

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

対馬雅己¹・三田地利之²・石川剛³

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

²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)

³学生会員 秋田大学大学院鉱山学研究科地球工学専攻(〒010 秋田市手形学園町1-1)

一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験に至る過程を三軸試験機内でシミュレートするような試験を行い、強度特性に及ぼす応力解放の影響について調べ、さらにサクシオンの測定を伴う一軸圧縮試験から乱れの影響のない強度を推定する方法を検討している。その結果、人為的に乱れを与えた高有機質土の一軸圧縮強度は、乱れを受けない強度に比べて著しく低下する。圧縮指数及び膨張指数が既知であれば、一軸圧縮試験前に供試体のサクシオンの測定を行うことによって乱れの影響のない強度が推定できることを示した。

Key Words : highly organic soil, suction, sample disturbance, unconfined compression test

1. はじめに

高有機質土は繊維質を多く含む土であり、これによって構成される地盤は土質工学上軟弱地盤の最も典型的な事例として知られている事から、その支持力に対する安定性、あるいは沈下などの問題への対処が難しく特別な配慮を要する。一般に泥炭地盤に対する安定解析では、一軸圧縮試験またはコーン貫入抵抗と一軸圧縮強度の関係から非排水強度を求められている。しかし、原位置の応力状態にあった試料が、サンプリングから室内試験に至る過程で応力解放と機械的な乱れを受けることにより有効応力が減少し、これにともなう強度低下を生じていることは周知のことである。

粘性土の非排水強度に及ぼすこれらの要因に関する研究はかなり進んでいるものの^{1)~7)}、一軸圧縮強度に及ぼす応力解放のみに限って検討した例は少なく^{6), 7)}、高有機質土に限ってみれば、この種の研究は皆無に等しい。

本研究では高有機質土についてまずサンプリングから応力解放を経て、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験に至る過程を三軸試験機内でシミュレートするような試験を行い、強度特性に及ぼす応力解放の影響について調べ、つぎに応力解放後の供試体のサクシオンを測定することによって残留有効応力を知り、

Table 1 Index properties of highly organic soil

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

これと一軸圧縮強度との関係について検討し、サクシオンの測定を伴う一軸圧縮試験から乱れの影響のない強度を推定する方法を提示するものである。

2. 試料及び実験方法

実験に用いた試料は、秋田市周辺から採取した不攪乱泥炭(Pt)であって、物理的性質をTable 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。本研究では、応力解放から試験に至る過程をシミュレートする実験の第1段階として、試験実施の容易さからすべての供試体について等方圧密(背圧100kPa)した後、Fig.1に

Table 2 Experimental condition

試験名	NO.	初期等方圧密せん断直前 (kPa)			OCR (σ'_c / σ'_v)	c u / σ'_v	備考
		(kPa)	σ'_c	σ'_v			
IS試験	IS2	60	59.3		1.0	0.614	
	IS3	100	99.4		1.0	0.562	
PS試験	PS2	60	50.5	50.5	1.2	0.703	圧密時の背圧と等しくなるまでセル圧低下
UC1試験	UC1-1	20		5.2	3.8	1.635	
	UC1-2	60		14.8	4.1	1.446	
	UC1-3	100		23.0	4.3	1.431	
	UC1-4	20		6.7	3.0	1.224	
	UC1-5	60		17.8	3.4	1.073	
	UC1-6	100		26.6	3.8	1.128	
UC2試験	UC2-7	60		18.1	3.3	1.376	応力解放時5%ひずみまで圧縮
	UC2-8	60		8.1	7.4	2.840	60kPa → 20kPa まで減少し吸水膨張
	UC2-9	60		10.5	5.7	2.105	60kPa → 30kPa まで減少し吸水膨張
	UC2-10	60		13.0	4.6	1.946	60kPa → 45.1kPa まで減少し吸水膨張
	UC2-11	100		27.1	3.7	1.351	応力解放時5%ひずみまで圧縮
	UC2-12	100		15.0	6.7	1.927	100kPa → 33.3kPa まで減少し吸水膨張
	UC2-13	100		16.7	6.0	1.880	100kPa → 50kPa まで減少し吸水膨張
	UC2-14	100		24.8	4.0	1.609	100kPa → 75.2kPa まで減少し吸水膨張

注1) UC試験については応力解放の影響を調べる一軸圧縮試験をUC1試験、応力解放して乱れを与えた後の一軸圧縮試験をUC2試験とした。
 注2) せん断時のひずみ速度は、供試体NO. UC1-4~UC1-6まで0.01%/min、それら以外はすべて0.1%/minとした。
 注3) すべての供試体に圧密時100kPaの背圧を作用させた。

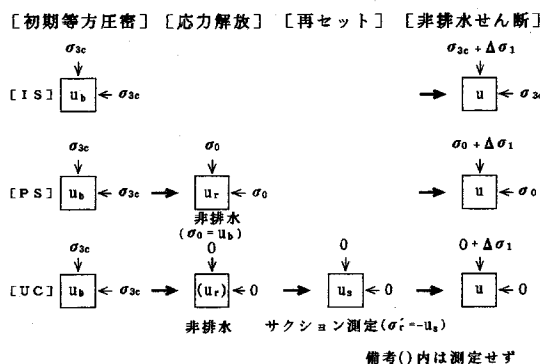


Fig.1 Simulation test under initial isotropic consolidation condition

示すような応力履歴を与えてシミュレーション実験を行った。各試験の概要は以下になる(試験条件の詳細についてはTable 2参照)。なお、圧密を促進するために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3t法を適用することによって判定した。

I) IS試験：圧密終了後すぐに非排水三軸圧縮試験。サンプリング時の応力解放その他の影響を全く受けない状態の強度を表すものとする。

II) PS試験：圧密時の背圧と等しくなる値($\sigma_v = u_b$)まで非排水でセル圧を下げ、間隙水圧が平衡状態に達した後(60分程度)、非排水三軸圧縮試験。Fig.1では供試体に σ_v が作用しているので、三軸圧縮試験のように見えるが、有効応力の立場からみれば、圧密時のセル圧と背圧との差、すなわち有効圧密圧力の解放の影響だけを受けた試料の一軸圧縮強度を表す。実際の試験業務の中でこのような試験を行うことは不可能であるが、一軸供試体が理

想的に応力解放の影響のみを受ける場合を想定した実験である。なお、Fig.1のようなセル圧と背圧の組み合わせを用いることによって、通常の方法で一軸圧縮試験中の間隙水圧の測定が可能となる。

III) UC試験：圧密終了後非排水で応力解放し、三軸セルを解体して供試体のろ紙を除去し、再セットして一軸圧縮試験。通常業務で行われる一軸圧縮試験に対応するもので、応力解放後再度セットを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。

この試験では以下のような方法で意図的に供試体に乱れを与え、その影響を検討した。

- i) 純粋に応力解放のみによる乱れ
- ii) 応力解放後、人為的に圧縮ひずみ(5%)を与えることによる乱れ
- iii) 吸水膨張(OCR:1.33,2,3)による乱れ

これらの乱れの影響によるサクシヨンの変化を検出するために、三軸セル内にセラミックディスクを設置し、それらのサクシオン(u_s)を測定⁸⁾した。

サクシヨンの測定方法について、さらに詳細に述べると次のようになる。まずセラミック付きペDESTALを脱気水の入ったピーカーの中に入れ、これを圧力容器内で12時間以上真空(93kPa)をかけ十分に脱気させる。次に三軸セル下盤の間隙水圧測定用ルート(Fig.2参照)内を脱気水で満たす。その後、脱気水を流しながら、圧力容器から取り出したセラミック付きペDESTALを気泡を巻き込まないように注意しつつ装着し、ペDESTAL表面に表面張力によって水が盛り上がった状態にする。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、サクシヨンの値が平衡状態になるまで測定する。

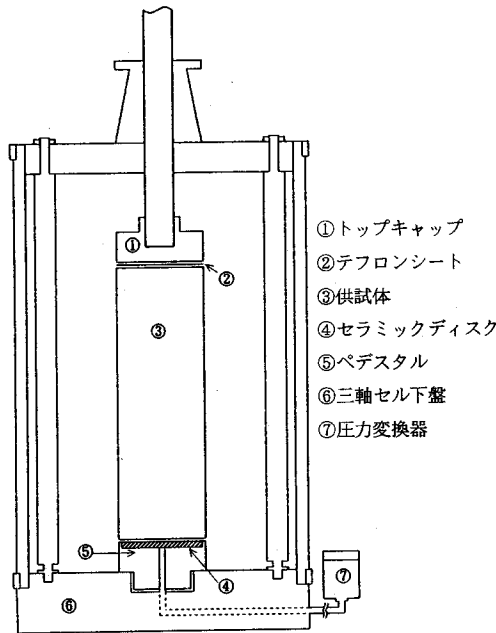


Fig.2 Unconfined compression apparatus with measurement of suction

サクシオンを測定後、間隙水圧を測定しながら一軸圧縮試験を行った (Fig.2)。実験に用いたセラミックディスクは直径60mm、厚さ4mmで、空気侵入値は220kPaである。

この試験では、i)の純粋に応力解放のみの影響を調べる一軸試験をUC1試験、またii),iii)の手順によって乱れを受けた後の供試体についての一軸試験をUC2試験とした。

非排水強度 c_u は軸ひずみ15%までの主応力差 q ($=\sigma_1 - \sigma_3$) の最大値の1/2で定義し、初期圧密時の有効圧密圧力で除すことによりこれを正規化した。以下、正規化した強度を c_u/σ_c' とする。

3. 実験結果および考察

(1) 非排水強度に及ぼす応力解放の影響

Fig.3は、ひずみ速度0.1%/minで行ったIS, PS, UC1試験の主応力差 q を応力解放前の有効圧密圧力 σ_c' で除したものと軸ひずみ ϵ との関係を示したものである。またTable 3は、Fig.3の関係から得られた正規化した非排水強度とIS試験の非排水強度 (c_{ui}) を基準とした他の試験の強度比を示した。Fig.3およびTable 3から明らかのように、IS試験とPS試験との強度差は、4%程度と小さい。これはPS試験においては、応力解放後も

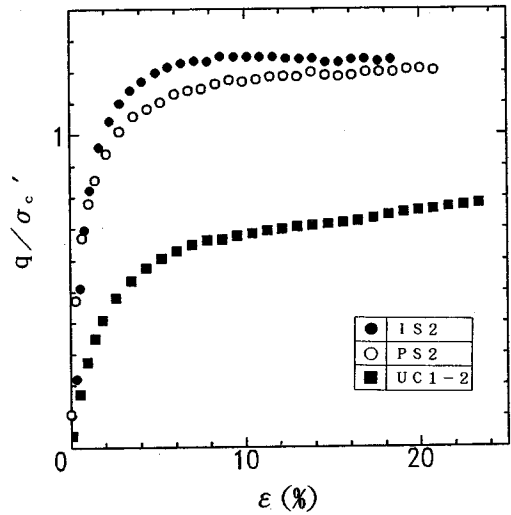


Fig.3 Principal stress difference vs. axial strain

Table 3 Normalized shear strength and strength ratio

	非排水強度 c_u/σ_c'	強度比 c_u/c_{ui}
IS試験	0.614	1.00
PS試験	0.594	0.96
UC1試験	0.357	0.58

平均有効主応力 p が解放前の値の84%も残留 (Fig.5参照) しており、一軸圧縮試験でも有効応力の保存状況がよければ、乱れを受けない強度と変わらない値が得られることになる。このような傾向は、三田地⁹⁾らが行った粘性土の一軸圧縮強度及び三軸圧縮強度に関するシミュレーション試験結果と同様である。一方、UC1試験では、IS試験と比べて40%程度も強度が低下している。このことは、Fig.5の有効応力経路に示されるように応力解放後、せん断開始前の有効応力の大きさに起因している。

Fig.4は、IS, PS, UC1試験における非排水せん断時の発生間隙水圧 Δu と軸ひずみ ϵ の関係を示したものである。ここで Δu は初期圧密時の圧力で正規化している。PS試験ではISに比べて Δu がかなり小さいが、これはFig.5の有効応力経路の出発点の横軸の値から分かるように、PS試験では応力解放時に16%程度有効応力が低下しており、

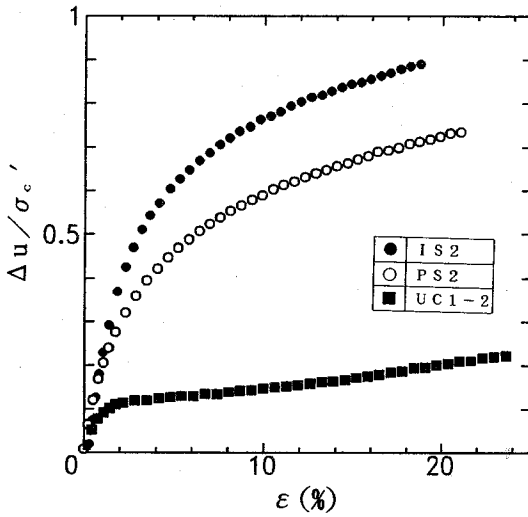


Fig.4 Pore water pressure vs. axial strain

その分だけせん断前に過剰間隙水圧が存在している（有効圧密圧力60kPaの16%で約9.6kPa）。この値を考慮すると軸ひずみ20%付近での $\Delta u / \sigma'_c$ は、IS試験のそれとほとんど一致する。また、UC1試験では応力解放後ポーラスセラミックディスクを用いて、せん断時の間隙水圧を測定した結果、この値はIS、PS試験に比べてかなり低下している。このことは、Fig.5に示される有効応力経路の横軸の出発点、すなわち応力解放時の有効応力の低下（疑似過圧密状態）がその後の間隙水圧の挙動に反映されているものと考えられる。

(2) 一軸圧縮強度に及ぼすサクシジョンの影響

Fig.6はUC1試験、すなわち等方圧密後、応力解放して残留応力を測定した後、2種類の異なるひずみ速度で間隙水圧を測定しながら一軸圧縮試験を実施した際の破壊に至る経路を示したものである。ひずみ速度の違いによってその経路が異なり、それぞれの破壊包絡線上に到達している。これによる有効せん断抵抗角は、ひずみ速度(0.1, 0.01%/min)の影響を受け、 $\phi' = 49.7^\circ \sim 54.3^\circ$ なる値が得られる。

Fig.7はIS試験における破壊時の有効せん断抵抗角を示したものである($\phi' = 54.1^\circ$)。図から分かるように、IS試験と併示したUC1試験の有効応力経路は異なるが、IS試験から得られた破壊包絡線上で、破壊に達していることが認められる。このように、高有機質土についてもポーラスセラミックディスクを用いた一軸圧縮試験を実施すること

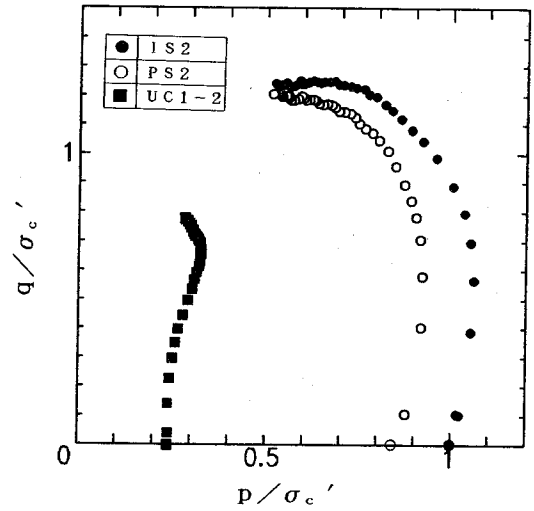


Fig.5 Effective stress paths in unconfined compression and triaxial compression tests

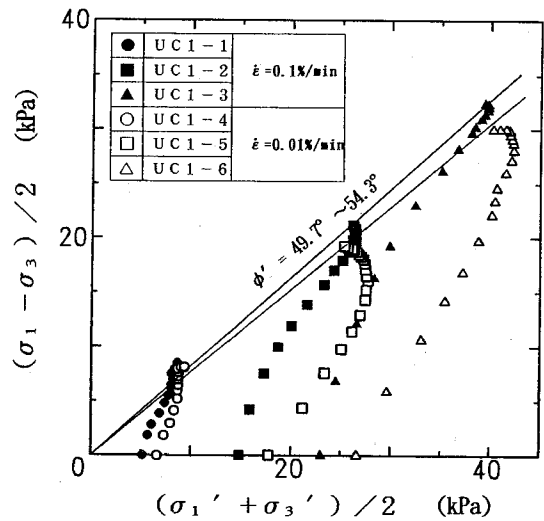


Fig.6 Effective stress paths in unconfined compression tests

によって、粘性土と同様¹⁰⁾に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。

Fig.8は一例として初期等方圧密100kPaの供試体について、IS試験と、応力解放後に人為的に乱れを与えたUC2試験の主応力差を有効圧密圧力で正規化した q / σ'_c 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、通常の三軸圧縮試験(IS3)と比べて応力解放後に5%ひずみまで圧縮して乱れを与えたUC2-11の強度低下は35%

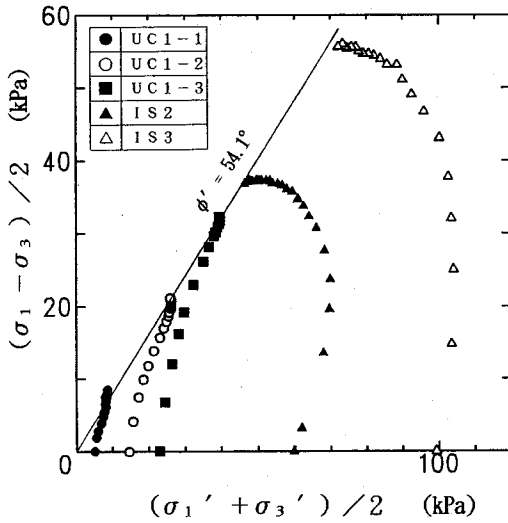


Fig.7 Effective stress paths in unconfined compression and IS tests

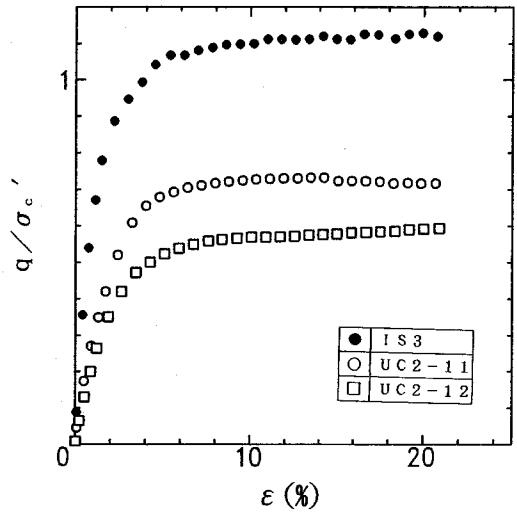


Fig.8 Principal stress difference vs. axial strain

であり、圧密終了時に吸水膨張させたUC2-12では、48%程度の強度低下がみられる。これは後述のように、応力解放および機械的乱れの影響によって生じた残留有効応力の低下に起因しているものと考えられる。さらに人為的に乱れ(5%ひずみ)を与えたUC2-11と比べ、吸水膨張(OCR=3)させたUC2-12の強度低下は21%であり、この強度低下がFig.9で示される発生間隙水圧の挙動に影響していることが分かる。また、このとき発生する間隙水圧を有効圧密圧力で正規化した $\Delta u / \sigma_c'$ と軸ひずみ ϵ の関係を示したのがFig.9である。応力解放後人為的に乱れを与えた試験では、IS試験と比べて発生間隙水圧が著しく低下している。

Fig.10は、Fig.8、Fig.9に対応した有効応力経路を示したもので、 p はせん断中の平均有効主応力である。図から分かるように、乱れを受けないIS試験と比べてUC2試験のせん断開始点の残留有効応力は、供試体の乱れの増大とともに低下していることが認められる。

(3) 乱れの影響のない強度の推定

Fig.11は一例として初期圧密圧力60kPaの供試体について、残留有効応力 σ_r' で正規化した非排水強度 c_u / σ_r' とOCR($=\sigma_c' / \sigma_r'$)との関係を示したものである。ここでは一軸圧縮試験前にサクシオンを測定することによって乱れの影響のない強度を推定することを意図しているもので、同様な試験結果は試料の種類が異なるが、三田地ら¹¹⁾

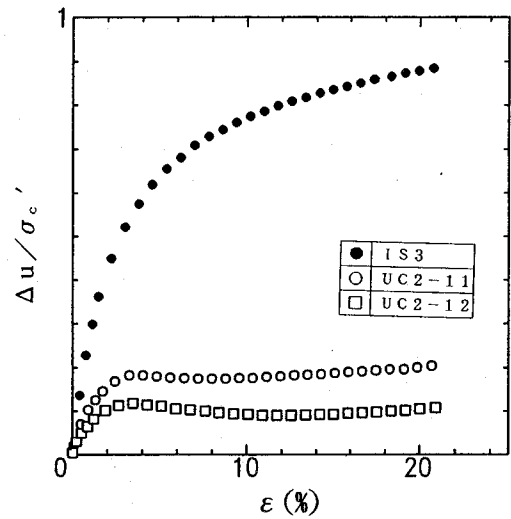


Fig.9 Pore water pressure vs. axial strain

によっても得られている。図中の実線は三田地ら¹²⁾が提案した過圧密粘土の強度推定式を高有機質土に適用した計算値であり、この強度推定式は次のように示される。

$$(c_u / \sigma_r')_{oc} = (c_u / \sigma_r')_{nc} \cdot OCR^\Lambda \quad (1)$$

ここに $\Lambda = 1 - C_s / C_c$ 、また C_c 、 C_s はそ

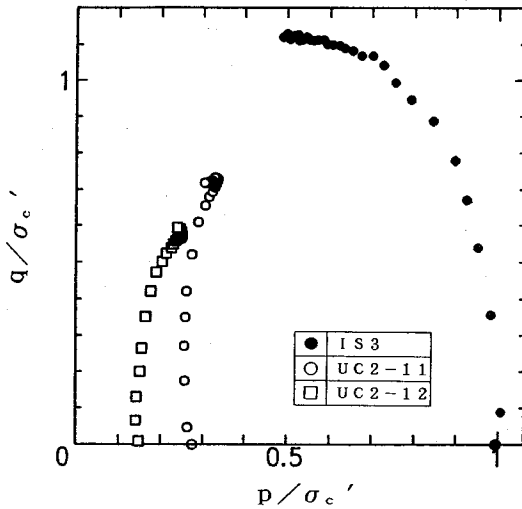


Fig.10 Effective stress paths in unconfined compression and IS tests

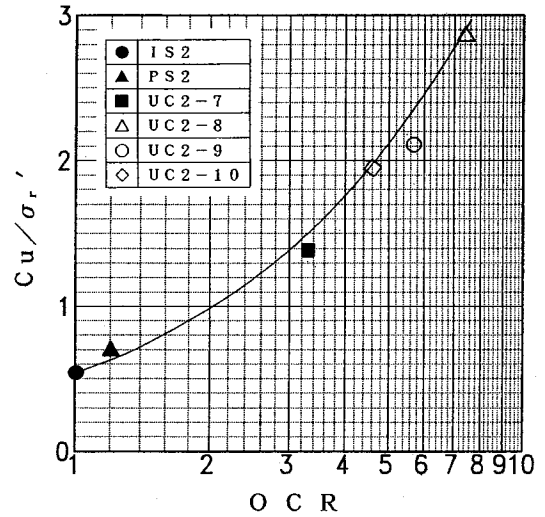


Fig.11 Undrained shear strength vs. overconsolidation ratio

それぞれ圧縮および膨張指数である。

等方圧密・等方膨張三軸圧縮試験結果から圧縮指数および膨張指数を求めて、式(1)を用いた計算値が、Fig.11で示される実線であり、実測値とほぼ近似している。

以上のことから、圧縮指数および膨張指数が与えられ、一軸圧縮試験前に供試体のサクシヨンの測定を行うことによって、高有機質土の乱れの影響のない強度を推定できることになる。

Fig.12は、粘性土について三田地¹¹⁾らが提案した原位置強度の簡易推定法を高有機質土に適用したものであって、残留有効応力 σ_r' で正規化した非排水強度 c_u/σ_r' とOCR(σ_c'/σ_r' , σ_c' は初期等方圧密時の有効圧力)との関係を両対数グラフ上に示したものである。乱れの程度が異なる試料についての一軸圧縮試験の実測値3点を結んだ直線を延長して得られる縦軸の切片、すなわち c_u/σ_r' の値がIS試験の実測値と近似することが分かる。このことから、圧縮指数および膨張指数がわからなくても、有効土被り圧が既知で乱れの程度の異なる2個以上の供試体についてサクシヨンの測定を伴う一軸圧縮試験を行えば、多少精度は落ちるが乱れの影響のない強度の推定が可能となる。

4. 結論

高有機質土のサンプリングから一軸および三軸圧縮試験に至る過程をシミュレートすることによって

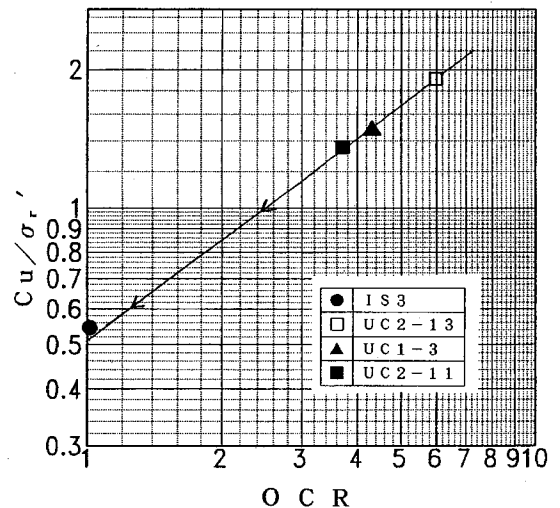


Fig.12 Undrained shear strength vs. overconsolidation ratio

強度に及ぼす応力解放の影響を調べ、サクシヨンの測定を伴う一軸圧縮試験から乱れの影響のない強度を推定する方法について行った研究結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 純粋に応力解放のみのPS試験の強度低下は、IS試験と比べて4%程度である。したがって、一軸圧縮試験でも有効応力の保存状態がよければ、乱れを受けない強度と変わらない値が得られる。
- (2) 通常の一軸圧縮試験では、IS試験と比べて40%程度も強度が減少することが認められる。

(3) 応力解放後、ポーラスセラミックディスクを用いて残留有効応力(サクシオン)を測定し、間隙水圧を測りながら一軸圧縮試験を行うことによって、有効応力に基づいた破壊包絡線が推定できる。

(4) 人為的に乱れを与えた供試体の一軸圧縮強度は、乱れを受けない強度に比べて著しく低下する。このことは供試体の残留有効応力の低下に起因していることが明らかにされた。

(5) 圧縮指数および膨張指数が既知であれば、一軸圧縮試験前に供試体のサクシオン(残留有効応力)の測定を行うことによって、高有機質土の乱れの影響のない強度を式(1)から推定することができる。

(6) 有効土被り圧が既知で、サクシオンの測定(乱れの程度の異なる供試体)を伴う2点の一軸圧縮試験結果から、多少精度は落ちるが乱れの影響のない強度の簡易推定が可能である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、サクシオンの測定方法に関して信州大学の阿部廣史先生(現、(株)中部地質)より適切なお助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Ladd, C.C. and Lambe, T.W.: The Strength of Undisturbed Clay Determined from Undrained Tests, *ASTM, STP 361*, pp.342-371, 1963.
- 3) 奥村樹郎：粘性土の攪乱に関する研究, 港湾技術研

究報告, Vol.8, No.1, 1969.

- 4) 阿部廣史, 川上浩：供試体の作成手順が一軸強度・サクシオンに及ぼす影響, 第15回土質工学研究発表会, pp.429-432, 1980.
- 5) Kimura, T. and Saitoh K.: The Influence of Disturbance due to Sample Preparation on the Undrained Strength of Saturated Cohesive Soil, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.4, pp.109-120, 1982.
- 6) 矢田部龍一, 榎明潔, 八木則男：一軸圧縮強度に及ぼす溶存ガスの影響, 第22回土質工学研究発表会, pp.377-378, 1987.
- 7) 外崎明, 赤石勝, 稲田倍穂：飽和粘土の一軸圧縮強さ, 第22回土質工学研究発表会, pp.395-396, 1987.
- 8) 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.
- 9) 三田地利之, 桜庭大久, 工藤豊：粘性土の強度特性に及ぼす応力解放の影響, 土木学会第43回年次学術講演会, pp.12-13, 1988.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 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.

(1994.9.26受付)

UNDRAINED STRENGTH OF HIGHLY ORGANIC SOIL AND ITS SUCTION MEASURED BEFORE SHEAR TEST

Masaki TSUSHIMA, Toshiyuki MITACHI and Go ISHIKAWA

A series of test simulating the process from sampling to unconfined compression and triaxial compression test for highly organic soil is performed, and the influence of stress release and mechanical disturbance of test specimen on the undrained strength is examined. A method for predicting undrained strength having no influence of disturbance based on unconfined compression test with suction measurement is proposed.

Test results show remarkable decrease of unconfined compression strength due to disturbance. It is shown that the proposed method well predicts undrained strength having no influence of disturbance by using the known value of compression and swelling indices and the value of suction measured before starting conventional unconfined compression tests.