M04 デジタル画像相関法を用いた 高精度溶接固有変形推定法の開発

河村 恵里

(指導教員:正岡孝治、柴原正和)

Estimation Method of Welding Inherent Deformation Using Digital Image Correlation

by Eri Kawamura

Abstract

It takes a great amount of time for the calculation by thermal elastic-plastic FEM analysis to predict the welding deformation. Inherent deformation method using the elastic FEM analysis as the initial strain is one of the effective methods to predict welding deformation of large structures. In this research, the measuring method to estimate inherent deformation of plate under bead welding using inverse analysis is developed. Based on this inverse analysis, the inherent deformation is estimated by measuring the three-dimensional coordinates using image processing technique by digital camera. Further, using the estimated inherent deformation, the welding deformation of a plate is predicted as the forward analysis.

1. 緒 言

近年におけるデジタルカメラの高性能化、特に画素数 の急激な増加に伴う画素分解能の向上によって、構造物 の変形・応力計測に画像相関法等の画像処理技術を応用 する研究¹⁾が盛んに行われている。この手法では一般的 に、構造物の変形前における状態を基準画像として撮影 し、また、計測・点検を実施したい変形後における状態を 計測対象画像として撮影する。そして、取得した 2 枚の画 像の輝度相関値を計算することにより、カメラで撮影さ れた全領域における変位分布、ひずみ分布および応力分 布を計算する。この手法は, 簡便であり、なおかつ原理的 には、画素数分だけ計測点を有しており、その情報量の多 さゆえ有望視されている手法である。

一方、溶接変形は、一般的に、面外変形である縦曲が り変形、横曲がり変形、および、面内変形である縦収縮、 横収縮に分類される。入熱量にもよるが、通常、面内変 形はサブミリのオーダーであることが多く、面内変形を 計測するためには、高い精度が要求されるが、サブミリ オーダーの面内変位を試験片全域に渡り短時間に測定す る方法は、現在のところ、画像処理を用いた方法以外に ないと考えられる。

また、溶接変形を予測する手法としては、FEM 熱弾塑 性解析法が一般的であるが、この解析法は、時々刻々と 変化する溶接の変形過程を逐次解析する手法であり、実 機レベルの大型構造物における溶接変形を予測するには、 計算時間が膨大になるという問題がある。一方、溶接継 手ごとの固有変形量が事前に求められている場合には、 弾性解析により、構造物全体の溶接変形を予測できる固 有ひずみ法を用いることができる。この手法は、短時間 に溶接変形を予測することができるが、高精度に固有変 形を求める方法が必要であり、村川ら^{2,3}は、試験片に精 確に円孔を設け、その中心座標を接触式三次元形状計測 装置にて測定することにより、固有変形4成分を測定す る方法を確立している。

そこで、溶接の変形計測にデジタルカメラによる計測 法を用いることを提案する。この手法を用いることによ り試験片に円孔を設ける手間を省くことができ、また、 変形前後の形状計測にかかる時間を短縮することができ、 計測点も多いことから、簡易的なおかつ高精度に固有変 形を同定することができると考えられる。本研究では、 デジタル画像相関法を基にするステレオ画像法を用いた 溶接変形計測システムを開発し、この計測システムを用 いて固有変形の同定を行った。さらにこの方法で同定し た固有変形を用いて FEM 弾性解析を行い、デジタルカメ ラを用いた変形計測結果と比較することで、同定した固 有変形およびこれを用いた弾性解析の妥当性について検 証した。

2. ステレオ画像法による溶接変形計測システム 2.1 提案手法の概要

本システムは、変形前の2枚の画像および変形後の2枚 の画像を用いて3次元変形量を算出するものである。計 測対象物の変形前後の3次元座標は、ステレオ画像法の 理論を用いる。3次元変形量を算出するために、この形状 計測に加えて、変形前と変形後における同一カメラの2 枚の画像を用いて対応付けを行い、サブピクセル単位で の変位量を算出する。ただし、この方法を用いる場合には、 変形後画像の画素間に存在する対応位置における変形量 を求める必要があり、ここでは画素位置における三次元 座標を線形補間して算出する。

2.2 ステレオ画像法

Fig. 1 に示す図は、ステレオ画像法における幾何学的パ



Fig. 1 Geometrical parameters on stereo imaging technique

ラメータを模式的に表したものである。計測対象物上の 点を $P(X_{P},Y_{P},Z_{P})$ とし、P とそれぞれの平面がなす角度を 図のように定める。これにより、三次元座標 $P(X_{P},Y_{P},Z_{P})$ は次式で表すことができる。

 $X_{P} = B \tan \beta_{R} / (\tan \beta_{L} + \tan \beta_{R})$ $Z_{P} = X_{P} \tan \beta_{L}$ $Y_{P} = Z_{P} \tan \alpha_{0}$ (1)

ただし、Bは左右カメラ間距離である。

2.3 画像照合法

本研究では、画像同士の対応位置を求める画像照合法 に正規化相関を用いる。基準画像上、比較画像上におい て同じ大きさの領域 $dx \times dy$ を設定し、両画像の領域内の 輝度値を用いて輝度相関値 $R(b_k,a_l)$ を算出する。これを、 基準画像上の領域を固定、比較画像上の領域を 1 ピクセ ルずつ順次ずらしながら算出していき、その中で輝度相 関値が最も 1 に近い、つまり両領域内画像の類似性が最 も高い基準画像領域の中心点 $b_k(x_i, y_j)$ の対応点が比較画 像領域の中心点 $a_l(x_i+\Delta x, y_j+\Delta y)$ となる。正規化相関で表 される輝度相関値 $R(b_k,a_l)$ を次式に示す。

$$R(\mathbf{b}_{k},\mathbf{a}_{1}) = \frac{\sum_{k=-n}^{n} \sum_{t=-m}^{m} \left\{ a_{t} \left(x_{i} + \Delta x + s, y_{j} + \Delta y + t \right) - a_{i}^{*} \right\} \left\{ b_{k} \left(x_{i} + s, y_{j} + t \right) - b_{k}^{*} \right\}}{\sqrt{\sum_{k=-n}^{n} \sum_{t=-m}^{m} \left\{ a_{t} \left(x_{i} + \Delta x + s, y_{j} + \Delta y + t \right) - a_{i}^{*} \right\}^{2}} \sqrt{\sum_{k=-n}^{n} \sum_{t=-m}^{m} \left\{ b_{k} \left(x_{i} + s, y_{j} + t \right) - b_{k}^{*} \right\}^{2}}}$$
(2)

ただし、2n=dx-1、2m=dy-1であり、 a_l^* 、 b_k^* は相関領域全域 における輝度値の平均値である。

2.4 サブピクセル画像相関法

前節の画像照合法で算出される対応位置はピクセル単 位であるが、一般に両画像の対応する点はピクセル間に 存在するため、サブピクセル単位での対応点探索が要求 される。サブピクセル画像相関法では、ピクセル単位で 得られた対応点 $a_i(x_i+\Delta x, y_j+\Delta y)$ と、その点を基準にして x,y 方向にそれぞれ±1 ずつずらした基準点周囲の画素の 計 9 点における輝度相関値を用いて次式で示される最小 自乗曲面 g(x,y)を作る。

$$g(x, y) = ax^{2} + bx + cy^{2} + dy + exy + f$$
 (3)

ただし、 $a \sim f$ は最小自乗法により得られる係数である。この曲面 g(x,y)が最大となる座標(x,y)がサブピクセル単位の対応点である。

3. ステレオ画像法を用いた溶接変形計測 3.1 溶接変形計測および実験条件

前章で述べた溶接変形計測システムを用いてビードオ ンプレート溶接の変形計測を実施した。溶接法は、TIG 溶 接とし、溶接条件としては、溶接速度を v=200mm/min で固 定、電流値 I を 7A~115A の間で変化させた。入熱量 Q は 電流値 I に対し、文献⁴⁾から求めた電圧値 V および熱効率 η を乗じ、以下の式により算出した。

$$Q = \eta \frac{VI}{v} \tag{4}$$

ただし、熱効率は0.7と仮定した。

Fig. 2 に計測対象である試験片の形状および寸法を示 す。板厚hは2mmまたは2.3mmであり、溶接方向は、X 軸正方向である。本実験では、提案システムにより得られ た計測結果の妥当性について検証するために、同図の●印 で示す位置に、直径2mmの円孔を設け、溶接前後におけ る変位量をデジタルノギスで測定し、面内変形の精度に ついて検証した。一方、面外変形については、レーザー変 位計を用いた3次元形状測定システム(LAF-3D)により検 証を行った。

3.2 溶接变形計測結果

提案したシステムにより得られた試験片全体に渡る変 位量の分布を入熱パラメータQ/h²=60.4J/mm³の場合にお いて Fig. 3(a)~(c)に示す。(a)は、変位の X 方向成分、(b) は変位の Y 方向成分を示す。さらに(c)には、変形図と共 に、変位の Z 方向成分を示す。同図(a)より、溶接線付近 で X 方向の収縮つまり縦収縮が確認できる。また、同図 (b)より、溶接線の上部より下部の方が上方に移動してお り、横収縮の発生が確認できる。その値に注目すると、終 端部ほど大きく収縮していることが確認できる。さらに、 同図(c)からは、単純に縦収縮および横収縮が発生してい るわけではなく、座屈形式の変形の発生が確認できる。

次に、Fig. 4 に Q/h²=20.5~60.4 J/mm³ の 5 通りの入熱パ ラメータに関し、板幅方向端部(Y=3 mm および Y=117 mm)における横収縮分布を、Fig. 5 および Fig. 6 に入熱パ ラメータ 3 通りに関し、溶接方向端部(X=3 mm および X=117 mm)における縦収縮分布と、溶接線方向中央部 (X=60mm)における面外方向変位分布をそれぞれ示す。い







ずれのケースも溶接線上を除く部分については、提案シ ステムによる結果と、ノギスおよびレーザー変位計によ る測定結果が良好に一致していることがわかる。その差 は最大で 0.03mm であり、ノギスの器差が±0.03mm であ ることからも、提案システムにより、高精度に変形計測 ができることがわかる。また、Fig. 4 の横収縮分布からは、 熱量ごとの終始端部の影響、Fig. 5 からはノギスでは測定 することのできない 0.01mm 以下の単位での縦収縮分布、 Fig. 6 からは熱量ごとの角変形の大きさおよび分布が計 測できることもわかる。

X 方向中央部での入熱パラメータ Q/h²ごとの横収縮量 を Fig. 7 に、角変形量を Fig. 8 に示した。Fig. 7 より入熱 パラメータと横収縮量がほぼ比例関係にあることが確認 できる。また、全入熱パラメータにおいて提案システム による結果とノギスの結果が良好に一致していることが 確認できる。Fig. 8 より、角変形量 θ は、Q/h²=9.92,12.31 J/mm³ あたりをピークとする山型の曲線を描くことがわ かる。ピークを過ぎると、それより大きい入熱量では角 変形量 θ が徐々に小さくなり、最も大きい入熱量

(Q/h²=60.4 J/mm³)で再び大きい値をとっている。この 理由は、裏板に熱伝導性の良い銅板を用いているためだ と考えられ、その吸熱効果に起因して、裏面と表面間の温 度差が大きくなり、角変形が生じやすくなったためと考 えられる。なお、△印で示すレーザー変位計の結果とは良 好に一致していることが確認できる。

4.溶接固有変形推定法

4.1 逆解析手法による固有変形の同定

固有変形が既知であれば、①変位-ひずみ関係、②応 カーひずみ関係、③つりあい方程式の3つの方程式を適 切な境界条件下で解くことで、弾性解析により変形を計 算することができる。そこで、固有変形の分布関数が、 有限個のパラメータで表せると仮定すると、溶接によっ て生じる変形が計測できれば、簡便に固有変形を同定で きると考えられる。そこで、本節では、計測点の三次元 座標から、簡便に固有変形を同定する逆解析法について 説明する。

(1) 固有変形の定義

溶接変形として、縦収縮 δ^{*i}_{x} 、横収縮 δ^{*i}_{y} 、縦曲り θ^{*i}_{x} 、横曲り(角変形) θ^{*i}_{y} の4成分を考える。ここで Fig.9 に、溶接線方向の固有ひずみ \mathcal{E}_{x}^{*i} と板幅方向の固有ひずみ \mathcal{E}_{y}^{*i} の Y-Z 断面での分布図(概念図)を示す。固有変形は、 同図に示した固有ひずみ $\mathcal{E}_{x}^{*i}, \mathcal{E}_{y}^{*i}$ の積分値として、次のよ うに定義する。

$$\delta_{x}^{*i} = \int \varepsilon_{x}^{*i} \, dy dz \, / \, h$$

$$\delta_{y}^{*i} = \int \varepsilon_{y}^{*i} \, dy dz \, / \, h$$

$$\theta_{x}^{*i} = \int \varepsilon_{x}^{*i} \, (z - h/2) \, / (h^{3} \, / \, 12) \, dy dz \qquad (5)$$

$$\theta_{y}^{*i} = \int \varepsilon_{y}^{*i} \, (z - h/2) \, / (h^{3} \, / \, 12) \, dy dz$$

(2) 固有変形の近似

固有変形は、十分に長い溶接の場合、始終端部を除け ば溶接線方向にほぼ一様に分布することが知られている。 本研究で用いる逆解析の理論では、固有変形 4 成分の分 布は、溶接線方向に一様に分布すると仮定する。 (3) 固有変形のパラメータ

各固有変形の分布関数が n 個のパラメータで表される とする。本研究では、前述の通り、固有変形を 4 成分と 仮定しているため、4n となる。

(4) 変形計測点数の条件

溶接前後の三次元座標を計測した点数をmとする。剛体変位を考慮し、計測点3点を頂点とする基準三角形を定める。基準三角形の3点の変位により、まず3条件を得る。その他の計測点に関しては、基準三角形の2点からの距離の変化により、2(m-3)条件を、基準三角形が作る面からの垂直距離の変化により、(m-3)条件が得られ、計



Fig. 10 Flow of measuring method to Fig. 11 FEM model for inverse analysis estimate inherent deformation

(3m-6)条件が得られる。そのため、 $(3m-6) \ge 4n$ が必要 条件となる。固有変形パラメータ n の数が多いほど、多 くの計測点が必要となる。

(5) 固有変形の同定

固有変形 a^*_i を用いて有限要素法で計算した変形量を $F_j(a^*_i)$ 、計測された三次元座標を用いて直接計算した変 形量を U_i とすると、次式が成り立つ。

$$F_j(\boldsymbol{a}^*_i) = \boldsymbol{U}_j \tag{6}$$

ただし、仮定した固有変形のパラメータをi(i = 1 - 4n)、 計測点より得られた条件をj(j = 1 - 3m - 6)とする。一般的 に、有限要素法を用いて計算した値と計測変位の間には 誤差があるが、最小二乗法により最確値である固有変形 $a^*_i \delta x$ める。

5. デジタルカメラを用いた溶接固有変形の推定

本章ではデジタルカメラを用いて計測した溶接変形の 結果を用いて固有変形を同定する。また、その精度を調 べるために、同定した固有変形よりFEM弾性解析を行い、 溶接変形を推定する。Fig. 10 に画像解析により得られた 3 次元変位から溶接固有変形を推定する手法の流れ図を 示す。

5.1 解析条件

3.2 で示した全長溶接の変形計測結果である、入熱パラ メータ Q/h²=2.78~14.69 J/mm³の計測結果を用いて解析 を行った。Fig. 11 に示す 40×40=1600 要素、1681 節点で 構成される弾性シェルモデルで解析を行う。デジタルカ メラによる溶接変形計測の結果は、X,Y,Z 方向それぞれに つき約 3 万個の変位データがあるが、これを 1681 個のデ ータに線形補間し、計測点数 m とした。同図に示す三角 形は 4.1(4)で述べた剛体変位を取り除くための基準三角 形である。材料定数は、ヤング率 E=210GPa、ポアソン比 v=0.3 を用いた。

5.2 逆解析を用いて同定した固有変形

Fig. 12 に、入熱パラメータ Q/h²=5.16J/mm³ の場合のデ ジタルカメラを用いた溶接変形計測結果を示す。この計 測結果を用いて逆解析を行い、4 成分の固有変形を同定し た。さらに、同定した固有変形から固有ひずみを求め、 前節で述べた解析モデルおよび境界条件でFEM 弾性解析 を行うことにより、溶接変形を推定した。その結果を Fig. 13 に示す。これらより、両者の変形の値は概ね一致して いることがわかる。これは、固有変形 4 成分が良好な精 度で同定されていることを示している。このことから、



Fig. 13 Predicted deflection by inverse analysis using the result of digital image correlation

デジタルカメラを用いて溶接前後の画像を撮影し、試験 片の各点における変位が計測できれば、逆解析を用いて 簡便に固有変形を同定可能であることがわかる。さらに、 同定した固有変形を初期ひずみとする固有ひずみを用い た弾性解析により、弾塑性解析を用いずに、構造物ある いは部材の溶接変形を解析することができる。

6. 結言

本研究では、デジタル画像相関法を基にするステレオ 画像法による溶接変形計測システムを開発し、この計測 方法を用いて固有変形を簡易的なおかつ高精度に同定す るシステムを構築することを目的とした。また、同定し た固有変形を用いて FEM 弾性解析を行い、その妥当性に ついて検証した。以下に得られた知見をまとめる。

- ステレオ画像法による溶接変形計測では、縦収縮、横 収縮、面外変形の分布を高精度に計測することができ、 試験片全面に渡る変形の分布特性が得られた。レーザ 一変位計、デジタルノギスと比較した結果、その差は、 0.03mm 程度であった。
- 溶接変形計測システムを用いて、逆解析により固有変 形を同定することができた。FEM 弾性解析を行い、そ の妥当性について検討した結果、十分な精度で固有変 形が同定されていることがわかった。

参考文献

- 畝田道雄、柴原正和、松石正克、石川憲一、岩田節雄、 北村幸嗣:サブピクセル画像処理を用いた構造物の 非接触変形・応力計測法に関する研究,精密工学会誌 360-364,(2006)
- 梁偉、曽根慎二、芹澤久、村川英一: 逆解析を用いた 溶接固有変形の簡易測定法, 関西造船協会講演概要 集, No.22, pp.97-100.
- 3) 梁偉、曽根慎二、村川英一、加藤国男:逆解析を用い た種々の溶接継ぎ手における固有変形の同定,関西 造船協会論文集, No.243, pp.71-77.
- 佐藤邦彦、寺崎俊夫:構造用材料の溶接変形におよぼ す溶接諸条件の影響,溶接学会,Vol.45,No.4,pp.302-308