

過圧密履歴を受けた高有機質土の 残留有効応力と一軸圧縮強度

荻野 俊寛¹・対馬 雅己²・三田地 利之³

¹正会員 工修 秋田大学助手 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町1番1号)

²正会員 工博 秋田工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒011-8511 秋田市飯島文京町1-1)

³フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

過圧密地盤を想定し、原地盤から試料を採取して室内試験に至るまでの作業過程をシミュレートするような一軸およびUU三軸圧縮試験を実施した。過圧密された供試体のサクシヨンの測定値から残留有効応力を知り、有効応力の変化が一軸およびUU三軸強度に与える影響を調べ、この有効応力と一軸圧縮強度の関係から原位置における非排水強度の推定法について検討した。その結果、過圧密地盤においても有効土被り圧が既知で乱れの程度の異なる数個の供試体についてサクシヨンを測定して残留有効応力が求まれば、一軸圧縮強度の測定値に補正を加えることによってかなりの精度で原位置強度が推定できることが分かった。

Key Words : overconsolidation, highly organic soil, suction, unconfined compression test

1. まえがき

未分解の植物繊維質に富んだ高有機質土は、取り扱いが容易ではなく、しかも室内せん断試験に供することが困難な場合が多い。有機物含有量を指標として高有機質土のせん断特性を推定する試みもあるが¹⁾²⁾、構成植物との関係など未解明の部分が多く、未だ実用段階には至っていない。したがって、高有機質土地盤の強度特性を知るためには、既往の調査データに基づいて推定するか、室内試験によらざるを得ない。

泥炭のような高有機質土は単位体積重量が小さい(秋田地方の泥炭で飽和密度 $\rho_{sat} \approx 1.2 \text{g/cm}^3$ 程度) 関係上、地下水位の季節的な変動でも地盤内有効応力に及ぼす影響は大きい。したがって高有機質土地盤は多かれ少なかれ圧密応力履歴を受けており、しかもこのような地盤から採取した試料は、応力履歴の他にサンプリングから室内試験に至るまでに機械的な乱れを受けやすい。従来、この種の地盤の安定解析においても一軸圧縮試験が多用されているが、試験結果のばらつきが大きいことは周知の事実である。

三田地ら³⁾⁴⁾は粘性土について、正規圧密および過圧密条件下での種々のシミュレーション試験結果から、サクシヨンの測定を伴う一軸圧縮試験によって原位置強度の推定が可能であることを明らかにした。しかし、上記のようなシミュレーション試験は一般的な粘性土に適用したものであって、特殊土といわれる高有機質土につい

表-1 試料の物理的性質

初期含水比 W_i (%)	強熱減量 L_i (%)	分解度 H (%)	土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)
560~680	60~70	80~90	1.65~1.75

ては、未だ解明されていないのが現状である。このような観点から、粘性土について提案された手法が、高有機質土に適用可能かどうかを検証することは大きな意味を持つものと考えられる。

筆者ら⁵⁾⁶⁾は高有機質土について、サンプリングから室内試験に至るまでの一連の過程をシミュレートし、サクシヨンの測定値から残留有効応力を知り、この有効応力と一軸圧縮強度の関係から原位置の強度を推定可能であることを示した。しかしながら、これらの一連の実験は正規圧密状態の供試体について実施したものであり、過圧密状態までの領域を考慮したものではなかった。

そこで、本研究では過圧密地盤を想定し、原地盤から試料を採取して、その後の室内試験に至るまでの作業過程をシミュレートするような一軸およびUU三軸圧縮試験を実施した。過圧密された供試体のサクシヨンの測定値から残留有効応力を知り、有効応力の変化が一軸およびUU三軸強度に与える影響を明確にするとともに、この有効応力と一軸圧縮強度の関係から原位置における非排水強度の推定法について検討するものである。

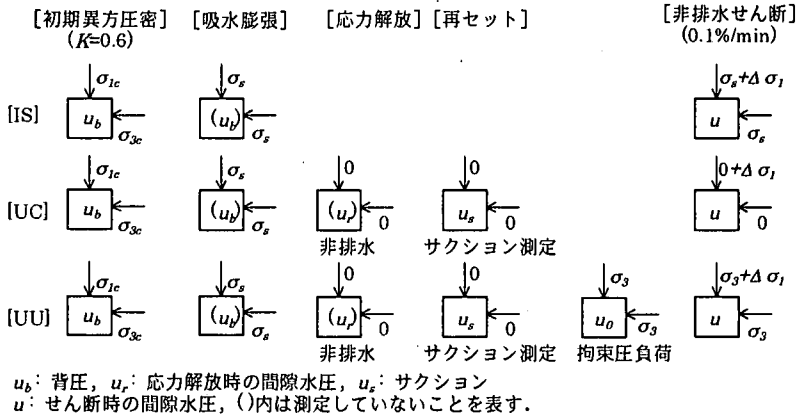


図-1 異方圧密および吸水膨張後のシミュレーション実験

表-2 実験条件および結果の一覧

試験名	No.	初期異方圧密(kPa)		α'_c (kPa)	OCR (σ'_{1c}/α'_c)	S_j/α'_c	S_j/α'_c
		α'_{mc}	α'_{1c}				
IS	IS-1	40	54.3	54.3	1.0	0.538	0.538
	IS-2	60	81.6	81.6	1.0	0.547	0.547
	IS-3	100	135.2	135.2	1.0	0.502	0.502
	IS-4	100	136.0	45.3	3.0	1.190	0.396
	IS-5	100	136.0	22.7	6.0	1.899	0.317
	IS-6	100	136.0	15.1	9.0	2.629	0.292
	IS-7	100	136.0	9.1	15.0	3.670	0.246

α'_{mc} : 有効平均主応力

α'_c : 吸水膨張後の有効圧密応力

α'_{1c} : 有効鉛直圧密応力

α'_c : 残留有効応力

表-3 実験条件および結果の一覧 (注: 記号説明は一部を除いて表-2 と同じ)

試験名	No.	初期異方圧密(kPa)		α'_c (kPa)	OCR (σ'_{1c}/α'_c)	α'_c (kPa)	OCR (σ'_{1c}/α'_c)	S_j/α'_c	S_j/α'_c	拘束圧力 α_1 (kPa)	有効応力 α'_c (kPa)
		α'_{mc}	α'_{1c}								
UC	UC-1	40	54.3	54.3	1.0	12.6	4.3	1.492	0.346		
	UC-2	60	81.9	81.9	1.0	19.5	4.2	1.436	0.342		
	UC-3	100	136.0	136.0	1.0	36.0	3.8	1.356	0.359		
	UC-4	40	54.5	18.2	3.0	7.6	7.2	2.276	0.317		
	UC-5	60	82.0	27.3	3.0	11.2	7.3	2.375	0.324		
	UC-6	100	136.0	45.3	3.0	14.0	9.7	2.850	0.293		
	UC-7	40	54.3	9.1	6.0	4.0	13.6	4.050	0.298		
	UC-8	60	81.8	13.7	6.0	6.1	13.4	3.639	0.271		
	UC-9	100	136.0	22.7	6.0	10.9	12.5	3.560	0.285		
	UC-10	40	54.5	6.1	9.0	2.7	20.2	4.963	0.246		
	UC-11	60	82.0	9.1	9.0	4.2	19.5	4.286	0.220		
	UC-12	100	136.0	15.1	9.0	5.7	23.9	5.895	0.247		
	UC-13	40	54.5	3.6	15.0	1.3	41.9	7.923	0.189		
	UC-14	60	82.0	5.5	15.0	2.8	29.3	6.214	0.212		
	UC-15	100	136.0	9.1	15.0	5.8	23.4	4.603	0.196		
UU	UU-1	60	82.0	82.0	1.0	18.1	4.5	1.740	0.384	80	23.8
	UU-2	60	81.8	27.3	3.0	11.5	7.1	2.487	0.350	80	17.4
	UU-3	60	82.0	5.5	15.0	3.1	26.5	6.194	0.234	120	4.1

OCR: 疑似過圧密比

2. 試料

実験に用いた試料は、秋田市近郊から採取した不攪乱泥炭(P1)であって、採取深度はおよそ1.5mであり、有効土被り圧は約20kPaである。試料の物理的性質を表-1に

示す。試料の採取は、内径70mmで長さ300mmのサンプリングチューブを泥炭層に押し込んで行った。サンプリングチューブから押し出した試料をカッターナイフなどで慎重に上下端面のみを仕上げて直径70mm、高さ160mmの供試体とした。

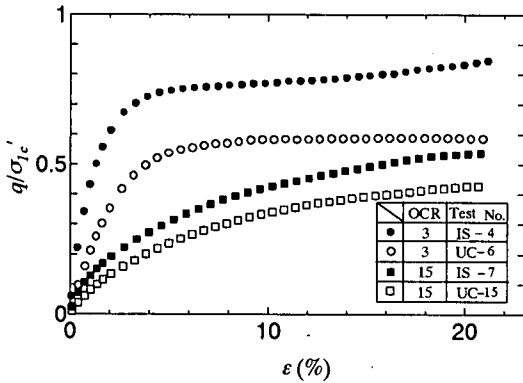


図-2 主応力差～軸ひずみ関係

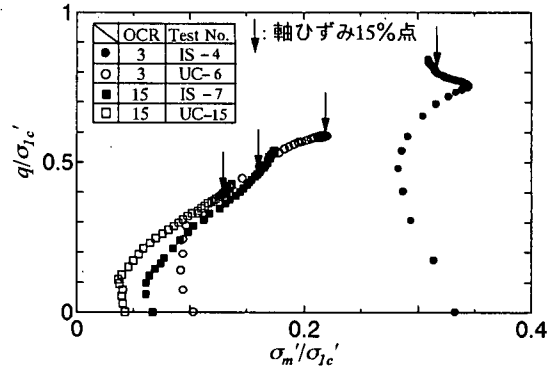


図-3 非排水せん断中の有効応力経路

3. 実験方法

この研究では、実験装置として軸対称三軸圧縮試験機を用い、サクシオンやせん断時の間隙水圧測定を伴う一軸およびUU三軸圧縮試験に対応すべく、通常のペDESTALをセラミックディスク付きペDESTALに交換できるように改良した⁹⁾。セラミックディスクの空気浸入値は220kPaである。なお、サクシオンの測定方法については、既報を参照されたい⁹⁾。

サンプリングによる応力解放から一軸圧縮および三軸圧縮試験に至る過程をシミュレートする第1段階として、すべての供試体について原位置の応力状態を近似するうえで $K=0.6$ の初期異方圧密後(背圧100kPa)、図-1に示すような応力条件のもとで実験を行った。なお、不攪乱試料の原位置有効土被り圧の2.5倍以上の応力で初期異方圧密した状態をシミュレーション実験上の原位置応力として設定した。各試験の概要は以下ようになる。また、実験条件の詳細については表-2、表-3に示す。なお、疑似過圧密比(QCR)は有効土被り圧と応力解放時の残留有効応力の比で示したものであり、本来の意味での過圧密比(OCR)と区別して用いることにする。

I) IS 試験(過圧密非排水三軸圧縮試験)

主応力比 $K=0.6$ で異方圧密終了後、過圧密比(OCR)3, 6, 9, 15のもとで等方的に吸水膨張させた供試体の非排水三軸圧縮試験。表-2においてOCR=1は正規圧密状態($K=0.6$)の供試体の非排水三軸圧縮試験である。このシミュレーション実験では、三軸セル内で異方圧密および過圧密後の供試体はそのまま非排水でせん断過程に入るのので、IS試験による強度は応力解放その他の乱れの影響を全く受けない状態の強度を表すものとする。

II) UC 試験(サクシオンの測定を伴う一軸圧縮試験)

IS試験と同じ手順で過圧密状態にした供試体を応力解放し、三軸セルを解体して供試体のろ紙を除去し、再セットしてサクシオンを測定後、間隙水圧を測定しながら

行う一軸圧縮試験。通常の業務で行われる一軸圧縮試験にサクシオンの測定を付加したもので、応力解放後再度セットし直すことでサンプリングチューブから抜き出した試料を試験機にセットするときの作業の一部をシミュレートしている。

III) UU 試験(サクシオンの測定を伴う UU 三軸圧縮試験)

UC試験と同じ手順で過圧密後の供試体の応力を解放する。つぎに三軸セルを解体して供試体のろ紙を除去し、さらに真空容器から取り出したセラミック付きペDESTALをセル下盤に装着し、サクシオンが測定できる状態にした後、供試体をペDESTALの上に載せる。サクシオンの値(u_s)が平衡状態(約30分)になるまで測定して残留有効応力 $\sigma'_s (=u_s)$ を求め、その後セル圧を作用させて有効応力を測定し、その後間隙水圧を測定しながら行う UU 三軸圧縮試験。通常の業務で行われる UU 三軸圧縮試験に対応するもので、応力解放後再度セットし直すことでサンプリングチューブから抜き出した試料を試験機にセットするときの作業の一部をシミュレートしている。この試験では応力解放後の供試体にセル圧を作用させることによる有効応力の変化とそれに伴う強度の増加を検討している。

なお、一連の試験における初期異方圧密段階では、圧密を促進するために供試体の側面に二重のろ紙を巻くとともに、圧密の打ち切り時間は体積変化量～時間曲線に対して3 σ 法を適用することによって判定した。応力～ひずみ曲線において明確な破壊が生じないため、非排水強度 S_u は軸ひずみ15%までの主応力差 q の最大値の1/2で定義し、初期圧密時の有効鉛直圧密圧力 σ'_{c0} で除することによりこれを正規化した。以下、正規化した強度を S_u/σ'_{c0} とする。また、せん断時のひずみ速度はすべて0.1%/minである。

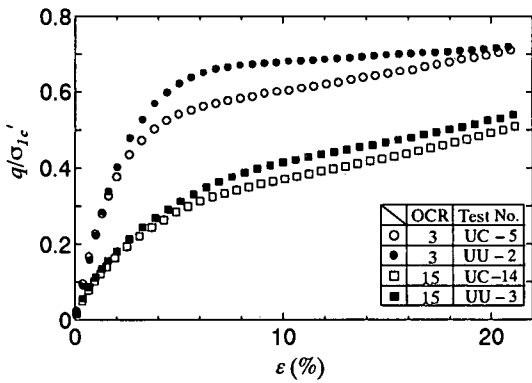


図-4 主応力差～軸ひずみ関係

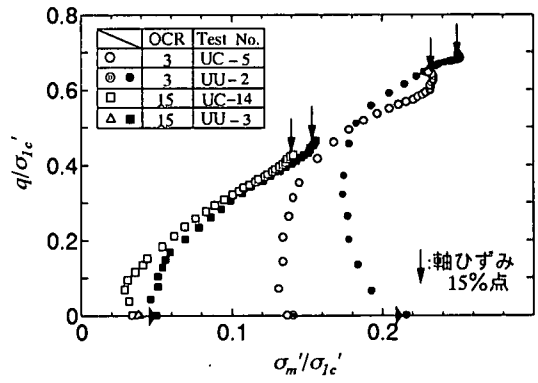


図-5 非排水せん断中の有効応力経路

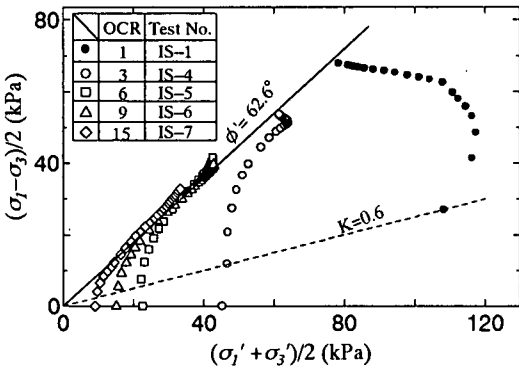


図-6 非排水せん断中の有効応力経路

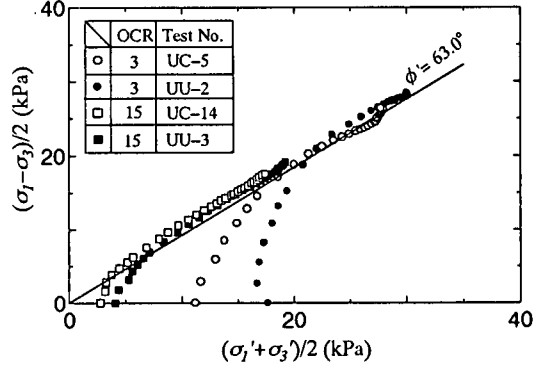


図-7 非排水せん断中の有効応力経路

4. 実験結果及び考察

(1) 圧密履歴および試験条件の違いがせん断特性に及ぼす影響

図-2は、過圧密後の供試体について、ISおよびUC試験の主応力差 q をそれぞれ初期異方圧密時の有効鉛直圧密圧力 σ'_{1c} で正規化した q/σ'_{1c} と軸ひずみ ε の関係を示したものである。図から分かるように、軽く過圧密($OCR=3$)されたIS-4と比べたUC-6の強度低下は26%であり、また $OCR=15$ でかなり過圧密された状態でIS-7とUC-15を比較するとUC-15の方が20%減少する。このような傾向は、図-3の有効応力経路に示されるように、吸水膨張によって過圧密状態にしたときのせん断開始前の残留有効応力によって支配される。

図-4は、異方圧密後、過圧密状態($OCR=3,15$)にした供試体のUCおよびUU試験における主応力差 q と軸ひずみ ε の関係を示したものである。ここで、主応力差 q は初期異方圧密時の有効鉛直圧密圧力 σ'_{1c} で正規化している。図からわかるように、過圧密比3程度条件の下でのUC-5と比べたUU-2の強度(軸ひずみ15%点)は約8%増加し、またかなり過圧密された状態($OCR=15$)でUC-14

とUU-3を比較するとUU-3の方が10%程度の強度の増加がみられる。このような傾向は、図-5にみられるように、過圧密状態の下で応力解放した残留有効応力がせん断開始前の拘束圧の荷重によって増大することに起因している。すなわち同一の過圧密条件におけるUU試験とUC試験の残留有効応力(図中の横軸上の(O,●)印; $OCR=3$, (□,△)印; $OCR=15$)は、いずれもほぼ同じ値を示すが、試験開始前に拘束圧を荷重することによって、過圧密比3,15における有効応力の値がそれぞれ●印と■印に移動し、その値は50%および30%程度増加する。したがって、この有効応力の増加がUU試験とUC試験における強度差に反映しているものと考えられる。図-6、図-7は、過圧密履歴を受けたIS試験とUCおよびUU試験における有効応力経路と破壊時のせん断抵抗角を示したものである。図-6から分かるように、過圧密比をパラメータとしたIS試験では、いずれも有効応力経路は異なるが、過圧密比に関わりなくほぼ同じ破壊包絡線上で破壊に達する傾向を示している。 $(\phi=62.6^\circ)$ 。また、図-7において異方圧密後、過圧密状態の供試体の残留有効応力を測定した後、間隙水圧を測定しながら行ったUC試験の有効応力経路は、同一条件の下でのUU試験のそれとは異なるが、いずれも同じ破壊包絡線上に到達す

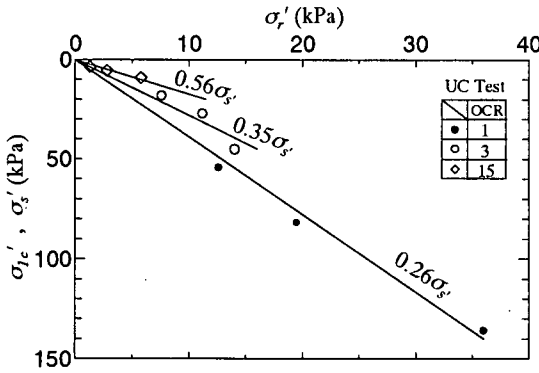


図-8 応力解放時の有効応力の残留割合

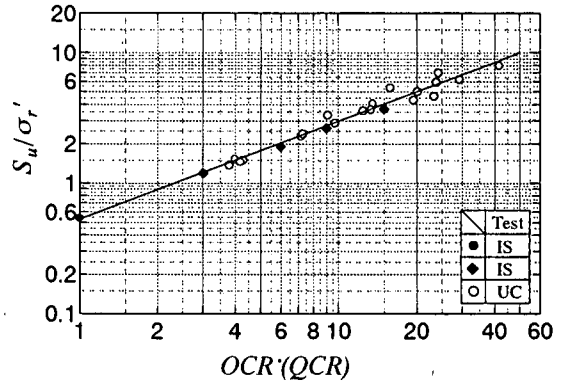


図-9 S_u/σ'_{ic} ~ OCR 関係

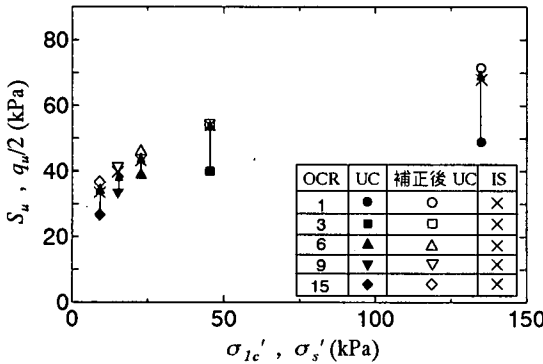


図-10 $q_u/2$ 値の補正例

る傾向にある($\phi=63.0^\circ$)。これらの図から、過圧密状態の下で試験条件が異なるがいずれもほぼ同じ破壊包絡線上に到達する傾向を示している。このように、過圧密条件下の高有機質土についても正規圧密の場合と同様^{9)~8)}、ポーラスセラミックディスクを用いた一軸圧縮及び UU 三軸圧縮試験を実施することによって、有効応力に基づいた破壊包絡線が推定できることになる。

図-8は種々の過圧密状態のもとで応力解放後、残留有効応力を測定し、この値を初期の有効鉛直圧密圧力および過圧密時の有効応力にそれぞれ対応させた関係を示したものである。図から分かるように、正規圧密状態から応力解放したときの残留有効応力は、有効鉛直圧密圧力、すなわち有効土被り圧に対して26%程度保持している。正規圧密状態における粘性土に関して、残留有効応力は有効土被り圧の15~20%となると報告されているが⁹⁾、高有機質土の残留有効応力の方が大きく、過圧密状態が進行するほどその割合は増加し、過圧密比15になると膨張終了時の有効応力の約56%が残留することがわかる。

(2) 原位置強度の推定

図-9は、三田地・工藤³⁾が提案した粘性土の原位置強度の推定法を異方圧密後、過圧密状態にした高有機質土

について適用したもので、IS および UC 試験の結果から求まる非排水強度 S_u をせん断開始前の残留有効応力で正規化した S_u/σ'_{ic} と QCR の関係を両対数グラフ上にプロットしている。ここで、 QCR 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。応力履歴が異なる供試体についての UC 試験の実測値(○印)に近似する直線を引き、これを延長して得られた縦軸($QCR=1$)の交点(推定値)と正規圧密状態の IS 試験結果による乱れを受けない強度(実測値●印)との差は2%程度の精度で一致する。また、それぞれ過圧密比3, 6, 9, 15に対する過圧密状態における原位置強度としての直線上の計算値($\sigma'_{ic}=\sigma'_{is}$; σ'_{is} は過圧密時の有効応力)と実測値(◆印)との差は1~9%の範囲の精度で近似する。このことから、過圧密地盤においても有効土被り圧が既知で乱れの程度の異なる数個の供試体についてサクシオンを測定して残留有効応力が求まれば、かなりの精度で原位置の強度が推定できることになる。

図-10は、高有機質土について図-9に示した推定法を適用して得られた S_u/σ'_{ic} と OCR 関係を基に、先行圧密圧力100kPa(平均主応力)から吸水膨張によってそれぞれ過圧密状態($OCR=3, 6, 9, 15$)にした有効鉛直圧密応力毎の $q_u/2$ 値の補正例を示したものである。 $q_u/2$ の補正方法は、①まず、図-9の S_u/σ'_{ic} と OCR の関係から $OCR=1$ に対応する直線の切片、すなわち正規圧密状態における原位置の S_u/σ'_{ic} ($\sigma'_{ic}=\sigma'_{is}$)の値を求める。また、 $OCR=3, 6, 9, 15$ に対応する直線の交点、すなわちそれぞれの過圧密時の有効応力 σ'_{is} で正規化した原位置強度 S_u/σ'_{is} の値を求める。②次に、 S_u/σ'_{ic} または S_u/σ'_{is} の値に有効鉛直圧密応力 σ'_{ic} または過圧密時の有効応力 σ'_{is} を乗ずることによって $q_u/2(=S_u)$ の補正值を得ることになる。図中の記号として(●, ■, ▲, ▼, ◆)印は補正前の $q_u/2$ であり、補正後の値が(○, □, △, ▽, ◇)印として示されている。なお、×印は異方圧密非排水三軸圧縮試験(IS試験)から得られた S_u 値である。図から分かるように、補正前の $q_u/2$ 値は補正後、原位置の強度、す

なわち IS の S_v に近似していることが明らかとなり、図-9 に示す推定法を用いた $q_u/2$ 値の補正法が過圧密状態においても適用できるものと期待される。

5. 結論

正規圧密状態のもとで乱れの影響を受けない強度の推定法についてすでに報告しているが⁹⁻¹⁰これまでに提案している手法の適用性を過圧密土について検証した結果、以下の結論が得られた。

1. 同一の過圧密条件で IS および UC 試験の強度を比較すると、UC 試験の方が過圧密比 3 程度で 26%、また過圧密比 15 では 20%程度それぞれ低下することが認められた。このことは、正規圧密条件の供試体と同様に、圧密時の応力履歴によって生じた残留有効応力の低下に起因している。
2. 同一の過圧密条件のもとで応力解放した供試体について、UU 三軸圧縮試験前に拘束圧を作用させることにより、応力解放後と比べて有効応力が 30~50%程度増加した。このことは過圧密状態からの応力解放による乱れの軽減に有効であり、その効果が強度に反映されていることが認められた。
3. 過圧密状態から応力解放し再セットした UC および UU 試験は、乱れを受けない IS 試験と比べて残留有効応力と強度が低下するが、有効応力表示によるせん断抵抗角にはほとんど影響がみられなかった。
4. 正規圧密状態から応力解放した場合の残留有効応力は、有効鉛直圧力、すなわち有効土被り圧に対して 26%程度保持しているが、過圧密状態のもとでは $OCR=15$ になると膨張終了時の有効応力に対して約 56%の有効応力が残留することが認められた。
5. 有効土被り圧が既知で乱れの程度の異なる数個の供試体についてサクシオンを測定して残留有効応力が

求めれば、一軸圧縮強度の測定値に補正を加えることによってかなりの精度で原位置の強度が推定できる。

参考文献

- 1) 対馬雅己, 岩崎恒夫, 宮川勇: 有機質土の強度試験結果に関する二, 三の考察: 土と基礎, Vol.25, No.9, pp.15-20, 1977.
- 2) 関子睦夫, 山口晴幸, 木暮敏二: 繊維性有機質土を想定した人工材料からなる供試体のせん断特性に関する基礎的研究, 土質工学会北海道支部泥炭に関する研究討論会論文集, pp.83-90, 1986.
- 3) 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.
- 4) 三田地利之, 工藤豊: サクシオ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.
- 5) 三田地利之, 工藤豊, 遠藤大輔: 残留有効応力による一軸試験結果の評価と q_u 値の補正, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.231-237, 1998.
- 6) 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オンとせん断強度の関係, 土木学会論文集, No.523/III-32, pp.91-97, 1995.
- 7) 対馬雅己, 三田地利之: 異方圧密履歴を受けた高有機質土のサクシオンと q_u 値に基づく原位置強度推定法, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.253-261, 1998.
- 8) Tsushima, M. and Mitachi, T.: Method for Predicting In-situ Undrained Strength of Highly Organic Soil Based on the Value of Suction and Unconfined Compression Strength, International Symposium on Problematic Soils, Vol.1, pp.11-14, 1998.
- 9) 土田孝, 奥村樹郎: 不攪乱粘性土試料の乱れとその補正法について, サンプリングに関するシンポジウム, pp.103-110, 1995.
- 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 Test, Soils and Foundations, Vol.33, No.3, pp.28-39, 1993.
- 12) Mitachi, T. and Kitago, S.: Change in Undrained Shear Strength Characteristics of Saturated Remolded Clay due to Swelling, Soils and Foundations, Vol.16, No.1, pp.45-58, 1976.

(2000.5.19 受付)

RESIDUAL EFFECTIVE STRESS AND UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF OVERCONSOLIDATED HIGHLY ORGANIC SOIL

Toshihiro OGINO, Masaki TSUSHIMA and Toshiyuki MITACHI

A series of test simulating the process from sampling to unconfined and UU triaxial compression tests for overconsolidated highly organic soil are performed. The influence of residual effective stress change on unconfined compressive and UU triaxial strength are examined, and a method for predicting in-situ strength from the relationship between residual effective stress and unconfined compressive strength is proposed. From the test results, it is found that strengths obtained from unconfined compression test with suction measurement can be reasonably corrected to estimate in-situ undrained strength by applying proposed method.