

## 繰り返しせん断応力を受ける飽和粘土の間隙水圧について

PORE WATER PRESSURE OF SATURATED CLAY UNDER  
CYCLIC SHEAR STRESS

大原 資 生\*・山本 哲 朗\*\*・滝本 邦 彦\*\*\*

By Sukeo OHARA, Tetsuro YAMAMOTO and Kunihiko TAKIMOTO

## 1. ま え が き

先に“飽和粘土の動的強度について”と題する論文<sup>1)</sup>を発表し、正規圧密飽和粘土の動的単純せん断試験の結果を述べ、飽和粘土の動的強度は間隙水圧の発生量によって決まるということ述べた。

著者は、その後もこの点を確かめるために過圧密飽和粘土について動的単純せん断試験を行い、その結果を間隙水圧の発生状況に注目して整理した。

実験は応力制御方式により、非排水せん断試験を行った。また、供試体には完全な粘土ということから前に用いたと同じカオリン粘土を用いた。

以上の実験結果およびその考察について順次述べる。

## 2. 実験装置および方法

本実験に用いた実験装置は前回に用いたものと同じで、動的単純せん断試験機などについては前論文<sup>2)</sup>で詳しく説明したので、ここでは改めて述べない。

今回も、実験は動的試験と静的試験とが行われたが、いずれも非排水状態で過圧密比（以後、OCR という）が1から4までの供試体について実験された。

静的試験では、ひずみ速度 5%/min でせん断を行った。

また、動的試験では前回と同様に周期 2 秒の矩形波に近い波形の繰り返しせん断力を加えて実験を行った。

静的試験、動的試験いずれもせん断応力、せん断ひずみおよび間隙水圧の変化はすべてペンシログラフに記録した。

## 3. 試料および供試体の作製

本実験に用いた試料は粉末状のカオリン粘土である。粘土含有率は 98% できわめて均質な粘土である。この粘土に含水比が 90% となるように脱気水を加え、よく練り合せた後、水分の蒸発を防ぎながら 1 昼夜放置する。

その後さらに気泡が完全になくなるまで繰り返すを行う。このようにして作った飽和試料をせん断箱の中へ 3 層に分けて詰め、1 層ごとに突き棒で突き固める。

そのようにして詰められた供試体を上、下面から排水可能な状態で所定の圧密圧によって 24 時間圧密する。

圧密後の供試体の寸法は直径 7.5 cm、高さ約 2.0 cm の円板状である。

過圧密供試体とするには、圧密圧を所要の鉛直圧まで除荷する。この際に生じる負の間隙水圧は除荷後、約 1 時間放置することによって消滅させた後にせん断力を加えた。実験に供した供試体の間隙比などは表-1 に示すとおりである。

## 4. 静的試験

前回同様に、静的試験の応力-ひずみ曲線はいずれの

表-1 供試体の状態

Normal stress $\sigma_v$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Pre consolidation stress $\sigma_p$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Over consolidation ratio OCR	Void ratio $e$	
			after Normal consolidation	after Over consolidation
0.25	0.25	1	1.45	1.45
	0.5	2	1.27	1.28
	0.75	3	1.21	1.22
	1.0	4	1.18	1.19
0.5	0.5	1	1.32	1.32
	1.0	2	1.23	1.23
	1.5	3	1.15	1.16
	2.0	4	1.11	1.13

\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 山口大学助手 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 鹿島建設(株)

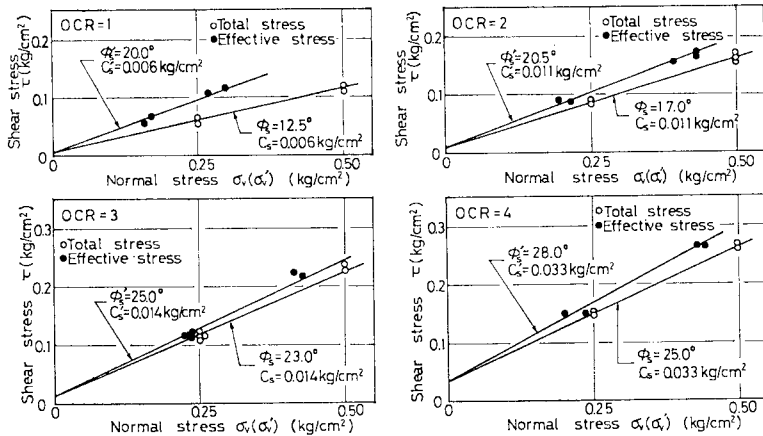
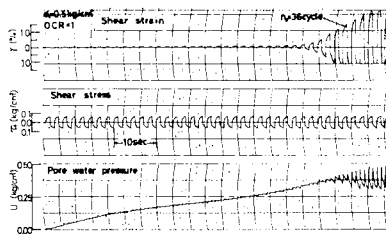


図-1 静的試験結果

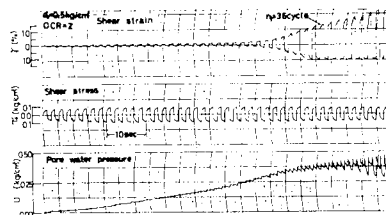
の OCR 供試体についてもひずみ量が 15% のときには、応力値は最大値を示しているの、この値をもってせん断強度とした。

図-1 はその結果から得られたクーロンの破壊線で、全応力表示と有効応力表示で示してある。OCR の大きい供試体ほど傾斜角(内部摩擦角)が大きくなっており、全応力表示と有効応力表示とが接近し、間隙水圧の生じ方が少ないことがわかる。

5. 動的試験



(a)



(b)

図-2 動的試験の記録例

図-2 は動的試験の記録例を示したものである。(a)が正規圧密供試体、(b)が過圧密供試体(OCR=2.0)によるもので、両者の違いはせん断ひずみの増加が(a)の方が急であることと、間隙水圧の増加の速度も(a)の方が大きいことである。

静的せん断試験結果との対応を考えて、このような記録からせん断ひずみが 15% に達したときまでのせん断応力の繰り返し回数を、供試体の破壊に要する繰り返し回数  $n_f$  とし、その際に負荷された繰り返しせん断応力  $\tau_d$  の初期有効鉛直圧  $\sigma_v$  に対する比  $\tau_d/\sigma_v$  との関係を示したのが図-3である。

$n_f$  の増大に従って  $\tau_d/\sigma_v$  が低下しており、実験値に  $\sigma_v$  の違いによるばらつきが目立つ場合もあるが、 $\tau_d/\sigma_v$  と  $n_f$  との関係は、OCR ごとにほぼ 1 本の直線で表わし得るとみることができる。

図-3 に示される結果は飽和砂の液状化の場合と非常

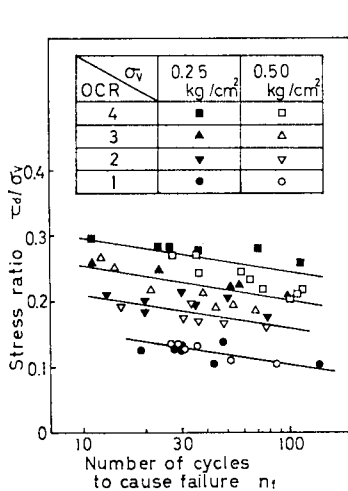


図-3 応力比  $\tau_d/\sigma_v$  と  $n_f$  との関係

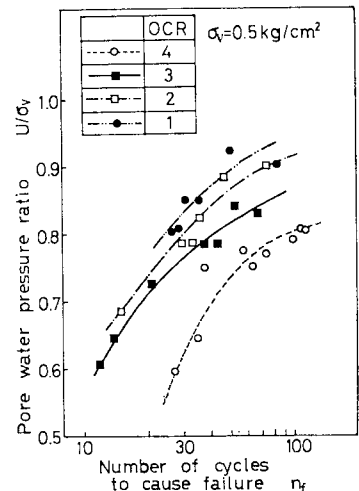
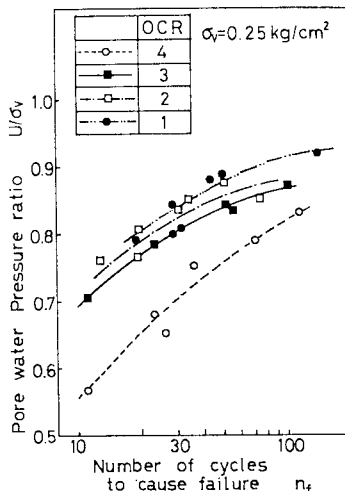


図-4 間隙水圧比  $u/\sigma_v$  と  $n_f$  との関係

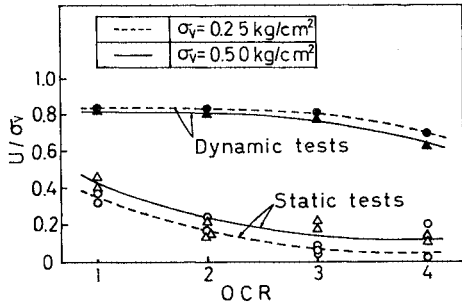


図-5  $n_f=30$  における  $u/\sigma_v$  と OCR との関係

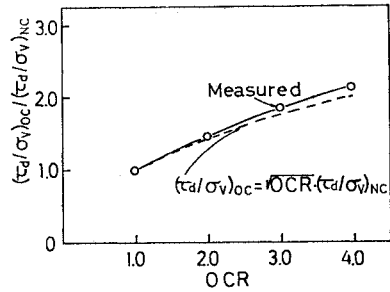


図-7 応力比と OCR との関係

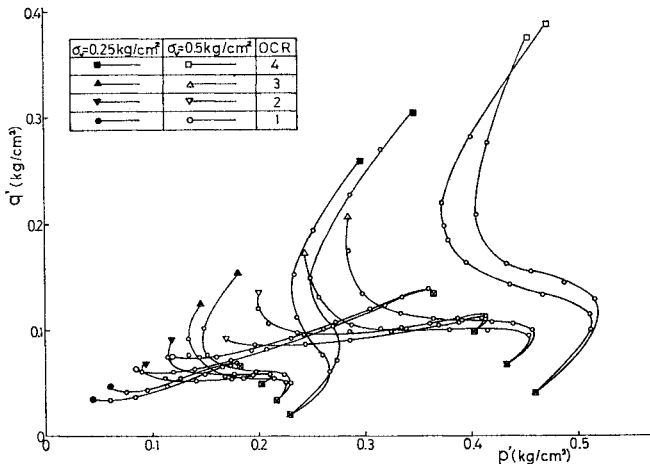


図-6 動的試験時の応力径路

によく類似している。すなわち砂質土の液状化の実験結果では応力比  $\tau_d/\sigma_v$  と  $n_f$  との関係は、それぞれの OCR ごとに 1 本の線で示されることがわかっているが、この飽和粘土についても同様な結果が得られていることは興味深い。

図-4 は破壊時の間隙水圧比  $u/\sigma_v$  と破壊に至るまでの繰り返し回数  $n_f$  との関係を示すもので、これより  $n_f=30$  の  $u/\sigma_v$  をとって OCR との関係を示したものが図-5 である。

この図中に静的試験における破壊時の  $u/\sigma_v$  と OCR との関係も記載した。OCR の大きい場合が  $u/\sigma_v$  の値が小さくなっている点は動的試験の結果も静的試験のそれも変わらないが、両者の間には減少の傾向に差が認められる。

また、両者の  $u/\sigma_v$  の値に大きい差があることが注目すべきことであろう。すなわち動的試験では、供試体の破壊は  $u/\sigma_v$  が 0.8 程度で生じている。この値は静的試験の場合のそれより非常に大きい値である。

結局は動的試験時の間隙水圧の発生量は大きいということである。

このように、供試体に繰り返しせん断力が負荷された

状態では間隙水圧の発生量が大きくなることは砂質土の液状化と同様である。

間隙水圧の発生挙動については、応力径路によって考察するのが便利である。しかし、この実験に用いた単純せん断試験機では側圧を制御できないので、静止土圧係数  $K_0$  が不明で正確な有効主応力が把握できない。そこで  $K_0$  値として、過圧密粘土の場合についても Brooker らが提案している値<sup>2)</sup>を用いることにした。

すなわち表-2 のように  $K_0$  値を定めた\*。

そして、この  $K_0$  値を

表-2  $K_0$  値

OCR	$K_0$
1	0.46
2	0.61
3	0.73
4	0.84

用いて次の式 (1), (2) から  $\sigma_1'$ ,  $\sigma_3'$  および  $p'$ ,  $q'$  を求め、動的試験時の応力径路を書いたのが図-6 である。なお、式 (1) は前論文<sup>1)</sup>で導いたものである。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1' &= \{(1-K_0)\sigma_v'^2 + \tau_d^2\} / \{(1-K_0)\sigma_v'\} \dots\dots (1) \\ \sigma_3' &= K_0\sigma_v' \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} p' &= \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} = \{\sigma_v'^2(1-K_0)^2 + \tau_d^2\} / \{2(1-K_0)\sigma_v'\} \dots\dots (2) \\ q' &= \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} = \{\sigma_v'^2(1-K_0)^2 + \tau_d^2\} / \{2(1-K_0)\sigma_v'\} \end{aligned} \right\}$$

ここで、 $\sigma_1'$ ,  $\sigma_3'$ : 有効主応力,  $\tau_d$ : 繰り返しせん断応力,  $\sigma_v'$ : 有効鉛直圧である。

図-6 より OCR によって応力径路が大きく異なることがわかる。出発点(初期状態)と破壊点との水平距離が大きいほど間隙水圧の発生量が大きいことを示すので、OCR=1.0 の場合がその発生量が最も大きく、OCR が大きくなるに従って順次小さくなる。

\* この実験に用いた飽和粘土の正規圧密の場合の内部摩擦角は 3 軸試験結果の有効応力表示で  $29^\circ$  となっている。Brooker らは OCR=1.0 の場合は  $K_0=0.95-\sin\phi'$  の式を提案しているが、 $\phi'=29^\circ$  とすると  $K_0=0.46$  となる。この値は Brooker らの実験値とよく一致していることから、他の OCR の値での  $K_0$  値も Brooker らの実験値を用いた。

以上の結果から動的試験時に生じる間隙水圧は静的試験時のその数倍になることがわかる。

また、図-3の結果から  $n_f=30$  のときの  $\tau_d/\sigma_v$  の値を求め、 $OCR=1.0$  のときの値を  $(\tau_d/\sigma_v)_{NC}$ 、過圧密状態 ( $OCR > 1.0$ ) のときの値を  $(\tau_d/\sigma_v)_{OC}$  とする。縦軸に両者の比  $(\tau_d/\sigma_v)_{OC}/(\tau_d/\sigma_v)_{NC}$  をとり、横軸に  $OCR$  をとると図-7が得られる。

石原らは、砂質土の液状化に対する過圧密比の影響をみるために、この方法を提案し、次の関係式を導いている<sup>3)</sup>。

$$(\tau_d/\sigma_v)_{OC} = \sqrt{OCR}(\tau_d/\sigma_v)_{NC} \dots\dots\dots(3)$$

図-7中の点線が式(3)の値である。これより、この実験に用いた粘土についても、ほぼ式(3)の関係が成り立っていることがわかる。

## 6. 結 語

飽和粘土の動的強度を調べることを目的にして、正規圧密粘土および過圧密粘土について動的単純せん断試験を行った。その際の供試体中の間隙水圧の発生挙動に注目して実験結果を考察し、次の結論を得た。

(1) 飽和粘土の動的強度は間隙水圧の発生量に大き

く影響される。

(2) 繰り返しせん断応力の作用によって生じる破壊時の間隙水圧は静的せん断応力負荷時のそれよりかなり大きい。

(3) 後者に対する前者の比率は過圧密比によって異なるが、正規圧密粘土で約 2、過圧密比 4 で約 4~6 となっている。

(4) 飽和粘土の動的強度に対する過圧密比の影響は式(3)で示され砂質土の液状化に対するそれと同一である。

最後に、本実験を行うにあたって本学大学院生 生田裕彦君の助力をいただいた。厚く謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 大原資生・松田 博：飽和粘土の動的強度について，土木学会論文報告集，第274号，pp. 69~78，1978年6月。
- 2) Brooker, E.W. and H.O. Ireland: Earth Pressures at Rest Related to Stress History, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, pp. 1~15, Feb. 1965.
- 3) Ishihara, K. and H. Takatsu: Effects of Overconsolidation and  $K_0$  Conditions on the Liquefaction Characteristics of Sands, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 4, pp. 31~42, Dec., 1979.

(1979.5.18・受付)