

締固め土の体積圧縮挙動に着目した応力ひずみ関係の定式化

(株)日建設シビル	正 会 員	○ 本 田 道 識
神戸大学	正 会 員	飯 塚 敦
東京工業大学	正 会 員	大 野 進 太 郎
神戸大学	正 会 員	河 井 克 之
(株)日建ソイルリサーチ	正 会 員	汪 偉 川

著者らは一次元圧縮試験結果の考察から締固め粘性土における圧縮特性の評価方法を検討し、乾燥密度、降伏応力、含水比を用いて圧縮曲線の評価できることを報告した¹⁾。今回はこの結果にもとづいて応力～ひずみ関係式を提案する。

継続的に表現するために橋口ら²⁾の下負荷面と浅岡ら³⁾の上負荷面の概念を用いて定式化を試みる。なお、圧縮曲線は $e \sim \log p$ 関係で定式化する。含水比の低い領域では圧縮曲線の傾きが小さくなってゆくため $\log(1+e) \sim \log p$ 関係で定式化する等の配慮が必要となるがその検討は別の機会とする。また、圧縮曲線上の収束点を入力定数として取り扱った構成式が既に孫ら⁴⁾によって提案されているが、ここでは、含水比によって変化する変数として取り扱う。

1. 締固め土の圧縮特性

文献¹⁾における検討結果より、締固め土の圧縮曲線は等価間隙比 $e_w (= \rho_s \cdot w$ (ρ_s :土粒子比重, w :含水比))に対応する飽和圧縮曲線上の点を不飽和圧縮曲線との収束点として取り扱い、片対数軸上での直線性を仮定することで図-1のようにモデル化できる。今回はこの収束点の応力 p_w' に着目して定式化を試みる。

下負荷面および上負荷面の概念を用いたカムクレイモデルの降伏関数は(1)式で定義される。

$$f = MD \ln \frac{p'}{p_0'} + D\eta + MD \ln \frac{R^*}{R} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (1)$$

ここに、M:強度定数, D:ダイレイタンシー係数, ($D = (\lambda - \kappa) / (M(1+e_0))$), λ :圧縮指数, κ :膨潤指数, e_0 :初期間隙比), ε_v^p :塑性体積ひずみ, $p' = p + (Sr - Sr_0) / (100 - Sr_0) \cdot s$, Sr:飽和度, s:サクシオン, Sr_0 :吸着水が占める飽和度分 ($= \rho_s \cdot w_0 / e$, w_0 :吸着水の含水比), $\eta = q/p'$, p_0' : $\varepsilon_v^p = 0$ のときの p' , $R^* = p_c' / p_c'^*$, $R = p_y' / p_c'^*$, p_y' , $p_c'^*$, p_c' :それぞれ下負荷面, 上負荷面, 正規降伏面における参照応力($q = 0$ のときの p') (図-2 参照)

2. 応力～ひずみ関係の定式化

不飽和状態ではサクシオンによって降伏が抑制されるため、飽和土よりも外側の圧縮曲線を描く。しかしながら含水比変化が小さい場合には圧縮の進行に伴い飽和度が増加してゆくため、最終的には飽和土の圧縮曲線に帰着するようになる。このような挙動を連

ここで、パラメータ R^* を飽和度に依存したパラメータとして取り扱い、圧縮の進行、つまり飽和度の増加に伴って R^* が増加してゆき、飽和度 100%に達したとき $R^* = 1$ となって通常のカムクレイモデルに帰着す

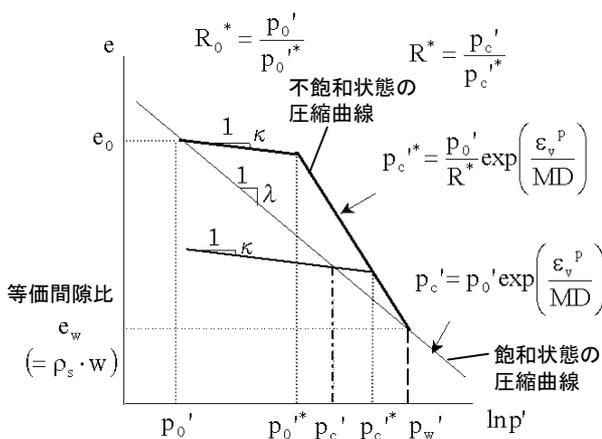


図-1 締固め土の圧縮曲線および上負荷面の硬化則の概念図

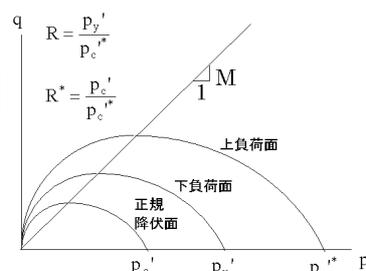


図-2 上下負荷面の概念図

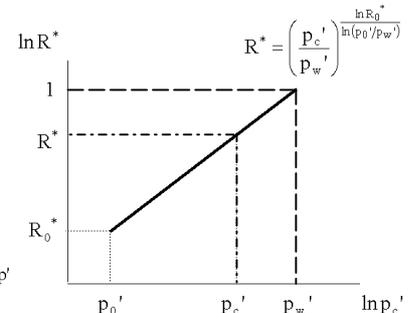


図-3 上負荷面パラメータ R^*

キーワード 締固め土, 圧縮特性, 構成式, 上下負荷面

連絡先

〒102-8117 東京都千代田区飯田橋 2-18-3 (株)日建設シビル 技術開発部 TEL 03-5226-3070

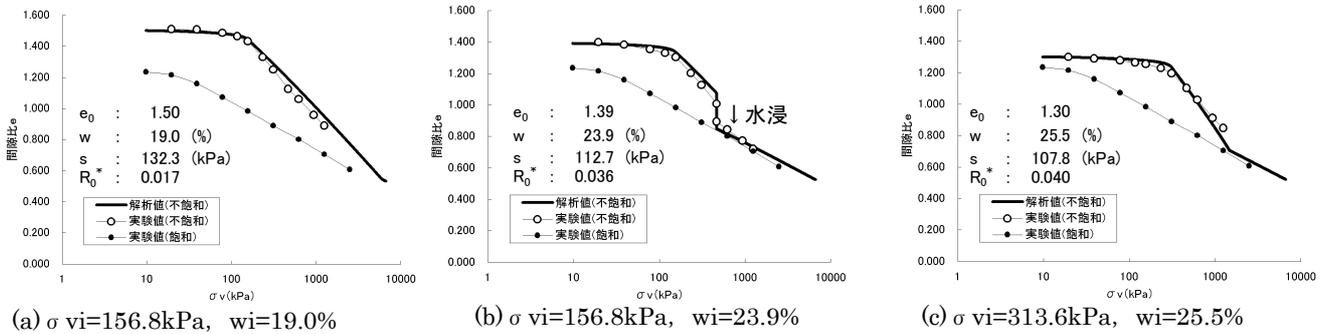


図-4 試験結果と解析結果との比較 (rho_s=2.7, wp=29.6%, Ip=13.4)

るようにR*を定義する。

図-3 のように両対数軸上でp' とR*の直線性を仮定してR*を(2)式で定義し、塑性体積ひずみと含水比で微分することにより発展則を(3)式で与える。

$$R^* = \left(\frac{p_c'}{p_w'} \right)^{\frac{\ln R_0^*}{\ln(p_0'/p_w')}} \quad (2)$$

ここに、p_w' : 図-1 における収束点のp'
(p_w' = p_0' \cdot \exp((e_0 - \rho_s \cdot w) / \lambda))

$$\dot{R}^* = \frac{\partial R^*}{\partial p_c'} \frac{\partial p_c'}{\partial \epsilon_v^p} \dot{\epsilon}_v^p + \frac{\partial R^*}{\partial p_w'} \frac{\partial p_w'}{\partial w} \dot{w} = \frac{R^* \cdot \ln R^*}{MD \ln(R^* p_c^*/p_w')} \dot{\epsilon}_v^p + \frac{\rho_s \cdot \ln R^*}{\lambda \cdot \ln(R^* p_c^*/p_w')} \cdot \dot{w} \quad (3)$$

下負荷面パラメータRの発展則は(4)式で与える。

$$\dot{R} = -\frac{m}{D} \ln R \left\| \dot{\epsilon}_{ij}^p \right\| \quad m : \text{材料パラメータ} \quad (4)$$

塑性ひずみ増分は(5)式の関連流れ則で与えるが、係数Lambdaに関しては(1)式より得られる(6)式のコンシステンシー条件から(7)式で定義する。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}'} \quad (5)$$

$$\dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}'} \dot{\sigma}_{ij}' + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} \dot{\epsilon}_v^p + \frac{\partial f}{\partial R^*} \dot{R}^* + \frac{\partial f}{\partial R} \dot{R} = 0 \quad (6)$$

$$\Lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}'} \dot{\sigma}_{ij}' + \frac{\rho_s \cdot \ln R^*}{\lambda \cdot \ln(R^* p_c^*/p_w')} \cdot \dot{w}}{\frac{\ln(p_c^*/p_w')}{\ln(R^* p_c^*/p_w')} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}'} \delta_{ij} - \frac{Mm}{R} \ln R \left\| \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}'} \right\|} \quad (7)$$

ここに、delta_ij : クロネッカーデルタ

3. 試験結果との比較

一次元圧縮試験結果¹⁾と解析結果との比較を図-4に、入力パラメータを表-1に示す。試験では側方応力を測定していなかったこと、不飽和土のKoは十分に解明

表-1 入力パラメータ

	単位	備考	
M	1.333	強度定数	※以下のパラメータは供試体条件、試験条件等から設定(数値は図中に明記)
lambda	0.1302	圧縮指数	
K	0.01302	膨潤指数	e_0 初期間隙比
rho_s	2.7 (g/cm ³)	土粒子密度	w 含水比
w_0	7.9 (%)	吸着水の含水比	s サクシオン
m	5	下負荷面パラメータ	R_0^* 上負荷面パラメータ

されていないことからKo=1.0の等方応力条件で計算を行っている。また、R_0^* (R*の初期値)の決定に用いる不飽和状態の降伏応力p_0'^*は飽和度を用いて有効応力へのサクシオン寄与分を算定し、締固め応力に加算することで決定している。図-4に示すとおり、初期間隙比、含水比と圧縮試験中のサクシオンを与えることで、締固め土の圧縮挙動を表現することができる。また、図-4(b)には途中で水浸させた試験の結果を示しているが、含水比変化を考慮することで水浸時の沈下挙動も表現することができる。

4. 結論

下負荷面と上負荷面の概念を用いて締固め土の応力~ひずみ関係を定式化した。飽和度からサクシオンによる有効応力への寄与分を算出し、CamClayModelで用いられているパラメータと下負荷面パラメータ、不飽和状態の降伏応力、含水比を与えることで締固め土の圧縮挙動を表現できることを確認した。

参考文献

- 1) 本田, 飯塚, 大野, 河井, 汪 : 締固め土の圧縮特性に関する評価方法, 第40回地盤工学研究発表会(投稿中), 2005.
- 2) Asaoka, A, Nakano, M & Noda, T : Superloading Yield Surface Concept for Highly Structured Soil Behavior, S&F, 40(2), 99-110, 2000.
- 3) Hashiguchi, K. and Ueno, M. : Elasto-plastic constitutive laws for granular materials, constitutive equations for soils, Proc. Specialty Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo, 73-82, 1977.
- 4) D. A. Sun, Matsuoka, H., Y. Yao, and Ichihara, W. : An Elasto-Plastic Model For Unsaturated Soil in Three-Dimensional Stresses, S&F, 40(3), 17-28, 2000.