

溶融亜鉛めっき桁のめっき時の熱伝達係数

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 学生会員 ○小林亮介
 大阪府立工業高等専門学校 三浦智一

1. まえがき 溶融亜鉛めっきにより防錆処理された鋼桁（以下、めっき桁と称す。）は昭和38年より実施例があり、当初ロールサイズH形鋼に用いられ、その後溶接桁にも適用された。めっき桁は最近10年間で急増しており、現在までの実績は約70,000tにのぼる¹⁾。しかし、高温下（約440℃）のめっき処理時に発生する大きな熱応力による鋼桁の変形・割れに関する技術的な対応不足が、めっき桁普及の障害となっている。その熱応力の計算において熱伝達係数の影響は大きい²⁾が、溶融亜鉛めっき時および水冷時の熱伝達係数は明らかにされていない。本文では、実際の大型亜鉛槽および水槽に供試体を浸漬させ、熱電対により板厚中心の温度を測定し、熱伝達係数を求める。

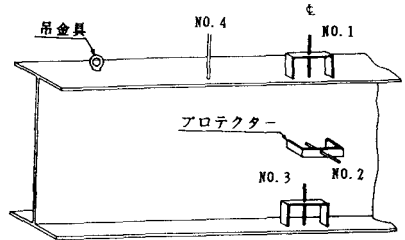


図-1 供試体

2. 実験概要 図-1に供試体（H形鋼、H-600x200x2000mm）を示す。熱電対埋め込み場所は2次元的な熱伝導が生じる場所を避けて、ウェブ中央・フランジ自由突出部に埋め込み、一次元非定常熱伝導問題としてデータ処理できるようにする。

3. 差分による熱伝達係数の計算式 測定した板厚中心温度は二次元的な熱伝導の影響を受けてない²⁾ので、鋼板厚方向 z の一次元非定常熱伝導方程式（1）、鋼表面での熱伝達に関する境界条件式（2）を用い差分により定式化する。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdots \cdots (1)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \pm \alpha (T_{out} - T_s) \cdots \cdots (2)$$

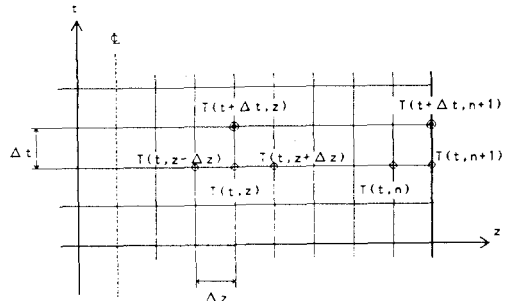


図-2 差分座標系

ここで、温度 T （℃）、時間 t （sec）、流体温度 T_{out} 、鋼板表面温度 T_s 、熱伝導率 λ （cal/cm·sec·℃）、熱伝達係数 α （cal/cm²·sec·℃）、比熱 c （cal/g·℃）、密度 ρ （g/cm³）である。

また、（1）、（2）式の $c\rho$ および λ を次式で近似する³⁾。

$$c\rho = 0.81 + 0.0009 \cdot T \quad (\text{cal/cm}^3 \cdot \text{℃}) \cdots \cdots (3)$$

$$\lambda = 0.117 - 0.00015 \cdot T \quad (\text{cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{℃}) \cdots \cdots (4)$$

図-2は縦軸に時間 t ・横軸に板厚方向の座標 z をとり、板厚の半分の n 等分したものである。この図により（1）式を差分表示し、フーリエ数 H で整理すると（5）式ようになる。

$$\begin{aligned} T(t+\Delta t, z) &= H \{ T(t, z+\Delta z) + T(t, z-\Delta z) - 2T(t, z) \} + T(t, z) \\ &= H \{ T(t, z+\Delta z) + T(t, z-\Delta z) + (1/H - 2) \cdot T(t, z) \} \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

ここで、 $H = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta z^2}$: フーリエ数 ただし、 $\frac{1}{H} - 2 \geq 0$ を満足しなければならない。

次に（2）式をフーリエ数 H 、ビオ数 $Bi = \Delta z \cdot \alpha / \lambda$ により整理すると（6）式ようになる。

$$T(t+\Delta t, n+1) = 2H \{ T(t, n) + Bi \cdot T_{out} + (\frac{1}{2H} - Bi - 1) \cdot T(t, n+1) \} \cdots \cdots (6)$$

なお（6）式が、成り立つには $H \cdot Bi$ に関する次の条件式を満足する必要がある。

$$1/2H - Bi - 1 \geq 0$$

（5）、（6）式により計算した板厚中心温度が実測値になるよう逐次近似により熱伝達係数を求める。

4. 板厚方向・時間分割幅の検討 図-3は浸漬後 $t=1.5\text{sec}$ の時の表面温度を示す。縦軸に温度、横軸

に時間分割幅 Δt をとり、各板厚分割数 n について理論値⁴⁾との差を比較したものの1例である。計算に用いた数値は $T_{out}=450^{\circ}\text{C}$ 、 $T_s=36^{\circ}\text{C}$ 、 $\alpha=0.075\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、 $c\rho=0.99\text{cal}/\text{cm}^3\cdot^{\circ}\text{C}$ 、 $\lambda=0.147\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}$ 、板厚 $L=1.5\text{cm}$ である。この図より以下の熱伝達係数の計算では時間分割幅 $\Delta t=0.0005$ 秒、板厚分割幅 $\Delta z=0.8\text{mm}$ とする。

5. 計算結果 測定された鋼板中心温度をもとに(3)～(6)式より逐次近似計算により、熱伝達係数を求める。一般に熱伝達係数は表面温度を基準として表す。しかし、2次元非定常熱伝導解析により熱応力計算をするため、板厚方向には平均温度を用いるので平均温度に対して熱伝達係数を表す必要がある²⁾

(以下、修正熱伝達係数と称す。)。鋼桁を溶融亜鉛(溶融亜鉛温度 $T_{out}=460^{\circ}\text{C}$ 、鋼板の初期温度 $T_0=36^{\circ}\text{C}$)に浸漬したときの実験データから下フランジ(板厚 1.63cm)の熱伝達係数を求め、板厚 1.02cm 、 3.26cm について修正熱伝達係数を求めて図-4、図-5に表す。縦軸に熱伝達係数($\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}$)、横軸には平均温度または表面温度を $^{\circ}\text{C}$ で表す。○印が熱伝達係数、△印が修正熱伝達係数を示す。浸漬時、鋼桁近傍の溶融亜鉛が固体化するため、熱伝達係数は特殊なカーブで表されている。また、板厚が増加すると修正熱伝達係数は低めの値となっている。同一の測点を水中に浸漬したとき

(冷却水温度 $T_{out}=70^{\circ}\text{C}$ 、鋼板の初期温度 $T_0=435^{\circ}\text{C}$)の修正熱伝達係数を求めて図-6、図-7に表す。沸騰現象が伴うので熱伝達係数の変化は大きく、膜・遷移・サブクール沸騰領域が現れている。また、溶融亜鉛中に比べると熱伝達係数は大きい。

6. 結び 実験値による修正熱伝達係数の求め方について述べると共に、その1例を示した。数値計算用のデータを得るには、なお実験を必要とする。

謝辞：大阪大学名誉教授 前田幸雄先生に貴重な御助言をいただき、また実験に際してオーエム工業(株)の御援助をいただきました。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、1988。 2) 日笠、中川、田中：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、
1990。 3) 渡辺、
佐藤：溶接力学と
その応用、朝倉書
店、1965。 4) 竹
内、野田：熱応力、
日新出版、1988。

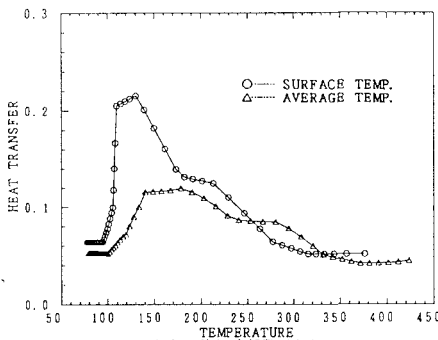


図-7 冷却水中の熱伝達係数(板厚 = 3.26 cm)

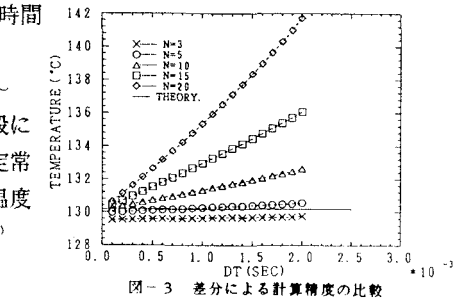


図-3 差分による計算精度の比較

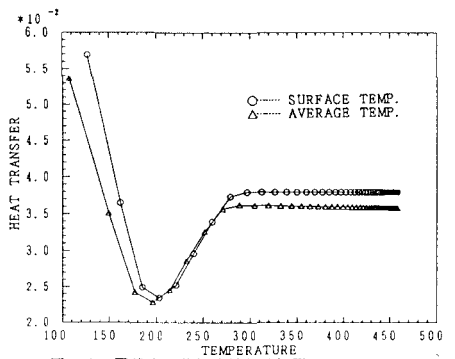


図-4 亜鉛中の熱伝達係数(板厚 = 1.02 cm)

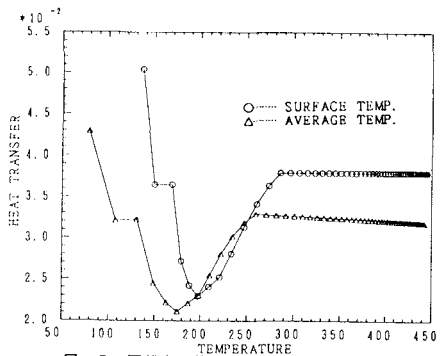


図-5 亜鉛中の熱伝達係数(板厚 = 3.26 cm)

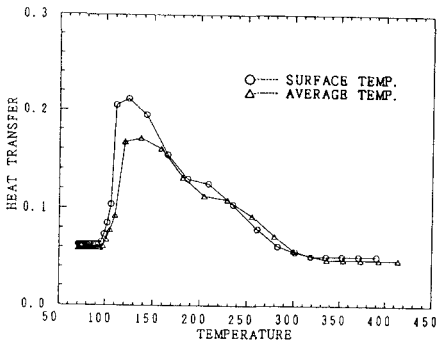


図-6 冷却水中の熱伝達係数(板厚 = 1.02 cm)