

異方的に軽く過圧密された粘性土の 応力-ひずみ挙動のモデル化

MODELLING FOR THE STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF ANISOTROPICALLY LIGHTLY OVERCONSOLIDATED CLAY

木幡行宏*・三田地利之**

By Yukihiko KOHATA and Toshiyuki MITACHI

A series of drained stress probe test on saturated remoulded clay specimens consolidated and rebounded under anisotropic stress condition was performed to investigate the influence of anisotropic stress history and stress path on the stress-strain behavior of clay. Based on the test results, a new constitutive model was proposed which could successfully describe the stress-strain behavior of anisotropically lightly overconsolidated clay.

Keywords: anisotropy, overconsolidation, drained shear, stress path, constitutive equation of soil

1. はじめに

近年土木技術の発展に伴い、有限要素法等の数値解析法の技術は飛躍的に進歩しつつある。土質・基礎工学に関連して数値解析を行ううえで重要なことは、土の応力-ひずみ挙動を的確に表現し得る土の構成式を用いなければならないことである。しかし、軟弱地盤上に構造物を築造する際の地盤の沈下・変形に関する問題、あるいは、地中構造物と地盤との相互作用問題等、破壊時点の前後に発生する問題に対して満足し得る解を得られる状況に至っていない。

土の変形問題を取り扱う構成式は、Druckerら¹⁾が弾塑性理論の土質材料への理論的指針を与えたことに始まり、Roscoeら²⁾が関連流れ則に従い単一降伏曲面を有するCam-clay Theoryを確立した。この理論では、状態境界面下の粘性土の応力-ひずみ挙動は弾性的であると仮定している。しかし、過圧密粘性土においてもせん断初期から無視できない塑性せん断ひずみが生じることが実験的に明らかにされ、Roscoe and Burland³⁾は、Cam-clay Theoryに別の降伏関数を導入し、軽く過圧

密された粘性土まで適用可能なように2つの降伏関数からなる'revised-modified' theoryを提案した。その後、種々のモデルが提案されたが、Pender⁴⁾は過圧密粘性土における塑性せん断ひずみの発生を説明するために、応力比一定線を降伏関数として、非関連流れ則を用いた弾塑性モデルを提案した。さらに、過圧密粘性土の複雑な応力-ひずみ挙動を説明するために複数の降伏関数を有するモデル等が提案され議論されている⁵⁾⁻⁸⁾。しかし、これらのモデルの多くは、等方的に過圧密された粘性土を対象にしたものがほとんどであり、異方圧密応力履歴を考慮したものは少ない。

一般に、原地盤の多くは異方圧密状態にあり、地盤を開削したような部分では、異方応力条件下で過圧密状態になっている。さらに、排水条件や荷重条件によって地盤内の土要素は種々の有効応力経路をたどると考えられる。このような異方過圧密粘性土を対象にした実験的研究は、きわめて少なく未解明な部分が多い。

そこで、本研究では'Wet'状態での異方過圧密粘性土の変形特性を解明するために、乱した飽和粘性土試料に対して、応力比一定の条件で異方圧密、膨張を行い、過圧密比1.33に至った粘性土供試体について、応力制御排水条件で平均有効主応力一定圧縮・伸張試験、応力増分比一定圧縮・伸張試験、偏差応力一定試験を実施した。

* 正会員 工博 北海道大学助手 土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 工博 北海道大学教授 土木工学科(同上)

表-1 試料の物理的性質

| | |
|------|-----------------------|
| 液性限界 | LL = 38 % |
| 塑性限界 | PL = 21 % |
| 塑性指数 | PI = 17 |
| 比重 | G _s = 2.73 |
| 粒度分布 | 砂分 20 % |
| | シルト分 58 % |
| | 粘土分 22 % |

その結果、'Wet' 状態における異方過圧密粘性土の変形特性が明らかにされ、得られた実験事実に基づいて、軽く過圧密された領域から正規圧密された領域に至るまでの粘性土の応力-ひずみ挙動を表現し得る新しい応力-ひずみ式を提案した。

2. 試料および実験

(1) 試料

実験に用いた試料は、北海道空知郡南幌町清幌で採取された自然粘性土であり、その物理的性質を表-1に示す。なお、表中に示した液性限界および塑性限界は、フォールコン法⁹⁾により求めた。採取した試料は、蒸留水を加え、420 μm ふるいを通した後、養生した。供試体は、このように準備した泥水状態の試料を3~4時間、ソイルミキサーで攪拌した後、真空で予圧密セルに導き100 kPaの鉛直応力で約10日間一次的に予圧密して得られた。

(2) 実験

予圧密後の粘土塊を水平方向に切り出して、直径50 mm、高さ120 mmの円柱に成形して供試体とした。供試体周面にはらせん状のスリットを付けた沓紙を巻き、水中で厚さ0.2 mmのメンブレンを被せ、三軸セルにセットした。供試体両端面には、摩擦の影響を軽減させるためにシリコングリースを塗布したテフロンシートを置いた。実験装置は通常軸対称三軸圧縮試験装置を用い、100 kPaのバックプレッシャーを圧密開始時より供試体に載荷した。なお、試験中の軸力は、三軸セル内にセットしたロードセルにより、軸変位量は、ひずみゲージ式変位変換器、また、側圧および供試体下端中央部における間隙水圧は、ひずみゲージ式圧力変換器によりそれぞれ測定した。さらに、軸力制御にはベロフラムシリンダーを、供試体上面までグリセリンで満たされた三軸セル内の側圧制御には、エアーレギュレータを用いた。吸排水量は、供試体側面に巻いた沓紙に集まった水をペダスタルを通して自動体積変化測定装置¹⁰⁾に導き自動計測を行った。試験期間を通して、室温は20°±0.5°Cに制御された。

異方圧密・膨張過程およびその後の排水せん断過程は以下のような手順で行われた。

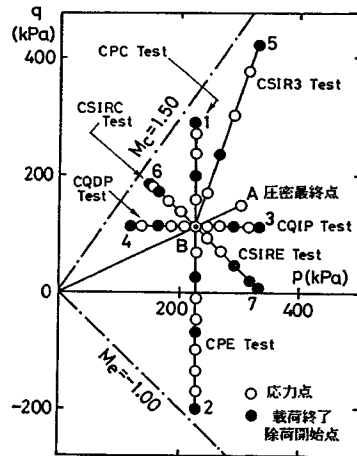


図-1 応力経路図

まず、三軸セル内にセットされた供試体を、バックプレッシャーを十分行きわたらせる目的で、有効側圧30 kPaで3時間等方圧密させた後、応力比 $\eta (=q/p) = 0.5$ の条件で、手動で側圧と軸圧を制御することによって12時間ごとに段階的に応力を載荷し、圧密最終点(平均有効主応力 $p (=(\sigma'_a + 2\sigma'_r)/3) = 300$ kPa, 軸差応力 $q (= \sigma'_a - \sigma'_r = 150$ kPa) まで異方圧密を行った(図-1, 経路OA)。その後、過圧密比OCR=1.33に相当する $p = 225$ kPa, $q = 113$ kPa (せん断開始点) まで異方膨張を行った(図-1, 経路AB)。

なお、圧密時の各荷重段階における平均主応力増分は、 $\Delta p/p = 0.2$ (p : 前段階の平均主応力, Δp : 平均主応力増分) となるように決定し、載荷段階数は13段階とした。また、各荷重段階における載荷時間は、排水量 $-\log t$ 関係に3t法を適用して決定し、600~800分とした。

次に、図-1に示すように、異方圧密、異方膨張終了後の試験供試体に対して、以下の7種類の応力経路に沿って応力制御排水せん断試験を実施した。なお、本研究において、過圧密比OCRは次式で定義される。

$$OCR = \sigma'_{an} / \sigma'_{ao}$$

ここに、 σ'_{ao} , σ'_{an} : 圧密終了時および膨張終了時の供試体軸方向の有効主応力

- ① CPC 試験 (経路B1) p を膨張終了時の値 ($p = 225$ kPa) に保ったまま q を増大させる試験
- ② CPE 試験 (経路B2) p を膨張終了時の値 ($p = 225$ kPa) に保ったまま q を減少させる試験
- ③ CQIP 試験 (経路B3) q を膨張終了時の値 ($q = 113$ kPa) に保ったまま p を増大させる試験
- ④ CQDP 試験 (経路B4) q を膨張終了時の値 ($q = 113$ kPa) に保ったまま p を減少させる試験
- ⑤ CSIR 3 試験 (経路B5) 応力増分比 ($\Delta q/\Delta p$)

が一定値 ($=3.0$) となるように p, q をともに増大させる試験

- ⑥ CSIRC 試験 (経路 B6) 応力増分比 ($\Delta q/\Delta p$) が一定値 ($=-1.0$) となるように p を減少させ, q を増大させる試験

- ⑦ CSIRE 試験 (経路 B7) 応力増分比 ($\Delta q/\Delta p$) が一定値 ($=-1.0$) となるように p を増大させ, q を減少させる試験

なお, 図中に示した M_c および M_e は, 等方圧密後の圧縮および伸張非排水せん断試験から得られた破壊時の応力比である. また, 全経路において, 沓紙自体の吸排水およびメンブレンからの透水を考慮して排水量の補正を行った¹¹⁾. 応力点は, CPC, CSIRC 試験については, CSIR 3 試験の η の値と一致するように, また, CQIP, CSIRE 試験では, CSIR 3 試験の p の値と一致するように決定した. さらに, CPE, CQDP 試験については, それぞれ CPC, CQIP 試験の応力点とせん断開始点に関して対称となるように決定した. なお, 本研究ではひずみパラメータとして次式で表わされる体積ひずみ v とせん断ひずみ ε を用いた.

$$v = \ln(V_0/V) = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$$

$$\varepsilon = \varepsilon_a - v/3$$

$$\varepsilon_a = \ln(H_0/H)$$

ここに, $\varepsilon_a, \varepsilon_r$: 供試体軸方向および半径方向の主ひずみ, H_0, H : 膨張終了時およびせん断中の供試体高さ, V_0, V : 膨張終了時およびせん断中の供試体体積

3. 実験結果と考察

図-2 は, 一連の排水せん断試験の結果を, 体積ひずみ v と応力比 η の関係で示したものである. なお, 図中の◎印は, せん断開始点を示している.

まず, 発生する体積ひずみがダイレイタンス成分のみであると考えられる平均有効主応力一定試験 (CP 試験) に注目してみると, 圧縮 (CPC), 伸張 (CPE) にかかわらず, 載荷時 (実線), 除荷時 (破線) とともに正の体積ひずみを示している. 正規圧密粘性土に対する平均有効主応力一定試験結果によれば, 除荷過程において応力比の変化量が小さい範囲では, わずかに負の体積ひずみの発生がみられるが, 応力比の変化量がある値を越えると, ある応力レベル以上では正の体積ひずみが発生するという報告がある^{12), 13)}. これらの実験事実から, 正規圧密粘性土および 'Wet' 側の過圧密粘性土において, 応力比の変化量がある値を越えると, 圧縮・伸張にかかわらず η の変化に対して常に正の体積ひずみが発生することがわかる. 図-3(a), (b) には, 圧密・膨張時の応力比および過圧密比は等しいが, せん断開始点の応力状態が異なる CP 試験の $\eta-v$ 関係を示した (図

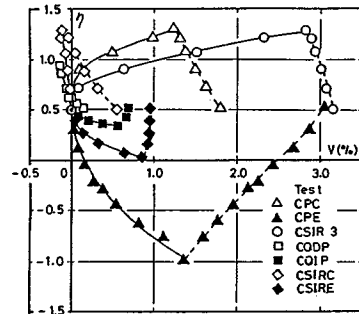


図-2 応力比-体積ひずみ関係

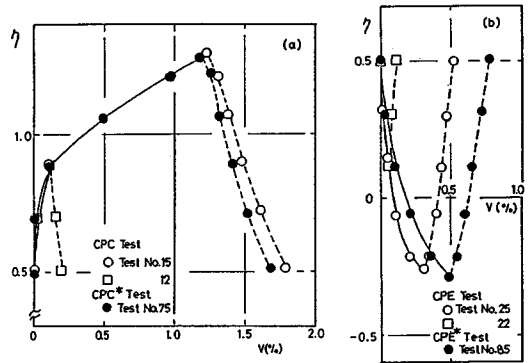


図-3 p 一定試験における応力比-体積ひずみ関係

中●印がこれに対応するもので CP* 試験とよばれ, せん断開始点で $p=270$ kPa, $q=135$ kPa である).

CP 試験と CP* 試験の結果を比較すると, 両者の応力-ひずみ曲線は, 圧縮, 伸張, 両試験ともほぼ一致している. このことから, 'Wet' 状態の過圧密粘性土においては同じ過圧密比であれば排水せん断中に発生する体積ひずみは応力レベルに関係なく等しいものとなることがわかる.

次に, p を変化させる試験についてみると, p が増加する CSIR 3, CQIP, CSIRE 試験では, CP 試験と同様, 載荷時, 除荷時ともに正の体積ひずみを示している. 一方, p が減少する CSIRC, CQDP 試験では, 載荷時に負, 除荷時に正の体積ひずみを示している. 図-2 より, 発生する体積ひずみがダイレイタンス成分のみである CP 試験では, 載荷時・除荷時ともに正の体積ひずみの発生を示していたことから, 載荷時に p が増加する経路において, 除荷時に p が減少するにもかかわらず正の体積ひずみが発生したのは, この領域の体積ひずみの発生傾向が, p 成分よりダイレイタンス成分に強く依存しているためであると考えられる.

図-4 は, 一連の排水せん断試験の結果をせん断ひずみ ε と応力比 η の関係で示したものである. 載荷時においては, CPC, CSIR 3, CSIRC 試験で正のせん断ひ

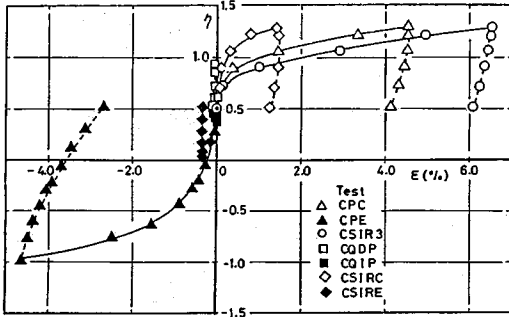


図-4 応力比-せん断ひずみ関係

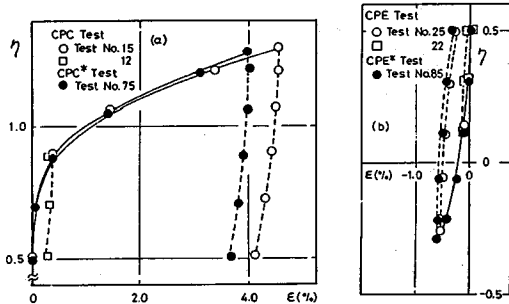


図-5 p一定試験における応力比-せん断ひずみ関係

ずみ, CPE, CSIRE 試験で負のせん断ひずみの発生が認められ, 除荷時には, いずれの試験においても非可逆成分が認められる。さらに, CQIP, CQDP 試験では顕著なせん断ひずみの発生は認められない。これらの実験結果より, 'Wet' 状態の過圧密粘性土において, 偏差応力一定の場合を除く経路で, 塑性せん断ひずみの発生が認められた。したがって, 過圧密領域においてもせん断降伏が生じていると考えられる。

図-5(a), (b) に CP 試験と CP* 試験の η - ϵ 結果を示したが, 両者を比較すると, 体積ひずみと同様, 圧縮・伸張にかかわらず両試験の挙動はほぼ一致していることがわかる。このことからせん断ひずみについても 'Wet' 状態の過圧密粘性土においては, 同じ過圧密比であれば応力レベルに関係なく, その挙動は一致することがわかる。

図-6(a) に CP 試験, 図-6(b) に CP 試験以外の状態経路を, それぞれ, $q/p_e \sim p/p_e$ 面 (p_e : 等価圧密圧力 (kPa)) に示した。なお, 図中の実線は載荷時, 破線は除荷時をそれぞれ示している。また, CP 試験の OCR=4 については除荷を行っていない。(a) 図をみると, OCR=1.33 では, 明らかに載荷過程で状態境界面に達しており, 状態境界面に達した後は, OCR=1 の状態経路に一致するようである。一方, OCR=4 は, 経路全域にわたって状態境界面下に存在し, 応力状態が

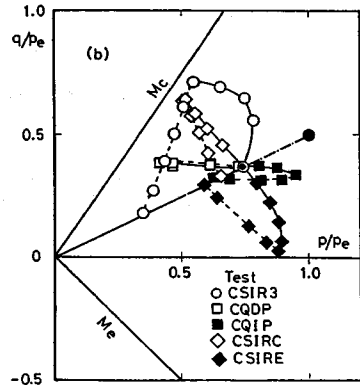
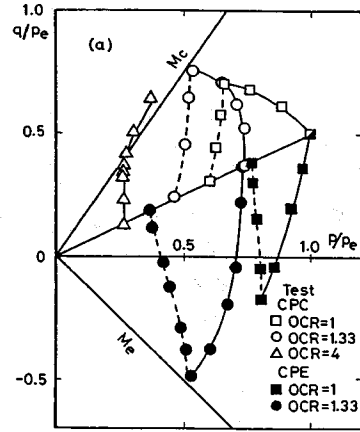


図-6 状態経路図

M_c 線に到達するまでは, p/p_e が一定である。除荷時についてみると, 状態境界面内部で圧縮伸張にかかわらず OCR=1, OCR=1.33 ではほぼ同じような挙動を示している。(b) 図より, 載荷時に平均有効主応力が増加する経路は, 載荷途中において状態境界面に到達するため, 状態経路は曲線を描いている。一方, 載荷時に平均有効主応力が減少する経路では, 状態経路は応力増分方向に一致するものとなっている。状態境界面内部に存在すると考えられる除荷時の挙動をみると, CSIRC 試験を除く経路で, 除荷時の状態経路は応力増分方向にほぼ一致するものとなっている。

4. 構成式の誘導

Roscoe and Burland³⁾ は, 等方条件で軽く過圧密された粘性土を対象にした 'revised Cam-clay Model' を提案し, 過圧密領域において塑性せん断ひずみの発生を考慮した。

Eekelen and Potts¹⁴⁾ は, 修正 Cam-clay モデルを改良した状態境界面とその内部に応力比一定降伏面を仮定し, 正規圧密および過圧密された粘性土の静的載荷およ

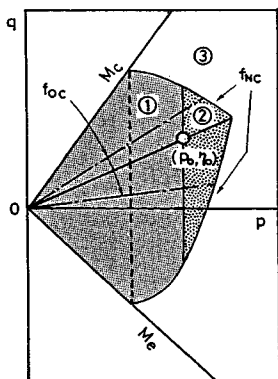


図-7 モデルの概念図

び繰り返し載荷に対する構成式を展開した。また、Adachi and Oka⁷⁾ は、Dafalias and Popov¹⁵⁾、Mrozら⁵⁾の提案する境界曲面の概念に基づいて正規圧密領域と過圧密領域を分ける境界曲面および境界曲面内部に応力比一定降伏面を仮定し、砂および過圧密粘性土の構成式を提案した。これらのモデルにおいて共通していることは、過圧密領域で塑性ひずみの発生を評価するということである。事実、前節で過圧密領域においても塑性ひずみの発生が認められる場合があった。

本研究において提案する構成式は、三軸条件下でWet状態からせん断が開始される場合の粘性土の応力-ひずみ関係を対象にしており、上述した種々の構成式および本研究で得られた実験事実を参考にして導かれたものである。図-7には、提案するモデルの概念図が示されている。図に示すように、提案するモデルでは、正規圧密時に応力比一定の条件で圧密が進行するときに形成される境界曲面 (f_{NC}) を仮定し、境界曲面の内部を過圧密領域、外部を正規圧密領域とした。さらに、過圧密領域内で応力比一定の降伏曲面 (f_{OC}) を仮定した。また、ひずみの発生傾向により以下に示す3つの領域を仮定した。すなわち、

- ① $p < p_0, f_{NC} < 0, \eta < M_c, \eta > M_e$ で囲まれる領域 (図中①部分)

この領域で発生するひずみを、 $v^e, \epsilon^e, \epsilon_{OC}^e$ のみとし、 $v_{OC}^e = 0$ と仮定する。

ここに、 v^e : 体積ひずみの弾性成分、 ϵ^e : せん断ひずみの弾性成分、 v_{OC}^e : f_{OC} によって生じる体積ひずみの塑性成分、 ϵ_{OC}^e : f_{OC} によって生じるせん断ひずみの塑性成分

- ② $p \geq p_0, f_{NC} < 0$ で囲まれる領域 (図中②部分)
この領域で発生するひずみは、 $v^e, \epsilon^e, v_{OC}^e, \epsilon_{OC}^e$ とする。
- ③ $f_{NC} \geq 0, \eta < M_c, \eta > M_e$ で囲まれる領域 (図中③部分)

この領域で発生するひずみは、 $v^e, \epsilon^e, v_{NC}^e, \epsilon_{NC}^e$ とする。ここに、 v_{NC}^e : f_{NC} によって生じる体積ひずみの塑性成分、

ϵ_{NC}^e : f_{NC} によって生じるせん断ひずみの塑性成分

(1) 正規圧密領域における塑性ひずみ増分式

正規圧密時に、応力比一定の条件で圧密が進行するときに、Original Cam-clay²⁾型の負荷関数を仮定し、それによって表わされる曲面を正規圧密領域と過圧密領域を分ける境界曲面とした。以下に誘導過程を示す。

まず、異方正規圧密粘土の塑性ひずみ増分比を以下のように仮定する。

$$\frac{d\epsilon_{NC}^e}{dv_{NC}^e} = \frac{\alpha}{M-\eta} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 M : 限界状態の応力比であり、 $d\eta > 0$ の場合、

$$M = M_c, d\eta < 0 \text{ の場合, } M = M_e \text{ とする。}$$

α : 後述の方法で決定されるパラメーター

本研究は正規・過圧密両領域にわたる応力変化を受ける際の粘土の変形挙動を説明し得るモデルの構築をめざしていることから、提案するモデルは第一に正規圧密での挙動をよく説明し得るものでなければならない。そこで、上記の仮定は新たなパラメーター α を導入することによって Original Cam-clay モデルにおける塑性ひずみ増分比に修正を加えたものである。

式(1)に関連流れ則を適用し、 $dq = \eta dp + p d\eta$ なる関係を代入し、初期条件 $\eta = \eta_0, p = p_0$ として積分を行うことによって塑性ポテンシャル関数 g_{NC} および負荷関数 f_{NC} は次式となる。

$$f_{NC} = g_{NC} = (1/\alpha) \ln(p_0/p) + \frac{1}{(1-\alpha)} \ln \left| \frac{(1-\alpha)\eta - M}{(1-\alpha)\eta_0 - M} \right| = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $M_e \leq \eta \leq M_c$ である。また、 $\alpha = 1$ のときは Original Cam-clay theory に一致する。

式(2)において、 p_0 も変数と考えると、

$$\frac{dp_0}{p_0} = \frac{dp}{p} + \frac{\alpha d\eta}{(M-\eta) + \alpha \eta} \dots\dots\dots (3)$$

一方、圧縮指数 λ 、膨張指数 κ を用いて、間隙比の変化量の塑性成分として

$$de^p = -(\lambda - \kappa) \frac{dp_0}{p_0} \dots\dots\dots (4)$$

を得る。

式(4)を式(3)に代入して塑性ひずみ増分式が得られる。

$$dv_{NC}^e = -\frac{de^p}{(1+e)} = \frac{(\lambda - \kappa)}{1+e} \left(\frac{dp}{p} + \frac{\alpha d\eta}{(M-\eta) + \alpha \eta} \right) \dots\dots\dots (5)$$

一方、式(1)から、

$$d\epsilon_{NC}^e = \frac{\alpha}{M-\eta} dv_{NC}^e \dots\dots\dots (6)$$

(2) 過圧密領域における塑性ひずみ増分式

過圧密領域において次式で示す降伏関数を仮定する。

$$f_{oc} = \eta - \eta_i - k = 0 \dots\dots\dots(7)$$

式(7)に含まれている k は硬化パラメーターであり、平均有効主応力一定経路における $(\eta - \eta_i) \sim \varepsilon_{oc}^e$ 関係を双曲線で近似することによって、

$$k = \frac{(M - \eta_i) \varepsilon_{oc}^e}{\beta (M - \eta_i) + \varepsilon_{oc}^e} \dots\dots\dots(8)$$

を得る。

ここで、 β を η の関数として

$$\beta = \beta_0 \left(\frac{M - \eta_i}{M - \eta} \right) \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 η_i ：応力増分比あるいは応力比の増分の符号が変化したときに置き換えられる応力比の値

β_0 ：後述する方法で決定されるパラメーター

と仮定し、式(9)を式(8)に代入すると、

$$k = \frac{(M - \eta)(M - \eta_i) \varepsilon_{oc}^e}{\beta_0 (M - \eta_i)^2 + (M - \eta) \varepsilon_{oc}^e} \dots\dots\dots(10)$$

を得る。

したがって、硬化パラメーター k は、 η と ε_{oc}^e の関数として仮定される。

次に、塑性ポテンシャル関数を応力増分方向によって、次式のように仮定する。

応力増分方向が図-7に示す領域①に向かう場合には、

$$g_{oc1} = q - q_k = 0 \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 q_k ：現在の応力状態における q の値と仮定し、

応力増分方向が図-7に示す領域②に向かう場合には、

$$g_{oc2} = \eta - \eta_i - M \ln(p_0/p) = 0 \dots\dots\dots(12)$$

と仮定する。

一般に、塑性ひずみ増分 $d\varepsilon_{ij}^e$ は次式で定義される。

$$d\varepsilon_{ij}^e = \Lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 Λ は正のスカラーパラメーターであり、Pragerの適合条件より決定される。

Pragerの適合条件は、

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{ij}^e} d\varepsilon_{ij}^e + \frac{\partial f}{\partial k} dk = 0 \dots\dots\dots(14)$$

で示される。

式(10)より k は、 η と ε_{oc}^e の関数であるから、式(14)中の dk は、

$$dk = \frac{\partial k}{\partial \varepsilon_{ij}^e} d\varepsilon_{ij}^e + \frac{\partial k}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} \dots\dots\dots(15)$$

となる。

よって、正のスカラーパラメーター Λ は次式で決定される。

$$\Lambda = - \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} + \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl}}{\left(\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{ij}^e} + \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \varepsilon_{ij}^e} \right) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}} \dots\dots\dots(16)$$

式(16)より

$$\frac{1}{H} = - \left(\frac{\partial f}{\partial \varepsilon_{ij}^e} + \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \varepsilon_{ij}^e} \right) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \dots\dots\dots(17)$$

とすると、式(13)は次式のように書き直される。

$$d\varepsilon_{ij}^e = H \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} + \frac{\partial f}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} \right) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \dots\dots\dots(18)$$

さて、応力増分方向が領域②に向かう場合について考えると、本研究の場合、三軸条件を対象としているので、式(17)を (η, p, q) で表現し、式(7)、(10)と結び付けると硬化関数 H として次式が得られる。

$$H = \frac{p\beta_0(M - \eta_i)^3}{2(M - \eta)^3} \dots\dots\dots(19)$$

よって、式(7)、(12)、(19)および式(18)より、塑性ひずみ増分式として次式が求まる。

$$dv_{oc}^e = \frac{\beta_0(M - \eta_i)^2(M + \eta - 2\eta_i)}{(M - \eta)^2} d\eta \dots\dots\dots(20)$$

$$d\varepsilon_{oc}^e = \frac{\beta_0(M - \eta_i)^2(M + \eta - 2\eta_i)}{(M - \eta)^3} d\eta \dots\dots\dots(21)$$

さらに、応力増分方向が領域①に向かう場合には、同様にして、硬化関数 H が次式のように得られる。

$$H = \frac{\beta_0(M - \eta_i)^3}{(M - \eta)^3} \dots\dots\dots(22)$$

よって、この場合の塑性ひずみ増分式として次式が得られる。

$$dv_{oc}^e = 0 \dots\dots\dots(23)$$

$$d\varepsilon_{oc}^e = \frac{\beta_0(M - \eta_i)^2(M + \eta - 2\eta_i)}{(M - \eta)^3} d\eta \dots\dots\dots(24)$$

さらに、弾性ひずみは全領域において次式で表わされるものとする。

$$dv^e = \frac{\alpha}{1 + e} \frac{dp}{p} \dots\dots\dots(25)$$

$$d\varepsilon^e = \frac{dq}{3G} \quad (G: \text{せん断剛性率}) \dots\dots\dots(26)$$

(3) パラメーターの決定法

モデルに必要とされるパラメーターは、 $\lambda, \alpha, M, \alpha, \beta_0$ および G である。等方圧密、等方膨張試験より、 $\lambda = 0.0680, \alpha = 0.00326$ が得られた。また、 M は、等方圧密非排水圧縮・伸張試験より、それぞれ $M_c = 1.50, M_e = -1.00$ を得た。パラメーター α および β_0 は、以下の方法によって求められる。

α は、正規圧密領域における構成式に含まれるパラメーターであり、図-8(a)に示すように式(5)による計算値が、OCR=1の平均有効主応力一定圧縮試験

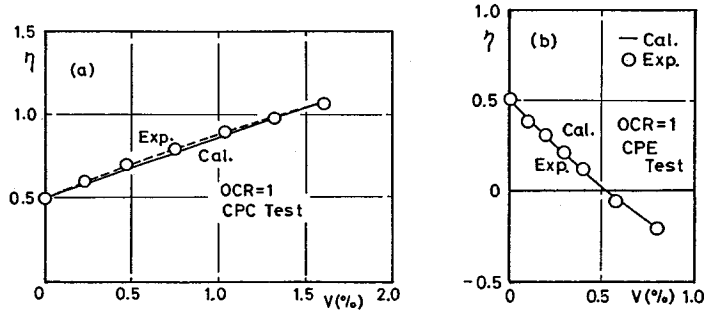


図-8 パラメーター α 決定のための CP 試験 (OCR=1) へのフィッティング

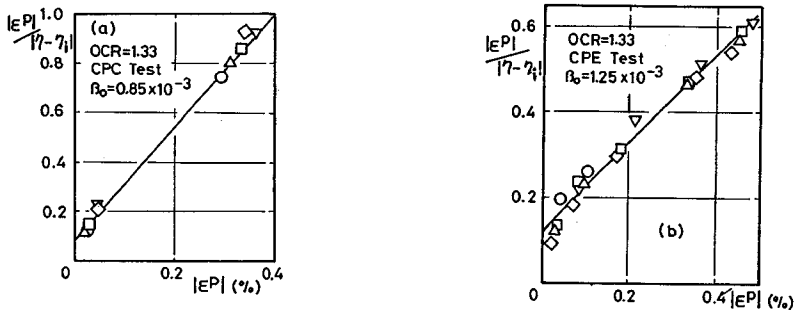


図-9 パラメーター β_0 の決定

における $\eta-v$ 関係に最もよく合うように決定した。その結果、 $\alpha=1.2$ を得た。

ところで、従来の実験結果^{16)~18)}を検討した結果、 $p-q$ 面上で圧縮側の降伏曲線と $\eta=M_c$ との交点における p の値と伸張側の降伏曲線と $\eta=M_c$ との交点における p の値は、ほぼ等しいとみることができる。そこで、伸張側のパラメーター α の値は、圧縮側で求められた α を式 (2) に代入し、 M_c との交点の p を求め、その値が式 (2) で計算される伸張側の降伏曲線と M_c との交点の p の値に等しくなるようにして求められた。その結果、伸張側では $\alpha=0.32$ を得た。

図-8 (b) には、OCR=1 の平均有効主応力一定伸張試験における $\eta-v$ 関係と $\alpha=0.32$ を用いた式 (5) による計算値の比較を示しているが、両者はきわめてよく一致していることが確かめられる。

β_0 は、過圧密領域における構成式に含まれるパラメーターであり、 $(\eta-\eta_i)-e^p$ 曲線の初期勾配である。図-9 (a), (b) は、CPC, CPE 試験における載荷時の初期部分に対する $e^p/(\eta-\eta_i)-e^p$ 関係を示している。式 (7), 式 (10) より、本モデルにおける $e^p/(\eta-\eta_i)-e^p$ 関係は非線形となるが、簡単のため $e^p/(\eta-\eta_i)-e^p$ 関係の初期部分を直線で近似すれば、縦軸切片の値として β_0 が与えられ、 $d\eta>0$ の場合には $\beta_0=0.85 \times 10^{-3}$ 、 $d\eta<0$ の場合には $\beta_0=1.25 \times 10^{-3}$ がそれぞれ得られる。さらに、せん断剛性率 G は、OCR=1.33 の平均有効主応力一定

試験の $q-\epsilon$ 関係の初期接線勾配より $G=6.0 \times 10^4$ kPa を得た。

(4) 予測値と実測値の比較

図-10, 11 に全経路の体積ひずみおよびせん断ひずみの予測値と実測値の比較を示した。これらの図より、体積ひずみおよびせん断ひずみについて全般的によい一致がみられているが、せん断ひずみについては偏差応力一定試験でありよ一致がみられていない。提案するモデルでは、CQ 試験の場合には $dq=0$ であるため、せん断ひずみは塑性成分のみとなり、 $d\eta>0$ となる経路においては、せん断ひずみの発生は、常に正となる。

図-11 に示す CQDP 試験結果によれば、載荷時に負のせん断ひずみが発生している。本実験の試験装置では、軸変位置測定用ダイヤルゲージの支柱が三軸セル上盤に取り付けられている。CQDP 試験の場合、軸差応力を一定に保ちつつ側圧を減少させることになる。この際、軸変位置の発生そのものがきわめて小さいために、側圧の変化による三軸セル自体のわずかな変形が供試体の軸変位置の測定結果に無視し得ない影響を及ぼすこととなり、軸ひずみが実際の値よりも過小に評価され、結果としてせん断ひずみが負の値を示したと考えられる。また、CQIP 試験の場合、側圧を増加させる試験であるので、現象としては CQDP 試験と逆のことが予想され、せん断ひずみを過大に評価する結果になったものと解釈される。

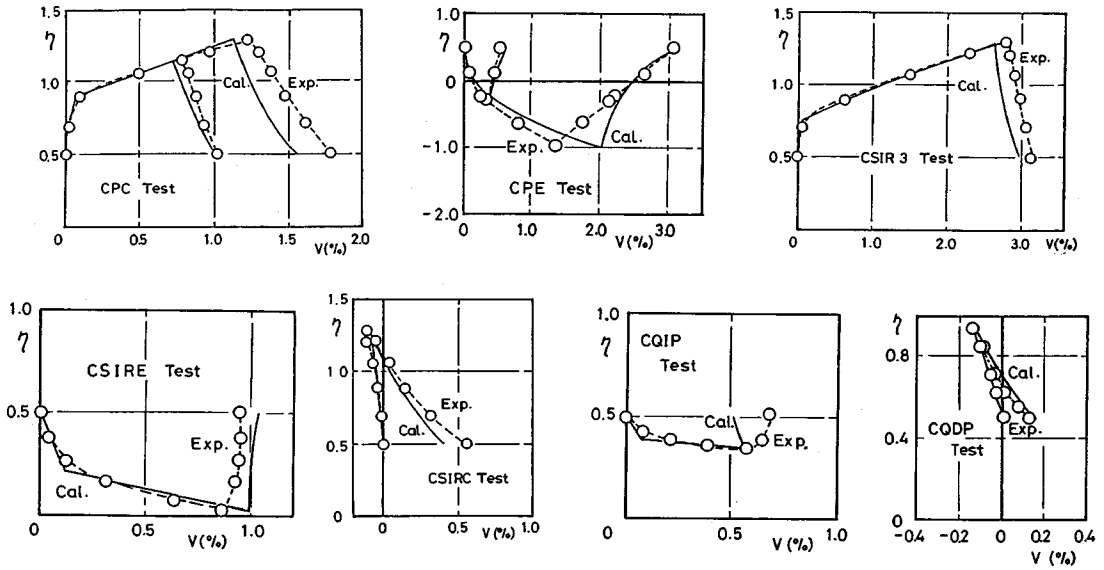


図-10 応力比-体積ひずみ関係の予測値と実測値の比較

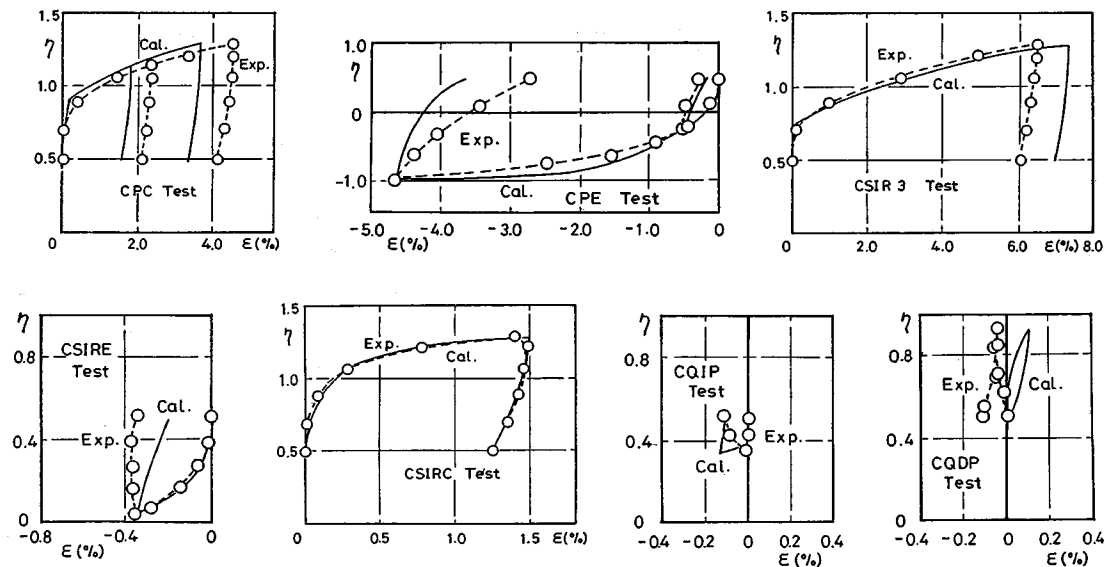


図-11 応力比-せん断ひずみ関係の予測値と実測値の比較

以上のことから提案するモデルはせん断ひずみの発生傾向もよく説明し得るものと考えられる。

5. まとめ

飽和粘性土について、 $\eta=0.5$ の条件で異方圧密膨張履歴を与え、種々の応力制御排水せん断試験を実施して得られた‘Wet’状態における過圧密粘性土の応力-ひずみ挙動についての考察と、これに基づいて誘導した構成式による予測値と実験値の検討結果から得られた主な結論をまとめると以下のものである。

- (1) ‘Wet’状態の過圧密粘性土について、ある応力レベル以上では圧縮・伸張にかかわらず応力比の変化に対して常に正の体積ひずみが発生する。したがって、応力比の減少量の大きな経路では平均有効主応力が減少する場合であっても、正の体積ひずみを生じることになる。
- (2) 過圧密領域においても塑性せん断ひずみの発生が認められ、せん断降伏が生じていることが確認された。
- (3) 本研究で提案したモデルの特徴は、正規圧密領域と過圧密領域を分ける境界曲面を仮定し、さらに、過圧密領域におけるひずみの発生傾向をよりよく説明する

ためにこの領域を2つに分けたことである。このことによつて、従来、提案されている弾塑性モデルよりもパラメーターの数が少なく、かつ'Wet'状態の異方過圧密粘性土の応力-ひずみ挙動をよく説明することができる。

謝 辞：本研究の実験に際しては、昭和62年度卒業生 柏倉 博君（現・大学院生）、および工藤 豊技官の多大な協力を得た。また、試料は北海道開発コンサルタントより提供を受けたものであり、研究にあたっては、昭和62年度文部省科学研究費一般研究（C）62550353の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Drucker, D. C., Gibson, R. E. and Henkel, D. J. : Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity, Transaction, ASCE, Vol. 122, pp. 338~346, 1957.
- 2) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajah, A. : Yielding of clay in states wetter than critical, Geotechnique, Vol. 13, No. 3, pp. 211~240, 1963.
- 3) Roscoe, K. H. and Burland, J. B. : On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay, Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, pp. 535~609, 1968.
- 4) Pender, M. J. : A model for the behaviour of overconsolidated soil, Geotechnique, Vol. 28, No. 1, pp. 1~25, 1978.
- 5) Mroz, Z., Norris, V. A. and Zienkiewicz, O. C. : Application of anisotropic hardening model in the analysis of elasto-plastic deformation of soils, Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 1~34, 1979.
- 6) Dafalias, Y. F. : Bounding surface plasticity. I, Mathematical foundation and hypoplasticity, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 112, No. 9, pp. 966~987, 1986.
- 7) Adachi, T. and Oka, F. : Constitutive equations for sands and over-consolidated clays, and assigned works for sand, Results of the International Workshop on Constitutive Relations for Soils, Grenoble, pp. 141~157, 1982.
- 8) 森脇武夫・木口 基・網干寿夫：異方過圧密粘性土の変形特性とその構成式，土質工学会論文報告集，Vol. 28, No. 1, pp. 161~170, 1988.
- 9) 北郷 繁・佐藤正義：液性塑性両限界の同時測定法に関する研究（第5報），土と基礎，Vol. 18, No. 6, pp. 9~15, 1970.
- 10) 小野 丘：三軸試験における体積変化測定法—水銀ポットによる方法—，土と基礎，Vol. 31, No. 7, pp. 50~51, 1983.
- 11) 三田地利之・成田 孝：三軸試験の体積変化測定に及ぼす紙の圧縮性およびゴム膜の透水性の影響，第20回土質工学研究発表会，pp. 467~470, 1985.
- 12) 清水正喜：粘性土の三軸伸張および等方圧縮挙動に対するせん断履歴の影響，京大防災研年報第23号，B-2, pp. 73~86, 1970.
- 13) 池浦 勲・三田地利之：異方圧密粘土の応力-ひずみ関係に及ぼす応力経路の影響，土質工学会論文報告集，Vol. 26, No. 3, pp. 157~168, 1986.
- 14) Eekelen, H. A. M. and Potts, D. M. : The behaviour of Drammen clay under cyclic loading, Geotechnique, Vol. 28, No. 2, pp. 173~196, 1978.
- 15) Dafalias, Y. F. and Popov, E. P. : Cyclic Loading for materials with a vanishing elastic region, Nuclear Engineering and Design, Vol. 41, No. 2, pp. 293~302, 1977.
- 16) Mitchell, R. J. : On the yielding and mechanical strength of Leda clays, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 7, No. 3, pp. 297~312, 1970.
- 17) Wong, P. K. K. and Mitchell, R. J. : Yielding and plastic flow of sensitive cemented clay, Geotechnique, Vol. 25, No. 4, pp. 763~782, 1975.
- 18) 木幡行宏・三田地利之・川田 貢：K₀過圧密粘性土の変形特性（第3報），土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，pp. 325~326, 1986.

(1988. 8. 11・受付)