

塗装鋼板のすみ肉溶接施工試験および十字継手の引張強度と疲労強度

WELDING QUALIFICATION TESTS ON PRE-PRIMED STEEL PLATES AND
TENSILE AND FATIGUE STRENGTH OF CRUCIFORM FILLET WELDED JOINTS森 猛^{*}、吉本 秀一^{**}、林 俊一^{***}、三木 千寿^{****}

By Takeshi MORI, Shuichi YOSHIMOTO, Toshikazu HAYASHI, Chitoshi MIKI

Pre-primed steel plates are widely used in fabrication of steel bridge members, because the pre-primed plates are protected against corrosion in a period of the fabrication. In case of welding the pre-primed plates, blowholes often occur at the roots of fillet welds. With the objective of making clear the properties of the blowhole, a series of fillet weldings are performed by using four welding procedures and three types of primer. Furthermore, an influence of root blowholes on static tensile strength and fatigue strength is discussed through tensile and fatigue tests on load carrying fillet welded joints.

Key Words : primer, blowhole, load carrying fillet welded joint, tensile strength, fatigue strength

1. はじめに

鋼橋の塗装のための素地調整は、原鋼板をショットブラストによりケレンしてプライマーを塗装する方法、いわゆる塗装鋼板を用いる方法と、原鋼板のままで製作した部材をショットブラストしてプライマーを塗装する方法とに大別される。前者の方法が鋼橋の製作に定着し始めたのは1960年代からであり、これは鋼板保管時および部材製作時の腐食の防止および素地調整のためのケレンの完全化とそれに伴う素地調整費の軽減を狙ったものであった。これらに加えて、塗装鋼板を用いることにより、鋼材の表面の欠陥を早期に発見して補修することができる、鋼板のマーキングが消えにくく見やすい、鋼板取扱い時に作業服が汚れにくいなどの利点もあることから、現在では鋼橋の製作で使用される鋼板の約75%が塗装鋼板であるとの調査結果¹⁾もある。一方、塗装鋼板の使用上の問題点として、高力ボルト摩擦接合面としては摩擦係数が不足するためプライマーを除去しなければならない、プライマーを除去する際に粉塵が発生し作業環境が悪化するなどが挙げられている。特に、プライマー付きのままですみ肉溶接を行なうと溶接部にピットやブローホール、ガス溝などの気孔が生じやすいことが問題とされている。

道路橋示方書には「溶接を行なおうする部分には、黒皮、錆、塗料、油などがあってはならない。」と規定されており²⁾、その解説には「溶接線近傍の黒皮、錆、塗料、油などはブローホールや割れの発生原因となる。………」と述べられている²⁾。そのため、鋼橋部材の製作においては、すみ肉溶接を行なう前に溶

* 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)

** 川崎重工業(株) 袖ヶ浦工場工作課 (〒299-02 千葉県袖ヶ浦市南袖 50-1)

*** 川鉄鉄構工業(株) 千葉工場技術部技術室 (〒260 千葉市中央区新浜町 1)

**** 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)

接線近傍のプライマーを除去するなどの対策が施されることが多い。しかし、作業環境の改善、作業の省力化や溶接の自動化・高速化・ロボット化の推進などの理由で、プライマーを除去せずに溶接することが望まれている。そのためには、プライマーの種類や膜厚および溶接方法やその条件を考慮した上で塗装鋼板を溶接した場合にどの程度のブローホールやピットが生じるのか、またそのような継手でどの程度の強度が確保できるのかを明らかにする必要がある。

本研究では、代表的なプライマーである長ばく型エッチングプライマー、無機ジंकリッチプライマー、低ジंकリッチプライマーを塗装した鋼板に対して、手溶接、サブマージアーク溶接、CO₂溶接、マイクロサブマージアーク溶接法によりすみ肉溶接を行ない、その際に生じるブローホールおよびピットを観察した。また、すみ肉溶接部に生じるブローホール等の気孔が直接大きな断面欠損となる荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の引張試験および疲労試験を行ない、ブローホールが静的引張強度および疲労強度に及ぼす影響について検討した。

表1 供試鋼材の機械的性質および化学成分

降伏点 (MPa)		引張強度 (MPa)	伸び (%)	
281		433	29	
C	Si	Mn	P	S
(x 100%)			(x 1000%)	
20	10	40	17	5

表2 溶接材料および溶接条件

溶接法	溶接材料	溶接条件
SMAW	JIS Z3212 D5016 (LB-52 5.0φ)	200A-26V-12cm/min
SAW	JIS Z3183 S501-H 相当 (US-36 4.0φ, MF-53 12X48)	650A-32V-60cm/min
FCW	JIS Z3313 YWF-24 (MX-200 1.2φ)	250A-30V-35cm/min (WP) 280A-32V-45cm/min (ZP, LZP)
MISA	JIS Z3183 S501-H 相当 (US-36 2.0φ, MF-53 8X48)	500A-38V-70cm/min

2. 溶接施工試験

2.1 供試鋼材および溶接方法

供試鋼材は板厚16mmのSS400である。その機械的性質および化学成分を表1に示す。この鋼板をショットブラストした後、その表面に目標膜厚を20μmとして長ばく型エッチングプライマー（以後ウォッシュプライマー、WPと呼ぶ、ビニレックス120アクチブプライマー）、無機ジंकリッチプライマー（ZP、ニッペジンキー1000P）あるいは低ジंकリッチプライマー（LZP、ニッペセラモ）を塗布した。なお、ブラスト後の平均の表面粗さは59Sであった。無機ジंकリッチプライマーについては、目標膜厚を15μmとした塗装鋼板も用意した。塗布した後、電磁式膜厚計で測定した各プライマーの平均厚さは、WPで20μm、ZPで20あるいは16μm、LZPで19μmであった。

これらの鋼板を所定の寸法にガス切断した後、図1に示すように組み立て、プライマー付きのまますみ肉溶接を行なった。なお、立板はガス切断後にプライマーを塗布し、そのコバ面に付着したプライマーはグラインダーで除去した。溶接方法としては、低水素系の溶接棒を用いた被覆アーク溶接法（以後SMAWと呼ぶ）、サブマージアーク溶接法（SAW）、フラックス入りワイヤーを用いた炭酸ガスアーク溶接法（FCW）、マイクロサブマージアーク溶接法（MISA）の4種類を用いた。膜厚16μmで無機ジंकリッチプライマーを塗布した鋼板は

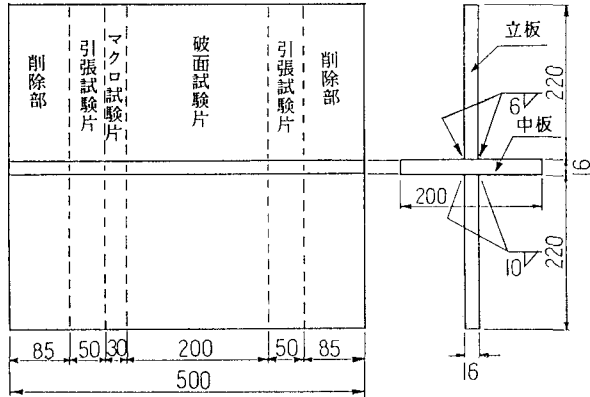


図1 溶接施工試験片

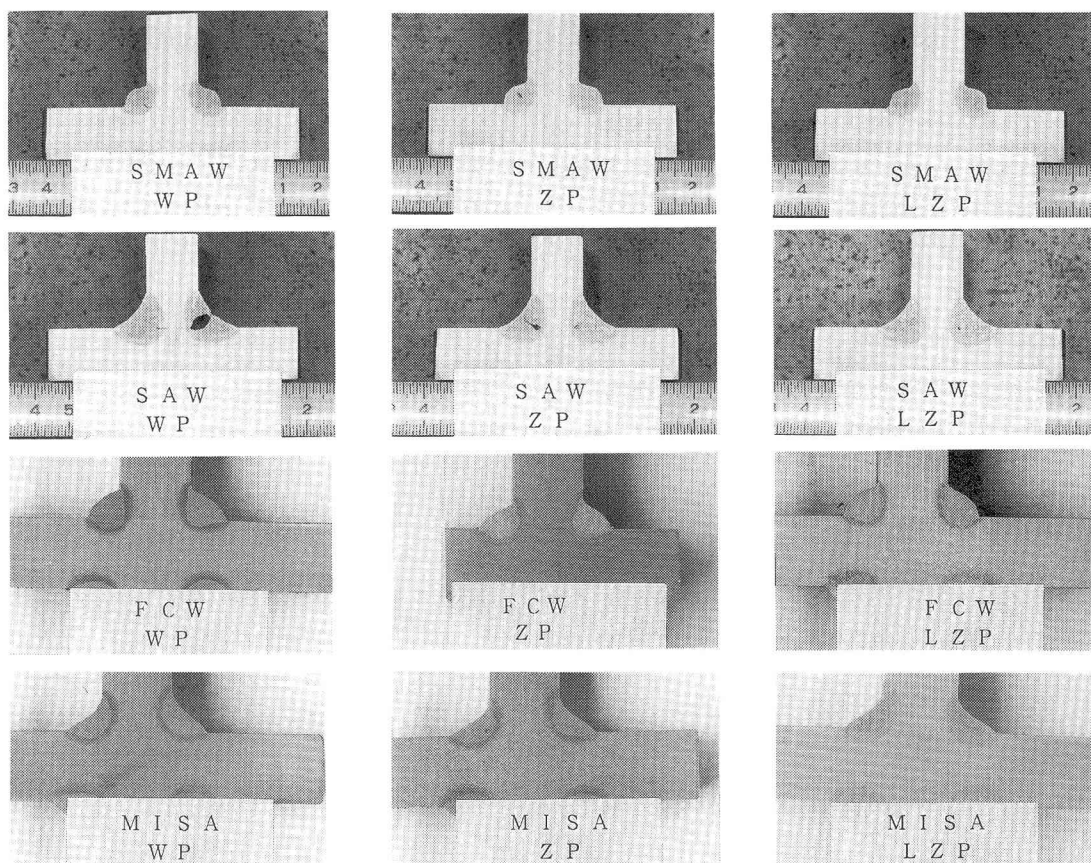


写真1 各溶接施工試験片の断面マクロ写真

FCW、膜厚 $20\mu\text{m}$ の鋼板は他の3種類の方法で溶接した。ウォッシュプライマーを塗装した鋼板および低ジंकリッチプライマーを塗装した鋼板については、4種類すべての方法で溶接を行なった。以上のようにプライマーと溶接法を組合せて、計12種類の試験片を製作した。各溶接方法で用いた溶接材料および溶接条件は表2に示す通りである。各溶接は、立板と中板を密着させた状態で図1に示す削除部に組立て溶接をした後、所定の条件で行なった。溶接姿勢はSAWで下向き、SMAW、FCWとMISAで水平とした。目標サイズは6mmである。下側の目標サイズ10mmの溶接は試験対象ではない（図1参照）。溶接終了後、図1に示すように試験片を切出し、マクロ試験、破面試験および引張試験を行なった。

2.2 試験結果

写真1に各溶接施工試験片での断面マクロを示す。溶接形状は、SMAWで凸、SAWで若干凹、FCWで若干凸、MISAではほぼフラットとなっている。また、溶込みはSAWで約3mmと最も深く、FCWで約1mm、SMAWとMISAではほぼ0となっている。以上のように、溶接形状や溶込みは溶接法ごとに異なっているが、プライマーの種類による差はない。WPおよびZP付き鋼板をSAWで溶接した試験片の断面マクロには、ブローホールが見られるが、その起点はルートであり、方向はのど厚方向となっている。他の種類の試験片に生じたブローホールにおいても同様であった。

写真2に各溶接施工試験片すみ肉溶接部のビード外観を示す。SMAWの溶接ビードには、プライマーの種類によらずピットは生じていない。WP付き鋼板にSAW、FCW、MISAで溶接した試験片のビード

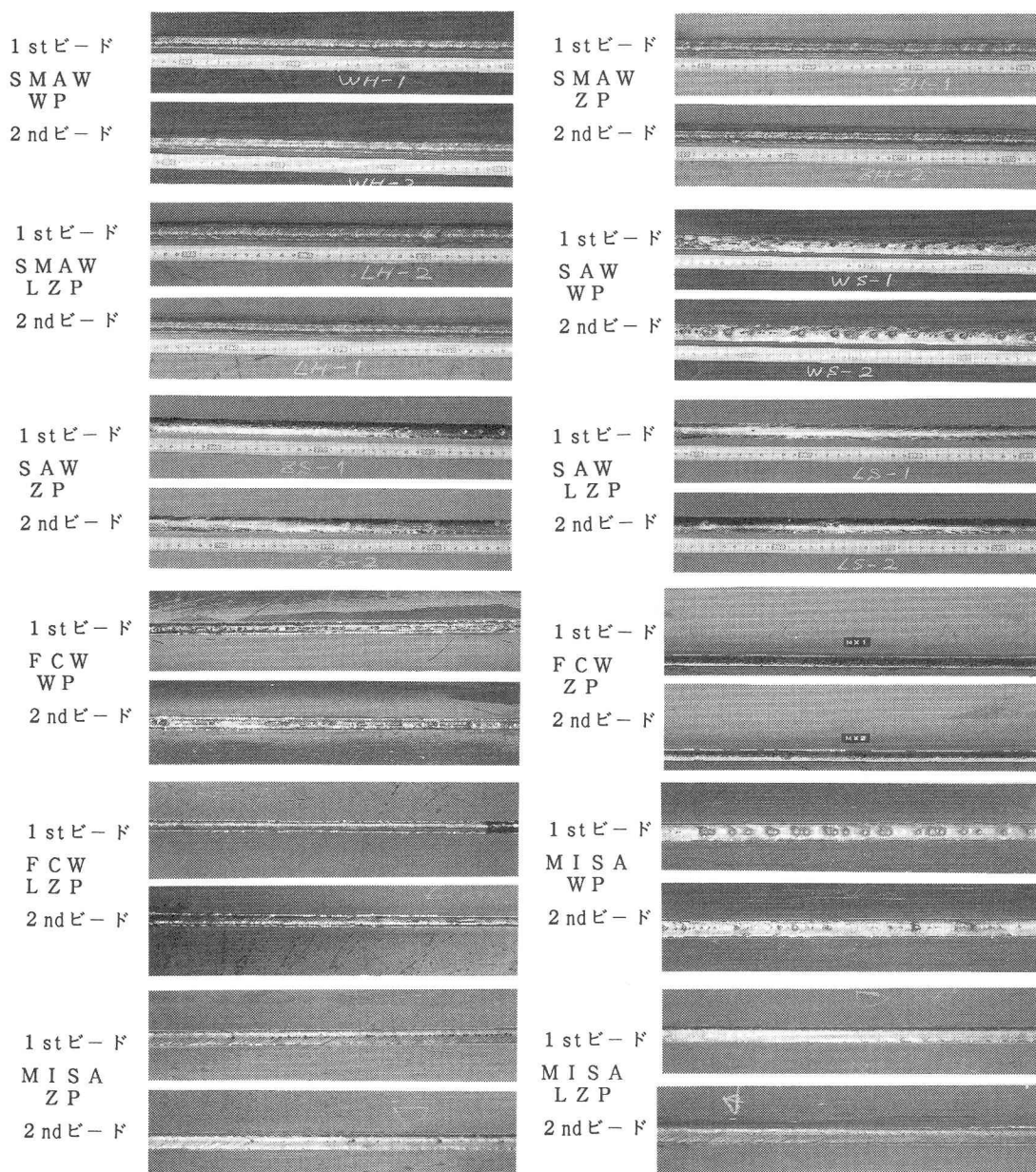


写真2 各溶接施工試験体の溶接ビード外観

には、1st側・2nd側によらず、著しいピットが生じており、FCWではビード表面が溝状に凹んだガス溝も生じている。表3に各試験片でのビード長さ100mm当たりのピット数を示す。溶接法、プライマーの種類ごとにピット数を比較すると、SAW、MISA、FCW、SMAWおよびWP、ZP、LZPの順となっている。

破面試験を行なうことにより露呈したすみ肉溶接部の状況を写真3に示す。各試験片とも、ルート部にブローホールが生じている。これらのブローホールによるすみ肉溶接のど断面積の欠損率、すなわち破面に占めるブローホール面積の割合をブローホール面積率と定義し、それぞれの試験片で測定したブローホール面

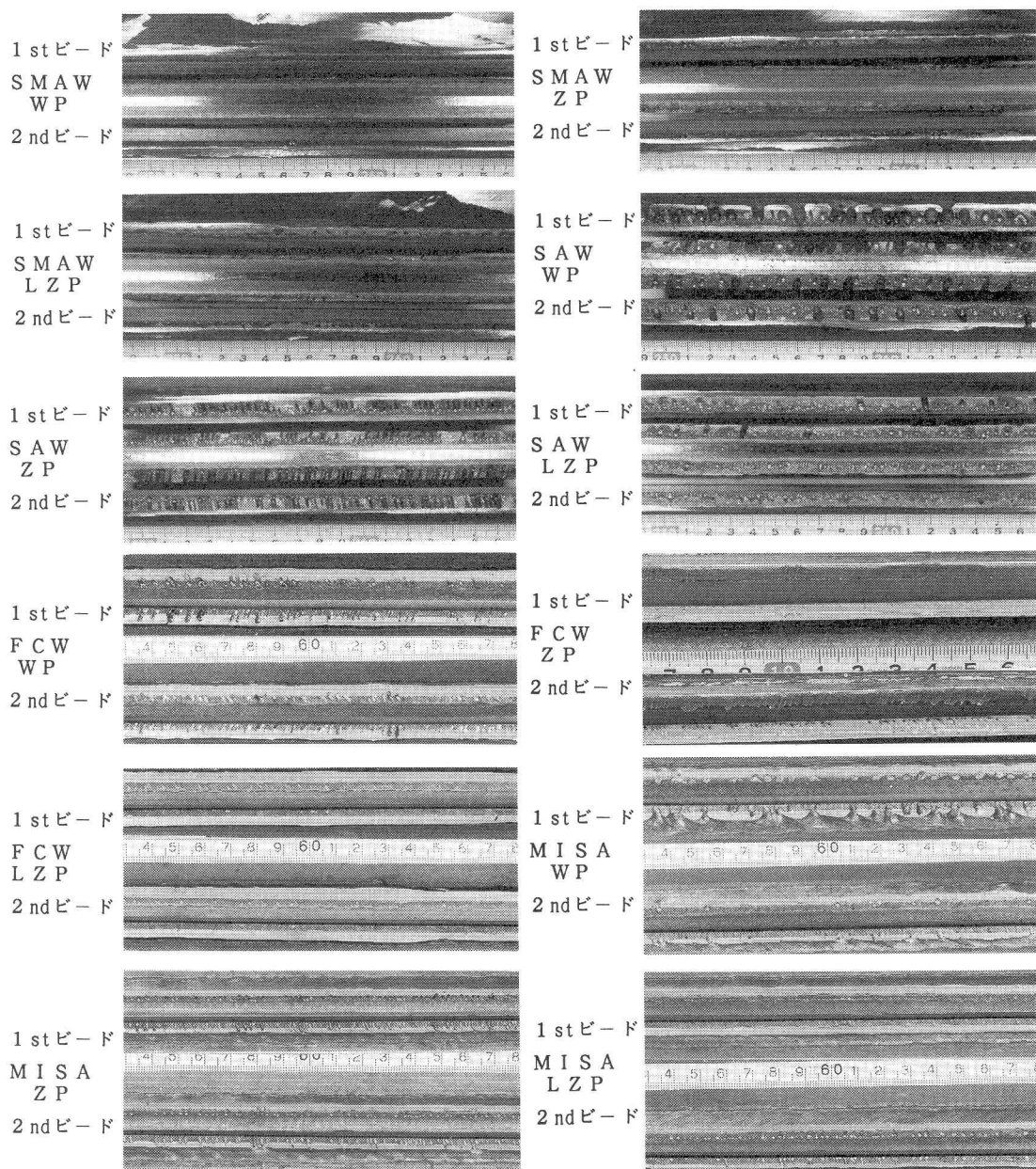


写真3 各溶接施工試験体の溶接暴露面

積率を表4に示す。なお、ブローホールの面積は、それを楕円形と見なすことにより求めた。すなわち、ブローホールの短径Wおよび長径Hを測定し、 $\pi \cdot W \cdot H$ より求めた。溶接法、プライマーの種類ごとに比較したブローホール面積率の順序はピット数の場合と同じである。ブローホール面積率とピット数の関係を図2に示す。ブローホール面積率は、溶接法やプライマーの種類によらず、ピット数が多くなるにしたがって高くなっている。したがって、ピット数より実質のすみ肉溶接のど断面積が推定可能と言える。また、図2より判断してピットが生じない場合のブローホール面積率の上限は10～15%程度となっている。道路橋示方

表3 ピット発生数 (個/100mm)

溶接法	W P		Z P		L Z P	
	1stt'-ト'	2ndt'-ト'	1stt'-ト'	2ndt'-ト'	1stt'-ト'	2ndt'-ト'
SMAW	0	0	0	0	0	0
SAW	13	26.5	21.5	6.5	1.0	3.0
FCW	10.5	5.6	0	0	0	1.0
MISA	6.8	11.4	16.0	7.4	0	0.4

表4 ブローホール面積率(%)

溶接法	W P	Z P	L Z P
SMAW	1.8	6.7	4.2
SAW	44.1	31.7	12.5
FCW	19.8	5.0	12.0
MISA	30.0	25.2	17.0

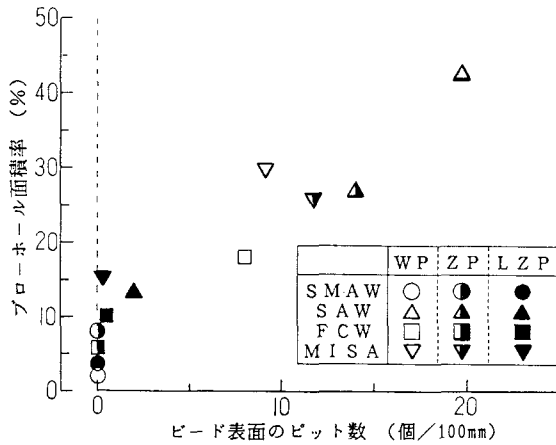


図2 ブローホール面積率とピット数の関係

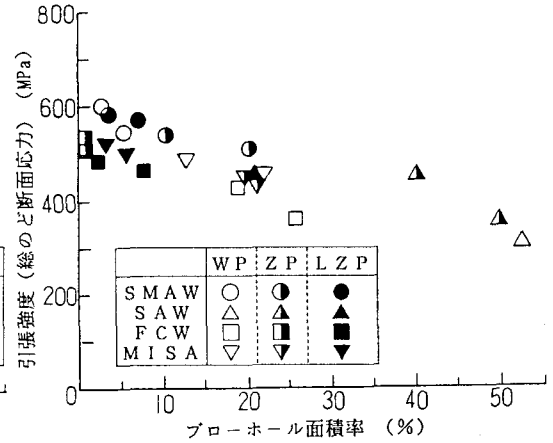


図3 引張強度（総のど断面積で整理）

書²⁾ではすみ肉溶接のピットに対して、「……、1継手につき3個、または継手長さ1mにつき3個までを許容するものとする。……」と規定されている。これは、図2においてほぼピットなしに対応し、その際のブローホール面積率の上限としては20%が目安になると言えよう。

3. 静的引張試験

図1に示したように試験片を切出し、万能試験機を用いて引張試験を行なった。破壊はいずれ試験片においても試験部である目標サイズ6mmのすみ肉溶接部で生じた。引張破壊の状況を写真4に示す。破断面は中板に対して45度の角度、すなわちのど厚方向となっている。

各試験片の引張試験における最大荷重を総のど断面積（ブローホールによる断面欠損を考慮しないのど断面積）で除すことにより引張強度を求めた。総のど断面積の計算は、疲労強度を整理するために提案されている(1)式に従った³⁾。

$$\text{総のど断面積} = 2 \times (\text{溶込み深さ} + \text{サイズ}) / \sqrt{2} \times \text{板幅} \quad (1)$$

このようなど断面積の求め方は日本鋼構造協会『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』⁴⁾でも用いられている。また、各試験片でのブローホール面積率を破面試験と同様に求めた。総のど断面積で整理した引張強度とブローホール面積率との関係を図3に示す。いずれの溶接方法の継手においても、引張強度はブローホール面積率が高くなるにしたがって低下している。

図4は、ブローホールによる断面欠損を考慮した純のど断面積に基づき計算した引張強度とブローホール

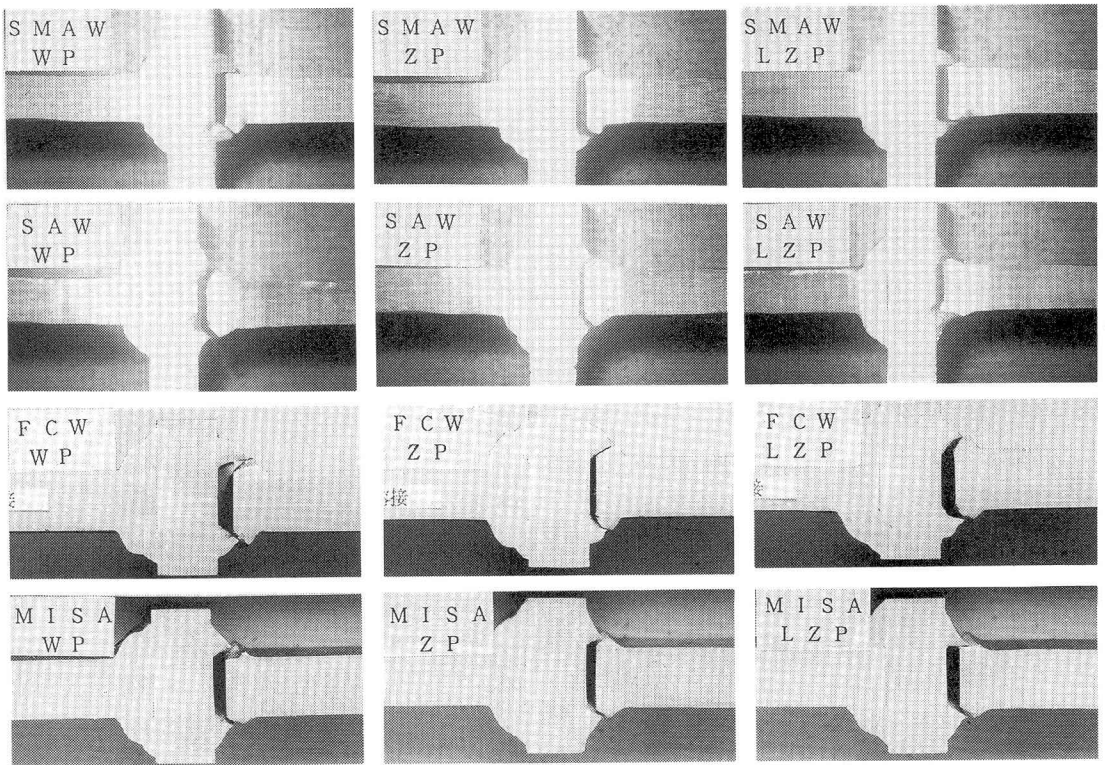


写真4 引張破壊の状況

面積率の関係を示している。純のど断面積は(2)式より算出した。

$$\text{純のど断面積} = \text{総のど断面積} \times (1 - \text{ブローホール面積率}) \quad (2)$$

引張強度は、溶接方法により異なっている。しかし、溶接方法ごとにみれば、S A Wでの引張強度がブローホール面積率の大きい領域で若干高くなっているものの、SMAW、FCW、MISAでの引張強度はブローホール面積率によらずほぼ一定となっている。したがって、ブローホールによる引張強度の低下の程度はブローホール面積率程度であると言えよう。

4. 疲労試験

4.1 試験方法

疲労試験には、ウォッシュプライマー (WP) 付き鋼板に手溶接 (SMAW) あるいは炭酸ガスアーク溶接 (FCW) を行なった試験片を用いた。供試鋼板、溶接条件などは表1および表2に示した通りである。また、比較のためにプライマーをグラインダーで除去した状態で溶接した試験片も

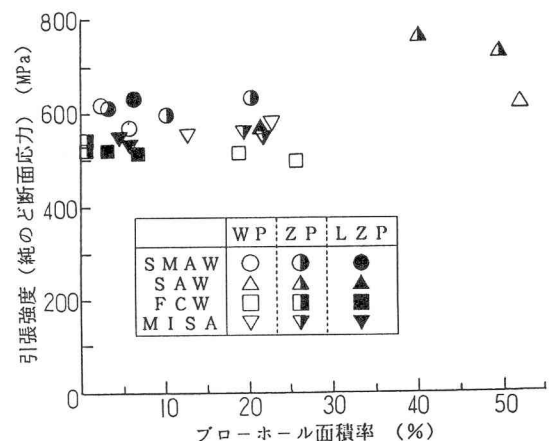


図4 引張強度 (純のど断面積で整理)

疲労試験に供した。試験片の形状および寸法を図5に示す。ここでは、手溶接でプライマー付きのまま溶接した試験片をS P試験片、プライマーを除去して溶接した試験片をS G試験片と呼ぶ。F C Wで溶接した試験片についても同様にF P試験片、F G試験片と呼ぶ。

疲労試験は動的能力100kNの電気油圧サーボ式材料試験機を用いて、片振り引張荷重下で行なった。その際、試験片のルート部近傍に生じる圧縮残留応力の影響を去除く目的で、のど断面での最大応力が200～240MPaとなるような条件で繰返し载荷を行なっている。なお、このような試験条件で圧縮残留応力の影響が生じないこと、すなわち未溶着部および疲労亀裂の閉口が生じないことは、未溶着部を挟んだ2点間の変位と荷重の関係を調べるにより確かめている。一部の試験片については、疲労亀裂の発生・進展性状を調べる目的で、上限荷重を一定としたまま所定の応力繰返し数(ΔN)ごとに下限荷重を変化させ、荷重範囲を半減するピーチマーク試験を行なった。

4.2 試験結果

疲労試験に用いた4種類の試験片の疲労破断面の例を写真5に示す。疲労亀裂はすべて未溶着部先端から生じ、溶接部を進展して破断に至っている。プライマーを除去して溶接したS G、F G試験片にブローホールはない。プライマー付きのままで炭酸ガスアーク溶接を行なったF P試験片には、大きなブローホールが多数存在しており、表面に開口したピットも少なくない。平均のブローホール面積率は45%であった。F P試験片に比べて、プライマー付きのままで手溶接を行なったS P試験片でのブローホール面積率は低く、最大で2.5%、平均で1.4%であった。

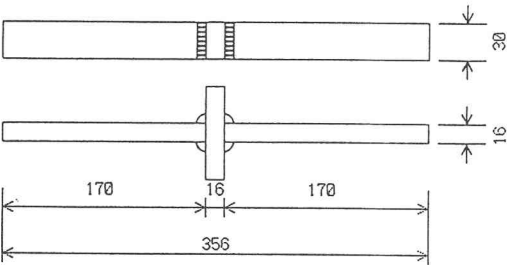


図5 疲労試験体

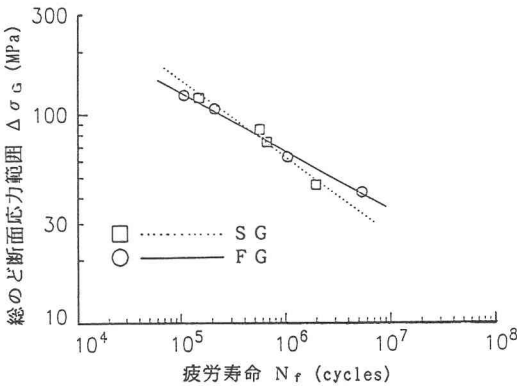


図6 疲労強度に及ぼす溶接法の影響

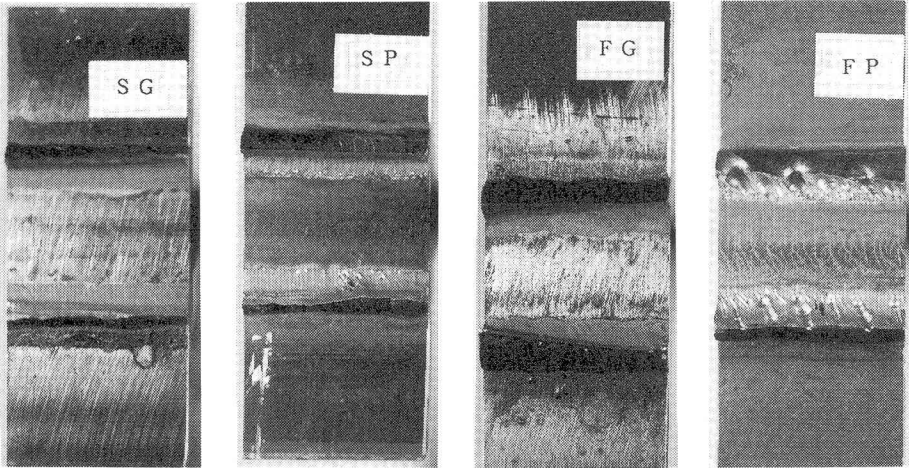


写真5 疲労破面

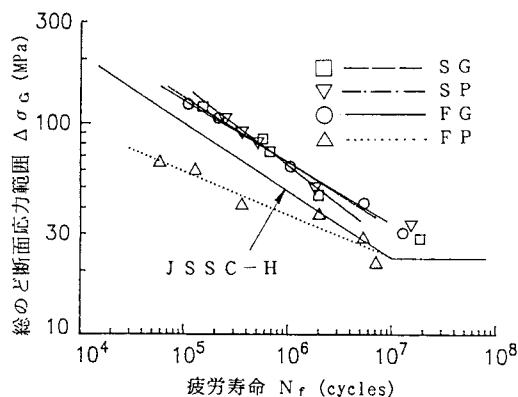


図7 疲労強度（総のど断面積で整理）

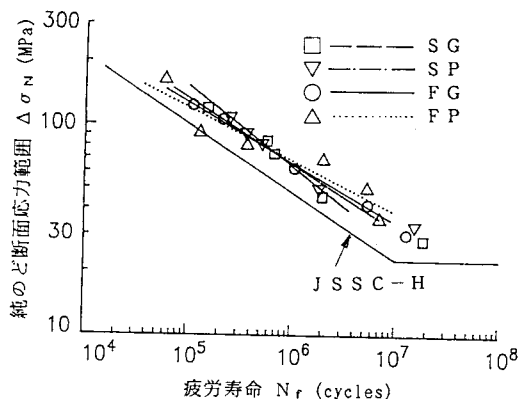


図8 疲労強度（純のど断面積で整理）

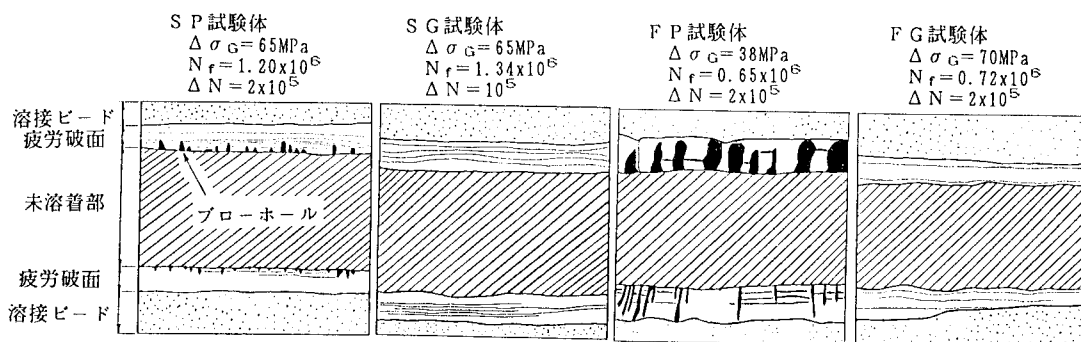


図9 ビーチマークの観察図

図6にブローホールの生じなかったS G試験片とF G試験片の疲労試験結果を示す。図の縦軸は荷重範囲を総のど断面積で除した応力範囲（総のど断面応力範囲） $\Delta\sigma_G$ であり、横軸は試験片が破断するまでの応力繰返し数（疲労寿命） N_f である。ただし、ビーチマーク試験を行なった試験片の疲労寿命に応力範囲を半減した際の繰返し数は含めていない。総のど断面積の求め方は3章で示した通りである³³⁾。図中の点線および実線は、それぞれS G試験片とF G試験片に対して求めた疲労寿命に対する応力範囲の回帰直線である。S G試験片とF G試験片の応力範囲－疲労寿命関係はほぼ一致しており、溶接法による疲労強度の差はないと言える。

すべての種類の試験片について、総のど断面応力範囲 $\Delta\sigma_G$ で整理した疲労試験結果を図7に示す。図中に示す折れ線は、日本鋼構造協会の『鋼構造物の疲労設計指針・同解説』⁴⁾（以後、J S S C指針と呼ぶ）で荷重伝達型十字すみ肉溶接継手（ルート破壊）に対して規定されている疲労設計曲線（強度等級H）である。ブローホール面積率が平均で1.4%と低いS P試験片の疲労強度は、ブローホールのないS G、F G試験片とはほぼ同じとなっている。それらに比べて、ブローホール面積率が平均で45%と高いF P試験片の疲労強度は非常に低く、J S S C指針のH等級も満たしていない。

ブローホールが著しい場合に疲労強度が低下する原因としては、ブローホールにより実際ののど断面積が減少すること、鋭い応力集中源である未溶着部先端にブローホールによる応力集中が重畳すること、の2つが考えられる。純のど断面積で整理した応力範囲（純のど断面応力範囲） $\Delta\sigma_N$ と疲労寿命 N_f の関係を図8に示す。純のど断面積の求め方は3章で示した通りである。すべての種類の試験片で疲労強度は同程度となっており、ブローホール面積率の高いF P試験片でもJ S S C指針・H等級の疲労設計曲線を満足している。

したがって、ブローホールによって疲労強度が低下する原因は主として断面積が減少することにあると考えられる。

図9にビーチマーク試験を行なった試験片の破面の観察図を示す。ブローホールのないSG、FG試験片での疲労亀裂は未溶着部先端から生じており、若干波状となっている未溶着部先端と平行にほぼ一様に進展し、亀裂が大きくなるにしたがって亀裂先端は直線的となっている。ブローホールを含むSP、FP試験片においても、疲労亀裂の発生・進展性状はSG・FG試験片と同じであり、疲労亀裂がブローホール内あるいはブローホールと未溶着部先端との隅角部から生じることはない。このことから、ブローホールによって疲労強度が低下する原因はブローホールによる断面積の減少にあると言える。

5. まとめ

長ばく型エッチングプライマー、無機ジンクリッチプライマー、低ジンクリッチプライマーを塗装した鋼板に対して、手溶接、サブマージアーク溶接、CO₂溶接、マイクロサブマージアーク溶接法によりすみ肉溶接を行ない、その際に生じるブローホールを観察した。また、荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の引張試験および疲労試験を行ない、ブローホールが静的引張強度および疲労強度に及ぼす影響について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) ブローホールおよびピットの発生は、長ばく型エッチングプライマー、無機ジンクリッチプライマー、低ジンクリッチプライマーの順で、またサブマージアーク溶接、マイクロサブマージアーク溶接、CO₂溶接、手溶接の順で著しい。
- (2) 手溶接ではいずれのプライマーにおいてもピットは生じなかった。ピットが生じない場合に、ブローホールがすみ肉溶接のど断面に占める割合は最大で20%程度と推定される。
- (3) ブローホールによりすみ肉溶接部の引張強度は低下するが、その程度はブローホールが溶接のど断面に占める割合程度である。
- (4) ルート部にブローホールを含む荷重伝達型十字すみ肉溶接継手の疲労強度は、ブローホールによる減少を考慮した実際のど断面に基づく応力範囲を用いれば、ブローホールのない継手と同程度である。

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。疲労試験の実施および試験結果の整理には、法政大学4年生であった安藤英樹（現 日本道路）、飯島大介（現 住友建設）の両氏に協力頂いた。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 日本溶接協会平成3年度共研第5分科会報告：フラックス入りワイヤによるすみ肉溶接での気孔に関する研究、1992。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ 共通編、Ⅱ 鋼橋編）、p.372, 丸善、1990。
- 3) 森猛、貝沼重信、三木千寿：荷重伝達型十字すみ肉溶接溶接継手ルート破壊の疲労強度解析、構造工学論文集、Vol.39A, pp.937～946, 1993。
- 4) 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。

（1993年 9月16日受付け）