溶接残留応力の固有ひずみ解析および熱弾塑性解析と
その中性子回折測定による検証*望月正人^{*1}, 林 眞琴^{*1}, 服部敏雄^{*1}Welding Residual Stress Estimation by Inherent Strain Analysis
and Thermal Elastic Plastic Analysis and Its Verification
Using Neutron Diffraction Measurement

Masahito MOCHIZUKI, Makoto HAYASHI and Toshio HATTORI

The internal residual stress distribution that resulted from welding a 4-inch-diameter carbon-steel pipe butt joint was evaluated using several methods and the results were compared. The analytical evaluation methods used were inherent strain analysis and thermal elastic plastic analysis, and the experimental methods were X-ray diffraction and strain gauge for the surface residual stress, and neutron diffraction for the internal stress. The residual stress distributions determined using the various methods agreed well with each other, both for surface stress and internal stress. The characteristics of the evaluation methods were summarized and it was found the most suitable method for any particular situation can be selected by considering the evaluated location and the operating conditions of the object to be evaluated.

Key Words: Welded Joint, Residual Stress, Finite Element Method, Stress Measurement, Thermal Elastic Plastic Analysis, Inherent Strain Analysis, Neutron Diffraction, X-Ray Diffraction, Strain Gauge

1. 結 言

溶接により発生する残留応力は、構造物に脆性破壊、疲労損傷、応力腐食割れなどの種々の影響を与える。特に、構造物の強度設計やき裂の進展評価などを行う際、部材内部を含めた詳細な残留応力の分布を把握することが重要となる⁽¹⁾⁽²⁾。ここで、溶接残留応力には構造物ごとに個々のばらつきが当然あるため、実測可能な手法を確立することが重要になる。しかし、現実には構造物の使用環境などの制約条件から測定が困難であることが多いことや、構造物の製作前に強度設計のツールなどとしても用いることを考えれば、測定手法と同時に汎用性に富む解析的な手法を確立しておくことが望ましい。これらのことから、固有ひずみ解析や熱弾塑性解析による残留応力評価手法の検討を著者はこれまでに種々進めてきた^{(3)~(7)}。

また、解析的評価手法により求めた溶接残留応力を、他の手法で求めた応力分布と比較することによって解析値の妥当性の検証を行ってきた。すなわち、構造物表面については解析結果とひずみゲージによる実測値

との直接比較⁽³⁾⁽⁴⁾、また、部材内部での残留応力については固有ひずみ解析と熱弾塑性解析結果との比較⁽³⁾を行い、それぞれよく一致することを示してきた。ただし、部材内部での残留応力の解析結果と実測値との直接比較は行われておらず、また、ほかに実施された例もほとんど見受けられない。

構造物内部の残留応力を実測する方法として、中性子回折による応力測定法がある。中性子回折法の原理はX線回折法と全く同じであるが、X線回折法ではX線の侵入深さが20 μm 程度と極めて浅いため、構造物表面での残留応力しか測定できないのに対し、中性子は侵入深さが鋼の場合でも約50 mmと深いため、部材内部での応力を測定することができる。この特徴を利用して、種々の溶接継手の内部残留応力が測定されている^{(8)~(15)}。ただし、この場合も中性子回折法による測定値と他の評価手法による応力分布との比較ならびに検証がなされた例はほとんど見受けられない。すなわち、中性子回折による溶接残留応力測定結果の妥当性については、他の評価手法による評価結果との直接比較によって検証されていないといえる。

そこで本報では、炭素鋼配管突合せ溶接継手を対象とし、従来は行われた事例のない溶接構造物の内部残留応力の測定値と解析値との比較を行う。すなわち、

* 原稿受付 1997 年 1 月 20 日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300 土浦市神立町 502)。

解析的評価手法として固有ひずみ解析法と熱弾塑性解析法を、測定手法として中性子回折法を取り上げ、残留応力評価結果の比較を行う。また同時に、構造物表面での残留応力についても従来より用いてきたひずみゲージによる応力弛緩法に加え、X線回折法を用いて解析値との比較を行う。さらに、残留応力評価手法のそれぞれの特徴を整理し、測定対象の制約条件を考慮した上で、それぞれの場合に最適な残留応力評価手法を選択できることを示す。

2. 残留応力評価対象

残留応力評価の対象とした炭素鋼 STPT 410 の配管突合せ溶接継手の形状寸法を図 1 に示す。開先形状は V 形、開先角度は 60 度、開先ルート幅は 3 mm である。また、入熱量は 1.1~1.3 kJ/mm、溶接パス数および溶接層数はいずれも 4 である。なお、溶接前に応力除去焼なましを行い、残留応力を除去してから溶接を行った。

3. 残留応力評価方法の概要

3.1 固有ひずみ解析法⁽³⁾⁽⁴⁾ 固有ひずみ $\{\epsilon^*\}$ により弾性体の任意の位置に発生する弾性ひずみ $\{\epsilon^e\}$ および残留応力 $\{\sigma\}$ は、 $[H^*]$: 固有ひずみ-弾性ひずみマトリックス、 $[D]$: 弾性応力-ひずみマトリックスとして以下に示す式のように表される。

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon^e\} = [D][H^*]\{\epsilon^*\} \quad (1)$$

固有ひずみの存在する範囲と大きさは、機械的切断などによる塑性変形が新たな固有ひずみを発生させない限り変化しない。このことから、固有ひずみは測定対象の物体の形状が切断により変化しても、弾性ひずみの解放量から以下のように推定することができる。

まず、構造物の一部に含まれている弾性ひずみを可能な限り多くの箇所で測定する。測定値 $\{m\epsilon\}$ には種々の誤差が混入することから、 $\{\rho\epsilon^*\}$: 固有ひずみの最確値、 $\{V\}$: 残差として、以下のように表される。

$$\{m\epsilon\} - [H^*]\{\rho\epsilon^*\} = \{V\} \quad (2)$$

固有ひずみの最確値 $\{\rho\epsilon^*\}$ は、残差の二乗和を最小

Fig. 1 Configuration of carbon-steel pipe welded butt joint

にする条件から、以下の式で求めることができる。

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

すなわち、任意の位置での残留応力の最確値 $\{\rho\sigma\}$ は、式(1)の固有ひずみ $\{\epsilon^*\}$ に、得られた固有ひずみの最確値 $\{\rho\epsilon^*\}$ を代入することにより求められる。

次に、対象となる配管突合せ継手の残留応力測定手順を図 2 に示す。試験片の表面にひずみゲージを貼り付けた後、高速切断機による切断と切断面へのひずみゲージの貼り付けを繰り返す。得られた弾性ひずみから式(3)を用いて固有ひずみを算定する。

具体的には、まず元の配管突合せ溶接継手から T 片と L_i 片 ($i=1, n$) を切り出す。薄片を切り出しても固有ひずみは変化しないため、T 片や L_i 片には元の溶接継手と同じ固有ひずみが存在する。この切り出しにより、L_i 片に残留する応力は、周方向固有ひずみ ϵ_θ^* のみによって発生していることになる。他の方向の固有ひずみは L_i 片に残留する応力に寄与しない成分となる。同様に T 片に残留する応力についても軸方向固有ひずみ ϵ_z^* と半径方向固有ひずみ ϵ_r^* により発生していることになる。これらの薄片をさらにサイ

(a) Location of pasting strain gauges and first cutting lines of butt joint

(b) Location of pasting strain gauges and second cutting lines of L-specimens

(c) Location of pasting strain gauges and third cutting lines of L- and T-specimens

(d) Location of forth cutting lines of L- and T-specimens

Fig. 2 Sequences of measuring released strains for calculating inherent strains in carbon steel pipe welded butt joint

コロ状の小片にまで切断することにより発生するそれぞれの解放ひずみを測定し、式(4)を用いることによって、 L_i 片からは周方向固有ひずみ ε_θ^* を、 T 片からは軸方向固有ひずみ ε_z^* と半径方向固有ひずみ ε_r^* を求めることができる。

このようにして試験片へのひずみゲージの貼り付けと切断を繰返すことにより、溶接継手全体の固有ひずみ分布を求める。継手全体の固有ひずみを用いて有限要素法による弾性解析を行い、配管突合せ継手の部材内部を含めた三次元残留応力を求めた。

3・2 熱弾塑性解析法⁽³⁾⁽⁵⁾ 熱弾塑性解析では溶接による温度変化による温度差などに起因して残留応力が発生する材料の熱弾塑性挙動を逐一シミュレートする。すなわち、

①室温から溶融温度を超える溶接時の最高温度までの各温度での材料の物性値を用意する。

②非定常熱伝導解析により溶接時の入熱による各時刻での温度分布を求める。

③材料の非線形性を考慮した熱弾塑性解析を行い残留応力を求める。すなわち、②で求めた各時刻での温度分布による熱応力を順次解析し、溶接後の被溶接材が冷却されたときの応力を残留応力とする。

対象となる配管突合せ継手については、軸対称モデ

ルとして熱弾塑性解析を行い、溶接残留応力を求めた。

3・3 中性子回折による測定法^{(13)~(15)} 中性子回折による方法では、材料を構成している各結晶粒に弾性応力が加わったとき、結晶内の特定の格子面の面間距離の異動を測定することによって応力を求める。中性子ビームは原子によってあらゆる方向に散乱するが、原子が三次元的に規則的に配列されていれば、Bragg の条件にあるように、特定の条件下で中性子ビームは、 λ :中性子の波長、 d :格子面間隔、 θ :回折角度として、次式のように回折現象を起こす。

$$2d \sin \theta = n\lambda \cdots \cdots (4)$$

結晶面間隔が残留応力あるいは負荷応力により変化すると、回折角度が変化する。式(4)を微分して書き換えると、ひずみ ε は以下のように表される。

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{d_0 - d}{d_0} = -\cot \theta_0 \cdot \Delta \theta \cdots \cdots (5)$$

すなわち、回折面間隔の変化 $\Delta d = d_0 - d$ 、または、回折角度の変化 $\Delta \theta$ を測定すると、ひずみ ε が求められる。このとき、無ひずみ状態の格子面間隔 d_0 、または、回折角度 θ_0 が必要となる。したがって、中性子回折法による残留応力測定では、測定対象の材料の一部を切り出し、応力除去焼なまし処理を行って回折角度 θ_0 を測定しなければならない。X線回折法ではこれが不要であるのに対し、無ひずみ状態の回折角度 θ_0 の測定が必要なのが中性子回折法の特徴である。

中性子回折法では図3に示すように、三軸方向のひずみを測定して応力を求める。軸方向ひずみ ε_z 、半径方向ひずみ ε_r 、周方向ひずみ ε_θ が測定されると、中性子回折の弾性定数 E_N を用いて、軸方向応力 σ_z 、半径方向応力 σ_r 、周方向応力 σ_θ はそれぞれ以下のようにになる。

$$\sigma_z = \frac{E_N}{1+\nu} \left[\varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta) \right] \cdots \cdots (6)$$

$$\sigma_r = \frac{E_N}{1+\nu} \left[\varepsilon_r + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta) \right] \cdots \cdots (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E_N}{1+\nu} \left[\varepsilon_\theta + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta) \right] \cdots \cdots (8)$$

また、対象となる配管突合せ継手では、最適回折面は(211)面であり、また、中性子回折の弾性定数を $E_N = 243 \text{ GPa}$ と設定した。

3・4 X線回折による測定法⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ X線回折による方法は基本的には中性子回折による応力測定法と同一である。ただし、X線の侵入深さは $20 \mu\text{m}$ 程度と極めて浅いため、構造物表面での残留応力のみを取扱うことになる。法線方向の応力成分は零と考えることができる。そのため、中性子回折法では必要であった回折角度 θ_0 の測定が必要ない。

Fig. 3 Scattering geometries for measurement of three components of lattice strain

対象となる配管突合せ継手については、 $\sin^2 \psi$ -6点法により測定を行った。なお、測定に用いた特性X線はCr-K β 線である。

3.5 ひずみゲージによる測定法⁽¹⁸⁾ ひずみゲージを用いた応力弛緩法は、残留応力の存在する部材から小片を切り抜いて取り出すことにより、小片の残留応力を機械的に解放させ、解放前後のひずみの変化量を測定して残留応力を換算する方法である。

直交する二軸方向の残留応力を求めるには、まず溶接後の配管突合せ継手の内外表面にひずみゲージを接着する。その後、ひずみゲージの周辺を10 mm角程度のサイコロ状の小片になるまで切断し、応力を弛緩することにより発生する軸方向の解放ひずみ ε_z と周方向の解放ひずみ ε_θ を測定する。軸方向残留応力 σ_z と周方向残留応力 σ_θ は、測定した解放ひずみから E を配管のヤング率、 ν をポアソン比として、以下の式を用いて求めることができる。

$$\sigma_z = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\theta) \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_z) \quad (10)$$

4. 残留応力分布の比較

3章の各手法を用いて、炭素鋼配管突合せ溶接継手の残留応力をそれぞれ評価した。すなわち、構造物内部での残留応力については、固有ひずみ解析法、熱弾塑性解析法、中性子回折法⁽¹⁵⁾、の3種類の評価方法による結果をそれぞれ比較した。また、構造物内外表面での残留応力については、固有ひずみ解析法、熱弾塑性解析法、外表面についてのみX線回折法⁽¹⁵⁾、ひずみゲージによる応力弛緩法⁽¹⁵⁾、の4種類の評価方法による結果を比較した。

性解析法、外表面についてのみX線回折法⁽¹⁵⁾、ひずみゲージによる応力弛緩法⁽¹⁵⁾、の4種類の評価方法による結果を比較した。

4.1 構造物内部での残留応力 配管突合せ継手内部の残留応力について、溶接部中心での軸方向残留応力の比較を図4に示す。横軸は内表面からの半径方向距離であり、内表面から外表面に向かって図示している。固有ひずみ解析法、熱弾塑性解析法、中性子回折法のそれぞれの手法によって求めた残留応力分布はよく一致していることがわかる。次に、溶接熱影響部での軸方向残留応力の比較を図5に示す。中性子回折法による内面側の実測値が若干低めの値になっているが、それ以外の箇所ではそれぞれの残留応力分布はある程度よく一致している。

また、溶接部中心での周方向残留応力を図6、溶接熱影響部での周方向残留応力を図7にそれぞれ示す。いずれも固有ひずみ解析法、熱弾塑性解析法、中性子回折法のそれぞれの手法による残留応力分布はよく一致していることがわかる。すなわち、それぞれの評価手法により得られた残留応力分布の妥当性を互いに検証することができたといえる。

4.2 構造物表面での残留応力 炭素鋼配管突合せ溶接継手の構造物表面での残留応力について、配管外表面での軸方向残留応力の比較を図8に示す。図中には、固有ひずみ解析法、熱弾塑性解析法、X線回折法、ひずみゲージによる応力弛緩法のそれぞれの評価手法による結果の比較を示している。熱弾塑性解析による解析結果が他に比べて多少高めになっているが、その他の手法による応力分布はそれぞれよく一致して

Fig. 4 Comparison of axial residual stress across the weld metal center in carbon steel pipe welded butt-joint

Fig. 5 Comparison of axial residual stress across the heat affected zone in carbon steel pipe welded butt-joint

いる。また、熱弾塑性解析結果も定性的には他の手法による結果と同じ傾向を示している。次に、配管内表面での軸方向残留応力の比較を図9に示す。外表面と同様に熱弾塑性解析による解析結果が若干他の結果とはずれているものの、それぞれの手法による評価結果は全体的によく一致している。

5. 各評価手法に対する考察

4章の結果から、それぞれの手法による炭素鋼配管溶接継手の残留応力の評価結果は互いによく一致することが確認できた。このことは、いずれの手法を用いても溶接による残留応力を精度よく評価することができることを意味する。そこで、各評価手法の特徴を、実機構造物への適用に当たった際の制約条件を考慮しな

がらそれぞれについて検討した。すなわち、

(1) 固有ひずみ解析法：弾性解析により残留応力を求めることができる簡易評価手法であり、固有ひずみのデータベースを構築しておけば、種々の形状の溶接構造物に適用できる⁽⁷⁾。ただし、データベースに適合しない形状の構造物や、異なる溶接法、溶接条件などの評価は困難であり、評価を行ったとしても固有ひずみを仮定して用いる必要がある。また、残留応力が最終的に分布するまでの溶接途中での熱応力履歴は求めることができない。

(2) 熱弾塑性解析法：溶接現象に伴う機械的性質の変化を忠実に模擬した詳細解析法であり、解析時間は膨大になる。また、室温から溶融温度付近までの対象材料の物性値を用意する必要がある。ただし、二次元形状にモデル化できる構造物であれば、物性値さえ

Fig. 6 Comparison of circumferential residual stress at the weld metal center in carbon-steel pipe welded butt joint

Fig. 7 Comparison of circumferential residual stress at the heat affected zone in carbon-steel pipe welded butt-joint

Fig. 8 Comparison of axial residual stress on the outer surface in carbon-steel pipe welded butt-joint

Fig. 9 Comparison of axial residual stress on the inner surface in carbon-steel pipe welded butt-joint

正しく定義すれば、ある程度の精度で残留応力を評価可能であり、解析条件をそろえれば有力な手法となる。また、固有ひずみ法の適用が困難である特殊な形状の構造物や、中性子照射を受けた材料のような実験が困難な材料の評価にも適する。

(3) 中性子回折法：部材内部での残留応力の直接測定が非破壊で可能な手法。ただし、中性子源装置の使用条件に制約が多いため、適用対象が限定される。また、無ひずみ状態での格子面間隔または回折角度が材料ごとに必要となる。すなわち、実機構造物の直接評価は困難な場合が多いが、試験片レベルの測定やモックアップ試験体による内部残留応力の検証には非常に有効な手段となる。

(4) X線回折法：部材極表面での非破壊残留応力測定が可能。ただし、測定される応力値は測定対象の表面状態によって大きくばらつくため⁽¹⁹⁾、測定には細心の注意が必要。また、材料の種類によっては溶接部などの結晶組織が粗大化した場所については回折プロファイルがばらつくため、測定が困難となる。なお、装置本体はかなり小形化できるため、実機構造物の測定手段としても用いられるが、狭あい部などでの測定は難しい。

(5) ひずみゲージによる応力弛緩法：最終的に切り出した小片内の平均的な応力を測定可能。測定対象を実際に切断する手法(破壊法)のため、実機構造物への適用は非常に困難である。ただし、試験片の残留応力測定手法としては最も汎用的な手法であり、固有ひずみ法などを併用すれば、部材内部の残留応力分布についても評価可能。ただし、極表面での残留応力など、微小領域での急こう配な分布をもつ応力の測定は難しい。

以上のように、評価手法のそれぞれの特徴を整理し、測定対象の諸々の制約条件を考慮した上で、測定対象の状況に応じて最適な評価手法を選択することができる。また、複数の評価手段を用いて評価した残留応力分布の信頼性を高めるのも効果的である。

6. 結 論

炭素鋼配管突合せ溶接継手の残留応力を種々の手法で評価し、比較を行った。以下に得られた結論を示す。

(1) 構造物内部での残留応力分布については、固有ひずみ解析法、熱弾塑性解析法、中性子回折測定法による評価結果は互いによく一致した。すなわち、それぞれの評価手法により得られた残留応力分布の妥当性が互いに検証できた。

(2) 構造物表面での残留応力分布についても、固有ひずみ解析法、熱弾塑性解析法、X線回折測定法、

ひずみゲージによる応力弛緩測定法による評価結果はよく一致した。

(3) 評価手法のそれぞれの特徴を整理し、測定対象の制約条件を考慮した上で、測定対象の状況に応じて最適な評価手法を選択できることを示した。

文 献

- (1) 例えば、児玉昭太郎、残留応力と疲れ強さ、機誌, 75-642 (1972), 1026-1033.
- (2) 轟章・小林英男、残留応力場の疲労き裂進展速度の予測(重ね合わせの原理の適用)、機論, 54-497, A (1988), 30-37.
- (3) 望月正人・斉藤直人・榎本邦夫・坂田信二・斉藤英世、固有ひずみ法による平板多層溶接突合せ継手の部材内部での残留応力の検討、機論, 61 587, A (1995), 1568-1573.
- (4) 望月正人・斉藤直人・坂田信二・魚住弘人、固有ひずみ法による配管および平板の溶接突合せ継手の残留応力の検討、機論, 62-595, A (1996), 808-813.
- (5) 望月正人・榎本邦夫・岡本紀明・斉藤英世・林英策、厚板を貫通する配管の溶接による残留応力発生機構の検討、溶接学会論文集, 12 (1994), 561-567.
- (6) 望月正人・林眞琴・服部敏雄、多層溶接周継手における溶接順序が残留応力に及ぼす影響、機論, 62 604, A (1996), 2719-2725.
- (7) 望月正人・林眞琴・中川正紀・多田伸雄・清水禎人、厚板を貫通する配管溶接部における残留応力の簡易弾性解析法の検討、機論, 62-597, A (1996), 1250-1255.
- (8) Allen, A. J., Hutchings, M. T., Windsor, C. G. and Andreani, C., Neutron Diffraction Methods for the Study of Residual Stress Fields, *Adv. Phys.*, 34 (1985), 445-473.
- (9) McEwen, S. R., Holded, T. M., Hobson, R. R. and Cracknell, G., Residual Strains in Rolled Joints, *Trans. SMiRT*, 9G (1983), 183-188.
- (10) Klassen, R. J., Root, J. H. and Holded T. M., Neutron Diffraction Measurements of Strain in a CANDU-3 Rolled Joint Hub, *AECL Report*, ANDI 50 (1991).
- (11) Hutchings, M. T., Neutron Diffraction Measurement of Residual Stress Fields, The Answer to the Engineers Prayer, *J. Nondest. Test. Eval.*, 5 (1990), 395-403.
- (12) Wikander, L., Karlsson, L., Nasstrom, M. and Webster, P., Finite Element Simulation and Measurement of Welding Residual Stresses, *Model. Sim. Mater. Sci. Eng.*, 2 (1994), 845-864.
- (13) 林眞琴・石渡雅幸・皆川宣明・船橋達・Root, J. H., 中性子回折による残留応力測定における回折面依存性, 材料, 44 (1995), 1115-1120.
- (14) 林眞琴・石渡雅幸・皆川宣明・船橋達, 中性子回折によるソケット溶接継手の残留応力の測定, 材料, 44 (1995), 1464-1469.
- (15) 林眞琴・石渡雅幸・森井幸生・皆川宣明, 中性子回折による炭素鋼配管突合せ溶接継手の残留応力, 材料, 45 (1996), 772-778.
- (16) 日本材料学会編, 改著 X線応力測定法, (1981), 54-88, 養賢堂.
- (17) 日本材料学会 X線材料強度部門委員会編, X線応力測定基準, (1982), 日本材料学会.
- (18) 米谷茂, 残留応力の発生と対策, (1979), 70-73, 養賢堂.
- (19) 朴位伸・小林英男・中村春夫・小出孝道, X線法によるオーステナイト系ステンレス鋼の溶接残留応力測定, 機講論(B), No. 940-37 (1994-10), 70-71.