

沈降過程を考慮した自重圧密解析(その1)

九州大学 (正) ○山田正太郎, (710-) 落合英俊, (学) 坊垣内真

1. はじめに

懸濁液状にした粘土を静置すると、沈降による堆積と、堆積した土の自重圧密という比較的明瞭に分けることができる二種類の現象が生じる。これまでの多くの自重圧密解析では沈降現象は解析の対象とはしてこなかったが、本稿では沈降現象(界面沈降)を含む自重圧密解析を行うことを視野に入れて、一次元圧縮応答のモデル化、および圧縮に伴う透水係数変化のモデル化について示す。

2. 一次元弾塑性構成式

固体状の粘土では、一次元圧縮時および膨張時に、比体積 v と鉛直有効応力 σ' とが両対数軸上で図1に示すような直線関係にあるものと仮定する¹⁾。

$$\ln v = \ln N - \bar{\rho} \ln \sigma' \quad (\text{正規圧密線}) \quad (1)$$

$$\ln v = \ln v_0 - \tilde{\gamma} \ln \sigma' \quad (\text{膨潤線}) \quad (2)$$

$\bar{\rho}, \tilde{\gamma}$ などの諸記号は図1に示すとおりである。ここでは、弾塑性理論に基づき、式(1)を弾塑性構成式、式(2)を弾性構成式として取り扱うが、それは次の正規降伏面および硬化則を導入することに相当する。

$$f(\sigma') = (\bar{\rho} - \tilde{\gamma}) \ln \sigma' / \sigma'_0 = \varepsilon'_p \quad (3)$$

ここに、 ε'_p は対数体積ひずみ(圧縮:正)であり、対数体積ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}'_p$ が弾性成分 $\dot{\varepsilon}'_e$ と塑性成分 $\dot{\varepsilon}'_p$ に加算分解できることを前提に次のように表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon'_p &= -\ln v / v_0 = -\ln v' / v_0 - \ln v / v' \\ &= \int_0^{\sigma'} \dot{\varepsilon}'_e d\tau + \int_0^{\sigma'} \dot{\varepsilon}'_p d\tau - \int_0^{\sigma'} \dot{\varepsilon}'_e d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

次に、ごく低応力下にある懸濁液状の粘土の大圧縮および過圧密土の一次元圧縮挙動をモデル化するために、浅岡ら²⁾³⁾に習い、式(3)の正規降伏面に対し、上負荷面および下負荷面⁴⁾の概念を導入する。図2に示すように、同一膨潤線上で、正規降伏面(NCLと膨潤線の交点)よりも外側に上負荷面を、それよりも内側に下負荷面を用意する(一次元であるが故に、面とは名ばかりでいずれも点として表される)。上負荷面上の応力 σ'_u に対する正規降伏面上の応力 σ'_0 の比を R^* ($0 < R^* \leq 1$)とし、上負荷面上の応力 σ'_u に対する下負荷面上の応力 σ'_l の比を R ($0 < R \leq 1$)とすると、現応力点の位置する下負荷面は次式のように表される。

$$f(\sigma') = (\bar{\rho} - \tilde{\gamma}) \ln \sigma' / \sigma'_0 + (\bar{\rho} - \tilde{\gamma}) \ln R^* - (\bar{\rho} - \tilde{\gamma}) \ln R = \varepsilon'_p \quad (5)$$

更に、塑性変形に伴い構造を有する過圧密土が繰り返す正規圧密粘土に漸近するよう R^* および R の発展則を次のように与える。

$$\dot{R}^* = \frac{U^*}{\bar{\rho} - \tilde{\gamma}} \dot{\varepsilon}'_p, \quad U^* = a \frac{\tilde{\gamma}}{\bar{\rho}} R^* (1 - R^*) \quad (6), \quad R = \frac{U}{\bar{\rho} - \tilde{\gamma}} \dot{\varepsilon}'_p, \quad U = -m \frac{\tilde{\gamma}}{\bar{\rho}} \ln R \quad (7)$$

ここに、 a および m はそれぞれ R^* および R が1に漸近する速度を表すパラメータである。これらの準備の下、適応条件より、塑性体積ひずみ速度は $\dot{\varepsilon}'_p$ あるいは $\dot{\varepsilon}'_e$ を用いて、それぞれ次のように表される。

$$\dot{\varepsilon}'_p = \frac{\bar{\rho} - \tilde{\gamma}}{\sigma'_0 (1 - \frac{U^*}{R^*} + \frac{U}{R})} \dot{\sigma}' \quad (8), \quad \dot{\varepsilon}'_e = \frac{\bar{\rho} - \tilde{\gamma}}{\bar{\rho} - \tilde{\gamma} + \tilde{\gamma} (1 - \frac{U^*}{R^*} + \frac{U}{R})} \dot{\varepsilon}'_p \quad (9)$$

式(2)を物質時間微分することで、弾性構成式は速度型で次のように表されるが、

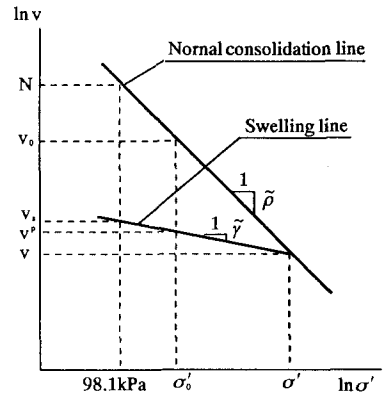


図1 正規圧密線と膨潤線

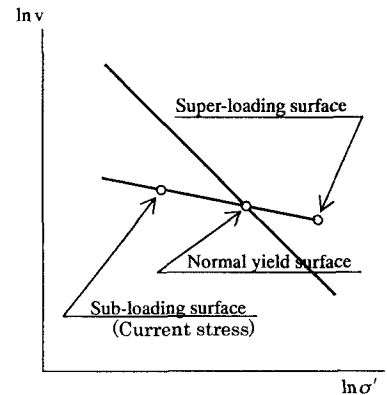


図2 三つの負荷面(点)

$$\dot{\epsilon}' = \frac{\tilde{\gamma}}{\sigma'} \dot{\sigma}' \quad (10)$$

この式と式(9)とを用いることで、最終的に速度型の弾塑性構成式は次のように表される。

$$\dot{\sigma}' = \frac{\sigma'(1 - \frac{U^*}{R^*} + \frac{U}{R})}{\tilde{\rho} - \tilde{\gamma} + \tilde{\gamma}(1 - \frac{U^*}{R^*} + \frac{U}{R})} \dot{\epsilon} \quad (11)$$

なお、負荷基準は式(9)の分母を正に保つことを条件に、 $\dot{\epsilon}$ が正の場合を負荷として与える。

3. 透水係数

圧密試験などで得られる透水係数と比体積の間には、両対数軸上で直線関係が得られることはよく報告されている。しかし、このような関係を高含水比状態の粘土にまで適用すると、透水係数は極めて大きな値をとることになる。そこで、土の剛性が必ずしも比体積のみによって決まらないとして上負荷面や下負荷面を導入したように、透水係数もまた比体積に加えて R^* や R の関数となるように次のように与える。

$$\ln k = -\Pi + \theta \ln v + u \ln R^* \quad (12)$$

ここに、 Π, θ, u はそれぞれパラメータである。

4. 構成式の応答および透水係数の変化

ここでは、初期に高含水状態にある粘土の一次元圧縮時の応答、圧縮に伴う透水係数の変化の様子を示す。解析に用いたパラメータは表 1 の通りである。初期値に関しては、泥水状態ではごく僅かな有効応力しか働かない状態にあるものとし、初期含水比が $w=2500, 1500, 800, 450, 300, 200\%$ (土粒子の比重: $G_s=2.7$) の状態にある土を想定して、表 2 のように与えた。解析結果を図 3 に示す。初期含水比の高い土は、初め低い剛性を示した後に、次第に $\ln v - \ln \sigma'$ 直線に漸近している。この挙動は、初期お互いに干渉はするものの非接触状態にある泥水状の粘土が、圧縮に伴い粒子が接触し大きく剛性を増す過程に相当する。また初期に高含水比の粘土では、剛性が増すと同時に比体積の変化に対する透水係数の変化の割合も大きくなっている。このモデルでは半液体状の土から固体状の土に変わり更に圧縮が進むと、大きく透水係数が低下することを示している。

表 1 材料パラメータ

N	3.12
$\tilde{\rho}$	0.074
$\tilde{\gamma}$	0.025
a	2.7
m	10.0
Π	32.0
θ	10.0
u	0.45

表 2 初期値

$w_0 (V_0)$	R^*_0	R_0
2500% (70.0)	1.0×10^{-10}	1.0
1500% (42.0)	5.0×10^{-7}	1.0
800% (22.4)	1.0×10^{-2}	1.0
450% (12.6)	1.0×10^{-1}	1.0
350% (9.8)	1.0×10^0	1.0
200% (5.6)	1.0×10^0	1.0

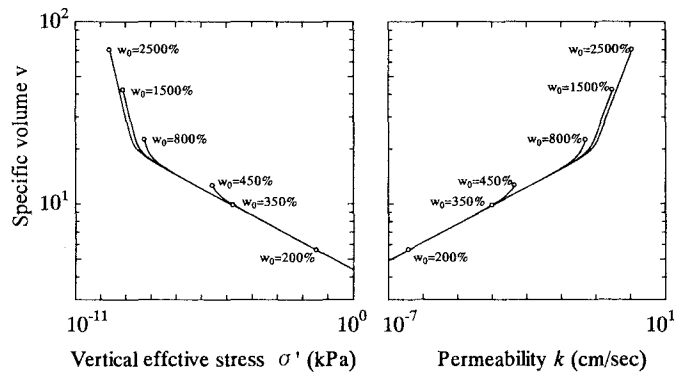


図 3 一次元圧縮応答および比体積－透水係数関係

5. おわりに

高含水比粘土の大圧縮を考慮した一次元弾塑性挙動、および圧縮に伴う透水係数の変化を示すためのモデル化を行った。これらを用いた一次元圧密解析結果はその 2 に譲る。

〈参考文献〉 1) Hashiguchi(1995): Short Communication on the Linear Relations ..., Int. J. Numer. Anal. Meth. Geotech., Vol.19, pp.367-376. 2) Asaoka et al.(2000): Superloading Yield Surface Concept ..., S&F, 40(2), pp.99-110. 3) 浅岡ら(2002): 液相から固相への変化を視野に入れた ..., 第 37 回地盤工学研究発表会講演集, pp317-318. 4) Hashiguchi(1989): Subloading surface model ..., Int. J. Solids Structures, Vol.25, No.8, pp.917-945.