

京都大学工学部 正員 赤井 浩一
 ○ 電力中央研究所 正員 中川 加明一郎
 京都大学大学院 学生員 北 健二

1. まえがき

飽和粘性土の応力-ひずみ関係の表現を確立することを目的に、従来より、数多くの研究がなされてきている。特に、Roscoe らにより提案された弾塑性モデル (Cam-clay model) は、State Boundary Surface の概念によって、粘土の挙動を統一的に説明することを試みたものであった。さらに、Roscoe らのモデルを基礎にして、正規圧密粘土の構成関係を時間依存性を含めて表現すべく、弾粘塑性モデルも提出されている。そしてこれらは、一方向載荷時の正規圧密粘土の挙動を、ある程度の妥当性をもって表現し得るものであることが明らかになっている。しかし、繰り返し載荷に対する挙動を表現することは困難である。Sungrey らは、正規圧密粘土に対し、極めて遅いひずみ速度で繰り返し載荷試験を、応力の最大値を制御することにより行ない、過剰間隙水圧が発生および蓄積し、あるレベル以下の応力では平衡状態に達することを指摘した。これは、有効応力経路が State Boundary Surface の内側、すなわち、過圧密の領域に入っていくことを意味している。筆者らは、この推移の過程に注目し、繰り返し載荷試験を行ない、実験結果にもとづいて考察を行なう。

2. 実験方法および実験結果

実験装置としては、電気・油圧サーボを用いて、ひずみ制御の試験に対しても、軸圧、側圧を、自動的に運動制御できる三軸装置を製作し、使用した。これにより、平均主応力を一定に保持しながら定ひずみ速度せん断試験を行なうことが可能となる。

実験試料は、室内で、繰り返し、再圧密した深草粘土 (先行圧密圧力は約 0.6 kg/cm^2) を用い、直径 5 cm 、高さ 10 cm に成形して供試体とした。物理特性は $LL 45.7\%$ 、

$PL 65.5\%$ 、 $G_s 2.697$ 、 60 分 分 14.6% 、シルト分 65.5% 、粘土分 20.9% 。

実験方法は、圧密非排水せん断 (圧密圧力は 2.0 kg/cm^2) とし、繰り返し試験は、図-1 に示されるように、定ひずみ速度で軸圧を載除荷することにより行なった。なおこのとき平均主応力は 2.0 kg/cm^2 に一定に保持した。ひずみ速度は $0.3 \text{ \%}/\text{min}$ 、 $0.01 \text{ \%}/\text{min}$ の2通りとし、ひずみ振幅は 0.1% 、 0.25% 、 0.5% の3通りとした。

実験結果のうち、 $\dot{\epsilon} = 0.3 \text{ \%}/\text{min}$ 、ひずみ振幅 0.5% としたものの有効応力経路を図-2 の破線で示した。

3. 考察および結論

本実験結果からは、繰り返しの回数が少なく、平衡状態を直接観測することはできなかった。しかし、応力経路の左方向への

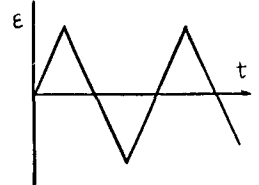


図-1
軸ひずみ-時間関係

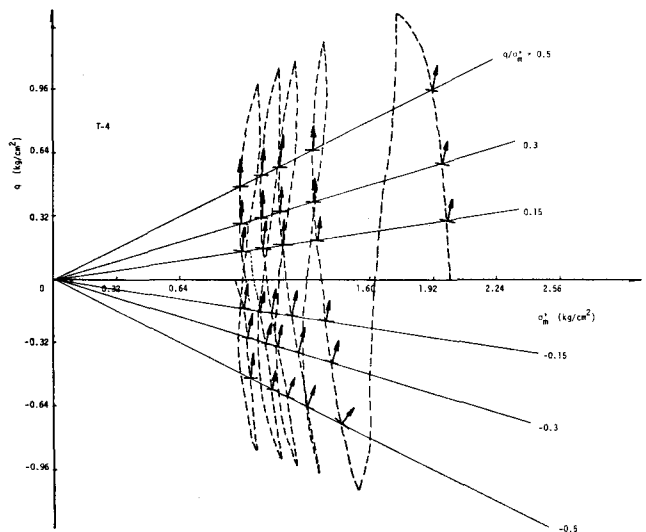


図-2

有効応力経路 (破線) および塑性ひずみ増分ベクトルの方向

移動量は繰り返しとともに減少し、すなわち、平衡状態へ漸近する様子が認められた。この推移は、正規圧密粘土が繰り返し載荷をうけるとき、過剰間げき水圧が発生および蓄積することにより、応力状態が、いわゆる State Boundary Surface 内に入り、平衡状態へと移動することを意味している。State Boundary Surface 内では弾性的挙動が仮定されており、実験事実はこの仮定の不合理性を示すものである。この不合理性は、以前より、過圧密粘土の挙動に関して指摘されていく。

今回の実験において示されたように、過剰間げき水圧の発生および蓄積は、State Boundary Surface 内においても塑性体積ひずみが発生することを意味する。ここで、塑性体積ひずみ増分 δV^p およびせん断ひずみ増分 δE を求める。そして、せん断ひずみ増分はすべて塑性せん断ひずみ増分 δE^p とすれば、 $\delta V^p / \delta E \equiv \delta V^p / \delta E^p$ は塑性ひずみ増分ベクトルの方向を表わすことになる。 q/σ_m の種々の値に対する塑性ひずみ増分ベクトルの方向と、図-2 の応力経路上に矢線を示す。ただしここでは、軸差応力増加時に対してのみ示す。これからわかるように、normality rule の成立を前提として、塑性ひずみ増分ベクトルに垂直な面はポテンシャル面を形成することになる。そこで、繰り返しの途中の過程において、 $\delta V^p / \delta E$ と q/σ_m とをプロットして図-3 を得る。これより $\delta V^p / \delta E$ と q/σ_m とは直線関係にあることがわかる。なお、この直線関係は繰り返しの回数を増加させても保持された。そして、この直線は次式のように表わせる。

$$\frac{\delta V^p}{\delta E} + \frac{\alpha}{\beta} \cdot \frac{q}{\sigma_m} = \alpha \quad \dots (1)$$

ここで、 α ; $\delta V^p / \delta E$ 軸の切片、 β ; q/σ_m 軸の切片

これは Roscoe の Cam-clay model における降伏曲面表示式

$$\frac{\delta V^p}{\delta E} + \frac{q}{\sigma_m} = M \quad M; \text{Critical State Line の傾き} \quad \dots (2)$$

と類似するものである。

以上の考察より次のことが結論される。
すなわち、State Boundary Surface と呼ばれる領域の内部にも塑性ポテンシャルが存在し、しかもそれは、State Boundary Surface の外部のものと同類である。

4. あとがき

Roscoe らは、間げき比、平均有効主応力および軸差応力 (e, σ_m, q) によ

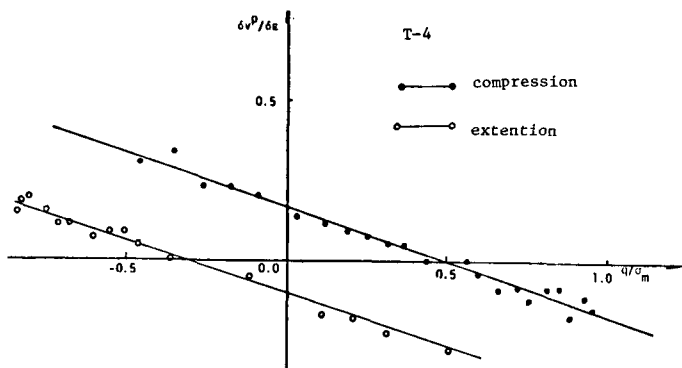


図-3 $\delta V^p / \delta E - q/\sigma_m$ 関係

り State Boundary Surface は一意に決定されるものとしか。しかし、今回の実験より得られた結論は、その一意性を極めて不明瞭なものにする。一方、Bjerrum は、正規圧密粘土において経時効果 (二次圧密) が存在することを指摘したが、このことも State Boundary Surface の一意性に反する。この経時効果により、到達する平衡状態は、繰り返し効果によって到達する平衡状態と同じ領域を形成するとも予想できる。結局、繰り返し効果あるいは経時効果によって到達する平衡状態においてのみ、State Boundary Surface にもとづく理論が成立すると考えられる。今後は、平衡状態への移動過程、それに影響を与える履歴の効果および時間依存性とともに表現しうるモデルの決定が望まれる。

参考文献、1) Roscoe et al.; Yielding of Clays in States Wetter than Critical, Geotech. Vol.13, 1963. 2) Sangroy et al.; The Effective Stress Response of a Saturated Clay Soil to Repeated Loading, Canadian Geotech. Jour. 6, 1969. 3) 赤井 他; 平均主応力一定のときの粘性土のせん断試験; 第13回土質工学研究発表会, 1978. 4) Bjerrum; Embankment on Soft Ground, Proc. ASCE Special Conf. on Performance of Earth-Supported Structures, Vol.2 1972.