溶接組立変形シミュレーション —切断から歪取まで—

Prediction of Welding Distortion during Assembly Process from Cutting through Straightening

村川英一・大阪大学接合科学研究所

Hidekazu Murakawa, Joining and Welding Research Institute, Osaka University

Key Words: Welding Distortion, Prediction, Inherent Deformation, Elastic FEM, Cutting, Forming, Straightening

論文要旨

鋼構造物のほとんどは熱切断された部材を溶接により順次組み合わせることにより製作される。したがってこうした溶接構造物の変形を抑え十分な寸法精度を確保するためには、切断から歪取までの各段階における変形を予測する技術が必要となる。本研究では、固有ひずみの概念と部材間の結合状態を表現する界面要素を用いた溶接組立変形シミュレーション法を開発した。

1. 緒言

船、自動車、車両、橋梁、化学プラント、発電機器など多くの工業製品は、ガス、アーク、プラズマ、電子ビーム、レーザーなどの熱源を用いた切断、曲面成形、溶接、歪取という一連の工程により製作される。一方、熱加工により生じる局部的な収縮は製品全体の変形の原因となる。このような変形を事前に予測し、これを低減するための対策を検討するための道具として著者らは固有ひずみの概念と界面要素を用いた溶接組立変形予測を目的とした有限要素法を開発した。固有ひずみの概念は固有応力、固有変形および固有力の概念と密接に関連しており、溶接における固有ひずみで、拘束が小さい横収縮は変形として現れ拘束が大きい縦収縮は応力あるいは力として現れる。このことは固有変形と固有力の両者を適宜併用するのが自然であることを意味し、この考え方と界面要素を用いて構築された溶接変形予測法について述べる。

2. 固有ひずみ、固有応力、固有変形、固有力

全ひずみ ε は、弾性ひずみ ε^e 、塑性ひずみ ε^p 、熱ひずみ ε^T 、クリープひずみ ε^c および相変態によるひずみ ε' から構成される。すなわち、

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^T + \varepsilon^c + \varepsilon' \quad (1)$$

ここで、変形および応力はそれぞれ全ひずみ ε と弾性ひずみ ε^e に対応付けられることから式(1)は次のように書き直すことができる。

$$\varepsilon - \varepsilon^e = \varepsilon^p + \varepsilon^T + \varepsilon^c + \varepsilon' = \varepsilon^* \quad (2)$$

式(2)の右辺の非弾性ひずみの和を固有ひずみ ε^* と定義すると、この式は、固有ひずみにより変形と残留応力が作られることを示している。さらに、薄板の場合に注目すると、変形および残留応力は、主として溶接線方向の固有ひずみ ε_x^* と溶接線に垂直方向の固有ひずみ ε_y^* により作られる。

固有ひずみに応力-ひずみ関係を適用すると、形式的に固有応力 σ_x^* 、 σ_y^* が定義される。

$$\sigma_x^* = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x^* + \nu \varepsilon_y^*)、\sigma_y^* = \frac{E}{1-\nu^2} (\nu \varepsilon_x^* + \varepsilon_y^*) \quad (3)$$

また、固有ひずみを溶接線に垂直な断面について積分し板厚 h に関する平均をとることで固有変形、すなわち、縦収縮 δ_L^* 、横収縮 δ_T^* 、縦曲り θ_L^* 、横曲り θ_T^* が定義される。

$$\delta_L^* = \frac{1}{h} \int \varepsilon_x^* dx dz、\delta_T^* = \frac{1}{h} \int \varepsilon_y^* dx dz、\quad (4)$$

$$\theta_L^* = \frac{1}{I} \int z \varepsilon_x^* dx dz、\theta_T^* = \frac{1}{I} \int z \varepsilon_y^* dx dz$$

ここで、 $I = \frac{1}{12} \int z^2 dx dz$

同じ矩形板の収縮を固有ひずみおよびこれと等価な固有変形で表現したものが図 1、2 である。さらに、式(4)で定義された固有変形を力あるいはモーメントに変換することにより固有力 F_L^* 、 F_T^* と固有モーメント M_L^* 、 M_T^* が定義される。

$$F_L^* = E \int \varepsilon_x^* dx dz = Eh \delta_L^*、F_T^* = E \int \varepsilon_y^* dx dz = Eh \delta_T^*、\quad (5)$$

$$M_L^* = E \int z \varepsilon_x^* dx dz = EI \theta_L^*、M_T^* = E \int z \varepsilon_y^* dx dz = EI \theta_T^*$$

3. 固有ひずみ、固有変形、固有力の有限要素法への導入

溶接構造物の組立工程は、切断、曲げ加工、溶接、歪取から構成され、いずれも熱加工であり、切断、溶接などでは固有ひずみが線状に集中して分布し、曲げ加工では広範囲に分布するため、前者は固有変形として、また後者は固有ひずみとして有限要素法に導入することができる。また、拘束が小さい横収縮は変形として現れ、拘束が大きい縦収縮はほとんどが応力あるいは力 (Tendon Force) として表れるので横収縮および縦収縮に対して固有変形と固有力を図 3 のように適宜選択して用いるのが自然である。ここで注意すべき点は、図 1 あるいは図 2 に示された固有ひずみの縦収縮成分と等価な縦収縮を表現するためには、図 3 (b) に示されるように固有力に加えてポアソン比による横方向への膨張を打消すための横方向の固有変形を重ね合わせる必要があるという点である。溶接線に接した要素に溶接による局部収縮を固有変形および固有力 (Tendon force) の組合せとして導入する方法をより具体的に示したものが図 5 である。

図 1 固有ひずみを用いた収縮の表現 図 2 固有変形を用いた収縮の表現

このように固有ひずみ、固有変形、固有力をそれぞれの特徴を活かして適宜選択的に用いることにより、効率的なFEM計算手法が構築できる。

4. 切断、接合、ギャップ、ズレの表現

溶接構造物の組立変形は熱による局部収縮が主たる原因の一つであるが、部材を順次組付けて行く際に生じる部材間のギャップやズレも重要な要因である。提案手法ではギャップやズレを表現するとともに、部材間の切断・接合を表現するために部材間に図5に示される非線形パネである界面要素を導入した。また、界面要素の特性は図6に示されるように、剛性 K 、結合強度 $f_{\max}$ 、ギャップ u_G をパラメータとして表すことができる。

(a) 横収縮 (b) 縦収縮
図3 固有変形と固有力を用いた収縮の表現

図4 要素における固有変形および固有力

図5 界面要素および界面における相対変位の定義。

図6 部材間の結合関係を表現する界面要素の特性

5. 切断から歪取までの一貫解析

著者らが提案する有限要素法は溶接や線状加熱などの熱加工による局部収縮を固有変形や固有力で表現し、部材間の切断・接合を界面要素により表現しているため、図7に示されるように熱切断から歪取までの全溶接組立工程を一貫解析することができる。

6. 船のブロック搭載による縦曲り変形の予測

ブロック工法により建造される船は、ブロックを順次搭載するため結果的に船首尾が反り上がるように変形する。これを具体的に示したものが図8であり、最終的に30 mm程度の変形が生じる。このような縦曲り変形は、ブロックを搭載して行く過程で生じるブロック間のずれやギャップが累積し生じるものであり、界面要素を用いることによりこれを考慮した変形予測が可能となる。

図7 切断から歪取までの一貫解析

(a) ブロック分割図

(b) ブロック搭載の初期段階

(c) ブロック搭載の中間段階

(d) ブロック搭載完了時

図8 ブロック搭載による縦曲り変形の予測