溶接欠陥を有する継手の極低サイクル疲労特性に及ぼす板厚の影響*

—ガス導管円周溶接部の許容きず寸法の検討 (第2報)—

萱森 陽一**, 瀬戸 厚司**, 増田 智紀***, 町田 進****, 三木 千壽*****

Influence of Plate Thickness on Very Low Cycle Fatigue Properties of Butt Welded Joints Containing Weld Defects*

—Study on Acceptable Size of Defects in Girth Welds of Gas Pipelines (2nd Report)—

by KAYAMORI Yoichi**, SETO Atsushi**, MASUDA Tomoki***,
MACHIDA Susumu**** and MIKI Chitoshi*****

Girth welded joints of pipelines may possibly contain defects which could reduce the fatigue strength of the joints under earthquake conditions. Hence it is necessary to identify the fatigue properties of the joints containing various defects and clarify the acceptable size of weld defects.

In this study, very low cycle fatigue tests and fatigue life estimation by fracture mechanics analysis of butt welded joints containing defects were carried out. The influence of plate thickness ranging from 9mm to 19mm on fatigue properties and the acceptable defect size in the welded joints were investigated. It was recognized that the fatigue life for the thickness of 19mm is shorter than that for the thickness of 9mm when the ratio of defect size to thickness is constant. The acceptable defect size in the welds under the earthquake conditions prescribed by the Japan Gas Association, namely, the strain amplitude of 0.5% for 50cycles of cyclic displacement, is proposed as a result of the analysis.

Key Words: low cycle fatigue, butt joint, weld defect, gas pipeline, crack, fatigue crack propagation, plate thickness.

1. 緒 言

地震による強制変位を受ける地中埋設ガス導管周継手の疲労に対する安全性を確保するために、溶接部の許容欠陥寸法を明確化する必要がある。著者らは、地震時に地中埋設導管に作用する繰り返し変位を想定し、突合せ溶接継手の極低サイクル疲労試験を行い、溶接欠陥の種類・寸法と疲労特性の関係を検討してきた。前報¹⁾では大径・高圧のガス導管の中で最も厚肉のものを検討対象とし、板厚 19mm の鋼板から成る溶接継手を使用した。そこで、欠陥を有する溶接継手の極低サイクル疲労特性に及ぼす板厚の影響を検討し、板厚 19mm の溶接部に対して定めた許容欠陥寸法が薄肉溶接部に對しても十分有効であることを証明する必要がある。

溶接継手の高サイクル疲労強度に及ぼす板厚効果について

は多くの検討例がある。継手形式、溶接付加物の方向と主荷重方向の関係、付加物と主板の寸法比、止端形状改善法などによって板厚効果が変化することが明らかになっており、疲労設計の規格^{2,3)}や指針^{4,5)}として採り入れられている。また、Lachmann ら⁶⁾は母材丸棒試験片の低サイクル疲労寿命に及ぼす寸法効果を検討し、試験片直径は疲労寿命に影響するがその効果は高歪範囲・短疲労寿命領域で小さいことを示した。しかし、欠陥を有する溶接継手を対象とし、数十回の繰り返し変位がもたらす極低サイクル疲労特性に及ぼす板厚の影響を検討した例はほとんど見あたらない。

そこで本研究では、種々の溶接欠陥を有する薄肉溶接継手を用いて極低サイクル疲労試験を実施した。前報¹⁾の板厚 19mm の溶接継手の結果と合わせて、極低サイクル疲労特性に及ぼす板厚の影響および薄肉から厚肉まで適用可能なガス導管円周溶接部の許容欠陥寸法を検討した。なお、本研究は(社)日本ガス協会が通産省から受託した「幹線パイプライン技術開発事業」の一環として実施されたものである。

2. 実 験

2.1 供試材料

供試鋼板の化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。高

*原稿受付 平成 13 年 1 月 23 日 平成 12 年度秋季全国大会で発表

**正 員 新日本製鐵(株) Member, Nippon Steel Corporation

*** 東京ガス(株) Tokyo Gas Co. LTD.

****正 員 千葉大学 Member, Chiba University

*****正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of steel used.

Plate thickness t (mm)	Chemical composition (mass%)					YS (MPa)	TS (MPa)	Elong. (%)
	C	Si	Mn	P	S			
9	0.16	0.10	1.28	0.018	0.004	434	576	19
12	0.08	0.27	1.42	0.017	0.004	476	603	21
19	0.08	0.29	1.53	0.011	0.003	538	585	26

* G.L.=200mm

Table 2 Welding conditions.

	1st	2nd~
Welding method	TIG	SMAW
Welding material	JIS Z3316 YGT60 (2.4mm ϕ)	JIS Z3212 D5816 (4.0mm ϕ)
Position of welding	Flat position	Flat position
Current (A)	60~120	110~200
Voltage (V)	9~12	21~27
Welding speed (cm/min.)	6~11	8~25
Groove angle (deg.)	60	

圧ガス導管に使用される API 規格 5L X65 と同程度の化学成分と機械的性質を有する厚板 HT570 を供試鋼板とした。板厚は 9mm と 12mm の二種類で、これらを用いて溶接欠陥を有する突合せ溶接継手を作製した。主な溶接条件を Table 2 に示す。溶接欠陥は三種類とし、表面欠陥として初層の溶け込み不足（以下 IP と称す）、埋没欠陥として中間層の融合不良（以下 LF と称す）とブローホールの凝集（以下 BH と称す）を導入した。IP は、楕円加工したルートフェイスを接触させて裏波が生じないように溶接するか、高さに差のあるルートフェイスを加工して初層は低い方のルートフェイスのみ溶融させることで導入した。LF は、板厚中央付近で一方の開先面を溶融させないように盛ることで導入した。BH は、溶接板厚中央付近で溶融池に窒素ガスを吹き込むか、溶接棒を振動させて溶融池を攪拌することで導入した。LF と BH の上層を溶接する際は、導入した欠陥が再溶融して消失しないように、小入熱で欠陥部分を被覆した。IP を導入する際に半楕円状のルートフェイスを接触させる場合を除いて、ルートギャップは 2.5~3.1mm、ルートフェイスの高さは 0.8~2.4mm とした。溶接欠陥の目標寸法は、前報¹⁾で述べた許容欠陥寸法の一指標、すなわち高さ $a_0=0.33t$ 、長さ $2c_0=t$ (t は板厚) を基準とし、それよりも小さいものから大きいものまで数段階に設定した。

2.2 疲労試験

疲労試験片の形状・寸法を Fig. 1 に示す。試験片板厚は素材の元厚のままとし、溶接ビードは研削しなかった。試験片平行部の長さ寸法は、板厚 9mm に対しては 50mm、板厚 12mm に対しては 75mm とした。

荷重容量 1,000kN もしくは 2,000kN の油圧サーボタイプ疲労試験機を用いて、歪制御による極低サイクル疲労試験を実施した。試験片裏波側に平行部長さと同一の評点間

Fig. 1 Configurations of fatigue test specimens (Unit : mm).

距離のクリップゲージを取り付け、評点間距離の変化量を初期の評点間距離で除することで制御歪を求めた。歪振幅 ϵ_a はガス導管耐震設計指針⁷⁾で規定されている許容歪と同一の 0.5% とし、歪比 R は -1 、歪速度は 0.1%/sec で制御した。ただし、破面にビーチマークを形成するために、試験の途中で最小歪を 0 (歪比 0) とする繰り返し歪を適当な間隔で挿入した。1 サイクルの最大歪時の荷重が試験初期の 75% 以下に低下した時に、試験を終了した。

試験後に破面上のビーチマークとストライエーションの間隔を測定し、き裂長さの経時変化と板厚貫通寿命 N_{thr} を調べた。き裂が板厚を貫通する前に最大歪時の荷重が試験初期の 75% 以下となり試験終了した場合は、便宜的に試験終了時の寿命を N_{thr} とした。さらに、溶接継手を均質と仮定し、次式⁸⁾を用いて J 積分範囲 ΔJ を算出した。なお、次式は表面き裂の深さが板厚の 0.8~0.9 倍まで適用可能であることが確認されている⁸⁾。

$$\Delta J = [\pi (\Delta \sigma)^2 / E + f_1(n) \Delta \sigma \Delta \epsilon_{pl}] a_{eq} \dots \dots \dots (1)$$

$$f_1(n) = 3.85 (1-n) / \sqrt{n} + \pi n \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $\Delta \sigma$: 公称応力範囲、 E : 縦弾性係数、

n : 加工硬化指数、 $\Delta \epsilon_{pl}$: 塑性歪範囲、

a_{eq} : 等価欠陥寸法 ($\Delta \sigma$ が作用する有限板中の三次元き裂の応力拡大係数範囲 ΔK と同一の ΔK をもたらす無限板中の二次元き裂の半長)

3. 実験結果

3.1 疲労強度および寿命

以後、本研究で用いた板厚 9mm と 12mm の継手の試験結果に対し、前報¹⁾における板厚 19mm の試験片の結果を加えて示す。ただし、板厚 19mm の溶接継手では、溶接割れ (CR) を有するものも用いた。 ϵ_a と N_{thr} の関係を Fig. 2 に示す。図中の a_{eq} は、表面欠陥では最深部、埋没欠陥では表面に最も近い位置の ΔK より算出した値である。BH の a_{eq} は、WES2805⁹⁾に準拠して欠陥の相互干渉を評価し、複合された欠陥寸法より求めた。なお、ガス導管耐震設計指針⁷⁾では、ガス導管の最大歪をもたらし地震動の等価繰

Fig. 2 Relationship between strain amplitude and number of cycles.

Fig. 3 Relationship between fatigue life and equivalent crack size.

り返し数を 50 回と想定し、ガス導管円周溶接部の許容歪を 0.5% と規定している。そこで、 $\epsilon_a = 0.5\%$ 、 $N_{thr} = 50$ 回の点を通り、ASME rule¹⁰⁾の疲労設計曲線の短寿命側の線と平行に引いたものをガス導管円周溶接部の疲労設計曲線とし、図中に示した。本研究では高さ $a_0 = 0.33t$ 、長さ $2c_0 = t$ よりも大きい溶接欠陥を有する継手も試験したが、得られた N_{thr} はすべて疲労設計曲線を上回った。また、Fig. 3 に $\epsilon_a = 0.5\%$ における N_{thr} と a_{eq} の関係を示す。ここ

Fig. 4 Fracture surface of fatigue test specimens ($t = 12\text{mm}$).

で、板厚 19mm の実験データで ϵ_a が 0.5% と異なる場合は、疲労設計曲線の寿命に対する実験値 N_{thr} の累積損傷率を用いて、 $\epsilon_a = 0.5\%$ における N_{thr} に換算して示した。 a_{eq} の増加に伴い N_{thr} が低下する傾向が認められた。

3.2 疲労破壊の形態

板厚 12mm の疲労試験片のマクロ破面の例を Fig. 4 に示す。板厚 9mm と 12mm のいずれの継手でも、疲労き裂伝播形態は基本的に前報¹⁾で示した板厚 19mm のそれと同様であった。表面欠陥である IP では、き裂は欠陥から板厚方向に半楕円状のまま伝播した後、溶接止端部に沿って板幅方向に急速伝播し、板幅貫通き裂となって板厚方向に伝播した。き裂が板幅方向への急速伝播を開始する直前のき裂深さ a^* を調査したところ、Fig. 5 に示すように、 $2c_0/t$ に依らず a^* は平均で a_0 の 1.3 倍であった。埋没欠陥である LF では、き裂は欠陥から楕円状に伝播し、表面に近づく溶接止端部に沿う板幅貫通き裂となって伝播した。BH では、個々のブローホールが初めは別れており、かつそれらの三次元形状は球状だが、繰返し初期に合体する

Fig. 5 Relationship between maximum height of semi-elliptical crack and relative length of defect.

Fig. 6 Relationship between J-integral range and fatigue crack propagation rate.

ため、LFと同様のき裂伝播形態を示した。いずれの試験片でも、き裂は溶接金属もしくは溶接熱影響部を伝播した。

3.3 疲労き裂伝播速度

破面上で観察されたストライエーションは、一般に高サイクル疲労破面上で観察されるストライエーションよりも間隔が大きく、50～100倍程度の低倍率の顕微鏡像で容易に認識できるものであった。また、ストライエーションが金属組織の影響を顕著に受けた様子は認められなかった。欠陥から発生した疲労き裂の板厚方向の伝播速度 da/dN と ΔJ の関係を Fig. 6 に示す。なお、図中には比較のため

に、他鋼材の母材^{11,12)}の $da/dN-\Delta J$ の関係を示した。また、高サイクル疲労におけるき裂伝播速度と比較するため、日本鋼構造協会(以下 JSSC と称す)の疲労き裂伝播平均設計曲線と最安全設計曲線⁴⁾の $da/dN-\Delta K$ の関係を $da/dN-\Delta J$ の関係に換算し、 da/dN と ΔJ が高い領域まで延長した線も示す。試験結果のばらつきは大きい、板厚 9mm と 12mm の継手の $da/dN-\Delta J$ 関係は、板厚 19mm のその近傍に位置した。また、溶接継手の $da/dN-\Delta J$ 関係は、板厚 19mm の母材および他鋼材の母材のそれと大差なかった。さらに、溶接継手の $da/dN-\Delta J$ 関係は、JSSC 平均設計曲線の延長線の近傍にばらつき、JSSC 最安全設計曲線の延長線よりも多くの場合が低速であった。

4. 考察

4.1 破壊力学的手法による疲労寿命の推定

Fig. 3 に示した通り、 a_{eq} の増加とともに N_{thr} が低下する傾向が認められた。このことは、溶接欠陥をき裂と見なした破壊力学の取り扱いが可能であることを示唆している。そこで、種々の溶接欠陥を有する継手の疲労寿命を推定するために、溶接欠陥を初期き裂とみなして疲労き裂伝播解析を行った。解析は WES2805⁹⁾ に準拠し、ルンゲクッタ法によりき裂伝播速度曲線の微分方程式を 1 サイクル毎に解き、き裂深さが初期寸法から板厚に達するまでの繰り返し数を N_{thr} とした。解析では Fig. 4 で示した実際のき裂伝播形態を考慮し、表面き裂の場合は初期の 1.3 倍の深さまで成長したら板幅貫通き裂に変化することとした。ただし、本実験では試験片を油圧チャックで掴み面外変形が小さいことから、板幅貫通き裂を半無限板中の片側き裂として扱った。

まず、解析方法の有効性を検証するために、JSSC 平均設計曲線の延長線を用いて N_{thr} を推定した。その推定結果と実験結果の比較を Fig. 7 に示す。板厚 9mm の継手では、推定結果が実験結果よりもわずかに短寿命となる傾向が認められた。この理由は、Fig. 6 に示すように、JSSC 平均設計曲線の延長線が板厚 9mm の継手の $da/dN-\Delta J$ 関係よりもわずかに高伝播速度側に位置するからである。また、各板厚の継手の $da/dN-\Delta J$ 関係には大きなばらつきが存在するため、 N_{thr} の推定結果と実験結果の関係は大きくばらついた。しかしながら、平均的には推定結果と実験結果は良く対応している。よって、本解析方法により N_{thr} を推定することが可能と判断した。

Fig. 8 に欠陥の板厚方向の位置を変えた解析結果を示す。ここでは典型的な例として、板厚 9mm と 12mm の継手が $\epsilon_a=0.5\%$ の条件下にある時、疲労き裂が高さ 0.33t、長さ t の欠陥から JSSC 平均設計曲線の延長線に従い伝播する場合を示す。表面欠陥の方が埋没欠陥よりも短

Fig. 7 Comparison of estimated fatigue lives with experimental fatigue lives.

Fig. 8 Influence of positions of defects in thickness direction on estimated fatigue lives.

疲労寿命となった。つまり、表面欠陥を有する継手の N_{thr} を推定することで、埋没欠陥を有する継手に対しても安全側の評価を与えることから、以後は表面欠陥を解析対象とした。

4.2 溶接欠陥を有する継手の疲労特性に及ぼす板厚の影響

表面欠陥を有する継手の極低サイクル疲労特性に及ぼす板厚の影響を検討するため、板厚を変えた解析を行った。解析は、欠陥寸法の絶対値を一定とする場合と欠陥寸法の板厚に対する比を一定とする場合の二通りを行い、 $\epsilon_a = 0.5\%$ の条件における N_{thr} を計算した。ただし、いずれの板厚に対しても安全側の寿命推定を行うよう、疲労き裂伝播曲線は JSSC 最安全設計曲線の延長線を用いた。解析結果と実験結果を Fig. 9 に示す。ただし、板厚 19mm の継手の実験結果で ϵ_a が 0.5% と異なる場合は、疲労設計曲線の寿命に対する実験値 N_{thr} の累積損傷率を用いて、 $\epsilon_a = 0.5\%$ における N_{thr} に換算して示した。欠陥寸法を絶対値で一定とする場合と板厚に対する比で一定とする場合のいずれも、解析結果は実験結果よりも短 N_{thr} 側に位置した。よって、本解析により、安全側の寿命評価が可能である。また、欠陥寸法を絶対値で一定とする場合は、薄肉継手の方が短 N_{thr} の推定を与えるのに対し、欠陥寸法を板厚に対する比で一定とする場合はその逆の傾向を示した。

推定値で $N_{thr} = 50$ 回を満足する ϵ_a を疲労強度として、疲労強度に及ぼす板厚の影響を Fig. 10 に示す。欠陥寸法の絶対値を一定とする場合は、板厚が減少するにつれて疲労強度が低下し、また、欠陥寸法の大きい方がその程度は大きかった。一方、欠陥寸法の板厚に対する比を一定とする場合は、板厚が増加するにつれて疲労強度が低下し、その程度は欠陥寸法の板厚に対する比にさほど影響を受けなかった。ところで、溶接継手の高サイクル疲労強度に対する典型的な板厚効果は、ある基準板厚 (例えば 25mm) 以上で板厚が増加するとともに疲労強度が低下することである。ただし、高サイクル疲労強度の板厚効果を検討する際は、例えば $a_0 \leq 0.2\text{mm}$, $2c_0 \leq 2\text{mm}$ のように初期欠陥寸法が極めて小さくその絶対値は一定であることを前提としており⁴⁾、板厚効果はき裂発生過程とき裂深さ 1mm までの破壊力学パラメータが小さいときき裂伝播過程で決まると考えられている¹³⁾。一方、本解析では、比較的大きい欠陥寸法を前提とし、かつ $N_{thr} = 50$ 回という極低サイクル領域を対象としており、板厚効果は破壊力学パラメータの大きい領域におけるき裂伝播過程で決まると考えられる。本解析で Fig. 9 および Fig. 10 のような結果となった理由は、欠陥寸法の絶対値を一定とする場合は、薄肉継手の方が ΔJ は大きい、欠陥寸法の板厚に対する比を一定とする場合は、その逆となるためである。さらに、概して前者は後者よりも板厚変化にともなう ΔJ の変化量が多いことも影響している。

Fig. 9 Estimated and experimental fatigue lives under the strain amplitude of 0.5%. (a) By the absolute value of defect size, (b) By the ratio of defect size to plate thickness.

4.3 許容欠陥寸法の検討

本研究の疲労試験で用いた試験片は、Fig. 2 で示した通りいずれも疲労設計曲線を満足したので、現行の設計指針を適用して問題ない継手と判断される。しかし、一般的に疲労特性にはばらつきがあるため、ある程度の安全率を見

Fig. 10 Influence of plate thickness on estimated fatigue strength for 50 cycles. (a) By the absolute value of defect size, (b) By the ratio of defect size to plate thickness.

込んで許容欠陥寸法を決める必要がある。そこで、JSSC 最安全設計曲線の延長線を用いたき裂伝播解析により、9mm, 12mm, 19mm の三種類の板厚に対して $\epsilon_a = 0.5\%$ の条件で $N_{thr} = 50$ 回を満足する表面欠陥の寸法を計算した。解析結果を欠陥寸法の絶対値と欠陥寸法の板厚に対する比の 2 通りの整理により Fig. 11 に示す。本図による a_0 と $2c_0$ の関係を用いることで、各板厚の溶接継手における許容欠陥寸法を安全側に評価することが可能である。ただし、板厚によって許容欠陥寸法は異なるため、欠陥の合否判定の際には常に Fig. 11 の関係を把握していなければならない。

Fig. 11 Estimation of acceptable defect size under the strain amplitude of 0.5% for 50 cycles. (a) By the absolute value of defect size, (b) By the ratio of defect size to plate thickness.

Fig. 11 の関係に従って溶接欠陥を厳密に管理する一方で、Fig. 11 の関係を簡便化して用いることも有用と思われる。欠陥寸法の絶対値を用いる場合は板厚 9mm の欠陥寸法を、欠陥寸法の板厚に対する比を用いる場合は板厚 19mm の欠陥寸法を基準とすることで安全側の評価が可能となる。例えば、前者では $a_0=5\text{mm}$, $2c_0=9\text{mm}$, 後者では $a_0=0.33t$, $2c_0=t$ がそれぞれの一指標となる。ただし、Fig. 10 に示した通り、欠陥寸法の絶対値を基準とすると板厚効果が大きいため、板厚 19mm の継手に対しては安全率が大きくなる。例えば、 $a_0=5\text{mm}$, $2c_0=9\text{mm}$ の欠陥を有する継手は、板厚 9mm に対して 0.5% の疲労強度だが、板厚 9mm に対して 0.65% の疲労強度であり、これは板厚 9mm の継手の 1.3 倍の疲労強度である。一方、 $a_0=0.33t$, $2c_0=t$ の欠陥を有する継手は、板厚 19mm に

対して 0.50% の疲労強度だが、板厚 9mm に対して 0.56% の疲労強度であり、これは板厚 19mm の継手の 1.1 倍の疲労強度である。したがって、許容欠陥寸法を簡便化する場合は、板厚 19mm の継手における欠陥寸法の板厚に対する比を用いる方が合理的で、例えば $a_0=0.33t$, $2c_0=t$ が一指標となる。

5. 結 言

板厚 9mm および 12mm の平板を用いて溶接欠陥を有する突合せ溶接継手を作製し、歪制御極低サイクル疲労試験を行った。そして、疲労強度、破壊形態および疲労き裂伝播特性を検討したところ、次のような結果が得られた。

(1) 本研究で用いた溶接欠陥を有する継手は、いずれもガス導管耐震設計指針の疲労設計曲線を満足した。また、等価欠陥寸法の増加とともに疲労寿命が減少する傾向が認められた。

(2) 表面欠陥から生じた疲労き裂は、半楕円き裂から板幅貫通き裂へ変化した。埋没欠陥から生じた疲労き裂は、楕円状き裂から半楕円状き裂に変化し、その後は表面欠陥から生じたき裂と同様に伝播した。

(3) 溶接欠陥から発生した疲労き裂の伝播速度と J 積分範囲の関係は、板厚、母材や溶接部といったき裂伝播部位、母材の鋼種に影響されず、ほぼ同程度であった。また、極低サイクル疲労におけるき裂伝播速度と J 積分範囲の関係は、J 積分範囲が小さい領域における高サイクル疲労のき裂伝播速度曲線の延長線と平均的にほぼ同じであった。

以上の結果に基づき、破壊力学的解析による極低サイクル疲労特性の推定を行ったところ、以下の知見を得た。

(4) 上記(2)のき裂伝播形態を想定し、J 積分範囲が小さい領域のき裂伝播曲線の延長線を用いた解析を行うことにより、いずれの板厚の溶接継手においてもき裂の板厚貫通寿命を推定することが可能である。

(5) 欠陥寸法の絶対値を一定と仮定すると、板厚の減少とともに疲労寿命は短くなり、欠陥寸法の板厚に対する比を一定と仮定すると、板厚の減少とともに疲労寿命が長くなる。

(6) それぞれの板厚に対して、ガス導管耐震設計指針が規定する許容歪 0.5% と繰り返し数 50 回を満足する溶接部の許容欠陥寸法を計算した。許容欠陥寸法をさらに簡便化する場合、絶対値よりも板厚に対する比を用いる方が合理的であり、欠陥高さは板厚の 0.33 倍、長さは板厚相当という寸法が一指標となる。

謝 辞

本研究は、(社)日本ガス協会が通産省から受託した「幹線パイプライン技術開発事業」の一環として実施され、同事業に対応して設置された(社)日本ガス協会溶接部継手

性能評価専門小委員会，溶接委員会，および AUT 専門部会において有益な討論を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 瀬戸厚司, 増田智紀, 町田 進, 三木千壽: 溶接きずを有する継手の極低サイクル疲労特性; ガス導管円周溶接部の許容きず寸法の検討, 本会論文集, Vol.17 (1999), No.1, pp. 130-138.
- 2) Department of Energy, UK: Offshore Installations; Guidance on Design and Construction, (1984).
- 3) Det Norske Veritas, Norway: Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units, Classification Notes, Note No. 30. 2, (1984).
- 4) (社) 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).
- 5) International Institute of Welding: Fatigue Design of Welded Joints and Components, (1996).
- 6) E. Lachmann, K. T. Rie: Effect of Specimen Size on Low-cycle Fatigue, Proc. FATIGUE 84, Vol. 3 (1984), pp. 1281-1290.
- 7) (社) 日本ガス協会: ガス導管耐震設計指針, (1982).
- 8) 星出敏彦, 田中啓介: 表面欠陥からの疲労き裂伝播の弾塑性破壊力学的解析, 日本機学会論文集 (A 編), 48 巻, 433 号 (1982), pp. 1102-1110.
- 9) (社) 日本溶接協会: 溶接継手の脆性破壊及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法, WES 2805-1997, (1997).
- 10) The American Society of Mechanical Engineers: Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Div. 1.
- 11) 三木千壽, 長谷川金二, 神代直弘: 弾塑性条件下での疲労き裂進展特性, 東工大土木工学科研究報告, No.31 (1983), pp. 121-142.
- 12) N. E. Dowling and J. A. Begley: Fatigue Crack Growth During Gross Plasticity and J-integral, ASTM STP590 (1976), pp. 82-103.
- 13) 八木順吉, 町田 進, 富田康光, 的場正明, 征矢勇夫: 溶接まま継手の疲労強度に及ぼす板厚効果とその影響因子, 日本造船学会論文集, 第 169 号 (1991), pp. 289-299.