

飽和粘土のひずみの局所化解析に与えるダイレイタンシーと透水性の影響

京都大学大学院 フェロー会員 岡 二三生
 京都大学大学院 学生会員 肥後 陽介
 京都大学大学院 学生会員 木元 早百合

1. はじめに

粘性土はせん断変形を受けるとダイレイタンシー特性を示す．負のダイレイタンシー特性を持つ正規圧密粘土は圧縮と共に平均有効応力が減少し，正のダイレイタンシー特性を持つ過圧密粘土は体積膨張を起こし平均有効応力が増加する．また，飽和粘土の変形の局所化に透水性が影響を及ぼすことが知られている ([1] など)．これらの点に着目し，岡ら [1] は正規圧密粘土および過圧密粘土の双方のダイレイタンシー特性を表現可能な飽和粘土の弾粘塑性構成式 [2] を用いた有限変形水-土連成有限要素法によるひずみの局所化解析を行い，ダイレイタンシー特性と透水性が変形の局所化に与える影響について研究した．そこで本研究では，これらの解析結果についてダイレイタンシーと透水性がひずみの局所化に与える影響についてさらなる考察を行うと共に，本解析におけるメッシュサイズ依存性についても検討を行った．

2. 飽和粘土の弾粘塑性構成式

岡ら [2] は，足立・岡の正規圧密粘土の弾粘塑性構成式 [3] をより一般化し，過圧密領域の挙動をも表現可能に拡張した飽和粘土の弾粘塑性構成式を誘導した．本構成式では，粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ が以下のように定義される．

$$\text{過圧密境界面} : f_b = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \left(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^* \right) \right\}^{\frac{1}{2}} + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0, \quad \sigma'_{mb} = \sigma'_{mbi} \exp \left(\frac{1+e}{\lambda} v^p \right) \quad (1)$$

$$\text{流れ則} : \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = C_{ijkl} \langle \Phi_1(f_y) \rangle \Phi_2(\xi) \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}}, \quad \Phi_1(f_y) = \sigma'_m \exp \{ m' f_y \} \quad (2)$$

$$\text{降伏関数} : f_y = \bar{\eta}_x^* + \tilde{M}^* \left| \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} - y_m^* \right| = 0, \quad \bar{\eta}_x^* = \left\{ \left(\eta_{ij}^* - x_{ij}^* \right) \left(\eta_{ij}^* - x_{ij}^* \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\text{塑性ポテンシャル関数} : f_p = \bar{\eta}_x^* + \tilde{M}^* \left| \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mp}} - y_m^* \right| \quad (4)$$

$$f_b < 0 ; \quad \tilde{M}^* = - \frac{\bar{\eta}_x^*}{\ln(\sigma'_m/\sigma'_{mc})}, \quad f_b \geq 0 ; \quad \tilde{M}^* = M_m^*, \quad \sigma'_{mc} = \sigma'_{mb} \exp \left(\frac{\bar{\eta}_0^*}{M_m^*} \right) \quad (5)$$

$$\text{第二材料関数} : \Phi_2(\xi) = 1 + \xi, \quad \xi = \frac{M_f^* \bar{\eta}_x^{**}}{G_2^* \left\{ M_f^* - \frac{\eta_{mn}^{**}(\eta_{mn}^{**} - x_{mn}^{**})}{\bar{\eta}_x^{**}} \right\}}, \quad \bar{\eta}_x^{**} = \left\{ \left(\eta_{ij}^{**} - x_{ij}^* \right) \left(\eta_{ij}^{**} - x_{ij}^* \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\text{応力履歴比テンソル} : \eta_{ij}^{**} = \frac{S_{ij}^*}{\sigma_m^*}, \quad \sigma_{ij}^* = \frac{1}{\tau} \int_0^z \exp(-(z-z')/\tau) \sigma_{ij}(z') dz', \quad dz = \sqrt{de_{ij} de_{ij}} \quad (7)$$

ここで， C_{ijkl}, m' は粘塑性パラメータである．硬化パラメータには非線形移動硬化則に基づき，粘塑性偏差ひずみに依存する x_{ij}^* と，粘塑性体積ひずみに依存する y_m^* を用いる [2]． B_1^*, B_2^*, A_2^* は材料定数， M_f^* は破壊時の応力比， M_m^* は変相応力比， e は間隙比， λ は圧縮指数， λ は膨潤指数， v^p は粘塑性体積ひずみ， δ_{ij} は Kronecker の Delta である． σ'_{ij} は有効応力テンソル， σ'_m は平均有効応力テンソル， η_{ij}^* は応力比テンソルである． $\Phi_2(\xi)$ は応力履歴比 [2] (応力履歴 σ_{ij}^* の比， de_{ij} は全偏差ひずみ増分) によって定義されるひずみ軟化を表す関数で， τ は応力履歴に関する材料定数である．

3. ひずみの局所化解析

前節の弾粘塑性構成式を用いて，有限変形水-土連成有限要素法によるひずみの局所化解析を行った．応力速度には Cauchy 応力の Jaumann 速度を用い，Updated-Lagrangian 法により，固相・流体相のつりあい式と流体相の支配方程式を離散化した．未知数の変位には 8 節点，間隙水圧には 4 節点のアイソパラメトリック要素 (それぞれ 2×2 の Gauss Point を持つ) を用いた．解析に用いた材料定数を表 1 に示す．要素数は $10 \times 20 = 200$ 要素である．

表 1 解析に用いた材料定数

圧密降伏応力 σ'_{mbi}	392kPa	破壊応力比 M_f^*	1.05	変相応力比 M_m^*	1.05
初期圧密応力 σ'_{m0}	392kPa(NC) 100kPa(OC)	応力履歴パラメータ τ	0.001(NC) 0.2(OC)	移動硬化パラメータ B^*	0(NC) 0.5(OC)
圧縮指数 λ	0.172	粘塑性パラメータ C_{01}	$4.5 \times 10^{-8} (1/sec.)$	軟化パラメータ G_2^*	100(NC)
膨張指数	0.054	" C_{02}	$4.5 \times 10^{-8} (1/sec.)$	軟化パラメータ G_2^*	1(OC)
初期間隙比 e_0	0.72	" m'	21.5	せん断弾性係数 G_0	5500kPa

3.1. ダイレイタンシーと透水性がひずみの局所化に及ぼす影響

ダイレイタンシーと透水性がひずみの局所化に及ぼす影響について検討を行うため，正規圧密粘土および過圧密粘土に対して，透水係数 $k = 1.54 \times 10^{-8} (m/s)$ と $10^{-10} (m/s)$ について図 1 のような境界条件で解析を行った．

図 2 に $k = 1.54 \times 10^{-8} (m/s)$ の場合について，粘塑性偏差ひずみ蓄積量 $\gamma^p (= \int d\gamma^p dt, d\gamma^p = \sqrt{de_{ij}^{vp} de_{ij}^{vp}})$ ，平均有効応力 σ'_m と粘塑性体積ひずみ v^p の分布図を示す (以下のコンター図は全て軸ひずみ 10% 時)．正規圧密粘土の解析結果を見ると，粘塑性体積ひずみが圧縮側 (正) に発生し，平均有効応力が初期値の 392(kPa) から減少して負のダイレイタンシー

キーワード：ひずみの局所化，ダイレイタンシー，弾粘塑性構成式，透水性，メッシュサイズ依存性

連絡先：〒 606-8501 京都市左京区吉田本町 Tel & Fax : 075-753-5086

特性を示しており、特にせん断帯内部において顕著である．一方、過圧密粘土は正のダイレイタンスーにより粘塑性体積ひずみが膨張側（負）に発生し、初期値の 100(kPa) から有効応力が増加しているものの、せん断帯内部における平均有効応力の増加量が他の部分に比べて小さく、せん断帯内部において膨張の体積ひずみが顕著であることと相反している．

そこで、過圧密粘土について低い透水性を持つ $k = 1.54 \times 10^{-10}(\text{m/s})$ の場合の解析結果図 3 を見ると、せん断帯内部の平均有効応力が大きな値となっており、ダイレイタンスー特性が明確に現れている．また、図 4 に示す間隙水圧の分布図を見ると、 $k = 1.54 \times 10^{-8}(\text{m/s})$ の場合は間隙水圧が供試体内部でほぼ一定の値となっており、比較的自由に移動していることがわかる．これらのことから、透水性が相対的に高い場合には間隙水の移動により、ダイレイタンスー特性が打ち消されるということがわかった．

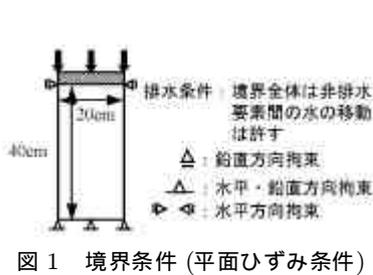


図 1 境界条件 (平面ひずみ条件)

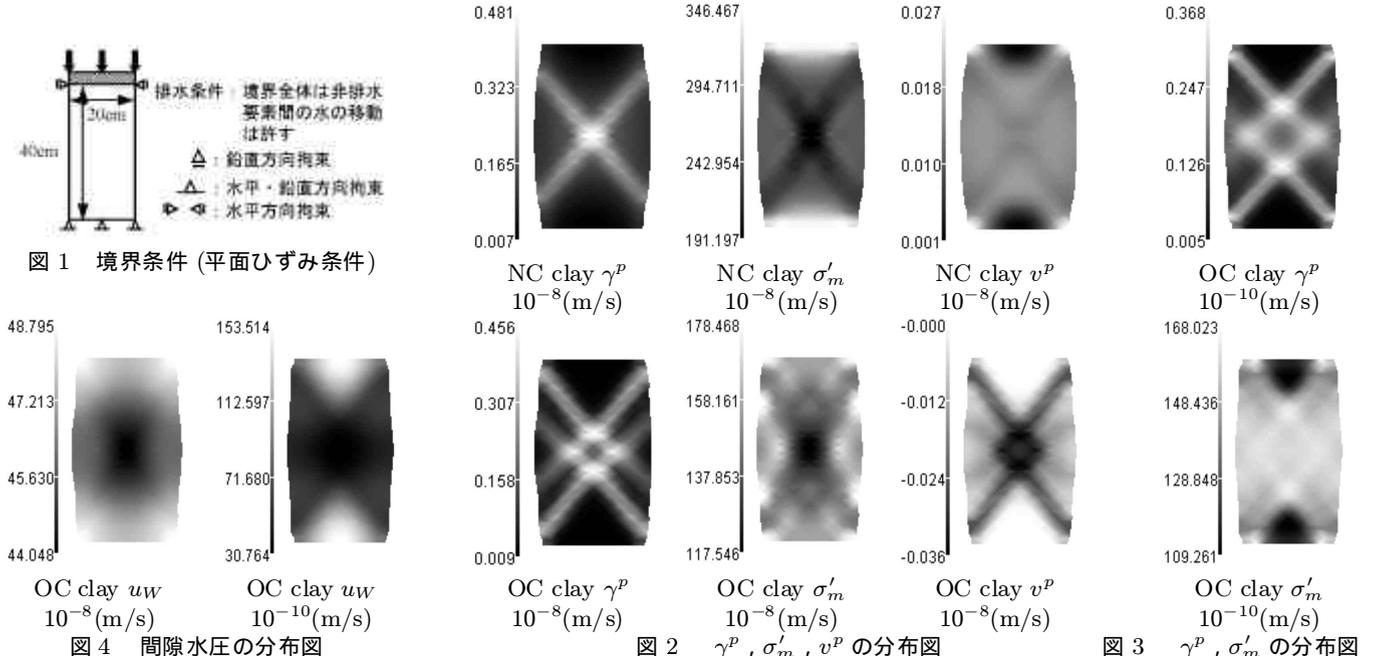


図 2 γ^p, σ'_m, v^p の分布図

図 3 γ^p, σ'_m の分布図

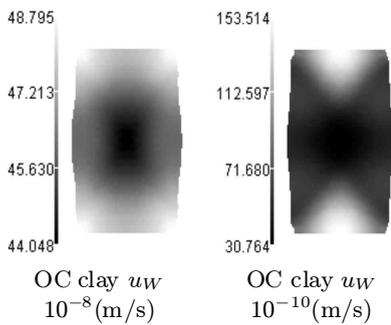


図 4 間隙水圧の分布図

3.2. 本解析におけるメッシュサイズ依存性

3.1 節に示した解析結果は要素数 200 のケースについてであったが、過圧密粘土についてさらに要素数を細かくした場合に、図 1 の境界条件を用いると変位拘束した部分のみに変形が集中し、軸ひずみが小さい段階で計算が発散してしまった．そこで、変位拘束の条件を緩和させるために図 5 に示す摩擦境界を用いて 50 要素、200 要素、800 要素の場合において解析を行った．なお、対称性を考慮して 1/4 断面のみを解析した．

図 6 に応力～ひずみ関係．図 7 に軸ひずみ 10% 時の γ^p 分布図を示す．これらの図から、際立ったメッシュサイズ依存性は確認されないとと言える．また場所の都合上省略したが、正規圧密粘土の場合は図 1 の拘束条件においてもメッシュサイズ依存性は見られなかった．これらのことから、過圧密粘土の方が不安定な状態に至りやすいこととなり、足立・岡モデルが正規圧密領域よりも過圧密領域において不安定である [4] ことと対応している．

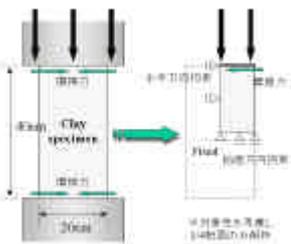


図 5 摩擦境界 (平面ひずみ条件)

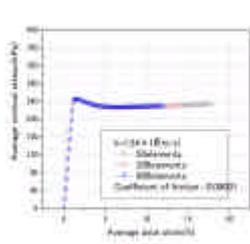
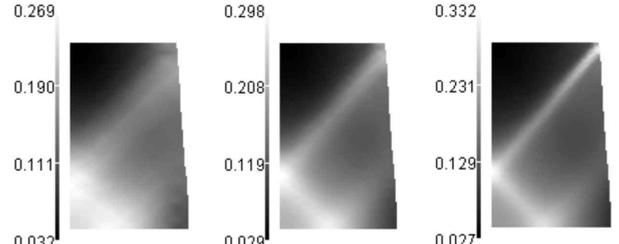


図 6 応力～ひずみ関係



50 要素 200 要素 800 要素
図 7 異なる要素数における γ^p 分布図 (OC clay)

4. 結論

正規圧密粘土と過圧密粘土のひずみの局所化解析を行い、粘性土のダイレイタンスー特性と透水性がひずみの局所化解析に及ぼす影響について検討したところ、透水性が相対的に高い場合、間隙水が比較的自由に移動し、せん断帯内部におけるダイレイタンスー特性を打ち消すということがわかった．また、本解析におけるメッシュサイズ依存性はほとんどみられないことが確認された．

参考文献

[1] 岡ら：飽和粘土の弾粘塑性構成式 (その 2)-変形の局所化解析-, 第 51 回地盤工学学会研究発表会講演概要集, pp.947-948, 2001. [2] 岡ら：飽和粘土の弾粘塑性構成式 (その 1)-構成式の誘導-, 第 51 回地盤工学学会研究発表会講演概要集, pp.945-946, 2001. [3] Adachi, T. et al. : Mathematical structure of an elasto-viscoplastic model for clay, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.31-42, 1987. [4] 岡ら：飽和粘土の弾粘塑性構成式の不安定性と変形の局所化, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, -A056, 2001.