



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	異方圧密粘土の強度に及ぼすサンプリング時の応力解放の影響：一軸及び三軸CU試験手順のシミュレーション
Author(s)	三田地, 利之; Mitachi, Toshiyuki; 工藤, 豊 他
Citation	北海道大学工学部研究報告, 149, 37-47
Issue Date	1990-02-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42217
Type	departmental bulletin paper
File Information	149_37-48.pdf



異方圧密粘土の強度に及ぼすサンプリング時の応力解放の影響
——一軸及び三軸 CU 試験手順のシミュレーション——

三田地 利之 工藤 豊
梅木 宏也 谷口 善則*
(平成元年9月30日受理)

**The Influence of Stress Release due to Sampling
on the Undrained Strength of Anisotropically Consolidated Clay**

Toshiyuki MITACHI, Yutaka KUDOH
Hiroya UMEKI and Yoshinori TANIGUCHI
(Received September 30, 1989)

Abstract

In general, the shear strength of cohesive soils is greatly influenced by the stress change to which they have been subjected before shear. Even if perfectly "undisturbed" samples could be obtained without mechanical disturbances owing to the improvement of sampling technique, they would inevitably be subjected to a change in stress condition on removal from the ground, and the strength obtained might be more or less affected by this change. The importance of the evaluation of this effect on the stress-strain-strength behaviour of clays have been discussed for a long time. But the studies extracting the influence of stress release on the unconfined compressive strength and the magnitude of back pressure on the consolidated undrained triaxial compressive strength are extremely limited.

The purpose of the present study is to investigate the influence of effective stress change on the strength properties of normally consolidated clays by the tests simulating the process from the in situ stress condition to the unconfined compression and triaxial compression test condition.

Six series of test were conducted on a saturated remolded clay to simulate the shear failure of soil mass in situ under undrained condition and to simulate routine unconfined compression test, together with unconsolidated undrained and consolidated undrained triaxial compression tests.

Experimental results indicate that

1) strength decrease due to the influence of stress release only is 6 to 7%, 2) strength decrease in the routine unconfined compression and unconsolidated undrained compression

土木工学科土質工学講座

*土木工学科土質工学講座 (現JR東日本)

test without the influence of swelling is about 20%, 3) routine consolidated undrained test overestimates the rate of strength increase due to consolidation up to 35%, and 4) undrained shear strength almost equals to that of in situ which can be obtained by approximating the effective stress condition in situ.

1. ま え が き

室内で行われるせん断試験においては、サンプリングから室内試験に至るまでの過程で土試料は応力解放や機械的乱れなどを受ける。機械的乱れなどは技術の向上により最小限にできるとしても、応力解放による有効応力の変化は避けることはできない。粘性土地盤の短期安定解析などに実務で日常的に用いられる強度は一軸圧縮強度で、一軸圧縮試験から真の原位置強度が推定できるならば、それが最も望ましいことである。粘性土の強度特性に及ぼす応力解放の影響に関する研究はかなり古くから行われており^{1)~15)}、一軸圧縮試験そのものについての意義に関する問題提起もなされているが¹⁶⁾、一軸圧縮強度に及ぼす応力解放の影響のみの要因に限定して検討した例は少ない^{13,14)}。また、三軸圧密非排水 (CU) 強度に及ぼす背圧の影響に関する研究も限られている^{17)~20)}。

本報告は原位置の応力状態から応力解放を経て一軸あるいは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実験を行い、粘性土の強度特性に及ぼす応力解放の影響及びその後の圧密段階における背圧の影響を調べたもので、過去に行った、供試体の初期圧密時の応力条件が等方の場合^{20),21)}の延長として、初期圧密を異方応力条件の下で行ったものである。

2. 試料及び実験装置

実験に用いた試料は、市販のカオリン粘土で、その物理的性質は $LL=85\%$ 、 $PI=45$ 、 $G_s=2.75$ である。供試体作製に先立ち、自立でき成形可能な含水比一定の飽和供試体を得るために、粉末状の試料に液性限界の2倍の含水比となるように蒸留水を加え、ミキサーで攪拌した後、真空中で大型の予圧密セル(直径 450 mm, 高さ 500 mm)に引き込み、100 kPa の鉛直応力で10日間一次元圧密した。このようにして予圧密した試料から鉛直方向に切り出し、直径 50 mm, 高さ 120 mm 及び直径 75 mm, 高さ 140 mm の円柱形に成形して供試体とした。供試体周囲にはスリットを設けたろ紙を貼り、端面摩擦軽減のためシリコングリースを塗布したテフロンシートを両端面に置いた。

実験装置は、通常の軸対称三軸圧縮試験機を用いた。なお、試験中の軸力は三軸セル内にセットしたロードセルにより、軸ひずみはひずみゲージ式変位計により、また供試体下端中央部における間隙水圧及びセル圧はひずみゲージ式圧力変換器によりそれぞれ測定した。

3. 実験方法

供試体の三軸セルへのセットに伴い、供試体とろ紙、ろ紙とメンブレン、及びペDESTALやキャップとメンブレンの間に余分な水が残るため、この水を排水する目的でセット終了後、セル圧 40 kPa を15分間(75 mm 供試体の場合 30分間) 載荷して仮排水を行った。

図-1に示すようにすべての供試体について最初に有効平均主応力 $\sigma'_m = 300$ kPa (一部 200, 350, 400 kPa で圧密したデータも含む: 表-1 参照) で異方圧密した後、以下のような実験を行った。なお、供試体の飽和度を高めるために 200 kPa または 300 kPa の背圧 (u_0) を圧密開始時か

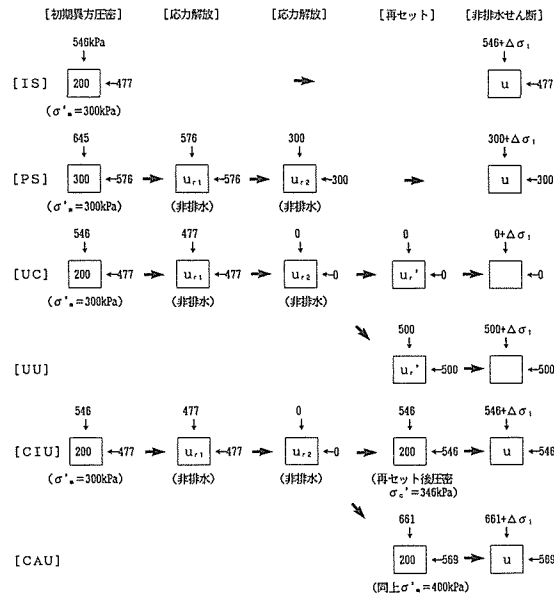


図1 実験条件の代表例

表1 実験条件

試験	No.	初期異方圧密				応力解放			再圧密			せん断直前		Cu/σ'ic	Af	強度比	
		σ'm1'	σ'i1'	σ'31'	ub	σ31	σ32	ur2	σ'm1'	σ'i2'	σ'32'	ub	σ32				σ'32'
IS	14	296.9	342.9	273.9	200								477	270.1	0.177	2.162	1.0
	31	294.9	340.9	271.9	200							477	268.1	0.179	2.187		
	16	398.1	459.4	367.4	200							569	363.3	0.176	2.071		
	32	396.0	457.3	365.3	200							569	362.6	0.177	2.076		
PS	17	197.8	228.5	182.5	200	385	200	43.9					200	155.6	0.166	0.737	0.93
	19	297.2	343.2	274.2	300	477	300	57.0					300	240.9	0.168	0.762	0.94
	20	350.4	404.4	323.4	300	623	300	21.0					300	279.0	0.165	0.744	0.93
UC	37	298.0	344.0	275.0	200	477	0	...					0	...	0.112		0.63
UU	38	296.6	342.6	273.6	200	477	0	...					500	...	0.119		0.67
UU	41	299.0	345.0	276.0	200	477	0	...					500	...	0.134		0.75
UU	43	297.2	343.2	274.2	200	477	0	...					500	...	0.144		0.81
UC	50	297.3	343.3	274.3	200	477	0	...					0	...	0.145		0.81
UU	51	299.0	345.0	276.0	200	477	0	...					500	...	0.146		0.82
CIU	44	295.7	341.7	272.7	200	477	0	...	312.2	312.2	312.2	0	346	313.8	0.241	0.791	1.35
	26	295.0	341.0	272.0	200	477	0	...	382.3	382.3	382.3	0	400	383.5	0.206	1.085	1.16
	21	294.2	340.2	271.2	200	477	0	...	476.0	476.0	476.0	0	500	476.6	0.191	1.275	1.07
	22	296.3	342.3	273.3	200	477	0	...	581.3	581.3	581.3	0	600	581.3	0.192	1.311	1.08
	29	296.5	342.5	273.5	200	477	0	...	343.7	343.7	343.7	200	546	343.6	0.208	1.145	1.17
	23	295.0	341.0	272.0	200	477	0	...	394.6	394.6	394.6	200	600	391.4	0.195	1.319	1.10
	24	295.1	341.1	272.1	200	477	0	...	494.5	494.5	494.5	200	700	491.1	0.187	1.349	1.05
	52	297.0	343.0	274.0	200	477	0	...	496.4	496.4	496.4	200	700	496.5	0.187	1.346	1.05
	30	298.9	344.9	275.9	200	477	0	...	397.6	397.6	397.6	300	700	396.5	0.203	1.323	1.14
	CAU	35	294.9	340.9	271.9	200	477	0	...	298.0	344.0	275.0	200	477	273.9	0.192	1.577
36		297.2	343.2	274.2	200	477	0	...	399.8	461.1	369.1	200	569	366.5	0.184	1.822	1.03

σ'ic': IS, PS, UU→σ'i1', CIU, CAU→σ'i2' 単位 (kPa)

No. 41, 43は初期圧密後上端5mm, 下端10mmカットして再セット

No. 50, 51~52はφ75mmで初期圧密してからφ50mmにトリミングして再セット

ら載荷し、圧密中の排水は半径方向に規制した。また、異方圧密時の主応力比は予備実験の結果から、ほぼ K_0 条件を満足する値として、 $\sigma'_3/\sigma'_1=0.80$ とし、5段階で載荷した。図-1に実験の各段階における応力の与え方の代表例を示し、表-1に全試験ケースの応力条件を示す。

1) IS 試験：圧密終了後すぐに非排水せん断。この試験から得られる強度は図-2の原位置強度に対応するもので、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強度を表すものと考えることができる。

2) PS 試験：圧密時の背圧と等しくなる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(約30分で平衡に達するが、実際には実験操作の都合上約1時間放置)、非排水せん断。図-1では、供試体に σ_3 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見れば、この試験から得られる強度は図-2における理想状態の一軸圧縮強度に対応するもので、圧密時の全応力と背圧との差、すなわち有効圧密応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、図-1のような応力の与え方をすれば、最初の鉛直応力 645 kPa を 300 kPa まで下げた時(この状態は実際のサンプリングの際に、地盤内にかかっていた土被り圧が解放された状態に対応する)、供試体内の間隙水圧が負にならないために一軸圧縮試験中の間隙水圧の測定が可能となる。

3) UC & UU 試験：非排水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。再セットに要した時間は約30分。応力解放に伴って吸気の可能性はある。この試験は通常業務で行われる一軸及びUU三軸圧縮試験(図-2)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時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ゼロの場合(UC)が一軸圧縮試験、セル圧 500 kPa の場合(UU)がUU三軸圧縮試験にそれぞれ対応する。

4) CIU 試験：3)と同様に圧密終了後セルを解体し、新たなろ紙及びメンブレンをつけて再セットして再び圧密した後非排水せん断。応力解放に伴って吸気の可能性はある。この試験は通常業務で行われるCU三軸圧縮試験(図-2)に対応するもので、応力解放後、再度セットし圧密する

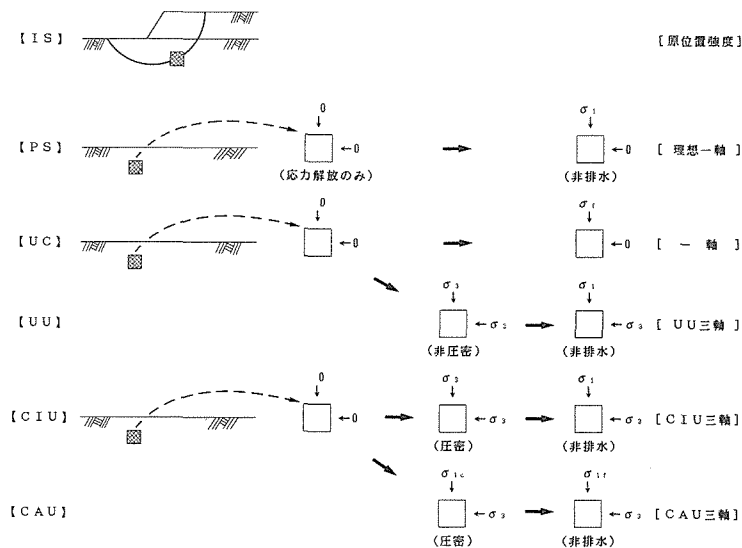


図2 原地盤から室内試験までの応力条件の変化

ことでサンプリングチューブからの抜き出しやトリミング作業以外の作業をシミュレートしている。このシリーズの実験では、CU 試験時の背圧の有無の影響をも調べることを目的とする。なお、再圧密に当たっては、供試体から（へ）の吸排水を生じさせないようにセル圧と背圧との差を約 200 kPa に維持しながら 5 段階で載荷した。

5) CAU 試験：4)と同様にして再圧密し、非排水せん断するが、再圧密時の応力条件を異方（表-1 参照）としたもの。この試験は通常業務で行われる CU 三軸圧縮試験の際に、原位置における圧密条件に近づける意味で異方圧密する場合を想定している。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、UC 及び UU 以外の試験においては供試体下端中央部で間隙水圧を測定した。非排水強度 c_u は主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) の最大値の 1/2 で定義し、CIU 及び CAU 試験の場合は再圧密時の有効鉛直圧密応力で、またそれ以外は全て最初の圧密の時の有効鉛直圧密応力で除すことによりこれを正規化して各試験結果の比較を行った。以下、正規化した強度を c_u/σ_{1c}' （表-1 参照）とする。

4. 実験結果

図-3 は IS, PS, UC, UU 試験の主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) を有効鉛直圧密応力 σ_{1c}' で除したものと軸

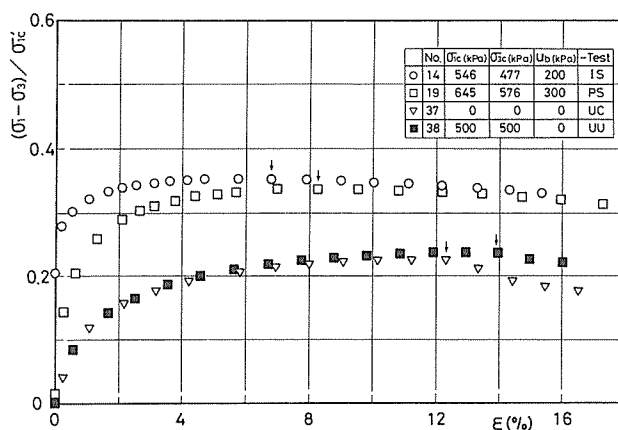


図3 一軸および UU 三軸条件下での主応力差一軸ひずみ関係

ひずみ ε の関係を示したものである。またそれぞれの試験の c_u/σ_{1c}' の平均値と IS 試験のそれとの比を表-1 に示した。以下それぞれの試験による強度比を試験名により、IS, PS 等のように表す。

図-3 から明らかなように IS と PS との強度差は 6~7% 程度と小さい。図-8 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 試験においては、応力解放後も有効応力が解放前の 80% 程度 ($\sigma_m'/\sigma_{1c}' \doteq 0.7 \rightarrow \sigma_m'/\sigma_{mc}' = \sigma_m'/\sigma_{1c}' \times \sigma_{1c}'/\sigma_{mc}' \doteq 0.8$) 保存されており、一軸圧縮試験でも有効応力の保存状態がよければ、原位置強度と大差ない値が得られることがわかる。

表-1 に示した強度比をみると、No. 37 と 38 の UC と UU ではせん断時のセル圧に関わらず IS のほぼ 65% 程度まで強度が低下することがわかる。No. 41, 43 は応力解放後再セットする時に供試体の上下端をそれぞれ 5 mm 及び 10 mm カットして再セットしたもので、応力解放時の排水ルートからの吸水の影響を除いたものである。また、No. 50, 51 は初期圧密時の供試体寸法を $\phi 75$ mm 高さ 140 mm にしておいて、再セット時に $\phi 50$ mm 高さ 100 mm に成形したもので、これらの強度比を比較（表-1）すると、応力解放時に吸水の影響がなければ強度低下は 20% 程度とみる

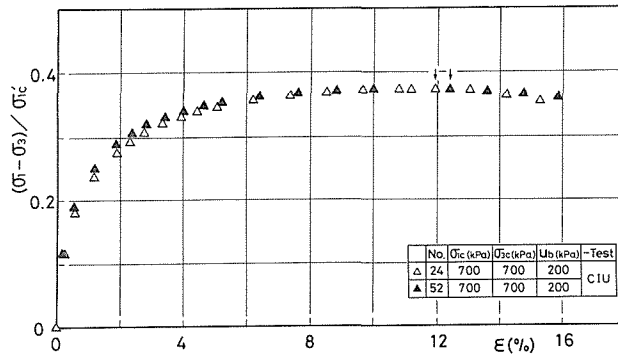


図4 CIU試験の主応力差一軸ひずみ関係（トリミングの影響の有無）

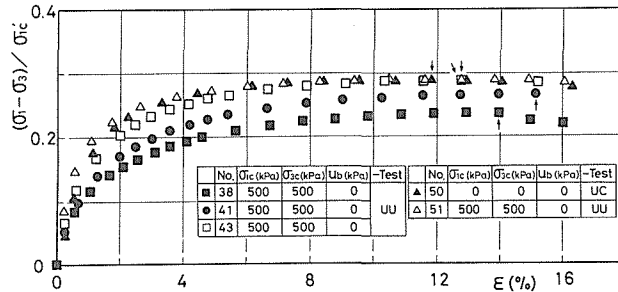


図5 UU試験の主応力差一軸ひずみ関係（トリミングの影響の有無）

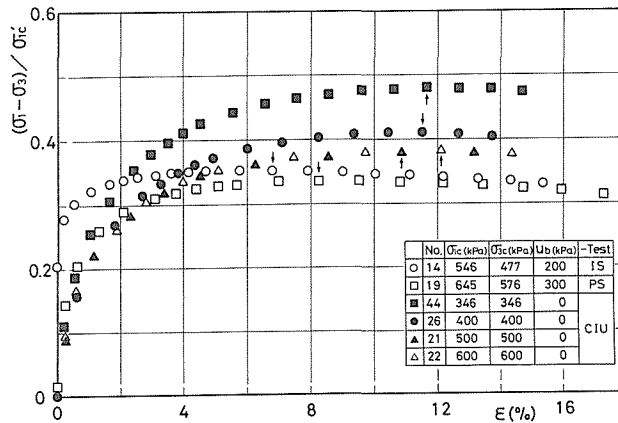


図6 CIU試験（背圧ゼロ）の主応力差一軸ひずみ関係

ことが出来る。

図-4はCIU試験でφ50mmで初期圧密して再セットしたもの(No.24)と、φ75mmで初期圧密した後φ50mmにトリミングしたもの(No.52)との主応力差(σ₁-σ₃)を、再圧密時の有効鉛直応力σ₁₂'で除したものと軸ひずみεの関係を示したもので、図から分かるように両者の強度は一致し、トリミングの影響はほとんどみられない。

図-5はUU試験で、φ50mmで初期圧密して再セットしたもの(No.38)と、再セット時に上下端をカットしたもの(No.41,43)及びφ75mmで初期圧密後φ50mmにトリミングしたもの(No.51)とUC試験(φ75mmで初期圧密後φ50mmにトリミング)の結果について、主応力

差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) を有効鉛直圧密応力 σ_{1c}' で除したものと軸ひずみ ϵ の関係を示したもので、この図から分かるように応力解放後そのまま再セットして圧縮試験を行った場合にはポーラスストーンなどからの吸水の影響が避けられないものと考えられ、これが強度低下の一因となっているものとみられるが、トリミングなどにより、この影響を除いた試験ではほぼ等しい強度を示している。

図-6 は IS, PS と CIU 試験 (再圧密時の背圧ゼロ) の主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) を有効鉛直圧密応力 σ_{1c}' (CIU の場合は再圧密時の有効鉛直応力 σ_{12}') で除したものと軸ひずみ ϵ の関係を示したもので、背圧ゼロの CIU の強度は IS よりも 7~35%程度大きい。これは応力解放によって不飽和化した供試体の間隙比が再圧密によって本来の $e - \log p'$ 関係に基づく間隙比以下に減少することによる強度増加と考えられる。また、この時の CIU の発生間隙水圧 Δu を再圧密時の有効鉛直応力 σ_{12}' で除したものと軸ひずみ ϵ の関係を示したのが図-7 で、背圧がゼロのため初期の Δu は小さい。また、図-6 から明らかなように再圧密時の有効圧密応力が高くなるのに従って強度は低下し、IS の c_u / σ_{1c}' に近づく傾向が見られるが、これは、再圧密時の有効圧密応力が高くなるのに従って飽和度が増すことにより Δu が大きくなり有効応力が小さくなることによるものと考えられ、図-8 の有効応力経路からも明らかである。

図-9 は IS と CIU 試験 (再圧密時の背圧ゼロと 200 kPa) の主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) を有効鉛直圧密

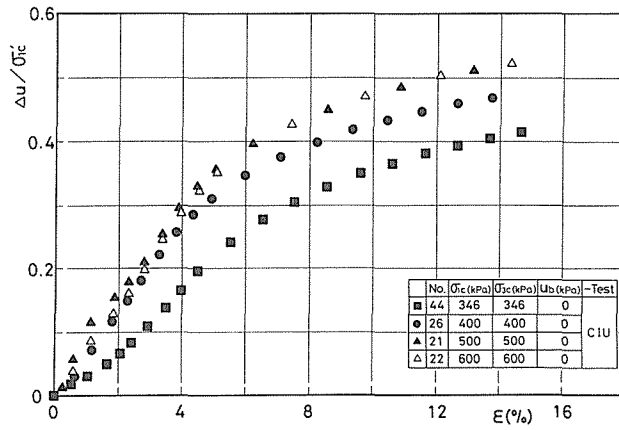


図7 CIU 試験 (背圧ゼロ) の間隙水圧一軸ひずみ関係

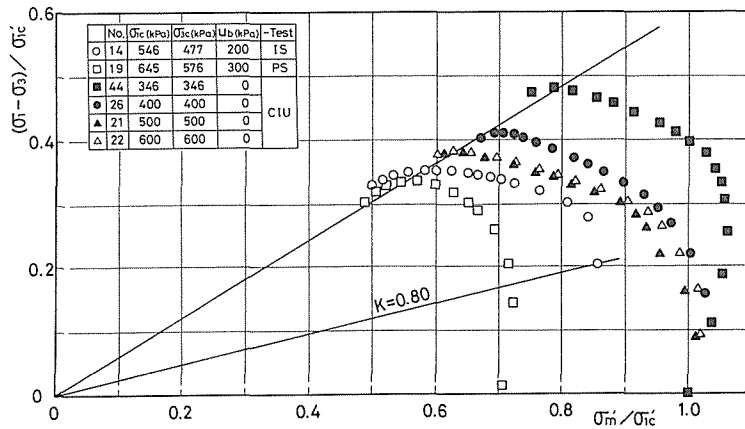


図8 CIU 試験 (背圧ゼロ) の有効応力経路

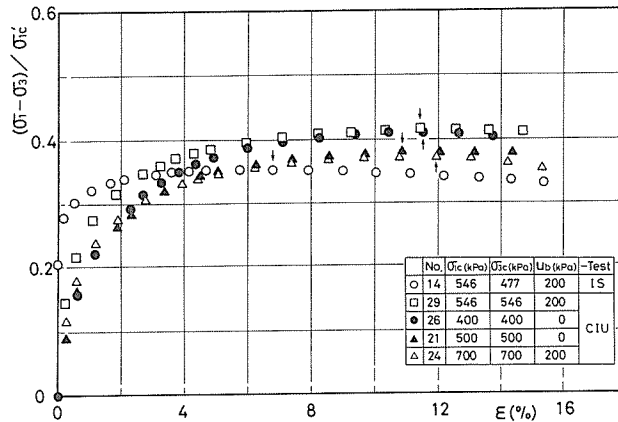


図9 CIU 試験の主応力差一軸ひずみ関係 (背圧の有無の影響)

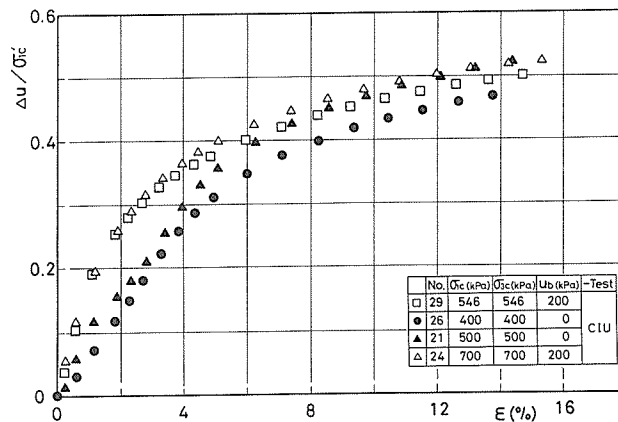


図10 CIU 試験の間隙水圧一軸ひずみ関係 (背圧の有無の影響)

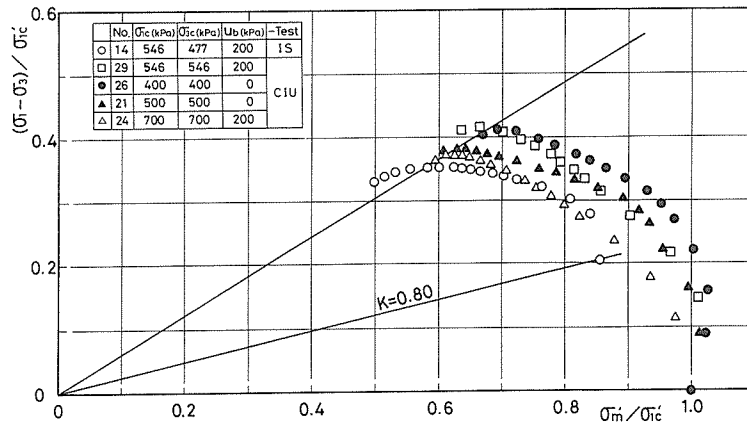


図11 CIU 試験の有効応力経路 (背圧の有無の影響)

応力 σ'_{ic} (CIU の場合は再圧密時の有効鉛直応力 σ'_{i2}) で除したものと軸ひずみ ϵ の関係を示したもので、再圧密時の有効圧密応力が同じならば強度もほぼ等しくなる。また、この時の CIU の非排水せん断時の発生間隙水圧 Δu を再圧密時の有効鉛直応力 σ'_{i2} で除したものと軸ひずみ ϵ の関係を示したのが図-10 で、背圧 200 kPa の場合の方がせん断初期の発生間隙水圧が大きい。

以上から背圧を加えた CIU 試験の場合、有効圧密応力が大きくなる程 IS の c_u/σ'_{ic} に近づくと
いう点で背圧ゼロの場合と同様の傾向を示しているが、表-1 の強度比をみると、No. 21, 23 と
No. 22, 24 の比較から有効圧密応力が 100 kPa 程度低くても背圧ゼロの場合とほぼ等しい c_u/σ'_{ic}
を与えている。これは、再圧密時に背圧を加えることにより飽和度が増すためと考えられ、図-9、

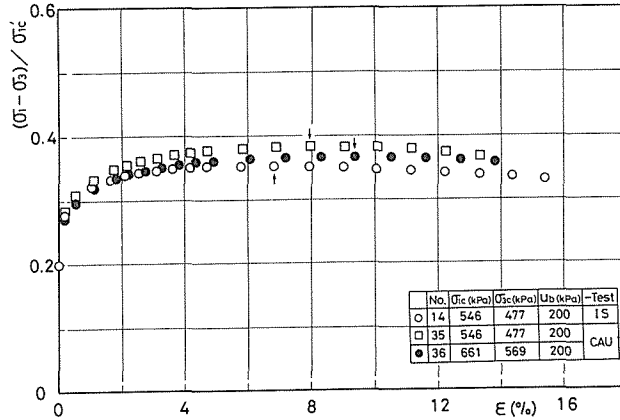


図 12 CAU 試験の主応力差-軸ひずみ関係

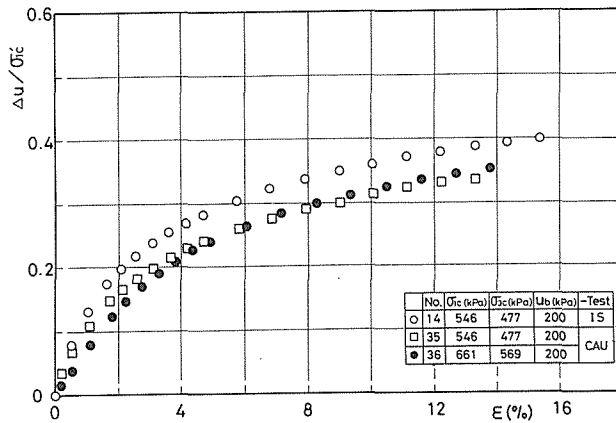


図 13 CAU 試験の間隙水圧-軸ひずみ関係

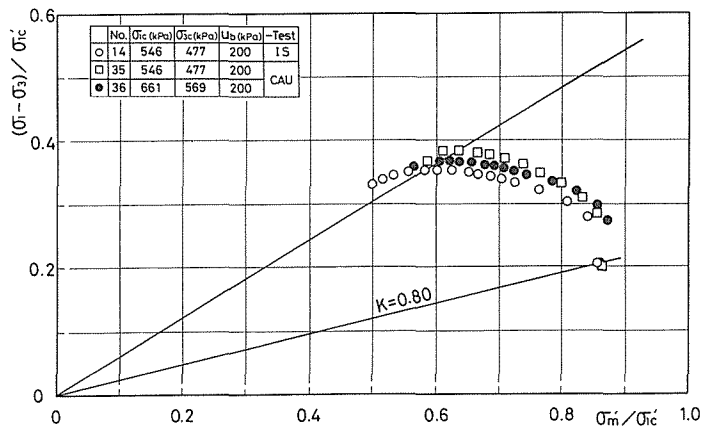


図 14 CAU 試験の有効応力経路

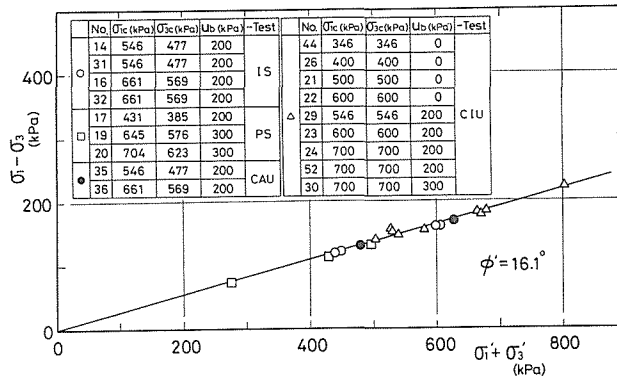


図15 主応力差最大時の $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim (\sigma_1' + \sigma_3')$ 関係

10に対応する図-11の応力経路図にも現れている。

図-12はISとCAU試験の主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を有効鉛直圧密応力 σ_{1c}' (CAUの場合は再圧密時の有効鉛直応力 σ_{12}') で除したものと軸ひずみ ε の関係を示したもので、CAU試験においては、初期異方圧密時の σ_1' 、 σ_3' と同じ圧密応力を加えて再圧密した場合でも c_u/σ_{1c}' の増加は8%程度に止まっており、平均有効主応力を400 kPaとした結果ではISの強度とほとんど一致する。また、この時の発生間隙水圧 Δu と軸ひずみ ε の関係を示したものが図-13で、平均有効主応力が高い方が Δu がわずかに大きく、図-14の有効応力経路図にも現れている。

非排水せん断時に間隙水圧を測定した全ての試験結果について主応力差最大時の $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と $(\sigma_1' + \sigma_3')$ の関係を示したものが図-15で、有効応力によるせん断抵抗角は応力解放の影響をほとんど受けないことが分かる。

5. ま と め

上記の実験結果を要約すると以下のようになる。

- 1) 純粋に応力解放のみの場合、強度低下は6~7%程度である (PS試験)。
- 2) 通常の一軸あるいはUU三軸試験では吸水の影響がない場合20%程度の強度低下が生じる (UC & UU試験)。
- 3) 背圧を載荷せずに原位置の鉛直圧密応力と等しい応力で等方的に再圧密した場合、 c_u/σ_{1c}' を35%程度大きく評価することになる (CIU試験)。
- 4) 再圧密時の応力条件によっては原位置強度に近似した c_u/σ_{1c}' を得る (CIU & CAU試験)。
- 5) CU三軸試験の場合、トリミングによる強度への影響はほとんど現れない。

以上の結果は、初期圧密を等方応力条件とした前回の報告^{20,21)}と傾向が一致しており、また、国内の漁港構造物基礎の設計のために行われた不攪乱試料についての強度データを集めて統計的に処理した大槪²²⁾の研究結果とも傾向が一致している。

今回の実験結果を実際の試験業務に対応させて考えると、一軸やUU三軸試験の結果から得られる非排水強度を有効土被り圧で除した値 c_u/σ_{1c}' と原位置の有効土被り圧で等方的に再圧密して得られるCU試験の c_u/σ_{1c}' との比較において、極端な場合、両者に2倍弱の開きがあることがわかり、設計に用いるべき強度の選択には十分な注意が必要である。

参 考 文 献

- 1) Skempton, A. W. and Sowa, V. A.: Geotechnique, Vol. 13 (1963), No. 4, p. 269-290.
- 2) Ladd, C. C. and Lambe, T. W.: ASTM, STP 361 (1963), p. 342-371.
- 3) Noorany, I. and Seed, H. B.: ASCE, Vol. 91 (1965), SM2, p. 49-80.
- 4) 奥村樹郎: 運輸省港湾技術研究所報告, Vol. 8 (1969), No. 1, p. 59-84.
- 5) 奥村樹郎: 運輸省港湾技術研究所報告, Vol. 8 (1969), No. 3, p. 77-98.
- 6) 三田地利之, 北郷 繁, 高橋喜一: 第6回土質工学研究発表会講演集 (1971), p. 133-136.
- 7) 北郷 繁, 三田地利之, 吉澤耿介, 唐牛義夫: 土質工学会北海道支部技術報告資料, 第12号 (1972), p. 23-28.
- 8) 中瀬明男, 勝野 克, 小林正樹: 運輸省港湾技術研究所報告, Vol. 11 (1972), No. 4, p. 83-104.
- 9) 三田地利之, 北郷 繁: 北海道大学工学部研究報告, 第68号 (1973), p. 253-268.
- 10) 阿部廣史, 川上 浩: 第15回土質工学研究発表会講演集 (1980), p. 429-432.
- 11) 北郷 繁, 三田地利之, 浅見秀樹: 第16回土質工学研究発表会講演集 (1981), p. 349-352.
- 12) 木村 孟, 斉藤邦夫: Soils and Foundations, Vol. 22 (1982), No. 4, p. 109-120.
- 13) 矢田部龍一, 榎 明潔, 八木則男, 武本 誠: 第22回土質工学研究発表会講演集 (1987), p. 377-378.
- 14) 外崎 明, 赤石 勝, 稲田倍穂: 第22回土質工学研究発表会講演集 (1987), p. 395-396.
- 15) Ladd, C. C. and Foott, R.: Proc. ASCE, Vol. 100 (1974), p. 763-786.
- 16) 松岡 元: 土と基礎, Vol. 31 (1983), No. 3, p. 55-57.
- 17) Lowe, J. and Johnson, T. C.: Proc., Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Colorado, ASCE (1960), p. 819-836.
- 18) 赤井浩一, 小谷 明: 土木学会論文集, 91号 (1963), p. 1-7.
- 19) Brand, E. W.: Soils and Foundations, Vol. 15 (1975), No. 2, p. 1-16.
- 20) 三田地利之, 桜庭大久, 工藤 豊: 土木学会第43回年次学術講演会概要集 (1988), p. 12-13.
- 21) 三田地利之, 工藤 豊, 桜庭大久: 土質工学会北海道支部技術報告集, 29号 (1989), p. 125-134.
- 22) 大槇正紀, 堀越伸幸: 土木学会第43回年次学術講演会概要集 (1988), p. 530-531.