

正規圧密粘土の部分排水せん断挙動に関する 理論的, 実験的研究

三隅浩二*

定率荷重載荷速度による部分排水三軸試験を行って、正規圧密粘土の部分排水条件下における破壊とせん断変形を考察している。破壊に対しては、供試体の極限荷重を弾塑性圧密解析と非排水極限約合い解析を相互補完的に用いて算定し、この極限荷重の載荷速度依存性を調べている。変形に対しては、実験で得られた実際の挙動と土の弾塑性構成式を用いた数値シミュレーション結果とを直接比較して考察している。

Keywords : partially drained condition, shear strength, shear deformation

1. はじめに

軟弱地盤の実務では、飽和粘性土の地盤の変形や支持力は常に部分排水状態で問題となる。部分排水状態とは有効応力が間隙水圧の勾配すなわち透水力の助けを受けて外力系と釣り合っている状態で、間隙水圧は外力系の変化に対して新たに発生したり消散したりしている。本論文では、このような部分排水条件下での粘土地盤の破壊やせん断変形を考察するために、定率荷重載荷速度による部分排水三軸せん断試験を利用することを考えた。

部分排水三軸試験では、排水コックを開けたままで有限な載荷速度でせん断するのだが、このとき圧密による脱水が部分的に進行し、供試体内部に不均一な過剰水圧の分布が生じ、供試体は通常の排水、非排水せん断試験のようにもはや均質なエレメントとはみなせなくなる。すなわち、三軸試験といえども部分排水試験の場合には、通常地盤の解析と同じように正しく初期値、境界値問題として解析される必要がある。

本論文では、部分排水挙動のうち破壊に対しては供試体が耐え得る極限荷重について解析し、この極限荷重の載荷速度への依存性を詳細に調べている。載荷速度が極端に小さい場合は、いま述べた部分排水強度はエレメントとしての粘土のいわゆる排水せん断強度 q_{fd} に対応し、反対にこれら速度が極端に大きい場合にはいわゆる非排水せん断強度 $q_{fu} = 2c_u$ に対応する。しかしながら、有限な載荷速度の場合には、部分排水強度は非排水強度、排水強度の中間に値をとる。ただし、後述するように、この部分排水せん断強度を発揮する載荷速度はかなり狭い範囲に限られる。

一方、この部分排水せん断強度を生じさせる載荷速度のレンジでは、破壊するまでの変形にも顕著な変化を発

現させるものと考えられる。このいわゆる部分排水せん断変形特性は弾塑性パラメーターを含む土の構成式、透水係数、供試体の境界条件などによって変化するものと考えられる。部分排水せん断変形の解析については参考文献1)に詳しいが、本論文では一般的な解析については、実験で得られた実際の挙動と土の弾塑性構成式を用いた数値シミュレーション結果との比較を通じて部分排水条件下でのせん断変形の特徴を考察している。ここで、数値解析に用いた弾塑性パラメーターの決定は非排水三軸試験データおよび等方圧密試験データをもとにしているが、弾塑性パラメーター間の整合性を考慮してオリジナルカムクレイモデルで弾性せん断ひずみの発生を許した修正モデル(以下、限界状態モデルと呼ぶ)の非排水強度式および一次元圧縮条件式を満たすように求めている。

以上をまとめると、本論文の目的は、部分排水せん断強度および部分排水せん断変形に及ぼす載荷速度依存性を数値解析と実験により詳しく調べることにある。

2. 連成極限約合い解析による 部分排水強度の決定

さて、部分排水せん断強度試験の解析として、次に述べる独立した2つの手法を考えることができる。

手法A: 粘土の弾塑性パラメーターや透水係数および問題の境界条件をすべて与件としたうえで弾塑性圧密解析と剛塑性有限要素法を相互に補完的に用いて、与えられた荷重履歴ないし変位履歴のもとで地盤(この場合三軸供試体)の極限荷重を解析する²⁾。

手法B: 荷重条件ないし変位条件だけを与件とし、現に起こっている弾塑性圧密変形挙動の区分線形近似¹⁾を通じて刻々の地盤(三軸供試体)の骨格剛性係数を逆算し、その劣化の過程から破壊荷重を予測する。

上記2つの解析はそれぞれLambe³⁾によるタイプA

* 正会員 工博 鹿児島大学講師 工学部海洋土木開発工学科 (〒890 鹿児島市郡元 1-21-40)

予測、タイプB予測にあたるが、実際問題（実験も含む）の解決のために、これら両手法は相互補完的役割を果たすことが期待される。

本論文では、実験で採用する載荷速度を決定するために、まず三軸試験の数値シミュレーション結果に対して手法Aを適用し、部分排水せん断強度を発揮することのできる載荷速度レンジを求めている。次に、その載荷速度レンジにおいて実際の三軸試験を行い部分排水せん断強度を求めて、数値シミュレーション結果と比較検討している。数値シミュレーションの解析はすべて、実験で用いた粘土試料が繰り返した正規圧密粘土であったことを考慮して、粘土の弾塑性モデルとして限界状態モデル⁴⁾を採用している。

(1) 限界状態モデルの概要

限界状態モデルは飽和した繰り返した正規圧密粘土の圧縮、せん断挙動を統一的に表現できる理論的に整ったモデルであり、土を巨視的に連続体とみなして、その力学的挙動を弾塑性理論によって説明するものである。限界状態モデルの基本仮定は以下のとおりである。①塑性挙動はDruckerの安定条件を満たし関連流れ則に従う。②降伏関数は等方でその形はいわゆるエネルギー理論によって導かれる。③ひずみ硬化パラメーターとして塑性体積ひずみをとる。④等方圧縮下での体積ひずみは $\ln p'$ 則に従い、弾性成分もまた $\ln p'$ 則に従う。⑤弾性挙動は等方的である。これらより、降伏関数式(1)および増分構成式(2)が得られる。

$$f(p', q) = \varepsilon_v^p = DM \ln \frac{p'}{p_0'} + D\eta' \dots\dots\dots (1)$$

$$\left\{ \begin{matrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_s \end{matrix} \right\} = \frac{D}{p'} \begin{pmatrix} \frac{M}{\Lambda} - \eta' & 1 \\ 1 & \frac{2}{3} \frac{1}{\bar{N}} \left(\frac{M}{\Lambda} - M \right) + \frac{1}{M - \eta'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dp' \\ dq \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 p' は平均有効主応力、 q はせん断応力、 ε_v は体積ひずみ、 ε_s はせん断ひずみ、 η' は応力比 q/p' であり、 D はダイレタンシー係数⁵⁾、 M は限界状態での η' であり、塑性体積ひずみ ε_v^p は $q=0$ 、 $p'=p_0'$ のときゼロとする。 p_0' は $\ln p'$ 則に従うパラメーター。さらに、 Λ は体積ひずみの $\ln p'$ 則の勾配 λ および κ を用いて、 $\Lambda = 1 - \kappa/\lambda$ である。さらに、 $\bar{N} = 3(1 - 2\nu)/(1 + \nu)$ で、 ν は有効ポアソン比、 \bar{N} は弾性成分だけが現れる一次元膨潤時の応力径路の勾配を示している。

土の破壊状態（限界状態）では、式(2)において、 $dq=0$ のとき $d\varepsilon_s$ が不定になる条件として、限界状態式 $\eta' = M$ が得られるが、これより、三軸試験における非排水強度 q_{ru} 、排水強度 q_{rd} は以下のように得られる。

$$q_{ru} = Mp_0' \exp(-\Lambda) \dots\dots\dots (3)$$

$$q_{rd} = 3Mp_0'/(3 - M) \dots\dots\dots (4)$$

(2) 弾塑性圧密解析と剛塑性有限要素法による極限荷重の解析

a) 連成極限釣合い解析の考え方⁶⁾

運動学的に許容な速度場に関して内部消散率を最小化することにより、塑性体に関する上界定理を極限釣合いの式に書き換えることができる。田村ら⁷⁾は有限要素離散化により、次の極限釣合い式と制約条件を示した。

$$\int_v B^T s dv + L^T \lambda = \mu F \dots\dots\dots (5)$$

$$F^T \dot{U} = 1 \dots\dots\dots (6)$$

$$L \dot{U} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 s : 全要素での偏差応力ベクトル、 λ : 全要素での平均応力ベクトル、 μ : 極限荷重 μF を与える限界荷重係数、 F : 外力の節点力ベクトル、 \dot{U} : (全体の) 節点変位速度ベクトル、 B : ひずみ～変位（ひずみ速度～変位速度）関係を与える行列、 L : \dot{U} から全要素の体積ひずみ速度ベクトル \dot{v} に移す行列、 $\dot{v} = L \dot{U}$ 。

式(6)は方向だけ決まって大きさが不定な速度の、その大きさを仮に決めておく条件である。式(7)は極限状態において全要素が体積ひずみを生じないための制約条件式である。この条件は破壊時に土が非圧縮性であることから、この条件式によって不定圧 λ (平均応力、全応力) が定まる。破壊時に体積変化なしの条件式は、土が塑性体積ひずみを硬化パラメーターに取ってモデル化されるのが普通であることを反映しているのだが、そのため式(5)～式(7)は正規圧密または若干過圧密な土 (Wetter Than Critical) や、緩づめ砂などの極限釣合い状態の解析に適用される。

限界状態とは応力増分がないのに塑性ひずみ速度の大きさが不定であるような状態と定義できる。この定義と法線則を考慮すれば、限界状態式は次式で表される。

$$q = Mp' \dots\dots\dots (8)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\bar{e}}{M} \frac{1}{(p')_f} \right) (s_{ij}), \quad \bar{e} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p} \dots\dots\dots (9)$$

$$\varepsilon_v^p \dots\dots\dots (10)$$

限界状態では塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ の大きさは不定であるが、体積変化は起こらないことに注意しなければならない。式(9)の逆関係式は自明である。土の極限釣合い状態の解析は式(9)の逆関係を式(5)に代入し、 \dot{U} 、 λ 、 μ に関して式(5)～式(7)を解くことにより決定される。しかし、注意しなければならないのは、式(9)には $(p')_f$ という未知の場の変数が存在するため、場の方程式を1つ加える必要があることである。この場の方程式のことをここでは土～水連成式と呼ぶ。

ここでは特に、土が全域で極限状態に達するまでの載荷が非排水条件下でなされる場合を考える。非排水であることは次式で表され、この式をもとに土～水連成式を作る。

$$\varepsilon_v^e + \varepsilon_v^p = 0 \quad \text{in } V \dots \dots \dots (11)$$

ここに、ひずみは荷重前から破壊までのものである。限界状態モデルの場合式 (11) は次のようになる。

$$\frac{M}{\Lambda} \ln \frac{p'}{p_0'} + \frac{q}{p'} = 0 \dots \dots \dots (12)$$

限界状態式、式 (8) を代入すると、土-水連成式は次式となる。

$$(p')_f = p_0' \exp(-\Lambda) \dots \dots \dots (13)$$

この式から限界状態での平均有効応力は初期有効応力状態によってのみ求められることがわかる。しかし、限界状態での平均応力 (全応力) は与えられた境界条件下で解かれてはじめて定まるので、限界状態での間隙水圧分布は境界条件に依存する。すなわち、

$$(u)_f = (p)_f - (p') - \gamma_w \cdot z \dots \dots \dots (14)$$

ここに、 $\gamma_w \cdot z$ は静水圧、全応力 $(p)_f$ は式 (5) の λ で与えられる。

b) 部分排水せん断強度の解析手法

非排水条件は荷重の極端な単純化に基づいている。実際には荷重中に部分的に吸排水が生じ、部分吸排水条件での極限約合い解析が問題になることが多い。ところが、この解析に上記の非排水極限約合い解析が応用できる。これを以下に述べる。

極限荷重 q_f は土質定数、境界条件はむろんのこと、荷重履歴ないし変位履歴に依存する。たとえば、荷重速度 \dot{q} 一定試験を弾塑性圧密変形解析を用いてシミュレートすると、三軸供試体内の刻々の有効応力分布 $\sigma_{ij}'(x, t)$ (Current Effective Stress) は荷重履歴に依存して与えられる。ベクトル x は供試体内の位置を表す。得られた有効応力分布 $\sigma_{ij}'(x, t)$ を用いて、ある時刻 t に非排水瞬間荷重を行えば、極限荷重 q_{fu} が求まるが、これは時刻 t の関数であり、 t までの荷重履歴を反映する。一方、上載荷重は荷重速度 q と時刻 t から、 $q(t) = \dot{q} \cdot t$ なので、 $q_{fu}(t) \geq q(t)$ から、部分排水条件での極限荷重 q_f は次式より求まる。 $q_{fu}(t_f) = q(t_f)$ 。この極限荷重 q_f は図-1 に示す図式解法によって求められる。すなわち、漸増荷重中の $q_{fu}(t)$ を表す下に凸の曲線と荷重履歴の延長線との交わる点 F での極限荷重が $q_{fu}(t_f) = q(t_f)$ である。3. で紹介する解析結果 (図-9) では、横軸には時刻 t の代わりに荷重 q を用いて整理しているが、原理は全く変わらない。

さて、以上の説明からも明らかなように、部分排水条件下での荷重による極限約合いの解析のためには、圧密が進行中の刻々の Current Effective Stress State を計算するための弾塑性圧密解析と、その応力状態を初期値とする非排水極限約合い解析の両者が必要であるが、本論文では特に、前者の解析には太田、飯塚による有限要素プログラム DACSAR⁸⁾ を用いた。

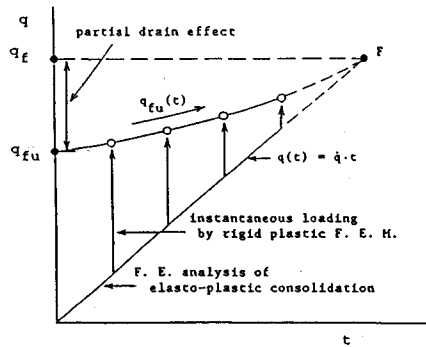


図-1 荷重履歴に応じて定まる極限荷重

3. 繰り返した深草粘土の部分排水せん断試験

関口ら⁹⁾ や Carter ら¹⁰⁾ は、軸ひずみ速度一定の条件で部分排水三軸圧縮試験のシミュレーションと実験を行っているが、供試体の破壊がその土の非排水強度と排水強度の中間の荷重で実現するひずみ速度はかなり狭い範囲にあることを示している。このことは荷重速度 \dot{q} 一定試験でも予想されるところであって、部分排水試験に適した荷重速度のレンジはやはり相当に狭いと考えられる。

実験に先立って部分排水状態での供試体の破壊の数値シミュレーションを実施する直接の目的は、この狭い荷重速度レンジをあらかじめ予想しておく点にある。この速度レンジを外して実験を行えば、部分排水試験はもはや十分な精度で非排水的ないし排水的な普通のせん断試験に近似してしまうからである。

(1) 数値シミュレーションによる部分排水強度特性の推定

数値シミュレーションで採用した三軸供試体縦断面の 1/4 の模型を図-2 に示す。このときに予想される供試体内部のストレスパスを図-3 に示す。描かれた 3 つのストレスパス A, B, C は、A 点が最も試料の排水端に近く、C は最も遠く、B はその中間である。

図-3 に示すように試料に作用させる全応力径路は、いわゆる排水パス ($p = p_0 + q/3$) に限定する。このように限定された荷重経路を用いて、荷重速度だけを変化させて試料内の有効応力パスをいろいろに変化させる。いわば、粘土に独特の実験といつてよい。

a) 弾塑性パラメーターおよび透水係数の決定

深草粘土の物理的指数を図-4 に一括して示しておく。供試体の作成方法は、74 μm ふるいを通した乾燥粉末状の試料をミキサーで完全なスラリー状になるまで十分繰り返す、供試体作成用の予備圧密装置 (直径 15 cm, 高さ 20 cm, 上下端排水) で圧密圧力 2.0 kgf/cm^2 をもって一次元圧密されたものをサンプリングして用い

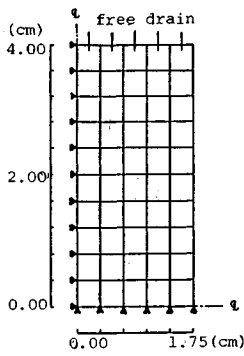


図-2 三軸円柱供試体の境界条件

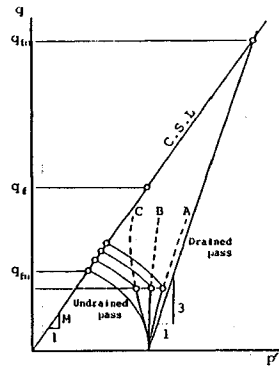


図-3 供試体内部のストレスパス

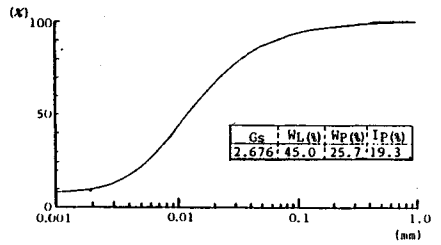


図-4 深草粘土の物理的指数

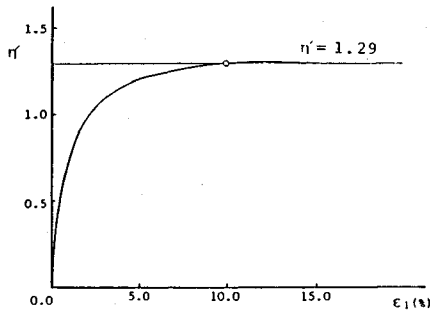


図-5 非排水三軸試験の結果

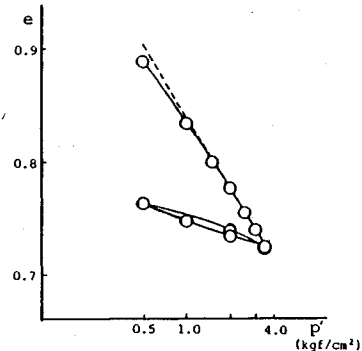


図-6 等方圧密試験の結果

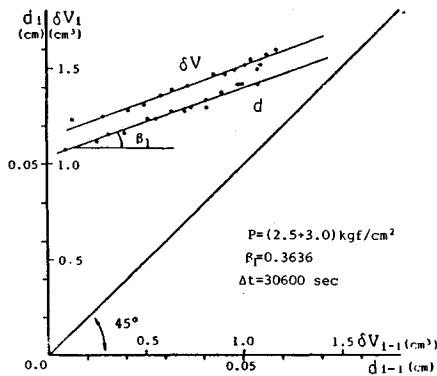


図-7 二次元差分表示

た。

解析では、これに対して限界状態モデルを用いるが、必要な弾塑性パラメーターと透水係数は以下のようにして定めた。

非排水三軸試験より限界状態の勾配 M を決定した(図-5参照)。ここに、圧密圧力 p_0' は 3 kgf/cm^2 である。等方圧密試験より圧縮指数 λ 、透水係数 k を決定した(図-6参照)。膨潤指数 κ はパラメーター間の整合性を考えて限界状態モデルの非排水強度式、式(3)から逆算した。

透水係数は、浅岡の方法¹¹⁾により決定している。浅岡によると圧密係数 C_v は、圧密の第1固有値 λ_1 を用いて以下のように示される。

$$C_v = -\frac{4H^2}{\pi^2} \cdot \lambda_1 = -\frac{4H^2}{\pi^2} \cdot \frac{\ln \beta_1}{\Delta t} \dots (15)$$

ここに、 H は排水長、 β_1 は差分図表示による直線の勾配、 Δt は差分図表示に用いた計測値の時間間隔である。これによって透水係数は、体積圧縮係数 m_v を伴って次式により算出される。

$$k = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \dots (16)$$

図-7は圧密係数決定のための差分図の一例を示している。これより等時間間隔で計測された圧密中の土の挙動を差分図表示すると軸変位 d も体積変化 ΔV も同一の勾配 β_1 をもっていることがわかる。また、図中のプロットの延長が45度線と交わる場所(たとえば $d_i = d_{i-1}$)で圧密の完了時点を予測できることもわかる。

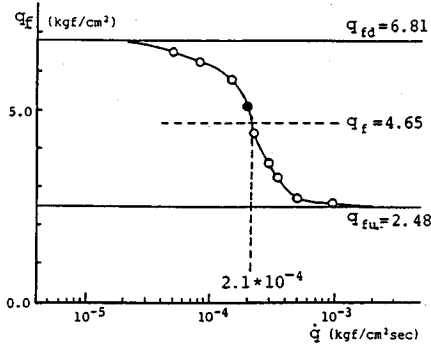
ダイレイタンス係数 $D = (\lambda - \kappa) / M / (1 + e_0)$ は上記で定められた λ 、 κ 、 M およびせん断開始直前の間隙比 e_0 を用いて定めた。

なお、 ν は 0.265 を採用した。以上の結果を一括して表-1に掲げる。

ところで、限界状態モデルでは一次元圧縮条件すなわ

表一 深草粘土の弾塑性パラメーター

M	1.29
λ	0.087
κ	0.048
D	0.017
ν'	0.265
k (cm/s)	1.5×10^{-8}



図—8 部分排水強度 q_f と載荷速度 \dot{q} の関係

ち横ひずみが生じない条件 ($de_3=0$) を考えると、弾塑性パラメーター \tilde{N} (ν' より求められる), M , A および η_{K_0}' には次の関係が成り立つ。

$$\eta_{K_0}' = \frac{\Omega - \sqrt{\Omega^2 - 4\tilde{N}(1-A)(M-1.5A)}}{2(1-A)} \dots\dots\dots(17)$$

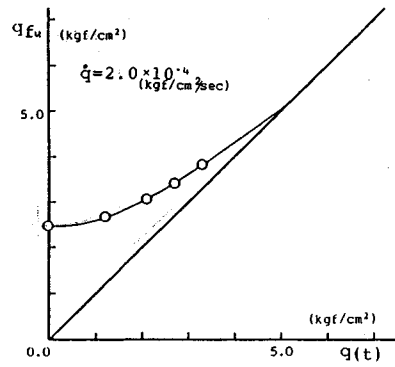
ここに、 $\Omega = \tilde{N} + M(1-A)$, $\eta_{K_0}' = 3(1-K_0)/(1+2K_0)$ 。
表一に示した弾塑性パラメーターの値より式(17)を用いて K_0 を求めると 0.7 となるが、この K_0 値はせん断直前の供試体の初期応力状態 (今の場合等方圧縮している) の $\sigma_3'/\sigma_1' = 1.0$ を示すものではなく、弾塑性パラメーターと一義的に関連する物性値である。 $K_0 = 0.7$ は少し大きな値だが、一次元圧縮された初期応力状態であるときにせん断初期における塑性せん断ひずみの発生が比較的小さくなるように選ばれた値である。

b) 載荷速度一定せん断試験の解析結果

さて、図—2 に示した三軸供試体について一連の載荷速度による部分排水圧縮強度 q_f を求めた。ただし、圧密圧力 p_0' はすべてのケースで 3.0 kgf/cm^2 とした。

図—8 は等方圧密された限界状態モデルについての部分排水強度 q_f と載荷速度 \dot{q} の関係を示している。図中・点で表された部分排水強度を求めるための供試体の破壊の解析のようすを図—9 に示す。図—9 は図—1 に対応している。

なお、図—9 で示す破壊荷重の決定は、弾塑性圧密解析においてまだ比較的小さい軸ひずみしか生じていない間の有効応力状態を利用した非排水支持力解析の結果の外挿を通じて求めている。軸ひずみの小さいことは後出の図—11 あるいは図—13 の $q \sim d$ 関係より確認できる



図—9 $q_{fu} \sim \dot{q}$ 曲線による外挿

が、図—9 は図—11 の b のデータ (説明は後で詳しく行う) を解析した結果である。

図—8 で重要な点は非排水強度と排水強度の間に部分排水強度をとる載荷速度レンジが、およそ、 $3.00 \times 10^{-5} \text{ kgf/cm}^2/\text{s} < \dot{q} < 1.00 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ であり、比較的狭いことである。この特別な載荷速度レンジを外して部分排水せん断試験を行っても、得られる強度はほとんど排水強度ないし非排水強度になってしまう。

(2) 部分排水三軸圧縮試験の実施とその考察

以上の数値解析で部分排水試験にふさわしい載荷速度がどの程度であるか予測されたので、これを参考に一連の部分排水三軸圧縮試験を実施した。実験で用いた載荷速度および圧密圧力 ($p_0' = 3 \text{ kgf/cm}^2$) は前述の数値シミュレーションのものと同じである。載荷速度を一括して表—2 に示す。

図—10, 図—11 は表—2 に示す実施した 5 つの載荷試験のうち、載荷速度が速い方の 3 タイプについて軸差荷重 $q \sim$ 時間 $t \sim$ 軸変位 d 関係および体積変化 $\Delta V \sim$ 時間 t 関係を示したもので、図—10 は実験結果、図—11 は限界状態モデルによる弾塑性圧密変形のシミュレーション結果である。最も載荷速度が速い場合において顕著にみられるごとく、実験では、ある荷重レベルを越えたとき急激に剛性が劣化し軸変位が大きく発達している。それに対し、限界状態モデルでは穏やかな軸変位の発達しか記述できていない。一方、体積変化についてみると、限界状態モデルは比較的良好に実験をシミュレートしていることがわかる。

図—10, 図—11 の $q \sim t$ 関係および $d \sim t$ 関係から t を消去して単なる荷重 \sim 変位関係に整理しなおしたときの実験結果を図—12 に、限界状態モデルによるシミュレーション結果を図—13 に示す。図—12, 図—13 は全応力径路が同じで単にその載荷速度が異なるだけの載荷履歴の差を反映したものであり、最もシンプルな形で強度およびせん断変形に及ぼす載荷速度依存性を示している。載荷中の部分排水の進行度合はもちろん載荷速度に依存

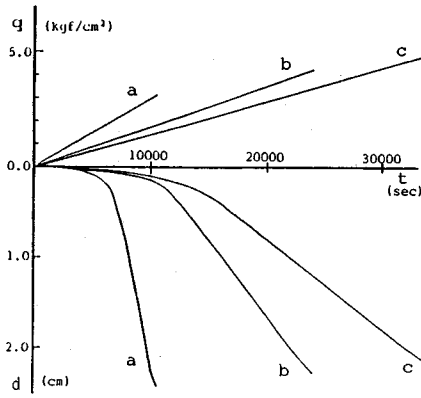


図-10 実験結果

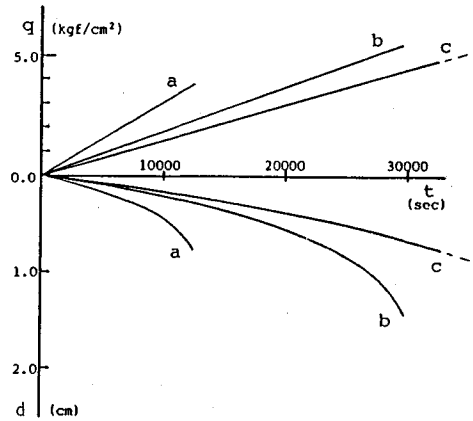


図-11 シミュレーション結果

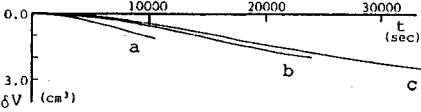


図-12 実験の荷重～軸変位関係

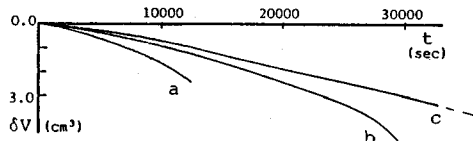


図-13 シミュレーションの荷重～軸変位関係

表-2 載荷速度一覧表

Type	\dot{q} (kgf/cm ² ·sec)
a	3.0×10^{-4}
b	2.0×10^{-4}
c	1.5×10^{-4}
d	1.0×10^{-4}
e	4.0×10^{-5}

するのだが、図-12と図-13の破壊までの荷重～変位関係の曲線の形すなわちせん断変形を比べると、実験においての方がモデルにおいてよりもなお顕著に部分排水効果を表していることがわかる。図-10の考察でも述べたが、載荷速度の一番遅い場合だけ除いて、実験結果(図-12)では、 q_{fu} 付近で剛性が急激に劣化して大きな軸変形が生じているもようが確認できる。

図-8の数値シミュレーションの結果と図-12とを比較する限り、数値シミュレーションによる載荷速度レンジの予測と部分排水強度の推定そのものは、つまり、強

度に関する限りは実験結果をよく説明していることがわかる。このことは、等方圧密試験と非排水強度式より弾塑性パラメータおよび透水係数を定めることが妥当であること、部分排水強度の解析手法が有効であることを示している。また、以上の考察より、限界状態モデルは体積変化や強度についてはうまく表現することができるが、せん断変形については限界があるものと考えられる。

4. 結 論

繰り返した深草粘土の弾塑性パラメータおよび透水係数を以下のようにして定めた。すなわち、等方圧密試験から正規圧密曲線の勾配 λ を、非排水三軸試験における破壊時の有効応力状態から限界状態線の勾配 M と膨潤曲線の勾配 κ を決定した。また、一次元圧縮時に成立する弾塑性パラメータ間の関係式より、 K_0 の値

を0.7と仮定してポアソン比 ν を定めた。透水係数は等方圧密データより圧密の固有値を測って決定した。このように定められた弾塑性パラメーター、透水係数を用いて、部分排水三軸圧縮試験結果を限界状態モデルに基づき解析すれば、以下の結論が得られた。

(1) 部分排水三軸圧縮試験の数値シミュレーションを実施し、部分排水せん断強度の載荷速度依存性を計算した。その結果、部分排水せん断強度が発現する載荷速度レンジは、きわめて狭いものであることがわかった。

(2) 上記の載荷速度レンジの予測は、試料に練り返した深草粘土を用いた部分排水三軸圧縮試験で得られた載荷速度レンジと全くよく一致した。

(3) 数値シミュレーションで計算した部分排水せん断強度は非排水せん断強度と排水せん断強度の中間に値をとり、実験結果ともよい一致を示した。(3)の結論とあわせて、本論文で提案する部分排水せん断強度の解析手法が有効であることがわかった。

(4) 部分排水条件における時間～体積変化関係、軸差応力～体積変化関係は実験とモデル計算とでよい一致を示した。このことより、弾塑性パラメーターおよび透水係数の決定方法の妥当性がいえるが、特に、 κ 、 D を限界状態モデルの非排水強度式、式(3)を用いて決定したので、体積変化の予測がうまくいったものとする。

(5) 部分排水条件における軸差応力～軸変位関係、時間～軸変位関係は、特に載荷速度の速い場合において、実験とモデルとでよい一致を示さなかった。実験ではある荷重レベルを越えたとき急激に剛性が劣化し軸変位が大きく発達しているのに対し、モデルでは穏やかな軸変位の発達しか記述できていない。このことより限界状態モデルは部分排水せん断変形特性の予測に関しては限界があるといえる。

最後に、本研究を行うにあたり終始適切なお指導、ご鞭撻を賜りました名古屋大学 浅岡 顕教授に謝意を表します。また、解析その他で多くの助言を得ました名古屋

屋大学 大塚 悟助教授、解析と実験に協力してくれた東洋建設 丸山敦司君、鹿島建設 松本清治郎君にあわせて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Asaoka, A. and Misumi, K. : Analysis and prediction of consolidation settlement of normally consolidated clay foundation under embankment loading, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.3, pp.35-50, 1988.
- 2) Asaoka, A. and Ohtsuka, S. : Bearing Capacity analysis of a normally consolidated clay foundation, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.3, pp.58-70, 1987.
- 3) Lambe, T. W. : Prediction in soil engineering, *Geotechnique*, Vol.23, No.2, pp.149-202, 1973.
- 4) Atkinson, J. H. : Foundations and Slopes (An introduction to applications of critical state Soil mechanics), McGRAW-HILL, 1981.
- 5) 柴田 徹 : 粘土のダイラタンシーについて, 京都大学防災研究所年報第6号, pp.128-134, 1963.
- 6) Asaoka, A. and Ohtsuka, S. : The analysis of failure of a normally consolidated clay foundation under embankment loading, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.2, pp.47-59, 1986.
- 7) Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T. : Limit analysis of soil structure by rigid plastic finite element method, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.1, pp.34-42, 1984.
- 8) Ohta, H. and Iizuka, A. : DACSAR FEM program Manual Dept. of Civil Engineering Kyoto University, 1983.
- 9) Sekiguchi, H., Nishida, Y. and Kanai, F. : Analysis of partially-drained triaxial testing of clays, *Soils and Foundations*, Vol.21, No.3, pp.53-66, 1981.
- 10) Carter, J. P. : Predictions of the nonhomogeneous behavior of clay in the triaxial test, *Geotechnique*, Vol.32, No.1, pp.55-58, 1982.
- 11) Asaoka, A. and Matuo, M. and Ueda, K. : A new interpretation of oedo meter consolidation test, the proceedings of 5th International Conference on Numerical methods in Geomechanics Nagoya, pp.621-628, 1985. (1990. 6. 4 受付)

ANALYSIS OF PARTIALLY DRAINED TRIAXIAL COMPRESSION TESTING OF CLAYS

Koji MISUMI

Strength characteristics of clays of loading history and loading rate are newly analyzed by the combination of both elasto-plastic consolidation deformation analysis and the rigid plastic analysis. The influence of loading rate on the magnitude of partially drained shear strength of clay can be predicted through this analysis procedure, and the results are applied to the laboratory testings of clays in which partially drained condition is considered through shear testing procedure. The testings are performed on remoulded clay. The ultimate intensity is found to be very sensitive to the loading rate.