

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で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)
** ㈱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 ㈱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⁸⁾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

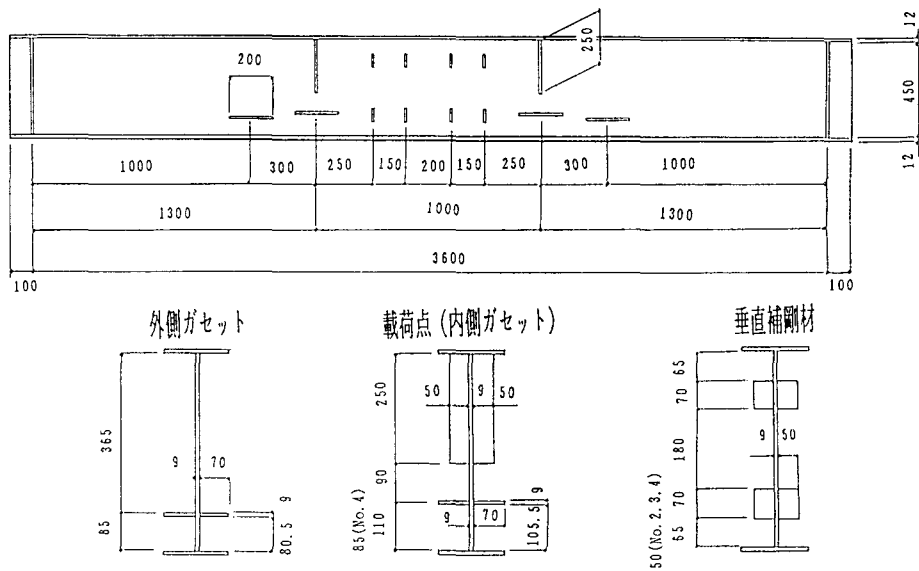


図1 試験体の形状・寸法および継手部詳細

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

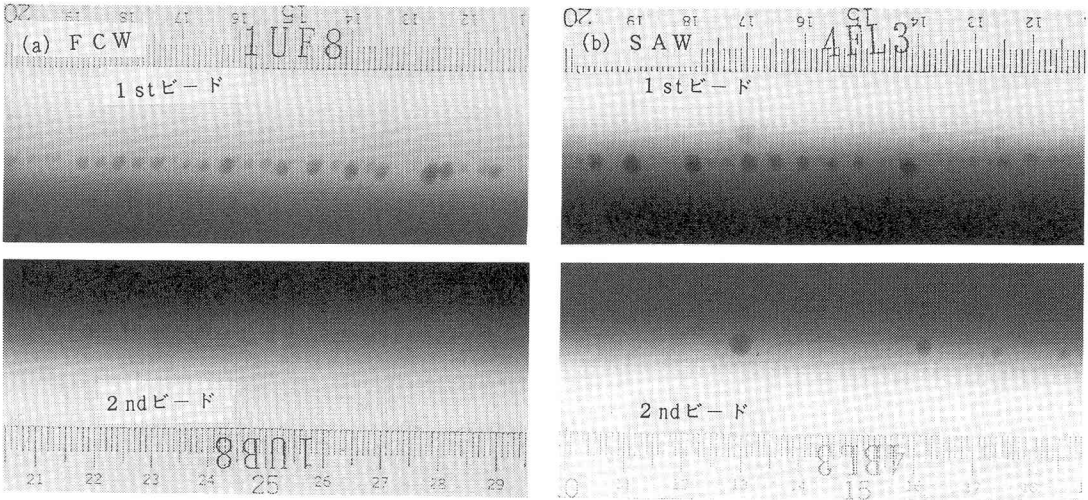


写真 1 首溶接部の X 線写真

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。

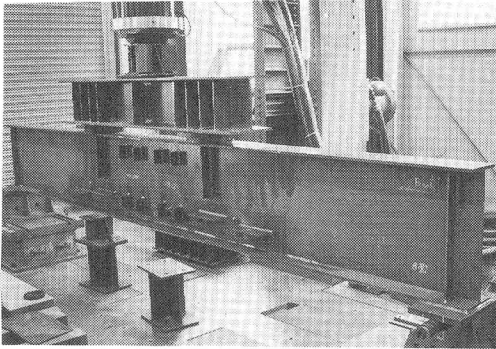


写真2 疲労試験の状況

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（ビーチマーク試験）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は荷重繰返し数を示している。

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

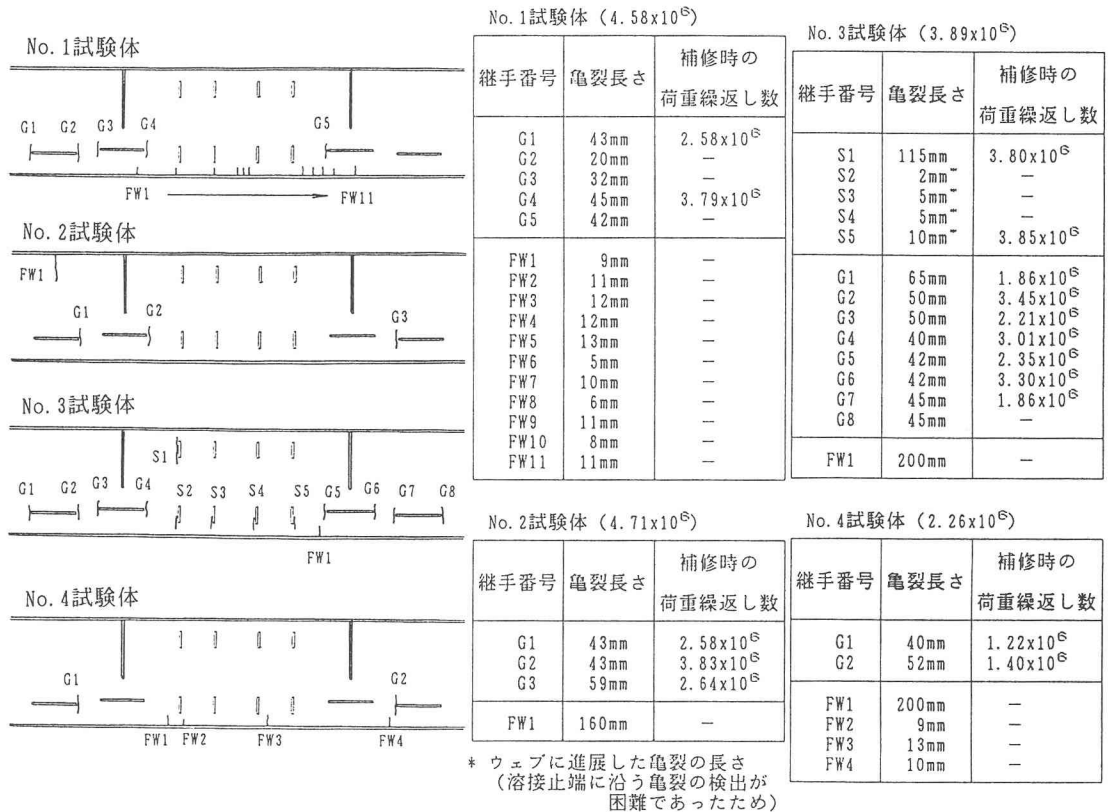


図2 各試験体に生じた疲労亀裂(試験終了時)

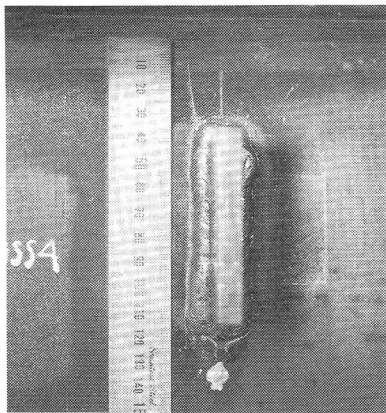


写真3 垂直補剛材溶接部に生じた疲労亀裂

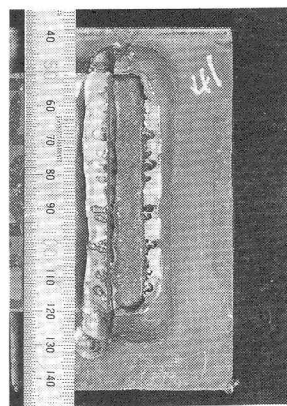


写真4 垂直補剛材溶接部のブローホール

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

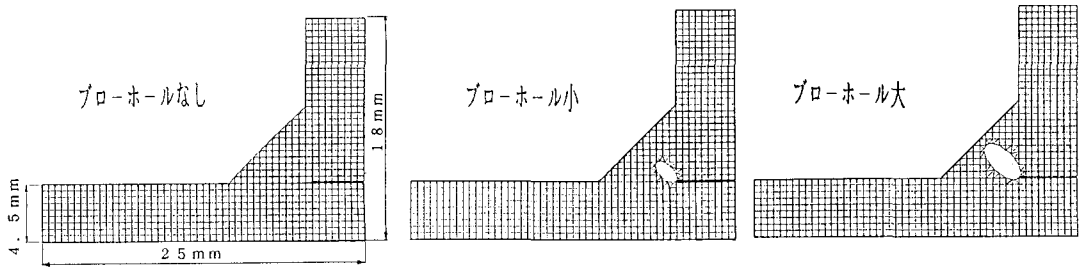


図4 解析モデル

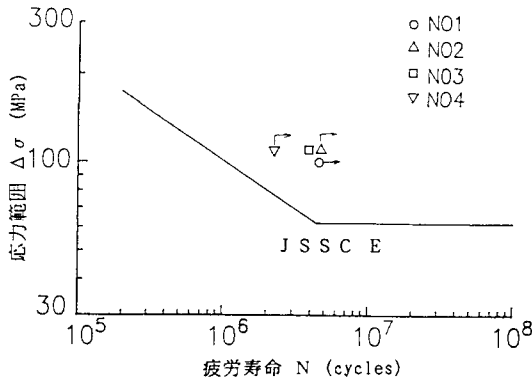


図3 垂直補剛材溶接部の疲労強度

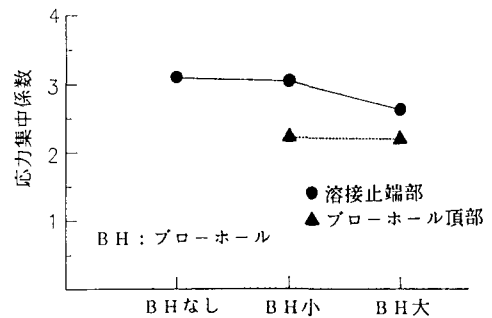


図5 溶接止端部の応力集中に及ぼす
ルートブローホールの影響

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、

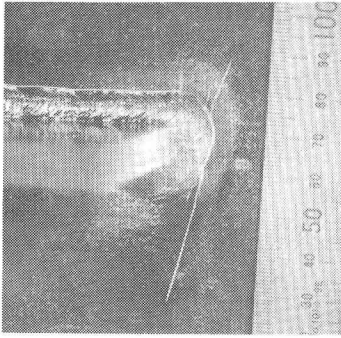


写真5 面外ガセット溶接部に生じた疲労亀裂

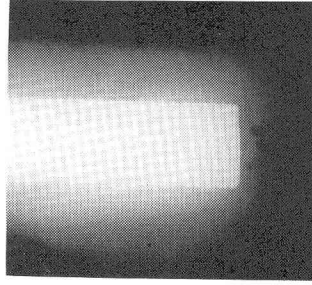


写真6 面外ガセット溶接部のX線写真

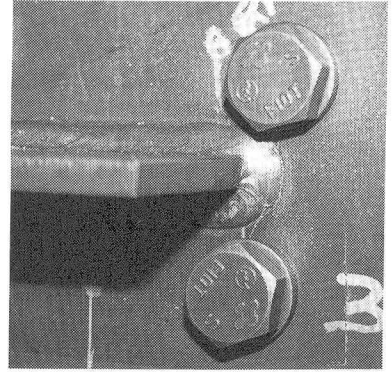


写真7 面外ガセット溶接部に生じた疲労亀裂の補修

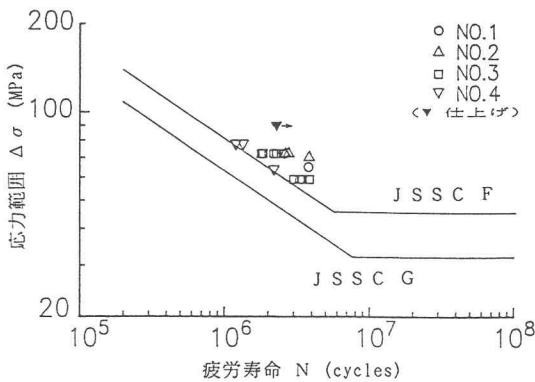


図6 面外ガセット溶接部の疲労強度

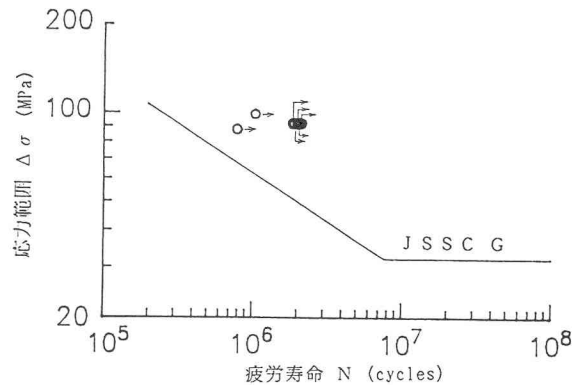


図7 疲労亀裂を補修した面外ガセット溶接部の疲労強度

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で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中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

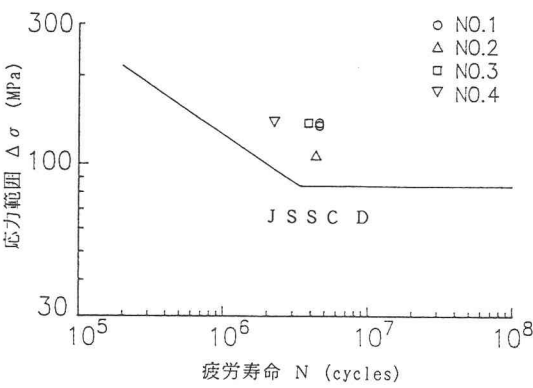


図8 首溶接部の疲労強度

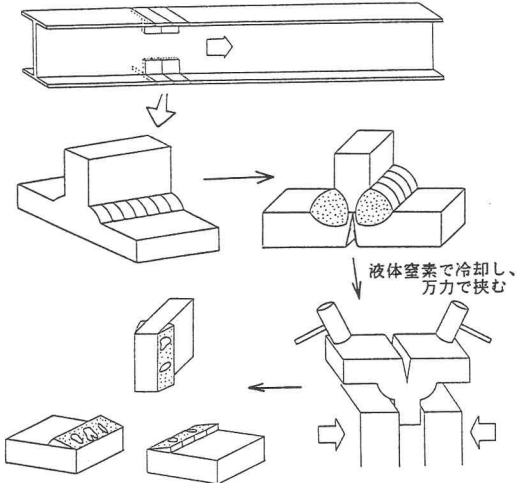


図9 首溶接部の解体手順

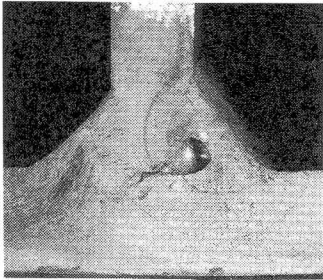
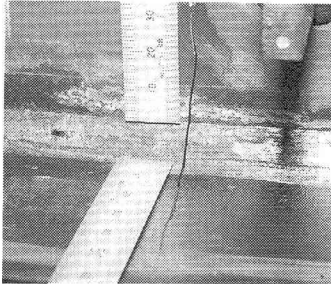


写真8 首溶接部のブローホールから生じた疲労亀裂（破面）

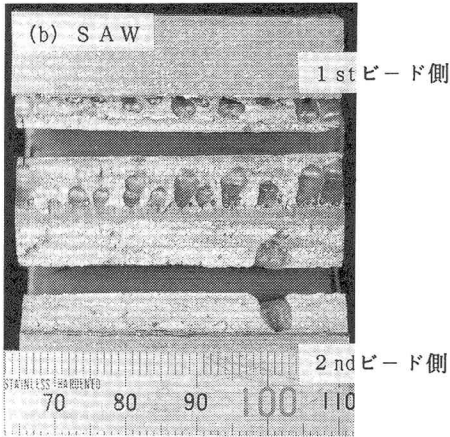
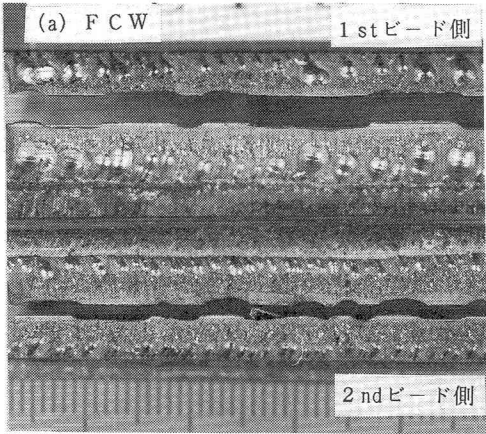


写真9 首溶接部のブローホールと疲労亀裂

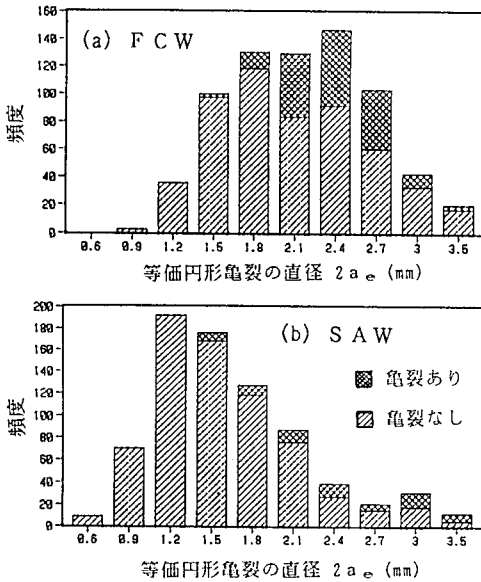


図10 首溶接部のブローホール寸法の頻度分布

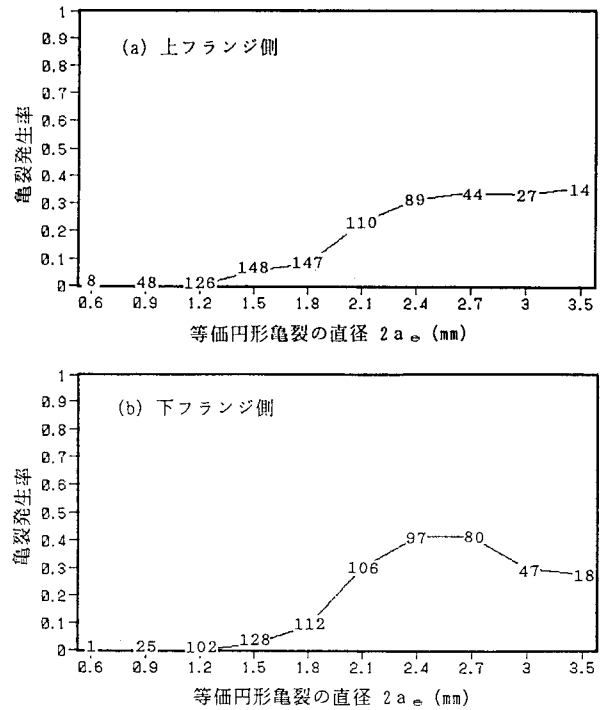


図11 ブローホールからの疲労亀裂発生率

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にする目的で、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ではなく、J S S C 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ではなく、J S S C 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 J S S C 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 東京鉄橋橋梁）、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, pp.27～40, 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)