

繰り返しせん断履歴を受けた飽和粘土の せん断強度について

SHEAR STRENGTH OF SATURATED CLAY PRE-SUBJECTED TO CYCLIC SHEAR

大原 資生*・山本 哲朗**・生田 裕彦***

By Sukeo OHARA, Tetsuro YAMAMOTO and Hirohiko IKUTA

1. 緒 言

軟弱地盤上に設けられた構造物の基礎や土構造物の耐震性を検討する場合には、それを構成する土の動的強度を知る必要がある。軟弱な砂質土では液状化という現象の解明によって、その動的特性や強度を予測できるようになったが、粘性土についてのこの種の実験的な研究はまだ十分に行われていない。

特に、動的強度の測定については、それを支配する因子、すなわち、粘着力、間隙水圧、ひずみ依存特性、繰り返し回数などの多くの因子があって、それらの強度に及ぼす影響が明らかにされていないのが現状であろう。

これらについての過去の実験的研究としては H.B. Seed¹⁾、²⁾をはじめ、Sangrey³⁾、松井⁴⁾などによる研究があるが、その大部分が動的三軸試験によるものであり、載荷方式においても、最初から一定のせん断応力振幅を与える方法、または初期にある値の静的せん断応力を与えた状態の供試体に繰り返しせん断応力を負荷する方式によったものが多い。

最近の研究⁵⁾では、飽和粘土の動的強度、動的挙動を解明するには有効応力の立場からのアプローチが必要であるとの考えから繰り返し載荷時に発生する間隙水圧の測定が行われるようになったが、側圧の制御が確実な動的三軸試験機を用いているため、その供試体の大きさから繰り返し載荷中の間隙水圧の時間的な変化を十分な精度で把握できていないとも考えられる。

著者らは先に、地盤中の応力条件の再現性が優れている点や、供試体の厚さが大きくないことによって間隙水圧の変化がよい精度で測定できるという点から、動的単純せん断試験機を用いて、飽和粘土の供試体に一定振幅

の繰り返しせん断応力を与える実験を行って、粘土の動的せん断強度は、繰り返し中に生じる間隙水圧の影響を強く受けるということを示した⁶⁾。

そこで、今回は飽和粘土の供試体に、最初に所定の繰り返しせん断ひずみを加え、その直後に静的せん断試験を行うという方法によって、繰り返しせん断履歴を受けた粘土のせん断強度がどのように変化するかを調べた。特に前回と同様に、間隙水圧の挙動に注目して実験結果を整理し考察した。

このような実験は現在まであまり多く行われていない。過去に Thiers と Seed²⁾が粘土の応力-ひずみの関係を繰り返し単純せん断によって求めたときに、その実験の一部として行っている。繰り返し回数を200回と限定し、200回の繰り返しせん断ひずみを加えた後の土のせん断強度の減少を調べている。その結果としてはひずみ振幅が1.5%以上となると、繰り返しせん断履歴を受けた土の強度は静的強度より減少することが明らかになったといっている。

このような実験結果は、土構造物や地盤が地震動やくい打ちなどによる振動を受けた直後の安定性を検討するのに必要であり⁷⁾、繰り返し回数やひずみ振幅と強度変化との関係をさらに詳しく調べる必要がある。

実験は単純せん断試験機を用い、非排水条件でひずみ制御方式によって行った。

試料としては、前回と同様に主としてカオリン粘土を用いたが、産地が前回用いたものと異なるので、今回用いたカオリン粘土については改めて物理試験、三軸試験などを行った。

今回の実験結果は、通常のせん断強度と繰り返しせん断を受けた供試体のせん断強度の比をとって、これをせん断強度比と定義し、この強度比と間隙水圧の変化、繰り返しせん断ひずみ振幅および繰り返し回数などとの関係を明らかにすることを目的として整理された。

なお、カオリン粘土については、実験室で供試体を作

* 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

*** 学生会員 山口大学大学院生 工学部土木工学専攻

製することになるので、このようにして作られた供試体と不攪乱粘土とでは実験結果にどのような違いがあるかをみるために、有明海沿岸の干拓地からシンウォールチューブで採取した有明粘土についても同様な実験を簡単に行った。

以下、実験方法、結果およびその考察について述べる。

2. 実験装置および方法

今回の実験に用いた装置は前回の実験に用いたものと同じ動的単純せん断試験機および測定装置、記録装置である。

図-1 に動的単純せん断試験機のせん断箱の部分を、図-2 にせん断ひずみ制御装置を示した。

これらについては、前回³⁾に詳しく述べているので、ここでは簡単に説明する。

せん断箱は Kjellman 型で、供試体は直径 75 mm、厚さ 20 mm の円板状でゴムスリーブに包まれ、内径 75.2 mm、外径 96.0 mm、厚さ 2.0 mm のプラスチックリングが 15~17 枚積み重ねられた中に納められており、鉛直圧載荷などによる供試体の側方膨れ出しを防止

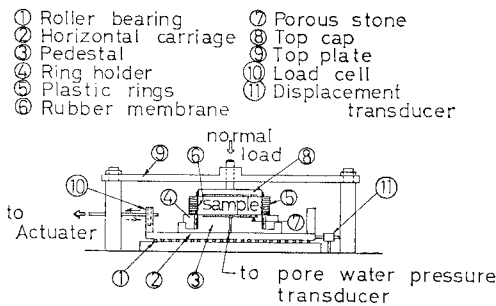


図-1 単純せん断試験装置

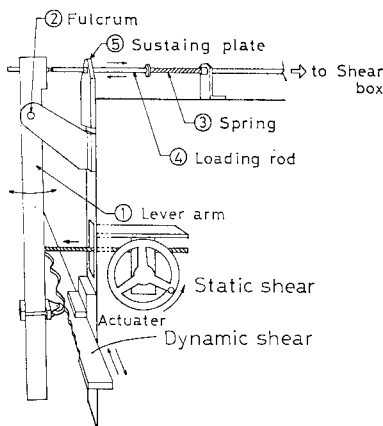


図-2 ひずみ制御装置

し、しかも供試体のせん断変形を妨げない構造となっている。

せん断ひずみ制御装置では、②が回転中心となったレバー①の下端を動かすことによって、上端がせん断箱の下部移動台に連結されている水平ロッドに一定の水平変位を生じさせる構造となっている。

静的せん断試験では、静的試験用のハンドルを回転して、5%/min のせん断ひずみ速度でせん断を行った。

繰り返しせん断試験では、図-2 に示すように波形の塩ビ板を周期 2 秒で、レバーと固定板との間に押し込んだり、引き抜いたりすることによって、所定のせん断ひずみ振幅 r_d を、所定の回数 n だけ加える。

今回の実験では、繰り返しせん断ひずみが加えられた粘土のせん断強度の変化を調べることが目的であるので、最初に供試体に所定のせん断ひずみ振幅を、所定の繰り返し回数だけ非排水条件で加えた後に、同じく非排水条件で静的せん断試験が行われた。

そして、静的試験では、せん断ひずみが 15% となったときのせん断応力をせん断強度とした。これは通常の静的せん断試験の場合、せん断ひずみが 15% のとき、せん断応力が最大となるのにならったためである。

繰り返しせん断試験、静的せん断試験のいずれのときも、せん断ひずみ、せん断応力および間隙水圧の変化などはペンオシログラフに記録された。

せん断ひずみは、図-1 の ⑪ に示す変位計で、せん断応力は図-1 の ⑩ で測定される。また、間隙水圧は供試体の下部の透水板における値をポリエチレン管で受圧面直径 6 mm の水圧計まで導いて測定した。

3. 試料および供試体の作製

カオリン粘土および不攪乱試料として使用した有明粘土の物理定数を表-1 に、粒度分布を図-3 に示した。

有明粘土の粒度分布曲線が 3 本あるが、これは 3 本のシンウォールチューブのものをそれぞれ書いたもので、採取位置、深さがまったく同一でなく、それぞれの間にいくぶんの違いができたためである。

供試体の作製については、カオリン粘土では前回とほぼ同じに次の方法によった。すなわち気乾状態の粘土に、含水比が 58% になるように脱気水を加え、よく練り返した後、水分の蒸発を防ぎながら一昼夜放置する。

表-1 試料の物理的性質

		Kaolinite clay	Ariake clay
Specific gravity	G_s	2.685	2.676
Liquid limit	W_l (%)	38.6	69.0
Plastic limit	W_p (%)	24.6	36.6
Plastic index	I_p (%)	14.0	32.4

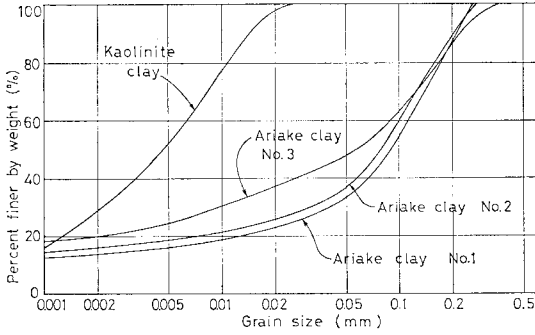


図-3 粒度曲線

表-2 圧密圧と間隙比

Normal stress σ_v (kg/cm ²)	Void ratio e
0.5	0.984
1.0	0.924
1.5	0.887
2.0	0.842

• 1 kg/cm² = 98 kPa

その後、気泡がないことを確認したうえで、せん断箱の中に3層に分けて詰め、両面排水状態で約24時間所定の鉛直圧で圧密する。圧密後の供試体の間隙比は表-2のとおりである。

不攪乱状態の有明粘土は、シンウォールチューブから抜き出し、成形してせん断箱に納める。その状態で30分間水浸した後、所定の鉛直圧で1時間圧密した。

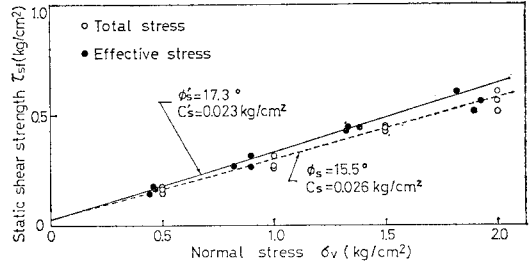
両試料とも飽和度を100%におくために、繰り返しせん断試験の直前に鉛直圧に等しいバックプレッシャーを数秒間加え、バックプレッシャーの値が落ち着いたのを確認したうえで、バックプレッシャーを0に戻した。

4. 実験結果および考察

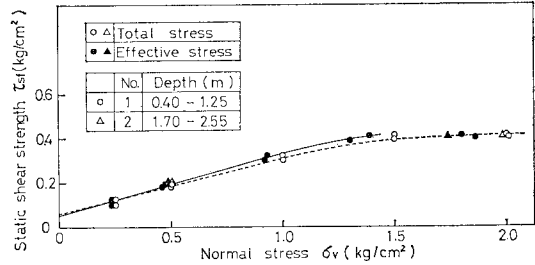
静的せん断試験の応力-ひずみ曲線の応力が、前述のようにひずみ量15%のとき、ほぼ最大値を示すことから、このときのせん断応力値をせん断強度 τ_{sf} とした。図-4はそれぞれの試料の破壊線を示す。(a)はカオリン粘土、(b)は有明粘土である。有明粘土の場合には鉛直圧の高いところで破壊線の勾配が緩くなっている。これは供試体が完全飽和でなかったためと考えられる。

このような静的せん断試験の結果にならって、繰り返しせん断を受けた供試体のせん断強度 τ_{dsf} を求める静的試験においてもせん断ひずみが15%のときのせん断応力の値をもって τ_{dsf} とした。

図-5は実験記録の例である。鉛直圧が1.0 kg/cm² (98 kPa)で圧密したカオリン粘土の供試体に対して、最初に繰り返しせん断を行い、その後静的せん断試験を行ったときに得られた記録例である。繰り返し回数は30回で、(a)、(b)、(c)、(d)、(e)はそれぞれ繰り返しせん断



(a) カオリン粘土



(b) 有明粘土
(1 kg/cm² = 98 kPa)

図-4 単純せん断による破壊線

断ひずみ振幅 (r_d) が約0.2%, 1%, 2%, 7%, 10%のものである。

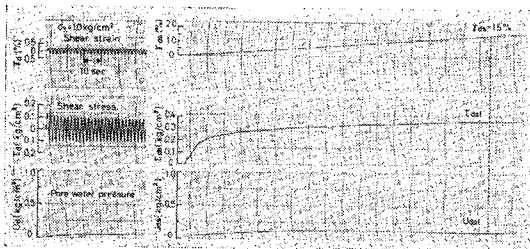
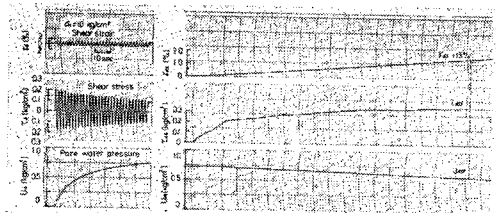
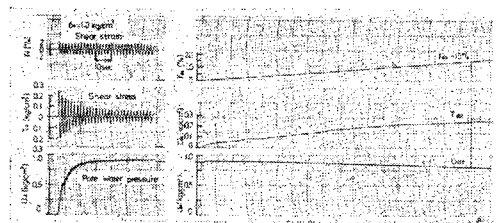
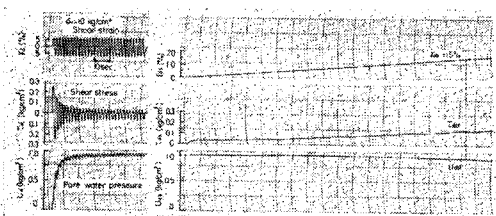
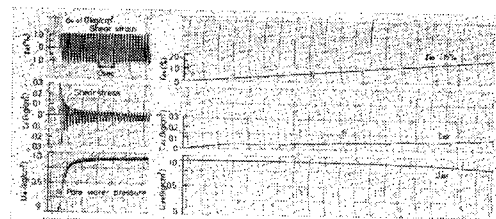
図中の記録線は、上から順にせん断ひずみ、せん断応力、間隙水圧の変化を示す。

前半が繰り返しせん断試験のものであり、(a)、(b)、(c)、(d)、(e)を比較してわかるように、はじめに加えられるせん断ひずみ振幅が大きい場合にはせん断ひずみ振幅が小さい場合に比べて、初期には大きいせん断応力(この場合にはせん断抵抗力という方が正しいと考えられるが、統一する意味でせん断応力という)が発生し、繰り返し回数の増加に伴って急速に減少する。

また、間隙水圧もせん断ひずみ振幅の大きい場合の方が急速に増大しているのがみられる。また $r_d > 1\%$ の場合には、繰り返し回数が10回以内で鉛直圧の50%以上の間隙水圧が発生しており、その後は徐々に増大し、繰り返しせん断ひずみ振幅の大小、繰り返し回数の多少によって異なるが、最終的には鉛直圧のほぼ90%に達している。

後半は繰り返しせん断試験後の静的せん断時の記録である。繰り返しせん断試験時に加えられたせん断ひずみ振幅が大きいほど静的せん断試験時に発生するせん断応力は小さく、そのため静的せん断ひずみ r_{ds} が15%のときの値も当然小さい。

なお、これらの記録からわかるように、繰り返しせん断試験中に生じた間隙水圧はそのままにして、次の静的せん断試験を行ったが、静的せん断試験では間隙水圧は $r_d > 1\%$ のときせん断ひずみの増加に伴って減少して

(a) $r_d \approx 0.2\%$ (b) $r_d \approx 1\%$ (c) $r_d \approx 2\%$ (d) $r_d \approx 7\%$ (e) $r_d \approx 10\%$ 図-5 実験記録例 (1 kg/cm²=98 kPa)

いる。

そして、この減少量は1%の繰返しせん断ひずみ振幅 (r_d) が加えられた供試体で最大になり、それ以下の r_d を加えると、この現象は次第に認められなくなる。

したがって、繰返しせん断試験時に加えた繰返しせん断ひずみ振幅が大きいとき、せん断強度 τ_{dsf} に対応する間隙水圧 u_{dsf} は大きい値として残る。そのため

にせん断強度 τ_{dsf} が低下すると考えられる。また、このことは小さい繰返しひずみ振幅が加わった供試体ほど静的せん断時に生じる正のダイランシー量が大きいということで、小さいひずみ振幅が加えられたときの供試体ほど土粒子の構造が安定になっているということであろう。

このように静的せん断試験時の間隙水圧の減少は、ダイランシーの起こり方に起因するものと考えられる。

以上の間隙水圧の変化状況を示したのが、図-6である。繰返しせん断試験を終った後に静的せん断試験を開始するまでに記録計や装置の調整などのため約10分くらいの時間が必要であり、この間に間隙水圧値にいくらかの変化が生じる。これは供試体中の間隙水圧分布の不均等がならされるためではないかと考えられる。

繰返しせん断を受けた供試体の静的せん断試験から得られたせん断強度 τ_{dsf} と繰返しせん断を受けない供試体のせん断強度 τ_{sf} との比 τ_{dsf}/τ_{sf} をせん断強度比と定義する。

図-7はせん断強度比と繰返しせん断ひずみ振幅との関係を、繰返しせん断回数 (n) をパラメーターにして示している。なお、図-7では $r_d=0$ 、すなわち繰返しせん断応力を受けない供試体ではせん断強度比は1.0となるので、 r_d が0に近くなるに従って、図-7のそれぞれの線は $\tau_{dsf}/\tau_{sf}=1$ の点に収れんすると考えられる。図-7でも繰返しせん断ひずみ振幅値が0.5%付近でせん断強度比が最大となり、繰返しせん断ひずみ振幅がそれ以下となるとそれぞれの直線が $\tau_{dsf}/\tau_{sf}=1$ の点に収れんし始めていることがわかる。

また、図-8は、せん断強度比に及ぼす繰返し回数の影響をみるために、図-7を書き換えたものである。図-7および図-8では、鉛直圧 σ_v が 0.5 kg/cm^2 (49 kPa)、 1.0 kg/cm^2 (98 kPa) の場合の結果をまとめてプロットしているが、両者はほぼ一本の線にまとまっているので、鉛直圧が異なっても τ_{dsf}/τ_{sf} はほぼ一致することがわかる。すなわち、せん断強度比は、一般的に繰返しせん断試験時に与えられた繰返しせん断ひずみ振幅が大きいほど小さくなり、繰返し回数の増加によっても小さくなるといえる。

一方、図-8から繰返しせん断ひずみ振幅が約1%の場合に、せん断強度の繰返し回数による減少の割合が大きくなっていることがわかる。

繰返し回数の増大によるせん断強度の減少を繰返し効果というならば、図-8の結果では繰返し効果は繰返しせん断ひずみ振幅が約1.0%の場合に最も大きいといえることができる。

また、図-7において、繰返しせん断ひずみ振幅が小さい範囲でせん断強度比が1.0より大きくなっている

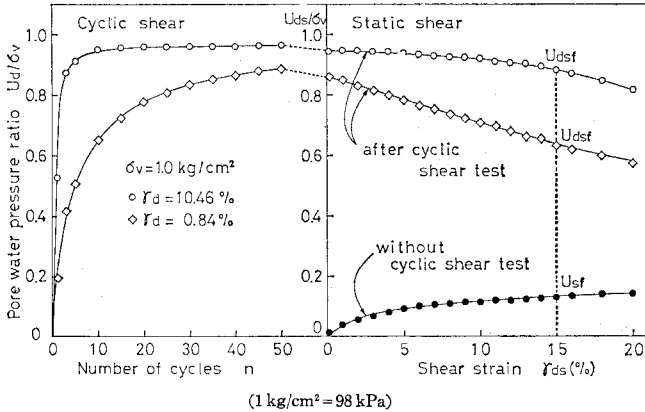


図-6 間隙水圧変化状況

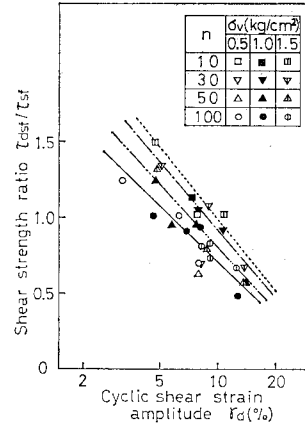


図-9 $\tau_{dsf}/\tau_{sf}-\gamma_d$ の関係 (有明粘土)

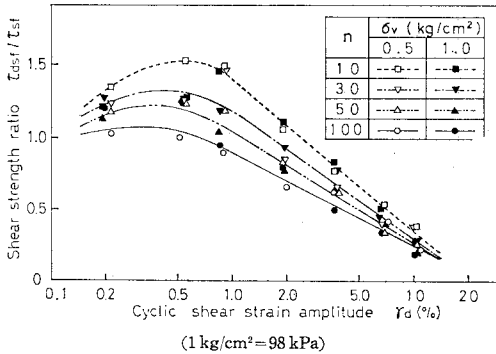


図-7 $\tau_{dsf}/\tau_{sf}-\gamma_d$ の関係 (カオリン粘土)

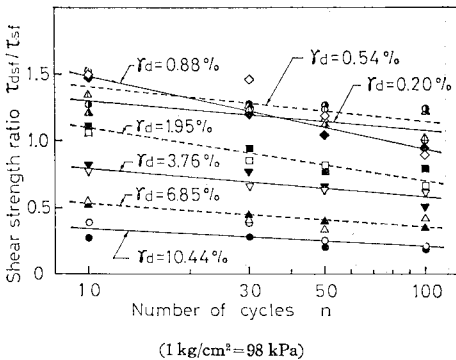


図-8 $\tau_{dsf}/\tau_{sf}-n$ の関係 (カオリン粘土)

部分がある。

これは繰り返しせん断を受けたことによって供試体のせん断強度が繰り返しせん断を受けていない供試体のそれより大きくなっていることを意味している。その原因については明らかではないが、ひずみ振幅が小さい繰り返しせん断履歴を受けた場合の方が、その後に行われた静的せん断試験による間隙水圧の下がり方が大きく、結局、せん断破壊時の間隙水圧 u_{dsf} が繰り返しひずみ振幅が小さいときの方が小さくなるのが原因の一つと考えられる。

しかし、図-6 にみるように、この u_{dsf} 値よりも、繰り返しせん断を受けない場合の静的せん断試験の際に生じる間隙水圧 u_{sf} がさらに小さいのであるから、間隙水圧の大小だけでは、この結果を十分に説明できない。図-5 の考察で述べたように、1.0% 前後の小さい繰り返しひずみ振幅を受けた供試体は静的せん断時に生じる正のダイラタンスー量が大きいということから H. B. Seed らが砂の液状化に対する応力履歴の影響について述べているように、小さいひずみ振幅を受けた砂の方が、大きいひずみ振幅を受けた砂より安定した微視構造を組むということと同じことが粘土の場合にも生じたと考えられる⁹⁾。したがって、この結果を生じたおもな原因は一種のひずみ硬化であるとするのが実験結果からみて最も妥当な結論といえよう。すなわち、土が繰り返しせん断を受けた場合、繰り返し効果による強度の低下と、せん断履歴による土の骨格構造の安定化による強度の増大が生じるが、ひずみ振幅が小さい範囲においては、前者より後者が上まわると考えることができる。結局、カオリン粘土の場合には、繰り返しせん断を受けた供試体では、繰り返し回数が10~100回の範囲では、そのひずみ振幅が2%以上でせん断強度比が1.0を下回ることになる。

先に述べた Thiers の実験結果²⁾では、繰り返し回数が200回の場合であるが、ひずみ振幅が1.5%以上でせん断強度比が1.0以下となるということであり、ひずみ振幅が小さい場合でもせん断強度比が1.0以上とならないという結果となっていることも図-7の繰り返し回数100回の場合の実験値から考えて、よく対応する結果といえる。

図-9 は有明粘土についての同様な実験結果である。

この結果では試料が多くなかったので、せん断強度比が1.0を下まわるひずみ振幅を求めることを目標として

実験を行ったので、 $r_d > 3\%$ の範囲の結果といえる。不攪乱供試体であるので、実験値にかなりのばらつきがあるが、せん断強度比が 1.0 を下まわるのは 6~10% の繰り返しせん断ひずみ振幅を受けた供試体となっており、カオリン粘土の場合のそれよりかなり大きくなっている。

これは、不攪乱試料の場合には土粒子間の永年にわたって生成されたセメンテーションによる結合力が原因と考えられるが、この点についても多くの不攪乱試料について同様な実験を行って検討する必要がある。

図-7 と 図-9 の結果を式で表わすと、次のようになる。

$$\tau_{dsf}/\tau_{sf} = C - \alpha \ln r_d \dots \dots \dots (1)$$

ただし、定数 C, α は土質によって異なり、カオリン粘土については、

$$C = 1.92 - 0.228 \ln n$$

$$\alpha = 0.648 - 0.0785 \ln n$$

有明粘土については、

$$C = 3.38 - 0.312 \ln n$$

$$\alpha = 0.910 - 0.0817 \ln n$$

ここで、 r_d はせん断ひずみ振幅 (%) で $r_d > 1\%$ とする。 n は繰り返し回数である。

図-10 は、この実験のカオリン粘土供試体の応力径路を示したものである。(a), (b), (c), (d), (e), (f) は

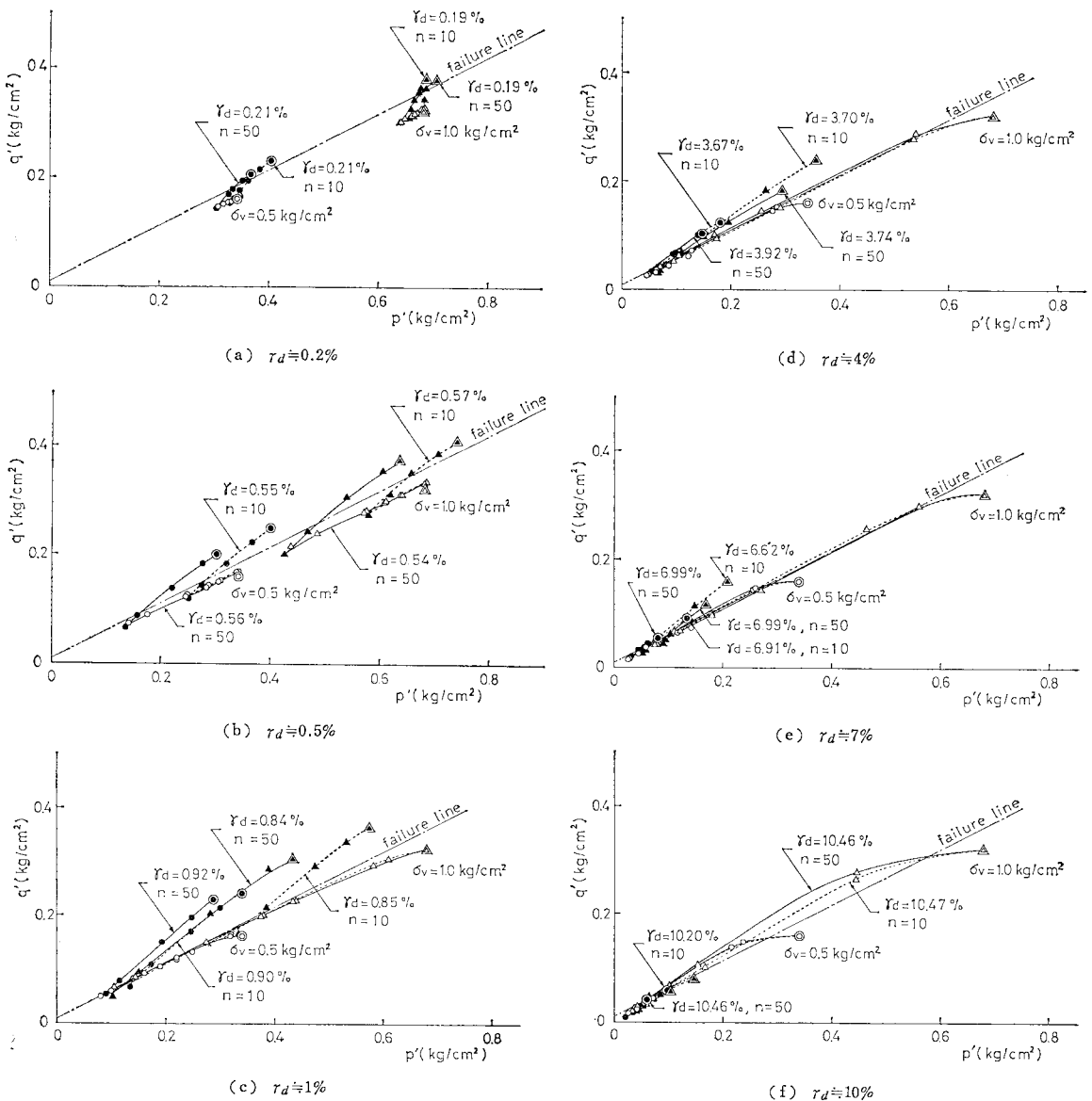


図-10 応力径路図 ($1 \text{ kg/cm}^2 = 98 \text{ kPa}$)

それぞれ繰り返しせん断ひずみ振幅がほぼ 0.2%, 0.5%, 1.0%, 4.0%, 7.0%, 10.0% の場合のものである。中が白地の点が繰り返しせん断試験, 中を黒く塗りつぶした点が, その後行った静的試験中の応力径路である。いずれも有効応力表示で p', q' は前回⁹⁾ 同様次の式 (2) で求めた。なお, K_0 値はカオリン粘土の三軸試験による内部摩擦角から求めた ($\phi' = 36.0^\circ$ であるので, $K_0 = 0.95 - \sin \phi' = 0.36$ とした)。

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

ここで, σ_1', σ_3' は有効主応力, τ_d は繰り返しせん断応力, σ_v' は有効鉛直圧, K_0 は静止土圧係数である。

繰り返しひずみ振幅が約 1.0% の (c) 図では, 繰り返しせん断試験時の応力径路は繰り返しせん断を受けない供試体の静的せん断破壊線に沿って下降し, 静的せん断では, その破壊線より上方の応力状態を経て破壊に達する。

この傾向は, ひずみ振幅が約 10% の (f) 図を除いて, すべてにおいてみられるが, 破壊線を上まわる度合は (c) 図が最も大きく, ひずみ振幅が約 1.0% より小さくても, また大きくても小さくなっている。

なお, 図-10 では初期点, 破壊点は二重点で示されており, 前者は白地, 後者は黒塗りの点で示されている。

そして, ひずみ振幅 10.46% の (f) 図では, 繰り返しせん断試験中の応力は静的破壊線を上まわるが, その後の静的せん断ではほぼ破壊線に沿った応力径路が得られ, 破壊点もほぼ破壊線上にある。

一方, (a) 図, (b) 図にみられるように, 微小ひずみ振幅を繰り返し受ける供試体では繰り返しせん断試験時の応力径路は水平移動量が小さく, その径路は静的せん断破壊線からも離れている。このことから, これらの供試体では, 繰り返しせん断による攪乱の影響が小さいためと考えられる。

この応力径路は有効応力表示であるので, 間隙水圧の影響を除いたせん断強度を考察することができる。

図-10 でひずみ振幅が約 10% の (f) 図を除くすべての応力径路図では, 破壊点は静的破壊線より上方に位置している。このことから, 繰り返しせん断履歴によって土の骨格構造が安定し, 強度が増加したとみることができる。特に, ひずみ振幅が約 1.0% の (c) 図でその傾向が最も大きくなっている。

しかるに, 全応力表示としては図-7の結果が得られている。両者の対応は次のとおりである。すなわち, 適当な大きさのひずみ振幅を適当な繰り返し回数だけ与え

た場合には, 骨格構造の安定化による強度増加が生じるにもかかわらず, 繰り返しせん断ひずみ振幅が大きい場合などでは大きい間隙水圧が残留するため, 全応力表示ではせん断強度が減少するという結果となり, せん断強度比が 1.0 以下になると考察される。

5. 結 語

地震およびその他の振動などによって, 繰り返しせん断を受けた粘土のせん断強度の変化を調べるために, 所定の繰り返しせん断ひずみを加えた供試体のせん断強度を求めるといふ実験を単純せん断試験機を用いて行い, 次の結論が得られた。

(1) 繰り返しせん断を受けた粘土のせん断強度は, 加えられた繰り返しせん断ひずみ振幅が大きいほど, また, 繰り返しせん断回数が多いほど減少する。ただし, 試験条件によりせん断強度比 $\tau_{dss}/\tau_{sf} > 1.0$ となる領域が存在する。

(2) 繰り返しせん断時には, 繰り返しせん断ひずみ振幅が大きいほど間隙水圧の上昇は急速であり, このため供試体に生じる繰り返しせん断応力の急速な減少が生じる。

(3) 繰り返しせん断時に生じた間隙水圧は, 繰り返しせん断ひずみ振幅 r_d が 1.0% 以上のとき, その後に行われる静的せん断時には減少する。その減少量は繰り返しせん断時に加えられたひずみ振幅が 1.0% のとき最大となり, 1.0% より小さくなるにつれて, この現象は認められなくなる。

(4) 本実験中の有効応力径路から, 本実験によって求められる粘土のせん断強度の変動は, せん断ひずみ振幅を加えることによって生じる土の骨格構造の安定化によるせん断強度の増大と, 繰り返しせん断中に生じる間隙水圧によるせん断強度の減少および繰り返し効果によって説明できる。

(5) 不攪乱状態の粘土の繰り返しせん断試験による強度の減少は, カオリン粘土のそれと類似しているが, せん断強度比が 1.0 以下となるせん断ひずみ振幅は不攪乱粘土の方がかなり大きい。これは永年の間に生じた粒子間のセメンテーションに起因すると考えられる。

最後に, 本実験を行うにあたり, 本学大学院生小串利勝君の助力をいただいた。厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Seed, H.B. and C.K. Chan : Clay Strength Under Earthquake Loading Conditions, ASCE, Vol. 92, SM 2, pp. 53~78, 1966.
- 2) Thiers, G.R. and H.B. Seed : Cyclic Stress-Strain Characteristics of Clay, ASCE, Vol. 94, SM 2, pp. 555~569, 1968.

- 3) Sangrey, D.A., D.J. Henkel and M.I. Esrig : The Effective Stress Response of a Saturated Clay Soil to Repeated Loading, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 241~252, 1969.
- 4) 松井 保・小原秀夫・伊藤富雄：飽和粘土の力学特性に及ぼす動的応力履歴の影響，土木学会論文報告集，第 257 号，pp. 41~51, 1977.
- 5) 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.
- 6) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版，1976.
- 7) Seed, H.B., K. Mor and C.K. Chan : Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands, ASCE, Vol. 103, GT 4, pp. 257~270, 1977.
- 8) 吉見吉昭：砂地盤の液状化，技報堂，pp. 45~48, 1980.

(1980.7.21・受付)
