

動的単純せん断試験機による粘性土の動的強度の測定

山口大学工学部 正員 大原 資生 学生員 松田 博

1. 緒言

地震時に粘性土がもつ強度を知ることは、軟弱地盤中に設けられた基礎工の耐震設計上からも必要である。しかし、粘性土の動的強度には、間ゲキ水圧や、チキソトロピーなどの因子がからみ、その挙動はかなり複雑である。

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、地震時の地盤の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、静的強度との比較を行なうとともに、試験中に発生する間ゲキ水圧の測定を行ない、その動的強度におよぼす影響について考えた。

また、単純せん断試験機で測定される静的強度は、三軸圧縮試験から得られた強度より小さいといわれておりその点についても考察を加えている。

2. 試料および供試体

実験に用いた土は、カオリン粘土でその粒径加積曲線および、物理的諸性質を、Fig.1, Table.1. に示した。Fig.1. をみると明らかなように、この土は粘土含有量が約98%あり、きわめて均質な粘土であるといえる。

これに脱気水を加えてよく練り、含水比が90%のスラリー状として脱気を行ない、これを後述するせん断箱のゴムスリーブに入れ、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 であった。供試体は、直径7.5cm、高さ2.0cmの円板状である。

3. 実験装置および実験方法

ここで用いた単純せん断試験機は、Fig.2. に示すような装置である。この装置は、われわれの実験室で以前から使われているものであるが、今回は、振動台とバアリングの間で生じる摩擦力の影響を少なくし、さらに高荷重にも耐えうるようにバアリングに改良を加えたものである。

この装置のせん断箱はKjellman型で、供試体はゴムスリーブで包まれた状態で、その外側には内径75.2mm、外径96.0mm、厚さ2.0mmのプラスチックリングを15~17枚つみ重ねることにより、平面ひずみ状態が満たされている。

圧密中の排水は、上下から行ない、せん断試験中は非排水として、供試体の下部で間ゲキ水圧の測定を行なった。

載荷方法は、静的試験の場合は、ひずみ制御方式をとり、Fig.2. で左方から、供試体に一定のひずみ速度1mm/minを与えた。

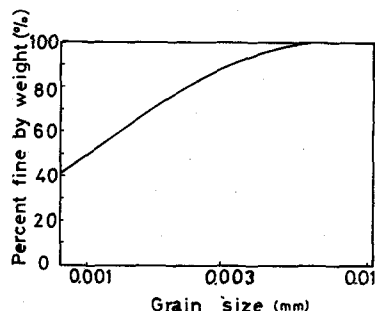


Fig. 1.

Table 1.

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%

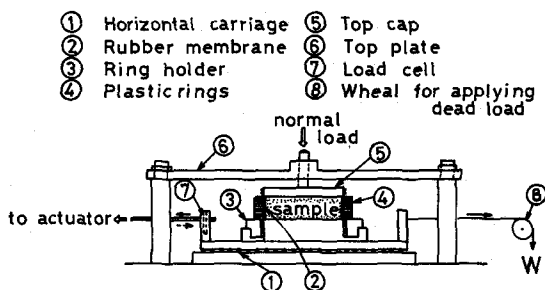


Fig. 2. Mechanism of simple shear test apparatus

動的試験を行なう場合は、複動式のエアー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り、供試体にくり返しせん断応力を与えた。そのとき、くり返しせん断力の波形は矩形波で、くり返し周期は2秒である。また、静的せん断応力 σ_v 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、 $\sigma_v/\sigma_s = 0.10, 0.25, 0.50, 0.75$ 、について実験を行なった。ここに、 σ_s は静的せん断強度である。

4. 実験結果および考察

i). 静的強度について

Fig.3. は、単純せん断試験機を用いて静的試験を行なったときの結果で、せん断応力とひずみの関係を示している。ひずみが増加するとせん断応力もしだいに増加し、ひずみが15%、になったとき、すべての鉛直圧の場合に、せん断応力は一定となっていることがわかる。したがって、ここでは供試体が破壊したことの判定として、せん断ひずみが15%、になったときとした。

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. の直線①となり、この直線の示す値が静的強度 σ_s となる。

ii) 単純せん断試験と三軸圧縮試験の対応

Fig.4. 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、明らかなちがいがみられるが、Bjerrum et al. 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。

しかし、落合、小田、は単純せん断試験中に垂直応力 σ_v が一定ならば、最小主応力は加えられたせん断応力 τ には無関係に一定値をとることを示しており、この結果を使うと、供試体中の最大主応力 σ_1 、最小主応力 σ_3 は、次式で与えられる。

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

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

ここに、 σ_v : 垂直応力、 τ : 与えられたせん断応力、 K_s : 静止土圧係数

(1) (2)式を使って、単純せん断試験で、破壊時の主応力を有効応力表示して、モール円をかくと、Fig.4. 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④との対応をみると、単純せん断試験より得た強度が大きくなっている。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が生じるもので、北郷、他は、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。

iii) 動的強度について

正規圧密されたカオリン粘土について、死荷重Wを加えることにより、静的せん断応力と静的強度の比 σ_v/σ_s をそれぞれ 0.0 0.10 0.25 0.50 0.75 に変化させて動的試験を行ない、そのとき発生する間接

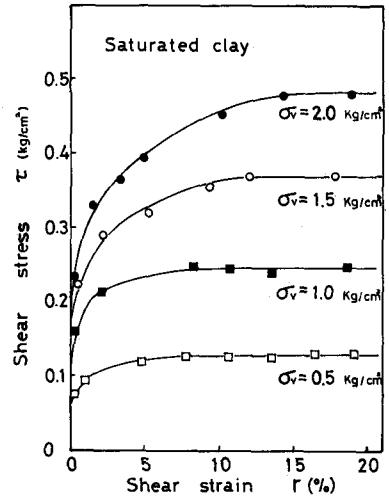


Fig. 3

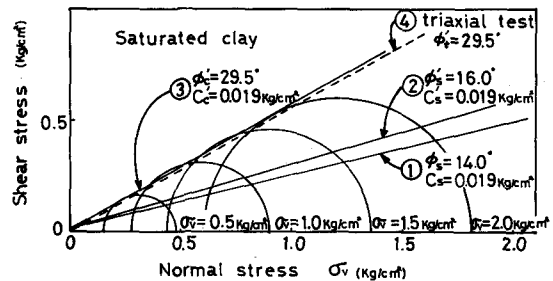


Fig. 4.

水圧の測定も行なつた。

Fig. 5. (a) (b) (c) は $\Delta\sigma/\tau_s = 0.00 \ 0.25 \ 0.75$

の場合のセン断ひずみ、くり返しセン断応力、間ゲキ水圧についての記録例を示している。それぞれ、 $\sigma_v = 1.0 \text{ Kg/cm}^2$ (一定) として行なわれたものである。静的セン断応力の負荷によつて、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、次のことがいえる。

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、破壊に至つてゐる。しかし、(c)では、供試体は一方方向にひきずられるような形でセン断ひずみが徐々に増加し、破壊に至つてゐるのかわかる。

また、間ゲキ水圧の場合も、(a) (b) については、どちらも発生の様子に似ており、セン断ひずみが急増しはじめあたりから、勾配が急になつてゐる。それに対し、(c)は、あるサイクル数まで勾配は急であるが、その後はゆるやかである。

次に、これらの記録をもとにして動的強度 $\Delta\tau$ と τ_s と、静的強度 τ_s の比が、くり返し回数 n によつてどう変わるかを示したものが、Fig. 6、である。

動的強度は、くり返し回数が増加すると小さくなつてゐることから、粘性土は、くり返し載荷によつ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、 $\Delta\sigma/\tau_s$ の値が大きくなると、 $(\Delta\tau + \tau_s)/\tau_s$ の値も大きくなつてゐる。以前にも同様の結果が得られてゐるが、その原因として、静的セン断応力負荷によるひずみ硬化などが考えられてゐる。

Fig. 7. は同様の実

験結果を $(\Delta\tau + \tau_s)/\tau_s$ と $\Delta\sigma/\tau_s$ との関係で整理したものである。図中、実線が実験結果を示してあり、点線と実線の縦距が、 τ_s/τ_s を示す。この回より明らかに、粘性土の動的強度は、静的セン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あはさつたものと考えられる。

破壊時に発生している間ゲキ水圧 U と、くり返し回数 n の関係を求めたものが、Fig. 8、で、 $\Delta\sigma/\tau_s$ のそれぞれ

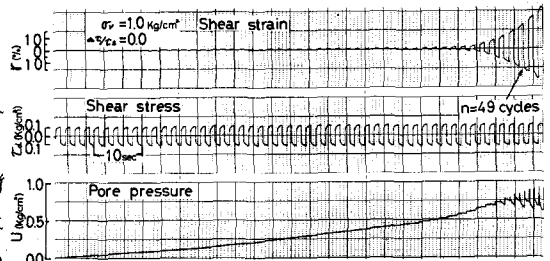


Fig. 5 (a)

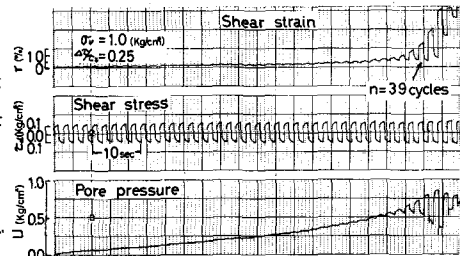


Fig. 5 (b)

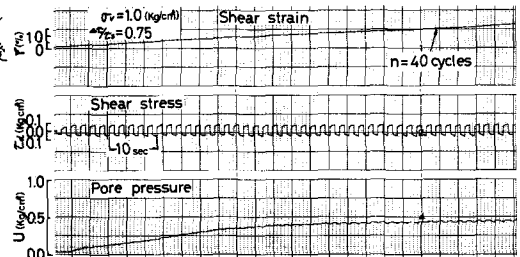


Fig. 5 (c)

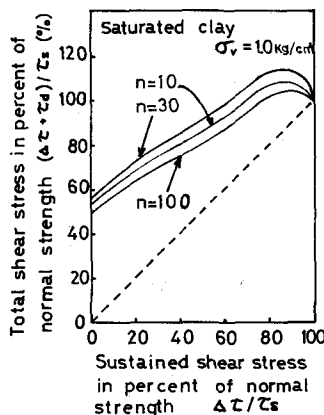


Fig. 7

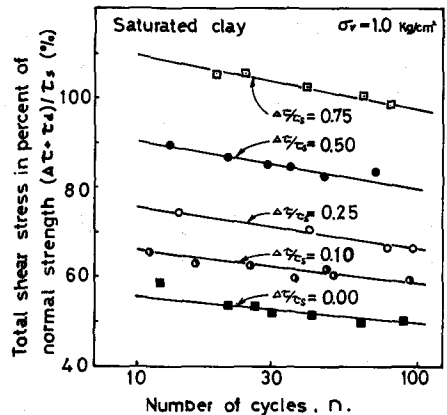


Fig. 6

の値に対して、 τ が大きいほど、発生する間ゲキ水圧が大きくなることを示している。このことは、Fig.6において、くり返し回数が大きくなると、動的強度が小さくなるという現象に一つの解釈を与えるものである。

Fig.9. はくり返し回数 $n=10, 30, 100$ のときに、間ゲキ水圧の発生量が $\Delta\tau/\tau_s$ によってどう変わるかを示したものである。一般に、 $\Delta\tau/\tau_s$ の値が小さいときに U/σ_v は大きくなっているが、これはFig.7 との対応から、発生する間ゲキ水圧は、くり返しせん断応力の大きさによって考えると理解できる。しかし、 U/σ_v は $\Delta\tau/\tau_s \approx 0.25$ で最大値をとることについては明らかではない。一方荷重と、両方向荷重による影響かとも考えられる。

いま、1 サイクル中に発生する間ゲキ水圧 ΔU と、くり返しせん断応力 τ の関係が次式であらわされるとする。

$$\frac{\Delta U}{\sigma_v} = C \left(\frac{\tau}{\sigma_v} \right)^n \quad (3)$$

(3) 式の関係を示したものが、Fig.10 である。吉見は、砂でのリングせん断での n の値は一定であるという報告をしており注目される。

5. 結論

今回は、単純せん断試験機を用いて、粘土についての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となった。

くり返し回数が増加すると、動的強度は減少するが、静的せん断応力の負荷によって増加する。

そして、その原因は、粘土のチキソロピーや、ひずみ硬化等によるものと思

われるが、間ゲキ水圧の関係からも説明できることがわかった。しかし、間ゲキ水圧は、一方荷重と、両方向荷重によって、その発生の様子もちがうものと思われ、今後も実験を続けて、その点について説明していく予定である。

参考文献

- 1) 大原賢生, 他, "粘性土の動的性質について" 第29回土木学会年次学術講演会講演概要集.
- 2) Bjerrum et al. "Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay" *Geotechnique*, Vol.16, No.1.
- 3) Masanobu Oda "On the relation $\sigma_v = K \cdot \tan \phi$ in the simple shear test" *Soils and Foundations* Vol.15, No.4.
- 4) Yoshiaki Yoshimi et al. "Influence of degree of shear stress reversal on the liquefaction potential of saturated sand" *Soils and Foundations*, Vol.15, No.3.

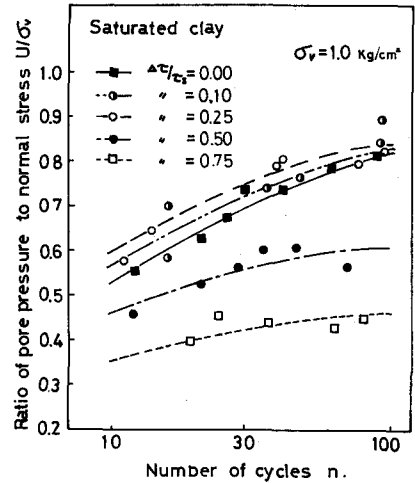


Fig. 8

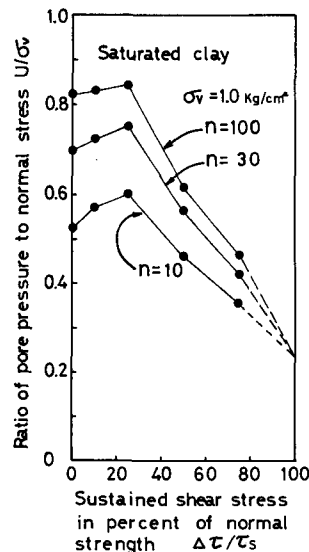


Fig. 9

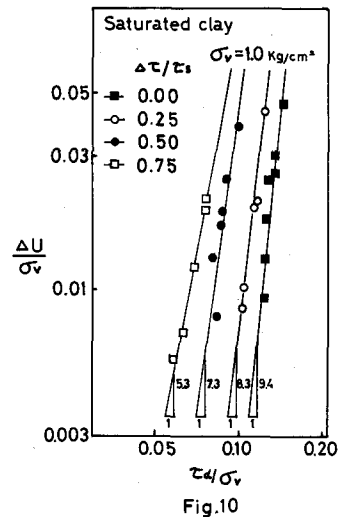


Fig.10