

正規圧密粘性土のダイレイタンスー挙動

DILATANCY BEHAVIOUR OF NORMALLY CONSOLIDATED COHESIVE SOILS

亀井健史*・竹野 毅**・常田 亮***

By Takeshi KAMEI, Takeshi TAKENO and Makoto TOKIDA

To investigate the dilatancy characteristics of normally consolidated cohesive soils, isotropically consolidated triaxial compression test with mean effective principal stress equal to constant (CIPCC) was performed on two soils. As a consequence, the time dependency on volumetric and shear strain rates was shown. In conventional laboratory triaxial testing, on the other hand, isotropically consolidated triaxial compression tests (CIUC) primarily are conducted because of convenience and simplicity of testing procedures. Comparison of CIUC and CIPCC test results suggest that the dilatancy characteristics from the CIPCC could be extrapolated from results obtained on CIUC test.

Keywords: cohesive soil, dilatancy, triaxial compression test

1. はじめに

堆積年代の新しい沖積軟弱地盤上における建設工事では、地盤の支持力不足のためさまざまな問題が生じている。この地盤を構成する土要素は正規圧密状態にあり、上載荷重によりせん断を受けると体積を減少させる方向にダイレイタンスーが発生する。このとき、地盤が排水状態であれば体積減少を生じるが、非排水状態の場合、間隙水圧が発生して土のせん断強度は低下する。

このようにダイレイタンスーは、土のせん断機構に深く関係しており、土の応力～ひずみ関係や地盤の支持力を評価するうえで重要な要因となっている。紫田¹⁾は平均有効主応力一定の排水試験を行い、ダイレイタンスー～軸ひずみ関係が圧密圧力の大きさに無関係に一定の曲線になることを見出すとともに、Henkel²⁾および水野ら³⁾の正規圧密粘土の排水三軸圧縮試験結果を用いて、正規圧密粘土のダイレイタンスー式を提案した。また、軽部・栗原⁴⁾は圧密非排水三軸試験を行いダイレイタンスー

特性と強度特性を求め、粘性土のせん断機構の検討を行っている。さらに、Shibata and Karube⁵⁾は、中間主応力を変化させて圧密非排水試験を行い、ダイレイタンスーと応力比の関係が中間主応力に影響されないことを明らかにした。

上記のようなダイレイタンスーに関する研究をもとに、Ohta and Hata⁶⁾は、塑性体積ひずみを降伏関数とする弾塑性構成式を求めている。また、Mitachi and Kitago⁷⁾は、 K_0 圧密平面ひずみ試験を行い三軸試験結果と比較・検討し、正八面体上でのせん断応力の関係を調べている。一方、清水⁸⁾は正規圧密および過圧密粘土に対して平均有効主応力一定試験を実施し、応力比とダイレイタンスーの関係を実験的に定式化するとともに、降伏関数を考慮し関連流れ則を適用した弾塑性構成式を提案している。

上記の点に着目し本研究では、正規圧密状態の飽和粘性土に対して平均有効主応力一定試験を行い、体積ひずみおよびせん断ひずみの時間依存性についてその諸特性を明らかにした。さらに上記試験結果と圧密非排水三軸圧縮試験結果を比較・検討し、簡便にダイレイタンスー特性を予測できることを示した。

* 正会員 工博 基礎地盤コンサルタンツ(株)
(〒102 千代田区九段北1-8-3)

** 工修 日本道路公団広島建設局
(〒724 広島市西条町大字西条東 829)

*** 正会員 工修 長野工業高等専門学校講師 土木工学科
(〒381 長野市大字徳間 716)

2. 試料および実験方法

(1) 試料

実験に使用した試料は、新潟県柏崎市米山より採取した米山土と同県栃尾市から採取した大野土の2種類の陸成粘性土を練り返して再圧密したものである。おのおのの試料の物理的性質を、Table 1 に示す。

練り返した試料の再圧密は、840 μm 以下の粘性土に水を加えてスラリー状にしたものを内径 15 cm、高さ 45 cm のモールドに入れて行い、圧密圧は 35 kPa で圧密時間は 1 週間とした。脱型した試料から 6.5×6.5×15 cm の直方体を切り出し、ラップで包みパラフィンでシールして 1 週間養生したものを実験に用いた。供試体は、直径 5 cm、高さ 10 cm の円柱形のもので、上述の 1 週間養生した試料からワイヤーソーで切り出して作成した。

(2) 実験方法

今回行った実験は、平均有効主応力一定試験 (CIPCC test) と圧密非排水三軸圧縮試験 (CIUC test) の 2 種類である。

a) 平均有効主応力一定試験 (CIPCC test)

この実験は、平均有効主応力 (p') を一定に保ちながら、軸差応力 (q) を段階的に上昇させる三軸試験である。各載荷段階は、Fig. 1 に示すように、有効応力経路が C. S. L. に達するまでを 11 分割して決定した。各段階での軸差応力 (q) と平均有効主応力 (p') の比の増分 ($\Delta\eta$) は、 $\Delta\eta = M/11$ ($M = q/p'$) より求めた。ここで M は、

Table 1 Index Properties of Soil Samples.

Soil Sample	Gs	ω_L (%)	ω_P (%)	I_P (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Yoneyama Clay	2.82	64.2	36.6	27.6	42.5	29.5	28.0
Ohno Clay	2.67	80.2	48.7	31.5	18.0	43.9	38.1

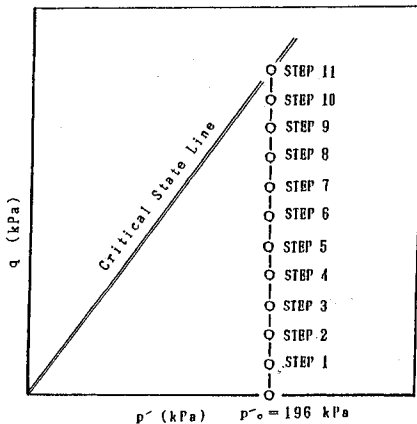


Fig. 1 Effective stress path in CIPCC test.

米山土および大野土の圧密非排水試験結果⁹⁾から決定し、米山土で $M=1.58$ 、大野土で $M=1.38$ である。また、軸圧の増加に対する側圧の減少の比率は $\sigma'_1 : \sigma'_3 = 2 : 1$ である。各載荷段階における載荷時間は 24 時間とし、排水量および軸変位を測定した。

b) 圧密非排水三軸圧縮試験 (CIUC test)

圧密圧力 196 kPa および 392 kPa で等方圧密した後、非排水せん断を行った。せん断はひずみ制御で行い、せん断速度は 0.07 %/min であり、圧密・せん断過程を通して 98 kPa のバックプレッシャーを加えている。ここでせん断速度は、供試体内の間隙水圧の均等化等を考慮して決定した^{10)~12)}。

3. 実験結果および考察

(1) 平均有効主応力一定試験結果

a) 体積ひずみ増分およびせん断ひずみ増分の経時変化

Fig. 2(a), (b) は、載荷段階 9 における米山土および大野土の体積ひずみ増分 ($d\nu_v$) の経時変化を示したものである。ここで体積ひずみ増分は、次式で定義した。

$$d\nu_v = \Delta V_i / V_i \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ΔV_i : 各載荷段階における体積変化 (cm³)

V_i : 各載荷段階における初期体積 (cm³)

米山土の場合 (Fig. 2(a)), 体積ひずみ増分は、載荷後約 8 分で増加し始め、およそ 200 分で一定値に収束している。これに対して大野土では、体積ひずみ増分が載

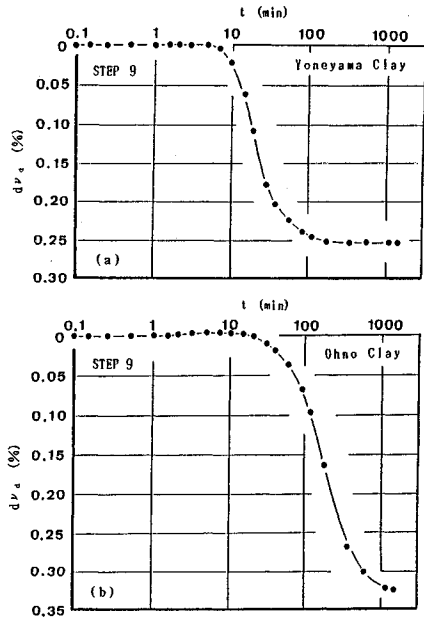


Fig. 2 Typical time—the increment of volumetric strain curve of nine step loading in CIPCC test.

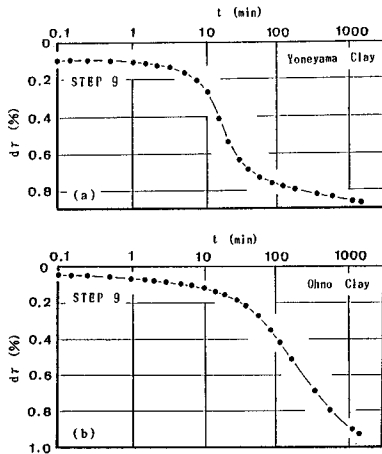


Fig. 3 Typical time—the increment of shear strain curve of nine step loading in CIPCC test.

荷後約 20 分から増加を始め、24 時間経過後も一定値に収束していない (Fig. 2(b)).

次に、載荷段階 9 のときのせん断ひずみ増分の経時変化を示すと、Fig. 3 のようになる。ここでせん断ひずみ増分 ($d\gamma$) は、次式で定義した。

$$d\gamma = d\epsilon_a - (d\nu_a/3) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $d\epsilon_a$: 軸方向ひずみ増分

$d\nu_a$: 体積ひずみ増分

Fig. 3(a) に示すように、米山土のせん断ひずみ増分は、載荷直後から即時的に発生し、およそ 10 分で著しい増加を示す。また、体積ひずみ増分と異なり載荷後 24 時間経過しても一定値に収束せず、2 次変形的傾向を示している。一方、大野土では (Fig. 3(b)) せん断ひずみ増分が載荷直後から即時的に発生し、約 60 分経過した時点から著しい増加傾向を示している。しかし、米山土と異なりせん断ひずみ増分は、2 次変形的な傾向を示さない。

以上のことより、ひずみの時間依存性は、ダイレイタンスー (体積ひずみ) よりもせん断変形 (せん断ひずみ) に支配されているものと考えられる。

b) ひずみ速度と応力比 (q/p') の関係

時間に対するひずみの変化の割合を定量的に把握するために、体積ひずみ速度およびせん断ひずみ速度と応力比 (q/p') の関係を調べ、Fig. 4 および Fig. 5 に示した。おのおののひずみ速度は、Walker¹³⁾ と同様に次式で定義した。

$$\text{体積ひずみ速度: } d\nu_a/d(\log t) \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{せん断ひずみ速度: } d\gamma/d(\log t) \dots\dots\dots (4)$$

米山土の体積ひずみ速度は (Fig. 4(a))、応力比 (q/p') が 0.75 まで一定であり ($d\nu_a/d(\log t) = 0.03$)、 q/p' が 0.75 以上になると q/p' の増加に伴って直線的に増加し

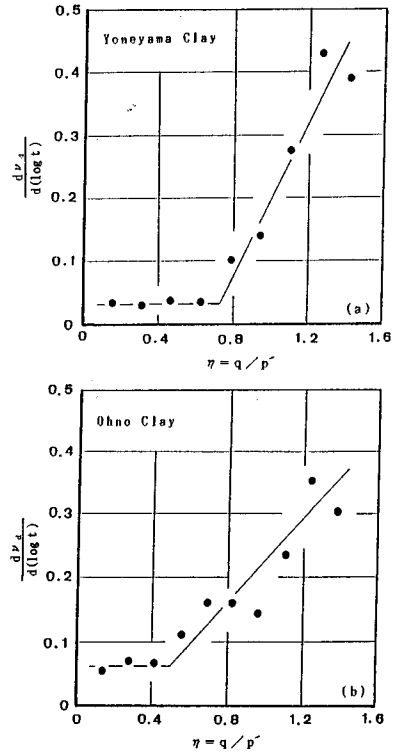


Fig. 4 Relationship between $d\nu_a/d(\log t)$ and η in CIPCC test.

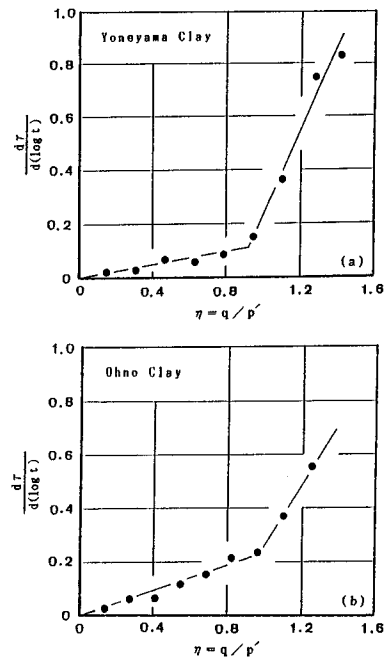


Fig. 5 Relationship between $d\gamma/d(\log t)$ and η in CIPCC test.

ている。また Fig. 4(b) に示すように、大野土の体積ひずみ速度は、 q/p' が 0.5 まで一定値 ($d\nu_a/d(\log t) = 0.06$) を示し、それ以後 q/p' の増加に伴って直線的に増加している。特に、米山土において応力比の増加に伴う体積ひずみ速度の増加傾向が、顕著であることがわかる。

一方、せん断ひずみ速度は、Fig. 5(a), (b) に示すように、両試料とも q/p' が約 1.0 の点で増加傾向が変化し、 q/p' が 1.0 以上になるとせん断ひずみ速度が急激に増加している。また、大野土と米山土を比較すると、応力比 (q/p') が 1.0 以下の範囲では大野土のせん断ひずみ速度が米山土のせん断ひずみ速度よりも大きく、 q/p' が 1.0 以上になると米山土のせん断ひずみ速度が大きくなっていることがわかる。

c) ダイレイタンスーと軸ひずみの関係

Fig. 6 は、平均有効主応力一定試験から得られたダイレイタンスー (ν_a) と軸ひずみ (ϵ_a) の関係を示したものである。ここでダイレイタンスーと軸ひずみは、各載荷段階における排水量および沈下量の累積を、圧密終了時の体積と高さで除して求めた。

図より、大野土および米山土とも軸ひずみが 3% 以下の範囲において、ダイレイタンスーと軸ひずみの関係は直線近似が可能であり、軸ひずみの増加に伴ってダイレイタンスーが増加する傾向を示している。しかし、軸ひずみが 4% を越えると、軸ひずみに対するダイレイタンスーの増加割合は低下しその直線関係が認められない。

以上の結果からダイレイタンスーは、軸ひずみが 3% 以下の領域で軸ひずみの増加に伴って直線的に増加するが、変形の進行に伴いダイレイタンスーの増分が低下していくことがわかる。

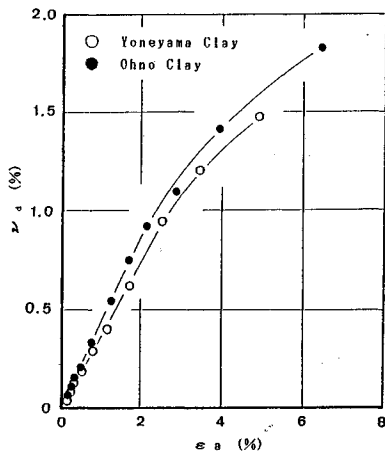


Fig. 6 Relationship between ν_a and axial strain in CIPCC test.

d) ダイレイタンスーの増分 ($d\nu_a$) と応力比 (τ_{oct}/σ'_m) の関係

Fig. 7(a), (b) は、米山土および大野土の各載荷段階におけるダイレイタンスーの増分 ($d\nu_a$) と応力比 (τ_{oct}/σ'_m) の関係を示したものである。

図に示すように、各載荷段階の $d\nu_a$ は、 τ_{oct}/σ'_m の増加に伴ってほぼ直線的に増加しており、次式で定式化することができる。

$$d\nu_a = D \cdot \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 D : 比例定数

また、ダイレイタンスーは、 $d\nu_a$ の累積で与えられるので、次式から求めることができる。

$$\begin{aligned} \nu_a &= \sum (d\nu_a) = \sum \left(D \cdot \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \right) = D \cdot \Delta \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \right) \cdot \frac{n(n+1)}{2} \\ &= \frac{D}{2} \cdot \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \cdot \left[\frac{1}{\Delta \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \right)} \cdot \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} + 1 \right] = A \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \right)^2 + B \cdot \frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \end{aligned} \dots \dots \dots (6)$$

$\Delta \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \right)$: 応力比の増分

n : 載荷段階

$$A = \frac{D}{2 \Delta \left(\frac{\tau_{oct}}{\sigma'_m} \right)}, \quad B = \frac{D}{2}$$

したがって、大野土および米山土のように砂分、シル

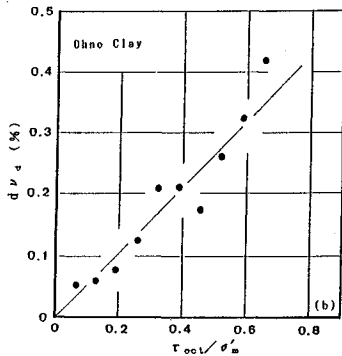
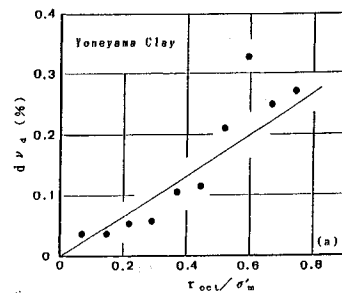


Fig. 7 Relationship between the increment of dilatancy and τ_{oct}/σ'_m in CIPCC test.

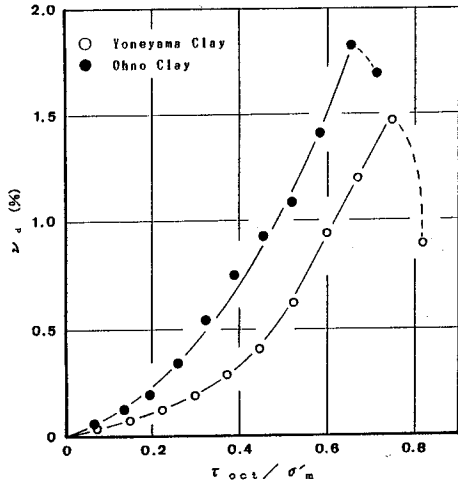


Fig. 8 Relationship between the dilatancy and τ_{oct}/σ'_m in CIPCC test.

ト分の多い低塑性粘性土における τ_{oct}/σ'_m とダイレイタンスー (ν_d) の関係は、紫田¹⁾が高塑性粘性土について述べているような直線関係ではなく、二次関数形で近似されることがわかる。

Fig. 8 は、ダイレイタンスー (ν_d) と τ_{oct}/σ'_m の関係を示したものである。図よりダイレイタンスーは、 τ_{oct}/σ'_m の増加に伴って二次曲線の変化を示し、上述の結果を裏付けるものであり、清水⁸⁾の行った実験結果とも一致している。

e) ひずみ増分ベクトル

米山土および大野土のひずみ増分ベクトルは、Fig. 9 に示すように、荷重段階が進むに伴ってひずみ増分が増加し、有効応力経路が C. S. L. に近づくにつれてベクトルの方向が鉛直上向きになっていく。本研究において、有効応力経路は荷重段階 11 で C. S. L. に達し、ひずみ増分ベクトルが鉛直上向きになり破壊に至っている。

(2) 平均有効主応力一定試験結果と非排水三軸圧縮試験結果の比較

a) 応力経路

e - $\log p'$ 面上の平均有効主応力一定試験と圧密非排水三軸圧縮試験の経路を示すと、Fig. 10(a), (b) のようになる。

圧密非排水三軸圧縮試験では、Fig. 10(a) に示すように、せん断に伴って平均有効主応力が減少するので、図中 \bar{p}' の状態は O. C. L. 上にあると考えられる。したがって、 \bar{p}' の状態に相当するダイレイタンスーは、 \bar{p}' を通る O. C. L. と平均有効主応力一定試験の経路の交点における間隙比の差を用いて表わすことができる。また、圧密非排水三軸圧縮試験の応力経路は、Fig. 10(b)

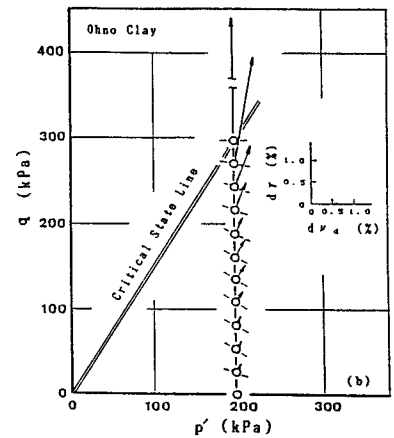
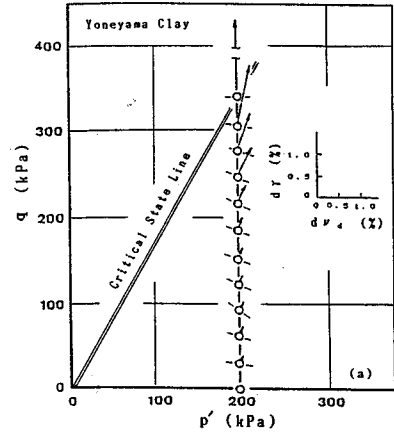


Fig. 9 Change in the increment of strain vector with the number of load steps in CIPCC test.

に示す A 点以下に平均有効主応力が減少しないので、図中 S 点までしかダイレイタンスーが対応しない。この限界点 S を e - q - p' の三次元空間上に表わしたものが、Fig. 11 である。図より限界点 S は、 q - p' 面上において、圧密非排水三軸圧縮試験の応力経路が C. S. L. に到達したときの降伏曲線と平均有効主応力一定試験の応力経路との交点であることがわかる。

b) ダイレイタンスー (ν_d) と応力比 (τ_{oct}/σ'_m) の関係

平均有効主応力一定試験より得られたダイレイタンスー (ν_d) および圧密非排水三軸圧縮試験より求めたダイレイタンスー指数 (d) と τ_{oct}/σ'_m の関係を、Fig. 12 に示す。ここでダイレイタンスー指数は、圧縮指数 C_c および膨潤指数 C_s を用いて次式より求めた^{4), 14), 15)}。

$$d = \frac{0.434 C_c}{1 + e_0} \cdot \frac{1}{p'_0} (\Delta u - \Delta \sigma_m) \dots \dots \dots (7)$$

$$d = \frac{0.434 C_s}{1 + e_0} \cdot \frac{1}{p'_0} (\Delta u - \Delta \sigma_m) \dots \dots \dots (8)$$

図より、ダイレイタンスー指数 d と τ_{oct}/σ'_m の関係は、

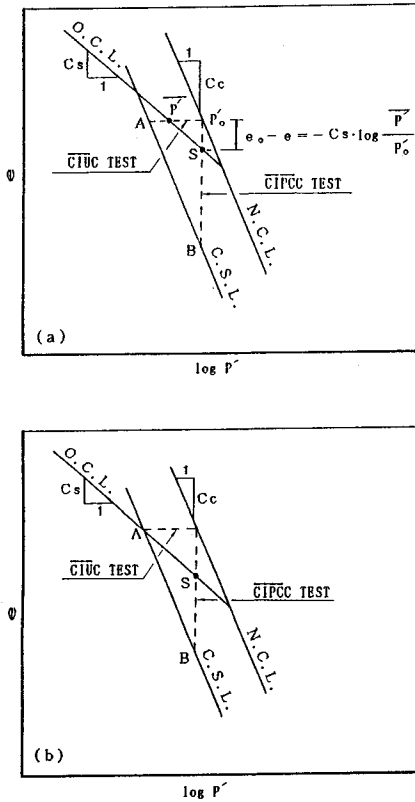


Fig. 10 Key sketch of stress paths in CIPCC test and CIUC test on e - $\log p'$ surface.

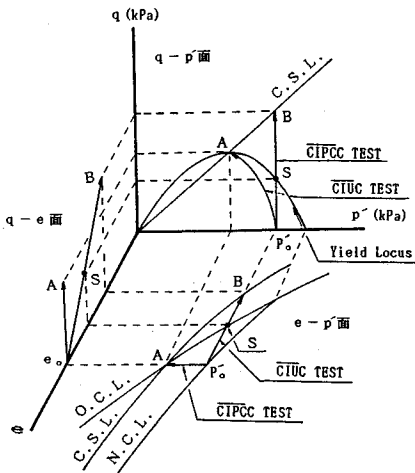


Fig. 11 Key sketch of stress paths in CIPCC test and CIUC test on e - q - p' surface.

圧密圧力の大きさに関係なくほぼ一致した傾向を示している。このことより軽部・栗原⁴⁾が述べているように、 d - τ_{oct}/σ'_m の関係が圧密圧力の大きさに影響されないことがわかる。

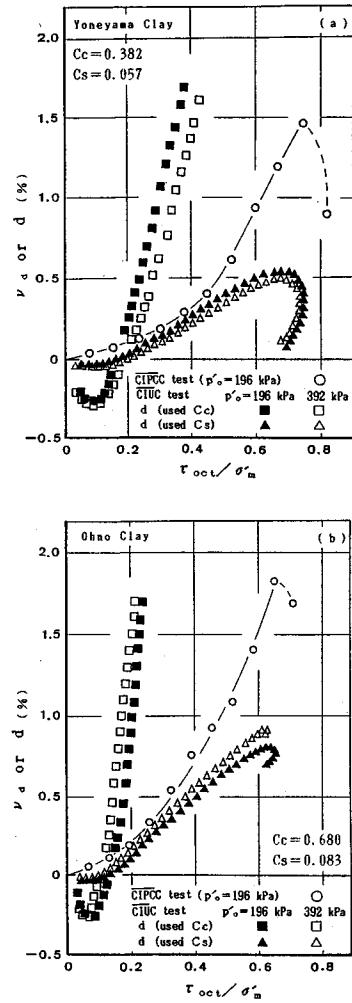


Fig. 12 Relationship between dilatancy (ν_d or d) and τ_{oct}/σ'_m .

さらに圧縮指数 C_c を用いて算出した d 値は、膨潤指数 C_s を用いて算出した d 値とかなり異なった挙動を示している。また、 τ_{oct}/σ'_m が 0.5 以下の領域において、膨潤指数 C_s を用いて算出した d 値は、平均有効主応力一定試験より得られたダイレイタンス (ν_d) とほぼ一致した挙動を示している。このことは、軽部・原田¹⁴⁾が述べているように、圧密非排水三軸圧縮試験の場合、圧密排水三軸圧縮試験と異なり、間隙水圧の上昇に伴ってせん断中の平均有効主応力が減少するため、ダイレイタンスの推定には膨潤指数 C_s を用いるのが妥当であることを示している。しかし、先に述べたように、 τ_{oct}/σ'_m が 0.5 以上になると両者の挙動はかなり異なっている。

c) ダイレイタンスとせん断応力増分 ($\Delta\tau_{oct}/\sigma'_{m0}$) の関係

Fig. 13(a), (b) は、平均有効主応力一定試験および

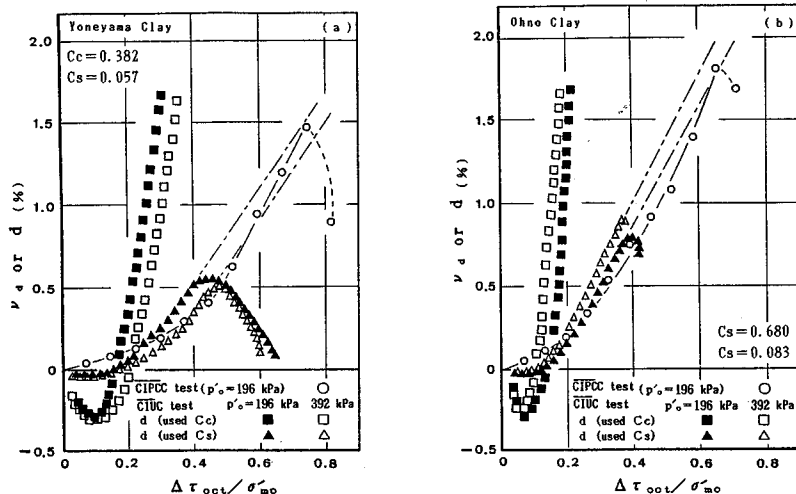


Fig.13 Relationship between dilatancy (ν_d or d) and $\Delta\tau_{oct}/\sigma'_{mo}$.

圧密非排水三軸圧縮試験より求めたせん断応力の増分 ($\Delta\tau_{oct}/\sigma'_{mo}$) とダイレイタンスー (ν_d or d) の関係を示したものである。ここでせん断応力の増分は、圧密終了時の平均圧密圧力 (σ'_{mo}) で正規化してある。

図より、ダイレイタンスーと $\Delta\tau_{oct}/\sigma'_{mo}$ の増分の関係は、平均圧密圧力 (σ'_{mo}) の大きさに無関係にほぼ一致した挙動を示すことがわかる。また膨潤指数 C_s を用いて算出した圧密非排水三軸圧縮試験のダイレイタンスー指数 d は、 d 値が最大値に達するまで平均有効主応力一定試験から得られるダイレイタンスー (ν_d) とよく一致している。一方、圧縮指数 C_c を用いて算出した d 値の一致性は認められない。したがって、圧密非排水三軸圧縮試験結果より膨潤指数 C_s を用いて算出したダイレイタンスー指数 d を、 $\Delta\tau_{oct}/\sigma'_{mo}$ に対してプロットしその関係を単純に延長することによって、平均有効主応力一定試験におけるダイレイタンスーのおおよその値を推定できるものと考えられる。

4. 結 論

本研究は、正規圧密状態の粘性土に対して、排水条件での平均有効主応力一定試験および圧密非排水三軸圧縮試験を行い、ダイレイタンスーの時間依存性や試験条件の違いによる相違点の解明を試みた。さらに、圧密非排水三軸圧縮試験の結果を用いた平均有効主応力一定試験におけるダイレイタンスーの予測法について検討を行った。

本研究によって得られた主要な結果は、以下のとおりである。

(1) 平均有効主応力一定試験において、各載荷段階の体積ひずみ増分は一定値に収束するが、せん断ひずみ

増分は徐々に増加し二次変形であるクリープ挙動を示す。

(2) 平均有効主応力一定試験における体積ひずみ速度およびせん断ひずみ速度は、応力比 (q/p') の増加に伴って直線的に増加し、ある応力比以上になると増加割合が急増するパイレニア的な挙動を示す。

(3) 圧密非排水三軸圧縮試験結果より圧縮指数 C_c を用いて算出したダイレイタンスー指数 (d) よりも、膨潤指数 C_s を用いて算出した d 値の方が、平均有効主応力一定試験より求めるダイレイタンスー (ν_d) と良好な一貫性を示す。

(4) 平均有効主応力一定試験より得られるダイレイタンスー (ν_d) 挙動は、圧密非排水三軸圧縮試験より膨潤指数 C_s を用いて算出したダイレイタンスー指数 (d) からある程度推定が可能である。

謝 辞：本研究を行うにあたり、長岡技術科学大学小川正二教授には有益なご助言とご指導をいただきました。ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 紫田 徹：粘土のダイラタンスーについて、京都大学防災研究所年報 6号, pp.128~134, 1963.
- 2) Henkel, D.J. : The Shear Strength of Saturated Remoulded Clays, Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, pp.533~554, 1960.
- 3) 水野享明・徳光善治・川上 浩：三軸試験中の間げき水圧について、土木学会第17回年次学術講演会講演概要集 3, pp.25~26, 1962.
- 4) 軽部大蔵・栗原則夫：繰り返し粘土のダイレイタンスーとせん断強度について、土木学会論文報告集, No.135,

- pp.16~24, 1966.
- 5) Shibata, T. and Karube, D. : Influence of the Variation of the Intermediate Principal Stress on the Mechanical Properties of Normally Consolidated Clays, Proc. 6th ICSMFE, Vol.1, pp.359~363, 1965.
 - 6) Ohta, H. and Hata, S. : A Theoretical Study of the Stress-Strain Relations for Clays, Soils and Foundations, Vol.11, No.3, pp.45~70, 1971.
 - 7) Mitachi, T. and Kitago, S. : The Influence of Stress History and Stress System on the Stress-Strain-Strength Properties of Saturated Clay, Soils and Foundations, Vol.19, No.2, pp.45~61, 1979.
 - 8) 清水正善：正規・過圧密粘土の変形特性—応力比~ひずみ増分関係，第14回土質工学研究発表会，pp.461~464, 1979.
 - 9) 高木広道・小川正二・池田俊雄・亀井健史・常田 亮：低拘束条件での粘性土の強度・変形特性，第23回土質工学研究発表会，pp.509~510, 1988.
 - 10) Kimura, T. and Saitoh, K. : The Influence of Strain Rate on Pore Pressures in Consolidated Undrained Triaxial Tests on Cohesive Soils, Soils and Foundations, Vol.23, No.1, pp.80~90, 1983.
 - 11) Nakase, A. and Kamei, T. : Influence of Strain Rate on Undrained Shear Characteristics on K_0 -Consolidated Cohesive Soils, Soils and Foundations, Vol.26, No.1, pp.85~95, 1986.
 - 12) 土質工学会編：土質試験法 [第2回改訂版]，pp.525, 1979.
 - 13) Walker, L. K. : Secondary Compression in the Shear of Clays, Proc., ASCE, Vol.95, No.SM1, pp.167~188, 1969.
 - 14) 軽部大蔵・原田征四郎：練り返し粘土の平面変形条件について，土木学会論文報告集，No.147, pp.1~9, 1967.
 - 15) Kamei, T. : Dilatancy characteristics of normally consolidated cohesive soils, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.165~172, 1989.
- (1989.3.27・受付)
-