特集

溶接変形・残留応力の予測・計測技術

大型構造物の数値シミュレーション による溶接変形・残留応力の予測*

金 裕 哲**

Prediction by Numerical Simulation of Welding Distortion and Residual Stress for Large Steel Structures*

by KIM You-Chul**

キーワード 溶接変形, 残留応力, 熱弾塑性解析, 数値解析, 固有ひずみ, 有効固有ひずみ

1. はじめに

「大型構造物の数値シミュレーションによる溶接変形・残留応力の予測」といった課題に対し、まず、溶接変形・残留応力の予測精度、すなわち、それらを高精度に予測するための支配因子についての研究成果を紹介する。その成果を踏まえ、大型構造物への展開についての現状とその可能性について、著者の主観を交え紹介する。

2. 溶接変形・残留応力の高精度予測における支配因子

すみ肉溶接を対象として行った実験を3次元熱弾塑性解析でシミュレーションした結果を基本として、溶接変形の高精度予測における支配因子を特定¹⁾し、その正当性を検証した結果^{2, 3)}を紹介する。また、HT780のような高張力鋼を対象とする場合、温度冷却過程における相変態を考慮する必要がある⁴⁾、相変態の取り扱いとその影響⁵⁾について述べる。

ところで、熱弾塑性解析⁶⁾では温度場と応力場は連成しないと仮定し、溶接に伴う温度履歴を非定常熱伝導解析で求め、この温度履歴を用いて弾塑性応力解析を行う。このため、当然のことながら、溶接変形・残留応力の高精度予測には、溶接に伴う温度履歴を高精度に求める必要があること。さらには、鋼材の物理的、機械的諸性質は温度依存性を示す⁷⁾。したがって、解析に用いる鋼材の物理的、機械的諸性質の精度が溶接変形・残留応力の予測精度に大きな影響を及ぼすことになる。これらのこと

を強調しておきたい。なお、温度履歴および鋼材の諸性質に関しては、各々の文献を参照していただきたい。

2.1 溶接変形の高精度予測における支配因子の特定

すみ肉溶接を対象とした実験、そして、実験を3次元熱弾塑性解析により忠実にシミュレーションした結果を種々考察し、溶接変形・残留応力の高精度予測における支配因子は以下の三つであることを特定した^{1, 6)}。

- (1) 全温度領域（特に、材料の降伏応力が小さい700℃以上の高温域）において降伏条件（弾塑性解析の必須条件）を満たすこと。
- (2) 溶接金属を溶着金属部と考えこの領域に入熱する、すなわち、溶け込み形状を考慮すること。
- (3) 熱伝導解析（解析が容易である）などを行い、溶融池長さを求め、これがn個の要素内にほぼ収まるように溶接線方向の要素長さを決めること。

2.2 高精度予測における支配因子の正当性検証

2.2.1 継手タイプの違いによる検証

突合せ溶接を対象に、前節で特定した三つの支配因子の正当性を検証した²⁾。

ところで、実験供試体の作製において目違いが生じ、これを回避するため、供試体裏面に0.5-1.0 mmの薄皮を残し、開先部を削り貫くことにした。なお、実験終了後、供試体裏面が完全に溶け込んでいたことは確認した。

支配因子を忠実に考慮し、突合せ溶接に対する実験をシミュレーションした結果を図1に示す。溶接変形が高精度に予測できていることがわかる。

一方、溶接残留応力の測定結果（残留応力は測定できないが、弾性ひずみを計測し、これを応力-ひずみ関係に代入して求めた応力を、本稿では、残留応力測定結果と称する）を図2に示すが、溶接変形が高精度に予測できている場合、溶接残留応力も高精度に予測できていることを確認した。

*原稿受付 平成23年1月7日

**正 員 大阪大学 接合科学研究所 Member, JWRI of Osaka University

断面マクロと要素分割

角変形

縦曲り変形

図1 突合せ溶接で生じる溶接変形の予測結果

断面マクロと要素分割

角変形

縦曲り変形

(a) 溶接変形

溶接線方向応力成分, σ_x 溶接線直角方向応力成分, σ_y

(b) 残留応力

図3 レーザ溶接で生じる溶接変形・残留応力の予測結果

溶接線方向応力成分, σ_x 溶接線直角方向応力成分, σ_y

図2 突合せ溶接で生じる留応力の予測結果

2.2.2 プロセスの違いによる検証

レーザを用いた溶接に対し、アーク溶接を対象として特定した溶接変形・残留応力の高精度予測における三つの支配因子の正当性と一般性を検証した³⁾。

支配因子を考慮、実験を忠実にシミュレーションし、得られた結果を図3に示す。溶接変形・残留応力が高精度に予測できていることがわかる。

以上、継手タイプやプロセスの違いなど関係なく、溶

図4 ヤング率の温度依存性と相変態域における理想化

接変形・残留応力の高精度予測における支配因子の正当性が検証できると共に、その一般性を確認した。

2.3 溶接変形・残留応力に及ぼす相変態の影響

温度冷却過程の相変態域において、機械的諸性質（降伏応力、引張応力およびヤング率など）を特定することはできない⁷⁾。文献7)に従い、相変態域における機械的諸性質を理想化し⁴⁾、実験を忠実にシミュレーションした。一例として、変態超塑性現象を考慮、解析に用いたHT780のヤング率の温度依存性（Model B）を図4に示す。すなわち、相変態域において、変態開始時に一旦ヤング率をゼロとし、そこから終了時まで線形に回復するとしている。

支配因子を忠実に考慮、実験をシミュレーションした結果を図5に示す。溶接変形・残留応力が高精度に予測できている。また、相変態を無視した結果（Model A）

(a) 溶接変形

(b) 残留応力

図5 溶接変形・残留応力に及ぼす相変態の影響 (HT780)

(a) 溶接変形

(b) 残留応力

図6 溶接変形・残留応力の予測とその精度

も示しているが、当然のことながら、溶接変形・残留応力の予測精度は大きく低下する。

3. 大型構造物への展開

上述のように、三つの支配因子を忠実に守れば、継手タイプおよびプロセスや鋼種の違いなどに関係なく、数値シミュレーションにより、溶接変形・残留応力が高精度に予測できることを明示した。これらを認識し、主題である、大型構造物の溶接変形・残留応力の予測に関し、私見も含め、その実状と展望を述べる。

3.1 熱弾塑性解析による溶接変形・残留応力の予測

3.1.1 熱源の理想化による予測

溶接変形・残留応力を3次元熱弾塑性解析により予測する場合、膨大な計算時間を要する。理由は、溶接現象を移動熱源として解析するところにある（前章で述べた種々の計算には4-6日を要した）。このため、大型構造物の溶接変形・残留応力を予測するには計算機の能力が2ケタ程度速くならなければ、現実性に乏しいと思われる。

一方、最も計算時間を要する熱源の移動過程を無視し、工学的見地から、溶接線方向に一度に熱を投与した場合、どのような結果が得られるのか、その力学的意義を検討した⁹⁾。

突合せ溶接およびすみ肉溶接を対象として得られた結果（突合せ溶接の結果を図6に示す）によれば、溶接変形の予測精度は低いが、残留応力の予測精度は高いようである。したがって、大型構造物に生じる残留応力を予測する場合、工学的見地に立てば、その可能性は大きいと思われる。

3.1.2 力学的特性に基づく予測

溶接を想定した場合、熱源は移動するものの温度特性に注目すると、溶接開始後ややもすると準定常状態になる⁹⁾。この領域では同じ温度履歴、すなわち、同じ荷重履歴を受けることになる。

一方、板端部に集中荷重が作用する場合、Saint-Venantの原理によれば、板幅の1.5-2.0倍程度内側では端部効果が消失し、一様分布荷重が作用することになる。このことより、溶接長が長い場合、ある程度内側では端部効果が消失し、膨張・収縮に対する拘束が一様となる領域が

存在することになる。

上述のような、温度および力学現象より、溶接長が無限大であっても、温度履歴および膨張・収縮に対する拘束が同じ領域が存在することになる。したがって、溶接の始・終端部はそのまま、中央部分は要素3個程度を考え、熱弾塑性解析する。そして、中央部分で得られる結果は連続するとし、用いれば良いことになる¹⁰⁾。一例を図7に示す。これにより、計算時間が大幅に短縮でき、大型構造物に生じる角変形は高精度に予測可能となる。

3.2 固有ひずみ法による溶接変形・残留応力の予測

固有ひずみ法は弾性論を基本としており、弾塑性の判定が不必要、かつ、膨大な計算時間を費やす熱源の移動過程など考慮する必要はなく、計算時間が大幅に短縮でき、大型構造物の溶接変形・残留応力の予測の可能性を有している。しかし、解決しなければならない基本的な種々の多くの問題を含んでいる。

ここでは、有限要素法を基本とした固有ひずみ法について簡単に紹介する。

3.2.1 溶接変形の予測

固有ひずみと全ひずみは式(1)の関係にある。したがって、固有ひずみが求まれば、全ひずみが求まり、式(2)から、節点変位 $\{u\}$ が求まる、すなわち、溶接変形が求まることになる。

式(1)の $[H^*]$ は弾性応答マトリックスと呼ばれるものである。これは、任意の要素に単位の固有ひずみが存在する場合、この固有ひずみが系全体に生じさせるひずみであり、全ての要素（溶接の問題では固有ひずみは溶接部近傍に限定される）について繰返し計算することで構成される。

$$\{\varepsilon\} = [H^*]\{\varepsilon^*\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\{u\} = [B]^{-1}\{\varepsilon\} = [B]^{-1}[H^*]\{\varepsilon^*\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$\{\varepsilon\}$: 全ひずみ

$[H^*]$: 弾性応答マトリックス

$\{\varepsilon^*\}$: 固有ひずみ

$[B]$: 変位・ひずみマトリックス

したがって、固有ひずみは、逆問題として式(1)を解き求めることになる。すなわち、

$$\{\varepsilon^*\} = [H^*]^{-1}\{\varepsilon\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ところが、一般に式(3)は不定となり、解けない。

固有ひずみを与え直接問題を解く場合、一様なひずみも一様でないひずみも、一義的に求まる。しかし、逆問題では、一様なひずみは特定できない。なぜなら、逆問題を解く場合、一様に1mm収縮するも1000mm収縮するも同じであり、その絶対値を特定することができず、不定となる。

一方、角変形の生成機構に注目すれば、板厚方向に固有ひずみが一様であれば、角変形は生じない。すなわち、角変形が生じるのは、板厚方向に固有ひずみが一様でないことを意味している。板厚方向の固有ひずみの分布を如何に求めるかなど、単純に逆問題を解き、固有ひずみを得ることはできず、この種の問題解決は必須である。

図7 力学特性に依拠した角変形の予測結果

上述のように、固有ひずみを如何に求めるか、解決しなければならない課題は多種多様である。いずれにせよ、固有ひずみが求まらなければ、固有ひずみ法は絵に描いた「モチ」に過ぎない。

3.2.2 残留応力

残留応力の予測，すなわち，弾性ひずみは計測でき，この弾性ひずみのみに限定すれば，固有ひずみは推定できる¹¹⁾。

式(1)を次式のように書き改める。すなわち，

$$\{\varepsilon^e\} = [H^*]\{\varepsilon^*\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\{\sigma\} = [D][H^*]\{\varepsilon^*\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに，

$\{\varepsilon^e\}$ ：弾性ひずみ

$[D]$ ：応力 - ひずみマトリックス

弾性ひずみに対応する弾性応答マトリックス $[H^*]$ は，任意の要素に単位の固有ひずみを与え，この固有ひずみが系全体に生じさせる弾性ひずみとして繰返し計算することで構成される。

弾性ひずみはひずみゲージなどを用いて直接計測することができる。ところで，計測される弾性ひずみは種々の計測誤差が混入する可能性がある。したがって，誤差の2乗和を最小にする条件より，固有ひずみの最確値 $\{\varepsilon^*\}$ が次式から求まる。

$$\{\varepsilon^*\} = ([H^*]^T[H^*])^{-1}[H^*]^T\{\varepsilon^e\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

したがって，式(6)の固有ひずみの最確値 $\{\varepsilon^*\}$ を式(5)の固有ひずみ $\{\varepsilon^*\}$ に代入し，残留応力 $\{\sigma\}$ が求まることになる。

ところで，弾性ひずみのみから求まる固有ひずみの最確値(式(6))は，式(1)の固有ひずみとは明らかに異なる。著者は，これを有効固有ひずみと称している。

以上，有効固有ひずみの最確値は求まり，これを媒介とする残留応力測定法¹¹⁻¹⁴⁾が示されている。なお，未知有効固有ひずみの総数決定法は文献15)を参照していただきたい。

4. ま と め

「大型構造物の数値シミュレーションによる溶接変形・残留応力の予測」といった特集課題をいただいた。現在，数値シミュレーションによる溶接変形・残留応力の予測がどの程度まで可能となっているか，著者の研究を中心に紹介した。そして，主題である，大型構造物の溶接変形・残留応力の予測に対し，どの程度現実性があるか，その現状と将来を展望した。

総論として，溶接変形・残留応力を熱弾塑性解析により高精度に予測する場合，2.1節の項目(3)を満たす必要があり，膨大な計算時間を要する。しかし，これは避けては通れず，溶接熱源の移動過程を如何に短縮するか(3.1.2項で述べた力学的特性に注目した高精度簡略法や

固有ひずみ法など)が，大型構造物に生じる溶接変形・残留応力の予測において，解決しなければならない本質的な問題と考える。あるいは，計算機の計算速度を期待し，それまで待つか，そのいずれかであろう。

一方，固有ひずみを用いて溶接変形を予測するには克服しなければならない多くの課題があるが，有効固有ひずみを媒介とする残留応力の予測は可能となっている。

ところで，ここでは触れなかったが，薄板の溶接において，溶接長が長くなると縦収縮力により，板が座屈する可能性が高く，座屈の条件を明確にするなどの重要案件が残っていることを付記しておく。

課題に対する現状と著者の主観を交え展望を述べた。読者の一助となれば幸甚である。

参考文献

- 1) 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，23-3 (2005)，p.431-435.
- 2) 金 裕哲，李 在翼，澤田 守，猪瀬幸太郎：溶接変形の高精度予測における支配因子の正当性と一般性の検証，溶接学会論文集，25-3 (2007)，p.450-454.
- 3) 猪瀬幸太郎，李 在翼，中西保正，金 裕哲：レーザを用いたすみ肉溶接で生じる溶接変形・残留応力の特徴と高精度予測の一般性の検証，26-13 (2008)，p.61-66.
- 4) 金 裕哲，廣畑幹人，岐山雄亮，猪瀬幸太郎：高張力鋼のレーザ溶接で生じる変形・残留応力，溶接学会論文集，28-3 (2010)，p.281-287.
- 5) 金 裕哲：熱変形・熱応力解析，日本機械学会 講習会教材 (No.95-88)，1996，pp.25-31.
- 6) 李 在翼，猪瀬幸太郎，金 裕哲：溶接変形の高精度予測に及ぼす溶接線方向要素長さの影響，溶接学会講演概要集，第83集，2008，pp.266-267.
- 7) 上田幸雄，金 裕哲，陳 楚，唐 逸民：相変態の力学的取扱いと拘束応力・拘束ひずみの解析的計算法，溶接学会論文集，2-1 (1984)，pp.89-97.
- 8) 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，2006，pp.559-562.
- 9) 例えば，渡辺正紀，佐藤邦彦：溶接力学とその応用，朝倉書店 (1965).
- 10) 金 裕哲，李 在翼，澤田 守：力学的特性に基づく面外変形予測法の提案，溶接学会講演概要集，第78集，2006，pp.202-203.
- 11) 上田幸雄，金 裕哲，袁 敏剛：溶接残留応力の生成源を用いた残留応力推定法，溶接学会論文集，6-1 (1988)，pp.59-64.
- 12) 上田幸雄，金 裕哲，梅國 章：溶接線に垂直な薄板のみ用いた3次元残留応力測定理論，溶接学会論文集，3-3 (1985)，611-616.
- 13) 上田幸雄，福田啓二，金 裕哲，山崎寿久：固有ひずみを媒介とする軸対称三次元残留応力測定法，日本機械学会論文集A編，51-463 (1985)，pp.697-706.
- 14) 福田啓二，金 裕哲，秋山哲也，寺崎俊夫：固有ひずみの概念による溶射材に生じる残留応力の推定法，溶射，27-3 (1990)，pp.1-8.
- 15) 文献12)の講演論文に対する討論記録，溶接学会論文集，4-1 (1986)，p.224.