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 限り小さくできる様な施工条件について検討できる手法 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

多層溶接時における溶接変形のモデル化を目的に,力 学モデルを用いた検討を行い,溶接変形の簡易予測式を 提案する.モデル化に際しては,固有収縮量 S を溶接部 に付与する場合を考える.Fig.1に解析における多層溶 接の模式図を示す.Fig.2に棒の数を層数と考えた多層 溶接のモデル化を示す.Fig.1,2(a)は,第1層,におけ るモデル化の概略を示す.溶接部の棒(灰色棒)の長さ(開 先幅)を B_w ,のど厚をh,ヤング率をEと定義し,固有ひ ずみを ε と定義すると, ε *は固有収縮量 S_0 *を用いて式(1) で表される.

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

線膨張係数を α ,入熱量をQ,比熱をc,密度を ρ とおくと



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_{1}, f_{2} とする.溶接部の棒に固有収縮量 S_{0}^{*} 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.



$$\Delta \delta = \frac{1}{2} \tag{4}$$

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

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 S₀*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 Δδ_nを式 (6), 角変形増分 Δθ_n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.

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



この横収縮増分 Δδ および角変形増分 Δθ 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.



提案した力学モデルにおける固有収縮量 S_0^* は,式(2) で与えられる.力学モデルにおいて,固有収縮量 S_0^* 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_0^* 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_0^* 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 S₀^{*}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 S₀^{*}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□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^* の比率を同図の〇印に示す.

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▲印のように固有



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●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.

- 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.276-277
2) 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