

鉄塔用山形鋼のめっき時の損傷解析

Damage Analysis of Pylon Members in Hot-Dip Galvanization

都 井 裕*・李 帝明*

Yutaka TOI, Jae Myung LEE

1. はじめに

最近、材料の破壊や破断などの損傷解析の有用な手段として連続体損傷力学 (Continuum Damage Mechanics) が注目されている。連続体損傷力学では、材料内部の損傷状態を適当な損傷変数を用いて表現し、これによって材料の損傷場を記述する。この CDM に基づいた破壊解析は局所的解析法 (Local approach to Fracture) と呼ばれ、材料と構造の損傷・破壊過程と最終破壊の予測に応用されている¹⁾。

ここでは、送電鉄塔部材の溶融亜鉛めっき時における割れ発生問題に対して損傷力学に基づいた有限要素解析を行い、CDM の工学的応用を試みるとともに、産業現場の技術課題の解決を図る。

2. 局所的破壊解析法

有限要素法と損傷力学に基づく局所的解析法による破壊解析においては、材料の破壊は要素ごとの応力やひずみ履歴により定まる損傷域の発展と見なすことにより計算される。局所的解析法は、損傷に関連する内部状態変数の連成方法により二つに分けられる。すなわち、損傷は構造応答とは一切連成しないと仮定し、構造解析による応力履歴から損傷の発展を独立に計算する非連成解析 (図 1) と、損

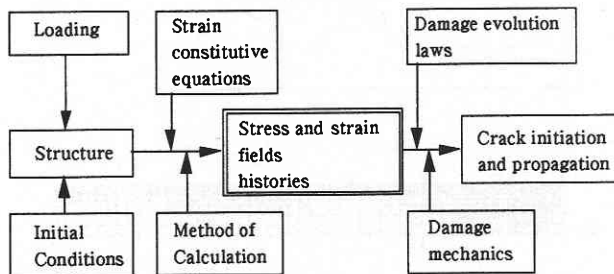


図 1 非連成解析の概念図¹⁾

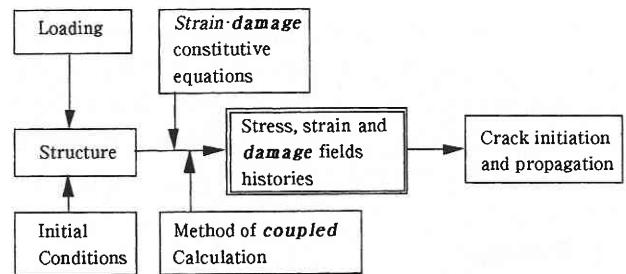


図 2 完全連成解析の概念図¹⁾

傷変数を構成式を介して構造解析に導入し、材料の剛性と強度を減少させる効果を直接考慮する完全連成解析 (図 2) とに分けられる¹⁾。

さらにもう一つの連成解析として、損傷の発展はひずみ履歴と損傷の完全連成式によって計算されるが、その損傷は構造挙動には何らの影響も及ぼさないと仮定する部分連成解析法もある。これは、完全連成解析において各増分段階で損傷の影響を考慮しなければならない計算上の手間を避ける方法であり、損傷の発生域が全体構造に比べて極めて小さい場合 (small yielding) に有用な方法とされている²⁾。実際の解析における計算手順は次節で説明する。

3. めっき割れ問題における損傷解析

3.1 損傷発展方程式

損傷発展則は対象となる問題の挙動特性に依存して脆性、粘塑性、クリープなどの各問題ごとに提案されている。ここでは、めっき問題の特徴である高温状態や時間依存性などを考慮するためクリープ損傷則を使うことにする。Kachnov はクリープ問題に対して次式のような変数分離型損傷発展式を提案した³⁾。この式は様々な損傷問題において、基本的な式になっている。

$$\dot{\omega} = f_1(\omega) f_2(\sigma) \dots \dots \dots (1)$$

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

研 究 速 報

Kachnov-Rabotnov は式 (1) の下で次のような損傷発展方程式を提案した⁴⁾。

$$\dot{\omega} = \frac{p}{q+1} \frac{\sigma_D^p}{(1-\omega)^q} \dots\dots\dots (2)$$

一方, Bodner-Chan は同様な形で次のような損傷発展式を提案している⁵⁾。

$$\dot{\omega} = \frac{p}{H} \left\{ \left[\ln(1/\omega) \right]^{(q+1)/p} \right\} \omega \dot{Q} \dots\dots\dots (3)$$

$$\dot{Q} = \left[\alpha \sigma_{\max}^+ + \beta \sqrt{3J_2} + (1-\alpha-\beta) I_1^+ \right]^r \dots\dots\dots (4)$$

ここに, ω ($0 < \omega < 1$) は材料の損傷状態を表す損傷変数であり, $\sigma_{\max}, \sigma_{EQ}, \sigma_D, S_{ij}, J_2, J_1$ はそれぞれ, 引張最大主応力, von Mises の相当応力 $\sigma_{EQ} = (3s_{ij} s_{ij}/2)^{1/2}$, 損傷有効応力 $\sigma_D = \alpha\sigma_{EQ} + (1-\alpha)\sigma_{\max}$, 偏差応力, 偏差応力の 2 次不変量, 応力の 1 次不変量である。また $\alpha, \beta, p, q, r, H$ は材料定数である。

3.2 局所解析法

損傷力学に基づいた局所解析法には前節で述べたように連成方法によって非連成解析, 部分連成解析, 完全連成解析がある。有限要素法に損傷力学手法を組み込むことは, 構成式の中へ損傷変数を導入することによって可能になる。本研究では著者らによってすでに開発されている熱・弾塑性解析プログラム⁶⁾に Bodner-Chan の損傷発展式を組み込むことにする。

まず, 材料損傷を考慮した構成式は次のようになる。

$$\Delta\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\omega) \left(\Delta\varepsilon_{kl} - \Delta\varepsilon_{kl}^p - \Delta\varepsilon_{kl}^t \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$C_{ijkl}(\omega) = E(\omega) \left\{ \frac{\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)} \delta_{ij}\delta_{kl} + \frac{1}{2(1+\nu)} (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{kj}) \right\} \dots (6)$$

$$E(\omega) = (1-\omega)E_0 \dots\dots\dots (7)$$

$$E(\omega) = \begin{cases} E(\omega) & \omega < \omega_{cr} \\ 0 & \omega \geq \omega_{cr} \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

ここに, $C_{ijkl}(\omega)$ は損傷変数 ω を考慮した弾性係数テンソル, E_0 は非損傷状態の弾性係数, ω_{cr} は損傷の限界値であり $\Delta\varepsilon_{kl}, \Delta\varepsilon_{kl}^p, \Delta\varepsilon_{kl}^t$ はそれぞれ全ひずみ増分, 粘塑性ひずみ増分, 熱ひずみ増分である。式 (5) ~ (9) は局所解析法における一般的な理論である。

また, 粘塑性ひずみ増分に対しては, Bodner-Partom の

粘塑性理論から Bodner-Chan によって拡張された, 損傷の効果を考えている次式を使用する。非連成解析の場合は損傷変数 ω を除いた式になる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{3\sqrt{D_0^2 \exp \left\{ -\{Z(1-\omega)/f\}^2 \{(n+1)/n\}^{1/n} \right\}^n}}{f} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dots (9)$$

4. 解析結果および考察

4.1 解析条件および材料定数

本研究では, 孔を有する鉄塔用山形鋼の溶融亜鉛めっき時における割れ発生問題を前述の損傷力学手法によって解析する。図 3 には解析モデルと有限要素分割を示している。解析は 2 次アイソパラメトリック軸対称要素を使っており, 数値積分は 2 × 2 点積分である。損傷発展方程式 (3), (4) における材料定数は温度 T の影響を考慮して以下のように決めた。

$$\alpha = 0, \beta = 0.75, p = 1, r = 7.1$$

$$H = (-6.908 \times T + 3113.0) \times 10^{17} \text{ ((MPa)'sec)}$$

式 (9) に対する材料定数, 有限要素定式化や有限要素解析における他のすべてのことは参考文献 (6) を参照されたい。

また, 損傷を発生させるために, 表面には降伏応力相当の引張残留応力, 中央面には圧縮残留応力を仮定し, その間は線形補間して初期残留応力分布とした。

4.2 有限要素依存性

損傷力学と有限要素法に基づいた局所的破壊解析法は, 損傷の発生からその進展, 破壊に至る過程を忠実に把握で

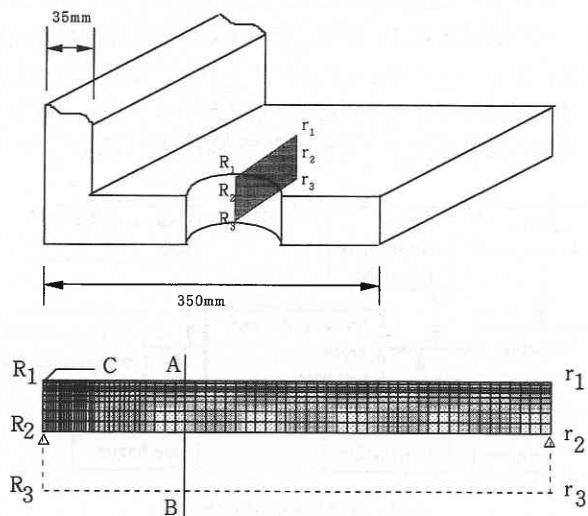


図 3 解析モデルとメッシュ分割

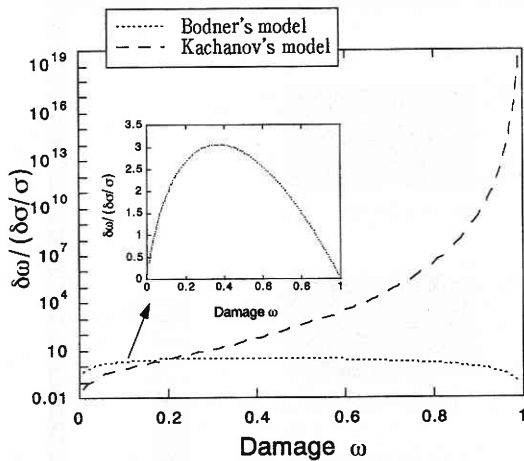


図4 応力変動に対する損傷変数の誤差の発達

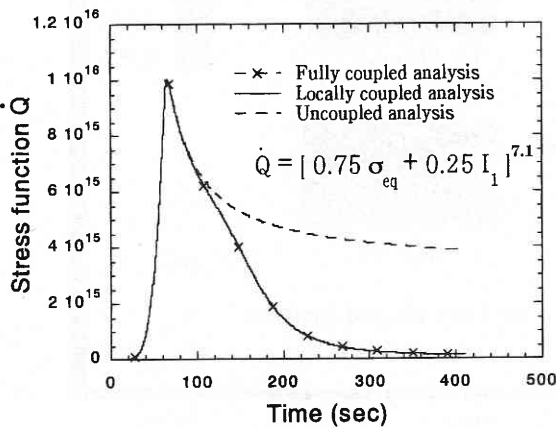


図5 損傷有効応力 (応力関数) の時刻歴

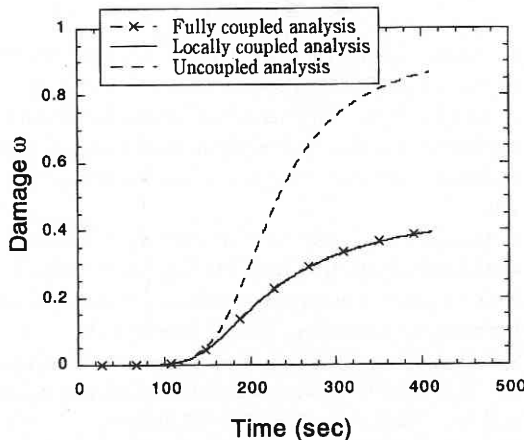


図6 損傷の時刻歴

きるといふ有用性を有すると同時に、有限要素への高い依存性が指摘されている⁷⁾。特に、損傷分布の局所化はそのうち最も本質的なものとして考えられており、その対策として非局所化理論の導入なども提案されている⁸⁾。ここで

は、有限要素依存性の主な原因となる損傷の局所化に対して検討する。

局所的解析法においては、損傷発展方程式の応力敏感性が損傷の局所化の重要な原因として議論されている。式(2)と式(3)をそれぞれ応力履歴に関する変動量の関数として表現すると、いくつかの簡単な数学定理によって次式を得る。これを図4に比較して示す。

$$\delta\omega = \frac{p}{q+1} \frac{1 - (1-\omega)^{q+1}}{(1-\omega)^q} \frac{\delta\sigma_D}{\sigma_D} \dots\dots\dots (10)$$

$$\delta\omega = v\omega \ln\left(\frac{1}{\omega}\right) \frac{\delta\sigma_D}{\sigma_D} \dots\dots\dots (11)$$

式(10)を見ると、損傷 ω が1に近いほど応力変動に対する損傷変数の誤差は非常に大きな値になることがわかる。これが損傷の局所化の根本的な原因であると議論されている。一方、本研究で採用している Bodner-Chan の損傷モデルでは図4で示すように、応力敏感性に対しては非常に安定的な特性を有することがわかる。

4.3 各解析法による結果

ここでは、Bodner-Chan の損傷モデルを用いた解析結果について説明する。図5、6には、図3に示した着目点C における損傷発展方程式(3)における応力関数(損傷有効応力)の時間履歴と損傷の時間履歴を示している。図からわかるように、非連成解析に比べて部分連成解析と完全連成解析では著しい応力の再分配が生じている。これは損傷の発展が材料剛性や強度を減少させる効果として作用していることを示す。また、部分連成解析と完全連成解析の結果を見ると両者の差はほとんど見られない。これは、2章で述べたように、損傷の発生が構造全体に比べて極めて小さい領域、すなわち穴縁だけである本問題のような場合には、部分連成解析が十分有用であることを示す。

また、図6を見ると、損傷は時間の経過とともにある程度増加の後、落ち着いているのがわかる。損傷発展挙動は、材料の破断や破壊をもたらす損傷の限界値に近づくと非常に不安定になると考えられるが、この結果には不安定化は見られない。これが、Bodner-Chan の損傷モデルの他のモデルと異なる特性であると判断される。Bodner-Chan の損傷モデルの使用に際しても、その適用範囲や実験からしか得られない損傷限界値の設定の問題などには議論の余地がある。しかし、これらは損傷発展方程式に共通の問題であり、本研究の目的である損傷力学に基づいた有限要素解析手法の確立とは別個の問題であろうと考えられる。最後に、図7に各解析法によって計算された損傷の分布を示す。三つの解析法いずれにしても、損傷域の発展は孔縁部で集中

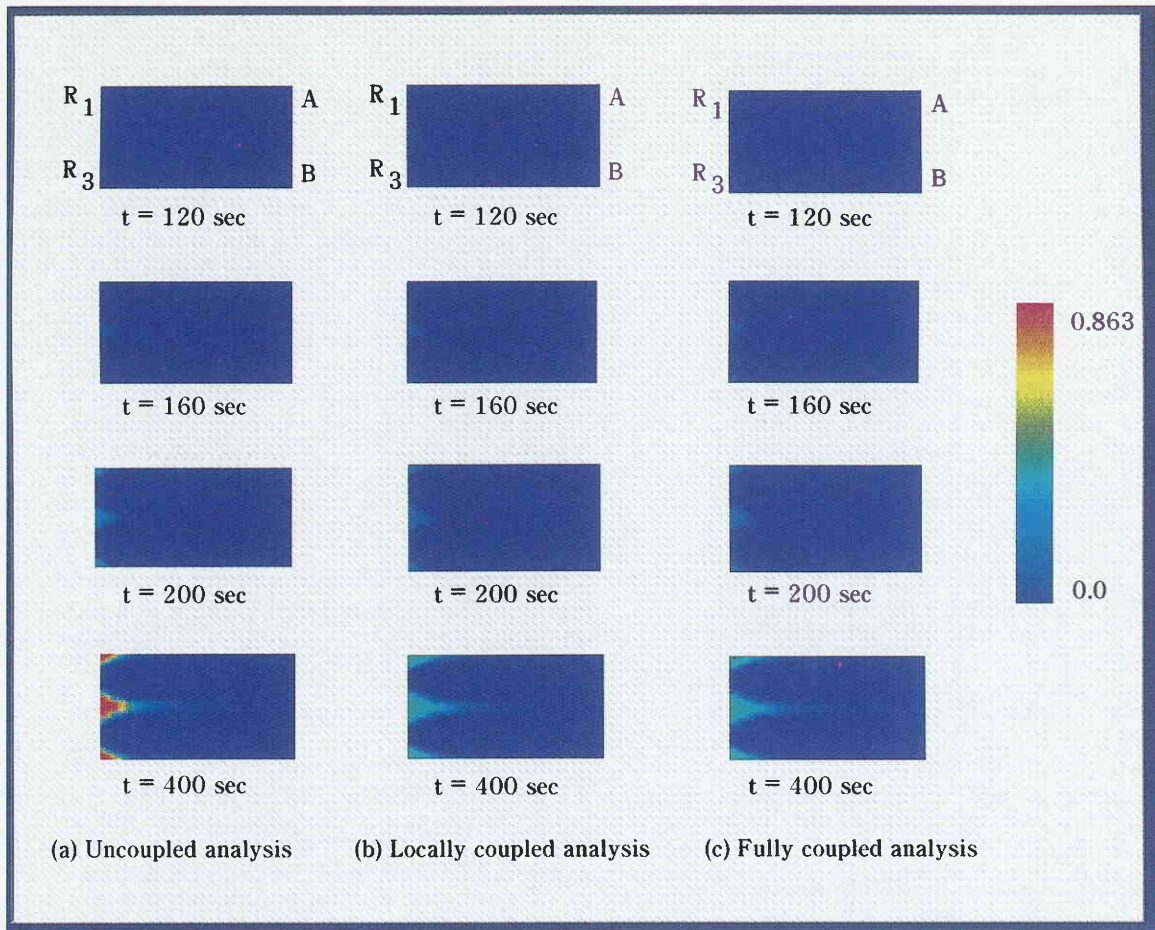


図 7 各解析法による損傷分布の比較

的に生じる同一な様子を示していることがわかる。

5. 結 論

本研究では、溶融亜鉛めっきを受ける鉄塔用山形鋼の割れ発生問題の解析のため、損傷力学に基づいた有限要素解析プログラムを開発した。めっき問題の力学的特徴を扱うため、Bodner-Chan のクリープ損傷発展方程式を用いて解析を行った。局所解析法における三つの連成計算を行って、本問題に対しては、部分連成解析が必要十分であることを確認した。この解析法によれば、損傷発展を考慮した構成式を、通常の有限要素解析コードによるひずみ履歴のポスト処理に用いることにより、構造内の損傷の発生・進展を予測することが可能である。

最後に、本研究に対し御助言をいただいた巴技研の家澤徹氏に謝意を表します。

(1998 年 4 月 1 日受理)

参 考 文 献

- 1) J. Lemaitre: "Local Approach of Fracture, Eng. Fract. Mech, Vol. 25, No. 5/6, pp. 523-537, 1986.
- 2) A. Benallal et al.: Continuum Damage Mechanics and Local Approach to Fracture: Numerical Procedure, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 92, pp. 141-155, 1991.
- 3) L. M. Kachanov: Time to Failure Under Creep Condition, Izv. Akad. Nauk., SSSR. Tech. Nauk, No. 8, pp. 26-31, 1958.
- 4) L. M. Kachanov: Introduction to Continuum Damage Mechanics, Dordrecht, the Netherlands: Martinus Nijhoff, 1986.
- 5) S. R. Bodner and K.S. Chan: Modelling of Continuum Damage for Application in Elastic-Viscoplastic Constitutive Equations, Eng. Fract. Mech., Vol. 25, pp. 705-712, 1986.
- 6) 都井, 李, 家沢: 生産研究 50 卷 2 号, pp. 103-108, 1998.
- 7) 村上澄男: "損傷力学と破壊解析に対するその応用", 応用数理 5 卷 4 号, pp. 43-59, 1995.
- 8) K. Sanouni et al.: On the Creep crack-growth Prediction by nonlocal damage formulation, European Journal of Mechanics, A/Solids, Vol. 8, pp. 437-459, 1989.