

繰り返し荷重を受ける鋼部材の損傷度評価法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 熙

1. 緒言

近年、既存の構造物の維持・補修等により、構造物のライフサイクルにおけるトータルコストをできるだけ小さくすることに対する重要性が大きくなり、余剰耐力や余寿命の評価を正確に行う手法の確立が望まれている。本研究では、構造物の余寿命評価を目指した基礎的な考察段階として、鋼部材を対象に繰り返し荷重を受けたときの損傷度評価を解析的に試みたものである。

2. 解析手法の概要

本研究では、損傷力学の概念を取り入れた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、荷重履歴による損傷の蓄積とともにメソレベルのひび割れへと進展するまでの過程を追跡することを試みた。

損傷は、図-1に示すように荷重の増加と共に塑性ひずみが蓄積され、

累積塑性ひずみ $p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p}$ がある一定値 p_D に達すると発生し、損傷の進展度を表す変数 D がある値 $D_C (\leq 1.0)$ に達した時に部材の破壊につながるメソレベルのひび割れが生じるものとみなした。損傷増分の算定式および部材の破壊判定値は、それぞれ式(1)、式(2)で表される。

$$\dot{D} = \frac{Y}{S} \dot{p} H_{(p-p_D)} \quad \dots(1) \quad \text{ここに、} Y : \text{損傷によるエネルギー密度}$$

解放率、 S : 損傷のエネルギー強度、 $H_{(p-p_D)}$: $p < p_D$ のとき 0 , $p \geq p_D$

のとき 1 の値をとるステップ関数

$$D_C = D_{1C} \frac{\sigma_u^2}{\sigma_f^2} \frac{1}{R_v} \quad \dots(2) \quad \text{ここに、} \sigma_u : \text{終局限界応力、} \sigma_f : \text{疲労}$$

限界応力、 R_v : 三軸応力比、 D_{1C} : 単軸引張試験による損傷限界値

また、材料定数の1つとして式(1)に含まれるエネルギー強度 S は、図-2のような低サイクル単軸引張圧縮試験による弾性係数の変化から求めた D と ε_p との関係を用いて以下の式により決定される。

$$S = \frac{\sigma^2}{2E(1-D)^2} \frac{dD}{d\varepsilon_p} \quad \dots(3)$$

本解析では、塑性と損傷の連成を簡易に考慮するため、完全弾塑性型の降伏関数を考え、損傷にともなう散逸ポテンシャル関数 F_D を導入した式(4)を負荷関数として適用した。

キーワード: 損傷力学、累積塑性ひずみ、寿命評価

連絡先: 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻

TEL&FAX: 092-642-3260

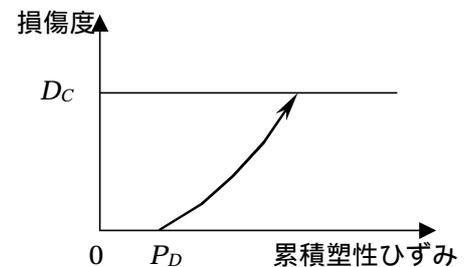


図-1 損傷の発生条件

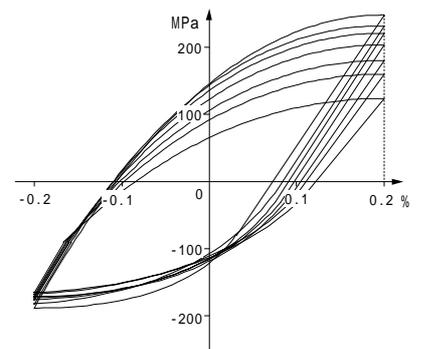


図-2 鋼材の低サイクル疲労試験曲線

$$F = \tilde{\sigma}_{eq} - \sigma_y + F_D \quad \dots(4)$$

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

したがって、塑性ひずみ増分と損傷増分は、関連流動則よりそれぞれ式(5)および式(6)で得られるものとした。

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \quad \dots(5) \quad dD = \frac{\partial F_D}{\partial Y} d\lambda \quad \dots(6)$$

以上の基本式をもとに、損傷の影響を考慮した弾塑性構成式として以下の式(7)が得られる。

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} \left\{ \delta_{ks} \delta_{lt} - \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rq}} D_{rqst} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rq}} D_{rqst} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{st}} - \frac{\partial f}{\partial D} \frac{\partial F_D}{\partial Y}} \right\} d\varepsilon_{st} \dots(7)$$

三次元弾塑性増分解析の各ステップで求めたひずみ増分をもとに、各要素の Gaussポイント別に式(6)を用いて損傷の評価を行い、得られた損傷値 D を次ステップの弾塑性構成式(7)に用いることで塑性と損傷の連成を考慮した解析を行った。

3. 数値計算例および考察

3.1 解析モデル

解析対象とした試験片は、図-3のような応力集中が生じやすい形状の鋼材で、左側端部を固定し、右側端部に等分布の両振幅交番荷重を与えた。計算に用いた鋼材の降伏荷重等の物性値は、図-2に表される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、載荷荷重 19.2tf 時の載荷方向のひずみ履歴と載荷回数との関係を表したものである。この図より、載荷回数が大きくなるほど損傷の影響により発生ひずみが大きくなっていくことが確認された。図-5は、荷重レベルを変えた場合のひび割れ発生までの載荷回数を比較したものであり、縦軸に応力比を、横軸にひび割れ発生までの載荷回数を与えている。この図より与えた荷重レベルが降伏荷重の 83% を下回ったあたりでひび割れ発生までの載荷回数が急激に増大する傾向にあることが認められた。

4. 結論

損傷力学の概念を取り入れた弾塑性解析を行うことで、鋼部材の損傷に関する傾向を把握できることが示された。今回は完全弾塑性を仮定した簡易な解析を行ったが、今後、材料試験結果との定量的な比較なども含めた検討を行いながら改良することで、鋼部材の寿命予測手法の確立へとつながるものと思われる。

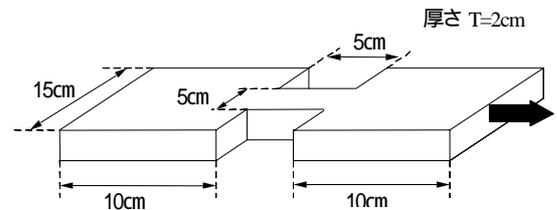


図-3 解析モデル

表-1 鋼材の物性値および損傷に関する材料定数

r : 疲労限界応力(kgf/cm ²)	1600
y : 降伏応力(kgf/cm ²)	2400
u : 終局応力(kgf/cm ²)	4100
S : 損傷のエネルギー強度(MPa)	6.76
D_{1c} : 損傷度の限界値	0.15
PD : 損傷発生時の累積塑性ひずみ	0.10

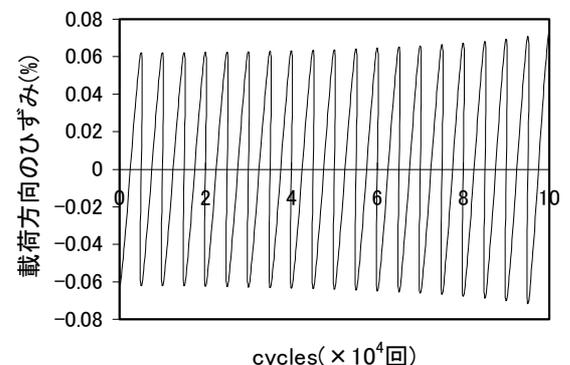


図-4 ひずみ履歴と載荷回数との関係

載荷荷重 19.2tf (/ $y=0.8$)

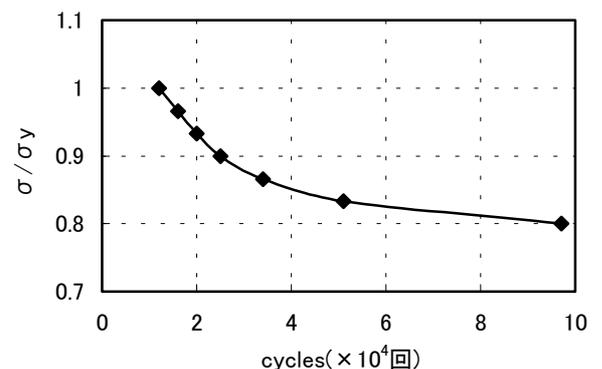


図-5 応力比 - ひび割れ発生までの載荷回数曲線