

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	厚肉溶接平板の3次元残留応力推定のための逆問題解析手法の開発
Title	Development of an Inverse Problem Analysis Method for Three Dimensional Residual Stress Estimation of Thick Welded Plate
著者	前久保 格也, 中村 春夫
Authors	Kakuya MAEKUBO, Haruo NAKAMURA
出典	関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会論文集, pp. 1-5
発行日 / Pub. date	2018, 3

厚肉溶接平板の 3 次元残留応力推定のための逆問題解析手法の開発

Development of an Inverse Problem Analysis Method for Three Dimensional

Residual Stress Estimation of Thick Welded Plate

○学 前久保 格也^{*1}, ◎正 中村 春夫^{*1}

Kakuya MAEKUBO^{*1}, Haruo NAKAMURA^{*1},

^{*1} 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

Key Words : Residual Stresses, Inverse Problem, Nondestructive Evaluation, Eigen-Strain

1. 結 言

エネルギー関連機器に代表される大型溶接構造物において、破壊力学や非破壊検査手法に基づき、設計から維持管理までを一貫して取り扱う構造健全性保証への取り組みが注目を集めており、エネルギー関連の分野を中心として進歩を遂げてきている。構造健全性保証においては、供用期間中に非破壊検査手法によってき裂の評価が行われる。検出されたき裂の破壊力学に基づく欠陥評価に際しては、き裂が進行するであろう方向に分布する（すなわち、進展が予測されるき裂面に垂直あるいは水平に作用する）残留応力の評価が必要である。特に、溶接部近傍はき裂の起点となりやすい候補個所の一つであるため、部材内部の残留応力を正確に評価する必要がある。

そこで本研究では、固有ひずみ法に基づく逆問題手法を用いて厚肉溶接部材の溶接残留応力を評価する。厚肉溶接平板を対象としたビードフラッシュ法においては、固有ひずみが板厚方向にも分布するために未知パラメータが増え、これが精度低下をもたらす。そこで、それを補う目的で余盛を除去した際に生じる解放ひずみ変化に加えて、X 線残留応力測定結果を付加して精度向上を試み、その有効性を数値解析により評価する。

2. 提案手法の原理及び基礎定式化

2・1 提案手法の概要

固有ひずみとは、外力を伴わない物体内部に弾性応力・ひずみが発生しているとき、その生成源として定義されるものである。固有ひずみを何らかの方法で推定することができれば、それを力学的境界条件として有限要素法などの数値解析を用いることで、部材の任意の位置の残留応力を求めることができる。本研究では、固有ひずみを逆問題手法により推定する。

本研究における解析対象は突合せ溶接平板であるため、溶接線方向をx、溶接線垂直方向をy、板厚方向をzとする直交座標系(x,y,z)を用いた。

2・2 ビードフラッシュ法の基礎定式化⁽¹⁾

以下に、余盛りを除去する際の弾性解放ひずみから、逆解析により固有ひずみを求めるための原理を示す。一般に、弾性ひずみベクトル $\{\epsilon_e\}$ と固有ひずみベクトル $\{\epsilon^*\}$ との間には、次式のような線形関係が成り立つ。

$$\{\epsilon_e\} = [R]\{\epsilon^*\} \quad (1)$$

ここで、 $[R]$ は弾性応答マトリクスであり、 $[R]$ の*i*番目の列は、固有ひずみベクトル $\{\epsilon^*\}$ の*i*番目の成分を1とし、ほかをすべて0とした単位固有ひずみ

$$\{\text{unit}\epsilon^*\}_i = \{0, \dots, \epsilon_i^* = 1, \dots, 0\}^T \quad (2)$$

を負荷した時に得られる弾性ひずみベクトルの値として、FEMの弾性解析から求められる。余盛り除去に際して新たな加工ひずみを生じさせない限り、除去前後での固有ひずみは不変($\{\epsilon_b^*\} = \{\epsilon_a^*\} = \{\epsilon^*\}$)であるから、解放ひ

ずみベクトル $\{\Delta\epsilon_e\}$ は

$$\{\Delta\epsilon_e\} = \{\epsilon_{ea}\} - \{\epsilon_{eb}\} = ([R_a] - [R_b])\{\epsilon^*\} = [R]\{\epsilon^*\} \quad (3)$$

となる。ただし、添え字の b と a は、それぞれ余盛りの除去前(before)と除去後(after)に対応するものであり、 $[R] = [R_a] - [R_b]$ とする。したがって推定固有ひずみ $\{\epsilon_{est}^*\}$ は、次式によって示される。

$$\{\epsilon_{est}^*\} = [R]^+\{\Delta\epsilon_e\} \quad (4)$$

ただし、 $[R]^+$ はムーアペンローズ一般化逆行列である、

2・3 X線回折法の導入

本研究では、従来手法に新たに X 線残留応力法により測定された弾性ひずみ $\{\epsilon_{X-ray}\}$ を新たに付加し精度向上を図っている。弾性ひずみ $\{\epsilon_{X-ray}\}$ と固有ひずみベクトル $\{\epsilon^*\}$ との間には、次式のような関係が成り立つ。

$$\{\epsilon_{X-ray}\} = [R_{X-ray}]\{\epsilon^*\} \quad (5)$$

そこで、式(3)と式(5)を組み合わせると次式のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_e \\ \epsilon_{X-ray} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [R] \\ [R_{X-ray}] \end{bmatrix} \{\epsilon^*\} \quad (6)$$

これより、推定固有ひずみ $\{\epsilon_{est}^*\}$ は

$$\{\epsilon_{est}^*\} = \begin{bmatrix} [R] \\ [R_{X-ray}] \end{bmatrix}^+ \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_e \\ \epsilon_{X-ray} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

として計算される。

2・4 固有ひずみの厚さ方向分布と関数近似

本研究では、入力情報を部材表面からしか得ることができないため、正しい解の推定が困難な不適切性の強い問題となる。そこで、固有ひずみを次式のように関数近似することで解の存在範囲を限定した。また、固有ひずみの厚さ方向分布は、熱弾塑性解析の結果を参考とし、最終パスを中心とした楕円形になると仮定し⁽²⁾その未知楕円半径比を α とした。

$$\{\tilde{\epsilon}_s^*\}(y, z) = \sum_{i=1}^4 \frac{-a_{si}}{1 + \exp(p_i + q_i \sqrt{y^2 + (z-t)^2 / \alpha^2})} \quad (8)$$

ただし、 $(s = x, y, z)$ であり、 t は溶接部材の板厚である。この解空間の限定により、応答マトリクスのrankは12となった。

2・5 適切化手法の導入

弾性応答マトリクスに対して特異値分解(TSVD法)を用いた階数低下法を用いることによって1~12のrankにおいて残留応力推定精度を評価した。

また、入力情報のノルマライズ(規格化)を行うためにペナルティ係数 β を用いた次のような評価関数 Π を停留させることを考える⁽³⁾。

$$\Pi(\beta) = \|RL(\alpha)\hat{a} - \Delta\epsilon_e\|^2 + \beta \|R_{X-ray}L(\alpha)\hat{a} - \epsilon_{X-ray}\|^2 \quad (9)$$

$\Pi(\beta)$ を停留させるような未知パラメータ $\hat{a}$ は次式で表せる.

$$\hat{a} = \left(RL(\alpha)^T RL(\alpha) + \beta R_{X-ray}L(\alpha)^T R_{X-ray}L(\alpha) \right)^{-1} \cdot \left(RL(\alpha)^T \Delta\epsilon_e + \beta R_{X-ray}L(\alpha)^T \epsilon_{X-ray} \right) \quad (10)$$

式(10)において, $rank$ は 1 から 12 まで, またペナルティ係数 β は 10^{-6} から 10^2 までそれぞれを独立して変動させた場合について, 残留応力推定精度を評価した.

残留応力推定精度の評価指標としては次式で与えられる誤差の二乗平均平方根 σ_{RMS} を用いた. σ_{RMS} が小さいほど残留応力推定精度が高いことを意味している.

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_{exact,i} - \sigma_{estimated,i})^2} \quad (11)$$

($N=56$ は評価範囲の節点数, $1 \leq i \leq 56$ は節点番号)

3. 数値シミュレーション方法・結果ならびに考察

3・1 解析モデル

解析対象のモデルは, 図 1 に示すような板厚 20[mm], 余盛り高さ 2[mm]の厚肉溶接平板の 1/4 モデルである. 節点数は 1106, 要素数は 762 である.

また, 測定誤差を想定し, 解放ひずみと表面の弾性ひずみに対して, 標準偏差がそれぞれ 20μ と 250μ となるような誤差を加えて模擬計測値とし, これに対して提案手法である逆解析を実施して, 残留応力推定精度を評価した.

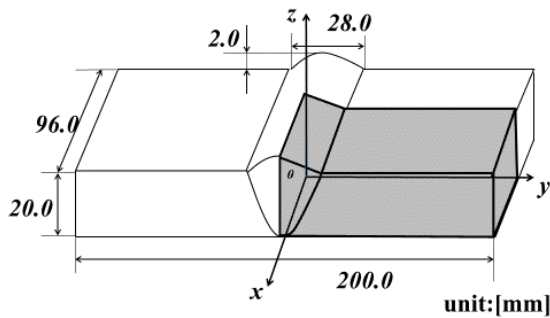


Fig.1 Analyzed welded plate and FEM model

3・2 解析結果

$rank=1$ から 12, および $10^{-6} \leq \beta \leq 10^2$ における推定精度を評価する. 測定誤差によるばらつきを考慮するため, あらかじめシード値を 100 パターン使用し, 各解析結果の σ_{RMS} の平均を求めた. 例として, 残留応力推定が比較的難しい $\alpha = 0.5$ におけるウラ表面の x 方向残留応力についての推定結果を図 2 に記した.

残留応力の推定精度は $rank$ に大きく依存することがわかる. またペナルティ係数 β については, 適当な範囲内の値を選択すれば, 精度よく推定できることが確認できる. 正解値を参照せず最適な β を推定することは困難であるため, 実際に解析する際にはあらかじめ β を定めておく必要があり, 以下でその手法の検討を行う.

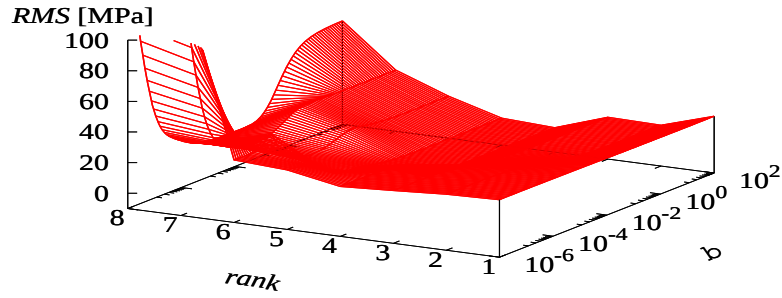


Fig.2 Average of $RMS[\sigma_x]$ on back surface

3・3 β の推奨値の導入

β を大まかに定める指標として、一般的にはペナルティ係数の推奨値が考えられている。これは、

$$\|\Delta \varepsilon_{err}\|^2 = \beta^2 \|\varepsilon_{X-ray\ err}\|^2 \quad (12)$$

を満たす β をペナルティ係数として用いるというものである。本研究の設定では、ペナルティ係数推奨値は0.11と決定できる。この値を用いて再び解析を行った結果を図3に示す。適切な $rank$ を選ぶことにより、従来手法よりも精度よく推定することが可能となる。実際に誤差分布を付与した際の推定結果の一例を図4に示す。

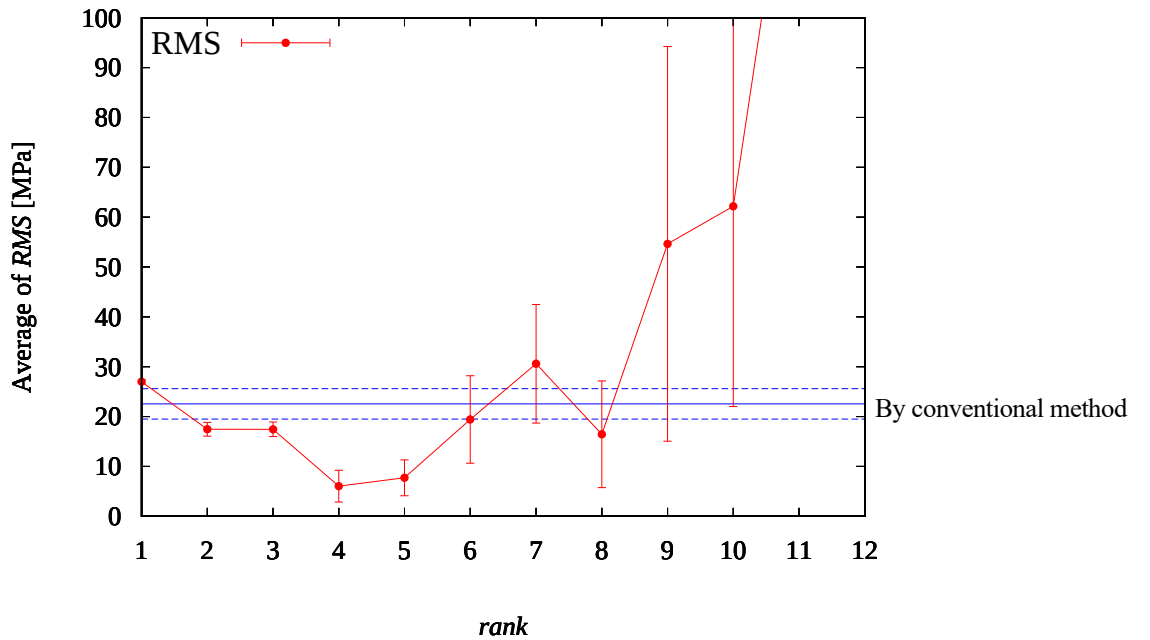
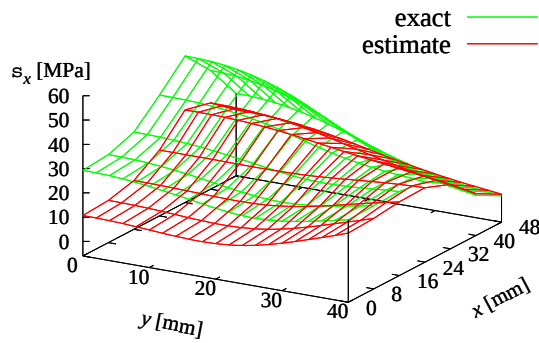
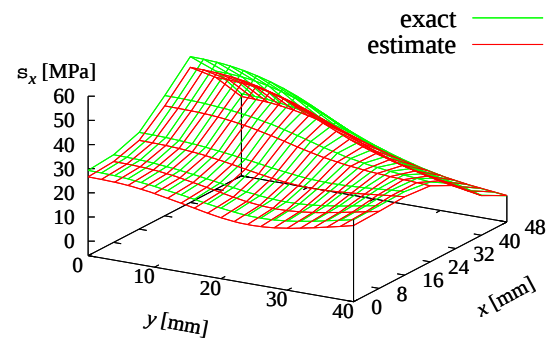


Fig.3 Average of $RMS[\sigma_x]$ on back surface ($\beta = 0.11$)



(a) Without $\{\epsilon_{X\text{-ray}}\}$ and β
 $RMS = 17.4$



(b) With $\{\epsilon_{X\text{-ray}}\}$ and β
 $RMS = 3.26$

Fig.4 Estimated result of σ_x

4. 結言

厚さ方向に固有ひずみが分布している厚肉溶接平板について、X線回折法による入力情報を追加し、その有効性の評価を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) X線回折法による入力情報を追加することにより、3次元固有ひずみ分布の評価精度、したがって残留応力の評価精度が向上した。
- (2) 特異値分解法およびペナルティ係数法を導入することにより残留応力推定精度が向上した。
- (3) β は推奨値を使用することで従来手法よりも精度よく推定することが可能である。
- (4) 実際に推定するには適切な $rank$ の推定手法が必要となり、これは今後の課題である。

文 献

- (1) 小川・中村, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 774, (2011-12), PP. 282-292.
- (2) 上田・麻, 溶接学会論文集, Vol. 11, No. 1, (1993), PP. 189-195.
- (3) 久保, 逆問題, (1992), 培風館