

溶融亜鉛めっき時の桁の軸方向応力について

大阪府立工業高等専門学校

正会員 日笠隆司

九州工業大学

学生員 ○木村佳英

新日本製鐵株式会社

加東貴司

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）^{1), 2)}が増加しており、現在までの実績は約8万トンにのぼるが維持補修の長所を考えるとその実績は十分とは言えない。この原因の1つとして、めっき処理時に発生する熱応力がある。この応力により桁が変形したり、溶接部に割れが生ずること^{3), 4)}が知られている。これらに対する研究がまだ不十分であることがめっき桁普及の妨げの1因である。筆者らは板厚方向平均温度に対する修正熱伝達係数⁵⁾を用い、端面からの入熱や平面的な熱伝導も考慮した有限要素法で節点温度を算出し、平面弾性問題として桁の熱応力度^{6), 7)}を計算している。これらによると桁端部以外の熱応力は一軸応力状態（桁軸方向）であり、また、平面的な熱伝導は桁の小領域（フランジ端面付近やウェブとフランジなどの板厚差のある近傍）で生ずるがフランジやウェブの軸方向平均熱応力に与える影響は小さいことを明らかにした。本文はめっき処理時の桁の「ねじり」や「はらみ」変形の主因と考えられるフランジやウェブの平均熱応力の計算手法について述べ、その特性について考察する。

2. 鋼桁の温度 鋼桁の平面的な熱伝導を無視すると板厚内部の温度 T は着目点の浸漬時間 t と板厚方向の座標 z により1次元非定常熱伝導問題⁸⁾として1)式で表される。 $\kappa (= \lambda / \rho c)$ は熱拡散率であり、 λ は熱伝導率、 ρc は熱容量である。

$$\partial T / \partial t = \kappa \cdot \partial^2 T / \partial z^2 \quad \text{—— 1)}$$

$$\lambda \cdot \partial T / \partial z = \alpha_s \cdot (T_{OUT} - T_s) \quad \text{—— 2)}$$

式2)は鋼板表面 $z=L/2$ の自由境界条件であり、 α_s は表面温度に対して用いられる通常の熱伝達係数、 T_{OUT} は流体（溶融亜鉛または水）の温度、 T_s は鋼表面温度であ。浸漬時間 $t=t_i$ のとき、1)、2)式による温度を図-1に点線で示す。実線 T は鋼板内の温度分布を一定と仮定したものである。この微分方程式を3)式で示す。その解は4)式となる。

$$\partial \bar{T} / \partial t = \beta \cdot (T_{OUT} - \bar{T}) \quad \text{—— 3)}$$

$$\bar{T} = T_{OUT} + (T_{INI} - T_{OUT}) e^{-\beta t} \quad \text{—— 4)}$$

ここに、 $\beta = 2\bar{\alpha} / (\rho c L)$ 、 T_{INI} は初期温度、 $\bar{\alpha}$ は平均熱伝達係数である。 α_s と $\bar{\alpha}$ を同じ値とすると、図-1の点線 T の平均温度は実線 $\bar{T}$ の温度より低い。その差は板厚 L や浸漬時間 t によって異なる。1)、2)式は固有値問題を解くことにより級数解⁹⁾により表されるが4)式に比較すると煩雑である。1次元非定常熱伝導問題の平均温度と同一の温

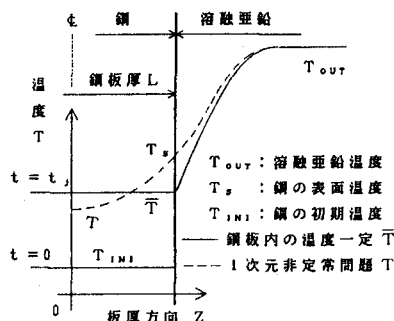


図-1 鋼板内部の温度分布

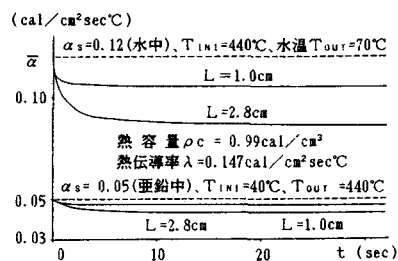
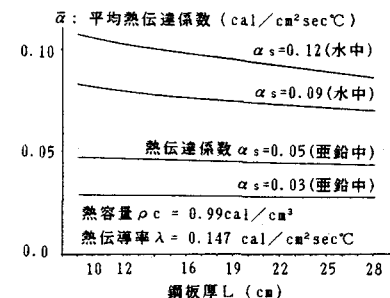
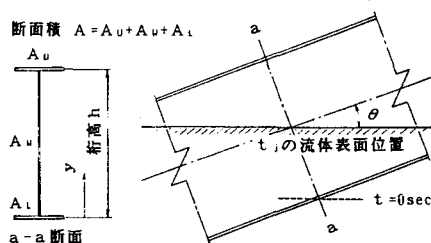
図-2 平均熱伝達係数 α 図-3 平均熱伝達係数 ($t=20\text{sec}$)

図-4 浸漬時の桁の概要図

Takashi HIKASA, Yoshihide KIMURA, Takashi KATO

度 $\bar{T}$ を、より簡単な4)式により求めるために平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}$ を導入し、図-2に示す。熱伝達係数 α_s :
 $0.12\text{cal/cm}^2\text{sec}^\circ\text{C}$ (水中冷却、水温 70°C)、 α_s : $0.05\text{cal/cm}^2\text{sec}^\circ\text{C}$ (亜鉛めっき、溶融亜鉛温度 440°C)とし、
 熱伝導係数 λ : $0.147\text{cal/cm sec}^\circ\text{C}$ 、熱容量 ρc : 0.99cal/cm^3 と仮定して板厚 $L=1.0, 2.8\text{cm}$ について、平均熱
 伝達係数 $\bar{\alpha}$ を時間 t について図示したものである。水中のとき厚い鋼板では t 約 20sec 程度で一定値となっ
 ていが、他の場合ではほぼ 10sec で収束している。20sec以後の温度は4)式に一定の $\bar{\alpha}$ を代入し、簡単に精度良
 く計算できるが10sec前後では精度は少し低下する。図-3は各種の板厚について、 $t=20\text{sec}$ の $\bar{\alpha}$ を表す。

3. 平均熱応力 桁断面の y 座標、および浸漬時の概要図を図-4に示す。桁傾斜角 θ 、浸漬速度 v より、
 断面の任意位置 y の浸漬時間は $(t-y\cdot\cos\theta/v)$ で表わされる。また、上下フランジ、ウェブ厚に対応した
 20sec後の平均熱伝達係数 $\bar{\alpha}$ による β_u, L, w を4)式に適用し、温度を求める。十分長い桁の中間部断面に生
 ずる熱によるフランジ軸力 F_F 、ウェブ軸力 F_w ⁸⁾は5)式で表わす。

$$F_F = -F_w = -\sigma_0 \cdot \{ (1 - e^{-\beta_L t}) \cdot A_L + (1 - e^{-\beta_u(t-h\cdot\cos\theta/v)}) \cdot A_u \} + \sigma_0 \cdot (A_u + A_L) / A \\ \cdot \{ (1 - e^{-\beta_L t}) \cdot A_L + [1 - e^{-\beta_u(t-h\cdot\cos\theta/v)}] \cdot A_u + L \cdot \int [1 - e^{-\beta_u(t-y\cos\theta/v)}] dy \} \\ + \sigma_0 \cdot \{ (1 - e^{-\beta_L t}) \cdot A_L \delta_L - (1 - e^{-\beta_u(t-h\cdot\cos\theta/v)}) \cdot A_u \delta_u + L \cdot \int [1 - e^{-\beta_u(t-y\cos\theta/v)}] \\ \cdot (\delta_L - y) \cdot dy \} \cdot (\delta_L + \delta_u) / I \quad \text{----- 5)}$$

ここに、 σ_0 : $\psi E (T_{OUT} - T_{INI})$ 、線膨張係数 ψ : 1.2×10^{-5} 、弾性係数 E : $2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ 、 δ_u, δ_L :桁の
 図心から上、下フランジ中心までの距離、 I :図心に関する桁の断面2次モーメントである。

計算は桁①: 2-Flg. ② 400×22 , Web ③ 1800×10 とし、フランジ厚 L_F ・ウェブ厚 L_w ・浸漬速度 V と角度 θ に
 関する最大平均熱圧縮応力の結果を図-5~7に示す。溶融亜鉛中のときはウェブ、水中のときはフランジ
 の最大平均熱応力をとる。溶融亜鉛中のデータ(以下カッコ内は水中)は λ : $0.147\text{cal/cm sec}^\circ\text{C}$ 、 ρc : 0.99
 cal/cm^3 、 α_s : 0.04 (0.09) $\text{cal/cm}^2\text{sec}^\circ\text{C}$ 、 $T_{OUT}=440$ (70) $^\circ\text{C}$ 、 $T_{INI}=40$ (440) $^\circ\text{C}$ とし、 $\bar{\alpha}$ は $t=20\text{sec}$ の値とする。

4. 結び めっき処理時の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について述べるとともに以下のこと
 を明らかにする。

1) 浸漬時の速度、角度の平均熱応力に与える影響は小さいが、
 通常より遅い速度ではその影響は大きい。

2) 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。

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、村川英一助教授に貴重な御助言をいただきました。
 ここに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、1989。2) 青山、
 前田、他: 橋梁と基礎、Vol. 25, No. 2, 1991。3) 日本橋梁建設協会: 溶
 融亜鉛めっき橋設計・施工マ
 ニュアル1990。4) 金沢、山下、
 他: 巴組鐵工所技報、No. 2、
 1989。5) 日笠、小林、三浦:
 土木学会関西支部年講、1990。
 6) 日笠、中川、田中: 土木学
 会関西支部年講、1990。7)
 日笠、前田: 第45回土木学会
 年講、1990。8) 竹内、野田:
 熱応力、日新出版、1988。

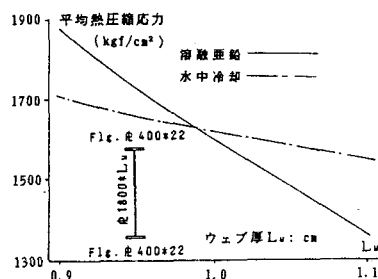


図-6 平均熱圧縮応力 (L_w)

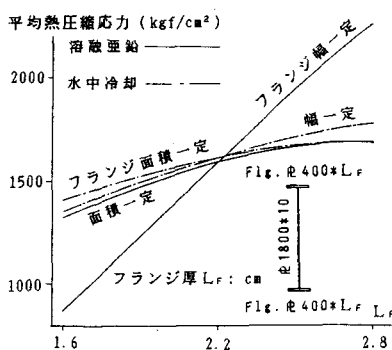


図-5 平均熱圧縮応力 (L_F)

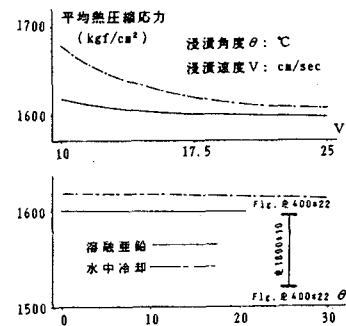


図-7 平均熱圧縮応力 (V, θ)