

大阪府立工業高等専門学校 正員 日笠隆司

1. まえがき 現在、鋼橋の防錆は殆ど塗装によって行われているが、塗装は塗り替えを必要とし、鋼橋建設後も多額の維持・補修費を要する。さうく、これらの費用は年々増大している。長期にわたり防食機能を発揮し、維持管理費の比較的低い防錆方法の一つとして、溶融亜鉛めっきがある。橋梁のロールサイズH型桁¹⁾には溶融亜鉛めっきが用いられているが、溶接桁への採用実績²⁾は少ない。鋼材に対し優れた防錆効果を持つ溶融亜鉛めっきが溶接桁に適用されない一因としては、高温下(約450℃)のめっき処理により熱応力が生ずること、処理後に生じ易い変形が矯正出来ないことである。このめっき処理における熱応力を解明することは液体金属ぜい性³⁾や変形防止対策上重要である。このため、本文は有限要素法により2次元非定常温度解析を行い、熱応力を求め、溶融亜鉛めっき桁の基礎的な問題に対し検討を加えたものである。

2. 実験概要 溶融亜鉛及び水中の鋼板の熱伝達率を求めるために、図-1に示す装置で実験を行う。槽の大きさは150×250×250mmである。CAシース熱電対は鋼板の厚さの中心部に硬うで埋め込み使用する。熱伝達率を求める供試体は幅100mm、長さ200mmの鋼板で、厚さは4.5, 6, 8mmの3種を用いる。この供試体を水平及び垂直状態で瞬時に溶融亜鉛中に入れ、熱電対の電位差をXYレコーダーにより記録する。鋼板が溶融亜鉛温度に達した後、取り出し、水中に入れ、同様な測定をする。これらの測定値より、ハイスラー線図⁴⁾を用い算出した熱伝達率を図-2に示す。横軸は鋼板の中心温度である。溶融亜鉛中の鋼板の熱伝達率の平均値は水平で0.05、垂直で0.075 cal/cm²sec²°Cである。温水中(45~55℃)は水温及び鋼板表面温度により核沸騰・膜沸騰領域が異なるので、鋼板の温水中の熱伝達率は鋼板中心温度に対して差が大きく、またその値も溶融亜鉛中より大きい。

3. 解析 鋼板を溶融亜鉛中に浸漬して行くとき、時間 t とともに板厚方向の温度は変化するが、その平均温度 T を用い、板厚方向の温度は一定とする2次元非定常熱伝導問題として有限要素法により解析する。 $\partial T/\partial t$ は負の熱源とみなし、 T の変分に対し不感であると仮定すると汎関数 I は次のようになる⁵⁾。

$$I = h\alpha_e \int_L \left(\frac{1}{2} T^2 - T_0 T \right) ds + \frac{1}{2} \lambda \iint_A \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy + \iint_A \left[\alpha_s (T^2 - 2T_0 T) + c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right] dx dy \quad (1)$$

C : 比熱, ρ : 密度, λ : 熱伝導率, h : 板厚, T_0 : 周囲の流体温度
 α_s, α_e : 鋼板の表裏面及び端面の熱伝達係数, L : 自由温度境界の積分, A : 鋼板の面内境界の積分

三角形要素により(1)式を定式化し、各節点の温度を計算することが出来る。なお、非定常項は最も簡単な差分モデルを用いて次のように表わす。

$$\{T_1, T_2, \dots, T_n\}_t = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left\{ \frac{\partial T_1}{\partial t}, \dots, \frac{\partial T_n}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} + \left\{ \frac{\partial T_1}{\partial t}, \dots, \frac{\partial T_n}{\partial t} \right\}_t \right\} \quad \{ \} : \text{列マトリックス}$$

各時間ごとの温度が計算されると、鋼桁のウェブはフランジ及び補剛材により面外変形を拘束されていると仮定し、ウェブを平面応力問題として、同

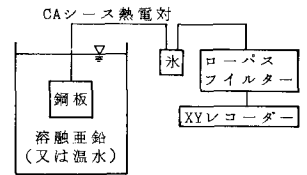


図-1 実験装置

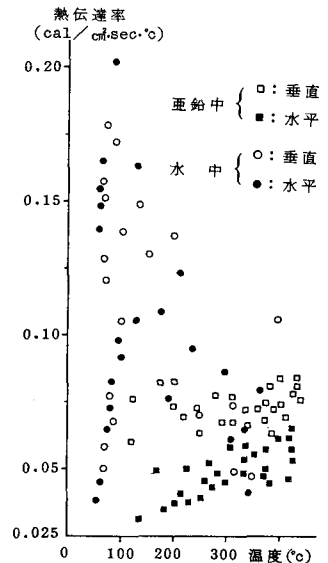


図-2 鋼板の熱伝達率

様に三角形要素による有限要素法で熱応力を算出する。なお、計算は弾性係数を一定とする弾性解析による。

4. 計算結果及び考察 鋼板を垂直に亜鉛中に浸漬するとき、鋼板の端面からの熱伝達を無視し、鋼板内のある点が浸漬する瞬間を時間 $t=0$ として、 $t=5, 10 \text{ sec}$ のその点の温度を有限要素法により算出し図-3に示す。図中の理論値(点線)は鋼板が両表面から熱伝達のみにより加熱されたときの微分方程式による鋼板の温度の理論解である(板厚方向の温度一定とし、鋼板の初期温度 40°C 、熔融亜鉛の温度 450°C)。図-3の理論値と有限要素法による値は大差なく、浸漬速度が大きくなると一致していることは、熔融亜鉛めっき時の鋼板の温度(端面よりある程度はなれた所)がその点の浸漬時間のみによって算出できる。すなわち、鋼板の面内方向の熱伝達の項は無視でき、鋼板の両表面の熱伝達の項のみの簡単な理論式で温度を求めることができる。図-4~6は、鋼桁のウェブを想定した鋼板 $1400 \times 10 \times 4000 \text{ mm}$ が熔融亜鉛中へ速度 10 cm/sec で垂直に浸漬されるとき、熱応力の時間変化を示す。横軸の時間(t)は鋼板の下端が亜鉛に接触したときを $t=0$ として表わす。図-4は Q 点の熱応力 σ_y 、図-5~6は b, C 点の熱応力 σ_x を示す。黒丸の端面考慮は各点が端面の近傍であるので、端面からの熱伝達を考慮したものである。図-4において、圧縮応力度の最大値は Q 点が熔融亜鉛中に浸漬した瞬間に生ずる。ウェブ端に相当する Q 点に生ずる大きな圧縮応力は問題であり、鋼桁の現場溶接部のように、補剛材のない桁端部はめっき時に補強が必要となる。鋼桁の上下フランジに相当する b, C 点に大きな圧縮応力が生ずることを図-5, 6は示す。このことは引張フランジにおいても圧縮フランジの幅厚比を用いるべきことを示唆している。また、 a, b 点のような端面の近傍では端面からの熱伝達の影響を強く受け、簡単な理論式によって温度を算出することが出来ない。

5. 結び 簡単なモデル化により、熔融亜鉛めっき時の熱応力を計算したが、さうに引き上げ時や水冷のとき大きな熱応力が発生する可能性もある。これらの熱応力が座屈変形や疲労破壊を助長することもあると考えられるので、フランジ・ウェブ補剛材の幅厚比・板厚や桁高等について、今後、十分な検討が必要である。

参考文献

- 1) 市川・中山・山田・橋梁と基礎, No.10, 1981.
- 2) 御子柴・市川・窪田他, 土木学会誌, Vol. 64, No.11, 1979.
- 3) 菊池・家沢, 材料, Vol. 31, No.342, 1982.
- 4) 日本機械学会, 伝熱工学資料, 1966.
- 5) 藤野, 熱伝導と熱応力, 培風館, S.47.

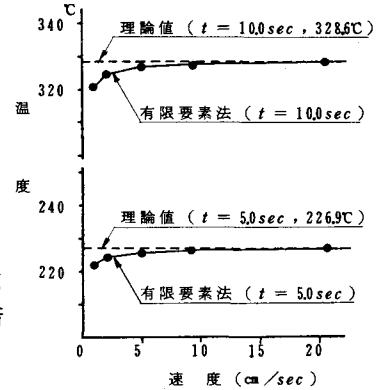


図-3 浸せき時の鋼板の温度

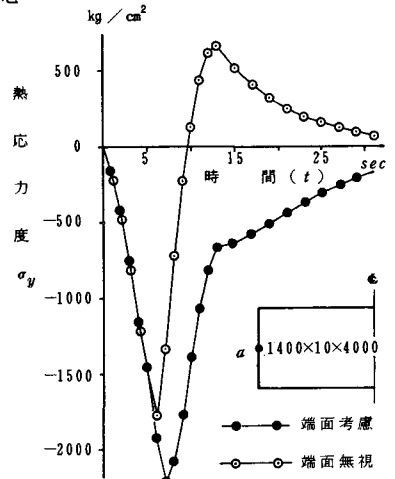


図-4 浸せき時の熱応力度

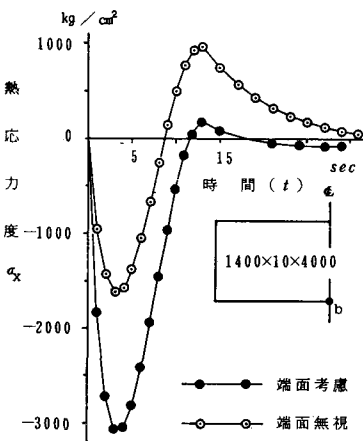


図-5 浸せき時の熱応力度

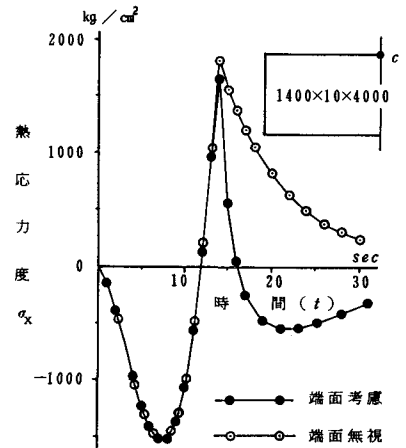


図-6 浸せき時の熱応力度