M05 三次元画像計測を用いた高精度溶接固有変形同定システムの開発

恩田 尚拡 (指導教員 柴原・深沢・馬場・池田)

Development of high accuracy welding inherent deformation identification system using three-dimensional image measurement

by Takahiro Onda

Abstract

The method for analyzing in which FEM elastic analysis that use the inherent strain method is typical as the method of predicting such a welding deformation. It is necessary to know the amount of the inherent deformation to apply the inherent strain method. Inverse analysis is assumed to be a method that handily identifies from the welding deformation experimenting measured. However, a conventional experiment measurement method installed in several points in the measured test specimen, and measured the center coordinates with the contact three-dimensional shape measurement device. Therefore, it takes time and effort to measure, and the obtained measurement data is few, highly accuracy inherent deformation value was not able to be obtained.

Then, the measurement of deformation before and after the welding is done by using the image measurement method to obtain a lot of three-dimensional measurement data at a time for noncontact. And inverse analysis is done based on the result, and a high accuracy inherent deformation is presumed in the present study. In addition, the inherent deformation of each various welding condition is presumed to forecast the welding deformation of a real structure and it has aimed at the establishment of the technique for making it to the data base.

1. 緒 言

溶接は、金属製構造物の優れた接合法として、船、各 種プラント、橋梁、自動車、家電製品など幅広い製品に 適用されている.物理的に溶接は、接合部に集中した熱 を与え、局部的に溶融・凝固させて部品を接合する方法 であるため、溶接変形が必然の結果として生じる.この ような溶接変形は、溶接構造物に様々な影響を及ぼし、 製品の寸法精度や外観を損ねるだけでなく、部材の疲労 強度や座屈強度を低下させる原因となる.このような問 題を解決するためには、溶接変形の定量的予測とこれに 基づく制御が必要となる.基本的に、これらの溶接変形 は.縦収縮、横収縮、縦曲がり、横曲がり(角変形)の 主要な四種類の固有変形により生じていると考える事が できる.

このような溶接変形を推定する方法として,FEM 熱弾 塑性解析や,固有ひずみ法を用いたFEM 弾性解析といっ た解析手法が代表的である.FEM 熱弾塑性解析では溶接 現象を忠実に模擬する逐次解析であるため,得られる結 果は精度が高いものの,膨大な計算時間を要する.さら に,精度の高い溶接変形を求めようとすると,外力に相 当する温度履歴を精度よく求める必要がある.そのため, 正確な溶け込み形状が再現できる入熱分布や,室温から 溶融温度付近までの材料定数の温度依存性に関するデー タが必要となる.また,解析モデルの作成に高度な知識 と経験を必要とするという問題もある.

一方,固有ひずみ法では熱サイクル後に発生する固有 ひずみのみを荷重として付与するため,金属の機械的な 温度特性や物理的な特性,拘束条件,熱源,溶接施工法 など材料特性や溶接時の詳細を知る必要がない.ただし, 固有ひずみ法を適用するには、固有変形量を知る必要が ある.これを、実験計測した溶接変形から同定する方法 として逆解析手法¹⁾⁻⁴⁾が提案されている.しかし、これま での実験計測法は、計測する試験片に数点の円孔を設け、 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 ものであった.そのため、計測に時間と手間がかかる点 が挙げられ、実構造物の溶接変形を予測するための、様々 な条件下での固有変形のデータが不足していた.また、 得られる計測データが少なく、高精度な固有変形値を得 ることができなかった.

そこで本研究では、従来の実験計測法の問題を解決す るために、非接触に、一度に多くの 3D 計測データが得ら れる画像計測法を用いて、溶接前後における変形計測を 簡便に行い、その結果を基に逆解析を実施し、高精度な 固有変形を推定する.すなわち、実構造物の溶接変形を 予測するために、様々な溶接条件ごとの固有変形を簡便 に推定しデータベース化する手法の確立を目的としてい る.

2. 逆解析による固有変形同定手法

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 章では,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.

2.1 **固有変形の定義**

溶接変形は主として、面内方向の固有ひずみ、あるい は塑性ひずみにより生じ、面外せん断ひずみの影響は少 ないと考える.溶接線方向をx、板幅方向をyとすると、 4 成分の固有変形である縦収縮 δ_x^i ,横収縮 δ_y^i ,縦曲がり θ_x^i ,横曲がり θ_y^i は固有ひずみ ε_x^i , ε_y^i を用いて次のよう に定義できる.

$$\delta_x^{*i} = \int \varepsilon_x^{*i} dy dz / h$$

$$\delta_y^{*i} = \int \varepsilon_y^{*i} dy dz / h$$

$$\theta_x^{*i} = \int \varepsilon_x^{*i} (z - h/2) / (h^3 / 12) dy dz$$
(1)

$$\theta_y^{*i} = \int \varepsilon_y^{*i} (z - h/2) / (h^3 / 12) dy dz$$

2.2 固有変形の近似

固有変形は、十分に長い場合、紙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.そこ で、本研究で用いる逆解析の理論では、固有変形の4成 分である、縦収縮、横収縮、縦曲がり、横曲がりの分布 は、溶接線方向に一様に分布すると仮定する.

2.3 固有変形のパラメータ

各固有変形の分布が n 個のパラメータで表されている 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.

2.4 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.剛体変位を取り除くために、Fig.1に示すように、計測点3点(①,②,③)を頂点とする基準三角形を定める.(同図は計測点が10点の場合について示している.)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(3m-6)条件が得られる.そのため、(3m-6) \geq 4n が必要条件となる.固有変形パラメータの数が多いほど、多くの計測点が必要となる.

2.5 固有変形の同定

仮定した固有変形のパラメータを i 個 (i=4n)とし,それ を $\{a *\}_i$ と表す. さらに、計測点の長さおよび距離の変位 量を $\{u\}_i$ (j=3m-6)とすると、

$$\{u\}_{i} = [H]_{ii} \{a *\}_{i} \tag{2}$$

ここで[H]は固有変形と弾性変形の関係を与える弾性応



Fig.1 Measurement point for inverse analysis.

答マトリックスである.変形計測点数の必要条件は,先 に述べたとおり, $(3m-6) \ge 4n$ であるから, $j \ge i$ である. 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.その誤差を $\{e\}$ として,最小二乗法 により最良の解である固有変形を求める.

$$\{e\} = \{u\}_{j} - [H]\{a*\}_{i}$$
(3)

ここで誤差の二乗和を E とし,

$$E = \{e\}^{T} \{e\} = \left(\{u\}_{j} - [H]\{a*\}_{i}\}^{T} \left(\{u\}_{j} - [H]\{a*\}_{i}\right) \right)$$
(4)

 $E o \{a *\}_i に関する1次微分がゼロより,$

$$\left(\begin{bmatrix} H \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} H \end{bmatrix} \right) \left\{ a \ast \right\}_i = \begin{bmatrix} H \end{bmatrix}^T \left\{ u \right\}_j$$
(5)

すなわち固有変形 {a *}; は, 次式より解くことができる.

$$\{a *\}_{i} = ([H]^{T} [H])^{-1} [H]^{T} \{u\}_{i}$$
(6)

2.6 弾性応答マトリクス [H]の導出

弾性応答マトリックスの第k列目の係数,

 ${h_{lk}, h_{2k}, \dots, h_{jk}}^{T}$ は,第ℓ番目の固有変形成分 $A_t \varepsilon 1$ (単位量)とし他の全ての成分をゼロとするベクトル ${a*}_i = {0, \dots, 0, A_l = 1, 0, \dots, 0}_i^{T}$ を仮定した時,固有変形の分布を弾性体に与えるときの弾性体のある節点に生じた変位uの大きさを表す.したがって,[H]マトリックスは有限要素法による弾性解析をi回繰り返すことによって導出する.

3. 溶接固有変形の同定結果

以上で説明した逆解析理論を用いて,溶接固有変形量 を実験計測した溶接変形から同定するために,溶接前後 における三次元座標をFig.2に示されるデジタルカメラ を用いた三次元計測装置を使用した.用いた試験片には, 水性スプレーを塗布することによりランダムパターンを 付与し,画像照合時の照合精度を高める工夫をした.試 験片の長さは120mm,幅は120mmである.また,溶接



Fig. 2 Experimental equipment.

Heat input speed	Thickness	Heat input
v(mm/min)	h(mm)	parameter
		$Q/h^2(J/mm^3)$
		5.16
		7.54
200	2.3	9.92
		12.3
		147

Table1 Welding condition

トーチを等速走行台車に固定し,溶接トーチから試験片 へ安定して入熱されるようにした.溶接法は,TIG溶接 とし,また,溶接条件はTable1に示す通りである.

3.1 解析条件

固有変形は溶接線方向に一様であると仮定する.今回の解析では対象がビードオンプレート溶接であるので, 2.3 節で示した各固有変形のパラメータが n=1 となり,全 固有変形のパラメータは4 となる.また,解析モデルお よび境界条件についてであるが,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,およそ 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,計測点数とした.

3.2 溶接固有変形の同定結果

Table1 に示す全5パターンについて、溶接固有変形の 同定を行った. Fig.3 に同定した溶接固有変形の結果を示 す. 同図より、横収縮の固有変形量に関しては入熱パラ メータが増加するのに伴い増加していることが確認でき る. また, 縦収縮の固有変形量は横収縮の固有変形より も小さいことがわかる.このことは、溶接線方向に比べ て溶接線垂直方向の方が収縮しやすいことから分かる. さらに、縦曲りの固有変形量が横曲がりの固有変形量に 比べて小さいため、横曲りが支配的となっている.また、 Q/h²=5.16J/mm³と Q/h²=14.69J/mm³の場合について,得ら れた固有変形量を用いた弾性順解析および画像解析によ り得られた面外方向成分の変形分布の比較を Fig.4 およ び Fig.5 に示す. 同図より, 両パターンにおいて z 方向の 変形分布が定性的に一致していることが確認できる. さ らに、Fig.6 に横収縮量および角変形量の逆解析と画像解 析の結果の比較を示す. 同図より, 溶接長が増加するの に伴い、横収縮量は増加していることが確認できる.ま た,全てのパターンにおいて横収縮量および角変形量は 逆解析と画像解析の結果がほぼ定量的に一致しているこ とが確認できる.

以上の結果より,提案手法が解析対象であるビードオ ンプレート溶接の溶接固有変形を同定するのに有効であ ることが示せた.また,同図より,一部の溶接条件につ いてではあるが,横収縮および角変形に関する,一種の 固有変形データベースを作成できていることが分かる.







しかし、本手法では、2.4節で示した基準三点の選出の 仕方によって、溶接固有変形の精度が極端に変化すると いう問題点が挙げられることが研究を進める過程で確認 できている.そのため、精度良く固有変形を求めるには、 何度も手動で基準三点を選出する必要があり、多大な時 間がかかってしまう.そこで、次節ではより高精度に溶 接固有変形を同定するために最適な基準三点を効率よく 選出する方法として遺伝的アルゴリズムを用いることが 有効であると考えたため、遺伝的アルゴリズムを用いた 固有変形の同定手法について説明する.

3.3 遺伝的アルゴリズム (GA)

GAは、適用範囲の広い、生物の進化を模倣したアルゴ リズム⁵⁾である.解の探索には、設計変数を2進数などに コード化した遺伝子を用い、突然変異や個体の交叉によ り遺伝子の組合せが偶然の要素をもって発生し、それが 環境に適合すれば増殖し、そうでなければ消滅するとい うメンデルの遺伝法則のメカニズムを工学的に取り入れ、 問題(環境)に対する適合度の良い個体をコンピュータ ーで生成しようというものである.現在、多くの適用例 がその有益性を十分語っており、今後飛躍的な発展が期 待される手法である.本解析は数多くある GA の種類の 中から、基本的である単純 GA を元にして、最適化計算 を行った.以下に手順の概要を示す.

- 制限範囲内の設計変数値をもつ遺伝子を、乱数を用いてN個作成し、初期集団を形成する.ただし、制約条件を満たすものとする.
- ② 次世代集団の親となる遺伝子を「選択」する.
- ③ 選択した遺伝子をある確率で「交叉」させ.制約条 件を満たす新しい遺伝子を作成する.
- ④ ③で作成された遺伝子をある確率で「突然変異」させ、遺伝子を変化させる.ただし、制約条件を満た



すものとする. (次世代集団の形成.) ⑤ ②から④を,終了条件を満たすまで繰り返す.

ただし、今回の設計変数は基準三点のそれぞれの x, y座 標の6種類であるため、遺伝子も6種類作成し、それら から1つの目的関数値が定まるようにした.また、「選 択」は「ルーレット選択」、「交叉」は「一様交叉」、 「突然変異」は「ビット反転」を採用した.

3.4 最適化計算結果

3.4.1 解析条件

GA で使用するパラメータを以下に示す.遺伝子個体数 は 200 個,世代数は 1000 世代,遺伝子長は 24,交叉確率 は 0.3,突然変異確率は 0.01 と設定した.また,最適化す る(最小化する)目的関数としては,設計変数である基 準三角形の座標を用いて逆解析した解析結果と画像解析 結果の三次元変位量の残差自乗和を採用した.さらに, 設計変数である基準三点のそれぞれの x, y 座標の初期値 は,それぞれ,試験片の大きさである 0~120 mm の範囲 で乱数を用いて与えた.

3.4.2 最適化計算結果

溶接条件が Q/h²=5.16J/mm³ と Q/h²=14.69J/mm³の場合 について, GA を用いて計算を行ったときの収束までの目 的関数値の最小値の履歴を Fig.7 に示している. 図中の破 線は3.2節で示した、手動で選定した比較的残差が小さく なると思われる試験片の端部近傍の三点を用いて逆解析 した結果と画像計測結果の残差自乗和を示している.同 図より、目的関数値の最小値が、両パターンで 3.2 節の残 差自乗和結果よりも小さい値に収束していることが確認 できる.次に、Fig.8 に同定した溶接固有変形の結果を示 す. Fig.3 と Fig.8 を比較すると、固有変形量が全く違う ことが確認できる.特に、横曲りと縦曲りの固有変形量 を見るとさらに、Fig.8 では縦曲りが横曲りの固有変形量 よりも大きく支配的になっている.また,以上の手法を 用いて選出した最適な基準三角形を用いて算出した溶接 固有変形を使って弾性順解析した結果と画像解析結果を 比較する.

Fig6 と同様に, Fig.9 に, GA を適用した逆解析により 得られた固有変形量を用いて弾性順解析して算出された 変形量と画像計測により得られた変形量とを比較を示す.



Fig.7 Minimum value of object function.



Fig.8 Inherent deformation.



Fig.9 Comparison between inverse analysis and image analysis.

これらの図より, Table1 に示す全てのパターンにおいて 横収縮量および角変形量は逆解析と画像解析の結果がほ ぼ定量的に一致していることが確認できる. さらに, こ れらの図は, GA を用いて固有変形を同定する際の最適な 基準三角形を選出することにより, 効率的かつより高精 度にビードオンプレート溶接における固有変形を同定す ることが可能であることを示唆している.

4. 結 言

本研究では、三次元画像計測を用いた溶接固有変形同 定システムを開発し、様々な溶接条件の溶接固有変形を 高精度に同定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、本手法の妥当性に ついて検証を行った.さらに、遺伝的アルゴリズムを逆 解析手法に適用し以下の知見を得た.

- 三次元画像計測法をビードオンプレート溶接変形計 測に適用し、算出された変形データを用いて溶接固 有変形を同定するシステムを構築することができた。
- 2) 逆解析手法を用いて同定した溶接固有変形を使って FEM 弾性順解析を実施し、三次元画像計測により算 出された三次元変位データと比較することにより、 高精度に固有変形が同定できていることが確認で きた.さらに、一部の溶接条件についてではあるが、 固有変形を用いたデータベースを作成可能である ことを示した.
- 3) 遺伝的アルゴリズムを用いて、逆解析で固有変形を 同定する際の最適な基準三角形を選出することに より、効率的より高精度にビードオンプレート溶接 における固有変形を同定することが可能になった.

参考文献

- 梁偉,曽根慎二,村川英一,加藤国男:逆解析を用 いた種々の溶接継手における固有変形の同定,2005, 関西造船協会論文集,第243号,pp71-77.
- 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,2004,関西造船協会春季講演会論文集,97-100.
- 3) 芹澤久,山本隆夫,梁偉,村川英一:逆解析による アルミニウム合金溶接継手の固有変形同定および実 構造部材の溶接変形推定,2007,溶接学会全国大会 講演論文集,第81集,pp124-1251.
- 4) 松本直博:逆解析手法を用いた残留応力予測法に関する研究,大阪府立大学大学院修士論文
- 5) 伊庭斉志:遺伝的アルゴリズムの基礎~GAの謎を解 く~,オーム社,1994