

第4章 塗装鋼板溶接桁の疲労強度

塗装鋼板溶接桁の疲労強度

FATIGUE STRENGTH OF WELDED GIRDERS FABRICATED FROM PRE-PRIMED STEEL PLATES

森 猛^{*}、田中 雅人^{**}、木幡 善人^{***}、三木 千寿^{****}

By Takeshi MORI, Masato TANAKA, Yoshito KOHATA, Chitoshi MIKI

When steel bridges are fabricated, pre-primed steel plates are usually used to protect against corrosion. In case of welding the pre-primed plates, blowholes often occur at the weld roots. In this study, an influence of blowholes in the roots of fillet welds on the fatigue strength is investigated by fatigue tests on welded plate girder specimens which are fabricated from the pre-primed steel plates. The girder specimens have included the vertical stiffener welded joints, the out-of-plane gusset welded joints and the flange-web welded joints.

Key Words : pre-primed plate, blowhole, fillet welds, fatigue strength

1. はじめに

鋼橋梁の製作においては、防錆を目的としたプライマー付きの鋼板、いわゆる塗装鋼板が用いられることが多い。塗装鋼板をそのまま溶接すると、その方法や条件によっては溶接ルート部にブローホールが発生することもあるため、溶接前にプライマーを除去することが多い。しかし、作業の省力化、溶接の高速化や自動化、ロボット化のために、プライマー付きのまま溶接することが望まれている。

ブローホールは鋼板表面に付着した有機物などが原因で溶接時に生じたガスが溶接金属中に閉じ込められた気孔であり、断面欠損や応力集中の原因となる恐れもある。そのため、ブローホールにより疲労強度が低下するとも考えられる。ブローホールが疲労強度に及ぼす影響については、本州四国連絡橋の箱断面トラス部材縦方向溶接部の施工に関連して数多くの研究がなされている¹⁻⁴⁾。その結果、疲労強度はブローホールの存在およびその大きさにより著しく低下することが明らかとされ、ブローホールの許容寸法が規定されるとともに、疲労に対する許容応力範囲が従来よりも低く設定されている⁵⁾。しかし、作業の省力化のためにプライマー除去の省略が特に望まれている垂直補剛材などの付加物すみ肉溶接継手については、ルート部のブローホールが疲労強度にどの程度影響するか不明である。

本研究では、橋梁用鋼板として使用されることも多く、またブローホールが発生しやすいとされている長ばく型エッチングプライマーを塗布したままの鋼板で製作した溶接桁試験体の疲労試験を行ない、鋼桁橋に

* 工博 法政大学助教授 工学部土木工学科 (〒184 東京都小金井市梶野町 3-7-2)
 ** (株)東京鐵骨橋梁製作所 生産計画部生産技術課 (〒302 茨城県取手市下高井 1020)
 *** 工修 (株)横河ブリッジ 千葉工場製作課 (〒261 千葉市美浜区新港 88)
 **** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

において基本的な継手である垂直補剛材のすみ肉溶接部、面外ガセットのすみ肉溶接部およびフランジとウェブのすみ肉溶接部（首溶接部）の疲労強度に対するブローホールの影響について検討する。

2. 試験方法

2.1 試験体

図1に示す形状・寸法および継手部詳細の桁試験体を4体（No.1～4試験体）製作した。これらの試験体には、垂直補剛材溶接部、面外ガセット溶接部、首溶接部（フランジとウェブの溶接部）が含まれている。長さ70mm・幅50mmの矩形鋼板は垂直補剛材を模擬したものである。垂直補剛材の取付け位置は、No.1試験体とNo.2～4試験体で変えている。各継手部とも溶接のままである。ただし、No.4試験体の内側の面外ガセットのみ、溶接止端部をペンシル型のグラインダーで止端の曲率半径が5mm程度となるように仕上げている。その取付け位置もNo.1～3試験体と変えている。

首溶接は、No.1,2試験体でフラックス入りワイヤを用いた自動CO₂アーク溶接法（以後FCWと記す）、No.3,4試験体でサブマージアーク溶接法（SAW）を用いて行なった。これらの溶接は、溶接時に発生するガスの流出をできるだけ防止してブローホール発生に対して厳しい環境とする目的で、ウェブとフランジを治具を用いて密着させた状態で行なった。垂直補剛材および面外ガセットは、試験体中央を境として右側半分を低水素系の溶接棒を用いた手溶接法（SMAW）で、左側半分を半自動FCWでウェブに溶接接合した。これらの溶接条件を表1に示す。溶接姿勢はSAWで下向き、他の溶接法で水平としている。目標としたすみ肉溶接のサイズはいずれも6mmである。

供試鋼材は、板厚9mmおよび12mmのSS400であり、それらの化学組成および機械的性質を表2に示す。厚さ9mmの鋼板はウェブ、垂直補剛材および面外ガセットに、厚さ12mmの鋼板はフランジに使用している。鋼板表面には、長ばく型エッチングプライマーを塗布している。プライマーの厚さは板厚9mmの鋼板で約30μm、12mmの鋼板で約20μmである。なお、長ばく型エッチングプライマーの膜厚の基準は、塗装便覧⁶⁾で15μm、本州四国連絡橋公団⁷⁾で20μmとされている。

2.2 ブローホールの発生状況

溶接終了後、首溶接部を目視で観察し、ピットの有無を調べた。ピットが生じていたのは、いずれの試験

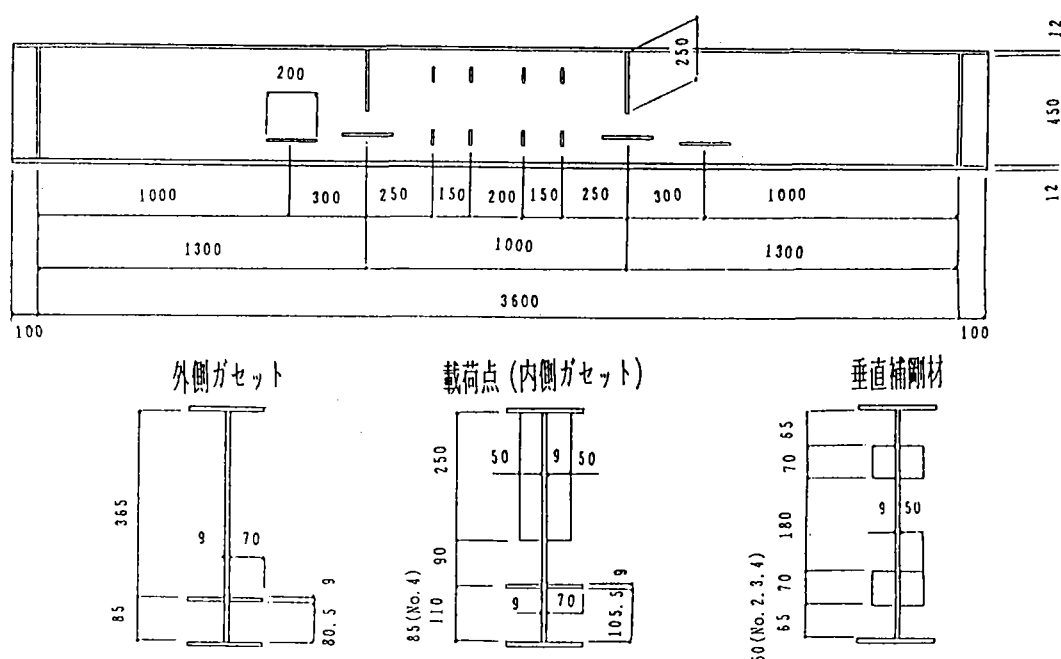


図1 試験体の形状・寸法および継手部詳細

表1 溶接条件

溶接法	溶接材料	溶接条件
SMAW	JIS Z3212 D5016 (LB-52 5.0φ)	200A
FCW	JIS Z3313 YWF-24 (MX-200 1.2φ)	230A 30V
自動FCW	JIS Z3313 YWF-24 (MX-200 1.2φ)	240A 34V 34cm/min
SAW	JIS Z3183 S502 相当 (US-36 4.0φ, MF-83 8-48)	650A 32V 60cm/min

表2 供試鋼材の機械的性質および化学組成

板厚	降伏点	引張強度	伸び		
12mm	278MPa	450MPa	31%		
9mm	294MPa	441MPa	29%		
板厚	C	Si	Mn (%)	P	S
12mm	0.20	0.10	0.38	0.027	0.007
9mm	0.19	0.10	0.37	0.024	0.008

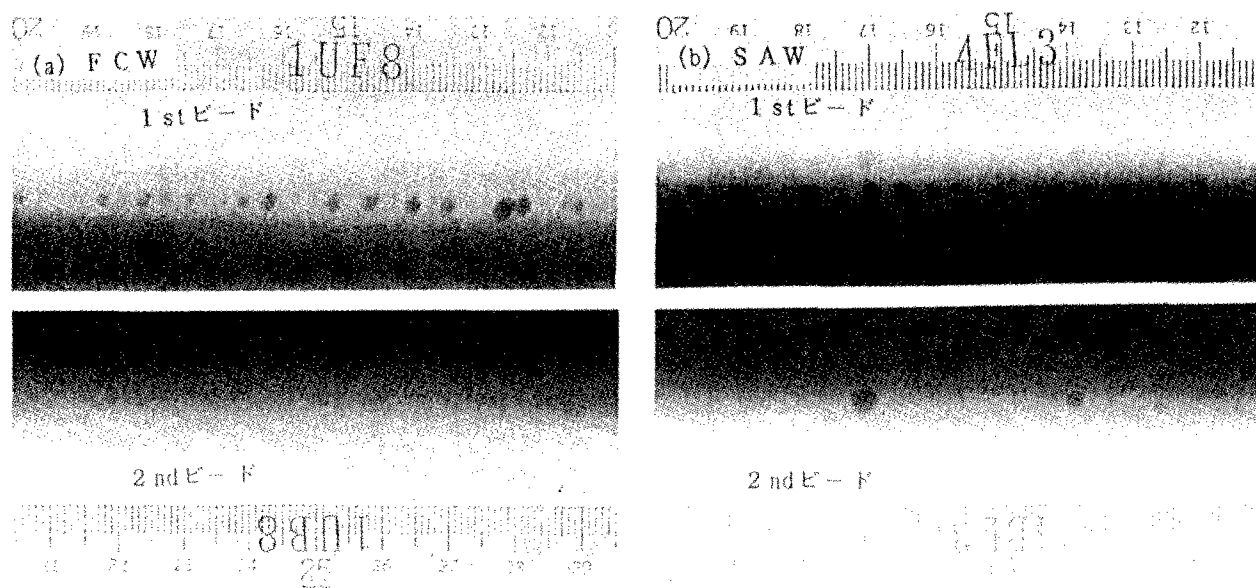


写真1 首溶接部のX線写真

体においても最初に溶接を行なった側（1stビード側）のすみ肉溶接部であり、裏面（2ndビード側）の溶接部にピットの発生は認められなかった。各試験体で首溶接の総延長は15.2mとなるが、ピットはNo.1試験体で11、No.2試験体で16、No.3試験体で6、No.4試験体で20箇所生じており、溶接法によるピットの発生数に差は見られない。なお、開口径が0.5mmを超えるピットが生じた部分については溶接補修を行なった。

疲労試験に先立ち、試験体中央部分2mの首溶接部をX線透過試験により検査し、ブローホールの発生状況を調べた。その例を写真1 (a), (b)に示す。写真上に段違いで薄く見えるブローホールは反対側の溶接部に生じたものである。いずれの溶接方法（FCW、SAW）においても、1stビード側に丸みを帯びた幅2~4mm・高さ3~6mm程度のブローホールが1m当たり180個程度生じている。ただし、SAWに比べてFCWで生じたブローホールの方が細長いものが多い。FCWの2ndビード側にも1000個/mと多数のブローホールが連続的に生じているが、それらはいずれも幅が0.5~1.0mm程度で高さが2.0mm程度の小さいものである。SAWの2ndビード側には、1stビード側と同程度の大きさのブローホールも存在するが、その数は少ない。一般に1st側の溶接ビードによって2nd側の溶接時に発生するガスの外部への放出が妨げられるために2ndビード側で大きなブローホールが数多く生じるとされているが、ここでの結果はこれと異なる。本試験体において1stビード側で2ndビード側よりも顕著なブローホールが生じた原因としては、溶接時にフランジとウェブを密着させたために1st側の溶接時においてもガスが放出しにくい状態となっていたこと、板が比較的薄いために1st側の溶接によって2nd側溶接面のプライマーが焼けたことなどが考えられる。

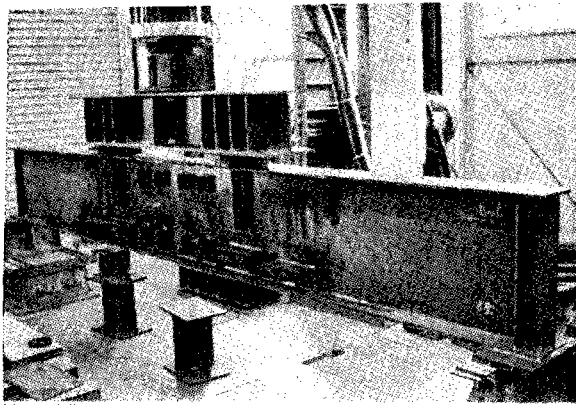


写真2 疲労試験の状況

2.3 疲労試験

疲労試験には、ジャッキタイプの電気油圧サーボ式材料試験装置（動的能力300kN）を用いた。載荷方法は、支間を3600mm、荷重点間距離を1000mmとした4点曲げである。載荷状況を写真2に示す。疲労試験は、すべての試験体に対して上限荷重を255kN、下限荷重を10kNとした一定振幅荷重下で行なった。繰返し速度は2.2Hz、荷重波形は正弦波とした。この繰返し荷重により各溶接継手部に生じる応力範囲は、垂直補剛材溶接部で100MPa（No.1試験体）および110MPa（No.2～4試験体）、溶接のままの面外ガセットで60～70MPa、止端を仕上げた面外ガセットで88MPa、首溶接部で141

MPa（等モーメント区間）である。No.4試験体については、疲労亀裂の発生・進展性状を調べるために、上限荷重を一定とした状態で所定の荷重繰返し数ごとに荷重範囲を〔123～255kN〕と半減する二段多重荷重試験（ピーチマーク試験）を行なった。すなわち、10～255kNの繰返し荷重を 3×10^5 回、123～255kNの繰返し荷重を 2×10^5 回づつ交互に載荷した。

各継手部からの疲労亀裂の発生および進展の観察は、磁粉探傷法により行なった。垂直補剛材および面外ガセット溶接部から疲労亀裂が生じ、40mm程度以上の長さとなった場合には、試験を中断し、疲労亀裂を補修した。補修は、疲労亀裂の先端に直径18mmの円孔を空け、そこをF10T-M16でボルト締めする方法で行なった⁸⁾。その後、首溶接部に疲労亀裂が観察されるまで疲労試験を継続した。

3. 試験結果および各溶接部の疲労強度

首溶接部に発生した疲労亀裂がある程度長くなった時点で試験を終了した。試験終了時の荷重繰返し数は、No.1試験体で 4.58×10^6 、No.2試験体で 4.71×10^6 、No.3試験体で 3.89×10^6 、No.4試験体で 2.26×10^6 である。ただし、No.4試験体の荷重繰返し数に荷重範囲を半減した荷重の繰返し数は含めていない。試験終了時に表面で観察された疲労亀裂の位置と長さを図2に示す。補修した溶接部については、そのときの疲労亀裂の長さとして示している。

3.1 垂直補剛材溶接部の疲労強度

図1に示すように各試験体には8組の垂直補剛材を模擬した溶接継手部がある。疲労亀裂は、No.3試験体で5ヵ所生じたが、他の試験体に疲労亀裂の発生は認められなかった。図2に示すように、各補剛材溶接部での疲労寿命は試験体の左右ではほぼ同じであり、溶接法（SMAW、FCW）による疲労強度の差は認められない。検出された亀裂の内、最も大きい亀裂は圧縮応力の領域にある補剛材で生じており、全長で115mmであった。図3に応力範囲と疲労寿命（疲労亀裂が長さが100mmとなったときの荷重繰返し数を疲労寿命とした）の関係を示す。図中の実線は、本溶接部に対して日本鋼構造協会の疲労設計指針⁹⁾（以後JSSC指針と呼ぶ）で定められている疲労設計曲線である。ここでの結果は、すべてJSSC指針の許容応力範囲を満たしている。

写真3に垂直補剛材溶接部に生じた疲労亀裂の例、写真4にその溶接部をルートに沿って暴露した例を示す。ルート部には、幅2mm・高さ2～5mm程度のブローホールがいくつか存在するが、疲労亀裂は溶接止端で発生し止端に沿って進展している。また、ブローホール内に疲労亀裂は認められない。他の部分についても同様であった。したがって、溶接ルート部のブローホールが疲労亀裂の起点となる可能性は低いと言えよう。

ルートブローホールが溶接止端で疲労破壊する場合の疲労強度に及ぼす影響を検討する目的で、平面ひず

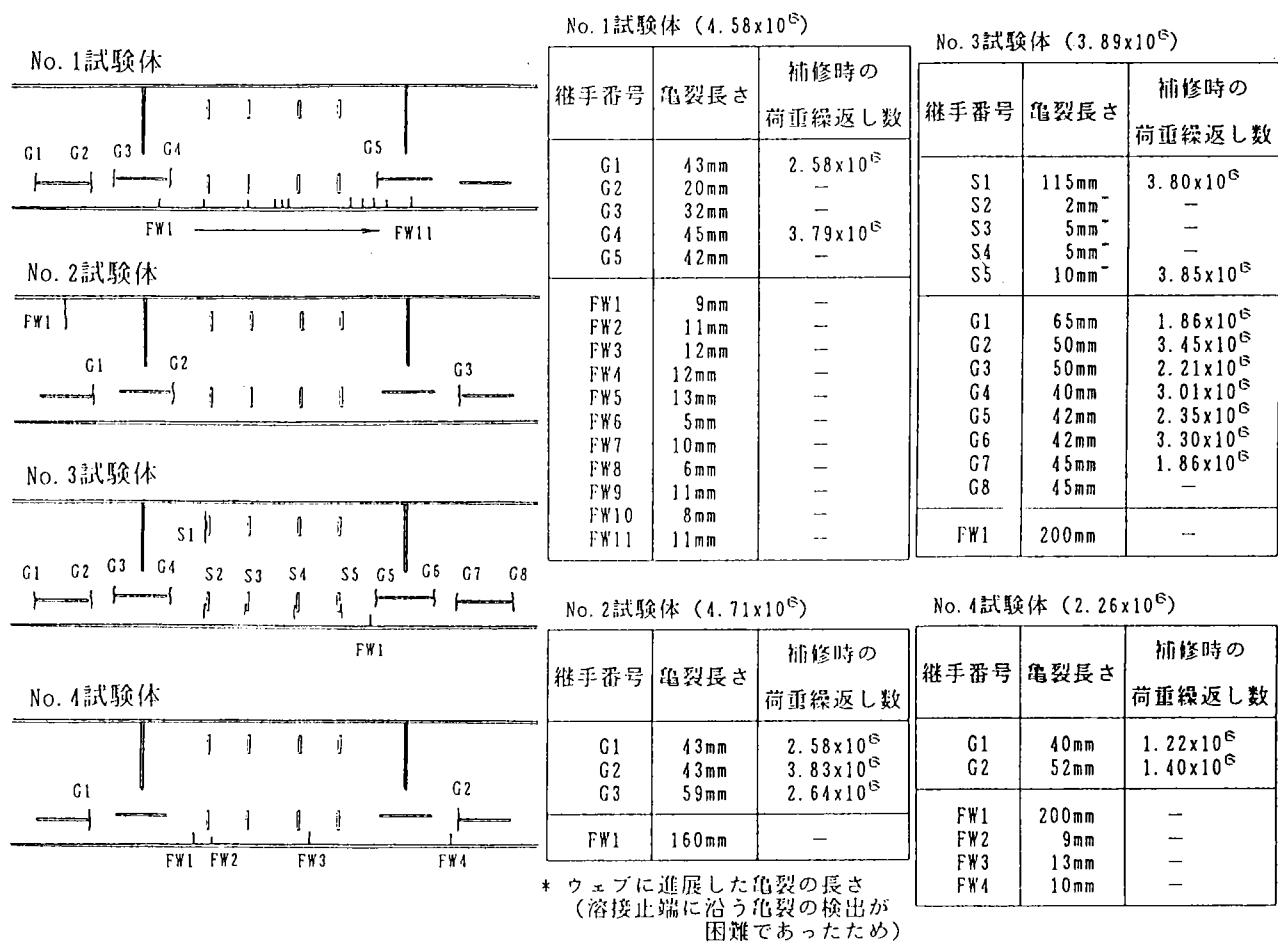


図2 各試験体に生じた疲労亀裂 (試験終了時)

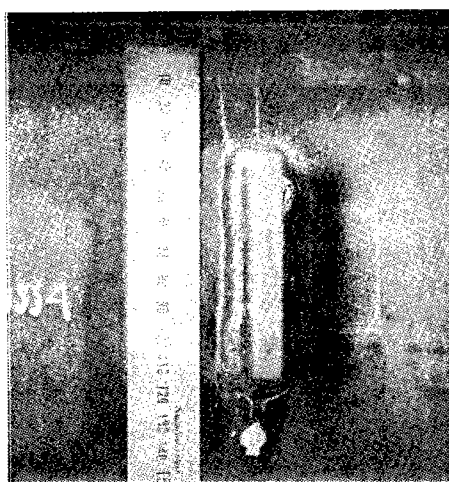


写真3 垂直補剛材溶接部に生じた疲労亀裂

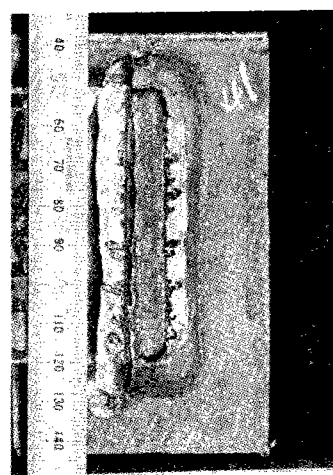


写真4 垂直補剛材溶接部のブローホール

み条件下で二次元有限要素応力解析を行なった。すなわち、ブローホールを溶接方向に連続した空洞にモデル化することにより、ブローホールの影響が顕著に生じるような条件で応力解析を行なった。解析モデルは、図4に示すように、ブローホールなし、ブローホールの高さをのど厚の1/2 (ブローホール小)、5/6 (ブローホール大) とした3つである。ブローホールの形状は楕円形とし、幅は高さの1/2とした。溶接の脚長は6mm、止端部の開き角は135度、曲率半径は0.5mmとした。最小の要素寸法は0.025mmである。応力集中は溶

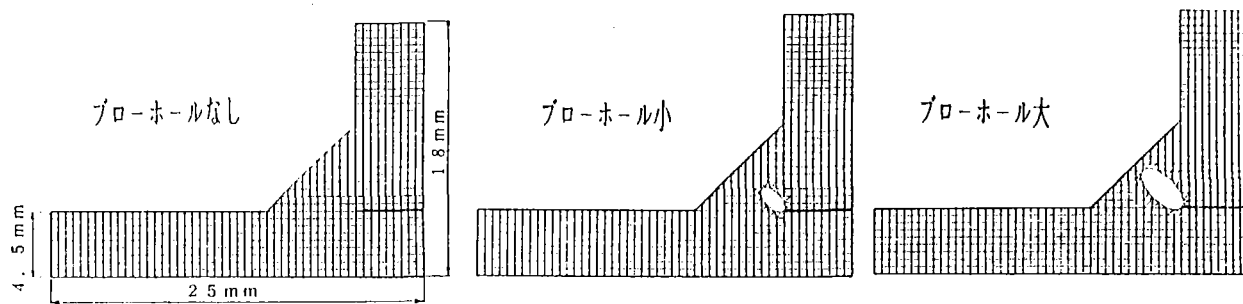


図4 解析モデル

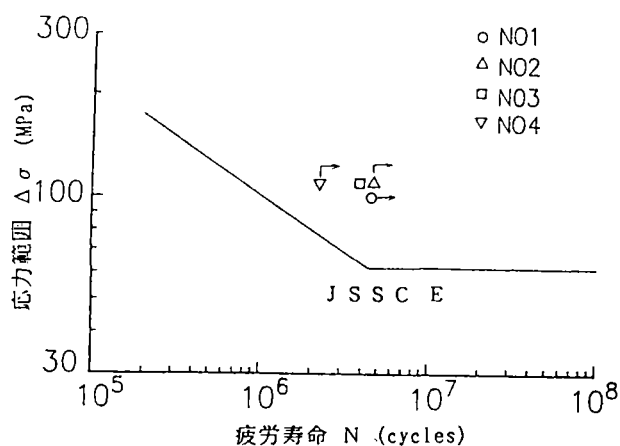


図3 垂直補剛材溶接部の疲労強度

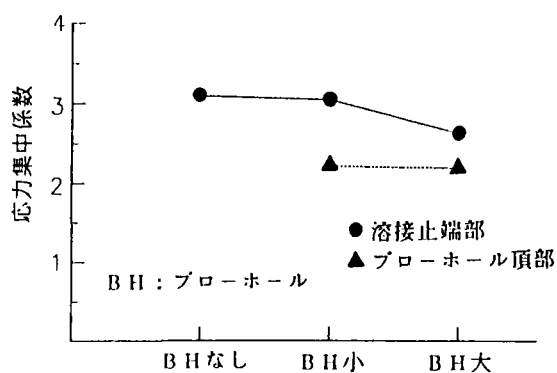


図5 溶接止端部の応力集中に及ぼす
ルートブローホールの影響

接止端の他にブローホールの頂部でも生じた。各モデルで得られた溶接止端部およびブローホール頂部での応力集中係数を図5に示す。いずれの場合も、応力集中係数を求めるために基準とした応力は、主板断面での公称応力である。溶接止端部での応力集中係数は、ブローホールなしで3.1、ブローホールの高さがのど厚の1/2で3.0、5/6で2.6となっている。したがって、ルート部にブローホールがあっても溶接止端部の応力集中係数が高くなることはなく、疲労強度が低下することはないと言えよう。また、ブローホール頂部での応力集中係数は、ブローホールの大きさによらずほぼ2.2となっており、止端部での応力集中係数に比べて低い。したがって、本解析からもブローホールが疲労破壊の起点となる可能性は低いと言える。

3.2 面外ガセット溶接部の疲労強度

図2に示すように、面外ガセット溶接部からは19ヵ所より疲労亀裂が発生し進展した。疲労亀裂は、いずれも溶接のままの溶接止端から生じており、止端を仕上げた継手では疲労亀裂の発生は認められなかった。また、試験体の左右で疲労亀裂の発生・進展性状に差はなく、したがって溶接法(SMAW、FCW)による疲労強度の違いはないと言える。写真5は疲労亀裂の例を、写真6はその溶接部のX線写真を示したものである。疲労亀裂が生じた溶接止端近傍のルート部にブローホールが認められるが、そこから疲労亀裂が生じることはなかった。

疲労試験結果を図6に示す。図の横軸の疲労寿命は、疲労亀裂の全長が40mmとなった時の荷重繰返し数である。図中の実線は、面外ガセット溶接継手に対してJSSC指針で定められている疲労設計曲線である。G等級は溶接のまま、F等級は止端を仕上げた継手に対して設定されている疲労設計曲線である。いずれの結果もJSSC指針での許容応力範囲を満たしている。

疲労亀裂の全長が40mm程度以上となった際には、亀裂の先端に18φの円孔を明け、円孔を高力ボルトF10T-M16で締め付けることにより補修した。この補修例を写真7に示す。補修した後、疲労試験を継続したが、

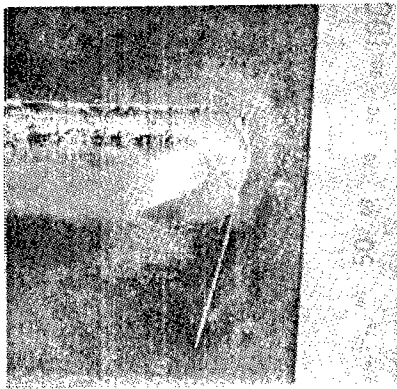


写真5 面外ガセット溶接部に生じた疲労亀裂

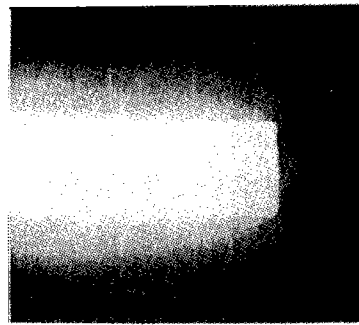


写真6 面外ガセット溶接部のX線写真

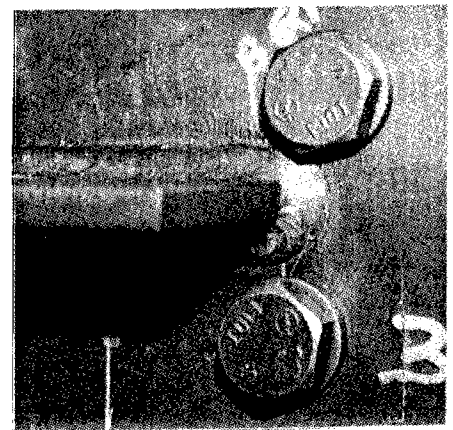


写真7 面外ガセット溶接部に生じた疲労亀裂の補修

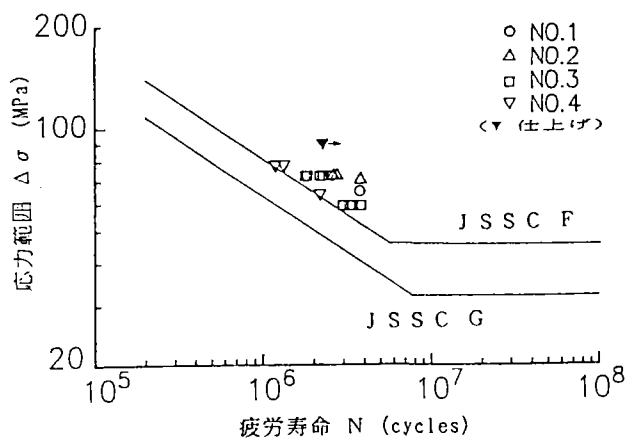


図6 面外ガセット溶接部の疲労強度

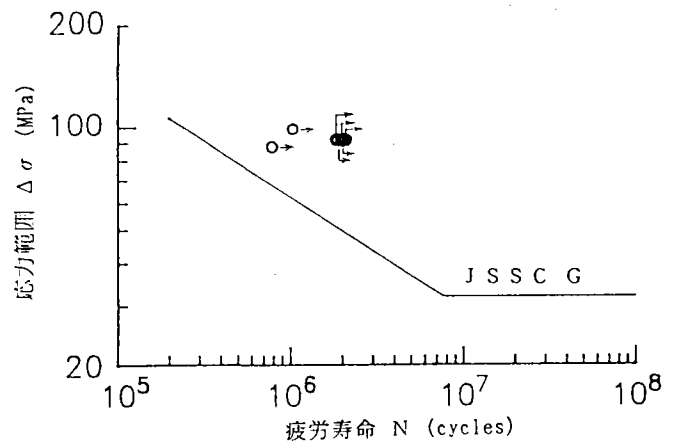


図7 疲労亀裂を補修した面外ガセット溶接部の疲労強度

補修部から疲労亀裂が再発生することはなかった。図7に補修部での応力範囲（円孔先端での公称応力範囲）と補修後の荷重繰返し数（図では疲労寿命）との関係を示す。図中にはJSSC指針の面外ガセット溶接継手（溶接のまま）に対する疲労設計曲線を実線で示しているが、補修部材の疲労強度は未使用の継手以上と判断される。

3.3 首溶接部の疲労強度

首溶接部の表面に現れた疲労亀裂の数は、図2に示すように、No.1試験体で11、No.2試験体で1、No.3試験体で1、No.4試験体で4であった。これらの疲労亀裂は、ピーチマーク試験を行なったNo.4試験体の疲労破面（写真8）からわかるように、ブローホールの頂部から発生し、溶接表面まで進展したものである。なお、No.2試験体では圧縮側の溶接部から生じた疲労亀裂がウェブを貫通し、200mmまで進展したことにより試験を終了している。図8に応力範囲と疲労寿命の関係を示す。疲労寿命は溶接表面での疲労亀裂の長さが約10mmとなったときの荷重繰返し数である。なお、10mm程度の疲労亀裂が生じた後の余寿命が破断寿命に占める割合はおよそ30%であった。図中の実線は、縦方向すみ肉溶接継手に対してJSSC指針で定められている疲労設計曲線である。プライマー付きのまま溶接した継手部であっても、JSSC指針での許容応力範囲を満たしている。

疲労試験終了後、全ての試験体に対して図9に示すように等モーメント区間の首溶接部を解体し、溶接ルート部に発生したブローホールの寸法およびブローホールから発生し溶接表面まで進展しなかった疲労亀裂

の存在とその大きさを測定した。したがって、1体当たり4m、合計16mの溶接部を観察したことになる。写真9(a),(b)に露呈した溶接部の例を示す。写真(a)に示すF C Wの2ndビード側には、ルート部を起点として幅1mm以下・高さ2~3mm程度のブローホールが連続して存在しているが、観察した約4000個のブローホールの内で疲労亀裂が生じていたのは3個であった。S A Wの2ndビード側には、F C Wに比べて数は少ない

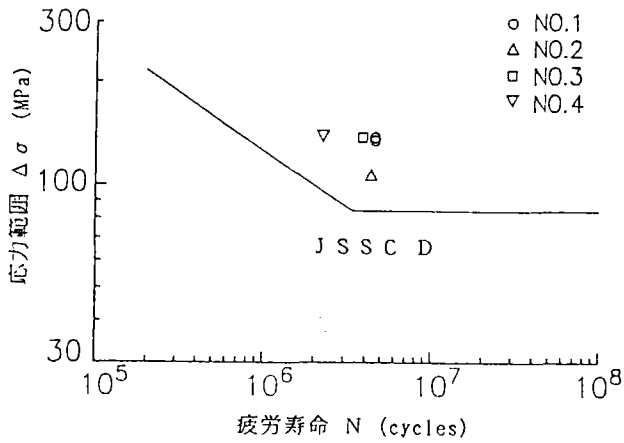


図8 首溶接部の疲労強度

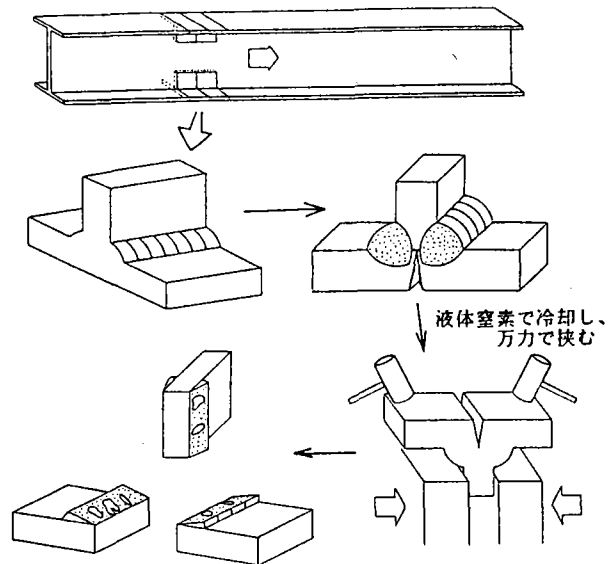


図9 首溶接部の解体手順

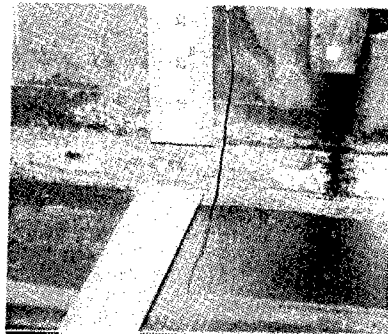


写真8 首溶接部のブローホールから生じた疲労亀裂(破面)

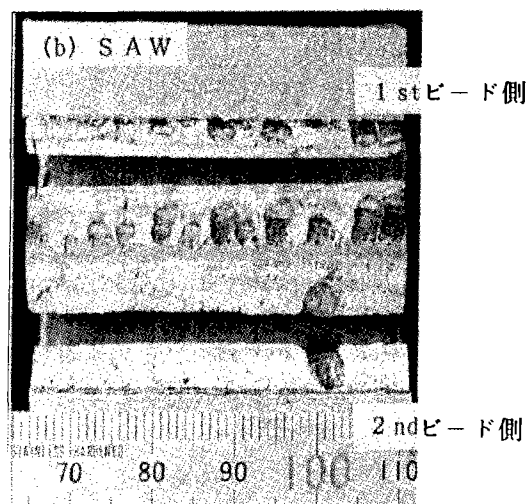
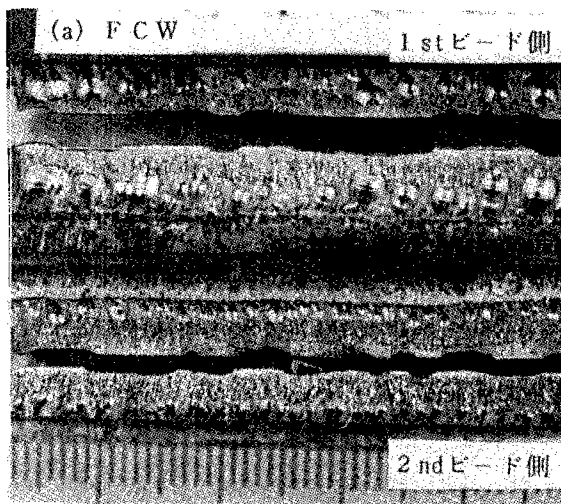


写真9 首溶接部のブローホールと疲労亀裂

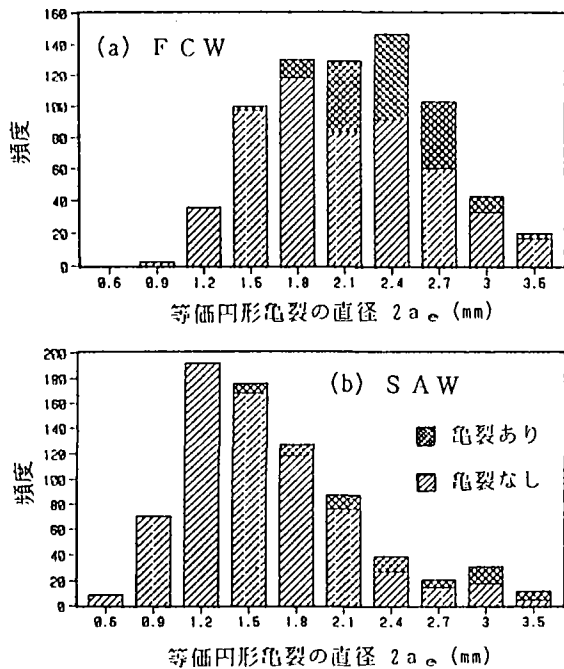


図10 首溶接部のブローホール寸法の頻度分布

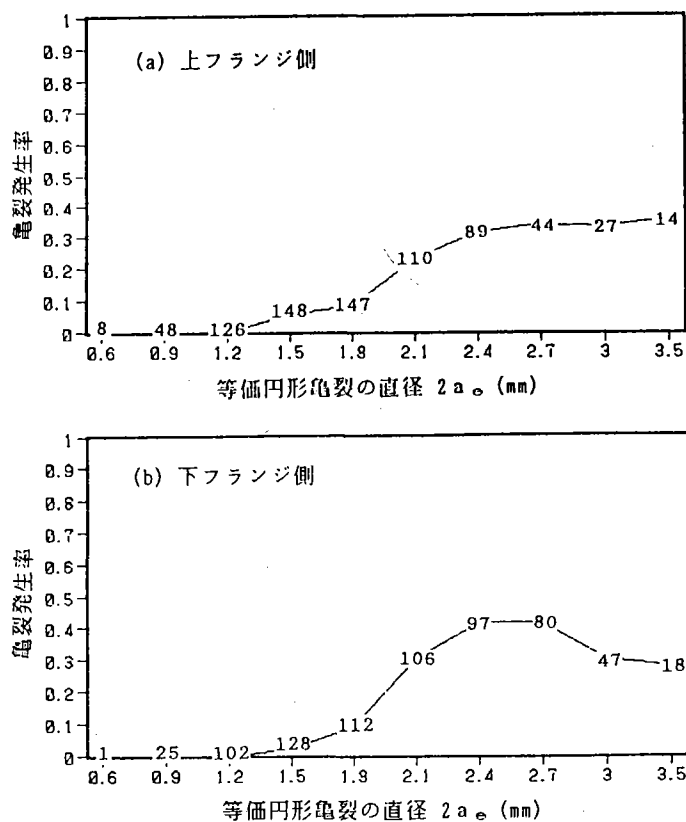


図11 ブローホールからの疲労亀裂発生率

ものの大きいブローホールも存在しており、約100個のブローホールの内5個のブローホールに疲労亀裂が生じていた。

2章で述べたように、1stビード側には2ndビード側に比べて著しいブローホールが生じている。1stビード側では、溶接長8mで計1476個のブローホールが観察され、その内231個のブローホールに疲労亀裂が生じていた。これらの疲労亀裂は、いずれもブローホールの頂部（溶接表面に近い部分）より発生していた。ブローホールの寸法を1つパラメータで表わすために、1stビード側の各ブローホールに対して測定したその幅Wおよび高さHを用いて次式より等価円形亀裂の直径 $2a_e$ を求めた¹⁰⁾。

$$2a_e = 0.94 \times W^{0.29} \times H^{0.48} \quad (1)$$

自動F C Wで溶接したNo. 1, 2試験体、S A Wで溶接したNo. 3, 4試験体での $2a_e$ の頻度分布を図10(a), (b)に示す。本図では、亀裂の生じたブローホールと亀裂の発生が認められなかったものとを印を変えて示している。S A WとF C Wとでブローホールの発生数はほぼ同じであるが、寸法は若干F C Wの方が大きく、また亀裂の発生したブローホールの割合も高くなっている。F C Wで疲労亀裂の生じたブローホールの割合が高くなっている原因としては、図2の表中に示すように、F C Wで溶接したNo. 1, 2試験体での荷重繰返し数がNo. 3, 4試験体よりも多くなっていることが考えられる。

図11(a)に圧縮側溶接部、図11(b)に引張側溶接部のブローホールからの疲労亀裂発生率と $2a_e$ の関係を示す。図中の数値は観察したブローホールの数である。いずれの場合も $2a_e$ が大きくなるにしたがって亀裂発生率が高くなる傾向が認められ、また亀裂発生率の値も圧縮側と引張側ではほぼ同じとなっている。したがって、圧縮を受ける首溶接部においても、引張側溶接部と同様の疲労に対する配慮が必要と考えられる。

4. まとめ

塗装鋼板を溶接した際に生じやすいとされているブローホールが垂直補剛材すみ肉溶接部、面外ガセットすみ肉溶接部およびフランジとウェブの首溶接部の疲労強度に及ぼす影響を明らかとする目的で、塗装鋼板で製作した溶接桁の疲労試験を行ない、以下の結果を得た。

- (1) 垂直補剛材すみ肉溶接継手のルート部にブローホールが存在しても、疲労亀裂は溶接止端より発生する。ルートブローホールによって、溶接止端の応力集中が高くなることはない。疲労強度は、溶接ルート部のブローホールによって低下することはない。JSSC指針の許容応力範囲を満足する。
- (2) 面外ガセット溶接継手のルート部にブローホールが存在しても、疲労亀裂は溶接止端より発生する。疲労強度は、溶接ルート部のブローホールによって低下することはない。JSSC指針の許容応力範囲を満足する。
- (3) 首溶接部においては、ルート部のブローホールが疲労破壊の起点となる。ブローホールが大きくなるにしたがって、疲労亀裂の発生する確率は高くなり、疲労強度は低下する。表面に達するような大きさのブローホールが存在しても、疲労強度はJSSC指針の許容応力範囲を満足する。

本研究は、鋼橋技術研究会・施工部会の活動のひとつとして行なったものであり、部会員各位には多大なる協力と有益な助言を賜った。また、日本橋梁建設協会からは研究費の補助を頂いた。疲労試験の実施および試験結果の整理には、法政大学4年生であった谷貝 誠（現 東京鉄橋）、横井 昭仁（現 川田工業）朝倉 健雄（現 祐功建設）、後藤 和宗（現 矢作建設工業）の諸氏に協力頂いた。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 西村俊夫、田島二郎、奥川淳志、三木千寿：レ型溶接縦方向継手を有する鋼部材の疲れ強さ、土木学会論文報告集、No. 291, pp27~40, 1979.
- 2) 旭一穂、岸本良孝、帆足博明：箱断面供試体を用いた大型疲労試験、橋梁と基礎、Vol. 14, No. 6, pp. 18~23, 1980.
- 3) Miki, C., Nishino, F., Hirabayashi, Y. and Ohga, H. : Fatigue strength of Longitudinal Welded Joints Containing Blowholes, 土木学会論文報告集、No. 325, pp. 155~165, 1982.
- 4) 夏目光寿、寺田博昌、深沢誠：高張力鋼溶接継手に含まれるルートブローホールの疲労強度に及ぼす影響、土木学会論文報告集、No. 334, pp. 177~180, 1983.
- 5) 久保村圭介、下川浩資、竹名興英：鉄道併用橋建設のための新技術の開発、土木学会誌、Vo. 68, No. 6, pp. 18~27, 1983.
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧、丸善、1993.
- 7) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等塗装基準・同解説、海洋架橋調査会、1990.
- 8) 森猛：ストップホールをボルト締めすることによる疲労亀裂の補修、構造工学論文集、Vol. 35A, pp. 969~976, 1989.
- 9) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、1993.
- 10) Miki, C., Mori, T., Sakamoto, K. and Sasaki, T. : An analysis of Fatigue Crack growth from Blowholes in Longitudinal Welded Joints, 土木学会論文集、No. 386, pp. 73~81, 1987.

(1993年 9月16日受付け)

付 属 資 料

付録 1

試験体製作要領

(1) はじめに

プライマー塗装鋼板のすみ肉溶接部のルートブロー（ピット）の影響を評価する。これにより、プライマー剥離を行なわなくても疲労強度がJSSC疲労設計指針程度を満足できることを確認し、結果を公にすることで製作の合理化に寄与する。

(2) 試験体

(a) 試験体の設定条件

1) 試験機の条件

試験機定格荷重	30TON
設計荷重振幅	25TON
試験体スパン	3600mm
桁高	450mm
載荷梁スパン	1000mm

2) 検討上の前提条件

- ① 試験体はスパン3600mm、桁高450mmのIセクションとし、首溶接以外に垂直ステイフナーとガセットプレートを取り付ける。
- ② 試験体の鋼材はSS400とし、試験体数は4体とする。
- ③ 載荷方法は、載荷梁（スパン1000mm）を介した2点載荷とする。中央1000mmは純曲げ区間、端部1300mmは曲げとせん断を受ける区間であり、端部も試験対象区間としガセットプレートを取り付ける。
- ④ 垂直補剛材は亀裂発生後も、補修により実験の継続が可能なように、長さが短い吊金具タイプのものとする。
- ⑤ 対象とする溶接方法は、SAW、FCW（フラックス入りワイヤ）、手溶接とする。ピットを発生させた後、補修した部分も試験対象とする。

(3) 試験体の応力度の検討

(a) 試験部の設定応力度

縦すみ肉 (ピット) 1400kg/cm²
 スティフナー 1000kg/cm²
 ウェブガセットプレート 700kg/cm²

単純桁としての断面力 (載荷荷重25ton)

純曲げ区間 端部ガセットプレート部
 $p/2=12.5\text{ton}$
 $M=p/2*1.3=16.25\text{ton}\cdot\text{m}$ $M=p/2*1.0=12.5\text{ton}\cdot\text{m}$

断面係数	A	Y	I
2-flg pl 150*12=36	23.1	19210	
1-web pl 450* 9=40.5		6834	
	76.5	26044	

首溶接部応力度

$\sigma=16.25*10^5/26044*23.7=1479\text{kg/cm}^2$ (フランジ外面)

$\sigma=16.25*10^5/26044*22.5=1404\text{kg/cm}^2$ (フランジ内面)

A部: 垂直補剛材内側部

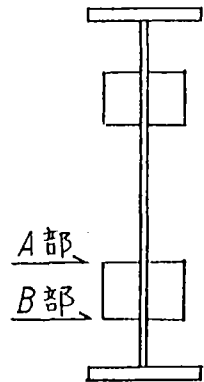
$h=65+70=135\text{mm}$ $y=450/2-135=90\text{mm}$

$\sigma=16.25*10^5/26044*9.0=562\text{kg/cm}^2$

B部: 垂直補剛材外側部

$h=65\text{mm}$ $y=450/2-65=160\text{mm}$
 (50) (175)

$\sigma=16.25*10^5/26044*16.0=998(1092)\text{kg/cm}^2$



①内側ガセットプレート部:

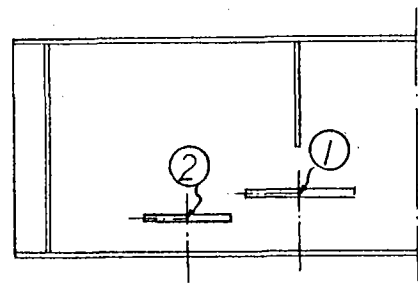
$h=110\text{mm}$ $y=450/2-110=115\text{mm}$
 (85) (140)

$\sigma=16.25*10^5/26044*11.5=718(874)\text{kg/cm}^2$

②外側ガセットプレート部

$h=85\text{mm}$ $y=450/2-85=140\text{mm}$

$\sigma=12.5*10^5/26044*14.0=672\text{kg/cm}^2$



たわみ

曲げによるたわみ

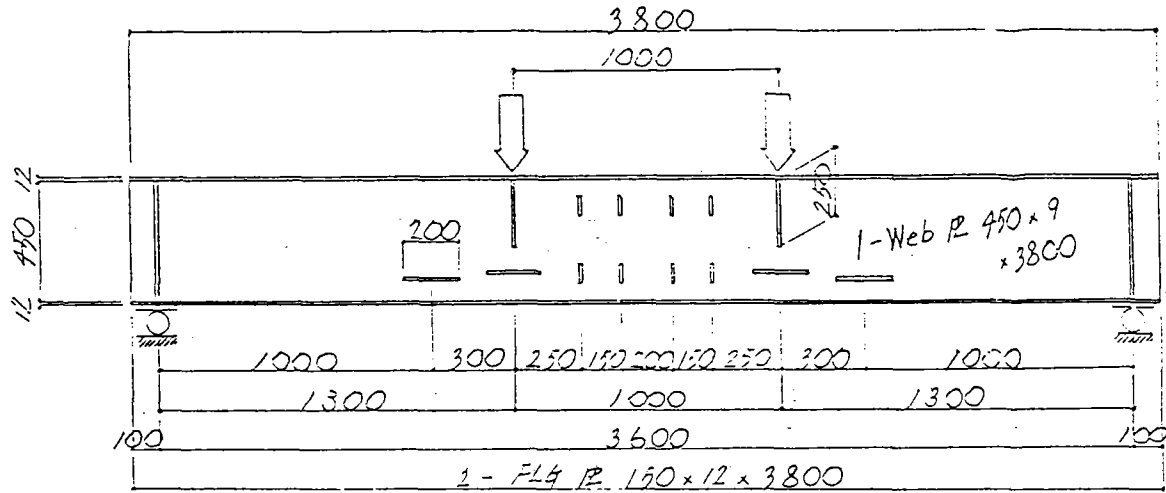
$y_1=12500 \times 130 / (24 \times 2.1^6 \times 26044) \times (3 \times 360^2 - 4 \times 130^2) = 0.39\text{cm}$

せん断によるたわみ

$y_2=12500 / (45 \times 0.9) \times (130 / 8.1^5) = 0.05\text{cm}$

合計たわみ $y=y_1+y_2=4.4\text{mm}$

プライマ-鋼板疲労試験体 $\epsilon = 1/20, 1/10$



1体当たりの重量

2-FLG PL 150 x 12 x 3800	107 kg
1-WEB PL 450 x 9 x 3800	121
4-STF PL 50 x 9 x 450	6
2-SOL PL 300 x 12 x 200	6
4-GUS PL 70 x 9 x 200	4
4-STF PL 50 x 9 x 250	4
4-GUS PL 70 x 9 x 200	4
16-STF PL 50 x 9 x 70	4
	256 kg
4体合計重量	1024 kg

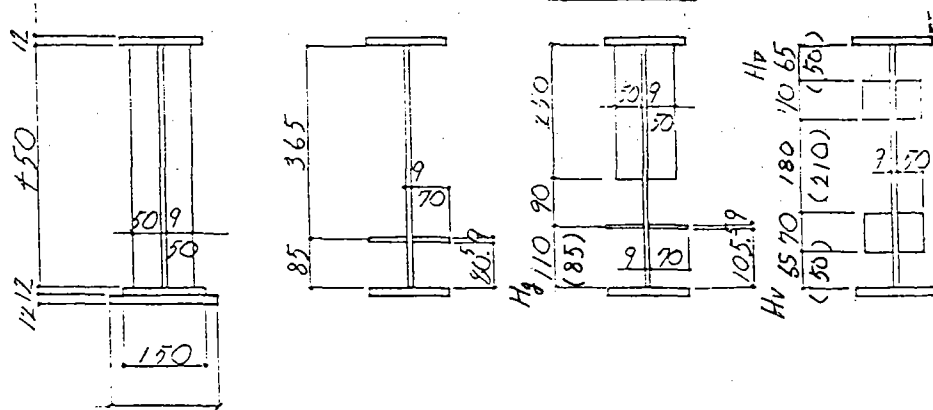
-127-

支点上

外側ガセット

載荷点
内側ガセット

垂直荷剛性



4-PL 50 x 9 x 450
2-Sole PL 300 x 12 x 200

4-PL 70 x 9 x 200

4-PL 50 x 9 x 250 16-PL 50 x 9 x 70
4-PL 70 x 9 x 200

図-1 疲労試験体形状

(b)鋼材

鋼材のミルシートを別紙に示す。

(c)試験体の形状および溶接方法

試験体の形状を図-1に示す。

表-1は各試験体の首溶接方法、詳細寸法の相違点等を示す。

表-1 試験条件の組合せ

試験体名称	首溶接方法	首溶接部のピット補修	ガセット取付け位置寸法、廻し部の処理	垂直補剛材取付け位置寸法
No.1	F C W	基本的に補修 注1)	Hg=110 :As Weld	Hv=65
No.2	F C W	全て補修	Hg=110 :As Weld	Hv=50
No.3	S A W	未補修あり	Hg=110 :As Weld	Hv=50
No.4	S A W	未補修あり	Hg=85 :止端仕上げ	Hv=50

注1)0.5mmのピット未補修

- ① No.1~No.4の全ての試験体では、垂直補剛材、ガセットプレートの溶接は、各試験体ごとにF C Wと手溶接を、試験体の中央で半数ずつ分ける。
- ② 首溶接をF C Wで施工した試験体 (No.1、2) の、首溶接部のピットは補修を行なった。(ただし、No.2の0.5mmのピット3箇所未補修。)
首溶接をS A Wで施工した試験体 (No.3、4) の、首溶接部のピットは1/3程度未補修のものを残した。
- ③ No.2の垂直補剛材、ガセットプレートのピットは全て補修を行っていない。
- ④ No.4試験体の内側ガセットプレートの取付け位置を85mmに下げて応力度を他の試験体よりも高く設定した。また、棒グラインダーにより廻し溶接部の止端処理を行なった。

(d)溶接要領

製作順序

- ① I 組立 治具にて圧着
- ② I 本溶接 常に表側を1st beadとした。
1溶接線は部材中心の近傍の仮付け溶接上で溶接を開始し、センター振り分けとした。スタート部分の溶接ビードはグラインダー整形した。
No.3 No.4 ではセンター振り分けは行っていない。
- ③ フランジの角折れの加熱矯正
- ④ 補剛材、ソールプレート、垂直補剛材、ガセットの取付け・本溶接

溶接サイズ

首溶接 -----サイズ 6mm
 垂直補剛材、ガセットプレート ---サイズ 6mm

表-2 溶接条件

溶接方法 (溶接姿勢)	溶材	溶接条件
仮付け溶接	LB-52T 3.2φ	---
被覆アーク溶接 (H)	LB-52 5 φ	200A
C O 2溶接 (H)	MX-200 1.2φ	半自動 230A 30V 自動 240A 34V 34cm/min
S A W (F)	US-36 4.0φ MF-53 8-48	650A 32V 60cm/min

(e)プライマー塗装状況

・プライマーの種類：長ばく形エッチングプライマー
 プリマイト長バク型 JIS-2 (大日本塗装)

・塗分け区分

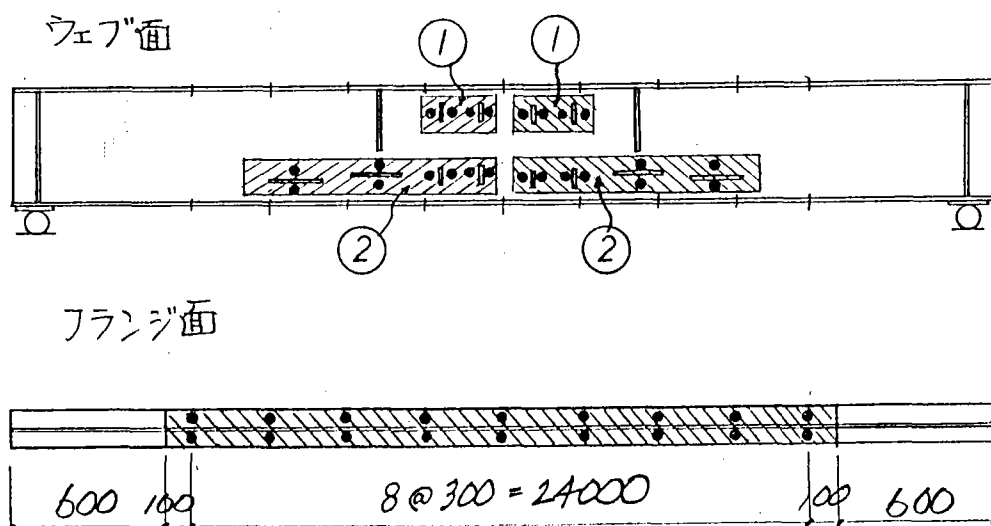
試験体の鋼材では、底板のプライマーは全て削除しない。また、立板のこぼ面の酸化被膜は取り除き、かつ板の表面はプラストのみ無塗装とする。

・膜厚測定結果

フランジ： 設定膜厚 15 ~ 20 μ

		計測箇所数 (計測箇所 1 箇所当たりの計測回数は 3 回) 平均膜厚 (μ) 標準偏差 (μ)		
* No.1	U-FLG	18	18.444	2.779
	L-FLG	18	19.629	3.298
* No.2	U-FLG	18	19.092	2.915
	L-FLG	18	19.611	1.897
No.3	U-FLG	18	20.351	3.337
	L-FLG	18	19.629	2.085
No.4	U-FLG	18	17.944	2.277
	L-FLG	18	19.518	4.096

● 計測位置



ウェブ： 設定膜厚 FCW 20~30 μ
 手溶接 30~50 μ

			計測箇所数	(計測箇所1箇所当たりの計測回数は3回)	
				平均膜厚 (μ)	標準偏差 (μ)
No.1 手溶接 (製作管理 番号はNo.2)	表側	①	4	46.166	4.407
		②	8	37.000	3.671
	裏側	①	4	39.250	4.245
		②	8	39.041	7.147
No.1 FCW	表側	①	4	29.666	2.933
		②	8	27.208	2.063
	裏側	①	4	27.000	3.668
		②	8	28.333	6.571
No.2 手溶接 (製作管理 番号はNo.1)	表側	①	4	35.833	2.516
		②	8	37.291	4.572
	裏側	①	4	38.583	6.828
		②	8	40.000	6.613
No.2 FCW	表側	①	4	30.333	10.696
		②	8	28.083	7.008
	裏側	①	4	22.750	2.632
		②	8	23.166	7.118
No.3 手溶接	表側	①	4	49.416	3.848
		②	8	43.625	4.441
	裏側	①	4	49.583	2.810
		②	8	37.958	4.133
No.3 FCW	表側	①	4	25.833	0.937
		②	8	24.958	2.274
	裏側	①	4	31.250	4.114
		②	8	20.750	2.801
No.4 手溶接	表側	①	4	55.000	3.692
		②	8	42.500	10.942
	裏側	①	4	42.166	2.724
		②	8	40.666	11.771
No.4 FCW	表側	①	4	35.583	4.337
		②	8	34.333	6.663
	裏側	①	4	25.000	2.000
		②	8	31.916	10.021

(f)ピットの発生状況・補修要領

試験体には以下のピットの発生が見られた。ピットは全て1ST側のビードにのみ発生している。

補修は、グラインダーにて長さ40mm程度、深さ2～3mm削った後、補修溶接を行なう方法（マーク：G）と、グラインダーしないで単に溶接で被せる方法（マーク：NG）の2方法にて施工した。

補修のグラインダー研削時に新たな欠陥が開口したものは、備考に個数を+1の様に表示した。

試験体番号部位	欠陥番号	追加距離	寸法	補修方法	備考	
No.1 U-FLG 表側 (製作管理 番号はNo.2)	P1	677	2	NG	X線写真範囲外	
	P2	920	3	NG		
	P3	1013	2	NG		
	P4	1356	2	NG		
	P5	1670	1	NG		
	P6	2007	2	G		
	P7	2263	3	G		G+1
	P8	2332	3	G		
	P9群	2390～97	0.5	無補修		微小BII 3個
	P10	2501	2	G		
	P11	2621	2	G		P11とP12は一緒にグラインダー G+2
	P12	2647	2	G		
	P13群	2721～2808	MAX1	G		微小BII 6個
	P14	2783	2	G		***** 注1 *****
L-FLG	P15	2653	2	G		
	P16	2974	3	NG		
No.2 U-FLG 表側 (製作管理 番号はNo.1)	P1	635	1	NG	X線写真範囲外	
	P2	985	2	NG		
	P3	2415	3	G		
	P4	2820	2	NG		
	P5	2883	2	G		G+1
	P6	2932	1	G		G+1
	P7	2996	4	NG		
L-FLG	P8	1908	3	NG		
	P9	1963	2	G		
	P10	2591	2	G	G+1	
	P11	2658	3	NG		

試験体番号部位		欠陥番号	追加距離	寸法	補修方法	備考	
No.3 表側	U-FLG	P1	1338	4	無補修		
	L-FLG	P2	1910	6	G		
	裏側	U-FLG	P3	807	5	無補修	
		L-FLG	P4	2842	4	無補修	
		L-FLG	P5	1237	5	無補修	
		L-FLG	P6	2318	4	無補修	
No.4 表側	U-FLG	P1	281	1	無補修		
	U-FLG	P2	557	1	無補修		
	U-FLG	P3	597~598	1	無補修	BH 2個	
	U-FLG	P4	635	--	ビード不整		
	U-FLG	P5	698	1	無補修		
	U-FLG	P6	718	3	無補修		
	U-FLG	P7	1100	6	G		
	U-FLG	P8	1390~1427	--	アーク再スタートのためビード整形		
	U-FLG	P9	1713	5	G		
	U-FLG	P10	2027	8	G		
	U-FLG	P11	2070	6	G		
	U-FLG	P12	2115	3	無補修		
	U-FLG	P13	2203	3	無補修		
	U-FLG	P14	2725	6	G	+1	
	L-FLG	P15	2530~2610	--	アーク再スタートのためビード整形		
	裏側	U-FLG	P16	480~540	--	アーク再スタートのためビード整形	
		U-FLG	P17	1672	6	G	
		U-FLG	P18	2900	--	ビード不整	
		U-FLG	P19	3051	3	無補修	
		L-FLG	P20	2387	2	無補修	

注1)

No.2試験体P14より部材端側を溶接中、シールドガスの流量不足(CO 2ポンベを使用)によりビード外観が荒れているのが確認された。このため、端部の溶接ビードを削除し再溶接を行なった。

P13、P14の補修時のグラインダー研削面に密集BHが確認された。X線写真でもこの付近ともう1箇所合計2箇所の密集BHが確認された。

(g)非破壊検査

疲労試験に先立ちX線により、部材中央部2mの範囲の欠陥の発生状況を確認した。ブローホールは安定してほぼ全線に発生していること、1stビード側と2nd側では発生したブローホールの形状が異なる(1st側--小太り、2nd側--針状)ことが確認できた。(首溶接部のみ検査可能)

注 文 者: SHIPPER C. ITOH
 注文者照合番号: REFERENCE No. 002-10118105
 契約番号: CONTRACT No. 1-102-H1-1-3-2404
 商 品 名: COMMODITY MILLEDGED STEEL PLATE
 規 格: SPECIFICATION JIS G310 SS400
 文 書 番 号: DOCUMENT No.

新日本製鐵株式会社
 Nippon Steel Corporation
 鋼材検査証明書
 INSPECTION CERTIFICATE

社 址: 〒100東京都千代田区大手町二丁目6番3号
 HEAD OFFICE: 2-6-3, OTEMACHI, CHIYODA-KU, TOKYO 100, JAPAN
 君津製鐵所: 〒299-11千葉県君津市君津1番地
 KIMITSU WORKS: 1, KIMITSU, KIMITSU-CITY, CHIBA-PREF., 299-11 JAPAN

証明書番号: CERTIFICATE No. Y-d9136 頁: PAGE 1E
 発行年月日: DATE OF ISSUE 1991-04-05

需要家: I.H.I./SUNAMACHI
 CUSTOMER: MTMB

需要家管理番号: 900031
 CUSTOMER'S CONTROL No. J04

寸 法 DIMENSION MM	員 数 QUAN- TITY	重 量 WEIGHT KG	製鋼番号 CAST No. 試験番号 TEST No.	製品番号 PLATE No.	引張試験 TENSILE TEST	衝撃試験 IMPACT TEST	化 学 成 分 CHEMICAL COMPOSITION %																					
							引張強さ T.S.		伸び EL %	位置 LOC.	方位 ORIENT.	試験片 SIZE	平均値 AVG	個々値 EACH	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Ti	Al	Ca
							YS	YP							%	#1	#2	#3	#1	#2	#3	×100	×100	×1000	×1000	×100	×100	×10000
12X2400X12000	01	2 5588	G5021 79161	FROM 200400106	TCG 281 450 B1	A																						
				TO 200400107																								
12X2400X12000	01	1 2794	G5021 79162	200400102	TCG 278 450 B1	A																						
12X2400X12000	01	1 2794	G5021 79162	200400111	TCG 278 450 B1	A																						
TOTAL	4	11170																										

注 意 NOTES: [#1] Location Orientation 位置・方向, T: 頂部Top, B: 底部Bottom, L: 長手方向Longitudinal, C: 横方向Transverse, Z: 板厚方向Through Thickness, R: 45°方向45Deg. to the Longitudinal Axis
 [#2] GL 標点距離Gage Length, A: 50mm 平形試験片Rectangular, B: 50mm 丸形試験片Round, C: 70mm 平形試験片Rectangular, D: 70mm 丸形試験片Round, E: 80mm 平形試験片Rectangular, F: 80mm 丸形試験片Round, G: 200mm, H: 2', I: 8', J: 5.65/So, K: 4/So
 [#3] RA: 絞りReduction of Area, YR: 降伏比Yield Ratio, [#4] A: 合格Acceptable, [#5] 2: 2.5mm, 3: 3.3mm, 4: 3.33mm, 5: 5.0mm, 6: 6.67mm, 7: 7.5mm, 8: 6.7mm, 9: 製品板厚Plate Thickness, [#6] P: 製品分析Product Analysis
 [#7] N: 焼戻Normalized, Q: 焼入れQuenched, T: 焼戻しTempered, CR: Controlled Rolled, NIC: NIC Process/TMC Process, CLC: CLC Process/TMC Process
 SH: せん断面Shear Fracture, CF: 結晶面率Crystallinity Fracture, LE: 横膨出Lateral Expansion, AGS: オーステナイト粒径Austenite Grain Size, FGS: フェライト粒径Ferrite Grain Size, SR: Stress Relieved/Post Weld Heat Treatment
 温度Temperature: 000C: 000C, 000F: 000F
 上記注文は御指定の規格または仕様に従って製造され、その要求事項を満足していることを証明します。

君津製鐵所品質保証企画室
 MANAGER, INSPECTION
 KIMITSU WORKS



付録 2

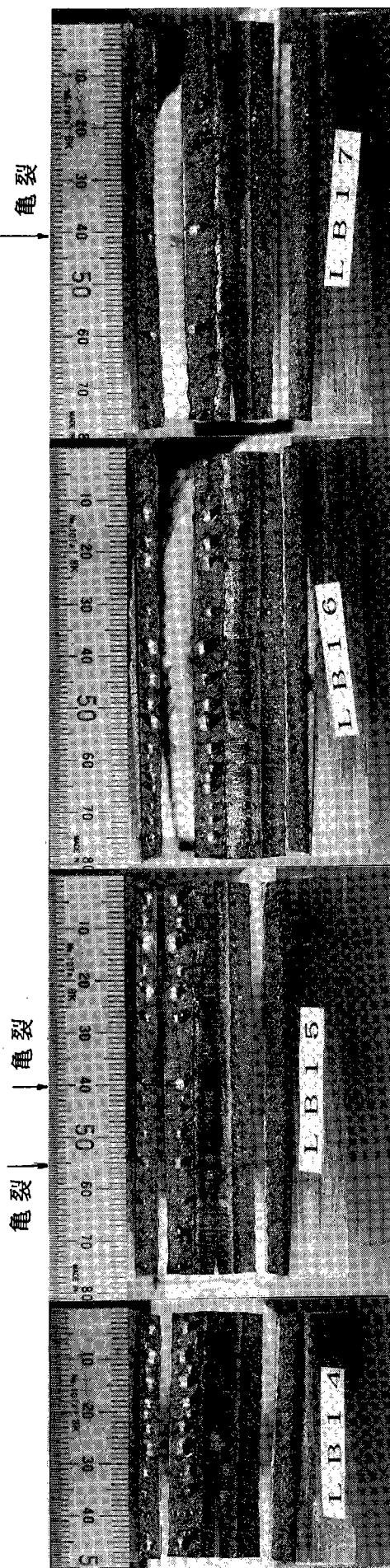
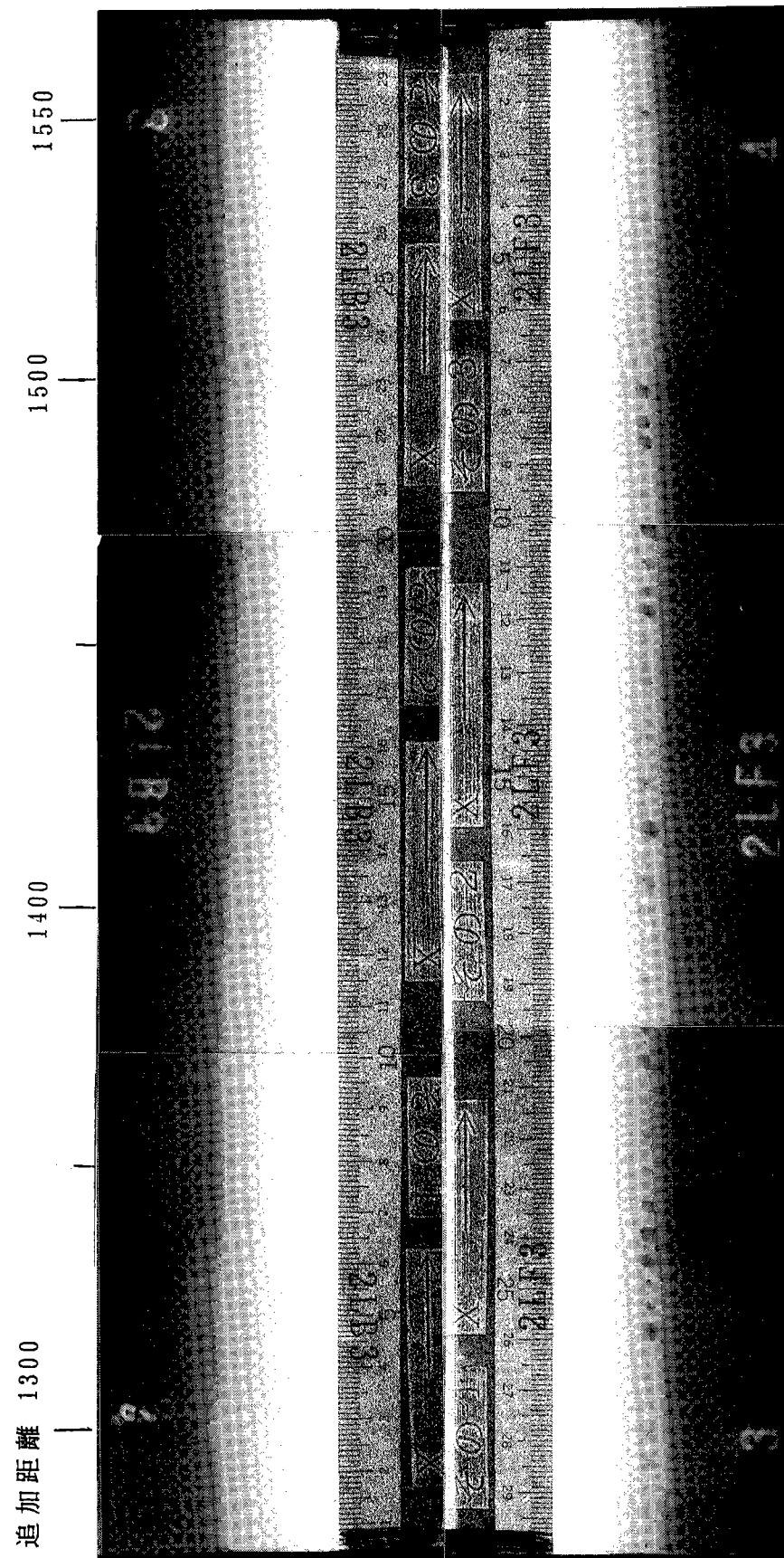
首溶接部のX線写真と破面写真

(その1) No. 1 試験体

B 側放射線試験結果

F 側放射線試験結果

破面試験結果

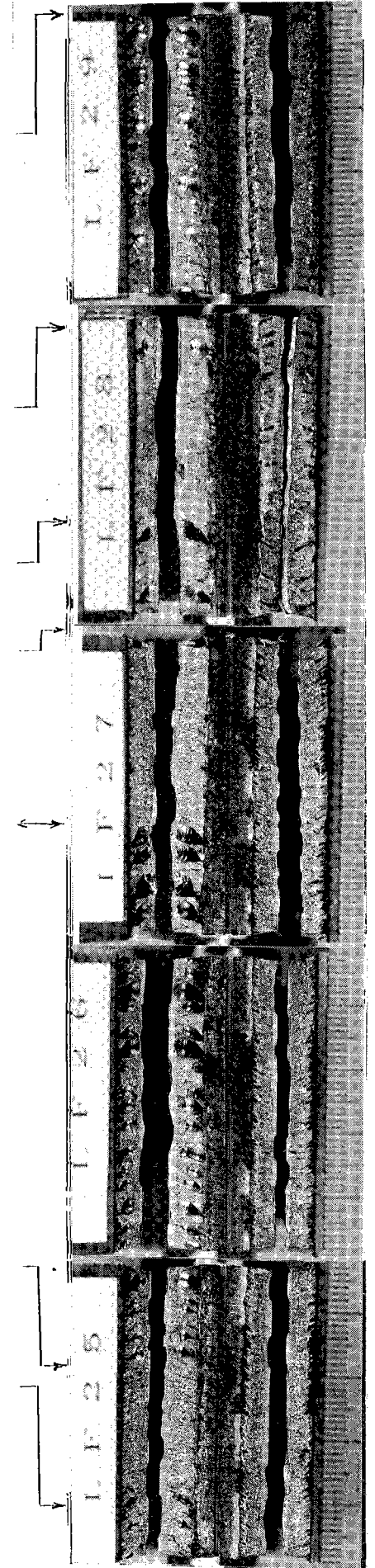
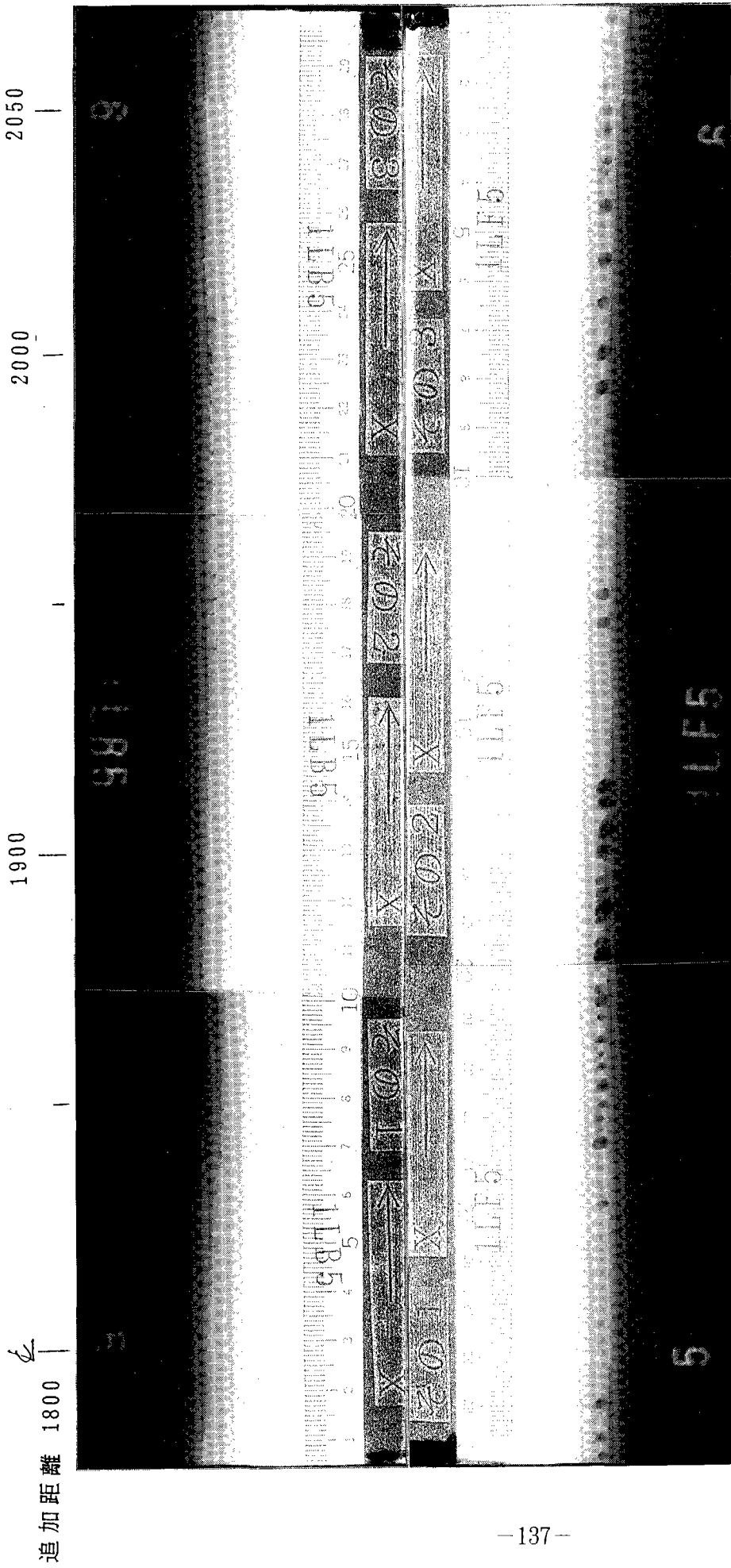


(その2) No. 2 試験体

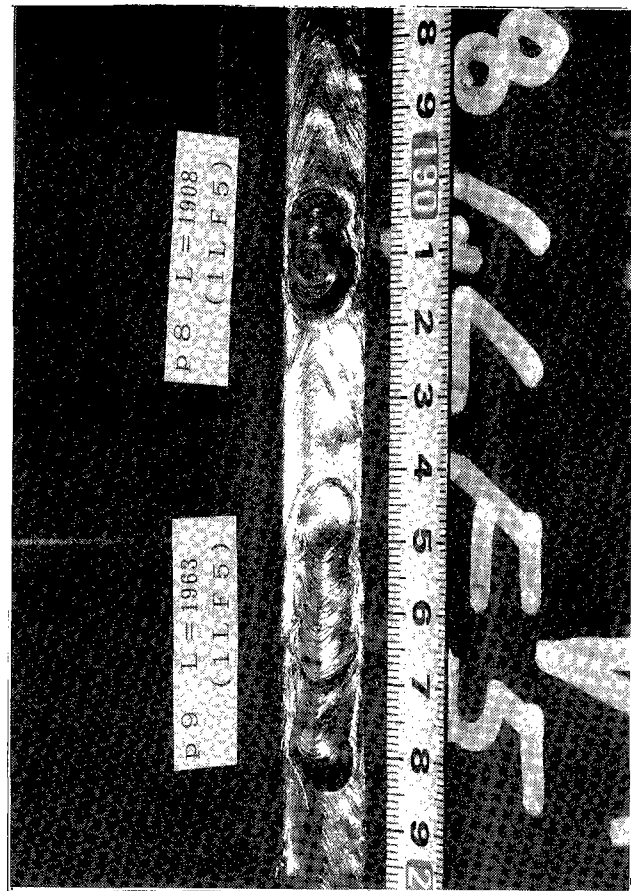
B側放射線試験結果

F側放射線試験結果

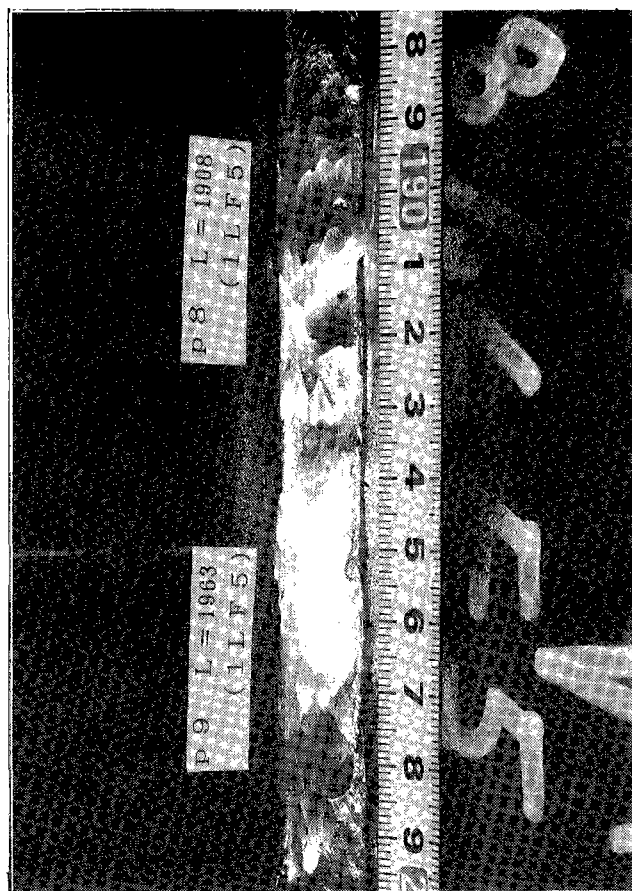
破面試験結果



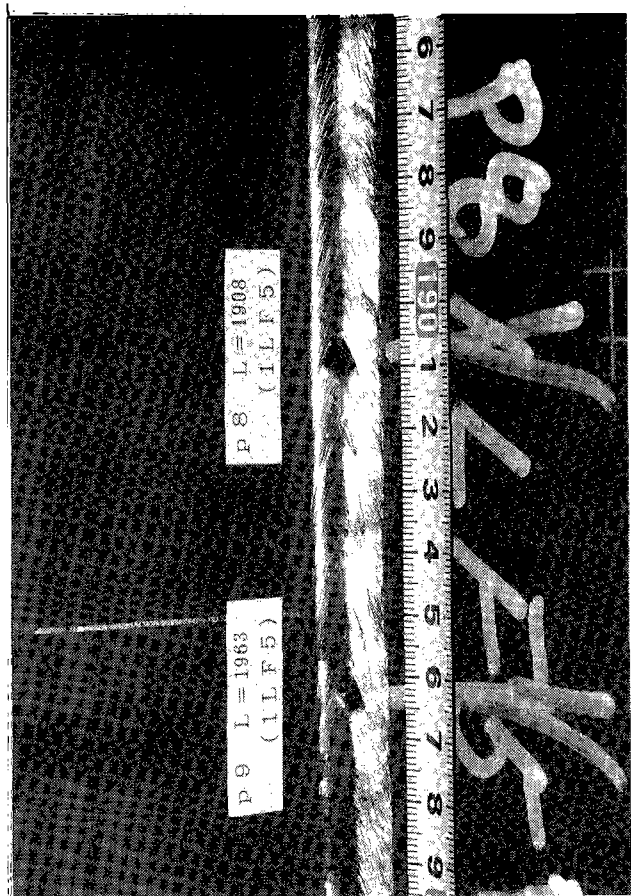
試験体 N O . 2 (P 月 日搬入分) ピット補修状況
 (P 8,9 /)



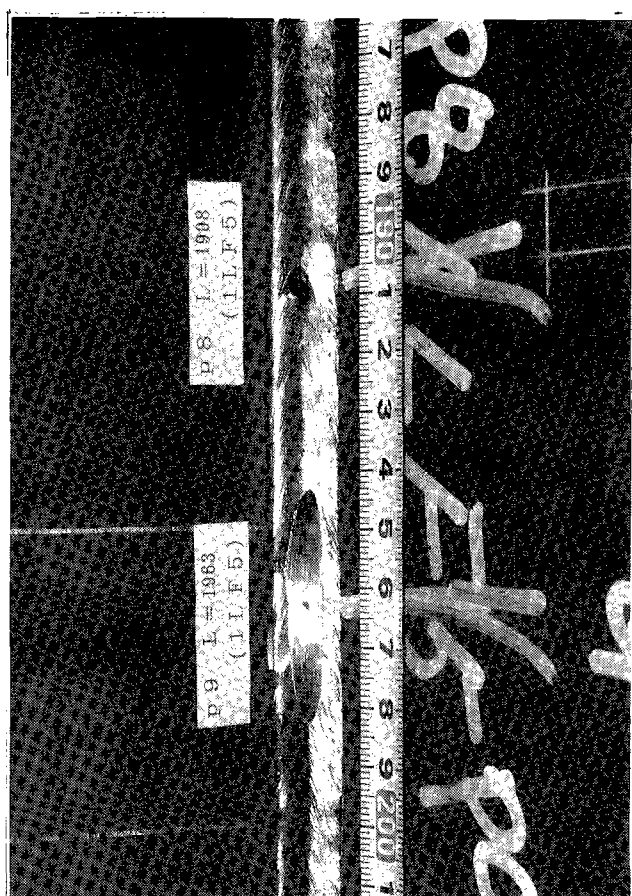
3. 補修溶接状況



4. ビード仕上げ状況



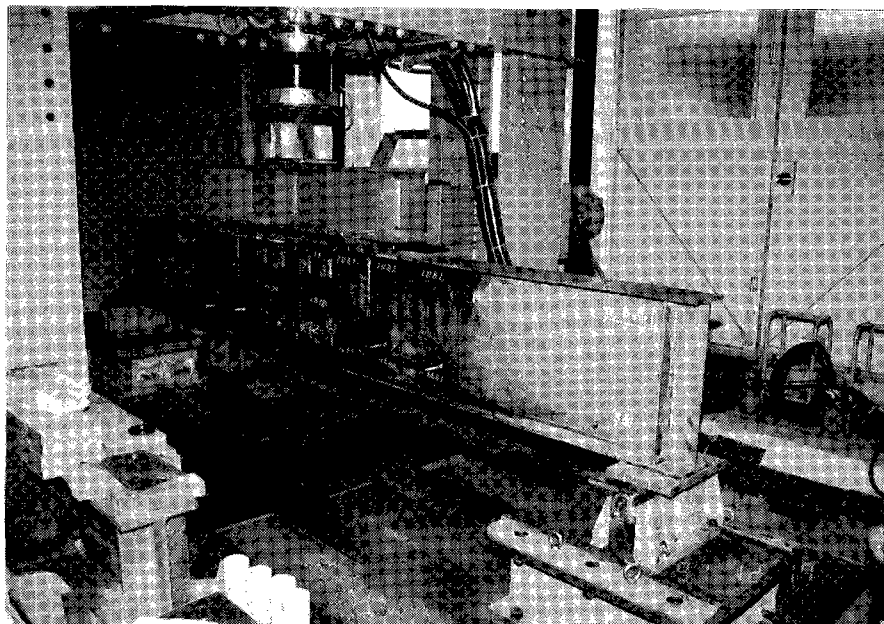
1. ピット発生状況



2. グラインダー処理 (有り、無し) 状況

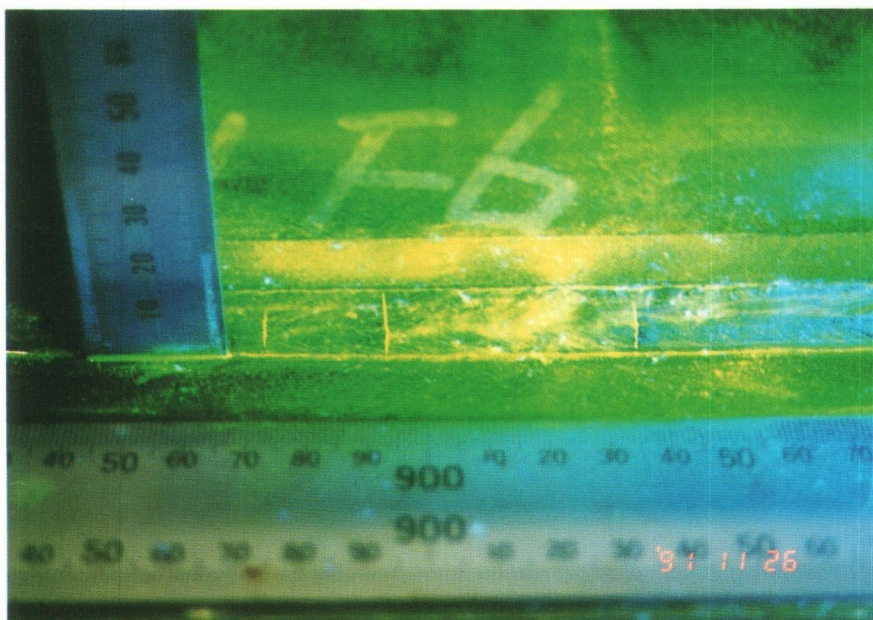
付録 3

疲労試験の状況

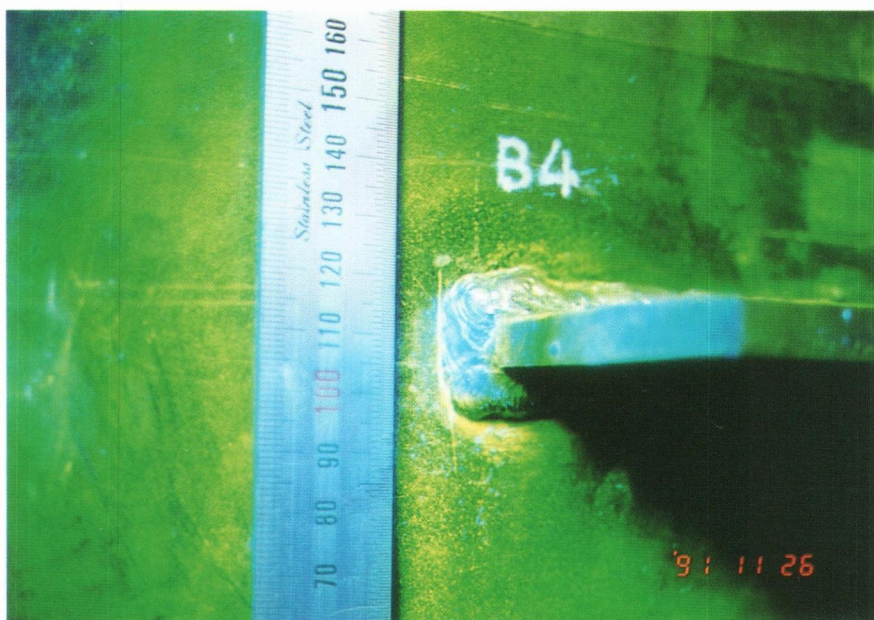


付録 4

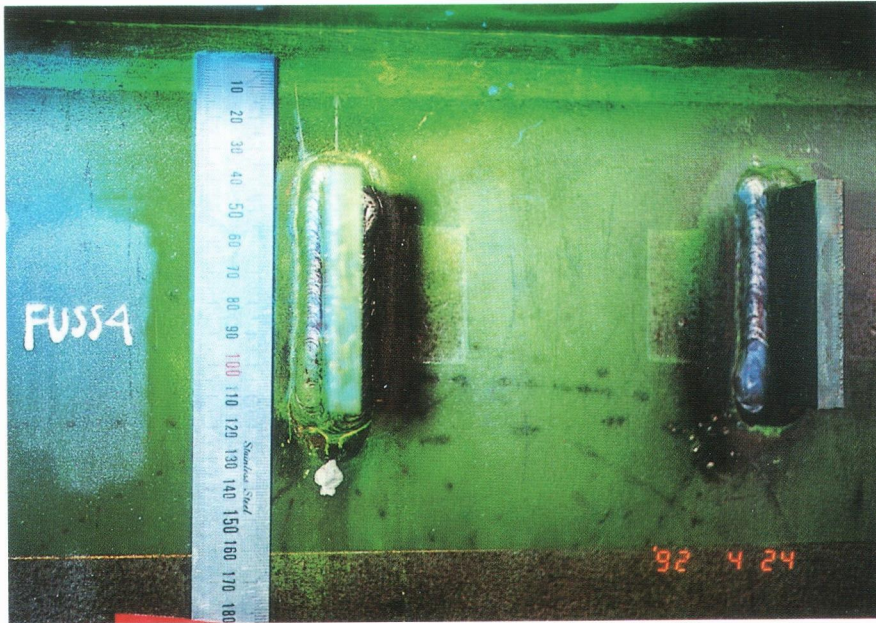
代表的な疲労亀裂と補修 (写真)



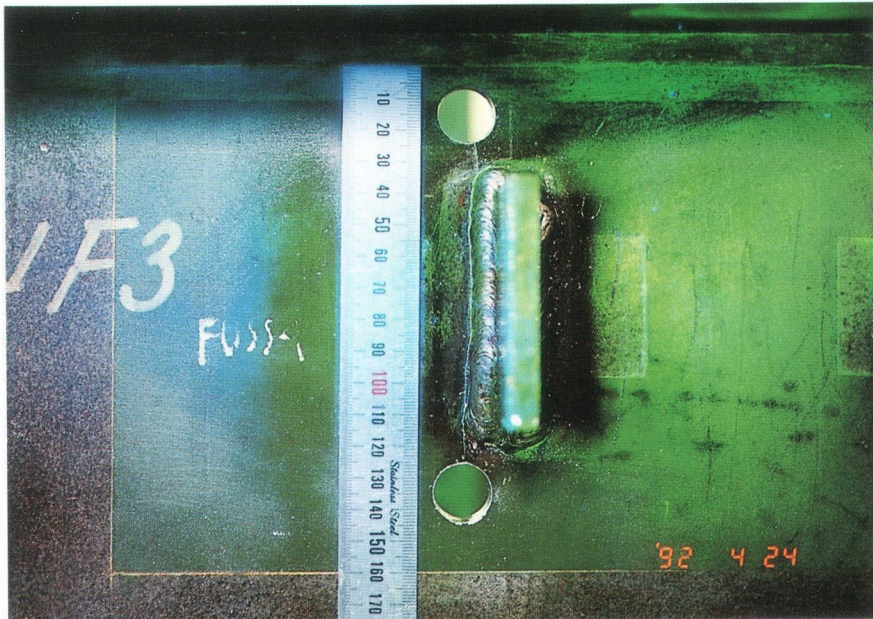
1 体目
首溶接部の
疲労亀裂



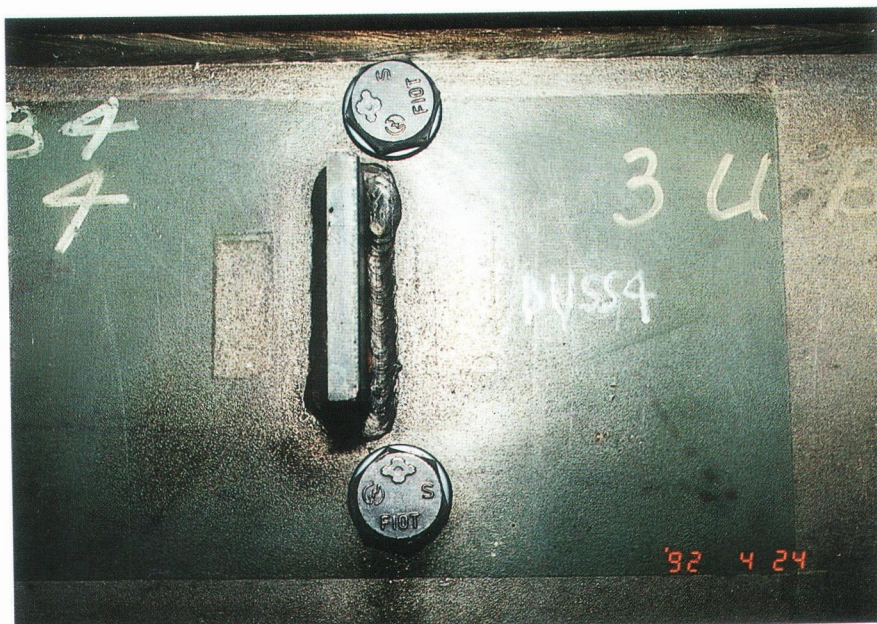
1 体目
G4 ガセットの
疲労亀裂



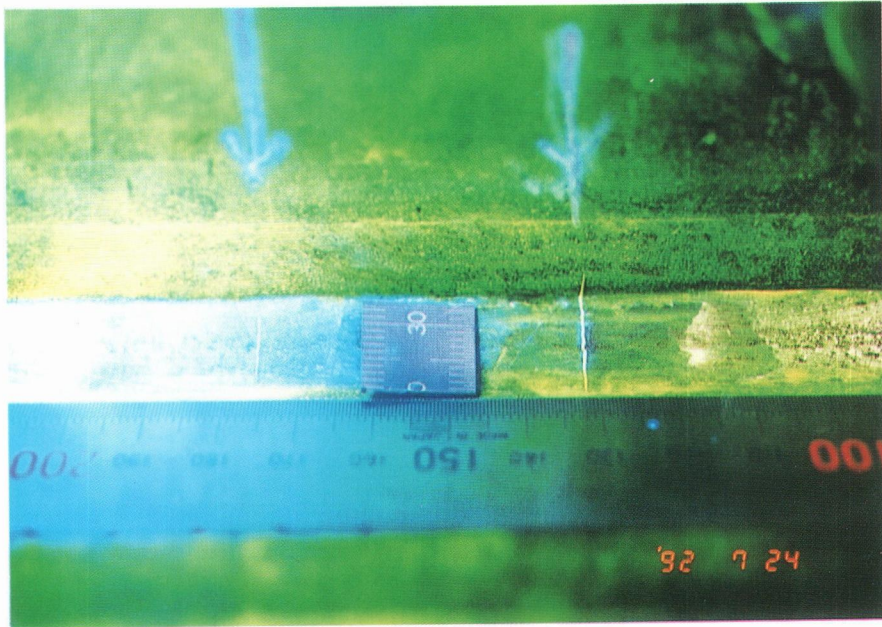
3 体目
 垂直補剛材の
 疲労亀裂



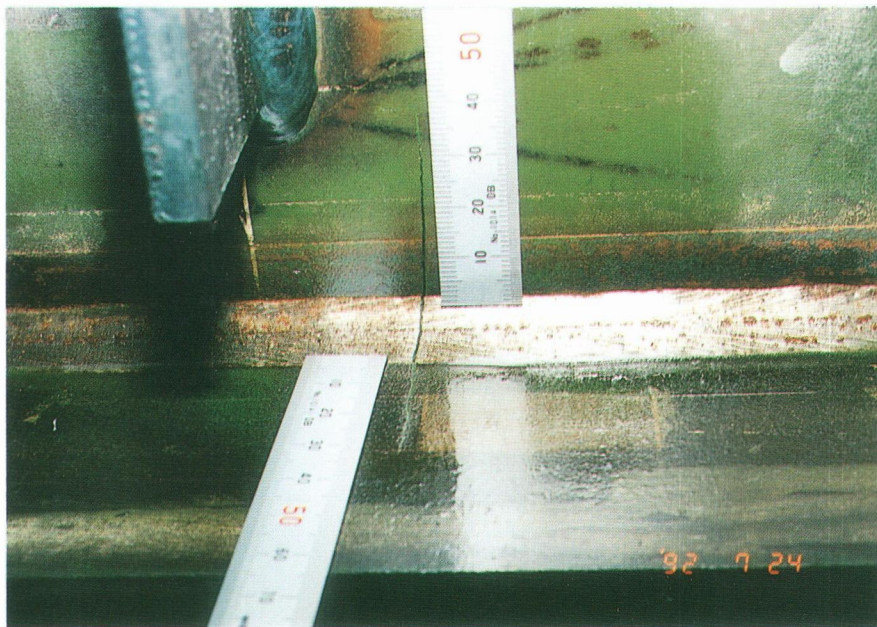
3 体目
 垂直補剛材の
 ストップホール
 の孔明け状況



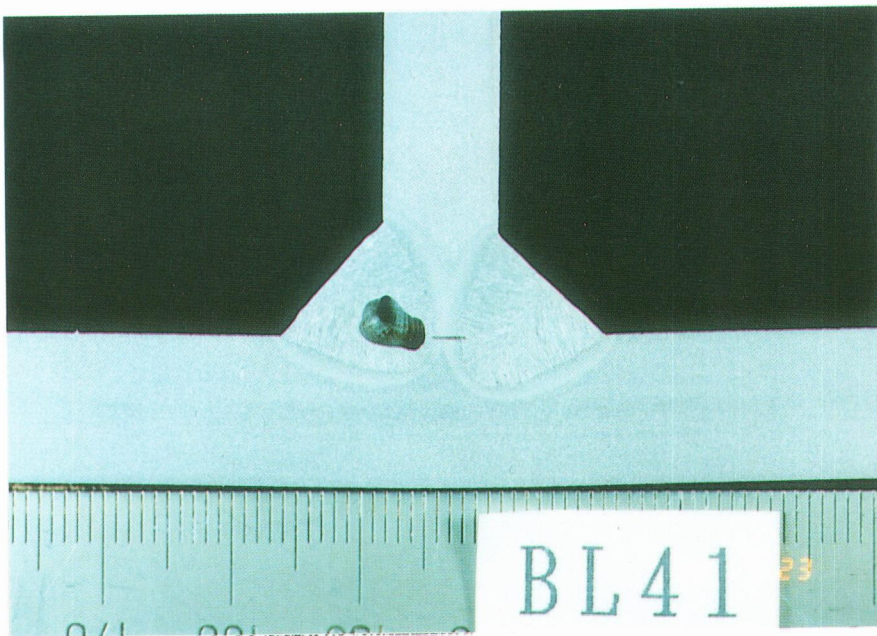
3 体目
 垂直補剛材の
 ハイテンボルト
 締め補修状況



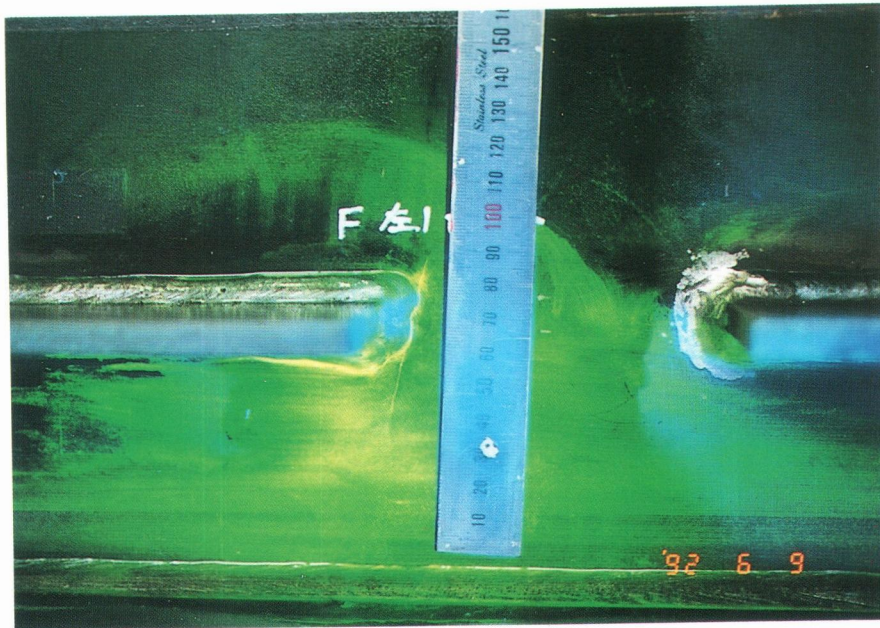
4 体目
首溶接部の
疲労亀裂



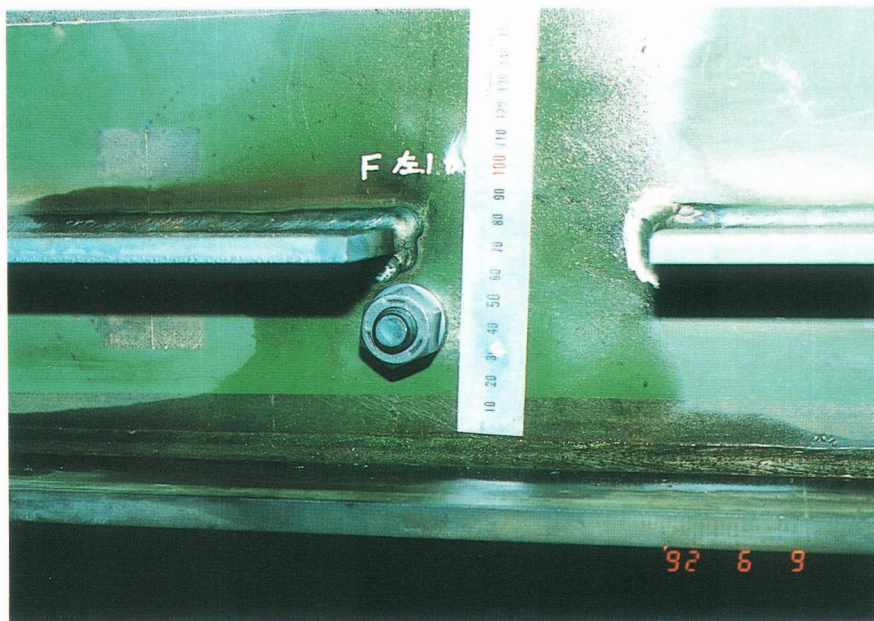
4 体目
首溶接部の
疲労亀裂



4 体目
首溶接部の
ブローホール
のマクロ写真

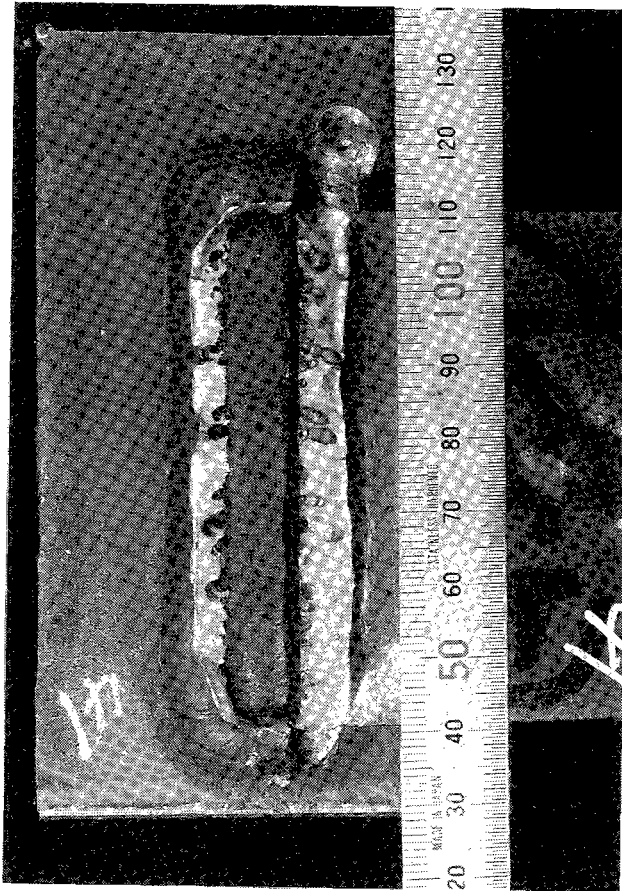


4 体目
G 1 ガセットの
疲労亀裂

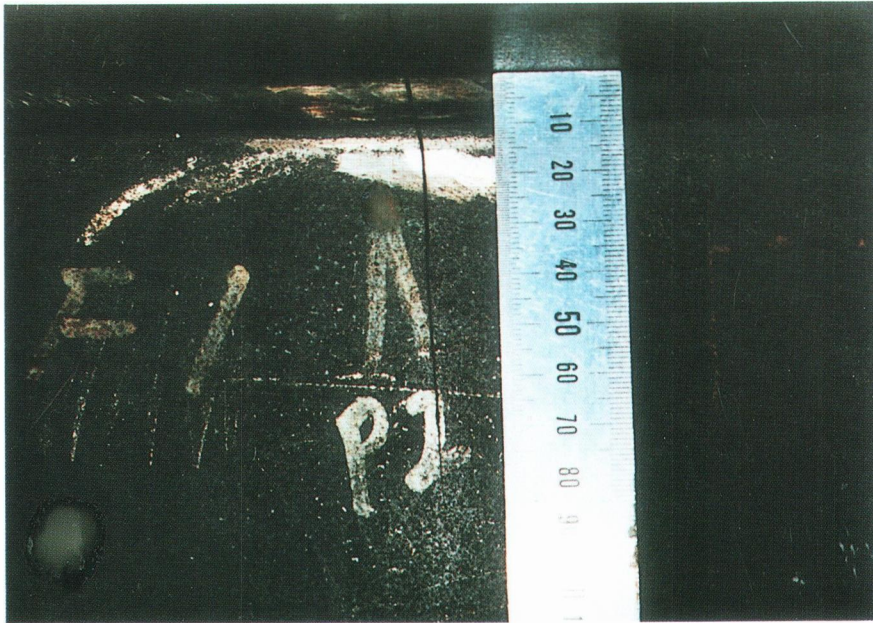


4 体目
G 1 ガセットの
ハイテンボルト
締め補修状況

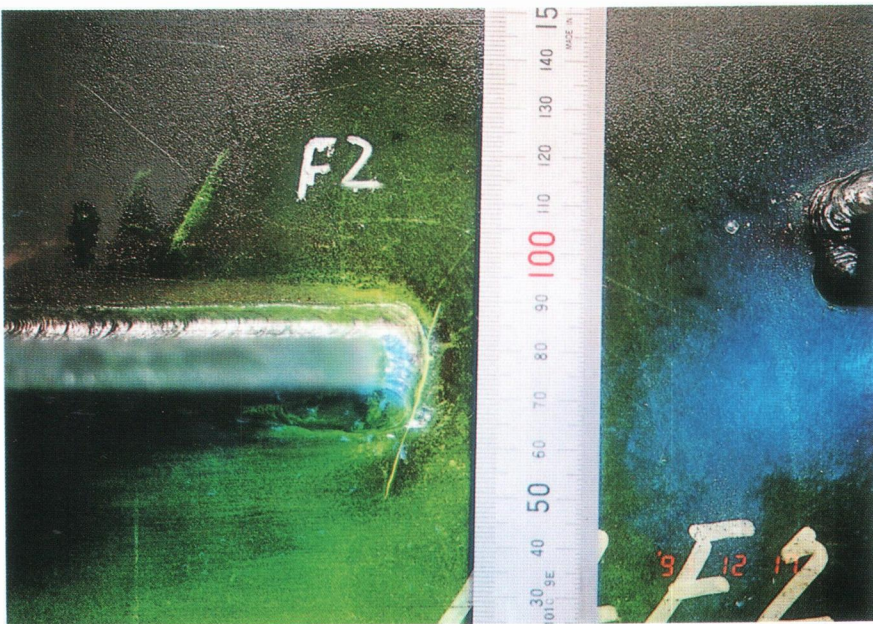
垂直補剛材の代表的な破面



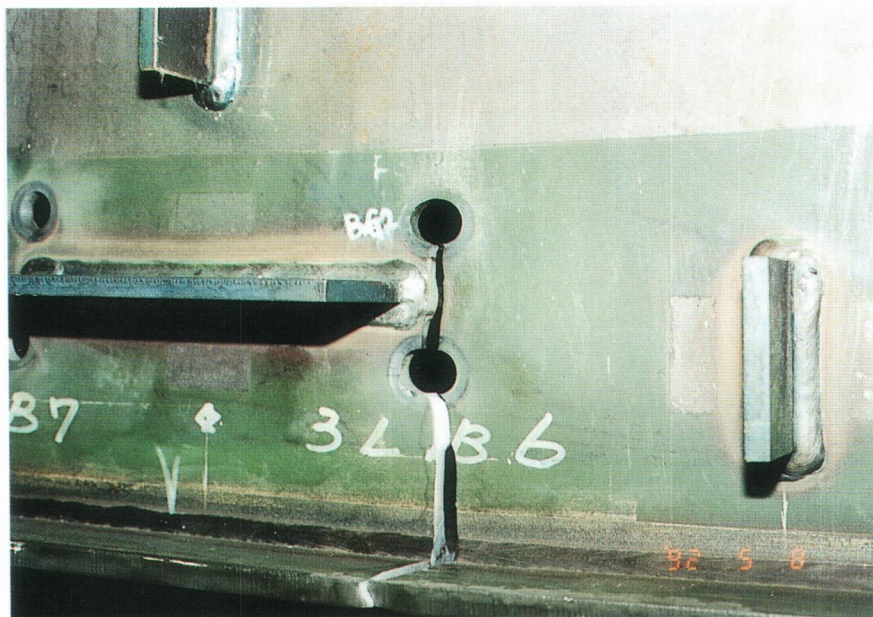
No. 4 試験体



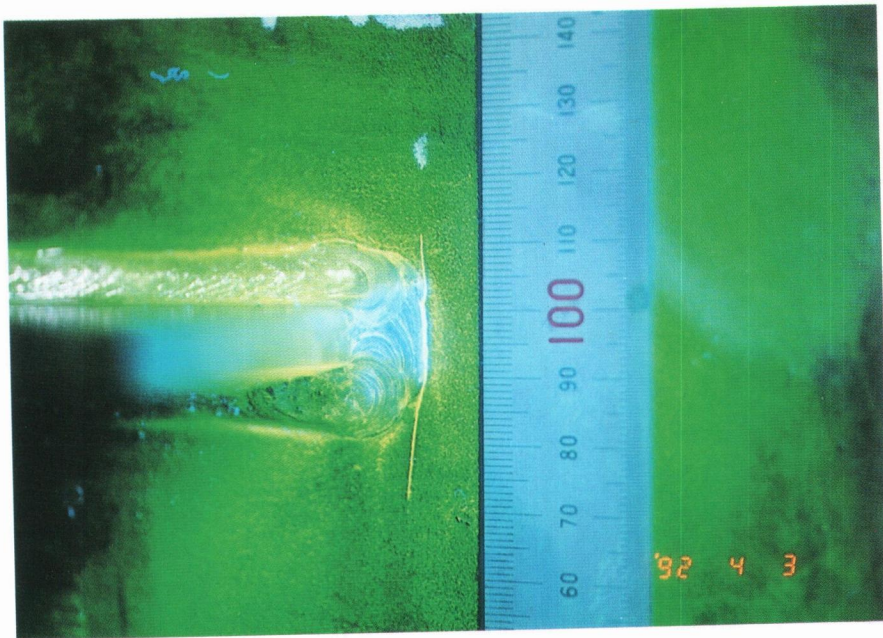
2 体目
首溶接部の
疲労亀裂



2 体目
G1 ガセットの
疲労亀裂



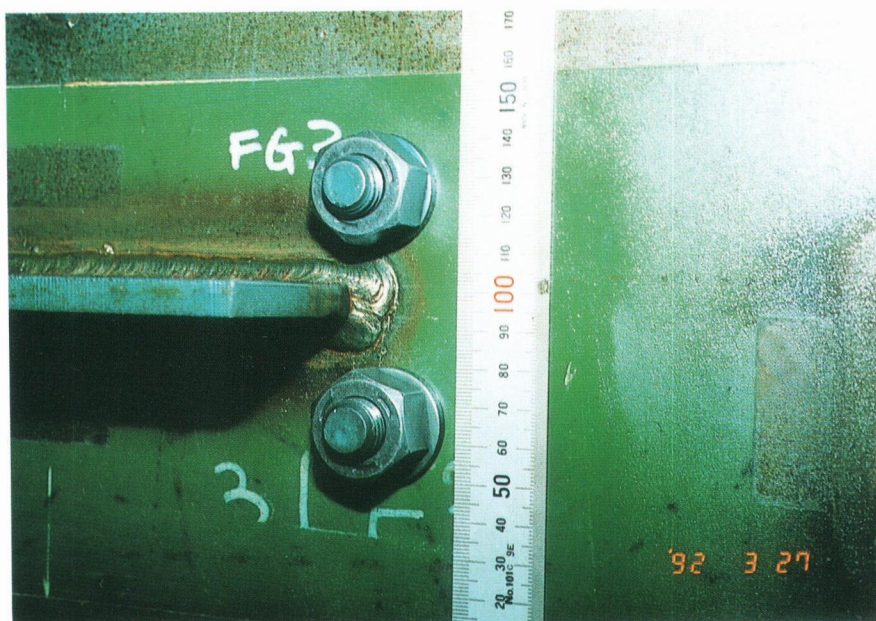
3 体目
首溶接部の
疲労亀裂



3 体目
G 2 ガセットの
疲労亀裂

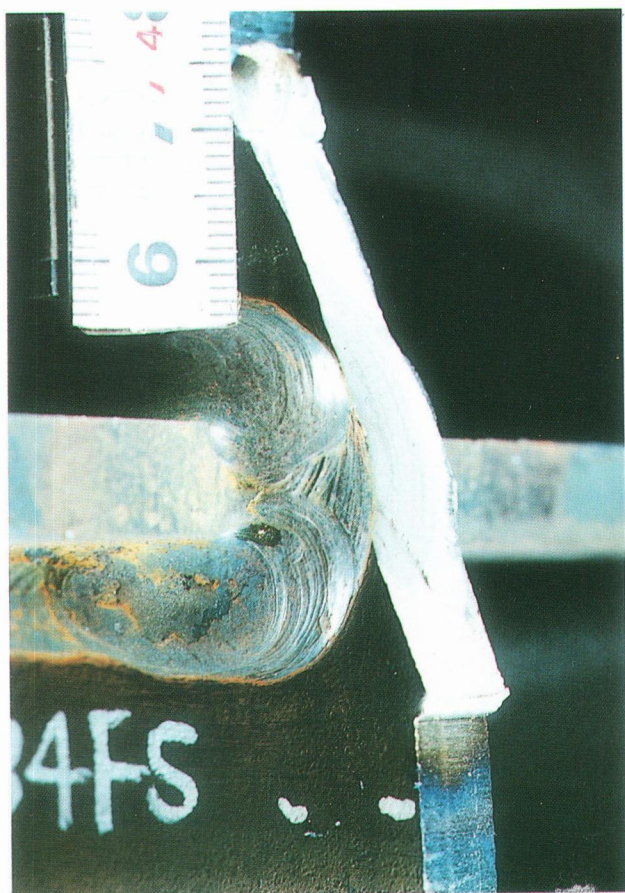


3 体目
G 2 ガセットの
ストップホール
の孔明け状況

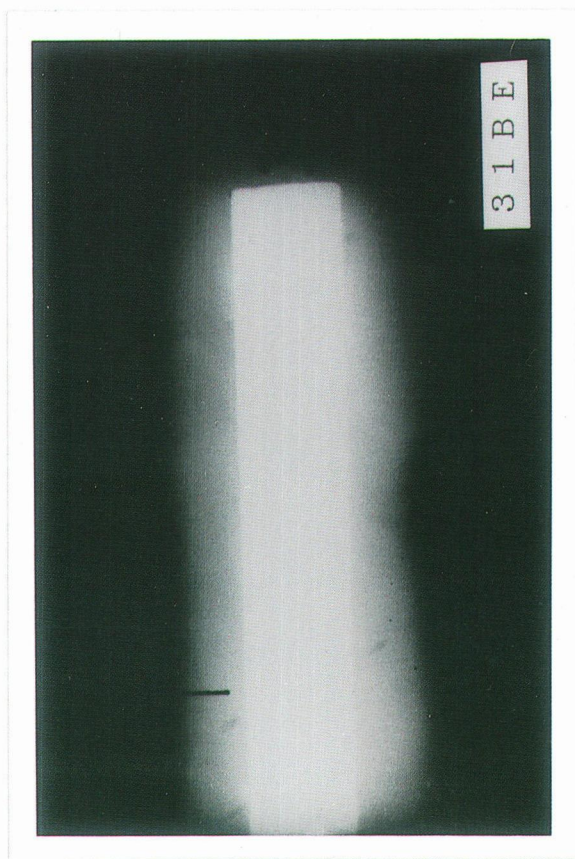


3 体目
G 3 ガセットの
ハイテンボルト
締め補修状況

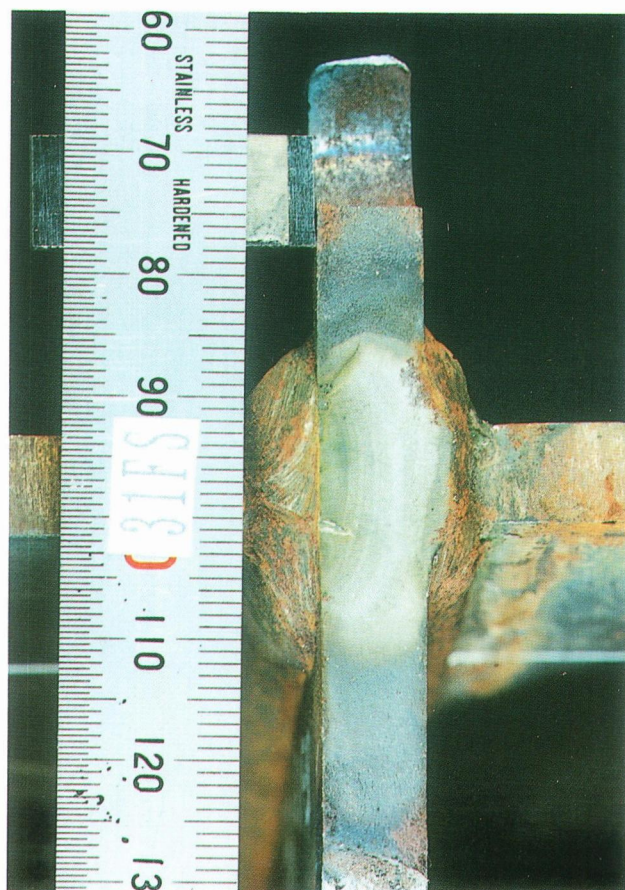
ガセットの疲労破面およびX線写真



No. 3 試験体疲労破面



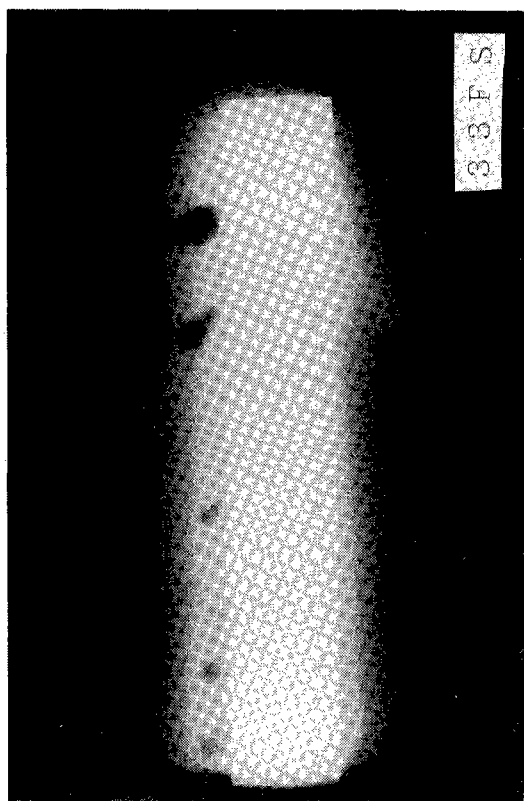
No. 3 試験体X線写真



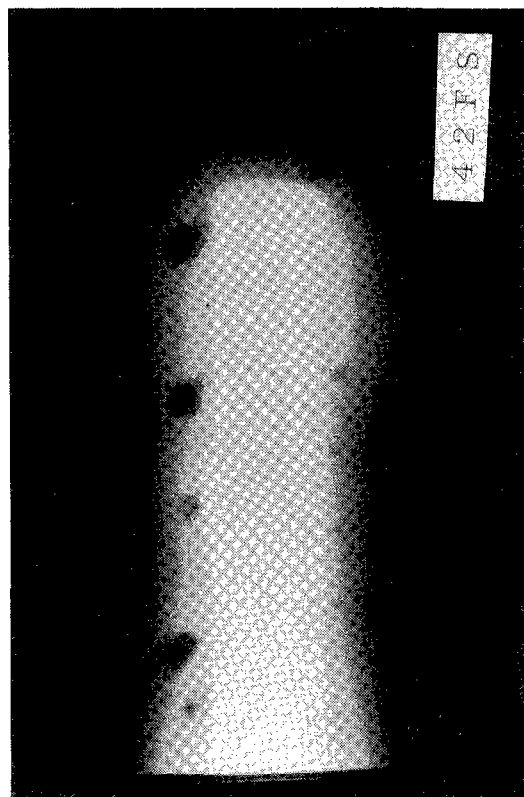
No. 3 試験体疲労破面



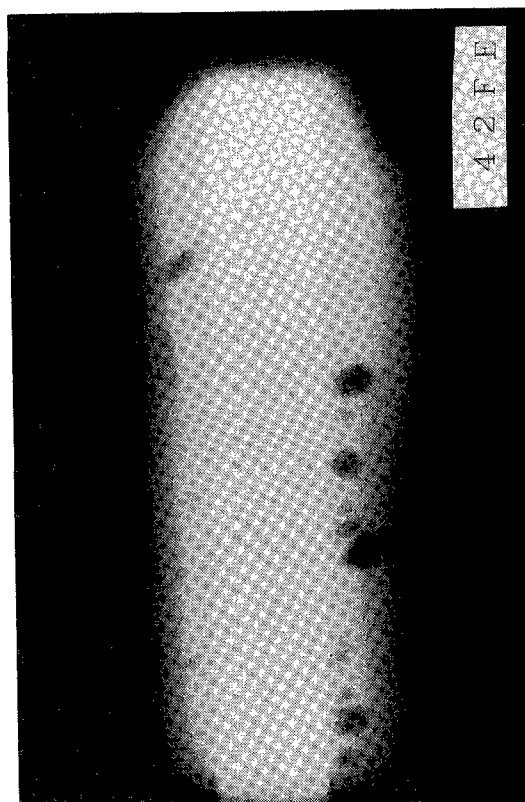
No. 3 試験体X線写真



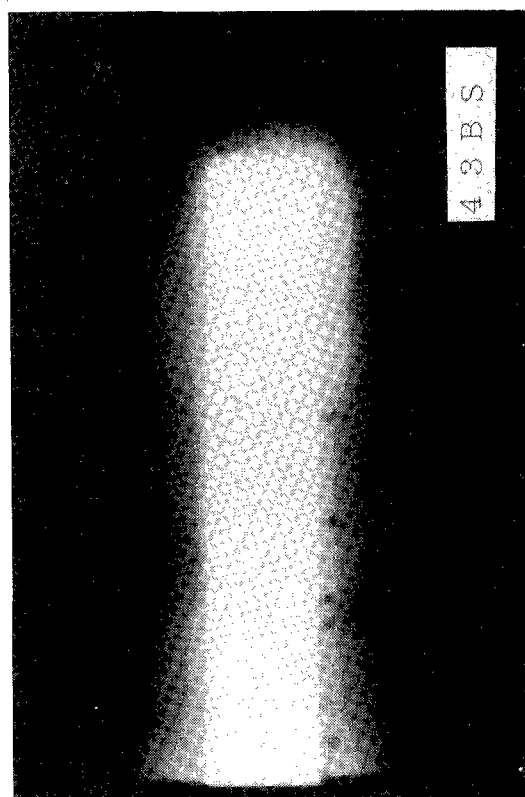
No. 3 試験体 X線写真



No. 4 試験体 X線写真



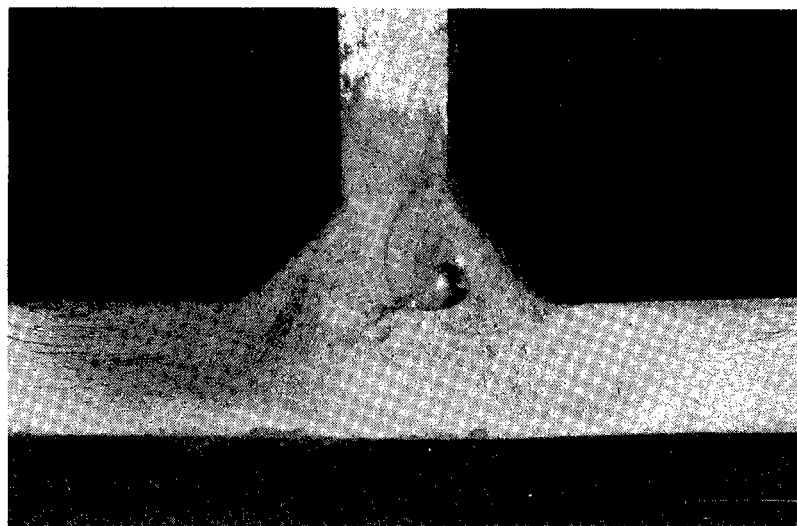
No. 4 試験体 X線写真



No. 4 試験体 X線写真

付録 5

代表的な疲労破面



№ 4 試験体のビーチマーク

付録 6

疲労試験結果一覧

試験終了時の荷重繰返し数と首溶接部から生じた亀裂の状況

試験体	荷重繰返し数	首溶接部からの亀裂
No. 1	4,580,000	13mm (非貫通)
No. 2	4,710,000	破断
No. 3	3,890,000	破断
No. 4	2,257,000	破断

首溶接の疲労亀裂進展状況（1体目下首溶接 F side）

繰返し数 X10 ⁴	基準点からの距離										
	1390	1551	1695	1801	1832	1856	2096	2171	2194	2238	2329
386	-	-	7	-	9	-	-	-	6	4	-
390	-	-	9	-	10	-	-	-	7	4	-
399	-	-	10	-	11	-	-	-	8	4	-
412	-	-	10	-	12	-	-	-	8	5	-
440	6	4	12	10	13	4	6	4	10	8	9
458	9	11	12	12	13	5	10	6	11	8	11

首溶接の疲労亀裂進展状況（2体目上首溶接 X=1000mm）

繰返し数 (×10 ⁴)	F	B	繰返し数 (×10 ⁴)	F	B	繰返し数 (×10 ⁴)	F	B
158	1	-	278	8	-	383	11	-
176	5	-	297	10	-	413	11	-
195	6	-	316	10	-	433	11	-
210	7	-	331	10	-	453	15	10
228	7	-	353	10	-	471	160	147
264	7	-	368	11	-			

首溶接の疲労亀裂進展状況（3体目下首溶接 F side）

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	基準点からの距離 2280 mm	
	F	B
385	20	12
389	破壊	破壊

首溶接の疲労亀裂進展状況（4体目下首溶接）

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	基準点からの距離				
	1522 F	B	1551 F	1968 F	2572 F
160	13	-	-	-	-
162	13	-	-	4	5
174	13	-	-	6	6
182	15	-	-	8	8
184	15	-	5	8	8
186	18	-	6	9	8
192	20	-	8	10	9
194	20	-	8	11	10
196	22	-	9	11	10
202	25	-	9	12	10
212	25	5	9	13	10
217	27	10	9	13	10
220	30	20	9	13	10
222	41	30	9	13	10
225	69	57	9	13	10
225.7	破壊	破壊	9	13	10

ウェブガセットの疲労亀裂進展状況（1体目） その1

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	ガセット1				ガセット2			
	内側 72MPa		外側 59MPa		内側 70MPa		外側 65MPa	
	F	B	F	B	F	B	F	B
1 3 3	-	-	-	-	-	-	-	14
1 5 0	19	-	-	-	-	-	-	15
1 6 7	20	-	-	-	-	-	-	16
1 8 5	22	-	-	-	-	-	-	16
1 9 7	23	-	-	-	-	16	-	16
2 1 2	25	-	-	-	-	16	-	18
2 3 0	29	-	-	-	-	17	-	18
2 4 4	36	27	-	-	-	17	-	18
2 4 8	-	32	-	-	-	-	-	-
2 5 3	40	36	-	14	-	18	-	20
2 5 8	43*	43*	-	-	-	-	-	-
2 7 5	-	-	-	14	-	18	-	20
2 9 5	-	-	-	14	-	18	-	20
3 1 0	-	-	-	14	-	18	-	20
3 2 5	-	-	-	15	-	20	15	22
3 4 3	-	-	-	15	18	22	24	25
3 6 5	-	-	-	16	22	23	37	31
3 7 9	-	-	-	17	23	23	45*	39*
3 8 6	-	-	-	17	23	23	-	-
3 9 9	-	-	-	17	24	26	-	-
4 1 2	-	-	-	17	24	28	-	-
4 4 0	-	-	-	18	30	32	-	-
4 5 8	-	-	-	20	32	35	-	-

*ストップホール+ボルト締めによる補修を行なった。

ウェブガセットの疲労亀裂進展状況（1体目） その2

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	ガセット3				ガセット4			
	内側 70MPa		外側 65MPa		内側 72MPa		外側 59MPa	
	F	B	F	B	F	B	F	B
133	-	-	-	-	-	-	-	-
150	-	-	-	-	-	-	-	-
167	-	-	-	-	-	-	-	-
185	-	-	-	-	-	-	-	-
197	-	-	-	-	-	-	-	-
212	-	14	-	-	-	-	-	-
230	-	14	-	-	-	-	-	-
244	-	14	-	-	-	-	-	-
248	-	-	-	-	-	-	-	-
253	-	14	-	-	-	-	-	-
258	-	-	-	-	-	-	-	-
275	-	14	-	-	-	-	-	-
295	-	14	-	-	-	-	-	-
310	-	14	-	-	-	-	-	-
325	-	15	-	-	-	-	-	-
343	-	18	-	-	-	-	-	-
365	-	20	-	-	-	-	-	-
379	-	21	-	-	-	-	-	-
386	-	21	-	-	-	-	-	-
399	-	23	-	-	-	-	-	-
412	15	24	-	-	-	-	-	-
440	31	35	-	-	-	-	-	-
458	37	42	-	-	-	-	-	-

ウェブガセットの疲労亀裂進展状況（2体目） その1

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	ガセット1				ガセット2			
	内側 72MPa		外側 59MPa		内側 70MPa		外側 65MPa	
	F	B	F	B	F	B	F	B
1 3 9	15	—	—	—	—	—	—	—
1 5 8	15	—	—	—	—	—	—	—
1 7 6	17	—	—	—	17	—	—	—
1 9 5	18	—	—	—	18	—	—	—
2 1 0	19	—	—	—	19	—	—	—
2 2 8	20	—	—	—	19	—	—	—
2 6 4	31	30	—	—	23	—	—	—
2 7 8	40*	43*	—	—	24	—	—	—
2 9 7	—	—	—	—	27	—	—	—
3 1 6	—	—	—	—	27	—	—	—
3 3 1	—	—	—	—	31	—	—	—
3 5 3	—	—	—	—	33	31	—	—
3 6 8	—	—	—	—	40	39	—	—
3 8 3	—	—	—	—	43*	42*	—	—

*ストップホール+ボルト締めによる補修を行なった

ウェブガセットの疲労亀裂進展状況（2体目） その2

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	ガセット3				ガセット4			
	内側 70MPa		外側 65MPa		内側 72MPa		外側 59MPa	
	F	B	F	B	F	B	F	B
139	-	-	-	-	-	13	-	-
158	-	-	-	-	-	15	-	-
176	-	-	-	-	-	18	-	-
195	-	-	-	-	-	21	-	-
210	-	-	-	-	-	27	-	-
228	-	-	-	-	-	30	-	-
264	-	-	-	-	59*	59*	-	-
278	-	-	-	-	-	-	-	-
297	-	-	-	-	-	-	-	-
316	-	-	-	-	-	-	-	-
331	-	-	-	-	-	-	-	-
353	-	-	-	-	-	-	-	-
368	-	-	-	-	-	-	-	-
383	-	-	-	-	-	-	-	-

*ストップホール+ボルト締めによる補修を行なった

ウェブガセットの疲労亀裂進展状況（3体目） その1

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	ガセット1				ガセット2			
	内側 72MPa		外側 59MPa		内側 70MPa		外側 65MPa	
	F	B	F	B	F	B	F	B
90	0.1	—	—	0.1	—	—	—	—
110	0.1	—	—	0.1	—	0.1	—	—
130	1	0.1	—	0.1	—	—	—	—
150	21	16	—	1	—	21	—	1
165	30	22	—	21	6	21	—	20
185	60	55	—	22	6	25	—	22
186.5	65*	65*	—	22	6	25	—	22
196.5	—	—	12	22	10	30	—	22
206.5	—	—	12	22	24	35	—	24
221.5	—	—	12	22	47*	50*	—	24
231.5	—	—	12	22	—	—	—	24
235	—	—	12	22	—	—	—	24
250	—	—	—	22	—	—	—	24
270	—	—	—	31	—	—	—	30
290	—	—	—	31	—	—	35	32
298	—	—	22	31	—	—	38	40
301	—	—	—	31	—	—	38*	40*
330	—	—	35	35	—	—	—	—
345	—	—	50*	48*	—	—	—	—
365	—	—	—	—	—	—	—	—
380	—	—	—	—	—	—	—	—
385	—	—	—	—	—	—	—	—
389	—	—	—	—	—	—	—	—

*ストップホール+ボルト締めによる補修を行なった。

ウェブガセットの疲労亀裂進展状況（3体目） その2

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	ガセット 3				ガセット 4			
	内側 70MPa		外側 65MPa		内側 72MPa		外側 59MPa	
	F	B	F	B	F	B	F	B
90	-	-	-	-	-	-	-	-
110	-	-	-	-	-	-	-	-
130	1	-	-	-	0.1	-	-	-
150	2	-	-	-	16	-	-	-
165	20	-	-	15	29	7	-	-
185	23	-	-	15	31	40	-	-
186.5	23	-	-	15	45*	44*	-	-
196.5	23	-	-	15	-	-	10	-
206.5	27	-	-	15	-	-	10	-
221.5	33	15	-	20	-	-	10	-
231.5	40	40	40	20	-	-	10	-
235	42*	42*	40	20	-	-	10	-
250	-	-	40	20	-	-	10	-
270	-	-	40	25	-	-	16	-
290	-	-	40	25	-	-	16	-
298	-	-	40	27	-	-	16	-
301	-	-	40	27	-	-	16	-
330	-	-	49*	52*	-	-	24	-
345	-	-	-	-	-	-	25	-
365	-	-	-	-	-	-	25	27
380	-	-	-	-	-	-	37	37
385	-	-	-	-	-	-	40	40
389	-	-	-	-	-	-	45	45

*ストップホール+ボルト締めによる補修を行なった。

ウェブガセットの疲労亀裂進展状況（4体目）

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	ガセット 1				ガセット 2			
	内側 78MPa		外側 64MPa		内側 91MPa		外側 84MPa	
	F	B	F	B	F	B	F	B
90	1.5	—	—	—	—	—	—	—
120	33	36	—	—	—	—	—	—
122	39*	40*	—	—	—	—	—	—
126	—	—	—	—	—	—	—	—
130	—	—	—	—	—	—	—	—
140	—	—	—	—	—	—	—	—
150	—	—	—	—	—	—	—	—
160	—	—	—	—	—	—	—	—
226	—	—	—	—	—	—	—	—

繰返し数 ($\times 10^4$ 回)	ガセット 3				ガセット 4			
	内側 91MPa		外側 84MPa		内側 78MPa		外側 64MPa	
	F	B	F	B	F	B	F	B
90	—	—	—	—	—	0.5	—	—
120	—	—	—	—	—	27	—	—
122	—	—	—	—	—	29	—	—
126	—	—	—	—	—	29	—	—
130	—	—	—	—	30	35	—	—
140	—	—	—	—	50*	52*	—	—
150	—	—	—	—	—	—	—	—
160	—	—	—	—	—	—	—	—
226	—	—	—	—	—	—	—	—

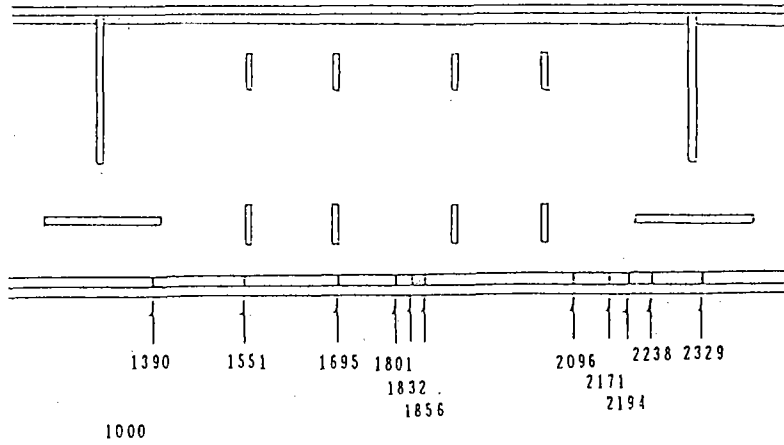
*ストップホール+ボルト締めによる補修を行なった。

表 2.12 垂直スティフナーの疲労亀裂進展状況 (3 体目 F side)

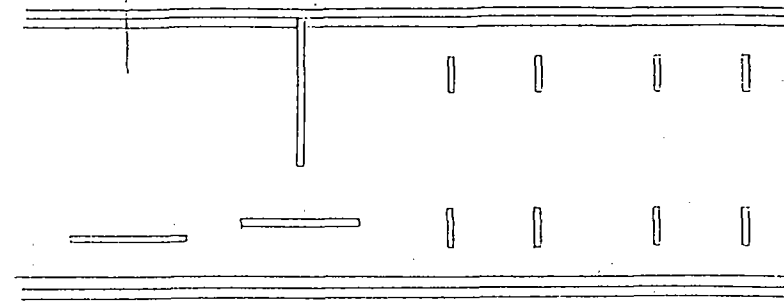
繰返し数 × 10 ⁴ 回	FUSS4		FLSS1	FLSS2	FLSS3	FLSS4
	上	下	下	下	下	下
3 3 0	1	—	—	—	—	2
3 4 5	4	—	—	—	—	2
3 6 5	1 2	—	—	—	—	5
3 8 0	3 2 *	1 0 *	—	4	—	7
3 8 5	—	—	1	5	5	1 0 *
3 8 9	—	—	2	—	—	—

*ストップホール+ボルト締めによる補修を行った。

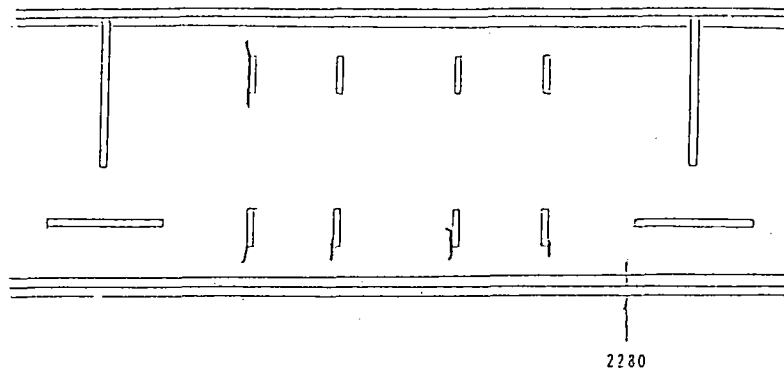
1体目 Fside



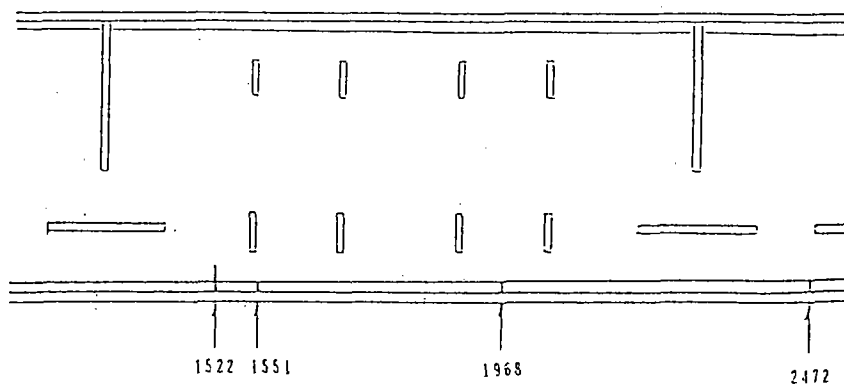
2体目 Fside



3体目 Fside

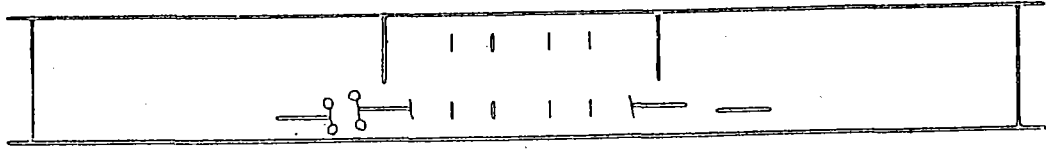


4体目 Fside

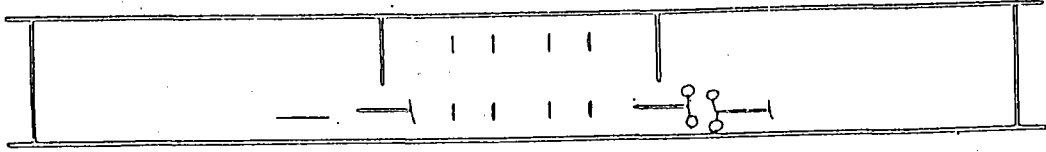


疲労亀裂の発生位置（首溶接、垂直スティフナー）

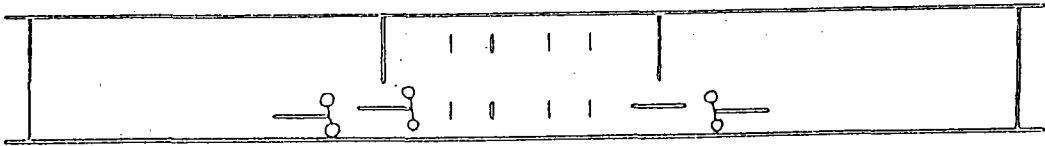
1 体目 Fside



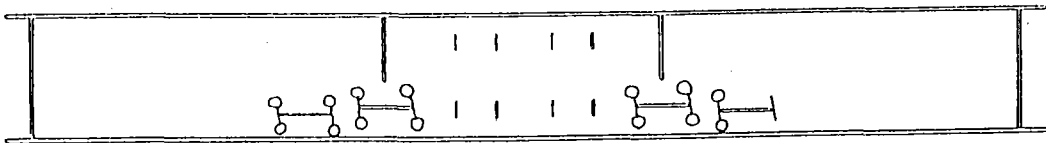
1 体目 Bside



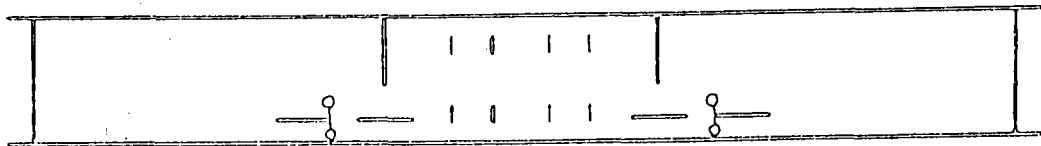
2 体目 Fside



3 体目 Fside



4 体目 Fside



疲労亀裂の発生位置 (ウェブガセット)

付録 7

首溶接部ブローホールからの疲労亀裂起点の検討

1. ブローホールの観察

1.1 解体方法

疲労試験終了後、1～4体目の首溶接部すべてを解体し、首溶接部のブローホールおよび疲労亀裂の有無を観察した。首溶接部の解体は、図1に示すように、以下の順序で行った。

- ① 試験体の首溶接部を、50mm間隔で切断する。
- ② 切断した断面の首溶接部に約5%の硝酸水溶液を塗ると、溶接部と試験体の境界がくっきり現れるので、未溶接部まで切れ込みを入れる。
- ③ これを液体窒素でとく冷やして、万力ではさみハンマーで割る。
- ④ 割った試験体のブローホールの寸法・形状および疲労亀裂の有無をルーペで調べる。

写真1は、露呈前と露呈後の試験体である。首溶接は1体につき4ヶ所（引張側・圧縮側、F面・B面）あり、その合計長さは1体につき8mである。4体を合計すると、32mになる。その32mすべてを露呈し、観察した。

1.2 疲労亀裂の起点

写真2に露呈した溶接部の例を示す。ブローホールはルート部を起点に多数発生しており、いくつかのブローホールからは、疲労亀裂が発生している。さらに詳細に見ると、疲労亀裂はブローホールの頂部より発生していることがわかる。他のいずれの場合においても同様に疲労亀裂の起点は、ブローホールの頂部であった。これまでに行なわれたブローホールを含む部分溶込み溶接部の疲労試験では、疲労亀裂はブローホールの側壁から生じることが多いとされており、ここでの結果はこれと異なる。

2. 有限要素法を用いた応力解析

2.1 解析方法

疲労亀裂がブローホールの頂部から発生しやすい原因を明らかとする目的で三次限有限要素法を用いてブローホールの周に沿う応力を解析した。解析対象は、ウェブとフランジのすみ肉溶接をモデル化したものある。解析モデルは、対称性を考慮し、図2に示すように、1/4モデルとした。この解析では残存のど厚（LT）をパラメータ

し、それを 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0mm と変化させている。ウェブの板厚、フランジの板厚、溶接脚長は、試験体と同じにしている。また、すべての解析でブローホールの高さとの比は2:1とし、L Tに合せてブローホールの高さを、8.3~3.8mmと変化させている。ルート部は、幅0.01mmのスリットを入れることによりモデル化している。

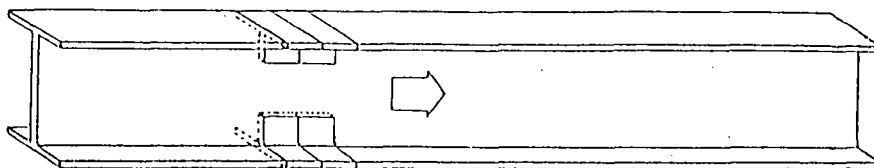
有限要素応力解析には、汎用プログラムCOSMOS/Mを用いた。用いた要素は、8節点固体要素であり、そのポアソン比は0.3、ヤング率は $2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ とした。要素分割例を図2に示す。

3. 2. 2 解析結果

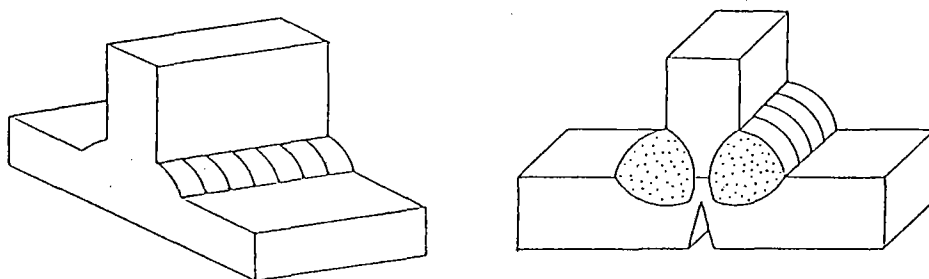
ブローホールの周に沿う応力分布を図3に示す。図の横軸はブローホールの周を構成する節点の番号である。節点1および21がルート部先端、節点11がブローホール頂部に対応する。ブローホールの寸法が変化しても、すなわち残存のど厚が変化しても、ブローホールの周の沿う応力の分布形状は同じであり、ブローホールの頂部で最も高い応力集中が生じ、ルート部先端では低くなっている。また、ブローホール側壁（節点5あるいは18に対応）でも比較的高い応力集中が生じているが、ブローホール頂部に比べて低い。これが比較的小さいすみ肉溶接部においてブローホール頂部が疲労亀裂の起点となりやすい原因と考えられる。なお、無限体内に回転楕円体形の空洞がある場合には、最大の応力集中はその側壁で生じることが知られており、ここでの結果は自由表面がブローホール頂部から近いことに原因があると考えられる。

図4にブローホール頂部での応力集中係数と残存のど厚(L T)との関係を示す。残存のど厚が小さくなるにしたがって応力集中係数は高くなり、L Tが0.5mmで2.95、L Tが5.0mmで1.83となっている。

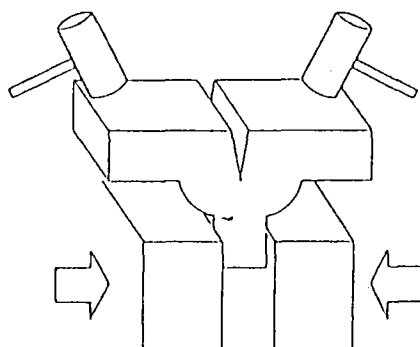
- ① 試験体の首溶接部を約50mm間隔で切断する。



- ② 切断した断面の溶接部に5%の硝酸水溶液を塗ると、溶接部と試験体の境界がくっきり現れるので、未溶接部まで切れ込みを入れる。



- ③ これを液体窒素でよく冷やして万力ではきみハンマーで割る。



- ④ 割った試験体のブローホール（寸法・形状）及びその亀裂をルーペで調べる。

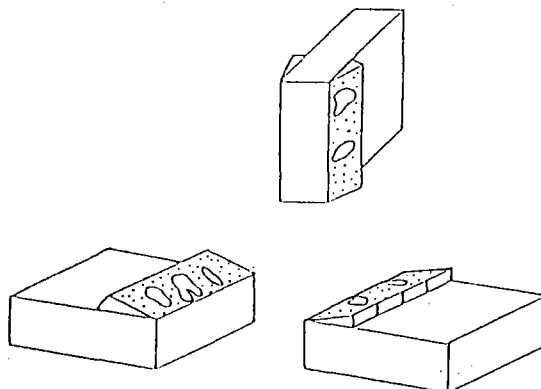


図1 首溶接部の解体手順

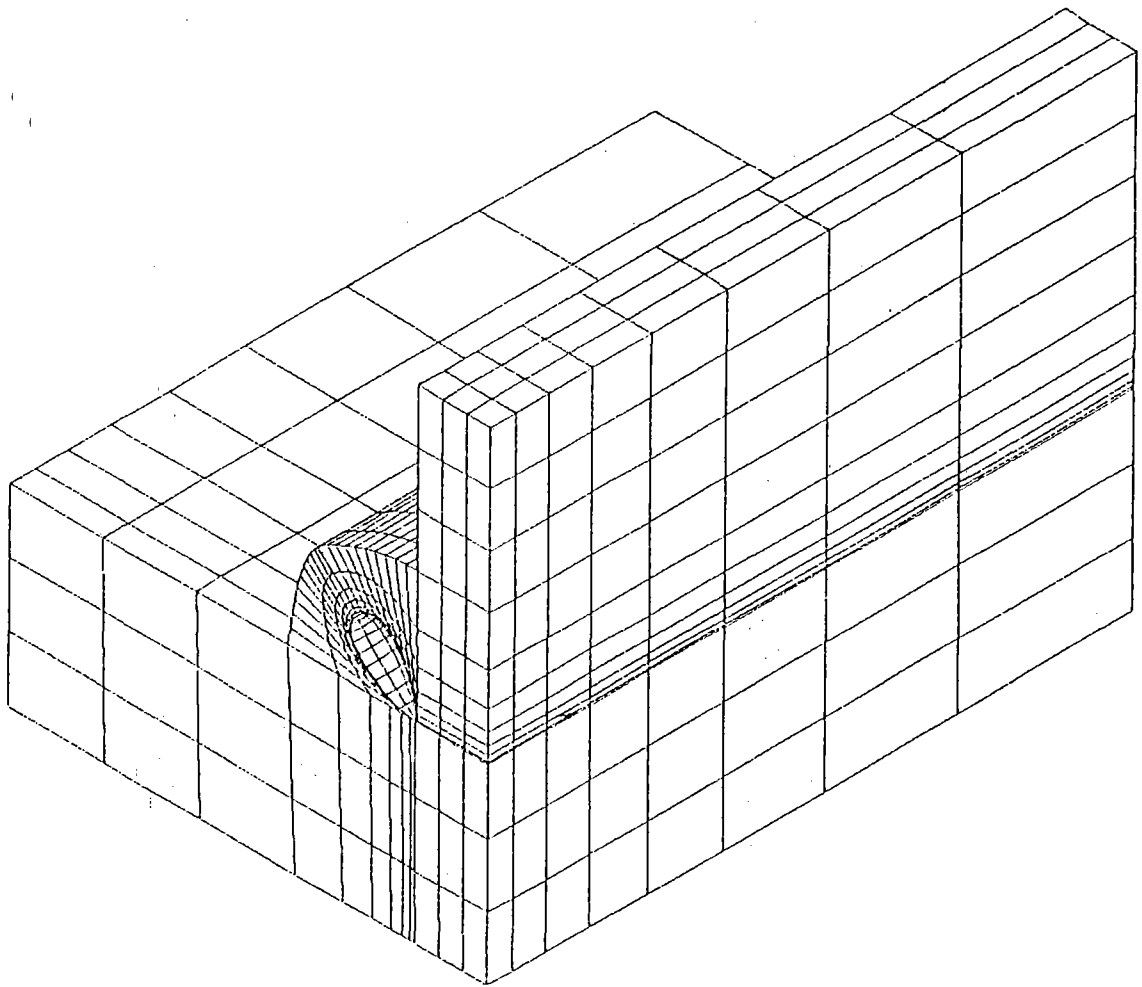
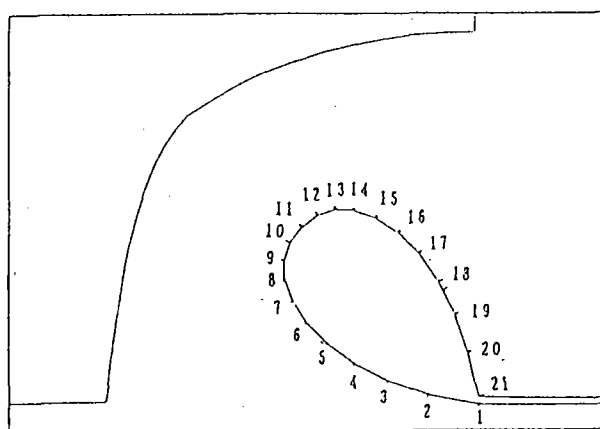
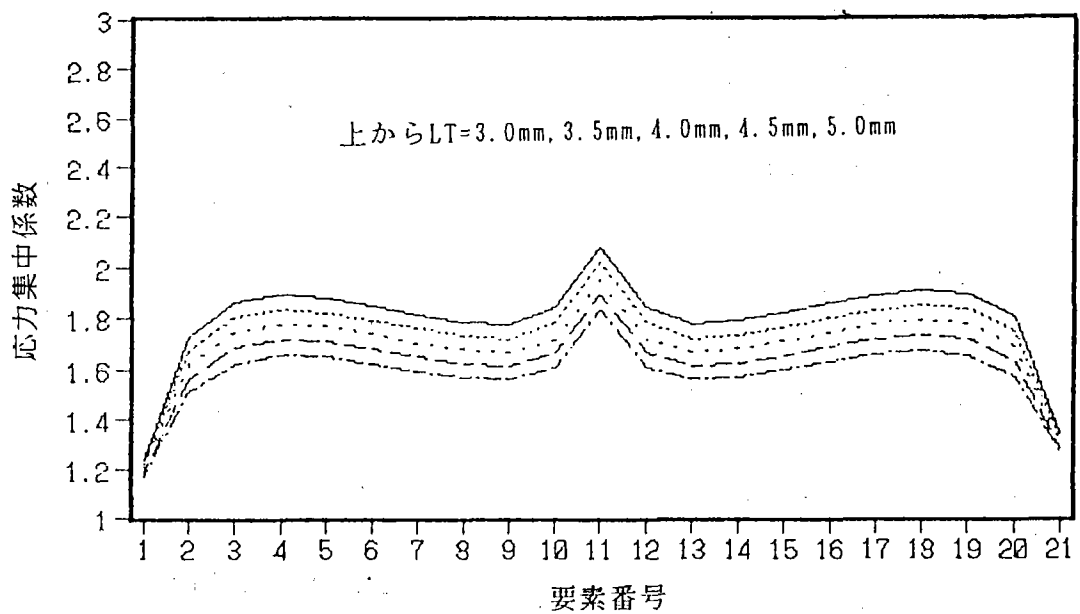
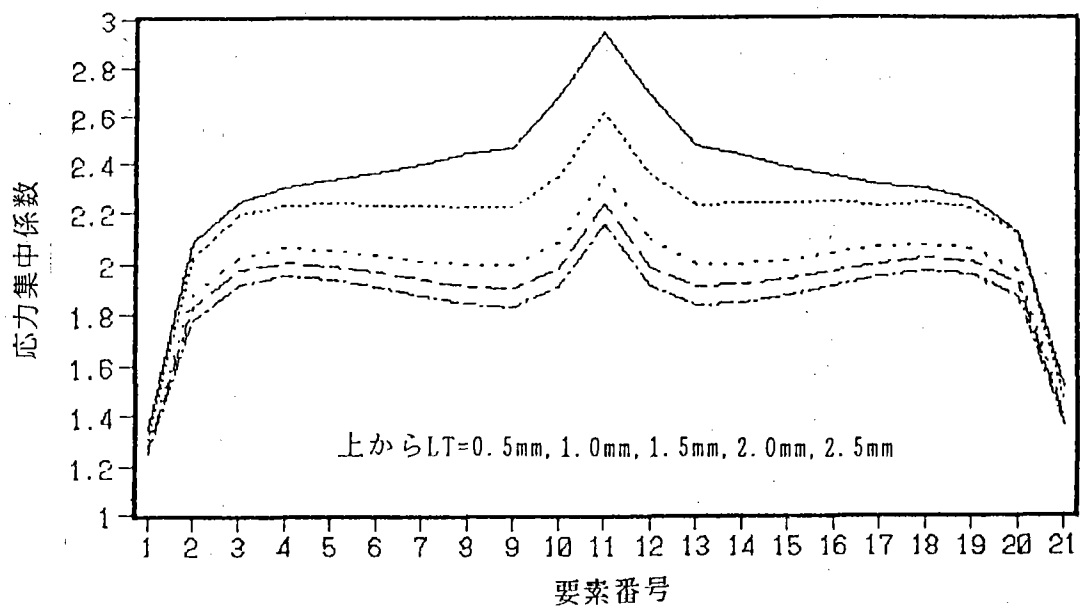


图2 要素分割例



図の横軸は左図に示す節点番号である

図3 ブローホールの周に沿う応力分布

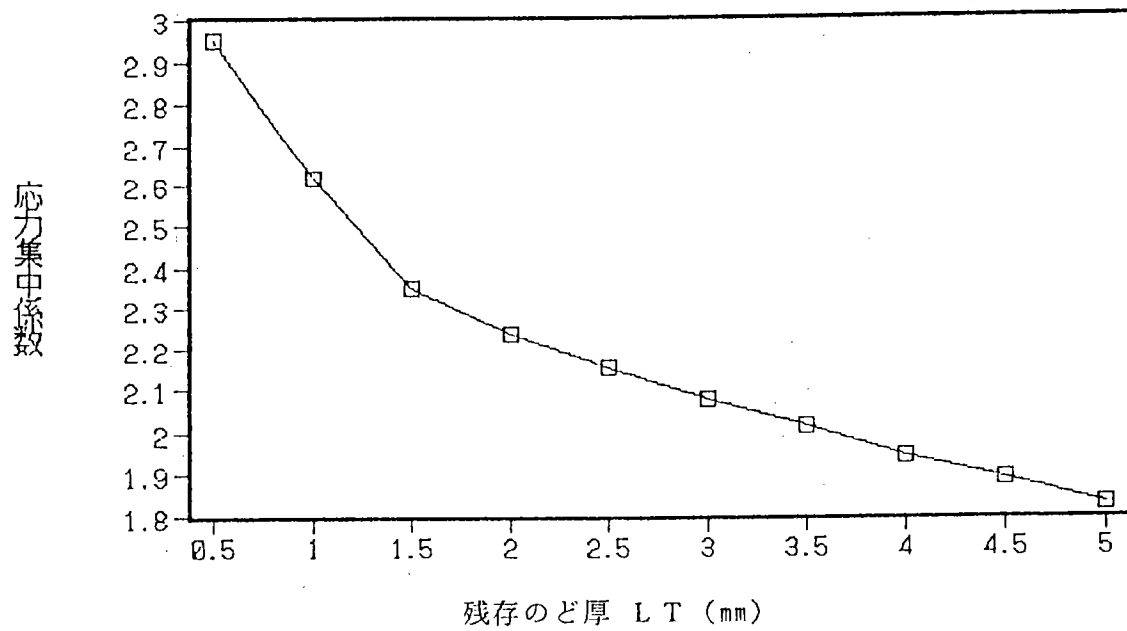


図4 応力集中係数と残存のど厚の関係

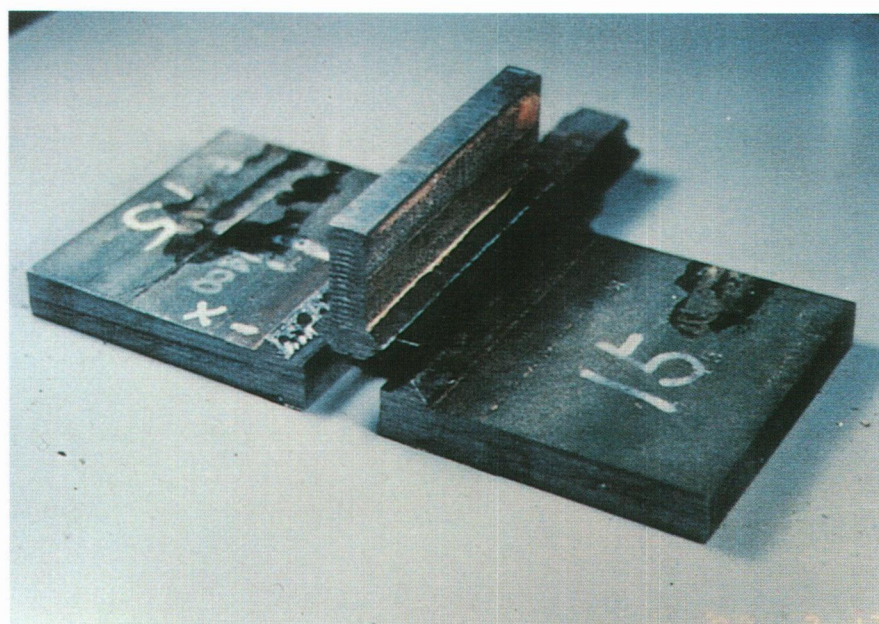
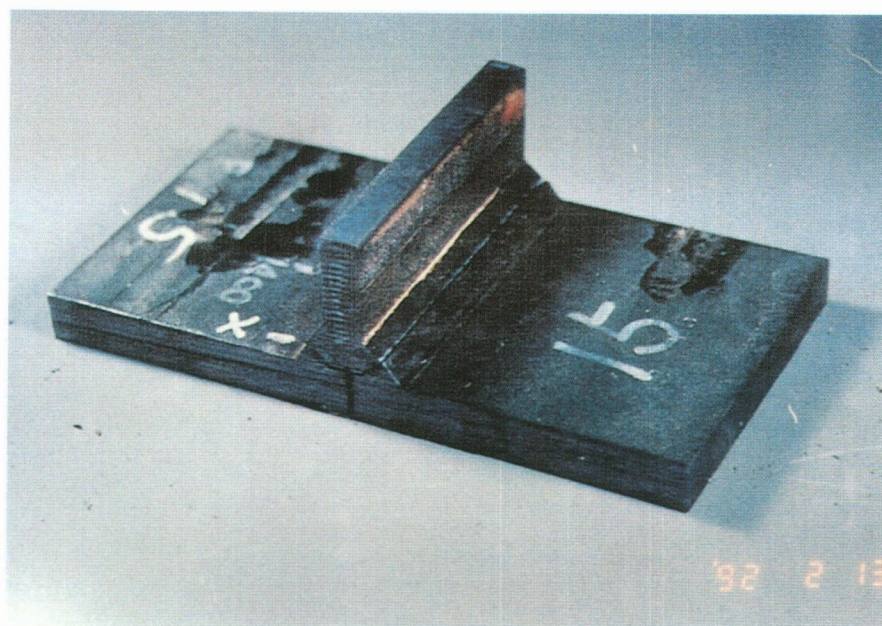


写真1 露呈した首溶接部

付録 8

ブローホールの寸法・形状と疲労亀裂発生との関係

1. ブローホールの形状・寸法を表わすパラメータ

首溶接部を解体し、ブローホールおよびブローホールからの疲労亀裂発生の有無を調べ、疲労亀裂発生を支配するパラメータについて検討する。なお、ここで示すブローホールは、等モーメント区間で観察されたものである。すなわち、すべて同じ大きさの繰返し応力（応力範囲 141MPa）を受けたブローホールである。

ブローホールの形状・寸法を表すパラメータとして、図1に示すように、ブローホールの幅 W 、高さ H 、形状比 H/W 、 $W+H$ 、 $W \times H$ 、残存のど厚 $L T$ 、等価円形亀裂の直径 $2a_e$ を考えた。

ブローホールの横幅 W は、三木らの研究によって、その値が大きくなるに従って疲労強度が低下するとされている。ブローホールの高さ H は、三木・森らの研究によって、その値が大きいほど疲労亀裂が発生しやすいとされている。ブローホールの高さを横幅で除した H/W は、ブローホールの形状を表しており、その値が大きいほど応力集中が高いとされている。 $W+H$ はブローホールのおよその周長を表しており、その値が大きいほど疲労亀裂が発生しやすいとされている。 $W \times H$ はブローホールのおよその面積を表しており、その値が大きいほど断面欠損率が高い。残存のど厚 $L T$ は、有限要素応力解析結果より、その値が小さいほどブローホールの頂部付近の応力集中が高くなることが確かめられており、疲労亀裂が発生しやすくなるといえる。 $2a_e$ は、等価円形亀裂の直径であり、次式で与えられる。

$$2a_e = 0.94 \times W^{0.29} \times H^{0.45} \quad (1)$$

W と H はそれぞれブローホールの横幅と高さである。 $2a_e$ は、ブローホールをその幅および高さを短軸・長軸とする回転楕円体形の空洞とみなした疲労亀裂進展解析より求めた疲労寿命と同じ寿命となるような円形亀裂の直径である。

2. 各パラメータと亀裂発生率の関係

各試験体の等モーメント区間の首溶接部で観察したブローホールの総数と疲労亀裂発生率を表1に示す。

図2は、ブローホールを上フランジ側（圧縮応力）と下フランジ側（引張応力）の溶接部に生じたものに分けて、各パラメータの頻度分布および各パラメータと亀裂発生率の関係を示したものである。いずれの場合も、圧縮応力側と引張応力側で亀裂発生率に特に違いは認められない。したがって、作用応力の符号は、疲労亀裂発生にさほど影響を与えないと言えよう。

図3は、ブローホールをCO₂溶接部とSAW溶接部に生じていたもので区別し、各パラメータの頻度分布および各パラメータと亀裂発生率の関係を示したものである。LTを除いた各パラメータとも、CO₂溶接の場合が、SAW溶接の場合に比べ、大きくなっている。すなわち、CO₂溶接部には、SAW溶接部に比べて、大きいブローホールが生じていることがわかる。発生率で比較してみると、溶接のちがいで、大きな影響はないとみれる。しかし、疲労亀裂の発生率は、それぞれのパラメータの値が同じであれば、CO₂溶接部とSAW溶接部でほぼ同じでなっている。

図4は、作用応力や溶接法による区別を行わずに、各パラメータと亀裂発生率の関係を示したものである。疲労亀裂発生率との相関は、等価円形亀裂直径 $2a_e$ が最も高くなっている。

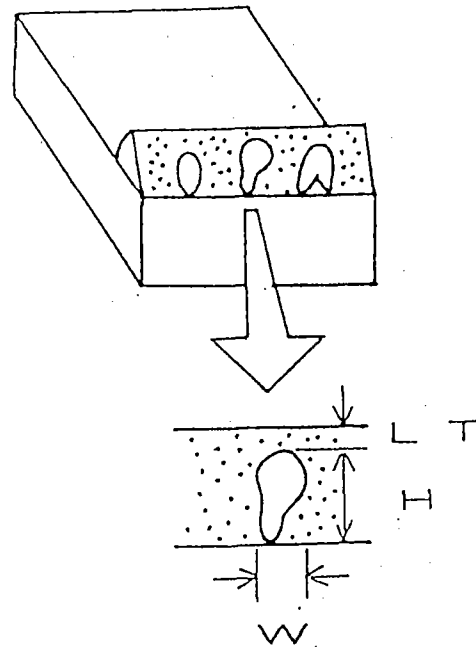
表 1 ブローホールの数と疲労亀裂発生率

応力 範囲	1体目				2体目			
	引張側		圧縮側		引張側		圧縮側	
	F	B	F	B	F	B	F	B
等 モジュール	58/188 30.9%	0/9 0%	40/181 22.1%	2/3 66.6%	40/159 25.2%	0/0 0%	32/166 19.3%	1/10 10%
その他	3/141 21.3%	0/10 0%	4/182 2.2%	0/16 0%	41/109 37.6%	0/0 0%	28/148 18.9%	0/11 0%

応力 範囲	3体目				4体目			
	引張側		圧縮側		引張側		圧縮側	
	F	B	F	B	F	B	F	B
等 モジュール	20/169 11.8%	0/3 0%	23/231 9.9%	0/5 0%	15/168 8.9%	4/24 16.7%	3/165 1.8%	1/4 25%
その他	6/167 3.6%	0/4 0%	1/142 0.7%	2/22 9.1%	6/171 3.6%	1/9 11.1%	5/137 3.6%	0/0 0%

上段：亀裂を含むブローホールの数／ブローホールの数

下段：亀裂発生率 %



注目した パラメータ	各パラメータの持つ意味
W	ブローホールの横幅
H	ブローホールの高さ
H/W	ブローホールの形状
W+H	ブローホールの周長
W×H	ブローホールの面積
L T	残存のど厚
2 a _e	等価円形亀裂の直径

図 2 注目したパラメータ

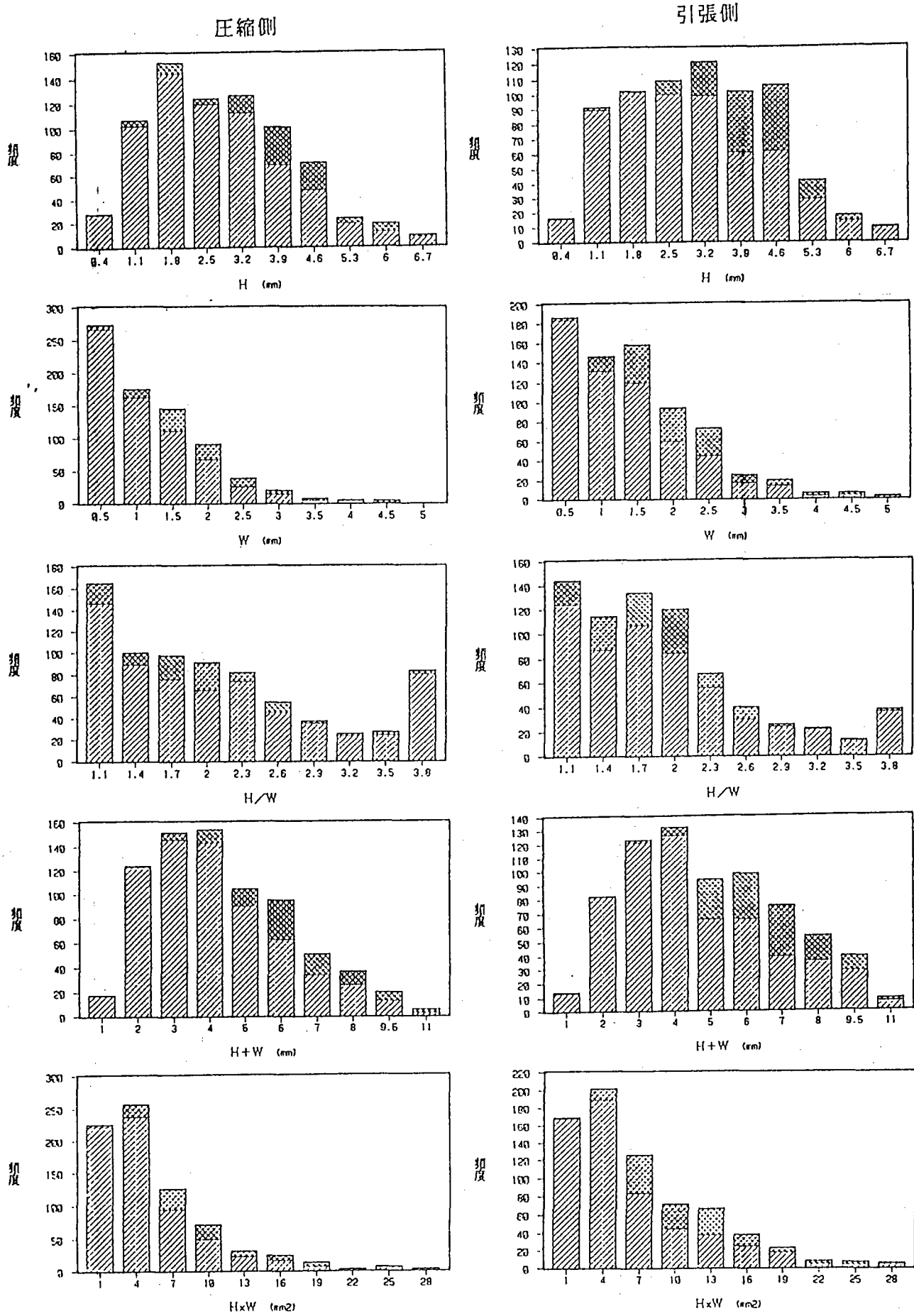


図 2 圧縮側と引張側の比較 (頻度分布) その 1

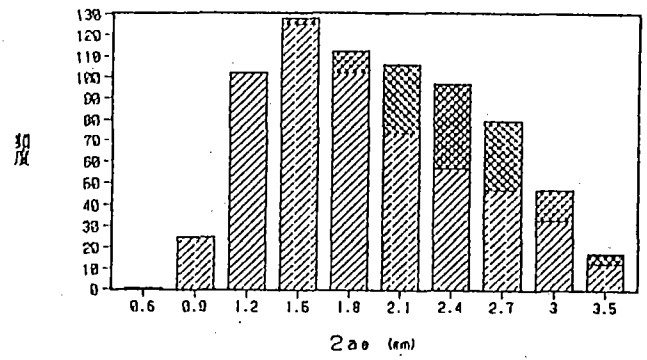
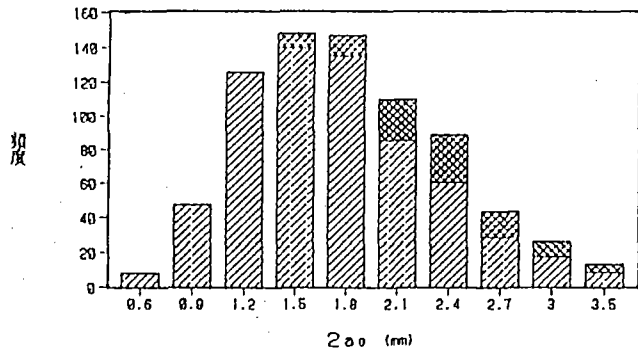
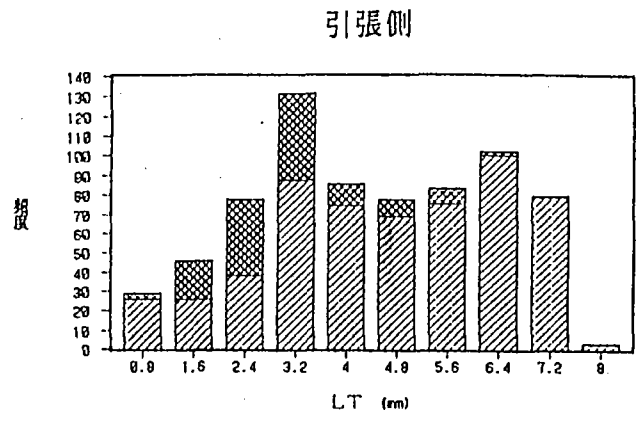
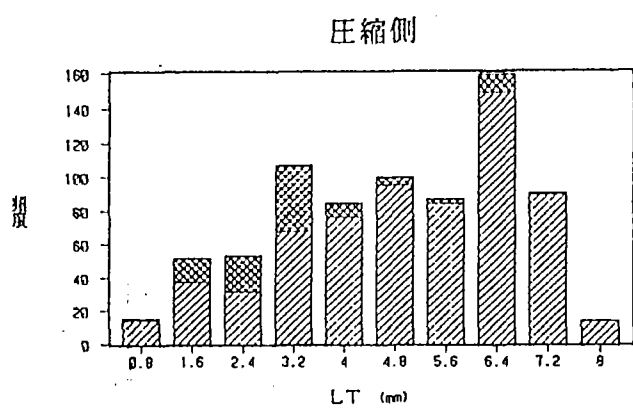
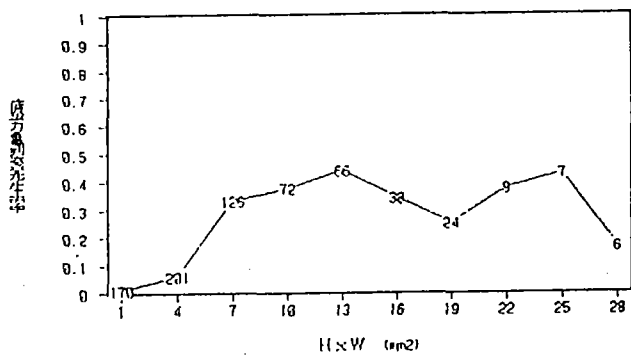
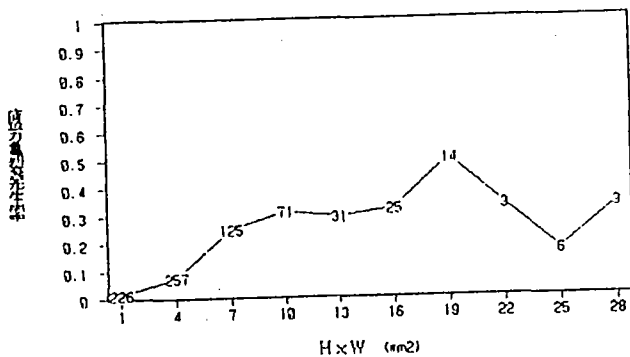
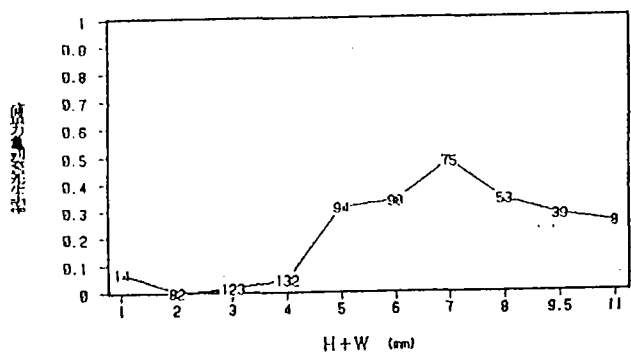
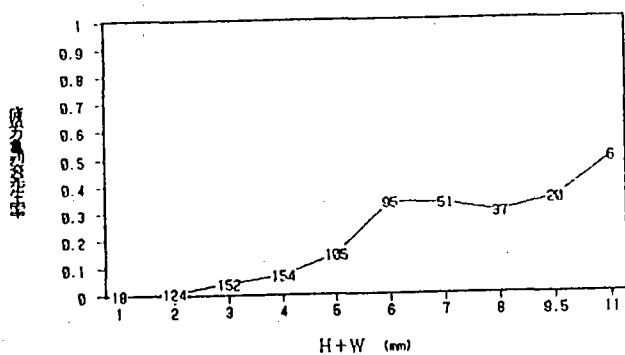
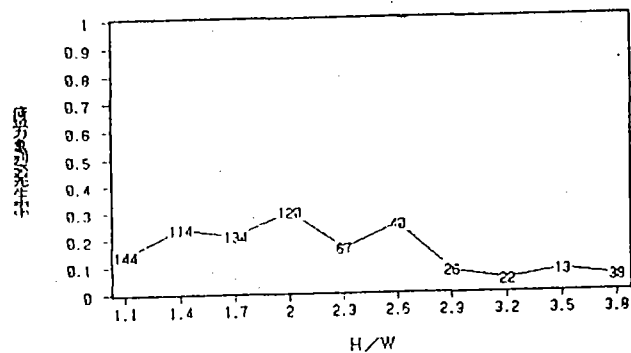
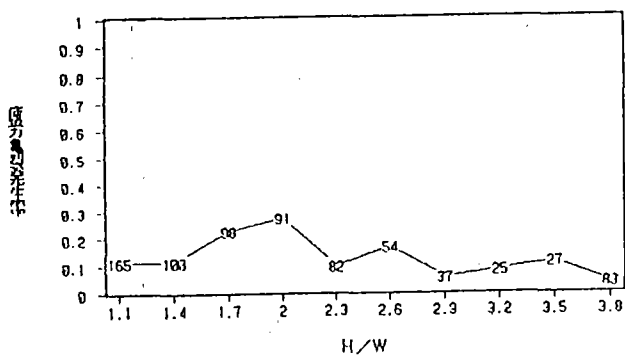
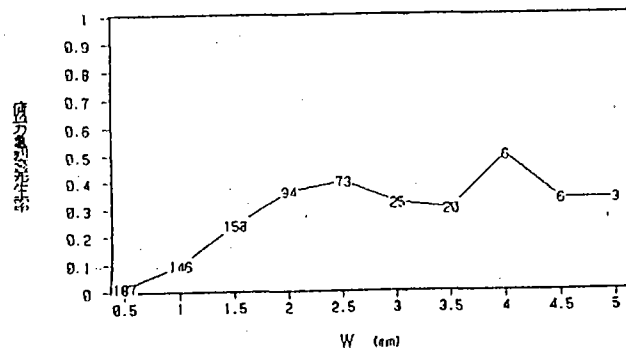
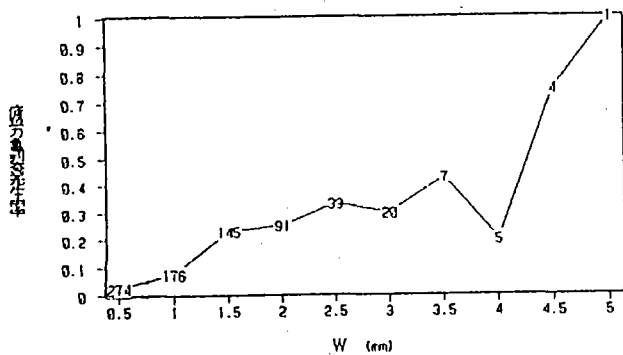
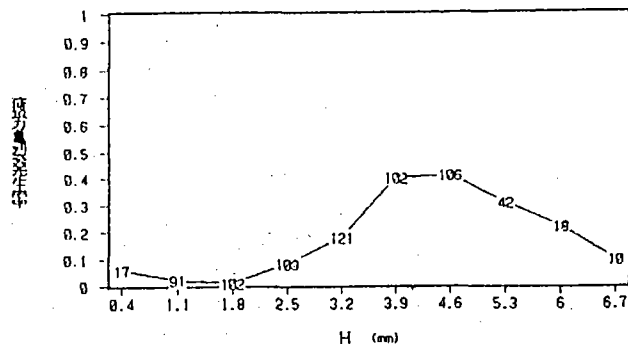
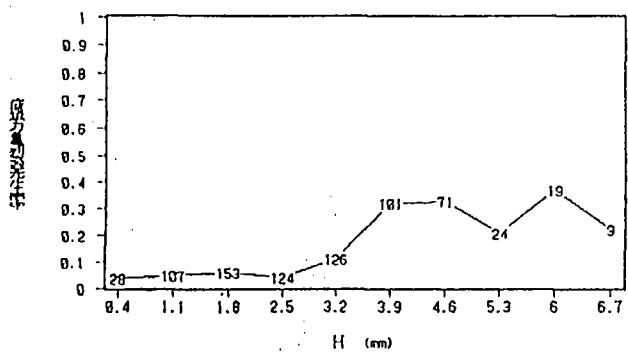


図2: 圧縮側と引張側の比較 (頻度分布) その2

圧縮側

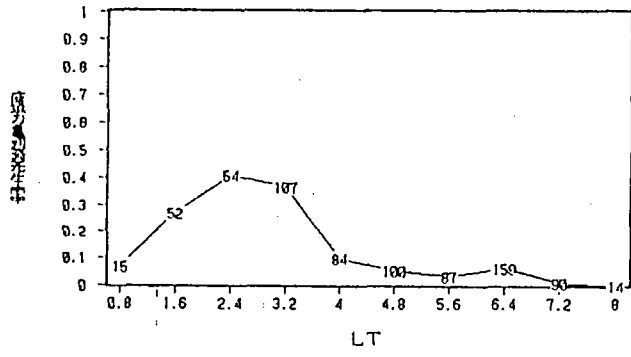
引張側



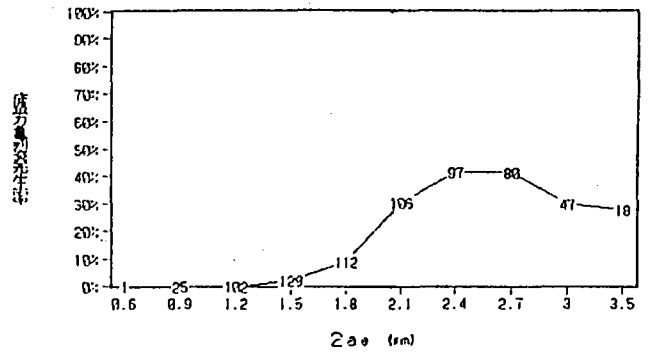
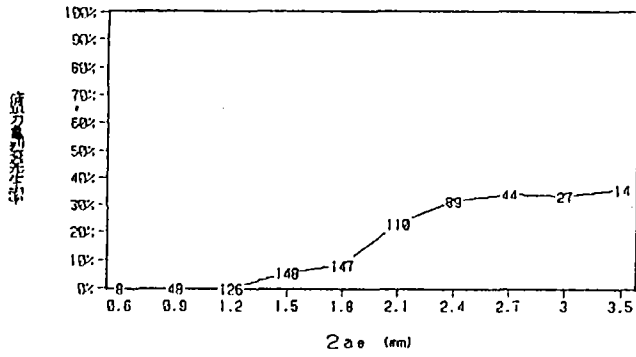
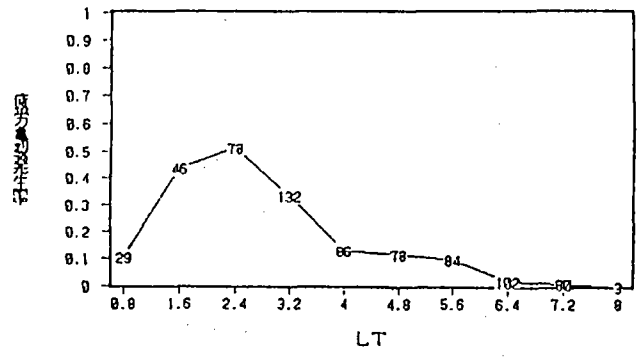
※図の数字は各値での頻度である。

図2 圧縮側と引張側の比較(発生率) その1

圧縮側



引張側



※図の数字は各値での頻度である。

図2 圧縮側と引張側の比較（発生率）その2

CO₂溶接

S A W溶接

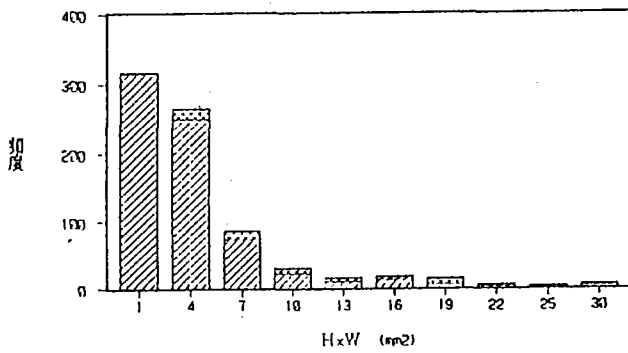
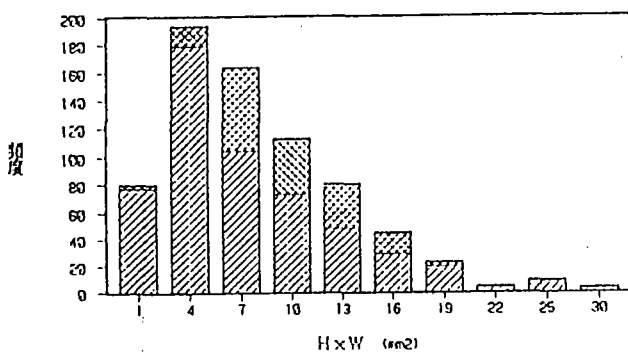
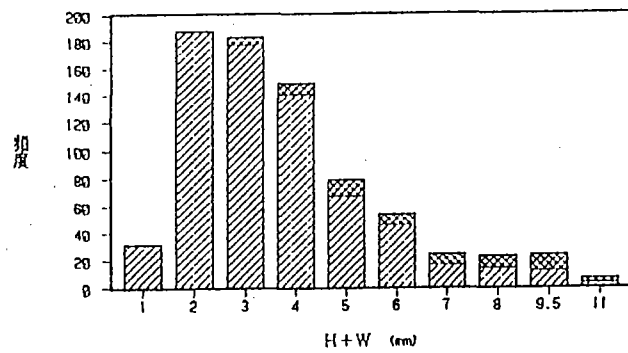
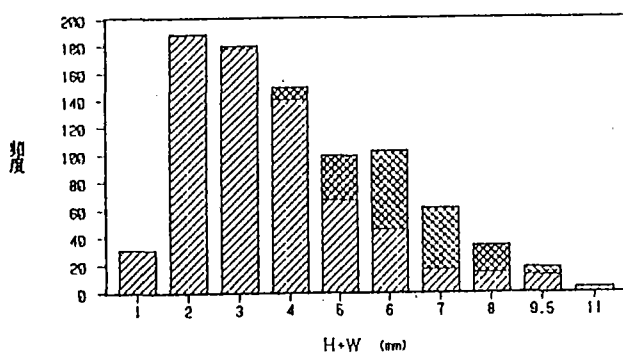
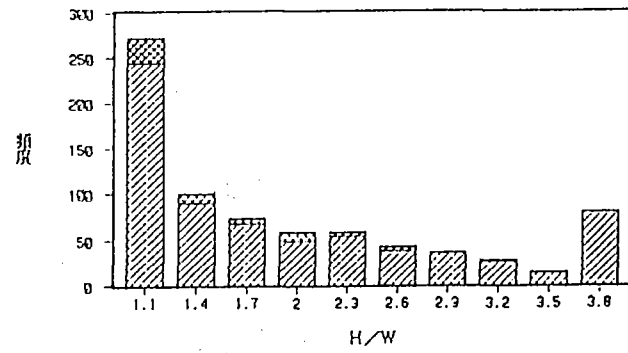
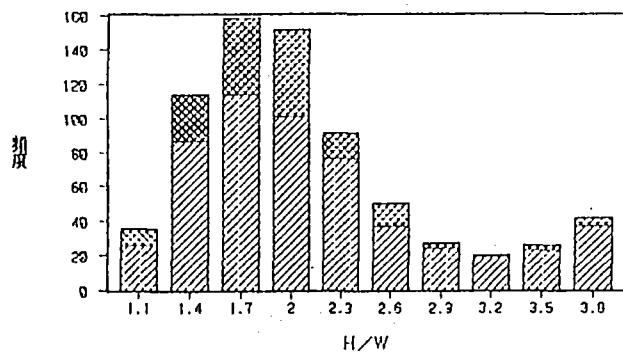
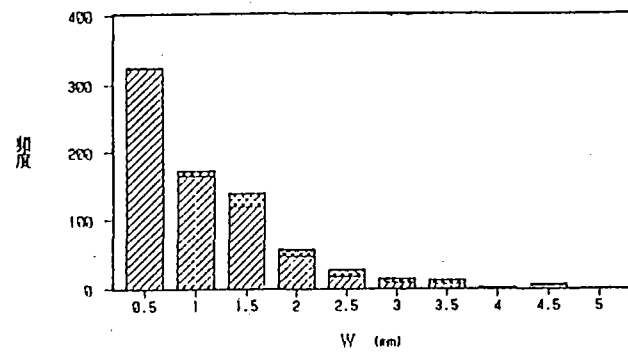
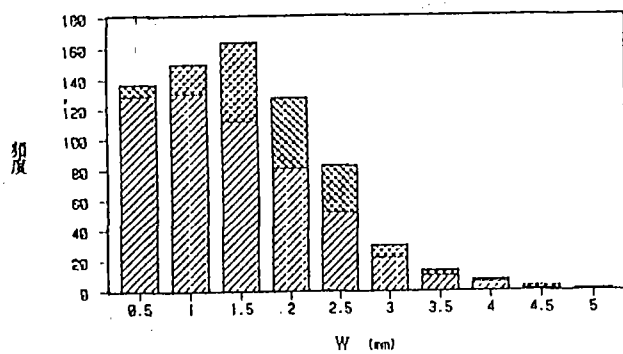
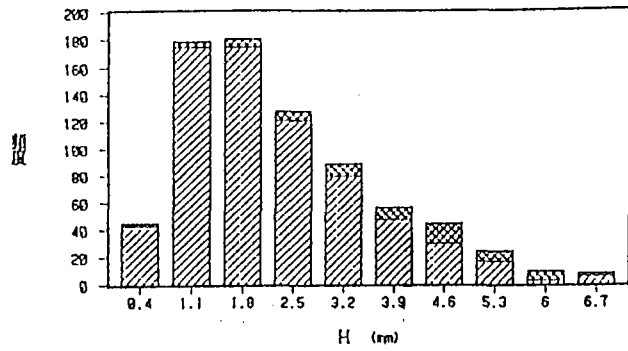
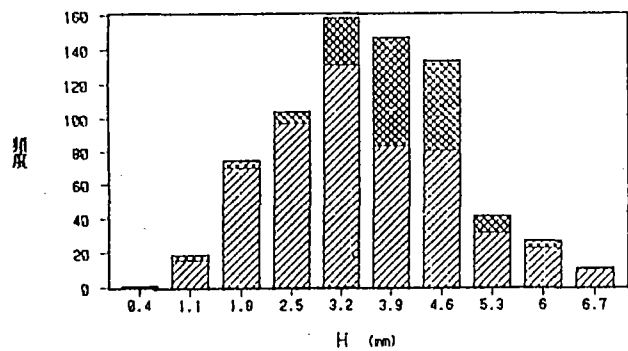


図3 CO₂とS A Wの比較 (頻度分布) その1

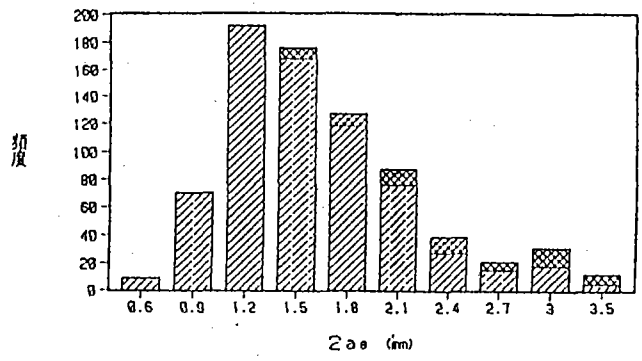
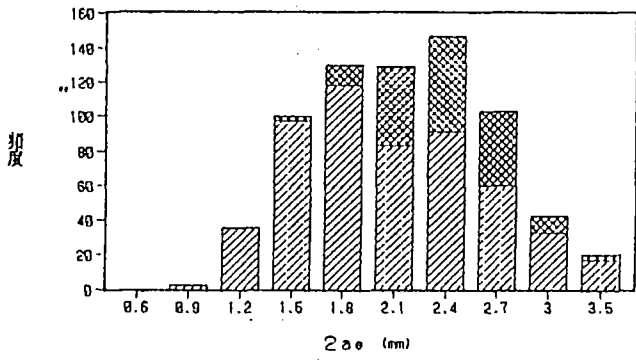
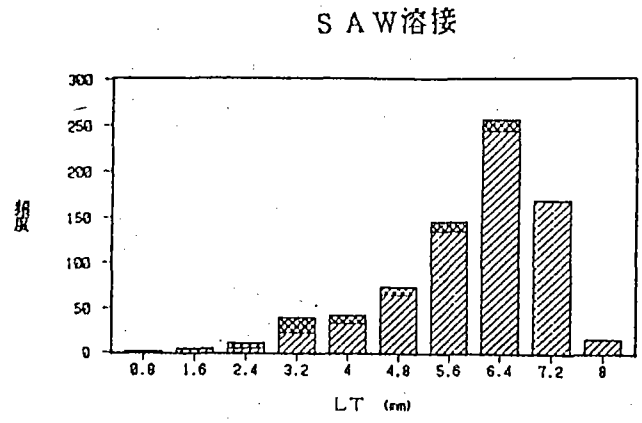
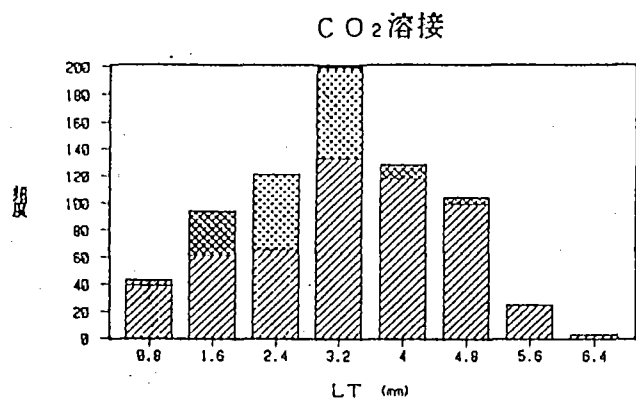
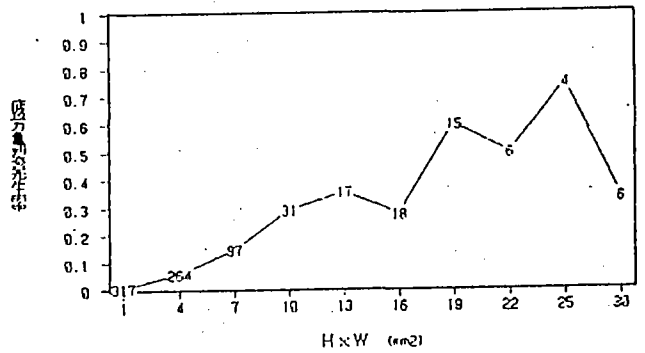
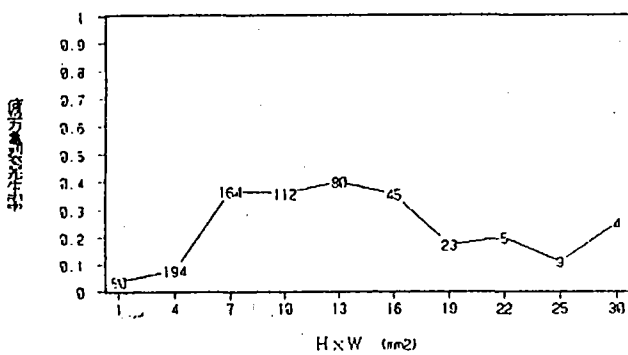
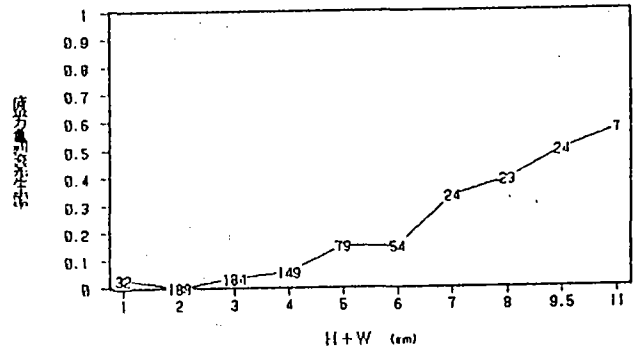
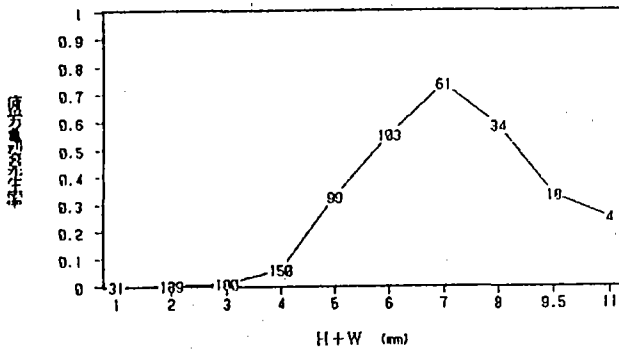
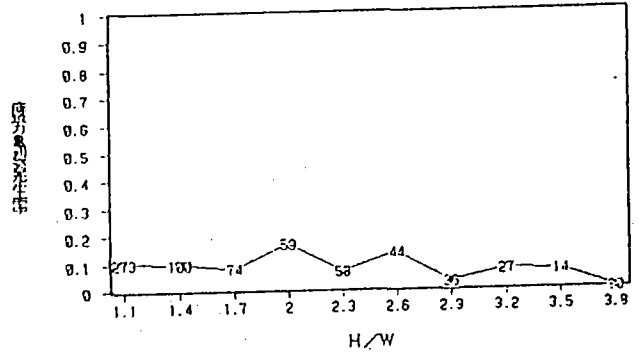
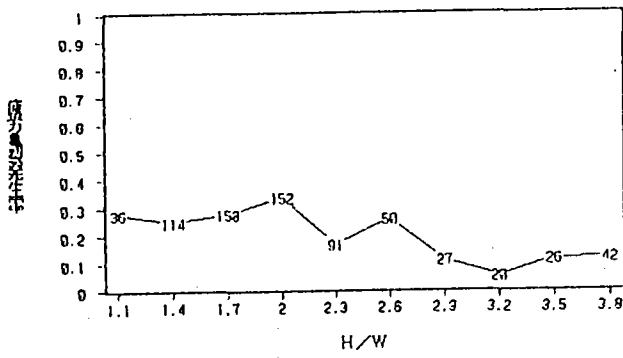
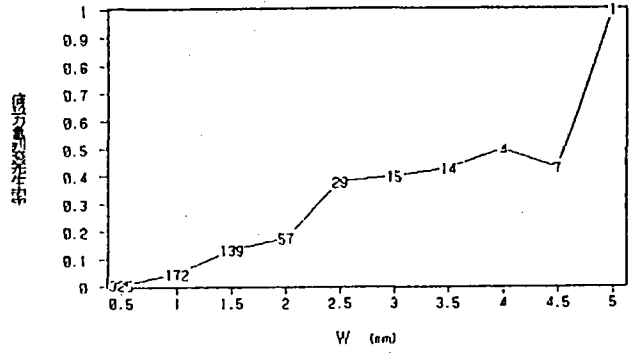
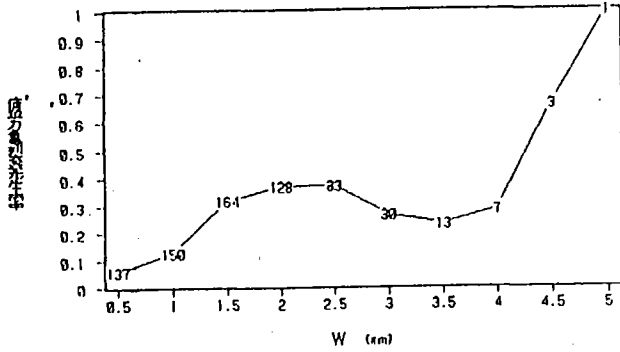
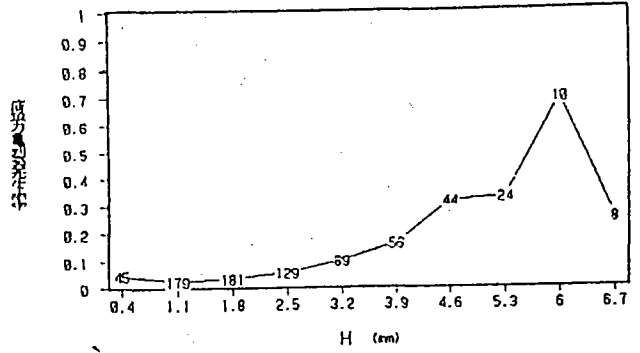
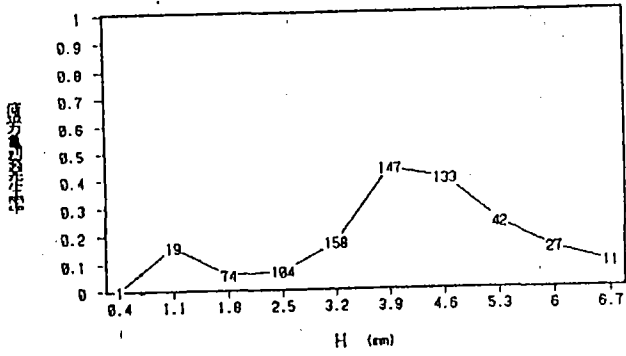


図3 CO₂とSAWの比較（頻度分布）その2

CO₂溶接

S A W溶接

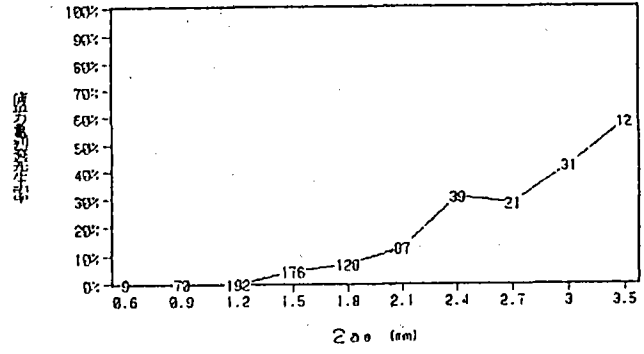
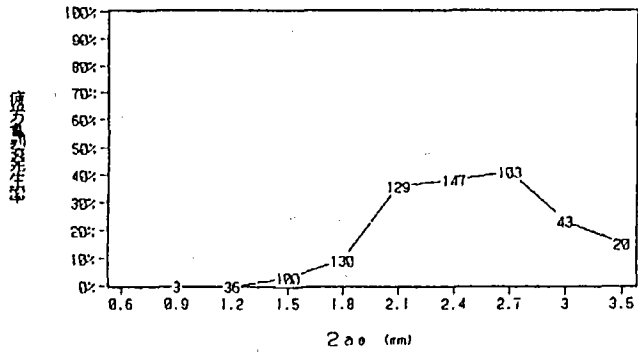
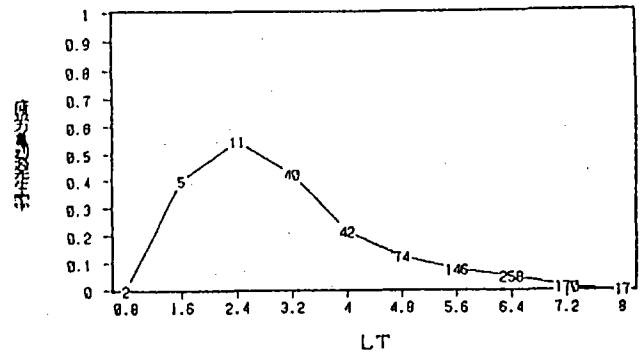
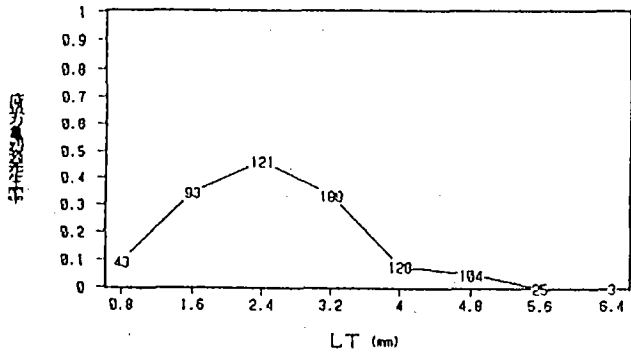


※図の数字は各値での頻度である。

図3 CO₂とSAWの比較(発生率)その1

CO₂溶接

S A W溶接



※図の数字は各値での頻度である。

図3 CO₂とSAWの比較(発生率)その2

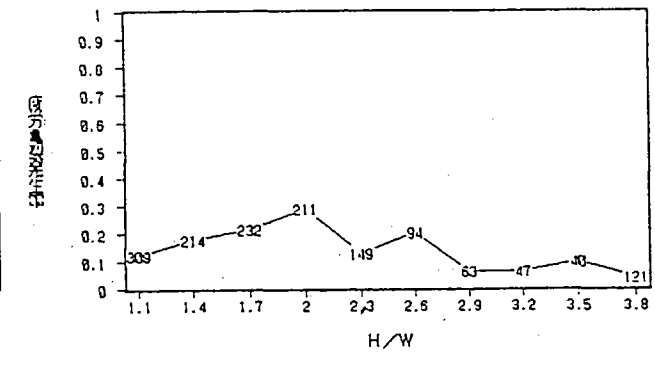
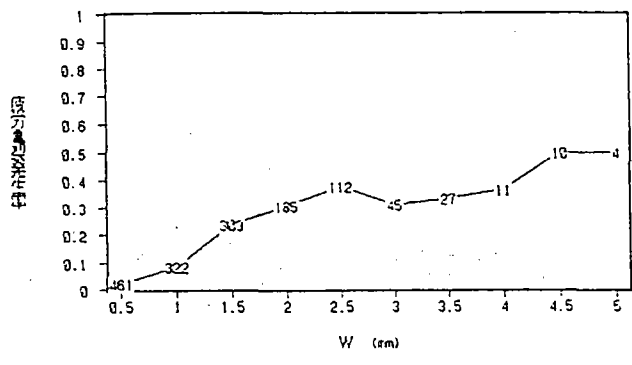
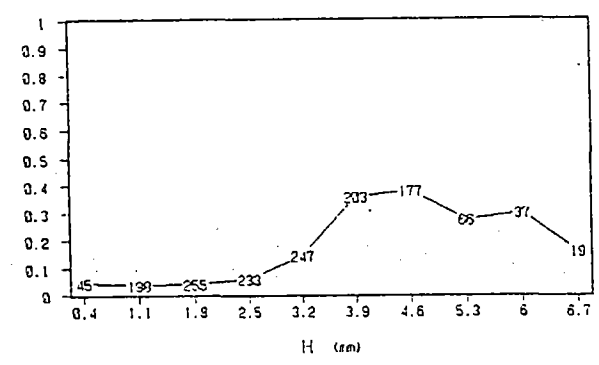
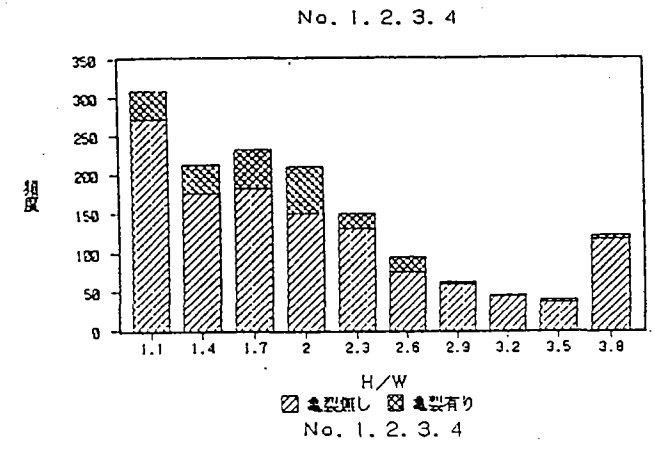
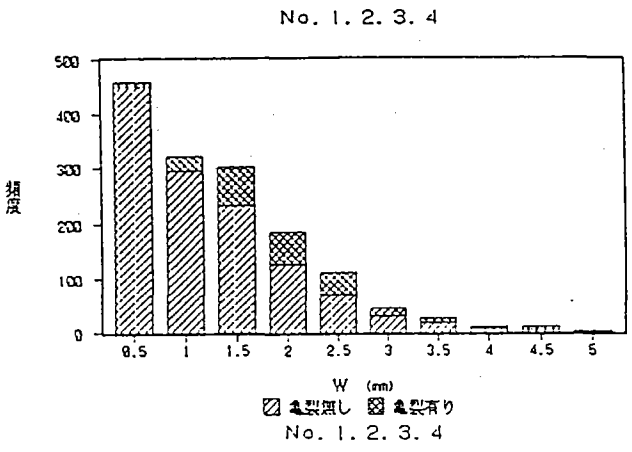
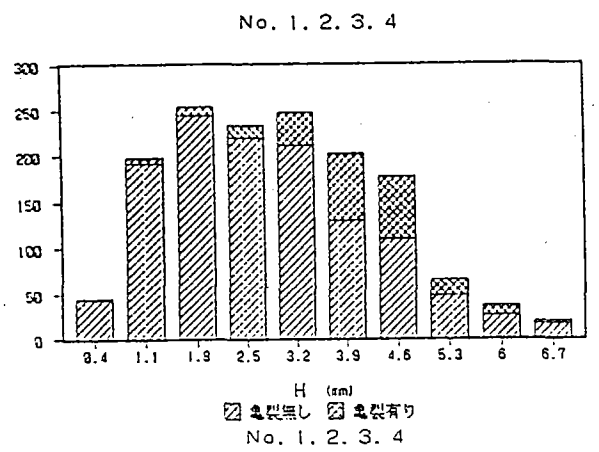


図4 全体の発生率と各パラメータの関係 その1

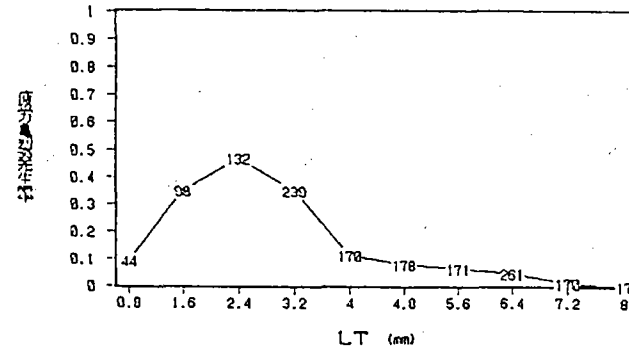
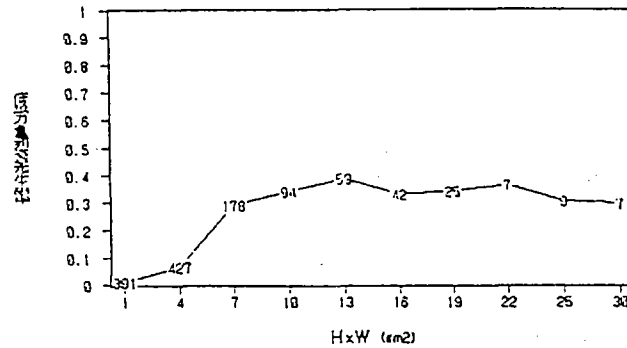
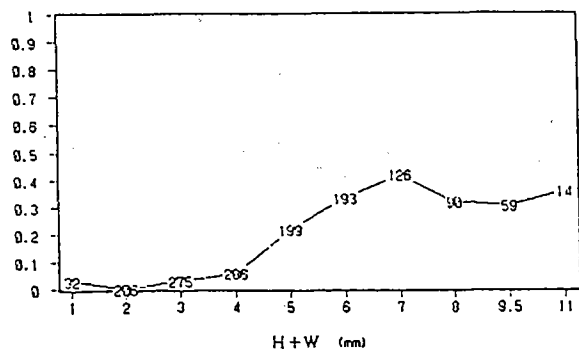
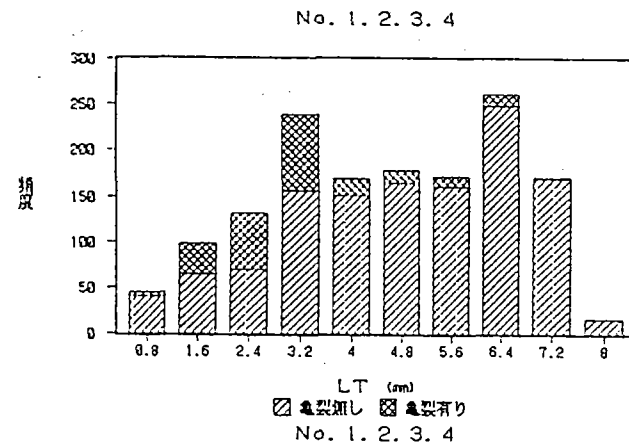
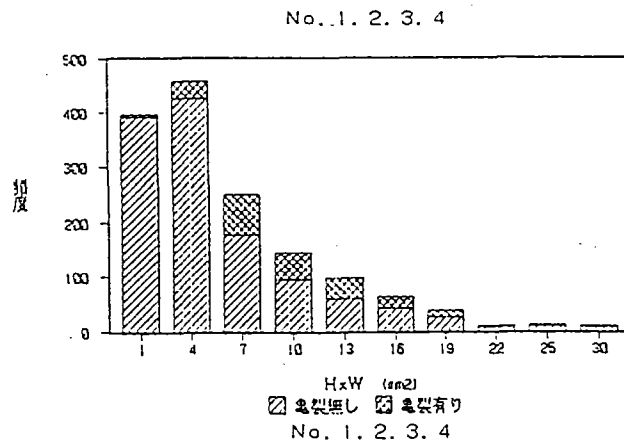
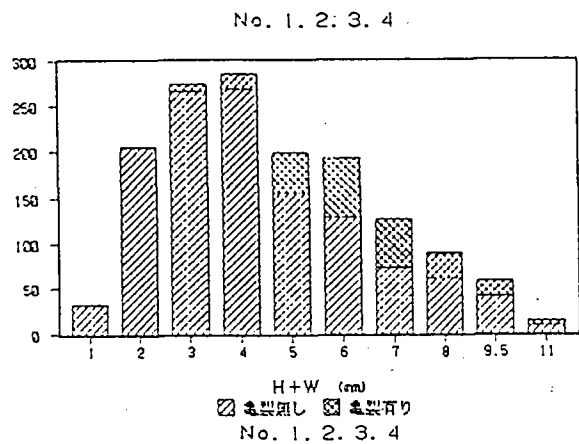


図 4 全体の発生率と各パラメータの関係 その2

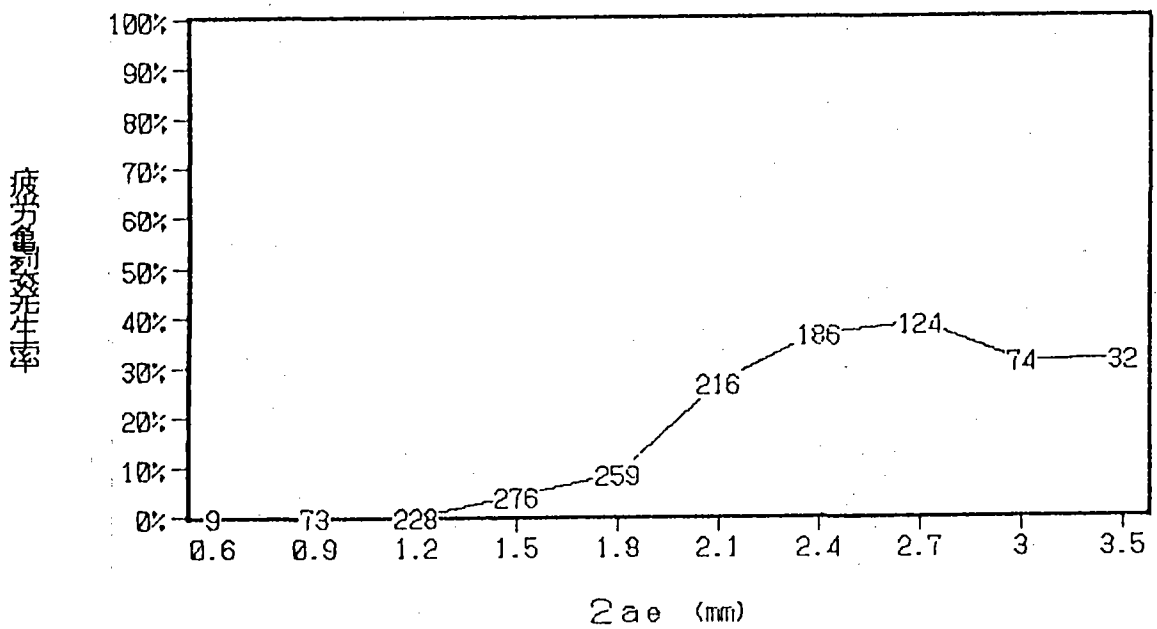
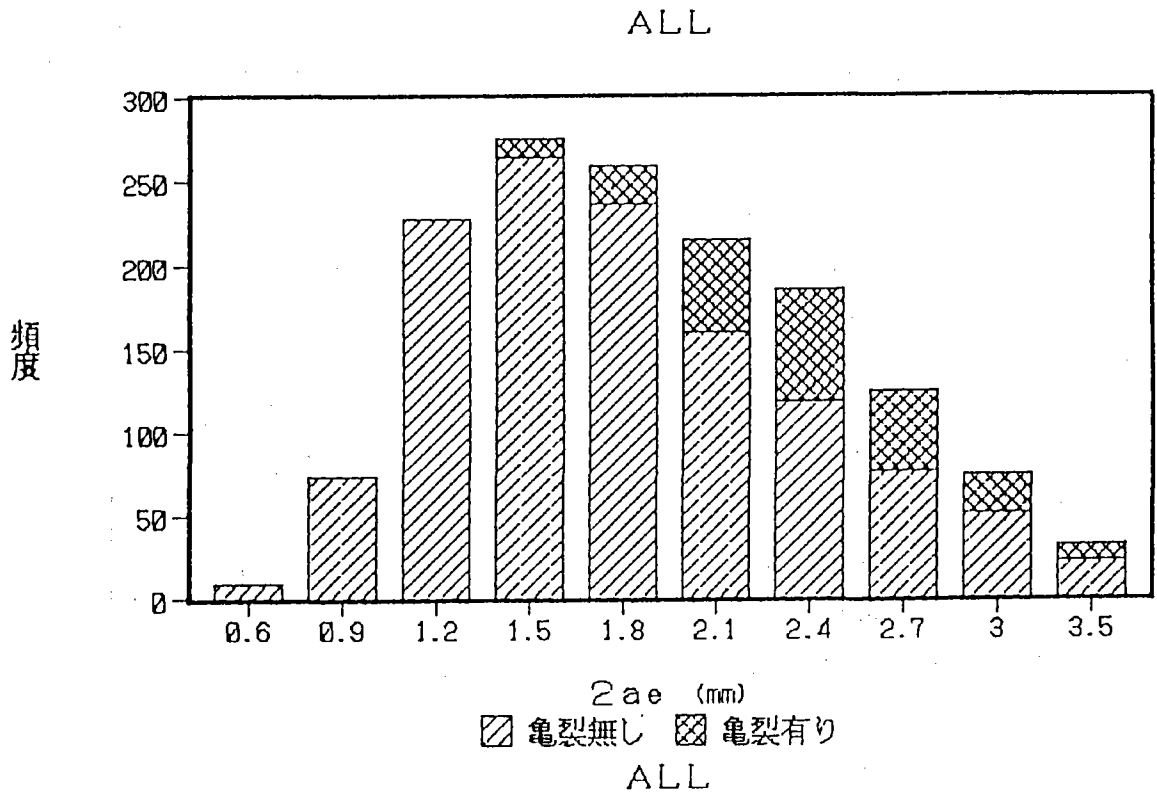


図 4 全体の発生率と各パラメータの関係 その3

付録 9

ブローホールの許容寸法の検討

検討の手順

- (a) 首溶接部を解体し、ブローホールの幅Wと高さHならびにブローホールからの疲労亀裂発生の有無と亀裂の大きさを測定する。

観察したブローホールの数 : 1480
疲労亀裂が生じていたブローホールの数 : 315

- (b) 疲労亀裂が生じていたブローホールについて、疲労亀裂進展解析を行ない、余寿命を求める。

(疲労寿命N) = (発見された亀裂が生じるまでの寿命) + (余寿命)

- (c) 疲労亀裂が生じていたブローホールについて疲労損傷度Dを求める。

$$D = \Delta \sigma^3 \cdot N \quad (1)$$

- (d) 疲労亀裂が生じていたブローホールについて、それを円形亀裂とみなした場合の亀裂直径 $2a_e$ を求める。

$$2a_e = 0.94 \times W^{0.29} \times H^{0.45} \quad (2)$$

- (e) Dを独立変数、 $2a_e$ を従属変数とした最小2乗法による回帰解析を行ない、 $2a_e$ とDの関係を求める。(図1参照)

$$\text{平均} : 2a_e = 2.84 \times 10^6 \cdot D^{-0.463} \quad (3)$$

$$\text{平均} - 2x \text{ (標準偏差)} : 2a_e = 2.03 \times 10^6 \cdot D^{-0.463} \quad (4)$$

$$\text{平均} - 3x \text{ (標準偏差)} : 2a_e = 1.72 \times 10^6 \cdot D^{-0.463} \quad (5)$$

- (f) 日本鋼構造協会疲労設計指針(案)では、疲労設計曲線を各強度等級(A~H)ごとに次式で与えている。(図2参照)

$$\Delta \sigma^3 \cdot N = D_0 \quad (D_0: \text{各強度等級に対応する定数}) \quad (6)$$

$$A : D_0 = 1.372 \times 10^{13} \quad B : D_0 = 7.448 \times 10^{12}$$

$$C : D_0 = 3.906 \times 10^{12} \quad D : D_0 = 2.000 \times 10^{12}$$

$$E : D_0 = 1.024 \times 10^{12} \quad F : D_0 = 5.493 \times 10^{11}$$

$$G : D_0 = 2.500 \times 10^{11} \quad H : D_0 = 1.280 \times 10^{11}$$

- (g) (3), (4), (5)式で与えられるDと(6)式の D_0 を比較することにより、各強度等級に対応する許容 $2a_e$ 値を求める。(図3参照)

例えば、(5)式に基づいてC等級に対応する許容 $2 a_e$ 値を求めれば2.54mm、D等級に対応する許容 $2 a_e$ 値は3.47mmとなる。(図3参照)

(h) (2)式および(4)、(5)式を用いて各強度等級に対するWとHの許容寸法を計算する。[図4(a),(b)]

検討結果

軟鋼で製作したI断面桁の首溶接部におけるブローホールの許容寸法は、本四連絡橋製作基準およびJSSC疲労設計(案)で示されている値(強度等級Cに対して、 $W \leq 1.5\text{mm}$ 、 $H \leq 4.0\text{mm}$)よりも緩和できる可能性が高い。例えば、強度等級Cに対して、 $W \leq 2.5\text{mm}$ 、 $H \leq 5.0\text{mm}$ 。

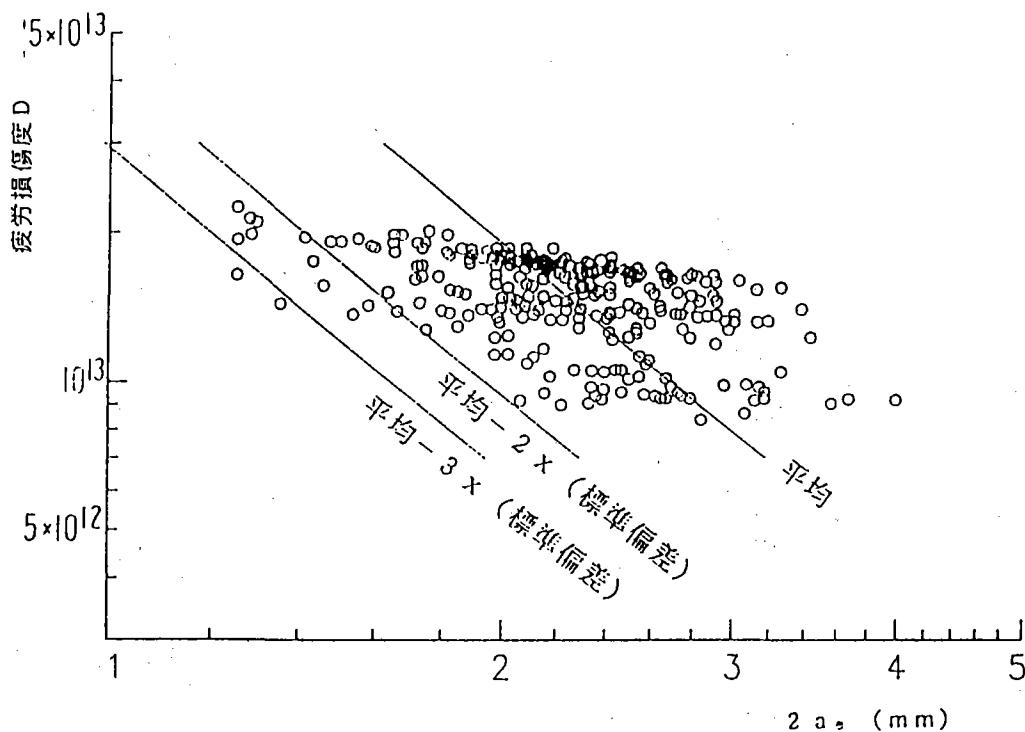


図1 疲労損傷度 D と等価円形亀裂直径 $2 a_e$ の関係

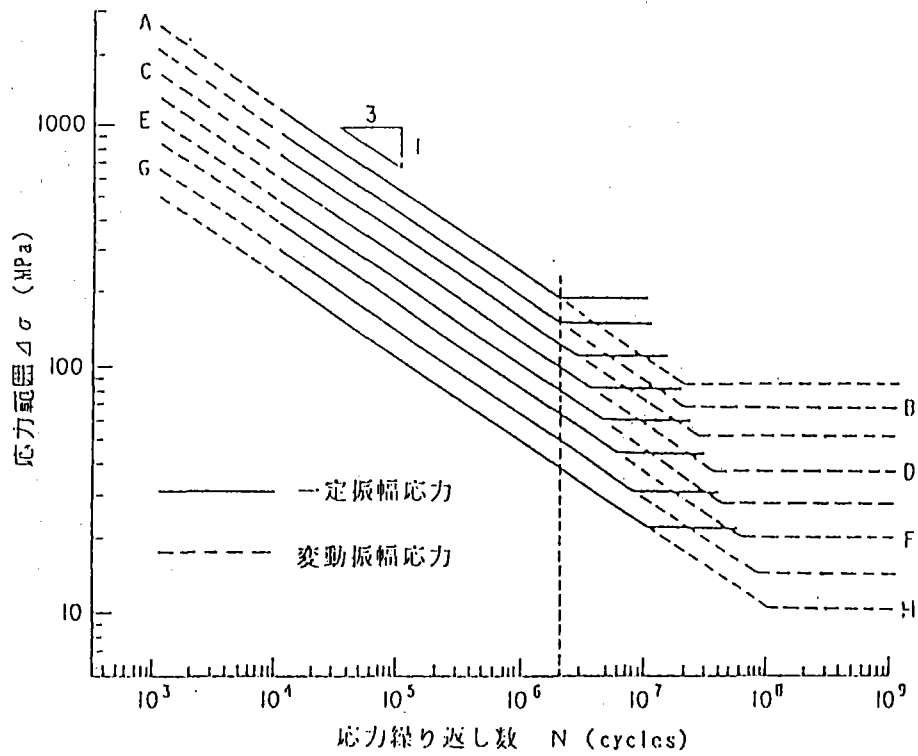


図2 JSSC疲労設計指針(案)の疲労設計曲線

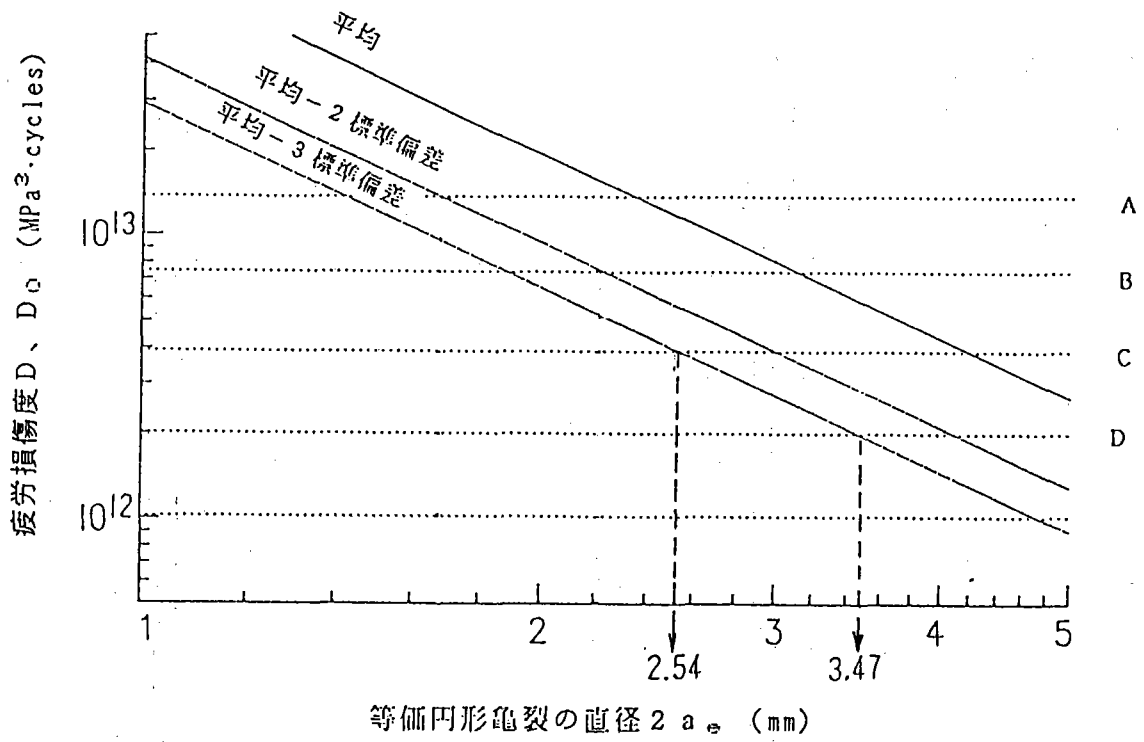
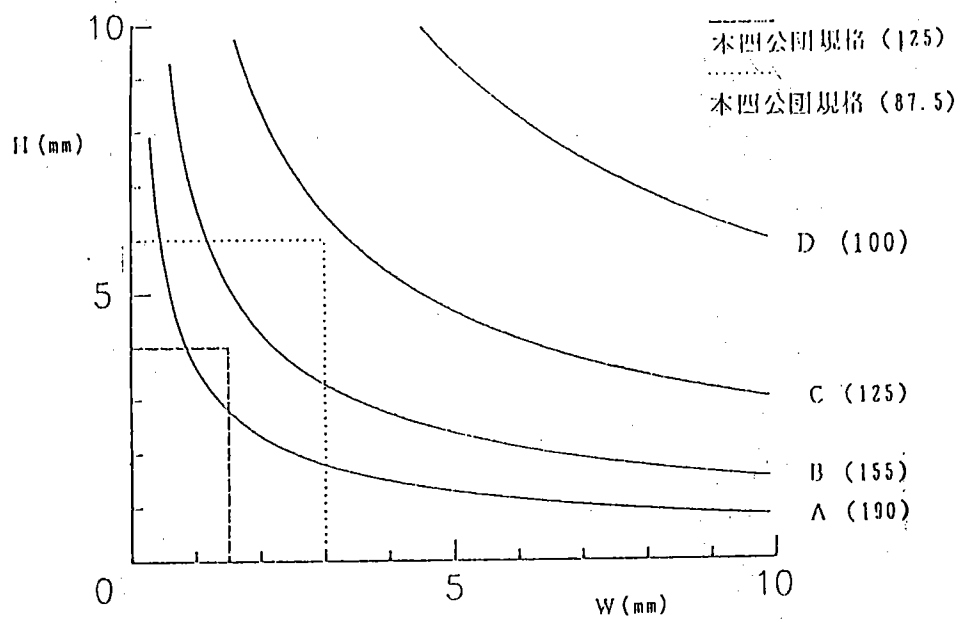
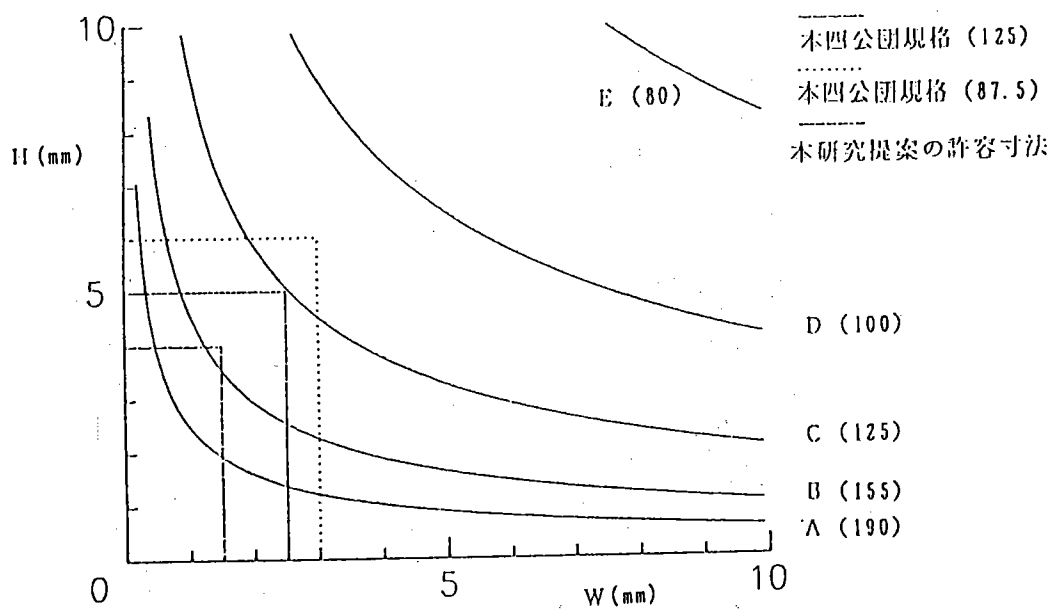


図3 許容 $2a_e$ 値の求め方



(a) 平均 - 2 標準偏差の $2 a_{\sigma} - D$ 関係



(b) 平均 - 3 標準偏差の $2 a_{\sigma} - D$ 関係

図4 ブローホールの許容寸法