

熱・損傷・脆化の連成を考慮した有限要素法による 溶融亜鉛めっき中の鋼構造部材の損傷解析

Damage Analysis of Steel Structural Members under Hot-Dip Galvanization by Finite Element
Method Considering Thermo-Damage-Embrittlement Coupling

高 垣 昌 和*・都 井 裕*

Masakazu TAKAGAKI and Yutaka TOI

1. は じ め に

鋼構造物の耐腐食性を高める手段のひとつにめっき加工がある。その加工法の中に溶融亜鉛めっきに浸漬する方法があるが、この方法を使用した場合、高温の液体金属中に部材を漬けるため構造物の形状によっては、熱負荷による熱ひずみが生じる。さらに脆化金属である亜鉛による液体金属脆化が生じ、部材の応力集中部にはこれらの負荷の重畳によりき裂が生じる事例が報告されている。そこで、液体金属脆化による鋼構造物の損傷について評価を行う必要がある。しかしながらめっき時のような環境下における力学的データを実験により正確に測定することが困難なうえ、さまざまな条件での実験を繰り返し行うことは、多大な労力を要する。したがって、脆化などによる強度劣化と損傷を考慮した応力解析と熱伝導解析の連成数値シミュレーションは、損傷を予測する力学的データを得るために必要不可欠であり、研究課題として重要なものと考えられる。

本研究では、著者ら¹⁾によって開発した熱・損傷・脆化の相互作用を考慮した連成解析手法を適用して溶融亜鉛めっき時の鋼構造物の損傷解析を実施するため、菊池ら²⁾のめっき中での単軸引張試験の実験結果より解析に必要な材料定数を決定した。さらにこれらの材料定数を用いて連成解析を行い、得られた結果について評価を行った。ここで、使用した解析モデルは実際に頻繁にき裂が発生することが報告されている鋼構造部材である。

2. 連成解析手法

2.1 熱伝導解析

損傷を受けた部材では、損傷により生じた空間（ボイド、微小き裂等）のために熱の伝わり方が健全材と比べ小さくなる。これにより損傷部と非損傷部では温度分布が異なり、

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

熱応力が発生する要因となると考えられる。そこで、このような状態を表現するため、Skrzypekは熱伝導率に損傷力学の概念を導入し、(1)式のような損傷を考慮した熱伝導率 λ^{eq} を提案している³⁾。

$$\lambda^{eq} = \lambda_0(1-D) + d\tilde{\lambda}^{rad} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 λ_0 は健全材における熱伝導率、 D は等方性損傷変数、 $d\tilde{\lambda}^{rad}$ は(2)式のような熱輻射の影響項である。

$$d\tilde{\lambda}^{rad} = \sigma_b \varepsilon_0 \left(4DT^3 + \frac{\partial D}{\partial T} \frac{\partial X}{\partial X} T^4 \right) dX \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ_b はボルツマン定数、 ε_0 は放射率、 T は温度である。本解析では(1)式の熱伝導率を熱伝導方程式に導入した。有限要素法は、ガラーキン法を適用し、時間積分の解法として中心差分法を適用した。

2.2 液体金属脆化による影響

本研究の解析対象である液体金属による脆化は、部材の粒界内における液体金属濃度をパラメータとして用い、損傷が発生する基準である損傷発生限界ひずみ ε_{pd} 、損傷進展速度 \dot{D} および損傷変数臨界値 D_{CR} を変化させることにより表現できると考えた。

そこで、粒界内の液体金属濃度比 C_f を用いて各損傷パラメータを(3)～(5)式のように拡張した。

$$\varepsilon_{pd} = (1-Z_1 C_f) \varepsilon_{pd0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{s(1-Z_2 C_f)} \right)^s \dot{p} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$D_{CR} = (1-Z_3 C_f) D_{CR0} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $C_f = C/C_0$ であり、 C は粒界内の液体金属濃度、

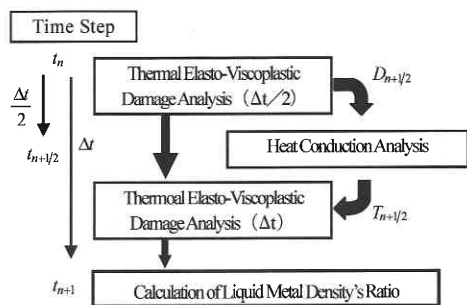


Fig. 1 Computational algorithm

C_0 は飽和液体金属濃度である。また、 ε_{pd0} は脆化前の損傷発生限界ひずみ、 γ はエネルギー解放率、 \dot{p} は相当塑性ひずみ速度、 D_{CR0} は脆化前の損傷変数臨界値である。 S, s, Z_1, Z_2, Z_3 は材料定数である。一方、 C_f は粒界拡散の概念による半無限平板に対する拡散方程式から (6) 式のように示される⁴⁾。

$$C_f = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{G_f t}} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$G_f = G_{f0}(1-D) \left(1 + \beta \frac{\sigma_l}{\sigma_u} \right) \cdot \exp \left(-\frac{Q_e}{R_g T} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 x は部材表面からの深さ方向距離、 t は液体金属の接触時間、 G_f は拡散係数であるが、武田らにより液体金属脆化は応力に依存すると報告⁵⁾ されている。さらに、著者らは損傷にも依存すると考え、(7) 式に示すような温度、応力および損傷の影響を考慮した形に拡張した。また、 G_{f0} は初期拡散係数、 σ_l は最大主応力、 σ_u は引張強度、 Q_e は活性化エネルギー、 R_g はガス定数 ($= 8.31 \text{ J/molK}$)、 T は絶対温度、 β は材料定数である。

2.3 連成解析のアルゴリズム

著者の一人らにより提案された熱弾粘塑性損傷解析法⁶⁾、損傷を考慮した熱伝導解析法³⁾ ならびに亜鉛脆化の効果を連成するためのアルゴリズムを検討した。熱弾粘塑性損傷解析に用いた材料定数に温度依存性を有するものがあるため、時間ステップ内の温度変化を考慮する必要があった。適用した損傷応力解析法は、時間積分法に中心差分法を用いていたため、図1のように損傷応力解析の1/2ステップを計算した時点で熱伝導解析を行うことにより温度依存性のあるパラメータを更新することができる。また、熱伝導解析時には1/2ステップ時において算出した損傷変数を用いている。次に、熱伝導解析によって得られた新しい温度 $T_{n+1/2}$ を用い、中心差分法における1ステップを計算する。各ステップの最後に液体金属の粒界濃度比 C_f を算出する。

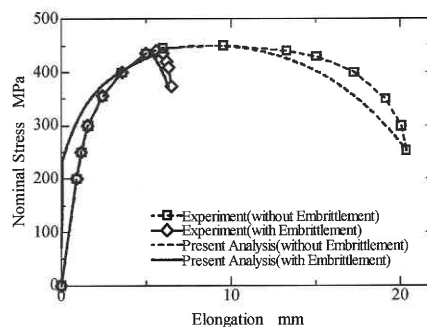


Fig. 2 Nominal Stress-Elongation Curve

3. 液体金属脆化割れ解析

3.1 亜鉛めっき中の単軸引張試験に対する解析

前項に示した (3) ~ (5), (7) 式にある材料定数を決定するため、菊池ら²⁾ によって実施された溶融亜鉛めっき中の単軸引張の実験に対する熱弾粘塑性損傷連成解析を行った。

解析は、実験と同一条件で実施してそれぞれの応力-伸び線図を求めて、引張強度、破断応力および伸びが一致するように材料定数を決定した。ここで、活性化エネルギーは、鋼材中の亜鉛原子に対するものである。

3.2 材料定数の決定

はじめに溶融亜鉛が非接触の場合の実験結果より公称応力-伸び線図が求められており、これと一致する解析結果が得られるように損傷解析に関する材料定数を ε_{pd0} , S , s , D_{CR0} を決定した。次に脆化に関するパラメータ $Z_1 \sim Z_3$, β を決定するため、同定した損傷解析のための材料定数を用いて熱・損傷・脆化の連成解析を行った。得られた解析結果と亜鉛脆化が生じる場合の実験結果より、先と同様にそれぞれの公称応力-伸び線図が一致するように材料定数を定めた⁷⁾。なお、決定された材料定数を適用して行った解析より得られた応力-伸び線図は、図2のようになっている。これをみると引張強度、破断応力および伸びが一致するようにパラメータを決定したため、剛性が低下している部分で実験と解析の結果が異なっている。しかしながら全般的には十分に応力-変位挙動を捉えていると考えられる。

4. 鋼構造物の脆化割れ解析

4.1 解析モデルおよび解析条件

これまでに述べた手法ならびに実験結果より同定した材料定数を用いて、亜鉛脆化を考慮した熱弾粘塑性損傷解析と熱伝導解析の連成解析を実施した。解析モデルは図3(a)に示すようなH型鋼 ($800 \times 300 \times 16 \times 28 \text{ mm}$) と箱型

鋼 (650 × 650 × 60 mm) を接合した形状であるが、この構造物はめっき時に頻繁に割れが生じるもののひとつであると言われている。図中 A 部にはスカラップ (半径 35 mm) が施されている。メッシュモデルは図 3(b) のような 1/2 モデルを使用する。本解析では、スカラップ付きとそうでないモデルの 2 種類の解析を実施した。解析で適用した有限要素は、8 節点三次元アイソパラメトリック六面体要素である。また、解析モデルは要素数 4344、節点数 5705 であり、時間ステップは 0.3 秒で計算を行った。数値積分はガウス積分法を適用し、損傷変数や粒界亜鉛濃度等の物理量はすべて積分点において評価を行っている。解析モデルの材質は、SM 490 鋼である。計算は、構造物の初期温度を 50°C として 450°C の溶融亜鉛中に 5 分間浸漬した場合を想定して実施した。

解析結果の評価点としては、実際の構造物において高い頻度でき裂が生じるとされるスカラップ部に注目した。スカラップなしの解析においてもこの点の近傍の積分点を調べた。また、発生する熱応力の要因となる温度分布を調べるために図 3 にある積分点①～⑤点 (②点: 板厚方向中心部) の温度履歴についても評価した。

4.2 解析結果および考察

図 3-①点において相当応力が最大となる時刻 30 秒の時点の相当応力コンター図を図 4 に示す。応力が高い値を示している位置は、実際のめっき時にき裂が生じやすいとされる付近であり、解析結果は、定性的に妥当な応力状態と

推察される。

図 5 は、スカラップ付きのモデルを用いて解析を行ったときの温度時間履歴である。H 型鋼のウェブのフランジ寄り (①点) と中央 (③点) の差をみると初期の段階で顕著な温度差が見られ、100 秒あたりから徐々に均一に向かっている。また、ウェブ (①点) とフランジ (④点) においても温度差が見られ、これによる熱応力が発生して損傷発生の要因となっているものと考えられる。

次に積分点①点においてき裂の発生、成長に寄与したと考えられる Y、Z 軸方向の応力-ひずみ挙動を図 6、図 7 に示した。ここで、図中の数値は解析における時刻歴 (秒) を表している。なお、0 秒において応力が生じているが、これは初期条件として溶接による残留応力を考慮しているためである⁷⁾。各応力-ひずみ成分ともスカラップ付きの

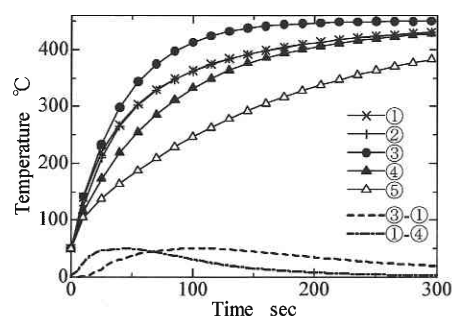


Fig. 5 Time History of Temperature

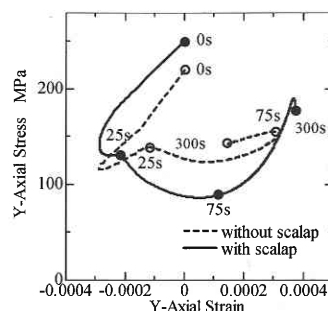


Fig. 6 Stress-Strain Behaviour (Y-Axial)

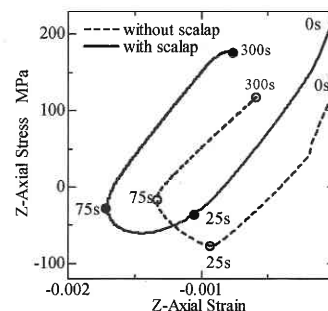


Fig. 7 Stress-Strain Behaviour (Z-Axial)

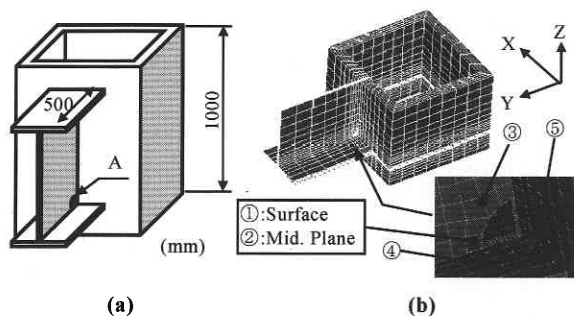


Fig. 3 Analysis model

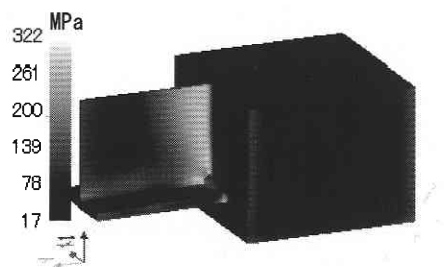


Fig. 4 Equivalent Stress Contour (with scallop)

研 究 速 報

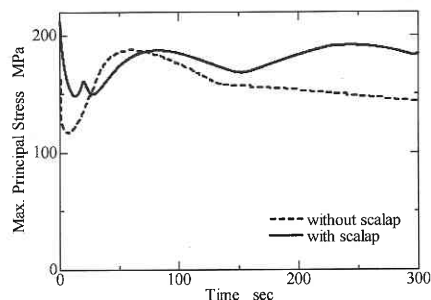


Fig. 8 Time History of Max. Principal Stress

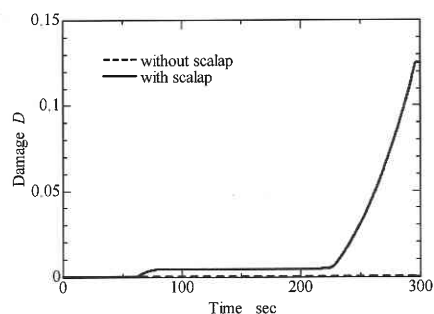


Fig. 9 Time History of Damage

解析結果の方が大きく変化していることがわかる。これは、スカラップを設けることにより応力集中部ができたためと考えられる。

また、スカラップなしの解析結果をみると、X 軸、Y 軸方向の応力-ひずみ曲線より部材の温度が均一になる以前に除荷していることがわかる。一方、スカラップ付きの結果をみると、各成分とも解析終了時点において剛性が低下している。特に Y 軸方向の応力変化が顕著である。これは、解析において損傷が発生したことにより応力が緩和したものと考えられる。

次に最大主応力の時間履歴を図 8 に示す。スカラップ付きの結果をみると、80 秒付近で最大となり、一旦応力値が減少するが、150 秒あたりから再度増加している。これに対し、スカラップなしでは、60 秒付近で最大となったあとは単調減少となっている。

スカラップ付きのモデルを用い場合には、有意な損傷変数が算出されているが、スカラップ無しのモデルではごくわずかな増加しか見られない。そこで、図 9 には損傷変数の時間履歴を示した。これをみるとスカラップ付きのモデルでは 70 秒あたりでわずかではあるが、損傷変数が増加している。一度、損傷の進展が止まり 220 秒あたりで再度損傷が進展し始める。この際には、急激な損傷の進展が見られる。しかし、295 秒経過後、再度進展が停留した。一方、スカラップ無しのモデルでは、70 秒あたりでわずか

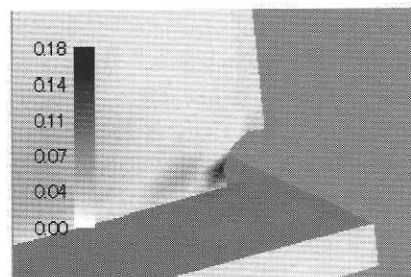


Fig. 10 Damage Distribution around Scalap

に増加するが、以後、進展はみられない。図 8 の最大主応力の時間履歴をみると、損傷が進展し始める時刻と最大主応力のピークとほぼ一致する。この傾向より最大主応力は、損傷進展の支配的因子の一つと考えられる。また、最大主応力のピーク時の応力値がほぼ同程度にもかかわらず、損傷進展が大きく異なるのは時間経過とともに亜鉛脆化が進行したためと考えられる。図 10 にはスカラップ周辺の損傷の分布を示した。これより、実際の構造部材に生じるき裂と同位置に損傷変数の最大となる点があり、解析結果は、十分に実際の現象を捉えていると考えられる。

5. 結 論

本研究では溶融亜鉛めっき時に生じる損傷を評価するため、損傷力学に基づいた熱弾粘塑性損傷解析、損傷の影響を考慮した熱伝導解析および粒界拡散侵入説に基づいた液体金属脆化の連成解析手法の開発を行った。

実際に割れが発生する確率の高い鋼構造部材のモデルを用いて解析を実施した。その結果、実際の現象と比較し妥当な解が得られたと考える。

本解析手法により亜鉛脆化割れなど実際の構造体では実験などが困難な現象の力学的挙動の検討が可能となるものとする。現段階では、厳密ではないものの構造の違い、また、残留応力など構造部材の初期状態の違いにより損傷の発生の可能性を判別する手法として適用可能と考える。

(2003 年 3 月 5 日受理)

参 考 文 献

- 1) 高垣, 都井, 機論 (A) (投稿中).
- 2) 菊池, 材料, 29, 317, 75-80, (1980).
- 3) Skrzypek, J., Ganczarski, A., J. of Thermal Stresses, 21, 3, 205-231, (1998).
- 4) 黒木ら, 金属の強度と破壊, 119-127, (1991).
- 5) 武田ら, 鉄と鋼, 69, 13, S-1504, (1983).
- 6) Toi Y., Lee J.M., Int. J. of Damage Mechanics, 11, 2, 171-185, (2002).
- 7) 高垣, 都井, 機論 (A) (投稿中).