

硬質粘土の品質及び圧密特性評価

利藤房男¹・大向直樹²・田中洋行³・田中政典⁴

¹正会員 応用地質(株) 技術本部 (〒330-8632 埼玉県さいたま市土呂町 2-61-5)

²正会員 応用地質(株) コアラボ (〒330-0038 埼玉県さいたま市宮原町 1-66-2)

³正会員 工博(独) 港湾空港技術研究所 (239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

⁴正会員(独) 港湾空港技術研究所 (239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

本研究の目的は、不攪乱状態で採取した硬質粘土試料の品質を評価すること、また、その圧密特性を適切に評価するための圧密試験方法を検討することである。本実験に用いた試料の品質は、定ひずみ速度圧密試験により原位置の有効応力まで再圧密したときのひずみ、及び間隙比の変化をもとに考察し、実務上良質な品質を有していることを示した。また、フィルターペーパー法を用いた残留有効応力の測定を行い、残留有効応力と試料品質との関係について検討した。その上で、これらの試料を用いて、水浸、非水浸により強制的に試料の残留有効応力を変化させ、これが圧密特性に与える影響について、定ひずみ速度圧密試験により検討した。この結果、今回用いた硬質粘土に関しては、試験前の残留有効応力が変化しても、圧密降伏応力、正規圧密領域での圧密特性に変化がないことを確認した。

Key Words: *stiff clay, sample quality, residual effective stress, filter paper method, constant strain rate consolidation test, consolidation yield stress*

1. はじめに

不攪乱状態で採取した粘土試料を用いて、圧密試験あるいは強度試験を行う場合、そのデータにばらつきがみられることが多い。この原因の一つとして、試料採取時の乱れの影響が指摘されている¹⁾。

最近では、構造物の大型化あるいは大水深における海上埋立てなど、その対象が沖積粘土のみならず、洪積の硬質粘土を対象になることが多い。沖積粘土を対象にしたサンプリング方法は、固定ピストン式シンウォールサンプラーが一般的に用いられており、慎重なサンプリングが実施されるならば、良質な試料の採取が可能となってきた。ところが、洪積粘土に代表される硬質粘土を対象とする場合には、ロータリー方式(一般的にはデニソンサンプラー方式)が用いられているが、固定ピストン式サンプラーと比較して、サンプリング技術の良否により品質にかなりばらつきが生じる。特に、大深度の硬質粘土を対象とする場合は、サンプリング方法が困難となるのに加え、試料採取時に生じる応力解放が大きく、採取した試料の品質にばらつきが生じる可能性が高い。

本研究の第1の目的は、様々な条件下(採取場所、深度、サンプリング方法が異なる)で採取した硬質粘土を対象に、その品質を評価することである。品質評価は、原位置の有効応力まで再圧密したときのひずみ、及び間隙比の変化をもとに行った。また、採取試料の残留有効応

力を測定し、これら硬質粘土が、かなり大きな残留有効応力を有することを示すとともに、試料品質との関連を検討した。

本研究の第2の目的は、硬質粘土試料の圧密特性を適切に評価するための圧密試験方法を検討することである。我が国の段階載荷圧密試験²⁾においては、硬質粘土を対象とする場合、圧密降伏応力までは供試体を水浸させずに載荷し、その後水浸させる事が推奨されている。この場合、供試体中に残留有効応力が存在するため、供試体にも有効に作用している圧力が特定できず、過圧密領域での $e \sim \log p$ 曲線が求められない。また、定ひずみ速度圧密試験³⁾においては、試験供試体をセットする際、間隙水圧を測定する必要性から、フィルター及びポーラスメタルを湿潤状態に保つ必要があり、供試体セット時に若干の吸水、膨張を許すことになる。また、供試体をセット後、加圧板の上端を固定した状態で密閉容器内に脱気水を満たし供試体を水浸させるが、加圧板の固定が不十分だと、その分試料は吸水膨張することになる。

このように、硬質粘土を対象とした場合、試料の持つ残留有効応力が大きいため、圧密試験時の供試体のセッティング方法の違いが、試験結果に大きな影響を与えることが懸念される。本研究では、圧密試験時のセッティング方法の違い(水浸・非水浸)により、供試体に異なる有効応力の解放を与え、これが圧密特性に与える影響を評価した。

2. 実験に用いた粘土の特徴

本実験には、硬質粘土として大阪湾周辺の洪積粘土⁴⁾ (尼崎粘土 Ma12 層, 大阪湾粘土 Ma10 層, 京都粘土 Ma4 層) を, その比較のために軟質粘土として韓国プサン沖積粘土を用いた。各粘土の特徴を表-1 にまとめた。

プサン粘土は, ほぼ正規圧密状態にあるが, 日本の一般的な沖積粘土と比較すると, 液性限界がやや小さめである。自然含水比は, 液性限界とほぼ同程度の値を示している。

洪積粘土の採取地は, 大阪湾粘土が海上, 尼崎粘土が沖積低地, 京都粘土が丘陵地である。尼崎粘土は, Ma12 層としては, 過圧密比が $OCR=2$ 前後と大きめである事が特徴的である。これは, 昭和 30~40 年代の地下水の揚水による地盤沈下の影響によるものと考えられる。大阪湾粘土は, $OCR=1.2\sim 1.7$ と尼崎粘土に比較して小さく, この過圧密分は過去に荷重を受けたのではなく, 年代効果による疑似過圧密であると指摘されている⁵⁾。京都粘土は, 尼崎, 大阪湾粘土に比較して, $OCR=4.0\sim 4.5$ と大きい。京都粘土は浸食場に形成されているとみられ, 過去に現状土被り以上の荷重を受けた真の過圧密状態にあるものと考えられる。なお, 実験に用いた洪積粘土は, 微化石分析の結果, 海成粘土であることを確認している。

サンプリング方法は, 沖積粘土であるプサン粘土は, 固定ピストン式シンウォールサンプラーで, 洪積粘土は, 水圧式サンプラー, デニソンサンプラー, トリプルサンプラーによった。

3. 硬質粘土の品質評価

(1) ϵ_{v0} , $\Delta e/e_0$ による不攪乱試料の品質評価

a) 品質評価方法

サンプリングの品質評価方法は, 種々提案されているが⁶⁾, 今回は原地盤の有効応力状態で再圧密した時の体積変化に着目した。Andersen and Kolstad⁷⁾ は, 沿岸域の鋭敏で軟弱な粘土試料を原地盤の有効応力状態まで再圧密した時の体積ひずみ (ϵ_{v0}) とサンプルの品質について表-2 の判断基準を示している。Lacasse and Berre⁸⁾ は, 圧密試験時の体積ひずみに加え, 過圧密比 (OCR) と深度を考慮して, 良質と判断できた試料の範囲を図-1 の斜線部で示している。

また, Lunne ほか⁹⁾ は, $\Delta e/e_0$ (Δe : 原地盤の有効応力状態まで再圧密した場合の間隙比の変化, e_0 : 初期間隙比) を用いた表-3 の評価方法を示している。この評価方法は, 間隙比変化 Δe を初期間隙比 e_0 で除した, 言うなれば間隙の変化率で試料の品質を評価している。前述の体積ひずみだけで試料の品質を評価すると, 初期間

表-1 実験に用いた試料の特徴

地区	尼崎	大阪湾	京都	プサン
	洪積層			沖積層
地層名	Ma12 層	Ma10 層	Ma4 層	
採取深度 (m)	27~37	130~155	21~25	5~22
土粒子密度 (g/cm^3)	2.68~ 2.69	2.68~ 2.74	2.72~ 2.74	2.71~ 2.74
湿潤密度 (g/cm^3)	1.50~ 1.56	1.64~ 1.85	1.64~ 1.69	1.55~ 1.67
自然含水比 (%)	77~88	39~59	55~63	57~70
液性限界 (%)	111~ 129	64~103	106~ 112	57~73
塑性限界 (%)	42~45	27~35	32~34	24~27
塑性指数	68~87	36~69	74~81	33~46
飽和度 (%)	≈ 100	≈ 100	≈ 100	≈ 100
過圧密比 OCR	1.7~ 2.1	1.2~ 1.7	4.0~ 4.5	1.0~ 1.3
サンプリング方法	デニソン トリプル	水圧式	水圧式 デニソン	シンウォール

表-2 再圧密時の体積ひずみ (ϵ_{v0}) と試料の品質 (Andersen and Kolstad)

ϵ_{v0} (%)	試料の品質
< 1	非常に良い (very good)
1~2	良い (good)
2~4	まあまあ (fair)
4~10	わるい (poor)
> 10	非常にわるい (very poor)

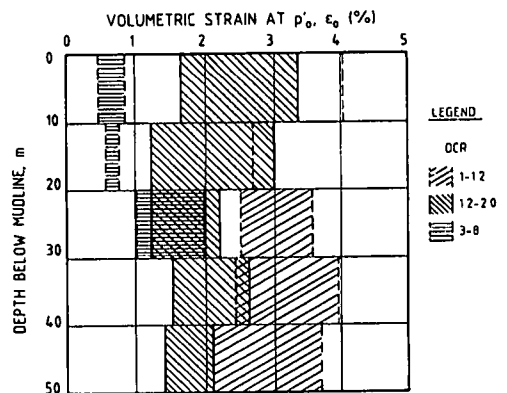


図-1 良好な品質の試料における再圧密時の体積ひずみ (ϵ_{v0}) (Lacasse and Berre)

表-3 再圧密時の間隙比変化率 ($\Delta e/e_0$) と試料の品質 (Lunne ほか)

Overconsolidation ratio	$\Delta e/e_0$			
	Very good to excellent	Good to fair	Poor	Very poor
1-2	<0.04	0.04-0.07	0.07-0.14	>0.14
2-4	<0.03	0.03-0.05	0.05-0.10	>0.10

For a particular clay multiply $\Delta e/e_0$ by $e_0/(1+e_0)$ to get the criteria in terms of ϵ_v .

表-4 本実験に用いた粘土試料の品質評価基準

地区	採取深度 (m)	OCR	品質判断基準	
			ϵ_{v0}	$\Delta e/e_0$
尼崎	27-37	1.7-2.1	3%未満	0.07 未満
大阪湾	130-155	1.2-1.7	4%未満	0.07 未満
京都	21-25	4.0-4.5	2%未満	0.05 未満
プサン	5-22	1.0-1.3	4%未満	0.07 未満

隙比がより小さい試料にとって有利な品質評価法となるが、初期間隙比で割ることで、この影響を取り除いている点で、よりすぐれた評価方法とみることができる。また、本手法では深度は考慮されていないが、過圧密比が考慮されており、OCR=2を境界にして、過圧密比が大きいほど厳しい基準となっている。

なお、表-2、3及び図-1の品質評価方法は、基本的には定ひずみ速度圧密試験及び異方圧密三軸圧縮試験結果の双方に適用できるものと考えられるが、Lunne ほか⁹⁾は、定ひずみ速度圧密試験から得られた ϵ_{v0} 及び $\Delta e/e_0$ の方が、三軸圧縮試験よりもわずかに大きくなる事を指摘している。

本研究では、表-2、3及び図-1に示すすべての評価方法を考慮して、本実験に用いた試料の品質に関して実務上良好であると判断できる基準を、表-4のように設定した。体積ひずみ ϵ_{v0} による判定は、表-2で非常に良い～まあまあの領域 ($\epsilon_{v0} < 4.0\%$) で全ての粘土を規定した。その上で、図-1により、採取深度、OCRを考慮して、京都粘土は $\epsilon_{v0} < 2.0\%$ 、尼崎粘土は $\epsilon_{v0} < 3.0\%$ 、大阪湾粘土とプサン粘土は $\epsilon_{v0} < 4.0\%$ を基準にすることにした。ただし、京都粘土は、OCR=4.0~4.5であるので、図-1をそのまま適用すると $\epsilon_{v0} < 1.0\%$ と非常に厳しい基準となるため、OCR=1.2~2.0の領域と、OCR=3.0~8.0の領域の中間的な範囲として $\epsilon_{v0} < 2.0\%$ を採用した。また、大阪湾粘土は採取深度が図-1より深い、深度30m~50mの $\epsilon_{v0} < 4\%$ を準用した。 $\Delta e/e_0$ による判定は、表-3のGood to fairの領域までを基準として、各粘土のOCRを考慮し、京都粘土は $\Delta e/e_0 < 0.05$ 、他の粘土は $\Delta e/e_0 < 0.07$ とした。

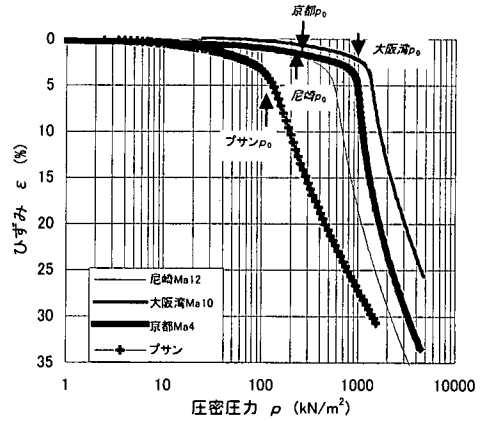


図-2 代表的な $e \sim \log p$ 曲線

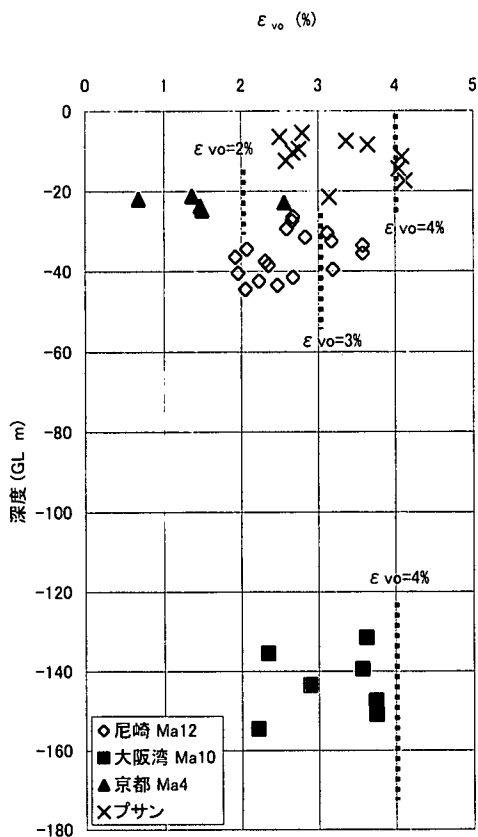
試料の品質は、原地盤から採取した不攪乱試料を用いた定ひずみ速度圧密試験結果を、上記の品質評価基準と比較することにより評価した。定ひずみ速度圧密試験の方法は、地盤工学会編土質試験の方法と解説⁹⁾に示されている方法に準じた。なお、試験時の背圧は、プサン粘土及び尼崎粘土 98kN/m²、京都粘土 147kN/m²、大阪湾粘土 196kN/m² とした。また、定ひずみ速度圧密試験から得られる圧密降伏応力は、一般にひずみ速度依存性が指摘されており、今回の実験ではこの影響を避けるため、ひずみ速度 0.02%/min で統一した。なお、このひずみ速度は、(独) 港湾空港技術研究所において標準的に実施されている速度に相当する。

b) 品質評価結果

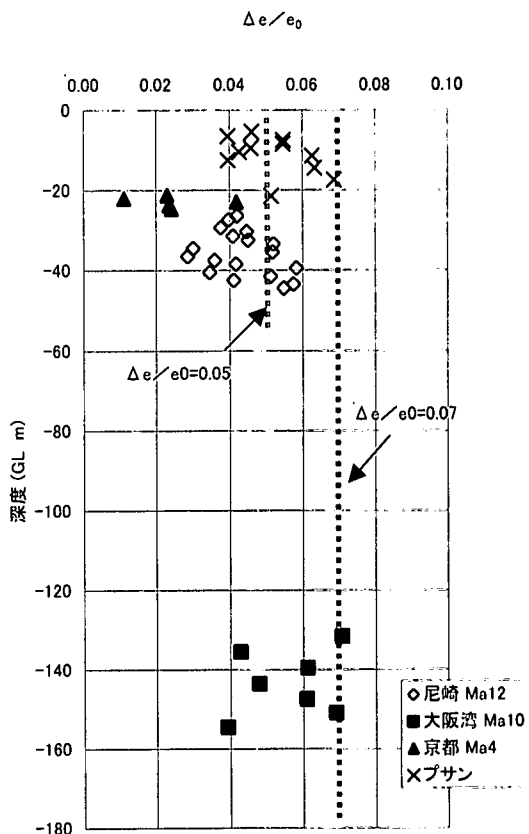
各粘土を用いて実施した定ひずみ速度圧密試験の代表的な $e \sim \log p$ 曲線を図-2に示す。試料の品質評価結果は、 ϵ_{v0} 及び $\Delta e/e_0 \sim$ 深度関係を図-3、4に、過圧密比 (OCR) との関係を図-5、6にまとめた。

尼崎粘土を原地盤の鉛直有効応力まで再圧密した時の体積ひずみは、 $\epsilon_{v0} = 2.0 \sim 3.0\%$ が主体であるが、深度 30~40m 付近で $\epsilon_{v0} = 3.0 \sim 3.5\%$ の試料が存在する。サンプリングは、深度 27~31m 間をデニソンサンプラーで、それ以深をトリプルサンプラーで実施しており、 ϵ_{v0} の変化とサンプリング方法の変更は関係ないと考えられる。一方、 $\Delta e/e_0$ により粘土の初期間隙比を加味して判定すると、 $\Delta e/e_0 = 0.03 \sim 0.06$ であり、判定基準値の $\Delta e/e_0 = 0.07$ 以内にすべておさまっている。

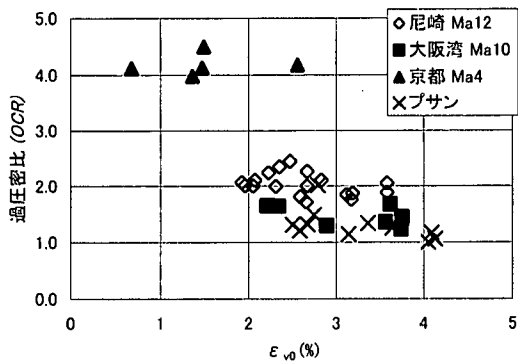
大阪湾粘土は、深度が 130~155m と深いにもかかわらず、 $\epsilon_{v0} = 2 \sim 4\%$ 、 $\Delta e/e_0 = 0.04 \sim 0.07$ と良質試料の範囲におさまっている。一般に、大深度から試料を採取する場合、サンプリングの難しさ、その応力開放度が大きいことより試料の乱れが大きいことが予想される。今回のサンプリングには、水圧式サンプラーを使用しており、採



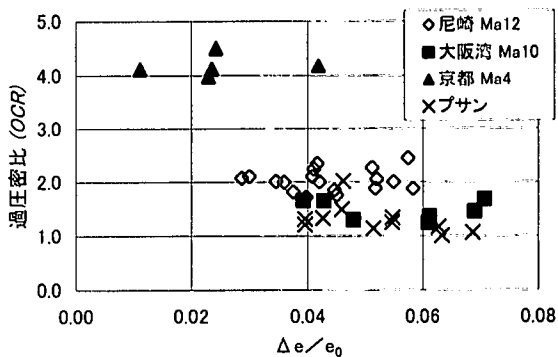
図—3 体積ひずみ (ϵ_{v0}) 深度分布図



図—4 $\Delta e/e_0$ 深度分布図



図—5 過圧密比 (OCR) ~
体積ひずみ (ϵ_{v0}) 関係図



図—6 過圧密比 (OCR) ~ $\Delta e/e_0$ 関係図

取した試料はかなり良質であると判断できる。

京都粘土は、 $\varepsilon_{v0}=1.0\sim 2.5\%$ 、 $\Delta e/e_0=0.01\sim 0.04$ と全試料の中でもっとも ε_{v0} 、 $\Delta e/e_0$ の値が小さい。これは、京都粘土が他地区の粘土に比較し、過圧密比が $OCR=4.0\sim 4.5$ と大きいことに起因しているものと考えられる。言い換えると、図-1、表-3で、品質の評価に OCR を考慮して、 OCR が大きいほど ε_{v0} を小さく押さえていることの妥当性を示しているともいえる。試料の品質は、良質試料の範囲に入ると判断される。サンプリング方法は、水圧式サンプラーとデニソンサンプラーを用いたが、試験個数が少ないこともあり、両者に有意な差はみられなかった。

今回唯一対象とした沖積粘土のプサン粘土は、沖積層と洪積層のサンプリング方法の違いが試料の品質にどう影響するかを把握することが主な目的である。プサン粘土の品質評価結果は、 $\varepsilon_{v0}=2.5\sim 4.0\%$ 、 $\Delta e/e_0=0.04\sim 0.07$ と良質試料の範囲には入っている。しかし、 ε_{v0} 、 $\Delta e/e_0$ の値は、尼崎粘土、京都粘土と比べるとやや大きめで、大深度から採取した大阪湾粘土とほぼ同程度～やや大きめである。この結果から、洪積粘土のサンプリングは一般に難しいと言われているが、今回の結果からは沖積層と比較してもかなり良好な試料が採取できていると判断される。

次に、 ε_{v0} 、 $\Delta e/e_0$ の値から判断される試料品質の善し悪しが、定ひずみ速度圧密試験から得られる圧密降伏応力に影響しているかどうかを確認するために、圧密降伏応力を原地盤の鉛直有効応力で除した過圧密比 (OCR)を ε_{v0} 、 $\Delta e/e_0$ との関係でまとめた (図-5、6参照)。これによると、 ε_{v0} で約2%、 $\Delta e/e_0$ で約0.03のデータのばらつきがみられるが、どの試料も ε_{v0} 、 $\Delta e/e_0$ の大きさによらず、 OCR はほぼ一定である。試料の品質が圧密降伏応力に影響しているとすれば、 ε_{v0} 、 $\Delta e/e_0$ が大きくなるにつれ、圧密降伏応力は低下するはずである。したがって、圧密降伏応力は、今回の試料品質の範囲内では、その影響をほとんど受けていないということが出来る。

以上考察したように、今回採取した試料は、採取した場所 (海上、沖積低地、丘陵地)、採取深度、サンプリング方法が異なっているが、実用上十分良好な品質を有していると判断される。

(2) フィルターペーパー法による残留有効応力の測定

a) 残留有効応力測定方法

残留有効応力の測定は、一般には加圧板法¹⁰⁾によって実施されることが多い。この方法は、残留有効応力の大きい試料では、供試体端面の仕上げ精度、ポーラスセラミックへの密着状態の良否が測定結果に影響を及ぼす。

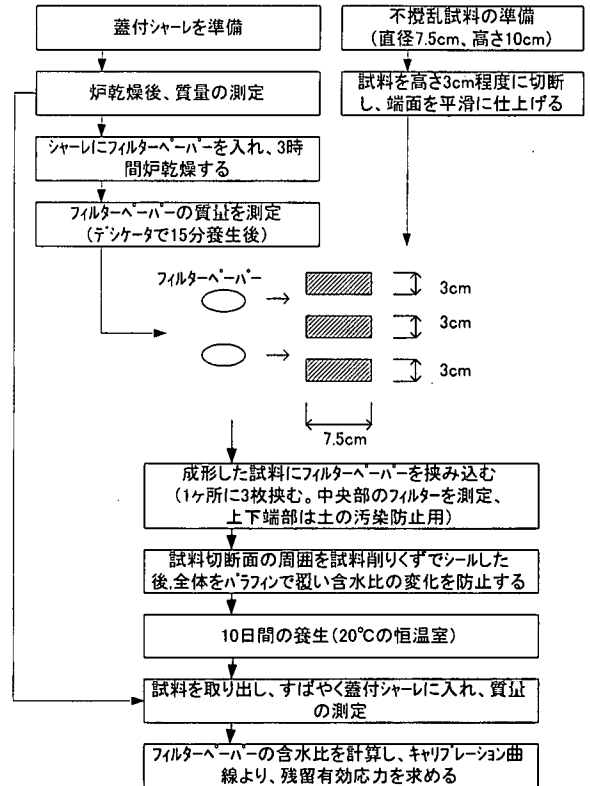


図-7 フィルターペーパー法の測定方法

また、ポーラスセラミックのエアークリーバリュウ (A. E. V.) によって測定限界がある。

本実験では、大阪湾粘土がかなり大きな残留有効応力を有すると予想されたため、測定限界の大きいフィルターペーパー法により残留有効応力の測定を実施した。フィルターペーパー法の原理は、土試料の中にセンサーとしてフィルターペーパーを挿入して、これが土試料の含水状態と平衡した後取り出し、その含水比を測定し、あらかじめ得られているキャリブレーション曲線から、試料の残留有効応力を求めるものである。フィルターペーパー法の具体的な実験手順は図-7に示した。

今回の実験には、ASTM standard specification E832に規定されている2種類のフィルターペーパーの内、Whatman No. 42 (Diameter 55mm)を使用した。このフィルターペーパーのキャリブレーション曲線を図-8¹⁰⁾に示す。この図から分かるように、残留有効応力軸は log スケールで表示されており、わずかなフィルターペーパーの含水比の違いが大きな残留有効応力の違いとなって現れる。また、フィルターペーパーの含水比が45%付近でキャリブレーション曲線は折れ曲がっており、これより残留有効応力の高い側ではより含水比の測定誤差が試験結果に深刻な影響を与える。このため、本実験では感度

1/10,000gの電子天秤を用いるとともに、濾紙の含水比の測定は蓋付シャーレを用いて試料が乾燥しないようにした。また、試料内にフィルターペーパーを直接挿入すると、粘土粒子がフィルターペーパーに付着し、試験結果に影響を及ぼす。このため、本実験では1測定点に対し、3枚のフィルターペーパーを重ねて挿入し、中央部の粘土と直接接触过していないフィルターペーパーの測定値を採用した。供試体内でのフィルターペーパーは、Fredlund and Rahardjo¹¹⁾によると7日間の養生で土試料の含水状態に平衡するとされている。今回は、この期間にやや安全を見込み、10日間の養生期間をとることとした。

b) 残留有効応力測定結果と考察

図-9には、飽和粘土を原位置からサンプリングした時の、サンプリング前後の有効応力と全応力の変化を示した。土要素が原地盤にあるときは、異方応力状態にあり、全応力は σ_v, σ_h で、有効応力は σ'_v, σ'_h で表される。一方、サンプリング後、全応力はゼロとなり、有効応力は等方応力状態 $\sigma'_p = -u_r$ となる。この応力を残留有効応力と呼んでいるが、この応力は、飽和粘土で完全なサンプリングが行われた場合、理論的には以下のように表される^{12), 13), 14)}。この場合の試料の状態を、ここでは完全試料と呼ぶことにする。

$$\sigma'_p = \sigma'_v \cdot [K_0 + A_0(1-K_0)] \quad (1)$$

K_0 : 静止土圧係数

A_0 : 間隙水圧係数

残留有効応力は、理論的には静止土圧係数 K_0 と密に関連している。間隙水圧係数 A_0 は、原地盤の有効応力除荷時の間隙水圧係数であり、Seedほか¹⁴⁾が指摘しているように、土の膨張性に支配され、したがって土の種類や過圧密の程度によって異なる。

Ladd and Lambe¹³⁾によると、間隙水圧係数 A_0 は、正規圧密粘土で0.1~+0.3、著しく過圧密されたもので0.3程度である。いずれにしても、 A_0 の値は、式(1)の形からして、残留有効応力の大きさにそれほど大きな影響を与えない。ここでは、平均的な A_0 の値として、 $A_0=0.1$ とみなし、静止土圧係数を $K_0=0.5$ とすると、残留有効応力は、 $\sigma'_p = 0.55 \sigma'_v$ となり、原地盤の平均有効応力： $(\sigma'_v + 0.5 \sigma'_h) / 2 = 0.75 \sigma'_v$ よりもやや低い値となる。

実験結果は、尼崎粘土とブサン粘土を用いて行ったフィルターペーパー法と加圧板法の比較を図-10に、各粘土の不攪乱試料の残留有効応力と原地盤の鉛直有効応力関係を図-11にまとめた。

図-10は同一サンプラー内から取り出した試料について、フィルターペーパー法と加圧板法で残留有効応力を測定したものであるが、良い一致が得られている。これより、フィルターペーパー法の精度は十分であると判断される。

図-11には、1:1~1:10と表示したラインを示してい

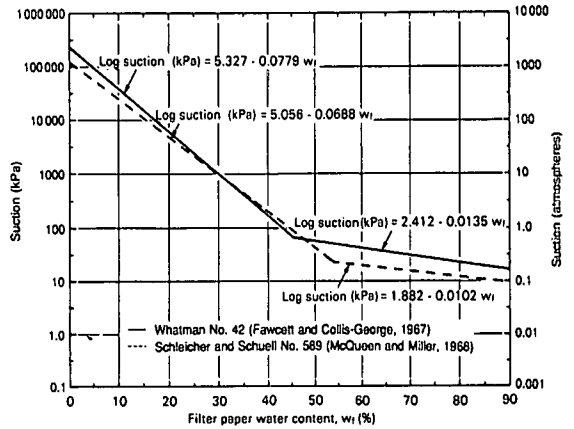


図-8 フィルターペーパーのキャリブレーション曲線¹¹⁾

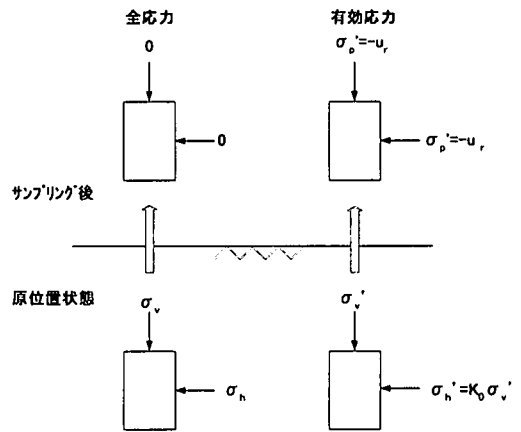


図-9 サンプリングに伴う飽和粘土の応力状態の変化

るが、これは残留有効応力と鉛直有効応力の比を表したもので、原地盤での鉛直有効応力に対し残留有効応力がどの程度残留しているかを見る目安となる。以下では、原地盤での鉛直有効応力に対する残留有効応力の割合を残留有効応力比と定義して考察する：(残留有効応力比=残留有効応力/原地盤での鉛直有効応力)。

京都粘土は、残留有効応力比が約0.45~0.85である。京都粘土の過圧密比は、 $OCR=4.0\sim4.5$ と大きいため、式(1)に示す K_0 値は0.5よりも大きいと考えられる。Brooker and Ireland¹⁵⁾により示されている $K_0 \sim \phi' \sim OCR$ の関係から、 $\phi' = 30^\circ$ と仮定すると、 $K_0=0.8$ となる。 $A_0=0.1, K_0=0.8$ として完全試料の残留有効応力を計算すると、 $\sigma'_p = 0.82 \sigma'_v$ となり、残留有効応力比(約0.45~0.85)の上限值とほぼ一致し、良好な試料であることが伺われる。

尼崎粘土($OCR=1.7\sim2.1$)、大阪湾粘土($OCR=1.2\sim1.7$)の残留有効応力比は、約0.20~0.30である。 OCR

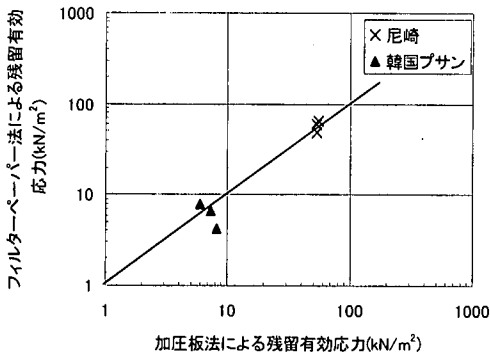


図-10 加圧板法とフィルターペーパー法の比較

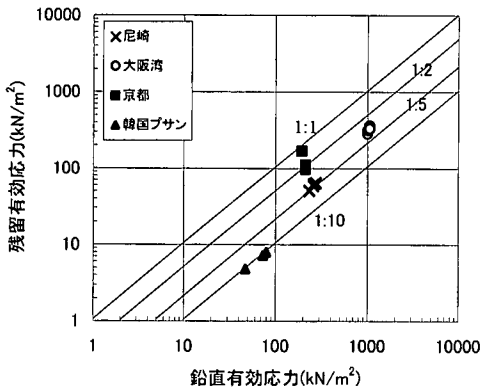


図-11 残留有効応力測定結果

R は、尼崎粘土の方がやや大きい、残留有効応力比は、大阪湾粘土の方がやや大きい。完全試料 ($\sigma_p' = 0.55 \sigma_v'$) と比較すると、大阪湾粘土で完全試料の約 55%、尼崎粘土で約 35%程度の残留有効応力を有している。なお、これらの粘土の OCR は、洪積粘土としては比較的小さく、このため K_0 値も京都粘土ほど大きくないと考えられるので、ここでは概略の傾向をつかむため、 $K_0 = 0.5$ とした完全試料との比較を行った。

沖積粘土であるプサン粘土 ($OCR = 1.0 \sim 1.3$) は、約 0.10 の残留有効応力比を有している。洪積層である京都、尼崎、大阪湾粘土と比べ、残留有効応力は小さめである。完全試料と比較すると、完全試料の約 20% の有効応力を有している。プサン粘土の残留有効応力が低い理由は明確には分らないが、洪積粘土よりは K_0 値が小さいこと、物理特性の違いなどが原因として推定される。

残留有効応力比をもとに、各地区の試料品質の優劣を評価すると、次のように判定される。

プサン < 尼崎 < 大阪湾 < 京都
(右の方が良質)

また、前述の ε_{10} 、 $\Delta e/e_0$ の測定値と、表-4 の品質評価基準値を比較し、あえて各地区の試料品質の優劣を評

価すると、次のように判定される。

プサン < 尼崎 = 大阪湾 < 京都

ε_{10} 、 $\Delta e/e_0$ による品質評価、残留有効応力比による品質評価ともに、評価結果はほぼ似た結果となった。これは、残留有効応力が大きいほど、原地盤の有効応力まで再圧密する時の圧力が小さくて済み、これに伴うひずみ、あるいは間隙比が相対的に小さくなるものと考えられる。ただし、残留有効応力が、 $\varepsilon \sim \log p$ 曲線 ($e \sim \log p$ 曲線) 上の原地盤の有効応力との相対的な圧力の位置関係を示すのに対し、 ε_{10} 、 $\Delta e/e_0$ による品質評価は、再圧密時の曲線の傾きに影響される。つまり、同一の残留有効応力を示していても、粘土の種類、圧縮性等によりやや異なった ε_{10} 、 $\Delta e/e_0$ の評価が得られることに注意する必要がある。

4. 残留有効応力の違いが圧密特性に及ぼす影響評価

(1) 実験の目的

ノルウェー土質研究所の G. Sandbaekken ほか¹⁶⁾ によると、硬質粘土の圧密試験時に水を含んだフィルターを用いると吸水膨張を生じ、その結果供試体が軟化し圧密降伏応力が著しく小さく測定されると報告されている (図-12 参照)。このため、硬質粘土の圧密試験に対しては、ドライフィルターを用いるべきであると述べている。この現象は、供試体の水浸に伴う残留有効応力の消失が原因で圧密降伏応力が小さくなったものと考えられる。

本実験では、硬質粘土を水浸した時の、残留有効応力の消散状況を水浸実験により把握した。その後、試験開始時の残留有効応力の違いを圧密試験時のセッティング方法で与え (水浸、非水浸)、これが圧密試験結果に与える影響について定みずみ速度圧密試験により検討した。

(2) 水浸実験

硬質粘土を水浸した時の、残留有効応力の消散状況を把握するために、図-13 に示す装置を用いて水浸実験を実施した。実験方法は、まず加圧板法による残留有効応力の測定を行い、測定値がピークに達したことを確認する。その後上部キャップより水を注入し、試料の上部端面から吸水させる。試験中の水面の高さは供試体下部から 10cm を維持するように、ビューレット下部のコックを手動で調整した。なお、本実験に用いた試料は、大阪湾粘土であるが、表-1 に示した Ma10 層とは異なり、Ma12 層 (深度 70m、原地盤の鉛直有効応力 420kN/m²) である。試験は、供試体高さの異なる条件 ($H_0 = 2.37\text{cm}$ 、 $H_0 = 4.92\text{cm}$) で行った。

実験結果は、図-14 及び表-5 にまとめた。実験結

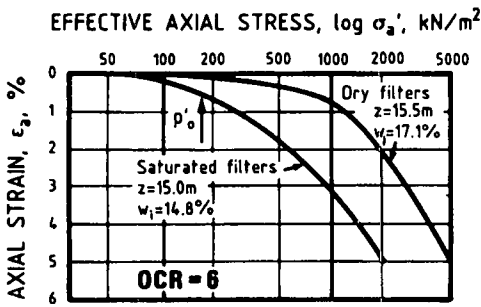


図-12 ドライ及びバウエット状態のフィルターでの硬質粘土の段階載荷圧密試験結果 (Sandbaekken ほか)

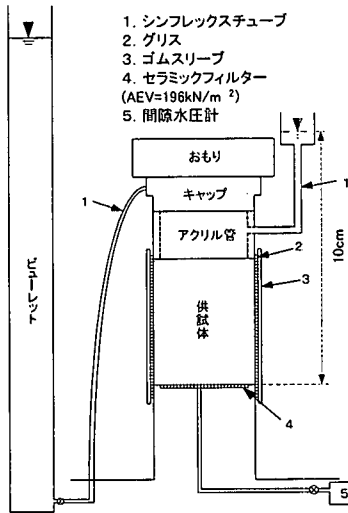


図-13 水浸による残留有効応力消散過程の測定装置

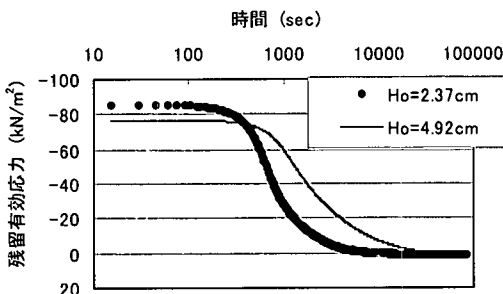


図-14 水浸開始後の残留有効応力経時変化図

表-5 実験結果一覧表

	H_0 (cm)	w_v (%)	ρt (g/cm ³)	残留有効応力 (kN/m ²)	t_{90} (sec)	c_v (cm ² /d)
1	2.373	57.7	1.640	-86.2	2295	180
2	4.920	61.9	1.616	-76.3	9165	192

果からみると、供試体の吸水膨張過程に伴う残留有効応力の消散状況は、テルツァーギ型の間隙水圧の消散曲線と比較的似かよっている。このため、残留有効応力の消散曲線をもちいて、圧密係数 c_v を、 $c_v = 0.848 H_0^2 / t_{90}$ で計算し、その結果を表-5に示した。なお、ここで言う t_{90} とは残留有効応力の90%が消散する時間のことである。同試料を用いて実施した定ひずみ速度圧密試験から得られる圧密係数は、正規圧密領域で $c_v = 110 \text{ cm}^2/\text{day}$ であるので、今回の結果はこれに比較的近い値となった。試験に用いた供試体厚さの異なる2ケースを比較すると、圧密係数 c_v がほとんど等しく、吸水膨張による残留有効応力の消失時間にも、ほぼ H^2 則が成立していることがわかる。なお、図-14に示すように、水浸後短時間で供試体の残留有効応力は消散し始めるため、定ひずみ速度圧密試験セット時に吸水させると、かなりの有効応力が失われている可能性がある。

(3) セッティング方法の異なる定ひずみ速度圧密実験 a) 実験方法

本実験では、試験開始時の残留有効応力の違いを圧密試験時のセッティング方法で与えることとし、その方法は、以下に示す3ケースとした(図-15参照)。なお、試験自体の方法は、定ひずみ速度圧密試験によることとし、ひずみ速度は、0.02%/minと一定条件とした。

<CASE 1>

供試体の膨張を許さないよう加圧板のヘッドを固定した後、供試体を水浸させ、背圧(試料に応じ98~198kN/m²)を作用させた状態で試験を開始する。基本的には、地盤工学会編「土質試験の方法と解説」に準拠した方法である。吸水に伴う若干の残留有効応力低下があるものと考えられる。

<CASE 2>

加圧板のヘッドを自由にして、供試体を24時間水浸させ、供試体の残留有効応力をゼロとした後に試験を開始する(供試体には、加圧板の重さ2.4kN/m²が作用している状態で吸水膨張を許容する)。供試体は、水浸実験結果から24時間の水浸で飽和状態にあり、間隙水圧の測定精度は十分高いと判断し背圧は作用させない。

<CASE 3>

供試体に吸水を許さずに実験を行う(サンプリング時の残留有効応力状態で試験を開始する)。ただし、間隙水圧の測定精度を確保するために、間隙水圧計のポーラスメタルは湿潤状態に保った。なお、試験中は、試料が乾燥しないよう十分注意をはらった。

b) 実験結果と圧密特性評価

実験結果は、各地区の粘土毎に、図-16~19の $\varepsilon \sim \log p$ 曲線にまとめた。なお、同図中の矢印は、各供試

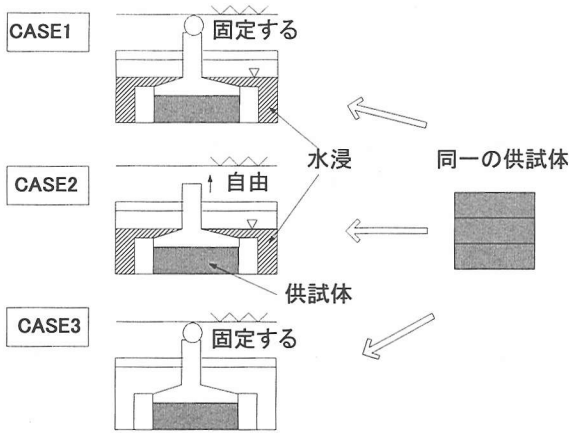


図-15 供試体のセッティング方法

体の原地盤での鉛直有効応力 p_0 及びCASE 1での圧密降伏応力 p_c の位置を示す。また、実験に用いた試料のばらつきをみるために、各試料の含水比と初期間隙比を図中に示したが、同一粘土の供試体間に有意な差はみられない。

沖積層であるプサン粘土の残留有効応力は、5~8kN/m²と小さい。したがって、水浸によって失う有効応力が小さく、CASE 2で24時間水浸させた場合の膨張量も0.01mmと小さい(膨張量に関係すると考えられる再圧縮指数は、 $C_s=0.17$)。実験結果は図-16に示すように、試験条件に関わらず、得られる $\varepsilon \sim \log p$ 曲線は同一で、圧密降伏応力も $p_c=90\sim 92\text{kN/m}^2$ と一致している。

尼崎粘土については、残留有効応力が51~64kN/m²と、プサン粘土よりは大きい。ただし、CASE 2で24時間水浸させた場合の膨張量は、プサン粘土よりは大きいものの、0.03mmと値自体はかなり小さい(再圧縮指数は $C_s=0.15$ とプサン粘土とほとんど同じ)。実験結果は図-17に示すように、試験条件に関わらず、得られる $\varepsilon \sim \log p$ 曲線もほぼ同じで、圧密降伏応力も $p_c=470\sim 510\text{kN/m}^2$ とほぼ一致している。

大阪湾粘土の残留有効応力比は、尼崎粘土よりやや大きい程度であるが、残留有効応力の絶対値は282~362kN/m²とかなり大きい。このため、CASE 2で24時間水浸させた場合の膨張量は、0.11mm($\varepsilon=0.55\%$)と比較的大きな値を示す(再圧縮指数は $C_s=0.17$ とプサン粘土、尼崎粘土とほとんど同じ)。このため、図-18に示すように、原位置の鉛直有効応力付近までの $\varepsilon \sim \log p$ 曲線は、載荷初期に水浸吸水を与えたCASE 2が、CASE 1, 3よりも上位に位置している。ところが、原位置の鉛直有効応力以降は、ほとんど $\varepsilon \sim \log p$ 曲線が一致し、圧密降伏応力も $p_c=1195\sim 1284\text{kN/m}^2$ とほぼ一致している。

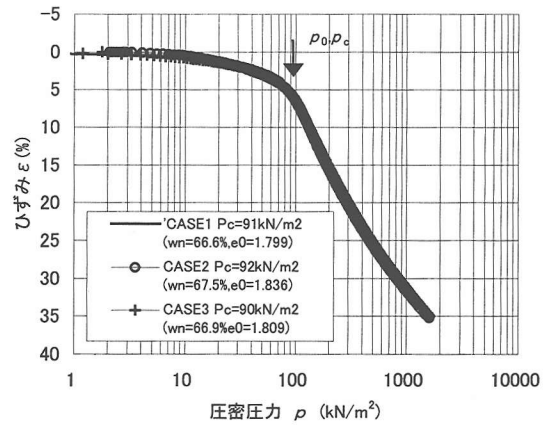


図-16 $\varepsilon \sim \log p$ 曲線 (プサン粘土: 沖積層)

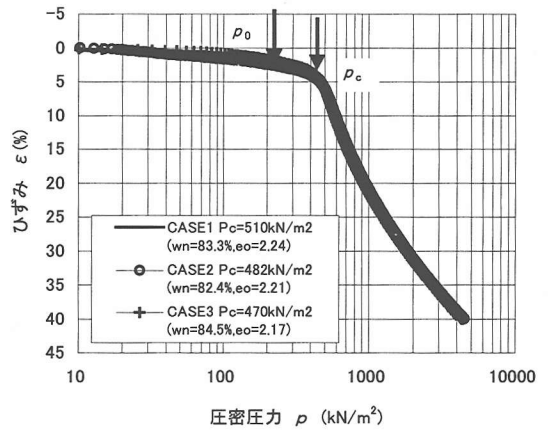


図-17 $\varepsilon \sim \log p$ 曲線 (尼崎粘土: Ma12層)

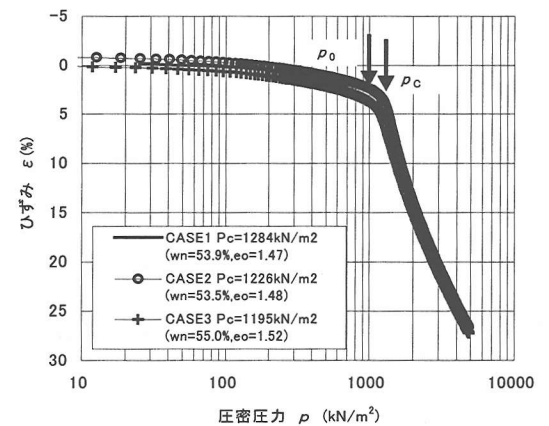


図-18 $\varepsilon \sim \log p$ 曲線 (大阪湾粘土: Ma10層)

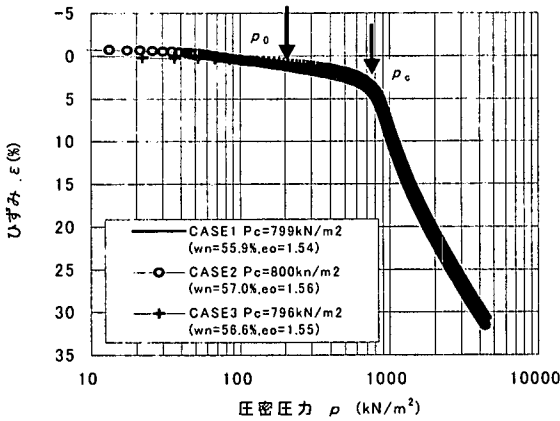


図-19 $\epsilon \sim \log p$ 曲線 (京都粘土 : Ma4 層)

京都粘土は、残留有効応力比は、全試料中最も大きい。残留有効応力の絶対値はややばつづくが、97~167kN/m²と大阪湾粘土よりもやや小さい。ところが、CASE 2で24時間水浸させた場合の膨張量は、0.18mm ($\epsilon=0.90\%$)と全試料中最も大きい。ただし、京都粘土の再圧縮指数は $C_s=0.10$ と全試料中もっとも小さく、膨張量との間に正の相関は得られなかった。図-19に示す $\epsilon \sim \log p$ 曲線は、大阪湾粘土と同様に、荷重初期に水浸吸水を与えたCASE 2が、CASE 1, 3よりも上位に位置している。ところが、原位置の鉛直有効応力以降は、ほとんど $\epsilon \sim \log p$ 曲線が一致し、圧密降伏応力も $p_c=796 \sim 800 \text{ kN/m}^2$ とほぼ一致している。

以上をまとめると、残留有効応力の比較的小さいプサン粘土及び尼崎粘土については、試験方法に関わらず、 $\epsilon \sim \log p$ 曲線がほぼ一致し、圧密降伏応力もほぼ同一の値を示す。残留有効応力が大きい大阪湾粘土及び京都粘土は、原位置の鉛直有効応力までは、試験条件により $\epsilon \sim \log p$ 曲線は異なるが、それ以降の曲線形状、圧密降伏応力はほぼ一致している。以上のことから、今回の実験に用いた粘土に関して、残留有効応力が異なっても、原位置の鉛直有効応力以降の圧密特性(圧密降伏応力、圧縮指数、体積圧縮係数等)は、ほとんど変化しないことが明らかとなった。

なお、図-12に示したノルウェーの硬質粘土で吸水軟化を生じている供試体の試験方法は、今回のCASE 2に近い条件に相当していると考えられるが、全く異なった試験結果となっている。このことは、今回実験に用いた大阪湾周辺の洪積粘土と、ノルウェーのものとは、本質的に粘土自体の特性が異なるものと考えられる。ノルウェーのものは、圧密試験セッティング時の吸水膨張に対し非常に慎重になる必要があるが、今回の試料では吸水に対してさほど慎重になる必要はない。

5. まとめ

本論文の結論を以下にまとめる。

- (1) 今回の実験は、洪積粘土として尼崎粘土 (Ma12 層: 採取深度 27~37m: $OCR=1.7 \sim 2.1$)、大阪湾粘土 (Ma10 層: 採取深度 130~155m: $OCR=1.2 \sim 1.7$)、京都粘土 (Ma4 層: 採取深度 21~25m: $OCR=4.0 \sim 4.5$)、沖積粘土としてプサン粘土 (沖積層: 採取深度 5~22m: $OCR=1.0 \sim 1.3$) を用いて実施した。定ひずみ速度圧密試験により、試料を原地盤の鉛直有効応力まで再圧密した時の、体積ひずみ (ϵ_v) と間隙比の変化率 ($\Delta e/e_0$) により、試料の品質を判定した。この結果、今回採取した試料は、採取場所、深度、サンプリング方法が違っても、実務上十分な品質を有していると判断できる。
- (2) 採取した試料を用いてフィルターペーパー法による残留有効応力の測定を実施した。残留有効応力比は、沖積のプサン粘土が約 0.10、尼崎粘土が約 0.20、大阪湾粘土が約 0.30、京都粘土が 0.45~0.85 であった。この残留有効応力比を試料の品質としてとらえると(残留有効応力が大きいほど品質が良い)、 ϵ_{v0} 、 $\Delta e/e_0$ の判定結果に調和的である。
- (3) 試験開始時の残留有効応力を水浸、非水浸で与えた定ひずみ速度圧密試験結果は、以下のようにまとめられる。
 - a) 試料を水浸させ、供試体が有している残留有効応力消散過程を測定する目的で水浸実験を実施した。この結果、残留有効応力の消散時間には、 H^2 則が当てはまるようである。
 - b) 初期の残留有効応力の比較的小さいプサン粘土及び尼崎粘土は、24時間水浸させてもほとんど膨脹傾向を示さない。試験条件を本文中に示したCASE 1~3に変化させても、 $\epsilon \sim \log p$ 曲線、圧密降伏応力等、圧密特性にほとんど変化はみられなかった。
 - c) 初期の残留有効応力の大きい大阪湾粘土、京都粘土は、24時間水浸による膨脹量は0.11~0.18mm ($\epsilon=0.55 \sim 0.90\%$)生じた。このため、吸水膨脹させたCASE 2が、CASE 1, 3条件と比較して、 $\epsilon \sim \log p$ 曲線は荷重初期では上位に位置する。ところが、原位置の鉛直有効応力以降では、 $\epsilon \sim \log p$ 曲線がほぼ一致する。つまり、初期の残留有効応力が異なっても、原地盤の鉛直有効応力以降の圧密特性(圧密降伏応力、圧縮指数、体積圧縮係数等)はほとんど変化しないことが明らかとなった。
 - d) 以上の結果は、今回実験に用いた大阪湾周辺の洪積粘土と、図-12に示したノルウェー粘土とは、本質的に粘土自体の特性が異なることを示している。ノルウェーのものは、圧密試験セッティング時の吸

水膨張に対して非常に慎重になる必要があるが、今回の試料では吸水に対してさほど慎重になる必要はない。また、今回のCASE 1の試験方法は、地盤工学会編土質試験の方法と解説に準じているが、今回用いた粘土に関しては妥当な試験方法であるといえる。

参考文献

- 1) 例えば、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，pp.22-53，1974.
- 2) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説－第一回改訂版－，土の段階荷重による圧密試験，pp.348-388，2000.
- 3) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説－第一回改訂版－，土の定ひずみ速度荷重による圧密試験，pp.389-414，2000.
- 4) 例えば，市原実：大阪層群，創元社，1993.
- 5) 例えば，土質工学会関西支部編：海底地盤，海底地盤の土質，pp.101-188，1995.
- 6) 例えば，地盤工学会編：地盤調査法，試料の品質評価，pp.143-151，1995.
- 7) Andresen, A. and Kolstad, P. :The NGI 54-mm Samplers for Undisturbed Sampling of Clays and Representative Sampling of Coarser Materials, *State of the Art on Current Practice of Soil Sampling, Progressing of The International Symposium of Soil Sampling*, Singapore, pp.13-21, 1979.
- 8) Lacasse, S. and Berre, T. :Triaxial Testing Methods for Soils, *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977*, pp.264-289, 1988.
- 9) Lunne, T., Berre, T. and Strandvik, S. :Sample disturbance effect in soft low plastic Norwegian clay, *Symposium on Recent developments in Soil and Pavement Mechanics*, Rio de Janeiro, pp.81-102, 1997.
- 10) 例えば，地盤工学会編：土質試験の方法と解説－第一回改訂版－，土の保水性試験，pp.118-135，2000.
- 11) Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. :*Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, pp.77-80, 1993.
- 12) Skempton, A. W. and Sowa, V. A. :The Behaviour of Saturated Clays During Sampling and Testing, *Geotech*, Vol.13, No4, pp.269-290, 1963.
- 13) Ladd, C. C. and Lambe, T. W. :The Strength of "Undisturbed" Clay Determined from Undrained Tests, *ASTM, STP-361 (Laboratory Shear Testing of Soils)*, pp.342-371, 1963.
- 14) Seed, H. B., Noorany, I. and Smith, I. M. :Effects of Sampling and Disturbance on the Strength of Soft Clays, *Research Report, TE-64-1*, Univ of California, p.83, 1964.
- 15) Brooker, E. W. and Ireland, H. O. :Earth Pressure at Rest Related to Stress History, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 2, No. 1, pp.1-15, 1965.
- 16) Sandbaekkeen, G., Berre, T. and Lacasse, S. :Oedometer Testing at Norwegian Geotechnical Institute, *Norwegian Geotechnical Institute Report*, 168, pp.1-25, 1987.

(2001. 1. 5 受付)

SAMPLE QUALITY AND ESTIMATE OF CONSOLIDATION CHARACTERISTICS OF STIFF CLAY

Fusao RITO, Naoki OHMUKAI, Hiroyuki TANAKA and Masanori TANAKA

This study aims to estimate the sample quality of the stiff clays obtained in Amagasaki site, Osaka Bay site, and Kyoto site, and examines if the variation in its consolidation yield stress profile was caused by the variation in residual effective stress of the sample. The samples of these stiff clays have good quality from the practical viewpoint. Within the range of this sample quality, the over consolidation ratio is constant regardless of the degree of disturbance. We conducted three sets of constant strain rate consolidation tests at different setting conditions, with and without soaking in water. From these tests, we could confirm that the consolidation yield stress do not change due to the variation in degree of release of the effective stress.