

不飽和粘土のせん断時の挙動について

峰 村 信 雄*

Shear Characteristics of Partly Saturated Clay

Nobuo Minemura

1. ま え が き

飽和土においてはせん断特性としての強度、体積変化等の挙動がいずれも有効応力に支配されることが知られている。ところが間げきが水と空気、すなわち液相と気相で満たされている不飽和土では、気相の圧縮性のほかに界面張力や、気相の液相への溶解などの現象が起るため挙動はより複雑となっており、不飽和土にも有効応力の原理を拡張して適用させようという試みが多くなされてきている⁽¹⁾が今なお未解の点を多く残している⁽²⁾。

ここでは三軸圧縮試験機を用いて不飽和土の排水（排気）試験と非排水（非排気）試験とを行ない、両者の応力変化、体積変化の挙動を比較することによって、不飽和土にはたらく有効応力を推察している。なお本文では飽和土の排水、非排水なる語に対応し、不飽和土については排気、非排気なる語を用いることにする。

2. せん断中の間げき圧、体積変化

土のせん断中の応力は一般に等方圧の成分と偏差応力の成分とにわけられ、それぞれ八面体直応力 σ_{oct} と八面体せん断応力 τ_{oct} であらわされる。

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_m \quad (1)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2)$$

ここに $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力

σ_m : 平均主応力

土の変形、強度を支配するのは全応力ではなく有効応力であるからそれぞれの σ のかわりに有効応力 σ' を用いる。また三軸圧縮試験においては $\sigma_2' = \sigma_3'$ であるから(1), (2)式はそれぞれ

$$\sigma_{oct}' = \frac{1}{3}(\sigma_1' + 2\sigma_3') = \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3' = \sigma_m' \quad (1')$$

$$\tau_{oct}' = \frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2')$$

となる。

土中に全応力の変化 $\Delta\sigma$ が起こりその結果間げき圧に Δu の変化を生じたとすれば有効応力の変化 $\Delta\sigma'$ は

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u \quad (3)$$

* 土木工学科

となる。間げき圧の変化 Δu は等方圧の変化 $\Delta\sigma_3$ と偏差応力の変化 ($\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$) によって

$$\Delta u = B \{ \Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \} \quad (8)$$

ここに B, A : 間げき圧係数

または

$$\Delta u = B \left\{ \frac{1}{3}(\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3) + \alpha\sqrt{2}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \right\} = B \{ \Delta\sigma_m + \alpha\sqrt{2}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \} \quad (5)$$

ここに α : Henkel の間げき圧係数

であらわされる。飽和土では $B=1$ となり等方圧のみが変化した場合には、 $\Delta u = \Delta\sigma_3$ となり有効応力は変化しない。不飽和土では一般に $B < 1$ となるので非排気条件で等方圧 $\Delta\sigma_3$ をかけた場合有効応力は

$$\Delta\sigma_3' = \Delta\sigma_3(1-B) \quad (6)$$

となる。また平均主応力の変化として

$$\Delta\sigma_m' = \Delta\sigma_m(1-B) \quad \therefore \Delta\sigma_m' / \Delta\sigma_m = 1-B \quad (7)$$

ともあらわされる。

不飽和土について有効応力式は Bishop⁽¹⁾ により

$$\sigma' = \sigma - \{ u_a - \lambda(u_a - u_w) \} \quad (8)$$

ここに u_a : 間げき空気圧, u_w : 間げき水圧, λ : 実験定数

とあらわされており、この式を用いた考察が多くなされているがここでは $u_a - \lambda(u_a - u_w)$ の項を等価間げき圧 u^* であらわし

$$\sigma' = \sigma - u^* \quad (8')$$

として扱っている。式(7)より

$$\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_m' = B\Delta\sigma_m = u^* \quad (7')$$

が得られる。

柴田⁽⁵⁾ は飽和粘土について σ_m' を不変に保つように三軸圧縮試験を行なったが、 σ_m' が異なっても $(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) / \sigma_m'$ は、ひずみ ϵ に対して一定の関係を保つことを示した。またせん断中の体積変化 $\Delta V / V$ と $(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \sigma_m'$ との関係は σ_m' が異なってもただ一つの直線に乗ることを示した。

ここで $(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$ は $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と等しいので以降 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を用いることにする。

不飽和土についても ϵ と $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m'$ との間には同様の関係が成立つことが実験により観察されたので、ここでは側圧の変化の影響を考えなくても、すなわち $\sigma_m' = \text{一定}$ の試験を行なわなくても $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m'$ に対する体積変化が考察できると考える。

初期条件(乾燥密度, 飽和度)の等しい試料の排気試験と非排気試験とを行ない、両方の $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m'$ の変化を等しいとおくことから非排気試験の平均主応力 σ_m' が求まり、したがって等価間げき圧 u^* が求まると考える。また(8')で示される有効応力による体積変化を考察することにする。最後に u^* と測定される間げき空気圧 u_a との関連を求めることにする。

3. 試料および実験方法

3-1 試料と装置

試料は栃木県宇都宮産の関白カオリンを用いた。その物理的性質は表-1の通りで比較的低塑性の粘土である。この試料について乾燥状態, 不飽和の状態, 飽和に近い状態を代表さ

せるため含水比をそれぞれ5%, 15%, 21%に調整し24時間以上保存したものをを用いた。

直径5cm, 高さ10cmの二つ割り

モールドにいずれも乾燥密度が1.53になるようにハーバード・タンパーで10層にわけて締固めた。試験の系列には三桁の系列番号を付したが、下2桁の数字は目標とした含水比の%であり、上1桁は非排気試験を1, 排気試験を2としている。

実験装置は通常の三軸圧縮試験機であり、排気, 非排気試験の配管図をそれぞれ図一, 図二に示す。なお試験はいずれも恒温恒室内で行なった。

表1 試料の物理的性質 (関白カオリン)

比重	L.L	P.L	砂分	シルト分	粘土分
2.601	33	26	52	19	29

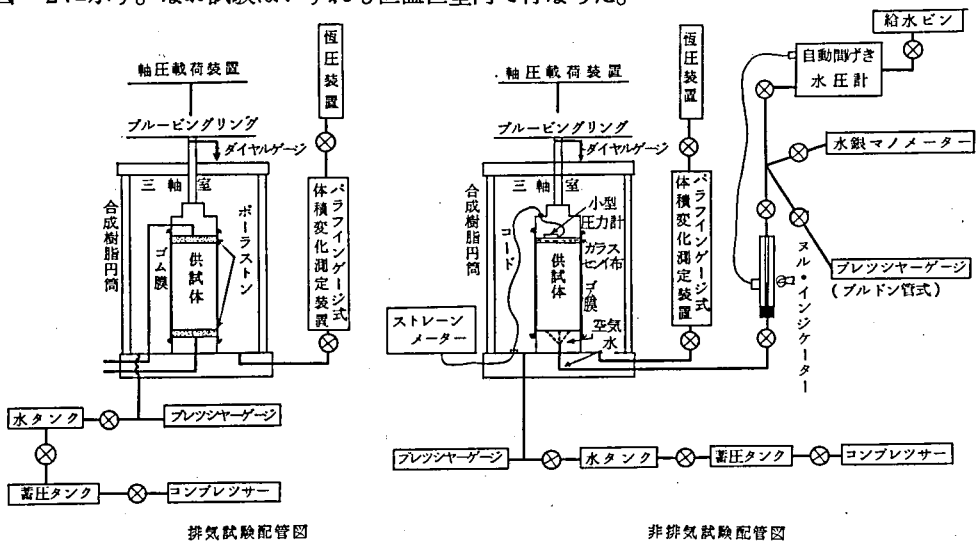


図1

図2

3-2 排気試験

排気試験では供試体上, 下端よりポーラス・ストーンを通じて排気を行なった。体積変化は不飽和土であるためパラフィンゲージ式体積変化計を三軸室と恒圧装置との間に挿入して三軸室からの水の出入りによって測定した。この体積変化計の信頼性はビューレットによる検定で確認済みである。⁽⁶⁾ 荷重速度はそれぞれの系列について十分排気が行なわれるよう考慮し221系では0.0025%/min, 215, 205系では0.01%/minとした。

3-3 非排気試験と空気圧の測定

不飽和土においては間げき空気圧と間げき水圧は異なりそれぞれ別々に測定されるべきであるし測定例もある。⁽¹⁾ しかし純粋な間げき水圧を測定することは困難なためここでは間げき空気圧のみを測定している。

空気圧については信頼性確認のため同一供試体について上下端よりそれぞれ別な方法によって測定している。上端からはガラス繊維布(日東紡CC-110)3枚を介して, 小型圧力計(共和電業PS-2)を用いてストレーンメーターで測定した。なお試料端より小型圧力計までの間の全間げき容積は0.88ccであった。

下端からはキャップにあげた直径1mm, 長さ2cmの穴4ヶ(全空げき容積0.5cc)によって間げき圧測定回路内の水との接触を断ち, 飽和土の場合と同じく管路内の水圧をスル・

インジケーターによる自動間げき水圧計を介して、水銀マノメーター又はブルドン管式圧力計によって測定している。測定装置内の空気の体積はいずれの場合も供試体内部の空気体積（例えば飽和度80%で空気体積は16cc）に比較すれば微小である。

下部からの測定値のうち 0.1kg/cm^2 に満たないものは水銀マノメーターによる測定値を採用し、それ以上のものについてはブルドン管式圧力計の測定値を採用した。これらの測定値と上部からの小型圧力計による測定値との代表的な比較を図-3、図-4に示す。図-3

において初期の圧力の小さい部分でマノメーターの読みが変化していないのは、自動間げき水圧計の感度が不足しているためと考えられる。また最後の部分で小型圧力計読みが下がっているにもかかわらずマノメーター読みが変化していないのは、圧力の減少にともなう管路内に溶け込んでいた空気が析出するために、ヌル・インジケータ

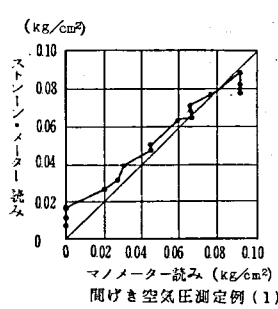


図3

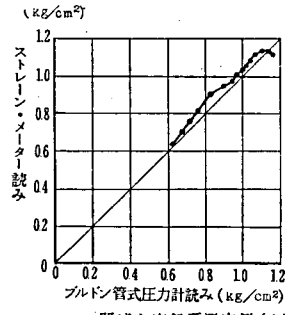


図4

ー附近の水が戻りにくいためと考えられる。一方ブルドン管式圧力計による読みは最小目盛が 0.2kg/cm^2 であるため読取り誤差によるものである。

一般に小型圧力計によるものの方が敏感に正しい値をキャッチしていると考えられ、計算には主としてこの測定値を採用したが、時折急激なゼロ・ドリフトを生ずることがあるのでチェックの意味で下部からの読みを参考にした。

載荷速度は121系で $0.0025\%/mim$ 、115系、105系では $0.25\%/min$ とした。

4. 試験結果および考察

一連の試験結果の概略を表-3に示す。

4-1 排気試験

排気試験の $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ におけるモールの応力円を図-5に示す。破壊包絡線はいずれの系列もほぼ原点を通る直線として表わされる。この載荷範囲では正規圧密試料の載荷試験と同じ条件と考えられ、かつ排気もほぼ完全であったと考えられる。

次に破壊に至るまでの軸差応力の変化 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ をひずみ ϵ に対してあらわすと側圧の大きいものが当然軸差応力も大きくなり形状の比較がしにくい。そこで $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m'$ と ϵ との関係プロットすると図-6が得られる。これをみると飽和土のごとく終始一つの曲線に乗っているとはいえないがひずみが12%を越えると σ_3 に無関係に $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m'$ は一つの値になることがわかる。この変化は応力径路をベクトル・カーブで示した場合に、破壊包絡線に到達した後破壊包絡線に沿う変化と対応している。

このことから初期条件（乾燥密度、飽和度）の等しい土の内部の破壊時の応力状態は応力の大きさによって変らないということが出来る。各系列の破壊時の $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m'$ の値は図-6より、205系で1.60、215系で1.60、221系で1.30と求められる。

また体積の変化について、 $\Delta V/V$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m'$ との関係を求めると図-7の通りとなる。この場合には飽和に近い221系では、だいたい一つの曲線に乗る。また $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m = 1.3$ の直線に到達するまでの間はほぼ直線的に増大しており柴田⁽⁵⁾の報告と一致する。到達以後

表2 試験結果表

種別	系列	試料番号	σ_3 (kg/cm ²)	乾燥密度 (g/cm ²)	含水比 (%)	飽和度 (%)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kg/cm ²)	ε_f (%)	$(\Delta V/V)_f$ (%)	u_{af} (kg/cm ²)
排気試験	205	1	0.5	1.531	5.01	18.66	2.588	2.05	+0.20	
		2	1.0	1.523	5.59	20.55	4.445	4.10	-0.15	
		3	1.5	1.527	5.38	19.91	5.430	8.21	-1.58	
		4	2.0	1.551	5.12	19.69	7.910	5.83	-1.11	
		5	2.5	1.527	5.05	18.67	8.072	10.68	-2.65	
	215	1	0.5	1.597	14.50	60.00	3.796	2.80	+0.06	
		2	1.0	1.494	15.00	52.70	4.234	11.24	-3.39	
		3	1.5	1.505	14.20	50.72	5.728	12.85	-3.14	
		4	2.0	1.492	14.60	51.13	6.893	12.85	-3.91	
		5	2.5	1.601	14.30	59.57	9.904	19.24	-6.49	
	221	1	0.5	1.533	19.84	74.17	1.049	12.82	-2.44	
		2	1.0	1.551	20.10	77.29	2.339	14.80	-4.22	
		3	1.5	1.541	20.07	75.96	3.217	17.75	-5.42	
		4	2.0	1.607	19.79	83.26	4.418	13.84	-4.64	
		5	2.5	1.537	19.99	75.11	5.462	17.75	-7.89	
非排気試験	105	1	0.5	1.530	4.90	18.22	2.587	3.69	-1.25	0.048
		2	1.0	1.487	5.41	18.79	3.559	10.68	-1.52	0.070
		3	1.5	1.509	6.09	21.89	5.082	10.68	-2.45	0.164
		4	2.0	1.527	5.30	19.61	6.348	11.50	-2.23	0.330
		5	2.5	1.533	4.77	17.81	8.145	14.79	-2.74	0.145
	115	1	0.5	1.500	14.57	51.64	3.161	1.60	-0.03	0.079
		2	1.0	1.477	15.40	52.70	3.446	12.04	-0.74	0.219
		3	1.5	1.493	15.10	52.94	5.050	13.65	-1.52	0.174
		4	2.0	1.491	14.90	52.09	6.088	19.27	-3.36	0.358
		5	2.5	1.495	14.90	52.45	7.689	14.45	-2.76	0.292
	121	1	0.5	1.531	20.90	77.79	1.965	19.80	-0.46	0.009
		2	1.0	1.551	20.80	79.98	2.124	19.80	-2.77	0.250
		3	1.5	1.574	20.20	80.59	2.604	19.09	-4.74	0.359
		4	2.0	1.547	20.45	78.13	3.176	19.90	-4.00	-0.021
		5	2.5	1.539	20.60	77.67	3.572	17.82	-5.41	-0.228

註： ε_f , $(\Delta V/V)_f$, u_{af} はいずれも $(\sigma_1 - \sigma_3)$ が最大つまり $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の時の値

曲線が $(\sigma_1 - \sigma_3)\sigma_m' = 1.3$ の線に沿って上昇しているのは、載荷速度が大きすぎたために排気による圧密のタイム・ラグによるものとも考えられるが、不飽和土特有の現象によるものとも考えられ、いずれであるかは不明である。

215, 205系では221系のようなまとまった曲線は得られなかった。これは一般に221系より $\Delta V/V$ の値が小さいこと、側圧が大きいくほど $\Delta V/V$ は大きくなることなどから、圧縮による飽和度の増大が体積収縮を大ならしめると考えられる。通常は水より圧縮性の大きい空気をより多く含む不飽和土の方が収縮しやすいと考えられるがこの場合には逆の現象が生じている。

これは不飽和土中に生ずる水と空気との間の界面張力によるものであると説明できる。すなわち表面張力は粒子間を結合させ安定性を増大

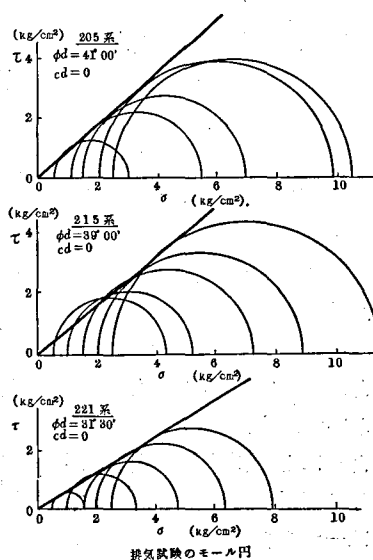


図5

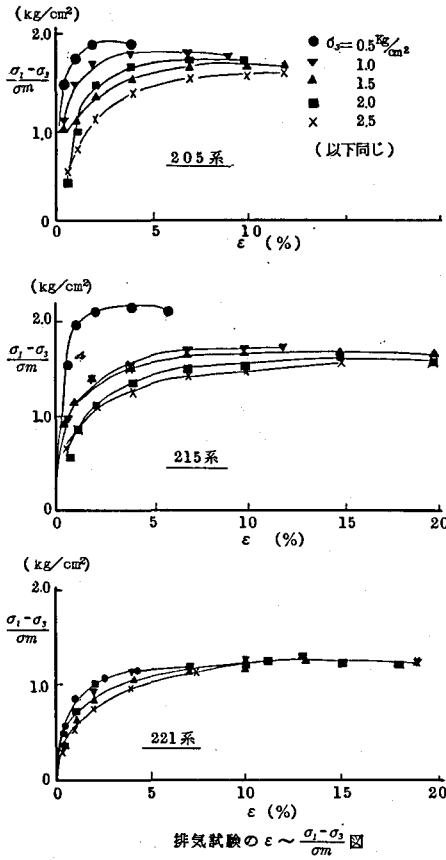


図6

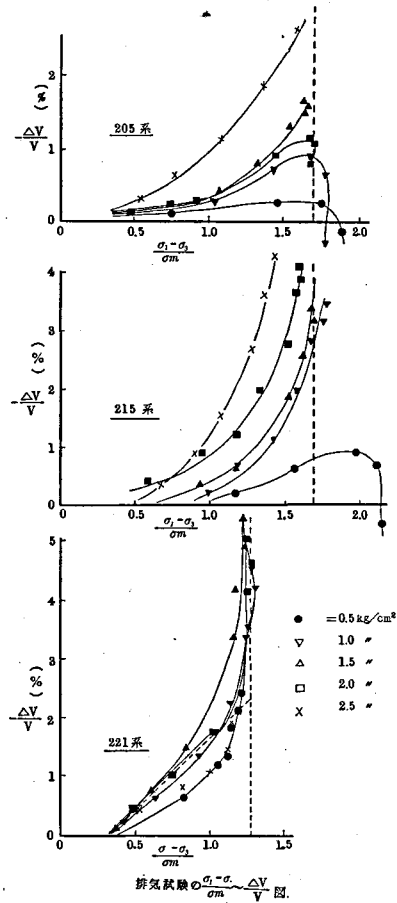


図7

させるように働らいており、荷重増加による部分的せん断には大きい抵抗力を示している。しかし飽和度が增大するとこの表面張力は次第に小さくなり部分的なせん断に対する抵抗が弱まる結果、体積は収縮するものと考えられる⁽²⁾

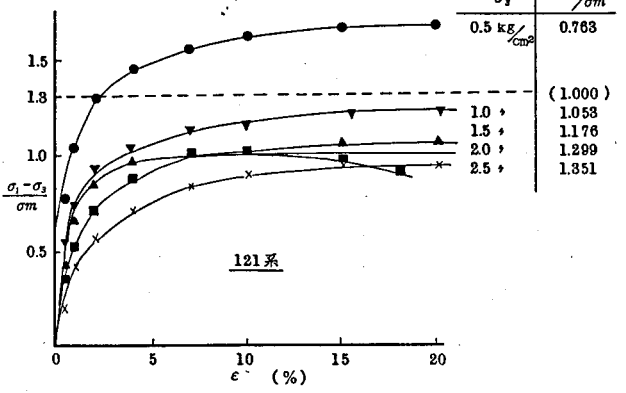
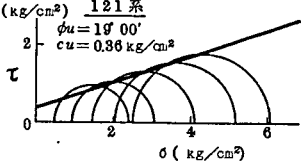
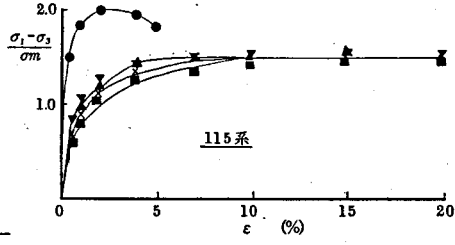
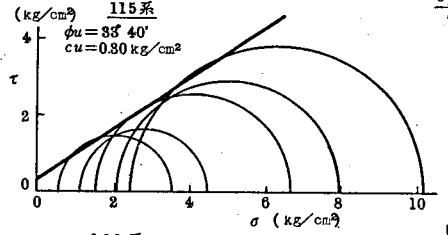
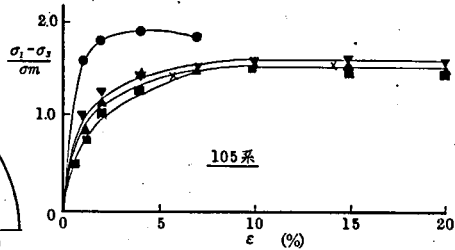
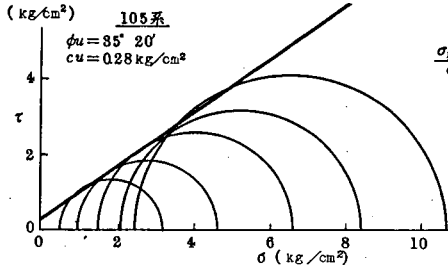
がこの現象を定量的に検討するまでにはまだ至っていない。

4-2 非排気試験

非気試験の全応力による破壊包絡線は図-8に示されるように原点は通らないがほぼ直線として表わされる。飽和度の増大につれて ϕ_u は減少し c_u は増大する傾向がみられるが c_u の増大はわずかである。

非排気試験の結果について全応力 σ_m を用い $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_m$ と ϵ の関係を求めると図-9の通りとなる。221系では側圧によりかなり異なった曲線となっているが分母を有効応力 σ' に直すといずれも最終値は排気試験の $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_m$ の値すなわち1.30と一致するはずである。このようにして(7)式の σ'_m/σ_m が求められる。この値を図-9に付記する。

105, 115系では圧側0.5kg/cm²の場合を除き、側圧のいかにかわらず $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_m$ の変化は一つの曲線となっており、しかも最終の $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma'_m$ の値が排気試験の結果すなわち1.6とほとんど一致している。これは、このように飽和度の低い土では空気の圧縮性によ



非排気試験の全応力モール円
図8

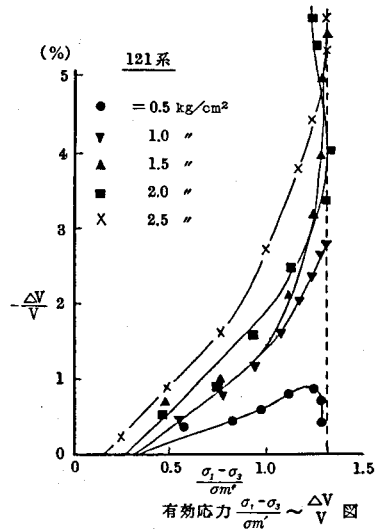
り、等価間げき圧が非常に小さいため排気、非排気試験の差があらわれないと考える。このことは非排気試験において測定した間げき空気圧が平均主応力の5%を越えていない点からも推察できる。

121系について上記の方法で $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m'$ を求め、これと体積変化との関係とを求めると図-10の通りとなり、排気試験の結果とほぼ同一となっていることがわかる。すなわち体積変化からみると計算された σ_m' はほぼ有効応力と等しいといえる。 $\Delta V / V$ が $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_m' = 1.3$ の直線に沿って上昇する現象がこの場合にも表われ、これは不飽和土特有の挙動であると考えられることができる。105, 115系については前述の通り明確な関係が得られないので図を省略する。

最後に測定された間げき空気圧について考察する。式(7)によりせん断中の等価間げき圧 u^* を求め、非排気試験で測定した u_a とこの u^* との関係プロットすると図-11が得られる。この変化はほぼ原点を通る直線で示され、これから各側圧に対する u_a と u^* との比

非排水試験の $\epsilon \sim \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m}$ 図

図9



有効応力 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m'} \sim \frac{\Delta V}{V}$ 図

図10

が求まる。比 u^*/u_a と σ_m'/σ_m との関係は図-12のようにほぼ比例している。すなわち比例定数を E とすれば

$$\frac{u^*}{u_a} = E \frac{\sigma_m'}{\sigma_m} \tag{9}$$

が成立つ。121系の場合図-12より $E=2.85$ となる。

式(7)', (9)より

$$\sigma_m' = \frac{\sigma_m^2}{Eu_a + \sigma_m} \tag{10}$$

が得られる。すなわち土の一つの初期条件（飽和度，含水比）については一つの定数 E が求められ，有効応力は間げき空気圧の測定値と，求められた定数 E によって算定できる。

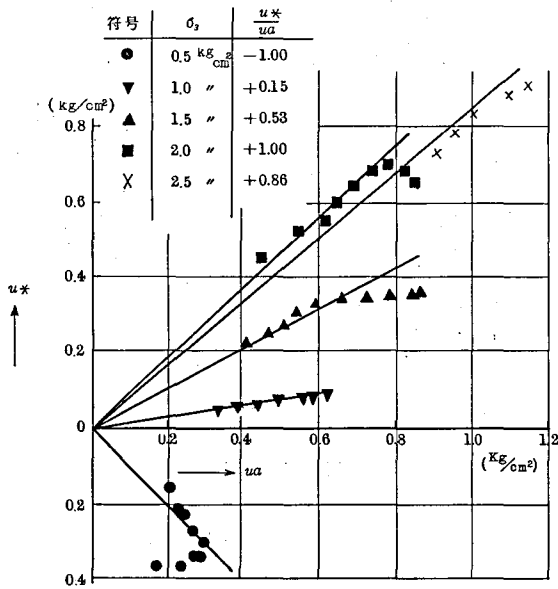


図11

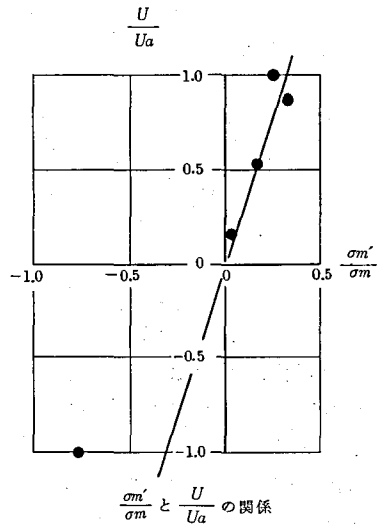


図12

不飽和土の有効応力は本来間げき空気圧と間げき水圧の分離測定によって求められるべきであるが排気，非排気試験中の応力状態の比較から等価間げき圧によって求めるこの方法は土の性質を調べるマクロ的な手法としては有力であると考えられる。

5. 結 果

不飽和締固め土のせん断中の挙動について排気，非排気三軸試験を行なって比較した結果次の結論を得た。

- (1) 有効軸差応力比 $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m'$ に対する体積変化率は飽和に近い土では側圧の大きさや排気条件によらずに一定である。
- (2) 飽和度の低い土ではこの関係が成り立たず飽和度が低くなるに従って，また側圧が低いほど圧縮量は小さくなる。これは土中の間げき水と間げき空気との間の表面張力による影響と考えられる。

- (3) 初期条件（飽和度，間げき比）の等しい土に対して間げき圧に関する定数が一つ定められ，これにより間げき空気圧のみの測定値から近似的な有効応力を求めることができる。

参 考 文 献

- (1) Bishop, A. W. and Henkel, D. J. : The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, 2nd edition (1962)
- (2) Jennings, J. E. B. and Burland, J. B. : Limitations to the effective stresses in partly saturated soils, *Géotechnique*, 12—2, (1962), 125~144
- (3) Skempton, A. W. : The pore pressure coefficients A and B, *Géotechnique*, 4, (1960), 186~187
- (4) Henkel, D. J. : The shear strength of saturated remoulded clays, Proc. Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, (1960), 550~552
- (5) 柴田 徹 : 京都大学防災研究所年報, 第6号, (1963)
- (6) 川上浩, 峰村信雄 : 不飽和締固め粘土の強度特性, 信州大学工学部紀要, 第25号

(44.9.20.受理)