

社会インフラ製品群では製造プロセス全体に占める溶接工程の割合 が非常に大きい。グローバルな調達・生産活動の進展に伴い,溶 接品質の維持や溶接能率の向上が重要となっている。日立グループ は、大型構造物の溶接シミュレーション技術を開発し,溶接の出来 栄えを事前に予測することにより,溶接手順などの施工要領や溶接 治工具の設計・配置を適正化することで,溶接構造物の高信頼化, 生産期間短縮に取り組んでいる。

1. はじめに

電力プラントや産業プラント機器,建設機械,鉄道車両 などの製品群では、大型の溶接構造が多く用いられてお り、製造プロセス全体に占める溶接工程の割合が非常に大 きい。溶接部位も複数箇所であることがほとんどである が、その溶接手順や、溶接によって生じる変形を抑制する ための拘束治具の設計・配置は経験的に決められているこ とが多く、溶接後の修正作業にも多くの時間を要してい る。素材の調達や生産拠点の多様化が進むと、材料特性の 変化による溶接品質のばらつきや、溶接作業者の経験不足 による不良の発生なども懸念される。このような課題を解 決するために、溶接品質(出来栄え)をシミュレーション で予測し、適正な材料仕様や施工要領を提示することが可 能な支援システムの開発を進めている。

ここでは,社会インフラ製品の高品質・高効率生産を支 える溶接シミュレーション技術について述べる。

2. 溶接シミュレーションの技術動向

溶接は極めて複雑な現象であり、学問としての体系化が 難しいため、すべての溶接現象や溶接結果などの予測は、 一つのシミュレーション手法で解決できるものではない。 そのため、検討対象によってさまざまなシミュレーション 手法が用いられている。

2.1 溶接シミュレーションの発展概要

溶接シミュレーションにおける主な研究対象および解析 技術を図1に示す。代表的な溶接シミュレーションの手法 としては、大きく分けると、有限要素法 (FEM: Finite Element Method) などによる溶接変形・応力のシミュレー ション¹⁾, 粒子法 (SPH: Smoothing Particle Hydrodynamics) などによる溶接プロセス・現象のシミュレーション²⁾、 フェーズフィールド法 (PFM: Phase Field Method) など による溶接部組織・特性シミュレーション³⁾の三つがある。 有限要素法や粒子法は,基本的に力学的視点から連続体の 方程式を数値的に解くための離散化手法である。フェーズ フィールド法は熱力学的視点から材料内部の組織変化や元 素偏析現象をシミュレーションする手法である。1970年 代から始まった変形・応力シミュレーション技術は、計算 精度と計算速度が大幅に向上し、幅広い分野で適用されて いる。近年、粒子法による物質の流れ現象を含む溶接プロ セスのシミュレーションや、フェーズフィールド法による 材料内部で生じるさまざまな組織変化過程のシミュレー ションの研究が注目されている。



溶接における変形・応力、プロセス・現象および組織・特性などの解析対象 によって、さまざまなシミュレーション手法が用いられている。

2.2 日立グループにおける溶接シミュレーションの研究現状

日立グループは、これまでに有限要素法による伝熱―構 造解析をベースとして、実製品の材質、構造、適用環境な どの特性を考慮した材料物性値のデータベースや、解析の 高速化・高精度化手法を開発し、実製品の溶接変形、溶接 部の残留応力、き裂伝播(ぱ)予測および寿命評価などを 行ってきた^{4)、5)}。最近では、粒子法やフェーズフィールド 法による溶接プロセスや溶接組織・特性などのシミュレー ション技術も積極的に取り入れ、有限要素法と融合した溶 接統合シミュレーション技術の開発に取り組んでいる。

ここでは、大型構造物の溶接変形シミュレーション技術 の開発状況および適用例について紹介する。

3. 溶接変形シミュレーション技術開発の取り組み

3.1 溶接変形シミュレーションの基本手法

有限要素法による溶接変形のシミュレーションは、大き く分けると熱弾塑性法(TEP:Thermo Elastic Plastic)と弾 性解析の固有ひずみ法(Inherent Strain)の二つがある。熱 弾塑性解析は、解析対象とする溶接構造物において、溶接 中の熱履歴を非定常熱伝導解析から求め、次に熱弾塑性解 析によって溶接中のひずみと応力の履歴を解析する方法で ある。この方法は、溶接開始から完了までの過程を細かい 時間間隔で解析するため、実溶接に近い熱履歴と変形履歴 を忠実に模擬するもので、高精度なシミュレーションが可 能になる。しかし、大型溶接構造物の場合、移動熱源の解 析および熱弾塑性解析に長時間の計算時間を必要とするた め、現実的には適用が困難なケースも多い。

固有ひずみ法による溶接変形の解析は,溶接部およびそ の近傍に生じた固有ひずみを溶接構造物に与え,弾性解析 により溶接変形を計算する方法である。溶接によって生じ る固有ひずみは,見かけのひずみから弾性ひずみを引いた 値であるが,固体力学の範囲では残留塑性ひずみと等し い。固有ひずみは,溶接実験から得られた計測ひずみ,あ るいは局部モデルの熱弾塑性解析によって求められた塑性 ひずみから得られる。固有ひずみ法を用いれば構造物の変 形は弾性解析のみで解析することができるため,計算時間 が大幅に短縮できる。しかし,実溶接の履歴を追跡できな いため,高精度なシミュレーションについては限界がある。

3.2 大型溶接構造物の変形シミュレーションの高度化

日立グループは,実製品に適用可能な大型構造物の変形 シミュレーション手法を開発している。これまで,実製品 のニーズと目的に応じて適切なシミュレーション手法を選 定し,実験・計測の技術に加え,解析モデルの最適化技術 を開発した。さらに,大学との共同研究を通じて,高精度 化と高速化を両立できる変形シミュレーション手法の開発 にも取り組んでいる。

溶接箇所が少なく,施工条件の適正化が要求される大型 構造物の変形シミュレーションは,熱弾塑性法の適用が望 まれるが,計算時間の短縮手法が課題になる。そこで,固 有ひずみ法の弾性解析手法をベースとし,溶接部および近 傍の熱弾塑性解析と構造物全体の弾性解析を連携すること によって解析時間の短縮を図った。さらに,実構造物の特 徴を考慮し,解析モデルの構築において,熱弾塑性解析が 必要な領域に三次元ソリッドモデルを適用し,弾性解析が 必要な領域には二次元シェルモデルを適用する。さらに, 解析精度を向上させるために,検証実験による材料の特性 や固有ひずみを計測して解析モデルに反映し,解析条件の 適正化を図った。

このような多様な手法の融合により、高精度、高速な大型溶接構造物の変形シミュレーションを実現できた。一例 として大型構造物の溶接変形シミュレーションの計算結果 (変形分布図)を図2に、従来の熱弾塑性法と開発した解 析手法との比較を図3に示す。

溶接箇所が多く、かつ継手形状と溶接条件が同じ溶接部



図2 | 大型溶接構造物の変形シミュレーション例 大きさは半径約3 m, 高さは約1.2 mである。



注:略語説明 TEP (Thermo Elastic Plastic)

図3 従来手法と開発手法の比較

従来手法に比べ,開発手法の精度を10%以上向上させ,解析時間を約30% 短縮させる。 feature

e articles



図4 実験検証用溶接構造体

厚さ6 mmの板材 [図中(1)~(5)] を溶接した長さ1,200 mm,幅600 mmの 構造体の外観を示す。溶接後に約100 mmの大変形が生じている。



図5 固有ひずみ法の解析結果

大変形を考慮した非線形の固有ひずみ法の適用により,実験で生じた大変形 を高精度に再現できる。

を複数有する溶接構造物の変形シミュレーションについて は、固有ひずみ法を適用し、解析精度の向上に注力した。 解析精度に影響する要因は、溶接施工によって生じる固有 ひずみ分布と構造体の力学的固有特性である。高精度な固 有ひずみを得るために、実験検証と連携した熱弾塑性法を 用いてひずみ分布を計算している。構造体の力学的固有特 性については、ほかの手法を用いて大変形が発生する可能 性を評価し、その結果によって線形または非線形の固有ひ ずみ法を適用する。

大変形を考慮した固有ひずみ法の一例を図4と図5に示 す。試作した溶接構造体は、厚さ6mmの板材〔図4(1)~ (5)〕を溶接した長さ1,200mm,幅600mmのものである。 溶接後に約100mmの大変形が生じていることがわかっ た。このような構造物に対し、熱弾塑性法の計算では時間 がかかるため、固有ひずみ法を適用した。しかし、従来の 固有ひずみ法は線形解析手法であり、大変形の現象を再現 できず、解析結果と実測値の誤差は90%にもなる。

一方,構造体の力学的固有特性を解析した結果を反映 し,大変形を考慮した非線形の固有ひずみ法を適用した場 合には,実験で生じた大変形を高精度に再現できた。大変 形を考慮した解析結果を図5に示す。変形傾向および最大 変形量とともに,解析結果は実験結果と一致していること を確認した⁶⁾。

4. 溶接変形シミュレーションによる生産プロセスの高度化

ここでは,大型構造物の溶接変形シミュレーション技術 の適用例を紹介する。

4.1 大型構造物溶接拘束治具の削減

原子力プラントの大型炉内構造物(ステンレス製品)の 溶接変形を抑制するため、大型拘束リングを取り付けてい るが、前述した溶接シミュレーション技術を用い、溶接変 形に及ぼす拘束条件の影響について検討を行った。その結 果から、溶接構造物の製造時に使用する拘束冶具の適正化 (治具の簡略化や削減)を行い、組立工数を低減すること で生産プロセスの合理化を図った(図6参照)。

4.2 溶接変形の低減例

施工工数の短縮(溶接変形の矯正時間の削減)および溶 接品質(溶接変形の観点)の向上のため,溶接シミュレー ション技術を用い,溶接変形に及ぼす溶接施工順序および 溶接施工方法の影響について検討した事例を紹介する。

厚板縦溶接を検討対象とし,溶接時に生じる溶接変形の 予測と変形対策の合理化を目的として,移動熱源の熱弾塑 性解析法により,溶接パス順序と溶接方向が溶接変形に与 える影響を検討した。解析結果から,溶接変形が最小とな



図6 | 大型構造物の溶接変形解析例 溶接変形を抑制するための大型拘束治具の取り付け作業を低減することがで きる。



図7 | 溶接変形の低減事例 溶接積層順序による溶接変形の低減を図る。

る方法で溶接を実施したところ,溶接変形の実測結果と解 析結果が精度よく一致することを確認した(図7参照)。

さらに、炉内構造物のレーザ溶接技術の開発において も、このシミュレーション技術を適用し、アーク溶接時の 変形との比較、レーザ溶接パス順序などの変形量に及ぼす 因子について検討を行い、溶接変形シミュレーション技術 の有効性を確認した。

5. おわりに

ここでは,社会インフラ製品の高品質・高効率生産を支 える溶接シミュレーション技術について述べた。

溶接は幾つもの現象が複雑に絡み合う過渡的なプロセス であり、その過程を完全にシミュレートすることは難し い。しかし、近年の技術進展により、溶接によって生じる 応力や変形を工業的に実用的な精度と計算時間で解析する ことは可能となっており、今後、設計・生産の支援ツール として適用が拡大すると考えられる。また、現時点では研 究開発段階であるが、溶接過程で発生する欠陥をシミュ レーションで事前に予測し、溶接部の設計や施工要領を適 正化する仕組みも必要とされている。

今後も解析主導による溶接設計・プロセス開発の高度化 をめざし、溶接CAE (Computer Aided Engineering) シス テムの構築を進めていく。

参考文献

- 1) 村川:溶接組立変形の計算科学,溶接学会誌, Vol. 81, No. 1 (2012.1)
- R. Das, et al.: Application of SPH for Modelling Heat Transfer and Residual Stress Generation in Arc Welding, Materials Science Forum, Vol.654-656 (2010.6)
- 福元,外:マルチフェーズフィールド法を用いたSUS304のミクロ組織形成の予測, 溶接学会論文集, Vol. 29, No. 3 (2011.8)
- 4) 柳田,外:溶接後熱処理の応力緩和シミュレーションに必要なクリープ特性に関する研究,溶接構造シンポジウム2011講演論文集,337-340 (2011.11)
- 5) 岩松,外:原子炉圧力容器底部の溶接残留応力場におけるSCCき裂進展評価,溶接 学会全国大会講演概要, Vol. 88, 196-197 (2011.3)
- J. Wang, et al.: Analysis of Twisting Distortion of Thin Plate Stiffened Structure Caused by Welding, 溶接構造シンポジウム2011講演論文集 (2011.11)
- 7) 張,外:大型構造物円周溶接の変形解析結果に及ぼす解析条件の影響に関する検討, 溶接学会全国大会講演概要,Vol. 85,66-67 (2009.9)

執筆者紹介



2007年日立製作所入社,日立研究所 材料研究センタ 環境材料プロ セス研究部 所属

現在,接合技術の研究開発に従事 工学博士

溶接学会会員、レーザ加工学会会員、Laser Institute of America会員

塚本 武志



1997年日立製作所入社,日立研究所 材料研究センタ 環境材料プロ セス研究部 所属 現在,接合技術の研究開発に従事 工学博士 溶接学会会員

多羅沢 湘



2002年日立製作所入社,日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力製造部 所属 現在,溶接技術の開発取りまとめ業務に従事 工学博士 溶接学会会員

三浦 雄一



1986年日立製作所入社,日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所原子力製造部所属 現在,原子力プラント機器の生産技術業務に従事