

琉球大学学術リポジトリ

飽和粘土の過圧密領域における K_0 値および粘弾性係数に関する研究

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-08-23 キーワード (Ja): キーワード (En): Saturated Clay, Over Consolidation, K_0 -value, Coefficient of Viscoelastic 作成者: 赤嶺, 伴子, 原, 久夫, 村吉, 政人, Akamine, Tomoko, Hara, Hisao, Murayoshi, Masato メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1439

飽和粘土の過圧密領域における K_0 値 および粘弾性係数に関する研究

赤嶺 伴子* 原 久夫** 村吉 政人***

A Study on K_0 -value in Over Consolidated Region and Coefficient of Viscoelastic of Saturated Clay

Tomoko AKAMINE* Hisao HARA** and Masato MURAYOSHI***

Abstract

A detailed stability analysis and a deformation analysis are necessary to planning of an important structure and to preventing from a ground disaster such as landslide or ground subsidence. The coefficient of earth pressure at rest K_0 -value and coefficient of viscoelastic are required in order to analyse the problems. This paper is a study on experiments on K_0 -value in over consolidated region and the coefficient of viscoelastic of saturated Shimajiri-Clay, Kin-Clay and Ariake-Clay.

K_0 -value in normally consolidated region is got easily, but K_0 -value in over consolidated region is not. Then K_0 -value in over consolidated region is got from $\ln p' - \eta$ curve. The linear relations between the parameter m and the plasticity index I_p is proved.

Saturated clay has the time dependent characteristics of deformation. The coefficient of viscoelastic is got by generalized Voigt model.

Key Words: Saturated Clay, Over Consolidation, K_0 -value, Coefficient of Viscoelastic

1. まえがき

重要構造物の設計や地すべり、地盤沈下などの地盤災害を未然に防ぐためには、より精密な安定解析、変形挙動解析が必要となる。そのためには、地盤の初期応力状態を表す静止土圧係数 K_0 や、粘土の時間依存性挙動を表す粘弾性係数が必要となってくる。本論文は飽和した島尻粘土、金武粘土、有明粘土の過圧密領域における K_0 値及び粘弾性係数に関する実験的研究を行ったものである。

正規圧密領域の K_0 値 (以下 $K_{0(NC)}$) は、 K_0 圧密膨潤試験の結果から容易に求められるが、過圧密領域においては鉛直有効応力 σ'_v と水平有効応力 σ'_h で表わされる応力経路が曲線となり K_0 値は応力の関数としてあらわされる。そこで、 K_0 圧密膨潤試験の結果得られる $\ln p' - \eta$ 曲線を利用して過圧密領域の K_0 値を求める方法が Wroth¹⁾ によって見出されていることを受けて、本論文では飽和した

島尻粘土、金武粘土、有明粘土の過圧密領域における K_0 値を求める。また、過圧密領域の K_0 値を求める際にパラメータとなる数を過圧密 K_0 数 m とし、過圧密 K_0 数 m と塑性指数 I_p が線形関係にあることが実測値として報告されている¹⁾ ことを受けて、本論文においても同様の関係を検証する。

また、飽和粘土は時間依存性挙動を顕著に示す粘弾性体であることが知られている。時間依存性挙動の解析には Maxwell モデルや Voigt モデルが用いられる。本論文では原²⁾らの研究で提案されている一般化 Voigt モデルを用い、それを飽和粘土の時間依存性挙動に適用して粘弾性係数を求め、その応力依存性を検証する。また、それぞれの粘土の瞬時変形分担率を求める。ここで用いた試料は、有明粘土、島尻粘土、金武粘土のそれぞれ乱さない試料と繰り返し再圧密した試料である。

受理：1999年6月7日

本論文は、平成9年度土木学会西部支部研究発表会にて一部発表

* 大学院理工学研究科環境建設工学専攻 Graduate Student, Civil Eng. & Arch

** 工学部環境建設工学科 Dept. of Civil Eng. & Arch., Faculty of Eng.

*** 沖縄県 Okinawa Prefecture

2. 静止土圧係数 K_0 ³⁾

地盤の精密な安定解析を行う場合には、地盤の初期応力状態を検討する必要があり、静止土圧係数 K_0 が必要となってくる。

2.1 正規および過圧密領域における K_0 値

2.1.1 正規圧密領域における K_0 値

静止土圧係数 K_0 値は、水平方向の変位を拘束したときの鉛直有効応力 σ'_v に対する水平有効応力 σ'_h の比として定義される。粘土の K_0 変形が正規圧密状態で進行するとき、 $\sigma'_v - \sigma'_h$ 関係は原点をとる直線となることが実験的に確かめられており、 $K_{0(NC)}$ は、この直線の傾きとして容易に求められる。

2.1.2 過圧密領域における K_0 値

$K_{0(NC)}$ は2.1.1に述べたように容易に求められるが、過圧密領域においては応力経路が曲線となり K_0 値は応力の関数としてあらわされる。

過圧密領域における K_0 変形では、その応力変化を応力比 $\eta = q/p'$ と $\ln p'$ で表すと直線になることがWroth¹⁾によって見出されており、 $\ln p' - \eta$ 曲線におけるその直線の勾配を $1/m$ とすると、

$$3m \left[\frac{1 - K_{0(NC)}}{1 + 2K_{0(NC)}} - \frac{1 - K_0}{1 + 2K_0} \right] = \ln \left[n \frac{1 + 2K_{0(NC)}}{1 + 2K_0} \right] \quad (1)$$

と表わされる。ここに、 n は過圧密比、 m は K_0 値と過圧密比 n を関連付けるパラメータとして用いられ、過圧密 K_0 数と呼ぶ。

また、過圧密 K_0 数 m と塑性指数 I_p が線形関係にあることが、London clay, Kaolin などの実測値として報告されている¹⁾ことを受けて、本論文においても島尻粘土、金

武粘土(2種類)、有明粘土の計4種類の乱さない飽和粘土に関して同様の関係を検証した。その結果、前述の報告とは傾きが異なるものの、線形関係にあることが確認できた。

2.2 試料土および試験方法

2.2.1 試料土

本論文で使用した島尻粘土は中城湾から、金武粘土は金武湾から、有明粘土は佐賀県の嘉瀬川からそれぞれシンウォールサンプラーにより採取されたものである。金武粘土は多様な土質の土が複雑に入り混じっているのが特徴である。試料土の物理的性質を表-1に示す。

2.2.2 試験方法

K_0 圧密膨潤試験は、三軸圧縮試験機を用いて合成応力速度98.1kPa/day(速度一定)で $p' = 147.5$ kPaまで K_0 圧密し、軸力が試験開始時と同じ値になるまで K_0 膨潤した。

非排水せん断試験は、 K_0 圧密膨潤試験後にせん断ひずみ速度0.1%/minの速度で行った。

2.3 試験結果および考察

2.3.1 K_0 圧密膨潤試験

a) 正規圧密領域

$K_{0(NC)}$ 値は $\sigma'_v - \sigma'_h$ 曲線における正規圧密領域の直線部の勾配として与えられる(図-1(a), 表-3)。

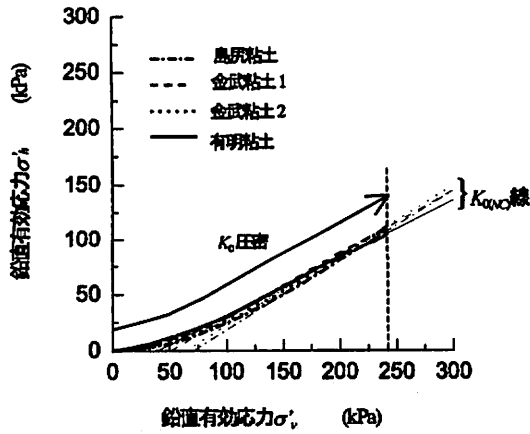
b) 過圧密領域

過圧密領域の K_0 値を求めるにあたり、まず過圧密比 n と K_0 値を関連付ける過圧密 K_0 数 m を求める(図-2)。

また、 m は I_p と線形関係にあることがWroth¹⁾によって

表-1 試料土の物理的性質

	土粒子の密度 (g/cm ³)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p (%)	粒度組成(%)
島尻粘土	2.68	64.50	20.34	44.16	粘土6%, シルト92%, 砂2%
金武粘土1	2.70	50.40	18.64	31.76	粘土6%, シルト91%, 砂3%
金武粘土2	2.70	31.65	13.63	18.02	粘土36%, シルト26%, 砂38%
有明粘土	2.60	71.50	35.38	36.12	粘土32%, シルト67%, 砂1%



(a) 正規圧密領域における K_0 圧密試験

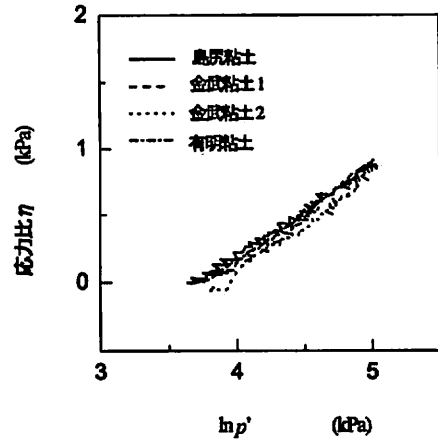
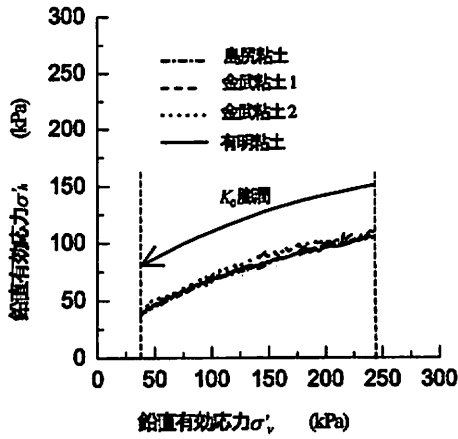


図-2 $\ln p' - \eta$ (過圧密領域)



(b) 過圧密領域における K_0 膨張試験

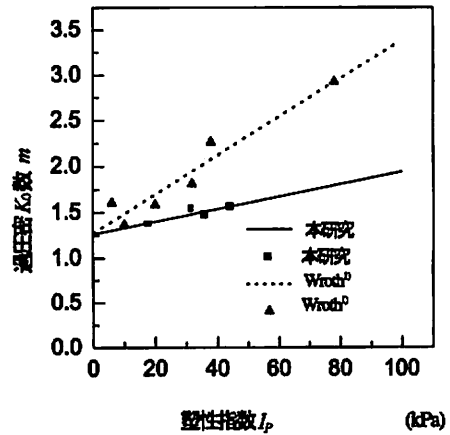
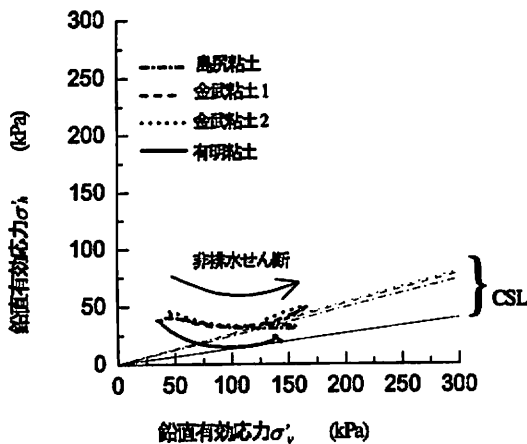


図-3 $I_p - m$



(c) K_0 過圧密状態からの非排水せん断試験

表-2 塑性指数 I_p (%)と過圧密 K_0 数 m

	農産粘土	金武粘土1	金武粘土2	有明粘土
I_p	44.16	31.76	18.02	36.12
m	1.56	1.54	1.37	1.47

図-1 応力経路

示されている。本研究においてもその関係を検証してみたところ、Wroth¹⁾の示した直線とは傾きが異なるが、線形関係にあることが確認できた(図-3、表-2)。傾きが異なるのは、粘土のローカリティを表しているものと思われる。

m と I_p の線形関係を示すことにより、物理試験の結果から過圧密領域の K_0 値を求めることができる。

$\ln p' - \eta$ 曲線において直線の勾配が $1/m$ であることから式(1)が得られ、これに K_{ovc} 値、 m 及び原位置の過圧密比 n を代入して K_0 値を求める(表-3)。

図-3より、本研究により得られた m の値がWroth¹⁾の示した値より小さいことがわかる。また、式(1)において過圧密比 n 一定のまま m の値を小さくすると K_0 値は大きくなることが示された。

c) 圧縮指数 λ および膨脹指数 κ

図-4は、 K_0 圧密膨脹試験における間隙比 e と平均有効応力 p' の関係を示す $e - \ln p'$ 曲線である。この曲線の圧

密過程からは圧縮指数 λ が、膨脹過程からは膨脹指数 κ が得られる(表-3)。

2.3.2 非排水せん断試験

非排水せん断試験により得られた応力経路を $\sigma'_v - \sigma'_h$ 曲線で示す(図-1(c))。

σ'_v と平均有効応力 p' および偏差応力 q の関係は、

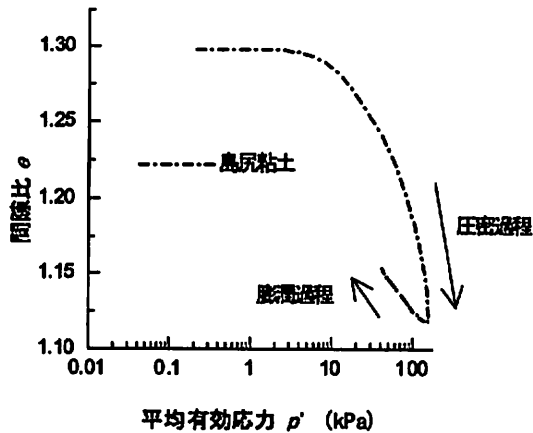
$$p' = \frac{1}{3}(1 + 2K_0)\sigma'_v \tag{2}$$

$$q = (1 - K_0)\sigma'_v$$

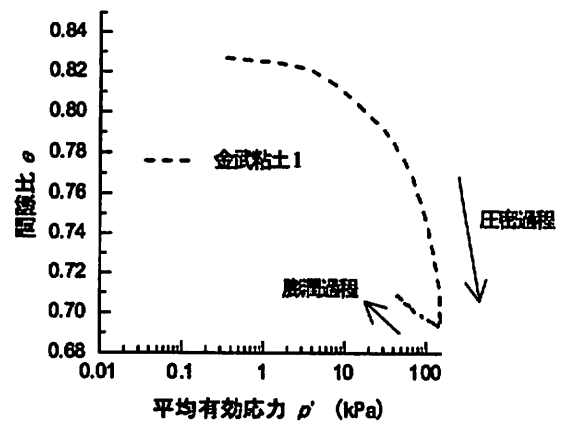
で表わされる。得られた $\sigma'_v - \sigma'_h$ 曲線における限界状態線 CSLの勾配を μ とすると、 $p' - q$ 曲線における CSLの勾配 M は、

$$M = \frac{1 - \mu}{\frac{1}{3}(1 + 2\mu)} \tag{3}$$

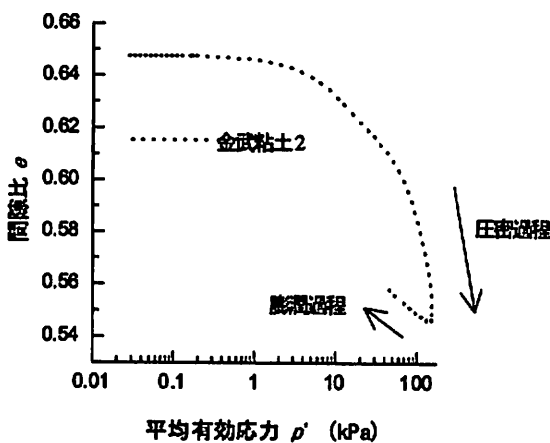
となる(図-1(c)、表-3)。



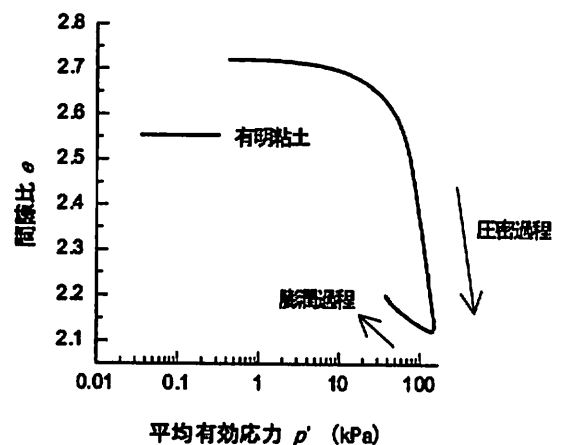
a) 奥尻粘土の $e - \ln p'$ 曲線



b) 金沢粘土1の $e - \ln p'$ 曲線



c) 金沢粘土2の $e - \ln p'$ 曲線



d) 有明粘土の $e - \ln p'$ 曲線

図-4 各粘土の $e - \ln p'$ 曲線

表-3 K_0 圧密試験結果により求められた値の一覧

	奥尻粘土	金武粘土 1	金武粘土 2	有明粘土
土被り圧 p'_v (kPa)	188.70	54.74	90.16	46.40
圧密降伏応力 p'_c (kPa)	—————	135	130	125
過圧密比 n	—————	2.47	1.44	2.70
CSLの勾配 M	1.51	1.45	1.43	2.04
圧縮指数 λ	0.11	0.08	0.08	0.48
膨張指数 κ	0.03	0.01	0.01	0.06
正規領域の K_{qc} 値	0.63	0.58	0.63	0.52
原位置における K_0 値	—————	0.87	0.75	0.82
過圧密 K_0 数 m	1.56	1.54	1.37	1.47

3. 粘弾性係数⁹⁾

飽和粘土の時間依存性挙動に3要素一般化Voigtモデルを適用し、三軸試験機を用いた線形漸増荷試験の結果から粘弾性定数を求める。

3.1 粘弾性係数の決定

3.1.1 3要素一般化Voigtモデル

図-5は、4要素一般化Voigtモデルの図であり、モデル全体の変形成分の中で、パネは弾性成分、ダッシュポットは粘性成分を表わしている。このモデルの要素で、Maxwell要素の緩和時間 $T_M \rightarrow \infty$ とすることによって、Maxwell要素のダッシュポットが剛体として挙動するため、要素数が一つ減ることになる。このようにしてできた3つの要素を持つ粘弾性モデルを、3要素一般化Voigtモデルと呼ぶ⁹⁾。

3.1.2 粘弾性係数の決定

3要素一般化Voigtモデルの支配方程式は、式(4)で表わされ、初期応力、初期ひずみをゼロとしたとき、応力速度 $\dot{\sigma}$ = 一定の条件下でのひずみ応答は式(5)となる。

$$C_M \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \frac{C_M + C_V}{T_V} \frac{d\sigma}{dt} = \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{1}{T_V} \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (4)$$

$$\varepsilon(t) = (C_M + C_V)\sigma - \sigma_{TV} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_V}\right) \right\} \quad (5)$$

ただし、 $\sigma_{TV} = \dot{\sigma} T_V$ 。

式(4)において、 C_V, C_M, T_V の3個の未知材料定数は、観測点を $t_2=2t_1, t_3=3t_1$ となるような t_1, t_2, t_3 の3点を選び、その時のひずみとの関係より式(5)~(7)が得られる。

$$T_V = -\frac{t_1}{\ln(E(t_1))} \quad (6)$$

$$C_V = \frac{\varepsilon_2 - 2\varepsilon_1}{2F_1 - F_2} \frac{1}{\sigma_{TV}} \quad (7)$$

$$C_M = \frac{\varepsilon_1 + \sigma_{TV} C_V F_1}{\sigma_1} - C_V \quad (8)$$

ただし、 $E(t_i) = \exp\left(-\frac{t_i}{T_V}\right)$ ($i = 1, 2, 3$)

$F_i = 1 - E(t_i)$ ($i = 1, 2, 3$)

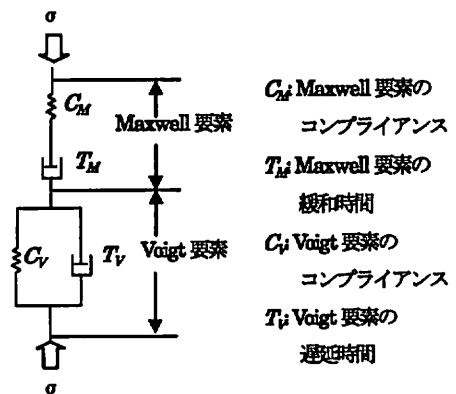


図-5 4要素一般化Voigtモデル

3.2 試験方法及び試料土

3.2.1 試験方法

粘土の粘弾性係数を求めるときには、土は過圧密状態でなければならない。そこで、通常の三軸試験機を用い線形漸増載荷方式で、ある応力まで排水せん断し、続いて側圧一定で等方応力状態まで除荷することによって土の過圧密状態を得る。

今回の試験では、この過圧密状態を粘弾性定数決定のための基準状態とした。その基準状態の過圧密粘土に対して同様に三軸試験機を用いて線形漸増載荷試験を行い、応力ひずみ関係を得た。

粘弾性係数については、飽和粘土の時間依存性挙動に3要素一般化Voigtモデルを適用し、三軸圧縮試験機を用いた線形漸増載荷試験の結果から値を求める。

3.2.2 試料土

試料土は、2.2.2で述べたものと同じ島尻粘土、金武粘土2、有明粘土を用いたが、ここでは乱さない試料だけでなく乱した試料も用いた。乱した試料は、一度 $425\mu\text{m}$ のフルイを通した粘土を、図-6に示すような装置を用い 50kPa の圧力で再圧密することにより作成した。

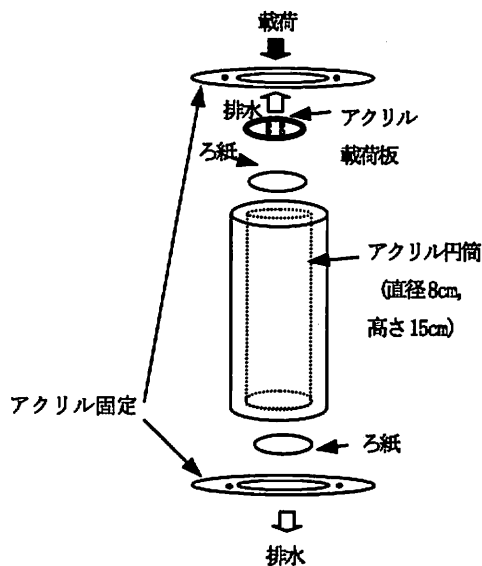


図-6 圧密装置

3.3 試験結果および考察

3.3.1 粘弾性係数および弾性係数

式(6)~(8)と実験結果から得られた粘弾性係数の結果を図-7~12に示す。図-13, 14は、粘弾性係数の結果と式(9),(10)より求めた、それぞれの粘土のせん断弾性係数および体積弾性係数である。

$$G = \frac{1}{3(C_{GV} + C_{GM})} \quad (9)$$

$$K = \frac{1}{C_{VM} + C_{VV}} \quad (10)$$

また、得られた粘弾性係数の応力依存性を表-4にまとめる。この表から、練り返し再圧密した粘土はせん断変形での弾性成分 C_{GM} , C_{GM} の大きさが、応力増加によって変化しないことがわかる。また、練り返し再圧密した金武粘土は、 T_{GV} , G , C_{VM} , C_{VM} , T_{VM} , K において他の2つの練り返し再圧密した粘土とは違った挙動を示すことがわかる。乱さない粘土の体積変形は、本論文で使用した3つの飽和粘土で応力増加にともなう粘弾性係数、弾性係数の増減変化が異なることがわかる。 C_{GM} については、本実験で使用した6つの飽和粘土すべてにおいて、応力依存性を示さないという結果が得られた。

3.3.2 瞬時変形分担率

全体の弾性変形量に対する瞬時変形量の分担率を求め(表-5)、瞬時変形量と遅延変形量の大きさを表-6にまとめる。せん断変形の瞬時変形分担率 α_G および体積変形の瞬時変形分担率 α_K は式(11), (12)より求められる。 C_{GM} , C_{VM} は瞬時変形量を受け持ち、 C_{GV} , C_{VV} は遅延変形量を受け持つ。

$$\alpha_G = \frac{C_{GM}}{C_{GM} + C_{GV}} \quad (11)$$

$$\alpha_K = \frac{C_{VM}}{C_{VM} + C_{VV}} \quad (12)$$

表-5から、本研究において使用したすべての飽和粘土において、体積変形のほうがせん断変形よりも瞬時変形分担率が大きくなることがわかる。また、金武粘土の体積変形を除いては、練り返し再圧密した粘土のほうが、乱さない粘土よりも瞬時変形分担率が大きくなる。

表-6からは、乱さない飽和粘土のせん断変形においては、遅延変形量が変形の大部分を占めていることがわかる。また、練り返し再圧密した金武粘土の体積変形においては、遅延変形量が変形の大部分を占めているのに対し、他の2つの練り返し再圧密した粘土の変形量は、応力が小さいときは遅延変形量が大きく、応力が増加するにつれて瞬時変形量のほうが大きくなることわかる。

- ▲ 乱さない有明粘土
- 乱さない島尻粘土
- 乱さない金武湾粘土
- △ 練り返し再圧密した有明粘土
- 練り返し再圧密した島尻粘土
- 練り返し再圧密した金武湾粘土

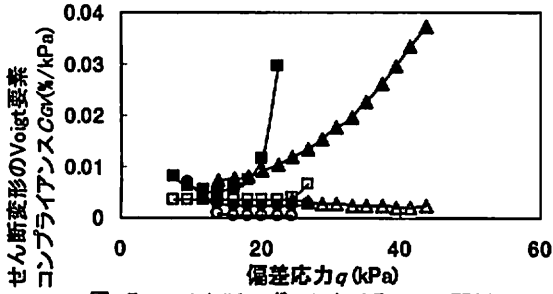


図-7 せん断ひずみにおける $q-C_v$ 関係

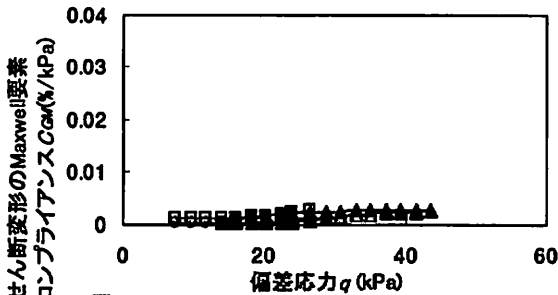


図-8 せん断ひずみにおける $q-C_m$ 関係

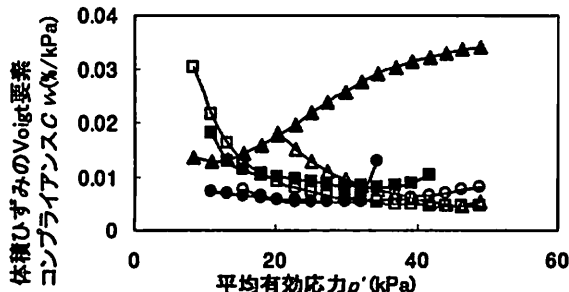


図-9 体積ひずみにおける $p'-C_v$ 関係

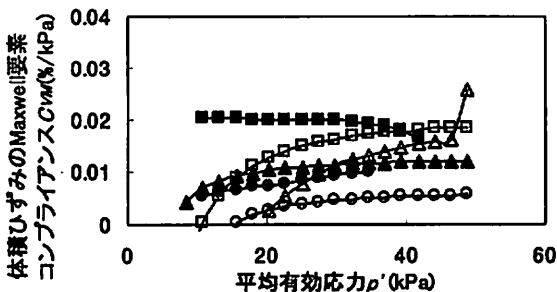


図-10 体積ひずみにおける $p'-C_m$ 関係

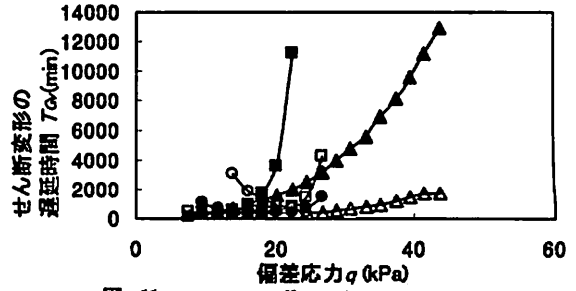


図-11 せん断ひずみにおける $q-T_d$ 関係

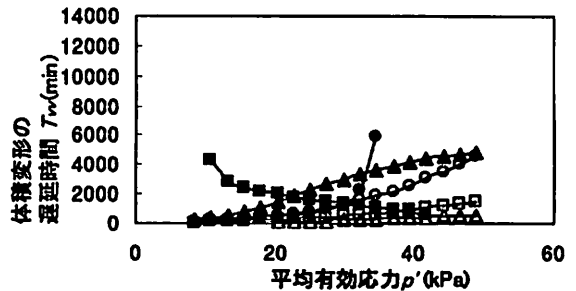


図-12 体積ひずみにおける $p'-T_w$ 関係

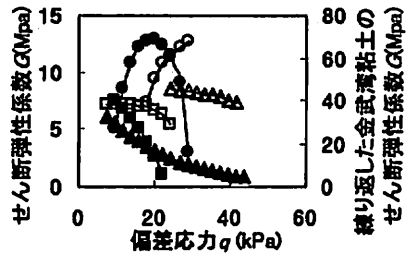


図-13 $q-G$ 関係

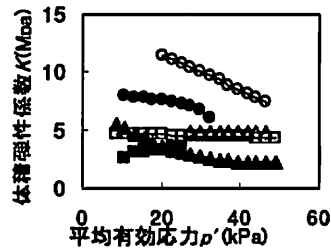


図-14 $p'-K$ 関係

粘弾性係数，弾性係数，瞬時変形分担率の結果から，練り返し再圧密した金武粘土は他の2つの練り返し再圧密した粘土とは違った挙動を示すことが多いことがわかる。

表-4 応力増加ともなう各々の粘土供試体の増減変化

各種粘土	係数定数				体積変形			
	C_{GV}	C_{GM}	T_{GV}	G	C_W	C_{VM}	T_{VM}	K
乱さない有明粘土	↑	→	↑	↓	↑	↑→	↑	↓
乱さない鳥尻粘土	↓↑	→	↑	↓	↓↑	→↓	↓	↑
乱さない金武湾粘土	↓	→	↓↑	↑↓	↓↑	↑	↑	↓
練り返し再圧密した有明粘土	→	→	↑	↓	↓	↑	→	→
練り返し再圧密した鳥尻粘土	→	→	↑	↓	↓	↑	→	→
練り返し再圧密した金武湾粘土	→	→	↓	↑	↓↑	↑→	↑	↓

- ↑ : 応力依存性を示し，その値が応力増加ともない増加する
- ↓ : 応力依存性を示し，その値が応力増加ともない減少する
- ↑↓ : 応力依存性を示し，その値が初期応力では増加し，後半で減少する
- ↓↑ : 応力依存性を示し，その値が初期応力では減少し，後半で増加する
- : 応力依存性を示さない
- ↑ : 応力依存性を示す部分と，示さない部分がある

表-5 瞬時変形量分担率

	練り返し再圧密した粘土			乱さない粘土		
	鳥尻粘土	金武湾粘土	有明粘土	鳥尻粘土	金武湾粘土	有明粘土
せん断変形 α_G	0.28	0.24	0.39	0.16	0.16	0.12
体積変形 α_V	0.64	0.39	0.58	0.63	0.52	0.31

表-6 瞬時変形量と遅延変形量の大小

	遅延変形量	練り返し再圧密した粘土			乱さない粘土			瞬時変形量
		鳥尻粘土	金武湾粘土	有明粘土	鳥尻粘土	金武湾粘土	有明粘土	
せん断変形	C_{GV}	≧	≧	=	>	>	>	C_{GM}
体積変形	C_{VM}	>→<	>	>→<	<	=	>	C_{VM}

≧ : 微妙に大きい

>→< : 応力小で遅延変化量が大きく，応力大で瞬時変化量が大きくなる

5. まとめ

K_0 値については3種類, 粘弾性係数については6種類の飽和粘土に関して実験的研究を行った結果得られた結論を以下に述べる.

- ①. K_0 圧密膨潤試験の結果得られる膨張曲線を応力比 η と $\ln p'$ で表すと直線になる.
- ②. その勾配 m は過圧密比 n と K_0 値を関連付けるパラメータとなる.
- ③. 過圧密 K_0 数 m は I_p と線形関係にある.
- ④. 乱さない粘土の体積変形では, 各々の粘土で, 応力増加にともなう粘弾性係数, 弾性係数の増減変化が異なる.
- ⑤. 繰り返し再圧密した粘土では, せん断変形での弾性成分 C_{GV} , C_{GM} の大きさは, 応力増加によって変化しない.
- ⑥. 本研究で用いた全ての粘土で, 弾性せん断変形成分 C_{GM} は, 応力増加によって変化しない.
- ⑦. 本研究で用いた全ての粘土で, 体積変形の方がせん断変形よりも瞬時変形の方の分担率が大きくなる.
- ⑧. 金武粘土の体積変形を除いては, 繰り返し再圧密した粘土の方が乱さない粘土よりも瞬時変形分担率が大きくなる.
- ⑨. 乱さない飽和粘土のせん断変形においては, 遅延変形量が変形の大部分を占める.
- ⑩. 繰り返し再圧密した金武粘土は他の2つの繰り返し再圧密した粘土とは違った挙動を示すことが多い.

参考文献

- 1) 石原研而, 木村孟: 土木工学体系8土質力学, 朝国社, pp.124 - 126, 1980.
- 2) 原 久夫: 繰り返し再圧密した島尻粘土の変形特性に関する実験とその解析, 土木学会論文集No.561/III-38, pp.109 - 118, 1997.3.
- 3) 赤嶺伴子: 乱さない粘土の K_0 圧密・膨潤特性の比較, 平成9年度土木学会西部支部研究発表会 (其の1) /III-56, pp.484 - 485, 1998.3.
- 4) 村吉政人: 3要素 Voigt モデルによる飽和粘土の粘弾性係数に関する研究, 平成10年度卒業研究, 1999.3.
- 5) 原 久夫: 一般化 Voigt モデルの粘弾性定数の決定方法とその適用例, 第六回沖縄土質工学研究発表会, pp.65-58, 1993.7.