M08 固有ひずみ法を用いた初期不整を有する薄板構造物の 最終強度解析法に関する研究

長尾誠(指導教員正岡・柴原)

Ultimate strength analysis for thin-walled structures with initial imperfection using inherent strain method

by Makoto Nagao

Abstract

Initial imperfection of thin-walled structures such as residual stress and initial deflection is induced by inherent strain due to welding in fabrication. The initial imperfection can be predicted by elastic FEM analysis and its input parameters on the magnitude and shape of the inherent strain distribution¹⁾. Ultimate strength of the structures can also be predicted by the elasto-plastic large deflection finite element analysis and the derived imperfection computed from the inherent strain information. In this paper, ultimate strength analysis for the thin-walled structures with initial imperfection using inherent strain method is proposed. Firstly, the inherent strain for bead-on-plate welding is assumed from the method of tendon force²⁾ for longitudinal shrinkage and Sato's empirical formula³⁾ for transverse shrinkage and angular distortion. Secondly, the residual stress distribution of the bead-on-plate welding using the inherent strain. Finally, the effect of the initial imperfection due to the inherent strain on the reduction of ultimate strength of stiffened plates is discussed. The impact of heat input Q and plate slenderness ratio β is investigated. It is found that the ultimate strength of the stiffened plates with thin plates, which means big β , is influenced by heat input Q.

1. 緒 言

近年の著しい計算機の能力向上と、有限要素法による 構造解析技術の向上を受けて、船体などの大型で複雑な 構造の非線形解析が可能になり、構造システム全体を考 慮した最終強度解析を基礎とした設計が実現可能になり つつある。船体など、溶接により組み立てられる構造に は初期不整が存在し、強度に大きく影響を与える。した がって、このような設計を行うとき、構造の溶接変形、 残留応力などの初期不整の決定方法は非常に重要になる。

一般に、初期不整は溶接などの熱加工により発生する 固有ひずみが原因であると考えることができる。溶接力 学分野では、溶接構造物の変形・残留応力予測手法とし て、固有ひずみに基づく溶接変形・残留応力予測法の開 発が進んでおり、あらかじめ固有ひずみの大きさと分布 がわかっていれば、弾性の FEM により残留応力と変形が 計算可能であることが報告されている¹⁾。本報告では、こ の予測手法を固有ひずみ法と呼ぶこととする。固有ひず み法は溶接条件に起因する固有ひずみより弾性解析によ る単純な計算によって一意的に初期たわみ、残留応力を 決定することができるため、初期不整に対して煩雑なモ デル化を必要とせず、構造システム全体を解析対象とし た場合にも適用可能である。また、様々な材質および溶 接継手の固有ひずみの大きさと分布が明らかになってい るため⁴⁻⁵⁾、この固有ひずみ法を用いた初期不整を有する 構造物の最終強度解析を行うことができれば、一連の解 析の中で溶接加工条件から変形予測、強度評価を行うこ とが可能になる。

そこで、本研究では、固有ひずみ法による初期不整を 有する薄板構造物の最終強度解析手法の構築を目的とし、 固有ひずみ法を非線形有限要素法解析に適用する。適用 にあたり、まずビードオンプレート溶接を対象にした精 度検証を行った。精度を確認した後、本解析手法の適用 例として、船体の基本的な構造である防撓構造の圧壊解 析を行い、加工条件から最終強度を評価することで、本 手法の有用性を示す。

2. 固有ひずみ法の最終強度解析への導入

藤田ら^のは、構造寸法を決めると要求される脚長がほぼ 定まり、溶接条件を決定できることから、溶接入熱Qに よって、初期たわみおよび残留応力を推定し、防撓板の 最終強度解析に適用した。本研究では、この藤田らの手 法に固有ひずみ法を適用する。Fig.1に、本研究の流れを 示す。

2.1 固有ひずみの導入

本手法を構築するにあたり、入熱量から固有ひずみの



決定を行う必要がある。本章では、佐藤ら³⁾の実験式を元 にビードオンプレート溶接の縦収縮成分、横収縮成分、 角変形成分の簡易固有ひずみ分布を決定する。

板幅 a×b、板厚 t の平板の中央線上に原点を取り、溶接 線方向に x 軸、板幅方向に y 軸、板厚方向に z 軸をとる。 このような平板にビードオンプレート溶接を施した時を 考える。

2.2 **縦収縮成分固有ひずみ** ε^{*}_x

溶接線からの距離によって、縦収縮方向固有ひずみは 変化する。この固有ひずみ分布に縦弾性係数を乗じ、断 面に沿って積分することにより、次式のような固有収縮 力(Tendon Force)が得られる²⁾。

$$F = 0.2275(Nm / J) \times Q(J / m)$$
(1)

この固有収縮力が、固有ひずみを与える幅 B に作用すると考える。つまり、縦収縮成分固有ひずみは、固有ひずみは B 内で全て降伏ひずみ & r であると仮定すると次式(2)が得られる。

$$B = F / E\varepsilon_{r}t = F / \sigma_{r}t$$
⁽²⁾

ただし、Q:入熱量、t:板厚、E:ヤング率 ε_Y :降伏ひずみ、 σ_Y :降伏応力

つまり、縦収縮成分固有ひずみは、式(2)により得られた幅 B の幅の長さにある要素に降伏ひずみを分配することによって近似的に固有ひずみ分布を再現する。

2.3 **横収縮方向固有ひずみ** ε^{*}、

板幅方向の固有ひずみは、ビードオンプレート溶接の 横収縮量推定式³⁾により算出する。すなわち、横収縮量を δとすると、横収縮成分固有ひずみは次式で表される。

$$\varepsilon_{y}^{*} = \delta / B \tag{3}$$

2.4 角変形方向固有ひずみ κ^{*}

角変形固有ひずみ κ^{*}も横収縮方向固有ひずみと同様に、 推定式³から得られた角変形が幅 B 内で発生していると 考える。そして、得られた角変形成分を次式のように板 幅方向の固有ひずみとして処理する。

$$\varepsilon_{y} = \varepsilon_{y}^{*} - z(\theta_{B}) = \varepsilon_{y}^{*} - z\kappa^{*}$$
(4)

ただし、z:板の中性面からの距離

以上得られた3種類の固有ひずみを、4節点アイソパ ラメトリックシェル要素に初期ひずみとして与える。そ の時、縦収縮成分固有ひずみ ε_x^* 、横収縮成分固有ひずみ ε_y^* は各積分点に一様に与える。また、角変形 κ ^{*}は Fig. 2 に示すように、板厚方向のひずみに線形的に変化させ、 角変形を表現する。





3. 初期不整の検討

2 章で仮定した固有ひずみ分布より得られる初期不整 の妥当性を検証する。残留応力分布に関しては、熱弾塑 性解析結果との比較によって本手法の妥当性の検証を行 う。

3.1 解析条件

Fig. 3 に解析モデルと境界条件を示す。今回対象とした モデルは一辺が 200mm、板厚が 10mm の正方形板であり、 材料定数はヤング率 E を 210(GPa)、降伏応力 σ_V を 265(MPa)、ポアソン比 $v \ge 0.3$ とした。境界条件は、拘束 の影響を出来るだけ小さくするため、要素が剛体回転を しないものとした。また、要素は4節点アイソパラメト リックシェル要素を用いた。

初期たわみは、Table 1、Table 2 に示す 3 種類の変形を 仮定し、式(3)、(4)よりそれぞれの変形に対応した固有ひ ずみに換算し、Fig. 3 中枠内の 2 要素、合計 10mm に考慮 した。

残留応力分布の推定には、本手法の妥当性の検証と合わせて、固有ひずみの大きさと分布が分かっていれば弾性 FEM によって初期不整が再現可能である事を確認するために、Fig. 4 に示すような 2 種類の要素分割のモデルを考えた。

まず、本手法を Fig. 4 (a) に示す Coarse mesh モデルに 適用する。Coarse mesh の場合、式(2)によって得られる幅



Fig. 4 FEM model for inherent strain method

	Case 1	Case 2	Case 3
Assumed δ (mm)	-5.0×10 ⁻⁴	-5.0×10 ⁻³	-5.0×10 ⁻²
ε,	-0.5×10^{-4}	-0.5×10^{-3}	-0.5×10^{-2}
δ from FEM (mm)	-5.0×10 ⁻⁴	-5.0×10 ⁻³	-5.0×10 ⁻²

Table 1 Assumed and presumed transverse shrinkage

Table 2 Assumed and presumed angular distortion

	Case 1	Case 2	Case 3
Assumed θ	5.0×10 ⁻⁴	5.0×10 ⁻³	5.0×10 ⁻²
$\kappa^*(1/mm)$	0.5×10^{-4}	0.5×10^{-3}	0.5×10 ⁻²
θ from FEM	4.9×10 ⁻⁴	4.9×10 ⁻³	4.9×10 ⁻²

B で降伏ひずみが一定であると考え、板幅方向の要素に x 軸方向に一様に ϵ_{x1} 、 ϵ_{x2}^* ・・と固有ひずみを分配する。次 に、Fig. 4 (b) に Fine mesh モデルでの固有ひずみを与え る要素を示す。Fine mesh モデルでは、熱弾塑性解析の結 果得られた x 軸方向塑性ひずみを板厚方向に平均化した 値を、板幅方向に ϵ_{x1}^* 、 ϵ_{x2}^* ・・と分布させる。Coarse mesh と同様に、それらを x 軸方向に一様に与え、残留応力分 布を推定する。今回、解析条件として、Q=2.81×10⁴(J/mm) を仮定した。

3.2 解析結果

3.2.1 初期たわみ

Table 1 に横収縮、Table 2 に角変形の計算条件と計算結 果をまとめる。Table 1 より、各計算条件において仮定し た横収縮量と計算結果が良好に一致していることがわか る。Table 2 より、角変形に関しても、仮定した θ と、計 算による角変形はよい一致を見せていることがわかる。

3.2.2 残留応力

Fig. 5 に、それぞれのモデル x=100mm 断面における x 軸方向残留応力を示す。Fig. 5 の横軸は板幅方向の座標を 示し、縦軸は残留応力の大きさを示している。実線は熱 弾塑性解析結果を、破線は Fine mesh、点線は Coarse mesh の解析結果を示す。Fig. 5 より、Coarse mesh、Fine mesh、 熱弾塑性解析は、良い一致を示していることがわかる。

以上より、ビードオンプレート溶接によって発生する 初期たわみ、残留応力は、本手法によって精度良く再現 可能であることがわかった。

4. 固有ひずみ法による防撓構造の最終強度解析

本手法の適用例として、船体の一般的な構造である防 撓構造の圧壊解析を行う。Fig.6に、船体の一般的な構造 の概念図を示す。図中の斜線部分のように連続している 基本的な防撓構造を解析対象としてモデル化する。

最終強度解析を精度良く行うためには、解析モデルに 対して適切な境界条件を設定する必要がある。対象とし た防撓構造は限定された領域を仮定したため、隣接する 構造との連続を保つため、周辺境界は直線を保持する必 要がある。本来、隅肉溶接など、断面の中性軸と溶接線 にずれがある場合、固有収縮力が防撓材の曲げ応力とな って、防撓板の全体的な面外変形(Overall distortion)が生じ る。しかし、現在の境界条件の下では、固有収縮力によ って断面が一様に変位し、防撓板の全体的な面外変形



(Overall distortion)の溶接初期不整を考える事ができず、固 有ひずみ法によって再現できる初期たわみ形状はスティ フナ間のプレートが持ち上がる痩せ馬モードのみであっ た。しかし、西澤[¬]によって防撓板の全体的な面外方向の 初期たわみ(Overall distortion)が最終強度に与える影響は 非常に大きい事が報告されており、全体的な面外方向の 初期たわみ(Overall distortion)を無視する事はできない。し たがって、本報告では固有ひずみによる初期不整の他に、 面外方向初期不整(Column-buckling mode)のみ付加的に与 え、その影響も考慮した。

4.1 解析条件

本節で解析対象とする Flat-bar 防撓板の形状を Fig. 7に 示す。このモデルは(a:2400mm)×(b:800mm)×t_pの平板に、 高さ h_w=150mm、板厚が t_w=17mm の Flat-bar が防撓材と して溶接された防撓板である。Fig. 7 (a) に示すように、 モデルにはプレート部分とスティフナ部分との隅肉溶接 によって生じる固有ひずみと ε_1^* と、トランス材とプレー ト部分の隅肉溶接によって生じる固有ひずみ ε_2^* の2種類 考える。Flat-bar 防撓板を隅肉溶接する場合、次式のよう に、溶接入熱 Q_T はプレート部分、スティフナ部分に単位 板厚あたりの入熱量 Q_p,Q_wで流入する⁸⁾。この入熱量を、 プレート、スティフナに適用する。

$$Q_{p} = 2t_{p} / (2t_{p} + t_{w})Q_{r}$$
(5)

$$Q_{w} = t_{w} / (2t_{p} + t_{w})Q_{T}$$
(6)

これらを考慮した時に得られる初期たわみ形状を Fig. 7 (b)に示す。解析モデルの寸法は、Table 3 に示すように、 平板の板厚を 6、8、10、16、20(mm)と 5 種類変化させ、 Table 4 に示すように、それぞれの板厚に、Q_T=500、1000、



Fig. 6 Analyzed area of stiffened plate structure



(b) FEM model with initial deformation due to initial strain Fig. 7 Stiffened plate model

Table 3Plate thickness of modelTable 4

e 4 Assumed heat input Q_T

t _n (mm)	В	λ		
6	5 20	0.632		Q _T (J/mr
0	2.00	0.674	Case 1	500
0	3.90	0.074	Case 2	1000
10	3.13	0./16	Case 3	1500
16	1.95	0.829	Cuse 5	1500
20	1.56	0.894		

1500(J/mm)と入熱量を変化させ、最終強度解析を行った。 なお、Table 3 内の β、λ は次式で表される細長比である。

$$\beta = b / t_{p} \sqrt{\sigma_{y} / E}$$
(7)

$$\lambda = a / \pi r \sqrt{\sigma_{\gamma} / E} , \quad r = \sqrt{I / A}$$
(8)

ただし、I: 断面2次モーメント、A: 断面積

4.2 解析結果

Fig. 8 に入熱量 Q_T=1500(J/mm)における細長比と最終強 度の関係を示す。横軸は平板の細長比を示し、縦軸は最 終強度を全断面塑性荷重で無次元化したものを示してい る。図中の破線は固有ひずみ法により得られた初期たわ みと残留応力を考慮したときの最終強度を示している。 一方、実線は固有ひずみより得られた初期たわみと残留 応力のうち初期たわみのみを考慮し、残留応力を考慮せ ずに解析した結果を示す。固有ひずみにより得られる初 期不整のみを考慮した太線では、防撓板が薄板になるに 従って残留応力が最終強度に与える影響は大きくなって いることがわかる。また、Column-buckling mode の初期不 整に固有ひずみ法を適用したときも、残留応力は強度低 下に影響を与えることがわかった。

5. 結 言

本研究では、固有ひずみ法による初期不整を有する薄 板構造物の最終強度解析手法の構築を目的とし、固有ひ



Fig. 8 Ultimate strength of a stiffened model with imperfection calculated by inherent strain method

ずみ法を非線形有限要素法解析に適用を行った。以下に 得られた知見をまとめる。

- (1)非線形有限要素法解析に固有ひずみ法を適用し、ビードオンプレート溶接を対象に精度検証を行った。その結果、精度よく初期たわみ、残留応力分布が再現可能である。
- (2)解析手法の適用例として防撓構造の最終強度解析を 行った。その結果、固有ひずみの影響により防撓構造 の最終強度が低下し、特に、薄板の場合にその傾向が 顕著に見られることがわかった。

本研究によって得られた知見は、一連の解析の中で溶 接加工条件から変形予測、強度評価を行うことができる ことを示唆しており、本手法の有用性を示している。

参考文献

- 村川ら: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1報)溶接における固 有ひずみの生成機構-,日本造船学会論文集,第180 号(1996), pp.739-751.
- 2) 成田ら:固有ひずみを用いた薄肉閉断面部材の溶接 変形予測,溶接構造シンポジウム 97,溶接構造研究 委員会(1997), pp.290.
- 佐藤ら:構造用材料の溶接変形におよぼす溶接諸条件の関係,溶接学会誌,第45巻,第4号(1976), pp.302-308.
- 上田ら:T型及びI型継手の残留応力の固有ひずみによる推定法,溶接学会論文集,第9巻,第3号(1991), pp.19-25.
- 5) 寺崎, 福谷: 突合せ溶接継手に生じる固有ひずみ分 布, 日本機械学会論文集 A, 第66巻, 第646号(2000), pp.1233-1238.
- 6) 藤田ら:防撓板の圧縮強度について(第2報) -溶 接にともなう初期不整を有する防撓板-,日本造船 学会論文集,第144号(1978),pp.437-445.
- 7) 西澤:初期たわみのある防撓板の圧縮最終強度推定 法,大阪府立大学修士論文,2002年.
- 佐藤ら:基本溶接継手の残留応力分布と溶接諸条件の関係,溶接学会誌,第48巻,第9号(1979), pp.52-57.