溶融亜鉛浸漬時に発生しためっき割れ及び熱変形の事例解析と対策

Analysis and the Measures for Sample Cases of Galvanizing Cracks and Thermal Deformation occurred in Molten Zinc

土屋 和弘* 岩崎 正二** 出戸 秀明*** 今野 貴史**** 辻 英朗***** Kazuhiro Tsuchiya, Shoji Iwasaki, Hideaki Deto, Takafumi Konno, Hideaki Tsuji

*岩手大学大学院工学研究科 建設環境工学専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)
**工博 岩手大学 工学部建設環境工学科 教授 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)
***工博 岩手大学 工学部建設環境工学科 准教授 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)
****工博 株式会社デンロコーポレーション・東北ガルバセンター (〒025-0301 岩手県花巻市北湯口 18-26-17)
***** 株式会社デンロコーポレーション・東北ガルバセンター (〒025-0301 岩手県花巻市北湯口 18-26-17)

When hot dip galvanizing treated steel structures, a sudden temperature change is given, and unsteady thermal stress occurs in a member between a part doing a dip earlier and parts doing a dip later, and there is the case that thermal strains and crack accidents. In this paper, with introduction of three sample cases of galvanizing cracks and thermal deformation, we are illustrating our analytical studies in order to figure out thermal distribution and its incidentally arising thermal stresses near galvanizing cracks. And we add examination about mechanism and the preventive measures against hot dip galvanizing cracks and thermal deformation from a provided analysis result. *Keywords : Hot dip galvanizing, Galvanizing crack, Temperature distribution, Thermal stress distribution*

キーワード:溶融亜鉛めっき,めっき割れ,温度分布,熱応力分布

1. はじめに

鋼構造物に急激な温度変化を加えた場合、はじめ に温度が加えられた部分と後から温度が加えられ た部分の間には温度差が生じ、部材内に非定常熱応 力が発生する。特に橋梁桁材のような大型鋼構造物 では、部材内に発生する温度分布の落差が大きくな る傾向にあるため、それに伴い発生する熱応力も大 きくなり、残留変形が残る場合もある。また、溶接 継手部が部材内に多く存在する場合には応力集中 により大きな引張応力が発生し、溶接時の残留応力 の影響とも合わせて溶接部分の割れや変形等の現 象を引き起こす一つの要因となる。

このような大型鋼構造物に急激な温度変形を与 えるものの一つに溶融亜鉛めっきがある。溶融亜鉛 めっきは、鋼部材を約 440~450℃の溶融亜鉛中へ 浸漬させて鉄-亜鉛の合金層を形成させ、鉄を錆か ら守る表面処理である。溶融亜鉛めっきは長期防錆 効果やメンテナンスフリーが期待でき、電力・通信 分野をはじめ、建築・土木等の幅広い分野の鋼構造 物に採用されている。近年では溶融亜鉛槽の大型化 によって、橋梁桁材・建築鉄骨の柱や梁材等の大型 鋼構造物にもその需要を拡大しつつある。¹⁾

しかし、大型鋼構造物を溶融亜鉛めっきする場合、 前述したような溶接部の割れや熱変形が事前に予 測できないという現状がある。既往の研究では、大 型鋼構造物の溶融亜鉛めっきによる割れや熱変形 に関する論文も数編ある。例えば、阿部等²⁾³⁾は非 分割箱桁や実物に近い I 桁モデルを用いて発生す る熱応力の変化や溶接部の割れ防止等に関する研 究を行っている。それらによると、薄板構造と厚板 構造ではめっき割れの原因およびメカニズムが異 なると述べており、この対策として、鋼材の改善で ある程度は防ぐことが可能であると述べている。 菊池等⁴⁾は鋼管の溶融亜鉛めっき時に発生する 熱変形や熱応力の変化について有限要素法を用い て計算し、試験結果とよく一致することを示してい る。また、鋼管を傾けて浸漬する場合の浸漬速度が 熱変形や熱応力に大きな影響を与えることを明ら かにしている。

日笠等⁵⁾は桁材の溶融亜鉛めっき時における変 形の主因であるフランジおよびウェブの平均熱応 力の計算手法を述べると共に、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 けると述べている。

しかし、どのような条件で熱変形や溶接部の割れ の現象が生じるかは、製品の寸法、形状、構造、溶 接方法、残留応力、浸漬速度、液体金属脆化等の種々 考えられる要因が、単独あるいは複合的に関連して 発生すると思われ、その発生を事前に予測すること は困難である。

しかし、具体的な溶融亜鉛めっき過程での溶接部 のめっき割れや熱変形などの事例の検討を積み重 ねていくことで、どのような条件で溶接部の割れや 熱変形が発生するかを明らかにできると思われる。

著者らは先の論文⁷⁾で最適化手法を用いて溶融 亜鉛浸漬中の鋼平板の温度分布を再現することに 成功した。今回の論文では、その発展的研究として、 板厚比の異なる鋼部材を溶接した場合や鋼部材溶 接部のスカラップ部などのように形状が湾曲する 場合に対しても最適化手法を用いて温度分布を再 現し、応力状態から溶接部のめっき割れのメカニズ ムをある程度解明することが可能となった。

すなわち本論文では、実際に現場でめっき割れや 熱変形が生じたことにより問題となっている代表 的な三つの事例を取り上げ解析的な検討を加える。 最初の事例は、大型鋼構造物と付属鋼材の溶接部に 発生しためっき割れの事例であり、2番目はH型鋼 溶接部のスカラップ部に生じためっき割れの事例 である。これらの事例と土木構造物の関連を示すと、 最初の事例は、鋼床版の縦補剛材やI型梁の縦横補 剛材等、板厚比の異なる鋼材を溶接した場合に起こ りうる事例である。次の事例は応力集中が起こりや すい溶接止端部等を形状変更によって応力緩和さ せる事例にあてはまると思われる。解析方法は、2 例ともめっき割れ近傍の局所モデルを作成し、一次 元熱伝導解析により温度分布を求め、その後3次元 有限要素法を用いて割れ近傍の熱応力を明らかに している。最後は、大型鋼I桁が溶融亜鉛めっき時 に形状全体にねじれ変形を起こした事例である。解 析方法は、汎用プログラムを用いた熱伝導---熱応力 連成解析を行っている。なお、阿部等³⁾日笠等¹¹⁾ では、橋梁部材の面外変形と局部ひずみの熱弾塑性 解析を行っているが、本研究では、著者のこれまで

の研究¹²から、熱応力の発生状態を定性的に把握 するだけであれば弾性解析でも十分な知見が得ら れると考え、熱応力分布の計算を弾性解析で行う。 また、鋼材や溶接部の残留応力は考慮していない。 各事例とも、実際の現場処理とは異なる方法で溶融 亜鉛めっきした場合の解析も行い、実用的に熱変形 や溶接部の割れを防止できる適切な処理方法につ いて検討している。

これらの局所的に割れの発生した二つの事例と 構造全体に熱変形が発生した事例を検討し、これら の発生メカニズムと対策を明らかにすることによ り、大型の土木鋼構造物に溶融亜鉛めっきを適用す ることが可能になると考えている。

2. 解析手法

2.1 局所的にめっき割れが発生した事例の場合

大型鋼構造物の溶接部やスカラップ部のように 局所的にめっき割れが発生した事例の場合は、めっ き割れ近傍の局所モデルを作成し、そのモデルの温 度分布を一次元熱伝導解析で求め、その温度分布を 用いて割れ近傍の熱応力を3次元有限要素法によ り計算する解析の流れとなっている。

既往の研究として、日笠等⁸⁾ は溶融亜鉛めっき 時の鋼桁の温度を算定するに際して、一次元非定常 熱伝導問題と二次元非定常熱伝導問題として扱っ ている。前者は一次元非定常微分方程式の級数解に より鋼桁任意点の平均温度を求め、それを節点温度 とし、平面弾性問題として有限要素法により熱応力 度を計算している。後者は温度と応力度の両者を有 限要素法により求めている。いずれの方法でも、鋼 桁を構成するフランジ、ウェブの板厚方向の温度は 一定と仮定している。

本研究の場合も同様に、溶融亜鉛面に到達後のモ デル上の各点の温度変化については阿部等²⁾³⁾お よび菊池等⁴⁾の論文で用いている一次元熱伝導方 程式から求める解を採用し、板面の両面からのみ加 熱される条件で温度分布を求めており、板厚方向に 変化する温度分布から非定常熱応力を準静的三次 元問題として解析している。

板の両面から加熱される場合の非定常一次元熱 伝導基礎方程式は式(1)で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad \cdots (1)$$

ここで、T は求める温度、t は時間、κ は熱拡散率、 z が板厚方向の座標である。また、

$$\kappa = \frac{\lambda}{c\rho} \qquad \qquad \cdots (2)$$

であり、比熱 c、密度 ρ および熱伝導率 λ は材料に

よって定まる定数である。

境界条件は、z=±B/2のとき次式のようになる。

$$\frac{\partial T}{\partial z} = H(T_0 - T) \qquad \cdots (3)$$

ただし、

$$H = \frac{\alpha}{\kappa c \rho} \qquad \cdots (4)$$

Hは鋼板外面と溶融亜鉛の境界における相対熱伝 達率、T₀は溶融亜鉛温度、Bは板厚、αは熱伝達係 数である。

t=0 で $T=T_1$ の初期条件で式(1)を解き、板の両 側面から熱伝達がある場合の板厚内の温度は式(5) のように求められる。

$$T(z,t) = (T_0 - T_1) \left\{ 1 - 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_n e^{-4\kappa \delta_n^2 t/B^2} \cos(2\delta_n z/B)}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \right\} + T_1$$

$$\cdots (5)$$

ここで、 T_1 は部材初期温度、 δn は式(6)より求める δ_1 , δ_2 , ・・の値である。

 $HB = 2\delta_n \tan \delta_n \qquad \cdots (6)$

上記で述べた熱伝導方程式に、一般的な鋼材の熱 拡散率 κ の値を使い、溶融亜鉛の流れによって変化 する熱伝達係数 α を数種類変化させて計算温度を 求め、実測結果と比較した。しかし、熱伝達係数 α の変化だけでは鋼平板が溶融亜鉛に浸漬した瞬間 から温度が上昇していく初期状態を再現すること ができなかった。そのため、著者等は、浸漬試験で 得られた鋼平板の温度履歴曲線に計算値が一致す るように熱拡散率 κ と熱伝達係数 α の最適値を求 める最適化手法⁷⁾を用いて温度分布を再現した。

また、阿部等²⁾および日笠等⁸⁾は、溶融亜鉛中のI桁の熱弾塑性有限要素解析を行い、ウェブ面に はらみ変形が生じることを明らかにしている。これ らの板厚は10~28mm 程度であり、板理論に基づい ている。しかし、今回の山形鋼の板厚は35mmもあ り、板厚がかなり厚い部材を有する立体モデルには 適用しにくい。そこで、本論文では有限要素として 図-1に示す20節点アイソパラメトリック立体要素 を用いている。このアイソパラメトリック立体要素



図-1 20節点アイソパラメトリック立体要素

を用いると任意形状の要素で計算できるため、溶接 部のような直線的でない境界を持つ場合でも四面 体要素を用いる場合に比べて少ない要素数で精度 の良い解を得ることが可能である。その際、ひずみ の評価は立体要素の節点の値の他に、ガウスの積分 点の値も用いて行っている。

2.2 構造全体に熱変形が発生した事例の場合

大型鋼 I 桁が溶融亜鉛めっき時に形状全体にね じれ変形を起こした事例であり、汎用構造解析プロ グラム (ANSYS)を用いた熱伝導解析と熱応力解析 の連成解析を行っている。鋼 I 桁に生じる熱変形を 求めるために、最初に三次元非定常熱伝導解析を行 う。時刻ごとに境界条件が変化するので、そのつど 熱伝達面を定義し、鋼 I 桁が溶融亜鉛に浸漬してい く時の温度分布を求めた。その得られた時刻歴の温 度分布を外力として、三次元有限要素法を用いた静 的熱応力解析を行った。このように三次元熱伝導解 析及び三次元熱応力解析の連成解析を行うことに よって、鋼 I 桁の温度分布及び熱応力分布を再現し た。

溶接部に対する溶融亜鉛浸漬時に発生するめっ き割れの検討

3.1 鋼平板と山形鋼の溶接部の割れ

図-2 のように鋼平板を溶接した山形鋼を浸漬速 度 0.17 (m/sec) で山形鋼背側を下にした V 字型の 浸漬方法で溶融亜鉛めっき処理したところ、山形鋼 と鋼平板の廻し溶接部で割れの現象が発生した。特 に山形鋼の背側寄りの廻し溶接部に割れが多く発 生している。



図-2 鋼平板と山形鋼の全体モデル

図-2 の矢印で示した割れ部分のうち、山形鋼背 側に発生した廻し溶接部の割れを拡大したものを 写真-1 に示す。鋼材の材質は山形鋼が SM490 材、 これに溶接されている鋼平板は SS400 材である。溶 接材料は SM490 材相当品を使用している。



写真-1 廻し溶接部付近の割れ



図-3 割れ発生時の浸漬方法(V字型浸漬)<図中右上は断面から見た図>

写真-1 の割れについて、浸漬方法の違いに着目 して検討を加える。図-2 中の矢印で示した割れの 発生した鋼平板と山形鋼の溶接部近傍をモデル化 し、2 種類の浸漬方法で温度分布と熱応力分布を比 較している。

鋼平板と山形鋼の廻し溶接部に割れの発生した V字型浸漬方法を図-3に示す。図-3のように山形 鋼背側を下にして全体が溶融亜鉛に浸漬する。

次に、割れの発生した溶接継手を有する山形鋼の V字型浸漬時に温度分布と熱応力分布を求める。割 れの発生した付近を中心に解析を行うため、温度分 布と熱応力分布を求める解析には、図-4 に示す山 形鋼の全体モデルから枠で囲んだ部分を抜き出し た局所モデル(以後部分解析モデルと表記)を用い る。

部分解析モデルは全要素数 284、総節点数 1756 となり、2.1 項で述べた手法により全節点温度を求 めている。割れ発生近傍の温度分布を把握するため に、割れ発生箇所を含む A-A'の断面の温度分布 および熱応力分布を示す。



図-4 全体モデルと部分解析モデル

(1) 温度分布の計算結果と考察

割れが発生した V 字型浸漬時の温度分布を再現 する。浸漬速度を実際に溶融亜鉛めっき処理した時 の浸漬速度 0.17(m/sec)とし、浸漬開始を 0 秒とし て 60 秒後までの温度分布を計算した。

図-4 に示す部分解析モデルにおける A-A'面の 温度分布のうち、図-5 は浸漬開始直後の1 秒後、 図-6 は部分解析モデル全体が溶融亜鉛に浸漬し、 表面と内部の温度差が大きくなる10 秒後、図-7 は モデル全体の温度が均一になりつつある60 秒後の 温度分布を示す。A-A'面の中央付近の囲み部は PL19 mm鋼材が溶接されている場所である。





図-6 10 秒後の温度分布 (A-A' 面)



図-7 60 秒後の温度分布 (A-A' 面)

この A-A'面の温度分布の中から、図中に示す割れの発生近傍の囲み部分を抜き出したグラフを図-8から図-10に示す。



図-10 60 秒後の割れ発生近傍の温度分布

図-5から図-10より、浸漬開始直後は表面の温度 が急激に上昇し、モデル全体に熱が供給されるもの の、溶接部及び山形鋼中心部では温度上昇が鈍いこ とが分かる。これに対し、溶接されている PL12 mm 鋼材は山形鋼と比較して板厚が薄いため温度上昇 が早い。これらの温度分布を基にして熱応力解析を 行い、解析モデルのA-A'面における熱応力分布を 計算する。

(2) 熱応力分布の計算結果と考察

前節で得られた温度分布を用いて図-4 に示す部 分解析モデルの熱応力分布を 3 次元有限要素法で 求めた。

割れ発生箇所を含むA-A'面の温度分布を示す図 -5から図-7に対応するように浸漬開始から1秒後、 10秒後、60秒後のσyの熱応力分布をそれぞれ図 -11から図-13に示す。



図-13 60 秒後の割れ近傍の σy の熱応力分布

これらの図では図-5から図-8と縦横の縮尺が異 なっているが、各節点の位置はそれぞれ対応してい るものである。なお、グラフは節点数43点分とガ ウスの積分点数72点分の熱応力値を入力して分布 図を作成している。値のない交点部分は直線近似で 計算されているため、近似的な分布図となっている が、熱応力の発生傾向は把握できるものである。 図より、浸漬開始直後から図中の座標 A (x, z=14.67, 41.21(単位:mm、以下同様))で、大き な圧縮応力が発生している。また、その近傍である 座標B(x, z=13.55, 41.21)と座標C(x, z=15.00, 38.50)でも比較的大きな圧縮応力が発生している。 しかし、座標Aの熱応力は、浸漬開始から 30 秒後 には引張応力へと変化していることが分かる。これ らの結果から割れが発生した近傍の 3 つの座標に おいて、大きな熱応力が作用していることが明らか となった。他の方向の応力については、紙面の都合 上省略するが、概ね同様の傾向が見られる。

(3) 異なる浸漬方法による温度分布と熱応力分布

割れの発生した V 字型浸漬に対して、溶融亜鉛浴 へ浸漬する際の山形鋼の向きが発生する熱応力に 影響を与えるかを比較検討するために、図-14 に示 すように山形鋼をく字型に浸漬させた場合の温度 分布および熱応力分布を求める。浸漬速度を V 字型 浸漬時と同様に 0.17 (m/sec)とし、浸漬開始を 0 秒 として 60 秒後までの温度分布を計算した。



図-14 く字型浸漬<図中右上は断面から見た図>

温度分布の計算結果より、温度上昇の傾向は V 字型浸漬時とほぼ同様である。V字型浸漬との違い は浸漬開始1秒後の温度分布が異なり、熱の伝わり やすいPL12 mm鋼材側から熱が伝わるため、割れ発 生近傍はV字型より温まりやすい傾向がある。また、 浸漬直後の1 秒後は亜鉛浴へ浸漬する向きが異な るため温度分布は異なるが、10 秒後には似たよう な温度分布になる。60 秒後には山形鋼内部の温度 分布が、V字型浸漬で150℃以下であるのに対し、 く字型浸漬では150℃以上200℃未満で表面との温 度差が少なく、発生する熱応力もV字型浸漬に比べ て小さくなると推測される。

計算で得られた温度分布を用いて図-4 に示す部 分解析モデルの熱応力分布を 3 次元有限要素法で 求めた。最大の引張応力が発生したのは、座標 A (x, z=235.33,41.21(単位:mm、以下同様))であっ た。また、その近傍である2つの座標B(x, z=236.45, 41.21)と座標C(x, z=235.00,38.50)でも比較 的大きな引張応力が発生しており、この傾向は V 字型浸漬時と共通している。しかし、最大の引張応 力値は V 字型浸漬時の値よりも小さい。

(4) まとめ

表 3-1 から表 3-3 は、熱応力分布図で大きな熱応 力が発生した 3 つの座標A、B、Cにおける σ_y の熱応力値を、浸漬方向別に比較した結果である。

表 3-1 σ_xの熱応力値(単位:N/cm²):座標A

浸漬方法	1 秒後	5 秒後	10 秒後	30 秒後	60 秒後
V 字型	-93500	-90900	-46800	+67100	+132000
く字型	-34800	-92700	-30100	+64300	+127000

浸漬方法	1 秒後	5 秒後	10 秒後	30 秒後	60 秒後
V 字型	-38800	-43300	-30100	+9550	+29500
く字型	-8790	-34600	-23900	+15500	+33300

表 3-3 σ_{*}の熱応力値(単位:N/cm²):座標C

	3				
浸漬方法	1 秒後	5 秒後	10 秒後	30 秒後	60 秒後
V 字型	-34200	-66600	-65100	-40000	-16800
く字型	-876	-70900	-70600	-43300	-19100

表 3-1 から表 3-3 より、割れ発生近傍の座標では、 浸漬方法に関係なく、浸漬開始直後から圧縮応力が 発生する。特に、座標A付近は、発生した圧縮応 力により塑性域に達していると考えられる。さらに 時間が経過すると圧縮応力が減少し、大きな引張応 カへと推移していく傾向が見られる。また、く字型 浸漬の熱応力値 σ_y は、V字型浸漬の熱応力値 σ_y と 比較して、同程度もしくは小さい傾向にある。これ は、浸漬方法の違いにより発生する温度分布の状態 が異なるためと考えられ、表面と溶接部内の温度差 が小さくなるためである。

浸漬方法別に熱応力値 σ_x、σ_y、σ_z を総合的に 比較してみると、溶接材料の強度は引張強度で 49000(N/cm²)相当であり,材料強度を 30%増し (63700N/cm²)と見た場合、V字型浸漬は材料強度 以上になることが多いが、く字型浸漬は材料強度境 界付近にある。したがって、く字型浸漬時も、溶接 や鋼材等の残留応力の状態によっては割れが発生

今回の熱応力解析には、溶接の残留応力の影響を 含んでいないが、割れ発生近傍で大きい熱応力が算 出されており、この熱応力に溶接の残留応力や鋼材 の残留応力等の影響も併せて割れが発生したもの と推測される。なお、これらのめっき時に発生する 熱応力の値から今後の課題として熱弾塑性解析の 適用が考えられる。

する可能性もあると考えられる。

本研究から、浸漬方向の違いが割れ防止の重要な

防止対策とは結論付けられないが、浸漬方向によっ て発生する熱応力を減少させる効果があることが 確認できた。したがって、鋼構造物の浸漬方向を考 慮することは、鋼材内部の温度差を小さくすること ができ、完全ではないが割れを防止することが可能 な有効な手段の一つであると思われる。

3.2 溶接 H 型鋼のスカラップ部のめっき割れ

熱伝導方程式を用いた事例解析の 2 例目は、図 -15 のような H 型鋼を斜めに溶接し、ウェブとフラ ンジ付け根付近に溶接用のスカラップを設けたと ころ、フランジの上下でスカラップの大きさが異な る形状となった。使用鋼材の材質は SS 材である。 このような H 型鋼を溶融亜鉛めっき処理したとこ ろ、小さいスカラップ形状のウェブ面に割れが発生 した。割れが発生した部分を拡大したものが写真-2 であり、丸囲みの部分に亀裂が入っていることが確 認できる。



図-15 溶接H型鋼の全体モデル



写真-2 小さいスカラップ部の割れ

このスカラップ部に発生した割れについて、設計 ディテール(スカラップ形状の大きさ)の違いに着 目して検討を加える。図-15に示す割れの発生した スカラップ部(以下、小スカラップ部)と発生のな いスカラップ部(以下、大スカラップ部)近傍をモ デル化し、大きさの2つの異なるスカラップ部での 温度分布と熱応力分布を比較している。 割れの発生した小スカラップ部を解析対象とし、 図-16 に示すような下フランジとウェブからなる 部分解析モデルを基にして図-17 に示す要素分割 を行い、温度分布および熱応力分布を求める。小ス カラップの部分解析モデルは、全要素数 624、総節 点数 3579 である。なお、本解析では部分解析モデ ルの全節点分の温度および熱応力の計算結果を得 ているが、割れの中心付近に着目しているため図 -17 のA-A'断面の温度分布および熱応力分布の結果 のみを示している。





図-17 小スカラップの部分解析モデル

(1) 温度分布の計算結果と考察

図-17 に示す部分解析モデルを実際の作業条件 で溶融亜鉛めっきした場合の温度分布を計算する。 温度分布の計算は解析モデルの浸漬開始から 30 秒 までとする。

図-18 は溶融亜鉛に浸漬する部分解析モデルの 動きを示している。



図-18 亜鉛浴へ浸漬する小スカラップ部の解析モ デル

図-18 の部分解析モデルの温度分布を浸漬開始 から 30 秒まで計算した結果のうち、割れ中心付近 の A-A'断面における浸漬開始 5 秒後と 10 秒後の グラフをそれぞれ図-19 と図-20 に示す。図中の縦 軸はモデルの高さ(mm)、横軸はモデルの長さ(mm) を示す。図-19 と図-20 より、浸漬開始から 5 秒ま では表面付近の温度が急激に上昇するが、ウェブと フランジの内部は表面に比べて温度は低い。10 秒 経過するとウェブ内部の温度は 200℃以上に上昇 するが、厚みのあるフランジ内部は 100℃~150℃ 程度であり、温度上昇が鈍いことが分かる。





図-20 10 秒後の温度分布 (A-A' 面)

(2) 熱応カ分布の計算結果と考察

熱伝導解析によって得られた小スカラップの部 分解析モデルの温度分布を用いて、熱応力分布を2 章で述べた3次元有限要素法で計算する。なお、解 析では全節点およびガウスの積分点の熱応力を求 めているが、めっき割れ発生近傍の熱応力分布を確 認するため、図-17に示すA-A'断面のみの熱応力 分布図となっている。

図-21 は浸漬開始から5 秒経過後、図-22 は浸漬 開始から 10 秒経過後のσy の熱応力分布を示して いる。図中の縦軸はモデルの高さ (mm)、横軸はモ デルの長さ (mm)を示す。

図-16 に示す解析対象モデルのウェブとフラン ジの付け根付近Aおよびウェブ内部Bの位置に着 目して σ y の熱応力分布の傾向を検討する。



図-21 5秒後のA-A'断面のσy熱応力分布



図-22 10 秒後の A-A' 断面の oy 熱応力分布

図より、浸漬開始5秒までにウェブとフランジの 付け根付近Aの表面からウェブ内部Bにかけて材 料の引張強度(40000N/cm²)を超える引張応力が発 生し、10秒経過後もウェブとフランジの付け根付 近Aの表面からウェブ内部Bにかけて材料の引張 強度(40000N/cm²)を超える引張応力が継続して発 生していることが分かる。表 3-4 に図のAおよび Bの5秒と10秒経過後の熱応力値を示した。他の 方向の応力については、紙面の都合上省略するが、 概ね同様の傾向が見られる。

なお、図-15 に示すように小スカラップ部の反対 側に設けられている大スカラップ部には割れは発 生していない。この事実から、スカラップの形状の 違いにより温度分布および熱応力分布の計算結果 が変わると考えられるため、次節において大スカラ ップ部についても同様に解析対象モデルを作成し、 温度分布と熱応力分布を計算し、小スカラップ部の 結果と比較検討を行う。

表 3-4 時刻歴の熱応力(小スカラップ部)

浸漬時間 (sec)	位置	Y 方向熱応力(N/cm ²)
5	А	522000
	В	96450
10	А	495000
	В	146120

(3) 異なるスカラップ形状の温度分布と熱応カ分 布

割れの発生しなかった大スカラップ部を解析対 象とし、上フランジとウェブからなる部分解析モデ ルを基にして図-23 に示す要素分割を行い、温度分 布および熱応力分布を求める。大スカラップの部分 解析モデルは、全要素数 612、総節点数 3539 であ る。なお、本解析では部分解析モデルの全節点分の 温度および熱応力の計算結果を得ているが、図-23 の A-A'断面の温度分布および熱応力分布の結果で 比較を行う。



図-23 大スカラップの部分解析モデル

温度分布の計算結果より、浸漬開始から5秒経過後 までは表面付近の温度が急激に上昇し、ウェブとフ ランジの内部の温度は表面に比べて低い傾向は小 スカラップの場合と同様である。しかし、10秒経 過後の温度分布はウェブ内部の約半分が250℃以 上300℃未満の高温状態になる。





図-25 10 秒後の A-A' 断面の oy の熱応力分布

この得られた大スカラップの部分解析モデルの 温度分布を用いて、熱応力分布を3次元有限要素法 で計算する。

図-24 は浸漬開始から 5 秒経過後、図-25 は浸漬 開始から 10 秒経過後の σ y の熱応力分布を示して いる。縦軸、横軸は、小スカラップの場合と同様で ある。小スカラップと同様に、ウェブとフランジの 付け根付近 C およびウェブ内部 D の位置に着目し て σ y の熱応力分布の傾向を確認すると、小スカラ ップ部の傾向と異なり、ウェブとフランジの付け根 付近 C に材料の引張強度 (40000N/cm²)を超える引 張応力は発生しない。また、浸漬開始 10 秒後には ウェブ全体の引張応力が小さくなる傾向が見受け られる。表 3-5 に C および D の 5 秒と 10 秒経過後 の熱応力値を示した。

表 3-5 時刻歴の熱応力(大スカラップ部)

浸漬時間 (sec)	位置	Y 方向熱応力(N/cm²)
5	С	18910
	D	22380
10	С	22330
	D	16280

(4) まとめ

割れの発生した小スカラップの場合、表 3-4 に示 すように、浸漬開始5秒までにウェブとフランジの 付け根付近Aの表面からウェブ内部Bにかけて材 料の引張強度(40000N/cm²)を超える引張応力が発 生し、割れに発展する初期段階の亀裂発生が生じ、 10秒経過後もAからBにかけて材料の引張強度を 超える引張応力が継続して発生するため、さらに割 れを進展させるものと考えられる。すなわち、小ス カラップ部では発生する熱応力が、ウェブとフラン ジの付け根付近Aに集中するため、その部分から 亀裂が生じ、AからBに向かって亀裂が進行しや すい構造と推測される。これに対し、表 3-5 に示す ように、大スカラップの場合、ウェブとフランジの 付け根付近CとDに材料の引張強度(40000N/cm²) を超えて亀裂を発生させる引張応力は発生せず、10 秒経過後にはウェブ全体の引張応力が小さくなる ため、割れが生じないと考えられる。

本解析は鋼材や溶接部の残留応力は考慮してお らず、弾性解析であるため塑性域到達後も加工硬化 による応力再配分が行われていないが、その結果は 実際の割れ発生のメカニズムにほぼ近いものと思 われる。

この解析結果より、スカラップ部を大きくするこ とにより、発生する熱応力を拡散させ、割れの発生 を抑えることが可能であると考えられる。

4. 熱変形の事例解析

4.1 鋼 | 桁のねじれ変形

大型鋼 I 桁を溶融亜鉛に浸漬させると写真-2 に 示すように構造全体にねじれ変形が生じることが 知られている。本章では、亜鉛浴面への鋼 I 桁の浸 漬方法を変えて数値解析を行い、どのような条件で ねじれ変形が発生するのかを検討する。そこで溶融 亜鉛浸漬時の鋼 I 桁の温度分布と熱応力分布を求 めるため、3 次元有限要素法による熱伝導解析及び、 熱応力解析の連成解析を採用している。



写真-2 鋼 I 桁のねじれ変形

図-26 は、実際にねじれ変形が生じた鋼 I 桁をモ デル化したものである。寸法は図中に示す通りであ り、補剛材は省略した。構造解析を行うにあたり、 拘束条件として鋼 I 桁を吊ってある状態を再現す るために上フランジ上端の両端 2 点にバネ要素を 用いた。全要素数 19240,総節点数 29475 である。 図-27 に亜鉛浴面への浸漬方法を示す。case I は、 亜鉛浴面に水平になるように浸漬させた場合であ り、case II は、z 方向へ 20° 傾けて浸漬させた場合 、case II は、z 方向へ 5° 傾けて浸漬させた場合、case IVは、z 方向へ 20°、x 方向へ 5° 傾けて浸漬させ た場合である。4 つの浸漬方法の違いで鋼 I 桁の熱 変形がどのように変化するかを比較検討する。



図-26 鋼 I 桁のモデル図



(1) case I の場合の温度分布と熱変形

浸漬速度を 0.008(m/sec)とし、浸漬開始を 0 秒 として500 秒後までの温度分布を3次元非定常熱伝 導解析によって求めた。温度分布図は省略するが、 温度分布は下端部分から浸漬する順に温度が上が っている。これらの各時刻で求めた温度分布から 3 次元非線形構造解析により熱応力分布、熱変形を求 めたが、溶融亜鉛に浸漬している部分が膨張してい るだけでねじれ変形は生じなかった。

(2) case IIの場合の温度分布と熱変形

浸漬速度を 0.008(m/sec)とし、浸漬開始を 0 秒 として 500 秒後までの温度分布を求めた。始めは角 度をつけて浸漬させたが、150 秒後以降は、実際の 溶融亜鉛めっきの施工方法に近づけるため亜鉛浴 面と水平になるように浸漬させている。浸漬開始か ら 30 秒後の温度分布を図-28 に示した。図より z 方向に 20°の角度をつけて浸漬させた場合、ウェ ブの浸漬した部分と浸漬していない部分で温度差



図-28 浸漬時間 30 秒後の温度分布(°C)

が大きくなっているのが分かる。これはウェブの板 厚が薄いためにフランジよりも温度の上昇が大き くなったためと考えられる。



(3) 浸漬時間 150 秒後の x 方向の熱変形(m) (変形倍率 50)

図-29 caseⅡのx方向の熱変形分布図

本ケースも各時刻での温度分布を用いて熱変形 及び熱応力分布を求めた。図-29 に、30 秒後、90 秒後、150 秒後の熱変形分布図を示す。色の違いは x 方向の変形量の違いを表している。図-29(1)より、 ウェブが矢印の方向に変形している。これは浸漬し た部分が急激に膨張し圧縮応力が生じてウェブが 変形してしまったと考えられる。表 4-1 より、図-30 のA、B、C点において大きな圧縮応力が働いて いる。この圧縮応力によって鋼 I 桁が塑性化し、残 留変形が残る可能性も考えられる。しかし、鋼 I 桁全体のねじれ変形というより、局所的な変形が起 き、座屈変形をおこしているようにも考えられる。



-.316E+09 -.199E+09 -.141E+09 -.238E+08 .347E+08 .932E+08 .210E+09 .210E+09

図-30 浸漬時間 30 秒後の y 方向の熱応力分布 (N/m²) (変形倍率 50)

表 4-1	時刻歴の最大熱応力
-------	-----------

浸漬 時間 (sec)	位 置	Y方向最大引 張応力×10 ⁸ (N/m ²)	位 置	Y方向最大圧 縮応力×10 ⁸ (N/m ²)
30	а	2.10	А	-3.16
90	b	2.43	В	-6.20
150	с	2. 37	С	-6. 53

(3) case IIIの場合の温度分布と熱変形

本ケースも浸漬速度を 0.008(m/sec)とし、浸漬 開始を0秒として500秒後までの温度分布を求めた。 この場合も始めは左側に角度をつけて浸漬させた が、120秒後以降は、亜鉛浴面と水平になるように 角度調整している。浸漬開始から、10秒後の温度 分布を図-31に示した。図-31より、下フランジの 左側部分が先に温められるので、温度が高くなって いるのがわかる。またウェブの左側部分の温度も同 様に高くなっている。



^{14.886} 40.954 ^{67.022} 93.09 ^{119.158} 145.225 ^{171.293} 197.361 ^{223.429} 249.497 図-31 浸漬時間 10 秒後の温度分布(℃) (図の右上は拡大図である)



図-32の熱変形図は、30秒後、90秒後、150秒後 の変形状態を示している。図-32より、鋼 I 桁の前 側と奥側では右側に変位しているだけで、ねじれ変 形は起こっていない。鋼 I 桁の下フランジ左側が急 激に温められ、膨張したことによって、反りが生じ たと考えられる。本ケースの場合 case II と比べて x 方向の変位が大きくなっている。これは z 方向に 20° 傾けて浸漬させた case II の場合は鋼 I 桁の一

(3) 浸漬時間 150 秒後の x 方向の熱変形(m)(変形倍率 50)

-.002399 -.001194 .106E-04 .001215 .00242

図-33 caseIVのx方向の熱変形分布図

これまでのケースと同様に各時刻の温度分布を 用いて熱変形及び熱応力分布を求めた。図-33(1) は浸漬開始から30秒後の熱変形図である。図より、 下フランジの左側が先に溶融亜鉛に浸漬するため その部分が急激に膨張することにより右側に変位 し、ねじれ変形が生じているのが分かる。また、図 -34 に示すように caseⅡの場合と同様にウェブに 働く応力が大きくなるので、ウェブが矢印の方向に 変形しているのがわかる。y 方向の最大圧縮応力と 最大引張応力の傾向も case Ⅱの場合と同じ傾向に なったので、塑性化する可能性が考えられる。表 4-3 は各時刻で x 方向の最大応力を示している。時 間がたつにつれ、x方向の最大引張応力の値が大き くなっているのが分かる。本解析では150秒後に亜 鉛浴面と水平になるように浸漬させているが、その まま傾けて浸漬させた場合は最大引張応力の値が 大きくなり塑性化する可能性もでてくる。図-33の 各時刻の熱変形図を見ると、時間がたつにつれ変位 が増えていくのが分かる。図-33(3)の150秒後の熱 変形図を見ると、x 方向の最大変位が約 3mm 生じて おり、構造半分がねじれている。

浸漬 時間 (s)	位置	X 方向最大引張 応力×10 ⁸ (N/m ²)	位置	X 方向最大圧縮 応力×10 ⁸ (N/m ²)		
30	а	1.70	А	-2.79		
90	b	2.17	В	-3.09		
150	с	2. 16	С	-3.10		

表 4-3 時刻歴の最大熱応力



図-34 浸漬時間 30 秒後の x 方向の熱応力分布 (N/m²) (変形倍率 50) (図の右上は左からみた図である)

(5) まとめ

鋼 I 桁を z 方向へ傾けて浸漬させた case II の場 合、鋼 I 桁の先端部分が急激に温められ、膨張する ことによってウェブに圧縮応力が働き、そのためウ ェブが変形することにより、ねじれ変形が生じると

考えられる。その変形は局部的であり、構造物全体 の変形には達していないようである。鋼 I 桁を x 方 向へ傾けて浸漬させた場合は、熱変形は大きく構造 全体が変形している。しかし、鋼I桁の中心から見 て、x軸に対称な変形となり、ねじれ変形は生じな い。最後にz方向及び、x方向に傾けて浸漬させた caseⅣの場合、先に浸漬した部分が温められ、膨張 することによってねじれ変形を起こし、その変形の 影響は、浸漬が進むと共に、構造物のかなりの部分 に達している。この浸漬方法が、事例を一番再現し ているようである。一般的には、工場での浸漬方法 は case Ⅱに近い方法をとっている。しかし、鋼 I 桁を浸漬する際に亜鉛面の浮力の影響などで、case IVに近い浸漬方法になっている可能性が疑われる。 したがって、鋼 I 桁を亜鉛浴面と水平になるように 浸漬させること(case I)ができれば、ねじれ変形は 生じないと考えられる。しかし、本解析では弾性解 析を行っているため、構造物全体が浸漬し、温度差 がなくなるにつれて熱変形は元に戻ってしまう。そ のため熱弾塑性解析を行う必要があり、今後の課題 としたい。

5. おわりに

本論文では、局所的に割れの発生した2つの事例 については一次元熱伝導解析を用いた手法、構造全 体に発生した熱変形の事例は有限要素法を用いた 三次元熱伝導解析による手法によって解析モデル の温度分布を計算した上で熱応力分布を推計して いる。得られた結果をそれぞれの事例ごとにまとめ ると以下のようになる。

(1) 鋼平板と山形鋼の廻し溶接部の割れについて

・板厚が大きいため温度上昇が遅い低温の山形鋼と、 板厚が小さいため温度上昇が早い高温の鋼平板と の間に挟まる溶接部で温度差が発生し、大きな熱応 力が発生した。この熱応力に溶接の残留応力や鋼材 の残留応力等の影響も併せて割れが発生したもの と推測される。

・異なる浸漬方法との比較では、浸漬させる方向に よって割れを回避できる可能性が示された。

(2) 溶接 H 型鋼のスカラップ部の割れについて

・溶融亜鉛浸漬時に発生する熱応力がウェブとフランジの付け根付近に応力集中するような形で亀裂を発生させるていることが分かった。スカラップ形状が小さくなると熱応力がより集中しやすくなると思われる。

・スカラップ形状が大きくなると発生する熱応力が
 スカラップの曲線部に沿って拡散しやすくなる傾向が見られた。

めっき割れの原因の一つと考えられる応力集中

については、西田⁹⁾が応力集中は構造物の形状の 湾曲あるいは不連続性など、形状の一様性が失われ ることが原因になると述べている。この形状の不連 続性はスカラップの形状だけでなく、溶接止端部も 該当すると考えられる。割れのないスカラップ部と の比較では、熱応力が拡散していることから、スカ ラップ部の大きさによって熱応力を分散し、割れを 防ぐことが可能と考えられる。

(3) 鋼 | 桁のねじれ変形について

・橋軸方向に傾けて浸漬させた場合、及び橋軸方向と橋軸直角方向に同時に傾けて浸漬させた場合 にねじれ変形が生じることが分かった。

・橋軸直角方向に傾けた場合、他の2つの事例よ り、変形が大きくでているので、橋軸方向と橋軸 直角方向に傾けて浸漬させる場合には橋軸直角方 向の角度がより大きくなるとねじれ変形も大きく なることが考えられる。

・鋼 I 桁のねじれ変形を防ぐためには、亜鉛浴面 に限りなく水平になるように浸漬させることが重 要と思われる。

(4) まとめ

これらの三つの事例から、溶融亜鉛めっきを大型の土木鋼構造物に適用するにあたり、事前に次 の対策をとることが考えられる。

・製品内の温度差を抑えるために、全体の温度差 が均一になるような浸漬方法を採用する。

・板厚比が大きいと薄板の温度が急激に上昇し温 度差を生じるため、溶接する部材同士の板厚比を 抑える。

・溶接止端部の形状を連続的にし、止端部の角度
 急変による応力集中が起こりにくいように改良する。

・応力集中を避ける設計ディテールを検討する。

・熱変形ができるだけ小さくなるような浸漬角度 を採用する。

これらの対策を正しく選択することにより、め っき割れやねじれ変形を抑えることが可能である と考えられる。今回の熱応力解析では弾性解析を 採用しているため、今後の課題として熱弾塑性解 析を用いて、めっき割れやねじれ変形のメカニズ ムをさらに解明したいと考えている。 【参考文献】

- 1) 日本鋼構造協会編:建築用溶融亜鉛めっき構造 物の手引き,2002
- 阿部英彦,紫桃孝一郎,家澤徹,加藤昭夫,栗飯 原周二:非分割箱桁橋の亜鉛めっき割れ防止に 関する基礎的研究,構造工学論文集,vol.42A, pp.955-963,1996
- 阿部英彦,家澤徹,金沢正午,加藤昭夫,栗飯原 周二:橋梁の亜鉛めっき割れ防止に関する熱弾 塑性解析と鋼材の基礎的研究,構造工学論文集, vol. 43A, pp. 1161-1170, 1997
- 4) 菊池昌利,家澤徹:溶融亜鉛めっき時における 鋼管の変形挙動,材料,第30巻,pp.322-329, 1981
- 5) 日笠隆司,木村佳英,加東貴司: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 部年次学術講演会, I-19, 1992
- 今野貴史, 岩崎正二, 出戸秀明, 宮本裕: 溶融亜 鉛浸漬中に発生する鋼平板の熱ひずみと温度 変化, 構造工学論文集, vol. 52A, pp. 853-864 2006
- 7) 今野貴史, 岩崎正二, 出戸秀明, 宮本裕, 二上輝
 彦: 最適化手法を用いた溶融亜鉛浸漬中の鋼平
 板の温度分布推計, 構造工学論文集, vol. 53A,
 pp. 926-935, 2007
- 8) 日笠隆司:溶融亜鉛めっき桁に関する基礎的研究(その1),第40回土木学会年次学術講演会, I-45,1985
- 9) 西田正孝:応力集中, pp. 4-9, 1967
- 10)(株) 巴コーポレーション,(株) 巴技研:解説・ 溶融亜鉛めっき大型鋼構造物のめっき割れ現 象とその防止法,2001
- 日笠隆司,上田幸雄,村上英一: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,構造工学論文集,vol. 39A, pp. 853-864, 1993
- 12) 今野貴史, 岩崎正二, 出戸秀明, 宮本裕, 青田宗 之: 溶融亜鉛めっき中に生じる鋼構造物の熱応 力について, 土木学会東北支部年次講演会概要 集, I-47, pp. 96-97, 2000

(2008年9月18日受付)