

鉄塔用山形鋼のめっき時の熱-弾粘塑性解析

Thermal Elasto-Viscoplastic Analysis of L-shaped steel members in Hot-Dip Galvanization

都井 裕*・李 帝明*・家 沢 徹**

Yutaka TOI, Jae Myung LEE and Tohru IEZAWA

1. はじめに

送電鉄塔などの鋼構造部材は、耐腐食性の向上または防錆メンテナンスの手間の軽減のため亜鉛めっきを施されることが普通である。しかし、この亜鉛めっきの最中には、構造部材の不均一な温度分布による熱応力が発生し、ボルト接合用の孔のようなひずみ集中部に亜鉛ぜい化割れ(めっき割れ)の事例が報告されている。現在、電力業界では送電鉄塔の使用部材の強度を上げ、軽量化により鉄塔製作費の低減に基づいた電力コストの低減を計っている。この高強度化を実現する際の技術課題の一つにめっき割れの問題があるが、実験によって力学的情報を得ることは非常に困難である。したがって、数値シミュレーションによる熱応力挙動の解明が期待されている。

高温または高い応力の作用下で使用される構造部材の設計および解析には時間依存形の非線形挙動に対する正確な把握が必要となり、このような問題に対しては、クリープまたは時間依存型塑性などの材料応答に関する構成式理論に基づいた有限要素解析が行われる。これらの理論の中で、Bodner-Partom のモデル、Walker のモデルなどは材料定数の決定方法の開発、温度依存モデリングへの拡張性等のため、よく使われている¹⁾⁻³⁾。本研究では温度およびひずみ速度に対して幅広い適用範囲を持っており、何らの判定条件も伴わず自動的に負荷、除荷、再降伏、材料定数の温度依存性などを考慮することが可能な Bodner-Partom のモデル³⁾を採用した有限要素解析プログラムによってめっき割れ発生の力学的メカニズムを解明する。

2. 有限要素解析アルゴリズム

2.1 Bodner-Partom の粘塑性理論

Bodner らは内部状態変数によって表現される粘塑性

構成式を次のように提案した。

$$\dot{\sigma}_{ij} = E_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}^e - E_{ijkl} \alpha_{kl} \dot{T} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 E_{ijkl} は Hooke の弾性係数テンソル、 α_{kl} は熱膨張係数テンソル、 \dot{T} は温度変化率であり、von Mises の降伏条件式を用いた塑性ポテンシャルを f とすれば、塑性流れ則に従う塑性ひずみ速度は次のようになる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

また、相当粘塑性ひずみ速度は次式のように与えられる。

$$\dot{\epsilon}^p (= \Lambda) = \frac{3 \sqrt{D_0^2 \exp \left[- \{Z/f\}^2 \left\{ \frac{n+1}{n} \right\}^{1/n} \right]^n}}{f} \quad \dots \dots (4)$$

$$Z = Z_1 + (Z_0 - Z_1) \exp \left(- m W_p / Z_0 \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 Z は材料定数 Z_0 、 m 、 n 、 D_0 、 Z_1 により計算される内部状態変数であり、 W_p は履歴依存の全粘塑性仕事である。したがって、(3) 式と (4) 式の関係によって粘塑性ひずみ速度の計算が可能になり、(5) 式で表現される履歴依存の内部状態変数によって材料の粘塑性応答が表現できる。

2.2 有限要素定式化

前節で述べた Bodner 型構成式を用いて熱荷重を受ける鋼構造物の有限要素定式化を行うことにする。Bodner 型構成式をいわゆる初期ひずみ法により定式化すれば、材料非線形性に関しては陽的アルゴリズムになる。したがって、

*東京大学生産技術研究所 第2部

**巴技研

研 究 速 報

熱ひずみ増分と塑性ひずみ増分を既知の初期ひずみ量とすれば、次のような増分型要素剛性方程式が得られる。

$$\{F_r\} + \{\Delta F\} + \int_V [B_o] [D_e] \{ \{\Delta \epsilon_\theta\} + \{\Delta \epsilon_p\} \} dV = [K_o] \{\Delta u\} \dots \dots \dots (6)$$

(6) 式で与えられる増分型剛性方程式の解法として中心差分法を用いて計算の安定性を高めている⁴⁾。

なお、(1) 式の E_{ijk} , α_{kl} はいずれも温度の関数であり、降伏応力の温度依存性は (4) 式 of 材料定数 n を温度の関数とすることによって考慮する。また、解析では残留応力の割れ発生に及ぼす影響を考察するため残留応力の有無を考慮する。事例によると、割れは孔縁部で半径方向に発生するので、考慮する残留応力は円周方向応力成分のみである。

3. 亜鉛めっき時の孔を有する山形鋼の熱弾塑性解析

3.1 解析モデル

ここでは (6) 式で与えられた有限要素定式化によって、亜鉛めっき時の山形鋼におけるボルト孔近傍の熱弾塑性解析を行う。図 1 に、解析モデルとメッシュ分割を示している。有限要素としては 2 次アイソパラメトリック軸対称要素を用いた。数値積分は 2×2 点積分であり、すべての諸物理量はこの積分点で評価する。また、めっき割れの発生が予想される孔縁部の挙動を、図 2 のような着目点において評価する。

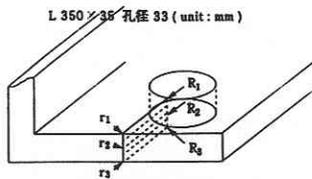


図 1 解析モデルおよびメッシュ分割図

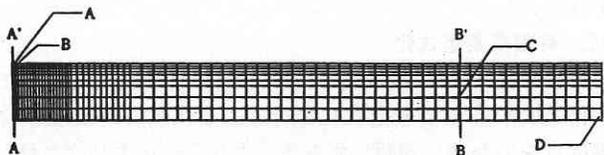


図 2 応力・ひずみ着目点

3.2 各位置における温度の計算

図 1 に示すような解析モデル内に生ずる温度分布については、初期温度 T_1 の板が両面と孔から T_0 で加熱されると仮定して、多次元物体の熱伝導理論によって計算する。板厚方向に対しては一次元無限平板の熱伝導方程式の解を、半径方向に対しては内部熱発生がある厚肉中空円筒の解を用いて、二つの方向に対するそれぞれの一次元熱伝導方程式の解の合成によって二次元分布を計算する^{5),6)}。すなわち、

$$T(r, z, t) = (T_0 - T_1) \times \left\{ 1 - 2f(z, t) [1 - G(r, t) + H(r, t)] \right\} + T_1$$

$$f(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_n \times \cos \left(\frac{2\delta_n z}{B} \right) \times e^{-\frac{4\kappa \delta_n^2 t}{B^2}}}{\delta_n + \sin \delta_n \times \cos \delta_n}$$

$$G(r, t) = \left\{ \frac{ah [1 - bh \ln (r/b)] + bh T_1 / T_0 [1 + ah \ln (r/a)]}{ah + bh + abh^2 \ln (b/a)} \right\}$$

$$H(r, t) = \pi \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\kappa \alpha_n^2 t} \frac{c_n h (c_n + T_1 / T_0 a_n)}{c_n^2 (\alpha_n^2 + h^2) - a_n^2 (\alpha_n^2 + h^2)} F_o(\alpha_n r)$$

$$F_o(\alpha_n r) = b_n J_0(\alpha_n r) - a_n Y_0(\alpha_n r) \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 r, z, t はそれぞれ板の中央面からの板厚方向の距離、孔の中心からの半径方向の距離、加熱開始からの時間を表わしている。 T_0, T_1 は加熱温度 (溶融亜鉛の温度) と部材の初期温度を表わす。なお、 h, k は熱拡散係数、相対熱伝導係数、 a, b, B は孔の半径、モデルの長さ、板の厚さであり、 J_0, Y_0 は第 1 種、2 種 Bessel 関数である。

表 1 Bodner 型構成式における材料定数

温度 非依存型 定数	$D_0 = 1.0 \times 10^8$ (/sec) $Z_0 = 600$ (MPa) $Z_1 = 930$ (MPa) $m = 0.03$
温度 依存型 定数	$n = -2.813 \times 10^{-9} T^3 + 8.9324 \times 10^{-6} T^2$ $+ 9.681 \times 10^{-3} T + 4.5282$ $\alpha = (-2.925 \times 10^{-6} T^2 + 2.3066 \times 10^{-3} T$ $+ 1.08293) \times 10^{-5}$ $E = -0.1027 T^2 - 20.2551 T + 209194$

表 2 解析において仮定した残留応力分布

	考慮する残留応力分布
case 1	$\sigma_{re,s} = \sigma_{re,m} = 0$
case 2	$\sigma_{re,s} = -200MPa \quad \sigma_{re,m} = 200MPa$
case 3	$\sigma_{re,s} = -390MPa \quad \sigma_{re,m} = 390MPa$
case 4	$\sigma_{re,s} = 390MPa \quad \sigma_{re,m} = -390MPa$

(7) 式の a_n, b_n, c_n および δ_n, α_n の具体形に関しては参考文献 (6) を参照されたい。実際の計算における温度は各積分点ごとに評価する。

3.3 解析条件および材料定数

本研究におけるすべての材料定数と解析条件を表 1 と表 2 に示す。

表 2 に示す残留応力は、板の表面の残留応力値 $\sigma_{re,s}$ と中央面の値 $\sigma_{re,m}$ を用いて板厚にわたって線形的に分布すると仮定する。また、温度計算に対する材料定数として、熱拡散係数は $k = 0.04771(m/hr)$ 、相対熱伝導係数は $h = 40.0(kcal/m^2hr^\circ C)$ 、部材初期温度と加熱温度はそれぞれ、 $T_1 = 50^\circ C, T_0 = 450^\circ C$ としており、解析は構造全体が均一な温度になるまでの時間を対象としている。

4. 解析結果および考察

図 3 に構造全体が均一な温度に至るまでの温度上昇を、構造内で温度上昇が一番速い部分と一番遅い部分について示している。この図から温度の時刻歴は各位置によって異なることがわかる。ここに、加熱開始の時間、考慮してい

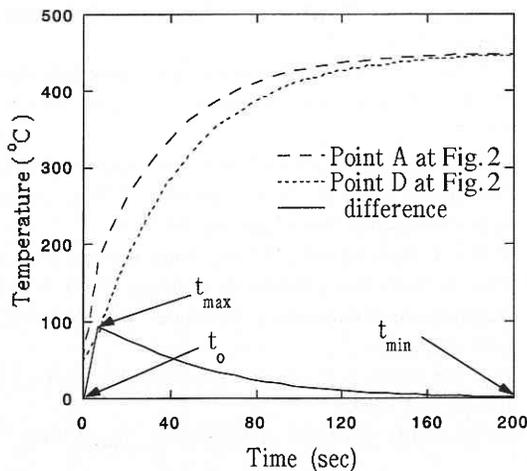


図 3 温度上昇の時刻歴

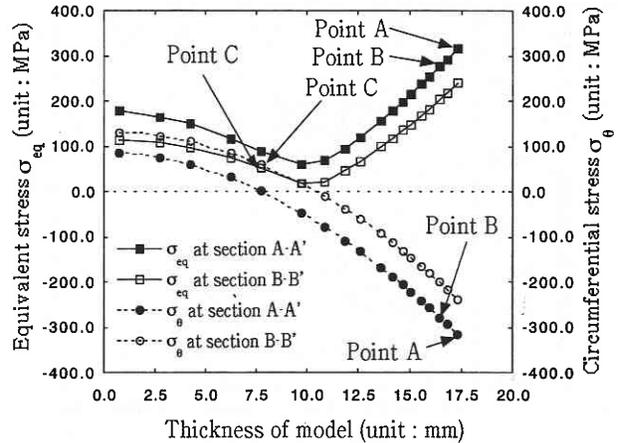


図 4 各横断面において相当応力と円周方向応力の分布

る二つの点の温度差が最大になる時間、全体の温度が均一になった時間をそれぞれ t_0, t_{max}, t_{min} として定義しておく。これらの中で、 t_{max} は応力・ひずみ挙動において特別な意味を持つ。図 4 には case1 において $t = t_{max}$ の時の図 2 に示した応力着目点における相当応力と円周方向応力を示している。この図からわかるように、表面と孔縁に近いほど大きな応力が発生している。図 5 には case1 の場合における円周方向応力・ひずみ挙動を示している。加熱直後から t_{max} までは温度上昇の速い部分の熱膨張が他の遅い部分によって拘束され圧縮挙動を示している。しかし、当初支配的であったこの圧縮挙動が時間が t_{max} を超えるとともに他の部分のより大きな熱膨張によって引張挙動 (応力の回復) に変化している。したがって、図 3 で定義している t_{max} は応力・ひずみ挙動において除荷点として作用している。また、

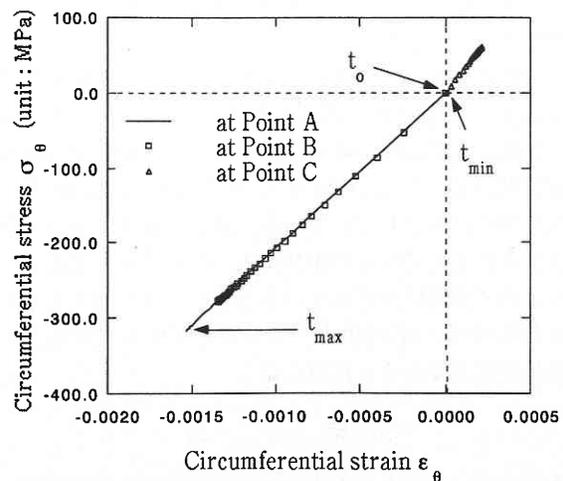


図 5 応力・ひずみ曲線 (case1)

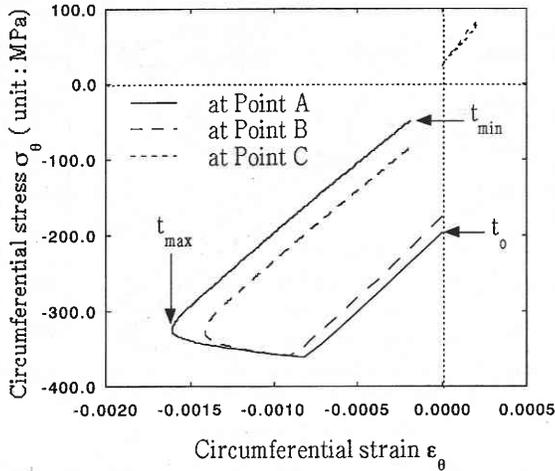


図 6 応力・ひずみ曲線 (case2)

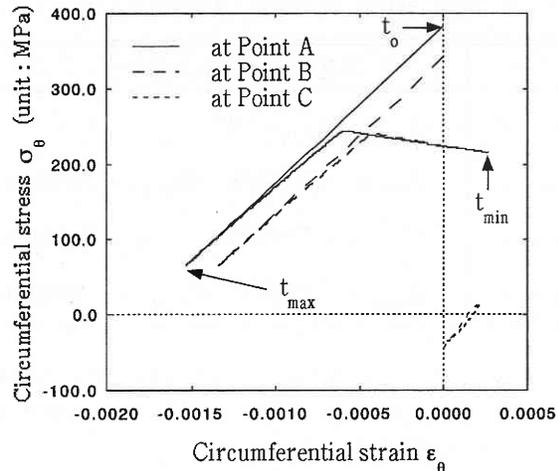


図 8 応力・ひずみ曲線 (case4)

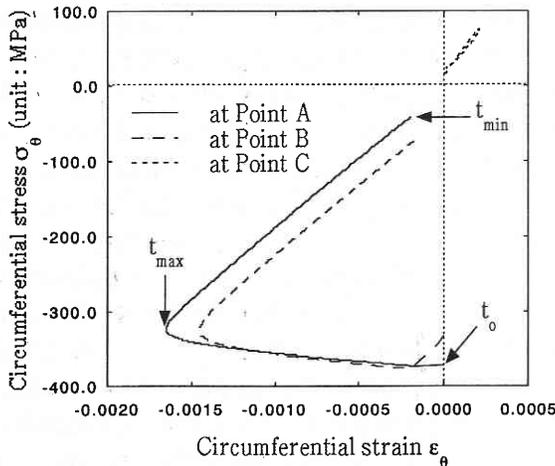


図 7 応力・ひずみ曲線 (case3)

図からわかるように、この場合（残留応力なし）においては塑性化は見られない。

図 6 から 8 までは残留応力を考慮した時の解析結果を示している。ひずみ集中部である A 点に着目すると、case 2 と 3 の場合は圧縮側で降伏を起こしているが、それ以後で引張降伏は起こしていない。これに比べて、case 4 の場合は圧縮降伏は起こしていないが、除荷が起きてから引張側で降伏を起こしているのがわかる。めっき時に発生する割れはこの引張降伏の時に生じる引張ひずみに起因すると考えられるので、case 4 のように分布している残留応力が割れ発生の原因であると推察される。

5. 結 言

本研究では、孔を有する鉄塔用山形鋼の溶融亜鉛めっき

時における割れ発生メカニズムの力学的解明を目的として Bodner 型構成式を用いた有限要素解析プログラムを開発した。実際に使用される山形鋼部材に対して解析を行って、その熱弾塑性挙動や応力・ひずみ挙動を明らかにしており、高強度鋼材の開発に当たり、鋼材性能指標を明確化するため熱応力挙動の計算力学的解明を実施した。さらに、代表的ないくつかの残留応力分布を仮定して、割れ発生に及ぼす残留応力の影響を考察した。本研究で開発した解析法によれば実験では得ることができないめっき割れ発生の挙動特性が把握でき、構造強度の推定や新材料開発にも有用であると判断される。

(1997 年 12 月 2 日受理)

参 考 文 献

- 1) G. H. James et al.: "An Experimental Comparison of Several Current Viscoplastic Constitutive Models at Elevated Temperature", ASME, Journal of Materials and Technology, Vol. 109, pp. 130-139, 1987.
- 2) G. J. Simitses and Y. Song: Thermo-Elasto-viscoplastic Buckling of Plates, ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 61, pp. 169-175, 1994.
- 3) S. R. Bodner and Y. Partom: Constitutive Equations for Elastic-Viscoplastic Strain-Hardening Materials, ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 42, pp. 385-389, 1975.
- 4) Y. Toi, K. Kobashi and T. Iezawa: Finite Element Analysis of Thermal Elasto-Plastic Behaviours of Bridge Girders in Hot-Dip Galvanization, Computers & Structures, Vol. 53, No. 6, pp. 1307-1316, 1994.
- 5) R. Byron Bird et al.: Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., pp. 373, 1960.
- 6) 伝熱工学資料 (第 4 版), 日本機械学会, pp. 35, 1986.