

港湾技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 498 Sept. 1984

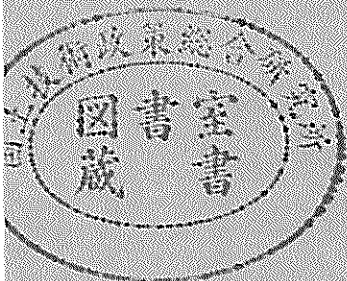
大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質

(その1) ボーリング及びサンプリング 堀江宏保・善 功企
石井一郎・松本一明

(その2) 物理的性質・圧密特性・透水性 石井一郎・小川富美子
善 功企

(その3) 静的せん断特性 土田 孝・菊池喜昭
中島謙二郎・小林正樹

(その4) 動的変形および強度特性 大根田秀明・梅原靖文
樋口嘉章・入澤一明



運輸省港湾技術研究所

序 文

大阪湾泉州沖に埋立地を造成することにより、関西国際空港の建設が計画され、昭和52年度、53年度、56年度及び57年度の4回にわたって、当海域の土質調査が実施されている。

水深20m地点における埋立地の造成とその利用にあたっては、当海域の海底地盤が軟弱な沖積粘土層の下に粘土を主体とする洪積世堆積物が深層まで続く地盤であるため、土質工学上解決すべき多くの問題が考えられる。特に、従来の港湾建設ではあまり問題とされない洪積粘性土層の土質工学的特性が大規模な埋立にともなう上載荷重の深層部への影響という観点から問題とされる点の一つの特徴と考えられる。

港湾技術研究所土質部では、大阪湾泉州沖土質調査において、大深度の土質調査の必要性に対応して、その調査方法の検討を実施するとともに、当海域における代表的地点において採取された乱さない試料について各種の土質実験を行い、各専門分野から海底地盤の工学的性質の評価ならびに検討を行った。

各種の調査ならびに試験についての詳細はそれぞれの報告に述べられているが、主要な結論を総括的に示すと下表のようになる。

調査試験結果のまとめ	
ボーリング・ サンプリング	ワイヤライン方式のサンプリング方法により、-400mまでの試料の連続採取を実施した。従来方式にくらべて、1.5~2倍の作業能率の向上、採取試料の品質の向上が認められた。
物 理 試 験	洪積層試料の土粒子比重、粒度組成、コンシステンシー特性は沖積層試料の場合と変わらない。液性指数については、沖積層試料の場合1以上であるのに対し、洪積層試料の場合0以下となった。
高圧圧密試験・ 長期圧密試験	洪積粘土の圧密降伏応力の正確な決定には荷重増加率の小さい試験が適している。長期圧密試験によれば、二次圧密係数は時間経過及び圧密荷重により大きく変化する。
透 水 試 験	乱さない場合ならびに乱した場合の砂質土について、それぞれの透水係数の密度及び粒度組成による変化傾向が明らかにされた。
室内ベーンせん断試験	沖積粘土の残留応力はピーク時の20~30%程度、鋭敏比は10~20の値が得られた。
三 軸 C I U 試 験	洪積粘土の正規圧密領域における強度増加率は塑性指数にかかわらず0.26~0.34 (平均0.30)、また、せん断抵抗角 ϕ' も塑性指数にかかわらず28~32度の範囲にある。これらは沖積粘土の場合にくらべやや小さい。洪積粘土の正割係数 E_{s0} と非排水せん断強度 C_u との比 E_{s0}/C_u は100~500の範囲にある。
三軸クリープ 試験	破壊強度と破壊時間の間には、载荷の方法によらず一定の関係がある。等方圧密後のクリープ特性は K_0 圧密後の特性と相違する。破壊時の有効応力比は圧密及びせん断方法によらず一定である。

<p>共振振動三軸 試験 (変形特性)</p>	<p>最大せん断剛性率G_0は原位置試験結果と比較的良好一致を示す。大阪湾の試料に対し、間隙比$e = 0.78 \sim 2.5$の範囲の土のためのG_0の予測式を提案した。また、せん断剛性率のひずみ依存性、減衰比hなどと塑性指数I_pとの相関性を示した。</p>
<p>振動単純せん 断試験 (強度 特性)</p>	<p>泉州沖海底地盤の動的強度及び動的強度比は一般の正規圧密粘性土より大きい。</p>

今回の調査試験の実施にあたっては、運輸省第三港湾建設局、同神戸調査設計事務所、同関西国際空港計画室より多大な助力と配慮をいただいた。また、本調査試験の成果を報告するにあたり、奥村樹郎前土質部長から適切な指導や有益な助言を頂いた。

以上の各関係機関ならびに関係各位に対し、深く謝意を表する次第である。

大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質

目 次

(その1) ボーリング及びサンプリング	
.....堀江宏保・善 功企・石井一郎・松本一明.....	5
((Part-1) Boring and Sampling.....Hiroyasu HORIE, Kouki ZEN,	
.....Ichiro ISHII and Kazuaki MATSUMOTO)	
(その2) 物理的性質・圧密特性・透水性	
.....石井一郎・小川富美子・善 功企.....	47
((Part-2) Physical Properties, Consolidation Characteristics and Permeability	
.....Ichiro ISHII, Fumiko OGAWA and Kouki ZEN)	
(その3) 静的せん断特性	
.....土田 孝・菊池喜昭・中島謙二郎・小林正樹.....	87
((Part-3) Static Characteristics of Shear	
.....Takashi TSUCHIDA, Yoshiaki KIKUCHI,	
Kenjiro NAKASHIMA and Masaki KOBAYASHI)	
(その4) 動的変形および強度特性	
.....大根田秀明・梅原靖文・樋口嘉章・入澤一明.....	115
((Part-4) Dynamic Stress-Strain and Strength Properties	
.....Hideaki OHNEDA, Yasufumi UMEHARA,	
Yoshiaki HIGUCHI and Kazuaki IRISAWA)	

大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質

(その3) 静的せん断特性

土田 孝*
菊池 喜昭**
中島 謙二郎**
小林 正樹***

要 旨

関西新国際空港の建設が予定されている大阪湾泉州沖の海底地盤は約25mの軟弱な沖積粘土層と薄い砂れき層をはさんだ数百メートルにおよぶ洪積粘土層によって構成されている。空港建設による埋立、盛土によって沖積粘土層はもとより大深度の洪積粘土層まで、変形を生じさせるような荷重の伝播が予想される。これらの地盤の力学特性を把握するため、泉州沖海底から採取した乱さな粘土試料を用いて三軸C I U試験、三軸クリープ試験を行った。一連の試験結果をまとめると次のようになる。

- 1) 三軸C I U試験から得られた15種類の洪積粘土のせん断特性は、塑性指数との関連が無くほぼ一様であった。
- 2) 沖積粘土の三軸クリープ試験結果から求めた非排水強度に関する時間効果は、東京湾大黒粘土とほぼ同程度であった。

* 土質部 主任研究官
** 土質部 土性研究室
*** 土質部 土性研究室長

**Engineering Properties of Marine Clays in Osaka Bay
(Part 3) Static Characteristics of Shear**

Takashi TSUCHIDA*
Yoshiaki KIKUCHI**
Kenjiro NAKASHIMA**
Masaki KOBAYASHI***

Synopsis

The strata of sea off Sensyu in Osaka Bay consist of very soft alluvial clay and diluvial clays which continue more than 400 meters. There is a big project to reclaim land from the sea to construct New Kansai International Airport in this area. It is predicted that the reclamation and the construction of airport facilities will give so much stress increments as to exceed the preconsolidation stress not only to the alluvial stratum but also to the deep diluvial strata. Therefore, it is necessary to investigate soil properties of these clays.

A series of triaxial compression tests and triaxial creep tests are carried out with undisturbed soil samples. The following conclusions can be drawn from the present study.

- 1) There is not a unique relationship between strength parameters of diluvial clays and plasticity index.
- 2) The rate of increase in undrained shear strength of deep diluvial clays is smaller than that of alluvial clays.
- 3) The time effect of undrained shear strength in Sensyu alluvial clay is as much as that of Daikoku clay in Tokyo Bay.

* Senior Research Engineer, Soils Division
** Member of Soil Mechanics Laboratory, Soils Division
*** Chief of Soil Mechanics Laboratory, Soils Division

目 次

要 旨	87
1. ま え が き	91
2. 沖積粘土および大深度洪積粘土の三軸C1U試験結果	91
2.1 三軸試験結果におよぼすバックプレッシャーの影響	91
2.2 試料および試験方法	93
2.3 試験結果	95
2.4 まとめ	103
3. 沖積粘土を用いた三軸クリープ試験結果	103
3.1 三軸クリープ試験機の概要	104
3.2 試料	106
3.3 試験結果	107
3.4 まとめ	113
4. あと が き	114
参 考 文 献	114
記 号 一 覧 表	114

1. まえがき

関西新空港の建設が予定されている大阪湾泉州沖の海底地盤は、約25mの軟弱な沖積粘土層と薄い砂れき層をはさんだ数百メートルにおよぶ洪積粘土層によって構成されている。空港の建設による埋立、盛土によって沖積粘土層はもとより大深度の洪積粘土層にまで、変形を生じさせるような荷重の伝播が予想される。これらの地盤の力学特性を把握するため港湾技術研究所において一連の土質試験が行われたが、本報告は三軸C I U試験、三軸クリープ試験の結果をもとに静的なせん断特性について検討したものである。このなかで、三軸C I U試験は、主として従来あまり調べられていなかった大水深、大深度の洪積粘土地盤の一般的なせん断特性を調べることを目的として行われている。また、三軸クリープ試験は、粘土のせん断時における時間効果を調べるためのもので、軟弱な粘土地盤上に建設される空港施設の沈下や経時的なせん断変形を解析するための基礎的な資料とするものである。

2. 沖積粘土および大深度洪積粘土の三軸C I U試験結果

2.1 三軸試験結果におよぼすバックプレッシャーの影響

大水深かつ大深度から採取された土試料は、サンプリングの過程で原位置での大きな土被り圧と間げき中に働いていた静水圧とが解除されるため不飽和になる¹⁾。三軸C I U試験においてせん断中の間げき水圧を精度よく測定するためには、土試料の間げきが十分に飽和していなければならない。このため、通常は1~2 kgf/cm²のバックプレッシャーが用いられるが、今回試験した土試料の原位置での静水圧が2.0~35.0 kgf/cm²に達するので、大きなバックプレッシャーが必要になると考えられる。奥村¹⁾によれば試料の応力解除による飽和度の低下およびそれともなう残留有効応力の回復のためには原

位置の静水圧と同程度の大きさのバックプレッシャーを用いることが望ましい。一方、三軸試験機の容量や計測器の精度の点から考えると、大きなバックプレッシャーを用いることによって使用できる試験機が制限されたり、大きな容量の計測器が必要となるために測定精度が低下するなどの問題もある。そこで、今回の三軸試験で用いるべきバックプレッシャーの大きさを検討するため次の2通りの予備実験を行った。

実験1：供試体にバックプレッシャーを加えず原位置の土かぶり圧に相当する圧力で等方圧密する。圧密終了後、非排水条件で側圧を5分間おきに0.2 kgf/cm²ずつ増加し、それぞれの圧力で供試体内間げき水圧の上昇を測定する。

実験2：3通りのバックプレッシャーを用い、供試体を土かぶり圧相当の有効圧密圧力で等方的に圧密する。圧密終了後0.03%/minのひずみ速度で非排水圧縮試験を行い間げき水圧を測定する。

表-1に予備実験に用いた3種類の粘土の深度と物理特性を示す。試料56-6・T-18は沖積粘土であり、56-6・D-8、D-21は洪積粘土である。

図-1は、実験1において側圧増加後の経過時間と試料内間げき水圧の上昇を示している。図中で間げき水圧は、次式で定義されるB係数で表している。

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_3$$

(Δu は間げき水圧増分、 $\Delta \sigma_3$ は側圧増分で0.2 kgf/cm²)

また、図中の初期間げき水圧は、側圧を増加する直前での供試体内間げき水圧である。図のように供試体内の初期間げき水圧が大きいくほど短時間でB係数は増加する。図-2は、図-1における5分後の間げき水圧と側圧との関係である。図-2をみると深度の小さい沖積粘土56-6・T-18の場合、供試体内の間げき水圧が0.3 kgf/cm²以上になるとB係数はほぼ1.0(完全飽和)になる。これに対して56-6・D-8、D-21の2つの洪積粘土では、供試体内の間げき水圧が0.7 kgf/cm²に達した後

表-1 予備実験に用いた試料と物理特性

試料名	海底面からの深度 (m)	土層区分	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p (%)	自然含水比 w_n (%)	砂分含有率 (%)	推定土かぶりの圧 p_{0, σ_3} (kgf/cm ²)	圧密降伏圧力 p_c (kgf/cm ²)
56-6 D-8	~ 44.00 ~ 44.80	Doc 1	80.3	36.7	43.6	55.4	12	3.2	4.0
56-6 D-21	~ 75.50 ~ 76.30	Ma 8	91.0	39.7	51.3	58.6	0	5.5	7.5
56-6 T-18	~ 25.00 ~ 25.80	Dtc	77.4	33.9	43.5	58.0	3	1.7	2.1

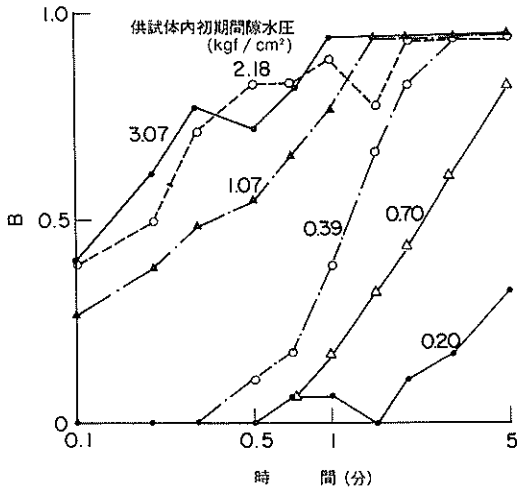


図-1(a) B係数と側圧増加後の経過時間の関係
(56-6・T-18)

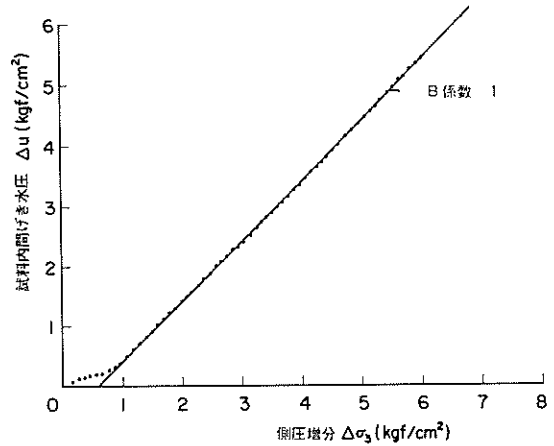


図-2(a) 試料内間げき水圧と側圧増分の関係
(56-6・T-18)

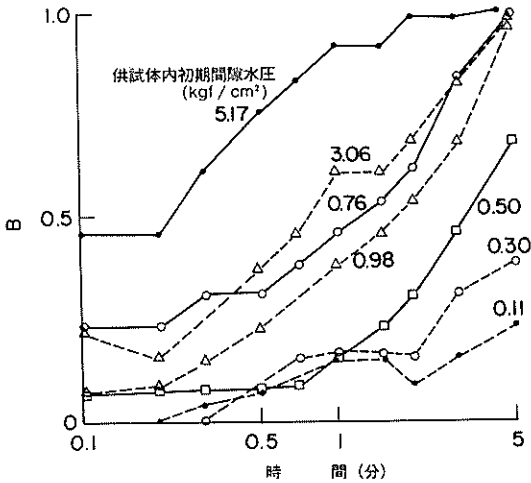


図-1(b) B係数と側圧増加後の経過時間の関係
(56-6・D-8)

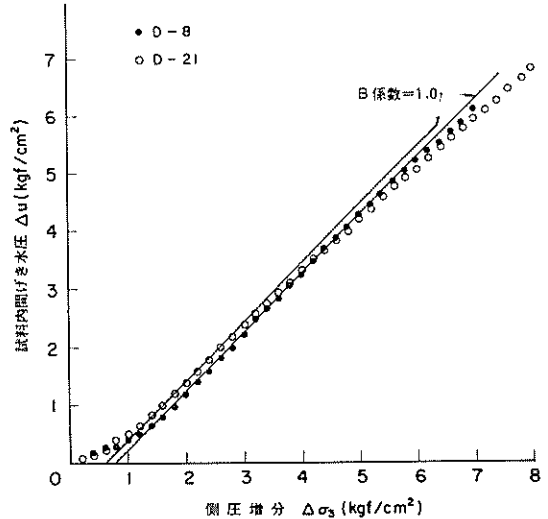


図-2(b) 試料内間げき水圧と側圧増分の関係
(56-6・D-8, D-21)

B係数がほぼ1.0になったが、さらに側圧が上昇し間げき水圧が上昇するとB係数はやや低下してD-8で0.92、D-20では0.90になった。このように側圧の増加と初期間げき水圧の増加によってB係数がわずかに低下する傾向を示す理由ははっきりしない。

次に図-3は、実験2における各粘土試料の軸ひずみ～軸差応力、間げき水圧曲線である。まず、沖積粘土56-6・T-18の試料をみると、軸差応力～ひずみ関係についてはピーク強度にばらつきがあるが、ひずみ10%程度のいわゆる残留強度をみると、バックプレッシャーによる差は無くほぼ一定になっている。また、間げき水圧

～ひずみ関係もほぼ一致しており、バックプレッシャーの違いによる応力～ひずみ関係への影響は小さいと考えられる。

試料D-8, D-20の場合は、バックプレッシャーの大きい場合ほど大きな間げき水圧が生じている。特にD-8の試料でバックプレッシャー1.0kgf/cm²の試験結果をみると、圧縮開始直後の間げき水圧の立ち上がりの悪い点や、軸差応力のピークおよび残留強度が他の2つの結果に比べ大きくなっていることから試料の飽和度が不十分な影響が表れていると考えられる。しかし、D-8のバックプレッシャー3.0kgf/cm², 6.0kgf/cm², D

静的せん断特性

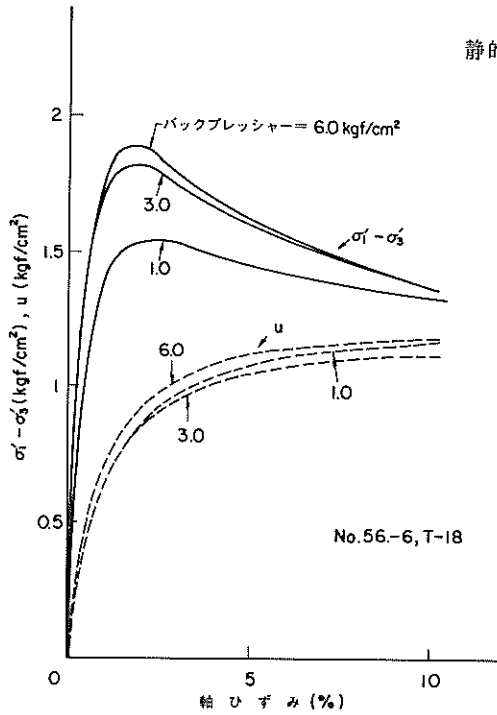


図-3(a) 軸差応力, 過剰間げき水圧と軸ひずみの関係
(56-6・T-18)

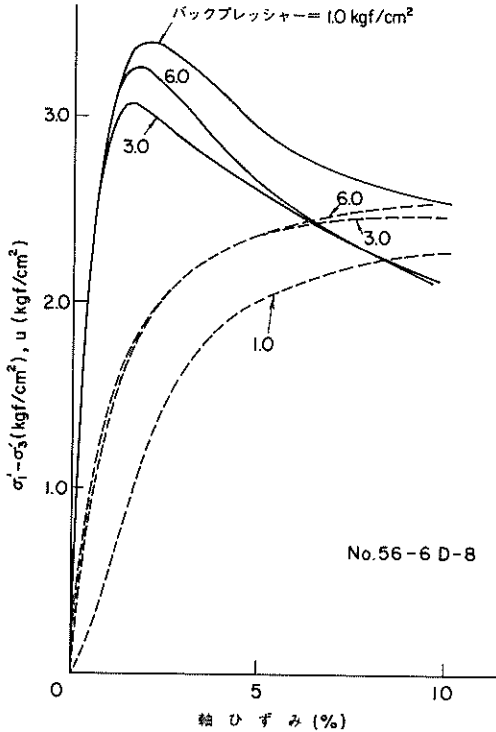


図-3(b) 軸差応力, 過剰間げき水圧と軸ひずみの関係
(56-6・D-8)

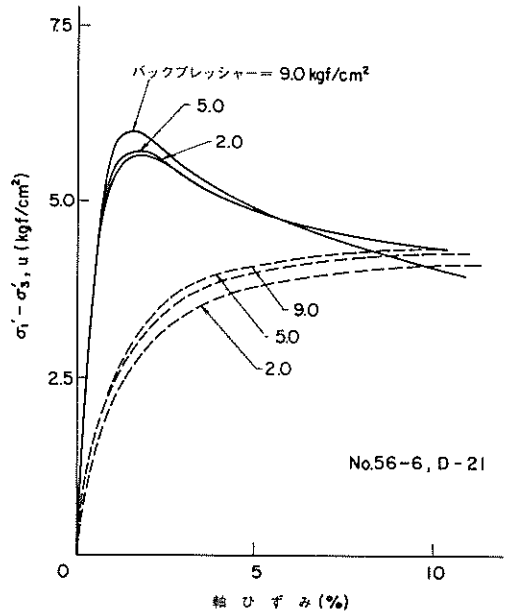


図-3(c) 軸差応力, 過剰間げき水圧と軸ひずみの関係
(56-6・D-21)

-20のバックプレッシャー 5.0 kgf/cm², 9.0 kgf/cm²の試験結果にはそれほど顕著な差が無く, 今回の試験条件ではバックプレッシャーとしては, 試料の静水圧 (D-8の場合 6.0 kgf/cm², D-20では 9.0 kgf/cm²) の 1/2 程度で十分なようである。

以上の予備実験の結果をまとめると, 大水深の海底地盤から採取した試料では, 間げき水圧が 0.75 kgf/cm² 以上になると B 係数が 0.9 ~ 1.0 に達する。また, 三軸 C I U 試験結果からバックプレッシャーの影響をみると, 原位置の静水圧の 2分の1 以上のバックプレッシャーがあれば結果に有為な差がみられない。以下に行った三軸 C I U 試験では, 各試料について原位置の静水圧の 2分の1 以上のバックプレッシャーを負荷するようにした。ただし, 10 kgf/cm² 以上のバックプレッシャーを負荷できないという試験機上の制約のためやむを得ず静水圧の 2分の1 以下になったものもあった。

2.2 試料および試験方法

表-2 に三軸 C I U 試験を行った粘土試料の深度, 上層区分, おもな物理特性をまとめて示した。表の中で 56-8・T-4, 56-8・T-10 が沖積粘土であり, その他は洪積粘土である。表の示すように用いた粘土の塑性指数は, 22.4 ~ 71.0 の範囲に分布している。また砂分含有率は 56-1・D-2 で 18.0%, 57-16・D-10 で 27% で

表-2 C I U試験に用いた試料の深度と土層区分, および物理特性

試料名	海底面からの深度 (m)	土層区分	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p (%)	自然含水比 w_n (%)	砂分含有率 (%)	推定土かぶり圧 p_0 (kgf/cm ²)	圧密降伏圧力 p_c (kgf/cm ²)
56-8 T-4	~ 4.50 5.30	Ac	103.0	34.5	68.5	108.5	1.0	0.23	0.30
56-8 T-10	~ 13.50 14.30	Ac	83.9	27.3	56.6	78.6	2.0	0.70	0.70
56-1 D-2	~ 16.00 16.80	Ma 12	60.4	21.5	38.9	57.2	18.0	1.40	3.30
56-8 D-4	~ 38.00 38.80	Ma 12	103.0	37.5	65.5	80.2	0	2.9	3.3
57-1 D-6	~ 33.50 34.30	Ma 12	97.8	31.7	66.1	85.6	1.0	2.3	3.1
57-1 D-16	~ 59.50 60.30	Ma 9	89.3	30.6	58.7	58.0	0.3	4.3	6.9
57-16 D-4	~ 39.50 40.30	Ma 12	109.9	38.9	71.0	89.0	1.0	2.8	3.2
57-16 D-10	~ 51.50 52.30	Doc 1	79.1	27.6	51.5	49.1	27.0	3.6	5.6
57-30 T-41	~ 56.20 57.10	D t c	77.5	26.2	51.3	53.9	1.0	3.9	4.5
57-30 D-26	~ 76.00 76.90	Ma 12	84.2	30.5	53.7	55.1	0.6	5.1	6.0
57-30 D-42	~ 104.20 105.10	Doc 1	77.0	30.6	46.4	50.4	1.1	7.3	8.3
57-30 T-79	~ 147.10 148.10	—	92.0	28.7	63.3	48.7	0.8	10.9	13.3
57-30 D-106	~ 190.60 191.50	—	89.7	32.4	57.3	50.8	0.8	14.1	18.1
56-9 T-182	~ 203.60 204.60	Ma 3	91.0	31.7	59.3	39.5	2.8	14.9	21.8
56-9 D-53	~ 294.20 295.10	—	69.1	29.5	39.6	28.1	1.2	22.3	32.5
56-9 D-86	~ 318.90 319.80	—	54.8	32.4	22.4	31.1	0.7	26.2	38.5
56-9 D-92	~ 324.40 325.30	—	61.6	24.3	37.3	21.5	2.9	26.2	38.5

あるほかはすべて3%以下である。今回の試験では、圧密圧力、バックプレッシャーが通常の三軸試験に比べてかなり大きくなるものも多いので、そのような試験は中圧三軸試験機(写真-1)、高圧三軸試験機(写真-2)を用いて実施した。中圧三軸試験機、高圧三軸試験機は

セル圧がそれぞれ10~30 kgf/cm²、30~110 kgf/cm²の試験を対象としている。

試験に用いた試料はいずれも固定ピストン付きシウォールサンプラーまたはデニソン型サンプラーによって採取された乱さない試料である。試料はサンプラーから

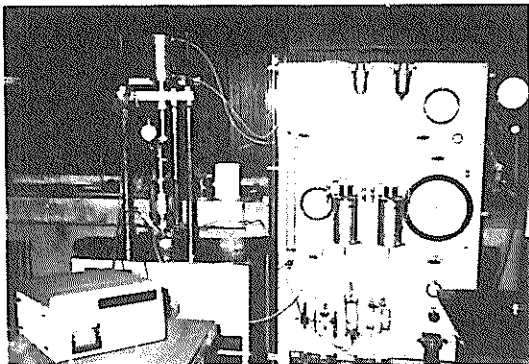


写真-1 中圧三軸試験機

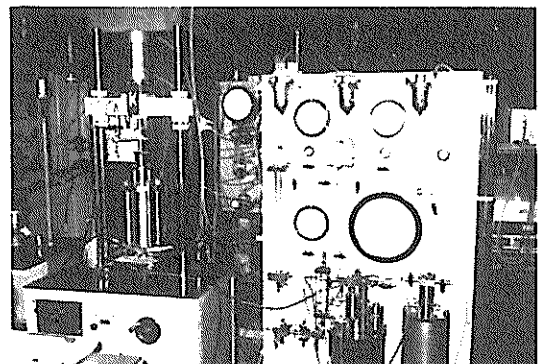


写真-2 高圧三軸試験機

押出した後直径3.5 cm, 高さ8.0 cmに注意深く成形し, 三軸試験機にセットされている。各試料とも24時間等方圧密した後, 0.03%/minのひずみ速度で非排水圧縮した。

2.3 試験結果

図-4(a)~(d)に各試料の有効圧密圧力と最大軸差応力の関係を示した。図-4(a)は沖積粘土56-8・T-4, T-10の結果であり, 図-4(b)~(d)に洪積粘土の結果を深度別にまとめている。図をみると, 圧密圧力が大きくなり試料が正規圧密状態になると最大軸差応力と圧密圧力の比は一定になる。正規圧密時の最大軸差応力の2分の1として求めた非排水せん断強度 c_u と, 有効圧密圧力 σ_c' との比 c_u/σ_c' (強度増加率) を求めると, 沖積粘土の場合0.36, 洪積粘土ではほぼ0.30~0.32であり, 洪積粘土の c_u/σ_c' が, 10~15%小さくなっている。なお, 図-4(d)では, 粘土の圧密降伏応力 p_c に比べ圧密圧力の

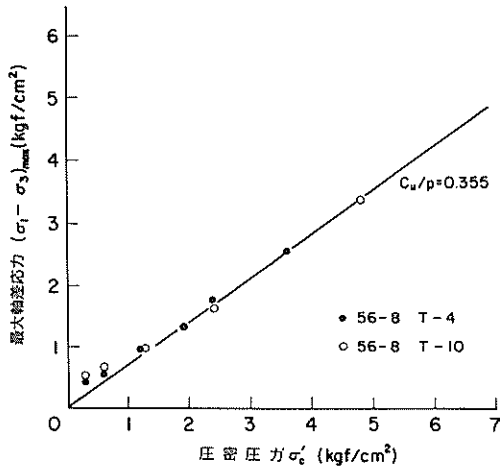


図-4(a) 最大軸差応力と圧密圧力の関係
(沖積粘土)

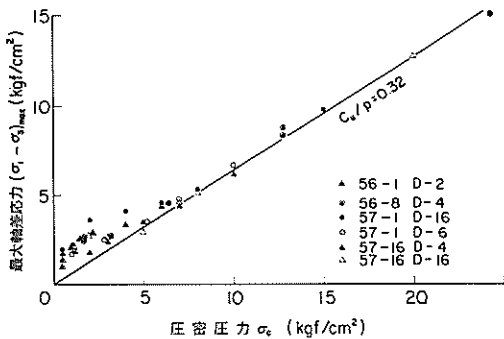


図-4(b) 最大軸差応力と圧密圧力の関係
(洪積粘土: 深度16m~60m)

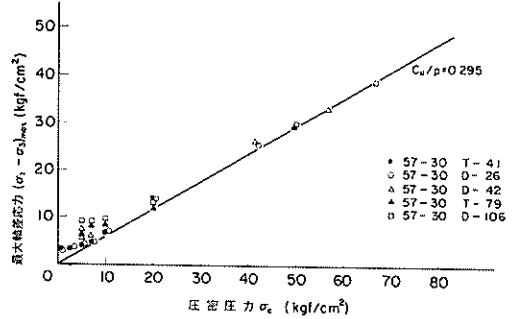


図-4(c) 最大軸差応力と圧密圧力の関係
(洪積粘土: 深度60m~190m)

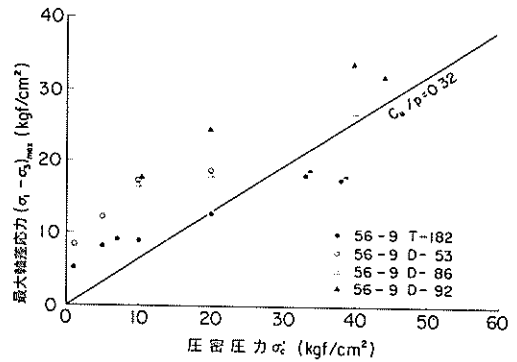


図-4(d) 最大軸差応力と圧密圧力の関係
(洪積粘土: 深度200m~330m)

小さいものが多く正規圧密での c_u/σ_c' を示す点が少なくなっている。

図-5(a)~(d)は, 各圧密圧力での c_u/σ_c' と圧密降伏圧力 p_c で正規化した有効圧密圧力 σ_c'/p_c との関係を示したものである。 σ_c'/p_c は, 通常 p_c/σ_c' で定義される過圧密

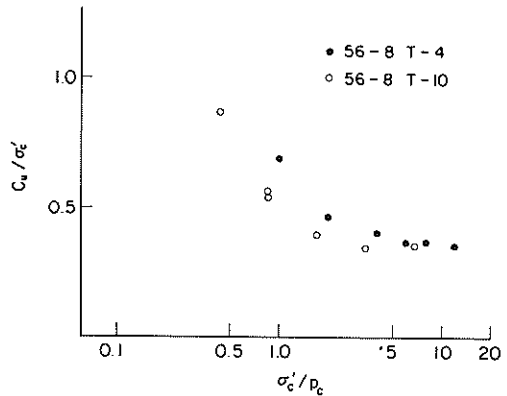


図-5(a) 強度増加率と正規化した圧密圧力の関係
(沖積粘土)

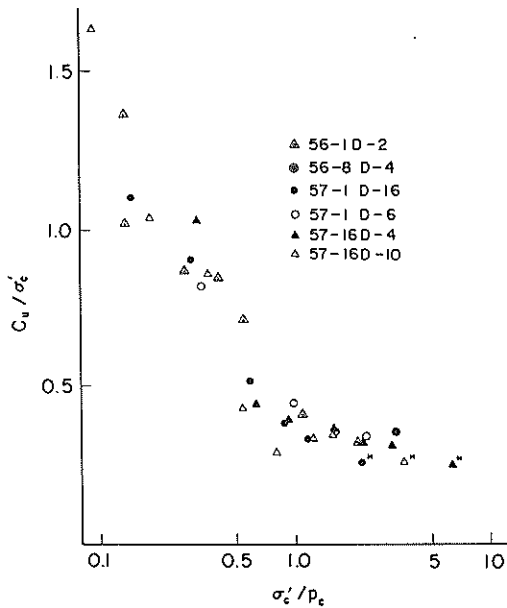


図-5(b) 強度増加率と正規化した圧密圧力の関係
(洪積粘土：深度16m～60m)

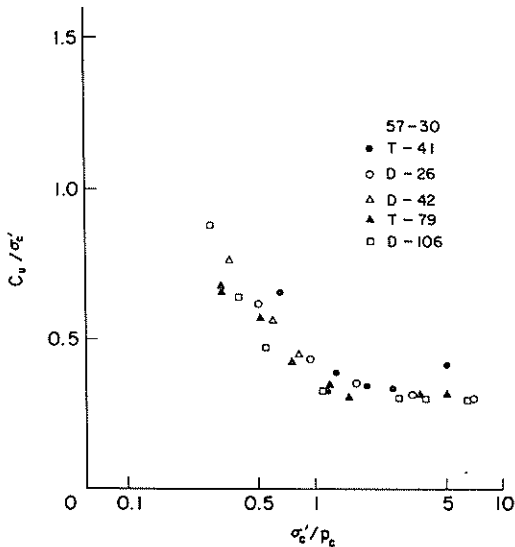


図-5(c) 強度増加率と正規化した圧密圧力の関係
(洪積粘土：深度60m～190m)

比の逆数となり、 σ'_c/p_c が1未満のとき試料は過圧密状態、 σ'_c/p_c が1以上のときは正規圧密状態である。ここで p_c は標準圧密試験から求められた値を用いているが、今回の洪積粘土の p_c を標準圧密試験から求めるのは必ずしも適切でないことが指摘されており²⁾、ここで用いた p_c も多少の誤差を含んでいる可能性がある点に注意

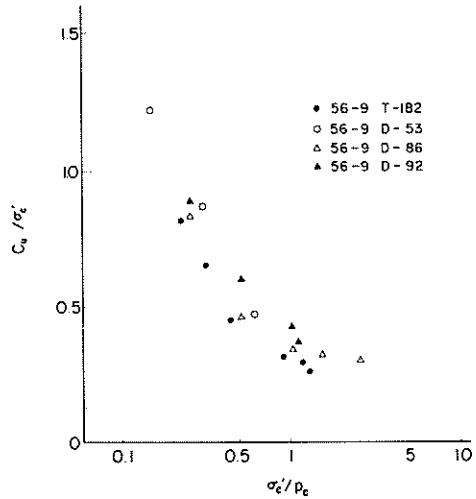


図-5(d) 強度増加率と正規化した圧密圧力の関係
(洪積粘土：深度200m～330m)

する必要がある。

図-5をみると、 c_u/σ'_c は σ'_c/p_c が1以下の場合 σ'_c/p_c が大きくなるとともに低下し、 σ'_c/p_c が1以上すなわち正規圧密領域ではほぼ一定ないわずかに σ'_c/p_c とともに低下する傾向を示す。図-6は図-5(a)～(d)の結果を、沖積粘土と洪積粘土とに大別してまとめたものである。図をみると15種類の洪積粘土における c_u/σ'_c と σ'_c/p_c の関係は粘土の深度や塑性指数などの違いによらず

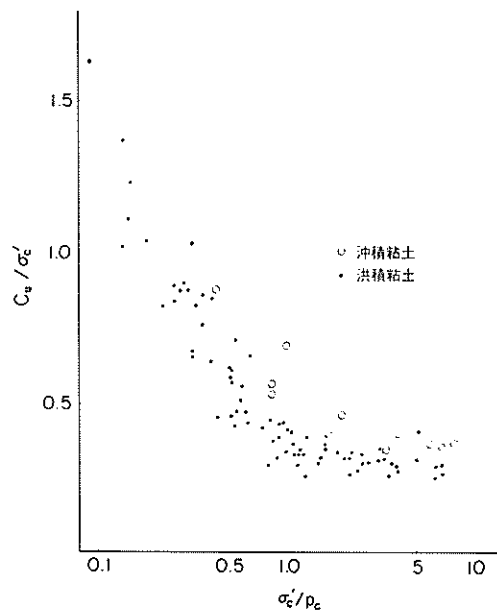


図-6 強度増加率と正規化した圧密圧力の関係
(全試料)

静的せん断特性

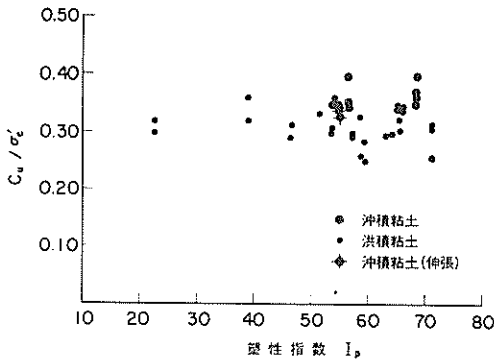


図-7 正規圧密領域における強度増加率と塑性指数の関係

ほぼ一様の傾向を示している。また、沖積粘土と比較した場合は、全体に洪積粘土の c_u / σ'_c の方が小さくなっている。

図-7は、各試料の正規圧密領域 ($\sigma'_c / p_c > 1$) における強度増加率 c_u / σ'_c と塑性指数 I_p との関係を示している。図のように今回用いた試料に関しては c_u / σ'_c は I_p

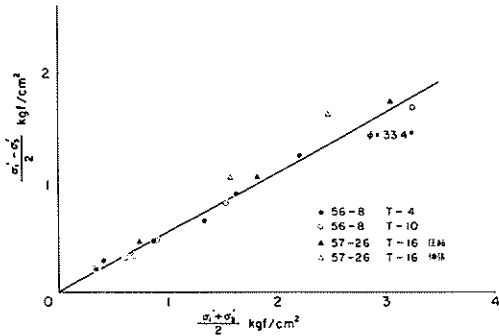


図-8(a) 最大軸差応力時の軸差応力と平均主応力の関係 (沖積粘土)

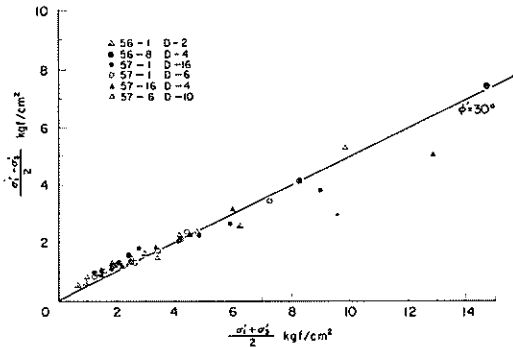


図-8(b) 最大軸差応力時の軸差応力と平均主応力の関係 (沖積粘土：深度16m～60m)

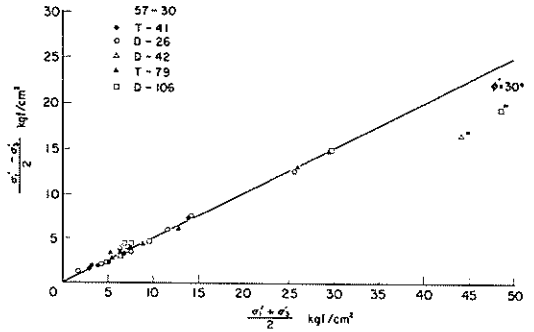


図-8(c) 最大軸差応力時の軸差応力と平均主応力の関係 (洪積粘土：深度60m～190m)

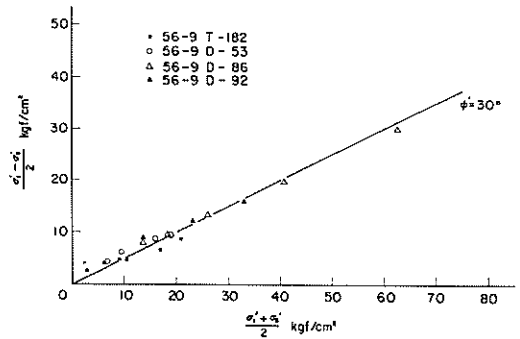


図-8(d) 最大軸差応力時の軸差応力と平均主応力の関係 (洪積粘土：深度200m～330m)

と明らかな関連がみられず、ほぼ一様にばらついている。土田ら³⁾は、わが国の港湾地域におけるいくつかの乱さない沖積粘土の正規圧密時の c_u / σ'_c について調べ、 c_u / σ'_c は I_p とあまり関連が無くほぼ 0.34～0.42 の範囲にあるとしている。また、亀井ら⁴⁾は、 I_p が 12.6～55.8 の範囲にある7種類の実験用海成粘土を用いた三軸 C I U 試験の結果から I_p が 20 以上では c_u / σ'_c は I_p に関連せず 0.36～0.62 の範囲にあることを報告している。図-7をみる

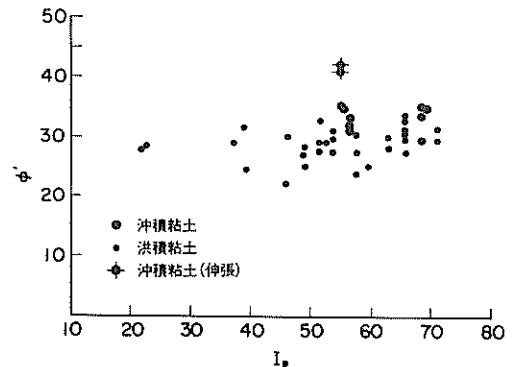


図-9 正規圧密時の内部摩擦角と塑性指数の関係

と、沖積粘土については土田らや亀井らの結果とほぼ適合しているが洪積粘土の c_u/σ_c' は、これらに比べ全体に小さい。

図-8(a)~(d)は、軸差応力最大時における有効応力に関するモールの円の頂点をプロットしたものである。これらのプロットを通る直線の傾きを $\tan \theta$ 、切片を b とすると、有効応力に関するせん断抵抗角 ϕ' 、粘着力 c' は次式で求められる。

$$\sin \phi' = \tan \theta \quad c' = b / \cos \phi'$$

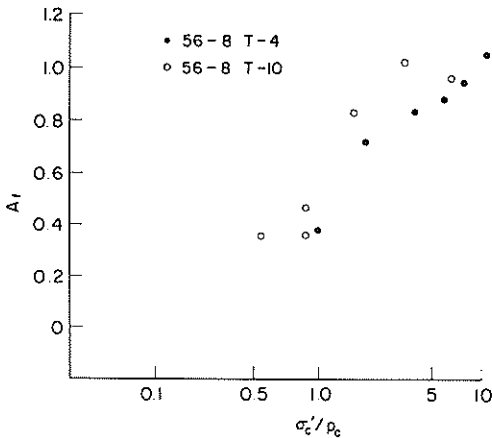


図-10(a) 軸差応力最大時の間げき水圧係数 A_f と正規化した圧密圧力の関係 (沖積粘土)

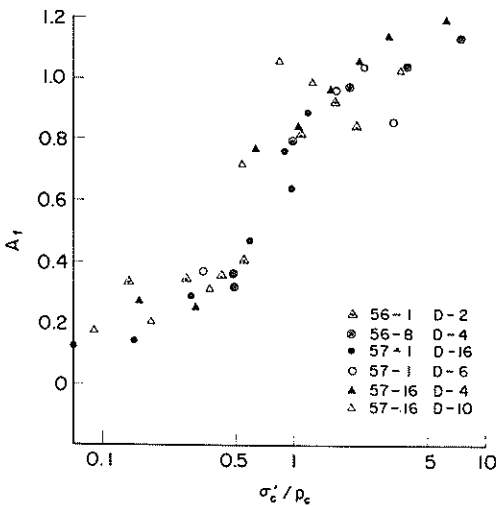


図-10(b) 軸差応力最大時の間げき水圧係数 A_f と正規化した圧密圧力の関係 (洪積粘土：深度16m~60m)

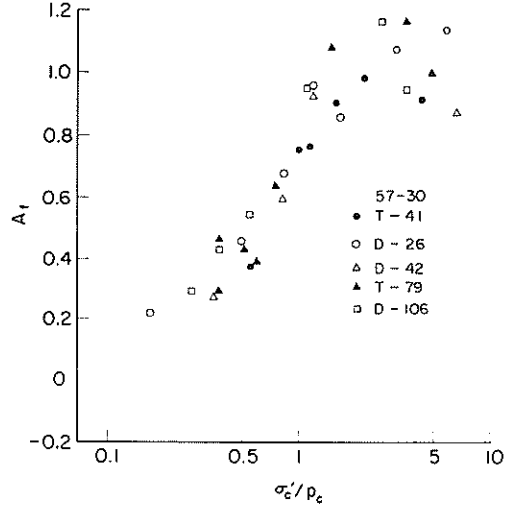


図-10(c) 軸差応力最大時の間げき水圧係数 A_f と正規化した圧密圧力の関係 (洪積粘土：深度60m~190m)

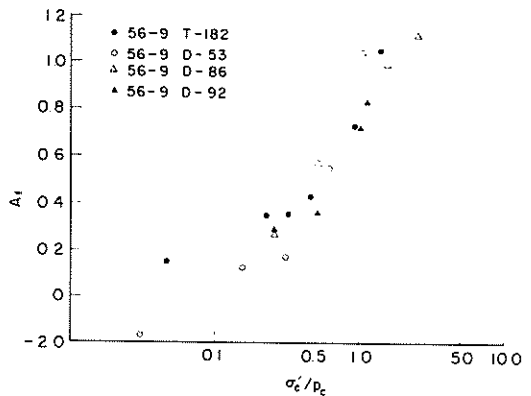


図-10(d) 軸差応力最大時の間げき水圧係数 A_f と正規化した圧密圧力の関係 (洪積粘土：深度200m~330m)

一般に正規圧密粘土では $c' = 0$ となり、過圧密粘土では $c' > 0$ となるとされているが、図-8(a)~(d)も同様の結果となっている。また、 $c' = 0$ として正規圧密時の ϕ' を求めると、沖積粘土で $30 \sim 35^\circ$ 、洪積粘土では $24 \sim 34^\circ$ となり洪積粘土の方が小さい。図-9は、正規圧密時の ϕ' と I_p の関係を示したものであるが、 ϕ' も c_u/σ_c' と同様に I_p による有為な差がみられなかった。

図-10(a)~(d)は、軸差応力最大時の間げき水圧係数 A_f と σ'_c/p_c との関係である。ここで間げき水圧係数 A_f は次式で定義されている。

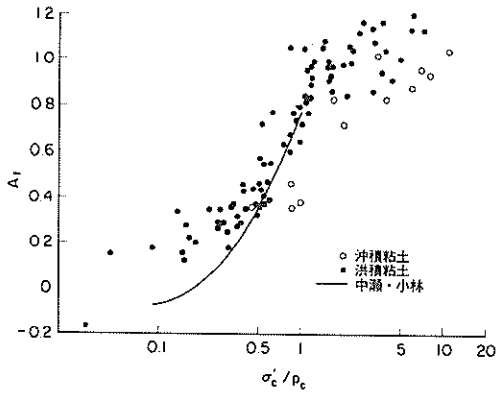


図-11 軸差応力最大時の間げき水圧係数 A_f と正規化した圧密圧力の関係 (全試料)

$$A_f = \Delta u_f / \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$$

$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$, Δu_f は、それぞれ最大軸差応力とそのときの過剰間げき水圧

一般に A_f は過圧密比(ここでは σ'_c / p_c の逆数)の増加とともに減少するとされている。⁵⁾ 図-11は、図-10の結果を沖積粘土と洪積粘土とに大別してまとめたものである。図をみると、全体に洪積粘土の A_f が沖積粘土の A_f よりも大きくなっている。中瀬ら⁵⁾は、名古屋港、千葉港の沖積地盤から採取した乱さない試料を三軸試験機で圧密および膨張させて過圧密粘土とし、過圧密比と A_f との関係を調べており、図中の実線は中瀬らのデータに基づいて新しく引いたものである。今回の試験は原位置から採取して一たん膨張した試料を三軸室内で再度圧密し

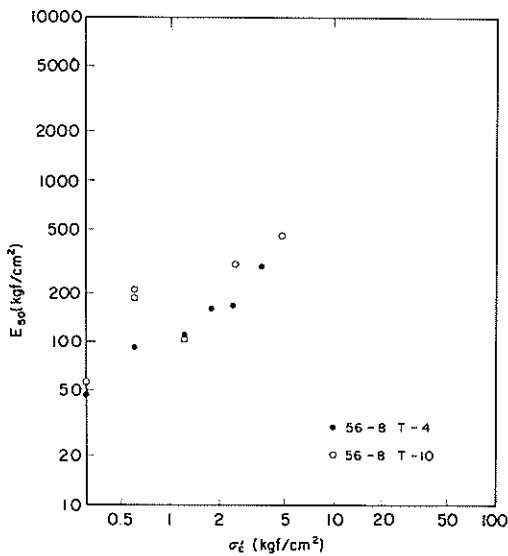


図-12(a) 圧密圧力と E_{50} の関係

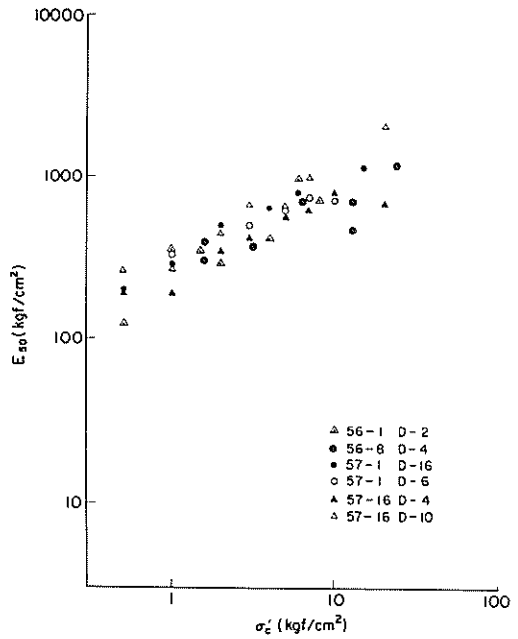


図-12(b) 圧密圧力と E_{50} の関係

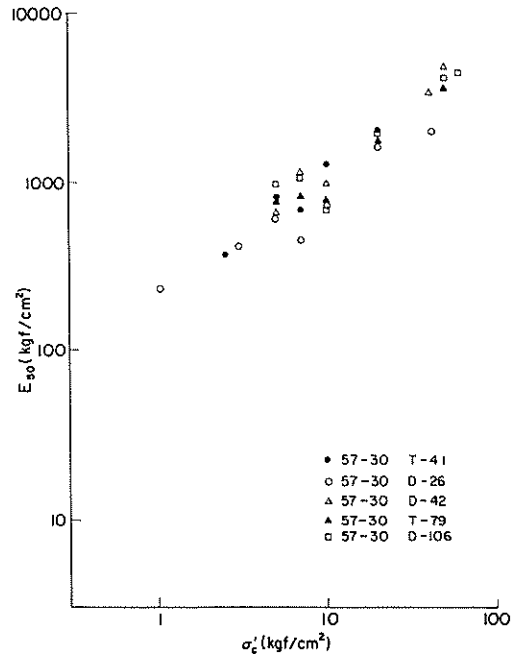


図-12(c) 圧密圧力と E_{50} の関係

たものであり、中瀬らの実験条件と少し異なっている点に注意する必要があるが、中瀬らの結果と比較すると今回の試料では σ'_c / p_c が小さい場合すなわち過圧密比が大きい場合の A_f が大きくなる傾向を示している。また、

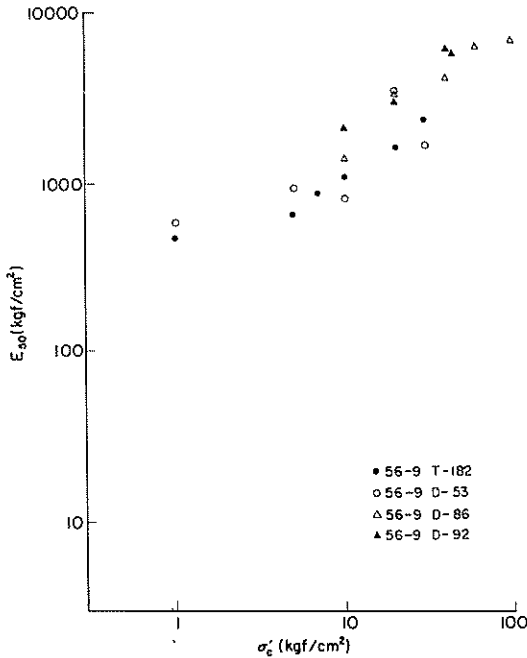


図-12(d) 圧密圧力と E_{50} の関係

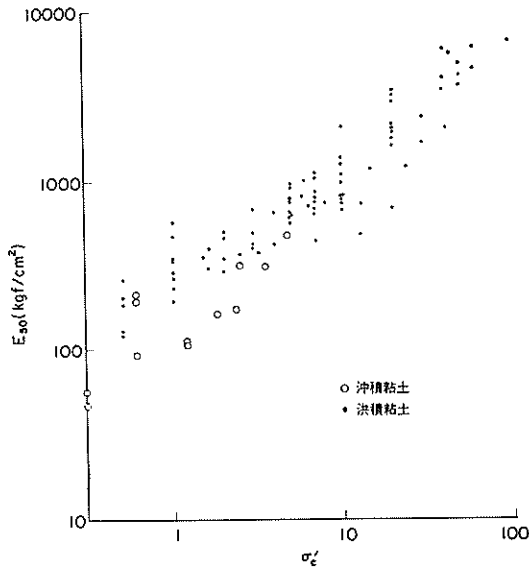


図-13 圧密圧力と E_{50} の関係 (全試料)

正規圧密時の A_f はほぼ 0.8 ~ 1.2 の範囲にあり港湾地域の沖積粘土についての土田ら³⁾の結果とよく適合している。

一般に土の圧縮試験における応力~ひずみ関係の初期傾度を表す指標としては正割係数 E_{50} が用いられる。

図-12(a)~(d)は、有効圧密圧力 σ'_c と正割係数 E_{50} の関

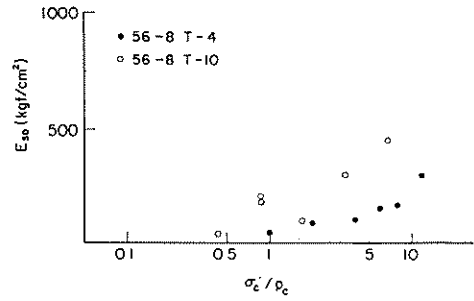


図-14(a) 正割係数 E_{50} と正規化した圧密圧力の関係

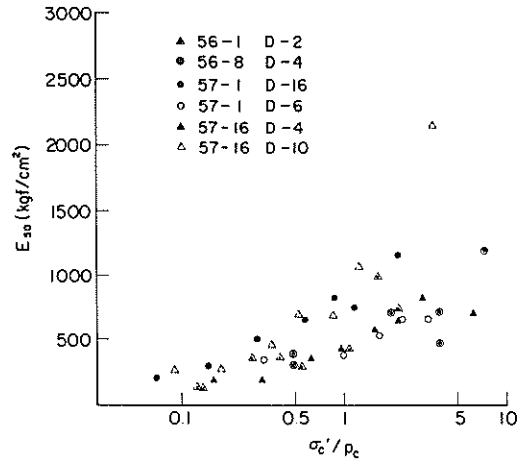


図-14(b) 正割係数 E_{50} と正規化した圧密圧力の関係

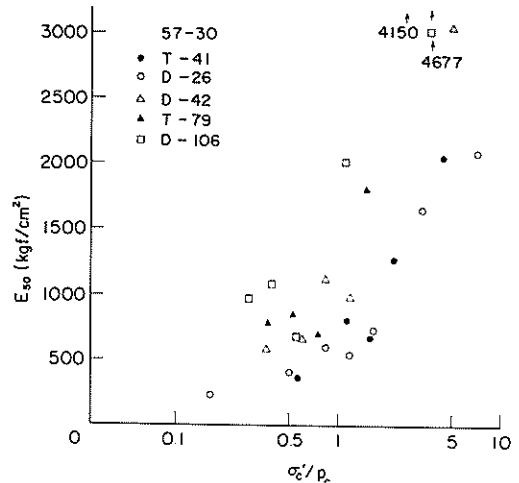


図-14(c) 正割係数 E_{50} と正規化した圧密圧力の関係

係を示したものである。 E_{50} は σ'_c とともに増加するが、両対数グラフ上で E_{50} と σ'_c の傾きを求めると 0.66 ~ 1.0 の範囲になる。図-13は、図-12の結果を沖積粘土と洪積粘土とに大別して示したものである。図をみると沖積

静的せん断特性

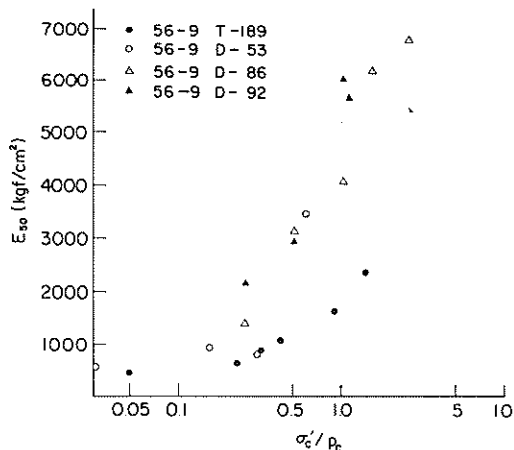


図-14(d) 正割係数 E_{50} と正規化した圧密圧力の関係

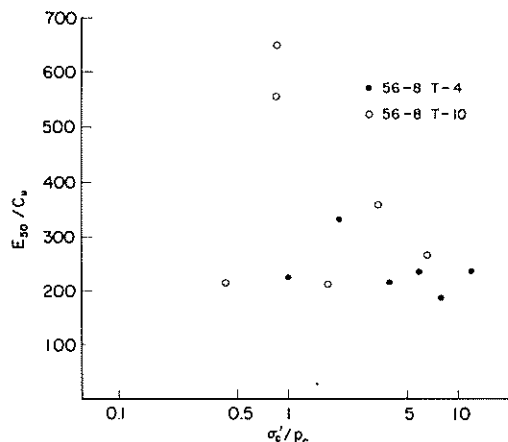


図-15(a) 正割係数と非排水強度の比 E_{50}/C_u と正規化した圧密圧力の関係 (沖積粘土)

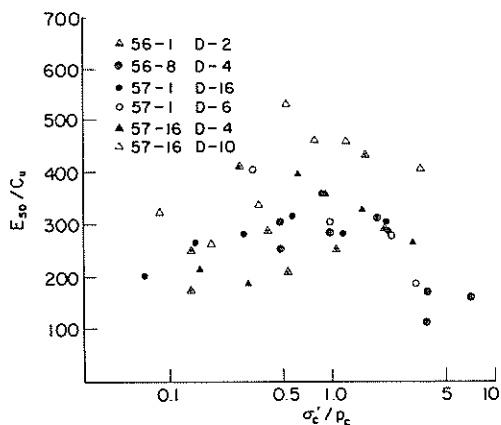


図-15(b) 正割係数と非排水強度の比 E_{50}/C_u と正規化した圧密圧力の関係 (洪積粘土：深度16m～60m)

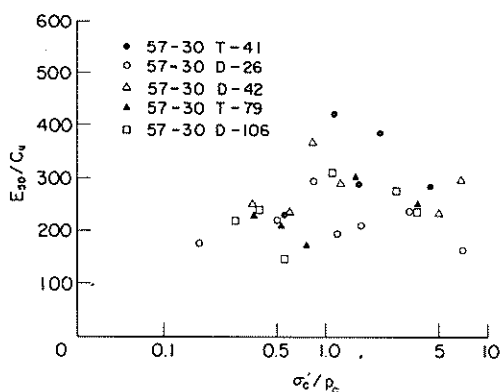


図-15(c) 正割係数と非排水強度の比 E_{50}/C_u と正規化した圧密圧力の関係 (洪積粘土：深度60m～190m)

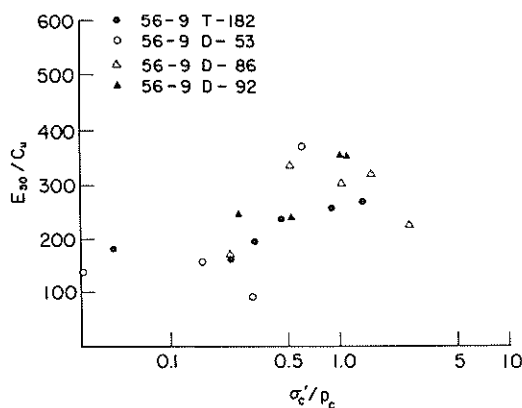


図-15(d) 正割係数と非排水強度の比 E_{50}/C_u と正規化した圧密圧力関係 (洪積粘土：深度200m～330m)

粘土の E_{50} は同じ圧密圧力の洪積粘土の E_{50} に比べ小さくなっているが、これは圧密履歴の違いによるものである。正規圧密時の $E_{50} \sim \sigma'_c$ 関係は沖積粘土、洪積粘土ともほぼ一致している。

図-14(a)～(d)は、 E_{50} と p_c で正規化した有効圧密圧力 σ'_c / p_c の関係を示している。図をみると σ'_c / p_c が1になる前後で E_{50} のばらつきが大きくなっている。

図-15(a)～(d)は、 E_{50}/c_u と σ'_c / p_c との関係を示したものである。中瀬ら⁵⁾の報告によると E_{50}/c_u は過圧密比2付近で極大となり、その後過圧密比の増大とともに減少する。また、正規圧密状態の E_{50}/c_u は圧密圧力の増大とともにやや小さくなる傾向があるとされている。図-16は、図-15の結果をまとめているが、図中の実線は中瀬らのデータの平均を示している。図をみると E_{50}/c_u は σ'_c / p_c が0.5～1.0のとき、つまり過圧密比1～2のときに

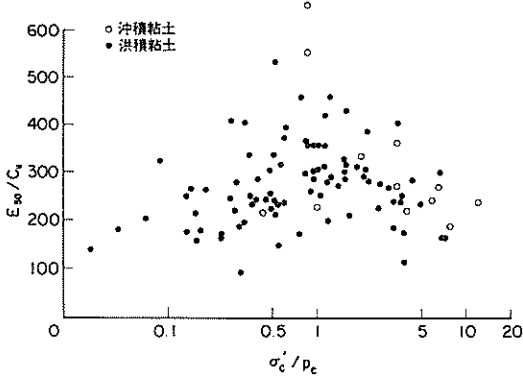


図-16 正割係数と非排水強度の比と正規化した圧密圧力の関係(全試料)

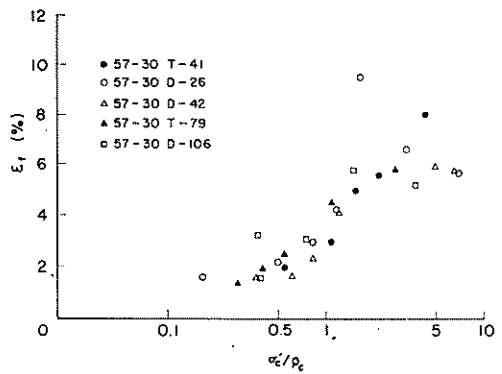


図-17(c) 破壊ひずみと正規化した圧密圧力の関係
(洪積粘土: 深度60m~190m)

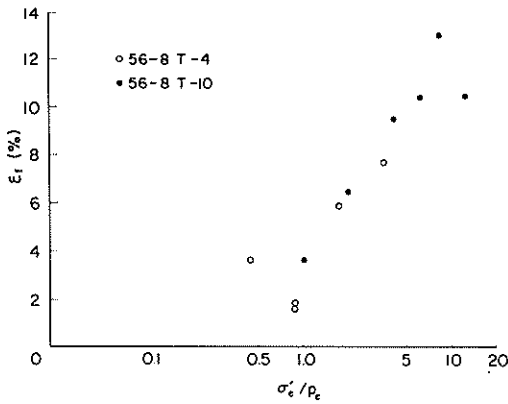


図-17(a) 破壊ひずみと正規化した圧密圧力の関係
(沖積粘土)

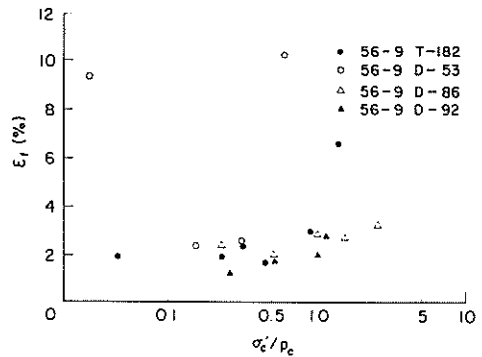


図-17(d) 破壊ひずみと正規化した圧密圧力の関係
(洪積粘土: 深度200m~330m)

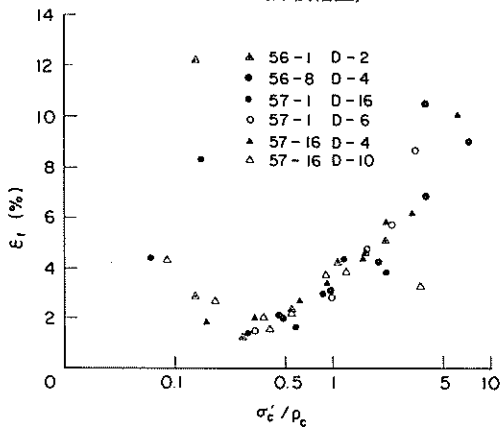


図-17(b) 破壊ひずみと正規化した圧密圧力の関係
(洪積粘土: 深度16m~60m)

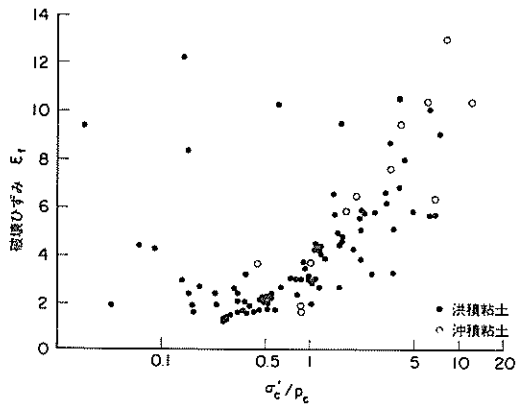


図-18 破壊ひずみと正規化した圧密圧力の関係

最も大きく、 $\sigma'_c/p_c > 1$ の正規圧密時では圧密圧力とともに減少する傾向を示している。これらの傾向は、中瀬らの結果と、ほぼ同様であるが、過圧密比3以上 (σ'_c/p_c

p_c では0.3以下)のデータを見ると中瀬らの結果では E_{50}/c_u が過圧密比とともに減少し続けるのに対して今回の結果では E_{50}/c_u が130以下には減少しなかった。また、全体として E_{50}/c_u は他の諸パラメータに比べてばらつきが大きく、洪積粘土では100~500の範囲にある。

図-17(a)~(d)は、軸差応力最大時の破壊ひずみ ϵ_f と

σ'_c/b_c の関係を示している。図-18は、これらをまとめてプロットしたものである。図をみると、 ϵ_f と σ'_c/b_c の関係は試料によらずかなり、一様な傾向を示している。 σ'_c/b_c が 0.2 ~ 0.9 (過圧密比 1.1 ~ 5) の場合は ϵ_f が 1.0 ~ 3.5% の間に集中し、正規圧密時では ϵ_f が圧密圧力とともに増加する。

2.4 まとめ

大深度の海底地盤から採取した洪積粘土をおもな対象とした一連の三軸 C I U 試験の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 洪積粘土の正規圧密領域における強度増加率 c_u/σ'_c は塑性指数 I_p と関連が無く、0.30 を中心に 0.26 ~ 0.34 の範囲にばらついている。また、有効応力に関するせん断抵抗角 ϕ' も I_p との関連は無く 28° ~ 32° の範囲にある。
- 2) 15種類の洪積粘土の c_u/σ'_c 、破壊時の間げき水圧係数 A_f 、破壊ひずみ ϵ_f と、圧密降伏圧力 b_c で正規化した有効圧密圧力 σ'_c/b_c との関係のみをみると粘土の種類や塑性による違いがあまりみられない。
- 3) 正割係数 E_{50} と非排水せん断強度 c_u の比 E_{50}/c_u は、試料によって大きくばらつき 100 ~ 500 の範囲にあ

る。また、 E_{50}/c_u は過圧密比 1 ~ 2 で最も大きく正規圧密領域では圧密圧力とともに低下する。

3. 沖積粘土を用いた三軸クリープ試験結果

軟弱な粘土地盤上に建設される空港施設を適切に設計するためには、粘土地盤の沈下や変形を精度よく予測する必要がある。粘土の変形で最も問題となるのは圧密現象である。圧密は粘土が荷重を載荷されたときに発生する過剰間げき水圧の消散に非常に多くの時間がかかるため、変形(沈下)がゆっくりと進行する現象である。一方圧密現象のほかに、粘土骨格自身のレオロジー的な性質により粘土の強度や変形が時間依存性を示すことも明らかになっている。このような時間効果は、圧密試験における二次圧密や、三軸試験におけるひずみ速度の影響となって表れるが、粘土地盤の変形を精度よく解析するためには十分な考慮が必要とされている。

三軸クリープ試験は、粘土の時間効果を調べるための代表的な試験の一つである。既往の研究としては、村山・柴田⁶⁾、栗原⁷⁾らによって実験室内で調整した粘土試料について行われたものがある。また、Vaid⁸⁾や Finn⁹⁾らは、原位置から採取した乱さない試料による一連の三軸

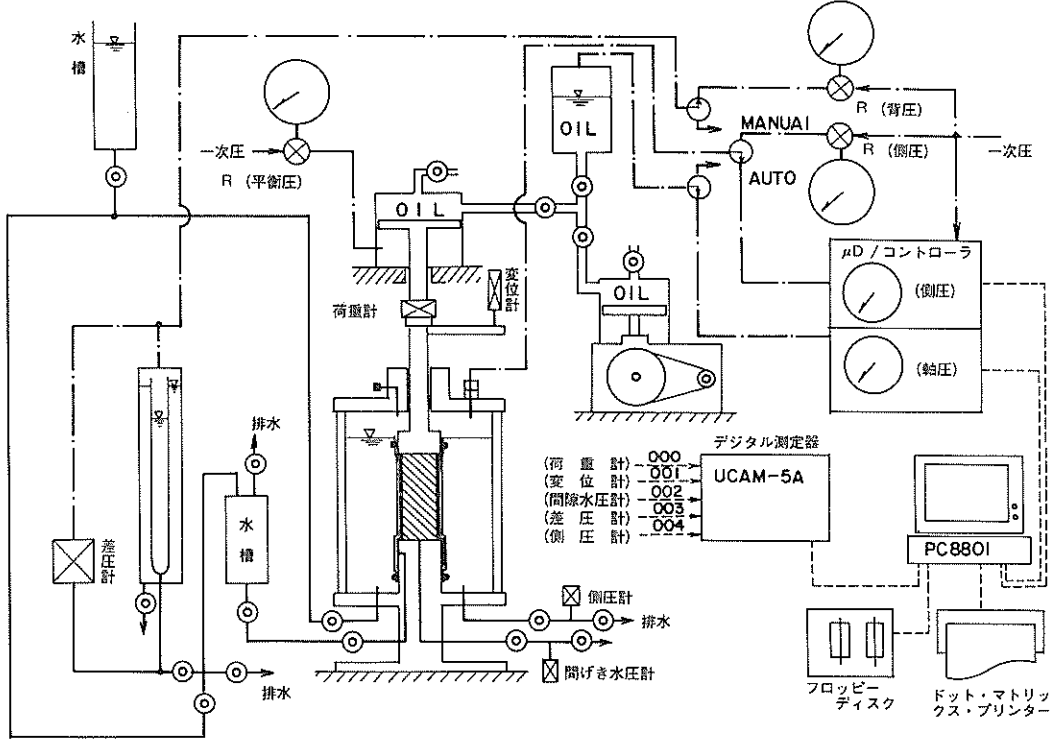


図-19 三軸クリープ試験機の構成

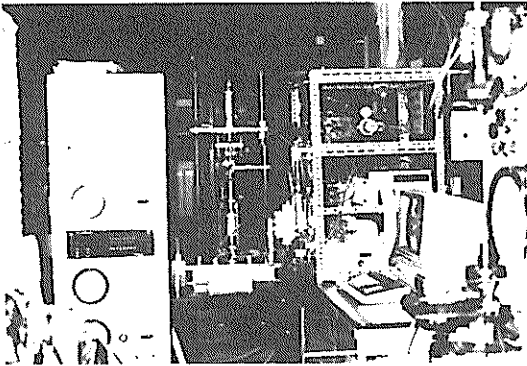


写真-3 三軸クリープ試験機

クリープ試験結果を報告している。ここでは泉南沖の沖積粘土試料を用いて三軸クリープ試験を行い従来の研究結果との比較検討を行った。

3.1 三軸クリープ試験機の概要

写真-3は今回用いた三軸クリープ試験機であり、図-19に試験機の構成を示す。本試験機では、軸力、軸変位、間げき水圧、排水量を自動的に計測している。軸力、軸変位、間げき水圧は、ひずみゲージ式の変換器を用いており、排水量は差圧伝送器によってビュレットの水位をヘッド差として計測している。また、軸力と側圧は、電空変換器によって制御された空気圧をそれぞれ油圧、水圧に変換して載荷している。電空変換器は、電圧またはデジタル信号を空気圧に変換するもので、本試験機ではパーソナルコンピュータから出力する8ビットのデジタル信号によって軸力、側圧を制御している。

試験中の計測、制御はすべてパーソナルコンピュータによって行っているが、図-20(a)~(d)にプログラムの概要を示す。図-20(a)は、圧密中の計測、制御を行うプロ

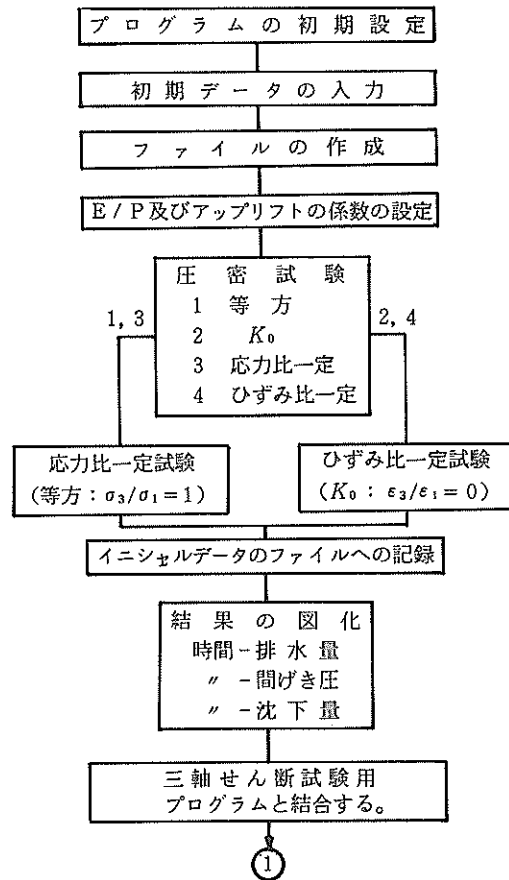


図-20(a) プログラムのフローチャート (圧密過程)

静的せん断特性

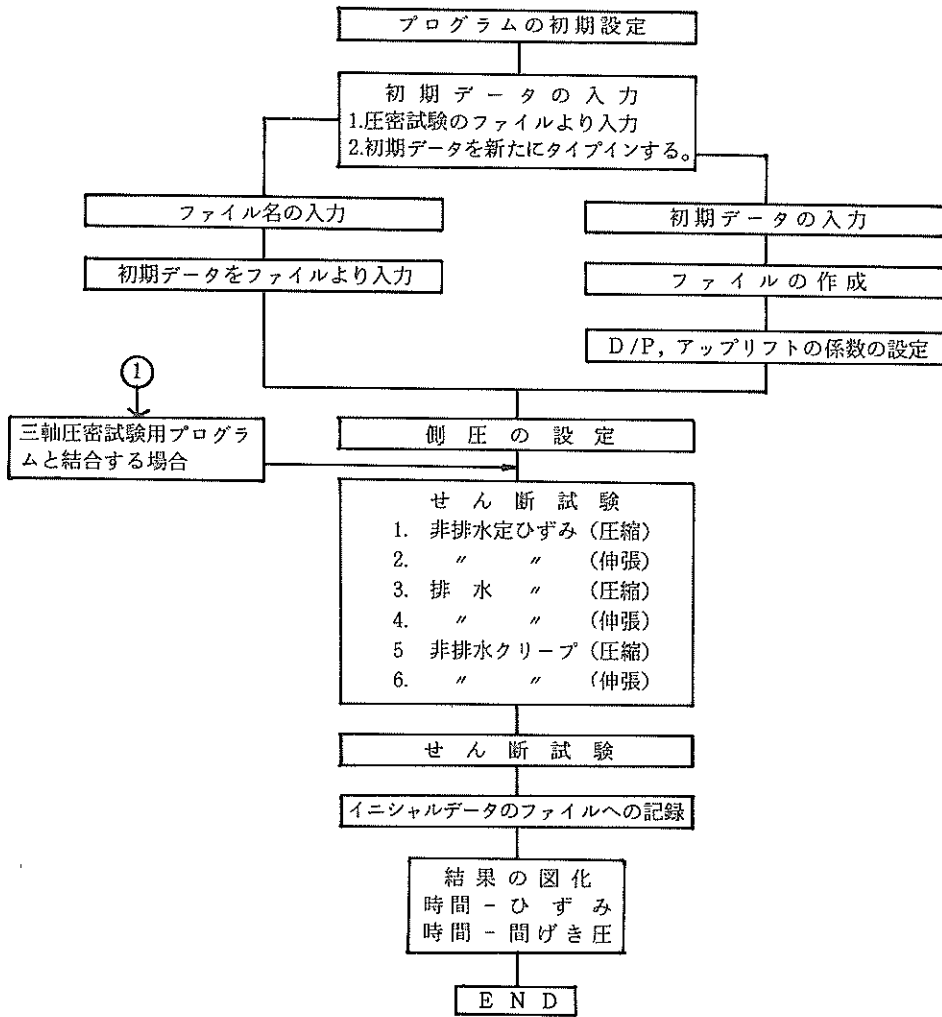


図-20(b) プログラムのフローチャート (せん断過程)

プログラムのフローチャートである。今回の試験では、供試体の圧密を等方圧密、 K_0 圧密の2種類の方法で行っている。等方圧密は、通常の三軸C I U試験で行われる圧密であるが、 K_0 圧密は、供試体が軸方向にのみ一次的に沈下し側方に変形が生じないように圧密するものである。原地盤は、一般に一次元圧密によって形成されていると考えられるので、 K_0 圧密は三軸室内において供試体を原地盤と同様の条件で圧密するために行っている。三軸試験機を用いて K_0 圧密を行う方法はいくつか開発されているが、ここでは最も簡便な方法として供試体内の断面積が変化しないように軸圧と側圧をコントロールして行った。すなわち供試体のセット時の断面積を A_0 とすると

圧密中に供試体の排水量 ΔV と沈下量 Δh が次式の関係満足すれば K_0 条件(断面積一定)は満足されていると考えられる。

$$\Delta V = A_0 \cdot \Delta h$$

本試験機では K_0 圧密中6秒ごとに排水量と沈下量を計測し、常に上式が満足されるように軸圧を制御した。また、 K_0 圧密を行う場合は、供試体中に軸差応力が加わるので圧力の増加速度が大きすぎると供試体内の間げき水圧の消散が不十分なためにせん断破壊が生じてしまうことがある。このため側圧を所定の圧力まで一定の速度でゆっくりと増加させることによって K_0 圧密中の過剰間げ

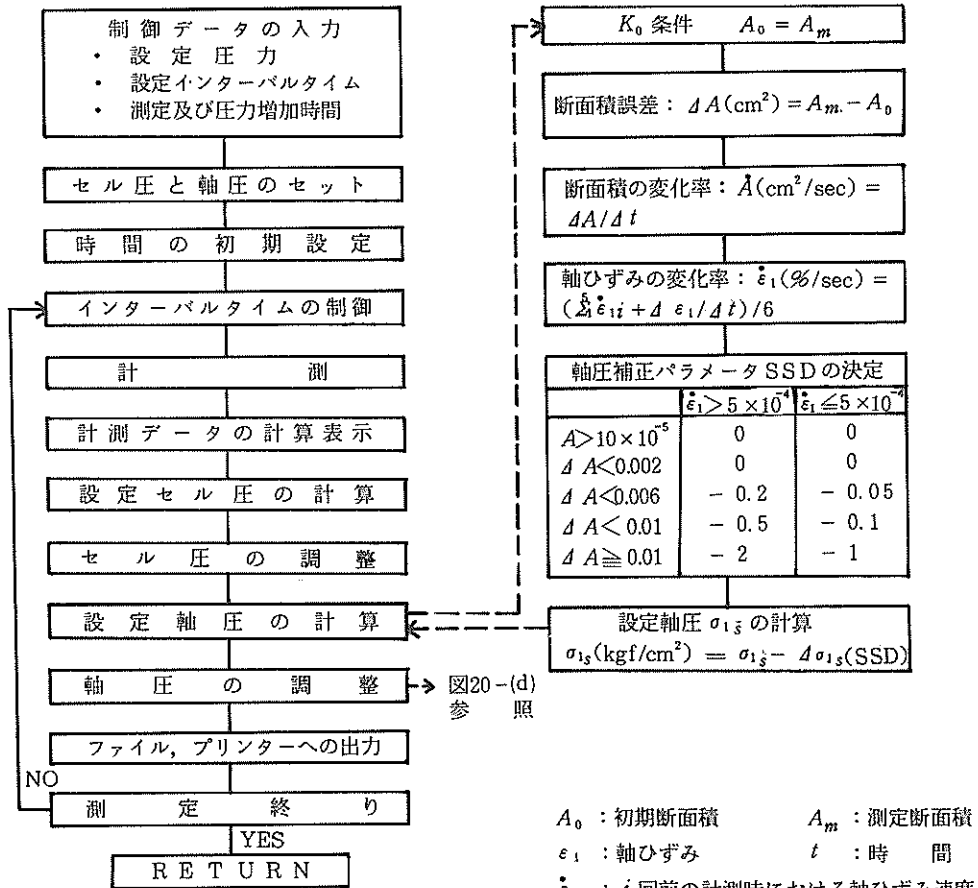


図-20(c) プログラムのフローチャート (K_0 圧密時の圧力制御)

き水圧を十分に小さくしている。図-20(c)は、 K_0 圧密を制御するサブルーチンのフローチャートを示している。圧密終了後に排水バルブを閉じ非排水条件で軸差応力を加え同時に計測を開始する。

クリープ試験は供試体断面に一定の圧縮応力を加え、時間～変形の間係を調べる試験である。供試体断面の圧縮応力を一定にするためには変形の進行とともに逐次軸方向荷重を増加させる必要がある。図-20(b), (d)はそれぞれクリープ試験中のフローチャートおよび断面補正のサブルーチンのフローチャートを示している。図のように、クリープ試験中の断面補正もコンピュータによって自動的に行った。

今回空圧の制御に用いた電空変換器は、8ビットのデジタル信号で制御されるため圧力の最小制御幅は最大圧の0.4%になる。そのためたとえ軸差応力を2.00 kgf

/cm²に設定してクリープ試験を行う場合、実際の軸差応力は1.98～2.02 kgf/cm²の範囲でばらついていた。

3.2 試料

表-3に今回の三軸クリープ試験に用いた粘土試料の深度とおもな物理特性を示す。56-24・T-12の試料では等方圧密後のクリープ試験、56-25・T-8の試料では K_0 圧密後のクリープ試験を行った。また、57-26・T-20の試料を用いて等方圧密後ひずみ速度一定で圧縮試験を行っている。さらに、比較のため東京湾の横浜大黒粘土を用いて一連のクリープ試験を行った。横浜大黒粘土は、実験室内で十分練り返した後0.5 kgf/cm²で再圧密した試料である。

なお、等方圧密の場合圧密時間は24時間とし、 K_0 圧密の場合は、大阪湾粘土で48時間、大黒粘土で24時間としている。

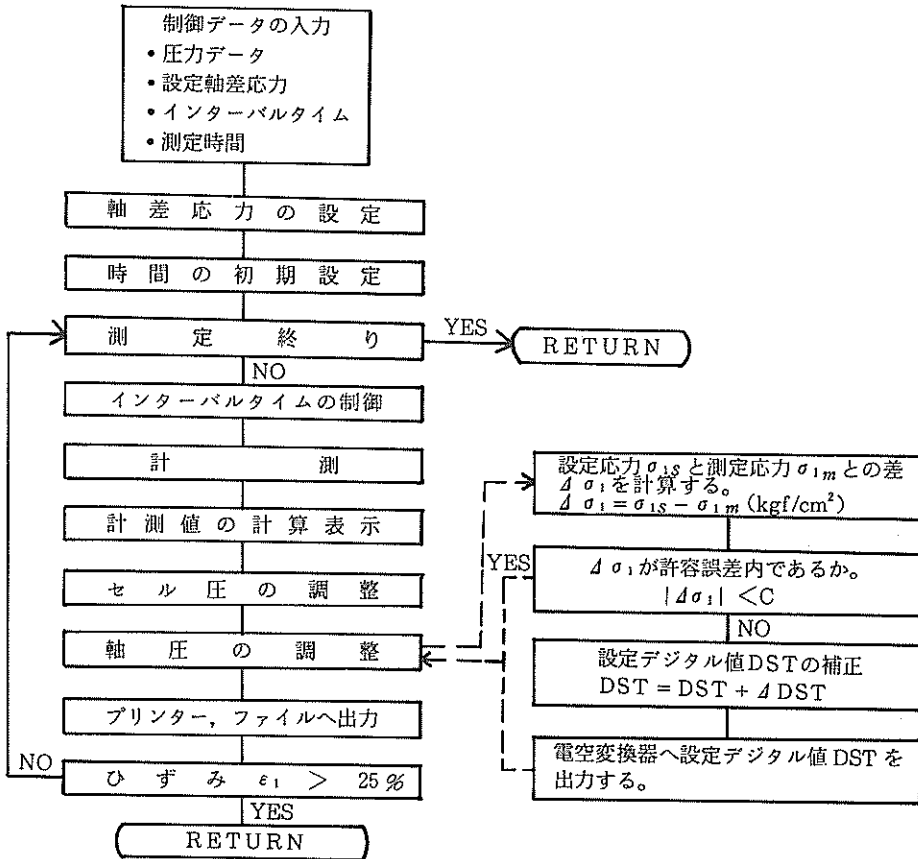


図-20(d) プログラムのフローチャート (クリープ試験中の軸応力制御)

3.3 試験結果

表-4, 5, 6, 7に試験結果の一覧をまとめて示した。

図-21(a)に大阪湾粘土の等方圧密後の三軸クリープ試験における軸ひずみ～時間関係を示す。同じデータを時間を対数目盛にとって示したのが図-21(b)である。また、図-22(a), (b)は同様に間げき水圧～時間関係を示した。図-23(a), (b), 図-24(a), (b)はそれぞれ K_0 圧密後の軸ひずみ～時間関係, 間げき水圧～時間関係である。大黒粘土についての同様の結果を図-25(a), (b), 図-26(a), (b), 図-27(a), (b), 図-28(a), (b)に示す。

一般にクリープ試験による時間～軸ひずみ関係は ① 載荷直後からのひずみ速度減少過程 ② ひずみ速度がほぼ一定 ③ ひずみ速度が増加し破壊に至る過程の3つに分けられ, それぞれ遷移クリープ過程, 定常クリープ過程, 加速クリープ過程とよばれている。図-21, 図-23, 図-25, 図-27をみると, 等方圧密後に比べて K_0 圧密後

のクリープ試験では遷移クリープ過程が短く, 比較的短時間で定常クリープ過程に移る傾向がある。図-29(a)~(d)は, 各クリープ試験でのひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と時間の関係を示したものであるが, 図をみても K_0 圧密後のクリープ試験で遷移クリープ過程が短いことがわかる。また, $\dot{\epsilon}$ が最小になり加速クリープ過程に移る点における軸ひずみをみると等方圧密後の場合は大阪湾粘土で9~13%, 大黒粘土で12~21%であり, K_0 圧密後は大阪湾粘土1~2.5%, 大黒粘土0.5~1%となる。このように定常クリープ過程から加速クリープ過程に移る点でのひずみの大きさが圧密条件によって大きく異なることは, ひずみ速度一定試験において等方圧密の場合と K_0 圧密の場合破壊ひずみがそれぞれ10~20%, 1~3%と異なっていることと対応していると考えられる。

図-22, 24をみると大阪湾粘土ではクリープ試験の間げき水圧が時間とともに上昇し続けている。また, ク

表-3 三軸クリーブ試験に用いた試料の深度とおもな物理特性

試料名	深 度 (m)	水 深 (m)	粒 度 組 成 (%)			液性限界 (%)	塑性限界 (%)	I_p (%)	自然含水比 (%)
			砂	シルト	粘 土				
大黒粘土	—	—	2.1	50.9	47.0	88.6	42.2	46.4	—
56-24 T-12	~ 11.00 ~ 11.80	~ 32.3 ~ 33.1	2	40	58	91.5	29.4	62.1	82.7
56-25 T-8	~ 10.50 ~ 11.30	~ 31.9 ~ 32.7	0	64	36	89.4	36.4	53.0	85.6
57-29 T-20	~ 18.80 ~ 19.60	~ 40.0 ~ 40.8	3	45	52	83.2	29.4	53.8	73.7

表-4 試験結果一覧 (その1: 大阪湾粘土等方圧密)

Test No.	セット時の 含水比 (%)	圧密圧力 σ_c' (kgf/cm ²)	軸差応力 q (kgf/cm ²)	破壊時間 t_f (min)	最小ひずみ 率 $\dot{\epsilon}_{min}$ (%/min)	q/σ_c'	破壊時の 間げき水圧 (kgf/cm ²)
1	86.1	3.00	2.55	6.5	2.2	0.850	2.28
2	90.6	3.00	2.39	200	0.055	0.797	2.36
3	84.7	3.00	2.24	122	0.098	0.747	2.33
4	84.6	3.00	2.04	526	0.023	0.680	2.38
5-1	89.6	3.00	1.84	6690	0.0027	0.613	2.46
5-2	—	3.00	1.84	4155	—	0.613	—
7	96.2	3.00	1.63	1700	—	0.543	—

試料 No. 56-24・T-12

表-5 試験結果一覧 (その2: 大阪湾粘土 K_0 圧密)

Test No.	セット時の 含水比 (%)	軸方向圧密 圧力 (kgf/cm ²)	側方向圧密 圧力 (kgf/cm ²)	軸差応力 q (kgf/cm ²)	破壊時間 t_f (min)	最小ひずみ 率 $\dot{\epsilon}_{min}$ (%/min)	K_0 値	q/σ_c'	破壊時の 間げき水圧 (kgf/cm ²)
1	88.2	3.56	1.50	2.50	80	0.07	0.42	0.702	0.80
2	85.0	3.45	1.50	2.50	12	0.5	0.43	0.725	0.76
3	85.0	3.39	1.50	—	—	—	0.44	—	—
4	87.6	3.35	1.50	2.30	86	0.05	0.45	0.687	0.81
5-1	92.8	3.35	1.50	2.20	82	0.06	0.45	0.657	0.79
5-2	90.2	3.26	1.50	2.10	1135	0.0044	0.46	0.644	0.88
6	85.4	3.20	1.50	2.00	1830	0.0025	0.46	0.625	0.93

試料 No. 56-25・T-8

静的せん断特性

表-6 試験結果一覧(その3:大黒粘土等方圧密)

Test No.	セット時の含水比(%)	圧密圧力 σ'_c (kgf/cm ²)	軸差応力 q (kgf/cm ²)	破壊時間 t_f (min)	最小ひずみ率 $\dot{\epsilon}_{min}$ (%/min)	q/σ'_c	破壊時の間げき水圧 (kgf/cm ²)
2	78.0	2.00	2.10	83	0.12	1.050	1.337
3	76.3	2.00	1.90	888	0.0082	0.950	1.523
4	78.2	2.00	1.80	>2714	0.0020	0.900	1.626
5	78.4	2.00	2.00	229	0.034	1.000	1.507
6	78.4	2.00	1.80	1740	0.0040	0.900	1.420
1	76.1	2.00	2.00	560	0.018	1.000	1.506
9	83.7	2.00	2.00	629	0.0094	1.000	1.572
10-1	83.2	2.00	2.20	12	0.68	1.100	1.460
10-2	—	2.00	1.80	>7290	0.0010	0.900	1.680

表-7 試験結果一覧(その4:大黒粘土 K_0 圧密)

Test No.	セット時の含水比(%)	軸方向圧密圧力 (kgf/cm ²)	側方向圧密圧力 (kgf/cm ²)	軸差応力 q (kgf/cm ²)	破壊時間 t_f (min)	最小ひずみ率 $\dot{\epsilon}_{min}$ (%/min)	K_0 値	q/σ'_c	破壊時の間げき水圧 (kgf/cm ²)
9	78.3	3.80	1.50	2.90	302	0.017	0.39	0.763	0.673
10	78.0	4.06	1.50	2.80	1150	0.0047	0.37	0.690	0.736
11	77.0	4.01	1.50	3.00	74	0.037	0.37	0.748	0.541
12	76.9	3.88	1.50	3.10	55	0.067	0.39	0.799	0.867
14	77.9	3.96	1.50	2.75	725	0.0052	0.38	0.694	0.672
①	—	3.98	1.50	2.70	4080	0.002	0.38	0.678	0.648
②	—	3.94	1.50	2.65	>5600	0.0014	0.38	0.673	—
③	—	3.80	1.50	3.10	53	0.1	0.39	0.816	0.763

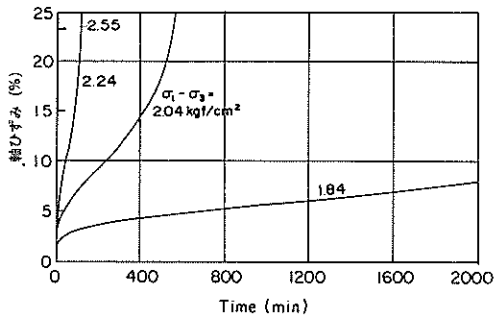


図-21(a) 軸ひずみと時間の関係
(大阪湾粘土, 等方圧密試料)

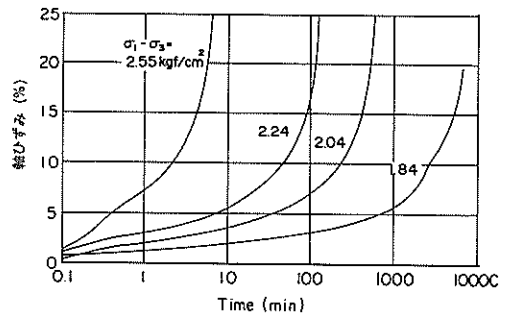


図-21(b) 軸ひずみと時間の関係
(大阪湾粘土, 等方圧密試料)

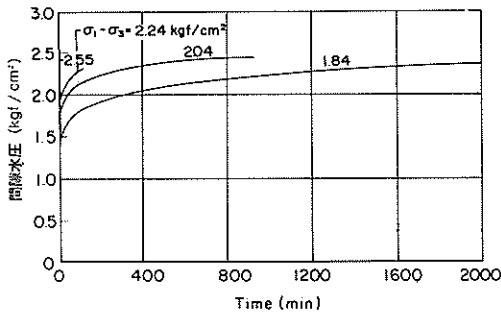


図-22(a) 間げき水圧と時間の関係
(大阪湾粘土, 等方圧密試料)

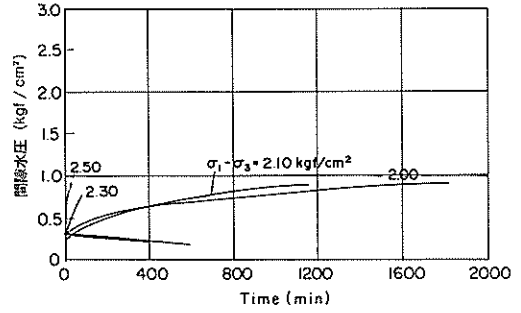


図-24(a) 間げき水圧と時間の関係
(大阪湾粘土, K_0 圧密試料)

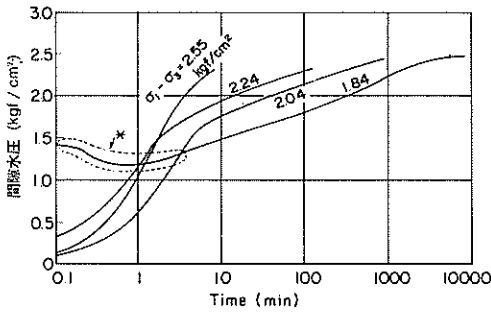


図-22(b) 間げき水圧と時間の関係
(大阪湾粘土, 等方圧密試料)

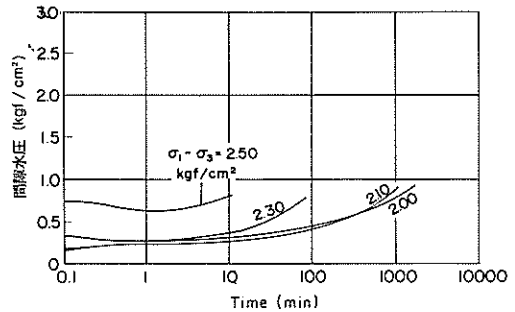


図-24(b) 間げき水圧と時間の関係
(大阪湾粘土, K_0 圧密試料)

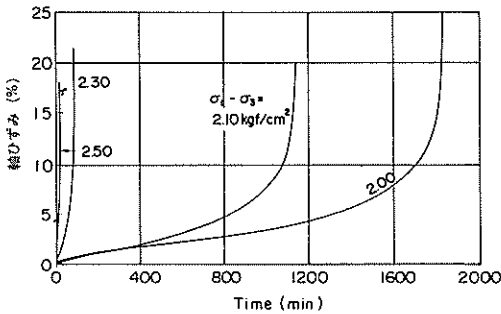


図-23(a) 軸ひずみと時間の関係
(大阪湾粘土, K_0 圧密試料)

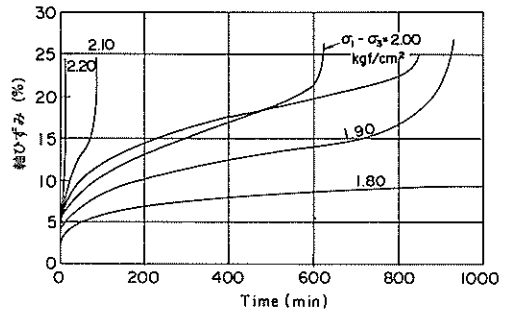


図-25(a) 軸ひずみと時間の関係
(大黒粘土, 等方圧密試料)

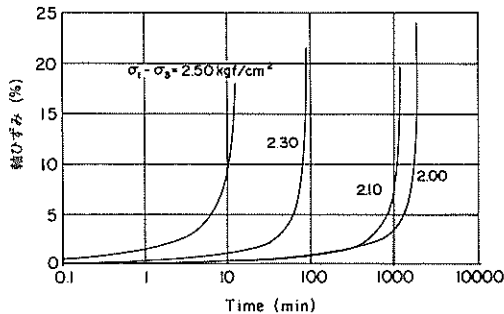


図-23(b) 軸ひずみと時間の関係
(大阪湾粘土, K_0 圧密試料)

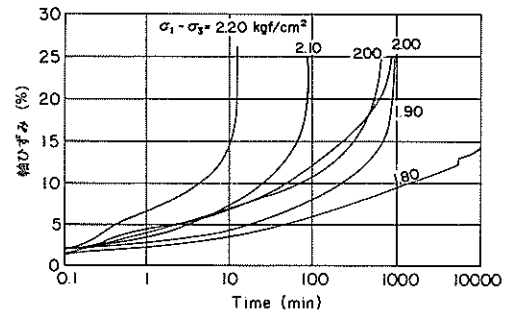


図-25(b) 軸ひずみと時間の関係
(大黒粘土, 等方圧密試料)

静的せん断特性

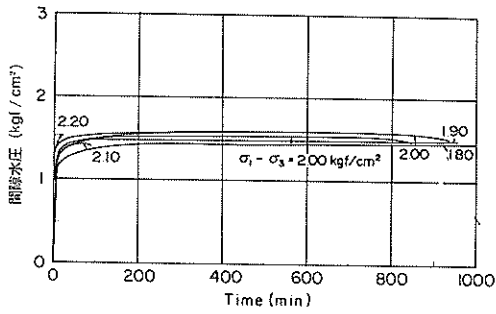


図-26(a) 間げき水圧と時間の関係
(大黒粘土, 等方圧密試料)

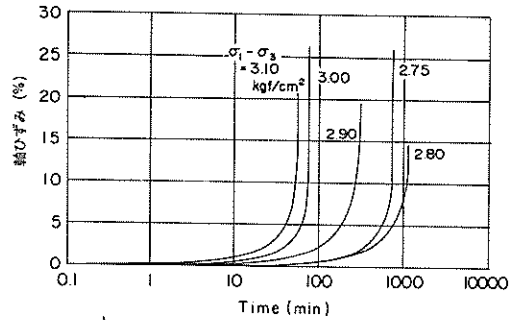


図-27(b) 軸ひずみと時間の関係
(大黒粘土, K_0 圧密試料)

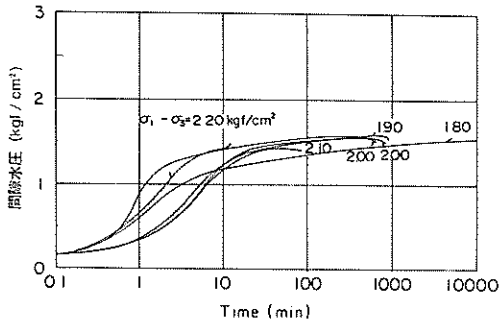


図-26(b) 間げき水圧と時間の関係
(大黒粘土, 等方圧密試料)

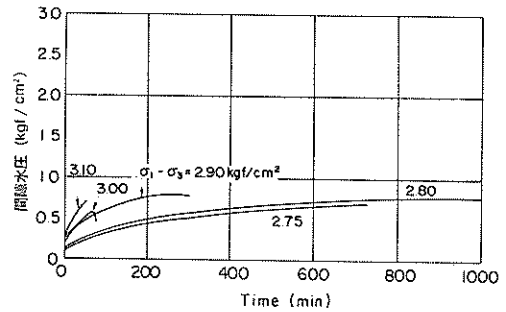


図-28(a) 間げき水圧と時間の関係
(大黒粘土, K_0 圧密試料) (a)

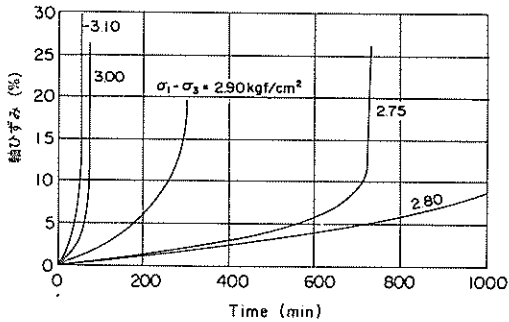


図-27(a) 軸ひずみと時間の関係
(大黒粘土, K_0 圧密試料)

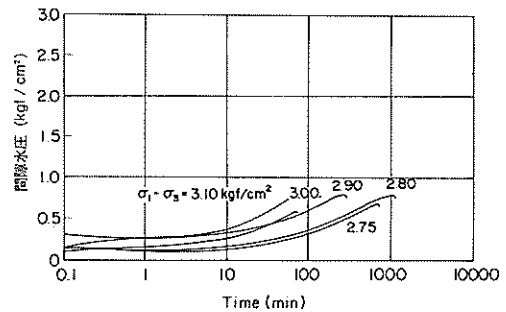


図-28(b) 間げき水圧と時間の関係
(大黒粘土, K_0 圧密試料)

リーブ応力の大きいものほど間げき水圧の上昇が著しい。図-26, 28は大黒粘土の間げき水圧～時間関係であるが、等方圧密後のクリープでは、載荷後一定時間が経過すると間げき水圧がほぼ一定になっている。しかし K_0 圧密後のクリープでは、時間とともに増加する傾向が続いている。

一般に粘性土の強度は急速に載荷された場合に大きく、ゆっくり載荷すると小さくなる。図-30, 31は、大阪湾粘土、大黒粘土のクリープ試験における軸差応力と破壊時間との関係を示したものである。なお、軸差応力は軸

方向圧密圧力によって正規化してある。図をみると、等方圧密後、 K_0 圧密後のいずれの場合も、軸差応力は破壊時間の対数に対しほぼ直線的に減少していることがわかる。また、図中には、大阪湾粘土57-29・T-20を用いてひずみ速度一定のC I U試験を行ったときの最大軸差応力と破壊時間もあわせてプロットしてある。図より、ひずみ速度一定試験とクリープ試験はほぼ同様の強度-破壊時間関係を示し、非排水せん断強度における時間効果が載荷方式の違いによらぬことを示している。図-30, 31より破壊時間が10倍になったときの軸差応力の低下

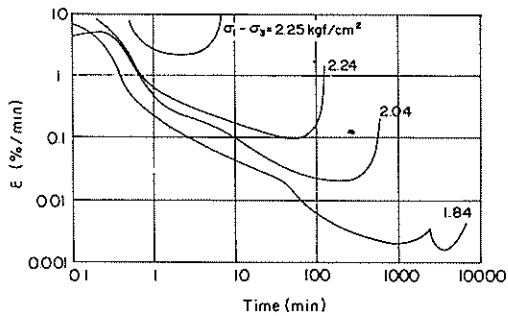


図-29(a) 軸ひずみ速度と時間の関係
(大阪湾粘土, 等方圧密試料)

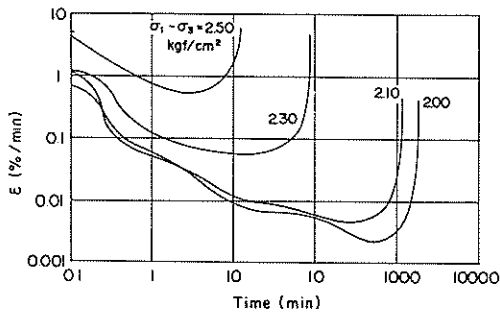


図-29(b) 軸ひずみ速度と時間の関係
(大阪湾粘土, K₀ 圧密試料)

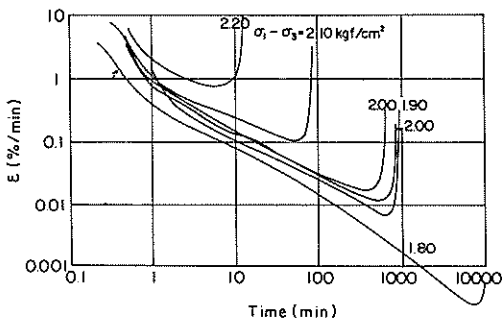


図-29(c) 軸ひずみ速度と時間の関係
(大黒粘土, 等方圧密試料)

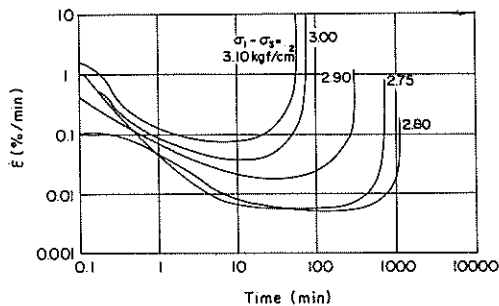


図-29(d) 軸ひずみ率と時間の関係
(大黒粘土, K₀ 圧密試料)

4 ($\sigma_1 - \sigma_3 / \sigma_{1c}$) を求めると表-8 のようになる。表よりデータのばらつきも考慮すれば、今回用いた大阪湾粘土、東京湾粘土においては、非排水圧縮強度における時間効果がほぼ同程度であるといえる。

図-32, 33 は、それぞれ大阪湾粘土、大黒粘土の破壊時(ひずみ20%)における有効応力状態である。図中には通常のC I U試験の結果もプロットしてある。図をみると、実験室で調整した試料である大黒粘土の方が原位置から採取した大阪湾粘土よりもばらつきが大きいという結果になっている点が問題ではあるが、破壊時の有効応力比が圧密方法やせん断方法の違いによらずほぼ一定になっている。

図-34 は、クリープ試験中の最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{\min}$ と破壊時間の関係を示したものである。 $\dot{\epsilon}_{\min}$ と破壊時間は両対数グラフ上で直線の関係になるとされており⁸⁾いくつかの実験式が提案されている。図中には齊藤・上沢の式と Snead の式を示した。両式はそれぞれ次のように表わされる。

$$\text{齊藤・上沢の式 } \log_{10} t_r = 0.498 - 0.916 \log_{10} \dot{\epsilon}_{\min}$$

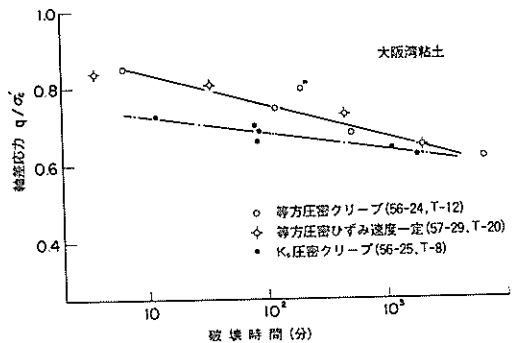


図-30 軸差応力と破壊時間の関係 (大阪湾粘土)

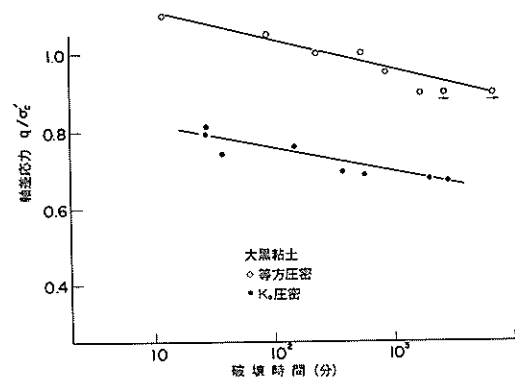


図-31 軸差応力と破壊時間の関係 (大黒粘土)

静的せん断特性

Snead の式 $\log_{10} t_r = 0.751 - 0.92 \log_{10} \dot{\epsilon}_{\min}$

ここに t_r は破壊時間 (分), $\dot{\epsilon}_{\min}$ は最小ひずみ速度 (%/分) である。

図-34をみると今回の試験結果は Snead の式に比較的近くなっているが全体にさらに右側にプロットされている。また、 K_0 圧密後の $t_r \sim \dot{\epsilon}_{\min}$ 関係は等方圧密後に比べてやや左側にプロットされており、同一の最小ひずみ速度における破壊時間が等方圧密の場合に比べ短くなる傾向が示されている。

3.4 まとめ

大阪湾泉南沖積粘土, 横浜大黒粘土を用いて行った一連の三軸クリープ試験の結果をまとめると次のようになる。

- 1) K_0 圧密後のクリープ試験では遷移クリープ過程が短く, 短時間で定常クリープ過程に移る。また, ひずみ 0.5 ~ 3% でひずみ速度の増加が始まる。

表-8 $d \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1} \right)$ の比較

	等方	K_0
大阪湾沖積粘土	0.082	0.045
横浜大黒粘土	0.076	0.060

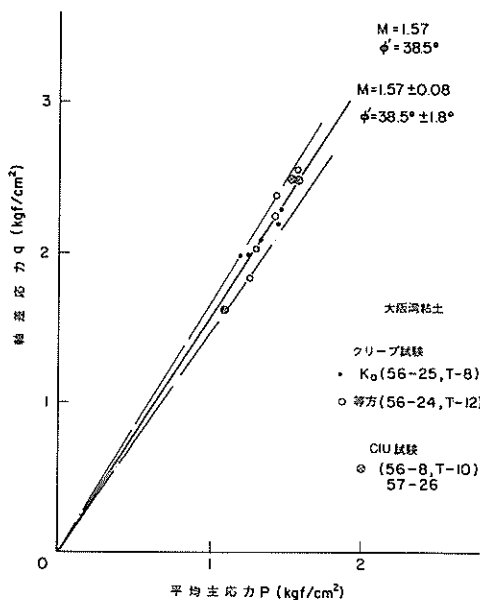


図-32 大阪湾粘土の破壊時 (軸ひずみ20%) の有効応力状態

- 2) 粘土の非排水圧縮強度における時間効果は, 荷重方法によらない。
- 3) 大阪湾粘土と横浜大黒粘土の非排水圧縮強度における時間効果はほぼ同程度である。

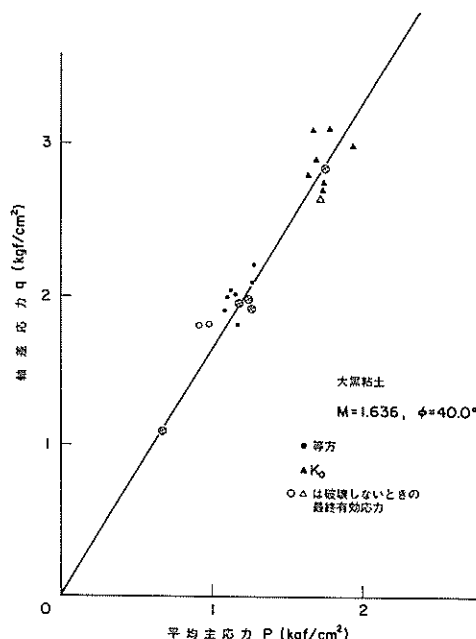


図-33 大黒粘土の破壊時 (軸ひずみ20%) の有効応力状態

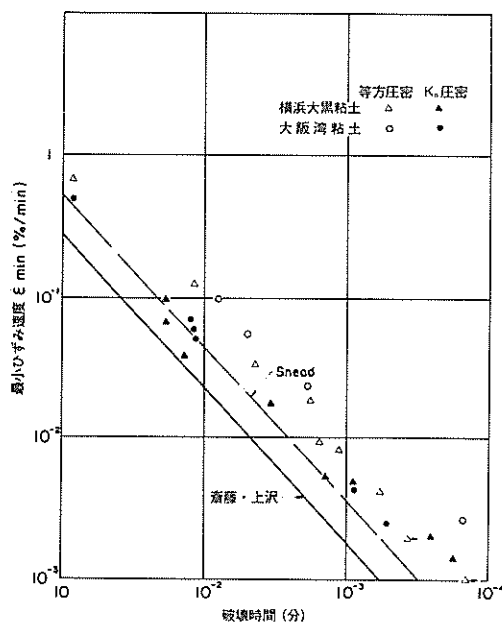


図-34 破壊時間と最小ひずみ速度の関係

- 4) 破壊時の有効応力比は、圧密方法やせん断方法の違いによらずほぼ一定になる。
- 5) クリープ試験における最小ひずみ速度と破壊時間の関係は両対数グラフ上ではほぼ直線になる。 K_0 圧密後のクリープ試験では等方圧密後に比べ同一の最小ひずみ速度での破壊時間が短い傾向がある。

4. あとがき

関西国際空港の建設予定地とされている大阪湾泉南沖の海底地盤を対象として行われた一連の土質試験のうち、土性研究室で実施した三軸 C I U 試験、三軸クリープ試験の結果の取りまとめを行った。本報告の結果については、今後さらに詳細な解析と検討を加えてゆきたいと考えている。

おわりに、本試験で用いた試料の物理試験は土質調査研究室小川技官に実施していただいたものである。また、試験実施にあたっては運輸省第三港湾建設局関西国際空港着工準備室から多大な協力を得た。ここに記して深く感謝いたします。

(1984年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 奥村樹郎：粘土試料の攪乱に関する研究（第2報）—不飽和土のサンプリングに伴う応力変化について—、港湾技術研究所報告，Vol. 8, No. 3, pp 77-98, 1969
- 2) 石井一郎・小川富美子・善功企：大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質（その2）物理特性、圧密特性および透水性、港湾技研資料，No. 498, 1984
- 3) 土田孝・佐藤正春・小林正樹：乱さない海成粘土の正規圧密状態におけるせん断特性について、港湾技研資料，No. 444, 1983
- 4) 亀井健史・平塚毅・中瀬明男：正規正密粘土の非排水せん断特性、第19回土質工学研究発表会講演集，Vol. 2-1, pp. 389-393, 1984
- 5) 中瀬明男・小林正樹・勝野克：圧密および膨張による飽和粘土のせん断強度の変化、港湾技術研究所報告，Vol. 8, No. 4, pp. 103-142, 1968
- 6) 村山朔郎・柴田徹：粘土のレオロジー的特性について、土木学会論文報告集第40号，pp. 1-30, 1956
- 7) 栗原則夫：粘土のクリープに関する実験的研究，土木学会論文報告集第202号，pp. 59-71, 1972
- 8) Vaid, Y. P. and Campanella, R. G : Time-

Dependent Behavior of Undisturbed Clay, Proceedings of A. S. C. E, Vol. 103, GT 7, pp. 693-709, 1977

- 9) Finn, W. D. L. and Snead, D. E : Creep and Creep Rupture of on Undisturbed Sensitive Clay, Proceedings of 8th I. C. S. M. F. E., Vol. 1, 1, pp. 135-142, 1973

記号一覧表

A_0	: 初期断面積
A_f	: 破壊時の Skempton の間げき水圧係数
B	: Skempton の間げき水圧係数
c_u	: 非排水強度
c_u / p	: 強度増加率
E_{50}	: 正割係数, $q_u / (2 \epsilon_{50})$
ϵ_f	: 破壊時の軸ひずみ
$\dot{\epsilon}_{\min}$: 最小ひずみ速度 (%/min)
Δh	: 供試体の高さの変化量
I_p	: 塑性指数
p_c	: 圧密降伏圧力
p	: 平均有効主応力
q	: 軸差応力
σ_c'	: 圧密圧力
$\sigma'_1 - \sigma'_3$: 軸差応力
σ'_{1c}	: 軸方向圧密圧力
t_f	: 破壊時間
Δu	: 過剰間げき水圧の増分
Δu_f	: 破壊時の過剰間げき水圧
ϕ'	: 有効応力にもとづく内部摩擦角
ΔV	: 供試体の体積変化量
w_0	: 初期含水比
w_p	: 塑性限界
w_L	: 液性限界
w_n	: 自然含水比