

B07 パイプ構造多層溶接継手の残留応力解析

岡田 崇志 (指導教員：柴原・深沢)

Residual Stress Analysis of Multi-pass Welding Joint for Pipe Structure

by Takashi Okada

Abstract

Heavy thick steel plate is getting to be used for ship structure recently, and multi-pass welding is usually adopted for the welding. Because of the thickness, residual stresses play an important role in the heavy thick steel plate. As the residual stress has much influence on the crack propagation, it is important to examine the residual stress of the welded heavy thick steel plate. In this context, a numerical analysis is available to analyze the residual stress. As for the existing implicit FEM welding analysis method, it is not easy to be applied to the problem of the multi degree of freedom, because of the computational time and memory consumption. On the other hand, it may be possible to simulate the residual stress in short time and with low memory consumption by means of Idealized Explicit FEM. The computational time of this method can be accelerated by using a Graphic Processing Unit (GPU), and the problem of a multi-pass welding can be solved. In this research, the Idealized Explicit FEM with a GPU is applied to the analysis of residual stress of multi-pass welding joint of pipe structure and heavy thick steel plate.

1. 緒言

近年船舶の大型化に伴い、厚手の鋼板が使用される機会が増えている。それらの厚肉鋼板を溶接する際は一般的に多層溶接が行われる。溶接部には一般的に応力が残留し、き裂の進展などに悪影響を及ぼす場合がある。よって溶接部の残留応力状態を知ることが溶接継手の健全性を評価する上で重要であると言える。しかし、従来において多層溶接の移動熱源モデルを用いて忠実に再現する数値シミュレーションはメモリ・計算時間等の制約により不可能な場合が多かった。これは従来より溶接問題に対してよく用いられる静的陰解法 FEM は節点変数と同程度の規模の多元連立一次方程式を解く必要があり、この方程式を解くため時間とメモリを消費する。したがって要素が多くなるとそれに伴い節点も増加するため計算時間・メモリがともに大きくなる。

そこで、本研究においては、静的陰解法 FEM に比べ計算時間・メモリ使用量の面において非常に有利である理想化陽解法 FEM を用いた。さらに今回この理想化陽解法 FEM に GPU による並列解析手法を適用し更なる計算性能の向上を図った。理想化陽解法に GPU による並列解析を適用し、計算性能の向上を図ることによって今まで不可能であった大規模構造物等の解析が市販されているコンピュータ 1 台で行えるようになると考えられる。

本手法を多層溶接問題に適用し、溶接継手の残留応力解析を行った。今回解析する事例はこれまで多層溶接が多く適用されてきた原子力プラントの原子炉圧力容器、加圧器及び蒸気発生器の管台部における溶接継手を解析対象とした。これらの溶接部の溶接残留応力は軸対称を仮定した二次元モデルにより解析評価されることが一般的であり、口径の大型化に伴う解析では複数の溶接パスを同時に発熱させるグルーピングというモデル化手法が使われており、全パスを再現し解析した事例は報告されていない。

本研究では全層・全パスを忠実に再現する多層溶接の三次元残留応力解析を行い、グルーピングについての検討を行った。また、パスの積層順序が残留応力に及ぼす影響について検討を行った。今回原子炉圧力容器の縦通配管を模擬したパイプモデルを用いて、多層溶接の三次元残留応力状態の解析を行った。

2. 解析理論

通常、溶接問題の解析に用いられる静的陰解法 FEM においては、動的効果を表す慣性項と減衰項の影響は非常に小さいと仮定し、現象を静的であると仮定して解析を行う。しかし、静的陰解法 FEM は要素数の 2~3 乗に比例して計算時間・メモリ使用量が増加するため、解析対象が小規模なものに限られてきた。そこで本研究では静的陰解法 FEM における溶接現象の温度変化に伴う各荷重ステップを動的な問題と捉え、計算時間・メモリ使用量を低減できる解析手法を提案する。

2.1 動的陽解法 FEM

FEM による動的解析手法には陰解法と陽解法の 2 つがあり、離散化の方法によって解くべき平衡方程式の解法が異なる。一般的に陰解法 FEM では基礎方程式を離散化し、節点変数と同程度の多元連立一次方程式を解く必要がある。しかし、陽解法 FEM では陰解法のような連立方程式を解く必要はなく、基本理論は次の通りである。

$$\{\ddot{u}\} = (\{u\}_{t+\Delta t} - 2\{u\}_t + \{u\}_{t-\Delta t}) / \Delta t^2 \quad (1)$$

$$\{\dot{u}\} = (\{u\}_{t+\Delta t} - \{u\}_{t-\Delta t}) / (2\Delta t) \quad (2)$$

t : 時間

Δt : 時間増分

$\{u\}_{t+\Delta t}, \{u\}_t, \{u\}_{t-\Delta t}$: それぞれの時刻における変位

式(1), 式(2)を次式(3)に示す平衡方程式に代入すると式(4)を得る.

$$[M]\{\ddot{u}\}_t + [C]\{\dot{u}\}_t + \int_V [B]^T \{\sigma\} dV = \{F\}_t \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) \{u\}_{t+\Delta t} \\ & = \{F\}_t - \int_V [B]^T \{\sigma\} dV - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \{u\}_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) \{u\}_{t-\Delta t} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで, 質量マトリックス[M]と減衰マトリックス[C]が節点集中型, すなわち対角成分のみ非零であるとする, 式(4)のマトリックス演算はもはや連立方程式ではなくなり, 過去の時間ステップにおける変位量 $\{u\}_t$ および $\{u\}_{t-\Delta t}$ を代入することで, 変位ベクトル $\{u\}_{t+\Delta t}$ を求めることができる. このことにより, 計算規模が大きくなればなるほど陰解法と比べて計算時間が小さくなり, また, 全体剛性マトリックス[K]を記憶する必要もなくなるので, 使用メモリも大幅に小さくなる.

2.2 理想化陽解法 FEM

前節における説明の通り, 動的陽解法 FEM では節点変数ごとに定められる式(4)を計算することで時間ステップを進める. 動的陽解法 FEM は通常, 衝撃問題のような非常に短い時間現象の解析に用いられる. これはクーラン条件と呼ばれる解析における時間増分の制限により溶接現象のような現象時間の長い問題には不向きであるからである. クーラン条件を式(5)に示す. 1 ステップの解析において動的陽解法 FEM は式(5)のような制約を受ける.

$$v = \sqrt{E/\rho}, \Delta l_{\min} / v > \Delta t_{cr} \quad (5)$$

v : 応力伝播速度

E : ヤング率

ρ : 密度

Δt_{cr} : 限界時間増分

$\Delta l_{\min}$: 要素における一辺の最小サイズ

式(5)に示されるように解析における限界時間増分が要素における一辺の最小サイズとヤング率, 密度により決定される. 溶接現象のような現象時間の長い問題にも動的陽解法 FEM を適用できるようにこのクーラン条件による制約を緩和できるような方法を本研究では考えた.

溶接力学解析では一般的に溶接線近傍の非線形領域は詳細解析が必要なため非常に要素分割を細かくする. そのため, 限界時間増分もそれに伴い小さくなってしまふ. そこで本手法では比較的少ないステップ数で変位を収束させられるように質量マトリックスと減衰マトリックスの決定法を提案する.

式(5)で表されるクーラン条件より時間増分 Δt_{cr} と要素における一辺の最小サイズ $\Delta l_{\min}$ および応力伝播速度 v の関係を与えると式(6)のようになる.

$$\Delta l_{\min} / v = a \Delta t_{cr}, \quad (a > 1) \quad (6)$$

a : 応力波が要素を通過するのに必要な計算回数

今回の解析では $a = 10$ として要素内の応力の伝播を十分評価できるようにした. 式(5)の応力伝播速度の式と式(6)より要素における自由度ごとの仮想的な密度

$\rho_i(i: x, y, z)$ は 式(7)のように表される.

$$\rho_i = a^2 \Delta t_{cr}^2 E / \Delta l_{\min}^2 \quad (7)$$

$\Delta l_{\min} (i: x, y, z)$: 要素の各自由度方向の最小サイズ
この仮想密度を用いて式(8)に示す積分を行い, 質量マトリックスを求める.

$$[M] = \int_V \{\rho_i\} dV \quad (8)$$

ただし, 式(12)の積分は行成分を対角項に集中させて, 節点集中型のマトリックスとする.

次に減衰マトリックス[C]は静的解へ早く収束することを目的とする. 1 次元振動理論を元に質量を m , 減衰係数を c , ばね定数を k とすると $c = 2\sqrt{mk}$ で臨海減衰となり, 最も早く静的解に収束することから式(9)のように決定する.

$$c_{ii} = 2\sqrt{m_{ii} k_{ii}} \quad (9)$$

c_{ii} : 減衰マトリックスの対角成分

m_{ii} : 質量マトリックスの対角成分

k_{ii} : 要素剛性マトリックスの対角成分

要素剛性マトリックスは静的陰解法と同じように熱弾塑性理論に基づき式(10)のように表される.

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (10)$$

$[B]$: 変位 - ひずみ関係を規定するマトリックス

$[D]$: 応力 - ひずみ関係を規定するマトリックス

$[K]$ マトリックスはステップごとに, ヤング率, 降伏応力の温度による変化を考慮した形で表される.

以上の方法により理想化陽解法は収束するのに必要な時間ステップ数を削減することが可能になると考えられる.

また, 解析手法の手順は静的解析と同様に, 熱伝導解析により得られた温度増分により発生した荷重を外力として用いる. この温度増分による荷重を式(4)に代入し, 前節で説明した仮想密度を用いて調整した質量マトリックス[M]と減衰マトリックス[C]を用いて式(4)を解くことにより各荷重ステップの変位を求め, 各荷重ステップの変位が収束するまで反復計算する. 変位が収束したと判断したときに応力や塑性ひずみなどの物理量の更新を行う. 前節で示したように慣性項と減衰項を決定することにより動的効果を抑えている.

2.3 GPU による理想化陽解法 FEM の並列化

理想化陽解法では式(4)に表されるように変位の計算は自由度ごとに計算が行われる. また等価節点力は次式のように表される.

$$\{F_{int}\} = \sum_i \int_V [B]^T \{\sigma\} dV \quad (11)$$

応力積分と変位を求める際に理想化陽解法は要素ごとまたは自由度ごとに独立した計算が繰り返される. よってこれらは並列化に適すると考えた. Graphic Processing Unit (以下 GPU) とは画像データ処理を行うプロセッサのことで, リアルなコンピュータグラフィックスなどを

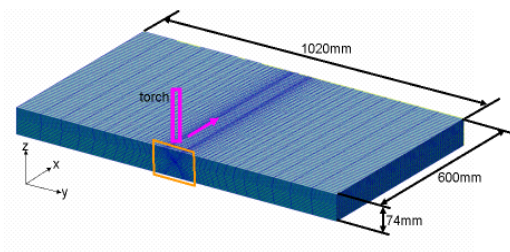


Fig.1 Analysis model.

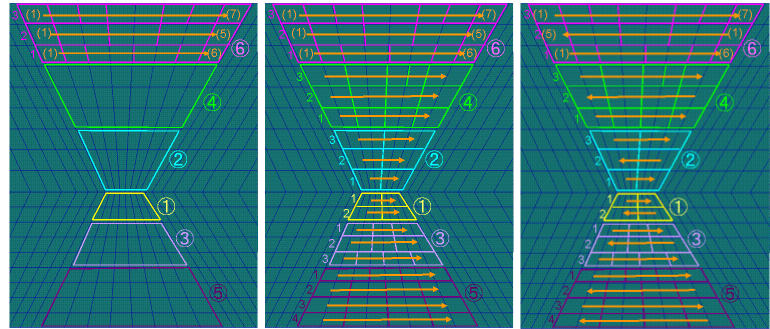


Fig.2 Welding sequence.

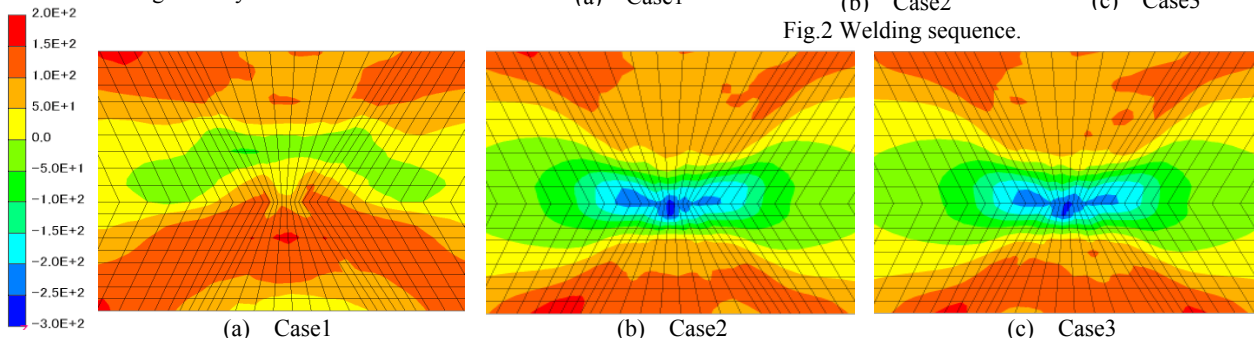
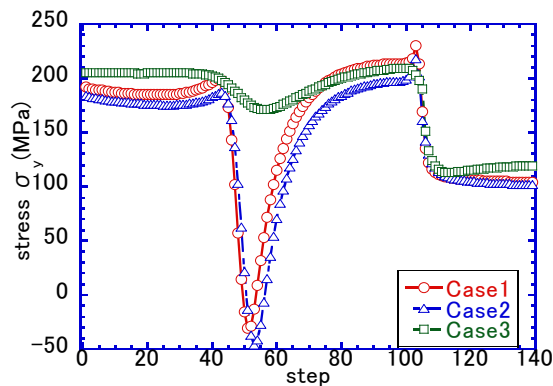
Fig.3 Residual stress distribution of σ_y .

Fig.4 History of stress in y direction.

生成するために用いられる。また GPU は数値演算能力が高いことで知られており、今回この GPU を用いて 1 要素の計算に GPU の 1 プロセッサを割り当て、並列計算を行った。

3. グルーピングが残留応力に及ぼす影響

以上の解析手法を用いて、多層溶接の詳細な解析を行った。解析に使用したモデルは多層溶接時に生成される残留応力の傾向を見るために厚板のモデルを用いた。解析はこれまで行われてきたグルーピングをして最終グループのパスのみグルーピングを行わないモデルと理想化陽解法に GPU 適用することによって可能となった全パス再現するモデルで比較を行った。

3.1 解析モデル

解析に使用したモデルの要素分割図を Fig.1 に示す。要素分割は溶接線方向(x 方向)に 60 分割、板幅方向(y 方向)に 56 分割、板厚方向(z 方向)に 18 分割である。

Fig.2 の(a)に Case1 としてグルーピングを行い①グループから⑤グループまで順にグループごとに加熱を行い、最終層のみ全パス加熱したモデル、(b)に Case2 として全

パスグルーピングせず加熱したモデル、(c)に各層のパスの積層方向を交互に変更し全パス加熱したモデルの積層順序を示す。

3.2 残留応力解析結果

Fig.3 にそれぞれのケースの y 方向の残留応力解析結果を示す。Fig.3 よりどのケースでも最終パス近傍に引張り残留応力が発生している。これは溶接のように金属を局部的に加熱すると膨張するが、周囲の冷たい部分によって拘束され圧縮される。そのため冷却後、この部分が収縮して周囲から引張られる。よって引張りの残留応力が付与される。一般的に溶接を行った部分には引張りの応力が残留するため、この解析は定性的に行われたと考えられる。

(a)の Case1 と(b)の Case2 を比較するとグルーピングを行った Case1 より全パス加熱を行った Case2 の方が最終パスと反対側の表面に大きな引張りの残留応力が発生している。これはグルーピングを行い入熱するよりも全パス入熱する方がそれぞれのパスで隣の要素からの熱が伝導して応力が残留するためではないかと考えられる。

また(b)の Case2 と(c)の Case3 の分布より、厚板の中心部には圧縮の残留応力が発生し、表面部には引張りの残留応力が発生している。これはまだ溶接パスが少なく、溶接部の厚さが薄いときは角変形が生じやすい。よって溶接部の反対側には引張りの塑性ひずみが付与され、圧縮の残留応力が発生する。しかし溶接パス数が増え、溶接部の厚さが厚くなると角変形が生じにくくなる。角変形が生じにくくなると前のグループの溶接時に付与された引張りの応力がそのまま残留し引張りの残留応力が生じるためであると考えられる。

Fig.7 に各ケースの最終溶接部の表面の応力の履歴を示す。50 ステップを過ぎたところで大きく応力が低下しているのはトーチが通過したためである。各ケースとも多少の違いはあるものの同じ傾向を示していることが確認できる。

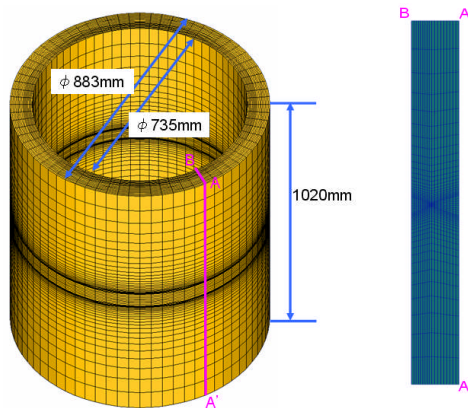


Fig.5 Analysis model of pipe joint

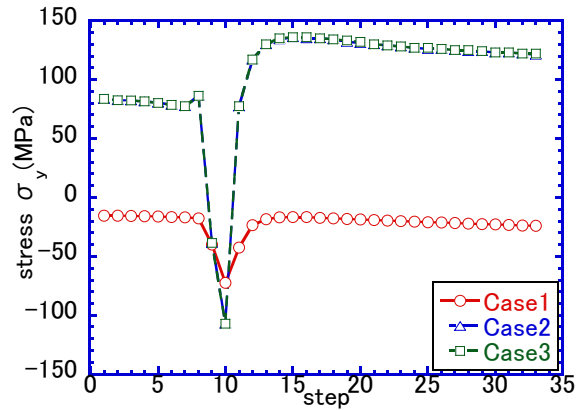
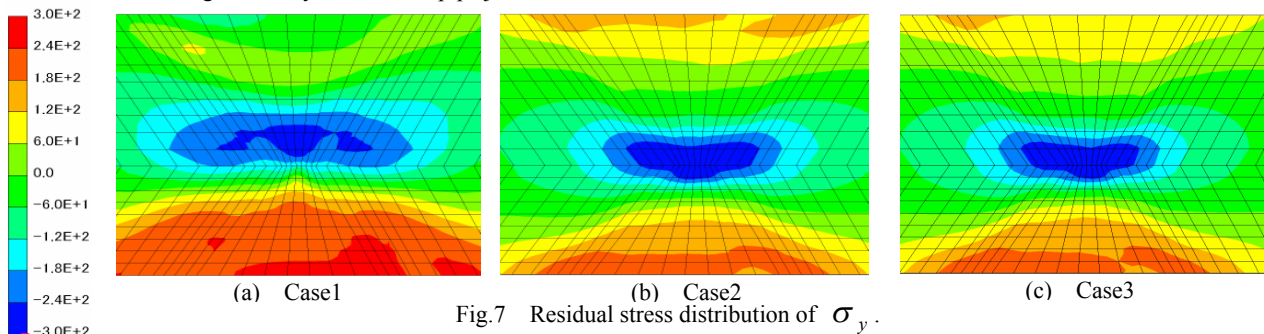


Fig.6 History of stress in y-direction

Fig.7 Residual stress distribution of σ_y .

以上よりグルーピングを行った解析では最終溶接部の応力値は全パスと比べても近い値が得られた。しかし溶接部の内部や最終溶接部の反対側の応力にはグルーピングを行った解析と全パス加熱を行った解析には違いが見られた。今回解析を行った両開先のようなモデルでは全パスを解析する必要があると考えられる。また、今回行った解析では同材の多層溶接を行ったため積層の順序による影響は大きくは出なかった。異材の多層溶接の解析ではこれ以上に影響が出てくると考えられる。

4. 実構造モデルへの適用

4.1 実構造モデル

第2節で説明したGPUを適用し並列化した理想化陽解法FEMを実構造モデルへ適用した。実構造モデルは原子炉圧力容器を模擬したパイプ構造を対象とした。今回解析を行ったモデルの全体図とA-A'平面の断面図をFig.5に示す。溶接の積層順序はFig.2に示す3ケースで行う。

4.2 パイプ構造モデルの残留応力解析結果

Fig.7にそれぞれのケースのy方向の残留応力解析結果を示す。パイプ構造の解析結果でも厚板と同様に、中心部に圧縮の残留応力が発生していることが確認できる。また3ケースともパイプの内側にあたる最終溶接グループと反対側に高い残留応力が発生している。これはパイプ構造の内側は半径が外側よりも小さくなるため、入熱量がひとつの要素あたり同じであると小さな要素は入熱量が大きくなるためグルーピングを行ったCase1ではより大きな引張りの応力が残留したと考えられる。この引張りの残留応力が大きいと最終パスの応力が小さくなったと考えられる。

Fig.6に最終溶接部の表面の応力の時間履歴を示す。これも各ケースとも同様の傾向を示しているが、グルーピングを行ったCase1のみ大きく違った応力値を計測した。

Case1の最終溶接部に圧縮の応力が残留した原因も半

径による入熱量の違いによると考えられる。グルーピングで一度に入熱を行ったため、全パス加熱を行った解析結果よりも影響が大きくなったと考えられる。

Case2とCase3を比較すると厚板と同様に顕著な違いは現れなかったが、最終パスの応力に違いが見られ、Case3のほうがy方向の残留応力が小さくなった。

これよりパイプ構造を解析する際にグルーピングを行うと、厚板よりも解析結果に大きな違いが現れることが確認できた。

6. 結 言

本研究では、理想化陽解法FEMによる熱弾塑性解析法に対し、GPUによる並列計算を適用した解析手法をパイプ構造の多層溶接継手に適用することによってグルーピングと全パス加熱の比較、積層順序による比較を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 最終パス近傍に高い引張りの残留応力が残り、最終溶接グループと反対側の表面にも引張りの残留応力が発生すること確認した。
- 2) グルーピングを行ったモデルと全パス加熱を行ったモデルより得られた残留応力の解析結果には違いが見られた。
- 3) 厚板の同材の継手モデルでは積層順序による違いは微小であったが、パイプ構造では違いが生じた。

参考文献

- 1) R. Wang, H. Serizawa, H. Murakawa : Thermal Elastic-Plastic FEM Analysis of Typical Welded Joints and Estimation of Inherent Deformations through Inverse Analysis [in Japanese], Pre-Prints of the National Meeting of JWS, (83), 2008, pp. 268-269