

## 溶融亜鉛めっき時の鋼桁の熱弾塑性挙動 に関する有限要素法解析

THERMAL ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF STEEL GIRDERS UNDER HOT-DIP ZINC GALVANIZATION  
BY A FINITE ELEMENT METHOD

日笠隆司\* 上田幸雄\*\* 村川英一\*\*\*

By Takashi HIKASA, Yukio UEDA and Hidekazu MURAKAWA

Thermal elasto-plastic behavior of an I-plate girder under hot-dip zinc galvanizing was calculated by a Finite Element Method. The deformation of the girder in molten zinc and cooling water of galvanizing process was studied, and following conclusions were drawn.

(1) The local buckling occurs at the middle web of the girder in molten zinc. The torsional buckling of the girder or the local buckling at the end web occurs in cooling water.

(2) The local buckling of the end web can be prevented by stiffening the web plate, but there are a lot of cases that the local buckling of the middle web and the torsional buckling cannot be prevented.

(3) A large residual deformation sometimes is developed by the local buckling of the middle web or by the torsional buckling when the section of the girder is large. These deformation can be reduced by increasing the web plate thickness, and by using the steel material of a high yield point.

### 1. まえがき

溶融亜鉛中に鉄を投入し、その表面を亜鉛皮膜で覆う溶融亜鉛めっき処理（俗にどぶ漬、天ぶらめっきとも称す）は18世紀の後半以後、小物の鉄鋼製品の防錆処理方法としてヨーロッパにおいて最初に用いられた。日本では1900年代の初期より使用され、特に猪苗代幹線（1914年、輸入品）などの送電鉄塔には長期的な使用実績がある。亜鉛は鉄に対し犠牲的防食作用があると共に、表面に耐食性のある緻密な腐食生成物の皮膜（酸化亜鉛、水酸化亜鉛、炭酸亜鉛など）を形成するので、現在、溶融亜鉛は鋼材の優れた防錆処理方法として各種の鉄鋼製品に広く適用されている。このため、日本工業規格（JIS）・国際標準化機構（ISO）によりめっき処理・めっき層の品質試験方法などが規格化されている。

鋼橋の主桁への溶融亜鉛めっきの適用は流藻川橋（1963年、建設省、ロールサイズH形鋼）が最初とされており、当時のめっき浴槽は小さいため、形鋼などの比較的小型の部材を対象としていた。その後、鋼材の開発、溶接技術の発達によりめっき浴槽が大型化し、足立高架橋（1974年、桁高1.7mの溶接I桁、日本道路公団）では溶接集成された大型断面部材が用いられた。橋梁の支承、伸縮継手、高力ボルト、ワッシャーにいたるまで全鋼部材に溶融亜鉛めっきが適用（以下、めっき橋梁と称す）されたのは明石SA橋（1976年、第2神明道路、日本道路公団）である。その後、めっき橋梁として近畿自動車道天理吹田

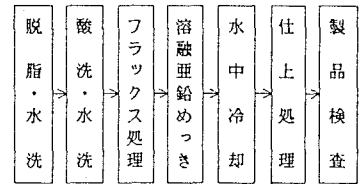
\* 大阪府立工業高等専門学校教授 建設工学科 （〒572 大阪府寝屋川市幸町26-12）

\*\* 工博 大阪大学教授 溶接工学研究所弾塑性学部門 （〒567 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1）

\*\*\* 工博 大阪大学助教授 溶接工学研究所弾塑性学部門 （〒567 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1）

線稲田高架橋下り線（１９７８年、日本道路公団）<sup>1)</sup>、西岩田高架橋（１９８５年、日本道路公団）などが竣工し、現在では桁高2.75mのＩ－プレートガーダーや曲線箱桁<sup>2)</sup>、トラス橋にも適用されている。

めっき工程の概略を図－１に示す。塗装工程と比較すると、替わりにこの工程をめっき工場で行う。工程は前処理工程（脱脂、酸洗）、めっき処理工程（フラックス、溶融亜鉛めっき、水中冷却）、仕上工程（仕上、検査）となる。前処理工程は塗装のサンドブラスト処理までの工程に相当し、加温したアルカリ水溶液（約１０％のか性ソーダ）による脱脂の後、加温した硫酸水溶液（約１０％）に浸漬し、黒皮、錆を取り除く。なお、酸洗のとき、鋼材によっては水素脆性について注意を要するが、対応する塗装工程の表面処理に比べると簡単である。めっき処理工程のフラックス処理は塩化亜鉛アンモニウム水溶液に浸漬し、鋼表面を清浄にしてめっき処理までの錆発生を防止する。十分水切りの後、溶融亜鉛（ $440 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ）に約５～１０分間浸漬すると、鋼の表面に純亜鉛層・その中間に亜鉛と鋼の合金層を形成する。合金層が促進されると純亜鉛層がなくなり、暗灰色の「やけ」（グレーコーティング）となって表面に露出する。この「やけ」を防止するために水中で冷却する。溶融亜鉛や水中では、大型鋼部材は過渡的な温度変化による熱応力の影響を受け易いため、以下の本文で、めっき処理時は溶融亜鉛および水中時を意味するものとする。



図－１ めっき工程の概略

鋼桁の防錆処理に溶融亜鉛めっきを適用するとき、めっき処理時の熱応力により発生する残留変形（めっき処理によって生ずる付加変形で、以下、めっき変形とも称す）への配慮が必要となる。めっき処理前の溶接変形の矯正加工や全体的な仮組立の工程は塗装桁と同様であるが、めっき処理後にも二次的な矯正加工と仮組立をすることが一般的である。しかし、めっき処理後のはらみ矯正は出来ないこともある。溶接変形のはらみ矯正基準はめっき変形を抑制するため塗装桁より厳しくしており、桁高の $1/500 \sim 1/600$ を標準<sup>3)</sup>としている。また、矯正はプレス加工が主流となっている。めっき処理後の開断面に生ずるねじり変形は架設ブロック毎に強制力を加えて地組（二次仮組立）により修正し、そのまま運搬・架設することが多い。

めっき橋梁の普及は溶融亜鉛めっきの優れた防錆効果とめっき浴槽の大型化が端緒となっているが、その背景としては、塗り替えに要する維持補修費の増大や塗り替え作業時の安全性確保の問題など、現行の塗装橋梁の弱点にも起因している。また、耐候性鋼材を用いた橋梁のような錆汁による環境汚染はないので、市街地の橋梁に適している。このため産業界でも、大型めっき浴槽の設置箇所の増加、めっき橋梁用の高張力鋼の開発<sup>4)</sup>などの対応がなされている。このような動向にもかかわらず、溶融亜鉛めっきを適用した橋梁の鋼重実績は現在約８万トン程度である。ここ数年の鋼橋の１年分の平均実績約７０万トンと比較すると微々たるものであり、まだ、鋼橋の防錆処理の殆どは塗装である。めっき橋梁の維持補修に対する長所などを考えるとその実績は不十分となっている。通常、鋼橋の溶接集成部材の断面は大であり、フランジやウェブの板厚差も大きい。このため、めっき処理時の熱応力が問題となり、過大なめっき変形や溶接部の割れが報告<sup>3), 4)</sup>されている。実寸大のパイロット桁の製作など、現場サイドの努力により技術は向上しているが、めっき処理時のこれらの現象は複雑であるため基礎的研究<sup>5)</sup>も少ない。めっき変形や割れの対策が不十分であることがめっき橋梁普及の妨げの一因となっている。

筆者らは板厚方向の平均温度に対する修正熱伝達係数<sup>6)</sup>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<sup>7), 8), 9)</sup>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明らかにしている。めっき処理後に発生する桁の「ねじり」や「はらみ」など

のめっき変形は、主としてフランジやウェブの軸方向圧縮熱応力によっている。このため、めっき処理時の鋼桁の熱変形挙動解析において、1次元的に求めた鋼桁の温度（平面的な熱伝導を無視）を用いて計算しても精度上の問題は少ないと考えられる。

本文はめっき処理時の鋼桁の熱弾塑性挙動<sup>11)</sup>を有限要素法により計算し、主としてI-プレート・ガーダーの変形について考察したものである。鋼桁節点温度に一次元非定常熱伝導問題<sup>10)</sup>の級数解を用い、弾性係数、線膨張係数、降伏関数の温度依存性および幾何学的非線形性を考慮した塑性流れ理論を適用する。

## 2. 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。本文では変位の連続性の問題を解決するために Reissner-Mindlin のモデル<sup>12)</sup>を用いる。このモデルは板厚方向のせん断変形を近似し、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表すと1)式となる。

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

ここに、変形前のウェブ平面を  $x, y$  平面、板厚方向を  $z$  とする座標系 (図-2 参照) 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  $U$  は軸方向変位 ( $u, v, w$ ) と回転変位 (たわみ角) ( $\theta_x, \theta_y$ ) で表す。 $U^*$  は板厚内の位置  $z$  における変位である。

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

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

なお、フランジやスティフナーのウェブ面外方向の変形も考慮に入れ  $u^*, v^*, w^*$  の2次の項までを採用するものとする。

応力  $\sigma$  とひずみ  $\epsilon$  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 Kirchhoff の仮定を近似的に満足させるという立場から別に扱い、常に弾性状態と仮定する。他のひずみ成分 ( $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ ) を等方性平面応力状態と仮定し、弾塑性理論を用いる。荷重は温度増分  $\Delta T$  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  $\Delta \sigma = \{\Delta \sigma_x, \Delta \sigma_y, \Delta \tau_{xy}, \Delta \tau_{yz}, \Delta \tau_{zx}\}$ 、ひずみ増分  $\Delta \epsilon = \{\Delta \epsilon_x, \Delta \epsilon_y, \Delta \gamma_{xy}, \Delta \gamma_{yz}, \Delta \gamma_{zx}\}$  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  $[D^*]$  の平面応力成分および  $[C]$  は文献 13) の5)、6)、16)、17)式の  $[D]$ 、 $[C]$  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、温度  $T$  である釣合状態にある応力  $\sigma$ 、ひずみ  $\epsilon$  の要素が温度 ( $T + \Delta T$ )、応力 ( $\sigma + \Delta \sigma$ )、ひずみ ( $\epsilon + \Delta \epsilon$ ) に変化した状態に対して、仮想仕事の原理を適用すると4)、5)式となる。

$$\delta U = \int \{ \sigma + [D^*] (\Delta^1 \epsilon + \Delta^2 \epsilon) + [C] \Delta T \} \cdot (\delta \Delta^1 \epsilon + \delta \Delta^2 \epsilon) \cdot dV = 0 \quad (4)$$

$$\int \{ \sigma + [C] \Delta T \} \cdot \delta \Delta^1 \epsilon \cdot dV + \int \{ \sigma \cdot \delta \Delta^2 \epsilon + [D^*] \Delta^1 \epsilon \cdot \delta \Delta^1 \epsilon \} \cdot dV = 0 \quad (5)$$

ここに、3) 式のひずみ $\Delta \epsilon$ において、2) 式の線形ひずみに対応する線形ひずみ増分を $\Delta^1 \epsilon$ 、非線形ひずみ増分を $\Delta^2 \epsilon$ とする。5) 式は4) 式の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 $\xi, \eta$ 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面内曲げに対するロッキングを防止するため、数値積分の数を長さ方向に1点、幅方向2点の計2点とし面内曲げの精度をあげている<sup>12)</sup>。同様に、面外応力の項(常に弾性として取扱う)は要素内の原点の1点での低減積分をしている。この板厚方向のせん断応力は放物線と仮定し、せん断弾性係数を5/6に補正して用いている。

なお、増分計算には各荷重(温度)ステップ毎にNewton-Raphson法を用る。このステップ内で、繰り返し剛性マトリックスを算出し、新たに求めた節点変位増分による残差節点力ベクトルを収束させる方法を採用している。

### 3. 計算結果および考察

鋼桁の座標系および流体(熔融亜鉛、冷却水)投入時の概要を図-2に示す。傾斜角 $\theta$ の鋼桁を等速度 $V$ で流体中に浸漬するものとする。鋼桁の入力データはI-プレート・ガーダー(Up.Flg. 巾400\*22\*9600、Web 巾1600\*(9、10、11)\*9600、Low.Flg. 巾400\*22\*9600、補剛材なし)、初期たわみ:0.1、0.5、1.0、1.5cm(軸方向3.5・sin波形、高さ方向半波形とし、最大値で示す)である。温度に関する入力データは熱伝導係数 $\lambda$ :0.147cal/cm sec $^{\circ}$ C、熱容量 $\rho c$ :

0.99cal/cm $^3$ であり、また、熔融亜鉛中のときは熱伝達係数 $\alpha$ :0.075cal/cm $^2$ sec $^{\circ}$ C、鋼桁初期温度 $T_0$ :40 $^{\circ}$ C、熔融亜鉛温度 $T_{out}$ :440 $^{\circ}$ C、投入速度 $V$ :15cm/secであり、冷却水中のときは $\alpha$ :0.12cal/cm $^2$ sec $^{\circ}$ C、 $T_a$ :440 $^{\circ}$ C、水温 $T_{out}$ :70 $^{\circ}$ C、 $V$ :20cm/secとする。なお、その他のデータ等はケース毎に示す。

図-3に熔融亜鉛中の鋼桁ウェブ中央(桁長および桁高の中央)の最大たわみ・残留たわみ(ウェブ面外方向)の精度とウェブの要素分割の関係を示す(ウェブ厚1.0cm、初期たわみの最大値:0.5cm、鋼桁の傾斜角 $\theta$ :0 $^{\circ}$ 、線膨張係数<sup>14)</sup> $\psi$ : $1.11 \cdot 10^{-5} \cdot (1.0 + 0.521 \cdot 10^{-3} \cdot \text{温度})$ 、弾性係数<sup>15)</sup> $E$ : $2.21 \cdot 10^6 \cdot (1.0 - 0.277 \cdot 10^{-3} \cdot \text{温度})$ kgf/cm $^2$ 、降伏点応力<sup>14)</sup> $\sigma_y$ : $(1.0 - 0.73 \cdot 10^{-3} \cdot \text{温度}) \cdot (1.0 + 2.0 \cdot \text{相当塑性ひずみ})$ kgf/cm $^2$ 、 $\sigma_y = 2400$ kgf/cm $^2$ )。最大たわみは熔融亜鉛中の鋼桁ウェブに生じたたわみの最大値であり、残留たわみは鋼桁が熔融亜鉛温度に達したときの残留変形の最大値である。最大たわみ・残留たわみは初期たわみを基準にとり表しているため、各々のたわみに初期たわみを加えたものが実際のはらみ量となる。分割要素(矩形)の縦横の

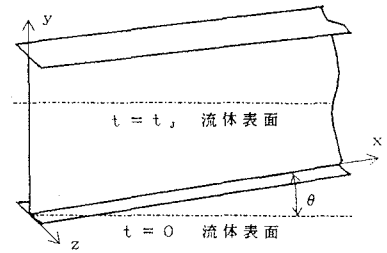


図-2 座標系と鋼桁投入時の概要

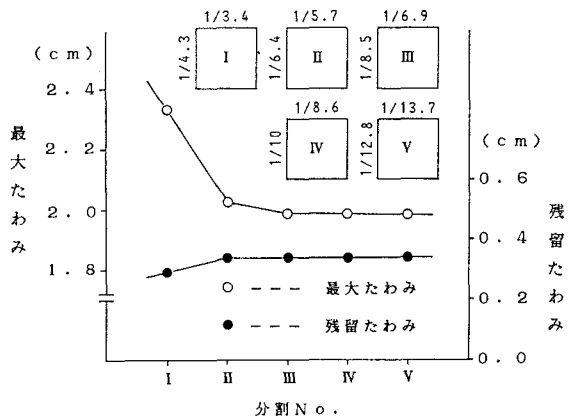


図-3 ウェブ中央のたわみと要素分割精度

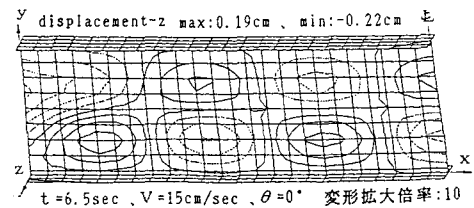


図-4 熔融亜鉛投入初期のウェブの「はらみ」変形

長さはたわみの半波長を1とし、分数で表す。要素の縦方向はウェブの高さ方向である。最大たわみ・残留たわみとも分割No. III (ウェブ高さ方向:半波長の1/8.5、長さ方向:同1/6.9)の要素で精度的に十分収束している。要素分割は縦横とも半波長の約1/7程度で良いことが分かるが、以後の計算はNo. IIIの分割要素で行う。

めっき処理時の変形挙動の特性を示すため、図-4～7に計算結果の一例(ウェブ厚:1.0 cm、初期たわみの最大値:0.5cm、線膨張係数 $\alpha$ : $1.11 \times 10^{-5}$ 、弾性係数 $E$ : $2.21 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、降伏点応力:2400 (1.0+30\*相当塑性ひずみ) $\text{kgf/cm}^2$ )を示す。計算および図形処理は大阪大学溶接工学研究所のEWS (タイタン、久保田コンピューターKK)を用いる。

図-4は桁長の半分(対称)を取り、時間 $t=6.5\text{sec}$ 、 $V=15\text{cm/sec}$ 、 $\theta=0^\circ$ の溶融亜鉛投入初期のウェブのはらみ変形を示す。溶融亜鉛中に水平の桁が約1m浸漬された状態である。浸漬部のウェブには軸方向の圧縮、大気部のウェブには引張熱応力が発生する。このため、浸漬部は初期たわみと同方向の変位が生じ、大気部は初期たわみの逆となる。浸漬時間の経過にかかわらず桁軸方向のたわみ波形は初期たわみとほぼ同じであるが、ウェブ高さ方向の変形モードはウェブの浸漬状態により変化する。鋼桁の浸漬初期における温度パターンの急激な変化がはらみ変形モードの変化となって現れており、特殊な変形挙動をしている。桁断面全体が浸漬するとウェブの軸方向圧縮熱応力(フランジは同引張力となり、桁断面の合力は0)が増加し、初期たわみと同様の変形モードの座屈波形が大きくなる。鋼桁の浸漬初期における温度パターンの急激な変化がはらみ変形モードの変化となって現れており、特殊な変形挙動をしている。その後、時間経過と共にこの変形が増大し、最大値に達したのち減少するが、塑性変形のため元の初期たわみの位置に戻らず、めっき処理による付加たわみとしての残留たわみを生ずる。

図-5は溶融亜鉛中の $t=16\text{sec}$ 、 $V=15\text{cm/sec}$ 、 $\theta=15^\circ$ の桁の変形である。桁長方向は対称とならないので全長をとり計算している。 $\theta=0^\circ$ の場合と比較すると、傾斜角 $\theta$ によって桁長方向に浸漬時間差が生ずるため、同一時間におけるウェブのはらみ変形の量は各波形ごとに異なるが、はらみ変形の最大値や残留のたわみには殆ど差は見られない。傾斜角のあるとき、浸漬初期には桁のねじり変形が認められるが、桁全体の浸漬とともに減少する。

図-6は冷却水中の傾斜角のないときの $t=12\text{sec}$ 、 $V=20\text{cm/sec}$ 、 $\theta=0^\circ$ であり、図-7は冷却水中の傾斜角のある場合の $t=22.5\text{sec}$ 、 $V=20\text{cm/sec}$ 、 $\theta=15^\circ$ である。冷却水中ではウェブに軸方向引張、フランジに軸方向圧縮熱応力が主として発生する。このため、ウェブ中間部にははらみ変形は生じないが、ウェブ端に高さ方向の大きな圧縮熱応力が発生し、ウェブ桁端が座屈する。溶融亜鉛中の上下フランジには主として軸方向の引張熱応力が発生するため桁のねじれ変形は小さいが、冷却水中の上下フランジは圧縮熱応力となるため、

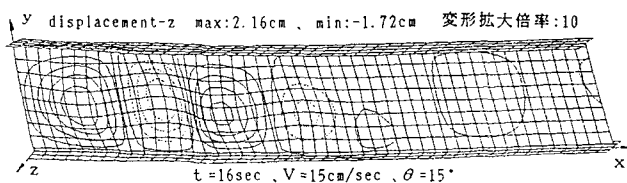


図-5 溶融亜鉛中のウェブの「はらみ」変形

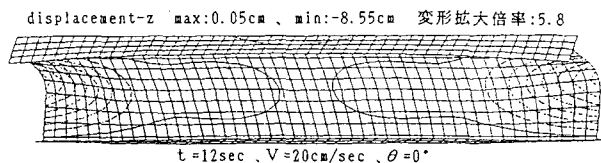


図-6 冷却水中の桁端ウェブの「はらみ」変形

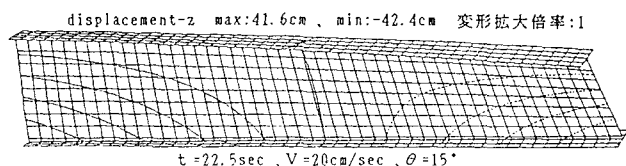


図-7 冷却水中の桁の「ねじれ」変形

ねじれ座屈が生じ易く、図-7では桁に大きなねじれ変形が発生している。図-6と図-7の入力データの相違は傾斜角度 $\theta$ のみであるが、その変形パターンは著しく異なっている。傾斜角のあるときは投入初期にねじれ変形が生じ易いので、その変形が熱応力の増大と共に成長するが、桁の大きなねじれ変形は軸方向熱応力を解放する。同時に桁端の高さ方向の圧縮応力は小となり、桁端に座屈が生じにくい。図-6の $\theta=0^\circ$ のとき、投入初期の桁のねじれ変形は僅かであるので、桁端の高さ方向の圧縮熱応力の解放も少なく、桁端に对称モードのウェブの座屈が発達し、非対称モードの桁のねじれ座屈に移行出来ないためと思われる。投入時の傾斜角によって生じるねじれ変形は熱応力を大きく解放するので、変形モードに著しい差異が生じたものと考えられる。なお、めっき処理時、添接部などの桁端ウェブは仮設の補剛材を取り付ける。この補剛材の剛性が不十分であるとき、桁端ウェブに図-6のパターンの座屈が発生する。桁端が十分に補剛されていれば、冷却水中では図-7の桁のねじれ座屈が発生する。

溶融垂鉛中の鋼桁のはらみ変形に与える初期たわみおよびウェブ厚の影響について、図-8～10に示す（線膨張係数 $\alpha:1.11 \times 10^{-5}$

$\times (1.0 + 0.521 \times 10^{-3} \times \text{温度})$ 、弾性係数 $E:2.21 \times 10^6 \times (1.0 - 0.277 \times 10^{-3} \times \text{温度}) \text{ kgf/cm}^2$ 、降伏点応力: $\sigma_y \times (1.0 - 0.73 \times 10^{-3} \times T) \times (1.0 + 2.0 \times \text{相当塑性ひずみ}) \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_y:2400, 3600, 4600 \text{ kgf/cm}^2$ 、鋼桁の傾斜角 $\theta:0^\circ$ ）。ウェブ厚 $1.0 \text{ cm}$ 、 $\sigma_y:2400 \text{ kgf/cm}^2$ のとき、ウェブ中央の最大たわみ・残留たわみ（ともに初期たわみに付加される量として表す）と初期たわみ（ $0.1, 0.5, 1.0, 1.5 \text{ cm}$ とし、桁軸方向 $3.5 \sin$ 波形、高さ方向半波形とし、最大値で示す）の関係を図-8に示す。幅厚比の大きい曲げ部材であるウェブに過大な軸方向の圧縮熱応力が発生するので面外のたわみは大となり、塑性変形による残留たわみが発生する。初期たわみを小さくするにつれて最大たわみ・残留たわみともに増加し、特に残留たわみの増加率が大きくなっている。これは、初期たわみが小であるとき、ウェブの軸方向の剛性が面外の非線形性により高くなり、同方向の平均熱応力が大きくなるためである。桁高 $160 \text{ cm}$ の鋼桁の矯正後の初期たわみを $0.3 \text{ cm}$ （桁高の約 $1/530$ とする。現行のめっき桁の矯正基準<sup>3)</sup>は $1/500 \sim 1/600$ ）とすると、残留たわみは $0.41 \text{ cm}$ 、ウェブのめっき処理後の総はらみは量 $0.71 \text{ cm}$ （初期たわみ+残留たわみ）となり、塗装鋼桁のはらみ許容値 $160/250=0.64 \text{ cm}$ より大となり、めっき桁では、はらみの許容値 $1/250$ が相当困難であることが分かる。経験的にきめている現行のめっき桁のはらみ許容値の基準<sup>3)</sup>  $1/150$  はめっき桁を製作する立場から理解できるが、塗装桁基準を緩和した根拠が不足していると思われる。 $1/150$ の許容値が妥当なもと、許容値の総はらみ量  $160/150=1.07 \text{ cm}$ とすると、めっき前の初期たわみ $0.80 \text{ cm}$ となる。この場合は  $1/200$ の矯正でよく、現行のような厳しい矯正基準は必要としないことが分かる。また逆に、現行基準より厳しい値で溶接集成後のウェブのはらみを矯正すると、初期たわみは小

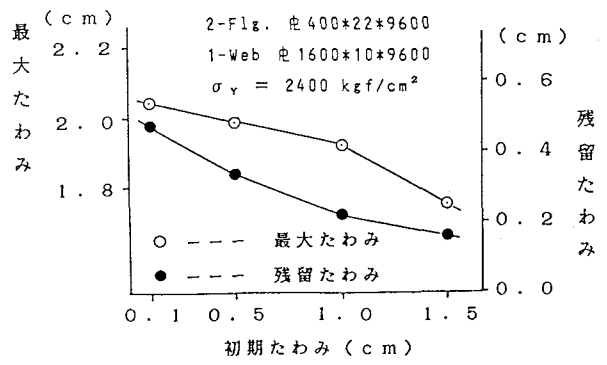


図-8 初期たわみとウェブ中央のたわみ

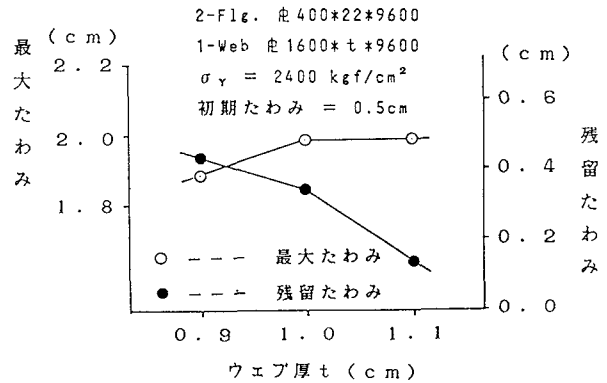


図-9 ウェブ厚とウェブ中央のたわみ

となるので、めっき処理後の残留たわみは大となる。しかし、めっき処理後の総はらみ（初期たわみ+残留たわみ）は減少するので、この「はらみ」は一定値に漸近する。この値がはらみ許容値を越えることもあり、その場合はめっき処理前の矯正のみでは処理できないこととなる。残留（付加）たわみはウェブ厚、ウェブの幅厚比、ウェブとフランジの面積比、ウェブの降伏点応力（鋼材の種類）、めっき処理条件などによって異なるので、現行のような同一の基準で矯正することは合理的でない。矯正基準やはらみ許容値についても今後検討を要する。

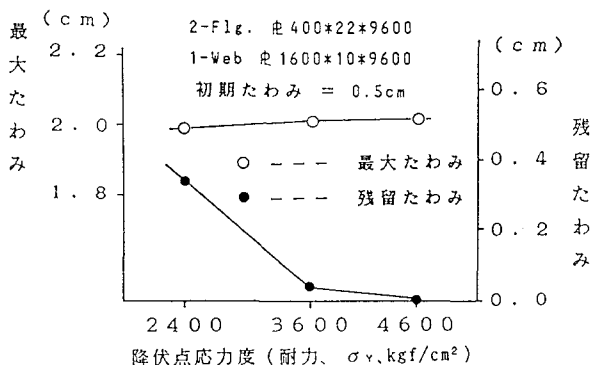


図-10 降伏点応力度とウェブ中央のたわみ

図-9はウェブ中央の最大たわみ・残留たわみとウェブ厚0.9、1.0、1.1cmの関係を示す（初期たわみ：0.5 cm、 $\sigma_v$ :2400kgf/cm<sup>2</sup>）。ウェブを厚くすることは残留たわみの減少に効果がある。図-10はウェブ中央の最大たわみ・残留たわみと降伏点応力度 $\sigma_v$ :2400、3600、4600kgf/cm<sup>2</sup>の関係を示す（ウェブ厚1.0cm、初期たわみ:0.5cm）。鋼材の降伏点強度が最大たわみに与える影響は少ないが、残留たわみ（めっき処理による付加たわみ）の減少には相当の効果があることが分かる。降伏点応力度のレベルを上げることによって、ウェブの降伏領域の減少による剛性の増大と熱応力の増加が起り、これらがほぼ同レベルで打ち消し合っているため最大たわみ与える影響は少ない。しかし、残留たわみは降伏領域の減少を直接的に受け、相当改善されている。

#### 4. 結び

維持補修費の軽減や交通事故による再塗装の困難性から溶融亜鉛めっきにより防錆処理された橋梁が増加している。しかし、橋梁部材は大型で板厚の差も大きいため、めっき処理時（溶融亜鉛および水中）に発生する熱応力が大となり、過大な残留変形や溶接部の割れが問題になっている。本文はめっき処理時の鋼桁の熱弾塑性挙動を有限要素法により計算し、主としてI-ブーレト・ガーダーの変形について考察し、以下のことを数値計算により明かにした。

1) 主として溶融亜鉛中では、軸方向の圧縮熱応力がウェブに発生し、ウェブは局部座屈により「はらみ」変形を生ずる。冷却水中では、ウェブの軸方向熱応力は主として引張となり、それに対応した圧縮熱応力がフランジに作用する。このフランジ圧縮力により桁に「ねじれ」座屈が生ずる。また、冷却水中の桁端ではウェブとフランジ間の「ずれ力」により、ウェブ高さ方向に圧縮力が発生し、桁端ウェブに局部座屈変形が起こる。

2) めっき処理時に端部を補剛することにより、桁端のウェブの局部座屈は簡単に防止している。しかし、対傾構のない単一部材のフランジに大きな軸方向の圧縮熱応力（桁断面ではその総和は0）が作用することにより発生するねじれ座屈、同様な熱応力によるウェブ（幅厚比の大きい曲げの板要素）中間部の局部座屈は防止できない場合が多い。このため、めっき処理による残留（付加）変形量は比較的大きくなり易い。

3) ウェブを厚くすることはめっき処理後の残留（付加）たわみの減少に効果があるが、ウェブの鋼材レベルを上げる方がより効果的である。

4) 桁を傾斜させて投入すると「ねじれ」変形が現れ易い。溶融亜鉛中でも投入初期に「ねじれ」変形が認められるが、桁全体の浸漬とともに減少し、「はらみ」変形が主体となる。「はらみ」変形に与える傾

斜角の影響は少ない。

5) 溶融亜鉛中での「はらみ」変形によっても熱応力の一部は解放されるが、水中の「ねじれ」変形による応力解放が大きい。

6) 初期たわみを小さくするにつれて最大(付加)たわみ・残留(付加)たわみともに増加する。特に、残留(付加)たわみにその傾向が強い。これは、初期たわみが小さいと、ウェブの軸方向の剛性が高くなり、同方向の平均熱応力が大きくなるためである。なお、初期たわみが小さくなると、めっき処理後の総はらみ量(初期たわみ+残留たわみ)は減少し、一定値に漸近する。

7) 一般の鋼桁のはらみの許容値  $1/250$  をめっき桁に適用することは相当困難であることが数値計算により明かとなった。なお、めっき桁のはらみの許容基準値については、桁の耐荷力や疲労強度と初期たわみの関係に関する研究がさらに必要であると思われる。また、残留(付加)たわみは初期たわみ、ウェブ厚およびその幅厚比などの桁の断面形状、降伏点応力、めつき処理条件などによって異なるので、現行のような同一の基準で矯正することは合理的でない。

8) 比較的大きい変位が生じたり、温度分布の変化に対応して変形モードが変わることもある熱変形挙動の計算においては、飛移現象など解の収束上の問題があると思われるので今後の検討を要する。

#### 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、pp15～52、1989.
- 2) 青山、前田、山田、白草、大久保:曲線箱桁への溶融亜鉛めっきの適用、橋梁と基礎、Vol. 25, No. 2, pp2～8、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、pp44～49、1990.
- 4) 山下、家沢、金沢、井上、金谷:溶融亜鉛めっき橋梁の研究(V)－溶融亜鉛めっき橋梁用高張力の研究(その2)、巴組鐵工所技報、No. 4, pp56～65、1991.
- 5) 都井、小橋、家沢:溶融亜鉛めっき時における構造部材の熱弾塑性挙動の有限要素解析、構造工学における数値解析シンポジウム論文集、第16巻、pp315～320、1992.
- 6) 日笠、小林、三浦:溶融亜鉛めっき桁のめっき時の熱伝達係数、土木学会関西支部年次講演会概要集、1-20-1～2、1990.
- 7) 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講演会概要集、1-19-1～2、1990.
- 8) 日笠、前田:溶融亜鉛めっき桁の熱応力解析、第45回土木学会年次講演会概要集、第一部、pp222～223、1990.
- 9) 日笠、木村、加東:溶融亜鉛めっき時の桁の軸方向応力について、土木学会関西支部年次講演会概要集、1-19-1～2、1991.
- 10) 竹内、野田:熱応力、日新出版、pp22、1988.
- 11) 日笠、上田、村川:溶融亜鉛めっき桁の熱弾塑性挙動、第46回土木学会年次講演会概要集、第一部、pp250～251、1990.
- 12) Y. Ueda, H. Murakawa, H. Masuda: Reissner-Mindlin Plate Element for Large Deflection Problem, Proceeding of International Conference on Computational mechanics, Vol. 1, chapter III, pp167～172, 1986.
- 13) 上田、山川、福田:温度変化を伴う棒、板の非線形挙動、日本造船学会論文集、No. 133, pp189～200、1973.
- 14) 渡辺、佐藤:溶接力学とその応用、朝倉書店、pp163, pp288、1965.
- 15) 川田、河本、横堀、宮川:材料強度工学ハンドブック、朝倉書店、資料編pp16、1970.

(1992年9月21日受付)