

M15 理想化陽解法 FEM による大規模構造物の弾性固有ひずみ解析

南 雄介 (指導教員 柴原・深沢・池田・馬場)

Elastic Inherent Strain Analysis for Large-Scale Structure Using Idealized Explicit FEM

by Yusuke MINAMI

Abstract

In the analysis of welding mechanics, it is difficult to analyze large-scale structures because of welding-specific moving local nonlinearity. In this research, the authors developed a new analytical method for welding mechanics, named Idealized Explicit Finite Element Method (IEFEM). In the proposed method, the load step is divided into hundreds of time steps as implicit FEM and the displacements are computed for each time step based on dynamic explicit FEM until the whole system reaches the static equilibrium state. And, to achieve the static equilibrium state faster, idealized mass matrix and damping matrix are introduced. The idealized mass matrix and damping matrix are based on the Courant condition and the vibration theory, respectively. The proposed method and static implicit FEM are compared through large scale welding problem to verify the validity and accuracy. The residual deformation of the proposed method shows good agreement with that of static implicit FEM. In addition, the computing time and memory consumption of the proposed method are 1/4 and 1/10 times smaller than those of static implicit FEM, respectively, in 571,176 degrees of freedom model. It is found that the proposed method has an advantage in large-scale analysis whose nodal points are more than tens of thousands.

Keywords: Elastic Analysis, Inherent Strain, Implicit FEM, Idealized Explicit FEM

1. 緒 言

実用溶接構造物のほとんどは大型であり、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現実的ではない。一方、溶接線が十分に長い場合、溶接部に生じる角変形や横収縮などの固有変形は、継手を構成する材料、板厚、溶接入熱によりほぼ決まり、溶接線に沿って一定であると考えることができる。また、一般に溶接や切断、板曲げなどの熱加工における残留応力および変形については、概念的に固有ひずみが両者の原因と考えることができる。これらの点に注目すると、固有変形が既知であれば、溶接部に固有変形を与え構造全体について弾性解析することにより、構造全体の溶接変形を予測することができ、固有ひずみ法と呼ばれる。¹⁾

従来造船工程における溶接変形については溶接時の変形による工作制度の低下が問題となっている。また溶接変形は強度・性能低下の原因につながるため、その手直しに多大な時間とコストを要していたことも問題となっている。よって、溶接変形を事前に把握することは重要であり、溶接時の変形量が事前に把握できれば溶接施工方法の改善、コスト削減につながると考えられる。

近年における計算機の高性能化により、かなり現実に近い溶接問題を固有ひずみ法に基づく FEM を用いて詳細に解析することが可能となりつつある。従来の FEM による解析手法には陰解法による弾性固有ひずみ解析法があげられるが、これは弾性解析なので、熱弾塑性解析と比べて解析時間が短いことが特徴として挙げられる。しかしその一方で、陰解法では連立方程式を構築し、それを解く必要があるため、メモリの制約上数十万要素の解析

は困難で、船体ブロックなどの大規模かつ複雑構造の解析は困難となっていた。つまり、大型構造物の溶接シミュレーションを実施するには省メモリ化が必要であり、本研究では理想化陽解法 FEM によって、大型構造物の溶接変形解析を高速かつメモリ消費量を少なく解くことを目的としている。理想化陽解法 FEM では、通常、溶接問題に良く用いられる静的陰解法 FEM と同様に、動的効果と言われる慣性力および減衰力の影響は無視することで、擬似静的問題として扱い、時間ステップ毎に静的解への収束計算を行う方法を考えた。こうすることにより、動的陽解法でありながら、静的釣り合い状態を保つ解析が可能となった。

本研究では、以上の手法に関してシェル要素を用いた弾性固有ひずみ解析にまで拡張し、薄板防撓構造溶接時における溶接変形問題に適用することにより、本手法の妥当性および有用性について検討を行った。その結果、開発した手法は、従来手法である静的陰解法 FEM と比べて、解析精度という点でほとんど差はなく、計算時間およびメモリ使用量の面において、理想化陽解法 FEM が有効であるという結論が得られた。さらに、本研究の成果として従来手法では解析困難であった数百万自由度のモデルを本手法を用いて実際に解析した事例を挙げる。

2. 固有ひずみに基づく溶接変形解析法

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。

本研究で用いている固有ひずみを用いた溶接変形の FEM 解析は入熱量(J/mm)に対して縦収縮 ε_x^* , 横収縮 ε_y^* , 角変形 θ_x^* , 縦曲がり θ_y^* の四成分の固有ひずみ量を算出する。このとき仮想的に溶接箇所には溶接時間に関係なく一律に固有ひずみが発生すると仮定する。さらに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。また、固有ひずみ量を求める場合には実験や熱弾塑性解析を用いるなどの方法が考えられる。次に、溶接変形は溶接熱により生じており、以下のような形で表せる。

$$[\text{全ひずみ(溶接変形)}] = [\text{固有ひずみ}] + [\text{弾性ひずみ(残留応力)}]$$

(1)

固有ひずみは全ひずみと弾性ひずみの差として定義され、式(1)に示すとおりほとんどの場合には塑性ひずみと等価である。以上の特徴を踏まえて求められた固有ひずみ量を基に陰解法による弾性非線形 FEM 解析を実施する。

Fig.1 に陰解法による弾性非線形 FEM 解析の流れを示す。

3. 理想化陽解法 FEM

溶接残留変形・応力、また、それらに至る過渡現象を解析する際には、一般に、溶接現象を慣性力が無視できる程度に小さい準静的な現象と捉え、陰解法 FEM を用いて解析を行うことが多い。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やメモリ使用量が増加するため、解析規模において制約を受ける。

そこで、柴原らは、静的陰解法 FEM における溶接現象の各荷重ステップを動的な問題と捉え、計算時間およびメモリ使用量を大幅に低減できる理想化陽解法 FEM を提案した。Fig.3 に示すように、静的陰解法 FEM における荷重ステップを動的陽解法 FEM における時間ステップに分割し、各時間ステップにおいて、動的陽解法 FEM に基づき変位を計算する。そして、各荷重ステップにおいて、系全体の静的つりあい状態が得られたときに次の荷重ステップに進むといった手法を採用する。

本研究ではこの手法をシェル要素を用いた弾性固有ひずみ解析にまで拡張した。本章では、柴原らが開発した理想化陽解法 FEM で用いた動的陽解法 FEM の基礎理論とその手法の詳細について以下に示す。

3. 1 理想化陽解法 FEM

Fig.2 に理想化陽解法 FEM の流れを示す。Fig.1 の静的陰解法 FEM に対して、静的陰解法 FEM に対して、理想

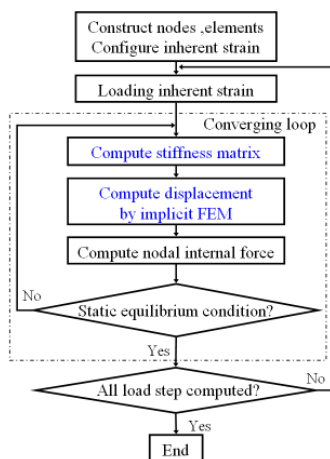


Fig.1 Elastic Inherent

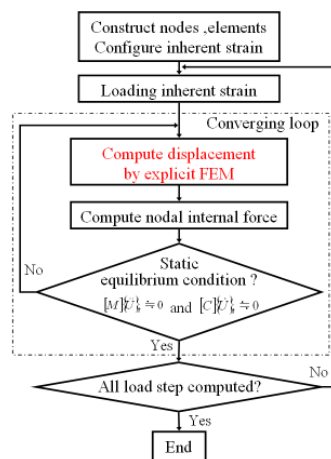


Fig.2 Concept of the Idealized Explicit

化陽解法 FEM では剛性マトリックスの作成が不要となり、結果、従来の陰解法 FEM と比べて理想化陽解法 FEM では陽解法による変位の算出を行う。これは、次節に示すとおり連立方程式を構築する必要がなく、スカラー方程式を解くだけとなるので一回の計算の速くなり、さらに剛性マトリックスを記憶するメモリが不要となるため、使用メモリの大幅な削減が可能となる。

3. 2 一般的な陽解法の基礎理論

FEM による動的解析手法には、陰解法と陽解法がある。2 つの手法の違いは時間微分項の離散化の方法によって平衡方程式の解法が異なる点である。陰解法では一般的に、Newmark の β 法や Wilson の θ 法を用いて時間を離散化することにより、最終的に導かれる連立方程式の変位ベクトル $\{u\}$ に対し、剛性行列 $[K]$ に関する項が乗ぜられているため、節点変位ベクトル $\{u\}$ を算出するためには、節点変数と同数程度の規模の多元連立一次方程式を解く必要がある。

一方、陽解法 FEM では連立方程式を解く必要は無く、その基本原理は次の通りである。

まず、節点変位ベクトル $\{u\}$ を用いて、中心差分により節点速度ベクトル $\{\dot{u}\}$ および節点加速度ベクトル $\{\ddot{u}\}$ を離散化する。

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

$$\{\dot{u}\}_t = (\{u\}_{t+\Delta t} - \{u\}_{t-\Delta t}) / (2\Delta t) \quad (3)$$

ここで、 t はある時刻、 Δt は時間増分を示し、 $\{u\}_{t+\Delta t}$, $\{u\}_t$, $\{u\}_{t-\Delta t}$ はそれぞれ時刻 $t + \Delta t$, t , $t - \Delta t$ における変位を示す。

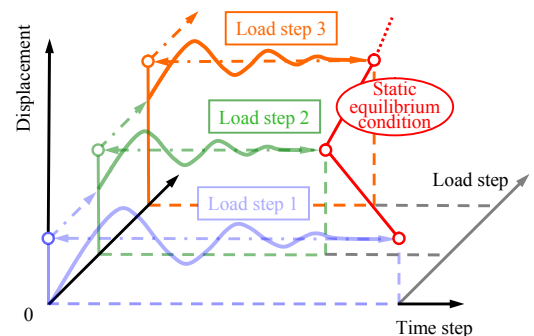
式(2)、式(3)を次式(4)に示す平衡方程式に代入する。

$$[M]\{\ddot{U}\}_t + [C]\{\dot{U}\}_t + \int [B]\{\sigma\} dV = \{F\}_t \quad (4)$$

式(4)を速度・加速度を中心差分で離散化した陽解法の平衡方程式が次式(5)となる。

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) \{U\}_{t+\Delta t} = \{F\}_t - \int [B]\{\sigma\}_t dV - \frac{2}{\Delta t^2} [M] \{U\}_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} [M] - \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) \{U\}_{t-\Delta t} \quad (5)$$

このとき、質量マトリックス $[M]$ 、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仮定すると、式(5)のマトリックス演算は、もはや連立方程式ではなく、過去の時間ステップにおける変位量 $\{U\}_{t+\Delta t}$



に $\{U\}_i$ と $\{U\}_{i-M}$ を代入することで変位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といえる。

3.3 理想化陽解法 FEM の提案

前節における説明の通り、動的陽解法 FEM では節点変数毎に定められる式(5)を計算することで時間ステップを進める。しかし、溶接変形問題のように、現象の持続時間が長い問題に対し、一般的な動的陽解法 FEM で用いられている $[M]$, $[C]$ ではクーラン条件と呼ばれる解析における時間増分値の制限により変位が収束するまでの解析ステップが膨大となる。そこで本手法では $[M]$, $[C]$ を理想化することで高速化をはかる。これは、1 ステップの解析において、(応力波の伝播速度) $\times$ (解析における時間増分) が最小有限要素サイズを超えないように時間増分を決定する必要があるためであり、本手法では、この点を克服することで、動的陽解法 FEM を現実的な計算時間で溶接問題に適用する。

既往の溶接力学解析では、慣性力や減衰力の影響は小さいと考え、静的陰解法 FEM を用いて問題を解く方法がほとんどである。すなわち、式(4)における第 1 項(慣性項)と第 2 項(減衰項)の影響は無視できる程度に小さい準静的な現象であるとし、増分型で記述された全体剛性方程式 $[K]\{\Delta u\} = \{\Delta F\}$ を解くものである。

一方、理想化陽解法 FEM では、外力として、固有ひずみによる荷重を式(4)に与え、次節で示す理想的な質量マトリックス $[M]$ 、減衰マトリックス $[C]$ を用いて同式を解くことで次ステップにおける変位を求める。

3.4 質量マトリックス・減衰マトリックスの理想化

理想化陽解法 FEM では、各荷重増分において静的平衡状態に達するまで繰返し計算を行う。その際に必要な計算ステップ数をできるだけ少なくするために質量マトリックス $[M]$ および減衰マトリックス $[C]$ の理想化を行う。本節では、その導出について説明する。

まず、一次元振動理論において、運動方程式は次式で与えられる。

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F \quad (6)$$

質量を m 、減衰係数を c 、バネ定数を k とするとき、 $c > 2\sqrt{mk}$ で過減衰、 $c = 2\sqrt{mk}$ で臨界減衰、 $c < 2\sqrt{mk}$ で

減衰振動であり、臨界減衰において最も速く変位が静的解に収束する。

ここで、質量とバネ定数を次式で示す関係と定義する。

$$m \equiv \alpha k \quad (7)$$

このとき減衰係数とバネ定数の関係は次式となる。

$$c = 2\sqrt{\alpha}k \quad (8)$$

よって、質量と減衰係数はバネ定数に依存する量として考えることができる。

これを基に質量マトリックス、減衰マトリックスの対角成分を式(8),(9)のように決定する。

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

$$m_{ii} = \alpha k_{ii} \quad (10)$$

ここで、 c_{ii} 、 m_{ii} 、 k_{ii} はそれぞれ減衰マトリックス、質量マトリックス、要素剛性マトリックスの対角成分であり、減衰マトリックス $[C]$ も質量マトリックスと同様に対角マトリックスであると仮定する。要素剛性マトリックスは静的陰解法 FEM と同様、式(10)より計算される。

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (11)$$

ここで、 $[B]$ は変位-ひずみ関係、 $[D]$ は応力-ひずみ関係を規定するマトリックスである。

以上の方法により要素サイズを考慮に入れた収束計算が可能となり、静的解に最も速く収束するような理想的な質量マトリックス、減衰マトリックスおよび時間増分を決定する。

4. 理想化陽解法 FEM の性能の評価

4.1 解析条件

以上の解析手法からシェル要素を用いた弾性固有ひずみ解析にまで拡張し、実際に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。解析モデルとして、薄板防撓構造を用いており、Fig.4 ような寸法を取る。今回は解析対象として、自由度数が数万程度のモデルから自由度数が数十万を超えるような比較的大きな構造までを対象としている。

各種パラメータについては入熱量 $Q = 623(J/mm)$ 、拘束条件として剛体移動のみを拘束する。材料定数としてヤング率 $E = 210(GPa)$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とする。また、板厚については $t_1 = 9(mm)$ 、 $t_2 = 9(mm)$ 、 $t_3 = 7(mm)$ とした。

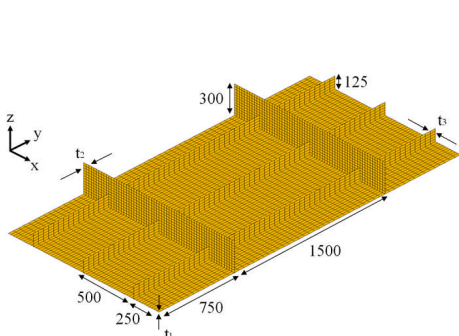


Fig.4 Analysis Model

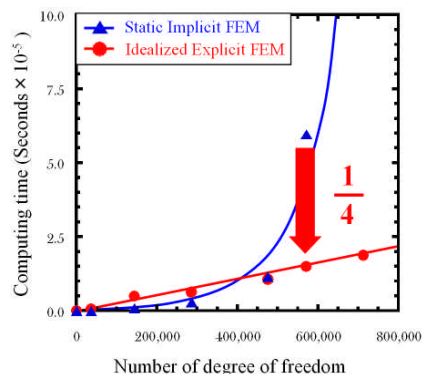


Fig.5 Comparison of Computing Time

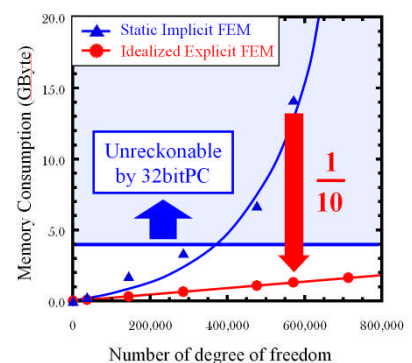
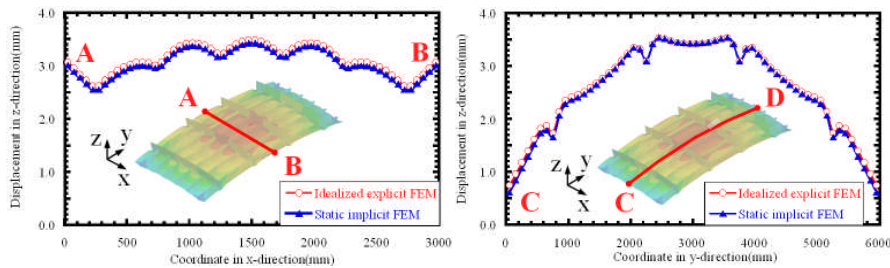
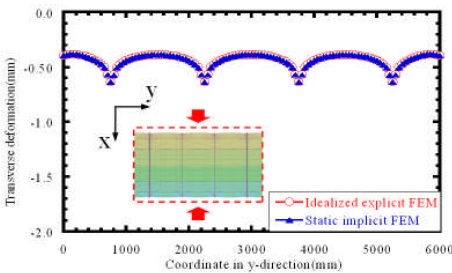


Fig.6 Comparison of Memory Utilization

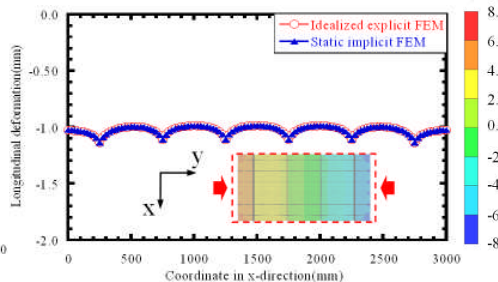


(a) Displacement in z-direction along A-B

(b) Displacement in z-direction along C-D



(c) Transverse Deformation



(d) Longitudinal Deformation

Fig.7 Comparison of Computing Results between Idealized Explicit FEM and Static Implicit FEM

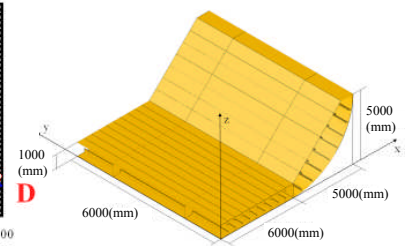
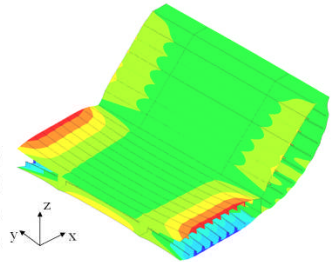


Fig.8 Analysis Model

Fig.9 Analysis Result
(Displacement in z-direction)

4.1 理想化陽解法FEMの計算時間・メモリ使用量の評価

Fig.5 および Fig.6 に計算時間およびメモリ消費量と自由度数の関係を示す。これらの図から計算時間およびメモリ消費量の点において、ソルバーにスカイラインを実装した静的陰解法 FEM の場合は、自由度数の 2~3 乗に比例して増加しているのに対して、理想化陽解法 FEM ではほぼ比例関係になっ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、理想化陽解法 FEM は静的陰解法 FEM に比べて、解析時間は 4 分の 1 程度、メモリ消費量においては 10 分の 1 程度になることがわかった。

4.3 理想化陽解法 FEM の精度の評価

Fig.7(a) および Fig.7(b) 図中のモデルの A から B、および C から D で示す部分における z 方向のたわみ分布を示す。さらに、Fig.7(c) および Fig.7(d) は、x 方向および y 方向それぞれの面内収縮量を示す。図中の○印は理想化陽解法 FEM の結果を示し、▲印は静的陰解法 FEM の結果を示す。Fig.7(a)~Fig.7(d)より静的陰解法 FEM と理想化陽解法 FEM の両者は面外変形、面内変形いずれに関しても良好に一致していることが分かる。

5. 大規模構造物の解析事例

5.1 解析条件

本研究での解析手法を用いて実際に大型構造物の溶接変形解析を行う。今回、理想化陽解法 FEM による解析を行ったのが、Fig.8 に示すような船体の二重底外板を模擬したモデルである。自由度数は 4,658,826 である。溶接線として 400 本以上を考慮しており、その本数に沿った要素全てに固有ひずみを付与する。

各種パラメータについては、入熱量 1,125(J/mm)。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、板厚については一様に 15(mm)とした。

5.2 解析結果

以上のモデルで理想化陽解法 FEM を用いて溶接変形解析を行った結果を Fig.9 に示す。

この解析モデルの計算中のメモリ使用量は陰解法で少

なく見積もっても 100GByte を超えるものとなる。一方、本研究で用いている理想化陽解法 FEM では、約 10.7GByte となりメモリ使用量は大幅に減少している。このことから、本手法を用いれば解析対象となるモデルが大きければよりその有効性を示すことができる。

また、解析時間は 40 時間 30 分となり、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 に基づく弾性固有ひずみ解析法を溶接変形問題に適用した結果以下の知見を得た。

1. 理想化陽解法 FEM および静的陰解法 FEM のメモリ使用量に関して比較を行った結果、静的陰解法 FEM では膨大なメモリを要する自由度数が数十万を超える大規模解析において、理想化陽解法 FEM は非常に少ないメモリ使用量で解析できることを示した。
2. 理想化陽解法 FEM の変形精度に関して検討を行った結果、本手法は、変位分布において、静的陰解法 FEM と同等の精度で解析可能であることを示した。
3. 理想化陽解法 FEM および静的陰解法 FEM における計算時間に関して比較を行った結果、自由度数が数百万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。

参 考 文 献

- 1) 羅宇, 村川英一, 上田幸雄: 固有ひずみを用いた弾性計算による溶接変形および残留応力の推定(第3報) 狭間先多層溶接における変形と残留応力, 日本造船学会論文集, (183), 323-333, 1986 年 9 月 5 日
- 2) 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), 第 4 号, 10-13
- 3) 津田政明, 萩原一郎: 準静的大変形問題の動的陽解法有限要素法に関する基礎的検討, 日本機械学会論文集(A 編), 64 巻 662 号(1998-6), 1548-1555