理想化陽解法 FEM による円筒多層溶接継手の大規模 3 次元 残留応力解析

Large-Scale 3D Residual Stress Analysis of Cylindrical Multilayer Welded Joints Using Idealized Explicit FEM

大阪府立大学	手銭	永遠	Towa TEZEN
大阪府立大学大学院	前田	新太郎	Shintaro MAEDA
大阪府立大学大学院	生島	一樹	Kazuki IKUSHIMA
大阪府立大学大学院	柴原	正和	Masakazu SHIBAHARA

Thick plates are used in steel structures of nuclear power plants, and multi-layer welding is used in their manufacturing methods and assembly. However, when the welds are constructed, residual stresses are generated near the welds that may cause stress corrosion cracking and fatigue cracking.

Currently, numerical analysis using the nonlinear finite element method (FEM) based on thermo-elastic plastic analysis theory is commonly used as a method for predicting weld residual stress, but the calculation time required for the analysis is problematic due to the enormous amount of calculation required. In this study, the idealized explicit FEM, which is a fast and memory-saving method, is applied to the residual stress problem in multi-layer welding of cylinders, and the effects of work-hardening model and grouping on the residual stress are discussed, considering a three-dimensional moving heat source.

Keywords: stress corrosion cracking, residual stress, Multilayer welding, IEFEM, Large-scale analysis

1. 緒言

原子炉圧力容器の管台部などでは厚板が使用され、こ の厚板を溶接する際には、一般的に多層溶接が用いられ る。しかしながら、多層溶接時には溶接部に繰り返し入熱 を行うことから、高い引張り残留応力が生じ、応力腐食割 れや疲労き裂の原因となる可能性がある。したがって、多 層溶接時における変形・応力の数値シミュレーションを 行うことが出来れば事前にこれらの危険を回避すること が可能となる。

現在、溶接残留応力を予測する手法としては、一般的に 熱弾塑性解析理論を用いた非線形有限要素法(FEM)によ る数値解析が用いられている。非線形 FEM による熱弾塑 性解析理論を用いて溶接残留応力を予想する場合、加熱 開始から完全冷却に至るまでの温度変化に伴う変形や応 力の変化を逐次解析する必要がある。そのため、一般的な 構造解析と比較して膨大な計算量が必要とされ、解析に 要する計算時間が問題となる。さらに、多層溶接において、 溶接パス数に応じて加熱開始から完全冷却に至るプロセ

連絡先:手銭永遠 大阪府立大学 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1番1号 E-mail:t tezen@marine.osakafu-u.ac.jp スを何度も解析する必要があり、計算時間という点から 解析は困難を極める。そのため、多層溶接の解析において、 計算時間の短縮を目的に隣接する溶接パスをまとめて解 析するグルーピングと呼ばれる手法が用いられている。 グルーピングを行うことにより計算量を削減し、解析に 要する計算時間を減少させることができるが、複数の溶 接パスをまとめることにより実現象とは異なる状態を解 析することになるため、残留応力分布に対して少なから ず影響があると考えられる。そこで本研究では、円筒の多 層溶接時の残留応力問題に対して、超高速・大規模解析が 可能な手法である理想化陽解法 FEM(Idealized Explicit FEM: IEFEM)を適用し、3次元の移動熱源を考慮した解析 を行うことにより、グルーピングの残留応力に対する影 響について議論する。

2.X開先円筒多層溶接継手の3次元残留応力 解析

2.1 解析モデルおよび解析条件

本章では多層溶接解析の残留応力におけるグルーピン グの影響について検討する。Fig. 1(a)に解析対象とした円



(b) Zoomed view of welding part.





Fig. 2 Cross section of weld joint.

筒多層溶接モデルを示す。本解析で使用したモデルは、節 点数が 1,125,360、要素数が 1,078,920、解析自由度数が 3,376,074 である. Fig. 1(b)に示すように、23 層の全 108 パ スを要する X 開先円筒継手の多層溶接を対象とした。母 材に SUSF316 および SFVQ1A、溶接金属およびバタリン グ部に ALLOY132、グラッディング部に SUS308 を用い ている。全パス溶接解析に際しては、グループ番号 1 か ら 6 までの各グループを番号順に溶接し、グループ内の 各層を円筒内面から外面に向かって移動熱源を用いて積 層する。各層内においては z 軸の負方向から正方向に溶 接するものとし、これを全パス溶接モデルとする。Fig.2 は全 108 パスの多層溶接実験後の断面マクロ試験の結果 を示している。本解析で実行したグルーピングモデルの グループ方法については、内外面最終層以外の全 21 層の 各層を 1 つの溶接パスとし、移動熱源を用いて入熱する



Fig. 3 Welding pass sequence of grouping model.

ものとした。内外面最終層に関しては、全パス溶接と同様 に1パスごとに入熱を行う。また、各層を1つの溶接パ スにまとめた部分では、層内の溶接パスの入熱量の和を 投入し、溶接速度は全パス溶接モデルと同じ値を用いた。 以上のグルーピングを行うことで、Fig.3に示すように計 算パスは、全21層の溶接および内外最終層溶接17パス の38となり、計算時間を短縮することが出来る。なお、 溶接方法はSMAW であり、各パスの溶接条件はTable1に 示す通りである。また、初層溶接のガウジング除去、再溶 接は考慮していない。

以上の条件で熱伝導解析を実施した結果、全パス溶接



(d) Grouping model – 12th layer (12th pass) (e) Grouping model – 18th layer (25th pass) (f) Grouping model – 23rd layer (38th pass)

Fig. 4 Comparison of axial stress distribution between actual model and grouping model on the cross section at 180° from start point of welding.

Group	Layer	Pass	Voltage [V]	Current [A]	Speed [cm/min]
1	1	1-3	27.0	120.0	19.0
	2	4-6	27.0	120.0	19.0
2	3	7-8	27.0	120.0	19.0
	4	9-11	27.0	120.0	19.0
	5	12-14	27.0	120.0	19.0
3	6	15-18	27.0	120.0	19.0
	7	19-22	27.0	120.0	19.0
	8	23-27	27.0	120.0	19.0
4	9	28-30	27.0	120.0	19.0
	10	31-34	27.0	120.0	19.0
	11	35-39	27.0	120.0	19.0
	12	40-44	27.0	120.0	19.0
5	13	45-48	27.0	130.0	19.0
	14	49-53	27.0	125.0	19.0
	15	54-57	27.0	125.0	19.0
	16	58-62	27.0	130.0	19.0
	17	63-67	27.0	130.0	19.0
	18	68-75	27.0	120.0	19.0
6	19	76-81	27.0	125.0	19.0
	20	82-87	27.0	125.0	19.0
	21	88-92	27.0	125.0	19.0
	22	93-99	27.0	125.0	19.0
	23	100-108	27.0	120.0	19.0

Table 1 Welding condition of X groove model.

モデル、グルーピングモデルの温度ステップ数はそれぞれ 69,961、25,269 となった。次に、温度ステップに対応する熱弾塑性解析を実施する。なお、本節の解析で使用した計算機は GPU に GeForce RTX 2080 Ti を一基搭載したものである。また、本解析においては加工硬化則に等方硬化と移動硬化の両方を考慮した複合硬化則を使用し、アニ

ール温度を850度とした。

2.2 全パス溶接モデルとグルーピングモデルの残 留応力分布の比較

Fig.4に12層(グループ4最終層)、18層(内面側最終層)、 23 層(最終層)溶接終了時の軸方向成分σ の残留応力分 布を示す。Fig.4においては、実験結果と比較するために 溶接開始位置から 180 度の位置の断面における残留応力 分布を比較した。同図において、全パス溶接モデルに対応 した残留応力分布を(a)、(b)、(c)に、また、グルーピング モデルに対応した残留応力分布を(d)、(e)、(f)に示す。Fig. 4 より、12 層溶接完了時点では、全パス溶接モデルとグ ルーピングモデルの両モデルの外面に引張り、内面側に 圧縮の応力が発生していることが確認できる。18 層溶接 完了時点では、全パス溶接モデルは内外面に引張りの応 力が発生しているのに対し、グルーピングモデルでは外 面に圧縮、内面に引張りの応力が発生していることが確 認できる。また、最終パス溶接完了時点では、両モデルの 内外面に引張り、内部に圧縮の応力が発生しているが、残 留応力の大きさがそれぞれのモデルにおいて違うことが 分かった。

次に、Fig. 4 と同様に周方向成分σ_θの残留応力分布を Fig. 5 に示す。また、全パス溶接モデルに対応した残留応 力分布を(a)、(b)、(c)に、また、グルーピングモデルに対 応した残留応力分布を(d)、(e)、(f)に示す。12 層溶接完了 時点では、全パス溶接モデルとグルーピングモデルの両 モデルの加熱部近傍に大きな引張り応力が発生している



(d) Grouping model – 12th layer (12th pass)
(e) Grouping model – 18th layer (25th pass)
(f) Grouping model – 23rd layer (38th pass)
Fig. 5 Comparison of hoop stress distribution between actual model and grouping model on the cross section at 180° from start point of welding.



ことが分かる。内面の溶接が完了した 18 層溶接完了時点 では、全パス溶接モデルは内外面に強い引張り応力が発 生しているのに対し、グルーピングモデルでは外面側の 引張り応力が全パス溶接モデルと比べて小さくなってい ることが分かる。溶接完了時点では、全パス溶接モデルと グルーピングモデルの両方において最終パス近傍に引張 の残留応力が発生していることが分かる。これは溶接の ように局部的に加熱すると金属は熱膨張するが、周囲の 冷たい部分によって拘束され圧縮される。その後の冷却 過程では、加熱部が収縮して周囲から引張られ、最終的に 引張りの残留応力が発生している。

Fig. 6 に溶接開始位置から 180 度の断面における Fig. 1(b)に示した線 A-A'上の残留応力分布の比較を示す。同 図において、太線および細線の実線はそれぞれ全パス溶 接モデルにおける軸方向成分σ_zの残留応力分布および周



Fig. 7 Distribution of maximum temperature at 45th pass on full pass model and 13th pass on grouping model.

方向成分*σ*_θの残留応力分布を、太線および細線の破線は それぞれグルーピングモデルにおける*σ*_z残留応力分布お よび*σ*_θ残留応力分布を示し、●印および◆印はそれぞれ 軸方向および周方向の残留応力の測定値を示す。残留応 力の測定結果は固有ひずみ法によるものである。Fig.6よ り、全パス溶接モデルに関しては、残留応力分布は軸方向、 周方向ともに測定結果と良く一致していることが分かっ た。グルーピングモデルに関しては、最終層の近傍では測





定結果および全パス溶接モデルの両方に対して近い分布 となっているが、内面側では測定結果、全パス溶接モデル の両方と差があることが確認できた。

以上の検討により、グルーピングモデルでは実現象を 十分に再現できていないことを示唆する結果が得られた ことを確認した。

2.3 残留応力分布に及ぼすグルーピングの影響

全パス溶接モデルとグルーピングモデルにおける σ_θ(周方向成分)残留応力分布の差に関して議論するため に、溶接開始位置から 180 度の断面での全パス溶接モデ ルにおける 45 パス目(第13層、第1パス)とグルーピング モデルにおける 13 パス目(第 13 層)の最高到達温度分布 を Fig.7 に示す。これらの溶接は、それぞれのモデルにお ける外面側の溶接から内面側の溶接に移った後の最初の パスであり、Fig.1(b)に示す溶接グループ5の最初の溶接 パスである。ここで、文献[9]に示す両端が完全拘束され た棒の一次元の力学モデルを仮定した場合、塑性変形を 生じる温度はおよそ 150℃となる。Fig. 7(a)より全パス溶 接モデルにおいて塑性変形が生じる可能性のある温度が 150℃以上になる領域は比較的小さくなっていることが 分かる。一方、同図(b)よりグルーピングモデルにおいて は、塑性変形を生じる可能性がある領域は全パス溶接モ デルに比べて大きくなっていることが確認できる。

さらに、全パス溶接モデルとグルーピングモデルでは、

溶接部を拘束する状態も異なっている。全パス溶接モデルにおける45パス目の溶接は母材の片側と第8層に拘束されているが、グルーピングモデルにおける13パス目の溶接では、母材の両側と第8層に拘束されていることから、溶接により発生する残留応力の大きさに影響すると考えられる。すなわち、溶接部の拘束が大きいグルーピングモデルでは、発生する残留応力が大きくなると推察される。

Fig. 8 に全パス溶接モデルにおける 45 パス目と、グル ーピングモデルにおける 13 パス目の溶接開始位置から 180 度の断面における周方向成分σθ の応力分布を示す。 全パス溶接モデルの溶接開始前、トーチ通過時、完全冷却 後の周方向成分 の応力分布を Fig.8(a)、(b)、(c)に示し、 グルーピングモデルの溶接開始前、トーチ通過時、完全冷 却後の周方向成分 σ_{θ} の応力分布を(d)、(e)、(f)に示す。Fig. 8(b)、(e)より、Fig.7に示した塑性変形が発生する可能性 のある150℃以上の領域に対応するように、溶接部近傍に 大きな圧縮の応力が生じていることが分かる。特に、グル ーピングモデルにおいては、全パス溶接モデルに比べ、大 きな圧縮応力が生じている領域が明らかに大きくなって おり、内面側の溶接金属のほぼ全域にわたり圧縮応力が 発生している。そのため、グルーピングモデルにおいて内 面側の溶接金属全体にわたって圧縮の塑性ひずみが発生 するため、Fig. 8(f)のように、完全冷却後に大きな領域に 引張の応力が発生するのに対し、全パス溶接モデルにお いては、同図(c)のように内面側の溶接金属に比較的近い 領域のみ完全冷却後に引張りの応力が発生していると考 えられる。

このように、全パス溶接モデルとグルーピングモデル においては、溶接中の過渡温度分布および溶接部近傍の 拘束状態の差から応力分布に違いが発生し、冷却後の応 力分布においても差が生じると考えられる。特に、本解析 で実行したグルーピングモデルでは、各層を1つの溶接 パスにまとめた部分に関しては層内の溶接パスの入熱量 の和を投入するという比較的単純なモデル化を行ったが、 上記のようにグルーピングにより応力分布に差が生じる 可能性があることから、グルーピングを使用する際は、全 溶接パスを詳細にモデル化し解析するか、溶接線方向に 塑性ひずみが発生する領域に関して十分に検討する必要 があると考えられる。

以上、本章における検討により、全パス溶接モデルによ り得られた残留応力分布とグルーピングモデルにより得 られた残留応力分布の間に大きな差が確認されたことか ら、多層溶接の解析において全パス溶接モデルの必要性 が確認された。

なお、全パス溶接モデルとグルーピングモデルの解析 に要した計算時間は、それぞれ約 190 時間および約 90 時 間であった。

3. 結言

本研究では、X 開先の円筒多層溶接継手の3 次元移動 熱源を考慮した残留応力解析に理想化陽解法 FEM を適 用し、グルーピングおよび溶接順序が残留応力に与える 影響について検討した結果、以下の知見が得られた。

 理想化陽解法 FEM を用いることで、3,376,074 自由 度の23 層 108 パスのX開先円筒多層溶接継手の残留応 力問題を、約190時間という実用可能な計算時間で解析 できることを示した。

 2) X開先円筒多層溶接を対象に、実施工の溶接順序を 再現した解析と溶接パスのグルーピングを用いた解析を 行い、残留応力に関して固有ひずみ法による測定結果と 比較した結果、実施工の溶接順序を再現した解析では測 定結果と良い一致が得られた。一方、グルーピングを使用 した解析は測定結果と異なる傾向となることがわかった。
3) グルーピングを用いた場合、全パスの溶接を考慮す る場合と比較して、溶接過渡の温度分布や拘束状態が異 なることから、そのモデル化に関して事前に十分検討す る必要があることが示唆された。

参考文献

- Y. Ueda and T. Yamakawa: Analysis of Thermal Elastic-Plastic Stress and Strain during Welding by Finite Element Method, Transaction of The Japan Welding Society, Vol.2-2(1971), pp.90-100.
- [2] I. Muroya, Y. Iwamoto, N. Ogawa, K. Hojo, K. Ogawa: Residual stress evaluation of dissimilar weld joint using reactor vessel outlet nozzle mock-up model (report-1), Proceedings of PVP2008 (2008), PVP2008-61829
- [3] J. J. Xu, P. Gilles, Y. G. Duan and C. Yu: Temperature and residual stress simulations of the NeT single-bead-on-plate specimen using SYSWELD, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.99 (2012), pp.51-60.
- [4] M. Shibahara, K.Ikushima, S. Itoh, K. Masaoka: Computational Method for Transient Welding Deformation and Stress for Large Scale Structure Based on Dynamic Explicit FEM, Journal of The Japan Welding Society, Vol.29, No.1(2011), pp.1-9.
- [5] Peter Wriggers: Nonlinear Finite Element Methods, Springer (2008).
- [6] K. Ikushima, S. Itoh and M. Shibahara: Development of Parallelized Idealized Explicit FEM Using GPU, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.31, No.1 (2013), pp.23-32.
- [7] R. H. Leggatt, D. J. Smith, S. D. Smith and F. Faure: Development and experimental validation of the Deep Hole method for residual stress measurement, Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol.31, No.3(1996), pp.177-186.
- [8] A. H. Mahmoudi, S. Hossain, C. E. Truman, D. J. Smith and M. J. Pavier: A New Procedure to Measure Near Yield Residual Stresses Using the Deep Hole Drilling Technique, Experimental Mechanics, Vol.49(2009), pp.595-604.
- [9] 上田 幸雄, 村川 英一, 麻 寧緒: 技術者のための溶 接変形と残留応力 攻略マニュアル, 産報出版, 初版, 第1刷 (2007), ISBN 978-4-88318-033-2.
- [10] K. Nakacho, T. Ohta, N. Ogawa, S. Yoda, M. Sogabe and K. Ogawa: Measurement of Welding Residual Stresses by Inherent Strain Method - New Theory for Axial-symmetry and Application for Pipe Joint -, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, Vol.27, No.1 (2009), pp.104-113