第Ⅱ部 溶接・接合工学の最近の動向

III 継手性能の評価

5. 溶接変形および残留応力評価

芹 澤 久*

Evaluation of Welding Distortion and Residual Stress

by SERIZAWA Hisashi*

キーワード：溶接，接合，変形，残留応力，予測，シミュレーション，測定，精度管理

5.1 はじめに

橋梁や船舶などの鋼構造物だけでなく，自動車・二輪車や車両などの構造物の製造においては，溶接・接合も含めて様々な熱加工が必要不可欠である．しかしながら，これらの熱加工は溶接をはじめとして，局所的に熱を与えるプロセスのため，変形だけでなく残留応力をも生成し，構造物製造時の寸法精度管理に問題が生じるだけでなく，製造後の構造物の強度にも影響を及ぼす．したがって，熱加工による変形ならびに残留応力の予測が必要不可欠である．これらを予測する手法としては，試作と計算機シミュレーションが考えられるが，近年の計算機演算速度の高速化にともない，有限要素法などを用いたシミュレーションが積極的に行われている．

5.2 溶接変形

5.2.1 熱弾塑性解析

溶接をはじめとする熱加工のほとんどは非定常現象であるため，溶接変形や残留応力を精度良く推定するためには，溶接プロセス現象に基づいたビード生成および溶融溶接金属から母材への熱伝導を考慮した解析が必要不可欠である．また溶接では，熱による力学的特性変化だけでなく，相変態などの材料組織変化も生じる．これらの影響を考慮するためには，溶接時の非定常温度場と，それにともなう応力－ひずみ場の変化を時々刻々，連成して解析する熱弾塑性解析が必要不可欠である．しかしながら通常の熱弾塑性解析では，非定常温度場解析に対して，弾塑性解析に要する解析時間の方がはるかに長いいため，非定常温度場解析を行った後，得られた温度場に基づいて弾塑性解析が行われている．したがって，溶接変形や残留応力の高精度な推定のためには，まず非定常温度場解析結果が，実際の溶接現象に対応していることが必要不可欠であり，入熱モデルや溶け込み形状が解析

結果に及ぼす影響について検討した結果が報告されている^{1, 2)}．また弾塑性解析においても，降伏条件（特に高温域：鉄鋼材料の場合は700℃以上）が正確に満たされていないければ，溶接変形の推定精度が悪くなることが報告されている³⁾．

また溶接変形を制御・低減することにより，橋梁，造船および建設機械などの鋼構造物の溶接施工時におけるエネルギー使用量の低減と溶接精度の向上を目的に，（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の地球温暖化防止新技術プログラムの一環として，「省エネルギー型鋼構造接合技術の開発プロジェクト」が，平成15～17年度の3ヵ年で実施された．このプロジェクトは，従来よりも溶接変形の少ない溶接材料を開発するとともに，その溶接材料の溶接変形低減効果を最大に活かす溶接施工方法決定手順を開発することにより，溶接後のガス加熱矯正が不要な溶接技術確立することを目的として実施された．この目的を達成するための研究開発の展開を，模式的に図1に示す⁴⁾．まず，（1）溶接変形低減の効果があり，実施工上問題のない溶接材料の最適化が行われた⁵⁾．つぎに，（2）材料の相変態特性を考慮した有限要素法三次元熱弾塑性溶接変形シミュレーションを活用するとともに，溶接変形実験結果と併せ，開発した溶接材料の効果を活かす溶接施工方法決定手順の提案が行われた⁶⁾．さらに，（3）開発した溶接材料を用いて作製した溶接継手および模擬溶接構造体の継手特性および構造健全性の評価が実施され⁷⁾，これらの成果を総合して，溶接変形を低減できる鋼構造接合技術の提案が行われた．このプロジェクト以外にも，溶接変形および残留応力⁸⁾，さらには溶接部が溶接後のプレス成形に及ぼす影響⁹⁾を調べるため，

図1 溶接変形低減の解析法の展開

相変態を考慮した熱弾塑性解析法を用いた研究結果が報告されている。また溶接変形低減方法として、複数熱源や冷却法を活用する方法があり、その有効性や最適条件を三次元熱弾塑性解析により検討した研究結果も報告されている^{10, 11)}。

しかしながら三次元熱弾塑性解析は、現在でも多大な解析時間を要するため、解析時間の短縮を目的に様々な試みが行われており、溶接時の非定常温度場に注目し熱源を理想化した解析¹²⁾や、自動車足回り部品の溶接変形解析においてシェル要素を用いた解析^{13, 14)}において、実験と良い一致が得られた報告がなされている。また、弾塑性解析におけるひずみ増分を大きくすることにより高速化に成功した研究結果も報告されている^{15, 16)}。一方、全く新しい試みとして、溶接問題特有の微小領域における非線形性に注目した、反復サブストラクチャー法という解析法も提案されており、実機部品を対象とした1パスの溶接変形において、実験結果と良い一致が得られた報告がなされている^{17, 18)}。さらに、反復サブストラクチャー法による解析時間の大幅な短縮により、原子力機器用配管のような多層盛り溶接における溶接変形を、三次元問題として解析した研究結果も報告されている¹⁹⁾。

5.2.2 固有変形を用いた弾性解析

溶接後に溶接部近傍に生成される塑性ひずみに注目し、溶接固有変形を用いた弾性解析により、溶接変形を予測する手法がある。この解析法では、溶接部に生じる固有変形を事前に把握しておく必要があるが、大型構造物の変形が予測可能であるという利点を有しており、溶接工程も含めた生産工程全体に渡る設計の最適化を考える上では、非常に有用な方法である。例えば桁およびパイプ構造を対象とした溶接変形の予測²⁰⁾だけでなく、船舶製造工程に用いられる線状加熱による曲面形状の平板作製シミュレーション²¹⁾にも、固有変形あるいは固有ひずみを用いた弾性解析が活用されている。特に、線状加熱については、従来は熟練技能者による加工が行われていたが、近年の熟練技能者の高齢化ならびに減少に対応するため、熟練技能を継承するためのシミュレータ²²⁾としても、固有ひずみを用いた弾性解析が活用されている。

一方、事前に把握が必要な固有変形については、従来は、溶接線上に均一に固有変形が分布しているとして取り扱う場合がほとんどであったが、溶接始末端部の影響を分離することにより、より高精度な溶接変形の予測が可能であるという報告も行われている²³⁾。また、固有変形を同定する手法としては、試作や熱弾塑性解析を用いたシミュレーションがよく用いられているが、比較的簡便に固有変形を同定する手法として、溶接前後の部材の三次元座標から同定する手法も提案されており²⁴⁻²⁶⁾、最終的な大型構造物の変形予測について、実験結果と良い一致が得られた報告もなされている²⁵⁾。

5.3 残留応力

溶接継手や異材接合継手の接合界面に発生する残留応力は、継手の静的強度や疲労強度などを低下させる原因となるため、その正確な同定と低減が望まれる。残留応力

の同定方法としては、切断法、X線回折法や磁気ひずみ法などに加えて、近年のデジタル画像計測精度の向上を活用した画像処理技術による推定法も報告されている^{27, 28)}が、溶接変形の推定と同様、近年では有限要素法を用いた解析による同定が数多く行われている。特に、残留応力は溶接部組織の影響を受けるため、高精度な予測のためには、相変態を考慮する必要がある^{29, 30)}。また有限要素法を用いた解析では、残留応力の推定だけでなく、残留応力を考慮した継手強度評価も可能であり^{31, 32)}、今後、解析による残留応力に基づいた接合方法や接合強度に関する研究がますます広がると考えられる。

一方、原子力構造物などの多層盛り溶接継手部の残留応力を推定する場合には、熱弾塑性解析による予測だけでなく、切断法やX線回折法などによる計測も非常に困難である。この問題を解決する一つの方法として、実験と解析とを連成させた固有ひずみ法が提案されており、経済産業省「革新的実用原子力技術開発提案公募事業」の一つとして、平成15, 16年度の2年間において、原子炉容器管台貫通部を模擬したモックアップ溶接継手を用いた実験および解析を実施した報告もなされている³³⁾。

5.4 溶接割れ解析

溶接割れの問題は、冶金および力学が複合した問題であり、問題の解決のためには、両者を考慮する必要がある。この問題に対しても、溶接変形や残留応力の推定と同様に、熱弾塑性解析を活用した研究が行われている。例えば温度依存型界面要素法を用いて、T継手完全溶け込み溶接時における梨形ビード割れの発生を二次元問題として予測した解析結果が報告されている³⁴⁾。また、三次元熱弾塑性解析法の高速化の一つである、反復サブストラクチャー法と組み合わせることにより、狭開先溶接時に発生する梨形ビード割れを三次元問題として解析した報告もなされている³⁵⁾。

5.5 まとめ

溶接変形、残留応力、溶接割れの評価法として、有限要素法を用いたシミュレーション解析を中心に、最近の代表的な話題をまとめた。近年の計算機演算速度の高速化にともない、熱弾塑性解析を用いた解析が数多く報告されており、溶接変形に対して溶接部組織の影響として相変態を考慮した解析が数多く報告されている。今後は、より高精度な推定のため、溶接プロセス、溶接部組織、溶接変形を統合したシミュレーションが行われると考えられる。一方、溶接部の高精度な解析だけでなく、溶接を生産工程の一部と考え、溶接前・後の加工も含めた、溶接による変形および残留応力、さらには接合強度特性までを、全てシミュレーションに評価する研究も進められており³⁶⁾、このような方向の研究が、ますます増えてくると予想される。

文 献

- 1) 長谷川忠之, 西川聡, 中田志津雄, 堀井行彦, 村川英一: FEM 解

- 析における入熱モデル形状の検討, 溶接学会全国大会講演概要, 第77集 (2005) 294-295.
- 2) 金裕哲, 李在翼, 猪瀬幸太郎: すみ肉溶接で生じる面外変形の高精度予測, 溶接学会論文集, 第23巻, 第3号 (2005), 431-435.
 - 3) 李在翼, 澤田守, 猪瀬幸太郎, 金裕哲: 突合せ溶接で生じる面外変形の高精度予測, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 555-558.
 - 4) 久保高宏, 天野虔一: 変態を利用した溶接変形低減の試み —第1報 研究開発プロジェクトの概要—, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 529-531.
 - 5) 安田功一, 森影康, 松下行伸, 丸山敏治: 変態を利用した溶接変形低減の試み —第2報 溶接材料の開発—, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 533-536.
 - 6) 望月正人, 豊田政男, 森影康, 久保高宏, 猪瀬幸太郎, 中西保正, 公門泰博, 中島康雅: 変態を利用した溶接変形低減の試み —第3報 溶接変形の少ない溶接施工方法—, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 537-545.
 - 7) 金裕哲, 李相亨: 変態を利用した溶接変形低減の試み —第4報 溶接継手の力学的特性—, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 547-553.
 - 8) 川上博己, 寺崎俊夫, 福谷理明: ビードンプレート溶接における相変態を考慮した溶接変形・残留応力の数値解析手法に関する研究, 溶接学会全国大会講演概要, 第77集 (2005) 302-303.
 - 9) 両角克之, 黒澤孝司, 伊藤彰宏: 溶接後プレス成形における溶接部の影響 (解析的検討その2), 溶接学会全国大会講演概要, 第77集 (2005) 284-285.
 - 10) 岡野成威, 望月正人, 豊田政男: 複数熱源による溶接変形特性に関する熱伝導論敵検討 —複数熱源を用いた温度場制御による溶接変形制御手法に関する研究 (第1報)—, 溶接学会論文集, 第24巻, 第4号 (2006), 324-330.
 - 11) 岡野成威, 望月正人, 豊田政男, 上山智之: 後方冷却法による溶接残留変形のインプロセス制御, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 563-568.
 - 12) 李在翼, 澤田守, 金裕哲: 溶接の理想化による溶接変形・残留応力の予測とその精度, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 559-562.
 - 13) 与語康宏, 岩田徳利, 中西広吉, 後藤憲毅, 柳下俊太郎: 高速な溶接変形解析手法の開発 (1) —計算手法の開発と妥当性検証—, 溶接学会全国大会講演概要, 第78集 (2006) 212-213.
 - 14) 与語康宏, 岩田徳利, 中西広吉, 後藤憲毅, 柳下俊太郎: 高速な溶接変形解析手法の開発 (2) —実部品模擬モデルを用いた精度検証—, 溶接学会全国大会講演概要, 第78集 (2006) 214-215.
 - 15) 中長啓治: 大温度増分・増分反復全ひずみ法の解析理論 —高速熱弾塑性解析法の開発 (第1報)—, 溶接学会論文集, 第24巻, 第4号 (2006), 299-305.
 - 16) 中長啓治, 近藤秀雄, 荒木義晴: 大温度増分・増分反復全ひずみ法の解析性能 —高速熱弾塑性解析法の開発 (第2報)—, 溶接学会論文集, 第24巻, 第4号 (2006), 306-311.
 - 17) 西川弘泰, 芹澤久, 村川英一: 大規模溶接シミュレーションの実機適用, 溶接学会論文集, 第24巻, 第2号 (2006), 168-173.
 - 18) 張林杰, 村川英一, 芹澤久, 寺坂裕二: 拘束および逆歪による溶接変形低減効果に関する熱弾塑性解析を用いた検討, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 569-575.
 - 19) 伊藤真介, 張林杰, 柴原正和, 芹澤久, 村川英一: パイプの多層盛溶接における溶接変形に対する諸因子の影響, 溶接学会全国大会講演概要, 第80集 (2007) 126-127.
 - 20) 梁偉, 鄧德安, 瀬波賢, 中島康雅, 芹澤久, 村川英一: 桁およびパイプ構造を対象とした溶接変形の計測と予測, 溶接学会全国大会講演概要, 第77集 (2005) 304-305.
 - 21) 石山隆庸, 丹後義彦: 線状加熱: 鉄鋌技能者は逆問題をどのようにして解いているか —自動加熱曲げシステム IHI- α の開発を通じた考察—, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.1 (2006) 261-267.
 - 22) 大沢直樹, 橋本聖史, 田中宏典, 須川雄太: 造船ぎょう鉄技能継承支援のためのシミュレーションシステムの開発, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.1 (2006) 269-272.
 - 23) 望月正人, 山崎紘樹, 三上欣希, 豊田政男: 溶接変形に及ぼす始終端部の影響に関する解析的検討, 溶接学会全国大会講演概要, 第76集 (2005) 144-145.
 - 24) 中島康雅, 長谷川壽男, 梁偉, 芹澤久, 村川英一: 溶接変形推定のための固有ひずみデータベースの拡充, 溶接学会全国大会講演概要, 第77集 (2005) 306-307.
 - 25) W. Liang, D. Deng, S. Sone and H. Murakawa: Prediction of Welding Distortion By Elastic Finite Element Analysis Using Inherent Deformation Estimated Through Inverse Analysis, Welding in the World, Journal of the International Institute of Welding, Vol.49, Issue 11/12, (2005), 30-39.
 - 26) 梁偉, Adan VEGA, 芹澤久, 村川英一: 線状加熱における固有変形の逆解析による同定, 溶接学会全国大会講演概要, 第79集 (2006) 392-393.
 - 27) 中村春夫: 画像処理技術による溶接構造物の残留応力・溶接変形の逆問題解析手法, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 655-658.
 - 28) 柴原正和, 山口晃司, 正岡孝治, 坪郷尚: 画像処理による非接触変形・応力計測法の開発, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 667-674.
 - 29) 望月正人, 松島彰吾, Christian THAULOW, 豊田政男: 溶接模擬熱サイクルを受ける材料の熱応力発生挙動に関する基礎的検討 —溶接時における温度・ミクロ組織・熱応力履歴の数値シミュレーションとその応用に関する研究 (第1報)—, 溶接学会論文集, 第23巻, 第1号 (2005), 103-111.
 - 30) 望月正人, 松島彰吾, 森影康, 久保高宏, 豊田政男: 溶接材料の相変態挙動を利用した溶接継手の残留応力低減効果に関する検討 —溶接時における温度・ミクロ組織・熱応力履歴の数値シミュレーションとその応用に関する研究 (第2報)—, 溶接学会論文集, 第23巻, 第1号 (2005), 112-121.
 - 31) 宮崎克雅, 沼田雅宣, 斎藤高一, 望月正人: 配管端部から円周溶接部までの距離が残留応力と応力拡大係数に及ぼす影響 —溶接残留応力場における SCC き裂進展評価 (第1報)—, 溶接学会論文集, 第24巻, 第1号 (2006), 70-77.
 - 32) 宮崎克雅, 望月正人: 表面き裂の応力拡大係数とき裂進展挙動に及ぼす残留応力分布および部材形状の影響 —溶接残留応力場における SCC き裂進展評価 (第2報)—, 溶接学会論文集, 第24巻, 第1号 (2006), 78-86.
 - 33) 中長啓治, 太田高裕, 小川直輝, 麻寧緒, 濱口裕充, 武田祐輔: 原子炉溶接継手の残留応力の固有ひずみ法による測定, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.2 (2006) 697-704.
 - 34) 柴原正和, 野田裕久, 正岡孝治, 永木勇人, 安田修, 鷹羽新二, 芹澤久, 村川英一: 温度依存型界面要素法を用いた T 継手完全溶け込み溶接時における梨形ビード割れの発生予測, 溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集, Vol.1 (2006) 287-294.
 - 35) M. Shibahara, S. Itoh, H. Serizawa and H. Murakawa: Numerical Prediction of Welding Hot Cracking Using Three-Dimensional FEM with Temperature Dependent Interface Element, Welding in the World, Journal of the International Institute of Welding, Vol.49, Issue 11/12, (2005), 50-57.
 - 36) クマル アジェイ アソク, 青山和浩: 大規模溶接構造物の建造における溶接変形による手直し作業発生リスクマネジメントによる溶接パラメタ公差設定, 溶接学会全国大会講演概要, 第76集 (2005) 146-147.