

粘性土の一軸圧縮試験における破壊形態と有効応力挙動

鳥取大学 正 清水正喜
鳥取大学 学 森本祐太
鳥取大学 正 中村公一

1. はじめに

不攪乱粘性土の一軸圧縮試験を行うとせん断破壊でなく引張り破壊を呈することがある．しかし，通常，引張り破壊とせん断破壊の区別は破壊面（亀裂または不連続面）の角度で判断している．本研究の目的は，不攪乱粘性土と締め固めた試料に対して間隙水圧を測定した一軸圧縮試験を実施し，破壊に至る変形の挙動を有効応力の観点から考察することである．

2. 試料・供試体

用いた試料の物理的性質を表1と図1に示す．

不攪乱粘性土は，シンウォールサンプラーによって深度 GL-11.1m から採取した一部で，サンプラーから抜いてプラスチック袋で真空保存したものである．試料採取後約1ヶ月後に試験した．飽和度は約98%であった．一軸圧縮試験供試体は直径5cm，高さ12cmの円柱に整形した．

締め固めた試料は不攪乱粘性土の力学挙動を模すために用いた．河川堤体の土であった砂礫混じり粘性土である．原試料を気乾後，2mmふるいを通したものを所定の方法で締め固めた．また，同じ目的で，この試料にセメントを混入させたものも使用した．セメント混入土は，セメント量と養生期間を変えた（セメント量：1,2,3,4%，養生期間：1日，1週間，4週間）．

所定の含水状態で二つ割れモールド（内径50mm）に入れて，CBR試験機で静的に圧縮することにより締め固めた．セメントを混入しない試料は締め固め時の最大圧縮力の大きさを3通りに変えた（1100,1650,2200N．表2参照）．セメント混入土は締め固め時の圧縮力を1650Nに統一した．含水比や締め固め力などは，締め固め後の密度ができるだけ同じになるよう，試行を経て決定した．

表1．物理的性質

試料	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	w_P (%)	I_P
不攪乱粘性土	2.646	121.0	64.0	57.0
旧堤体土細粒分	2.724	35.1	18.0	17.1

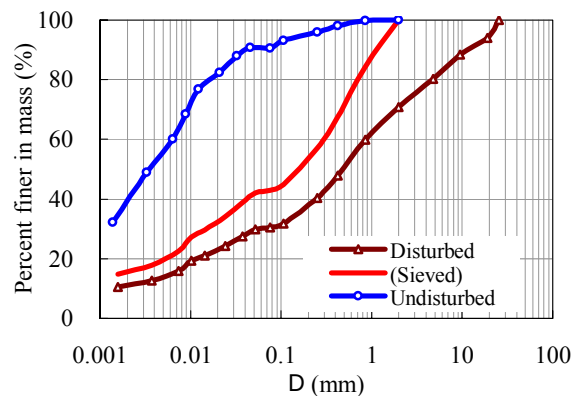


図1．試料の粒径加積曲線

表2．不攪乱試料と調整試料の物理的条件と主な試験結果

試料	試験名 (締め固め力， N)	w_0 (%)	ρ_{t0} (g/cm ³)	ρ_{d0} (g/cm ³)	S_{r0} (kPa)	e_0	S_0 (kPa)	q_u (kPa)	ε_f (%)	S_{min} (kPa)
不攪乱試料	Z	103.68	1.413	0.694	97.68	2.815	18.68	147.73	6.43	-16.62
調整試料	A (1100)	18.27	2.085	1.763	91.45	0.545	40.33	210.20	4.16	0.70
	B (1650)	16.81	2.108	1.805	89.97	0.509	66.32	276.30	3.00	0.36
	C (2200)	16.66	2.121	1.818	91.16	0.498	83.30	331.15	3.14	-13.63

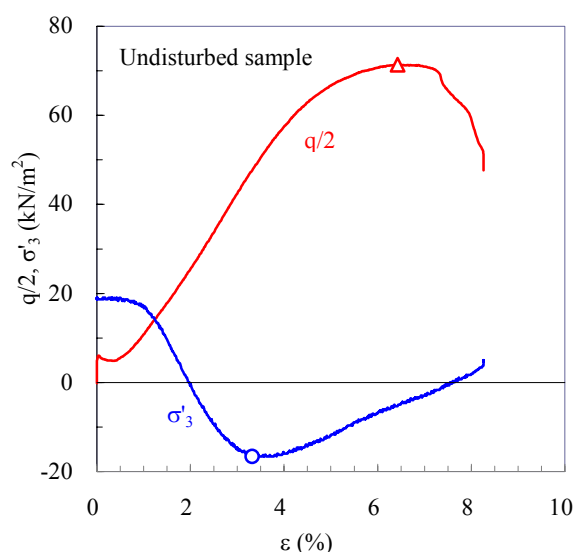
3．一軸圧縮試験の方法

装置と方法の基本原理は従来の研究¹⁾と同じである．供試体をメンブレンで覆わないで三軸セル底盤のペDESTAL 上面に置き，セル圧 u_c を作用させて底面で間隙水圧 u_w を測定する．ペDESTAL にはセラミック板を装着して いて，間隙空気が底面から漏れないようにしている．軸方向に圧縮する前に初期の間隙水圧 u_{w0} を測定すること に よって供試体の有するサクシヨンの初 期値 ($s_0=u_a-u_{w0}$) を測定した．本研 究では直径が 75mm の供試体まで試験 できるよう装置を改良した．この試験 方法に応じた最大・最小の全応力およ び有効応力の定義を表 1 に要約した．

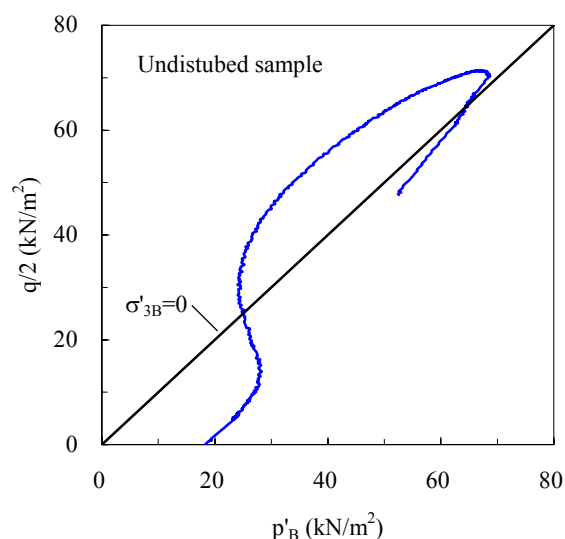
表 3．全応力と有効応力の定義

Total stresses	Effective stresses	
	Sr=100%	Sr<100%
$\sigma_1 = q + u_c$	$\sigma'_1 = \sigma_1 - u_w = q + s$	$\sigma'_{1B} = \sigma_1 - u_a + S_r s = q + S_r s$
$\sigma_3 = u_c$	$\sigma'_3 = \sigma_3 - u_w = s$	$\sigma'_{3B} = \sigma_3 - u_a + S_r s = S_r s$

q : 軸差応力, u_c : セル圧 ($=u_a$: 間隙空気圧), u_w : 間隙水圧, s : サクシ ョン ($=u_a-u_w$)



(a) 応力 - ひずみ関係



(b) 有効応力経路

図 2．不攪乱試料の一軸圧縮試験時の挙動

4．結果

(1) 不攪乱試料の一軸圧縮挙動

応力 - ひずみ関係と有効応力経路を図 2 に示す．図(a)は 45 度 面上のせん断応力 ($=q/2$) および最小有効応力 σ'_3 と軸方向圧縮 ひずみ ε との関係，図(b)は $q/2$ と平均有効応力 p'_B の関係である．ここに，

$$p'_B = \frac{\sigma'_{1B} + \sigma'_{3B}}{2} (= \frac{q}{2} + S_r s) \quad (1)$$

この供試体の初期サクシヨンは 19kPa であることが図(b)から わかる．軸差応力は，せん断開始時に操作の不手際に起因する 挙動を示すが，その後，軸圧縮とともに増加し，軸ひずみ ε が約 6.5% でピークに達した．一方，最小有効応力 σ'_3 ははじめ低下し， ひずみが約 3.5% で最小値をとり，その後増加に転じた．最も特 徴的なことは σ'_3 が負，即ち引っ張り応力が発生していることで ある．

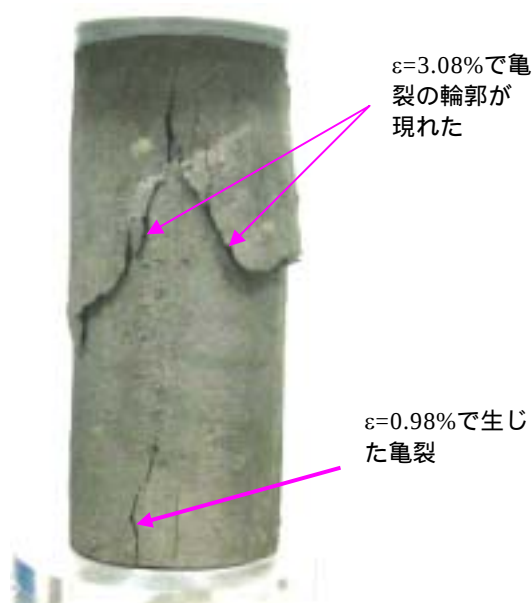


図 3．試験後の供試体

試験中，一定の時間間隔で供試体の写真撮影を行った．写真に記録された時刻からそのときのひずみを推定した．

図3は試験後の供試体を撮影したものである．この図を用いて圧縮中に観察された変形の挙動を述べる．

$\varepsilon=0.98\%$ で下部に鉛直の亀裂が現れた． $\varepsilon=1.87\%$ のときに上部に間隙水の染み出しが見られた． 3.08% のときには，染み出した部分の周りで，その後亀裂になった範囲の輪郭が明らかになった．染み出した部分が盛り上がるようになって上部の亀裂が現れた．

最初に現れた下部の亀裂は鉛直であり，鉛直面に集中的に引っ張り有効垂直応力が作用したと思われる．図1から明らかなように，そのとき平均的な有効垂直応力は正（圧縮側）のままである．一方，上部の亀裂は鉛直でないのでおそらくせん断破壊面であろうと推測できる．ここで，興味深いことは引っ張り応力やせん断応力が最大になる前に不連続面が現れたことである．

(2) 締め固めた試料の挙動

図4は締め固めた供試体の結果である．比較のため不攪乱試料の結果も併せて示した．本研究の方法で締め固めた場合，どの供試体も一軸圧縮強度 $q_u (=q_{\max})$ も E_{50} も不攪乱試料より大きくなった．締め固め時の圧縮力が大きいほど q_u も E_{50} も大きくなっている．さらに， σ'_3 は供試体Cで負になったが，AとBでは負にならなかった．供試体Cは不攪乱試料と同様に供試体下部から鉛直亀裂が生じた．なお，亀裂の発生時を正確に把握できなかったが， $\varepsilon=2.19\%$ のときに亀裂が生じていた． $\sigma'_3 B$ が負の最大値に達したとき（ $\varepsilon=1.94\%$ のとき）には亀裂が見えなかった．この点が不攪乱試料の場合と異なる．

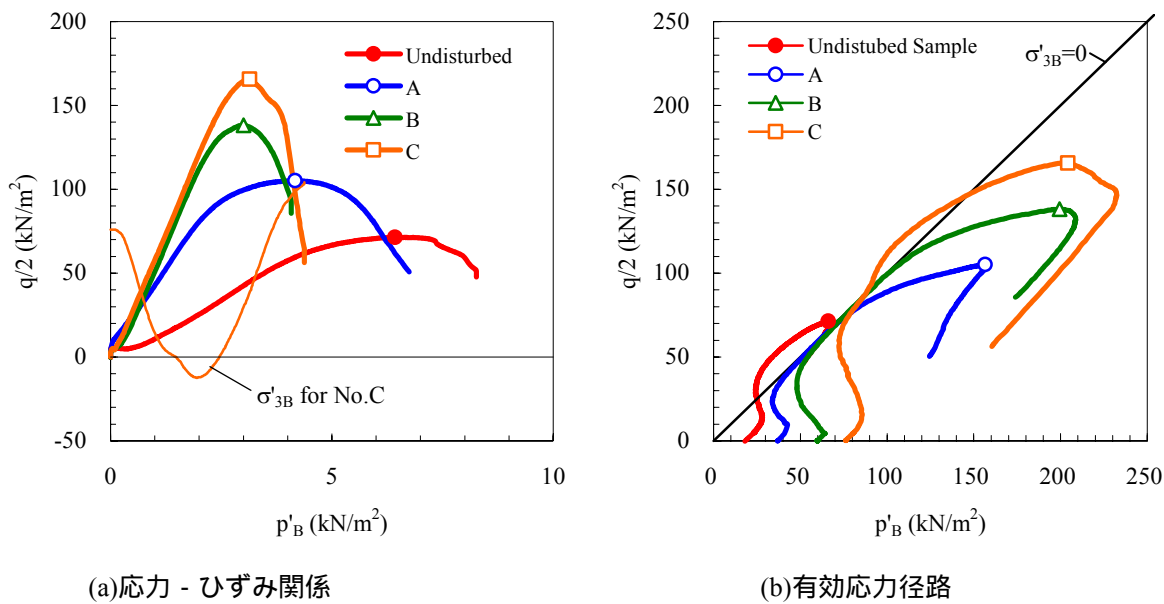


図4．締め固めた供試体の結果

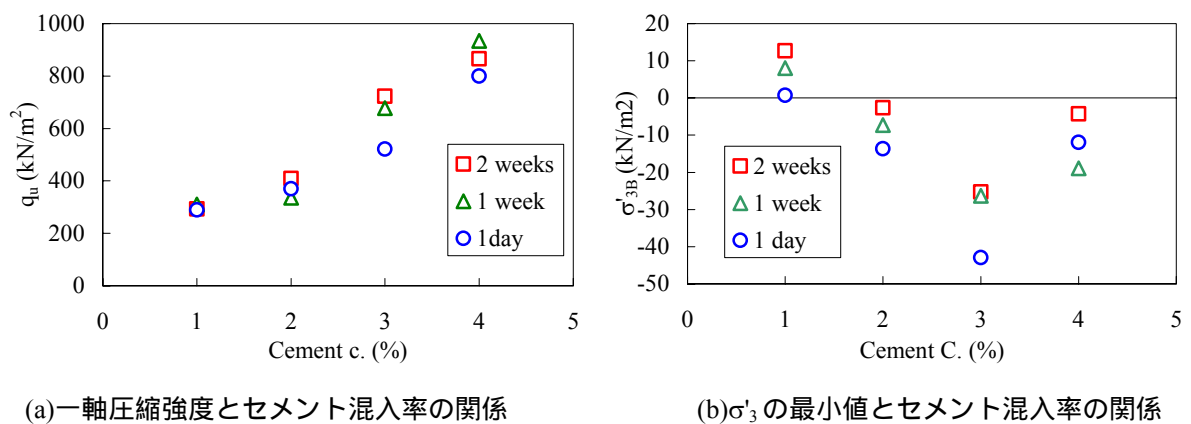


図5．セメント混入土の結果

(3) セメント混入土の特性

図5にセメント混入土の結果をまとめた。図(a)からセメント量が多いほど q_u が大きくなることが明らかであるが、同じセメント量であっても養生期間の影響は明瞭ではない。図(b)から、セメントを混入すると σ'_{3B} は負、即ち引っ張り有効応力が発生したが、セメント量を多くすればするほど引っ張り応力が大きくなるわけではない。

5. 終わりに

不攪乱粘性土と締固めた細粒土の一軸圧縮試験を有効応力を測定して行い、破壊の進展形態を有効応力の観点から考察した。不攪乱試料で有効応力が負になる挙動を、締固め土においても、セメントを混入するか、締固め荷重を大きくすることによって再現することが出来た。今後、破壊の観察の方法を改良して、さらに系統的に機構を解明したい。

参考文献

- 1) 清水正喜, 景山健 (2010): 不飽和土の一軸圧縮試験における強度とサクシヨンの挙動, 地盤工学会中国支部論文報告集, Vol.28, No.1. pp.47-53.