

弾塑性損傷モデルによる極低サイクル疲労に関する強度評価のための基礎的研究

○東北大学工学部建築・社会環境工学科	学生会員	渡部 慎也
東北大学大学院工学研究科	学生会員	番場 良平
筑波大学システム情報系		新宅 勇一
大阪大学接合科学研究所	正会員	堤 成一郎
東北大学災害科学国際研究所	正会員	森口 周二
東北大学災害科学国際研究所	正会員	寺田 賢二郎

1. 緒言

大規模地震時、鋼構造物には過大な外力が繰り返し作用し、一度荷重を受けただけでは破壊しなくとも、繰り返し载荷によって損傷が進行し、破壊に至る可能性があり、こうした比較的少数の繰り返し変形を受けて破壊する低サイクル疲労破壊は、実際の地震においても観察されている。したがって、地震を経験した鋼構造物が安全に使えるかどうかを正確に予測するためには、蓄積されている損傷および構造物の有する残留強度を適切に評価するための解析手法が必要となる。現状の低サイクル疲労破壊を表現するモデル [1] では終局強度を支配する破壊時の挙動を適切に表現できておらず、引張破壊前に見られるネッキングのような、変形に伴う応力状態の変化が考慮されていない。そこで本研究ではこの目的のために提案された破壊力学に基づく弾塑性損傷モデルについて、SM490A を用いた実験に対する表現性能を検証する。

2. 実験概要

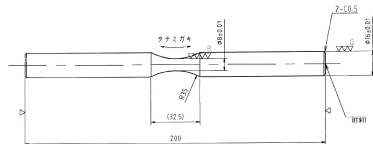


図-1 試験片寸法

疲労試験機を用い、鋼構造物として広く利用されているSM490A 鋼材に対して単調引張試験および塑性ひずみ一定引張試験を行う。試験片の形状は、図-1 に示すような最小断面部の直径が8 mm の砂時計型丸棒である。実験は数値解析モデルの検証を行うため3種類の素材実験を行った。

- 1) 単調引張試験（以下、実験 I）
- 2) 塑性ひずみ範囲一定両振り試験（以下、実験 II）
- 3) 塑性ひずみ範囲一定両振り試験を一定回数後、単調引張試験を行なう（以下、実験 III）

加力には、動的最大荷重 300 kN の油圧式疲労試験機を用い、最小断面の直径方向変化量をレーザー厚み計により 10 Hz で連続的に計測し、測定直径の径方向変位を試験片の非圧縮性を仮定して軸方向変位に換算し、塑性ひずみを算出し制御している。これらの導出にあたり、以下の式を

用いた。[2]

$$\begin{aligned}\sigma_a &= \frac{4P}{\pi d^2} \\ \epsilon_e &= \frac{\sigma_a}{E} ; \quad \epsilon_p = -2 \left\{ \ln \frac{d}{d_0} + \frac{\nu \sigma_a}{E} \right\} \\ \epsilon_a &= \epsilon_e + \epsilon_p = -2 \ln \frac{d}{d_0} + (1 - 2\nu) \frac{\nu \sigma_a}{E}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 P は荷重、 d は試験片最小断面部の初期直径、 d_0 は最小断面部の当該負荷レベルにおける直径、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。

3. 有限ひずみ弾塑性損傷モデル

物質の破壊は、材料中に亀裂が通過することによって起こる。この破壊の過程を、ひび割れ境界間での結合力と開口変位の関係として与えることで破壊進行領域での力学挙動をモデル化する。以下、本研究で採用する有限ひずみ弾塑性損傷モデルを示す。

3.1 対数ひずみを用いた Hencky 超弾性モデル

本モデルでは有限ひずみに対数ひずみを用い、弾性構成則として Hencky 超弾性モデル [3] を適用することとする。

3.2 超弾性構成則に基づく乗算分解塑性モデル

変形勾配 $\mathbf{F}$ は、 $\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_p$ のように弾性部分と塑性部分との積の形に分解できるものと仮定する。

3.3 対数ひずみを用いたヘンキー超弾性モデル

金属材料では一方向に負荷した後、反対方向への塑性降伏の抵抗が小さくなる Bauschinger 効果が現れる。この現象をモデル化するために移動硬化を導入し、降伏基準に次式のような移動硬化 von Mises モデルの降伏関数を採用する。

$$\Phi(\tau, \beta, \sigma_y) = \sqrt{3J_2(s(\tau) - \beta)} - \sigma_y \quad (2)$$

ここで τ は Kirchhoff 応力、 s は Kirchhoff 応力の偏差成分、 β は偏差背応力テンソル、 σ_y は降伏応力、 J_2 は括弧内のテンソルの第二不変量である。 β の発展則には、(3) 式のような Prager の非線形移動硬化則を用い、非線形等方硬化則には Voce 硬化則を用いる。

$$\dot{\beta} = \frac{2}{3} H \dot{\epsilon}^p - \dot{\gamma} \beta \quad (3)$$

ここで $\dot{\gamma}$ は塑性乗数、 H は移動硬化係数、 ϵ^p は累積塑性ひずみである。

3.4 等方性の有限ひずみ損傷モデル

ひび割れ境界間の結合力と開口変位の関係を損傷モデルに導入する．損傷を考慮した等価コーシー応力 σ_{eq} は (4) 式で表される．

$$\sigma^{eq} = (1 - D) \frac{E}{J_{eq}} \ln \lambda_e^{eq} = (1 - D) \frac{E}{J_{eq}} \epsilon_e^{eq} \quad (4)$$

ここで，等価弾性ひずみ ϵ_e^{eq} 等価弾性ストレッチ λ_e^{eq} である．また，一次元問題における結合力-開口変位関係を応力とひずみで表した式が，(4) 式と同形式になるよう書き換えると，損傷変数 D は (5) 式のようになる．

$$D(\lambda^{eq}) = 1 - \frac{J_{eq}}{E} \sigma_0 \exp\left(-\frac{\sigma_0 L_e}{G_f} (\lambda^{eq} - \lambda^d)\right) \quad (5)$$

ここで， σ_0 は損傷発生応力， L_e は要素の代表長さ， G_f は破壊エネルギーである． σ_d は損傷発生ストレッチであり，損傷発生ひずみを ϵ_d 用いて (6) 式で表される．

$$\lambda_d = \exp(\epsilon_d); \quad \epsilon_d = \epsilon_0 \exp\left(1 - \frac{D}{0.5}\right)^n \quad (6)$$

ここで， σ_0 は塑性変形の影響を受けない場合の損傷発生ひずみであり， n はパラメータである．

4. 数値解析例

数値解析モデルの形状は図-2 に示すように，実際の試験片の設置状況に沿って，くびれ部分のみを解析対象とし，境界条件はくびれ部分と丸棒部分に与える． $x-y$ ， $y-z$ ， $x-z$ 平面上の対称条件を考慮して，1/8 モデルとし，実験 I および実験 III と同様の条件の負荷となるように，強制変位を与える．

本研究における損傷・結合力モデルについて，同定したパラメータを用いた引張解析により得られた応力-ひずみ曲線と，引張試験の応力-ひずみ曲線をそれぞれ比較したものを図-3，図-4 に示す．また，実験における DIC と数値解析から得られた引張方向主ひずみ分布の比較を図-5，図-6 において，またそれぞれの形状の比較を図-7，図-8 に示す．実験 I 条件下での数値解析では，終局状態に至るまでの主ひずみ分布や形状は実験に近い挙動を再現することができた．一方で，実験 III の場合，主ひずみ分布や形状を含め，実験 I と比べると精度が劣る．これは，数値解析が理想的な状態において実験を再現していることに対し，実験では設置の際に生じた僅かな傾きを含む誤差が圧縮の過程においてせん断力として現れ，主ひずみ分布や形状に影響を与えているものと考えられる．

5. 結言

本研究では，損傷変数に塑性ひずみを考慮した有限変形弾塑性損傷モデルを用いて，数値解析による引張試験の応力-ひずみ線図に対する再現を行った．そして，実験より

得られたデータ，解析より得られたデータとの比較を行った．その結果，従来の Lemaitre モデル [4] では表現できない，破断以降の SM490A の挙動を主ひずみ分布や形状の点からも適切に再現することができた．

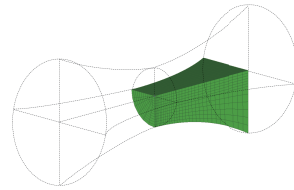


図-2 引張試験数値解析モデル

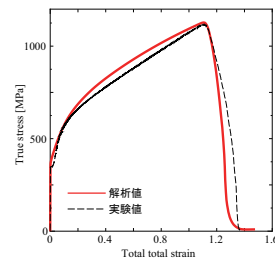


図-3 実験 I：真応力-全ひずみ履歴曲線

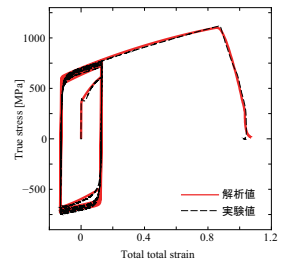


図-4 実験 III：真応力-全ひずみ履歴曲線

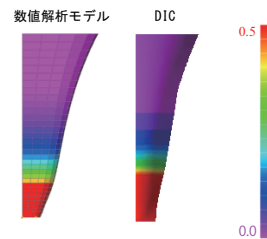


図-5 実験 I：終局状態における引張方向主ひずみ分布の比較

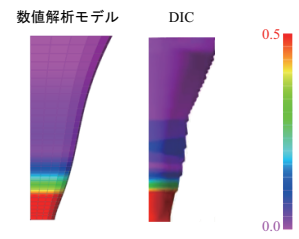


図-6 実験 III：終局状態における引張方向主ひずみ分布の比較

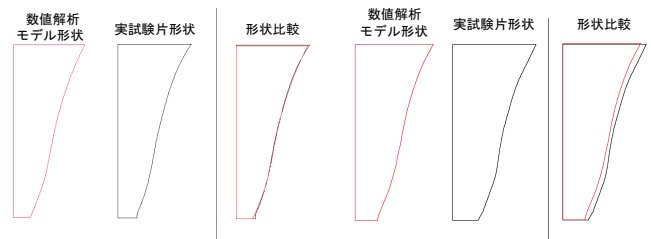


図-7 実験 I：終局状態における形状比較

図-8 実験 III：終局状態における形状比較

参考文献

- 1) Milan, J and Marco, B., Numeral aspects of the crack band approach, *Computers and Structures.*, 110-111, pp. 60-78, 2012.
- 2) Nakagomi, T., Lee, K.: Experimental study on fatigue characteristic of SM490 by repeated load, *J. Struct. Constr. Eng.*, AIJ, No.469, pp.127-136, 1995
- 3) EA de Souza, D Perić, DRJ Owen: 非線形有限要素法, pp.577-580, 森北出版, 2013
- 4) Lemaitre, J., A continuous damage mechanics model for ductile fracture, *J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 99, pp. 2-15, 1977.