

SPB 方式 LNG 船用アルミタンクの突合せ溶接の改善

正員 馬 場 脩*
正員 奥 本 泰 久**

正員 真 鍋 英 男**
正員 池 添 眞 光**

Improvement of Butt Welding for Aluminum Alloy Tank of SPB LNG Carrier

by Osamu Baba, *Member*
Yasuhisa Okumoto, *Member*

Hideo Manabe, *Member*
Sanemitsu Ikezoe *Member*

Summary

Though two systems of LNG tank structure, membrane type combined with hull structure and MOSS type of independent tank, have widely been applied in LNG carrier in the world, Ishikawajima-Harima Heavy Industries, Co., Ltd. (IHI) originally developed the LNG carrier of SPB system (Self-supporting Prismatic type-B) having independent prismatic tank, which completely differs from these two systems. In SPB system, it must be guaranteed that the fatigue crack should not occur or be limited within the allowable length during ship service life. Therefore detail structural analysis and fatigue analysis for the tank have to be carried out, and also advanced quality control is necessary so that stress concentration around the welded joint is lesser. This paper focuses on the butt weld of aluminum alloy plates of the tank, and states the results of a series of study including some experiments to ensure the reliability of the joint, especially for the bead shape. The measuring device of weld beads and also flat bed structure with forced vacuum system to prevent the irregularity and angular distortion in the vicinity of weld bead are also reported.

1. 緒 言

LNG（液化天然ガス：Liquefied natural gas）船に搭載される貨物タンクには、形状および構造様式の異なる幾つかの方式が実用化されている。金属薄膜（SUS材およびインバー材）でタンクを製作し、貨液荷重をタンクで支持せず保冷構造を介して船体構造全体で受け持つ設計の「メンブレン方式」と、船体構造と独立した球形タンクを搭載する「モス方式」の2方式が広く採用されている。

石川島播磨重工業（株）は、これら2方式とは全く異なる自立角形タンクによるSPB方式（Self-supporting Prismatic type-B）のLNG船を独自開発した¹⁾。タンク材料には、アルミニウム合金、ステンレス鋼、9%ニッケル鋼を用いることができるが、SPB方式LNG船の一番船は、アルミ合金製の角型タンクを搭載した。

このアルミタンクの特長は、船の耐用期間中疲労亀裂が発生しないか、万一亀裂が発生しても大きな破壊に至るまで亀裂が進展せず、十分安全に検知できることである。すなわち、

ガスリークに対する高い安全性を保証しており、そのために高度な応力解析や疲労解析がなされると同時に、溶接継手の応力集中を設計で規定した許容値以下に保つ品質管理が必要である。

本稿では、アルミニウム合金の突合せ継手溶接ビードに対し、応力集中を緩和するためにあらゆる技術を集結し、溶接のままでスムーズなビード形状が得られる施工法を研究し、継手の信頼性を確保した一連の成果を紹介する。既に著者らは、すみ肉溶接に関する研究結果を発表しているが²⁾、本報は引き続き突合せ溶接に対し、溶接ビードの改良のみならず、溶接部の目違いや角変形防止のための定盤の製作および溶接ビード計測装置の研究開発についても言及する。

2. SPB方式アルミタンク工作における設計要求と問題点

2.1 設計要求

SPB方式のタンクの構造をFig.1に示す。デッキやボトムは縦通方式（縦通材＋横桁）、サイドや縦通隔壁は横防撓方式（立て防撓材＋水平桁）となっている。材料はアルミニウム合金A5083-O材（焼きなまし材）が使われている。

タンク構造には、様々な溶接継手が用いられているが、溶接ビードの止端部の局部応力で整理すると、継手形式に依らず1本のS-N線図で強度評価できることがわかった^{3) 4)}。ここでは、目違いや溶接角変形による付加的な応力も考慮し

* Jurong Shipyard（元石川島播磨重工業株）

** 近畿大学工学部

*** ㈱アイ・エイチ・アイ マリンユナテッド

原稿受理 平成19年3月1日

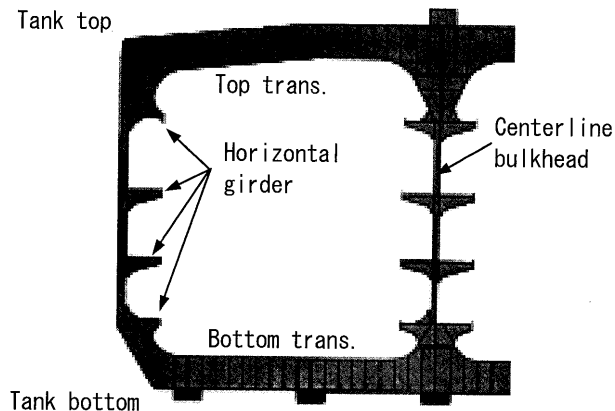


Fig.1 Tank structure

て、溶接止端部の局部応力を次式で定義した。

$$\sigma = K_t(\sigma_B + (K_d + K_m - 1)\sigma_N) \quad (1)$$

σ : 溶接止端部の局部応力

K_t : 応力集中係数

K_d : 溶接角変形影響係数

K_m : 目違い影響係数

σ_B : 曲げによる(縁)応力

σ_N : 公称膜応力

応力集中係数 K_t は、溶接継手の形状をパラメータとして、次式で計算することができる(未溶着部の存在による影響は省略)³⁾。

$$K_t = 1 + f(\theta)\{g(\rho) - 1\} \quad (2)$$

$f(\theta)$: 溶接余盛角の影響

$g(\rho)$: 溶接止端半径の影響

$f(\theta)$ 、 $g(\rho)$ は、Fig.2 に示す溶接部の止端半径 ρ 、フランク角 θ 、余盛高さ(脚長) h 、部材板厚 t をパラメータとして計算される。また、 $g(\rho)$ は荷重条件と継手形式により異なった値をとる³⁾。これらの影響関数の精度は、光弾性試験や FEM 計算および試験片の応力計測結果と比較検証している。

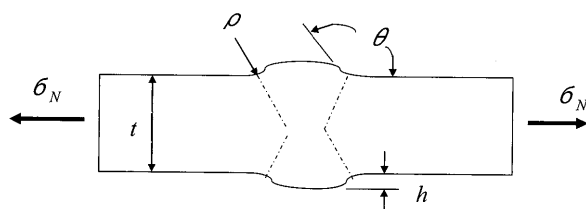


Fig.2 Shape around weld bead

したがって、全ての溶接継手の応力集中係数 K_t をある一定値以下になるように常に制御すれば、詳細な溶接ビード形状を個別に考慮することなく、部材に作用する公称応力を詳細な構造解析から推定することにより、疲労寿命の下限値を予測することができる。ここで、 K_t を小さく設定すれば溶接の

仕上げ作業が増加し、逆に K_t を大きく設定すれば、溶接の仕上げの基準は緩やかになる。実船の建造に際しては、過去の実績を調査し⁵⁾、許容値として $K_t = 3$ が設定された。建造中の全工程において、溶接施工時にはこの基準を厳守することが求められる。

一方、応力集中係数 K_t には複数のパラメータが含まれているが、なかでもフランク角 θ と止端半径 ρ の影響が大きく、それぞれ下記を満足すれば $K_t \leq 3$ となることがわかった⁶⁾。

フランク角度 $\theta \geq 120^\circ$

溶接止端半径 $\rho \geq 1.0\text{mm}$

以上のことを踏まえ、タンク建造中の全工程において、溶接ビードのフランク角 θ と止端半径 ρ を重点的に制御、管理することとした。シャープノッチを除くアンダーカットは、止端半径で管理し、シャープノッチに関しては亀裂進展の観点から別途許容値を設定した。また、工作精度要求として、目違い量に対して $0.15t$ (t : 板厚) 以下、角変形に対してロングスペース間のたわみ量を 6mm 以下に設定し、これら精度要求に対応した K_d 、 K_m と K_t を用いてタンク疲労設計が行われた。

2.2 突合せ継手の溶接における問題点

アルミ板突合せ溶接の施工上解決すべき課題は、疲労強度を阻害する次の2つの溶接品質項目を適切に管理することである⁷⁾。

(1) 溶接ビード形状 (溶接止端半径、フランク角度)

(2) 溶接継手部の目違いおよび角変形

溶接のままで滑らかな溶接ビード形状を得るには、設定された開先形状(開先角度、ルート寸法およびギャップなど)に対して、適切な溶接条件(電流、電圧、速度など)を確立することが必要である。

また、溶接されたビード形状の良否を判定するためには、新たな計測装置が必要である。計測装置は、ビード形状の計測結果を表示すると同時に、演算処理し応力集中係数 K_t 値を算出できれば大変便利である。

また、溶接部の目違いや角変形を押さえる必要があるため、拘束定盤の開発が必要である。これらにつき、以下順に説明する。

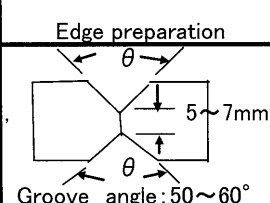
3. 突合せ継手の溶接ビード形状の改善

従来、アルミ MIG 溶接においては、疲労強度を向上させる方法の一つとして、予め余盛ビードを大きく溶着させて、溶接後にビードを切削機械で削り取り、滑らかな形状に整形することが行われてきた。しかし、SPB方式 LNG 船では、

Table 1 Welding materials (weight %)

(JIS rule)	Size (mm)	Si <0.40	Fe <0.40	Cu <0.10	Mn 0.40~1.0	Mg 4.0~4.9	Zn <0.25	Cr 0.05~0.25	Ti <0.15
A5083-O	14.5t	0.13	0.20	0.02	0.63	4.54	0.01	0.10	0.01
	20.0t	0.08	0.25	0.02	0.70	4.70	0.00	0.08	0.01
	25.5t	0.08	0.20	0.03	0.69	4.76	0.02	0.09	0.03
A5183-WY	3.2dia	0.08	0.13		0.65	5.10		0.08	0.06

Table 2 Welding condition

Edge preparation 	Thickness (mm)	Face/Back	Current (Amp)	Voltage (Volt)	Sppeed (cm/min)	Shield gas(l/min)	
						Inner	Outer
14.5	14.5	Face	450~500	32~35	70~73	70	70
		Back	600~650	26~28	65~70	70	70
20	20	Face	480~520	32~35	68~71	70	70
		Back	630~680	26~28	63~67	70	70
25.5	25.5	Face	500~550	32~35	64~67	70	70
		Back	650~700	26~28	59~63	70	70

より高能率にタンクを製作することを目指しており、「溶接のまま」で疲労強度上適切なビード形状が得られる溶接施工法の確立が必要であった。そのため、板厚毎に溶接実験を行い、各溶接パラメータがビード形状におよぼす影響を調査した。

3. 1 溶接試験要領

突合せ溶接確認試験は、アルミニウム合金材 A5083-O を用いた試験片で実施した。Table 1 に化学成分表を示す。試験片の大きさは、幅×長さ=1,000mm×2,000mm とし、板厚は 14.5mm, 20.0mm, 25.5mm の 3 種類を用いた。開先形状は Table 2 に示すように、両面溶接用の X 開先である。

溶接は、陸上の LNG タンク 建造で多くの実績があり、アルミ溶接の中で最も安定している大電流 MIG 溶接法を適用し、両面開先の表・裏面を 1 パスで溶接を行った。溶接材料は、5183-WY のワイヤで 3.2mm 径を使用した。Table 1 に化学成分を示す。このワイヤは同じく陸上のアルミニウムタンクの溶接に広く適用され、最も実績の多いものである。

上記の条件を用いて、突合せ溶接の試験を行い、溶接ビード形状が要求 K_t 値を満足するための溶接条件を検証した。Fig.3 に大電流 MIG 溶接状況および溶接装置を示す。

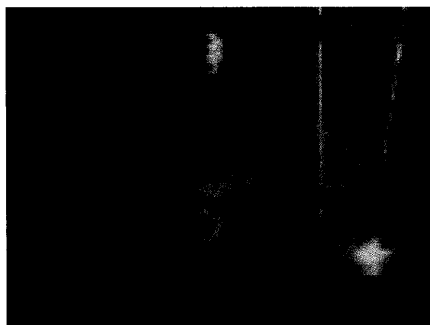


Fig.3 Welding equipment

3. 2 溶接試験結果

溶接ビード形状は、次の 3 項目を計測した。計測には、本研究のために特別に開発したレーザー方式ビード計測装置（後述）を使用した。

- (1) 溶接ビードのフランク角度
- (2) 溶接ビードの止端半径
- (3) 溶接ビードの余盛高さ（参考用）

試験は、両面開先に対して、溶接電流と速度を変化させ電圧を一定（アークが安定する電圧）で行った。Table 2 はそれぞれの板厚に対する適正溶接条件範囲を示す。

一例として板厚 14.5mm の場合、表側の溶接条件は電流値 450~500A, 電圧 32~35V, 溶接速度 70~73cm/min (0.0117~0.0122m/sec), 裏側の溶接条件は電流値 600~650A, 電圧 26~28V, 溶接速度 65cm/min~70cm/min (0.0108~0.0117m/sec) を用いて溶接を行うことにより、溶接のままで K_t 値を満足する溶接ビード形状が得られることがわかった。Fig.4 に表面溶接ビード形状を示す。また、Fig.5 は 500mm ピッチで行われたビード形状計測結果を示す。Fig.5 により、フランク角度 120° 以上、止端半径 1.0mm 以上を満足していることがわかる。

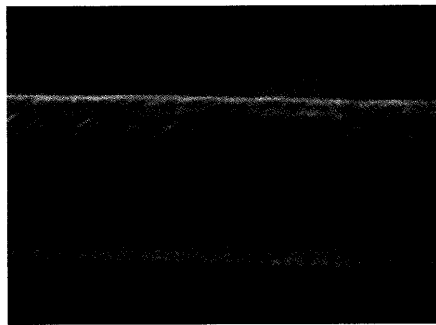


Fig.4 Bead shape

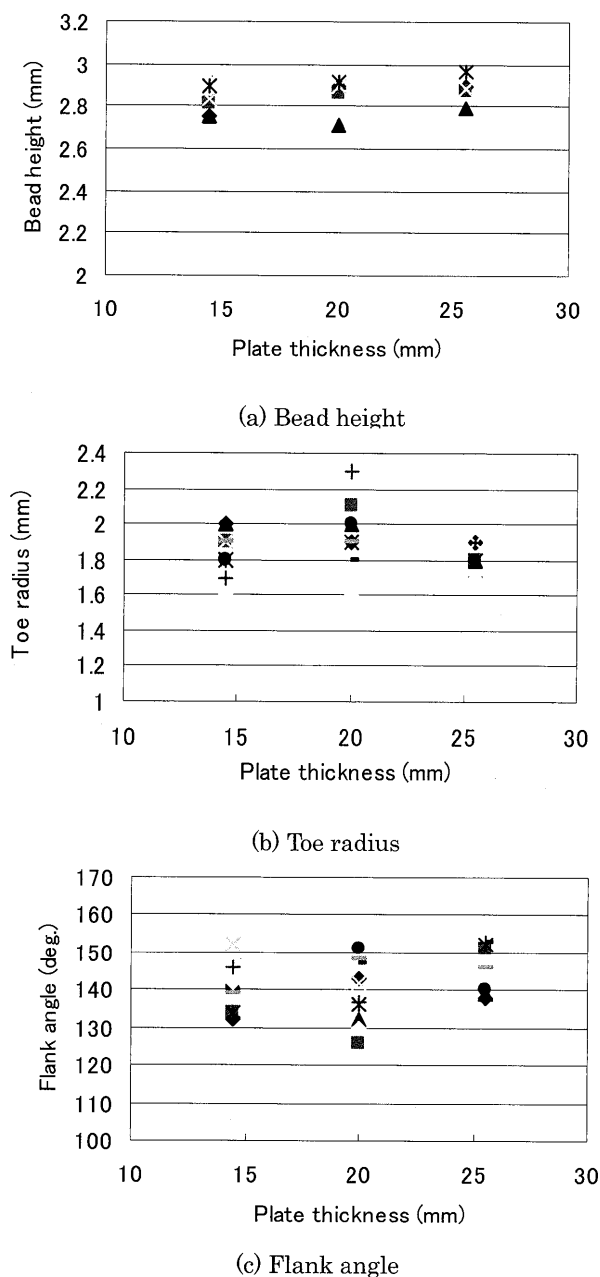


Fig.5 Test results

3. 3 溶接ビード形状計測装置の開発

当初小さな溶接ビードの止端部を正確に計測する装置がなく、試験的には断面マクロで計測していた。しかし、実船建造中に効率よく溶接ビード形状を計測するためには軽量小型の計測装置が必要である。今回、非接触式のレーザーでスキャンし画像処理とそのデータを演算する計測システムを開発した。装置の構成を Fig.6 に示す。

本計測装置は、溶接ビード表面にレーザーを照射しながらビードに沿って移動する装置で、溶接ビードに照射したレーザーの反射光を検知し、表面の凹凸を測定する。計測と同時に演算処理を行い、前述した3項目の形状管理指標および K_t 値を算定し、基準値に対する評価判定結果をビード形状断面

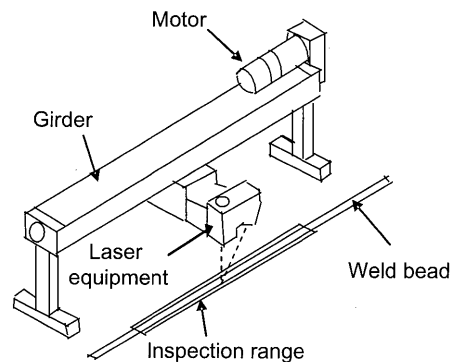


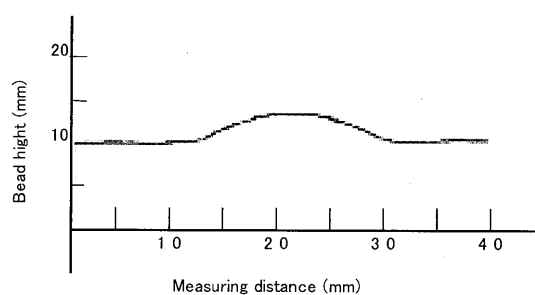
Fig.6 Measuring apparatus

図とともに印字する。検出誤差は $\pm 0.2\text{mm}$ である。装置本体はロングヤスチフナ間にセットできるよう、コンパクトなサイズに纏められている。また、本装置は突合せ継手だけでなく、すみ肉溶接にも適用できる。

計測装置の構成は、レーザー受発信装置と、それを振幅させるオシレート装置、溶接ビード方向にレーザー受発信部を移動させるトラバースで構成されている。

ビード形状計測結果の一例を Fig.7 に示す。この装置は、可搬性に優れ、現場での設置も容易で、表面計測結果は、基準値に対し K_t 値を瞬時に判定し“OK or NG”が表示されるために、溶接品質管理の重要なツールとなった。

また、ビード形状計測結果の分析から、溶接ビードのフランク角度及び止端半径は、余盛高さと強い相関があることがわかり、リアルタイムに計測可能な（溶接ビード余盛高さをパラメータとする）自動溶接制御システムを開発することができた⁸⁾。



Items	Measuring data	Judgment	Measuring data	Judgment
1. Bead height	H = 3.05mm	OK		
1. Flank angle	Ar = 152°	OK	Ar = 154°	OK
2. Toe radius	Rr = 1.97 mm	OK	Rr = 2.03 mm	OK
3. Kt value	Kr = 2.07	OK	Kr = 1.99	OK

Fig.7 Measured example

4. 溶接目違いおよび角変形の改善

4. 1 目違いと角変形

本来水平であるべき母板に段差が生じたまま溶接された状態を目違いと呼ぶ (Fig. 8(a))。目違いは、元々段差がある

状態で仮付けした場合のほか、「溶接中に仮付けビードが割れて」あるいは「溶接中に仮付けビードが溶融された際」母板に段差を生じたまま溶接作業を継続したことによっても発生する。したがって、目違いの防止は継手溶接中に母板そのものの動きを拘束することが有効と考えられる。

また溶接条件によっては、冷却時に突合せ継手溶接線に沿って、アルミ板が折れ曲がったような変形が生じる。この横曲がり変形を角変形と呼ぶ。角変形は板厚方向に残留する溶接歪が一樣でないため、面外曲げによって発生するもので、Fig.8(b)にその様子を示す。

角変形の大きさは母板の板厚と溶接入熱に依存し、変形防止方法として最も有効な方法は溶接入熱を小さくすることであるが、高エネルギー密度溶接は未だ造船所の現場に適用できるレベルに達しておらず、生産効率を落としてまで溶接変形を抑えることは現実的ではなかった。そこで、拘束ジグによって変形を押さえる方法を採用し、目違い防止と合わせて、突合せ溶接専用拘束定盤を開発した。但し、この方法では、残留応力による溶接割れが発生しやすくなるので、適切な溶接条件を確立するため、小型試験片による実証試験を行った。

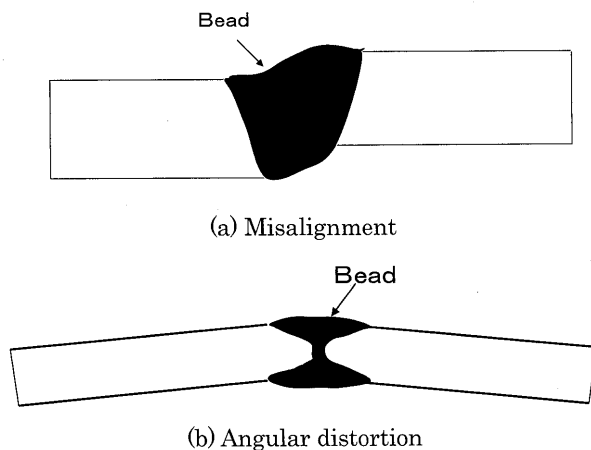


Fig.8 Defects of butt welding

4. 2 小型試験片による実証

建造工場に設置する大型拘束定盤の製作に先立ち、突合せ溶接拘束用バキュームパッドの必要拘束力を小型試験片による試験で検証した。またバキュームパッド配置についても、溶接線に沿って1列配置する場合と2列配置する場合の比較を行い、その結果、400kgfの拘束力を有する直径300mmのバキュームパッドを片側2列に配置することとした。この拘束定盤をFig.9に示す。3.2節において設定した溶接条件を用いて溶接試験を繰り返し、溶接割れなどの不具合を起こさずに角変形を抑えて、工作精度要求を満足できることを確認した。

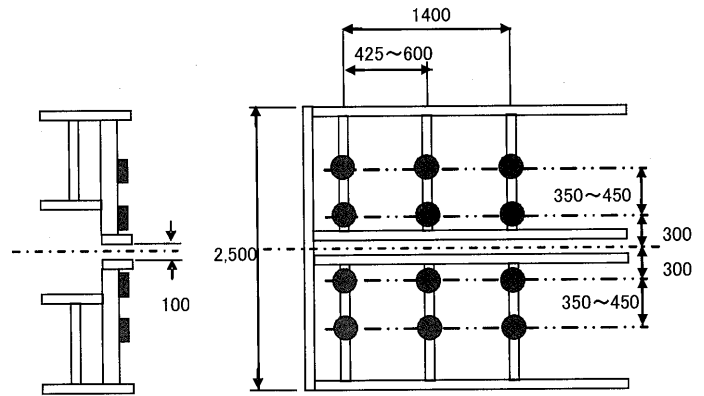


Fig.9 Platform for welding tests

4. 3 拘束定盤による角変形矯正効果

実際のタンク建造では、幅広のアルミ板を溶接するため、横曲がり変形量（上下）よりも角変形量の計測の方が容易であり、さらに、溶接変形を引き起こす仮想外力も面外曲げモーメントで考える方が実現象に近いと思われる。小型試験片による実証試験結果に基づき、角変形量と面外曲げモーメントを変数として、拘束条件下の実際の角変形量を簡便に推定する手法を考案した。

(1) 角変形計算

溶接線に対して直角方向の端部を拘束する場合について考える (Fig.10)。

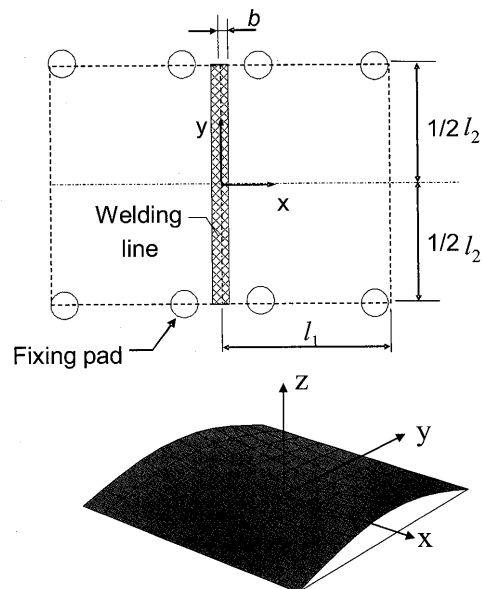


Fig.10 Co-ordinate system

母材の撓みは次式で近似できると仮定する。

$$w = w_0 \frac{x}{l_1} \cos \frac{\pi y}{l_2} \quad (3)$$

母材部分の曲げ歪エネルギー、および溶接部の角変形を外力

によって減じるのに要するエネルギーは次式で表される。

$$U_m = \frac{D}{2} \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy \quad (4)$$

$$\text{ただし, } D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5)$$

U_m : 母材の曲げひずみエネルギー

E : ヤング率, ν : ポアソン比, h : 板厚

$$U_w = \int_0^{\theta_f - \theta_0} M_x l_2 d\theta \quad (6)$$

U_w : 溶接部の角変化を θ_f から θ_0 まで減らすのに要するひずみエネルギー

θ_f : 拘束のない場合の角変化

両端支持の細長板に M_x が働く時の曲げモーメントと角変形の式より

$$M_x = \frac{D_w(\theta_f - \theta_0)}{2b} \quad (7)$$

b : 溶接部の半幅

D_w : 溶接部の曲げ剛性

仮想仕事の原理より次の関係式を得る。

$$D\theta_0 \left\{ \frac{\pi^4}{6} \left(\frac{\ell_1}{\ell_2} \right)^3 + (1-\nu)\pi^2 \left(\frac{\ell_1}{\ell_2} \right) \right\} - \frac{D_w(\theta_f - \theta_0)}{2b} = 0 \quad (8)$$

$$\theta_0 \left[1 + \frac{Db}{D_w} \cdot \frac{1}{\ell_2} \left\{ \frac{\pi^4}{3} \left(\frac{\ell_1}{\ell_2} \right)^3 + 2(1-\nu)\pi^2 \left(\frac{\ell_1}{\ell_2} \right) \right\} \right] = \theta_f \quad (9)$$

(9) 式を変形すると,

$$\frac{\theta_0}{\theta_f} = \frac{1}{1 + \beta c} \quad (10)$$

$$c = \left\{ \frac{\pi^4}{3} \left(\frac{\ell_1}{\ell_2} \right)^3 + 2(1-\nu)\pi^2 \left(\frac{\ell_1}{\ell_2} \right) \right\} \frac{1}{\ell_2} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{Db}{D_w} \approx b \quad (12)$$

上記はバキュームパッドによる拘束が有効な状態において成立する関係式であり, 拘束を解除した後に起きるスプリングバックを考慮すると, 必ずしも正確に溶接角変形量を求められる訳ではないが, 実験結果から長尺幅広板の溶接変形を簡便に予測する近似式としては十分である。なお, 実際には Fig.11 に示すように溶接線方向にも面外たわみが生じるので溶接試験片の角変形量は9箇所(図中矢印)の変位量から平均の角変形量を求めた。

ℓ_2 にバキューム間隔をとった時の板中央での角変形 θ_0 は式(10)～(12)を用いて求めることができる。試験片 800mm×800mm と 1,000mm×1,750mm の場合の実測値と計算値を Table 3 および Fig.12 に示す。なお, 拘束状態の計

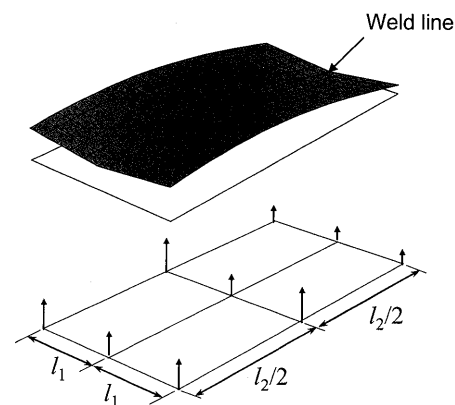


Fig.11 Deformation of welded plates

算には, 試験片 800mm×800mm の非拘束実験値 θ_f を用いた。

板厚 14.5mm の場合, 板厚方向の温度差が小さく残留歪の偏りが少ないので, 非拘束でも角変形は小さく, 拘束の場合と差異がない。そのため, 計算値が実験値に比べて過小になっている。一方, 板厚 20mm 及び 25.5mm の場合, 実験値と計算値はよく合っており, 比較的厚板の場合は本簡易計算式が有効と判断される。

拘束定盤を適用して溶接した状況を Fig.13 および Fig.14 に示す。良好なビード形状が得られていることがわかる。

Table 3 Calculation results

h: Plate thickness		(mm)	14.5	20.0	25.5	
b: Bead half width		(mm)	21	25	29	
Plate size	Pad dist.					
800 × 800	800 × 725	Experience	θ_f (rad)	0.003	0.019	0.029
			θ_0 (rad)	0.003	0.006	0.010
			θ_0/θ_f	1.000	0.316	0.345
		Calculation ($\beta=b$)	C (1/mm)	0.0812		
			θ_0'/θ_f	0.370	0.330	0.298
			θ_0'' (rad)	0.001	0.006	0.009
1,000 × 1,750	1,000 × 700	Experience	β'' (mm)	0.00	26.7	23.4
			θ_0 (mm)	---	0.001	0.002
			C (1/mm)	0.1634		
		Calculation ($\beta=b$)	θ_0'/θ_f	0.291	0.245	0.211
			θ_0'' (rad)	0.001	0.005	0.006

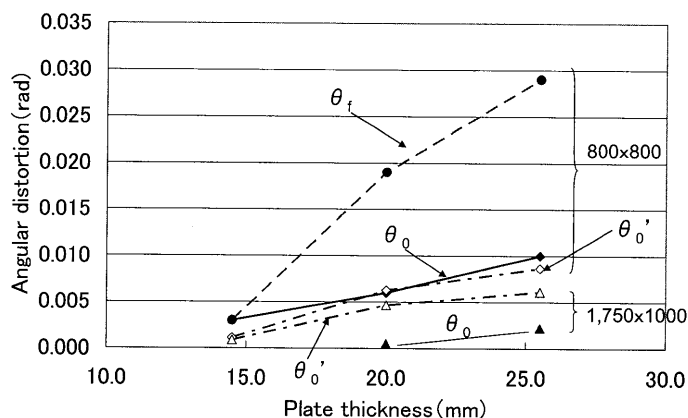


Fig.12 Angular distortion

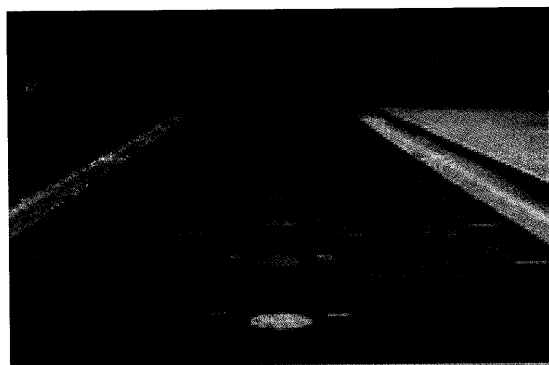


Fig.13 Welding platform

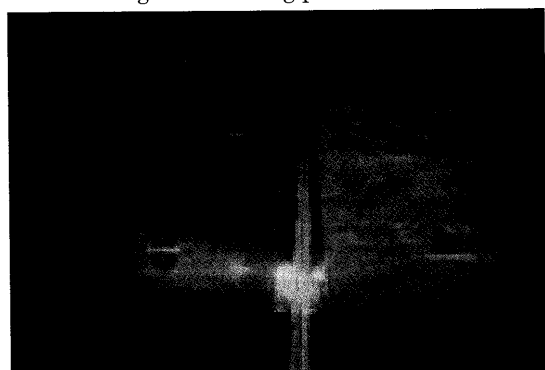


Fig.14 Welding result

5. 結 言

SPB方式LNG船のアルミタンクの設計・建造において、疲労強度の高信頼性を実現しつつ、溶接工程における仕上げ作業を削減することは技術的に大きな課題である。そのためには、ビード形状の改善と継手部の目違いおよび角変形の防止策の確立が最重要事項である。この課題に対して問題点を調査、検討し、様々な実証実験や計測装置および溶接拘束定盤の開発を行った。

突合せ溶接ビード形状の改善に関しては、溶接のままで疲労設計上の要求を確保するための溶接条件と管理指標を確立し、開発した溶接ビード形状計測装置を用いて効率よく検査を行うことができた。アルミ溶接継手部に発生する目違いや角変形は、開発した溶接用拘束定盤を用いて効果的に防止することができた。

これらの施策を講じて、SPB方式LNGタンクを実用化することができた。

参考文献

- 1) 元網数道, 藤谷 光: IHI 自立角型 (SPB) LNG 船 第1報 開発と原理, 石川島播磨技報 第25巻 第2号, (1985), pp. 84-89

- 2) 馬場脩, 奥本泰久・池添眞光: SPB 方式 LNG 船用アルミタンクのすみ肉溶接ビード形状の改善, 日本船舶海洋工学会論文集 第5号, (2007), (投稿中)
- 3) 後川理, 中山英治: 溶接継手部の応力集中係数, 石川島播磨技報 第23巻 第4号, (1983), pp. 351-355
- 4) 酒井啓一ほか: アルミニウム合金 5083-0 板骨構造の疲労設計法の検討, 日本造船学会論文集 第153号, (1983), pp. 268-280
- 5) 後川理: 溶接継手部の応力集中係数—第2報 確率論的評価—, 石川島播磨技報 第24巻 第2号, (1984), pp. 98-103
- 6) 安部昭則: SPBタンク構造設計法に関する研究, 東京大学博士論文, (2000), pp. 110
- 7) (社) 軽金属溶接構造協会: アルミニウム合金構造物の溶接施工管理V アルミニウム合金 品質管理, (1992), pp. 14-21
- 8) 入澤敏夫ほか: アルミニウム合金溶接ビード形状制御システムの開発, 石川島播磨技報 第32巻 第3号, (1992), pp. 175-180