

繰り返しせん断における粘土の力学特性

村 山 朔 郎・栗 原 則 夫

MECHANICAL PROPERTIES OF CLAY UNDER THE REPETITIOUS LOADS

By *Sakuro* MURAYAMA and *Norio* KURIHARA

Synopsis

Triaxial repetitious compression tests were performed on saturated remoulded clay specimens under the undrain condition and changes in some mechanical properties due to repetitious loading were investigated.

Furthermore, the influence of stress history on the shear strength was discussed.

Principal conclusions obtained from these tests are as follows;

(1) It may be supposed that, if clay specimens, whose water contents are equal but whose consolidation histories are different, are remoulded by applying repetitious loads, the effective stresses in the specimens thus remoulded are almost equal.

(2) The shear strength and the strain which appear in the specimen at failure become almost constant due to the repetitious loading irrespective of its history whether it is normally consolidated or overconsolidated.

1. ま え が き

粘土のせん断特性を支配する主要素として、その時点で粘土が受けている応力条件、間ゲキ比、応力履歴、温度などがあるが、このうち応力履歴の影響については、まだ統一的な説明がされていないようである。その原因の1つに、実験上の問題として、現在用いられている試験装置の欠陥によって、試料を均一にせん断したり、大変形を与えたりしにくいということが考えられる。ここでは、繰り返し飽和粘土を用いて、三軸非排水圧縮試験による繰り返しせん断によって、より均一なせん断変形が試料に与えられることを期待し、繰り返しせん断時の粘土の力学的性質の挙動を調べるとともに、主として圧密履歴などの応力履歴が破壊時の強度やヒズミにどのような影響を及ぼすのかを考察してみた。

2. 試料および試験方法

試料は、防災研究所宇治川水理実験所構内の沼沢地から採取した粘土で、その物性は $L.L. = 38.3\%$, $P.L. = 25.5\%$, 粘土分 $= 60\%$, 比重 $= 2.73$ である。この粘土を高含水比で繰り返し、大型圧密容器で 0.5 kg/cm^2 の圧力で再圧密したものを、硫酸紙とパラフィンで密閉包装し、恒温室内で一定期間養生したものを供試体として用いた。

試験はすべて圧密排水三軸圧縮試験で、載荷方法はヒズミ制御式である。試験方法は、繰り返しの方法によって、Fig. 1 に示すように五種類行なった。すなわち、

(イ) 試験 1 は、通常の圧縮試験で繰り返しせん断は行なわないもの。

(ロ) 試験 2 は、ヒズミ $= 1\%$ の間でまず 5 サイクル繰り返しせん断し、次にヒズミ $= 10\%$ までせん断し、

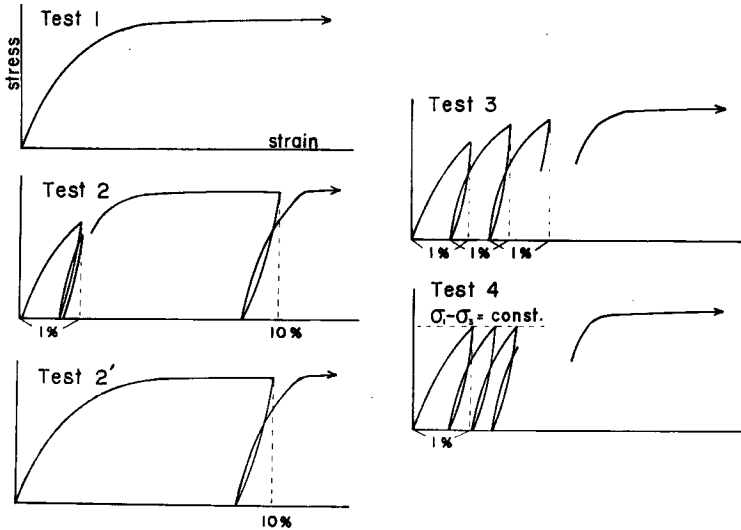


Fig. 1 Figures explaining the test methods

除荷した後、破壊させるもの。

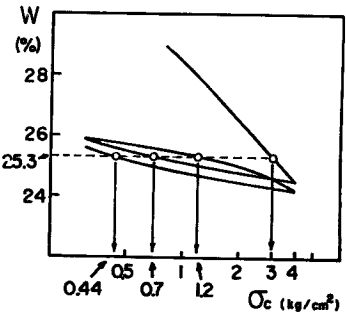
(ハ) 試験2'は、最初からヒズミ=10%までせん断し、除荷して後、破壊させるもの。

(ニ) 試験3は、各回のヒズミ増分が1%となるような繰り返しせん断を19サイクル行なった後、ヒズミ増分を2%にして2サイクル繰り返し、その後破壊させるもの。

(ホ) 試験4は、最初ヒズミ=1%までせん断し、以後そのときの応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ の値で、 $\sigma_1 - \sigma_3$ =一定となる繰り返しせん断を25サイクル行ない、その後 $\sigma_1 - \sigma_3$ の値を大きくして2サイクル繰り返し、最終的に破壊させるもの。

試験1, 2については、あらかじめ行なっていた等方圧密試験による Fig. 2 のような圧密曲線から、含水比が一定(この場合 25.3%)となる点を4点求め(それぞれ圧密圧力 $\sigma_c = 0.44, 0.7, 1.2, 3.0 \text{ kg/cm}^2$ のもの)、それらの点に相当する供試体について試験した。他の試験はすべて $\sigma_c = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ のものについて行なっている。

ヒズミ速度は、載荷時で約330分/1%、除荷時で約1000分/1%であり、すべての試験において圧密終了後、せん断開始前に、 1.0 kg/cm^2 の back pressure を半日以上作用した。

Fig. 2 Consolidation curve (w =water content, σ_c =consolidation pressure)

3. 結果および考察

3-1 繰り返しせん断時の力学的性質

3-1-1 弾性係数

繰り返しせん断時の応力～ヒズミ曲線から、応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ をパラメーターとして、各 $\sigma_1 - \sigma_3$ における曲線の接線の勾配、すなわち接線弾性係数 E_t を繰り返し回数 n に対してプロットすると Fig. 3(a), (b) のようである。(a)は試験3、(b)は試験4についてのもので、図中の記号は同じである。 $\sigma_1 - \sigma_3 < 1.2 \text{ kg/cm}^2$ の場合、1サイクルから2サイクルに渡って E_t は急に大きくなり、以後 n の増加とともに減少(その割合は $\sigma_1 - \sigma_3$ の小さいほど大きい)し、 n の大きいところで $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.3 \text{ kg/cm}^2$ 以外のものはすべて同じ

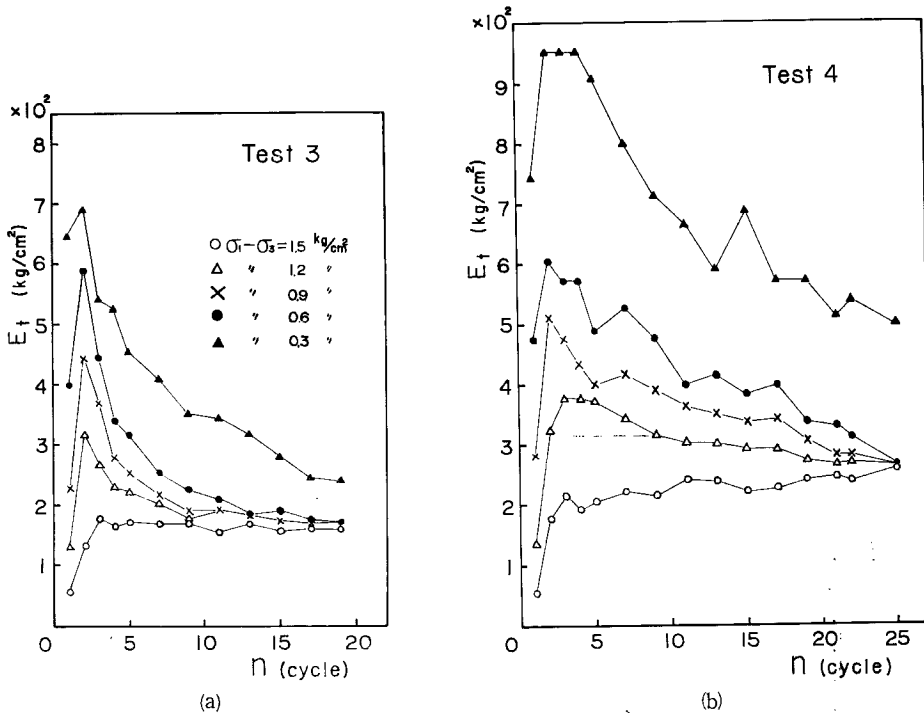


Fig. 3 Relationship between tangential elastic modulus E_t and repetitive cycle n : (a) for test 3 (b) for test 4

E_t の値に落着いている。 $\sigma_1 - \sigma_3 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ のものについては、 E_t は n とともに漸次増加し、最終的に $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.6, 0.9, 1.2 \text{ kg/cm}^2$ はのものと同じ値になっている。以上のことは (a), (b) とともに共通している傾向であるが、2 サイクル以後の E_t の大きさ、および E_t が n の大きいところで落着く値は (a), (b) で異なっている。1 サイクルでの (a), (b) の各 $\sigma_1 - \sigma_3$ における E_t の値がそんなに変わらないことからみて、これは主として試験 3, 4 で繰返しせん断時の $\sigma_1 - \sigma_3$ の範囲が異なっていることなどの試験の違いによる原因によるものであろう。

一方、砂について行なわれた試験 4 と同様の繰返し三軸圧縮試験（側圧一定）の結果⁹⁾をみると、 E_t は n の増加とともに増加しており、Fig. 3 の傾向とは逆の傾向を示している。これは、その試験が排水試験で、繰返しとともに体積減少しているのに対し、試験 4 は非排水試験で繰返しとともに正の間ゲキ水圧が増加しているという両方の試験の差異によるものであろう。

3-1-2 残留ヒズミ

村山・岩井²⁾によれば、現地盤の締固めの際の永久沈下量の計算に用いられている佐々木の式³⁾は、砂の排水条件における繰返し三軸圧縮試験にも適用できる。すなわち、繰返しせん断時の各回の残留ヒズミを ε_R 、繰返し回数を n とすると、 ε_R と n との間には、

$$\varepsilon_R = \frac{n}{a + bn} \quad (a, b \text{ は定数})$$

が成立する。この式が粘土の場合についても成立するかどうかを検討してみる。もし上式が成立するとすれば、式の変形から、 n/ε_R と n の間に直線関係が成立する筈である。Fig. 4 に試験 2, 3, 4 についてのプロットを示す。(a) は試験 2, (b), (c) は試験 3, 4 についてのものである。まず (a), (b) から、試験 2 では n の範囲が小さくてはっきりしたことはよくわからないが、少なくともこの繰返しの範囲では n/ε_R と n の間には直線関係が成立しており、試験 3 では $n=10$ くらいから直線関係が成立している。しか

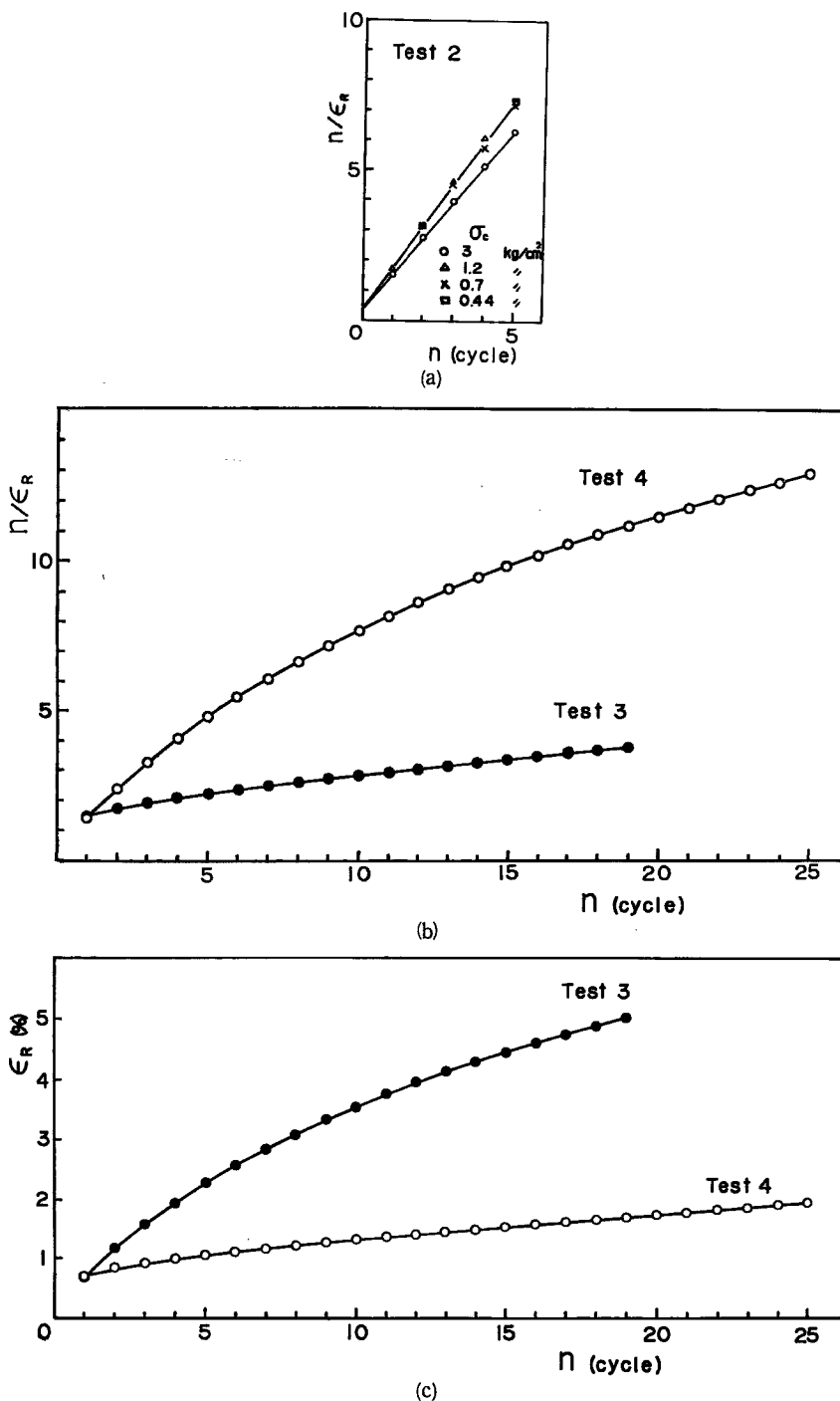


Fig. 4 Relationship between residual strain ϵ_R and repetitious cycle n :
(a) for test 2, (b) and (c) for test 3 and test 4

し、試験4では、この範囲では n/ε_R と n の間には直線関係はない。ところで、Fig. 4 (c) のように ε_R と n をプロットしてみると、試験4では ε_R は n と直線関係 ($n > 10$ において) にあるとわかる。以上のよう
に粘土の場合、砂について成立する残留ヒズミと繰り返し回数の関係式は成立する場合としない場合があり、さらに繰り返しを行なう $\sigma_1 - \sigma_3$ の範囲、載荷の方法や条件、排水条件などを変えて試験しなくては、はっきりしたことはいえないが、一般的に粘土の場合に佐々木の式が成立するとはいえないようである。

3-1-3 残留間ゲキ水圧

各試験の最終の載荷直前の除荷された状態を考える。そのとき各供試体中に残留している間ゲキ水圧 Δu_R をそれぞれの圧密圧力 σ_c に対してプロットすると Fig. 5 のようになる。図から Δu_R と σ_c の間には $\sigma_c = 0.7 \text{ kg/cm}^2$ を切片とする。傾き 45° の直線関係が得られる (実際は含水比のバラツキによって、 $\sigma_c = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ のものについては多少プロットのバラツキが見られる)。

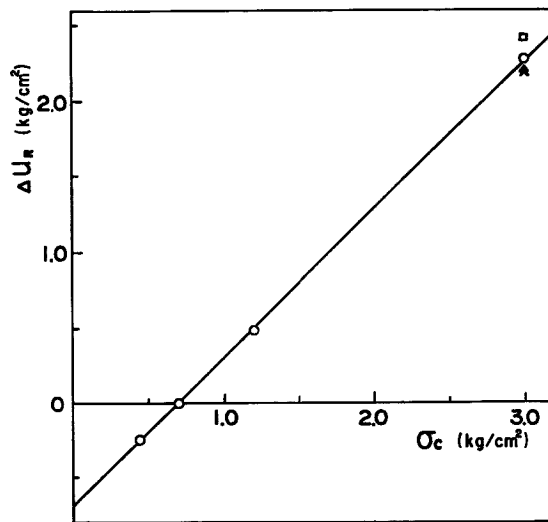


Fig. 5 Residual pore-water pressures in the remoulded, unloaded specimens after repetitious loading (Δu_R = residual pore-water pressure, σ_c = consolidation pressure)

これは、この状態で各供試体中の有効応力がすべて約 0.7 kg/cm^2 であることを意味している。ところで、繰り返しせん断によって供試体は繰り返され、最終的にはよく繰り返された一種の平衡状態に近づくと考えられる。したがって、上の結果から、「含水比が等しく、圧密履歴の異なる供試体が、非排水状態で繰り返しせん断によって繰り返し効果を受けると、初期の圧密履歴の相違にかかわらず、最終的にせん断応力の作用していない状態で、すべて等しい有効応力をもつようになる」ということが予想される。この点の議論は、さらにデータを集積した上で確めてゆきたい。

3-2 最終の載荷時のせん断特性

Fig. 6 に各試験の最終の載荷時の応力経路を示す。立ち上りの点は、供試体によってバラツキがみられるが、経路はすべて (試験1の経路以外の) ごく近くに集っており、 $\sigma_1 - \sigma_3$ の大きいところではほぼ同じ経路を示すといえる。とくに全く同じヒズミ履歴を与えた試験2の各経路は、すべて図中の斜線で示した狭い領域にあり、全く同一の経路であるといえる。図中の一点鎖線は、繰り返しを行なわない試験1の $\sigma_c = 0.7 \text{ kg/cm}^2$ のものを示しているが、これと他のものとの違いをみるため、Fig. 7 に試験1, 2のものの $\sigma_c = 0.7 \text{ kg/cm}^2$ の応力～ヒズミ曲線、間ゲキ水圧～ヒズミ曲線を示す (試験2については、最終の載荷の出発

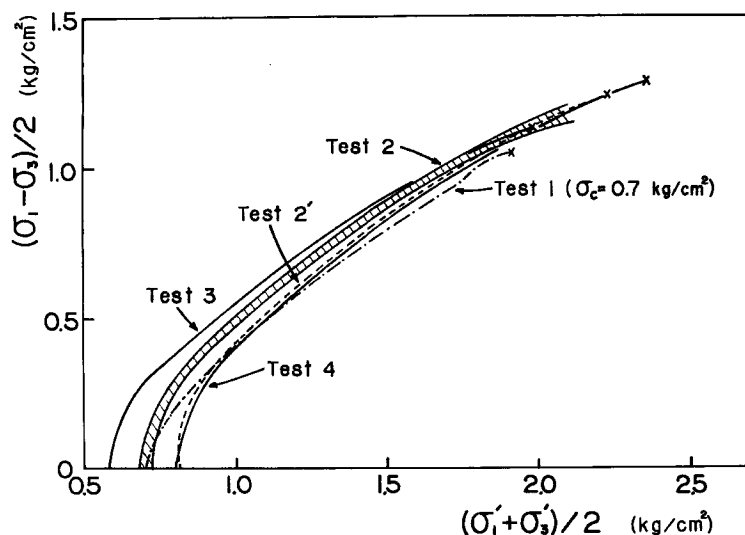
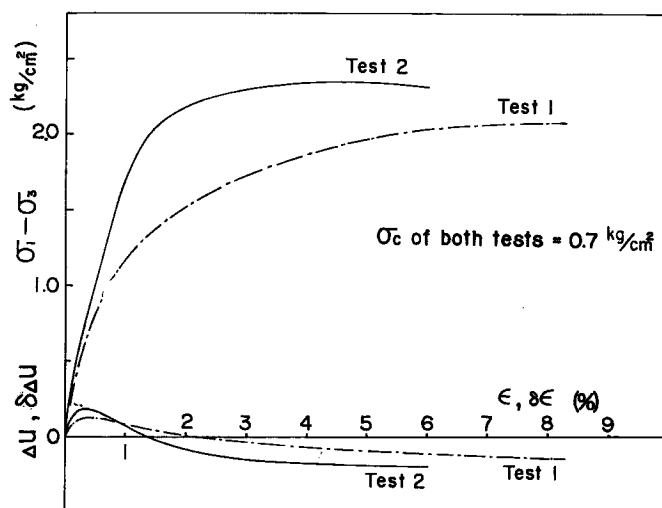


Fig. 6 Stress paths of the last loading

Fig. 7 Relationship between stress $\sigma_1 - \sigma_3$, excess pore-water pressure Δu and strain ϵ ($\delta \Delta u$ =pore-water pressure increment, $\delta \epsilon$ =strain increment)

点からの間ゲキ水圧の増分 $\delta \Delta u$ とヒズミの増分 $\delta \epsilon$ を示している)。繰り返しせん断を行なった他の供試体の最終の載荷時の応力、間ゲキ水圧～ヒズミ曲線も図中の試験2のものとはほぼ同一である。試験2の応力～ヒズミ曲線は、典型的な塑性体のそれであり、繰り返しせん断後、供試体は塑性体のような挙動をすることを表わしている。間ゲキ水圧は、 $\sigma_1 - \sigma_3$ が一定になった後、ほぼ一定となり、破壊時にはその変化率は0である。試験1のものは、 $\sigma_1 - \sigma_3$ が ϵ とともにダラダラと増加し、 Δu も同様に減少し、しかも破壊時にも Δu は減少の傾向を示している。

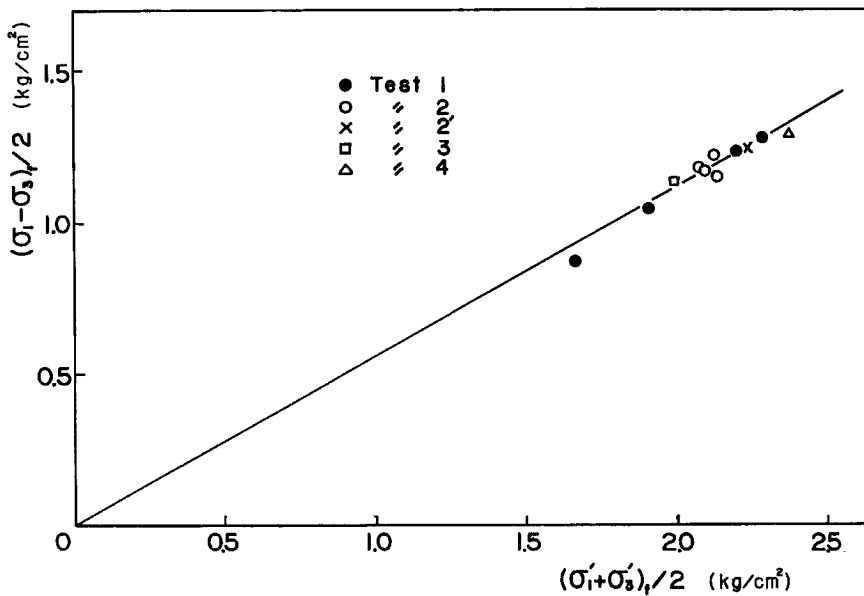
3-3 破壊強度および破壊ヒズミ

破壊を $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ で定義すると、各試験での破壊時の諸量は Table 1 のようになる。また破壊点を

Table 1 Test results (at failure)

Test method	σ_c kg/cm ²	w_i %	w_f %	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ kg/cm ²	Δu_f kg/cm ²	ε_f %
Test 1	3.0	33.0	25.3	2.48	2.00	11.3
	1.3	33.2	24.9	2.47	0.24	9.6
	0.7	33.1	25.6	2.09	-0.16	7.8
	0.44	32.3	25.2	1.74	-0.35	14.0
Test 2	3.0	33.1	25.3	2.44	2.10	13.1
	1.2	33.8	25.5	2.34	0.28	16.0
	0.7	33.1	25.2	2.36	-0.20	13.7
	0.44	32.9	24.9	2.29	-0.54	13.1
Test 2'	3.0	—	25.3	2.49	2.02	13.6
Test 3	3.0	32.4	24.7	2.27	2.14	11.2
Test 4	3.0	—	24.1	2.58	1.92	12.9

σ_c =consolidation pressure, w_i =initial water content, w_f =water content at failure, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ =principal stress difference at failure, Δu_f =excess pore-water pressure at failure, ε_f =failure strain

Fig. 8 Relationship between $(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ and $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2 \sim (\sigma_1' + \sigma_3')/2$ の関係としてプロットすると, Fig. 8 の通りである。Table 1 および Fig. 8 から次のようなことがわかる。

- (1) すべての試験において, 繰り返しせん断の有無, 繰り返しせん断の仕方の相違, 圧密履歴の違いなどに係りなく, 破壊点は原点を通る同一の破壊線上にある。
- (2) 繰り返しせん断を行なった試験, とくに試験 2 では, 圧密履歴の違いにもかかわらずほぼ同じ破壊

点が得られている。これは繰り返しせん断を行なわない試験1の破壊点が、圧密履歴の違いによってかなりバラツキをみせているのと著しい対照をみせている。

(3) 破壊ヒズミも繰り返しせん断の効果によって、バラツキが少なくなり、ほぼ同じような値を示すようになる。

(4) 正規圧密粘土 ($\sigma_c = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ のもの) は、繰り返しせん断によって破壊強度や破壊ヒズミにあまり影響を受けないようである。

これらのことの原因として、次のようなことが考えられる。

試験1の普通の圧密非排水試験では、過圧密粘土がせん断される場合、まずある部分にせん断が生じると、その領域は体積膨張しようとして負の間ゲキ水圧を生じる。したがって、その領域での有効応力が増大し、その領域でのせん断が促進される。こういった現象や端面拘束の影響などによって、せん断が比較的狭い領域で進行し、供試体の他の部分のせん断抵抗が十分 mobilize されないうちにスベリが生じ、その結果、破壊時の強度やヒズミが小さく測定されたり、バラツキを示したりする。こうした現象が繰り返しせん断によって是正され、より広範囲にせん断領域が拡がり、十分せん断抵抗を mobilize するようになると考えられる。一方、正規圧密粘土では、ある部分にせん断変形が生じると、体積減少しようとして正の間ゲキ水圧が生じるため、その部分の有効応力が減少し、したがってせん断は有効応力の大きいまわりの部分へ拡大される。その結果、繰り返しせん断をしなくても、比較的広範囲な領域にせん断が生じる。

また、Fig. 6, Fig. 8 から、繰り返しせん断を行なった試験の最終の載荷時の応力経路は、破壊線の上へ突き出ていることが特徴的である。

4. ま と め

得られた結論を要約すると次のようになる。

(1) 繰り返しせん断時において、一定の応力以下の範囲では、接線弾性係数は、繰り返し回数1サイクルから2サイクルにかけて急に増大した後、繰り返し回数の増加とともに漸次減少してゆく。これは砂についての同様な試験の結果と逆の傾向であるが、これは試験時の排水条件の違いによるものであろう。

(2) 繰り返しせん断時の残留ヒズミと繰り返し回数の間には、砂の場合成立する佐々木の式は一般的には成立しないようである。

(3) 含水比が等しく、圧密履歴の異なる粘土が、非排水状態で繰り返しせん断によって繰り返し効果を受けると、初期の圧密履歴の相違にかかわらず、最終的にせん断応力の作用していない状態で、すべて等しい有効応力をもつようになるということが予想される。

(4) 繰り返しせん断によって、粘土は塑性体のような応力～ヒズミ関係を示すようになる。

(5) 繰り返しせん断によって、圧密履歴の違いにかかわらず、同じような破壊強度、破壊ヒズミが得られる。

最後に、本研究において終始並々ならぬ実験上の御協力を得た京都大学研修員、松川元氏に深い感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 村山・八木: “砂質土の変形特性について” 土と基礎, 13-2, 1965年2月, pp. 65-71.
- 2) 村山・岩井: 砂の弾性について, 第17回土木学会年次学術講演会概要, 昭和37年