

論文

低拘束圧三軸圧縮試験機の開発による
へどろの特性評価

今	泉	繁	良*
北	園	芳	人**
枡	野	保	博***
岩	熊	真	一****
鈴	木	敦	巳*****

Development of Low Confined Pressures Triaxial
Compression Test Device and
Soil Characteristics of Hedoro

Shigeyoshi IMAIZUMI
Yoshito KITAZONO
Yasuhiro MASUNO
Shinichi IWAKUMA
Atsumi SUZUKI

1. まえがき

有害物質を含むへどろを覆土処分し、跡地利用を考
えるとき、覆土後の圧密沈下がどのように進行し、どの
程度の支持力が期待しうるかを評価することは重要な
問題である。しかしながら、へどろは間隙比が大きく単
位体積重量が小さいため、水中で施工されたような場
合の圧密圧力は 1 kgf/cm^2 以下の低圧力となる。このよ
うな非常に軟らかい状態にあるへどろの強度・変形特
性を評価するには特殊な実験装置と方法が必要であり、

圧密に関しては定ひずみ速度圧密試験装置¹や浸透圧
を利用した方法²があり、へどろの圧密特性が徐々に明
らかにされつつある。

他方、三軸圧縮試験機に関しては十分な装置は見ら
れず、液性限界以上の含水比状態にあるへどろを取り
扱い易い含水状態にまで脱水して予備圧密した後、供
試体として成形し、三軸圧縮試験を実施しているのが
通常である。しかしながら、この方法では、予備圧密の
圧力除荷と試料成形に伴う試料の乱れが予想され、こ
のことが低拘束圧時の応力-ひずみ関係の評価にも影
響を与えることが懸念される。また、粘性土を種々の含
水比で繰り返して圧密非排水三軸試験を実施した八木
らの実験^{3,4}では、予備圧密開始時の含水比の違いが圧
縮係数 C_c 、破壊時の軸ひずみ量 e_f 、破壊時の間隙圧係数
 A_f に影響を与えることが示されており、予備圧密に基
づく方法がへどろの土質特性の正確な評価法でありう

* 助教授，工博，地域共同研究センター

** 助手，工修，土木工学教室

*** 東亜建設工業㈱（元熊本大学生）

**** 技官，土木工学教室

***** 教授，工博，土木工学教室

るのか疑問である。

本研究では、液性限界以上の含水状態にあるへどろをそのまま低圧で圧密・拘束して三軸圧縮試験を実施することのできる装置の概要と、これを用いて含水比が180%程度のへどろを圧密非排水試験した結果について、主として従来の予備圧密に基づく方法と比較しながら、水戻へどろの土質特性について報告する。

2. 低拘束圧三軸圧縮試験装置と試験方法

図-1は開発した低拘束圧三軸圧縮試験装置の概要を示している。この装置は、へどろに軸圧縮力を加えたときの微弱なせん断抵抗力を精度良く計測することができるように、へどろ用コーン貫入試験機の荷重計測機構⁵を取入れたもので、載荷荷重を検知するロードセルを上部載荷板とピストンロッド先端の間に設置するとともに、載荷板を上方に吊り上げる形式でピストンロッドに固定させたものである。このような機構を用いることによって、軟弱なへどろ供試体に上部載荷板の重量が作用するのを防ぎ、また、ピストンとその軸受との間の摩擦力が軸圧縮力の評価に与える影響を除去することが可能となる。その結果、高含水状態での供試体の自立と低圧力での圧密、低せん断応力レベルでの応力-ひずみ関係の精度良い計測が可能となる。

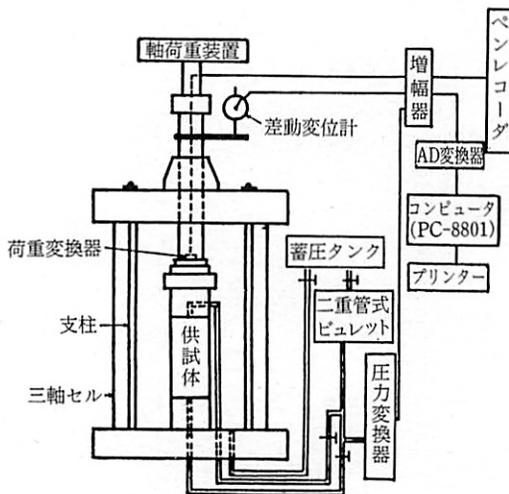


図-1(a) 低拘束圧試験装置の概要

ところで、荷重検出機構としてロードセルだけでなく締め付けねじとゴムリングを含めたものとしたために、上部載荷板に作用する荷重とロードセルが出力する値(マイクロひずみ)の間に線形関係が保たれているかどうか心配される。図-2は、締め付けねじによるロードセルへの初期荷重値 P_0 を30.9マイクロひずみとしたときの両者の関係を示したものである。両者の関係を示す傾き(校正係数)は、ロードセルだけの場合に比べてやや小さいものとなっているが、載荷時と除荷時とも線形関係は保たれており、ループ特性は良好である。

図-3は、三軸セル内にこの計測機構をセットし、供試体を置かずにセル内の水圧を変化させたときの検出値を示したものである。両者の関係において図-3のような傾きが現われる理由は、図-1(b)の荷重検出部に関する水圧の釣合において、上方からのものが断面積 A_0 に相当する分だけ不足するためであり、実際、傾き $\beta=3.25$ は $A_0=3.14\text{ cm}^2$ に近いものとなっている。したがって、等方圧密を行う際には、セル内の液圧だけでは上方からのこの断面積分の水圧が不釣り合いとなるために、側方圧力に等しい上記軸圧力を作用させる必要がある。

次に、軟弱なへどろの供試体を予備圧密法によるのではなく、セル内にて直接作成するために、二つ割り

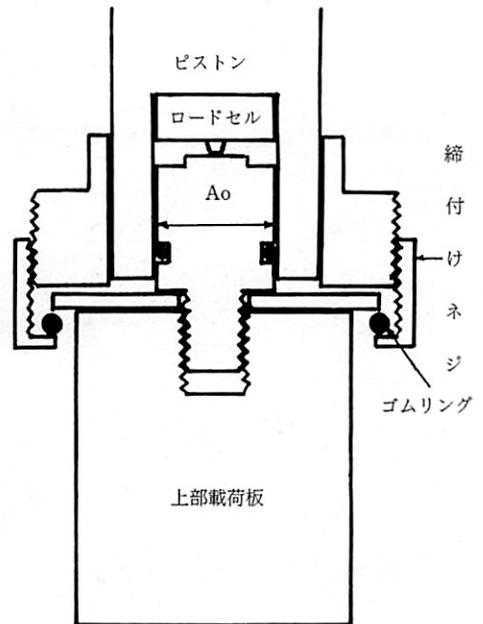


図-1(b) 載荷部詳細図

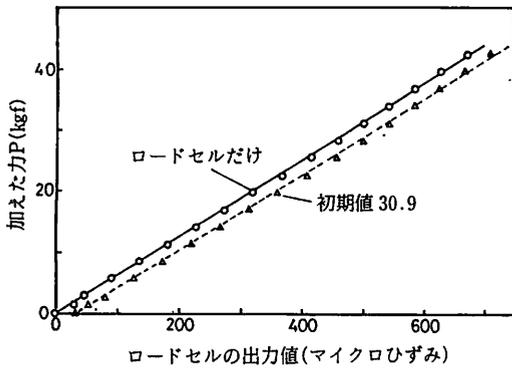


図-2 検定曲線

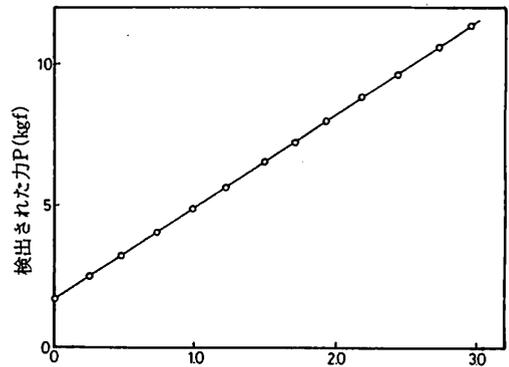
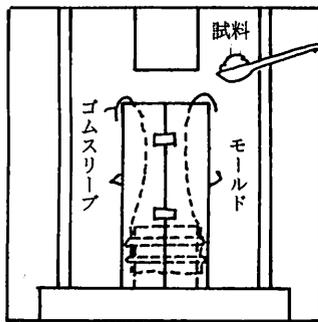
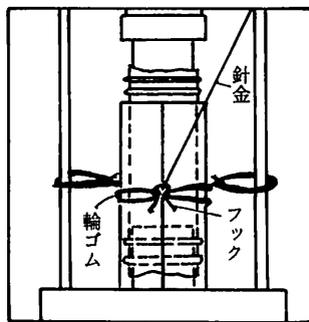


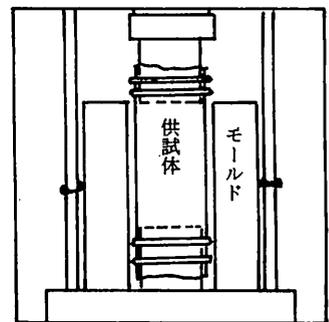
図-3 水圧検定線



試料セット前



試料セット完了



脱型(セル内注水後)

図-4 供試体のセット方法

モールドを利用して、ゴムスリーブ内にスラリー状(含水比は230~260%)のへどろを流しこみ、側圧を作用させた後でモールドを開く方法⁶を採用した(図-4参照)。なお、この方法における等方圧密前の供試体の大きさは、直径45mm、高さ110mmである。

供試体には1.0~1.5 kgf/cm²のバックプレッシャーを与え、等方圧密時における圧密終了の判断は、土質試験法⁷に従って、圧密量-時間(対数目盛)曲線の最急線を時間的に3倍だけ平行移動し、それが圧密量-時間曲線と交わったときを圧密打ち切り時間とした。また、せん断時の軸ひずみ速度は、間隙水圧を精度良く計測できるように予備実験した結果、0.05%/minで実施することにした。

新しい試験装置と比較するために、自然含水状態のへどろを含水比が120%程度になるまで脱水した後、直径6.8cm、高さ23.8cmの塩化ビニールパイプ内において0.5 kgf/cm²の圧密圧力で予備圧密したものを、直

径5cm、高さ12.5cmの供試体に成形し、通常の三軸圧縮試験装置を用いて実験した。

3. へどろの物理的特性

使用したへどろは水俣湾の海底に堆積しているもの

表-1 試料の物理特性

自然含水比 (%)		186.5
比 重		2.705
コンシステンシー	液性限界 (%)	101.9
	塑性限界 (%)	52.2
	塑性指数	49.7
粒度試験	レキ分 (%)	2.1
	砂分 (%)	15.7
	シルト分 (%)	49.2
	粘土分 (%)	33.0
	最大粒径 (mm)	19.1
分類	日本統一土質分類	MH

を採取したもので、試料の物理特性と粒径加積曲線を表一と図-5に示す。へどろの組成は、主としてシル

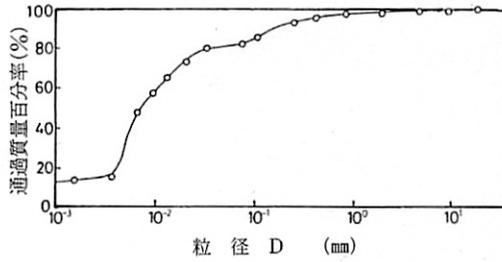
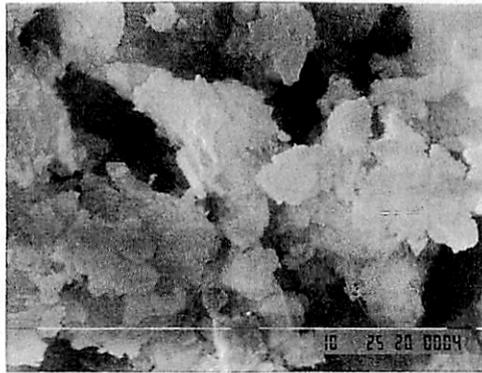


図-5 へどろの粒径加積曲線

ト分(49.2%)と粘土分(33.0%)からなる。試料を×線分析すると石英、方解石、イライト、カオリナイト、白雲母の鉱物とNaClが検出された。また、走査電子顕微鏡で観察すると、粒径5 μ m以下の微細粒子としては、写真-1に示すような扁平形状のカオリナイトが団粒化したベッドの他に、写真-2に示す多孔質な鉱物(ハロイサイトとも考えられる)も一部観察された。液性限界はLL=94.7~101.9%、塑性限界PL=50.2~52.2%、塑性指数PI=44.5~49.7で、日本統一分類法に従えば“高塑性シルト、(MH)”に分類される。自然含水比は $W_n=175.6\sim 186.5\%$ と液性限界より高い含水状態にある。なお、有機物含有量は5.9%でありそれほど高くない。

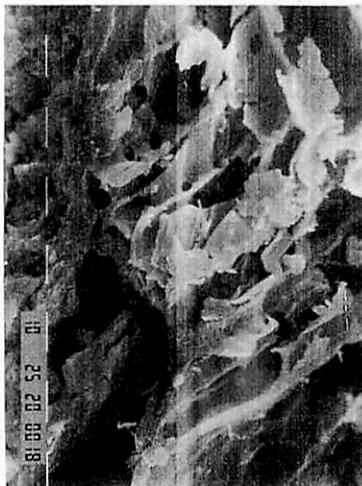


10 μ m



1 μ m

写真-1 カオリナイトの走査型顕微鏡写真



20 μ m

写真-2 ポーラスな鉱物の走査型顕微鏡写真(立体写真)

4. 圧密非排水三軸圧縮試験結果と考察

(A) 等方圧密試験

圧密圧力 P_c を 0.1、0.3、0.5、0.7、1.0、1.5 kgf/cm^2 と 6 段階に変化させて実験した。図-6 は等方圧密時の時間-体積変化量関係の一例を示したものである。低拘束圧試験機での圧密による体積ひずみ量は表-2 に示すように 38.5~56.6% と通常の粘性土の場合に比べて非常に大きい。圧密量-時間曲線から曲線定規法に基づいて圧密係数 C_v を求める場合、一般にはテルツァーギの理論解が利用されているが、図-6 に示したへどろのように圧密量が大きいときには、三笠³⁾が提案した圧密中に生じる層厚の変化を考慮した理論(式(1)参照)に基づくほうが適当と考える。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= C_v \zeta^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial Z_0^2} \\ \zeta &= \frac{(\delta Z)_0}{(\delta Z)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 ζ は圧密比
 $(\delta z)_0$ は粘土の最初の厚さ
 (δz) はその考える時の厚さである。

(1)式を差分法で解き、曲線定規を作成した後、圧密量-時間曲線にフィットさせ、圧密係数 C_v を求めた結果を表-2 に示した。

まず、解析手法としてのテルツァーギ法と三笠法を比較してみると、テルツァーギ法では実験データの極めて初期の部分でしか一致しないのに対し、三笠法では低拘束圧試験機の場合においても圧密後半部分まで

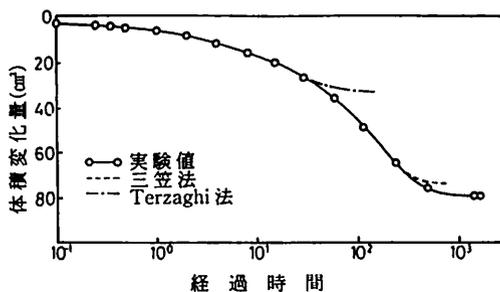


図-6(a) 時間-体積変化量曲線
 (低拘束圧試験機、 $P_c=1.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$)

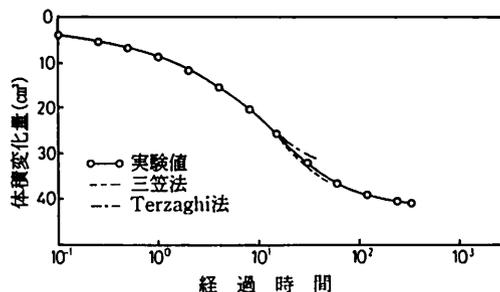


図-6(b) 時間-体積変化量曲線
 (予備圧密法、 $P_c=1.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$)

良く一致している。その結果、テルツァーギ法では圧密係数を大きめに評価する傾向にあり、特に、低拘束圧試験機を用いて圧密圧力を大きくした場合にその傾向が強い(例えば、圧密圧力が $1.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ のとき両者の比は 18:1 となる)。試験装置の違いに関しては、三笠法で解析した時、低拘束圧試験機の方が $1/3 \sim 1/5$ と小さい値を与えている。

表-2 等方圧密試験結果

	圧密圧力 (kg/cm^2)	最終体積圧縮歪 (%)	圧密前の間隙比	圧密後の間隙比	圧密係数 C_v (cm^2/day)	
					三笠法	Terzaghi法
予備圧密法	0.3	9.835	1.809	1.549	175.651	374.239
	0.5	12.887	1.846	1.455	268.741	381.283
	1.0	16.975	1.840	1.360	178.969	290.088
	1.5	19.053	1.793	1.275	148.029	269.110
低拘束圧試験法	0.1	38.488	7.946	3.435	52.599	160.758
	0.3	48.193	7.316	2.942	46.604	201.337
	0.5	53.658	7.345	2.621	56.229	374.225
	0.7	50.415	6.574	2.485	61.720	633.277
	1.0	53.785	7.930	2.371	39.859	723.240
	1.5	56.582	7.447	2.148	41.789	1,003.577

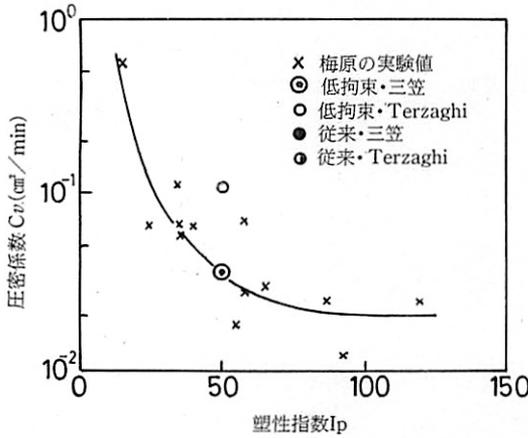


図-7(a) 圧密係数と塑性指数の関係 (Pc=0.1 kgf/cm²)

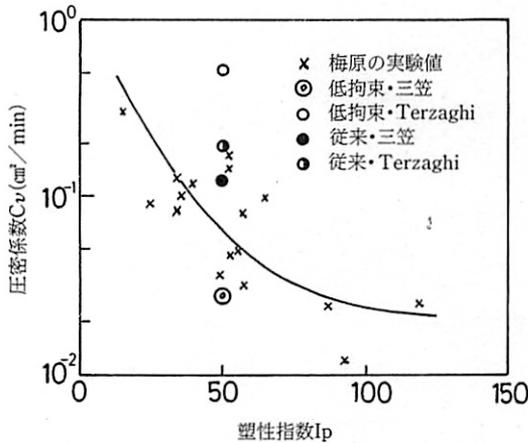


図-7(b) 圧密係数と塑性指数の関係 (Pc=1.0 kgf/cm²)

図-7は、梅原¹⁾が日本各地の海底土に対して定ひずみ試験装置を用いて圧密係数を求め、塑性指数との関係を示した図である。本研究で評価された三笠法に基づく値は、圧密圧力が0.1kgf/cm²のとき梅原の平均的関係を示す線上に存在する。しかし、圧密圧力が1.0 kgf/cm²の場合には、梅原の平均的関係線は予備圧密法による値と低拘束圧試験機による値の間となっている。

図-8は、等方圧密終了後の間隙比と圧密圧力との関係を示したものである。予備圧密法の場合は低拘束圧試験機による結果よりも間隙比が小さく、圧縮指数

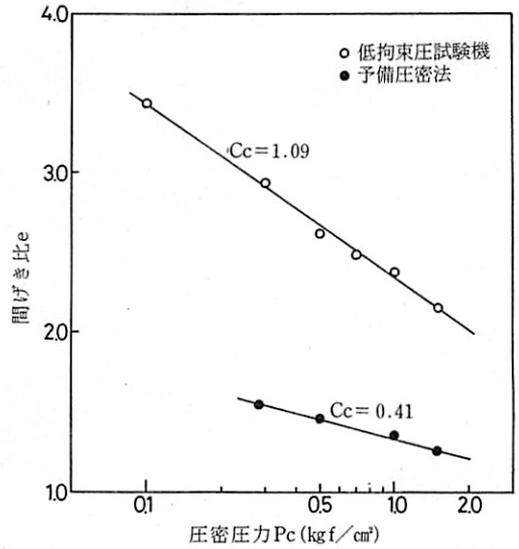


図-8 圧縮曲線

Ccも小さめの評価を与えている。図-8に示すような関係は粘性土を練返し再圧密するときの含水比を液性限界より多くしたときと少なくしたときの関係³⁾と類似している。今回、予備圧密はこの点も考慮して液性限界(101.9%)より大きな初期含水比で実施しているため、この違いは、予備圧密の除荷と成形に伴う試料の乱れが主たる原因と考えられる。

(B) 三軸圧縮試験

表-3は、非排水三軸圧縮試験の結果を示したものである。なお、破壊は主応力比 σ_1/σ_3 が最大となる点とした。表より低拘束圧試験機を用いた場合、圧密圧力が0.5kgf/cm²以下のとき、供試体の含水比は97~127%と液性限界より大きい。通常、液性限界におけるせん断強さは20~30gf/cm²である⁹⁾といわれているが、本試験結果では、液性限界に近いPc=0.5kgf/cm²でのせん断強さは230gf/cm²となり、1オーダー大きい値を示した。他方、予備圧密法による試験結果は、前述した通り、等方圧密終了後の含水比が液性限界よりかなり低いにもかかわらず、そのせん断強さは低拘束圧試験機の場合に比べて圧密圧力が低いところではほぼ等しく、圧力の高いところで僅かに大きい程度である。限界状態理論に基づけば、飽和粘土のせん断強さは含水比(間隙比)・圧密圧力・過圧密比によって一義的に定まる。本実験においては、両者の供試体は共に正規圧密状態にあるので、当然、両者のせん断強さの関係は含水比の小さい予備圧密法に基づくほうが大きめの値となる

表-3 非排水三軸圧縮試験結果

	拘束圧力 (kg/cm ²)	含水比(%)	間隙比	$\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}$ の最大値	破壊時の至	$\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}$ の最大値	U _f	A _f	E _{so}	E _t	E _{so} /Cu
予備圧密法	0.3	57.3	1.549	4.717	12.79	0.367	0.183	0.499	53	139	288
	0.5	53.8	1.455	4.268	13.55	0.553	0.333	0.602	89	217	321
	1.0	50.3	1.360	4.471	16.20	0.989	0.719	0.727	136	353	274
	1.5	47.1	1.275	4.552	15.77	1.501	1.085	0.723	214	476	285
低拘束圧試験法	0.1	127.0	3.435	5.791	14.14	0.116	0.076	0.654	7	28	120
	0.3	108.8	2.942	5.887	14.49	0.352	0.228	0.648	30	88	170
	0.5	96.9	2.621	4.250	14.87	0.463	0.358	0.772	39	116	168
	0.7	91.9	2.485	4.855	15.00	0.708	0.516	0.729	68	217	192
	1.0	87.6	2.371	4.928	17.43	0.939	0.761	0.810	60	256	120
	1.5	79.4	2.148	5.096	14.24	1.371	1.165	0.850	167	363	243

はずである。ところが、表-3に示したように等しい圧密圧力に対してほぼ等しいせん断強さを示した理由は、八木ら³⁾が唱えているような土の構造の違いによるものと思われるが、その詳細は今後の研究課題としたい。

図-9は、有効せん断抵抗角 ϕ' と有効粘着力 c' を求めるために破壊時の $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ と $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$ の関係を示したものである。図-9では、低拘束圧試験機による方法も予備圧密法も同一直線上に存在し、せん断抵抗角に関しては試験法による差は現われず $\phi' = 40.4^\circ$ と評価された。これは八木ら³⁾が強度定数に関しては繰り返し時の含水比は影響しないとした結論と一致している。図-10は、通常の粘土における ϕ' と塑性指数との関係¹⁰⁾に水俣へどろの値を記入したものである。図-10より水俣へどろの ϕ' は異常に高い値であることがわかる。

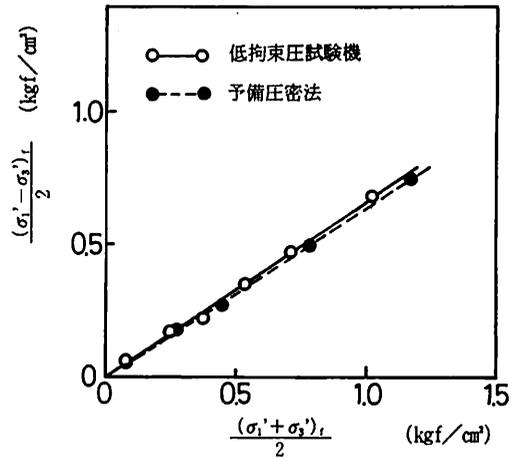


図-9 $(\sigma_1' - \sigma_3')/2$ と $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ の関係

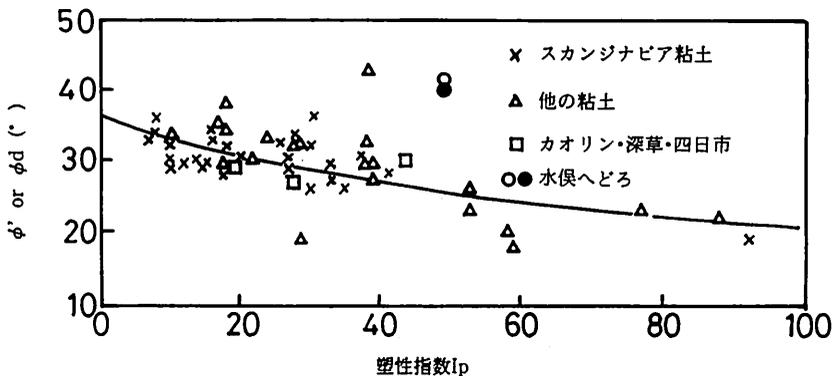


図-10 ϕ' とIpの関係

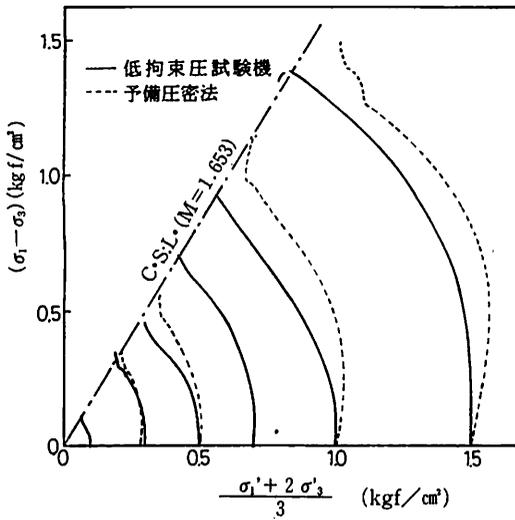


図-11 応力径路

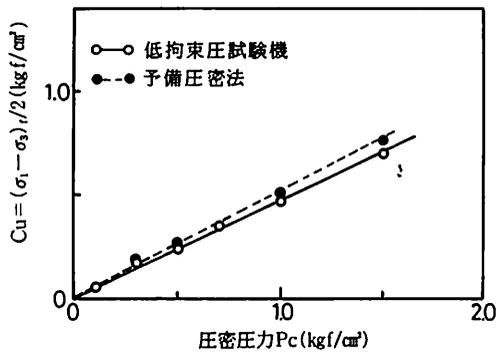


図-12 $\Delta C_u/\Delta p$ の関係

図-11 に示した有効応力径路に関しては、低拘束圧試験機における圧密圧力が 0.5 kgf/cm^2 以下の含水比が液性限界以上の場合にも、応力径路は相似形を示し、通常の粘土と同じ性質を示している。試験法の違いに関しては、低拘束圧試験機法では平均主応力は減少しながら限界状態線 (CSL) に到達しているのに対し、予備圧密法では平均主応力が限界状態線近くで最小値を示したあとその値を増加させつつ限界状態線上に至る。限界状態理論に従えば、非排水状態すなわち間隙比一定では低拘束圧試験結果のような径路を通るはずであり、再圧密法のような径路はグレイタンシーすなわち間隙比に変化が生じていることを示唆している。

図-12 は圧密圧力と非排水強度との関係を示したものである。その傾き、すなわち強度増加率 $\Delta C_u/\Delta p$

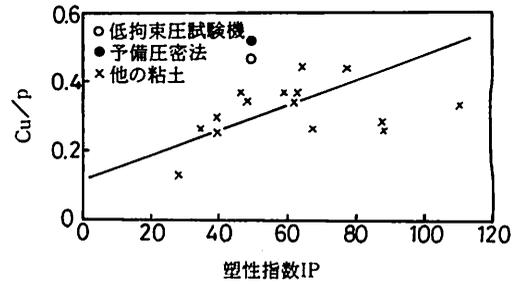


図-13 日本の港湾地域における C_u/p と I_p の関係

は予備圧密法による値のほうがやや大きいもののほぼ同じと考えて良く 0.5 である。この値を我が国の海底粘土のもの¹¹と比較 (図-13 参照) すると大きめの値であり、Skempton の経験式とも大きく異なる。

図-14 は、応力一軸ひずみ曲線から割線変形係数 E_{50} と初期変形係数 E_i を求め、圧密圧力との関係を示したものである。ここに、応力一ひずみ曲線は双曲線に近似できる¹²ものとして、 $\varepsilon/q \sim \varepsilon$ 関係の初期部分から求めた。低拘束圧試験機からの結果は、両変形係数とも圧密圧力に対し原点を通り線形的に増大しているとみなすことができ、Cam Clay 理論から導かれる傾向¹³と一致したものとなっている。また、このことは E_i/E_{50} が圧密圧力によらず一定であることを示す。予備圧密法の場合、 E_{50} は原点を通る直線となっているが、 E_i は原点を通らない。これは、予備圧密法では、低圧密圧力部での応力一ひずみ曲線初期部分において予備圧密による過圧密の影響が現われやすいためと考える。

図-14 の直線の傾き $\Delta E/\Delta p$ を深草・四日市・カオリン粘土のもの¹⁰ (ひずみ速度は $0.04\%/min$) と比較したのが図-15 である。水保へどろの値は、 E_{50} ではかなり大きめに、 E_i では逆にやや小さめになっている。深草粘土等の場合、繰り返し時の含水比は液性限界よりやや高い程度で試験されていることが原因とも考えられる。

変形係数に関する今回の結果は、(1)八木ら⁴は繰り返し時の含水比が低いほうが E_{50} も低くなることを示しているが、それと逆の傾向を示している。(2)一般に E_{50}/C_u の値が小さいほど (例えば、 165 以下) 乱れが大きいといわれているが、 C_c の結果から乱れが大きいと判断される再圧密法のほうが E_{50}/C_u は大きい、等従来の見解と一致しない点もある。

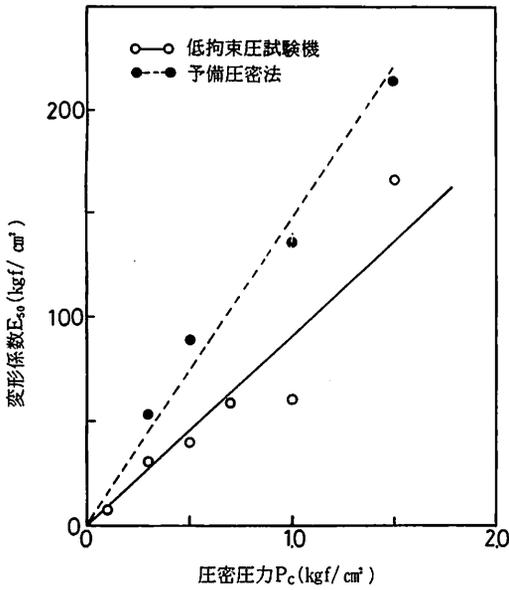


図-14(a) 圧密圧力と変形係数の関係

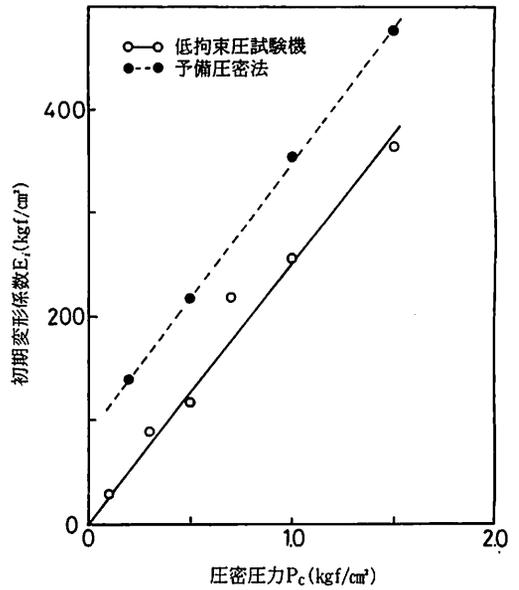


図-14(b) 圧密圧力と初期変形係数の関係

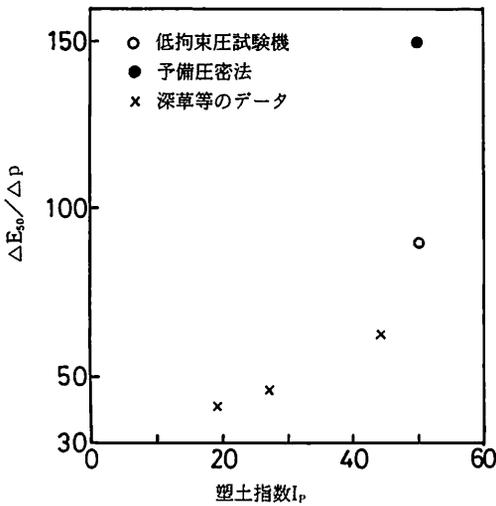


図-15(a) $\Delta E_{s0}/\Delta p$ と I_p の関係

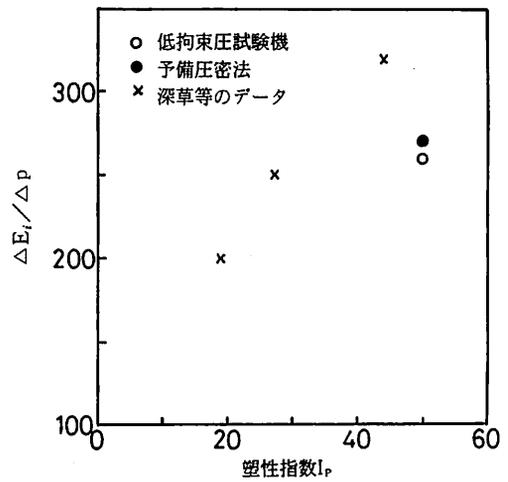


図-15(b) $\Delta E_i/\Delta p$ と I_p の関係

5. おわりに

液性限界以上の含水状態にあるへどろの強度・変形特性を評価しうる試験装置として低拘束圧三軸圧縮試験機を試作した。本研究によって得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 試作した低拘束圧三軸圧縮試験機は液性状態にある粘土試料を試験するのに有効である。
- 2) へどろのような軟弱な粘土を従来からの予備圧密

に基づいて供試体を作成し、三軸圧縮試験を実施すると、強度常数(ϕ' , C_u)は正しく評価されるが、変形特性のうち C_v , E_{s0} , E_i は大きめに、 C_c は小さめに評価される。

- 3) 水俣へどろの土質特性は、 ϕ' , $\Delta C_u/\Delta p$, $\Delta E/\Delta p$ に関して、我国の海底粘土の平均的傾向と異なる値を示す。

今後は、この試験機を用いて3)の水俣へどろの特異性について解明および圧密進行に伴う強度の変化等を明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 梅原靖文(1983)：土の圧密特性とその試験法に関する研究、学位論文
- 2) Goro Imai(1979)：Development of a new consolidation test procedure using seepage force, S&F
- 3) 八木則男 他(1983)：練り返し時含水比の異なる再圧密土の力学特性、土木学会論文報告集
- 4) 八木則男 他(1984)：乱れを受けた飽和粘性土の力学特性、土木学会論文集
- 5) 今泉繁良 他(1980)：高感度貫入試験機による堆積へどろの調査例、土と基礎
- 6) 山口柏樹 他(1984)：飽和粘土のCUC、DCにおける強度・変形特性、第19回土質工学発表会
- 7) 土質工学会(1979)：土質調査法
- 8) 三笠正人(1963)：軟弱粘土の圧密、鹿島出版会
- 9) ゴールドシュティン(大草重康訳)(1976)：新しい土質力学、森北出版
- 10) 今泉繁良 他(1986)：塑性の異なる飽和粘性土のCIUCにおける強度・変形特性、第21回土質工学研究発表会
- 11) 中瀬明男(1984)：海洋土質、技報堂出版
- 12) R.L.Kondner(1963)：Hyperbolic Stress-Strain Response, Proc. of ASCE SM1
- 13) 石原研而 他(1980)：土質力学、彰国社