反復サブストラクチャー法を用いた高速溶接シミュレーションと検証

前川 晃^{*1}, 河原 充^{*2}, 芹澤 久^{*2}, 村川英一^{*2}

Fast Welding Simulation Based on Iterative Substructure Method and Its Validation

Akira MAEKAWA^{*3}, Atsushi KAWAHARA, Hisashi SERIZAWA
and Hidekazu MURAKAWA

^{*3} Institute of Nuclear Safety System, Inc., Institute of Nuclear Tecnology
Sata 64, Mihama-cho, Mikata-gun, Fukui, 919-1205 Japan

Residual stress caused by welding process affects characteristics of strength and fracture of equipment and piping in nuclear power plants. Numerical analysis is powerful tool to evaluate weld residual stress in the actual plants. However, the three-dimensional precise analysis requires enormous computation time. In this study, the analysis code using iterative substructure method developed to speed up welding simulation was improved to simulate welding process of the plant equipment and piping. Furthermore, the improved analysis code was validated by measurements and other analysis results.

Key Words : Welding simulation, Residual stress, Three-dimensional stress distribution, Welded joint, Fast computation, Highly efficient calculation, Validation

1. 結 言

溶接は発電プラントや化学プラントのような安全性や信頼性が求められる構造物に広く利用される技術である。しかし、溶接に伴い発生する残留応力が脆性破壊強度さらには応力腐食割れや疲労によるき裂進展特性へ影響する。

実機溶接部に発生する残留応力を把握するには、数値解析が強力なツールとなる。しかしながら、溶接現象が強非線形形過渡を伴う熱弾塑性問題であることから、3次元の残留応力分布を正確に計算するには膨大な時間を要するため、溶接シミュレーション計算を高速化・高効率化する必要がある。

近年、加圧水型原子炉では容器・配管継手部や容器貫通部の溶接部に応力腐食割れによるき裂の発生が報告されており、詳細なき裂進展評価を行うために詳細な溶接残留応力分布の評価を必要としている。対象となる溶接部は多層溶接かつ複雑形状であることから、3次元モデルを用いたリアルスティックなシミュレーションによる結果がより正確であると考えられるが、市販解析コード

では実用的な計算時間で実施できないという課題がある。

そこで、このような大規模溶接問題を効率的に計算するために村川ら⁽¹⁾によって開発された反復サブストラクチャー法を基にして、多層溶接かつ複雑形状部の溶接施工工程を正確に再現するために高速の溶接シミュレーションコードを開発した。

2. 反復サブストラクチャー法

溶接の力学現象の特徴に着目して溶接問題を効率的に高速解析する反復サブストラクチャー法 (ISM) は、図1に示すように、非定常熱伝導解析結果から得られる温度分布をもとに疑似弾性挙動とみなせる線形領域と弾塑性挙動が顕著な非線形領域に区分し、大規模溶接問題を小規模の非線形問題と大規模の線形問題へ変換することで非線形領域を縮小し計算速度を向上させる。

さらに、小規模の非線形領域を含めて線形領域と定義することで、溶接熱源の移動に伴う非線形領域の移動が線形領域の解に極力影響を与えないようにし、過去に計算した線形領域の結果を継続利用できるようにして線形領域の計算回数を低減している。小規模非線形問題は線形領域の計算結果から得た境界Γ上の変位を変位境界条件として解く。このようにして移動する小規模非線形領域のみを再定義しながら時々刻々と解いていく。

^{*1} 正員, (株)原子力安全システム研究所 (〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田 64)。

^{*2} 大阪大学 接合科学研究所。
E-mail: maekawa@inss.co.jp

Fig.1 Concept of iterative substructure method (ISM)

3. 解析コード

溶接施工工程に対応できるように、ISM を基に、機能付加した解析コードを構築した。

(1) 多層多パス溶接対応

各溶接パスの溶接開始時に当該パスを構成する全要素をアクティブにして非定常熱伝導解析を実施する。弾塑性応力解析時には、剛性を通常値から低減させておいて溶着された部分までの剛性を復帰させて解析する。

(2) 構造部分切断による溶接残留応力の低減・再配分

切断は今まで存在していた要素が消失する（ノンアクティブ）プロセスとして処理する。

(3) 熱処理対応

空間的に等温度である理想状態を仮定した温度定義を与えて応力解析する。

(4) 耐圧試験のような荷重条件への対応

圧力荷重をモデル全体へ与える。

(5) 並列計算

OpenMP を用いて並列計算を実施する。

4. 解析コードの最適化検討

解析コードの計算速度と精度に影響を与えると考えられた主な因子を抽出して条件の最適化検討を行った。「4. 検証」で用いた解析モデルを使用して検討した。

Temp.	> 400°C	> 300°C	> 200°C
Calc. time	12800sec	12800sec	13000sec
Strong nonlinear region			
Hoop residual stress			
Axial residual stress			

Fig.2 Influence of size of strong nonlinear area on stress distribution and computation time

4・1 強非線形領域の定義が計算精度に及ぼす影響

ISM は解析領域を疑似弾性域と強非線形領域に分けることにより計算の高速化・高効率化が図られている。よって、温度解析結果を基に定義する強非線形領域の大きさが応力分布に及ぼす影響を調べ、最適化を図った。

強非線形領域として定義する下限界温度を 500°C, 400°C, 300°C, 200°C に設定した計算結果を図 2 に示す。500°C の場合は疑似弾性領域における非線形形性が高く収束しなかった。その他の 3 ケースの応力分布は図に示すとおりであり、強非線形領域の大きさの影響は見られない。計算時間の点からは 400°C 以上の定義が有利である。

4・2 ノンアクティブ要素の剛性が計算精度に及ぼす影響

多層溶接の溶着を模擬するために使用するノンアクティブ要素の剛性の影響を通常値の 1/100, 1/1000, 1/10000 の 3 ケースで計算した。図 3 に示す結果からは応力分布への影響は見られず、計算時間の観点から 1/100 が適当と考えられた。

Fig.3 Influence of stiffness of non-active element

5. 検証

5・1 測定値による検証

図 4(a) に示す配管溶接継手供試体を製作し、内外表面の残留応力をひずみゲージ法を用いて測定した。供試体には配管口径 6B(165.2mm)、肉厚 Sch160(18.2mm) のオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316TPS) を使用し突合せ溶接により製作した。初層は自動ガスタングステンアーク (GTA) 溶接の下向き姿勢にて行い、残層は被覆アーク溶接 (SMAW) の下向き姿勢にて 5 層 5 パス溶接を行った。溶接は 0° から 360° へ周溶接を行った。その後全長 100mm に切断した。溶接施工条件を表 1 に示す。図 4(b) に示す解析モデルを用いて溶接施工条件に従い開発した解析コードで溶接シミュレーションを行い、残留応力を解析した。解析では材料定数の温度依存性を考慮した。応力-ひずみ関係は同じ溶接施工をした平板から得た母材部と溶金部の試験片よりデータを取得した。解析コードへは塑性特性を加工硬化係数で与えた。硬化則は等方硬化則を用いた。その他の材料定数は ASME コードの文献値を用いた。近年、溶接残留応力解析では硬化則として、移動硬化則が推奨のされ

ている。一方、本研究では、等方硬化則にアニーリング効果の考慮を組み合わせることによって十分な精度で残留応力解析ができることを測定値との比較により調べた。ここで、アニーリング効果は要素の温度が 800°C を超えた時に塑性ひずみをゼロとすることで表現した。

図5にひずみゲージ法による測定値(▲, ▲)と解析コードの結果とを比較した。溶接が準安定状態となった 180° 位置での管軸方向の応力分布を比較した。解析値はアニーリング効果を考慮した場合(■)と考慮していない場合(●)をプロットした。図5が示すとおりアニーリング効果を考慮することで解析値は測定値に近づいており精度が向上することがわかる。溶金部に生じる残留応力も妥当と考えられる大きさまで低減しており、等方硬化則の使用で指摘される残留応力の過大評価傾向を緩和することがわかる。軸方向応力では差が見られるがモデルの拘束条件やメッシュサイズの粗さの影響と考えられた。

5・2 市販解析コードとの比較 図4(b)のモデルに対する市販解析コード ABAQUS(Ver.6.4) (▲)との解析結果を図6に比較する。図は溶接中心部断面の応力分布を示す。ABAQUS では応力-ひずみ関係データを多直線で与え母材部と溶金部の塑性挙動を厳密に考慮した。硬化則は等方硬化則を用いた。アニーリング効果を考慮する(■)ことで ABAQUS により計算した応力分布とよく似た形状となり適切な残留応力解析ができていることがわかる。

このモデルにおける計算速度を比較すると、ABAQUS の214Hr (CPU : Intel Xeon(2.8GHz), Memory : 2GB)に対して、開発したコードは 41Hr (CPU : Intel Xeon X5272(3.4GHz), Memory : 64GB)と計算を高速化できていることが確認できた。

文 献

- (1) Murakawa, H., et al., J.Kansai Soc.Nav.Archit.Jpn., No.243 (2005), pp.67-70.
- (2) Smith, M.C. and Smith, A.C., Int.J.Pres.Ves.Pip., Vol.86, (2009), pp.79-95.

(a) Specimen (b) FEM model
Fig. 4 Specimen and analysis model of welded joint

Table 1 Welding conditions

No. of pass	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/sec)	Thermal efficiency (%)	Heat input (kJ/mm)
1	123.0	10.5	1.85	65	0.45
2	105.0	25.0	1.33	75	1.48
3	150.0	25.0	1.08	75	2.81
4	150.0	25.0	1.00	75	3.04
5	150.0	25.0	1.08	75	2.81

Fig.5 Comparison of analysis results and measurement: analysis accuracy improved by consideration of annealing

Fig.6 Comparison of commercial code and developed code: analysis accuracy improved by consideration of annealing