

阿蘇火山灰土の動的せん断特性について

大原資生*・山本哲朗*

Dynamic Shear Characteristics of Aso Kuroboku

Sukeo O-HARA and Tetsuro YAMAMOTO

Abstract

In order to clarify the property of static and dynamic strengths, and shear modulus of Aso Kuroboku, the following experiments are performed. The dynamic triaxial tests were carried out by the method decreasing a confining pressure during cyclic dynamic loading. Shear modulus in a very low confined stress, such as no surface load is placed on a sample, was measured using a shaking box (Fig.5) fixed on a shaking table.

From the above experiments, it is found that the angle of dynamic shearing resistant of Kuroboku is nearly half of that in the case of static. Furthermore, it seems shear modulus in a range of very low confined stress can be extrapolated from the results of simple shear tests.

1. まえがき

しらすおよび黒色火山灰土（以下、黒ボクという）は土質工学上、特殊土の範ちゅうに入る土であって、これらの土は九州地域に広く分布している。

黒ボクは土の分類によれば火山灰質粘性土であるが、この土は有機物の含有量が相当高いものであることがその特徴として挙げられる。そのために、黒ボクの土質工学上の諸性質が他の一般の粘性土のものとはかなり異なる結果となっている。

本文は阿蘇で採取した黒ボクの動的強度および剛性率、減衰定数を測定することを目的として、試験結果およびその考察について述べている。

試験方法の特徴として、動的強度の測定は従来と同じように動的三軸試験機を用いているが、排水条件下で側圧を次第に減少させるという実験方法によって行っている。

さらに、低拘束圧下での剛性率の測定ではゴム板製円筒状振動箱内に詰めた試料の振動実験を行っている。

2. 試料

この実験に用いた黒ボク試料は阿蘇で採取した攪乱状態のものである。採取時の含水比は約 60% であって、すべての実験にはこの自然含水比を保持するよう

にビニール袋に保存した試料を用いた。

試料の粒度分布およびその他の諸性質はそれぞれ Fig.1, Table 1 に示すとおりである。このうち、有機物含有量は強熱減量試験によって求めた値である。

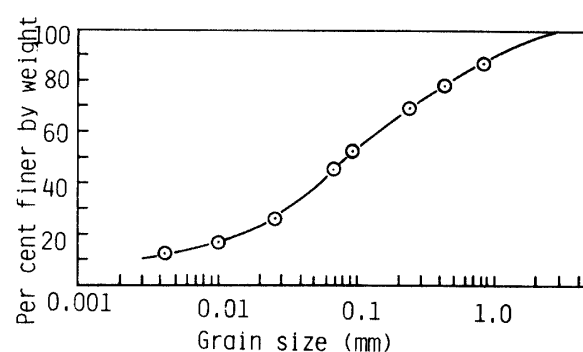


Fig.1 Grain size distribution curve of sample.

Table 1 Physical properties of sample.

Specific gravity	G_s	2.29
Liquid limit	W_L	73.8%
Plasticity index	I_p	15.5%
Diameter at which 50% of soil is finer	D_{50}	0.075mm
Organic content		28.7%

3. 実験装置および実験方法

実験は黒ボクの次の2つの強度値を求めるために行

* 土木工学科

われた。すなわち、i) 静的・動的強度定数、ii) 剛性率、減衰定数の2項目である。以下、i), ii) についてその実験方法および実験装置についてのべる。

静的および動的強度の測定にはそれぞれ静的三軸圧縮試験機、砂の液状化実験にも用いられている動的三軸試験機が用いられた。

静的三軸試験は圧密排水条件下で、せん断速度は1%/minとした。

動的三軸試験はまず、供試体に側圧 (σ_3) = 1.0 kg/cm² を加えて圧密し、しかる後に、排水状態で側圧を徐々に低下させながら、供試体に周期2秒で振幅一定の矩形波のくり返し軸差応力を負荷した。したがって、この実験では動的せん断応力を負荷する時に供試体に作用する有効応力を減少することによって供試体を破壊に至らしめることになる。

この実験では、軸ヒズミ (ϵ_1) およびくり返し軸差応力 (σ_d) はペン書きオシロに記録した。その記録例を Fig.2 に示す。さらに、側圧および供試体の体積変化をブルドン管圧力計、乾燥供試体の体積変化測定用ビューレットによって測定した。側圧および供試体の体積ヒズミの測定の一例をそれぞれ Fig.3, Fig.4 に示す。

Fig.2 に示した実験はくり返しせん断応力 (τ) が 0.11 kg/cm² で行ったものであるが、せん断応力のくり返し回数 (n) が41回の時に軸ヒズミが急増するのが認められる。この時に供試体は破壊したとみなした。

なお、Figs.2, 3で、 e, w はそれぞれ圧密後の供試体の間ゲキ比、含水比を示す。

剛性率および減衰定数の測定のうち、一つはこれまでの実験で用いてきた Kjellman 型の単純せん断試験機を用いて測定した。試験機および実験方法の詳細は前論文¹⁾にも述べられているので、ここでは省略し、その概要だけをのべる。

供試体は直径 75mm、厚さがほぼ 20mm の円板状であり、ゴムスリーブ内に収められている。その外側には厚さ 2mm、内径 75.2mm、外径が 96mm のアクリルリングが 12~14 枚積み重ねられた状態ではまっている。

単純せん断試験では、鉛直圧が 0.3, 0.2, 0.1 kg/cm² といった比較的低い拘束圧下で実験を行った。供試体に負荷するせん断応力およびせん断ヒズミは X-Y レコーダーで記録した。

他の一つは、Fig.5 に示す振動箱を振動台にのせ、

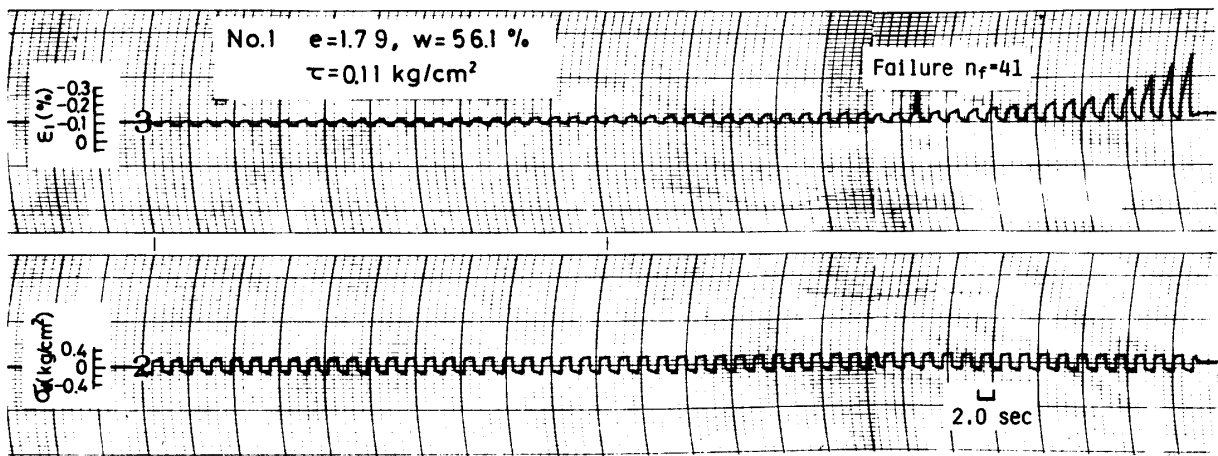


Fig.2 An example of record of dynamic triaxial compression test.

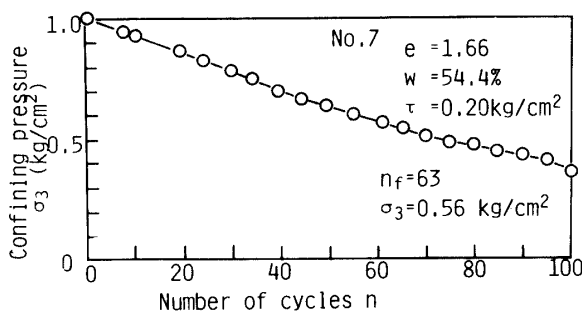


Fig.3 An example of decrease of confining pressure.

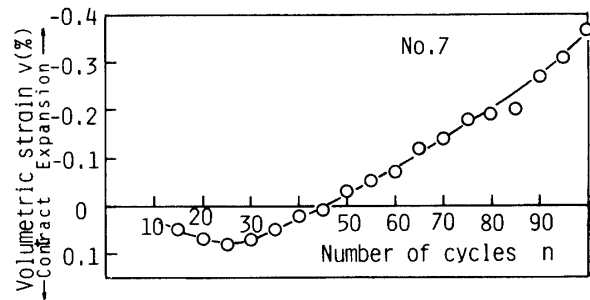


Fig.4 Relationship between volumetric strain v and number of cycles n .

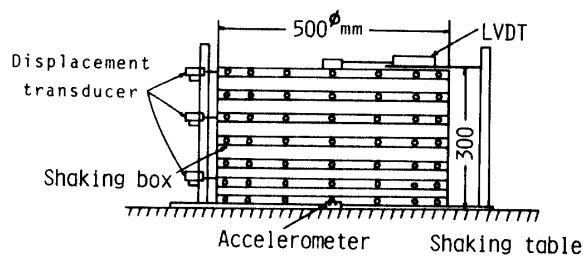


Fig.5 Experimental apparatus.

その中に試料を詰め、振動実験を行い、その振動変位から剛性率を求めた。

この振動箱は厚さ 2mm のゴム板で作られた円筒形のものであって、直径、高さはそれぞれ 500mm, 300mm である。ゴム板の外側には幅 20mm, 厚さが約 2mm の鋼製リングが 7 本取り付けられていて、試料を詰めたときの側方への膨出しに対して補強されている。

実験はまず、振動台（許容塔載重量：1t, 載荷面積：1m²）上に振動箱を固定し、箱の中に試料を詰める。詰めるときの密度は 3 種類とした。各試料の間ゲキ比 (e) は 3.53, 2.37 および 1.99 である。もっともゆる詰めの場合は黒ボクを箱に流し込むようにして詰めて作製したものである。 $e=2.37$ と 1.99 の場合は自重 3kg, 直径 10cm のコンクリート製タンパーを試料の表面からの落下高さを変えて一層について 50 回ずつの突き固め回数で 3 層に分けて突固めた。試料の層厚は 30cm である

以上の方法で試料を詰めた箱を振動数が 3Hz, 水平震度 (k_h) がほぼ 0.1, 0.2, 0.3 および 0.4 の正弦波加速度を与え、強制振動変位振幅を箱の底面からの高さ (H) が 6, 19, 29cm および試料表面の計 4 ケ所の位置で測定した。前 3 ケ所の高さでの変位は箱側壁の変位振幅をダイヤルゲージ式変位計（最大測定長が 10mm）によって、また、試料表面での変位は差動トランス型変位計（最大測定長が 50mm）によって測定した。これらの測定値はすべてペン書きオシロに記録した。

試料表面上の変位は振動時の慣性力が無視できるほどの軽い木片を試料中に埋めて測った。そのため、試料がゆる詰めの場合は試料の沈下が生じて、表面での変位振幅は十分な精度で測定できなかった。したがって、変位分布から剛性率を計算によって求める場合に、表面での変位は用いないことにした。

4. 実験結果および考察

4.1 静的および動的強度定数

Fig.6 は静的三軸試験結果および強度定数を示している。

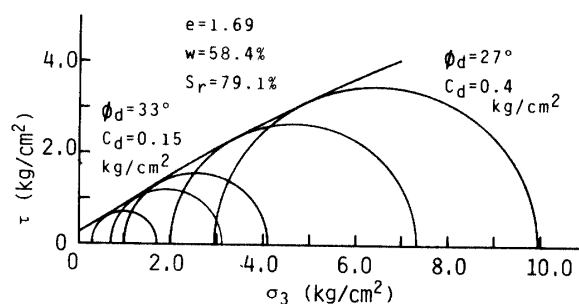


Fig.6 Results of static triaxial compression tests.

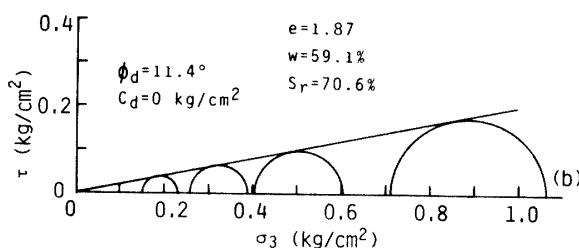
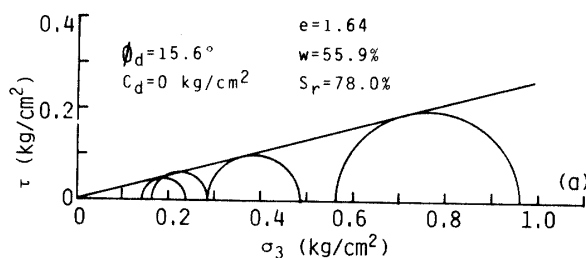


Fig.7 Results of dynamic triaxial compression tests.

Figs.7 (a), 7(b) は圧密後の間ゲキ比 (e) が 1.87, 1.64 の試料の動的三軸試験結果を示す。 $e=1.64$ の試料は静的三軸試験での $e=1.69$ の試料と同じ締固め方法で作製したものである。それゆえ、両試料の試験結果を比較して、黒ボクの動的セン断抵抗角 (ϕ_d) は静的セン断抵抗角のほぼ 1/2 であるとの結果が得られた。

ところで、筆者らは 2, 3 の砂質土に対して液状化

実験を行った際に、動態時のセン断抵抗角は静的セン断抵抗角の 4~6 割程度であるということのべている²⁾。このように粘性土の一種である黒ボクにおいても砂質土の動的強度と静的強度間に見られた関係が得られたことは興味深い。

4.2 振動台実験による剛性率の測定

Fig.5 に示した振動箱内に試料を詰めた状態での振動実験から得た記録の一例を Fig.8 に示す。この図における記録線は上から順に振動台加速度、振動箱の底部からの高さ (H) が 29, 19, 6cm の高さでの変位振

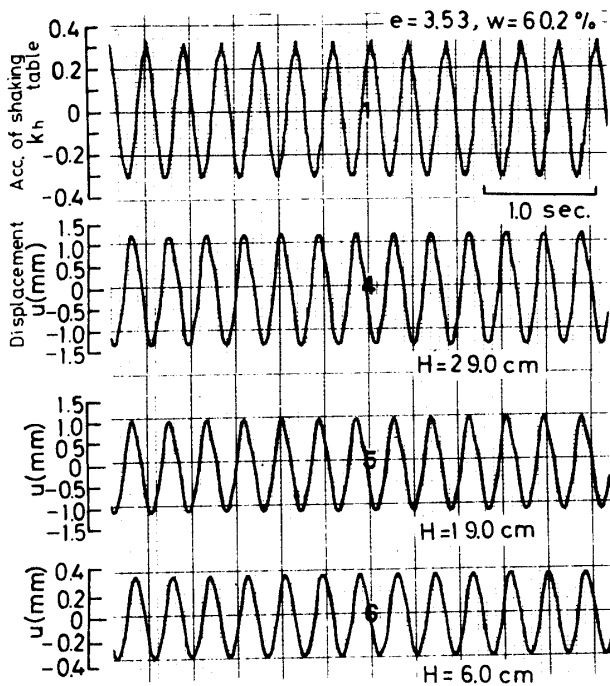


Fig. 8 An example of record of the vibrating test on a sample compacted in a shaking box.

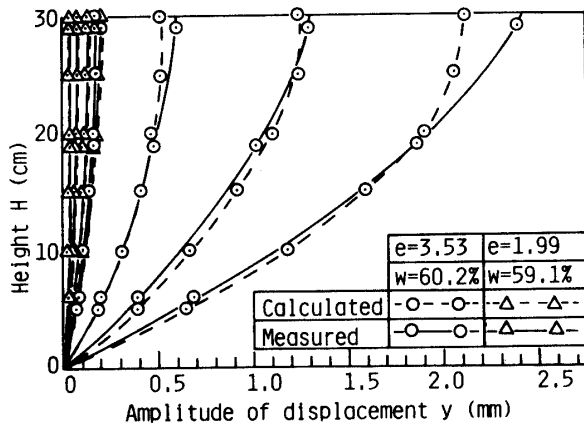


Fig.9 Calculated and measured distributions of displacements.

幅を示す。

Fig.9 は Fig.8 の結果に基づいて、水平震度 (k_h) が 0.1, 0.2, 0.3 および 0.4 の場合の変位分布を描いた結果である。これより、変位分布は試料の剛性率が深さ方向で一定とみなして次元セン断方程式を解いて得られるセン断変位分布に近似している。さらに、箱自体の剛性率は 0.4kg/cm^2 程度であり、それは後で示すように試料の剛性率に比べてかなり小さい値であるので、箱の剛性が試料の剛性率に及ぼす影響は無視できると考えた。

この変位振幅をセン断振幅で見なし、セン断振動方程式の解に代入して 3ヶ所の位置での剛性率を逆算した。最後に、黒ボクの平均的剛性率として各位置での剛性率を算術平均して求めた。

以上の方法で得た剛性率を用いて改めて計算によって求めたセン断変位分布を Fig.9 に示す。この図には密詰め試料 ($e=1.99$) とゆる詰め試料 ($e=3.53$) の 2つの試料の実験結果を示している。当然のことではあるが、試料の密度が大きくて締まっている場合、セン断変位量は著しく減少するのがわかる。

次に、セン断変位分布の実験値と計算値を比較すると、特に試料の表面付近で、セン断変位の実験値は計算値よりも大きい傾向が認められる。この原因は箱に詰めた黒ボクのセン断振動では、表面付近では塑性変形が顕著に起っているためと思われる。

この塑性的な変位量は震度が大きくなるにともなって増加すると考えられるので、Fig.10に示すように仮に水平震度が 0.1 のときの試料表面での変位 $(y_t)_{k_h=0.1}$ を基準として、その変位量に対するそれぞれの震度での変位 $(y)_{k_h}$ との比を求めた。同図には気乾状態および含水比 (w)=8.3% の潤滑状態の豊浦砂の結果も掲げている。これは粒子間の水分が塑性変位量に与

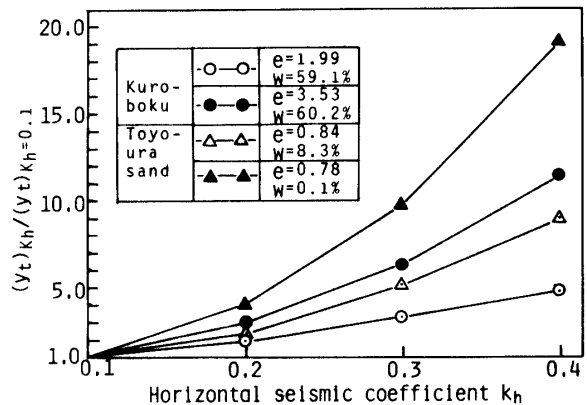


Fig.10 Relationship between amplitude of surface displacement of soil layer and horizontal seismic coefficient.

える影響を見ることができる。

Fig.10から、黒ボクおよび豊浦砂とも表面変位量は水平震度と線形な関係にはなくて、震度が増加するにともなって表面変位の増加の割合が著しく大きくなるのがわかる。

また、黒ボクでは、試料の間ゲキ比が小さくなると、震度の増加による試料の表面変位の増加の割合が減少していることもわかる。

一方、気乾状態の豊浦砂では表面変位の増加がかなり大きい、ある程度の水分を含ませて粒子間に見かけの粘着力が働くようにした場合、表面変位が非常に小さくなる。塑性変形による変位は、震度はもちろん密度および含水状態等に依存すると言える。

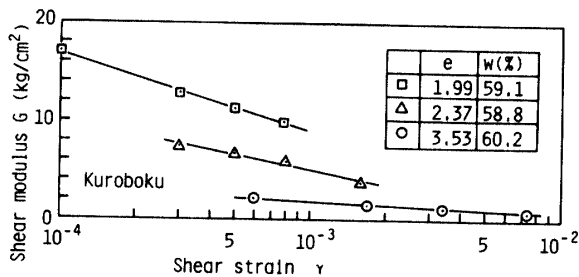


Fig.11 Relationship between shear modulus G and shear strain γ . (Kuroboku)

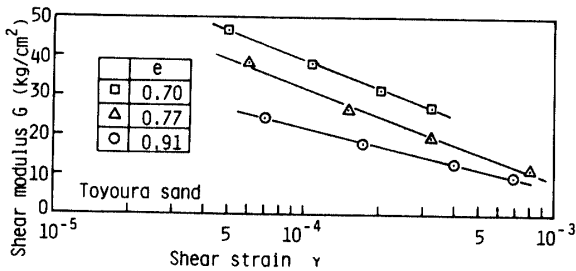


Fig.12 Relationship between shear modulus G and shear strain γ . (Toyoura sand)

Figs. 11, 12 はそれぞれ黒ボク、気乾状態の豊浦砂について、剛性率 G とせん断ヒズミ γ との関係を示す。プロットした点はヒズミが小さい方から順に水平震度が 0.1, 0.2, 0.3 およびの 0.4 の結果である。

Fig.9 に示した変位分布からもわかるように、厚さが 30cm の土層全体でせん断ヒズミは一定ではない。したがって、Fig.11, Fig.12 の関係を求める場合のせん断ヒズミは $H=10\text{cm}$ と $H=20\text{cm}$ 間の厚さ 10cm の土要素のせん断変位量から求めることにした。なお、この深さでのせん断ヒズミは $H=5\text{cm}$ から 15cm 間

および $H=15\text{cm}$ から 25cm 間のそれぞれの土要素について求めたせん断ヒズミの平均的な値にほぼ等しい。

本実験のように表面載荷重はなく、試料の自重だけで生じる、高々 0.02kg/cm^2 の非常に小さい土かぶり圧の下では、黒ボクおよび砂の剛性率 G はヒズミ γ の対数値と比例するようである。また、黒ボクと砂との剛性率はせん断ヒズミの大きさが異なるので直接比べることはできないが、黒ボクの剛性率は砂のそれよりやや小さいように見られる。

4.3 単純せん断試験から測定した剛性率および減衰定数

単純せん断試験から得られた黒ボクの履歴曲線の特徴の一つは曲線の形がせん断ヒズミのレベルで異なるということであった。すなわち、履歴曲線はせん断ヒズミが 10^{-3} 以下のヒズミでは、バイリニア型に近い形 (Fig.13) であり、ヒズミが 10^{-3} 以上の場合、楕円形に近いものであった。このようにヒズミの大きさで履

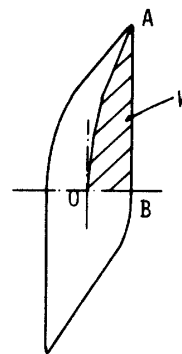


Fig.13 Measurement of strain energy W for bi-linear stress-strain relation for soil.

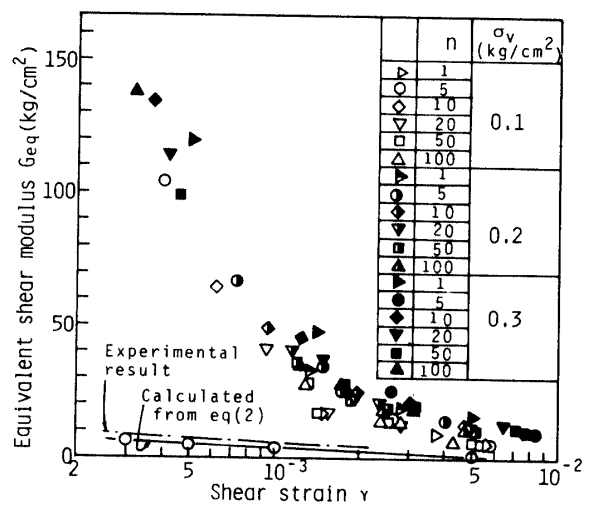


Fig.14 Relationship between equivalent shear modulus G_{eq} and shear strain γ .

歴曲線の形が変化する原因についてはよくわからない。

Fig. 14 は履歴曲線から求めた等価剛性率 (G_{eq}) とセン断ヒズミ (γ) との関係を試験時の鉛直圧 (σ_v) およびセン断応力のくり返し回数 (n) に対して示している。 $\gamma=5.0 \times 10^{-4}$ 程度より小さいヒズミ振幅での結果が少ないが、鉛直圧が 0.1 kg/cm^2 から 0.3 kg/cm^2 の範囲では、黒ボクの剛性率はセン断応力のくり返し回数にはほとんど影響を受けない。さらに、剛性率は鉛直圧が増加する場合に若干大きくなるようである。

通常、砂質土の剛性率 (G) は拘束圧 (σ_0') およびセン断ヒズミ (γ) との関係で (1) 式で与えられている³⁾。

$$G = k_1 (\sigma_0')^m \quad (1)$$

ここで、 m : セン断ヒズミに依存する定数

k_1 : セン断ヒズミおよび間ゲキ比等に
依存する定数

いくつかの砂の剛性率の測定結果に基づき、(1) 式中の m とセン断ヒズミとの関係は平均的な一本の曲線と与えられている。それによると、一般的傾向として m はヒズミが大きくなるにつれて 1 に近づく。砂の場合、たとえばヒズミが 1.0×10^{-3} 、 3.0×10^{-3} では、 m はそれぞれ 0.70、0.85 という値である。これに対して黒ボクの m はそれぞれのヒズミで 0.51、0.67 という値であった。

(1) 式は粒度分布および間ゲキ比の異なる任意の砂質土の剛性率を与えようとするものである。これに対して、特定の間ゲキ比の土に対する剛性率 G はセン断ヒズミ (γ)、鉛直圧 (σ_v) の関数とみなして (2) 式が示されている。

$$G = c \cdot \gamma^{-n} \sigma_v^m \quad (2)$$

ここで、 c 、 n 、 m : 実験定数

この式を用いてゴム板製円筒状振動箱内に詰めた試料について、自重だけが作用する鉛直圧下での $G \sim \gamma$ 関係を求めてみる。

そのため、まず、単純セン断試験での $\sigma_v = 0.3, 0.2, 0.1 \text{ kg/cm}^2$ における 3 本の $G \sim \gamma$ 曲線から (2) 式中の c 、 m 、 n を求めた。その結果は $c = 0.925$ 、 $m = 1.083$ 、 $n = 0.799$ である。この値を用いて黒ボク層の中央部での $\sigma_v = 0.016 \text{ kg/cm}^2$ の下での曲線を求めた。結果は Fig. 14 に示すとおりである。この結果と実験曲線の比較によって、 0.1 kg/cm^2 程度以上の鉛直圧下での剛性率とセン断ヒズミの関係を用いて表面荷重がない場合の剛性率 \sim セン断ヒズミ関係を予測できる可能性があるように思われる。

Fig. 15 は (3) 式に示す等価履歴減衰定数 (λ_{eqh}) とセン断ヒズミの関係を調べた結果である。

$$\lambda_{eqh} = \Delta W / 4\pi W \quad (3)$$

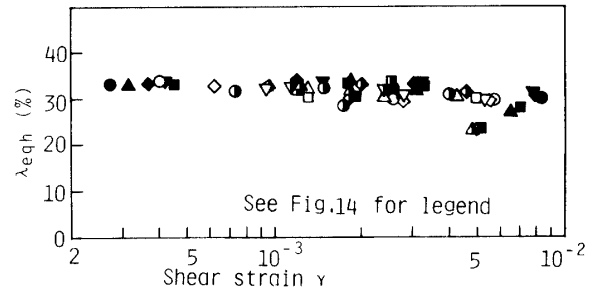


Fig. 15 Relationship between equivalent damping factor λ_{eqh} and shear strain γ .

ここで、 ΔW : 1 サイクル中のエネルギー損失

W : ヒズミエネルギー

ΔW は履歴曲線の囲む全体の面積で与えられる。 W の求め方には 2、3 の方法があるが、ここでは、骨格曲線の下側の面積を測定することで求めた。Fig. 13 に模式的に示したバイリニア型履歴曲線の場合には、骨格曲線 AO は 3~4 本の直線からなるものとした。

Fig. 15 からわかるように、セン断ヒズミが 3×10^{-4} から 1×10^{-2} の範囲では、黒ボクの等価履歴減衰定数はあまりヒズミの影響を受けずに、その値は 32% 程度である。

なお、骨格曲線を Fig. 13 での点 A と O を結ぶ直線として減衰定数を求めると、この場合の値は特にヒズミが小さい範囲で Fig. 15 の値より大きいものであった。その差はヒズミが 5×10^{-4} 、 2×10^{-3} においてそれぞれ 20%、10% 程度であった。このことは土の応力ヒズミ関係がバイリニア型の場合、等価履歴減衰定数を算出するに当たっては、骨格曲線の定め方に注意を払わねばならないことを示唆する。

5. まとめ

阿蘇産の火山灰土 (黒ボク) の静的・動的強度および剛性率等の測定を行い、以下の結果を得た。

- 1) 黒ボクの動的セン断抵抗角は静的セン断抵抗角のほぼ $1/2$ すなわち $11 \sim 15^\circ$ といった値である。
- 2) 厚さ 2mm のゴム板製円筒形振動箱 (直径 : 500mm, 高さ : 300mm) の中に詰めた試料に強制振動を与え、試料表面に荷重がない場合の剛性率を求めた。その結果は Figs. 11, 12 に示されている。

今後、砂質土を対象として、本文でのべた方法で動的強度および剛性率を測定する予定である。

最後に本研究は自然災害特別研究費の補助を受けて行ったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 大原資生, 周藤宜二: 砂質土の動的せん断定数について,
山口大学工学部研究報告, 27, (1976) p.35~44.
- 2) 大原資生, 山本哲朗: 砂質土の液化に関する 2, 3 の考

- 察, 第13回土質工学研究発表会講演集, (1978) p.525~528.
- 3) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, (1976) p.141.

(昭和54年10月12日 受理)