

飽和粘土の動的強度について

大原 資生*・松田 博**

Experimental Study on Dynamic Shear Strength of Saturated Clay

Sukeo ŌHARA and Hiroshi MATSUDA

Abstract

Dynamic simple shear tests under undrained conditions were conducted to obtain the dynamic shear strength of normally consolidated soil, which is contained a clay at the rate of 98 per cent.

Dynamic shear stress pulses were superposed on the sustained shear stress equal to 0, 10, 25, 50, 75 per cent of the static shear strength.

Particularly, in these experiments, the following significant results were obtained.

(1) The degree of the sustained shear stress ratio $\Delta\tau/\tau_s$, had considerable effect on the apparent cohesion, but had no significant effect on the angle of the internal friction.

(2) In the case that the sustained shear stress equals to zero, pseudo liquefaction occurs in a clay.

三軸圧縮試験機を用いて得られた強度より小さいといわれており¹⁾, その点についても考察を加えている。

1. 緒 言

地震時に、粘性土がもつ強度を知るということは、軟弱地盤中に設けられた基礎工、フィルダムのコア、あるいは、斜面の耐震設計を行なう際に必要とされる。

それにもかかわらず、われわれの知るかぎりでは、粘性土の動的性質についての研究報告は少なく、間ゲキ水圧やチキソトロピーなどの因子が動的強度に及ぼす影響については、いまだ解明されていない点が多いように思う。

そこで、われわれは単純せん断試験機によって供試体に生じる変形は、地震時の現地盤のソイルエレメントに生じる変形によく似ているという点から、動的単純せん断試験機を用いて、粘性土の動的強度の測定を行ない、静的強度と比較するとともに、試験中に発生する間ゲキ水圧の測定を行ない、その動的強度に及ぼす影響について考察した。

供試体には、正規圧密されたカオリンを用い、実際の地盤で考えられる数種の応力状態のもとで実験が行なわれた。

また、単純せん断試験機で測定される静的強度は、

2. 試料および供試体

今回は、粘土の基本的な動的性質を知るということで、Fig. 1に示すような粘土含有率が98%という均質なカオリン粘土を使用した。試料は気乾燥状態のもので、その物理的性質はTable 1に示す。

Table 1 Soil properties of kaolin used in these tests

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%

まず、飽和状態の供試体をつくるために、次のような操作を行なった。

試料の含水比が90%になるように脱気水を加え、よく練り合わせた後、試料の蒸発を防ぎながら一昼夜放置する。次に、供試体の表面にヘラでみぞを数本入れた後、みぞの上部がほぼ合流するまで容器に軽い衝撃を与える。そして、さらにみぞを入れたときに、気泡がみえなくなるまでこの操作をくり返す。このようにして脱気を行なった結果、試料のB係数(間ゲキ圧

* 土木工学科

** 大学院土木工学専攻

係数)は0.96以上となり、ほぼ飽和状態が保たれている。

これを後述するセン断箱のゴムスリーブの中に入れ、所定の圧密圧 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm²) で、24時間圧密した。圧密後の間ゲキ比は、それぞれ、1.51, 1.37, 1.22, 1.19 で、そのとき供試体の寸法は、直径7.5 cm, 高さ約2.0 cm の円板状である。

3. 実験装置および実験方法

ここで用いた実験装置は、Fig. 2に示すような動的単純セン断試験機と三軸圧縮試験装置である。このうち動的単純セン断試験機は、われわれの研究室で以前から砂の液化化の実験などに使われてきたものである

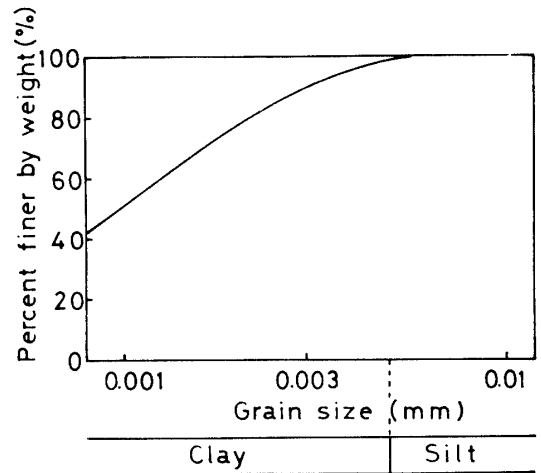


Fig. 1 Grain size distribution curve.

- ① Horizontal carriage
- ② Rubber membrane
- ③ Ring holder
- ④ Plastic rings
- ⑤ Top cap
- ⑥ Top plate
- ⑦ Load cell
- ⑧ Porous stone

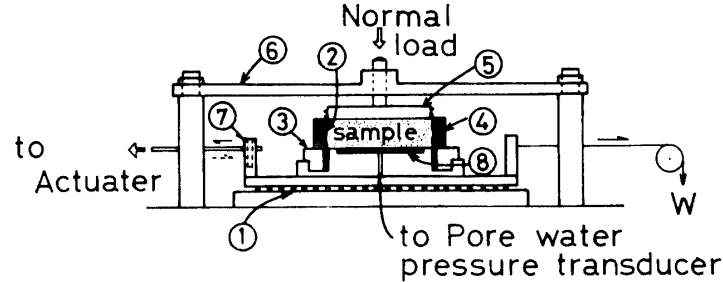


Fig. 2 Mechanism of dynamic simple shear test apparatus.

が、今回の実験では、ベアリングの部分で生じる摩擦力を小さくし、大きい垂直荷重 ($\sigma_v=2.0\text{kg/cm}^2$) にも耐えうるように改良したものを使った。その結果、ベアリングの部分で生じる摩擦力は、静的強度の2%程度となった。

実験装置の詳細については、以前に報告されている²⁾ので、ここではその概略だけを説明する。セン断箱は Kjellman 型で、供試体は厚さ0.2 mm のゴムスリーブで包まれた状態にあり、その外側には内径75.2 mm, 外径96.0 mm, 厚さ2.0 mm のアクリルリングを15~17枚積み重ねることにより、供試体は、横方向に膨れだすのを拘束している。

また、上部載荷板を水平方向に拘束することによって供試体の上部境界面の水平方向変位を拘束し、下部境界面に水平方向のセン断応力を負荷することにより、供試体を現地盤のソイルエレメントが地震時にもつ応力状態と相似な状態におくことができる。

このセン断応力の負荷には、リレー回路を使って、複動式のペロフラムシリンダーの圧力室に一定の空気

圧を交替的に送り込むことによって、供試体にくり返しセン断応力を与えた。そのときのくり返しセン断応力の波形は矩形波に近いもので、くり返し周期は2秒である。

また、静的セン断応力 $\Delta\tau$ を負荷した状態で動的試験を行なう場合は、Fig. 2にWと記して示した死荷重を用い、 $\Delta\tau/\tau_s=0.00, 0.10, 0.25, 0.50, 0.75$ についての試験を行なった。ここに、 τ_s は静的セン断強度である。

静的セン断強度 τ_s を求める場合には、前述のペロフラムシリンダーのかわりに、定ひずみ速度発生装置を使って、1mm/min のひずみ速度を供試体に与えた。

セン断試験中に発生する間ゲキ水圧は、供試体の下部より間ゲキ水圧計に連結して測定を行なった。

その際、セン断応力、セン断変位、間ゲキ水圧はすべて動ひずみ測定装置で増幅し、ペン書きレコーダーで自記記録させた。

4. 静的試験の結果および考察

4.1 静的強度および破壊ひずみ

Fig. 3は、単純せん断試験機を用いて行なった静的試験の結果で、せん断応力とせん断ひずみの関係を示している。せん断ひずみが増加するとせん断応力は急増し、せん断ひずみが15%になったとき、すべての鉛直圧の場合に、せん断応力は一定になっているのがわかる。そのことより、供試体が破壊したことの判定としては、せん断ひずみが15%になったときとした。

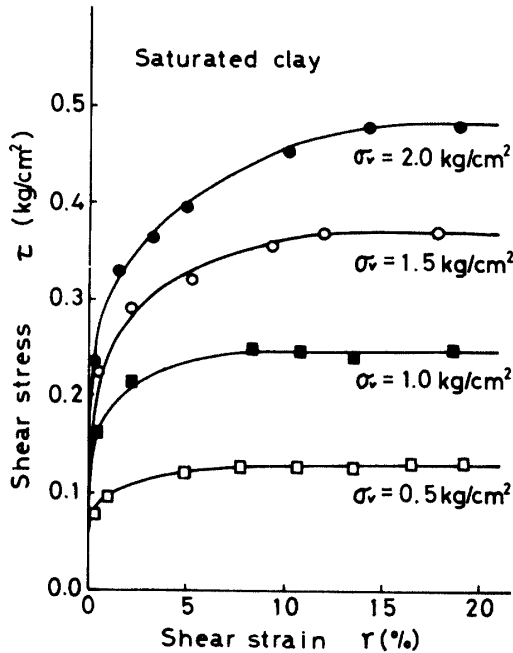


Fig. 3 Stree-strain curve for simple shear test.

Fig. 3の結果からクーロンの破壊線を求めて全応力表示すると、Fig. 4(a)の直線①となり、この直線の示す値が、静的強度 τ_s となる。

4.2 単純せん断試験と三軸圧縮試験の対応

Fig. 4(a)の直線②は、直線①を有効応力表示したものである。一方、点線④は、同じ試料について三軸圧縮試験を行ない、破壊線を有効応力表示したものである。両者のあいだには明らかながいが見られるが、Bjerrum et al.¹⁾は、粘土について、両試験での非排水強度を求めて、その比は約2/3になると報告しているが、その原因は明らかにしていない。

Fig. 4(b)は、単純せん断試験中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、鉛直方向には σ_v という主応力が働き、水平方向には $K_0\sigma_v$ という主応力が働くから、この状態をモール円表示すれば、点A、Bを通る円弧であ

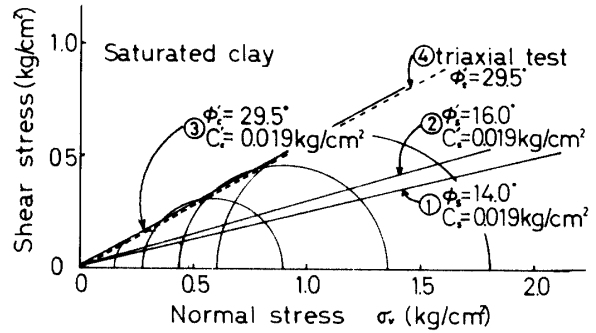


Fig. 4(a) Mohr-coulomb diagram at failure for simple shear test and triaxial test.

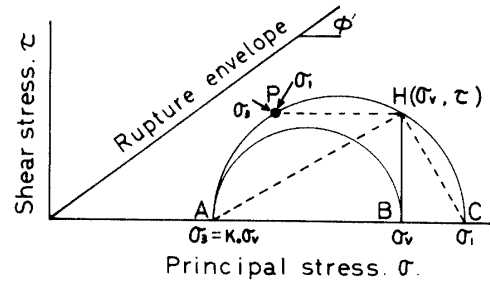


Fig. 4(b) Mohr diagram for simple shear test.

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 を作用させた場合には、水平面はせん断応力が生じているためにも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³⁾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、このことを使ってせん断応力 τ が加わったときの応力状態をモール円表示すれば、点A、C、Hを通る円弧であらわされる。このとき最大主応力 σ_1 および最小主応力 σ_3 は幾何学的な関係から

$$\sigma_1 = \{(1 - K_0)\sigma_v^2 + \tau^2\} / (1 - K_0)\sigma_v \quad (1)$$

$$\sigma_3 = K_0\sigma_v \quad (2)$$

で示される。

(1)、(2)式を使って、単純せん断試験での破壊時の主応力を有効応力表示し、モール円を書くと、Fig. 4(a)のようになり、破壊包絡線は直線③で示される。ここで、三軸圧縮試験の結果より得た強度が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ちがいによるもので北郷他⁴⁾は、非排水強度で比べると、その差は約8%であると報告しており、このことから、(1)、(2)式の妥当性がうかがえる。

5. 動的試験の結果と考察

5.1 セン断ひずみ, セン断応力, 間ゲキ水圧の波形

Fig. 5 (a), (b), (c) は, 静的セン断応力 $\Delta\tau$ の値を変化させた場合のセン断ひずみ, くり返しセン断応力, 間ゲキ水圧の記録例である. いずれも, $\sigma_v = 2.0 \text{ kg/cm}^2$ での結果であるが, 静的セン断応力の負荷によって, セン断ひずみと間ゲキ水圧の発生の様子にいくつかのちがいがみられるが, 一般的な傾向として次のことが言える.

(1) くり返し回数とセン断ひずみの関係についてみると, (a), (b)では, あるサイクル数になると, セン断ひずみは急増し, 数パルス後には破壊に至っている.

また, (a)ではセン断ひずみが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)は, 静的セン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) くり返し回数と間ゲキ水圧の関係をみると, (a), (b)についてはどちらも発生の様子が似ており, セン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, (c)はあるサイクル数までは勾配が急であるが, その後はゆるやかである.

なお, 図中で, n_f はセン断ひずみが 15% になったとき (破壊時) のくり返し回数を示し, n_L はひずみが急増しはじめる点でのくり返し回数を示している.

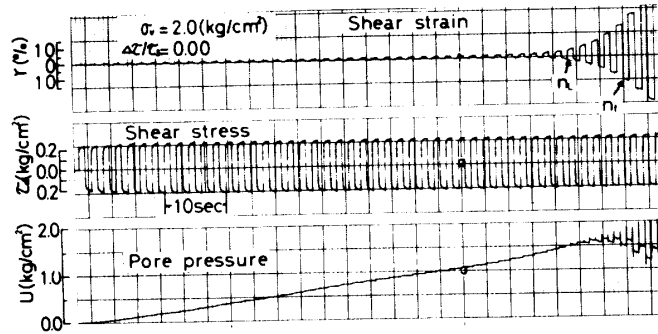


Fig. 5 (a) Typical record of dynamic simple shear test.

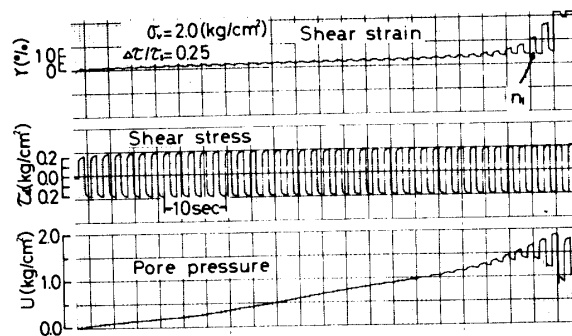


Fig. 5 (b) Typical record of dynamic simple shear test.

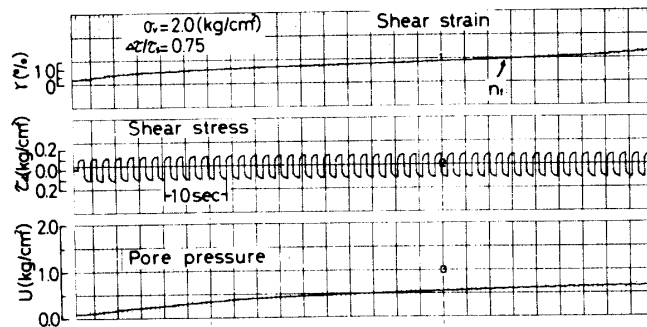


Fig. 5 (c) Typical record of dynamic simple shear test.

5.2 くり返し回数と動的強度の関係

動的強度 $(\tau_d + \Delta\tau)$ と静的強度 τ_s の比がくり返し回数によってどう変わるかを示したものが Fig. 6 (a), (b)である。

動的強度はくり返し回数が増加すると小さくなっており、粘性土はくり返しによって弱化するものと思われる。これがいわゆるくり返し効果といわれるもので、粘性土の動的強度にはチキソトロピーの影響が大きいと考えられる。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。以前にも同様の結果が得られているが⁵⁾、その原因として、静的セン断応力の負荷によるひずみ硬化などが考えられている。

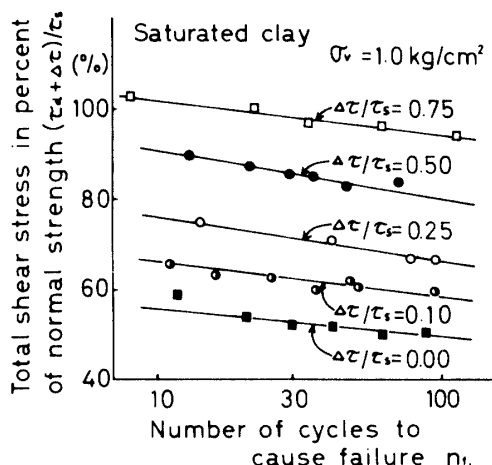


Fig. 6 (a) Relationship between $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ and n_f .

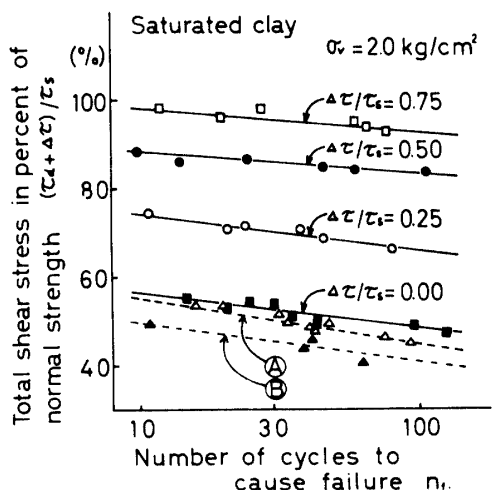


Fig. 6 (b) Relationship between $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ and n_f .

Fig. 7は同様の実験結果を $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ と $\Delta\tau/\tau_s$ との関係を示す。くり返し回数 n_f と圧密圧力をパラメータとして整理したものである。この図から明らかに、粘土の動的強度は、静的セン断応力負荷によ

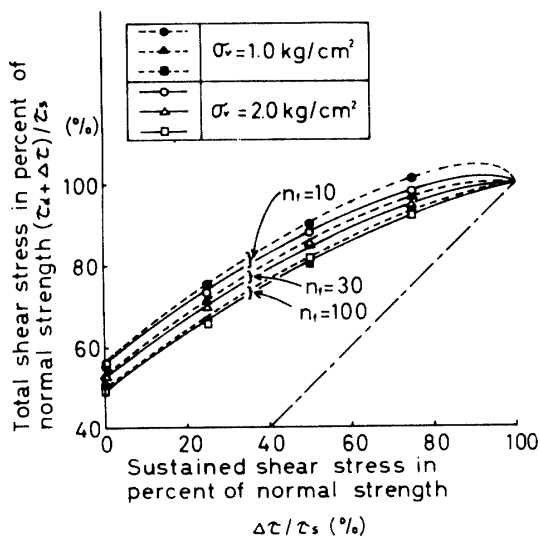


Fig. 7 Relationship between $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ and $\Delta\tau/\tau_s$.

る強度増加と、くり返し効果による強度低下とがあわさったものと考えられる。

また、同図において、圧密圧力が増加すると、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みられた。この原因としては、粒子配向や、ダイレイタンシーの影響などが考えられるが、特に間ゲキ水圧は、後述するように、圧密圧力が大きいほど、その発生量は大きくなっており、強度低下の一因となっていると思われる。

次に、Fig. 6 (b)において、点線④、⑤は、静的セン断応力の効果をみるために行なった実験の結果で、それぞれ $\Delta\tau/\tau_s = 0.50, 0.75$ の静的セン断応力を供試体に負荷し、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ゲキ水圧が存在する供試体にくり返しセン断応力を負荷したときの結果である。但し、 $\Delta\tau/\tau_s$ の載荷・除荷に要した時間は15分間で、この間にセン断ひずみおよび間ゲキ水圧はそれぞれ一定値に落ちついている。

その結果、点線④、⑤は $\Delta\tau/\tau_s = 0.00$ 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ゲキ水圧の存在のもとでは、動的強度は低下するという結果が得られた。この原因は、15分間ではあるが静的セン断応力を加えると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、残留ひずみだけが生じているときの効果については、今回の実験では明らかにすることができなかった。

5.3 くり返しセン断試験における間ゲキ水圧

破壊時に発生している間ゲキ水圧比 U/σ_v と、くり返し回数 n_f の関係を整理したものが、Fig. 8 (a), (b)で、

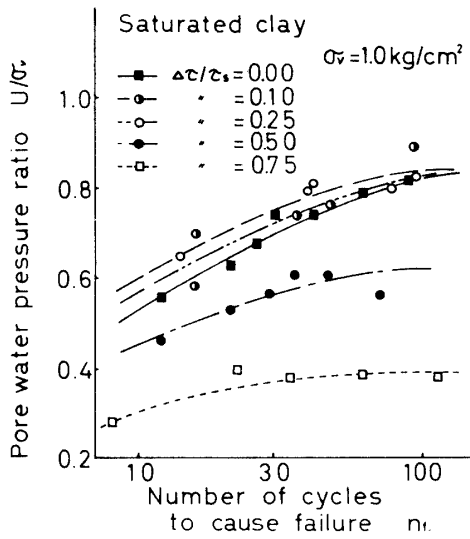


Fig. 8(a) Relationship between U/σ_v and n_f .

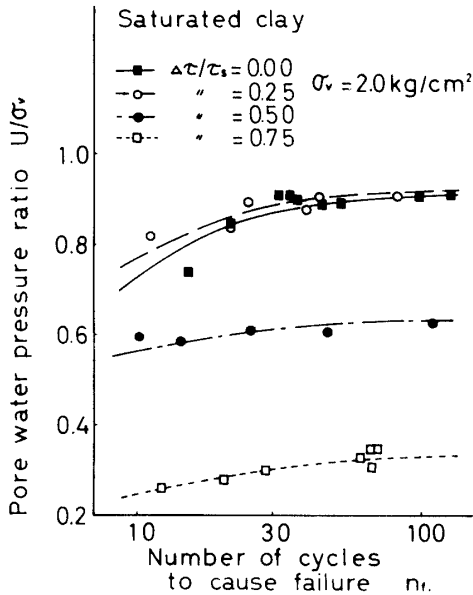


Fig. 8(b) Relationship between U/σ_v and n_f .

$\Delta\tau/\tau_s$ のそれぞれの値に対して、 n_f が大きいほど発生する間ゲキ水圧が大きくなっている。このことは、Fig. 6において、くり返し回数が増加すると動的強度が低下するという現象に、有効応力の概念から一つの解釈を与えるものである。

次に、くり返しせん断応力と、それによって発生する間ゲキ水圧の関係をみるために、1サイクル中に発生する間ゲキ水圧の増分 $\Delta U/\sigma_v$ と、くり返しせん断応力比 τ_d/σ_v を両対数グラフ上にプロットしたものが、Fig. 9(a), (b)である。それらの点はほぼ一直線上に並んでおり、そこで次の関係式が導かれる。

$$\Delta U/\sigma_v = C(\tau_d/\sigma_v)^\alpha \quad (3)$$

ここに、 C 、 α はダイレイタンスに関する定数で、

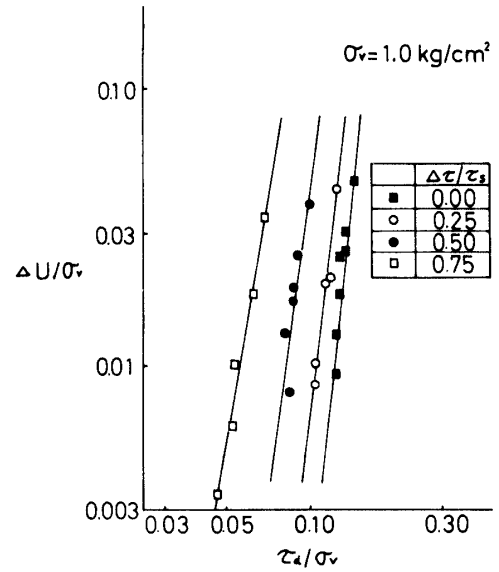


Fig. 9(a) Relationship between the increment of pore water pressure ratio per stress cycle and shear stress ratio.

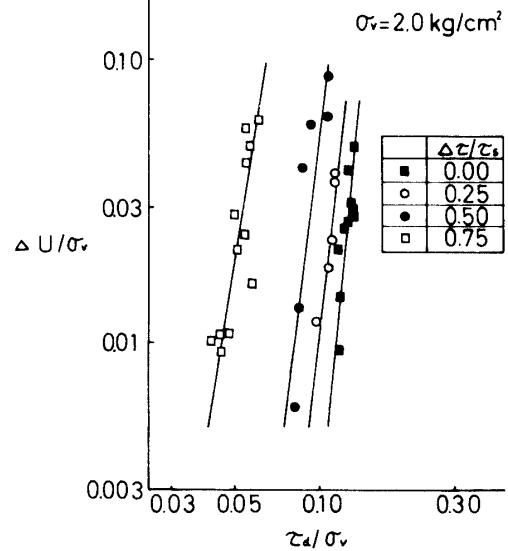


Fig. 9(b) Relationship between the increment of pore water pressure ratio per stress cycle and shear stress ratio.

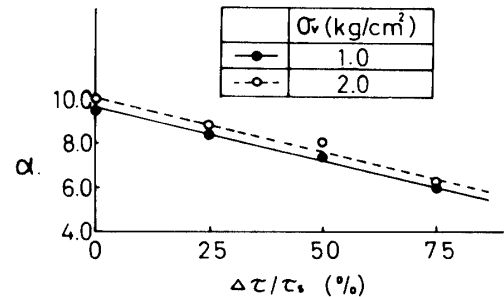


Fig.10 Coefficient α of Eq. (3).

Fig.10, Fig.11にその関係を示している。

吉見, 他⁶⁾は、砂のリングせん断で、 α の値は静的

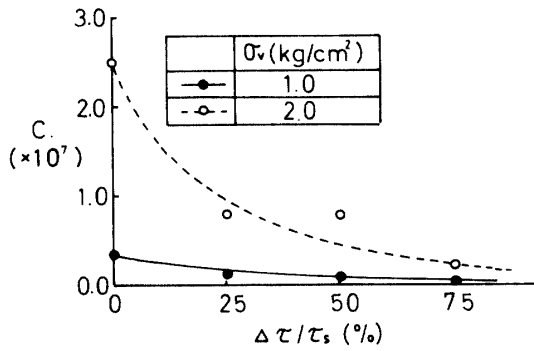


Fig. 11 Coefficient C of Eq. (3).

セン断応力比 $\Delta\tau/\tau_s$ によらず一定であると報告しており、この実験結果と異なっている。

また、 C 、 α はともに圧密圧力の大きい場合に大きくなっているが、これは、圧密圧力のちがいが、ダイレイタンスーに影響していると考えられる。しかし、その詳細について知るためには、さらに異なった圧密

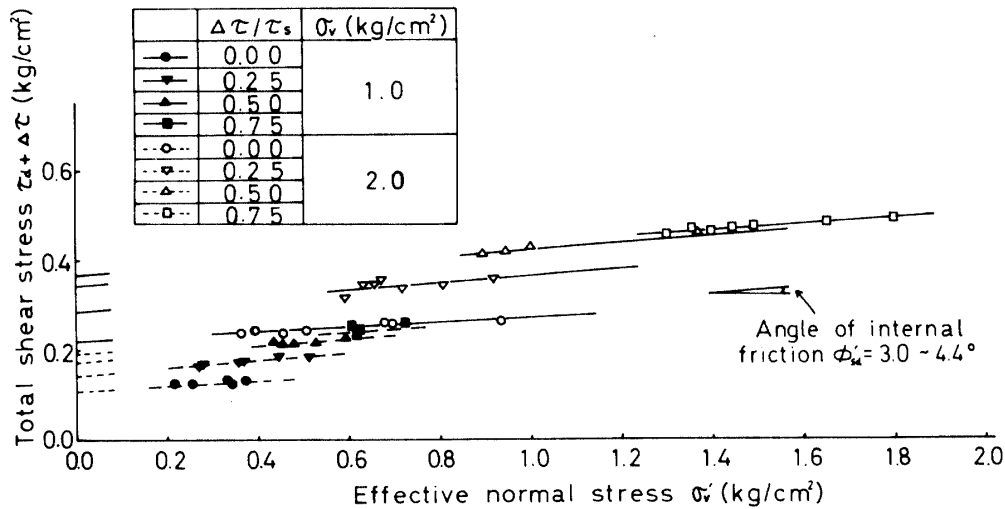


Fig. 12 Mohr diagram at failure.

す。

このとき、供試体の破壊規壊は次式であらわされる。

$$\tau_d + \Delta\tau = C'_{sd} + \sigma'_v \tan \phi'_{sd} \quad (4)$$

ϕ'_{sd} は、Fig. 12 より、 $3.0 \sim 4.4^\circ$ で、内部摩擦角は、圧密圧力や、静的セン断応力によってあまり影響されないことがわかる。

次に、式 (4) において

$$C'_{sd} = k_{sd} \sigma_v \quad (5)$$

とおく。

ここで、 k_{sd} は、いわゆる Hvorslev の規準における粘着力係数に相当するもので、Fig. 13 に k_{sd} と、 $\Delta\tau/\tau_s$ の関係が示されている。圧密圧力 σ_v によって

圧力のもとでの実験を重ねる必要があると思われる。

5.4 破壊時の内部摩擦角と見掛けの粘着力

先に $\Delta\tau/\tau_s$ の増加によって強度が増すことの原因として、ひずみ硬化をあげたが、この点を破壊規準の観点から次のように考えてみる。

Fig. 5 (a), (b), (c) からわかるように、くり返しセン断応力を加えると、くり返し回数が増すとともに間ゲキ水圧は上昇している。それにともない供試体の有効応力は減少するのであるが、供試体が破壊ひずみに至ったときにもつ有効応力 σ'_v と、加えられたセン断応力 ($\tau_d + \Delta\tau$) との関係を整理してみると、Fig. 12 のようになる。それらの点は、それぞれの応力条件によって一直線上に並んでおり、この直線は、供試体がくり返しセン断応力を受けたときの破壊線と考えることができる。したがって、その直線の傾斜角が内部摩擦角 ϕ'_{sd} を、縦軸との切片が見掛けの粘着力 C'_{sd} を示

k_{sd} はあまり変化しないが、 $\Delta\tau/\tau_s$ によっては大きく影響されることがわかる。

したがって、先に述べた動的強度は $\Delta\tau/\tau_s$ が増加すると大きくなるということは、 $\Delta\tau/\tau_s$ によって見掛け

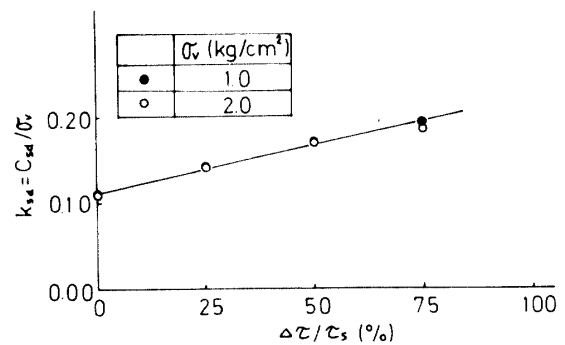


Fig. 13 Relationship between k_{sd} and $\Delta\tau/\tau_s$.

の粘着力が増すためであると考えられる。このことはひずみ硬化の具体的な意味づけでもある。

5.5 粘土の液化現象について

Fig. 5 (a)において、くり返し回数が n_L になると、セン断ひずみは急増しはじめ、間ゲキ水圧の勾配も急になる。この傾向は、 $\sigma_v=1.0\text{kg/cm}^2$ のときにもみられるが、これは、ゆる詰め飽和砂が液状化を生じる時の様子に似ている。

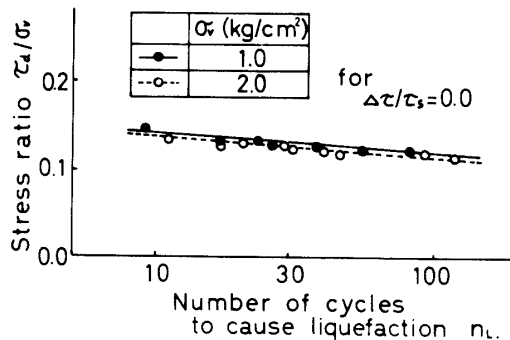


Fig.14 Stress ratio τ_d/σ_v required to cause liquefaction.

そこで、 n_L と、くり返しセン断応力比 τ_d/σ_v の関係を整理すると、Fig.14 のようになる。くり返し回数 n_L が増加すると、くり返しセン断応力比 τ_d/σ_v は、ほぼ直線的に減少しており、飽和砂の液化試験の結果と似ている⁷⁾。

また、Fig. 5 (a) においては、間ゲキ水圧は、最終的に拘束圧に等しくなる瞬間が見られる。このことは、粘土においても有効応力がゼロになるという意味で、液状化を生じる可能性があることを示唆している。

しかし、粘土においては、Fig.12 でも示したように、見掛けの粘着力が存在するために、たとえ有効応力がゼロになっても、粒子が分離してしてしまうようなことはなく、厳密には、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。

6. 結 語

以上述べてきたように、今回は、単純セン断試験機を用いて、純粋な粘土について、静的強度の基準づけ

を行なうとともに、動的強度の測定を行なって次のことが明らかになった。

(1) 単純セン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) 動的強度は、くり返し回数が増加すると、減少する。その原因としては、粘土のチキソトロピーなどの影響が考えられる。また、静的セン断応力の負荷によって強度は増加する。

(3) 圧密圧力が増加すると動的強度比は一般に減少する。

(4) 供試体に静的セン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ゲキ水圧がある状態でくり返しセン断応力を負荷すると、動的強度は、 $\Delta\tau/\tau_s=0.00$ のときの値よりもさらに減少する。

(5) 間ゲキ水圧はくり返し回数 n_f が増すにつれて大きくなるが静的セン断応力を負荷することにより一般に減少する。

(6) 破壊時の内部摩擦角は $3.0\sim 4.0^\circ$ で、静的セン断応力や圧密圧力によってあまり影響されない。しかし、見掛けの粘着力は、静的セン断応力を負荷することにより増加する。

(7) $\Delta\tau/\tau_s=0.00$ のとき、粘土においても、液状化に似た現象が生じる。

参 考 文 献

- 1) Laurits Bjerrum and Arvid Landva: Geotechnique, **16**, 17 (1966).
- 2) 大原資生, 鈴岡直彦: 昭和46年文部省科学研究費総合研究(B)「構造物の基礎の地震時安定に関する研究」(1972) p.36.
- 3) Masanobu Oda: Soils and Foundations, **15**, 38 (1975).
- 4) 北郷繁, 三田地利之, 三浦清一: 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集, **III**, 26 (1973).
- 5) 大原資生・藤井信夫: 山口大学工学部研究報告, **25**, 151 (1975).
- 6) Yoshiaki Yoshimi and Hiroshi Oh-oka: Soils and Foundations, **15**, 35 (1975).
- 7) 大原資生・宮内彰・藤井信夫: 山口大学工学部研究報告, **23**, 126 (1972).

(昭和51年10月15日受理)