

泥炭の強度特性に及ぼす応力履歴とサクシヨンの影響

対馬 雅己

The Influence of Stress History and Suction on Shear Strength Characteristics of Peat

Masaki TSUSHIMA

(1994年8月22日受理)

The purpose of study is to investigate the influence of Stress history and suction on shear strength characteristics of the normally and overconsolidated peat. The samples used in this study are undisturbed peat obtained by using thin-wall sampling tubes, 70 mm in diameter and 300 mm in height. Specimens, 70 mm in diameter and 160 mm in height, for triaxial compression and unconfined compression test were trimmed by cutting upper and lower ends of samples.

It has been found that an unconfined compressive and unconsolidated undrained triaxial strength decreases of 20 to 30 percent compared with in-situ strength. It has also been found that the in-situ strength of peat which dose not receive a disturbance by performing the measurement of the suction of the specimen before the unconfined compression test can be presumed.

1. まえがき

著者は泥炭の強度特性に及ぼすサンプリング時の応力解放の影響について既に報告^{1,2)}しているが、その延長として、本研究は三軸圧縮試験機を用いて原位置で過圧密履歴を受けた状態から応力解放を経て一軸圧縮試験あるいはUU三軸圧縮試験に至る過程をシミュレートするような実験を行い、強度特性に及ぼす過圧密履歴と応力解放の影響を調べている。さらに、サクシヨンを測定した一軸圧縮試験における有効応力原理の適用性とその強度特性についても言及している。

2. 試料

本実験で用いた試料は秋田市周辺から採取した不攪乱泥炭(Pt)であり、物理的性質を表-1に示す。

表-1 試料の物理的性質

初期含水比(%)	強熱減量(%)	分解度(%)	比重
560~680	60~70	80~90	1.65~1.75

試料の採取は、内径70 mm、長さ300 mm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、直径70 mm、長さ160 mmの供試体とした。

3. 実験方法

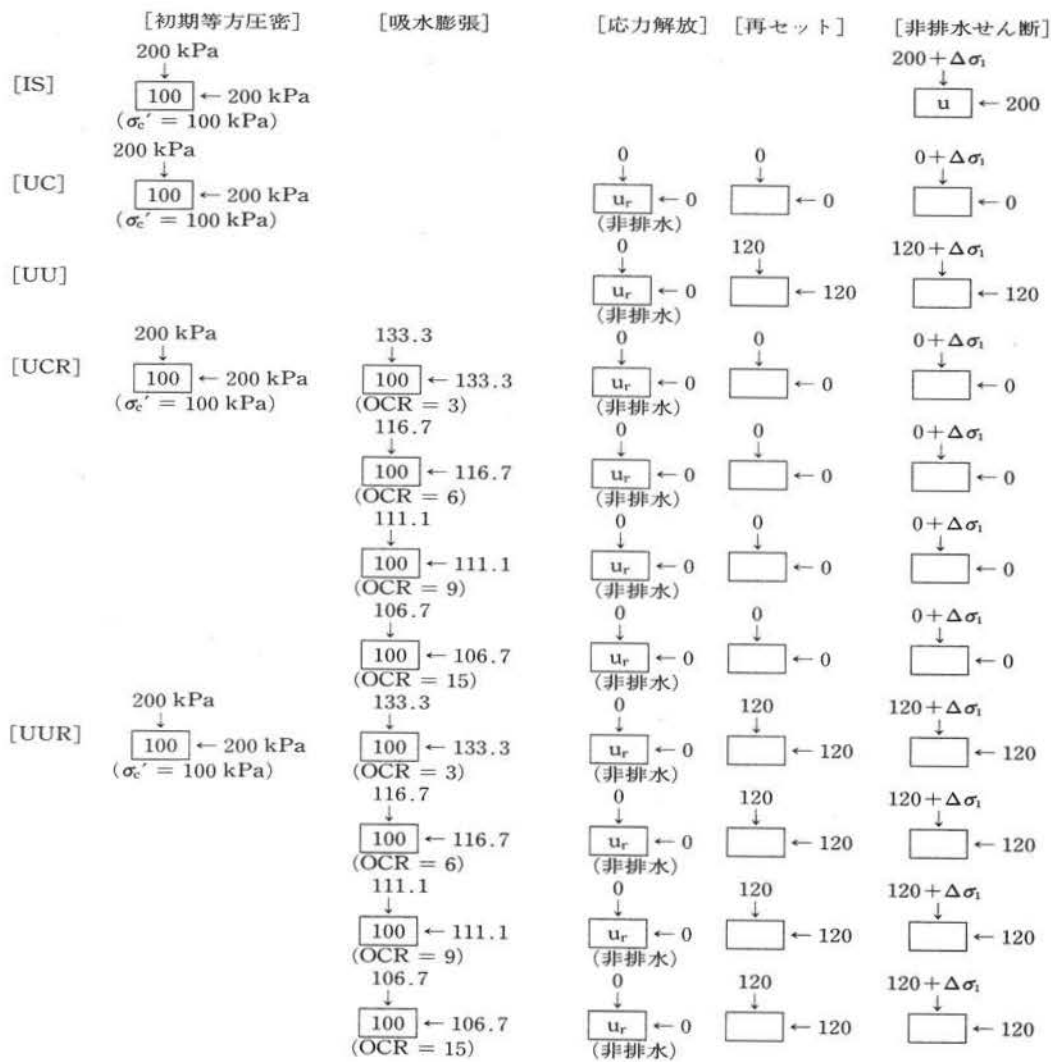
3.1 実験A

図-1, 2に示すように、すべての供試体について最初に有効圧密圧力100 kPaで等方圧密および異方圧密(有効主応力比 $K = 0.6$)した後、以下のような実験を行った。

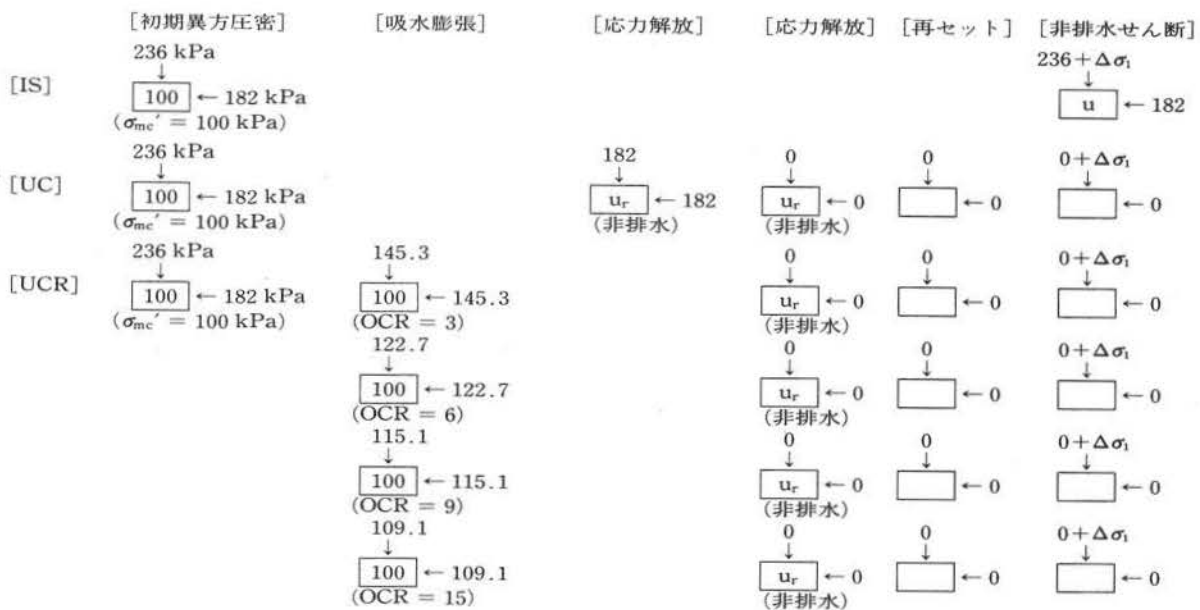
1) IS試験：圧密終了後すぐに非排水圧縮試験。この試験から得られる強度は原位置強度に対応するものであって、サンプリング時の応力解放、その他の影響を全く受けない場合の高有機質土の強度を表すものとする。

2) UC & UU試験：非排水状態で応力解放後セルを解体して供試体のろ紙を除去し、再セットして非圧密非排水せん断試験。再セットに要した時間は30分。この試験は通常業務で行われる一軸および

泥炭の強度特性に及ぼす応力履歴とサクシヨンの影響



図一 試験条件



図二 試験条件

UU 三軸圧縮試験に対応するもので、応力解放後、再度セットすることで実際に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。再セット後のセル圧がゼロの場合 (UC) が一軸圧縮試験、セル圧がゼロ以外の場合 (UU) が UU 三軸圧縮試験にそれぞれ対応する。

3) UCR 試験：それぞれ過圧密比 3, 6, 9, 15 で吸水膨張させ、終了後非排水状態で応力解放し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。

4) UUR 試験：それぞれ過圧密比 3, 6, 9, 15 で吸水膨張させ、終了後非排水状態で応力解放しセルを解体して供試体のろ紙を除去し、再セットして UU 三軸圧縮試験。

UCR & UUR 試験では、原位置における応力履歴を想定したものであって、この履歴を受けた後の試験は通常業務で行われる一軸および UU 三軸圧縮試験に対応するものである。

以上の試験において、非排水せん断時のひずみ速度はすべて 0.1%/min であって、非排水強度は軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) の最大値の 1/2 で定義した。

3. 2 実験 B

実施した試験は一軸圧縮試験であって、以下のような方法で行った。

1) 有効圧密圧力 20, 60, 100 kPa でそれぞれ等方圧密及び異方圧密 (有効主応力比 $K = 0.6$) 終了後、非排水状態で応力解放して初期サクションを測定した後、それぞれ 2 種類の軸ひずみ速度 0.1, 0.01%/min で圧縮試験を行う。

2) 有効圧密圧力 60, 100 kPa で等方圧密終了後、非排水状態で応力解放して 5% 及び 10%, 15% のひずみまで圧縮させた後、初期サクションを測定し、それぞれ軸ひずみ速度 0.1%/min で圧縮試験を行う。

3) 有効圧密圧力 60, 100 kPa で等方圧密終了後、拘束圧力を所定の 3 段階まで減少させて吸水膨張した後、初期サクションを測定し、軸ひずみ速度 0.1%/min で圧縮試験を行う。

応力解放後の供試体の初期サクションおよびせん断過程における間隙水圧は、微細孔を有するセラミックディスクを用いて供試体下端で測定した。また、実験に用いたセラミックディスクは直径 65 mm, 厚さ 4 mm であって、空気圧の限界値 AEV は 220 kPa である。

なお、実験 A および実験 B で使用したすべての供試体は、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、圧密の終了は体積変化量-時間曲線に対して 3 t 法を適用することによって判定した。

4. 実験結果および考察

4. 1 初期等方圧密条件下で応力履歴を受けた泥炭の強度特性

表-2 は一軸、UU 三軸試験における非排水強度 cu と有効圧密圧力 (初期等方圧密時) σ'_c の比 cu/σ'_c および IS 試験を基準とした強度比を示したものである。ここで、過圧密履歴を受けた泥炭の原位置の強度⁴⁾を IS1~IS4、応力解放後の UCR および UUR 試験の過圧密比の違いにより、UCR1~4, UUR1~4

表-2 非排水強度及び強度比 (初期等方圧密)

試 験	cu/σ'_c	強度比
IS	0.554	1.00
UC	0.405	0.73
UU	0.416	0.75
IS1 (OCR = 3)	0.408	1.00
UCR1 (" 3)	0.333	0.81
UUR1 (" 3)	0.313	0.76
IS2 (OCR = 6)	0.355	1.00
UCR2 (" 6)	0.291	0.81
UUR2 (" 6)	0.269	0.75
IS3 (OCR = 9)	0.317	1.00
UCR3 (" 9)	0.244	0.76
UUR3 (" 9)	0.237	0.74
IS4 (OCR = 15)	0.285	1.00
UCR4 (" 15)	0.206	0.72
UUR4 (" 15)	0.205	0.71

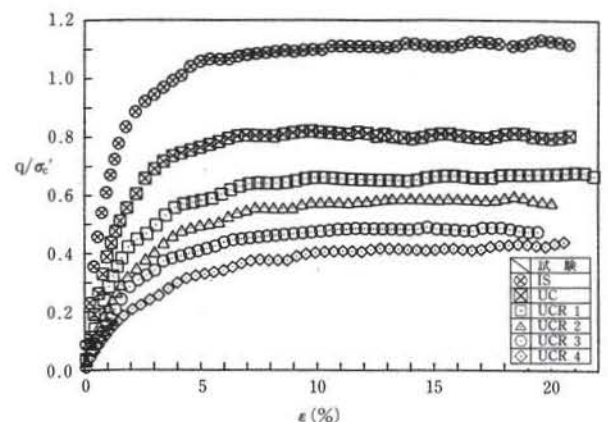


図-3 軸差応力~ひずみ関係

とそれぞれ呼称する。図-3はIS, UC および UCR 試験における軸差応力 $q(=(\sigma_1-\sigma_3))$ と軸ひずみ ϵ の関係を示したものであって、 q を初期圧密時の有効圧力 σ'_{ic} で正規化している。表-2 及び図-3 から分かるように、初期等方圧密時の IS 試験と UC 試験との強度差は30%程度となることが認められる。また、かなり過圧密 (OCR = 15) された UCR4 試験では、同条件下での原位置強度 (IS 4 試験) と比べて30%程度減少する。このような傾向は、他の過圧密比をパラメータとした UCR 試験と同条件下での IS 試験と同様であることが認められる。また、UUR 試験と同条件下での IS 試験の関係についても上記と同様である。このように、応力履歴をパラメータとした原位置強度と一軸及び UU 三軸強度との差は、同じ応力履歴を受けた状態であれば 20~30%程度となることが分かる。したがって、正規圧密および過圧密状態における原位置強度とそれぞれ同じ条件下で応力解放した後の一軸 & UU 三軸試験から得られる強度との差は、大きな相違がないことが認められる。

つぎに一軸圧縮試験 (UC 試験) を基準としたときの過圧密履歴の影響について検討してみる。UC 試験と過圧密比をパラメータとした UCR 試験の強度差は、過圧密比 3 程度では約 20% であるが、かなり過圧密 (OCR = 15) された状態になると 50% にも達している。

4. 2 初期異方圧密条件下で応力履歴を受けた泥炭の強度特性

表-3 は一軸試験における非排水強度 c_u と有効鉛直圧密圧力 (初期異方圧密時) σ'_{ic} の比 c_u/σ'_{ic} および IS 試験を基準とした強度比を示したものである。ここで、UCR 試験の過圧密比の違いにより、UCR 5~8 と呼称する。また、図-4 は前図と同様、初期異方圧密時の IS, UC および UCR 試験における軸差応力 $q(=(\sigma_1-\sigma_3))$ と軸ひずみ ϵ の関係を示したものであって、 q を有効鉛直圧密圧力 σ'_{ic} で正規化している。図から分かるように、IS 試験と UC 試験との強度差は 35% 程度となり、前述した初期等方圧密時と同様の低下が認められる。

つぎに一軸圧縮試験 (UC 試験) を基準としたときの過圧密履歴の影響を調べてみると、UCR 試験の強度低下は過圧密比 3 程度では約 20% であるが、過圧密比 15 になると 50% も低下する。このような傾向は、初期等方圧密条件下でのそれらの関係と基本的には同様であることが認められる。

表-3 非排水強度及び強度比 (初期異方圧密)

試験	c_u/σ'_{ic}	強度比
IS	0.550	1.00
UC	0.359	0.65
UCR5 (OCR = 3)	0.301	/
UCR6 (" 6)	0.264	
UCR7 (" 9)	0.219	
UCR8 (" 15)	0.167	

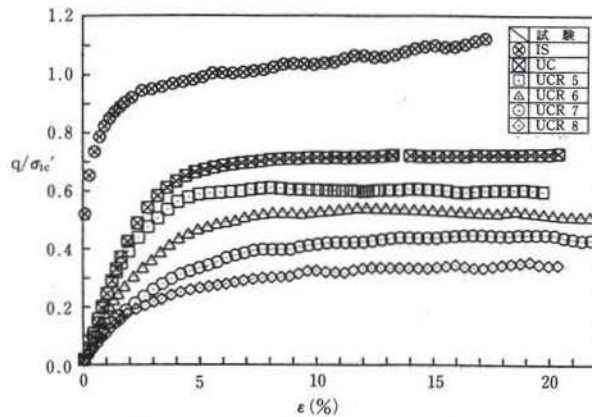


図-4 軸差応力~ひずみ関係

4. 3 サクシジョン測定を伴う一軸圧縮試験による強度特性

図-5, 6 は、それぞれ初期圧密条件によって異なった初期サクシジョンを有する供試体について、ひずみ速度の相違による圧縮応力 q , 発生間隙水圧 Δu ~ひずみ関係を示したものである ($\sigma'_c = \sigma'_{mc} = 100$ kPa)。ここで、 $q, \Delta u$ は応力解放前の有効鉛直圧密圧力 σ'_{ic} で正規化している。図から分かるように、これらの挙動はひずみ速度をパラメータとした三軸圧縮試験結果³⁾と同様な傾向を示すものであり、セラミックディスクを用いた泥炭の間隙水圧の測定に関しては、この 2 種類の軸ひずみ速度で実施しても十分有効応力で解析できるものと考えられる。また、ここでは圧縮強度の明確なピークが軸ひずみ 20% を越えても生じないため、15% に達したときのせん断抵抗をもってせん断強さとした。図-7 は、初期サクシジョンおよびせん断時のひずみ速度の異なる試料についての有効応力経路を示したものである。また、図中の破壊包絡線は、同じ試料について等方圧密非排水三軸圧縮試験⁴⁾から求めたものである。供試体によって若干ばらつきがあるものの、初期サクシジョンおよびひずみ速度によって有効応力経路が異なるが、いずれも有効応力に基づいた破壊線上で破壊に達している。このことから、泥炭についてもポーラスセラミックスを用いた一軸圧縮試験を実施するこ

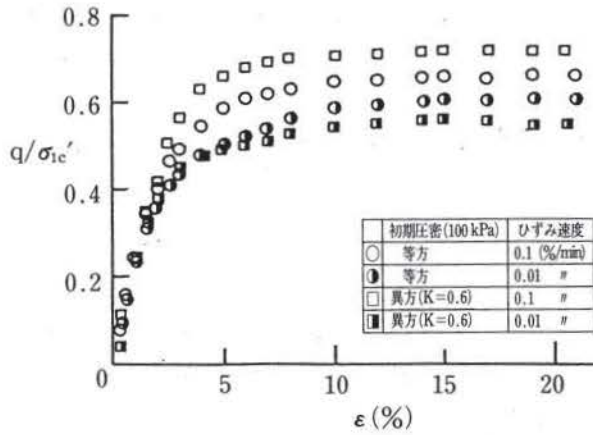


図-5 軸差応力～ひずみ関係

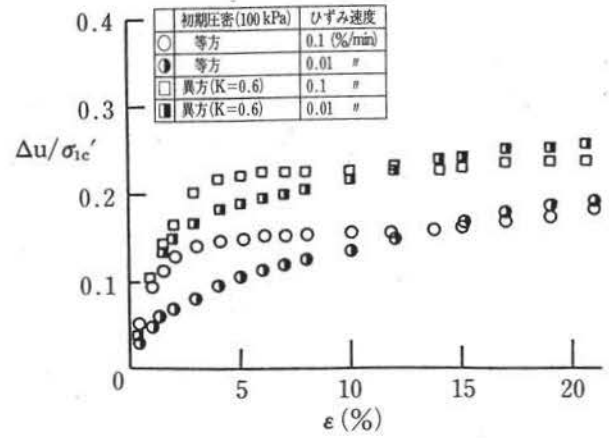


図-6 間隙水圧～ひずみ関係

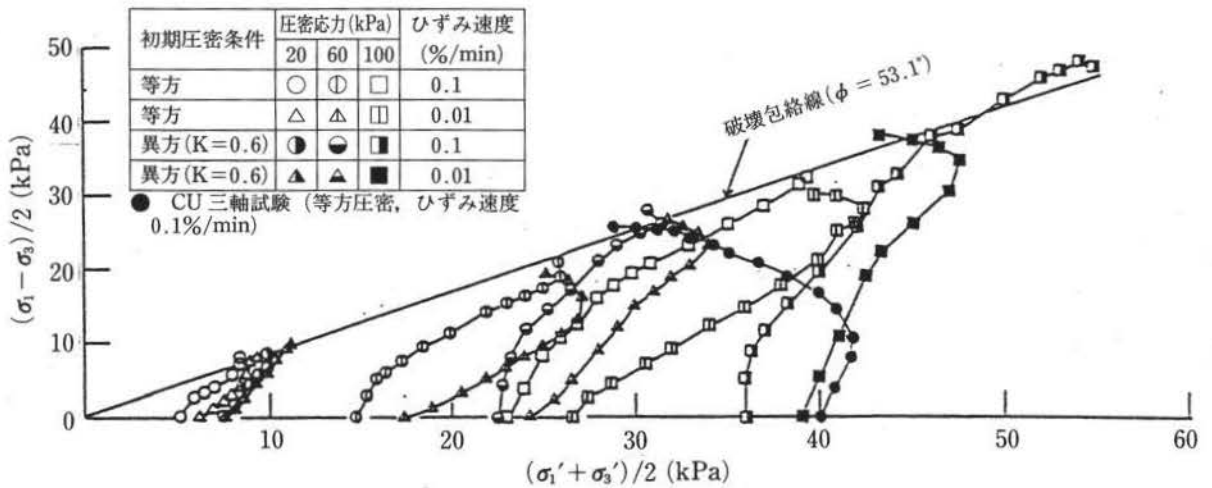


図-7 有効応力経路

とによって、有効応力による整理が可能となる。また、これにより初期有効応力の測定ができ、かつせん断中の間隙水圧が測定ができることによって、有効応力の破壊包絡線が推定できる。

図-8は、初期圧密圧力60 kPaの供試体について、残留有効圧力(サクション) σ'_r で正規化した非排水強度 c_u/σ'_r と OCR (σ'_c/σ'_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ョンを測定することによって原位置の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⁶⁾らによっても得られている。図中の実線は、三田地⁷⁾らが提案した過圧密粘土の強度推定式を泥炭にも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。

$$(c_u/\sigma'_r)_{oc} = (c_u/\sigma'_r)_{nc} \cdot OCR^\Lambda \dots\dots(1)$$

ここに、 $\Lambda = 1 - C_s/C_c$ 、また C_c 、 C_s はそれぞれ圧縮指数および膨張指数である。

図中で示される実線の計算値で前提となる圧縮指

数および膨張指数の値は、標準圧密試験から得られたものを適用すべきであると考えられるが、実際問題としてそれらの指数を用いて式(1)で強度推定値を計算した結果、実測値と計算値との対応性が悪い。このため三軸圧縮試験機内で圧縮指数および膨張指数を求めて、式(1)を用いた計算値が図-8で示される実線であり、実測値とほぼ対応している。

以上のことから、圧縮指数と膨張指数が与えられ、一軸圧縮試験前に供試体のサクション(残留有効応力)の測定を行うことによって、乱れを受けない泥炭の原位置強度を推定できることになる。

図-9は粘性土について三田地⁶⁾らが提示した原位置強度の簡易推定法を泥炭にも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応力) との関係を示したものである。図中の●は原位置強度に相当するCU三軸試験(実験AのIS試験, 初期等方圧密: 100 kPa)の実測

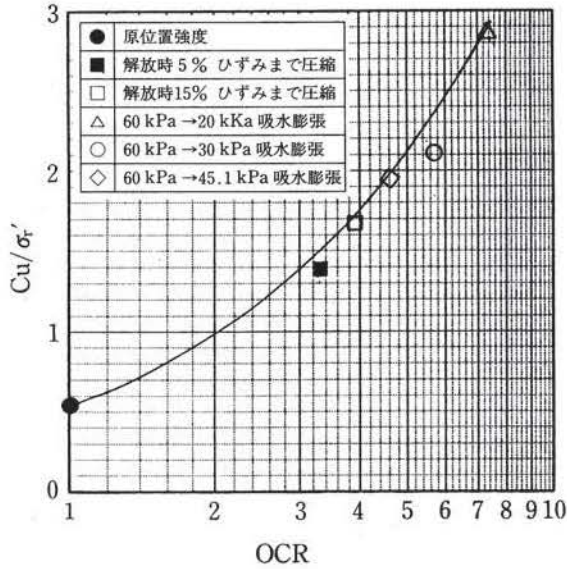


図-8 非排水強度～過圧密比

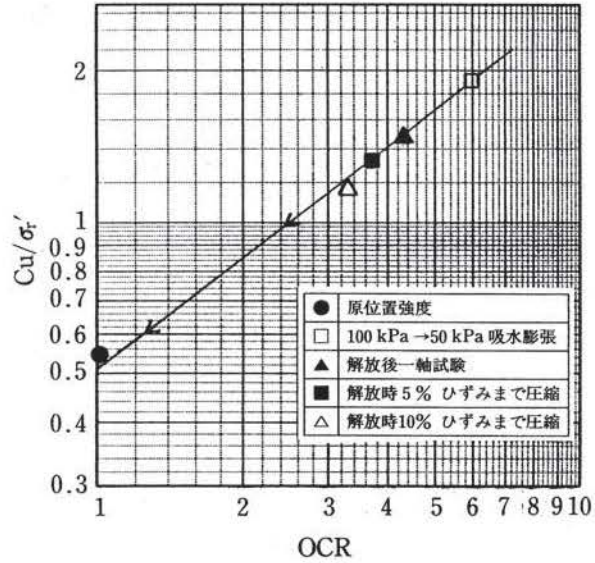


図-9 非排水強度～過圧密比

値である。また、その他の記号については、実験 B の 1), 2) および 3) の方法 (いずれも初期等方圧密: 100 kPa) で得られた実測値をプロットしている。一軸圧縮試験の実測値 4 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 cu/σ'_v 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、有効土被り圧が既知で、一軸圧縮試験前にサクシジョンを測定すれば、原位置強度が推定できることになる。

4. まとめ

過圧密履歴を受けた泥炭の一軸及び UU 三軸強度の比較、ならびにサクシジョンを測定した一軸圧縮試験における有効応力原理の適用性について検討した結果、以下のような結論を得ている。

- 1) 一軸及び UU 三軸強度は、同条件下における IS 試験の 20~30% 程度まで低下する。
- 2) 一軸圧縮試験を基準とした過圧密履歴による一軸強度は、過圧密比 3 程度では 20% の減少となるが、かなり過圧密 (OCR = 15) された状態になると 50% も低下する。
- 3) セラミックディスクを使用し、間隙水圧を測定した一軸圧縮試験における挙動は有効応力原理で説明できる。
- 4) 圧縮指数と膨張指数が与えられ、一軸圧縮試験前に供試体のサクシジョン (残留有効応力) の測定を行うことによって、乱れを受けない泥炭の原位置強度を推定できる。
- 5) 原位置強度の簡便推定法として、一軸圧縮試

験前にセラミックディスクを用いて乱れの程度の異なる供試体のサクシジョンを測定した一軸圧縮試験結果 (2 点の実測値) から原位置強度を推定できる。

参考文献

- 1) 三田地・対馬, 泥炭の一軸及び三軸強度に及ぼすサンプリング時の応力解放の影響, 高有機質土に関するシンポジウム, pp. 47~52, 1989.
- 2) 対馬・三田地, 異方圧密泥炭の一軸及び三軸強度に及ぼすサンプリング時の応力解放の影響, 土木学会第 45 回年次学術講演会, pp. 303~304, 1990.
- 3) 対馬・岩崎・宮川, 有機質土の強度試験結果に関する二, 三の考察, 土と基礎, pp. 13~18, 1977.
- 4) 対馬・三田地, 泥炭のコーン貫入抵抗と非排水強度との相関, 土質工学会論文報告集, pp. 201~211, 1991.
- 5) 不飽和土の工学的性質に関する研究委員会 (土質工学会), 不飽和土の測定に関する信州セミナーテキスト, 1989.
- 6) 三田地・工藤・橋詰・福田, サクシジョンの測定を伴う一軸圧縮試験による原位置強度推定法, 土質工学会北海道支部技術報告集, 第 33 号, pp. 131~136, 1993.
- 7) Mitachi and Kitago, Change in Undrained Shear Strength Characteristics of Saturated Remolded Clay due to Swelling, Soil and Foundations, Vol. 16, No. 1, pp. 45~58, 1976.