

# 正規圧密粘性土の変形特性に及ぼす 応力経路履歴の影響

INFLUENCE OF THE STRESS HISTORY ON THE DEFORMATION  
CHARACTERISTICS OF REMOULDED, NORMALLY  
CONSOLIDATED COHESIVE SOIL

大 楨 正 紀\*  
By Seiki OHMAKI

## 1. ま え が き

本文は、種々の応力比で異方圧密された土試料が、その後、種々の応力経路（平均主応力一定経路、応力比一定経路および両者が変化する経路）に沿ってせん断および圧密されるときに示す変形挙動を、三軸圧縮および伸張条件下で実験的に調べ、得られた実験結果をもとにして、異方圧密時の応力履歴の影響を考慮した応力～ひずみ関係式を求めたものである。

本論文では、応力履歴として異方圧密（応力比一定下で、平均有効主応力を増加する圧密）を受けた粘性土の変形特性を扱っている。したがって、はじめに、異方性を有する土の変形挙動に関する従来の研究についてみる。土のような粒状体からなる材料では、材料を構成する粒状体の形状やその初期の配列に起因する固有異方性（初期異方性）と、その土が受けた外力の変化によって生じる粒子配列の変化によって、後天的に生じる誘導異方性（後発異方性）がある。

はじめに、土の固有異方性に関する研究についてみる。Wong<sup>1)</sup>らは、鋭敏なカナダ粘土がその粒子間のセメンテーションの結果として、降伏時および破壊時において固有異方性を有していることを示している。また、鬼塚ら<sup>2)</sup>は乱さない有明粘土の固有異方性が土の変形係数、応力～ひずみ関係、ダイレタンシー特性などに及ぼす影響に関する試験結果を示している。また、小田ら<sup>3)</sup>は砂の平面ひずみ試験により、山田ら<sup>4)</sup>は砂の多軸試験により、いずれも供試体作成時の試料の固有異方性がせん断時の変形挙動、特に、応力～ひずみ曲線に与える影響を示している。

一方、正規圧密粘土では、土の初期構造が等方的であ

っても、その後の応力経路履歴の影響を受けて異方性——誘導異方性——を示す。Skemptonら<sup>5)</sup>、Ladd<sup>6)</sup>、Parryら<sup>7)</sup>は室内試験において、等方圧密を受けた正規圧密粘性土と側方拘束圧密（ $K_0$ 圧密）を受けた正規圧密粘性土では、非排水せん断中の有効応力経路の形状が大きく異なることを示している。また、Lewinら<sup>10)</sup>およびLewin<sup>11)</sup>は応力経路履歴の異なる正規圧密土では、同じ応力状態から同じ応力増分を与えても、これにより生ずる塑性ひずみ増分比は異なる実験結果を示した。これらの実験結果は、粘性土のダイレタンシー特性や応力～ひずみ特性が、それまでに受けてきた応力経路履歴、特に、異方圧密を受けるということにより大きく影響されることを示すものである。

このような土の異方性を考慮した応力～ひずみ関係式がいくつか提案されている。Calladine<sup>12)</sup>は多数の塑性ポテンシャルを用いた、いわゆる‘Microstructural’モデルを示し、土の異方性を表わそうとした。太田ら<sup>13)</sup>、Pender<sup>14)</sup>、関口ら<sup>15)</sup>は、基準となる応力比（初期の異方圧密時の応力比など）を与えて、現在の応力比とこの基準応力比との差の応力比と平均有効主応力をパラメータとした、異方圧密粘性土の応力～ひずみ関係式を示している。一方、Prevost<sup>16)</sup>とMrozら<sup>17)</sup>は塑性ポテンシャルがせん断とともに応力空間を移動すると仮定して異方性を表わす土の応力～ひずみ関係を示した。これらの応力～ひずみ関係はいずれも、せん断前に受けてきた応力経路履歴の影響をせん断時の応力～ひずみ関係に反映させるようにしたものであり、この意味で、これらのモデルは土の誘導異方性を扱ったものといえる。一方、龍岡<sup>8)</sup>および松岡ら<sup>9)</sup>は固有異方性をもつ土の応力～ひずみ関係を示している。

以上、異方性を示す土の応力～ひずみ関係に関する実験および理論的研究についてみてきた。これらの研究

\* 正会員 工博 水産庁水産工学研究所水産土木工学部研究員

の中で、粘性土の変形に及ぼす誘導異方性、すなわち、応力経路履歴がその後の変形特性に及ぼす影響について調べた系統的な実験的研究は非常に少ない。この点をふまえ、本研究は種々の応力比で等方または異方圧密を受けた正規圧密飽和粘性土が、軸対称の応力条件下で種々の応力経路に沿って圧密、せん断を受けるときの変形特性を実験的に調べ、この結果をふまえて得られた異方圧密時の応力履歴を考慮に入れた応力～ひずみ関係を示したものである。とりわけ、次に示す各点に着目して研究を進めた。①粘性土のダイラタンシー特性は異方圧密時の応力比によりどのように影響を受けるか、また、異方圧密を受けた粘性土でも間隙比は応力経路によらない状態量として表わし得るか、②多くの研究者により種々の形で示されている応力比と塑性ひずみ増分比の関係は、異方圧密時の応力比により影響を受けるか、また、これはせん断および圧密中の応力経路によりどのように影響されるか、特に、せん断成分に関するものと圧密成分に関するものに分けてこれを明確にする、③塑性ひずみ増分のせん断成分と圧密成分（定義は後に述べる）が異方圧密時の応力比の影響をどのように受け、これをどのように、応力～ひずみ関係式に反映させればよいか、④ Lewin ら<sup>10)</sup>、Hambly<sup>18)</sup>、Wood<sup>19)</sup>、Lade ら<sup>20)</sup>、軽部ら<sup>21)</sup>、西ら<sup>22)</sup>および著者<sup>23)</sup>により示された応力増分方向の相違によるひずみ増分方向の相違は、異方圧密時の応力比によりどのように影響されるか、⑤以上の各特性は三軸圧縮下と伸張下でどのように異なるか、などである。

著者はすでに軸対称条件下で等方圧密された正規圧密粘性土の応力～ひずみ関係を示している<sup>23)</sup>。また、この中で、得られた応力～ひずみ関係と Roscoe ら<sup>20)</sup>および Roscoe ら<sup>29)</sup>の応力～ひずみ関係について実験結果と比較しながら議論している。また、著者<sup>23)</sup>は、この関係式を松岡・中井<sup>30)</sup>の空間滑動面上の応力比の概念を導入することにより、3次元的な応力条件下の関係に一般化した。これらの解析において、土を非剛連流れをもつひずみ硬化材料と考え、塑性ひずみ増分をせん断成分と圧密成分に分けて解析している。西ら<sup>22)</sup>は砂について、実験を行い、塑性ひずみ増分を2つに分けて解析を行っている。得られた関係式のうち、西らの塑性ひずみ増分のせん断成分については、著者のもの<sup>23)</sup>と同じ形になっている。一方、圧密成分は西らの場合ひずみ増分の等方成分しか含んでいないが著者のものは偏差成分も含んでいる。これは、塑性ひずみ増分の圧密成分の求め方の相違によるものと思われる。異方圧密時の応力比とひずみ増分比の関係は軽部ら<sup>21)</sup>、松岡ら<sup>31)</sup>によって示されている。本論文においても定性的には同様の関係式を示している。松岡ら<sup>31)</sup>によるとひずみ増分の圧密成分は異方圧

密時のひずみ増分に等しいとしているが、本研究では実験結果より必ずしもそうはならないことを示している。

本研究で得られた応力～ひずみ関係式<sup>23)</sup>を異方圧密時の応力履歴を考慮できるものに拡張したものである。したがって、得られた関係式において、異方圧密時の応力比  $n_i$  を零とすると等方圧密時のそれ<sup>23)</sup>に一致するようになっている。

## 2. 試料、試験方法および解析に用いたパラメータ

### (1) 試料

試験に用いた試料は、市販の粉末粘性土（通称、藤の森粘土）であり、京都市南部で採取したものを乾燥粉末状にしたものである。物理特性は、 $w_L=44\%$ 、 $w_P=26\%$ 、 $PI=18\%$ 、 $G_s=2648$  である。粒度組成は、粘土分（粒径  $d \leq 5 \mu$ ）が 18%、シルト分（ $5 \mu < d < 50 \mu$ ）が 50%、砂分（ $d > 50 \mu$ ）が 32% で、三角座標分類ではシルト質ロームである。

試料は、含水比約 120% で、ソイルミキサーにより十分練り返した後、大型圧密リング（直径 25 cm、高さ 15 cm）で最終圧密圧力 49 kPa まで圧密した後、除荷して吸水膨潤させた練返し再圧密試料である。大型圧密リングによる試料作成期間は約 40 日である。大型圧密リングから取り出した試料は約 5 cm × 5 cm × 10 cm の直方体に切り出し、含水比が変化しないようにアルミ箔で包んだ後、ろう付けして実験室内に保管し、適宜、取り出して実験に供した。

### (2) 試験方法

試験は、N.G.I. 型三軸セル内に供試体（直径 3.5 cm、高さ 7.9 cm）を設置し、供試体の両端には端面拘束の影響を軽減するため、シリコングリスを塗布したゴムの薄膜を貼り付けた合成樹脂製の円板を挿入した。供試体の排水は、圧密期間を短縮するため、供試体の周囲に巻いたスリット状のろ紙による周面排水により行った。載荷は、供試体を三軸セル内に設置した後、側圧は水による液圧を加え、軸圧はピストンロッドを介してレバーにより静的に荷重を加えた。

試験は、軸圧、側圧を一定期間ごとに段階的に変化させていく荷重制御条件で行っている。すなわち、あらかじめ与えられた応力経路上の応力点ごと（図—1, 7, 10, 13, 18 参照）に約 24 時間ずつ載荷するが、その際、応力変化を小さくするため、初めに、現在の応力点と次の応力点の間差点まで載荷し、30 分間放置して、

この載荷による過剰間隙水圧の消散を待つ。その後、次の応力点の応力状態を与える。供試体の変位の測定は、供試体上端面の鉛直変位量をピストンロッドを介してダイヤルゲージ（精度 1/100 mm）で測定し、供試体の体積変化量をビューレット（精度 1/10 cc）で測定した。

(3) 解析に用いたパラメーター

試験結果の解析には、次の応力、ひずみのパラメーターを用いた。

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_a' + 2\sigma_r'), \quad q = \sigma_a' - \sigma_r', \quad \eta = \frac{q}{p}$$

$$v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r, \quad \varepsilon = \frac{2}{3} (\varepsilon_a - \varepsilon_r)$$

ここに、 $\sigma_a'$ 、 $\sigma_r'$  は円柱供試体の軸方向および半径方向の有効主応力であり、 $\varepsilon_a$ 、 $\varepsilon_r$  は円柱供試体の軸方向および半径方向の主ひずみである。したがって、 $p$  は平均有効主応力、 $q$  は軸差応力、 $\eta$  は応力比である。また、 $v$  は体積ひずみ、 $\varepsilon$  は軸方向の偏差ひずみである。ここに用いた応力およびひずみのパラメーターは、いずれも圧縮を正としている。また、三軸圧縮下および三軸伸張下での破壊時の応力比 ( $\eta$ ) をそれぞれ  $M_C$  および  $M_E$  で表わしている。

3. 平均主応力一定経路に沿うせん断特性

(1) 試験結果

図-1 に行った各試験の応力経路を示している。試験はすべて排水状態で応力制御により行っている。各試験は  $p = 49$  kPa で約 1 日間等方圧密を行った後、 $p$  を一定として所定の応力比  $\eta_i$  まで約 1 日間で段階的に応力比を変化させる。その後、応力比  $\eta$  を一定 ( $=\eta_i$ ) として  $p = 98, 196$  kPa と 1 日ごとに異方圧密を行う。この後、 $p$  を一定として、図中のプロットに従って 1 日ごとに応力比を変化させ、破壊に至らしめるものである。同図 (a) の各試験は、三軸圧縮下 ( $\eta_i \geq 0$ ) で異方圧密を行った後、 $p$  一定でせん断を行い、三軸圧縮下で破壊に至る ( $M = M_C > 0$ ) ものである。同図 (b) の各試験は、三軸圧縮下 ( $\eta_i \geq 0$ ) または三軸伸張下 ( $\eta_i \leq 0$ ) で異方圧密を受けた後、 $p$  一定せん断中に静水圧軸を横切って、それぞれ三軸伸張下および三軸圧縮下で破壊に至るものである。

図-2 は試験結果である。同図 (a) は各試験の応力比

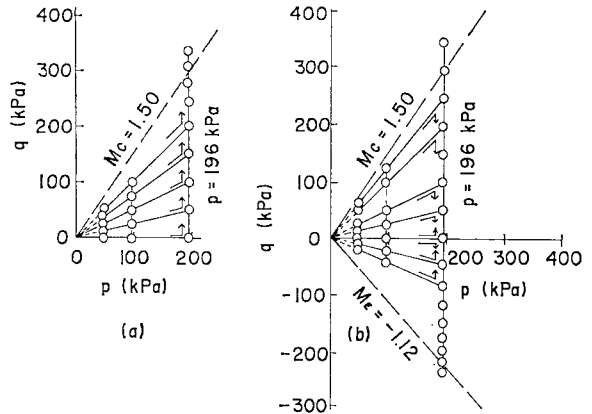


図-1 応力経路

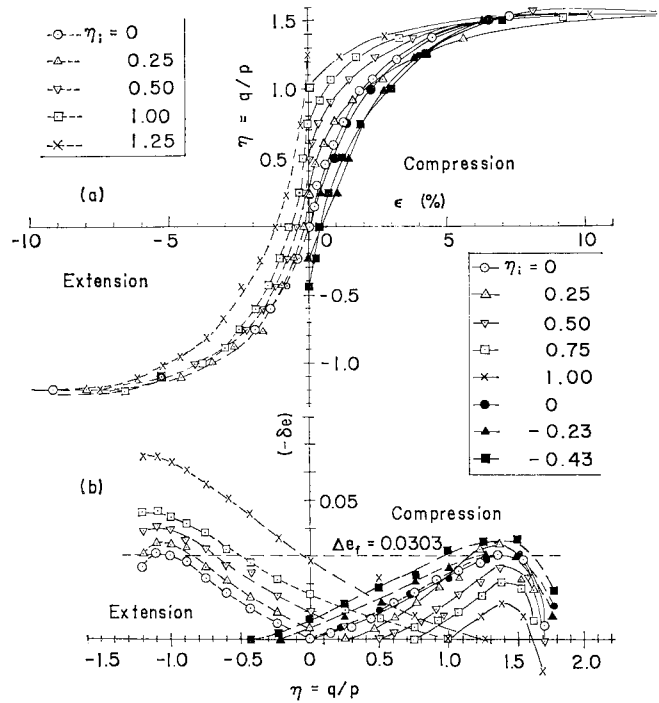


図-2 平均主応力一定せん断試験結果 ((a)  $\eta \sim \varepsilon$  関係, (b)  $(-\delta e) \sim \eta$  関係)

$\eta$  と偏差ひずみ  $\varepsilon$  の関係を示している。図より、破壊時の応力比  $M$  は、異方圧密時の応力比  $\eta_i$  にほとんど関係なく、ほぼ一定値に達している。ここでは、三軸圧縮下および三軸伸張下での破壊時の応力比をそれぞれ  $M_C = 1.50$ 、 $M_E = -1.12$  としている。ただし、これらの値の実際の決定は 図-5 より行った。同図 (b) は、各試験の  $p$  一定下でのせん断開始時からの 間隙比の減少量 ( $-\delta e$ ) と応力比  $\eta$  の関係を示している。図から破壊付近で土が膨張に転じているが、それまでは  $(-\delta e) \sim \eta$  関係は互いに平行な直線とみなせる。また、等方圧密試料

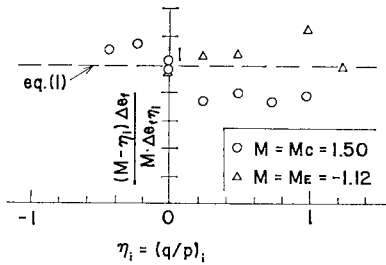


図-3  $(M-\eta_i) \cdot \Delta e_f / (M \cdot \Delta e_f \eta_i) \sim \eta_i$  プロット

$(\eta_i=0)$  の  $(-\delta e)$  のピーク値は、三軸圧縮と伸張ではほぼ同じになっている ( $\Delta e_f=0.0303$ )。

いま、応力比  $\eta_i$  で異方圧密された試料のせん断による間隙比の減少量  $(-\delta e)$  のピーク値を  $\Delta e_f \eta_i$  とする。図-3 は各試験の  $(M-\eta_i) \cdot \Delta e_f / (M \cdot \Delta e_f \eta_i)$  と  $\eta_i$  の関係をプロットしている。これより、 $\Delta e_f \eta_i$  は次のように表わせる。

$$\Delta e_f \eta_i = \frac{M-\eta_i}{M} \Delta e_f \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\Delta e_f$  は等方圧密試料のせん断による間隙比の減少量の最大値である。

(2) 解析結果

ここでは、異方圧密試料が平均有効主応力一定経路に沿ってせん断されるときの  $\eta \sim \epsilon$  関係および  $(-\delta e) \sim \epsilon$  関係を次のように表わす<sup>29)</sup>。

$$\eta - \eta_i = (M - \eta_i) \{1 - \exp(-A|\epsilon|)\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} (-\delta e) &= \Delta e_f \eta_i \{1 - \exp(-A|\epsilon|)\} \\ &= \frac{M - \eta_i}{M} \Delta e_f \{1 - \exp(-A|\epsilon|)\} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 $(-\delta e)$  は異方圧密終了後のせん断開始時からの間隙比の減少量である。また、式(1)の関係を用いている。また、 $A$  は実験定数である。式(2)、(3)より、 $\epsilon$  を消去すると次式を得る。

$$(-\delta e) = \frac{\Delta e_f}{M} (\eta - \eta_i) \dots\dots\dots (4)$$

式(2)、(4)の微分形は次のように与えられる。

$$d\epsilon = \pm \frac{1}{A} \frac{d\eta}{M - \eta} \dots\dots\dots (5)$$

$$(-\delta e) = \frac{\Delta e_f}{M} d\eta \dots\dots\dots (6)$$

式(5)において、正および負の符号は、三軸圧縮下 ( $M=Mc > 0$ ) および三軸伸張下 ( $M=ME < 0$ ) で破壊する場合に対応する。式(5)、(6)よりひずみ増分比は次のように書ける。

$$\frac{dv}{d\epsilon} = \pm \frac{A \cdot \Delta e_f}{1 + e} \left(1 - \frac{\eta}{M}\right) \dots\dots\dots (7)$$

式(2)、(3)より、 $\log\{(M-\eta)/(M-\eta_i)\}$ 、 $\log\{1 - (-\delta e)/\Delta e_f \eta_i\}$  と  $\epsilon$  の直線関係の勾配より、係数  $A$  を決

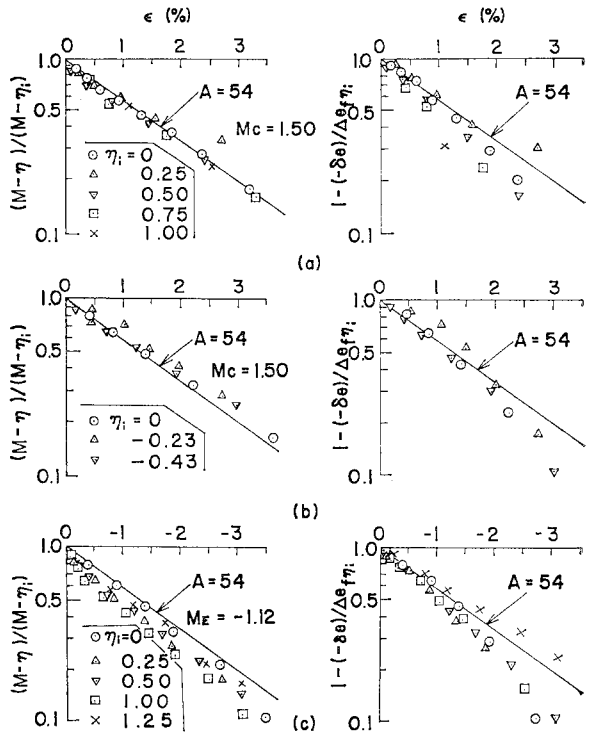


図-4  $(M-\eta)/(M-\eta_i)$ 、 $[1 - (-\delta e)/\Delta e_f \eta_i] \sim \epsilon$  の関係  
(a), (b)  $M=Mc=1.50$ , (c)  $M=ME=-1.12$

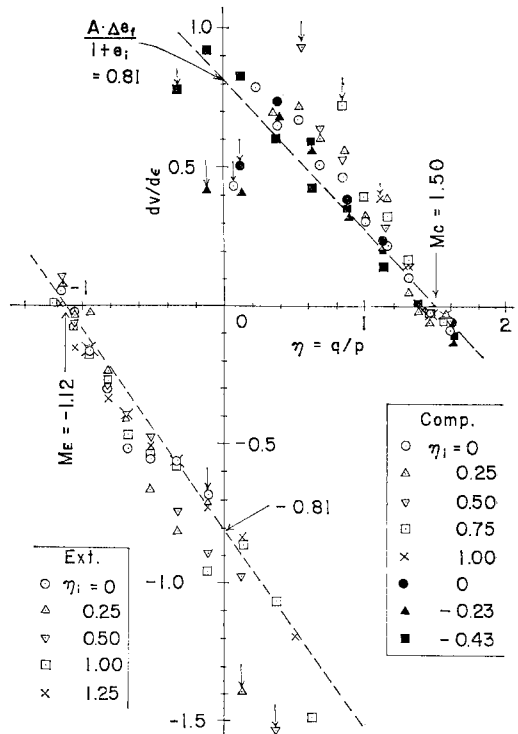


図-5  $dv/d\epsilon \sim \eta$  プロット

定することができる。図-4 (a)~(c) に、図-1 の各試験結果をこの関係で示している。図より、 $A$ の値は、異方圧密時の応力比  $\eta_i$  に関係なく、また、三軸圧縮、伸張の場合に限らず、ほぼ同じ値で表わされる。また、式 (2) と式 (3) でも同じ  $A$  の値 (=54) が得られている。

図-5 は、各試験の  $p$ 一定せん断時のひずみ増分比 ( $dv/d\varepsilon$ ) と応力比  $\eta$  の関係である。図中の矢印で示されているプロットは  $\eta$ 一定経路から  $p$ 一定経路に変化した直後のプロットである。矢印で示される点を除けば、各プロットは異方圧密時の応力比  $\eta_i$  に関係なく、ほぼ同一直線上にあるとみることができる。図中の破線は式 (7) で示される関係である。ただし、 $de_f = 0.0303$  (図-2 (b)),  $A = 54$  (図-4),  $e \approx e_i = 1.0105$  を用いて計算している。解析結果はほぼ実験結果を満足している。

図-6 (a), (b) に式 (2), (4) を用いた解析結果を示す。同図 (a) は  $\eta \sim \varepsilon$  関係であるが、図-2 (a) の試験結果にほぼ合っている。同図 (b) は  $(-\delta e) \sim \eta$  関係であるが、図-2 (b) の試験結果と比較して、破壊付近を除いてほぼ合っている。

#### 4. 異方圧密時の変形特性

##### (1) 異方圧密時の変形特性に及ぼす応力履歴の影響

ここでは、応力履歴の異なる試料を同じ応力経路に沿って応力比を一定として異方圧密するときの変形挙動を調べる。ここでは、図-7 に示すグループ A, B と図-10 に示すグループ C, D の4種類の応力経路を用いている。このうち、グループAに属する応力経路は初めから応力比を一定として異方圧密のみを行うものであり応力履歴としては最も単純な、しかし、最も基本的なもので、異方圧密時の変形特性を調べるものである。これに対し、グループ B, C, D に属する応力経路はそれぞれ等方圧密 ( $\eta_i = 0$ ), 三軸圧縮下での異方圧密 ( $\eta_i > 0$ ) および三軸伸張下での異方圧密 ( $\eta_i < 0$ ) という応力履歴を受けた試料が、その後、種々の応力比で再び異方圧密を受けるときに示す変形特性を調べるために用いたものである。図-7 は行った各試験の応力経路を示している。図中のさし絵に示したように、試験はA, Bの2種類行っている。すなわち、グループA, Bは、それぞれ  $p = 49 \text{ kPa}$ ,  $196 \text{ kPa}$  まで等方圧密した後、 $p$ を一定として所定の応力比  $\eta_i$  までせん断する。その後、応

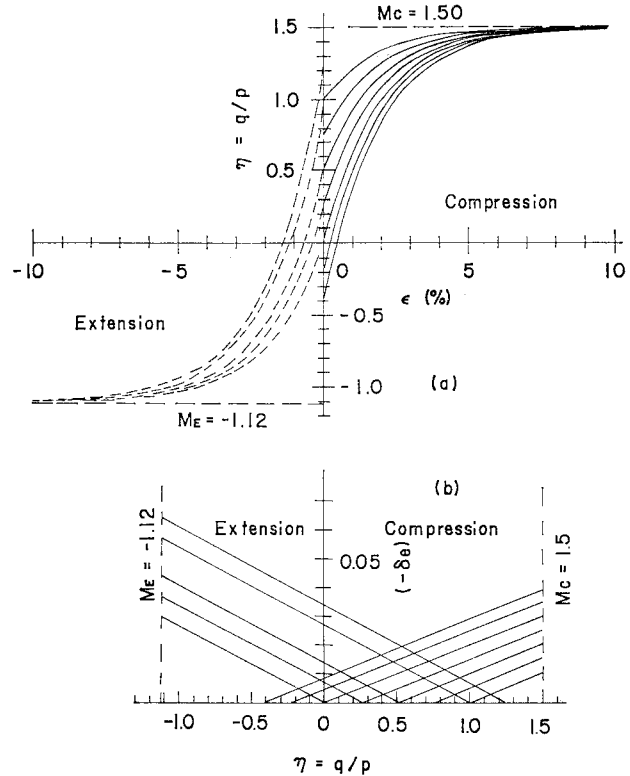


図-6  $p$ 一定せん断試験の解析結果 ((a)  $\eta \sim \varepsilon$  関係, (b)  $(-\delta e) \sim \eta$  関係)

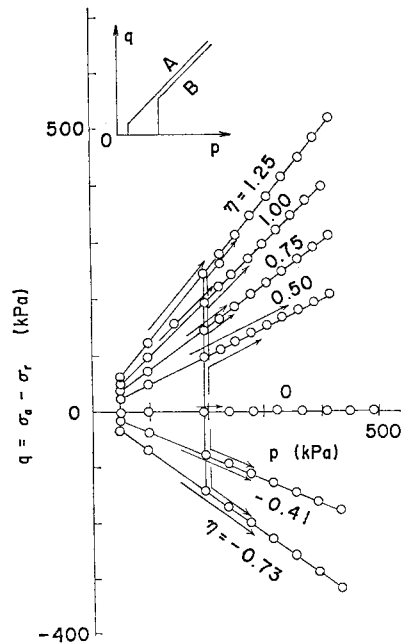


図-7 応力経路

力比一定 ( $=\eta_i$ ) で図中のプロットに従い、異方圧密を行うものである。  $p > 196 \text{ kPa}$  では、グループ A, B

の同じ  $\eta_i$  の試験では、同じ荷重ステップに従って試験を行っている。試験は排水条件のもとに、荷重制御で行っている。

図-8 は、各応力比でのグループ A, B の、 $p=49$  kPa,  $q=0$  kPa での応力状態からの間隙比の減少量  $(-\delta e)$  と  $\log p$  の関係を示している。図からわかるように、 $\eta=1.0$  の場合を除き、三軸圧縮、伸張ともに、 $p \geq 196$  kPa での  $(-\delta e) \sim \log p$  関係は、応力履歴に関係なくグループ A, B で同じになるとみなせる。また、図より圧縮指数  $C_c$  の値は三軸圧縮、伸張ともに同じで、 $C_c=0.244$  である。

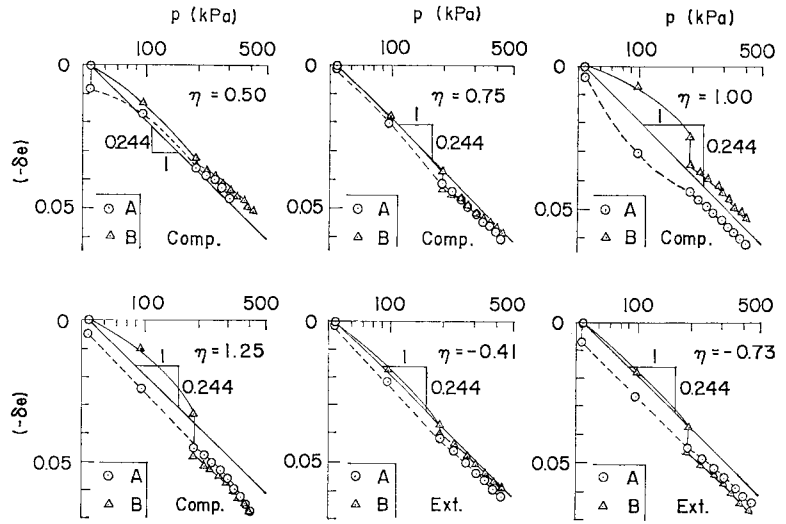


図-8  $(-\delta e) \sim \log p$  プロット ( $(-\delta e)$  は  $p=49$  kPa からの間隙比の減少量)

図-9 は、各試験の  $p=196$  kPa で異方圧密開始時からの  $\epsilon$  と  $v$  の関係を示している。図より、等方圧密試験 ( $\eta_i=0$ ) では全試験期間を通じて  $\epsilon \approx 0$  となっている。また、同じ応力比で異方圧密された2種類の試験結果を比較すると、破壊に近い  $\eta_i=1.25$  の場合を除き、グループAの試験の  $\epsilon \sim v$  曲線がグループBのものより内側 ( $v$  軸側) にある。これは、グループA, Bでの各試験の応力履歴の相違によるものである。すなわち、グループBに比べてグループAでは以前より現在の応力比と同じ応力比を受けており、供試体内の粒子配列がこの応力比でのせん断に、より抵抗しやすいように再配列されていることによるものと思われる。

図-10 (a), (b) に、それぞれ  $\eta_i=0.75, -0.60$  で、 $p=49$  kPa から 196 kPa まで異方圧密した後、 $p$  を一定として所定の応力比までせん断し、その後、応力比を一定として異方圧密を行った試験の応力経路を示す。ここでは、 $\eta_i=0.75, -0.60$  の応力履歴をもつ各試験をそれぞれグループC, Dとよぶ。荷荷方法、荷荷期間は図-7の場合と同じである。

図-11 (a), (b) は、それぞれ図-10 (a), (b) に示したグループC, Dの各試験の  $p=196$  kPa からの  $\epsilon \sim v$  関係を示している。図からわかるように、同じ応力比ではグループCの  $\epsilon \sim v$  曲線の勾配がグループDの  $\epsilon \sim v$  曲線の勾配よりかなり小さくなっている。また、等方圧密試験 ( $\eta_i=0$ ) の場合の  $\epsilon \sim v$  曲線を見ると、グループCでは勾配は負であるが、グループDでは正となっている。このような傾向は、49 kPa  $<$   $p <$  196 kPa での異方圧密時の応力履歴の影響と考えることができる。

図-12 はグループ A~D の  $p=196$  kPa で応力経路

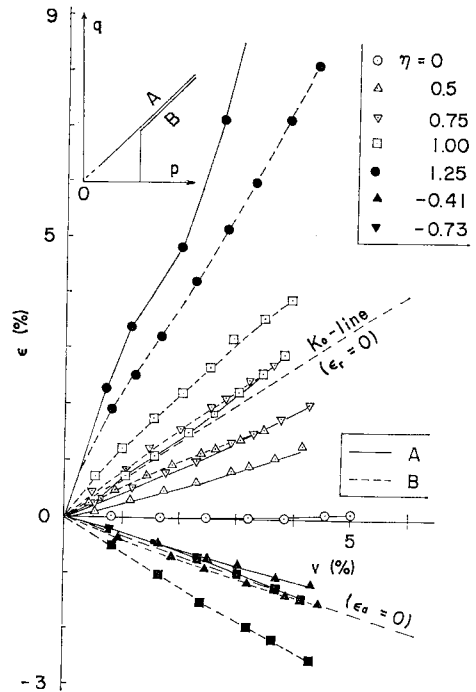


図-9 異方圧密時のひずみ経路

が急変した直後のひずみ増分比  $d\epsilon/dv$  と応力比  $\eta$  の関係を示している。グループAの各試験では、 $p=49$  kPa で  $p$  一定せん断を受けているので、 $p=196$  kPa ではこのせん断による応力履歴の影響はほとんどなくなっていると考えられる。すなわち、初めから異方圧密のみを受けた試料の挙動とほとんど同じ挙動を示しているとみなせる。図より、 $\eta \sim d\epsilon/dv$  関係は、 $p=49$  kPa  $\rightarrow$  196 kPa での異方圧密時の応力比  $\eta_i$  の相違により異なっている。

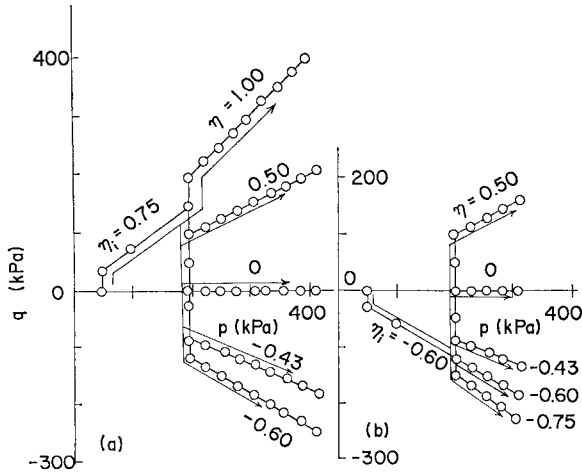


図-10 応力経路 ((a) グループ C ( $\eta_i=0.75$ ), (b) グループ D ( $\eta_i=-0.60$ ))

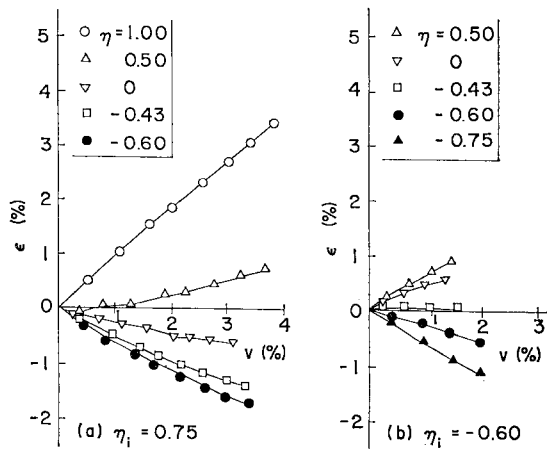


図-11 異方圧密時のひずみ経路 ((a) グループ C ( $\eta_i=0.75$ ), (b) グループ D ( $\eta_i=-0.60$ ))

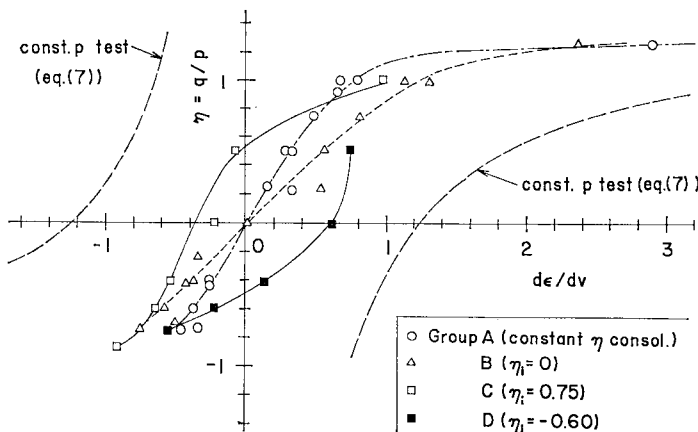


図-12  $\eta \sim d\epsilon/dv$  関係

また、グループ B, C, D の各試験の  $\eta \sim d\epsilon/dv$  の関係は、各グループの  $\eta = \eta_i$  ではグループ A の応力経路と一致するので、グループ A のひずみ増分比  $d\epsilon/dv$  に一致する。図からわかるように、 $\eta_i$  が増加するに従って (グループ D  $\rightarrow$  B  $\rightarrow$  C), 同じ  $\eta$  での  $d\epsilon/dv$  の値は減少している。

図-13 (a) は、三軸圧縮および伸張下でそれぞれ 3 種類の応力履歴を受けた後、それぞれ  $\eta = 0.75$  および  $-0.41$  で異方圧密を行ったときの応力経路を示す。同図 (b) は、各試験の異方圧密時 ( $p \geq 196$  kPa) の  $\epsilon \sim v$  関係である。三軸圧縮および伸張下における  $\epsilon \sim v$  関係の相違は  $49 \text{ kPa} < p < 196$  kPa での応力履歴の相違と考えられる。図-14 は、図-13 に示した各試験の  $p = 49 \text{ kPa}$ ,  $q = 0 \text{ kPa}$  の応力状態からの間隙比の減少量 ( $-\delta e$ ) と  $\log p$  の関係である。 $p > 196 \text{ kPa}$  での異方圧密中の ( $-\delta e$ )  $\sim \log p$  関係は、三軸圧縮および伸張の両方において応力履歴に関係なく同じとみなせる。

(2) 異方圧密時の応力比と塑性ひずみ増分比の関係

ここでは、4.(1) で示した試験結果をもとにして、種々の応力履歴をもつ供試体が応力比を一定として異方圧密するときの応力比と塑性ひずみ増分比の関係についてみる。

はじめに、4.(1) に示したグループ A に属する試験のように、 $p$  が小さいときから異方圧密を受ける場合につ

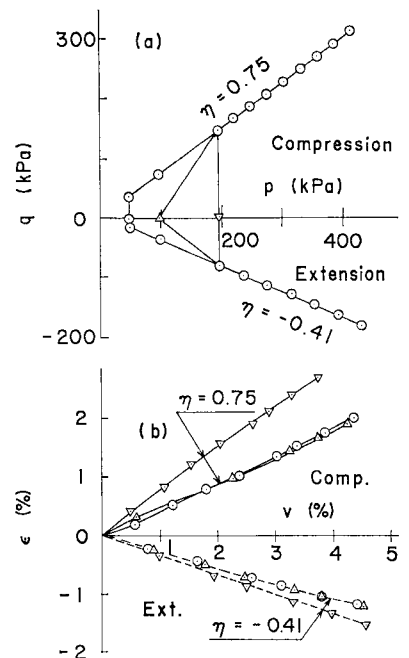
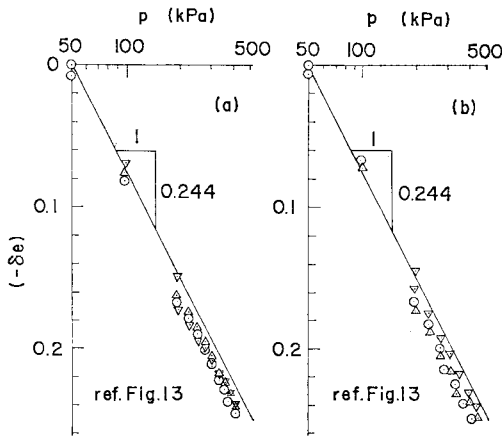


図-13 ひずみ経路に及ぼす応力履歴の影響 ((a) 応力経路, (b) ひずみ経路)



図一14 (a) 三軸圧縮下, (b) 三軸伸張下での試験の  $(-\delta e) \sim \log p$  関係

いて考える。多くの研究者によって示されているように、正規圧密粘性土の異方圧密時の  $\epsilon \sim v$  曲線は  $p$  に無関係にほぼ直線になる<sup>1), 26), 27)</sup>。このときの  $\eta$  と塑性ひずみ増分比  $(d\epsilon/dv)_a^p$  の関係を次式で表わせると仮定する。

$$\left(\frac{d\epsilon}{dv}\right)_a^p = \pm \frac{1}{D_a} \frac{M\eta}{M^2 - \eta^2} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、三軸圧縮および三軸伸張に対して、正および負の符号を用いるものとし、 $M$  はそれぞれ  $M_C (> 0)$  および  $M_E (< 0)$  を用いる。式 (8) 中の  $D_a$  は定数である。いま、側方変位を拘束した場合 ( $d\epsilon_r = 0, K_0$  圧密時) および軸方向変位を拘束した場合 ( $d\epsilon_a = 0$ ) の応力比をそれぞれ  $\eta_{K_0,a}$  および  $\eta_{K_0,r}$  とし、異方圧密時のひずみ増分比に対しても、後に示す式 (13) が成立すると仮定すると、これらは次のように表わされる。

$$\eta_{K_0,a} = \frac{\sqrt{9\beta^2 + 16} - 3\beta}{4} M_C = \frac{3(1 - K_0)}{1 + 2K_0} \dots\dots\dots(9)$$

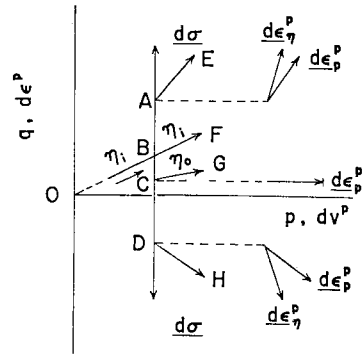
$$\eta_{K_0,r} = \frac{\sqrt{9\beta^2 + 4} - 3\beta}{2} M_E \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $K_0$  は静止土圧係数であり、 $\beta$  は次式で表わされる。

$$\beta = \frac{\lambda - \kappa}{\lambda} \frac{1}{D_a} \dots\dots\dots(11)$$

試験に用いた試料は  $\lambda = 0.106, \kappa = 0.0187, K_0 = 0.43, M_C = 1.50, M_E = -1.12$  であるから、これより  $D_a = 1.21, \eta_{K_0,a} = 0.92, \eta_{K_0,r} = -0.46$  を得る。

次に、グループ B, C, D のように、異なった応力比で異方圧密を受けた試料の異方圧密時の挙動についてみる。グループ B, C, D のような試験は Hambly<sup>18)</sup>, Lewin<sup>11)</sup> によっても行われており、図一12 と同様の傾向が示されている。いま、図一15 に示したように、ある応力比  $\eta_i$  で異方圧密された試料が  $p$  一定 ( $= p_i$ )



図一15 応力増分ベクトルと塑性ひずみ増分ベクトル (模式図)

でせん断を受けた後、種々の応力比で異方圧密される場合を考える。いま、図一15 中の点 A ~ D で示される応力点より  $\eta$  一定の応力経路に折れ曲がった直後の塑性ひずみ増分比  $(d\epsilon/dv)_p^p$  について考える。ここに、下添字  $p$  は  $\eta$  一定経路上のひずみ増分比であることを示している。図一8, 14 に示したように、異方圧密時の体積ひずみは応力履歴の影響をほとんど受けないので、その弾性成分、塑性成分を次のように表わす<sup>28)</sup>。

$$dv_p^e = \frac{\kappa}{1+e} \frac{dp}{p}, \quad dv_p^p = \frac{\lambda - \kappa}{1+e} \frac{dp}{p} \dots\dots\dots(12)$$

ここに、 $\lambda, \kappa$  は  $e \sim \ln(p)$  図上での圧縮指数、膨潤指数である。いま、偏差ひずみ増分の弾性成分が無視できる ( $d\epsilon_p^e = 0$ ) と仮定すると、次式が成立する。

$$\left(\frac{d\epsilon}{dv}\right)_p^p = \frac{\lambda}{\lambda - \kappa} \left(\frac{d\epsilon}{dv}\right)_p \dots\dots\dots(13)$$

また、 $p$  一定せん断時の弾性成分は無視できる ( $dv_p^e = 0, d\epsilon_p^e = 0$ ) と仮定すると、 $(d\epsilon/dv)_p^p = (d\epsilon/dv)_p$  である。図一5 に示したように、 $(d\epsilon/dv)_p^p (= (d\epsilon/dv)_p) \sim \eta$  関係は異方圧密時の応力比  $\eta_i$  に無関係にほぼ同じ関係とみなせた。しかるに、図一12 からわかるように、 $(d\epsilon/dv)_p^p \sim \eta$  関係は、 $\eta_i$  の影響を大きく受ける。他方、等方圧密試料 ( $\eta_i = 0$ ) については次式が成立することを著者は示している<sup>23)</sup>。

$$\left(\frac{d\epsilon}{dv}\right)_p^p = \pm \frac{1+e}{A \cdot D \cdot \Delta \epsilon_f} \frac{M\eta}{M^2 - \eta^2} \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 $A, D (\geq 0.5)$  は実験定数であり、正、負の符号は三軸圧縮および伸張下で破壊する場合に対応している。図一12 において、各  $\eta_i$  のグループの試験の曲線において  $(d\epsilon/dv)_p (= (d\epsilon/dv)_p^p) = 0$  のときの応力比を  $\eta_0$  とする。図よりわかるように、 $\eta_0$  は異方圧密時の応力比  $\eta_i$  の関数である。いま、新しい応力比パラメータを次のように定義する。

$$\xi = \eta - \eta_0, \quad M_\xi = M - \eta_0 \dots\dots\dots(15)$$

このとき、応力比  $\eta_i$  で異方圧密を受けた試料の任意



の応力比  $\eta$  の応力比一定経路上での塑性ひずみ増分比を次のように表わす。

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\varepsilon}{dv}\right)_p &= \pm \frac{1+e}{A \cdot D \cdot \Delta e_f} \frac{M_\xi \cdot \xi}{M_\xi^2 - \xi^2} \\ &= \frac{1}{\alpha \cdot D_a} \frac{M_\xi \cdot \xi}{M_\xi^2 - \xi^2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{A \cdot D \cdot \Delta e_f}{(1+e) \cdot D_a} \quad (\approx \text{一定}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 $\alpha$  は定数と考える。式 (16) において、 $\xi=0(\eta=\eta_0)$  のとき、 $(d\varepsilon/dv)_p^p = 0$ 、すなわち、 $d\varepsilon_p^p = 0$  となり、これは、**図-15** の応力増分ベクトル CG の場合に対応している。また、 $\xi=M_\xi(\eta=M)$  のとき、 $(d\varepsilon/dv)_p^p \rightarrow \pm\infty (d\varepsilon_p^p \rightarrow \pm\infty)$  となる。

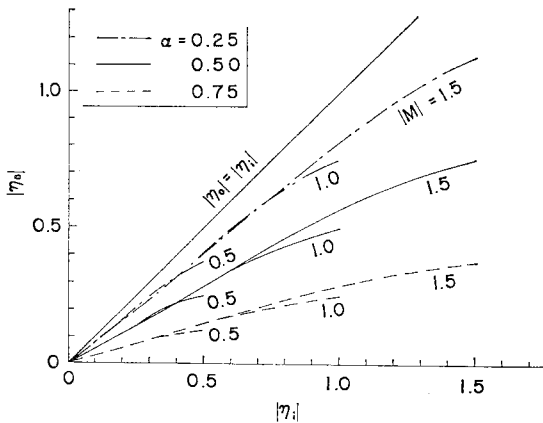
また、式 (16) において、 $\eta=\eta_i(\xi=\eta_i-\eta_0)$  のときは、 $\eta=\eta_i$  で異方圧密を受けた試料が同じ応力比で異方圧密を継続して受けるときの塑性ひずみ増分比を表わしている。したがって、これは、式 (8) で表わされる塑性ひずみ増分比に等しくなる。すなわち、 $\eta=\eta_i$  のとき  $(d\varepsilon/dv)_p^p = (d\varepsilon/dv)_a^p$  である。これより、次式を得る。

$$\begin{aligned} (M+\eta_i)\eta_0^2 - \{(M+\eta_i)^2 - 2\alpha M\eta_i\}\eta_0 \\ + (1-\alpha)(M+\eta_i)M\eta_i = 0 \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

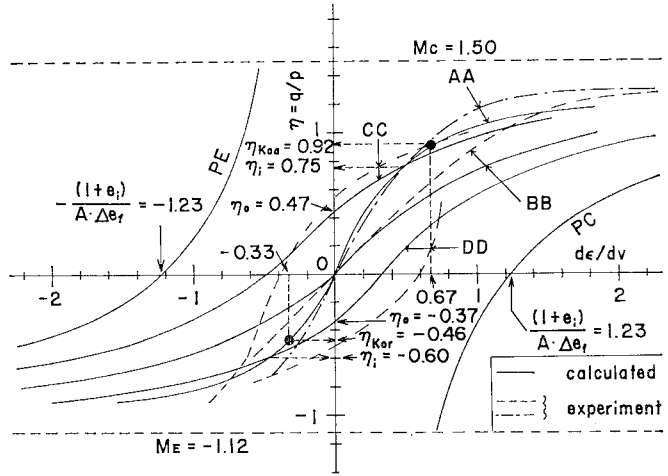
ただし、三軸圧縮 ( $\eta_i > 0$ ) のときは、 $M=M_C (> 0)$ 、三軸伸張 ( $\eta_i < 0$ ) のときは、 $M=M_E (< 0)$  である。これより、 $0 < |\eta_0| < |\eta_i|$  を考慮すると、 $\eta_0$  は次式より求まる。

$$\eta_0 = \frac{(M+\eta_i)^2 - 2\alpha M\eta_i - \sqrt{(M^2 - \eta_i^2)^2 + 4\alpha^2 M^2 \eta_i^2}}{2(M+\eta_i)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

**図-16** に式 (19) より求めた  $|\eta_0|$  と  $|\eta_i|$  の関係の計



**図-16**  $|\eta_0| \sim |\eta_i|$  関係の計算例



**図-17** 応力比とひずみ増分比との関係

**表-1** 解析に用いた係数値

係 数	値	係 数	値
$\lambda$	0.106	$D$	0.66
$\kappa$	0.0187	$M_C$	1.50
$A$	54	$M_E$	-1.12
$\Delta e_f$	0.0303	$e_i$	1.0105
$K_0$	0.43		

算例を示す。式 (19) において、 $\eta_i=0$  のとき  $\eta_0=0$  である。また、式 (18) および  $M \cdot \eta_i > 0$  を考慮すると、式 (19) の分子は零または正となるので、 $\eta_i$  と  $\eta_0$  は同符号となる。

次に、式 (16) は  $\eta_0=0$  のときは、式 (14) に一致する。このとき、式 (8)、(16) より、 $(d\varepsilon/dv)_p^p = (1/\alpha)(d\varepsilon/dv)_a^p$  である。**図-12** より、 $|(d\varepsilon/dv)_p^p| \geq |(d\varepsilon/dv)_a^p|$  であるから、 $0 < \alpha \leq 1$  を満足する。 $\alpha=1$  のとき  $(d\varepsilon/dv)_p^p = (d\varepsilon/dv)_a^p$  となり、等方圧密終了後 ( $\eta_i=0$ ) ある応力比  $\eta$  で異方圧密したときの塑性ひずみ増分比  $(d\varepsilon/dv)_p^p$  は、初めから同じ応力比  $\eta$  で異方圧密を継続したときの塑性ひずみ増分比  $(d\varepsilon/dv)_a^p$  に等しくなる。すなわち、このときは、等方圧密時の応力履歴を示さない。

**図-17** に応力比  $\eta$  と各ひずみ増分比の関係の計算結果を実線で示す。計算に用いた諸係数値を **表-1** に示した。これらの諸係数値より、 $\alpha=0.444$  を得る。図中において、 $p$  一定せん断時の関係 (曲線 PC, PE) は式 (7) により計算している。また、初期から応力比を一定として異方圧密したときの関係 (曲線 AA) は式 (8)、(13) により、また、 $\eta_i=0, 0.75, -0.60$  で異方圧密を受けた後の異方圧密時の関係 (曲線 BB, CC, DD) は、式 (13)、(16) より計算している。図からわかるように、曲線 BB, CC, DD はそれぞれ  $\eta=\eta_i$  で曲線 AA に交わっている。図中には、**図-12** に示した実験結果

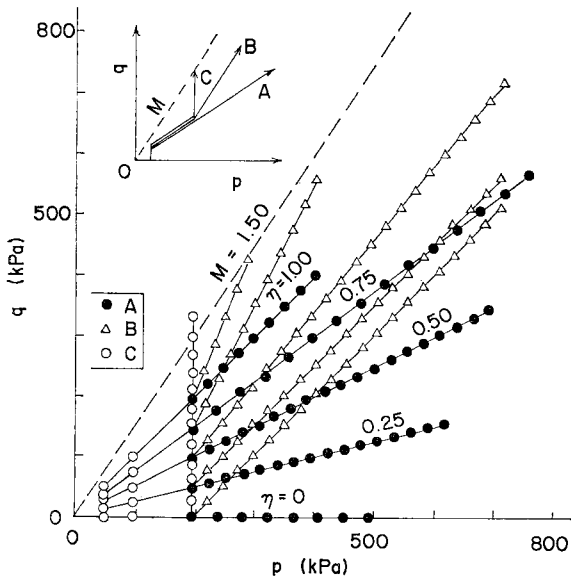


図-18 応力経路

を破線および一点鎖線で示した。両者はほぼ合っている。

### 5. 一般応力経路上での変形特性

#### (1) 試験結果

ここでは、 $p$ 一定経路、 $\eta$ 一定経路および $p$ と $\eta$ が同時に増加する応力経路に沿って行った試験結果を示す。図-18に行った各試験の応力経路を示す。ただし、図中には、A, B, Cにより応力経路の種類を示しているが、これは4. で用いたものと別である。試験はこの図に示したように、 $p=49$  kPa まで等方圧密した後、 $p$ を一定として所定の応力比  $\eta_i$  までせん断する。その後、応力比を一定 ( $=\eta_i$ ) として  $p=196$  kPa まで異方圧密を行った後、図-18 中のさし絵に示したように、(A) 応力比一定、(C) 平均主応力一定、および (B) これらの中間の応力比と平均主応力が同時に増加する応力経路に沿ってせん断するものである。試験では  $\eta_i$  の値として、0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 が用いられている。載荷方法、載荷時間は、図-7 に示した試験の場合と同じである。

図-19 に各試験結果を示す。同図 (a) には、各応力比  $\eta_i$  で異方圧密を受けた後、応力経路 A, B, C に沿って行った試験結果を示している。図からわかるように、応力経路の勾配が増加するに従い、 $\eta \sim \epsilon$  曲線の初期接線勾配も増加している。同図 (b) には  $v \sim \eta$  曲線を示しているが、各  $\eta_i$  の試験では、その初期接線勾配は応力経路の勾配 ( $dq/dp$ ) が増加するに従い (A→B→

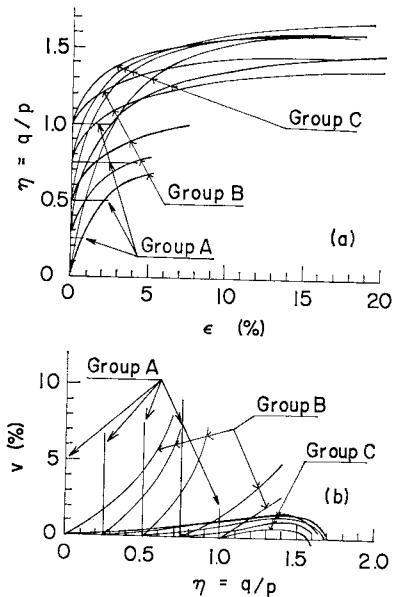


図-19 試験結果 ((a)  $\eta \sim \epsilon$  関係、(b)  $v \sim \eta$  関係)

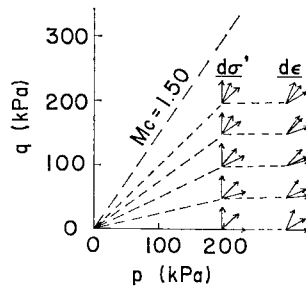


図-20 応力増分ベクトル方向とひずみ増分ベクトル方向の関係 (実験結果)

C), 減少している。

図-20 は、各試験の  $p=196$  kPa 付近での応力増分ベクトル方向とこれに対応するひずみ増分ベクトル方向を示している。ひずみ増分ベクトル方向の勾配は、応力増分ベクトル方向の勾配が増加するに従い増加している。

図-21 はこれらの各試験の解析結果である。同図 (a) は  $\{(-\delta e) - (-\delta e)_\eta\}$  と  $(-\delta e)_p$  の関係を示している。ここに、 $(-\delta e)$  はある  $\eta_i$  の異方圧密履歴をもつ試料のせん断開始時の応力状態 ( $p_i, \eta_i$ ) からある応力状態 ( $p, \eta$ ) までの間隙比の減少量である。ここに、 $p_i=196$  kPa である。 $(-\delta e)_\eta$  は同じ  $\eta_i$  の応力履歴をもった試料 (図-18 のさし絵中の応力経路 C) の ( $p_i, \eta_i$ ) から ( $p, \eta$ ) まで  $p$  一定せん断するときの間隙比の減少量である。 $(-\delta e)_p$  は次式で計算している。

$$(-\delta e)_p = \lambda \ln \frac{p}{p_i} \dots \dots \dots (20)$$

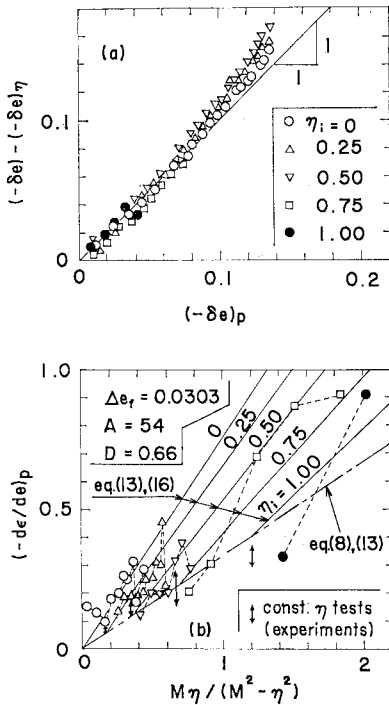


図-21 (a)  $\{(-\delta e) - (-\delta e)_\eta\} \sim (-\delta e)_p$  プロット, (b)  $(-d\epsilon/de)_p \sim M\eta/(M^2 - \eta^2)$  関係の比較

計算では、 $\lambda=0.106(C_c=0.244)$  を用いている。図からわかるように、各プロットは異方圧密時の応力比  $\eta_i$  に関係なく、勾配 1 の破線付近にある。すなわち、次式が成立する。

$$(-\delta e) = (-\delta e)_\eta + (-\delta e)_p \dots (21)$$

図-21 (b) は応力経路 A, B (図-18) の各試験の  $(-d\epsilon/de)_p \sim M\eta/(M^2 - \eta^2)$  の関係を示している。ここに、

$$d\epsilon_p = d\epsilon - d\epsilon_\eta, \quad de_p = de - de_\eta$$

より、図-21 (a) の場合の  $\{(-\delta e) - (-\delta e)_\eta\}$  と同様にして求めている。図中には、式 (8), (16) と式 (13) を用いて計算した解析結果も同時に示している。一般応力経路に沿う試験の各曲線は  $\eta = \eta_i$  で異方圧密時の曲線に交わっている。図より、解析結果は試験結果をほぼ説明している。

(2) 応力~ひずみ関係の解析結果

ここでは、図-22 中の点 E で異方圧密が終了した後、 $d\eta \approx 0, dp > 0$  なる一般応力経路に沿ってせん断したときの応力~ひずみ関係の計算方法について述べる。いま、一般応力経路上での応力増分  $\overline{AB}(dp, d\eta)$  による塑性ひずみ増分は、応力増分  $\overline{AC}(dp=0, d\eta)$  によるもの (ここでは  $\eta$  成分とよぶ) と応力増分  $\overline{AD}(dp, d\eta=0)$  によるもの ( $p$  成分) の和として表わさ

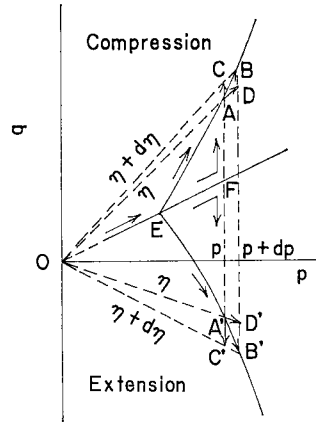


図-22 一般応力経路上での応力増分

れていると仮定する<sup>22)~24), 31)</sup>。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} d\epsilon &= d\epsilon^p = d\epsilon_\eta^p + d\epsilon_p^p \\ dv &= dv^e + dv^p = dv^e + dv_\eta^p + dv_p^p \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

ここで、 $d\epsilon^e=0$  を仮定している。また、 $dv^e$  は式 (12) の第 1 式により表わされるとする。他方、塑性ひずみ増分の  $\eta$  成分は式 (5), (6) より次のように表わされる。

$$dv_\eta^p = \frac{\Delta\epsilon_f}{(1+e) \cdot M} d\eta, \quad d\epsilon_\eta^p = \pm \frac{1}{A} \frac{d\eta}{M - \eta} \dots (23)$$

さらに、塑性ひずみ増分の  $p$  成分は、図-22 において EFA と圧密、せん断された後の応力増分  $\overline{AD}$  による塑性ひずみ増分に等しいと仮定する。すなわち、式 (12) の第 2 式および式 (16) より次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} dv_p^p &= \frac{\lambda - \kappa}{1+e} \frac{dp}{p} \\ d\epsilon_p^p &= \pm \frac{\lambda - \kappa}{(1+e) \cdot \alpha \cdot Da} \frac{M_\xi \cdot \xi}{M_\xi^2 - \xi^2} \frac{dp}{p} \end{aligned} \right\} \dots (24)$$

図-23 は上で述べた応力~ひずみ関係を用いて、図-19 の試験結果を解析したものである。解析結果はほぼ試験結果に合っている。

ここで解析に用いた実験定数について述べる。ここに示した応力~ひずみ関係に必要な定数は表-1 に示した 9 種類である。これらのうち、 $\lambda, \kappa$  は等方または異方圧密、膨潤試験より求める。A,  $\Delta\epsilon_f, M_C, M_E$  は三軸圧縮および三軸伸張下での平均主応力一定試験より得られる。ただし、材料の破壊基準を与えれば、 $M_C$  と  $M_E$  はいずれか一方が求まれば、他方は計算できることになる。 $K_0$  の決定については従来より種々の方法が提案されており、いずれかの方法で決定する。D は式 (14) に示したように、A,  $\Delta\epsilon_f$  が決定された後、等方圧密粘性

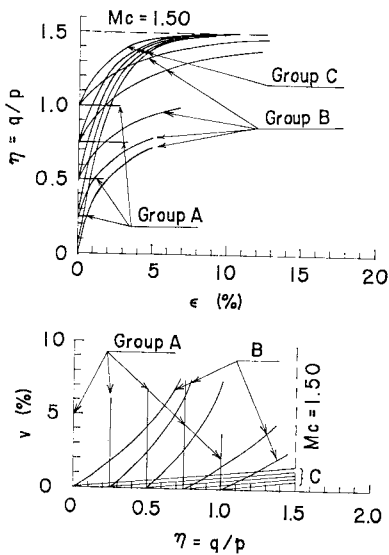


図-23 解析結果 ((a)  $\eta \sim \epsilon$  関係, (b)  $v \sim \eta$  関係)

土の塑性ひずみ増分比の圧密成分と応力比の関係より決定される。塑性ひずみ増分比の圧密成分を求めるためには平均主応力一定試験と一般応力経路に沿う試験の2種類を行う必要がある。一般応力経路に沿う試験としては最も簡単には側圧一定試験を行えばよい。以上、まとめると、本理論に必要な実験定数を決定するために必要な試験として、① 等方圧密、膨潤試験、② 平均主応力一定試験、③ 測圧一定試験、④  $K_0$  圧密試験、を行う必要がある。実際には、①～③の各試験は比較的容易に行い得るが、④の試験は手軽に行えないので、Jakyの式、 $K_0 = 1 - \sin \phi'$  などより求めた方が実際的と思われる。

最後に、図-20に示したようなひずみ増分ベクトル方向が応力増分ベクトル方向により影響される特性は、等方圧密試料の場合<sup>23)</sup>と同様に、式(22)～(24)により表わすことができることが指摘できる。

## 6. 結 論

本論文において、三軸セル内で種々の応力比で異方圧密した正規圧密粘性土の平均有効主応力一定下、応力比一定下、および平均有効主応力と応力比が同時に増加する場合の圧密、せん断特性について、軸対象条件下で調べた。また、試験結果を説明する応力～ひずみ関係式を与えた。これらのことより、次の結論が得られた。

(1) 異方圧密粘性土を  $p$  一定下でせん断するとき、せん断開始時から破壊時までの間隙比の減少量は式(1)で表わされる。また、体積ひずみ増分と偏差ひずみ増分の比  $dv/de$  は異方圧密時の応力比に関係なく、式(7)で表わされる。

(2) 小さい拘束圧から異方圧密を継続したときのひずみ増分比と応力比の関係は、式(8)で近似的に表わされる。また、ある応力比  $\eta_i$  で異方圧密を受けた後、平均有効主応力一定でせん断し、その後、応力比を一定として再び異方圧密するときのひずみ増分比は、 $\eta_i$  に大きく影響される。このときの塑性ひずみ増分比と応力比の関係は式(16)で表わされる。

(3) 異方圧密粘性土を  $dp > 0, d\eta \approx 0$  なる応力経路に沿ってせん断したときの塑性ひずみ増分は、それぞれ式(23)および式(24)で示されるような  $\eta$  成分と  $p$  成分に分けて解析することができる。

本研究は京都大学防災研究所で同大学 柴田 徹教授の指導のもとに行ったものに、その後、考察を加えたものである。実験は京都大学防災研究所で行った。実験の遂行にあたって同研究所 清水博樹技官の多大な援助を受けた。ここに記して関係各位に深甚の謝意を表する次第である。

## 記 号

- A:  $(\eta - \eta_i) \sim \epsilon$  曲線の形状を表わす実験定数
- D: 塑性ひずみ増分比の圧密成分と応力比の関係に含まれる実験定数(式(14)参照,  $D \geq 0.5$ )
- $D_a$ : 異方圧密時の塑性ひずみ増分比と応力比の関係に含まれる実験定数
- $e$ : 間隙比
- $e_i$ : せん断開始時の初期間隙比
- $K_0$ : 静止土圧係数
- M: 破壊時の応力比
- $M_C, M_E$ : 三軸圧縮下および三軸伸張下での破壊時の応力比
- $p$ : 平均有効主応力
- $p_i, \eta_i$ : 異方圧密時またはせん断開始時の平均有効主応力および応力比
- $q$ : 軸差応力 ( $= \sigma_a' - \sigma_r'$ )
- $v$ : 体積ひずみ
- $\alpha$ : 式(17)により定義される実験定数から求まる定数
- $\beta$ : 式(11)により定義される定数
- $\Delta e_f$ :  $p$  一定下で等方応力状態からのせん断開始時から最圧縮時までの間隙比の減少量
- $\Delta e_{f\eta_i}$ : 初期応力比  $\eta_i$  で異方圧密終了後のせん断開始時から、 $p$  一定下でせん断したときの最圧縮時までの間隙比の減少量
- $(-\delta e)$ :  $p$  一定下でせん断開始時からの間隙比の減少量

$\varepsilon$  : 軸方向の偏差ひずみ

$\varepsilon_a, \varepsilon_r$  : 軸方向および半径方向の主ひずみ

$\eta$  : 応力比 ( $=q/p$ )

$\eta_{K_e a}, \eta_{K_e r}$  : 半径方向および軸方向を拘束して圧密するときの応力比

$\eta_0$  : 塑性偏差ひずみ増分の圧密成分 ( $d\varepsilon_p^p$ ) が零となる応力比, 式 (19) により,  $\eta_i$  より計算される.

$\lambda, \kappa$  :  $e \sim \ln p$  図上での圧縮指数 および膨潤指数

$\xi, M_\xi$  : 式 (15) で定義される応力比パラメーター

$\sigma_a', \sigma_r'$  : 軸方向および半径方向の主応力

上添字  $e, p$  : それぞれ, その量が弾性成分および塑性成分であることを示す.

下添字  $\eta, p$  : それぞれ, その量がせん断成分, 圧密成分であることを示す.

下添字  $a$  : その量が異方圧密時の量であることを示す.

参考文献

- 1) Wong, P.K.K. and R.J. Mitchell : Yielding and Plastic Flow of Sensitive Cemented Clay, *Geotech.* Vol. 25, No. 4, pp. 763~782, 1975.
- 2) 鬼塚克忠・林 重徳・平田登基男・村田重之 : 有明粘土の異方性について, 土質工学会論文報告集, 第16巻, 第3号, pp. 111~121, 1976.
- 3) 小田匡寛・小石川 功・樋口利男 : Experimental Study of Anisotropic Shear Strength of Sand by Plane Strain Test, 土質工学会論文報告集, 第18巻, 第1号, pp. 25~38, 1978.
- 4) 山田恭史・石原研而 : Anisotropic Deformation Characteristics of Sand under Three Dimensional Stress Conditions, 土質工学会論文報告集, 第19巻, 第2号, pp. 79~94, 1979.
- 5) 龍岡文夫 : Stress-Strain Behavior of Idealized Anisotropic Granular Material, 土質工学会論文報告集, 第20巻, 第3号, pp. 75~90, 1980.
- 6) 松岡 元・中井照夫・石崎 仁 : 複合滑動面に基づいた異方性土の応力・ひずみ関係, 土木学会論文報告集, 第300号, pp. 57~67, 1980.
- 7) Skempton, A.W. and V.A. Sowa : The Behaviour of Saturated Clays during Sampling and Testing, *Geotech.* Vol. 13, No. 3, pp. 269~290, 1963.
- 8) Ladd, C.C. : Stress-Strain Behavior of Anisotropically Consolidated Clays during Undrained Shear, *Proc. 6th ICSMFE*, Vol. 1, pp. 282~286, 1965.
- 9) Parry, R.H.G. and V. Nadarajah : Observations on Laboratory Prepared, Lightly Overconsolidated Specimens of Kaolin, *Geotech.* Vol. 24, No. 3, pp. 345~358, 1974.
- 10) Lewin, P.I. and J.B.B. Burland : Stress Probe Experiments on Saturated Normally Consolidated Clay, *Geotech.* Vol. 20, No. 1, pp. 38~56, 1970.
- 11) Lewin, P.I. : The Influence of the stress History on the Plastic Potential, *Proc. Symp on the Role of Plasticity in Soil Mechanics*, Cambridge, pp. 96~107, 1973.
- 12) Calladine, C.R. : A Microstructural View of the Me-

- chanical Properties of Saturated Clay, *Geotech.* Vol. 21, No. 4, pp. 391~415, 1971.
- 13) 太田秀樹・島 昭治郎 : 異方圧密粘土の状態曲面上について, 土木学会論文報告集, 第196号, pp. 117~124, 1972.
- 14) Pender, M.J. : A Unified Model for Soil Stress-Strain Behaviour, *Proc. Specialty Sess. 9, 9th ICSMFE*, pp. 213~222, 1977.
- 15) 関口秀雄・太田秀樹 : Induced Anisotropy and Time Dependency in Clays, *Proc. Specialty Sess. 9, 9th ICSMFE*, pp. 229~238, 1977.
- 16) Prevost, J.-H. : Anisotropic Undrained Stress-Strain Behavior of Clays, *Proc. ASCE*, Vol. 104, No. GT 8, pp. 1075~1090, 1978.
- 17) Mroz, Z., V.A. Norris and O.C. Zienkiewicz : Application of an Anisotropic Hardening Model in the Analysis of Elasto-plastic Deformation of Soils, *Geotech.* Vol. 29, No. 1, pp. 1~34, 1979.
- 18) Hambly, E.C. : Plane Strain Behaviour of Remoulded Normally Consolidated Kaolin, *Geotech.* Vol. 22, No. 2, pp. 301~317, 1972.
- 19) Wood, D.M. : Explorations of Principal Stress Space with Kaolin in a True Triaxial Apparatus, *Geotech.* Vol. 25, No. 4, pp. 783~797, 1975.
- 20) Lade, P.V. and J.M. Duncan : Stress-Path Dependent Behavior of Cohesionless Soil, *Proc. ASCE*, Vol. 102, No. GT 1, pp. 51~68, 1976.
- 21) 軽部大蔵 : 正規圧密粘土の軸対称圧縮状態における応力-ひずみ式, 土木学会論文報告集, 第273号, pp. 83~97, 1978.
- 22) 西 好一・江刺靖行 : Stress-Strain Relationships of Sand Based on Elastoplasticity Theory, 土木学会論文報告集, 第280号, pp. 111~122, 1978.
- 23) 大槻正紀 : A Mechanical Model for the Stress-Strain Behaviour of Normally Consolidated Cohesive Soil, 土質工学会論文報告集, 第19巻, 第3号, pp. 29~44, 1979.
- 24) Vermeer, P.A. : A Double Hardening Model for Sand, *Geotech.* Vol. 28, No. 4, pp. 413~433, 1978.
- 25) 大槻正紀 : A Stress-Strain Relationship of Normally Consolidated Cohesive Soil under General Stress Condition, 土質工学会論文報告集, 第20巻, 第1号, pp. 29~43.
- 26) Roscoe, K.H. and H.B. Poorooshasb : A Theoretical and Experimental Study of Strains in Triaxial Compression Tests on Normally Consolidated Clays, *Geotech.* Vol. 13, pp. 12~38, 1963.
- 27) El-Sohby : Deformation of Sands under Constant Stress Ratios, *Proc. 7th ICSMFE*, Vol. 1, pp. 111~119, 1969.
- 28) Roscoe, K.H., A.N. Schofield and A. Thurairajah : Yielding of Clays in States Wetter than Critical, *Geotech.* Vol. 13, pp. 211~240, 1963.
- 29) Roscoe, K.H. and J.B. Burland : On the Generalized Stress-strain Behaviour of 'Wet' Clay, *Engineering Plasticity*, Cambridge Univ., pp. 535~609, 1968.
- 30) 松岡 元・中井照夫 : Stress-Deformation and Strength Characteristics of Soil under Three Different Principal Stresses, *Proc. JSCE*, No. 232, pp. 59~79, 1974.
- 31) 松岡 元・中井照夫 : Stress-strain Relationship of Soil Based on the 'SMP', *Proc. Specialty Sess. 9, 9th ICSMFE*, pp. 153~162, 1977.