

弾粘塑性ひずみ軟化モデルによる一次元圧密解析

大阪大学工学部 正 会 員 阿 部 信 晴
大阪大学工学部 学生会員 ○吉田圭伊智
大阪大学大学院 学生会員 橋 本 和 晃

1. まえがき

構造の発達した鋭敏粘土は、降伏後、大きな圧縮性を示し、降伏後の $e-\log p$ 関係が直線とならないことが多い。本研究では、このような粘土を対象として、interacting continua theory と弾粘塑性理論に基づいて、ひずみ軟化挙動をも表現可能な一次元弾粘塑性モデルを提案し、そのモデル特性を一次元圧密解析結果により明らかにする。

2. 鋭敏粘土の圧縮特性

図-1は、鋭敏粘土の圧縮性に関する概念モデルを示したものである。すなわち、鋭敏粘土の降伏は粘土の固有構造の劣化に起因するものとして、圧縮特性を3つの領域に分けて説明している。領域Ⅰは発達した固有構造が保持されている領域であり、鋭敏粘土はここでは比較的大きな剛性を有している。応力（ひずみ）が増加していくと、構造の劣化が始まり、降伏挙動を示す。そして、構造のbondが完全に破壊されると鋭敏粘土は練し返し状態での圧縮特性を示すようになる。これが領域Ⅲである。領域Ⅱは、領域Ⅰから領域Ⅲへの遷移領域であり、鋭敏粘土の固有構造の劣化過程とする。

3. 一次元弾粘塑性 interacting continua model

鋭敏粘土の圧縮性に関する概念モデルを数値モデル化するために、interacting continua theory を用いる。図-1の領域Ⅰ、Ⅲを非損傷領域、損傷領域とし、それぞれの領域における圧縮特性を表現する変形成分、非損傷成分と損傷成分を考える。そして、領域Ⅱにおける鋭敏粘土の挙動は、累積ひずみに依存して寄与率が変化する2つの変形成分の応答の和として表現される。

粘土要素の体積を V とし、非損傷成分、損傷成分の体積をそれぞれ V_n, V_d （ただし、 $V = V_n + V_d$ ）とすると、粘土要素全体の平均応力は次式で与えられる。

$$\bar{\sigma}_s = \frac{1}{V} \left(\int_{V_n} \sigma_n^s dV_n + \int_{V_d} \sigma_d^s dV_d \right) \quad (1)$$

また、非損傷部分、損傷部分での平均応力 σ_{sn}, σ_{sd} は、それぞれ次式で与えられる。

$$\sigma_{sn} = \frac{1}{V_n} \int_{V_n} \sigma_n^s dV_n \quad (2), \quad \sigma_{sd} = \frac{1}{V_d} \int_{V_d} \sigma_d^s dV_d \quad (3)$$

ここに、 σ_n^s, σ_d^s はそれぞれ非損傷部分、損傷部分における応力である。損傷成分の全体挙動への寄与率を損傷率として次式で定義する。

$$r = V_d / V \quad (4)$$

(2), (3)式を (1)式に代入し、(4)式を用いることにより、

$$\bar{\sigma}_s = (1-r)\sigma_{sn} + r\sigma_{sd} \quad (5)$$

(5)式の時間微分をとることにより、

$$\dot{\bar{\sigma}}_s = (1-r)\dot{\sigma}_{sn} + r\dot{\sigma}_{sd} - \dot{r}(\sigma_{sn} - \sigma_{sd}) \quad (6)$$

ひずみについては、非損傷成分の平均ひずみ ϵ_{sn} と損傷成分の平均ひずみ ϵ_{sd} は常に等しいものとする。

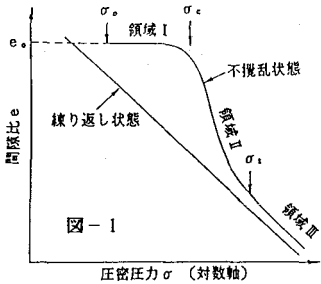


表-1

非損傷成分	損傷成分
$\kappa_n = 4.2 \times 10^{-3}$	$\kappa_d = 4.2 \times 10^{-3}$
$\lambda_n = 2.1 \times 10^{-2}$	$\lambda_d = 2.1 \times 10^{-1}$
$\mu_n = 3.0 \times 10^{-3}$	$\mu_d = 3.0 \times 10^{-3}$
$\dot{\epsilon}_{Yrn} = 5.0 \times 10^{-6}$ (1/min)	$\dot{\epsilon}_{Yrd} = 5.0 \times 10^{-6}$ (1/min)
$\delta_n = 1.0 \times 10^{-4}$	$\delta_d = 1.0 \times 10^{-4}$
$h = 160.0$ $k = 0.001$ $m = 1.05$ $r_0 = 1.0$	$k_{s0} = 1.0 \times 10^{-6}$ (cm/min) $C_k = 0.75$ $\sigma_{s0} = 1.0$ (kgf/cm ²) $e_0 = 1.5$ $H_0 = 5.0$ (cm)

Nobuharu ABE, Keiichi YOSHIDA and Kazuaki HASHIMOTO

$$\text{すなわち, } \bar{\varepsilon}_s = \varepsilon_{sn} = \varepsilon_{sd} \quad (7) \quad \dot{\bar{\varepsilon}}_s = \dot{\varepsilon}_{sn} = \dot{\varepsilon}_{sd} \quad (8)$$

ここでは、非損傷成分、損傷成分とも弾粘塑性体と仮定して、次式で与えられる流動曲面モデルを適用する。

$$\dot{\sigma}_s = \left[\frac{\kappa}{1+e_s} \frac{1}{\sigma_s} + \frac{\partial F}{\partial \sigma_s} \right]^{-1} \left(\dot{\varepsilon}_s - \frac{\partial F}{\partial t} \right) \quad (9)$$

$$F = \mu \ln \left[\frac{1}{\delta} \left(\left(1 - \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_s t \right) \right) \exp \left(\frac{\varepsilon_s}{\mu} \right) + \delta \exp \left(-\frac{\delta}{\mu} \dot{\varepsilon}_s t \right) \right) \right] - \varepsilon_s \dot{\gamma} = 0 \quad (10)$$

(8), (9), (10)式を(6)式に代入することにより、一次元弾粘塑性 interacting continua model の応力速度～ひずみ速度関係が得られる。

$$\dot{\sigma}_s = \bar{D} \dot{\varepsilon}_s - L \quad (11)$$

$$\text{ここに, } \bar{D} = (1-r)D_n + rD_d \quad (12)$$

$$L = (1-r)D_n \frac{\partial F_n}{\partial t} + rD_d \frac{\partial F_d}{\partial t} + \dot{\gamma}(\sigma_{sn} - \sigma_{sd}) \quad (13)$$

$$D_n = \left[\frac{\kappa_n}{1+e_s} \frac{1}{\sigma_{sn}} + \frac{\partial F_n}{\partial \sigma_{sn}} \right]^{-1} \quad (14), \quad D_d = \left[\frac{\kappa_d}{1+e_s} \frac{1}{\sigma_{sd}} + \frac{\partial F_d}{\partial \sigma_{sd}} \right]^{-1} \quad (15)$$

損傷率 r は粘塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_s^p$ の関数とし、次式で与えるものとする。

$$r = r_0 [1 - \exp(-h(\bar{\varepsilon}_s^p - k)^m)] \quad (16)$$

ここに、 r_0 は r の限界値であり、 k は構造の劣化が始まる粘塑性ひずみの値である。 h, m は定数である。 $\langle \rangle$ は Macaulay bracket である。

4. 鋭敏粘土の一次元圧密解析

(11)式の増分関係式を求め、弾粘塑性一次元圧密解析を有限要素法により行った。解析対象は厚さ5cmの鋭敏粘土であり、これを10要素に分割し、上面のみを排水面としている。第1要素が排水面に、第10要素が非排水面に位置している。材料パラメータ、初期条件を表-1に示しているが、簡単のため、非損傷成分、損傷成分の弾性および粘性パラメータを同一としている。

定ひずみ速度圧密解析：図-3は圧縮指数（ただし、 $d\varepsilon_s/d\log\sigma_s$ で定義）

の変化を示しているが、ほぼ妥当な傾向となっている。図-4は $h=200$ として損傷速度を大きくした場合であるが、ひずみ軟化挙動が認められる。

定応力載荷圧密解析：定応力載荷圧密では顕著なひずみ軟化挙動が認められ、一次圧密過程で間隙水圧の上昇が生じている。

定応力速度圧密解析：圧密降伏後、間隙水圧が一旦増加し、その後減少していくことがわかる。

5. まとめ

降伏後、大きな圧縮性を示す鋭敏粘土を対象として、ひずみ軟化挙動をも表現可能な一次元弾粘塑性モデルを提案し、そのモデル特性を一次元圧密解析結果に基づいて考察した。

