B09 極厚板溶接時における溶接変形予測法の確立

田原 暢人 (指導教員 柴原)

Establishment of prediction method of welding distortion in very thick plate welding

by Nobuhito Tahara

Abstract

Recently, the use of thick plate is increased due to the growing size of structures. In the construction of such structures, the multi-pass welding is usually adopted. It is necessary to determine the proper condition of construction in advance because the correction of the deformation is difficult. Accordingly, it is important to establish evaluation method of construction conditions for deformation. In this study, welding deformation of large-scale multi-pass welding problems is investigated by using idealized explicit FEM that can analyze large scale multi-pass welding problems in realistic computing resources. In addition, the mechanical model of welding deformation is proposed by considering inherent shrinkage. And effects of constrain, melting efficiency and residual stresses are applied to mechanical model. As a result, it is found that the proposed prediction model can calculate welding deformation of multi-pass welding accurately.

1. 緒 言

近年、構造物の大型化に伴い厚板が用いられるようになり、その際には多層溶接が行われることが一般的である。しかし、溶接を施工する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、冷却後に変形が残留する。この変形はギャップや食い違いの原因となり、品質低下を引き起こすことになる。特に、厚板部材はその板厚により剛性が大きいため、一度変形が生じるとその矯正には困難を伴うことから、施工条件に関して事前に検討することが重要であるといえる。しかしながら、厚板の多層溶接における施工条件の決定においては、熟練者の経験と勘に頼るのが現状である。そのため溶接変形量を事前に正確に予測し、溶接変形を可能なめ溶接変形量を事前に正確に予測し、溶接変形を可能なの確立は極めて重要な課題であるといえる。

多層溶接における変形に関する既存の研究としては、 寺崎らにより多層溶接において溶接順序が角変形に大き く影響することを実験的に明らかにした研究が報告 ¹⁾されている.また、突合せ多層溶接の溶接変形を支配する 因子の影響についても寺崎らにより示されている ²⁾が、厚板の多層溶接の具体的な溶接変形予測法についての検討 は行われていないのが現状である.しかしながら、極厚板 の溶接変形を実験により定量的評価をすることは、コストや施工時間の面で難しいことから数値シミュレーション手法を用いて検討を行うことが望ましい.

一方、溶接変形の予測手法としては、熱弾塑性解析理論を適用したFEMによる数値シミュレーションが挙げられる。この手法は溶接トーチの移動に伴う温度及び変形の変化を逐次再現するため、精度の高いシミュレーションが可能である。しかし熱弾塑性解析では材料の溶融を含む強非線形現象を再現する必要があるため、非常に詳細な解析となることから、解析時間やメモリ消費量が膨

大となり、大型構造物への適用はこれまで困難であった. しかしながら、近年、理想化陽解法 FEM と呼ばれる大規 模な溶接熱弾塑性解析を実現するための手法が開発され、 多層溶接の解析に対して適用可能であることが示されて いる.

そこで本研究では、大規模な多層溶接の変形問題の解析が可能な理想化陽解法FEMを用いて極厚板の多層溶接時における溶接変形についての検討を行う。また、多層溶接時における溶接変形のモデル化を目的に、力学モデルを用いた固有収縮量に基づく検討を行うことで、極厚板の多層溶接時における横収縮および角変形の発生機構についても明らかにし、得られた知見を基に、溶接変形予測法の高度化を行う。

2. 多層溶接の溶接変形予測法の提案

2.1 力学モデルを用いた変形予測

$$\varepsilon^* = \frac{S_0^*}{B_w} \tag{1}$$

線膨張係数を α , 入熱量をO, 比熱をc, 密度を ρ とおくと

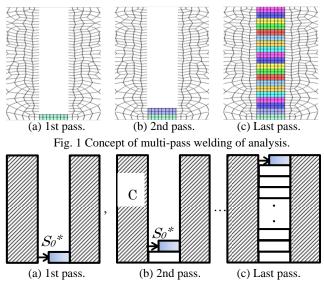


Fig. 2 Concept of proposed method based on mechanics.

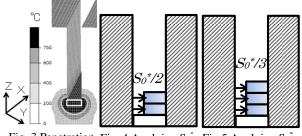


Fig. 3 Penetration shape. Fig. 4 Applying S_0^* Fig. 5 Applying S_0^* to two layers. Fig. 5 Applying S_0^* to three layers.

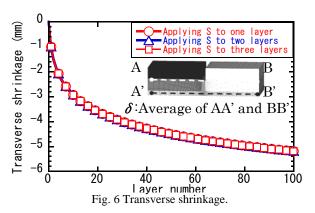
固有収縮量 S_0 *は溶接部の収縮量と等しくなり、式(2)で表される.

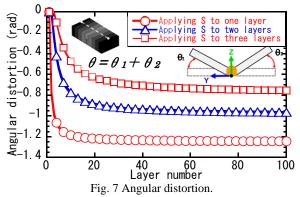
$$S_0^* = \frac{\alpha Q}{c\rho h} \tag{2}$$

ここで、応力を σ 、変位量を δ とすると、応力 - ひずみ関係($\sigma=E\varepsilon$)、変位 - ひずみ関係($\delta=\varepsilon B_w$)を用いて、変位量 δ を算出すると、式(3)となる。ただしfは溶接部の棒にかかる内力とする。

$$\delta = \frac{fB_w}{AE} - \varepsilon^* B_w \tag{3}$$

上述の議論は、第 1 層を溶接する際のモデル化に関するものであるが、本研究においては多層溶接を対象とすることから、溶接層数を棒の数におきかえることでこれをモデル化する. Fig.1, 2 (b) は、第 2 層、また、Fig.1, 2 (c) は、最終層におけるモデル化の概略を示す。第 2 層の溶接において、第 1 層の棒、溶接部の棒(灰色棒)のそれぞれにかかる内力を f_{I} , f_{2} とする. 溶接部の棒に固有収縮量 S_{o}^{*} を与えた時の収縮量 δ 、また、その時に剛体 C(斜線)の傾きに相当する角変形量 θ を算出する.第 2 層を溶接する際の、第 1 層の棒、溶接部の棒の収縮量をそれぞれ δ_{I} , δ_{2} とおく.この時の 2 パス目の溶接による平均横収縮増分 $\Delta\delta$ を式(4)に示す.同様に、この時の角変形増分 $\Delta\theta$ を式(5)に示す.





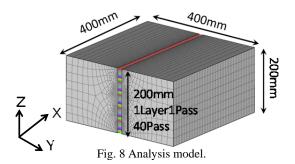
$$\Delta \delta = \frac{(\delta_1 + \delta_2)}{2} \tag{4}$$

$$\Delta\theta = \frac{(\delta_2 - \delta_1)}{h} \tag{5}$$

これらの式を、力のつり合い式、モーメントのつり合い式、のびの関係式より求める.上記の考えに基づき、棒の数を増やし、多層溶接をモデル化する.

ここで、溶接を行う際に固有ひずみが発生する場所は、 溶け込み形状により変化することから、力学モデルにお いても溶け込み形状について考慮する必要があると考え られる. Fig. 3 に、白枠のパスを加熱したときの溶け込み 形状の図を示す. 同図の黒色の部分は, 白枠のパスを溶 接したときの,力学的溶融温度である750℃を超える溶け 込みを表している. 同図より, 力学的溶融温度を超えて いる範囲は,2-3パス分に相当することがわかる.このこ とより, 前述の多層溶接のモデル化では Fig. 2 のように, 溶接を行うパスのみに固有収縮量 S_0^* を与えたが、Fig. 3 に示す溶け込み形状より,2層もしくは3層に均等に固有 収縮量を与えると考えることもできる. そこで, 固有収 縮量 S_0 *を2層に均等に付与したときの模式図を Fig. 4 に 示し、固有収縮量 S_0 *を3層に均等に付与したときの模式 図を Fig. 5 に示す. 横収縮に関しては、定式化上、固有 収縮量を付与する層数を変化させても変化しない. 棒の 本数が n 本のときの横収縮増分 $\Delta\delta_n$ を式 (6), 角変形増分 $\Delta\theta$, を式 (7) に示す. ただし, 固有収縮量を付与する棒の 数を I とおく.

$$\Delta \delta_n = -\frac{S_0^*}{n} \tag{6}$$



$$\Delta \theta_n = \frac{(n-I)}{\sum_{k=1}^n a_k} \frac{S}{h} \quad a_k = a_{k-1} + (k-1)$$
 (7)

$$I = 1$$
 $a_2 = 1$, $I = 2$ $a_3 = 3$, $I = 3$ $a_4 = 6$

この横収縮増分 $\Delta\delta$ および角変形増分 $\Delta\theta$ を足し合わせることによって、多層溶接における変形履歴の作成する.

S=1, h=1 としたときの,横軸に層数とした変形履歴を示す.Fig. 6 に横収縮 δ の履歴を,Fig. 7 に角変形 θ の履歴を示す.これは多層溶接における変形履歴に対応しており,本モデルを用いることで溶接変形を簡易的に予測する.また,固有収縮量 S_0^* を付与する層数を検討することによって,角変形量 θ が変わることが分かった.

3. 厚板基礎継手における多層溶接の変形解析 3.1 厚板基礎継手モデルの寸法と解析条件

Fig. 8 に厚板基礎継手モデルの解析対象として用いる 試験体とその寸法を示す.解析モデルは板厚 200mm,板 長および板幅はそれぞれ 400mm である.溶接線方向のメ ッシュ分割は等分割で 8mm,すなわち 50 分割とした.開 先幅は 15mm である.また,1 層あたり1パスで溶接を行 い,1 層の厚さは 5mm とした.パス数は 40 パスとする. 要素分割の結果,節点数 90,933,要素数 86,300 となった.

溶接条件は、全パス同一とし、電流 500A, 電圧 35V, 速度 250mm/min, 熱効率 0.75 とし、入熱量 3150J/mm とする. 溶接順序は最下層から上に向けて 1 層ずつ溶接を行うものとした. 横収縮は、中央断面における溶接金属部の平均横収縮とした. 角変形は、中央断面表面部の変位量を基に算出した.

3.2 解析結果と力学モデルに基づく変形予測との比較

前節の溶接順序通り,全パスの熱伝導解析および熱弾 塑性解析を行った.全パス解析結果の最高温度分布を Fig. 9 に示す. 同図の黒色部は,一般的に金属が溶融する 1500℃以上の溶け込みを表している. 同図より溶接金属 部は十分に溶融していることがわかる. 次に, Fig. 10 に 中央断面における y 方向の変位分布を, Fig. 11 に中央断 面における z 方向の変位分布を示す. Fig. 10, 11(a) に 5 パス目の変形, Fig. 10, 11(b) に 10 パス目の変形, Fig. 10, 11 (c) に 20 パス目の変形, Fig. 10, 11 (d) に最終パスの変 形を示す. Fig. 10, 11 より, パスが進むにつれ変形が大 きくなることが分かる.しかし,20パス以降ではほとん ど変化がみられなくなる.次に、全パス解析と力学モデ ルに基づく変形予測の比較を行う. 全パス解析より, 力 学モデルに基づく変形予測のほうが変形が大きくなる. 固有収縮量 S^* が変形に大きく影響を及ぼすことから、固 有収縮量 S^* についての詳細な考察を行う.

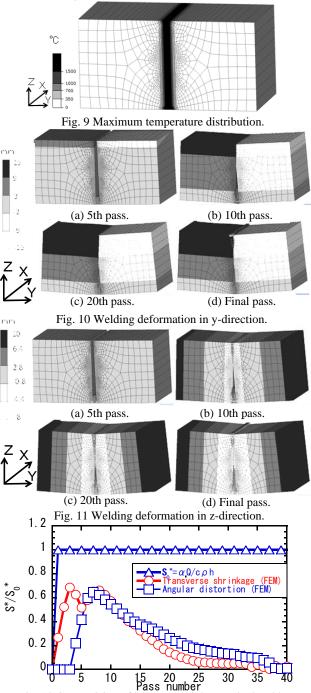


Fig. 12 Comparision of inherent shrinkage calculated by transverse shrinkage and angular distortion.

提案した力学モデルにおける固有収縮量 S_o^* は、式(2)で与えられる。力学モデルにおいて、固有収縮量 S_o^* は各層で一定となる。ここで、全パス解析の結果より、固有収縮量 S^* を算出する。式(6)、(7)で与えられる横収縮、角変形の増分値の式より、固有収縮量 S^* で算出することができる。解析結果を基に、得られた固有収縮量 S^* を力学モデルにより算出された固有収縮量 S_o^* で除した値について検討する。その比較を Fig. 12 に示す。角変形においては、固有収縮量を 3 層に与える場合を仮定した。同図より、力学モデルに与えた固有収縮量 S_o^* と解析結果より算出された固有収縮量 S^* には大きな差があることがわかる。また、Fig. 10, 11 の変位分布からわかるように、最終パス

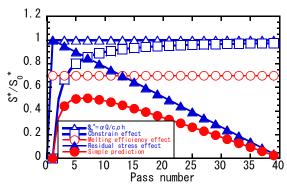


Fig. 13 Ratio of inherent shrinkage considering effect of constrain, melting efficiency and residual stress.

に近づくにつれ変形量が減少していることも分かる. そこで、次節以降では力学モデルにおける固有収縮量 S^* に関する検討を行う.

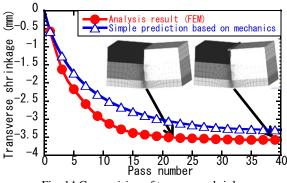
3.3 力学モデルにおける固有収縮量 S^* に関する検討

まず、力学モデルにおける固有収縮量 S^* に及ぼす拘束の影響の考察を行う。多層溶接において、初パス付近の拘束は弱く、与えた固有収縮量 S_0^* が全て変形になるわけではないが、パス数が増えるにつれ、周辺の母材部の拘束が強くなり、与えた固有収縮量 S_0^* は全て変形になると考えられる。以上のように拘束の影響を考えた固有収縮量 S^* の比率は Fig. 13 の口印のように表すことができる。

次に、入熱量 Q の溶融の寄与(溶融効率)について考える.溶融効率とは、与えた入熱量がいかに溶融に使われたかを表すもので、通常、与えた入熱量の全てが溶融に使われることはない.ここでは、解析結果より算出した固有収縮量 S^* のピークが 7 割程度であるため、そのピークを溶融効率によるものだと考え、溶融効率を 7 割と仮定する.以上のように溶融効率の影響を考えた固有収縮量 S^* の比率を同図のO印に示す.

また、力学モデルにおいては残留応力の影響を考慮し ていないので、残留応力の影響の有無を考える. 全パス 解析は残留応力の影響が有る場合の解析であり、残留応 力による影響の有無を比較するために, 残留応力の影響 無の解析を行う. 各パスを 1 パスごとに個別に解析し, そのパスの変形量の増分量を算出し、そのパスをそれぞ れ足し合わせることによって変形量を算出した結果を, 残留応力の影響無の解析とする.全パス解析では、2パス 目以降の解析においては, 溶接済みのパスの残留応力が 存在するため, 残留応力の影響無の解析とは変形の傾向 が異なると予想される. 残留応力の影響有の解析結果と 残留応力の影響無の解析結果の比較を行う. 横収縮, 角 変形ともにパス数が増えるにつれて残留応力の影響有の 解析と残留応力の影響無の解析との変形量の差が大きく なり. 残留応力の影響無の変形量が大きい. また, 固有 収縮量 S^* についての検討を行うと、残留応力の影響無の 解析より算出した固有収縮量 S^* の方が、全パス解析より 算出した固有収縮量より大きい. これは, 残留応力の影 響が無いことに起因すると推察される. そこで Fig. 12 に おける 10 パス目付近以降の固有収縮量 S^* の値が減少する 理由は、残留応力の影響だと考えるとする.

残留応力の影響を考慮する際、Fig. 12 の全パス解析より算出した固有収縮量 S^* に着目すると、最終パス付近では変形が生じず、固有収縮量の値はゼロである。また、残留応力の影響を考慮すると Fig. 13 の \triangle 印のように固有



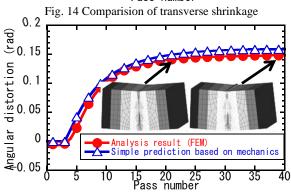


Fig. 15 Comparision of angular distortion

収縮量 S^* の比率を表す.そして,拘束,溶融効率と残留応力の影響を考慮した固有収縮量 S^* の値を乗じることにより新たな力学モデルを構築し,簡易予測式として扱う.その固有収縮量 S^* を同図の \blacksquare 印に示す.Fig. 12 と比較すると,解析結果と同じであると言える.そこで,簡易予測式の固有収縮量 S^* を,式 (6), (7) に適用し,横収縮,角変形の変形履歴と解析結果との比較を行う.Fig. 14 に横収縮,Fig. 15 に角変形の比較を示す.解析結果と良好に一致してる.以上のことより,拘束や溶融効率や残留応力の影響を考慮した固有収縮量 S^* を考えることで実際の現象を捉えた力学モデルを構築できると考えられる.

4. 結 言

本研究では、多層溶接のモデル化を、力学モデルを用いた検討を行い、溶接変形の簡易予測式を構築した。また、厚板基礎継手における多層溶接解析を、理想化陽解法 FEM による熱弾塑性解析を行い、構築した簡易予測式に対して比較検討を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 力学モデルを用いた固有収縮量に基づく検討を行 うことで、多層溶接時における溶接変形のモデル 化を構築することができた.
- 2) 厚板多層溶接において、全パス解析を行った結果、パスが進むにつれ、横収縮、角変形ともに、パスが進むにつれ、変形が大きくなるが、約20パス以降においては変形増分がほぼゼロになることが分かった。
- 3) 厚板基礎継手に、拘束、溶融効率、残留応力の影響を考慮した簡易予測式を構築し、を適用すると、 概ね正確に溶接変形を予測できることが分かった.

参考文献

1) 寺崎ら: 突合せ多層溶接により生じる各パスごとの溶接変形とその特徴,溶接学会公演概要第83集 pp.276-2772) 寺崎ら: 突合せ多層溶接の溶接変形を支配する因子の影響についての研究,溶接学会誌第45巻 pp.464-470