UT によるき裂の発生と進展の推定

繰り返し数 50 万回, 100 万回, 200 万回の各時点での超音波探傷試験結果から推定されたき裂の位置, 範囲等について整理した。UT 結果からのき裂範囲等の推定結果を以下に整理する。

① き裂範囲 x

き裂範囲 x の推定結果を表-2.3.3～5, 図-2.3.5～7 に示す。各図の(a)は 4 本の対象溶接継手毎, (b)は応力条件が近似すると考えられる a, d と b, c の結果をそれぞれ平均したもの及び a～d の全結果を平均したものを示す。

表-2.3.3 き裂範囲 x の UT 推定結果 (50 万回载荷時点)

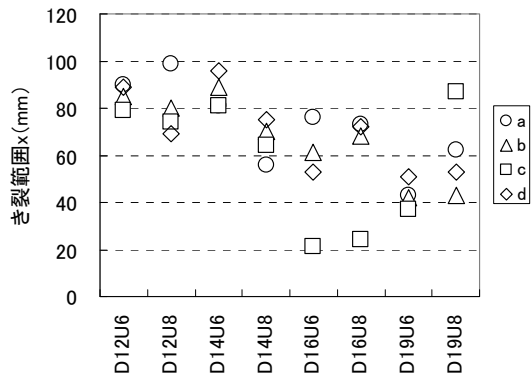
検査箇所	き裂範囲x(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	90.0	85.0	79.0	89.0	89.5	82.0	85.8
D12U8	99.0	80.0	74.0	69.0	84.0	77.0	80.5
D14U6	81.0	89.0	81.0	96.0	88.5	85.0	86.8
D14U8	56.0	70.0	64.0	75.0	65.5	67.0	66.3
D16U6	76.0	61.0	21.0	53.0	64.5	41.0	52.8
D16U8	73.0	68.0	24.0	72.0	72.5	46.0	59.3
D19U6	43.0	42.0	37.0	51.0	47.0	39.5	43.3
D19U8	62.0	43.0	87.0	53.0	57.5	65.0	61.3

表-2.3.4 き裂範囲 x の UT 推定結果 (100 万回载荷時点)

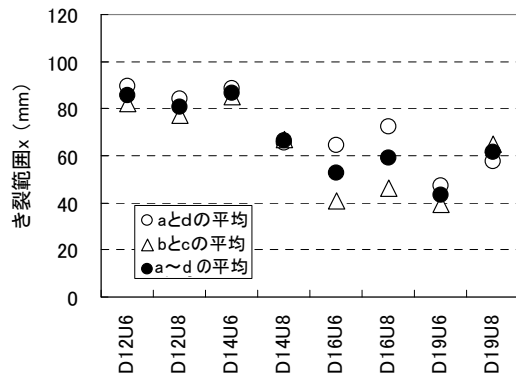
検査箇所	き裂範囲x(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	90.0	85.0	87.0	89.0	89.5	86.0	87.8
D12U8	110.0	90.0	96.0	85.0	97.5	93.0	95.3
D14U6	85.0	92.0	85.0	119.0	102.0	88.5	95.3
D14U8	109.0	98.0	97.0	87.0	98.0	97.5	97.8
D16U6	88.0	81.0	70.0	78.0	83.0	75.5	79.3
D16U8	84.0	87.0	76.0	90.0	87.0	81.5	84.3
D19U6	74.0	59.0	52.0	71.0	72.5	55.5	64.0
D19U8	77.0	45.0	87.0	68.0	72.5	66.0	69.3

表-2.3.5 き裂範囲 x の UT 推定結果 (200 万回载荷時点)

検査箇所	き裂範囲x(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	97.0	92.0	92.0	96.0	96.5	92.0	94.3
D12U8	110.0	101.0	123.0	96.0	103.0	112.0	107.5
D14U6	94.0	105.0	99.0	120.0	107.0	102.0	104.5
D14U8	123.0	107.0	97.0	100.0	111.5	102.0	106.8
D16U6	99.0	83.0	76.0	84.0	91.5	79.5	85.5
D16U8	99.0	97.0	96.0	109.0	104.0	96.5	100.3
D19U6	99.0	68.0	73.0	88.0	93.5	70.5	82.0
D19U8	80.0	59.0	103.0	82.0	81.0	81.0	81.0

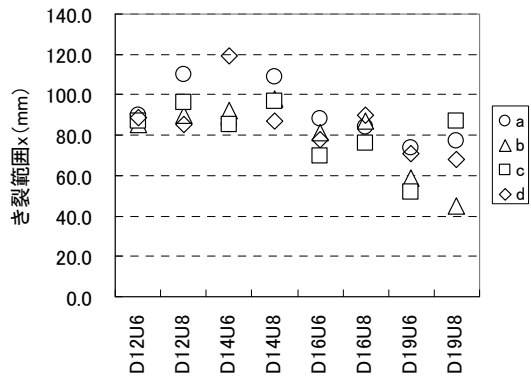


(a)

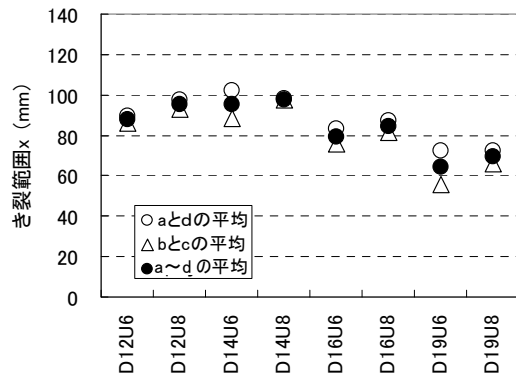


(b)

図-2.3.5 き裂範囲 x の UT 推定結果 (50 万回载荷時点)

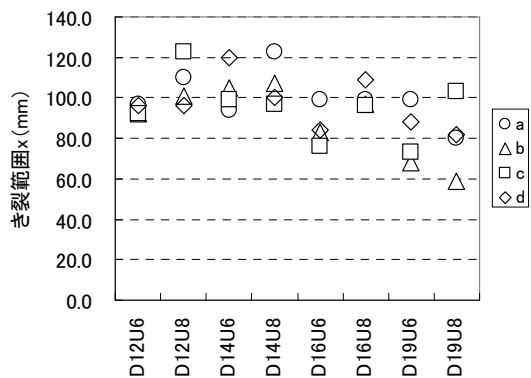


(a)

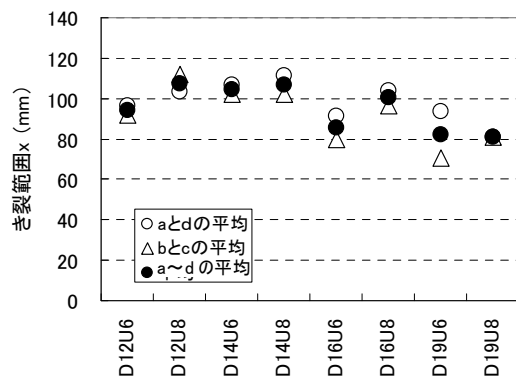


(b)

図-2.3.6 き裂範囲 x の UT 推定結果 (100 万回载荷時点)



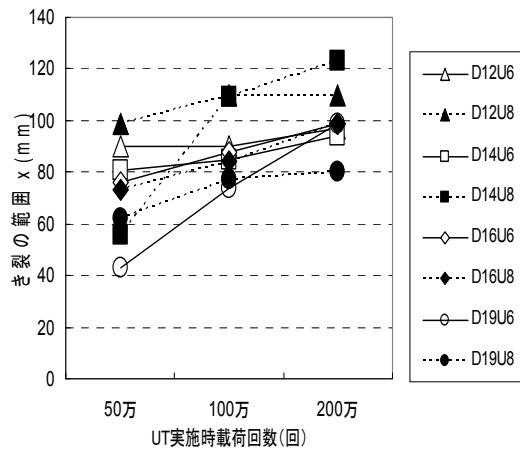
(a)



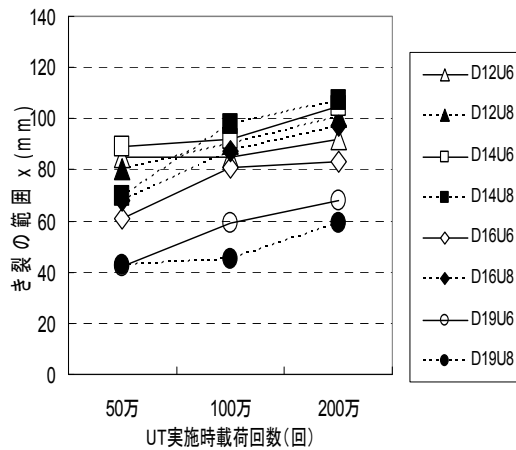
(b)

図-2.3.7 き裂範囲 x の UT 推定結果 (200 万回载荷時点)

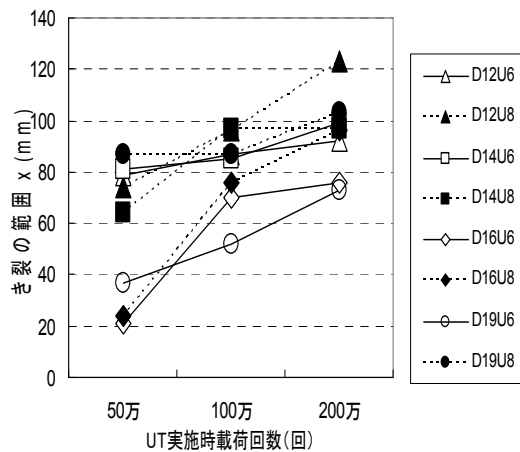
また、図-2.3.5～7 に示したき裂範囲 x の推定結果を、载荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.8 に示す。



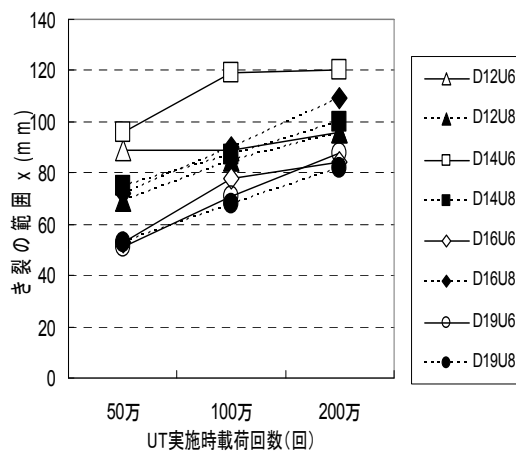
(a) 継手部 a



(b) 継手部 b

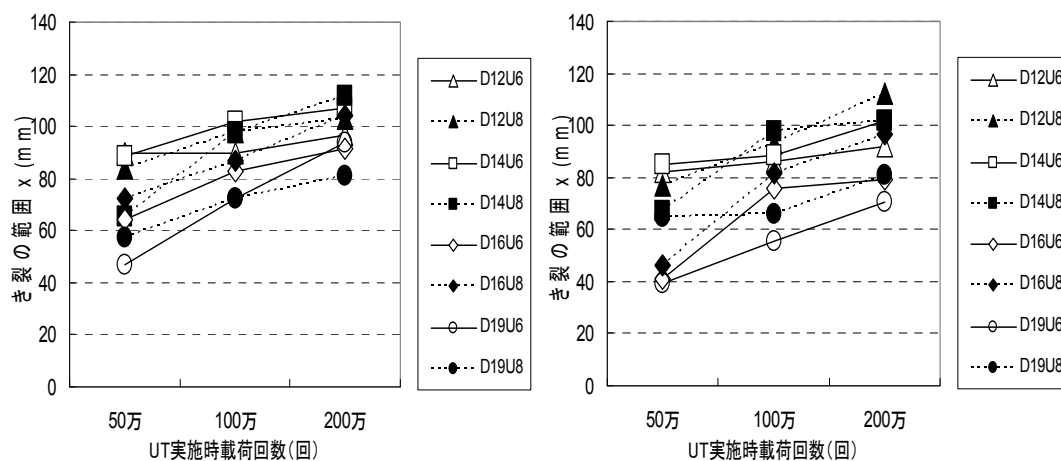


(c) 継手部 c



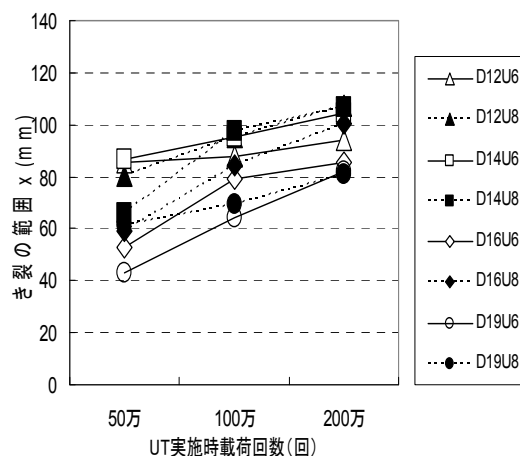
(d) 継手部 d

図-2.3.8(1) UT 推定による载荷回数とき裂範囲 x の値の変化



(e) 継手部 a と d の値の平均

(f) 継手部 b と c の値の平均



(g) 継手部 a, b, c, d の値の平均

図-2.3.8(2) UT 推定による载荷回数とき裂範囲 x の値の変化

以上、各ケースの溶接線毎にややばらつきがみられるものの、载荷回数に従ってき裂範囲 x は確実に大きくなっている。

デッキプレート厚が薄いケースほど、载荷回数 100 万回前後で、き裂範囲 x の拡大速度がやや鈍化している傾向がみられ、载荷回数 50 万回までに急速にき裂が進展していた可能性があり、逆にデッキプレート板厚の大きい D19 や D16 では、試験を終了した 200 万回载荷後も载荷を継続することで、引き続きき裂範囲 x が拡大した可能性があったものと考えられる。

② き裂範囲 y

き裂範囲 y の推定結果を表-2.3.6～8，図-2.3.9～11 に示す。各図の(a)は 4 本の対象溶接継手毎，(b)は応力条件が近似すると考えられる a，d と b，c の結果をそれぞれ平均したもの及び a～d の全結果を平均したものを示す。

表-2.3.6 き裂範囲 y の UT 推定結果（50 万回載荷時点）

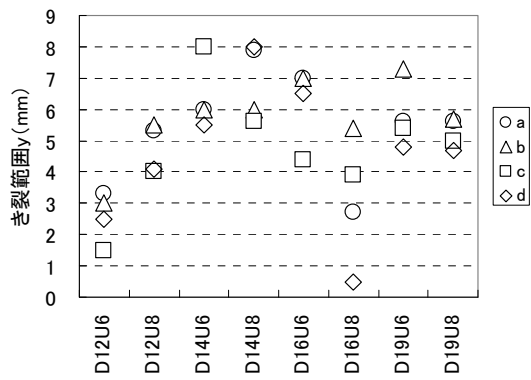
検査箇所	き裂範囲y(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	3.3	3.0	1.5	2.5	2.9	2.3	2.6
D12U8	5.3	5.5	4.0	4.1	4.7	4.8	4.7
D14U6	6.0	6.0	8.0	5.5	5.8	7.0	6.4
D14U8	7.9	6.0	5.6	8.0	8.0	5.8	6.9
D16U6	7.0	7.0	4.4	6.5	6.8	5.7	6.2
D16U8	2.7	5.4	3.9	0.5	1.6	4.7	3.1
D19U6	5.6	7.3	5.4	4.8	5.2	6.4	5.8
D19U8	5.6	5.7	5.0	4.7	5.2	5.4	5.3

表-2.3.7 き裂範囲 y の UT 推定結果（100 万回載荷時点）

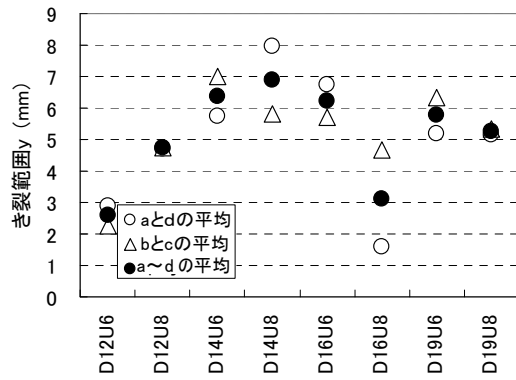
検査箇所	き裂範囲y(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	7.4	9.5	8.0	7.0	7.2	8.8	8.0
D12U8	7.0	7.0	6.0	5.0	6.0	6.5	6.3
D14U6	8.0	7.9	8.8	8.7	8.4	8.4	8.4
D14U8	8.9	9.1	9.2	8.6	8.8	9.2	9.0
D16U6	7.2	7.1	12.2	11.2	9.2	9.7	9.4
D16U8	10.4	11.0	9.5	11.3	10.9	10.3	10.6
D19U6	6.8	7.3	7.1	6.6	6.7	7.2	7.0
D19U8	8.1	7.8	7.1	7.3	7.7	7.5	7.6

表-2.3.8 き裂範囲 y の UT 推定結果（200 万回載荷時点）

検査箇所	き裂範囲y(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	7.4	9.5	8.0	7.5	7.5	8.8	8.1
D12U8	8.4	8.6	7.8	7.4	7.9	8.2	8.1
D14U6	9.5	10.0	12.6	9.9	9.7	11.3	10.5
D14U8	11.7	11.8	11.0	11.9	11.8	11.4	11.6
D16U6	13.7	17.0	16.3	16.5	15.1	16.7	15.9
D16U8	12.1	12.7	12.5	12.0	12.1	12.6	12.3
D19U6	10.3	9.7	9.0	10.2	10.3	9.4	9.8
D19U8	9.2	8.1	9.3	9.1	9.2	8.7	8.9

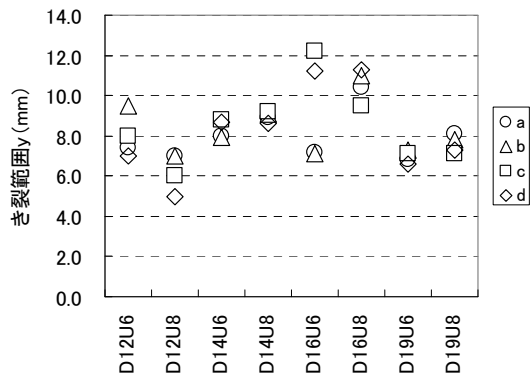


(a)

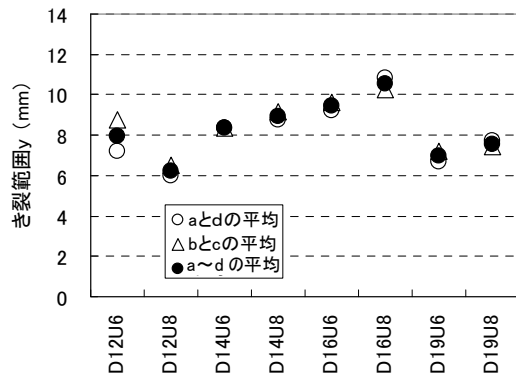


(b)

図-2.3.9 き裂範囲 y の UT 推定結果 (50 万回载荷時点)

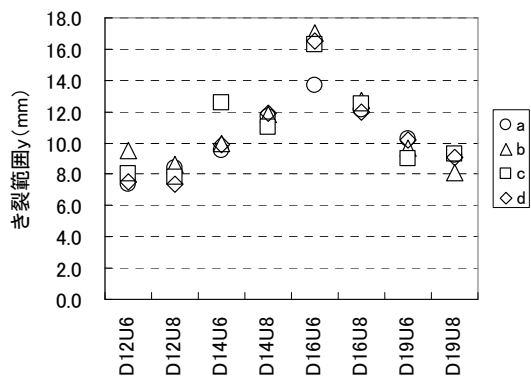


(a)

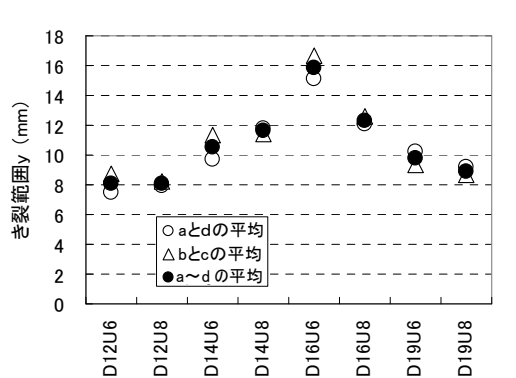


(b)

図-2.3.10 き裂範囲 y の UT 推定結果 (100 万回载荷時点)



(a)



(b)

図-2.3.11 き裂範囲 y の UT 推定結果 (200 万回载荷時点)

また、図-2.3.9～11 に示したき裂範囲 y の推定結果を、载荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.12 に示す。

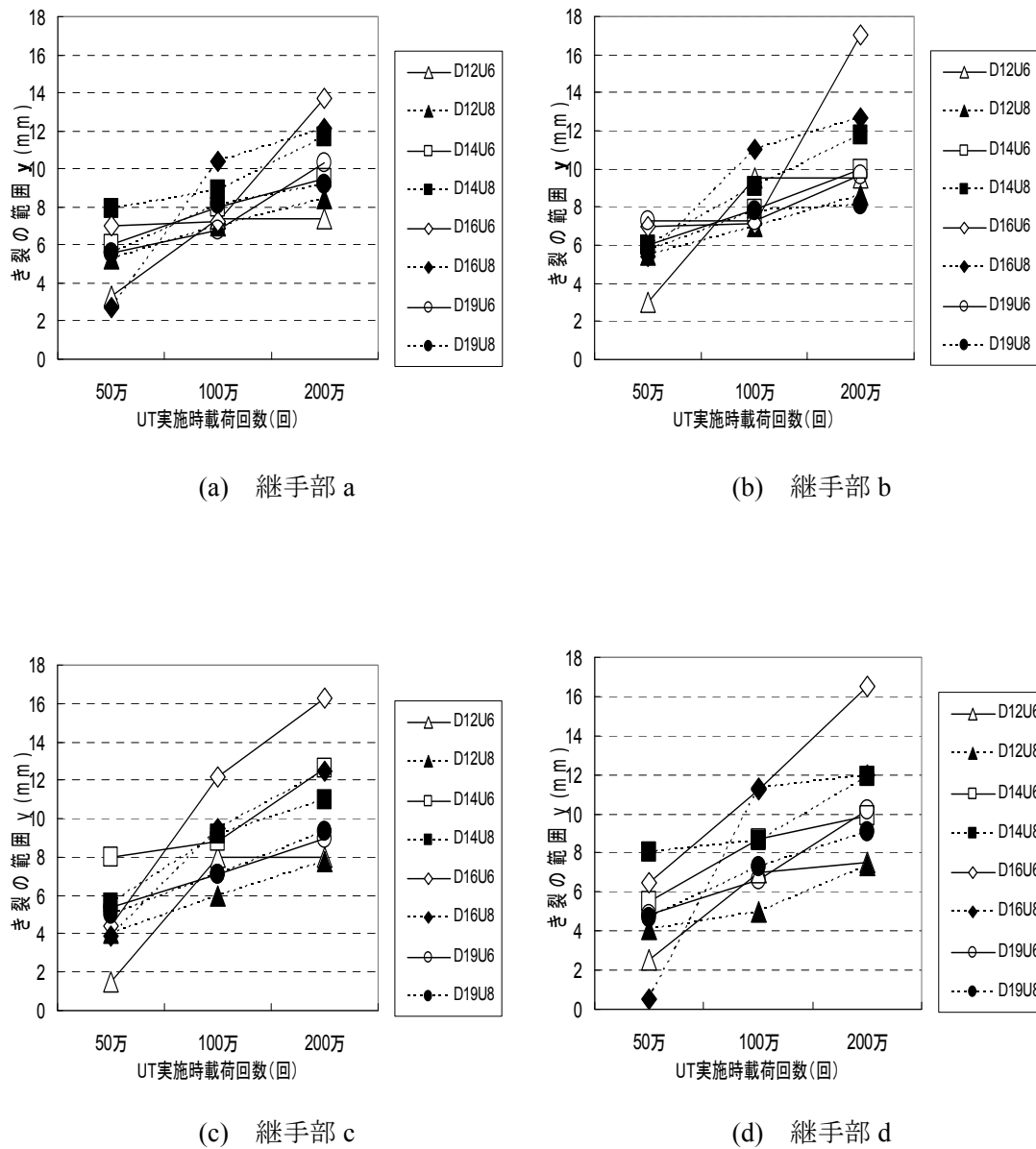
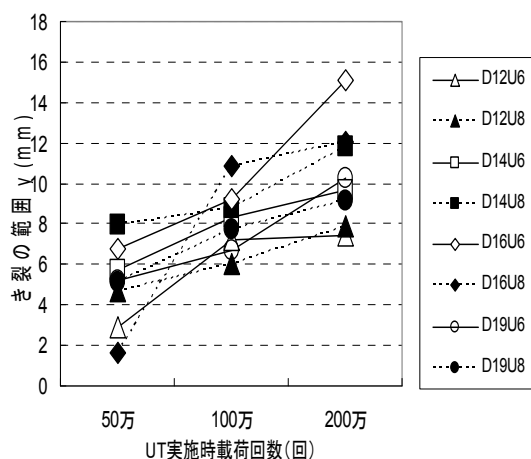
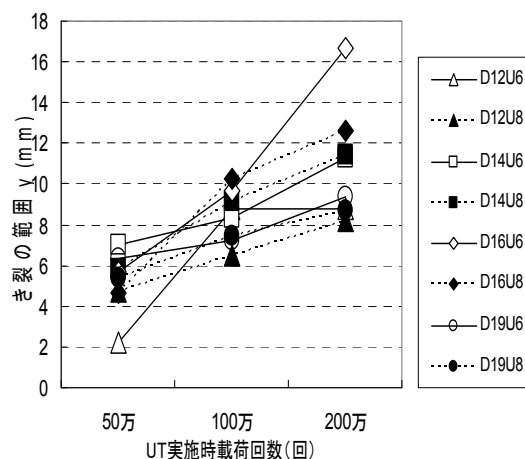


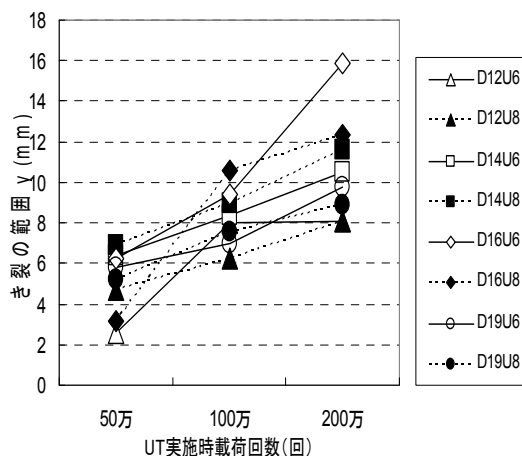
図-2.3.12(1) UT 推定による载荷回数とき裂範囲 y の値の変化



(e) 継手部 a と d の値の平均



(f) 継手部 b と c の値の平均



(g) 継手部 a, b, c, d の値の平均

図-2.3.12(2) UT 推定による荷重回数とき裂範囲 y の値の変化

各荷重段階においてデッキプレート板厚やトラフリブ板厚に対する傾向は明確でない。荷重回数 200 万回時点で D16U6 のケースが突出して大きなき裂範囲 y を示したことは他のケースと異なる特異な現象であった可能性も否定できないが、200 万回荷重時点で D16U6 の a～d の全ての溶接線で同様の値となっており応力状態や変形特性などとの関係により再現性のある現象である可能性もある。200 万回荷重時点でのき裂範囲 y の大きさは、D16→D14→D19→D12 の順に大きくなっており板厚の組み合わせとの相関関係については明確にできていない。

荷重回数毎のき裂範囲 y の進展状況からは、デッキプレート板厚が小さいものほど、荷重回数 100 万回前後での進展速度の鈍化が顕著なものがやや多くみられる。

③ き裂範囲 z

き裂範囲 z の推定結果を表-2.3.9～11、図-2.3.13～15 に示す。

なお、UT ではき裂までの距離を測定して推定しており、「き裂範囲 z」はデッキプレート板厚からき裂までの推定距離を引いて算出したものである。

各図の(a)は4本の対象溶接継手毎、(b)は応力条件が近似すると考えられる a、d と b、c の結果をそれぞれ平均したものおよび a～d の全結果を平均したものを示す。

表-2.3.9 き裂範囲 z の UT 推定結果 (50 万回載荷時点)

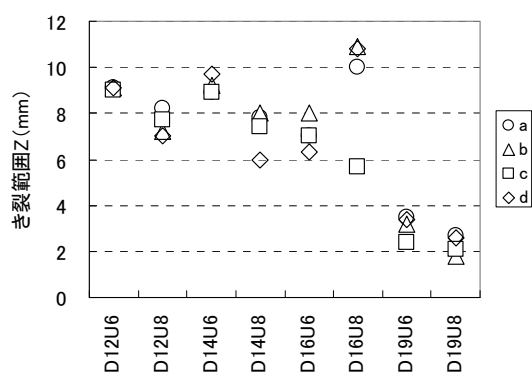
検査箇所	き裂範囲z(mm)							き裂までの距離(UT実測) (mm)							
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均	min
D12U6	9.1	9.1	9.0	9.1	9.1	9.1	9.1	2.9	2.9	3.0	2.9	2.9	3.0	2.9	2.9
D12U8	8.2	7.2	7.7	7.0	7.6	7.5	7.5	3.8	4.8	4.3	5.0	4.4	4.6	4.5	3.8
D14U6	8.9	9.2	8.9	9.7	9.3	9.1	9.2	5.1	4.8	5.1	4.3	4.7	5.0	4.8	4.3
D14U8	7.8	8.0	7.4	6.0	6.9	7.7	7.3	6.2	6.0	6.6	8.0	7.1	6.3	6.7	6.0
D16U6	7.0	8.0	7.0	6.3	6.7	7.5	7.1	9.0	8.0	9.0	9.7	9.4	8.5	8.9	8.0
D16U8	10.0	10.9	5.7	10.8	10.4	8.3	9.4	6.0	5.1	10.3	5.2	5.6	7.7	6.7	5.1
D19U6	3.5	3.2	2.4	3.4	3.5	2.8	3.1	15.5	15.8	16.6	15.6	15.6	16.2	15.9	15.5
D19U8	2.7	1.8	2.1	2.6	2.7	2.0	2.3	16.3	17.2	16.9	16.4	16.4	17.1	16.7	16.3

表-2.3.10 き裂範囲 z の UT 推定結果 (100 万回載荷時点)

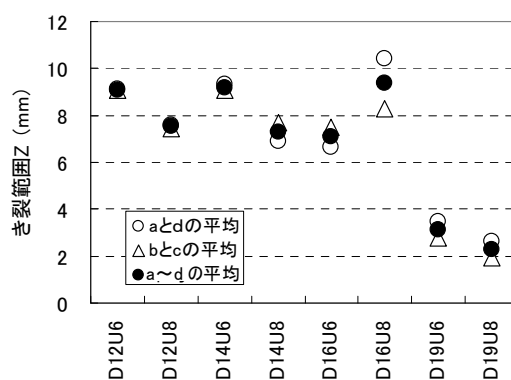
検査箇所	き裂範囲z(mm)							き裂までの距離(UT実測) (mm)							
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均	min
D12U6	9.6	9.6	9.5	9.7	9.7	9.6	9.6	2.4	2.4	2.5	2.3	2.4	2.5	2.4	2.3
D12U8	9.6	9.6	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	2.4	2.4	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	2.3
D14U6	11.1	11.1	11.0	11.2	11.2	11.1	11.1	2.9	2.9	3	2.8	2.9	3.0	2.9	2.8
D14U8	10.4	10.3	10.3	10.5	10.5	10.3	10.4	3.6	3.7	3.7	3.5	3.6	3.7	3.6	3.5
D16U6	12.4	12.5	12.5	12.6	12.5	12.5	12.5	3.6	3.5	3.5	3.4	3.5	3.5	3.5	3.4
D16U8	11.5	11.6	9.6	11.8	11.7	10.6	11.1	4.5	4.4	6.4	4.2	4.4	5.4	4.9	4.2
D19U6	6.7	4.4	4.7	6.4	6.6	4.6	5.6	12.3	14.6	14.3	12.6	12.5	14.5	13.5	12.3
D19U8	4.4	3.7	4.0	6.0	5.2	3.9	4.5	14.6	15.3	15	13	13.8	15.2	14.5	13.0

表-2.3.11 き裂範囲 z の UT 推定結果 (200 万回載荷時点)

検査箇所	き裂範囲z(mm)							き裂までの距離(UT実測) (mm)							
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均	min
D12U6	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
D12U8	10.6	10.5	10.1	10.2	10.4	10.3	10.4	1.4	1.5	1.9	1.8	1.6	1.7	1.7	1.4
D14U6	11.6	11.4	11.5	11.4	11.5	11.5	11.5	2.4	2.6	2.5	2.6	2.5	2.6	2.5	2.4
D14U8	11.2	11.2	11.1	11.1	11.2	11.2	11.2	2.8	2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8
D16U6	13.5	13.5	13.4	13.4	13.5	13.5	13.5	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.5
D16U8	12.4	12.8	11.8	12.7	12.6	12.3	12.4	3.6	3.2	4.2	3.3	3.5	3.7	3.6	3.2
D19U6	11.5	8.0	10.0	8.8	10.2	9.0	9.6	7.5	11	9	10.2	8.9	10.0	9.4	7.5
D19U8	8.2	5.5	8.5	9.4	8.8	7.0	7.9	10.8	13.5	10.5	9.6	10.2	12.0	11.1	9.6

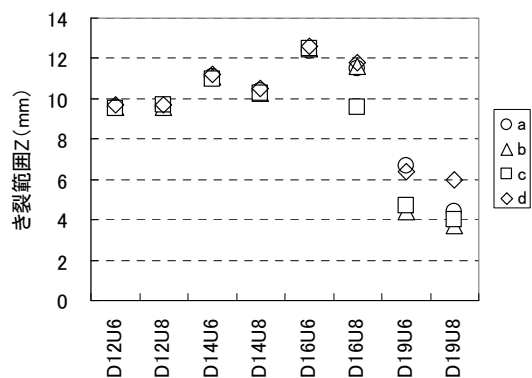


(a)

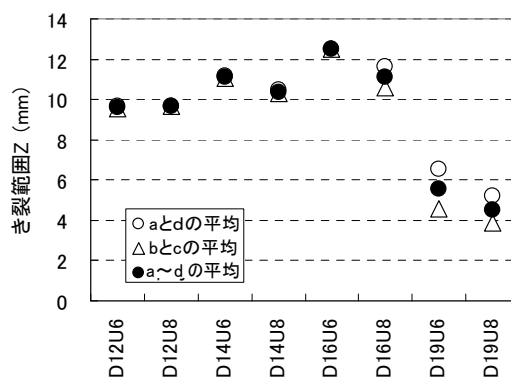


(b)

図-2.3.13 き裂範囲 z の UT 推定結果 (50 万回载荷時点)

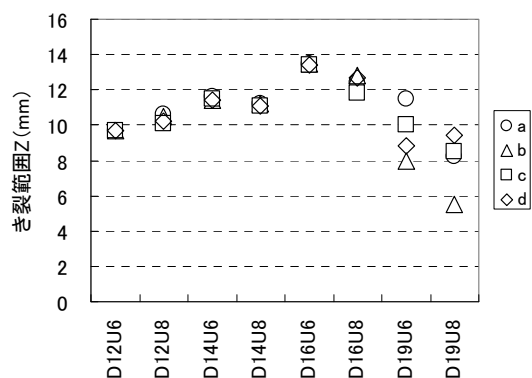


(a)

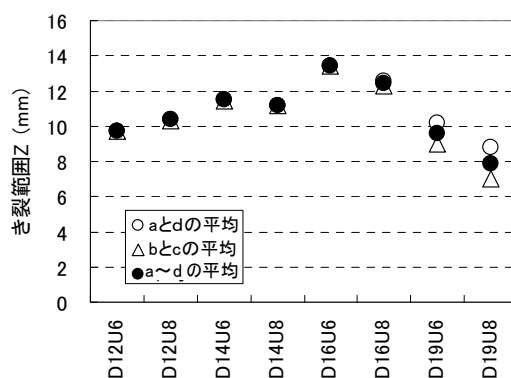


(b)

図-2.3.14 き裂範囲 z の UT 推定結果 (100 万回载荷時点)



(a)



(b)

図-2.3.15 き裂範囲 z の UT 推定結果 (200 万回载荷時点)

また、図-2.3.13～15 に示したき裂範囲 z の推定結果を、载荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.16 に示す。

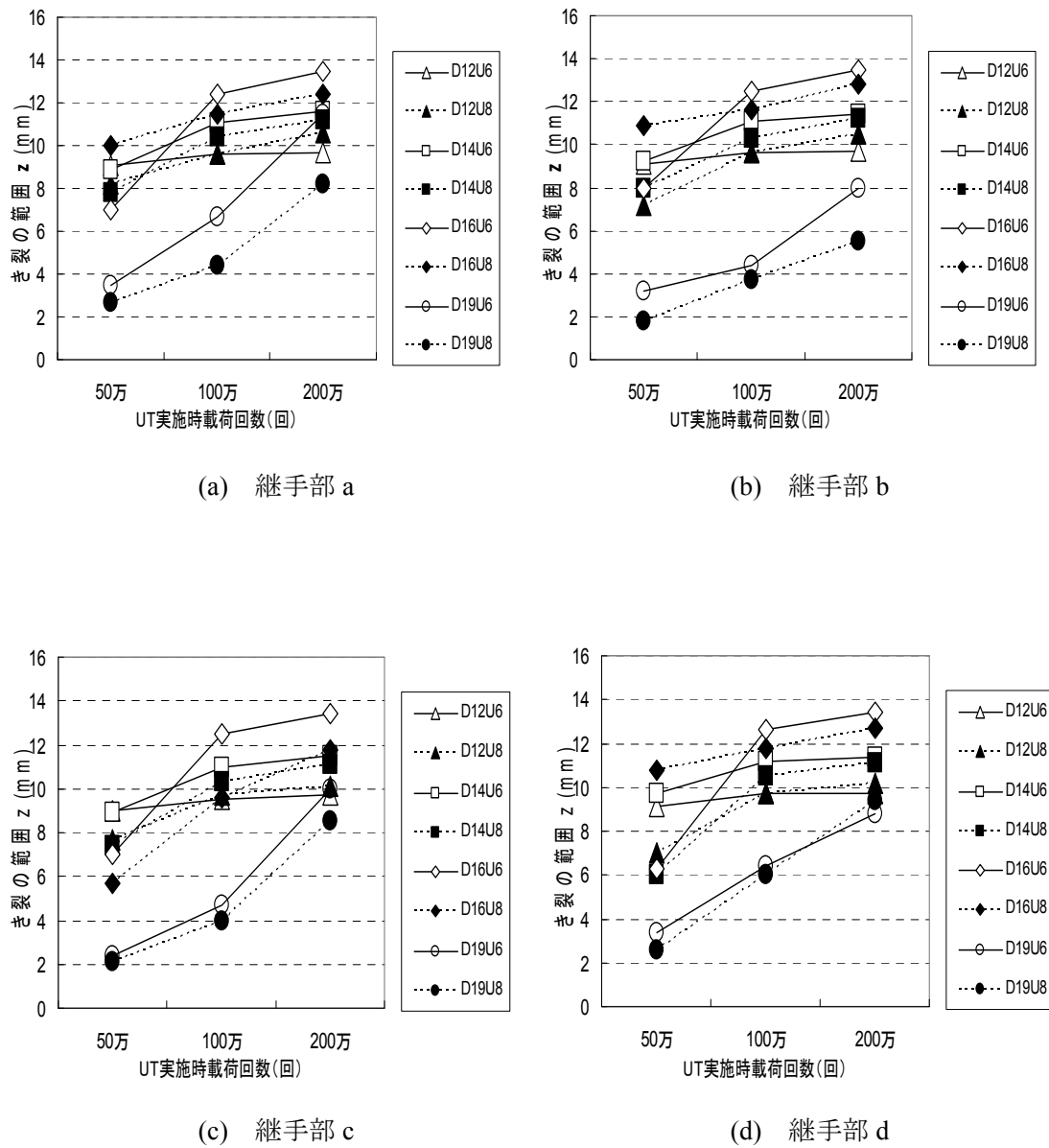
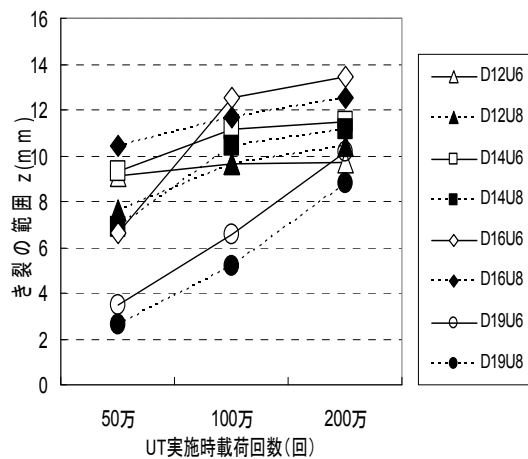
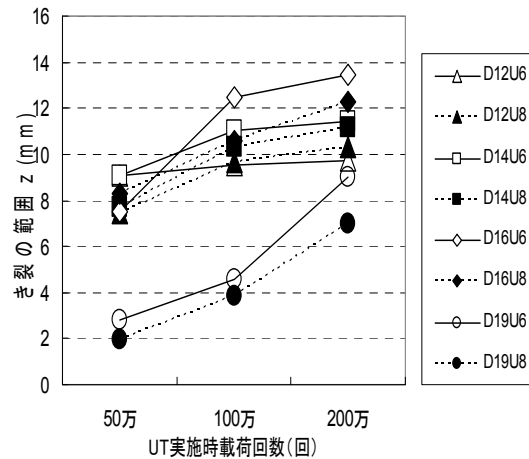


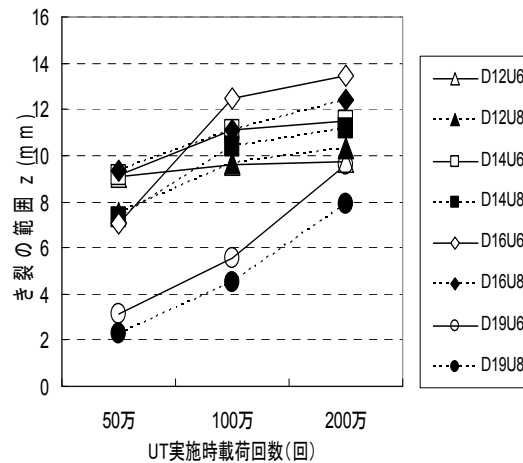
図-2.3.16(1) UT 推定による载荷回数とき裂範囲 z の値の変化



(e) 継手部 a と d の値の平均



(f) 継手部 b と c の値の平均



(g) 継手部 a, b, c, d の値の平均

図-2.3.16(2) UT 推定による载荷回数とき裂範囲 z の値の変化

D19 のケースを除き载荷回数が増えるにつれて溶接線毎の差は小さくなり载荷回数 200 万回時点ではほぼ一致する。

デッキプレート板厚 16mm 以下では、载荷回数 50 万回時点で 5mm 以上デッキ貫通方向にき裂が進展しており、100 万回以降はそれ以前よりき裂進展速度が鈍化する傾向がみられる。一方、D19 では 50 万回時点ではき裂は概ね 3mm 以下と推定され、100 万回までは他ケースに比べてき裂範囲に大きな差がみられる。また 100 万回以降もき裂範囲 z は顕著に拡大しており、200 万回以降も载荷を継続した場合にはさらに拡大が進んだものと推定される。

载荷回数 200 万回時点で D12 を除き同じデッキプレート厚ではトラフリブ板厚が大きい方がき裂範囲は若干小さくなっており、き裂進展速度の抑制にトラフリブ板厚増が寄与する可能性が示唆される。ただし、デッキプレート板厚との関係は 200 万回時点では D16 が最

も値が大きいなどき裂範囲 z の絶対値との傾向は明確でない。

④ 板厚欠損率

板厚欠損率の推定結果を表-2.3.12～14、図-2.3.17～19 に示す。

板厚欠損率は、UT 計測結果とデッキプレート板厚から求めた「き裂範囲 z 」の値とデッキプレート板厚の比であり、当該位置においてき裂によるデッキプレート板厚の欠損比率を推定したものである。

各図の(a)は4本の対象溶接継手毎、(b)は応力条件が近似すると考えられる a 、 d と b 、 c の結果をそれぞれ平均したものおよび $a\sim d$ の全結果を平均したものを示す。

表-2.3.12 UT 推定結果から算出した板厚欠損率（50 万回載荷時点）

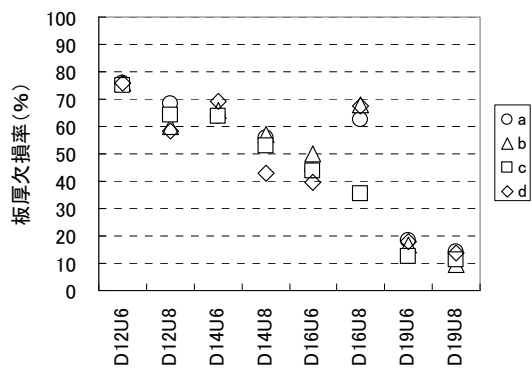
検査箇所	板厚欠損率(%)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	75.8	75.8	75.0	75.8	75.8	75.4	75.6
D12U8	68.3	60.0	64.2	58.3	63.3	62.1	62.7
D14U6	63.6	65.7	63.6	69.3	66.4	64.6	65.5
D14U8	55.7	57.1	52.9	42.9	49.3	55.0	52.1
D16U6	43.8	50.0	43.8	39.4	41.6	46.9	44.2
D16U8	62.5	68.1	35.6	67.5	65.0	51.9	58.4
D19U6	18.4	16.8	12.6	17.9	18.2	14.7	16.4
D19U8	14.2	9.5	11.1	13.7	13.9	10.3	12.1

表-2.3.13 UT 推定結果から算出した板厚欠損率（100 万回載荷時点）

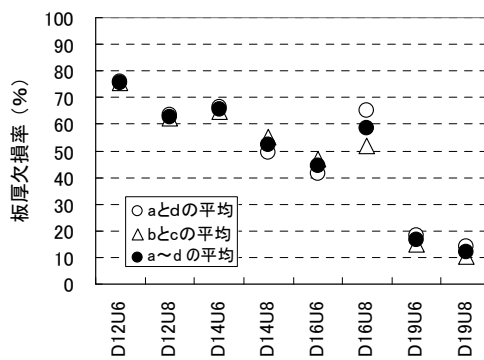
検査箇所	板厚欠損率(%)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	80.0	80.0	79.2	80.8	80.4	79.6	80.0
D12U8	80.0	80.0	80.8	80.8	80.4	80.4	80.4
D14U6	79.3	79.3	78.6	80.0	79.6	78.9	79.3
D14U8	74.3	73.6	73.6	75.0	74.6	73.6	74.1
D16U6	77.5	78.1	78.1	78.8	78.1	78.1	78.1
D16U8	71.9	72.5	60.0	73.8	72.8	66.3	69.5
D19U6	35.3	23.2	24.7	33.7	34.5	23.9	29.2
D19U8	23.2	19.5	21.1	31.6	27.4	20.3	23.8

表-2.3.14 UT 推定結果から算出した板厚欠損率（200 万回載荷時点）

検査箇所	板厚欠損率(%)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8	80.8
D12U8	88.3	87.5	84.2	85.0	86.7	85.8	86.3
D14U6	82.9	81.4	82.1	81.4	82.1	81.8	82.0
D14U8	80.0	80.0	79.3	79.3	79.6	79.6	79.6
D16U6	84.4	84.4	83.8	83.8	84.1	84.1	84.1
D16U8	77.5	80.0	73.8	79.4	78.4	76.9	77.7
D19U6	60.5	42.1	52.6	46.3	53.4	47.4	50.4
D19U8	43.2	28.9	44.7	49.5	46.3	36.8	41.6

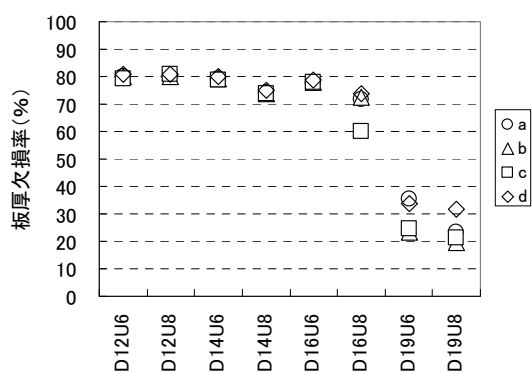


(a)

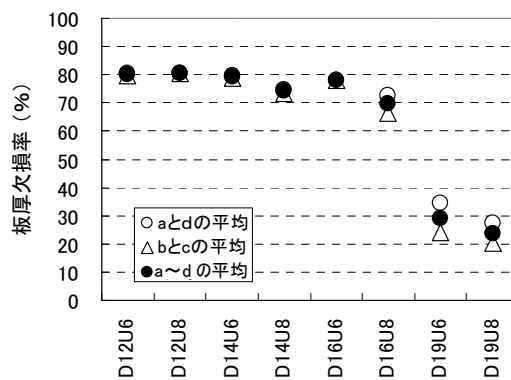


(b)

図-2.3.17 UT 推定結果から算出した板厚欠損率 (50 万回载荷時点)

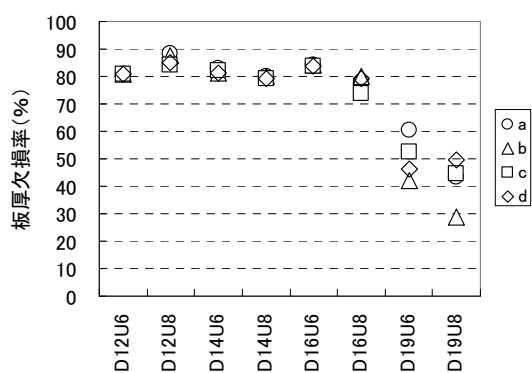


(a)

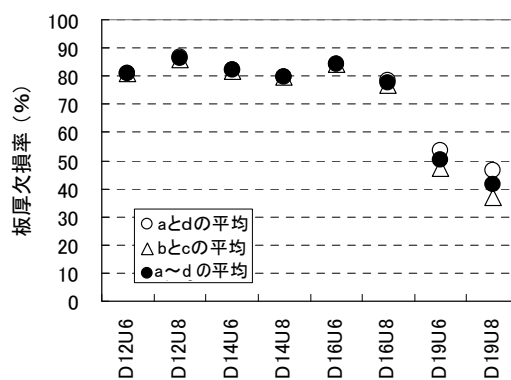


(b)

図-2.3.18 UT 推定結果から算出した板厚欠損率 (100 万回载荷時点)



(a)



(b)

図-2.3.19 UT 推定結果から算出した板厚欠損率 (200 万回载荷時点)

また、図-2.3.17～19 に示した板厚の欠損率の推計結果を、载荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.20 に示す。

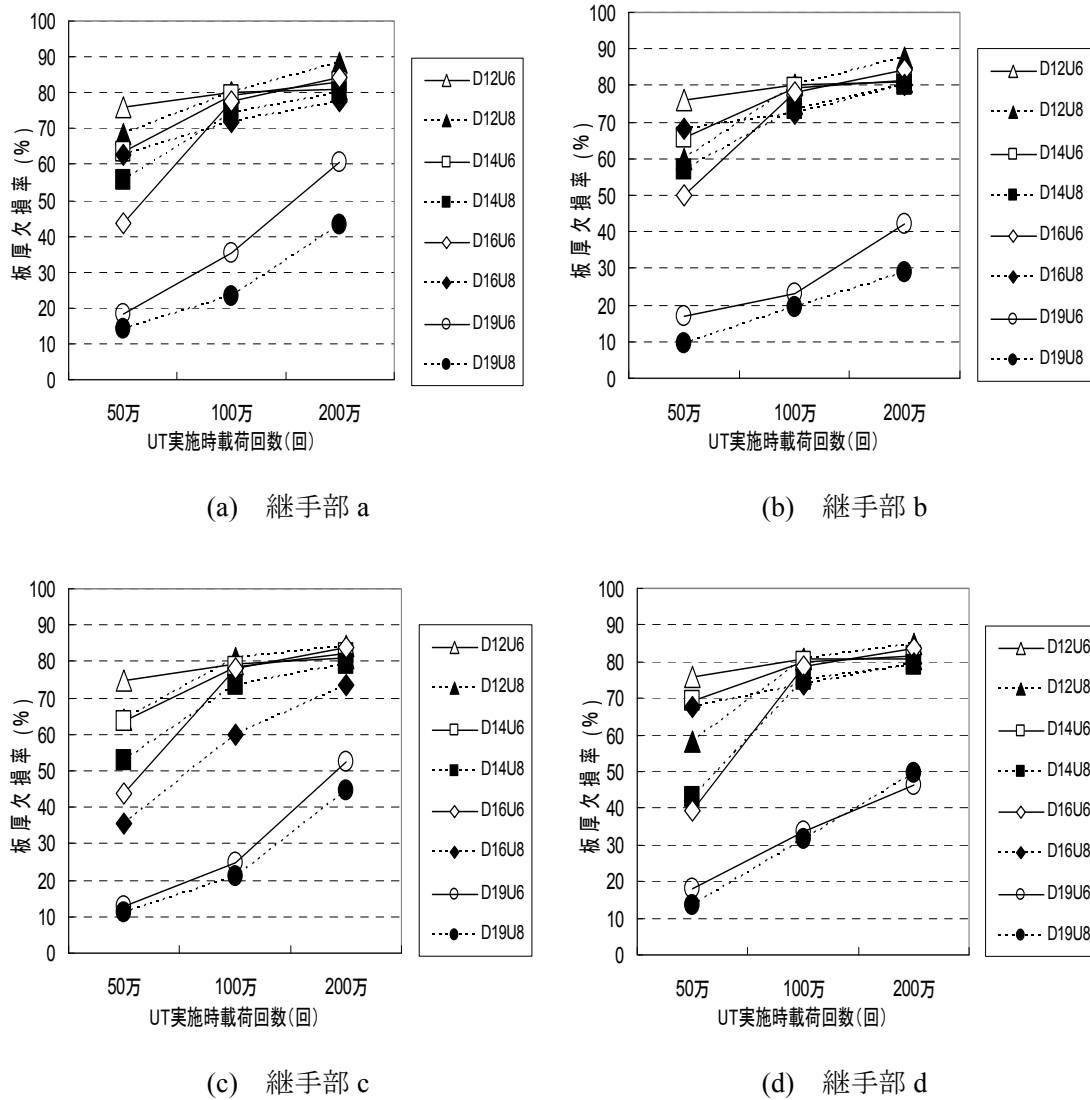
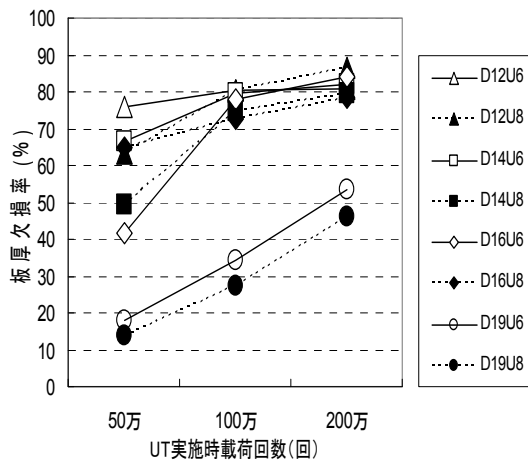
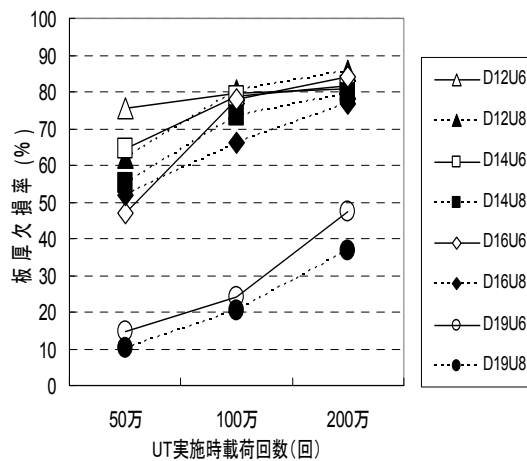


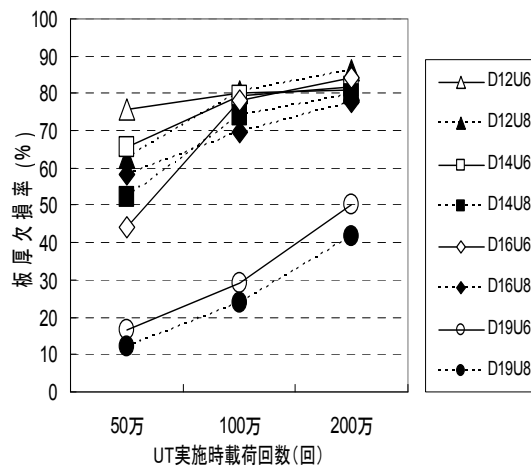
図-2.3.20(1) UT 推定による载荷回数と板厚欠損率の変化



(e) 継手部 a と d の値の平均



(f) 継手部 b と c の値の平均



(g) 継手部 a, b, c, d の値の平均

図-2.3.20(2) UT 推定による载荷回数と板厚欠損率の変化

き裂範囲 z をデッキプレート板厚で無次元化した板厚欠損率は、载荷回数に依らず総じてデッキプレート板厚が大きいほど小さくなる傾向がみられ、デッキプレートの板厚増によるデッキプレート貫通されつの進展抑制効果が認められる。特に D19 では他のケースに比べて板厚欠損率は著しく小さい。

D19 以外のケースでは载荷回数 100 万回時点ですでに板厚の欠損率が 70% 程度以上に達しており、デッキプレート貫通に至る直前の段階といえる。また载荷回数 100 万回以降はそれ以前と比較して板厚欠損率の増加は小さく、デッキプレート貫通に至る前段階で载荷回数に対するき裂進展速度が鈍化する傾向が認められる。

⑤ き裂の道のり L

き裂の道のり L の推定結果を表-2.3.15～17、図-2.3.21～23 に示す。

各図の(a)は 4 本の対象溶接継手毎、(b)は応力条件が近似すると考えられる a、d と b、c の結果をそれぞれ平均したものおよび a～d の全結果を平均したものを示す。

表-2.3.15 UT 推定結果から算出したき裂の道のり L (50 万回載荷時点)

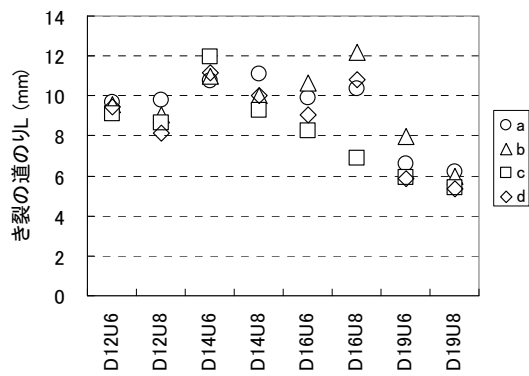
検査箇所	き裂の道のりL(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	9.7	9.6	9.1	9.4	9.6	9.4	9.5
D12U8	9.8	9.1	8.7	8.1	8.9	8.9	8.9
D14U6	10.7	11.0	12.0	11.2	10.9	11.5	11.2
D14U8	11.1	10.0	9.3	10.0	10.6	9.6	10.1
D16U6	9.9	10.6	8.3	9.1	9.5	9.4	9.5
D16U8	10.4	12.2	6.9	10.8	10.6	9.5	10.1
D19U6	6.6	8.0	5.9	5.9	6.2	6.9	6.6
D19U8	6.2	6.0	5.4	5.4	5.8	5.7	5.7

表-2.3.16 UT 推定結果から算出したき裂の道のり L (100 万回載荷時点)

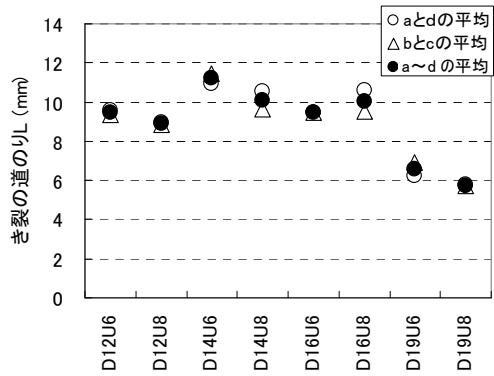
検査箇所	き裂の道のりL(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	12.1	13.5	12.4	12.0	12.0	13.0	12.5
D12U8	11.9	11.9	11.4	10.9	11.4	11.6	11.5
D14U6	13.7	13.6	14.1	14.2	13.9	13.9	13.9
D14U8	13.7	13.7	13.8	13.6	13.6	13.8	13.7
D16U6	14.3	14.4	17.5	16.9	15.6	15.9	15.8
D16U8	15.5	16.0	13.5	16.3	15.9	14.7	15.3
D19U6	9.5	8.5	8.5	9.2	9.4	8.5	8.9
D19U8	9.2	8.6	8.1	9.4	9.3	8.4	8.9

表-2.3.17 UT 推定結果から算出したき裂の道のり L (200 万回載荷時点)

検査箇所	き裂の道のりL(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	12.2	13.6	12.6	12.3	12.2	13.1	12.7
D12U8	13.5	13.6	12.8	12.6	13.1	13.2	13.1
D14U6	15.0	15.2	17.1	15.1	15.0	16.1	15.6
D14U8	16.2	16.3	15.6	16.3	16.2	15.9	16.1
D16U6	19.2	21.7	21.1	21.3	20.2	21.4	20.8
D16U8	17.3	18.0	17.2	17.5	17.4	17.6	17.5
D19U6	15.4	12.6	13.5	13.5	14.5	13.0	13.7
D19U8	12.3	9.8	12.6	13.1	12.7	11.2	11.9

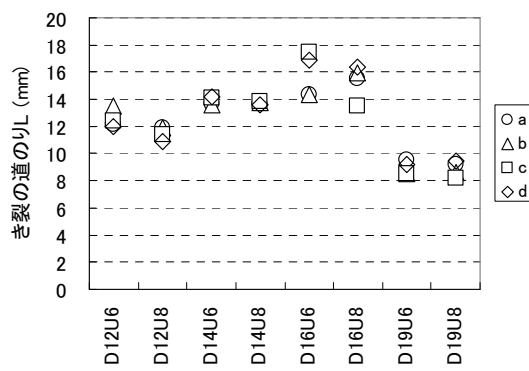


(a)

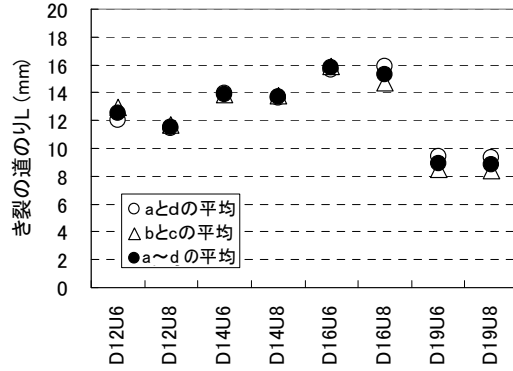


(b)

図-2.3.21 UT 推定結果から算出したき裂の道のり L (50 万回載荷時点)

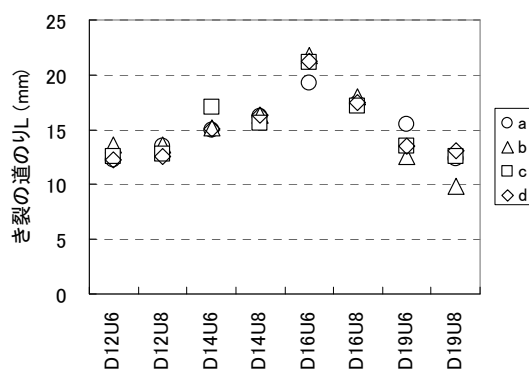


(a)

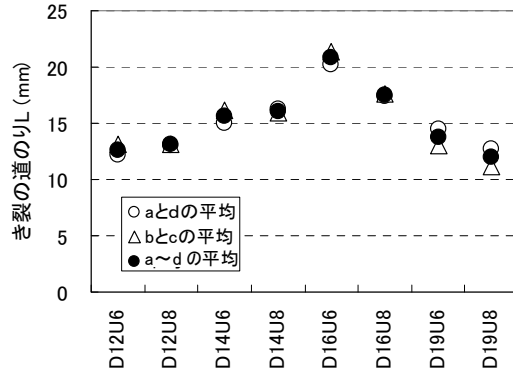


(b)

図-2.3.22 UT 推定結果から算出したき裂の道のり L (100 万回載荷時点)



(a)



(b)

図-2.3.23 UT 推定結果から算出したき裂の道のり L (200 万回載荷時点)

また、図-2.3.21～23 に示したき裂の道のり L の推計結果を、载荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.24 に示す。

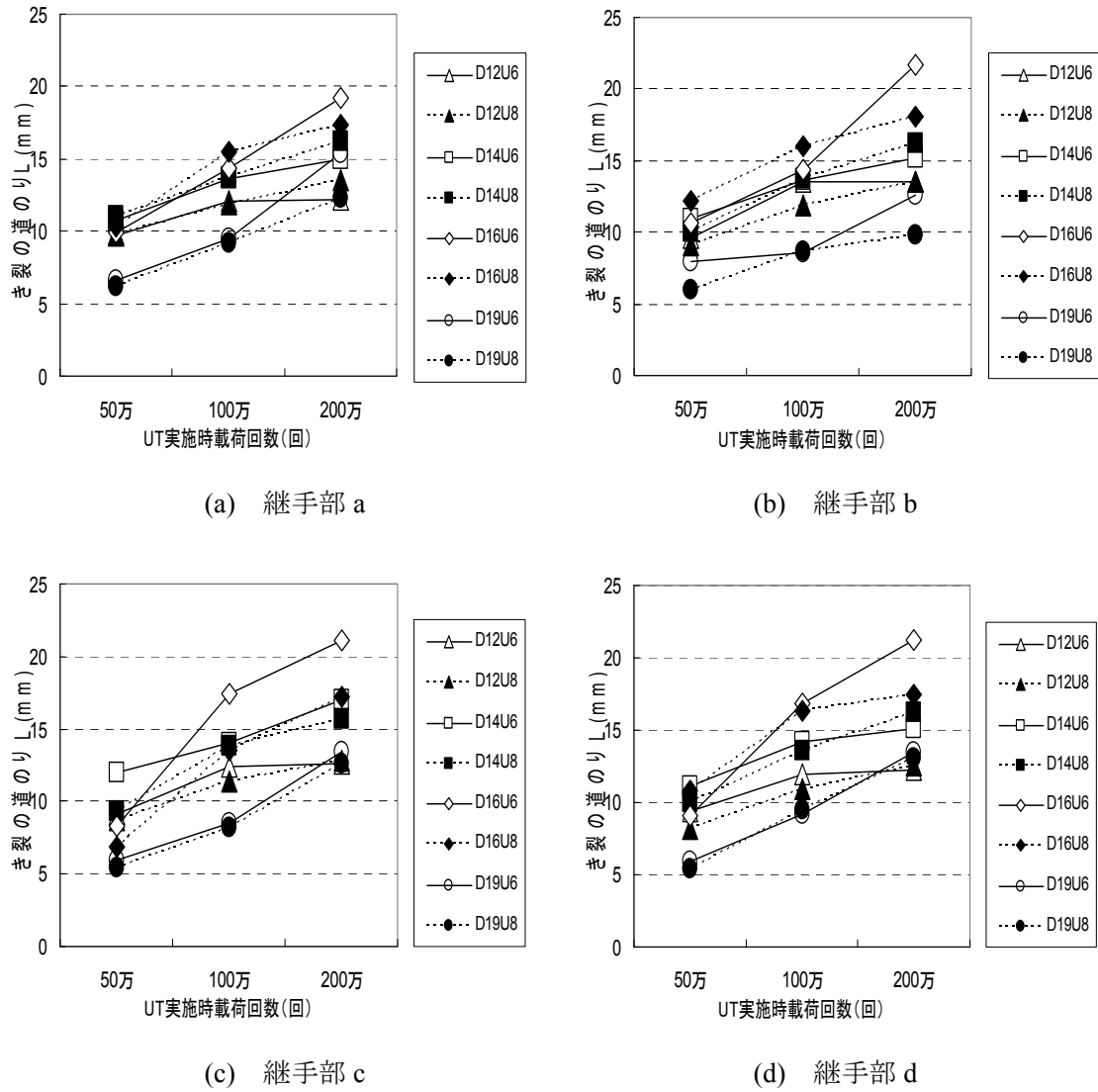
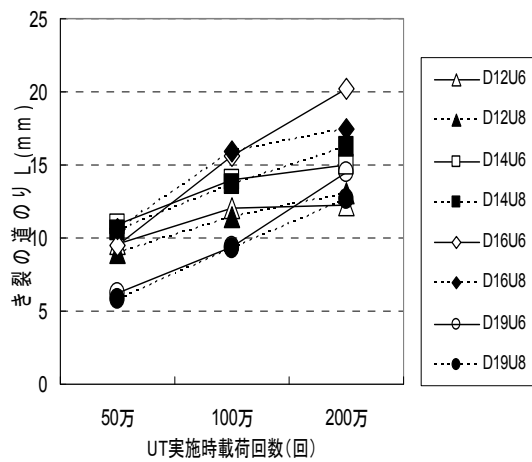
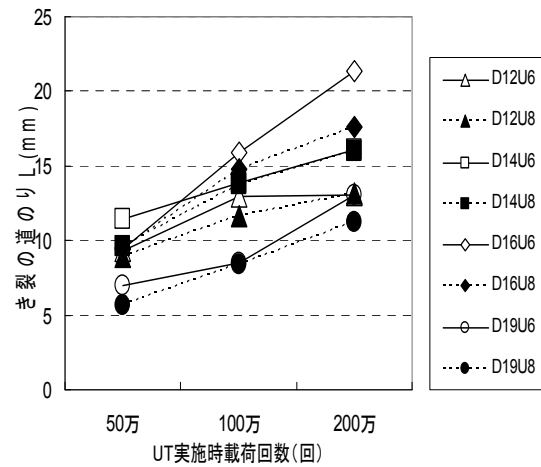


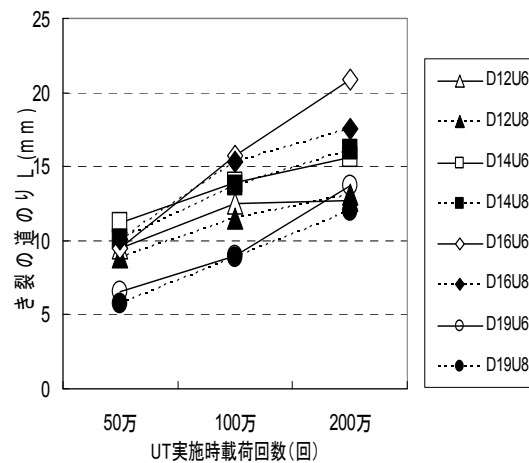
図-2.3.24(1) UT 推定による载荷回数とき裂の道のり L の変化



(e) 継手部 a と d の値の平均



(f) 継手部 b と c の値の平均



(g) 継手部 a, b, c, d の値の平均

図 2.3.24(2) UT 推定による载荷回数とき裂の道のり L の変化

き裂の道のり L は、基本的に溶接ルート付近からデッキプレート上方に向かって斜めに進展するき裂の進展長さを代表させるために定義した値である。そのためき裂範囲 y 、き裂範囲 z と進展の傾向やデッキプレート板厚、トラフリブ板厚との関係は概ね同様な傾向となっている。

⑥ き裂の面積 A

き裂の面積 A の推定結果を表-2.3.18～20、図-2.3.25～27 に示す。

各図の(a)は 4 本の対象溶接継手毎、(b)は応力条件が近似すると考えられる a, d と b, c の結果をそれぞれ平均したものおよび a～d の全結果を平均したものを示す。

表-2.3.18 UT 推定結果から算出したき裂の面積 A (50 万回載荷時点)

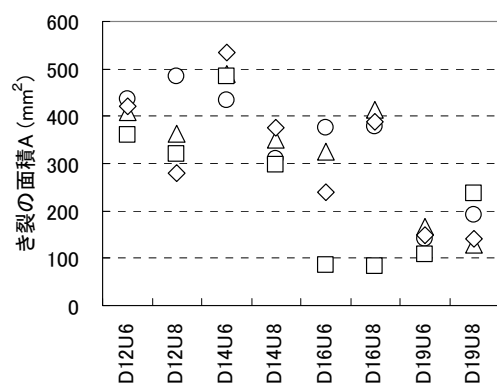
検査箇所	き裂の面積A(mm ²)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	435.6	407.2	360.4	420.0	427.8	383.8	405.8
D12U8	483.3	362.4	321.0	279.9	381.6	341.7	361.7
D14U6	434.7	488.8	484.7	535.2	485.0	486.7	485.8
D14U8	310.9	350.0	297.0	375.0	342.9	323.5	333.2
D16U6	376.2	324.2	86.8	239.9	308.0	205.5	256.8
D16U8	378.1	413.6	82.9	389.2	383.6	248.2	315.9
D19U6	142.0	167.4	109.3	150.0	146.0	138.4	142.2
D19U8	192.7	128.5	235.9	142.3	167.5	182.2	174.9

表-2.3.19 UT 推定結果から算出したき裂の面積 A (100 万回載荷時点)

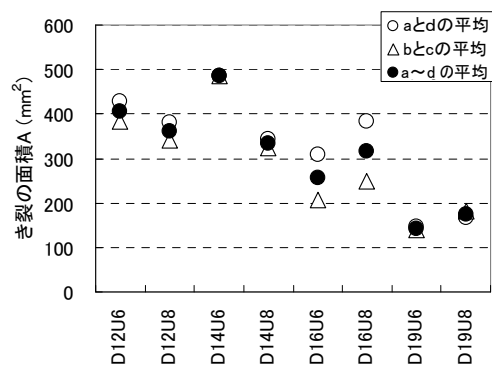
検査箇所	き裂の面積A(mm ²)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	545.4	574.0	540.3	532.3	538.9	557.1	548.0
D12U8	653.5	534.6	547.5	463.8	558.6	541.1	549.8
D14U6	581.5	626.7	598.7	843.8	712.7	612.7	662.7
D14U8	746.0	673.5	669.8	590.4	668.2	671.6	669.9
D16U6	630.9	582.2	611.3	657.5	644.2	596.8	620.5
D16U8	651.2	695.4	513.2	735.2	693.2	604.3	648.8
D19U6	353.2	251.4	221.4	326.4	339.8	236.4	288.1
D19U8	354.9	194.2	354.5	321.3	338.1	274.4	306.2

表-2.3.20 UT 推定結果から算出したき裂の面積 A (200 万回載荷時点)

検査箇所	き裂の面積A(mm ²)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	591.7	624.6	578.4	588.5	590.1	601.5	595.8
D12U8	743.9	685.4	784.8	604.9	674.4	735.1	704.7
D14U6	704.7	796.1	844.4	905.9	805.3	820.3	812.8
D14U8	996.1	870.4	757.9	813.7	904.9	814.2	859.5
D16U6	952.1	900.9	801.8	892.7	922.4	851.4	886.9
D16U8	857.6	874.5	825.1	952.3	904.9	849.8	877.4
D19U6	764.2	427.5	491.1	592.7	678.5	459.3	568.9
D19U8	493.0	288.8	648.9	536.4	514.7	468.8	491.8

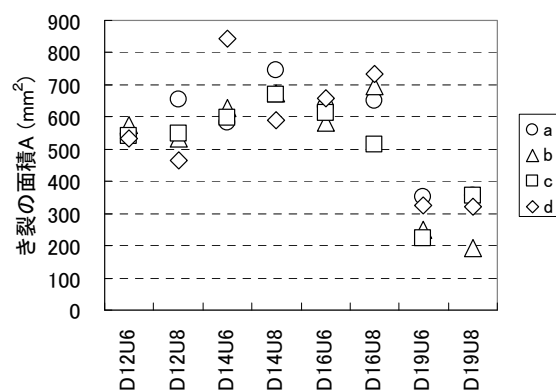


(a)

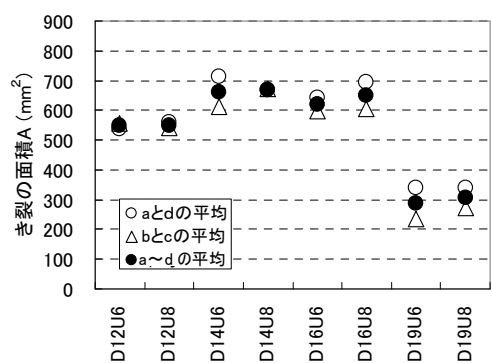


(b)

図-2.3.25 UT 推定結果から算出したき裂の面積 A (50 万回載荷時点)

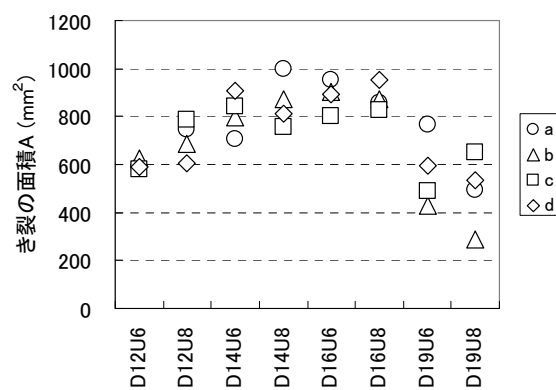


(a)

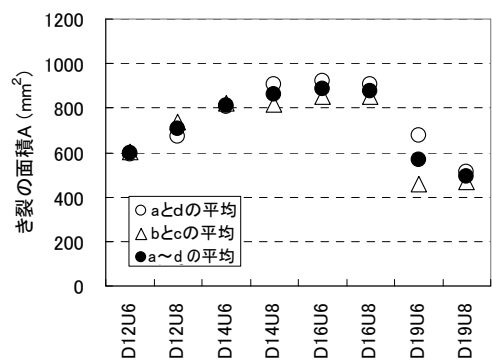


(b)

図-2.3.26 UT 推定結果から算出したき裂の面積 A (100 万回載荷時点)



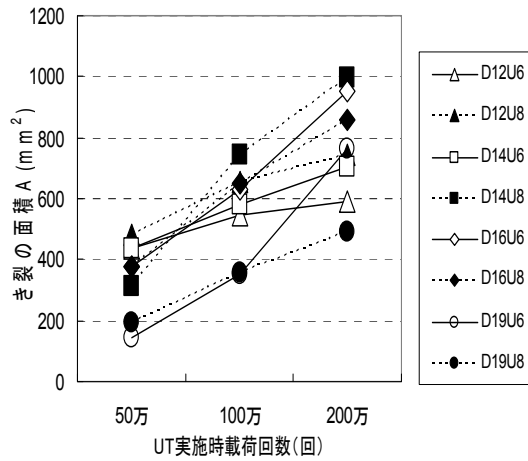
(a)



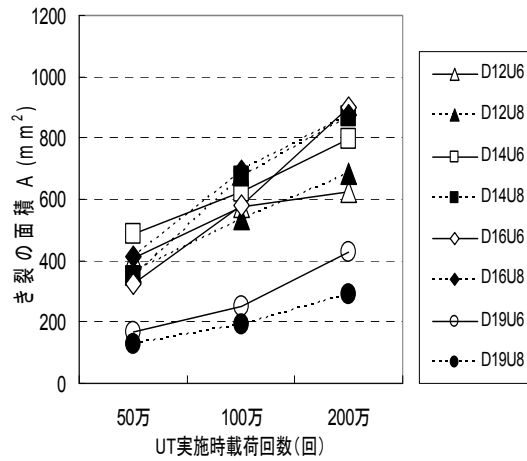
(b)

図-2.3.27 UT 推定結果から算出したき裂の面積 A (200 万回載荷時点)

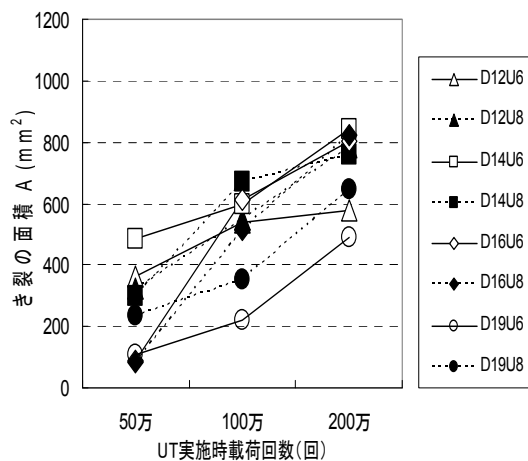
また、図-2.3.25～27 に示したき裂の面積 A の推計結果を、載荷回数毎に整理して推移を比較したものを図-2.3.28 に示す。



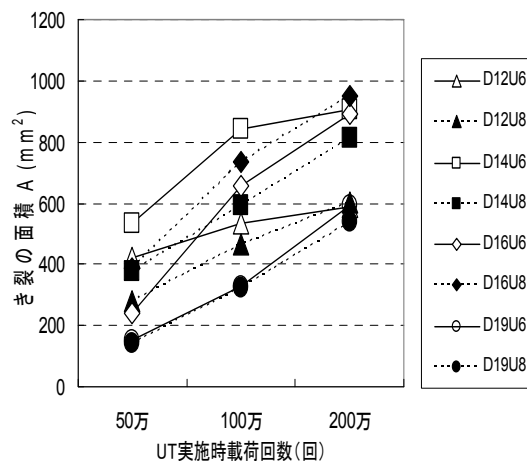
(a) 継手部 a



(b) 継手部 b

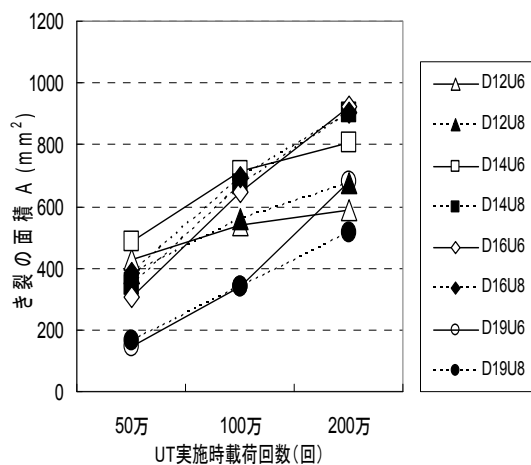


(c) 継手部 c

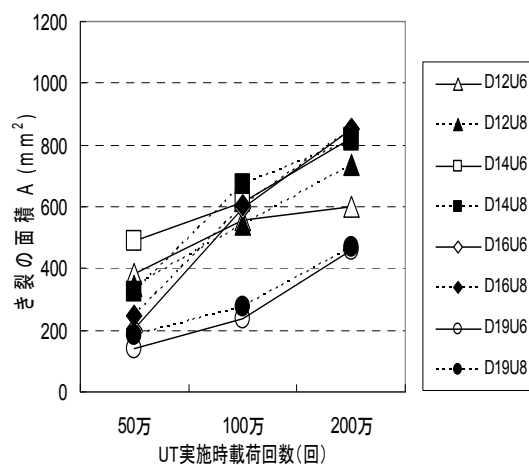


(d) 継手部 d

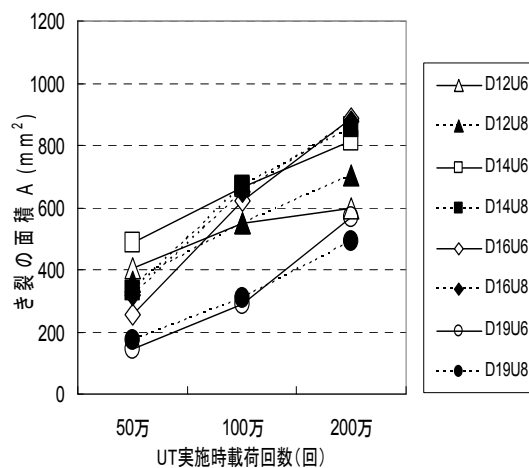
図-2.3.28(1) UT 推定による載荷回数とき裂の面積 A の変化



(e) 継手部 a と d の値の平均



(f) 継手部 b と c の値の平均



(g) 継手部 a, b, c, d の値の平均

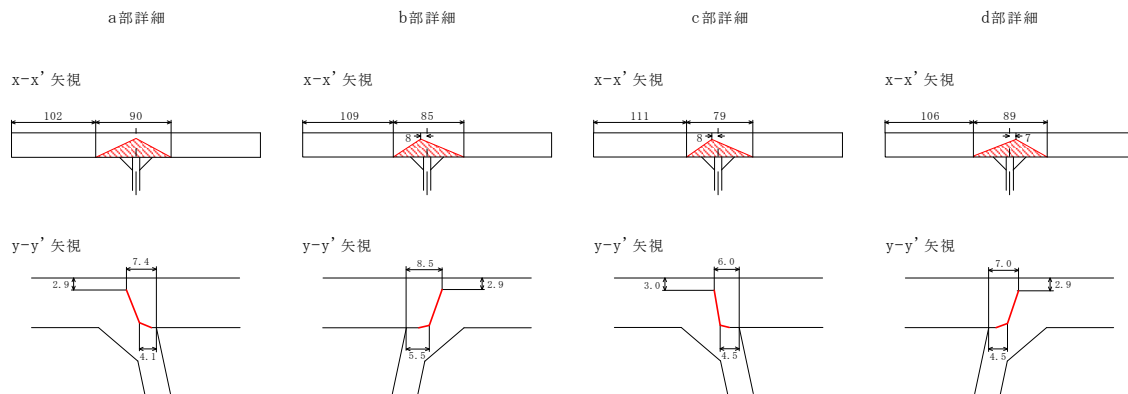
図-2.3.28(2) UT 推定による载荷回数とき裂の面積 A の変化

载荷回数によらず各ケースともやや溶接線毎のばらつきがみられる。载荷回数 200 万回時点では、D16 以下のケースではデッキプレート板厚が大きいほどき裂面積も大きくなっており、D19 は他のケースに比べて顕著にき裂面積は小さい。き裂範囲 x と z の拡大傾向より D19 では载荷回数 200 万回以降の载荷継続によってき裂範囲はさらに拡大するものと考えられる。

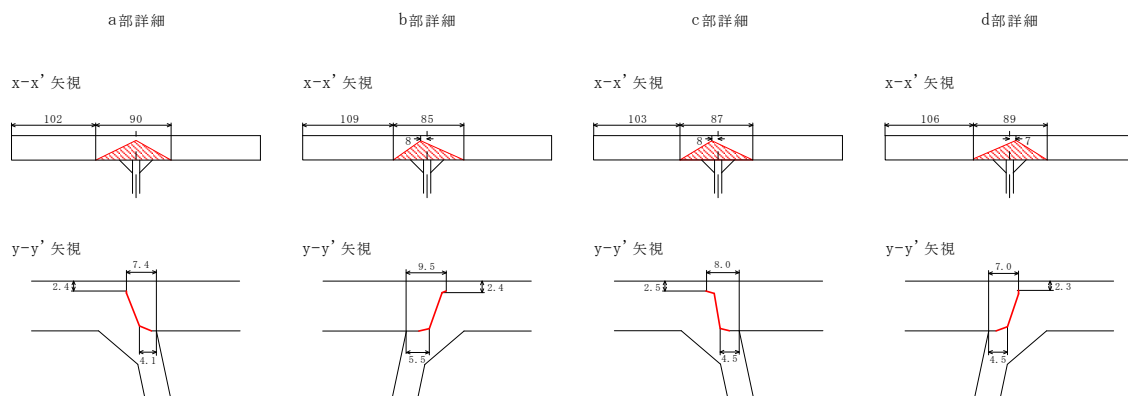
以上より,一定荷重振幅の繰り返しによって,デッキプレート貫通方向に拡大するき裂は,はじめは比較的急速に拡大したのち,ある程度板厚欠損が進んだ段階からやや進展速度が鈍化するような進展の特徴を有するものと考えられる。

そして, D16 以下に比べて D19 は, き裂の進展が顕著に抑制されており, 載荷回数 200 万回時点では板厚欠損率も他のケースに比べて小さく, 板厚欠損が進んだ段階以降に見られるき裂速度の鈍化段階に至る前に実験を終了したものと考えられた。

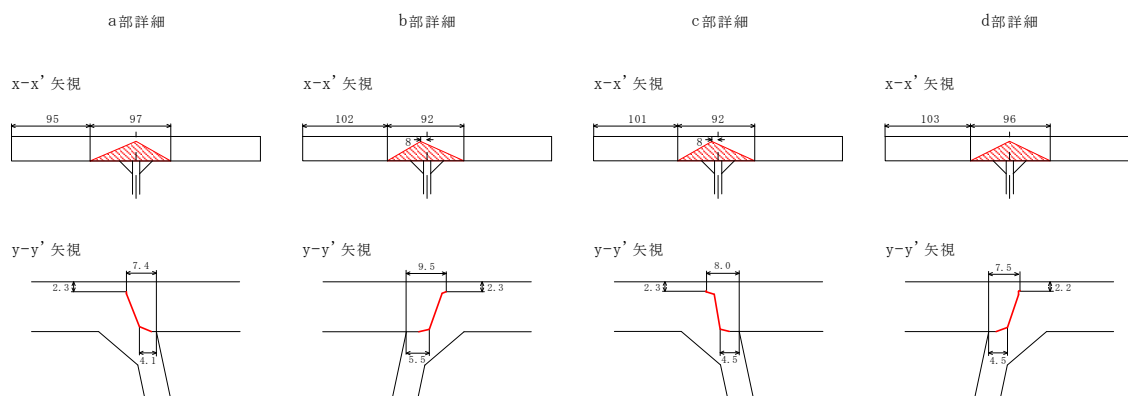
UT 結果から推定されたき裂進展の状態を図化したものを図-2.3.29～36 に示す。なおき裂の範囲はき裂面積の推定方法と同様にき裂の道のり最大位置とき裂の範囲 x の両端を直線で結ぶ三角形形状として図化した。



(a) 50 万回終了時

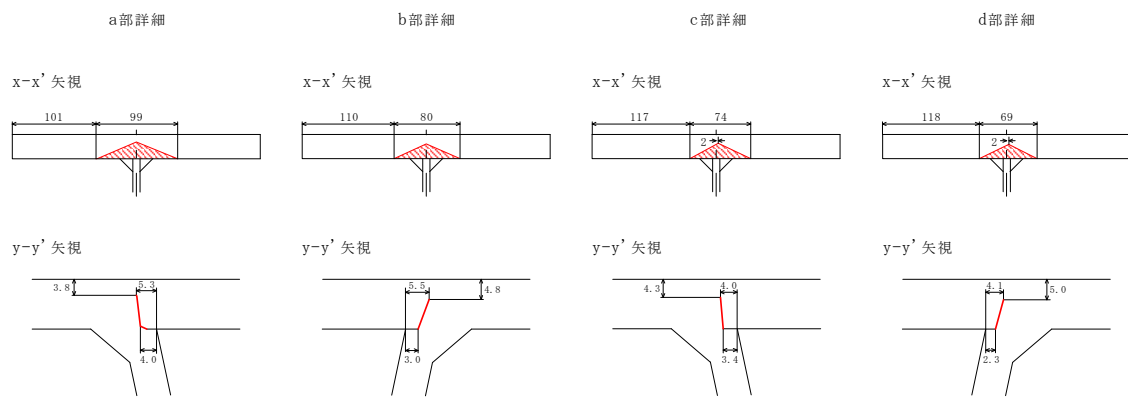


(b) 100 万回終了時

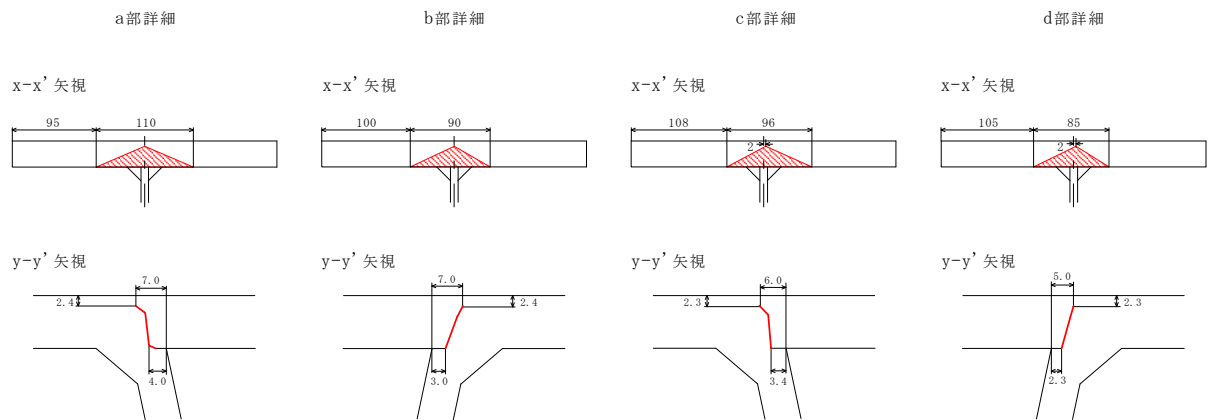


(c) 200 万回終了時

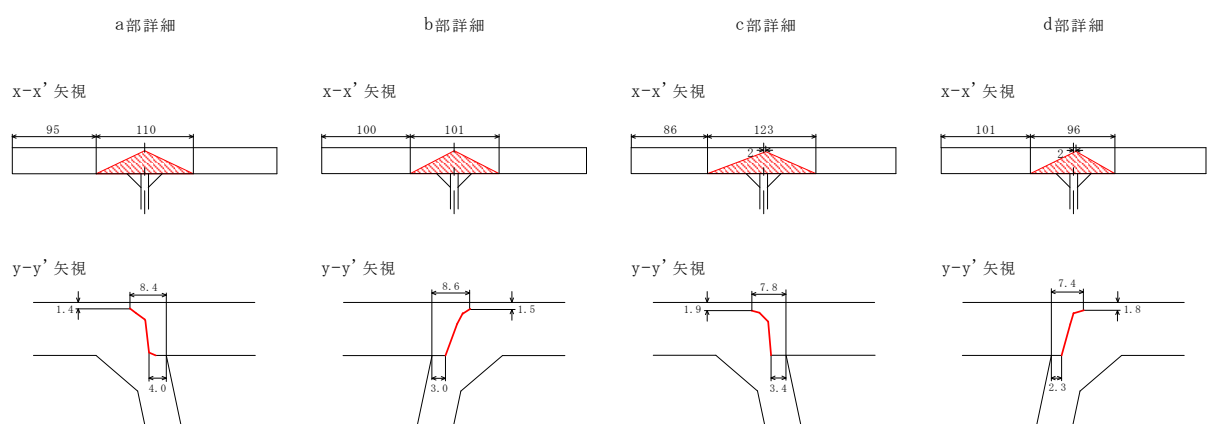
図-2.3.29 き裂の発生と進展の推定結果 (D12U6)



(a) 50 万回終了時



(b) 100 万回終了時



(c) 200 万回終了時

図-2.3.30 き裂の発生と進展の推定結果 (D12U8)

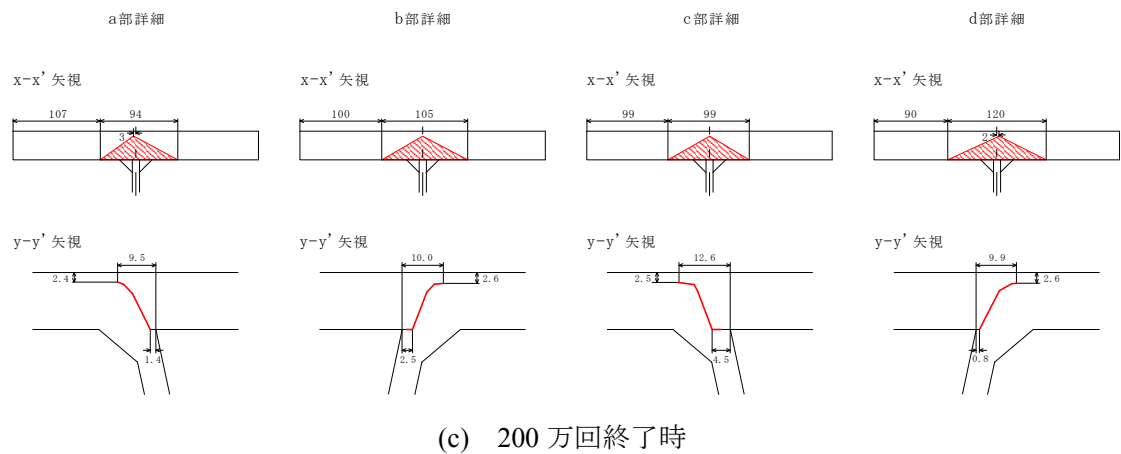
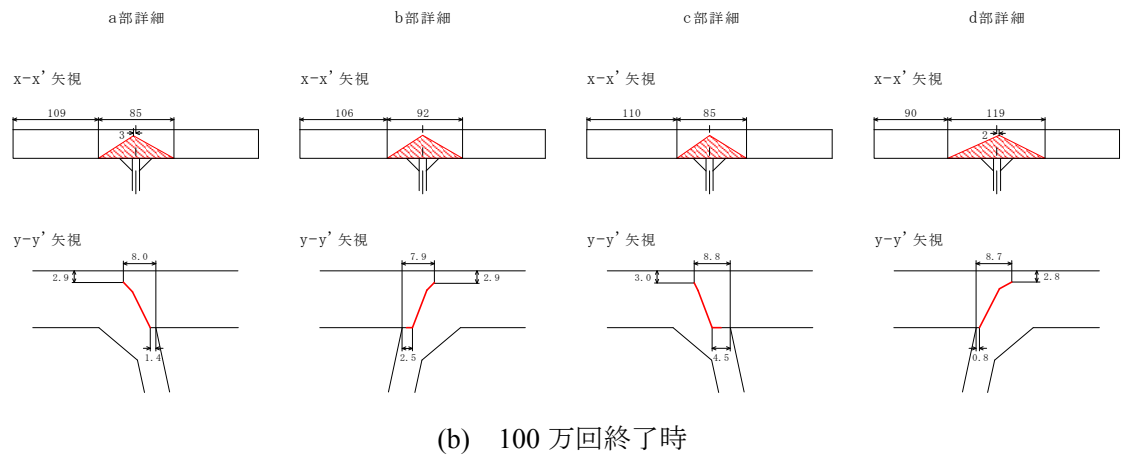
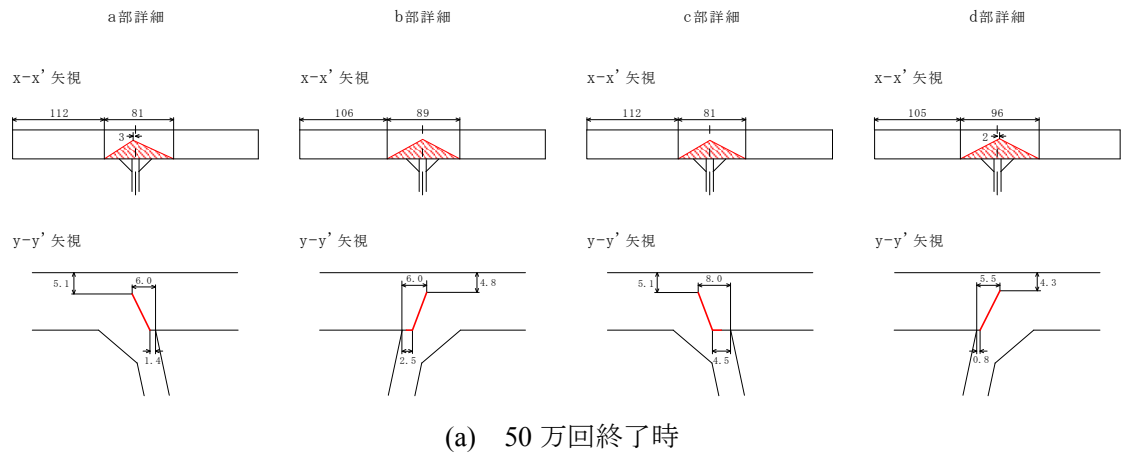


図-2.3.31 き裂の発生と進展の推定結果 (D14U6)

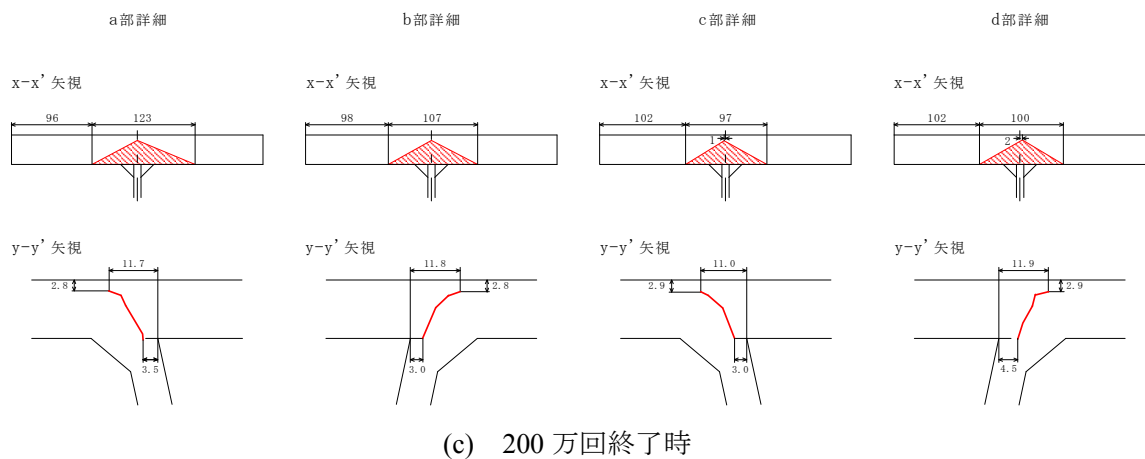
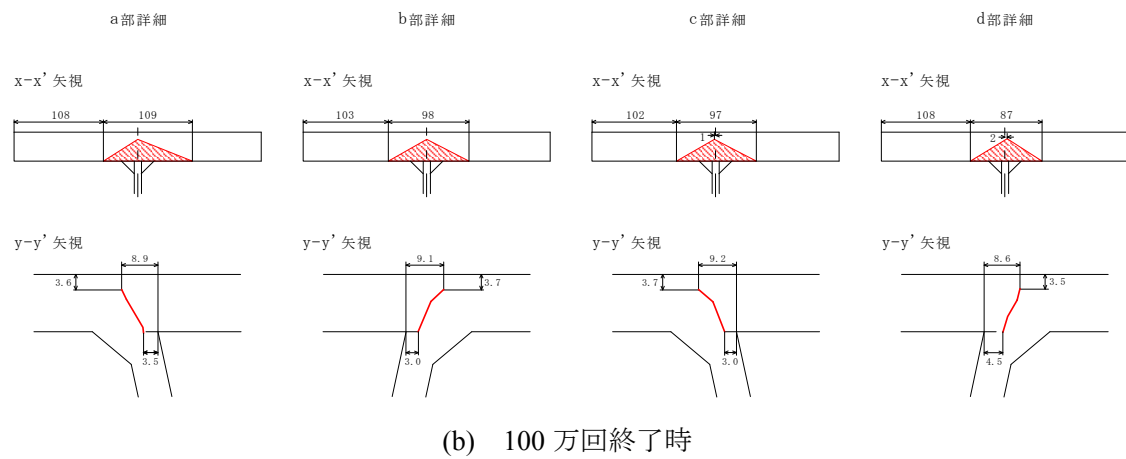
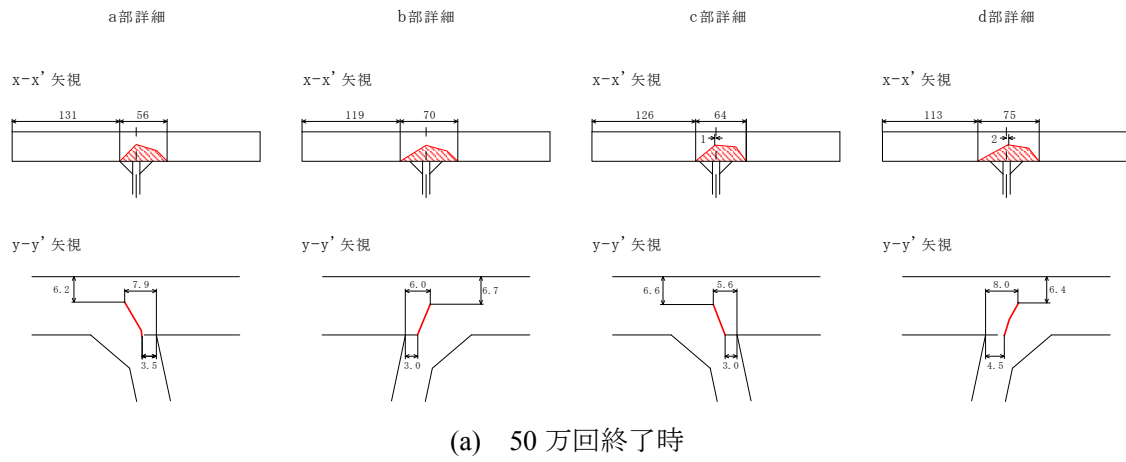


図-2.3.32 き裂の発生と進展の推定結果 (D14U8)

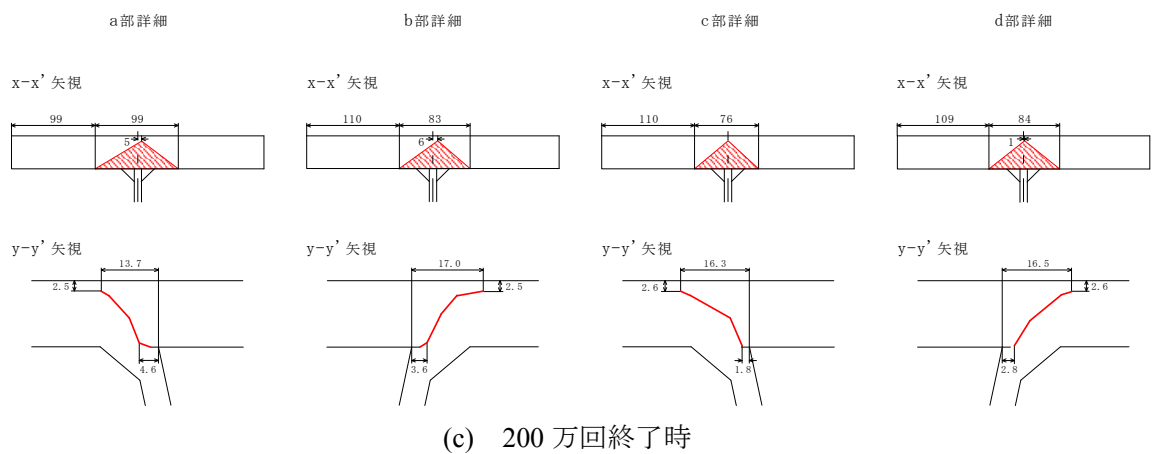
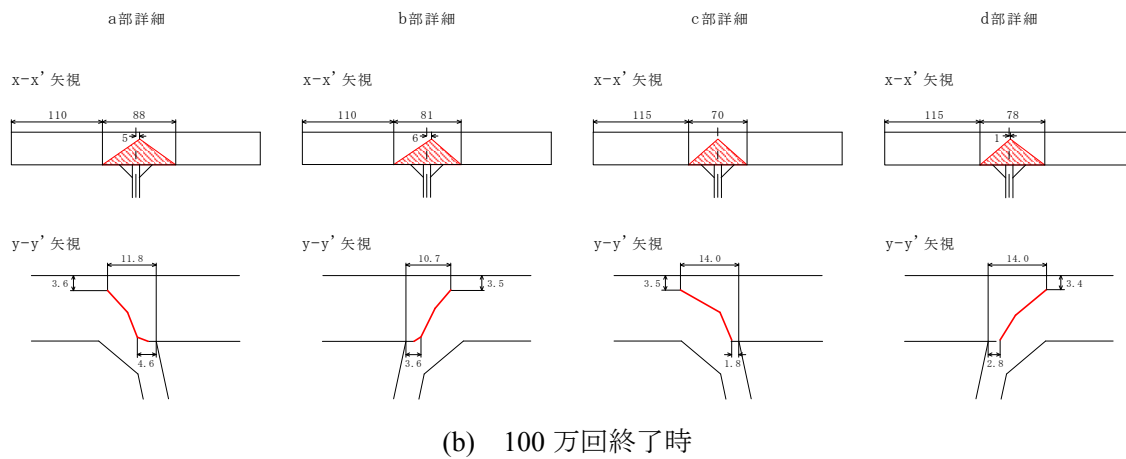
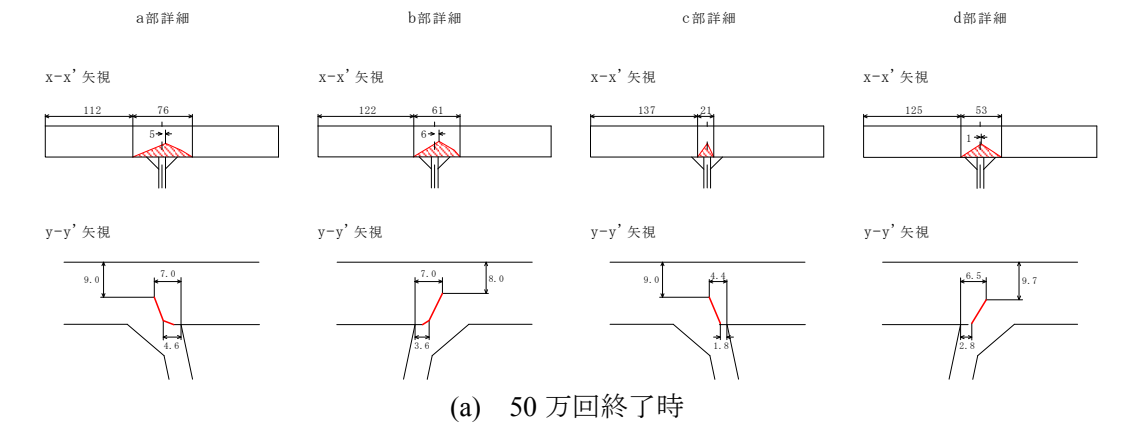


図-2.3.33 き裂の発生と進展の推定結果 (D16U6)

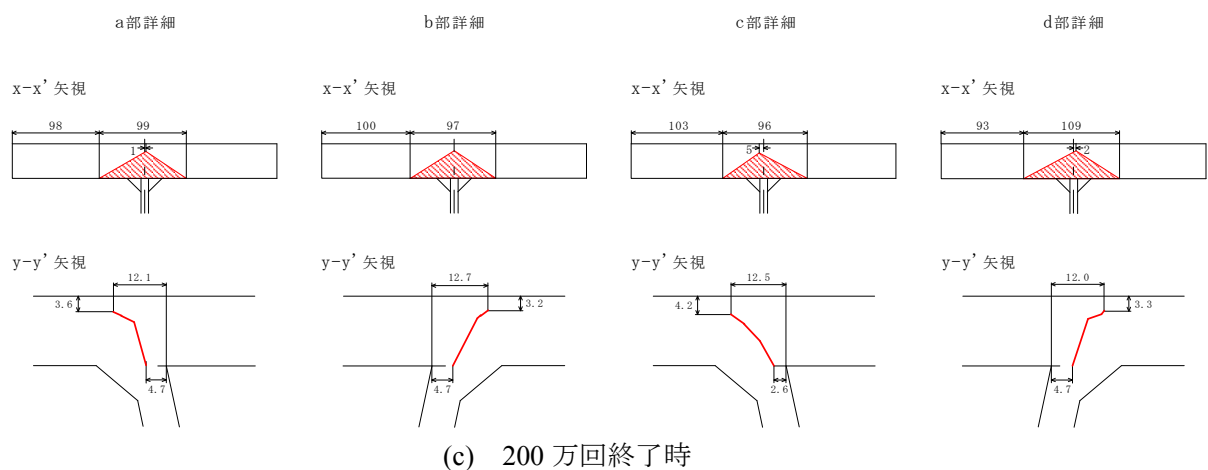
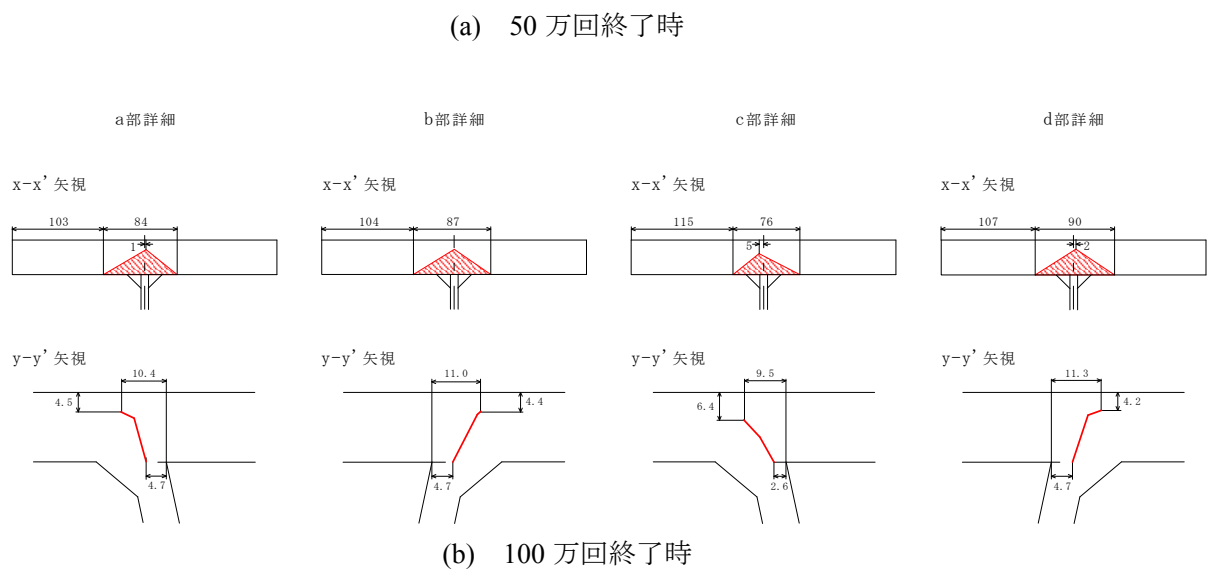
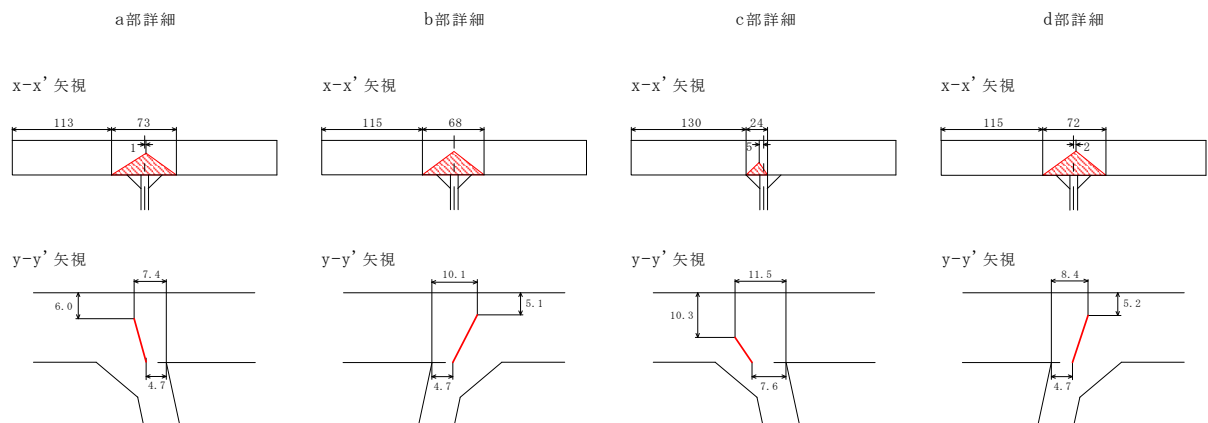
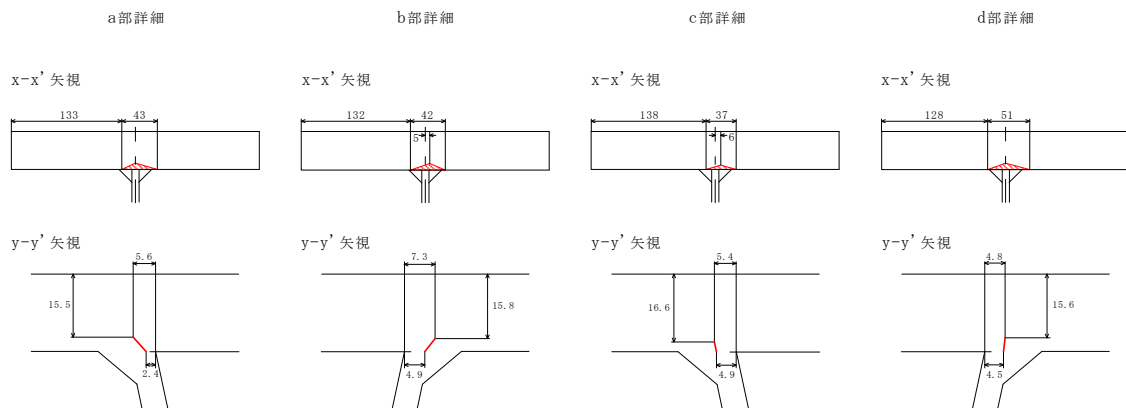
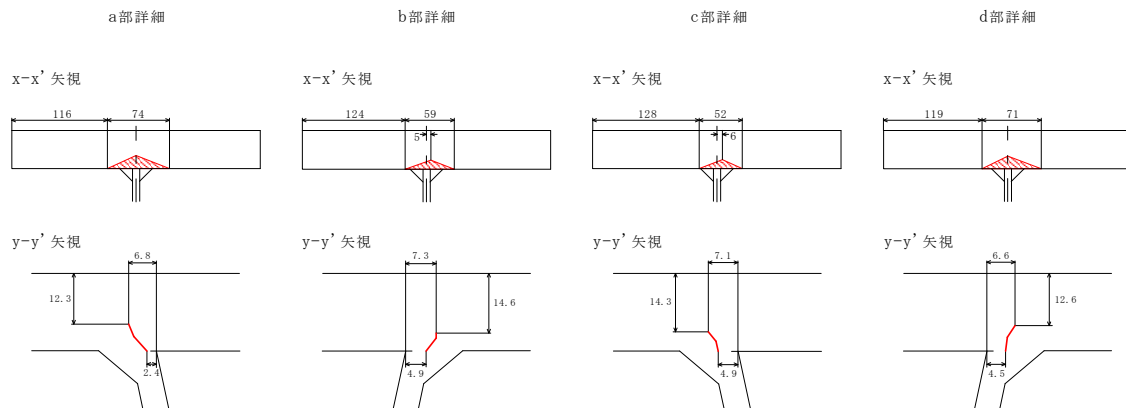


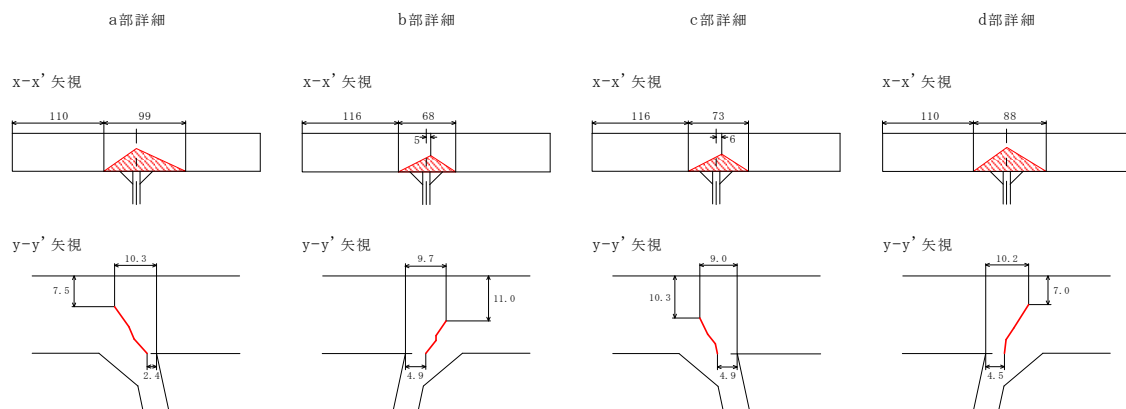
図-2.3.34 き裂の発生と進展の推定結果 (D16U8)



(a) 50 万回終了時



(b) 100 万回終了時



(c) 200 万回終了時

図-2.3.35 き裂の発生と進展の推定結果 (D19U6)

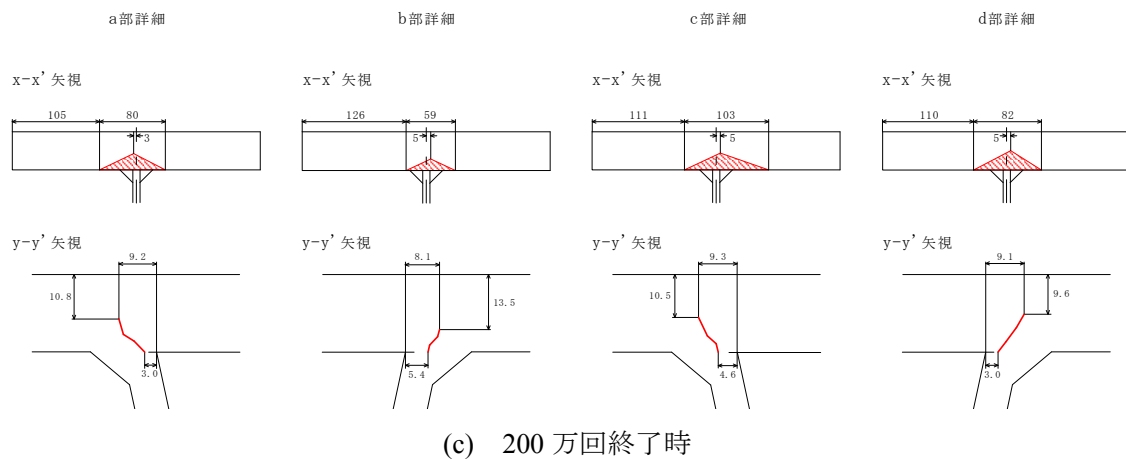
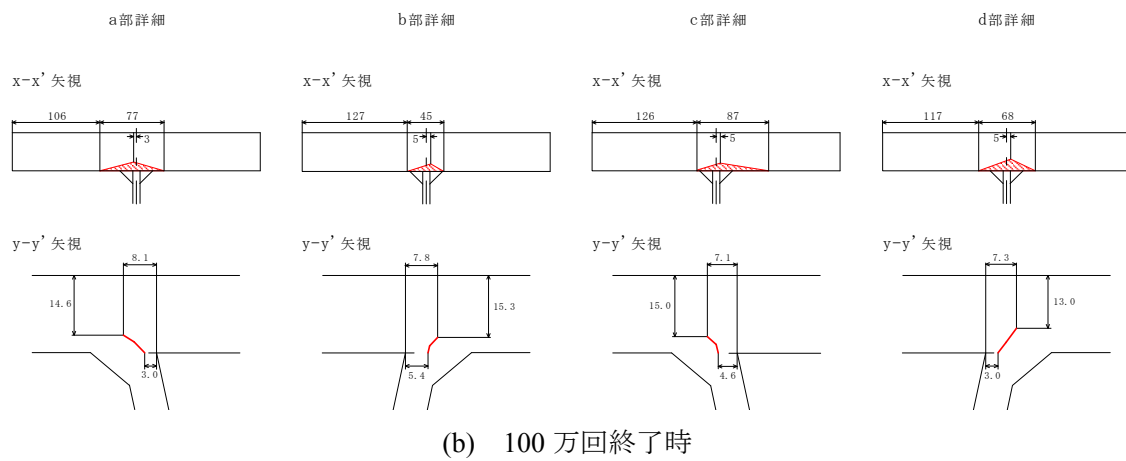
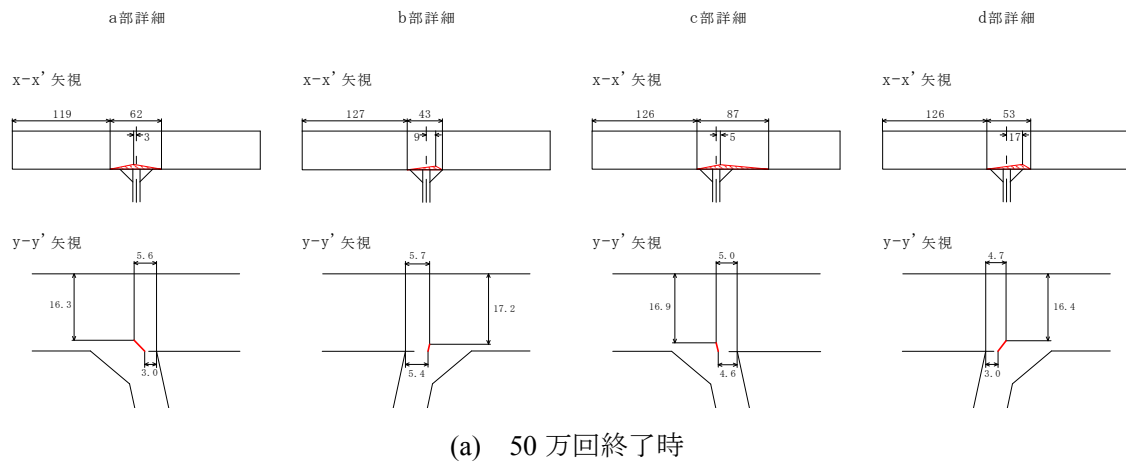


図-2.3.36 き裂の発生と進展の推定結果 (D19U8)

2.3.4 破面調査

疲労試験の途中段階での超音波探傷試験結果からのき裂進展状況の推定の妥当性の確認とき裂の起点や進展の状況を確認するために、定点繰返し載荷を 200 万回終了後に、低温脆性破壊させ破面の調査を行った。

破面調査は、図-2.3.37 に示すように供試体を切断したのち、き裂面が境界となるよう低温で脆性破壊させた。

なお、本実験では載荷試験完了段階で全てのケースでき裂がデッキプレートとトラフリブの縦方向溶接ルート付近からデッキプレート内部を上方に向かって進展していることが超音波探傷試験で確認されていたが、き裂はデッキプレート上面までは進展していないことを確認している。

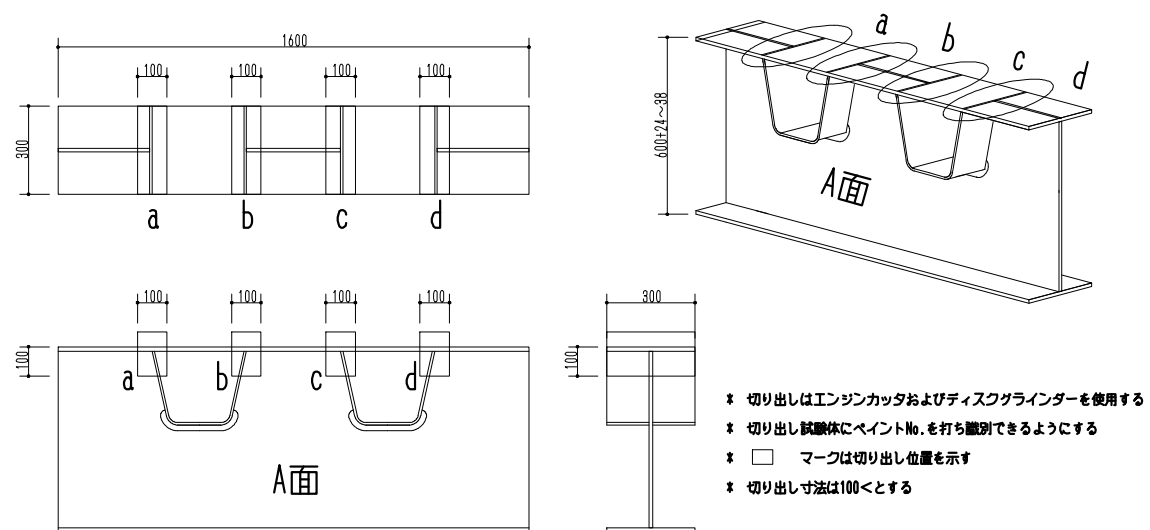


図-2.3.37 供試体切り出し加工図

写真-2.3.1 及び 2 に実験後の破面の例とき裂面の位置のイメージを示す。本実験ではビーチマーク試験を行っていないため破面には載荷回数との関係を明確に示す特徴は現れていないが、き裂範囲の形状や表面の性状からは横リブ位置付近を起点として放射状にき裂範囲が拡大したものと考えられる。



写真-2.3.1 破壊後の破面の例

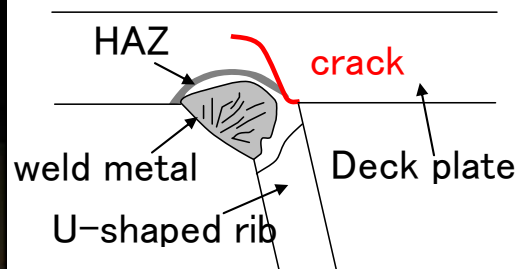


写真-2.3.2 実験終了後の破面

写真-2.3.3 及び 4 に、D19U8 の破面の例を示す。この例では複数のき裂が同時に発生拡大していたことが疑われる。このように供試体によってはき裂の起点が必ずしも 1 箇所でないケースが一部みられたが、き裂が一体化していない場合にはより大きいものを代表として整理した。

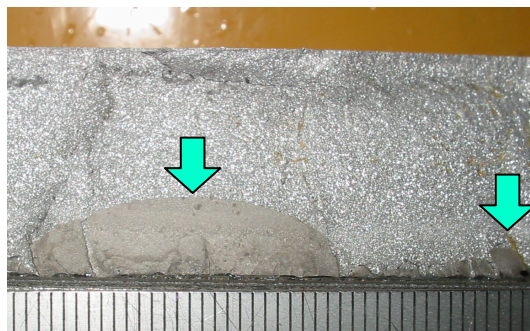


写真-2.3.3 き裂の断面図

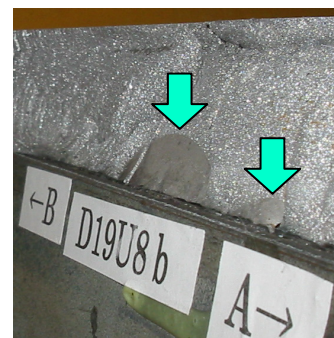


写真-2.3.4 き裂の断面図

破壊後に暴露されたき裂面の観察とき裂範囲の寸法等の計測を行った。図-2.3.38 及び 39 にき裂範囲の計測方法の概要を示す。

デッキプレート下面位置から上方へのき裂高さ(Z), トラフリブ方向のき裂範囲寸法(X), デッキプレートとトラフリブの縦方向溶接のルート位置からデッキプレート面方向にトラフリブ軸と直交方向の進展長さ(Y)として各供試体の計測を行った。

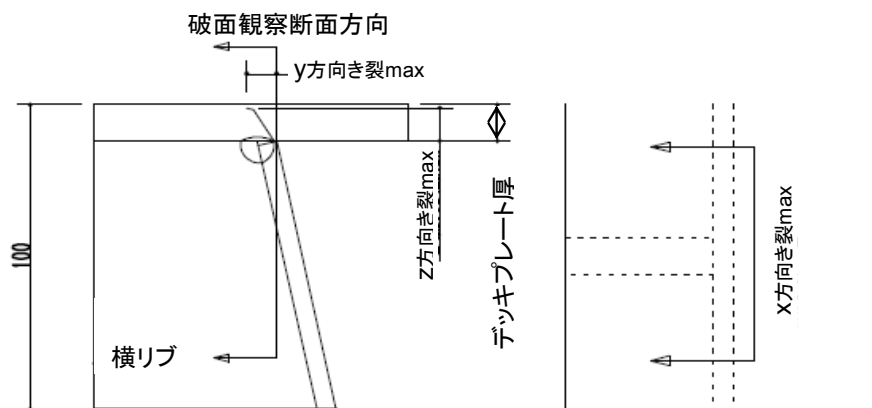


図-2.3.38 き裂範囲の計測要領

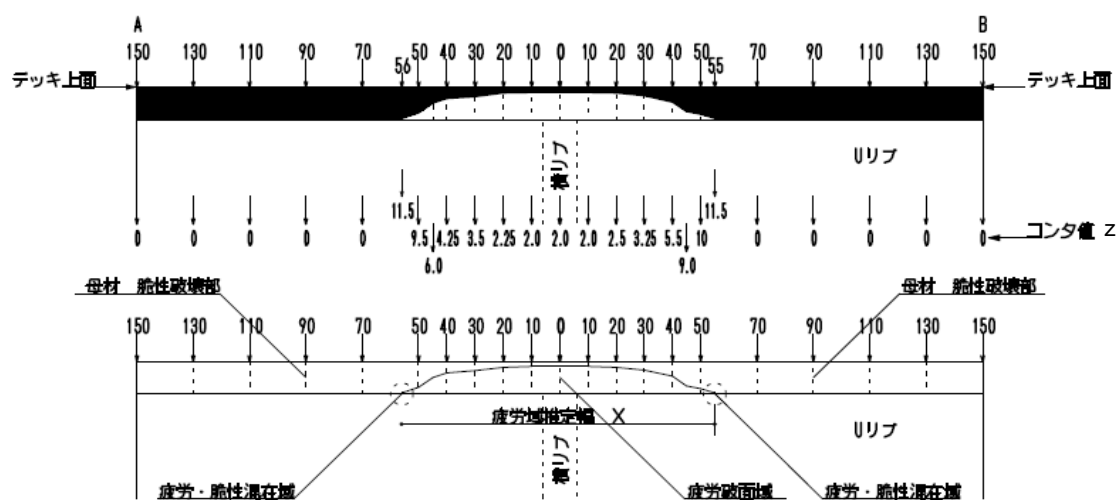


図-2.3.39 計測要領 (D12U6a)

各供試体の a～d の 4 つの対象溶接線の全てについて破面観察結果から算出したき裂の範囲等について表-2.3.21～26 及び図-2.3.40～45 に示す。

表-2.3.21 破壊試験で特定したき裂範囲 x

検査箇所	き裂範囲x(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	111.0	116.5	100.5	109.5	110.3	108.5	109.4
D12U8	111.0	88.0	98.3	109.5	110.3	93.2	101.7
D14U6	94.0	104.0	100.0	122.0	108.0	102.0	105.0
D14U8	87.0	92.5	80.0	86.0	86.5	86.3	86.4
D16U6	87.5	87.0	84.0	77.5	82.5	85.5	84.0
D16U8	115.0	99.0	92.0	104.5	109.8	95.5	102.6
D19U6	73.5	60.0	60.5	69.0	71.3	60.3	65.8
D19U8	55.0	26.0	63.0	74.0	64.5	44.5	54.5

表-2.3.22 破壊試験で特定したき裂範囲 y

検査箇所	き裂範囲y(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	7.0	8.0	7.5	8.5	7.8	7.8	7.8
D12U8	6.5	7.0	8.0	6.5	6.5	7.5	7.0
D14U6	9.5	9.5	11.0	11.0	10.3	10.3	10.3
D14U8	9.9	9.5	10.5	10.0	10.0	10.0	10.0
D16U6	10.0	10.0	7.5	9.0	9.5	8.8	9.1
D16U8	10.0	12.0	11.8	11.0	10.5	11.9	11.2
D19U6	9.0	9.5	10.0	9.5	9.3	9.8	9.5
D19U8	9.0	5.5	8.0	9.5	9.3	6.8	8.0

表-2.3.23 破壊試験で特定したき裂範囲 z

検査箇所	き裂範囲z(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	10.0	10.3	10.0	10.3	10.2	10.2	10.2
D12U8	10.3	9.5	10.0	9.8	10.1	9.8	9.9
D14U6	11.1	11.1	11.1	11.2	11.2	11.1	11.1
D14U8	11.0	11.0	11.0	11.3	11.2	11.0	11.1
D16U6	12.1	11.8	10.8	11.2	11.7	11.3	11.5
D16U8	12.6	12.5	12.0	13.0	12.8	12.3	12.5
D19U6	10.8	8.7	9.5	11.0	10.9	9.1	10.0
D19U8	8.0	5.5	9.0	10.0	9.0	7.3	8.1

表-2.3.24 破壊試験で特定したき裂範囲から算出した板厚欠損率

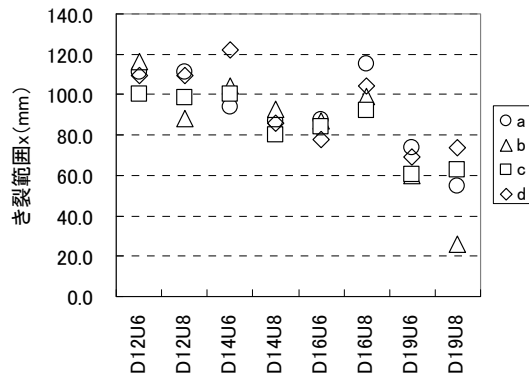
検査箇所	板厚欠損率(%)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	83.3	85.8	83.3	85.8	84.6	84.6	84.6
D12U8	85.8	79.2	83.3	81.7	83.8	81.3	82.5
D14U6	79.3	79.3	79.3	80.0	79.6	79.3	79.5
D14U8	78.6	78.6	78.6	80.7	79.6	78.6	79.1
D16U6	75.6	73.8	67.5	70.0	72.8	70.6	71.7
D16U8	78.8	78.1	75.0	81.3	80.0	76.6	78.3
D19U6	56.8	45.8	50.0	57.9	57.4	47.9	52.6
D19U8	42.1	28.9	47.4	52.6	47.4	38.2	42.8

表-2.3.25 破壊試験で特定したき裂範囲から算出したき裂の道のり L

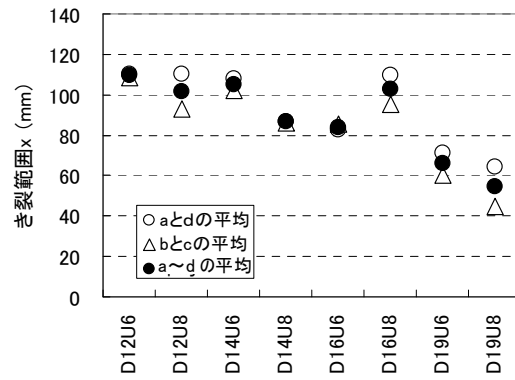
検査箇所	き裂の道のりL(mm)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	12.2	13.0	12.5	13.4	12.8	12.8	12.8
D12U8	12.2	11.8	12.8	11.8	12.0	12.3	12.1
D14U6	14.6	14.6	15.6	15.7	15.2	15.1	15.1
D14U8	14.8	14.5	15.2	15.1	14.9	14.9	14.9
D16U6	15.7	15.5	13.1	14.4	15.0	14.3	14.7
D16U8	16.1	17.3	16.8	17.0	16.6	17.1	16.8
D19U6	14.1	12.9	13.8	14.5	14.3	13.3	13.8
D19U8	12.0	7.8	12.0	13.8	12.9	9.9	11.4

表-2.3.26 破壊試験で特定したき裂範囲から求めたき裂の面積 A

検査箇所	き裂の面積A(mm ²)						
	a	b	c	d	aとdの 平均	bとcの 平均	a～dの 平均
D12U6	677.5	759.7	628.1	731.2	704.3	693.9	699.1
D12U8	676.0	519.2	629.4	643.8	659.9	574.3	617.1
D14U6	686.7	759.7	781.4	957.6	822.1	770.5	796.3
D14U8	643.8	672.2	608.3	648.8	646.3	640.2	643.3
D16U6	686.8	672.8	552.2	556.8	621.8	612.5	617.2
D16U8	924.9	857.7	774.2	889.8	907.4	815.9	861.7
D19U6	516.6	386.5	417.2	501.4	509.0	401.8	455.4
D19U8	331.1	101.1	379.3	510.3	420.7	240.2	330.5

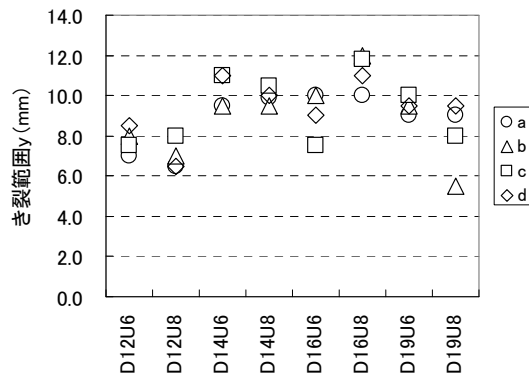


(a)

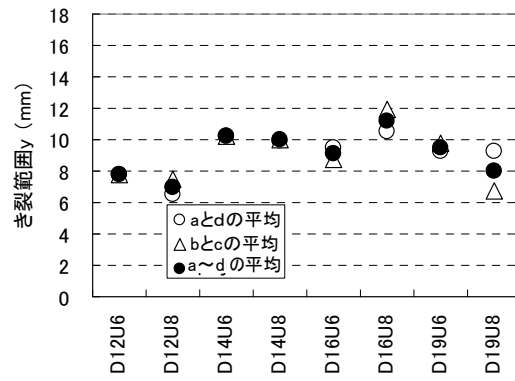


(b)

図-2.3.40 破壊試験で特定したき裂の範囲 x

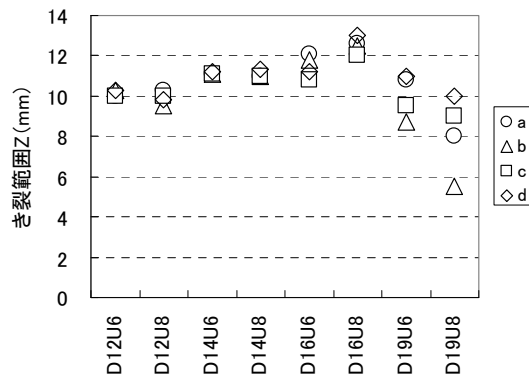


(a)

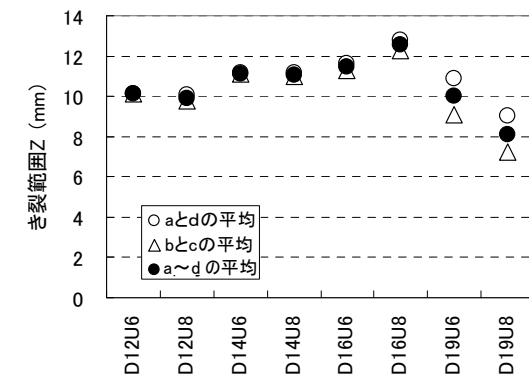


(b)

図-2.3.41 破壊試験で特定したき裂の範囲 y



(a)



(b)

図-2.3.42 破壊試験で特定したき裂の範囲 z

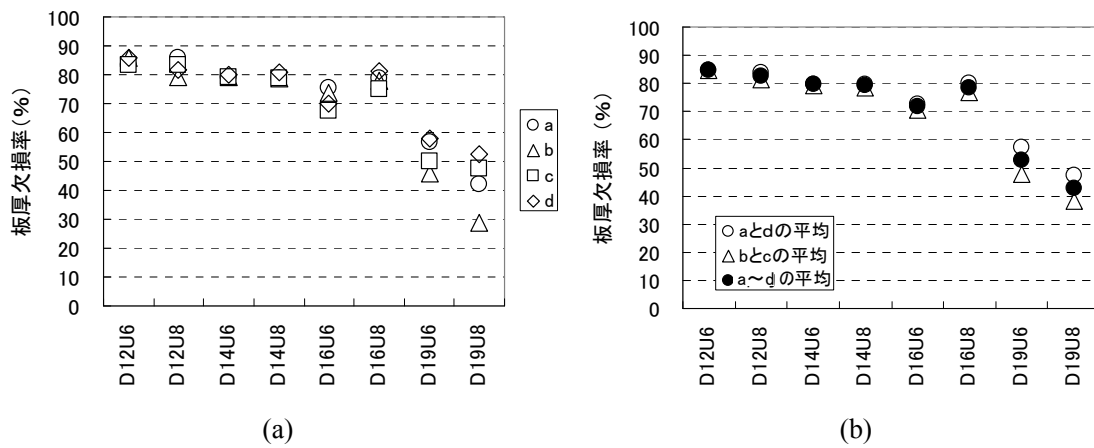


図-2.3.43 破壊試験で特定したき裂の範囲から算出した断面欠損率

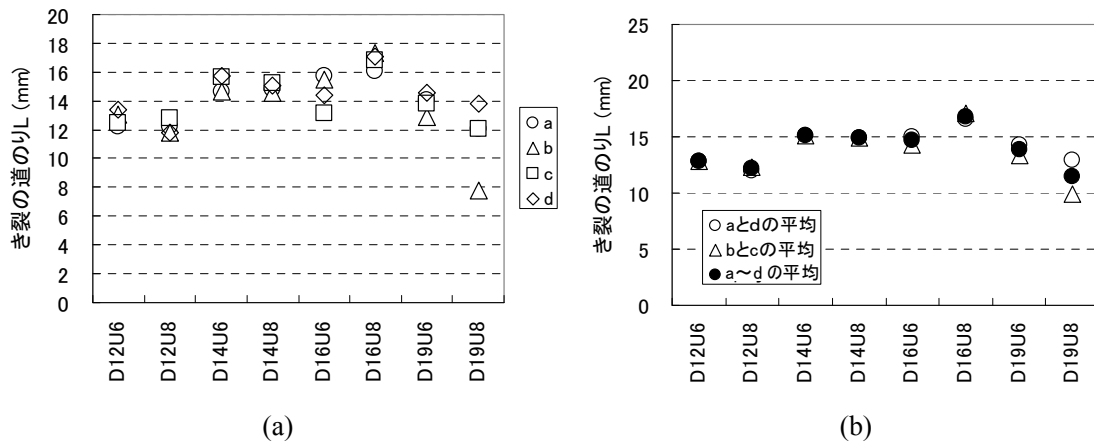


図-2.3.44 破壊試験で特定したき裂の範囲から算出したき裂の道のり L

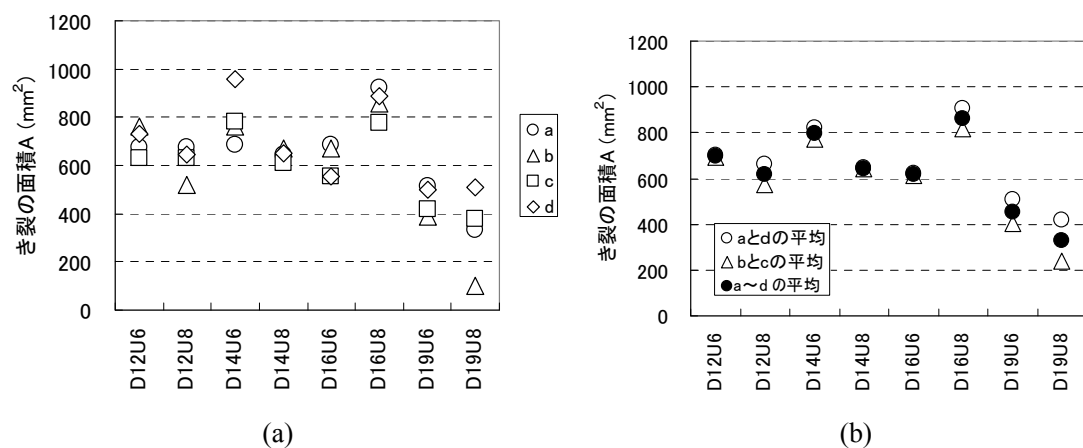


図-2.3.45 破壊試験で特定したき裂の範囲から算出したき裂の面積 A

2.3.5 破面観察結果と超音波探傷試験による推定結果の比較

200 万回の繰返し載荷試験の終了直後に実施した超音波探傷試験からの推定き裂範囲と試験後の破面観察で特定したき裂範囲の比較を行った。

その結果, 超音波探傷試験からの推定結果と破面観察結果はほとんどのケースでよい一致を示した。特にデッキプレート内部へのき裂進展深さ (z) については両者の結果はほぼ一致しており, 超音波探傷試験によってデッキプレート貫通き裂の板厚内部への高さ方向の進展深さは精度よく推定できる可能性が高いことが示された。

表-2.3.27 及び 28 に a~d の対象継手の全平均結果でのき裂状態の UT 推定結果と破壊試験結果の比較を示す。

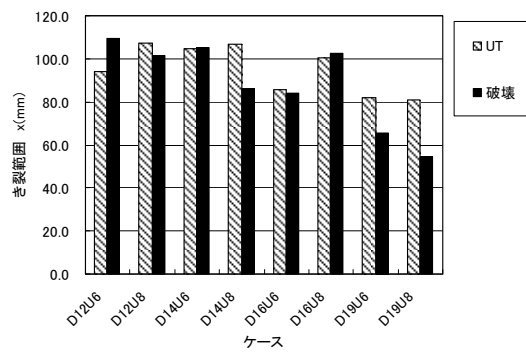
図-2.3.46~51 にこれらをグラフ化したものを示す。

表-2.3.27 き裂状態の UT 推定結果と破壊試験結果の比較(1)

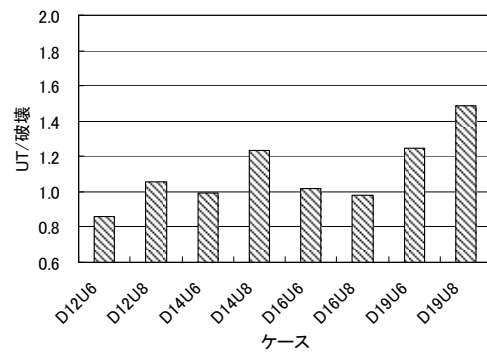
ケース	UTからの推定 (200万回時点) (a,b,c,dの平均)					破壊試験結果 (a,b,c,dの平均)				
	き裂範囲x (mm)	き裂範囲y (mm)	き裂範囲z (mm)	き裂の道のりL(mm)	き裂の面積 A(mm ²)	き裂範囲x (mm)	き裂範囲y (mm)	き裂範囲z (mm)	き裂の道のりL(mm)	き裂の面積 A(mm ²)
D12U6	94.3	8.1	9.7	12.7	595.8	109.4	7.8	10.1	12.8	698.0
D12U8	107.5	8.1	10.4	13.1	704.7	101.7	7.0	9.9	12.1	615.9
D14U6	104.5	10.5	11.5	15.6	812.8	105.0	10.3	11.1	15.1	796.3
D14U8	106.8	11.6	11.2	16.1	859.5	86.4	10.0	11.1	14.9	642.9
D16U6	85.5	15.9	13.5	20.8	886.9	84.0	9.1	11.5	14.7	617.2
D16U8	100.3	12.3	12.4	17.5	877.4	102.6	11.2	12.5	16.8	861.7
D19U6	82.0	9.8	9.6	13.7	568.9	65.8	9.5	10.0	13.8	455.4
D19U8	81.0	8.9	7.9	11.9	491.8	54.5	8.0	8.1	11.4	330.5

表-2.3.28 き裂状態の UT 結果と破壊試験結果の比較(2)

ケース	UT結果/破壊試験結果 (a,b,c,dの平均)				
	き裂範囲 x	き裂範囲 y	き裂範囲 z	き裂の道のり L	き裂の面積 A
D12U6	0.86	1.04	0.96	0.99	0.85
D12U8	1.06	1.15	1.05	1.08	1.14
D14U6	1.00	1.02	1.03	1.03	1.02
D14U8	1.24	1.16	1.00	1.08	1.34
D16U6	1.02	1.74	1.17	1.42	1.44
D16U8	0.98	1.10	0.99	1.04	1.02
D19U6	1.25	1.03	0.96	1.00	1.25
D19U8	1.49	1.12	0.98	1.05	1.49

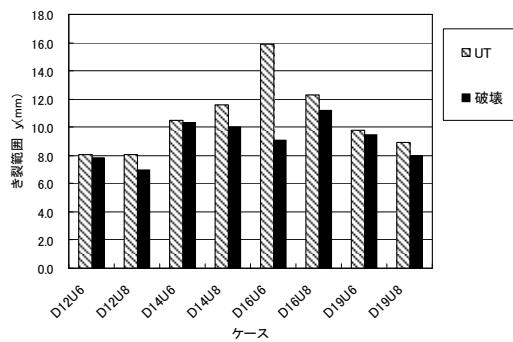


(a)

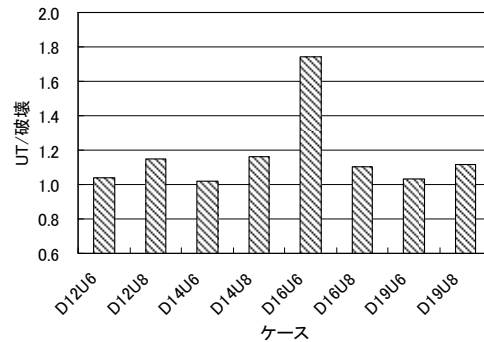


(b)

図-2.3.46 UT 推定結果と破壊試験結果の比較 (き裂範囲 x)

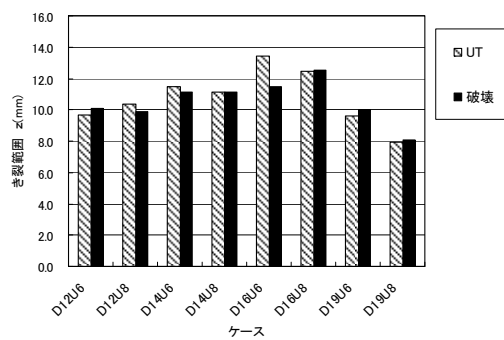


(a)

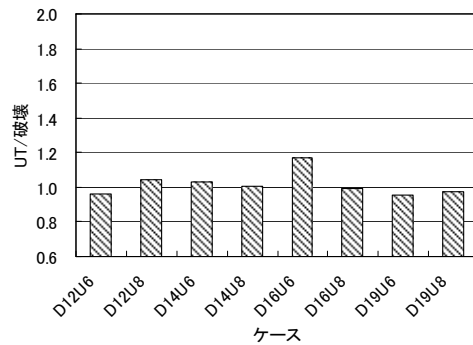


(b)

図-2.3.47 UT 推定結果と破壊試験結果の比較 (き裂範囲 y)

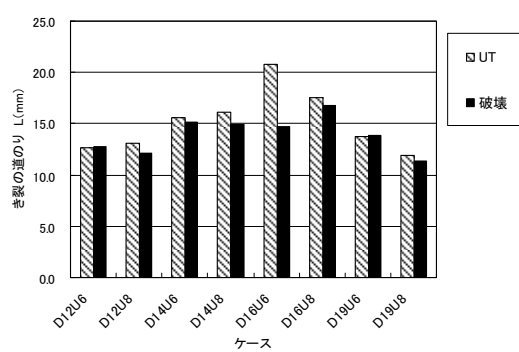


(a)

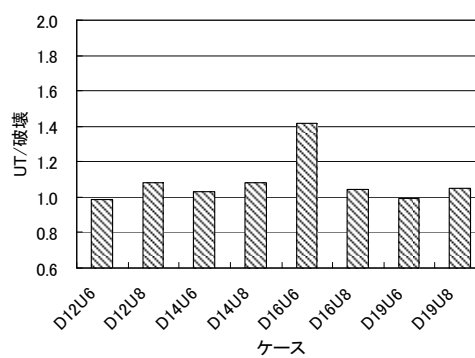


(b)

図-2.3.48 UT 推定結果と破壊試験結果の比較 (き裂範囲 z)

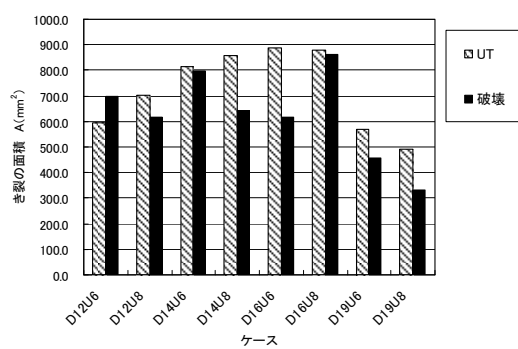


(a)

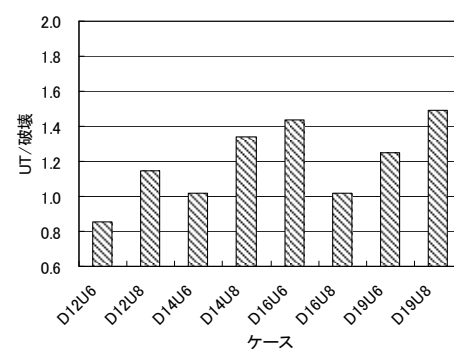


(b)

図-2.3.49 UT 推定結果と破壊試験結果の比較 (き裂の道のり L)

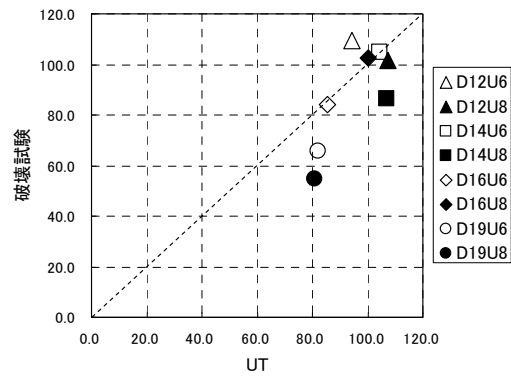


(a)

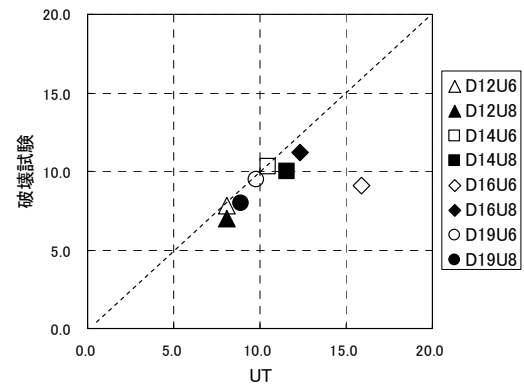


(b)

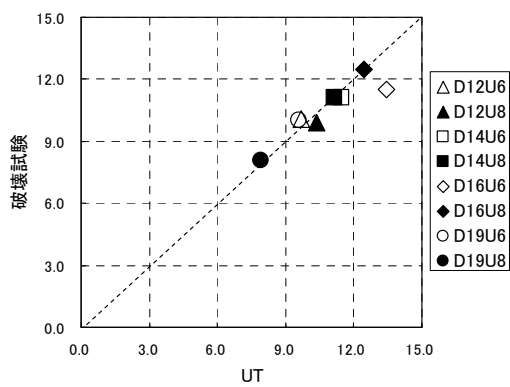
図-2.3.50 UT 推定結果と破壊試験結果の比較 (き裂の面積 A)



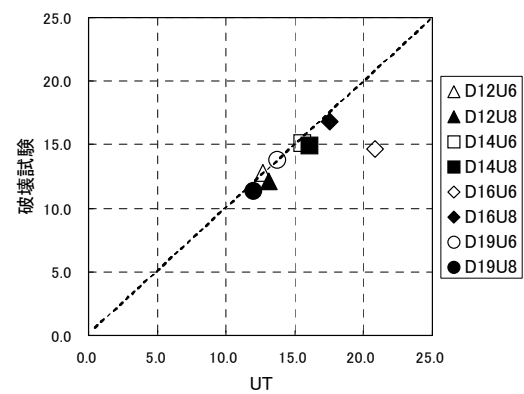
(a) き裂の範囲 x



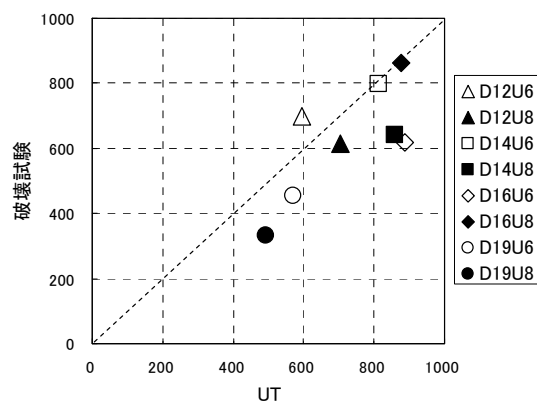
(b) き裂の範囲 y



(c) き裂の範囲 z



(d) き裂の道のり L



(f) き裂の面積 A

図-2.3.51 UT 推定結果と破壊試験結果の比較

2.3.6 ひずみの計測結果

疲労試験の各途中段階で、き裂の発生・進展の検出とその影響による耐荷力機構など構造系の変化を把握するために、静的載荷を行って各部のひずみを計測している。

図-2.3.52 にひずみゲージの貼付位置を示す。ひずみゲージは全て 1 軸ゲージで橋軸直角方向の計測である。

ひずみ計測時の静的載荷では、一定荷重載荷に対する応答を把握するために、10kN, 110kN の 2 ケースの載荷を行いそれぞれに対応するひずみを計測し、同じ載荷回数での 10kN 載荷時と 110kN 載荷時のひずみの差（以下「ひずみ振幅」という。）を算出した。

なお、各ケース計測対象となるトラフリブとデッキプレートの縦溶接継手部が 4 箇所（a～d）あり、特記のない場合は a～d の平均値である。それぞれの継手に対応した位置の計測結果の場合には図中等に記号で区別した。計測点①の場合の記号の例を図-2.3.53 に示す。

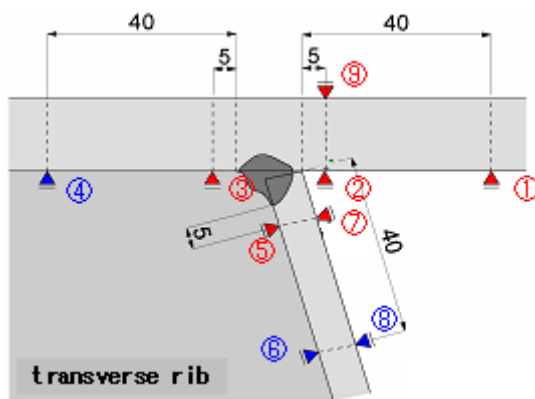


図-2.3.52 ゲージ設置箇所

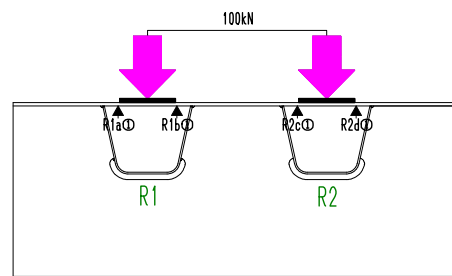
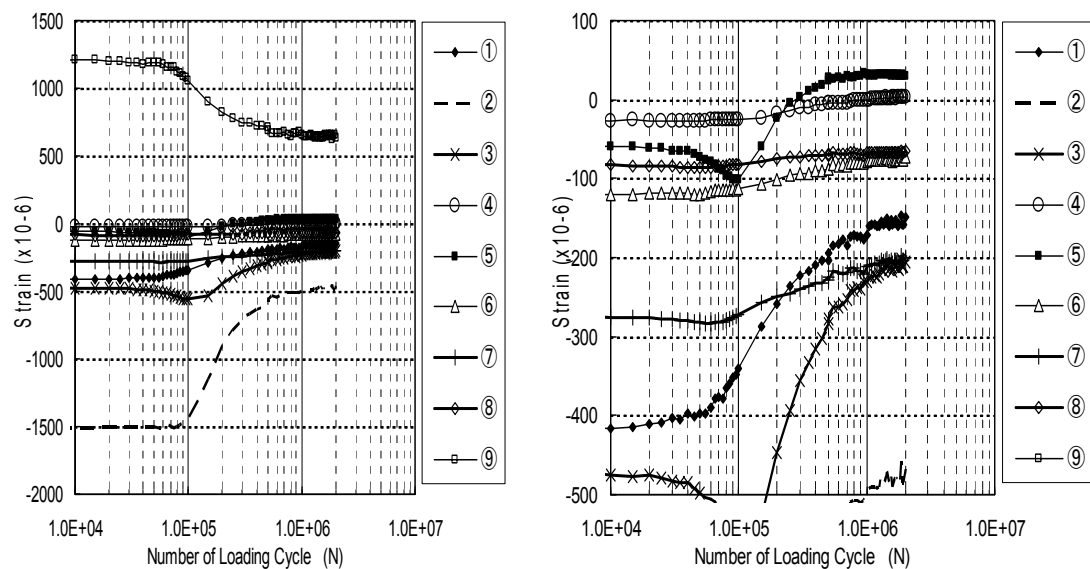
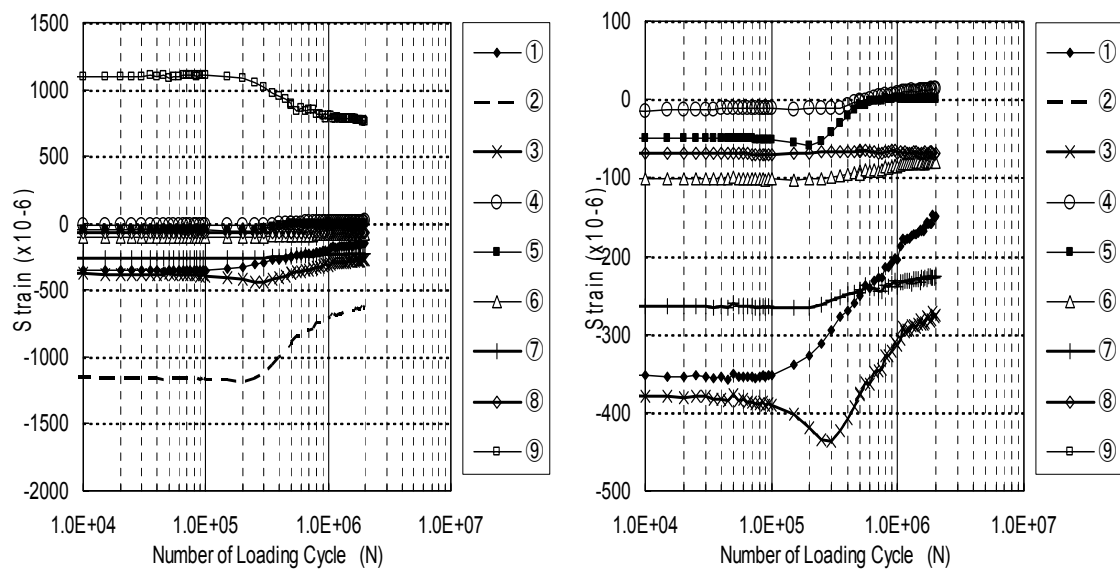


図-2.3.53 対象溶接継手毎のゲージ記号の
区別の例

図-2.3.54～57 に、各ケースで計測された代表的な位置のひずみ振幅の変化を示す。右側のグラフは左側のグラフで線が混んでいるところを縦軸のレンジを変えて拡大したものである。

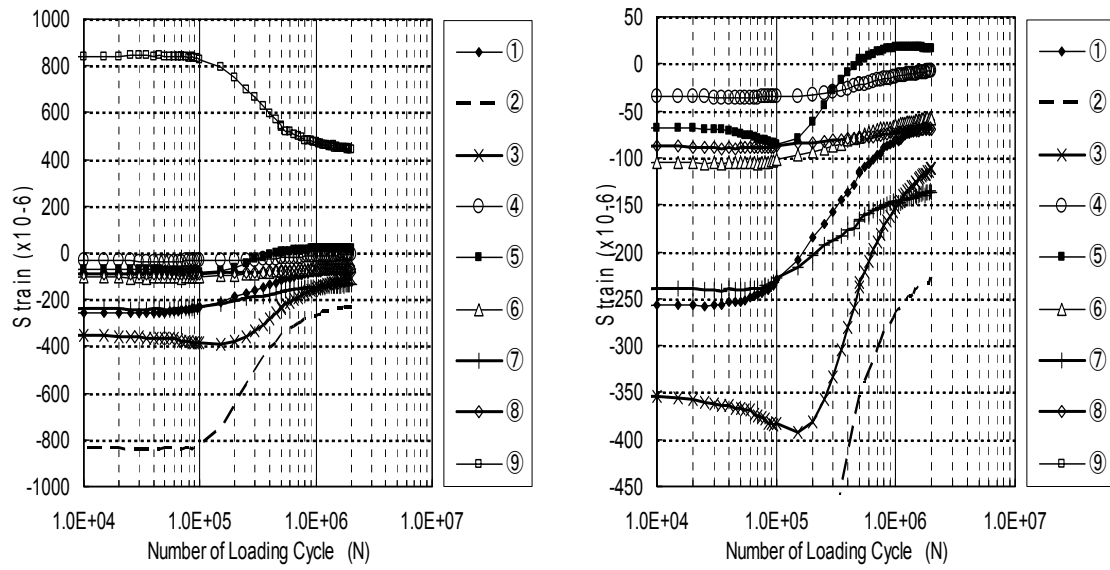


(a) D12U6

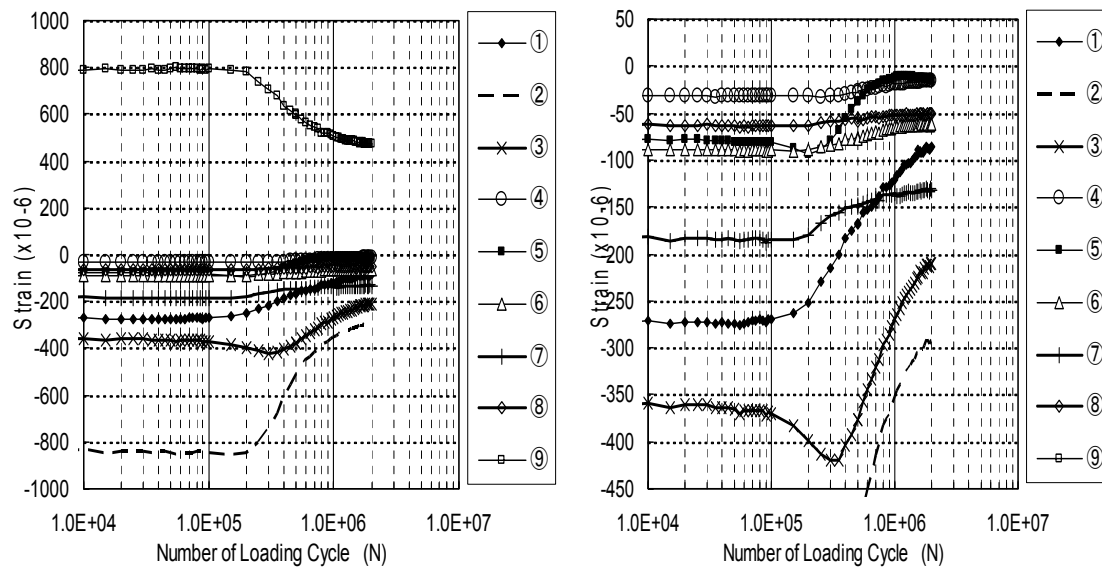


(b) D12U8

図-2.3.54 ひずみ振幅の平均値の推移(D12)

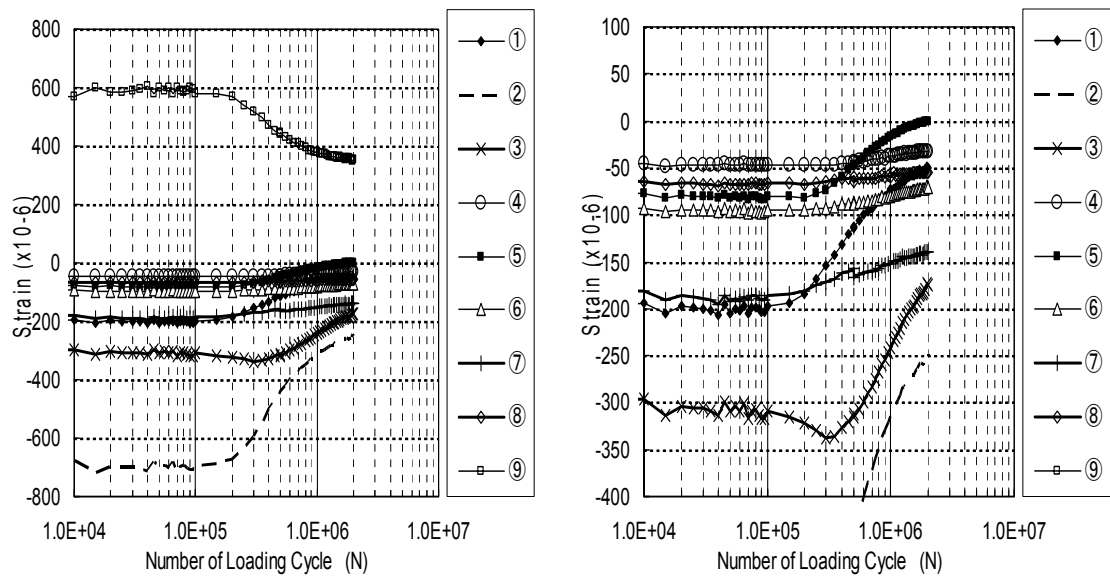


(c) D14U6

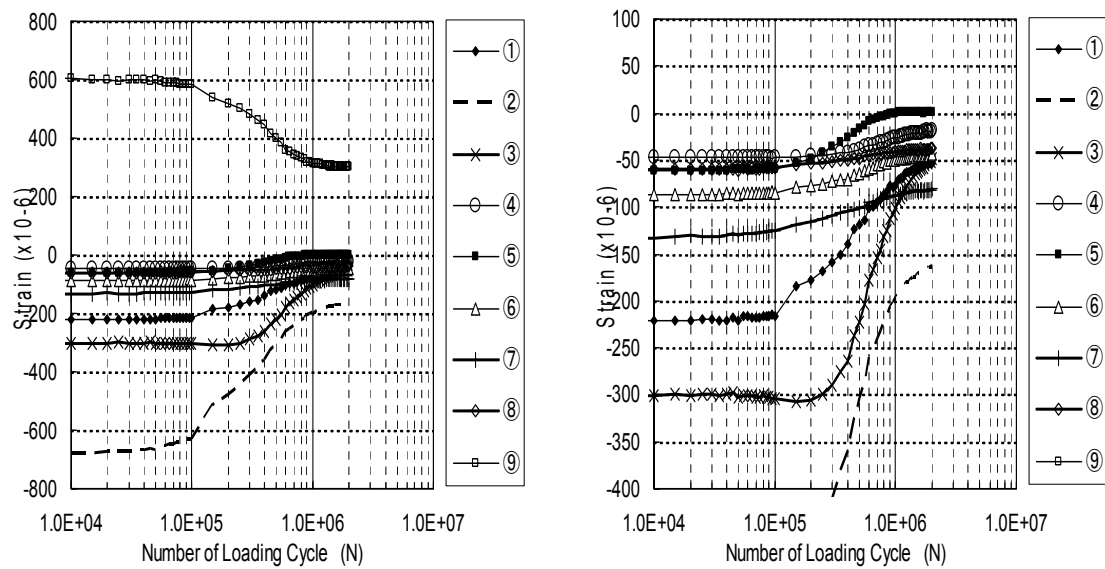


(d) D14U8

図-2.3.55 ひずみ振幅の平均値の推移(D14)

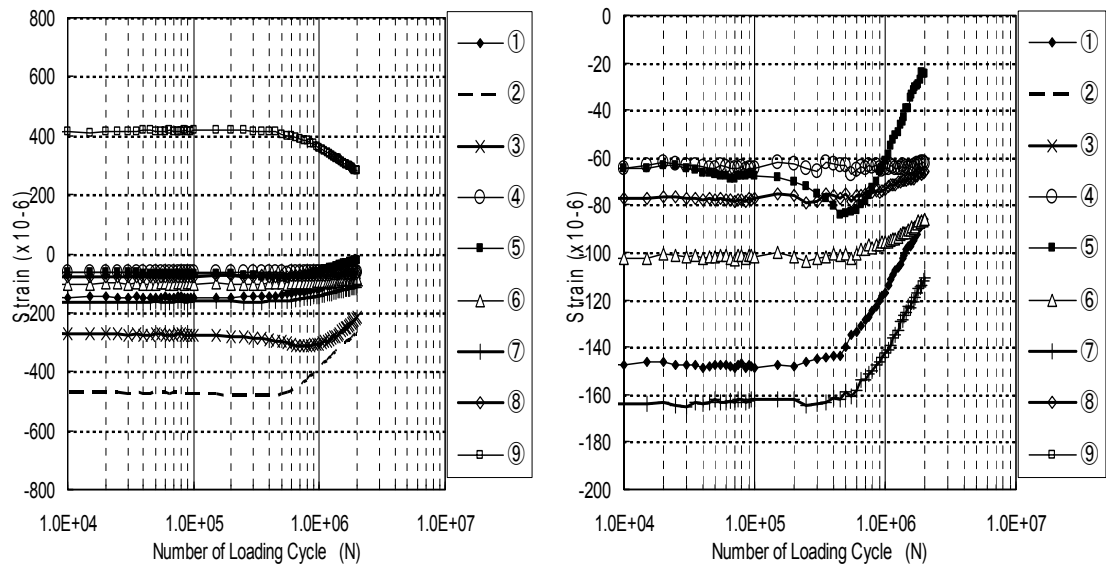


(e) D16U6

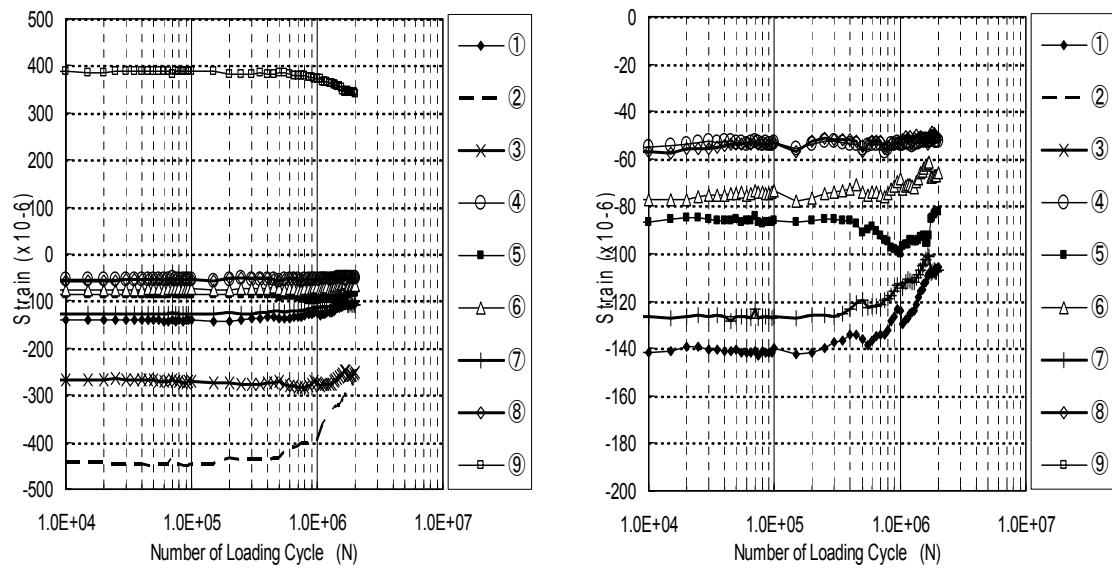


(f) D16U8

図-2.3.56 ひずみ振幅の平均値の推移(D16)



(g) D19U6



(h) D19U8

図-2.3.57 ひずみ振幅の平均値の推移(D19)

いずれのゲージ位置の計測値も、デッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせが異なっても変化の傾向は近似している。

特に②、⑤、⑨の位置のひずみゲージで計測されるひずみの値は、各ケース毎にほぼ同じ時期に変化が現れることから、き裂の発生により載荷荷重に対する耐荷力機構に変化を生じ、その結果として各部のひずみ応答が変化したことが反映されたものと考えられる。

また詳細には、②、⑤、⑨のひずみ変化が先行して、それが継続している中で少し遅れて③のひずみゲージの変化がやや顕著になる傾向がみられる。

そのため③のひずみの変化傾向が変わる前後でき裂の進展方向や速度などの性状が変化している可能性が疑われる。

トラフリブ板厚とデッキプレート厚さが異なる組み合わせとなっているにもかかわらず、載荷開始から実験終了までの各計測位置のひずみゲージの変動の特徴は類似した傾向にある。

それらをまとめると概ね以下の通りである。

- ・計測点①

ひずみ振幅の値は一貫して減少傾向である。

- ・計測点②

ひずみ振幅は①と同様の变化傾向を示すが、絶対値が大きい。

- ・計測点③

ひずみ振幅が一旦大きくなった後、減少する傾向を示す。

- ・計測点⑤

途中まで③と類似の傾向を示し、D19を除いてひずみ振幅は0に漸近して安定する。

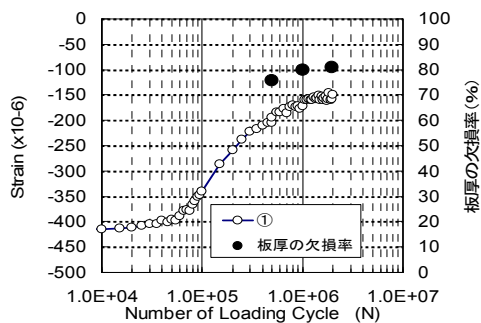
- ・計測点⑦

ひずみ振幅が一貫して減少する傾向を示す。ただしひずみ振幅の変化は相対的に値は小さい。

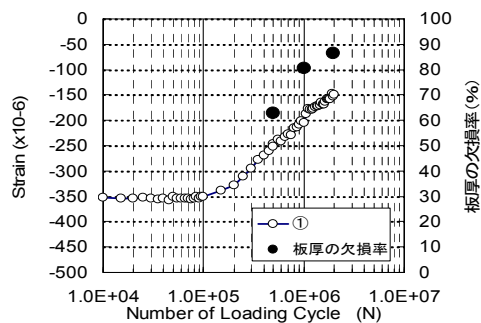
- ・計測点⑨

ひずみ振幅は徐々に減少するが、途中より変化速度が小さくなり安定する。

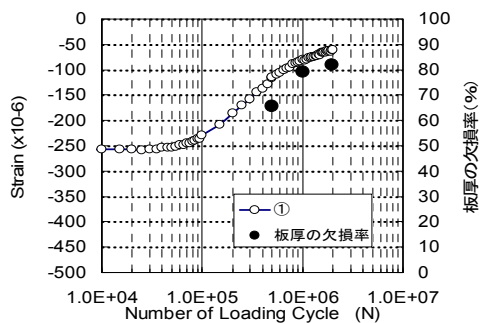
これらの各ゲージでのひずみ応答の変化とき裂の進展程度との関係をより明確にするために、各位置のゲージについて、ひずみ振幅と超音波探傷試験で推定した板厚の欠損率の関係を整理した。結果のグラフを図-2.3.58～67に示す。



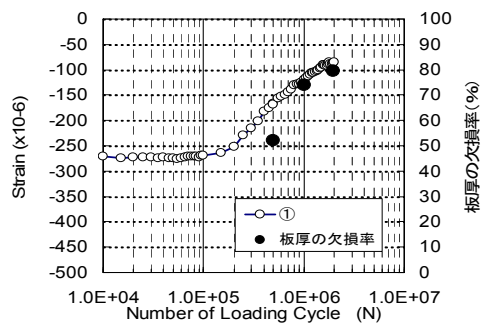
(a) D12U6



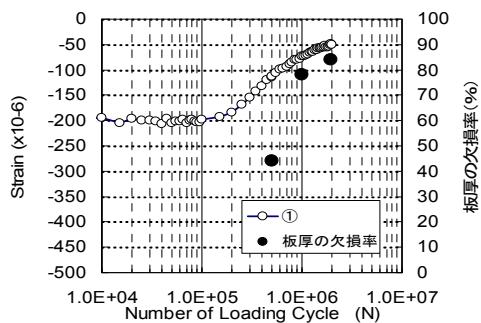
(b) D12U8



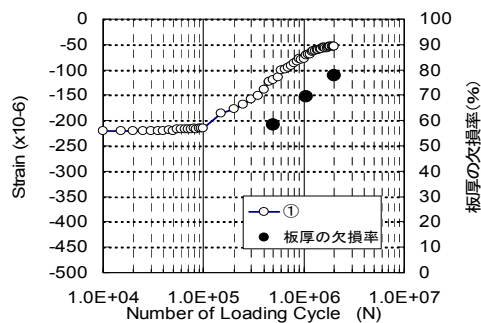
(c) D14U6



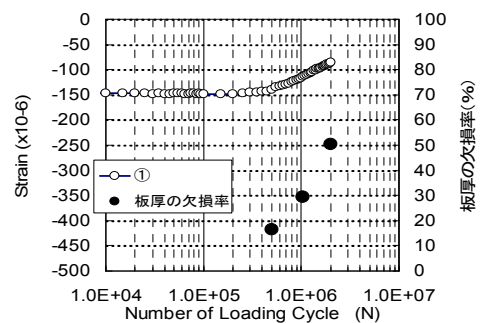
(d) D14U8



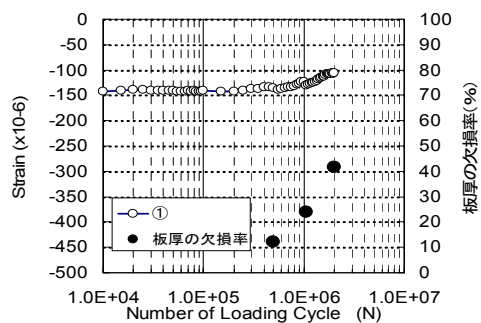
(e) D16U6



(f) D16U8

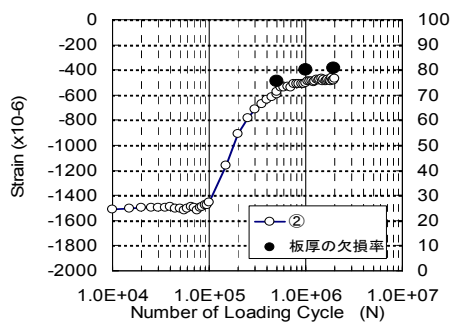


(g) D19U6

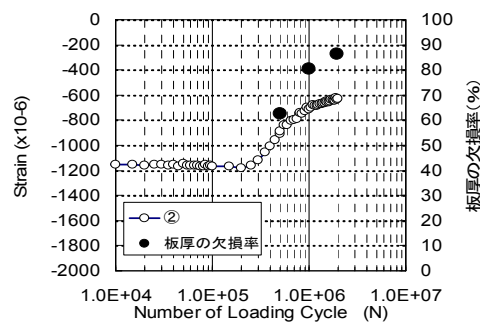


(h) D19U8

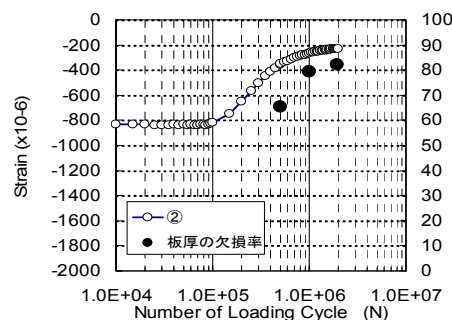
図-2.3.58 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ①)



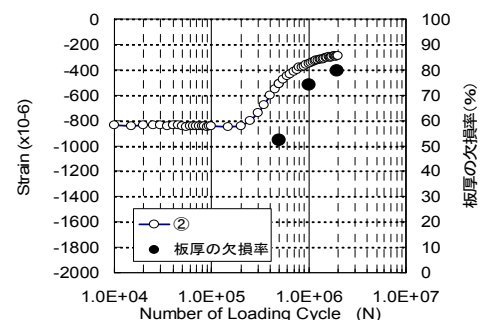
(a) U12U6



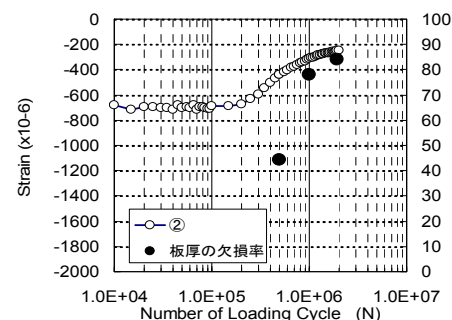
(b) D12U8



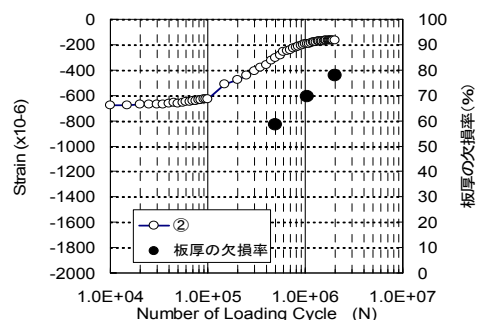
(c) D14U6



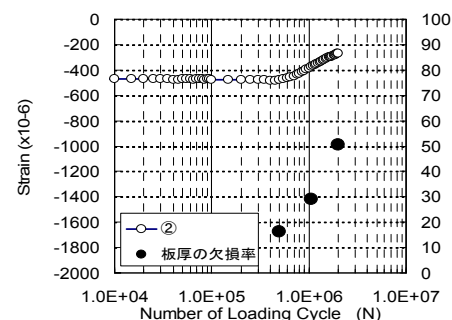
(d) D14U8



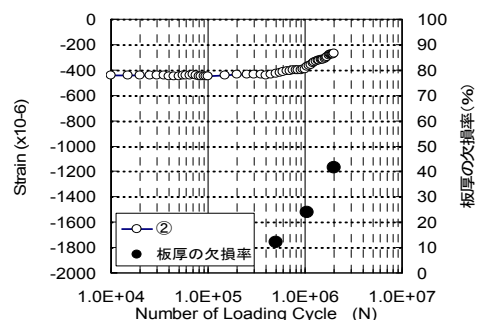
(e) D16U6



(f) D16U8

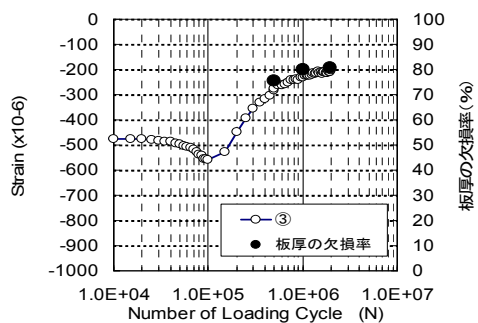


(g) D19U6

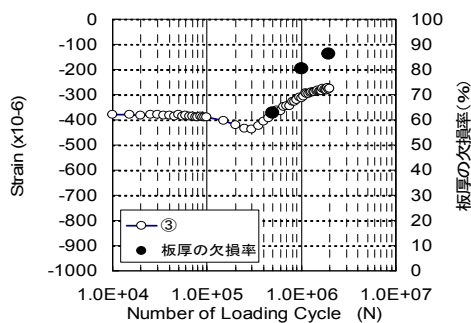


(h) D19U8

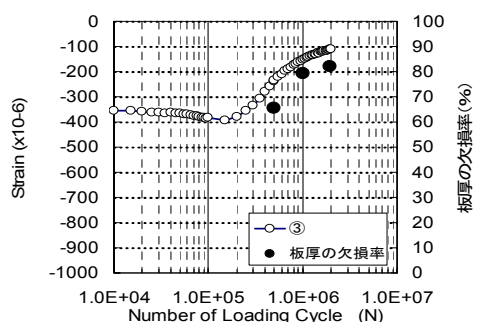
図-2.3.59 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ②)



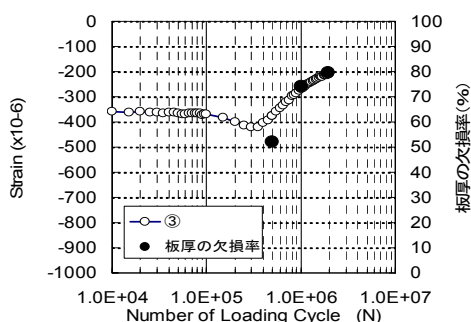
(a) D12U6



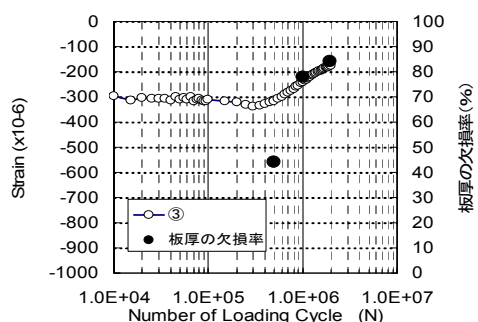
(b) D12U8



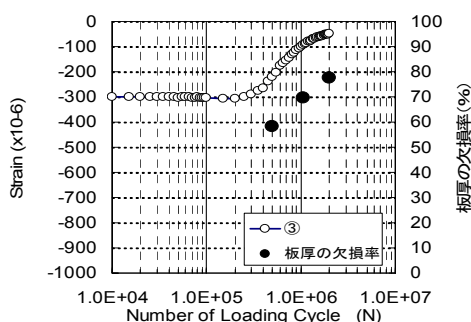
(c) D14U6



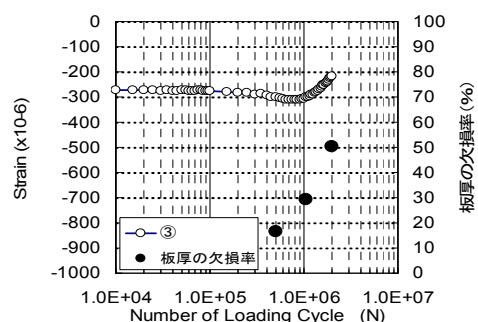
(d) D14U8



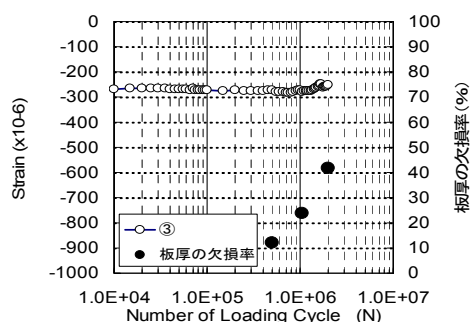
(e) D16U6



(f) D16U8

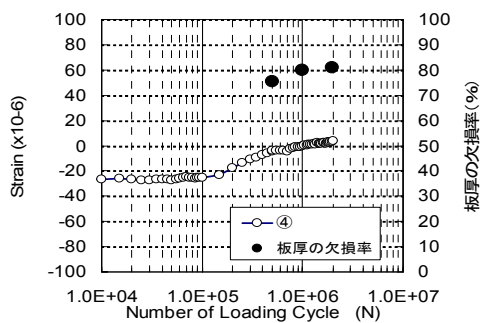


(g) D19U6

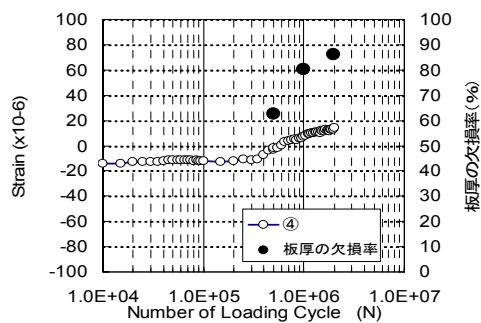


(h) D19U8

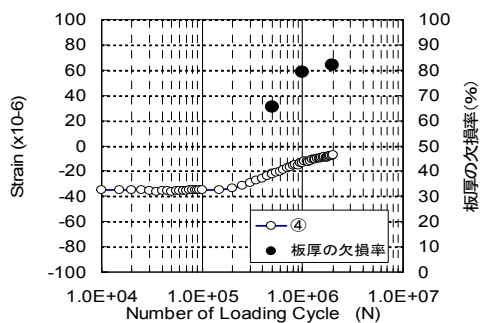
図-2.3.60 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ③)



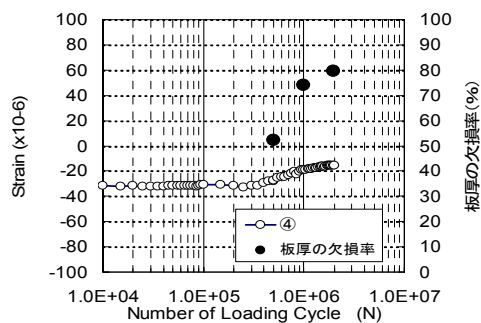
(a) D12U6



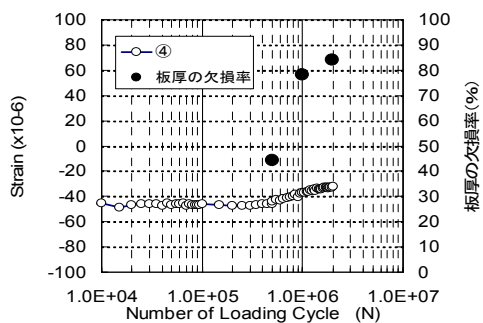
(b) D12U8



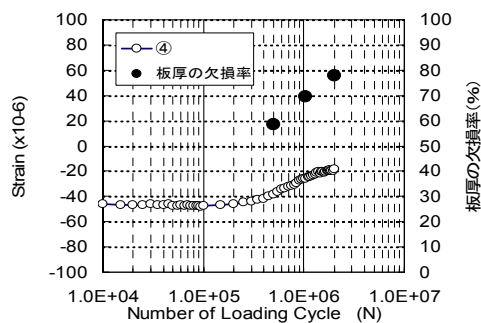
(c) D14U6



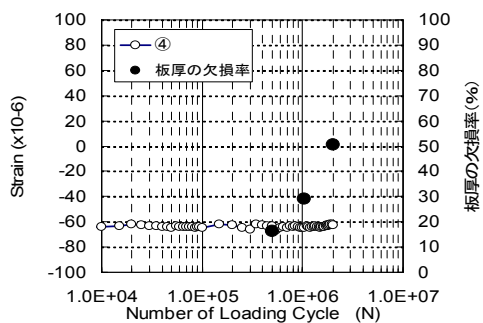
(d) D14U8



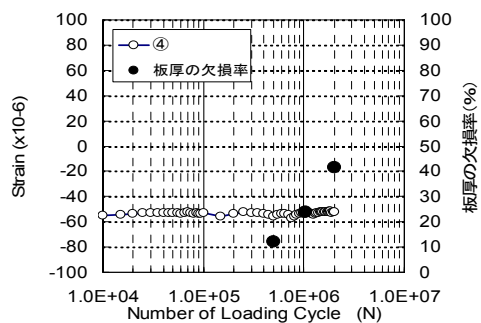
(e) D16U6



(f) D16U8

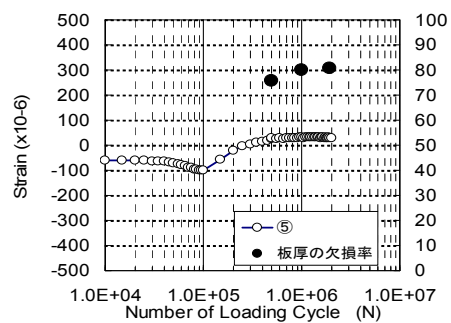


(g) D19U6

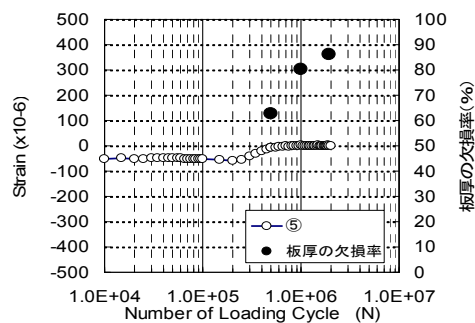


(h) D19U8

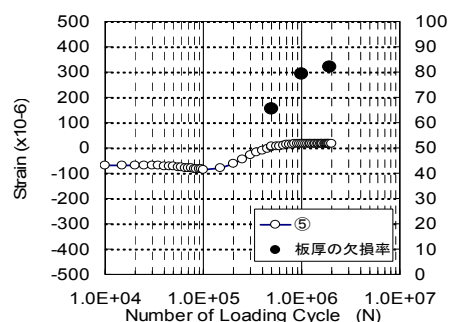
図-2.3.61 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ④)



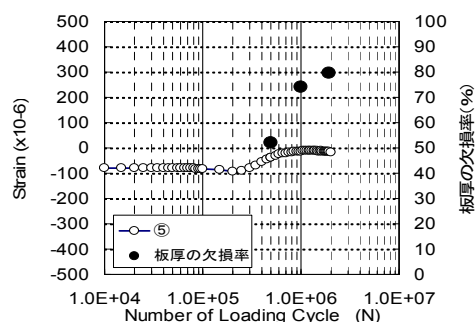
(a) D12U6



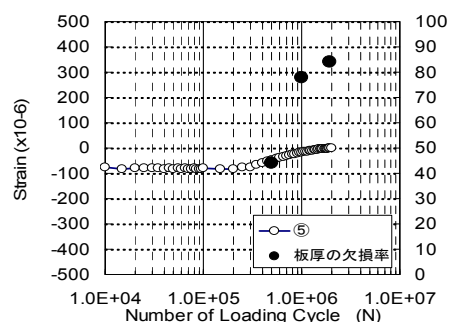
(b) D12U8



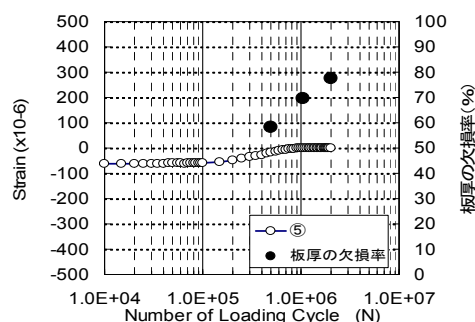
(c) D14U6



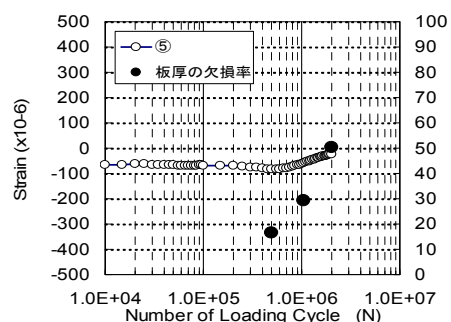
(d) D14U8



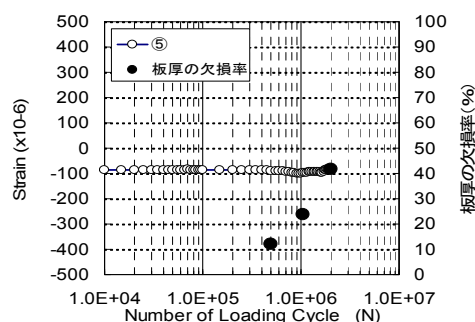
(e) D16U6



(f) D16U8

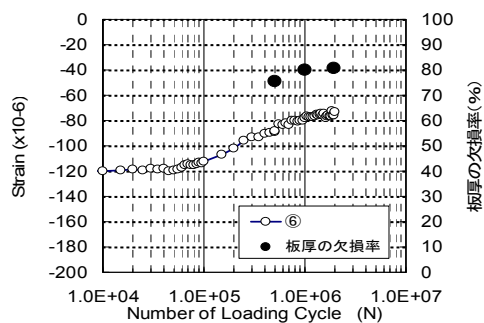


(g) D19U6

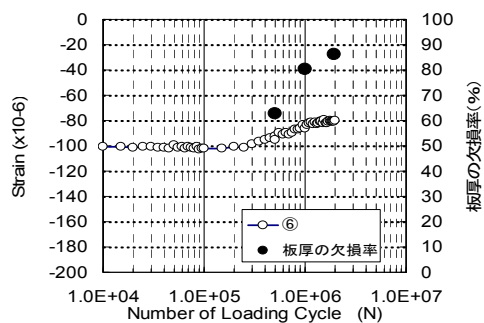


(h) D19U8

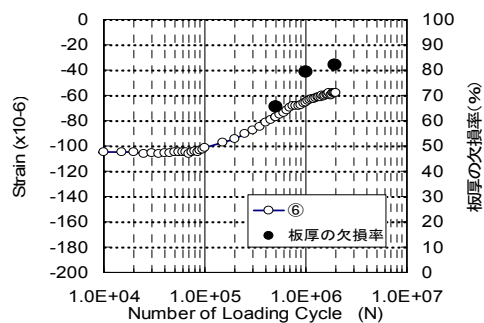
図-2.3.62 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ⑤)



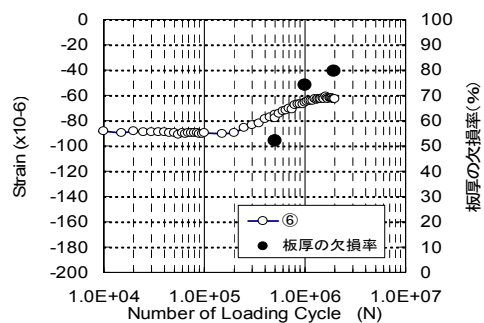
(a) D12U6



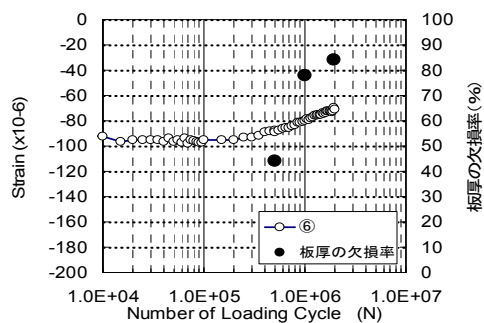
(b) D12U8



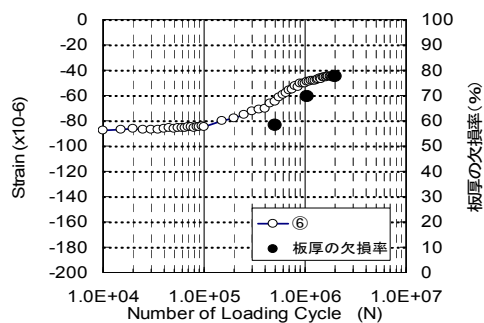
(c) D14U6



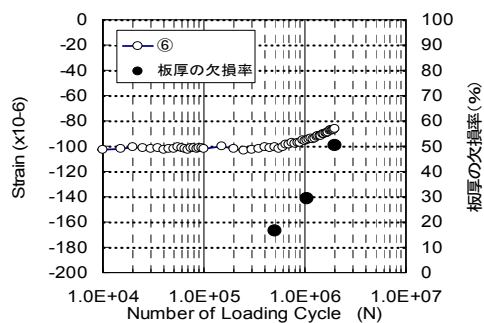
(d) D14U8



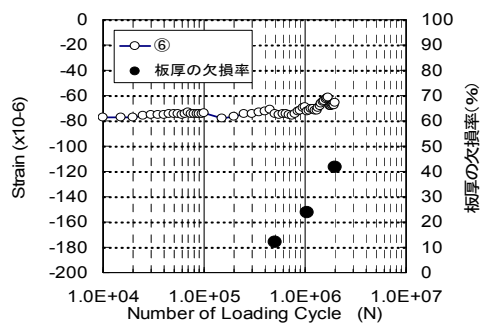
(e) D16U6



(f) D16U8

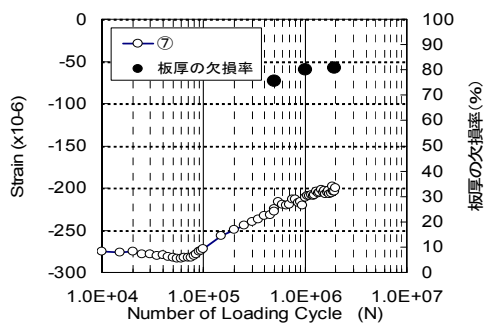


(g) D19U6

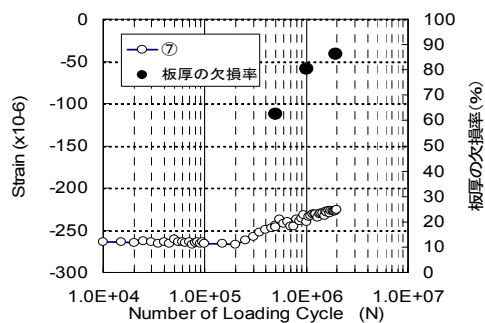


(h) D19U8

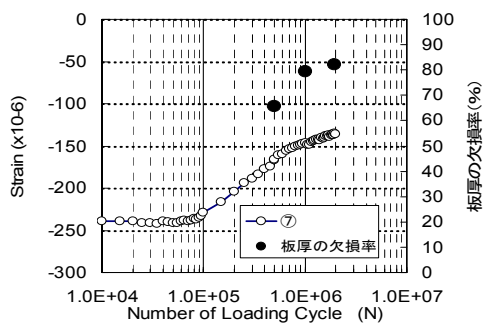
図-2.3.63 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ⑥)



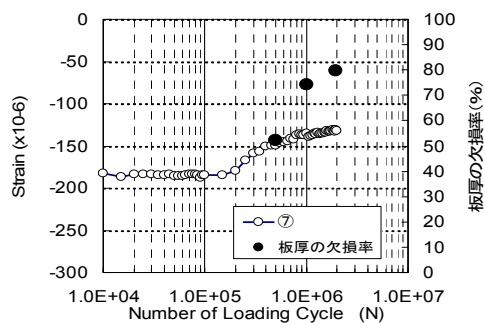
(a) D12U6



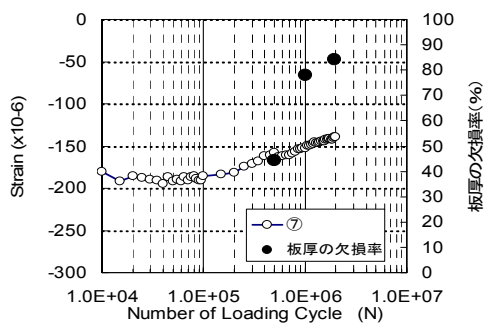
(b) D12U8



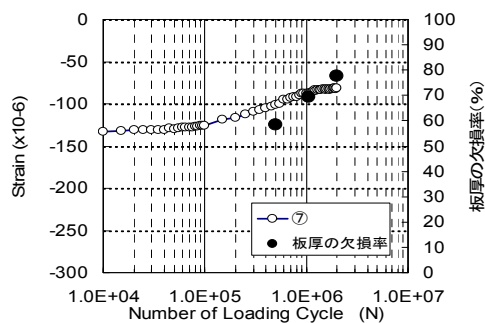
(c) D14U6



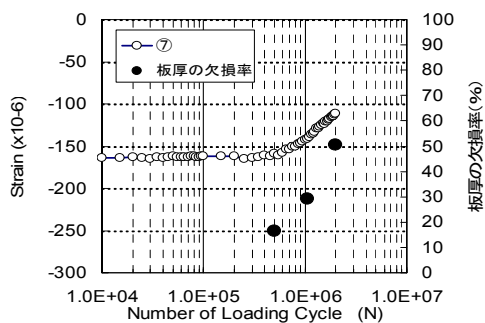
(d) D14U8



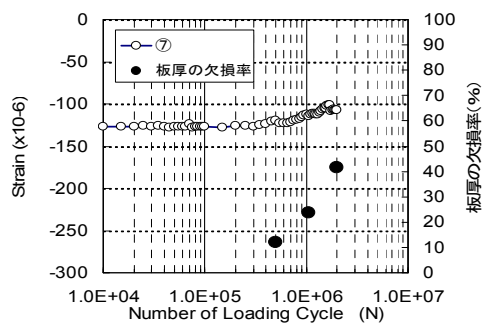
(e) D16U6



(f) D16U8

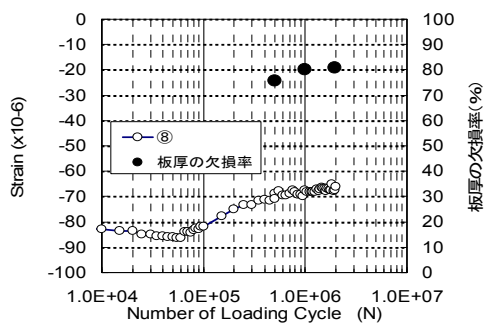


(g) D19U6

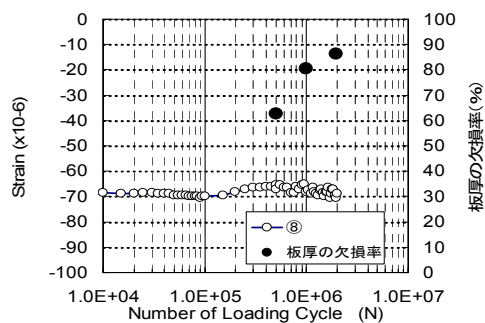


(h) D19U8

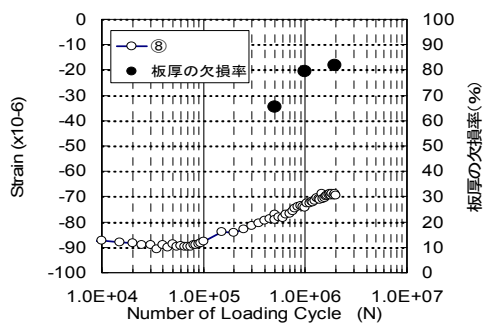
図-2.3.64 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ⑦)



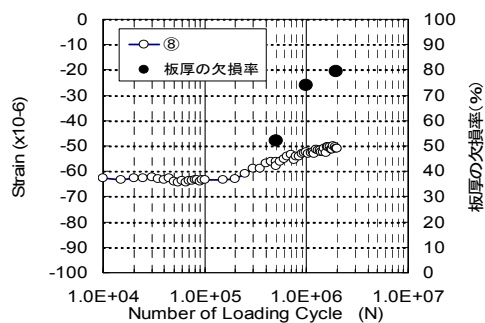
(a) D12U6



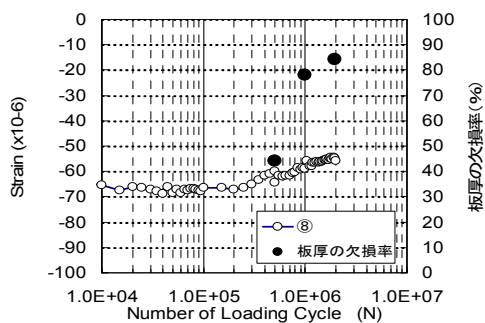
(b) D12U8



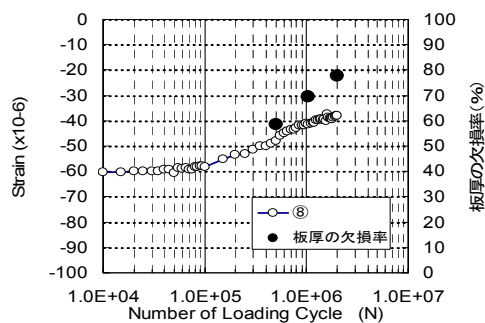
(c) D14U6



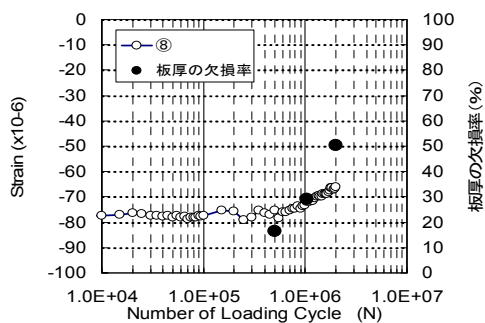
(d) D14U8



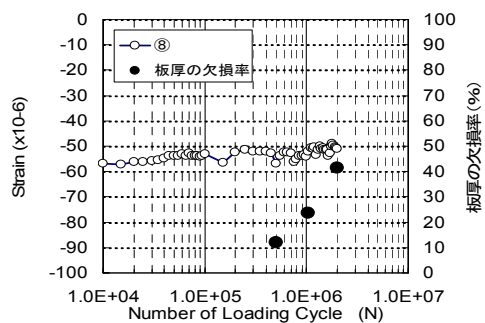
(e) D16U6



(f) D16U8

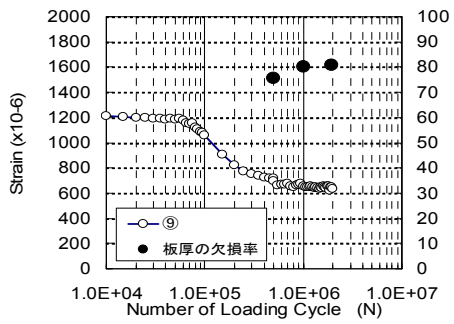


(g) D19U6

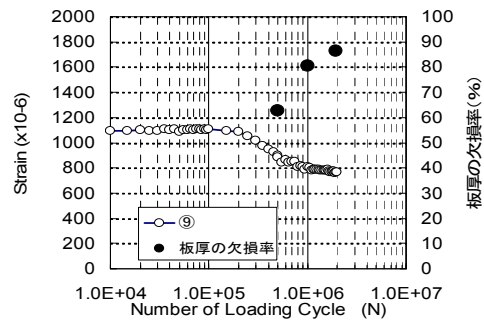


(h) D19U8

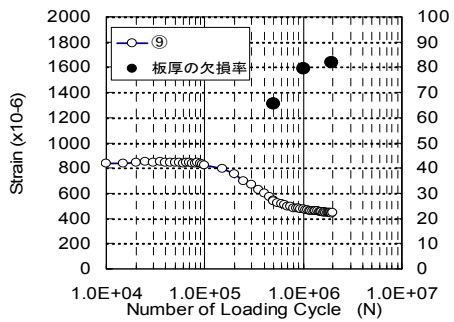
図-2.3.65 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ⑧)



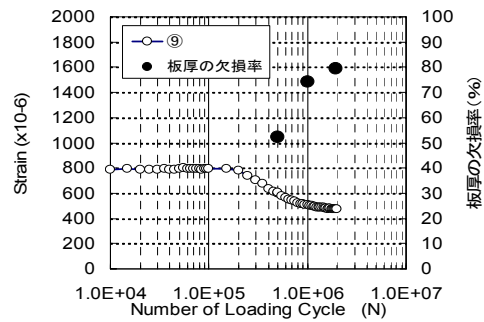
(a) D12U6



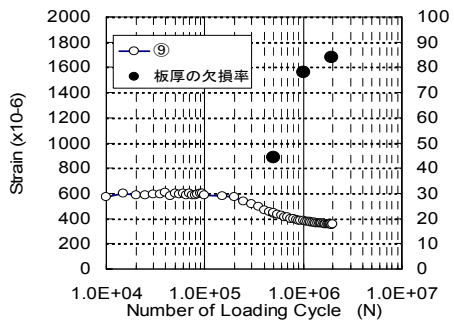
(b) D12U8



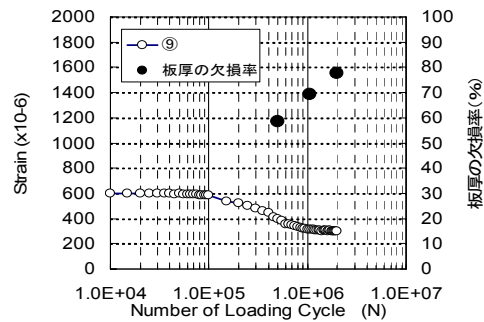
(c) D14U6



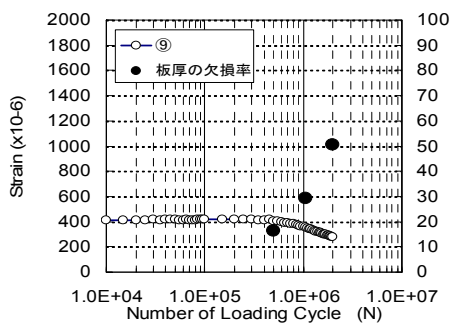
(d) D14U8



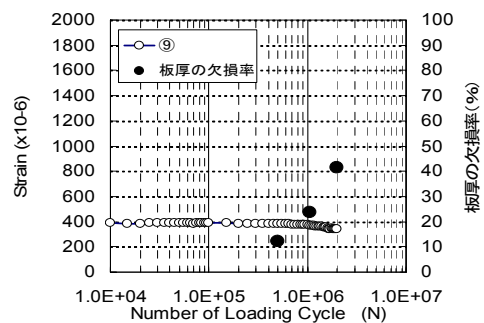
(e) D16U6



(f) D16U8

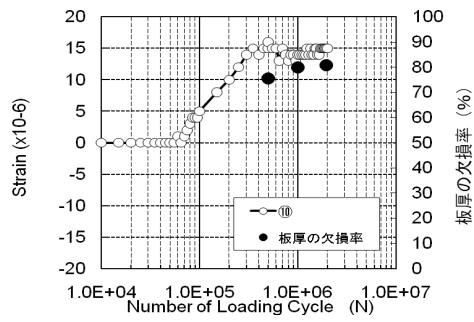


(g) D19U6

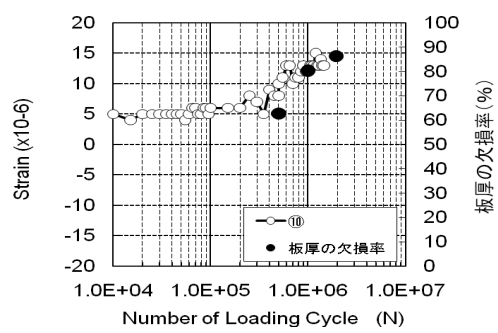


(h) D19U8

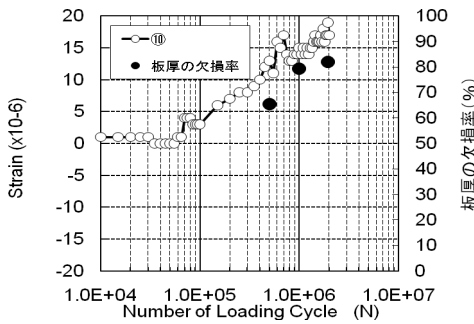
図-2.3.66 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ⑨)



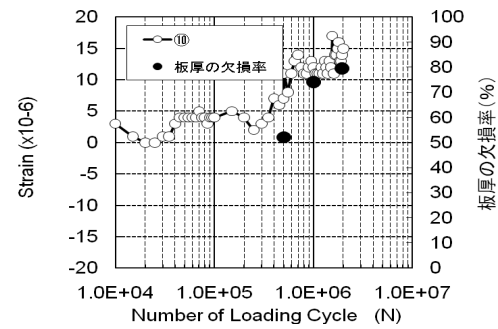
(a) D12U6



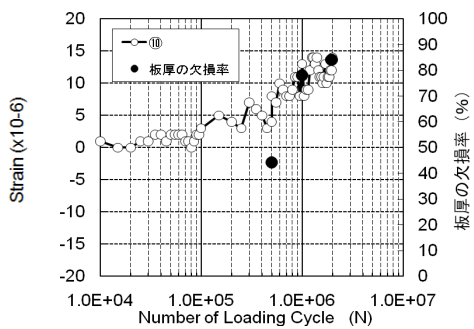
(b) D12U8



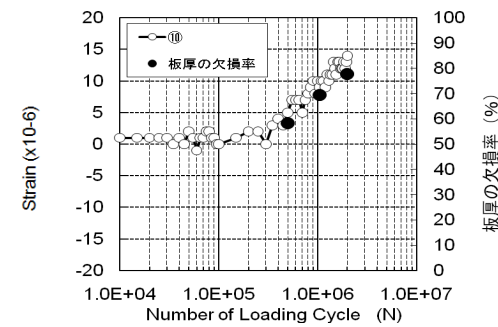
(c) D14U6



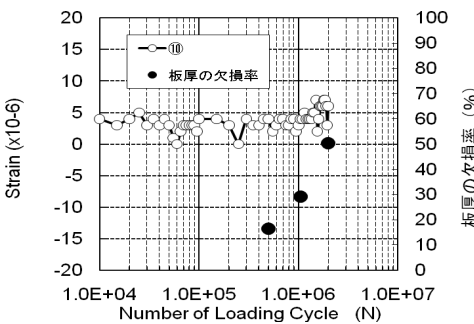
(d) D14U8



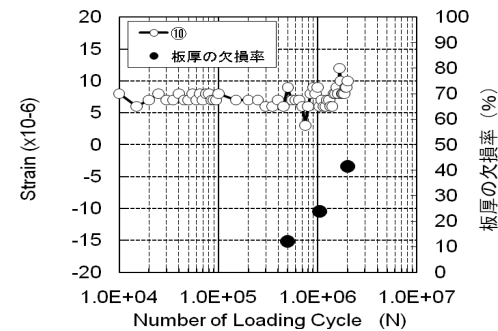
(e) D16U6



(f) D16U8



(g) D19U6



(h) D19U8

図-2.3.67 ひずみ振幅と板厚欠損率の推移 (ゲージ⑩)

以上の各ゲージ位置での結果でみられた主な特徴は次の通り

・ゲージ②

いずれのケースでも、ひずみの値の変化傾向は、UTによる推定板厚欠損率の変化傾向と同様の傾向を示しており、デッキ板厚 19mm のケース (D19U6,D19U8)では、ひずみの値が変化し始めた時期と、UTによって板厚欠損がほぼ確実と認識できる板厚欠損率 10%程度となる時期はほぼ一致している。

また、デッキ板厚 12mm のケース (D12U6, D12U8)のケースでは、途中急激に変化していたひずみが試験最終段階ではその変化が徐々に小さくなっているが、UT による推定板厚欠損率の変化の傾向の傾向もこれと一致している。

このように②のゲージで計測されるひずみの変化傾向は UT による推定板厚欠損率の変化と同調した傾向を示しており、き裂の進展程度と直接的な関係にあるものと考えられる。

また、デッキプレート板厚とトラフリブ板厚の組み合わせに依らず、き裂進展の傾向とそれに対するひずみの変化傾向は同じとなることがわかる。

・ゲージ③

各ケースの変化から、き裂の進展に伴い、ひずみの値の変化傾向は一旦ひずみ振幅が拡大したのち、急速に小さくなるが最終段階でもある程度のひずみ振幅が保持される。

このときひずみ振幅が最大となるのは D19, D16, D14 の結果から板厚欠損率が 30~50% 程度となった段階に対応しているものと推定される。

板厚が小さいケースほど、ひずみ振幅が一旦拡大する現象がより顕著に表れる傾向にあるものの、③のゲージで計測されるひずみの変化傾向もゲージ②の場合と同様に、ひずみの変化と UT による推定板厚欠損率の変化はデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせに依らず同様の变化傾向を示すものと考えられ、き裂の進展程度を反映しているものと考えられる。

・ゲージ⑤

各ケースの変化から、き裂の進展に伴い、ひずみの値の変化傾向は一旦ひずみ振幅が拡大したのち、急速に小さくなり最終的にはひずみ振幅は 0 に近づいていくものと推定される。

このときひずみ振幅が最大となるのは D19, D16, D14 の結果から板厚欠損率が 30~50% 程度となった段階に対応しているものと推定され、変化傾向が変わる時期はゲージ③でのひずみと一致しているものと考えられる。

なおゲージ③と異なり、板厚欠損率が大きくなるにつれてひずみ振幅はケースによらずゼロに近づく特徴があり、概ね板厚欠損率が 80%程度にまで至るとひずみ振幅はほぼゼロとなるものと考えられる。

板厚が小さいケースほど、ひずみ振幅が一旦拡大する現象がより顕著に表れる傾向にある

ものの、③のゲージで計測されるひずみの変化傾向もゲージ②の場合と同様に、ひずみの変化と UT による推定板厚欠損率の変化はデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせに依らず同様の变化傾向を示すものと考えられ、き裂の進展程度を反映しているものと考えられる。

・ゲージ⑨

各ケースでひずみ振幅の値は徐々に減少し、ゲージ②のひずみと丁度正負が反転したような変化の挙動を示す。

ゲージ②と同様に、デッキ板厚 19mm のケース (D19U6,D19U8)では、ひずみの値が変化し始めた時期と、UT によって板厚欠損がほぼ確実と認識できる板厚欠損率 10%程度となる時期がほぼ一致している。

また、デッキ板厚 12mm のケース (D12U6, D12U8)のケースでは、途中急激に変化していたひずみが試験最終段階ではその変化が徐々に小さくなっているが、UT による推定板厚欠損率の変化の傾向の傾向もこれと一致しており、この特徴もゲージ②と同様である。

このように⑨のゲージで計測されるひずみの変化傾向はゲージ②と同様に UT による推定板厚欠損率の変化と同調した傾向を示しており、き裂の進展程度と直接的な関係にあるものと考えられる。

また、デッキプレート板厚とトラフリブ板厚の組み合わせに依らず、き裂進展の傾向とそれに対するひずみの変化傾向は同じとなることがわかる。

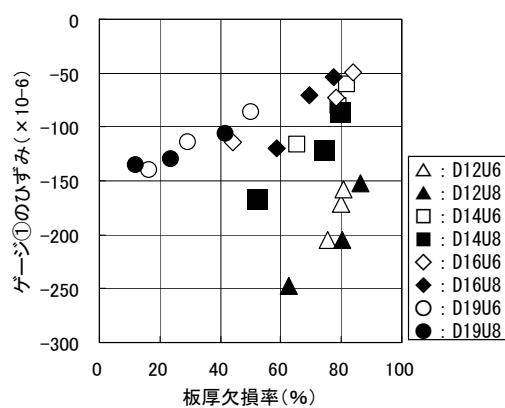
・ゲージ⑩

ゲージ⑩では、ひずみ振幅が他のゲージと比較して極めて小さいものの、デッキプレート板厚 19mm 以外のいずれのケースでもひずみの値の変化傾向は、UT による推定板厚欠損率の変化傾向と同様の傾向を示しておりひずみが大きくなるほど板厚欠損率も大きくなる傾向があることがわかる。一方デッキプレート板厚 19mm の場合では断面欠損 50%でも当初と同じようなひずみ振幅を示すことがあり、他のケースとは若干異なっている。

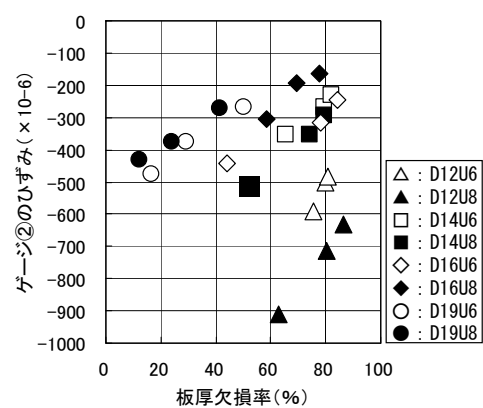
以上のように、デッキプレートの板厚とトラフリブの板厚の組み合わせによらず、各ゲージ位置でのひずみ振幅の変化傾向と UT による板厚欠損率の変化傾向は一定の対応関係にあることがわかる。

そのためいずれのケースにおいても本疲労試験によるき裂の進展過程は同様であり、亀裂発生時期（载荷回数）と進展速度のみがデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせに応じて異なっていたものと推定される。

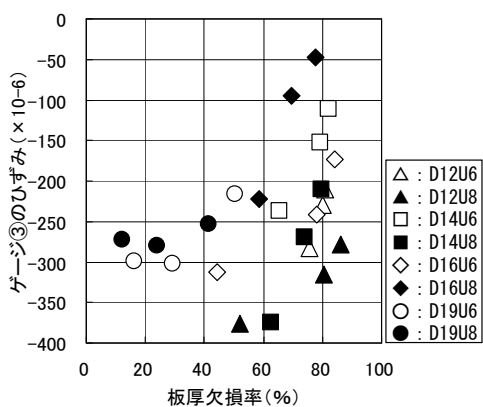
図-2.3.68 に、全てのゲージについて UT による推定板厚欠損率とそのときのひずみ振幅の関係を示す。



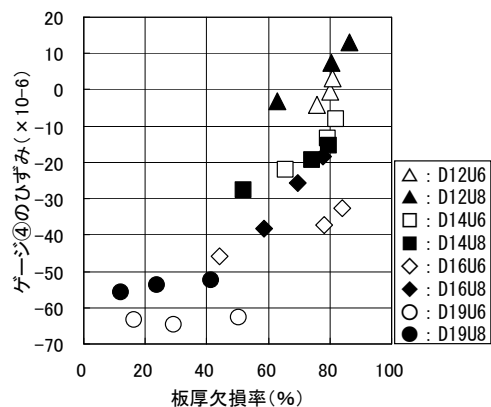
(a) ゲージ①



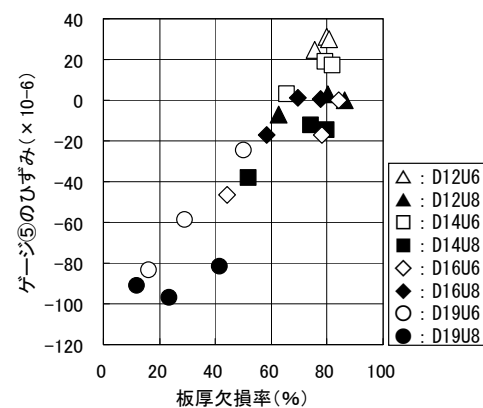
(b) ゲージ②



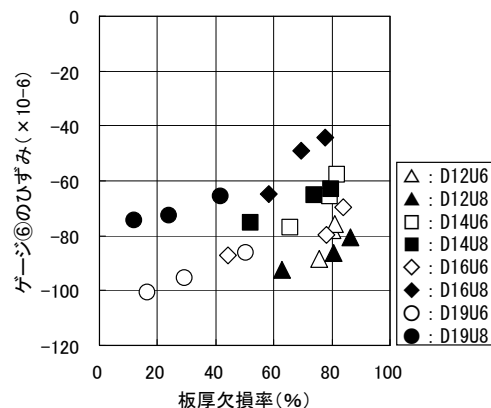
(c) ゲージ③



(d) ゲージ④

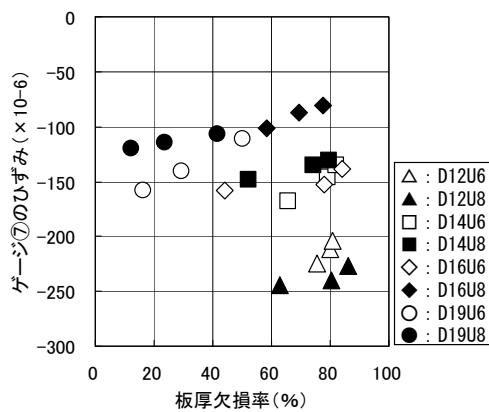


(e) ゲージ⑤

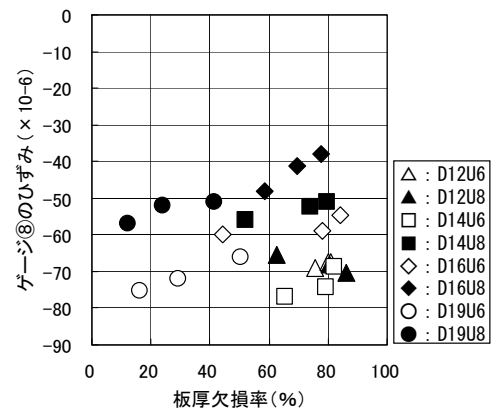


(f) ゲージ⑥

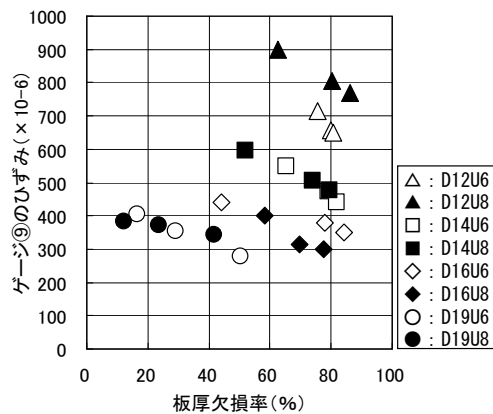
図-2.3.68(1) ひずみ振幅と板厚欠損率の関係(1)



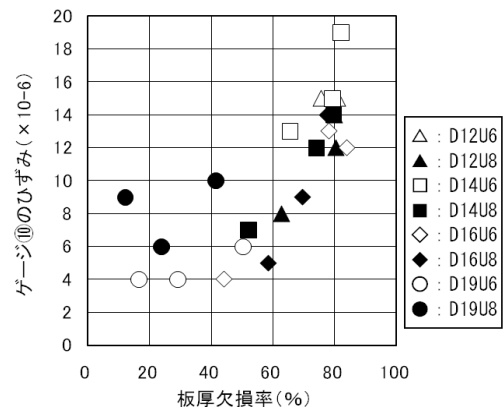
(g) ゲージ⑦



(h) ゲージ⑧



(i) ゲージ⑨



(j) ゲージ⑩

図-2.3.68(2) ひずみ振幅と板厚欠損率の関係(2)

ゲージ①, ②, ⑤, ⑥, ⑦, ⑨ではそれぞれのケースについて比較的, 板厚欠損率に応じてひずみ振幅に変化が生じる関係が現れている。

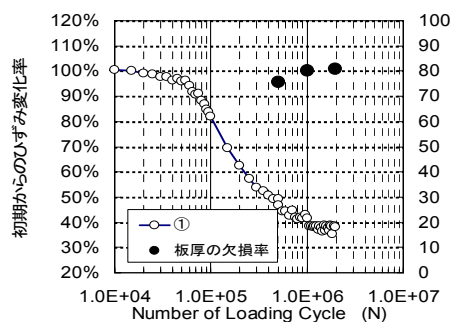
そのうち, ゲージ①, ②, ⑥, ⑦, ⑨ではデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせによって, 板厚欠損率に対応したひずみ振幅の値に差があり, デッキプレートとトラフリブいずれも板厚が大きいほどひずみ振幅が大きく, 板厚欠損率が大きくなるにつれてその差は小さくなるため欠損率の変化に対するひずみ振幅の値の変化は板厚が小さいものほど大きくなる傾向が見られる。

一方, ゲージ⑤ではデッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせに依らず, 板厚欠損率に対応するひずみ振幅の絶対値が近似する結果となっている。そして板厚欠損率が 80% 程度までき裂が進展するとケースによらずひずみ振幅が現れなくなるものと推測され, ゲージ⑤の位置ではき裂の進展に伴う耐荷力機構の変化によって応力負担されなくなるものと考えられる。

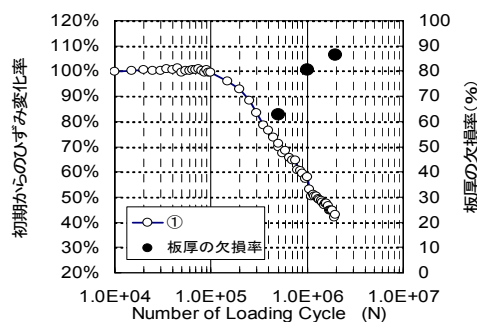
以上のように、デッキプレートの板厚とトラフリブの板厚の組み合わせによらず、同じ位置で計測されるひずみ振幅の変化傾向は推定されたき裂の進展に程度に対応して概ね一致したものとなる。このことから、各ケースともき裂進展過程は現象的にほぼ一致しているものと考えられる。

次に、デッキプレートとトラフリブの板厚の異なる組み合わせに対して、ひずみ振幅の変化の程度によって、予測されるき裂進展のどの段階に至っているのかが推定可能かどうかという観点から、繰り返し载荷による初期状態からのひずみ振幅の変化率と超音波探傷検査によって推定した板厚欠損率の推移の対応関係を整理した。

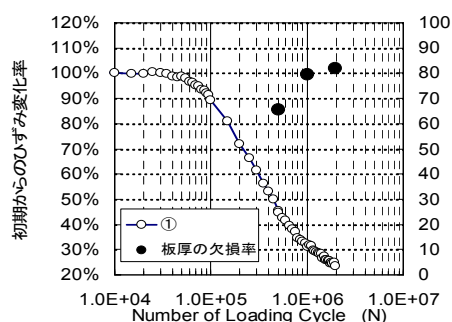
結果を図-2.3.69～77に示す。また板厚欠損率とひずみ振幅の初期状態からの変化率の対応関係を図-2.3.78に示す。



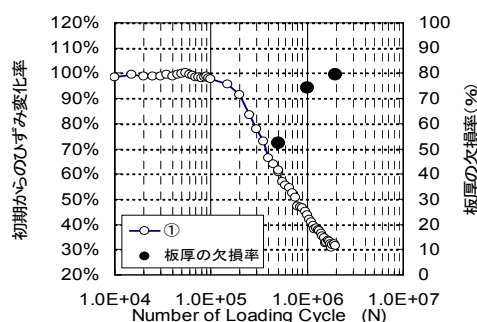
(a) D12U6



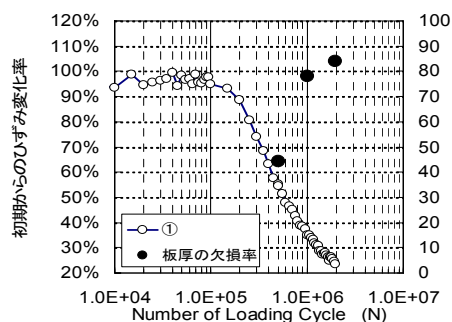
(b) D12U8



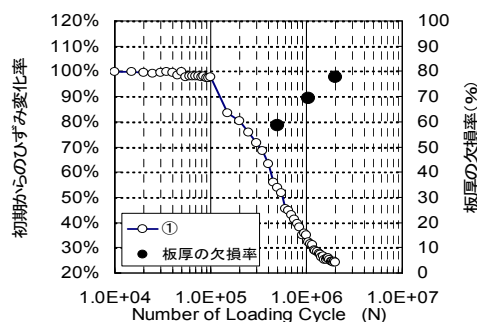
(c) D14U6



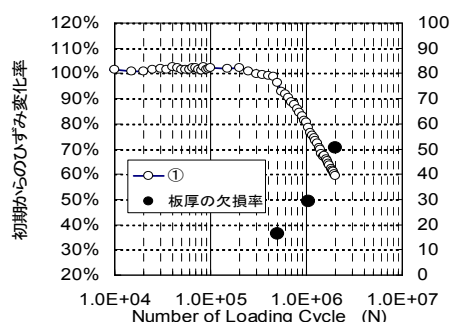
(d) D14U8



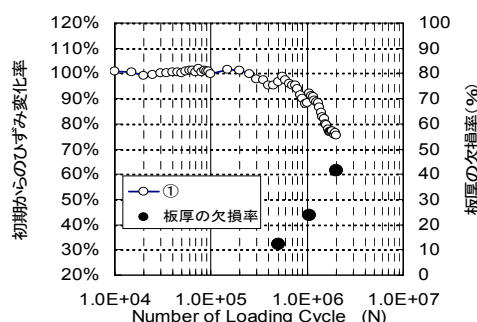
(e) D16U6



(f) D16U8

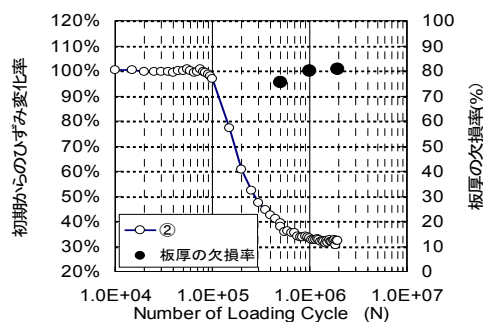


(g) D19U6

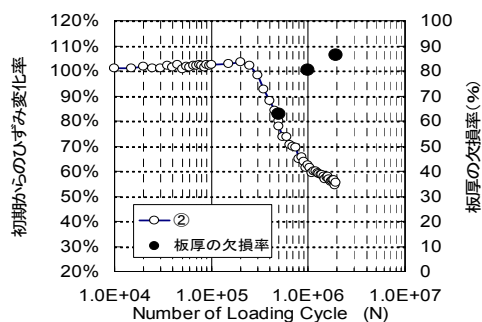


(h) D19U8

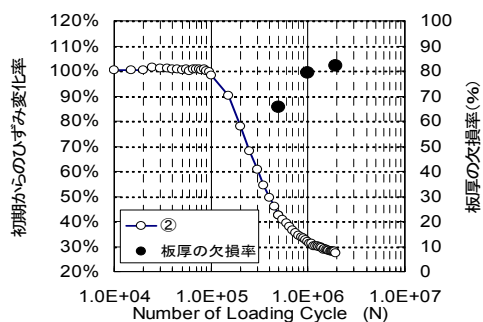
図-2.3.69 ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の推移 (ゲージ①)



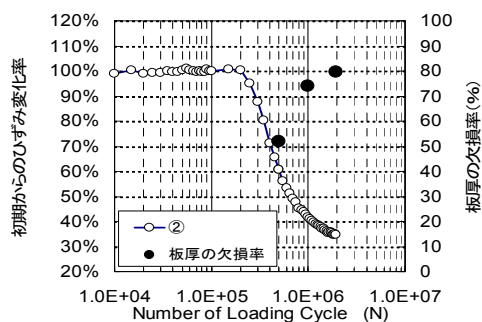
(a) D12U6



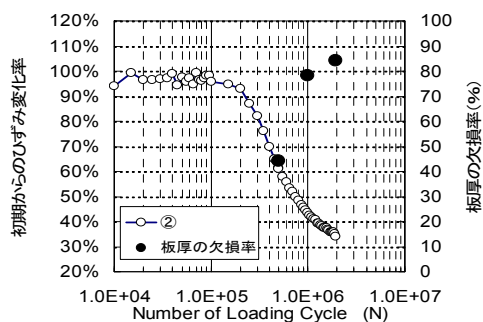
(b) D12U8



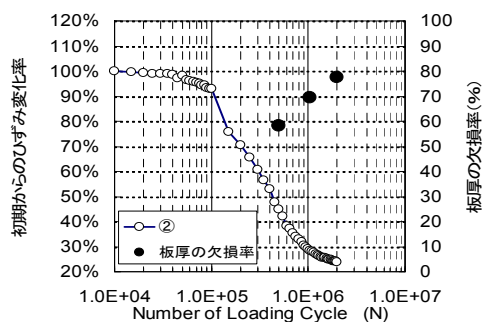
(c) D14U6



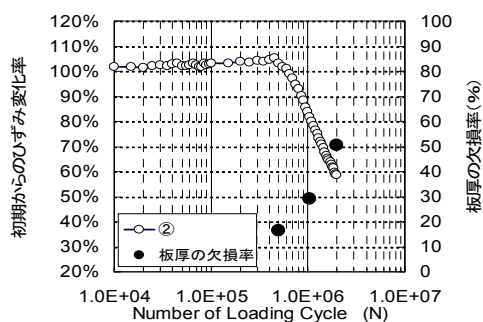
(d) D14U8



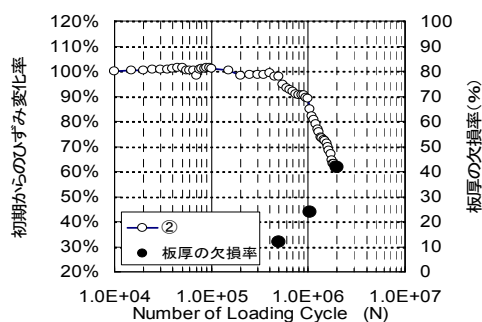
(e) D16U6



(f) D16U8

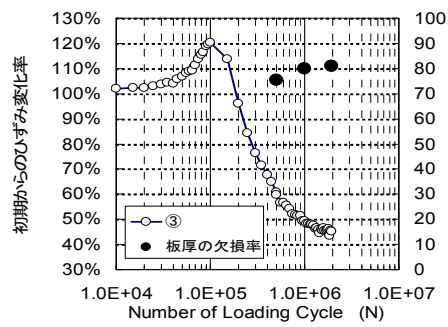


(g) D19U6

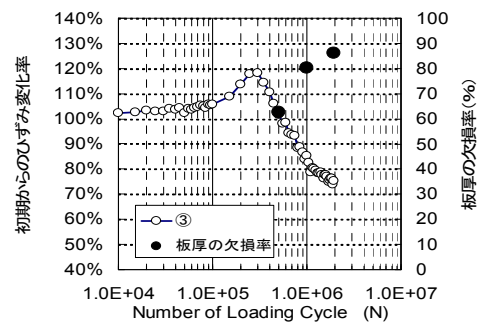


(h) D19U8

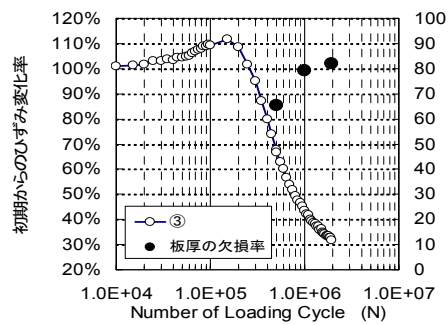
図-2.3.70 ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の推移 (ゲージ②)



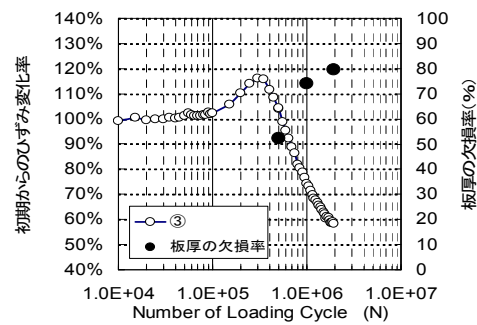
(a) D12U6



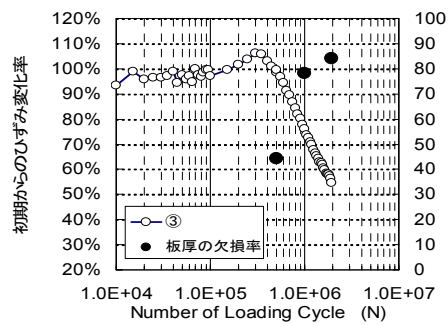
(b) D12U8



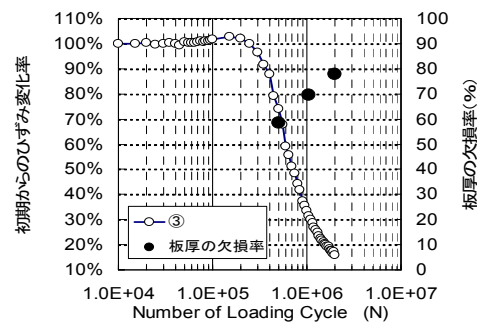
(c) D14U6



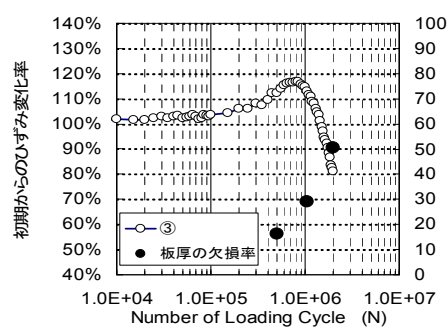
(d) D14U8



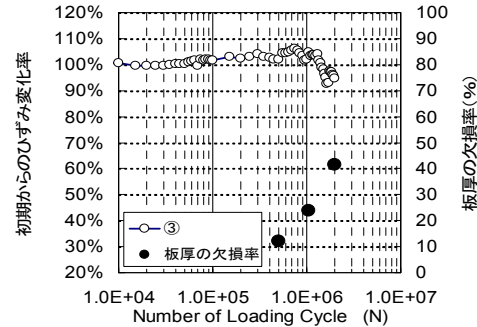
(e) D16U6



(f) D16U8

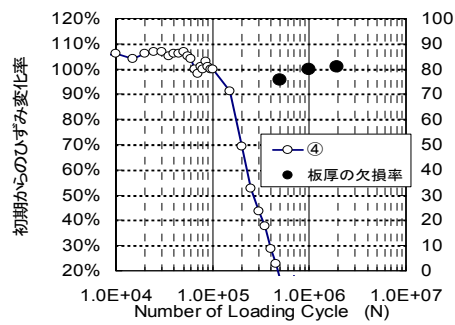


(g) D19U6

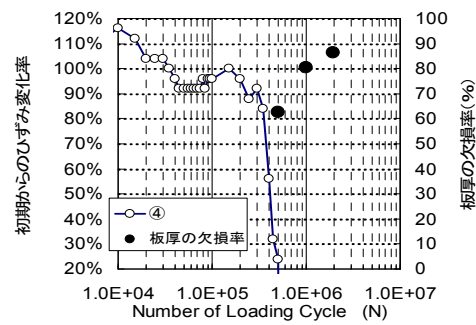


(h) D19U8

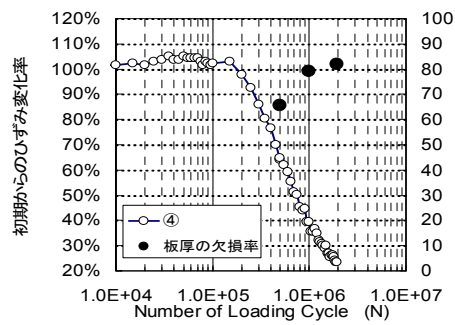
図-2.3.71 ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の推移 (ゲージ③)



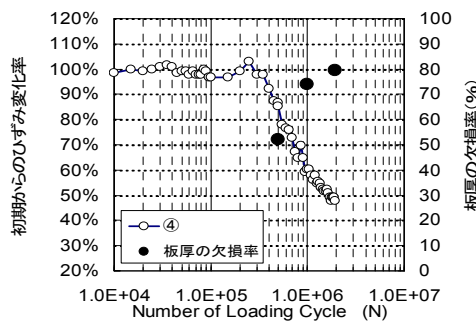
(a) D12U6



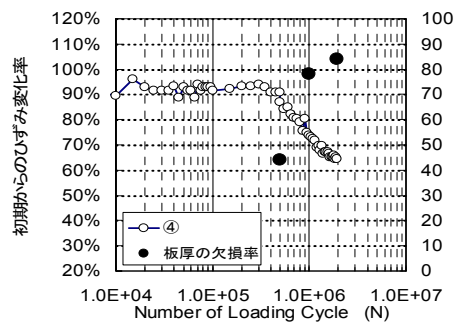
(b) D12U8



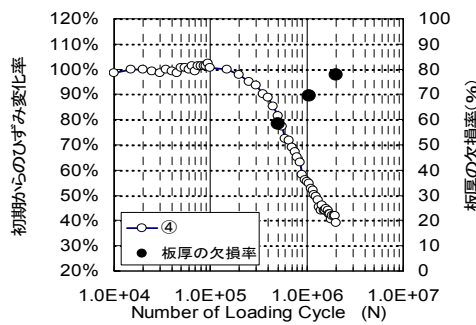
(c) D14U6



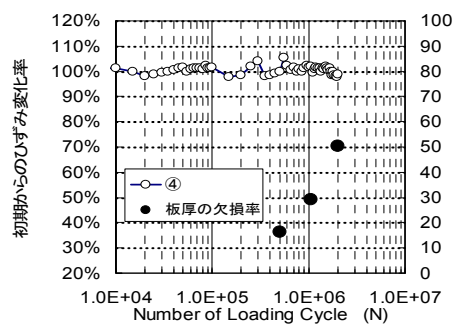
(d) D14U8



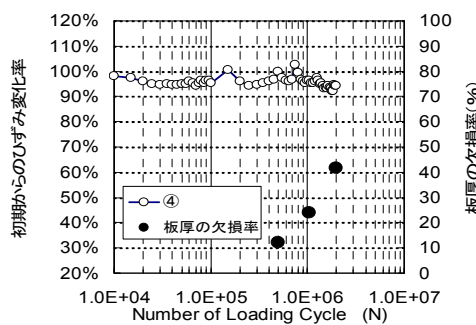
(e) D16U6



(f) D16U8

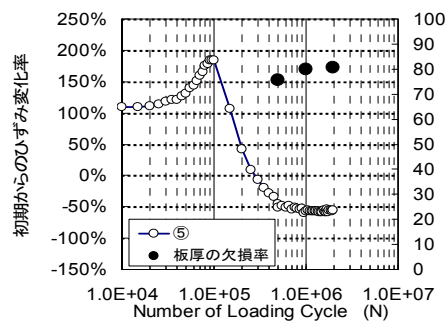


(g) D19U6

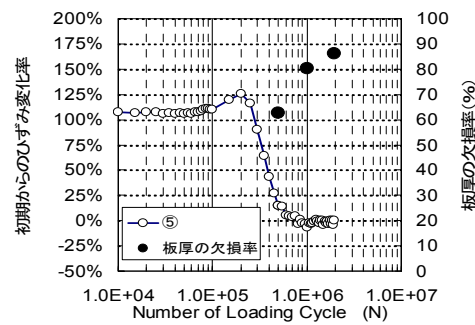


(h) D19U8

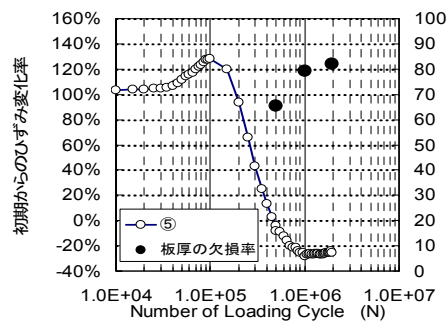
図-2.3.72 ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の推移 (ゲージ④)



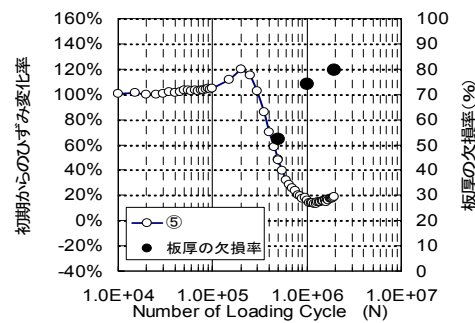
(a) D12U6



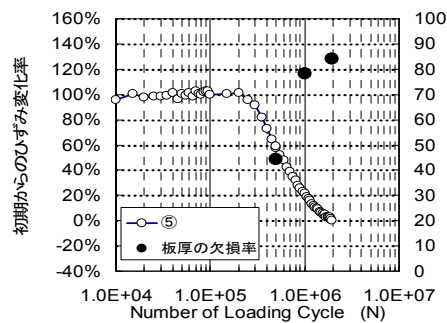
(b) D12U8



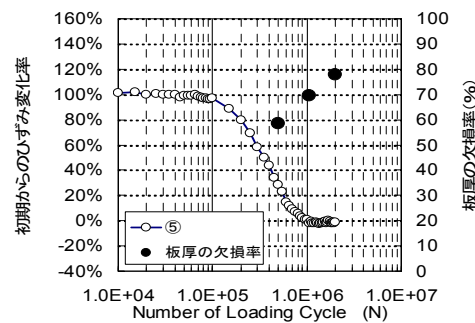
(c) D14U6



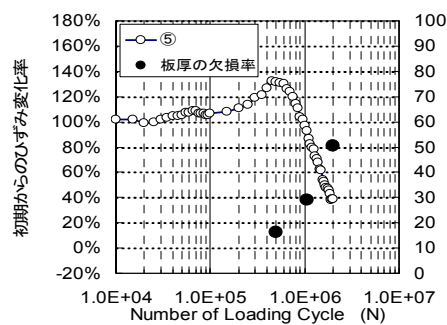
(d) D14U8



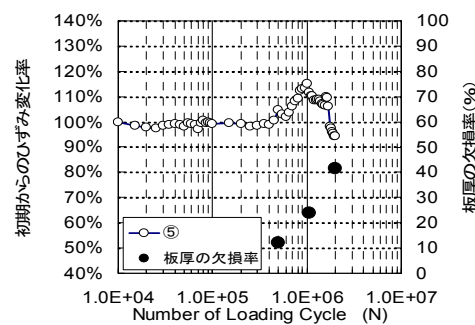
(e) D16U6



(f) D16U8

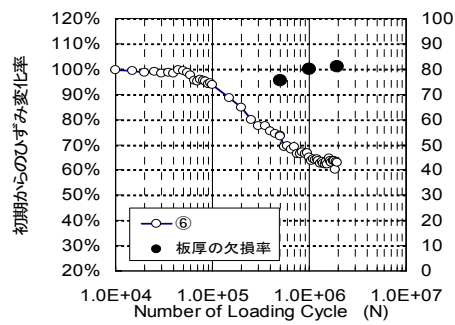


(g) D19U6

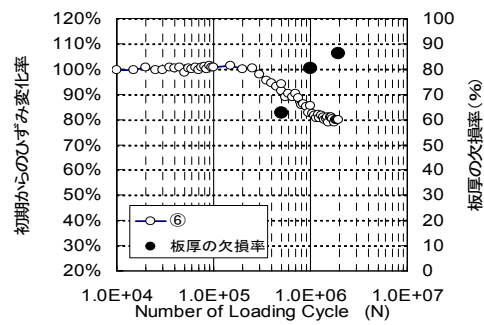


(h) D19U8

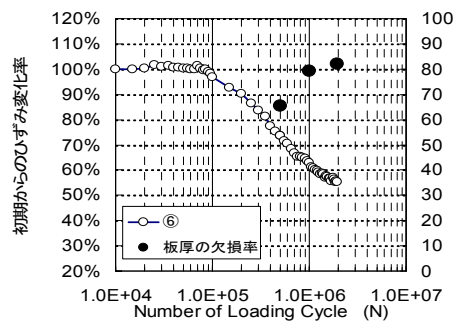
図-2.3.73 ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の推移（ゲージ⑤）



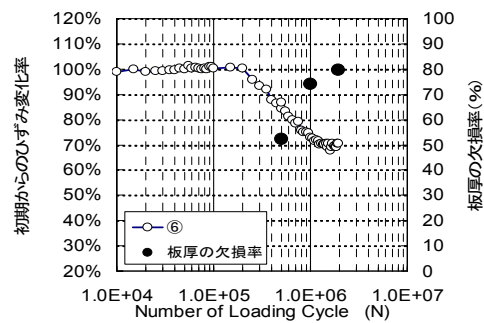
(a) D12U6



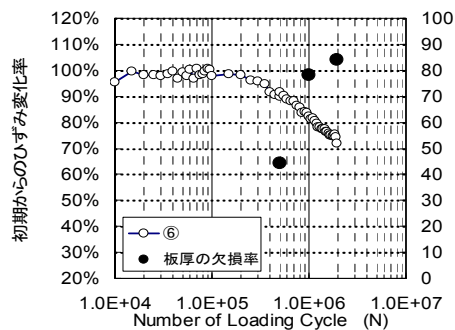
(b) D12U8



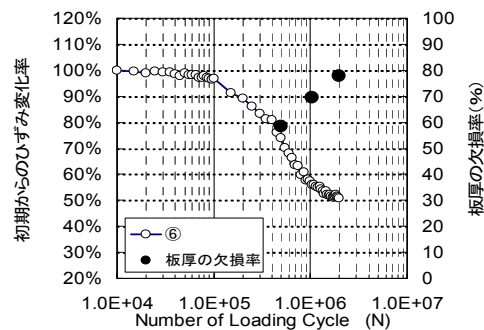
(c) D14U6



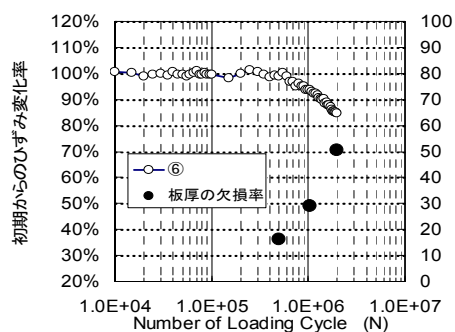
(d) D14U8



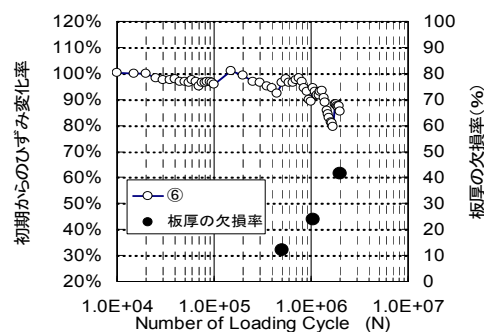
(e) D16U6



(f) D16U8

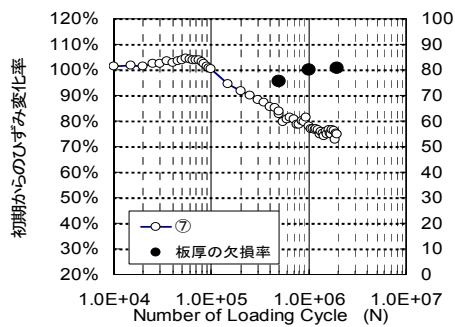


(g) D19U6

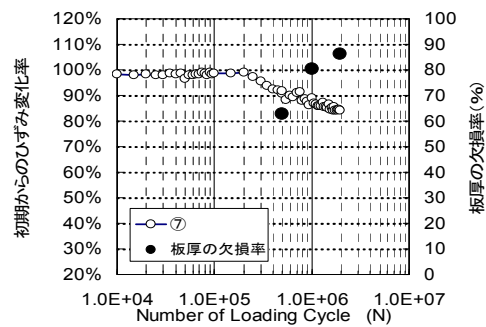


(h) D19U8

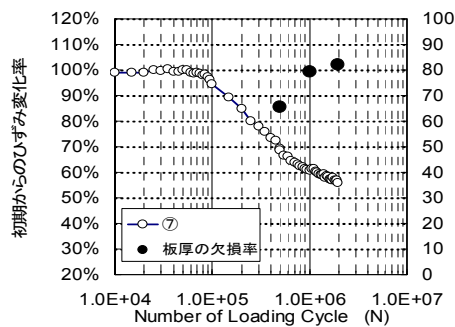
図-2.3.74 ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の推移 (ゲージ⑥)



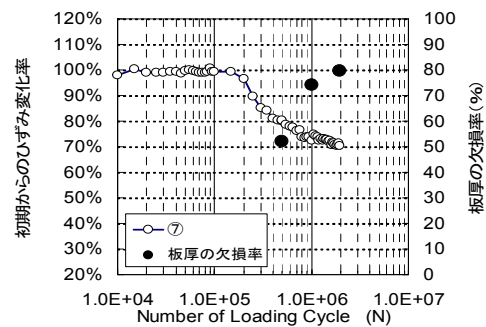
(a) D12U6



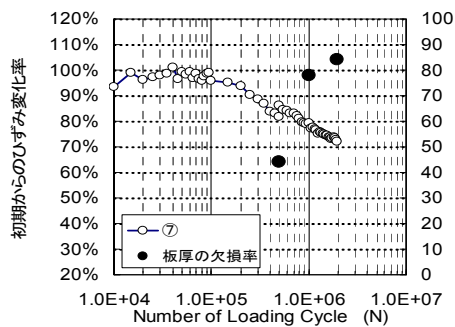
(b) D12U8



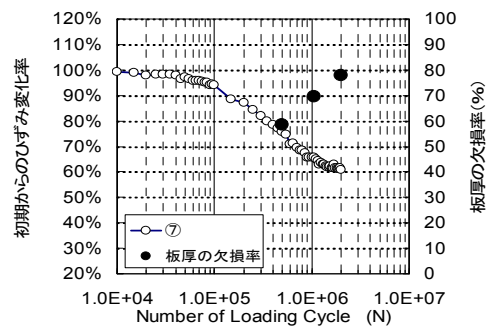
(c) D14U6



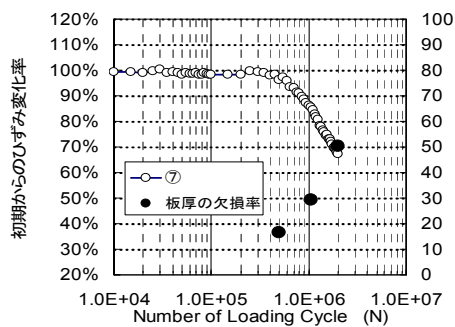
(d) D14U8



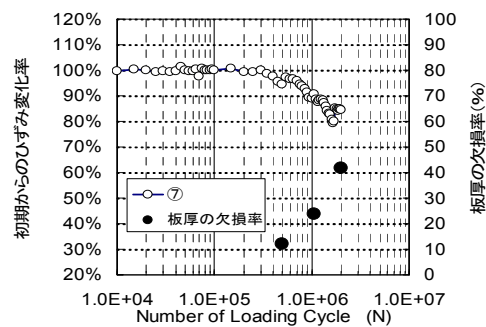
(e) D16U6



(f) D16U8

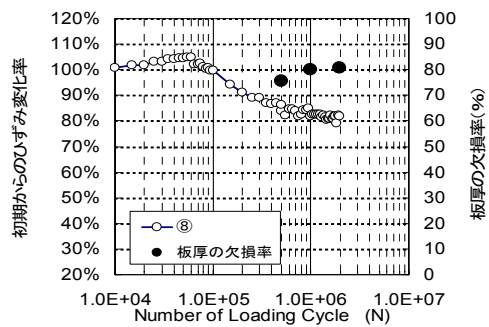


(g) D19U6

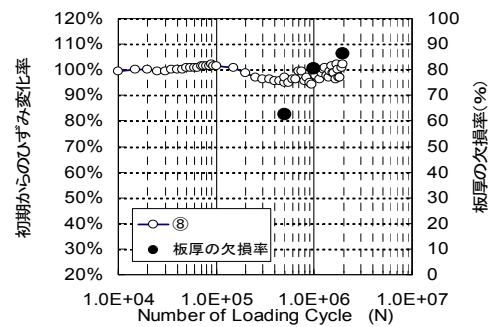


(h) D19U8

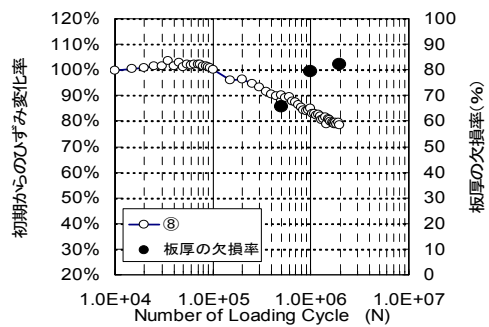
図-2.3.75 ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の推移 (ゲージ⑦)



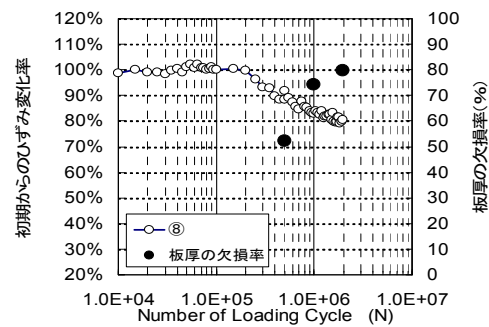
(a) D12U6



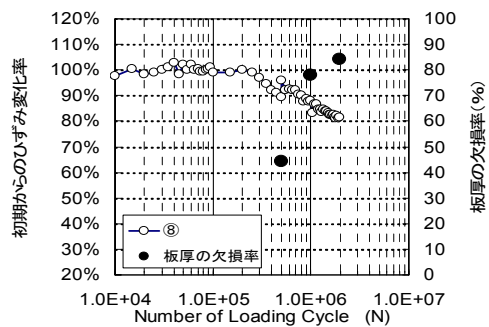
(b) D12U8



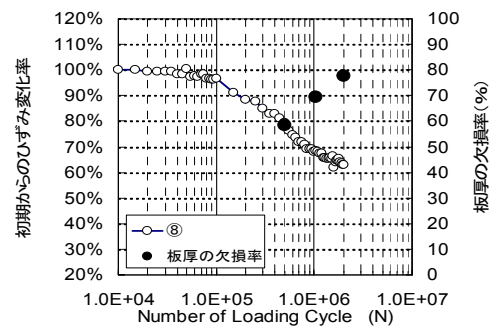
(c) D14U6



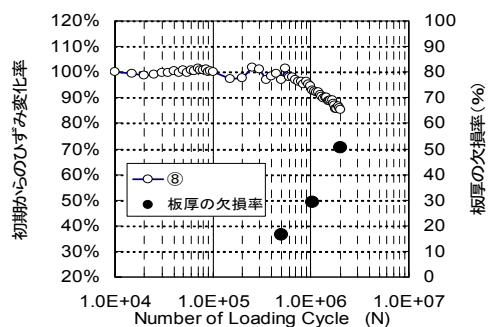
(d) D14U8



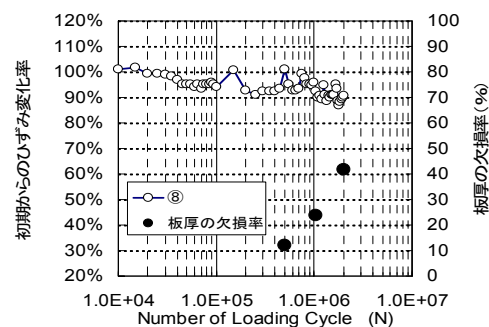
(e) D16U6



(f) D16U8



(g) D19U6



(h) D19U8

図-2.3.76 ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の推移 (ゲージ⑧)



(a) D12U6



(b) D12U8



(c) D14U6



(d) D14U8



(e) D16U6



(f) D16U8

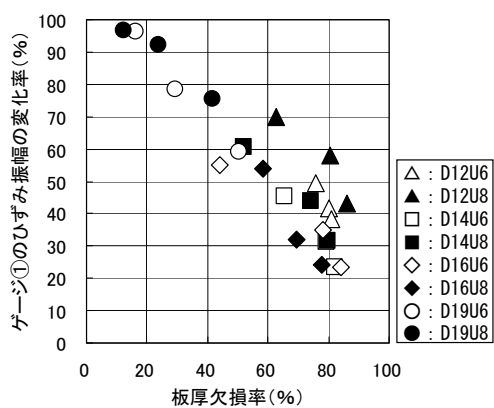


(g) D19U6

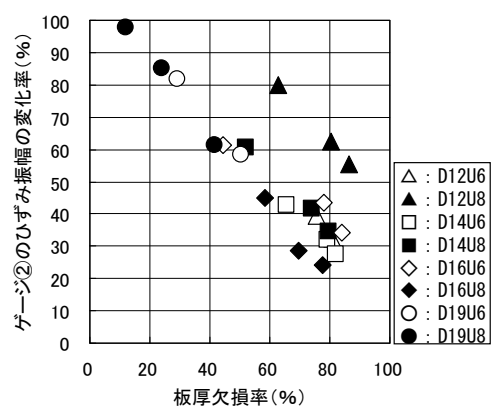


(h) D19U8

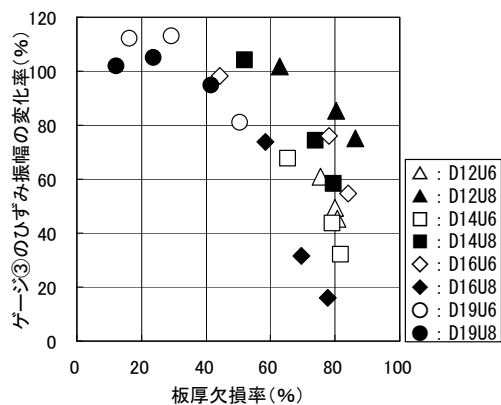
図-2.3.77 ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の推移（ゲージ⑨）



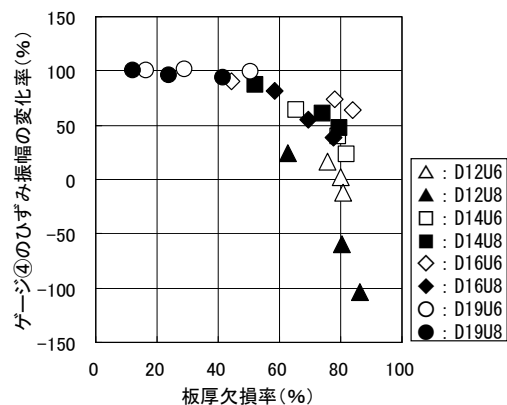
(a) ゲージ①



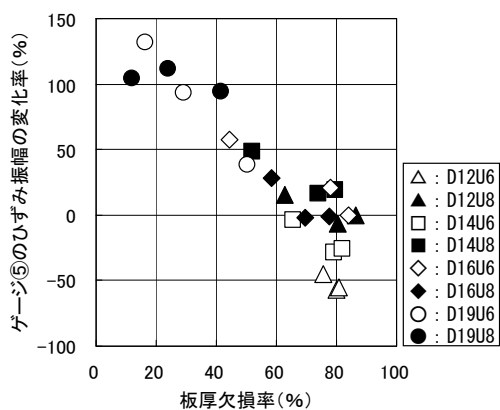
(b) ゲージ②



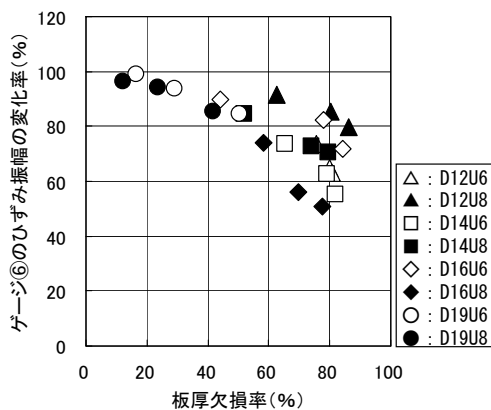
(c) ゲージ③



(d) ゲージ④

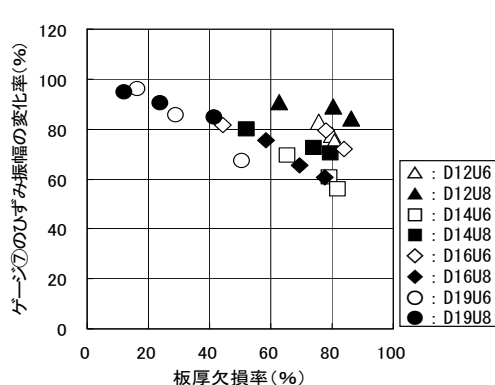


(e) ゲージ⑤

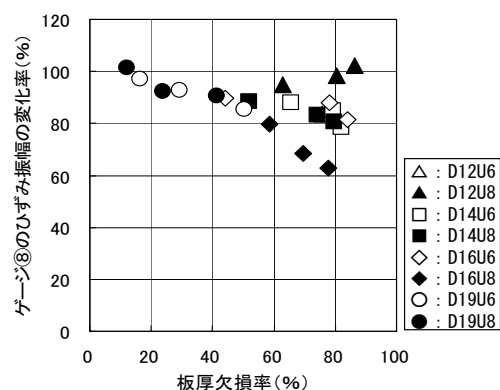


(f) ゲージ⑥

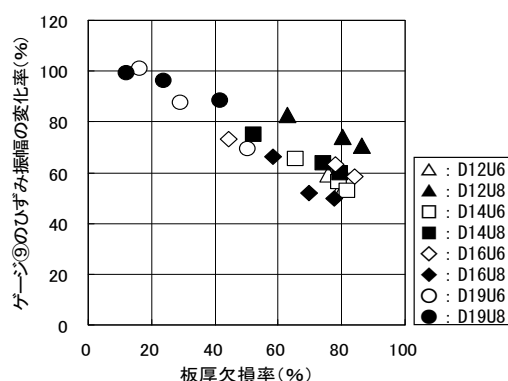
図-2.3.78(1) ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の関係(1)



(g) ゲージ⑦



(h) ゲージ⑧



(i) ゲージ⑨

図-2.3.78(2) ひずみ振幅の変化率と板厚欠損率の関係(2)

以上より、ゲージ①、②、⑤、⑥、⑦、⑨では、板厚欠損率と各ゲージの初期状態からのひずみの変化率には強い相関が見られる。

特に、ゲージ①、②、⑤、⑨では、板厚欠損率が比較的小さい領域でも、板厚欠損率に応じて初期状態からのひずみ変化率が明確に変化することから、デッキプレート貫通型き裂が発生した後、比較的に早い段階でき裂発生前との明確な差が確認できる可能性がある。

またゲージ①、②、⑨では初期状態では安定したある程度の規模のひずみ振幅が計測され、かつ板厚欠損率が 50%を越える段階では、ひずみ振幅が初期状態の 50%程度に顕著に減少することからき裂の進展状態の推定に有効な情報を与えるものと考えられる。

一方、ゲージ⑤、⑥は、初期段階よりひずみ振幅の値が小さく、その値の低減程度から板厚欠損の進展程度を特定することは困難が予想される。しかしゲージ⑤はひずみ振幅が板厚欠損率が大きくなるとその値がゼロに近似したり初期と正負が逆転することから、これにより鋼床版としての耐荷力機構に致命的な板厚欠損を生じているか否かの推定に有効と考えられる。

2.3.7 疲労試験結果のまとめ

デッキプレート板厚とトラフリブ板厚の組み合わせを変えて行った、鋼床版横リブ交差部の部分供試体による定点疲労載荷試験により得られた主な結果は以下のとおり。

- ・デッキプレート板厚（12，14，16，19mm）とトラフリブ板厚（6，8mm）の範囲では、板厚の組み合わせによらず本試験方法によって、デッキプレートとトラフリブの縦溶接継手のルート部付近を起点として、デッキプレート内部をデッキプレート貫通方向に進展するき裂が発生し、載荷回数とともに拡大した。

- ・載荷回数毎の UT によるき裂進展状況からは、載荷回数 50 万回において、デッキプレート板厚が小さい供試体では既にき裂が相当に進行した段階となっており、デッキプレート板厚が厚いケースではより初期段階となっている。また載荷を終了した 200 万回時点でデッキプレート板厚が小さい供試体ではデッキプレート貫通直前段階までき裂が進行している一方、デッキプレート板厚 19mm のケースではき裂拡大速度の鈍化前であり引き続き載荷を継続することでさらにき裂の進展が生じたものと推定される。

- ・き裂範囲の拡大傾向は、板厚の組み合わせに依らず近似しており、総じて板厚が大きい組み合わせほど同じ載荷回数段階におけるき裂進展程度が小さく、板厚増によるき裂進展抑制効果（疲労耐久性向上効果）があるものと考えられる。なおデッキプレート板厚に比べてトラフリブ板厚のき裂進展抑制効果は明確でなく、認められた場合もその程度は小さい。

- ・各ケースから、本試験で発生したデッキプレート貫通方向に進展するき裂では共通的に次のような特徴を有するものと考えられる。

- ・デッキプレート貫通に至るまで、き裂進展速度は一樣ではなく、ある段階からそれ以前よりも鈍化する。
- ・鋼床版断面内のき裂進展方向は一樣でなく、初期段階では傾きが小さく（き裂進展の比較的初期段階が計測されたと考えられる D19 からの推定）、き裂範囲の拡大とともにやや上向きに進展方向が変わり、デッキプレートの板厚の 80%程度が欠損した時点では、起終点を結ぶ線が概ね 40～60° 程度の傾きとなる。

- ・デッキプレート表面からの超音波探傷試験によるき裂範囲の推定結果は破面観察結果とよい一致を示し、特にデッキプレート内部へのき裂進展深さ（z）の結果はほぼ一致した。

このことから、条件によっては超音波探傷試験によりデッキプレート貫通き裂による板厚欠損の程度は精度よく推定できる可能性が高いと考えられる。

2.4 FEM 解析

2.4.1 解析条件

解析モデルは図-2.4.1に示すように，対称性を考慮した1/4モデルとし，8節点又は6節点SOLID要素を用いてモデル化した。材料定数は使用材料の一般的な値を採用し，鋼材の弾性係数を $2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，ポアソン比を0.3とし，载荷ゴムは弾性係数 $20 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ，ポアソン比0.49の弾性体とした。なお，溶接部について詳細にモデル化するために，溶接脚長を6mm，溶接ルート部の溶接溶け込み量をUリブ板厚の75%とした。拘束条件は，架台と下フランジ接触部を鉛直方向に固定とした。荷重条件は，载荷ゴム表面（ $200 \times 200 \text{mm}$ ）に圧力荷重 1.25N/mm^2 を载荷（一箇所当たり50kN）した。

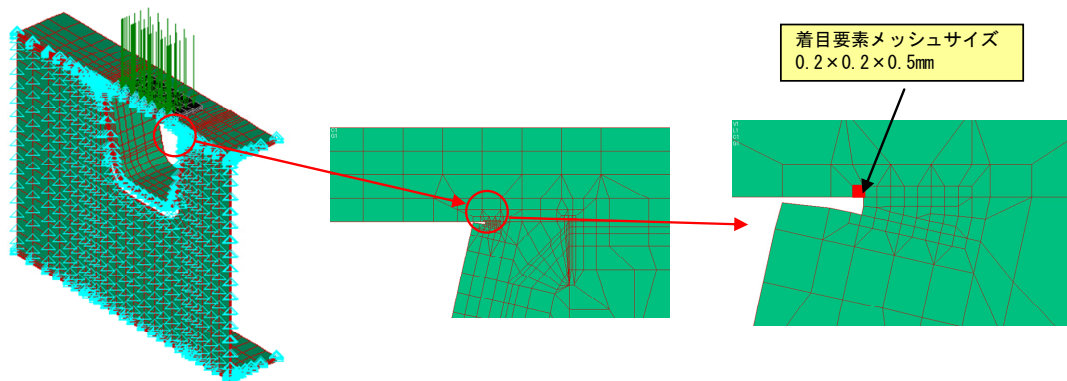


図-2.4.1 デッキプレート-Uリブ溶接部近傍のメッシュ分割と着目要素

なお，本解析にはNX NASTRAN Ver5.0を用いた。

2.4.2 疲労試験開始前のひずみ計測結果と解析結果の比較

図-2.4.2 にデッキプレート下面 U リブ内の橋直方向ひずみ，表-2.4.1 に U リブ内中央のデッキプレート下面の鉛直変位（端部に対する中央部の相対変位）の実測値と解析結果の比較を表す。解析では実際の溶接形状や初期不正等をモデル化していないことを考慮すれば，実測値と解析結果は，ひずみ，変位ともに良く一致しており，解析モデルは妥当であると考えられる。

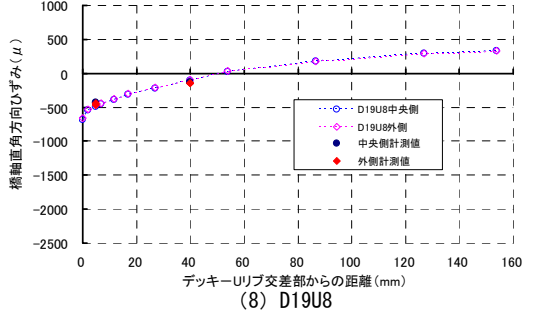
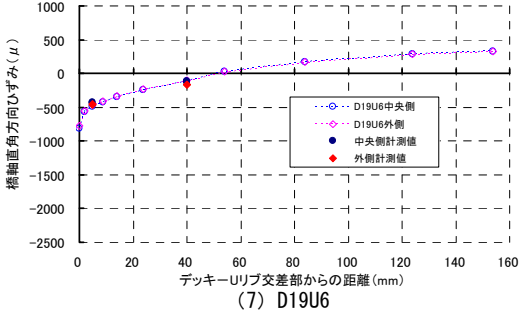
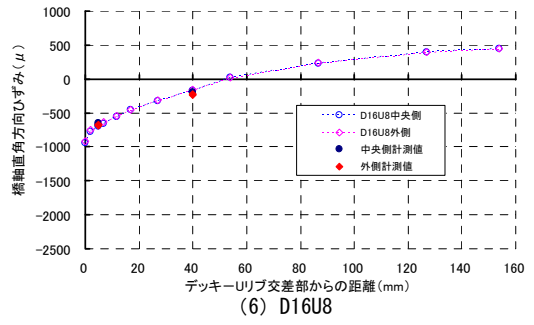
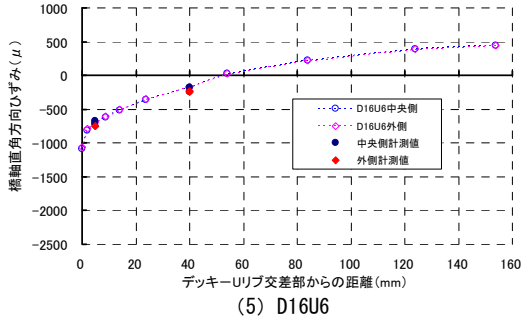
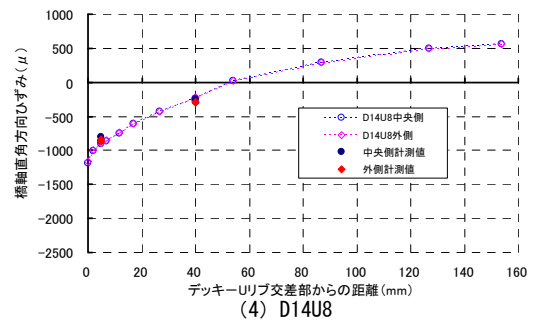
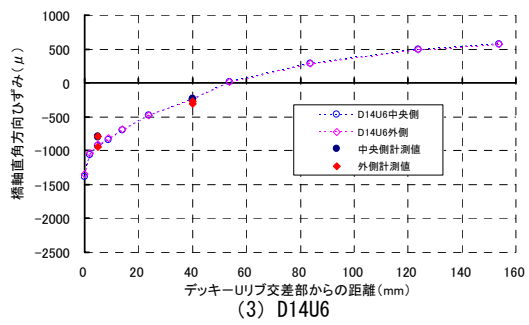
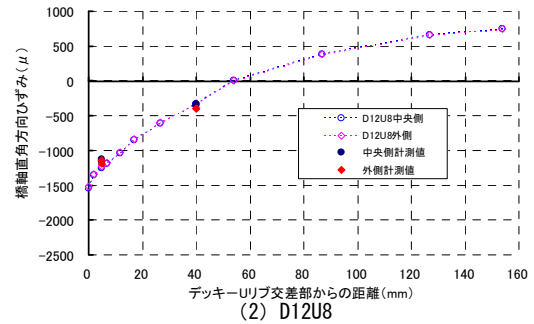
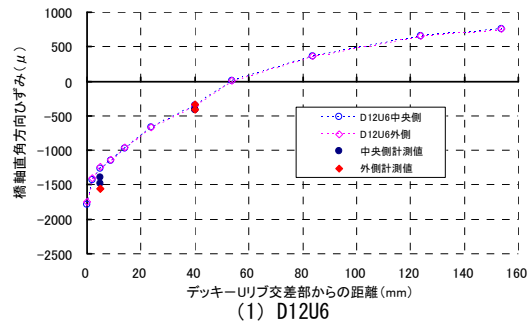
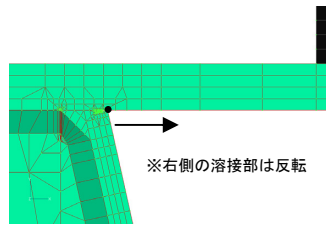
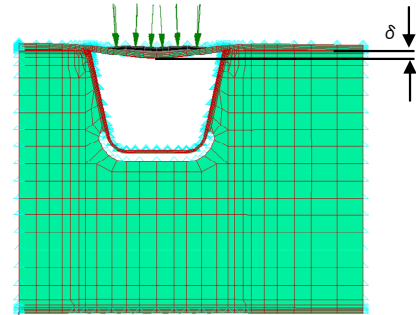


図-2.4.2 デッキプレート下面 U リブ内の橋直方向ひずみ

表-2.4.1 Uリブ内中央のデッキプレート下面の鉛直変位

	解析結果		実験結果					
	鉛直変位 (mm)	対D12U6	左側リブ			右側リブ		
			変位	対D12U6	対解析結果	変位	対D12U6	対解析結果
D12U6	-1.05	1.00	-1.20	1.00	1.14	-1.20	1.00	1.15
D12U8	-1.02	0.97	-1.14	0.95	1.11	-1.15	0.96	1.13
D14U6	-0.71	0.68	-0.75	0.62	1.05	-0.76	0.63	1.07
D14U8	-0.70	0.67	-0.77	0.64	1.10	-0.76	0.64	1.09
D16U6	-0.52	0.49	-0.53	0.44	1.03	-0.59	0.49	1.15
D16U8	-0.51	0.48	-0.61	0.51	1.20	-0.58	0.48	1.14
D19U6	-0.35	0.33	-0.40	0.34	1.16	-0.41	0.34	1.18
D19U8	-0.34	0.33	-0.39	0.33	1.15	-0.36	0.30	1.05

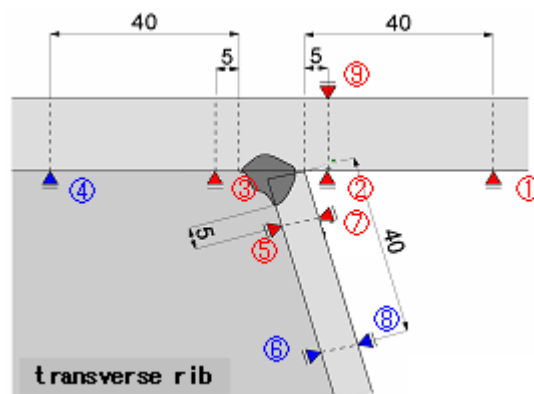


2.4.3 解析結果

表-2.4.2 に溶接ルート部の局部の橋軸直角方向応力と最小主応力、デッキプレート下面のUリブ内部のUリブ板コバ部から5mm位置と40mm位置の橋軸直角方向ひずみの一覧を示す。表中にはD12U6に対する値も示している。また、図-2.4.3は縦軸に上記の5mm位置のひずみ、横軸にルート部の最小主応力を取りグラフ化したものである。

表 2.4.2 解析結果一覧

		t _{deck} (mm)	ルート部局部応力(N/mm ²)				5mm位置ひずみ(μ)		40mm位置ひずみ(μ)	
			橋直方向応力	D12U6基準	最小主応力	D12U6基準	橋直方向ひずみ	D12U6基準	橋直方向ひずみ	D12U6基準
左 (中央側)	D12U6	12	-1053.3	1.00	-1252.0	1.00	-1264.2	1.00	-348.1	1.00
	D14U6	14	-845.7	0.80	-1012.8	0.81	-927.7	0.73	-241.5	0.69
	D16U6	16	-696.7	0.66	-841.9	0.67	-698.7	0.55	-174.0	0.50
	D19U6	19	-541.6	0.51	-661.5	0.53	-485.8	0.38	-111.3	0.32
	D12U8	12	-893.0	0.85	-1099.2	0.88	-1247.4	0.99	-331.5	0.95
	D14U8	14	-726.4	0.69	-900.4	0.72	-906.3	0.72	-229.8	0.66
	D16U8	16	-601.3	0.57	-751.3	0.60	-696.6	0.55	-165.3	0.47
右 (外側)	D19U8	19	-470.5	0.45	-593.9	0.47	-487.5	0.39	-105.6	0.30
	D12U6	12	-1034.9	1.00	-1230.3	1.00	-1244.9	1.00	-344.0	0.99
	D14U6	14	-826.9	0.80	-990.3	0.80	-909.4	0.73	-236.9	0.68
	D16U6	16	-677.2	0.65	-818.4	0.67	-681.2	0.55	-168.8	0.48
	D19U6	19	-521.1	0.50	-636.4	0.52	-468.7	0.38	-105.5	0.30
	D12U8	12	-877.4	0.85	-1080.3	0.88	-1228.4	0.99	-326.8	0.94
	D14U8	14	-710.1	0.69	-880.4	0.72	-888.3	0.71	-224.8	0.65
	D16U8	16	-584.3	0.56	-730.2	0.59	-679.1	0.55	-160.0	0.46
	D19U8	19	-452.3	0.44	-571.1	0.46	-470.3	0.38	-99.8	0.29



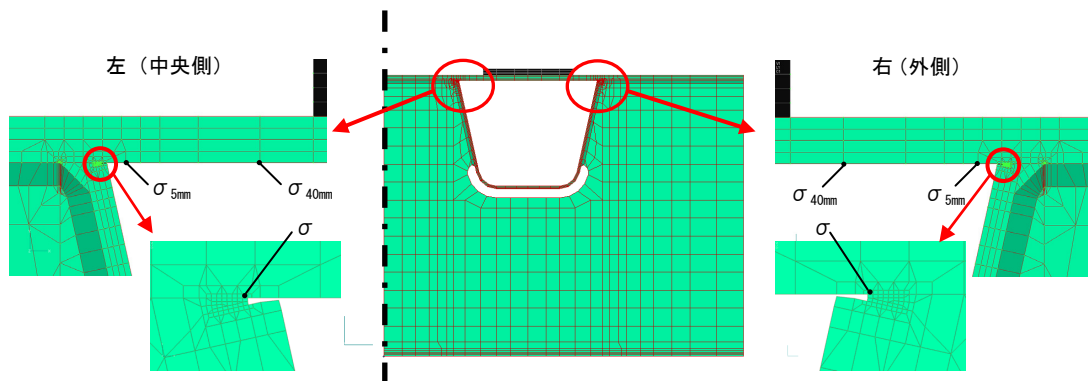


図-2.4.3 内側 5mm 位置のひずみとルート部局部応力

以上より以下のことがいえる。

- ・ 左（中央側）の溶接部のほうが 2%～4%程度，右（外側）よりも発生応力が高い。
- ・ ルート部の局部応力は，デッキプレート厚・U リブ板厚ともに大きくなると発生応力が緩和される。
- ・ D12U6 モデルを基準とした値を比較すると，ルート部の橋直方向応力と最小主応力の比率はほぼ同じである。5mm 位置と 40mm 位置の橋直方向ひずみはルート部と比較してデッキプレート厚の変化に対してはやや感度が高く，U リブ板厚の変化に対しては鈍感である。

2.5 第2章のまとめ

第2章では、道路橋に一般的に用いられる U 型のトラフリブ (U320-240) を用いた鋼床版で報告のあるデッキプレート貫通き裂に着目して、デッキプレートとトラフリブそれぞれの板厚拡大による疲労耐久性向上策について検討した。検討ではデッキプレート 12mm～19mm、トラフリブ 6mm と 8mm についてそれらを組み合わせた条件に対して横リブ交差部を対象とした定点載荷疲労試験を実施した。

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 第2章で対象とした横リブ交差部の部分模型による定点載荷疲労試験では、デッキプレートとトラフリブの板厚の組み合わせにかかわらず、いずれもデッキプレート貫通に至るものと考えられるき裂がトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手より発生し、き裂進展の特徴は共通しているものと考えられる。
- (2) デッキプレートとトラフリブそれぞれの板厚の増加に伴い、き裂発生時期や進展速度に違いがみられ、疲労耐久性は向上する傾向があるといえる。
- (3) このとき、デッキプレート板厚とトラフリブ板厚ではデッキプレート板厚の方が疲労耐久性に及ぼす影響はより支配的と考えられる。
- (4) (2)と(3)の FEM 解析による発生応力の傾向は実験と概ね整合する。

第3章 輪荷重走行試験（供試体A）

3.1 概要

デッキプレート貫通き裂の発生と進展を抑制する策として、デッキプレートの厚板化による鋼床版の疲労耐久性向上に及ぼす効果を確認する目的で、輪荷重走行試験を実施した。（社）日本橋梁建設協会（以下「橋建協」という。）が担当したのは、16mm 厚のデッキプレートを有する U リブ 1 径間分の試験体を用いた輪荷重走行試験である。この試験結果と過年度に橋建協が実施したデッキプレート厚 12mm および 14mm の輪荷重走行試験結果との比較を行うことにより、デッキプレート厚の影響を確認した。

また、本研究と過年度に実施された試験体を対象として、試験では計測できない溶接ルート部の局部応力性状を把握する目的で、FEM解析を実施した。

3.2 試験方法

3.2.1 試験機

静的多点載荷試験および輪荷重走行試験は、（株）IHI 所有のクランク式輪荷重走行試験機（写真-3.2.1、表-3.2.1 参照、神奈川県綾瀬市）を使用した。

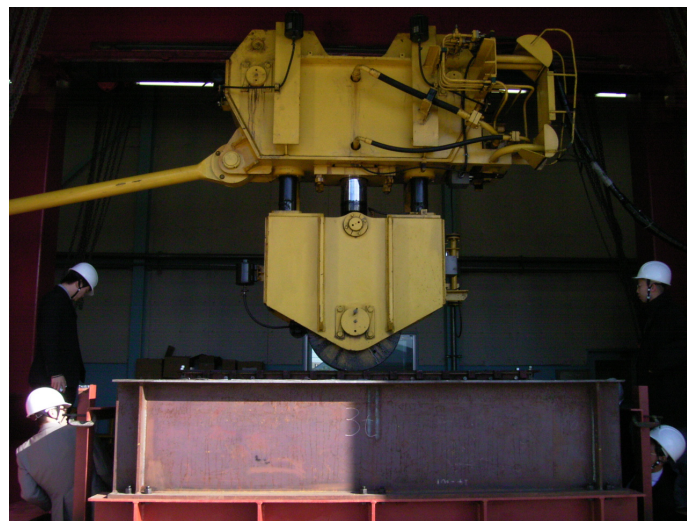


写真-3.2.1 輪荷重走行試験機

表-3.2.1 輪荷重走行試験機の仕様

項目		仕様
形状・寸法	試験装置寸法	フレーム:高さ約5.8m×長さ約8m フライホイール:直径3.5m
	供試体寸法	標準 幅2.8m×長さ4.5m×厚さ0.16~0.35m (供試体幅 最大5.3m)
	車輪の種類	鉄輪:直径750mm×幅320mm
駆動	電動機	90kW×6P×AC400V×f3×50Hz
	走行範囲	±1.15m(±0.5/±1.0/±1.25m対応可)
	フライホイール回転数	MAX 30rpm
載荷	載荷荷重	12t~50t
	シリンダーストローク	400mm

3.2.2 供試体

供試体図面を図-3.2.1 に示す。U リブの支間長は 2,500mm であり, 全て SM490 材である。供試体の構造パラメータとして, デッキプレートの板厚 16mm に対して, U リブの板厚構成を 6mm と 8mm に変化させた。

デッキプレートと U リブの溶接は, 自走式溶接機による炭酸ガスアーク溶接を行った。溶込み量が U リブ板厚の 75%以上確保されるように, 開先角度を 45° とし, 2 パスで溶接した。また, デッキプレート側止端部はグラインダ仕上げを行った。

3.2.3 試験要領

(1) 静的多点載荷試験

静的多点載荷位置図を図-3.2.2 に示し, 載荷版形状図を図-3.2.3 に示す。

橋直方向の載荷ラインは, U リブとデッキプレートの溶接部に最も高い応力が発生する場合として, U リブ (t=6mm) ウェブ直上に荷重を載荷することとした。載荷点は, 図-3.2.2 に示すように, 橋軸方向に 11 点とした。載荷荷重は, 溶接近傍の鋼材が降伏しない荷重として 118kN で一定とした。

載荷版形状については, H17 年度に橋建協が実施した輪荷重走行試験と同形状とし, 図-3.2.3 に示すように, せん断キーを介して横断方向に可動とした 2 枚の載荷版を硬質ウレタンゴムとベニヤ板で挟み込んだ形状とした。硬質ウレタンゴムについては, 接地面の面圧分布が大型車後輪のダブルタイヤに近くなるように, 200×10×175mm のものを横断方向に 150mm 間隔で並べたものを使用した。

静的載荷試験は, 図-3.2.3 に示す載荷版ブロックの敷き並べ方の違いにより, 下記の 2 通りの方法により実施した。なお, ①の方法については, 図-3.2.2 に示す, C, G, K の 3 点の載荷時に感圧紙を用いて, 接地面の面圧分布も合わせて測定した。感圧紙は超低圧タイプ(感度 0.5~2.5MPa)を使用した。

- ① 載荷版ブロック 1 組に, 鉄輪で鉛直荷重を油圧により定点載荷する方法 (写真-3.2.2)
- ② 載荷版ブロックを橋軸方向に 13 組敷き並べて, 1 枚の敷鋼板上から, 鉄輪で鉛直荷重を油圧により定点載荷する方法 (写真-3.2.3)



写真-3.2.2 載荷版ブロックごとでの静的多点載荷

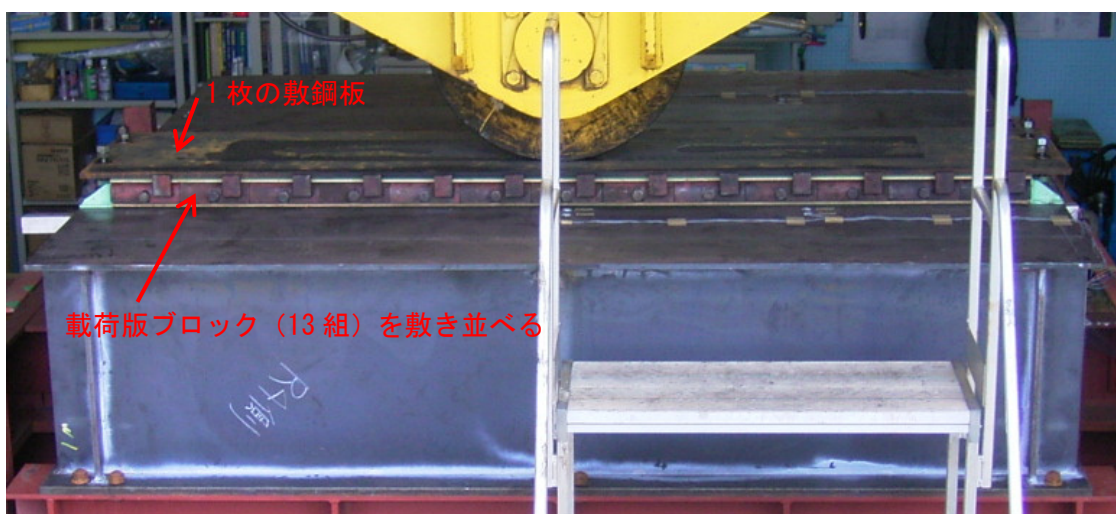


写真-3.2.3 載荷版ブロック（13組）を敷き並べて1枚の敷銅板上からの静的多点載荷

(2) 輪荷重走行試験

静的多点載荷後に、輪荷重走行試験を実施した。載荷荷重は 118kN とし、載荷位置は、静的多点載荷時と同様、U リブ ($t=6\text{mm}$) ウェブ直上とし、載荷版は写真-3.2.3 に示すように、載荷版ブロックを橋軸方向に 13 組並べ、走行範囲が 2,000mm となるようにした(図-3.2.2, 図-3.2.3)。載荷速度は片道 40 回 (往復 20 回) /分で、走行回数は片道 300 万回 (往復 150 万回) まで実施した。なお、片道 5 万回毎に走行範囲中央への静的載荷を行い、静的なひずみ・たわみデータの計測を行った。

3.2.4 計測項目

表-3.2.2 計測項目 CH 対応表

CH番号	記号	タイプ	位置	CH番号	記号	タイプ	位置
0	荷重			39	ADL-4-oL	1軸	デッキ下面
1	ADL-3-o	1軸	デッキ下面	40	AR4L-o	1軸	Uリブ側面
2	BDL-3-o	1軸		41	BR4L-o	1軸	
3	AR3R-ou	1軸	Uリブ側面	42	ADU-4-o	1軸	デッキ上面
4	BR3R-ou	1軸		43	BDU-4-o	1軸	
5	AR3R-oc	1軸	デッキ下面	44	ADU-4-i	1軸	
6	ADL-4-o	1軸		45	BDU-4-i	1軸	
7	AR4L-ou	1軸	Uリブ側面	46	BDL-4-o	1軸	デッキ下面
8	AR4L-oc	1軸		47	BR4L-ou	1軸	Uリブ側面
9	—	—	—	48	ADL3-C1	集中	デッキ下面
10	ADL-4-X	2軸	デッキ下面	49	ADL3-C2		
11	ADL-4-Y			50	ADL3-C3		
12	ADL-5-X	2軸		51	ADL3-C4		
13	ADL-5-Y			52	ADL3-C5		
14	ADL-6-X	2軸		53	AR3R-C1	集中	Uリブ側面
15	ADL-6-Y			54	AR3R-C2		
16	ADL-7-Y	1軸	55	AR3R-C3			
17	AR3L-N-X	3軸	56	AR3R-C4			
18	AR3L-N-Y		Uリブ側面	57	AR3R-C5		
19	AR3L-N-Z			58	ADL4-C1	集中	デッキ下面
20	AR3R-N-X	3軸		59	ADL4-C2		
21	AR3R-N-Y			60	ADL4-C3		
22	AR3R-N-Z		61	ADL4-C4			
23	AR3B-X	1軸	Uリブ下面	62	ADL4-C5	集中	Uリブ側面
24	AR4L-N-X	3軸	Uリブ側面	63	AR4L-C1		
25	AR4L-N-Y			64	AR4L-C2		
26	AR4L-N-Z			65	AR4L-C3		
27	AR4B-X	1軸	Uリブ下面	66	AR4L-C4	変位計	
28	ADL-3-i	高温	デッキ下面	67	AR4L-C5		
29	BDL-3-i		Uリブ内面	68	DS-D1		
30	AR3R-i			69	DS-D2		
31	BR3R-i	1軸	デッキ下面	70	DS-D3		
32	ADL-3-or			71	DS-D4		
33	AR3R-o		Uリブ側面	72	DS-D5		
34	BR3R-o	73		DS-D6			
35	ADL-4-i	高温	デッキ下面	74	DS-R1		
36	BDL-4-i		75	DS-R2			
37	AR4L-i	Uリブ内面	76	DS-R3			
38	BR4L-i		77	DS-R4			

*黄色着色部のCHについては、動的計測計により、動的なひずみ・たわみデータの計測も行った。

計測装置設置位置図を図-3.2.4～3.2.7 に示す。着目する断面は、断面 A（支間 1/2）および断面 B（支間 1/4）とした。ひずみゲージは、ゲージ長さ 3mm のものを使用した。計測項目（ひずみ・たわみデータ）の CH 対応表を表-3.2.2 に示す。計測は基本的に静的なひずみ・たわみデータであるが、CH 番号 1～4, 6～7, 69, 72 の 8CH については、動的計測計を用いて動的なひずみおよびたわみデータについても計測（周波数設定はサンプリングを 150Hz, フィルタリングを 10Hz とした）を行った。

3.2.5 非破壊検査

鋼床版デッキプレートと U リブ溶接部におけるルート部からデッキプレート方向に進展するき裂の成長をとらえるために、超音波による計測を実施した。適用した超音波探傷試験

は、①クリーピング波法、②表面SH波法、③端部エコー法、④垂直探傷法とした。①、②は主にき裂の有無を判定するために用いた。まず、①クリーピング波法により、各溶接線の全長を走査するとともに、②表面SH波により一定間隔(10cm)毎の定点およびクリーピング波法で異常が見つかった部位を検査した。その後、①クリーピング波法、②表面SH波法により、き裂の深さが2mm以上と判断された部位に対して、収束型斜角探触子で屈折角70度のものを用いて③端部エコー法によりき裂深さを計測した。④垂直探傷法は、溶接ビード内部を進展するき裂が発生した場合に適用するものとし参考とした。

非破壊検査を適用する溶接線は、輪荷重直下の溶接線 R3L と、隣接する溶接線 R3R, R4R の3溶接線とした。また、計測する範囲は輪荷重の走行範囲 2m を 20 等分し、10cm 間隔に区間を分けて行った。

検査を行う載荷回数は、初期状態、40 万回、80 万回、100 万回、125 万回、150 万回、200 万回、300 万回の合計 8 回とした。

超音波探傷検査の詳細については、付録の「鋼床版デッキプレート-U リブ溶接部の超音波探傷検査要領」を参照されたい。

3.2.6 コア抜き調査

輪荷重走行試験終了後の鋼床版試験体からコアサンプルを採取し、コアの断面マクロ・ミクロ組織観察を実施した。コアサンプルは5箇所から採取しており、それぞれのコアサンプルの採取位置を表-3.2.3 に示し、コアの採取状況を写真-3.2.4~3.2.6 に示す。なお、コアブローチは、外径 40mm×内径 32mm (抜き取られるコアの外径は 32mm) 深さ 35mm を用いた。

(1) コア外周マクロ観察

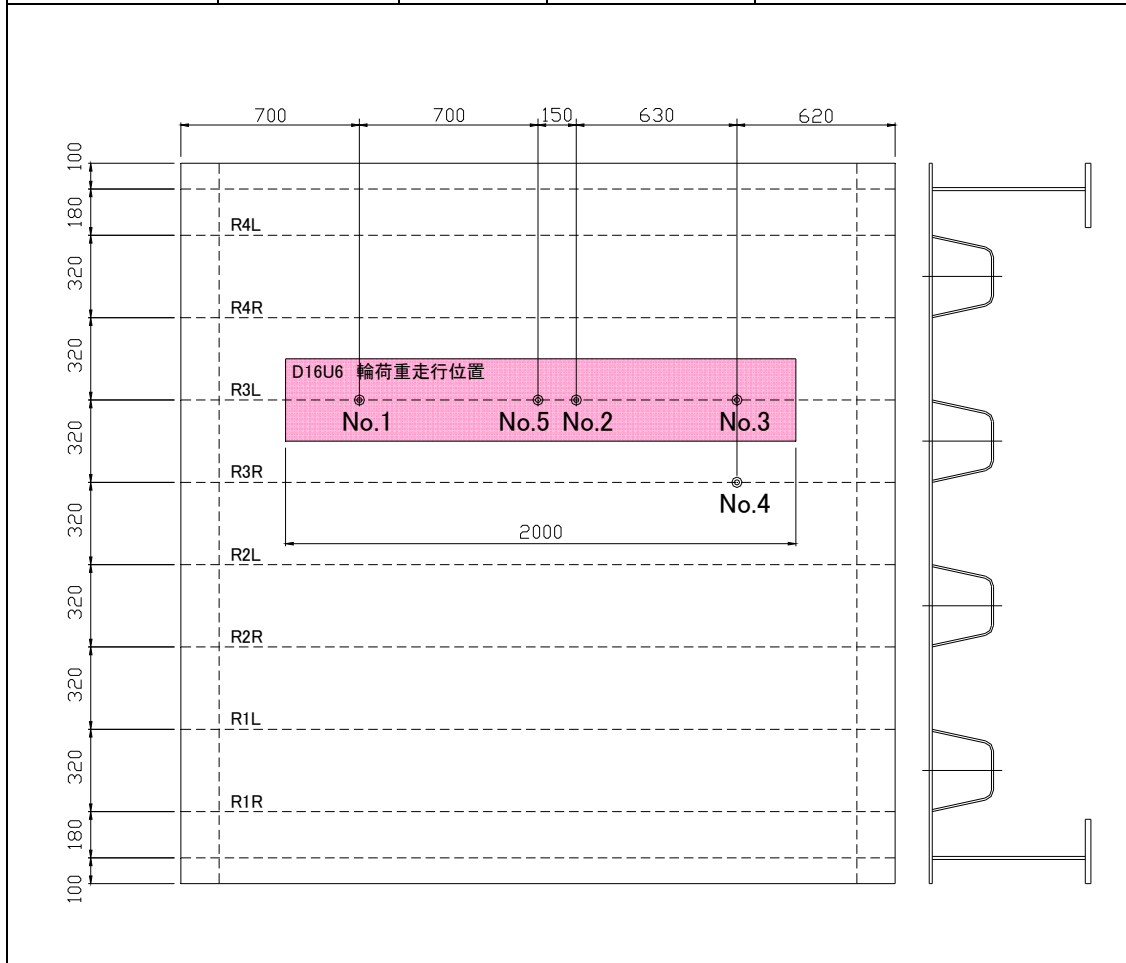
割れ発生部位の溶接状況を調べるため、コア外周のマクロ組織観察を実施した。コア外周は、湿式研磨にて#100~#1000 までの研磨を行った後、1 μ m のダイヤモンドペーストで鏡面研磨を施した。鏡面研磨の後、3%ナイトル溶液を用いて溶接金属部の組織を現出して撮影を行った。抜き取られたコアサンプルの割れ発生状況を観察するため、磁粉探傷試験を実施した。磁粉探傷試験は極間法を用いて湿式蛍光磁粉探傷試験を行った。

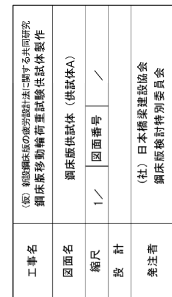
(2) コア断面組織観察

割れ発生状況を観察するため、コア断面の組織観察を行った。断面の組織観察はコアサンプルを湿式切断機を用いて2分割し、切断されたサンプルの片方を樹脂に埋め込み、湿式研磨にて#100~#1000 までの研磨を行った後、1 μ m のダイヤモンドペーストで鏡面研磨を施し、さらに0.25 μ m のアルミナ粉末によって詳細な研磨を施した。研磨の後、3%ナイトル溶液を用いて組織を現出してマクロ組織およびミクロ組織観察を行った。なお、観察倍率は、断面マクロ組織観察の場合は10倍、断面ミクロ組織観察の場合は100倍とした。

表-3.2.3 コア採取位置

対象溶接線	コア記号	採取位置		採取目的
		超音波 測定番号	採取位置 (mm)	
R3L	No.1	4	700	健全部
	No.2	12～13	1550	き裂検出部
	No.3	18～19	2180	き裂検出部（仮付溶接）
	No.5	11	1400	センターライン
R3R	No.4	18～19	2180	き裂検出部（仮付溶接）



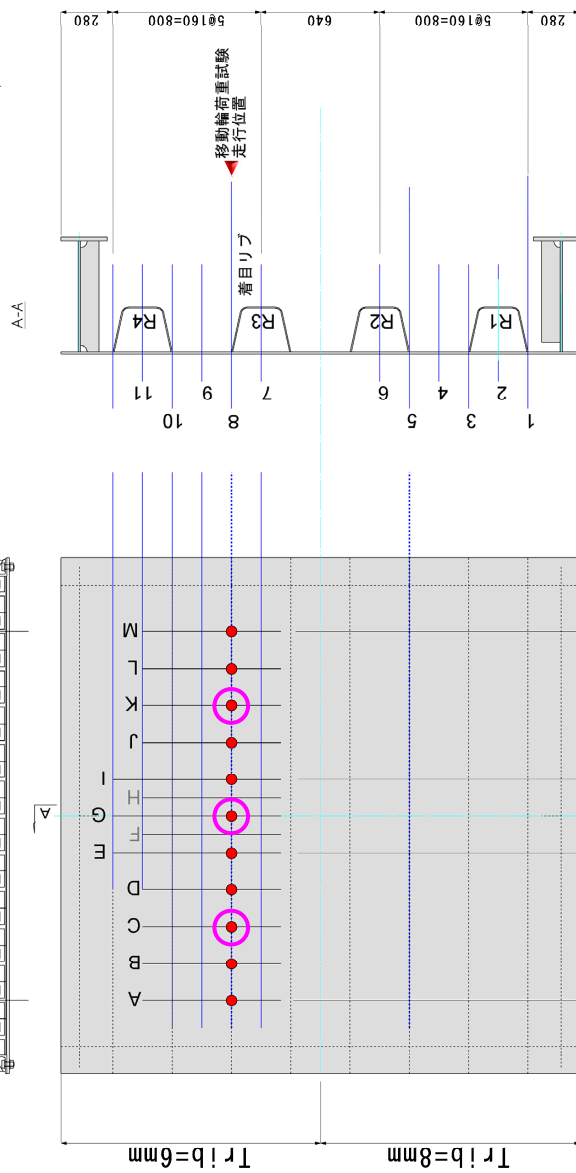


注＜

- 原料の種類は原料表に示す。
- 特記なきものは、溶剤則ち長は6mmとする。
- 力ケラフは、溶剤溶融後、15mmとする。
- 其試体は、溶剤を除去し、溶剤を溶融後、15mmとする。
- 力ケラフは、溶剤を溶融後、15mmとする。
- 防錆処理は、溶剤を溶融後、15mmとする。

図-3.2.1 鋼床版供試体Aの寸法及び諸元

【載荷点名称】
・載荷点の名称は、レーン数字＋載荷断面とする。
・(例) 載荷点名12C



＜静的載荷試験要領＞

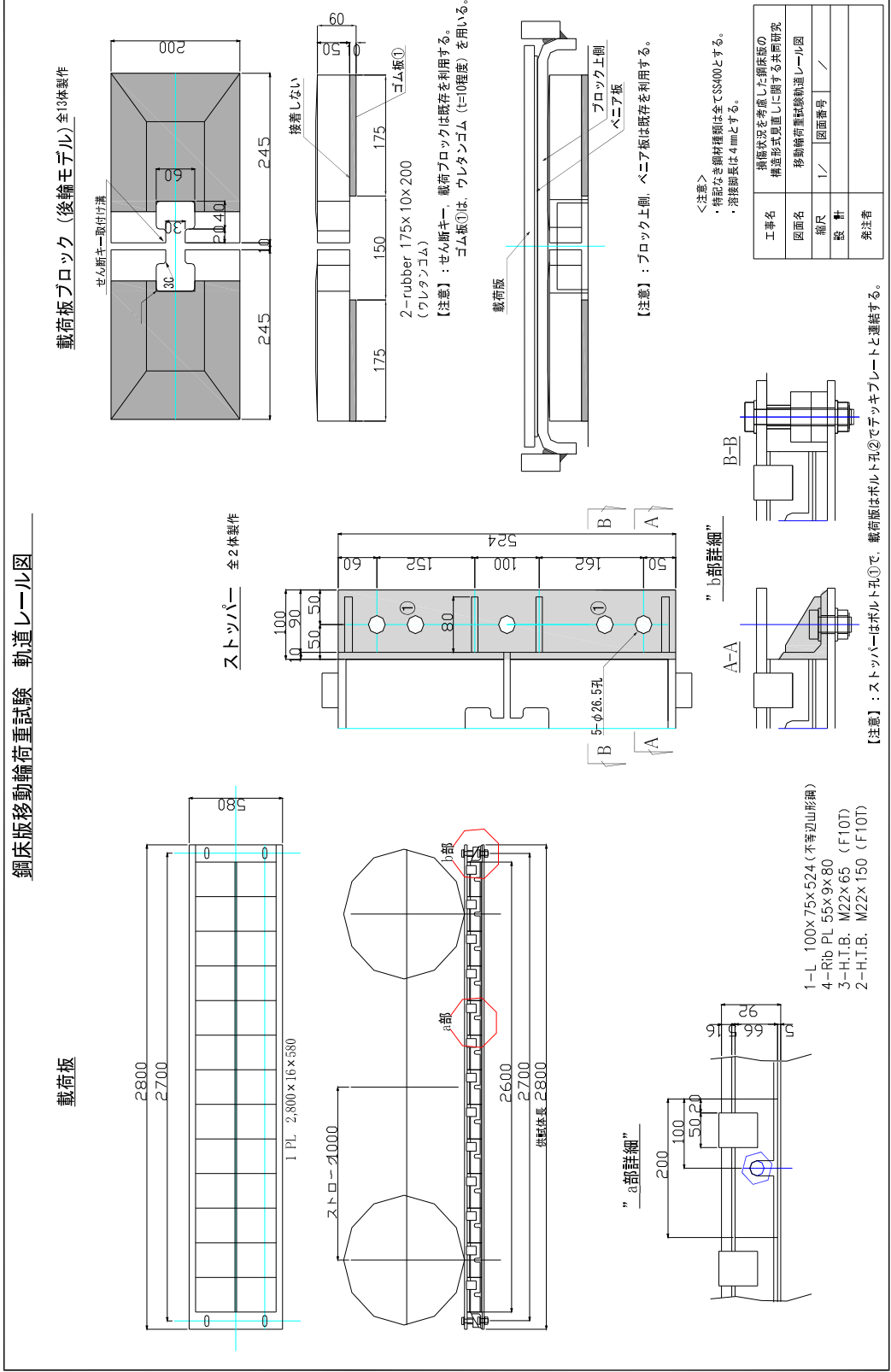
- ・最大載荷荷重は118kN（12tonf）とする。
- ・橋軸方向の移動は、輻重台車を移動させる。
- ・横断方向の移動は、供試体をつしーム上で移動させる。

<凡例>

●：載荷点（輪の中央位置）

工事名	橋樑状況調査を有した側柱の 標準断面位置に関する共同研究			
図面名	供試体A	静的載荷試験	載荷位置	
縮尺	1/	図面番号	/	
設計				
標準 断面				

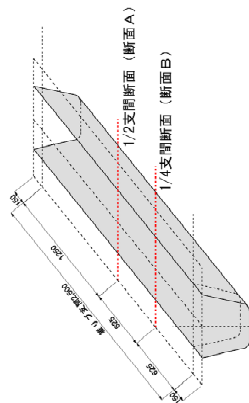
図-3.2.2 静的載荷試験の載荷位置



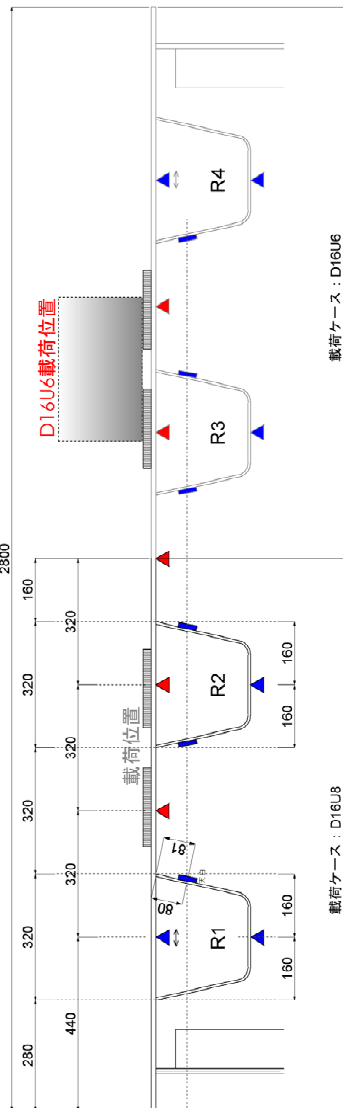
鋼床版移動輪荷重試験 センサー設置位置 (T16)
【供試体 A】

●一般部ひずみゲージ (断面A)

1) 貼付位置

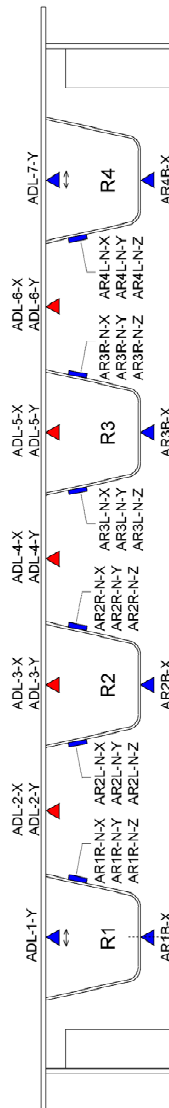


下矢印は損断方向が密度方向であることを示す。
矢印のない場合は、横断方向とする。



※左右対称の位置に貼付する

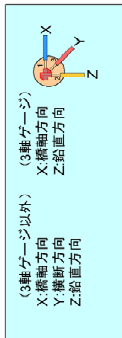
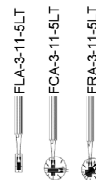
2) 名称



3) センサー類 員数

供試体 1 体あたり

- ▲ : 1軸ゲージ (FLA-3-11-5LT) × 6枚
- ▲ : 2軸ゲージ (FCA-3-11-5LT) × 5枚
- ▲ : 3軸ゲージ (FRA-3-11-5LT) × 6枚



工事名	損傷状況を表した引張板の 構造部位置に貼付する共同研究		
図面名	供試体A 計測センサー取り付け位置		
図尺	1/	図面番号	/
配	計		
製			

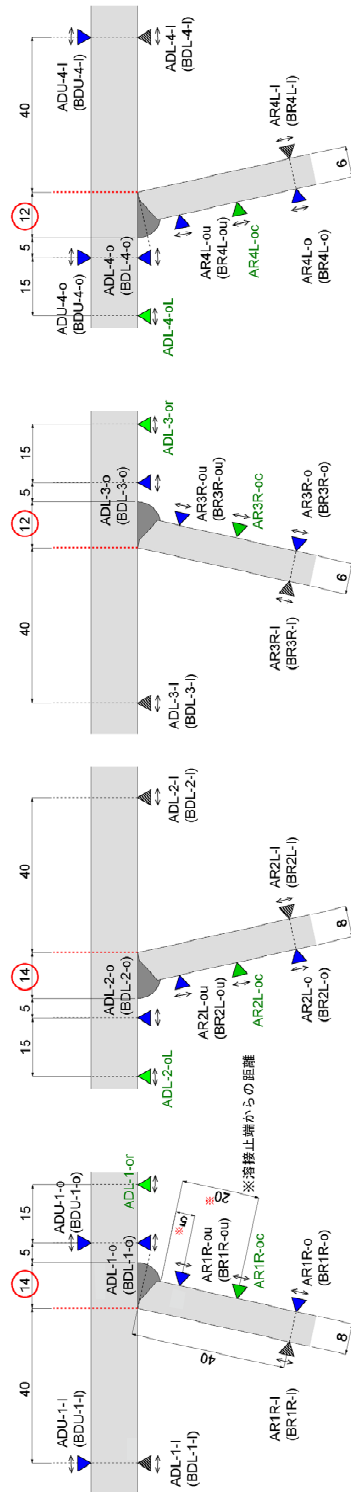
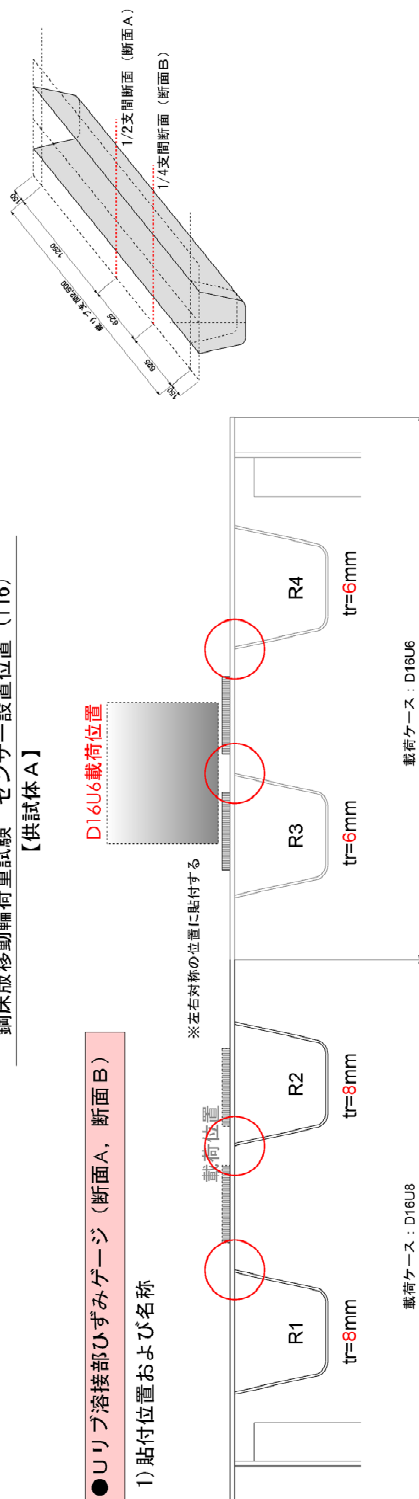
図-3.2.4 鋼床版供試体A センサー設置位置(1)

鋼床版移動輪荷重試験 センサー設置位置 (T16)

【供試体 A】

● Uリブ溶接部ひずみゲージ (断面A, 断面B)

1) 貼付位置および名称



2) センサー類 員数

供試体 1 体あたり

▲ : 1軸ゲージ	(FLA-3-11-5LT) × 32枚
▲ : 1軸ゲージA断面のみ追加分	(FLA-3-11-5LT) × 8枚
▲ : 高温用ゲージ	(ZFLA-3-550-11-4FA-5LT) × 16枚

【注意】

- 1) 本図に示すゲージは全て膨張方向を横断方向とする。
- 2) Uリブ内部のひずみゲージは供試体組み立て前に貼付する。
- 3) Uリブ溶接時は、ひずみゲージに陰影響を与えないよう留意すること。
- 4) 追加ゲージは、A断面にのみ施工すること。

工事名	鋼床版移動輪荷重試験と鋼床版の構造形式変更に伴う共同研究
図面名	供試体A 計測センサー取付け位置
縮尺	1/
図面番号	1/
設計	
発注者	

図-3.2.5 鋼床版供試体Aセンサー設置位置 (2)

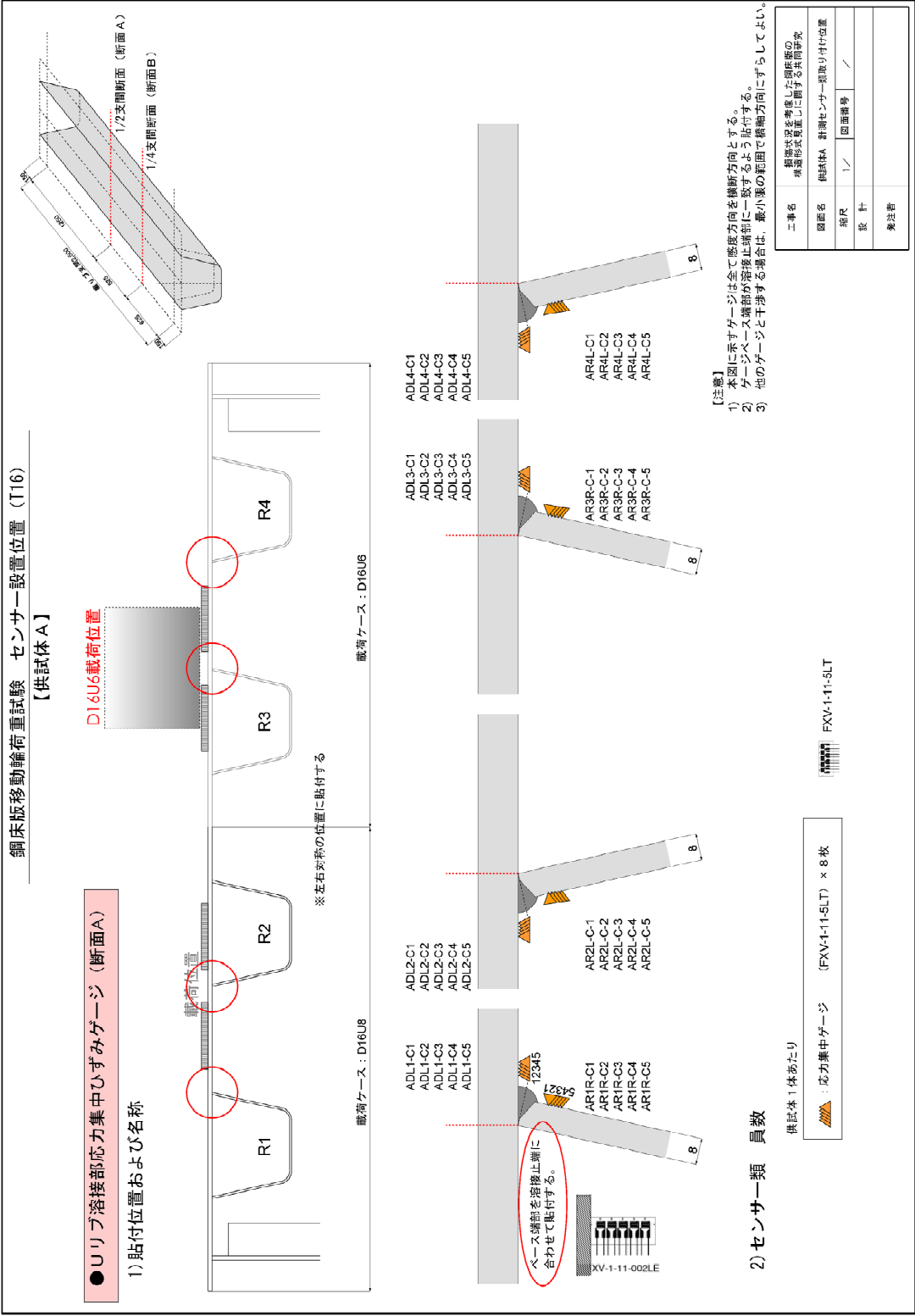


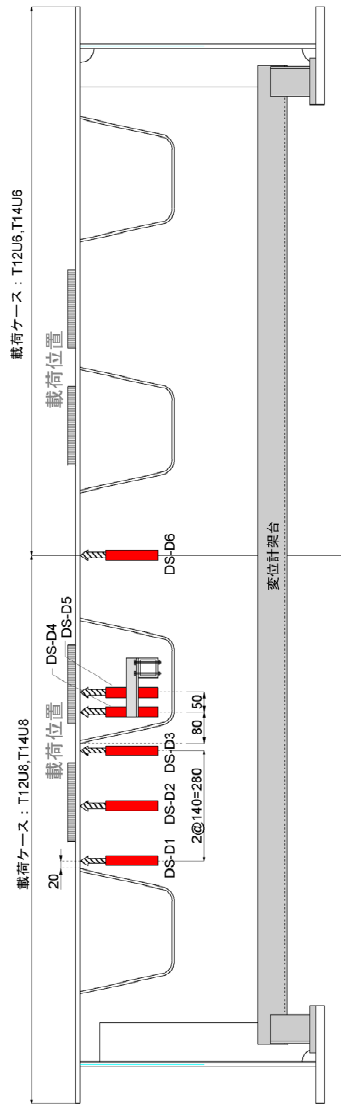
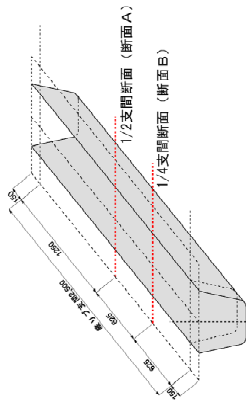
図-3.2.6 鋼床版供試体 A センサー設置位置(3)

鋼床版移動輪荷重試験 センサー設置位置 (T16)

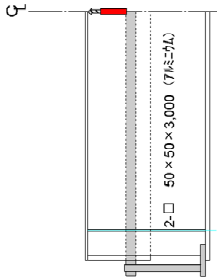
【供試体A】

●鋼床版鉛直変位 (断面A)

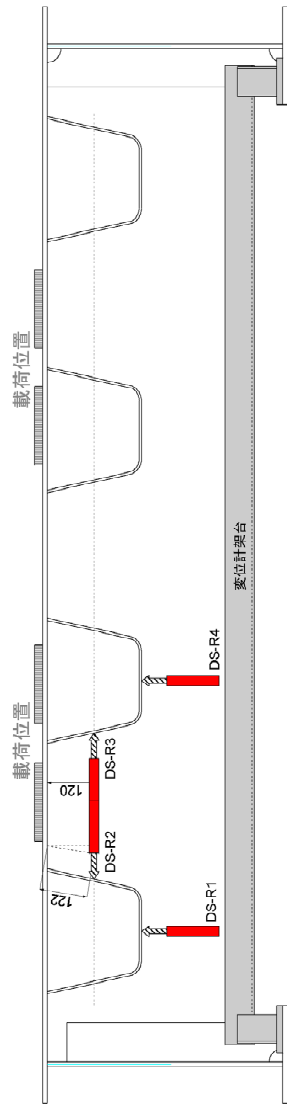
1) 計測位置および名称



Uリブ内変位計架台取付図



Uリブ内部の変位計は、アルミニウム製の角材により架台を製作し取り付ける。



2) センサー類 員数

供試体1体あたり

●変位計 (CDP-25) × 12台
(Uリブ内の変位計は載荷ケース毎の流用はしない)



CDP-25

【注意】

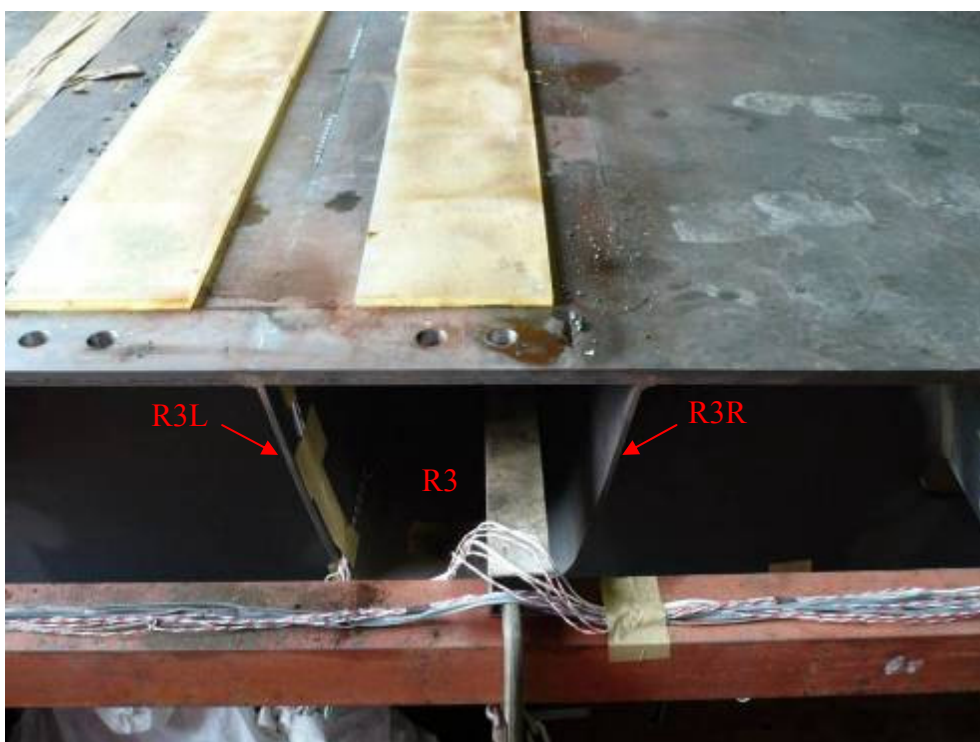
- 1) 変位のゼロ点は主桁下フランジからとるものとする。
- 2) Uリブ内部の変位計以外は、試験ケース毎に対象に設置しない。
- 3) 他の変位計やゲージ類と干渉する場合は、最小限の範囲で循環方向にすらすらしてよい。

工事名	橋梁はるを修繕した御供所の構造形式を調査しに調査を共同研究		
図面名	供試体	計測センサー取り付け位置	
縮尺	1/	図面番号	/
数	計		
集計書			

図-3.2.7 鋼床版供試体Aセンサー設置位置(4)



(a) デッキ上面側



(b) 着目リブ(R3)部

写真-3.2.4 鋼床版試験体の外観



(a) 切削油噴霧状況



(b) コア切削状況

写真-3.2.5 コア抜き作業状況



(a) コア切削完了（デッキ上面側より）



(b) コア切削完了（デッキ下面側より）

写真-3.2.6 コア抜き完了

3.3 試験結果

3.3.1 静的多点载荷結果

(1) 静的多点载荷試験：方法①（载荷ブロック 1 組毎の载荷）

図-3.2.2 に示す橋軸方向の 11 点に静的多点载荷を行ったときの、着目溶接部における横断方向ひずみの橋軸方向影響線を図-3.3.1 に示す。図-3.3.1 より、輪荷重载荷直下の溶接止端から 5mm 位置のデッキ橋直方向応力のひずみ範囲は 1/2 支点 (ADL-3-o), 1/4 支点 (BDL-3-o) で各々, 786, 809 μ であった。

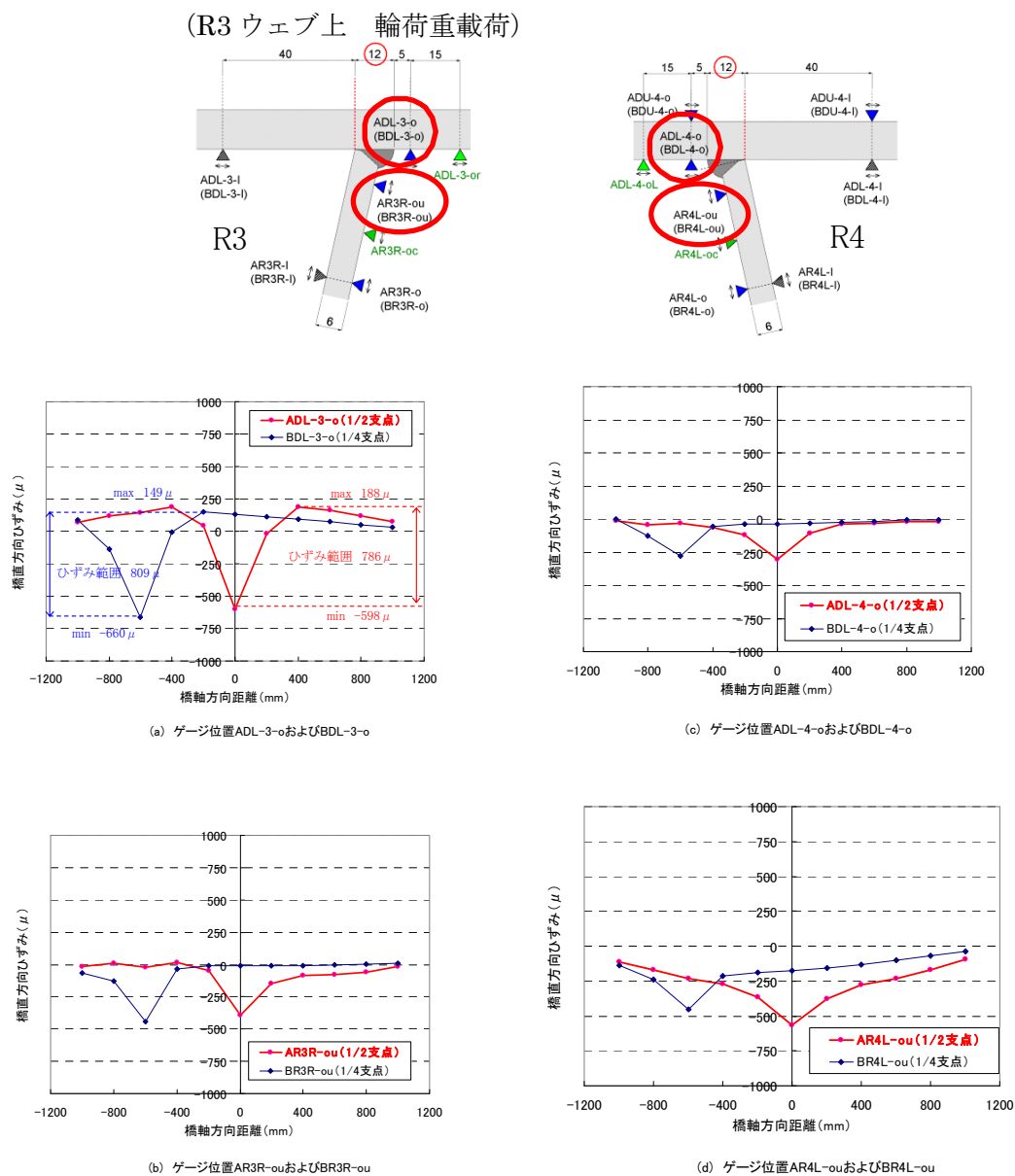
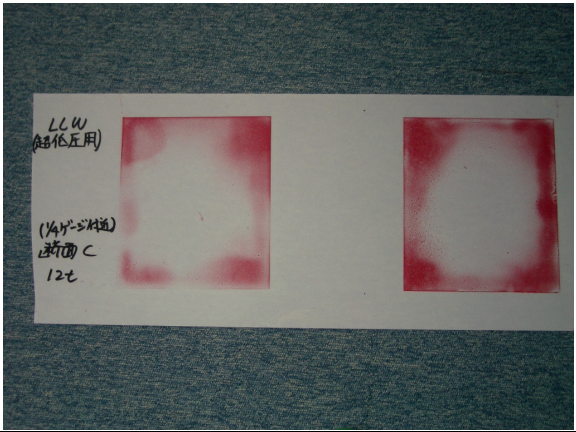
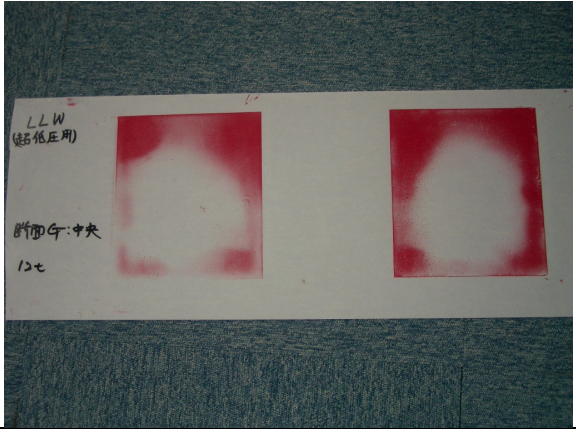
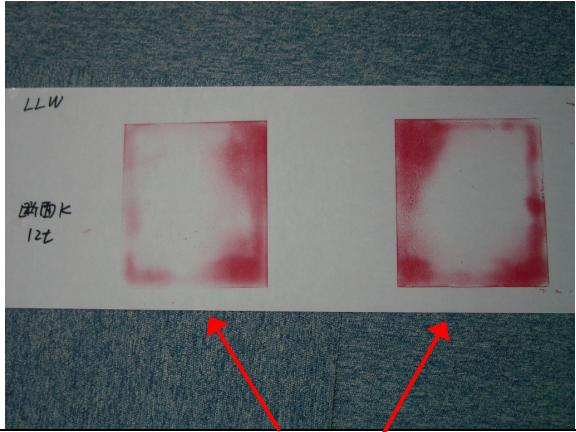


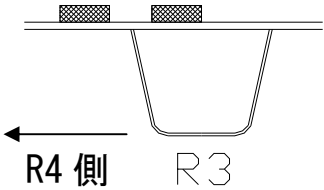
図-3.3.1 着目溶接部における横断方向ひずみの橋軸方向影響線（方法①）

(2) 面圧測定結果

方法①の静的載荷試験における、面圧分布の測定結果を表-3.3.1 に示す。表-3.3.1 より、左右の面圧分布はほぼ同程度になっていることが確認できた。

表-3.3.1 面圧測定結果

荷重載荷断面位置	圧力分布測定結果
C	
G	
K	



(3) 静的多点載荷試験：方法②（敷鋼板上からの載荷）

敷鋼板上から橋軸方向に 11 点静的多点載荷を行ったときの、着目溶接部における横断方向ひずみの橋軸方向影響線を図-3.3.2 に示す。着目部溶接位置のデッキ橋直方向ひずみ（1/2 支点（ADL-3-o），1/4 支点（BDL-3-o））について，方法①の静的多点載荷試験結果と比較したものを各々，表-3.3.2，表-3.3.3 に示す。これより，敷鋼板自体の剛性と荷重分散効果によりひずみは 7 割程度に低減することがわかる。

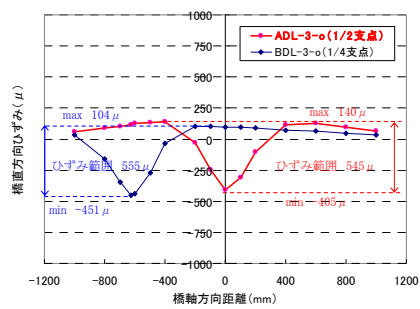
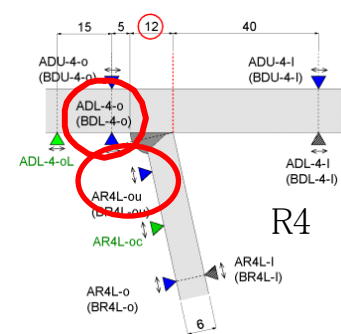
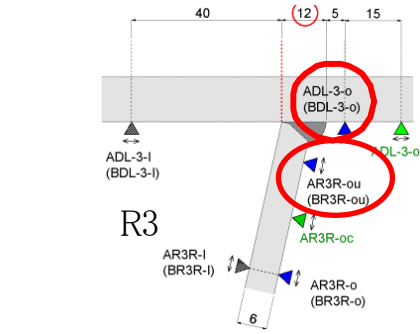
表-3.3.2 着目溶接部における静的載荷結果比較(1) (ADL-3-o)

	①直接静的載荷 結果	②敷鋼板上から の静的載荷結果	②/①
max	188	140	0.74
min	-598	-405	0.68
ひずみ範囲	786	545	0.69

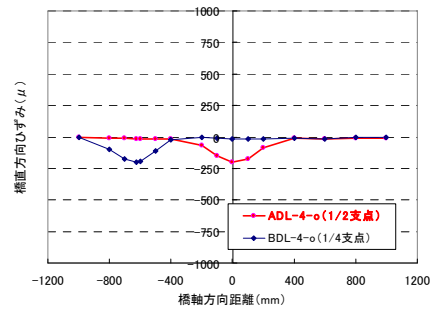
表-3.3.3 着目溶接部における静的載荷結果比較(2) (BDL-3-o)

	①直接静的載荷 結果	②敷鋼板上から の静的載荷結果	②/①
max	149	104	0.70
min	-660	-451	0.68
ひずみ範囲	809	555	0.69

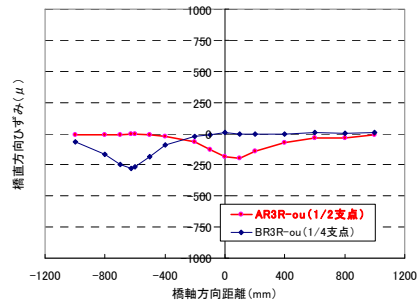
(R3 ウェブ上 輪荷重載荷)



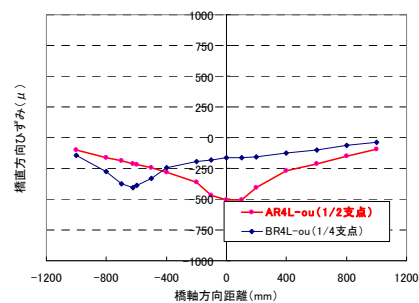
(a) ゲージ位置ADL-3-oおよびBDL-3-o



(c) ゲージ位置ADL-4-oおよびBDL-4-o



(b) ゲージ位置AR3R-ouおよびBR3R-ou



(d) ゲージ位置AR4L-ouおよびBR4L-ou

図-3.3.2 着目溶接部における横断方向応力の橋軸方向影響線 (方法②)

3.3.2 輪荷重走行試験結果

(1) 動的計測による橋軸方向影響線

表-3.2.2 に示す動的計測チャンネル(8CH)の計測結果を下記3ステージに分けて、図-3.3.3～5 に示す。

- (a) 走行開始初期時 (片道 30 万回走行終了時)
- (b) 走行中間時 (片道 195 万回走行終了時)
- (c) 走行終了時 (片道 300 万回走行終了時)

図-3.3.3～5 より、1 往復 (周期 3.2 sec 程度) の間に着目点 (1/2 支点 (ADL-3-o), 1/4 支点 (BDL-3-o)) のひずみ範囲は 635～650 μ 程度であった。また、着目点の鉛直変位 (DS-D2, DS-D5) は 1.3～1.5mm 程度の振幅であった。これらは走行開始初期時から走行終了時までほとんど同程度の振幅であり、特に大きな変化は見られていない。

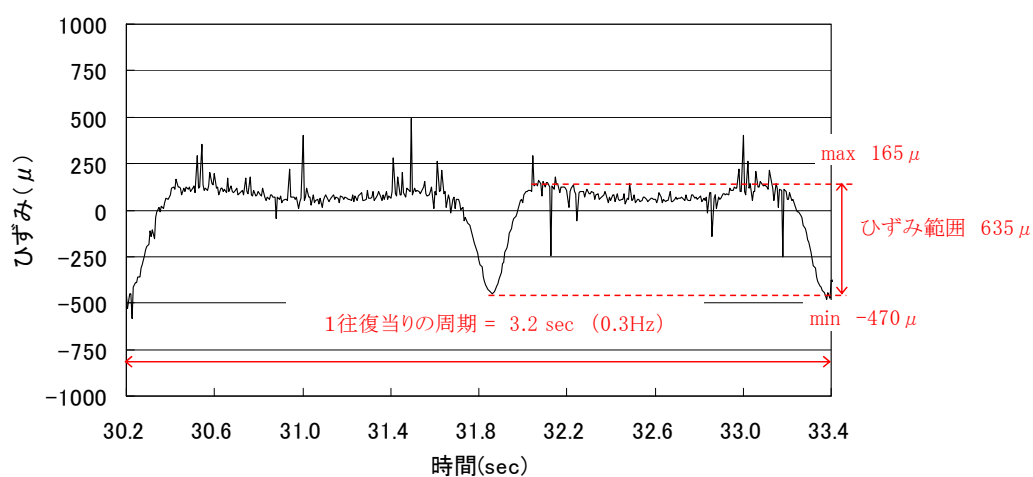
なお、着目部溶接位置のデッキ橋直方向ひずみ (1/2 支点 (ADL-3-o), 1/4 支点 (BDL-3-o)) について、敷鋼板上からの静的載荷結果 (方法②) と比較したものを各々、表-3.3.4 及び 5 に示す。これより、衝撃がひずみ範囲に与える影響は 2 割程度であることがわかる。

表-3.3.4 着目溶接部における静的・動的計測結果比較(1) (ADL-3-o)

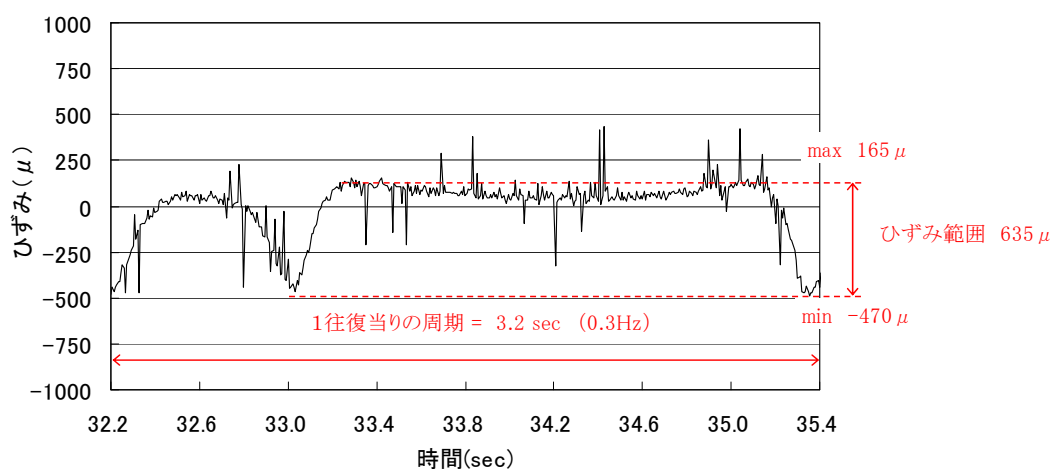
	①敷鋼板上からの静的載荷結果	②動的計測結果 (平均値)	②/①
max	140	190.0	1.36
min	-405	-453.5	1.12
ひずみ範囲	545	643.5	1.18

表-3.3.5 着目溶接部における静的・動的計測結果比較(2) (BDL-3-o)

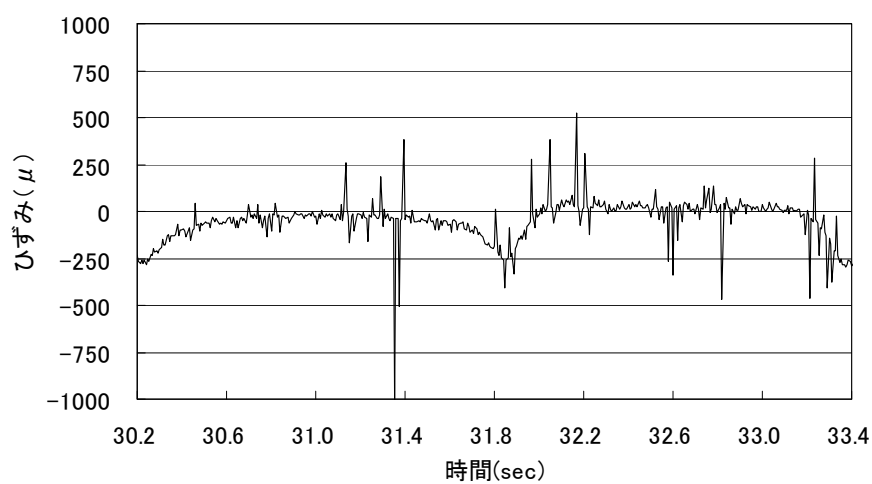
	①敷鋼板上からの静的載荷結果	(平均値)	②/①
max	104	181.5	1.75
min	-451	-456.5	1.01
ひずみ範囲	555	638.5	1.15



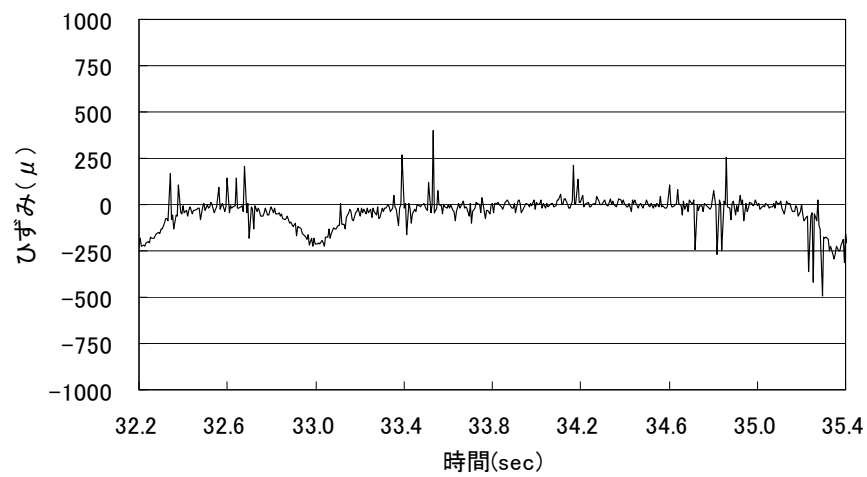
(a) 動的ひずみデータ (ADL-3-O) (30.2～33.4秒表示)



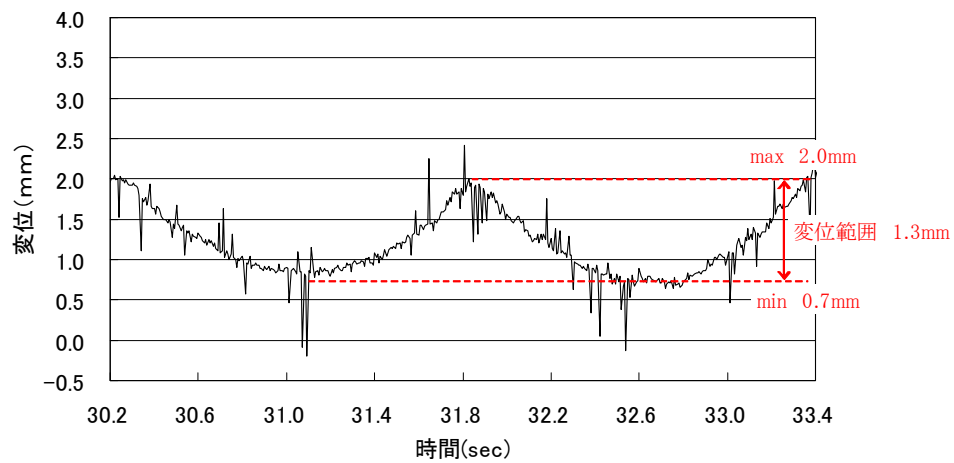
(b) 動的ひずみデータ (BDL-3-O) (32.2～35.4秒表示)



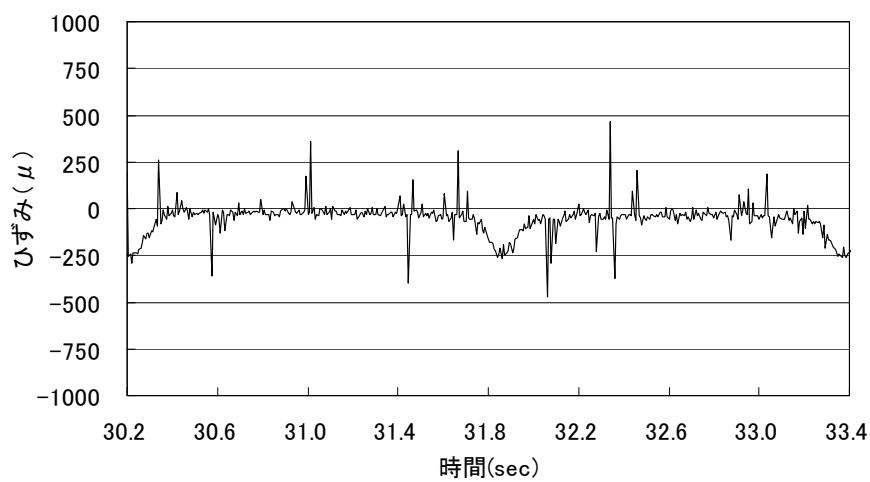
(c) 動的ひずみデータ (AR3R-OU) (30.2～33.4秒表示)



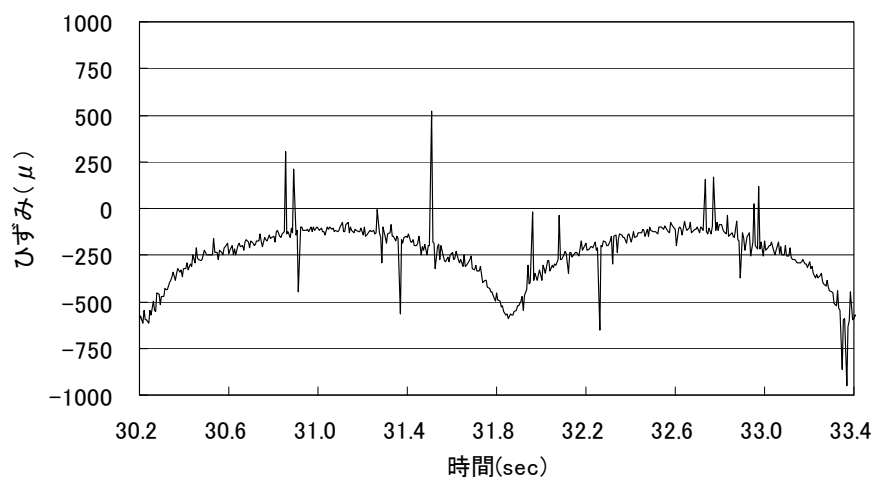
(d) 動的ひずみデータ (BR3R-OU) (32.2～35.4秒表示)



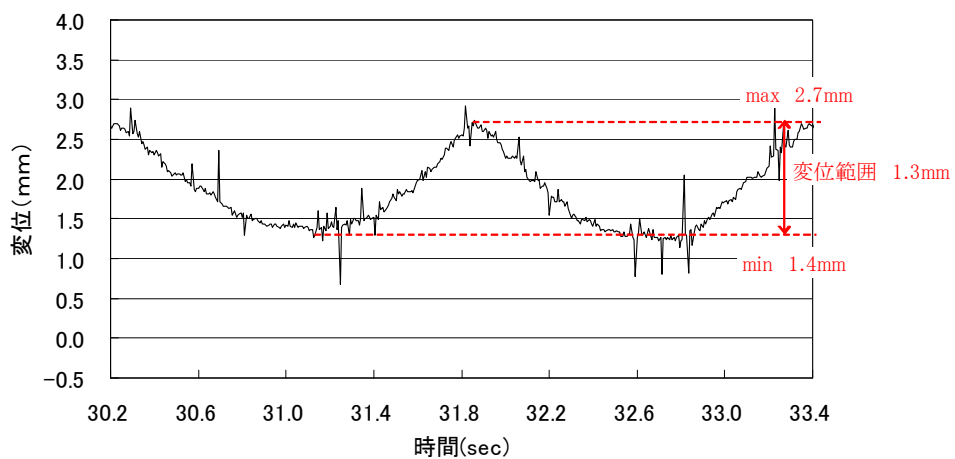
(e) 動の変位データ (DS-D2) (30.2～33.4秒表示)



(f) 動的ひずみデータ (ADL-4-O) (30.2～33.4秒表示)

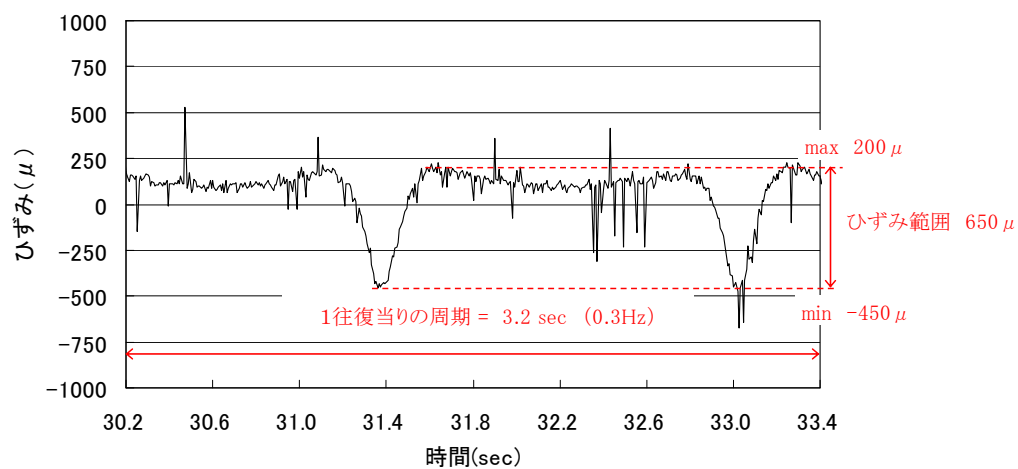


(g) 動的ひずみデータ (AR4L-OU) (30.2～33.4秒表示)

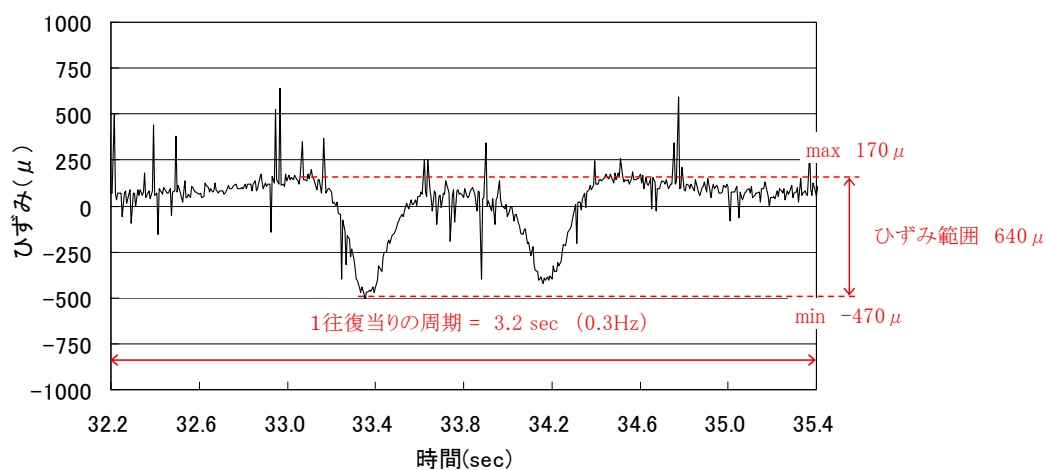


(h) 動的変位データ (DS-D5) (30.2～33.4秒表示)

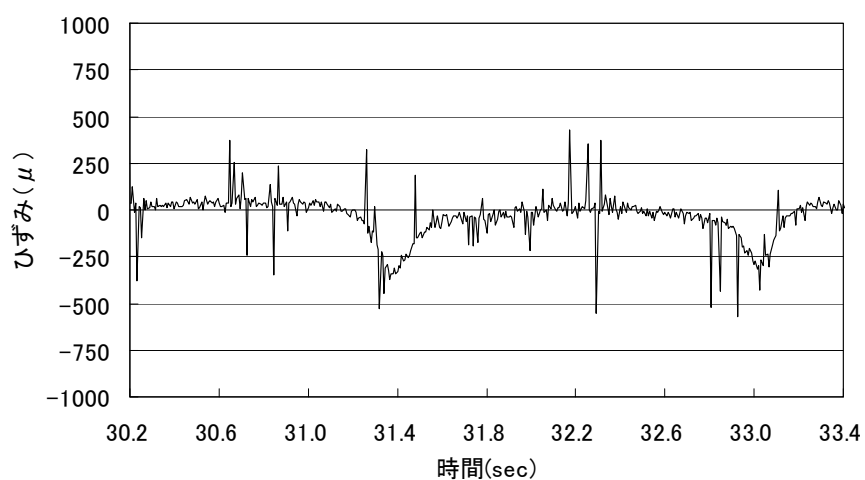
図-3.3.3 動的計測による橋軸方向影響線 (片道 30 万回走行終了時)



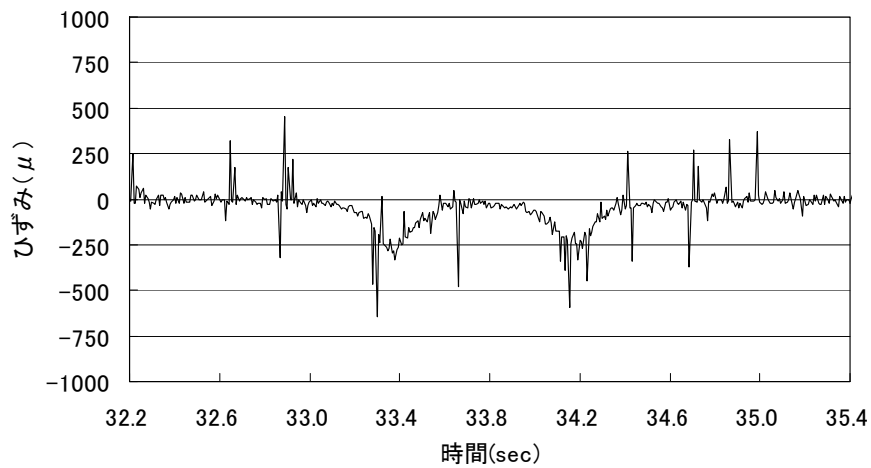
(a) 動的ひずみデータ (ADL-3-O) (30.2~33.4秒表示)



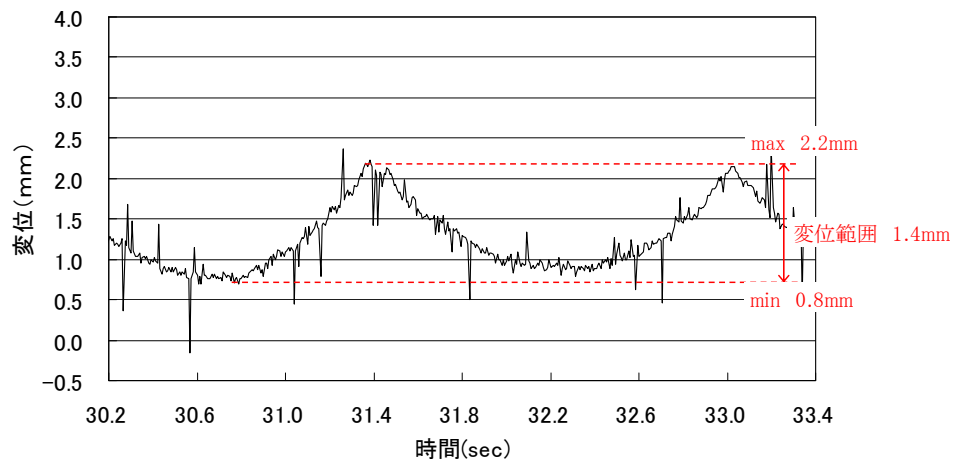
(b) 動的ひずみデータ (BDL-3-O) (32.2~35.4秒表示)



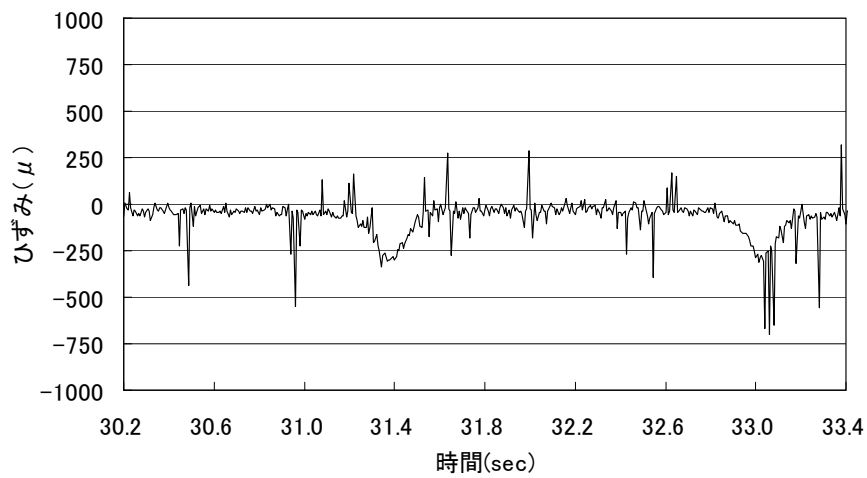
(c) 動的ひずみデータ (AR3R-OU) (30.2~33.4秒表示)



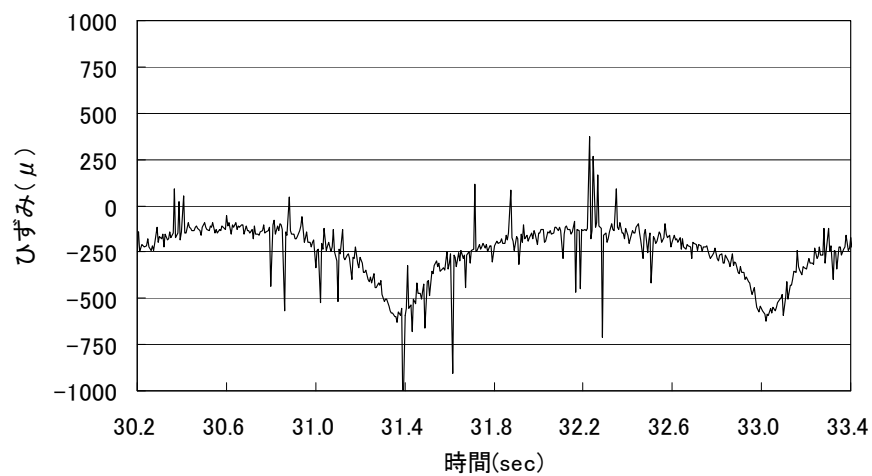
(d) 動的ひずみデータ (BR3R-OU) (32.2～35.4秒表示)



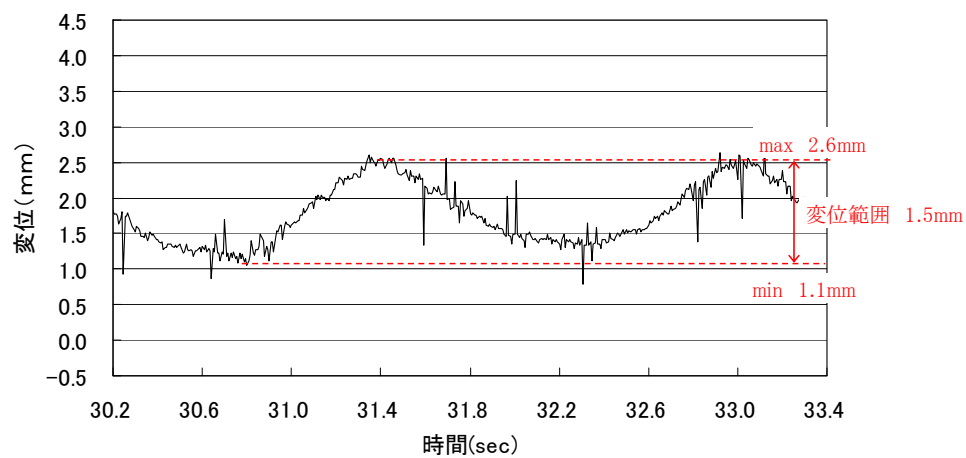
(e) 動的変位データ (DS-D2) (30.2～33.4秒表示)



(f) 動的ひずみデータ (ADL-4-O) (30.2～33.4秒表示)

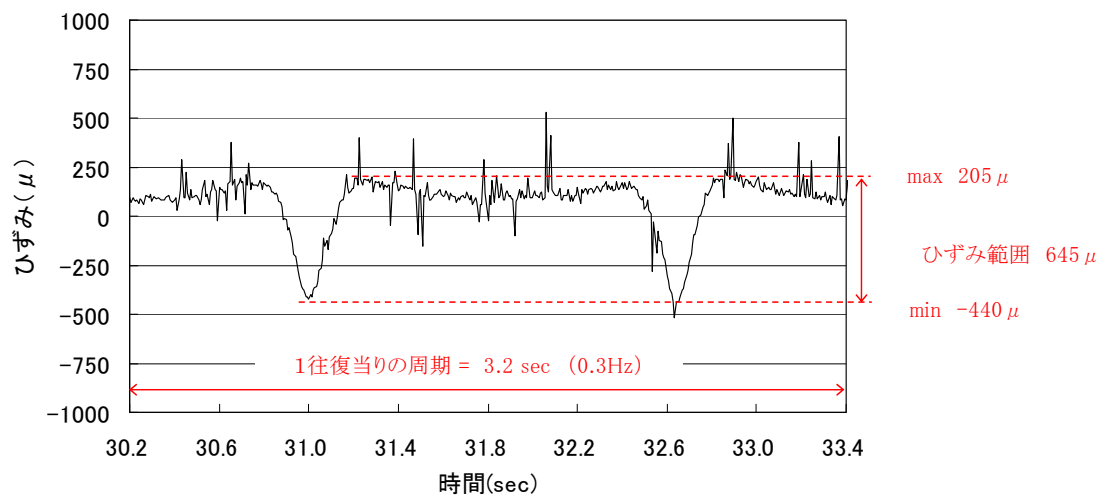


(g) 動的ひずみデータ (AR4L-OU) (30.2～33.4秒表示)

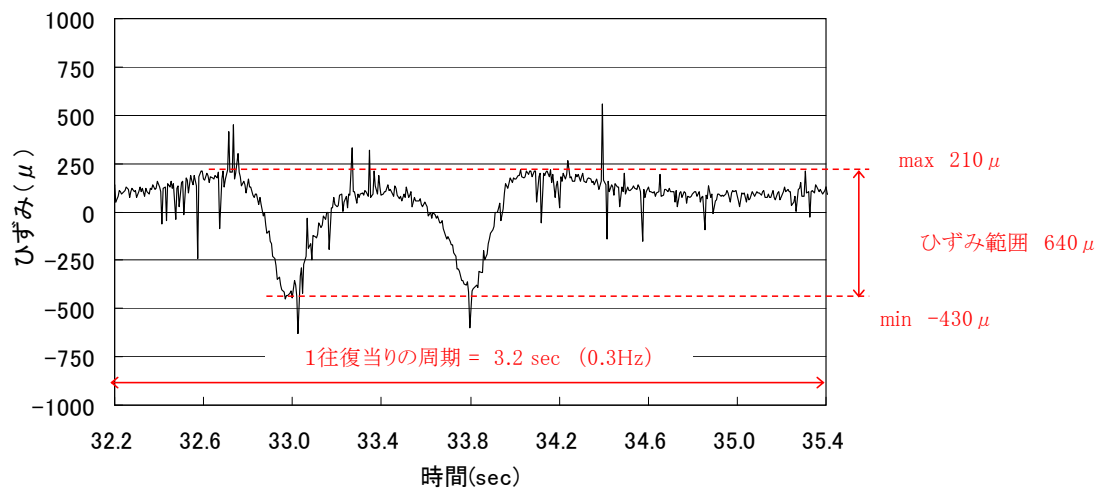


(h) 動的変位データ (DS-D5) (30.2～33.4秒表示)

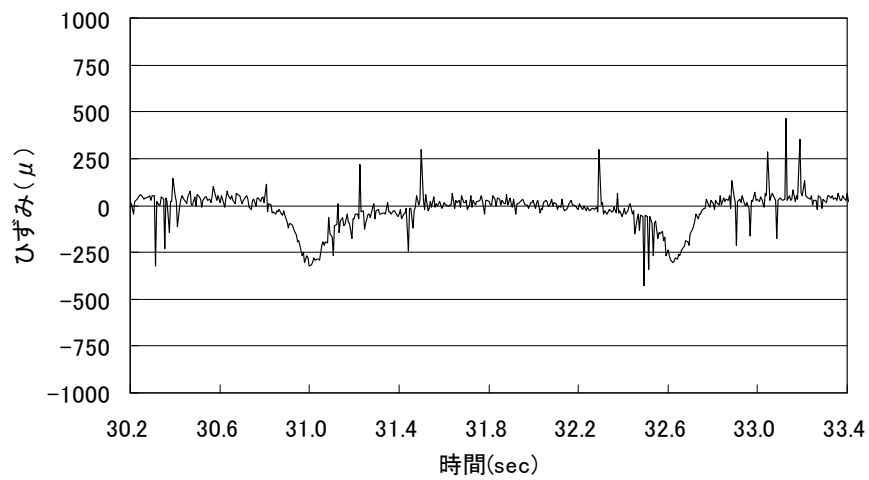
図-3.3.4 動的計測による橋軸方向影響線 (片道 195 万回走行終了時)



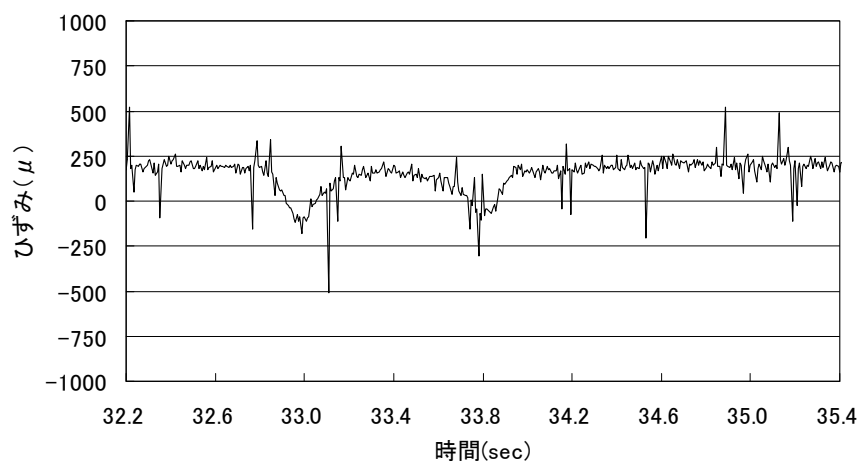
(a) 動的ひずみデータ (ADL-3-O) (30.2~33.4秒表示)



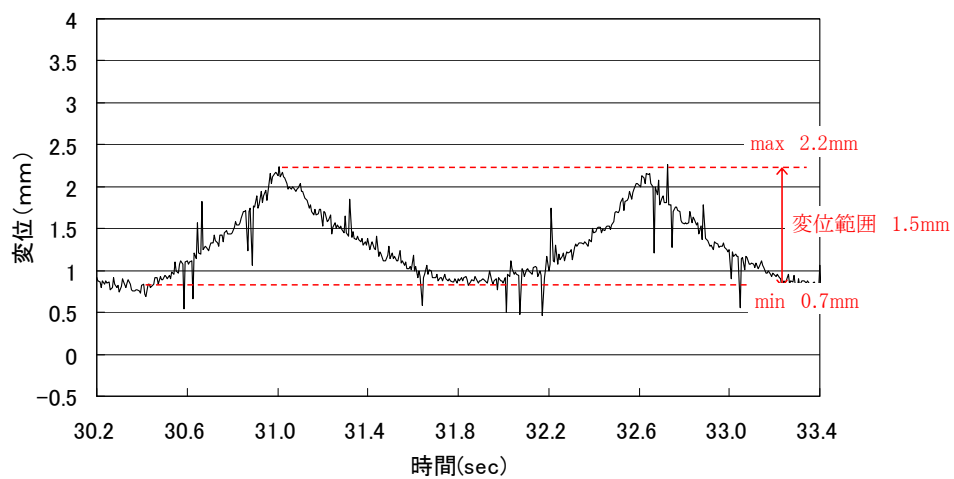
(b) 動的ひずみデータ (BDL-3-O) (32.2~35.4秒表示)



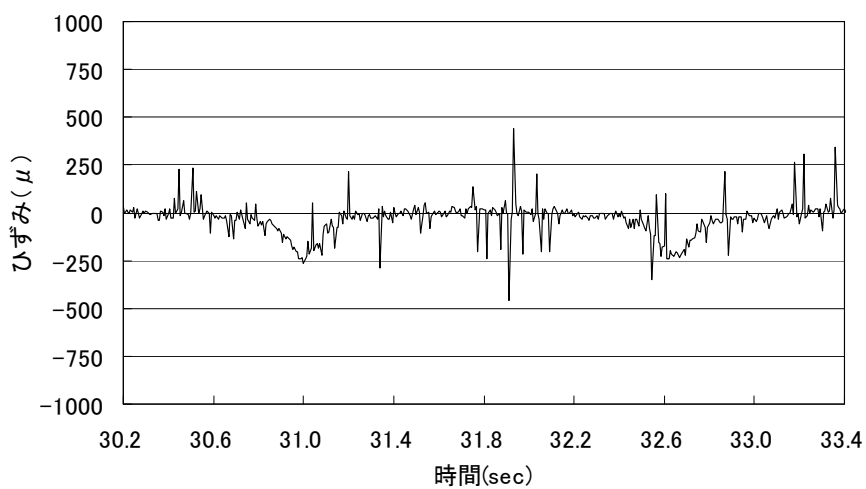
(c) 動的ひずみデータ (AR3R-OU) (30.2~33.4秒表示)



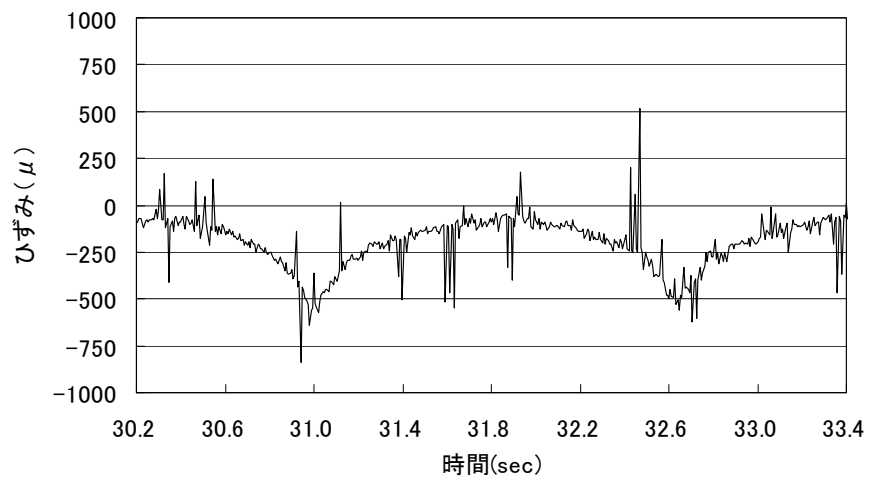
(d) 動的ひずみデータ (BR3R-OU) (32.2～35.4秒表示)



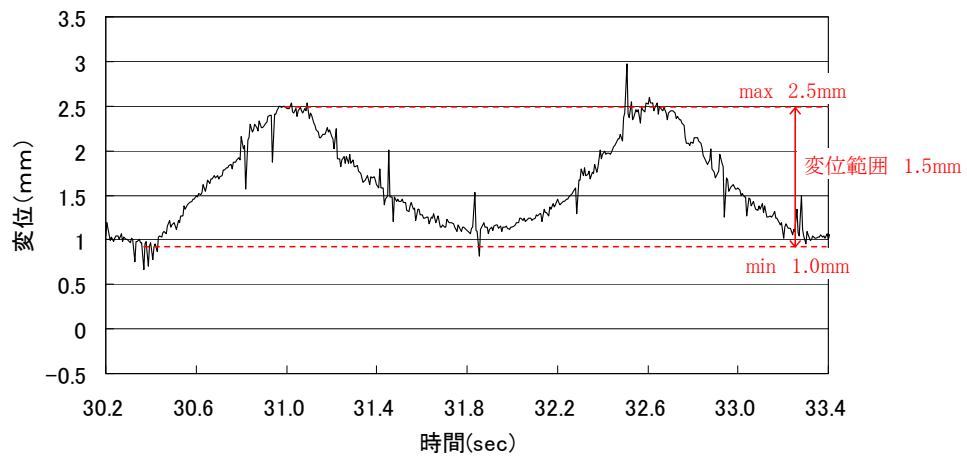
(e) 動の変位データ (DS-D2) (30.2～33.4秒表示)



(f) 動的ひずみデータ (ADL-4-O) (30.2～33.4秒表示)



(g) 動的ひずみデータ (AR4L-OU) (30.2～33.4秒表示)



(h) 動的変位データ (DS-D5) (30.2～33.4秒表示)

図-3.3.5 動的計測による橋軸方向影響線 (片道 300 万回走行終了時)

(2) 走行回数に伴う、ひずみ・変位の推移

5 万回走行終了おきに、支間中央に静的载荷を行い、ひずみ・たわみデータを取得しているが、各計測チャンネルにおける静的ひずみ・たわみと走行回数の関係を以下の図に示す。

a) 着目点（動的計測チャンネル（8CH））

動的計測チャンネル（8CH）における静的ひずみ・たわみと走行回数の関係を図-3.3.6～3.3.7 に示す。図-3.3.6～3.3.7 より、300 万回走行終了まで比較的安定して推移しており、床版としての剛性が確保されていることがわかる。

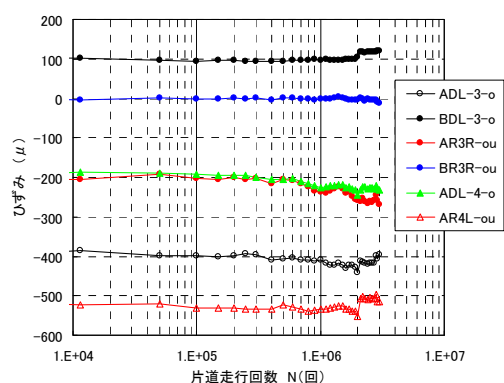
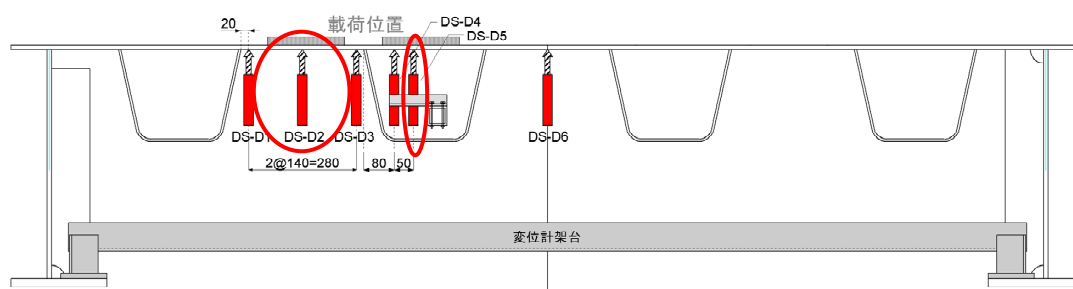


図-3.3.6 応力－走行回数関係

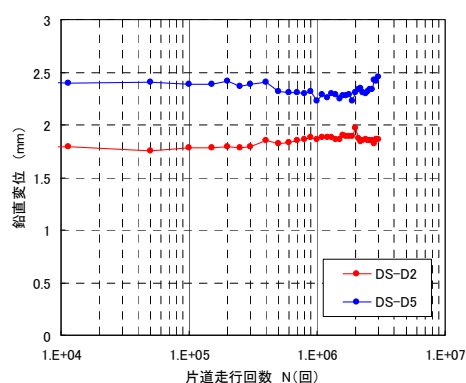


図-3.3.7 鉛直変位－走行回数関係

b) Uリブ溶接部応力集中ひずみゲージ

応力集中ゲージ貼付け箇所における静的ひずみと走行回数の関係を図-3.3.8 に示す。図-3.3.8 より、20 万回前後までは比較的安定して推移しているが、その後は増加する傾向が確認できる。

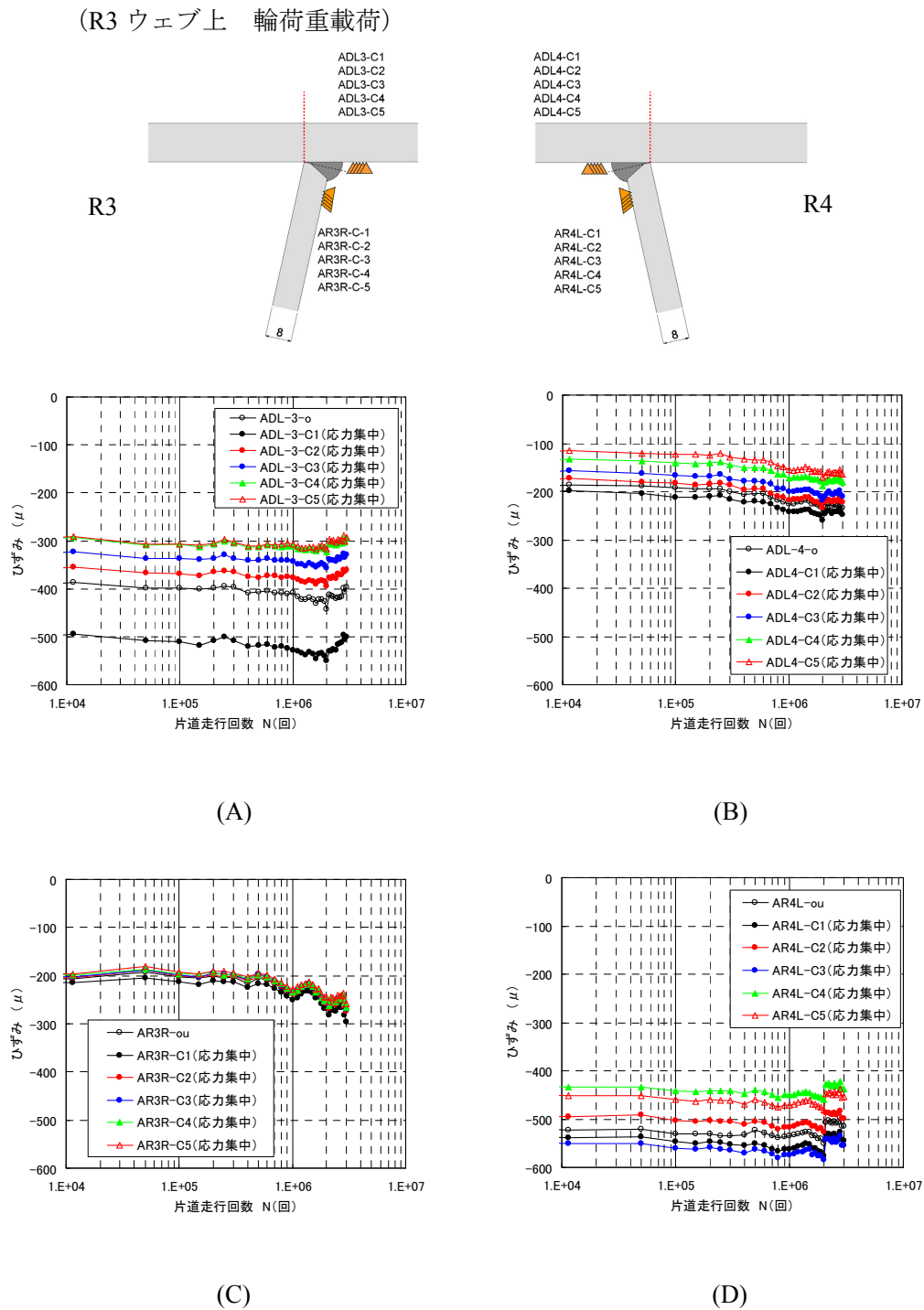


図-3.3.8 応力集中ゲージ箇所のひずみ－走行回数関係

c) Uリブ溶接部ひずみゲージ（着目点以外）

Uリブ溶接部ひずみゲージ貼付け箇所（着目点以外）における静的ひずみと走行回数の関係を図-3.3.9に示す。図-3.3.9より、300万回走行終了まで比較的安定して推移していることがわかる。

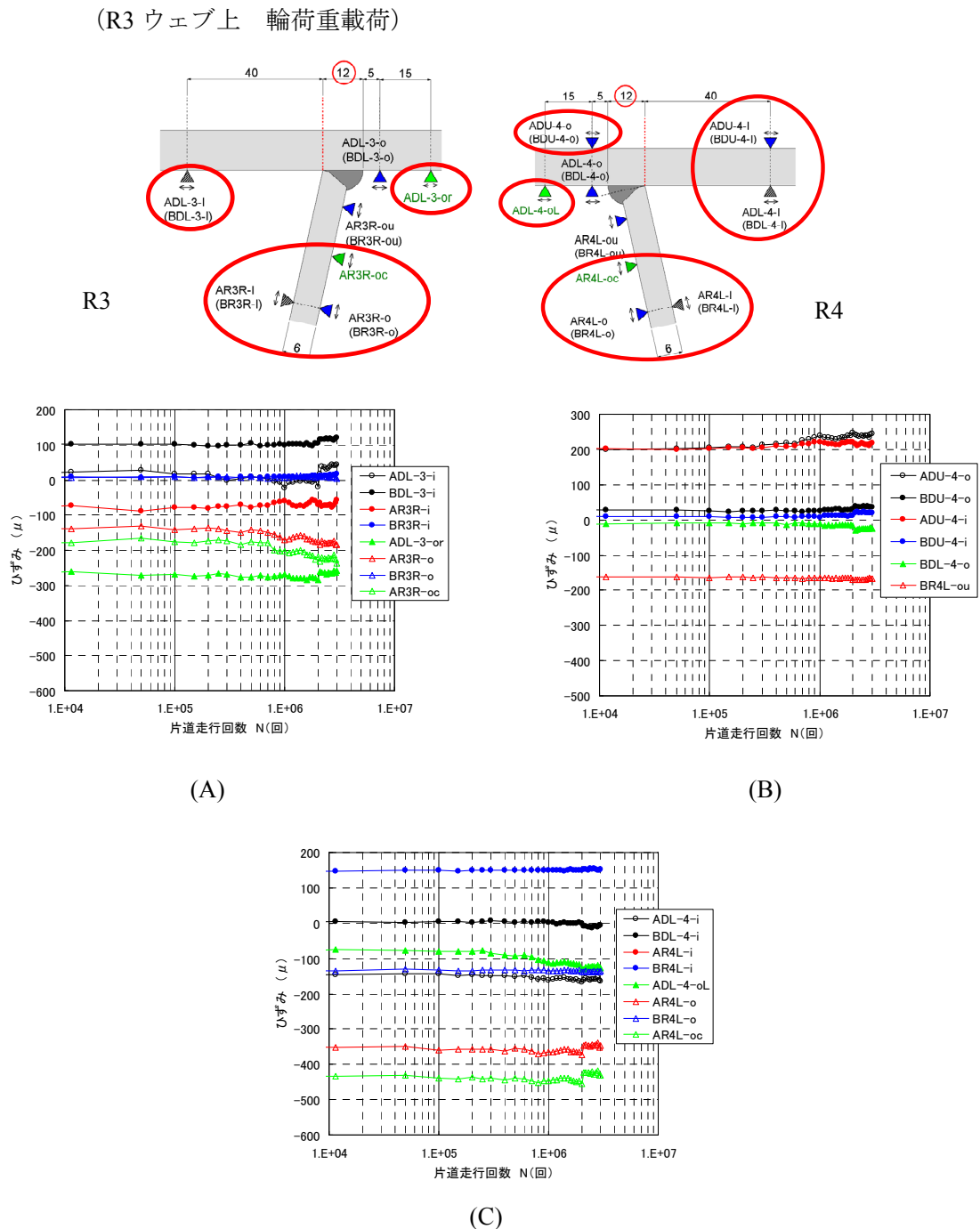


図-3.3.9 溶接部ひずみゲージ箇所のひずみ－走行回数関係

d) 一般部ひずみゲージ（断面 A）

一般部ひずみゲージ貼付け箇所における静的ひずみと走行回数の関係を図-3.3.10 に示す。

図-3.3.10 より、300 万回走行終了まで比較的安定して推移していることがわかる。

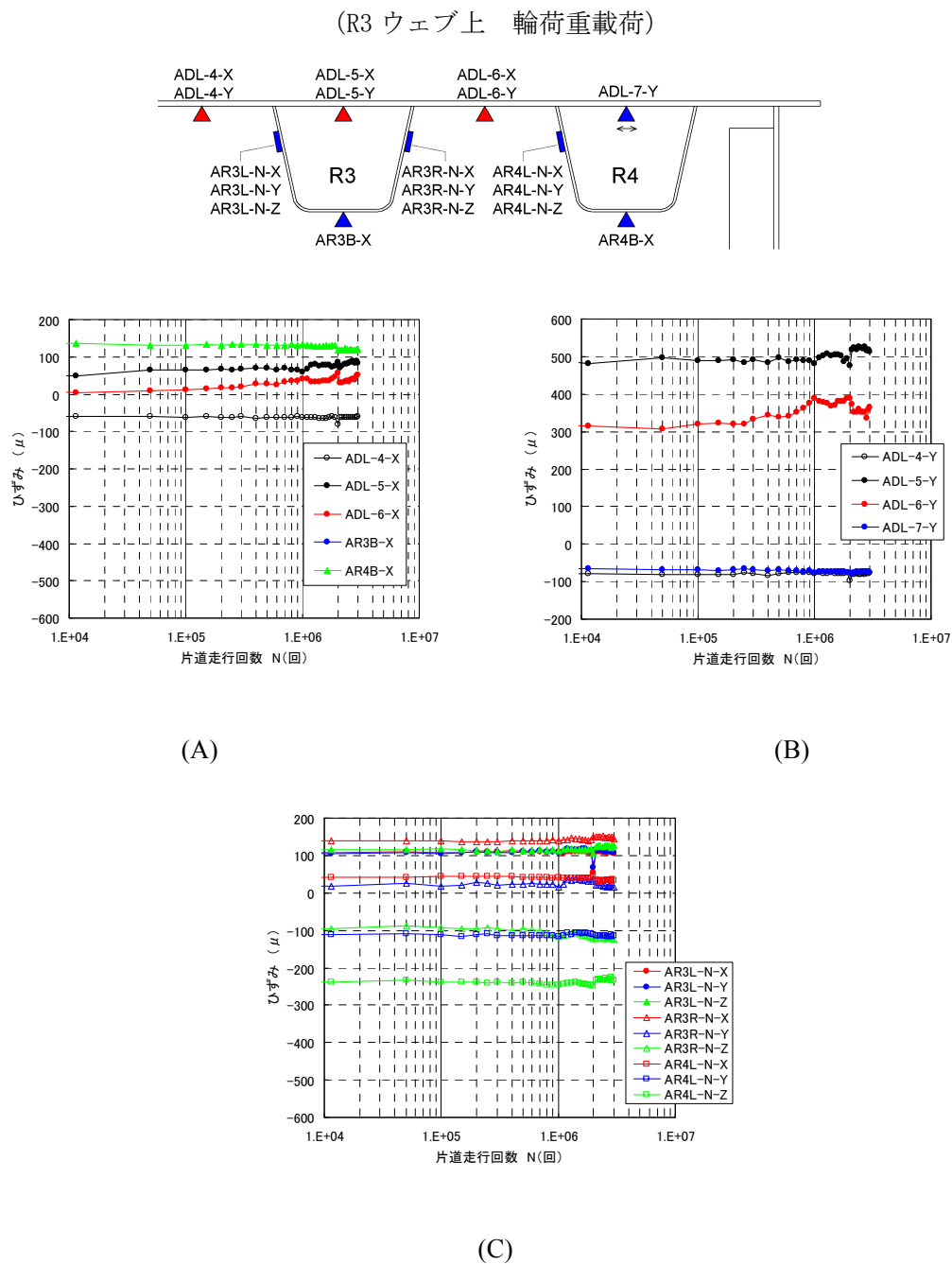


図-3.3.10 一般部ひずみゲージ箇所のひずみ－走行回数関係

e) 鋼床版およびUリブ変位（着目点以外）

変位計取り付け箇所における変位と走行回数の関係を図-3.3.11 に示す。図-3.3.11 より、300 万回走行終了まで比較的安定して推移していることがわかる。DS-D4 については 40 万回走行終了以降、計測機器の問題で正常な計測を実施できなくなったため、計測を行っていない。

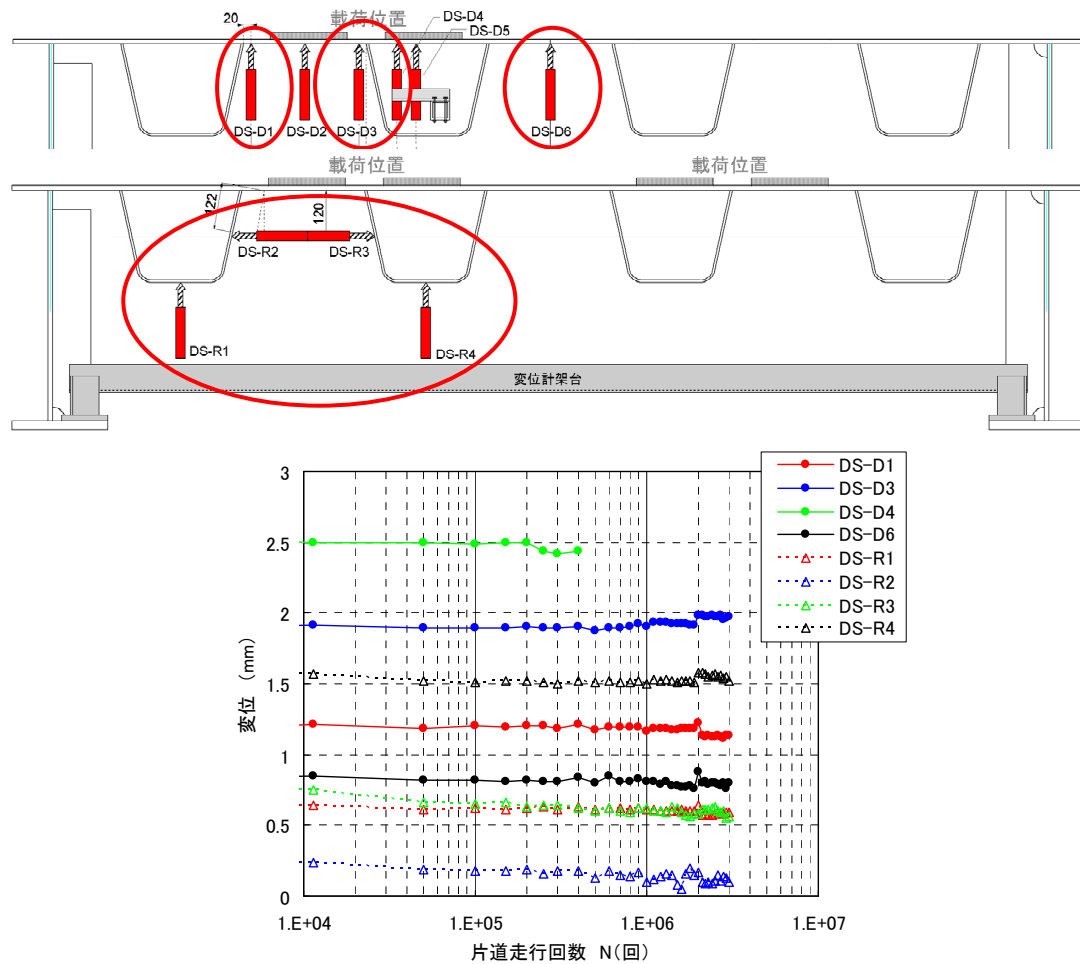


図-3.3.11 変位－走行回数関係（着目点以外）

(3) 超音波計測結果

図-3.3.12 に輪荷重の走行回数と各溶接線で計測されたエコー高さの推移を示す。図-3.3.12 より、エコーは荷重直下の溶接線 R3L では、U リブ支間中央付近と輪荷重走行範囲の端部に比較的大きなエコーが見られた。隣接する溶接線 R3R では、300 万回の計測時に輪荷重走行範囲の端部にエコーが確認された。

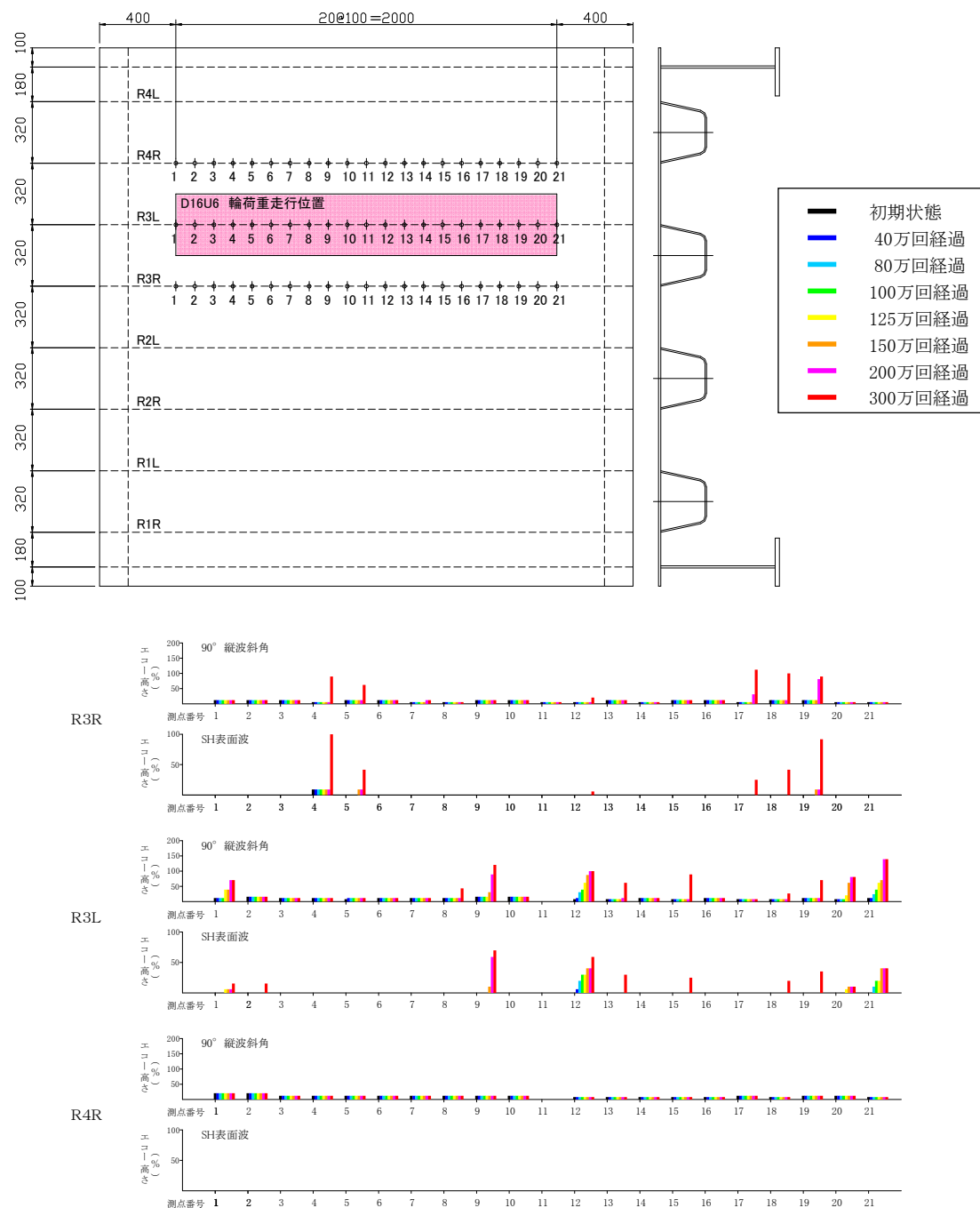


図-3.3.12 エコー高さの推移

このエコー高さから推察される繰り返し载荷回数 300 万回時のき裂の深さ方向の形状を
図-3.3.13 に示す。図より予想されるき裂の最大深さは 4.6mm となった。

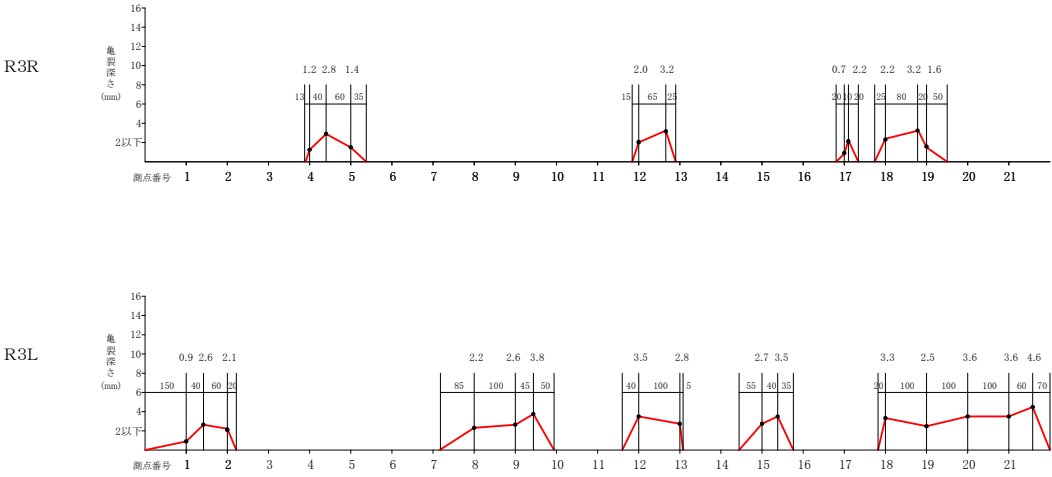


図-3.3.13 き裂深さ (300 万回時)

(4) 過年度走行試験結果との比較

着目点（動的計測チャンネル（8CH））の静的ひずみと走行回数の関係について、過年度に実施されたデッキプレート厚 $t = 12\text{mm}$ および 14mm の走行試験結果¹⁾と比較した結果を図-3.3.14 に示す。図中の凡例で D12U8 という表記は、デッキプレート厚 $D = 12\text{mm}$ で、U リブ厚 $t = 8\text{mm}$ 上での走行試験結果を示す。D12U8、D14U6 および D16U6 の計測位置記号の対応関係を表-3.3.6 に示す。なお、図中においては、D14U6 および D16U6 の計測位置記号で表記している。

図-3.3.14 より、デッキプレート厚の差はデッキプレート側溶接止端部 5mm 位置のゲージ（ADL-3-o, ADL-4-o）に大きく現れており、デッキプレートを増厚することにより、板厚増厚分の割合の二乗以上、ひずみ低減効果が確認できる。

これらのうち、着目溶接線のデッキプレート側溶接止端部 5mm 位置であり、疲労き裂の発生が確認された ADL-3-o について、各試験の 10 万回走行終了時のひずみ値を基準としたひずみ変化量と変化率の関係を示したのが図-3.3.15 である。図中には、ひずみの変化が直線関係であると仮定し、10 万回と 200 万回時のひずみ値を結んだ劣化曲線も示している。なお、起点を 10 万回時の値を基準としたのは、試験システムが安定するまでのバラツキを考慮したものであり、終点を 200 万回時の値としたのは D12U8 試験体で 200 万回走行終了時に試験荷重を 20%程度上回る過荷重（145kN）を与えた影響を除外するためである。

表-3.3.7 は図-3.3.15 の劣化曲線から、10 万回走行終了時のひずみを基準としたひずみの変化率が 5%に至るまでの走行回数を整理した結果である。表-3.3.7 より、ひずみ変化率が 5%に至るまでの走行回数は、D14U6 が最も早く、D12U8、D16U6 の順となっている。また、ひずみの変化量の絶対値をみると、 $D12U8 > D14U6 > D16U6$ となっている。

表-3.3.6 計測位置記号対応表

D16U6 D14U6	D12U8
ADL-3-o	ADL-2-o
BDL-3-o	BDL-2-o
AR3R-ou	AR2L-ou
BR3R-ou	BR2L-ou
ADL-4-o	ADL-1-o
AR4L-ou	AR1R-ou
DS-D2	DS-D2
DS-D5	DS-D5

(R3 ウェブ上 輪荷重載荷)

(R3 ウェブ上 輪荷重載荷)

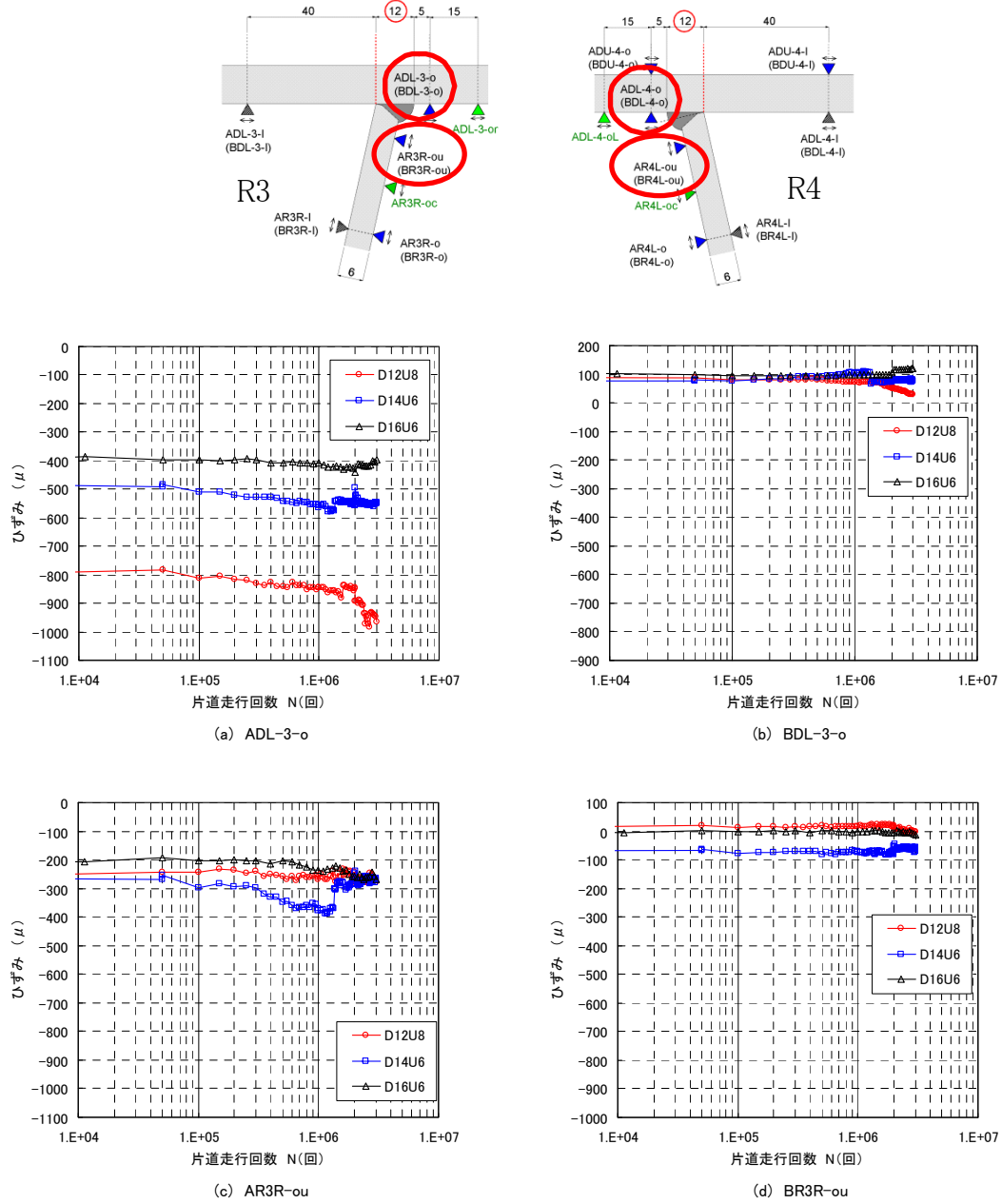


図-3.3.14 過年度走行試験結果との比較（着目点）（その 1）

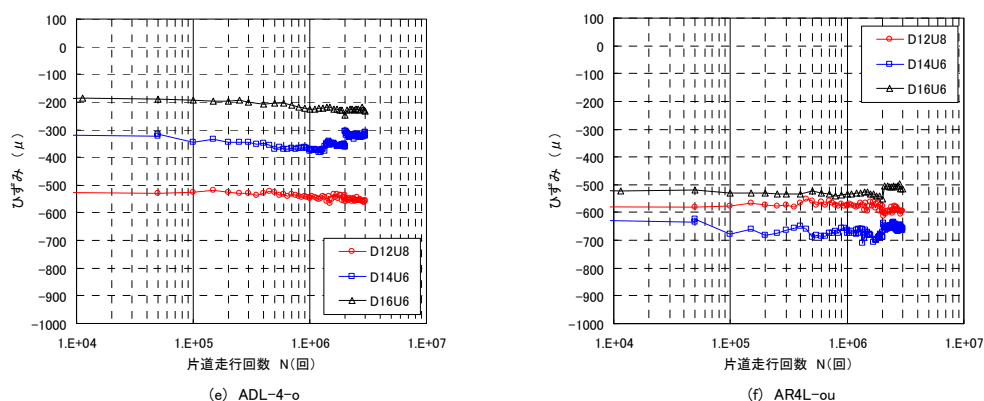


図-3.3.14 過年度走行試験結果との比較（着目点）（その2）

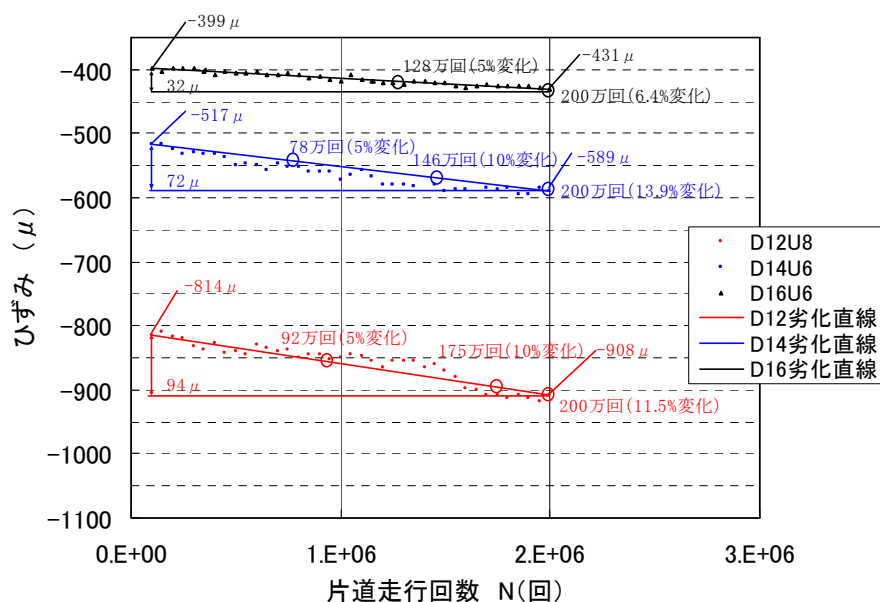


図-3.3.15 ひずみ変化量と変化率（ADL-3-o）

表-3.3.7 ひずみ変化率が5%に至るまでの走行回数とひずみ値（ADL-3-o）

	D12U8	D14U6	D16U6
走行回数 (5%ひずみ変化時)	920,000	780,000	1,280,000
ひずみ値 (10万回走行終了時)	814	517	399

超音波探傷検査の結果についても D12U8, D14U6 の結果と比較を行った。図-3.3.16 は、横軸に載荷回数、縦軸には荷重直下の溶接線 R3L の輪荷重走行距離 2m に対して、①2mm 未満のき裂が確認された溶接線長の割合、②2mm 以上のき裂が確認された溶接線長の割合、③6mm 以上のき裂が確認された溶接線長の割合、④8mm 以上のき裂が確認された溶接線長の割合を示している。き裂深さが、6mm 未満の図の①、②は計測方法の精度を考えると参考値である。図の③より、デッキプレート厚が 16mm の場合には、300 万回まで深さ 6mm 以上のき裂は発生しなかったことがわかる。また、デッキプレート厚さの増加とともに、き裂の進展が小さくなることがわかる。

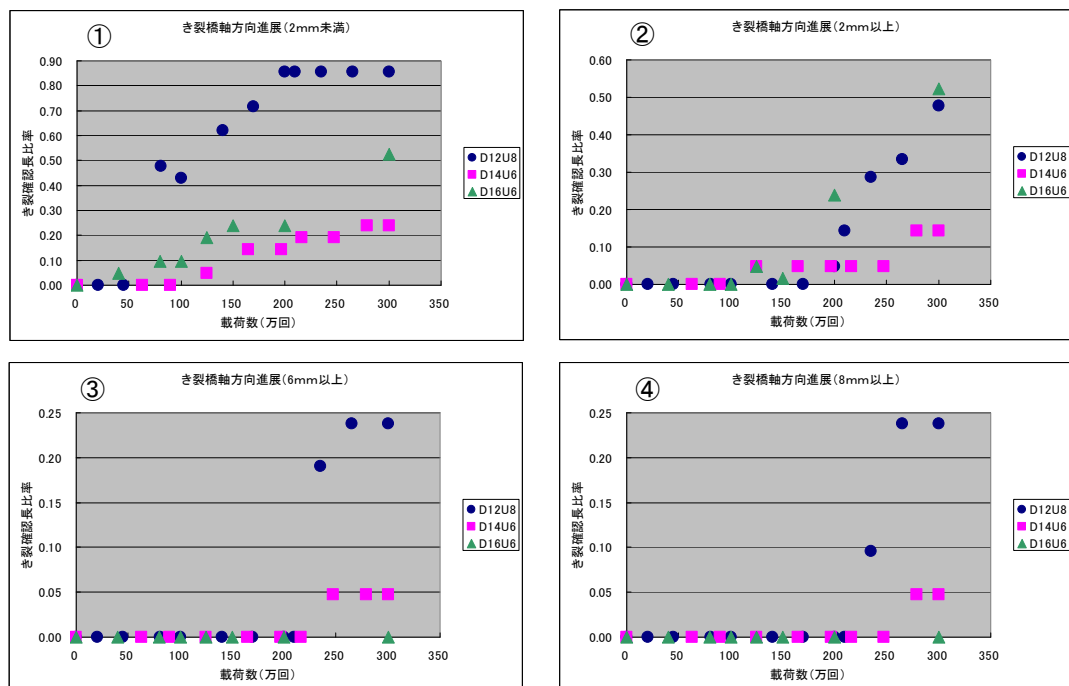


図-3.3.16 デッキプレート板厚とき裂進展

3.3.3 コア抜き調査結果

(1) コア外周マクロ観察

No.1～5 のコアサンプルを用いて、コア外周マクロ観察を実施した。観察の結果を写真-3.3.1～写真-3.3.5 に示す。なお、き裂はコアサンプル自身が円形を呈しており、光の反射状況によって見えにくいことから、磁粉探傷試験の結果もあわせて示す。

No.4 では、溶接がUリブを突き抜けており、U リブ内側に出来た溶接の止端部からき裂が発生している。

No.1, No.4 以外について、き裂はいずれもルート部から生じており、溶接止端部側には認められない。き裂の先端はいずれもデッキプレートで停止しており、未貫通き裂であった。

No.4 以外の溶接溶け込み量はUリブ板厚の 68%～77%であり、一部 75%を下回る箇所も確認されたが、き裂発生との相関はみられなかった。

(2) コア断面マクロ組織観察

No. 1～5 のコアサンプルの中央部断面を切断し、断面マクロ・ミクロ観察を行った。断面組織観察の結果を写真-3.3.6～写真-3.3.10 に示す。き裂はルート部付近から進展しており、デッキ母材へと進んでいる。

コア断面マクロ組織観察から、き裂長さを測定した結果を表-3.3.8 に示す。

表-3.3.8 断面マクロ組織観察からのき裂長さ測定結果

対象溶接線	コア記号	採取位置		き裂長さ (mm)	き裂深さ (mm)
		超音波 測定番号	採取位置 (mm)		
R3L	No. 1	4	700	0	0
	No. 2	12～13	1550	3.2	3
	No. 3	18～19	2180	3.7	3.5
	No. 5	11	1400	3.9	3.5
R3R	No. 4	18～19	2180	4.7	4.1

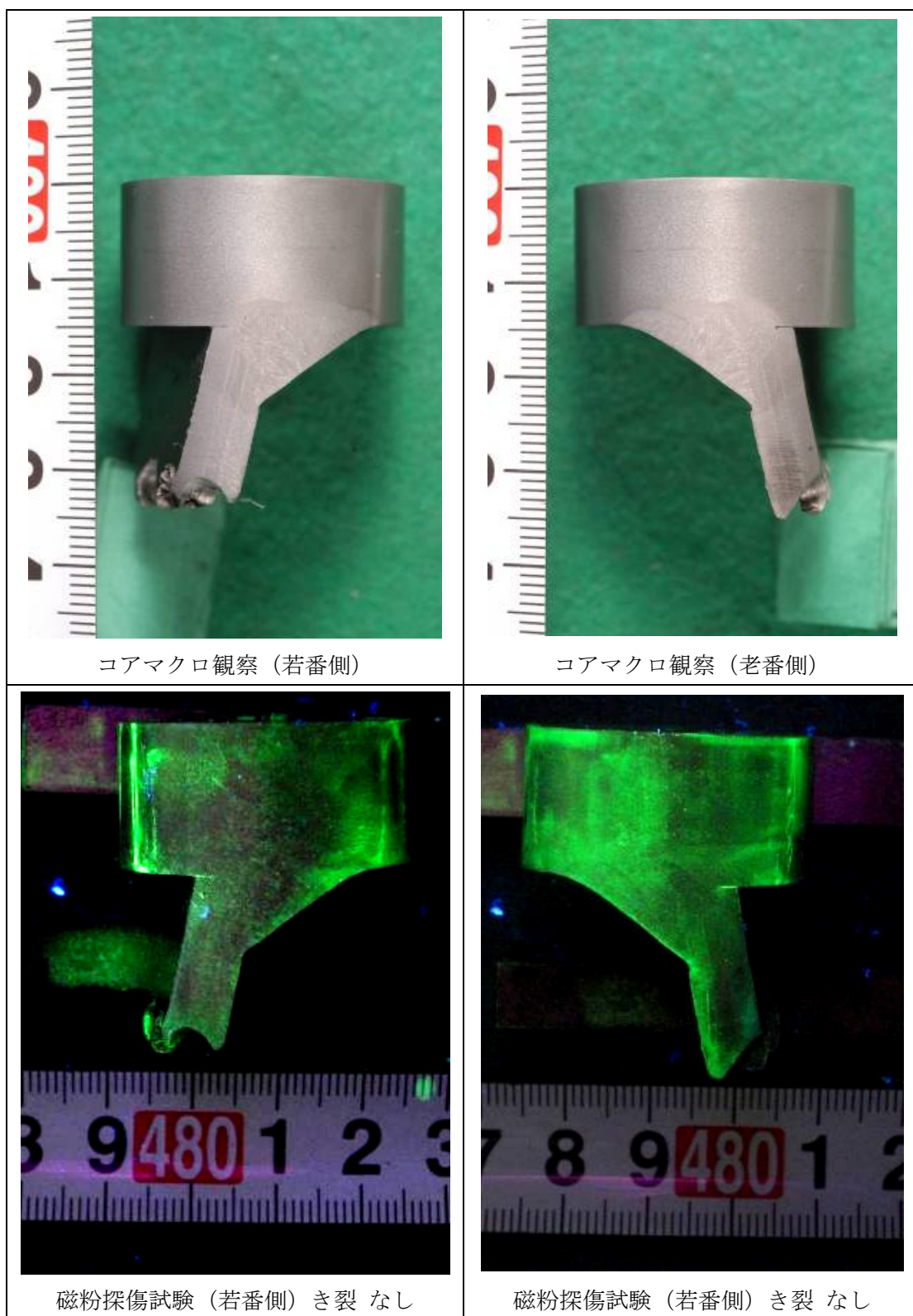


写真-3.3.1 コアマクロ観察および磁粉探傷試験（No.1 試験片）

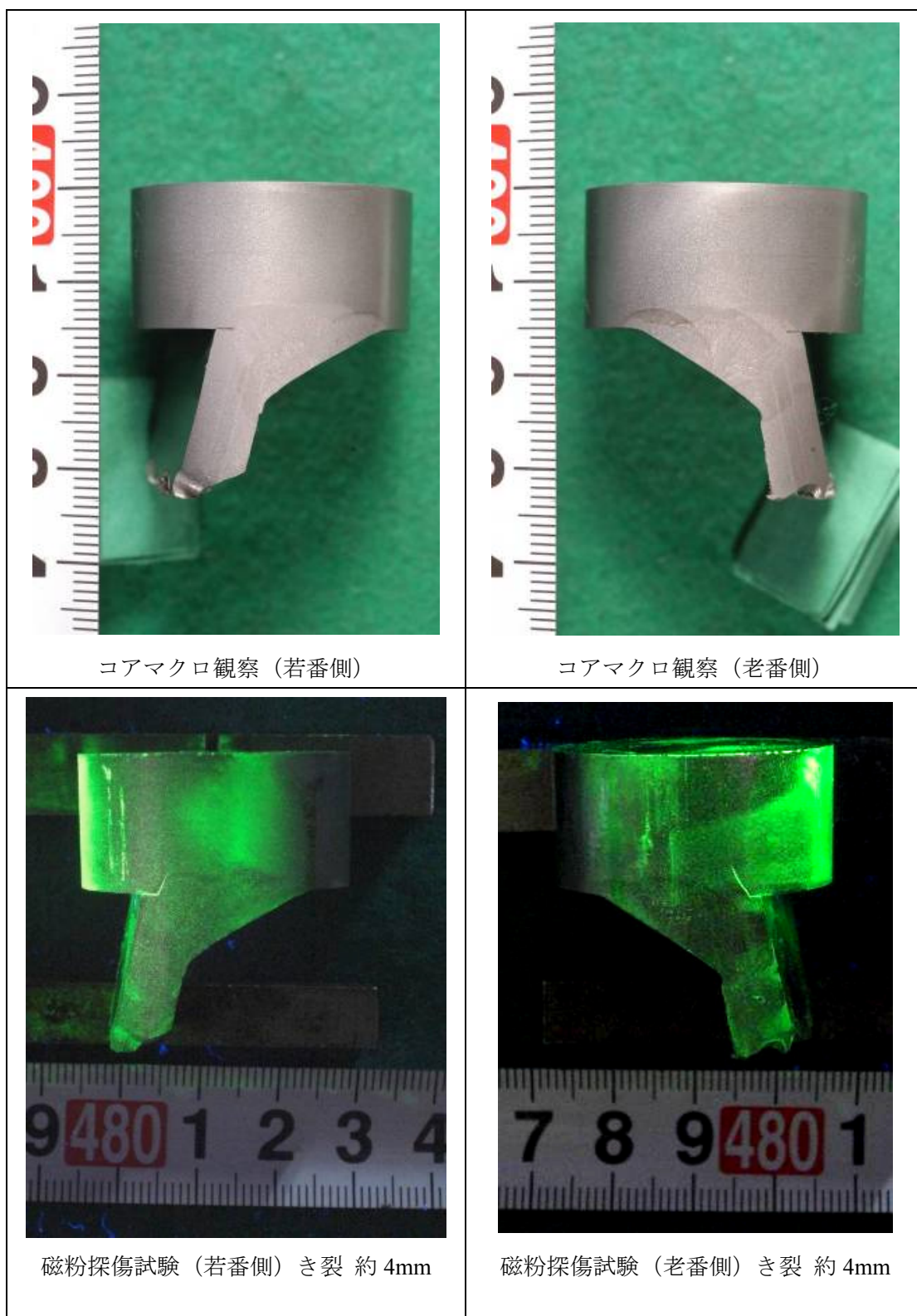


写真-3.3.2 コアマクロ観察および磁粉探傷試験（No.2 試験片）

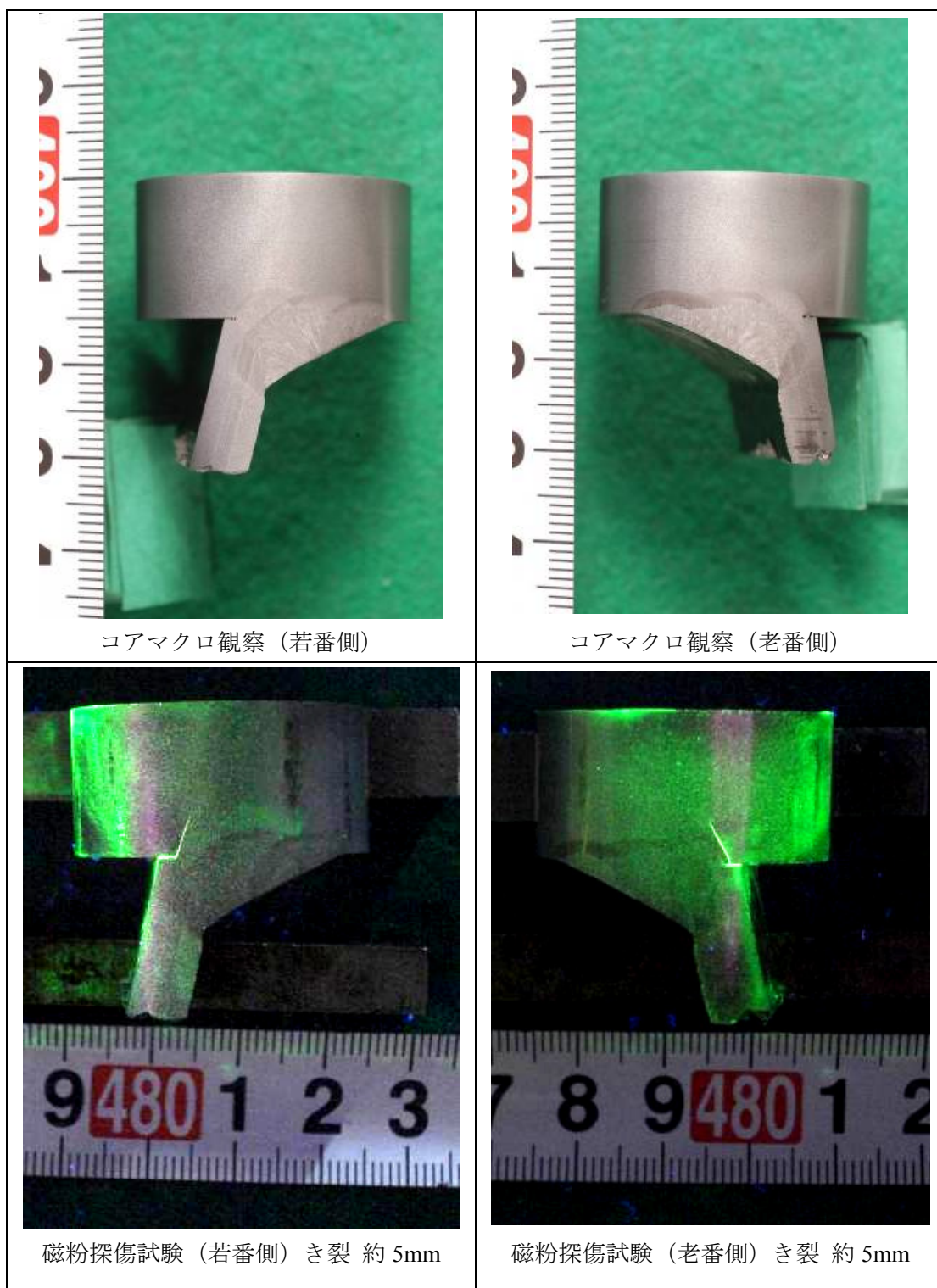


写真-3.3.3 コアマクロ観察および磁粉探傷試験（No.3 試験片）

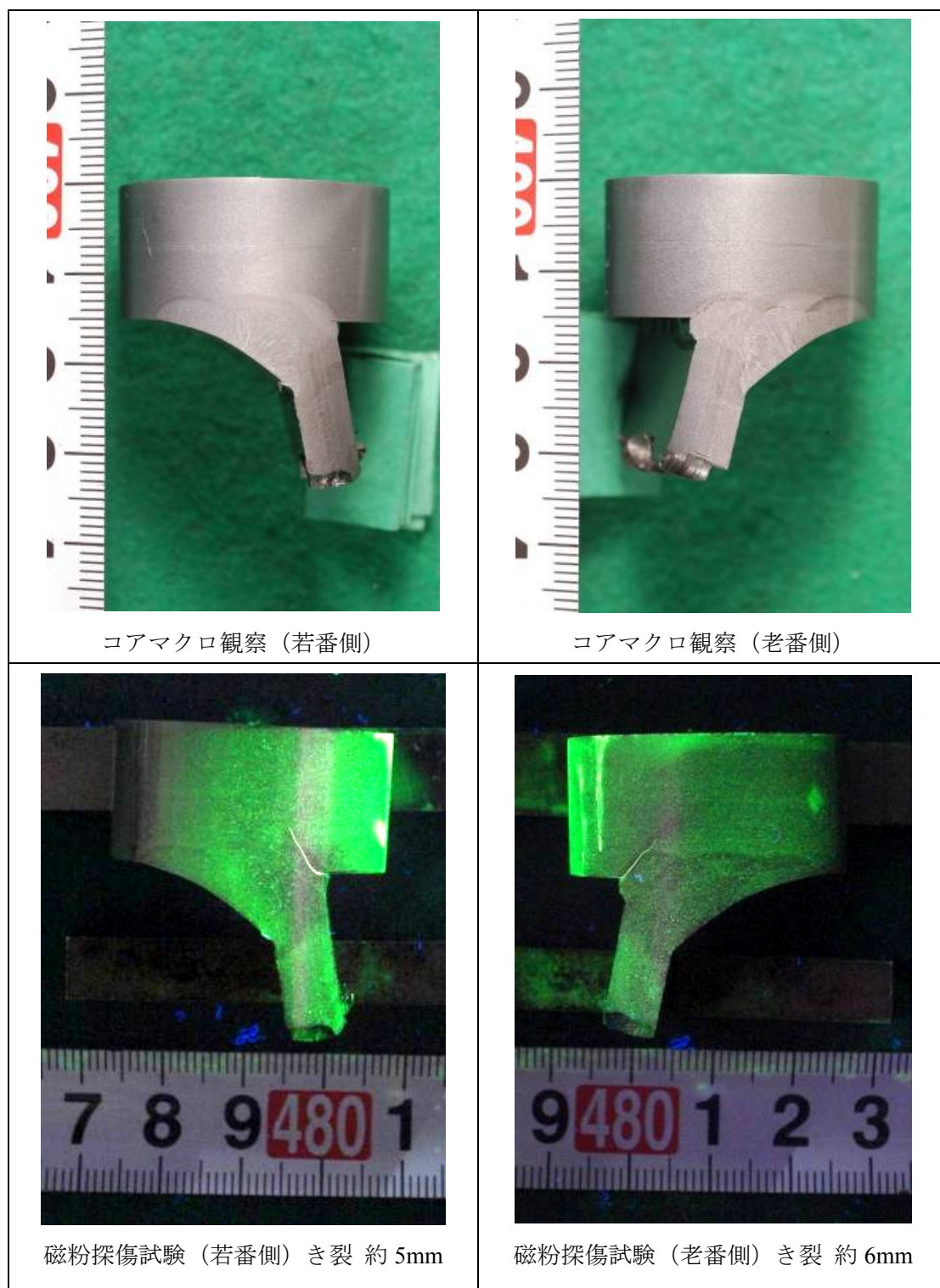


写真-3.3.4 コアマクロ観察および磁粉探傷試験（No.4 試験片）

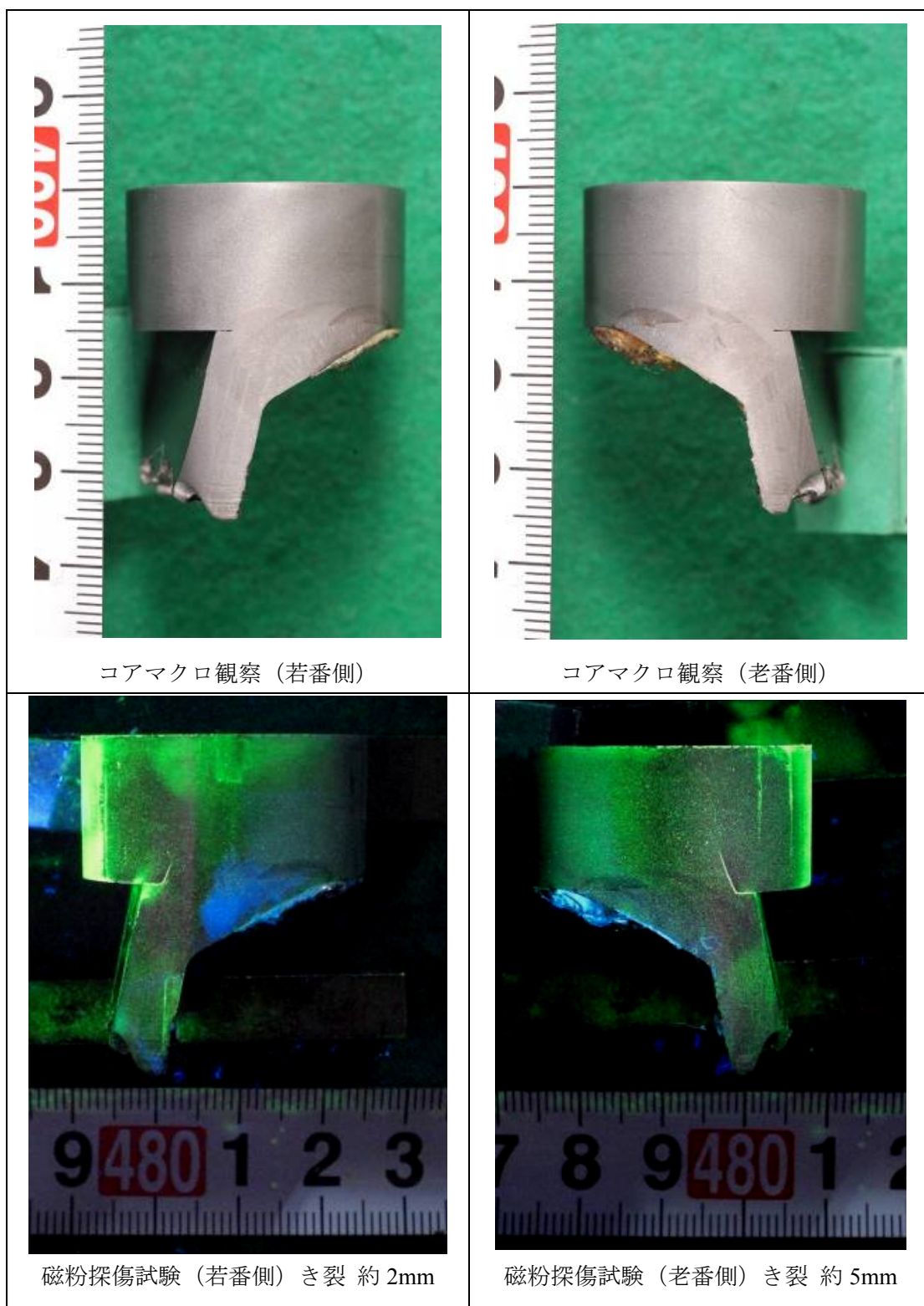


写真-3.3.5 コアマクロ観察および磁粉探傷試験（No.5 試験片）

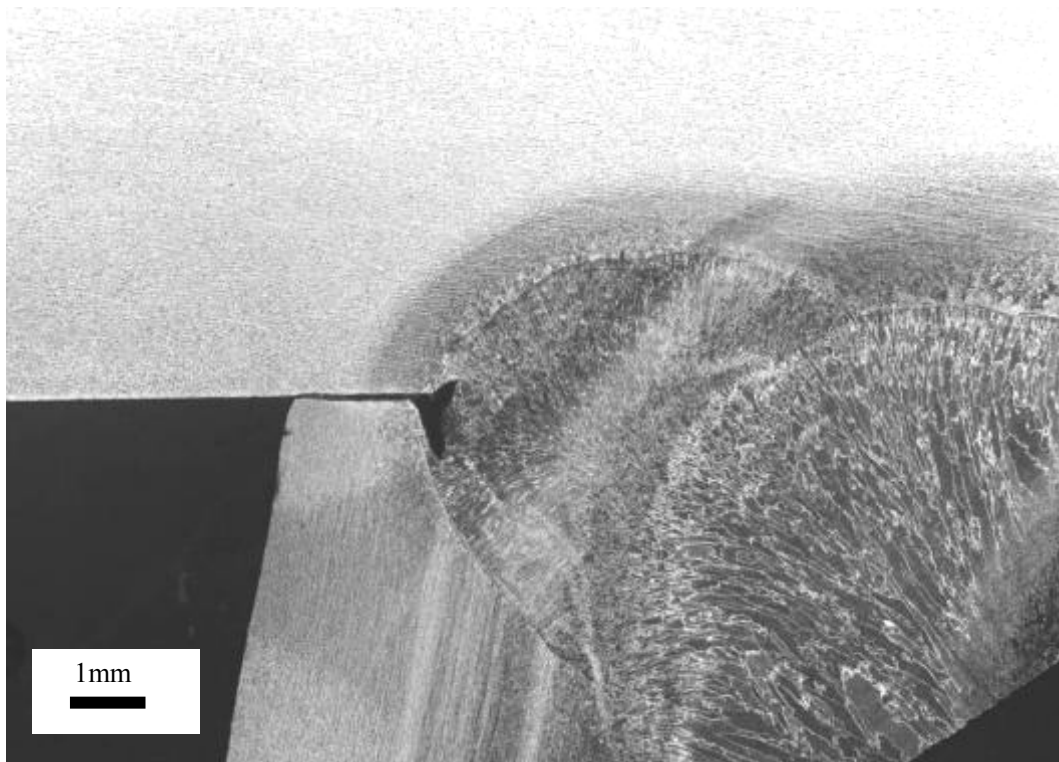


写真-3.3.6 No.1 試験片のルート部組織観察

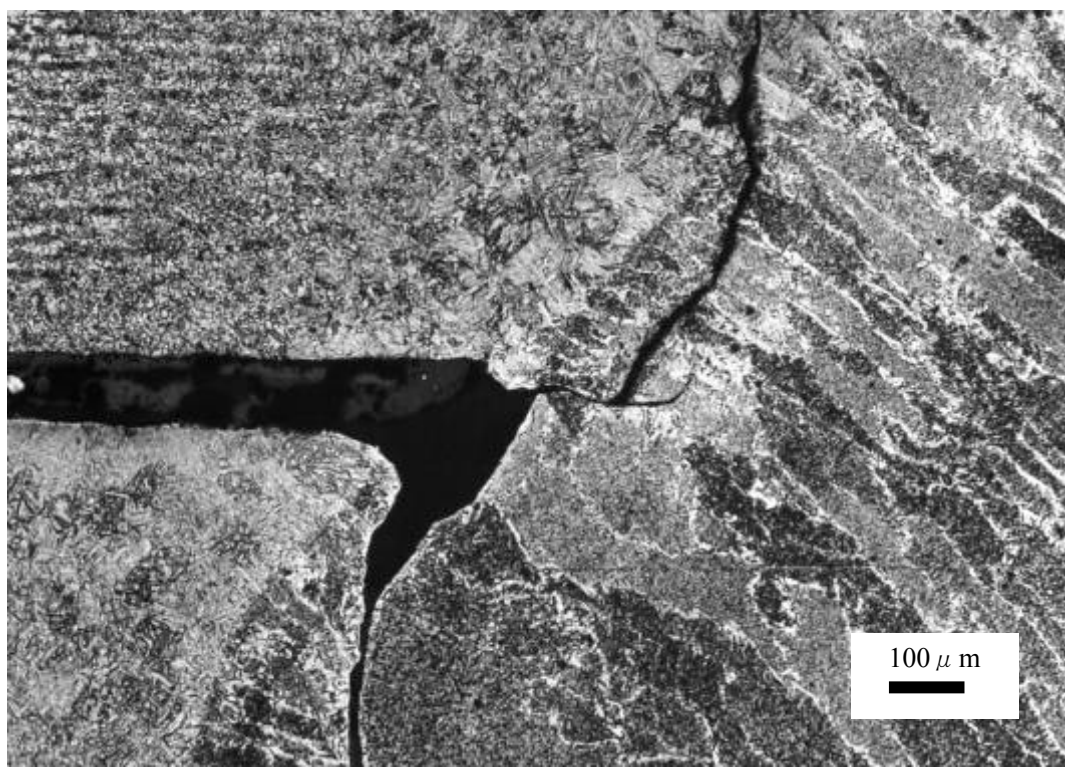
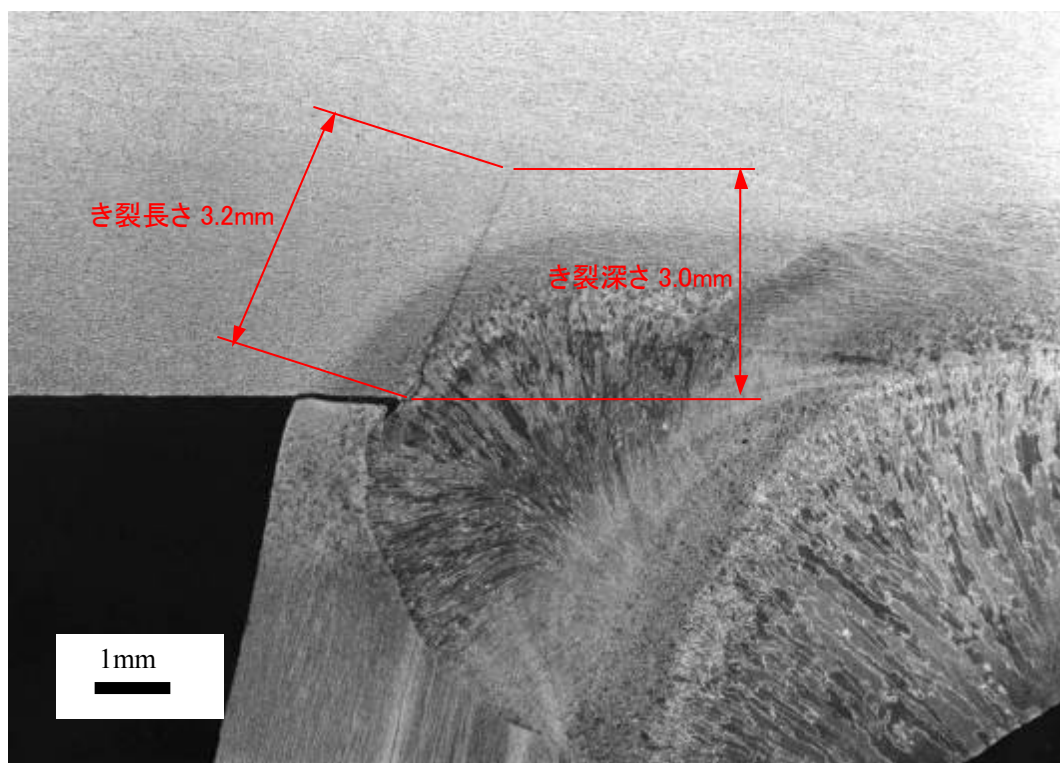


写真-3.3.7 No.2 試験片のルート部組織観察

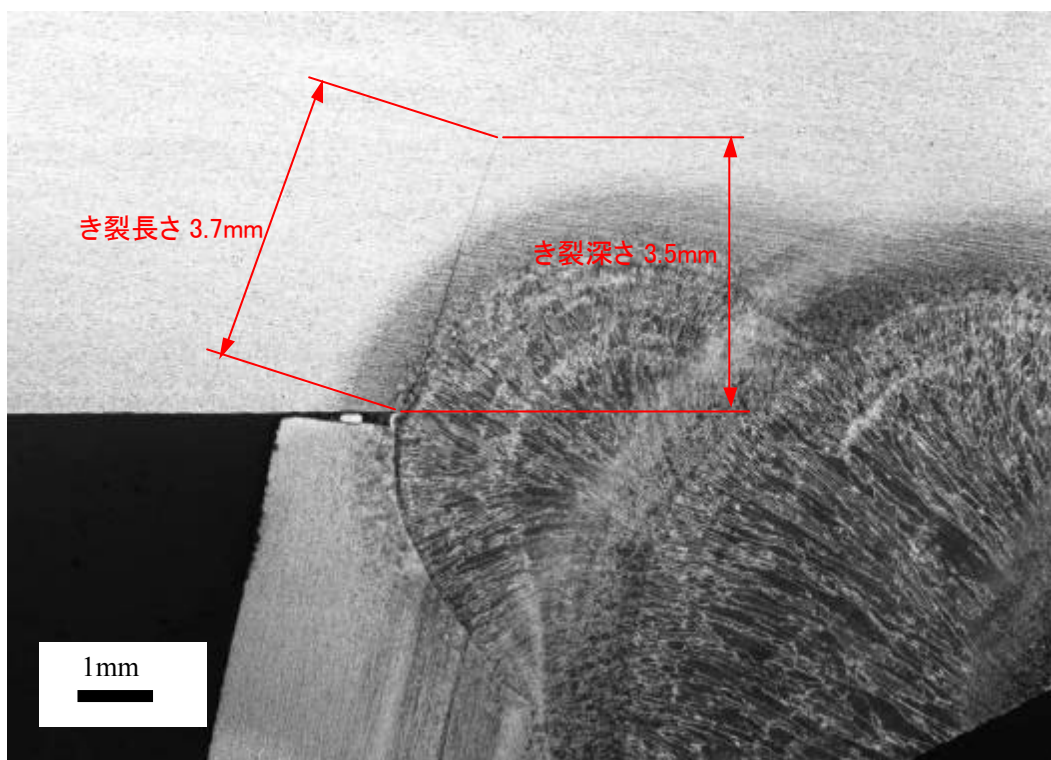


写真-3.3.8 No.3 試験片のルート部組織観察

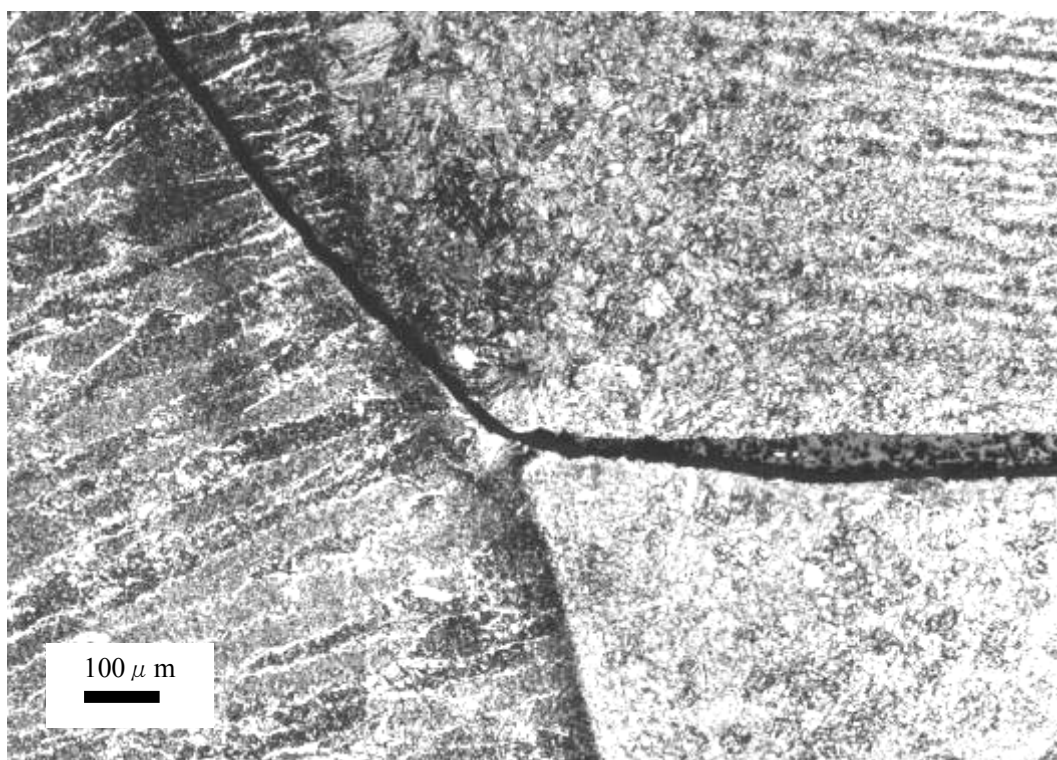
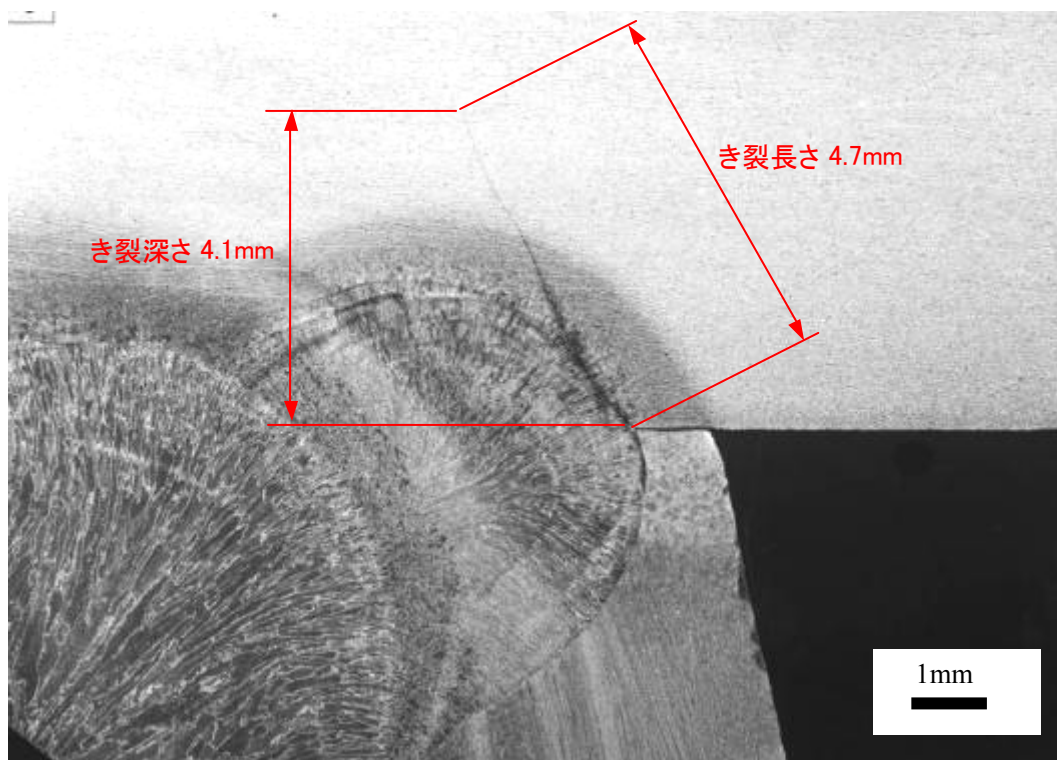


写真-3.3.9 No.4 試験片のルート部組織観察

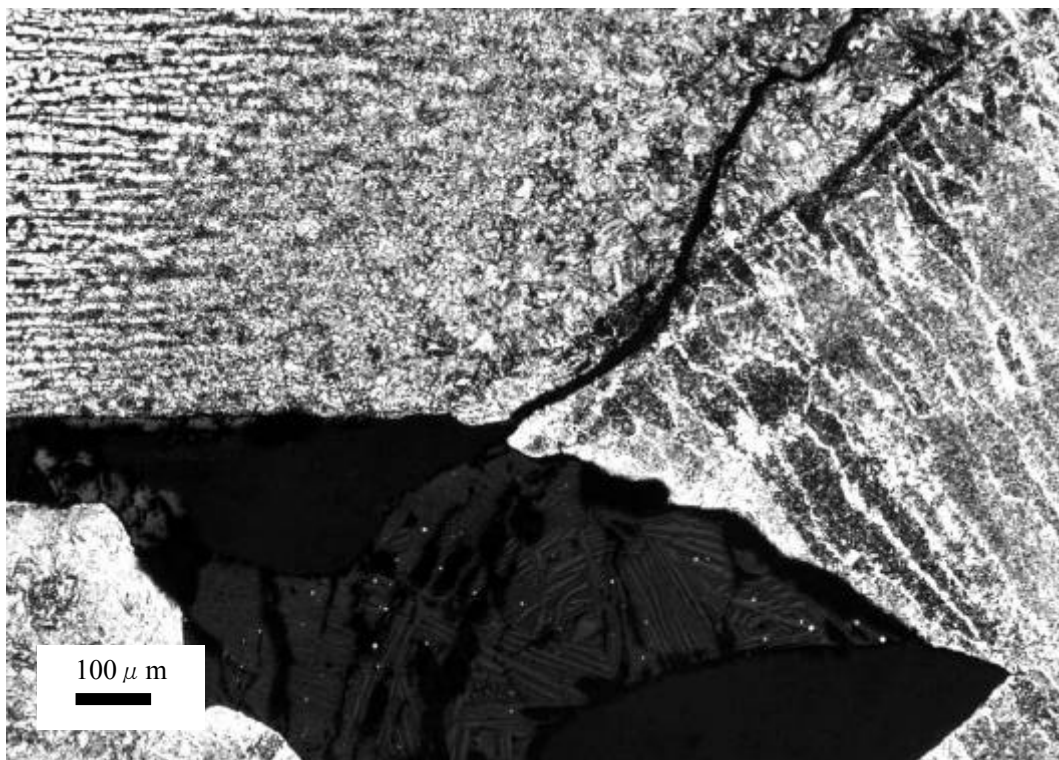
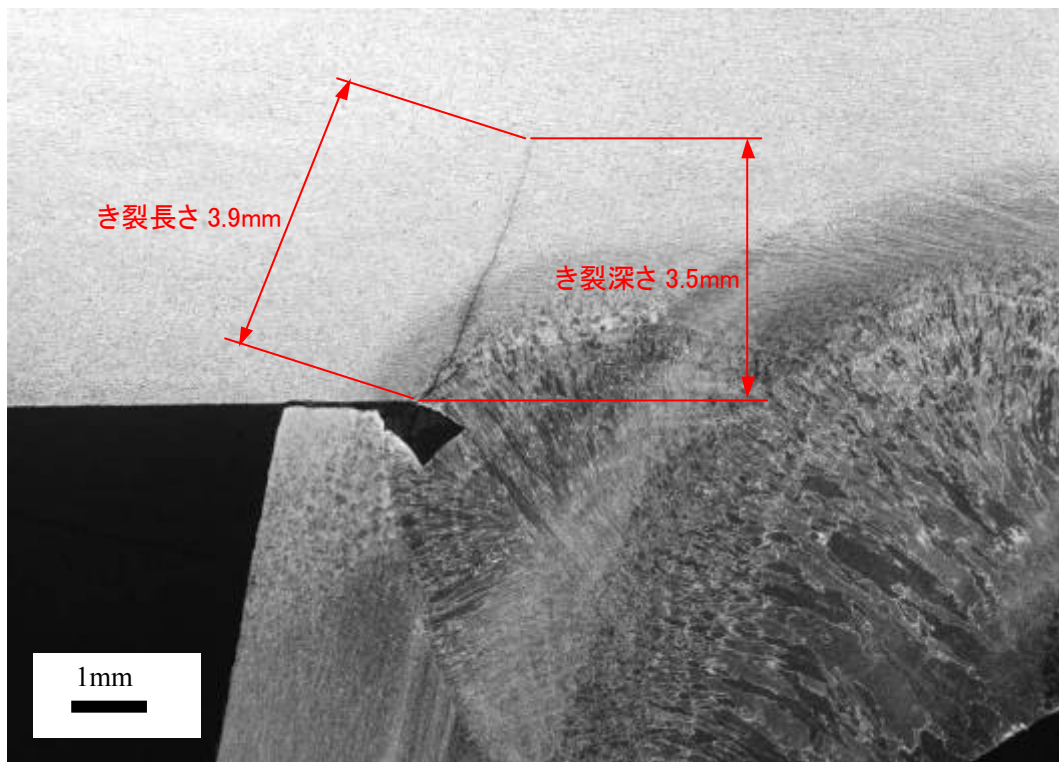


写真-3.3.10 No.5 試験片のルート部組織観察

3.4 FEM 解析

3.4.1 検討概要

輪荷重載荷時の溶接ルート部の局部応力性状を把握することを目的とし、試験体Aを対象としたFEM解析を行った。解析的検討では、静的多点載荷結果と比較することにより解析モデルが妥当であることを検証し、局部応力性状を確認した。さらに、過去に橋建協が実施したデッキプレート厚12mm、14mmとUリブ厚6mm、8mmを組み合わせた4種類の試験体の静的多点載荷試験¹⁾を対象とした解析も実施し、デッキプレート厚とUリブ厚が溶接ルート部の局部応力性状に与える影響について検討を行った。

3.4.2 解析モデル

(1) 基本解析条件

解析は線形弾性解析とし、MSC NASTRAN2007を用いて実施した。解析モデルを図-3.4.1に示す。解析モデルは試験体の他、載荷ブロックによる荷重分散効果やエッジにおける荷重の集中を考慮できるように、載荷ブロックの一部もモデル化している。使用した要素と材料物性値を表-3.4.1に示す。SOLID要素とSHELL要素の結合部の自由度の処理は、図-3.4.2に示すようにSHELL要素を一層埋込むことにより曲げを伝達した。また、デッキプレートとウレタン板間には厚さ0.5mmの弾性係数の小さい要素を挿入し、デッキプレートと載荷ブロックが合成することを回避した。

荷重は載荷ブロック上面に試験状況から判断した一輪あたり100mm×155mmの設置面積を考慮し、118kN（12tf）載荷した。図-3.4.3に載荷状態を示す。なお、拘束条件は主桁下フランジ下面を完全固定としている。

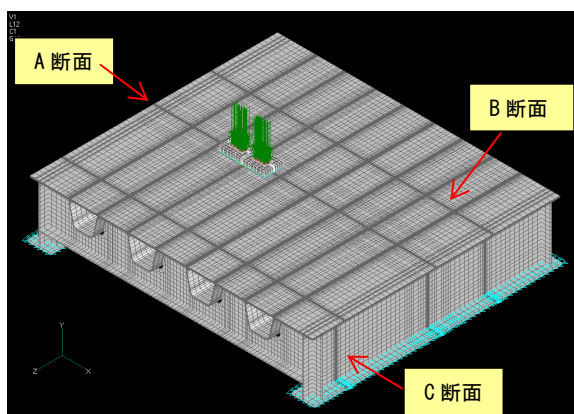


図-3.4.1 解析モデル

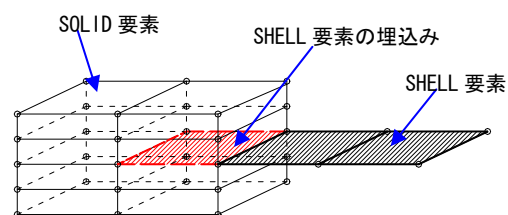


図-3.4.2 SOLID要素とSHELL要素の結合

表-3.4.1 使用要素と材料物性値

材料物性	鋼材	$E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$
	ウレタン	$G=9.0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.49$
	ベニヤ	$E=5.0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.49$
	デッキプレート-ウレタン板間	$E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$ (厚さ0.5mm)
使用要素	SOLID	デッキプレート、トラフリブ、載荷板(載荷ブロック、ベニヤ、ウレタン)
	TRUSS	載荷板せん断キー
	SHELL	上記以外の鋼板

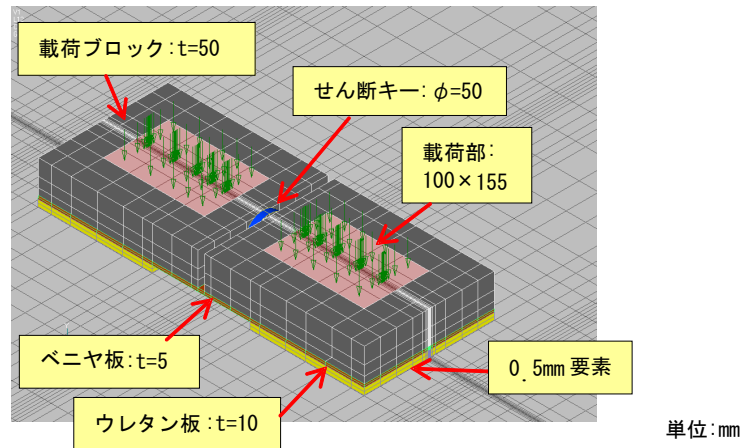


図-3.4.3 載荷ブロック詳細

(2) 着目部近傍のメッシュ分割と着目要素

解析における着目断面は図-3.4.1中に示すように、ひずみ計測を行った縦リブ支間中央（A断面）と縦リブ支間1/4点（B断面）に加え、輪荷重走行試験にて疲労き裂が確認された横リブ近傍断面（C断面）とした。また、ひずみゲージ、および、変位計設置位置には節点を設けた。着目するダブルタイヤに挟み込まれる溶接線近傍のメッシュ分割図を図-3.4.4に示す。

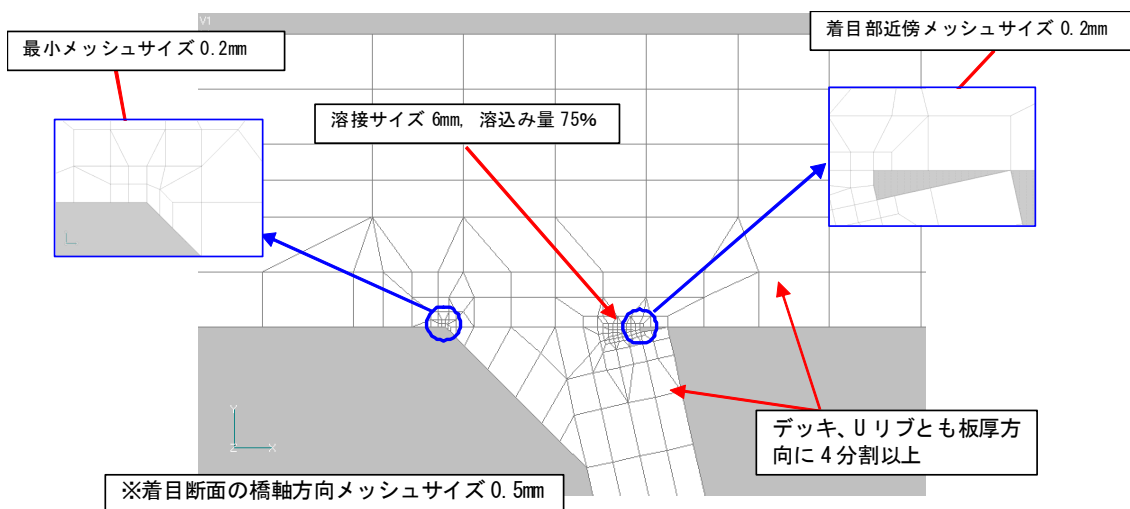


図-3.4.4 着目部近傍メッシュ分割図

3.4.3 解析結果

(1) 溶接部近傍の横断方向ひずみ

A断面直上（縦リブ支間中央）に載荷した場合のA断面，B断面直上近傍（縦リブ支間中央から600mmの位置）に載荷した場合のB断面における着目溶接線の横断方向ひずみについて，解析結果と計測結果の比較を図-3.4.5(a)-(d)，図-3.4.6(a)-(d)に示す。

A断面，B断面のひずみ分布はほぼ同じである。また，両断面ともに，Uリブ外部と内部の解析結果と計測結果はよく一致している。縦リブ支間中央断面のUリブ外側面において，溶接止端部近傍の応力分布の傾向が解析結果と計測結果で若干異なるようにも見えるが，当該箇所のメッシュ分割が粗いこと，Uリブ側面には直応力と曲げ応力が合成されており荷重位置に対して非常に敏感である²⁾こと等を考慮すると，ここで用いた解析モデルを用いてデッキプレート部の局部応力評価が可能だと考えられる。

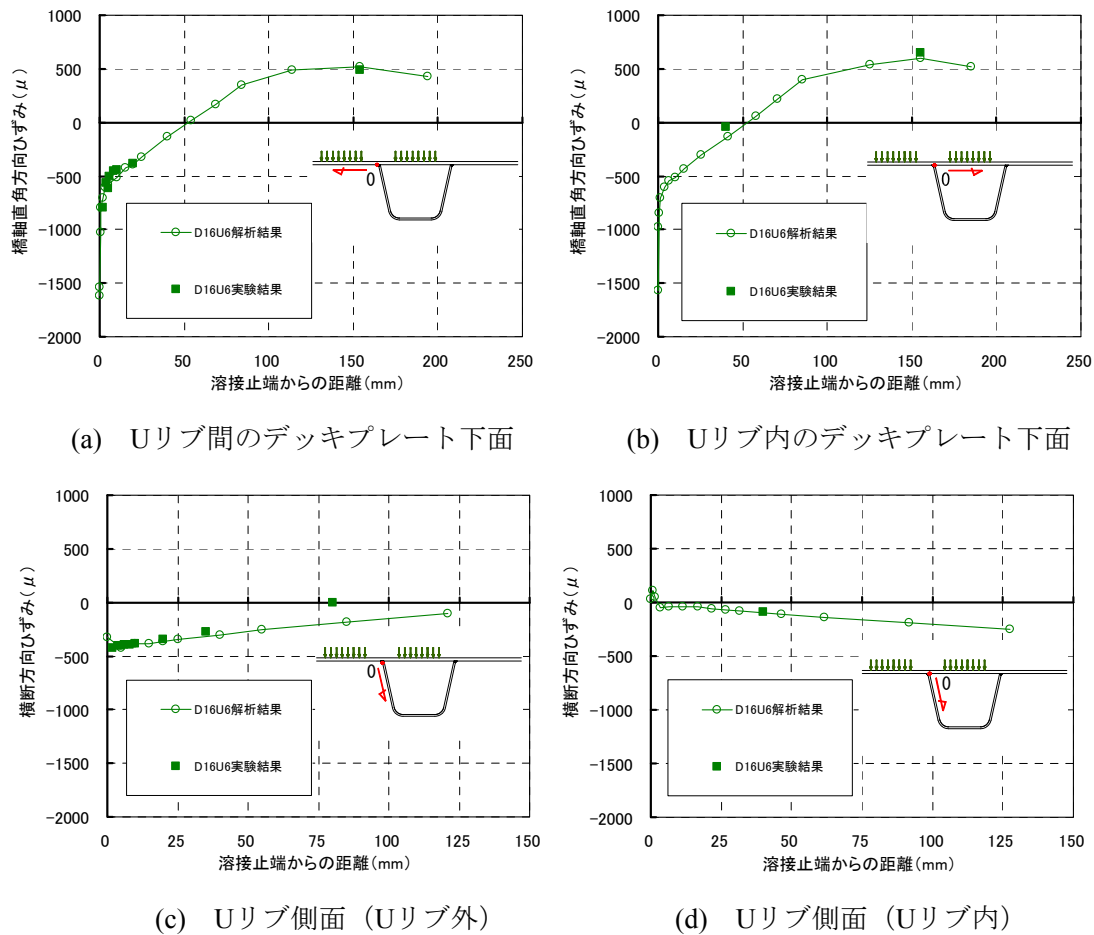
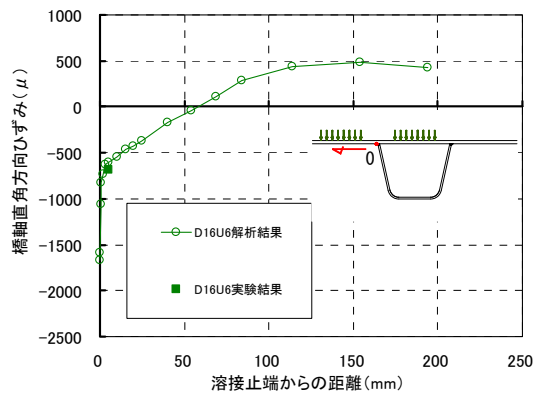
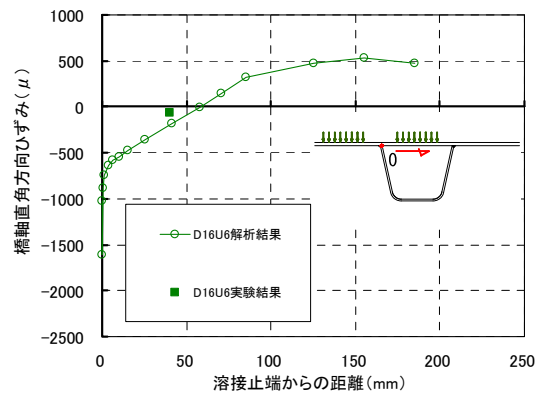


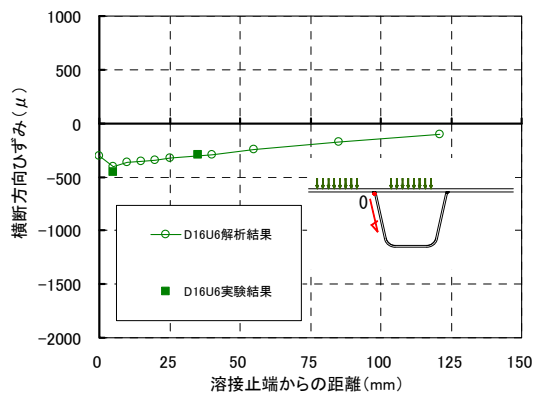
図-3.4.5 A断面の横断方向ひずみ



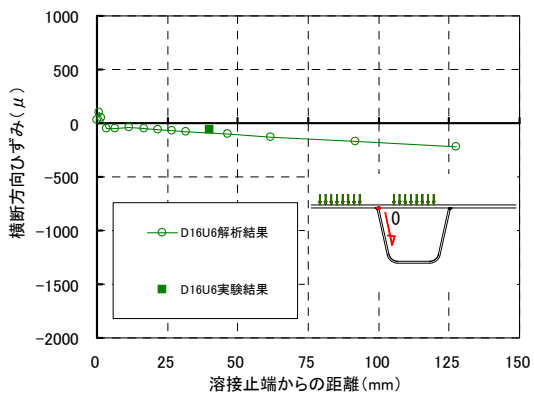
(a) Uリブ間のデッキプレート下面



(b) Uリブ内のデッキプレート下面



(c) Uリブ側面 (Uリブ外)

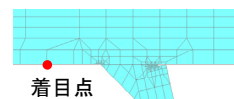
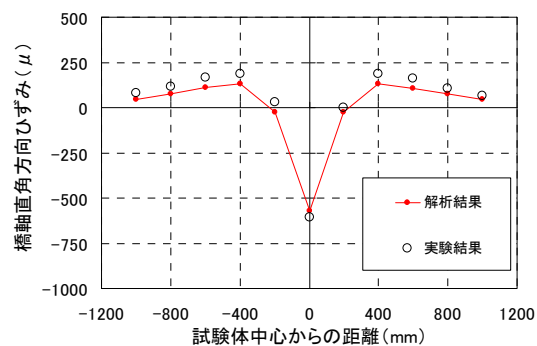


(d) Uリブ側面 (Uリブ内)

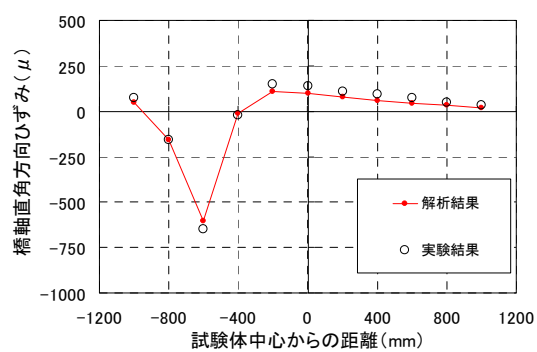
図-3.4.6 B断面の横断方向応力分布

(2) 影響線荷重時のひずみ変動

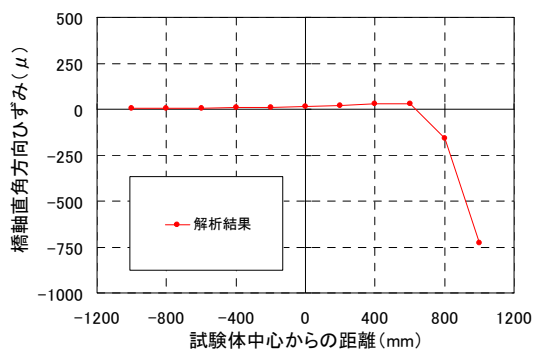
断面A, B, Cにおける着目溶接線のデッキプレート側溶接部から5mm離れた位置に着目した影響線荷重時の橋軸直角方向のひずみ変動を図-3.4.7に示す。各断面とも、直上に載荷した場合は大きな圧縮ひずみが生じるが、着目断面から荷重が離れると引張ひずみが生じており、その値は400mm程離れた位置に載荷した場合に最大となっている。これらのひずみを断面位置で比較すると圧縮ひずみはC, B, A断面の順に大きく、引張ひずみはA, B, C断面の順に大きい。また、断面A, Bについては計測結果もプロットしているが、解析結果と計測結果はよく一致している。



(a) A断面（縦リブ支間中央）



(b) B断面（縦リブ支間1/4点）



(c) C面（横リブ近傍）

図-3.4.7 デッキプレート側溶接部から5mm位置のひずみ変動

3.4.4 構造パラメータと局部応力性状

表-3.4.2に、着目溶接線のA（縦リブ支間中央）、B（縦リブ支間1/4点）、C断面（横リブ近傍）における溶接ルート部局部の橋軸直角方向応力とデッキプレート側溶接止端部から5mm位置の橋軸直角方向ひずみの一覧を示す。表中には本研究で疲労試験を実施したデッキプレート厚16mm、Uリブ板厚6mm（D16U6）に加え、D12U6、D12U8、D14U6、D16U8の解析結果も示している。

全てのケースでA断面とB断面の差は小さい。また、C断面では引張が減少し圧縮が増加する傾向にあり、応力範囲、ひずみ範囲は4～7%増加している。

構造パラメータに着目すると、全ての断面でデッキプレートの板厚が2mm増加すると応力範囲、ひずみ範囲が30%程度低減されることがわかる。Uリブ板厚はデッキプレート厚が薄い場合、若干ではあるが8mmの場合の応力範囲、ひずみ範囲が小さい。

図-3.4.8は構造パラメータ毎に溶接ルート部の橋軸直角方向応力とデッキプレート側溶接止端部5mm位置の橋軸直角方向ひずみの関係を示したものである。図中には、最小二乗法で求めた近似曲線を破線で示しているが、構造パラメータによらず、両者には高い相関性が見られる。溶接溶け込み量やUリブ板厚が異なる場合の溶接条件等については別途検討する必要があるが、本研究で用いた試験体に対し、溶接止端部5mm位置の橋軸直角方向ひずみを用いて疲労強度評価が行える可能性はある。

表-3.4.2 解析結果一覧

試験体	断面	溶接ルート部 橋軸直角方向応力(N/mm ²)			デッキプレート側溶接止端5mm位置 橋軸直角方向ひずみ(μ)		
		$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$	$\Delta \sigma$	$\varepsilon_{\max}$	$\varepsilon_{\min}$	$\Delta \varepsilon$
D12U6	A	74	-716	790	139	-1123	1262
	B	63	-715	778	116	-1139	1254
	C	15	-801	816	23	-1293	1316
D14U6	A	73	-518	591	136	-809	945
	B	62	-523	585	114	-832	946
	C	17	-600	617	26	-972	998
D16U6	A	73	-382	455	132	-572	705
	B	62	-392	454	110	-601	712
	C	19	-463	482	28	-727	755
D12U8	A	54	-674	728	127	-1130	1257
	B	46	-666	712	104	-1141	1245
	C	8	-738	746	18	-1285	1304
D14U8	A	55	-498	552	122	-827	948
	B	46	-497	543	100	-845	944
	C	10	-561	571	20	-973	993
D16U8	A	55	-374	429	116	-597	712
	B	46	-377	424	95	-620	714
	C	12	-436	448	21	-734	755

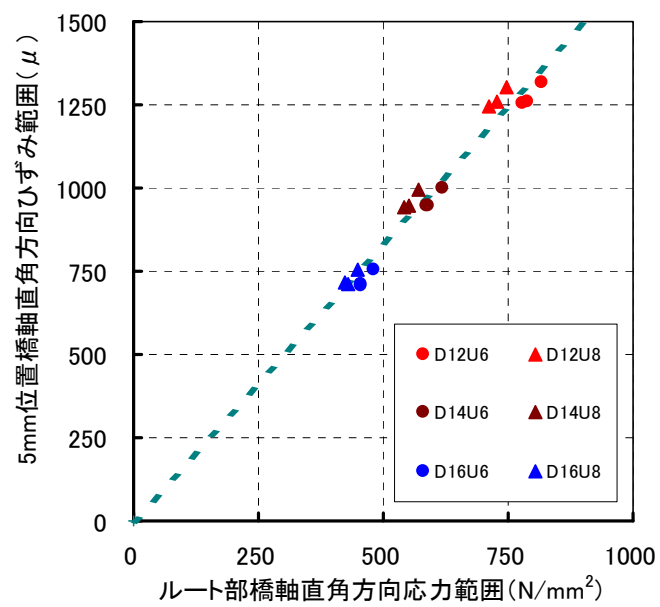


図-3.4.8 外側5mm位置のひずみとルート部局部応力

3.5 第3章のまとめ

本章では、デッキプレート厚を 16mm、U リブ板厚を 6mm (D16U6) とした試験体 A (1 パネル試験体) の静的載荷試験、輪荷重走行試験結果と FEM 解析結果についてとりまとめた。以下に、本章のまとめを述べる。

(1) 輪荷重走行試験

輪荷重走行試験では、118kN の荷重を 300 万回載荷したが、床版としての剛性が問題となるような変状は見られなかった。

輪荷重走行試験中に経時的に実施した超音波探傷試験では 6mm 以上のき裂を検知することは出来なかったが、このことは輪荷重走行試験後に実施したデッキプレートのコアサンプルのマクロ試験で、最大き裂深さが 4.1mm であったことと一致していた。なお、コア抜き試験の結果、デッキプレートと U リブ溶接で溶接が U リブ内部まで達しているものが確認され、U リブ内部に形成された溶接ビードの止端部からデッキプレートへ進展するき裂が確認された。

(2) 過年度に実施された輪荷重走行試験結果との比較

過年度に実施された同形状で、デッキプレート厚が 12mm で U リブ板厚が 8mm (D12U8)、デッキプレート厚が 14mm で U リブ板厚が 6mm (D14U6) の輪荷重走行試験結果との比較では、デッキプレートを増厚することにより、着目溶接線近傍でひずみ低減効果があることを確認した。疲労試験結果の整理ではデッキプレート側溶接止端から 5mm 位置のひずみゲージの疲労き裂発生に起因すると考えられるひずみ変化に着目した。ひずみが 5% 変化するまでの走行回数は D14U6、D12U8、D16U6 の順で早くなり、変化するひずみの絶対値は D12U8、D14U6、D16U6 の順で大きくなることを確認した。さらに、超音波探傷試験の結果も比較し、デッキプレートが厚くなるとひずみの進展が遅くなる傾向にあることも確認した。U リブの板厚、すなわち溶接条件の違いや疲労試験の結果のばらつきもあり、3 者を単純に比較することは出来ないが、デッキプレートを 16mm とすることにより、疲労き裂の発生と進展を抑制できる可能性を確認した。

(3) 解析的検討結果

解析的検討では、本研究と過年度に実施した疲労試験体を対象とし、D12U6、D12U8、D14U6、D14U8、D16U6、D16U8 の 6 種類のモデルを対象とした。その結果、U リブの板厚が発生応力に与える影響は小さいこと、デッキプレートを増厚することによりひずみの低減が可能なことを確認した。なお、疲労設計曲線の傾きを表す係数 $m=3$ と仮定すれば、デッキプレートを 12mm から 14mm とすることで、疲労寿命が 2 倍以上、16mm とすることで 5 倍前後となる。

また、溶接止端部 5mm 位置の橋軸直角方向ひずみと溶接ルート部の橋軸直角方向応力の比較を行い、溶接止端部 5mm 位置の橋軸直角方向ひずみを用いて疲労強度評価が行える可能性を示した。

【参考文献】

- 1) 川畑篤敬，井口進，廣中修，鈴木統，齊藤史朗：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試験，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.247-252，2006.7.
- 2) 例えば，井口 進，寺尾圭史，西野崇史，村越潤：鋼床版 S F R C 舗装施工前の静的載荷試験，土木学会第 60 回年次学術講演会，CS10-017，2005.9.

【付録】

鋼床版デッキプレート-Uリブ溶接部の超音波探傷検査要領

1. 適用範囲

本要領は鋼床版デッキプレートとUリブ溶接部におけるデッキプレート方向に進展する亀裂の調査のための超音波探傷検査について規定する。また参考として溶接部内に発生し溶接表面に向かう亀裂についても監視を行うものとする。

2. 準拠する規格

JIS Z 2344「金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法」

JIS Z 2345「超音波探傷試験用標準試験片」

JIS Z 2350「超音波探触子の性能測定方法」

JIS Z 3060「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」

3. 検査装置および資材

(1) 超音波探傷器	UI-25	菱電湘南エレクトロニクス(株)	
(2) 探触子	クリーピング波法	5C10×5LAD90	ジャパンプローブ(株)
	表面SH波法	5Z5×5HAD90	ジャパンプローブ(株)
	端部エコー法	5C15A70-SF	ジャパンプローブ(株)
	垂直法	FH2E-D	パナメトリクス
(3) 接触媒質	グリセリン(濃度75%以上)およびソニコートSH		
(4) 標準試験片	STB-A1, STB-A2, STB-A3		

4. 検査技術者

検査技術者は(社)日本非破壊検査協会の認定する超音波検査2種以上の資格を有するものとする。

5. 検査対象箇所

鋼床版デッキプレート-Uリブ溶接部 R3R R3L R4R

6. 探傷の準備

(1) 装置の調整

使用する検査装置については、探傷に先立ち入射点の測定、STB屈折角の測定を行う。測定範囲は端部エコー法では125mmに、またクリーピング法、表面SH波法垂直法では50mmに調整する。

(2) 探傷面の手入れ

探傷に支障となるスパッタ、スケール等がある場合はこれを除去する。

(3) 探傷の時期

荷重載荷の前に初期状態のデータを採取する。その後は指定された載荷回数に応じて探傷を行う。

7. 探傷方法

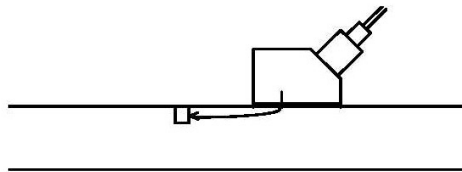
7-1 クリーピング波法・表面SH波法

7-1-1 デッキプレート方向に進展する亀裂の調査

(1) 探傷感度

クリーピング波法は90° 縦波斜角探触子を用いる。STB-A2のφ4×4の標準穴と探触子前面との距離を15mmに保ち、エコー高さを50%になるよう感度を調整し、6dB感度を高めて探傷感度とする。

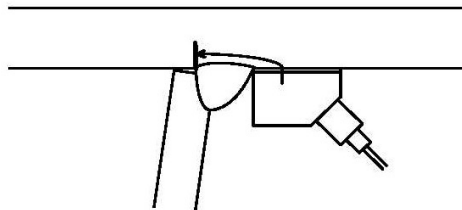
表面SH波法はSH斜角探触子を用いる。STB-A2のφ4×4の標準穴と探触子前面との距離を15mmに保ち、エコー高さを50%になるよう調整し、12dB感度を高めて探傷感度とする。



(2) 探触子の走査

下図に示すように探触子をデッキ側に配置し、接近限界付近を溶接線方向に走査する。このとき若干の前後走査、首振走査を行う必要がある。

クリーピング波法は検査範囲全線を走査するものとし、表面SH波法では定められた定点及びクリーピング波法で亀裂が認められた部位について走査を行う。



(3) 記録

定められた定点においてルート部付近に得られるエコーはすべて記録する。

(4) 評価

初期状態で得られたエコー高さを基本とし、初期状態でエコーのない部位に新たにエコーが出現した場合、あるいは明らかに初期状態よりエコー高さが高くなった場合には亀裂が発生したと評価する。

クリーピング波法ではエコー高さが50%まで、表面SH波法ではエコー高さが30%まではその亀裂深さを2mm以下とする。

いずれか一方でもそれを超えた場合には、後述する端部エコー法により亀裂の深さを測定する。

7-1-2 溶接部内を進展する亀裂の確認

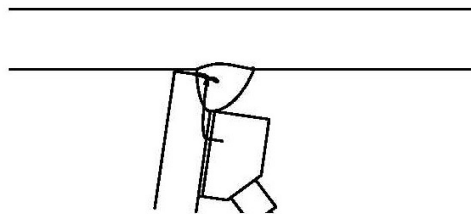
(1) 探傷感度

前項7-1-1の(1)と同じ探傷感度とする。

(2) 探触子の走査

下図に示すように探触子をUリブ側に配置し、接近限界付近を溶接線方向に走査する。このとき若干の前後走査、首振走査を行う必要がある。

クリーピング波法は検査範囲全線を走査するものとし、表面SH波法では定められた定点及びクリーピング波法で亀裂が認められた部位について走査を行う。



(3) 記録

定められた定点においてルート部付近に得られるエコーはすべて記録する。

(4) 評価

初期状態で得られたエコー高さを基本とし、初期状態でエコーのない部位に新たにエコーが出現した場合、あるいは明らかに初期状態よりエコー高さが高くなった場合には亀裂が発生したと評価する。

亀裂の深さは後述する端部エコー法及び垂直法により測定する。

7-2 端部エコー法

(1) 適用範囲

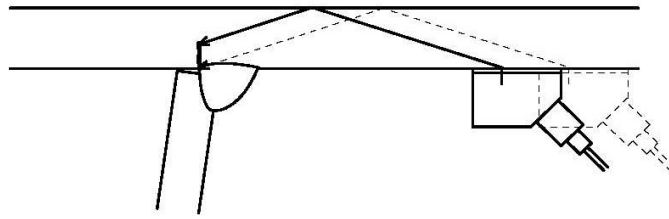
端部エコー法は、前述のクリーピング波法及び表面SH波法において亀裂と評価され、その深さが2mmを超えると判断された場合に適用する。

(2) 探傷感度

集束型斜角探触子で屈折角 70° のものを使い、STB-A2の $\phi 4 \times 4$ の標準穴を0.5スキップで80%に調整し探傷感度とする。この感度はあくまで標準であり、端部エコーが十分確認できるよう増減することができる。

(3) 探触子の走査

次図に示すように探触子を配置し、亀裂に対し前後走査を行う。



(4) 測定方法

前後走査により亀裂の上端部からの端部エコーを検出し、最大エコーが得られる位置での反射源の深さを求め亀裂の高さとする。

7-3 垂直法

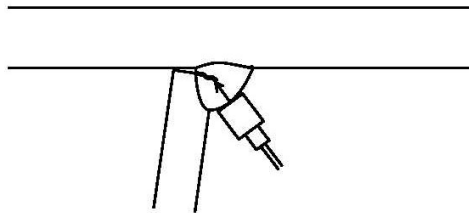
垂直法は、基本的にデッキプレートの亀裂調査には必要ではないが、万が一溶接部内を進展する亀裂が発生し、デッキプレート調査に支障が生じる場合を想定して参考までに行うものとする。

(1) 探傷感度

分割型垂直探触子を用い、STB-A2 $\phi 4 \times 4$ の裏面からのエコー高さを50%に調整した後、6dB感度を高めて探傷感度とする。

(2) 探触子の走査

探触子を溶接線上に配置し、検査範囲全線を走査する。



(3) 記録

定められた定点においてルート部付近に得られるエコーはすべて記録する。

(4) 評価

初期状態で得られたエコー高さを基本とし、初期状態でエコーのない部位に新たにエコーが出現した場合、あるいは明らかに初期状態より距離が短くなった場合には亀裂が発生したと評価する。

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 ではこば面を 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。

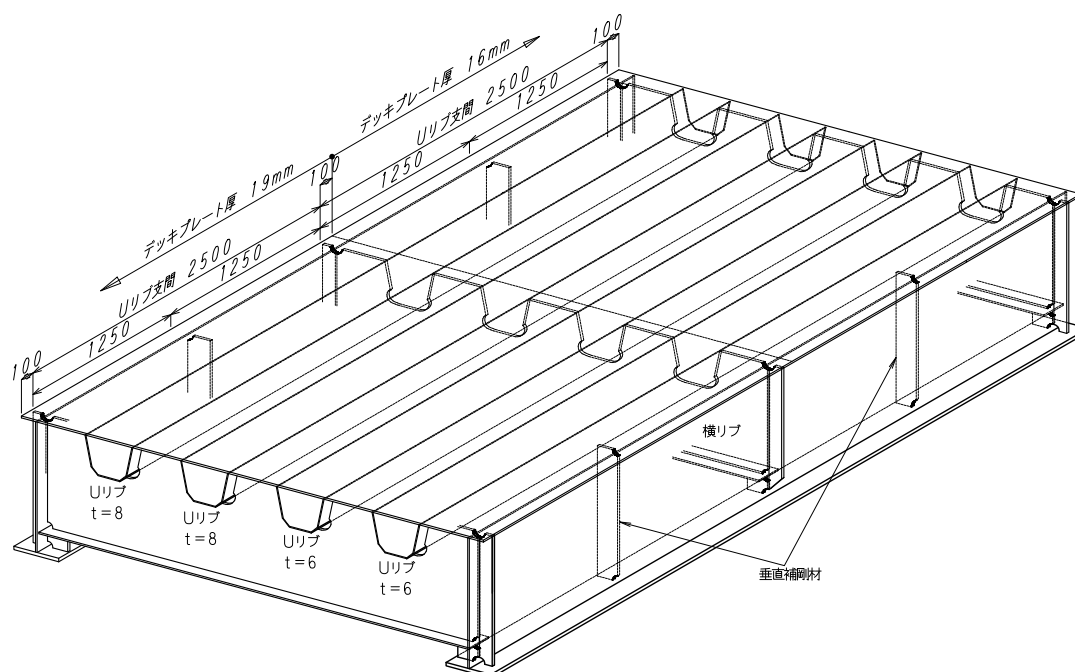


図-4.2.1 供試体の概略図

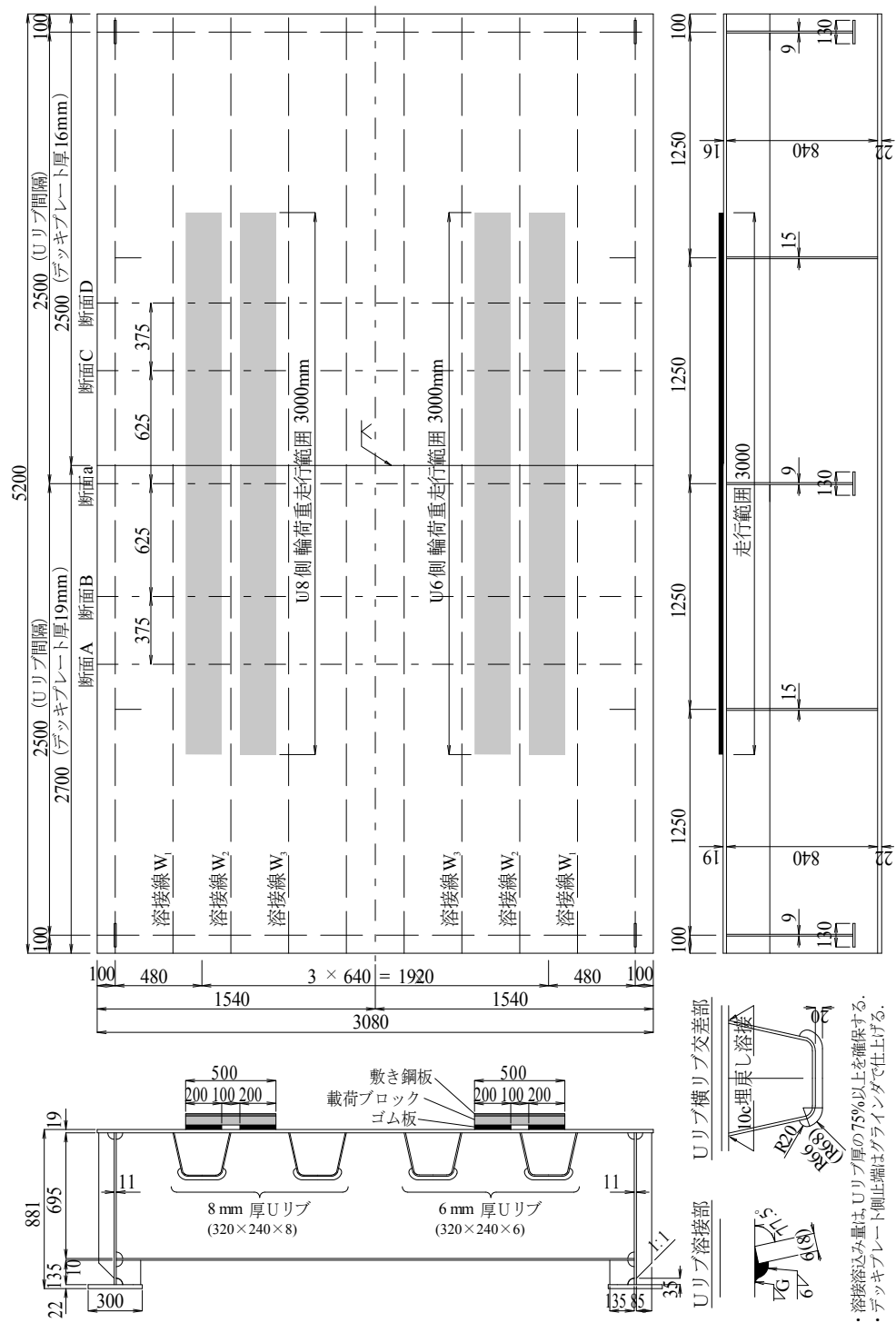
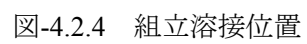
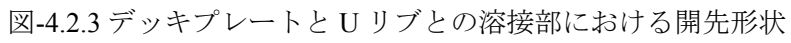


図-4.2.2 供試体の寸法形状



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	φ 700×幅500mm (供試体幅=2,800mm用)
			鉄輪 2	φ 700×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 , ±1.5m
		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)
		最大ストローク		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。

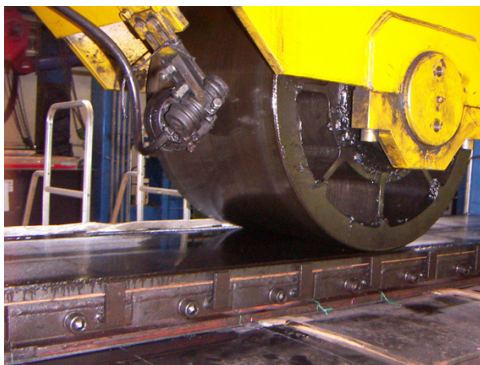
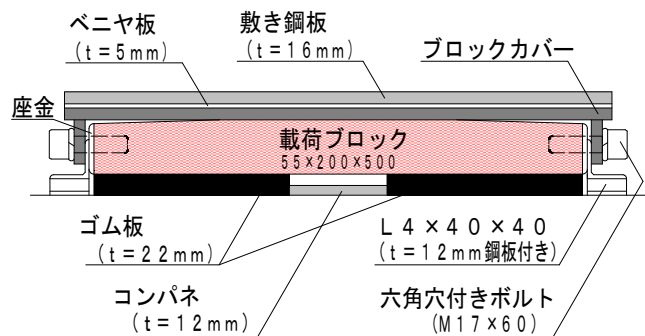
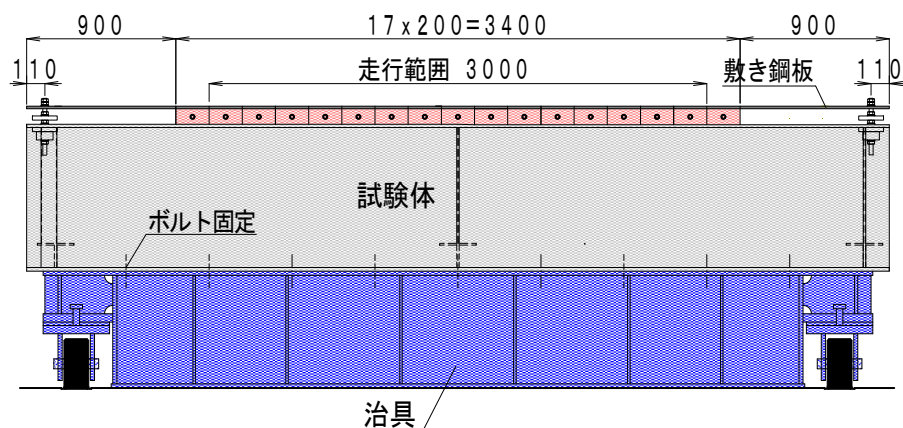


写真-4.3.2 載荷状況



(a) 載荷法の概要

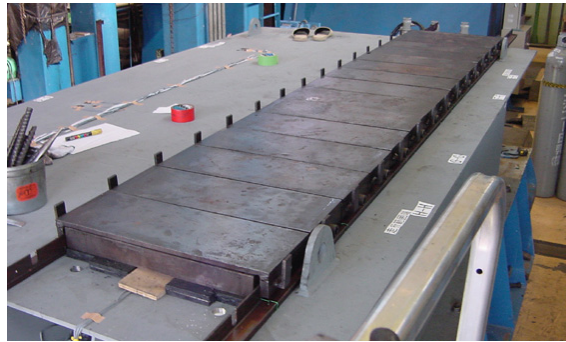


(b) 載荷ブロックの設置

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。

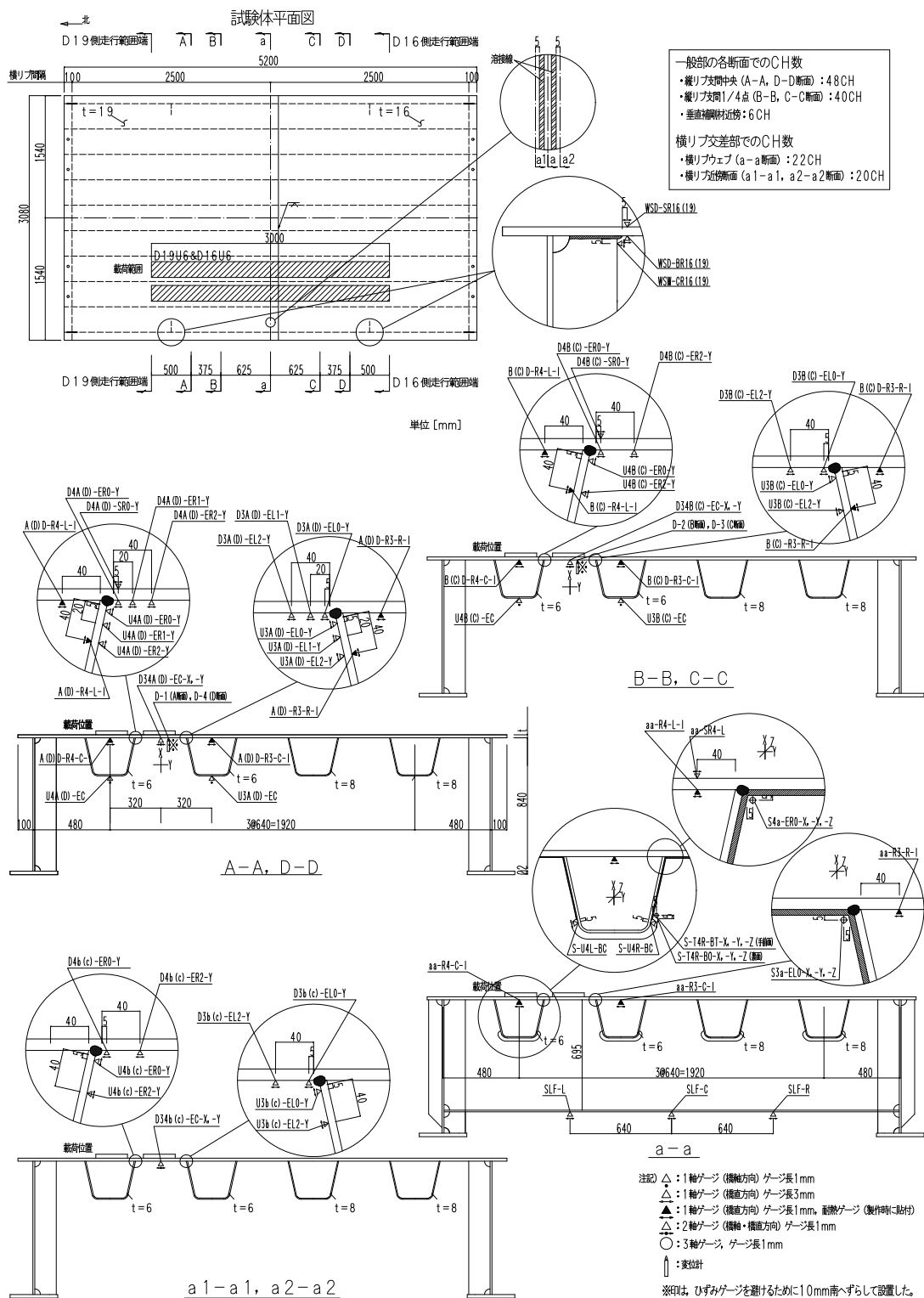


図-4.3.2 ひずみゲージ等設置位置 (1/2) : U6 側載荷時

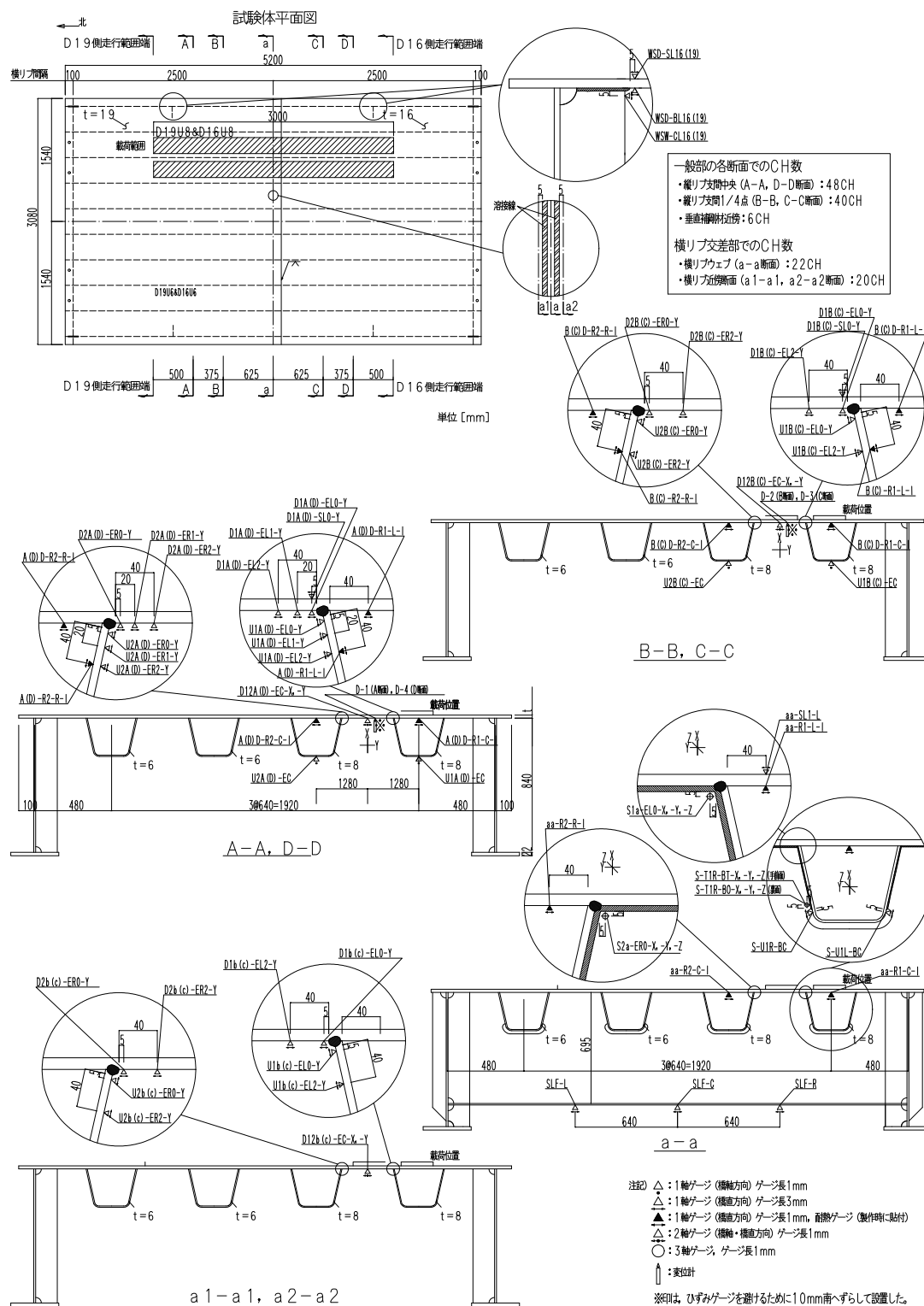


図-4.3.2 ひずみゲージ等設置位置 (2/2) : U8 側載荷時

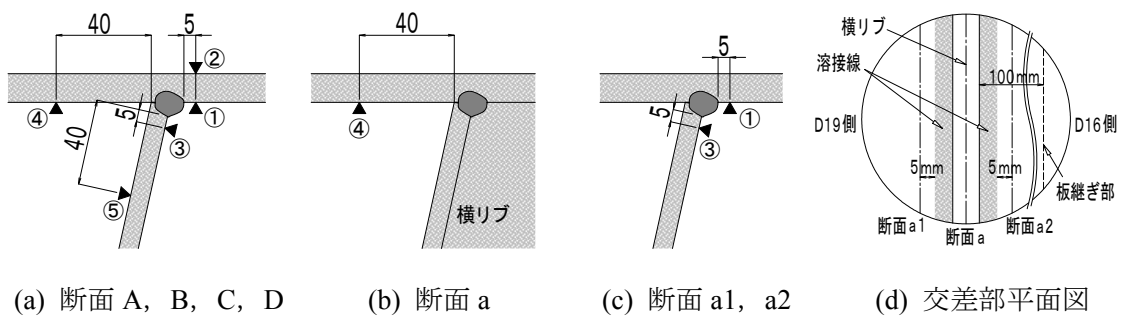


図-4.3.3 着目溶接線近傍における主要なひずみゲージ

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

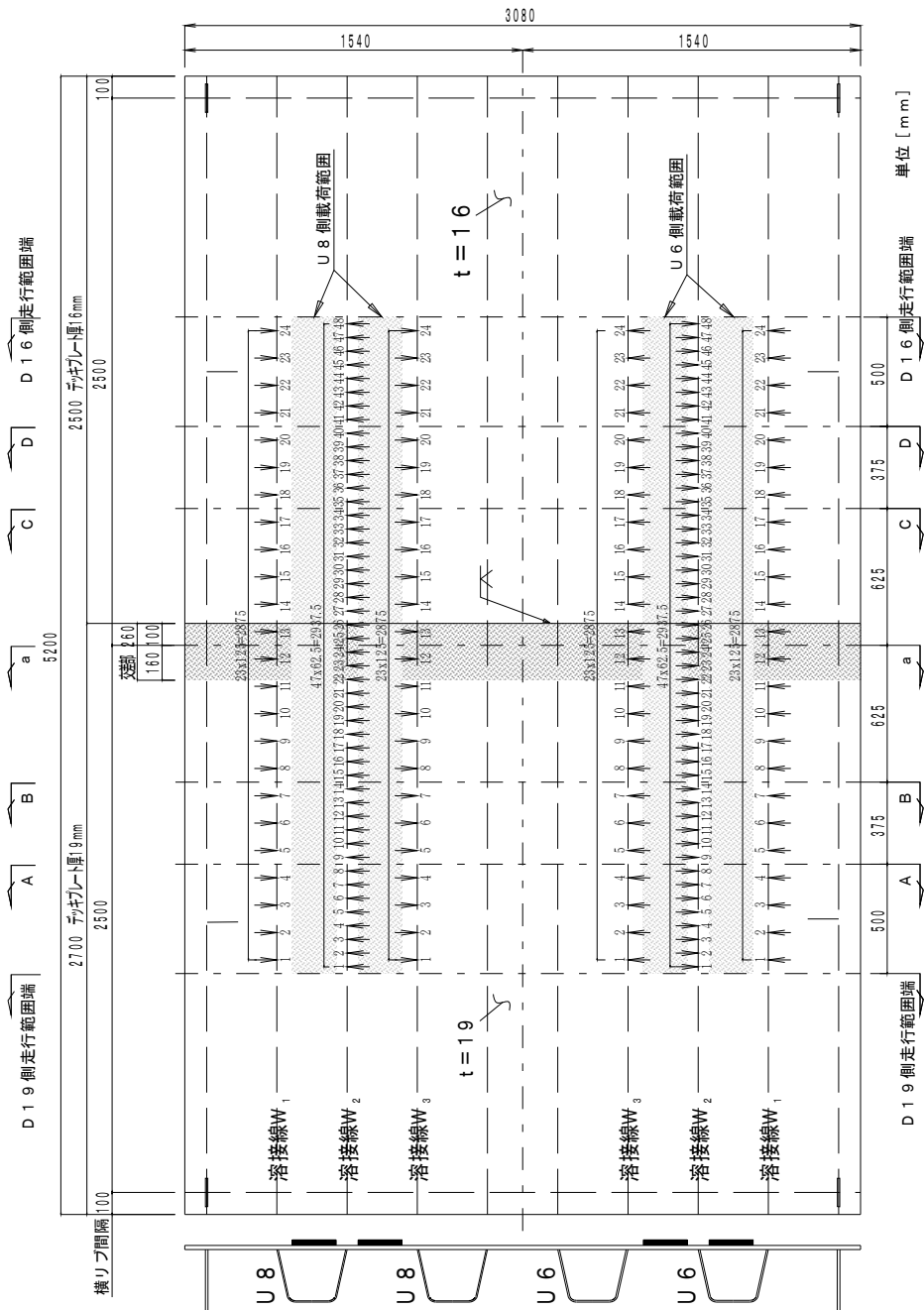


図-4.3.4 超音波探傷試験による計測位置



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）

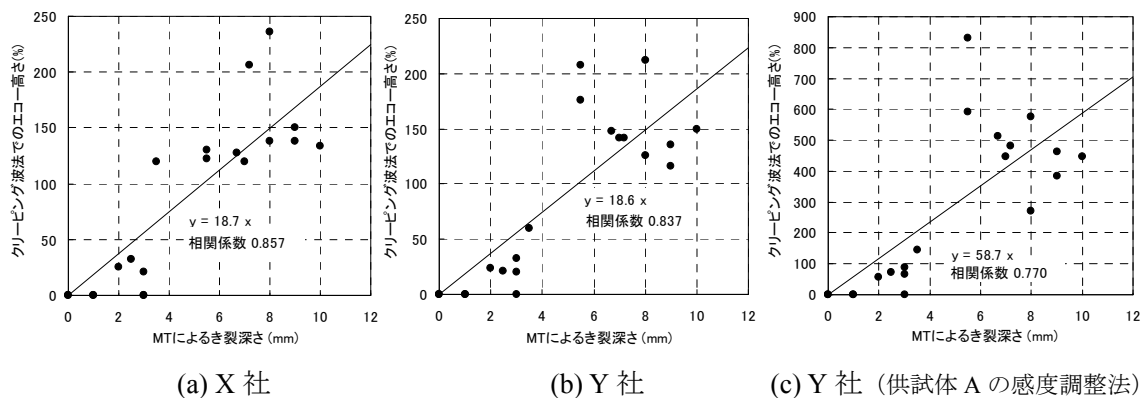


図-4.3.5 クリーピング波法による超音波探傷試験結果とき裂深さの関係

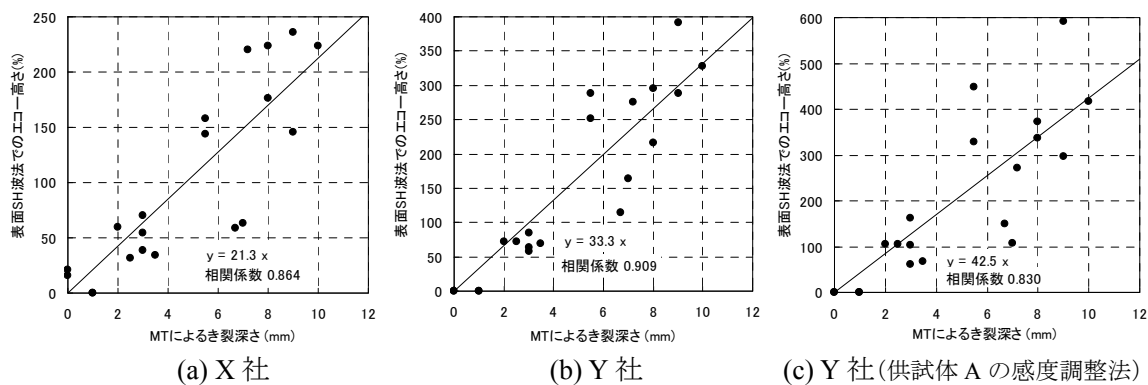


図-4.3.6 表面 SH 波法による超音波探傷試験結果とき裂深さの関係

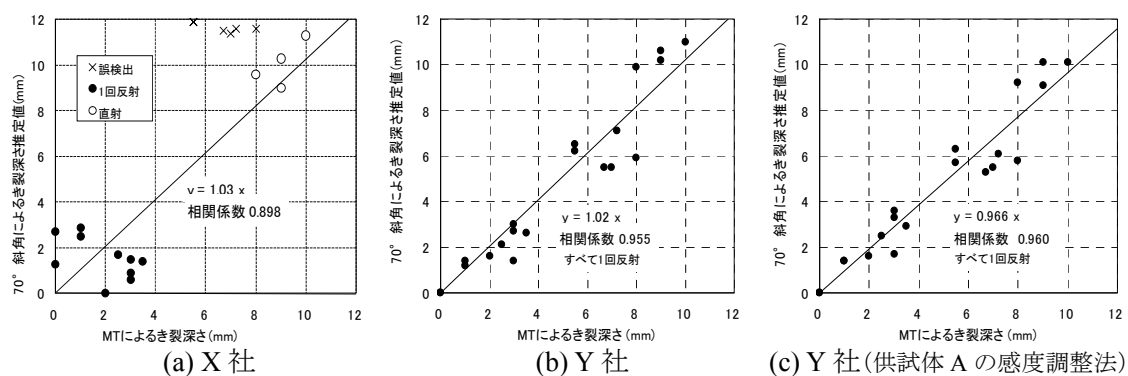


図-4.3.7 70° 斜角法（端部エコー法）による超音波探傷試験結果とき裂深さの関係

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。

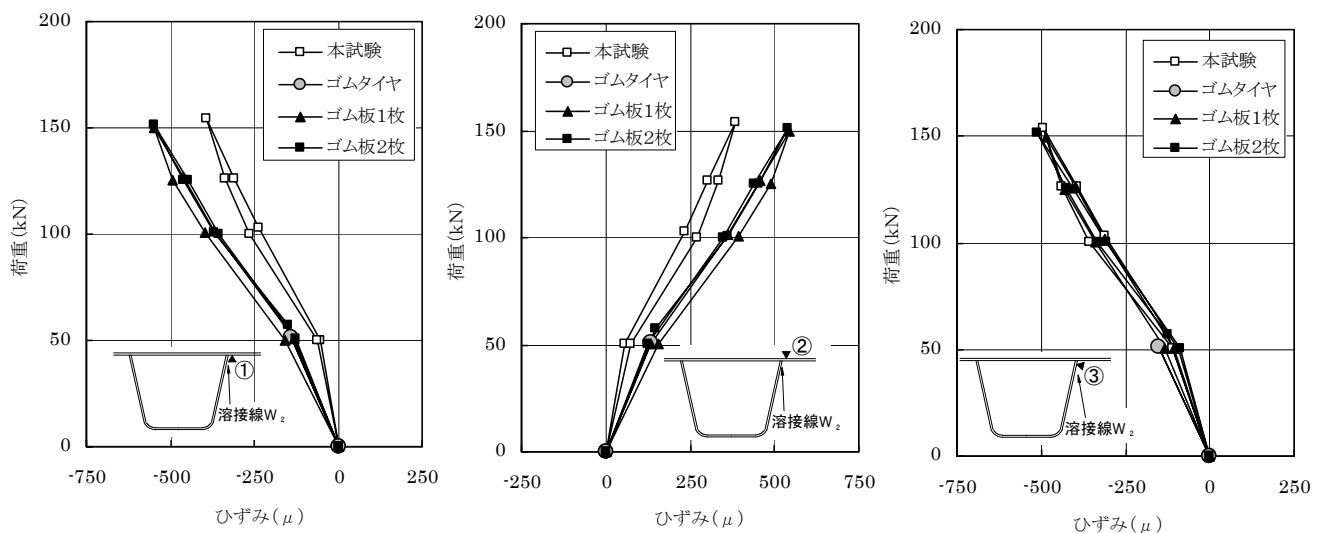
写真-4.4.1に接地圧分布計測時の状況を、写真-4.4.2に計測結果を示す。ケースaの150kN載荷時の結果は他のケースよりも橋軸方向に分布する傾向がみられ、接地圧分布計測からも敷き鋼板による橋軸方向の荷重分散と考えられる。

表-4.4.1 計測条件

載荷方法		ケース a(本載荷)		ケース b	ケース c	ケース d
載荷輪		鉄輪		ゴムタイヤ	鉄輪	鉄輪
介在物		敷き鋼板、載荷ブロック、ゴム板1枚		なし	載荷ブロック、ゴム板1枚	載荷ブロック、ゴム板2枚
静的載荷試験時	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	50
	気温 (℃)	23	12	26	25	25
	湿度 (%)	80	78	66	66	66

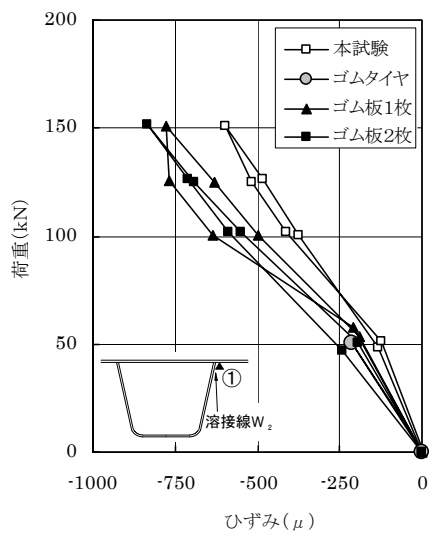
表-4.4.2 ひずみゲージ①における本試験ケースとゴム板1枚ケースのひずみ比率
(敷き鋼板の影響)

	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	

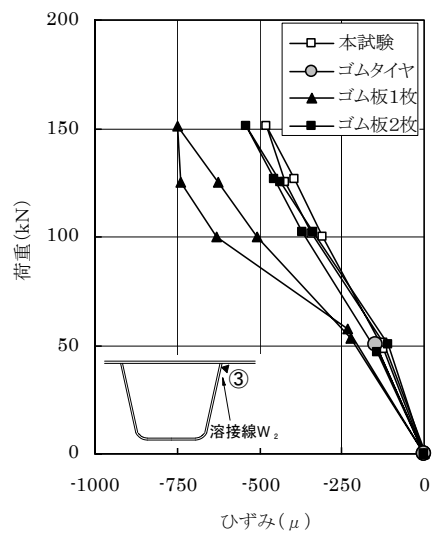


i) デッキプレート側止端 5mm ii) デッキプレート上面 iii) Uリブ側止端 5mm

(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

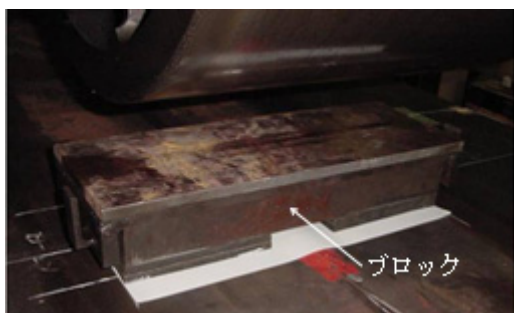
図-4.4.1 載荷時の計測ひずみ



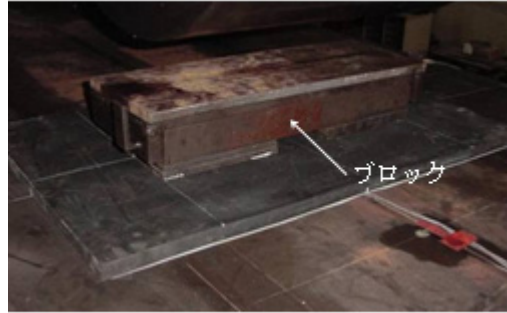
ケース a: 本試験



ケース b: ゴムタイヤ

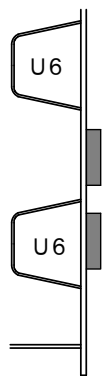


ケース c: ゴム 1 枚



ケース d: ゴム 2 枚

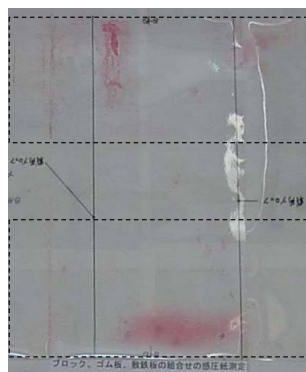
写真-4.4.1 感圧紙による接地圧分布の測定状況



載荷位置



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)

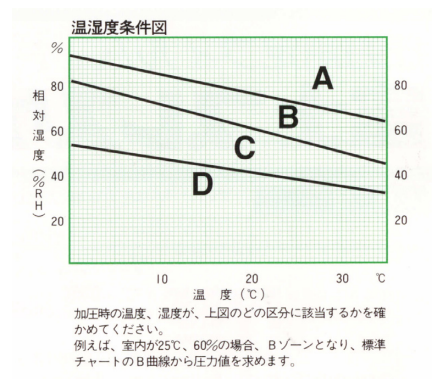
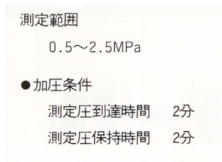
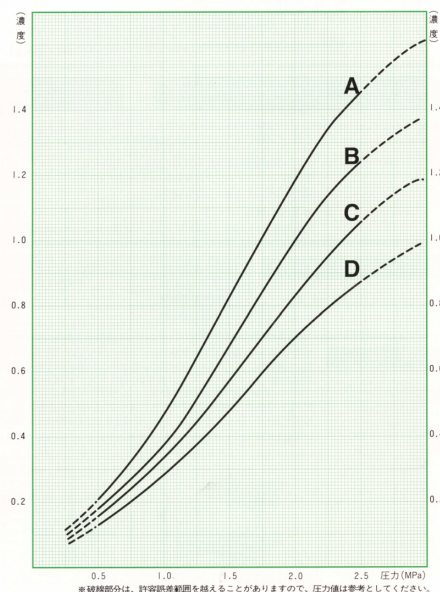
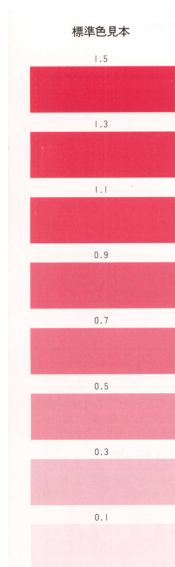


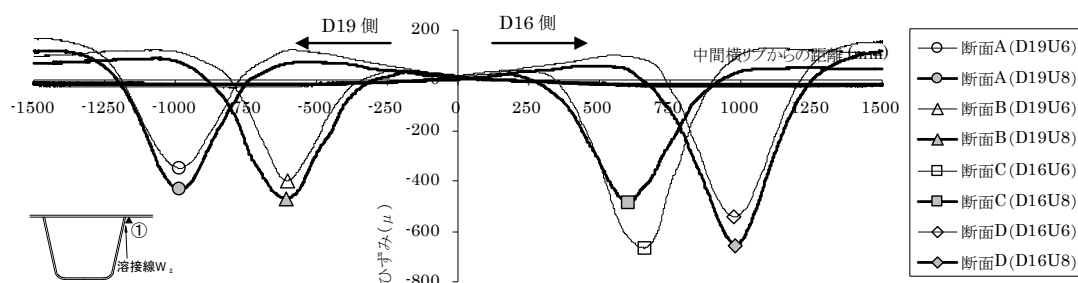
写真-4.4.2 感圧紙の試験結果 (すべて下側が主桁側)

(2) 動的計測による影響線の計測

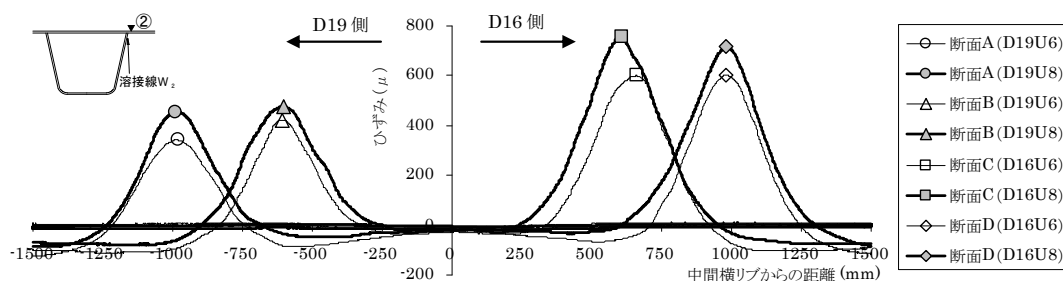
表-4.4.3 に輪荷重走行試験前に実施した動的計測によって得られたひずみの最大値, 最小値, および変動範囲を, 図-4.4.2 に動的計測結果 (影響線) を示す。

表-4.4.3 ひずみの最大値, 最小値, および変動範囲

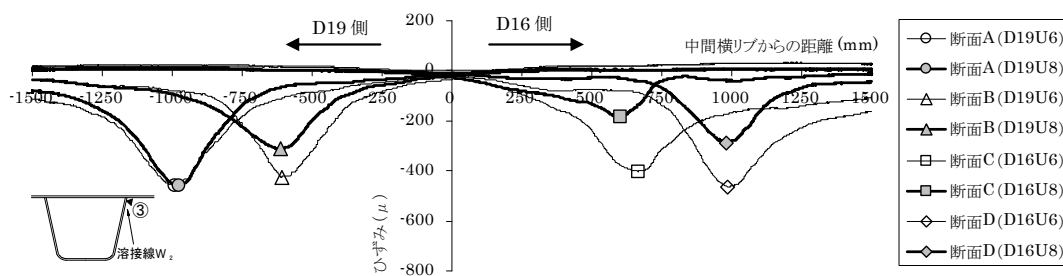
		ゲージ①: デッキプレート下面			ゲージ②: デッキプレート上面			ゲージ③: Uリブ側面		
		最大値	最小値	変動範囲	最大値	最小値	変動範囲	最大値	最小値	変動範囲
D19U6	断面A	167	-349	516	343	-123	466	31	-459	491
	断面B	121	-398	520	423	-111	534	33	-427	460
D19U8	断面A	119	-432	551	456	-87	543	9	-461	470
	断面B	88	-469	558	475	-78	553	7	-313	321
D16U6	断面C	130	-667	797	600	-103	704	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)

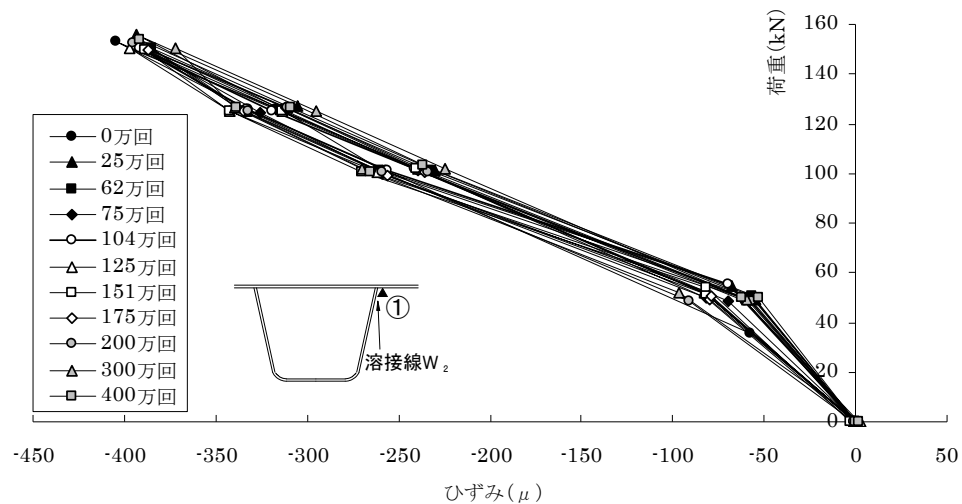
図-4.4.2 影響線の計測結果

4.4.2 輪荷重走行試験

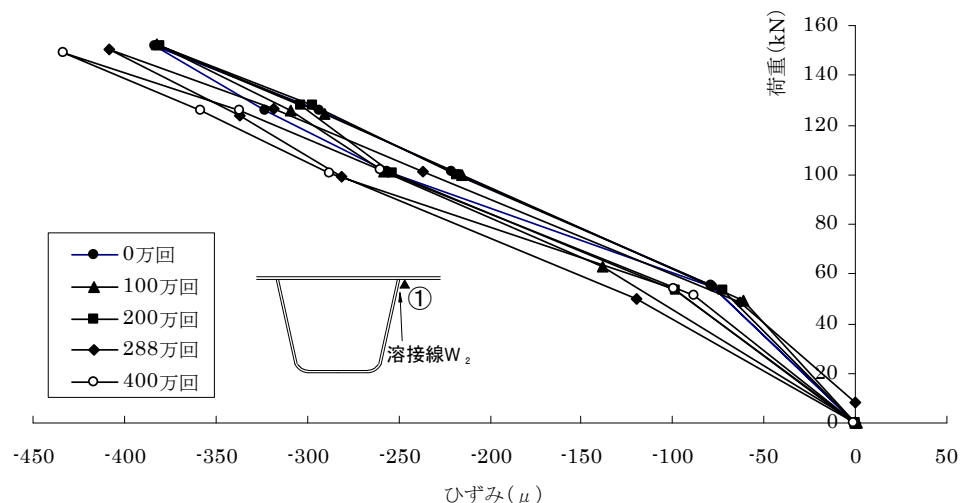
(1) 静的計測

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-）

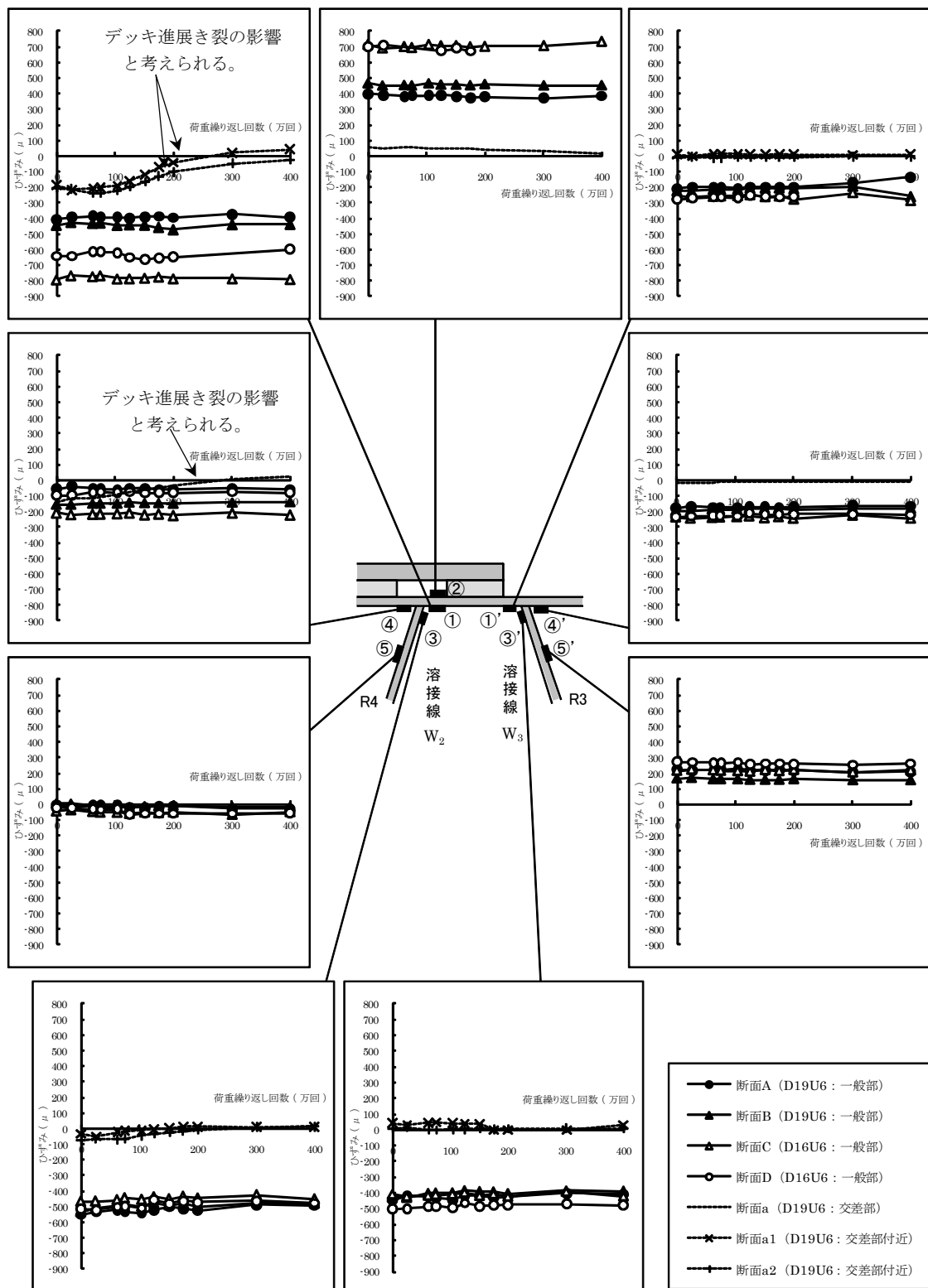


図-4.4.4 U6側の静的載荷試験における各部のひずみの推移

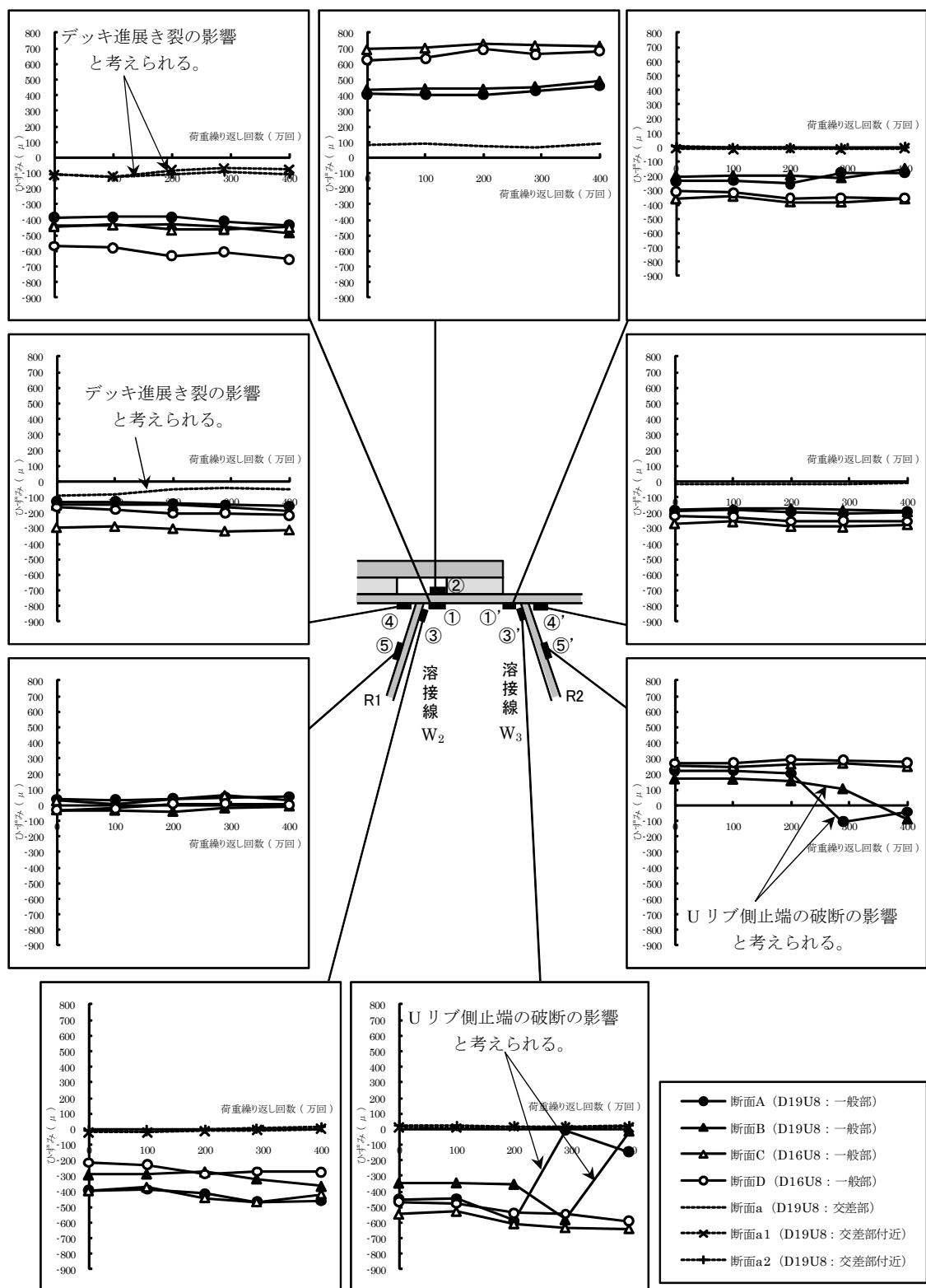


図-4.4.5 U8 側の静的載荷試験における各部のひずみの推移

(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。

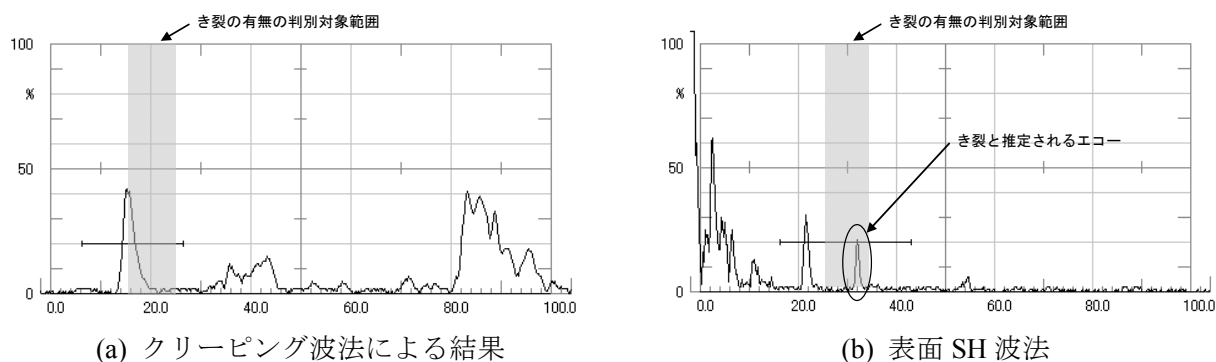
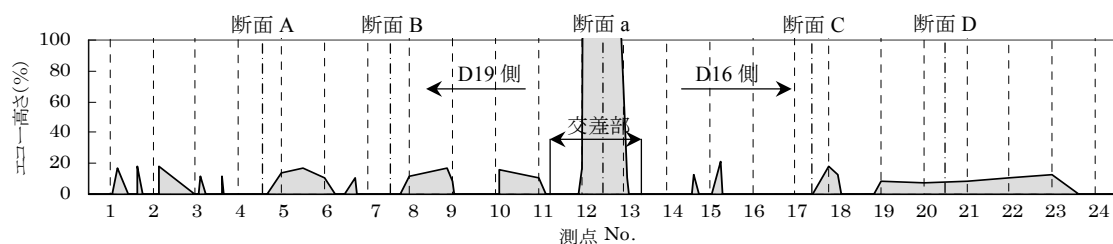
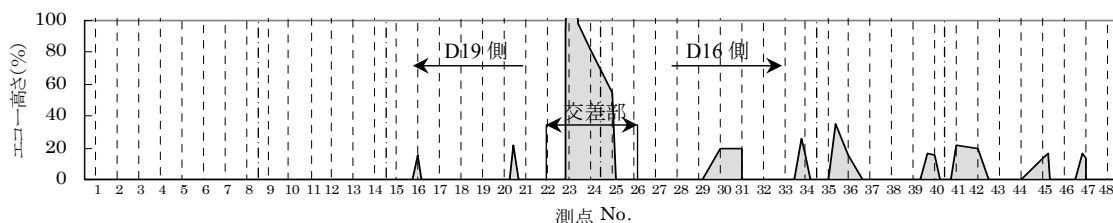


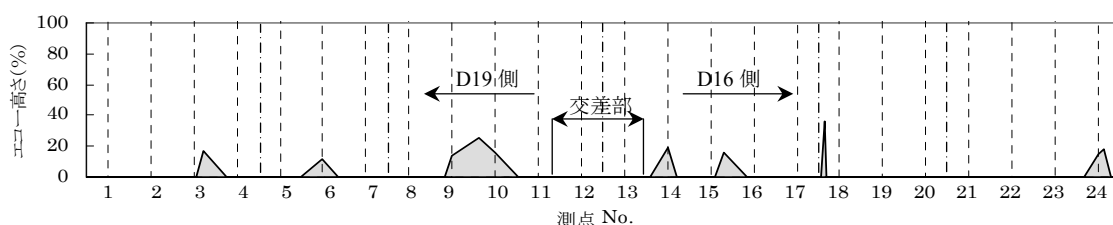
図-4.4.6 デッキプレート下面からの A スコープ画像の例
(U6 側溶接線 W_2 の測点 41 における試験終了後)



i) 溶接線 W_1

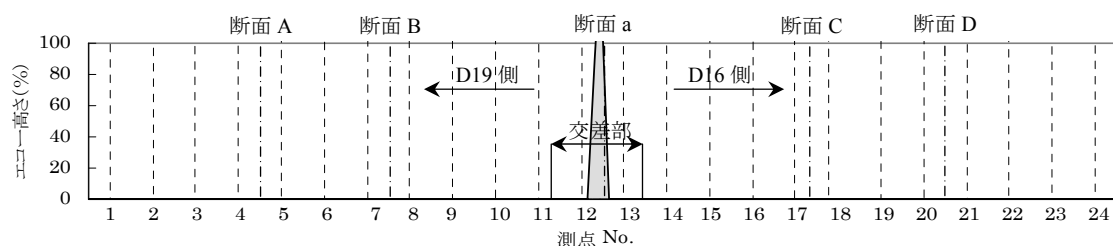


ii) 溶接線 W_2

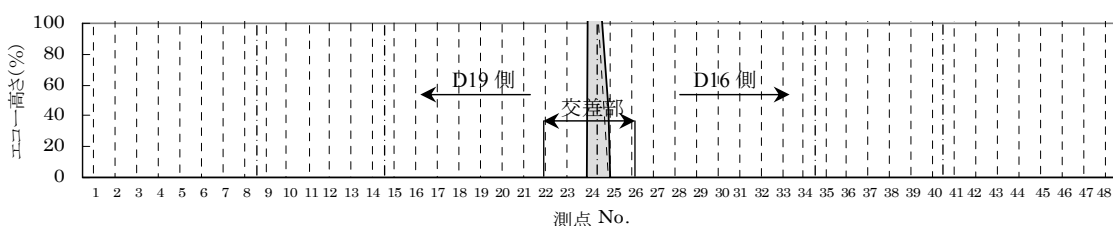


iii) 溶接線 W_3

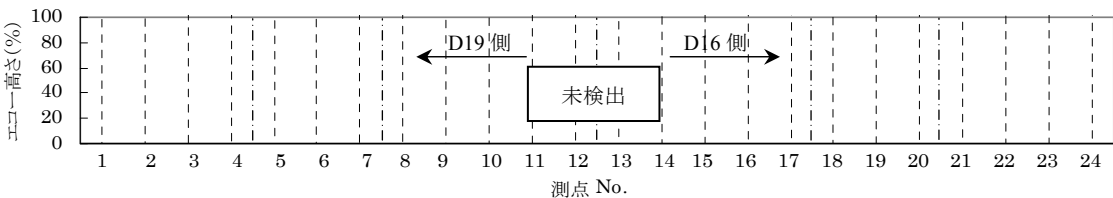
(a) U6 側



i) 溶接線 W_1



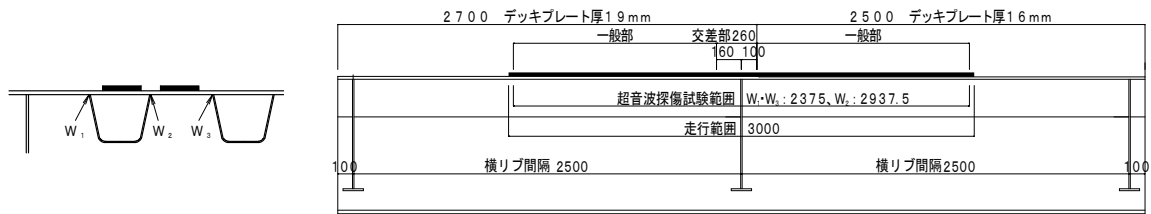
ii) 溶接線 W_2



iii) 溶接線 W_3

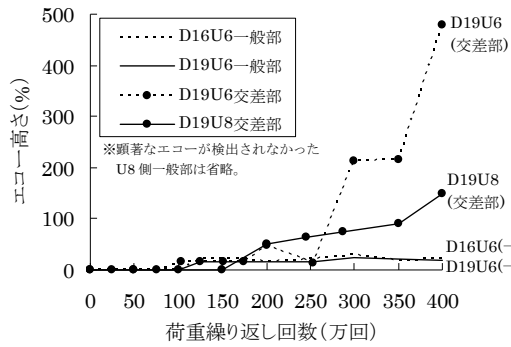
(b) U8 側

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

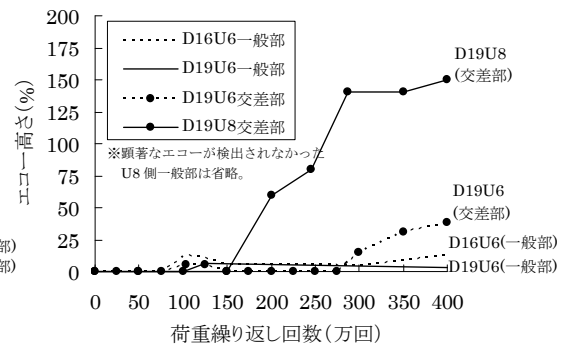


探傷溶接線

探傷範囲

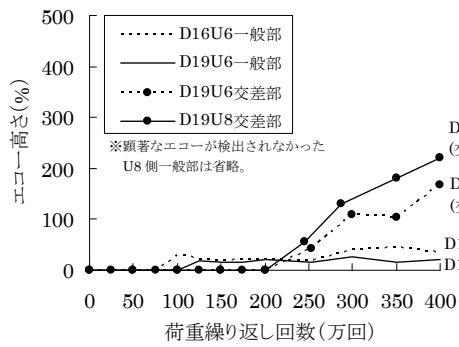


(i) クリーピング波法

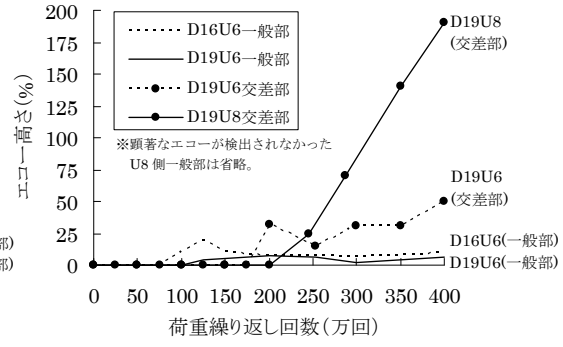


(ii) 表面SH波法

(a) 溶接線 W₁

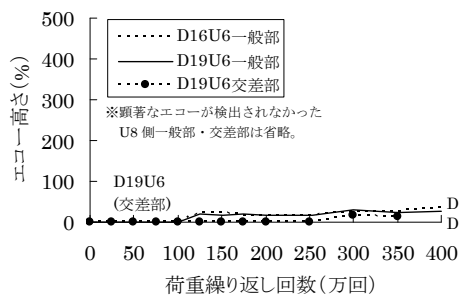


(i) クリーピング波法

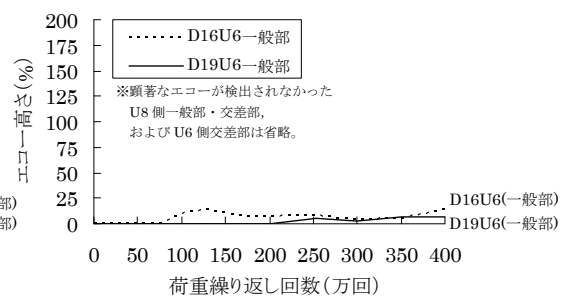


(ii) 表面SH波法

(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。

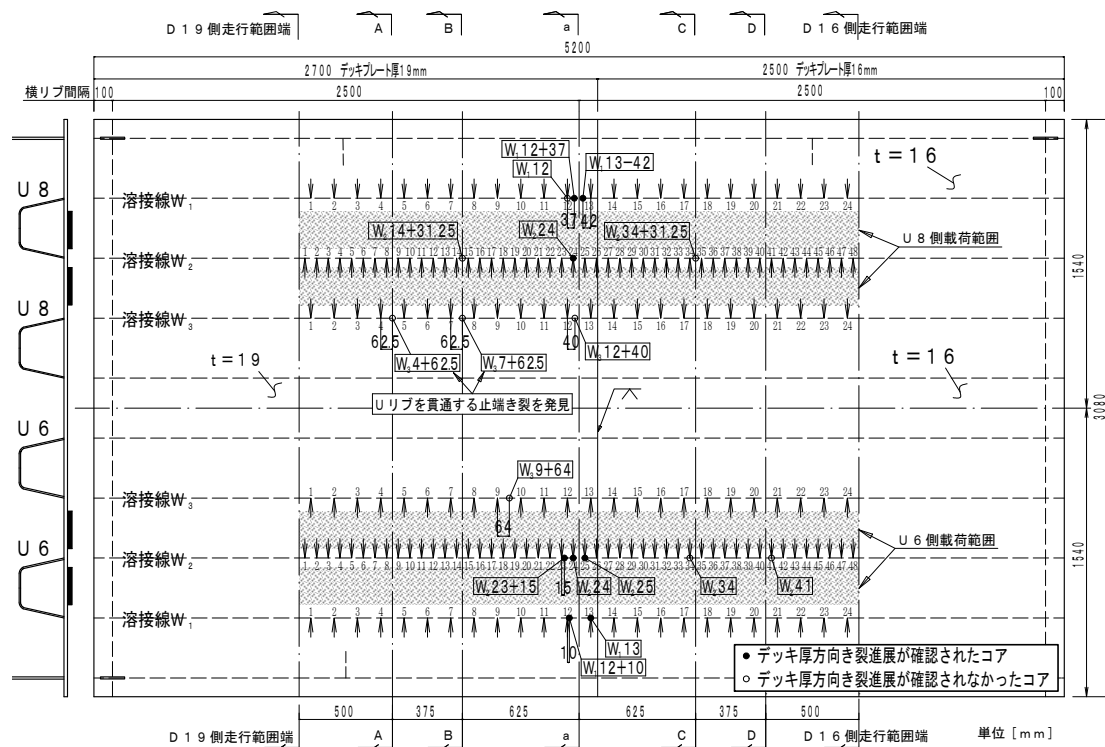
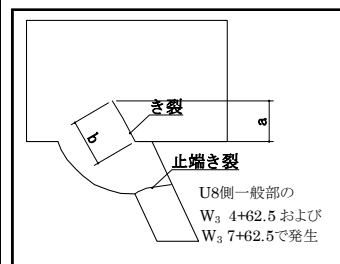


図-4.4.9 コア抜き位置

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	クリーニング波法	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
U8側	交差部 近傍	W ₃ 9+64	0	0	0	0	29* ³	3* ³
		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。

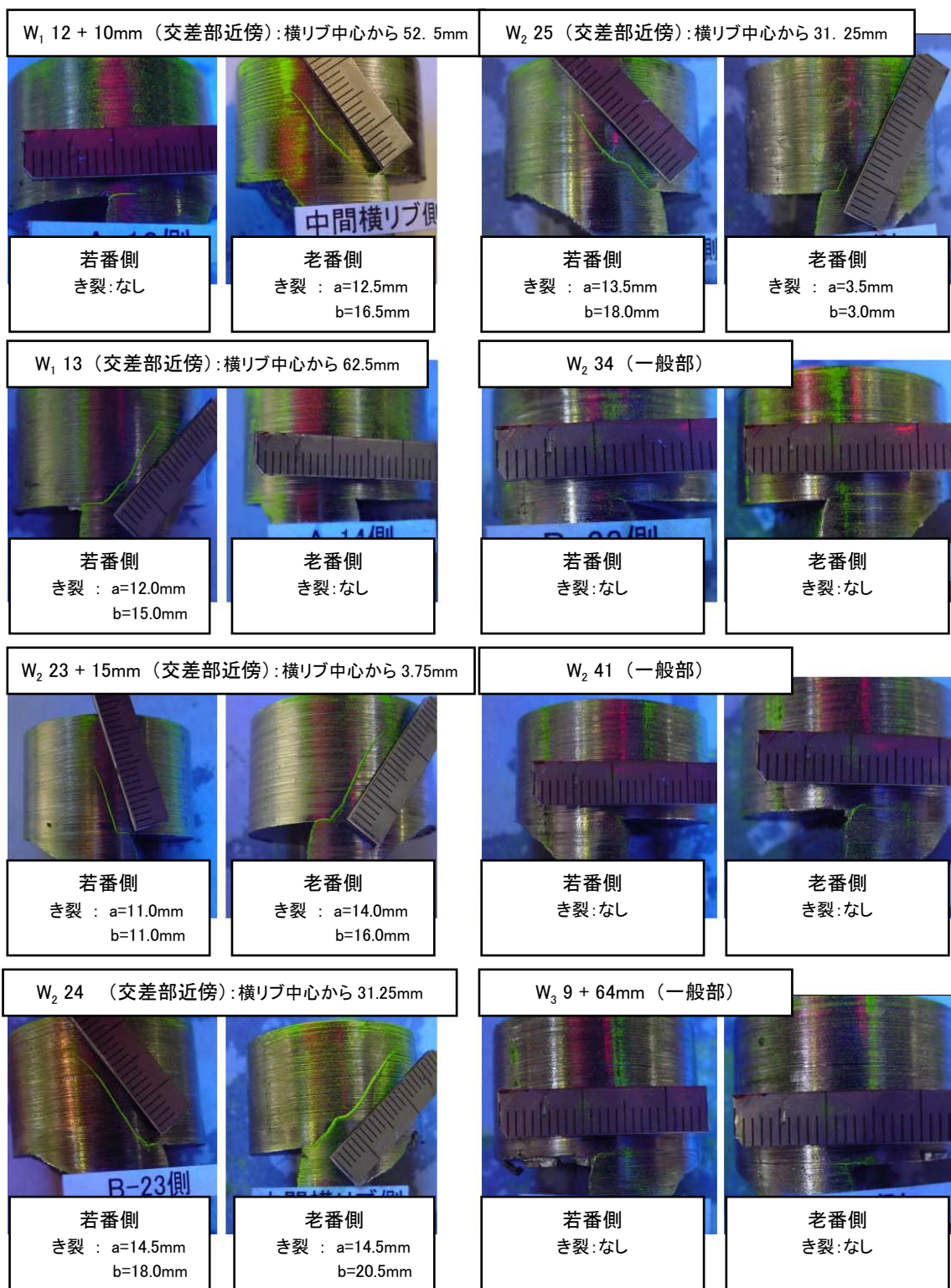


写真-4.4.3 U6 側でのコア抜き結果

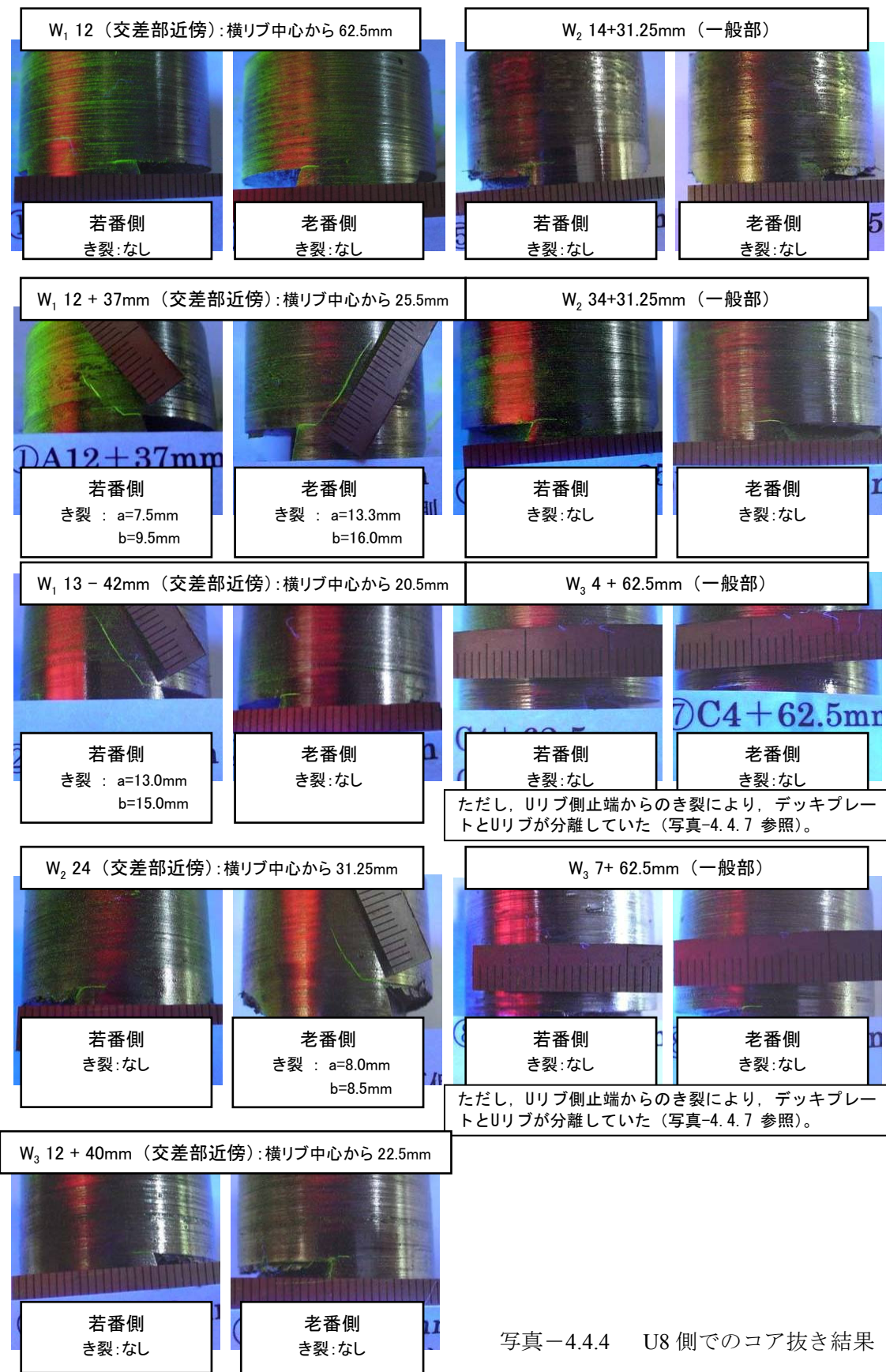
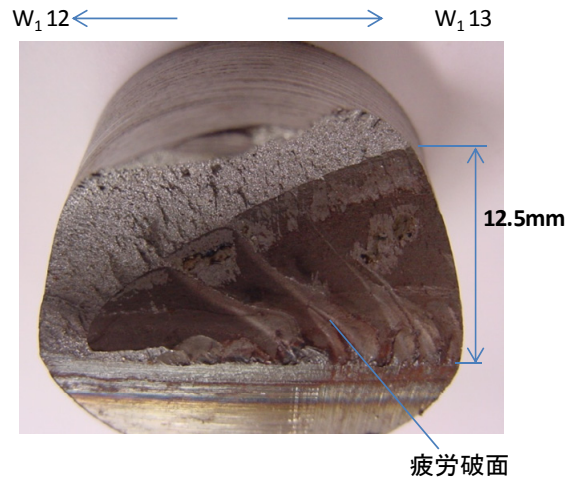
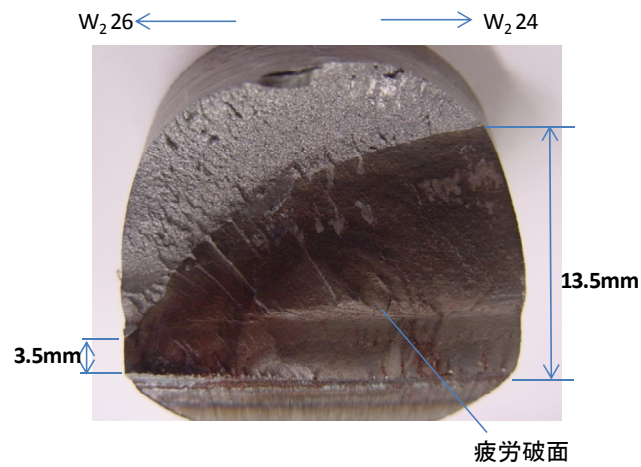


写真-4.4.4 U8 側でのコア抜き結果

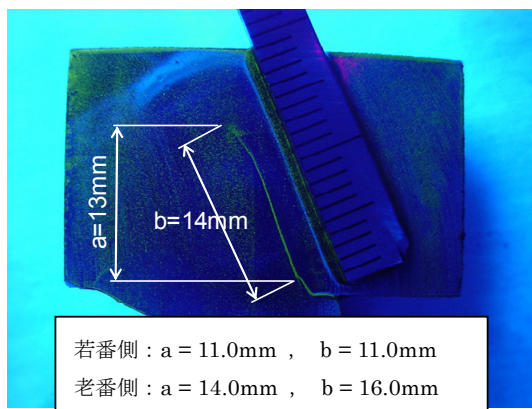


(a) $W_1 12 + 10\text{mm}$ (横リブ中心から 52.5mm)

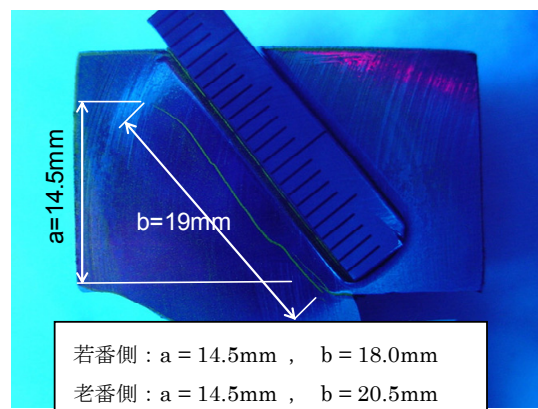


(b) $W_2 25$ (横リブ中心から 31.25mm)

写真-4.4.5 U6 側の破面写真

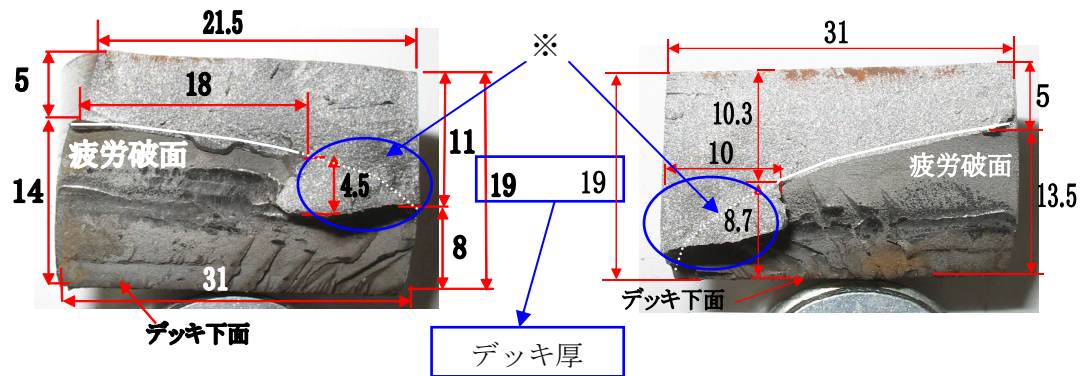


(a) $W_2 23 + 15\text{mm}$ (横リブ中心から 93.75mm)

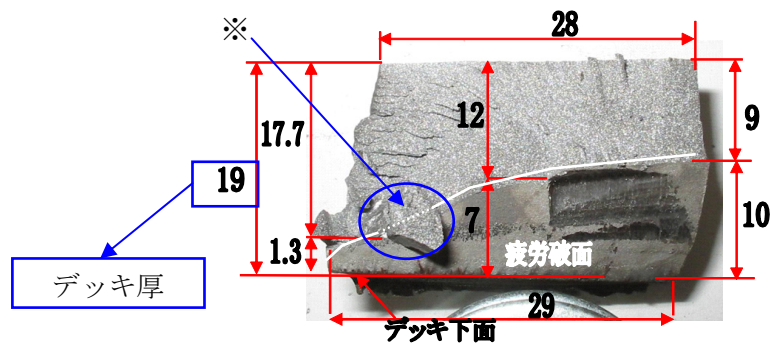


(b) $W_2 24$ (横リブ中心から 31.25mm)

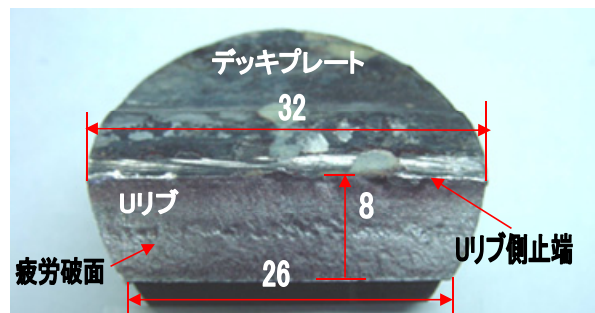
写真-4.4.6 U6 側のコア抜き結果



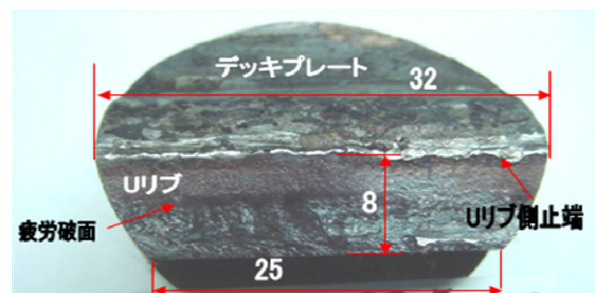
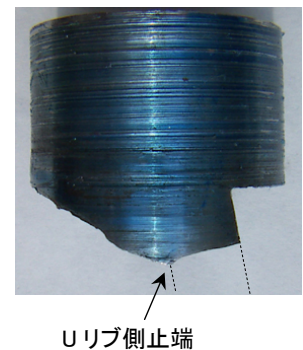
(a) W_1 12+37mm (横リブ中心から 25.5mm) (b) W_1 13-42mm (横リブ中心から 20.5mm)



(c) W_2 24 (横リブ中心から 31.25mm)



(d) W_3 4+62.5mm



(e) W_3 7+62.5mm

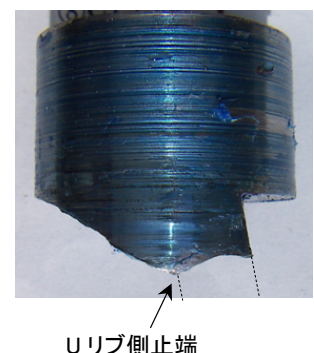


写真-4.4.7 U8 側の破面写真

(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。

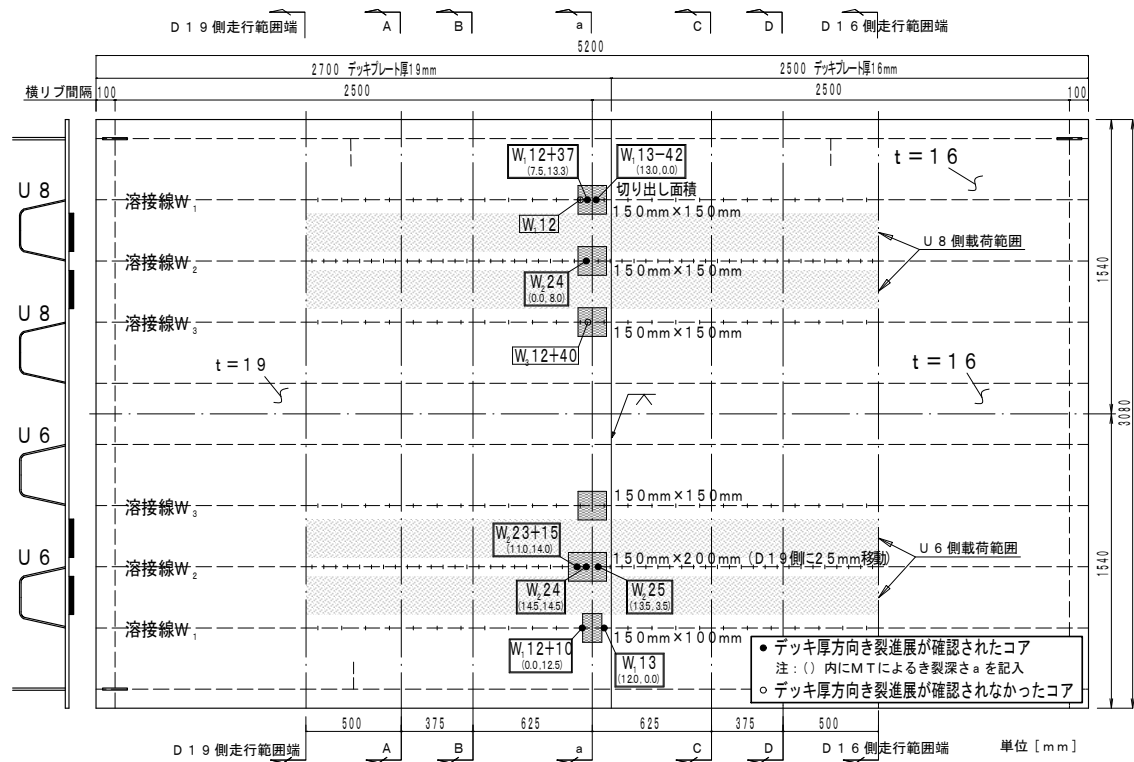
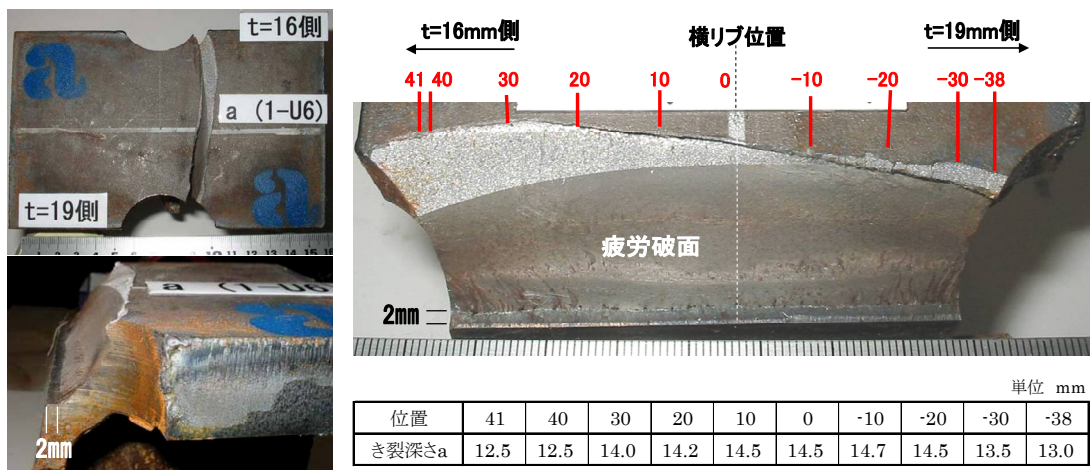
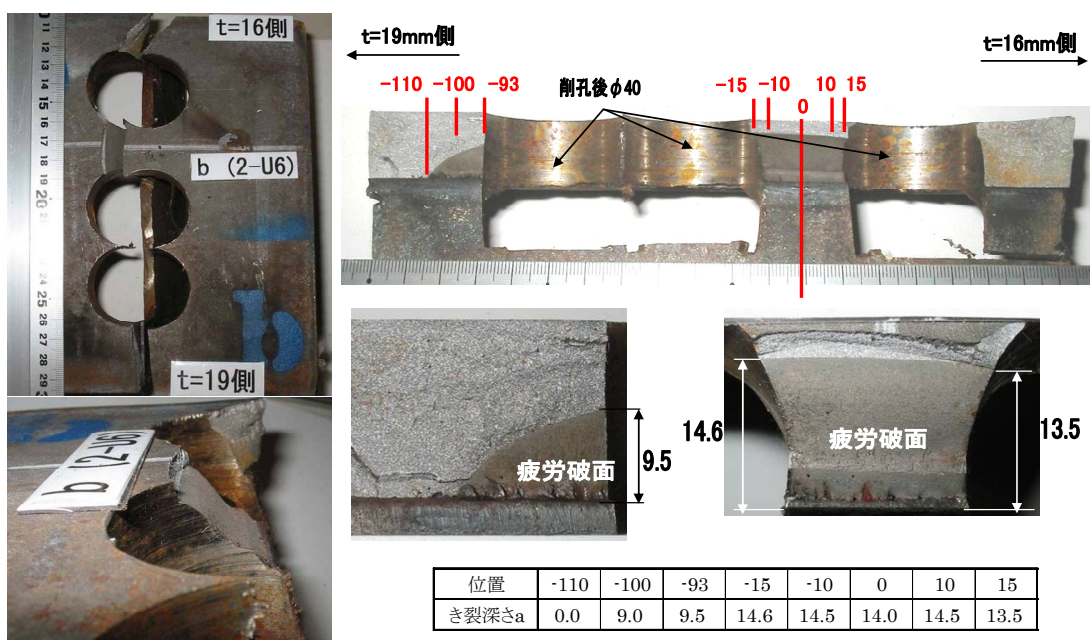


図-4.4.10 切り出し調査位置



(a) U6 側 溶接線 W_1

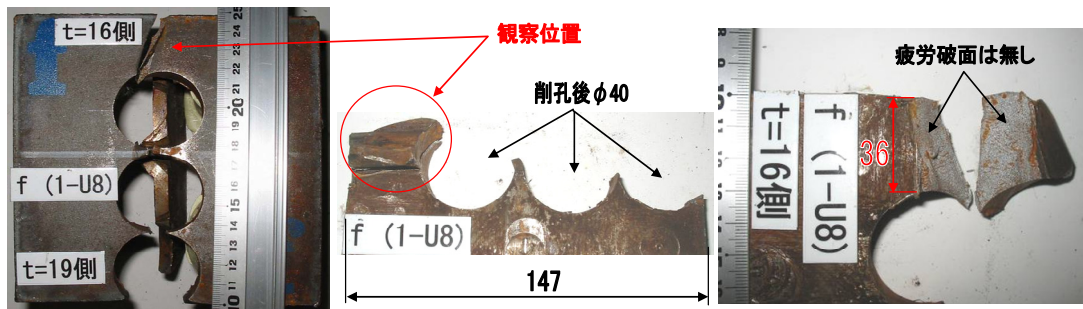


(b) U6 側 溶接線 W_2

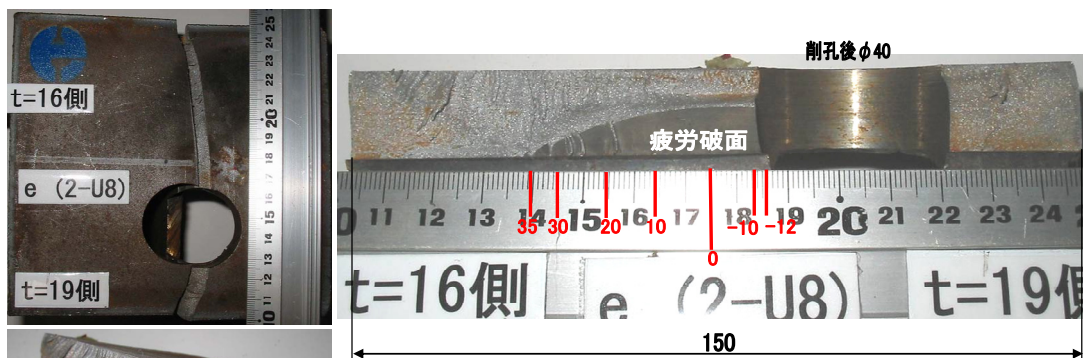


(c) U6 側 溶接線 W_3

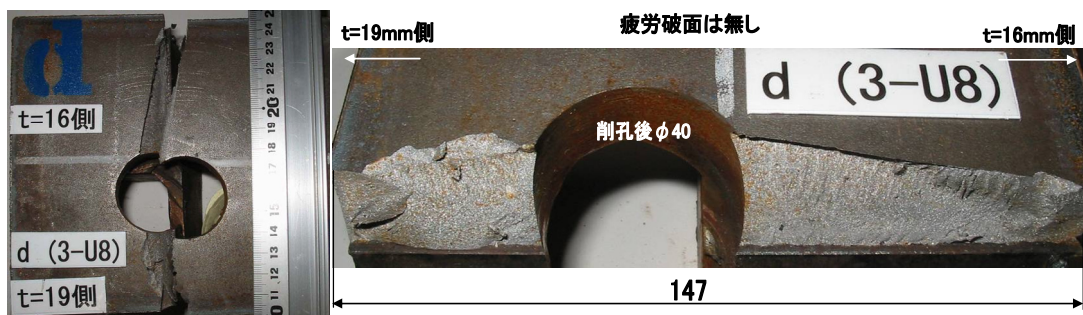
写真-4.4.8 切り出し調査による破面の状況 (その 1 : U6 側)



(d) U8 側 溶接線 W_1



(e) U8 側 溶接線 W_2

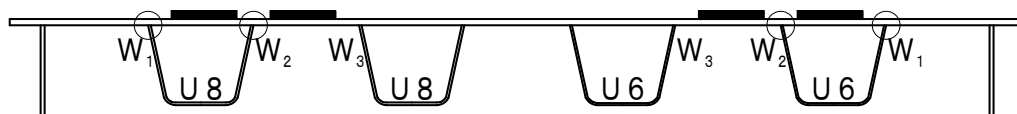


(f) U8 側 溶接線 W_3

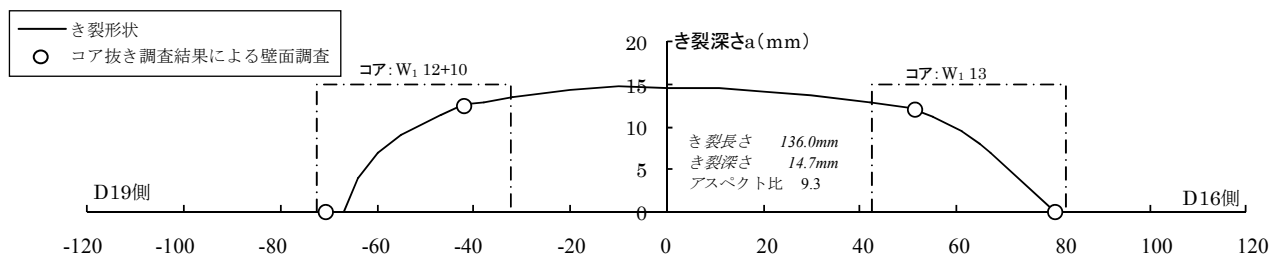
写真-4.4.8 切り出し調査による破面の状況 (その 2 : U8 側)

(3) 交差部のき裂の形状と進展挙動

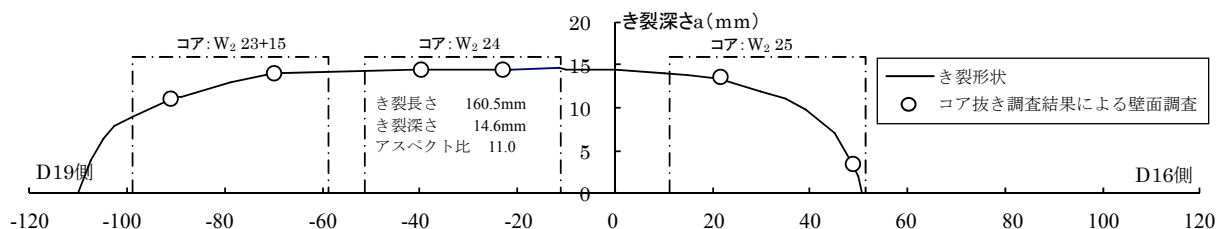
図-4.4.11 に、切り出し調査およびコア抜き調査の結果から横リブ交差部におけるき裂形状を整理した結果（デッキプレート面に垂直方向に投影した深さ）を示す。図中の実線は切り出し調査の結果を示し、破線はコア抜き調査の結果から推定したき裂の形状を示している。交差部に発生したき裂は、横リブウェブを挟んで半楕円状に進展している。アスペクト比（横リブ位置でのき裂長さ／き裂深さ）は、U6 側が約 10、U8 側が約 6.5 であった。なお、き裂深さおよび長さは、U8 側に比べ U6 側が大きい。



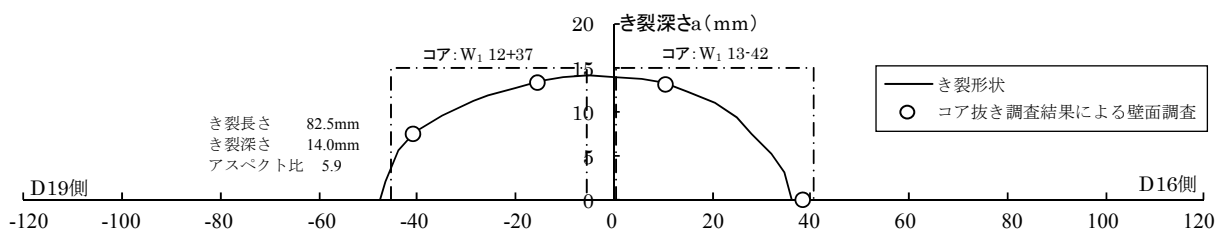
着目溶接線



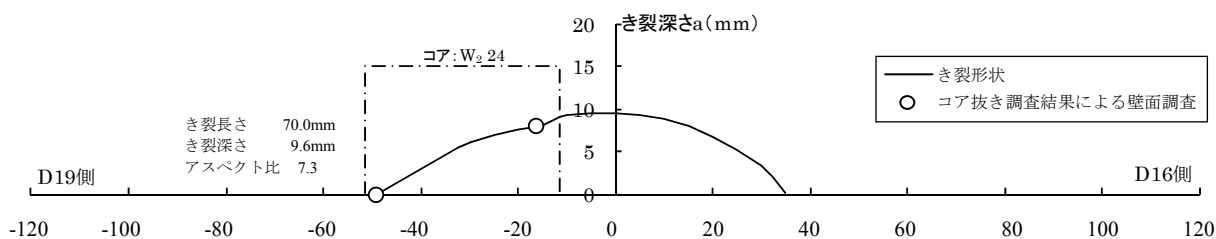
(a) U6 側 溶接線 W₁



(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。

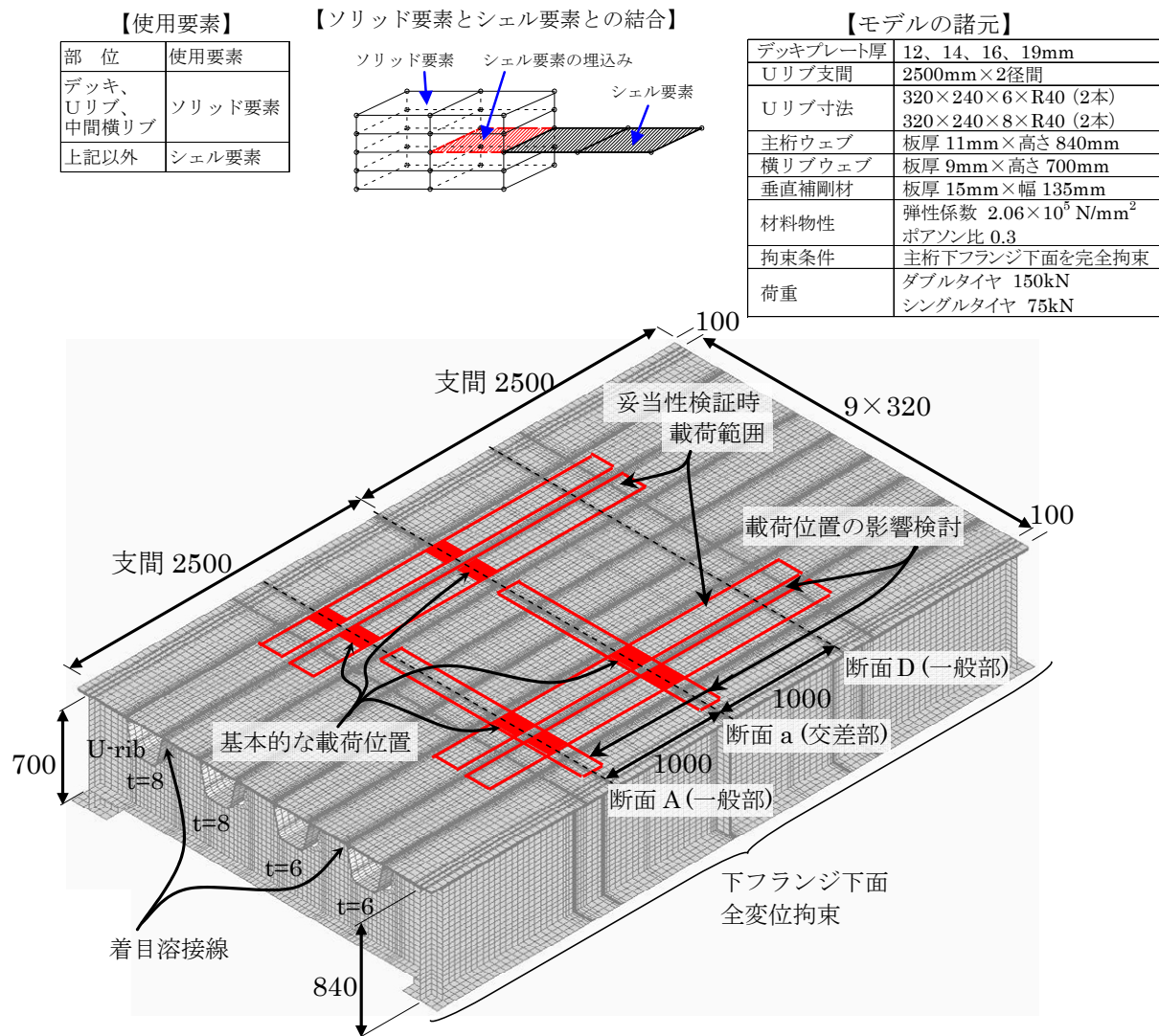


図-4.5.1 解析モデル，使用要素，モデルの諸元等

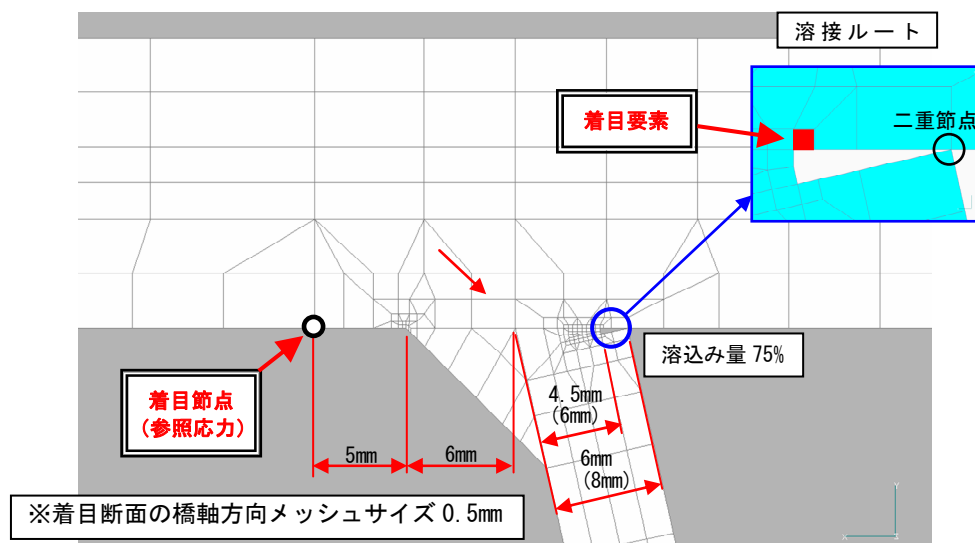


図-4.5.2 溶接部近傍の要素分割と着目要素

(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。

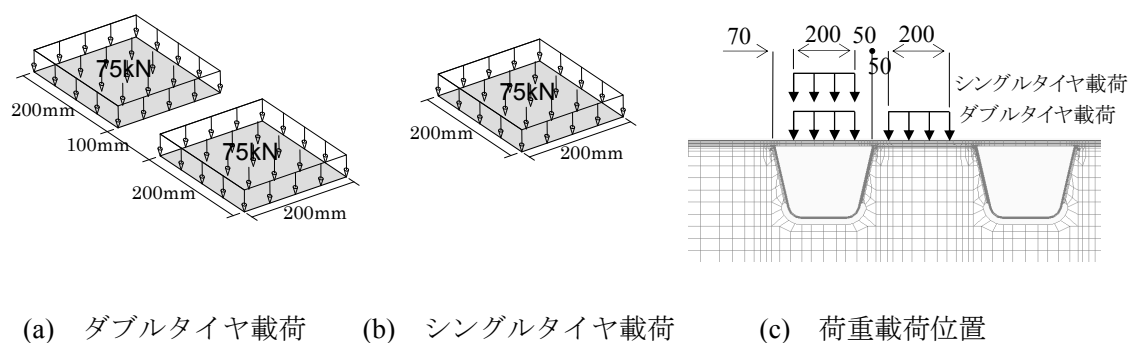


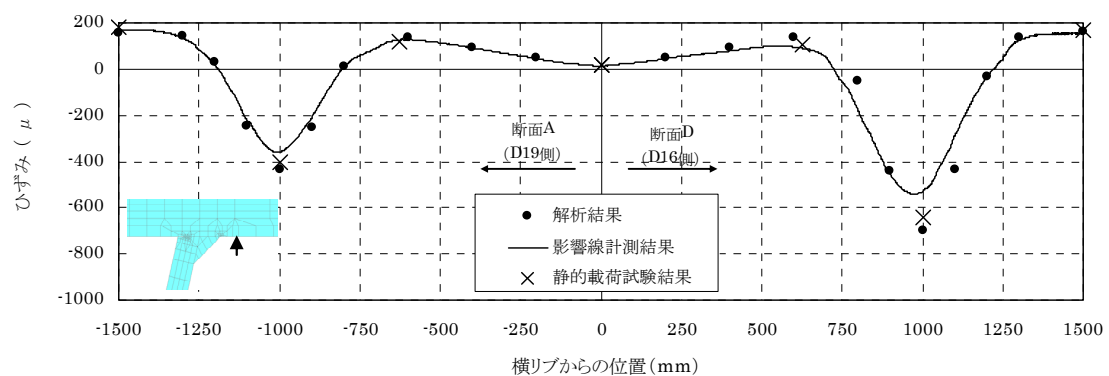
図-4.5.3 載荷荷重および載荷位置

4.5.3 解析結果

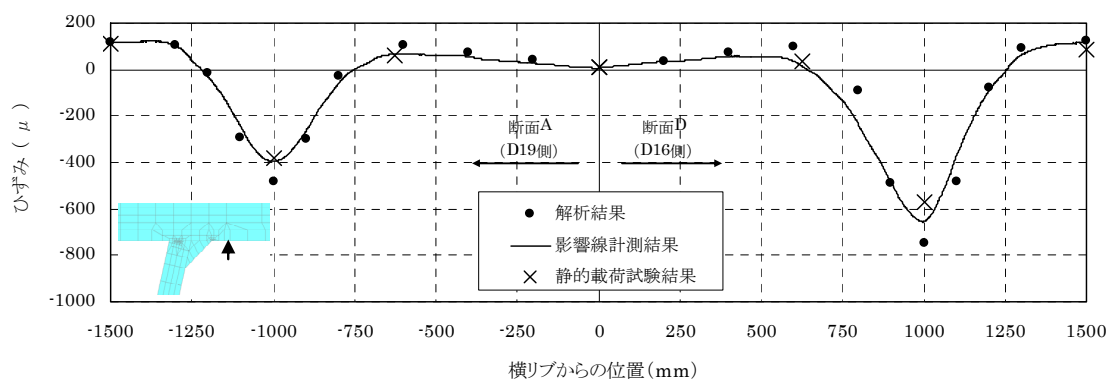
(1) 解析結果と実験結果の比較

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。

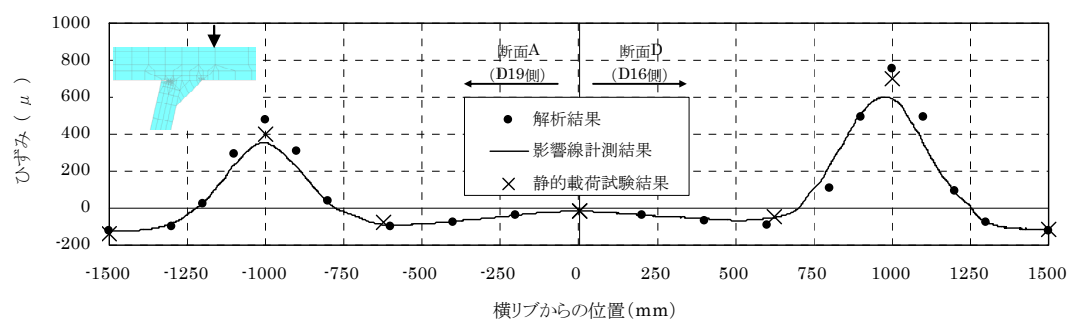


(a) U6 側

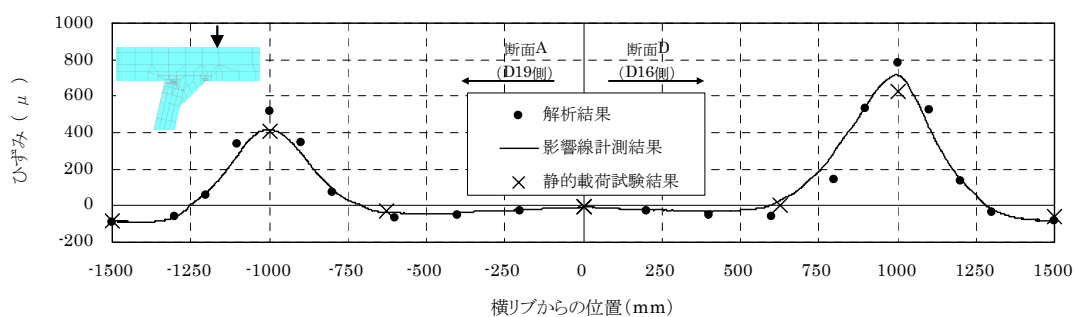


(b) U8 側

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

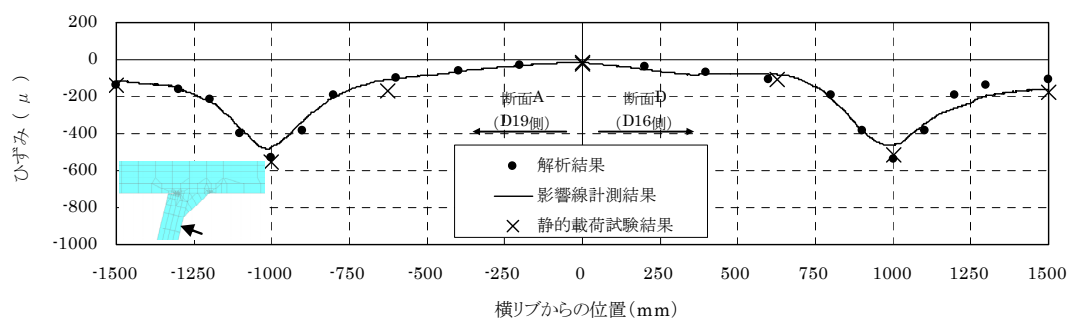


(a) U6 側

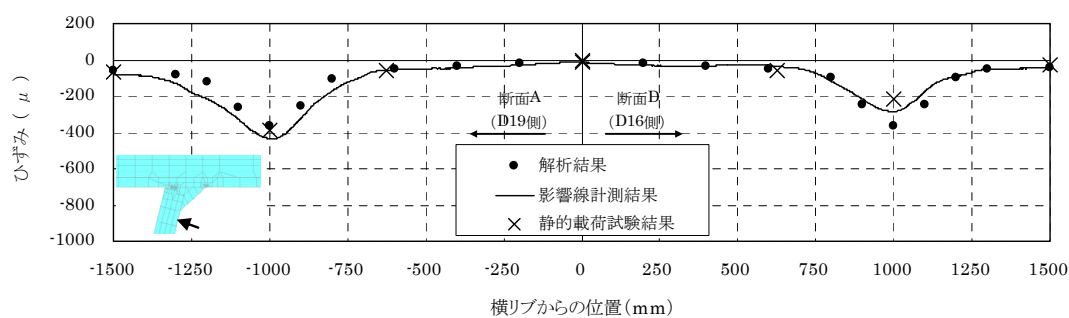


(b) U8 側

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

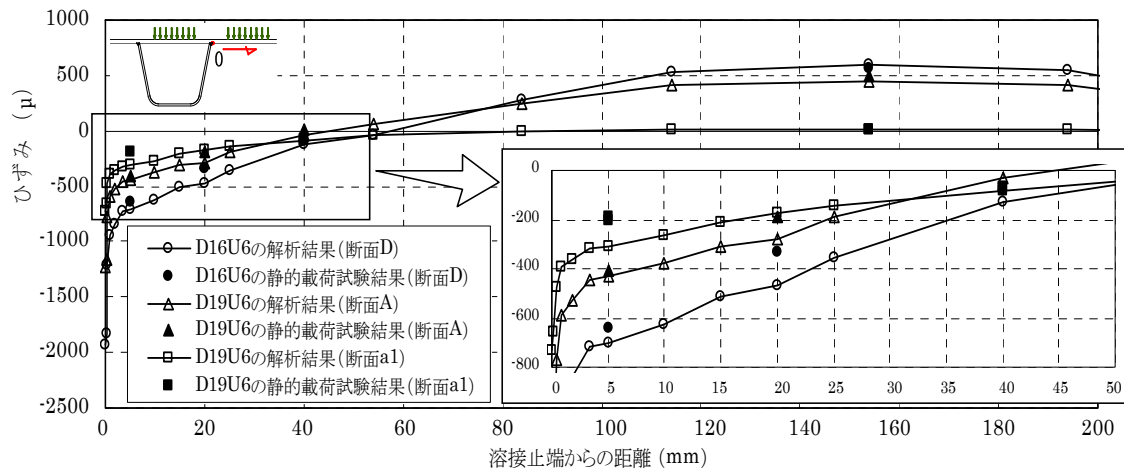


(b) U8 側

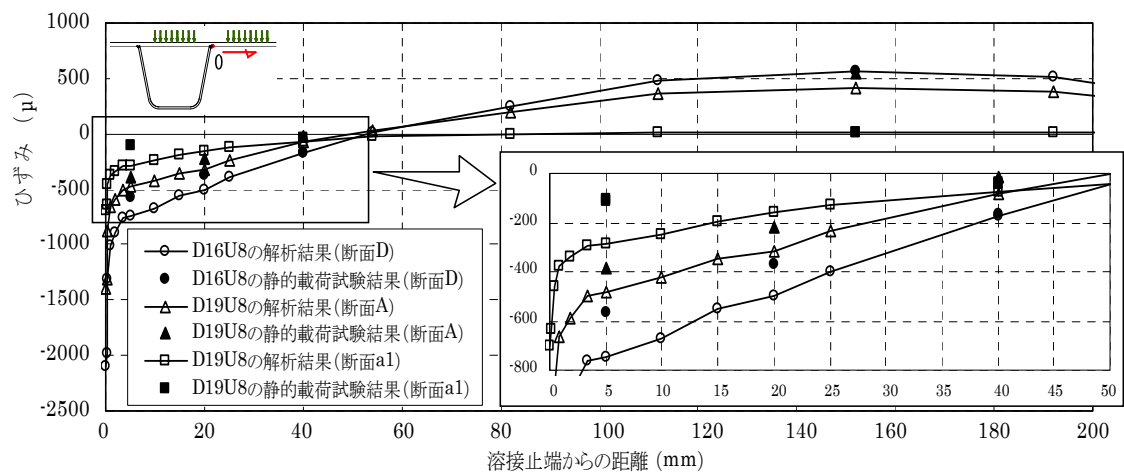
図-4.5.6 U リブ側止端 5mm 位置 (ゲージ③位置) のひずみ

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。

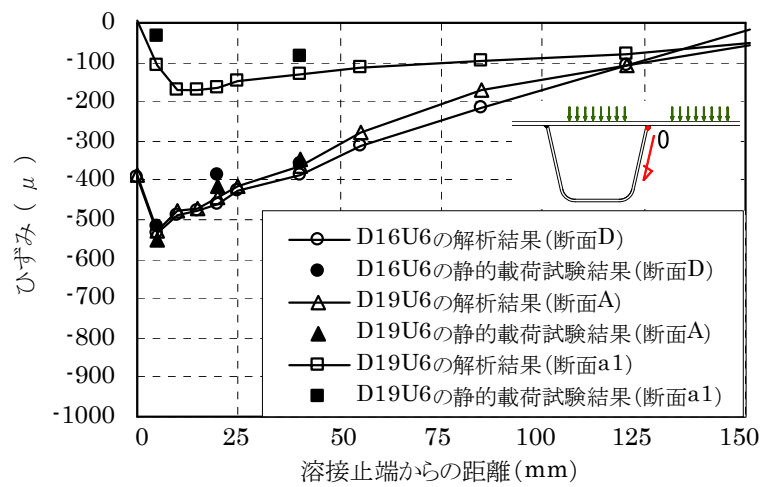


(a) U6 側

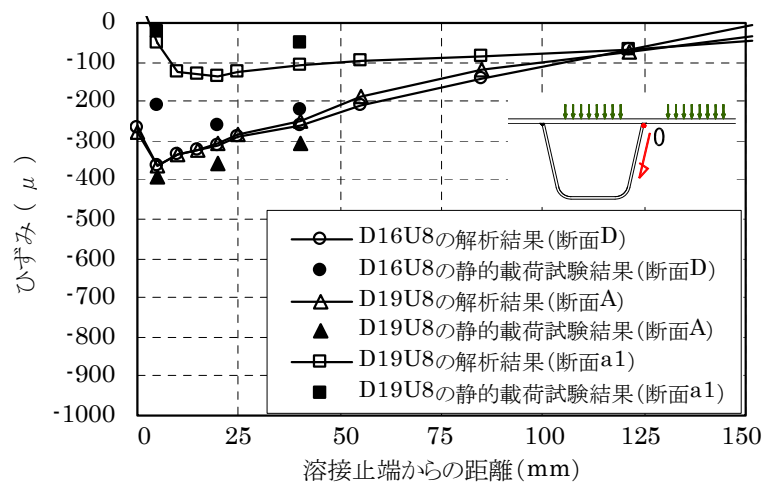


(b) U8 側

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

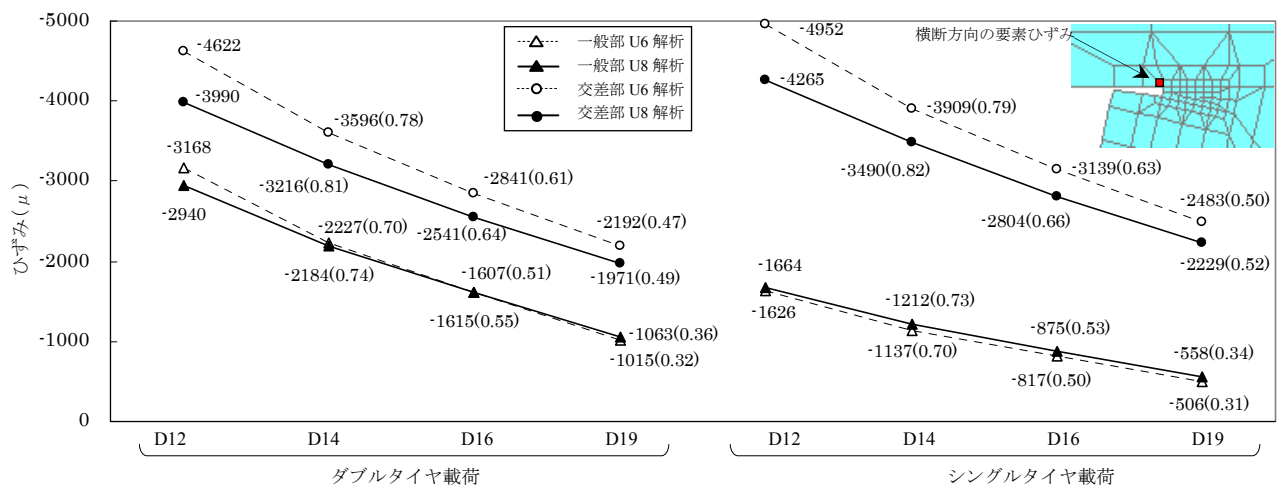
i) ルート部とデッキプレート側止端 5mm 位置のひずみ

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。

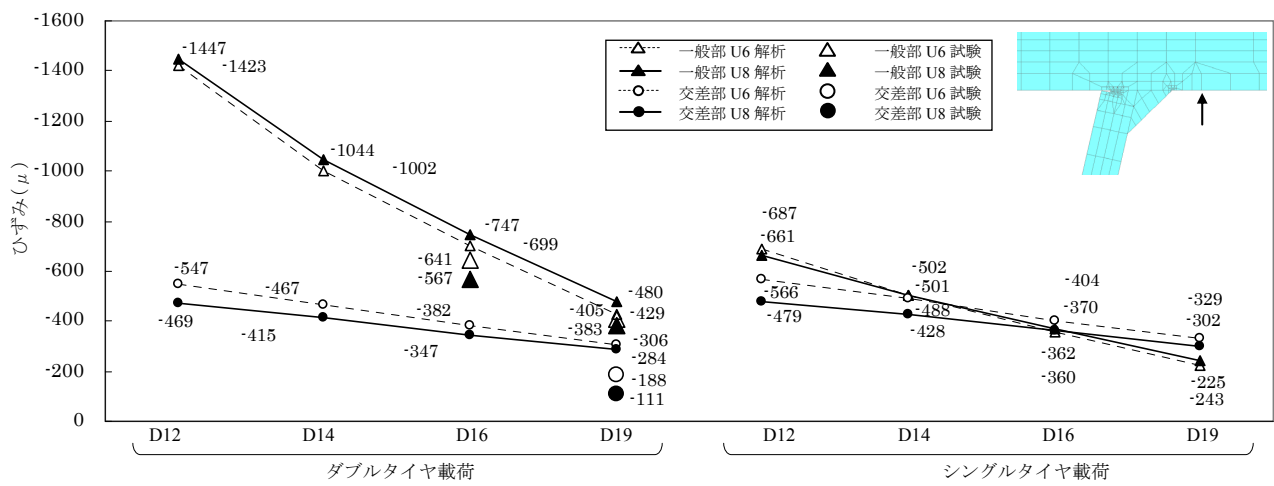
ルート部およびデッキプレート側止端 5mm 位置では、デッキプレートの厚板化によりひずみ絶対値が小さくなっている。一方、U リブ側止端 5mm 位置では交差部のひずみは小さいが、一般部ではダブルタイヤ載荷時にはデッキプレート厚の影響を受けずにほぼ一定の圧縮ひずみが発生しており、シングルタイヤ載荷時にはデッキプレートの厚板化により引張から圧縮に変化している。この原因として、一般部において、ダブルタイヤ載荷時に対して、シングルタイヤ載荷時に曲げ変形が相対的に大きくなるため、デッキプレート厚が薄い場合に U リブ側面の曲げ引張ひずみが卓越したものと考えられる (後述の表-4.5.1 参照)。

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。

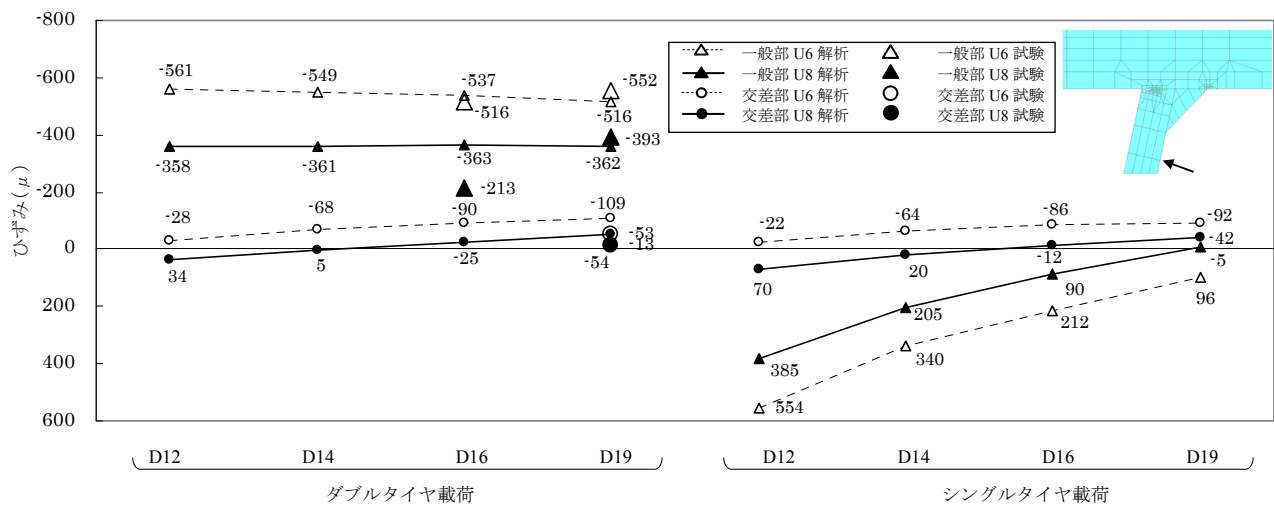
ルート部とデッキプレート側止端 5mm 位置では、デッキプレートの厚板化によりひずみが同様に小さくなる傾向がみられ、相関性がみられる。そこで、ルート部とデッキプレート側止端 5mm 位置のひずみ比を、図-4.5.10 に示すとおり整理した。一般部のひずみ比は、デッキプレート厚、U リブ厚、および載荷方法によらず 2.0~2.5 程度でほぼ一定である。交差部のひずみ比は、U リブ厚および載荷方法の影響をほとんど受けないが、デッキプレート厚が増加するとともに減少する傾向にある。



(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

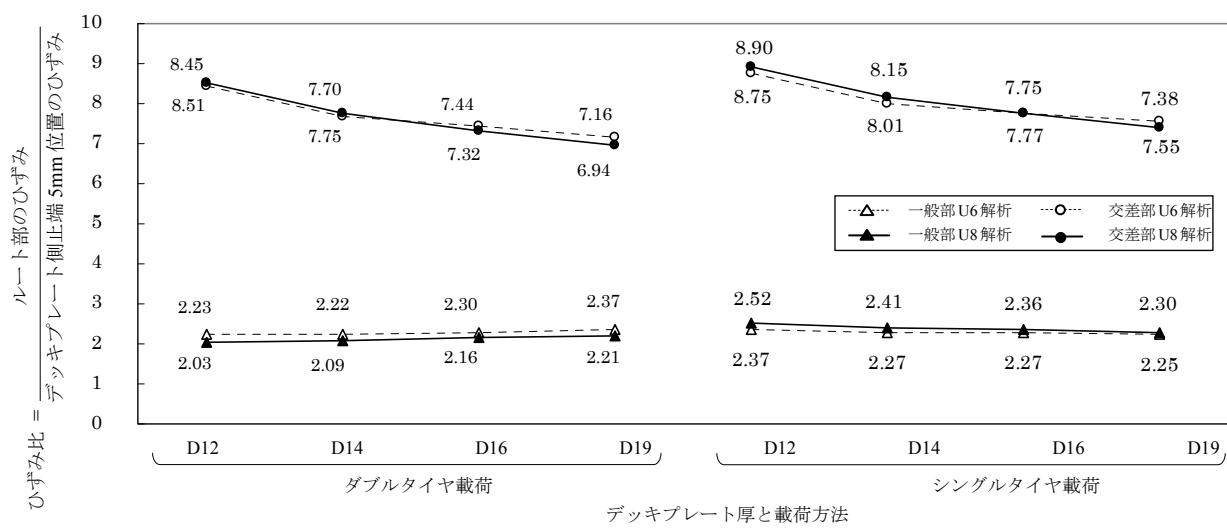


図-4.5.10 ルート部とデッキプレート側止端 5mm 位置のひずみ比

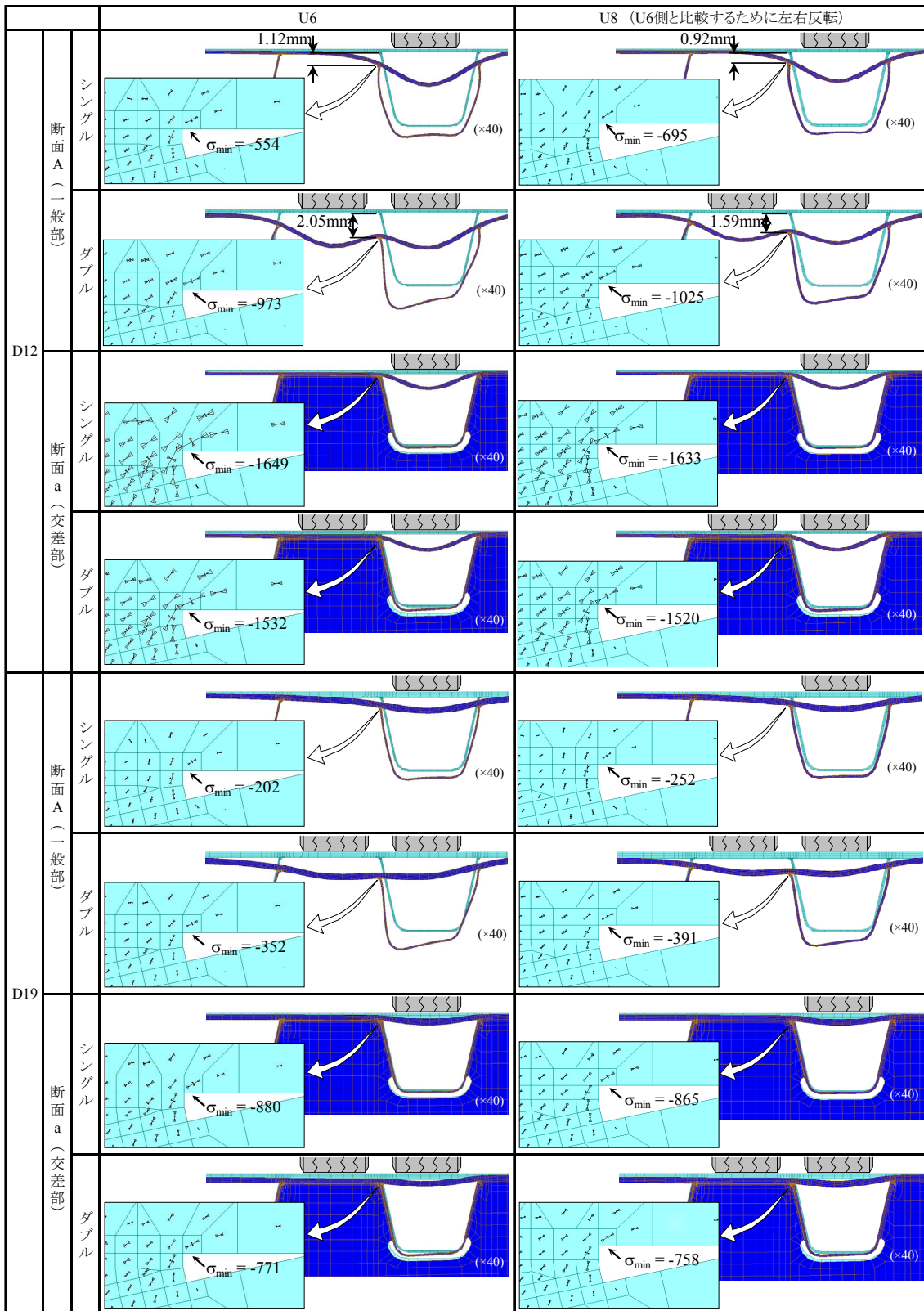
ii) デッキプレートと U リブの変形挙動とルート部の応力状態

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が確認できる。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、シングルタイヤ载荷で U リブが面外に変形する形状に、ダブルタイヤ载荷で 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载荷とシングルタイヤ载荷を比較すると、ダブルタイヤ载荷では 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载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、ダブルタイヤ载荷では 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、シングルタイヤ载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载荷、交差部ではシングルタイヤ载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 リブ厚や载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



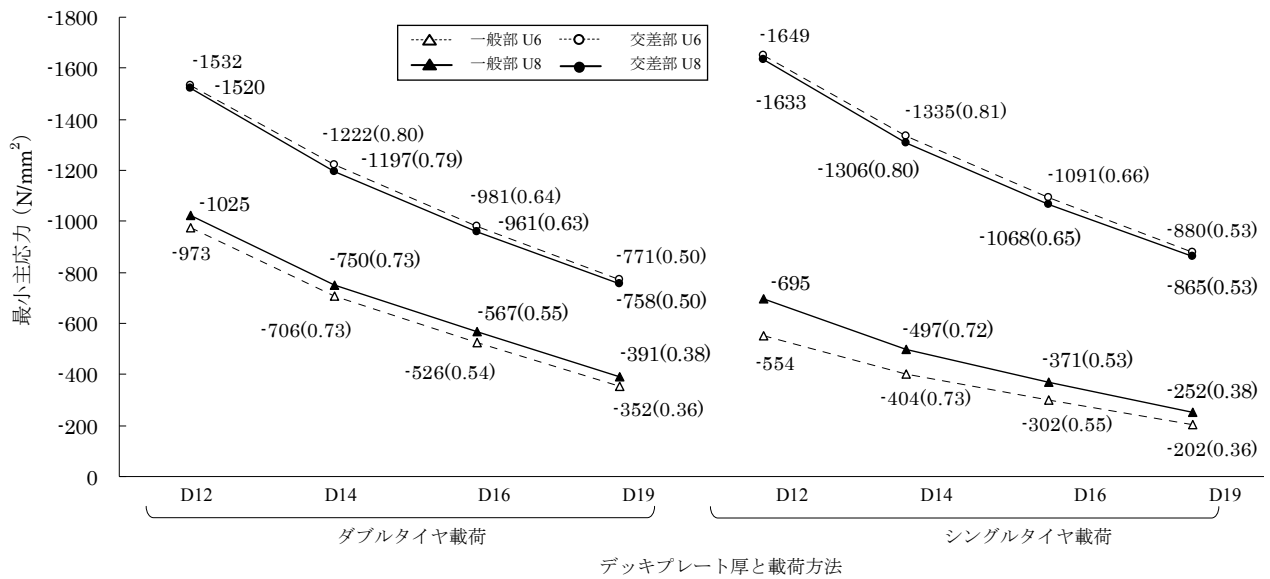


図-4.5.11 デッキプレート厚板化の効果（ルート部の最小主応力）

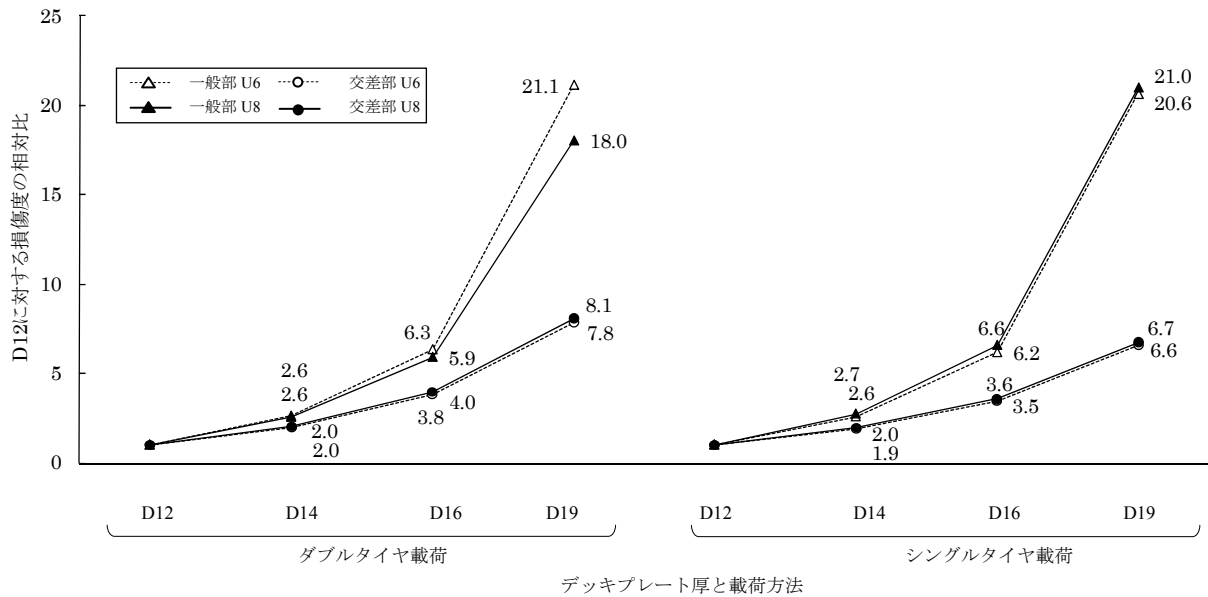


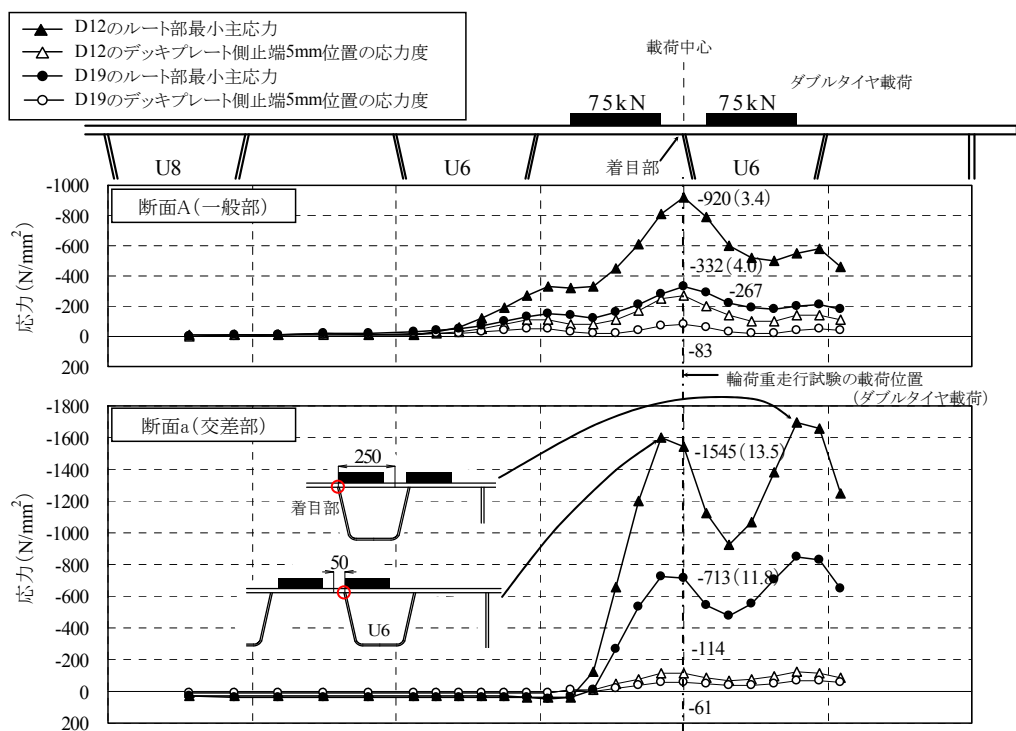
図-4.5.12 解析結果による疲労耐久性の相対比較

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

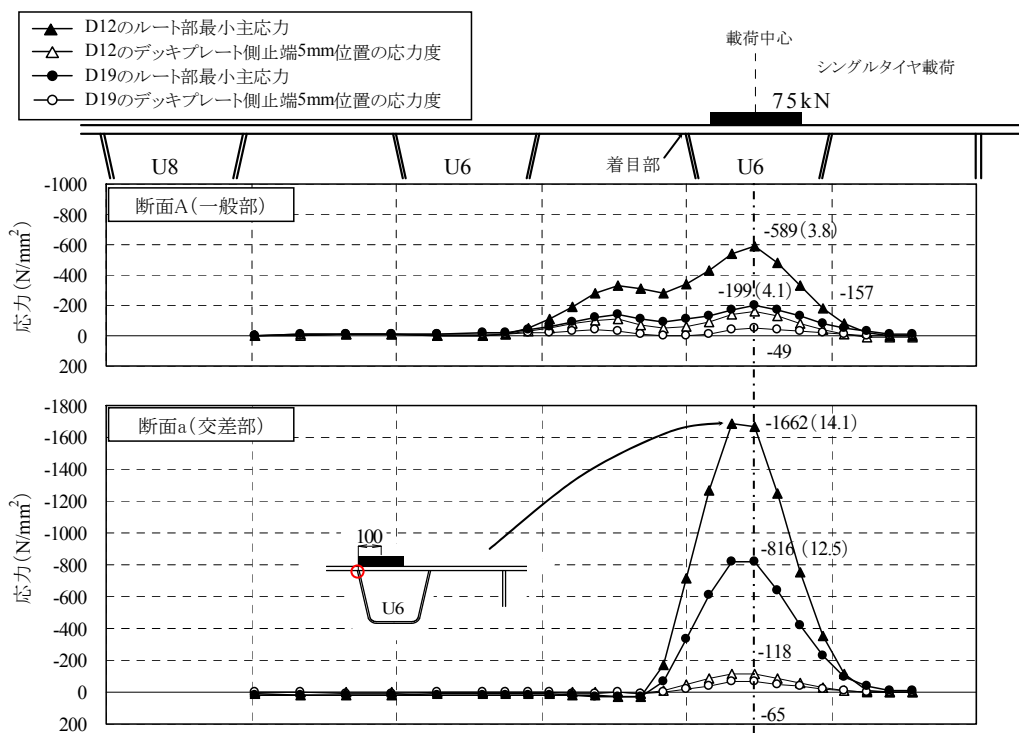
デッキプレート厚 12, 14, 16, および 19mm のモデルを対象に, U リブ厚 6mm 側のデッキプレートと U リブの溶接部に着目して, ダブルタイヤ載荷およびシングルタイヤ載荷を橋軸直角方向に移動させた解析を実施した。図-4.5.13 にデッキプレート厚 12, 19mm の断面 A (一般部) および断面 a (交差部) におけるルート部の最小主応力とデッキプレート側止端 5mm 位置の横断方向ひずみにヤング係数 ($2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$) を乗じて算出した応力度について整理した結果を示す。図中では, 最小主応力とデッキプレート側止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

第5章 まとめ

本共同研究では、道路橋に一般的に用いられる U 型のトラフリブ (U320-240) を用いた鋼床版で報告のあるデッキプレート貫通き裂に着目して以下の疲労試験を実施し、デッキプレートとトラフリブそれぞれの板厚拡大による疲労耐久性向上策について検討した。

- ・デッキプレート (12mm, 14mm, 16mm, 19mm) とトラフリブ (8mm, 6mm) を組み合わせた合計 8 タイプの横げた交差部を対象とした定点载荷疲労試験
- ・デッキプレート板厚を 16mm, U リブ板厚を 6mm (D16U6) とした、一般部に着目した実物大試験体の輪荷重走行試験
- ・デッキプレート板厚 (19mm, 16mm) とトラフリブ (8mm, 6mm) を組み合わせた、一般部および交差部を含む実物大試験体を用いた輪荷重走行試験

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 交差部に着目した定点载荷疲労試験の結果、デッキプレート板厚 12mm~19mm, トラフリブ板厚 6, 8mm を組み合わせた鋼床版では、それらの板厚の組み合わせにかかわらず、報告されている損傷事例と同様なデッキプレート貫通に至るものと考えられるき裂がトラフリブとデッキプレートの縦方向溶接継手より発生し、き裂進展の特徴は共通しているものと考えられる。
- (2) 交差部に着目した定点载荷疲労試験の結果、デッキプレート貫通き裂の発生時期及び進展による構造系の変化の程度に着目すると、デッキプレート板厚とトラフリブ板厚はそれぞれ大きいほど疲労耐久性は向上する傾向があるといえる。また、このとき、デッキプレート板厚とトラフリブ板厚ではデッキプレート板厚の方が疲労耐久性に及ぼす影響はより支配的となる傾向がみられる。
- (3) 一般部に着目した試験供試体の輪荷重走行試験では、デッキプレート厚が 12mm に対して、14mm, 16mm と増厚することにより、デッキプレート側溶接止端部 5mm 位置での 5% ひずみ変化が生じる繰返し回数が増加した。また、上記位置で発生するひずみ範囲も、板厚 12mm の場合に対して、14mm で約 6 割、16mm で約 5 割に低減される。
- (4) 一般部および交差部を含む試験供試体の輪荷重走行試験では、交差部のみ疲労き裂が確認された。このことから、本試験条件において一般部に比べ交差部の疲労耐久性が低いと考えられる。

【参考資料-1】損傷橋梁の構造諸元

1 損傷橋梁の構造諸元と疲労耐久性の検討

損傷橋梁の各諸元について表-1 に示す。表に示す損傷橋梁の各諸元の共通性と既往の研究結果から、鋼床版の構造諸元が疲労耐久性に与える影響の有無を整理する。

(1) 橋梁形式、橋長・支間割

橋梁形式はいずれも箱桁形式であった。またその支間長は箱桁橋の場合は 50～120m 程度であった。

鋼床版において箱桁形式は広く一般的に用いられている形式であること、および、支間長は鋼床版箱桁橋の標準的な範囲内であったことから、これらの諸元の疲労耐久性に与える影響は少ないと考えられる。

(2) 幅員（車線幅）、車線数

車線幅は 3.25～3.5m 程度であった。車線数は 7 橋中 6 橋が片側 2～3 車線であった。

既往の研究¹⁾では、車線幅が狭い場合には大型車の走行位置のばらつきが小さくなり疲労に対する荷重条件が厳しくなることが指摘されている。しかし、今回調査した損傷橋梁においては、特に車線幅が狭いなどの特徴を有するものは無く、今回の諸元の範囲では疲労耐久性に与える影響は少ないと考えられる。

(3) 舗装厚と舗装の材質

舗装厚は 65～80mm であった。その材質は 7 橋中 4 橋が改質アスファルトであった。

損傷橋梁は一般的な舗装厚であり、今回の諸元の範囲では疲労耐久性に与える影響は少ないと考えられる。一方、今回の調査範囲では、損傷橋梁の 7 橋中 4 橋は改質アスファルト舗装であった。舗装の剛性が鋼床版の疲労に影響を及ぼすことが既往の研究²⁾で指摘されている一方、具体的な舗装の種類ごとの疲労耐久性は明らかになっていないが、鋼床版設計時には留意する必要があると考えられる。また、舗装が損傷した場合に着目溶接部の発生応力が増加するという研究事例³⁾があることから、鋼床版設計時には舗装の維持管理性についても検討する必要があると考えられる。

(4) トラフリブ形式

損傷橋梁 7 橋のうち 4 橋が現在の日本鋼構造協会規格（JSS II 08-1983）と異なる形状のトラフリブが採用されていた。また、トラフリブ厚は 7 橋中 4 橋が 8mm であった。

現在のトラフリブ規格制定前に施工された橋梁は現在の JSS 規格と形状寸法が異なり、これらの形状寸法の違いは着目溶接部の発生応力に影響を与えると考えられる。しかし、損傷橋梁のトラフリブウェブ間隔は 310mm～340mm、高さは 240～280mm 前後であり現

在のトラフリブ規格に近い寸法形状であること、および、現在の JSS 規格に準じる橋梁においても損傷が発生していることから、今回調査した諸元の範囲では損傷要因と大きな因果関係は無いと考えられる。

一方、トラフリブ厚が 6mm に比べ 8mm の場合に溶接ルート部の発生応力が 6～7% 上昇することが示された解析的研究⁴⁾や、そののど厚はトラフリブ厚に比例して増厚することが必要との研究例⁵⁾がある。また、トラフリブ厚が 8mm の場合には開先を設けることが多く、トラフリブ厚 6mm の場合に比べ溶け込み量が多くなる（一般に、50% 程度の溶け込み量となる）という構造的な差異が発生する。溶け込み量と疲労損傷の関係は明確になっていないが、これらの研究結果、およびトラフリブ厚 8mm の場合に損傷が多いことを考慮し、鋼床版設計時に構造諸元を検討する必要がある。

(5) 横リブ間隔

損傷橋梁 7 橋の内、横リブ間隔が 2.5m 未満のものが 2 橋で、その他 4 橋は 2.5m～3.0 m であった。

既往の研究⁴⁾において、横リブ間隔が 2.5m から 3.0m になることで輪荷重直下の着目溶接部の最小主応力の差異の影響は少ないという結果が得られているが、値は小さいものの直上載荷で無い場合の最大主応力が 10% 程度増加する結果となっている。また、横リブ間隔の増加により床組み応力も増加する。よって、損傷橋梁の傾向を踏まえ、横リブ間隔は 2.5m 以下が望ましいと考えられる。なお、疲労設計指針⁶⁾を適用する場合には、横リブ間隔を 2.5m 以下としておく必要がある。

(6) 供用年、大型車交通量

損傷橋梁の供用年数は 13 年～30 年、大型車交通量は 1900 台/車線/日～12000 台/車線/日であった。また、損傷橋梁はいずれも重交通路線上の橋梁であった。

文献 1) では、損傷橋梁の供用年数および大型車交通量の実績からデッキプレート貫通き裂発生の有無が検討されている。検討の結果、損傷橋梁は 1 車線あたりの大型車累積台数が概ね 2.5×10^7 台以上の橋梁に該当することが示されている。これは、例えば、供用期間を 100 年とした場合、 2.5×10^7 台 / 36500 日 = 684 台 / 日 / 車線以上の大型車交通量を有する場合に損傷が生じる結果となる。

また、損傷橋梁は厳しい荷重条件を有する重交通路線上に位置しており、舗装の損傷も著しい橋梁が多かったことから、特にこの様な特徴を有する路線では、鋼床版設計時に留意が必要である。

(7) デッキプレート厚

損傷橋梁における損傷部のデッキプレート厚は 12mm であった。

損傷橋梁においては、断面変化によりデッキプレートが変化すること場合であっても、

デッキプレート貫通き裂が発生した部位は、デッキプレート厚が 12mm あるいは 13mm の箇所であった。なお、このうち 1 橋で超音波探傷試験によりルート内部のき裂の有無を調査した結果、デッキプレート厚が 12mm の場合、検査溶接延長に対し 1.3% の長さでエコーが確認されたが、デッキプレート厚が 13mm の場合には 0.4%、14mm 以上の場合には検出されなかった。よって、損傷橋梁の各諸元の範囲では、デッキプレート厚が 14mm 以上ではデッキプレート貫通き裂に対する耐久性が高まると考えられる。

【参考文献】

- 1) 鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究－実態調査に基づく鋼床版の点検手法に関する検討－，国土技術政策総合研究所資料共同研究報告書，第 471 号，H20.8
- 2) 岩崎，長田，西川，小塩，山田：アスファルト舗装が鋼床版の疲労に及ぼす影響，土木学会論文集，No.563，I-39，pp.161-171，1997.4
- 3) 井口，内田，川畑，玉越：アスファルト舗装の損傷が鋼床版の局部応力性状に与える影響，鋼構造論文集，第 15 巻 59 号，pp.75-86，2008.9
- 4) 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 回床版シンポジウム講演論文集，pp.13-24，2006.7
- 5) 川畑他：デッキプレート厚・U リブ厚・溶接溶け込み量が鋼床版の応力性状に与える影響，第 4 回床版シンポジウム講演論文集，pp.17-22，2005.7
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，H14.3
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅱ表－解 8.2.1，H14.3

表-1 デッキプレート貫通き裂発生橋梁とその諸元について※1)

橋梁名		M2橋	M3橋	M10橋	C1橋	A橋	H橋	K橋
橋梁諸元	型式	鋼床版箱桁橋 (単純・3径間連続+単純)	3径間連続箱桁橋	3径間連続箱桁橋×2連 (鋼床版部)	3径間連続箱桁橋 (鋼床版部)	3径間連続箱桁橋 (損傷部)	ニールセンローゼ桁	斜張橋
	橋長	405.8 m (62.5+280.1+62.5m)	210 m	698m	469 m	840m	256m	455m
	支間割	連続桁部90+100+90m	65.0+80.0+65.0m	88.5+88.0+88.5(鋼床版部)	59.0+74.0+59.0m(鋼床版部)	124.2+150.0+124.2m	254m	40.5+134.0+220.0+60.5m
	幅員 (車線幅)	15.0 m (3.5m)※3)	24.0 m (3.5m)	12.5 m (3.25m)	12.5 m (3.25m)	14.9～17.6m (3.5m)	20.25m (3.5m)	23.5m (3.25m)
	車線数(1方向)	3車線	3車線	1車線	3車線	2車線	2車線	2車線
構造諸元	厚さ	75mm	75mm	70mm	80mm	75mm	65mm	80mm
	舗装 表層材質※3)(厚さ)	改質アスコン 35mm	表層改質1型 35mm	ホリヤ改質アスファルト 30mm	密粒度キヤップアスコン 40mm	鋼床版用改質アスコン 35mm	密粒度アスファルト 35mm	粗粒度キヤップアスコン(コノ入)40mm
	基層材質※3)(厚さ)	改質アスコン 40mm	基層改質1型 40mm	ホリヤ改質アスファルト 40mm	細粒度アスコン 40mm	鋼床版用改質アスコン 40mm	ケースアスファルト 30mm	ケースアスファルト 40mm
	トラフ型式	U-340×284×8(円形リブ)※4)	310×274×8(円形リブ)※4)	U-320×250×8※4)	U-340×280×8※4)	U-320×240×6	U-320×240×6	U-320×260×6
履歴その他	橋リブ間隔	30m※4)	端部1.2m、一般2.5m	2.75m※4)	2.95m※4)	2.0m	3.0m※4)	2.1m
	供用年	1980年	1978年	1986年	1979年	1996年	1993年	1987年
	大型車交通量※5)	5,668台/日/車線	5,668台/日/車線	2,617台/日/車線	1,943台/日/車線	5,489台/日/車線	5,234台/日/車線	11,921台/日/車線
	舗装の損傷等	損傷多数あり	舗装補修痕が多い	舗装補修痕が多い	舗装補修が頻発	損傷少	損傷あり	舗装補修が頻発
損傷状況	損傷部	一般部、横リブ交差部 12mm	一般部 12mm	貫通き裂は一般部 12mm(貫通き裂箇所)	一般部、横リブ交差部 12mm	交差部 12mm	交差部 12mm	一般部、横リブ交差部 12mm
	その他	損傷発生部の デッキプレート厚は12mm	損傷発生部のデッキプレート厚は12mm 損傷発生部は、端横リブと横リブ間(縦リブ支間1.25m)	超音波によるき裂の推定結果 損傷率(損傷長さ/溶接長) デッキ厚12mm:1.3% デッキ厚13mm:0.4% デッキ厚14mm以上:損傷無	損傷発生部の デッキプレート厚は12mm	損傷発生部の デッキプレート厚は12mm	損傷発生部の デッキプレート厚は12mm	損傷発生部の デッキプレート厚は12mm

※1) 国総研共同研究報告書 鋼部材の耐久性向上に関する共同研究 -実態調査に基づく鋼床版の点検手法に関する検討- を参考とし、独自の調査結果を追加

※2) 図面に記載が無かったため、道路幅員および車線数、道路等級の推定から算出した値。

※3) 建設時図面、日本道路学会議論文等から記載したもの

※4) 鋼道路橋の疲労設計指針(日本道路協会、H14.3)の適用範囲外

※5) H17交通センサ結果から算出したもの

【参考資料-2】トラフリブ鋼床版に関する諸外国の基準

1 AASHTO

AASHTO ではデッキ厚とトラフリブ厚に関する規定として以下の照査式を設定している。

$$\frac{t_r a^3}{t_d^3 h} < 400 \quad (1)$$

ここで、

t_r : トラフリブ板厚 t_d : デッキ板厚 (ただし舗装の影響を考慮した有効板厚)

h : トラフリブ高さ a : トラフリブウェブ間隔

である。この照査式はトラフリブに発生する応力に対して規定された以下の経験式 (2) より導かれている。

$$f = k \frac{q a^2}{8} \frac{6}{t_r^2} \frac{\frac{t_r^3}{h}}{\frac{t_d^3}{a} + \frac{t_d^3}{a} + \frac{t_r^3}{h}} \quad (2)$$

ここで、

q : 荷重強度

k : リブに作用する曲げモーメントの分配を考慮するための係数

式(2)を式(1)の左辺に合わせて整理すると、

$$\frac{t_r a^3}{t_d^3 h} = \frac{8}{3k(q/f) - 4(t_r/a)^2} \quad (3)$$

となる。

以上より、AASHTO では、式(3)の右辺を定数 (=400) として照査式(1)の上限値としているが、右辺にはリブ厚 t_r およびトラフリブ間隔 a が含まれるため、リブ厚とデッキ厚に応じて上限値を設定する方がより合理的と考えられる。そこで、本検討ではこの点を考慮して当面推奨される鋼床版のデッキ厚、トラフリブ厚について考察する。なお、AASHTO では式(3)右辺に含まれる定数について具体的な記述が無いため、ここでは次の様に仮定する。

リブに発生する応力と荷重強度については、以下のとおりとする。

- $f=140\text{N/mm}^2$: SM400 の許容応力
- $q=1.4\text{N/mm}^2$: T 活荷重の面圧に対し衝撃係数 1.4 (道示Ⅱ8.4.2) を考慮

ここで、 k については具体的な根拠の下に値を定めることができないが、 f, q を上記の値と

し、トラフリブ間隔 a をこれまでの疲労試験や解析に合わせて 320mm とした場合、 $t_r=6\text{mm}$ において AASHTO の上限値（式(3)の右辺が 400）になるとすれば、 $k = 0.7$ となるため、今回はこの値を用いることとする。

以上の仮定のもと、今回の疲労試験で用いた供試体に対して照査を実施した結果を表-1 に示す。疲労試験に用いたトラフリブはいずれも日本鋼構造協会規格（JSS II 08-1983）に準拠したものであるが、この規格に該当しない大型のトラフリブを用いた鋼床版に対する照査結果も参考として同表に記載する。

表-1 AASHTO に準拠し試算した結果

	td	tr	a	h	$\frac{t_r a^3}{t_d^3 h}$ ①	$\frac{8}{3k(q/f) - 4(t_r/a)^2}$ ②	照査結果 ①<②	
(日本鋼構造協会規格)	D19U6	19	6	320	240	119	408	○
	D19U8	19	8	320	240	159	432	○
	D16U6	16	6	320	240	200	408	○
	D16U8	16	8	320	240	267	432	○
	D14U6	14	6	320	240	299	408	○
	D14U8	14	8	320	240	398	432	△
	D12U6	12	6	320	240	474	408	×
	D12U8	12	8	320	240	632	432	×
(大型Uリブ)	木曽川・揖斐川橋	18	8	440	330	354	407	○
	旧JH 合理化鋼床版	18	9	450	330	426	412	△
	橋建 合理化鋼床版	18	8	440	330	354	407	○
		18	9	454	332	435	412	△
		19	8	450	330	322	405	○
東京港臨海大橋	16	8	400	343	364	412	○	

注： t_d は鋼床版のデッキ厚とした。

表-1 に示した照査結果から、以下のことがいえる。

- ・ JSS 規格のトラフリブを用いた場合、デッキ厚は 14mm 以上あれば照査式を満足する。ただしデッキ厚 14mm、リブ厚 8mm の場合は照査値が上限値の 92%となり余裕が少ない。
- ・ 大型トラフリブを用いた場合もほとんどのケースで照査を満足するが、一部のケースで上限値を 5%ほど超過する。ただし、いずれも超過量が少ないことから、今回の検討で考慮しなかった舗装厚の影響を加味して再考する余地があると考えられる。

以上の結果から、例えばトラフリブ形状を日本鋼構造協会規格に準拠した場合、デッキ厚は 16mm 以上とすることが当面の措置として推奨される構造諸元となる。

2 Eurocode

Eurocode では、鋼床版の疲労設計に対し、数値的な疲労評価に替えて各部位の構造詳細を規定する方法が採用されている。このうち、鋼床版のデッキプレート厚については、敷設される舗装厚と関連付けて以下のように規定している。

- ・ 舗装厚 70mm 以上の場合 : 最小デッキプレート厚=14mm
- ・ 舗装厚 40mm～70mm の場合 : 最小デッキプレート厚=16mm

通常、舗装厚は 70mm 以上確保されると考えられるが、70mm を下回る場合についても対応することを考慮すれば、推奨される最小デッキプレート厚の条件は 16mm 以上となる。

【参考資料-3】デッキプレート厚が鋼重に及ぼす影響の試算

1 検討の目的

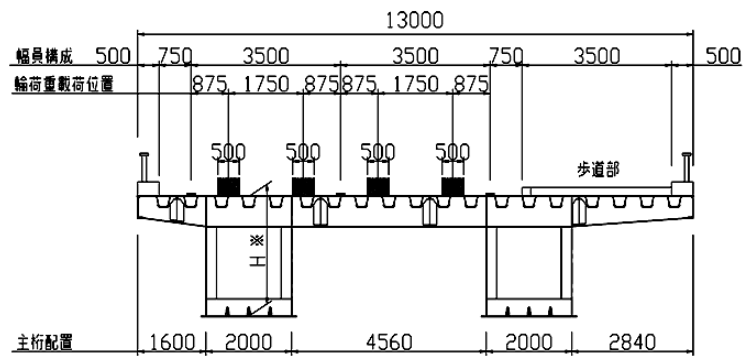
疲労耐久性向上によるデッキプレートの増厚が、橋梁の鋼重に与える影響を確認することを目的とし、デッキプレート厚をパラメータとした概略設計を実施する。

2 検討方法

デッキプレート厚が 12, 14, 16, 19mm の 4 種類に対し、床組作用と主桁作用の設計計算を行い、デッキプレート厚と鋼重の相関について確認を行う。

3 検討モデル

一般道におけるこれまでの実績を参考に、2 車線と歩道部を有する単純箱桁橋および 3 径間連続箱桁橋とする。横断面図を図-1、主要諸元を表-1、骨組モデルを図-2 に示す。主桁本数は 2 本とし、支間長は 70m を基本とした。ただし、連続桁では、側径間と中央径間のバランスがよい 80+100+80m についてもケースに加え支間割の違いによる影響が無いことを確認する。また連続桁の中間支点部は、桁高変化させ経済断面とした。



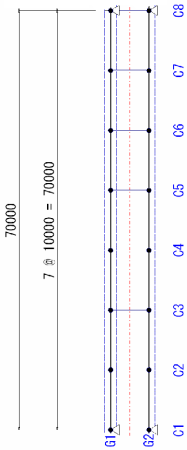
※連続桁において中間支点部は桁高変化させるものとし、経済断面とする。

図-1 横断面図

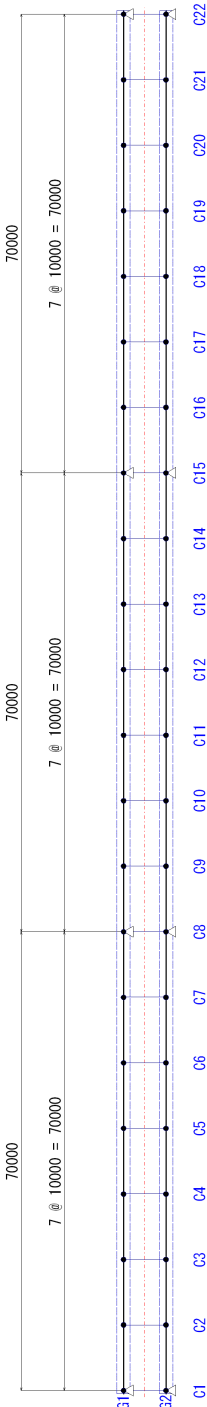
表-2 主要諸元

モデル	主桁形式	橋梁形式	支間割 (m)	車線数	幅員 (全幅) (m)	主桁本数	標準桁高 (m)	デッキプレート厚 (mm)	鋼床版縦リブ支間 (m)	横桁間隔 (m)
1	箱桁	単純桁	70	2	13.0	2	3.0	12,14,16,19	2.5	10
2		3径間連続桁	70+70+70	2	13.0	2	2.6			
3			80+100+80	2	13.0	2	2.7~3.5			

モデル 1 単純桁 (支間長 70m)



モデル 2 連続桁 (支間長 70+70+70m)



モデル 3 連続桁 (支間長 80+100+80m)

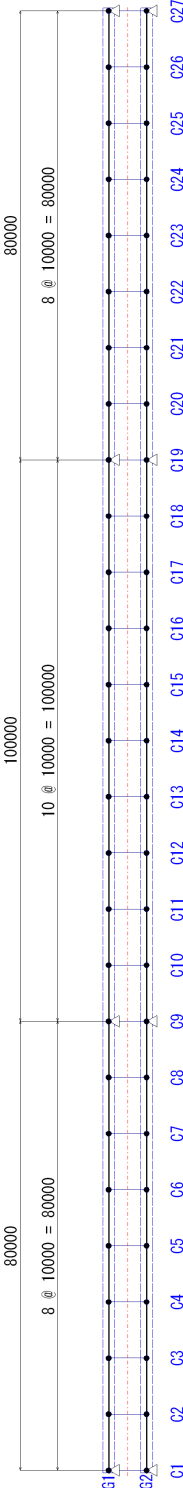


図-2 骨組モデル

4 検討条件

- 1) デッキプレート厚は 12, 14, 16, 19mm の 4 種類とし、橋梁全長にわたり一定とする。
- 2) トラフリップのサイズは、320×240×6 を用いる。
- 3) 縦リブ支間長は、「鋼道路橋疲労設計指針」（日本道路協会）より 2.5m とする。
- 4) 使用材質は SM400, SM490Y 材とする。ただし、条件統一のため、同一モデルではデッキプレート厚によらず材質の使用区分を統一する。

5 検討結果

床組作用と主桁作用の設計結果を表-2、表-3 に示す。床組作用において、デッキプレート増厚に伴う作用応力度の変動幅は小さい。これは、鋼重の増加と部材剛性の増加が相殺されるためである。また、主桁作用において、デッキプレートを増厚しても主桁下フランジ断面に大きな変更は生じない。これは、図-3 に示すようにデッキプレート増厚による部材剛性の増加と中立軸がデッキプレート寄りにシフトすることが、相殺されるためである。これらの結果より、デッキプレート増厚によるトラフリップや主桁下フランジなどの断面決定に与える影響が小さい。

表-2 床版作用の試設計結果

鋼床版板厚 (mm)		(単位: N/mm ²)			
支間部	デッキ応力度 σ_u	-42	-37	-34	-30
	U-Rib 下端 応力度 σ_l	110	107	105	103
支点部	デッキ応力度 σ_u	22	19	18	16
	U-Rib 下端 応力度 σ_l	-57	-56	-55	-54

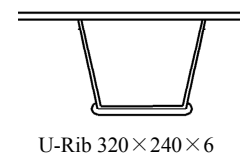


表-3 主げた作用の試設計結果

(1) モデル 1：単純桁（支間長 70m）

曲げモーメント・応力比較表（支間中央）		(単位: kN・m, N/mm ²)			
鋼床版板厚 (mm)		12	14	16	19
下フランジ厚 (mm)		28	28	28	28
曲げモーメント (死+活)	解析値	45289	45653	46270	47061
	増加量 (t=12mm に対し)	—	364	981	1772
デッキ ($\sigma_a=140$)	応力度 σ_u	-132.1	-126.5	-115.0	-105.4
	増加量 (t=12mm に対し)	—	-5.6	-17.1	-26.7
下フランジ ($\sigma_a=210$)	応力度 σ_l	206.5	207.5	207.3	208.7
	増加量 (t=12mm に対し)	—	1.0	0.8	2.2

(2) モデル 2 : 連続桁 (支間長 70+70+70m)

曲げモーメント・応力比較表 (支間中央)		(単位:kN-m, N/mm ²)			
鋼床版板厚 (mm)		12	14	16	19
下フランジ厚 (mm)		23	23	23	24
曲げモーメント (死+活)	解析値	33880	34385	34614	35578
	増加量 (t=12mm に対し)	—	505	734	1698
デッキ ($\sigma_a=140$)	応力度 σ_u	-125.1	-115.9	-107.3	-98.1
	増加量 (t=12mm に対し)	—	-9.2	-17.8	-27.0
下フランジ ($\sigma_a=210$)	応力度 σ_l	207.5	208.3	207.8	205.5
	増加量 (t=12mm に対し)	—	0.8	0.3	-2.0

曲げモーメント・応力比較表 (中間支点)		(単位:kN-m, N/mm ²)			
鋼床版板厚 (mm)		12	14	16	19
下フランジ厚 (mm)		16	16	16	16
曲げモーメント (死+活)	解析値	-32888	-32965	-33391	-34124
	増加量 (t=12mm に対し)	—	77	503	1236
デッキ ($\sigma_a=140$)	応力度 σ_u	133.4	128.2	119.5	109.1
	増加量 (t=12mm に対し)	—	-5.2	-13.9	-24.3
下フランジ ($\sigma_a=210$)	応力度 σ_l	-204.6	-204.6	-205.1	-206.9
	増加量 (t=12mm に対し)	—	0.0	0.5	2.3

(3) モデル 3 : 連続桁 (支間長 80+100+80m)

曲げモーメント・応力比較表 (支間中央)		(単位:kN-m, N/mm ²)			
鋼床版板厚 (mm)		12	14	16	19
下フランジ厚 (mm)		23	23	23	24
曲げモーメント (死+活)	解析値	35891	36459	36741	38044
	増加量 (t=12mm に対し)	—	568	850	2153
デッキ ($\sigma_a=140$)	応力度 σ_u	-121.9	-112.5	-104.1	-95.6
	増加量 (t=12mm に対し)	—	-9.4	-17.8	-26.3
下フランジ ($\sigma_a=210$)	応力度 σ_l	206.1	206.7	206.5	205.7
	増加量 (t=12mm に対し)	—	0.6	0.4	-0.4

曲げモーメント・応力比較表 (中間支点)		(単位:kN-m, N/mm ²)			
鋼床版板厚 (mm)		12	14	16	19
下フランジ厚 (mm)		18	18	19	19
曲げモーメント (死+活)	解析値	-53817	-54483	-55441	-56810
	増加量 (t=12mm に対し)	—	666	1624	2993
デッキ ($\sigma_a=210$ or 140)	応力度 σ_u	159.5	145.6	137.6	126.0
	増加量 (t=12mm に対し)	—	-13.9	-21.9	-33.5
下フランジ ($\sigma_a=210$)	応力度 σ_l	-208.7	-208.7	-204.8	-207.1
	増加量 (t=12mm に対し)	—	0.0	-3.9	-1.6

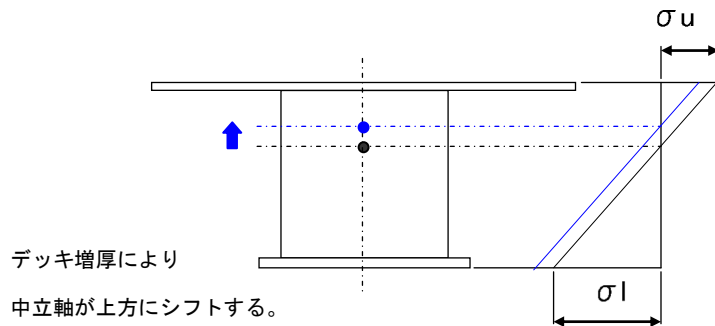
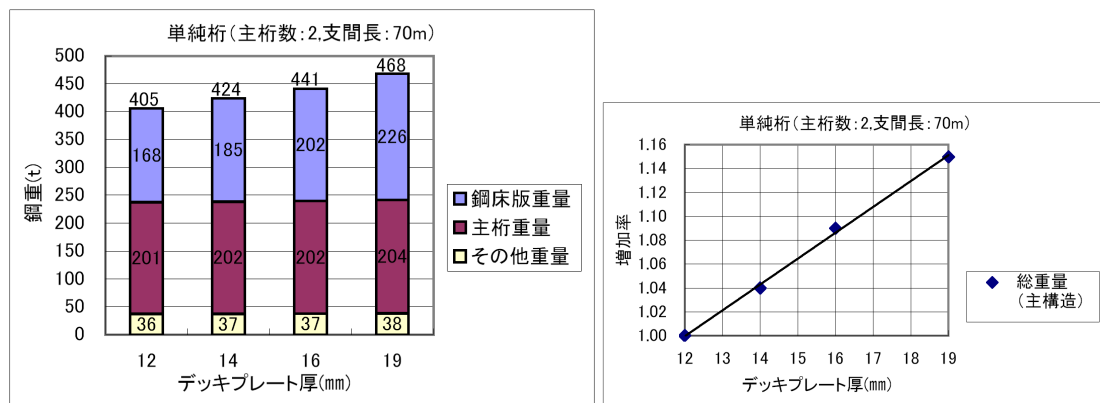


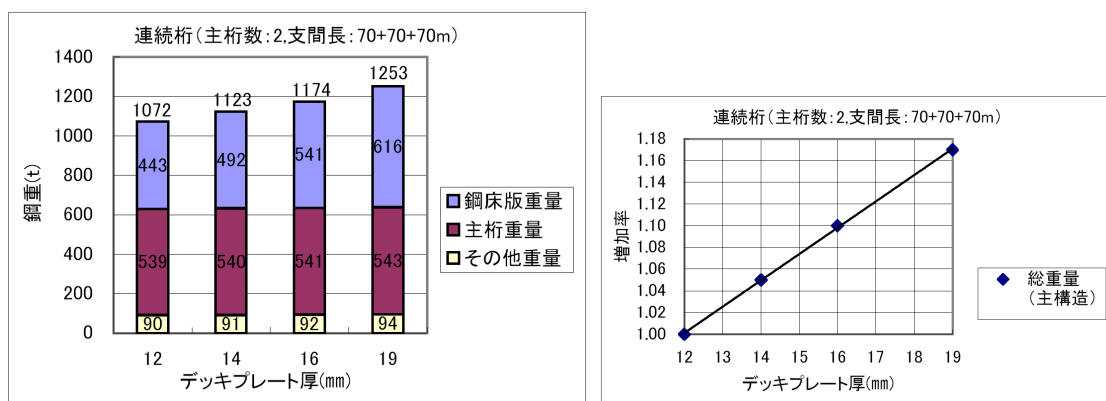
図-3 デッキプレート増厚と中立軸の関係

次に鋼重比較を図-4 に示す。上述した理由により，橋梁形式や支間割に関係なく，鋼重の増加量に対しデッキプレートがほとんどを占めている。また，鋼重の増加率はデッキプレートの増厚 1mm に対し約 2%である。

(1) モデル 1：単純桁（支間長 70m）



(2) モデル 2：連続桁（支間長 70+70+70m）



(3) モデル3：連続桁（支間長 80+100+80m）

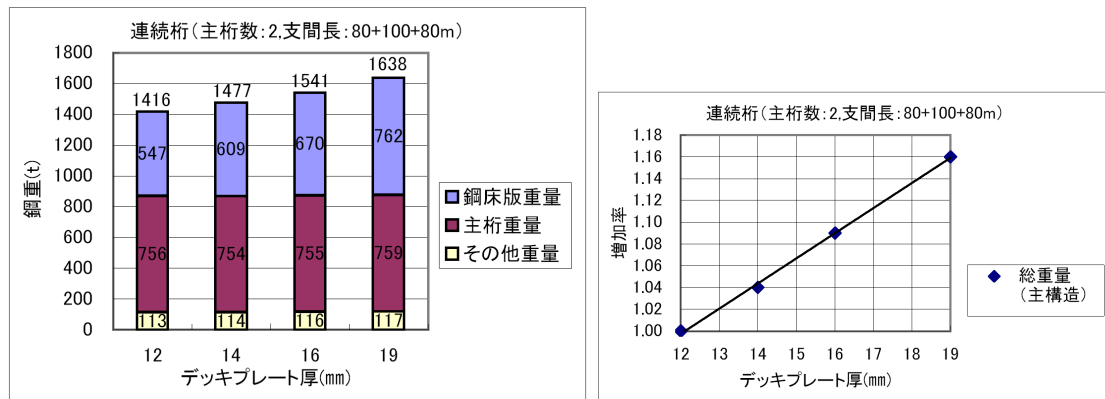


図-4 鋼重比較

6 結論

以上の検討より、デッキプレート増厚はトラフリブや主桁断面決定に与える影響が小さく、鋼重に与える影響はデッキプレート自身のみであり、その鋼重に比例し増加する。

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

N o. 608

September 2010

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

©独立行政法人 土木研究所

©社団法人 日本橋梁建設協会

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地

国土技術政策総合研究所

企画部研究評価・推進課 PHONE 029-864-2675