

溶融亜鉛浸漬中に発生する鋼平板の二次元温度分布と熱応力算定

岩手大学工学部 学生会員 ○土屋和弘
 日本電炉株式会社 正 会 員 今野貴史
 岩手大学工学部 正 会 員 岩崎正二 出戸秀明 宮本裕

1. はじめに

溶融亜鉛めっきは鋼部材を約 440~450℃の溶融亜鉛中へ浸漬させて鉄-亜鉛の合金層を形成させ、鉄を錆から守る処理のことである。しかし部材の急激な温度変化によって熱変形やめっき割れが生じる場合がある。本研究の目的は溶融亜鉛浸漬中の鋼平板の二次元温度分布を最適化手法を用いて再現し、鋼平板にどのような熱応力が生ずるかを明らかにすることである。

2. 溶融亜鉛浸漬試験

熱応力を求めるためには、鋼材が溶融亜鉛に浸漬する時の温度分布の状態を把握する必要がある。そのため図-1 に示す単純な鋼平板を用いて異なる板厚における溶融亜鉛浸漬中の温度履歴を測定した。材質はSS400である。また、試験に使用した鋼平板の材厚Bは9mm、22mm 浸漬速度Vは0.008(m/sec)、0.020(m/sec)、0.042 (m/sec)、0.062(m/sec)、0.083(m/sec)の5種類で、図-1 に示すように1-①~5-⑤の25ヶ所に熱電対を設置し、データロガーにより計測した。

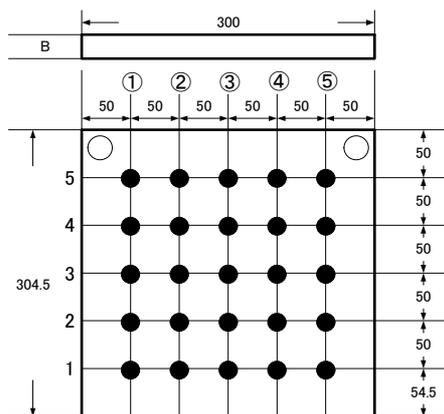


図-1 鋼平板試験体と熱電対設置位置(単位:mm)

3. 溶融亜鉛浸漬試験結果と考察

図-2 は板厚 9mm、図-3 は板厚 22mm の試験体において、浸漬速度 0.008(m/sec)、測定位置 3-①~3-⑤、の温度分布履歴であり、縦軸は温度(℃)、横軸は測定位置を表す。測定時間 180 秒の内、グラフを見やすくするために測定時間を数点に絞っている。

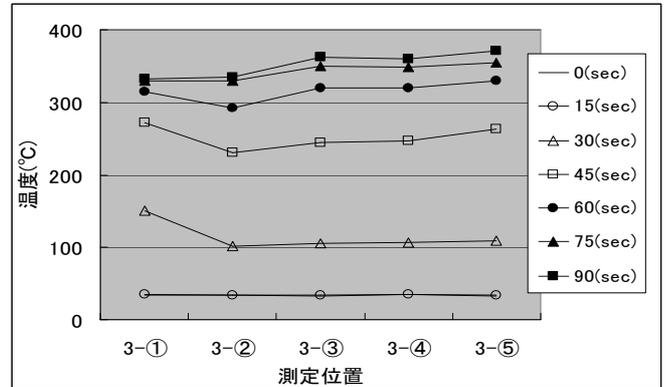


図-2 板厚 9mm・水平方向の温度分布履歴
(浸漬速度 0.008(m/sec))

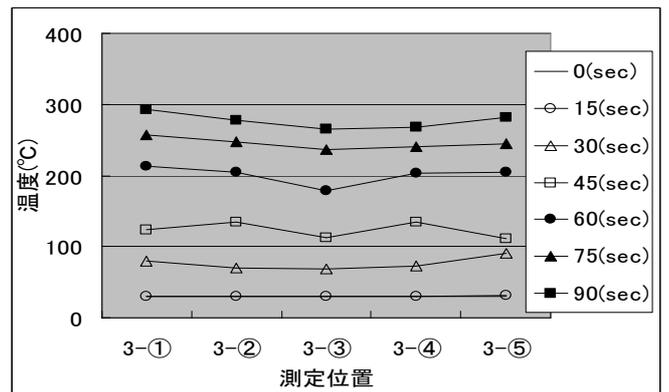


図-3 板厚 22mm・水平方向の温度分布履歴
(浸漬速度 0.008(m/sec))

図-2、図-3 より、3-①~3-⑤の亜鉛浴面と水平方向の温度分布は板厚の違いによって温度上昇の仕方が異なることが分かる。

4. 最適化手法による熱拡散率と熱伝達係数の関係

本研究での鋼平板モデルの座標系を図-4 に示す。一次元熱伝導方程式は式(1)で表わされる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots(1)$$

ここで、T は求める温度、t は時間、 κ は熱拡散率、z が板厚方向の座標である。

境界条件は、板厚を B として $z = \pm B/2$ のとき式(2)のようになる。

$$\frac{\partial T}{\partial z} = H(T_0 - T) \quad \dots(2) \quad \text{ただし、} H = \frac{\alpha}{\kappa} \quad \dots(3)$$

H は鋼板外面と熔融亜鉛との境界における相対熱伝達率、 T_0 は熔融亜鉛温度、 α は熱伝達係数である。

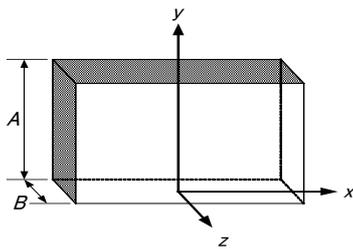


図-4 鋼平板モデルの座標系

はじめに一般的な鋼材の熱拡散率 κ ($0.042 \text{ m}^2/\text{s}$) と鋼-亜鉛の熱伝達係数 α ($0.75 \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{C}$) を用いて、熱伝導方程式を解析的に解いて得られた結果と実測値の比較検討を行ったが、全く一致せず温度分布を再現することができなかった。そこで、本研究では熱拡散率 κ と熱伝達係数 α を試験結果から逆算して求める最適化手法を用いて温度分布の再現を行う。この最適化手法は式(4)の目的関数 OBJ を用いて熱拡散率 κ と熱伝達係数 α を各試験の実測値と最も近い計算値となるように、最小二乗法で求める手法である。

$$OBJ = \sqrt{\sum (T - T')^2} \quad \dots(4)$$

ここで、OBJ は目的関数、T は実測値、 T' は熱伝導方程式を解いた計算値である。 κ 、 α の最適値は板厚 9mm の場合、浸漬速度 $0.008(\text{m}/\text{sec})$ で $\kappa = 0.2(\text{m}^2/\text{sec})$ 、 $\alpha = 0.5(\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{C})$ となり、浸漬速度 $0.083(\text{m}/\text{sec})$ で $\kappa = 0.2(\text{m}^2/\text{sec})$ 、 $\alpha = 1.0(\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{C})$ となった。

5. 鋼平板に生じる熱応力分布

本研究のように、板厚方向に一定温度で、y 方向のみ温度分布 \bar{T} を持つ鋼平板の場合、x 方向の熱応力は、梁の一次元熱応力式(5)により与えられる。

$$\sigma_x = -\beta E \bar{T}(t') + \frac{1}{S} \int_0^A \beta E \bar{T}(t') B(y) dy + \frac{y}{I_z} \int_0^A \beta E \bar{T}(t') B(y) y dy \quad \dots(5)$$

ここで、 $t' = t - y/V$ 、 β は線膨張係数、E は縦弾性係数、 $B(y)$ は y 方向の板厚変化、S は断面積、 I_z は z 軸回り断面 2 次モーメント、A は鋼平板下端から上端までの距離である。この式を用いて浸漬速度の違いによる熱応力

分布を比較検討してみた。図-5、図-6 は、板厚 9mm の試験体における浸漬速度 $0.008(\text{m}/\text{sec})$ と $0.083(\text{m}/\text{sec})$ 、測定位置③-1～③-5 の熱応力計算結果を示したものである。

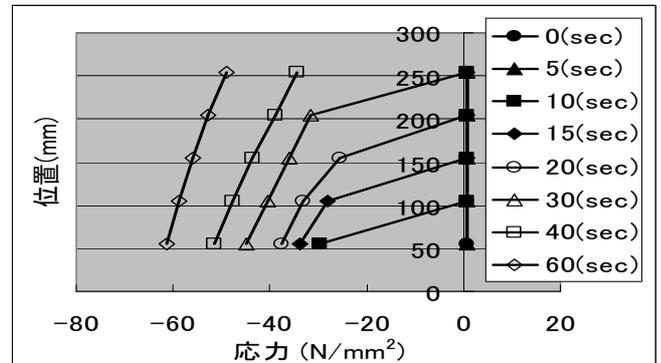


図-5 板厚 9mm・浸漬速度 $0.008(\text{m}/\text{sec})$ の熱応力分布(平均温度使用)

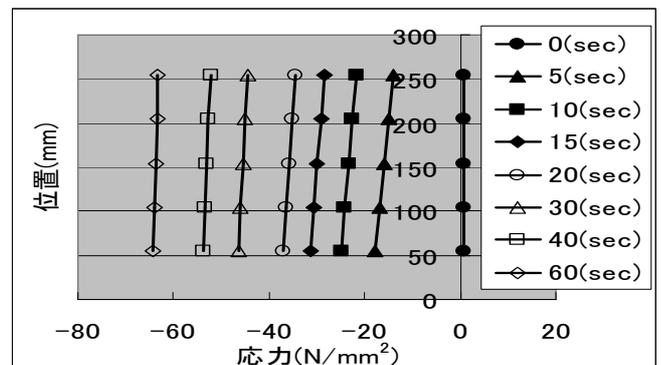


図-6 板厚 9mm・浸漬速度 $0.083(\text{m}/\text{sec})$ の熱応力分布(平均温度使用)

図-5、図-6 より浸漬速度の違いによって最大圧縮応力に差は見られないが、浸漬速度が $0.008(\text{m}/\text{sec})$ の場合には浸透 30 秒後で鋼平板の下部と上部の間の最大応力差が約 $45(\text{N}/\text{mm}^2)$ となり、熔融亜鉛に浸漬している部分としていない部分の温度差の影響を強く受けていることが分かった。

6. あとがき

今回の研究では一次元熱伝導方程式解を実測値の温度履歴曲線に一致させる最適化手法を用いて熱拡散率 κ と熱伝達係数 α を同時に求めた。求められた温度分布を用いて、鋼平板の熱応力分布を明らかにすることができた。今後は、鋼平板だけでなく I 桁や溶接構造物等に応用し、熱変形やめっき割れのメカニズムを解明していきたい。