

M09 AMG 法を導入した理想化陽解法 FEM による 大規模薄板構造物の溶接変形解析

竹内 啓洋 (指導教員 柴原・伊藤)

Analysis of Welding Deformation of Large-scale Thin Plate Structures by Using Idealized Explicit FEM Based on AMG

by Akihiro Takeuchi

Abstract

In the assembly of structures such as construction machines and ship hulls, welding is widely used as a joining technique of members. However, the large distortion may occur due to thermal cycles of welding. This deformation may cause the inconsistency such as gaps on the construction, and it decreases the quality of products. Therefore, it is desired to establish the method which can accurately predict the welding deformation of practical structures. In this study, multigrid method is introduced to Idealized Explicit FEM (IE-FEM) to achieve faster and low memory computation of welding deformation of thin plate structures. The performance of the developed method is evaluated through the thin plate welding problem. As a result, the validity and usefulness of the developed method is verified. In addition, the developed method was applied to the analysis of welding deformation of the construction machine. The results obtained by the developed method and the measured deformation are compared. As a result, it is found that the both results agree very well. This concludes that the developed method is effective on the analysis of practical thin plate structures.

1. 緒 言

船舶や橋梁、建設機械といった構造物の建造において、部材を接合する手法として溶接が用いられることが多い。しかし、溶接を行うと溶接部近傍に大きな熱ひずみが発生するため、材料が局部的に降伏し、冷却後に永久的な変形が残る。この変形はギャップや食い違い等の施工上の不良の原因となり、品質低下を引き起こすことになる。また、溶接変形の矯正は熟練工による手作業によりなされることが多く、構造物の建造において手間やコストや時間の増加につながる。そこで、溶接施工前に溶接変形量を正確に予測することが出来れば、溶接変形を考慮した構造の設計が可能になり、建造コストや時間の削減につながると思われることから、溶接変形や残留応力の定量的な予測は重要であるといえる。

溶接変形や残留応力の予測手法として、熱弾塑性解析理論を適用した非線形 FEM による数値シミュレーションが挙げられる。しかし、熱弾塑性 FEM 解析を用いて溶接の力学現象を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解析の実行が困難な場合が多かった。これは、溶接問題において一般的に用いられる静的陰解法 FEM においては、節点変数と同程度の大規模な連立一次方程式を解く必要があり、構造解析において連立一次方程式の求解に一般的に用いられる直接法においては、計算時間・メモリがともに解析自由度数の 2~3 乗に比例して大きくなるためである。

これらの問題を解決するために、大規模構造解析に関して多くの研究がなされてきた。しかしながら、これらの研究は、PC クラスタやスーパーコンピュータ等の大規模な計算設備を用いるものであり、設計や生産の現場で

使用する為には市販の PC1 台程度のハードウェアでの解析を実現する必要がある。この目標を達するために、本研究では理想化陽解法 FEM¹⁾と呼ばれる手法に注目する。理想化陽解法 FEM は動的陽解法 FEM を基に開発された手法であり、静的陰解法 FEM に比べて、圧倒的に高速かつ省メモリであることが示されている。理想化陽解法 FEM を用いることで、従来手法では極めて解析困難な、百万要素を超えるモデルや 100 パスを超える大型厚板構造物の多層溶接の溶接変形や残留応力を、現実的な時間で解析可能であることが示されている。

このように、理想化陽解法 FEM を用いることで、従来手法では困難な大規模構造物の溶接変形問題の解析が実現されている。しかし、理想化陽解法 FEM はその定式化上、薄板溶接変形解析問題においては計算時間が増大する場合が存在する。溶接を用いて製作される構造物には、船舶に代表されるような、大規模薄板構造物が多数存在し、前述の様に溶接に伴い生じる変形が問題となっていることから、薄板構造物の溶接変形をより効率的に予測できる手法の確立が必要であると言える。

そこで、本研究においてはマルチグリッド法と呼ばれる手法に注目し、マルチグリッド法を理想化陽解法 FEM に導入することで、薄板構造物の溶接変形や残留応力解析を効率的に実施することが可能な解析手法を開発する。開発手法の性能評価として、基礎的な薄板溶接変形解析を実施し、解析結果および計算時間を静的陰解法 FEM と比較し、開発手法の有用性を示す。さらに、大規模薄板構造物の溶接変形解析問題への開発手法の適用可能性について示すため、開発手法を建設機械の台座部を製作する際の溶接に伴う変形の解析に対して適用し、解析結果

と実験計測結果を比較する。

2. マルチグリッド法を導入した理想化陽解法 FEM の開発

2.1 マルチグリッド法

マルチグリッド法とは、本来の解析に用いる計算格子よりも格子間隔が粗いコースグリッドと呼ばれる格子を用いて、連立方程式の反復解法における収束性を高める手法である。一般に反復法では、残差の高周波成分を早く除去することができるが、低周波成分を除去するには非常に多くの反復回数が必要となる、平滑化作用が知られている。そこで、マルチグリッド法では、格子間隔が異なる複数の格子を用意し、各格子上で反復法を用いることで、各格子における残差の高周波成分を除去する。そうすることで、ある格子における残差の低周波成分は、より粗い格子においては高周波成分として除去されるため、全体的に解を高速に求めることが可能となる。

前述の通り、マルチグリッド法を用いるためには、粗い格子を作成する必要がある。粗い格子の作成方法の違いにより、幾何学的 (Geometric) マルチグリッド法と代数的マルチグリッド (Algebraic Multi Grid : AMG) 法の 2 種類に分類される。このうち幾何学的マルチグリッド法は、問題を解く際に格子情報を処理する必要があり、有限要素法などの非構造格子を用いる解析においてはその取扱が困難となる。一方、代数的マルチグリッド法は、連立方程式の係数行列のみから粗い格子の係数行列を生成するため、必要なデータは問題の係数行列のみであり、非構造格子を用いる解析手法に対しても容易に適用が可能である。本研究では、有限要素法を用いた複雑構造物の解析を対象としていることから、係数行列のみから粗い格子の係数行列の作成が可能な代数的マルチグリッド法を用いる。

次に、AMG 法における粗い格子の係数行列の作成方法を示す。まず、解くべき問題である連立方程式が式(1)の形で与えられる。

$$[K_1]\{u_1\} = \{F_1\} \quad (1)$$

ここで、 $[K_1]$ は最も密な格子、すなわちユーザーが作成したメッシュにおける解くべき問題の係数行列、 $\{u_1\}$ は未知数ベクトル、 $\{F_1\}$ は定数ベクトルである。式(1)に対して、1つ粗い格子上の係数行列 $[K_2]$ は式(2)を用いて作成する。

$$[K_2] = [P_1]^T [K_1] [P_1] \quad (2)$$

ここで、 P は補間演算子と呼ばれるものであり、この補間演算子の作成方法の違いによって、AMG 法にも異なる解法が存在する。本研究においては、粗い格子の未知数 1 つを密な格子の未知数の集合体としてあらわす、Smoothed Aggregate (SA) 法²⁾を用いる。

2.2 AMG 法の理想化陽解法 FEM への導入

本研究では、上述の AMG 法を導入した理想化陽解法 FEM を開発する。開発手法では、最初に SA 法に基づき粗い格子を作成し、補間演算子を用いて式(2)より粗い格子の剛性行列を作成していく。そして最も粗い格子の剛

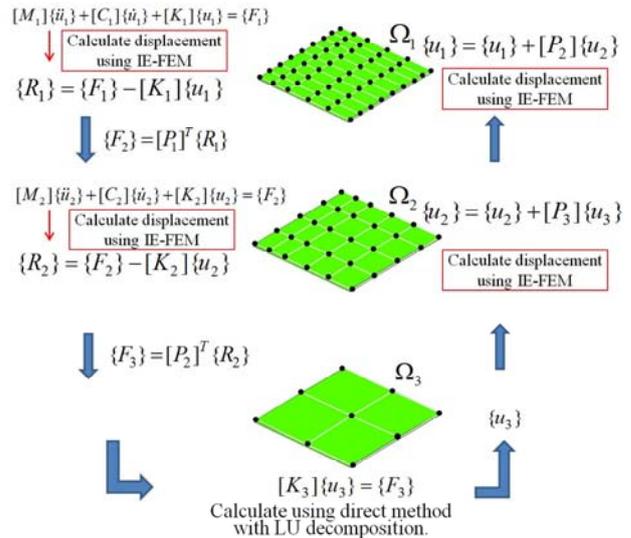


Fig. 1 Flow of Idealized Explicit FEM based on AMG.

性行列に対して LU 分解を行い、結果を保存する。なお剛性行列は疎行列の形式で保存する事でメモリ消費量を低減させる。以上の処理を行ったのち、温度場を更新し、最も密な格子の剛性行列を、更新した温度場を用いて再度作成する。その他のレベルの格子の剛性行列は、格子の作成の際に計算されたものを継続して使用する。これは、溶接の進展にともなう局所の非線形弾塑性変形への追従性を、局所の変形への追従性が最も良い、最も密な格子において確保するためである。構造全体の線形弾性変形は粗い格子における剛性行列を用いて計算する。剛性行列の更新に続いて、Fig. 1 に示すように理想化陽解法 FEM を用いた変位の計算を各格子において実行する。まず、最も密な格子において、理想化陽解法 FEM を用いた計算を数回実行し、残差力ベクトルを式(3)のように算出する。

$$\{R_1\} = \{F_1\} - [K_1]\{u_1\} \quad (3)$$

式(3)によって求めた残差を、補間演算子を用いて式(4)のように 1 つ粗い格子の荷重ベクトルへ射影する。

$$[F_2] = [P_1]^T [R_1] \quad (4)$$

同様の計算を最下層の格子に達するまで行う。最下層においては保存した LU 分解を使用し、直接法にて変位を算出する。最下層にて変位を算出したのちは、1つ密な格子に補間し、理想化陽解法 FEM による収束計算を複数回実施する。この解と最初に求めた解を足し合わせることで変位を求める。この作業を最も密な格子に達するまでおこない、求めた変位を用いて残差力ベクトルを算出し、収束判定を行う。

3. 開発手法の基礎的検討

本章では、開発したマルチグリッド法を導入した理想化陽解法 FEM を、基礎的な薄板構造物の溶接変形解析に適用し、開発手法の精度検証ならびに性能評価をおこなう。まず、静的陰解法 FEM の解析結果との比較を通して、

開発手法の解析精度検証を行う。次に、開発手法、GPU 並列化理想化陽解法 FEM、静的陰解法 FEM において解析時間の比較を行い、薄板構造物の溶接変形解析における開発手法の性能評価をおこなう。なお、比較対象である静的陰解法 FEM の連立一次方程式のソルバーに Intel Fortran Compiler 11.1 の Math Kernel Library に付属する直接法スパースソルバーである PARDISO を採用した。また、開発手法および GPU 並列化理想化陽解法 FEM の並列計算には NVIDIA 社製の GPU である GeForce GTX 560 Ti を用いた。

3.1 開発手法の精度検証

Fig. 2 に解析モデルを示す。本解析モデルは板幅 1000 mm、長さ 1000 mm、板厚 10 mm の板の中央を溶接するビードオンプレート溶接とした。本解析モデルの要素数は 55,200、節点数は 61,307 である。溶接条件は Table 1 に示す通りとした。溶接条件を決定するにあたり、佐藤・寺崎らにより明らかにされた入熱量と角変形の関係式より、角変形が最も大きくなると考えられる入熱量 $Q_{net} = \eta AV / S$ を用いることとし、これより電流 A を 100 A、電圧 V を 100 V、溶接速度 S を 8 mm/s、熱効率 η を 0.8 とした。また、変位の拘束条件は Fig. 2 に示す Δ 印に示すように、1 点を x, y, z 方向に拘束し、1 点を y, z 方向、残り 1 点を z 方向に拘束し、剛体移動モードのみを拘束するものとした。

Fig. 3 に Z 方向変位分布の解析結果を示す。同図(a)は開発手法、(b)は静的陰解法 FEM の解析結果である。Fig. 3 より、開発手法と静的陰解法 FEM の Z 方向、すなわち面外方向の変位分布は良好に一致していることが分かる。Fig. 4 は、Fig. 3 に示す面外方向の変位分布、すなわち角変形を溶接線方向中央横断面 A-B 上で比較したものである。Fig. 4 の●印が開発手法、○印が静的陰解法 FEM の解析結果である。同図より、開発手法と静的陰解法 FEM の角変形は定量的にも一致していることが分かる。同様に、横収縮、縦収縮、残留応力も定量的に一致する結果が得られており、基礎的な薄板構造物における開発手法の有用性を示すことができた。

3.2 開発手法の性能評価

本節では、先述の板厚 10 mm のモデルの他に、板厚 5 mm と 20 mm のモデルにおいても同様のビードオンプレート溶接モデルにおける溶接変形解析をおこない、計算時間に関しての性能評価を行う。

解析モデルは、前節で用いたものと同じ板厚 10 mm のモデルを基準とし、板厚 5 mm のモデルは要素数が半分になるように、板厚 20 mm のモデルは要素数が倍になるように作成した。また、溶接条件は、板厚を 2 倍にしたとき、電流を 2 倍、溶接速度を半分とすることで、 Q_{net} / h^2 (h は板厚)の値が等しくなるようにした。このような条件の下、開発手法、GPU 並列化理想化陽解法 FEM (IE-FEM)、および静的陰解法 FEM (SI-FEM) による解析を実施し、

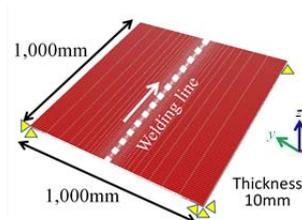


Fig. 2 Analysis model.

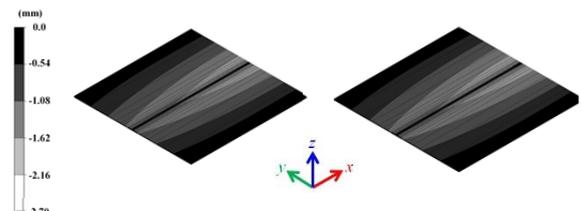
Table 1 Welding conditions.

Current	100.0(A)
Voltage	100.0(V)
Welding speed	8.0(mm/s)
Heat efficiency	0.8

解析時間の比較を行った。

まず、参考解である静的陰解法 FEM の解析の収束条件として、非線形の反復計算における、残差力ベクトルの 2 乗ノルムと、等価節点力ベクトルの絶対値の全節点に関する和をとったベクトルの 2 乗ノルムの比を用いておこない、この比の値が 1.0×10^{-3} を下回れば反復計算が収束したとみなし、次の温度ステップの計算に移るものとした。

開発手法は、前節で示した静的陰解法 FEM の解析結果との比較より、収束条件が 1.0×10^{-3} の場合に、静的陰解法 FEM とほぼ同等の解が得られることが分かった。一方、理想化陽解法 FEM は、本解析モデルにおいては、構造全体の変形を収束させるため収束条件を小さくする必要があり、収束条件を 1.0×10^{-4} に設定する必要があることが分かった。よって、その収束条件における計算時間を用いて性能評価を実施する。以上の条件において計算時間を整理したものが Fig. 5 である。同図は横軸に自由度数を、縦軸に計算時間をとっている。なお、それぞれのモデルの板厚の自由度数は、板厚 5 mm の場合は 99,681、板厚 10 mm の場合は 183,915、板厚 20 mm の場合は 352,383 である。Fig. 5 において、●印は開発手法、□印は理想化陽解法 FEM、△印は静的陰解法 FEM の計算時間を示す。Fig. 5 より板厚 10 mm の場合において、開発手法は静的



(a) Developed method. (b) Static Implicit FEM.

Fig. 3 Distribution of displacement in Z direction.

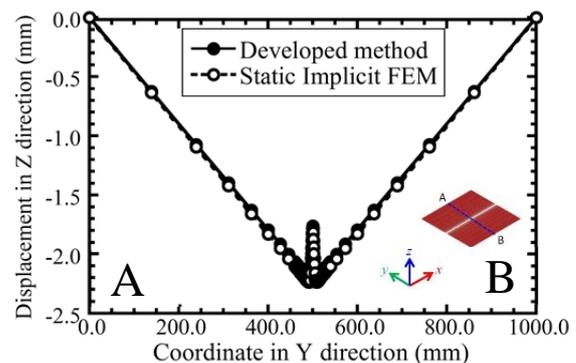


Fig. 4 Distribution of displacement in Z direction along A-B line.

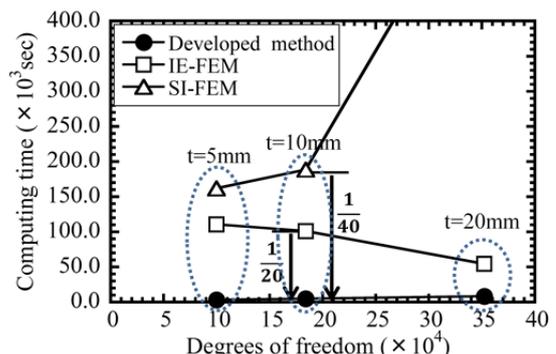


Fig. 5 Comparison of computing time.

陰解法 FEM に対して約 40 倍の高速化, 理想化陽解法 FEM に対しても約 20 倍の高速化を実現していることがわかる。よって開発手法は薄板構造物解析問題において, 理想化陽解法 FEM より高速で解析可能であることが分かった。

また, 理想化陽解法 FEM の解析時間は, 自由度数が少なくなっているにも関わらず, 計算時間が増加していることがわかる。これは諸言で述べた通り, 薄板構造物解析においては計算時間が増加するというを示している。一方, 開発手法の計算時間は自由度数に比例する程度であり, 理想化陽解法 FEM の薄板構造物解析における問題点を克服し, 薄板問題における効率的な解析を実現できたといえる。

4. 大規模構造物における開発手法の適用性

前章までの議論により, 開発手法の妥当性, および, その基本的な性能について示した。本章では, 開発手法を大規模薄板構造物の溶接変形解析に対して適用し, 実験計測結果との比較を通して開発手法の有する解析精度を検証し, 開発手法が大規模薄板構造物の溶接変形解析に対し適用可能であることを示す。

解析モデルを Fig. 6 に示す。同図に示す通り, 解析モデルは建設機械の台座部を対象としている。溶接は 28 パス実施する。解析モデルの節点数は 585,363, 要素数は 485,831 である。

Fig. 7 に解析結果を示す。同図は, Fig. 6 に示す解析モデルの裏面における Z 方向変位分布を示している。Fig. 7 より, 最大で 1.5 mm 程度の溶接変形が発生していることが分かる。Fig. 8 に実験計測結果と解析結果の比較を示す。本解析モデルにおいて, Fig. 6 中の点線で示す, 構造物裏面の溶接変形が問題となっている。よって, その部分の溶接変形に注目して検討を行う。Fig. 8 は, ライン C-D 上の, 解析結果と計測結果の Z 方向変形量の分布を比較したものである。同図の●印は解析結果, □印は計測結果を示している。同図より, 解析結果と計測結果は定量的に一致していることが分かる。

以上より, 解析結果と実験計測結果の傾向はおおよそ一致しており, 大規模薄板構造物においても, 開発手法の有用性を示すことができたと言える。また, 解析に要した計算時間は 1 パス 1.5 時間程度であり, 全パス解析では約 51 時間(約 2 日)という実用可能な時間で解析可能であった。

以上のように, 開発手法は, 大規模薄板構造物の溶接変形解析問題に適用可能であり, かつ, 市販の PC1 台程度のハードウェアを用いて, 現実的な時間で解析可能であることが示せた。

5. 結 言

本研究では, 薄板構造問題の溶接変形や残留応力解析を効率的に実施することが可能な手法を構築するため, AMG 法を導入した理想化陽解法 FEM を開発した。開発手法を基礎的な薄板構造物ならびに大規模薄板構造物の変形解析問題に適用した結果, 以下の知見が得られた。

1) 開発手法を基礎的な薄板構造物の溶接変形問題に適用し, 従来手法の解析結果と比較した結果, 残留変形, 残留応力において, 両者は良好に一致することが分かった。

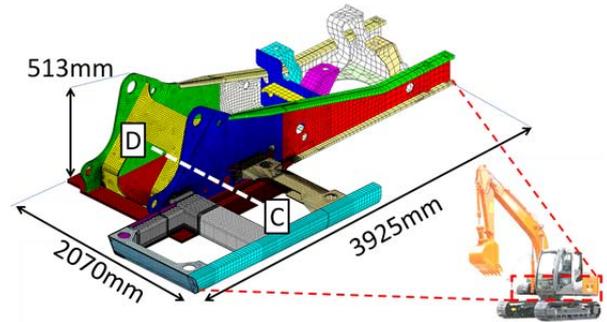


Fig. 6 Analysis model.

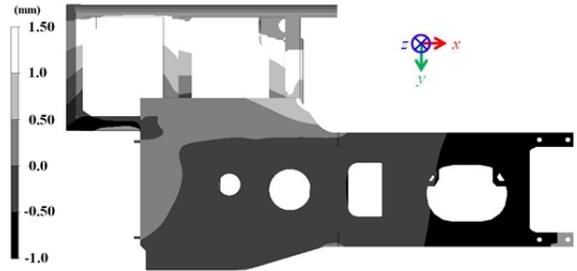


Fig. 7 Distribution of displacement in Z direction.

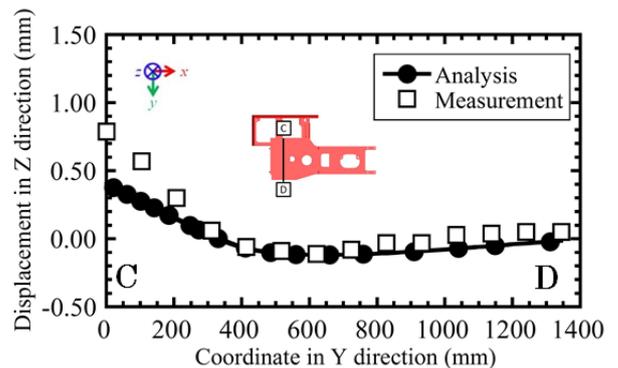


Fig. 8 Comparison of displacement in Z direction along C-D line between measurement and analysis.

- 2) 開発手法の性能評価のため, 静的陰解法 FEM ならびに GPU 並列化理想化陽解法 FEM との計算時間の比較をおこなった, その結果, 板厚 10 mm, 183,915 自由度数のモデルの解析において, 静的陰解法 FEM と比べて 40 倍, GPU 並列化理想化陽解法 FEM と比較して 20 倍の高速化が可能であることが分かった。
- 3) 開発手法を大規模薄板構造物の解析に適用し, 解析結果と実験計測結果を比較した結果, 両者はおおむね良好に一致したことから, 開発手法は大規模薄板構造物の溶接変形解析に対しても有効であることが分かった。

参考文献

- 1) 生島一樹, 八木利起, 伊藤真介, 柴原正和: GPU を用いた並列化理想化陽解法 FEM の開発, 溶接構造シンポジウム講演論文集, 2011, pp.313-320.
- 2) Michael W. GEE, Jonathan J. Hu, Raymond S. Tuminaro: A new smoothed aggregation multigrid method for anisotropic problem, Numerical Linear Algebra Applications, Vol.16, 2009, pp.19-37