# B20 パイプ溶接時における溶接変形予測に関する検討

竹内 啓洋 (指導教員 柴原・伊藤・深沢)

Study on prediction of welding Deformation under welding of pipe

by Akihiro Takeuchi

#### Abstract

Although welding is essential to joint and assemble the steel structures such as ships and pressure vessels, it is very difficult to prevent the occurrence of both the welding deformation and the residual stress. Therefore, it is important to predict the welding deformation and to clarify its mechanism. In this study, to predict the welding deformation of butt welding of pipes, the inherent strain analysis is applied. Furthermore, since it is very costly to perform the welding experiments of pipes if the object is large-scale structure such as pressure vessel, the alternative procedure by the small mockup of the pipe is investigated. From the results, it is found that the residual displacement in radial direction of the pipe with a diameter of 500 mm show good agreement with that of the simulation using the inherent strain of the pipe with a diameter of 100 mm and the displacement in axial direction of the pipe with a diameter of 500 mm also show good agreement with the simulation using the inherent strain of the pipe with the simulation using the inherent strain of the pipe with the simulation using the inherent strain of the pipe with the simulation using the inherent strain of the pipe with the simulation using the inherent strain of the pipe with the simulation using the inherent strain of the pipe with the simulation using the inherent strain of the pipe with the simulation using the inherent strain of the pipe with a diameter of 500 mm also show good agreement with the simulation using the inherent strain of the welded plate.

# 1. 緒 言

船舶をはじめとする構造物の建造において,部材を接 合する手法として溶接が用いられることが多い.しかし, 溶接を行うと溶接部近傍に大きな熱ひずみが発生するた め,材料が局部的に降伏し,冷却後に変形が残る.この 変形はギャップや食い違いの原因となり,品質低下を引 き起こすことになる.また,溶接変形は熟練工による手 作業で矯正されるため,コストや時間の増加につながる. ここで,溶接施工前に溶接変形量を正確に予測すること が出来れば,溶接変形を考慮した構造の設計が可能にな ると考えられることから,溶接変形や残留応力の定量的 な予測は重要であるといえる.

溶接変形の予測手法としては、熱弾塑性解析理論を適 用した FEM による数値シミュレーションが挙げられる. この手法は溶接トーチの移動に伴う温度及び変形の変化 を逐次再現するため、精度の高いシミュレーションが可 能である.しかし、材料の溶融を含む強非線形現象を再 現する必要があるため、非常に詳細な解析となることか ら、解析時間が膨大となり、大型構造物への適用は難し いという問題がある.

そこで本研究では,変形をより簡易的に予測する手法 である固有ひずみ解析<sup>1,2)</sup>を用いて,溶接変形の予測を行 う方法について検討する.

固有ひずみ解析とは、固有ひずみ分布が既知である場 合、簡単な弾性計算のみで溶接変形の予測が可能となる 手法である.このため、固有ひずみ解析は熱弾塑性解析 と比較して計算時間を大幅に短くすることが可能となる. しかし、固有ひずみ分布を求めるためには、材料や溶接 条件を対象に合わせて実験を行わなければならず、多大 な人的、時間的コストが必要となるため、任意の継手寸 法、および溶接の任意の溶接条件における固有ひずみ分 布を固定するのは難しいというのが現状である.

そこで、任意の継手寸法、および溶接条件を持つ構造

物の溶接変形を簡易的に予測する手法の確立を目的とし, そのための基礎的検討としてパイプ周方向溶接時の溶接 変形予測を,固有ひずみ解析を用いて行う.さらに構造 的因子が異なる Bead on plate モデルとパイプ構造モデル の固有ひずみ分布を,解析対象のパイプ構造モデルに付 与することで解析を行う.

まず,パイプ構造の周溶接に対して,熱弾塑性解析を 適用し,実験と比較することで熱弾塑性解析手法の妥当 性について示す.続いて,得られた固有ひずみ分布を用 いた固有ひずみ解析により溶接変形を算出し,熱弾塑性 解析の結果と比較することで固有ひずみ解析の妥当性に ついて示す.

### 2. 固有ひずみ解析

固有ひずみ解析とは、永久変形を規定する固有ひずみ 分布が既知である場合、簡単な弾性計算のみで溶接変形 の予測が可能となる手法である<sup>3)</sup>.固有ひずみ  $\varepsilon^*$ は、式 (1)の様に変形ひずみ(全ひずみ)  $\varepsilon$  から弾性ひずみ  $\varepsilon^e$ を 除去したひずみで表され、熱ひずみ  $\varepsilon^T$ 、塑性ひずみ  $\varepsilon^e$ , クリープひずみ  $\varepsilon^c$ ,相変態によるひずみ  $\varepsilon'$ と定義される.

$$\varepsilon^* = \varepsilon - \varepsilon^e = \varepsilon^T + \varepsilon^p + \varepsilon^c + \varepsilon^t \tag{1}$$

溶接変形問題の熱弾塑性解析では一般的にクリープや相変態現象を考慮することが少ない<sup>4)</sup>ため,  $\epsilon^{c}=0$ ,  $\epsilon^{d}=0$ と仮定し、さらに加熱・冷却の結果,温度が室温に戻った状態では、 $\epsilon^{T}=0$ と考えることが出来るため、固有ひずみ $\epsilon^{*}$ は次式で表すように塑性ひずみそのものと考えることができる.

$$\mathcal{E} - \mathcal{E}^e = \mathcal{E}^p = \mathcal{E}^* \tag{2}$$



Fig.1 FE mesh division of thermal elastic plastic analysis



Fig.2 Photograph of welding experiment

式(2)は、溶接変形および残留応力の生成機構や抑制方法 を考える上で非常に重要な意味を持つ.すなわち、残留 応力と変形の原因は、非可逆過程で生じた永久ひずみ(固 有ひずみ)であり、固有ひずみが分かれば、単純な弾性計 算により、残留応力と残留変位を求めることができると いうことを意味する.本研究で用いた手法では、まず、 固有ひずみ分布を熱弾塑性解析により求め、その固有ひ ずみを解析対象の構造物に付与し、弾性解析を行うこと で、溶接変形を予測する.

### 2.1 固有ひずみ分布の座標変換

固有ひずみ分布を求める対象構造のうち, Bead on plate モデルの固有ひずみ分布は,パイプ構造モデルと形状が 異なるため,そのままではパイプ構造モデルに付与する ことができない.さらに,固有ひずみ分布を定常部から パイプ全周へ分布させるためにも,座標変換が必要であ る.よって,その際に使用した座標変換について説明す る.

座標変換前の座標系で示したひずみベクトル $\epsilon$ T,座標 変換後をT',座標変換マトリックスをLとすると,Tに 関する座標変換は式(3)のように表される<sup>5)</sup>.

$$T' = LT \tag{3}$$

ー方,ひずみテンソルを ε とし,それぞれの座標系を用 いてコーシーの公式を表し式(3)に代入すると式(4)とな る.

$$\varepsilon'^T n' = L \varepsilon^T n \tag{4}$$

また,式(3)にならい,n'=Lnであるので

$$\varepsilon'^T Ln = L\varepsilon^T n \tag{5}$$

とも表されるので法線ベクトル n にかかるテンソル部分 を比較すると

$$^{T}L = L\varepsilon^{T} \tag{6}$$

となる.両辺の後ろから
$$Q^T$$
をかけると,

 $\varepsilon'$ 

Е

$$U = L \varepsilon^{T} L^{T}$$
(7)

となり、 $\varepsilon^{T} = \varepsilon$ ,  $\varepsilon^{T} = \varepsilon$ なので



Fig.3 Illustration of measuring point

Current [A]	Voltage [V]	Welding speed [mm/s]
90.0	10.0	5.24

$$\varepsilon' = L \varepsilon L^T$$
 (8)  
となり、ひずみの座標変換を示せた.

## 3. 熱弾塑性解析の精度評価

本研究では、継手全体の弱非線形領とトーチ周辺の強 非線形領域とで異なる計算を実行することで計算の高速 化を図る、反復サブストラクチャー法<sup>6,7</sup> (Iterative Substructure Method: ISM)を用いた.この ISM を用いた熱 弾塑性解析の精度を実験結果と比較することで検証した.

Fig.2 に実験・解析に用いたモデルの全体図を示す.本 検証に用いたのは、単純なパイプで、その内径は 158.15 mm,外径は 165.25 mm,板厚は 3.55 mm,長さは 440 mm である.解析に用いるために作成したモデルの要素分割 は、径方向に 5 分割、周方向に 100 分割、長さ方向に 40 分割とし、要素数は 20,000、節点数は 24,600 である.ま た、実験のパイプの材料には、配管に広く用いられてい る SUS 304 を用いた.

実験の手法は Fig.1 に示すように、パイプ中央部を周方向に TIG 溶接する.実験時の入熱条件を Table1 に示す. ISM を用いた解析においても同じ入熱条件を用いた.

次に、計測手法について述べる. 径方向については溶 接開始位置を0°としたとき、溶接開始位置の裏面に当た る180°位置において長さ方向に軸をとり計測した.計測 はダイヤルゲージを用いて計測した.軸方向の計測につ いては、計測のために同軸上に穴を複数個あけると残留 応力が解放され、変形量が変化する可能性あるため90°, 180°,270°において、溶接部から左右に50 mmの位置 に穴を開け、その2点の距離の差から変形量を算出した. 計測点の位置をFig.3 に示す.計測は溶接後に全体が20℃ まで冷却したのちに行う.なお、誤差を考慮して3回計 測をおこない、その平均値を実験結果とした.

Fig.4 (a)に径方向,(b)に軸方向についての実験結果と解 析結果を比較したグラフを示す.径方向については溶接 線から離れた所では多少誤差が生じているが,最大でも 0.02 mm ほどである.軸方向に関しては実験結果と解析結 果が定量的に一致している.よって径方向,軸方向とも に ISM による解析結果と実験による計測結果がほぼ一致



Fig.4 Comparison of welding deformation between experimental and computational result



Fig.5 Influence of outer diameter on axial shrinkage

していることから, ISM による熱弾塑性解析の結果は, 十分に妥当なものであるといえる.

# 4. 残留変位におよぼす諸因子の影響 4.1 幾何学的因子の影響(パイプロ径の影響)

パイプロ径の大きさが残留変位に与える影響について 考察するために、外径 R を R=100 mm、200 mm、300 mm および 500 mm としたモデルの解析を行う.板厚を 6 mm とし、入熱量は3章の実験と同様とした. Fig.5 に Y 座 標が 250 mm の位置における軸収縮量を比較したグラフ を示す.比較のために、R=100 mm のパイプ構造モデルを 展開し Bead on plate モデルとした解析の溶接線中央横断 面での横収縮量も併せて示している.同図より、口径が 大きくなるほど軸収縮量が Bead on plate モデルの軸収縮 量に近づいていることが分かる.これは、構造的因子と して、口径が大きくなるほどパイプ構造の曲率が小さく なり、平板に近づくため、曲率の影響が小さくなりパイ プの軸方向変位量が平板に近づいたと考えられる.

### 4.2 力学的因子の影響(入熱条件の影響)

溶接条件の代表として式(9)で表される入熱量が溶接 変形に及ぼす影響について検討を行う.なお,入熱量は 以下の式で表せる.

$$\mathbf{Q} = \frac{I \times V}{S} \times \eta \tag{9}$$

Q:入熱量 (J/mm), I:電流 (A) , V:電圧 (V) S:溶接速度 (mm/s), η:熱効率

電圧を 10 V, 熱効率を 0.7 に固定し, 電流と溶接速度の 影響を考察する. 電流を 50 A, 90 A, 150 A の 3 種類,



Fig.6 Influence of heat input on displacement in radial direction

溶接速度を9 mm/s, 5 mm/s, 3 mm/s に設定して解析を行った. なお,入熱量はそれぞれ70 J/mm, 125 J/mm, 210 J/mm となる.解析モデルは前節において R=100 mm および 500 mm としたものを用いる.溶接線上における径方向変形量の解析結果をFig.6 に示す.縦軸は径方向変形量を示し,横軸は単位長さ当たりの入熱量 Q を示す.同図より,入熱量が大きいほど変形量が大きくなることがわかる.この理由としては,入熱量が大きいほど,塑性変形する範囲が大きくなるため変形が大きくなる点が挙げられる.また,式(9)より算出される総入熱量は同じであるが,変形量には差が出ていることがわかる.入熱量が小さい場合は溶接速度が速いほど変形量が小さく,逆に大きい場合は変形量も大きくなっている.この結果は,溶接変形は入熱量のみでは決まらず,溶接速度の影響を大きく受けて変化することを示唆するものである.

### 5. 固有ひずみを用いたパイプ構造溶接変形予測

4章において、口径が大きくなるほど、構造的因子によ りパイプ構造の軸方向変位量が Bead on plate モデルの横 収縮量に近づいていくことを示した.そこで、この章で は、4章で用いた Bead on plate モデルの溶接線方向中央横 断面における固有ひずみ分布を、径の異なるパイプ構造 モデルに付与する事で固有ひずみ解析を行い、溶接変形 予測を行う.同時に、R=100 mm のパイプモデルの180° 位置における固有ひずみ分布も用いる.また4章におい て、入熱量のパラメータの中でも、溶接速度が溶接変形 に与える影響が大きい事が分かったので、溶接速度を変 えた固有ひずみ解析を行う.

まず、4章で用いたパイプ構造の4つのモデルを用い、



Fig.8 Comparison of welding distortion between T.E.P. FEM and inherent strain analysis

ISM を用いた変形解析を行った.溶接速度以外の入熱条件は3章の実験と同様とした.その結果を径方向および軸方向変位量と外径の関係についてまとめ、Fig.7にそれぞれ示す.同図より,径方向の変位量は外径が大きくなると変形量も大きくなる事が分かる.一方、軸方向変位は、入熱量が大きい場合を除き、外径が変化してもほとんど変わらない。入熱量が大きく、外径が小さい時には、始終端部の影響が大きくなるため、軸方向変位量が小さくなったと考えられる。

次に, ISM による熱弾塑性結果, Bead on plate モデル の固有ひずみを用いた解析結果, R=100 mm のパイプモデ ルの固有ひずみを用いた解析結果をまとめたものを Fig.8 に示す.同図(a)に径方向変形量,(b)に軸方向変位量を 示している.ともに横軸は入熱量である.同図より,径 方向変形量についてはパイプモデルの固有ひずみを用い た解析結果と一致し,軸方向変位量は Bead on plate モデ ルの固有ひずみ分布を用いると,熱弾塑性解析結果と良 好に一致することが分かった.

# 6. 結 言

本研究では、パイプ周方向溶接時における残留変形お よび残留応力に関する基礎的検討を行い、以下の知見を 得た.

- 熱弾塑性解析手法である ISM の有用性について、実 験を行った結果、高精度に解析可能であることがわ かった。
- パイプ構造モデルの口径の影響に関する解析を行った結果,口径が大きくなるにつれて Bead on plate モデルに近づく事が分かった.

- 入熱条件のうち、電流よりも溶接速度のほうが溶接 変形に及ぼす影響が大きい事がわかった。
- 4) Bead on plate モデルとパイプ構造モデルの固有ひず み分布を用いた固有ひずみ解析を行った結果,径方 向変形量についてはパイプ構造モデル,軸方向変形 量については Bead on plate モデルの固有ひずみ分布 を用いた結果が外径の変化に依存すること無く、熱 弾塑性解析結果と良好に一致することが分かった.

### 参考文献

- 野本敏治,寺崎俊夫:固有ひずみを媒介としたパイ プ円周溶接で生じる残留応力と溶接変形の予測,日 本機会学会論文集(A編),66巻642号(2000-2)
- 中長啓治:固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残 留応力の測定,溶接学会論文集,第25巻,第4号, p p 581-589(2007)
- 2) 上田幸雄,村川英一,麻寧緒:溶接変形と溶接力学, pp23-25
- 4) Odqvist,F.K.G.: Mathematical Theory of Creep and Creep Rupture, 2nd (1974), Clarendon Press.
- 5) 吉田総仁:弾塑性力学の基礎, pp11-13,35-36
- 6) 村川英一,伊藤真介,柴原正和:反復サブストラク チャー法を用いた溶接熱弾塑性解析の高速化,関西 造船協会論文集,第243号,pp67-70
- 前川晃,高橋茂,芹澤久,村川英一:配管溶接継手 の残留応力解析における反復サブストラクチャー法 の適用による高速化, INSS JOURNAL, Vol.17 (2010), pp60-74