

硬化特性を考慮した鋼部材の損傷度評価に関する解析的考察

九州大学 学生会員 永廣 淳一郎 九州大学 正会員 園田 佳巨 九州大学 正会員 彦坂 照

1. 緒言

近年、公共投資額の削減の必要性が高まるとともに、既設構造物に対して適切な維持・補修計画を立てることでライフサイクルコストを低減することが重要視されるようになりつつある。老朽化した構造物に対して、適切な維持・補修計画を立案するためには、構造物の損傷度および余寿命を評価する必要があるが、現実にはその定量的評価は非常に困難である。本研究では、鋼構造物の余寿命評価を目指す基礎的考察として、鋼部材が繰り返し荷重を受けたときの損傷度評価を試み、硬化特性と損傷の進展度の関係について解析的な検討を行った。

2. 解析手法の概要

本研究では、損傷力学の概念を用いた3次元弾塑性解析プログラムを作成し、鋼部材に潜在する微小欠陥が、損傷の蓄積とともにメソレベルのひび割れが進展する過程を追跡することを試みた。損傷度の評価法としては、(メソレベルの) 損傷を表すスカラー変数 D を想定した。損傷変数 D は、

図・1に示すように累積塑性ひずみ p ($\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\epsilon}_d^p \dot{\epsilon}_y^p$) が、ある

一定値 p_D に達すると発生し始め、ある値 D_C (1.0) に達した時に部材の破壊につながるひび割れが生じるものとみなした。なお、部材全体の挙動を求めるマクロレベルの解析には、式(1)に示す降伏関数を考え、負荷関数には損傷による散逸ポテンシャル関数 F_D を導入した式(2)を適用した。

$$f = \tilde{\sigma}_{eq} - \sigma_y - R \quad (1) \quad F = \tilde{\sigma}_{eq} - \sigma_y - R + F_D \quad (2)$$

ここに、 $\tilde{\sigma}_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{1-D}$: 損傷を考慮したミーゼス相当応力、

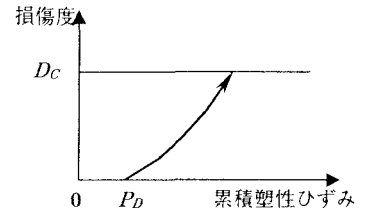
σ_y : 単軸試験による降伏応力、 R : 等方硬化変数

ところで、疲労限より大きな応力であれば疲労破壊が発生することを考えると、微小欠陥近傍では疲労限をわずかに上回る応力でも塑性ひずみが発生・進展するものと考えられる。そこで、メソレベルの損傷度評価を行う解析には、式(1)と異なる降伏関数を以下の式(3)のように定義した。

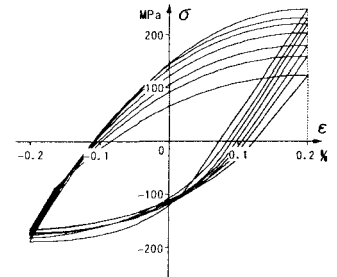
$$f = \tilde{\sigma}_{eq} - \sigma_f \quad (3)$$

ここに、 σ_f : 疲労限界応力

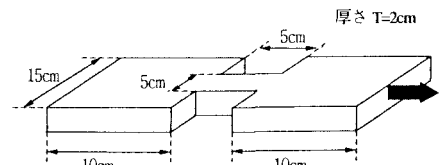
式(3)の降伏関数を用いて得られる損傷変数 D_{local} は、微小欠陥の存在を前提にメソレベルの応力場で評価されたもので、この値を直接、式(1)、(2)に適用し、部材全体の挙動解析に用いることは損傷の影響を過大評価することにつながると考えられる。そこで、式(4)に示すように、材料の疲労試験データから得られる降伏応力、疲労限界応力それぞれに対する破壊までのサイクル数比 N_f/N_f を乗じて補正を加えた D_{global} を式(1)、(2)に適用して部材全体の挙動解析を行うことにした。



図・1 損傷の発生条件



図・2 鋼材の低サイクル疲労試験曲線



図・3 解析モデル

$$\dot{D}_{global} = \dot{D}_{local} \times \frac{N_y}{N_f} \quad (4)$$

ここに、 $\dot{D}_{global}$ ：全体解析に用いる損傷度増分

以上の仮定により、式(1)によるマクロレベルでは弾性状態でも、メソレベルの塑性の進展が式(3)により認められれば、損傷に応じた弾性係数の低減が式(5)により考慮されることになる。一方、式(1)により塑性状態と判定された場合には、関連流動則より求めた式(6)で表される弾塑性構成方程式により、塑性と損傷の連成を考慮した解析を行った。

$$d\sigma_{ij} = E_{ijkl}(1 - D_{global})d\epsilon_{kl} \quad (5) \quad d\sigma_{ij} = D_{ijkl} \left\{ \delta_{ij} \delta_{kl} - \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} - \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \frac{\partial F_D}{\partial D} - \frac{\partial f}{\partial R} b(R_\infty - R)} \right\} d\epsilon_{kl} \quad (6)$$

ここに、 R_∞ ：等方硬化限界応力、 b ：等方硬化係数

なお、損傷度増分 $\dot{D}$ と部材の破壊判定値 D_C は、それぞれ式(7)、式(8)で表される。

$$\dot{D} = \frac{Y}{S} \dot{p} H_{(p-p_D)} \quad (7) \quad D_C = D_{IC} \frac{\sigma_u^2}{\sigma_f^2} \frac{1}{R_v} \quad (8)$$

ここに、 Y ：損傷によるエネルギー解放率、 $H_{(p-p_D)} = 0$ ($p < p_D$)、 $=1$ ($p \geq p_D$) なるステップ関数、 σ_u ：終局応力、 R_v ：三軸応力比、 D_{IC} ：単軸試験で求めた損傷限界、 S ：損傷のエネルギー強度（材料定数として、図-2に示す低サイクル疲労試験の弾性係数の変化から求めた D と ϵ_p との関係を用いて次式(9)により決定される）

$$S = \frac{\sigma^2}{2E(1-D)^2 dD/d\epsilon_p} \quad (9)$$

3. 数値計算例および考察

3.1 解析モデル

解析対象は、図-3のような応力集中が生じやすい形状の鋼部材で、左端を固定し、右端に等分布の両振幅交番荷重を与えた。鋼材の物性値は、図-2に示す単軸疲労試験データから求めたもので、損傷の評価に必要な材料定数と合わせて表-1に示す。

3.2 数値計算例

図-4は、部材の挙動解析に用いる損傷変数として、 D_{local} を用いた時と、 D_{global} を用いた時のひび割れ発生までの载荷数を比較したもので、荷重レベルが小さくなるにつれて、両者のひび割れ発生までの载荷数の差が大きくなることが認められた。これは、荷重レベルが小さなほど、破壊までの载荷数にメソレベルの損傷進展が占める割合が大きくなるため、補正の影響が顕著になったものと考えられる。図-5は、損傷変数に D_{global} を使い、式(1)のレベルで完全弾塑性と等方硬化を考慮した時の、ひび割れ発生までの载荷数を比較したもので、両者の差は高サイクル疲労になるほど小さいことが分かる。したがって、硬化の影響は、高サイクル疲労破壊に対してはあまりみられないことが推察された。

表-1 鋼材の物性値および損傷に関する材料定数

σ_f ：疲労限界応力(kgf/cm ²)	1600
σ_y ：降伏応力(kgf/cm ²)	2400
σ_u ：終局応力(kgf/cm ²)	4100
S ：損傷のエネルギー強度(MPa)	6.76
D_{IC} ：損傷度の限界値	0.15
ϵ_{PD} ：損傷発生時の累積塑性ひずみ	0.10
R_∞ ：等方硬化限界応力(MPa)	300
b ：等方硬化係数	1.0

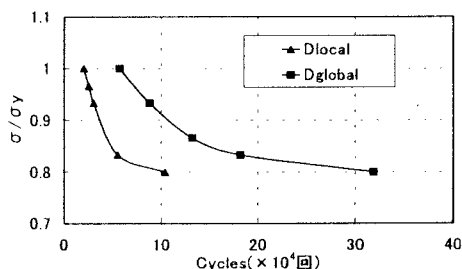


図-4 損傷度評価の修正による比較

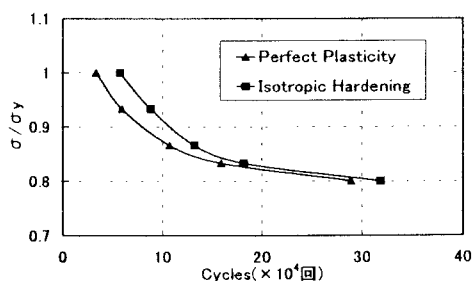


図-5 完全弾塑性と等方硬化を考慮した時の比較