

溶融亜鉛めっき中の構造部材の熱弾塑性解析

Thermal-Elasto-Plastic Analysis of Structural Members in Hot-Dip Galvanization

都 井 裕*・小 橋 啓 司*・家 沢 徹**

Yutaka TOI, Keiji KOBASHI and Tohru IEZAWA

1. 序

$$\{\dot{\epsilon}_{vp}\} = \Lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \tag{1}$$

橋梁部材、送電鉄塔部材などの鋼構造部材は、耐腐食性能を向上させ、防錆メンテナンスの手間を軽減するために、溶接組み立てされた後に、約450°Cの溶融亜鉛に浸漬され、亜鉛めっきを施されることがある。めっき過程において、構造部材には不均一温度分布による熱応力が発生し、ひずみ集中部に割れが生ずることがある。溶融亜鉛中の現象のため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、数値解析による現象解明が期待されている。

と計算される。ここに、 f は塑性ポテンシャルであり、*von Mises*の降伏条件式を用いるものとする。

*Bodner*の粘塑性理論によると相当粘塑性ひずみ速度 $\bar{\dot{\epsilon}}_{vp}$ は、次式により与えられる。

$$\bar{\dot{\epsilon}}_{vp}(=\Lambda) = \frac{3\sqrt{D_0^2 \exp\left[-\left\{\frac{Z^2}{f^2}\right\}\left(\frac{n+1}{n}\right)^{\frac{1}{n}}\right]^n}{f} \tag{2}$$

$$Z = Z_1 + (Z_0 - Z_1) \exp\left(-\frac{mW_p}{Z_0}\right) \tag{3}$$

熱弾塑性問題において、材料定数の温度依存性を考慮しながら、熱履歴に伴う降伏、除荷、再降伏挙動を、通常の弾塑性構成式により精度よく解析することは容易でない¹⁾。本研究では、負荷、除荷、再降伏、材料定数の温度依存性などを、何らの判定条件も伴わず自動的に考慮することが可能な、*Bodner*型の構成式²⁾を装備した有限要素解析プログラムにより、溶融亜鉛めっき時の板桁橋梁部材の熱弾塑性構造挙動を解析して、亜鉛脆化割れ発生の力学的メカニズムを解明する。

ここに、 D_0 、 m 、 n 、 Z_0 、 Z_1 は材料定数、 W_p は履歴に依存した全粘塑性仕事、 dt は微小時間を表す。(2)式を(1)式に代入すれば、粘塑性ひずみ速度 $\{\dot{\epsilon}_{vp}\}$ が求まる。

(1)式からわかるように、*Bodner*の構成式においては、微小応力下でも塑性ひずみが生じており、したがって、降伏応力の概念は含まれない。また、(3)式により定義される応力履歴に依存した内部状態変数により、降伏、除荷、再降伏などが、何らの判定も伴うことなく、自動的に考慮される。なお、降伏応力の温度依存性は、材料定数 n を温度の関数とすることにより考慮する。実際の解析では、計算された応力が(仮想的な)降伏曲面を逸脱しないよう応力レベルの回復計算を行っている。

2. 有限要素解析アルゴリズム

3. 溶融亜鉛めっき時の板桁橋梁部材の熱弾塑性解析

本研究では、材料定数の温度依存性を考慮した熱弾塑性解析において *Bodner* 型の粘塑性構成式を用いる。粘塑性ひずみを熱ひずみとともに初期ひずみ法で扱い、時間積分には中心差分法を用いて計算の安定性を高めている。幾何学的非線形性は *Total Lagrangian Approach* に基づく増分理論により扱い、有限要素としては仮想の面内回転剛性を付与した2次のアイソパラメトリックシェル要素を用いた³⁾。また、ヤング率、線膨張係数、降伏応力の温度依存性を考慮する。

粘塑性ひずみ速度 $\{\dot{\epsilon}_{vp}\}$ は塑性流れ則に従えば

図1に、板桁橋梁部材の溶融亜鉛めっき過程を示す。めっきを受ける板桁部材は、上下に厚いフランジを有しており、パネル部は4本の垂直スティフナにより3つの部分に分けられている。各部には上下2段(あるいは1段)の水平スティフナが設けられている。また、垂直スティフナと上下フランジは溶接により剛に接合されている。解析した6体の板桁構造モデルの諸元を表1に示す。このような板桁部材を、図1に示すように450°Cの溶融亜鉛に浸漬させ、構造全体の温度が均一になるまでの時

*東京大学生産技術研究所 第2部

**巴技研

表 1 板桁橋梁部材の諸元(単位 mm)

No.	NH	HW	TW	BUF	BLF	TUF	TLF	$R\sigma_{max}$
No1(1)	1	1850	9	620	620	32	32	10.3
No1(2)	2	1850	9	620	620	32	32	9.0
No2	2	2300	10	530	530	28	28	5.9
No3	2	2500	10	380	470	22	25	4.6
No4	2	2700	10	380	380	19	19	3.0
No5	2	2900	10	360	360	15	15	2.1

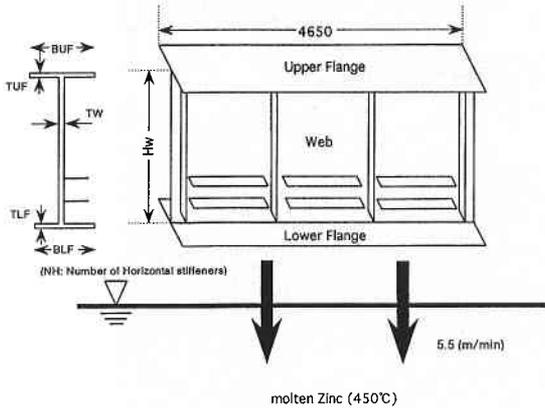


図 1 板桁橋梁部材の溶融亜鉛めっき過程

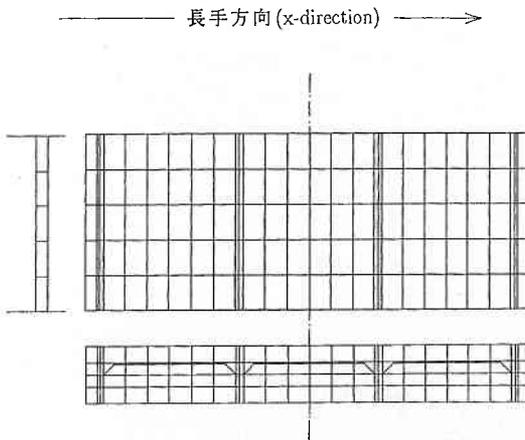


図 2 要素分割図

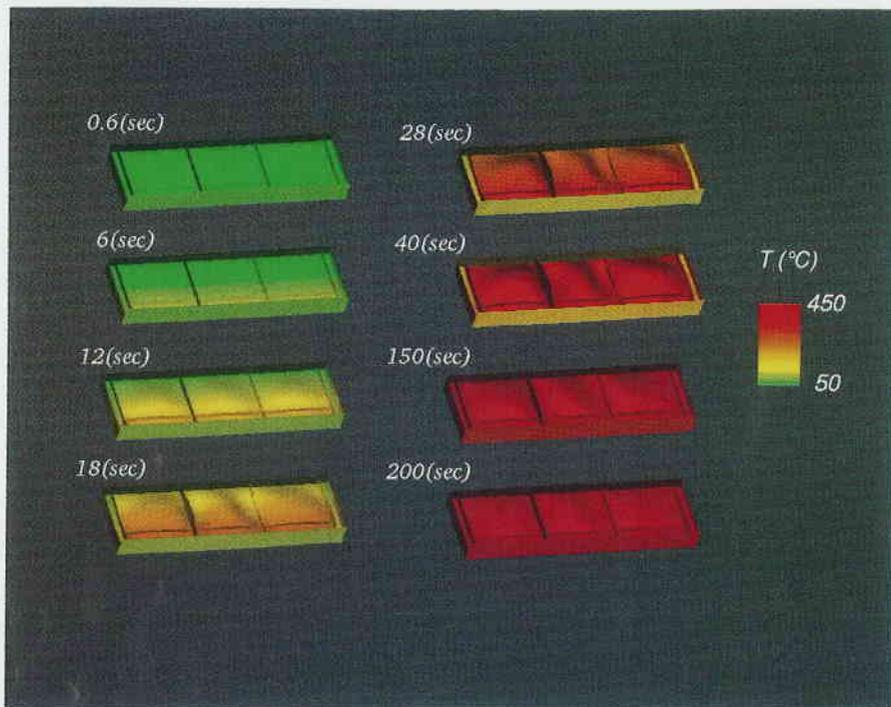
間を解析対象とした。解析領域は長手方向半解析とし、図 2 に示すような要素分割を用いた。ひずみ集中を定量的に議論するためには粗すぎるメッシュであるが、現象の力学的解明には十分と判断される。仮定した材料定数については文献4)を参照されたい。板桁構造内に生ずる温度分布については、鋼板表面の各点が溶融亜鉛に浸漬した瞬間以降、板の両面から450°Cで加熱されると仮定し、1次元熱伝導方程式の解を用いて板厚方向の温度分

布を決定している。実際の計算プログラムにおいては、要素内の各数値積分点ごとに浸漬/非浸漬の判定を行っている。

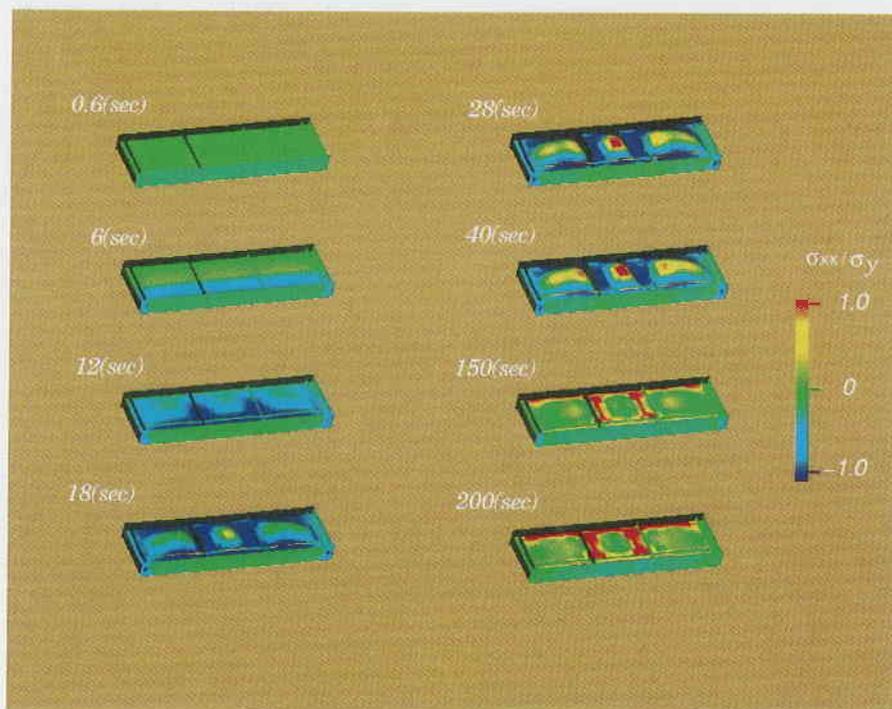
代表例として、No. 1(1) (1段水平スティフナモデル)モデルの解析結果を図3に示す。図3(a)は鋼板の表面近傍の積分点 ($-\frac{h}{2} < z < \frac{h}{2}$ で板厚方向の座標が定義されるとき $z = \frac{2}{5}h$ の点)における温度と、全体変形を示している。これにより、当初パネル部の横方向の熱膨張が、その厚さのために温度上昇の遅いフランジによって拘束されパネルは座屈するが、フランジの熱膨張にともなってパネルの座屈変形が回復することがわかる。図3(b)は鋼板表面近傍の積分点における長手方向(x方向)の応力(各点の温度依存性を考慮した降伏応力で無次元化している)と変形の様子を示したものである。当初支配的であったパネル部の圧縮応力が座屈変形およびその回復過程を経て引張応力に変化していることがわかる。ひずみ集中部である水平スティフナ端点B(鋼板表面近傍点)に着目すると、図4に示すようにパネルの座屈変形時に圧縮降伏し、パネル変形の回復とともに、除荷から引張降伏を起こしている。このときに発生する引張りひずみにより、水平スティフナ端部に割れが発生すると考えられる。

表1のすべてのモデルに対する最終引張りひずみ値と、板桁部材の形状パラメータである弾性座屈強度比 $R\sigma_{max}$ ⁵⁾の関係を、図5に示す。最終引張りひずみは、図中に定義されている。また、弾性座屈強度比とは、弾性解析により計算される最大熱応力とパネルの弾性座屈荷重の比であり、この値と割れ発生との相関が高いと言われている。図5を見ると、 $R\sigma_{max}$ と最終引張りひずみの間には強い相関があることがわかり、 $R\sigma_{max}$ を割れ発生の目安として用いることの妥当性が確認される。

割れ発生限界ひずみ値を知るために、これとは別に板桁橋梁部材の水平スティフナ端部のみをモデル化した試験体による溶融亜鉛中曲げ試験が行われ、割れ発生の限界変形が知られている(直接溶融亜鉛浴槽内でひずみを測定することは困難である)。この現象を有限要素法によりシミュレートすることによって、割れ発生限界変形時のひずみ集中部におけるひずみの値を推定することができる。この結果、0.38%なる限界ひずみ値が得られた。図5から $R\sigma_{max}$ の限界値を評価すれば、約8.1なる値が得られる。実験では、 $R\sigma_{max} > 5$ 程度で割れが発生すると言われており、この計算値はほぼ妥当な値と判断される。

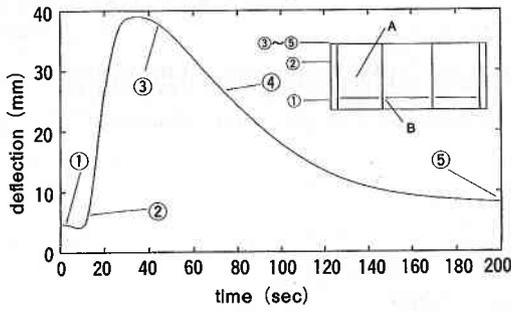


(a) 温度分布および変形図 (変位×10)

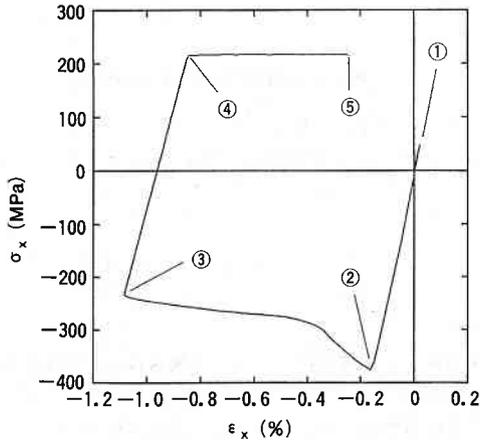


(b) 応力分布および変形図 (変位×10)

図3 板桁橋梁部材の全体変形、温度分布および応力分布



(a) 面外変形の時刻歴 (A点)



(b) 応力・ひずみ曲線 (B点)

図4 板桁橋梁部材の面外変形および応力・ひずみ関係

4. 結 言

本研究では、溶融亜鉛めっき時における板桁橋梁部材の亜鉛脆化割れ挙動の力学的解明を目的として、Bodner型の構成式を用いた有限要素解析プログラムを開発した。数体の板桁橋梁部材の解析により、溶融亜鉛めっき時における板桁橋梁部材の熱弾塑性座屈変形挙動およびホットスポットの応力・ひずみ挙動を明らかにした。

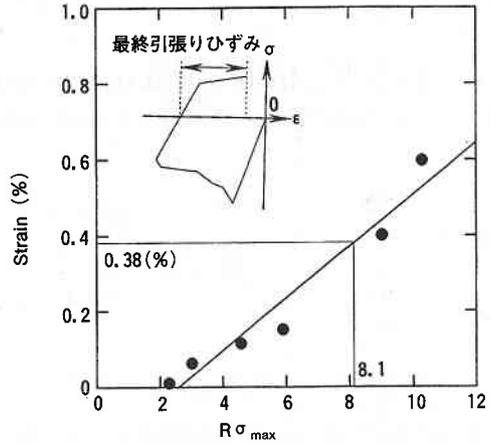


図5 弾性座屈強度比と最終引張りひずみの相関

さらに、割れ発生に関する形状寸法パラメータ $R\sigma_{max}$ (弾性座屈強度比) の妥当性を確認し、割れ発生限界値を定量的に評価し、経験値にほぼ合致する値を得た。また、本解析により得られた溶融亜鉛めっきによる残留応力・ひずみ分布は橋梁部材の構造強度算定上も有用である。
(1993年 6月11日受理)

参 考 文 献

- 1) S. K. Ray and S. Utku: A numerical model for the thermo-elasto-plastic behavior of a material, *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 28, (1989), 1103-1114
- 2) J. Aboudi: *Mechanics of Composite Materials (A Unified Micromechanical Approach)*, Elsevier, (1991)
- 3) D. R. J. Owen and E. Hinton: *Finite Element Software for Plates and Shells*, Pineridge Press LTD., Swansea, U. K., (1984)
- 4) 都井・小橋：溶融亜鉛めっきを受ける構造部材の熱弾塑性解析，第35回構造強度に関する講演会論文集，(1993)
- 5) 金沢・山下・家沢・征矢：溶融亜鉛めっき橋梁の研究(Ⅲ)溶融亜鉛めっき中での応力挙動の研究(その2)，巴組鐵工所技報，No. 2，(1989)