肉盛溶接の有限要素法による数値シミュレーション

武蔵工業大学 正会員 白旗弘実

1. はじめに

鋼構造物において,溶接継手はもっとも基本的な継 手の一つである.残留応力の発生は溶接継手において 特徴的な現象の一つであり,継手の強度や疲労に及ぼ す影響が研究されている¹⁾.

溶接過程における熱伝導および応力ひずみの計算は これまでも行われてきた²⁾.しかしながら,溶接過程 は温度,金属組織および応力が複雑に連成する過程で あり,特に溶融・凝固,相変態などを考慮した計算例 は,それほど多くない.

本研究において,溶融を考慮した溶接のシミュレー ションプログラムを作成した.定式化は王,井上³⁾の 研究を参考とし,それに加えてマルテンサイト変態も 考慮できるものとした⁴⁾.本報告は,その一例を示す ものである.

2. 熱伝導方程式

固体の非定常熱伝導方程式は次式で表される.

$$\rho c \dot{T} - \operatorname{div} \left(k \operatorname{grad} T \right) + \rho \sum_{i} l_{i} \dot{\xi}_{i} = \rho \gamma \qquad (1)$$

ここに, ρ は物体の密度,cは比熱,Tは温度,kは熱 伝導率, l_i は相変化の潜熱, ξ_i は各相の体積分率, γ は 単位質量あたりの熱発生量である.iは相に関する指 標である.ここではパーライト,オーステナイト,液 相およびマルテンサイトを考慮している.また,^{'''}, (ドット)は時間増分を表している.

3. 相変態の速度式

考慮した 4 つの相のうち,パーライトからオーステ ナイトは体積分率が温度に関して線形的に変化すると 仮定した.また,オーステナイトと液相の間はてこの 原理に従うものとした.オーステナイトの冷却過程で, 実際はフェライト,ベイナイトなども生じることにな るが,まとめてパーライト変態として,以下の速度式 に従うものとした³⁾.

$$\xi_p = 1 - \exp\left\{-\int_0^t f(T, \sigma_m)(t-\tau)^3 d\tau\right\}$$
 (2)

 ξ_p はパーライトの体積分率, σ_m は平均応力である.マ ルテンサイト変態に関しては次式に従うものとした⁴⁾.

$$\xi_m = 1 - \exp\left\{C_1(M_s - T) + C_2\sigma_m + C_3J_2^{1/2}\right\} (3)$$

 ξ_m はマルテンサイトの体積分率, M_s はマルテンサイト変態開始温度, J_2 は応力第二不変量, C_1, C_2, C_3 は定数である.

4. 応力解析

溶接過程中に発生する応力 σ とひずみ ε は次式で表 される ³⁾.

$$\dot{\sigma} = D^{EP} \left(\dot{\varepsilon} - \alpha \dot{T} - \frac{1}{S_0} \frac{\partial F}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial F}{\partial T} \dot{T} + \sum_i \frac{\partial F}{\partial \xi_i} \dot{\xi}_i \right) \right)$$
(4)

ここに, D^{EP} は塑性を考慮した材料構成テンソル, α は線膨張係数, S_0 は定数,Fは降伏関数である.ひず みは,弾性ひずみ ε^e ,粘弾性ひずみ ε^v および相変態 に伴う膨張によるひずみ ε^m に分解される.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^v + \dot{\varepsilon}^m \tag{5}$$

$$\dot{\varepsilon}^v = \frac{1}{2\mu} \left(1 - \frac{F}{\sqrt{3}J_2^{*1/2}} \right) s^*$$
 (6)

$$\dot{\varepsilon}^m = \sum_i \beta_i \dot{\xi}_i \tag{7}$$

 β は相変態による膨張に関する係数, μ は粘性係数, s^* は偏差応力である.

解析においては,式-(1)を解いたのち,式-(2)などの相分率を計算し,式-(4)を計算することになる.

5. 解析例

直径 300mm,厚さ 8mm の板の中心に肉盛溶接を 行ったときのシミュレーションを示す.板の中心は直 径 10mm の穴があけられている.鋼材は SM400 を想 定している.モデルを図-1 に示す.ヤング率,降伏応 力などには温度依存性があるが,図-2 に示すように定 めた.これらの値は王ら³⁾の文献のほかいくつかの文 献⁵⁾を参考にしたが,一部には仮定も含まれている.

図-1のモデルを軸対称問題として解析した.肉盛溶 接として,円盤の中心を20秒間加熱した.そのとき

Key Words: 溶接,残留応力,熱伝導,有限要素法 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1



図-3 温度の時間変化

の入熱量を毎秒700calとした.時間による温度変化を 図-3に示す.図には半径0,5,10および20mm位置での 温度変化が示されている.王らの結果³⁾と著者の結果 はよく一致している.

図-4 に残留応力分布を示す.図には王らの解析結果 および実験結果も示されているが,本解析も王らの結 果と定性的によく一致している.

図-5 にマルテンサイトの体積分率の変化を示す.溶 接前の金属組織はすべてパーライトとしているが,A₁ 温度をこえた部分はオーステナイトとなる.オーステ ナイトは冷却過程でパーライトとマルテンサイトに変



態する.図より,オーステナイトに変態した部分は半径10mmの範囲までであることがわかる.その中でマルテンサイトは体積分率で40~50%であることがわかる.また残留オーステナイトは1%にも満たない.

6. おわりに

王らの定式化と同様のシミュレーションを行い,ほ ぼ同様の結果を得ることができた.また,マルテンサ イト変態も考慮できるように拡張した.

今後はプログラムを改良し, I 桁に生じる溶接残留 応力と残留変位, 低温相変態溶接, 割れの解析などを 行えるようにしたいと考えている.

参考文献

- Miki, C., Nishino, F., Hirabayashi, Y. and Takena, K.: Influence of Residual Welding Stress on Fatigue Crack Growth Rate, Proc. of JSCE, No.330, pp.161-168, 1983.
- 2) 望月正人,三上欣希,豊田政男:溶接シミュレーション による溶接継手の機械的特性の評価,鋼構造年次論文報 告集, Vol.10, pp.35-42, 2002.
- 3) 王志剛,井上達雄:溶融を考慮した粘塑性体の構成式と それを用いた溶接過程の解析,日本機械学会論文集(A 編), Vol.50, No.459, pp.1900-1908, 1984.
- 山口豪,王志剛,井上達雄:歯車の焼入過程における温度, 組織および応力の解析,材料,Vol.33,No.370,pp.814-820,1984.
- 5) 大中逸雄:コンピュータ伝熱・凝固解析入門, 丸善, 1980.