

沖積海成粘土の強度の異方性

Undrained strength anisotropy of alluvial marine clays

半 沢 ひで 郎* 金 谷 やす 邦*
 岸 田 隆 夫* 尾 内 泰 俊 之*

1. はじめに

土の強度の異方性の問題は、かなり古い時期から実験的、理論的研究が行われてきたが、本格的な研究が行われるようになつたのは1960年代に入ってからである。その結果、実際の安定問題に強度の異方性を取り入れる重要性が認識されてきた。1970年に入って発表された Bjerrum (ベーラム) の安定図表¹⁾ や Ladd (ラッド) の SHANSEP (シャンセップ) 法²⁾ は、この問題についての多くの成果に立脚したものである。また我が国においても1970年代後半から筆者らにより、強度の異方性の実際問題への適用結果が報告されている^{3), 4)}。

本論文は、まず、再圧密粘土について実施した一連の異方圧密三軸圧縮および伸張試験結果をもとに、圧密時における応力状態の異方性が粘土の非排水強度に及ぼす影響について報告する。ついで、東京湾、アラビア湾に分布する四つの海成粘土について実施した一連の原位置および室内試験結果をもとに、これらの粘土の下記の特性について報告するものである。

- ① 原位置における強度の異方性
- ② 正規圧密状態における強度の異方性
- ③ 強度増加率の異方性

2. 再圧密粘土の圧密時の応力状態が強度に及ぼす影響

圧密時の応力状態が粘土の非排水強度にどのような影響を及ぼすかを調べるために、圧密時の応力比 K 値 ($K = \sigma_{hc}/\sigma_{vc}$, σ_{hc} = 水平圧密応力, σ_{vc} = 鉛直圧密応力) を変えて一連の三軸圧縮および伸張試験を実施した。本章では、上記の実験結果について報告する。

2.1 実験方法

粘土試料 ($I_p = 90\%$, $G_s = 2.67$) を液性限界以上の含水比で練り返し、大型圧密箱で予備圧密 (圧密圧力 $p = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$) した。ついで、径 3.5 cm, 高さ 8.5 cm の供試体を試料より切り出し、三軸試験機にセットした。表-1 に示す応力状態で圧密した後、非排水状態で圧縮および伸張試験

表-1 三軸圧縮および伸張試験における圧密応力

K 値 ($K = \sigma_{hc}/\sigma_{vc}$)	鉛直圧密応力 σ_{vc} (kgf/cm^2)	水平圧密応力 σ_{hc} (kgf/cm^2)
0.5		1.0
0.75		1.5
1.0	2.0	2.0
1.5		3.0
2.0		4.0

に供した。圧縮試験では短冊状、伸張試験ではらせん状のドレンペーパーを使用し、圧密時間は過剰間隙水圧がほぼゼロになるまでとした。軸ひずみ速度は圧縮および伸張試験とも $0.1\%/\text{min}$ である。

2.2 実験結果

異方圧密三軸圧縮および伸張試験より得られた応力-ひずみ曲線を図-1 に示す。図に示されるように、圧縮試験、伸張試験とも、応力-ひずみ曲線は、 K 値の違いによって異なる。圧縮試験の破壊ひずみは K 値の増加と共に増加し、一方、伸張試験では逆の現象が認められる。

図-2 に平均圧密応力と圧縮強度 $S_{uc(e)}$ および伸張強度 $S_{ue(e)}$ との関係を示す。図に示すように、平均圧密応力の増加に伴い当然のことながら $S_{uc(e)}$ および $S_{ue(e)}$ とも増加しているが、その傾向は、 $S_{ue(e)}$ の方が大きい。

図-3 は、圧縮強度と伸張強度の比 $S_{uc(e)}/S_{ue(e)}$ と K 値の関係を示している。図に示されるように、 K 値の増加に伴い $S_{uc(e)}/S_{ue(e)}$ 比は、ほぼ直線的に増加している。

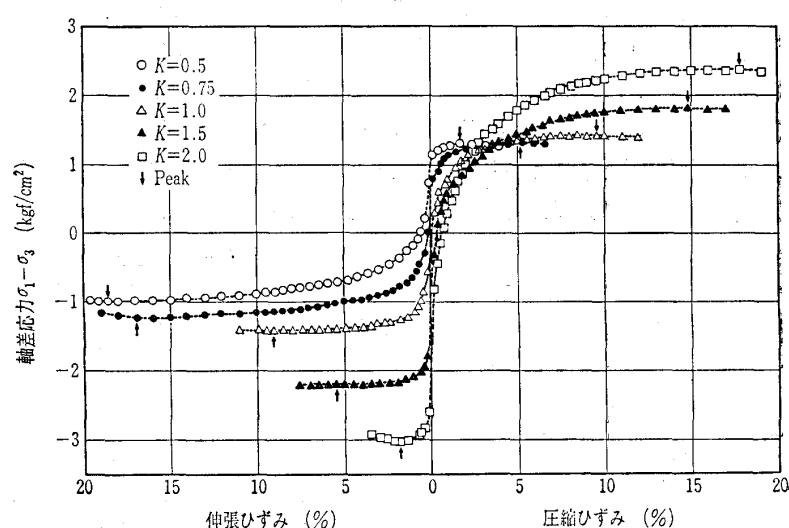


図-1 異方圧密三軸圧縮および伸張試験より得られた応力-ひずみ曲線

*東亜建設工業技術研究所土質研究室

No. 1481

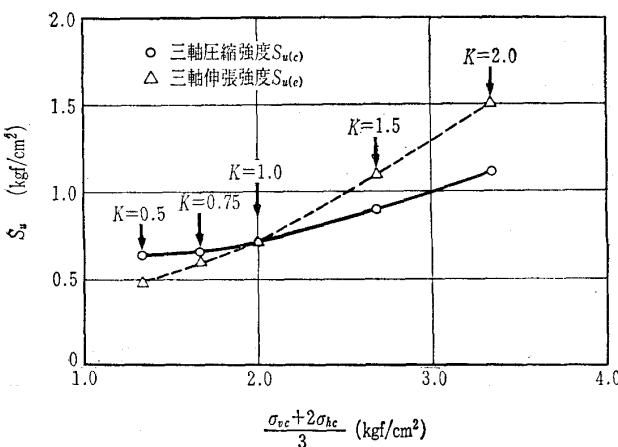
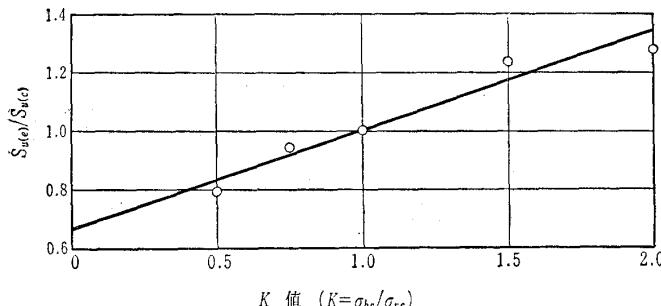


図-2 平均圧密応力と非排水強度の関係

図-3 K値と $S_{ue(e)}/S_{uc(e)}$ の関係

3. 沖積海成粘土の強度の異方性

前章では、圧密時の応力状態の変化に伴う圧縮および伸張強度の変化について報告した。その結果、強度の異方性は、圧密時の応力状態に大きく依存することが判明した。逆に、強度の異方性を知ることにより、地盤内の応力状態が推察し得るとも考えられる。本章では、実際の粘土地盤の強度の異方性について、東京湾およびアラビア湾に分布する四つの沖積粘土をとりあげ報告する。

3.1 調査対象粘土と調査・実験法

調査を実施した東京湾およびアラビア湾の粘土「A」、「B」、「C」、「D」の自然含水比(w_0)、塑性指数(I_p)および圧密試験より求めた過圧密比($OCR = p_c/p_0$, p_c =圧密降伏応力, p_0 =有効土かぶり圧)を表-2に示す。東京湾の二つの粘土(「A」および「B」粘土)は、 $I_p=40\sim60\%$ の高塑性粘土、アラビア湾の二つの粘土(「C」および「D」

表-2 調査対象土の概要

性質 粘土	自然含水比 $w_0(\%)$	塑性指数 $I_p(\%)$	過圧密比 OCR
東京湾	「A」粘土	70~80	40~50
	「B」粘土	80~90	50~60
アラビア湾	「C」粘土	35~45	15~20
	「D」粘土	40~45	30~35

粘土)は $I_p=15\sim30\%$ の低~中塑性粘土である。「A」、「B」および「D」粘土は $OCR=1.4\sim9$ と過圧密状態にあるが、その原因は、化学的結合作用や二次圧密といった年代効果によるものであり、正規圧密 aged (エージド) 粘土⁵⁾に分類される。一方、アラビア湾の「C」粘土はほぼ正規圧密状態にある。

実施した調査実験を下に記す。

(1) 現場ベーン試験(以下F.V.試験と称する)

使用したベーンは標準型($D=5\text{ cm}$, $H=10\text{ cm}$)で、測定中の回転速度は $0.1^\circ/\text{度}/\text{s}$ とした。なお、ボーリングはケーシング掘りで行い、測定中のロッドのぶれを防止するため、ぶれ止め用ガイドを使用した。

(2) 一軸圧縮試験(以下 q_u 試験と称する)

不かく乱試料より径 3.5 cm , 高さ 8.5 cm の供試体を作成し、軸圧縮速度 $1\%/\text{min}$ で試験に供した。

(3) 三軸試験

不かく乱試料より作成した供試体を K_0 状態で圧密し、圧縮および伸張試験に供した。圧密時の応力状態およびせん断タイプの違いから、下記の四つの試験に分類できる。

- CK₀UC₁試験 鉛直圧密応力 σ_{vc} を採取したサンプルの有効土かぶり圧 p_0 に等しくして K_0 圧密(CK₀)した後、非排水状態(U)で圧縮(C)試験に供する。
- CK₀UC₂試験 採取したサンプルの圧密降伏応力 p_c よりかなり大きな圧力で K_0 圧密した後、非排水状態で圧縮試験に供する。
- CK₀UE₁試験 $\sigma_{vc}=p_0$ のもとで K_0 圧密した後、非排水状態で伸張(E)試験に供する。
- CK₀UE₂試験 $\sigma_{vc}>p_c$ のもとで K_0 圧密した後、非排水状態で伸張試験に供する。

三軸試験に供した供試体の形状は径 3.5 cm , 高さ 8.5 cm で、軸ひずみ速度は約 $0.1\%/\text{min}$ で、圧縮試験では短冊状の、伸張試験ではらせん状のドレンペーパーを使用

表-3 実施した試験一覧

粘土種類	現場ベーン	一軸圧縮	三軸圧縮		三軸伸張		一面せん断	
			CK ₀ UC ₁	CK ₀ UC ₂	CK ₀ UE ₁	CK ₀ UE ₂	CK ₀ US ₁	CK ₀ US ₂
東京湾	「A」粘土	○	○	○	○	○	○	○
	「B」粘土	○	○	○	—	○	—	—
アラビア湾	「C」粘土	○	○	○	○	—	—	—
	「D」粘土	○	—	○	○	—	—	—
非排水強度	$S_{uf(v)}$	$\frac{1}{2}q_u$	$S_{uf(c)}$	S_{unc}	$S_{uf(e)}$	S_{unc}	$S_{uf(s)}$	S_{unc}
粘土の(応力)状態	原位置	原位置	原位置	正規圧密	原位置	正規圧密	原位置	正規圧密

した。

(4) 一面せん断試験

不かく乱試料より作成した供試体(径6cm, 高さ2cm)を圧密した後(自動的に K_0 圧密となる), せん断中に体積変化を生じないように鉛直応力を変化させ(等体積せん断)⁶⁾, 0.125mm/minの水平変位速度でせん断試験に供した。三軸試験と同様, 下記の二つの試験を実施した。

- i) CK₀US₁試験 $\sigma_{vc} = p_0$
- ii) CK₀US₂試験 $\sigma_{vc} > p_0$

圧密時間は三軸試験では過剰間隙水圧がほぼゼロになるまでとし, 一面せん断試験では一次圧密完了までとした。表-3に各粘土について実施した試験をまとめて示す。

3.2 原位置における強度の異方性

原位置における粘土の非排水強度を推定する方法として, 筆者らによって修正ベーラム法が提案されている⁷⁾。実施した試験のうち CK₀UC₁, CK₀UE₁ および CK₀US₁ 試験はこの方法にもとづいたものであり, これらの試験より得られる強度は, 原位置での圧縮強度 $S_{uf(c)}$, 伸張強度 $S_{uf(e)}$ および一面せん断強度 $S_{uf(s)}$ である。

図-4は「A」, 「C」および「D」粘土の $S_{uf(c)}$, $S_{uf(e)}$ および $S_{uf(s)}$ の関係を示したものである。図に示すように, 各強度の間には次に示す関係が認められた。

- i) 「A」粘土 $S_{uf(e)} = 0.6 S_{uf(c)}$
 $S_{uf(s)} = 0.7 S_{uf(c)}$
- ii) 「C」粘土 $S_{uf(e)} = 0.75 S_{uf(c)}$
- iii) 「D」粘土 $S_{uf(e)} = 0.7 S_{uf(c)}$

「A」, 「C」および「D」粘土のOCRは表-2に示すように, 1~9の範囲にあるにもかかわらず, 各粘土について各強度の間にOCRに依存しないユニークな関係が認められたが, この現象は, 正規圧密エージド粘土の重要な特性のひとつである。

図-5は「A」, 「B」, 「C」および「D」粘土の $S_{uf(c)}$ と現場ペーン強度 $S_{uf(v)}$ および一軸圧縮強度 $\frac{1}{2}q_u$ との関係を示したものである。図に示すように, 各強度の間には次に示す関係が認められる。

- i) 「A」粘土 $S_{uf(v)} = 0.9 S_{uf(c)}$
 $\frac{1}{2}q_u = 0.8 S_{uf(c)}$
- ii) 「B」粘土 $S_{uf(v)} = 0.9 S_{uf(c)}$
 $\frac{1}{2}q_u = 0.8 S_{uf(c)}$
- iii) 「C」粘土 $S_{uf(v)} = 0.8 S_{uf(c)}$
 $\frac{1}{2}q_u = 0.5 S_{uf(c)}$
- iv) 「D」粘土 $S_{uf(v)} = 0.6 S_{uf(c)}$

(1)式と同様, $S_{uf(c)}$, $S_{uf(v)}$ および $\frac{1}{2}q_u$ の間には, OCRに関係なく, 各粘土についてそれぞれ固有な関係が認められる。

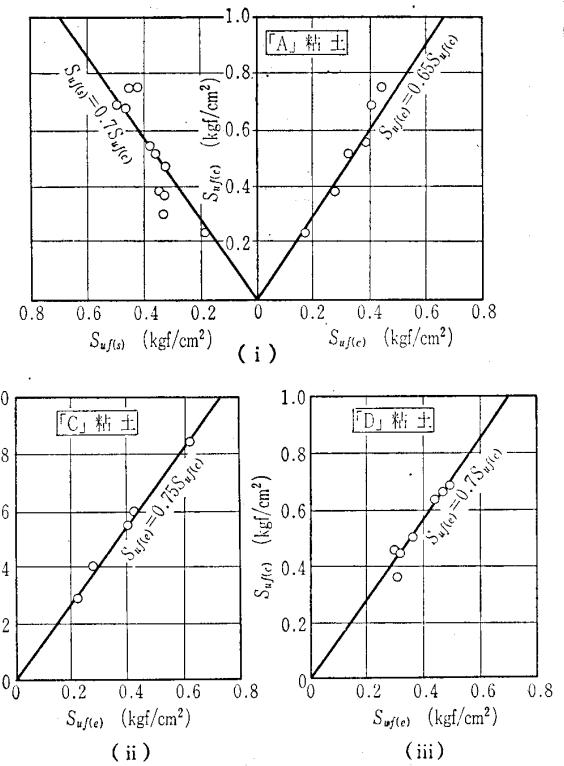


図-4 各粘土の $S_{uf(c)}$, $S_{uf(e)}$ および $S_{uf(s)}$ の関係

前述のように, $S_{uf(c)}$, $S_{uf(e)}$ および $S_{uf(s)}$ は原位置における非排水強度である。(1)式および(2)式に示した関係が得られると, それらの関係を用いて $\frac{1}{2}q_u$ や $S_{uf(v)}$ からも, 原位置での圧縮強度, 伸張強度および一面せん断強度などの強度を求めることができる。

3.3 正規圧密状態における強度の異方性

CK₀UC₂, CK₀UE₂ および CK₀US₂ 試験から得られた強度 $S_{uf(c)}$, $S_{uf(e)}$ および $S_{uf(s)}$ は, 正規圧密状態における

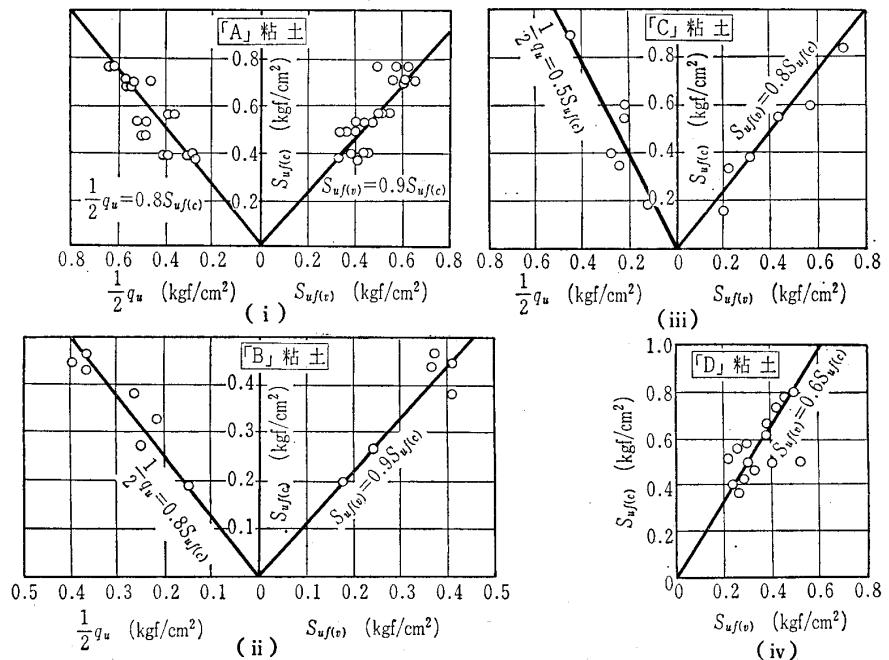


図-5 各粘土の $S_{uf(c)}$, $S_{uf(v)}$ および $\frac{1}{2}q_u$ の関係

非排水強度を示すものである。「A」,「B」,「C」および「D」粘土で実施した試験の結果より、各粘土について次に示す強度増加率 S_{un}/σ_{ve} が得られた。

i) 「A」粘土	$S_{un(c)}/\sigma_{vc} = 0.36$	}
	$S_{un(e)}/\sigma_{vc} = 0.22$	
	$S_{un(s)}/\sigma_{vc} = 0.25$	
ii) 「B」粘土	$S_{un(c)}/\sigma_{vc} = 0.36$	}(3)
	$S_{un(e)}/\sigma_{vc} = 0.20$	
iii) 「C」粘土	$S_{un(c)}/\sigma_{vc} = 0.39$	
iv) 「D」粘土	$S_{un(c)}/\sigma_{vc} = 0.36$	

したがって正規圧密状態での強度の異方性は「A」粘土の場合(4)式に示すように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} S_{un(e)} &= \frac{0.22}{0.36} S_{un(c)} = 0.6 S_{un(c)} \\ S_{un(s)} &= \frac{0.25}{0.36} S_{un(c)} = 0.7 S_{un(c)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

(4)式の関係を(1)式の関係と比べると両者は一致している。すなわち、 $OCR = 1.4 \sim 7$ の「A」粘土の強度の異方性は、原位置および正規圧密状態においても等しいことを示している。すなわち、正規圧密エージド粘土については OCR 値に関係なく(5)式に示す関係が成立する。

強度の異方性(原位置)=強度の異方性 (正規圧密)(5)

(5)式に示す関係を別な観点から検討してみよう。図-6は、正規圧密エージド粘土の非排水強度 S_u と有効鉛直圧 σ' の関係を示したもので、このタイプの粘土については(6)式に示す関係が成立する。

したがって正規圧密エージド粘土の OCR は次式によって求められる。

(7)式より得られるOCRが圧密試験より得られるOCRと一致すれば、(5)式に示した関係の有効性を示す有力な証左となる。

図-7は、(7)式および圧密試験より得られた「A」粘土のOCRを比較したものである。図に示すように、(7)式より求めたOCRは圧密試験より得られたOCRと実用上一致している。

3.4 強度増加率に関する考察

軟弱な粘土地盤上に盛土の段階施工などを実施するに際して、粘土の強度増加率を知る必要がある。そのため、強度の異方性を考慮した粘土の強度増加率を適切に決定することが重要な課題となる。平坦な粘土地盤上の盛土の安定解析は、実用上圧縮強度と伸張強度の平均値を用いればよい⁴⁾。この観点からすれば、段階施工の盛土の安定解析用強度を決定するに際して必要な強度増加率は、正規圧密状

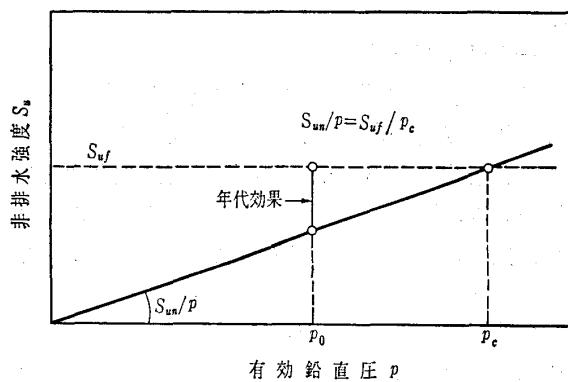


図-6 正規圧縮 aged 粘土非排水強度の模式的表示

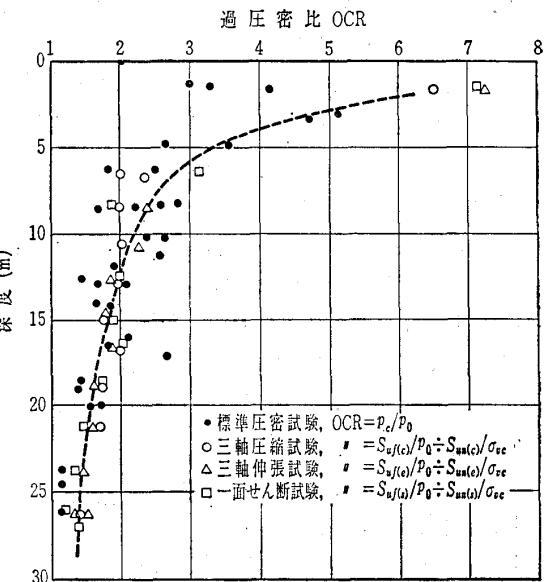


図-7 原位置および正規圧密状態における強度より与えられる過圧密比と圧密試験より得られる過圧密比の比較

態における圧縮および伸張強度増加率の平均値を用いればよいことになる。(5)式に示すように、正規圧密エージド粘土の場合、原位置および正規圧密状態における強度の異方性は等しい。したがって、 $\frac{1}{2}q_u$ や $S_{uf(v)}$ と原位置強度の間に固有の関係が得られれば、簡単に実施できるこれら二つの試験から得られる強度を用いて対象とする粘土の強度増加率を推定することができる。本節では、上記二つの試験より得られる各粘土の強度増加率をこれらの試験の適用性も含めて検討してみよう。

四つの粘土のうち、「C」および「D」粘土については CK₀UE₂ 試験を実施していないが、二つの粘土の伸張強度に対応する強度増加率 $S_{un(e)}/\sigma_{uc}$ は次式より求めることができる。

(1)および(3)式に示した関係より

$$S_{un(e)}/\sigma_{vc} = 0.39 \times 0.75 = 0.29 \text{ (C 粘土)} \\ = 0.355 \times 0.7 = 0.25 \text{ (D 粘土)}$$

同様に、正規圧密状態における一軸およびベーン強度に対応する強度増加率は(9)式によって与えられる。

表-4 強度増加率のまとめ

粘 土	強度増加率 S_{un}/σ_{vc}			
	圧縮+伸張 2	一面せん断	現場ベーン	一軸圧縮
東京湾 「A」粘土	0.29	0.25	0.32	0.29
「B」粘土	0.29	—	0.32	0.29
アラビア湾 「C」粘土	0.34	—	0.30	0.20
「D」粘土	0.30	—	0.22	—

$$\frac{1}{2}q_{un}/\sigma_{vc} = S_{un(c)}/\sigma_{vc} \times \frac{1}{2}q_u/S_{uf(c)} \quad \left. \begin{array}{l} S_{un(v)}/\sigma_{vc} = S_{un(c)}/\sigma_{vc} \times S_{uf(v)}/S_{uf(c)} \\ \frac{1}{2}q_{un}/\sigma_{vc} = \text{一軸圧縮強度に対応する強度増加率} \\ S_{un(v)}/\sigma_{vc} = \text{ベーン強度に対応する強度増加率} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{1}{2}q_{un}/\sigma_{vc} = \text{一軸圧縮強度に対応する強度増加率}$$

$$S_{un(v)}/\sigma_{vc} = \text{ベーン強度に対応する強度増加率}$$

(2)および(3)式に示す関係より、上記の値が簡単に求められる。

表-4は、上記の方法で求めた四つの粘土の強度増加率をまとめたものである。「A」および「B」粘土の $\frac{1}{2}q_u$ より求めた強度増加率は、圧縮および伸張強度の平均値に一致しているが $S_{uf(v)}$ より求めた値は、約10%ほど大きい値を示している。また「C」粘土については、 $\frac{1}{2}q_u$ より求めた強度増加率は非常に低い値を示している。

表-4に示した結果より、段階式載荷も含めた短期安定解析用強度決定法として q_u およびF.V.試験の適用性について下記の点が指摘できる。

- ① 東京湾粘土については q_u 試験より適切な強度が得られるが、F.V.試験より得られる強度は危険側の値を示す。
- ② アラビア湾粘土については若干データーが不足しているが、「C」粘土についての q_u および「D」粘土についての $S_{uf(v)}$ はきわめて安全側の値を与える。

4. 結論

圧密時における応力状態の異方性がその強度特性に及ぼす影響と、アラビア湾および東京湾に分布する四つの海成

粘土の強度の異方性について報告した。その結果、下記のような結論が得られた。

- ① 再圧密粘土の圧密応力の異方性は、その強度一変形特性に大きな影響を及ぼす。
- ② 本論文で報告した四つの海成粘土の原位置強度の異方性は、 $OCR(p_c/p_0)$ にかかわらずほぼ一定値をとり、かつ正規圧密状態における強度の異方性と等しい。
- ③ 四つの海成粘土の現場ベーンおよび一軸圧縮強度と、原位置におけるある強度（例えば圧縮強度）の間には固有の関係が認められた。この固有の関係を把握することにより、現場ベーンおよび一軸圧縮強度を実際問題に有効に用いることができる。
- ④ 東京湾粘土の一軸圧縮強度は圧縮強度と伸張強度の平均強度にほぼ一致しており、東京湾粘土への一軸圧縮強度の有効性を示している。

参考文献

- 1) Bjerrum, L.: Embankments on Soft Ground, Proc. Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. II, pp. 1~54, 1972.
- 2) Ladd, C.C. and Foot, R.: New Design Procedure for Stability of Soft Clay, Proc. ASCE, Vol. 100, No. GT 7, pp. 763~786, 1974.
- 3) Hanzawa, H.: Three Case Studies for Shot Stability of Soft Clay Deposits, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 2, pp. 140~154, 1983.
- 4) 半沢秀郎・岸田隆夫: 非排水強度決定法が安全率に及ぼす影響, 土と基礎, Vol. 30, No. 9, pp. 15~22, 1982.
- 5) Bjerrum, L.: Problems of Soil Mechanics and Construction of Soft Clays and Structurally Unstable Soils, State-of-the-Art Report, Proc. 8th ICSMFE, Vol. 3, pp. 111~159, 1973.
- 6) Taylor, D.W.: A Direct Shear Test with Drainage Control, Special Technical Publication, No. 131, ASTM Symposium on Direct Shear Testing, pp. 63~74, 1952.
- 7) Hanzawa, H. and Kishida, T.: Determination of In-situ Undrained Strength of Soft Clay Deposits, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 2, pp. 1~15, 1982.

(原稿受理 1984.8.22)

学会発行図書案内

土の試験実習書 [第1回改訂版]

B5判 267ページ、データーシートつき 送料 350円
定価 1,500円 会員特価 1,200円

土の調査実習書 [第1回改訂版]

B5判 241ページ、データーシートつき 送料 350円
定価 1,800円 会員特価 1,400円

発行: 土質工学会

東京都千代田区神田淡路町2-23(菅山ビル4階)
〒101 電話 03-251-7661(代)