

## 乾燥収縮履歴が飽和粘土の圧密特性に及ぼす影響

Effect of Shrinkage Histories due to Desiccation on Consolidation  
Characteristics of Saturated Clays

田中政典 Masanori TANAKA ((独) 港湾空港技術研究所地盤・構造部)  
谷 俊博 Toshihiro TANI (日本海工(株) 事業部)  
亀井健史 Takeshi KAMEI (島根大学総合理工学部)

海成粘性土地盤には、堆積後の海水準の変動によって陸化し、乾燥や侵食の影響を受け、再び海水中に没した地盤が存在する。このような乾燥履歴を受けた地盤と乾燥の影響を受けない地盤とを比較すると、それらの工学的性質は大きく異なることが予測される。本研究では、乾燥履歴の影響を受けた粘性土の工学的性質を解明するために、不攪乱試料と再構成試料に対して乾燥収縮過程における乾燥収縮特性を調べた。また、粘性土の正規収縮過程における圧密特性の変化を検討している。この結果、乾燥履歴を受けることによって、圧密降伏応力や過圧密比は増大するが、圧縮指数、圧密係数や体積圧縮係数は変化しないことが明らかとなった。

キーワード：乾燥収縮、圧密降伏応力、過圧密比、圧密特性 (IGC : D05)

## 1. はじめに

沿岸域には、海水準の変動によって陸化し、再び海中に没した地盤が存在する。筆者らは地盤の工学的性質と調査法に関する研究の一環として、海外の土を採取し我が国の土との工学的特性の比較検討を行い、地盤の地域特性に関する研究を行っている。この研究過程においてシンガポールの海底から得られたある層は、有効土被り圧に対して非常に大きなせん断強さが得られた。また、放射線炭素法( $^{14}\text{C}$ )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が明らかになった。Kaizuka et al.<sup>1)</sup>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、現在に至っている、と報告している。このような海水準の変動によって沿岸域に堆積した地盤には、ある時期に同様な条件で堆積したのにも関わらず、乾燥履歴を受けた地盤と受けない地盤とが存在しており、それぞれの工学的性質は大きく異なっているものと考えられる。このため、本論文では乾燥過程に伴う飽和粘土の圧密特性の変化を明らかにする。

土の乾燥収縮に関する研究として、Haines<sup>2)</sup>は土の収縮現象を土粒子、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 & Warkentin<sup>3)</sup>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して試みた。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<sup>4)</sup>や風間・高橋<sup>5)</sup>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<sup>6)</sup>や谷・田中<sup>7)</sup>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<sup>8),9)</sup>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-1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<sup>10)</sup>。図中には $^{14}\text{C}$ 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。-10m以深の地盤は現在より、およそ24,600年以前に堆積した地盤であり、Kaizuka et al.<sup>1)</sup>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( $\rho_s$ )は2.64~2.75Mg/m<sup>3</sup>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 $\rho_s$ の値である2.65Mg/m<sup>3</sup>よりもやや大きな値を示している<sup>11)</sup>。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

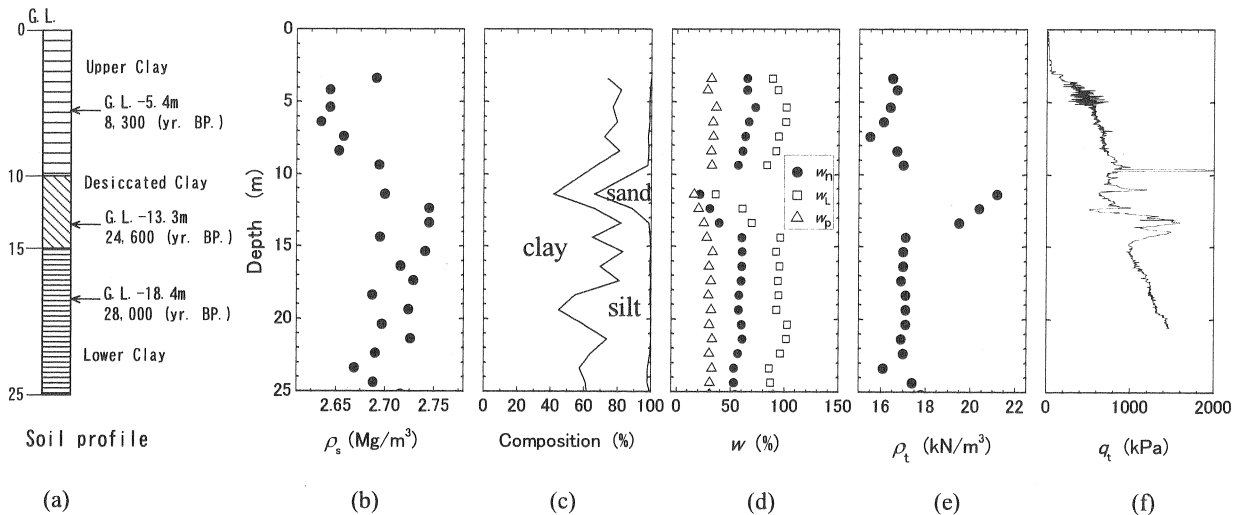


図-1 土質概要(シンガポール, Tekong 地区)<sup>10)</sup>

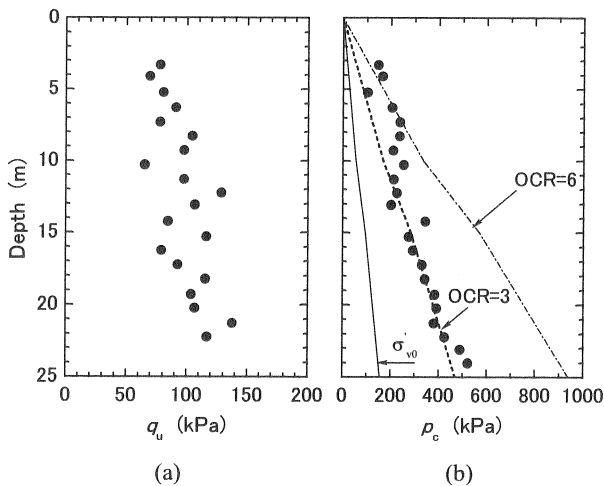


図-2  $q_u$  と  $p_c$  の深度分布

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。湿潤密度( $\rho$ )は深度-10~-15mの試料を除き、15.5~16.7 kN/m<sup>3</sup>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  $\rho$  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-2(a)と図-2(b)に当地区でサンプリングされた試料の一軸圧縮強さ( $q_u$ )と圧密降伏応力( $p_c$ )の深度分布を示す。 $p_c$

表-1 本実験で用いた試料の物理試験結果

試料名	$\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	sand (%)	silt (%)	clay (%)	$w_L$ (%)	$w_p$ (%)	$w_s$ (%)	$A_c$
シンガポール粘土	2.692	1.2	28.8	70.0	85	31	20	0.99
南本牧粘土	2.650	5.4	44.1	50.5	118	39	-	1.88
有明粘土	2.640	2.0	31.0	67.0	120	48	48	1.19

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-2(b)には有効土被り圧( $\sigma'_{v0}$ )、 $3 \cdot \sigma'_{v0}$  (OCR=3に相当する $p_c$ )および $6 \cdot \sigma'_{v0}$  (OCR=6に相当する $p_c$ )のラインも併せて示す。ここに、OCRは過圧密比である。図-2(a)より $q_u$ 値は深さ方向に増加する傾向にある。 $q_u/\sigma'_{v0}$ 値は上層部で約2.3、下層部で約1.1であり、小川・松本<sup>11)</sup>が示した我が国の港湾地域で得られる過圧密粘土の $q_u/\sigma'_{v0}$ の平均値である0.81と比較すると大きな値を示している。図-2(b)から、OCR値は上部層で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増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有明粘土を用いた。シンガポール粘土は深度-13m 付近の不攪乱試料および再構成試料を使用した。物理的性質を表-1に示す。表中の $w_s$ は収縮限界を、 $A_c$ は活

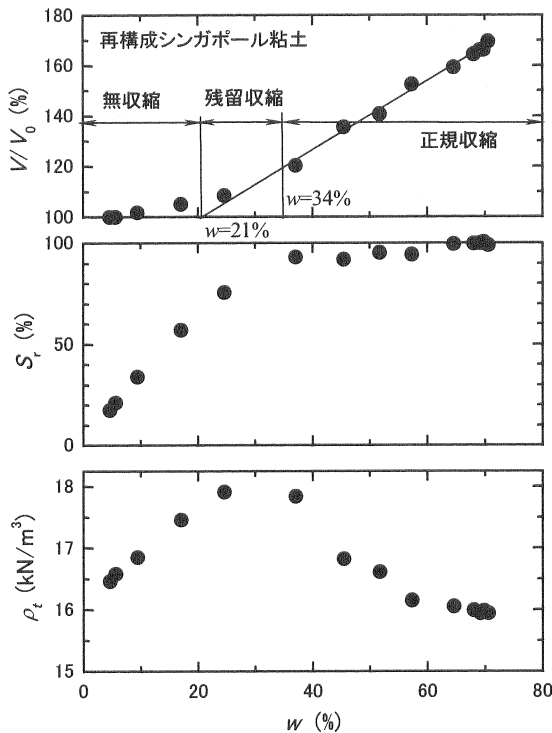


図-3 乾燥収縮試験結果

性を示す。

### 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 $\mu\text{m}$ 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 $\phi=80\text{mm}$ または $\phi=200\text{mm}$ 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。 $\phi=80\text{mm}$ 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、 $\phi=200\text{mm}$ の予圧密容器で作製したそれは、圧密終了高さが3cmとなるように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

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 $\phi=200\text{mm}$ 、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 $\phi=60\text{mm}$ 、 $h=20\text{mm}$ に成形した。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」によった。ひずみ速度は0.02%/minとした。なお、本実験では試

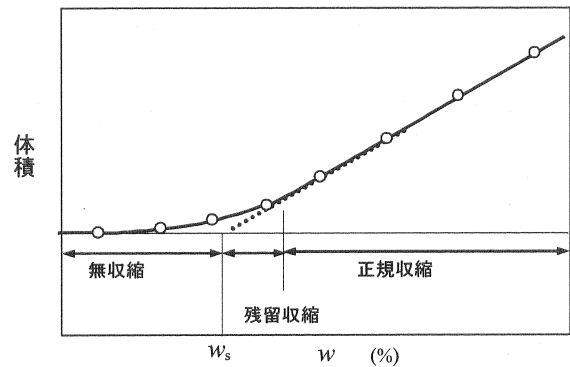


図-4 乾燥収縮時の体積変化

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。

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 乾燥収縮試験

図-3にシンガポール粘土(再構成試料)の $w$ と体積変化( $V/V_0$ )、飽和度( $S_r$ )ならびに $\rho_t$ 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、 $V$ は $t$  min後の供試体体積である。

$V/V_0$ と $w$ の関係についてはHaines<sup>2)</sup>の考え方が理解しやすいので、この考え方を明らかにした上で本実験結果の説明を行うこととする。図-4に土の乾燥収縮時の体積変化と含水比との関係を示す。Haines<sup>2)</sup>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、供試体の水分の減少量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、水分の減少量よりも体積変化が小さくなる残留収縮過程、さらに乾燥が進み、水分量が減少しても体積変化の生じない無収縮過程に分類される。

図-3における $V/V_0$ と $w$ の関係から、 $V/V_0$ 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 $V/V_0$ 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21%よりも小さくなると、 $V/V_0$ 値はあまり変化せず無収縮状態となる。 $w$ 値が5%よりも小さくなると、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。無収縮になる含水比は本論文で用いた方法とJIS A 1209の方法とを比較してもほとんど変わらなかった。

$S_r$ と $w$ 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。

$\rho_t$ 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%から収縮限界に至るまでは増大していき

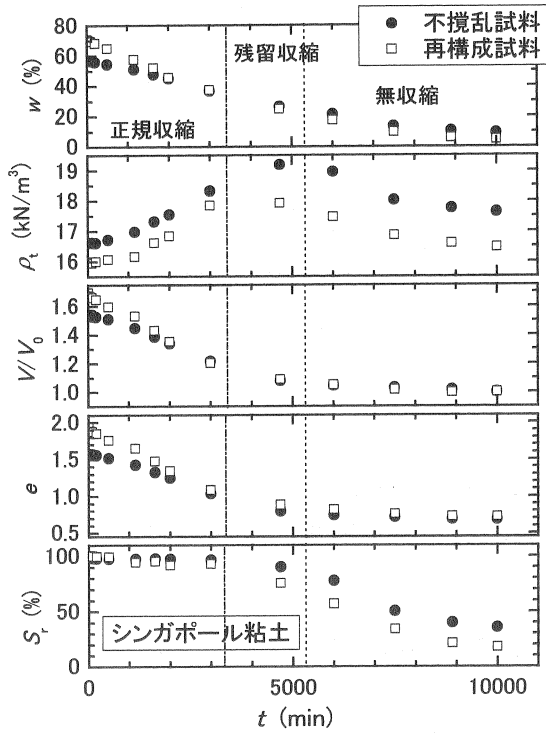


図-5 代表的な土質定数値の経時変化

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であり、供試体は飽和状態で  $m_{s0}$  は変化していないので、 $m_{s0}$  が  $V$  に対して相対的に大きな値となり、結果として  $\rho_t$  は初期の状態よりも収縮限界付近まで大きく現れる。

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こととする。図-5 に  $t$  に対する  $w$ ,  $\rho_t$ ,  $V/V_0$ ,  $e$ , および  $S_r$  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。 $w$  と  $t$  の関係の比較から、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。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く現れている。これは、本実験に用いたシンガポール試料は過圧密粘土であったため、不攪乱試料と同じ  $\sigma'_{v0}$  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り、その減少傾向も大きく現れたものと考えられる。 $\rho_t$  と  $t$  の関係の比較から、不攪乱試料および再構成試料の  $\rho_t$  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  $\rho_t$  値は徐々に減少していく。この時、再構成試料の  $\rho_t$  値は不攪乱試料のそれよりもいくぶん早く最大値を示す。この理由について、再構成試料は配向構造であり、不攪乱試料はランダム構造になっているためと考えられる。本実験のように乾燥が主に供試体周面方向からゆっくりと進んでいく場合には、供試体内部の水分は円周方向に移動していく。再構成試料のように構造が水平方向に卓越している場合には、再構成試料はランダム構造の不攪

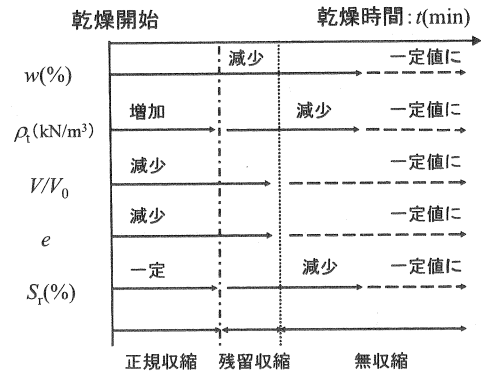


図-6 乾燥収縮課程における土の物性変化

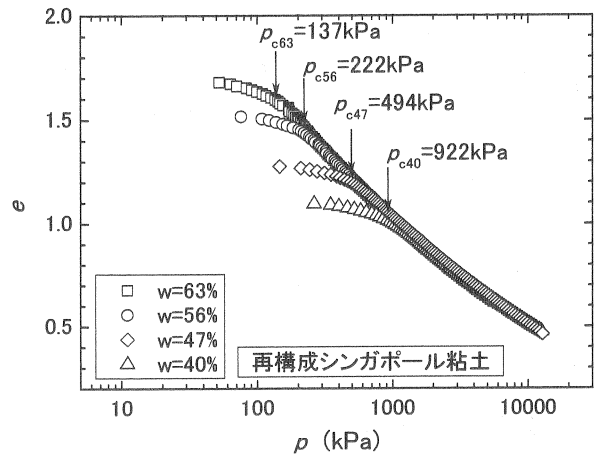


図-7 乾燥収縮に伴うシンガポール粘土の  $e \sim \log p$  曲線の変化

乱試料より早く含水比の低下が進むものと考えられる<sup>8)</sup>。また、不攪乱試料の  $\rho_t$  値は全体に再構成試料のそれより大きな値を示す。理由は前述したとおりである。次に、 $V/V_0$  と  $t$  の関係を示す。不攪乱試料と再構成試料の  $V/V_0$  値は、 $t$  値の増加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  $V/V_0$  値の減少傾向は残留収縮過程や無収縮過程よりも大きい。 $e$  と  $t$  の関係についても、当然のことながら  $V/V_0$  値と  $t$  値の関係と同様な傾向を示す。 $S_r$  と  $t$  の関係では、 $t$  値の増加に伴って、 $S_r$  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である。

これらの乾燥収縮に伴う土の物性変化を Haines<sup>2)</sup> が提案した乾燥過程と関連づけ、まとめて図-6 に示す。 $w$  値は乾燥の進行に伴って収縮限界となってもさらに減少を続け、自由水がなくなるまで減少する。 $\rho_t$  値は、乾燥の進行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。 $V/V_0$  値および  $e$  値は乾燥に従って収縮限界になるまで減少し、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す。さらに乾燥が進むと  $S_r$  値は減少し始めゼロに近づく。なお、残留収縮状態になると供試体内の含水状態は一様ではなくなる<sup>8)</sup>。

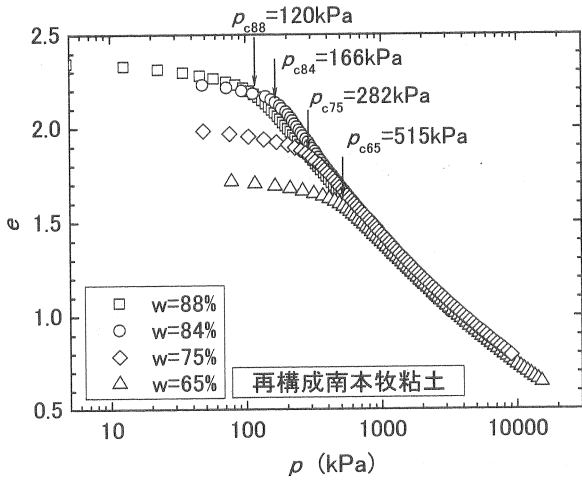


図-8 乾燥収縮に伴う南本牧粘土の  $e \sim \log p$  曲線の変化

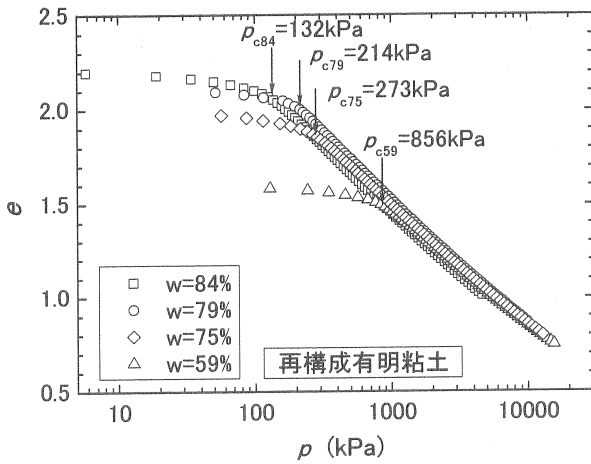


図-9 乾燥収縮に伴う有明粘土の  $e \sim \log p$  曲線の変化

#### 4.2 圧密特性

図-7は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%供試体の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63%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。このような傾向が他の粘土においても認められるのかを確認するため、南本牧粘土および有明粘土を用いてさらに検討を行うこととする。

図-8および図-9に南本牧粘土と有明粘土の乾燥に伴う  $e \sim \log p$  曲線の変化を示す。南本牧粘土および有明粘土ともに乾燥収縮が進行することによって、初期間隙比の減少や  $p_c$  値の増加など図-7に示したシンガポール粘土と同様な傾向を示し、乾燥収縮を受けた粘土は土の種類によらずほぼ同様の挙動を示すことがわかる。

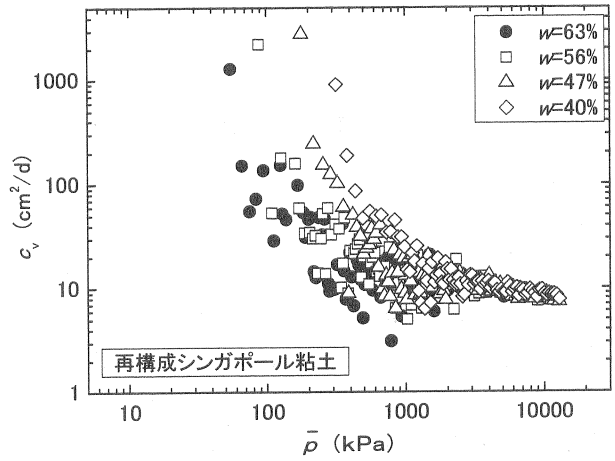


図-10 乾燥収縮に伴うシンガポール粘土の  $\log c_v \sim \log \bar{p}$  曲線の変化

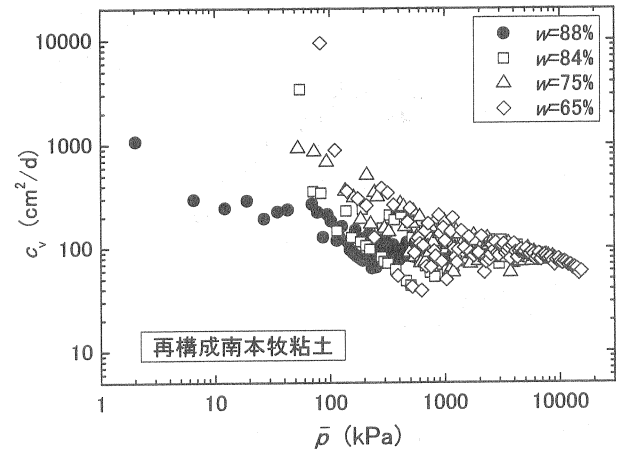


図-11 乾燥収縮に伴う南本牧粘土の  $\log c_v \sim \log \bar{p}$  曲線の変化

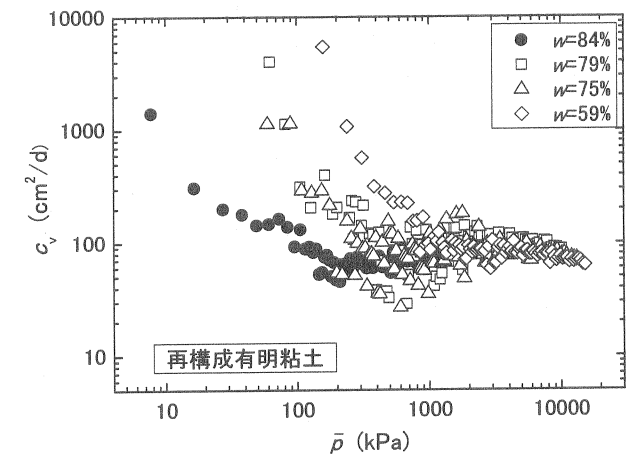


図-12 乾燥収縮に伴う有明粘土の  $\log c_v \sim \log \bar{p}$  曲線の変化

図-10に乾燥に伴うシンガポール粘土の  $c_v$  値の変化を示す。63%供試体の  $c_v$  値は、 $\bar{p}$  値の増加に伴って、 $\bar{p}$  値が1,000kPa程度まで減少を続ける。その後、 $c_v$  値は  $\bar{p}$  値の増加に伴って、一旦増加するものの  $\bar{p}$  値が2,500kPa程度を越

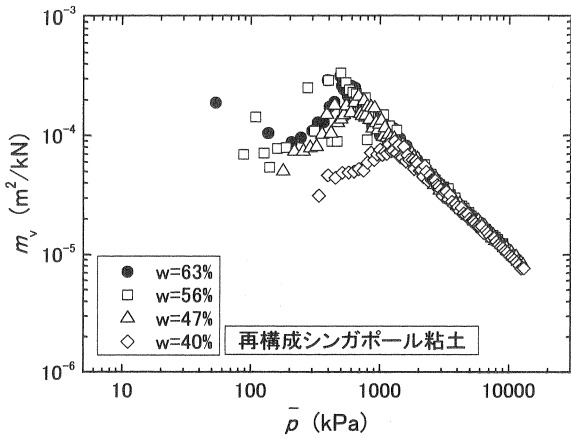


図-13 乾燥収縮に伴うシンガポール粘土の  $\log m_v \sim \log \bar{p}$  曲線の変化

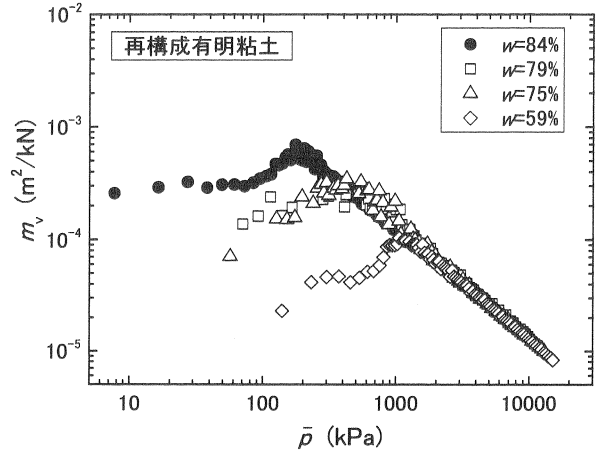


図-15 乾燥収縮に伴う有明粘土の  $\log m_v \sim \log \bar{p}$  曲線の変化

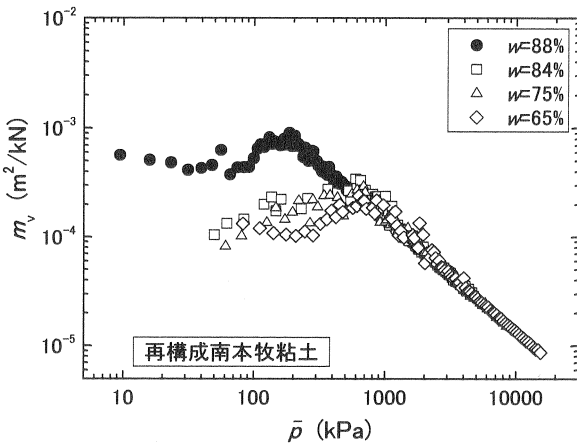


図-14 乾燥収縮に伴う南本牧粘土の  $\log m_v \sim \log \bar{p}$  曲線の変化

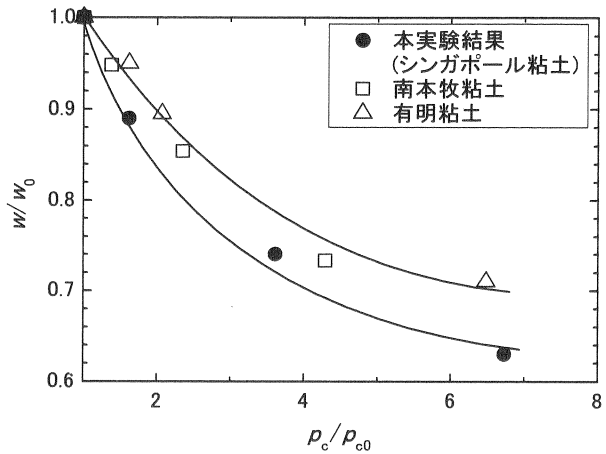


図-16 含水比の減少に伴う  $p_c$  の変化

すと僅かではあるが再び減少に転ずる。乾燥の影響を受けた供試体では、乾燥の進行に伴って間隙比が減少するため、圧縮圧力の増分に対する圧縮ひずみ量が小さくなり、 $\log c_v \sim \log \bar{p}$  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63%供試体の  $\log c_v \sim \log \bar{p}$  曲線上に近似していく。

図-11および図-12に南本牧粘土および有明粘土の  $\log c_v \sim \log \bar{p}$  曲線の変化を示す。これらの曲線についても  $\bar{p}$  値が大きくなってくると、乾燥を受けていない供試体の  $\log c_v \sim \log \bar{p}$  曲線上に近似してくる。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、シンガポール粘土と同様な傾向が見られる。 $c_v$  値にはばらつきも見られるが、乾燥を受けた土の  $c_v$  値は、 $\bar{p}$  値が大きな領域においてほぼ同じ値を示している。

図-13に乾燥に伴うシンガポール粘土の  $\log m_v \sim \log \bar{p}$  曲線の変化を示す。63%供試体の  $m_v$  値は、 $\bar{p}$  値が増加するのに従ってやや大きくなり、600kPa付近で最大値を示す。 $\bar{p}$  値がさらに大きくなると  $m_v$  値は減少をはじめ、その傾きは一定となる。乾燥の影響を受けた供試体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、 $m_v$  値はすべて

の供試体で同じ傾きを示す。

図-14および図-15に南本牧粘土と有明粘土の  $\log m_v \sim \log \bar{p}$  曲線の変化を示す。これらの曲線についても、 $\bar{p}$  値が大きくなってくると、その傾きは乾燥を受けていない供試体の  $\log m_v \sim \log \bar{p}$  曲線に近似してくる。これらの傾向はシンガポール粘土と同様であり、乾燥を受けた供試体の  $\log m_v \sim \log \bar{p}$  曲線は、乾燥を受けていない供試体の同曲線とほぼ一致する。

図-16にシンガポール粘土の含水比の変化と圧密降伏応力の変化との関係を南本牧粘土および有明粘土の結果とともに示す。縦軸は乾燥後の含水比  $w$  を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。横軸は乾燥を受ける前の  $p_c$  値 ( $p_{c0}$ ) を基準として、乾燥収縮に伴う  $p_c/p_{c0}$  の変化を示す。シンガポール粘土の  $p_c/p_{c0}$  値は  $w/w_0$  値の減少に伴って、著しく増加する傾向にある。 $w/w_0$  値が0.89, 0.74, 0.63へと減少することに伴って、 $p_c/p_{c0}$  値は1.62, 3.61, 6.73とそれぞれ増加していく。また、 $w/w_0$  値の変化割合がほぼ同じであっても、 $p_c/p_{c0}$  値の増加傾向は、 $w/w_0$  値によって大きく異なっている。特に、 $w/w_0$  値が小さな領域において、 $w/w_0$  値の減少に対する  $p_c/p_{c0}$  値の増加

表-2 乾燥に伴う正規圧密領域における圧密特性の変化

試料名	w (%)	e	S <sub>r</sub> (%)	p <sub>c</sub> (kPa)	p <sub>c</sub> /p <sub>c0</sub>	C <sub>c</sub>	c <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /d)	m <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /kN)
63% 供試体	63.4	1.69	99.5	137	1.00	0.51	13	5.46 × 10 <sup>-5</sup>
56% 供試体	56.3	1.51	100.7	222	1.62	0.50	12	5.38 × 10 <sup>-5</sup>
47% 供試体	47.2	1.28	99.5	494	3.61	0.51	12	5.66 × 10 <sup>-5</sup>
40% 供試体	40.2	1.09	99.0	922	6.73	0.51	10	5.55 × 10 <sup>-5</sup>

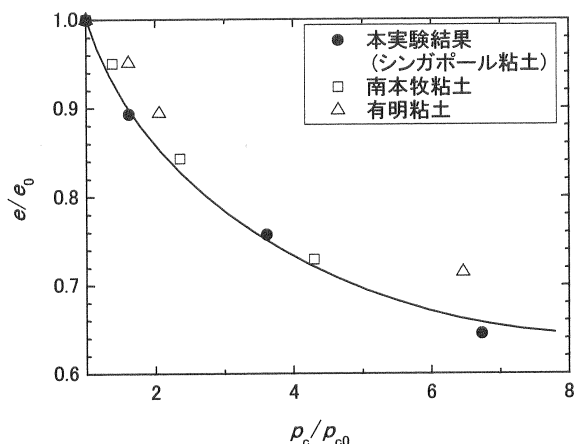


図-17 間隙比の減少に伴う p<sub>c</sub> の変化

は著しい。土試料の水分が30%程度減少すると p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> 値は乾燥を受けていない試料の約5倍となっている。南本牧粘土および有明粘土についても同様な関係が見られ、w/w<sub>0</sub> 値の減少に伴って p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> 値は著しく増加する傾向を示している。ここに示した3種類の粘土試料から、乾燥収縮の進行に伴って、p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> 値は増大していき、水分が3割程度減少すると p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> 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予測される。

図-17にシンガポール粘土の e と p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> との関係を示す。縦軸は乾燥後の間隙比 e を粘土が乾燥を受ける前の間隙比 e<sub>0</sub> で除してあり、乾燥に伴う各供試体の e の変化割合を示している。横軸は図-16に示した定義と同様に p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> を示す。p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> 値は e/e<sub>0</sub> 値が小さくなるのに従って増加する。特に e/e<sub>0</sub> 値が小さな領域では、e/e<sub>0</sub> 値の大きな領域と比較して、e/e<sub>0</sub> 値の増分に対する p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> 値の増加は著しい。この結果は本質的に w/w<sub>0</sub> 値と p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> 値の関係と同じである。

以上、正規収縮過程におけるシンガポール粘土の圧密特性の変化をまとめて表-2に示す。ここに、c<sub>v</sub> 値は  $\bar{p}$  値が 2,000~3,000kPa における平均値、m<sub>v</sub> 値は  $\bar{p}$  値が 2,000kPa における値、すなわち正規圧密領域における圧密特性の変化を示した。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<sub>c</sub> 値や p<sub>c</sub>/p<sub>c0</sub> 値は増大する。また、C<sub>c</sub> 値、c<sub>v</sub> 値および m<sub>v</sub> 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、このような傾向が、実地盤にも当てはまるのか検討を行うこととする。なお、実地盤から得られている土質パラメーターは限られているので、 $\rho_t$  と OCR ならびに e と

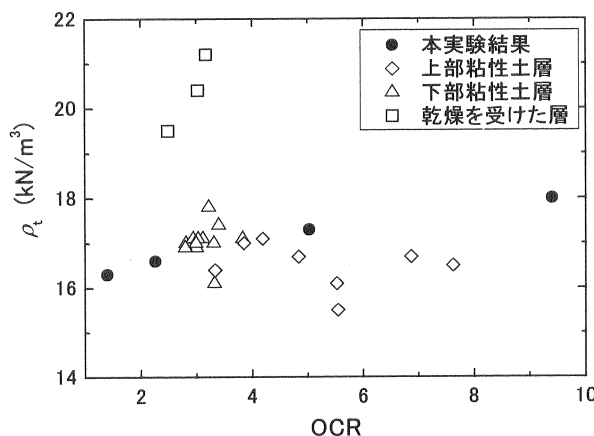


図-18 シンガポール粘土の  $\rho_t$  と OCR との関係

OCR の関係について検討を行うこととする。

図-18に  $\rho_t$  と OCR との関係を実地盤の結果とともに示す。乾燥収縮試験によって得られる OCR は p<sub>c</sub> を予圧密圧力 98.1kPa で除した値とした。また、実地盤については、図-1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  $\rho_t$  値は OCR 値の大きさによらず 15.5~18.0kN/m<sup>3</sup> の間に分布している。実験結果から得られた  $\rho_t$  値(黒丸)は OCR 値の増加にともない 16 から 18kN/m<sup>3</sup> へと増加している。乾燥を受けた層から得られた  $\rho_t$  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  $\rho_t$  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  $\rho_t$  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、 $\rho_t$  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、この層には砂が多く含まれていることから、 $\rho_t$  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  $\rho_t$  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-2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。この層では OCR 値はほとんど変わらないのに、 $\rho_t$  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

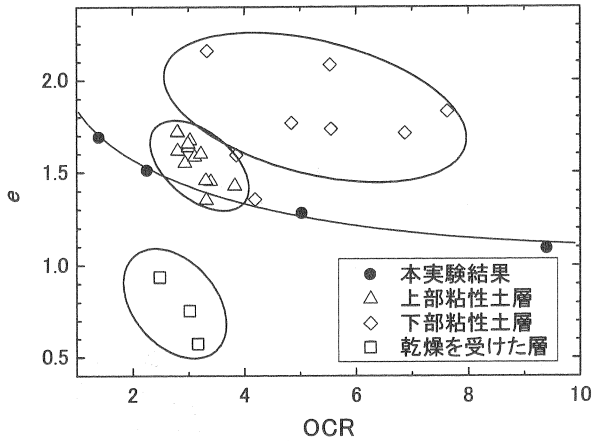


図-19 シンガポール粘土の  $e$  と OCR の関係

$\rho_d$  値は OCR 値の増加によって増加傾向を示し、 $20\text{kN/m}^3$  よりも大きな値を示すこともあった。

図-19に  $e$  と OCR との関係を実地盤の結果とともに示す。OCR の定義は前述したとおりであり、図-18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  $1.3\sim 2.2$  の間にあり、OCR 値は  $2\sim 8$  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るためである。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  $2\sim 3$  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。

## 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、乾燥履歴によって圧密特性がどの程度変化するのか、正規収縮領域において定量的な把握を試みた。本研究から得られた主要な知見を以下に述べる。

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を示した。同様の結果を間隙比についても示した。

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、正規圧密領域では、圧縮指数、圧密係数や体積圧縮係数は、乾燥履歴による影響をほとんど受けないことが明らかとなった。

## 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, 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 15<sup>th</sup> 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, 港研報告, Vol. 17, No.3, pp.70-76, 1978.

(2006年7月18日 受付)