

# 海成粘土の土質工学的特性に関する研究

——軟弱な有明粘土について——

平 間 邦 興      鳥 井 原   誠  
塩 田 耕 三

## Study on Geotechnical Characteristics of Marine Clay

——Soft Marine Clay of Ariake Sea——

Kunioki Hirama      Makoto Toriihara  
Kouzou Shiota

### Abstract

Investigations were conducted on the geotechnical characteristics of marine clay, especially changes in properties with depth and angle of sample collection. The methods of study were the usual, conventional tests such as physical and chemical tests, for example, unconfined compression tests, triaxial compression tests, vane tests and consolidation tests. Ariake clay was used for the investigations, it being a representative marine clay distributed in and around the Ariake Sae in Kyushu. As a result of studies, it was ascertained that the characteristics of marine clay such as high moisture content, high clay content, anisotropies of both deformation and strength, and high sensitivity are affected by in-situ depth.

### 概 要

有明海沿岸に広く分布する沖積粘土層は一般に有明粘土と呼ばれ、全国でも有数の軟弱地盤である。有明粘土は我が国における海成粘土の代表例のひとつとされ、粘土分が非常に多く、自然含水比が液性限界を大きく上回るといった特徴がある。

この報告は、有明粘土の土質工学的性質を明らかにするため、現地で採取した試料を用いて各種の調査・試験を行ない、物理・化学的考察と力学的考察を行なったものである。主な結果として、(1) 海成粘土の地質学的な検討に化学分析が有用である。(2) 著しい強度異方性がある。(3) かく乱による強度低下のしやすさを示す指標である鋭敏比が20~250であり、一般の正規圧密粘土の5~10に比べて、極端に大きい。(4) 間隙比が大きく、圧縮性が非常に高い。しかも擬似過圧状態にある、などが明らかになった。

従って、実際工事に際しては、海成粘土の持つ上記の諸特性を十分に考慮した設計・施工が必要となる。

### 1. まえがき

有明海沿岸に広く分布する沖積層は約 10,000~6,000 年前頃の縄文海進と多数の河川の沖積作用によって堆積した全国有数の軟弱地盤であり、一般に有明粘土と呼ばれている。有明粘土は均質で青灰色を呈しており、粘土分含有量が50%以上と非常に多く、自然含水比も 100~170% と液性限界の約 100% を大きく上回って高塑性を示し、我が国における海成粘土の代表例のひとつであると言われている<sup>1)</sup>。

こういった性質をもつ有明粘土地盤上で建設工事を行なうに際しては、(1)高鋭敏性に基づく強度低下によってせん断変形が生じやすい。(2)沈下量が大きく、しかも長

時間に及ぶ、といったことが問題になることが多い。そこで、この報告では、現地で採取した不攪乱の有明粘土試料を用いて各種の調査・試験を行ない、その特性を検討することによって、問題点の要因のいくつかを明らかにした。物理・化学的特性の中では、地質学的考察も加え、力学的特性の中では、強度異方性、鋭敏性、圧密特性を主として検討を行なった。

### 2. 調査位置と試料採取

有明粘土の分布は図-1 に示すごとく非常に広範囲にわたるが、その性状は筑後川と嘉瀬川を境界として、東岸地域、北岸地域、西岸地域で異なっている。この相違は有明海の湾流が緩やかな反時計回りであることと、堆

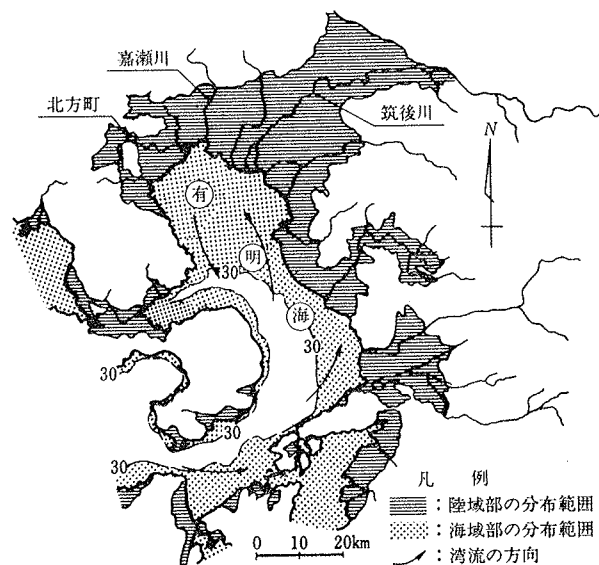
積土砂の大部分が東岸の後背山地から供給されていることに起因すると言われている<sup>1)</sup>。すなわち東岸は砂分を比較的多く含んでいるのに対して、西側にいくほど細粒分を多く含む傾向がある。今回の研究対象とした試料は、この西岸地域に位置する佐賀県杵島郡北方町でサンプリングしたものであり、粘土分含有量が特に卓越している。

試料採取方法としては、ボーリング孔を利用した通常の固定ピストン式シンウォールサンプリング ( $\phi 75\text{ mm}$ ,  $\phi 97\text{ mm}$ ) のほかに、図-2のようなオープン掘削によるサンプリングを実施した。これは掘削後に人力でシンウォールチューブ ( $\phi 75\text{ mm}$ ,  $l=500\text{ mm}$ ) を土中に挿入し、試料を採取する方法である。この時、異方性の影響を検討するために、採取角度  $\beta$  として  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  の4種類を採用している。

### 3. 物理・化学的特性と堆積環境

当地点の土性一覧図を図-3に示す。当地の有明粘土は、層厚も10m程度と有明粘土地盤としては比較的薄い。粘土分含有量は非常に多くほとんどの深度で50%を越えている。自然含水比は液性限界を50~60%も上回り、液性指数は  $I_L \approx 2.0$ 、活性度も  $A = 1.3 \sim 4.2$  と両者とも非常に高い。間隙比も  $e_0 \approx 4.0$  前後と非常に高い。土粒子の比重は  $G_s = 2.55 \sim 2.56$  とやや軽く、有機分の存在が予想された。このことは強熱減量の値が12%前後と比較的大きいこともよい対応を示している。全体の地層は、ほぼ均一の成層状態を示すが、自然含水比、間隙比あるいは単位体積重量の分布をみると、GL-3.5m前後で若干その土性に变化があるようである。また、pH

試験では、GL-2.3m と GL-6.4m では中性ないし弱酸性であり、中層部は  $\text{pH} = 8.0$  前後となっている。(参考までに、海水の  $\text{pH}$  は約 8.0 である<sup>2)</sup>。)



図中の30は有明粘土層下底の-30m等深線である。

図-1 有明粘土の分布

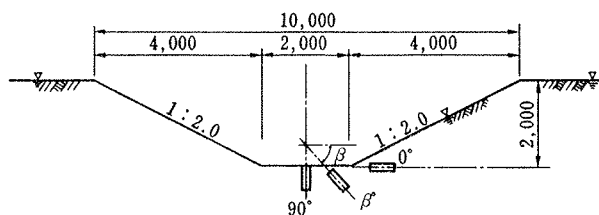


図-2 オープン掘削による試料採取

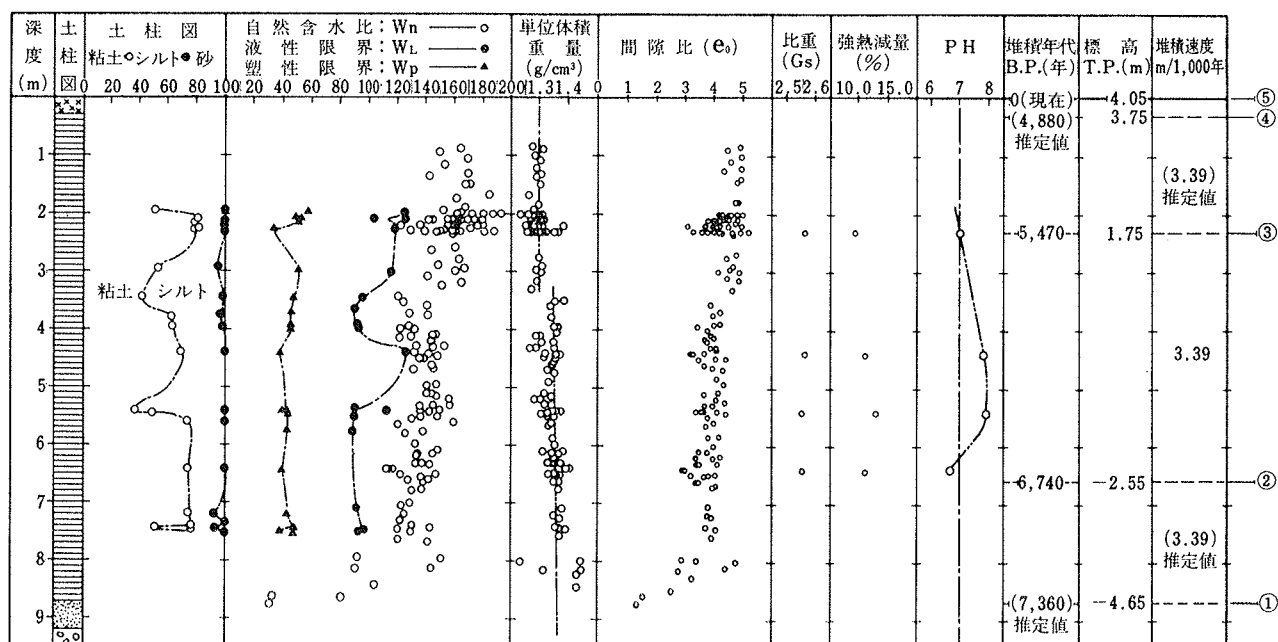


図-3 土性一覧図 (B.P.O年=西歴1950, 図右端の①~⑤は図-4参照)

次に微視的検討として、X線分析により粘土鉱物の同定を行ない、走査型電子顕微鏡写真観察により粘土粒子の状態を確認した。まず、X線分析では、粘土鉱物として、雲母とスメクタイトの中間体 (Mi/Sm)、緑泥石とスメクタイトの中間体 (Ch/Sm)、スメクタイト (Sm)、緑泥石 (Ch)、雲母 (Mi)、カオリン (Ka) を確認し、一次鉱物として、石英 (Qu)、長石 (Feld) を確認した。次に走査型電子顕微鏡写真を、写真-1 に示すが薄片状、板状あるいは棒状などさまざまな形の粘土鉱物が見られ、その中に珪藻類や有孔虫と思われる微化石も多数存在している。

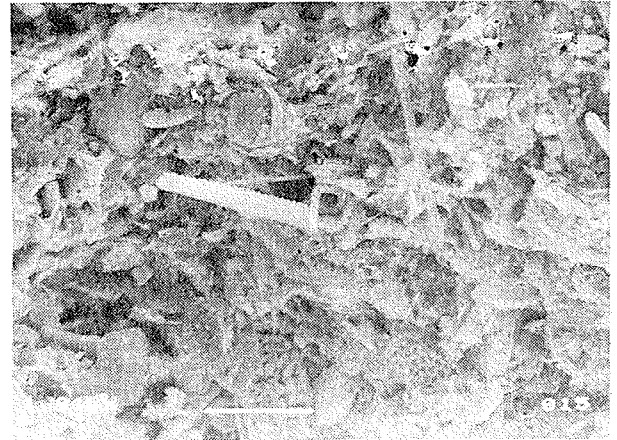


写真-1 走査型電子顕微鏡写真(1,010倍)

堆積年代の検討として、試料中に含まれていた木片を使って  $^{14}\text{C}$  測定法を行なった結果を図-3 に示すが、GL-2.30 m で5,470年前、GL-6.60 m で6,740年前であった。この結果より、当地盤では4.30 m の区間を3.39 m/1,000年の速度で堆積したことになる。この仮定を層全体に適用すると粘土層の上下端の堆積年代は図-4 に示す完新世海面変動曲線<sup>3)</sup>上の④、①になり、縄文海進の中期と、その後の海況の安定した時期の中期に、それぞれ相当する。

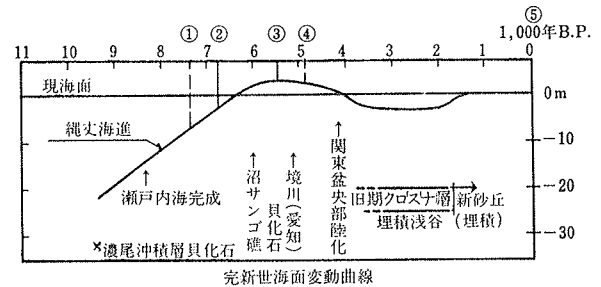


図-4 完新世海面変動曲線

以上のことより、有明粘土の堆積環境をまとめると、当粘土は、洪積層の島原海灣層という砂礫層を基盤として、約10,000~8,000年前頃より堆積を始め、縄文海進の下で堆積した下部層と、それに続く海面が比較的安定した海況で堆積した上部層に2分され、当地ではGL-3.5 m 付近がその境界にあたるようである。有明粘土がこのように2分されることは、今までにもいくつか報告されている<sup>1),4)</sup>。そのなかでも、有明海研究グループ<sup>4)</sup>が、土中の化石珪藻の調査から下部には淡水性種が多く、上部には海性種が多いことを報告していることは、土質工学的手法とは異なる生物学的見地に立った研究成果として興味深い。また pH 値の深さ方向変化からは有明粘土が堆積後も複雑な化学的作用を受けたであろうことが予想される。すなわち堆積後に基盤砂礫層内を流れる地下水や地表からの雨水の影響を受けて海水性の pH=8.0 から中性化あるいは酸性化が進行したのでであろう。このような複雑な環境のもとに、細粒分の卓越した粘土が広く厚く堆積したのが当有明粘土である。

#### 4. 力学的特性

##### 4.1. 強度異方性

有明粘土の不攪乱試料の強度異方性を確認するため、一軸圧縮試験を行なったがその結果を図-5 に示す。図-5 (a) は一軸圧縮強度と採取角度の関係を示したものである。いずれの深度においても採取角度が大きくなるほど一軸圧縮強度が大きくなる傾向が明らかである。図

5 (b) は変形係数  $E_{50}$  と採取角度の関係を示したものである。一軸圧縮強度の場合と同様に採取角度が大きくなるにつれて、変形係数も大きくなる傾向が明らかである。三笠等<sup>5)</sup>は、自然堆積粘土の強度異方性として、水平・鉛直供試体の強度比 ( $q_u: \beta=0^\circ$ )/( $q_u: \beta=90^\circ$ ) が0.6~0.7 となることを報告しているが、今回の試料では水平供試体の強度がかなり低下しており、その値が0.3~0.6 とかなり小さくなっている。このことより、当粘土の強度異方性は、一般の粘性土と比較しても相当に大きいことが明らかとなる。

##### 4.2. 鋭敏性

図-6 (a) は不攪乱試料の一軸圧縮強度と原位置ベーンせん断試験から得られたせん断強度の深さ方向分布を示したものである。バラツキは多いもののこれらの試験結果から、せん断強度の深度方向分布はGL-5.5 m 以浅の深度に比例して増加する領域とそれ以深の深度による影響をさほど受けない領域の2つに大別することができる。しかし、ここで物理化学的特性と堆積年代の章で明らかとなった上下層の境界のGL-3.5 m との関わりであるが、一軸圧縮強度の深度方向分布を見ると、GL-3.5 m でわずかに変化はあるようであるが、それ以上の変化がGL-5.5 m では存在している。この原因については後述する。図-6 (b) は室内ベーンせん断

試験で求めた攪乱後の強度の深度方向分布を示したものである。深度が増すにつれて攪乱後の強度が低下していく様子が明らかである。図-6(c)は、図-6(a)の一軸圧縮試験結果 ( $q_u$ ) と図-6(b)の室内ペーンせん断試験結果 ( $\tau$ ) から求めた鋭敏比 ( $S_t = q_u/2\tau$ ) の深度方向分布である。全層にわたって相当大きな鋭敏比を示しており、しかも、その値は深度が増すにつれて大きくなっていく傾向が明らかである。特に GL-6.5 m ではバラツキは多いものの最大値が 250 を示すものもある。参考までに、一般の正規圧密粘土の鋭敏比は 5~10 というわれている<sup>6)</sup>。このように深部で鋭敏比が大きくなっている原因の一つとして、基盤の洪積砂礫層内の地下水による化学的な溶脱作用の影響が考えられる。溶脱作用とは、堆積当時の比較的安定した骨組構造を形成していたイオン結合が、堆積後に地下水などによってイオンを溶脱され、結合が弱くなる現象のこと<sup>7)</sup>であり、攪乱によって容易に強度低下を起こすのである。この影響が、GL-5.5 m 以深にでているのであろう。また図-3で深層部の pH が弱酸性であることにも表われているようである。

4.3. 圧密特性

図-7は、GL-2.0~6.0 mの深度で採取した4試料の e-log p 曲線を示したものである。一般に粘性土は圧密降伏応力を過ぎると e-log p 曲線は直線になるが、海成粘土の場合には下に凸な曲線になることが多いといわれている<sup>8)</sup>。今回の試験結果も e-log p 曲線は全体として逆S字形の様相を呈しており、海成粘土の特徴を良く表わしている。図-7で間隙比が4.2から1.2に低下していることは、その圧縮性の大きさを示している。また、初期間隙比  $e_0$  が4.0前後に分布することは、港湾地域の軟弱地盤の自然間隙比が1.0~5.0に分布し、その大部分は3.5以下である<sup>9)</sup> ことから、当粘土の圧縮性の大きさが明らかである。次に、図-7より求まる圧密降伏応力  $P_c$  と有効土被り圧の比である過圧密比 (OCR) を図-8に示すが、各深度共に相当の過圧密状態であり、特に浅層部になる程過圧密比は大きくなっている。ところが、当地域は海水面の低下による有効土被り圧の若干の増加は認められるものの、過去に大規模な浸食作用を受けた形跡はない。したがって、ここで示されている過圧密状態は、上載圧の変化に伴う通常のそれではない。このように、圧力の変化によらない過圧密状態は擬似過圧密と呼ばれている。このことも有明粘土が持つ大きな特徴の一つである。この原因として考えられることの内、主

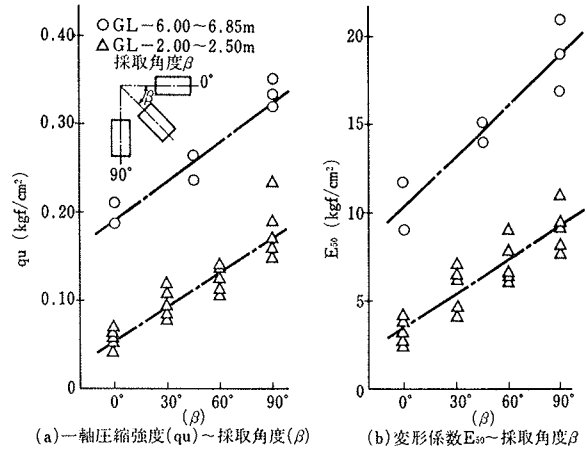


図-5 強度・変形の異方性

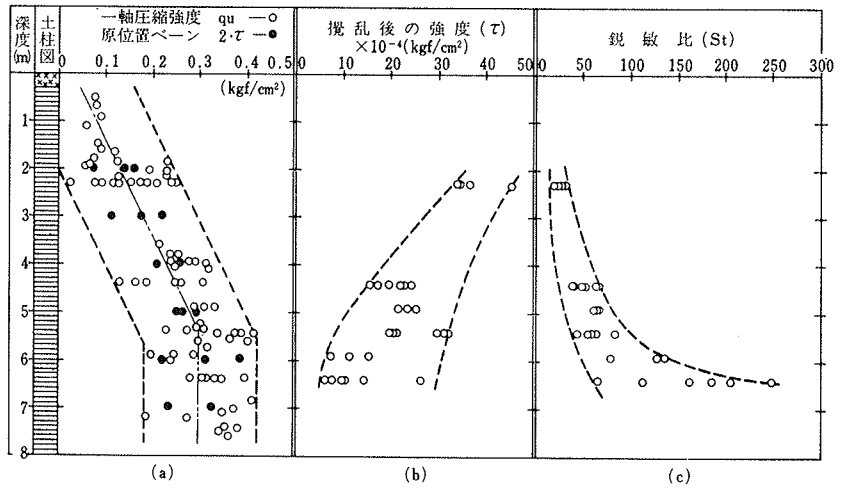


図-6 せん断強度・鋭敏比の深度方向分布

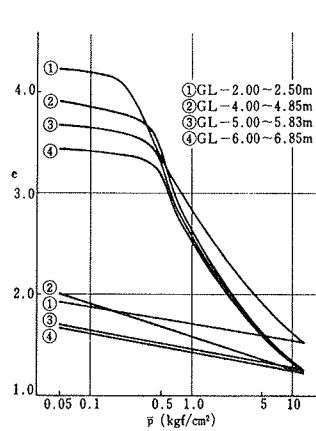


図-7 e-log p 曲線

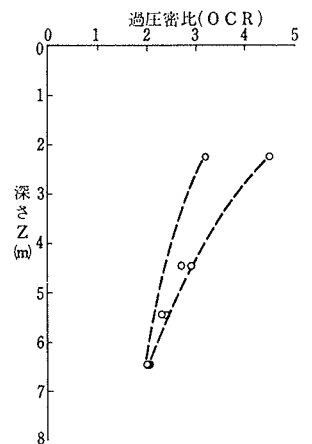


図-8 過圧密比

要なものをあげると①時間効果、②セメンテーションなどである<sup>8)</sup>。時間効果とは、長時間圧縮によって粘性土の骨格構造がより安定なものとなる現象であり、セメン

ーションとは、ある種の固結物質によって、粘土粒子間の化学的結力が増大する現象である。海成粘土はこういった現象を受けやすい環境で堆積しているのであるが、有明粘土もその特性を強く持っているといえよう。

図-9は体積圧縮係数  $m_v$  と圧密圧力  $\bar{p}$  の関係を示したものである。図-9(a)は採取深度の異なる試料の試験結果であり、図-9(b)は採取角度が異なる試料の試験結果である。いずれの場合も  $\bar{p} < p_c$  の過圧密領域で  $m_v$  は徐々に増加するが  $\bar{p} > p_c$  の正規圧密領域ではほぼ一本の直線上を低下していく傾向がある。

図-10は圧密係数  $C_v$  の試験結果である。 $C_v$  は過圧密および正規圧密領域ともそれぞれの領域でほぼ一定値を示しているが、過圧密領域での値が極端に大きいという特徴がある。

図-11は透水係数  $k$  の試験結果である。 $k$  は  $\bar{p}$  の増加とともにほぼ一様に低下しており、 $m_v$  や  $C_v$  の場合のような過圧密領域と正規圧密領域で異なる挙動を示すという現象はないようである。

これらの圧密試験結果の内、図-9(b)~11(b)の採取角度が異なる場合の試験結果によれば、図-4で示した一軸圧縮強度の場合とは異なり、ほとんど異方性はみられないようである。

### 5. まとめ

以上述べてきたとおり、今回の研究対象である有明粘土は、その生成時の要因からも粘土分が非常に多いことが特徴であり、そのため、その後の堆積環境の変化に由来するさまざまな化学的作用やその他の影響によって一般の粘性土にはみられないいくつかの特性を有している。今回の調査・試験より得られた主な結果を示し、設計・施工での注意点について以下に示す。(1)著しい強度異方性があり、安定解析の強度定数に何らかの配慮が必要であろう。(2)攪乱による強度低下のしやすさを示す指標である鋭敏比が20~250であり、一般の正規圧密粘土の5~10に比べて極端に大きい。このため施工による攪乱がもたらす強度低下を十分に配慮した施工が必要となろう。(3)間隙比が大きく、圧縮性が非常に高い。しかも、擬似過圧密状態にある。このため圧密沈下量と沈下時間の予測においては、この特性を十分に配慮する必要がある。

### 参考文献

1) 鬼塚克忠：有明粘土，九州・沖縄における特殊土，土質工学会九州支部，(1982.5)，pp. 21~37

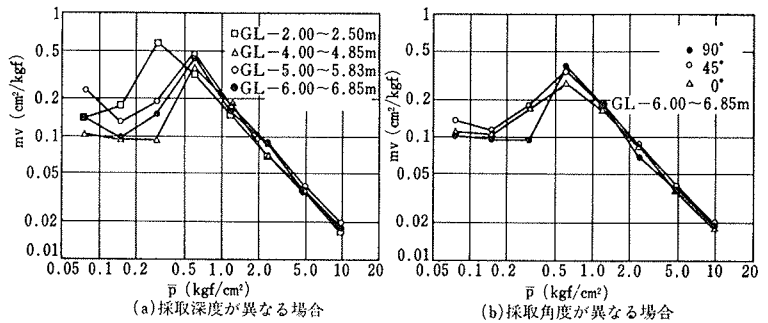


図-9  $\log \bar{p} \sim \log m_v$

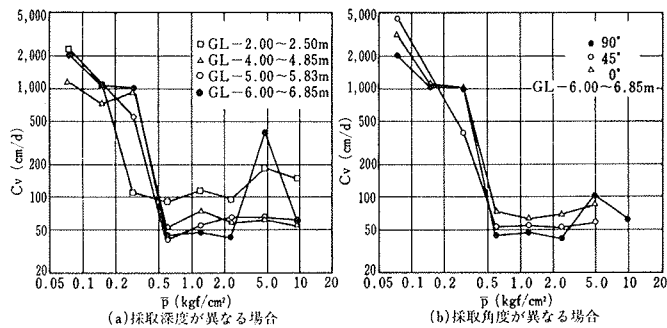


図-10  $\log \bar{p} \sim \log C_v$

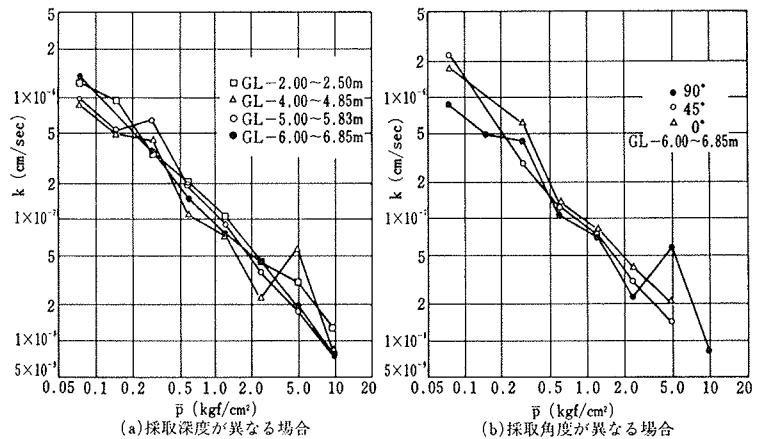


図-11  $\log \bar{p} \sim \log k$

2) 土質工学会編：土質試験法（第2回改訂版），（昭和57.10.30発行），p. 257  
 3) 井関弘太郎：完新世の海面変動，日本の第四紀研究 東大出版会，日本第四紀学会編，(1977)，pp. 89~98  
 4) 有明海研究グループ：有明，不知火海域の第四系，地学団体研究会専報11，(1965)  
 5) 三笠正人，他：一次元圧密粘土と自然堆積粘土の非排水強度の異方性，土と基礎，Vol.32, No.11, (1984)，pp. 25~30  
 6) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，(1982)，p. 200  
 7) 浅川美利：リーチング，土と基礎，Vol. 26, No. 8, (1978)，pp. 87~88  
 8) 中瀬明男：海洋土質，新体系土木工学84，技報堂出版，(1984)，pp. 131~144  
 9) 渡辺 進：工学的な性質，土質基礎工学ライブラリー1，軟弱地盤の調査・設計・施工法，（昭和52.7）