

京都大学防災研究所 正員 村山翔郎

同上 正員 栗原則夫

1. まえがき

粘土のせん断特性を支配する主な要素として、現在の応力条件、固ゲキ比、応力履歴、温度などがあげられるが、このうち応力履歴の影響については、いまだ統一的な説明が与えられていないのが現状である。その一つの原因として、三軸試験などでは供試体全体にわたってせん断変形を与えたり、また大変形を与えたりすることがむずかしく、結局測定結果がどの程度せん断領域の状態を反映しているか解らないという測定技術上の困難さに加えて、とくに過圧密粘土の場合、後述するようにその傾向が助長されるということが考えられる。そこでこの研究では、繰返し飽和粘土について、一定の含水比において、破壊荷重以下の荷重で種々の繰返しせん断を行ない、供試体のより広い部分に、より均一なせん断変形を与え、種々の応力履歴が繰返し粘土の破壊強度に及ぼす影響について主に調べた。なおデータの一部は、本年度関西支部学術講演会において発表している。

2. 試料および試験方法

試料は、京大防災研究所構内の湿地帯から採取した粘土で、物性は $L.L. = 38.3\%$ 、 $P.L. = 25.5\%$ 、粘土分 50% である。この粘土を高含水比で充分繰返し、 0.5 kg/cm^2 の圧力で再圧密したものを供試体として用いた。試験は、ヒズミ制御式の圧密非排水三軸圧縮試験で、繰返し載荷の種類によって試験Ⅰ、Ⅱ、Ⅱ'、Ⅲ、Ⅳに分類される。まず試験Ⅰは、普通の圧縮試験で繰返し載荷は行なわない(記号Sで表わす)。試験Ⅱでは、図-1のようにヒズミ $\epsilon = 1\%$ まで5サイクルの載荷除荷を行ない、その後 $\epsilon = 10\%$ まで載荷し、除荷して、最終的に破壊まで載荷した(記号Rで表わす)。試験Ⅲは、ヒズミ増分 $\delta\epsilon = 1\%$ となるように19サイクル繰返し(載荷し、ついで $\delta\epsilon = 2\%$ で2サイクル繰返し載荷し、その後破壊させた。試験Ⅳでは、まず $\epsilon = 1\%$ まで載荷

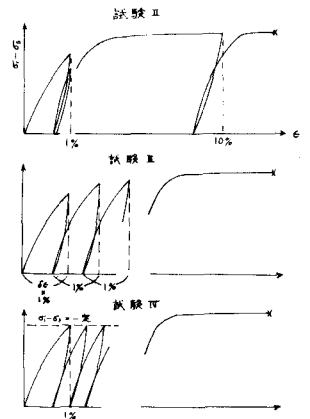


図-1 試験の種類

し、以後そのヒズミの $\sigma_1 - \sigma_3$ まで計25サイクル繰返し(載荷し、その後 $\sigma_1 - \sigma_3$ を大きくして2サイクル繰返し、最後に破壊に至らせた。試験Ⅱ、Ⅳは、図-1に図で説明している。また試験Ⅱ'では、最初から $\epsilon = 10\%$ まで載荷し、除荷して、ついで破壊させた。試験Ⅰ、Ⅱでは、あらかじめ等圧圧密試験によって求めた含水比が一定(25.3%)となるような圧密圧力 $3.0, 1.2, 0.7, 0.44 \text{ kg/cm}^2$ のものについて、他の試験では圧密圧力 3.0 kg/cm^2 のものについてそれぞれせん断した。ヒズミ速度は、載荷時で $330\%/1\%$ 、除荷時で $1000\%/1\%$ で、すべての場合、せん断開始前に $\text{back pressure } 1.0 \text{ kg/cm}^2$ を半日以上作用した。

3. 試験結果および考察

3-1. 破壊強度: 破壊を $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ で定義すると、各試験で破壊時の諸量は表-1のようにな

る。破壊点を $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \sim (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 図上にプロットすると、図-2の通りである。まず、すべての点が同一の破壊線上にのっていることが特徴である。そして試験Ⅰの各破壊点がバラついていて、破壊ヒズミもバラついているのに対して、試験Ⅱでは、繰返しせん断の効果によって、応力履歴が違っているにもかかわらず破壊点はほぼ同じような位置に集中しており、破壊ヒズミも小さくなってバラツキが小さくなっている。これは次のような要因のためと考えられる。

試験の種類	σ_c (kg/cm ²)	w_i (%)	w_f (%)	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ (kg/cm ²)	Δu_f (kg/cm ²)	ϵ_f (%)
Ⅰ	3.0	33.0	25.3	2.480	2.00	11.3
	1.2	33.2	24.9	2.468	0.24	9.6
	0.7	33.1	25.6	2.092	-0.16	7.8
	0.44	32.3	25.2	1.739	-0.35	14.0
Ⅱ	3.0	33.1	25.3	2.436	2.100	13.1
	1.2	33.8	25.5	2.341	0.282	16.0
	0.7	33.1	25.2	2.357	-0.195	13.7
	0.44	32.9	24.9	2.293	-0.541	13.1
Ⅱ'	3.0	—	25.3	2.441	2.019	13.6
Ⅲ	3.0	32.4	24.7	2.267	2.44	11.2
Ⅳ	3.0	—	24.1	2.575	1.921	12.9

表-1 試験結果

試験Ⅰのような普通の三軸非排水試験では、過圧密粘土がせん断されると、せん断領域で員の間ゲキ水圧が発生し、したがってこの領域での有効応力は増大し、せん断はその領域でさらに進行する。そして三軸試験機の性質上、そのような現象および端面拘束その他の影響で、せん断が比較的狭い領域で進行し、供試体の他の部分が充分 mobilize されないうちに破壊してしまうため、強度が小さく測定されたり、バラツキが生じたりする。

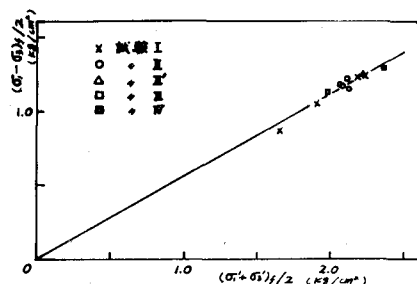


図-2 破壊強度線

こうした現象が繰返しせん断によってより広範囲にせん断されることによって是正され、上述のような効果が生じたと考えられる。一方、正規粘土ではせん断領域で正の間ゲキ水圧が発生するため、過圧密粘土の場合と逆の現象が生じて、せん断は有効応力の大きいまわりの領域に拡大して、比較的広範囲がせん断される。その結果、正規粘土は繰返しせん断と同じような破壊点を与える。このことは、図-4において試験Ⅰの最終の経路が他の繰返しせん断の最終の経路に近いものとなっていることから推察される。

3-2 繰返しせん断によって生じる限界状態

図-3に試験Ⅱ、Ⅱ'、Ⅲ、Ⅳのそれぞれの繰返し載荷の最終の載荷の出発点で供試体中に残留している間ゲキ水圧 (Δu_r) を圧密圧力 σ_c に対してプロットしてある。図から両者は直線関係にあり、しかも重要なことは、その直線の勾配がほぼ 45° となっていることである。すなわち、試験Ⅱ、Ⅲ、Ⅳのものは多少バラツキがみられるが、最終の載荷の出発点において各試験の供試体中の粒子間の有効応力はほぼ等しい(この場合約 0.7 kg/cm^2) ということである。このことから定性的に次のことがいえる。すなわち、含水比が同一で応力履歴の異なる粘土の相違は構造の相違にあると考えられるが、それら非排水状態で繰返しせん断することによって一種の繰返し効果を与えてやると、構造が乱されてすべて同じような構造となる。

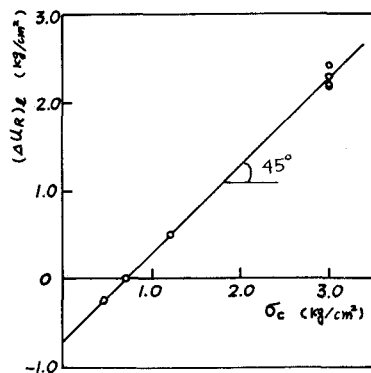


図-3 最終的な残留間ゲキ水圧と圧密圧力の関係

構造の乱れは、残留間ゲキ水圧の発生となって現われ、結局、十分繰返しせん断が行われる、供試体

が十分繰返された状態になると、構造が同じになり、粒子間の有効応力も同じになる。いいかえると、繰返しによりて現出する一定の限界状態が各含水比について存在し、その状態での粒子間の有効応力は、含水比によりて一義的に決まる。これを式で表わすと、 $\sigma'_c = \sigma'_{re} + \sigma'_s \dots\dots (1)$

ここに、 σ'_c は、圧密平衡状態における粒子間有効応力、 σ'_{re} は、その含水比での繰返し限界状態での有効応力、 σ'_s は、圧密圧力のうち構造によりて受けてたれこいる部分で、繰返しによりて消滅する。

3-3 繰返し載荷の最終的載荷時のせん断特性

図-4に最終載荷時の有効応力経路を示す。図中には比較のため、試験Ⅰの $\sigma_c = 0.7 \text{ kg/cm}^2$ のものが示されている。立ち上る点にバラツキがみられるが、経路は同じような傾向を示しており、破壊に近いところではほとんど同じような位置にきている。また、試験Ⅰの経路より上にふくらんでおり、経路が図-2の破壊線の上側へ出ていることがわかる。すなわち、図-2からこの粘土では $\phi = 0$ と考えられるから、図-4より、最終載荷時に破壊時の ϕ より大きい ϕ をmobilizeしたので、試験の種類、応力履歴の違いにかかわらず破壊時には、同一の ϕ が発揮されることわかる。図-5に最終載荷時の応力、間ゲキ水圧～ヒズミ曲線の例を示してある。応力～ヒズミ曲線の形から最終載荷時には粘土は塑性状態になっていることがわかる。

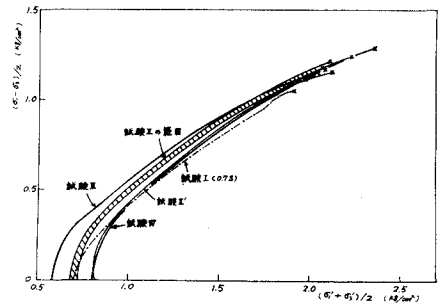


図-4 最終載荷時の有効応力経路

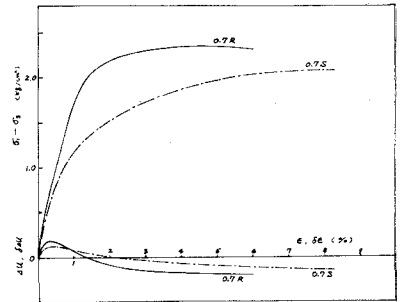


図-5 最終載荷時の応力、間ゲキ水圧～ヒズミ曲線の例

3-4 繰返し載荷時の力学特性(試験Ⅲ,Ⅳ)

図-6に試験Ⅳの繰返し載荷時の応力～ヒズミ曲線上のいろいろな応力における接線の勾配 E_t (接線弾性係数)と繰返し回数 n の関係を示す。 $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.3 \sim 1.2 \text{ kg/cm}^2$ では、 n の増加とともに E_t は減少($\sigma_1 - \sigma_3$ の小さいほど変化は大きい)しているが、 $\sigma_1 - \sigma_3 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ ではわずかに増加している。これは砂について同様の形式の繰返し荷重試験で得られている関係と逆な傾向である¹⁾。次に、繰返しせん断時の残留ヒズミについては、砂の場合

$$E_{rn} = m / a + b n \quad (\text{佐々木の式}) \dots\dots (2)$$

が成立することからわかっている。ここに E_{rn} は n 回目の残留ヒズミ、 n は繰返し回数、 a, b は定数である。試験Ⅲ,Ⅳについて E_{rn} と n の関係を示したのが図-7である。もし(2)式が成立するならば、図にあって m/E_{rn} と n の間には直線関係が得られる筈である。試験Ⅲでは、 $n \approx 12 \sim 13$ までは直線であって、図から $a = 1.72$ 、 $b = 0.11$ が得られ、結局 $n \rightarrow \infty$ とすると、 $E_R = 9.09\%$ が得られる。一方、試験Ⅳでは、この繰返しの範囲では(2)式は成立し

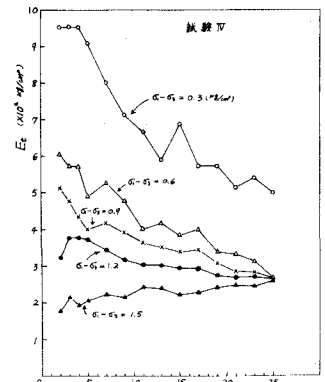


図-6 繰返し載荷による接線弾性係数の変化

こいがい。試験Ⅲ、Ⅳのこの違いは、図中にも示しているように、 e_R の値が試験Ⅲでは直線部分で4~5%であり、十分塑性状態に入っているに対して、試験Ⅳでは $n=25$ でも $e_R=1.94\%$ であり、まだ十分塑性状態となっていないことが一つの理由と考えられる。また、もっと n を大きくすると直線関係が得られることも考えられる。

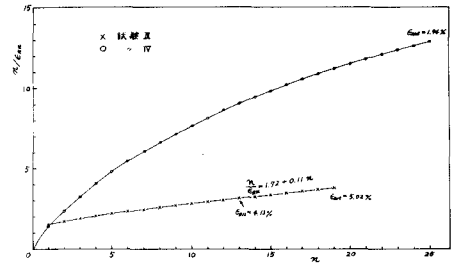


図-7 残留ヒズミと繰返し回数の関係

図-8 (a)(b)に繰返し載荷時の有効応力経路を示す。各経路において、それぞれの出発点からのヒズミ増分 $\delta\epsilon$ の等しい点を結ぶと図中の点線のような等ヒズミ増分線が得られる。

(a)(b)において、それぞれの等ヒズミ増分線は原点を通る曲線となっているが、同じ $\delta\epsilon$ の線でも位置はずれしており連続性はみられない。これは、図-7からわかるように繰返し載荷時の試験Ⅲ、Ⅳの状態が異なるためであろう。この等ヒズミ増分線をもう少し詳しく調べるため、例えば図-9において $\delta\epsilon$ をパラメーターにして $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)$ を n に対してプロットすると、 $\delta\epsilon$ の如何にかかわらず $n \geq 15$ では $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3) = \text{一定}$ の傾向がみられる。 $n=15$ の経路より左側では、等ヒズミ増分線は原点を通る直線となる。さらに $\delta\epsilon$ をパラメーターに、各経路の出発点における残留間ゲキ水圧 u_{UR} からの増分 δu_{UR} と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の比で定義した間ゲキ水圧係数 A_δ を n に対してプロットすると図-10のようになり、 $\delta\epsilon$ の小さいところではバラツキがみられるが、やはり $n \geq 15$ では $A_\delta = \text{一定}$ となっている。すなわち、 $n \geq 15$ では $\delta\epsilon$ が決まれば ϕ' のmobilizationが決まり、間ゲキ水圧係数 A_δ が決まる。

4. 謝辞

本研究に当っては、京都大学研修員松川元氏に実験上の並みならぬ御協力を得たことを付記し、ここに謝意を表する次第である。

[参考文献] 1) 村山ハ本“砂質土の変形特性について”土と基礎 1965年2月

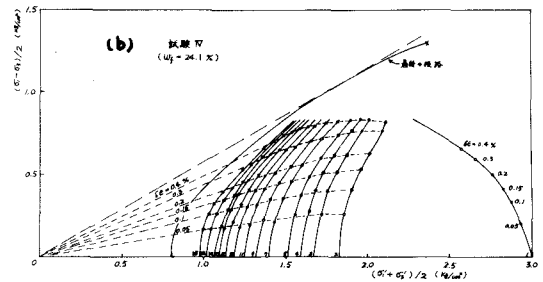
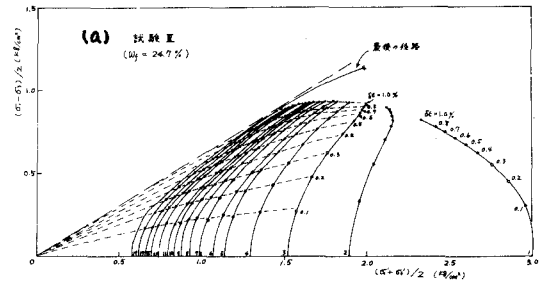


図-8 等ヒズミ増分線

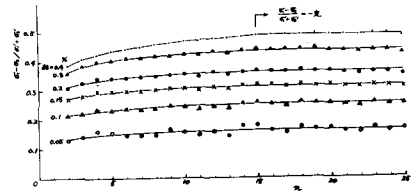


図-9 ϕ' のmobilizationの変化

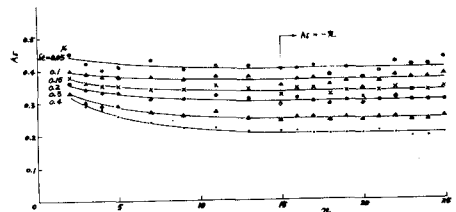


図-10 等ヒズミ増分線上での間ゲキ水圧係数