

不攪乱状態のシラスの動的性質

山口大学工学部 正員[○] 大原資生 藤井信夫 安永文夫

1 緒言 攪乱状態で採取したシラスを締め固めて作った供試体について剛性率の測定と液化に対する実験的研究を行なったのに続きついで 今回は不攪乱状態で採取された供試体について同様の実験を行なったので その結果を報告する。

2 試料 不攪乱試料も攪乱シラスと同じ郡城市付近で採取されにもので 直径約10 cm 長さ20 cm のブリーチ板製円筒に地山から切り出されたシラス塊を詰め 上下をパラフィンで密封したものである。自然含水比の平均は21.36% 乾燥単位重量は1.12 g/cm³ 自然間げき比は1.14であった。粒度曲線はFig 1に示す。

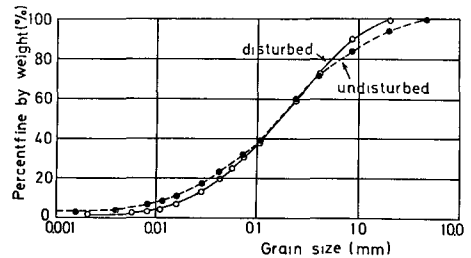


Fig 1 Grain size distribution curves

3 実験装置および実験方法 今回の実験には動的せん断試験機のみを用いた。この試験機はわれわれの実験室での試作品であって Fig 2に示す機構をもっている。

せん断箱は Kjellman型であり 供試体は直径が75 mm 厚さが20 mm の円板状であり ゴムスリーブの中に収められている。その外側には厚さ2 mm 内径が75.2 mm 外径が96 mm のアクリルリングが12～14枚つみ重ねられた状態ではめられている。

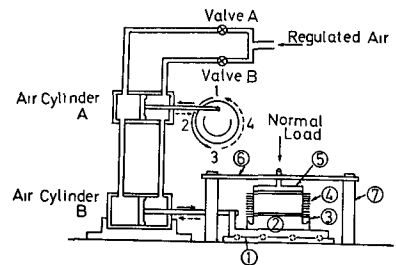


Fig 2 Mechanism of dynamic simple shear test apparatus

上部加圧板は水平方向に固定され 下部加圧板は試料台に固定されていて これに水平力が加わるので供試体はせん断力をうける。水平力は複動式のエアーシリンダーの左右の圧力室の圧力を交替的に高めることによって生じる。Fig 2に示すように この装置では2つのエアーシリンダーを用いることによって水平力を正弦波状に変化している。水平力の大きさはエアーシリンダーに最初に封入される空気圧および偏心軸の偏心度を変化することによって変化する。水平力の大きさは試料台とピストンロッドの接合部に貼りつけてある板バネに生じるひずみで測定し せん断ひずみは試料台の変位を差動変圧器型の変位計で測定して求めた。液化についての実験での間げき水圧の測定は下部加圧板のポーラスメタルを通してきた水圧を受圧面直径6 mm の圧力計で測定した。実験方法は次のとおりである。

a 剛性率の測定 まず 内径75 mm 厚さ20 mm のリングカッターを用いて供試体を不攪乱シラス塊から削り出す。それをせん断箱に収め ゴムスリーブ プラスチックリングをはめ上部加圧板をのせる。次に所定の鉛直圧を加え 所要のせん断力を負荷する。その際に生じるせん断ひずみとせん断応力との関係をX-Yレコーダーに記録した。このような実験を鉛直圧 せん断応力を変化して行なった。

b 液化についての実験 供試体を切り出し それをせん断箱にセットするまどはaと同じである。

そして飽和時に供試体の膨脹を生じないように 0.1 kg/cm^2 の鉛直圧を加えた後に下部加圧板から脱気水を送る。そのとき 上部加圧板の排水孔は用いておき 供試体の気泡をぬく。

排水孔から気泡が出なくなつて供試体が完全に飽和されたら排水孔を用いる。このあとあらためて所定の鉛直圧を加え 下部加圧板の排水孔を用いて圧密する。圧密が完了したならば所要のせん断力を供試体の液化が生じるまで加える。その際のくり返しせん断力 せん断ひずみ 向けき水圧などの変化はペン書きオシロに記録した。せん断力の周期は2秒で 鉛直圧 σ_v は $0.5 \quad 0.7 \quad 1.0 \text{ kg/cm}^2$ の3段階に変化して実験を行なった。

4 実験結果とその考察

α 動的剛性率および履歴減衰係数について Fig. 3は鉛直圧 $\sigma_v = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ くり返しせん断力 $\tau_d = 0.298 \text{ kg/cm}^2$ で実験を行なったときの履歴曲線を示したものである。Fig. 4は締め固めたシラスの履歴曲線であり これとFig. 3とを比較してわかるように締め固めたシラスではほぼ完全な長円形の履歴曲線が得られているのに対し 不攪乱シラスでは完全なバイリニヤー形に近い履歴曲線が得られている。また 締め固めたシラスでは等価剛性率 G_{eq} はせん断力のくり返し回数が増加するにしたがって その値が大きくなっているが 不攪乱シラスではくり返し回数が増加しても G_{eq} の値はほとんど変化せず ほぼ一定となっている。 G_{eq} のとり方はFig. 5に示した。

また 締め固めたシラスではFig. 6に示すように G_{eq}/σ_v は一定となったが 不攪乱シラスではそれぞれ一定とならなかった。その原因は不攪乱シラスではある程度の粒子間の結合力をもっており そのため圧密降伏荷重をもっていると同じ状態になっているためと考えられる。

このように 締め固めたシラスと不攪乱シラスとは性質が相当に異なる

といえるが G_{eq} に関しては次の点では同じ傾向をもつ。すなわち 不攪乱シラスの G_{eq} はせん断ひ

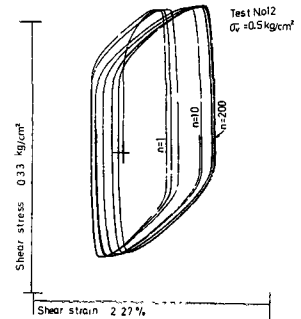


Fig. 3 Hysteresis curve (Undisturbed sample)

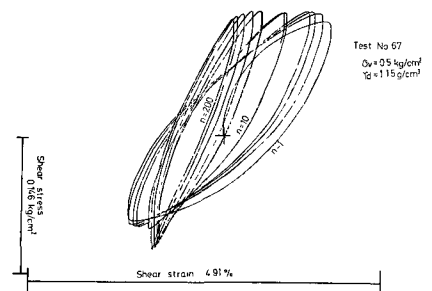


Fig. 4 Hysteresis curve (Compacted sample)

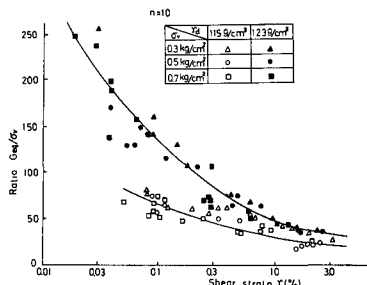


Fig. 6 Relationships between ratio G_{eq}/σ_v and strain

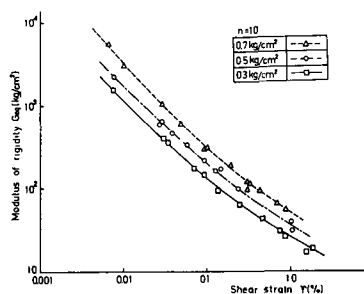


Fig. 7 Relationships between rigidity and shear strain

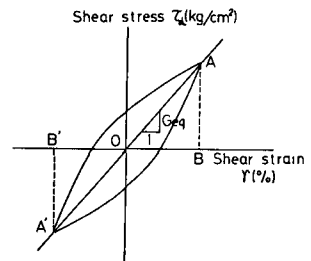


Fig. 5 Equivalent hysteretic stress-strain properties

ずみ量 γ の増加によってその値が極端に低下する。そして 一次比例的ではないが鉛直圧 σ_v が大きい場合が G_{eq} の値が大きい。これらを裏付ける結果の一つとしてはFig 7である。Fig 6とFig 7とくらべてみても不攪乱シラスの動的剛性率が締め固めシラスのそれよりかなり大きいことがわかる。

いま、 G_{eq} をせん断ひずみ量 γ と鉛直圧 σ_v の関数として次の形におく。

$$G_{eq} = C (\sigma_v)^m / \gamma^n \quad (1)$$

そして 最小自乗法 (Deming の方法) によって実験値から定数 C n m の値を求めた。その結果が右の表である。ただし この値は $n = 1.0$ のときの G_{eq} を用いて求められたものであり せん断ひずみ γ が $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2}$ の範囲において適用できるものと考える。

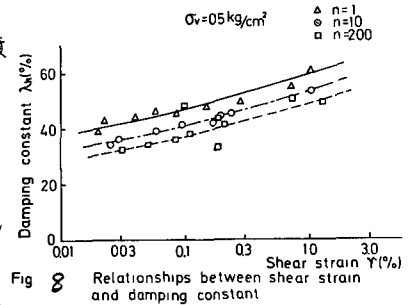
		C	n	m
締め固めシラス	$\gamma_d = 1.15 \%$	10.27	0.25	1.02
	$\gamma_d = 1.23 \%$	6.11	0.45	1.06
不攪乱シラス	$\gamma_d = 1.12 \%$	1.90	0.82	1.15

次に等価履歴減衰定数 λ_R についてであるが この値はFig 5に示したように 履歴曲線の囲む面積 ΔW と三角形A O Bの面積 W との比をとって次の(2)式によって求めた。すなわち

$$\lambda_R = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$

その結果の例をFig 8に示した。

不攪乱シラスの λ_R も締め固めシラスのそれと同じようにせん断力のくり返し回数の増加によって λ_R の値は減少している。



しかし せん断ひずみ量 γ の増加によってあまり変化していない。

このことは締め固めシラスの Dense Packing の状態が鉛直圧 σ_v が大きい場合とその傾向が非常によく似ているといえる。また 不攪乱シラスの λ_R は締め固めシラスのそれの約2倍の数値を示しているが、これは両者の履歴曲線の形の相異によるものである。

8. シラスの液化 Fig 9は不攪乱シラスの実験記録

の例である。これらの例からわかるように 供試体にくり返しせん断応力 τ_d を負荷すると そのくり返し回数 n が増加するにつれて供試体中の間隙水圧 u が次第に上昇しFig 9に示した例では $n = 13 \sim 14$ 付近からせん断変位が増大しはじめ、この時点で初期液化がおこっていることがわかる。そこで初期液化が起るまでのせん断力のくり返し回数 n_L と応力比 τ_d/σ_v との関係を示したのがFig 10である。Fig 10において注目すべきことは不攪乱シラスの液化はそれが発生するまでのせん断応力のくり返し回数 n_L は応力比 τ_d/σ_v によって一義的にきまらないう点である。

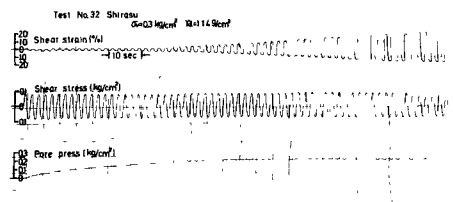


Fig. 9 Record of dynamic simple shear test

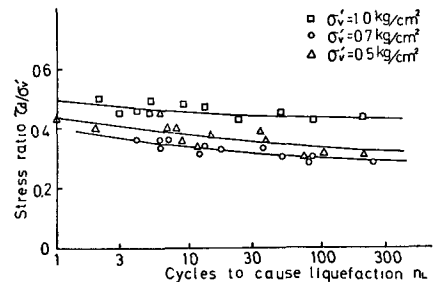


Fig 10 Stress ratio τ_d/σ_v required to cause liquefaction

このことが不攪乱シラスの液化と攪乱シラスの液化との大きな相異点である。この相異点の原因は動的剛性率の測定結果のところでものべたように 不攪乱シラスに

は土粒子間にある種の結合力が存在していることによるものと思われる。Fig 11は初期液状化が生じに時点での有効応力 $(\sigma'_v - u_f)$ とくり返しせん断力 τ_d の関係をプロットした結果の一例で、初期液状化時のモールフロー線の破壊線と考える。そこでこの線の傾きなどから初期液状化時の内部摩擦角 ϕ と粘着力 C を求めることができる。このように不攪乱シラスでは見掛け上の粘着力があることが砂や締め固めシラスの場合と異なる。

このような粘着力をもつ土の液状化時の応力条件式は次のように考えられる。

$$\tau_d = C + (\sigma'_v - u_f) \tan \phi \quad (3)$$

(3)式を(4)式のようにし、両辺を σ'_v で除すれば

$$\tau_d - C = (\sigma'_v - u_f) \tan \phi \quad (4)$$

$$\frac{\tau_d - C}{\sigma'_v} = \left(1 - \frac{u_f}{\sigma'_v}\right) \tan \phi \quad (5)$$

Δu を1パルス当りの間引き水圧上昇高、 n_L を液化に要するパルス数とすれば、 $u_f = n_L \cdot \Delta u$ となるので

$$\frac{\tau_d - C}{\sigma'_v} = \left(1 - \frac{n_L \Delta u}{\sigma'_v}\right) \tan \phi \quad (6)$$

をうる。(6)式からFig 10に示した実験結果をFig 11に併示した結果から得られた粘着力を用いて $(\tau_d - C)/\sigma'_v$ と n_L との関係で改めて整理してみたのがFig 12である。

Fig 10とFig 12を比較してわかるようにFig 10では σ'_v のちがいによって3本の線にわかれていた結果がFig 12ではほぼ1本の線にまとまっていることがわかり、不攪乱シラスの液化には土粒子間の結合力の影響があることが明らかにになった。

5 結論 今回行なった不攪乱シラスの動的性質に関する実験およびその結果についてのべたが、それから明らかにになった事柄を列記すれば次のとおりである。

1) 不攪乱シラスの等価剛性率 G_{eq} はせん断ひずみ γ が大きくなればその値は減少し、鉛直圧 σ'_v が大きくなれば、その値は増加する。三者の関係を示す実験式は次のとおりである。

$$G_{eq} = \frac{1.90}{\gamma^{0.82}} \sigma_v'^{1.15}$$

なお、上式の適用範囲は $1 \times 10^{-4} \leq \gamma \leq 2 \times 10^{-2}$ である。

2) また、等価履歴圧減衰定数 λ_n は G_{eq} とは逆の傾向を示す。

3) 不攪乱シラスの液化については応力比を $(\tau_d - C)/\sigma'_v$ とすれば初期液化を起すまでのせん断力のくり返し回数 n_L は応力比によって一義的にきまるという一般的な結果と同じであるということができる。

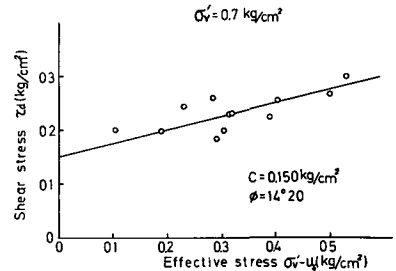


Fig 11 Relationships between effective stress and shear stress

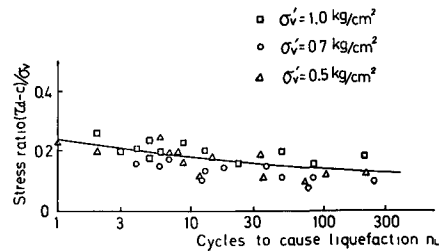


Fig 12 Stress ratio $(\tau_d - C)/\sigma'_v$ required to cause liquefaction