固有ひずみの 3 次元分布を考慮した溶接変形・残留応力の 同時推定に関する研究

山崎祐^{*1}, 中村春夫^{*2}

Estimation of Welding Deformation and Residual Stresses by Considering Three-dimensional Eigen-Strain Distributions

Tasuku YAMASAKI^{*3} and Haruo NAKAMURA

^{*3} Tokyo Institute of Technology Dept. of Mechanical and Control Engineering
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550 Japan

Concept of assurance of structural integrity has been taken into account for large structures like energy related structures where flaw evaluation is conducted based on the fracture mechanics and non-destructive inspections. When its application is attempted to welded locations, welding residual stresses must be given qualitatively, and it is relatively difficult as the X-ray technique gives only information near the structure surface and the thermo-elasto-plastic simulation gives only the qualitative information due to complexity of welding process. Moreover, prediction of welding deformation is also required in the design process. So, development of a new evaluation method of both welding deformation and residual stresses that can be applicable to the finite element (FEM) analysis is desired. In this study, by incorporating the eigen-strain method, a new method is proposed where estimation of both welding deformation and residual stresses can be conducted. In the proposed method, three dimensional eigen-strain distribution is estimated by using “the Truncated Singular Value Decomposition (TSVD)” method and the penalty method. The validity of the proposed method is made clear by numerical analysis.

Key Words :Inverse Problem, Welding Deformation, Residual Stresses, Eigen-strain

1. 緒言

近年、エネルギー関連構造物のような高い安全性が求められる構造物に対して、破壊力学と非破壊検査に基づいて欠陥評価を行い、設計から施工、維持管理までの健全性を一貫して評価する、構造健全性保証⁽¹⁾の手法が適用されてきている。また、設計の段階では、有限要素法 (FEM) を用いた構造解析をすることによって安全性を評価するデザイン・バイ・アナリシスの考え方が取り入れられ、期間短縮、効率化が図られている。これらの考え方は溶接構造物への適用も期待されているが、その場合に、溶接変形と残留応力の評価が重要となる。しかし、溶接シミュレーションを用いた純解析的な手法では実証性が欠如しており、また、実験的な X 線回折法で得た情報は FEM 解析に直接適用することができないといった問題点があるため、適用が遅れている。

そこで著者らは FEM に適用可能な溶接変形・残留応力の評価手法として、ビードフラッシュ法⁽²⁾や画像処理法⁽³⁾などの固有ひずみ法を用いた非破壊評価手法を提案してきている。固有ひずみ法を適用することで、固有ひずみという単一パラメータを用いて設計、施工、供用期間中検査の一貫した評価が FEM を援用することによって可能となる。

本研究では、デジタル画像相関法 (以下、DIC) による情報の取得を想定し、溶接変形・残留応力の同時評価が可能な等価固有ひずみ (equivalent eigen-strain) を逆解析によって求める。そのために必要な未知固有ひずみ分布の条件ならびに有効な逆解析手法などを検討して定式化を行い、数値実験を行うことによりその有効性を示す。

2. 提案手法の定式化

2・1 固有ひずみ法 本研究における固有ひずみとは、均一に生じた場合に応力を生成しない非弾性ひずみ (eigen-strain) であり、所定の溶接後の状態などを再現することを目的として導入した仮想的なひずみである。部材

^{*1} 東京工業大学 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

^{*2} 正員, フェロー, 東京工業大学 理工学研究科.

E-mail: hnakamura@mep.titech.ac.jp

に不均一な固有ひずみが負荷されると、その結果として残留応力、変位などが生成される。そこで、実験などにより得た情報を援用して逆解析を行って固有ひずみを求め、これを弾性解析して部材内全体の溶接変形・残留応力を再現するという手法である。

部材に不均一な固有ひずみ ε^* が負荷されたとき、固有ひずみと変位 u 、ひずみ ε との間には以下の様な線形関係が成立する。

$$\begin{Bmatrix} u \\ \varepsilon \end{Bmatrix} = [R] \{\varepsilon^*\} \quad (1)$$

ここで、 $\{u\}$ 、 $\{\varepsilon\}$ は変位、ひずみベクトル、 $\{\varepsilon^*\}$ は固有ひずみベクトル、 $[R]$ は弾性応答マトリクスである。実測により変位やひずみの情報が得られたとき、ムーア・ペンローズの一般化逆行列 $[R]^+$ を用いて、推定固有ひずみは以下のように表される。

$$\{\varepsilon^*\} = [R]^+ \begin{Bmatrix} u \\ \varepsilon \end{Bmatrix} \quad (2)$$

2・2 溶接変形・残留応力の同時推定 き裂進展予測に用いるための残留応力評価では、逆問題の不適切性を解決するために固有ひずみの垂直成分のみを推定対象とし、未知変数を削減してきた⁽²⁾。しかし、溶接変形を評価対象に加えた場合、平板突き合わせ溶接における変形モードの1つである面内せん断変形を再現するには、固有ひずみのせん断成分の考慮が不可欠である⁽⁴⁾。本研究では、求める未知固有ひずみを ε_x^* 、 ε_y^* 、 γ_{xy}^* の3種類とした。また、角変形のような大きな板厚方向変位が発生する場合も考慮するために、固有ひずみ分布を板厚方向に全一様とするのではなく、溶接変形・残留応力が推定可能な固有ひずみ分布を用い、 ε_x^* 、 ε_y^* は溶接線垂直方向にのみ分布し、 γ_{xy}^* は3次元に分布するとした⁽⁶⁾。

2・3 定式化 逆問題では一般的に、求める未知変数の数が多くなるほど悪条件な問題となる。問題が悪条件であるとき、適切化手法を用いて不適切性を回避する必要がある。本研究では、未知変数の数が多く、また、DICによる変位・ひずみ取得を想定しているため部材の表面の情報のみしか得ることができず、さらに溶融部上の情報は得ることができない。一般には、平滑化による適切化手法として特異値分解による階数低下法（以下TSVD法）が有効であるが、本研究では最終的な評価対象が溶接変形と残留応力の2種類あり、どちらも精度よく推定できるような固有ひずみが求まる最適ランクが存在しない可能性がある。デザイン・バイ・アナリシスへの適用を考えた場合、溶接変形・残留応力それぞれが求まるだけではなく、それらを同時に精度よく推定できる等価固有ひずみ分布を求める必要がある。

そこで本研究では、TSVD法によって残留応力・変位それぞれを別の適切化ランクにおいて推定し、そこで得られた情報を先験情報として用い、再解析を行うことによって等価固有ひずみを求めることを考える。先験情報を拘束条件として扱い、それを近似的に成立させるような固有ひずみを求める。具体的には、以下のように表される評価関数 Π を最小化する固有ひずみを求める。

$$\begin{aligned} \Pi = & \left\| [R] \{\varepsilon^*\} - \begin{Bmatrix} u \\ \varepsilon \end{Bmatrix}_{\text{measured}} \right\|^2 \\ & + \alpha \left\| [R_{\text{full}}] \{\varepsilon^*\} - \begin{Bmatrix} u \\ \varepsilon \end{Bmatrix}_{\text{calculated}} \right\|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、添字の measured は実測によって得られた情報ベクトルであり、calculated はひずみと変位それぞれの最適ランクにおける推定解を合わせて作ったベクトルであることを表す。また、 $[R_{\text{full}}]$ は、弾性解析を行った時に全ての節点での変位・ひずみを求める弾性応答マトリクス、 α は処罰係数である。

3. 数値実験

3・1 解析概要 本手法の有効性の検証のため数値実験を行った。まず、熱弾塑性溶接シミュレーションによる解析結果を参考に正解の固有ひずみを設定する。それを弾性解析することによって正解の残留応力、変位、ひずみが求まる。正解の情報に乱数を用いて計測誤差を模擬して入力情報に加える。入力情報を用いて逆解析した結果を、正解の溶接変形・残留応力と比較し、手法の有効性を検討する。溶接シミュレーションには熱弾塑性有限要素解析ソフト Quick Welder（株）計算力学研究センター）を、また弾性計算には汎用有限要素解析ソフト AMPS（株）アドバンストテクノロジー）をそれぞれ用いた。

3・2 解析モデルおよび解析条件 本研究における解析モデルを図1に示す。鋼の突合せ溶接平板を解析の対象とし、対称性を仮定して平板の半分を解析する。総要素数は1280、総節点数は1785である。板厚方向の変形が大きい場合を想定するため、溶接シミュレーションにおけるパス数を4パスとし、溶接開先はV字開先とする。溶融部の片幅は9.375mmで、この領域の情報は取得できないものとした。入力情報には、DICで取得できる表面、裏面の溶融部でない領域の変位、及び変位分布からひずみの定義式に基づき計算されるひずみを用いる。入力情報は3944個、未知変数は1056個となる。また、平均0、標準偏差3.3 μm （変位）、30 μ （ひずみ）の正規分布に従う乱数を誤差として正解に与え、計測誤差を模擬した。

3・3 解析結果 上記の条件で解析を行った。まず、TSVD法を適用し、弾性応答マトリクス $[R]$ のランクを下げていった時の推定解の変動を見た。なお、本研究では手法の有効性を検討するのが目的であるため、最適ラ

ンク、及び最適な処罰係数の探索は行わない。図2にTSVD法を行わなかった場合の結果を、図3にTSVD法を適用してランクを830まで落とした場合の結果を示す。なお、以下のグラフは全て表面における結果を示しており、赤色で示されているのが正解分布、緑色で示されているのが推定分布である。

[R]がフルランクの時には変位が高精度で再現出来ているが、残留応力が推定できていない。また、ランクを830まで落とした時には、残留応力が良い精度で推定できているが、逆に変位の推定精度が下がっている。このように、すべてのランクの場合の解析結果について、溶接変形・残留応力の同時推定が行うことができる適切化ランクは見つからなかった。

そこで、適切化を行わずに推定した時の変位の情報と、適切化ランクが830の時のひずみの情報を用いてベクトルを作成し、式(3)を適用する。また、ここでは処罰係数の値を $\alpha=10^{-3}$ とする。以上の条件で再解析を行った結果を図4に示す。図2、図3と図4とを比較すると、本手法を適用することで飛躍的に精度が向上しているのがわかる。これは、X線回折法などの従来手法と比較しても十分な精度であり⁹⁾、実際の設計へも適用できる可能性がある。

本研究では正解が既知であるという仮定のもと解析を行っているため、適切化ランクを求める際には、正解の値と推定値とを比較することで求めることができた。しかし、実際には正解は未知であるので、正解の参照に頼らない最適な適切化ランクの探索、処罰係数の決定方法が今後の課題である。

4. 結言

溶接変形・残留応力の同時推定のための等価固有ひずみを求める逆解析手法を提案・定式化し、数値シミュレーションにより有効性評価を行った。実測に近い条件での解析でも精度の良い結果が得られ、本手法の有効性が示された。

文献

- (1) Kobayashi, H., Practical Fracture Mechanics-Assessment of Integrity of Structures, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 87, No. 786 (1984), pp. 448-454.
- (2) Ogawa, M. and Nakamura, H., Proposal of an Estimation Method of Welding Residual Stresses in Welded Pipes for Risk-Analysis-Based Assurance of Structural Integrity (2nd Report: Application of the L-curve and the Artificial Noise Methods), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.77, No.774 (2011), pp.282-292.
- (3) Nakamura, H. and Kondo, A., A New Concept Evaluating Welding Deformation and Residual Stresses by Image Processing for Structural Design & Maintenance (1st Report: Formulation of the Method), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.72, No.723, (2006), pp.1615-1622.
- (4) Masuda, K. and Nakamura, H., Improvement of the Inverse Analysis Approaches for Assessment of Welding Deformation and Residual Stresses by Using Thermo-Elasto-Plastic Welding Simulation (2nd Report, Deformation Analysis), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.76, No.769 (2010), pp.1186-1194.
- (5) Kurimura, T. and Akiniwa, Y., Development of Materials Evaluation by Diffraction Method I: Residual Stress of Weld Section and X-Ray Residual Stress Measurement, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.58, No.10, (2009) pp.873-878.

Fig. 1 FEM Analysis model

Fig. 2 Distribution of u_y and σ_x (without TSVD)

Fig. 3 Distribution of u_y and σ_x (rank = 830)

Fig. 4 Distribution of u_y and σ_x using Eq. (3)