

乾燥収縮履歴がシンガポール粘土の圧密特性に及ぼす影響

亀井健史¹⁾, 田中政典²⁾

¹⁾ 島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

²⁾ (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部

Effect of Shrinkage Histories due to Desiccation on Consolidation Characteristics of Singapore Clay

Takeshi KAMEI¹⁾ and Masanori TANAKA²⁾

¹⁾ Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

²⁾ Port and Airport Research Institute

Abstract

Most natural clays involve some degree of overconsolidation due to processes of mechanical unloading such as erosion, excavations, and changes in groundwater pressures. This paper describes an experimental investigation of the consolidation characteristics of natural and reconstituted Singapore clays subjected to desiccation histories, carried out using constant rate of strain consolidation. The test results show that the compression index, the coefficient of consolidation and the coefficient of volume compressibility are approximately constant irrespective of the shrinkage due to desiccation, although the consolidation yielding stress and the overconsolidation ratio are changed by shrinkage due to desiccation histories. Similar tendencies were shown by test results for Minamihonmoku and Ariake clays.

1. はじめに

わが国沿岸域は、海水準の変動に伴う海退によって陸化し、海進に伴って海中に没した地盤が存在する。Kaizuka et al.¹⁾は、今から約2万年前の最終氷期(主ウルム氷期)には海水準が現在の海水準より約140mも低下していたことを指摘し、その後、海水準は上昇や下降を繰り返しながら上昇し、現在の地盤が形成されていると報告している(図-1)。このような海水準の変動に伴って沿岸域に堆積してできた地盤には、乾燥履歴を受けた地盤と受けてない地盤が存在しており、両者の地盤工学的性質がかなり異なっている可能性は容易に推測できる。

筆者らはこれまで、海外において多くの土を採取し、我が国と外国との土の工学的特性の違い、さらには地盤調査法の違いが土の工学的性質に及ぼす影響を解明を解明してきている。この研究過程においてシンガポールの海底地盤のある層では、その時代に大きな載荷重変化が想定できないにもかかわらず、原位置における有効土被り圧に対して非常に大きなせん断強さの存在していることが明らかとなった。また、放射線炭素法(¹⁴C)による年代測定から、この層が氷河期には海水準の低下によって乾燥の影響を受けた可能性のあるこ

とを推定することができた。

土の乾燥収縮に関する研究として、Haines²⁾は土の収

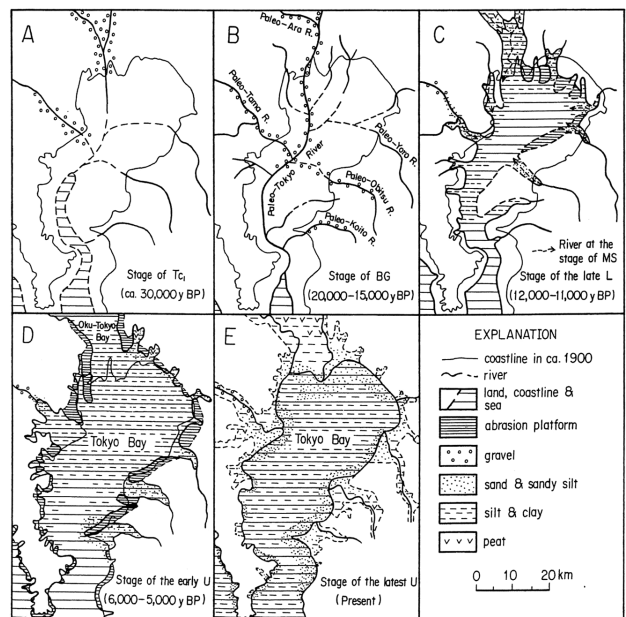


図-1 東京湾における海水準の変動に伴う地形変化¹⁾

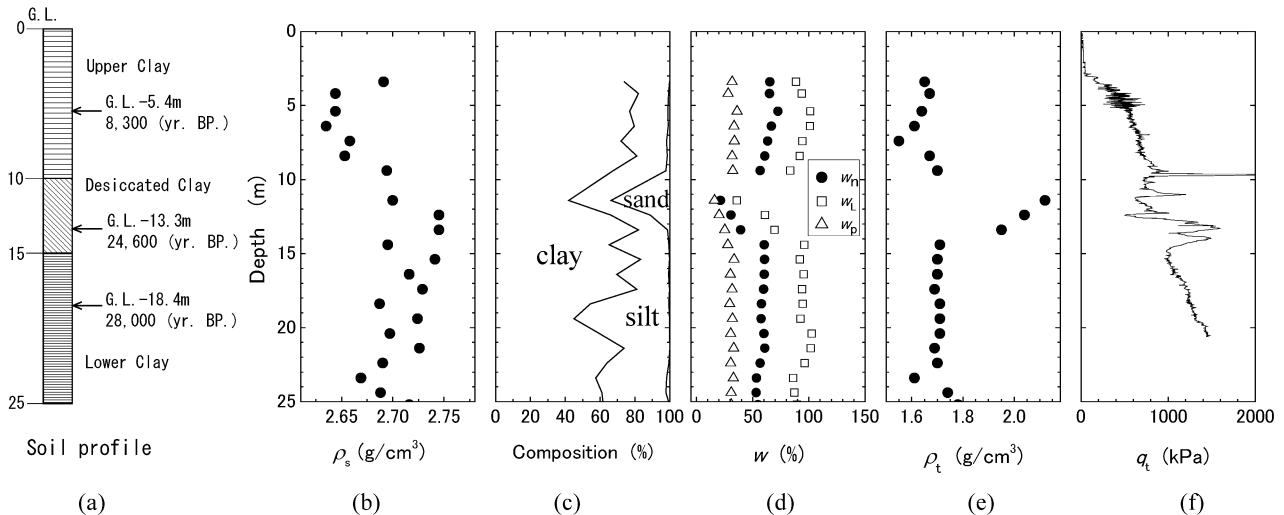


図-2 土質概要(シンガポール, Tekong 地区)

縮現象を土粒子、水および空気の体積変化に着目し、水分の減少と体積の減少が同量である正規収縮、水分の減少量に対して体積の減少が少ない残留収縮および水分が減少しても体積が減少しない無収縮状態が存在することを明らかにした。また、Yong & Warkentin³⁾は、土の配列構造から乾燥過程における土の体積変化等の挙動を明らかにしようと試みた。我が国における土の乾燥収縮に関する研究は、比較的新しく、土の乾燥収縮を土の物理的性質として扱った綿引⁴⁾や風間・高橋⁵⁾などの研究がある。最近では、土の乾燥収縮が工学的特性に与える影響について、伊藤・田中⁶⁾や谷・田中⁷⁾によって残留有効応力、圧密特性や過圧密比に着目した研究が行われている。田中ら^{8), 9)}はこれら一連の研究結果から、供試体内部の水分変化を精度良く捉えるため、磁気共鳴映像法(MRI)による可視化を試みた。

しかしながら、土の乾燥収縮に伴う工学的性質の変化を議論した研究は未だ少なく、未解明な点が多い。そこで本研究では、乾燥に伴う収縮履歴が圧密特性に及ぼす影響について、従来の定性的な概念から定量的な評価へと進展させることを目的としている。

2. 乾燥を受けた地盤の特徴

2.1 物理的性質

図-2 にシンガポール, Tekong 地区の地盤調査で得られた土質概要を示す¹⁰⁾。図中には¹⁴C から得られた年代測定結果も併せて示す。本調査地点の水深は約 15m であり、過去に-7m の航路浚渫がなされている。土質柱状図より、海底面から-10m までは完新世に堆積した地盤、-10m 以深の地盤は更新世に堆積している。その地盤は現在より、およそ 24,600 年以前に堆積した地盤であり、Kaizuka et al.¹⁾が指摘した年代から推察すると、

海水準の低下によって、乾燥の影響を受けた可能性があることが示唆される。土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$ は 2.64~2.75 の間に分布しており、我が国の沿岸域に分布する平均的な ρ_s 、2.65 よりもやや大きな値を示している¹¹⁾。粒度分布は、一部に砂分やシルト分が卓越する箇所もあるが、全体的には粘土分の多い地盤である。液性限界(w_L)と塑性限界(w_P)は深度-11m 付近を除けば、 w_L は 80%~110%、 w_P は 30%~40%の値を示している。塑性指数(I_p)は 40~70 を示し、塑性の高い粘性土に分類される。単位体積質量(ρ)は深度-10m~-15m の試料を除き、1.55~1.67 g/cm^3 にあり、我が国の沿岸域に堆積している海成粘性土よりもその値は大きな傾向にある。コーン貫入試験から得られた先端抵抗(q_t)は、深度-5~-10m および深度-15~-20m の層では深さ方向にその値が直線的に増加する傾向が見られるが、深度-10~-15m 付近層では大きなばらつきが認められる。

深度-10~-15m 付近では砂分が急激に増加している箇所見られ、その箇所では w 値は減少し ρ 値が増加している。また、この層の q_t 値に大きなばらつきが見られることから、この深度において堆積環境が変化していることは明らかである。

2.2 力学的性質

図-3(a)と図-3(b)に一軸圧縮強さ(q_u)と圧密降伏応力(p_c)の深度分布を示す。 p_c はひずみ速度0.02%/minとして、定ひずみ速度圧密試験(CRS)から求めた値である。なお、図-3(b)には有効土被り圧(σ_{v0})、 $3 \cdot \sigma_{v0}$ (OCR=3) および $6 \cdot \sigma_{v0}$ (OCR=6)のラインも併せて示す。ここに、OCRは過圧密比である。図-3(a)より q_u 値は深さ方向に増加する傾向にあるが、強度増加率に相当する $(q_u/2)/p_c$ 値は上層部で0.17、下層部で0.20程度であり、我が国の港湾地域で得られる $(q_u/2)/p_c$ 値の0.35と比較すると小さな値を示している¹¹⁾。図-3(b)から、OCR値は上部

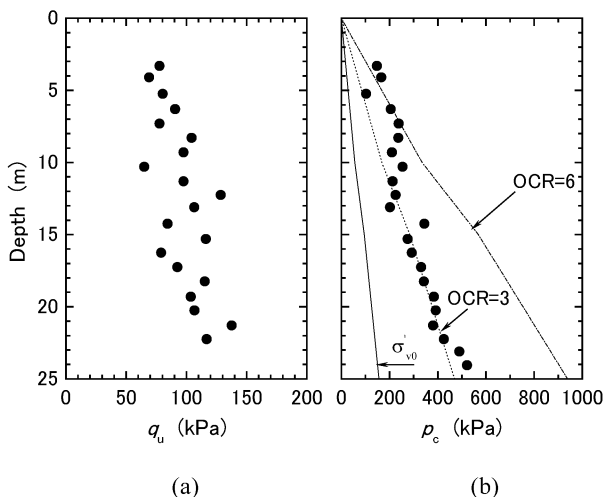


図-3 q_u 値と p_c 値の深度分布

層で6前後、下部層では3程度を示した。また、 p_c 値は上部層や下部層で深さが增大するのに従って増加する傾向にあるが、乾燥を受けた土と考えられる層の p_c 値は深さの増大に対する増加が小さい。

以上、乾燥収縮の影響を受けたと考えられる地盤についてその特徴を述べた。本論文では乾燥収縮を受けた地盤の特性がどのように変化するかを明らかにするため、CRSによる室内実験を行い、乾燥収縮に伴う粘土の圧密特性の変化を調べた。

3. 試料および試験方法

3.1 試料

本実験で用いた試料はシンガポール粘土の他に南本牧粘土および佐賀有明粘土を用いた。それらの物理的性質を表-1に示す。表中の A_c は活性度を示す。

3.2 再構成試料の作製方法

本実験では乾燥過程における土の構造変化を知るため、不攪乱試料と再構成試料を用いた。再構成試料の作製は425 μ mのフルイで裏ごしした後、 w_L の約2倍の含水比(w)となるよう調整し、よく攪拌して $\phi=80$ mmまたは $\phi=200$ mmの予圧密容器に入れ、98kPaで圧密した。圧密時間は \sqrt{t} 法における圧密度90%に対する時間(t_{90})を基準として $4 \cdot t_{90}$ とした。 $\phi=80$ mmの予圧密容器で作製した再構成試料は、圧密終了高さが12cmとなるよう試料の投入量を調整して乾燥収縮試験に、 $\phi=200$ mmの予圧密容器で作製した試料は、圧密終了高さが3cmとなるよう調整して圧密試験に使用した。

3.3 試験方法

a) 乾燥収縮試験

表-1 本実験で用いた試料の物理試験結果

試料名	ρ_s (g/cm ³)	sand (%)	silt (%)	clay (%)	w_L (%)	w_p (%)	A_c
シンガポール粘土	2.692	1.2	28.8	70.0	85	31	0.99
南本牧粘土	2.650	5.4	44.1	50.5	118	39	1.88
佐賀有明粘土	2.640	2.0	31.0	67.0	120	48	1.19

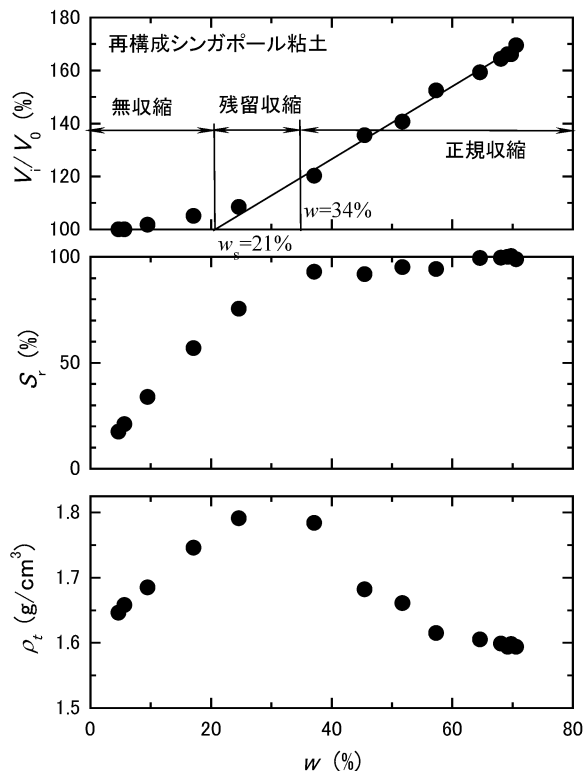


図-4 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験は不攪乱試料と再構成試料を直径3.5cm、高さ8cmに成形した後、室温を約20°C程度に保った実験室で自然乾燥させ、直径、高さおよび質量を測定した。測定を行った時間(t)は供試体切り出し後、10、100、200、500、1150、1630、2000、3000、4700、6000、7500、8900、10000min.である。

b) 圧密試験

圧密試験は $\phi=200$ mm、高さ3cmの再構成試料を4分割して室温約20°Cで自然乾燥させ、目標の含水比となったところで $\phi=60$ mm、 $h=20$ mmに成形した。圧密試験はJIS A 1227「土のひずみ速度載荷による圧密試験方法」によった。ひずみ速度は0.02%/minとした。なお、本実験では試料が飽和している状態、いわゆる水分量の低下と体積変化が同量である正規収縮状態で試験を行った。

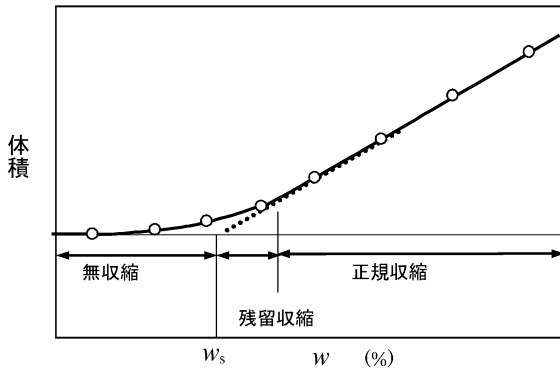


図-5 乾燥収縮時の体積変化

4. 試験結果および考察

4.1 乾燥収縮試験

図-4にシンガポール粘土(再構成試料)の w と体積変化(V_i/V_0), 飽和度(S_r)ならびに ρ_t の関係を示す。 w は, 初期含水比(w_0)から供試体の土粒子質量(m_{s0})および初期含水量(m_{w0})を求め, m_{w0} から自然乾燥によって減少した含水量を差し引き, m_{s0} で除して求めた。また, V_0 は供試体の初期体積(cm^3), V_i は t min後の供試体体積(cm^3)である。

V_i/V_0 と w の関係については, Haines²⁾の考え方に基づいて本実験結果の説明を行うこととする。図-5に土の乾燥収縮時の体積変化と含水比との関係を示す。Haines²⁾によれば, 土の乾燥収縮は飽和粘性土をゆっくり乾燥させると, 供試体の水分量の減少と体積変化が同量生ずる正規収縮過程, さらに乾燥が進み, 水分量の減少よりも体積変化が小さくなる残留収縮過程, さらに乾燥が進むと, 水分量が減少しても体積変化が発生しない無収縮過程に至る。

図-4における V_i/V_0 値と w 値の関係から, V_i/V_0 値は w 値が34%付近まで, w 値の減少に対して直線的に低下しており, 正規収縮状態を呈している。 w 値が34%よりも小さくなると V_i/V_0 値の減少傾向は, 正規収縮状態よりも小さくなり, 残留収縮状態を示す。 w 値が収縮限界(w_s)の21%よりも小さくなると, V_i/V_0 値の大きな変化は認められず無収縮状態となる。最終的に w 値が5%より小さくなると, 土試料はほとんど収縮しなくなる。JIS A 1209「土の収縮定数試験方法」による収縮限界は19.8%であった。なお, w_s 値が異なった理由としては, 試料の準備方法や試験方法の違いが考えられる。

S_r 値と w 値の関係では, 正規収縮状態において供試体はほぼ飽和しているが, 残留収縮状態になると S_r 値は明らかに低下する。無収縮状態になると S_r 値は, 残留収縮状態よりも著しい低下を示す。

ρ_t 値は w 値が60%程度まではあまり変化は認められないが, w 値が60%から w_s に至るまでは増大していき,

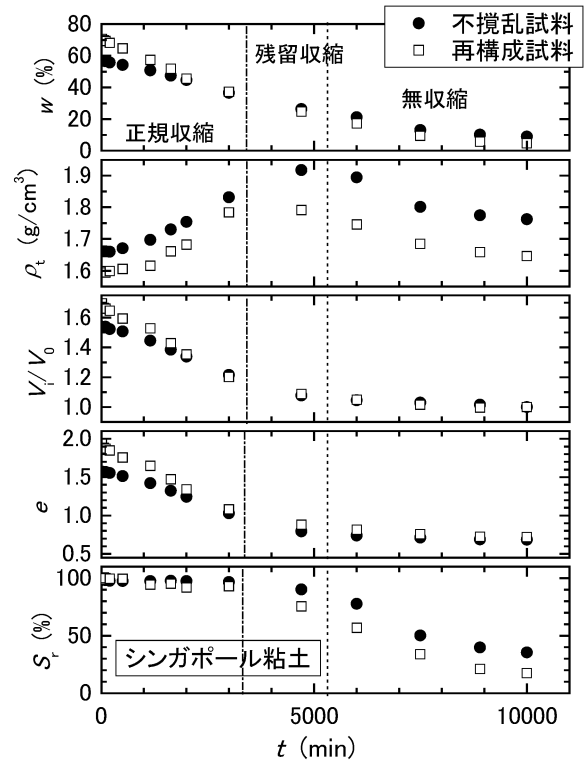


図-6 代表的な土質定数値の経時変化

これを過ぎると減少に転ずる。このような現象は, 乾燥によって水分量が少なくなるものの, 供試体の体積収縮と同程度を示しており, 供試体の飽和状態での m_{s0} 値は変化していないので, m_{s0} が V_i に対して相対的に大きな値となり, 結果として ρ_t 値は初期の状態よりも w_s 値付近まで大きく現れることとなる。

次にシンガポール粘土の不攪乱試料と再構成試料の乾燥収縮過程の違いを比較する。図-6に w , ρ_t , V_i/V_0 , e , および S_r と時間 t との関係を示す。図中の一点鎖線は正規収縮から残留収縮に, 点線は残留収縮から無収縮に移行する時間の目安を示したものである。 w 値と t との関係から, 不攪乱試料および再構成試料ともに時間の経過とともに w 値は減少していく。また, 正規収縮から残留収縮に移る付近まで, 再構成試料の w 値は不攪乱試料のそれよりも減少傾向が大きい。これは, 本実験に用いたシンガポール試料が過圧密粘土であったため, 不攪乱試料と同じ σ_{v0} で圧密して作製しても, 再構成試料の w 値は不攪乱試料のそれよりも大きな値となるため, その差が大きく現れたためと考えられる。

つぎに ρ_t 値と t の比較から, 不攪乱試料および再構成試料の ρ_t 値は, 正規収縮過程から残留収縮過程にかけて徐々に増加し, 4,000~5,000minにかけて最大値を示す。その後, さらに乾燥が進むと水分量の減少によって ρ_t 値は徐々に減少していく。再構成試料の ρ_t 値が不攪乱試料のそれよりも僅かに早く最大値を示しているが, これは再構成試料の構造が不攪乱試料よりも配

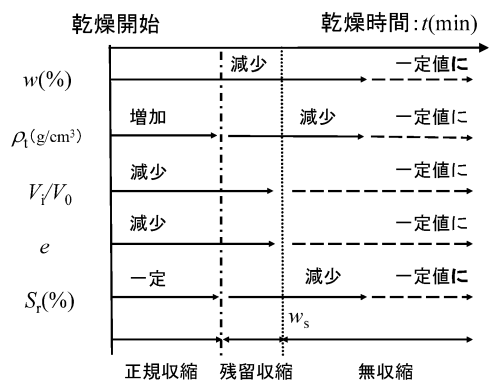


図-7 乾燥収縮過程における土の物性変化

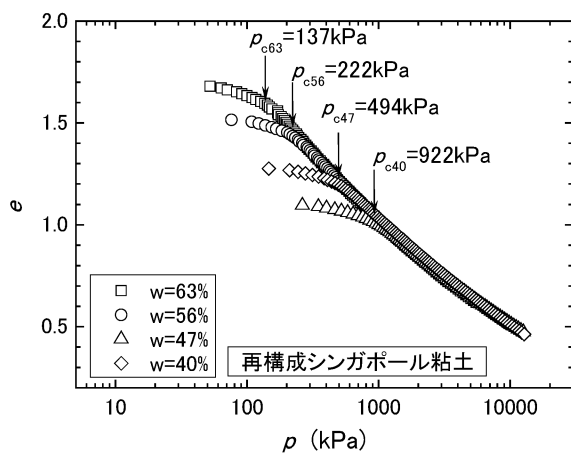


図-8 乾燥収縮に伴う $e \sim \log p$ 曲線の変化(1)

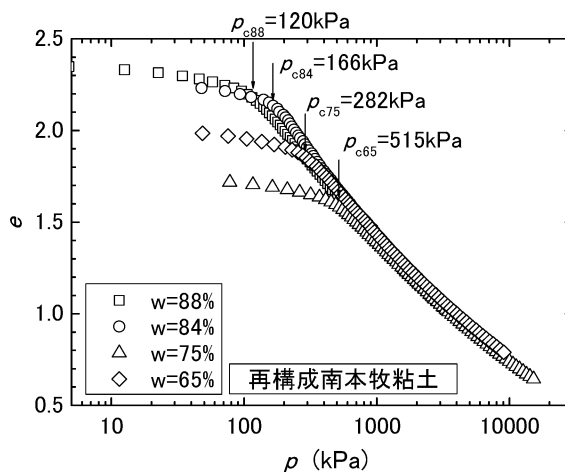


図-9 乾燥収縮に伴う $e \sim \log p$ 曲線の変化(2)

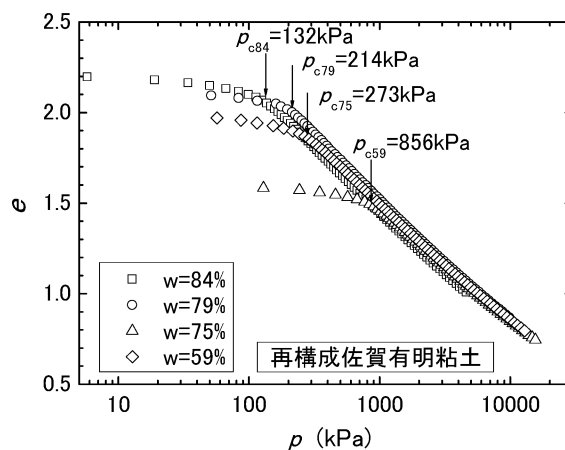


図-10 乾燥収縮に伴う $e \sim \log p$ 曲線の変化(3)

向しているためと考えられる。また、不攪乱試料の ρ_c 値は全体に再構成試料のそれより大きな値を示した。この理由は前述したとおりである。次に、 V_t/V_0 値と t の関係を示す。不攪乱試料と再構成試料の V_t/V_0 値は、時間の経過に伴って乾燥が進み、徐々に減少していく。特に、正規収縮過程における V_t/V_0 値の減少傾向は残留収縮過程や無収縮過程よりも大きくなっている。 e 値と t の関係についても、当然のことながら V_t/V_0 値と t 値の関係みられるような同様な傾向を示す。一方、 S_r 値と t の関係では、時間の経過に伴って、 S_r 値は減少していくが、正規収縮過程においてはほぼ飽和状態を示した。

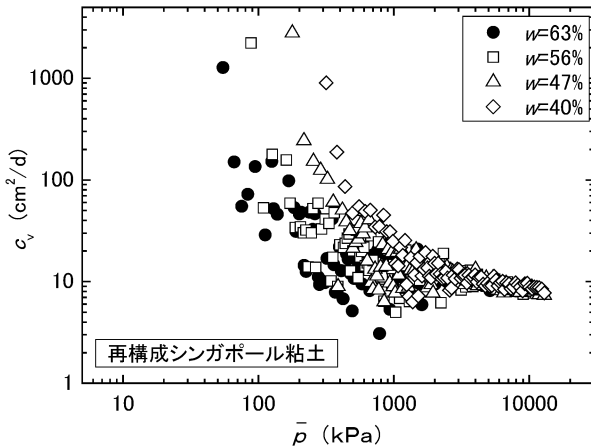
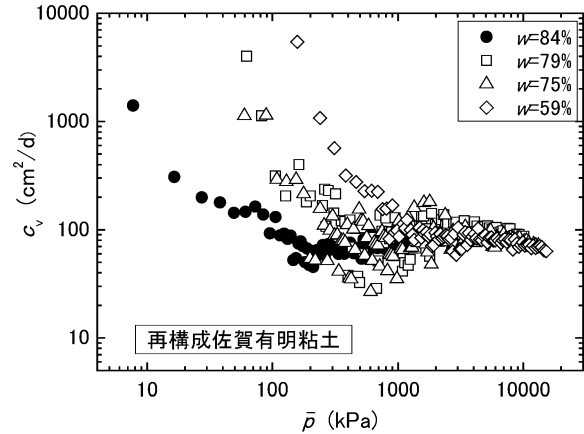
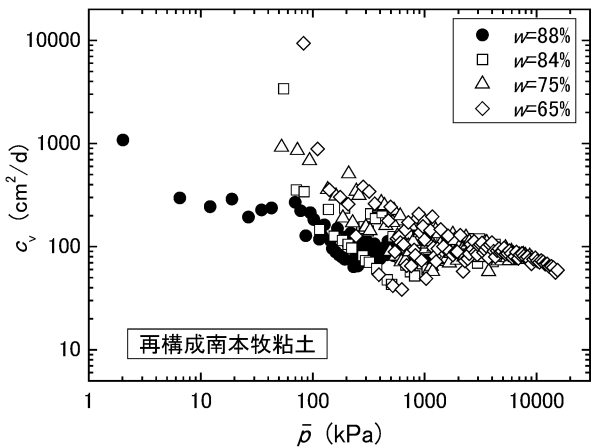
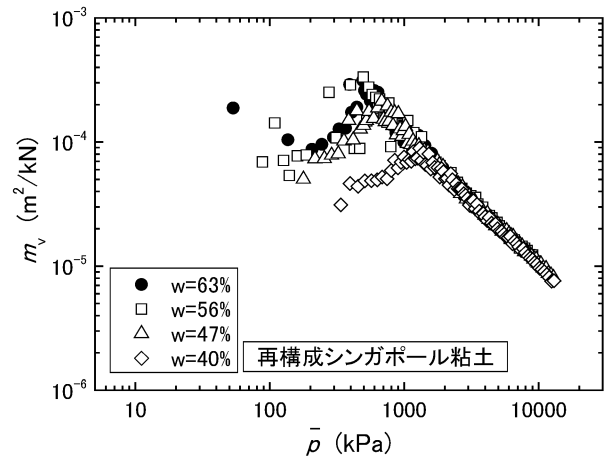
これらの乾燥収縮に伴う土の物性変化を Haines²⁾が提案した乾燥過程と関連づけて図-7に示す。 w 値は乾燥に伴って w_s 値を越してもさらに減少を続け、自由水がなくなるまで減少する。 ρ_t 値は、乾燥に伴って正規収縮状態においては増加し、残留収縮状態から無収縮状態にかけては減少し一定値となる。また、 V_t/V_0 値および e 値は乾燥に伴って w_s 値まで減少し、その後一定値となっていく。 S_r 値は正規収縮状態においてはほぼ一定の値を示し、その後乾燥状態がさらに進むと S_r 値

は減少し始め最終的に0に近づいていく。なお、この時の供試体内の含水状態は一樣ではない⁸⁾。

4.2 圧密特性

図-8にシンガポール粘土の乾燥に伴う $e \sim \log p$ 曲線の変化を示す。図中の p_{c63} は初期含水比が63%における圧密降伏応力を示す。以下、同様な表記とする。乾燥が進行することによって、供試体の初期間隙比は減少し、 p_c 値は増大していくことがわかる。乾燥を受けていない $w=63\%$ の供試体の $e \sim \log p$ 曲線は、 p 値が50~130kPa付近の領域では、 p 値が大きくなるのに従って e 値はなだらかに減少する。 p 値が130kPaを越すと e 値はやや大きく減少し、その後一定の勾配になり減少していく。その他の供試体においても同様な傾向が見られ、乾燥に伴う C_c 値の変化はほとんど認められない。このような傾向の一般性を確認するため、南本牧粘土と佐賀有明粘土に対して同様の実験を行った。

図-9および図-10に南本牧粘土と佐賀有明粘土の乾燥に伴う $e \sim \log p$ 曲線の変化を示す。南本牧粘土および

図-11 乾燥収縮に伴う $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線の変化(1)図-13 乾燥収縮に伴う $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線の変化(3)図-12 乾燥収縮に伴う $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線の変化(2)図-14 乾燥に伴う $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線の変化(1)

佐賀有明粘土の両試料とも乾燥収縮過程の進行に伴って、初期間隙比の減少や p_c 値の増加など図-8に示したシンガポール粘土と同様な傾向を示した。このことより乾燥収縮を受けた粘土は、その種類によらずほぼ同様の挙動を示すことが明らかとなった。

図-11に乾燥に伴うシンガポール粘土の c_v 値の変化を示す。 $w=63\%$ 試料の c_v 値は、 \bar{p} 値の増加に伴って、1,000kPa程度まで減少を続け、その後一旦増加するものの2,500kPa程度からは僅かではあるが、再び減少に転ずる。その他の乾燥履歴を受けた試料では、乾燥に伴って測定される間隙水圧 (u_i) の発生量が大きくなるため、 \bar{p} 値が1,000kPa以下の領域では $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線は右側に移動していく。また、これらの $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線は、 \bar{p} 値が大きな領域において乾燥を受けていない $w=63\%$ 試料の $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線上に漸近していく。ここで u_i 値が大きくなった理由としては、 e 値が小さくなることによって、間隙水圧が発生しやすく、かつ、大きく測定されたためと考えられる。

図-12および図-13に南本牧粘土および佐賀有明粘土

の $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線を示す。これらの曲線についても \bar{p} 値の大きな範囲では、乾燥を受けていない試料の $\log c_v \sim \log \bar{p}$ 曲線上に漸近してくる。両粘土ともに \bar{p} 値が大きな領域では c_v 値はほぼ同じ値を示し、シンガポール粘土の場合と同様な傾向が認められた。また、 c_v 値にはばらつきも認められるが、乾燥を受けた土の c_v 値は、 \bar{p} 値が大きな領域ではほぼ同じ値を示している。

図-14に乾燥に伴うシンガポール粘土の $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線を示す。 $w=63\%$ 試料の m_v 値は、200kPa付近から \bar{p} 値の増加に伴ってやや大きくなり、600kPa付近で最大値を示す。その後 \bar{p} 値がさらに大きくなると m_v 値は直線的に減少しはじめる。その他の試料もほぼ同様な傾向を示しており、 \bar{p} 値が十分大きな領域では、異なる乾燥履歴によらず m_v 値は同じ傾きで減少していく。

図-15および図-16に南本牧粘土と佐賀有明粘土の $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線を示す。これらの曲線についても、 \bar{p} 値の大きな範囲では、その傾きは乾燥を受けていない試料の $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線に漸近してくる。これらの傾向は先述したシンガポール粘土の場合と同様であり、乾燥

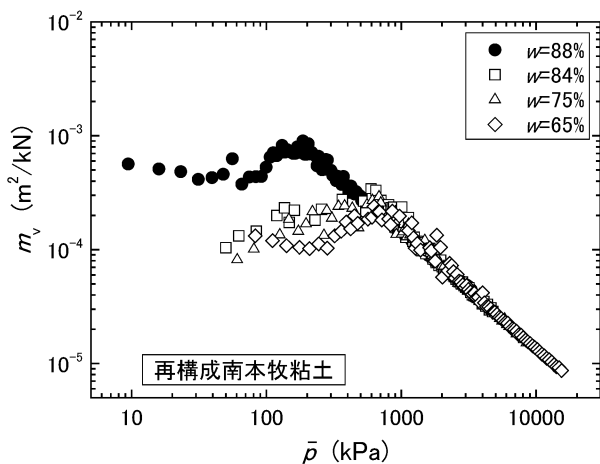


図-15 乾燥に伴う $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線の変化(2)

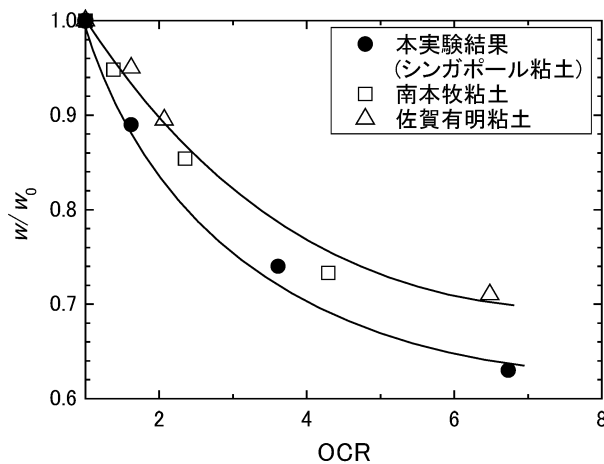


図-17 含水比の減少に伴う OCR 値の変化

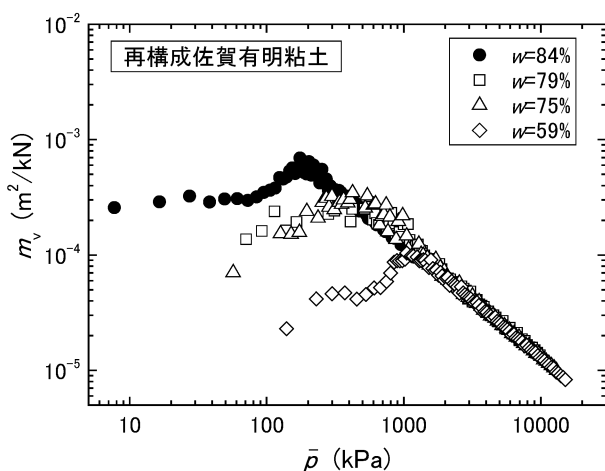


図-16 乾燥に伴う $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線の変化(3)

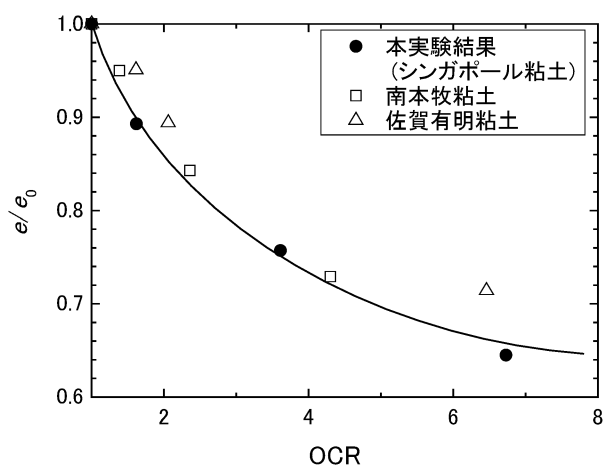


図-18 間隙比の減少に伴う OCR 値の変化

を受けた試料の $\log m_v \sim \log \bar{p}$ 曲線は、 \bar{p} 値の大きな範囲では乾燥を受けていない試料の同曲線とほぼ一致する。

図-17にシンガポール粘土の含水比の変化とOCR値との関係を、南本牧粘土および佐賀有明粘土の結果と伴に示す。縦軸は試験開始前の含水比 w をそれぞれの粘土が乾燥を受ける前の含水比 w_0 で除してあり、各試料の w 値の変化割合を示す。横軸はそれぞれの試料が乾燥を受ける前の p_c 値 (p_{c0}) を基準として表しており、乾燥収縮に伴う p_c/p_{c0} 値 (OCR値) の変化を示す。

図より、シンガポール粘土のOCR値は w/w_0 値の減少に伴って増加する傾向にあることがわかる。具体的には w/w_0 値が 0.89, 0.74, 0.63 へと減少することに伴って、OCR値は 1.62, 3.61, 6.73 とそれぞれ増加している。また、 w/w_0 値の変化割合がほぼ同じであっても、OCR値の増加傾向は、 w/w_0 値によって大きく異なっている。すなわち、 w/w_0 値が小さな領域 (大きな乾燥履歴を受けた土) において、 w/w_0 値の減少に対するOCR値の増加は著しい。たとえば、土試料の水分が30%程度減少するとOCR値は乾燥を受けていない試料の約4倍程度

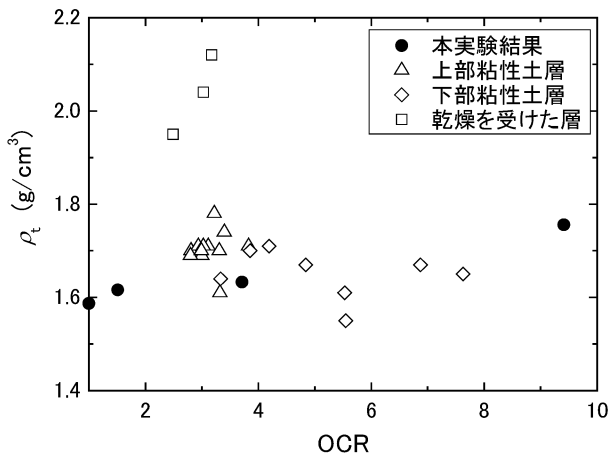
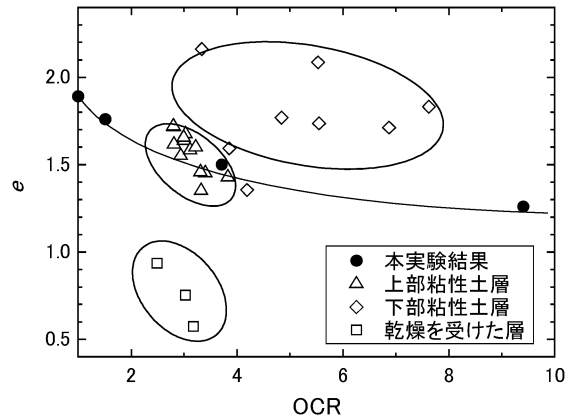
の値を示す。南本牧粘土および佐賀有明粘土についても図より同様な関係が認められた。以上のことから、乾燥収縮の進行に伴って、OCR値は増大していき、乾燥によって水分が3割程度減少するとOCR値は乾燥を受けていない試料の4倍程度に増加することの可能性が示唆された。

図-18にシンガポール粘土の e 値とOCR値との関係を南本牧粘土および佐賀有明粘土の結果と伴に示す。縦軸は試験開始前の間隙比 e をそれぞれの粘土が乾燥を受ける前の間隙比 e_0 で除してあり、乾燥に伴う各試料の e 値の変化割合を示している。横軸は図-17に示した定義と同様でOCR値を示す。OCR値は e/e_0 値が小さくなるのに従って増加する。特に e/e_0 値が小さな領域では、 e/e_0 値の大きな領域と比較して、 e/e_0 値の増分に対するOCR値の増加は著しい。この結果は本質的に w/w_0 値とOCR値の関係と同じであるが、図-17と比較して、バラツキが僅かに少なくなっており、傾向がより明瞭に表れているように思われる。

以上、正規収縮過程におけるシンガポール粘土の圧

表-2 乾燥収縮による圧密特性の変化

試料名	w (%)	e	S_r (%)	p_c (kPa)	OCR p_c/p_{c0}	C_c	c_v (cm ² /d)	m_v (m ² /kN)
W63	63.4	1.69	99.5	137	1.00	0.51	13	5.46×10^{-5}
W56	56.3	1.51	100.7	222	1.62	0.50	12	5.38×10^{-5}
W47	47.2	1.28	99.5	494	3.61	0.51	12	5.66×10^{-5}
W40	40.2	1.09	99.0	922	6.73	0.51	10	5.55×10^{-5}

図-19 ρ_t 値と OCR 値との関係図-20 e 値と OCR 値との関係

密特性の変化をまとめて表-2に示す。ここに、 c_v 値は \bar{p} 値が2,000~3,000kPaにおける平均値、 m_v 値は \bar{p} 値が2,000kPaにおける値を示した。乾燥収縮が進行することに伴って、 w 値や e 値は減少し、 p_c 値やOCR値は増大する。また、 C_c 値、 c_v 値および m_v 値は、乾燥収縮に伴う影響をほとんど受けていないことがわかる。

次に、このような傾向の実地盤への適応性について検討する。なお、実地盤から得られている土質パラメータは限られているので、 ρ_t 値とOCR値ならびに e 値とOCR値の関係について検討を行うこととした。

図-19に ρ_t 値とOCR値との関係を実地盤の実験結果と併に示す。実地盤については、図-2の土質柱状図を参考に上部粘性土層、下部粘性土層および乾燥を受けた層の三層に分類して示した。多くの ρ_t 値はOCR値の大きさによらず1.55~1.80g/cm³の間に分布している。実験結果から得られた ρ_t 値はOCR値の増加に伴い増加している。乾燥を受けた層から得られた ρ_t 値は、わずかなOCR値の増加であっても著しく増加する傾向が見られる。一方、上部粘性土層から得られた ρ_t 値はOCR値が大きくなって増加する傾向はほとんど見られない。また、下部粘性土層から得られた ρ_t 値は、OCR値がほとんど変化していないのにその値は変化しており、それぞれの層によって、 ρ_t 値とOCR値の関係は大きく異なっている。これらの違いは堆積環境に大きく依存

しているものと考えられる。乾燥を受けた層については海水準が上昇と下降を繰り返していた時期と考えられ、この層には砂分が多く含まれていることから、 ρ_t 値は大きく現れ、かつ、OCR値はあまり変化していないものと考えられる。上部粘性土層については完新世に堆積した層ではあるが、セメンテーションなどの発達によって ρ_t 値はそれほど変化していないのに、OCR値は大きく変わっている。下部粘性土層は、図-3に示したように、ほぼOCR=3を示すような層が連続していることから、更新世に、ある一定の条件下で均一に堆積したものと考えられることができる。この層ではOCR値はほとんど変わらないのに、 ρ_t 値のみが変動しているように現れている。本検討から、乾燥を受けた土の ρ_t 値はOCR値の増加によって増加傾向を示し、2g/cm³よりも大きな値を示すこともあることがわかった。

図-20に e 値とOCR値との関係を実地盤の試験結果と併に示す。実地盤については、図-19と同様に上部粘性土層、下部粘性土層および乾燥を受けた層の三層に分類して示した。 e 値はOCR値の増加によって減少する傾向が見られる。多くのデータは e 値が1.3~2.2の間にあり、OCR値は2~8を示している。これらの実地盤データと実験結果を比較すると、同じ e 値であっても、実地盤では大きなOCRを有するデータが多い。特に e 値が大きな領域ではこの傾向が際だっている。これは、実地

盤の土は構造を持っており、同じ e 値であっても p_c 値が大きく測定されたためである。すなわち、同じ e 値であっても実地盤の圧縮性は小さいことを示している。一方、乾燥を受けたとされる試料は、 e 値が1.0以下であり、OCR値は2~3程度と小さく現れている。実地盤のデータと実験結果とを比較すると、 e 値の減少に伴ってOCR値は増加する傾向にある。しかしながら、実地盤では e 値が小さいからといってOCR値が指数的に増加することはなさそうである。

以上のことから乾燥収縮履歴を受けたと考えられる地盤が想定される場合には、圧密試験結果から得られたOCR値は大きな値を示している可能性が高い。よって、実務において原位置から得られたOCR値が想定される載荷履歴より大きなOCR値が得られた場合の定数設定においては、地盤の工学的性質を評価する際に十分な検討が必要となる。

5. まとめ

海水面の変動によって過去に乾燥の影響を受けたと考えられる土の工学的特性を解明するため、不攪乱試料と再構成試料に対して乾燥収縮試験を行った。また、乾燥履歴を受けることによって土の圧密特性が一般の飽和粘土と比較してどの程度変化するのかについて定量的な観点からの解明を試みた。

本研究から得られた主要な知見を以下に列記する。

- 1) 乾燥履歴を受けることによって、土の含水比や間隙比は減少し、逆に圧密降伏応力は増大していき、その結果過圧密比(OCR)は大きくなる。また、乾燥収縮量と圧密降伏応力との関係を定量的に示した。
- 2) 乾燥収縮の進行に伴って、土のOCR値は増大していき、水分が3割程度減少するとOCR値は乾燥を受けていない試料の5倍程度に増加することが明らかとなった。同様に間隙比とOCRの関係についても示した。
- 3) 正規収縮過程における圧密特性の変化を定量的に把握することができた。また、荷重が大きな領域では、圧縮指数、圧密係数や体積圧縮係数は、一定値を示し、乾燥履歴による影響をほとんど受けないことを実証した。

参考文献

- 1) Kaizuka, S., Naruse, Y. and Matsuda, I.: Recent formations and their basal topography in and around Tokyo Bay, Central Japan, *Quaternary Research*, 8, pp.32-50, 1977.
- 2) Haines, W. B.: The volume-changes associated with variation of water content in soil. *Jour. Agric. Sci.*, Vol. 13, pp.296-310, 1923.
- 3) Yong, R. N. and Warkentin, B. P.: Soil properties and behavior, *Elsevier Scientific Publishing Company*, 1975, 山内豊聡, 竹中肇, 東山勇, 前田隆監訳: 新編土質力学の基礎<土の性質と挙動>, 鹿島出版会, pp.117-140, 1978.
- 4) 綿引恵一: 収縮限界に影響を与える因子の検討(その1), 第24回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.287-288, 1994.
- 5) 風間秀彦, 高橋玲子: 粘性土の乾燥収縮過程における体積変化の挙動, 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.375-376, 1998.
- 6) 伊藤康成, 田中政典: シンガポール硬質粘性土の圧密特性, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, 第III部門, pp.717-718, 2002.
- 7) 谷俊博, 田中政典: 残留有効応力と過圧密比の関係, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.225-226, 2003.
- 8) 田中政典, 永嶋一臣, 亀井健史, 安藤慶彦, 辻岡孝彦: 磁気共鳴映像法(MRI)による土の乾燥過程における水分変化の観察, 土木学会論文集, No.788/III-69, pp.173-181, 2004.
- 9) Tanaka, M., Kamei, T. and Ando, Y.: Magnetic resonance imaging observation of changes in water content during the drying and water absorption processes of soil, *Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.436-441, 2005.
- 10) 篠井隆之, 田中洋行, 田中政典, 三島理: シンガポール(Tekong島)の地盤調査結果について, 第36回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.81-82, 2001.
- 11) 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, 港湾技術研究所報告, Vol. 17, No.3, pp.70-76, 1978.

