

# 面外ガセット溶接継手の 疲労強度に及ぼす板厚の影響

坂野 昌弘<sup>1</sup>・新井 正樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工学博士 関西大学助教授 工学部都市環境工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

<sup>2</sup>正会員 (株)バコーポレーション 橋梁技術部 (〒323-0811 栃木県小山市犬塚9 9 6)

主板厚75mmと付加板厚25mmのSM570Q材で製作した面外ガセット溶接継手試験体の面外曲げ疲労実験と3次元FEM解析結果を用いた疲労亀裂進展解析を行い、既報の結果と比較することにより疲労強度に及ぼす板厚の影響について検討した。板厚75mmの面外ガセット継手の面外曲げ疲労強度は、溶接止端部の大きな応力集中のため板厚25mmのおよそ1/2から1/3に低下することから、面外ガセット継手に対しても板厚の影響を考慮する必要があることが明らかとなった。疲労限の低下は、引張荷重下では板厚比の1/4乗則に従うこと、また、面外曲げ荷重下では板厚に反比例する場合があることを疲労亀裂進展解析により示した。

**Key Words :** fatigue strength, welded joint, out-of-plane gusset, thickness effect

## 1. はじめに

鋼構造物の大型化や製作の合理化をねらった少補剛厚肉化、あるいは地震時の塑性変形性能向上を目的として、板厚の大きな鋼材を使用する機会が増加してきている。構造物の疲労強度は継手部で決まる場合が多いが、溶接継手の中には板厚が大きくなると疲労強度が低下するものがあることが知られている。また構造物の供用年数の長期化を考えると、特に疲労限付近の低応力・長寿命領域の挙動が重要となる。

著者らは既報において、本州四国連絡橋<sup>1)</sup>で使用が認められている75mmまでの板厚の面外ガセット溶接継手を対象として3次元FEMモデルを用いた疲労亀裂進展解析を行い、前面すみ肉溶接継手と同程度の板厚効果が存在する可能性があることを示した<sup>2)</sup>。また、その後JSSC疲労設計指針<sup>3)</sup>で基準板厚とされている25mmおよび本四規格<sup>1)</sup>最大板厚75mmの2種類の板厚の面外ガセット溶接継手試験体を対象として疲労試験を実施し、特に疲労限について板厚の影響が顕著に現れ、疲労強度がJSSC指針の推奨等級を下回る場合も存在することを明らかにした<sup>4)</sup>。

本研究では新たに主板厚のみが大きな面外ガセット試験体5体を用いた最長5000万回にも及ぶ長寿命疲労試験と3次元FEM解析および疲労進展解析を行い、既報<sup>4)</sup>の実験結果と合わせて、面外ガセット継手の疲労強度に及ぼす板厚の影響について検討を行った。疲労試験は、既報<sup>4)</sup>と同様に試験機容量の関係から継手主板の面外方向の曲げ载荷により行い、それらの結果を用いて疲労亀裂進展解析法の検証を行った上で、同解析法により、引張荷重下の疲労強度に及ぼす板厚の影響について検討した。なお、供

試鋼材は鉄道橋<sup>5)</sup>や道路橋<sup>6)</sup>などの鋼構造物において一般的に使用されている高張力鋼SM570Qを用いた。その理由は、大型厚肉部材では高張力鋼の使用が増えるものと考えられること、また溶接継手では疲労強度に関して高張力鋼の方が普通鋼に比べて低くなる傾向があることを考慮したためである。

## 2. 実験方法

### (1) 試験体

面外ガセット溶接継手試験体の基本的な形状は既報<sup>4)</sup>と同様であるが、今回用いた試験体はガセットの板厚がJSSC指針<sup>3)</sup>の基準板厚25mm、主板の板厚が本州四国連絡橋<sup>1)</sup>の最大板厚75mmのものを5体用いた(図-1)。すなわち、付加板厚が変わらずに主板厚のみ大きな場合について検討したものである。鋼材は主板、付加板ともに、現在橋梁などの鋼構造物で一般的に使用されている調質型高張力鋼JIS SM570Qを用いた。付加板の主板への取付けはフラックス入りワイヤJIS YFW26を用いた炭酸ガスシールドアーク溶接により行った。ワイヤの機械的性質と化学成分(ミルシート値)と溶接条件は既報通りである。すみ肉溶接のサイズは鉄道構造物等設計標準<sup>5)</sup>および道路橋示方書<sup>6)</sup>の規定に従い、板厚75mmに対して13mmに設定した。

すみ肉溶接継手の疲労挙動は、亀裂発生位置とな

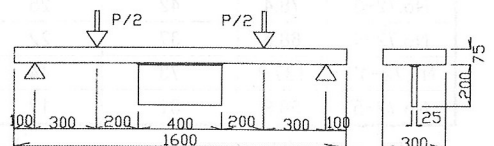


図-1 試験体

るすみ肉溶接止端部の局所的な形状に大きく影響を受けることが知られている<sup>7)</sup>。図-2はシリコン型取り材を用いて計測したすみ肉溶接止端部の曲率半径 $\rho$ と角度 $\theta$ の分布を、(a)亀裂発生位置以外も含めた全ての測定データと(b)亀裂発生位置付近に分けて既報<sup>4)</sup>のものと一緒に示したものである。(a)については $t_1=25\text{mm}$ の試験体で $\rho$ の大きいものがみられるが、(b)では $\rho$ 、 $\theta$ ともにばらつきは小さくなって、最大、最小、平均値ともにほぼ一致し、試験体の種類による違いはほとんど認められない。

## (2) 疲労試験

疲労試験には動的容量 $\pm 400\text{kN}$ の電気油圧式疲労試験機を用いた。荷重方法は図-1に示すように4点曲げ荷重とし、継手部の主板には面外の純曲げを作用させた。実構造物ではある程度の死荷重応力が生じることを配慮し、継手部の公称曲げ応力の最大値をすべての試験体で一定値(約150MPa)とするために、最大荷重値を294kNで一定とした。その結果、最小応力の値により応力比は0.53から0.80となったが、最大応力の値が一定なのでこの程度の応力比の違いは疲労強度にほとんど影響しないと考えられる。荷重波形は正弦波、荷重繰返し速度は5~10Hzである。なお、ガセット端部のすみ肉溶接止端から試験体長手方向に50mm離れた断面の主板表裏面それぞれに3枚ずつひずみゲージを貼付し(板幅中央、および両縁からそれぞれ20mm離れた位置)、試験中に生じている応力範囲を測定した。この位置では継手の影響はほとんど消失しており、応力分布は板幅方向にほぼ

同様、板の表裏では正負ほぼ対称であった。また、応力測定は試験開始時および試験中2000~5000回で適宜行い、応力範囲が変化していないことを確認している。

疲労亀裂の検出には交流ポテンシャル法<sup>8)、9)</sup>を適用した。疲労試験中に交流ポテンシャル法によって得られた電位差変化がある程度の大きさに達し、疲労亀裂発生を確信した場合には、最大荷重はそのままで荷重範囲を半減させ、破壊面にピーチマークを残すことを試みた。

## 3. 実験結果と考察

疲労試験結果を表-1に示す。 $\Delta P$ は荷重範囲、Srは等曲げ区間の公称曲げ引張応力範囲で、ガセットを無視して一般的な矩形断面のはりとして求めた計算値と、ひずみゲージによって求めた実測値を併記してある。支点部で水平方向の動きを拘束しているために実測値は計算値の6割~7割程度となっている。Niは疲労亀裂発生寿命、Ndは疲労亀裂発見寿命、Nfは試験体の破断寿命である。Niは交流ポテンシャル法によって電位差変化が検出され始めたときの応力繰返し数(3.(2)で詳述)、Ndはある程度の大きさの電位差変化が検出され1本目のピーチマークが導入されたときの応力繰返し数、 $a_d$ と $2b_d$ は1本目のピーチマークの深さと表面長さである。なお、これらの疲労寿命にはピーチマーク導入のための半減荷重の繰返し回数は含んでいない。

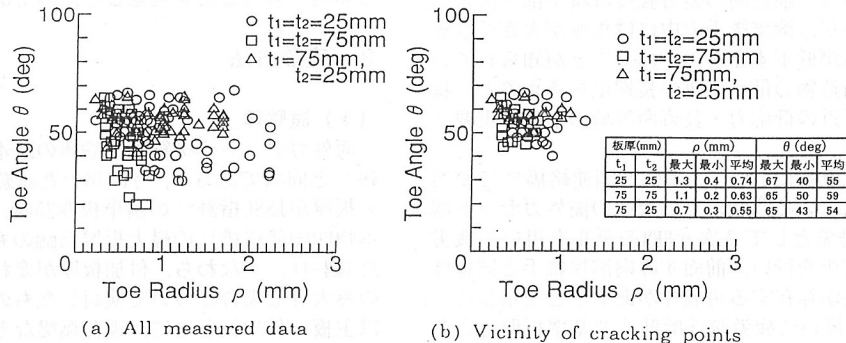


図-2 溶接止端の角度と曲率半径の分布

表-1 疲労試験結果

Specimen	$\Delta P$ (kN)	Sr		Ni (Mcycles)	Nd (Mcycles)	Nf (Mcycles)	$a_d$ (mm)	$2b_d$ (mm)
		Calculated	Measured					
No.72-1	127.5	68	49	1.13	1.34	12.18	8.0	50.0
No.72-2	88.2	47	30	4.12	5.12	35.18	7.0	34.0
No.72-3	78.4	42	25	5.30	6.00	>30.00	8.0	38.0
No.72-4	68.6	37	22	8.48	12.85	>21.10	11.0	48.0
No.72-4**	137.2	73	44	—	—	9.23	—	—
No.72-5	58.8	31	17	>50.00	—	>50.00	—	—

$P_{\max} = 294.0(\text{No.72-1} \sim 5)$

\*\*):retest

### (1) 疲労亀裂の発生進展性状

図-3に試験体No. 72-3について疲労破壊面と荷重条件の例を示す。図-3の破壊面では1本のピーチマークが認められている。ガセット端部の主板側のすみ肉溶接止端部から亀裂が発生し、半楕円形状に進展している様子がわかる。図-3では亀裂が溶接部から出たところ(表面長さ約120mm)で進展が停まったため、荷重範囲を増大させて強制的に破断させている。なお、表-1に示した破断寿命 $N_f$ (30.00Mcycles)は荷重範囲を増大させる前の $\Delta P$ (78.4kN)に対するものである。疲労破壊面上では停留位置にピーチマーク状の痕跡が残され、亀裂が徐々に停留していくようすがよく現れている。図-4は亀裂の寸法と荷重繰返し回数比の関係を、(a)亀裂深さと(b)亀裂表面

長さについて既報<sup>4)</sup>のものといっしょに表したものである。板厚75mmの場合には亀裂深さが板厚の約半分に達するまでに要する応力繰返し数が寿命全体の大半(7~9割)を占めているのに対し、板厚25mmの場合には板厚に比べて板幅が相対的に大きいため寿命の前半で板厚方向の亀裂進展がほとんど終了してしまい、それ以降、寿命の半分以上が板厚方向の亀裂進展に費やされている。一方、表面の亀裂進展に関しては板厚による違いはほとんど見られず、全寿命の8割以上が表面長さが200mm程度に成長するまでに費やされている。

図-5には、個々の亀裂に対する深さ $a$ と表面長さの半分 $b$ の関係を示す。板厚25mmの場合には、 $a$ が板厚の半分の12.5mm程度を越えると板厚方向の亀裂

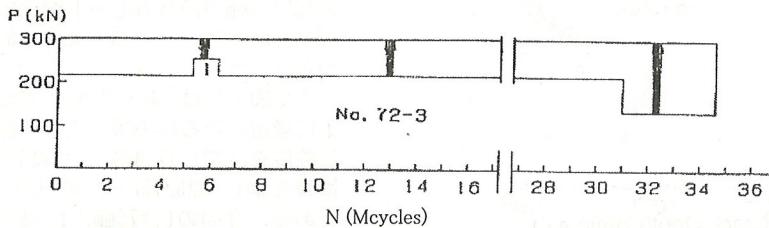


図-3 疲労破壊面と荷重条件 ( $t_1=75$  mm,  $t_2=25$  mm)

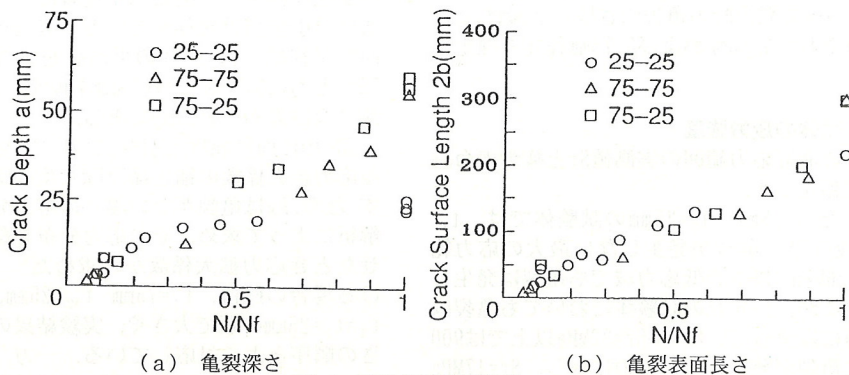


図-4 疲労亀裂進展性状



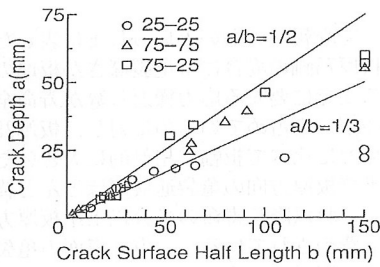


図-5 亀裂深さと亀裂表面長さの関係

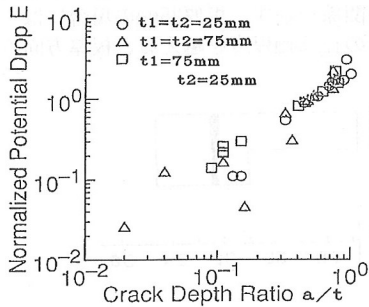


図-6 電位差変化と亀裂深さ比の関係

進展が停滞してしまうために亀裂形状が扁平となっていくが、それ以外では、板厚の違いにかかわらず亀裂形状比 $a/b$ は $1/2 \sim 1/3$ の範囲でほぼ一定とみなすことができる。

### (2) 疲労亀裂発生寿命の定義

図-6に交流ポテンシャル法により測定した電位差変化とピーチマークから読み取った亀裂深さ比の関係を示す。縦軸の $E$ は亀裂深さが板厚の半分に達したときの電位差変化値で無次元化したものである。亀裂が開始のころでは亀裂発生位置と電位差センサー位置の遠近によってばらつきがみられるが、全体的には試験体や板厚の違いにかかわらず右上がりの直線状に分布していると見做すことができる。

本研究では、 $E=0.01$ のときの応力繰返し数を亀裂発生寿命 $N_i$ と定義した。 $E=0.01$ のとき $a/t_i=0.01$ であり、したがって発生時の亀裂深さは $t_1=25\text{mm}$ および $75\text{mm}$ でそれぞれ $a=0.25\text{mm}$ および $0.75\text{mm}$ 程度と推定される。

### (3) 各試験体の疲労強度

図-7に公称曲げ応力範囲の実測値 $S_r$ と疲労寿命 $N_i, N_d, N_f$ の関係を示す。

今回用いた $t_1=75\text{mm}, t_2=25\text{mm}$ の試験体では、 $t_1=t_2=75\text{mm}$ の疲労限（亀裂が発生しない最大の応力範囲と定義） $26\text{MPa}$ <sup>4)</sup>以下の低応力域でも亀裂は発生し進展しているが、いずれの試験体においても亀裂は停滞し破断には至っていない。 $S_r=22\text{MPa}$ 以上では900万回までに亀裂が発生しているのに対し、 $S_r=17\text{MPa}$ では5000万回の繰返し载荷を受けても亀裂は検出さ

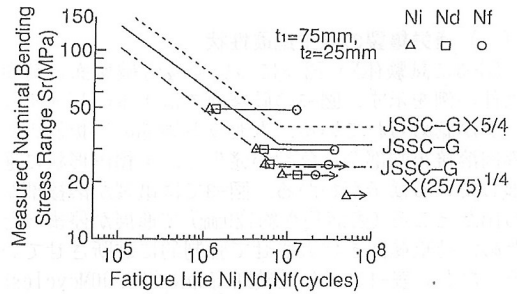


図-7 疲労試験結果と設計曲線 ( $t_1=75\text{mm}, t_2=25\text{mm}$ )

れなかったため、疲労限を亀裂が発生する限界と定義するならば疲労限は $17 \sim 22\text{MPa}$ の間に存在すると推定される。以上により、面外曲げを受ける場合、主板厚 $75\text{mm}$ の面外ガセット溶接継手の疲労限は、主板厚 $25\text{mm}$ の約 $1/2 \sim 1/3$ と大きく低下することが明らかとなった。

また図-7には、JSSC指針<sup>3)</sup>で面外ガセット溶接継手に適用されるG等級の設計曲線、面外曲げを考慮し強度を割増し(5/4倍)した設計曲線、および板厚の影響を補正( $(25/75)^{1/4}$ 倍)した設計曲線を併記してある。今回の $t_1=75\text{mm}, t_2=25\text{mm}$ の場合には1/4乗則による板厚の補正を行った設計曲線でさえ疲労限付近の実験値をカバーできず、面外曲げ荷重下で主板厚のみが増加する場合には新たな補正が必要となることが明らかとなった。

## 4. 板厚効果の解析的検討

前述の疲労試験により、面外ガセット溶接継手において顕著な板厚効果が存在することが明らかとなった。この章では、継手部の応力集中に主に着目し、文献2)と同様な手法を用いた疲労亀裂進展解析により、面外曲げと軸引張を受ける面外ガセット溶接継手の板厚効果について解析的に検討する。

応力解析は3次元ソリッド要素を用いた弾性FEM<sup>10)</sup>により実施した。図-8と図-9にそれぞれ面外曲げと引張りを受ける面外ガセット継手の解析モデルを示す。対称性を考慮して、ハッチングされた1/4と1/8の部分について解析した。対称面では直角方向の変位を拘束し、図に示す位置にモーメント荷重あるいは引張荷重を与えている。溶接止端部の角度と曲率半径は、図-2(b)の平均値を参考に板厚 $25\text{mm}, 75\text{mm}$ ともに $60^\circ$ および $0.5\text{mm}$ を仮定した。最小要素寸法は板厚方向に $0.01\text{mm}$ である。

図-10に面外曲げと引張りについて、応力分布に関する応力拡大係数の補正係数 $F_g$ と亀裂深さの関係を示す。なお、 $F_g$ は亀裂がない場合の応力分布を3次元FEM解析によって求め、その応力分布を亀裂面に作用させたとき応力拡大係数から求めた<sup>2)</sup>。面外曲げを受ける場合の $F_g$ は、 $t_1=75\text{mm}, t_2=25\text{mm}, t_1=t_2=75\text{mm}, t_1=t_2=25\text{mm}$ の順で大きく、実験結果の疲労限の大きさの順序とよく対応している。一方、引張の場合には、 $t_1=25\text{mm}$ に比べて $t_1=75\text{mm}$ の方が $F_g$ は大きい

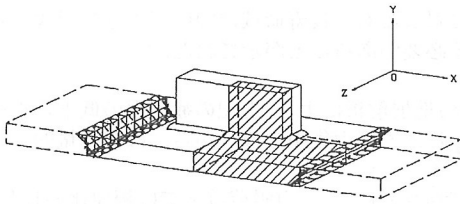


図-8 解析モデル(面外曲げ)

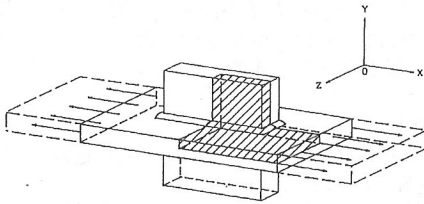


図-9 解析モデル(引張)

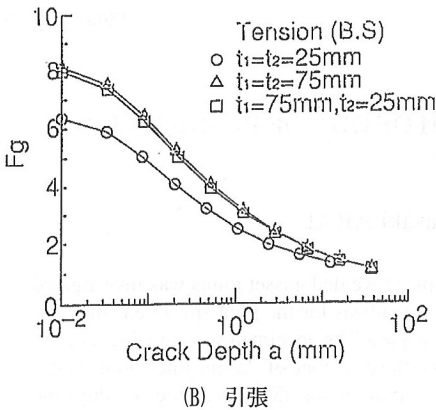
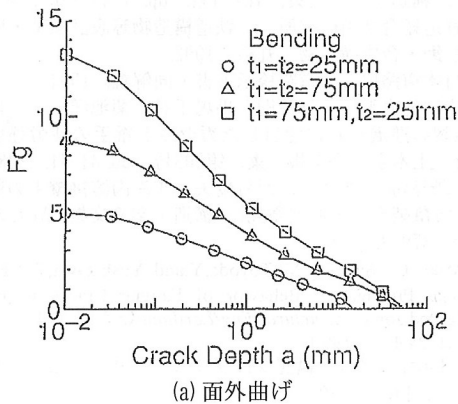


図-10 補正係数と亀裂深さの関係

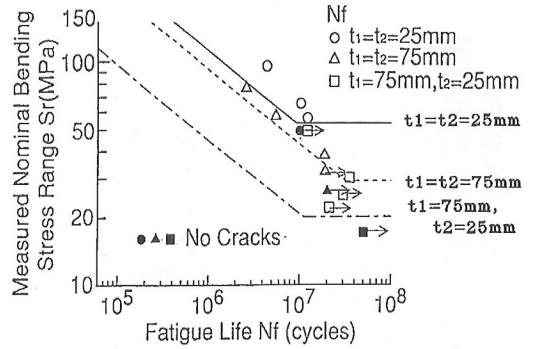


図-11 疲労寿命曲線

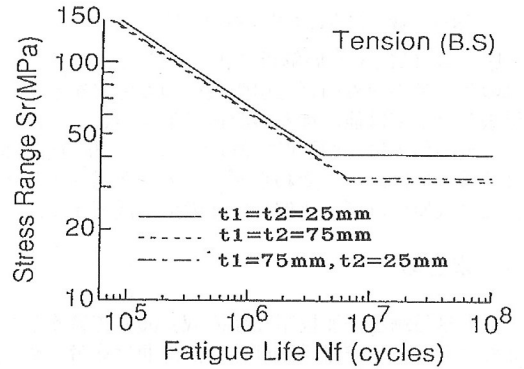


図-12 疲労寿命曲線(引張)

面外曲げと異なり $t_2$ の影響はほとんど見られない。これは、面外曲げの場合には、ガセットによって面外変形を拘束される領域が $t_2$ が小さくなる程小さくなり、それだけ応力集中が厳しくなるためと推測できる。

図-11に疲労亀裂進展解析によって求められた面外曲げを受ける場合の疲労寿命曲線を実験値とともに示す。初期亀裂深さは、溶接継手の疲労破面で観察された第一段階亀裂面の深さ<sup>8), 9)</sup>を参考に、安全側として0.05mm(表面長さ0.1mm)、最終亀裂深さはそれぞれの板厚の半分、亀裂形状比は図-5を参考に1/2を仮定した。亀裂進展速度式はJSSC指針<sup>3)</sup>の平均的な関係式を用いた。それぞれの寿命曲線は $t_1=75\text{mm}$ 、 $t_2=25\text{mm}$ で亀裂の停留が生じている試験体を除いて実験結果をよく表していることから、面外曲げを受ける面外ガセット溶接継手の板厚効果は継手部の応力分布の違いにより、ほぼ定量的に説明できることが示された。

図-12には、引張を受ける場合について、応力分布に関する補正係数 $F_g$ と最終亀裂深さ( $t_1$ の80%)、および解析モデル以外は面外曲げを受ける場合と全く同じ条件で求めた寿命曲線を示す。 $t_1=75\text{mm}$ の方が $t_1=25\text{mm}$ に比べて疲労限界が20%以上小さくなるが、面外曲げの場合と異なり $t_2$ の影響はほとんど見られない。

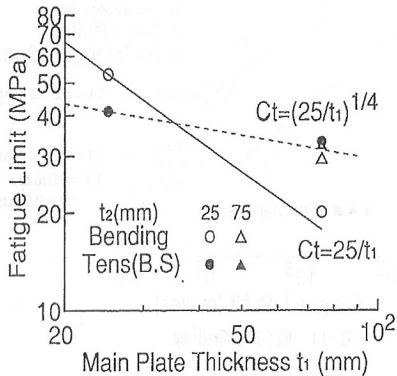


図-13 疲労強度に対する板厚効果

図-13には亀裂進展解析によって得られたそれぞれのケースの面外曲げと引張載荷の疲労限を示す。引張荷重下では他の種類の溶接継手と同じように<sup>3)</sup>疲労限の低下は1/4乗則に従っている。一方、面外曲げ荷重下では、 $t_2$ が変わらず、 $t_1$ のみが増加する場合には板厚にほぼ反比例して疲労限が低下する。

## 5. まとめ

主板厚75mmと付加板厚25mmのSM570Q材で製作した面外ガセット溶接継手試験体の面外曲げ疲労実験と3次元FEMを用いた疲労亀裂進展解析を行い、既報の結果と比較することにより疲労強度に及ぼす板厚の影響について検討した。

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 疲労亀裂は他の試験体と同様にガセット端部の主板側のすみ肉溶接止端から発生し、半楕円状に進展している。疲労限近くの低応力域では、一旦生じた亀裂が溶接部付近の応力集中域から出たところで停留する場合も見られた。

(2) 面外曲げを受ける場合、主板厚75mmの試験体の疲労限は主板厚25mmの場合の1/2~1/3程度まで大きく低下し、JSSC疲労設計指針<sup>3)</sup>のG等級を下回る。特にガセット板厚が小さく主板厚のみが大きい試験体で疲労限の低下が著しい。したがって面外ガセット

継手に対しても、長寿命域について板厚の影響を考慮する必要があることが示された。

(3) 疲労進展解析により、上記の疲労限の低下は板厚の違いによる応力集中の違いから、ほぼ定量的に説明できる。

(4) 疲労限の低下は、引張荷重下では板厚比の1/4乗則に従い、面外曲げ荷重下では板厚に反比例する場合があることを疲労亀裂進展解析により示した。

謝辞：当時関西大学学部生の中野英明、石井規美、顯両君には、実験と解析を行う際に協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋鋼上部構造用鋼板規格の解説，1979.
- 2) 坂野昌弘，新井正樹，三上市蔵：疲労亀裂進展解析による面外ガセット継手の寸法効果の検討，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 503-510，1991.
- 3) 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.
- 4) 坂野昌弘，三上市蔵，新井正樹，米本栄一，高垣奈津子：面外ガセット溶接継手の板厚効果に関する疲労実験，構造工学論文集，Vol. 40A，pp. 1255-1264，1994.
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説-鋼・合成構造物，丸善，1992.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1994.
- 7) 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注目したガセット継手の疲労強度解析，土木学会論文報告集，第303号，pp. 31-41，1980.
- 8) 坂野昌弘，新井弘，西村俊夫：すみ肉溶接継手の腐食疲労亀裂発生・進展挙動，構造工学論文集，Vol. 36A，pp. 379-388，1990.
- 9) Miki, C., Sakano, M., Toyoda, Y. and Yoshizawa, T.: Early Stage Propagation Behavior of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints, *Structural Eng/Earthquake Eng.*, Vol. 7, No. 1, pp. 123s-131s, 1990.
- 10) 日本マーク：MARCプログラムユーザーマニュアルA. B. C. D編 1989.

(2003. 7. 9 受付)

## THICKNESS EFFECT ON FATIGUE STRENGTH OF OUT-OF-PLANE WELDED GUSSET JOINT

Masahiro SAKANO and Masaki ARAI

The effect of plate thickness on fatigue strength of the out-of-plane welded gusset joints was investigated through out-of-plane bending fatigue test and 3-D finite element analysis for the joint specimens made of JIS SM570 high strength steel plates of 25mm and 75mm thicknesses. The specimen with the thickness of 75mm has such a lower fatigue limit as about one-half or one-third of that of 25mm thick joint under out-of-plane bending, because of its very high stress concentration at the fillet weld toe. Finally, the authors proposed the correction factor for fatigue strength of the out-of-plane welded gusset joint taking account of thickness effect under both of out-of-plane bending and tensile loading.