

低拘束圧下での砂質土のせん断弾性係数 に関する振動台実験

大原資生*・山本哲朗**・森田 匠***・森岡弘道****

Shaking Table Tests on Shear Moduli of Sandy Soils at Low Confining Pressures

Sukeo O-HARA, Tetsuro YAMAMOTO, Takumi MORITA and Hiromichi MORIOKA

Abstract

Shear moduli of the sand and the decomposed granite soil were measured under low confining pressures below 5 kPa. Test apparatus used in these tests is Kellman's type shear box fixed on a shaking table. The size of the specimen is 60 cm in diameter and about 7.5 cm in height.

As a result of this investigation, it is shown that shear moduli of the sand and the decomposed granite soil increase in proportion to the effective confining pressure to the power 0.66 and to the power 0.75 respectively.

1. まえがき

近年、飽和砂地盤の液状化あるいは地震時土圧などの理論的解析が行われ、その解析結果は振動台などを用いた模型実験の結果と比較検討されている。

そのような模型実験での砂層の厚さは、通常1 m以下であるので解析で用いる砂のせん断弾性係数および減衰定数としては10kPa程度の低拘束圧下での値が必要となる。しかしながら、現在までそのような低い拘束圧下での砂のせん断弾性係数および減衰定数は実験的にほとんど求められていない。

そこで、本論文は振動台を利用した、供試体が比較的大きい実験装置を用いて低拘束圧下での砂およびまさ土のせん断弾性係数を測定し、その結果をのべたものである。今回の実験で用いた装置はわれわれの研究室で試作し、これまで飽和砂の液状化特性などを明らかにするために用いてきた装置^{1), 2)}の一部を改造したものである。

この装置では供試体の直径、高さはそれぞれ60cm, 約7.5cmで比較的大きいので、ここで用いたまさ土のような粒径の大きい試料のせん断弾性係数の測定も行うことは本装置の特徴の一つとしてあげられる。

以下に、試料、実験装置および方法、結果について順次のべる。

2. 試 料

実験に用いた試料は豊浦砂および宇部市産出のまさ土である。まさ土は山口県に広く分布するが、現在まで通常の大さの拘束圧下でのせん断弾性係数もほとんど測定されていないので、本実験での試料として用いた。

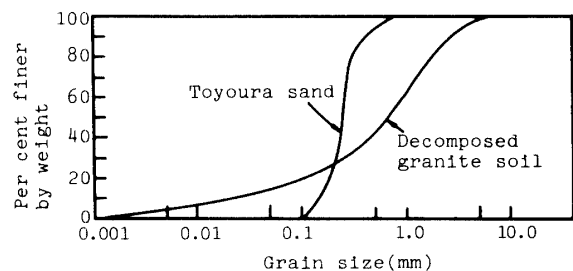


Fig.1 Grain size distribution curves of samples.

* 土木工学科
** 工業短期大学部 土木工学科
*** 大成道路(株)
**** 山口県庁

Table 1 Physical properties of samples.

	Toyoura sand	Decomposed granite soil
G_s	2.63	2.62
D_{max} (mm)	0.84	9.52
D_{50} (mm)	0.24	0.72
U_c	1.6	62.5
e_{max}	1.028	1.330
e_{min}	0.678	0.844
ϕ' (°)	39.7	40.6
c (kN/m ²)	0	0

両試料の物理的性質ならびに粒径加積曲線をそれぞれTable 1, Fig. 1に示す。まさ土は均等係数 (U_c) が62.5で、粒度分布が非常によいことが特徴である。なお、Table 1の中に示した、砂およびまさ土の内部摩擦角 (ϕ') は三軸試験時の試料の間隙比 (e) がそれぞれ0.970, 1.000のときの値である。

3. 実験装置および方法

実験装置はFig. 2に示す。この装置は振動台を利用したものである。

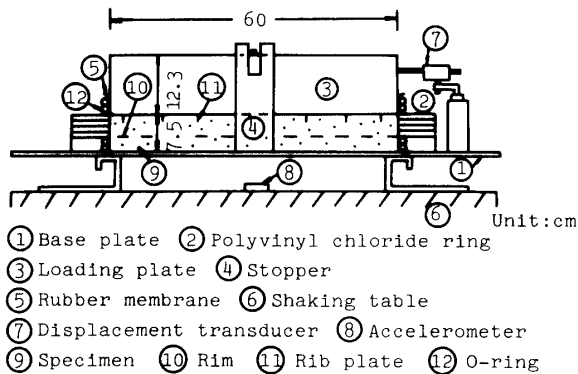


Fig. 2 Experimental arrangement.

本装置はわれわれの研究室で試作し、これまで飽和砂の液状化実験などに用いてきたもので、今回の実験では供試体内の間隙水圧を測定する回路を除いてある。

また、厚さ1 cm、内径および外径がそれぞれ60.6 cm, 76.0 cmのドーナツ状の塩化ビニール板リングが供試体の周囲に4枚積み重ねられているので、振動中、供試体のせん断変形が拘束されず、しかも側方への膨れ出しが防止されることになる。

今回の実験では、供試体の表面には質量100 kgあるいは255 kgの載荷板がのせられており、これによってそれ

ぞれ供試体の底面には有効鉛直圧 $\sigma_v' = 3.5$ kPa, 8.8 kPaが作用する。また、振動時の載荷板などの慣性力によって供試体にせん断応力が作用する。

実験方法は次のとおりである。まず、供試体は次の方法で作製した。試料が豊浦砂の場合には、含水比 (w) = 20%程度の湿潤状態の試料をリム(10)にあらかじめ取り付けた厚さ1 mmのゴムスリーブ内に詰める。その後、砂層の表面に載荷板をのせた後、振動数 (f) = 3 Hz, 水平震度 (k_h) = 0.4 の正弦波形の加速度を90秒間与えて砂層を締め固める。この方法で作製した供試体の間隙比はほぼ0.97である。

まさ土の場合には、 $w = 14\%$ 程度の試料をゴムスリーブ内に3通りの間隙比で詰める。次に、豊浦砂の場合と同様に90秒間まさ土を振動によって締め固めて供試体を作製した。

以上の方法で供試体を作製した後、振動台を駆動して供試体全体に $f = 3$ Hzで振幅一定の正弦波形の加速度を与えた。加速度振幅は段階的に増加して実験を行った。加速度の大きさは水平震度 (k_h) に換算してほぼ0.025, 0.05, 0.10, 0.20および0.30である。各加速度の加振時間は20秒とした。

実験中には振動台の加速度および供試体表面上の載荷板の水平変位振幅をそれぞれ抵抗線ひずみ計式の加速度計 (容量: 5 g), 抵抗線ひずみ計式の変位計 (容量: 10 mm) で測定した。これらの測定量はペンオシロに記録した。

4. 実験結果および考察

4.1 豊浦砂のせん断弾性係数

本振動台実験では供試体底面に作用するせん断応力 τ は式(1)で計算する。

$$\tau = \frac{k_h \cdot W}{A} \quad (1)$$

ここで、 W , A はそれぞれ供試体、載荷板、リングの重量および供試体の断面積である。

せん断ひずみ振幅 γ は式(2)で求まる。

$$\gamma = \frac{\Delta y}{H} \quad (2)$$

ここで、 Δy , H はそれぞれ繰返しせん断変位振幅、供試体の高さである。

せん断弾性係数 G は式(3)で与えられる。

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3)$$

Fig. 3は豊浦砂のせん断弾性係数 G とせん断ひずみ γ の関係を示す。図中、 \circ , \triangle 印は、供試体底面に作用

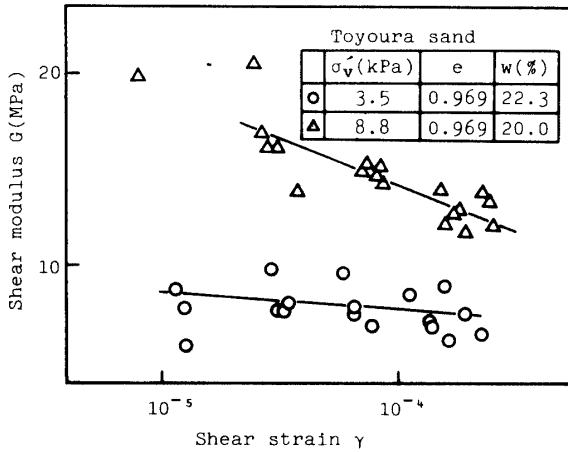


Fig. 3 Relationship between measured shear modulus G and shear strain γ for Toyoura sand.

する有効鉛直圧 σ'_v がそれぞれ3.5kPa, 8.8kPaでの実験値を示す。図からわかるように振動台実験で得られた、有効鉛直圧が小さい場合の豊浦砂のGは $\sigma'_v=100$ kPa程度の有効鉛直圧下で測定された砂質土のG³⁾にくらべると、その実験値はややばらつきが大きい。さらに、本実験のような低い有効鉛直圧下においてもGは通常の大さき有効鉛直圧での結果と同じように、せん断ひずみ γ が大きい場合、また有効鉛直圧が小さい場合に小さい。

なお、Fig. 3に見られるように本振動台実験装置で測定しうる供試体のせん断ひずみの下限値は、ダイヤルゲージ変位計の測定精度からほぼ 10^{-5} である。

豊浦砂のせん断弾性係数Gを式(4)に示すように平均有効拘束圧 σ'_m と間隙比eを変数とした実験式で与える。A, Bは実験定数である。式(4)は通常拘束圧下において $\gamma=10^{-4}$ での砂のGを与える実験式で、間隙比eが0.8以下で丸味をおびた粒子からなる砂の場合に得られた式である⁴⁾

$$G = A \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^B \quad (4)$$

σ'_m は式(5)で与えられる。

$$\sigma'_m = \frac{1 + 2K_0}{3} \sigma'_v \quad (5)$$

ここで、 K_0 は静止土圧係数で、式(6)で与えられる。

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (6)$$

三軸試験から求めた $\phi'=39.7^\circ$ ($e=0.970$ の時)を式(6)に代入し、 $K_0=0.36$ をうる。したがって式(5)から $\sigma'_v=3.5$ kPa および 8.8 kPa の場合での σ'_m はそれぞれ2.0 kPa, 5.0 kPaとなる。

Fig. 3 での $\sigma'_v=3.5$ kPa および 8.8 kPa での平均的な

実験曲線から $\gamma=1 \times 10^{-4}$ でのGを読みとり、そのGなどを式(4)に代入して、 $A=6720$, $B=0.66$ をうる。したがって、豊浦砂のGの実験式は式(7)で与えられる。

$$G = 6720 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.66} \quad (7)$$

式(7)で計算した豊浦砂のGとeの関係をFig. 4に示す。図中の○印はFig. 3の曲線から読み取ったGの実験値である。

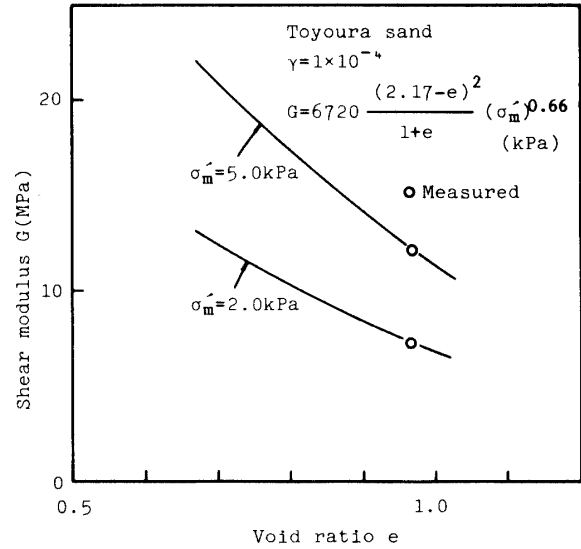


Fig. 4 Experimental equation of shear modulus G at shear strain $\gamma=1 \times 10^{-4}$ for Toyoura sand.

以上のべたように豊浦砂の低拘束圧下で $\gamma=1 \times 10^{-4}$ におけるGは σ'_m の0.66乗に比例して大きくなることがわかった。なお、従来の研究によって通常の拘束圧下では、砂のGは σ'_m の0.5乗に比例して大きくなることがわかっている。

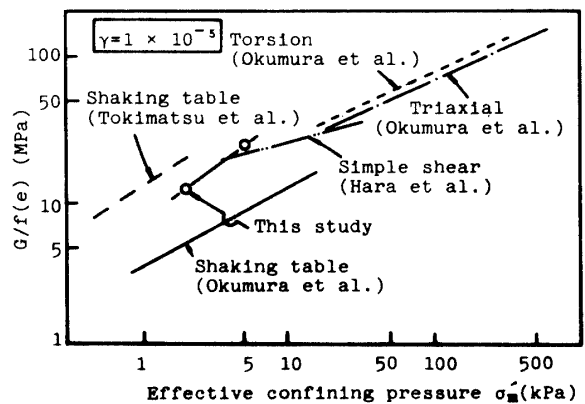


Fig. 5 Comparison between $G/f(e)$ at shear strain $\gamma=1 \times 10^{-5}$ for Toyoura sand obtained by this experiment and the other experimental results (after Okumura et al., 1985).

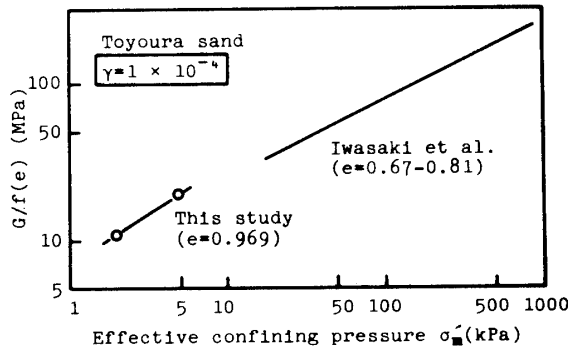


Fig. 6 Comparison between $G/f(e)$ at shear strain $\gamma = 1 \times 10^{-4}$ for Toyoura sand obtained by this experiment and the other experimental results.

Fig. 5, Fig. 6 は実験方法および有効拘束圧の大きさが違う他の実験で得られた $G/f(e)$ と σ'_m の関係^{5), 6)} と本振動台実験結果と比較したものである。Fig. 5, Fig. 6 はそれぞれ $\gamma = 1 \times 10^{-5}$, 1×10^{-4} の結果である。 $f(e)$ は式(8)に示す。この $f(e)$ は式(7)の中で間隙比 e の関数として表される係数である。

$$f(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (8)$$

G は通常の大さきの拘束圧下で豊浦砂およびそれに近い砂の G に及ぼす間隙比の影響を表す係数 $f(e)$ で除しているの、各実験間の砂の間隙比の違いが G に与える影響は、無視できる。

Fig. 5, Fig. 6 からわかるように、本振動台実験から得た豊浦砂の $\sigma'_m = 2 \sim 5$ kPa での $G/f(e)$ と σ'_m の関係は、 $\sigma'_m = 100$ kPa のような通常の大さきの拘束圧での砂の $G/f(e) \sim \sigma'_m$ 関係から外挿されるその関係とほぼ一致する。

4.2 まさ土のせん断弾性係数

まさ土のせん断弾性係数 G は有効鉛直圧 $\sigma'_v = 3.5$ kPa および 8.8 kPa において 3 通りの間隙比の試料について測定した。その結果の一例を Fig. 7 に示す。図中の曲線は実験値から描いた平均的な実験曲線である。

Fig. 8 は $\sigma'_v = 3.5$ kPa および 8.8 kPa での所定の間隙比 e でのまさ土の $G \sim \gamma$ の実験曲線を示す。図からわかるように、 G は e が小さい場合、また σ'_v が大きい場合に大きくなる。

豊浦砂の場合と同様に Fig. 8 に示すそれぞれの間隙比の試料の $\gamma = 1 \times 10^{-4}$ での G を用いて式(9)での実験定数 C, D を求めた。式(9)は通常の大さきの拘束圧下で e が 0.6 以上で角ばった粒子からなる砂に対して得られた式である⁴⁾

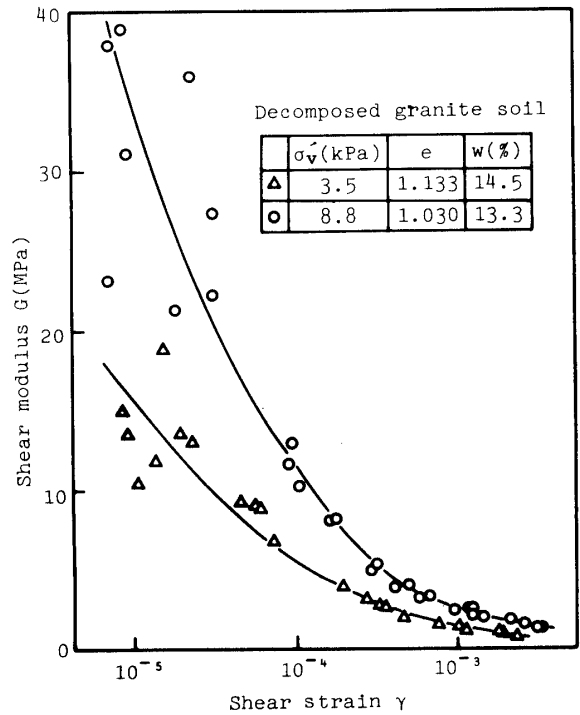


Fig. 7 An example of relationship between measured shear modulus G and shear strain γ for decomposed granite soil.

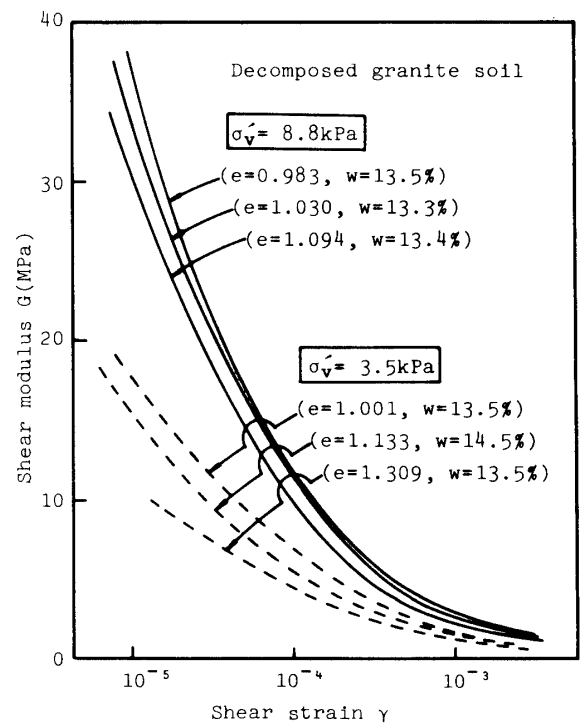


Fig. 8 Relationship between measured shear modulus G and shear strain γ for decomposed granite soil.

$$G = C \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^D \quad (9)$$

その結果, $C=1910$, $D=0.75$ を得た. したがって G の実験式は式(10)で与えられる.

$$G = 1910 \times \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.75} \quad (10)$$

なお, 実験定数 C , D を求める場合, K_0 としては三軸試験から求めた $\phi=40.6^\circ$ ($e=1.000$ の時)を式(6)に代入して得た 0.35 を用いた.

実験式(10)で計算した $\sigma'_m=5.0\text{kPa}$ ($\sigma'_v=8.8\text{kPa}$) および $\sigma'_m=2.0\text{kPa}$ ($\sigma'_v=3.5\text{kPa}$) での実験曲線を Fig. 9 に示す. 図中の○印は最小 2 乗法を用いて実験式(10)を求める場合に用いた実験値である.

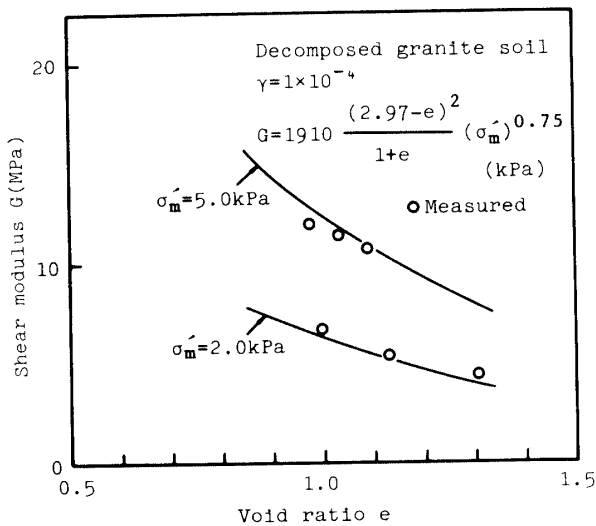


Fig. 9 Experimental equation of shear modulus G at shear strain $\gamma = 1 \times 10^{-4}$ for decomposed granite soil.

式(10)からわかるようにまき土の G は σ'_m の 0.75 乗に比例して大きくなっており, したがってまき土の G に対する平均有効拘束圧の影響は豊浦砂の場合よりもやや大きいといえる.

今回の実験では 2 種類の σ'_v の場合だけで砂質土のせん断弾性係数を測定した. 試料は粒度分布のかなり異なるまき土と豊浦砂であったが, 粒度分布の違いによるせん断弾性係数の違いは厳密には検討できなかった. ただ, Fig. 4 および Fig. 9 の豊浦砂およびまき土の実験曲線を比較して, 間隙比 (e) = 1.0 の場合, 湿潤状態の豊浦砂およびまき土のせん断弾性係数はほぼ同じであることがわかる.

5. まとめ

振動台を利用した実験装置を用いて平均有効拘束圧が 5kPa 以下の低い拘束圧下での砂およびまき土のせん断弾性係数の測定を行った. 結論として, 豊浦砂およびまき土のせん断弾性係数はそれぞれ平均有効拘束圧の 0.66 乗, 0.75 乗に比例して大きくなるという結果が得られた.

参考文献

- 1) 大原資生・山本哲朗: 振動台による飽和砂の再液状化特性に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol.22, No. 2, 123-132 (1982)
- 2) O-hara, S., Kotsubo, S. and Yamamoto, T.: Pore Pressure Developed in Saturated Sand Subjected to Cyclic Shear Stress under Partial-Drainage Conditions, Soils and Foundations, Vol.25, No. 2, 45-56 (1985)
- 3) 大原資生・安永文夫・藤井信夫: 乱さないシラスの動的性質, 土質工学会論文報告集, Vol.14, No. 4, 107-114 (1974)
- 4) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会 (1976)
- 5) 奥村哲夫・成田国朝・大根義男: 低拘束圧下における砂質土の動的変形特性, 土木学会論文集, 第364号/Ⅲ-4, 67-76 (1985)
- 6) Iwasaki, T., Tatsuoka, F. and Takagi, Y.: Shear Moduli of Sands under Cyclic Torsional Shear Loading, Soils and Foundations, Vol.18, No. 1, 39-56 (1978)

(昭和61年3月29日受理)