

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 園田 明大

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、既存構造物の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。

2.1 損傷の概念の導入

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 $r = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \cdot \varepsilon_{ij}^p}$ 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。なお、損傷の進展にともなう散逸ポテンシャル関数を次式により定義した。

$$F_D = \frac{Y^2}{(1-D)} H_{(r-p_D)} \quad (1)$$

ここに、 $Y = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2} \left\{ \frac{2}{3}(1+\nu) + \frac{3}{1-2\nu} \left(\frac{E\varepsilon_H}{\sigma_s} \right)^2 \right\}$: 損傷によるエネルギー開放率、 σ_{eq} : ミーゼスの降

伏条件を想定した相当応力、 $H_{(r-p_D)}$: $r < p_D$ のとき 0、 $r \geq p_D$ のとき 1 の値をとるステップ関数

本解析では、累積塑性ひずみと損傷の連成を簡易に考慮するため、式(1)を導入したひずみ硬化を考慮しない完全弾塑性型の降伏関数として、式(2)を適用した。

$$F = \bar{\sigma}_{eq} - \sigma_y + F_D \quad (2)$$

ここに、 $\bar{\sigma}_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{1-D}$: 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

また、塑性ひずみ増分と損傷変数増分は、それぞれ以下の式で得られるものとした。

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \quad (3)$$

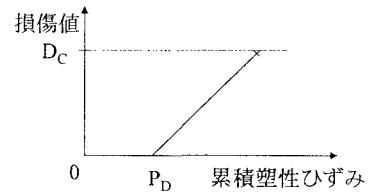


図-1 損傷の発生条件

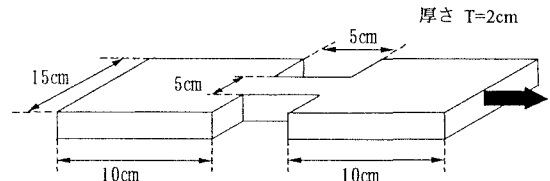


図-2 解析モデル

$$dD = \frac{\partial F_D}{\partial Y} d\lambda \quad (4)$$

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(5)が得られる。

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} \left\{ \delta_{ks} \delta_{lt} - \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rq}} D_{rqst} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{rq}} D_{eqst} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{st}} - \frac{\partial f}{\partial D} \frac{\partial F_D}{\partial Y}} \right\} d\epsilon_{st} \quad (5)$$

2.2 損傷の影響を考慮した弾塑性解析

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、各要素のガウスポイント別に損傷の評価を式(4)を用いて行い、得られた損傷変数値 D を次ステップの弾塑性構成式(5)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. 数値計算結果および考察

3.1 解析モデル

解析対象とした試験片は、図-2 のような応力集中が生じやすい形状の鋼材 4 種類で、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。計算に用いた各鋼材の降伏荷重等の物性値を表-1 に示す。なお、損傷の評価に必要な材料定数には、鋼材の単軸疲労試験結果をもとにした表-2 に示す値を用いた。本来、鋼種によってこれらの値は異なるものと思われるが、ここでは全ケースに対して同一の値を適用した。

3.2 数値計算結果

(1) 荷重レベルとひび割れ発生回数の関係

鋼材 1 を対象に、荷重レベルを変えた場合のひび割れ発生までの载荷回数を比較した。図-3 は、各荷重レベルで得られたひび割れ発生までの回数を、降伏荷重を与えたときの発生回数で除した比を示したものである。この図より、荷重レベルが降伏荷重の 80% を下回るとひび割れ発生までの载荷回数が急激に増大する傾向にあることが認められた。

(2) 鋼種とひび割れ発生回数の関係

次に、表-2 に示す 4 種類の鋼材に対して降伏荷重の 93% 相当の荷重をかけた場合のひび割れ発生までの载荷回数を表-3

に示す。この表より、高強度の鋼材ほど損傷度の進展が早く、ひび割れ発生までの载荷数が小さくなる傾向にあることが解析的に示された。今後、実験データとの比較を通して定量的な検討を行う必要があるが、本研究で用いた手法を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。

表-1 各鋼材の降伏応力

	疲労限界応力	降伏応力	終局応力
鋼材1(構造用軟鋼)	1600	2400	4100
鋼材2(低合金鋼)	2300	3450	4800
鋼材3(調質炭素鋼)	3730	5600	7000
鋼材4(溶接構造用高張力鋼)	4670	7000	7840

表-2 損傷に関する材料定数

S: 損傷のエネルギー強度	7.0 (MPa)
D_{lc} : 単軸試験による損傷度の限界値	0.15
ϵ_{PD} : 損傷発生時の累積塑性ひずみ	0.10

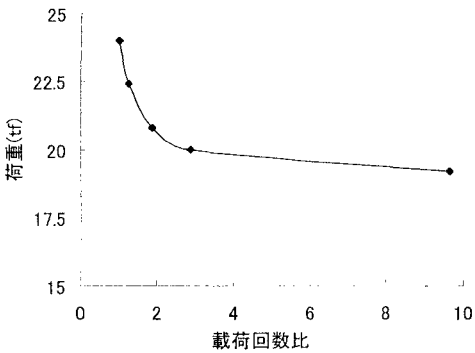


図-3 ひび割れ発生までの载荷回数比 (鋼材 1)

表-3 鋼種とひび割れ発生回数の関係

鋼種	鋼材1	鋼材2	鋼材3	鋼材4
载荷回数比	1.00	0.36	0.14	0.11