

- 2) 上田, 中長ら: 極厚板の多層突合せ溶接における過渡および残留応力, 溶接学会誌, 44-6 (1975), 464-474
- 3) 上田, 金, 柄谷, 山北: 厚板補修溶接部の力学的特性, 溶接学会論文集, 4-3 (1986), 533-539
- 4) 金沢ら: 応力除去焼鈍われ(再熱割れ)に関する研究(第3報), 溶接学会誌, 46-8 (1977), 591-597
- 5) 上田, 金, 山北, 房: 3次元熱弾塑性問題の平面変形問題への置換の可能性の検討, 溶接学会論文集, 6-1 (1988), 32-38

溶接残留応力の生成源を用いた残留応力推定法*

上田 幸雄**, 金 裕哲**, 袁 敏剛***

A Predicting Method of Welding Residual Stress Using Source of Residual Stress*

by Yukio Ueda**, You Chul Kim** and Min Gang Yuan***

In this paper, a predicting method of welding residual stress by using the source of residual stress (inherent strain) is proposed. And the validity of the method is demonstrated by numerical experiments with the aid of the finite element method.

Welding residual stress is produced as a result of thermal elasto-plastic behavior. Their source is composed of the thermal strain and/or plastic strain, etc., which is called here inherent strain.

Taking a butt welding joint as an example, the sources of residual stress are estimated in different sizes manufactured on the same welding condition. It is found that the distributions of the source of residual stress are almost the same if the sizes of the joint are larger than that of a specific one, which is named a standard size.

It is demonstrated that the residual stress produced in the joint of any different sizes can be predicted accurately by elastic analysis using the inherent strain in a standard size of the joint, unless the sizes are too small.

Key Words: (Welding residual stress) (Inherent strain) (Source of residual stress) (Butt welding) (Thermal stress) (FEM)

1. 緒 言

溶接構造物には必然的に溶接残留応力が生じ、これが溶接構造物の使用性能、時には安全性に大きな影響を及ぼすことが知られている。したがって、溶接構造物の強度を精度よく推定するには溶接により生じる残留応力の分布と大きさを精度よく知ることが重要となる。

溶接残留応力を簡単に予測することを目的として多くの研究がなされている¹⁻³⁾。中でも、溶接残留応力の生成源に注目した研究がある^{1,2)}。しかし、溶接条件等が種々変化した場合、生成源をどのように決めるのか具体的な推定方法が示されていないことから、実用に供されていない。一方、部材内部をも含む3次元残留応力測定法が開発され⁴⁾、残留応力の生成源を推定し、残留応力を求めることができることを具体的に示している⁵⁻⁸⁾。

本研究では、溶接残留応力の生成源について考察する。そして、生成源が継手の寸法にあまり依存しないことに注目し、一定の生成源を用いた弾性解析により、溶接残留応力が推定できる方法を提案する。また、突合せ溶接継手を例に取り、本研究で提案する残留応力推定法の妥当性と適用性を示す。また、溶接残留応力の生成源の特性をも考察する。

2. 溶接残留応力推定法の提案

2.1 溶接残留応力の生成における特徴

溶接残留応力は溶接熱エネルギーによる不均一温度分布による熱膨張・収縮に起因して生じる塑性変形などによって生成される。したがって、溶接残留応力の分布と大きさを決める主要な支配因子は次の三つである。

- (1) 鋼種(物理定数および機械的性質の温度依存性、温度冷却過程で生じる相変態温度域等)
- (2) 拘束条件(継手形式、部材の諸寸法等)
- (3) 溶接条件(入熱量、予熱・後熱の有無等)

上述のように、塑性ひずみを含む不適合ひずみが溶接残留応力の生成源であり、本論文ではこの不適合ひずみを総称して、固有ひずみと呼ぶことにする。

一般に、溶接残留応力の分布と大きさは、鋼種、溶接条件が同じであっても、継手の寸法により異なる。ところで、溶接の場合、残留応力の生成源(固有ひずみ)は溶接部近傍のみに生成されると考えられる。このため、鋼種、溶接条件を一定とした場合、固有ひずみの存在領域を取り囲む領域(部材の諸寸法)がある程度以上大きくなると、固有ひずみの分布と大きさは無限大の大きさを有する部材に生じる固有ひずみとほぼ等しくなると予想される(部材の諸寸法が小さくなると、固有ひずみの分布と大きさは変化する)。いずれにせよ、拘束条件が同じ、すなわち、(1)同形式の継手で、(2)部材寸法がある程度以上大きくなると、それに生成される固有ひずみの分布と大きさは継手の寸法に無関係に鋼種と溶接条件に

*原稿受付 昭和62年9月8日 昭和63年度春季全国大会で論文発表

**正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute, Osaka University

*** 大阪大学大学院 Graduate Student of Osaka University

より決まると推論される。

上述の推論が成立すれば、(1)無限大と同じ効果を有する大きさの溶接継手の寸法を決め、(2)それに生成されている不適合ひずみ(固有ひずみ)を一度だけ推定しておく、(3)同形式の継手であれば、寸法が種々変化しても、前述の固有ひずみを無応力状態の個々の継手に与えて弾性解析を行うことから、個々の継手のあらゆる点に生じている溶接残留応力の分布と大きさが、熱弾塑性解析を行うことなしに、比較的簡単に予測できることになる。

これが、本研究で提案する溶接残留応力推定法であり、3節でその妥当性を検証する。

2.2 固有ひずみの推定方法と溶接残留応力の計算法

上述したように、本推定法を適用する場合、(1)任意の入熱量に対し、無限大と同じ効果を有する大きさの継手の寸法を決定し、(2)それに生成されている固有ひずみを一度推定する。(3)それを無応力状態の種々の寸法を有する継手に与え、弾性解析する必要がある。

ここでは、有限要素法を適用して、(2)、(3)を求める場合について説明し、(1)については3節3.2項で述べることにする。

溶接残留応力の生成源(固有ひずみ)の推定に対する基礎理論^{4,9)}および平面応力状態の継手に生成されていた固有ひずみの推定⁹⁾に関してはそれぞれの文献に詳細に述べている。ここでは、本論文で用いる平面応力状態にある突合せ溶接継手を例に固有ひずみの推定法(定ひずみ要素を用いた場合)の概要を述べることにする。

溶接の場合、固有ひずみ $\{\epsilon^*\} = \{\epsilon_x^*, \epsilon_y^*, \epsilon_{xy}^*\}^T$ は溶接部近傍の限られた領域にのみ生成されると考えられる。しかし、これに起因した溶接残留応力 $\{\sigma\}$ (弾性ひずみ $\{\epsilon\}$) は板全体に生じる。これらの関係は次式のように表わされる。

$$\{\epsilon\} = [H^*] \{\epsilon^*\} \quad \dots\dots(1)$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、

$[D]$: 応力-ひずみマトリックス

$[H^*]$: 弾性応答マトリックス

例えば、上式において、溶接部近傍の限定された固有ひずみ生成域の有限要素数を m とすると、固有ひずみ成分は3つあるので、全固有ひずみ成分は $3m$ となる。他方、継手全域の有限要素数は $n(n > m)$ で、生じる弾性ひずみ・残留応力成分は $3n$ となる。したがって、式(1)の大きさは次のようになる。

$$\begin{matrix} 3n & 3n \times 3m & 3m \\ \{\epsilon\} = & [H^*] & \{\epsilon^*\} \end{matrix} \quad \dots\dots(1')$$

上式において $3m$ 個の固有ひずみ成分 $\{\epsilon^*\}$ を決定する場合には、式(1)を逆に解く必要がある。

そのためには、まず、 $\{\epsilon\}$ に $3m$ 以上の既知弾性ひずみが必要になる。実験では、弾性ひずみの計測に種々の方法を用いることができる。例えば、応力弛緩法ではひずみゲージを貼付して継手を細断し、弛緩ひずみの逆符号として弾性ひずみ $\{\epsilon\}$ が求まる。また、後述の数値実験では、熱弾塑性解析で得られる弾性ひずみをそのまま計測弾性ひずみ $\{\epsilon\}$ として用いる。

ところで、 $\{\epsilon\}$ を計測する際に種々の誤差が混入する可能性がある。したがって、残差の二乗和を最小にする

条件より、次式に示す固有ひずみの最確値 $\{\hat{\epsilon}^*\}$ を推定する。すなわち、

$$\{\hat{\epsilon}^*\} = ([H^*]^T [H^*])^{-1} [H^*]^T \{\epsilon\} \quad \dots\dots(3)$$

固有ひずみの最確値 $\{\hat{\epsilon}^*\}$ が推定できると、これを式(2)に代入することから、任意の位置に生じていた溶接残留応力の最確値 $\{\hat{\sigma}\}$ が求まることになる。

$$\{\hat{\sigma}\} = [D] [H^*] \{\hat{\epsilon}^*\} \quad \dots\dots(2')$$

3. 溶接残留応力推定法の妥当性と適用性の検証

ここでは、瞬間平面熱源による薄板の突合せ溶接継手を解析モデルとして取り上げ、有限要素法を用いた数値実験を行い、本研究で新たに提案している残留応力推定法の妥当性を検証する。

3.1 解析対象

解析モデルとして、2枚の長方形薄板を突合せ溶接する場合を考える (Fig. 1)。

板の諸寸法は長さ $2L$ 、幅 B 、厚さ $h=6\text{ mm}$ とする。また、鋼材は軟鋼とし、その物理定数および機械的諸性質の温度依存性は文献(10)に示したものをを用いる。

溶接は炭酸ガス溶接を想定し、入熱量 Q は電流 $I=220\text{ (A)}$ 、電圧 $V=24\text{ (V)}$ 、溶接速度 $v=24\text{ (m/h)}$ および熱効率 $\eta=0.75$ とし、 $Q=594\text{ (J/mm)}$ の瞬間平面熱源とした。

また、解析は解析モデルの対称性を考慮し、モデルの1/4について行った。

3.2 基準モデルの決定

本研究で提案する方法によって残留応力を推定する場合、無限大と同じ効果を有する大きさの溶接継手(基準モデルと呼ぶ)に生じている固有ひずみを一度推定しておく必要がある。したがって、基準モデルの大きさを決める必要があり、これについて述べる。

まず、温度履歴に注目する。

無限板の板幅 (y) 方向における各点の最高到達温度 T_{\max} を Fig. 2 に示す。 y が大きくなるにつれ T_{\max} が小さくなり、 $y=500\text{ mm}$ 以上では $T_{\max}=15^\circ\text{C}$ (室温) となる。よって、板幅 $B \geq 500\text{ mm}$ の有限板では板幅境界からの熱反射の影響をほとんど受けないことになり、 $B=500\text{ mm}$ 以上を無限板に相当する大きさの板幅と見なすことができる。したがって、温度履歴に注目した基準モデルの板幅 B は $B=500\text{ mm}$ として、板長 $2L$ を次のように決めた。

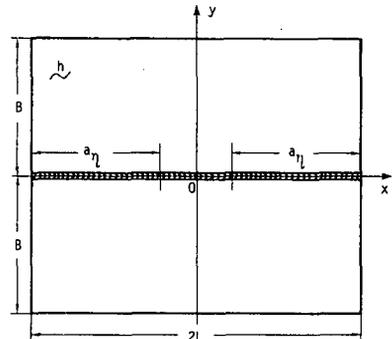


Fig. 1 Model of butt welded joint for analysis

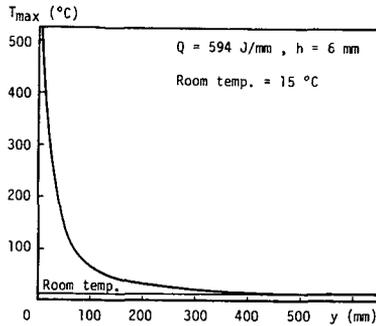


Fig. 2 Maximum temperature in the perpendicular direction to the welded line in infinite plate

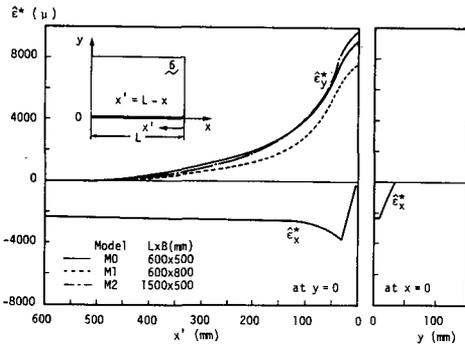


Fig. 3 Distributions of most probable values of inherent strains

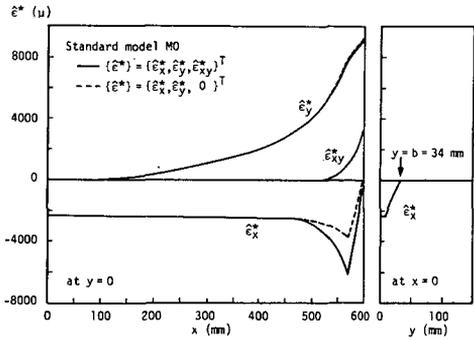


Fig. 4 (a) Distributions of most probable value of inherent strain components

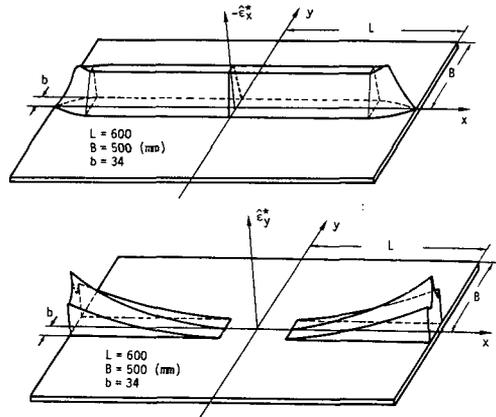


Fig. 4 (b) Schematic representations of distributions of inherent strain components in butt welded joint

板長 $2L$ は、板端面の自由境界の影響が板中央部にまで及ばない最小長さ $2a_\eta$ 以上となるように決めた (Fig. 1)。自由境界の影響が97.5%消失するに必要な板端部からの距離 a_η は次式⁷⁾ から計算できる。すなわち、

$$L > a_\eta = 3.8 \sqrt{b(B-b)} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、

b : 固有ひずみ生成域の半幅 (この例では、後述するように 34 mm であった)。

式(4)より、 a_η を求めると、 $a_\eta = 480$ mm であった。したがって、板長 L は $L = 600$ mm とした。

以上より、板厚 $h = 6$ mm の軟鋼で、入熱量 $Q = 594$ J/mm とした場合、基準モデル M0 の大きさは $B_0 = 500$, $L_0 = 600$ (mm) とする。なお、ここで設定した基準モデルの妥当性を次のように検証した。

基準モデル M0、モデル M1 ($L = 600$, $B = 800$ (mm)) およびモデル M2 ($L = 1500$, $B = 500$ (mm)) に対し熱弾塑性解析を行い、弾性ひずみを求めた。この弾性ひずみを用いて、剪断固有ひずみ成分を無視し、固有ひずみ $\{\epsilon^*\} = \{\epsilon^*_x, \epsilon^*_y, 0\}^T$ を推定した (剪断固有ひずみ成分を無視した詳細な理由は次項で述べる)。その結果を Fig. 3 に示す。これによれば、板端部からの溶接線方向固有ひずみ成分の最確値 ϵ^*_x はモデルの大きさに関係なく、同じ値となっている。しかし、溶接線直角方向成分の最確値 ϵ^*_y は、モデルの大きさにより、大きさが多少異なっている。その理由として、 ϵ^*_x は溶接線近傍の溶接

線方向の収縮に対する拘束の大きさに依存して決まるが、 ϵ^*_y は面内の剛性、すなわち、 L/B に大きく依存するためと考えられる。

3.5 項で詳述するが、突合せ溶接の場合、溶接残留応力の分布と大きさを決める支配固有ひずみ成分は ϵ^*_x であり、これは3モデルで同じであった。また、基準モデル M0 から推定した固有ひずみを用いて具現したモデル M1, M2 の溶接残留応力のそれぞれの熱弾塑性解析結果に対する不変推定値 $\bar{\sigma}_0$ は各々 9.7, 8.7 MPa であった。以上より、モデル M0 の大きさは基準モデルとして妥当であると考えた。

3.3 基準固有ひずみとその精度

基準モデル M0 に対し熱弾塑性解析を行い、得られた弾性ひずみを式(3)の $\{\epsilon\}$ に用い、推定した不適合ひずみ (固有ひずみ: $\{\epsilon^*\} = \{\epsilon^*_x, \epsilon^*_y, \epsilon^*_{xy}\}^T$) の分布を Fig. 4(a) に実線で示す。

ところで、突合せ溶接の場合、剪断固有ひずみ成分 ϵ^*_{xy} は板端部にのみ生成されている (Fig. 4(a))。したがって、 $\epsilon^*_{xy} = 0$ と推定した固有ひずみを用いても、残留応力の具現性が高ければ、未知固有ひずみ成分の個数が2/3となり、固有ひずみの推定に要する手間、時間などが減少することになる。このような利点を利用するため、剪断固有ひずみ成分を無視し、固有ひずみ:

$\{\hat{\epsilon}^*\} = \{\hat{\epsilon}_x^*, \hat{\epsilon}_y^*, 0\}^T$ として推定した。その結果を Fig. 4(a) に破線で示す。これによれば、剪断の固有ひずみ成分 $\hat{\epsilon}_{xy}^*$ の役割を溶接線方向の固有ひずみ成分 $\hat{\epsilon}_x^*$ が補っているような分布となっている。

Fig. 4(a) から、固有ひずみは溶接線より $y=34$ mm までの狭い領域にのみ存在していることがわかる。また溶接線方向成分 $\hat{\epsilon}_x^*$ は端部を除く各横断面で同じ分布をしており、溶接線直角方向成分 $\hat{\epsilon}_y^*$ は溶接線に沿って放物線のような分布をしている (Fig. 4(a))。これらを模式的に示したのが Fig. 4(b) である。

本論文では、 $\hat{\epsilon}_{xy}^* = 0$ として基準モデルから推定した固有ひずみ: $\{\hat{\epsilon}^*\} = \{\hat{\epsilon}_x^*, \hat{\epsilon}_y^*, 0\}^T$ を基準固有ひずみと呼び、これを基本として、以下の議論を進めることにする。

なお、基準固有ひずみを用いても残留応力の具現性が高い。これを次に示しておく。

基準モデル M0 から推定した基準固有ひずみを無応力状態の基準モデルに与え弾性解析を行い、固有応力(残留応力)を求めた。固有応力と熱弾塑性解析より求めた残留応力とを比較したのが Fig. 5(a), (b) である。中央断面 ($x=0$, Fig. 5(a)) および $x=400$ mm (板の端より 200 mm 内側) の横断面 (Fig. 5(b)) における残留応力分布を見ると、両者はよく一致している。また、板全体に生じていた溶接残留応力(熱弾塑性解析結果)に対する不変推定値 $\hat{\sigma}_\sigma$ は $\hat{\sigma}_\sigma = 6.5$ MPa であった。

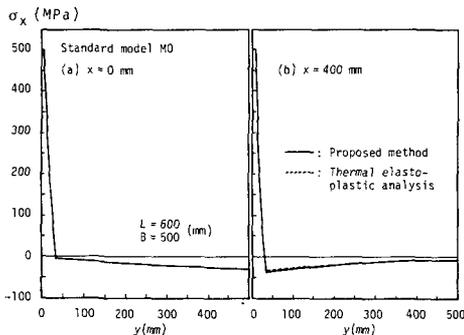


Fig. 5 Welding residual stresses obtained by using standard inherent strains and by thermal elasto-plastic analysis

以上のように、突合せ溶接の場合、剪断固有ひずみ成分がないとした基準固有ひずみを用いても、溶接残留応力の具現精度が高いことを確認した。

3.4 基準固有ひずみ分布の与え方とその妥当性の検討

基準固有ひずみ分布を種々の寸法のモデルに与える場合、板幅方向は一般に $B > b$ であるので基準固有ひずみを板幅方向に与えるのに不都合が生じないが、モデルの長さ L が基準モデル M0 の長さ L_0 と異なる場合、基準固有ひずみをそのまま与えることができない。この場合、突合せ溶接継手(基準モデル)に生じる固有ひずみ分布 (Fig. 4) の特徴、すなわち、板の端部を除く中央部分で基準固有ひずみは一定に分布していたことから、次のように基準固有ひずみを与えることにする。

$L > L_0$ の場合、板の端部を一致させ、端部から L_0 までは基準固有ひずみ分布をそのまま与える。そして、中央から $L-L_0$ までは基準固有ひずみの中央断面における分布をそのまま延長 ($\hat{\epsilon}_x^*$: 一定, $\hat{\epsilon}_y^* = 0$) して用いる。また、 $L < L_0$ の場合も板端部を一致させ、板長 L まで、基準モデルの固有ひずみ分布をそのまま用いる。

基準固有ひずみを上述の方法で寸法が種々異なるモデル M3~M6 に与え、弾性解析を行い、求めた中央断面における溶接残留応力分布を Fig. 6 に示す。また、図中に熱弾塑性解析による結果も示している。

結果によれば、寸法の異なるいずれの場合でも、溶接残留応力の分布形状と大きさがよく具現できているが、板幅 $B \leq 100$ mm では、基準固有ひずみをそのまま適用すると溶接残留応力の推定精度が低下するようである。

3.5 固有ひずみ成分と残留応力の具現精度

まず、固有ひずみ成分が残留応力の分布形状に与える影響を考察する。

固有ひずみ成分の中で、溶接線方向成分 $\hat{\epsilon}_x^*$ と溶接線直角方向成分 $\hat{\epsilon}_y^*$ とを別々に基準モデル M0 に与え弾性解析を行い求めた応力分布を Fig. 7 に示す。これによれば、溶接残留応力の分布と大きさを決める支配固有ひずみ成分は $\hat{\epsilon}_x^*$ であり、 $\hat{\epsilon}_y^*$ は残留応力分布の圧縮側の傾きに大きく影響を及ぼすことがわかる。

ところで、前項で示したが、板寸法が基準モデルより小さい領域に対しても、基準固有ひずみを用いて具現される溶接残留応力の精度が高かった。これは、残留応力

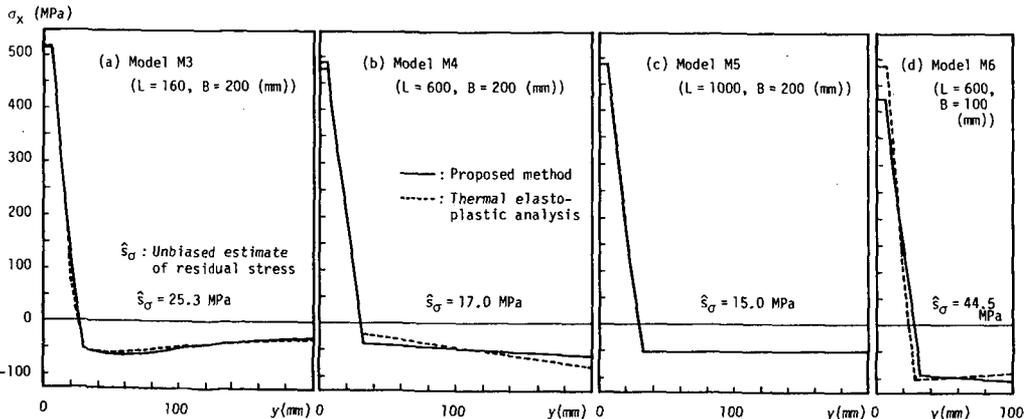


Fig. 6 Reproducibility of welding residual stresses using standard inherent strain

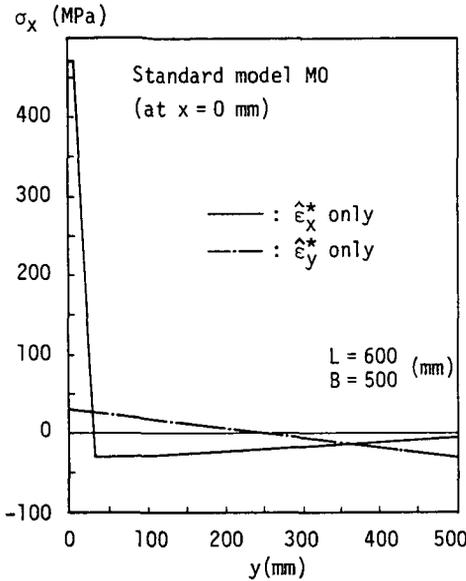


Fig. 7 Stresses produced by $\hat{\epsilon}_x^*$ and $\hat{\epsilon}_y^*$ respectively

の分布と大きさを決める支配固有ひずみ成分が溶接線方向成分 $\hat{\epsilon}_x^*$ であったためである。すなわち、支配固有ひずみ成分である $\hat{\epsilon}_x^*$ の生成は溶接線近傍の溶接線方向の収縮に対する拘束の大きさに依存する。したがって、板寸法が基準モデルに比べ多少小さくなくても、溶接線方向の剛性が低下しないため、 $\hat{\epsilon}_x^*$ はほとんど同じ分布と大きさになるためと考えられる。

一方、同じ基準固有ひずみを寸法の異なる継手に与えるにもかかわらず、長さ方向の各横断面に生じる溶接残留応力 σ_x の分布形状が変化する。すなわち、 $x/L=0, 0.5, 0.9$ の各断面に生じる応力分布の形状を L と B との比: L/B で分類して模式的に示したのが Fig. 8 である。

- 範囲 I $L/B < 1$
- 範囲 II $1 < L/B < 4$
- 範囲 III $4 < L/B$

個々の範囲において、中央断面に生じる応力分布形状を Type A, Type B, Type C と呼ぶことにすると、範囲 I は Type A の分布が全長に及び、範囲 II になると、中央断面では Type B, 端面に近づくと Type A になる。また、範囲 III では、中央断面は Type C, 端面に近づくと Type B, Type A と変化する。

ここで、Type A は、継手の長さが幅に比べて短く、端面 ($x=L$) である自由境界の効果、すなわち、剪断遅れが支配的な影響として現われた分布である。Type B は剪断遅れの影響は消えているが、継手が余り長くないので、端面近傍に存在する $\hat{\epsilon}_x^*$ による面内曲げの影響が顕著に現われた分布になっている。Type C は、板が十分長いため、端面の効果である剪断遅れおよび端部近傍の $\hat{\epsilon}_x^*$ による曲げの影響が中央部にまで及ばない、いわゆる平面変形状態で、 $\hat{\epsilon}_x^*$ だけが応力の生成に寄与する 1 軸応力状態となっている。

本論文で提案した方法で残留応力を推定する場合、板寸法の相違よりも応力分布の形状により、推定精度が左

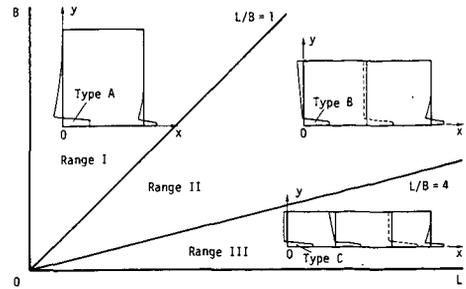


Fig. 8 Feature of welding residual stress distributions in three ranges of L/B

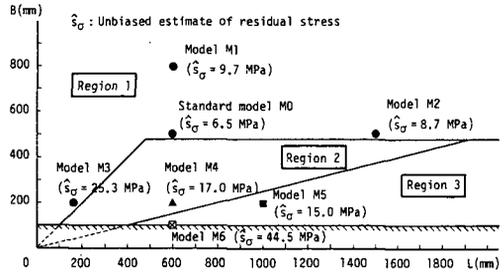


Fig. 9 Applicability of proposed method

右されるようである。すなわち、Type A と Type C の応力分布に対しては推定精度は高い。しかし、Type B の推定精度はやや低く、具体的には、圧縮側の傾きに多少の誤差が現われるようである。これは、 L/B (面内剛性) の大きさによって、 $\hat{\epsilon}_x^*$ が変化するにもかかわらず、基準モデルから推定した $\hat{\epsilon}_x^*$ を L/B の大きさに関係なく用いたためであると考えられる。

ここで、基準固有ひずみの分布領域を考慮して、本推定法の適用範囲を $L=B > 100$ mm とすると、推定精度は大体次のようになる (Fig. 9)

(1) 領域 I

$L/B < 1$ あるいは $B \geq 500$ (mm) を満たす領域では、全溶接長にわたって高精度である。

(2) 領域 II

$1 < L/B < 4$ かつ $B < 500$ mm を満たす領域では、中央断面の応力分布は Type B になり、やや精度が低下する。しかし、端部では Type A となり、高精度となる。

(3) 領域 III

$4 < L/B$ かつ $B < 500$ mm を満たす領域では、中央および端部に近い断面では、それぞれ Type C および Type A の応力分布となり、高精度である。しかし、その中間では Type B の分布になるのでやや精度が低下する。

以上の結果より、前節で述べた推論のように、一度基準モデルから固有ひずみを推定しておき、これを板寸法 (L, B) が種々変化する継手に与え弾性解析することから、寸法の変化と共に変化する溶接残留応力の分布と大きさが精度よく具現できることが明らかになった。これにより、本研究で提案した溶接残留応力推定法の妥当性と適用性が確認できた。

4. 結 言

得られた主な結果を要約すると次の通りである。

(1) 溶接残留応力の生成源、すなわち、不適合ひずみ(固有ひずみ)の特性を利用した溶接残留応力推定法を開発し、突合せ溶接を例に取り、その妥当性と適用性を示した。すなわち、鋼種、溶接条件を一定にした場合、溶接継手の寸法がある程度以上大きくなり、無限板と同じ効果を示す有限板(基準モデル)に生じる固有ひずみは、無限板に生成される固有ひずみとほぼ同じである。したがって、そのような有限板に生成される固有ひずみ(基準固有ひずみ)を一度推定しておけば、部材寸法が種々変化してもそのつど熱弾塑性解析を実施する必要はなく、推定した基準固有ひずみを与え、弾性解析を行うと溶接残留応力が簡単に求まる。これが新たに開発した溶接残留応力推定法の特徴であり利点である。また、その推定精度は高い。

(2) 突合せ溶接の場合、剪断固有ひずみ成分 ϵ_{xy}^* = 0 とした基準固有ひずみ: $\{\epsilon^*\} = \{\epsilon_x^*, \epsilon_y^*, 0\}^T$ を用いて、溶接残留応力の分布と大きさが精度よく具現できる。

(3) 溶接残留応力の分布と大きさを決める支配固有ひ

ずみ成分は ϵ_x^* である。また、溶接線直角方向成分 ϵ_y^* は残留応力の圧縮側の傾きに大きな影響を及ぼす。

参 考 文 献

- 1) 増淵：分布した不適合度による応力について、造船協会論文集、88 (1955)、189-200
- 2) 藤本：固有ひずみの概念による溶接残留応力および溶接変形の解析法、溶接学会誌、39-4 (1970)、236-252
- 3) 佐藤、寺崎：構造用材料の溶接残留応力分布に及ぼす溶接諸条件の影響、溶接学会誌、45-2 (1976)、105-156
- 4) 上田、福田、中長、円道：残留応力の有限要素法に基づく測定原理と推定値の信頼性、日本造船協会論文集、138 (1975)、525-533
- 5) 上田、福田、谷川：固有ひずみ論に基づく3次元残留応力測定法、造船協会論文集、145 (1979)、215-223
- 6) 上田、福田、福田：長い溶接継手の3次元残留応力測定理論、溶接学会誌、49-12 (1980)、845-853
- 7) 上田、福田：3次元溶接残留応力の簡易測定法に関する研究、溶接学会誌、52-2 (1983)、115-117
- 8) 上田、金、梅国：溶接線に垂直な薄板のみ用いた3次元残留応力測定理論、溶接学会論文集、3-3 (1985)、611-616
- 9) 上田、中長、金、村川：残留応力測定法の基礎理論(数値解析入門)、溶接学会誌、55-8 (1986)、458-465
- 10) 上田、金、柄谷、山北：厚板補修溶接部の力学的特性、溶接学会論文集、4-3 (1986)、533-539

サーマルスリーブ付ノズルの高周波加熱応力改善法の開発*

坂田信二**, 榎本邦夫**, 清水 翼**, 佐川 涉***

Development of the Induction Heating Stress Improvement for a Nozzle with a Thermal Sleeve*

by Shinji Sakata**, Kunio Enomoto**, Tasuku Shimizu** and Wataru Sagawa***

The Induction Heating Stress Improvement (IHSI) technique is regarded as one of the most effective remedies for intergranular stress corrosion cracking (IGSCC) occurring in the heat affected zone (HAZ) of susceptible stainless steel in some boiling water reactor piping systems. In this process, cooling water must flow at a velocity high enough to keep the inside surface of the pipe relatively cool, creating a high temperature gradient through the pipe wall. However, nuclear plant pipings, where forced flowing during this process may be difficult, have been welded. This paper presents computer simulation analyses and experimental verifications of post-IHSI residual stress distribution of the welded portion of a nozzle with a thermal sleeve, where forced water cooling is difficult. From these analyses and experiments a new IHSI technique is developed. This technique consists of new heating method which has temperature gradient through both the pipe wall and longitudinal direction.

Key Words: Induction heating stress improvement (IHSI), Intergranular stress corrosion cracking (IGSCC), Heat affected zone (HAZ), Nozzle with a thermal sleeve, Stress corrosion cracking (SCC), Welding residual stress, Short period heating with axial temperature gradient method (SPAT)

1. 結 言

米国の沸騰水型原子炉 (Boiling Water Reactor 以下、

BWR と呼ぶ) においてオーステナイト系ステンレス鋼配管の溶接熱影響部 (Heat Affected Zone 以下、HAZ と呼ぶ) に応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking 以下、SCC と呼ぶ) による微小き裂が発見されて以来、SCC の発生メカニズムの解明とその対策法の開発が精力的に進められて来た。

SCC は、溶接残留応力や運転時応力の応力因子と溶接熱による材料の鋭敏化や合金元素の含有量などの材料

*原稿受付 昭和62年4月7日 昭和63年度春季全国大会で論文発表

**正 員 (株)日立製作所機械研究所 Member, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

***正 員 (株)日立製作所日立工場 Member Hitachi Works, Hitachi, Ltd.