

飽和粘性土の残留有効応力を支配する要因

田中政典¹・田中洋行²・三島 理³

¹正会員 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)
E-mail:tanakam@pari.go.jp

²正会員 工博 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

³正会員 工修 国土交通省中国地方整備局 (〒730-0029 広島県広島市中区三川町2-10)

自然堆積した飽和粘性土の残留有効応力(σ'_r)を測定した。この結果、同一の方法によって試料を採取したにもかかわらず、測定された σ'_r は地盤によって大きく異なることがわかった。この原因を明らかにするため室内で再構成した試料を用いて、圧密時間や過圧密比を変化させ、 σ'_r に対する影響を調べた。また、豊浦砂や珪藻土を混ぜた混合土を作製し、粒度組成や塑性指数と σ'_r との関係を示した。この結果、圧密係数が大きな土ほど σ'_r が一定となる時間が短いこと、圧密時間が長くなるのにしたがって σ'_r が増加すること、過圧密比の増加によっても σ'_r は大きくなることなどがわかった。

Key Words : residual effective stress, sand content, saturated clay, overconsolidation ratio, plasticity index

1. はじめに

地盤から採取された試料は土が受けていた拘束圧から解放され、その応力状態を全応力で表示すると、鉛直応力(σ_v)および水平応力(σ_h)は、 $\sigma_v=0$, $\sigma_h=0$ となる。しかし、有効応力の観点から採取された試料の応力状態を考えると、原位置の有効拘束圧の一部は負の間隙水圧($-u_w$)となって供試体内に保持される。したがって、一軸圧縮試験の状態においても、目には見えない残留有効応力(σ'_r)が有効拘束圧として供試体に作用していることになり、これが一軸圧縮強さ(q_u)を設計強度に使う根拠の一つとなっている。しかし、試料の σ'_r の値はサンプリング時の乱れによって大きく左右され、この違いが q_u に大きな影響を与える¹⁾。この乱れを σ'_r の減少として考え、 σ'_r によって q_u を補正する方法が提案されている(例えば、三田地・工藤²⁾, 正垣・丸山³⁾)。

しかしながら、後で詳しく述べるように同じサンプリング方法で採取された試料であっても、地盤によって測定される σ'_r は著しく異なる⁴⁾。つまり、 σ'_r はサンプリング時の試料に加えられた乱れの程度が同じであっても、地盤によって大きく変わることを意味している。本論文では σ'_r を支配している主要な因子を明らかにするため、室内で再構成された試料

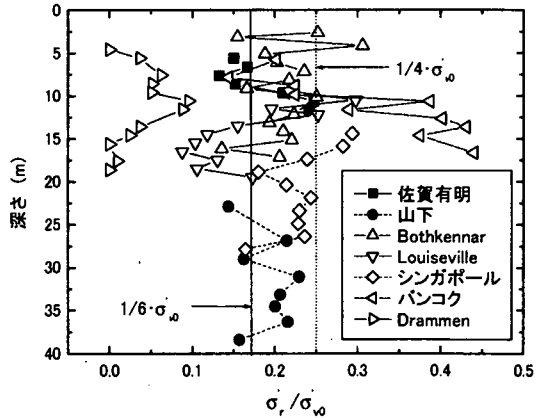


図-1 各種地盤で得られた σ'_r

を用いて、土の種類(粒度組成や塑性指数(I_p))や圧密条件の違い(時間や過圧密比)が σ'_r に与える影響を調べた。

2. 地盤によって異なる残留有効応力

筆者らは国内外を含めた様々な地盤で地盤調査を行っている。図-1にこれらの調査で得られた σ'_r を示す⁴⁾。図中の横軸は σ'_r を原位置の有効土被り圧(σ'_{v0})

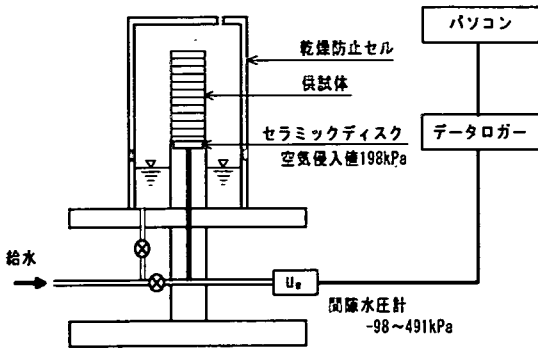


図-2 サクションの計測装置

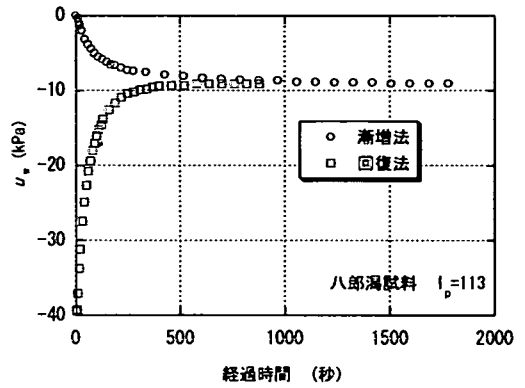


図-3 計測方法と σ_r

で正規化した値を示している。これらの調査では、すべての地点で地盤工学会基準JGS 1221「固定ピストン式シンウォールサンプラーによる土の乱さない試料の採取」に従ってサンプリングを行った。海外の調査ではサンプラーを日本から現地を持ち込み、筆者らの監督の下で我が国の基準に沿って、現地のオペレーターによる試料採取が行われた。なお、地盤条件の詳細は以下の文献を参照されたい(Tanaka & Tanaka⁵⁾, 田中ら⁶⁾, 澁谷ら⁷⁾, Tanaka *et al.*⁸⁾).

図から我が国の沖積粘性土地盤の σ_r は奥村も⁹⁾示したように深さによらずおよそ $1/4 \sim 1/6 \cdot \sigma'_{v0}$ の関係にある。一方、海外の土から得られた σ_r は、バンコク粘土のように σ_r/σ'_{v0} が0.4を越す土やノルウェーのDrammen粘土のように σ_r/σ'_{v0} が0.1に満たない土もある。バンコク粘土の σ_r/σ'_{v0} が大きな理由として、地下水のくみ上げの影響が考えられ、この結果として深さ方向に σ_r/σ'_{v0} の値が大きくなっているものと考えられる。また、カナダのLouiseville粘土の σ_r/σ'_{v0} も深さが15mを越した試料では $1/6 \cdot \sigma'_{v0}$ よりも小さな値を示している。本論文の目的は同じサンプリング方法を用いたのにもかかわらず、なぜ σ_r が地盤によって大きく異なるかを明らかにするものである。

3. 測定条件の違いによる残留有効応力

(1) 残留有効応力の測定方法

σ_r の計測に用いた装置を図-2に示す。 σ_r の計測に関する詳細はFredlund & Rahardjo¹⁰⁾の研究を参照されたい。本論文では、 σ_r の測定の対象となった試料が比較的浅い深さの沖積粘性土であったので、空気侵入値196kPaのセラミックディスクと-98~491kPaまで測定できる間隙水圧計を使用した。なお、本計測装置で測定できる σ_r の最大値は70kPa程度であり、最小読取り値は0.1kPaである。残留有効応力測定中

は供試体含水比の変化を防ぐため、供試体をアクリル製の円筒で覆った。本試験で用いた供試体の寸法は直径3.5cm、高さ8cmで、一軸圧縮試験に用いられる供試体と同じである。

飽和粘性土の σ_r の測定方法は未だJISあるいはJGSによる基準に定められてはいないが、JGS 0527「不飽和土の三軸圧縮試験法」に示されているマトリックサクションと同様である。飽和粘性土の σ_r の測定は文献などを参考にすると以下の二つの方法が用いられているようである¹¹⁾。一つは、あらかじめセラミックディスクの間隙水圧を大気圧状態にして、供試体をセラミックディスクの上に静置し、間隙水圧(u_w)が一定となった値をもって σ_r とする方法である。ここではこれを漸増法と呼ぶ。もう一つは正垣・丸山³⁾が行っているように、セラミックディスクの初期間隙水圧を供試体の σ_r より大きな負圧とした後、セラミックディスク上に供試体を静置し、 u_w が一定となった値をもって σ_r とする方法であり、ここでは回復法と呼ぶ。

図-3にこれらの測定方法で得られた経過時間と u_w の比較を示す。使用した試料は八郎潟粘土で、49kPaで圧密された再構成試料である(再構成試料の作製方法は後で詳しく述べる)。回復法ではバルブを閉じセラミックディスクの u_w を約-40kPaまで下げた後、すなわち、セラミックディスクから間隙水圧計までの経路に約-40kPaの負圧を与えた状態で供試体をセットし u_w の計測を開始した。回復法では計測開始後 u_w は急激に上昇し、計測開始後400秒程度で一定に落ち着いた。一方、漸増法では供試体をセットしてから1,000秒ほどで一定となった。両方法で得られた最終の u_w 、すなわち σ_r の大きさは変わらないが、回復法の方が漸増法より u_w が一定となる時間は多少短いようである。

このように、異なった測定方法から得られた σ_r で

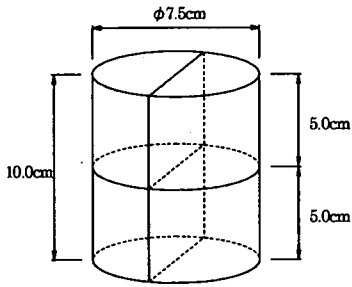


図-4 試料の分割

も値はほぼ同じとなることがわかった。しかし、回復法では試験開始時にセラミックディスクの u_w をどの程度下げてよいのか不明であることや試験方法の簡便さから、本論文においては図-1に示した結果も含めて漸増法によって σ_r を計測した。

(2) 試料採取後の残留有効応力

図-1に示した σ_r の測定結果には海外の試料も含んでいる。したがって、図-1に示す σ_r/σ'_{v0} が異なる原因として、試料を採取して σ_r を測定するまでの経過時間や運搬による試料の乱れが考えられる。このため、以下に示す調査を行った。

a) 採取してから測定までの経過時間

佐賀有明の試料を使用して、試料採取後の経過時間と σ_r との関係を調べた。採取した試料は現地でサンプリングチューブから高さ10cmの円柱状に切り出し、これを図-4に示すように4分割した。このうち1試料は分割後直ちに σ_r を測定した。残った3試料はラップし、パラフィンで密封した後、スポンジで梱包してワゴン車とフェリーによって横須賀まで運搬された。図-5に佐賀有明粘土から得られた σ_r と経時変化の関係をBothkennar粘土の初期有効応力(p'_i)¹²⁾とともに示す。 p'_i は三軸セル内の供試体に加えた圧力(p_i)と発生した間隙水圧(u_i)の差から求められる。 p'_i は本論文で議論している σ_r と測定方法に違いは認められるものの供試体の残留有効応力と見なすことができる。なお、試料の採取深さは、佐賀有明粘土で6.4m、Bothkennar粘土で約7mである。縦軸の p'_i と σ_r は σ'_{v0} で正規化した。佐賀有明の σ_r/σ'_{v0} は60日頃までわずかながら増加傾向を示しているが、経過日数の経過による σ_r の減少はあまり認められず、0.14から0.17の間にある。一方、Hightら¹²⁾によれば、 p'_i (σ_r)は経過時間とともに減少すると報告している。しかし、図からも明らかなように彼らのデータにおいても現場での計測結果を除けば、時間経過に伴う p'_i の変化はほとんど認められない。 σ_r あるいは p'_i は

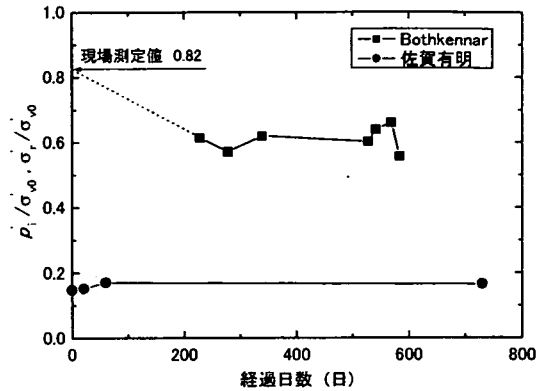


図-5 σ_r と経時変化

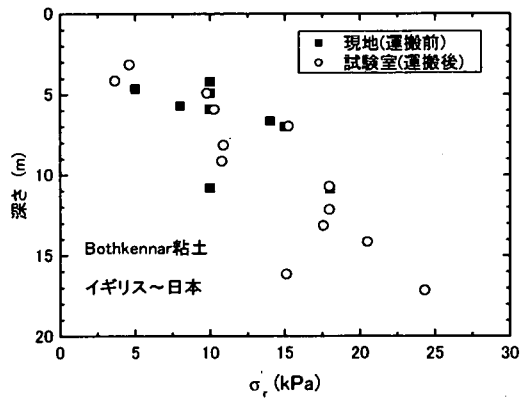


図-6 運搬による σ_r の変化

Hightら¹²⁾のデータが示すようにややばらついており、かつ、その値は非常に小さい。また、 σ_r は試料の乱れの影響を受け易いので、作業環境や計測精度に十分な注意を払う必要がある。

b) 運搬による影響

σ_r は運搬に伴う試料の乱れによっても変化することが考えられる。また、 σ_r は国内と比べて海外からの運搬の方が乱れの程度は大きいものと考えられる。そこで、イギリスのBothkennar粘土を用いて、運搬による σ_r の影響を検討する。図-6に現地と港湾空港技術研究所の試験室で測定された σ_r を示す。試料採取は日本の固定ピストン式シンウォールサンプラーによって行われた¹³⁾。採取された試料は、サンプリングチューブに入った状態で、クッション材を内装した輸送箱に入れてロンドンから空輸された。なお、当所の試験室で σ_r を測定した時期は、試料採取後3ヶ月である。図から、現地で計測された σ_r と3ヶ月後の σ_r の違いは認めることはできない。したがって、このことから経過時間や運搬による影響はあまりないものと考えられる。

表-1 自然粘性土の物理的性質

試料名	土粒子密度 (g/cm ³)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数	圧密係数 (cm ² /day)
南本牧	2.650	5.4	44.1	50.5	118	39	79	53
大阪南港	2.684	1.1	40.7	58.2	109	31	78	14
山下公園	2.697	4.9	40.4	54.7	119	49	70	48
八郎潟	2.606	0.4	36.2	63.4	176	63	113	60
佐賀有明	2.640	0	32.0	68.0	107	45	62	40
釜山	2.731	0.4	41.0	58.6	63	24	39	6.4
バンコク	2.730	2.1	20.9	77.0	89	26	62	6.0
シンガポール	2.692	1.2	28.8	70.0	85	31	54	15

表-2 人工試料の物理的性質

試料名	土粒子密度 (g/cm ³)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数	圧密係数 (cm ² /day)
カオリン	2.775	0.1	19.6	80.3	69	35	34	4.1×10 ⁶
珪藻土	2.294	0	64.5	35.5	NP	NP	-	2.8×10 ⁶
豊浦砂	2.641	99.3	0.7*		NP	NP	-	-

* シルト分と粘土分を合わせ 0.7%

以上示した実験より、図-1に示すように地盤によって σ_r/σ_v が異なるのは、試験方法や試料を採取して σ_r を測定するまでの経過時間、あるいは試料運搬に伴う乱れによるものではなく、地盤の特性によって生じたものと考えられる。もちろん、日本から持ち込んだサンプラーで我が国の基準に基づいてサンプリングを行ったとしても、採取された試料には乱れの影響が当然含まれている。そこで、図-1に示された結果から σ_r が決まる主要な因子が何であるのかを明らかにするために、室内で作製された再構成試料を用いて、どのような因子が σ_r に大きな影響を与えているのかを検討した。以下に、再構成試料に用いた土の基本的性質と作製方法を述べる。

4. 再構成試料の作製方法

(1) 使用した試料の物理的性質

a) 自然土

自然土として南本牧、大阪南港、山下、八郎潟、佐賀有明、釜山、バンコク、シンガポール粘土の8種類の試料を用いた。これらの試料の物理試験結果を圧密係数(c_v)とともに表-1に示す。釜山粘土とバンコク粘土の土粒子密度(ρ_s)は日本の港湾域で一般的に得られる2.60から2.70g/cm³よりも大きな値を示している。粒度組成ではバンコク粘土が他の粘性土

よりも粘土分が多く、 c_v は小さい。また、大阪南港と釜山粘土の粒度組成はほぼ同じであるのに I_p や c_v は大きく異なっている。なお、南本牧粘土を始めとする我が国の粘性土には珪藻が多量に含まれているが、釜山粘土、バンコク粘土およびシンガポール粘土には珪藻はほとんど含まれていない。

b) 人工試料

今回用いた自然土の I_p や粘土分含有量は試料によって大きく異なる。このため、本論文では豊浦砂や珪藻土を用いて、人工的に砂分やシルト分を調整した人工試料を作製した。人工試料はカオリナイトを主成分とするカオリン粘土とスメクタイトを主成分とするバンコク粘土に豊浦砂と珪藻土をそれぞれ混合したものである。カオリン粘土、珪藻土および豊浦砂の物理試験結果を表-2に、それぞれの混合試料のコンシステンシー特性を表-3～表-6に示す。

表-2からカオリン粘土は ρ_s が2.775g/cm³と一般の海成粘性土よりも大きく、粘土分が多い。しかし、 I_p は小さく、活性度が自然土と比べて小さいことを示している。また、カオリン粘土と釜山粘土の I_p はほぼ同じであるが、両者の c_v は大きく異なっている。珪藻土は岡山県蒜山で産出したもので、約10万年前に堆積したものである。珪藻土の ρ_s は2.294g/cm³と小さく、シルト分に相当する数十 μ mの円盤状の*Stephanodiscus niagarae*を多く含んでいる。液性限界(w_L)と塑性限界(w_p)はともにNPで、 c_v は非常に大き

表-3 カオリン粘土と豊浦砂混合土のコンシステンシー特性

カオリン：豊浦砂 K : S	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p
K:S=100:0	69	35	34
K:S=75:25	54	30	24
K:S=50:50	38	23	15
K:S=25:75	NP	NP	NP
K:S=0:100	NP	NP	NP

表-5 カオリン粘土と珪藻土混合土のコンシステンシー特性

カオリン：珪藻土 K : D	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p
K:D=100:0	69	35	34
K:D=75:25	83	48	35
K:D=50:50	101	68	33
K:D=25:75	112	88	24
K:D=0:100	NP	NP	NP

表-4 バンコク粘土と豊浦砂混合土のコンシステンシー特性

バンコク：豊浦砂 B : S	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p
B:S=100:0	89	26	63
B:S=75:25	63	20	43
B:S=50:50	45	16	29
B:S=25:75	29	NP	NP
B:S=0:100	NP	NP	NP

表-6 バンコク粘土と珪藻土混合土のコンシステンシー特性

バンコク：珪藻土 B : D	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p
B:D=100:0	89	26	63
B:D=75:25	109	42	67
B:D=50:50	NP	NP	NP
B:D=25:75	NP	NP	NP
B:D=0:100	NP	NP	NP

い。

表-3～表-6に示した表中の記号で、Kはカオリン粘土、Bはバンコク粘土、Sは豊浦砂、Dは珪藻土を示す。表中の比は混合率を示し、それぞれの試料の乾燥重量比で表されている。例えば、K:S=75:25は、カオリン粘土と豊浦砂を乾燥重量比で75:25で混合した試料を意味する。また、混合土の名称をそれぞれの記号を用いて、例えば、カオリン粘土と豊浦砂との混合土をKS混合土と呼ぶことにする。

(2) 試料の作製方法

本実験に用いた再構成試料は、内径80mm、高さ500mmのアクリル円筒の圧密容器を用いて、所定の圧力を一定時間載荷して作製した。試料は液性限界の約2倍の含水比となるよう調整を行い、攪拌機によって十分攪拌した。なお、NP試料の場合には、NPになる前の混合土試料の w_L の変化を参考にして含水比の調整をした。次に、これらの試料を圧密容器に入れ、圧密終了後の試料高さが約12cmとなるよう試料の投入量を調整した。圧密圧力(σ_{vc})は98kPaを標準とした。しかし、珪藻土とカオリン粘土の場合、98kPaでは σ_{vc} が小さすぎ供試体の成形が困難であったので σ_{vc} を245kPaとした。なお、圧密時間は \sqrt{t} 法における圧密度90%に対する時間(t_{90})を基準とし時間を定めた。本論文では特に断らない限り再構成試料の圧密時間は $4 \cdot t_{90}$ としている。圧密時間は、沈下量 $\sim \log t$ 曲線から得られる3t法による圧

密打切り時間と $4 \cdot t_{90}$ とがそれほど違わないことや t_{90} を基準としたデータ整理を考慮して $4 \cdot t_{90}$ とした。ここに、 t は経過時間である。このように作製された試料を正規圧密試料と呼ぶ。

過圧密試料の場合には、所定の最大圧密圧力時で $3 \cdot t_{90}$ の時間で圧密を行った後、最終除荷圧密圧力である49kPaの状態で行い、過圧密比(OCR)が1, 2, 4および8の再構成試料を作製した。この時のリバウンド量は0.5～1mm程度であった。なお、圧密時間は、過圧密比による σ_r の変化傾向の把握を目的としたので、正規圧密試料の $4 \cdot t_{90}$ よりも短い $3 \cdot t_{90}$ とした。

圧密終了後、このように作製された試料をピストンによってアクリル円筒から押し出し、高さ約12cmの試料をおよそ3cmと9cmになるよう分割した。分割した試料はラップされ、パラフィンでシールした後、室温が20°Cに保たれた恒温室の試料箱で保管した。 σ_r の測定試験を行うまでの保管期間は約2～20日であった。

圧密容器からの試料を押し出す際や、供試体の成形時にも試料の乱れによって σ_r が減少すると考えられるが、すでに述べたように圧密後の再圧密試料の厚さは同じであり、試料の押し出しと切出しは同一人物が行ったので、 σ_r に与える影響の度合いは全試料ほとんど同じと考えられる。

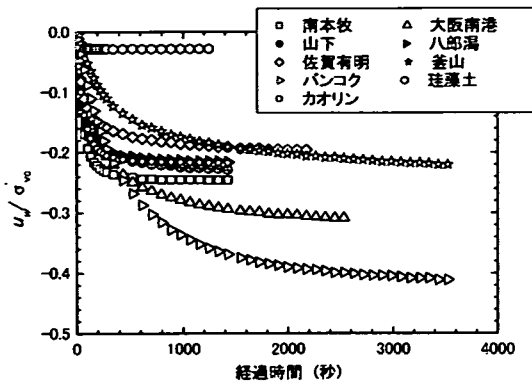


図-7 再構成試料の間隙水圧の挙動

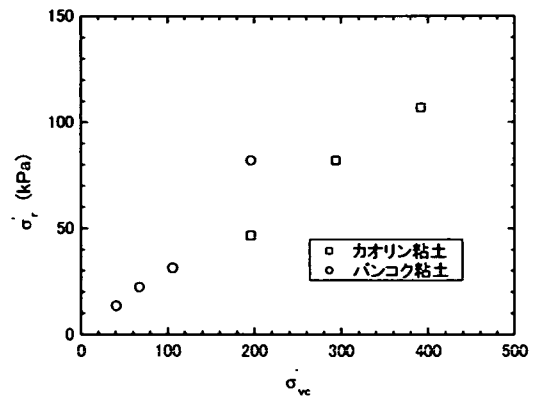


図-8 σ_r' と予圧密圧力との関係

5. 試験結果

(1) 土の種類と負の間隙水圧の挙動

図-7に再構成試料(正規圧密試料)の u_w と経過時間との関係を示す。縦軸は再構成試料の圧密圧力(σ_{vc})で正規化した。

図-7では縦軸を σ_{vc} で正規化した。再構成試料の場合でも u_w が σ_{vc} に対して正規化できるのか確かめるために、カオリン粘土とバンコク粘土を用いて検討を行った。カオリン粘土とバンコク粘土は4. (1)で述べたように、その鉱物組成や生成過程が大きく異なっており、かつ、珪藻土は含まれていない。すなわち、異なったこれらの試料について一定の傾向が得られれば一般的な性質であると考え、両粘土を選定した。図-8に σ_r' と σ_{vc}' の関係を示す。 σ_r' は u_w が一定となった時の値で、 $\sigma_r' = -u_w$ の関係にある。カオリン粘土およびバンコク粘土ともに σ_{vc}' の増加に対して σ_r' も直線的に増加しており、 σ_r' および u_w は σ_{vc}' で正規化できるものと考えられる。

図-7より土の種類によって最終の u_w/σ_{vc} (すなわち、 σ_r'/σ_{vc})の値が異なるばかりでなく、 u_w/σ_{vc} と経過時間の形状が明らかに異なっていることがわかる。南本牧、山下、八郎瀧、佐賀有明、カオリン粘土では u_w の測定を開始した後、500秒程度経過するとほぼ一定の値に近づく。しかし、大阪南港と釜山試料では u_w/σ_{vc} の減少する割合は緩やかであり、2,000秒を越えても減少傾向にある。珪藻土ではわずか150秒程度で一定の u_w/σ_{vc} に達する。バンコク粘土では u_w/σ_{vc} が一定値になるのは3,500秒経過した後である。

u_w/σ_{vc} が一定となる時間と表-1に示した c_v との関係を見てみると、大阪南港、釜山およびバンコク粘土の例に見られるように c_v の小さな試料では u_w/σ_{vc} が一定となる時間が長くなる傾向にある。一方、珪藻土のように c_v が大きな試料では、 u_w/σ_{vc} が一定と

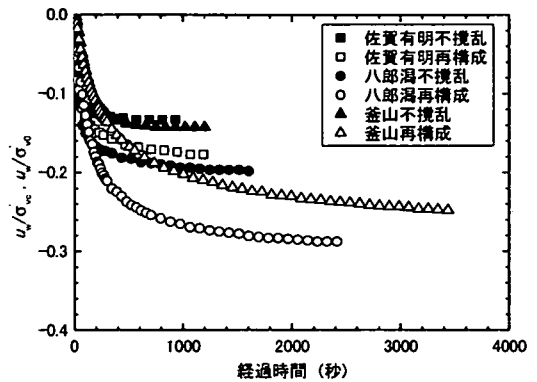


図-9 再構成試料と不攪乱試料の間隙水圧

なる時間は早い。

次に、最終の u_w/σ_{vc} の値、 σ_r'/σ_{vc} を見ると、それらの大きさは試料によって異なる。バンコク粘土は、 σ_r'/σ_{vc} の値が0.4を越えており、珪藻土のそれは0.025より小さく、両者には大きな違いが見られる。また、多くの試料の σ_r'/σ_{vc} は0.18から0.25の間にある。

(2) 不攪乱試料と再構成試料の残留有効応力

不攪乱試料と再構成試料で測定された u_w と経過時間との関係を比較してみる。図-9に佐賀有明、八郎瀧および釜山粘土の結果を示す。再構成試料の σ_{vc} は正規圧密状態と考えられる位置の σ_{v0} とし、佐賀有明では40kPa、八郎瀧では70kPa、釜山では105kPaの圧力で圧密を行った。縦軸は u_w を不攪乱試料の場合には σ_{v0} で、再構成試料の場合には σ_{vc} で正規化した。不攪乱試料では各試料とも再構成試料と比べて u_w が一定となる時間は短い。試料の状態を考慮すると $\log c_v \sim \log p$ 関係において、再構成試料の c_v は正規圧密時、不攪乱試料の c_v は過圧密時の値と見なすことができるので、再構成試料の c_v は不攪乱試料のそ

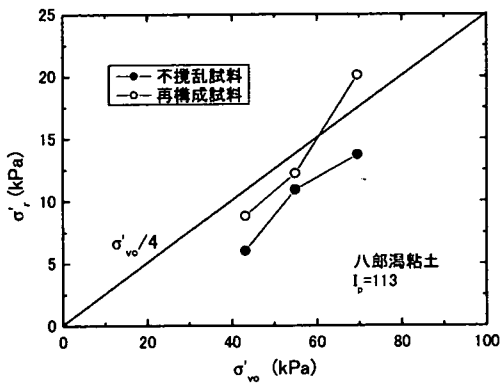


図-10 不攪乱試料と再構成試料の σ'_r と有効土被り圧

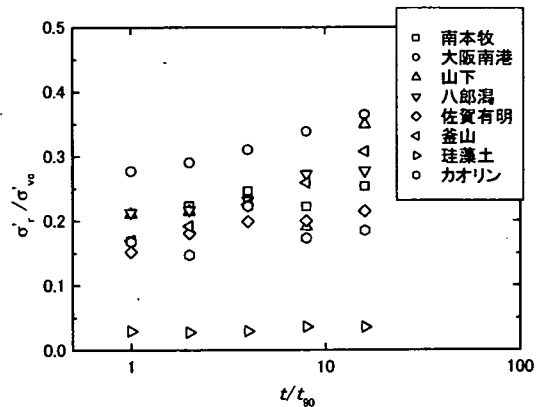


図-11 σ'_r と圧密時間との関係

れと比べて小さい。したがって、再構成試料と不攪乱試料とで u_w と時間の関係が異なるのは、すでに図-7で考察したように、 c_v の違いによるものと考えられる。

次に、 u_w が一定となった時の σ'_r は、再構成試料の σ'_r が不攪乱試料のそれより大きくなっており、再構成あるいは不攪乱試料とも佐賀有明、釜山、八郎潟粘土の順に大きくなっている。このことから、 σ'_r は地盤の物理・化学的特性に大きく左右されていると考えられる。

今回行った調査地点を含めて、年代効果や化学的变化によって不攪乱試料のOCRは1以上となる。したがって、再構成試料の σ'_r が不攪乱試料の σ'_r より小さい理由として、再構成試料は σ'_{vc} 、不攪乱試料は σ'_{v0} で正規化した影響が考えられる。

そこで、不攪乱試料と再構成試料の σ'_r の比較をもう少し詳しく調べてみる。八郎潟粘土のOCRはおおよそ1.0であるので、 $\sigma'_{vc} = \sigma'_{v0}$ の状態で行ったことになる。図-10に八郎潟粘土で得られた不攪乱試料と再構成試料の σ'_r と σ'_{v0} との関係を示す。どの深さの σ'_{v0} に対しても再構成試料の σ'_r が不攪乱試料の σ'_r よりも大きく現れており、やはり再構成試料の σ'_r が大きく測定される結果が得られた。このように正規圧密された地盤の σ'_r は、再構成試料の σ'_r が不攪乱試料の σ'_r より大きく現れる。

また、後で述べるようにOCRの増加に従い、 σ'_r も増加することが確かめられている。不攪乱試料のOCRは1以上であるので、本来ならば不攪乱試料の σ'_r/σ'_{v0} の方が、再構成試料の σ'_r/σ'_{vc} より大きくなるはずである。しかしながら、OCRが1に近い正規圧密地盤では、今回の結果が示すようにOCRが σ'_r に与える影響よりも、サンプリングによる乱れの影響の方が大きいことを示唆している。すなわち、不攪乱試料の場合には、ボーリング孔の削孔、シンウォールチ

ューブの挿入、引き抜き、さらに室内試験におけるチューブからの押し出しによって試料が乱される。一方、再構成試料の場合には、アクリル円筒からの試料の抜き出しが乱れの主な原因となる。この違いが図-9や図-10に示した σ'_r の差となって表れたものと思われる。

(3) 圧密時間と残留有効応力

実際の地盤は、堆積してからの圧密時間が本論文で対象とした再構成試料とは比較にならないほど長い。従来の研究から¹⁴⁾、一次圧密終了後の二次圧密時間が長いほど圧密降伏応力(p_c)やせん断強さが増加することが知られている。したがって、 σ'_r も二次圧密時間によって影響されることが予想される。

そこで圧密時間と σ'_r との関係を調べてみた。圧密時間の影響を調べるため、 \sqrt{t} 法による圧密度90%に対する時間(t_{90})を基本として、 t_{90} の2, 4, 8, 16倍の時間でそれぞれ圧密した再構成試料を作製した。図-11に σ'_r と t_{90} に対する圧密時間との関係を示す。縦軸は σ'_{vc} で正規化した。横軸は t_{90} を基本とした圧密時間(t/t_{90})である。いずれの試料も t_{90} に対する圧密時間の増加、つまり二次圧密の経過とともに σ'_r は増加する傾向にある。しかし、珪藻土は二次圧密時間の増加に対する σ'_r の増加は小さい。

(4) 過圧密比(OCR)と残留有効応力

すでに述べたように、自然に堆積した地盤は応力履歴的には正規圧密であっても、OCRは1よりも大きい。この原因として二次圧密やセメンテーションが考えられ、前節では二次圧密と σ'_r の関係について明らかにした。ここでは、力学的に過圧密した試料の σ'_r について述べる。

図-12に南本牧粘土とシンガポール粘土の σ'_r とOCRの関係を示す。ここでのOCRとは最大圧密圧力

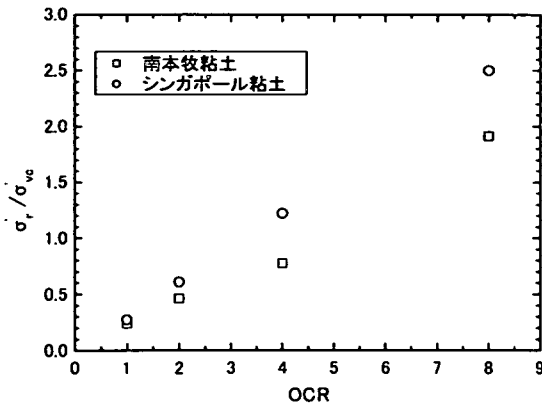


図-12 σ_r と過圧密比との関係

と最終圧密圧力($\sigma_{vc}=49\text{kPa}$)との比と定義する。図より、南本牧およびシンガポール粘土の σ_r/σ_{vc} はOCRとともに直線的に増加する。すなわち、 σ_r は最大圧密圧力によって決まることになる。これは、OCRが大きくなると、 σ_r/σ_{vc} も限りなく大きくなることを意味している。しかしながら、飽和粘性土地盤では σ_r は σ_{v0} よりも大きくなり得ないことから σ_r/σ_{vc} には限界値があると考えられる。また、図-12からOCR=4における σ_r/σ_{vc} がおよそ1であることや図-13に示されるように通常の粘性土地盤ではOCRが4以上の土を取り扱うことはほとんどないため、本論文ではOCRの最大値を4と考え、OCRが4程度までは、 σ_r/σ_{vc} とOCRとの間に直線関係が認められるとの表現に留めたい。

図-13に自然地盤のOCRと σ_r との関係を示す。自然地盤のOCRは p_c/σ_{v0} で定義した。 p_c は0.02%/minのひずみ速度で行った定ひずみ速度載荷による圧密試験から求めた圧密降伏応力である。

図から同一地点で得られた σ_r/σ_{v0} に着目すると、再構成試料と同様にOCRによって σ_r/σ_{v0} は確かに増加していることが認められる。特に、Drammen粘土とLouisville粘土ではこの傾向が明瞭に現れている。

我が国の沖積海成粘土である佐賀有明粘土と山下粘土を比べてみると、OCRにはそれぞれ1と2との違いはあるが、 σ_r/σ_{v0} にそれほど大きな違いが認められない。しかし、海外の土を見てみると同じOCRであっても σ_r/σ_{v0} の値は大きく異なっている。例えば、OCR=1.5のバンコク粘土とDrammen粘土を比べると、Drammen粘土の σ_r/σ_{v0} は0.04、バンコク粘土のそれは0.4とほぼ10倍の開きがある。

(5) 粒度組成と残留有効応力

倉田・藤下¹⁵⁾は試料に含まれる砂分が増えることによって、同じ圧密圧力で圧密された再構成試料で

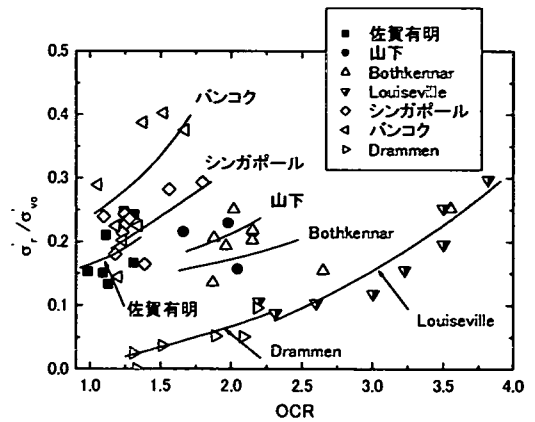


図-13 自然地盤の σ_r と過圧密比との関係

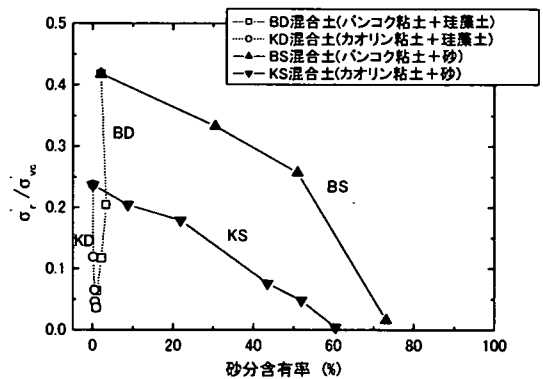


図-14 σ_r と砂含有率との関係

あっても q_u が減少することを指摘した。また、中瀬ら¹⁶⁾は粒度組成や I_p によって q_u を補正する方法を提案した。この実験事実や補正方法の提案の背景にあるのは、砂分の増加によって試料の保持できる σ_r が減少するために、 q_u が低下することを意味している。港湾の施設の技術上の規準・同解説¹⁷⁾においても、一軸圧縮試験の実施には粘土分とシルト分の含有率が50%以上であることを条件としている。本論文では、粒度組成の違いによって σ_r がどのように変化するか、混合試料を用いて調べてみた。

図-14に各混合土の砂分含有率と σ_r との関係を示す。縦軸は σ_{vc} で正規化した。砂を加えたKS混合土とBS混合土では砂分含有率が増えるのに従って σ_r/σ_{vc} は小さくなる。BS混合土では砂分含有率がゼロの時、 σ_r/σ_{vc} は0.42と大きな値を示しているが、砂分含有率が増えるのに従って σ_r/σ_{vc} は徐々に小さくなって行く。砂分含有率が50%を越すと σ_r/σ_{vc} は急激に小さくなり、砂分含有率75%で σ_r/σ_{vc} はほぼゼロになる。KS混合土の σ_r/σ_{vc} もBS混合土と同様

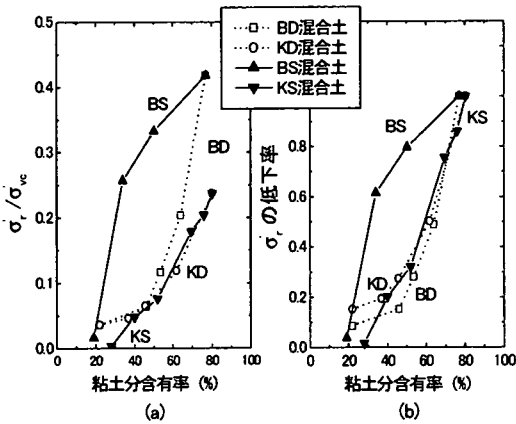


図-15 σ_r と粘土分含有率との関係

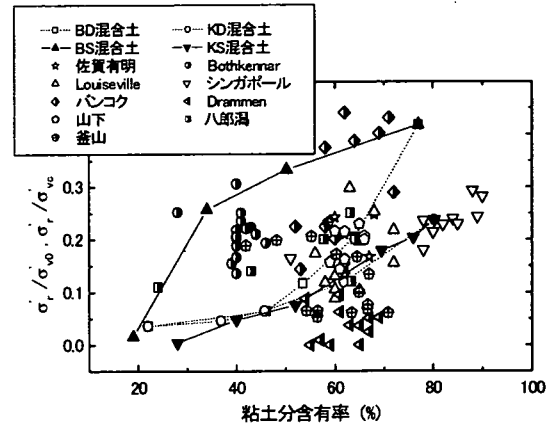


図-16 自然地盤の σ_r と粘土分含有率の関係

に砂分含有率が大きくなるのにしたがって次第に小さくなって行き、砂分含有率が60%になるとゼロに近づく。このように、砂分含有率によって σ_r の大きさは著しく影響され、 q_0 値を砂分あるいは細粒分で補正する手法¹⁶⁾はかなり有効であるように思える。

しかしながら、珪藻土を混合した実験結果を見ると、砂分は増加していないのに σ_r は著しく減少しているのがわかる。これは、珪藻土の粒径のほとんどはシルト径なので、珪藻土の量が增大しても砂分は増加しないためである。つまり、砂分は増加しなくても σ_r は小さくなっており、砂分含有率のみで土の σ_r の減少を説明することはできない。

珪藻土の混合によって σ_r が減少することから、 σ_r を支配する因子は砂分ではなく、粘土分であることが想像される。図-15に粘土分含有率(ここでは、日本地盤工学会の基準に従い粒径 $5\mu\text{m}$ 以下を粘土分とする)と σ_r との関係を示す。図-15(a)には σ_r/σ_{vc} を、図-15(b)には σ_r の低下率を示す。 σ_r の低下率とは、珪藻土や砂を混合する前の試料の σ_r を基準として、珪藻土や砂を混合することによってどの程度 σ_r が減少したのかを比で表したものである。図-15(a)から、粘土分含有率の低下によって、 σ_r/σ_{vc} の値も小さくなっており、砂分含有率に対する指標よりも、 σ_r の減少をうまく説明できる。しかし、同じ粘土含有率でもBS混合土の σ_r は他の試料よりも大きな値を示しており、粘土分含有率だけで σ_r を一義的に表すことができないことを意味している。低下率として σ_r の減少を捉えたと、図-15(b)に示すように、図-15(a)に示した σ_r/σ_{vc} より、試料の違いによる差は小さくなるが、それでもBS混合土の低下率は他の試料とは異なっている。したがって、 σ_r は粘土分含有率の他に粘土の活性度や間隙径などの多くの因子によって複雑に支配されているものと思われる。

図-15(a)の混合土の再構成試料の関係に不攪乱試料で得られた関係を加え、再整理して図-16に示す。図-13に示したように、 σ_r はOCRにも関係するので、 σ_r と粘土分含有率の間には大きなばらつきが予想される。しかし、同一地点に限定すると、Bothkennar粘土と釜山粘土を除いて粘土分含有率の増加に伴い、 σ_r/σ_0 の増加が認められる。また、興味深いことに、BS混合土とKS混合土で得られた関係が、不攪乱試料で得られた関係の、それぞれ上限値と下限値になっている。この範囲を大きく逸脱しているのは、Drammen粘土とバンコク粘土および釜山粘土の一部である。

(6) 塑性指数と残留有効応力

中瀬ら¹⁶⁾は、一軸圧縮強さの補正を I_p によって行うことも提案している。この補正方法は、 I_p と砂分含有量が密接な関係にあることを前提としている。すなわち、粘土分の活性度が同じで、しかも砂分とシルト分の比率が同じであれば、砂分の増加と I_p の減少は同じことを意味する。しかし、図-14に示したように、豊浦砂の混合土の例を見てみると、同じ粘土含有量であるのに、KS混合土とBS混合土とを比較すると、両者の σ_r/σ_{vc} にはかなりの差が認められる。また、不攪乱試料の例を示した図-16においても、粘土含有量が多いDrammen粘土の σ_r/σ_0 が他の試料と比べて極端に小さい。同じ粘土含有量でも、これを構成する粘土鉱物によって、比表面積や交換性陽イオン容量などの化学的性質が、 σ_r を支配していることが考えられる。これらの特性を表している指標として工学的には I_p が使われており、以下に σ_r と I_p の関係を検討してみる。

図-17に図-15の場合と同様に混合土から得られた I_p と σ_r の関係を示す。図からBS混合土とKS混合土の

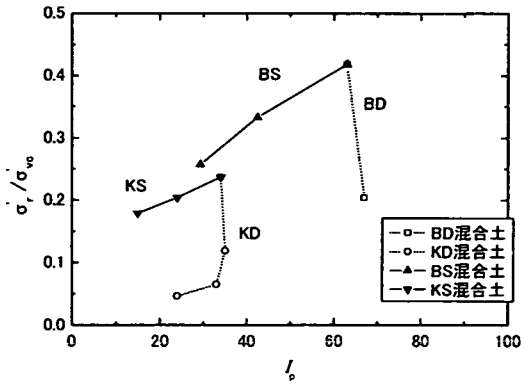


図-17 再構成試料の σ_v' / σ_{ve}' と I_p との関係

σ_v' / σ_{ve}' を I_p に対してプロットすると、 I_p の増加によって σ_v' が増加しているのがわかる。したがって、 σ_v' を粘土分含有量と関連づけるよりも、 I_p の方がより一義的に表すことが可能となる。しかし、珪藻土を混合したBD混合土やKD混合土の場合には I_p と σ_v' / σ_{ve}' との間に有意な関係を認めることはできない。これは珪藻土を混合した試料では、粘土分の特性を I_p によって適切に表現できないためである。すなわち、珪藻土は粒径がシルトとはいへども多孔質であるため、その内部に水を大量に保持しているからである。したがって、珪藻含有量が増加し、粘土分が減少しても表-3～表-6に示したように、結果的に I_p はそれほど変化しない¹⁹⁾。

次に、これらの混合土試料の I_p と σ_v' の関係を不攪乱試料で得られた値を加えて図-18に示す。図-16と同様に、縦軸は不攪乱試料の場合には σ_{v0}' で、再構成試料の場合には σ_{ve}' で正規化した。図-16から同程度の粘土分含有量を示すDrammen粘土とバンコク粘土の σ_v' / σ_{ve}' は大きな開きが認められた。一方、 σ_v' を I_p で整理すると、多くの粘土で図-18に示すように I_p の増加に伴って σ_v' / σ_{ve}' が増加していると説明することができる。しかしながら、八郎潟粘土、佐賀有明粘土や山下粘土は I_p がかなり大きいにもかかわらず、 σ_v' はバンコク粘土に比べるとかなり小さい。特に、八郎潟粘土の I_p は他の粘土の I_p と比べて非常に大きな値を示しているが、 σ_v' は他の粘土より大きくはない。このように、 σ_v' を I_p によって全て説明することはできない。同じ図に珪藻混合土と I_p との関係を示すが、すでに述べたように、珪藻の含有量によって σ_v' が低下する。我が国の粘性土には珪藻が多量に含まれていることが知られており¹⁹⁾、これが八郎潟粘土、佐賀有明粘土や山下粘土の σ_v' が小さい理由の一つとして考えられる。また、すでにOCRによっても σ_v' が大きく影響されることを示したが、図-18に

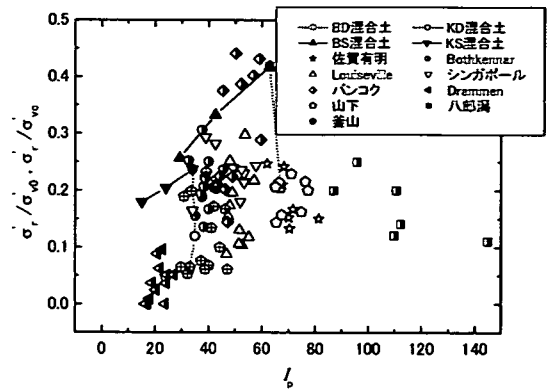


図-18 自然地盤の σ_v' / σ_{ve}' と I_p との関係

示す試料のOCRはかなり異なる。これらの要因が重なって図に示すような σ_v' と I_p の関係が得られたものと考えられる。

6. まとめ

日本を始め世界各地で、我が国のサンプリング方法によって試料を採取し、残留有効応力(σ_v')を測定した。その結果、粘土の種類によって σ_v' は大きく異なった。試料が採取されてから σ_v' の測定を行うまでの時間を調べたが、試料の保存を適切に行えば、採取されてから最低2年間、 σ_v' は変化しないことがわかった。したがって、土の種類によって σ_v' の大きさが異なると結論できる。本論文では、どのような要素が σ_v' の大きさに影響を与えるのか、自然土あるいは混合土の再構成試料を用いて、 σ_v' を支配する因子を明らかにした。主要な結論を以下にまとめる。

- 1) σ_v' が一定となる時間や値は、土の種類によって大きく異なる。圧密係数が大きな土ほど σ_v' が一定となる時間は短い。
- 2) 圧密時間によって σ_v' は増加する。しかし、珪藻土は圧密時間の増加に対する σ_v' の増加は小さい。
- 3) OCRの増加によって σ_v' は大きくなる。不攪乱試料の場合でもその傾向が確かめられた。
- 4) 不攪乱試料の σ_v' が大きな試料は、再構成しても σ_v' は大きい。また、正規圧密粘性土地盤においては、常に再構成試料の σ_v' が不攪乱試料の σ_v' より大きかったことから、サンプリングによる試料の乱れの影響が考えられる。
- 5) 豊浦砂や珪藻土を混合した再構成試料から、砂分含有率やシルト分含有率が増えると σ_v' は急激に小さくなることがわかった。

- 6) 塑性指数が大きくなると σ_r も大きくなる傾向にあるが、一義的に決めることはできない。

参考文献

- 1) 田中政典, 田中洋行, 三島理: 海外の土の地盤調査と工学的性質, 第45回地盤工学シンポジウム-地盤工学の国際化-論文集, pp. 87-90, 2000.
- 2) 三田地利之, 工藤豊: サクションと一軸圧縮強度に基づく粘土の非排水強度推定法, 土木学会論文集, No. 541/III-35, pp. 147-157, 1996.
- 3) 正垣孝晴, 丸山仁和: サンプラー内の乱れの異なる試料を用いた原位置の非排水せん断強度の推定法, 土と基礎, Vol. 46, No. 4, pp.29-32, 1998.
- 4) 三島理, 田中洋行, 田中政典: 種々の粘性土の残留有効応力の比較, 土木学会, 第54回年次学術講演会概要集3-A, pp. 94-95, 1999.
- 5) Tanaka, H. and Tanaka, M.: Sample Quality Obtained by Various Types of Samplers, *Proceedings of 10th Asian Regional Conference on SMFE*, pp.83-86, 1995.
- 6) 田中洋行, 田中政典, K. K. Hamouche: 海外の粘土に対する一軸圧縮試験の適用性, 第41回地盤工学シンポジウム -一軸圧縮強さの功罪/これに代わるもの-, pp. 61-66, 1996.
- 7) 澁谷啓, 田中洋行, 田中政典, K. K. Hamouche: バンコック粘土の地盤工学的特性に関する二国間共同研究, 地質と調査, Vol. 2, pp. 44-51, 1997.
- 8) Tanaka, H., Shiwakoti, D. R., Mishima, O., Watabe, Y. and Tanaka, M.: Comparison of Mechanical Behavior of Two Overconsolidated Clays: Yamashita and Louiseville Clays, *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 4, pp. 73-87, 2001.
- 9) 奥村樹郎: 粘土のかく乱とサンプリング方法の改善に関する研究, 港湾技研資料, No. 193, 145p., 1974.
- 10) Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.: *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, JOHN WILEY & SONS, INC., pp. 260-262, 1993.
- 11) 田中政典, 田中洋行, 三島理, 渡部要一: 採取された試料の残留有効応力の評価について, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp. 553-554, 2000.
- 12) Hight, D. W., Böese, R., Butcher, A.P., Clayton, C. R. I. and Smith P.R.: Disturbance of the Bothkennar clay prior to laboratory testing, *Géotechnique*, Vol. 42, No. 2, pp.199-217, 1992.
- 13) Tanaka, H.: Sample Quality of Cohesive Soils: Lessons from Three Sites, ARIAKE, BOTHEKENNAR and DRAMMEN, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 4, pp. 57-74, 2000.
- 14) Bjerrum, L. and Aitchison G. D.: Problem of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soil (collapsible, expansive and others), *Proc. of 8th ICSMFE*, pp. 111-159, 1973.
- 15) 倉田進, 藤下利男: 砂と粘土の混合土の工学的性質に関する研究, 運輸技術研究所報告, 第11巻, 9号, pp.389-424, 1961.
- 16) 中瀬明男, 勝野克, 小林正樹: 砂分の多い粘性土の一軸圧縮強さ, 港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 4, pp.83-102, 1972.
- 17) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 上巻, p.243, 1999.
- 18) Shiwakoti, R. D., Tanaka, H. and Mishima, O.: Some Peculiar Characteristics of Diatomite- Kaolin Mixture, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp.421-422, 1998.
- 19) 田中洋行, LOCAT, J., SHIWAKOTI, R. D., 田中政典: 日本と海外の海成粘性土の物理・化学特性に関する相違点, 土と基礎, Vol. 49, No. 2, pp. 5-8, 2001.

(2002. 2. 25 受付)

MAIN FACTORS GOVERNING RESIDUAL EFFECTIVE STRESS OF SATURATED CLAY

Masanori TANAKA, Hiroyuki TANAKA and Osamu MISHIMA

Residual effective stress (σ_r) was measured for various soils, which were recovered from various sites in the world. As a result, it turns out that measured σ_r is considerably different among those sampled specimens.

Behavior of negative pore water pressure (u_w) is found to be dependent on c_v . Soils with large value of c_v , can't retain their suction for long time, while the soils with low c_v can retain u_w for relatively longer time. It has been found that σ_r of samples obtained from different areas are influenced by their depositional environments.