最適化手法を用いた溶融亜鉛浸漬中の鋼平板の温度分布推計

Temperature Distribution Estimation of Steel Plates by Dipping into Molten Zinc by using the Optimization Technique

○今野 貴史* 岩崎 正二** 出戸 秀明*** 宮本 裕** 二上 輝彦**** Takafumi KONNO, Shoji IWASAKI, Hideaki DETO, Yutaka MIYAMOTO, Teruhiko Nikami

| * | 日本電 | 彭卢株式会社 | と・東北ガル | バセンター | | (〒025-0301 | 岩手県花巻市北湯口 18-26-17) |
|------|-----|--------|--------|--------|-----|------------|---------------------|
| ** | 工博 | 岩手大学 | 工学部建設 | 環境工学科 | 教授 | (〒020-8551 | 岩手県盛岡市上田 4-3-5) |
| *** | 工博 | 岩手大学 | 工学部建設 | 環境工学科 | 助教授 | (〒020-8551 | 岩手県盛岡市上田 4-3-5) |
| **** | 岩手ナ | マ学大学院コ | 二学研究科 | 建設環境工作 | 学専攻 | (〒020-8551 | 岩手県盛岡市上田 4-3-5) |

When hot dip galvanizing treated steel structures, a sudden temperature change is given, and unsteady thermal stress occurs in a member between a part doing a dip earlier and parts doing a dip later, and there is the case that thermal strains and crack accidents. In this paper, steel plates were soaked in melted zinc to reproduce the state of the temperature distribution in the material that had a big influence on thermal strains etc., and the temperature distribution is measured. Moreover, the temperature distribution is estimated by using the optimization technique analyzing it for the relation between the heat diffusivity and the heat transfer coefficient and steels thickness.

Keywords : Hot dip galvanizing, Heat diffusivity, Heat transfer coefficient, Temperature distribution キーワード:溶融亜鉛めっき,熱拡散率,熱伝達係数,温度分布

1. はじめに

鋼構造物を錆から守り、メンテナンスフリーも期 待できる表面処理が溶融亜鉛めっきである。現在、 省資源・省エネルギー・自然環境保護等の観点から 有効な防錆処理として市場が拡大している。社会基 盤を支える電力・通信分野の鉄塔をはじめ、立体駐 車場や設備架台等の建築分野、道路標識柱や橋梁高 欄材等の土木分野で幅広く採用されている¹⁾。

溶融亜鉛めっきは高温の溶融亜鉛中へ鋼部材を浸 漬させ、鉄ー亜鉛の合金層を形成することで鉄を錆 から守る表面処理である。この時、鋼部材が約 440 ~450℃の溶融亜鉛中へ浸漬するため急激な温度変 化が与えられ、先に溶融亜鉛に浸漬する部分と後か ら浸漬する部分との間に温度差が生じ、鋼部材の内 部に非定常熱応力が発生する。橋梁主桁のような大 型の鋼構造物では、鋼部材に生じる温度分布の落差 が大きくなる傾向にあるため、それに伴って発生す る熱応力も大きくなり、めっき後に熱歪み(残留変 形)が残ることもある。さらに、溶接継手部が多く 存在する場合、応力集中により大きな引張応力が発 生し、溶接の残留応力の影響とも合わせて溶接部の めっき割れ現象を引き起こす一つの原因となる。

溶融亜鉛めっきによる急激な温度変化が生じる場 合の既往の研究も数編あり、阿部等²⁾³⁾は非分割箱桁 や実物に近い I 桁モデルを用いて溶融亜鉛めっき施 工試験や理論的解析を行い、発生する熱応力の変化 や溶接部のめっき割れ防止等に関する研究を行って いる。その中でめっき割れの要因は薄板構造の場合、 溶融亜鉛浸漬時には局部的に大きな変形を生じるが、 それが直接的な原因ではなく、その後の全体の温度 均一化による変形の戻りが重要な因子であり、この 現象は溶融金属脆性に強い材料でも発生し得ると述 べている。また、厚板構造の場合には、溶接時の熱 変形が拘束されることと鋼材の溶融亜鉛脆性が相ま って、めっき割れの原因になると考えており、その メカニズムは薄板構造の場合と異なるが、ある程度 は鋼材の改善で防ぐことが可能であると述べている。 菊池等⁴⁾は鋼管の溶融亜鉛めっき時に発生する熱 変形や熱応力の変化について有限要素法を用いて計 算し、試験結果とよく一致することを示しており、 鋼管を傾けて浸漬する場合の浸漬速度が熱変形や熱 応力に大きな影響を与えることを明らかにしている。

日笠等⁵⁾ は桁材の溶融亜鉛めっき時における変形 の主因であるフランジおよびウェブの平均熱応力の 計算手法を述べると共に、平均熱応力はフランジ断 面積、フランジ厚、ウェブ厚の影響を大きく受ける と述べている。

しかし、どのような条件の下で熱歪みやめっき割 れの現象が起きるのかは、製品の寸法、形状、構造、 溶接方法、残留応力、浸漬速度、液体金属脆化等の 種々考えられる要因が、単独あるいは複合的に関連 して発生すると考えられ、その発生を事前に予測す ることは極めて困難である。したがって、設計ディ テール、鋼材、浸漬方法などを適切に選べば実用的 にめっき割れを防止できるものと思われる。今回は 複数の要因の中から製品の板厚と浸漬速度に着目し、 熱歪みやめっき割れの原因とされる熱応力を解明す るための温度分布の推計を目的としている。

このため、鋼平板に急激な温度変化を与える溶融 亜鉛浸漬試験を行い、鋼平板が溶融亜鉛に浸漬し、 その中で保持されている状態の温度履歴を測定した。 鋼平板は大型桁材に使用されるビルドH形鋼や広巾 のH形鋼のウェブ面を仮定して、板厚9、12、16、 19、22 mmの5種類を使用し、鋼平板の板厚中央部お よび鋼平板全体の温度を測定した。

既往の研究では一次元熱伝導方程式に用いられる 熱拡散率 κ と熱伝達係数 α は、各研究で異なる値を 使用している。しかし、既往の研究の熱拡散率 κ と 熱伝達係数 α を用いると、試験で得られた温度分布 を一次元熱伝導方程式の解析解で再現できない。そ こで、本研究では溶融亜鉛浸漬試験の温度測定結果 を基に最適化手法を用いて板厚毎に変化する熱拡散 率 κ と熱伝達係数 α を計算し、板厚との関係を明ら かにすることを目的とする。また、鋼平板が厚くな ることにより一次元熱伝導方程式で最適解が得られ る限界も考察している。この最適化手法により得ら れた熱拡散率 κ および熱伝達係数 α を用いて鋼平板 の温度分布を推計し、試験結果と比較検討している。

さらに、得られた温度分布を用いて溶融亜鉛浸漬 中に発生する鋼平板の熱応力分布を求め、浸漬速度 と板厚の違いによる比較を行い、その影響を明らか にした。

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 の板厚Bおよび寸法、浸漬速度Vを表-1に示す。



表-1 鋼平板の板厚と寸法

| 板厚B (mm) | 寸法 (mm) | 浸漬速度 V(m/sec) | | | | | |
|----------|--------------------|---------------|--|--|--|--|--|
| 9.0 | | | | | | | |
| 12.0 | | | | | | | |
| 16.0 | 304.5×300 | (1) 0.008 | | | | | |
| 19.0 | | (2) 0.042 | | | | | |
| 22.0 | | | | | | | |

表-1 に示す浸漬速度 V は、0.008 (m/sec) が複雑 な構造で容易に亜鉛浴に浸漬しない場合、0.042 (m/sec) が一般的な製品の浸漬に用いられる速度で ある。

表-1 に示す浸漬速度 V で連続的に溶融亜鉛浴に試 験体を浸漬させ、鋼平板の温度を K 型被覆熱電対で 温度履歴を 180 秒間測定した。熱電対は図-2 に示す ように、板厚中央部 (B/2)の①~⑤に設置した。



また、板厚9 mmと 22 mmの試験体は、浸漬速度 V の 違いによる温度分布の比較をするため、速度を3種 類 (0.020 (m/sec) と 0.062 (m/sec)、0.083 (m/sec)) 追加した。このうち、0.083 (m/sec) は構造がシン プルな場合や熱歪み等の発生を抑えたい場合の浸漬 速度である。その他 2 つの速度は 0.008~0.042~ 0.083 (m/sec) の中間速度を用いている。温度履歴 は図-3 に示すように 1-①~5-⑤の 25 ヶ所に熱電対 を設置し、試験体全体の温度を測定した。



3. 溶融亜鉛浸漬試験結果と考察

図-4 は板厚 9.0mm・浸漬速度 0.008 (m/sec)の試験 体における測定位置 1-3~5-3の温度履歴曲線であ り、縦軸は温度(℃)、横軸は時間(sec)を表している。 測定時間は 180 秒だが、グラフを見やすくするため に測定時間 60 秒までの結果を図中に示す。



図-4 板厚9mm・垂直方向測点の温度履歴曲線 (浸漬速度 0.008(m/sec))

図-4より、1-③~5-③の亜鉛浴面と垂直方向の温 度分布は、亜鉛浴に浸漬する測定位置の順番にした がって温度上昇していることが分かる。この現象は、 板厚および浸漬速度に関係なく、すべての場合にお いて同様な傾向を示す。 図-5 は板厚 9 mm、図-6 は板厚 22 mm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-5 板厚9mm・水平方向の温度分布履歴 (浸漬速度 0.008(m/sec))



図-6 板厚22mm・水平方向の温度分布履歴 (浸漬速度 0.008(m/sec))

図-5と図-6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り温度上昇の仕方が 異なることが分かる。板厚9mmの場合、試験開始後 30~45秒の間にかけて温度が全体的に約150℃上昇 するが、板厚22mmの場合には同じ時間で約50℃ほ どしか温度が上昇しない。これは板厚が大きくなる ことで内部への熱の伝わりが遅くなるためである。

また、図-6 で 3-③の温度が 3-①や 3-⑤と比較す ると低い。この理由として 3-①や 3-⑤は鋼平板の正 面方向からの入熱だけでなく、端面からの入熱影響 を受けているためと思われる。したがって、板厚が 大きくなり、鋼平板の中央部に近くなるほど温度が 周囲よりも低くなると考えられる。日笠等⁶⁰は鋼平 板の端面近傍では端面からの熱伝達の影響を強く受 けると述べており、これを裏付ける結果が得られた。

図-7 は板厚9mm・浸漬速度0.008(m/sec)の試験体 の試験開始から35秒後の温度分布を示している。縦 軸が垂直測点、横軸は水平測点である。



図-7 板厚 9 mm・試験開始 35 秒後の温度分布 (浸漬速度 0.008(m/sec))

著者等⁷⁾はこれまで鋼平板の中心線に沿って垂直 方向の温度分布しか測定しなかったが、今回、板厚 9mmおよび22mmの試験体において温度測定点を全体 に広げて溶融亜鉛浸漬試験を行うことによって、図 -7のように鋼平板全体の温度分布の傾向を推定する ことが可能になり、側面からの入熱も温度上昇に影 響することを確認することができた。

4. 一次元熱伝導方程式による温度解析

既往の研究として、日笠等⁸⁾は溶融亜鉛めっき時 の鋼桁の温度を一次元非定常熱伝導問題と二次元非 定常熱伝導問題として扱っている。前者は一次元非 定常微分方程式の級数解により鋼桁任意点の平均温 度を求め、それを節点温度とし、平面弾性問題の有 限要素法により熱応力度を計算している。後者は温 度と応力度の両者を有限要素法により求めている。 いずれの方法でも、鋼桁を構成するフランジ、ウェ ブの板厚方向の温度は一定と仮定している。

また、阿部等²⁾³および菊池等⁴⁾の論文では、モ デルが溶融亜鉛に浸漬する際、溶融亜鉛面に到達し ていない部分は溶融亜鉛面に到達するまで温度上昇 せずに、到達と同時に急速に上昇するとして、到達 していない部分は部材初期温度と仮定し、一次元非 定常熱伝導問題として温度分布を求めている。前項 でも述べたが、日笠等6は鋼板の端面近傍では端面 からの熱伝達の影響を強く受けると述べているが、 端部から離れた点においては二次元的(面内二次元) 影響は少ないと述べている。今回の実験では比較的 小さなモデルを用いているため、日笠等 6 が述べる ように端面からの熱伝達の影響を受けている。しか し、本研究は大型桁材のウェブ面の熱伝達を想定し ているため、鋼平板中央部付近の熱伝達には端部の 熱影響は少ないと考え、溶融亜鉛面に到達後のモデ ルの温度変化については阿部等23 および菊池等4) の論文で用いている一次元熱伝導方程式から求めら れる解を採用している。

本研究での鋼平板モデルの座標系を図-8 に示す。 この解析モデルでは鋼平板上の各点が亜鉛の液面に 到着し、鋼平板両面からのみ加熱される条件で、鋼 平板の温度分布を求め、板厚方向に対する平均温度 の分布から鋼平板の非定常熱応力を準静的二次問題 として解析している。



板の両面から加熱される場合の非定常熱伝導基礎 方程式は式(1)で表される。

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

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。また、

$$\kappa = \frac{\lambda}{c\rho} \quad \cdots \quad (2)$$

であり、比熱 c、密度 ρ および熱伝導率 λ は材料に よって定まる定数である。

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

$$\frac{\partial T}{\partial z} = H(T_0 - T) \quad \cdots \quad (3)$$

ただし、

$$H = \frac{\alpha}{\kappa} \quad \cdots \quad (4)$$

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

t=0で $T=T_1$ の初期条件で式(1)を解き、板の両 側面から熱伝達がある場合の板の温度は式(5)で与 えられる。

$$T(z,t) = (T_0 - T_1) \left\{ 1 - 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_n e^{-4\kappa \delta_n^2 t/B^2} \cos(2\delta_n z/B)}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \right\} + T_1$$
... (5)

ここで、 T_1 は部材初期温度、 δ n は式(6)より求めた δ_1 、 δ_2 、・・・である。

$$HB = 2\delta_n \tan \delta_n \quad \cdots \quad (6)$$

式(5)より板厚方向zに対する時間tにおける温度を求めることができ、板厚方向の平均温度は

$$\overline{T}(t) = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} T(z,t) dz \quad \cdots \quad (7)$$

となる。

温度分布は、既往の研究⁹では I 桁の場合、溶融 亜鉛めっき時には I 桁の各部位が溶融亜鉛液面に到 達するまでは温度が上昇せず、液面到達後に板の両 面からのみ加熱されると仮定して桁中心の温度分布 を求めているが、著者等も鋼平板の下端部を基準と し、浸漬速度 V で溶融亜鉛めっきする場合のある時 刻 t における方向および z 方向の温度分布を式(8) と式(9)のように表した。

$$t' < 0 のとき T(w, t') = T_1 \cdots (8)$$

t´≧0のとき

$$T(w,t') = (T_0 - T_1) \left\{ 1 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_n e^{-4\kappa \delta_n^2 t'/B^2} \cos(2\delta_n w/B)}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \right\} + T_1$$
... (9)

ただし、

 $t' = t - \frac{y}{V} \quad \cdots \quad (10)$

なお、上式で時間 t は鋼平板の下端部が溶融亜鉛 液面に到達した瞬間を 0 として、今回のような鋼平 板のみの場合には w = z と仮定し、板厚方向座標 wと時間 t^{*}で温度分布 T (w, t^{*}) を表す。

式(8) および(9) より、式(11)のように板厚 方向に積分することで、板厚方向には平均温度でw 方向のみに温度分布をもつ一次元温度分布を得るこ とができる。

$$\overline{T}(t') = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} T(z,t') dz \quad \cdots \quad (11)$$

5. 最適化手法による熱拡散率と熱伝達係数の関係

前項に示した熱伝導方程式内で用いられる熱拡散 率 κ は基本的に材料の物性値から求められ、材料の 温度が時間とともに変動する場合の解析に現れる物 性値であり、物質内部を温度変化が伝わっていく速 さを表す定数と考えられる。これに対して熱伝達係 数 α は単位温度差(鋼板-溶融亜鉛流体) あたりの熱 伝達による熱流速を規定する係数で、流れ場に依存 するものである。

はじめに著者等は一般的な鋼材の熱拡散率 κ (0.042 m²/s)と既往の研究⁸⁰で得られている鋼-亜鉛 の熱伝達係数(0.75kcal/m²・sec・ \mathbb{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、図-9に示すように全く一致 せず、温度分布を再現することはできない。なお、 図-9の実測値は板厚 9 mm・浸漬速度 0.042(m/sec) の試験体における中央点の温度履歴曲線を表したも のであり、縦軸は温度(\mathbb{C})、横軸が時間(sec)である。



図-9 計算結果と試験結果の比較

図-9より、一般的な熱拡散率κおよび熱伝達係数 αの値を用いて得られた計算結果では、本研究で測 定された温度分布を再現することは困難である。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。

はじめに一般的な鋼材の熱拡散率κ(0.042 m²/s) を使い、溶融亜鉛の流れによって変化する熱伝達係 数αを数種類変化させて計算値を求め、試験結果と 比較した。

図-10 は板厚 9 mm・浸漬速度 0.042 (m/sec)の実測 値に対して、熱拡散率 κ を固定し、熱伝達係数 α を 変化させて熱伝導方程式を解いた結果の温度履歴曲 線を示している。熱伝達係数 α を 2 倍 (α =1.5)およ び100倍(α=75)で計算させても、α=0.75(kcal/m²·sec・℃)の場合とほとんど計算値が変わらず、実測値 と一致しなかった。また、熱伝達係数αの変化だけ では鋼平板が溶融亜鉛に浸漬した瞬間から温度が上 昇していく状態を再現することができないことが分 かる。なお、他の試験結果も同様の傾向が見られる。



温度履歴曲線(κ=0.042(m²/sec))

そこで著者等は、熱伝達係数αだけでなく本来は 材料パラメータである熱拡散率κが材料の急激な温 度変化によって変化するのではないかと考え、浸漬 試験で得られた鋼平板の温度履歴曲線に計算値が一 致するように最適化手法を用いて、熱伝導方程式内 の熱拡散率κと境界条件式内の熱伝達係数αの値を 求めている。

この最適化手法は、式(12)の目的関数 0BJ 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。

$$OBJ = \sqrt{\sum (T - T')^2} \quad \cdots \quad (12)$$

なお、OBJ は目的関数、T は実測値、T イは熱伝導方 程式を解いた計算値である。



図-11 は板厚 9 mm・浸漬速度 0.042 (m/sec)の試験 体の鋼平板中央部の熱拡散率 κ と熱伝達係数 α を同 時に変化させて求めた目的関数 OBJ のグラフであり、 目的関数 OBJ が最小値になる κ =0.8 (m²/sec)、 α =0.6 (kcal/m²·sec· $^{\circ}$)が得られる。

この最適化手法により得られた熱拡散率 κ と熱伝 達係数 α のうち、図-12 は浸漬速度 0.008 (m/sec) と 0.042 (m/sec)の時の板厚 B と熱拡散率 κ を、図-13 は浸漬速度 0.008 (m/sec) と 0.042 (m/sec)の時の板 厚 B と熱伝達係数 α の関係を示したものである。



図-13 板厚Bと熱伝達係数 a の関係

図-13 より、板厚が大きくなると浸漬速度に関係 なく熱伝達係数 α は減少することが分かる。これは、 熱伝達係数 α が物質間の熱の伝わり易さを表す値で あり、板厚が小さいほど熱伝達が良く、逆に板厚が 大きいと熱伝達が悪くなることを示している。

また、図-12 より基本的に板厚が大きくなると共 に熱拡散率 κ は大きくなる傾向があるが、板厚22 mm の場合には熱拡散率 κ の値が急激に減少することが 分かる。この理由を実測値と計算値を比較した図-14 を用いて説明する。図中の丸囲み部において、計算 値は温度の測定位置に溶融亜鉛が到達してから温度 上昇を開始するが、実測値はその前から温度が上昇 している。これは測定位置に溶融亜鉛が到達する前 に底部をはじめ既に溶融亜鉛に浸漬した部分から熱 伝導の影響を受けているためと思われる。



温度履歴曲線

したがって、目的関数 OBJ を求めた時には計算上、 熱拡散率 κ と熱伝達係数 α の最適値が得られている が、実際は浸漬直後の温度分布の状態を再現できて いない。このことから、板厚 22 mm以上の厚みを持つ 鋼平板の温度分布を一次元熱伝導方程式で表すこと は可能だが、鋼平板底部からの熱伝導解析を含めれ ばより実測値に近い温度分布が再現可能と思われる。

板厚 19 mm以下において、最適化手法により求めら れた熱拡散率κと熱伝達係数αを用いて熱伝導方程 式を解いた値と実測値を比較した温度履歴曲線の一 例を図-15 に示す。実際は浮力等により浸漬速度が 若干変化するため亜鉛浴への浸漬開始時間もずれる が、そのずれを解消する補正を行っている。



温度履歴曲線

図-15 から、溶融亜鉛浴に浸漬した後の温度上昇の状態を一次元熱伝導方程式で非常に精度良く再現している。また、板厚19 mm以下の場合であれば浸漬

速度に関係なく良好な温度履歴を再現できている。

これにより、図-15 と図-9 を比較してみると鋼平 板が溶融亜鉛に浸漬した直後の急激な温度上昇の傾 きを再現するためには、熱伝達係数 α より熱拡散率 κ の影響力が強いことを確認できた。また、熱伝達 係数 α を考慮して熱拡散率 κ を導出する新たな最適 化手法を提案することができた。

6. 鋼平板の温度分布の推計

図-16と図-17は板厚9m・浸漬速度0.008(m/sec) および 0.083 (m/sec)の場合において解析による平 均温度分布と実測値を時刻毎に比較したものである。 この図は、鋼平板の下面から高さ方向の温度分布に ついて示したもので、縦軸は測定位置、横軸が温度 になる。本来、温度は鋼平板の板厚方向に変化して いるが、板厚方向に積分することにより平均温度を 求めたため、高さ方向にのみ温度分布をもつグラフ が得られている。



図-17 板厚 9 mm・浸漬速度 0.083 (m/sec) の 平均温度分布(実線:計算値、破線:実測値)

図-16 と図-17 より、浸漬直後は計算値と実測値の 間に誤差があるものの、全体的に時間毎の鋼平板の 温度分布を示すことができた。また、浸漬速度の違いによって温度上昇の形が全く異なっており、特に 浸漬速度0.008(m/sec)の場合、溶融亜鉛浸漬後に測 定位置の最下部と最上部で約150℃くらいの温度差 が発生している。これに対し、浸漬速度0.083(m/sec) の場合、鋼平板全体が溶融亜鉛に瞬時に浸漬するた め、最下部と最上部の温度差は約50℃以内に納まる。 この温度差が熱応力に影響を及ぼし、熱歪みやめっ き割れ等を発生させる一つの要因と考えられる。

したがって、温度差が小さいほど熱歪みやめっき 割れ等が発生しにくく、今回の実験を基にした実製 品の熱歪みやめっき割れ等を防ぐための提案として、 適切な浸漬速度は0.083 (m/sec)とし、亜鉛浴への 浸漬角度は部材全体を同時に亜鉛浴へ浸漬させて部 材内の温度を均一化させるため、角度をつけない方 が良いと思われる。溶融亜鉛めっき後に水冷を行う が、その際にも亜鉛浴浸漬時と同様な条件で行うこ とで冷却による温度差の発生も抑えられると考えら れる。ただし、実製品は構造やサイズが複雑であり、 各メーカーの設備も異なるため、今回の提案が全て の実製品に適用できるとは限らないが、温度差を小 さくするためには、実製品全体を出来るだけ速い速 度で亜鉛浴に浸漬させることがポイントになる。

図-18 は板厚 22 mm・浸漬速度 0.042 (m/sec) の場合の平均温度分布と実測値を比較したものである。



図-18 板厚 22 mm・浸漬速度 0.042 (m/sec)の 平均温度分布(実線:計算値、破線:実測値)

図-18 より、最下部の温度が上昇し始めるのが計 算値は20秒であるのに対し、実測値は5秒である。 また、鋼平板全体が浸漬した60秒や90秒後も中央 より下の部分は計算値よりも実測値の方が温度の高 い状態を示している。このことから、板厚22mにつ いては鋼平板の底部および浸漬した部分から浸漬し ていない部分への熱影響があると考えられ、一次元 熱伝導方程式で鋼平板全体の温度分布を表現しにく い原因の一つと思われる。そのため、板厚が大きい 場合における底部からの熱影響を含めた新たな解析 方法を検討する必要がある。

7. 鋼平板に生じる熱応力分布

本研究のような鋼平板の場合、板厚方向には一定 温度で、y方向のみに温度分布を持つ x方向の熱応 力は、梁の一次元熱応力式(13)により与えられる。

$$\sigma_{x} = -\beta E\overline{T}(t') + \frac{1}{S} \int_{0}^{A} \beta E\overline{T}(t')B(y)dy$$
$$+ \frac{y}{I_{z}} \int_{0}^{A} \beta E\overline{T}(t')B(y)ydy \quad \cdots (13)$$

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、Iz は z 軸回 りの断面 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(13)を用いて鋼平板の熱 応力を求めた。ただし、B(y)は一定値である。



図-19 板厚9 mm・夜頂速度 0.008 (m/ sec) の 熱応力分布(平均温度使用)





はじめに浸漬速度 V の違いによる熱応力分布を比 較検討してみた。図-19 と図-20 は、板厚 9 mm・浸漬 速度 0.008(m/sec) と 0.083(m/sec)の試験体におけ る熱応力計算結果を示したものである。

図より、浸漬速度 V の違いによる最大圧縮応力差 は見られないが、浸漬速度が 0.008 (m/sec)の場合に は浸漬開始 30 秒後で鋼平板の下部と上部の間に最 大応力差が約 45 (N/mm²) 生じ、溶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。これに対し、浸漬速度が 0.083 (m/sec)の場 合、浸漬開始 5 秒後に鋼平板の下部と上部に生じる 最大応力差は約 4 (N/mm²) である。浸漬速度が 10 倍に なると応力差は最大で 0.1 倍になっている。このこ とから、前述したが、めっき処理を行う場合には、 構造等の影響もあるが、浸漬速度をできるだけ速く することで鋼材内に発生する熱応力を抑える必要が ある。

次に、板厚 B の違いによる熱応力分布を比較検討 してみる。図-21 と図-22 は板厚 22 mm・浸漬速度 0.008(m/sec) と 0.083(m/sec)の試験体における熱 応力計算結果を示したものである。



図-21 板厚 22 mm・浸漬速度 0.008 (m/sec)の 熱応力分布(平均温度使用)



図-22 板厚 22 mm・浸漬速度 0.083 (m/sec)の 熱応力分布(平均温度使用)

各図より鋼平板の下部と上部の間に図-21 の浸漬 速度0.008(m/sec)の場合では約27(N/mm²)、図-22の 浸漬速度0.083(m/sec)の場合では約2(N/mm²)の最大 応力差が発生している。図-19と図-21および図-20 と図-22を比較すると、浸漬速度Vが同じでも板厚B が大きくなると圧縮応力は減少している。今回の場 合、板厚Bが2.4倍で最大熱応力は約0.5倍である。 これは板厚Bが大きくなることで熱伝達が遅くなり、 鋼材内での温度差が広がらないためと思われる。

図-23 は板厚 9 mm・浸漬速度 0.008 (m/sec) の温度 実測値を用いた熱応力計算結果、図-24 は板厚 22 mm・浸漬速度 0.083 (m/sec) の温度実測値を用いた熱 応力計算結果を示したものである。



図-24 板厚 22 mm・浸漬速度 0.083 (m/sec)の 熱応力分布(実測温度使用)

図-19と図-23を比較すると、実測温度で求めた熱応力と平均温度で求めた熱応力に大きな差は見受けられない。このことから、板厚Bが小さい場合には板厚中央部の実測温度と計算による平均温度の間に温度差がほとんどないと思われ、計算による平均温度を用いることで熱応力分布を再現することが可能である。

しかし、図-22 と図-24 を比較すると板厚 B が大き くなると熱応力に差が見られることから、熱応力計 算に使用している実測温度と平均温度の間に差があ り、鋼材内の熱応力の発生状況を再現しているとは いい難く、今後はどのような温度分布を用いること で熱応力分布が再現できるかを検討する必要がある。

8. まとめ

今回の研究では、急激な温度変化を伴う溶融亜鉛 浸漬試験の中で鋼平板の板厚 B と浸漬速度 V を数種 類変化させ、温度分布を測定した。板厚 9 mmと 22 mm の試験体は、鋼平板全体の温度分布を測定すること で試験体全体の温度上昇の傾向および温度分布を明 らかにすることができた。

また、一次元熱伝導方程式解を実測値の温度履歴 曲線に一致させて熱拡散率 κ と熱拡散係数 α を同時 に求める最適化手法を提案することができた。この 熱拡散率κは、板厚19mmまで板厚に比例するように 上昇している。著者等はこれまでにも最適化手法に より板厚が大きくなるほど熱拡散率κが大きくなる 結果を得ており 7)、今回の実験も含めて各板厚の熱 拡散率 κ は鋼平板内における温度上昇の傾きを表す 定数として用いられるものであり、一次元熱伝導方 程式内で大きな影響を持つ係数であると言える。こ の熱拡散率κと熱伝達係数αを用いて、各板厚・浸 漬時間における鋼平板の温度分布を浸漬直後に若干 の誤差があるものの推計することができた。しかし、 本研究の場合は板厚22mmにおいて、溶融亜鉛に浸漬 した底部等からの熱影響を受け、一次元熱伝導方程 式のみでは鋼平板全体の温度分布を推計しにくいこ とも明らかにした。

さらに、熱伝導解析で得られた温度分布を用いて 鋼平板の熱応力分布を計算した。同じ板厚 B でも浸 漬速度 V が速くなるほど、また、同じ浸漬速度 V で も板厚 B が大きくなるほど鋼材内に発生する熱応力 が小さくなることが明らかとなった。どちらの場合 も、鋼材内の温度差の広がりが大きく影響を及ぼし ている。実測温度で得られた熱応力と計算値で得ら れた熱応力を比較すると、板厚 B が小さい場合には 発生する熱応力に大きな差は見られず、計算で求め た平均温度を用いることで鋼材内の熱応力分布を再 現できる。これに対し、板厚 B が大きい場合には発 生する熱応力に差が見られ、熱応力分布の再現性と いう点から見ると不十分と思われる。

今後は得られた温度分布を用いて鋼平板における 熱応力の算出を行うと共に、板厚が大きくなった場 合の底部やフランジ面の熱影響を含めた温度分布の 解析を進める。また、板厚毎に異なる熱拡散率 κ な らび熱伝達係数 α の関係式の導出を行い、鋼平板だ けでなく I 桁や溶接構造物等に応用していきたい。 さらに、板厚が大きい場合の熱応力分布を再現する ために必要な温度分布を二次元または三次元の熱伝 導解析から求めることも含めて検討を進めていきた い。

【参考文献】

- 日本鋼構造協会編:建築用溶融亜鉛めっき構造物の手 引き,1998
- 阿部英彦,紫桃孝一郎,家澤徹,加藤昭夫,栗飯原周二:非分割箱桁橋の亜鉛めっき割れ防止に関する基礎的研究,構造工学論文集,vol. 42A, pp955-963, 1996
- 阿部英彦,家澤徹,金沢正午,加藤昭夫,栗飯原周二: 橋梁の亜鉛めっき割れ防止に関する熱弾塑性解析と 鋼材の基礎的研究,構造工学論文集, vol.43A,pp1161-1170,1997
- (4) 菊池昌利,家澤徹:溶融亜鉛めっき時における鋼管の 変形挙動,材料,第30巻,pp322-329,1981
- 5) 日笠隆司,木村佳英,加東貴司:溶融亜鉛めっき時の桁 の軸方向応力について,土木学会関西支部年次学術講 演会,I-19,1992
- 6)日笠隆司:溶融亜鉛めっき桁に関する基礎的研究(その1),第40回土木学会年次学術講演会,I-45,1985
- 7) 今野貴史, 岩崎正二, 出戸秀明, 宮本裕: 溶融亜鉛浸漬 中に発生する鋼平板の熱いずみと温度変化, 構造工学 論文集, vol. 52A, pp853-864, 2006
- 8)日笠隆司,中川和紀,田中一智:溶融亜鉛めっき桁の熱応力解析,土木学会関西支部年次学術講演会,I-19,1990
- 9) (株) 巴コーポレーション,(株) 巴技研:解説・溶 融亜鉛めっき大型鋼構造物のめっき割れ現象とその 防止法,2001

(2006年9月11日受付)