

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

FATIGUE CRACK PROPAGATION ANALYSIS ON SIZE EFFECT OF OUT-OF-PLANE GUSSET JOINT

坂野昌弘*・新井正樹**・三上市蔵***

By Masahiro SAKANO, Masaki ARAI and Ichizo MIKAMI

Size effects of the main plate and gusset plate on the fatigue strength of out-of-plane gusset joints are investigated through fatigue crack propagation analyses applying the fracture mechanics concept. The fatigue limit of the joint with gusset plates of the thickness more than 25 mm decreases with increase of the main plate thickness. However, the fatigue strength of the joint with gusset plates of 25 mm thickness is almost independent of the main plate thickness.

1. はじめに

継手の種類により、板厚などの寸法が疲労強度に影響を及ぼす場合がある¹⁾。前面すみ肉溶接継手の疲労強度に及ぼす継手寸法の影響に対しては、山田・Hirt²⁾、三木ら³⁾などにより検討されており、現在改訂中の日本鋼構造協会疲労設計指針(案)⁴⁾(以下、JSSC指針(案)と略称)ではそれらの継手に対して板厚の影響による疲労許容応力範囲の補正係数が規定されている。

面外ガセット継手に関しては、山田ら⁵⁾による板厚10mmの試験体を用いた疲労試験と強度解析、下川ら⁶⁾による板厚30mmの比較的大型の試験体を用いた疲労試験、竹名ら⁷⁾による板厚9mmと18mmの継手を対象とした応力解析と疲労試験、および著者ら⁸⁾による板厚9mmの継手試験体を用いた長寿命疲労試験と疲労亀裂進展解析などが行われているが、解析・実験例ともに十分ではなく、その疲労強度に及ぼす継手寸法の影響について十分に明らかにされているとはいえない。特に、板厚の大きな面外ガセット継手を対象とした疲労限付近の低応力・長寿命領域の研究が不足している。構造物の大型化に伴って板厚の大きな鋼材を使用する機会が多くなること、および鋼構造部材に実際に生じる繰返し応力の大きさや繰返し回数を考慮すると、面外ガセット継手に関するそのような研究が必要と考えられる。

しかしながら、板厚の大きな面外ガセット継手の疲労試験を行う場合には大型の試験体が必要となり、試

* 工博 関西大学助手 工学部土木工学科 (〒564 大阪府吹田市山手町3-3-35)

** 巴組鐵工所 橋梁設計部橋梁設計課 (〒135 東京都江東区豊洲3-4-5)

*** 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

験機容量の面から試験の実施が困難になる。また、疲労限付近の長寿命疲労試験を数多く実施するには膨大な時間が必要となる。そこで、本研究では、破壊力学の手法を用いた疲労亀裂進展解析を行うことにより、面外ガセット継手の疲労強度に及ぼす主板厚、付加板厚および付加板長さの影響を検討した。

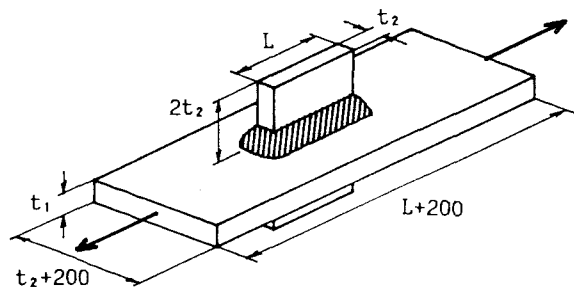
2. 疲労亀裂進展解析方法

(1) 解析対象

解析の対象とした面外ガセット継手の形状と寸法を図－1に示す。主板厚（ t_1 ）と付加板厚（ t_2 ）は本州四国連絡橋で使用されている鋼材⁹⁾の最大板厚を考慮して25, 50, 75mmの3種類、付加板長さ（ L ）はJSSC指針（案）⁴⁾で L が100mmを境に強度等級を区別していることを考慮して100, 200, 400mmの3種類に設定した。 t_1 , t_2 , L の寸法の組合せを表－1に示す。 $t_1=t_2=25$ mmおよび75mmについて L の影響を検討し、それ以外の t_1 , t_2 の組合せでは $L=400$ mmのみについて t_1 , t_2 の影響を検討した。なお、すみ肉溶接のサイズは、国鉄建造物設計標準¹⁰⁾ および道路橋示方書¹¹⁾に従い、 $t_1=25, 50, 75$ mmに対して、それぞれ8, 10, 13mmに設定した。

表－1 継手寸法の組合せ（単位：mm）

t_1	t_2	25	50	75
25	$L=$	100 200 400		
50	$L=$	400	$L= 400$	
75	$L=$	100 200 400	$L= 400$	$L= 400$



図－1 面外ガセット継手（寸法：mm）

(2) 解析方法

疲労亀裂は、ガセット端部の回し溶接止端から発生し、主板内を荷重方向（継手の長手方向）と垂直に半楕円形状に進展すると仮定した。疲労亀裂進展寿命の計算方法は、ガセット継手の疲労亀裂発生・進展挙動を検討した文献⁹⁾および疲労設計曲線について検討した文献¹²⁾と同様である。即ち、溶接止端部に生じた亀裂の最深部における応力拡大係数範囲（ ΔK ）は、公称応力範囲を S_r 、亀裂深さを a とし、亀裂形状、表面亀裂、有限板厚および応力分布に対する補正係数、 F_e , F_s , F_t および F_g を用いて、式(1)で表される。

$$\Delta K=F_e \cdot F_s \cdot F_t \cdot F_g \cdot S_r \sqrt{\pi a}$$
 (1)

F_e , F_s , F_t については、式(2)～(4)で表される。

$$F_e=1/\sqrt{1+1.464(a/b)^{1.65}}$$
 (2)

$$F_s=1.12-0.12(a/b)$$
 (3)

$$F_t=(1-0.025 \lambda^2+0.06 \lambda^4) \sqrt{\sec (\pi \lambda / 2)}$$
 (4)

ここで、 b は亀裂表面長さの半分、 λ は a/t_1 である。亀裂形状比 a/b は、ガセット継手の疲労試験結果⁹⁾を参考に、初期亀裂に対して1/2、それ以外では安全側をとり1/5と仮定した。したがって、 F_e , F_s に関しては、継手の寸法によらず同一条件である。なお、ここでは単独の初期亀裂を仮定したが、疲労寿命に及ぼす初期亀裂数の影響は非常に小さいことが三木ら³⁾により報告されている。

補正係数 F_g は、表－1に示した10ケースの継手寸法の組合せを対象として亀裂が無い場合の応力分布を3次元FEM解析¹³⁾によって求め、その応力分布を亀裂面に作用させたときの応力拡大係数から求めた。したがって、 F_g は継手寸法によって異なったものとなる。ここで、疲労亀裂の発生位置となるすみ肉溶接止端

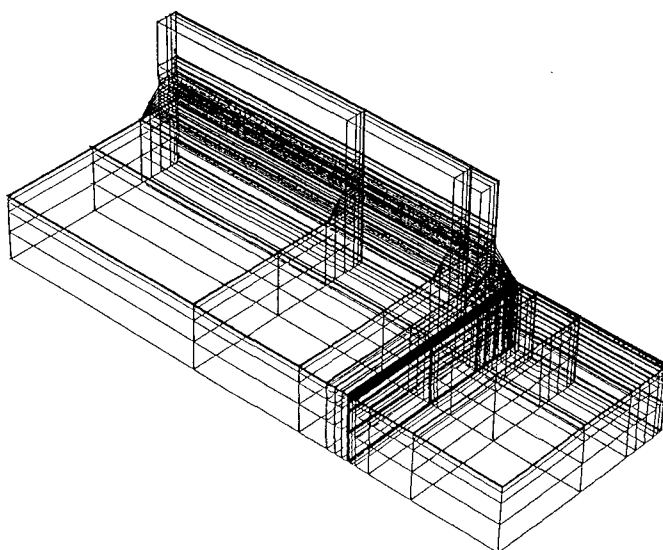
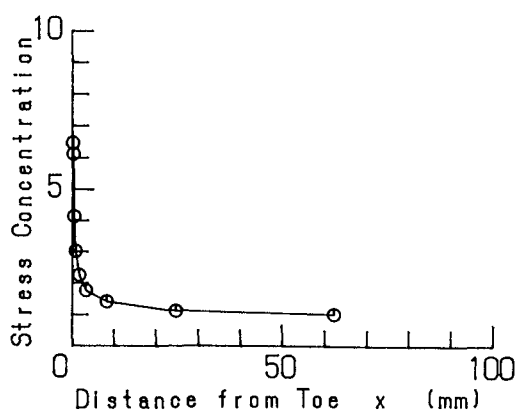
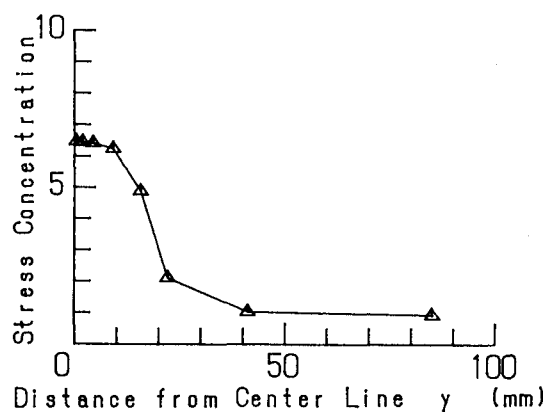


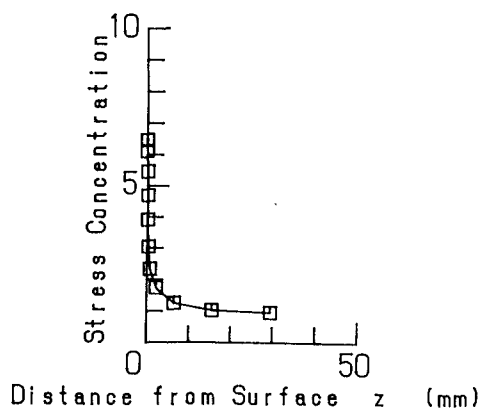
図-2 FEM要素分割 ($t_1=75\text{mm}$, $t_2=25\text{mm}$, $L=400\text{mm}$)



(a) x方向分布



(b) y方向分布



(c) z方向分布

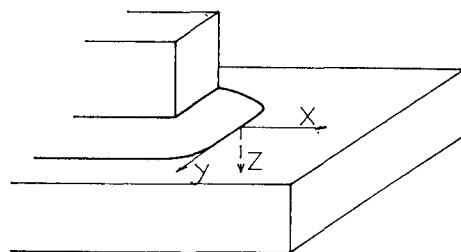


図-3 長手方向応力の分布 ($t_1=75\text{mm}$, $t_2=25\text{mm}$, $L=400\text{mm}$)

部の開き角と曲率半径は、6種類の溶接材料を用いて製作したすみ肉溶接継手の溶接止端形状¹⁴⁾を参考に安全側をとり、全てのケースについて、それぞれ120°および0.5mmと仮定した。図-2に、FEM解析に用いた要素分割の例を $t_1=75\text{mm}$, $t_2=25\text{mm}$, $L=400\text{mm}$ の場合について示す。また、このケースについて求められた長手方向応力の主板表面における中心軸上(x方向)分布および回し溶接止端位置での中心軸直角方向(y方向)分布、および回し溶接止端位置での板厚方向(z方向)分布を図-3に示す。図-3より、面外ガセット継手の応力集中はガセット端部の回し溶接止端に沿った極めて局所的なものであることがわかる。

初期亀裂深さは、SM41およびSM58鋼溶接部⁴⁾およびSM50鋼溶接部¹⁴⁾の疲労破面で観察された第1段階亀裂面の深さを参考に安全側として0.05mmに、限界亀裂深さは主板厚の80%に仮定した。したがって、主板厚が大きいほど限界亀裂深さが大、即ち亀裂進展経路が長いことになる。また、疲労亀裂進展速度(da/dN)と応力拡大係数範囲(ΔK)の関係は、JSSC指針(案)⁴⁾で示されている平均的な関係(式(5))を用いた。

$$da/dN = 1.5 \times 10^{-11} \Delta K^{2.75} \quad (\Delta K > \Delta K_{th}) \quad (5)$$

ここで、 ΔK_{th} は下限界応力拡大係数(= $2.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)である。

3. 解析結果

(1) 付加板長さの影響

継手寸法の影響が主として応力分布に対する応力拡大係数の補正係数 F_g に現れることから、以下では解析結果として F_g の亀裂深さ方向の分布と疲労寿命曲線を示す。

付加板長さの影響は、 $t_1=t_2=25\text{mm}$ および $t_1=75\text{mm}$, $t_2=25\text{mm}$ で、それぞれ $L=100, 200, 400\text{mm}$ の3ケースについて検討した。それぞれの t_1 について、 F_g の亀裂深さ方向の分布と疲労寿命曲線を図-4と図-5、および図-6と図-7に示す。図-5中には、下川ら⁶⁾の実験結果($t_1=t_2=30\text{mm}$, $L=450\text{mm}$)も示してある。 $t_1=t_2=25\text{mm}$, $L=400\text{mm}$ の疲労寿命曲線は下川らの実験結果に対してやや安全側であるが、初期亀裂深さ、亀裂形状比、溶接止端形状を安全側に設定していることを考えあわせればよく表しており、ここでの解析方法が妥当なものであることがわかる。

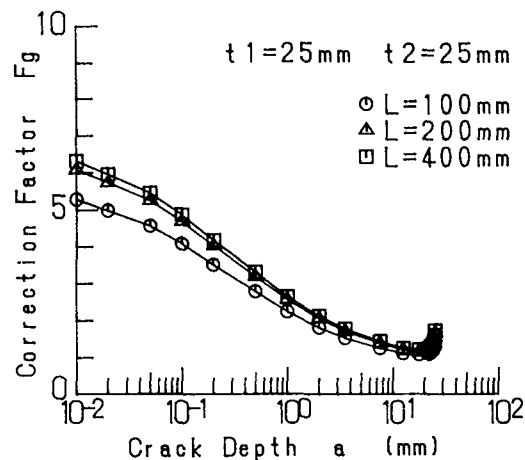


図-4 F_g の分布 (L の影響, $t_1=25\text{mm}$)

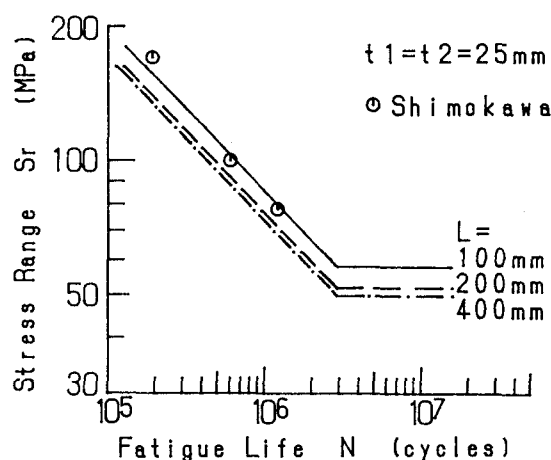


図-5 疲労寿命曲線 (L の影響, $t_1=25\text{mm}$)

$t_1=25\text{mm}$ 、 $t_1=75\text{mm}$ ともに $L \geq 200\text{mm}$ に比べて $L=100\text{mm}$ の F_g が小さくなっており、それに対応して疲労寿命曲線は $L=100\text{mm}$ のものが $L \geq 200\text{mm}$ よりも高強度側である。疲労限で比較すると、 $t_1=25\text{mm}$ では $L=200\text{mm}$ で 51MPa 、 $L=400\text{mm}$ で 50MPa に対し、 $L=100\text{mm}$ では 58MPa 、 $t_1=75\text{mm}$ では $L=200\text{mm}$ および 400mm の 47MPa に対し、 $L=100\text{mm}$ では 53MPa と $13 \sim 16\%$ 程度大きくなっている。したがって、主板厚の大小によらず、付加板長さ 100mm の継手の疲労強度が 200mm 以上のものよりも大きいことが確かめられた。

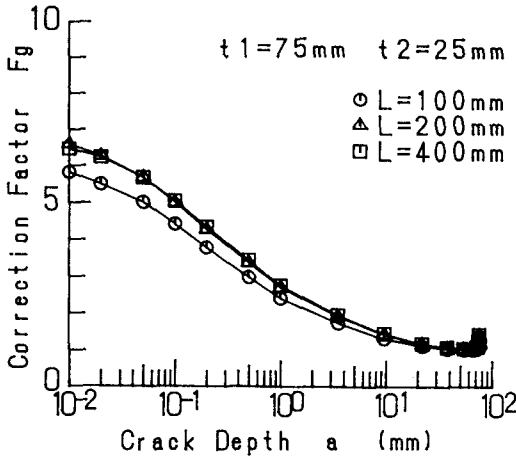


図-6 F_g の分布 (L の影響, $t_1=75\text{mm}$)

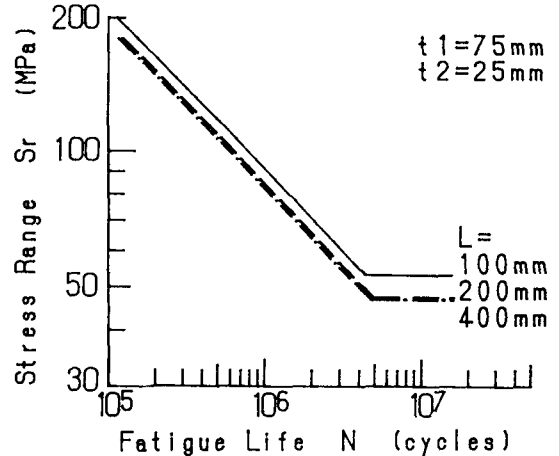


図-7 疲労寿命曲線 (L の影響, $t_1=75\text{mm}$)

(2) 主板厚と付加板厚が同じ場合

主板厚と付加板厚が同じ場合の板厚の影響は、 $L=400\text{mm}$ で $t_1=t_2=25, 50, 75\text{mm}$ の3ケースについて比較した。図-8に F_g の分布、図-9に疲労寿命曲線を示す。図-8に示すとおり、 t_1, t_2 が大きいほど F_g は大きくなる。図-9の有限寿命域の疲労寿命曲線では板厚の増加に伴う F_g の増大と限界亀裂寸法の増大の影響が相殺するため板厚の影響はほとんどみられないが、疲労限は $t_1=t_2=25\text{mm}$ で 50MPa 、 50mm で 43MPa 、 75mm で 37MPa と小さくなっている。低下率は $t_1=t_2=25\text{mm}$ に対して 50mm で 14% 、 75mm では 26% である。このように、主板厚と付加板厚がともに増加する場合には疲労限が大きく低下する。

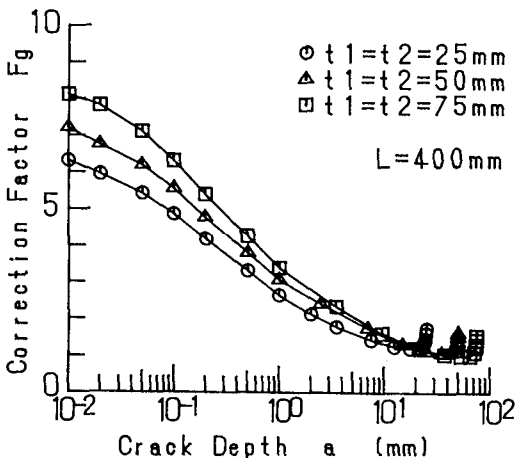


図-8 F_g の分布 (板厚の影響, $t_1=t_2$)

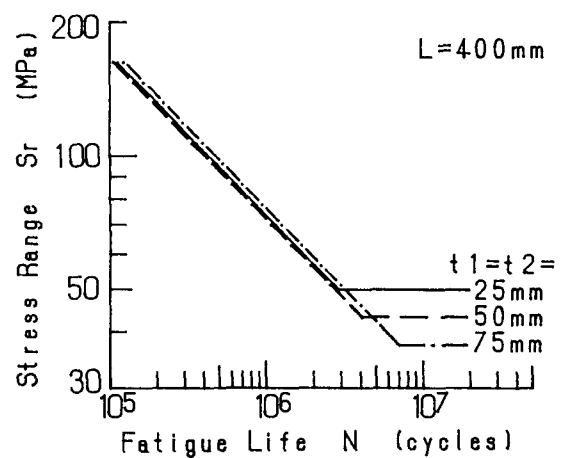


図-9 疲労寿命曲線 (板厚の影響, $t_1=t_2$)

(3) 主板厚の影響

主板厚のみが異なる場合の F_g の分布と疲労寿命曲線を図-10と図-11に示す。 $t_2=25\text{mm}$, $L=400\text{mm}$ で $t_1=25, 50, 75\text{mm}$ の3ケースについて比較している。図-10に示すとおり、 t_1 による F_g の違いは非常に小さい。図-11に示すように、疲労限の低下も $t_1=25\text{mm}$ のときの 50MPa に対して $t_1=50$ および 75mm の 47MPa と6%程度である。また、有限寿命域では、板厚の増加に伴って限界亀裂寸法が大きくなるため疲労限の場合とは逆に $t_1=75\text{mm}$ の場合が最も長寿命となる。したがって、付加板厚が 25mm 程度であれば主板厚の増大に対して疲労強度の低下はほとんど問題にならないと考えてよい。

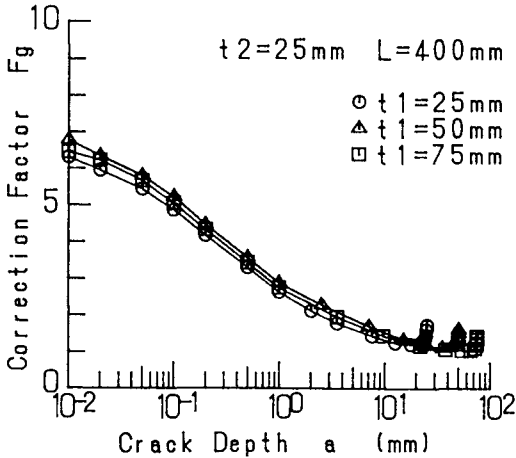


図-10 F_g の分布 (t_1 の影響)

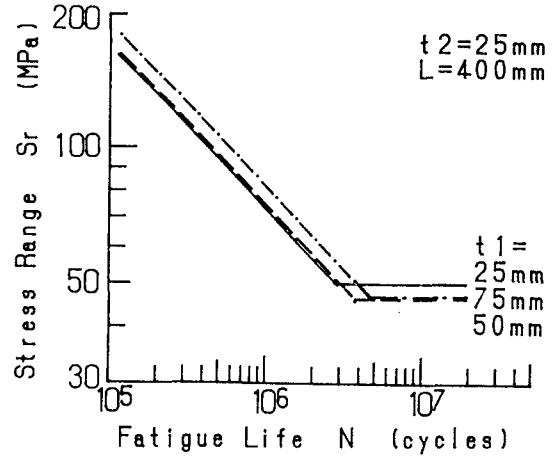


図-11 疲労寿命曲線 (t_1 の影響)

(4) 付加板厚の影響

付加板厚の影響については $t_1=75\text{mm}$, $L=400\text{mm}$ で $t_2=25, 50, 75\text{mm}$ の3ケースで検討した。図-12に F_g の分布、図-13に疲労寿命曲線を示す。 $t_2=25\text{mm}$ と比べて $t_2 \geq 50\text{mm}$ では F_g が大きくなっており、それに対応して疲労限は $t_2=25\text{mm}$ の 47MPa に対し、 $t_2=50\text{mm}$ の 38MPa および $t_2=75\text{mm}$ の 37MPa と20%程度小さくなる。したがって、付加板厚が 25mm を越える場合には疲労強度の低下を考慮する必要がある。

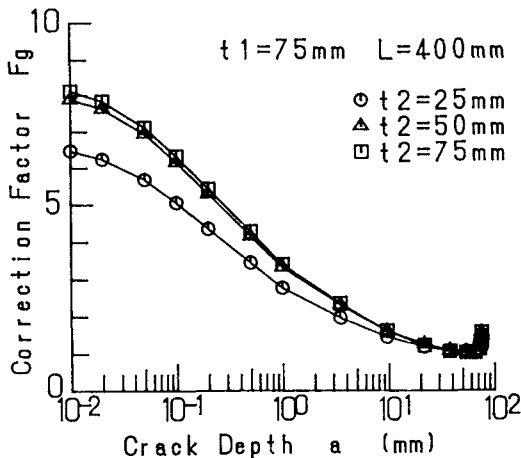


図-12 F_g の分布 (t_2 の影響)

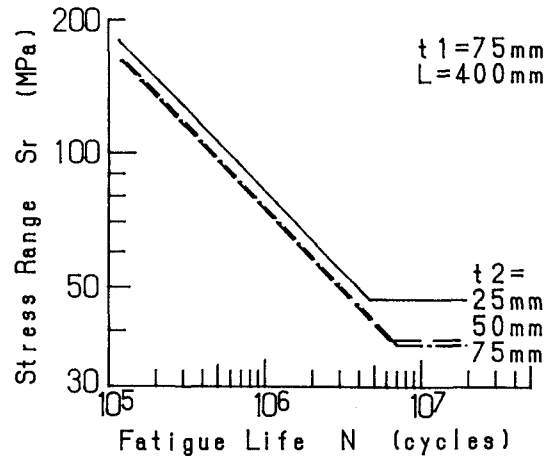


図-13 疲労寿命曲線 (t_2 の影響)

4. 板厚による疲労強度の補正方法

図-14に $L=400\text{mm}$ の6 ケースについて主板厚と疲労限の関係を両対数紙上に示す。黒塗りの印は $t_2 > 25\text{mm}$ のケースを表す。図中には $t_1 = t_2 = 25\text{mm}$ の点を通り、傾きが $-1/4$ の直線も示してある。 $t_2 = 50\text{mm}$ および 75mm の点は、その直線とほぼ一致する。したがって、主板厚と付加板厚がともに 25mm を越える場合の疲労強度の補正係数 C_t は、JSSC 指針 (案)⁴⁾ の十字溶接継手とカバープレート端の前面すみ肉溶接継手に対する補正係数と同様に、式(6) で表すことができる。

$$C_t = \sqrt[4]{25/t_1} \quad (6)$$

付加板厚が 25mm の場合には、主板厚が大きくなると疲労強度が低下する傾向がみられるもののその度合いは小さく、特に補正を必要とするほどではない。

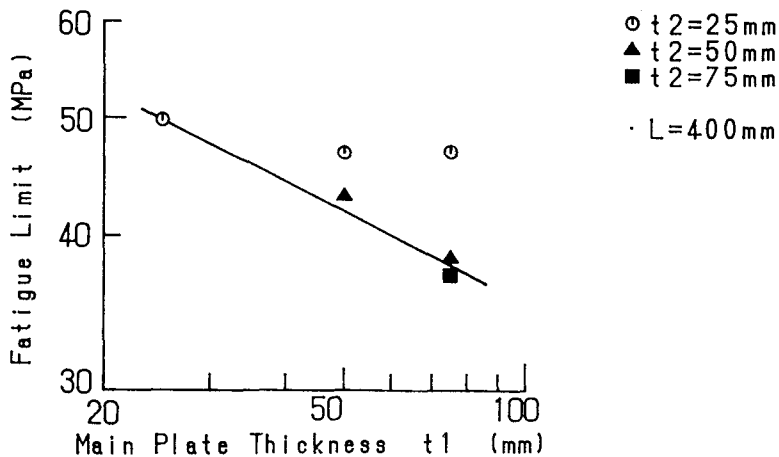


図-14 疲労強度に対する板厚効果

5. おわりに

面外ガセット継手の疲労強度に及ぼす主板厚、付加板厚および付加板長さの影響について、疲労亀裂進展解析により、主に継手寸法による応力分布の違いに着目して検討した。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 板厚の大小にかかわらず、付加板長さが 100mm の継手の疲労強度は 200mm 以上のものよりも 15% 程度大きくなる。
- (2) 主板厚と付加板厚が同じでともに増加する場合には疲労限が小さくなる。低下率は、板厚 25mm に対して 50mm で 14% 、 75mm では 26% 程度である。
- (3) 付加板厚が 25mm 程度であれば、主板厚の増大に対して疲労強度の低下はほとんど問題にならない。しかし、付加板厚が 25mm を越える場合には疲労強度の低下を考慮する必要がある。
- (4) 主板厚と付加板厚がともに 25mm を越える場合の疲労強度の補正係数は、主板厚の $-1/4$ 乗で表すことができる。

なお、ここで得られた結果を検証するためには、大きな板厚の試験体を用いた疲労実験データの蓄積が必

要と考えられる。最後に、本研究の一部が文部省科学研究費補助金（奨励研究(A) 課題番号：01750428）によるものであることを付記する。

参考文献

- 1) Gurney, T.R. : The Influence of Thickness on the Fatigue Strength of Welded Joints, Second International Conference on Behavior of Off-Shore Structures, London, paper 41, 1979.
- 2) 山田健太郎・M. A. Hirt : 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.
- 3) 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.
- 4) 日本鋼構造協会 : 疲労設計指針(案), JSSCレポート, No. 14, 1989.
- 5) 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.
- 6) Shimokawa, H., Takena, K., Itoh, F. and Miki, C. : Fatigue Strengths of Large-Size Gusset Joints of 800 MPa Class Steels, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 2, No. 1, pp. 255s-263s, 1985.
- 7) 竹名興英・川上博道・伊藤文夫・三木千寿 : ウェブガセット溶接継手の応力解析と疲労寿命予測, 土木学会論文集, 第392号/1-9, pp. 345-350, 1988.
- 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) 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.
- 10) 土木学会 : 国鉄建造物設計標準解説, 1983.
- 11) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, 1990.
- 12) 三木千寿・坂野昌弘 : 疲労亀裂進展解析による疲労設計曲線の検討, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 409-416, 1990.
- 13) Wilson, E. L. : A Static Analysis Program for Three Dimensional Solid Structures, Denver Mining Research Center Report, U. S. Department of the Interior Bureau of Mines, 1971.
- 14) 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.

(1990年10月12日受付)