

多孔質体の弾塑性損傷進展解析

○ 法政大学 学生会員 内田 亮介
 法政大学 正会員 草深 守人
 法政大学 正会員 竹内 則雄
 法政大学 正会員 武田 洋

1. はじめに

本文では、リサイクル材として開発された比較的粒径の揃った粗粒な増粒物の集合体である多孔質固化体に対する損傷モデルの適用性について考察した．ここでは、焼成増粒物の集合体である多孔質体の構成モデルとして損傷の進展を表現できる損傷構成方程式を採用する．また、粒子接点に存在する結合物内の微視的亀裂の進展が、多孔質体としての巨視的な構造の応力-ひずみ関係を支配するものとした．

2. Drucker-Prager の降伏関数

降伏関数が Drucker-Prager の降伏関数に従うものと仮定すると、等方損傷モデルにおける降伏関数 f は、ひずみ等価仮説に基づき次式のように拡張される．

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = \frac{1}{1-D} (\sqrt{J_{2D}} - \alpha J_1) - \Lambda(\bar{\epsilon}^p) = 0 \quad (1)$$

ここで、 σ_{ij} 、 ϵ_{ij} はそれぞれ Cauchy の応力テンソルとひずみテンソル、 ϵ_{ij}^p は塑性ひずみ、 α は材料定数、 $\Lambda(\bar{\epsilon}^p)$ はひずみ硬化を表現する項、 D は損傷量、 $\bar{\epsilon}^p$ は相当塑性ひずみ、 J_1 、 J_{2D} はそれぞれ応力テンソルの第一不変量と偏差応力テンソルの第二不変量である．また、式(1)のひずみ硬化項は次式のように表すことができる．

$$\Lambda(\bar{\epsilon}^p) = \kappa + \frac{1 - \sqrt{3}\alpha}{\sqrt{3}} H \int d\bar{\epsilon}^p \quad (2)$$

ここで、 κ は材料定数、 H はひずみ硬化率である．

3. 散逸ポテンシャルと等方硬化弾塑性損傷構成方程式

損傷の進展は、塑性論における塑性ひずみ速度の決定に塑性ポテンシャルの存在を仮定したと同様に、損傷の進展速度を支配する損傷ポテンシャルの存在を仮定する．すなわち、塑性ひずみ増分と損傷の進展速度を規定する散逸ポテンシャル $\bar{F}$ を次式で仮定する．

$$\bar{F} = F + F_D \quad (3)$$

ここで、 F は塑性ポテンシャル関数であり、 F_D は損傷ポテンシャル関数である．

損傷速度が損傷の進展に伴って開放される弾性ひずみエネルギーの密度 Y （ひずみエネルギー開放率）に比例して増加するものと仮定すると、損傷ポテンシャル関数は次式で表すことができる．

$$F_D = \frac{Y^2}{2S(1-D)} H(\bar{\epsilon}^p - \bar{\epsilon}_D^p) \quad H = \begin{cases} 1 & \bar{\epsilon}^p - \bar{\epsilon}_D^p \geq 0 \\ 0 & \bar{\epsilon}^p - \bar{\epsilon}_D^p < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$Y = \frac{1}{2E(1-D)^2} \{ (1+\nu) S_{ij} S_{ij} + (1-2\nu) \sigma_H^2 \}$$

ここで、 S は損傷のエネルギー強度、 $\bar{\epsilon}_D^p$ は損傷の進展が始まる時点の相当塑性ひずみ、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 S_{ij} は偏差応力テンソル、 σ_H は静水圧応力成分、 H はステップ関数であり、損傷の発生はひずみがあるレベルに達した時点から生じ、それ以前には損傷の進展がないことを表している．

塑性の発生と損傷の進展がそれぞれ独立に塑性ポテンシャル（本文では、 $F = f$ とした）と損傷ポテンシャルに支配されるとし、かつ両者に流れ則を仮定することにより、通常の塑性論における構成方程式の誘導過程と全く同様にして損傷材料の構成方程式を次式のように導くことができる．

キーワード：損傷力学，構成方程式，等方損傷，多孔質体，連続体力学

連絡先：〒184-0002 東京都小金井市梶野町 3-7-2 法政大学工学部土木工学科 草深守人

$$d\sigma_{ij} = \left\{ E_{ijkl}^e(1-D) - E_{ijkl}^p \right\} d\epsilon_{kl} - E_{ijkl}^e \epsilon_{kl} dD$$

$$E_{ijkl}^p = \frac{E_{ijpq}^e(1-D) \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} E_{mnkl}^e(1-D) \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}}}{h + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} E_{mnpq}^e(1-D) \frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}}} \quad (5)$$

ここで、 E_{ijkl}^e は弾性コンプライアンスである。

4. 三軸圧縮試験と計算値の比較

三軸試験はJST-T524に基づき、完全排水条件で実施した。使用材料は、ゴミ焼却灰を焼成増粒することによって生産された人工砂（セメント Wc/焼成灰 Wa=50%）および固化材（Wc/Wa=50%）を使用し、人工砂の質量 Ws に対する固化材の質量 Wac の配合率（Wac/Ws）を 7, 10, 13% とした。拘束圧 σ_3 は 0.050, 0.075, 0.100, 0.125 (MPa) として三軸圧縮試験を行った。

式(5)の弾塑性損傷構成方程式に従って三軸試験の数値解析を実施した。ここでは、Wac/Ws = 13% の解析値と試験値を例に、応力-ひずみ関係で比較したものを図 1～図 4 に示す。これらの例を含めた他の試験条件に対する比較は、全般的には試験値と解析値の間に良好な対応を示しているものの、一部の解析値は試験値と大きく異なる結果となった。この原因は三軸試験結果に部分的に特異なデータが含まれていたことによるものと考えられるが、現状では、材料試験上の問題か理論的な問題かは明らかでなく、今後の検討が必要である。

図 5 は、解析から得られた供試体内部の損傷量を軸ひずみとの関係で示したものである。損傷は、ほぼ降伏点から進展を開始し、損傷の進展速度が最大応力を越えた時点から急速に上昇するようである。

5. あとがき

リサイクル材として開発された比較的粒径の揃った粗粒な増粒物の集合体である多孔質固化体に対する損傷モデルの適用性について考察した。

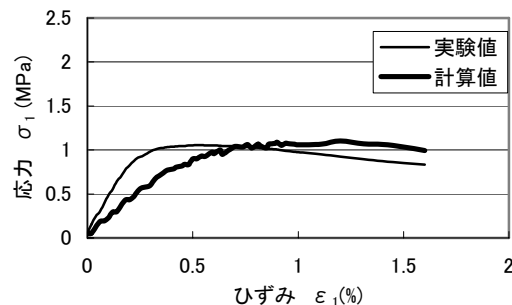


図 1 Wac/Ws=13%, $\sigma_3=0.050$ MPa

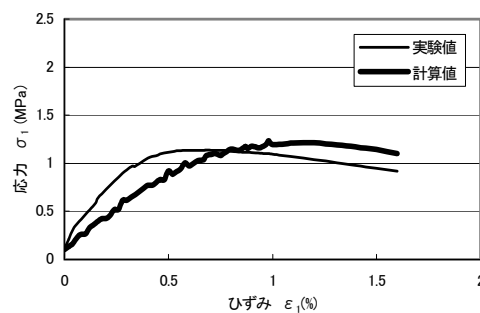


図 2 Wac/Ws=13%, $\sigma_3=0.075$ MPa

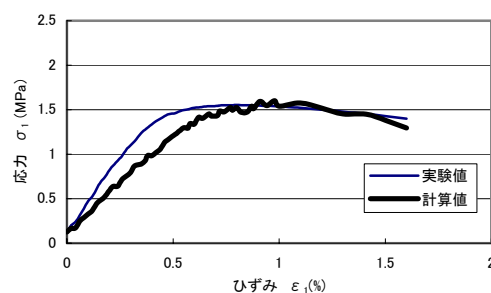


図 3 Wac/Ws=13%, $\sigma_3=0.100$ MPa

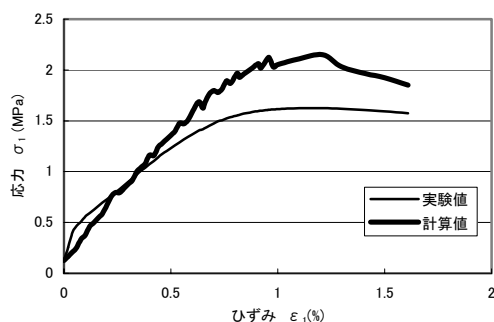


図 4 Wac/Ws=13%, $\sigma_3=0.125$ MPa

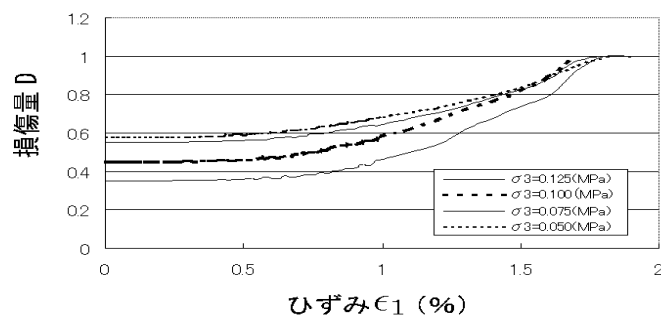


図 5 損傷の進展 (Wac/Ws=13%)