海洋構造物の溶接部の局部溶接変形量とその影響因子*

—海洋構造物の溶接変形予測と制御に関する基礎的研究 (第1報)—

中長 啓治**, 盛岡 純一***, 上田 幸雄****

Local Shrinkage and Rotations near the Joint by Welding in Offshore Structure and Their Influential Factors*

—Prediction and Control of Welding Deformation of Offshore Structure (Report 1)—

by Keiji Nakacho**, Junichi Morioka*** and Yukio Ueda****

Most of offshore structures for oil exploitation are composed of a deck and legs which are framed by welding many pipes. The prediction and control of the welding deformation is very important for the efficient and economical building of offshore structures. This is a basic study of the prediction and control, of which object is the offshore structure of jacket type.

Almost all studies on the welding deformations of pipes (cylindrical drums, cylindrical shells) have been performed in relation to the local deformation by the circumferential butt welding. In this study, the welding deformation when a pipe (brace) is welded on the wall of another pipe (chord), like the welding of T-joint or Y-joint, was investigated in the actual building process of a jacket. The local deformations of the braces by welding were measured near the joints. At the same time, the influential factors, such as brace sizes, groove shapes, welding sequences, heat inputs, etc., on the local deformations were investigated.

The correlations between the deformations and the factors were examined. As a result, it was made clear that the total heat input (the summation of heat inputs per unit length, of all welding passes) for each joint had influence on the local deformations most. The relations between the local deformations, namely, axial shrinkage, in-plane rotation, out-of-plane rotation, of the brace and the total heat input were formulated by the regression analysis. Also, the mechanisms of the increase and decrease of the deformations were discussed in detail, related to the total heat input, the welding sequence, etc. In the next report, the welding deformation of the whole structure will be simulated by the theoretical analysis, using the above relations for the local deformations.

Key Words: Welding deformation, Shrinkage and rotation, Joint, Prediction, Control, Offshore structure, Jacket type

1. 緒 言

石油掘削用海洋構造物の建造工程は複雑であり、あらゆる製作段階において合理化が望まれている。この合理化の重要な課題の1つに溶接変形の制御がある。これを適切に行うことができると、単に製品寸法の向上に寄与するだけでなく、建造時の手直しやそれに関連した工程の遅延を少なくすることができる。したがって、溶接変形の制御は建造工程の合理化・最適化、ひいては経費削減の支配的課題の1つであると言える。

そこで、本研究では海洋構造物の建造時に生じる溶接変形の予測と制御の実現を目指し、その基礎的研究を行う。すなわち、ジャケット型海洋構造物を対象とし、まず、実機の建造時に溶接部近傍に生じる局部溶接変形を測定する。測定結果より局部溶接変形の支配的因子を検出し、変形量との相関を関数式化する。次に局部溶接変形を元に構造物全体の溶接変形をシミュレーションすることができる理論解析法を開発し、それに基づく解析プログラムを作成する。これに上記の局部溶接変形予測式を入力し、実構造物に対してシミュレーション解析を行い、建造過程で構造物全体に生じる溶接変形の予測と制御を試みる。このうち、

本報では、前者の溶接部近傍に生じる局部溶接変形とその支配的影響因子の関係について報告する。

ここで研究対象とするジャケット型海洋構造物はパイプ(円筒)骨組構造物である。これまで円筒部材間を溶接した場合に生じる溶接変形に関して数多くの研究が行われているが、そのほとんどが円筒部材間を突合せ円周溶接した場合を対象としている。又、その中の多くは薄肉円筒を軸対称問題として取り扱っている^{1,2)}。本研究では、円筒の側面に他の円筒が接合され、所謂、T継手やY継手が形成される場合に生じる溶接変形を対象とする。又、円筒は中厚板で多層溶接が行われ、移動熱源(溶接手順・方向)の影響により周上に不均一な収縮変形が現われる。このようなT継手やY継手の接合時に生じる溶接変形を対象とした研究はこれまでほとんど実施されていない(残留応力を取り扱った研究はわずかに見られる³⁾)。本研究は、これを実構造物の建造時に実測することにより試みる。

2. 海洋構造物の建造工程と溶接変形

本研究では海洋構造物としてジャケット型プラットフォームを取り上げる。これは掘削設備、居住設備等を搭載したデッキをパイプによる骨組構造であるジャケットが支える構造型式のプラットフォームである。本研究で実際に溶接変形を測定したジャケットをジャケットAとして、その大体の形状をFig.1に示す。1つの側面が垂直面である非対称な構造をしている。上下方向に主部材である約90 m長のコード(レグ)が4本配置され、その間を数多くのブレースが結合している。コードの外径は約1,300~1,400 mm、板厚は約15~60 mmで、ブレースの外径は約500~

*原稿受付 平成8年4月22日 平成7年11月溶接構造シンポジウムで発表

**正 員 大阪大学 Member, Osaka University
*** 川崎製鉄(現:退職) Kawasaki Steel Corp.
(Present: Retired)

****正 員 大阪大学(現:近畿大学) Member, Osaka University (Present: Kinki University)

750 mm, 板厚は約12~32 mm である。このようなジャケットの上にデッキが設置される。

次に、ジャケットの建造工程をジャケットAの場合を例にとり簡単に説明し、建造時に溶接変形が及ぼす工作上的の問題点について述べる。ジャケットの建造は、Fig. 2 に示すように、横倒しした状態で施工される。その建造工程は、大別して、平組みまでと、その立ち上げ後の大組みの2段階に分けることができる。

Fig. 1 Jacket A.

(a) Framing of two rows on the ground

(b) Standing of the rows and framing of the other rows

Fig. 2 Building process of jacket A.

平組みでは、Fig. 2 (a)に示すように、水平面状態でコードに種々のブレースを接合していく。各ブレースの仮付け溶接を順次行い、それと並行して仮付けされた溶接部を本溶接していく。次に、このように平組みの完了した部分構造（ロー：Row）を互いに結合させる大組みに移る。すなわち、Fig. 2 (b)に示すように、クレーン等を用いて各ローを立ち上げ、その間を各種ブレースで結合していく。

平組み溶接時及び大組みでのロー間の接合時に、ブレースの接合位置のずれ、不適量ルートギャップ等が生じていると、全体の工作精度の低下や工程の遅延をもたらす。主要骨組が完了した時点で要求される工作精度は、例えば、仕様書において、コード及びコンダクター（ガイド）の直線度に関しては、許容変形量、すなわち、コード全長に対する直線からの“ずれ”が10 mm 程度の厳しい基準となっている。これは、その後の掘削機器、パイル等の取り付け時に支障を来さない為に必要な寸法精度として要求されている。もし、基準値以上のずれが生じていた場合は、何らかの方法で手直しをする必要がある。したがって、建造時の溶接変形を精度よく予測し制御することができれば、工作精度を向上させると同時に建造工程の高効率化をもたらすことが可能となる。

ところで、以上のような溶接変形は、溶接時に溶接部及びその近傍に生じる局部収縮による変形が直接の原因である。したがって、まず、この溶接部近傍の局部変形の実態を調査し、その特性を把握することが重要である。

3. 溶接部の局部収縮量の計測と局部変形量の算出

本研究では、溶接変形の計測をジャケットAの製作時に、その平組み工程 (Fig. 2 (a)の工程) において実施した。前述のように、構造物の溶接変形の直接の原因は溶接部の局部収縮にあると考えられるが、その局部収縮量に影響を与える可能性がある因子としては次のようなものが上げられる。そこで、溶接部の局部収縮量と共に、これらの因子についてもできる限り記録することにした。

- (a) 鋼材及び溶接材料の力学的性質
- (b) ブレース（鋼管）寸法
- (c) ブレースのコードへの入射角及び開先形状
- (d) ルートギャップ
- (e) 入熱量（パス数、層数）
- (f) 溶接順序、他

局部収縮量の計測は次のように行った。Fig. 3 に示すように、ブレース側で溶接部から200 mm の位置と、コード側

Fig. 3 Measurement of the displacements near a joint.

で溶接部周辺に、それぞれ対応する周上8箇所(時計0時の位置より45°間隔)にポンチマークを印した。本溶接の前後でその間の距離を計測し、その差を“溶接部近傍での局部収縮量”と定義した。この変位の計測は0.1mmのオーダーまで行った。

次に、ブレースの溶接部近傍での変形としてはFig.4に示す主要な3種類の変形を対象とした。まず、ブレース軸方向の収縮変形(軸方向収縮変形)、次に、コードとブレースが作る面内での回転変形(面内回転変形)、そして、同面に対して垂直方向への回転変形(面外回転変形)である。

平組み時の局部収縮計測量を用いて、上記の変形量を次のように算出した。まず、8点の局部収縮量を平均して軸方向収縮変形量とした。次に、平組み時の溶接周上3時と9時の位置の収縮量の差より面内回転変形量を、そして、0時と6時の位置の収縮量の差より面外回転変形量を求めた。

Fig. 4 Deformations near a joint by welding.

4. 溶接部の局部変形量とその影響因子との相関性

ジャケットAの平組み建造時において、垂直ブレース(コードにほぼ垂直に接合されるブレース)及び斜めブレース(垂直ブレース間を対角線状に結合するブレース)の溶接時に、第3章で述べた局部収縮量とその影響因子(諸量, 手順等)が可能な限り実測・記録された。結果を整理し、局部変形量(軸方向収縮量, 面内回転変量, 面外回転変形量)と影響因子の相関性を調べた。その結果、今回の測定結果から、局部変形量は全入熱量との間にかかなり高い相関性を有していることが見い出された。

ここでの全入熱量とは、各継手の溶接において、すべてのパスの単位長さ(mm)当りの入熱量を合計したものであ

る。この時、同じパスでも周上の位置により単位長さ当たりの入熱量は多少変化しているため、周上での平均値をそのパスの入熱量とした。

なお、管部材の鋼種はASTMA36であり、溶接棒にはJIS Z3211 D4301及びD4316規格品が使用された。それらの室温での力学的性質をTable 1に示す。

4.1 軸方向収縮変形量と全入熱量の関係

Fig.5に、ブレース軸方向収縮変形量と全入熱量の関係を示す。両者の相関性はかなり高い。図より分かるように、軸方向収縮量は全入熱量の増加と共に増加していくが、その変化量は次第に小さくなっていく。今回の記録からは、全入熱量(約10,000~42,000 J/mm)と溶接層数(3~7層)は平均的には比例関係に近かったため、この理由を層の増加に対して述べる。

ブレース軸方向の収縮は主に溶着金属の横収縮とそれに伴う塑性変形によるものと考えられる(以後、支配因子である溶着金属の横収縮に代表させて説明する)。しかし、溶接層が増加していくと新しい層の溶着金属の収縮を既存層が拘束する。その拘束力は層数と共に増加していく。このため、収縮量の増加量は層数の増加と共に小さくなっていくと推察される。この関係を関数式で表すことを考え、これまでの類似の研究を調査してみた。

平板の突合せ溶接における横収縮量は、多層溶接の場合、渡辺・佐藤により次式で表されると報告されている⁴⁾。

$$S_n = C \cdot (A/h^2) \cdot \log(w_n/w_0) + S_1 \quad (1)$$

ここで、 S_n : 第n層までの溶接による収縮量、 C : 溶接棒と溶接条件によって定まる定数、 A : 開先断面積、 h : 母板の板厚、 w_n : 第n層までの溶着金属量、 w_0 : 初層の溶着金属量、 S_1 : 初層溶接による収縮量。

上式は1つの継手を多層溶接する場合、溶着金属量の増加と共に横収縮量が対数的に増加していくことを示している。最終層まで溶接が終了した後の残留横収縮量は次のようになる。

$$S_f = C \cdot (A/h^2) \cdot \log(w_f/w_0) + S_1 \quad (2)$$

ここで、 S_f : 多層溶接による全収縮量、 w_f : 最終層までの全溶着金属量。

上式的全溶着金属量(w_f)は全入熱量(Q_f)に比例する

Fig. 5 Relation between axial shrinkage and total heat input.

Table 1 Mechanical properties of base plate and welding materials.

Materials	Mechanical properties	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Base plate ASTM A36	ASTM standards	250 ≤	400 ≤ ≤ 550	20 ≤
	Mill sheet	399	635	31
Welding material JIS Z3211 D4301	JIS	345 ≤	420 ≤	22 ≤
	Catalog (KS-7)	420	470	33
Welding material JIS Z3211 D4316	JIS	345 ≤	420 ≤	25 ≤
	Catalog (LB-52U)	460	550	31

ものと考え、横収縮量 (S_r) と全入熱量 (Q_r) の関係にだけ注目して上式を簡単化すると次のようになる (添字 f は省略する)。

$$S = C_1 \cdot \log Q + C_2 \quad (3)$$

ここで、 C_1 、 C_2 ：多くの因子の影響を受ける定数。

平板突合せ溶接での横収縮は、本研究でのブレースのコードへの溶接の場合、ブレース軸方向の収縮に相当する。そこで、Fig. 5 に示した結果の整理に上式を適用してみた。対数関数型最小二乗法を用いて回帰分析を行った結果が、Fig. 5 の図中に示した曲線で次式で表わされる。ブレース軸方向収縮量と全入熱量の間には対数型のかなり良い相関関係が存在するようである。

$$S(\text{mm}) = 2.20 \log Q(\text{J/mm}) - 7.03 \quad (4)$$

ここで、 $S(\text{mm})$ ：軸方向収縮量、 $Q(\text{J/mm})$ ：全パスの単位溶接長当りの入熱量の総和。

なお、相関関係式(4)の適用範囲は以下の通りである。

- ・材料：被覆アーク溶接棒 D4301, D4316 (JIS Z3211)
鋼材 ASTM A36
- (あるいは、これらと力学的性質が類似のもの)
- ・ブレース寸法：直径400～800 mm、板厚10～30 mm
- ・コード寸法：ブレース/コード直径比0.3～0.6
- ・入熱量 (単位溶接長当りの入熱量)：
1,500～7,000 J/mm (各パスに対して)
10,000～45,000 J/mm (全パスの総和)

4.2 面外回転変形量と溶接手順及び全入熱量との関係

面外への回転変形量と全入熱量の関係を Fig. 6 に示す。平組み時においてブレースの一方を溶接した時、その溶接部近傍がブレースの他端を持ち上げようとする方向へ回転した場合、正の回転とした。この図から2つのことが分かる。1つは、上下方向の回転変形はほとんどすべてが正の方向に、すなわち、部材他端を持ち上げようとする方向に生じている。もう1つは、その回転変形の大きさは全入熱量が大きくなると小さくなっていく。この2つの特徴について考察する。

まず、各継手の各パスの溶接手順 (方向) を調べ単純化すると、大体 Fig. 7 に示すように大きく2つに分けることが出来る。左右ほとんど同時に溶接が進められる場合と、片側ずつ交互に溶接される場合である。いずれにせよ、溶接は下部から上部に向かって行われている。このため、各パスでは上部の方が後で溶接金属が冷却し収縮する。したがって、上部への回転変形が生じているものと推察される。

次に、その面外回転変形量が全入熱量の増加と共に減少するのは次の理由によるものと考えられる。初層の溶接時においては上記の理由で回転変形が上部へ生じる。2層目以降はそれまでに形成された層の上に盛られるので、既存層は高温に達し剛性が一旦低下する。そのため、上部への回転変形はブレースにかかる重力により緩み、逆方向の下部へ回転する。その後、新しい層の溶接金属の収縮により再び上部への回転が付加されるが、後の層ほど既存層の抵抗のため変形は生じにくくなる。剛性の低下のため緩んで減少する回転量と新たに増加する回転量の大小関係によって、その層での付加回転変形の方向が決まる。Fig. 6 の横軸は4.1節のはじめに述べたように層数と考えてもよく、今回の各継手の溶接層数3～7層の間においては、結果として減少量の方が多くなったものと推察される。ただし、この

Fig. 6 Relation between out-of-plane rotation and total heat input.

Fig. 7 Welding sequences in each pass.

ような挙動は層数の増加と共に生じにくくなっていくと考えられる。そこで、Fig. 6 に示した結果を、前節同様、対数関数型最小二乗法を用いて回帰分析してみた。Fig. 6 に示されている曲線がその結果であり、次式で示される。軸方向収縮量に比べるとかなりバラつきはあるが、全体的傾向は表わされているものと思われる。

$$R_o(\text{rad}) = -0.00120 \log Q(\text{J/mm}) + 0.00672 \quad (5)$$

ここで、 $R_o(\text{rad})$ ：面外回転変形量、 $Q(\text{J/mm})$ ：全パスの単位溶接長当りの入熱量の総和。

なお、相関関係式(5)の適用範囲は式(4)と同じである。

4.3 面内回転変形量とブレース入射角及び全入熱量との関係

面内での回転変形量と全入熱量の関係を Fig. 8 に示す。Fig. 7 に示した溶接順序で後で溶接した側へ回転した場合を正の回転とした。左右ほとんど同時の場合もどちらかに振り分けた。面外回転と同様に、面内でも後で溶接した側へ回転するものと予想していたが、わずかにそのような傾向が見られるものの、平均値は0に近い。これは、左右どちら側を先に溶接してもほぼ交互に溶接されるので、溶接パス数が多くなると優位差がほとんど無くなるためであると考えられる。

そこで、斜めブレースに限って、今度はその鋭角側に回転した場合を正の回転として全入熱量との関係を Fig. 9 に表わしてみた。図より、斜めブレースはすべて鋭角側へ回転していることが分かる。この理由を考えてみた。Fig. 10 に斜めブレースの溶接部断面を示す。鈍角側をA、鋭角側をBとする。入熱量の記録から、鈍角側の溶接時と鋭角側の溶接時で全入熱量にほとんど差が見られない。そこで、

Fig. 10では鈍角側と鋭角側の溶着金属部の断面積をほぼ等しくしている。これらの溶着金属の収縮をコード外面に対する垂直方向の成分と平行な成分に分けると、プレースをコード側へ引き寄せる効果は垂直方向の収縮成分によると考えられる。鈍角側では外側の半分の領域は垂直方向の収縮に対して自由表面を有し、プレースを引き寄せる効果が薄い。これに対し、鋭角側ではほぼ全域で溶着金属の収縮力はプレースに伝達される。この収縮効果の相違により回転変形が生じているものと考えられる。ただし、全周の収縮量の平均値である軸方向収縮量と同様、溶接層が増加していくと新しい層の溶着金属の収縮を既存層が拘束するので、その回転変形量の増加量は層数の増加と共に小さくなっていくものと推察される。そこで、Fig. 9に示した結果を、軸方向収縮量同様、対数関数型最小二乗法を用いて回帰分析してみた。次式がその結果であり、Fig. 9に示すように、データ点はそのような傾向を有しているように見受けられる。

$$R_{ID}(\text{rad}) = 0.00301 \log Q(\text{J/mm}) - 0.0104 \quad (6)$$

ここで、 $R_{ID}(\text{rad})$ ：斜めプレースの面内回転変形量、 $Q(\text{J/mm})$ ：全パスの単位溶接長当りの入熱量の総和。

Fig. 8 Relation between in-plane rotation and total heat input.

Fig. 9 Relation between in-plane rotation and total heat input (Diagonal brace).

Fig. 10 Mechanism of in-plane rotation of diagonal brace by welding.

なお、相関関係式(6)の適用範囲は式(4)と同じである。

4.4 ルートギャップと局部溶接変形の関係

本溶接前のルートギャップが局部溶接変形にかなり影響を与えるものと予想し、局部収縮量と同様に、溶接部円周上8箇所でもルートギャップを計測した。その周上のルートギャップの平均値と軸方向収縮量、上下点のルートギャップより求められる傾斜量と面外回転変形量、更に、左右点のルートギャップより求められる傾斜量と面内回転変形量、それぞれの間の相関性を調べたが、今回の測定結果からは、これらの間に明確な相関関係を見出すことができなかった。

5. 結 言

本研究は、石油掘削用海洋構造物の建造時に生じる溶接変形の予測と制御を目的としたものである。その基礎的研究として、ジャケット型プラットフォームを対象に、建造工程の平組み時に生じる溶接部の局部変形とそれに影響を及ぼすと考えられる諸量を実測した。得られた測定値を整理し、溶接部の各種局部変形量とその影響因子との関連を検討した。その結果、下記の局部変形量と全入熱量(Q)の間には、かなり明確な相関性があることが判明した。そこで、相関性が生じる理由を考察すると共に、相関関係式を求めた。

- (1) 軸方向収縮変形量： S
 $S(\text{mm}) = 2.20 \log Q(\text{J/mm}) - 7.03 \quad (4) \text{ bis}$
- (2) 面外回転変形量： R_O (上方向への溶接の場合)
 $R_O(\text{rad}) = -0.00120 \log Q(\text{J/mm}) + 0.00672 \quad (5) \text{ bis}$
- (3) 面内回転変形量： R_{ID} (斜めプレースに対してのみ)
 $R_{ID}(\text{rad}) = 0.00301 \log Q(\text{J/mm}) - 0.0104 \quad (6) \text{ bis}$

現在、実構造物を対象として、建造時に建造物全体に生じる溶接変形をシミュレーションすることができる解析法とプログラムを開発中である。これは実際の建造工程と同

じようにコードにプレースを順次接合していくもので、その各部材の接合時に溶接部に生じる局部変形量を、ここで得られた相関関係式を用いて部材の種類（垂直プレース、斜めプレース）と入熱量より求める。本プログラムを使用して建造時の溶接変形を種々の条件でシミュレーション解析することにより、建造過程での溶接変形の推移特性を調べ、溶接変形の予測と制御の可能性、溶接変形を軽減させる工作法等を検討する予定である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり多大なるご協力を頂いた川鉄鉄構工業株式会社（現：川鉄マシナリー株式会社）及び川重検査サービス株式会社の関係各位に厚くお礼申し上げます

す。また、大阪大学で卒業研究として取り組まれた小椋隆氏及び増田浩氏（両氏共に、現：日本アイ・ビー・エム株式会社）の労にも深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、藤田、野本、長谷川：円筒殻と鏡板の円周溶接による溶接変形ならびに残留応力，溶接学会誌，50-8 (1981)，731-736。
- 2) 例えば、佐藤、豊田、他：任意の領域に存在する一様固有ひずみによる薄肉円管の応力と変形，溶接学会誌，51-2 (1982)，142-148。
- 3) 松岡、直井：構造物鋼管T継手部の残留応力，日本造船学会論文集，157 (1985)，295-303。
- 4) 渡辺、佐藤：突合わせ溶接継手の横収縮，横曲り変形と溶接条件との関係，溶接学会誌，25-8 (1956)，455-460。