

溶融亜鉛めっき桁の熱応力解析

大阪府立工業高等専門学校 正会員 ○日笠隆司

大阪府立工業高等専門学校 中川和紀

大阪府立工業高等専門学校 田中一智

1. まえがき 近年、鋼橋において溶融亜鉛めっきにより防錆処理された溶接鋼桁（以下、めっき桁と称す。）が増加している¹⁾。しかし、めっき処理時に発生する大きな熱応力により、鋼桁が変形し、また溶接部に割れが生ずることも報告^{1), 2)}されてお

り、めっき桁普及の妨げとなっている。

現在までのめっき桁の熱応力に関する解析は、めっき処理時の鋼桁の温度を1次元非定常熱伝導問題としてモデル化³⁾したものと、2次元非定常熱伝導問題として取り扱ったもの⁴⁾がある。前者は1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たものである。本文は筆者ら⁴⁾の計算手法をさらに改良し、考察したものである。

2. 浸漬時のモデル化 鋼桁の要素が溶融亜鉛中に浸漬されたとき、周囲の流体の温度 T_{OUT} は室温から溶融亜鉛温度（約440℃）、熱伝達係数 α は[鋼-空気]から[鋼-亜鉛]の α へ瞬間的に激変する。このとき温度の自由境界条件は不変であるので、 T_{OUT} および α の値が変化するとして浸漬時のモデル化を行う。図-1は溶融亜鉛中に等速度 V で鋼桁を投入するときの状態である。下フランジ下面が溶融亜鉛に接するときを $t=0$ 秒とする。浸漬開始後 t_j 秒のとき、溶融亜鉛表面位置は節点1、 m から節点 n へ瞬間的に移動し、節点1、 m 、 n をもつ三角形要素 i は δ_j 秒間亜鉛中に浸かる。このため、 t_{j+1} 秒における節点 n の浸漬時間に δ_j の誤差が生ずる。図-2は初期温度 T_{INI} の鋼板（板厚 L ）を瞬間的に温度 T_{OUT} の溶融亜鉛中に浸漬し、 t 秒経過したときの温度分布を示したものである。実線は本計算に用いたモデルであり、点線は一次元非定常熱伝導解析の温度分布である。実線の鋼板の温度 T （板厚方向一定）は1)の微分方程式で表され、その解は2)式でしめされる。

$$dT/dt = \beta (T_{OUT} - T) \quad \text{—— 1)}$$

$$T = T_{OUT} + (T_{INI} - T_{OUT}) e^{-\beta t} \quad \text{—— 2)}$$

ただし、 $\beta = 2\alpha / (\rho c L)$ 、 α ：熱伝達係数、
 ρ ：密度、 c ：比熱、 L ：板厚

ウェブのある節点が溶融亜鉛に浸漬され、それ以後

Takashi HIKASA, Kazunori NAKAGAWA, Tomokazu TANAKA

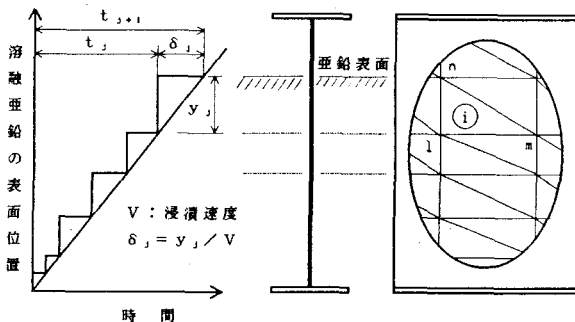


図-1 浸漬時のモデル化

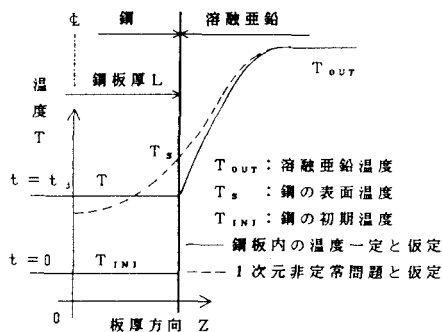
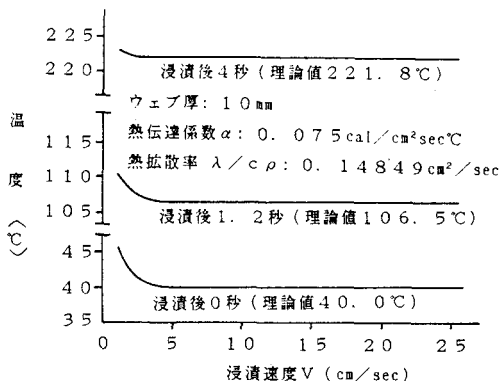


図-2 鋼板と溶融亜鉛の温度分布

図-3 浸漬速度 V と節点温度

の各経過時間における節点温度と浸漬速度 V の計算結果を図-3に示す。ウェブ(板厚10mm)の高さ方向は等分割(各々の V に対し $\delta_j=y_j/V=0.01$ sec、図-1参照)する。計算に用いた数値は室温 40°C 、鋼桁初期温度 $T_{\text{INI}}=40^{\circ}\text{C}$ 、溶融亜鉛温度 440°C 、鋼-空気熱伝達係数 $\alpha=0.9456 \times 10^{-3} \text{ cal/cm}^2\text{sec}^{\circ}\text{C}$ 、鋼-亜鉛の $\alpha=0.075 \text{ cal/cm}^2\text{sec}^{\circ}\text{C}$ 、熱拡散率 $0.14849 \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。浸漬直後の要素の α は亜鉛と空気との平均値、流体の温度は亜鉛温度を用いる。なお、図に示した節点はウェブ端面および上下フランジよりある程度離れており、これらの熱伝導の影響を受けない位置とする。また、図中の理論値は2)式による。この図よりウェブ端面およびフランジよりある程度離れたウェブ節点温度は2次元熱伝導の影響を受けず、 β と浸漬時間のみにより計算することができる。

3. 熱伝達係数の修正 板厚方向の温度変化を無視したが、浸漬後の鋼板の平均温度 T は時間とともに急激に変化するので図-2の鋼表面温度 T_s と T の差は大きい。このため平均温度を用いて計算すると鋼表面での熱流束に誤差を生ずる。この補正を熱伝達係数(以下、修正熱伝達係数 α と称す)により次のように行う。

$$\alpha = \alpha_s (T_{\text{OUT}} - T_s) / (T_{\text{OUT}} - T) \quad \text{————— 3)}$$

式中の α_s は板厚方向の温度変化を考慮した T_s に関する熱伝達係数であり、 α を平均温度 T の関数として表す。図-4は鋼板厚10、20、30mmの修正熱伝達係数 α の一例を示す。 α_s を一定とし、一次元非

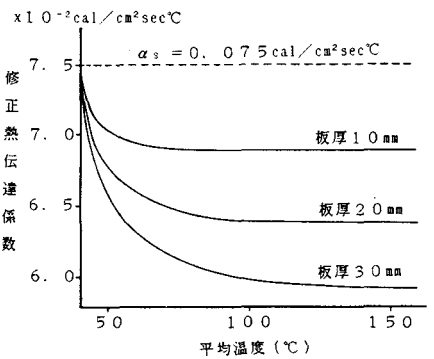


図-4 修正熱伝達係数

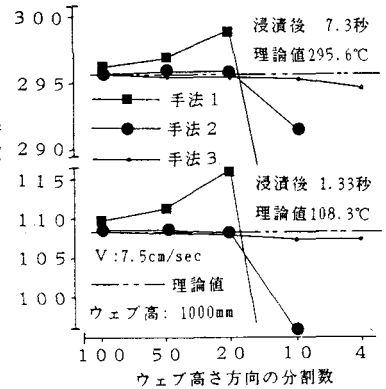


図-5 ウェブ分割数と節点温度

定常熱伝導問題の級数解より計算したもので、用いた数値は $T_{\text{INI}}: 40^{\circ}\text{C}$ 、溶融亜鉛温度 $T_{\text{OUT}}: 440^{\circ}\text{C}$ 、 $\alpha_s: 0.075 \text{ cal/cm}^2\text{sec}^{\circ}\text{C}$ 、熱拡散率 $0.14849 \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。厚い板ほど α の変化は大きく、平均温度の上昇と共に各々一定値となる。図-5に修正熱伝達係数を用いた有限要素法による計算例を示す。図中の手法1は図-1のモデルで浸漬するため δ_j 誤差を含んだものである。手法2は浸漬直後の n 節点の温度を初期温度に修正し(図-1参照)、 δ_j の誤差を取り除きながら次の計算ステップに移行したものである。手法3は荒い分割の計算にも適用できるように時間分割を小さくし、部分的に浸漬した要素の節点温度をその節点の浸漬時間で補正しながら計算したものである。ウェブ高1000mmの鋼桁(板厚 $L: 10\text{mm}$ 、 $T_{\text{INI}}: 40^{\circ}\text{C}$)を速度 $V=7.5 \text{ cm/sec}$ で溶融亜鉛($T_{\text{OUT}}: 440^{\circ}\text{C}$)に浸漬したときの計算例である。分割数100、50、20、10、4を横軸に等間隔にとり、浸漬後1.33、7.3秒経過したときの節点温度を異なる目盛りで縦軸に示す。計算に用いた数値は鋼表面に関する $\alpha_s: 0.075 \text{ cal/cm}^2\text{sec}^{\circ}\text{C}$ 、熱拡散率 $0.14849 \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。図中の理論値は一次元非定常熱伝導の解より計算したものである。この節点はウェブ端やフランジから離れているので浸漬時間より一次元的に計算できることがわかる。また、有限要素法の定式化において α を一定としているが α を温度の関数としても適用出来ることがわかる。ウェブやフランジの端面の影響を考慮した計算結果は当日発表する。今後の熱応力の研究課題として熱伝達係数を明らかにする必要がある。

謝辞： 大阪大学名誉教授 前田幸雄先生、大阪大学溶接工学研究所 上田幸雄教授に貴重な御助言をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路公団大阪建設局：溶融亜鉛めっき橋梁工事報告書、1998。
- 2) 金沢、山下、家沢、徹：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。
- 3) 金沢、山下、家沢、征矢：溶融亜鉛めっき橋梁の研究(Ⅰ)-溶融亜鉛めっき中での応力挙動の研究(その1)、巴組鐵工所技報、No. 1、1988。
- 4) 日笠：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。