

I-106

溶融亜鉛めっき桁の熱弾塑性挙動

大阪府立工業高等専門学校 正会員 ○日笠隆司

大阪大学溶接工学研究所

上田幸雄

大阪大学溶接工学研究所

村川英一

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⁾が増加しており、現在までの実績は約8万トンにのぼる。しかし、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。その原因の1つにめっき処理時に発生する熱応力がある。この応力によりめっき桁に大きな残留変形が生じたり、溶接部に割れが発生することが報告²⁾されている。これらに対する研究が不十分であることがめっき桁普及の妨げの一因となっていると考えられる。筆者らは板厚方向平均温度に対する修正熱伝達係数³⁾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、めっき処理時の桁の熱応力度を平面弾性問題として計算^{4), 5), 6)}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、平面的な熱伝導は桁の小領域(フランジやウェブの端面付近や板厚差のある近傍)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理論的に明らかにした。また、めっき処理時に発生する桁の「ねじり」や「はらみ」の残留変形は主として桁軸方向の圧縮熱応力によって生じると考えられる。このため、変形を解析の対象とするときの鋼桁温度は平面的な熱伝導を無視し、1次元的に求めることができる。本文は幾何学的非線形を考慮した熱弾塑性プログラムを作製し、鋼桁節点温度に1次元非定常熱伝導問題の級数解を用い、めっき処理時(溶融亜鉛および冷却水中)の鋼桁の熱弾塑性挙動の概要を数値計算により明らかにしたものである。

II. 理論の概要 当初、有限要素法の薄板曲げ理論はKirchhoffの仮定を基礎としてきた。このモデルは分割要素間のたわみの1次導関数の連続性に問題があったので、変分理論の進展とともに各種の工夫がなされ、現在に至っている。本文ではReissner-Mindlin⁷⁾のモデルを用いる。板厚方向のせん断変形を同方向に直線近似して導入し、たわみ角を独立変数と考えたものである。このため、汎関数は1次の導関数までで表示でき、平面問題と同様に要素間で連続、要素内では1次微分可能な変位関数となり、連続性の問題は生じない。変位関数 U 、 U^* はウェブを例にとり1)式で示す。

$$U = \{u, v, w, \theta_x, \theta_y\}, \quad U^* = \{u^*, v^*, w^*\} = \{u - z\theta_x, v - z\theta_y, w\} \quad 1)$$

ここに、変形前のウェブ平面を xy 平面、板厚方向を z とするカーテシアン座標系をとる。なお、以後の理論は有限変位・微小ひずみを対象とする。板厚中央の座標点 $(x, y, 0)$ の変位は軸方向変位 (u, v, w) と回転変位(たわみ角) (θ_x, θ_y) で表せる。 U^* は板厚内の位置 z における変位である。

微小ひずみ $\epsilon = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}$ は有限変位 U^* により2)式となる。

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \partial u^* / \partial x + 0.5 [(\partial u^* / \partial x)^2 + (\partial v^* / \partial x)^2 + (\partial w^* / \partial x)^2] - z \partial \theta_x / \partial x \\ \epsilon_y &= \partial v^* / \partial y + 0.5 [(\partial u^* / \partial y)^2 + (\partial v^* / \partial y)^2 + (\partial w^* / \partial y)^2] - z \partial \theta_y / \partial y \\ \gamma_{xy} &= \partial u^* / \partial y + \partial v^* / \partial x + (\partial u^* / \partial x)(\partial u^* / \partial y) + (\partial v^* / \partial x)(\partial v^* / \partial y) \\ &\quad + (\partial w^* / \partial x)(\partial w^* / \partial y) - z [\partial \theta_x / \partial y + \partial \theta_y / \partial x] \\ \gamma_{yz} &= \partial w^* / \partial x - \theta_x, \quad \gamma_{zx} = \partial w^* / \partial y - \theta_y \end{aligned} \quad 2)$$

u^*, v^* の2次の項はフランジやスティフナーを考慮したものである。応力 σ とひずみ ϵ の関係は塑性域において塑性流れ理論を適用するので増分 $\Delta \sigma$ 、 $\Delta \epsilon$ で表す。2)式のひずみの内、立体ひずみ成分 $(\gamma_{yz}, \gamma_{zx})$ は別に扱い、常に弾性とし、他のひずみ成分 $(\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy})$ を等方性平面応力状態として表す。荷重は温度増分 ΔT のみとし、弾性係数、線膨張係数、降伏関数(塑性硬化係数は塑性ひずみの関数とする)の温度依存性を考慮すると、応力増分 $\Delta \sigma$ 、ひずみ増分 $\Delta \epsilon$ は3)式となる。

$$\Delta \sigma = [D'] \Delta \epsilon + [C] \Delta T \quad 3)$$

ここに、マトリックス $[D']$ の平面応力成分は文献8)の5)、16)式の $[D]$ に相当する。 $[D']$ の立体応力成分は常に弾性とする。 $\Delta \epsilon$ は温度変化により実際に生ずる全ひずみであり、 $[C] \Delta T$ の項は完全拘束 $\Delta \epsilon = 0$ のときの熱応力に相当する。 $[D']$ 、 $[C]$ は応力

、ひずみなどにより各増分ステップごとに計算できる。 温度場と応力場は連成しないとし、ある釣合状態にある温度 T 、応力 σ 、ひずみ ϵ の要素が温度 $(T+\Delta T)$ 、応力 $(\sigma+\Delta\sigma)$ 、ひずみ $(\epsilon+\Delta\epsilon)$ に変化して釣合ったとき、仮想仕事の原理を適用すると4)、5)式となる。

$$\delta U = \int \{ \sigma + [D'] (\Delta^1 \epsilon + \Delta^2 \epsilon) + [C] \Delta T \} \cdot (\delta \Delta^1 \epsilon + \delta \Delta^2 \epsilon) dV = 0 \quad (4)$$

$$\int \{ \sigma + [C] \Delta T \} \cdot \delta \Delta^1 \epsilon dV + \int \{ \sigma \Delta^2 \epsilon + [D'] \Delta^1 \epsilon \delta \Delta^1 \epsilon \} dV = 0 \quad (5)$$

ここに、3)式のひずみ $\Delta\epsilon$ において、2)式の線形ひずみを $\Delta^1\epsilon$ 、非線形ひずみを $\Delta^2\epsilon$ とする。5)式は4)式の増分の2次の項までをとり示したものであり、5)式の第1項が温度荷重項であり、第2項が剛性マトリックスの項である。要素は四辺形のアイソパラメトリック要素を用い、局所座標系によるガウスの数値積分を用いる。積分点は面内 ξ 、 η について各2点の計4点とし、板厚方向は6点とする。なお、フランジ、スティフナーの要素については幅方向に1点とし、面内計2点の数値積分により面内せん断剛性成分の精度をあげている。また、面外応力の項(常に弾性として取扱う)の積分は要素内の中心の1点のみとしてロッキングを防止し、ゆがみに対する補正係数 $\kappa=5/6$ としている。

Ⅲ. 数値計算 入力データはI-Plate girder(Up. & Low.Flg. 巾400*22*9600、Web Flg. 巾1600*10*9600、補剛材なし)、初期たわみ最大0.5cm(軸方向3.5sin波形、高さ方向半波形)、熱伝導係数 λ :0.147cal/cm sec $^{\circ}$ C、熱容量 ρc :0.99cal/cm 3 、熱伝達係数 α :0.12cal/cm 2 sec $^{\circ}$ C(水中冷却、水温70 $^{\circ}$ C、速度 V :20cm/sec)、 α :0.075cal/cm 2 sec $^{\circ}$ C(亜鉛めっき、熔融亜鉛温度440 $^{\circ}$ C、 V :15cm/sec)、水平面に対する桁軸の角度 θ :0、15 $^{\circ}$ 、線膨張係数 ψ :1.11*10 $^{-5}$ 、弾性係数 E :2.21*10 6 kgf/cm 2 、降伏点応力:2400(1.0+30*相当塑性ひずみ)kgf/cm 2 である。計算は大阪大学溶接工学研究所のTitan(久保田コンピュータ)で行う。詳細は可視化により当日発表する。

Ⅳ. まとめ 数ケースの計算結果より次のことが明らかになった。

- 1) 温度分布の変化により変形モードが変わる。
- 2) 主として熔融亜鉛中ではウェブの「はらみ」、冷却水中では桁の「ねじれ」と桁端ウェブの「はらみ」変形が生ずる。

3) 桁を傾斜させて投入するとねじれが発生しやすい。特に水中の場合、変形の差が大きい。熔融亜鉛中では投入初期にねじりを生じるがはらみ変形に与える影響は認められなかった。

参考文献 1)青山、前田、他:橋梁と基礎、Vol.25、No.2、1991。2)日本橋梁建設協会:めっき橋設計・施工マニュアル、1990。3)日笠、小林、三浦:関西支部年講、1990。4)日笠、中川、田中:関西支部年講、1990。5)日笠、前田:第45回土木学会年講、1990。6)日笠、木村、加東:関西支部年講、1991。7)Y. Ueda, H. Murakawa, H. Masuda: Proc. of Inter. Conference on Computational mech., may, 1986。8)上田、山川、福田:日本造船学会論文集、No.133、1973。

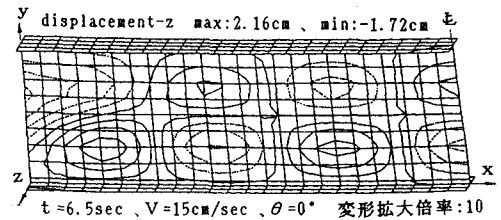


図-1 熔融亜鉛投入初期のウェブの「はらみ」変形

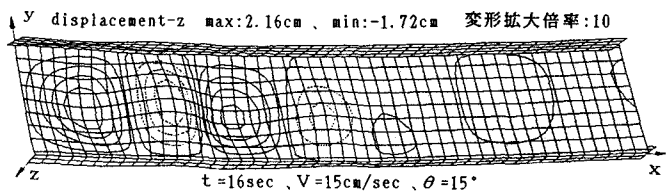


図-2 熔融亜鉛中のウェブの「はらみ」変形

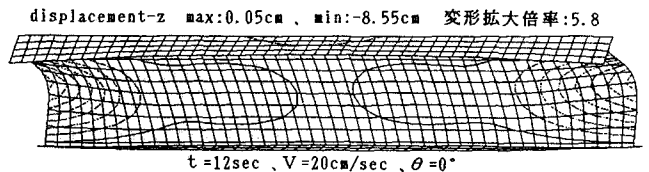


図-3 冷却水中の桁端ウェブの変形

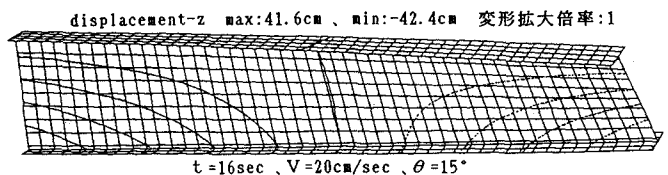


図-4 冷却水中の桁の「ねじれ」変形