

■-7 高圧下の砂と正規圧密粘土の応力・ひずみ挙動の類似性について

山口大学工学部 正員 三浦哲考
九州大学大学院 学生員 乗安直人
パシフィックコンサルタンツ 榎本和弘

1. まえがき 高圧下における砂の挙動と低圧下における正規圧密粘土の挙動の間にはいくつかの共通する特徴を見出すことができる。このことに着目して、筆者らは先に、正規圧密粘土に対して Roscoe らが与えた応力・ひずみ式¹⁾を用いて高圧下における砂の応力・ひずみ関係を予測することを検討した。そして、数百 kg/cm² の拘束圧下で排水せん断するときの豊浦砂²⁾の供試体の応力・ひずみ曲線は、Cam-Clay 式またはその修正式によっておおむね予測できることを明らかにした³⁾。それに引続いて、豊浦砂²⁾の供試体（初期間隙比 $e \approx 0.83$ ）についても前報と同様な検討を行なったのでここに報告する。なお本報告では、高圧下の砂と正規圧密粘土の挙動の類似性を示すために、豊浦砂²⁾の供試体についての高圧三軸圧縮試験結果と正規圧密されたカオリンに対する標準的三軸圧縮試験結果とを対比させながら議論を進める。

2. 高圧下の砂と正規圧密粘土の挙動の類似性 宇部カオリンおよび豊浦砂の $e \sim \log_{10} p_c$ と等方圧力 p_c （または一次元圧密圧力 p_1 ）との関係は図-1 および図-2 に示すようであった。カオリンの $e \sim \log_{10} p_c$ 曲線は同試料についての $e \sim \log_{10} p_c$ 曲線とはほぼ同じ傾向を示していると考えてよいであろう⁴⁾。豊浦砂の $e \sim \log_{10} p_c$ 曲線における径路 A, B, C, D, E, F がカオリンの $e \sim \log_{10} p_c$ 曲線における径路 A, B, C, D, E, F に対応していると考えれば、両試料の間隙比 e 圧力曲線は類似の特性を有していることがわかる。豊浦砂の $e \sim \log_{10} p_c$ 曲線における A, C, E を包絡する直線は、主として粒子破碎に起因して不可逆的な間隙比変化を生ずる領域であり、それはカオリンの正規圧密曲線 A, C, E に対応していると考えることができよう。図-2 から、豊浦砂²⁾の供試体 $p_1 = 100 \text{ kg/cm}^2$ 付近で正規圧密線に達すると思われる。この圧力で圧密した供試体を拘束圧一定 ($\sigma_3 = p_1 = 100 \text{ kg/cm}^2$) で排水せん断したときの応力・ひずみ曲線は図-4 のようであった。これと正規圧密カオリンの応力・ひずみ曲線 ($\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, 図-3) とを比較すると、両試料の応力・ひずみ関係の類似性は明らかである。上述のような実験事実から、豊浦砂²⁾の供試体は $p_1 \geq 100 \text{ kg/cm}^2$ で硬化する弾塑性体であると考え、その応力・ひずみ曲線に対する Cam-Clay 式またはその修正式の適合性を以下において検討する。

3. 材料定数の決定 限界状態 (critical state) の概念に基づいて導かれた Cam-Clay 式（またはその修正式）では、三つの材料定数 λ , κ および μ が用いられる。 λ および κ は、 $e \sim \ln p_c$ 図上における正規圧密直線勾配および膨張

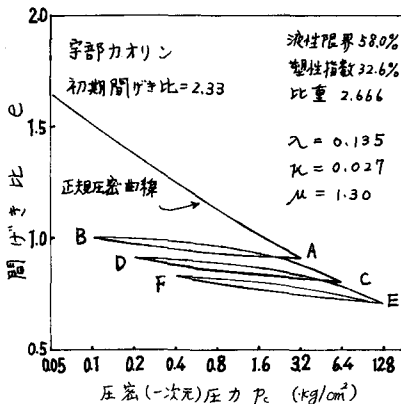


図-1 宇部カオリンの $e \sim \log_{10} p_c$ 曲線

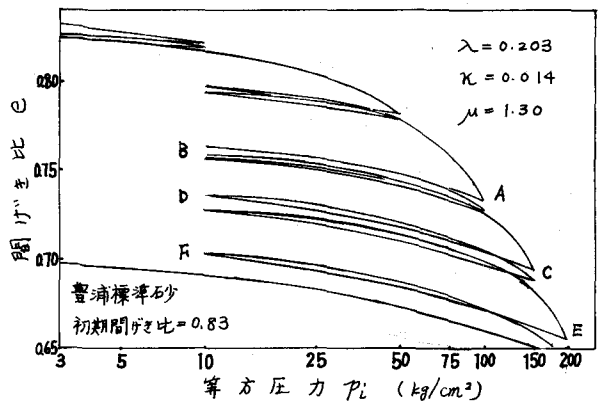


図-2 豊浦砂の $e \sim \log_{10} p_i$ 曲線

曲線勾配によって与えられる。次に、材料の摩擦特性を表わす定数 μ は、せん断応力下で材料が限界状態に達したときの軸差応力 $q (= \sigma'_1 - \sigma'_3)$ と平均主応力 $p = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ の比で与えられる。すなわち、 $\mu = (q/p)_{cs}$ である。正規圧密されたカオリンの材料定数は図-1 に、また豊浦砂ゆるめめ供試体の三つの材料定数は図-2 にそれぞれ示されている。

4. 応力・ひずみ関係 Cam-Clay 式およびその修正式において、せん断ひずみ増分 $d\epsilon$ および体積ひずみ増分 $d\epsilon_v$ は、それぞれ平均主応力 p と応力比 $\eta (= q/p)$ の関数として与えられている。排水せん断試験に対しては $dp/p = d\eta/(3-\eta)$ なる関係を用いてひずみ増分を積分すると次式を得る。

Cam-Clay 式については、

$$\epsilon = \left(\frac{\lambda - K}{1 + e} \right) \left\{ \frac{1}{3 - \mu} \ln \left(\frac{3 - \eta}{\mu - \eta} \right) - \frac{1}{\mu} \ln (\mu - \eta) + C_1 \right\} \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{1 + e} \left\{ \frac{\lambda - K}{\mu} \eta - \lambda \ln (3 - \eta) + C_2 \right\} \quad (2)$$

修正式については、

$$\epsilon = \frac{2(\lambda - K)}{1 + e} \left\{ \frac{3}{2\mu(3 + \mu)} \ln (\mu + \eta) - \frac{3}{2\mu(3 - \mu)} \ln (\mu - \eta) - \frac{1}{\mu} \arctan \left(\frac{\eta}{\mu} \right) + \frac{3}{q - \mu^2} \ln (3 - \eta) + C_3 \right\} \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{1 + e} \left\{ (\lambda - K) \ln (\mu^2 + \eta^2) - \lambda \ln (3 - \eta) + C_4 \right\} \quad (4)$$

ここに、 e は等方圧縮後の間隙比である。また積分定数 $C_1 \sim C_4$ は、 $\eta = 0$ で $\epsilon = v = 0$ なる条件より求められる。豊浦砂については、 $C_1 = -0.290$, $C_2 = 0.223$, $C_3 = -0.343$, $C_4 = 0.124$ となる。またカオリンについては、 $C_1 = -0.290$, $C_2 = 0.223$, $C_3 = -0.343$, $C_4 = 0.092$ を得る。

上記の各式に3つの材料定数を入れると $\epsilon \sim \eta$ および $v \sim \eta$ 関係を得る。それらをもとにして $q \sim \epsilon_1 \sim v$ 関係を描くと図-3 および

図-4 に示すような応力・ひずみ曲線となる。まず正規圧密カオリンの場合は、実測された $q \sim \epsilon_1$ 曲線は Cam-Clay 式曲線と修正式曲線のほぼ中間にあり、 $\epsilon_1 \sim v$ 実測曲線は Cam-Clay 式に近い変化を示している。一方豊浦砂ゆるめめ供試体の場合には、実測の $q \sim \epsilon_1$ 曲線は修正式によく一致するか実測の $\epsilon_1 \sim v$ 曲線は Cam-Clay 式によく一致する。

5. まとめ 砂は高压下において、低圧下における正規圧密粘土と類似の応力・ひずみ挙動を示す。Roscoe が正規圧密粘土に対して導いた応力・ひずみ式を用いれば、少なくとも正規圧密されたカオリンに対するのと同程度の精度において、高压下の砂の応力・ひずみ関係を予測し得る。

文献

- 1) Roscoe, Burland, Engineering Plasticity, 1968.
- 2) 三浦: オート土質工学シンポジウム, 1975. および 三浦・岡田: 山
- 3) Parry: Proc. ASCE, Vol. 101, GT12, 1975. 口大工学部研究報告, Vol. 26, No. 1, 1975.

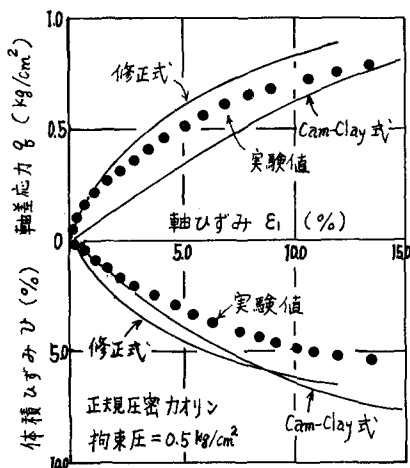


図-3 正規圧密されたカオリンの拘束圧一定排水せん断試験における応力ひずみ曲線

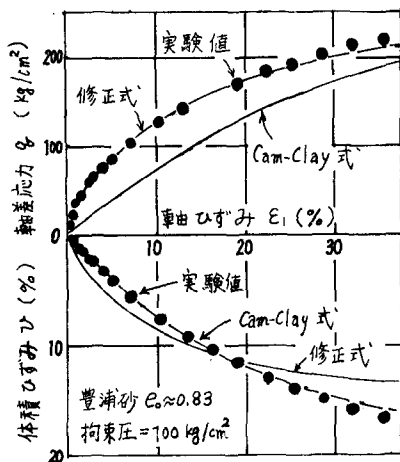


図-4 豊浦砂の拘束圧一定排水せん断試験における応力ひずみ曲線