

# 高有機質土の残留有効応力と一軸圧縮強度 に及ぼす異方圧密の影響

対馬 雅己<sup>1</sup>・三田地 利之<sup>2</sup>・荻野 俊寛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>フェロー 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)

<sup>3</sup>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)

異なる主応力比のもとで異方圧密された高有機質土のサンプリングから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三軸圧縮試験を実施した。圧密時の主応力比が異なる高有機質土について応力解放後、サクシジョンの測定から残留有効応力を知り、圧密時の応力異方性が残留有効応力や一軸強度に与える影響を調べている。さらに、異なる主応力比で圧密された高有機質土の強度の推定方法についても検討している。圧密時の主応力比をパラメータとした簡便推定法の適用例から、有効土被り圧が既知で乱れの程度が異なる数個の供試体についてサクシジョンを測定して残留有効応力が求まれば、一軸圧縮強度に補正を加えることによっていずれもかなりの精度で原地盤の強度が推定できる可能性を示した。

**Key Words :** anisotropy, principal stress ratio, suction, unconfined compression test, highly organic soil

## 1. まえがき

高有機質土はその生成過程と構成植物の種類から考えられるようになり不均質であり、深さ方向と堆積面方向では異なった組成を有し、この構造異方性が強度・変形特性に反映されると考えられる。

このような構造異方性を有する高有機質土のせん断抵抗は、せん断変形に伴って植物繊維相互間の摩擦抵抗のほか、繊維自身の引張りあるいは繊維の切断による抵抗などが総合的に発揮されるものと考えられる。したがって、高有機質土のせん断挙動の微視的なメカニズムは非常に複雑であり、今後これらの解明が待たれるところである。

一方、たとえば高有機質土から構成される軟弱地盤に盛土を行う際など、地盤の安定性を支配するせん断強度は盛土荷重前荷前の地盤の異方性の度合いの影響を受けると考えられる。

高有機質土の正規圧密および過圧密状態の下での残留有効応力と一軸圧縮強度の関係を調べた試験の結果から、筆者らは多くの研究成果<sup>1)~5)</sup>を得ているが、いずれも圧密時の応力異方性の影響を考慮したものではなかった。また、三田地ら<sup>6)~10)</sup>は粘性土を対象にしてサンプリングから室内試験に至る一連の作業過程をシミュレートし、サクシジョンの測定を伴う一軸圧縮試験によって応力解放や乱れの影響を補正することにより原位置の強度を

推定できることを明らかにした。しかしながら、高有機質土および粘性土のいずれについても、供試体の残留有効応力に及ぼす圧密時の応力異方性の度合いの影響に着目した研究例は見当たらないのが現状である。一方、原位置の強度を的確に推定するためには異方圧密の影響を知る必要がある。

本研究では、異なる主応力比のもとで異方圧密された高有機質土のサンプリングから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三軸圧縮試験を実施し、圧密時の主応力比が異なる高有機質土について応力解放後、サクシジョンの測定から残留有効応力を知り、圧密時の応力異方性が残留有効応力や一軸強度に与える影響を調べる。さらに、供試体の残留有効応力と一軸圧縮強度から、異方応力状態にある原地盤の強度を推定する方法についても検討を加える。

## 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

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 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$
560~680	60~70	80~90	1.65~1.75

泥炭(Pt)であって、採取地点における有効土被り圧は約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直径70mm、高さ160mmの供試体とした。

### 3. 実験方法

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ため、図-1に示すような応力条件のもとで実験を行った。

各試験の概要は以下になる。また、実験条件の詳細を表-2に示す。なお、疑似過圧密比( $QCR = \sigma_{1c} / \sigma_r$ 、 $\sigma_{1c}$ は有効鉛直応力、 $\sigma_r$ は残留有効応力)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。

#### 1) IS試験(圧密非排水三軸圧縮試験)

主応力比  $K(\sigma_{3c} / \sigma_{1c})$  ( $\sigma_{3c}$ は有効水平応力) = 1.0, 0.8, 0.6, 0.4 でそれぞれ異方圧密終了後の供試体の非排水三軸圧縮試験。研究例は限られているが、既往の研究<sup>12)</sup>によれば正規圧密状態の高有機質土の $K_0$ 値は0.3~0.4の値をとるとされている。また、一般に高有機質土は地表面付近に分布することから、地下水位の変動の影響を受けやすく浅い深度では過圧密状態にあることが多い。本研究ではこれらのことを考慮して応力比 $K$ を上記のような範囲に設定して実験を行った。この実験では、三軸セル内で異方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、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(サクシヨンの測定を伴う一軸圧縮試験)

IS試験と同じ主応力比のもとで異方圧密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ヨンを測定後、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ヨ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) PS試験: ISおよびUC試験と同様な主応力比でそれぞれ異方圧密した後、圧密時の背圧と等しくなる値( $\sigma_0 = u_b$ )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)に行う非排水圧縮試験。図-1では供試体に $\sigma_0$ が作用しているの、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。図-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。

なお、II)の実験において応力解放後のサクシヨンの測定は、セラミックディスク(AEV=210kPa)を用いて供試体下端で行った。サクシヨンの測定方法については既報を参照されたい<sup>1)</sup>。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3t法を適用することによって判定した。三軸セルへの供試体セットに当たっては端面摩擦軽

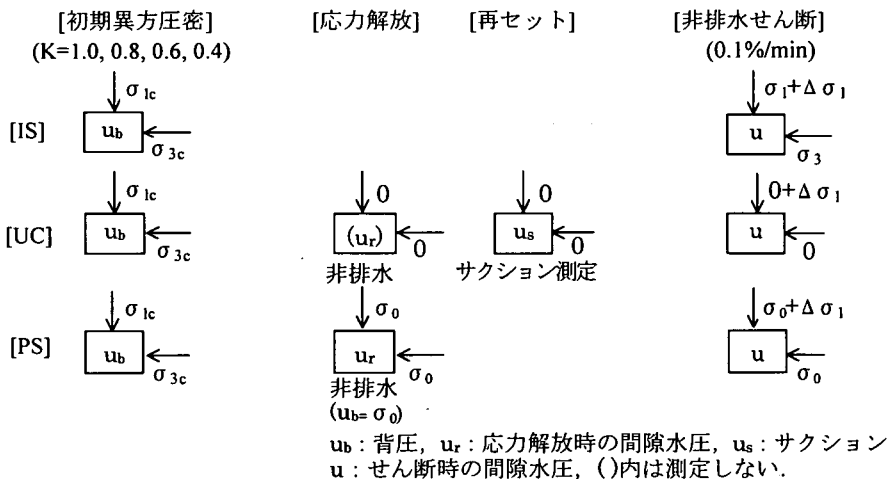


図-1 圧密時の主応力比をパラメータとしたシミュレーション実験

表-2 実験条件および結果の一覧

試験名	No.	異方圧密(kPa)		$\sigma_r'$ (kPa)	QCR ( $\sigma_{lc}'/\sigma_r'$ )	$S_u/\sigma_r'$	$S_u/\sigma_{lc}'$	主応力比K
		$\sigma_{mc}'$	$\sigma_{lc}'$					
IS 試験	IS-1	40	39.9	/	1.0	/	0.506	1.0
	IS-2	60	59.8		1.0		0.502	
	IS-3	100	99.9		1.0		0.513	
	IS-4	40	46.2	/	1.0	/	0.506	0.8
	IS-5	60	69.2		1.0		0.500	
	IS-6	100	115.4		1.0		0.503	
	IS-7	40	54.3	/	1.0	/	0.538	0.6
	IS-8	60	81.9		1.0		0.545	
	IS-9	100	135.9		1.0		0.500	
	IS-10	40	66.7	/	1.0	/	0.555	0.4
	IS-11	60	100.0		1.0		0.558	
	IS-12	100	166.7		1.0		0.543	
UC 試験	UC-1	40	40.0	14.4	2.8	1.021	0.368	1.0
	UC-2	60	60.0	20.1	3.0	1.109	0.372	
	UC-3	100	100.0	31.3	3.2	1.147	0.359	
	UC-4	40	46.2	15.0	3.1	1.053	0.342	0.8
	UC-5	60	69.2	20.8	3.3	1.130	0.340	
	UC-6	100	115.4	32.1	3.6	1.240	0.345	
	UC-7	40	54.5	16.0	3.4	1.119	0.328	0.6
	UC-8	60	82.0	22.5	3.6	1.160	0.318	
	UC-9	100	135.8	34.4	3.9	1.247	0.316	
	UC-10	40	66.7	17.0	3.9	1.176	0.300	0.4
	UC-11	60	100.0	23.6	4.2	1.267	0.299	
	UC-12	100	166.5	41.3	4.0	1.242	0.308	
PS 試験	PS-1	60	59.8	50.5	1.2	0.564	0.477	1.0
	PS-2	100	99.8	76.5	1.3	0.629	0.482	
	PS-3	60	69.0	49.4	1.4	0.628	0.449	0.8
	PS-4	100	115.2	80.9	1.4	0.644	0.452	
	PS-5	60	81.8	53.8	1.5	0.704	0.463	0.6
	PS-6	100	135.8	82.3	1.7	0.725	0.440	
	PS-7	60	99.8	59.2	1.7	0.774	0.459	0.4
	PS-8	100	166.5	87.9	1.9	0.794	0.419	

$\sigma_{mc}'$ : 有効平均主応力(kPa)  $\sigma_{lc}'$ : 有効鉛直圧密応力(kPa)  $\sigma_r'$ : 残留有効応力(kPa)

QCR: 疑似過圧密比  $S_u$ : 非排水強度(kPa)

減のため、テフロンシートにシリコングリースを塗布した。試料の分解が進んでいるため、異方圧密時における供試体の周面凹凸は目立つものではなく、圧密後の供試体の高さとの比は2前後であった。また、応力~ひずみ曲線において明確なピークが生じないときは、JGS 0523 にならい軸ひずみ 15% までの主応力差  $q$  の最大値の 1/2 を非排水強度  $S_u$  で定義し、初期圧密時の有効鉛直圧密圧力  $\sigma_{lc}'$  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  $S_u/\sigma_{lc}'$  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。

#### 4. 実験結果及び考察

図-2 は、圧密時の主応力比は異なるが同一の有効平均主応力 ( $\sigma_{mc}'=60\text{kPa}$ ) の下で異方圧密終了後、それぞれ非排水状態で応力解放した後の UC 試験の有効応力経路を

示したものである。図から分かるように、得られた強度は圧密時の応力の異方性による影響を受け、応力の異方性の増大に伴って一軸圧縮強度が減少する傾向を示す。また、せん断開始前の残留有効応力の値 (横軸の出発点) は、主応力比  $K=1.0$  の供試体と比べ、 $K=0.8$  では 10% 程度の減少に対して、 $K=0.4$  では 30% 程度も減少していることが分かる。このように、応力解放に伴う主応力差の変化量が大きいほど、供試体に大きな乱れを与え、これが強度減少につながっているものといえる。

図-3 は、同一の有効平均主応力 ( $\sigma_{mc}'=100\text{kPa}$ ) で異方圧密終了後、圧密時の背圧と等しくなる値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の PS 試験の有効応力経路を示したものである。この試験では純粋に応力解放の影響のみをみることを意図したものである。UC 試験と同様、圧密時の応力の異方性による影響を受け、応力の異方性の増大に伴って強度が減少する。

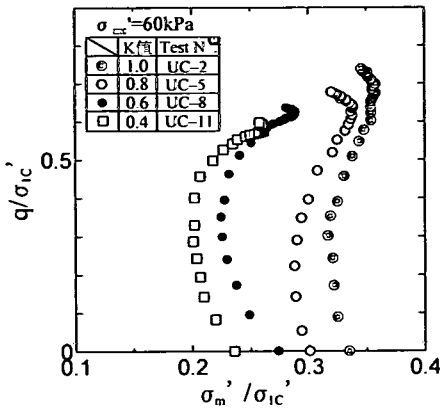


図-2 非排水せん断時の有効応力経路(UC試験)

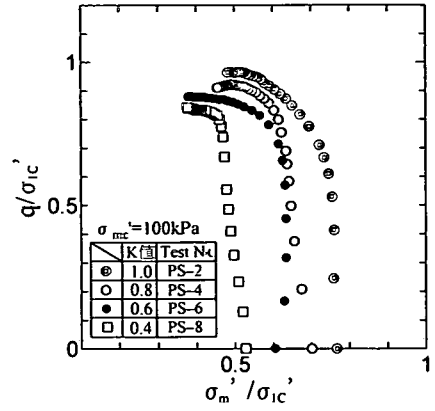


図-3 非排水せん断時の有効応力経路(PS試験)

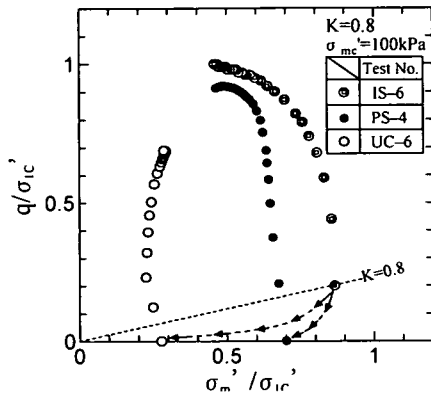


図-4 非排水せん断時の有効応力経路(K=0.8)

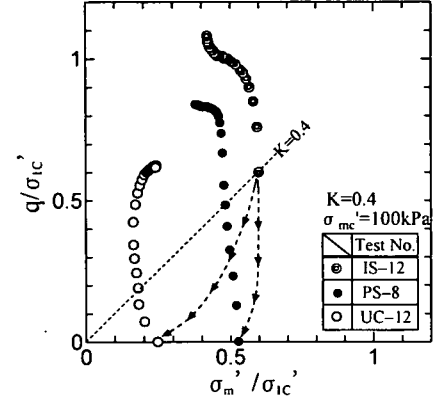


図-5 非排水せん断時の有効応力経路(K=0.4)

このような傾向は、純粋に応力解放の影響のみの場合でも図にみられるように残留有効応力の値(横軸の出発点)に違いを生じ、これが強度の差となって表れることを示している。

図-4, 5はそれぞれ圧密時の主応力比  $K=0.8, 0.4$  について、試験条件が異なる IS, PS および UC 試験 ( $\sigma_{mc}'=100\text{kPa}$ ) のせん断時の有効応力経路を示したものである。IS 試験の強度を基準とした各試験の強度比を主応力比毎に検討してみる。主応力比  $K=0.8$  について、IS 試験と PS 試験との強度差は 10% 程度である。これは PS 試験において、応力解放後も有効平均主応力  $\sigma_m'$  が解放前の値の 80% 程度残留しており、一軸圧縮試験でも有効応力の保存状態が良ければ、乱れを受けない強度と大きな差を生じないことになる。また応力解放後、一軸圧縮試験を実施した UC 試験では IS 試験に比べて 30% 程度も強度が減少している。一方、主応力比  $K=0.4$  では IS 試験と PS 試験との強度差は、 $K=0.8$  の条件と異なり 20% 程度も生じることが認められる。さらに UC 試験と IS 試験の比較では 40% も強度が低下している。このように圧密時の

応力の異方性が大きいほど応力解放後の強度に大きな影響を与えていることが分かる。これは圧密時の有効平均主応力が同じであれば主応力比  $K$  が小さいほど有効鉛直応力は大きくなり、結果として応力の解放に伴う主応力差の変化量が大きく、せん断変形量も大きい結果、残留有効応力が低下するためと考えられる。

図-6は圧密時の主応力比をパラメータとして、圧密後応力解放した供試体の残留有効応力  $\sigma_r'$ 、せん断過程における破壊時の有効応力  $\sigma_f'$  と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係を示したものである。図から分かるように、圧密時の応力の異方性に関わらず、応力解放後の供試体の残留有効応力と一軸圧縮強度との間には線形関係が認められる。すなわち、一軸圧縮強度がせん断試験開始前の残留有効応力に支配されることが分かる。一方、所定の圧密圧力で予圧密した飽和供試体に種々の乱れを与えた場合の初期および破壊時のサクシオンと一軸圧縮強度の関係を検討した研究結果<sup>11)</sup>から、一軸圧縮強度は破壊時のサクシオンと密接な関係を示すことを報告している。このような研究結果の相違は、応力解放後、せん断時に供試体を飽和

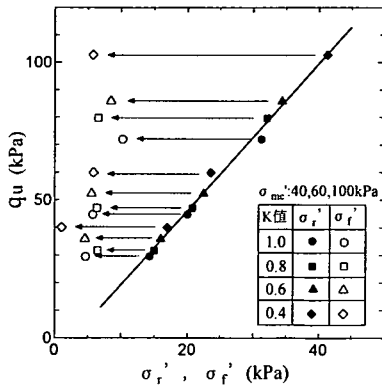


図6 一軸圧縮強度と残留有効応力および破壊時の有効応力の関係( $\sigma_r' : \sigma_{3f}'$ )

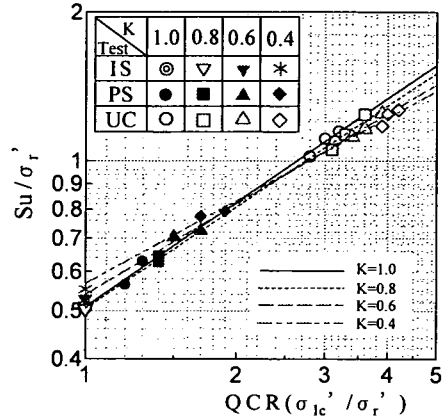


図7  $Su/\sigma_r' \sim QCR$ 関係

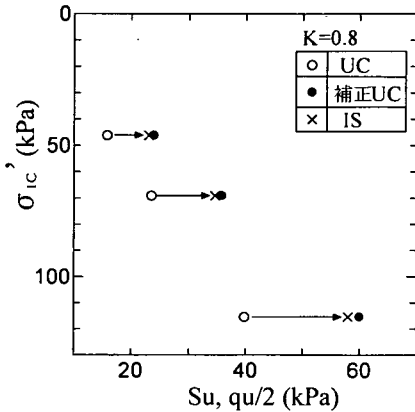


図8  $qu/2$  値の補正例( $K=0.8$ )

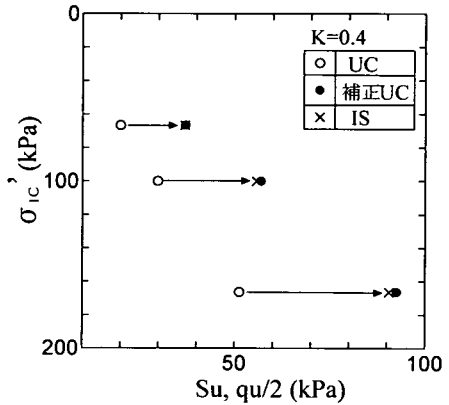


図9  $qu/2$  値の補正例( $K=0.4$ )

させて行った場合<sup>11)</sup>と、本研究のように応力解放後そのまま一軸圧縮試験に供した場合のせん断前の有効応力の違いによるものと考えられる。

次に、三田地ら<sup>9)</sup>が提案した粘性土の原位置強度の簡易推定法を高有機質土に適用してみる。図-7は圧密時の主応力比 $K=1.0, 0.8, 0.6, 0.4$ をパラメータとして、IS, PSおよびUC試験から得られる非排水強度 $Su$ を残留有効応力 $\sigma_r'$ で正規化した $Su/\sigma_r'$ と $QCR$ との関係を両対数グラフ上に示したものである。ここで、横軸の $QCR$ 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。

個々の主応力比毎にPS試験(●, ■, ▲, ◆印)およびUC試験(○, □, △, ◇印)の実測値に近似する直線を引き、この直線を延長して得られる縦軸の交点、すなわち $Su/\sigma_r'$ の推定値と正規圧密状態のIS試験( $\sigma_r' = \sigma_{lc}'$ )の実測値(◎, ▽, ▼, \*)印との差は、それぞれ1~3%程度の精度で一致する。

図-8, 9は図-7に示した推定法を適用して得られた $Su/\sigma_r'$ と $QCR$ 関係を基に、圧密時の主応力比 $K=0.8, 0.4$ に対する $qu/2$ 値の補正例を示したものである。 $qu/2$ 値の

補正方法は以下のものである。

図-7の主応力比 $K=0.8, 0.4$ について、それぞれ $Su/\sigma_r'$ と $QCR$ の関係から $QCR=1$ に対応する直線の切片、すなわちそれぞれの応力比で異方圧密された粘土の応力解放や、乱れの影響を受けない状態での圧密応力に対する強度の比 $Su/\sigma_{lc}'$ ( $\sigma_r' = \sigma_{lc}'$ )の値を求める。次に、 $Su/\sigma_{lc}'$ の値にそれぞれの実験値に対応する有効鉛直圧密応力 $\sigma_{lc}'$ を乗ずることによって $qu/2$ の補正値を得ることになる。図中の記号として○印は補正前の $qu/2$ であり、補正後の値が●印として示されている。なお、×印はIS試験から得られた $Su$ 値である。図から分かるように、圧密時の主応力比に関わらず、補正後の $qu/2$ 値はそれぞれ対応する乱れの影響を受けない状態(原位置)での強度、すなわちIS試験の $Su$ 値に1~8%程度の精度で近似することが認められる。

## 5. 結論

正規圧密状態の下で圧密時の主応力比を変えて行っ

たシミュレーション試験における応力解放時の有効応力や一軸圧縮強度に及ぼす主応力比の影響、さらに異方応力状態にある地盤の強度の推定方法について検討した結果、以下の結論が得られた。

1) 圧密時の応力の異方性の増大に伴って一軸圧縮強度が減少する傾向を示す。これは応力解放に伴う主応力差の変化量が大いほど、供試体に大きな乱れを与え、結果として応力解放時の残留応力が小さくなることに起因する。

2) PS 試験においても UC 試験の場合と同様の傾向がみられるが、UC 試験の場合に比べて残留有効応力の低下割合が小さい結果、IS に比べた強度の減少も少ない。

3) IS, PS 試験に及ぼす圧密時の主応力比の影響を検討すると、主応力比  $K=0.8$  では IS 試験と比べ PS 試験の強度低下は 10%程度であるが、 $K=0.4$  では 20%程度も低下することが認められた。これは主応力比が小さいほど有効鉛直圧密応力は大きくなり、応力解放に伴う主応力差の変化量が大いほど供試体に大きな乱れを与える結果、残留有効応力が低下することによるものと考えられる。

4) 応力解放後の高有機質土の残留有効応力と一軸圧縮強度との間には圧密時の主応力比に関わらず線形関係が認められ、一軸圧縮強度がせん断試験開始前の残留有効応力に支配されることが分かる。

5) 有効土被り圧が既知で乱れの程度が異なる数個の供試体についてサクションを測定して残留有効応力が求まれば、一軸圧縮強度に補正を加えることによって 1~8%程度の精度で異方圧密された高有機質土地盤の非排水強度が推定できる。

#### 参考文献

- 1) 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-32, pp.91-97, 1995.
- 2) 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

サクションと  $qu$  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.

- 3) Tsushima, M. and Mitachi, T.: Method for predicting in-situ undrained strength of highly organic soil based on the value of suction and unconfined compressive strength, *International Symposium on Problematic Soils*, Vol.1, pp.11-14, 1998.
- 4) Tsushima, M., Mitachi, T., Oikawa, H. and Ogino, T.: Evaluation of the Effect of Ageing on Unconfined Compressive Strength of Highly Organic Soil Based on the Residual Effective Stress, *Proceedings of the GEOTECH - YEAR 2000*, pp.107-114, 2000.
- 5) 荻野俊寛, 対馬雅己, 三田地利之: 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, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp.195-200, 2001.
- 6) 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.
- 7) 三田地利之, 工藤豊: 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, 土木学会論文集, No.541/III-35, pp.147-157, 1996.
- 8) 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  $qu$  値の補正, 土木学会論文集 No.589/III-42, pp.231-237, 1998.
- 9) Mitachi, T., Kudoh, Y., Fukuda, F. and Tsushima, M.: Correction of unconfined compressive strengths based on residual effective stress, *Proceedings of the International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, Vol.1, pp.77-82, 2000.
- 10) Mitachi, T., Kudoh, Y. and Tsushima, M.: Estimation of in-situ undrained strength of soft soil deposits by use of unconfined compression test with suction measurements, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.5, pp.61-71, 2001.
- 11) 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.
- 12) 三田地利之: 北海道に特徴的な地盤の工学的特性, 基礎工, Vol.30, No.9, pp.8-13, 2002.

(2002. 11. 5 受付)

## EFFECT OF ANISOTROPIC CONSOLIDATION ON RESIDUAL EFFECTIVE STRESS AND UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGHLY ORGANIC SOIL

Masaki TSUSHIMA, Toshiyuki MITACHI and Toshihiro OGINO

Simulation test for the process from sampling to unconfined and triaxial compression tests on undisturbed highly organic soil are performed with different anisotropic consolidation stress condition. The influence of anisotropy of consolidation stress on residual effective stress and unconfined compressive strengths are examined. From the test results, it is found that the unconfined compressive strengths decrease with the degree of consolidation stress anisotropy. It is also found that the unconfined compressive strengths of highly organic soil obtained from the tests of different anisotropic consolidation stress can be reasonably corrected by applying a simplified method which is formerly proposed by the authors.