

# 高張力鋼すみ肉溶接継手部の疲労強度の 溶接材料依存性

館石和雄<sup>1</sup>・慶 甲秀<sup>2</sup>・町田文孝<sup>3</sup>・三木千寿<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東京工業大学講師 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>2</sup>学生会員 工修 東京工業大学博士課程 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>3</sup>正会員 東京工業大学研究生 (川田工業(株)中央研究所) (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>4</sup>フェロー 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)

高張力鋼すみ肉溶接継手部の疲労強度の向上を目的として、溶接材料の工夫や溶接後処理を施した試験体を製作し、疲労試験を行った。その結果、本溶接後に少ない入熱量で付加溶接を行う、いわゆる化粧溶接を行った場合には、TIG処理と同等の高い疲労強度向上効果が得られること、軟質溶接、止端改良溶接棒の適用では疲労強度の向上効果はないことが明らかとなった。これらの原因について、溶接止端形状、残留応力から考察を加えた。

**Keywords:** fatigue, welded joint, high strength steel, toe profile, residual stress, hardness

## 1. はじめに

最近の大型モデルによる疲労試験では、高強度鋼を用いた溶接継手の疲労強度が軟鋼材のそれよりも低くなる傾向が認められている<sup>1)~5)</sup>。すなわち、大型構造物の溶接継手部では、鋼材の引張強度の増加に伴って疲労強度が低下する、逆の強度依存性が存在する可能性がある。長大橋の建設には高強度鋼の使用が不可欠であることから、高強度鋼の溶接継手の疲労強度の向上は極めて重要であり、高強度鋼溶接継手部の疲労強度を軟鋼材のそれと同等あるいはそれ以上とすることが望まれる。

溶接継手部の疲労強度を向上させるためには、1) 応力集中を下げる、2) 引張残留応力を低減する、3) 割れが生じない範囲内で硬度を上げる、という3つの条件のいずれかを満たすのが効果的である<sup>6)</sup>。これらを実現するための手法として、応力集中の低減に効果があり疲労強度向上法として最も一般的に用いられているグラインダー処理や、残留応力を引張から圧縮にかえることのできるピーニング処理、応力集中の低減と硬化を実現することができるTIG処理などが考えられてきた。いずれの手法についても疲労強度改善効果が認められており、特にTIG処理が疲労強度向上効果、実構造物への適用性ともに優れているといわれ<sup>7)</sup>、すでに多数の施工例がある。また高張力鋼においてもその効果が認められている。

本研究は過去に検討されてきたこれらの疲労強度改善方法とは異なるアプローチとして、溶接材料そのも

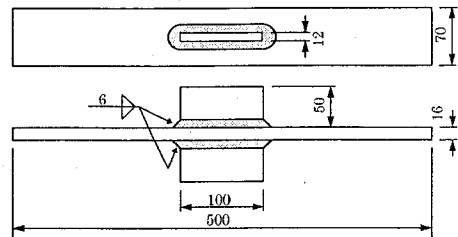


図-1 試験体

の工夫を加えることによる疲労強度改善の可能性について検討したものである。溶接材料を工夫するのみでTIG処理と同等の疲労強度向上効果が得られれば、通常の製作ラインによって疲労抵抗性の高い溶接継手をつくることが可能となり、高強度鋼溶接継手部の疲労強度における逆の材料依存性に対して極めて簡易なかつ効果的な対策となる。

## 2. 試験体

供試材は表-1に示すSM570材である。図-1に試験体の形状、寸法を示す。表-2に溶接方法の一覧を、表-3に使用した溶接材料の機械的性質および化学成分を示す。TIG処理、化粧溶接による入熱を除けば入熱量は

表-1 鋼材の機械的性質・化学成分

	機械的性質			化学成分							
	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)	C (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	V (%)
SM570	629	684	34	0.12	0.25	0.017	0.003	0.02	0.02	0.06	0.04

表-2 溶接方法一覧

Type	溶接方法	溶接棒 型式	棒径 (mm)	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/分)	入熱量 (kJ/cm)
A	低水素系溶接棒による溶接	L-60G	6	310	25	35	13.3
B	ソリッドワイヤーによる CO <sub>2</sub> 溶接	MG-60	1.2	280	36	45	13.4
C	フラックス入りワイヤーに よるCO <sub>2</sub> 溶接	DW-60	1.2	270	36	45	13.0
D	軟質溶接棒による溶接	LTB50A	6	300	25	35	12.9
E	低水素系溶接棒による溶接後 止端部を化粧溶接	L-60G B-14	6 3.2	310 170	25 23	35 60	13.3 3.9
F	低水素系溶接棒による溶接後 止端部をTIG処理	—	2.4	120	24	38	4.5
G	止端改良棒による溶接	LBF-62A	6	310	25	35	13.3

表-3 溶接材料の機械的性質, 化学成分

溶接棒型式	機械的性質				化学成分					
	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	C.V.N. (J)	EL. (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Mo (%)
L-60G	530	630	120	30	0.06	0.78	1.04	-	-	0.28
MG-60	570	670	150	28	0.08	0.51	1.39	0.012	0.009	0.29
DW-60	560	620	72	27	0.05	0.33	1.13	0.014	0.008	0.21
LTB-50A	450	530	90	29	0.08	0.10	0.34	0.017	0.008	0.38
B-14	400	460	110	32	0.10	0.10	0.43	0.017	0.008	0.26
LBF-62A	600	660	110	27	0.09	0.43	1.29	0.015	0.007	0.12

いずれの試験体ともほぼ同一である。各タイプについて5体づつ試験を行った。TypeA,B,Cは通常用いられる3種類の溶接方法により溶接を行ったものであるが、TypeCのフラックス入りワイヤーによる低水素溶接は既往の研究<sup>8)</sup>で疲労限が高くなる傾向が認められている。TypeD~Gは疲労強度向上を目的として特殊な工夫を施した試験体である。TypeDでは通常のものよりも低い降伏強度、引張強度を有する溶接材料を用いた、いわゆる軟質溶接を行った。軟質溶接とすることにより応力集中部での弾塑性挙動が通常とは異なり、またそれに伴って残留応力の発生性状も異なると考えられることから、疲労強度が向上する可能性がある。TypeEでは低水素溶接棒による溶接後、溶接止端部に付加溶接を施しており、これは残留応力の再分配および止端形状の改良による応力集中の緩和をねらったものである。TypeFは低水素溶接棒による溶接後止端部にTIG処理を行ったものである。TIG処理の効果は高いことがすでに明らかとなっているが、他の試験体との比較を行うために用意した。TypeGは疲労強度改善を目的として

しばしば用いられている止端改良棒を用いた溶接を行ない、応力集中の緩和をねらったものである。図-2に各試験体の溶接止端部のマクロ的形状を示す。TypeE~Gでは滑らかな形状となっており、試験体製作上の目的は達成できている。

### 3. 試験方法

疲労試験に先立ってすべての試験体の溶接止端形状の測定を行った。測定は歯科用印象材を用いて止端形状の型を採取し、それを約1mmの厚さに切断した後、拡大投影機により10倍に拡大して行った。測定を行った範囲は図-3に示すように、回し溶接に沿った止端部である。

疲労試験は最大能力±300kNの油圧サーボ式疲労試験機により行った。最小荷重は10kNとし、最大荷重は疲労寿命が10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup>回のいわゆる長寿命領域となるように決定した。疲労き裂が発生しなかったものについては10<sup>7</sup>回で試験を打ちきり、応力振幅を増加させて再

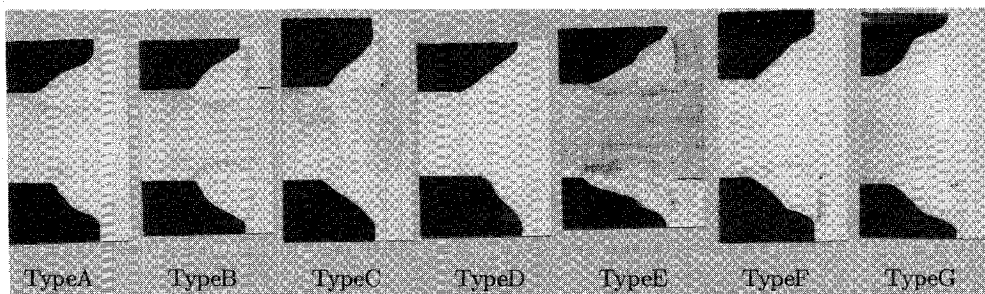


図-2 止端部マクロ形状

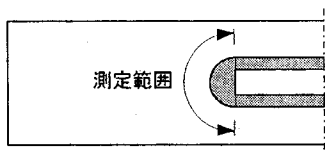


図-3 止端形状測定範囲

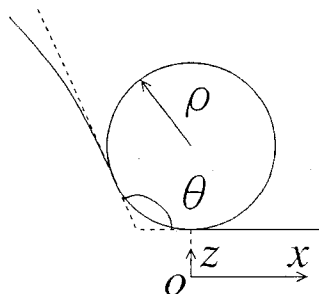


図-4 止端形状パラメータ

試験を行なった。疲労き裂面にビーチマークを残すため、所定の回数ごとに最大荷重一定で荷重範囲を半減させている。

疲労試験終了後、疲労き裂の生じていない側の回し溶接止端部近傍にひずみゲージを貼付し、切断法により残留応力の測定を行った。

#### 4. 溶接止端部の微視的形狀と応力集中

従来からの研究<sup>9)10)</sup>と同様に、止端形状を表わすパラメータとして止端半径 $\rho$ と止端角 $\theta$ に着目し(図-4)、これらのパラメータと溶接止端部の応力集中との関係を解析的に検討した。本研究で対象とした試験体では、縦リブが存在することによる構造的な応力集中が大きいことから<sup>11)</sup>、解析は固体要素を用いた3次元FEM解析により行った。解析モデルを図-5に示す。まず試験体の対称性を考慮した1/8モデル(同図(a))により全体解析を行った。全体解析モデルの最小要素サイズは0.45mmであり、溶接止端半径はモデル化せず $\rho=0$ としている。その後、同図(b)に示す溶接止端部近傍の細部を取り出して詳細解析を行った。詳細解析の境界条件は、全体解析から求められた節点変位とした。詳細解析モデルの最小要素サイズは0.01mmである。解析ケースは $\rho$ を0.2~1.0mm、 $\theta$ を95~175deg.とした。

試験体表面での長手方向の応力分布の例を図-6-aに示す。ただし縦軸は公称応力で無次元化した応力集中係数で示している。止端から板厚の10%程度以上離れた

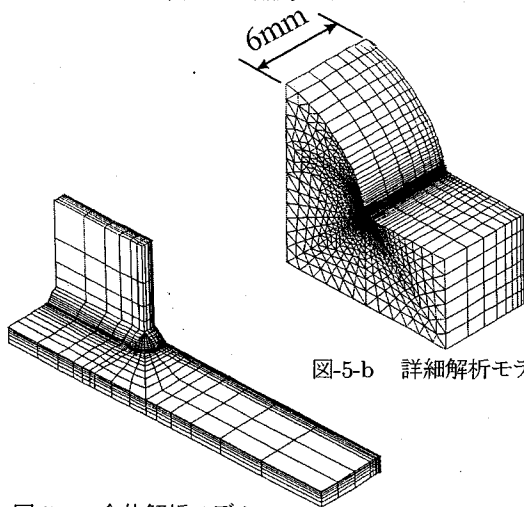


図-5-a 全体解析モデル

図-5-b 詳細解析モデル

図-5 有限要素モデル

領域では全体解析結果と詳細解析結果とはほぼ一致しており、また詳細解析モデルにおいて着目点から少し離れた位置では止端半径の差による影響がなくなっていることから、詳細解析モデルとして切りだした領域の大きさは適切であるといえる。

同図の止端近傍の範囲を拡大し、詳細解析結果のみを示したものが図-6-bである。なお、座標原点は図中に示すようにとった。止端半径は止端部での応力集中に非常に大きな影響を与え、止端半径が0.2mmから1.0mm

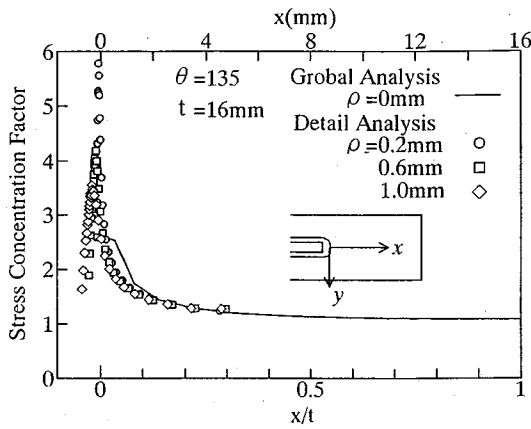


図-6-a 全体解析結果

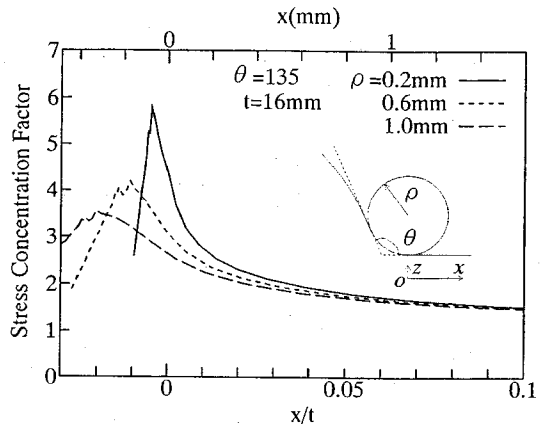


図-6-b 詳細解析結果

図-6 x軸上の応力分布

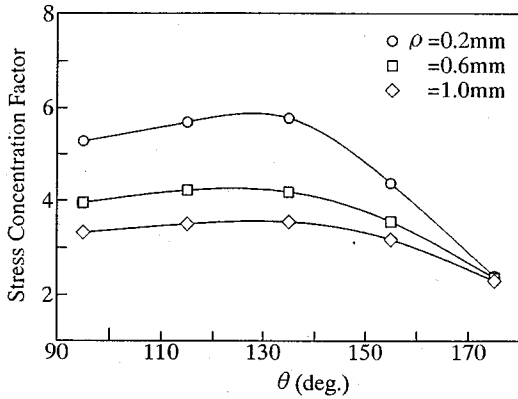


図-7 応力集中係数, Kt

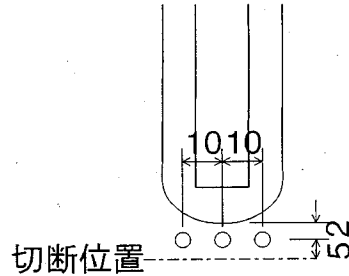


図-10 ゲージ位置

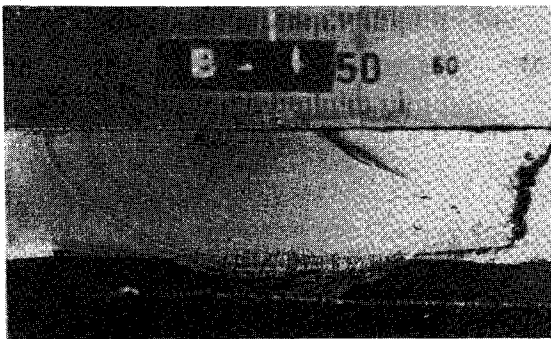


図-9 疲労破面

に増加することにより応力集中は6程度から3.5程度まで低下している。しかし溶接止端部近傍に発生する応力分布の差は、 $x$ が0.4mm程度以上になると小さくなっている。

図-7は応力集中係数と、止端半径 $\rho$ 、止端角 $\theta$ の関係を示したものである。ここで応力集中係数は、止端近傍における $x$ 軸方向応力の最大値を公称応力で除すことによって求めた。応力集中係数は止端角が135程度

度までは主に止端半径の影響を受けるが、止端角がそれ以上になると止端半径による差は徐々に小さくなり、止端角の影響を大きく受けるようになることがわかる。

図-8に、各試験体の止端形状の測定結果から図-7に示す関係を用いて応力集中係数を求めた結果を示す。図中には応力集中係数の平均値と分散もともに示した。フラックス入りワイヤによる $CO_2$ 溶接のTypeC、化粧溶接を行ったTypeE、TIG処理を施したTypeFの応力集中係数は全体的に小さく、またばらつきも小さい。TypeE、Fの応力集中係数の分布が小さいことから、止端改良によって微視的な溶接止端形状も大幅に改善されていることが明らかである。低水素棒を用いて溶接したTypeA、 $CO_2$ 溶接のTypeBの応力集中係数は比較的高い領域まで分布している。軟質溶接のTypeDは通常溶接のTypeA~Cよりも応力集中係数が高い分布となっており、微視的な止端形状は逆に悪化していることがわかった。また、止端改良棒を使用したTypeGも応力集中係数でみるとそれほどの改良効果はみられなかった。

図-9に示すような疲労試験後の破面を観察することによりき裂発生点を推定し、その位置における溶接止端半径を求めた結果を図-8中に三角印で示した。応力集

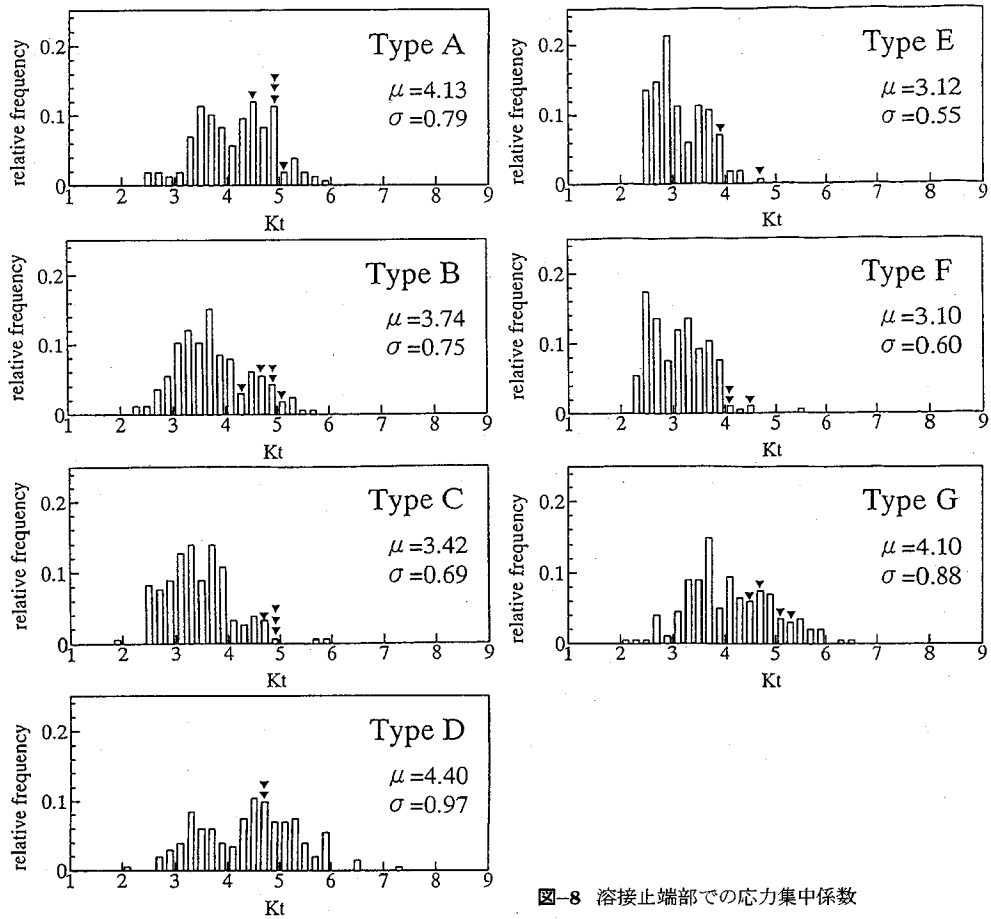


図-8 溶接止端部での応力集中係数

中係数にばらつきが大きいTypeA,B,D,Gにおいては、必ずしも応力集中が最大のところから疲労き裂が発生していないのに対して、全体的に応力集中係数が低いTypeC,E,Fにおいては応力集中係数がほぼ最大の箇所から疲労き裂が生じていることがわかる。

## 5. 溶接残留応力

疲労試験終了後、疲労き裂の生じていない側の直し溶接止端部近傍に図-10に示すようにひずみゲージを貼付し、切断法により残留応力の測定を行った。図-11に測定結果を示す。残留応力の主方向は溶接止端に沿って複雑に変化しているが、TypeE以外ではいずれの試験体でも中心軸からやや左にずれた位置において最大主応力が生じている。これはこの位置付近で溶接棒継ぎ行っていることと関係があるものと考えられるが、詳細は不明である。

タイプ別に見ると、残留応力を低減させることを狙って軟質溶接を施したTypeDの残留応力が最も小さくなっている。これは溶接金属部の軟質化により、残留応力が導入される過程での熱弾塑性挙動が他と異なっ

いたためであると予想されるが、詳細な原因は今後の検討課題である。通常の溶接であるTypeA,B,Cでは、低水素系溶接棒によるTypeAに大きな残留応力が生じているが、CO<sub>2</sub>溶接であるTypeB,Cの残留応力は小さい。今回の試験体においては、化粧溶接を施したTypeEの残留応力が最も低くなっており、これは化粧溶接による再加熱によって残留応力の再分配や熱処理効果などが生じるためであると考えられる。

## 6. 疲労試験結果

### (1) 疲労き裂発生点

図-12に疲労き裂発生点近傍のマクロ写真を示す。疲労き裂は溶接止端部における溶接金属とHAZの境界から少し溶接金属側に入った位置から発生し、HAZ内を進展し、母材へと達している。図-13は応力解析により求められたVon-Mises相当応力の等高線図を示したものであるが、応力は母材表面から溶接部にやや入ったところで最大となり、溶接止端部近傍の極めて狭い範囲に高い応力が発生していることがわかる。この位置は疲労き裂が発生した位置とほぼ同一であり、疲労

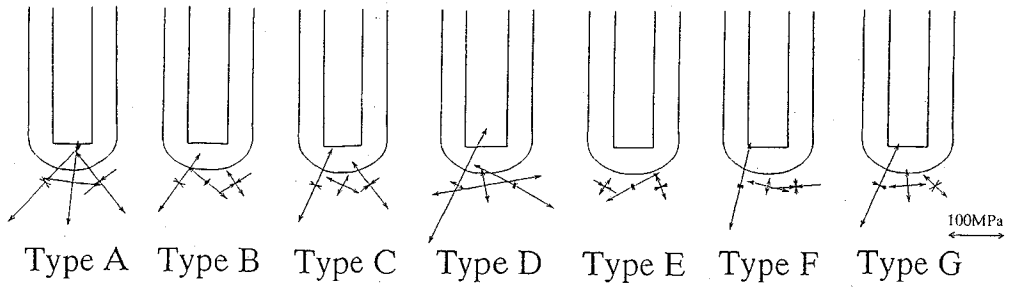


図-11 残留応力分布

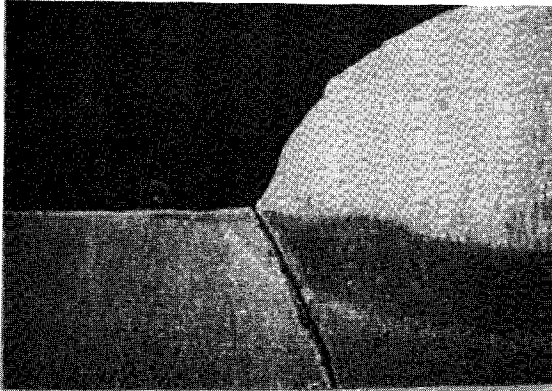


図-12 疲労き裂発生点

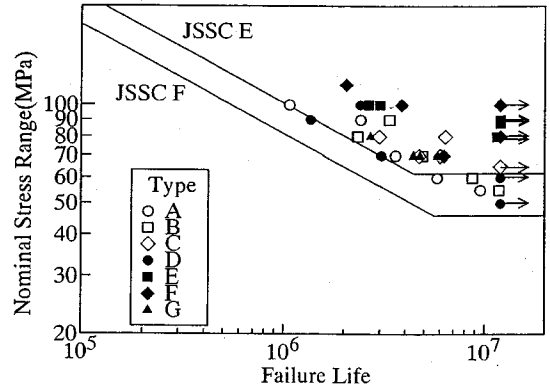


図-14 公称応力範囲と破断寿命との関係

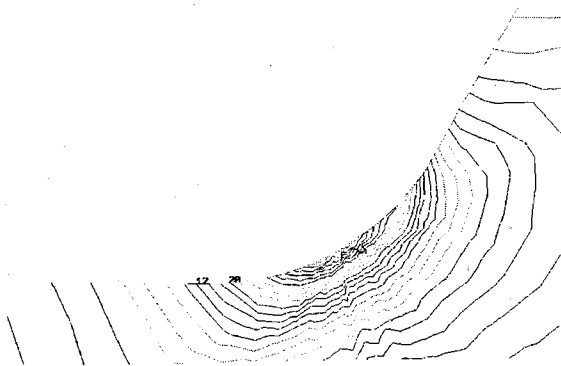


図-13 Von-Mises 応力等高線

き裂が溶接金属部から発生することは力学的にも説明できる。疲労き裂が溶接金属部から発生していることより、溶接継手の疲労き裂発生寿命は溶接金属の弾塑性挙動や切欠き感度などに影響をうけるものと考えられ、逆に溶接金属の疲労性状を改良することができれば疲労き裂発生寿命の延命化に効果があるといえる。

## (2) 疲労強度

図-14に破断寿命と公称応力範囲との関係を示す。

JSSC疲労設計指針<sup>12)</sup>では、この継手は止端仕上げの有無に応じてE等級およびF等級とされており、本実験で使用した試験体では、TypeE,FがE等級、その他はF等級に該当する。

破断寿命でみると化粧溶接を行ったTypeE、TIG処理を行ったTypeFの疲労強度が他と比較して明らかに高く、疲労限も上昇していることから、止端処理の効果が明確に現れているといえる。また、両者の疲労強度はほぼ同程度であり、化粧溶接によってTIG処理による疲労強度改善効果とほぼ同等の効果を得ることができるといえる。TypeE,Fでは疲労き裂発生位置での応力集中係数が小さいこと、またTypeEについては溶接残留応力が低いことが疲労強度向上の原因であると考えられる。

通常の溶接方法であるTypeA~Cを比較すると、低水素溶接棒によるTypeAの疲労強度が最も低い。またフラックス入りワイヤによるCO<sub>2</sub>溶接を施したTypeCの疲労限はわずかではあるが高い傾向が認められる。軟質溶接のTypeD、止端改良棒のTypeGには疲労強度改善効果は全く認められず、フラックス入りワイヤによるTypeCの疲労強度よりもむしろ低い傾向を示していることがわかる。これは今回製作した軟質溶接継手では止端部に高い応力集中が生じていたこと、残留応力

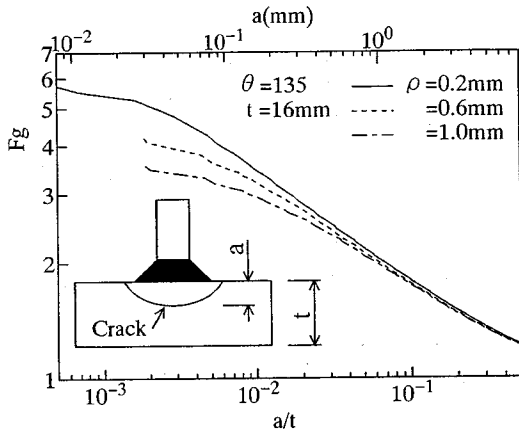


図-15 補正係数,  $F_g$

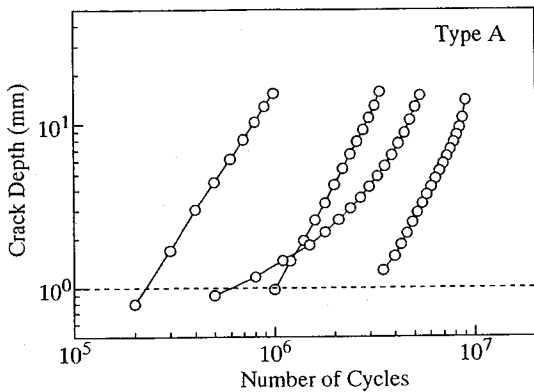


図-16 き裂深さと繰返し回数の関係

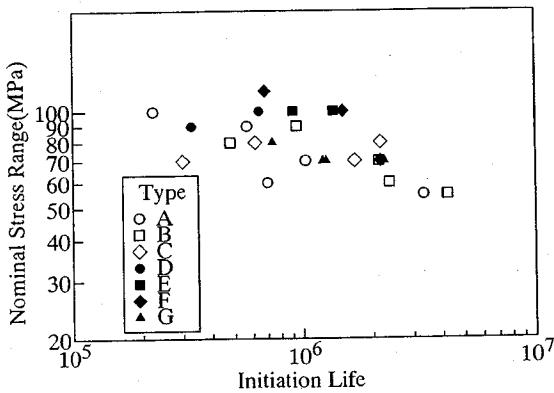


図-17 公称応力範囲とき裂発生寿命の関係

が大きかったことによるものであると考えられる。また TypeG ではき裂発生点での微視的な溶接止端形状にそれほどの改良効果が見られなかったことから通常溶接と同程度の疲労強度となったものと考えられる。

次に、試験体タイプによる疲労き裂発生寿命の差を明らかにするために、次のようにして疲労き裂発生寿命を定義し、実験データを整理した。図-15は4章で示

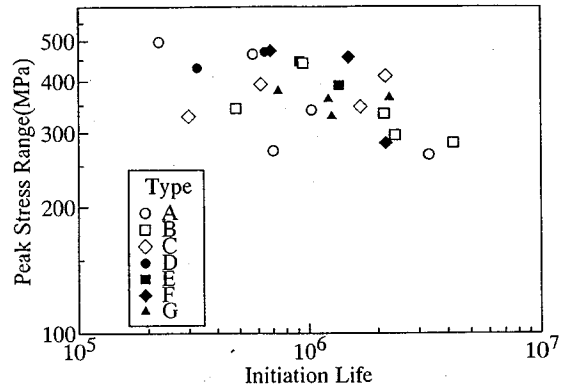


図-18 止端部の局部応力範囲とき裂発生寿命の関係

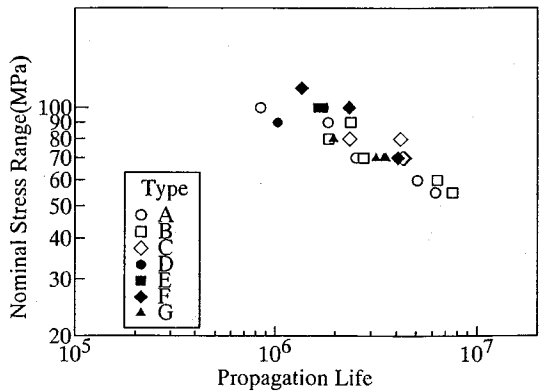


図-19 公称応力範囲とき裂進展寿命の関係

した3次元応力解析より求められた補正係数 $F_g^{(12)}$ を各溶接止端形状ごとに示したものである。溶接止端形状はき裂深さが1mm程度になるまで $F_g$ に影響を与えていることがわかる。すなわち、本試験体の場合、止端形状による応力集中の差はき裂発生寿命およびき裂深さ1mm程度になるまでの進展速度に影響を与えているといえることから、き裂深さが1mmとなったときの寿命を疲労き裂発生寿命として定義した。き裂深さ1mmのときの繰返し回数は、図-9に示したピーチマークの観察から図-16に示すようにき裂深さと繰返し回数との関係を求めることにより推定した。図-17にこのようにして求めた疲労き裂発生寿命と公称応力範囲との関係を示す。データは非常にばらつきが大きい、き裂発生寿命についても化粧溶接を施したTypeEおよびTIG処理を施したTypeFが他より高い傾向が見られる。図-18は各き裂発生点での溶接止端形状から応力集中係数を求め、溶接止端部に生じていると考えられる応力とき裂発生寿命との関係を示したものである。データは大きくばらついていることから、溶接止端部での応力集中のみによってはき裂の発生挙動を整理することは

きず、残留応力など他の因子が大きく影響している可能性があることがわかる。

図-19にき裂進展寿命と公称応力範囲の関係を示す。き裂進展寿命の試験体タイプによるばらつきは小さいことから、TypeE,Fの破断寿命が他よりも長かったのは、主にき裂発生寿命(き裂深さが1mmになるまでの寿命)が伸びたためであると考えられる。

## 7. 結 論

- (1) 化粧溶接を行なうことにより疲労強度は向上し、その程度はTIG処理によるものとほぼ同等である。これは化粧溶接では止端形状による応力集中が小さくなること、残留応力が小さくなることによるものと考えられる。
- (2) 今回使用した軟質溶接では、通常溶接よりも止端形状がシャープとなり、また溶接残留応力も大きいことから、疲労強度の向上効果はほとんど見られなかった。
- (3) 止端改良棒による溶接は、マクロ的にはなめらかな止端形状となるが、微視的な溶接止端形状に対する改良効果はほとんどなく、そのため疲労強度向上効果も低い。
- (4) 溶接止端形状は、疲労き裂が発生しその深さが1mmに進展するまでの寿命に対して影響を及ぼす。
- (5) 溶接継手部のき裂発生寿命は止端部における応力集中の程度だけでは評価できず、残留応力など他の因子の影響が無視できないほど大きい。
- (6) 疲労き裂は溶接金属とHAZとの境界からやや溶接金属に入った位置から発生した。これは応力解析によって求められる最大応力発生位置と一致した。

謝 辞: 本研究は土木学会鋼構造新技術小委員会WGの活動の一部として行ったものである。関係各位に感謝します。

## 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, 1979.
- 2) Takena,K., Hirano,S., Ito,F. and Miki,C.: Fatigue Strength of Box Section Truss Chord with Corner Joints, *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, I-1, 1987.
- 3) Tajima,J., Takena,K., Miki,C. and Ito,F.: Fatigue Strength of Truss made of High Strength Steels, *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, No.341, 1984.
- 4) Shimokawa,H., Takena,K., Fukazawa,M. and Miki,C.: A Fatigue Test on the Full-Size Truss Chord, *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, No.341, 1984.
- 5) Sakamoto,K., Yasuda,M., Fukawaza,M. and Miki,C.: An Investigation on Fatigue Strength for Transverse Chord of Stiffening Truss, *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, No.341, 1984.
- 6) 日本鋼構造協会: 止端加工による疲労強度向上法. JSSC レポート No.6, 1987.
- 7) Miki,C., Takenouchi,H., Mori,T. and Ohkawa,S.: Repair of Fatigue Damage in Cross Bracing Connections in Steel Girder Bridges. *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, Vol.6, No.1, 1989.
- 8) Miki,C., Sakano,M., Toyoda,Y. and Yoshizawa,T.: Early Stage Propagation Behavior of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints, *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, No.341, 1984.
- 9) Yamada,K. and Hirt,M.A.: Fatigue Crack Propagation from Fillet Weld Toes. *ASCE*, Vol.108, No.ST7, 1982.
- 10) 後川理, 中山英治: 溶接継手部の応力集中係数. 石川島播磨技報, Vol.23, No.4, 1983.
- 11) 三木千寿, 館石和雄, 山本美博, 宮内政信: 局部応力を基準とした疲労評価手法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.38A, 1992.
- 12) 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.

(1995.11.20 受付)

## INFLUENCE OF WELDING MATERIALS ON FATIGUE STRENGTH OF FILLET WELDED JOINTS MADE FROM HIGH STRENGTH STEEL

Kazuo TATEISHI, Kab-Soo KYUNG, Fumitaka MACHIDA and Chitoshi MIKI

In order to develop a method to improve fatigue strength of fillet welded joints made from high strength steel, specimens with special considerations in electrode materials or post welding treatments were made and tested. Fatigue test results showed that weld toe re-melting method or TIG dressing could obviously improved fatigue strength, while applying under matching welds or special electrode with high fluidity had little advantage. These results were discussed in relation to welded toe profile, residual stress and hardness.