III－77　等方圧密・異方圧密後の放射状応力経路下の粘土の変形挙動とその解析

旭化成工業(株)　正員　○福元 信一
名古屋工業大学　正員　松岡 元

土は応力経路や応力履歴によって著しく変形特性が異なる材料であるが、中でも正規圧密か、過圧密か(平均有効主応力σ_mが過去最大のものより増加するか減少するか)ということは、その変形・強度特性に大きな影響を及ぼす。例えば、図－１に示すように圧密時の変形特性は、σ_m（あるいは圧密圧力ｐ）の増減によって圧縮指数C_cで表されたり、膨張指数C_sで表されたりして大きく異なる。また、図－２に示すようにせん断時の強度特性も周知のようにσ_mの増減によって$c_{(NC)}$(≒０)、$\phi_{(NC)}$になったり、$c_{(OC)}$、$\phi_{(OC)}$になったりして異なる。従って、せん断時の変形特性もσ_mの増減によって異なると考えるのは自然であるかもしれない。ここでは、このような考えに基づいて、等方圧密および異方圧密後の放射状応力経路下の粘土の応力～ひずみ挙動の簡便な解析法について述べる[1]。

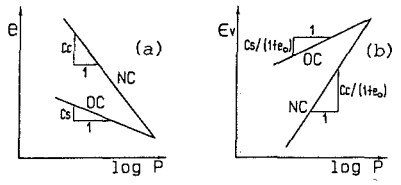

図-1 圧密時の変形特性の概念図

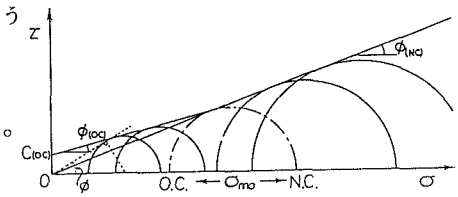

図-2 せん断時の強度特性の概念図

１．実験に用いた試料と実験方法

藤の森粘土（粘土粉末の練り返し再圧密試料：w_L＝４１％、w_P＝２３％、G_s＝２．６７）を試料として排水三軸圧縮および伸張試験を行った。試験の種類は、図－３に示す等方圧密線上の１点から放射状直線応力経路に沿う試験と図－４に示す異方圧密（$R \equiv \sigma_1/\sigma_3$＝２）線上の１点から放射状直線応力経路に沿う試験である。

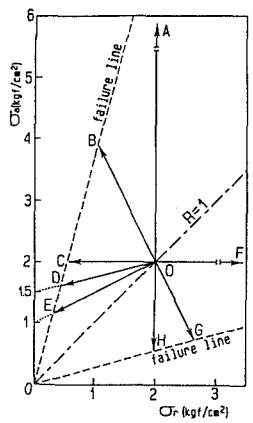

図-3 等方圧密線上からの放射状応力経路

２．平均有効主応力σ_mの増域による変形・強度特性の差異の表現

σ_mの増減による変形・強度特性の特徴的な差異を挙げれば次の通りである。１）図－１に示すように圧密時の変形特性は、σ_m（あるいは圧密圧力ｐ）の増減によって圧縮指数C_cで表されたり、膨張指数C_sで表されたりして大きく異なる。２）図－２に示すようにせん断時の強度特性も、σ_mの増減によって$c_{(NC)} \fallingdotseq 0$、$\phi_{(NC)}$になったり、$c_{(OC)}$、$\phi_{(OC)}$になったりして大きく異なる。以上の２つの差異を考慮すれば、せん断時の変形特性も、σ_mの増減によって異なると考えるのは自然であろう（例えば、図－５中の経路ＯＢと経路ＯＣの応力～ひずみ関係の差に注目）。そこで、提案している任意座標表示の土の構成式[2),3)]中のせん断によるひずみ絶対値を決める係数k_s（σ_mの増加する正規圧密状態での係数$k_{s(NC)}$とσ_mの減少する過圧密状態での係数$k_{s(OC)}$）の関係を次のように仮定する[1]。

$$k_{s(OC)} = \frac{C_s/(1+e_o)}{C_c/(1+e_o)} \cdot k_{s(NC)} \qquad (1)$$

ここに、$C_c/(1+e_o)$、$C_s/(1+e_o)$は正規圧密状態と過圧密状態における圧密時の体積ひずみに対する変形係数であり、せん断時の

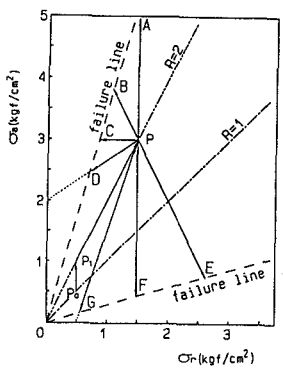

図-4 異方圧密線上(R=2)上からの放射状応力経路

変形係数がそれらと同じ比率で変化するとみなしたわけである。

また、図－２に示したように三軸圧縮および伸張条件下での過圧密領域（σ_mの減少する領域）でのϕ（$\phi_{comp.}$および$\phi_{ext.}$と表示する）は、$c_{(OC)}$、$\phi_{(OC)}$を用いて次のように表される。

$$\left.\begin{matrix}\sin\phi_{comp.}\\ \sin\phi_{ext.}\end{matrix}\right\}=\frac{\sin\phi_{(OC)}-S_1\cdot c_{(OC)}\cdot\cos\phi_{(OC)}}{1\mp S_2\cdot c_{(OC)}\cdot\cos\phi_{(OC)}} \quad (2)$$

ここに、S_1、S_2は直線応力経路上の任意の２点（σ_{r1}、σ_{a1}）、（σ_{r2}、σ_{a2}）の座標より決まる定数で、次式で与えられる。

$$\left.\begin{matrix}S_1\\ S_2\end{matrix}\right\}=\frac{(\sigma_{a2}-\sigma_{a1})\mp(\sigma_{r2}-\sigma_{r1})}{\sigma_{a1}\cdot\sigma_{r2}-\sigma_{a2}\cdot\sigma_{r1}} \quad (3)$$

式（１）、（２）より求まる$k_{s(OC)}$、$\phi_{comp.}$、$\phi_{ext.}$を用いれば、過圧密領域（σ_mの減少する領域）における土の構成式が、正規圧密領域（σ_mの増加するあるいは一定の領域）と同様に規定されることになる。

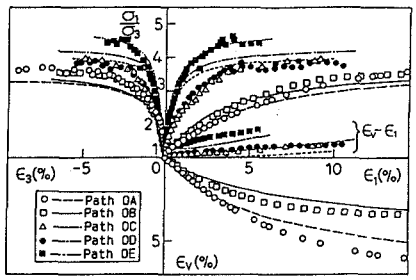

図-5 等方圧密後の放射状経路での主応力比～主ひずみ～体積ひずみ関係

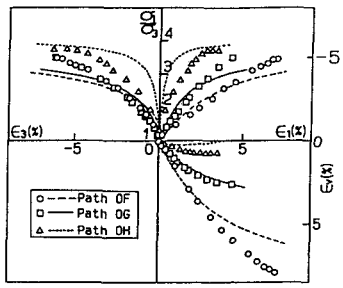

図-6 等方圧密後の放射状経路での主応力比～主ひずみ～体積ひずみ関係

３、実験結果と解析結果の比較

以上のように定めたk_sとϕを用いて、提案モデル[2),3)]に基づいて解析したのが、図－５～８中の各曲線である。縦軸を主応力比σ_1/σ_3で表示しているので差が目立つ部分もあるが、解析結果は実測値の傾向をおおむね適切に表現しており、式（１）、（２）を用いて過圧密領域（σ_mが過去最大のものより減少する領域）でのパラメーターを推定する考え方は適用可能と思われる。

以上より、$c_{(OC)}$、$\phi_{(OC)}$だけを新たに定めれば、正規圧密領域と同様、過圧密領域での変形特性の予測が可能となる。なお、解析に用いたパラメーターは、$\phi_{(NC)}=35^\circ$、$c_{(OC)}=0.09$ (kgf/cm²)、$\phi_{(OC)}=33^\circ$、$C_c/(1+e_o)=9.4\%$、$C_s/(1+e_o)=1.6\%$、$\lambda=1.1$、$\mu=0.31$、$k_{s(NC)}=1.7\%$である。

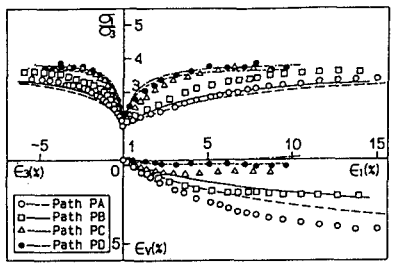

図-7 異方圧密後の放射状経路での主応力比～主ひずみ～体積ひずみ関係

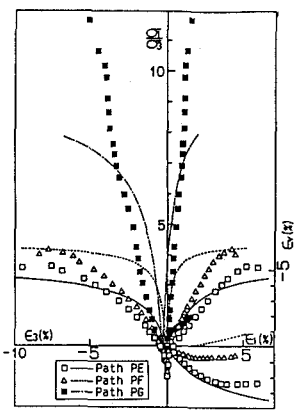

図-8 異方圧密後の放射状経路での主応力比～主ひずみ～体積ひずみ関係

謝辞　上記の実験は自動計測制御システムを備えた三軸試験装置を用いて行ったが、同システムの開発に尽力いただいた本学中井照夫助教授に謝意を表します。

文献

1)村田・松岡・福元(1988):土木学会第43回年次学術講演会、Ⅲ-246、pp.534-535.

2)H.Matsuoka et al(1986):2nd Int. Symp. on Numerical Model in Geomechanics, Ghent, pp.67-78.

3)H.Matsuoka and K.Sakakibara(1987):S&F, Vol.27, No.4, pp. 73-88.