

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

三田地 利之¹・工藤 豊²

¹正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
²正会員 北海道大学技官 工学部土木工学科 (同 上)

粘性土地盤の非排水強度を決定する方法の一つとして、我が国ではいわゆる“乱さない”試料による一軸圧縮試験が広く行われている。しかし、試料採取から室内試験に至るまでの過程で試料が受ける応力解放や乱れの影響で、試験結果にしばしば大きなばらつきを生じる。本研究は、原位置の応力状態から一軸圧縮試験に至る過程を三軸試験機内でシミュレートした実験を行い、一軸圧縮試験と並行して供試体に働くサクションを測定することによって粘性土試料の乱れの程度を評価可能であることを示すとともに、一軸圧縮試験結果を用いた原位置非排水強度の推定方法を提案したものである。

Key Words : clay, sample disturbance, suction, undrained strength, unconfined compression test

1. まえがき

粘性土地盤の安定解析に際して、地盤の非排水強度を把握する必要がある。この目的のために

“乱さない試料”を用いた室内せん断試験が一般に実施されるが、その方法の一つとして我が国では一軸圧縮試験が広く用いられて来た。しかし、この場合サンプリングから室内試験に至るまでの過程で、土試料が地中で受けた応力の解放による有効応力の変化を受けるのは避けられない。さらに、サンプリングチューブの押し込みに始まって試料の運搬・保存、供試体成形を経て試験開始に至るまでの各段階で供試体は多くの要因による乱れを受けることになる。しかもそれらが常に一定の割合で試験結果に影響を与えるわけではなくて、その程度は人為的な要因に大きく左右される。その結果“一軸圧縮試験結果はばらつきの大きいもの”という見方が定着してしまった観がある。

毛管負圧という不安定な拘束圧の下での一軸圧縮試験に頼るのはやめにして、原位置の応力状態の下で再圧密してからせん断する三軸試験によるべきとする意見¹⁾もあるが、建設工学上の各種設計基準・指針類における土の強度定数に関する規定の現状からみれば、まだしばらくの間は設計用非排水強度の設定に一軸圧縮試験が用いられる状

況が続くであろう²⁾。1991年に三軸試験に関する一連の基準が整備され³⁾、さらにK₀圧密後の三軸試験基準案も公示された⁴⁾ことから、今後各種設計基準・指針類に三軸試験結果の利用が規定されるものとみられるが、すべての場合に三軸試験によることもなく、必要に応じて適宜試験方法を選択すべきものと考えられる。

粘性土の強度特性に及ぼす応力解放や乱れの影響に関する研究はかなり古くから行われている⁵⁾が、本研究は均質とみなされる地盤から採取された試料でもサンプリングチューブ内の位置によって最大50%も強度が異なる⁶⁾という「一軸圧縮強度のばらつきの原因」を究明し、明確な理由のもとに“一見ばらついて見えるに過ぎない”ことを示すことが第一の目的であり、ばらついた試験データからどのようにすれば原位置の圧縮モードでの強度を推定できるかを示すのが第二の目的である。

筆者らはサンプリングから室内試験に至る過程で試料の受けた乱れは残留有効応力を反映され、その結果として一軸圧縮強度の低下が生じるとの考えから、供試体のサクションを測定して残留有効応力を知り、これと一軸圧縮強度の関係から正規圧密状態にある粘性土地盤についての原位置強度推定法をすでに提案した^{7), 8)}。

本論文では、その後に不攪乱試料を用いひずみ速度を変えて行った確認実験のほかに、これまでより

も深い深度から採取された試料の場合を想定したシミュレーション実験を行っている。この際供試体に発生する大きなサクションを測定するために、供試体内外に back air pressure を加えた上でサクションを測定して残留有効応力を知り、通常の手順で一軸圧縮試験を実施して、以前に提案した原位置強度推定法の適用性を検証している。これに加えて、原位置で過圧密状態にある粘土がサンプリングから応力解放を経て一軸圧縮試験に至る過程をシミュレートした実験を行い、過圧密地盤の原位置強度推定にもすでに提案している方法が適用可能であることを示している。

2. 試料および実験装置

(1) 試料

本実験で用いた試料は、市販の MC カオリン粘土、北海道内で採取された 3 種類の不搅乱粘土(篠路、日高、岩見沢)で、その物理的性質を圧密試験による圧縮・膨張指数 C_c 、 C_s とともに表-1 に示す。

表-1 試料の指標的性質

	MC	篠路	日高	岩見沢
W_L (%)	87	77	68	54
I_P	49	43	34	19
ρ_s (g/cm^3)	2.77	2.72	2.70	2.67
C_c	0.730	0.668	0.410	0.490
C_s	0.200	0.066	0.055	0.055

MC カオリンについては、粉末状の試料に液性限界の 2 倍の含水比になるように蒸留水を加え、ミキサーで攪拌したのち、真空で予圧密セルに引き込み、鉛直応力 100kPa で一次元圧密し、鉛直方向に約 $90 \times 90 \times 180$ mm の角柱形に切り出してパラフィンでコーティングして養生し、その後、直径 50mm、高さ 120mm の円柱形に成形して供試体とした。なお、後述のように三軸セル内で K_0 圧密後応力を解放し、直径 50mm の供試体に成形し直して一軸圧縮試験を行う場合は、供試体初期寸法を直径 75mm、高さ 150mm とした。

不搅乱試料については、シンウォールチューブから抜出した試料から、直径 50mm、高さ 120mm の円柱形に成形して供試体とした。

(2) 実験装置

本研究において原位置の応力状態を再現する目的で行う IS 試験(後述)では、練返し予圧密試料(MC カオリン)について最初に三軸セル内で K_0 圧

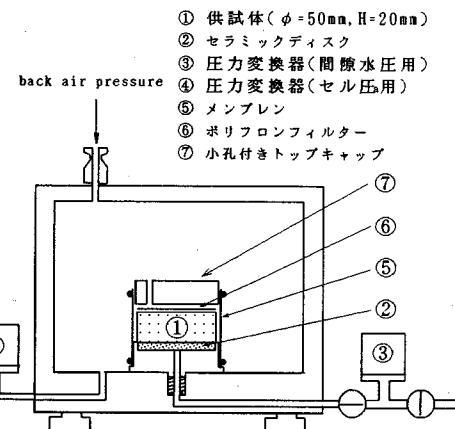


図-1 back air pressure を加えてサクションを測定する場合の構成

密を行っているが、実験装置としては、通常の軸対称三軸圧縮試験機を用い、コンピュータ自動制御システム⁹⁾を併用した。

サクションの測定に用いたセラミックディスクは日本化学陶業㈱の電解隔膜(F-C1)で、これをダイヤモンドコアカッターで $\phi 50$ mm に切り抜いた後グラインダーで $\phi 44$ mm に削り、両面をサンドペーパーで研磨して目標厚さ(2mm)に仕上げた後よく洗浄し、炉乾燥して室温まで冷却したものをエポキシ樹脂接着剤によってペデスタルに固定した。このセラミックディスクの空気侵入値(AEV)は 240kPa である。

(3) サクションの測定方法¹⁰⁾

上記のような工程で製作したセラミック付きペデスタルを十分に脱気した後、真空による差圧で脱気水を通水し飽和させる。その後、20kPa の圧力で脱気水を流しながら、ペデスタルをあらかじめ脱気水で飽和された図-1 の間隙水圧測定ルート接続部分に気泡を巻き込まないように注意しつつ装着し、ペデスタル表面に表面張力によって水が盛り上がった状態にする。脱気水供給バルブを閉じ非排水状態にした後、乾いた布でペデスタル表面の水を軽く拭き取る。このとき間隙水圧の値が速やかに -45kPa 程度を示したならば(セラミックディスクの飽和の確認)、乾燥防止用のメンブレンおよびトップキャップを装着した供試体を図-1 に示すようにペデスタルの上に載せ、密着を良くするため軽く押された後、O リングを掛けて間隙水圧の測定に入る。このとき -100kPa を越えるサクションの発生が予想される場合には、トップキャップを通して back air pressure を加えた状態で間隙水圧の値が平衡状態になるまで(約 20 分)測定する。

図-2はセラミックディスクを飽和させるための脱気方法の比較を行ったものである。従来は脱気に6時間程度、時には翌日まで放置することにして10時間以上、通水に2時間程度をかけていたが、図から分かるように脱気1時間通水1時間程度でも同等のサクション測定結果が得られることが分かる。

なお、供試体からの排水を許さない状態でback air pressureを載荷する目的から、トップキャップの下面にはフィルター材としてグラスファイバークロスを3枚重ねてシリコン接着剤で接着し、その下にポリフロンフィルター(ADVANTEC TOYO PT-2)をはさんで供試体と接している。

3. 実験方法

本研究において実施した実験内容は正規圧密および過圧密地盤を想定した以下の2つに大別される。なお、本論文中の応力は特にことわらない限りすべて有効応力である。

(1) 正規圧密地盤を想定した実験

a) 比較的浅い深度からの採取試料を想定した実験

練返し粘土を主体にした過去の研究成果⁸⁾を確認する目的で実施したもので、実験には篠路、日高、岩見沢の3種類の不攪乱粘土を用いて、以下の手順によって行った。実験条件および結果の一覧を表-2に示す。

I)IS試験(K_0 圧密非排水三軸圧縮試験)：原位置の有効土被り圧の1.5～2倍以上の有効鉛直応力まで K_0 圧密を行い、圧密終了後すぐにひずみ速度0.01%/minまたは1%/minで非排水せん断する。この試験から得られる強度は試料採取から試験に至るまでの応力解放その他の影響をまったく受けていないという意味で原位置の強度を表すものと考えることができる。

II)UC試験(サクションの測定を伴う一軸圧縮試験)：シンウォールチューブから抜出した試料を直径50mmに成形後、高さ100mm(SL供試体)と20mm(SS供試体)に分割し(図-3参照)、SS供試体でサクションを測定しながら並行してSL供試体を用いて一軸圧縮試験(ひずみ速度0.01%/minまたは1%/min)を行う。ひずみ速度1%/minのUC試験は通常業務で行われる一軸圧縮試験そのものである。

b) 深い深度からの採取試料を想定した実験

実験には市販のMCカオリンの予圧密試料を用い、予圧密圧力の1.5倍または4倍の有効鉛直圧応力(150kPaまたは400kPa)まで K_0 圧密後、以下

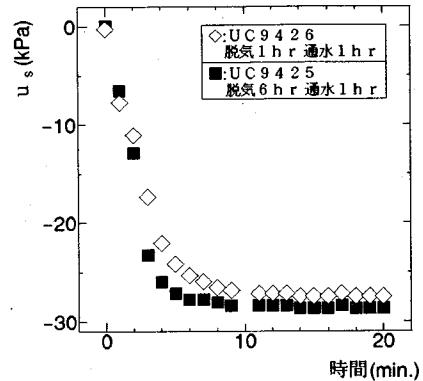


図-2 脱気方法の違いとサクション測定結果の関係

	せん断前に与えた乱れ		せん断	参考
IS試験	—	—	三軸圧縮 ひずみ速度 0.01%/min または 1.0%/min.	
UC試験	K_0 圧密 応力 解放 5%ひずみ 5回 再成形 2分割	SL サクション 測定 SS サクション 測定	一軸圧縮 ひずみ速度 0.01%/min または 1.0%/min.	サクション 測定のみ

図-3 シミュレーション実験の方法

のような実験を行った。なお、200kPaの背圧を圧密開始から載荷し、圧密中の排水は供試体周面に巻いたろ紙(IS試験では被覆面積率50%, UC試験の K_0 圧密段階では圧密時間短縮の目的から100%)に向かう半径方向とした。実験条件および結果の一覧を表-3に示す。

I)IS試験： K_0 圧密終了後すぐにひずみ速度0.01%/minまたは1%/minで非排水せん断する。

II)UC試験：自然地盤からサンプリングした試料を用いてサクションの測定を伴う一軸圧縮試験を行いうまでを再現している。参考のために表-3には93シリーズで予圧密試料から直径50mm、高さ120mmに成形した供試体を用いて一軸圧縮試験を実施した例も併せて示している。94シリーズでは直径75mm、高さ150mmの供試体について K_0 圧密終了後非排水で応力解放し、供試体に乱れを与えたのち、三軸セルより供試体を取り出してろ紙を除去し直径50mm、高さ120mmの円柱形に成形し直す。両シリーズともに成形後の試料を分割し、SS供試体について図-1と同様のシステムで(94シリーズでは150kPaのback air pressureを加えて)サクションを測定しながら、並行してSL供試体による一軸

表-2 実験条件および結果の一覧(不攪乱粘土対象)

	試験	No.	σ_{v_c}	K_0	σ_r	OCR	$\dot{\epsilon}$	q_u	ϵ_f	c_u / σ_{v_c}	c_u / σ_r	予測値	予測比
篠路	I S	9301	201	0.51	—	1.0		128.0	0.9	0.319	←	←	1.00
	U C	02	118*	—	22	5.4	0.01	67.4	3.1	0.287	1.532	0.338	1.06
		03	118*	—	22	5.3		59.3	4.0	0.252	1.330	0.297	0.93
		04	118*	—	28	4.2		64.4	3.3	0.274	1.138	0.314	0.98
日高	I S	26	150	0.50	—	1.0		114.0	1.1	0.381	←	←	1.00
	U C	11	118*	—	22	5.4	1.0	66.4	3.7	0.282	1.516	0.333	0.87
	I S	9315	151	0.54	—	1.0	0.01	112.6	9.2	0.374	←	←	1.00
	U C	16	100*	—	13	7.9		47.2	15.0	0.236	1.873	0.311	0.83
岩見沢	I S	9324	200	0.54	—	1.0		171.7	14.1	0.429	←	←	1.00
	U C	17	100*	—	12	8.3	1.0	52.3	9.2	0.262	2.179	0.347	0.81
		18	100*	—	10	10.1		63.5	7.6	0.317	3.207	0.433	1.01
	I S	9319	251	0.53	—	1.0	0.01	166.2	3.4	0.331	←	←	1.00
見沢	U C	20	177*	—	52	3.4		99.4	5.5	0.281	0.965	0.322	0.97
	I S	23	250	0.52	—	1.0		198.1	1.8	0.396	←	←	1.00
	U C	21	177*	—	35	5.1	1.0	117.4	4.2	0.332	1.677	0.398	1.01
		22	177*	—	28	6.4		108.1	4.9	0.305	1.944	0.376	0.95

 σ_{v_c} : 有効鉛直応力(kPa)*: 有効土被り圧(kPa) σ_r : 残留有効応力(kPa)OCR : σ_{v_c} / σ_r q_u : 破壊時の主応力差(kPa) ϵ_f : 破壊時のひずみ(%) $c_u = q_u / 2$ (kPa) $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度(%/min)

表-3 実験条件および結果の一覧(深い深度からの採取試料想定一 MC カオリン) (注: 記号説明は表-2と同じ)

試験	No.	σ_{v_c}	K_0	σ_r	OCR	$\dot{\epsilon}$	q_u	ϵ_f	c_u / σ_{v_c}	c_u / σ_r	予測値	予測比	
I S	9405	400	0.73	—	1.0		149.2	6.0	0.187	←	←	1.00	
U C	02	400	0.73	215	1.9	0.01	118.4	10.7	0.148	0.275	0.175	0.94	
	03	400	0.70	210	1.9		115.4	10.0	0.144	0.275	0.172	0.92	
	04	402	0.73	126	3.2		97.8	11.0	0.122	0.387	0.167	0.89	
I S	9325	151	0.72	—	1.0	1.0	68.0	7.4	0.225	←	←	1.00	
	09	100*	—	38	2.6		31.8	9.7	0.159	0.415	0.207	0.92	
	14	100*	—	36	2.8		32.5	10.3	0.162	0.449	0.215	0.96	
U C	I S	9406	400	0.77	—	1.0	1.0	163.8	4.5	0.205	←	←	1.00
	07	400	0.73	152	2.6	119.7	11.7	0.150	0.395	0.195	0.95		
	08	400	0.74	185	2.2	130.7	8.7	0.163	0.353	0.201	0.98		
	09	400	0.73	157	2.5	113.5	10.0	0.142	0.361	0.183	0.89		

圧縮試験(ひずみ速度 0.01%/min または 1%/min)を行った。なお、SS 供試体についての測定値と比較するために、一部の試験においては SL 供試体についてもサクションを測定している(図-3 参照)。

以上の試験において、ひずみ速度 1%/min の UC 試験は通常業務で行われる一軸圧縮試験そのものであり、 $\phi 75\text{mm}$ 供試体による K_0 圧密後応力解放しトリミングすることで、実際にサンプリングチューブから抜出した試料を試験機に設置する作業の一部をシミュレートしている。また、トリミングの前に意識的に 5% の圧縮ひずみを 5 回繰返し与えることにより、サンプリング時や試料抜出しの際に生じる乱れの影響を検出することを意図した。

(2) 過圧密地盤を想定した実験

MC カオリンの予圧密試料を用いて以下のようない実験を行った。実験条件および結果の一覧を表-4 に示すが、過圧密状態を作り出す過程以外の実験手順・方法は(1)b)と同じである。

1) IS 試験 (K_0 圧密膨張非排水三軸圧縮試験)

: 直径 50mm、高さ 120mm の供試体について、有効鉛直応力 400kPa まで K_0 圧密後、OCR=2 および 3 となるように K_0 吸水膨張させ、膨張終了後すぐにひずみ速度 0.01%/min または 1%/min で非排水せん断を行った。この試験から得られる強度は図-4 の B 点における過圧密地盤の原位置強度を表している。

表-4 実験条件および結果の一覧(過圧密地盤想定—MC カオリン)

試験番号	σ_{vc}	σ_{vs}	K_0		σ_r	OCR	$\dot{\varepsilon}$	q_u	ε_f	c_u/σ_{vs}	c_u/σ_r	予測値	予測強度比	
			圧密	膨張										
IS	9405	400	—	0.73	—	—	1.0	149.2 118.7	6.0 9.4	0.187 0.296	—	—	—	—
	10	400	200	0.72	0.93	—	2.0		—	—	—	—	—	1.00
UC	12	400	200	0.68	0.92	162	2.5	0.01	113.9 113.3 100.6 105.8	12.6 10.8 9.7 11.9	0.285 0.284 0.502 0.398	0.352 0.407 0.402 0.441	0.302 0.313 0.286 0.304	1.02 1.06 0.97 —
	13	399	199	0.67	0.90	139	2.9		—	—	—	—	—	—
	15	400	200	0.72	0.94	125	3.2		—	—	—	—	—	—
	14	400	132	0.67	0.97	120	3.3		—	—	—	—	—	—
IS	9406	400	<	0.77	—	—	1.0	1.0	163.8 131.4 127.3 111.1	4.5 8.1 8.7 9.9	0.205 0.164 0.317 0.278	< — < —	< — < —	1.00 0.98 1.00 0.99
UC	18	399	<	0.72	—	194	2.1		—	—	—	—	—	—
IS	20	400	201	0.73	0.92	—	2.0		—	—	—	—	—	—
UC	16	399	200	0.77	0.99	129	3.1		—	—	—	—	—	—
IS	22	400	133	0.74	0.99	—	3.0	—	104.9 105.7	8.8 12.0	0.395 0.398	< 0.435	< 0.406	1.00 1.03
UC	17	400	133	0.72	0.97	122	3.3		—	—	—	—	—	—

 σ_{vc} : 有効鉛直圧密応力(kPa) σ_{vs} : 膨張終了時の有効鉛直応力(kPa) σ_r : 残留有効応力(kPa)OCR : σ_{vc}/σ_r (ISについては σ_{vc}/σ_{vs}) q_u : 破壊時の主応力差(kPa) ε_f : 破壊時のひずみ(%) c_u : $q_u/2$ (kPa) $\dot{\varepsilon}$: ひずみ速度(%/min)

II) UC 試験(サクションの測定を伴う一軸圧縮試験)：直径 75mm、高さ 150mm の供試体について、 K_0 壓密 K₀ 壓密後非排水で応力解放し、供試体を直径 50mm、高さ 120mm に成形し直す。以下、前述の (1)b) と同じ手順で一軸圧縮試験を行った。この試験では応力解放後トリミングすることで図-4 の B 点から C 点への移行、すなわち、過圧密地盤から採取した試料をサンプリングチューブから抜出し試験機に設置する過程での状態変化をシミュレートしている。

4. 非排水強度に及ぼす乱れの影響

図-5 は MC カオリンについて有効鉛直圧密応力 400kPa まで K_0 壓密した後の試料についてひずみ速度 0.01%/min で行った IS, UC 試験のせん断中の主応力差 $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$ と平均有効主応力 σ_m を有効鉛直圧密応力 σ_{vc} で正規化した有効応力経路(図中の破線は圧密終了点とせん断開始点を結んだものでサンプリングからせん断試験に至るまでの有効応力の変化を概念的に表している)を示したものである。

図-5 と表-2 から、乱れを与えた UC 試験のせん断開始時の平均有効主応力すなわち残留有効応力 σ_r ($= \sigma_s - u_s$: σ_s は back air pressure, u_s はサクションの値) が乱れの増大とともに低下しているのが分かり、強度 (c_u/σ_{vc})においてもトリミングをしただけの UC9402, UC9403 では IS9405 に比べて 20 % 程度、応力解放後に 5 % ひずみを 5 回繰返し与えた UC9404 では 35 % の低下がみられる。

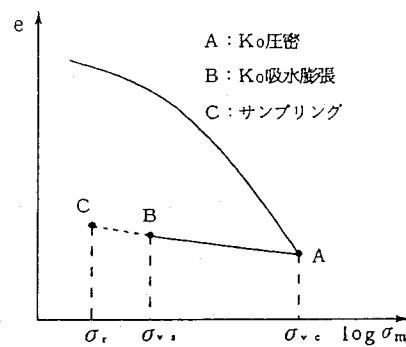


図-4 過圧密地盤におけるサンプリングから試験までの試料の状態変化

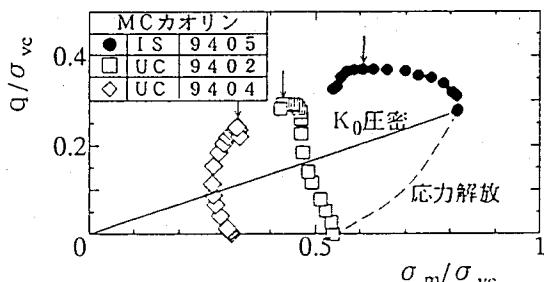


図-5 非排水せん断中の有効応力経路

これは応力解放および乱れの影響により生じた残留有効応力 σ_r の低下に起因している。

以上の実験結果は、鉛直有効応力を 200kPa 以下に設定して K_0 壓密を行い、サクションの測定時に back air pressure を載荷せずに実験を行った従来の試験結果⁸⁾と同じ傾向を示している。

5. 原位置強度の推定法

自然堆積の粘性土地盤を想定し、側方に変位のない、いわゆる K_0 条件で圧密完了した土要素を考える。この状態は間隙比 - 応力関係を示した図-6 の A 点で表される。図中 $-\lambda$ の傾きを持つ実線は応力として平均有効主応力 σ_m ($= (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$) を用いて表した正規圧密線であり、 $-\kappa^*$ の傾きを持つ実線は A 点まで圧密された粘土がサンプリングから実験室までの運搬、サンプリングチューブからの抜出し、成形を経て試験に至るまでに受ける応力解放を含めた種々の乱れの要因による有効応力の低下とそれに伴う体積膨張によって到達した B 点とを結んだ線分である。

ここで、B 点から非排水せん断された供試体と同じ間隙比を持つ正規圧密線上の D 点から非排水せん断された供試体の限界状態における有効応力が等しい(C 点)と仮定すると、以下の関係を導くことが出来る。

すなわち、A,B,D 各点における応力をそれぞれ σ_c 、 σ_r および σ_e とすると、AB および AD 間の応力変化に対する間隙比の変化が等しいことから、

$$\sigma_c / \sigma_r = (\sigma_c / \sigma_r)^{\kappa^*/\lambda} \quad (1)$$

B 点における有効応力 σ_r に対する非排水強度 c_u の比 c_u / σ_r は

$$c_u / \sigma_r = (c_u / \sigma_e) \cdot (\sigma_e / \sigma_c) \cdot (\sigma_c / \sigma_r) \quad (2)$$

と表される。

式(2)に式(1)の関係を代入すると

$$c_u / \sigma_r = (c_u / \sigma_e) \cdot (\sigma_c / \sigma_r)^{\kappa^*/\lambda} \quad (3)$$

ここで $\Lambda^* = 1 - \kappa^*/\lambda$ σ_e 、 σ_c は共に平均主応力であるが、これをそれぞれに対応する鉛直応力 σ_{ve} 、 σ_{vc} と K_0 値で表すと、

$$\sigma_e = K_0 \cdot \sigma_{ve}, \quad \sigma_c = K_0 \cdot \sigma_{vc}, \quad K_0 = (1+2K_0)/3 \quad (5)$$

式(5)の関係を式(3)に代入して整理すると次式を得る。

$$c_u / \sigma_r = K^{-\kappa^*/\lambda} \cdot (c_u / \sigma_{ve}) \cdot OCR^{\Lambda^*} \quad (6a)$$

または

$$c_u / \sigma_{ve} = K^{\kappa^*/\lambda} \cdot (c_u / \sigma_r) \cdot OCR^{-\Lambda^*} \quad (6b)$$

ここで、OCR($= \sigma_{vc} / \sigma_r$) は疑似過圧密比であり、供試体の乱れの程度を表す指標となる。

式(6b)の意味するところは以下のようである。すなわち、A 点まで正規圧密された粘土の原位置非排

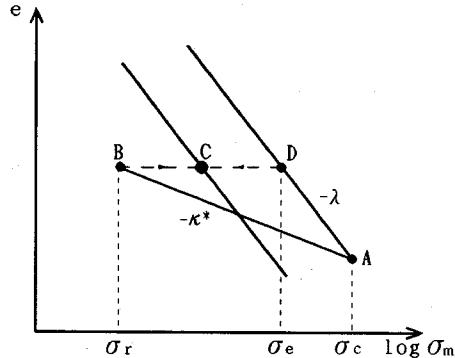


図-6 サンプリングからせん断試験終了までの試料の状態変化

水強度と鉛直有効圧密応力の比 c_u / σ_{ve} は D 点に対応する c_u / σ_{vc} に等しいが、この値は B 点の残留有効応力 σ_r と非排水強度 c_u の測定値、有効土被り圧 σ_{vc} 、 K_0 値および圧密・膨張指數 λ 、 κ^* が与えられれば計算可能であることを示している。また、一つの粘土について K_0 、 λ 、 κ^* および c_u / σ_{ve} は一定値とみてよいから、式(6a)は c_u / σ_r と OCR との関係が両対数紙上で直線で表されることを示している^{8), 11)~13)}。

ところで、 κ^* は K_0 圧密後の粘土に働いていた異方応力が解放されて等方応力 σ_r になる過程の $e - \log \sigma$ の関係(図-6 の A-B)の傾きである。通常の圧密試験から得られる圧縮・膨張指數の比 κ / λ は多くの自然粘土について 0.1 ~ 0.2 の値をとることが知られているが、図-6 のような応力解放および乱れによる有効応力の減少過程での κ^* の値は膨張指數 κ よりも小さいと推定される。そこで $\kappa^* / \lambda \approx 0.1$ を想定し、 K_0 値を 0.5 ~ 0.6 に変化させて式(6b)の係数 $K^{\kappa^*/\lambda}$ を計算すると、

$$K^{\kappa^*/\lambda} = 0.96 \sim 0.97$$

を得る。そこで $K^{\kappa^*/\lambda} \approx 1$ と近似すると、サクションの測定を伴う一軸圧縮試験結果(c_u / σ_r)による原位置強度(c_u / σ_{ve})の推定式として、

$$c_u / \sigma_{ve} = (c_u / \sigma_r) \cdot OCR^{-\Lambda^*} \quad (7)$$

を得る。

以下に前述の各種シミュレーション実験結果を用いて式(7)の適用性を検討した結果について示す。

(1) 不攪乱粘土についての実験結果(正規圧密)

図-7(a)~(c) はそれぞれ篠路、日高、岩見沢粘土についての 3. (1)a の実験から得られた一軸圧

縮強度 q_u の $1/2$ を非排水強度 c_u とし、これを残留有効応力 σ_r で除した c_u/σ_r と疑似過圧密比 OCR との関係を示したものであり、図中の曲線の縦軸切片は式(7)を適用した計算値である。

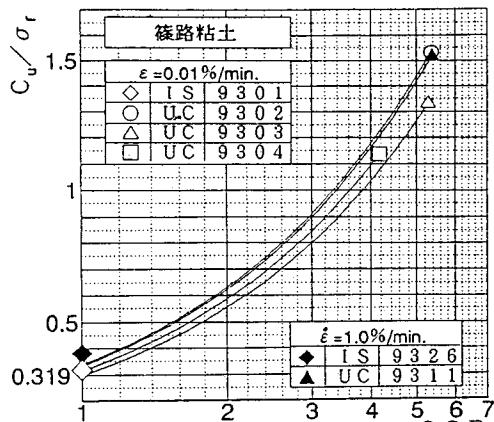
なお、 $\Lambda^* = 1 - C_s/C_c$ として、圧密試験による圧縮・膨張指標 C_c 、 C_s を用いた。

図-7 と表-2 の予測値欄における IS と予測値の比較から、ひずみ速度 $1\%/\text{min}$ の場合若干精度は落ちるが、式(7)によって原位置強度を予測可能であることが分る。したがって、練返し予圧密粘土を中心に行った実験結果より導かれた結論^⑨が不攪乱粘土についても有効であることが検証されたことになる。

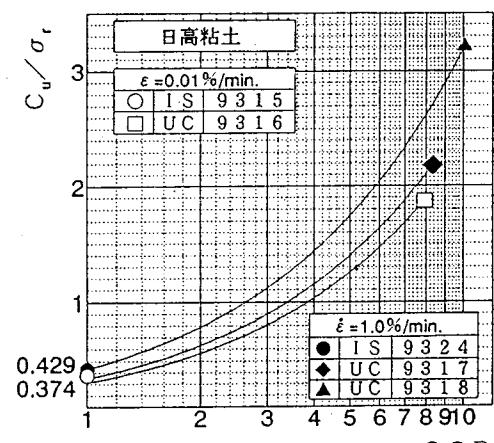
(2) 深い深度からの採取試料を想定したシミュレーション実験結果(正規圧密)

図-8 は MC カオリン粘土についての実験結果を図-7 と同様に表したものである。図-8 と表-3 の IS 試験の実測値と予測値欄の UC の値の比較から、残留有効応力の高い供試体についても式(7)を適用することによって、原位置強度を予測可能であることが分かる。

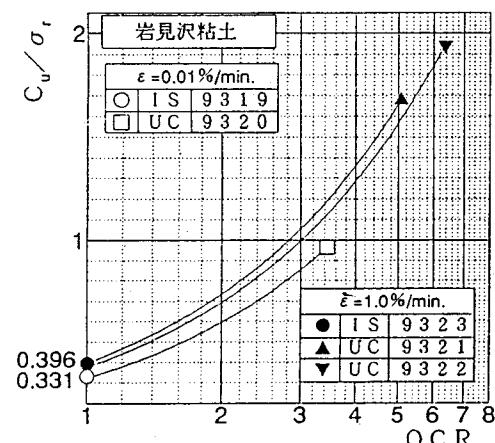
図-9 (a) に示すように浅い深度から採取された供試体の場合、SS 供試体についてサクションを測定すれば、20 分の測定時間で平衡状態に達し、しかも、SL 供試体によるサクションの値とほとんど一致している。一方、深い深度からの試料を想定した図-9 (b) の場合、SS と SL の残留有効応力 σ_r の差は 10% 程度であるが、 σ_r は c_u/σ_r と $\text{OCR} (= \sigma_{uc}/\sigma_r)$ の両方の計算値に影響し、しかも Λ^* の値が $0.8 \sim 0.9$ の値をとる ($C_s/C_c = 0.1 \sim 0.2$) から、式(7)による推定値の変動は 1% 程度となる¹²⁾。したがって、一軸試験用供試体から厚さ 20mm のサクション測定用供試体を分割用意することさえ出来れば、これを図-1 と同様に設置してサクションを測定しながら、一方で通常の一軸圧縮試験を実施することにより、余分な時間を割くことなしに一軸圧縮強度とともに供試体の残留有効応力を知ることが出来る。なお、図-9 (b) で時間とともに残留有効応力が減少しているが、これは以下の理由による。すなわち、この場合には高いサクションの発生が予想されることから 150kPa の back air pressure (σ_a) を載荷している。供試体をセラミックディスク付ペデスタルの上に設置した瞬間には -80kPa 程度の u_s が発生するが、その後図-1 のように圧力室を組立てて σ_a を載荷すると、 σ_a の供試体内への伝達と u_s とのバランスに時間を要し、図-9 (b) のような結果を得る。



(a) 篠路粘土



(b) 日高粘土



(c) 岩見沢粘土

図-7 $c_u/\sigma_r \sim \text{OCR}$ 関係(不攪乱粘土対象)

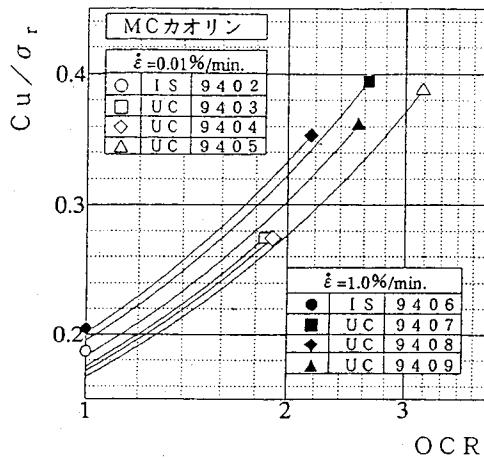


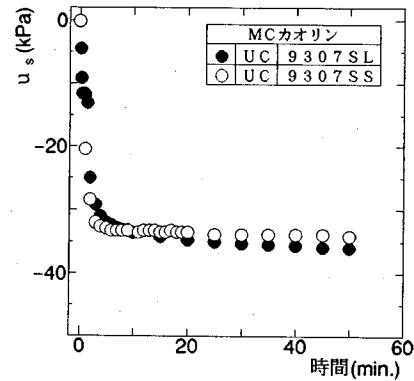
図-8 $c_u / \sigma_r \sim OCR$ 関係(深い深度からの採取試料)

(3) 過圧密地盤の原位置強度推定への応用

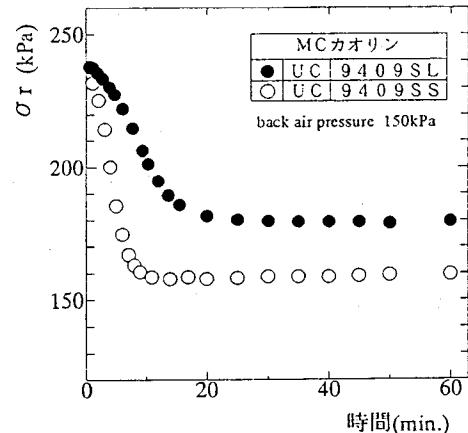
図-10(a)はMCカオリンについての0.01%/minのひずみ速度で行われた過圧密地盤のシミュレーション実験結果に基づいて、推定値と実験値(IS試験結果)との比較を表したものである。UC試験結果のOCRは全て疑似OCRの値であり、IS試験のOCRは圧密降伏応力(400kPa)を現在の鉛直有効圧密応力(200kPa)で除したものである。過圧密状態の原位置強度に相当するのはIS9410の値であり、OCR=2に対応している。また、OCR=1の原位置強度を表すIS9405も図示している。UC9412, 9413, 9415はK₀圧密後、OCR=2までK₀膨張させた後再成形した供試体による一軸圧縮強度である。3つのUC試験結果を式(7)に適用して求めた曲線とOCR=2の交点(↑↓印)で与えられる推定値は、IS試験結果(●印)とよく一致している。また、上述の曲線と縦軸切片(OCR=1)との交点(↑↓印)で表される推定値とOCR=1の原位置強度の実験値(◎印)もかなりよく一致している。

図-10(b)は1%/minのひずみ速度による実験結果を図-10(a)と同じ表現で示したものであり、図中の曲線の縦軸切片は式(7)を適用した正規圧密状態の計算値である。図中で過圧密状態の原位置強度に相当するのがIS9420(●印)および9422(■印)で、それぞれOCR=2および3の状態に対応している。これとK₀圧密後OCR=2および3までK₀膨張させた後再成形した供試体により一軸圧縮試験を行ったUC9416(○印)および9417(□印)から推定式を用いて求めた曲線との交点(図中←印)で与えられる推定値とは極めてよく一致している。

以上のように過圧密状態の場合についても、サク



(a) 低残留有効応力の場合



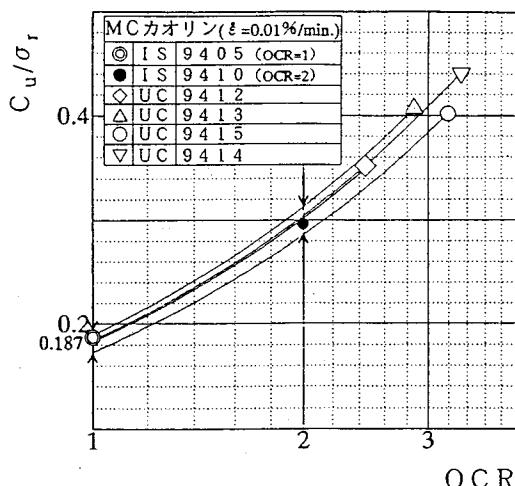
(b) 高残留有効応力の場合
図-9 SS と SL 供試体による u_s , σ_r の比較

ションの測定を伴う一軸圧縮試験の結果から原位置強度の推定が可能であることがわかる。

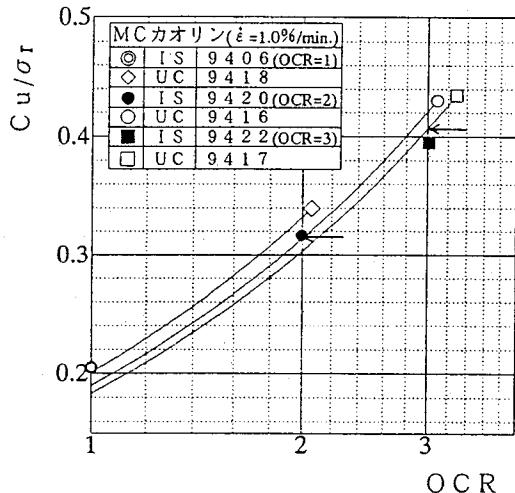
(4) 原位置強度の簡便推定法

以上述べてきた方法においては、式(7)を適用するに際して Λ^* の値が必要である。しかし、 Λ^* の値が未知でも、乱れの程度の異なる複数の供試体による $c_u / \sigma_r \sim OCR$ 関係のデータが得られれば、式(7)が両対数紙上で直線関係を表すという性質を利用することによって原位置強度の推定が可能である。以下にその例を示す。

図-11(a)は、図-10(a)に対応する簡便法を示したもの(ひずみ速度0.01%/minの場合)である。UC試験の結果(△○▽△印)から求まる c_u / σ_r とOCRとの関係を、両対数グラフ上に表示し、これらの点に近似した直線(直線の勾配は式(7)の Λ^* に相当)を引き、その直線とOCR=2の交点(↓印)



(a) $\dot{\varepsilon} = 0.01\%/\text{min}$ の場合



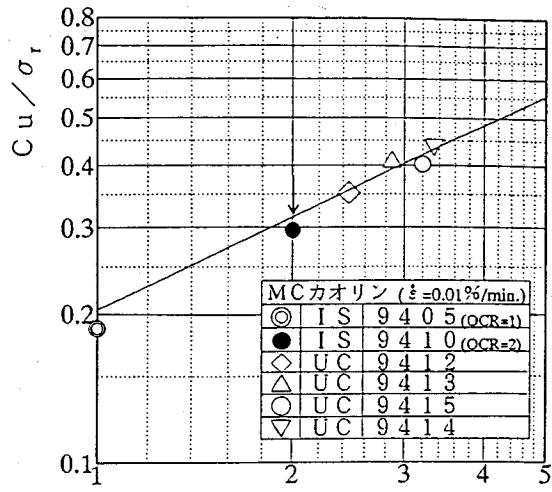
(b) $\dot{\varepsilon} = 1\%/\text{min}$ の場合

図-10 $C_u / \sigma_r \sim \text{OCR}$ 関係(過圧密地盤想定)

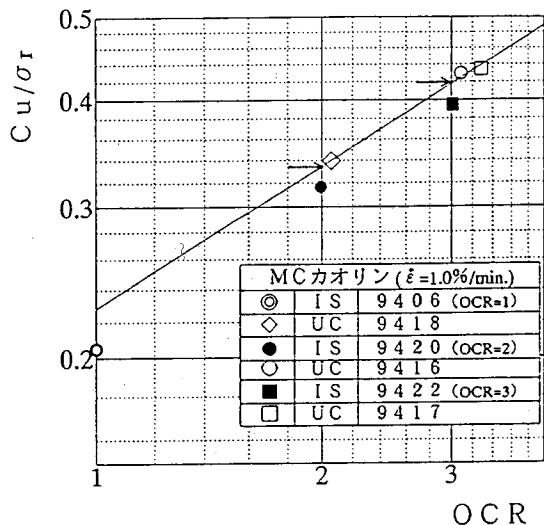
の値(推定値)と、IS9410から求めた原位置強度(●印)とを比較すると、推定値は約0.31と与えられ、原位置の c_u / σ_{vr} (=0.296)に近似した値となっている。

図-11(b)はひずみ速度1%/minの場合についてのものであり、疑似過圧密比の異なるUC試験結果3点(□○◇)を通る直線とOCR=2, 3との交点(→印)で与えられる c_u / σ_r の推定値とIS試験の実測値(●■)との差は、5~6%と多少精度は落ちるが、簡便法によっても過圧密状態の原位置強度の推定が可能である。

以上の結果から、圧密降伏応力が既知で乱れの程



(a) $\dot{\varepsilon} = 0.01\%/\text{min}$ の場合



(b) $\dot{\varepsilon} = 1\%/\text{min}$ の場合

図-11 原位置強度の簡便推定法(MC カオリン)

度の異なる2つ以上の試料についての一軸圧縮試験結果と、それぞれのサクションの測定値から求まる残留有効応力とが分かれれば、実用的に十分な精度で過圧密粘土の原位置強度を推定できることが分かる。図-12は、運輸省港湾技術研究所から提供された有明粘土による試験の諸データ¹⁴⁾について図-11と同じ手法を適用したものである。(◇▲)等の印は、種々のサンプラー(図中L,T,s,n,NはそれぞれLaval, Thin wall, Shelby, NGI54, NGI100を表す)による採取試料についての一軸圧縮強度の1/2を試験前の残留有効応力 σ_r で除して c_u / σ_r とし、同一深度の

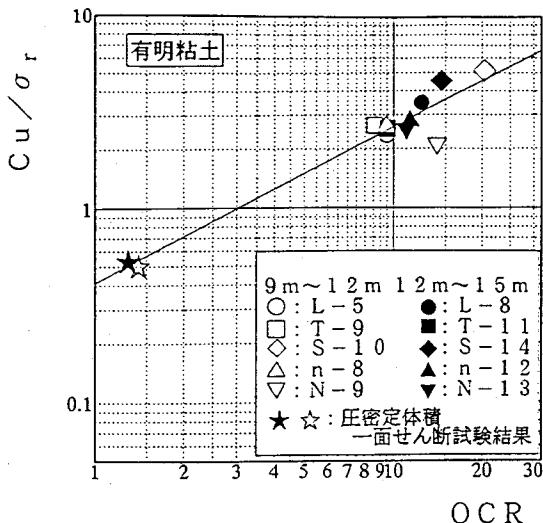


図-12 原位置強度の簡便推定法(有明粘土)

試料の圧密試験から得られた圧密降伏応力を σ_v で除して疑似 OCR を求めてプロットしたものである。また、図中(★☆)印は、採取深度の有効土被り圧で圧密後の定体積一面せん断試験結果を無次元化して縦座標とし、圧密降伏応力と有効土被り圧の比をもって OCR としてプロットしている。

図中の直線は△▲等の一軸圧縮試験結果に対してフィットさせたもので、この直線の勾配は式(7)の Λ^* に相当する。図のように、定体積一面せん断試験の結果(原位置での単純せん断モードでの強度に相当)が直線の延長線上にある。一軸圧縮試験結果と一面せん断試験ではせん断モードに違いがあるので、この結果のみから結論を下すことは早計ではあるが、サンプリングの方法によって乱れの程度が大きく異なっても、サクションの測定によってせん断試験直前の供試体の残留有効応力が評価出来れば図のように c_u / σ_r と OCR の関係を表すことで、原位置強度を推定できる可能性が示唆される。

図-12 はまた、粘性土の強度試験結果の支配要因の一つとしてサンプリング方法の良否を論ずることに加えて、強度試験直前の供試体の品質評価手段としての残留有効応力測定の重要性を示している。

6. 結論

練り返し予圧密試料を用いたシミュレーション実験結果を基にして以前に提案した原位置非排水強度の推定方法について、あらためて理論的考察を加えるとともに、不攪乱試料に対する推定法の適用性、深い深度から採取された試料についての適用性、さ

らに過圧密状態を想定した場合の適用性を検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 一軸圧縮試験を実施するにあたり、試験と並行して供試体のサクションを測定することによって、疑似過圧密比の大きさで乱れの程度を評価することが出来、さらに式(7)を適用して原位置強度を推定できる。

(2) 乱れの程度の異なる 2 個(以上)の供試体の c_u / σ_r と OCR が与えられれば、簡便法として図-11, 12 と同様なプロットを行うことにより原位置強度を推定できる。

(3) 高い残留有効応力を有する試料の一軸圧縮試験において、試験と並行して短い供試体に back air pressure を加えてサクションを測定することにより、(1),(2)と同じ手法で原位置強度を推定できる。

(4) 圧密降伏応力が既知であれば、式(7)は過圧密地盤の原位置強度推定にも応用出来る。

通常業務として行われる一軸圧縮試験と並行して短い供試体でサクションを測定すれば、本論文に示した方法が適用出来る。この場合通常の試験装置に加えて必要なのはセラミックディスク付ペデスタルのみである(ただし、高いサクションの値が想定される場合は、図-1のようにして back air pressure を載荷することが必要)。本研究では有効鉛直応力 σ_v が既知であることが前提になっているが、未圧密地盤や強く過圧密された地盤などで σ_v が正確に把握されていない場合には、たとえば図-12で、 σ_v と圧密降伏応力の差に起因する OCR の差の分だけプロット点がシフトする結果、 c_u / σ_r の予測値が変化することになる。しかし、 c_u そのものの算出にあたって σ_v を乗ずることになるので、非排水強度の推定精度が大きく低下することにはならない。なお、本研究に用いた試料は $I_p=20 \sim 50$ の範囲のものであるが、砂分・シルト分の多い土に対する適用限界を見極めることが今後の課題である。

7. あとがき

本論文の主旨は、設計に用いるべき非排水強度として 5. で述べた方法による計算値をそのまま採用するよう提案しているのではない。筆者らの目的は“一軸圧縮試験結果はばらつきの大きいもの”という先入観を払拭したいということである。

本研究の結果は“乱れを受けた供試体の有効応力状態が忠実に強度に反映されることによって、一見ばらついてみえる試験結果が得られる”と解釈するのが正当であり、したがってその逆をたどれば元の

状態すなわち原位置の強度を推定出来ることを示している。

本文に示した方法で応力解放と乱れの影響を除いた真値に近い強度が求められたとしても、これが例えば斜面安定計算に用いるべき c_u 値にはならない。強度の異方性やひずみ速度依存性についての補正が必要とするのは言うまでもない。補正係数を得るために今後のデータの蓄積が必要であるが、少なくとも従来の“極めてあいまいな q_u 値¹⁵⁾”をそのまま用いて $c_u = q_u / 2$ として設計するのではなく、応力解放や乱れの影響を取り除いた修正 c_u 値を確定した上で、設計計算用の非排水強度を設定するというステップを踏むべきである。

地盤工学にたずさわる者は自然の土が相手であるから、対象が一様均質であるはずがなく深さ方向はもちろん平面的にも“分布”があるのは当然であるが、現場に出た途端にすべてがばらつきで片づけられ、有効応力の原理の下で整理されたはずの知識が全く役に立たないので、若い技術者の落胆を招くばかりである。本文が土質試験の信頼回復に役立てば幸いである。

本研究を実施するにあたり、サクションの測定方法に関して(中部地質の阿部廣史氏(元、信州大学)にご教示いただいた)。また、北海道土質コンサルタントより篠路、日高、岩見沢の不攪乱試料を、運輸省港湾技術研究所地盤調査研究室より有明粘土についてのサクションと一軸圧縮および一面せん断試験データを提供して頂いた。実験およびデータ整理にあたっては、本学卒業生橋詰哲治氏(現、(株)フジタ)ならびに本学大学院生津國典洋、遠藤大輔両君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松岡 元：土の一軸圧縮強度の意義、土と基礎、Vol. 31, No.4, pp.55-57, 1983.
- 2) 三田地 利之：地盤工学における土質試験の役割、土と基礎、Vol.43, No.11, pp.1-2, 1995.
- 3) 土質工学会：土質試験の方法と解説 pp.339-383, 1991.
- 4) 地盤工学会基準(案)：土の K_0 圧密非排水三軸圧縮試験方法、土と基礎、Vol.43, No.9, pp.78-84, 1995.
- 5) 例えは、Skempton,A.W. and Sowa,V.A.: The Behaviour of Saturated Clays During Sampling and Testing, *Geotechnique*, Vol.13, No.4, pp.269-290, 1963.
- 6) 田中 政典、田中 洋行、後藤 健二、深沢 健：諸外国のサンプラーで採取された試料の品質比較、平成4年 地盤サンプリングシンポジウム、pp.17-24, 1992.
- 7) 工藤 豊、三田地 利之、杉原 靖彦：飽和粘性土の応力解放時のサクションと非排水強度の関係、土木学会 第47回年次学術講演会概要集、pp.428-429, 1992.
- 8) 三田地 利之、工藤 豊：一軸圧縮試験結果に基づく原位置強度の推定法、土と基礎、Vol.42, No.4, pp.15-20, 1994.
- 9) 小田 美明、三田地 利之：飽和粘土の三軸 K_0 圧密試験方法について、土木学会論文集、No.448/ III, pp. 71-96, 1989.
- 10) 土質工学会「不飽和土の工学的性質に関する研究委員会」編：不飽和土の測定に関する信州セミナーテキスト、pp.71-96, 1989.
- 11) Shimizu, M. and Tabuchi, T. : Effective stress behavior of clays in unconfined compression tests, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.3, pp.28-39, 1993.
- 12) 三田地 利之、津國 典洋、工藤 豊：サクションの測定を伴う一軸圧縮試験の実用化に関する研究、第29回土質工学研究発表会講演集、pp.629-632, 1994.
- 13) 対馬 雅己、三田地 利之、石川 剛：高有機質土の応力解放時のサクションとせん断強度の関係、土木学会論文集、No.523/ III, pp.91-97, 1995.
- 14) 田中 政典、田中 洋行、横山 裕司、鈴木 耕司：異なるサンプラーで得られた試料の品質評価、土質工学会サンプリングに関するシンポジウム、pp.31-36, 1994.
- 15) 半沢秀郎：ディスカッション：土の一軸圧縮強度の意義、土と基礎、Vol.31, No.12, pp.95, 1983.

(1995. 9. 22 受付)

METHOD FOR PREDICTING IN-SITU UNDRAINED STRENGTH OF CLAYS BASED ON THE SUCTION VALUE AND UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH

Toshiyuki MITACHI and Yutaka KUDOH

Unconfined compression tests have been widely used in Japan for the purpose of determining undrained strengths of clay samples, but the unconfined compressive strengths are usually scattered even if specimens tested seem to have been subjected to the same stress history. In order to make clear the cause of scattering of the measured strengths, a series of test simulating the process from sampling to unconfined and triaxial compression test for saturated clay samples was performed with a remolded clay and four undisturbed clays, and the influence of stress release and mechanical disturbance of test specimen on the undrained strength was examined. Based on the test results, a new method for predicting in situ undrained strength of clays from the results of conventional unconfined compression test with suction measurement was proposed.