

メキシコシティー盆地縁部における地盤の工学的特性

Geotechnical Properties of Mexico City Clay in Marginal Part of its Amphitheater

田中政典	Masanori TANAKA	((独) 港湾空港技術研究所地盤・構造部)
渡部要一	Yoichi WATABE	((独) 港湾空港技術研究所地盤・構造部)
松岡達也	Tatsuya MATSUOKA	(東亜建設工業(株) 技術研究開発センター)
富田龍三	Ryuzo TOMITA	(興亜開発(株) 関東支店)
小川靖弘	Yasuhiro OGAWA	(島根大学総合理工学部)

メキシコシティー粘土の工学的特性を解明するために、メキシコシティー盆地の縁部においてサンプリング、静的コーン貫入試験および原位置ベーンせん断試験を行った。また、サンプリング試料に対しては物理試験、室内ベーンせん断試験、一面せん断試験および圧密試験を行った。さらに、メキシコシティー粘土の堆積環境を明らかにするため、年代測定、珪藻分析、X線回折試験、塩化物含有量試験や強熱減量試験などを行った。その結果、メキシコシティー粘土の主要鉱物はガラス質の非結晶物質であり、粘土鉱物はほとんど存在せず、有機物によって土の粘性が発揮されていることなどが明らかになった。

キーワード：物理特性、せん断特性、圧密特性、珪藻分析

(IGC : C06, D06)

1. はじめに

メキシコシティーは火山に囲まれたメキシコ中央高原の標高約 2240m の盆地にある。メキシコシティー盆地には、かつてテスココ(TEXCOCO)という広大な湖があり、14 世紀初頭にテスココ湖の小島にアステカ王国の都市テノチティランが築かれた。16 世紀に入るとアステカ王国は滅亡し、スペイン人によってテノチティランの上に新たな都市が建設された。その後、都市の発展とともにテスココ湖は埋め立てられ、今日、湖はほとんど残っていない。

メキシコシティー盆地は更新世における火山活動による地殻の変動によって、2 本の大きな川がせき止められテスココ湖が形成された¹⁾。さらに、その後に続いた火山活動による降灰や周辺部の山脈から流入した土砂によって、盆地基盤の上に数 10m の厚さの軟弱な湖成堆積層が形成された。

メキシコシティーの地盤は、自然含水比が 400~500%以上、間隙比が 10 以上にも及ぶ特徴を有しており、特異な工学的特性を持つ粘土として世界的にもよく知られている²⁾。我が国の沿岸域に堆積している海成粘土の自然含水比は 50~120%程度であり、その間隙比は 1~3 程度を示しており³⁾、メキシコシティー粘土とは土の物理的特性が大きく異なっている。Mesri et al.²⁾は、メキシコシティー粘土が火山灰起源の堆積物であること、スメクタイトが主要粘土鉱物であること、珪藻化石や有機物が多く含まれていることを指摘している。一方、我が国に分布している多くの粘性土も火山灰起源の堆積物であり、主要粘土鉱物はスメクタイト、その堆積物には珪藻化石が多く含まれており、

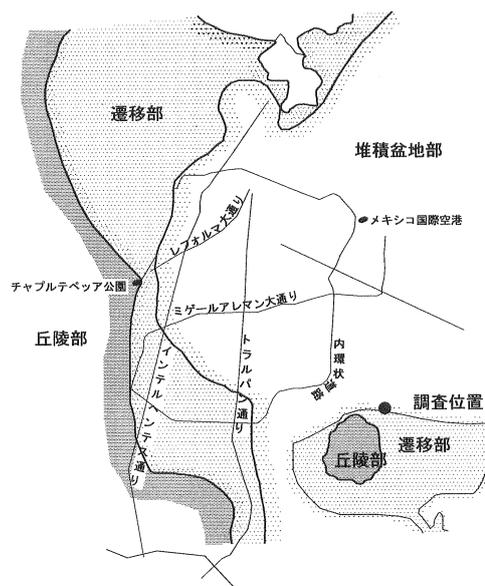


図-1 調査位置

自然含水比や間隙比の大きさの違いを除くと、メキシコシティーの地盤と我が国の粘性土地盤には多くの共通点も見られる。

筆者らは現在、メキシコシティーの地盤を対象として、堆積盆地構造の地盤特性について研究を行っており、得られた成果を基に、堆積盆地構造が地震動に及ぼす影響と地震被害との関係を明らかにしようと考えている。堆積盆地構造の地盤特性を明らかにするためには、堆積構造の異なった盆地中央部と盆地縁部の 2 箇所での地盤調査を行い、それらの振動特性も考慮して検討を行う必要がある。今回、メキシコシティー盆地縁部において地盤調査を実施した。調査位置を図-1 に示す。調査箇所は市内中心から南東に

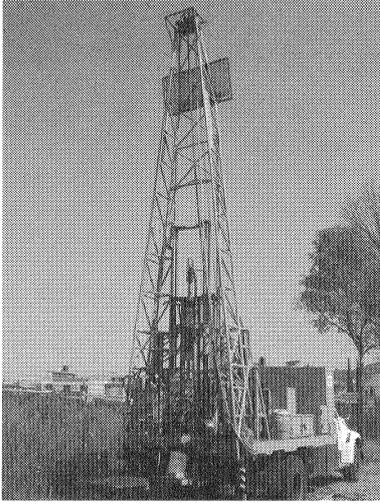


写真-1 ボーリングマシン



写真-2 室内ベーンせん断試験機

約 15km(Juarez 国際空港から南に約 15km)離れたところに位置しており、緯度経度はおよそ $N19^{\circ}19'17''$, $W99^{\circ}3'59''$ である。調査地点はメキシコシティの盆地縁部にあり、埋立厚さや基盤深さの変化が激しいところである。調査地点の埋立厚さは約 9m, 基盤深さは約 80m である。地盤調査は土のサンプリング, 静的コーン貫入試験および原位置ベーンせん断試験を行った。サンプリング試料に対して、物理試験, 室内ベーンせん断試験, 一面せん断試験および圧密試験を行った。なお, サンプリング試料については横浜植物防疫所から輸入許可を得た。また, 堆積環境を明らかにするために pH 試験, 強熱減量試験, 塩化物含有量試験, X 線回折試験, 放射線炭素法による年代測定および珪藻分析を行った。本論文では, メキシコシティ粘土の特徴を堆積環境の観点から考察すると共に, その工学的特性について我が国の港湾地域の粘性土との比較を行い, その違いについて検討を行ったので報告する。

2. 試料採取と原位置試験

2.1 サンプリング

サンプリングは日本から水圧式サンプラーを現地に持ち込み, JGS 1221「固定ピストン式シンウォールサンプラーによる土試料の採取方法」に準拠した。使用したボーリングマシンを写真-1 に示す。ボーリングマシンは原位置試験にも対応できるよう, ストロークが 1.5m 程度ある油圧ジャッキを装備している。サンプリングは, G.L.-9m から-14m まで 1m 毎に行った。

2.2 静的コーン貫入試験

静的コーン貫入試験(CPTU)は, 先端抵抗(q_c), 周面摩擦(f_s)および間隙水圧(u_d)を測定できる電気式静的コーン貫入試験機を使用した。 q_c の容量は30MPa, f_s の容量は0.5MPa, u_d の容量は2MPaであった。CPTUはJGS 1435「電気式静的

コーン貫入試験方法」によった。貫入は写真-1に示した貫入能力50kN程度のボーリングマシンを使用し, 貫入速度はほぼ1m/minであった。

2.3 原位置ベーンせん断試験

原位置ベーンせん断試験は JGS 1411「原位置ベーンせん断試験方法」に基づいて実施した。ベーンせん断試験機は押し込み式を使用した。ベーンシャフトには保護管との摩擦を極力なくすために, ボールベアリング付きのセンターライザーが取り付けられている。用いたベーンの直径は 4cm, 高さは 8cm である。ベーンの回転速度は $6^{\circ}/\text{min}$ となるよう手動で回転を与えた。トルクはトルクリングの読み値から求めた。試験終了後, ベーンを急速に 30 回転させ, 乱した地盤のベーンせん断強さを求めた。

3. 室内試験方法と試料押し抜き状況

3.1 室内ベーンせん断試験

室内ベーンせん断試験は, 試料をサンプリングチューブに入れたままの状態ベーンを 7cm 押し込んだ後, JGS 1411「原位置ベーンせん断試験方法」に準じて試験を実施した。室内ベーンせん断試験装置を写真-2 に示す。同装置は試料押し抜き装置に室内ベーンせん断試験用の機器を取り付けたものである。今回用いたベーンの直径は 1.5cm, 高さは 3cm である。ベーンの回転速度は $6^{\circ}/\text{min}$ である。トルクは荷重計による方法から求めた。試験終了後, 原位置ベーンせん断試験と同様にベーンを急速に 30 回転させ, 乱した状態で室内ベーンせん断強さを求めた。

3.2 一面せん断試験

一面せん断試験は JGS 0560「土の圧密定体積一面せん断試験方法」に基づき実施した。なお, 圧密は有効土被り圧(α_0)で載荷し, 圧密時間は一次圧密終了までとした。

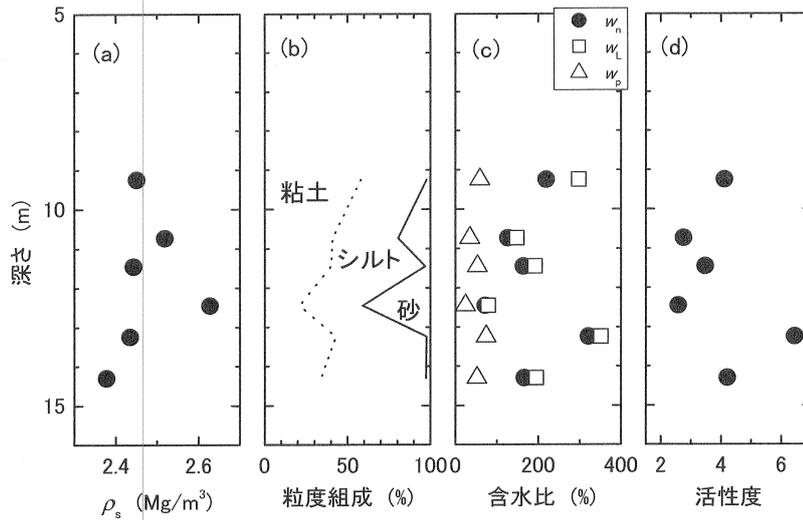


図-2 物理試験結果

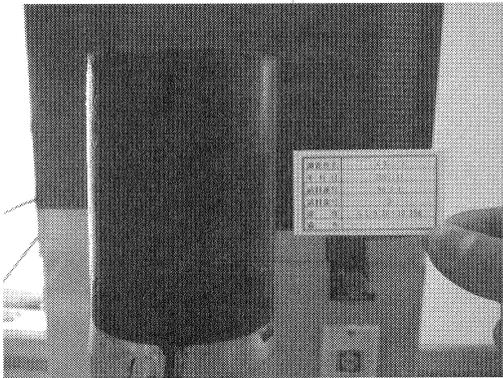


写真-3 試料の押し抜き状況

3.3 圧密試験

圧密試験は、JIS A 1227「土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法」に従った。ひずみ速度は0.02%/min、背圧は98kPaとした。

3.4 珪藻分析試験

珪藻分析は珪藻の種類と個数から堆積環境を把握する方法である。分析用試料は湿潤重量で約1gを取り出し、過酸化水素水で有機物の前処理を行った後、マウントメディアで封入しプレパラートを作製した。プレパラートは光学顕微鏡を使用して1,000倍で観察を行い、珪藻化石200個体以上について、同定および計数を行い、試料重量および計数したプレパラート面積から1g中の珪藻殻数を求めた。珪藻化石の環境指標種群は安藤⁷⁾および小杉⁸⁾が提案した方法により決定した。

3.5 化学分析試験

メキシコシティー粘土の化学特性を知るため、強熱減量試験、pH試験および塩化物含有量試験を行った。強熱減量試験はJIS A 1226「土の強熱減量試験方法」による。

pH試験はJGS 0211「土懸濁液のpH試験方法」による。pH標準液は中性りん酸塩とフタル酸塩を用いた。塩化物含有量試験はJGS 0241「土の水溶性成分試験法」による。得られた塩化物含有量から塩分濃度を求めた。

3.6 試料押し抜き状況

試料の押し抜き状況を写真-3に示す。試料は黒色を示す試料が多く、分解の進んだ有機物を多く含んでいることが推察される。

4. 試験結果および考察

4.1 物理特性

物理試験結果を図-2に示す⁴⁾。土粒子密度(ρ_s)は2.378~2.628Mg/m³に分布しており、我が国の海成粘性土の ρ_s の平均値2.68Mg/m³よりも小さな値を示している³⁾。我が国の海成粘性土の ρ_s 値は、珪藻化石の含有のため諸外国の粘性土から得られたそれよりも小さいことが知られている⁵⁾が、メキシコシティー粘土の ρ_s 値は我が国のそれよりもさらに小さい。これは、メキシコシティー粘土には有機物が多く含まれていることが理由の一つと考えられる。粒度組成については、深度10.5mと12.5m付近に砂分が多く含まれている層が認められるが、その他の深度ではシルト分と粘土分が卓越している。メキシコシティーの地盤は盆地山塊部からの土砂の流入や降灰による影響のため、地盤構成は複雑である。なお、図-2(b)に示した粘土分は2 μ m以下の粒径とした。液性限界(w_L)は砂分の含有量の多い深度12.5mのデータを除くと148~351%の範囲に分布している。自然含水比(w_n)は同じく深度12.5mのデータを除くと126~351%に分布しており、多くの深度で w_n 値と w_L 値はほぼ同じ値を示している。塑性限界(w_p)についても、深度12.5mのデータを除くと、35~74%の範囲に分布しており、塑性指数(I_p)は113~277を示す。地盤材料の工学的分類名は、粘土(高液性限界)であり、分類記号は(CH)であ

表-1 珪藻殻の数 (個/g)

Mexico City clay						Hiruzen	Hachirogata clay
9.5m	10.5m	11.5m	12.5m	13.5m	14.5m	Diatoms	
14.7E+06	3.40E+06	3.70E+06	0.43E+06	3.92E+06	2.16E+06	2.14E+08	1.90E+07

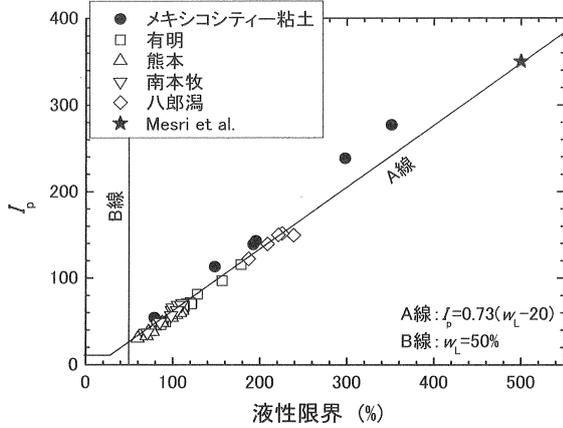


図-3 塑性図

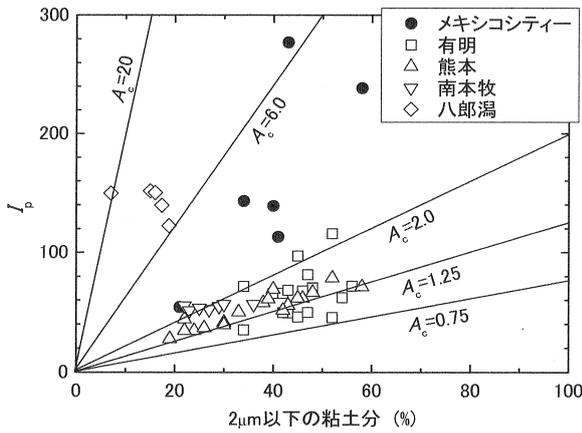
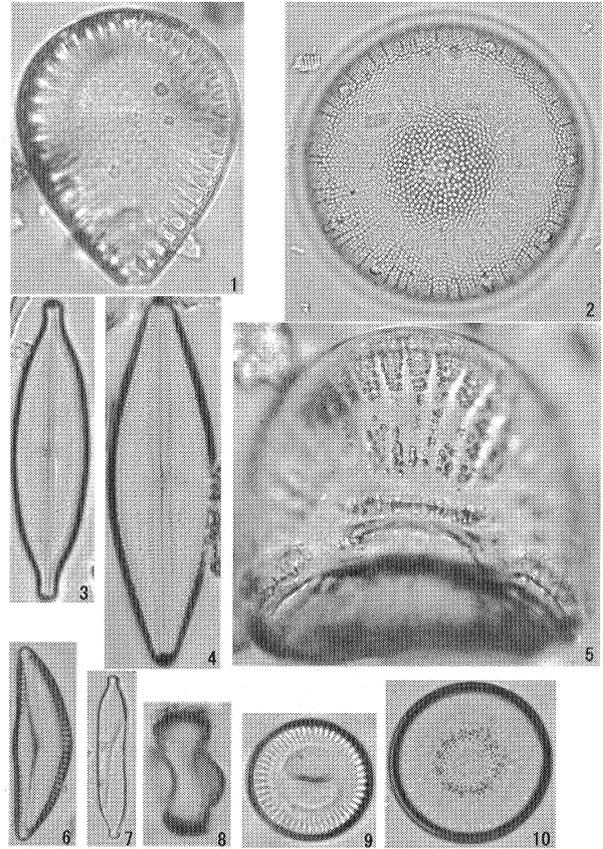


図-4 活性度

る。メキシコシティ粘土は火山性堆積物であると考えられるが、日本の火山灰質粘性土の(VH₁)や(VH₂)とは物理特性が本質的に異なるものと推察される。活性度(A_c)は 2.6 ~6.4 を示し活性の高い土に分類される。

メキシコシティ粘土の I_p と w_L の関係を有明粘土、熊本粘土、南本牧粘土ならびに八郎潟粘土のそれらと伴に塑性図として図-3 に示す。今回得られたメキシコシティ粘土の塑性は、諸外国の粘性土でも見られたように A 線のかなり上方に位置している⁹⁾。一方、同じメキシコシティ粘土でも Mesri et al.²⁾が示したデータは A 線上にある(★印、1 データのみ)。メキシコシティ粘土とはいっても火山噴出物の違いや堆積条件などによって、物理特性は大きく異なっていることが推察される。次に、A_cに着目してメキシコシティ粘土の物理特性を検討することとする。

図-4 に図-3 に示した粘土の活性度を示す。メキシコシティ粘土の A_cは前述したように活性粘土に分類される。我が国の海成粘性土である有明粘土、熊本粘土および南本



No.5 は 50μm, その他 20μm

1. *Surirella peisonis*, 2. *Stephanodiscus sp.*
- 3・4. *Anomoeoneis aphaerophora f. costata*
5. *Champlodiscus sp.* 6. *Cymbella caespitosa*
7. *Hantzschia amphioxys* 8・9. *Cyclotella meneghiniana*
10. *Cyclotella lacunarum*

図-5 珪藻化石顕微鏡写真

牧粘土の A_c 値はおおよそ 0.75~2.2 を示しており、普通の活性度の粘土あるいは活性粘土に分類されるが、メキシコシティ粘土のそれよりかなり小さい。後述するようにこの両者の違いは有機物含有量の差によるものと考えられる。次に、Mesri et al.²⁾はメキシコシティ粘土には珪藻化石が多く含まれていることを指摘しているため、珪藻化石が活性度に及ぼす影響について比較する。八郎潟粘土は珪藻化石を多く含んでおり、強熱減量(L_i)も 12%程度である。メキシコシティ粘土の L_i 値は 4.2 化学特性で示すように 7~15%であり、八郎潟粘土とほぼ同様な値を示している。八郎潟粘土の A_c 値は 6 以上であり、今回のメキシコシティ粘土の A_c 値が 2~6 程度であることを考えると、この違いは珪藻化石の含有量の影響と考えられ、今回のメキシ

表-2 X線回折結果

採取深度	Qz	Cr	Pl	Sm	Cc	Py	Amo
9.00~9.90m	±	△	+		±	±	○
11.00~11.90m	±	+	+	±	△	±	○
12.00~12.90m	±	+	△	±	+	±	△
13.00~13.88m	±	+	+	±	±	±	○
14.00~14.90m	±	△	+	±	△	±	○

量記号...◎:多量, ○:中量, △:少量, +:微量, ±:極めて微量

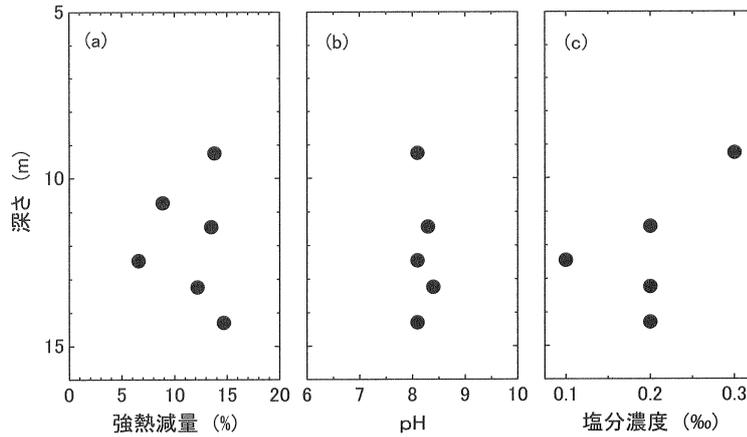


図-6 化学特性結果

コシティー粘土には珪藻化石があまり含まれていないものと推察される。珪藻化石は20~80 μ m程度の大きさを示すものが多いため、粒度試験を行うと珪藻化石はシルトに分類される。このため、珪藻化石を多く含む試料の粘土分は相対的に少なくなり、 A_c 値は大きくなることから、今回のメキシコシティー粘土には珪藻化石がそれほど多く含まれていないと判断できる。この事実を確認するため珪藻分析を行ったので以下に述べる。

図-5に珪藻化石の顕微鏡写真を示す。なお、写真右下に示す1~10の番号は、それぞれ凡例に示した1~10の珪藻名に対応している。深度9.5m, 10.5m, 12.5mおよび14.5mの試料では、淡水性の*Cyclotella meneghiniana*が多く出現しており、河川最下流部で河川の流速が遅くなった環境で堆積したものと考えられる⁷⁾。また、深度11.5mおよび13.5mの試料は、*Anomooneis*が多く出現しており、湖岸の泥表土付近に堆積したことが推定される⁸⁾。メキシコシティー粘土は珪藻化石の種類からも水の流れが非常に緩やかな環境で堆積したことが明らかとなった。表-1にメキシコシティー粘土から得られた珪藻殻数を蒜山産珪藻土および八郎潟粘土の珪藻殻設計数結果と併せて示す。深度9.5mから得られた珪藻数は八郎潟粘土のそれとほぼ同じであるが、その他の深度の珪藻数は八郎潟粘土のそれよりも少ない。このことから、今回調査したメキシコシティー粘土の珪藻化石の含有量は、比較的少ないことがわかる⁵⁾。以上の物理特性結果から図-3や図-4に示されたメキシコシティー粘土の塑性や活性度は有機物によって発揮されているものと考えられる。

4.2 化学特性

図-6に強熱減量、pHおよび塩分濃度の分布を示す。強熱減量(L_i)は7~15%に分布しており、我が国の海成粘性土の L_i 値がおよそ1~2%であることを考えると全体的に有機質分の多い地盤である。図-6(b)にpH値の分布を示す。pH値は8.1~8.4の弱アルカリ性を示しており、土の堆積過程において一度も大気に曝されることなく淡水中に沈降したことが推察される。海成粘性土においても海水準の変動によって陸化しない限り、pH値は8前後を示す。図-6(c)に塩分濃度の分布を示す。塩分濃度はおよそ0.1~0.3%を示している。一般に、海水の塩分濃度は35%程度であり、本データはそれより非常に小さな値を示していることから、淡水中に堆積したことが推定される。

4.3 鉱物の同定と堆積年代

土に含まれる鉱物を同定するために、無定方位法および定方位法によってX線回折試験を行った。定方位法に用いた試料はEG(エチレングリコール)処理を行った後、再度X線回折試験を行った。表-2に無定方位法から得られた結果を示す。表中の記号でQzは石英、Crはクリストバライト、Plは斜長石、Smはス멕タイト、Ccは方解石、Pyは黄鉄鉱、Amoは非結晶物質を示す。全体的な傾向として、少量のクリストバライト、微量の斜長石、極めて微量の石英、方解石、黄鉄鉱が認められ、非結晶物質(火山ガラス、珪藻化石など)が中程度含まれており、粘土鉱物は認められない。定方位法によっても粘土鉱物は認められなかった。Mesri et al.²⁾はその論文でス멕タイトの有無を

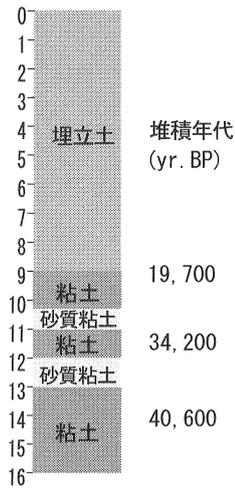


図-7 年代測定結果

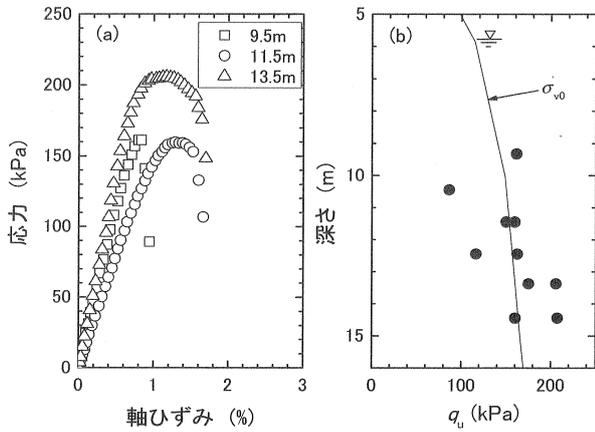


図-8 一軸圧縮試験結果

論じ、「スメクタイト有り」と結論づけたが、堆積層によっては、スメクタイトが検出されない事例が報告されている⁷⁾。今回の調査からも粘土鉱物は認められなかったが、前述したようにメキシコシティー粘土は非常に大きな m_L 値と I_p 値を示す。すなわち、メキシコシティー粘土の主要鉱物はガラス質の非結晶物質であり、粘土鉱物はほとんど存在しないが、有機物によって土の粘性が発揮されているものと考えられる。

年代測定は加速器質量分析法(AMS 法)による放射性炭素年代測定を行った。試料は超音波洗浄や塩酸などによる酸洗浄を行い、炭化植物遺体などを用いて測定を行った。図-7 に年代測定結果を土質柱状図と併に示す。深度 9.5m で 19,700yrBP、深度 12.5m で 34,200yrBP、深度 14.5m で 40,600yrBP の値を得た。埋立地盤直下の深度 9.5m における年代は 19,700yrBP を得ているが、年代測定に当たって炭化植物遺体を用いたことや Santoyo et al.⁹⁾ が示しているメキシコシティーの地盤情報から推察すると得られたデータは信頼性の高い値であると考えられる。

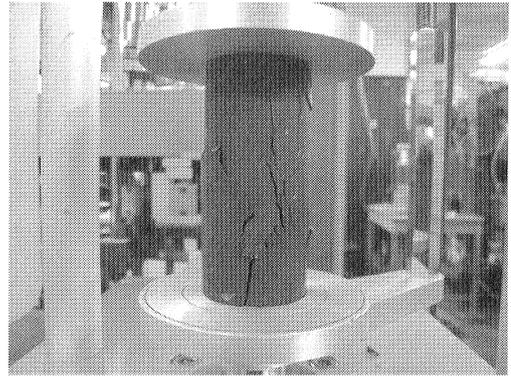


写真-4 試料の破壊状況

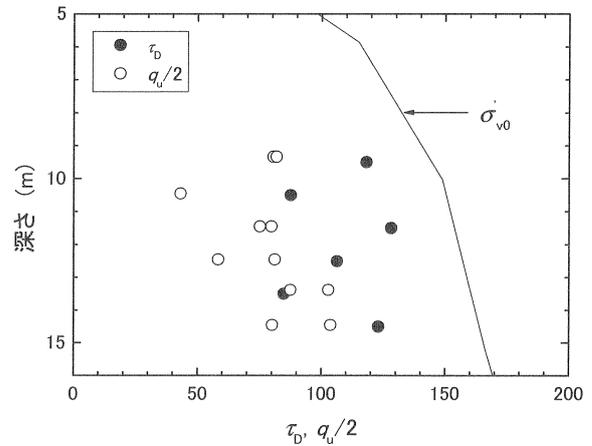


図-9 一面せん断試験結果

4.4 せん断特性

a) 一軸圧縮試験

図-8 に一軸圧縮試験結果を示す。図-8(a)に代表的な応力～ひずみ曲線を示す。いずれの試料も破壊時のひずみは 0.8～1.3 と極めて小さく、構造が発達しているものと推察される。深度 9.5m の試料では、破壊に至るまで応力と軸ひずみは急激かつ直線的に増加していく。また、応力が最大値を示すとその後、僅かな軸ひずみの増加であっても、応力は急激に減少する脆性破壊の傾向が見られた。試料の破壊状況を写真-4 に示す。これらの試料の変形係数(E_{50})は、15.9～27.3MPa を示しており、小川・松本³⁾が示した E_{50} と粘着力(c)の上限値の相関である、 $E_{50}=335 \cdot c$ に近い値を示している。図-8(b)に q_u 値の分布を有効土被り圧(α'_0)と併に示す。 q_u 値の多くは α'_0 ラインあるいはそのラインより大きな値を示している。小川・松本³⁾は正規圧密領域の粘性土の土には、 $q_u=0.68 \cdot \alpha'_0$ の関係が、過圧密領域の粘性土では $q_u=0.81 \cdot \alpha'_0$ の関係があることを報告している。メキシコシティー粘土の q_u/α'_0 値は砂分の多い深度 10.5m と 12.5m の試料を除くと、0.98 から 1.27 を示しており、 α'_0 値に対して q_u 値が非常に大きな値を示し、高位な構造を有していることがわかる。

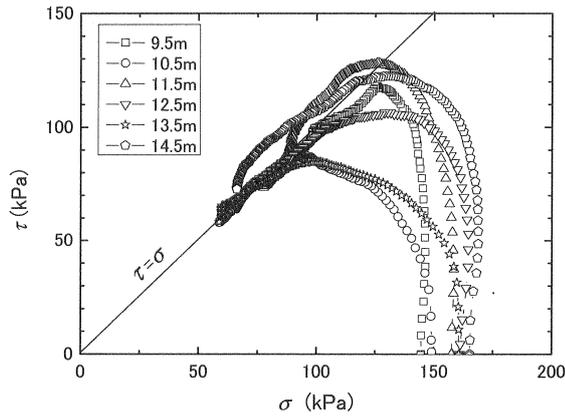


図-10 応力経路

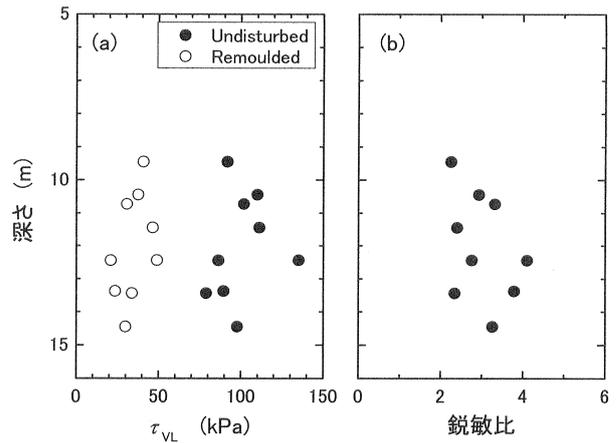


図-11 室内ベーンせん断試験結果

b) 一面せん断試験

図-9 に一面せん断強さ(τ_D)の深度分布を一軸圧縮強さ($q_u/2$)の深度分布および α'_0 ラインと併に示す。 τ_D 値は85~128kPaにばらついて分布している。これは、調査地点の地層構成が一樣ではなく、堆積条件がそれぞれの地層によって微妙に異なっているためと考えられる。また、 τ_D 値と $q_u/2$ 値を比較すると、多くの深度で τ_D 値は $q_u/2$ 値よりも大きな値を示しており、 $q_u/2$ 値が砂分含有量や脆性破壊の影響を受けていることが推察される。 τ_D/α'_0 値は0.53~0.83を示しており、小川・松本³⁾が示した、過圧密海成粘性土の($q_u/2$)/ α'_0 値の0.4程度より、かなり大きな値を示している。堆積環境が大きく変わる盆地構造の地盤においては、一軸圧縮試験の適用には十分な注意を払う必要がある。

図-10 に一面せん断試験から得られた応力経路を示す。深度10.5mと13.5mから得られた試料の応力経路は、正規圧密試料の経路を、その他の深度の応力経路はやや過圧密試料の経路を示している。また、破壊基準線の傾きはほぼ $\tau = \sigma$ を示し、それぞれの試料の τ の最大値を結んだ ϕ_1 は約41°、包絡線の傾きを示す ϕ_2 は約45°を示している。メキシコシティー粘土は(CH)に分類されてはいるが、 ϕ は砂質土以上に大きな値を示している。その理由を明らかにするため、今後土構造やひずみ速度の影響など十分な検討が必要となる。

c) 室内ベーンせん断試験

図-11(a)に室内ベーンせん断強さ(τ_{VL})の深度分布を示す。不攪乱状態の τ_{VL} 値は τ_D 値と同様にばらついており、その値は79~135kPaに分布している。 τ_{VL}/α'_0 値についても τ_D/α'_0 値と同様0.49~0.86を示しており、小川・松本³⁾が示した、過圧密海成粘性土の($q_u/2$)/ α'_0 値の0.4程度より、極めて大きな値を示している。攪乱状態の τ_{VL} 値についても0.21から0.49とばらついている。田中¹⁰⁾は乱れの異なった試料に対して室内ベーンせん断試験を実施し、同試験は試料の乱れの影響を受けにくい試験であると評価していることから、ここに表れたばらつきは地盤の特徴であるものと考えられる。図-11(b)に鋭敏比の深度分布を示す。鋭敏比は不攪乱状態の τ_{VL} 値を攪乱状態の τ_{VL} 値で除して

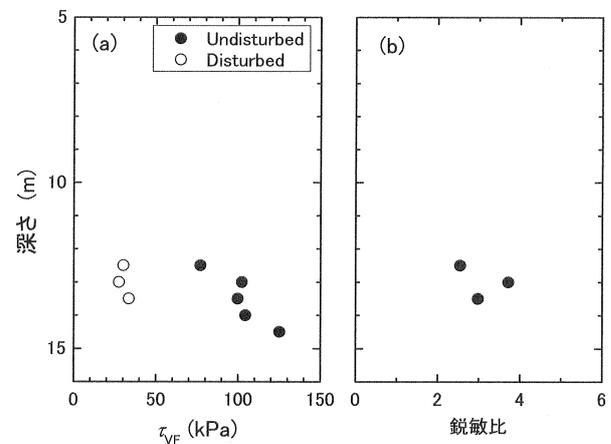


図-12 原位置ベーンせん断試験結果

求めた。鋭敏比は地層の変化を受け、2.2~4.1にばらついている。Díaz-Rodríguez¹¹⁾は一軸圧縮試験から得られた鋭敏比を平均値で8と報告しており、室内ベーンせん断試験から得られた鋭敏比はDíaz-Rodríguez¹¹⁾が報告した値よりかなり小さい値を示した。また、本調査地点における鋭敏比は過圧密粘土のカナダ、ルイズビル粘土の鋭敏比(4~6)¹¹⁾と比較しても小さな値を示している。

d) 原位置ベーンせん断試験

原位置ベーンせん断試験結果を図-12に示す。図-12(a)に原位置ベーンせん断強さ(τ_{VF})の深度分布を示す¹²⁾。原位置ベーンせん断試験は地盤が固かったことやベーンが保護ケースから出なかったこともあり、深度12.5mから14.5mまで50cm毎に5点の測定を行った。また、攪乱状態の原位置ベーンせん断試験は、深度12.5mから50cm毎に3点の測定を行った。不攪乱状態の τ_{VF} 値は77~125kPaに分布しており、深度が増加するのに従ってその値も増加している。攪乱状態の τ_{VF} 値は27~34kPaを示した。図-12(b)に鋭敏比の深度分布を示す。鋭敏比は室内ベーンせん断試験結果と同様におよそ2.5~3.7に分布している。この値は、室内ベーンせん断試験結果と同様に、Díaz-Rodríguez¹¹⁾が報告した鋭敏比あるいはルイズビル粘土の

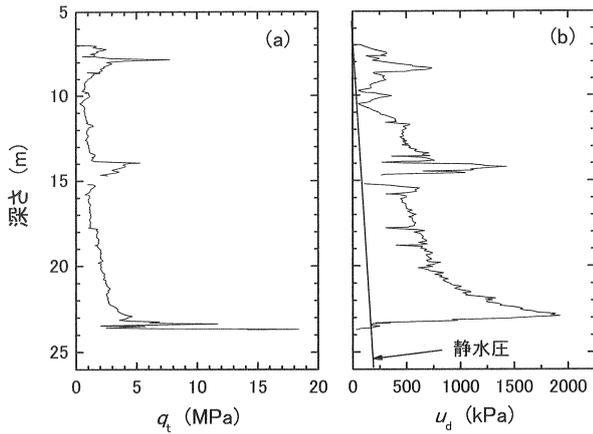


図-13 コーン貫入試験結果

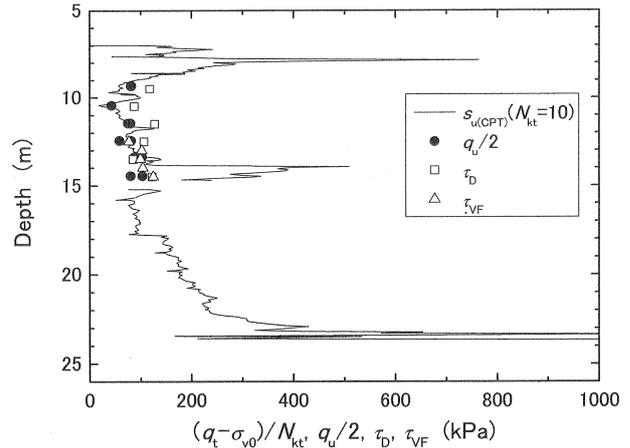


図-14 各種試験から得られたせん断強さの比較

鋭敏比¹¹⁾よりも小さな値を示している。不攪乱試料の τ_{VF} 値は、図-14に示すように他のせん断試験結果と比較しても常識的な値を示しているため、鋭敏比が小さいことについては攪乱試料の τ_{VF} 値に問題のあることが示唆される。ベーンせん断試験における攪乱状態の τ_{VF} 値を求めるための試験方法やベーンせん断強さの発現機構について今後詳細な検討が必要であろう。

e) 静的コーン貫入試験結果

図-13に静的コーン貫入試験結果を示す¹²⁾。図-13(a)は間隙水圧(u_d)で補正された先端抵抗(q_t)の深度分布を示す。深度7mまではよく締まった埋立部が存在するため、深度7mまではボーリングによって事前削孔を行い、CPTUは深度7mから計測を行った。また、深度15m付近にもCPTUの貫入が困難な地層があったのでボーリングによる削孔を行った。深度8m、14mおよび24m付近では q_t 値が著しく大きな箇所が認められ、また、 u_d 値が静水圧に近いことから密な砂層が存在することが分かる。深度10m~13mおよび深度16m~22mでは q_t 値が小さく、 u_d 値が大きことから粘土層と判断される。しかしながら、ところどころに q_t 値および u_d 値が共に小さくなる層が存在することから、緩い砂層を挟在しているものと考えられる。

図-13(b)に u_d の深度分布を示す。深度8.4m、14.2mおよび22.8m付近に u_d 値が著しく大きな層がある。また、この層の q_t 値は比較的大きな値を示しており、 u_d 値と q_t 値の両方が大きな層が存在している。この層はRobertsonが示した土質分類¹³⁾によれば、粘土質シルト~シルト質粘土に相当しており、この層の前後の土の性状から判断するとやや固結した火山灰層と推定される。深度14.2mから採取された試料の観察結果から、この層は火山灰層であることが確認された。また、この層の間隙水圧係数(B_q)は0.35~0.45を示しており、正規化された先端抵抗(Q_t)は、19~27を示す。 B_q と Q_t は次式で定義される¹³⁾。

$$B_q = (u - u_0) / (q_t - \alpha_0) \quad (1)$$

表-3 土質とコーン係数

調査地点	主要粘土鉱物	地質年代	過圧密比	N_{kt}
メキシコシティ	なし	更新世	1.3-2.5	10
ルイズビル	イライト, クロライト	完新世	2.2-4.4	12
佐賀有明	スメクタイト	完新世	1.0-1.3	10
八郎潟	スメクタイト	完新世	1.0-1.1	8
釜山	イライト	完新世	1.0-1.3	10
バンコク	スメクタイト	完新世	1.0-2.2	8
シンガポール上部層	カオリナイト	完新世	3.7-5.8	12
シンガポール下部層	カオリナイト	更新世	2.8-3.6	20
ハイフォン	カオリナイト	更新世	2.0-2.5	16

$$Q_t = (q_t - \alpha_0) / \alpha_{v0} \quad (2)$$

ここに、 u は u_d 、 u_0 は静水圧、 α_0 は全応力表示の土被り圧である。正規圧密粘土の B_q 値は0.6~0.8であり¹⁴⁾、過圧密粘土のそれは0.5~0.8程度といわれており¹⁵⁾、正規圧密粘土の B_q 値は過圧密粘土のそれよりも大きい。火山灰層と考えられる本層の B_q 値は0.45以下を示していることから、一般的な正規圧密粘土や過圧密粘土と火山灰層とを B_q 値によって区別できるものと考えられる。また、 Q_t 値についても通常の粘性土地盤よりも大きな値を示すことから、 q_t 値と u_d 値に加え、 B_q 値と Q_t 値を考慮することによって、CPTUから火山灰層を特定することが可能であるものと考えられる。

図-14にコーン係数(N_{kt})を10とした場合のせん断強さ($s_{u(CPT)}$)、 $q_u/2$ 、 τ_D および τ_{VF} の深度分布を示す。 N_{kt} の値は $q_u/2$ 値を参考に決定した。 N_{kt} 値を10とした場合の $s_{u(CPT)}$ 値と $q_u/2$ 値は、深度14.5m付近のデータを除きよく一致している。深度14.5m付近で両者のデータが一致しない理由として、調査地点はメキシコシティ盆地縁部に当たり、火山灰層と考えられるこの地層が複雑に傾斜しているためと考えられる。 τ_D 値は $s_{u(CPT)}$ 値および $q_u/2$ 値と比較するとやや大きめの値を示す。 τ_{VF} 値は τ_D 値とほぼ同様の値を示しており、その品質に問題はないと考えられるが、ベーンせん断試験の測定不能箇所が多くあり、このような地盤に対するその適用性に課題を残した。

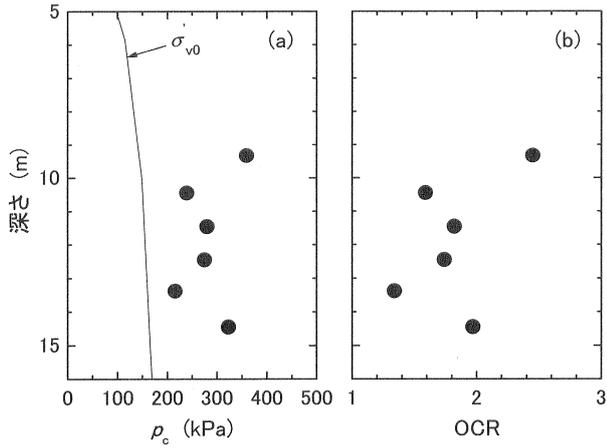


図-15 p_c と OCR の深度分布

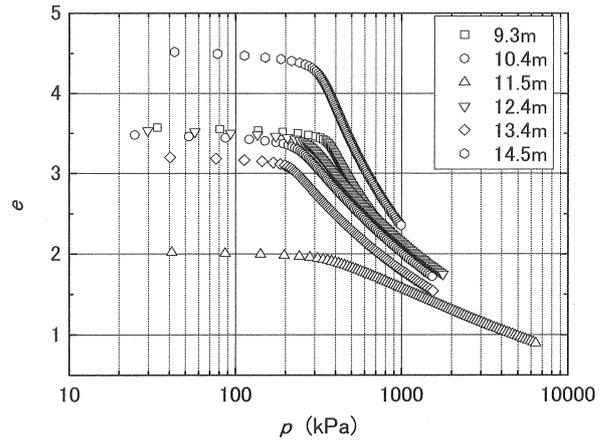


図-16 e - $\log p$ 曲線

表-3 に $q_u/2$ を基準として得られた N_{kt} 値を示す¹⁶⁾。図-14 に示したようにメキシコシティー粘土の N_{kt} 値は 10 を示しており、完新世の粘性土から得られたそれとほぼ同じ値を示している。メキシコシティー粘土が堆積した地質年代は更新世であるので、シンガポール粘土下部層やハイフォン粘土のように、 N_{kt} 値が大きくなることが予想されるが、メキシコシティー粘土の粘性は有機物で発揮され、採取した試料に十分な残留有効応力が保持されたものと考えられ、一軸圧縮試験の適用条件を満足した結果であるものと考えられる。しかしながら、この結果は堆積年代と N_{kt} 値とを一義的に関連づけることが困難であることを示唆しており、CPTU の適用条件や評価基準に関するさらなる研究が望まれる。

4.5 圧密特性

a) 圧密試験結果

図-15(a)に定ひずみ速度載荷による圧密試験(CRS)から得られた圧密降伏応力(p_c)の分布を α_{v0} と伴に示す。 p_c 値は α_{v0} より大きな値を示しており、過圧密比(OCR)の比較的大きな地盤であることがわかる。深度 9.3m の試料の p_c 値はおよそ 360kPa であり、埋立荷重の影響を受けているものと考えられる。この深度 9.3m のデータを除くと、 p_c 値は深度方向に増加する傾向が見られる。

図-15(b)に OCR の深度分布を示す。OCR 値は 1.3~2.5 にばらついて分布している。我が国の海成粘性土地盤における OCR 値は 1.1 程度を示すことが多いので³⁾、メキシコシティーの地盤はかなり過圧密比の大きな地盤といえる。また、メキシコシティー粘土の OCR 値は、過圧密履歴を持つレイズビル粘土の OCR 値である 2.2~4.4 と比較するとやや小さな値を示す。姜ら¹⁷⁾によれば、メキシコシティー粘土は、間隙構造において団粒間のリンクが地盤堆積方向に非常に発達した高位な構造を有していると報告している。このことから、メキシコシティー粘土は、過圧密履歴を受けたレイズビル粘土とは異なり、二次圧密やセメンテーションによる年代効果で過圧密を示す擬似過圧密粘土であると考えられる。

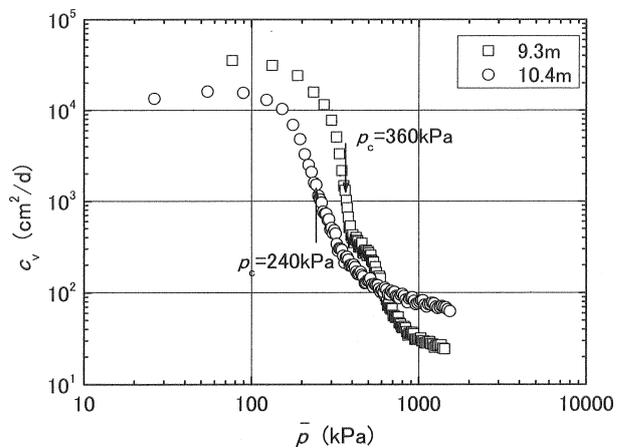


図-17 深度 9.3m および 10.4m から得られた試料の $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線

図-16 にメキシコシティー粘土の e - $\log p$ 曲線を示す。初期間隙比(e_0)はおよそ 2.04~4.56 に分布しており、深度 14.5m の試料の e_0 値が一番大きく、深度 11.5m の試料のそれが一番小さい。多くの試料の e_0 値は 3.5 付近にあり、深度方向に e_0 値が小さくなる正規圧密粘土のような特徴は見られない。深度 11.5m の試料の e - $\log p$ 曲線が他の試料のそれとは異なる挙動を示しているが、これはこの試料に砂分がやや多く含まれていたためと考えられる。深度 11.3m の試料を使って再試験を行ったところ、深度 9.3m 試料の e - $\log p$ 曲線とほぼ同様な曲線が得られた。同じシンウォールチューブ内においても土性は大きく異なっていることがわかる。圧縮指数(C_c)は 0.89~4.63 に分布している。深度 11.5m の試料のデータを除くと、メキシコシティー粘土の C_c 値は、2.31~4.63 となり、我が国の海成粘性土地盤の C_c 値である 1~2³⁾より、かなり大きなことがわかる。すなわち、メキシコシティーの地盤は載荷重が p_c 値をすこしでも上回ると非常に大きな沈下を生じる危険性のあることが示唆される。

図-17~図-19 に $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線を示す。それぞれの試料の $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線が複雑な挙動を示しているため、試

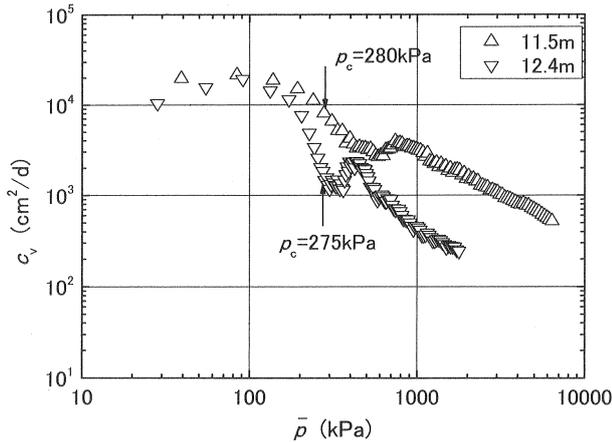


図-18 深度 11.5m および 12.4m から得られた試料の $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線

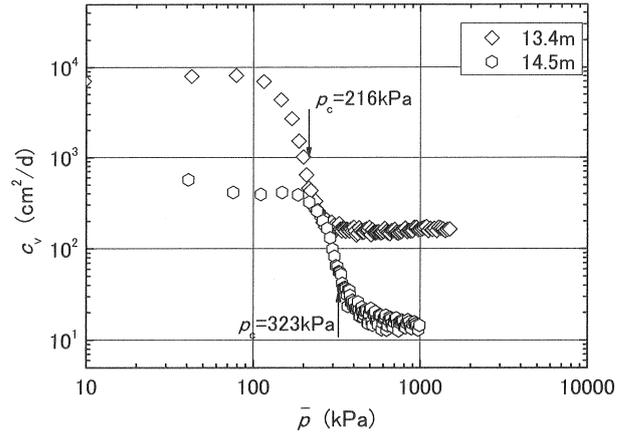


図-19 深度 13.4m および 14.5m から得られた試料の $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線

験結果を 3 タイプに分けて表示する。図-17 に深度 9.3m および 10.4m の試料から得られた $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線を示す。なお、CRS は軸ひずみが 40%となったところで試験を終了している。 c_v 値は過圧密領域では \bar{p} 値の増加に対してそれほど大きく減少しないが、 p_c 値付近になると大きく減少し始める。その後、正規圧密領域においても、 c_v 値は \bar{p} 値の増加に対して減少を続けている。深度 9.3m の c_v 値は 26 から $3.5 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{d}$ まで変化しているが、試料には有機物が多く含まれているため、過圧密領域においては間隙水圧の発生がほとんど無く、 c_v 値が大きく計算されているものと考えられる。このような $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線の挙動は、粒子破碎や有機物の存在ならびに CRS を軸ひずみが 40%となったところで打ち切ったことに原因があるものと考えられる。

図-18 に深度 11.5m および 12.4m の試料から得られた $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線を示す。深度 11.5m の試料から得られた c_v 値は過圧密領域では \bar{p} 値の増加に対してそれほど大きく減少しないが、深度 12.4m の試料の c_v 値は過圧密領域においても大きく減少している。また、両試料の c_v 値は、 \bar{p} 値が p_c 値より大きくなるとやや増加する傾向を示すが、 \bar{p} 値がさらに増加して正規圧密領域になると、 c_v 値は \bar{p} 値の増加に対して減少する。このような $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線は、有機物を多く含む土の挙動に類似しており¹⁸⁾、メキシコシティー粘土に有機物が多く存在している証と考えられる。

図-19 に深度 13.4m および 14.5m の試料から得られた $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線を示す。両曲線とも一般的に見られる $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線を示している。深度 13.4m および 14.5m の試料から得られた c_v 値はそれぞれ 150 および $18 \text{cm}^2/\text{d}$ である。深度 14.5m の試料から得られた c_v 値は我が国の港湾域で得られる平均的な c_v 値³⁾である $100 \sim 200 \text{cm}^2/\text{d}$ 程度よりかなり小さい。

以上のことから、メキシコシティー粘土の c_v 値は、応力履歴や堆積条件によって大きく異なり、 c_v 値を決定できない層のあることがわかった。

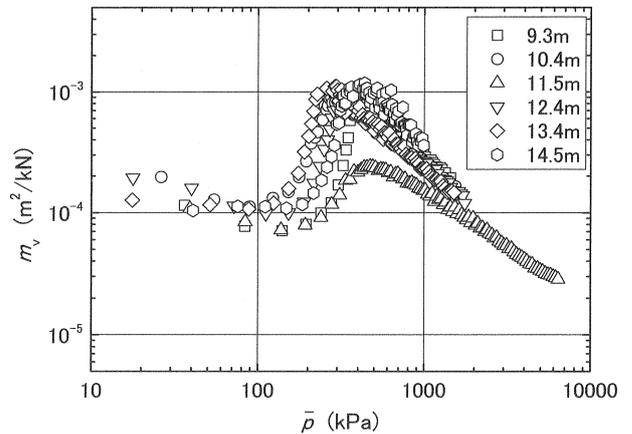
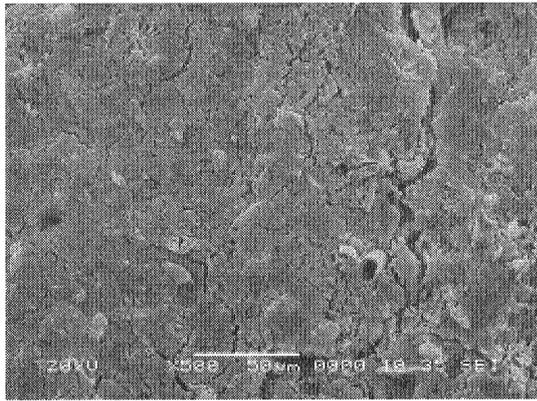


図-20 $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線

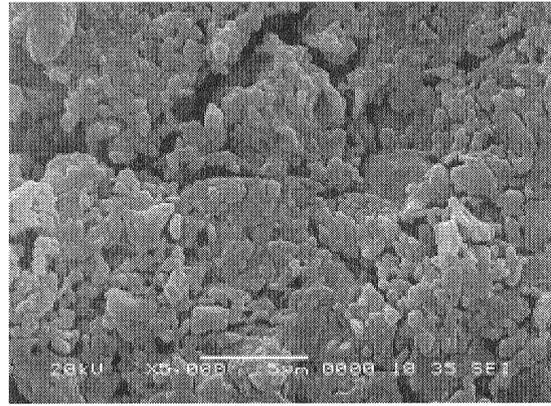
図-20 に $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線を示す。いずれの試料の $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線においても、 \bar{p} 値が 150kPa 付近に到達するまで m_v 値は緩やかな減少傾向を示し、 \bar{p} 値が p_c 値に到達する直前に m_v 値は急激に大きくなる。 \bar{p} 値が p_c 値を越すと m_v 値は、 \bar{p} 値の増加に伴ってその値は減少していく。 \bar{p} 値が 1,000kPa を越すとこれらの試料の $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線は深度 11.5m の試料を除き、一致する傾向を示す。 \bar{p} 値が 1,000kPa における m_v 値はおおよそ $2.5 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{kN}$ である。この値は \bar{p} 値が 1,000kPa における我が国の海成粘性土の m_v 値である $1 \sim 2 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{kN}$ よりもやや大きな値を示している³⁾。

4.6 微視構造

メキシコシティー粘土の構造特性を知るために、走査型電子顕微鏡(SEM)を使用して検討を行った。ここでは図-16 に示した $e \sim \log p$ 曲線において、異なった挙動を示した深度 11.5m の試料と平均的な挙動を示した深度 13.4m の試料の SEM から得られた画像を示す。図-21 は深度 11.5m

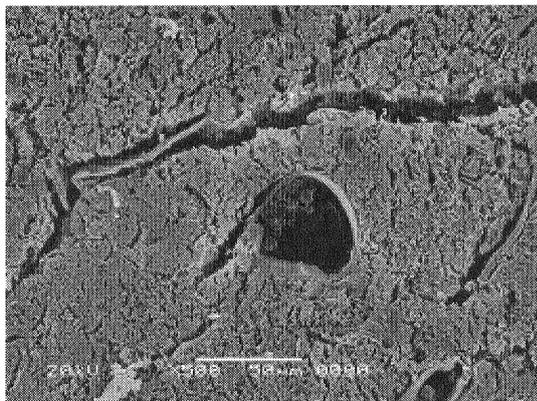


(a) 500 倍

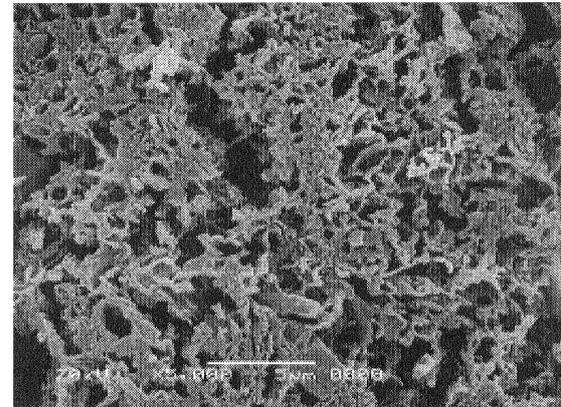


(b) 5,000 倍

図-21 深度 11.5m の SEM 画像

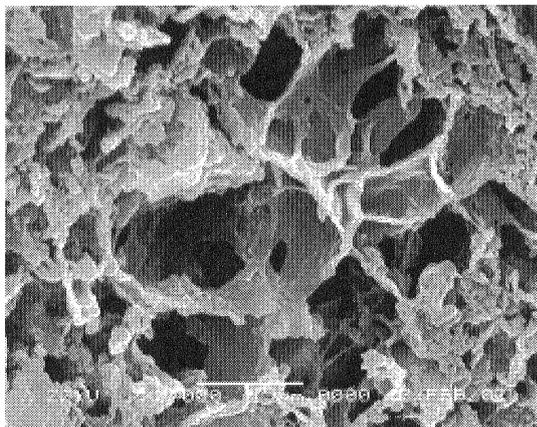


(a) 500 倍

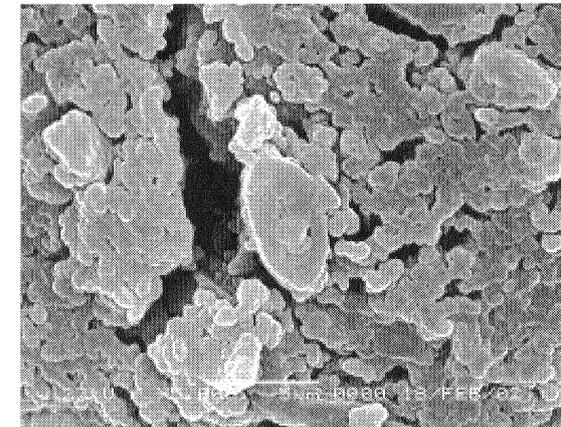


(b) 5,000 倍

図-22 深度 13.4m の SEM 画像



(a) 圧密前



(b) 圧密後

図-23 圧密前後の SEM 画像¹⁷⁾

の試料から得られた SEM 画像で 500 倍と 5,000 倍の画像を示す。500 倍の画像から、中央部右下にパイプ状の珪藻化石が存在するが、その他の箇所には認められない。5,000 倍の画像からは、1 μ m 以下の土粒子が多く認められるが、粒子間同士の結合は認識されず、図-23(b)に示す圧密後の画像に近い。このことから、この層は埋立地盤の荷重を受け圧密が進んだ層である可能性が高い。

図-22 に深度 13.4m から得られた試料の SEM 画像を示

す。500 倍の SEM 画像から、ところどころに珪藻化石や有孔虫化石が観察され、深度 11.5m の試料とは堆積環境が異なっていることがわかる。5,000 倍の SEM 画像から、海綿状の大きな間隙が見うけられ、その周りの土と土とはしっかりと結合していることが確認できる。このような地盤は、図-16 に示した e -log p 曲線からも理解できるように、 p_c 値よりも大きな荷重を受けることによって、急激な沈下を生ずることが予測される。

図-23に姜ら¹⁷⁾が行ったメキシコシティ粘土不攪乱試料の圧密前後の SEM 画像の比較を示す¹⁷⁾。図-23(a)に5,000倍で撮影された圧密前の SEM 画像を示す。試料には5 μm 程度の間隙が随所に見られ、それらがしっかり結合していることが見て取れる。一方、図-23(b)に示す圧密後の試料では、試料内の間隙はほとんど無くなり、0.5 μm 以下の粒子がもともとあった間隙を埋めている構造を示している。本結果から、図-21(b)に示した土構造は圧密によって生成されたものと推察される。

5. まとめ

メキシコシティ盆地縁部においてサンプリング、静的コーン貫入試験および原位置ベーンせん断試験を行った。サンプリング試料に対しては物理試験、室内ベーンせん断試験、一面せん断試験および圧密試験を行った。また、年代測定、珪藻分析、X線回折試験、塩化物含有量試験や熱減量試験などを行い堆積環境の検討を行った。これらの試験結果からメキシコシティ粘土の工学的性質について我が国の海成粘性土のそれとの比較を行った。本検討結果から得られた知見を以下に述べる。

- 1) メキシコシティ粘土の主要鉱物はガラス質の非結晶物質であり、粘土鉱物はほとんど存在しないが、有機物によって土の粘性が発揮されている。
- 2) メキシコシティ粘土は、珪藻分析から水の流れが非常に緩やかな環境で堆積したことが明らかとなった。また、メキシコシティ粘土の珪藻化石の含有量は、比較的少ないことがわかった。
- 3) メキシコシティ粘土は、過圧密履歴を受けたルイズビル粘土とは異なり、二次圧密やセメンテーションによる年代効果で過圧密を示す擬似過圧密粘土であると考えられる。
- 4) メキシコシティ粘土の c_v 値は、応力履歴や堆積条件によって大きく異なり、 c_v 値を決定できない層のあることがわかった。
- 5) 静的コーン貫入試験から得られるコーン係数(N_{kt})から、 N_{kt} 値と堆積年代とを一義的に関連づけることが困難であることを示唆した。

本研究は科学研究費補助金、基盤研究(B)海外学術調査、課題番号 20404010 によって実施されたものである。

参考文献

- 1) Díaz-Rodríguez, J. A.: Characterization and engineering properties of Mexico City lacustrine soils, *Proc. of Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Singapore, Vol. 1, pp. 725-755, 2003.
- 2) Mesri, G., Rokhsar, A. and Bohor, B.: Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay, *Geotechnique*, 25, No. 3, pp.527-554, 1975.

- 3) 小川富美子, 松本一明: 港湾地域における土の工学的諸係数の相関性, 港研報告, Vol. 17, No.3, p.34, 1978.
- 4) 中島美代子, 富田龍三, 田中政典: メキシコシティ粘土の特性(その1: 物理特性), 第43回地盤工学研究発表会講演集, pp. 155-156, 2008.
- 5) 田中政典, 田中洋行, 亀井健史, 林照悟: 珪藻含有量が土の工学的性質に与える影響, 第47回地盤工学シンポジウム論文集, pp.121-126, 2002.
- 6) 田中政典, 西川昌芳, 中島美代子, 亀井健史: 珪藻含有量が物理特性に及ぼす影響, 第43回地盤工学研究発表会講演集, pp. 325-326, 2008.
- 7) 安藤一男: 淡水産珪藻による環境指標群の設定と古環境復元への応用, 東北地理学会, 季刊地理学, Vol. 42, No. 2, pp. 73-88, 1990.
- 8) 小杉正人: 珪藻の環境指標種群の設定と古環境復元への応用, 日本第四紀学会, 第四紀研究, Vol. 27, No. 1, pp. 1-20, 1988.
- 9) Santoyo, E. V., Ovando, E. S., Mooser, F. and León E. P.: Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de MÉXICO, *TGC geotecnia*, pp.21-23, 2005.
- 10) 田中政典: 地盤の調査方法が沿岸域に分布する土の物性評価に与える影響の研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1068, p.66, 2003.
- 11) 田中政典, 亀井健史, 小川靖弘, 富田龍三: カナダ・ケベック州ルイズビル粘土の工学的特性, 地盤と建設, Vol. 25, No. 1, pp.25-32, 2007.
- 12) 田中政典, 渡部要一, 松岡達也, 三枝弘幸, 富田龍三: メキシコシティ粘土の特性(その2: 力学特性), 第43回地盤工学研究発表会講演集, pp. 157-158, 2008.
- 13) Robertson, P. K.: Soil classification using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 151-158, 1990.
- 14) 田中洋行, 榊原基生, 後藤健二, 鈴木耕司, 深沢健: 我が国の正規圧密された海成粘性土の静的コーン貫入試験から得られる特性, 港湾技術研究所報告, Vol. 31, No. 4, pp.61-92, 1992.
- 15) Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T. and Lancellotta, R.: New developments in field and laboratory testing of soils, *Proc. of 11th ICSMFE*, Vol. 1, pp.57-153, 1985.
- 16) Tanaka, M. and Tanaka, H.: An examinations and considerations on the engineering properties and the cone factor of soils from East Asian region, 2nd International Conference on Site Characterization, *Millpress*, Vol. 1, pp.1019-1024, 2004.
- 17) 姜敏秀, 土田孝, 西田ふみ: メキシコシティ粘土の微視的な構造特性, 第37回地盤工学研究発表会講演集, pp.261-262, 2002.
- 18) 池永均, 山口晴幸: 定ひずみ速度下での高有機質土の圧密特性, 土質工学会, 高有機質土地盤の諸問題に関するシンポジウム発表論文集, pp.141-146, 1993.

(2008年6月30日 受付)