鋼構造部材に対する熱・損傷・脆化の連成を考慮した 有限要素解析手法*

高 垣 昌 和^{*1}, 都 井 裕^{*2}

Finite Element Analysis Considering Thermo-Damage-Embrittlement Coupling for Steel Structural Members

Masakazu TAKAGAKI^{*3} and Yutaka TOI^{*3} Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

The 3-D finite element analysis program considering the coupling of heat conduction, damage evolution and liquid metal embrittlement has been developed in order to solve thermal damage and liquid metal embrittlement problems. The developed program has been applied to the evaluation of damage generated by the effect such as zinc-embrittlement in hot-dip galvanization. The heat conductivity considering the influence of damage is applied to heat conduction analysis and the damage analysis is conducted by the finite element program using the constitutive equation based on Lemaitre's theory. Numerical studies for the damage evolution in thick cylinders under high temperature have been done to show the validity of the coupling of heat conduction, damage evolution and the effect of liquid metal embrittlement.

Key Words: Computational Mechanics, Damage Mechanics, Finite Element Method, Thermal Stress, Coupled Analysis, Liquid Metal Embrittlement, Heat Conduction

1. 序 論

構造物などに熱負荷が加わると熱応力が発生する場合があるが、部材の形状や温度分布の不均一のために応力集中部が生じることがある。より大きな応力集中が生じたり、材料劣化に繋がる要因が重畳すると想定外のき裂などが発生する可能性がある。例えば、構造部材に溶融した脆化金属が接触するとその部分の強度が低下するが、これとあわせて温度分布の不均一により生じた応力集中部に割れが生じる事例が報告されている。これ以外にもさまざまな熱損傷問題の事例がある。しかし、損傷が生じるような高温の熱負荷条件における力学的データを実験により得ることは非常に困難である。したがって、脆化などの劣化と損傷を考慮した応力解析と熱伝導解析の連成解析の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の一つと考えられる。

本研究では、これまでに熱損傷の解析法として著者のひとりが Lemaitre⁽¹⁾によるスカラー損傷変数発展則

ならびにクリープ塑性等方硬化理論を適用した粘塑性損傷則を拡張することにより熱弾粘塑性損傷解析法の提案がなされている⁽²⁾⁽³⁾。本報告では、新たに先の解析法に損傷による影響を考慮した熱伝導解析を導入して熱伝導と損傷進展の連成解析を行う。熱伝導解析には Skrzypek⁽⁴⁾らにより提案された損傷力学概念を取り入れた熱伝導率を導入した。さらに液体金属脆化を考慮するために Allegra らによる粒界拡散説⁽⁵⁾をもとにその効果を損傷解析部に組み込んだ。

連成手法は、Staggard 法による計算アルゴリズムを適用して応力解析法と損傷の影響を考慮した熱伝導解析法の連成を構成している。ここでは、提案する手法を用いて溶融亜鉛めっき時の亜鉛脆化割れ挙動解析の簡単な試解析を実施した。

2. 連成解析手法

2.1 熱伝導解析 損傷を受けた部材では、ボイドや微小き裂等の損傷により生じた空間のために熱の伝わり方が健全材と比べ小さくなる。このため、損傷部と非損傷部では温度分布が異なり、この部位には熱ひずみが生じて応力が発生すると考えられる。そこで、これらの損傷を考慮した熱伝導解析を行うために Skrzypek らによって提案された損傷力学の概念を導入

* 原稿受付 2002 年 8 月 15 日。

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)。^{*2} 正員, フェロー, 東京大学生産技術研究所。
E-mail: mtak@iis.u-tokyo.ac.jp

した熱伝導率を適用した。Skrzypek らは、(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⁽⁴⁾。

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

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、 $d\tilde{\lambda}^{rad}$ は熱輻射の影響項である。(1)式の右辺第1項は、損傷による熱伝導率の減少を表し、第2項は、損傷により生じた空間内での熱輻射を考慮するものである。これにより損傷場における厳密な熱伝導の状態を表現し得るものとする。損傷を含む微小空間における熱輻射の影響項 $d\tilde{\lambda}^{rad}$ は、

$$d\tilde{\lambda}^{rad} = k_B e_0 \left(4DT^3 + \frac{\partial D / \partial X}{\partial T / \partial X} T^4 \right) dX \quad (2)$$

と示されている。ここで、 k_B はボルツマン定数、 e_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、直交座標系 o -xyz における支配方程式を(3)式のように求めた。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \lambda_0(1-D) + k_B e_0 \left(4DT^3 + \frac{\partial D / \partial x}{\partial T / \partial x} T^4 \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \lambda_0(1-D) + k_B e_0 \left(4DT^3 + \frac{\partial D / \partial y}{\partial T / \partial y} T^4 \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \lambda_0(1-D) + k_B e_0 \left(4DT^3 + \frac{\partial D / \partial z}{\partial T / \partial z} T^4 \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right\} + \frac{\partial Q}{\partial t} \\ & = C_i \rho \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 Q は内部発熱率、 C_i は比熱、 ρ は密度である。熱伝導に関する有限要素法は、ガラーキン法を適用し(3)式より求めた。また、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熔融金属による脆化の機構は、熔融金属が部材の粒界内に浸透することにより機械的強度が低下する現象である。先の熱弾粘塑性損傷解析法において損傷力学パラメータとして損傷が発生する時のひずみとして損傷発生限界ひずみ、損傷進展速度ならびに破断時の損傷変数を表す臨界値があるが、本解析法では、これらのパラメータを粒界内における脆化金属濃度比によって変化させることにより、脆化の力学的挙動を表現できるものと考えた。つまり、図1のように脆化が生じると応力-ひずみ挙動が実線から点線に変化する。このとき、損傷発生限界ひずみは減少し、損傷進展速度は増加し、損傷変数臨界値は減少することになる。

そこで、粒界内の脆化金属濃度比 C_f を用いて損傷発生限界ひずみ ε_{pd} 、損傷進展則 $\dot{D}$ および損傷変数臨界

Fig. 1 Stress-Strain Behavior on Embrittlement

値 D_{CR} を(4)-(6)式のように定義した。

$$\varepsilon_{pd} = (1 - C_f^{Z_1}) \varepsilon_{pd0} \quad (4)$$

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{S(1 - C_f)^{Z_2}} \right)^s \dot{p} \quad (5)$$

$$D_{CR} = (1 - Z_3 C_f) D_{CR0} \quad (6)$$

ただし、 $C_f = C_b / C_{b0}$ であり、 C_b は粒界内の脆化金属濃度、 C_{b0} は飽和脆化金属濃度である。また、 ε_{pd0} は脆化前の損傷発生限界ひずみ、 Y 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。なお、相当塑性ひずみ速度は(7)式のように定義されている⁽³⁾。

$$\dot{p} = \left(\frac{\sigma_e / (1 - D) - R - k}{K} \right)^N \quad (7)$$

ここで、 σ_e は Mises 相当応力、 R は等方硬化係数、 K, k, N は粘塑性に関する材料定数である。一方、 C_f は金属の粒界拡散の概念⁽⁶⁾による半無限平板に対する拡散方程式から(8)式のように示される。

$$C_f = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{G_f t}} \right) \quad (8)$$

$$G_f = G_{f0} (1 - D) \left(1 + \beta \frac{\sigma_I}{\sigma_U} \right) \cdot \exp \left(-\frac{Q_c}{R_g T} \right) \quad (9)$$

ここで、 x は部材表面から深さ方向の距離、 t は脆化金属との接触時間、 G_f は温度依存を考慮した拡散係数であるが、武田らにより液体金属脆化は応力に依存すると報告⁽⁷⁾されており、また、著者らは損傷にも依存すると考え、(9)式に示すような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_I は最大主応力、 σ_U は引張強度、 Q_c 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 本研究において適用した熱弾粘塑性損傷解析法、損傷を考慮した熱伝導解析法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る、連成方法を次のように考えた。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る。そこで連成解析として一般的に行われるようなステップごとに交互に熱伝導解析と損傷応力解析を実施するのではなく、図2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い1/2ステップ時の温度を計算する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、熱伝導解析において得られた新しい温度を用いて、中心差分法における1ステップを計算する。最後に、粒界に侵入した液体金属濃度比を計算する。以上を1ステップとして繰り返し解析を行う。

このように連成解析を実施することによって温度依存性のあるパラメータは時刻暦に厳密な値となり、従来の手法に比べより厳密な解析が行えるものと考えた。

3. 熱・損傷連成解析

3.1 クリープ損傷応力解析 これまでに述べた手法により熱弾粘塑性損傷解析と熱伝導解析の連成解析法の検証のため、Skrzypekらが差分法を用いて実施した厚肉円筒のクリープ損傷応力解析と同一の解析を本手法により行った。

ここで、本解析法においてクリープ損傷を考慮するために(10)~(13)式のようなクリープひずみおよび損

傷発展則を導入した。

$$\dot{\varepsilon}_x^c = \frac{\tilde{\sigma}_{eq}^{m(T)-1}}{(1-D)^{m(T)}} \left(\sigma_x - \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} \right) t^n \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon}_y^c = \frac{\tilde{\sigma}_{eq}^{m(T)-1}}{(1-D)^{m(T)}} \left(\sigma_y - \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \right) t^n \quad (11)$$

$$\dot{\varepsilon}_z^c = -(\dot{\varepsilon}_x^c + \dot{\varepsilon}_y^c) \quad (12)$$

$$\dot{D} = C_r(T) \left\langle \frac{\sigma_I}{1-D} \right\rangle^{r(T)} \quad (13)$$

ただし、 $\tilde{\sigma}_{eq}$ は、有効応力を用いたMisesの相当応力であり、 $m(T)$ 、 $C_r(T)$ 、 $r(T)$ は、温度依存性のある材料定数である。また、 t は時刻、 n は材料定数である。なお、ここでは円筒の軸方向に対して平面ひずみならびにクリープの非圧縮性を仮定している。

3.2 解析モデルおよび解析条件 以上の手法により熱と損傷の連成解析の簡単な試解析を実施した。解析モデルは、図3のような厚肉円筒とし、メッシュモデルは図4のような扇形のモデルを使用する。解析で使用する有限要素は、8節点三次元アイソパラメトリック六面体要素である。数値積分はガウス積分法を適用し、損傷変数や粒界金属濃度等の物理量は、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、ステンレス鋼である。また、解析条件および材料定数は、Skrzypekらが行った解析において用いられた値を適用した。これらを表1,2に示す。熱負荷である円筒の内面と外面の温度は、常に一定であるものとす

Fig. 3 Shape of Analysis model

Fig. 4 Mesh model of Analysis

Fig. 2 Computational algorithm

Table. 1 Analysis condition and Material Data

Inner Temperature T_i	625.0 °C
Outer Temperature T_o	650.0 °C
Young's Modulus E	150.0 GPa
Yield Stress $\sigma_{0.2}$	120.0 MPa
Poisson's Ratio ν	0.3
Coefficient of Linear Expansion α	$1.85 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Initial Heat Conductivity λ_0	$23.0 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2\text{°C}$

Table. 2 Temperature Affected Material Data

T (°C)	m	r	C (Pa ⁻¹ s ⁻¹)
600	4.5	3.1	1.07×10^{-34}
650	4.0	2.8	1.21×10^{-31}
700	3.5	2.5	8.91×10^{-29}

る。

実施した試解析は熱伝導と損傷進展の連成を考慮した解析ととそうでない場合の2種類である。それぞれの解析手法の結果を比較することにより本連成解析法の妥当性についての評価を行った。

3.3 解析結果および考察 解析の流れとしては、円筒の初期温度を 625°C として、内面と外面の温度をそれぞれ条件値としたときの定常状態における応力分布を計算する。次にこの応力値を初期状態（時間 $t=0$ ）として、クリープ損傷解析を実施する。解析時間は、損傷変数が臨界値（ $D=0.95$ ）に達する時間（ $t=t_{cr}$ ）までとする。解析結果は、非連成、連成のそれぞれについて温度、周方向応力および損傷変数を図 5-10 に示した。図中には $t=0$, $0.5t_{cr}$, t_{cr} の時間における結果を示している。各図の横軸は、無次元化した半径であり、円筒の内面を 0.5 とし外面を 1.0 としている。また、図 6, 9 の縦軸は、降伏応力により無次元化した周方向応力である。

熱と損傷を連成した解析の結果である図 8-10 には本解析法の妥当性を評価するため、Skrzypek らの解析結果（ $t=t_{cr}$ のみ）を合わせて示した。これらを見ると比較した解析結果が軸対称問題として差分法で解かれているため、また、解析アルゴリズムが本解析法と異なるため、それぞれの解析結果ともわずかながら差異が生じたと推察する。さらに、それぞれの構成則における温度依存性の扱いが異なっていることも半径方向に分布の差が生じた原因であると考えた。しかしながら、それぞれの解析結果を比較した結果、部分的には差があるものの十分な一致がみられる。

Fig. 5 Temperature Distribution (without coupling)

Fig. 6 Hoop Stress Distribution (without coupling)

Fig. 7 Damage Distribution (without coupling)

Fig. 8 Temperature Distribution (with coupling of heat and damage)

Fig. 9 Hoop Stress Distribution (with coupling of heat and damage)

Fig. 10 Damage Distribution (with coupling of heat and damage)

一方、非連成と連成の結果を比較すると、図 6,9 の応力分布図をみると無次元半径 0.6 付近の応力値は、連成解析の方が小さくなっている。これは、図 5 に示されているように温度分布が非連成では一定であるのに対して、連成解析では損傷が生じることにより温度上昇がみられる (図 8)。このため、特に大きく温度が上昇している 0.6 付近において正の熱ひずみが生じることにより、応力緩和が促進されたためと考えられる。また、これに伴って図 7 と図 10 を比較すると損傷変数のピークをとる位置が内面側にわずかではあるが変化している。

以上の解析結果より本手法の熱と損傷の連成についての妥当性が確認されたと考える。

4. 熱・損傷・脆化を考慮した連成解析

4.1 脆化に関する解析条件 熱と損傷の連成解析につづいて、液体金属脆化の連成を含めた試解析を実施した。本解析では、先の解析と同様に厚肉円筒モデルを使用し、熱、損傷に関する材料定数および条件も、同一とした。ただし、円筒内部には 625℃の液体金属が存在するものとする。一方、新たに考慮する脆化に関する材料定数は表 3 に示した。

4.2 解析結果および考察 脆化を考慮したクリープ解析を実施した結果、熱、周方向応力、損傷は図 11-13 のような結果が得られた。図 13 をみると脆化を考慮したことにより、最大の損傷変数が求められた位置が無次元半径 0.55 付近から内表面に変化している。現実の現象を考えると液体金属脆化は円筒内表面から生じるため、得られた結果は、液体金属脆化の現象を表現できていると考えられる。図 11 の温度分布を見ると先の解析結果と比べ、全体的に温度上昇が小さくなっている。これは、解析で得られて損傷の分布が内面に一層偏っているために損傷により熱伝導率が低下した領域が減少して温度上昇が押さえられたと考えられる。次に図 12 の周方向応力の分布をみると、脆化を考慮しない場合に比べ内面付近の応力が小さくな

Table. 3 Material Data on embrittlement

Activation Energy Q_e		52.0 kJ/mol
Diffusion Coefficient G_{f0}		50.0 mm ² /sec
Material Constant	β	1.5
	Z_1	2.0
	Z_2	0.05
	Z_3	1.0

Fig. 11 Temperature Distribution (with coupling of heat, damage and embrittlement)

Fig. 14 Max. Principal Stress Distribution

Fig. 12 Hoop Stress Distribution (with coupling of heat, damage and embrittlement)

Fig. 13 Damage Distribution (with coupling of heat, damage and embrittlement)

っている。これも最大の損傷変数の位置が内面に移動したことによるものと考えられる。

次に、図 14 には時間 $0.5t_{cr}$ における各解析での最大主応力の分布を示した。これを見ると脆化を考慮した解析の場合に内面付近の主応力が小さくなっている。これは、脆化により剛性が低下してしていることを表現できていると考える。また、すべての解析とも無次元半径 0.68 あたりで主応力が大きく変化している。したがって、これより円筒の内側では引張、外側で圧縮の状態にあると考えられる。また、損傷変数の計算結果も最大主応力をパラメータとする(13)式から明らかに 0.68 より内面側で大きな値が得られている。

また、脆化を考慮しない場合、損傷変数の最大値は内面より少し外側で算出されているが、この原因は、図 14 のような最大主応力の分布に加え、損傷発展則に温度依存性のパラメータが含まれているためによるものと考えられる。

5. 結論

本研究では、損傷力学に基づいた損傷解析、ポイドやき裂など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についてそれぞれ検討し、これらの連成解析手法の開発を行った。さらに本解析手法の妥当性を評価するため、高温環境下にある円筒のクリープ損傷解析を非連成、熱・損傷の連成、および、熱・損傷・脆化の3つの現象を考慮した連成解析を実施した。

Skrzypek が差分法により行った解析結果と比較したところ、十分に妥当な解が得られることが確認された。さらに、脆化を考慮した解析では現実の液体金属脆化

現象をよく表現した結果が得られた。

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考える。一方、今後は単純な試験体の材料試験データをもとに材料定数を同定して定量的な評価が必要と考える。

参考文献

- (1) Lemaitre, J., Chaboche, J. L., "Mechanics of solid materials", Cambridge University Press, 1990.
- (2) 都井 裕, 李 帝明, "溶融亜鉛めっき時の構造部材の三次元損傷解析", 日本機械学会論文集 (A 編), 66, 643, 618-625, (2000).
- (3) Toi, Y. and Lee, J.-M., "Thermal Elasto-Viscoplastic Damage Behavior of Structural Members in Hot-Dip Galvanization", Int. J. of Damage Mechanics, 11, 2, 171-185, (2002).
- (4) Skrzypek, J., Ganczarski, A., "Modeling of Damage Effect on Heat Transfer in Time-Dependent Non-Homogeneous Solids", J. of Thermal Stresses, 21, 3, 205-231, (1998).
- (5) Allegra, L., Hart, R. G., Townsend, H. E., "Intergranular Zinc Embrittlement and Its Inhibition by Phosphorus in 55 Pct Al-Zn-Coated Sheet Steel", Metallurgical Trans., A, 14A, 401-411, (1983).
- (6) 黒木 剛司郎, 大森宮 次郎, "金属の強度と破壊", 森北出版, 119-127.
- (7) 武田 鉄治朗, 山戸 一成, 金谷 研, "溶融 Zn われ感受性指数とわれ発生機構", 鉄と鋼, Vol. 69, No. 13, S-1504, (1983).