

B18 理想化陽解法 FEM を用いた薄板防撓構造の溶接大変形解析

重政 拓海 (指導教員 柴原, 伊藤, 深沢)

Analysis of Welding Large Deformation of Thin Plate Stiffened Structure Using Idealized Explicit FEM

by Takumi Shigemasa

Abstract

Welding is widely used to assemble the steel structures such as ships because of its usefulness and strength of the joint. However, the welding always causes various problems such as welding deformation and residual stress. As a result, welding may various problems such as increase of production costs and decrease of product efficiency. Furthermore, in the case of thin plate, the buckling deformation can be caused after welding, and its straightening is extremely difficult. In the ship building, the car deck of car carrier ship which the thin plate is applied is often buckled after welding. Therefore, it is necessary to accurately predict welding residual stress and develop welding procedures that minimize that deformation.

The objective of the reported work is to investigate welding procedures to find out that which minimizes residual stress to avoid plate buckling. A series of numerical predictions of residual stress is carried out with different welding procedures. Moreover, Idealized Explicit FEM which can simulate large and complicated welding distortion is applied to the buckling problem after welding on the car deck block of the car carrier.

1. 緒 言

船舶に代表される大型鋼構造物の製造において、部材を組立てる際には部材同士を接合する工程が必要であり、接合技術の中で、簡便さや強度などの面から溶接が広く用いられている。しかし、溶接の施工に伴い、残留応力や収縮・曲げなどの溶接変形が必ず生じ、溶接構造物の組立時のギャップや疲労き裂の発生など様々な問題の要因となることがある。特に薄板の溶接においては、矯正が困難な座屈形式の変形を引き起こすこともある。

船舶分野において、板厚 6mm 程度の薄板は自動車運搬船の車両甲板等によく用いられているが、車両甲板の組立工程における溶接により変形が発生し、この変形による面外たわみが板厚の 50 パーセントを超えた場合、プレス曲げやバーナーで炙った後、水冷するといった方法で、面外たわみを減少させるひずみ取りを行わなければならない。一般に、溶接変形を予測することに比べて、ひずみ取りにおける変形を予測する方が格段に難しいと考えられる。その理由としては、ひずみ取りの発生原因において固有ひずみ、変形、残留応力の三者が互いに絡み合っており、特に残留応力は目に見えないという点が挙げられる。すなわち、ひずみ取りの場合には、非常に大きな残留応力がもともと存在し、変形に対する影響が無視できない。また、薄板における大変形は非線形性を示すため、ひずみ取りの機械化が難しく熟練工の手作業で行われており、多くの時間と人手を要する。このような点から考えると、溶接施行の段階において溶接変形をできるだけコントロールし、ひずみ取りを少なくするような工作法を目指すことでコスト削減につながると考えられる。

しかしながら、大型構造物の溶接変形を詳細な熱弾塑性解析により予測することは、膨大な計算時間を要するという点から極めて困難であるのが現状である。そこで、本研究は継手を構成する材料、板厚、溶接入熱によりほ

ぼ決まる固有変形を溶接変形発生源として与え、構造物全体について弾性解析することで溶接変形を予測する固有ひずみ法を用いる。また、既往の解析手法としては陰解法による FEM 解析があげられるが、この手法は構造物全体にわたる連立方程式を構築し、求解する必要があるため、船体ブロックなどの大規模かつ複雑構造の解析は、解析時間やメモリの観点から困難である。そこで、本研究では動的陽解法を基とし、高速化、省メモリ化を図った理想化陽解法 FEM を用いる。また、薄板における大変形座屈問題にも対応できるように幾何学的非線形性を考慮した。

本研究では、以上の開発手法を薄板構造モデルの溶接に適用し、開発手法と従来手法、そして実験結果との比較を行うことにより開発手法の有用性について検討を行う。また、開発手法を薄板防撓構造溶接の大変形問題にも適用することにより、溶接条件や溶接方法が変形に及ぼす影響について考察する。最後に、大型構造物である自動車運搬船(PCC 船)に対して本手法を適用することで、開発手法の大規模実構造物への適用可能性を示す。

2. 解析手法

2.1 理想化陽解法 FEM

開発手法である理想化陽解法 FEM は、静的陰解法 FEM の各荷重ステップにおいて、動的項を付加し、その影響が十分小さくなるまで反復計算を実行することで、静的平衡状態を得る手法である。ここで、動的項の係数マトリックスを節点集中型、つまり対角行列とすることにより、連立方程式を構築・求解する必要をなくし、計算の高速化、省メモリ化を実現する。本手法では、この理想化陽解法 FEM を Fig.1 に示すように固有ひずみを用いた溶接変形解析に導入することで、解析の高速化を図る。

2.2 固有ひずみ法

本研究で用いた固有ひずみによる FEM 解析の他に主な

数値シミュレーション手法として FEM 熱弾塑性解析が挙げられる。これは熱及び変形履歴を逐次再現し、変形解析を行うので、解析時間が膨大となるため大型構造物の解析には不向きであるといえる。

これに対して、固有ひずみ解析は弾性解析であるため、計算時間が熱弾塑性解析に比べてかなり短時間であることが特徴として挙げられる。熱履歴の結果として、残留応力が生じる場合には必ず塑性ひずみが生じており、この残留応力の生成源が固有ひずみであり、次式で示される。

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^* \quad (1)$$

ここで、 ε は全ひずみ(溶接変形)、 ε^e は弾性ひずみ(残留応力)、 ε^* は塑性ひずみ(固有ひずみ)である。

また、本研究では、固有ひずみの算出に入熱量(J/mm)と縦収縮、横収縮、角変形の三成分の固有ひずみ量 ε_x^* 、 ε_y^* 、 θ_x^* の関係を整理したデータベース¹⁾²⁾³⁾を用いた。

2.3 大変形弾性 FEM の導入

大変形問題を扱う際は、幾何学的非線形性を考慮した以下のひずみ-変位関係式⁴⁾を用いる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

変形が大きくなると変位とひずみの間に存在する線形関係が崩れ、面内および面外の大変形項を考慮する必要がある。式(2)に示すように大変形は非線形性を示すため、変位解への収束が不安定となり解析を行うのは困難であ

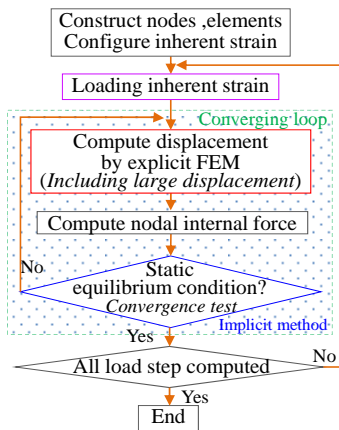


Fig.1 Computing flow of proposed method.

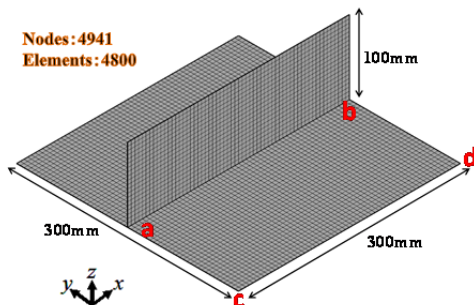


Fig.2 T joint model.

る。そのため、本手法で用いている陽解法ステップにおける質量マトリックス $[M]$ および減衰マトリックス $[C]$ の値を調整することで、変位解への収束安定性を図る。

3. 溶接実験における本解析手法の精度評価

3.1 実験・解析モデルと解析条件

以上の解析手法に基づいて、シェル要素を用いた弾性固有ひずみ解析に適用し溶接変形解析を行う。本研究では四角形シェル要素を用いた要素分割を行う。解析モデルは、T字継手を対象とし、解析の妥当性を確かめるため実際に溶接実験を行い、変形を比較する。また、微小変形のみを考慮した解析結果においても比較検討を行う。実験・解析条件は、電流 180A、電圧 26V、溶接速度 4.3mm/s、熱効率 0.6 とする。また、モデルは Fig.2 に示すように板厚 6.0mm、300mm×300mm の板に板厚 6.0mm、300mm×100mm の板を A 点から B 点まで両側溶接する。解析モデルは剛体変位のみを拘束し、節点数、要素数はそれぞれ 4,941、4,800 である。

3.2 実験・解析結果と本手法の精度評価

実験結果及び解析結果の z 方向 (面外方向) 変位量分布のグラフを Fig.3 に示す。同図の横軸は c 点から d 点までの x 座標値をとり、縦軸に z 方向変位量の分布をとる。同図が示す通り、本手法の解析結果と実験結果は共に良好に一致していることが分かる。また、幾何学的非線形性を考慮することで、より実験結果に近い結果が示された。

4. 座屈変形への溶接条件の影響

薄板防撓構造モデルにおいて、入熱量や溶接方法といった溶接条件による変形への影響を検証する。

4.1 解析条件

解析モデルを Fig.4 に示すように、縦部材を 3 本、横部材を 2 本配置している。節点数、要素数はそれぞれ 6,070、5,940 であり、拘束条件は剛体移動のみを拘束する。材料定数としてヤング率 $E=210(\text{GPa})$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とする。また、板厚については一般に自動車運搬船(PCC)でよく用いられているものに合わせて 6.0mm とする。溶接方法に関しては、固有ひずみの与える要素を選択することで両側連続溶接、片側連続溶接、両側断続溶接、千鳥溶接の 4 通りを検証する。

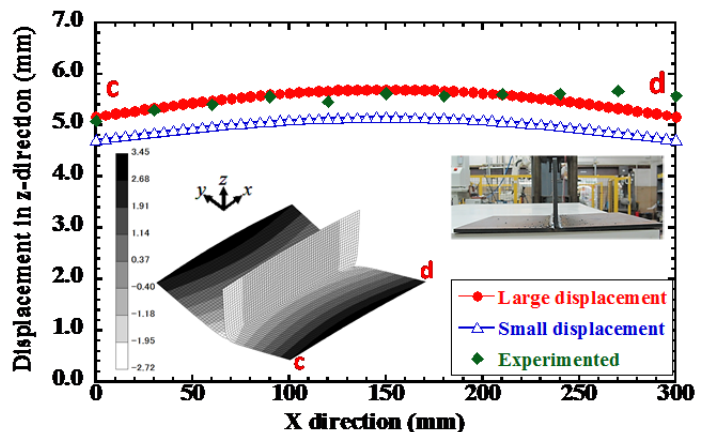


Fig.3 Comparison of displacement between analysis and experiment.

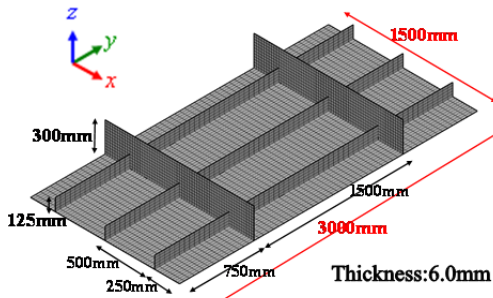


Fig.4 Stiffened structure model of thin plate.

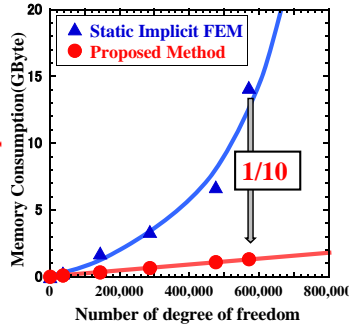


Fig.5 Comparison of memory utilization and computing time.

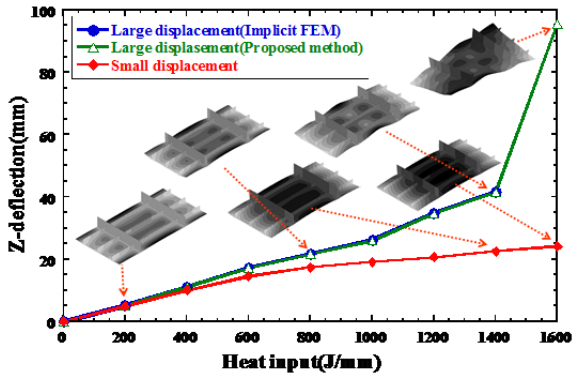
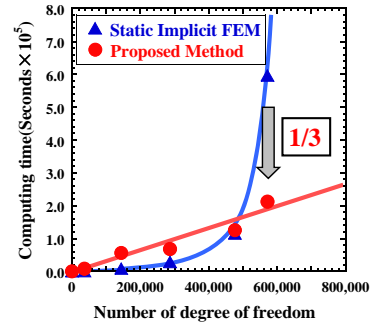


Fig.6 Comparison of deflection in heat input between large and small displacement.

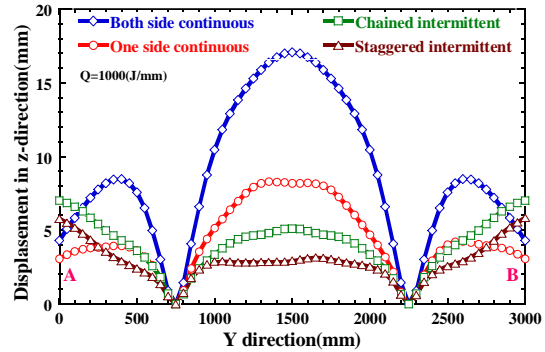


Fig.7 Comparison of displacement with welding method.

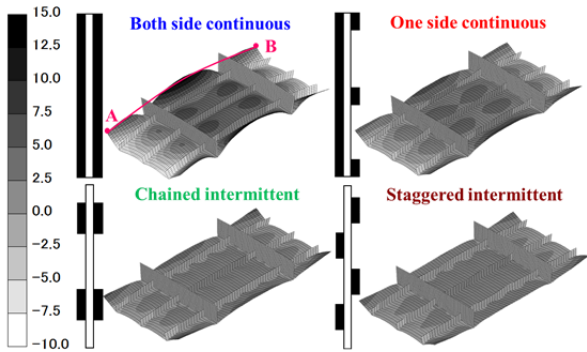


Fig.8 Distribution of welding displacement in z-direction.

4.2 本手法の性能評価

メモリ消費量及び計算時間と自由度数の関係を本手法と静的陰解法 FEM により比較した図を Fig.5 に示す。同図からメモリ消費量及び計算時間の点において、静的陰解法 FEM は、自由度数の 2~3 乗に比例して増加しているのに対して、本手法では自由度数に対してほぼ比例的に増加していることがわかる。さらに、自由度数約 57 万の解析において、本手法は静的陰解法 FEM に比べて、メモリ消費量においては 10 分の 1 程度、解析時間は 3 分の 1 程度になることがわかった。

4.3 入熱量の影響

Fig.6 に、入熱量とたわみの関係を示す。図中の縦軸はたわみ量を示し、平面に置いた際に接する 3 点を基準とする平面と、最大となるたわみ量との距離を示している。同図より、入熱量が $Q \leq 1400 \text{ J/mm}$ の範囲では、理想化陽解法 FEM による解析結果と従来手法である静的陰解法 FEM による解析結果が良好に一致していることが分り、本手法の妥当性を示すことができたと考えられる。また、陰解法 FEM では解の発散により解析結果を得ることができなかった $Q=1600 \text{ J/mm}$ においても理想化陽解法 FEM を

用いた解析では、解析することが出来た。このことは陰解法 FEM よりも理想化陽解法 FEM の適用範囲が広いことを意味するものである。さらに、変形モードに着目すると、 $Q=1600 \text{ J/mm}$ において、ねじれが大きく影響した変形が表されていることから、本手法を用いることで異なる複数の座屈形式の変形モードが解析可能であることが分かる。

4.4 溶接方法の影響

次に、4 通りの溶接方法が面外変形に及ぼす影響について整理した結果を Fig.7 および Fig.8 に示す。同図より、総入熱量の大きな両側連続溶接、片側連続溶接の場合において、座屈形式の変形が確認できる。また、両側断続溶接、千鳥溶接においては座屈形式の変形は見られず、変形量が小さくなっている。

以上の結果より、本手法を用いることで、大入熱量の座屈形式の変形についても解析可能であることが確認できる。

5. 自動車運搬船車両甲板モデルにおける溶接変形解析

5.1 解析条件

本研究での解析手法を用いて実際に大型実構造物である自動車運搬船の車両甲板ブロックを対象とした溶接変形解析を行う。解析モデルは、実際の自動車運搬船の設計図を基に寸法やロンジ材、トランス材の大きさや間隔など模擬して作成する。解析モデルの概要を Fig.9 に、またロンジ材、トランス材の詳細な図を Fig.10 に示す。解析モデルは幅 32160mm、長さ 57600mm、高さ 25000mm とし、節点数、要素数はそれぞれ 335,923、344,136 である。また、自由度数は 2,015,538 である。ロンジ材 351 本、トランス材 63 本の溶接線に沿った要素全てに固有ひずみを付与する。材料定数はヤング率 $E=210 \text{ (GPa)}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とし、板厚については外板を 20mm、それ以外を 6.0mm とする。

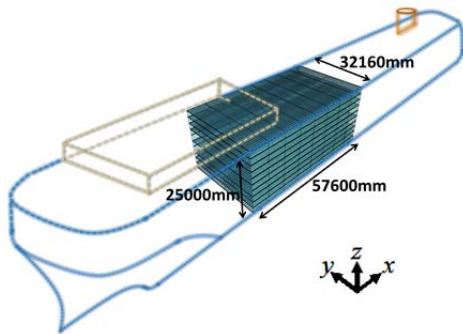


Fig.9 Shape and size of PCC model.

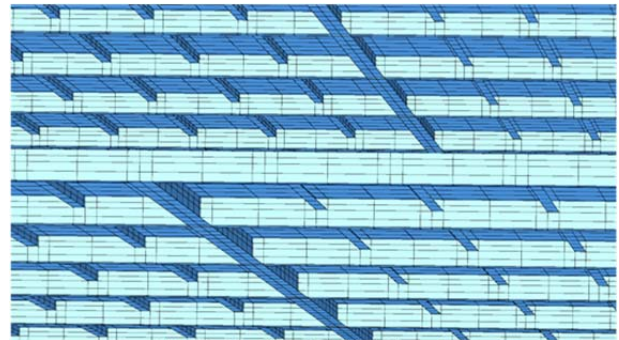


Fig.10 Detail of stiffened model.

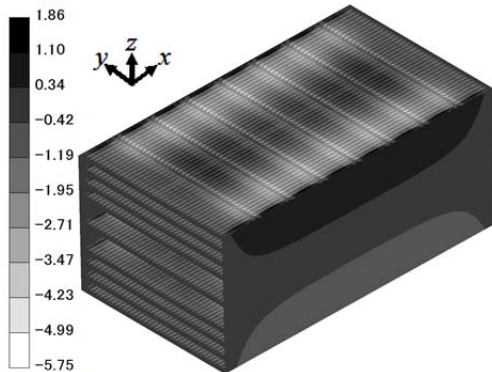


Fig.11 Displacement in z-direction. (Q=500J/mm)

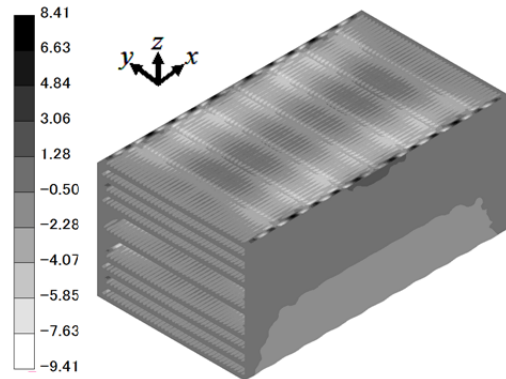


Fig.12 Displacement in z-direction. (Q=700J/mm)

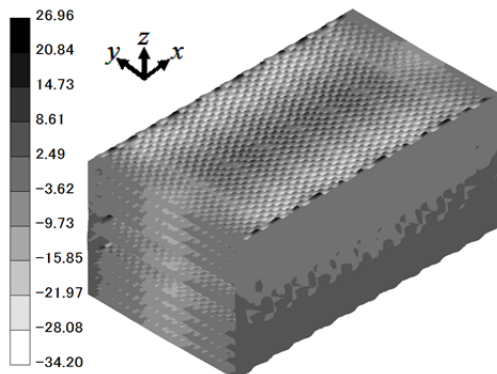


Fig.13 Displacement in z-direction. (Q=1000J/mm)

5.2 解析結果

上記のモデルについて理想化陽解法 FEM による溶接変形固有ひずみ解析を、入熱量 $Q=500\text{J/mm}$, $Q=700\text{J/mm}$, $Q=1000\text{J/mm}$ の条件で行った結果を Fig.11, Fig.12, Fig.13 に示す。変形倍率はすべて 20 倍で表示している。入熱量の増加にしたがって変形量が増加していることが確認でき、どの入熱条件においても車両甲板全体で座屈形式の変形が起きていること分かる。また、 $Q=1000\text{J/mm}$ においてはスティフナごとの区画の中でも座屈形式の変形が起きているのが確認できる。

この解析モデルの計算中のメモリ使用量は 4.8(GByte)であり、従来手法である陰解法 FEM では一般的な PC を用いて計算することは非常に困難である。また、解析時間は 48 時間程度であり、現実的な計算時間内に解析を終えられるという結果が得られた。

6. 結言

本研究では理想化陽解法 FEM において幾何学的非線形性を考慮し、それに基づいた非線形固有ひずみ解析法を開発し、溶接大変形問題に適用した結果、以下の知見を得た。

- 1) 本手法の解析精度に関して検討を行った結果、実験及び従来手法である静的陰解法 FEM と同等の精度で解析可能であり有用性が示された。
- 2) 理想化陽解法 FEM および静的陰解法 FEM における計算時間、メモリ使用量に関して比較を行った結果、節点数が数万を超えるような大規模な溶接変形解析において、理想化陽解法 FEM は非常に有効であることを示した。
- 3) 理想化陽解法 FEM に大変形解析を導入することで大規模問題の座屈挙動の解析が可能であることを示した。
- 4) 連続溶接の代わりに、両側断続溶接や千鳥溶接などの断続溶接を用いて防撓材をスキンプレートに溶接することは、面外たわみの低減に有効であることを示した。
- 5) 汎用ソフトでは解析困難な自由度数が数百万を超えるような構造モデルにおいて、本手法での有用性が示された。

参考文献

- 1) 村川英一，羅宇，上田幸雄，『固有ひずみを用いた弾性計算による溶接変形及び残留応力の推定 - (第一報)溶接における固有ひずみの生成機構-』，溶接学会誌，180 号，1996 年，P.739-751
- 2) 村川英一，羅宇，上田幸雄，『固有ひずみを用いた弾性計算による溶接変形及び残留応力の推定 - (第二報)多重履歴の元手の変形と残留応力-』，溶接学会誌，182 号，1997 年，P.783-793
- 3) 寺崎俊夫：溶接変形の支配因子と定量化，溶接学会誌，第 72 巻(2003)，10-13
- 4) 久田俊明，野口裕久：非線形有限要素法の基礎と応用，丸善株式会社