

作用応力に斜めに溶接された面外ガセット継手の疲労試験

Fatigue test of tensile plate with out-of-plane gussets inclined to applied stress

山田健太郎*・加藤秀一郎**・岡部篤紀***・金 仁泰****・小塩達也*****

Kentaro YAMADA, Shuichiro KATO, Atsunori OKABE, In-Tae KIM, Tatsuya OJIO

*Ph.D. 名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**工修 ㈱鹿島建設 (〒163-1029 東京都新宿区西新宿3-7-1) (前名古屋大学大学院)

***愛知県・建設部 (〒460-8501 名古屋市中区三の丸3-1-2) (前名古屋大学)

****工修 名古屋大学 大学院工学研究科土木工学専攻博士課程 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

*****工修 名古屋大学助手 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Fatigue tests of tensile plates with inclined out-of-plane welded gussets are carried out. The gussets are welded at inclined angles of 0, 30, 45, 60 and 90 degree to transverse direction of the specimens. Stress range of 190 MPa is applied to the specimens, and fatigue crack initiation and its propagation are observed at gusset ends and toes of fillet weld. Fatigue crack initiated and propagated from weld toes either gusset ends or toes of fillet weld. Fatigue life increases as inclined angles increase from 0 to 45 degree for fatigue cracking from fillet weld toes. For fatigue cracking from gusset ends, fatigue life decreases as inclined angles increase from 30 to 90 degree.

Key Words : Fatigue test, welded joint, out-of-plane gusset, inclined angle

1. はじめに

溶接継手の疲労試験は、一般に溶接線に垂直、あるいは平行に応力を作用させる。主桁のフランジのように作用応力が一方向であり、それに垂直、あるいは平行に溶接線がある場合が多いので、このような疲労試験結果が適用できる。

立体的に溶接組立てされた鋼構造物の疲労照査では、作用する繰り返し応力が溶接線に垂直でないことがある。例えば、プレートガーダー橋の垂直補剛材の下部やウェブに溶接された面外ガセット、鋼床版リブが横リブウェブに溶接された部位のように、直応力とせん断応力が同時に作用する場合がそれに相当する。現行の疲労設計指針では、一般に直応力とせん断応力が同時に作用して、それが無視できない程大きい場合には、最大主応力を計算し、許容応力は直応力に対するものを用いて照査する。この方法は、最大主応力を溶接線に垂直に作用させることから、一般に短寿命側の疲労寿命を推定する。

しかしながら、既設構造物の疲労耐久性を評価する場合、この方法では疲労寿命が短く推定され、場合によっては「要補強」といった判定になることもある。既設構造物の耐久性をより精度良く評価し、不必要な補強を省くためには、主に作用する応力に斜めに溶接線が存在する場合の疲労試験データが不可欠である。

本研究では、斜めのすみ肉溶接止端から発生する疲労

き裂の挙動を検証する予備試験として、作用応力に対して斜めにガセットを溶接した引張試験体で疲労試験を行い、ガセットの軸が作用応力に斜めの場合の疲労挙動を評価した。また、ガセット端に種々の仕上げを施して、すみ肉溶接止端から疲労き裂を発生させ、溶接線に斜めに応力が作用する場合の疲労き裂の発生・進展挙動に注目した疲労試験を行い、荷重非伝達型のリブ十字すみ肉溶接継手と比較した。

2. 疲労試験体および疲労試験方法

2.1 疲労試験体

疲労試験で用いた試験体の形状と寸法を図-1に示す。試験体は、200×1000 mm、板厚 9mm の主板の両面に面外ガセットを CO₂ 半自動溶接したものである。ガセットの取付け角度は、 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の 5 タイプで、 $\theta = 90^\circ$ を除いて、主板の材端からガセットの材端までの距離を 20mm(一定)とした。したがってガセット(9×50×Lmm)の長さ L は試験体ごとに異なり、 $\theta = 0^\circ$ で 160 mm、 $\theta = 30^\circ$ で 173 mm、 $\theta = 45^\circ$ で 212mm、 $\theta = 60^\circ$ で 300mm となっている。 $\theta = 90^\circ$ は 200mm とした。材質は溶接構造圧延鋼材 JIS SM490A であり、その化学成分および機械的性質を表-1に示す。

この試験では、比較を容易にするため、ガセット端を

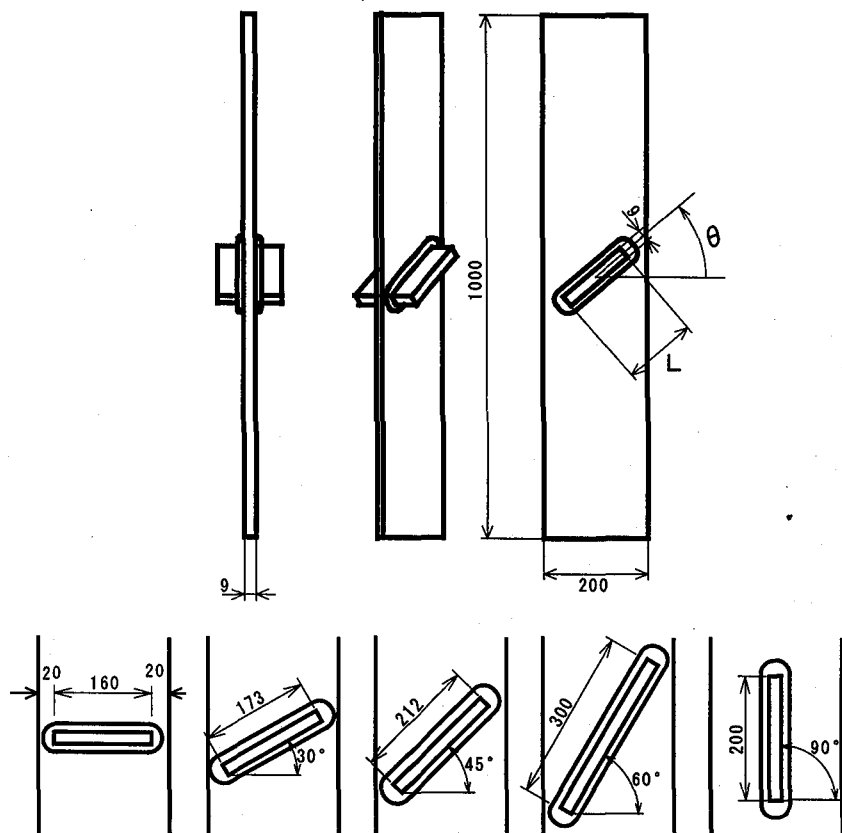


図-1 疲労試験体の形状と寸法

表-1 試験体に用いた鋼材の化学成分と機械的性質

C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
0.11	0.43	1.16	0.018	0.013	426	524	27

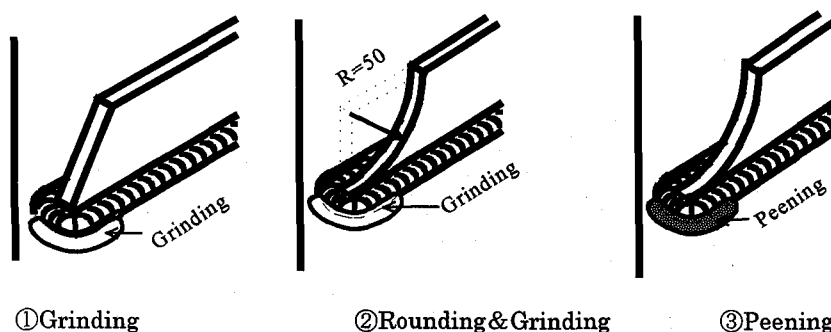


図-2 試験体のまわし部の処理

非仕上げ(As-welded)のもの($\theta = 0^\circ$ を 4 体, 他は 2 体)を応力範囲 190MPa で疲労試験を行った。それに加えて, $\theta = 30^\circ$, 45° の試験体では, 疲労き裂を斜めのすみ肉溶接止端から発生させるため, まわし溶接部に, 図-2 に示すように①グラインダー仕上げ, ② $R=50\text{mm}$ の加工とグラインダー仕上げ, あるいは③ピーニング処理を施した。

2.2 疲労試験方法

疲労試験は, すべてアムスラー型万能疲労試験機(容量 980kN)を用いて, 毎分約 270 回(4.5Hz)の繰り返し速度の定荷重振幅で行った。最小応力は 16 MPa とした。

試験体には, 図-3 に示すように, 母材端部から 40mm 離れた溶接止端部と母材に 0.04mm の被覆銅線を貼付した。疲労き裂が進展すると銅線が切れ, 試験機が停止する。ここでは, 試験体が破断するまでの繰り返し数を疲労寿命 N_f とした。また, 疲労き裂の進展状況を見るためにビーチマーク試験を行った。ここでは, 荷重

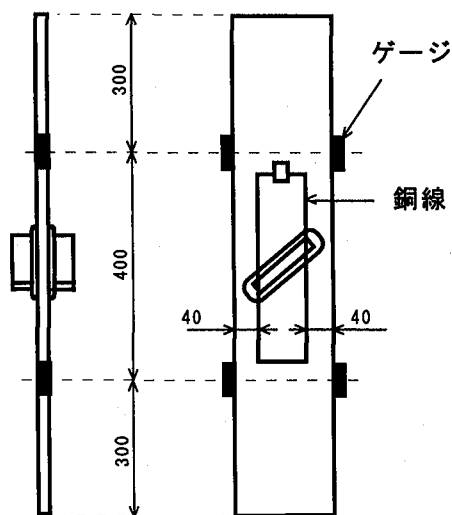


図-3 ひずみゲージと銅線の貼付位置

の上限値は変えず、応力範囲を $1/2$ にして、一定回数だけ繰り返し荷重を加えた。ただし、ピーチマーク試験中の繰返し数は、疲労寿命 N_f には含めないこととした。

3. 疲労き裂の発生と進展

3.1 疲労き裂の発生と進展状況

疲労試験結果を表-2 に示す。図-4 に示すように疲労き裂は大きく分けて、溶接止端部のうち、まわしすみ肉溶接付近(以後、まわしと呼ぶ)から発生したものと、まわし以外のすみ肉溶接止端部(以後、止端と呼ぶ)から発生したものがあつた。

3.2 止端から疲労き裂が発生した試験体

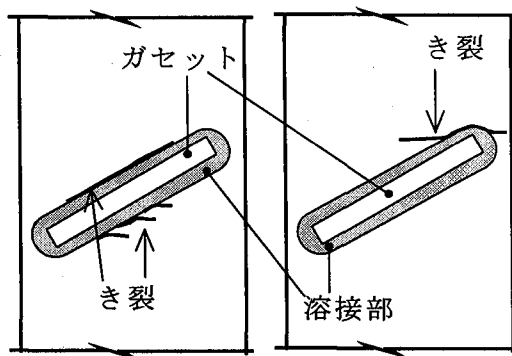
まず、 $\theta = 0^\circ$ (As0-01~06)の試験体は、溶接線が作用応力に垂直であり、通常の荷重非伝達のリブ十字すみ肉溶接継手である。写真-1 に示すようにすみ肉溶接の止端に沿って半だ円形のき裂が数カ所発生し、隣り合うき裂が合体、すなわち横につながりながらより大きなき裂になり、破断に至る。疲労き裂は止端に沿って、作用応力に対して垂直方向に進展する。

$\theta = 30^\circ$ の試験体になると、疲労き裂進展の様相が異なる。まず、疲労き裂は止端に沿って複数発生する。き裂発生初期の段階では、き裂の進展方向は止端沿いで、破面の角度は作用応力に対して、ほぼ 30° であつた。これらの疲労き裂は、進展するにつれて破面の角度を少しずつ変え、作用応力に対して垂直になる方向に進展していく。発生点の位置が近いき裂どうしは進展の過程で合体して大きくなり、合体するまでの位置の違いが段差となって破面に現れている(写真-2 参照)。破面には、数個のき裂が合体して1つの破面を形成したものがいくつか見られる。破断後に見られる大きな段差は、疲労き裂が大きくなり試験体が破断した時にできたものと思われる。止端から破断した3体の疲労き裂は、いずれもガセット

表-2 疲労試験結果

試験体名	応力範囲 (MPa)	疲労寿命 ($N_f \times 10^3$)	き裂発生位置
As0-01	190	216	溶接止端
As0-02	190	237	
As0-03	190	355	
As0-04	98	3,428	
As0-05	120	1,564	
As0-06	190	476	
As30-01	190	784	まわし
As30-02	190	632	
RG30-03	190	603	溶接止端
RG30-04	190	371	
RG30-05	190	608	
Gr45-01	190	1,447	溶接止端
Gr45-02	190	653	まわし
Gr45-03	190	1,051	
RG45-04	190	1,404	
As45-05	190	394	
As45-06	190	702	
Pe45-07	190	1,278	溶接止端
Pe45-08	190	982	溶接止端
As60-01	190	252	まわし
As60-02	190	308	
As90-01	190	94	まわし
As90-02	190	94	

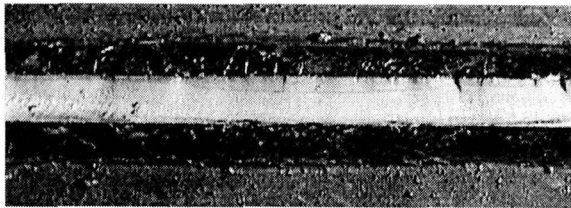
As : As-weld, R : Rounding,
Gr, G : Grinding, Pe : Peening



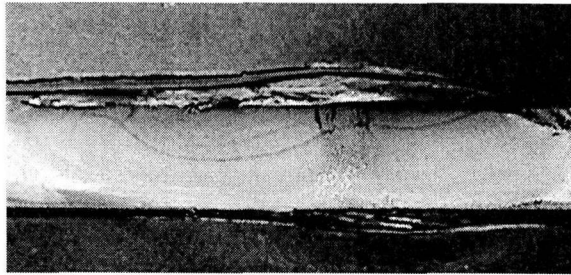
(a)すみ肉溶接止端のき裂 (b)まわし溶接部のき裂
図-4 疲労き裂発生位置の違い

端部付近に多く見られた。

$\theta = 45^\circ$ の試験体で止端から疲労き裂が発生したものは3体あるが、き裂の発生の仕方がそれぞれ異なっていた。Gr45-01は、き裂の発生点点が2カ所あつた。1カ所は止端のより大きな目の凸凹交差部から発生しており、このき裂は作用応力に垂直方向に進展し、破断に至つた。もう1カ所の発生点はまわしに近い止端で、まわしからの疲労き裂発生を押さえるためにグラインダーを施した境界付近から発生した。このき裂は、初期段階は止端沿いだったが、 $\theta = 30^\circ$ の場合と異なり、すぐに角度を変えて作用応力に対して垂直方向に進展した。しかし、破



(a) As0-02

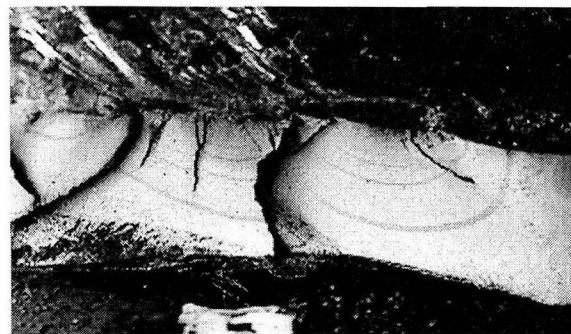


(b) As0-06

写真-1 $\theta = 0^\circ$ の疲労破面



(a) RG30-01

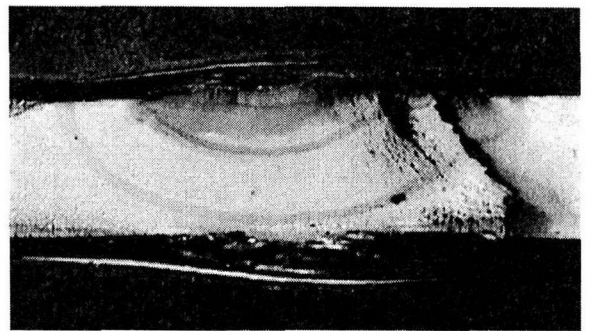


(b) RG30-4

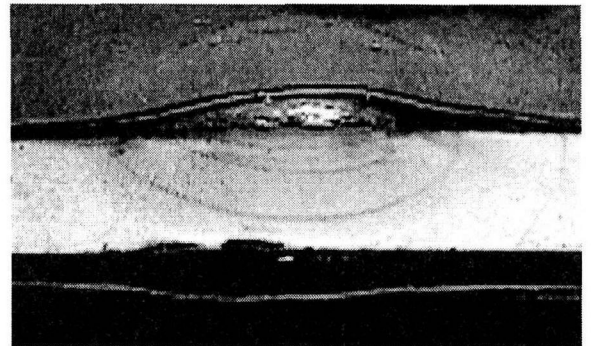
写真-2 $\theta = 30^\circ$ の疲労破面

断には至らなかった。

Pe45-07 では、き裂の発生点はまわしに近い止端で、ピーニングを施した境界付近から発生した。き裂は初期段階のうちは止端沿いに進展し、すぐに角度を変えて作用応力に対して垂直方向に進展した。Pe45-08 のき裂の発生点はまわしに近い止端で、作用応力に対してほぼ垂直に進展した。このき裂発生点となった止端は、オーバーラップ気味で、ほぼ 90° 近いものであった。



(a) As60-04



(b) As90-02

写真-3 まわしからき裂が発生した場合の疲労破面

3.3 まわしから疲労き裂が発生した試験体

この試験体では、面外ガセットが $\theta = 0^\circ$ の場合以外では、ガセット端のまわし溶接部に最大の応力集中が生じる。従って、溶接止端を仕上げない試験体(As-welded)では、この部分から疲労き裂が発生する。また、この部分をグラインダー仕上げ、あるいはピーニング処理したにもかかわらず、 $\theta = 45^\circ$ の試験体 3 体では、ガセット端から疲労き裂が発生した。

まわしから発生した試験体では、写真-3 に示すように疲労き裂の発生位置や進展状況において、角度の差はほとんど見られなかった。すなわち、疲労き裂はまわし部の 1 カ所に発生し、まわし部の止端沿いに少し進展した後、まわし部から離れて、作用応力に対して垂直に進展した。

4. 疲労寿命の評価

4.1 すみ肉溶接止端からの疲労き裂について

(1) 作用応力範囲で整理した S-N 線図

まず、すみ肉溶接の角度にかかわらず、疲労試験結果を作用応力範囲で示した S-N 線図を図-5 に示す。 $\theta = 0^\circ$ は、通常の荷重非伝達のすみ肉溶接継手であり、JSSC 疲労設計指針では継手等級 E にランクされる。実験を行った 6 体の試験体はいずれも JSSC・E よりも長寿命側であった。 $\theta = 30^\circ$ の 2 体と $\theta = 45^\circ$ の 3 体は、 $\theta = 0^\circ$ より寿命が長くなっており、 $\theta = 30^\circ$ は D 等級、 $\theta = 45^\circ$ は C 等級程度となった。

θ が大きくなるにしたがって、寿命が長くなる理由は、

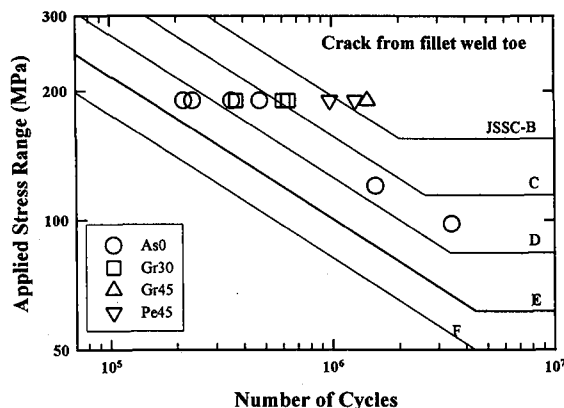


図-5 溶接止端からき裂が発生し進展する場合

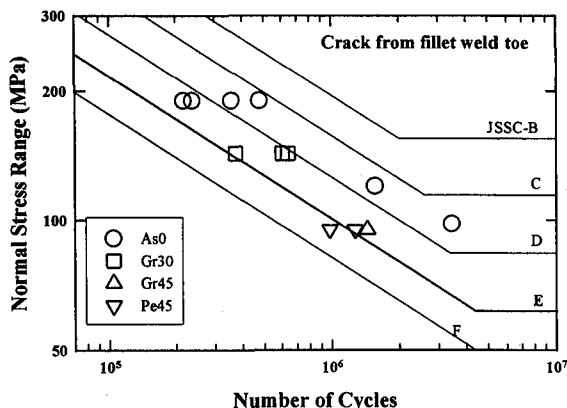


図-7 溶接止端に垂直方向の応力で整理

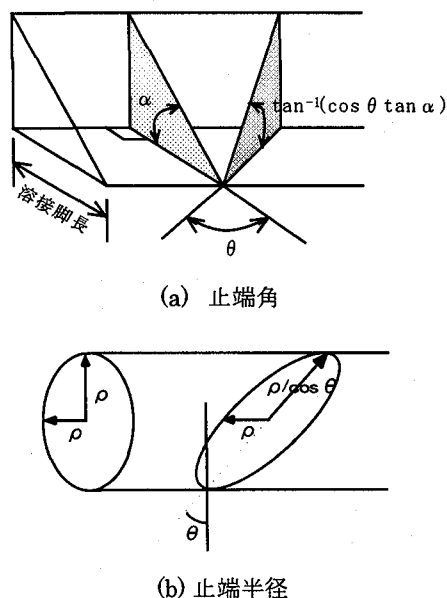


図-6 斜めになることによる溶接止端形状の変化

以下の2つが考えられる。第1に、前述したように、溶接線が斜めの止端から発生する疲労き裂は、ある段階で段差を生じて合体するまで、き裂が半楕円形を保ちながら単独に進展する。これに比べて、 $\theta = 0^\circ$ の場合には、止端に発生したき裂が同一面上で早く合体し、扁平なき裂になる。一般に半楕円形の疲労き裂は、扁平なき裂より進展速度が遅いため、結果として疲労寿命が長くなる。

第2の理由は、図-6に示すように作用応力方向からみた場合の止端角、止端半径の幾何的な形状が変わることがあげられる。例えば、止端角 α を 45° と仮定した場合、 $\theta = 0^\circ$ に比べて、 $\theta = 30^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ は、作用荷重方向からみた見かけ上の止端角 α' は、それぞれ次式(1)により 41° 、 35° となり、見かけ上で止端角が小さくなる。

$$\alpha' = \tan^{-1}(\cos \theta \cdot \tan \alpha) \quad (1)$$

$$\rho' = \rho / \cos \theta \quad (2)$$

また、止端半径 ρ についても、止端半径を $\theta = 0^\circ$ のときに、仮に 0.5mm とした場合に、 $\theta = 30^\circ$ と $\theta = 45^\circ$ の場合には、それぞれ見かけ上の止端半径 ρ' は、式

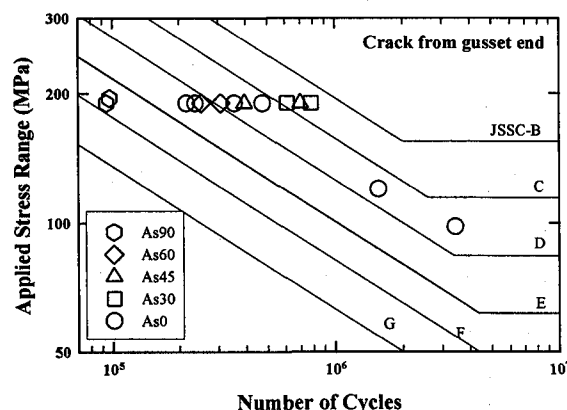


図-8 非仕上げのガセット端からの疲労き裂

(2)により 0.58 と 0.71mm に相当する。作用荷重の方向で見かけ上の止端角が小さく、止端半径が大きくなることが、すみ肉溶接止端からの疲労寿命が長くなる理由の一つと考えられる。

(2) 溶接線に垂直方向の応力で整理したS-N線図

溶接線に垂直な方向の応力は、 $\Delta \sigma \cos^2 \theta$ で計算される。この応力範囲でS-N線図を示すと、図-7のようになる。この場合、前述した止端角や止端半径は、 $\theta = 0^\circ$ の場合と同等になるので、もし、溶接線に垂直な方向の応力で疲労寿命が決まるとすれば、 $\theta = 30^\circ$ と 45° のデータと $\theta = 0^\circ$ のデータがほぼ同一のS-N線図上に図示される。図-7にみられるように、溶接線垂直方向の応力を用いた場合の $\theta = 30^\circ$ と 45° のデータは、 $\theta = 0^\circ$ の場合より短い寿命となり、一部のデータではJSSC-Eを下回るものもある。つまり、本試験体のように面外ガセットによる応力集中が影響するような場合に溶接線に垂直な応力で疲労寿命を評価すると、危険側になる場合があることを示唆している。

4.2 まわしから疲労き裂が発生した場合

面外ガセットでは、一般にまわし部のすみ肉溶接止端部の応力集中が最大となり、この部分から疲労き裂が発生・進展する。また、同一の溶接条件であれば、ガセット長 L が長くなると疲労寿命が短くなる。今回の実験で

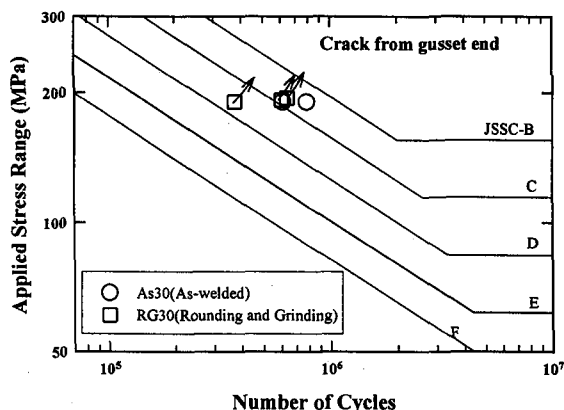


図-9 まわし部の仕上げの効果($\theta = 30^\circ$)

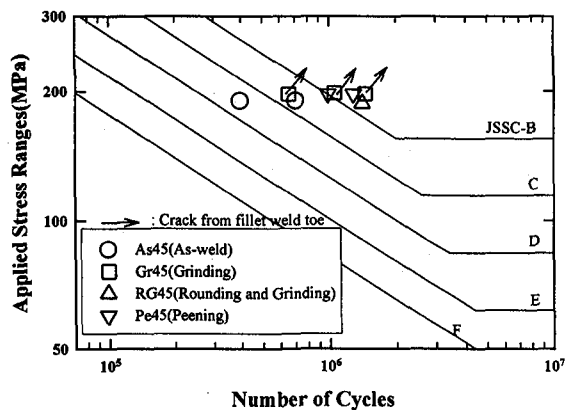


図-10 まわし部の仕上げの効果($\theta = 45^\circ$)

は、引張試験体の縁端からガセット端の距離を 20mm としたため、図-1 に示すように取り付け角度 θ 毎に、 L が異なる。

まず、非仕上げ(As-welded)の面外ガセットのまわしからき裂が発生した試験体の疲労試験結果を図-8 に示す。比較のため、 $\theta = 0^\circ$ の荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労試験結果を示す。ここでは、 $\theta = 90^\circ$ が通常的面外ガセット継手であり、 $L=200\text{mm}$ の 2 体の試験体は、この継手の等級である JSSC-G より 1 ランク程度長い寿命を示した。これに対して、 $\theta = 60^\circ$ 、 45° 、 30° と θ が小さくなるにしたがって、疲労寿命は長くなった。この理由として考えられるのは、 θ が小さくなると、ガセット端からガセットに流れる応力が、 $\theta = 90^\circ$ の場合に比べて小さくなることあげられる。

実験で用いた面外ガセットは、長さが異なるために、応力集中の比較がしにくい。そこで、疲労試験体をモデル化した 3 次元の有限要素応力解析を行った。解析には、汎用有限要素解析プログラム COSMOS/M を用い、8 節点ソリッド要素を使用した。解析モデルでは、すみ肉溶接はまわし部を含めて、脚長 6mm、止端角 45° 、止端半径 0mm とした。要素の最小寸法は着目部で $1.0 \times 1.0 \times 1.0\text{mm}$ とした。溶接止端を含めた応力集中係数を評価するには、ここで用いた要素寸法は若干大きい。しかしながら、全てのモデルの着目部を同じように要素分割したので、モデル間の相互の比較は可能と思われる。

3 次元有限要素応力解析から求められたこの試験体の応力集中係数 K_t は、 $\theta = 90^\circ$ で $K_t=2.4$ に対して、 $\theta = 60^\circ$ で $K_t=2.02$ 、 $\theta = 45^\circ$ で $K_t=1.85$ 、 $\theta = 30^\circ$ で $K_t=1.66$ であった。従って、図-8 に見られる疲労寿命の差は、このような応力集中の差に起因しているものと思われる。

本研究では、さらに $\theta = 90^\circ$ 、 $L=200\text{mm}$ のモデルについて 3 次元有限要素応力解析を行い、そこで求められた節点変位を入力した溶接止端近傍の 2 次元平面解析を行った。ここでの要素の最小分割は、 $0.1 \times 0.1\text{mm}$ とした。また、この計算では、試験体の止端部の形状を実測して、止端角 75° 、止端半径 0.5mm とし、溶接形状を考慮している。この計算の結果では、ガセット端部の

溶接止端の K_t は 5.41 となった。

4.3 まわし部の仕上げ、ピーニング処理による疲労寿命の向上効果

$\theta = 30^\circ$ と 45° の試験体では、すみ肉溶接止端部から疲労き裂を発生させるために、まわし溶接部に①グラインダー処理、②R加工+グラインダー処理、③ピーニング処理による疲労強度向上法を試みた。いずれもこの部分でのき裂発生を抑えるために、行ったものであるが、どの程度の疲労強度の向上効果があったかをまとめる。

表-2、図-9 に示すように、 $\theta = 30^\circ$ では、グラインダー仕上げをした 3 体は、まわし部から疲労き裂が発生する前に、すみ肉溶接止端から疲労き裂が発生・進展し、破断に至った。したがって、まわし部からは疲労き裂が発生しておらず、データは矢印をつけて示した。この場合の疲労寿命は、溶接止端から疲労き裂が発生する場合より長寿命になると予測される。図-10 に示すように、いずれも D 等級以上の寿命を示すものと思われる。また、 $\theta = 45^\circ$ の場合は、非仕上げ(As-welded)が D 等級程度であったものが、いずれも C 等級以上の疲労寿命を示した。

5. まとめ

本研究では、面外ガセットを角度 $\theta = 0^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° ですみ肉溶接した引張試験体の一定振幅荷重による疲労試験を行い、疲労き裂の発生・進展状況と疲労寿命を求めた。予備試験として行った実験のため、試験体数が少ないが、疲労試験から得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1)すみ肉溶接止端部から発生する疲労き裂に対しては、 $\theta = 0^\circ$ 、 30° 、 45° と大きくなるにしたがって疲労寿命が長くなった。この実験では、 $\theta = 0^\circ$ が JSSC-E 等級であるのに対して、 $\theta = 30^\circ$ は D 等級程度、 $\theta = 45^\circ$ は C 等級程度であった。
- 2)すみ肉溶接止端部からの疲労き裂は、 $\theta = 30^\circ$ では止端から溶接線に沿って発生した複数個のき裂が合体しながら進展し、その後、作用応力に垂直方向に進展し

た。最終破断は、いくつかの独立して進展したき裂が、破断時に段差を生じてつながる形で生じた。このことが疲労寿命が長くなった要因の一つと推察される。

- 3) 面外ガセット端部の非仕上げのまわし溶接部から発生した疲労き裂についても、 $\theta = 90^\circ$ に比べて、 $\theta = 60^\circ$ 、 45° 、 30° となるにしたがって疲労寿命が長くなった。実験に用いた試験体は、ガセット長が異なるので、3次元有限要素解析により疲労き裂発生点の応力集中係数を求めた。その結果、用いた試験体では、 θ が小さくなることによる応力集中係数が低くなり、疲労寿命が長くなったと思われる。

謝辞：本試験を遂行するにあたって、名古屋大学大学院土木工学専攻の貝沼重信氏にご協力を頂いた。また、試験体の製作に際してはトピー工業(株)豊橋製造所の酒井吉永氏にお世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山田健太郎・牧野時則・菊池洋一：横リブ十字隅肉溶接止端部に発生する疲労亀裂の解析，土木学会論文報告集，No. 292，pp.1-12，1979.
- 2) 太田省三郎：斜方すみ肉溶接の強さに関する一考察（第2報），溶接学会誌，第28巻，第6号，pp.377～389，1959.
- 3) 山田健太郎・村山眞・近藤明雅・菊池洋一：大気暴露された無塗装の耐候性鋼および普通鋼溶接継手の疲れ強さ，土木学会論文報告集，No. 337，pp.67-74，1983.
- 4) 田垣徳幸・近藤明雅・山田健太郎・菊池洋一：溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端形状の影響，土木学会論文報告集，No. 324，pp.151-159，1982.
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂，1993.
- 6) 鎌倉将英・二瓶正俊・佐々木悦男・金尾正雄・稲垣道夫：SM50B リブ十字すみ肉溶接継手の疲れ特性におよぼす寸法効果，溶接学会誌，Vol.48，No.12，pp.1060-1064，1979.
- 7) 三木千寿・森 猛・阪本謙二・柏木洋之：前面すみ肉溶接継手の疲労強度に対する継手寸法の影響，構造工学論文集，Vol.33A，pp.393-402，1987.
- 8) 山田健太郎・三ツ木幸子・近藤明雅：ガセット溶接部材の疲れ強さと設計基準，構造工学論文集，Vol.32A，pp.25-33，1986.
- 9) 太田省三郎・浅井公屋・大谷真一：すみ肉溶接継手の止端部の TIG アーク再溶融による疲労強度の向上，溶接学会論文集，第8巻，第2号，pp.254～261，1990.
- 10) 田垣徳幸・近藤明雅・山田健太郎・菊池洋一：溶接継手の疲労寿命に与える隅肉溶接止端形状の影響，土木学会論文報告集，第324号，pp.151～159，1982.
- 11) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針，1993.
- 12) 三木千寿・坂野昌弘・豊田幸宏：隅肉溶接止端からの疲労亀裂の発生と初期進展挙動，構造工学論文集，Vol.35A，pp.321～328，1989.
- 13) 山田健太郎・牧野時則・馬場千尋・菊池洋一：疲労亀裂の進展挙動に着目したガセット継手の疲労強度解析，第303号，pp.31～41，1980.

(2000年9月14日 受付)