

すみ肉溶接止端近傍の応力に着目した付加物溶接継手の疲労強度解析

Re-analysis of fatigue test data of attachments based on stress at fillet weld toe

山田健太郎*, 肖志剛**, 金 仁泰***, 舘石和雄****

Kentaro YAMADA, Zhi-Gang XIAO, In-Tae KIM, Kazuo TATEISHI

*Ph.D. 名古屋大学教授 大学院環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

** 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)

*** 工博 名古屋大学講師 理工科学総合研究センター (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**** 工博 名古屋大学助教授 大学院環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Fillet weld causes stress concentration, K_t , at weld toe. Its effect is rather local, for example within 1 mm deep for non-load-carrying fillet-welded joints of 10 mm thick with fillet welds of 6 mm leg length. Such a fillet-welded joint is taken as a reference detail. Then, K_t of other fillet-welded details can be defined as local K_t multiplied by global (geometric) K_t . In this study K_t at 1 mm away from weld toe of fillet-welded attachment is analyzed to find the global K_t . Fatigue test data of attachments is re-plotted with nominal stress range multiplied by global K_t . It is in good agreement with the test data of the reference detail. This new approach may open a way to investigate fatigue strength of more complicated fillet-welded attachments by FEM analysis.

Key Words: attachment, fillet weld, geometric stress concentration, fatigue strength

キーワード: 付加物溶接継手、すみ肉溶接、構造的な応力集中、疲労強度

1. まえがき

実構造物の疲労試験は実施時間とコストがかかるため、一般には日本鋼構造協会の疲労設計指針¹⁾などを参考にして決められることが多い。しかしながら、疲労設計指針に示される継手は、強度等級が疲労試験結果をもとに決められている関係上、その種類に限りがあり、多様な実構造物の継手に対応しない場合が生じる。その場合、破壊力学を用いた疲労き裂進展寿命の解析や、ホットスポットストレス(HSS)法に基づいて強度評価を行う^{1),2)}。溶接継手に生じる疲労現象が、疲労き裂の発生と進展に左右され、溶接止端やルートに応力集中部を持つ溶接継手では、疲労き裂進展が寿命の大半を占めることから、これまで前者の手法が有効なことが示されている。

後者のHSS法は、海洋構造物で多用された鋼管継手のような複雑な応力状態の溶接継手の疲労評価に用いられた。鋼管継手の疲労試験を行うと、疲労き裂が発生する部位では、塑性繰り返しにより発熱することも含めて命名されたこの方法は、き裂発生部位やその寿命を予測する方法として一般的に用いられてきた。この方法では、決められた2点の応力を外挿して溶接止端の構造的な応力集中(HSS)を求める。すなわち、溶接止端の応力範囲をHSSによって代表させる考え方である。HSSは、溶

接継手近傍の所定の位置にひずみゲージを貼付して実験的に求めるか、FEM解析によって解析的に求める³⁾。この場合、溶接止端部の疲労強度は、非仕上げの突合せ溶接継手やリブ十字形すみ肉溶接継手で代表される。

HSS法の考え方は単純であるが、どの位置の応力を外挿するかについては議論が分かれる。例えば、板厚 t に対して止端から $0.4t$ と $1.0t$ の位置の応力を外挿してHSSとする方法²⁾が提案されているが、解析や実験で対象とする継手が異なると、同一の結果にならないこともある。これを解消する手段として、対象とする実構造物の継手の形状がある程度統一性がある場合には、応力を外挿する点を一律に決めるのも一つの方法である⁴⁾。

また、砂本ら⁵⁾はすみ肉溶接止端の応力をピーク応力、二次応力、公称応力の3種類に分けて、評価する方法を提案している。ピーク応力を含むことから、参照するのは母材の疲労強度となる。構造的な二次応力の推定は、HSS法のように、板表面の応力分布から求める。

溶接継手の疲労では、疲労き裂は主に溶接止端と溶接ルートから発生する。このうち、すみ肉溶接止端のき裂は、すみ肉溶接の局所的な応力集中に起因して発生、進展する。その疲労挙動は、一般にリブ十字形すみ肉溶接継手の疲労試験を行って検討する。これに対して、実構造物には、複雑に板を組み合わせた溶接継手が存在する。

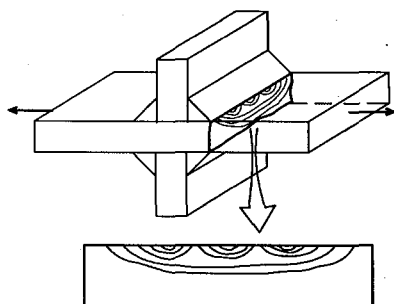


図-1 リブ十字形すみ肉溶接継手の
疲労破面のスケッチ

そのような継手でも疲労き裂がすみ肉溶接止端から発生する場合には、構造的な応力集中をリブ十字形すみ肉溶接継手の K_t との比として定義できる。この定義は、HSS 法と似ているが、ここでは、疲労き裂が発生、進展するすみ肉溶接止端のごく近傍の K_t を求めることとした。

2. 溶接止端の応力の考え方

2. 1 溶接止端に発生する疲労き裂と基準強度

作用応力に直角なすみ肉溶接の疲労試験は、図-1 に示す荷重非伝達のリブ十字形すみ肉溶接継手で試験されることが多い。すみ肉溶接の止端には、一般に止端の凹凸に沿って複数の半楕円形のき裂が発生し、隣り合うき裂が合体しながら板厚方向に進展する。すみ肉溶接の止端形状、すなわち止端角 θ と止端半径 ρ 、およびこの疲労き裂の進展時の形状 a/b が、リブ十字形すみ肉溶接継手の疲労寿命のばらつきを与える。ここで、 a は表面き裂の深さ、 b はき裂の幅の $1/2$ である。き裂形状については、き裂が半円に近いほど一般に疲労寿命が長くなる⁶⁾。作用応力に斜めにすみ肉溶接線がある場合も、止端に沿って複数個発生したき裂が合体しながら作用応力に直角に進展する⁷⁾。そのため角度が大きい場合、例えば作用応力に直角な面に対して 30° や 45° の場合、き裂は半楕円形のまま板厚方向に進展し、ある段階で段差を生じてき裂がつながる。き裂が半楕円形で進展するため、一般に作用応力に直角なすみ肉溶接の場合より長寿命側となる。

実際のすみ肉溶接の疲労強度を考える場合、すみ肉溶接止端の形状や発生する疲労き裂の形状をコントロールすることはできない。そのため、疲労試験結果には同一の試験体であってもある程度のばらつきが生じる。疲労設計指針では、通常そのようなデータのばらつきの下限値を下回る継手等級を与える。リブ十字形すみ肉溶接継手では、JSSC-E (200 万回疲労強度で 80MPa) となる¹⁾。また、試験体の形状、例えば板厚やリブ厚が大きくなると疲労強度が低下する。これに対しては、板厚効果として厚板になるほど、疲労強度を下げるような配慮

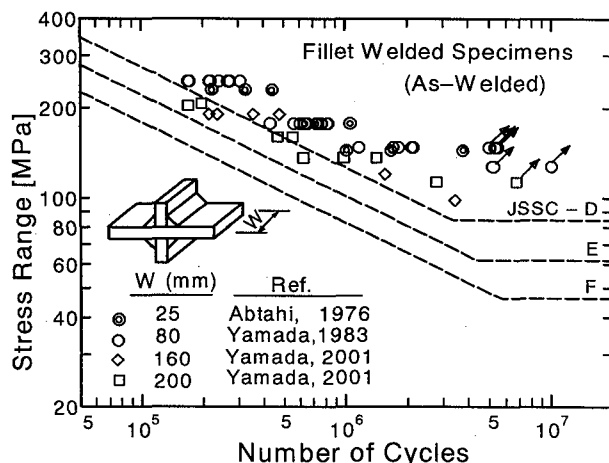


図-2 リブ十字形すみ肉溶接継手の疲労試験結果

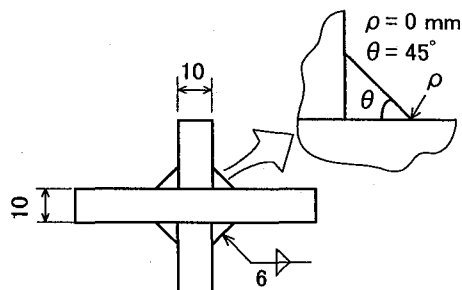


図-3 基準とするリブ十字形すみ肉溶接継手

をしている。

リブ十字形すみ肉溶接継手の疲労試験結果の一例を、図-2 に示す^{7)~10)}。ここに引用した試験体の板厚とリブ厚は約 10mm で、試験体幅が 25, 80, 160, 200mm と異なる。いずれもこの継手の継手等級である JSSC-E より長寿命側である。また、試験体幅が大きくなると疲労寿命が短くなる傾向が見られる。このため、リブ十字形すみ肉溶接継手では、ある程度の幅を持つ試験体での疲労試験結果を用いて強度等級を決める必要がある。

2. 2 溶接止端の応力の考え方

本研究では、図-3 に示す板厚とリブ板厚が 10mm、すみ肉溶接の脚長 6mm のリブ十字形すみ肉溶接継手が基準強度を与えると考える。すみ肉溶接の形状は止端角 $\theta=45^\circ$ 、止端半径 $\rho=0\text{mm}$ とする。

これに対して、対象とする複雑な継手のすみ肉溶接止端の応力集中 K_t は、止端の局所的な応力集中 $K_{t,\text{local}}$ と構造的な応力集中 $K_{t,\text{global}}$ の積で表すことができると考える。

$$K_t = K_{t,\text{local}} \times K_{t,\text{global}} \quad (1)$$

ここでは、構造的な応力集中がある継手の FEM 応力解析を行い、止端部近傍の K_t を求める。構造的な応力集中 $K_{t,\text{global}}$ は、 K_t を $K_{t,\text{local}}$ で除して表示することがで

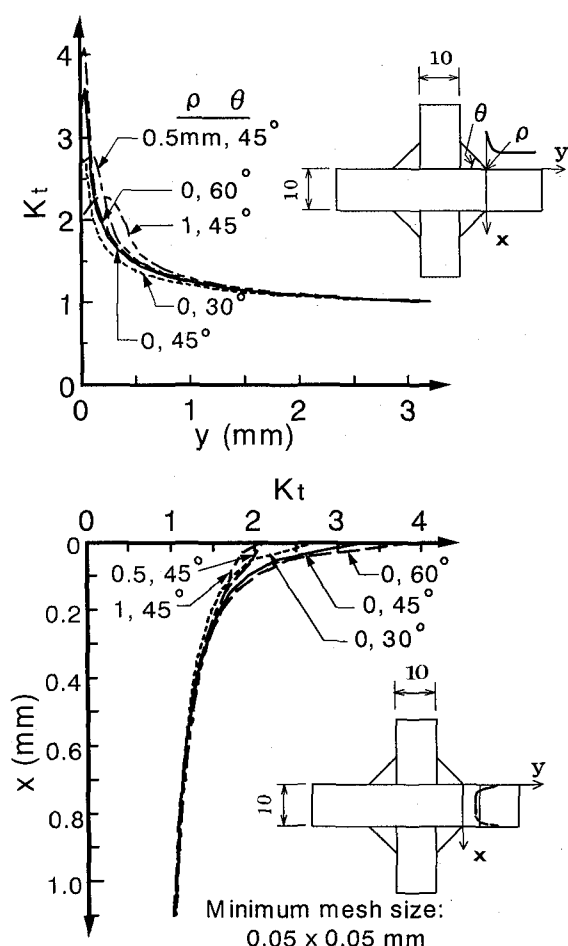


図-4 基準とするすみ肉溶接止端近傍の応力集中

きる。すなわち、ここで基準としたリブ十字形すみ肉溶接継手は $K_{t, \text{global}}=1$ と考える。

解析モデルは、 $\rho=0$ mm であるので、止端位置で特異点を生じる。そのため、FEM解析で求めた止端の K_t は、必ずしも精度の良いものではない。また、すみ肉溶接には止端形状のばらつきがあり、限られた形の止端の K_t を精度良く求めることは余り意味を持たない。そこで、止端から 1 mm 離れた位置の K_t を求め、リブ十字形すみ肉溶接継手の同じ位置の K_t で無次元化する。

2. 3 基準とするすみ肉溶接継手

基準とした継手の解析は汎用有限要素プログラム COSMOS/M で、平面ひずみ四角形要素で行った。解析結果を節点の平均応力でもとめる。ここでは、まず 0.05×0.05 mm の要素サイズで板厚方向 (x 方向) と板表面に沿った方向 (y 方向) の K_t (式 1 の定義では、 $K_{t, \text{local}}$) を求め、図-4 に実線で示す。ここでは、板厚方向では、1 mm 程度、板表面では 2mm 程度離れたところで、 $K_t \approx 1$ となっており、すみ肉溶接の影響は局所的であることが分かる。

図-4 には、すみ肉溶接の止端形状を変えたもの、すなわち、 θ を 45° に対して 30° 、 60° 、 ρ を 0 mm に対し

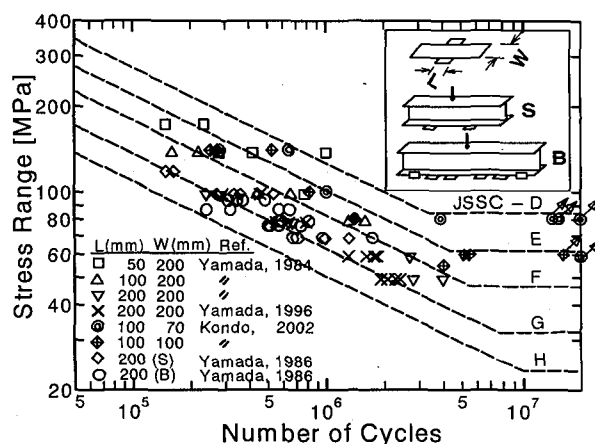


図-5 面内ガセット溶接継手の疲労試験結果

て 0.5, 1 mm. とした解析結果も示す。この解析では、最小要素寸法を 0.05×0.05 mm とした。いずれも応力集中の影響は局所的である。従って、溶接のまま (as-welded) のすみ肉溶接止端の局所的な K_t は止端形状のばらつきがあってもこの程度であると考えて良い。

3. 面内ガセット溶接継手の止端応力の解析

3. 1 面内ガセット溶接継手の疲労試験結果

面内ガセット溶接継手の疲労試験は、実構造物で比較的疲労強度が低い部類に入る継手であり、図-5 に示すように引張試験体やはり試験体の引張フランジに付加物を溶接する形で試験が行われている (12)~(16)。

この試験体では、特にガセットの長さ L が疲労寿命に影響を及ぼす。例えば、 $L=50$ mm のガセットは、ほぼ F 等級程度であるのに比べ、 $L=200$ mm では、H 等級程度になっている。

3. 2 応力集中の考え方

面内ガセット溶接継手では、ガセット端のまわし溶接部の止端から疲労き裂が発生し、最初半楕円形のき裂として進展する。このき裂は、すぐに板厚を貫通し、主板を破断する方向に進展する。すみ肉溶接止端からき裂が発生することから、本研究の考え方で解析を行い、この方法の適用性について検討する。

まず、 $L=50, 100, 200$ mm の面内ガセット溶接継手の止端近傍を、リブ十字形すみ肉溶接継手と同じく 0.2×0.2 mm の要素サイズで要素分割して、 x 方向 (ガセット溶接継手では板幅方向) と y 方向 (板面で止端に直角方向) の応力集中 K_t を求めて図-6 に示す。ガセットの長さによって K_t は異なり、この応力集中の違いが、疲労強度の差となってあらわれている。また、板幅方向、止端直角方向の K_t を見ると、いずれも止端直近で急に高くなっている。これは、ガセットに起因する応力集中にすみ肉溶接止端の応力集中 $K_{t, \text{local}}$ が重畳したものと考

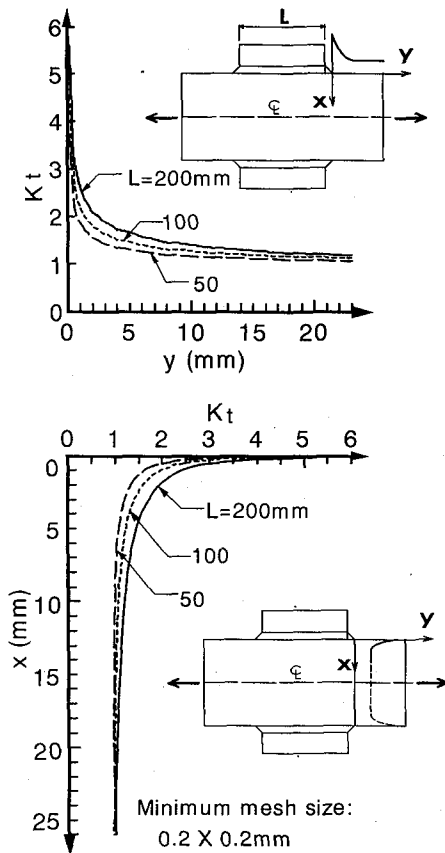


図-6 面内ガセット溶接継手の応力集中

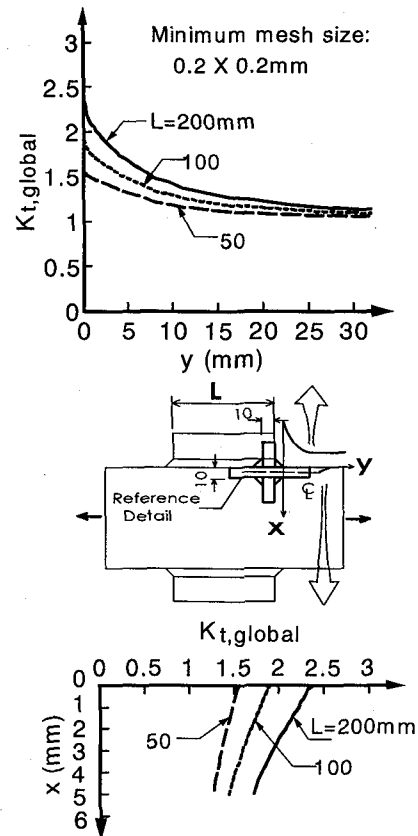


図-7 基準継手の $K_{t,local}$ で無次元化した $K_{t,global}$

られる。

そこで、この K_t を、基準となるリブ十字形すみ肉溶接継手の応力集中 $K_{t,local}$ で無次元化した構造的な応力集中 $K_{t,global}$ を計算し、図-7に示す。この結果を見ると、 x 方向、 y 方向ともに、ガセット長 200 mm で $K_{t,global} \approx 2.5$ 程度であり、また x 方向、 y 方向ともに比較的ゆっくり低減していることが分かる。例えば、疲労き裂が進展する x 方向では、200 mm のガセットで、 $x=0$ mm で $K_{t,global} = 2.5$ 程度から、 $x=3$ mm で $K_{t,global} = 2$ 程度の緩い低減を示している。疲労き裂の特徴として、き裂が小さい間は進展が遅く、ある程度き裂が大きくなると進展が早くなる。図-7で示されるような、構造的な応力集中が x 方向で同じような値であるということは、すみ肉溶接止端の応力が、 $K_{t,global}$ 相当大きくなったと考えても良い。

ここで示したガセット溶接継手のように単純な形状ではなく、複雑な構造物では、比較で用いた 0.2×0.2 mm の小さな要素サイズで応力解析するのは、不可能ではないが困難である。そこで、止端近傍の要素サイズを 1.0×1.0 , 3.0×3.0 , 5.0×5.0 mm と大きくして求めた K_t を図-8に白めきの印で示す。 0.2×0.2 mm の要素サイズで計算した K_t を基準の継手で無次元化した解析結果と比較すると、疲労き裂が発生、進展する止端のごく近傍は、200 mm のガセットで $K_{t,global} \approx 2.5$ であり、 $x=1$ mm の場合がその値に相当する。また、 $x=1$ mm では、

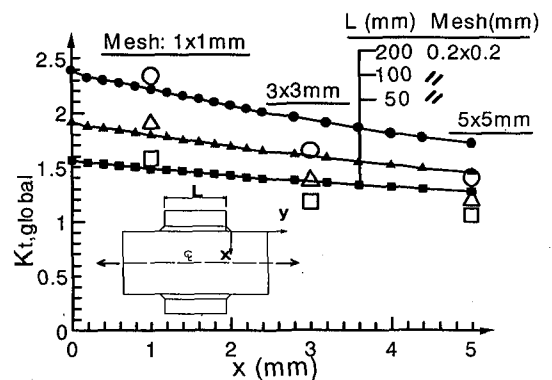


図-8 要素サイズを変えた場合の K_t

0.2×0.2 mm の要素サイズで計算して無次元化したものと 1.0×1.0 mm の要素サイズで計算したものの差は小さい。このことは、構造的な応力集中を $x=1$ mm 程度の位置の K_t を求めることで止端と同程度の K_t を求めることができ、さらに 1.0×1.0 mm 程度の要素サイズでも $K_{t,global}$ が解析可能なことを示唆している。さらに、ガセット溶接継手の $K_{t,global}$ は、き裂進展方向になだらかな勾配を持っている。このように $K_{t,global}$ がある程度の大きさまで一定と見なせるような状況であれば、本解析法や HSS 法のような考え方が適用可能である。

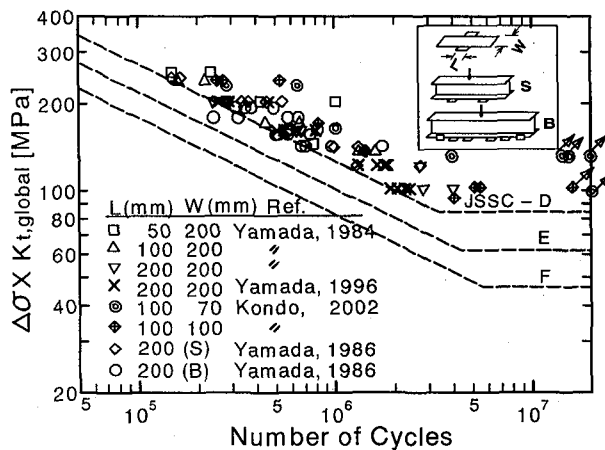


図-9 $K_{t,global}$ を用いて再整理した S-N 線図

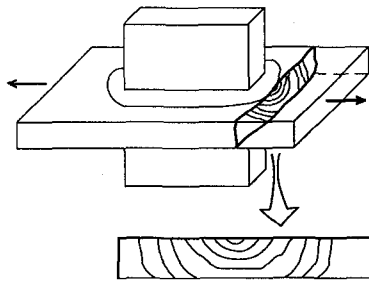


図-10 面外ガセットの疲労き裂の例

3. 3 疲労試験結果の再整理

FEM解析で得られた $K_{t,global}$ の値を、面内ガセット溶接継手の公称応力範囲に乗じて、疲労試験結果を再整理したものを、図-9に示す。このようにすると、ガセットの長さによって差がある疲労強度がほぼ同じような強度の所に集まってくる。また、その強度は、図-2に示すリブ十字形すみ肉溶接継手と同程度になる。逆に言えば、リブ十字形すみ肉溶接継手に対して、ガセットを溶接したことによる $K_{t,global}$ を考えると、ガセット溶接継手の疲労強度が推定できることになる。

4. 面外ガセット溶接継手の止端応力の解析

4. 1 面外ガセット溶接継手の疲労試験結果

ガセットを板面に作用応力方向に溶接した面外ガセット溶接継手は、プレートガーダー橋の腹板にガセットが溶接されるような場合を想定している。疲労試験は、引張試験体で行う場合^{8),10),17),18)}と、はりの腹板に溶接して曲げ疲労試験する場合¹⁹⁾がある。また、面外ガセットの方向を作用応力に対して斜めに溶接する試験¹⁰⁾も行われている。

ガセットの端部は、通常まわしすみ肉溶接される。この部分は、面内ガセットと同様に止端に起因する $K_{t,local}$ とガセットの長さ起因する $K_{t,global}$ が重畳するため、図-10に示すようにガセット端のまわしすみ肉溶接の止端から疲労き裂が発生、進展する。発生した1個または

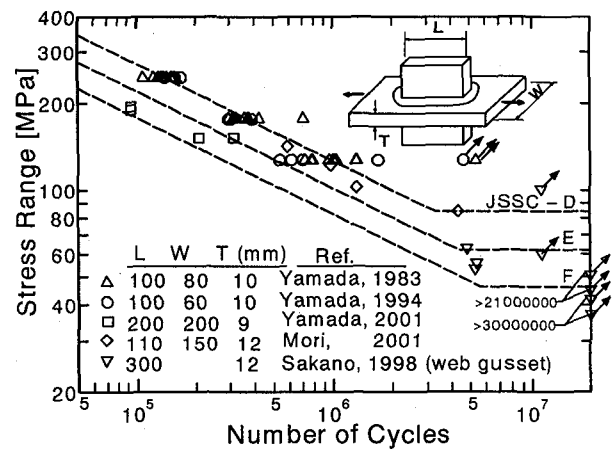


図-11 面外ガセット溶接継手の疲労試験結果

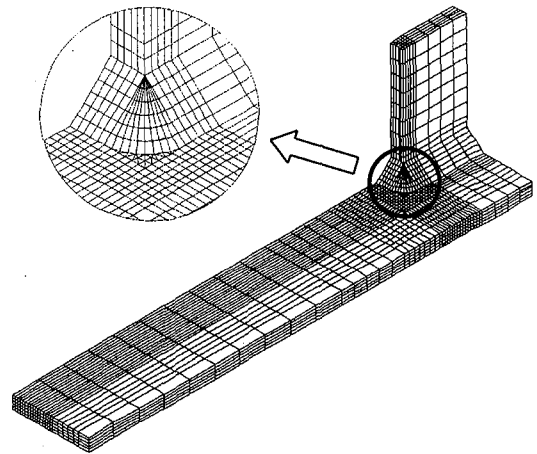


図-12 面外ガセット溶接継手の要素分割の例

複数個の疲労き裂は、合体しながら板厚方向に進展する。板幅方向には、まわし溶接に沿ってしばらく進展した後、止端から離れて作用応力に直角の方向に進展する。

これまで実施された疲労試験結果を図-11に示す。実験では、試験体の板幅、板厚、ガセットの長さが異なり、結果としてガセットが溶接されたことによる $K_{t,global}$ が異なる。そこで、これまで実験で用いられた試験体の $K_{t,global}$ を計算し、面内ガセット溶接継手の場合と同様に、それらの疲労強度がリブ十字形すみ肉溶接継手に帰結することを示す。

4. 2 応力集中の解析

面外ガセット溶接継手のまわしすみ肉溶接の止端部は、3次元解析が必要になる。そのため要素分割が複雑になり、止端部に用いる要素の大きさが平面モデルより大きくならざるを得ない。面内ガセット溶接継手で示したように、止端部の局所的な応力集中 $K_{t,local}$ を除いて、構造的な $K_{t,global}$ を求めるのであれば、1.0 mm の要素サイズを用いることができる。ここでは、用いる要素の最小寸法を1 mm の立方体として、8 節点固体要素を用いて解析した。解析に用いた要素分割の一例を図-12に示す。

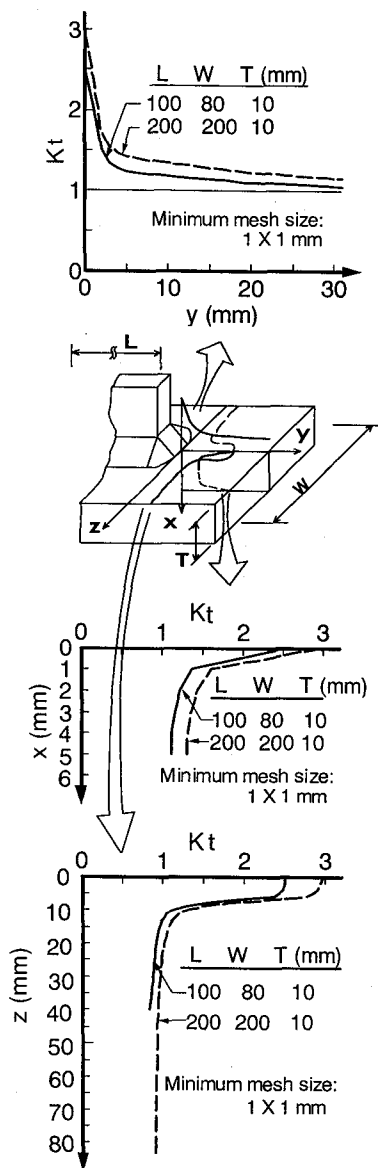


図-13 まわし溶接止端近傍の応力集中

まわしすみ肉溶接部は、止端角 45° 、止端半径 $\rho=0$ mm とし、対称性を考えて $1/8$ をモデル化した。

ガセット端のまわしすみ肉溶接止端近傍の応力の分布を、板幅 80 mm と 200 mm の試験体の場合について図-13に示す。板厚方向の K_t (この場合は、 $K_{t,global}$) は、ガセットを溶接することで、止端部近傍の応力集中だけでなく、板厚方向の K_t も全体に大きくなっている。このような場合には、疲労き裂が進展する板厚方向の応力が、 $K_{t,global}$ だけ大きくなったと考えることができる。すなわち、ガセット溶接継手とリブ十字形すみ肉溶接継手が止端近傍の $K_{t,global}$ を介してつながったことになる。

この結果を用いて、面外ガセット溶接継手の公称応力範囲を $K_{t,global}$ 倍だけしてデータを再プロットして、図-14に示す。公称応力範囲で示した図-11では、ガセットの長さによって疲労寿命に差があったものが、 $K_{t,global}$ を用いることで、図-2に示すリブ十字形すみ肉溶接継手相当の疲労寿命になることが分かる。

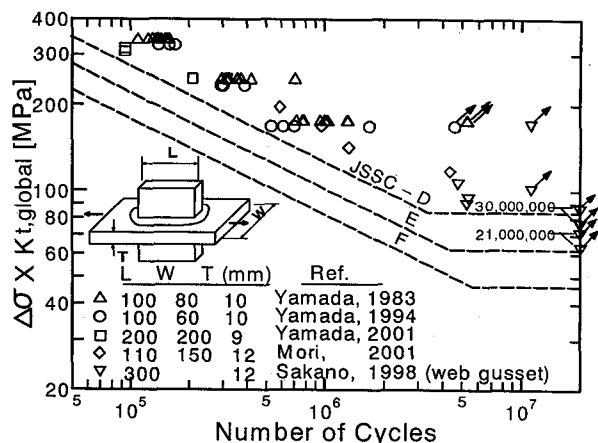


図-14 $K_{t,global}$ で整理した疲労試験結果

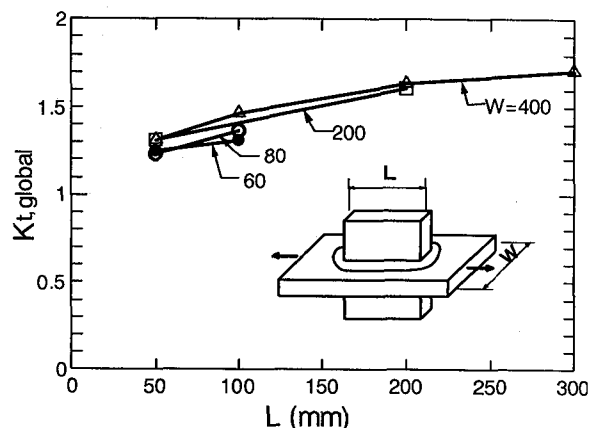


図-15 ガセット長、試験体幅を変えた場合の $K_{t,global}$

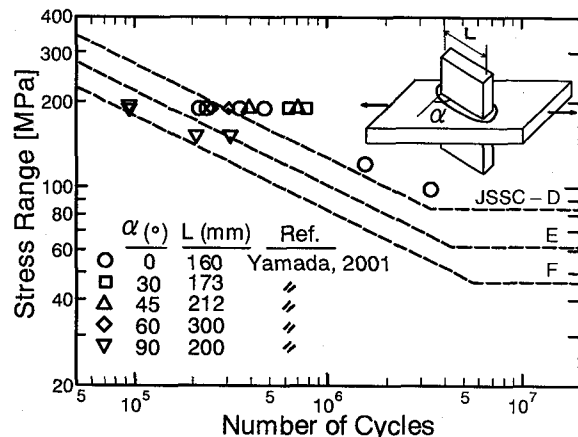


図-16 斜めに溶接された面外ガセット

面外ガセット溶接継手は、試験体幅 W の影響を受ける。そこで、 $W=60\sim 400$ mm とし、そこにガセット長 $L=50\sim 300$ mm の面外ガセットが溶接された場合を想定して、 $K_{t,global}$ を計算し、図-15に示す。前述したように、ガセットの長さの影響が大きいことが分かる。たとえば、 $W=200$ mm では、 $L=50$ mm の $K_{t,global}=1.3$ 程度が、 $L=200$ mm では $K_{t,global}=1.6$ となっている。それに比べて、幅 W の影響は比較的小さい。

4. 3 作用応力に斜めに溶接された面外ガセット

図-16に示す作用応力に斜めに溶接された面外ガ

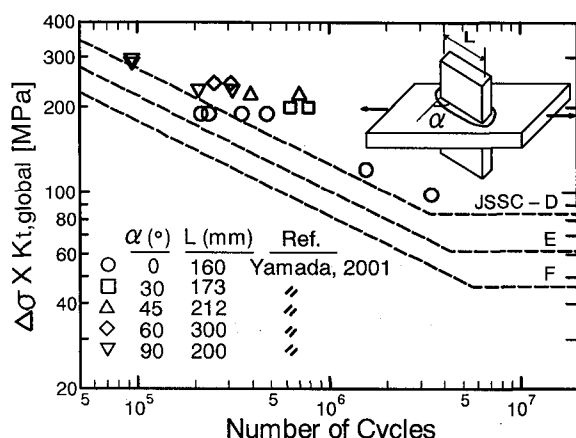


図-17 $K_{t,global}$ で再整理した S-N 線図

セット溶接継手では、作用応力に直角の場合 ($\alpha=0$, すなわちリブ十字すみ肉溶接継手になる) に比べて、一般に疲労強度は低下する。また、同じ長さの面外ガセットより寿命が長くなる。その程度は、面外ガセットの角度による。この実験では、ガセット長 L と面外ガセットの取り付け角度 α が試験体毎に異なる。

そこで、この継手についても、3次元の FEM 解析を行い、止端部の要素分割を $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ mm とした場合の $K_{t,global}$ を求めた。この値を公称応力範囲に乗じて実験データを再整理した S-N 線図を図-17 に示す。結果は、これまでと同様に、リブ十字すみ肉溶接継手の疲労強度程度になることが分かる。この結果を見ても、溶接止端の $K_{t,global}$ を求めることで、基準となるリブ十字すみ肉溶接継手の疲労強度と関連づけることが可能である。

5. まとめ

本研究では、HSS 法と同様に、溶接止端の応力集中を、溶接止端に起因する局所的な応力集中 $K_{t,local}$ と、構造的な応力集中 $K_{t,global}$ とに分けて、疲労試験結果を再解析することを試みた。まず、板厚 10 mm、溶接サイズ 6 mm のリブ十字すみ肉溶接継手を基準とする継手と仮定し、すみ肉溶接止端直近の応力を FEM 解析で求めて $K_{t,local}$ と仮定した。また、それと同じサイズの要素を用いて面内ガセット溶接継手を解析し、両者の比をとり、面内ガセット溶接継手の構造的な応力集中 $K_{t,global}$ とした。この比を用いてガセット溶接継手の疲労試験結果を再整理して、リブ十字すみ肉溶接継手とほぼ同じ疲労強度になることを示した。また、用いる要素サイズについて検討した。さらに、同様な解析を面外ガセット溶接継手に適用した。比較に用いた継手は、いずれも疲労き裂は溶接止端から発生したものであるから、同じような疲労強度と見なすことが可能であることを示した。

本研究の内容をまとめると以下のようにある。

- (1) リブ十字すみ肉溶接継手と面内ガセット溶接継

手に対しては、FEM 解析に用いる四角形平面ひずみ要素の最小メッシュサイズを 0.2×0.2 mm とし、て応力集中を解析し、止端の局所的な $K_{t,local}$ とガセットに起因する構造的な $K_{t,global}$ を分離することを試みた。

- (2) 板厚 10mm, リブ厚 10mm, すみ肉溶接の脚長 6mm のリブ十字すみ肉溶接継手を基準として、面内ガセット溶接継手の公称応力範囲に解析で求めた $K_{t,global}$ を乗じることで、両者の疲労強度を関連づけることができた。
- (3) また、面内ガセット溶接継手については、FEM 解析で用いる要素サイズを大きくしても、得られる $K_{t,global}$ の値が変わらないことを示した。
- (4) 同様な解析を面外ガセット溶接継手、および斜めに溶接された面外ガセット溶接継手についても行った。この解析では、面内ガセット溶接継手の検討結果を参考にして、すみ肉溶接止端の要素サイズを $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ mm とした。その結果得られた $K_{t,global}$ を用いて疲労試験結果を再整理して、リブ十字すみ肉溶接継手と同じような疲労強度となることを示した。
- (5) この考え方をを用いると、複雑な構造の止端き裂に対して、構造的な応力集中 $K_{t,global}$ を求めることで疲労寿命の推定が可能になる。

謝辞

本論文では、解析結果を比較するのに主に名古屋大学で行った疲労試験データを用いたが、法政大学森猛先生、関西大学坂野昌弘先生には、面内や面外ガセット溶接継手に関する貴重なデータを送っていただいた。また、名城大学近藤明雅先生には、同様な解析をより細かい要素分割で行った結果を見せていただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説、1993 年 4 月。
- (2) IIW : Recommendations on Fatigue of Welded Components, 1995.
- (3) 八木順吉, 町田進, 富田康光, 的場正明, 川寄哲郎 : ホットスポット応力基準による平板構造の疲労強度評価(第一報), 日本造船学会論文集, 第 169 号, pp.311-318, 1991.
- (4) 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, pp.1055-1062, 1992.
- (5) 砂本大造, 山内崇賢, 的場正明 : 溶接継手の疲れ強さに関する新しい評価法の検討, 三菱重工技報,

vol.16, No.3, 1979.

- 6) 山田健太郎, Hirt, M. A. : 破壊力学を応用したパラメトリックな疲労寿命解析, 土木学会論文報告集, 第319号, pp.55-64, 1982.
- 7) 山田健太郎, 金仁泰, 伊藤健一: 作用応力に斜めな荷重非伝達型リブ十字すみ肉溶接継手の疲労挙動, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.121-127, 2001.
- 8) 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, 第337号, pp.67-74, 1983.
- 9) Abtahi, A., Albrecht, P., M. and Irwin, G. R. : Fatigue of Periodically Overloaded Stiffener Detail, Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE, Vol.102, No.ST11, pp.2103-2119, 1976.
- 10) 山田健太郎, 加藤秀一郎, 岡部篤紀, 金仁泰, 小塩達也: 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, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1039-1045, 2001.
- 11) 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.
- 12) 山田健太郎, 酒井吉永, 菊池洋一: ガセットを溶接した引張部材の疲れ強さとストップホールの効果, 土木学会論文報告集, 第341号, pp.129-136, 1984.
- 13) Yamada, K., Sakai, Y., Kondo, A. and Kikuchi, Y. : Fatigue Strength of Tension Members with Welded Gussets and Life Estimation by Fracture Mechanics, IIW Doc., XIII-1204-86, 1986.
- 14) 山田健太郎, 岡戸直樹, 田中寿志, 近藤明雅: 側方に静的荷重を受けたガセット継手の疲労強度, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.33-42, 1996.
- 15) 近藤明雅, 山田健太郎: 面内ガセット溶接継手の長寿命変動荷重疲労試験, 構造工学論文集, Vol.48A.
- 16) Yamada, K., Sakai, Y., Kondo, A. and Kikuchi, Y. : Weld Repair of Cracked Beams and Residual Fatigue Life, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol.3, No.2, pp.373s-382s, 1986.
- 17) 近藤明雅, 山田健太郎, 菊池洋一: 10年間大気暴露した耐候性鋼と普通鋼溶接継手の疲労挙動, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.383-390, 1994.
- 18) 森猛, 公表予定.
- 19) 坂野昌弘, 宝角正明, 下良利成, 三上市蔵: 主桁-横桁接合部ウェブガセット溶接継手の長期疲労強度, 鋼構造学論文集, 第5巻第18号, pp.31-40, 1998.

(2001年9月14日受付)