多層溶接における力学モデルを用いた溶接変形簡易予測法の提案

大阪府立大学大学院 柴原 正和,〇臼杵 龍太 生島 一樹

Simplified Estimation Method For Welding Deformation on Multi-pass Welding

by Masakazu SHIBAHARA, Ryuta USUKI and Kazuki IKUSHIMA

1. 緒 言

船舶や橋梁,プラント配管などの厚板構造物では多層溶接が多く用いられている.溶接施工においては, 溶接トーチからの入熱により,溶接部近傍が局所的に溶融し,それに伴い大きな熱ひずみが発生することで, 冷却後に溶接変形が残留する¹⁾ことが知られている.溶接変形は,製品の外観を損なうとともに,次の組み 立て工程におけるギャップや目違いの原因となり,製品の品質低下を引き起こす要因となり得る.特に,厚 板溶接の場合には板の剛性が大きく,一度変形が生じてしまうとその矯正は非常に困難となるので,溶接施 工時において溶接変形を低減させることは重要であるといえる.しかしながら,多層溶接における溶接施工 条件は,熟練工の経験と勘により決定されることが多く,変形発生メカニズムを考慮し変形が小さくなるよ う検討された継手設計はなされていない場合が存在する.よって,溶接変形量を事前に予測し,可能な限り 低減させる施工条件について検討することは重要であると言える.

多層溶接の変形に関する既往の研究としては、寺崎らにより溶接順序が角変形に及ぼす影響について実験 的に明らかにされた事例²⁾が報告されている.また、突合せ多層溶接の溶接変形を支配する因子についても 寺崎らにより示されている³⁾が、厚板の多層溶接における溶接変形の発生メカニズムについての検討事例は 少ない.

そこで、本研究では、発生メカニズムを含む、多層溶接における力学モデルを用いた溶接変形簡易予測法 を提案する.さらに、大規模解析が可能な理想化陽解法 FEM^{4.5)}を用いた熱弾塑性解析を実施することで、溶 接変形簡易予測法の高度化を図るとともに、提案手法の妥当性について検証する.

2. 多層溶接における溶接変形簡易予測法の提案

2. 1 多層溶接における力学モデルを用いた溶接変形簡易予測法

本節では多層溶接時における横収縮および角変形を対象に,多層溶接における力学モデルを用いた固有収 縮量に基づく溶接変形簡易予測法の提案を行う.

モデル化に際しては、溶接部にのみ固有収縮が発生していると考える. Fig. 1 に多層溶接における力学モデルを用いた溶接変形(横収縮・角変形)を模式的に示す. 第 n 層溶接時にその層に発生する固有収縮量 S^{*n} を同図(a)に示す. 図中の B^n_w は、第 n 層溶接時における n 層目の開先幅を示す. ここで固有ひずみが開先内にのみ発生すると仮定すると、第 n 層溶接時にその層に発生する固有ひずみ ε^{*n}_w は固有収縮量 S^{*n} を用いて式(1)のように定義できる.

$$\varepsilon_w^{*_n} = \frac{S^{*_n}}{B_w^n} \tag{1}$$

ここで、溶接金属の線膨張係数を a、 比熱を c、密度を ρ 、第 n 層溶接時の単位長さあたりの入熱量を Q^n 、 第 n 層ののど厚を h^n とおき、各層における固有収縮量 S^{*n} の $a Q^n / c \rho h^n$ に対する割合を ξ^n とおくと、第 n 層に おける固有収縮量 S^{*n} は、次式で表される.

$$S^{*n} = \xi^n \frac{\alpha Q^n}{c\rho h^n} \tag{2}$$

次に、Fig. 1(b)に第 n 層溶接時における内力の釣合い状態を示す. 第 n 層溶接時に第 i 層目に加わる力を f_i^n , と定義する. また、Fig. 1(c)は第 n 層溶接時における変形を模式的に示す. 第 n 層溶接時における第 i 層目の 横収縮量を δ_i^n と定義する. ここで、力の釣合い式、モーメントの釣合い式およびのびの関係式はそれぞれ 式(3)、式(4)および式(5)のように表される.

$$f_1^n + f_2^n + f_3^n + \dots + f_i^n + \dots + f_{n-1}^n + f_n^n = 0$$
(3)

$$(n-1)f_1^n + (n-2)f_2^n + (n-3)f_3^n + \dots + (n-i)f_i^n + \dots + 2f_{n-2}^n + f_{n-1}^n = 0$$
(4)

$$\delta_{1}^{n} - \delta_{2}^{n} = \delta_{2}^{n} - \delta_{3}^{n}, \quad \delta_{2}^{n} - \delta_{3}^{n} = \delta_{3}^{n} - \delta_{4}^{n}, \quad \cdots, \quad \delta_{i-2}^{n} - \delta_{i-1}^{n} = \delta_{i-1}^{n} - \delta_{i}^{n}, \quad \cdots, \quad \delta_{n-2}^{n} - \delta_{n-1}^{n} = \delta_{n-1}^{n} - \delta_{n}^{n} \quad (5)$$

上記の考えに基づくと、第 n 層溶接時における第 i 層の応力-ひずみ関係および変位-ひずみ関係より次式(6) が導かれる.

$$\sigma_i^n = \frac{f_i^n}{A_i} = \mathbf{E}\varepsilon_i^n = \frac{\delta_i^n}{B_w^i}E \qquad (1 \le i \le n-1)$$
(6)

同様に溶接部において、次式が成立する.

$$\sigma_n^n = \frac{f_n^n}{A} = \mathbb{E}\varepsilon_w^{*n} = (\frac{S^{*n} + \delta_n^n}{B_w^n})E \quad \text{(at position of current welding)}$$
(7)

式(3)~(7)を用いると、第n層溶接時における第i層の横収縮量 δ_i^n は式 (8)で表される.

$$\delta_i^n = -\frac{S^{*n}}{n} - \frac{\left\{(n-1)^2 + 2(n-1)(i-1)\right\}}{2(1+3+6+10+\dots+\frac{\left[2+\left\{(n+1)(n-2)\right\}\right]}{2})}S^{*n}$$
(8)

よって,

$$\delta_i^n = -\frac{S^{*n}}{n} - \frac{\left\{(n-1)^2 + 2(n-1)(i-1)\right\}}{2\sum_{k=2}^n a_k} S^{*n}$$
(9)

ただし, $a_k = a_{k-1} + (k-1)$, $a_2 = 1$



Fig. 1 Schematic illustration of inherent shrinkage on multi-pass welding in proposed model.

ここで、第n層溶接時における初層および第n層の横収縮量 δ_1^n 、 δ_n^n は式(10)および式(11)で表される.

$$\delta_1^n = -\frac{S^{*n}}{n} - \frac{(n-1)^2 S^{*n}}{2\sum_{k=2}^n a_k}$$
(10)

$$\delta_n^n = -\frac{S^{*n}}{n} + \frac{(n-1)^2 S^{*n}}{2\sum_{k=2}^n a_k}$$
(11)

さらに、すべての層ののど厚を一定(=h)と仮定した場合、第 n 層を溶接した際の、溶接部のみの平均横収縮 増分 $\Delta \delta^n$ と角変形増分 $\Delta \theta^n$ は、それぞれ式(12)、式(13)で表される.

$$\Delta \delta^n = \frac{\left(\delta_n^n + \delta_1^n\right)}{2} \tag{12}$$

$$\Delta \theta^n = \frac{(\delta_n^n - \delta_1^n)}{(n-1)h} \tag{13}$$

式(12),式(13)に式(10),式(11)を代入すると第 n 層溶接時における平均横収縮増分 $\Delta\delta^n$ と角変形増分 $\Delta\theta^n$ は それぞれ式(14),式(15)で表される.

$$\Delta \delta^n = -\frac{S^{*n}}{n} \tag{14}$$

$$\Delta \theta^n = -\frac{(n-1)}{\sum_{k=2}^n a_k} \frac{S^{*n}}{h}$$
⁽¹⁵⁾

今回提案する多層溶接における溶接変形簡易予測法においては、この平均横収縮増分 $\Delta\delta^n$ および角変形増分 $\Delta\theta^n$ を各層溶接ごとに足し合わせることにより、横収縮と角変形の変形履歴を作成した.

3. 極厚板狭開先継手モデルの解析および力学モデルを用いた溶接変形簡易予測法の適用

本節では,前章までに提案した多層溶接における力学モデルを用いた溶接変形簡易予測法を極厚板狭開先 多層溶接継手モデルの解析に適用し,理想化陽解法 FEM を用いた熱弾塑性解析による全パスの詳細解析の結 果と比較することで,溶接変形簡易予測法の高精度化を図るとともに,提案手法の妥当性について検証する.

3.1 極厚板狭開先多層溶接継手モデルの形状・寸法および解析条件



(a) Welding direction of basic model (b) Overall view of basic model. Fig.2 FEM mesh division for basic multi-pass welding.



Fig. 2 に極厚板狭開先多層溶接継手の形状および寸法を示す. 今回解析対象とした試験体は提案された推定 法の広範囲な適用性について検討するため,板厚 200 mm,板幅 200 mm,溶接長 400 mmの極厚板試験体と し,1層1パス,のど厚 5 mmの多層溶接を仮定した.すなわち,総パス数は 40 である.変形の履歴は,溶 接変形簡易予測法と同様にして,各パスにおける横収縮量と角変形量の増分値を,足し合わせることで算出 した.

今回用いた溶接条件は、電流 250 A、電圧 35 V および溶接速度 250 mm/min で全パス同一とした. Fig.3 と Fig.4 に理想化陽解法 FEM を用いた熱弾塑性解析結果として得られた第 5 層、第 20 層および最終層溶接終了 時における y 軸方向の変位分布と z 軸方向の変位分布を示す. Fig.3(a)および Fig.4(a)に第 5 層溶接後, Fig.3(b) および Fig.4(b)に第 20 層溶接後, Fig.3(c)および Fig.4(c)に最終層である第 40 層溶接後の変形を示す. Fig.3 お よび Fig.4 より、積層が進むにつれ変形が大きくなることが確認されるが、第 20 層溶接後と最終層溶接後の 変位分布に大きな差がなく、第 20 層以降の溶接においてはでほとんど変形しないことが分かる.





角変形や横収縮は、同一入熱量であっても、溶け込み形状の影響を受けて変化すると考えられる.そこで、 本予測法においては、力学的溶融領域の溶け込み深さの影響について検討する.Fig.5に、前節で示した解析 結果の第5層溶接時における最高到達温度分布を示す.同図における750℃以上の領域は、力学的溶融領域 を示す.同図より、力学的溶融温度を超えている範囲は、本溶接条件においては約3層分に相当することが わかる.また、Fig.6にFig.5と同一の解析条件で第5層を溶接したときのy方向塑性ひずみ分布を示す.同 図より、0.2%以上の塑性ひずみの発生する領域は溶接金属部の約3層分であり、力学的溶融領域とほぼ同一 領域であることが確認できる。このことより、簡易予測式における固有収縮量 S^{*n} は、3層に均等に与えると 考える.第5層溶接時に固有収縮量 S^{*n} を、3層に均等に与えた場合の模式図をFig.7に示す.そのときの平 均横収縮増分 $\Delta\delta^{n}$ および角変形増分 $\Delta\theta^{n}$ は次式(16)および(17)で与えられる.

$$\Delta \delta^n = -\frac{S^{*n}}{n} \tag{16}$$

$$\Delta \theta^{n} = -\frac{(n-3)}{\sum_{k=4}^{n} a_{k}} \frac{S^{*n}}{h} , \quad a_{k} = a_{k-1} + (k-1) \quad (4 \le n)$$

$$a_{4} = 6$$
(17)

なお、横収縮に関しては、式(14)および式(16)から分かる通り、固有収縮量 S^{*n} を付与する層数に関わらず変化しない、一方、角変形に関しては、固有収縮量 S^{*n} を付与する層数の大小の影響を受け、変化することが確認できる.

3.3 力学モデルにおける固有収縮率の検討

最後に固有収縮率について検討する.固有収縮率とは、各層溶接時に発生した横収縮量を佐藤・寺崎の実 験式における収縮量 $a Q^n (c \rho h^n)$ で除したものと定義する.すなわち固有収縮量は層ごとに拘束や残留応力の 影響を受けて変化すると考えられるが、その変化分を式(2)における固有収縮率 ξ^n を用いて表すことを考え る.まず、 ξ^n を1.0とした時の溶接変形簡易予測法により得られた横収縮の結果をFig.8 に●印で示す.同様 にして、熱弾塑性解析により得られた横収縮を▲印で示す.同図より、提案した溶接変形簡易予測法と熱弾 塑性解析結果として得られた横収縮量において、大きな差があることが確認される.これは、暗に、各層に おける固有収縮量S*nが拘束や残留応力等の影響により佐藤・寺崎の実験式と $a Q^n (c \rho h^n)$ 一致しないことを示 している.そこで、解析結果から得られた平均横収縮増分値を溶接変形簡易予測法から得られた平均横収縮 増分値で除し、各層溶接時における固有収縮量S*nの横収縮の $a Q^n (c \rho h^n)$ に対する割合すなわち各層溶接時に おける固有収縮率 ξ^n を得た.各層溶接時の固有収縮率をFig.9 に示す.同図より、固有収縮率 ξ^n は、いずれ の層を溶接した場合においても、1.0を下回ることが確認された.また、固有収縮率 ξ^n は、自拘束の小さな第







Fig.9 Ratio of inherent shrinkage between FEM and prediction based on proposed theory.



Fig.10 Relationship between FEM and prediction based on proposed theory on transverse shrinkage.



Fig.11 Relationship between FEM and prediction based on proposed theory on angular distorsion.

2 層あたりまでは小さな値をとり、その後ピークを迎え、積層が 100mm となる第 20 層以上においては、0.1 以下の値になることが確認される. この理由としては、残留応力の影響が考えれるが、これについては今後の課題とする. 次に固有収縮率ξⁿを考慮した簡易予測式を用いた横収縮および角変形の結果を Fig.10 および Fig.11 の●印で示す. 両図より、固有収縮率ξⁿを考慮した結果、横収縮のみならず、角変形においても解析 結果と簡易予測式の値が良好に一致する事を確認した. これにより、横収縮と角変形が独立したものではな く、固有収縮量という共通の物理量で表現できることを示した.

4. 結言

本研究では,溶接後の固有収縮量に注目した力学モデルよる,多層溶接における溶接変形簡易予測法を 提案した.本手法を用いた横収縮および角変形履歴と熱弾塑性解析結果とを,比較した結果,以下の知見 を得た.

- 1) 固有収縮率ξⁿを考慮することで、多層溶接の横収縮および角変形が定量的に予測できることを示した.
- 2) 固有収縮率ξⁿは、初層溶接時に小さい値をとり、第 3~7 層溶接時にピークとなり、その後、層を重ねるにつれて小さくなることが分かった.なおのど厚が 100mm を超える第 20 層以上の溶接においては、固有収縮率ξⁿは 0.1 以下の小さな値をとることが分かった.
- 3) 力学モデルを構築することで, 横収縮と角変形が独立したものでなく固有収縮量という共通の物理量で 表現できることを示した.

参考文献

- R.Kamichika: Why Does Welding Residual Stress Occur, and How Can it be Controlled?, Journal of The Japan Welding Society, (1990), pp.502-508
- 2) T.Terasaki, D.Yamakawa: Study on Numerical Analysis of Welding Residual Stress and Welding Deformation Generated in Butt Joint, Journal of The Society of Naval Architectsof Japan, (2003), pp.211-217
- K.Satoh, T.Terasaki: Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Multipass Welded Butt Joint, Journal of The Japan Welding Society, (1976), pp.464-470
- 4) M. Shibahara, K. Ikushima, S. Itoh, K. Masaoka : Computational Method for Transient Welding Deformation and Stress for Large Scale Structure Based on Dynamic Explicit FEM, QJJWS, Vol.29, No.1 (2011), pp.1-9
- 5) M. Shibahara, K. Ikushima:Ultra High Speed and Large Scale Computational Using Idealize Explicit FEM, 溶接 構造シンポジウム, (2011), pp.301-308