

不飽和土のせん断特性に関する実験的研究

沢 崎 雅 之

Experimental Investigation on Shearing Characteristics of Unsaturated Soil

Masayuki SAWAZAKI

In order to have knowledge of the properties of unsaturated cohesive soil, especially strength and dilatancy characteristics, the author carried out some triaxial undrained compression tests on the static compacted silty loam.

From the experiments, it is clarified that the shearing resistance have been corrected by applying Taylor - Bishop's energy method to volume change of the only shearing component, and the stress - strain curve has been similar to that of soft steel.

It was ascertained that strength factors of unsaturated soil were capable of overestimation on the cohesion term.

1. ま え が き

不飽和土の研究において Bishop の有効応力式を用いる場合、圧密に関しては collapse 現象を考えるべきだという Jennings 等の批判¹⁾がある。一方これをせん断特性の研究に適用する場合には、実用性が一応実験的に立証されているが、間ゲキ水圧や間ゲキ空気圧の測定には技術的に困難な面があり、今後研究すべき点が多い。このように理論が確立されていないにもかかわらず、増々不飽和状態にある土構造物の設計施工等が増加する傾向にある。例えば近年、地スベリ防止を目的とする鋼管杭が施工されて、以前の防止対策に比べて効果の程が大きくなったと言われてはいるが、まだまだ一時的な効果しか期待できない場合や、あるいは逆に不経済となるような場合も生じ、合理的設計施工が行なわれていないのが現状である。それは、過去の調査研究等から地スベリ地の土が、風化泥岩、礫や岩片混じりの粘土といったものから生成されているが、その土質特性というものの把握が不十分であるためである。特に地スベリ面外土（つまりスベリ層と地表間の土）は、一般に不飽和状態にあるといわれている。また防止杭の挙動解析等を見るとその変位量もかなり大きいといわれている。それゆえ、地スベリ面外のような不飽和土の土質特性を知することは、斜面の安定計算や地スベリ防止対策の上から非常に重要である。

上のような理由から本研究は、不飽和土のせん断特性を知る基礎的研究として、初期乾燥密度と初期含水比を一定として、締固めた不飽和粘性土の非排水三軸圧縮試験を行ない、不飽和土の強度と変形、すなわち強度特性やダイレタンシー特性をはじめとする二、三の挙動を実験的に明ら

かにすることを目的としている。

2. 体積変化とせん断強さの測定

2-1 実験方法

本実験に用いた試料は、一度気乾燥した土を粉碎し、1.2mmフルイを通過させたものである。物理的性質は比重2.69、液性限界44.0%、塑性限界26.0%、粒度試験の結果から粘土分20%、シルト分60%、細砂分20%で、三角座標による土の組成分類によればシルト質ロームに分類される。また非繰返し法で行った標準突固め試験の結果は、最適含水比24.5%であった。その試料をあらかじめ含水比調整した後一日放置して、20cm立方の圧密箱に詰め、所定の乾燥密度になるように試料の高さを計算し、それに合致するように圧縮装置（最大10kg/cm²まで载荷可能）で圧縮した。そのため各試料によって圧縮圧は異なっているので沈下量のみを測定した。この状態で一定圧力を加えたまま一日放置した後とりはずし、直径5cm、高さ12.5cmの円柱供試体を作製した。実験装置は標準三軸圧縮試験機を用い、三軸セルと恒圧装置との途中に体積変化計を介入させたものである。そして、試験中のセル内体積変化に呼応してピストンが上下するようになっており、ダイヤルゲージにより0.02cm³の変化まで読みとれる。供試体のセットが完了した後、三軸セル系統の空気泡を完全に除き非排水状態で実験を開始した。供試体はゴムスリーブでおおわれているが、初期にはゴムスリーブと供試体が十分密着していないための供試体の体積変化が生じる可能性がある。そのような影響の補正を行なった後、所定の側圧で圧縮速さ0.8%/minのヒズミ制御で実験を行なった。

2-2 全応力-全ヒズミ関係

圧縮試験のデータ整理上、表-1のように分類しておくことにする。例えばA-1と表示されている場合、最初のアλファベットはA、B、C、Dの4グループを示し、次の数字は実験時の

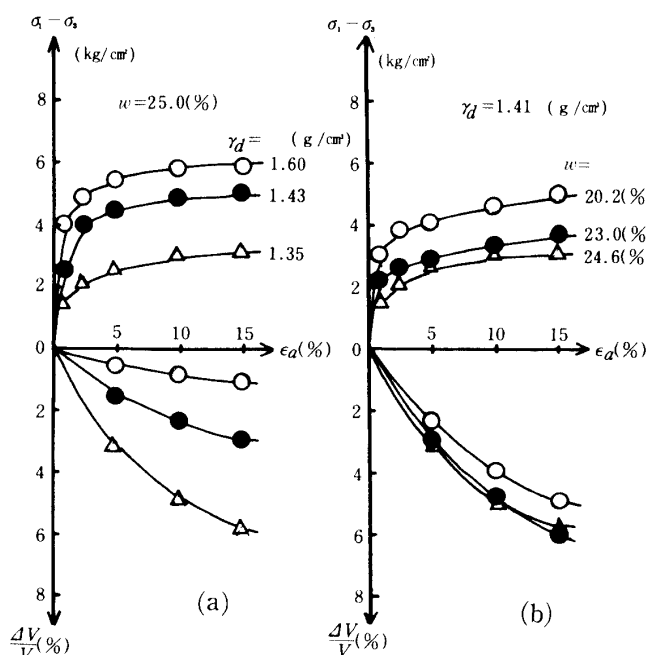


図-1：軸差応力と軸ヒズミの関係

側圧を示す。このように分類した上で、軸ヒズミ (ϵ_a) と全応力表示の主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) との関係を示す曲線の一例が図-1(a), (b)である。

ここで w は初期含水比、 γ_d は圧密終了時乾燥密度を表わす。図より明らかなようにほとんどの結果は正規圧密飽和粘性土の非排水せん断試験で得られる応力-ヒズミ曲線に似てピーク強度を示さない。また、図中の体積ヒズミはせん断試験開始時の体積を基準にして求めたものである。それらの結果より、一定側圧で乾燥密度が一定の場合含水比が低い程、また一定側圧で含水比が一定の場合乾燥密度が大きい程、各々軸差応力は大きくなっているし、さらに軸差応力

表－１：乾燥密度(γ_d)と含水比(w)による分類

	分類記号	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	$w(\%)$
A グループ	A-3	1.53 ± 0.01	26.0
			24.6
			23.4
			17.7
	A-2		25.1
			24.5
			23.3
	A-1		23.1
B グループ	B-3	1.41 ± 0.02	19.7
	B-2		24.6
			23.0
			20.2
			28.3
	B-1		24.7
			20.0
C グループ	C-3	1.53	25.0 ± 0.5
		1.48	
	C-2	1.60	
		1.52	
		1.43	
		1.35	
		1.40	
	C-1	1.26	
D グループ	D-3	1.55	20.5 ± 1.0
		1.47	
		1.40	
	D-2	1.50	
		1.41	
		1.37	
	D-1	1.47	
		1.39	

表－２：初期接線係数(E_i)と定数(b)
とポアソン比(ν)との値

$E_i(\text{kg/cm}^2)$	$b(\text{kg/cm}^2)$	ν
10.00	0.19	0.42
6.25	0.17	0.40
10.00	0.20	0.39
10.00	0.11	0.36
7.14	0.20	0.42
10.00	0.19	0.44
6.25	0.17	0.41
6.25	0.23	0.47
1.52	0.15	0.30
1.89	0.29	0.37
2.33	0.26	0.34
3.45	0.15	0.37
2.22	0.60	0.41
2.38	0.44	0.39
5.88	0.31	0.44
6.25	0.17	0.40
2.08	0.29	0.35
10.00	0.17	0.47
7.14	0.20	0.42
1.89	0.29	0.37
0.83	0.41	0.37
2.38	0.44	0.39
0.67	0.61	0.33
7.14	0.14	0.38
4.17	0.17	0.31
1.52	0.15	0.30
7.14	0.14	0.41
3.45	0.15	0.37
2.08	0.21	0.33
16.67	0.20	0.47
5.88	0.31	0.44

が大きい程体積変化は少なくなっていることがわかる。

２－３ Kondner の方法²⁾による解析

三軸試験の応力－ヒズミ曲線に対する Kondner 表示は次のように示される。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_a}{a + b\epsilon_a}$$

ここで、 $\sigma_1 - \sigma_3$: 主応力差, ϵ_a : 軸ヒズミ, a, b : 定数である。これを变形して

$$\frac{\epsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_a$$

とし、 $\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_a$ の関係をプロットしたとき、その結果は切片 a 、傾き b をもった変換座標上に一つの直線となり、このときの定数 a が初期接線係数 (E_i) の逆数、定数 b が無限ヒズミで漸近する双曲線に対する応力差といった物理的意味をもっている。この場合、変換応力～ヒズミ曲線の最初の部分（軸ヒズミが約4%位まで）は直線にのらず、三軸試験における土の初期接線係数は双曲線の初期接線係数を超過することになる。しかし、本実験では大部分直線にのっている。上記の手法によって求めた定数 b 及び E_i を表-2に示す。表より、主応力差の場合の傾向と同じように、乾燥密度一定の場合一定側圧ごとにおいて含水比が低い程初期接線係数 (E_i) は大きくなり、含水比一定の場合一定側圧ならば密度が大きい程 E_i は大きくなる。一方、三軸試験においてポアソン比は次のように定義される。

$$\nu = -\frac{d\epsilon_r}{d\epsilon_a}$$

ここで ν : 軸ヒズミ ϵ_a における接線ポアソン比

$d\epsilon_r$: 半径方向ヒズミの変化量

$d\epsilon_a$: 軸方向ヒズミの変化量

しかし半径方向ヒズミは体積ヒズミ (ϵ_v) を使用すれば、

$$\nu = -\frac{\Delta\epsilon_r}{\Delta\epsilon_a} = -\frac{\Delta(\epsilon_v - \epsilon_a)}{2\Delta\epsilon_a} \quad (\text{但し圧縮を正とする})$$

と表わせるので $\epsilon_a \sim (\epsilon_v - \epsilon_a)$ 関係をプロットし、その勾配の $\frac{1}{2}$ をとれば接線ポアソン比となる。実験より求めた ν は表-2に示した。直線にのらない場合はその平均値を求めた。表より含水比が一定であれば、乾燥密度が大きい程接線ポアソン比は大きくなる。一方、乾燥密度が一定で側圧が高い場合 (3 kg/cm^2)、含水比が大きい程接線ポアソン比は大きいけれども、側圧が低い場合 ($1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$) には一定の傾向が見られない。これは Daniel らの言う側圧による影響が生じているものと考えられる³⁾。

3. 不飽和土のダイレタンシー特性

本節では、乾燥密度と初期含水比を規定した場合のダイレタンシー特性について二、三の考察を行ってみる。この場合、ダイレタンシー特性を議論するには、セン断成分のみによる体積変化量が必要になるので、全体積変化量から平均主応力の増加による体積変化量を分離して、セン断成分のみによる体積変化を求める方法について述べる。

3-1 体積変化 $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$ と平均主応力 (σ_m) の関係

一般に不飽和粘性土を等方圧縮していく過程において、間ゲキ中の気泡が間ゲキ水に溶け込んで体積変化を生じることが Henry の法則として知られている。この体積変化は拘束圧が増加するにしたがってある値に漸近していくものと考えられるが、拘束圧が小さい範囲（本実験においては $\sigma_m \div 0 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ ）では、所定の側圧に達するまでの供試体自身の圧縮量は等方圧（側圧）の一次関数に近似できる。そして、圧縮試験時の平均主応力 $\left(= \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \right)$ の増加による体

積変化量を示した一例が図-2 (a), (b) である。

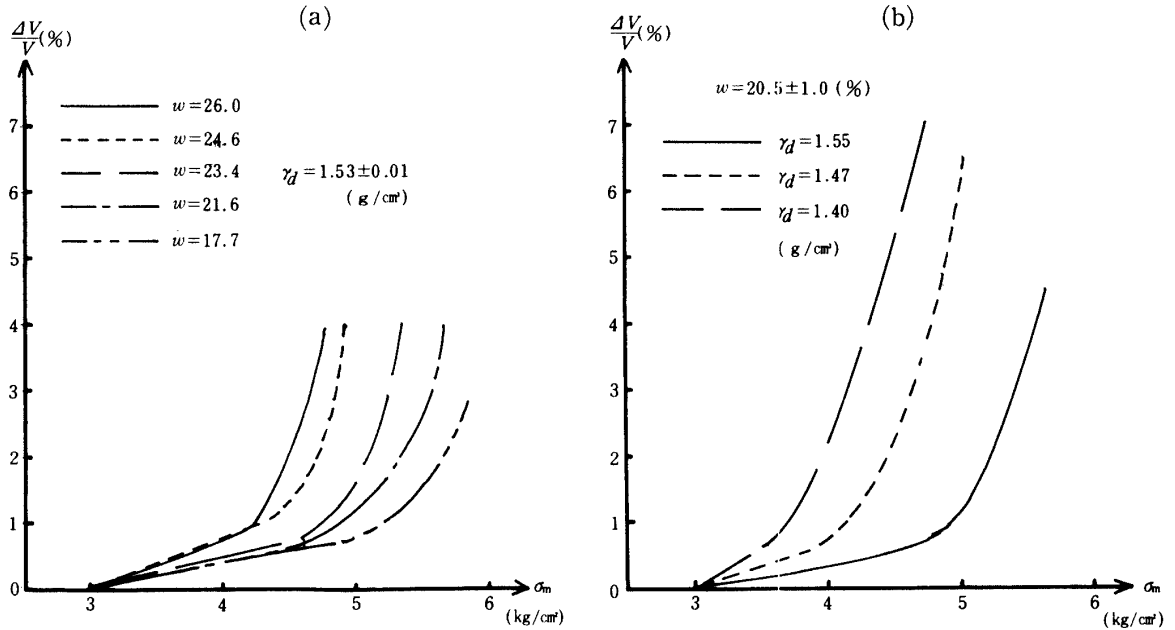


図-2：軸圧縮時の体積変化 $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$ と平均主応力 (σ_m) の関係

これらの関係より A グループの供試体では、体積変化量 $\frac{\Delta V}{V} = 1\%$ 位まで、B グループの供試体では $\frac{\Delta V}{V} = 0.5\%$ 位まで $\frac{\Delta V}{V} = K \cdot \sigma_m$ という一次関数で近似できる。この比例定数 K は、乾燥密度を一定にした場合は含水比が小さい程、また含水比を一定にした場合には乾燥密度が大きい程小さくなる傾向を示している。この $\frac{\Delta V}{V} \sim \sigma_m$ 関係が、初期の部分で一次関数として表わせる範囲は、軸ヒズミにして $\epsilon_a = 1\%$ 前後に相当する。つまり土がこの範囲では弾性挙動を示していることを示している。しかし、 σ_m が大きくなるにつれて $\frac{\Delta V}{V}$ は σ_m の多次関数となっている。

3-2 平均主応力 (σ_m) 成分による体積変化

飽和粘性土の圧密の研究においてその時間経過による、いわゆる時間特性というものが非常に重要な要素となっていることは既往の研究でも知られていることであるが、不飽和粘性土の平均主応力による圧縮特性についても当然検討されなければならないことである。まず、初期乾燥密度と初期含水比が同一の 4 本の試料を一連のものとして実験を行った。そして、側圧(平均主応力)を 0.1 kg/cm^2 増加させるのに、各々 10sec, 30sec, 1 min, 5 min の異なった速度で圧力を加えていき、ゴムスリーブによる影響を考慮すればその時の σ_m と $\frac{\Delta V}{V}$ との関係は、図-3 のように一次関数に近似でき $d\frac{\Delta V}{V}/d\sigma_m$ が求まる。次にその傾きと、側圧増加時間間隔 (t) との関係を半対数グラフを使ってプロットしたのが図-4 であり、この関係はほぼ直線近似され、

$$\frac{d\frac{\Delta V}{V}}{d\sigma_m} = a \log t + b$$

ここで a , b は定数

という関係式で表示できる。図より、傾きに相当する定数 a は含水比、乾燥密度が変化してもほぼ同様とみなしてよい。つまり、パラメータ乾燥密度、含水比にかかわらず、 σ_m の増加量を一

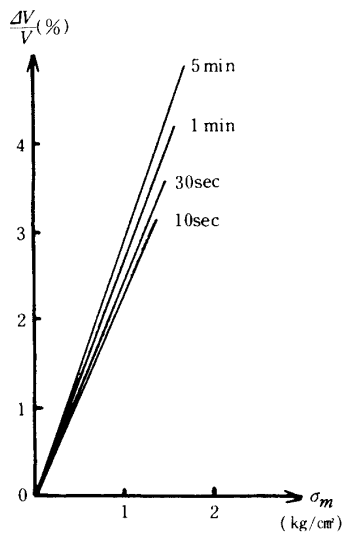
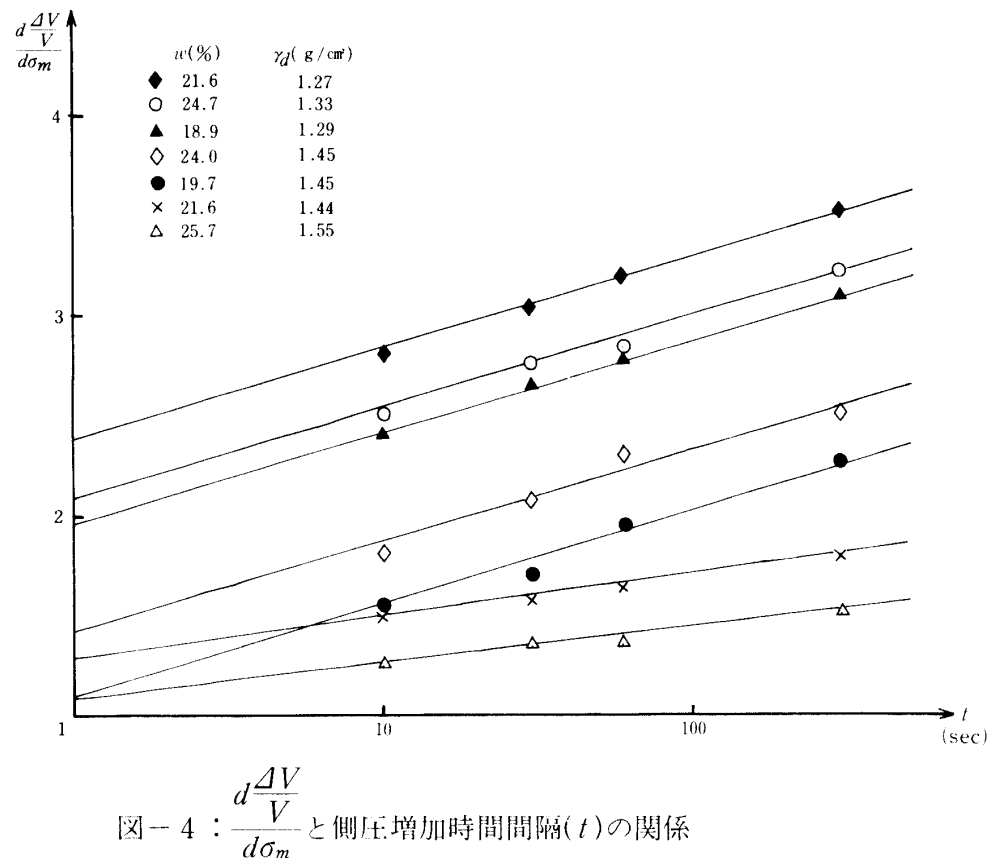


図-3：等方圧縮時の体積変化と平均主応力の関係

定にしたとき、体積変化量 $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$ は $\log t$ に比例することを示している。また、切片に相当する定数 b は初期圧縮量の大小による相違を意味するが、それは含水比を一定にした場合、乾燥密度が小さい程大きい。乾燥密度を一定にした場合、含水比が22~23%を境にして変化していると思われるし、 $\gamma_d \approx 1.3 \text{ g/cm}^3$ と $\gamma_d \approx 1.45 \text{ g/cm}^3$ の試料が、各々グループを形成していることから、含水比より乾燥密度による影響がかなり大きいといえる。そして、既報の方法により図-4を用い、三軸圧縮試験中の平均主応力成分による体積変化を求めて、軸ヒズミに対してプロットした一例が図-5であり、時間効果を考慮することによって σ_m による体積変化が、単純に分離した場合よりかなり小さくなっている。


 図-4： $\frac{d\frac{\Delta V}{V}}{d\sigma_m}$ と側圧増加時間間隔(t)の関係

3-3 体積変化 $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$ ~ 軸ヒズミ (ϵ) 関係

圧縮試験時の全体積変化量から平均主応力成分による体積変化量を差し引いて求めたセン断成分のみによる変化量と軸ヒズミとの関係を図-5にプロットした。セン断成分のみによる体積変化は、軸ヒズミの小さな範囲では膨張側にあり、 ϵ が増大すると次第に圧縮側に変化しているか、あるいはそのままほぼ一定値となっている。このような体積変化は供試体の乾燥密度、含水比によって変化し、含水比が一定の場合で、しかも側圧一定ならば、体積変化曲線は軸ヒズミ1

～ 2 % 付近で膨張から圧縮に転じ、かつ漸次 $d\frac{\Delta V}{V}/d\epsilon$ が増加する傾向にあり、その変化は乾燥密度が小さくなるほど著しい。一方乾燥密度が一定の供試体で側圧が一定の場合を比較すると、含水比が小さくなるにつれて、 $d\frac{\Delta V}{V}/d\epsilon$ が小さくなっていく。このようにセン断成分のみによ

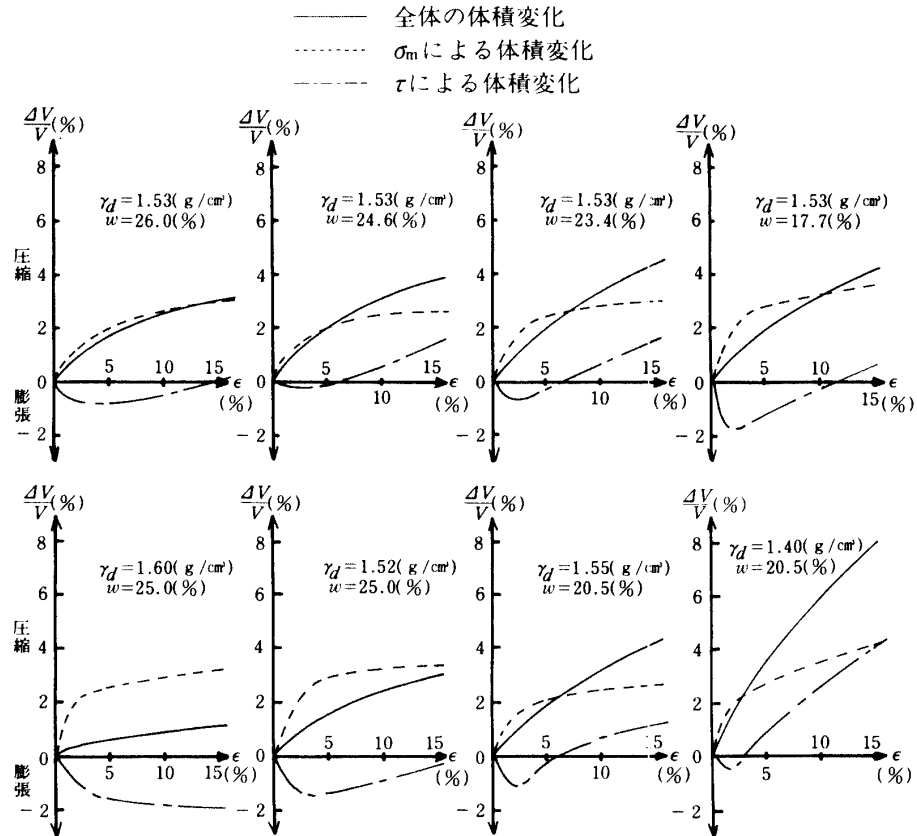


図-5：全体積変化， σ_m による体積変化， τ による体積変化と軸ヒズミとの関係

て体積が最初膨張し、途中で圧縮に転じたりするということは、セン断中の平均主応力による体積変化特性への寄与が相当影響していると思われる。

3-4 主応力差 $\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m}\right)$ とダイレタンシー係数 $\left(d\frac{\Delta V}{V}/d\epsilon\right)$ の関係

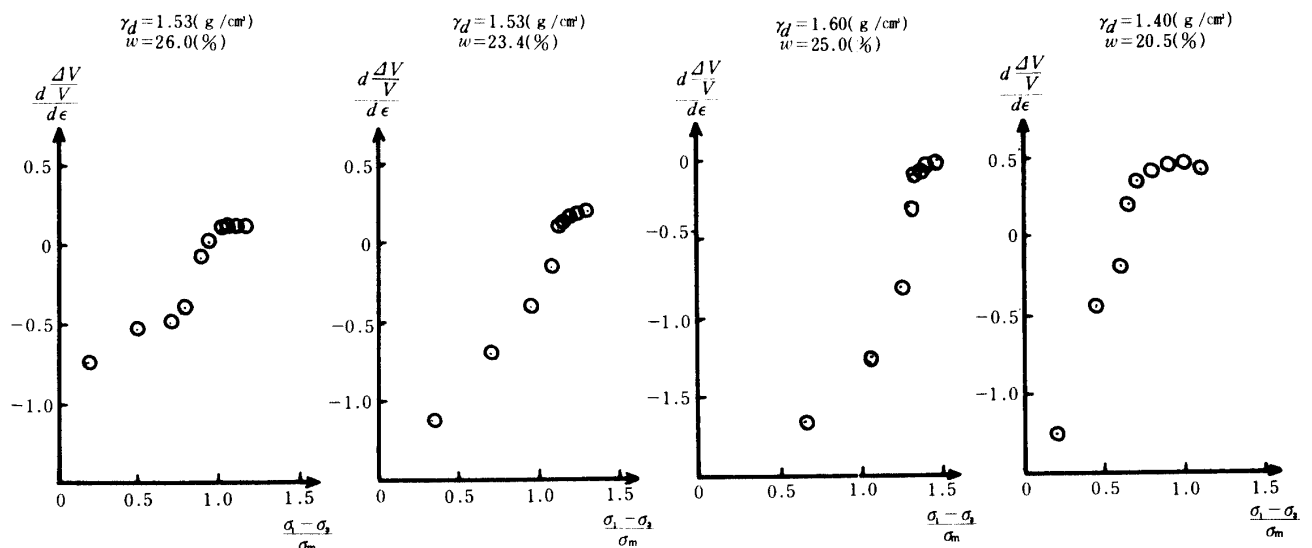


図-6： $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m}$ と $d\frac{\Delta V}{V}/d\epsilon$ の関係

ダイレタンシー係数は体積ヒズミ $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$ と軸ヒズミ (ϵ) の増分の比で表わされる。Taylor-Bishop のエネルギー補正において、補正量は $d\frac{\Delta V}{V}/d\epsilon$ の大きさに比例するものである。せん断成分のみによる $\frac{\Delta V}{V} \sim \epsilon$ 関係より、各々の微小部分におけるダイレタンシー係数は、体積ヒズミ増分 $\left(d\frac{\Delta V}{V}\right)$ を軸ヒズミ増分 $(d\epsilon)$ で割ると求まり、これが無次元であることを考慮して、 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m}$ との関係の一例を示すと図-6 のようになる。ここで、 σ_m , $\sigma_1 - \sigma_3$ はせん断成分分離時の計算誤差に基づく影響をなくするために、エネルギー補正前の値を使用した。ダイレタンシー係数は $\frac{\Delta V}{V} \sim \epsilon$ 関係に対応して、負 \rightarrow 0 \rightarrow 正と変化し、最終的にはほぼ一定値 $\left(d\frac{\Delta V}{V}/d\epsilon \approx 0.1 \sim 0.2\right)$ に収束している。さらに初期の部分（軸ヒズミにして2～3%）は直線的に増加する傾向にある。乾燥密度を一定にした場合、 $\gamma_d \approx 1.53$ より $\gamma_d \approx 1.41$ の方がよりよく初期部分を直線近似できる。つまり初期乾燥密度の小さい方が、 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m}$ に対して $d\frac{\Delta V}{V}/d\epsilon$ は一次関数で表わせる関係にあるといえるが、この場合密度は相対的に比較しているだけなので、さらに締固め特性との関係を考察する必要がある。一方、含水比が小さい場合、直線近似も悪くなり、傾きは側圧が同一ならばほぼ同じであるが、側圧が小さくなるにつれて減少する傾向にある。次に含水比を一定にしたとき、乾燥密度が小さくなるにつれて、側圧に無関係に傾きは大きくなっているが、この場合側圧が小さくなるにつれて、初期部分の直線近似が悪くなっている。このようにダイレタンシー係数は、含水比、乾燥密度、側圧をパラメータとして

$$\frac{d\frac{\Delta V}{V}}{d\epsilon} = f(\sigma_3, w, \gamma_d)$$

のような関数で近似できると思われる。特に初期の部分において $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m}$ との間には

$$\frac{d\frac{\Delta V}{V}}{d\epsilon} = K(\sigma_3, w, \gamma_d) \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m}$$

という表示ができる。

4. 体積変化によるせん断抵抗力の修正

一般に不飽和粘性土を圧縮していくと体積変化を生じる現象は容易に想像がつくところである。不飽和土の非排水三軸圧縮試験を行なう場合には、最初側圧 $\sigma_3 = 0$ から所定の側圧まで増大させるが、これは等方圧縮過程であり、平均主応力の増加によって体積変化が生じることになる。その時の体積変化量は無視できない量である。同様にして一定側圧で三軸圧縮試験を行なう場合、軸圧 (σ_1) の増加に伴って平均主応力が増加する。したがって、全体積変化量から平均主応力の増加による体積変化量を差し引いた量が、せん断成分のみによる体積変化量であるといえる。このように考えると逆に等方圧に起因するせん断抵抗力の修正をした値が、真にせん断のみによって生じたせん断抵抗力といえる。

4-1 体積変化を考慮したせん断抵抗力

Taylor-Bishop のエネルギー補正法をこの三軸圧縮試験にも適用する。すなわち、軸ヒズミの増分 $d\epsilon$ の間に拘束圧力 σ'_3 に抗して $d\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$ の体積ヒズミの増分を生ずるための仕事は、

$\sigma'_3 \cdot \delta \left(\frac{\Delta V}{V} \right)$ であり、この間に外部より加えた仕事は $(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \delta \epsilon$ であり、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ を土のせん断のみに消費された部分の主応力差とすると、

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 - \sigma_3)_r + \sigma'_3 \frac{d \frac{\Delta V}{V}}{d \epsilon}$$

となる。⁵⁾ この方法によって求めた主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ と軸ヒズミとの関係を求めると図-7の破線のようになる。図でせん断成分のみによる応力-ヒズミ曲線は、軟鋼の応力ヒズミ曲線と類似した形であり降伏点が表われている。このような現象は Whitman の砂の動的試験や、河上の粘性土の一軸圧縮試験にもみられている。⁶⁾ このように軸ヒズミ $\epsilon = 1\%$ 前後で鋼の場合の上降伏点付近の挙動に類似した挙動がみられるということは、せん断面上の土粒子のすべり抵抗の増大、すなわちヒズミ硬化性の影響がかなり大きいと推察できる。この補正したせん断抵抗力の最大値は、乾燥密度が一定の場合には含水比が小さい程大きく、含水比が一定の場合には乾燥密度が大きくなるほど大きい。このような傾向はダイレタンシー補正をしない場合の傾向と一致するところである。しかし、ダイレタンシー補正をしたときのせん断強さは、補正しない場合より小さく、その低下率は上降伏点に相当するせん断抵抗力で約20%、軸ヒズミ15%におけるせん断抵抗力で約5%である。しかし、低下率そのものについては、含水比、乾燥密度によって一定の傾向を示していない。

4-2 不飽和土の破壊強さ

不飽和土の非排水試験結果をモールの応力図で表わすと、応力円の破壊線ははじめ曲線状で側

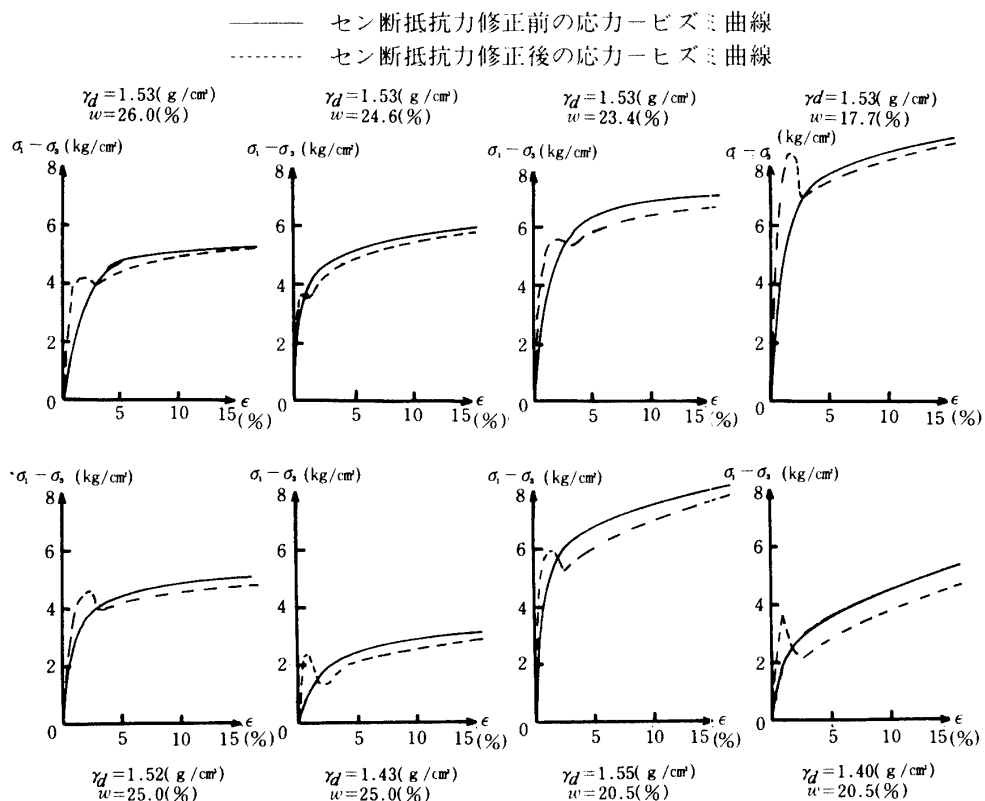


図-7：せん断抵抗力修正前後の応力-ヒズミ曲線

圧の増大とともに傾きを減じ、ついには $\phi = 0$ の状態となる。実際は拘束圧の増加に伴って間ゲキ圧が増大し有効応力が変化するので、有効応力表示すれば $\phi = 0$ とならない。したがって不飽和土において c , ϕ の値を示すには、ある応力範囲を決めて、その範囲内の破壊線に近い直線を用いて c , ϕ を求める必要がある。しかし、ここでは次に示すように3種の破壊線に分けてセン断抵抗力の修正による影響についてのみ考察する。

- ① セン断抵抗力の修正を施さない場合の破壊線。
- ② セン断抵抗力の修正後（ダイレタンシー補正後）の降伏点での破壊線
- ③ セン断抵抗力の修正後の塑性領域における $\epsilon = 15\%$ での破壊線

上記三つの破壊線を比較すれば、セン断抵抗力の修正を施さない場合と修正後の $\epsilon = 15\%$ での破壊線との結果はほぼ同じとみなせるが、わずかに修正後の $\epsilon = 15\%$ での破壊線が下に位置して、粘着力の低下がある。しかし、セン断抵抗力の修正を施さない時と、修正後の降伏点での破壊線を比べた場合、摩擦角はほぼ同じであるが、粘着力については、修正後の降伏点での破壊線の方が、 0.5 kg/cm^2 前後低下している。すなわち、本実験のようにセン断抵抗力の修正を施さないで用いられている強度定数が、真の値よりも過大視されている傾向にあるということを意味している。そして実際の土構造物の設計に際して、かなり危険側の安定計算が行なわれているということがいえる。それゆえ Mohr-Coulomb の破壊規準を適用して求められる強度定数 c , ϕ は、ダイレタンシーによるセン断抵抗力の修正をした時の降伏点荷重に基づいて決める必要がある。

5. むすび

以上の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 圧縮試験中の平均主応力と体積変化とは軸ヒズミにして1%前後まで

$$\frac{\Delta V}{V} = K \cdot \sigma_m$$

と表示できる。また時間効果を考慮することによって、平均主応力の一定増加量に対する体積変化は

$$\frac{d\frac{\Delta V}{V}}{d\sigma_m} = a \log t + b$$

と表示できて、単純に分離した場合よりかなり変化率が減少している。そして、その影響は軸ヒズミが大きくなるにつれて増大する。

- (2) エネルギー補正を行ってセン断抵抗力の修正を行なうと、その応力-ヒズミ曲線は軟鋼の応力-ヒズミ曲線と類似し、曲線のはじめの部分でかなり弾性挙動を示し、明瞭な降伏点を経てから塑性領域に入る。これは、载荷速度の速い一軸圧縮試験や、動荷重を受ける密な飽和砂の挙動にも類似している。さらにセン断抵抗力はエネルギーの修正前と比べて降伏点付近で約20%、塑性域で約5%の低下がある。
- (3) セン断成分のみによる体積変化はヒズミの小さい範囲では膨張側にある。また、ヒズミが

増大すると次第に圧縮側に変化しているか、あるいはそのままほぼ一定となって過圧密粘性土の体積変化挙動に類似している。さらに修正されたせん断抵抗力に基づくダイレタンシー係数は、修正前の $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m}$ と対比すれば降伏点付近で

$$\frac{d\frac{\Delta V}{V}}{d\varepsilon} = K(\sigma_3, w, \gamma_d) \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_m}$$

というように表示できる。

- (4) 不飽和土の破壊強度について、せん断抵抗力の修正によって表われる降伏点強度に Mohr-Coulomb の破壊規準を適用し、修正前の破壊包絡線と比較するならば、修正を施さない強度定数は粘着力項が過大評価され、設計に際して危険側の定数を与えることになる。最後に、御指導いただいた新潟大学工学部 小川正二助教授に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) Jennings, J.E.B. and Burland, J.B. (1962) : Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils, *Géotechnique* Vol.12, No. 2, pp. 125-144.
- 2) Kondner, R.L (1963) : Hyperbolic Stress-Strain Response Cohesive Soils, *Proc. ASCE*, Vol. 89, No. SM 1, pp. 115-143.
- 3) Daniel, D.E. and Olson, R.E. (1974) : Stress-Strain Properties of Compacted Clays, *Proc. ASCE Journal of the Géotechnical Engineering Division*, pp. 1123-1136.
- 4) 小川, 沢崎, 山本 (1976) : 締固めた不飽和粘性土の強度と変形, 第11回土質工学研究発表会講演集 pp. 247-250.
- 5) 最上武雄, 土質力学, 技報堂, p.529.
- 6) 河上房義, 地震時の土の力学的性質, 土質工学会, 地震と地盤 pp.39-48.