

飽和粘性土の動的強度に及ぼす静的付加せん断応力の影響について

大原 資生*・山本 哲朗**・小串 利勝***

Effects of Sustained Shear Stress on the Dynamic Strength of Saturated Clay

Sukeo O-HARA, Tetsuro YAMAMOTO and Toshikatsu OGUSHI

Abstract

It seems that the soil-elements in the slope and near the structures are usually subjected the initial shear stress.

Therefore, it is important for earthquake engineering to study the dynamic characteristics and strength of saturated clay sustained shear stress.

So, in order to investigate the effects of sustained shear stress $\Delta\tau$ on the dynamic strength of saturated clay, this experiment was carried out using a dynamic simple shear test apparatus and the dynamic strength was compared with the static strength under various stress conditions.

It is concluded that the dynamic strength decreases in proportion to the number of cycles of cyclic shear stress n_f and increases in proportion to $\Delta\tau$.

1. 緒 言

斜面内や構造物直下あるいはその付近の土要素は、常に初期せん断応力を受けているために、その応力の大小により地震時の動的挙動が異なることが予想される。したがって、これらの土要素の動的特性および動的強度を知ることは、耐震工学上必要である。

そこで、長期にわたり安定化した斜面内の土要素を想定して、飽和粘土の動的強度に及ぼす静的付加せん断応力の影響について調べた。

まず、静的強度を求めるために静的単純せん断試験を行ない、次に圧密後の供試体に静的付加せん断応力を負荷して動的単純せん断試験を行ない動的強度を求め、静的強度と比較するとともに、過剰間隙水圧の挙動、応力条件および見掛けの粘着力等に注目して整理し検討を行なった。

以下、その詳細について述べる。

2. 実験装置および方法

本実験には、ひずみ制御型および応力制御型の単純せん断試験機が用いられた。

この装置は、Kjellman 型のせん断箱により構成されており、以前からわれわれの実験室で使用されており、前論文¹⁾でも度々紹介しているので、ここでは概略のみを述べる。

せん断箱は、Fig. 1 に示した。直径 7.5 cm、厚さ約 2.0 cm の供試体は、ゴムスリーブに包まれ、上、下のペDESTAL の間に置かれ、鉛直圧荷の際の横方向

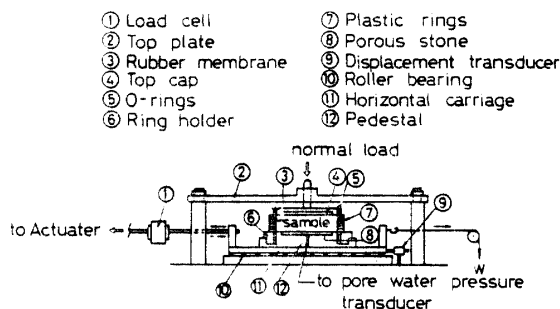


Fig. 1 Mechanism of simple shear test apparatus.

* 土木工学科

** 工業短期大学部土木工学科

*** (株) 建設技術研究所

の膨れ出しを防ぐために厚さ 2mm のプラスチックリングを積み重ねた中に収められている。

このせん断箱は、水平移動台の上に設置されているため、この水平移動台が動くことにより、供試体にせん断ひずみあるいは繰り返しせん断応力が負荷される。

また、鉛直圧や静的付加せん断応力は、ワイヤーロープと連結したヨーク皿に荷重板を載荷することにより、それぞれ供試体に負荷される仕組みになっている。

次に、Fig. 2 は、静的単純せん断試験に用いた変位伝達装置である。この装置は、ハンドルを一定回転数で回すと、ロッドが一定速度で押し出され、その変位量が支点を中心としたレバーの回転変位量に変換され、ロッドを通して供試体に 5%/min の定ひずみが負荷される。また、Fig. 3 (a) は、動的単純せん断試験に

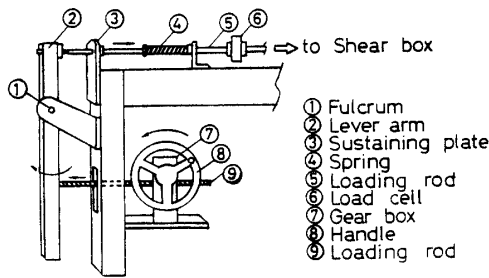


Fig. 2 Mechanism of displacement transmitting system.

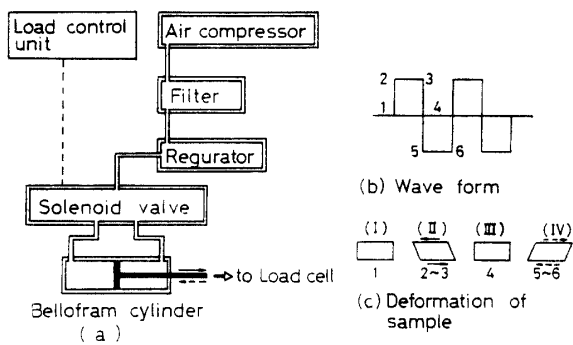


Fig. 3 Mechanism of cyclic load generator and wave form.

用いた矩形波繰り返し応力負荷装置の概略図である。

この装置は、エアーコンプレッサーより送られてくる圧縮空気をフィルターを通してレギュレーターで調圧した後、コントロールユニットによりソレノイドバルブを周期的に開閉させ、復動式ベロフラムシリンダーの左右の圧力室に交替的に出入りさせることにより、供試体に周期 2 秒の繰り返しせん断応力を負荷する仕組みになっている。Fig. 3 (b) は、この装置に

よって生じる応力波形を、Fig. 3 (c) は、その時の供試体の変形の様子を示したものである。

なお、せん断中のせん断ひずみ、せん断応力および過剰間隙水圧は、それぞれ水平変位計、ロードセルおよび間隙水圧計で測定し、動ひずみ測定装置で増幅した後、ペン書きレコーダーに記録した。

3. 試料および供試体作製方法

本実験で使用した試料は、カオリン粘土であり、その粒径加積曲線を Fig. 4 に、物理定数を Table 1 に示した。

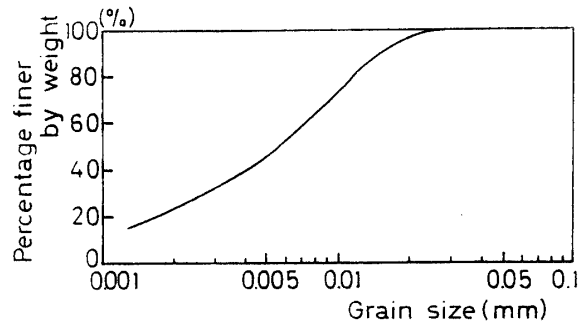


Fig. 4 Grain size distribution curve.

Table 1 Physical properties.

Specific gravity	G_s	2.684
Liquid limit	W_L (%)	38.3
Plastic limit	W_p (%)	25.9
Plasticity index	I_p	12.4
Average grain diameter	D_{50}	5.8 μ

供試体の作製方法は次の通りである。

気乾状態のカオリン粘土粉末に含水比が 58% になるように脱気水を加え、よく練り合せた後、水分の蒸発を防ぎながら一日放置する。そして、再び攪乱した後、容器に衝撃を与え脱気を行ない飽和状態にして、前述のせん断箱に一層毎突き固めながら三層に分けて詰め、両面排水状態で約 23 時間 K_0 圧密を行なう。

圧密後の供試体を完全飽和状態とするために、鉛直圧と等しいだけのバックプレッシャーを数秒間負荷し、定常になったのを確認したのち 0 に戻した。

圧密後の供試体の間隙比は、Table 2 に示した。

なお、動的試験では、この供試体に、非排水状態で静的付加せん断応力を 15 分間負荷し、この時発生し

た過剰間隙水圧を 10 分間の排水状態で消散させ、再び非排水状態にしてから、繰り返しせん断応力を負荷した。

Normal stress σ_v (kgf/cm ²)	0.5	1.0	1.5
Void ratio e	0.984	0.915	0.881

4. 実験結果および考察

4.1 静的試験結果

この試験より得られた応力 (τ_s)~ひずみ (γ_s) 曲線を Fig. 5 に示した。いずれの曲線も、せん断ひずみ

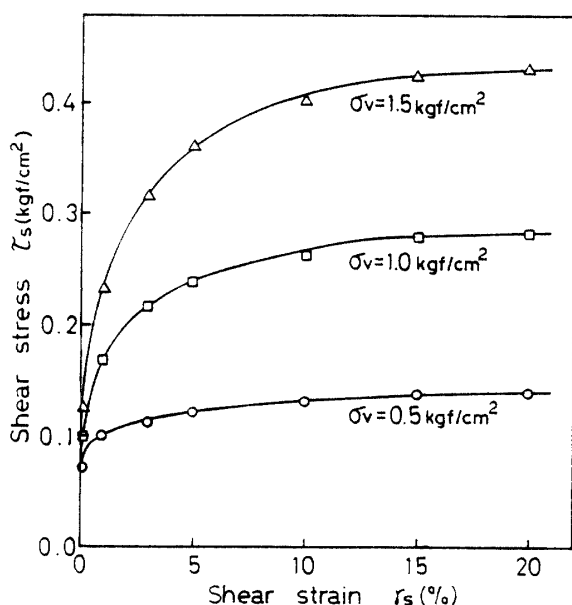


Fig. 5 Stress-strain curve for simple shear tests.

の増加に伴いせん断応力は増加しているが、せん断ひずみが 15% 付近でその増加の割合は小さくなり、その後はほぼ一定であることから、破壊は、 γ_s が 15% に達した時とし、その時のせん断応力を静的強度 (τ_s) と定義した。

Fig. 6 は、この結果をもとにクーロン破壊線を全応力および有効応力表示したものである。

また、この静的単純せん断試験結果を、式 (1) を用いモール円表示したのが Fig. 8 であり、Fig. 7 はその方法²⁾を示す。

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

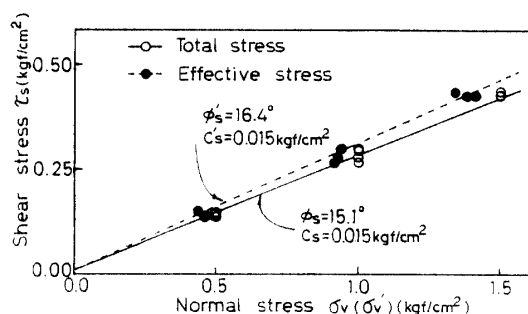


Fig. 6 Mohr-Coulomb diagram at failure for simple shear tests.

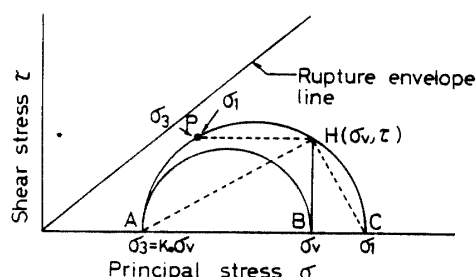


Fig. 7 Mohr diagram for simple shear test.

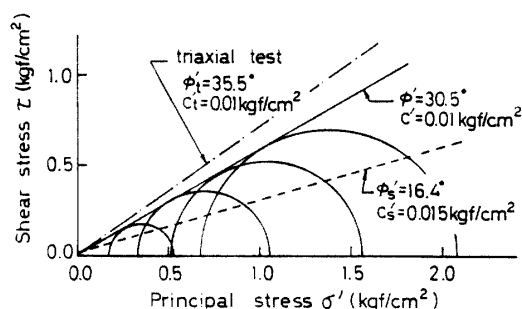


Fig. 8 Mohr-Coulomb diagram for simple shear test and triaxial test.

$$K_0 = 0.95 - \sin \phi_1' \quad (\text{Brooker の式})$$

なお、式中において

σ_1' : 最大主応力, σ_3' : 最小主応力, σ_v : 鉛直圧, u : 過剰間隙水圧, K_0 : 静止土圧係数, ϕ_1' : 三軸圧縮試験の有効応力表示による内部摩擦角である。

両試験を比較すると、破壊線は粘着力に関して一致しているが、内部摩擦角には 5° ほど違いがみられる。

これは、三軸圧縮試験が軸対称であるのに対し、単純せん断試験が平面ひずみ状態であるという応力状態の違いによるものであろう。

4.2 動的試験結果

4.2.1 記録波形について

Fig. 9 は、動的単純せん断試験より得られた記録例

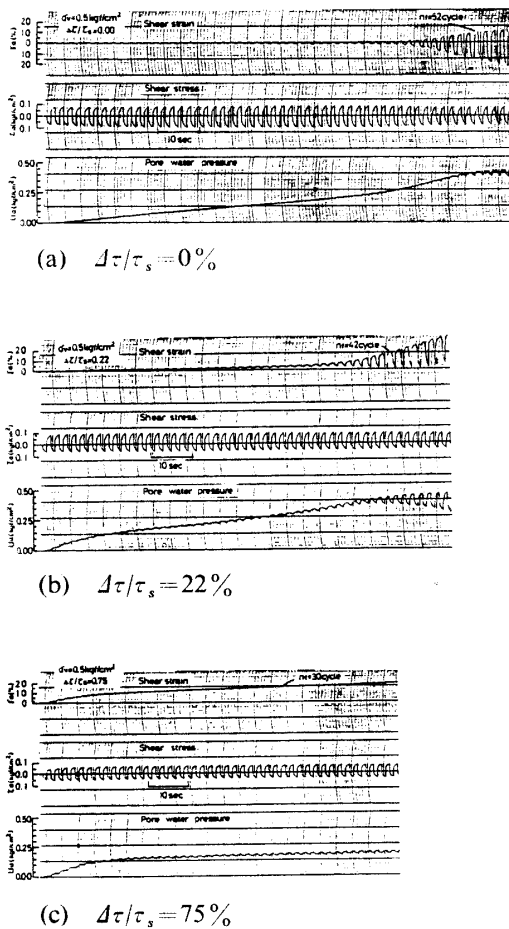


Fig. 9 Typical record of dynamic simple shear test.

を示し、(a), (b), (c) はそれぞれ静的付加せん断応力比 ($\Delta\tau/\tau_s$) が 0%, 22%, 75% のものであり、記録線は上からせん断ひずみ (γ_d)、せん断応力 (τ_d)、過剰間隙水圧 (U_d) を示す。

これらの図から、一般的な傾向として次のことがいえる。

- (1) (a) のように $\Delta\tau/\tau_s = 0\%$ すなわち完全両振り試験では、 γ_d は繰り返し回数の増加に伴いほぼ対称的に増加し破壊ひずみに達するが、(b), (c) のように両振り、片振り試験では、静的付加せん断応力の負荷方向にひきつられるように γ_d が蓄積し破壊ひずみに達する。
- (2) 繰り返し回数の増加に伴い過剰間隙水圧は大きくなっている。また、 $\Delta\tau/\tau_s$ が大きいほどその立ち上りは大きく、逆に最終的な発生量は小さくなっている。

なお、図中の n_f は破壊点および破壊までの繰り返し回数を意味し、破壊は、せん断ひずみが片振幅で 15% あるいは蓄積ひずみが 15% に達した時と定義した。

4.2.2 動的強度と繰り返し回数および静的付加せん断応力比の関係について

Fig. 10 は動的強度 ($\tau_d + \Delta\tau$) と静的強度 (τ_s) との比 $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ と n_f の関係を示したものである。

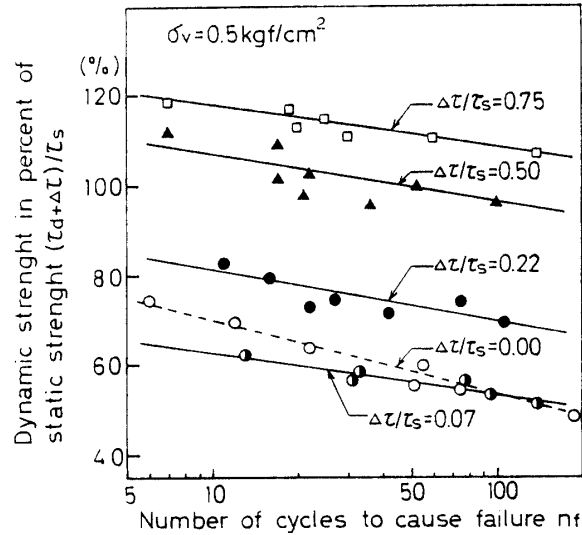


Fig. 10 Relationship between $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ and n_f .

動的強度は、繰り返し回数の増加に伴い小さくなっているが、 $\Delta\tau/\tau_s$ が大きくなるにつれて大きくなっている。これは、静的付加せん断応力負荷によりひずみ硬化が生じたために強度が増加したと思われる。

次に、Fig. 11 は、Fig. 10 の関係を n_f をパラメーターにして $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ と $\Delta\tau/\tau_s$ の関係に整理したものであり、図中の一点鎖線より上の縦距離は τ_d/τ_s を、下の縦距離は $\Delta\tau/\tau_s$ を示している。

いずれの n_f に関しても、 $\Delta\tau/\tau_s$ が増加すると動的

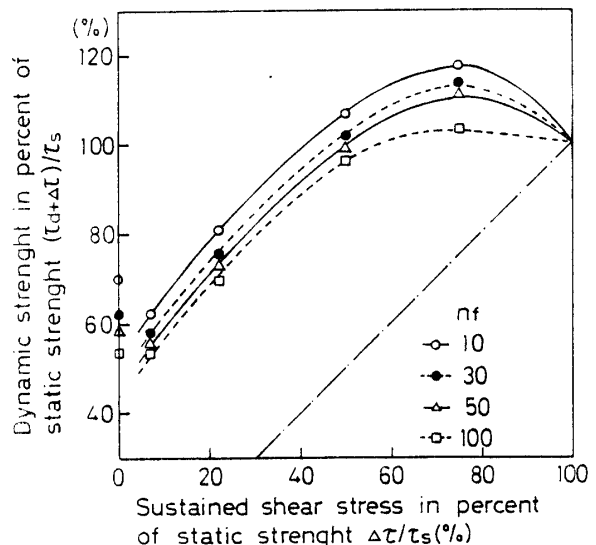


Fig. 11 Relationship between $(\tau_d + \Delta\tau)/\tau_s$ and $\Delta\tau/\tau_s$.

強度は大きくなっており、 $\Delta\tau/\tau_s$ が約 50% 以上では、 $(\Delta\tau + \tau_d)/\tau_s$ は 100% を越えている。これは、動的強度が静的強度を上回っていることを意味する。

さらに、繰り返しせん断応力 (τ_d) のみに注目して応力比 (τ_d/σ_v) と n_f の関係を示したのが、Fig. 13 である。

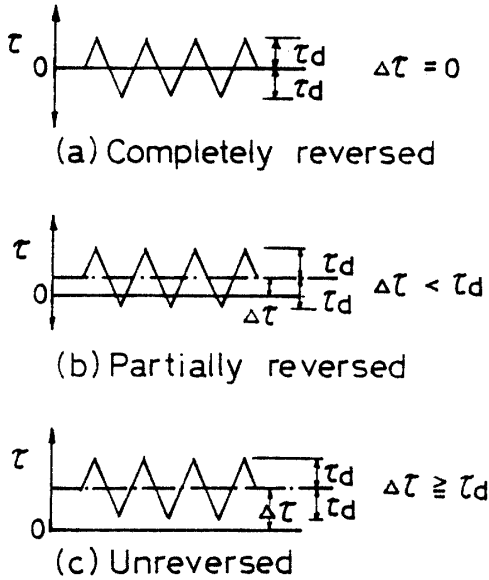


Fig. 12 Stress conditions of dynamic shear test.

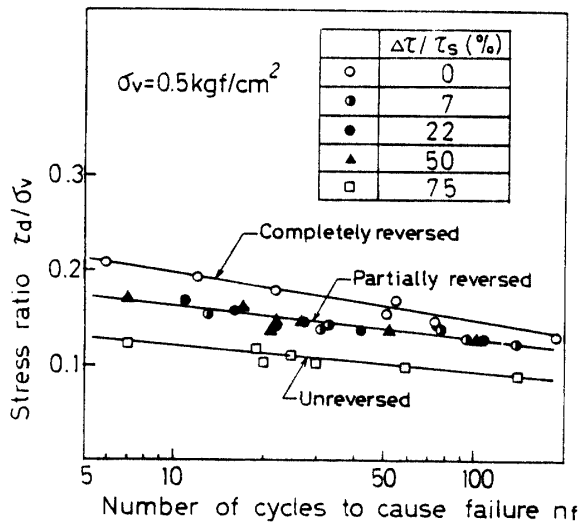


Fig. 13 Relationship between τ_d/σ_v and n_f .

この図より、いずれの場合も n_f が増加すると τ_d/σ_v は小さくなり、Fig. 12 に示した応力条件により τ_d/σ_v と n_f の関係に明らかな相違があることがわかる。すなわち、完全両振り、両振り、片振り状態となるにつれ τ_d/σ_v は減少している。

以上のことを考え合わせると、動的強度は繰り返し

効果による強度低下と静的付加せん断応力負荷による強度増加とが合わさったものであると考えることができる。

4.2.3 過剰間隙水圧について

Fig. 14 は、間隙水圧比 (U_d/σ_v) と繰り返し回数比 (n/n_f) の関係について示したもので、これは、破壊に到るまでの過剰間隙水圧の挙動を意味する。

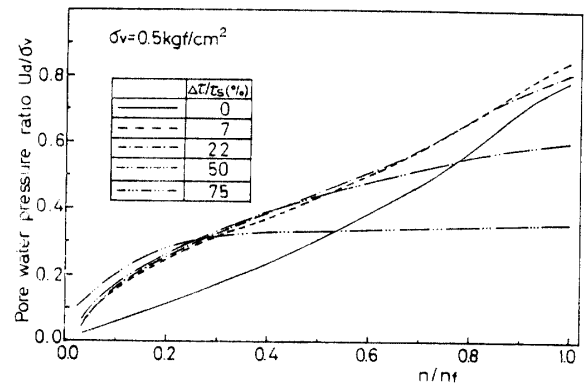


Fig. 14 Relationship between U_d/σ_v and n/n_f .

$\Delta\tau/\tau_s$ が大きくなるにつれ、過剰間隙水圧の立ち上りは大きくなっているが、逆に繰り返し回数の増加に伴う増加の割合は小さくなっている。

Fig. 15 は、破壊時の過剰間隙水圧 (U_{df}) に注目し

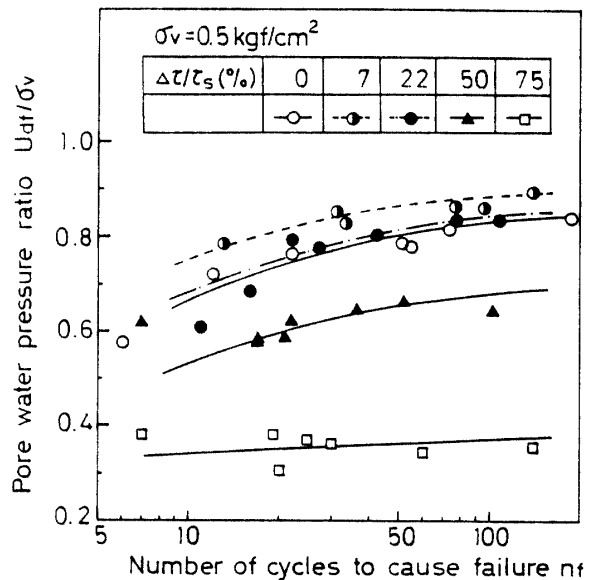


Fig. 15 Relationship between U_{df}/σ_v and n_f .

たものであり、これより、 n_f が増すと発生する過剰間隙水圧が大きくなっていることがわかる。

また、Fig. 16 は、Fig. 15 の関係を n_f をパラメー

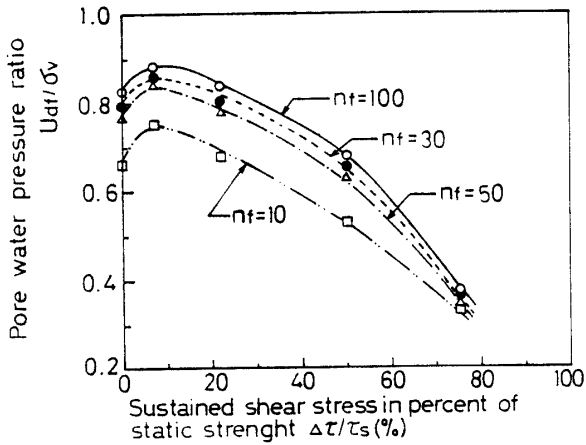


Fig. 16 Relationship between U_{df}/σ_v and $\Delta\tau/\tau_s$.

ターにして U_{df}/σ_v と $\Delta\tau/\tau_s$ の関係に整理したものである。 U_{df}/σ_v は $\Delta\tau/\tau_s$ が 7% 付近でピークに達し、その後は $\Delta\tau/\tau_s$ の増加に伴い減少しており、これは、Fig. 11 の傾向と全く逆の傾向を示している。これらの関係は、動的強度の増減を有効応力の概念から一つの解釈を与えるものである。

4.2.4 破壊時の内部摩擦角と見掛けの粘着力について

供試体が破壊した時の有効鉛直圧 (σ'_v) とせん断応力 ($\tau_{df} + \Delta\tau$) との関係を整理したのが、Fig. 17 である。

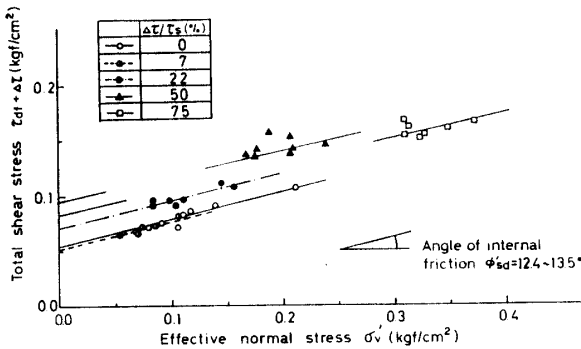


Fig. 17 Mohr diagram at failure for dynamic simple shear tests.

それらの点は、 $\Delta\tau/\tau_s$ ごとに一本の直線で表わされており、Hvorslev 規準に基づく破壊線とみなすことができる。そこで、この破壊線を式 (2) で表わした。

$$\tau_{df} + \Delta\tau = c'_{sd} + \sigma'_v \tan \phi'_{sd} \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 c'_{sd} : 見掛けの粘着力、 ϕ'_{sd} : 内部摩擦角、 τ_{df} : 破壊時の繰り返しせん断応力である。

図より、 ϕ'_{sd} は $\Delta\tau/\tau_s$ の値にかかわらず $12.4^\circ \sim 13.5^\circ$ とほぼ一定であるが、 c'_{sd} は $\Delta\tau/\tau_s$ の増加に

より増大していることがうかがえる。この見掛けの粘着力を式 (3) で表わし

$$K_{sd} = c'_{sd} / \sigma_v \quad \dots\dots (3)$$

K_{sd} と $\Delta\tau/\tau_s$ の関係を示したのが Fig. 18(a) である。

図より、 K_{sd} は $\Delta\tau/\tau_s$ が増加するにつれ増大し、 $\Delta\tau/\tau_s$ が 50% を越えると減少しており、見掛けの粘着力は静的付加せん断応力の負荷により影響を受けていることがわかる。

そこで、Fig. 18(b) に $(c'_{sd} + \Delta\tau)/\tau_s$ と $\Delta\tau/\tau_s$ の関係を示した。

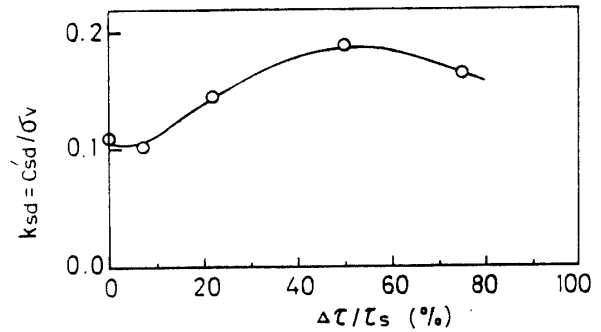


Fig. 18(a) Relationship between k_{sd} and $\Delta\tau/\tau_s$.

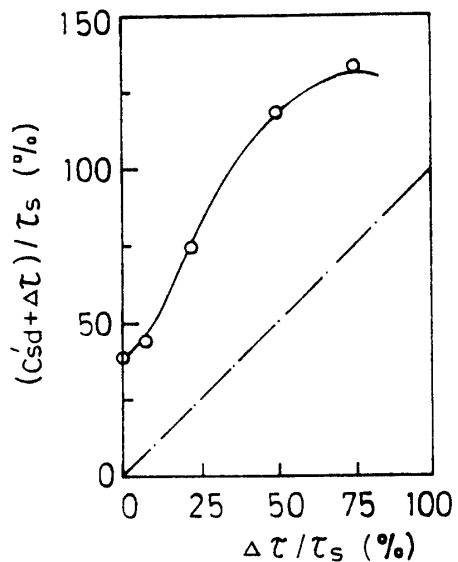


Fig. 18(b) Relationship between $(c'_{sd} + \Delta\tau)/\tau_s$ and $\Delta\tau/\tau_s$.

この関係から得られた傾向は、Fig. 11 の傾向とよく一致していることから、 $\Delta\tau/\tau_s$ が増加すると動的強度が増大するのは、 $\Delta\tau/\tau_s$ の増加に伴い見掛けの粘着力が増大するためであると考えられる。

5. 結 語

斜面内の土要素の動的強度を求め、それに及ぼす諸因子の影響を調べる目的で、圧密後の供試体に静的付加せん断応力を負荷して動的単純せん断試験を行なった結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 動的試験において、破壊をひずみ量で定義すると、応力条件により破壊に到るまでのせん断ひずみに明らかな相違が生じる。すなわち、完全両振り試験では、蓄積ひずみは生じず、せん断ひずみ振幅量が破壊ひずみに達するが、片振り試験では、蓄積ひずみが卓越し破壊ひずみに達する。
- (2) 動的強度は、繰返し回数が増すと減少し、また静的付加せん断応力負荷の増加により増大する。
- (3) 繰返しせん断応力は、完全両振り、両振り、片振り試験となるにつれて小さくなる。また、繰返し回数の増加に伴い減少する。
- (4) 動的強度は、繰返し効果による強度低下と静

的付加せん断応力負荷による強度増加とが合わさったものであると考えられる。

- (5) 破壊時の過剰間隙水圧は、繰返し回数が増すにつれて大きくなるが、静的付加せん断応力負荷の増加により減少する。
- (6) 破壊時の内部摩擦角は、静的付加せん断応力負荷により影響されずほぼ一定であるが、見掛けの粘着力は、その増加により増大する。
- (7) 静的付加せん断応力負荷の増加に伴う動的強度の増大は、過剰間隙水圧の減少と見掛けの粘着力の増大に起因する。

参 考 文 献

- 1) 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、No. 274, 69-78, (1978)
- 2) 落合英俊：単純せん断試験による正規圧密粘土の非排水強度について、第15回土質工学研究発表会講演集、437-440, (1980)

(昭和57年3月27日 受理)