

面外ガセット溶接継手の板厚効果に関する疲労実験

FATIGUE TEST ON THICKNESS EFFECT OF OUT-OF-PLANE WELDED GUSSET JOINT

坂野昌弘* 三上市藏** 新井正樹*** 米本栄一**** 高垣奈津子*****

SAKANO Masahiro, MIKAMI Ichizou, ARAI Masaki, YONEMOTO Eiichi and TAKAGAKI Natsuko

The effect of the plate thickness on the fatigue strength of the out-of-plane welded gusset joint is investigated through fatigue tests for the joint specimens made of JIS SM570 high strength steel plates of 25 mm and 75 mm thicknesses. The out-of-plane welded gusset joint with the thickness of 75 mm has such a lower fatigue strength as about a half of that of the 25 mm thick joint, because of its very high stress concentration at the fillet weld toe.

Key Words: fatigue test, gusset joint, thickness effect

1. はじめに

鋼構造物の大型化および製作時の省力化を意図した厚肉少補剛化により、板厚の大きな鋼材を使用する機会が増えることが予想される。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。欧州鋼構造協会連合（略称ECCS）疲労設計指針¹⁾および日本鋼構造協会（略称JSSC）疲労設計指針²⁾では、板厚効果が確認されている前面すみ肉溶接継手³⁾⁻⁵⁾に対して板厚により疲労許容応力範囲を補正することを推奨している。面外ガセット溶接継手に関しては、板厚9mmから30mm程度までの試験体を用いた疲労試験が幾つか行われているが⁶⁾⁻⁹⁾、その疲労強度に及ぼす板厚の影響を十分に解明するまでには至っていない。

著者のうち、坂野・新井・三上は、本州四国連絡橋¹⁰⁾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¹¹⁾。本研究では、JSSC指針²⁾で基準板厚とされている25mmおよび本四規格¹⁰⁾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

* 工博 関西大学専任講師 工学部土木工学科 (〒564 吹田市山手町3-3-35)

** 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

*** (株)巴コーポレーション 橋梁設計部設計課 (〒135 東京都江東区豊洲3-4-5)

**** 関西大学大学院生 工学研究科土木工学専攻 (現在：片山ストラテック(株)製造技術部)

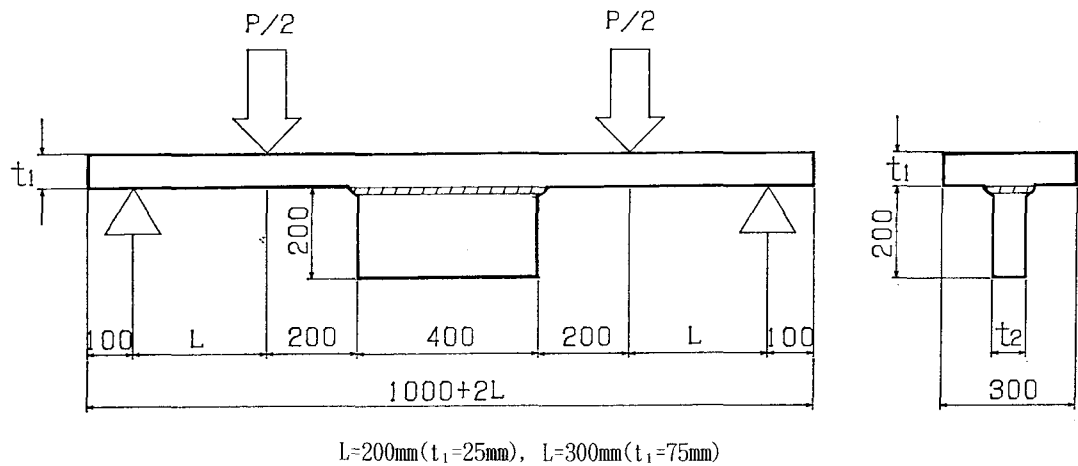
***** 関西大学学生 工学部土木工学科 (現在：松尾橋梁(株)設計部)

試験を実施し、疲労強度に及ぼす板厚の影響について実験的に検討する。供試鋼材は、鉄道橋¹²⁾ や道路橋¹³⁾ 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。なお、試験機容量の関係から、継手主板の面外方向の曲げ載荷により疲労試験を実施した。

2. 実験方法

(1) 試験体

面外ガセット溶接継手試験体の形状と寸法を図－1に示す。板厚はJSSC指針²⁾の基準板厚25mmと本四規格¹⁰⁾の最大板厚75mmの2種類である。疲労亀裂進展解析による検討結果¹¹⁾では主板厚(t_1)と付加板厚(t_2)がともに大きい場合に疲労強度が低下していることから、試験体の t_1 と t_2 は等しく設定した。また板厚75mmの試験体では、所定の応力を導入するために載荷スパン(支点と載荷点の間の距離)を板厚25mmの場合よりも100mmほど長く設定している。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。各板厚の鋼材の機械的性質と化学成分(ミルシート値)を表－1に示す。板厚75mmの鋼材の降伏点と引張強度は、25mmのものに比べてそれぞれ14%と10%ほど低い。



図－1 面外ガセット溶接継手試験体(寸法: mm)

表－1 試験体材料の機械的性質と化学成分(ミルシート値)

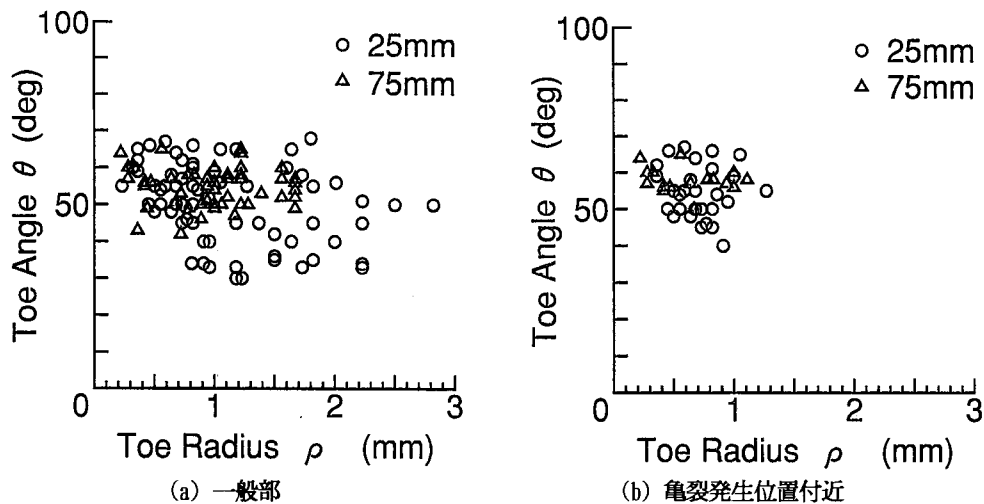
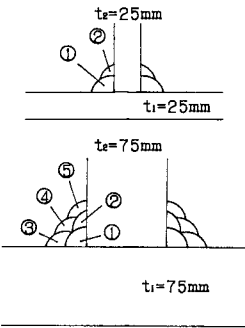
Material	Mechanical Properties				Chemical Composition (%)								
	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)	A.E. (-5° C) (J)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000	Cr ×100	Mo ×100	V ×100	Ceq. ×100
SM570Q(25mm)	600	678	23	306	13	24	144	16	4				38
SM570Q(75mm)	516	611	30	252	13	25	128	10	1	22	10	3	42
YFW26	568	651	24	66	5	66	184	16	10				

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）を表－１に、溶接条件を表－２に示す。すみ肉溶接のサイズは鉄道構造物等設計標準¹²⁾ および道路橋示方書¹³⁾ の規定に従い、板厚25mmおよび75mmに対してそれぞれ 8mmおよび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¹⁴⁾。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角度 θ と曲率半径 ρ の分布を、(a)一般部と (b)亀裂発生位置付近とに分けて示したものである。(a)の一般部については板厚25mmの方で ρ の大きいものがみられるが、(b)の亀裂発生位置付近では ρ 、 θ ともにばらつきは小さくなり、また板厚による違いはほとんど認められない。

表－２ 溶接条件

t_1 (mm)	Pass	Speed (cm/min)	Current(A)	Voltage(V)	Heat Input(kJ/cm)
25	①	28	220	32	15.1
	②	39	220	29	9.8
75	①	32	220	32	13.2
	②	43	220	32	9.8
	③	30	220	32	14.1
	④	34	220	32	12.4
	⑤	36	220	32	11.7



図－２ 溶接止端の角度と曲率半径の分布

(2) 疲労試験

疲労試験には動的容量±400kN の電気油圧式疲労試験機を用いた。載荷方法は図－１に示す４点曲げ載荷とし、継手部の主板には面外の純曲げを作用させた。継手部の公称曲げ応力の最大値を全ての試験体で一定値（約150MPa）とするために、最大荷重値を板厚25mmの試験体については49kN、板厚75mmについては294kNでそれぞれ一定とした。その結果、最小応力の値により応力比は0.20～0.73となった。荷重波形は正弦波、

載荷繰返し速度は5～10Hzである。なお、主板表面の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離れた位置にひずみゲージを貼付し、実際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はほぼ一様、板の表裏ではほぼ対称であった。また、応力測定は試験開始時および2000～5000回の載荷後に行い、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^{9)・14)}を適用した。疲労試験中、交流ポテンシャル法から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荷重範囲を半減させ破壊面にビーチマークを残すことを試みた。

3. 実験結果および考察

疲労試験結果を表－3に示す。No.22-1～3の試験体は板厚25mm、No.77-1～4は板厚75mmである。 ΔP は荷重範囲、 S_r 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様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。支点や載荷点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～8割となっており、応力振幅が小さいほど割合も小さい。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本目のビーチマークが導入されたときの応力繰返し数、 a_a と $2b_a$ はその1本目のビ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半減荷重の繰返し回数は含まない。

表－3 疲労試験結果

Specimen	ΔP^* (kN)	S_r (MPa)		Ni (Mcycles)	Nd (Mcycles)	a_a (mm)	$2b_a$ (mm)	Nf (Mcycles)
		Calculated	Measured					
No. 22-1	24.5	78	49	>10.00	————	—	—	>10.00
No. 22-1**	39.2	125	95	0.12	0.50	8.0	44.0	4.40
No. 22-2	29.4	94	65	0.56	0.92	3.3	18.0	10.30
No. 22-3	27.0	86	56	0.59	1.30	3.7	24.0	12.20
No. 77-1	147.0	78	57	0.25	0.34	1.3	5.8	5.52
No. 77-2	107.8	58	38	0.70	6.48	12.0	60.0	18.60
No. 77-3	78.4	42	26	>20.00	————	—	—	>20.00
No. 77-3**	186.2	99	76	0.20	0.20	3.0	12.0	2.61
No. 77-4	93.1	50	32	1.94	2.83	8.0	44.0	>19.00
No. 77-4**	186.2	99	76	————	————	—	—	2.00

*) P_{max} =49.0kN(No. 22-1～3), P_{max} =294.0kN(No. 77-1～4) **) retest

(1) 疲労亀裂の発生進展性状

図－3に板厚25mmの試験体、図－4に板厚75mmの試験体について疲労破壊面と荷重条件の例を示す。図－3の破壊面には8本のビーチマークが、図－4の破壊面には3本のビーチマーク(内側の隣り合う2本は最

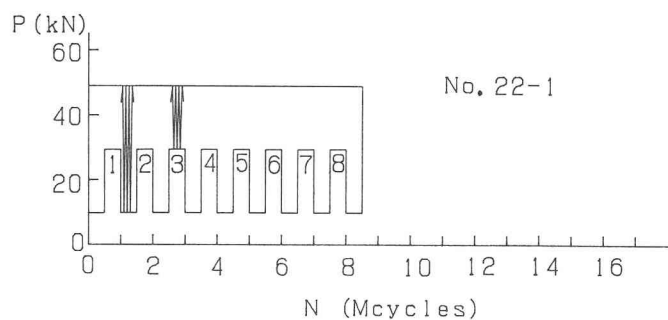
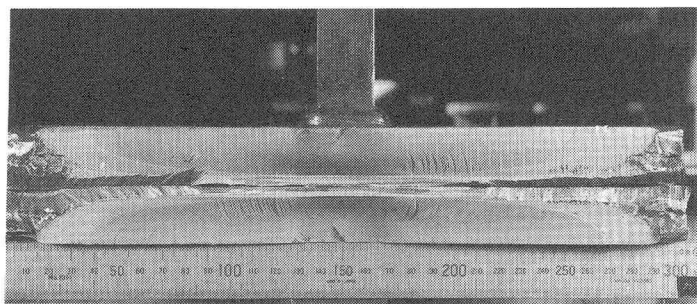


図-3 疲労破壊面と荷重条件 ($t_1=t_2=25$ mm)

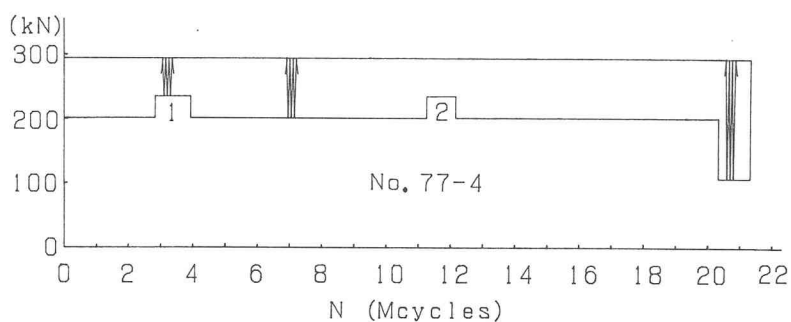
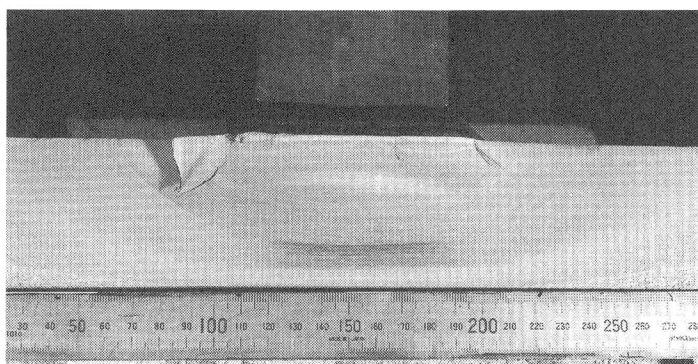


図-4 疲労破壊面と荷重条件 ($t_1=t_2=75$ mm)

初の半減荷重で残されたもの)が認められる。いずれの試験体もガセット端部の主板側のすみ肉溶接止端から亀裂が発生し、半楕円形状に進展している。試験体No.77-4の場合には亀裂が溶接部から出たところ(表面長さ約17cm)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。疲労破壊面上には2回目のビーチマークの後で亀裂が停留していくようすがよく現れている。

図-5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(8~9割)を占めている。それに対し、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に寿命の前半で板厚方向の亀裂進展が飽和状態となり、それ以降、寿命の半分以上が板幅方向の亀裂進展に費やされている。

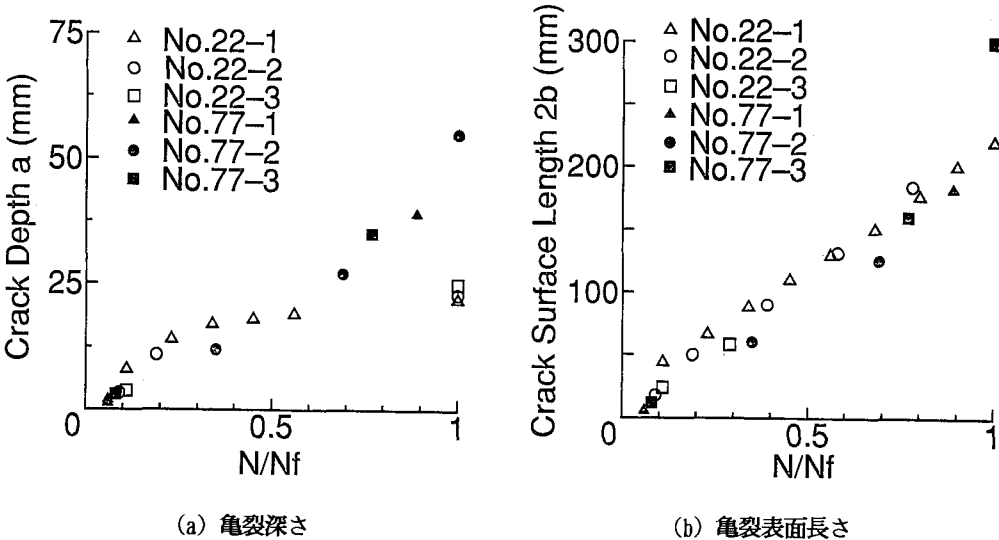


図-5 疲労亀裂進展性状

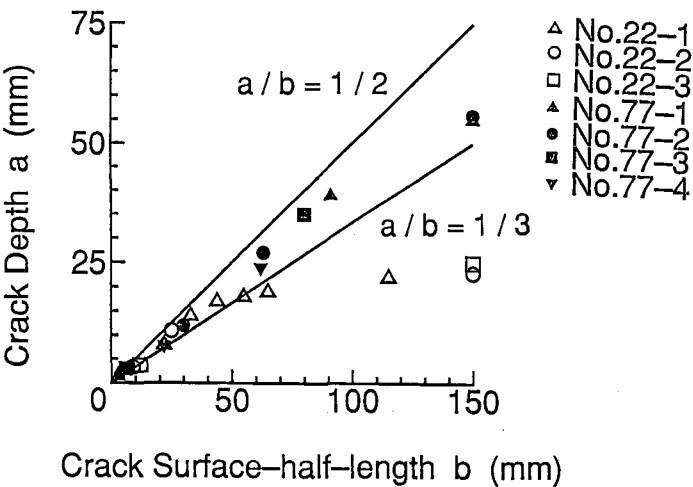
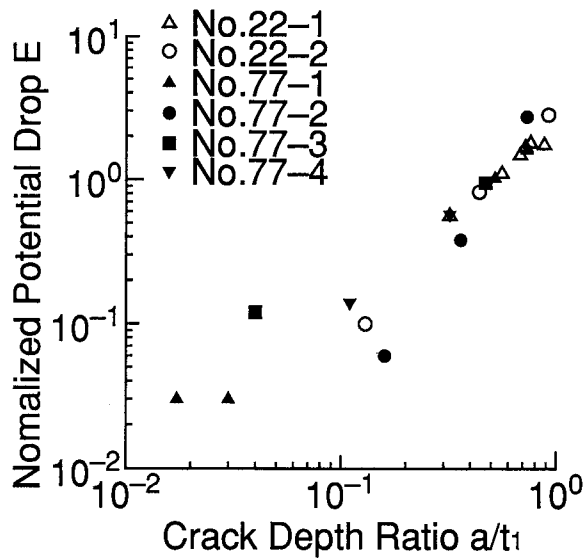


図-6 亀裂深さと亀裂表面長さの関係

図－6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の場合には板厚方向の亀裂進展が飽和状態となるために b が50mm程度を越えると亀裂形状が偏平になっていくが、それを除けば、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－7に交流ポテンシャル法により測定した電位差変化と亀裂深さ比の関係を示す。縦軸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。亀裂が出始めのところでは亀裂発生位置と電位差検出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大まかに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。本研究では測定方法の精度を考慮し、板厚の1%程度の深さの亀裂が生じるまでの応力繰返し数を亀裂発生寿命 N_i と定義した。



図－7 無次元化した電位差変化と亀裂深さ比の関係

(3) 各試験体の疲労寿命

図－8に各試験体について、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。板厚25mmの試験体では、疲労亀裂が生じる場合には全て 100万回までに生じている。 $S_r=49\text{MPa}$ の試験体では1000万回の繰返し载荷を受けても交流ポテンシャル法で検出可能な板厚の1%程度以上の深さの亀裂は検出されないことから、板厚25mmの試験体の疲労限を49MPa と定めた。

一方、板厚75mmの試験体では、板厚25mmの疲労限以下の低応力域においても疲労亀裂は発生し進展している。板厚75mmでは25mmの場合に比べて低応力域であることから 100万回を越えて亀裂が生じた例がみられるが、それでも 200万回弱であり、200万回を越えてから亀裂（但し、深さが板厚の1%程度以下の微小な亀裂）が生じた例はみられない。 $S_r=32\text{MPa}$ の試験体では 200万回程度で亀裂が発生し進展したが、図－4に示したように溶接部から出たところで停留してしまったために約2000万回で試験を打ち切っている。 $S_r=26\text{MPa}$ の試験体では2000万回の繰返し载荷を受けても亀裂は検出されないことから、板厚75mmの疲労限を26MPa と定めた。したがって、曲げを受ける場合、板厚が75mmの面外ガセット溶接継手の疲労限は、板厚25mmの53%と大きく低下することが明らかとなった。

図-8中には、JSSC指針²⁾で面外ガセット溶接継手に割り当てられたG等級の設計曲線、面外曲げを考慮して強度を割増し(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。試験体の破断寿命で比較すれば、板厚25mmの実験値に対して、曲げを考慮したG等級の設計曲線で十分に安全側であることがわかる。一方、板厚75mmの実験値に対しては、曲げを考慮した設計曲線はもちろん、軸力に対する設計曲線でさえ十分安全側とはいえなくなり、板厚の補正が必要となる。

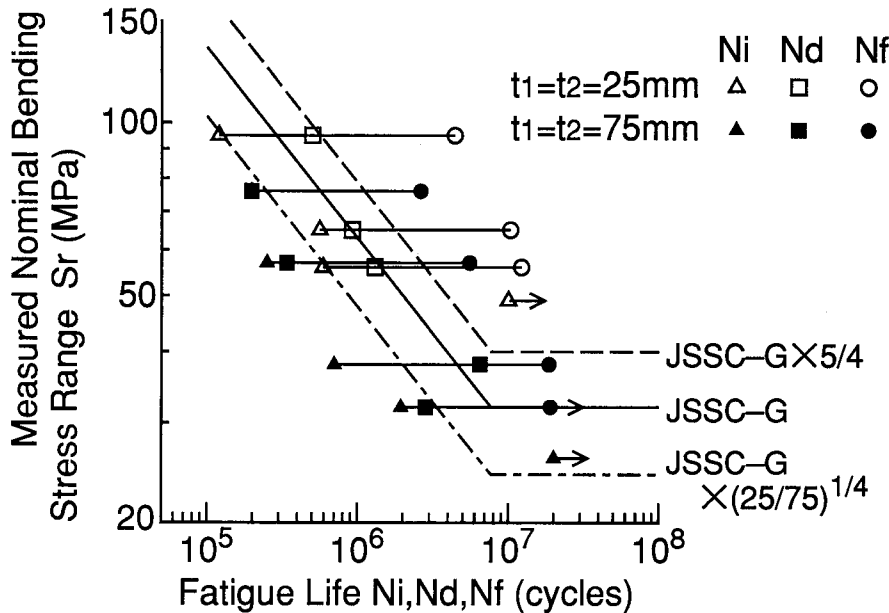


図-8 面外ガセット溶接継手試験体の疲労寿命

4. 板厚効果の検討

図-8に示したとおり、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、継手部の応力分布の違いに主に着目し、文献11)と同様な手法を用いた疲労亀裂進展解析により、面外曲げを受ける面外ガセット溶接継手の板厚効果について定量的な評価を試みる。

応力解析は3次元ソリッド要素を用いた弾性FEM¹⁵⁾により実施した。図-9に板厚75mmの場合の要素分割を示す。対称性を考慮して試験体の1/4を解析対象とした。溶接止端部の角度と曲率半径は、図-2(b)を参考に板厚25mm、75mmともに60°および0.5mmを仮定した。図-10に板厚25mmと75mm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。初期亀裂深さを仮定した0.05mmのときの F_g の値は、板厚75mmが6.0、板厚25mmで4.6と、75mmのほうが30%程度大きい。

図-11に亀裂進展解析によって求められた板厚25mmと75mmの面外ガセット溶接継手の疲労寿命曲線を実験値とともに示す。初期亀裂深さは0.05mm、最終亀裂深さはそれぞれの板厚の半分、亀裂形状比は図-6を参考に板厚25mmについては1/2、板厚75mmについては図-4に示したような複数の亀裂の影響を考慮して1/5を仮定した。亀裂進展速度式はJSSC指針²⁾の平均的な関係式を用いた。それぞれの寿命曲線は実験値と概ね対応していることから、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と複数の亀裂が生じることによる亀裂形状比の違いにより、ほぼ定量的に説明することができる。

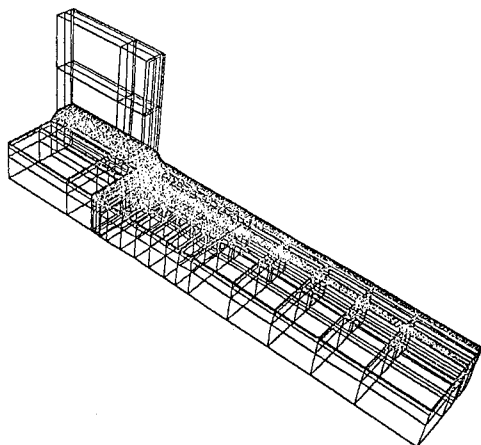


図-9 3次元有限要素分割図

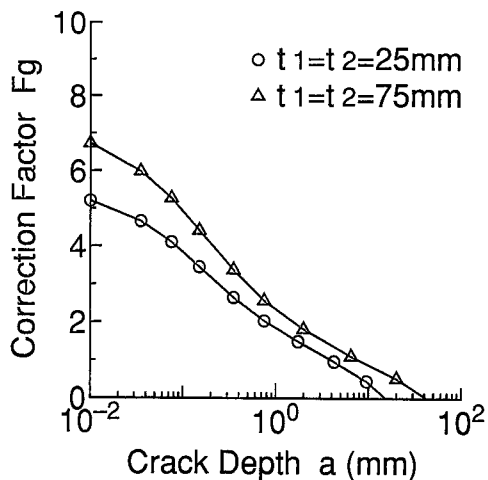


図-10 補正係数 F_g の比較

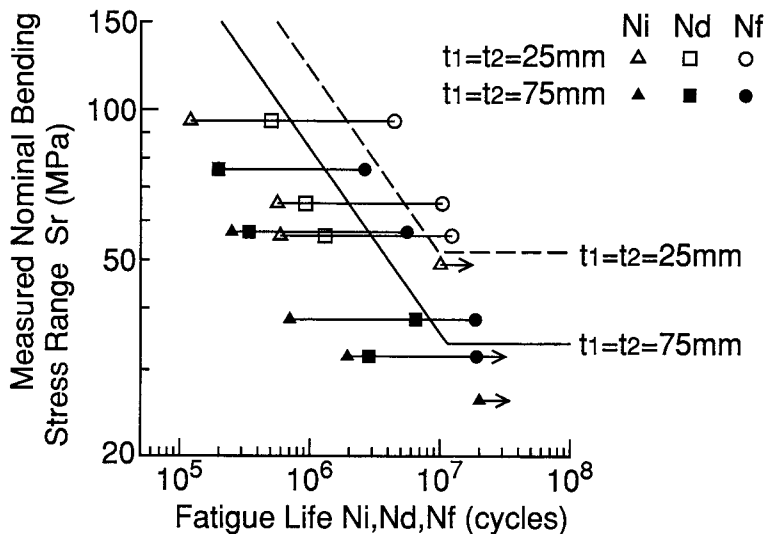


図-11 疲労亀裂進展解析による疲労寿命予測

5. まとめ

板厚25mmと75mmの2種類のSM570Q鋼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を行い、疲労挙動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、半楕円形状に進展している。疲労限近くの低応力域では、一旦生じた亀裂が溶接部から出たところで停留する場合もみられる。
- (2) 交流ポテンシャル法により測定した電位差変化と亀裂深さ比の関係は、試験体や板厚の違いにかかわらず両対数紙上で右上がりの直線状に分布する。
- (3) 板厚75mmの試験体の疲労限は板厚25mmの場合の半分程度まで大きく低下し、JSSC疲労設計指針²⁾のG等級を下回る。したがって、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。

- (4) 面外ガセット溶接継手の板厚効果は継手部の応力分布と複数亀裂による亀裂形状比の違いを考慮した亀裂進展解析により、ほぼ定量的に説明することができる。

謝辞：本研究を行うにあたり、(株)巴コーポレーション技師長清水実氏には試験体の製作等で大変お世話になり、関西大学土木工学科田淵智秀（現新日本技研(株)）、西村剛、中野英明の各氏には疲労試験、解析およびデータ整理等でご助力いただいた。また、本研究の一部は平成5年度文部省科学研究費補助金（総合研究（A））、研究代表者：藤野陽三東京大学教授）によるものである。各位に対し深甚なる感謝の意を表する。

参考文献

- 1) European Convention for Constructional Steelwork - Technical Committee 6 - Fatigue : Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures, 1985.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Shimokawa, H., Takena, K., Itoh, P. 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1990.
- 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.
- 15) 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.

(1993年9月16日受付)