

# くり返しせん断力による直接せん断試験 (第1報)

大原 資生\*・永田 洋文\*

Dynamic Direct Shear Test (1st Report)

Sukeo OHARA and Hirofumi NAGATA

## Abstract

In this paper, we described the dynamic direct shear test of soil which was carried out recently in our laboratory, by means of acting cyclic shear stress.

Dry TOYOURA sand and UBE alluvial clay were used in this test. The alluvial clay was pre-consolidated by the special apparatus shown in Fig.3.

Fig.5 and Fig.6 are the relationships between shearing strength and number of pulse that required the shearing failure.

We can compare dynamic shearing strength of soil with static one in Fig.8.

## 1. 緒 言

近年、土の動的特性に関する実験が各所でおこなわれるようになった。この目的は地震時の土の性質の変化をしらべるためでもあり、路盤、路床土の走行荷重による土の特性の変化をしらべるためでもある。

特に土が振動的に応力をうけている場合に、そのせん断強度がどのように変化するか、静的なせん断強度とどれだけ異なるかということはわれわれの関心のあるところである。

今度、われわれの実験室で土の動的性質に関する実験の一部として直接せん断試験機をせん断応力が一定の周期でくり返して加わるように改造して、土の動的せん断試験を行なってみた。その結果、砂と粘土（過圧密状態）それぞれ一種類についての結果が得られたが、両者はあいことなつた興味ある結果が得られたので、第1報としてここに報告する。

## 2. 実験装置および試料

実験装置は Fig. 1 に示すように、直接せん断試験機においてせん断力を加える部分をエアシリンダーにかえて、このエアシリンダー内に圧縮空気を一定の時間々隔で出入する。この空気圧によってピストンロッドに推力が生じ、くり返しせん断力を試料に負荷することができる。圧縮空気の出入は時間制御回路とそれによって駆動されるソレノイドバルブによって制

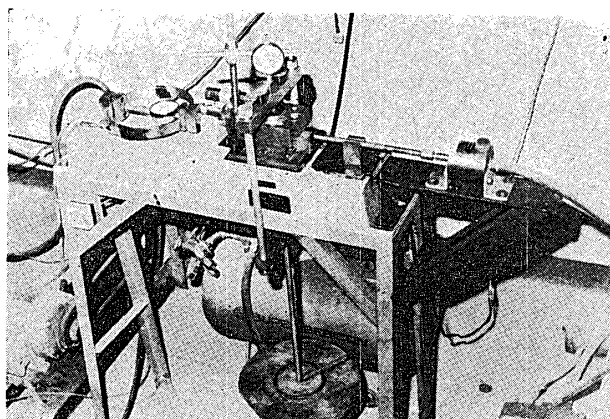


Fig. 1 Apparatus of dynamic shear test

御される。この時間制御回路はくり返しせん断力の周期を0.1秒から2.0秒までの範囲に調節できるが、実際に実験を行なった結果では、この範囲内での周期変化は実験結果に変化を生じないことがわかったので、今回の実験では周期を1.0秒、すなわちせん断力の負荷時間0.5秒、除荷時間0.5秒とした。もちろん波形は矩形波となる。ここに使用したエアシリンダーはペロプラムシリンダーといって従来のエアシリンダーと異なつて、シリンダーとピストンの間およびピストンロッドと軸受との間に摺動マサツがほとんどない特殊なエアシリンダーである。ピストンの有効面積17.7 cm<sup>2</sup>のものをを用いたので、許容最大空気圧10kg/cm<sup>2</sup>

\* 土木工学教室

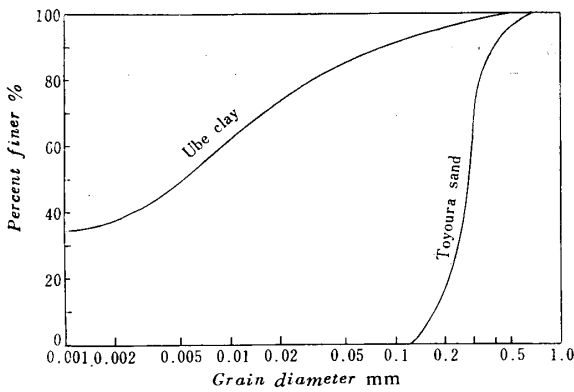


Fig.2 Grain size curves

の圧縮空気が送り込まれたときは177kgの推力が発生する。

せん断時に生じる試料のせん断抵抗力はひずみリングに接着した抵抗線ひずみゲージによって測定される。

また、上、下のせん断箱の間に生じるせん断変位量は差動変圧器型の変位計によって測定された。

これら、せん断抵抗力およびせん断変位の時間的变化はペンオシログラフに同時に記録された。

この実験に用いられた試料は、気乾状態の豊浦標準砂と宇部地区の海底粘土で、その粒度分布は Fig.2 に示す。このうち豊浦標準砂についてはその締め固め度を一定にするようにしてせん断箱内につめて試験したのであるが、粘土の方は自然堆積状態の均質な粘土が大量に得られないので、この実験のために Fig. 3 に示す装置を用いて圧密した粘土を作った。

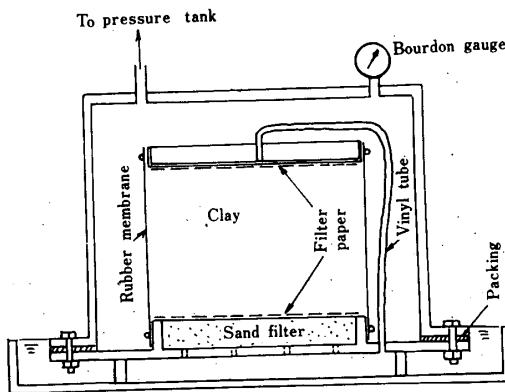


Fig.3 Apparatus for preconsolidation

Fig.3 に示す装置は三軸室と同じような構造になっていて、円筒状になったゴム膜によくときほぐされてペースト状になった粘土を流し込み上蓋をおいて密閉する。そのとき、ゴム膜だけではゴム膜がはり出すので、これをふせぐためにゴム膜の外側にやわらかい布

をまきつける。

なお、粘土試料の下部は砂フィルター、上部は厚手の濾紙を敷いた上からステンレス板で作られた上蓋がおいてあって、粘土内部の間げき水は上下から排水できるようにになっている。さらに外蓋をかぶせてタンクを密閉し、この中に0.9kg/cm<sup>2</sup>の水圧を送り込む。この水圧は一定値を長時間保つ必要があるため、全高が10mの水圧塔によって作られる。この状態で約10日間放置するとペースト状の粘土は負荷された水圧に等しい先行圧密圧を受けた自然状態に近い粘土となるので、これを切り出してせん断試験に供した。

タンクの直径は60cm で1回の圧密作業で約48個の供試体が得られる。試料の乾燥をふせぐために全体を5個ほどの塊に分けて、ビニール袋に入れて密封し含水比が変化しないように配慮して保存しながら用いた。

Fig.3 の装置による試料作製において、10日間の圧密後に圧密圧を除去したまま、1日間放置し粘土の体積膨脹を完全に終わらせた後に粘土をとり出すが、その際の粘土の体積膨脹や、また圧密時に粘土が乾燥することなどによって試料が不飽和になるのを防止するために Fig. 3 にあるようにタンクの底面は常に水中に浸しておいた。

このようにして作られた粘土試料は平均値として間げき比1.337 (1.425~1.288)、乾燥密度1.140g/cm<sup>3</sup> (1.164~1.104) で飽和度は平均94.2% (97.8~92.0) であり、含水比は47.3% (51.0~45.5) であった。なお、各値のバラツキの範囲を示すために ( ) 内に最大値と最小値を示した。

また、この粘土そのもののアッターベルグ限界は液性限界65.6%、塑性限界27.7%、流動指数9.9であるので、上述のようにして準備された粘土試料のコンシステンシー指数は0.558となる。

### 3. 実験方法

試料が乾燥砂の場合には75gの砂をせん断箱の中に入れ、試料を押し込むための円板で軽く押える。そして砂表面の高さを測り、1.0kg/cm<sup>2</sup>の荷重を加えて先行圧密する。その際の沈下量をはかり、試験前の試料厚さを求める。この実験では砂の場合の試料厚さは1.90~1.95cm となった。せん断箱の直径は6cm であるので、このときの試料の見掛け密度は1.36~1.38g/cm<sup>3</sup> で間げき比は0.89~0.93となる。このようにしてつめられた試料にせん断時の垂直荷重をそれぞれ1.0, 0.7, 0.5, 0.3kg/cm<sup>2</sup> にもどしてせん断を行なった。

試料が粘土の場合には、前述の装置によって  $0.9 \text{ kg/cm}^2$  の先行圧密をうけた粘土を通常のせん断試験試料の作製と同じ方法によって高さ  $2 \text{ cm}$ 、直径  $6 \text{ cm}$  の試料を作り、この重量、含水比を測定して後に、これをせん断箱に入れる。つぎに試験前に  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  の垂直荷重を加えて  $10$  分間圧密する。その後の垂直荷重をそれぞれ  $0.5, 0.3, 0.1 \text{ kg/cm}^2$  にもどしてせん断を行なった。

せん断試験はつぎのようにして行なう。まず空気圧調節弁によって空気圧、すなわちせん断力の大きさを設定する。この場合、せん断力としては  $5 \sim 100$  回の範囲内のあるくり返し回数で試料がせん断破壊をおこすと予想されるせん断力が試料に加わるように考えてせん断力の設定を行なった。

せん断力の設定が終わった後、せん断抵抗力およびせん断変位を測定する力率計、変位計を測定状態にセットして、その感度を調節する。

以上の準備が終わったらペンオシログラフを駆動した後、ソレノイドバルブのスイッチを入れ、せん断力を負荷する。試料のせん断破壊が生じたら装置のスイッチを切って測定を終わる。なお、せん断中に生じる試料の垂直変位はパルスメーターを見ながらせん断力のくり返し回数  $10$  回ごとおよびせん断後に測定した。前述のように、せん断力のくり返し回数が最大  $100$  回までの間に試料のせん断が完了するようにして実験を行なったので、せん断に要する時間は最大  $100$  秒となる。このように比較的短時間でのせん断であるので粘土の場合については圧密非排水せん断と考えることができると思う。

4. 実験結果および考察

Fig. 4 はペンオシログラフの記録の一例を示すものである。上図が砂、下図が粘土の場合の記録であり、

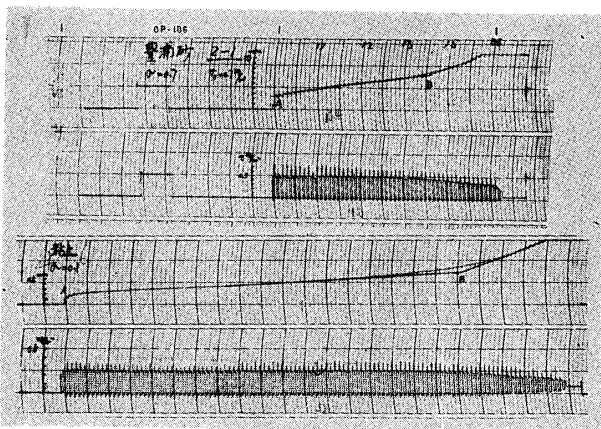


Fig. 4 Examples of record

二本の線の上がせん断変位、下がせん断抵抗力の変化を示す。両者を対比してみると、せん断開始直後に約  $2 \sim 3 \text{ mm}$  のせん断変位が生じる。その後はせん断力のくり返し回数が増加するにしたがって、除々にせん断変位が増加し、くり返し回数がある数に達するとせん断変位の増加が急激に大きくなる。そして、それまでほぼ一定値を保っていたせん断抵抗力が減少しはじめる。

このことから、せん断破壊はせん断変位の増加が急激に大きくなる付近であると考え、つぎの方法によって破壊点 **B** を定めた。すなわちせん断変位曲線において **B** 点前後のそれぞれの直線部 (いかなる場合もほぼ完全な直線となる) の交点を求めて **B** 点とした。

最初から **B** 点までのせん断力のくり返し回数をこの試料が破壊するに要したくり返し回数  $n_f$  とし、それまでに生じたせん断抵抗力の最大値 (ほぼ **B** 点附近に生じる) をその  $n_f$  で破壊する場合の動的せん断強度とした。

Fig. 4 に示すようなせん断抵抗力とせん断変位の関係は試料が砂の場合でも粘土の場合でも全く同じであったので両者とも同じ方法によって整理した。

垂直圧とせん断力とを変えて多くの供試体を用いて試験を行ない、上記の方法により  $n_f$  とそれに対応する動的せん断強度を求め、それぞれの試料についての結果をプロットしたのが Fig. 5, Fig. 6 である。Fig. 5 が豊浦砂、Fig. 6 が粘土の結果である。

動的な実験であるので実験値にある程度のバラッキはあるが、豊浦砂では  $n_f$  が大きい場合の方が動的せん断強度も大きくなっており、粘土では逆に  $n_f$  の大きい場合の方が動的せん断強度が小さくなっていることがわかる。

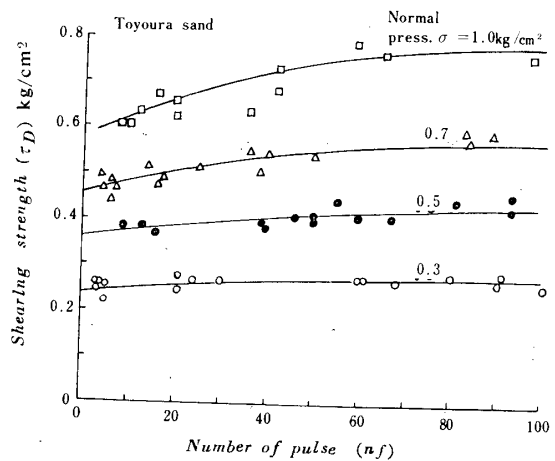


Fig. 5 Relation between  $\tau_D$  and  $n_f$

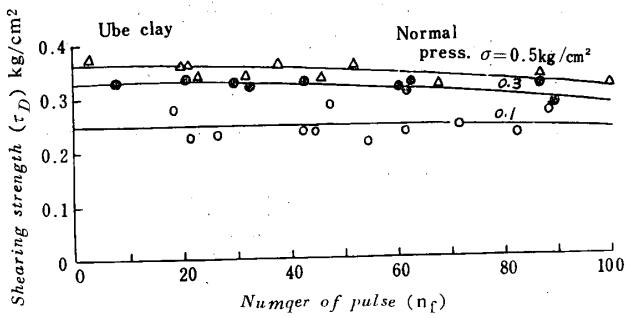


Fig. 6 Relation between  $\tau_D$  and  $n_f$

これらの傾向はいずれも垂直圧が大きい方が顕著である。この原因としてはダイラタンシーやチキソトロピー等が考えられるが、それをしらべるために、この試験において得られたせん断破壊時の供試体の垂直変位量と  $n_f$  との関係を Fig. 7 に示した。

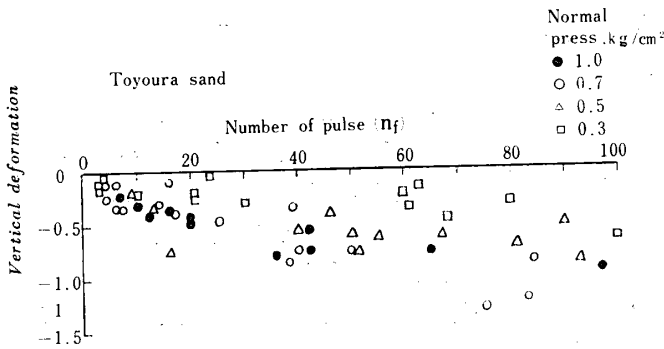


Fig. 7 (a) Vertical deformation due to shearing

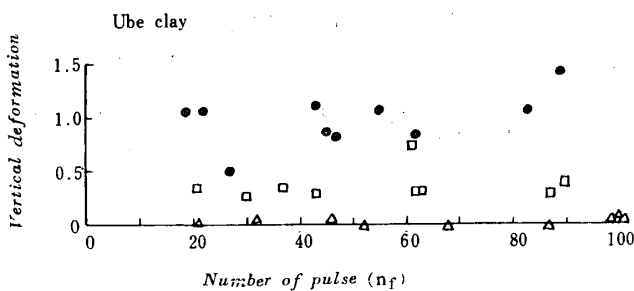


Fig. 7 (b) Vertical deformation due to shearing

Fig. 7 において、せん断によって砂では試料の収縮が生じ、粘土では逆に膨脹が生じていることがわかる。

そして厳密にはその収縮や膨脹の度合に垂直圧の大きさに関係していることがわかる。すなわち、せん断によって生じる砂の場合の収縮量、粘土の場合の膨脹量は垂直圧の大きさに比例して大きくなっている。

Fig. 7 の結果では、砂の場合には収縮量は  $n_f$  にも比例して大きくなっているため、 $n_f$  が大きい場合の方が砂がよく締まるのでせん断強度が大きくなるとい

うことが考えられ、Fig. 5 の結果を裏付けうるが、粘土の場合は膨脹量は垂直圧にのみ関係し、 $n_f$  には無関係にほぼ一定となっている。

このことから Fig. 6 に示す結果、すなわち  $n_f$  が大きくなると動的せん断強度が低下するという実験結果は説明できないと思われる。

Fig. 6 に示す結果の原因としては試料が粘土であり、動的問題であるので、チキソトロピー現象を考へることもできるが、著者は後述の粘土試料の動的せん断強度が静的せん断強度より大きいという結果も考へあわせて、この原因は試料の膨脹にともなう負の間げき水圧であろうと考えている。すなわち粘土ではせん断時の鉛直圧は 0.1, 0.2, 0.3 kg/cm<sup>2</sup> としたので、かなりの過圧密状態でのせん断となっている。ゆえにせん断時には試料は膨脹を生じ、そのため、試料内の間げき水圧は一時的に負となる。その負の間げき水圧が消失するまでの間、見掛上せん断強度が増加することとなる。しかし、この負の間げき水圧は破壊に達するまでの時間が長くなれば次第に減少して零にもどる。ゆえに  $n_f$  が増すにつれてせん断強度が低下すると考へている。

Fig. 5, Fig. 6 に示される実験結果において各垂直荷重ごとに  $n_f$  と動的せん断強度との関係を示す平均的な実験値曲線を描いた。この実験値曲線から  $n_f$  がそれぞれ 5, 10, 50, 90 回の場合の各垂直荷重ごとの動的せん断強度を求めて、Fig. 8 に示すように、それぞれの  $n_f$  ごとのせん断破壊線を描いた。Fig. 8 には普通の静的試験で求められた破壊線も記入した。

これよりわかることはせん断破壊が生じるまでに要したくり返し回数  $n_f$  ごとに破壊線はちがったものとなることがわかる。すなわちせん断抵抗角および粘着

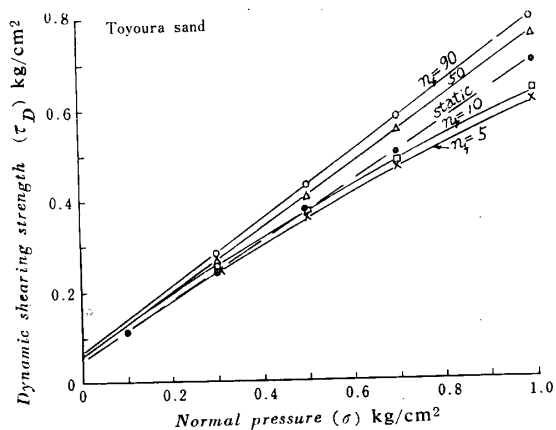


Fig. 8 (a) Relation between  $\sigma$  and  $\tau_D$

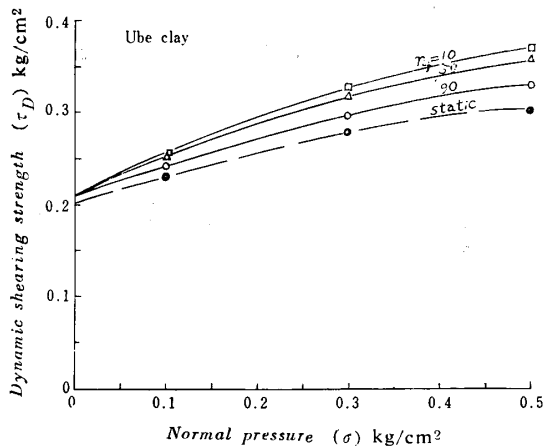


Fig. 8 (b) Relation between  $\sigma$  and  $\tau_D$

力が  $n_f$  によって変化するという結果が得られた。その状況を Fig. 9 に示した。

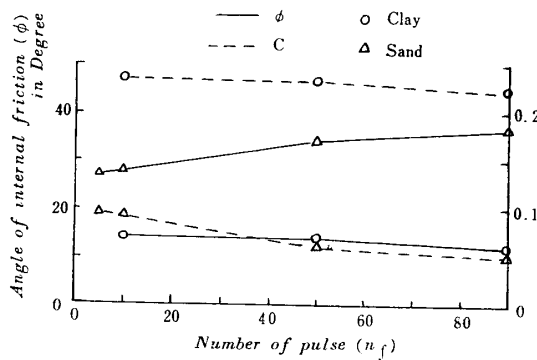


Fig. 9 Changes of  $C$  and  $\phi$  due to  $n_f$

Fig. 8 でわかるように、砂においては  $n_f$  が 5, 10 回の場合のせん断強度は静的な場合のそれより小さく、 $n_f$  が 50, 90 回の場合には大きくなっており、しかも  $n_f$  が大きくなるにしたがってせん断角が増大している。

それに対して、粘土ではいずれの  $n_f$  の場合でも動的せん断強度は静的のそれより大きくなっており、 $n_f$  が大きい場合ほど動的せん断破壊線は静的なそれに近づく傾向が見える。

粘土においてこのような実験結果が得られる原因はせん断中に生じる負の間げき水圧によるものと前述のように考察するのである。すなわち Fig. 6 に示されている、せん断破壊に達するくり返し回数が増すにつれて動的せん断強度が減少する現象を粘土のチキソトロピーによって説明することは一応可能であるが、この動的せん断によって粘土にチキソトロピーが生じているならば、Fig. 8 に示される動的せん断強度は静的強度より大きいという結果とは逆の結果が得られな

ればならない。

それに対して、これらの結果の原因を負の間げき水圧によるものとするならば、Fig. 6 の結果については前述のように説明でき、Fig. 8 の結果についても、この試験が圧密非排水試験であるので、せん断時には試料の体積膨脹によって負の間げき水圧による見掛けのせん断強度が生じ、動的せん断では静的せん断よりせん断破壊に達するまでの時間、すなわちせん断時間が短いのでせん断破壊時に残っている見掛けのせん断強度の量は動的せん断の方が多いとみることができる。そのため動的せん断強度は静的強度より大きくなっているであろうという説明ができる。また、このように考えれば、Fig. 8 において  $n_f$  が大きくなるにしたがって動的な破壊線が静的な破壊線に近づくという点も説明できるように思う。

なお、試料が破壊に達するまでの時間は、動的試験ではくり返し回数 90 回としたときでも 90 秒であるのに対し静的試験では約 240 秒であった。

なお、粘土においては破壊線が一定勾配の直線とならないでやや上に凸の曲線となったが、この原因は試料が完全な飽和土でなかったためか、その他の原因によるものが明らかでない。

上記の考察については間げき水圧の測定結果および正規圧密粘土についての試験結果がないので、いづらか信ぴょう性にかける点もあるが、いろいろな解釈の中で最も矛盾のない解釈と考える。

### 5. 結 語

以上のべたように、従来使用されている一面せん断試験機において、そのせん断力を周期 1.0 秒でくり返して負荷するようにし、乾燥砂および粘土についての動的せん断試験を行なってみた。

その結果、せん断破壊に達するまでのくり返し回数と動的せん断強度との関係は乾燥砂と粘土 (過圧密) ではことなっていることなどがわかり、それについていづらか考察を加えた。それらをまとめればつぎのとおりである。

- (1) 試料が破壊に達するまでのせん断力のくり返し回数  $n_f$  と動的せん断強度との関係は  $n_f$  が多くなると、砂では動的せん断強度は大きくなるが、過圧密粘土では逆に小さくなる。
- (2) 動的せん断強度と静的せん断強度とをくらべると、砂では  $n_f$  が小さいうちは静的せん断強度の方が大きいが、 $n_f$  が大きくなると動的せん断強度の方が大きくなる。また、過圧密粘土ではいずれの

$n_f$ でも動的せん断強度は静的のそれより大きい。しかし、 $n_f$ が大きくなるにしたがって動的せん断強度は静的強度に近づいてくる。

- (3) (1), (2)に示された結果はせん断によって生じた試料の垂直変位と  $n_f$  との関係から、砂においては試料のしまりによるもの、粘土においては試料の膨脹にともなう負の間げき水圧がそれぞれの原因と解釈される。

以上、砂と粘土のくり返しせん断力によるせん断試験を行なった結果についてのべたのであるが、粘土についての試験では過圧密粘土だけについて試験を行ない、その結果の考察から上記の結論を導いたものであり、現在、砂の初期間げき比を変化しての試験および正規圧密粘土の試験も続行中であるので、これを第1

報として報告したのである。

なお、この装置ではせん断箱と底板の間のマサツのため、強度のかなり小さい粘土の動的せん断は行なうことができなかつたが、現在では既にこの点についての改良も完了して実験を行なっている。

この実験には当時の本学々生山本 厚君の助力を得たことを付記して謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) 土の動的性質とその応用, 土質工学会, (1964)
- 2) Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations, ASTM, STP 450 (1969)

(昭和45年9月14日受理)