

飽和粘土の動的強度について

DYNAMIC SHEAR STRENGTH OF SATURATED CLAY

大原 資生*・松田 博**

By Sukeo OHARA and Hiroshi MATSUDA

1. ま え が き

軟弱地盤上に設けられた構造物の基礎の耐震性の検討を行う場合にはその地盤を形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することができるようになったが¹⁾、粘性土においては実験的な研究もまだ十分に行われていない。

この原因は粘着力の存在が砂質土の液状化のような地盤の破壊の発生を拘束していることにもあるが、粘土そのものが砂とちがって強度を支配するより多くの因子も持っていることにもよる。

いずれにせよ、飽和粘土の動的強度の予測は単に軟弱地盤中の基礎の耐震性だけでなく、粘着力や間隙水圧が振動中にどのように変化し、それらの動的強度に及ぼす影響を明らかにすることは土質力学の上でも重要なことである。

本論文では、飽和粘性土の動的強度を求めることを目的として粘土の動的単純せん断試験を行い、その結果について考察したものであるが、単純せん断試験そのものがまだ一般化されていないので動的試験に先立って、まず静的試験を行って粘性土の静的強度の定義を行った。

動的強度はこの静的強度との比として定義し、その測定はせん断応力のくり返し回数、静的付加せん断応力および間隙水圧などの動的強度に及ぼす影響を明らかにするというを目的として行われた。

この実験に用いた単純せん断試験機はわれわれの実験室で試作し、先に飽和砂の液状化の実験などに用いた²⁾ものである。単純せん断試験によって供試体に生じる応力状態についての考察も十分になされていない現状ではあるが、地震時に地盤に生じるせん断変形が単純せん断

試験で生じる供試体の変形にもっとも類似しているという点を重視して本実験には単純せん断試験機を用いることにした。

また、本実験では応力制御方式とひずみ制御方式の二つの方式の実験を行った。前者では負荷せん断応力振幅および周期ともに一定の定常的なせん断応力負荷の実験を行い、後者では静的試験と不規則波形のせん断ひずみを負荷する実験を行った。

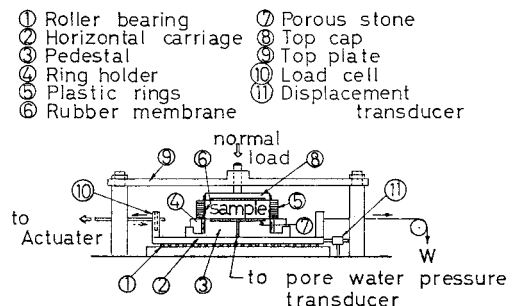
本実験では供試体には比較的均一な飽和したカオリン粘土を用いたので、実験結果に一般的な粘土によるものとのちがいが多少あるかも知れないが、粘性土の動的強度を知るためにできるだけ完全な粘土という意味でこの粘土を使用した。

以上の実験結果およびその考察について順次のべる。

2. 実験装置

この実験に用いられた単純せん断試験機の概略は図一に示す。これはせん断箱の部分を示したものである。

せん断箱は水平移動台②の上のペダスタル③に設けられる。すなわち、ペダスタルの外側に厚さ0.2mmのゴムスリーブをかけ、これをリングでとめる。その外側には供試体中の間隙水圧の漏れを防ぐためと積み重



図一 単純せん断試験装置

* 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 広島大学大学院工学研究科

ねたプラスチックリングを支持するために二つ割りの塩化ビニール製のリング受け台④をはめこむ。この受け台は外側から締め金具で締められてベDESTALとゴムスリーブの間を水密にし、供試体中に発生する間隙水圧の漏れを完全に防ぐ。

この受台の上に内径 75.2 mm, 外径 96 mm, 厚さ 2 mm のプラスチックリングを 15~17 枚積み重ねる。そのため、供試体はせん断変形に対してはほぼ自由であるが、横方向にふくれ出すのは拘束される。

ゴムスリーブの中に後述するような方法で準備された飽和試料を入れた後、その上に濾紙およびポーラストンさらにその上にトップキャップ⑧をおく。ゴムスリーブの上端はトップキャップにOリングと金属バンドでとめられる。トップキャップの軸棒は固定板の軸受孔に入り、水平方向の動きは拘束される。軸棒の先の球座には重錘懸架装置がのせられ供試体に鉛直圧が加わるようになっていく。

結局、本装置では所定の鉛直圧をうけた状態で供試体の下面に水平力が加えられた供試体にせん断応力が生じることになる。

水平移動台②の下にはローラーベアリング①が入っていて水平移動に対する摩擦をできるだけ小さくするようにしてある。しかし、この摩擦量は零ではないのでこの量を測定し負荷せん断力の補正を行った。

その測定は次のようにして行われた。すなわち、プラスチックリングを 17 枚積み重ねた中にゴムスリーブをはり、その中に供試体のかわりに水を満たす。その上に 1.0 kg/cm^2 の鉛直圧をかけ、水平移動台②を周期 2 秒で動かしてそのときに生じる力をロードセル⑩で測定した。図-2 がその結果である。これでもわかるように、摩擦力は変位振幅によって異なるが、ほぼ 0.01 kg/cm^2 程度となり、この供試体の静的強度 ($\tau_s=0.248 \text{ kg/cm}^2$) の約 4% に相当することがわかる。

a) 定ひずみ速度試験装置

この装置は静的単純せん断試験を行う際に用いられるもので、通常的一面せん断試験装置に用いられているウ

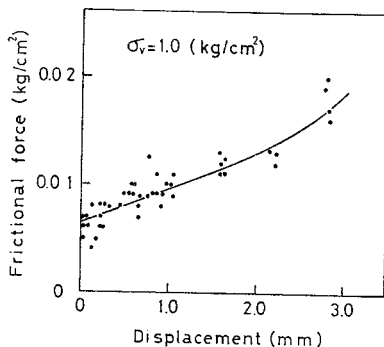


図-2 変位量と摩擦力の関係

ームギヤ機構と同一である。この実験では装置の都合からひずみ速度が $6.5\%/\text{min}$ となるようにして実験を行った。この場合、実験結果に対する速度効果の影響が考えられるが、急速試験の強度増加は破壊に至るまでの時間が 100~600 秒の範囲ではほとんどないという実験結果があり⁹⁾、このひずみ速度による実験結果への影響はないと思われるので、このひずみ速度で実験を行った。

b) 定常的くり返しせん断力負荷装置

応力制御方式のくり返しせん断力負荷装置でレギュレーターによって所定の圧力に調節された高压空気を電磁弁を通して復働式のペロフラムシリンダーの左右の圧力室に交替的に出入させる。ペロフラムシリンダーはピストンとシリンダーの間の摩擦が非常に小さいエアシリンダーである。

電磁弁の開閉はリレー回路によって所定の周期で行われる。圧力室の空気圧に比例してピストンロッドに押し引きの力が生じ、それがロードセルを経て水平移動台②に伝達される。押し引きの力は矩形波状となる。本実験では周期は 2.0 秒とした。

供試体に加わるせん断力の測定はピストンロッドに加わる押し引きの力を測定する形でつけられたロードセルによった。

c) 不規則なくり返しせん断ひずみ負荷装置

不規則波形の動的強度試験は、ひずみ制御型の動的単純せん断試験機によって行われた。

この装置は前述と同じ型の単純せん断試験機でせん断力負荷装置を動的なひずみ発生装置にかえたものである。

その全景は図-3に、ひずみ制御部の機構を図-4に示した。この装置は主としてレバー①、スプリング③、軸棒④より構成されている。支点②を中心にしてレバー①に生じた回転変位はレバーの上端の球座から軸棒④の水平変位として伝達される。

レバー①の回転変位は定常波形の場合は偏心ローラ

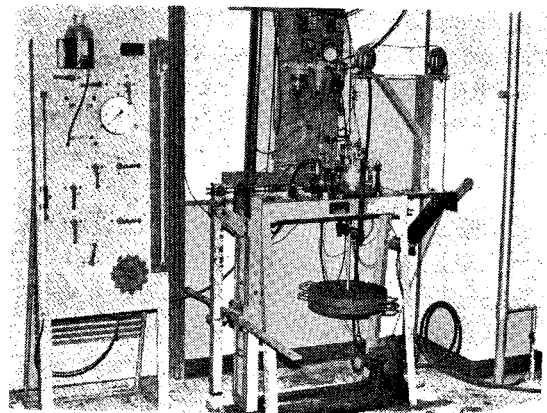
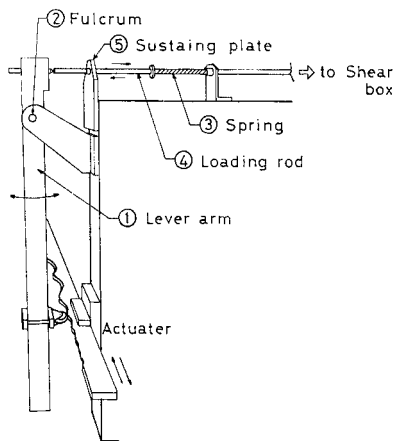


図-3 実験装置 (全景)



図—4 動的ひずみ制御装置

一の回転で生じさせ、不規則波形の場合は図—4に示すように塩化ビニール板（長さ 1.5 m, 厚さ 1.0 cm）に 1 サイクルごとに波長、振幅の異なった波形を切りこんだものをレバーの下端につけたローラーと固定板との間に動かすことによって生じさせた。

軸棒 ④ はスプリング ③ で常にレバーの球座の方に押しつけられた形となっており、軸棒 ④ と水平移動台との間には応力制御方式の場合に用いられていると同じロードセルがつけられていて供試体に生じるせん断抵抗力を測定できるようになっている。

鉛直荷重の載荷は重錘をヨークの皿にのせ、これをトップキャップの軸棒の上におくという直接的な方法による。重錘が大きい場合を考えてヨークは皿に重錘のせたままワイヤロープで吊り上げることができるようになっており、供試体には任意の速度で鉛直荷重を載荷できるようにしている。

また、供試体に一定レベルの静的せん断力を負荷した状態でくり返しせん断力を加えるという実験を行うために、図—1の右側に W と記した重錘をつけるようになっている。これによって生じる静的せん断力を静的付加せん断力という。

実験中の供試体の間隙水圧の測定は供試体が薄いことや、単純せん断変形をすることなどから、間隙水圧は鉛直方向にはほぼ一様に分布していると考えられるので、図—1に示すように供試体の下部からポーラストンを通して銅管で間隙水圧計に連結して行った。

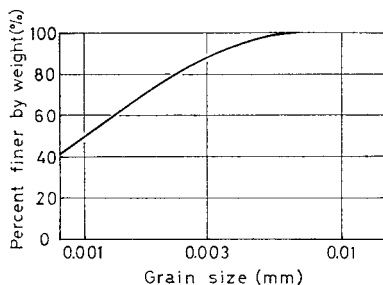
間隙水圧計として用いられたのは受圧面直径 6.0 mm の抵抗線ひずみゲージ応用の圧力計で受圧面のたわみ量は無視できる程度のものである。

供試体のせん断ひずみは供試体下面の水平変位を供試体の厚さで除して得られるが、水平変位は水平移動台の変位に等しく、差働変圧器型の変位計で測定した。これらの測定量はペンシログラフに記録した。

3. 試料および供試体

本実験に用いた試料は粉末状のカオリン粘土で気乾状態のものである。粒度分布は図—5に他の物理定数は表—1に示す。これよりわかるように、この粘土は粘土含有率 98% のきわめて均質な粘土であるといえる。

この試料を用いて飽和状態の供試体を作ったが、その操作は次のとおりである。



図—5 試料の粒径加積曲線

表—1 試料の物理的性質

Specific gravity	G_s	2.673
Maximum grain size	D_m	6.4 μ
Liquid limit	W_l	60.3 %
Plastic limit	W_p	34.7 %
Plasticity index	I_p	25.6 %

含水比が 90% になるように脱気水を加え、よく練り合わせた後、試料からの水分の蒸発を防ぎながら一昼夜放置する。

次に試料の表面にヘラを使って溝を作り、溝の上部がほぼ合流するまで容器に振動を与え、試料内に気泡が完全になくなるまでこの操作をくり返す。

この飽和試料をせん断箱のゴムスリーブの中に 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試料を上下面から排水可能な状態にして所定の圧密圧で約 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。

表—2 圧密圧力と間隙比

Normal stress σ_p (kg/cm ²)	Void ratio e
0.5	1.51
1.0	1.37
1.5	1.22
2.0	1.99

また、圧密後の飽和度は 98% 以上でほぼ飽和状態が保たれている。

圧密後の供試体の間隙比は表—2のとおりであった。

4. 静的強度の測定とその考察

前述のように動的強度を定義するのに静的強度が必要である。そのために動的試験に先立って静的単純せん断試験を行って静的強度および破壊ひずみの決定を目的とする静的単純せん断試験が行われた。

図-6 はその結果で、せん断応力とせん断ひずみの関係を示している。

せん断ひずみが増すとせん断応力は急増し、せん断ひずみが 15% になったとき、鉛直圧 $\sigma_v = 0.5 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ の範囲では鉛直圧のいかんにかかわらずせん断応力は一定になっていることがわかる。

このことから動的試験のときの供試体の破壊もせん断ひずみが 15% になったときと定義した。

図-6 の結果からクーロンの破壊線を求め、全応力表示をすると図-7 の直線 ① が得られる。この破壊線の

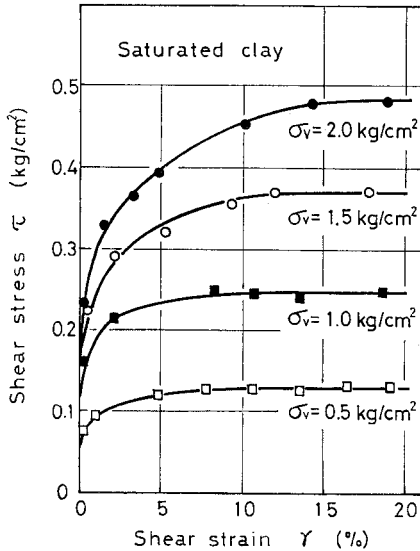


図-6 応力-ひずみ曲線

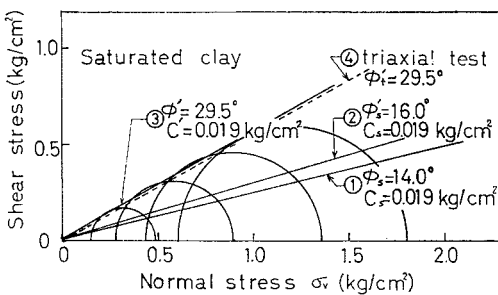


図-7 単純せん断試験による破壊線

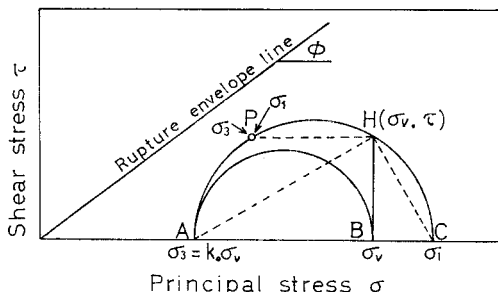


図-8 単純せん断試験中の応力状態

示す値を静的強度 τ_s と定義した。

ここで、この単純せん断試験から得られた静的強度について若干の考察をこころみためたので、その結果を述べる。

図-7 にその結果も一緒に示した。直線 ② は直線 ① を有効応力表示した結果である。一方、点線 ④ は同じ試料についての三軸圧縮試験の結果を有効応力表示したものである。直線 ② と点線 ④ との間には明らかながいが見られるが、Bjerrum ら⁹⁾ は粘土について、単純せん断試験による非排水強度は三軸試験のその 2/3 くらいになると報告している。

図-8 は単純せん断試験中の供試体のソイルエレメントの応力状態を示したもので、いま圧密時の応力状態を考えると、この供試体は異方圧密状態となるので、主応力は鉛直方向に σ_v 、水平方向には $K_0 \sigma_v$ となるから、この状態をモール円表示すれば点 A, B を通る円であらわされる。ここに、 K_0 は静止土圧係数である。

次に供試体の上下面にせん断応力 τ が作用した場合には、水平面はせん断応力が生じているためにはや主応力面ではなくなり、主応力軸も回転する。このときの応力状態は、供試体の側面にせん断応力がほとんど生じないために複雑となるが、文献^{5), 6)} によれば垂直応力 σ_v が一定ならば最小主応力は与えられたせん断応力に無関係に一定値をとるといわれている。したがって、このことを用いてせん断応力 τ が加わったときの応力状態を表わすモール円は点 A, C, H を通る円となる。このときの最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 との関係は幾何学的に次のように求まる。

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

式 (1) を用いて単純せん断試験での破壊時の主応力を有効応力表示し、モール円を描くと図-7 に示す 4 個のモール円になり破壊線は直線 ③ で示される。直線 ③ の示す値は点線 ④ の値よりやや大きくなっている。これは、平面ひずみ状態と軸対称応力状態という応力条件の違いによるもので、北郷氏ら⁷⁾ は非排水強度で比べると両者の差は約 8% であると報告しており、このことから式 (1) の妥当性がうかがえる。

以上の静的試験結果についての考察から、本実験での静的強度は図-7 の直線 ① の示す値をとることにした。

5. 動的強度の測定とその考察

動的試験では、せん断力を定常波形で負荷する実験とせん断ひずみを不規則波形で与える実験の二種類の実験を行った。それらについて別々にのべる。

(1) 一定の大きさの動的せん断応力振幅を与えた実験

図-9はこの実験によって得られた記録例で鉛直圧 $\sigma_v = 2.0 \text{ kg/cm}^2$ の結果である。(a), (b), (c)はそれぞれ静的付加せん断応力 $\Delta\tau$ の値が異なる場合を示したもので、 $\Delta\tau$ の大きさによって、せん断ひずみと間隙水圧の増加の様子に、かなりの違いが見られる。その一般的な傾向として次のことがいえる。

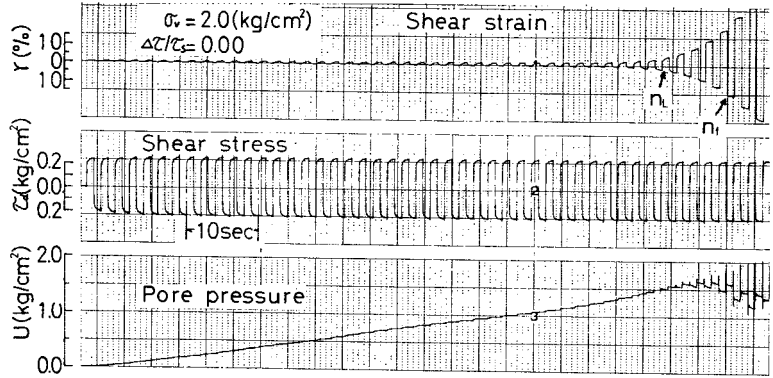
① (a), (b) 図ではせん断応力のくり返しがある回数に達すると、せん断ひずみは急増し、数パルス後には破壊に至っている。

また、(a) ではせん断ひずみが正負両方向に生じているのに対し、(b), (c) では一方方向にひきずられるような形で生じている。このことは (b), (c) 図は静的付加せん断応力がたえず一方方向に作用しているということより容易に理解できる。

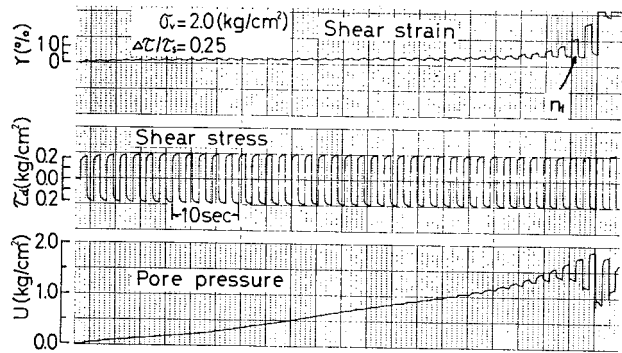
② 間隙水圧についてみると、(a), (b) ではどちらも発生の様子が似ており、せん断ひずみが急増しはじめるあたりから勾配が急になっている。それに対して、(c) はあるパルス数までは勾配が急であるが、その後はむしろゆるやかとなり、

(a), (b) とは異なる傾向がみられた。

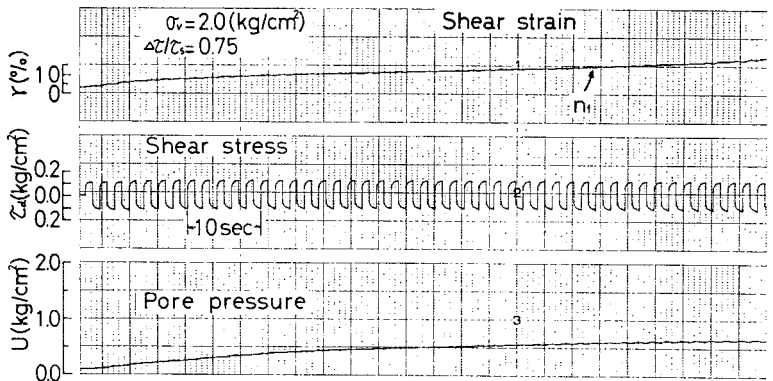
このような実験記録から、動的強度と静的強度の比 $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ と供試体が破壊ひずみを生じるまでのくり返し回数 n_f との関係を求めると、図-10 (a), (b) が得られる。この図より、動的せん断応力が大きければ少ないくり返し回数で破壊ひずみに到達し、それが小さければくり返し回数が多くなければ破壊ひずみに到達しないことがわかる。このことから粘性土はくり返しせん断応力の作用回数が多くなると動的強度が減少すると解釈



(a)



(b)



(c)

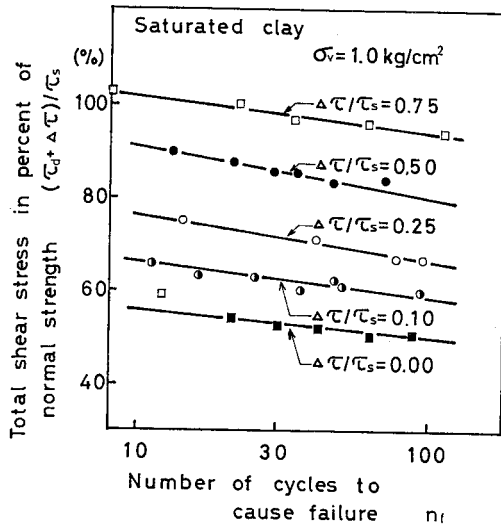
図-9 定常波形による記録例

できる。

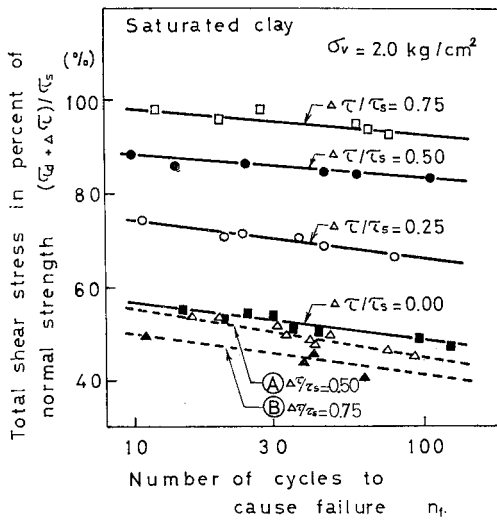
これがいわゆるくり返し効果といわれるものである。

また、 $\Delta\tau/\tau_s$ の値が大きくなると $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ の値も大きくなっていることがわかる。

図-11 は同じ実験結果を $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ と $\Delta\tau/\tau_s$ との関係について、くり返し回数 n_f と圧密圧力 σ_v とをパラメーターとして整理したものである。図中の一点破線で示す直線より上の部分の縦距は τ_d/τ_s 、下の部分の縦



(a)

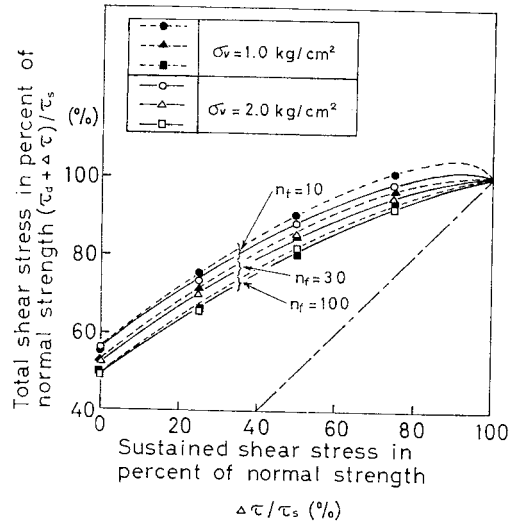


(b)

図一10 動的強度とくり返し回数の関係

距は $\Delta\tau/\tau_s$ をあらわすことになる。また、実線と点線が実験結果で、 $\Delta\tau/\tau_s$ の値が増加すると動的強度も大きくなっているが、特に $\Delta\tau/\tau_s$ が 100% 近くになると縦軸の値が 100% を越える実験値が得られており、動的強度が静的強度を上まわる場合があることを示している。このような傾向は Seed⁹⁾ らによる粘土の動的三軸試験の結果においても得られている。

また、くり返し回数が増すと動的強度が低下している様子が同図からも見られる。したがって、図一10, 11 から粘土の動的強度は、静的付加せん断応力負荷による強度増加とくり返し効果による強度低下とが合わさったものと考えたと理解できる。また、図一11 において、圧密圧力 σ_v が増加すると動的強度は一般に低下しており、砂の場合と異なった傾向が見られた。この原因として、



図一11 動的強度と静的付加せん断応力の関係

カオリン粘土の粒子形状は偏平あるいは板状のものが多くことから、圧密圧力の増加による粒子配向やダイレイタンスの影響などが考えられるが、今回の実験ではそれらの点を明らかにできなかった。

次に、図一10(b) において、点線 (A), (B) は静的付加せん断応力の効果を見るために、それぞれ $\Delta\tau/\tau_s = 0.50, 0.75$ に相当する静的せん断応力を供試体に一時的に負荷し、さらにこれを除荷した状態、つまり、残留ひずみおよび残留間隙水圧が存在する供試体に戻りせん断応力を負荷したときの結果である。ただし、 $\Delta\tau/\tau_s$ の負荷、除荷に要した時間は 15 分間で、この間にせん断ひずみおよび間隙水圧はそれぞれ一定値に落ち着いている。

その結果、点線 (A), (B) は $\Delta\tau/\tau_s = 0$ の場合よりも小さくなり、上記のような残留ひずみおよび残留間隙水圧の存在のもとでは動的強度は低下するということがわかった。この原因は 15 分間ではあるがせん断応力を加えることによって土粒子の配向がその応力に比例して生じるためと考えられる。しかし、残留ひずみだけの効果については今回の実験では明らかにすることはできなかった。

以上の結果を有効応力の概念を用いて考察するために、破壊ひずみを生じたり返し回数において発生している間隙水圧の最大値 U と圧密応力 σ_v の比 U/σ_v と、くり返し回数 n_f との関係で整理したものが図一12(a), (b) である。この図から $\Delta\tau/\tau_s$ のそれぞれの値に対しては、せん断応力のくり返し回数 n_f が大きいほど発生する間隙水圧が大きくなっているけれども、 $\Delta\tau/\tau_s$ が大きい場合のほうが一般にその発生量は小さくなっていることがわかる。したがって、これらのことは図一10(a), (b)

において、動的強度はせん断応力のくり返し回数が増すと小さくなるという現象と大きい静的付加せん断応力を負荷した場合のほうが増大するという現象とに有効応力の概念から一つの解釈を与える結果と考えることができる。

また、図-9(a)において、せん断応力のくり返し回数が n_L になるとせん断ひずみは急増しはじめ、間隙水

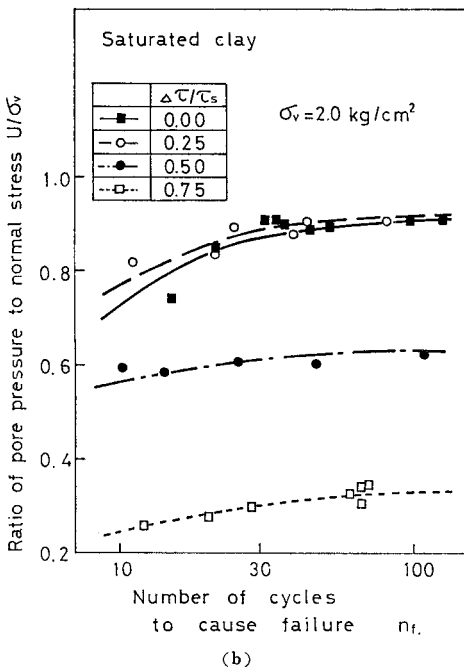
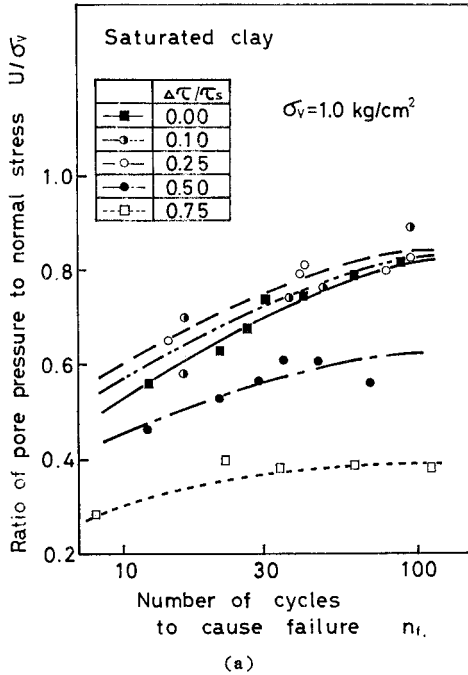


図-12 間隙水圧とくり返し回数の関係

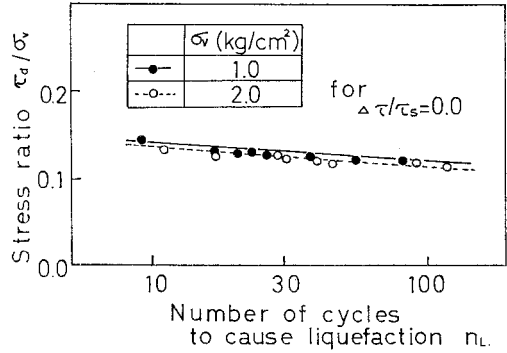


図-13 $\tau_d/\sigma_v \sim n_L$ 関係

圧の上昇も急勾配になる。

この傾向は $\sigma_v = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ のときにも見られるが、これはゆる詰め飽和砂が液状化を生じるときの様子に似ている。ここで、このくり返し回数 n_L は初期液状化が生じるときの値であると考え、この n_L とくり返しせん断応力と圧密圧力（初期有効圧） σ_v との比、いわゆる応力比 τ_d/σ_v との関係を整理すると図-13 が得られる。

n_L が増加すると、応力比 τ_d/σ_v はほぼ直線的に減少しており、これは飽和砂の液状化試験の結果とその傾向が似ている²⁾。

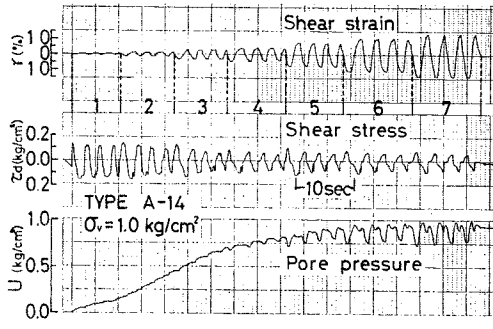
さらに、図-9(a)においては間隙水圧は最終的に初期有効圧 σ_v に等しくなる瞬間が見られ、このことは粘土においても有効応力が零になるという意味で液状化を生じたと判断せざるを得ない。しかし、粘土においては、粘着力が存在するために、たとえ有効応力が零になっても粒子が分離してしまうようなことはなく、砂のような非粘性土に生じる液状化とは異なると考えられる。

(2) 不規則波形の動的せん断ひずみ振幅を与えた実験

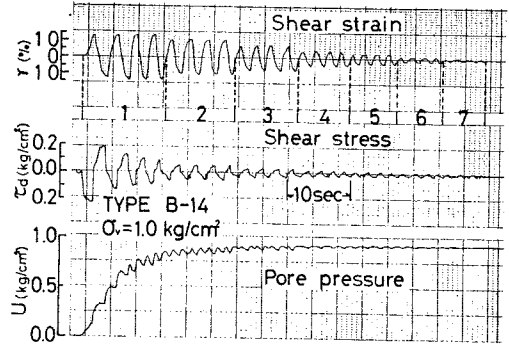
図-3, 4 に示した装置を用いることによって、供試体には図-14(a), (b)に示したようなせん断ひずみ波形が与えられた。図-14(a) はせん断ひずみ振幅が4パルスごとに増加する型であり、図-14(b) は逆に4パルスごとにひずみ振幅が減少する型である。ひずみ波形の下の番号は4パルスごとのひずみレベルを番号で示したものである。ここでは、そのようなひずみ波形の型をそれぞれ A-タイプ、B-タイプとよぶことにし、供試体に生じる最大ひずみ振幅（14%, 5%）によって A-14, B-14 といった記号で試験種別を表示した。また、図-14(a), (b)にはせん断ひずみに対応するせん断抵抗力、間隙水圧の記録も同時に示されている。

そこで、AタイプとBタイプを比較すると、せん断抵抗力と間隙水圧の波形にかなりのちがいが見られる。

まず、せん断抵抗力はAタイプではランダムな波形を

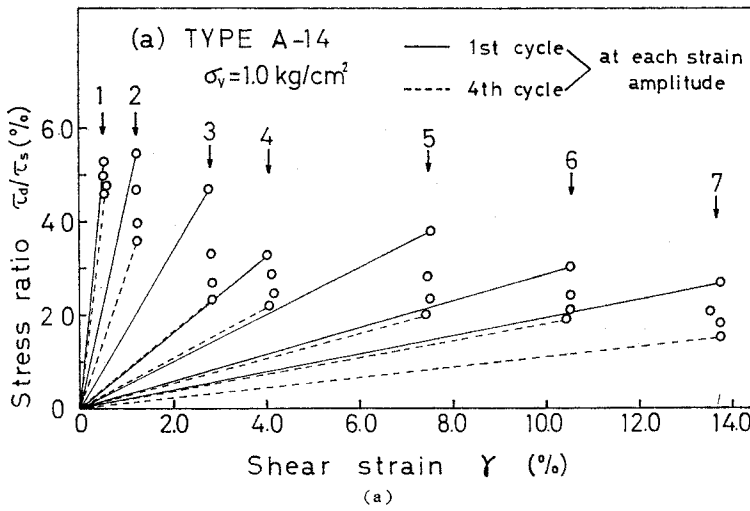


(a)

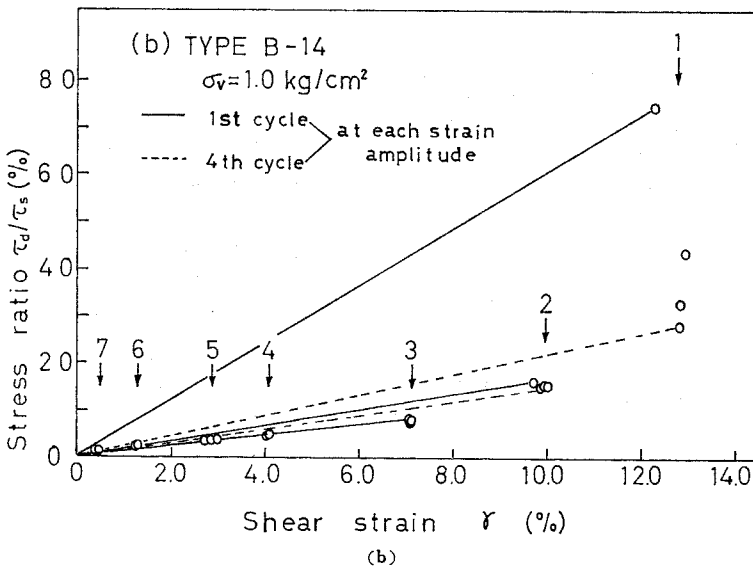


(b)

図-14 不規則波形による記録例



(a)



(b)

図-15 せん断抵抗力とせん断ひずみの関係

とるが、Bタイプにおいては減衰振動のように次第にその振幅は減少している。また、間隙水圧については、Aタイプでは徐々に増加するのに対し、Bタイプでは最初の数パルスで急激に上昇して圧密圧力に近くなり、その後はゆるやかな勾配で上昇しており、ひずみ波形のちがいがせん断抵抗力や間隙水圧の発生に大きく影響している様子がわかる。

このような記録をもとにして、加えられたせん断ひずみとそれによって生じるせん断抵抗力の関係を示したものが図-15(a),(b)で、それぞれA-14, B-14の実験について示されている。また、図中の番号はそれぞれ図-14(a),(b)においてひずみレベルを示す番号に対応している。図-15(a),(b)において、同一のひずみレベルにおいてはせん断ひずみのくり返しによって、実験値を示す同一ひずみレベル付近の4個の点の縦軸の位置が下降していることから、せん断抵抗力は減少しているのがわかる。

このことより、粘土のせん断抵抗力はあるレベルのせん断ひずみがくり返し作用したときにも減少する可能性のあることを示している。しかし、ひずみレ

ベルの小さいときはBタイプではあまりこの傾向はみられない。

これは 図-14 (a),(b) において間隙水圧は、はじめの数パルスで圧密圧力に近くなり、せん断抵抗力の大部分を失ってしまっていることが一因であると考えられる。

また、図-15(a),(b) において実線と点線は、それぞれ原点と各ひずみレベルにおける第1パルスおよび第4パルスの点を結んだものである。したがって、その直線の傾きはそのときの供試体の剛性率に比例する量を与えるものと考えてよい。そこで、AタイプとBタイプとを比較すると、まずBタイプでは、第1番目に与えられたひずみレベルにおいて、急速に剛性率は低下し、第2番目のひずみレベルにおいてはいきなりほぼ最終状態になっている。そして、その後は各ひずみレベルやせん断ひずみのくり返し回数によってほとんど変化していない。

それに対してAタイプでは最後のパルスまで、くり返しによる効果がみられる。すなわち、剛性率はしだいに小さくなっている。このちがいは、Aタイプでは最後のパルスまで間隙水圧は上昇しているのに対し、Bタイプでは先にものべたように、最初の数パルスで間隙水圧はほぼ最終値近くの一定値まで上昇してしまうためと思われる。このように、ひずみ波形のちがいによって供試体に生じるせん断抵抗力減少の過程には大きなちがいが生じる。

次に、このようなひずみ波形のちがいによる強度低下の過程のちがいを有効応力とせん断抵抗力の比 $(\sigma_v - U) / \tau_d$ と、加えられたせん断ひずみ γ との関係について整理したものが 図-16 に示されている。すなわち、横軸は単位せん断抵抗力当りの有効応力を示している。そこで、AタイプとBタイプにおいて両者の強度を比較するために、横軸の値を一定とした場合を考えると、Bタイ

プのほうがAタイプよりも大きいせん断ひずみを生じている。このことは、Bタイプすなわち最初に大きいひずみ振幅を与え、その後ひずみ振幅を減少させるような場合のほうが動的強度の低下は大きくなっていることを示している。また、前述のように、実験値はかなりばらばらしているが、図-16 よりひずみ波形が同じであれば、ひずみ振幅が変わっても(14%と5%のどちらの場合も)その結果にはあまり影響を及ぼしていないのがわかる。以上のことより、供試体にせん断ひずみがくり返し作用した場合、Aタイプの波形が作用した場合よりBタイプの波形が作用したほうが強度の低下が大きく、その傾向は最大ひずみ振幅によってはあまり影響されないのであろうということが明らかとなった。

通常の地震動はBタイプであるので、地震動をうけたときの粘土の強度低下は大きいとみななければならないことが注目される。

この原因についての考察は今後に残された課題ではあるが、直接的な原因としてはAタイプとBタイプとの間隙水圧の発生の様子のちがいということになろう。

6. 結 語

以上のべてきたように、今回は単純せん断試験機を用いて、純粋な粘土について静的強度の基準づけを行うとともに、動的強度の測定を行って次のことが明らかとなった。

(1) 単純せん断試験中に最小主応力は変化しないとして応力状態をモール円表示すると、その破壊線は三軸圧縮試験から得られたものとほぼ一致する。

(2) 粘性土の動的強度はくり返しせん断力の作用回数が多くなると減少するが、静的付加せん断応力の負荷

によっては増加する。

(3) 供試体に静的せん断応力を負荷して再び除荷した状態、すなわち、残留ひずみおよび残留間隙水圧が存在する状態でくり返しせん断応力を負荷すると、動的強度は $\Delta\tau/\tau_s=0$ のときの値よりさらに減少する。

(4) 破壊時に供試体に発生している間隙水圧はくり返し回数 n_f が増すにつれて増加するが、静的付加せん断応力を負荷することによってその発生はおさえられる。

(5) $\Delta\tau/\tau_s=0$ のとき、くり返しせん断応力の負荷によって

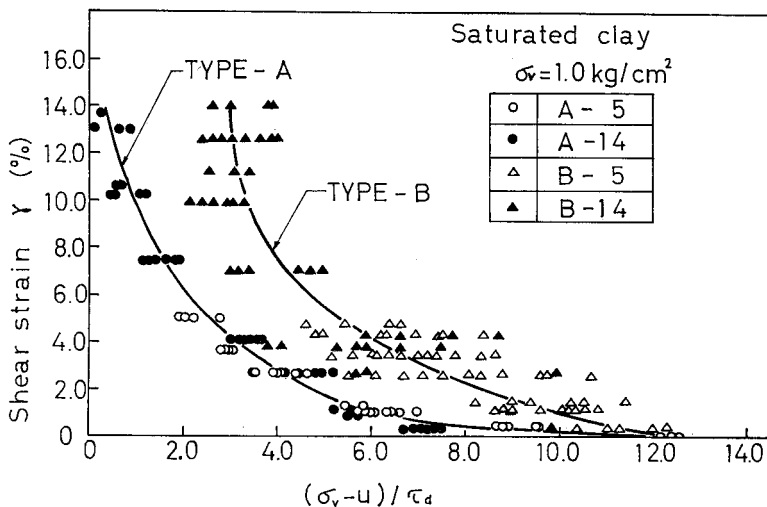


図-16 $(\sigma_v - U) / \tau_d \sim \gamma$ 曲線

粘土にも液状化に似た現象が生じる。

(6) 粘土のせん断抵抗力は、あるレベルのせん断ひずみがくり返し作用したときにも減少する可能性がある。

(7) 粘性土の動的強度の低下はそのひずみ振幅の与え方によって異なる。すなわち、最初に大きいひずみ振幅を与え、その後徐々に振幅を減少させた場合のほうが、ひずみ振幅を徐々に増加させるよりも強度の低下は大きくなる。したがって、通常の地震動は前者に近いので、地震動をうけたときの粘性土の強度の低下は大きい。その直接の原因は間隙水圧の発生の違いによって説明できる。

終りに、本実験を行うにあたって、貴重な討議をいただいた本学の三浦哲彦助教授と実験を手伝ってくれた学生、篠原勝徳君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp. 231～

293, 1976.

- 2) 大原資生・鈴岡直彦：振動砂箱による飽和砂の液化に関する実験結果の検討，土質工学会論文報告集，Vlo. 12, No. 4, pp. 85～94, Dec. 1972.
- 3) 石原研而・小川正二：土と構造物の動的相互作用，土質工学会，pp. 443, 1973.
- 4) Bjerrum, L. and A. Landva : Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay, *Geotechnique*, Vol. 16, No. 1, pp. 1～20, 1966.
- 5) 落合英俊・山内豊聡：砂の直接せん断，第10回土質工学研究発表会，pp. 129～132, 1975.
- 6) Oda, M. : On the relation $\tau/\sigma_N = K \cdot \tan \phi$ in the simple shear test, *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 4, pp. 35～41, Dec. 1975.
- 7) 北郷 繁・三田地利之・三浦清一：平面ひずみ試験機の試作と二・三の実験結果，土木学会第28回年次学術講演会講演概要集，pp. 25～26, 1973.
- 8) Seed, H.B. and C.K. Chan : Clay strength under earthquake loading conditions, *Proc. ASCE*, Vol. 92, No. SM. 2, pp. 53～78.

(1977.4.28・受付)