では400℃)まで準定常温度を経験する領域に生じる残留応力の分布形状と大きさが平面変形解析から予測できるようである。なお、3次元および平面変形熱弾塑性解析に要した計算時間(CPU-time)をTable 2に示しておく。平面変形解析は3次元解析の1/1000程度である。

5. 結 言

得られた主な結果を要約すると次のようになる。

3次元熱弾塑性解析結果を基本として、

1) 準定常温度履歴を経験する領域では、溶接線方向に温度勾配があっても、熱収縮に対する剛性が一樣であれば、溶接線方向に同じ残留応力、残留塑性ひずみが生成される。

2) 補修溶接長が短くなるほど、また、溶接速度が遅くなるほど、溶接線直角方向応力成分 σ_y は大きくなる。また、溶接速度が遅くなるほど、塑性開始時期が遅れるため、溶接線方向塑性ひずみ成分 ϵ_y^p は小さくなる。

2次元平面変形解析結果と3次元解析結果とを比較検討した結果、

3) 過度および残留応力、残留塑性ひずみの分布形状、大きさをも含めて3次元問題を平面変形問題に置換できる厳密な力学的条件は、溶接長が長くかつ溶接線方向に温度勾配がない場合のみである。しかし、残留応力は鋼材の降伏条件に制約されるため、3次元問題を平面変形問題として取扱っても、結果に大きな差異は生じ

ず、その分布形状と大きさが予測できる。ただし、溶接速度が遅くなると、平面変形解析では溶接線直角方向応力成分 σ_y のみ小さく評価することになり、注意が必要である。一方、塑性ひずみの分布形状、大きさは力学的境界条件の変化により大きく相違するため、残留応力の推定に比べ、平面変形解析では精度が落ちる。

4) 平面変形熱応力解析に用いる温度分布は、3次元解析することなく、横断面からの熱伝導がないとした2次元解析から求めることができる。

5) 本論文で用いたモデルによれば、温度が400℃に冷却するまで準定常温度を経験する領域(溶接長 $l \geq 0.2$ mであれば、少なくとも中央部は準定常温度を経験する)でかつ溶接速度 $v \geq 0.0055$ m/sを満たせば、残留応力、残留塑性ひずみの分布形状と大きさが平面変形解析から予測できる。一方、残留応力の分布形状と大きさのみ平面変形解析から予測する場合、 $v \geq 0.0017$ m/sを満たせば良い。

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 上田, 福田, 金, 古木: スリット溶接継手に生じる拘束応力・拘束ひずみの一般特性及び拘束度の力学的指標としての意義, 溶接学会誌, 51-8 (1982), 636-643
- 3) 佐藤: 移動熱源による熱伝導の特性に関する覚え書, 溶接学会誌, 36-2 (1967), 154-159

厚板補修溶接部の応力除去焼なまし時における力学的挙動*

金 裕哲**, 山北晃久***, 房 漢瑞****, 上田幸雄**

Mechanical Behavior on Welding Residual Stress Relief Annealing of Repair Welding in Thick Plate*

by You Chul Kim**, Teruhisa Yamakita***, Han Sur Bang**** and Yukio Ueda**

In this paper, the mechanical behavior on SR (stress relief annealing) for the purpose of removing the residual stress produced by repair welding of thick plate is clarified. The obtained main result is as follows:

From the results of three-dimensional thermal elasto-plastic stress and creep analyses:

- 1) At the early stage during SR-treatment, the creep strain tends to easily accumulate in HAZ (Heat Affected Zone) and weld metal in which has been existed larger welding residual stress than the base metal, so that the stress relaxation is remarkable in HAZ and weld metal. After the stresses in HAZ and weld metal reached to be almost same magnitude of those of base metal, the stress relaxation progresses same amount all over the plate.
- 2) The configuration of stress distribution is not changed during SR-treatment regardless of heating and holding stage, and then the plastic strain is not produced during SR-treatment.
- 3) If the stress relaxation characteristic is poor in the base metal, the creep strain can easily accumulate in the weld metal and HAZ.

*原稿受付 昭和62年7月24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(現川崎重工(株)) Graduate Student of Osaka Univ. (Presently Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

**** 大阪大学大学院 Graduate Student of Osaka Univ.

Comparing the results of three-dimensional thermal elasto-plastic creep analysis with that of two-dimensional plane-deformation one and one-dimensional approximate analysis:

- 4) The choosing of SR condition, i.e. heating rate, holding temperature and holding time etc., can be predicted by the results of one-dimensional approximate analysis.
- 5) In the case of replacing three-dimensional problem with two-dimensional plane-deformation problem for analyzing of the welding residual stress and SR, the accuracy of the creep strain and stress during and after SR depends upon how to actually represent the severity of mechanical conditions including the magnitude of welding residual stresses.

Key Words: Repair welding, Welding residual stress, Residual stress, Plastic strain, Post weld heat treatment, Stress relief annealing, Transient-state creep law, Steady-state creep law, Creep strain, Equivalent creep strain

1. 緒 言

溶接構造物の建造時に各種溶接割れ、あるいは、移動時に疲労亀裂など生じることがある。この場合、割れ、疲労亀裂などを除去した後、そこに補修溶接を行うことがある。補修溶接により溶接残留応力が生じ、これが溶接部の疲労強度、脆性破壊強度等を著しく低下させる危険性があり、溶接残留応力の除去を目的として通常種々の熱処理が行われる。種々の熱処理の中でも、応力除去焼なまし (stress relief annealing; 以下、SR と呼ぶ) 処理が多くの場合行われる。

ところで、SR 時に新たに割れ、すなわち、SR 割れが生じることが報告されており、これに関連した多くの研究がなされている。この種の問題に対し、力学的観点から SR 割れ発生・防止条件の選定法を示すことを大きな目的とするが、本論文では、厚板補修溶接を行い、これを SR 処理した時の力学的挙動を明らかにする。

まず、3次元熱弾塑性解析を行い厚板補修溶接で生じる溶接残留応力を求める。これを初期応力として3次元熱弾塑性クリープ解析を行う。解析結果から、SR 処理時の力学的挙動を明らかにする。さらに、SR 後残留応力を簡単に推定することを目的として示されている1軸近似推定法¹⁾により求めた結果および2次元平面変形熱弾塑性クリープ解析結果と3次元解析結果とを比較考察し、従来の結果が有する力学的意義を3次元解析結果を基本として明らかにする。

2. 3次元熱弾塑性応力および3次元熱弾塑性クリープ解析結果と考察

2.1 解析モデルの設定

厚板補修溶接を想定した解析モデルおよび座標系を Fig. 1 に示す。溶接は幅 $b=8$ mm、深さ $d=5$ mm、長さ $l=100$ mm の溝部分に入熱量 $Q=3.4$ kJ/mm、溶接速度 $v=5.5$ mm/sec で x 方向に一層行うものとする。

鋼材は、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼である。一連の解析で用いた鋼材の物理定数および機械的諸性質の温度依存性²⁾ ならびにクリープ定数³⁾ は各々文献を参照して頂きたい。

SR 条件は昇温速度 $100^\circ\text{C}/\text{h}$ 、保持温度 600°C 、保持時間 1 h とする。

ところで、熱弾塑性クリープ解析で用いたクリープ則であるが、遷移クリープ速度が定常クリープ速度より大きい場合には次式に示す遷移クリープ則を、

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = \frac{3}{2} m A^{1/m} \bar{\sigma}^{1/m} (\dot{\epsilon}^c)^{-(1/m)} \{\sigma'\} \quad \dots\dots(1)$$

逆に、遷移クリープ速度が定常クリープ速度より小さい

Fig. 1 Model for analysis

場合には、次式に示す定常クリープ則を用いた。

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = \frac{3}{2} \beta \sigma^n \{\sigma'\} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、

$\{\dot{\epsilon}^c\}$: クリープひずみ速度

$\bar{\sigma}$: 相当応力

$\dot{\epsilon}^c$: 相当クリープひずみ

$\{\sigma'\}$: 偏差応力

m, A, γ, β, n : クリープ定数 (文献(1)参照)

また、 400°C 以下の温度域で生じるクリープひずみは小さく、クリープ解析において、 400°C 以下ではクリープひずみは生じないとした。さらに、溶接金属、熱影響部 (HAZ)、母材のクリープひずみ速度は同じとした。

なお、一連の解析は有限要素法を用いている。

2.2 3次元熱弾塑性解析結果

3次元熱弾塑性 (移動熱源) 解析で得られた溶接金属 ($y=3, z=8$ (mm)) の溶接線に沿う溶接残留応力、残留塑性ひずみ分布を Fig. 2 に示す。また、中央横断面 ($x=0, yz$ 面) における $y=3$ mm の板厚に沿う溶接残留応力、残留塑性ひずみ分布を Fig. 3 に示す。Fig. 2 および Fig. 3 に示した溶接残留応力を初期応力として、前述の SR 条件で SR する。

なお、溶接残留応力、塑性ひずみの特徴とそれらの生成機構についての詳細は既に報告³⁾ しているので、ここでは省略する。

2.3 3次元熱弾塑性クリープ解析結果

3次元熱弾塑性クリープ解析によって得られた溶接金属 ($y=3, z=8$ (mm)) における累積クリープひずみお

Fig. 2 Distributions of welding residual stresses and plastic strains along weld line

Fig. 3 Distributions of welding residual stresses and plastic strains along z-direction (at middle section)

よび SR 処理後残留応力の溶接線に沿う分布を Fig. 4 に示す。

累積クリープひずみ成分：溶接線方向 ϵ_x^c 、溶接線直角方向 ϵ_y^c および板厚方向 ϵ_z^c の溶接線に沿う分布は、溶接線に沿ってほぼ一様となっている。

まず、クリープひずみ成分 ϵ_x^c および ϵ_y^c に注目すると、これらはいずれも正であるため、SR により、溶接

Fig. 4 Distributions of creep strains and stresses along weld line after SR

線方向残留応力成分 σ_x 、溶接線直角方向残留応力成分 σ_y は大きく緩和している。これに対し、板厚方向クリープひずみ成分 ϵ_z^c は大きな負の値となっているにもかかわらず、残留応力成分 σ_z はやや緩和している。これから、 ϵ_z^c が大きな負の値となった理由を考えると、クリープひずみは非圧縮性であるとして取扱っていることによる。すなわち、体積一定の条件を満たすべく、力学的拘束条件の最も緩い板厚方向³⁾が、大きな負の値になったものと考えられる。

SR により生じた中央横断面 ($x=0$, yz 面) における $y=3$ mm の板厚に沿う相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}^c$ 、各クリープひずみ成分の過渡および累積値を Fig. 5 に示す。また、SR 中の板厚に沿う相当応力 $\bar{\sigma}$ 、各応力成分の過渡および SR 後残留応力分布を Fig. 6 に示す。

ここで、Fig. 6 に示した過渡応力分布であるが、通常温度上昇に伴いヤング率 E が低下する。このため、クリープひずみが生じなくても応力は小さくなる。しかしここではクリープひずみの累積に伴う応力緩和履歴を鮮明にするため、室温のヤング率 E_R を用いてヤング率の低下に伴う応力低下を無視し、次式のように補正した応力を示している。

$$\{\sigma\} = (E_R/E_T)\{\sigma_T\} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、

E_R, E_T : 室温および温度 T におけるヤング率

さらに、一般に、保持温度から室温に冷却する過程でもクリープひずみが生じ、これにより応力は若干緩和する。しかし、本論文では、保持温度からの冷却過程でクリープひずみは生じないとして、SR 後の残留応力を求めた。

2.4 クリープひずみの累積と応力緩和特性

ここでは、Fig. 5, Fig. 6 を基本として、クリープひずみの累積および応力緩和特性について述べる。

まず、相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}^c$ および相当応力 $\bar{\sigma}$ の過渡分布に注目する。

ここで用いたクリープ則によれば、クリープひずみ速度 $\{\dot{\epsilon}^c\}$ は遷移クリープ域では相当応力 $\bar{\sigma}$ の γ/m 乗、

Fig. 5 Distributions of creep strains along z-direction during SR (at middle section)

定常クリープ域では σ の n 乗に比例する。3次元熱弾塑性解析結果によれば、溶接残留相当応力 $\bar{\sigma}$ は、溶接金属、HAZ で 700 MPa、HAZ に隣接した母材で 380 MPa (いずれも材料の降伏応力 σ_y に等しい) である。 r/m および n を求めると、溶接金属、HAZ に生じるクリープひずみは母材に生じるクリープひずみの10倍以上となる。

よって、SR の初期、溶接金属、HAZ 部の応力緩和が顕著であり、母材との応力差がなくなった以後、全体的に応力緩和することになる。

次に各成分に注目する。

クリープひずみ増分 $\{\Delta \epsilon^c\}$ は偏差応力 $\{\sigma'\}$ に比例する。成分表示すると次式となる。すなわち、

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_x^c &\approx 2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z \\ \Delta \epsilon_y^c &\approx 2\sigma_y - \sigma_x - \sigma_z \\ \Delta \epsilon_z^c &\approx 2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y \end{aligned} \quad \dots (4)$$

熱弾塑性解析結果によれば、溶接金属、HAZ に生じ

Fig. 6 Distributions of stresses along z-direction during SR (at middle section)

る溶接残留応力成分： σ_x , σ_y , σ_z の大きさは $\sigma_x > \sigma_y \gg \sigma_z \approx 0$ であった (Fig. 2, Fig. 3)。

したがって、クリープの初期 (Fig. 5; 昇温過程 $T = 400 \sim 500^\circ\text{C}$)、クリープひずみ成分の増分 $\Delta \epsilon^c$ は式(4)より、溶接線方向成分 $\Delta \epsilon_x^c > 0$ 、溶接線直角方向 $\Delta \epsilon_y^c \approx 0$ 、板厚方向 $\Delta \epsilon_z^c < 0$ となる。よって、 $\Delta \epsilon_x^c$ の累積値 ϵ_x^c は正で増加することになり、結果として、溶接線方向応力成分 σ_x は大きく緩和される (Fig. 6)。一方、 $\Delta \epsilon_y^c$ の累積値 ϵ_y^c はほとんど増加しない (Fig. 5) ため、溶接線直角方向応力成分 σ_y はさほど緩和されない (Fig. 6)。

次に、 $T = 500^\circ\text{C}$ では、 σ_x と σ_y との差がなくなり (Fig. 6)、 $T = 500 \sim 600^\circ\text{C}$ におけるクリープひずみ増分： $\Delta \epsilon_x^c > 0$, $\Delta \epsilon_y^c > 0$ となる (式(4))。したがって、累積値 ϵ_x^c , ϵ_y^c は正で大きくなる (Fig. 5)。このため、応力成分 σ_x , σ_y は大きく緩和することになる (Fig. 6)。

一方、昇温、保持過程にかかわらず、 $\Delta \epsilon_z^c$ の累積値 ϵ_z^c は大きな負の値となっている (Fig. 5)。2.3 項で述べ

たが、負の大きな ϵ_z^c が生じた理由は、力学的拘束の最も緩い板厚方向に、体積一定の条件を満たすべく生じたものである。このため、負の大きな ϵ_z^c が生じているにもかかわらず、板厚方向応力成分 σ_z が大きくなりなかつたものと考えられる。

ところで、溶接金属、HAZ 部に生じている溶接残留応力成分の中で、溶接線方向成分 σ_x の緩和の程度に比べ、溶接線直角方向成分 σ_y の応力緩和はさほど大きくない。前述の、溶接金属、HAZ 部にクリープひずみの累積が顕著であった理由は、 σ_y が緩和されにくかったことに起因していたものと考えられる。

また、昇温、保持過程にかかわらず、応力の分布形状は変化しないまま応力緩和している。なお、熱弾塑性クリープ解析では SR 中に塑性ひずみは生じなかった。

以上のように、SR 時の力学的挙動、すなわち、クリープひずみの累積および応力緩和は i) 溶接残留相当応力 σ および ii) 溶接残留偏差応力 $\{\sigma'\}$ の大きさ (多軸効果) の影響を多大に受ける。この他に、iii) 応力は自己平衡するため、母材の応力緩和特性にも注目する必要がある⁴⁾。これに関しては次章で考察する。

3. 考 察

ここでは、3次元熱弾塑性クリープ解析結果と SR 処理後の残留応力を簡単に推定することを目的とした 1 軸近似推定法¹⁾ および 2次元平面変形熱弾塑性クリープ解析結果とを比較検討する。そして、3次元結果を基本として、1 軸近似あるいは平面変形⁵⁾ 解析結果が有する力学的意義について考える。さらに、母材のクリープ特性がクリープひずみの累積および応力緩和に与える影響について考察する。

3.1 3次元結果と 1 軸近似結果との比較考察

3次元クリープ (3D) 解析により得られた溶接金属の $y=3$, $z=8$ (mm) における応力緩和履歴を Fig. 7 に太線で示す。また、 $y=3$, $z=8$ (mm) における溶接残留相当応力 (700 MPa) を初期応力とした変温リラクセーション試験結果を熱弾塑性解析により求めた溶接残留応力の成分比によって求めた SR 中の各応力成分、すなわち、1 軸近似 (1D) の結果を細線で示している。

結果によれば、溶接残留応力成分の中で、溶接線方向成分 σ_x および板厚方向成分 σ_z の応力緩和履歴は 1 軸

Fig. 7 Comparison of one-dimensional approximate analysis (1D) with three-dimensional one (3D) on stresses and equivalent creep strain in weld metal (at $y=3$, $z=8$ (mm)) during SR

近似で精度よく近似できている。しかし、1 軸近似では溶接線直角方向成分 σ_y および相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}^c$ の推定精度が低いことがわかる。

いずれにせよ、1 軸近似推定法では相当クリープひずみおよび SR 後残留応力成分の中で、 σ_y の推定精度が低下する。しかし、SR 処理後の残留応力が手軽かつ簡単に予測できることから、この方法を SR 条件の選定、すなわち、昇温速度、保持温度および保持時間などを決定する際に用いれば有効と考えられる。

3.2 3次元結果と平面変形解析結果との比較考察

3次元解析モデルの中央 ($x=0$) 横断面 (yz 面) に対し (Fig. 1(b); モデル 2D-F), まず、2次元平面変形熱弾塑性応力解析を行った。板厚に沿う溶接残留応力分布を破線で Fig. 8 に示す。これを初期応力として、2次元平面変形熱弾塑性クリープ解析を行った。

溶接金属 ($y=3$, $z=8$ (mm)) における SR 中の応力緩和履歴を細線で Fig. 9(a) に示す。なお、図中の太線は 3次元解析結果である。前項の 1 軸近似推定法と同様、モデル 2D-F に対する平面変形熱弾塑性クリープ解析結果によれば、相当クリープひずみ $\bar{\epsilon}^c$ および SR 後残留応力成分の中で、溶接線直角方向成分 σ_y の推定精度が低いようである。SR 後残留応力成分 σ_y の推定精度が低い理由は、熱源の移動効果を考慮した 3次元問題では注目点後方の既溶接部が注目点の収縮を拘束するが、

Fig. 8 Comparison of two-dimensional plane-deformation analysis (2D) with three-dimensional one (3D) on welding residual stresses along z -direction (at middle section)

Fig. 9 Comparison of two-dimensional plane-deformation analysis (2D) with three-dimensional one (3D) on stresses and equivalent creep strain in weld metal (at $y=3, z=8$ (mm)) during SR

モデル 2D-F では、既溶接部の効果が考慮されない⁵⁾。これに起因して、溶接残留応力成分 σ_y が 3 次元解析結果に比べて小さい (Fig. 8) ことによると考えられる。

したがって、Fig. 1(b) のモデル 2D-R に示すように、既溶接部が溶接金属部の収縮を拘束する効果を簡単に具現する目的で、端部で y 方向の変位を拘束したモデルに対し平面変形熱弾塑性応力解析を行った。板厚に沿う溶接残留応力分布を Fig. 8 に一点鎖線で示す。また、これを初期応力として、平面変形熱弾塑性クリープ解析を行った。得られた溶接金属 ($y=3, z=8$ (mm)) における SR 中の応力緩和履歴を細線で Fig. 9(b) に示す。図中の太線は 3 次元解析結果である。

当然のことではあるが、3 次元問題を 2 次元問題として取扱う場合、3 次元問題の力学的拘束条件をいかに精度よく具現できているかが、結果の信頼性を決めることになる。よって、3 次元解析で得られた溶接残留応力の具現精度の高いモデル 2D-R (Fig. 8) では、SR に伴う応力緩和の履歴、SR 後残留応力、さらには相当クリープひずみの累積 ϵ^c など平面変形クリープ解析から精度よく推定できる。

以上の結果より、SR 中の力学的挙動および SR 後のクリープひずみの累積、残留応力などを 2 次元平面変形解析から推定する場合、3 次元問題における溶接残留応力をいかに忠実に表わしているかでそれらの精度が決まることになる。なぜならば、溶接残留応力の分布と大きさが 3 次元問題の力学的拘束条件の厳しさを示すひとつの力学的指標となっている³⁾ からである。

3.3 母材のクリープ特性がクリープひずみの累積および応力緩和に与える影響

クリープひずみの累積および応力緩和を考える場合、

Fig. 10 Effect of creep strain rates on stress and equivalent creep strain (at $y=3, z=8$ (mm))

何らかの拘束のない継手に生じる溶接残留応力および SR 中の応力は自己平衡を保ちながら変化する。このため、母材のクリープ特性にも注目する必要がある⁹⁾。

ここでは、3 次元解析結果を精度よく近似していたモデル 2D-R を用い、溶接金属と HAZ のクリープ速度は同じ ($\dot{\epsilon}_{WM} = \dot{\epsilon}_{HAZ}$) とし、母材のクリープ速度 $\dot{\epsilon}_{BM}$ を $\dot{\epsilon}_{HAZ}$ の 10 倍、100 倍と変化させて平面変形熱弾塑性クリープ解析を行った。相当クリープひずみ ϵ^c および各応力成分: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ の緩和履歴を Fig. 10 に示す。

解析結果によれば、母材のクリープ特性が良くなると ϵ^c の累積は小さくかつ溶接線直方向応力成分 σ_y の緩和が著しくなるようである。換言すれば、母材のクリープ特性が悪いと、溶接金属、HAZ にクリープひずみの累積が顕著となることを示唆している。

4. 結 言

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

3 次元解析結果によれば、

(1) SR の初期、母材に比べて溶接残留応力の大きい溶接金属、HAZ にクリープひずみが累積されやすい。このため、応力緩和は溶接金属、HAZ が顕著であり、やがて、溶接金属、HAZ と母材との応力差がなくなった後は全体的に応力緩和する。

(2) 昇温および保持過程にかかわらず、応力の分布形状は変形しないまま応力は緩和する。また、クリープ解析では SR 処理中に塑性ひずみは生じなかった。

(3) 母材の応力緩和特性が悪いと、溶接金属、熱影響部にクリープひずみが累積しやすい。

3 次元解析結果と 1 軸近似推定法および 2 次元平面変形解析結果とを比較検討した結果によれば、

(4) SR 処理条件の選定、すなわち、昇温速度、保持温度および保持時間などを一軸近似結果から予測することができる。

(5) 3 次元問題に対する SR 処理中の力学的挙動および処理後クリープひずみの累積、残留応力などを 2 次元平面変形解析から予測する場合、3 次元問題の溶接残留応力の分布と大きさをいかに忠実に表わしているかでそれらの精度が決まる。

参 考 文 献

- 1) 上田、中長；応力除去焼なまし処理後の残留応力の近似推定法 (第 1 報)、溶接学会論文集、1-2 (1983)、174-181

- 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