

III-51 振動時の乾燥砂のせん断強さについて

東北大学工学部 正員 河上房義
工学部 正員 柳沢栄司
鹿島建設技研 正員 阿部 裕
東北大学大学院 学生員 河合秀次

1. 緒言

一般に粒状体のせん断強さが振動時に減少するといわれているが、振動中の粒状体の性質を決定する機構については未だ研究が進んでいない。ここでは、粒状体として粒径の異なるガラス球、形状の異なるカーボランダム、乾燥砂を用いて振動時のせん断強さの変化について調べる。

2. 実験装置 (図-1)

土中を振動波が伝わる場合に、土体の各要素は一連の複雑な運動をする。この運動成分は、体積歪、せん断歪、回転、位置の変化である。ある振動条件における各成分の大きさは、振動波の種類、土の特性など種々の要素によって決定される為、ある特定の振動方法によって現場の振動状態をシミュレートすることはできない。ここでは振動台を振動させることによって水平振動を与えるが、この条件下では試料箱境界の運動は全く複雑であるが、内部では土粒子に働く慣性力は、動的な体積歪とせん断歪を引き起こしている。上に述べた条件は、振動台にのせた直接せん断試験機に試料をつめ、振中 0.5mm 、振動数 $0 \sim 30\text{Hz}$ に変化させて作り出した。

尚、せん断箱 (ステンレス製) の直径は 50mm 、試料の厚さは 20mm 、歪速度は 1mm/s であり、用いた試料の性質を表-1、粒度分布曲線を図-2 に示した。

試料	粒径	比重	初期孔隙比	Angularity*
ガラス球	1 0.1 ^{mm}	2.50	0.62	0
	2 0.3	2.50	0.68	0
	3 0.5	2.50	0.67	0
	4 1.0	2.50	0.67	0
	5 2.0	2.50	0.65	0
	6 3.0	2.50	0.69	0
C 砂	A $d_{50}=1.03$	3.20	0.84	1534
	B $d_{50}=0.65$	3.20	0.76	1076
	C $d_{50}=0.58$	3.20	0.73	665
開上砂	I $d_{50}=0.42$	2.71	0.72	653
	II $d_{50}=0.26$	2.71	0.87	476

表-1 試料の性質

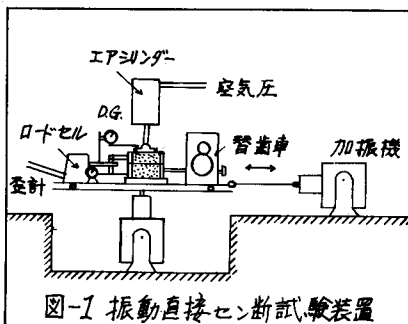


図-1 振動直接せん断試験装置

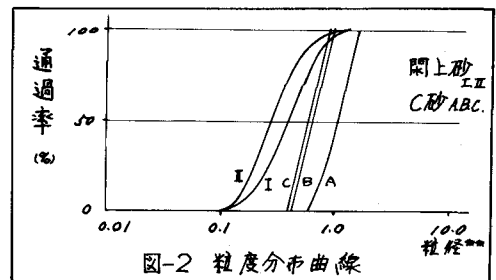


図-2 粒度分布曲線

3. 実験結果

3-1 静的セン断と振動時における応力・歪曲線

図-4に示す様に、いづれの場合(鉛直圧 $20 \sim 40 \text{ kg/cm}^2$)も応力比 τ/σ と水平変位 ϵ の初期勾配は、加速度比が増加するにつれて減少する。つまり振動によってセン断弾性係数は減少する。また、 τ_{max} となるセン断歪は加速度が大きくなるにしたがい小さくなってゆき、鉛直変位量が減少し、より早く限界間隙比に近づく。しかしながら図-5に示す様に鉛直圧が減少して 0.5 kg/cm^2 になると、振動時におけるセン断弾性係数の方が大きい値を示す。この原因は、拘束圧が小さくなるとセン断時に振動による締固めよりも間隙がゆるむ現象が卓越し静的セン断の場合より大きな膨張を示す為と思われる。

3-2 内部摩擦係数と加速度比の関係

Barkanは砂の内部摩擦係数と加速度比の間の次式の様な関係が成立すると考えた。

$$\tan \phi = \tan \phi_{min} + (\tan \phi_{st} - \tan \phi_{min}) \cdot e^{-\beta \eta} \quad \eta: \text{加速度比}$$

本実験が上述の様な関係が成立すると思われるが、 β の値の意味がはっきりしなかった。さらに振動時における内部摩擦の各成分の変化については、図-6に示す様に粒状体の種類によらず体積変化分は一定であり、摩擦みだけが減少していく。この理由としては、振動エネルギーがある値以下であればピーク強度時における構造が振動時と静的な場合似かよっている為と考えられる。しかしながら振動エネルギーが大きくなると、粒子構造が変化し粒子間のかみ合わせが急激に減少して ϕ_{max} の値も減少していくものと思われる。

3-3 振動時のセン断強さに及ぼす表面摩擦の影響

表面をよくみがいた摩擦の大きいガラス球(A)と表面に粉をぬった摩擦の小さいガラス球(B)とをセン断試験した結果を図-7に示すが、これによるとA球では、(振動時における残留強度/静的試験における残留強度)の値が、かなり大きいのに比してB球では、ほとんど0に等しい。この原因は、表面摩擦が小さい程振動時に粒子間のかみ合わせがゆるみやすく、粘性流体としての力学状態を示しやすくなる為と考えられる。

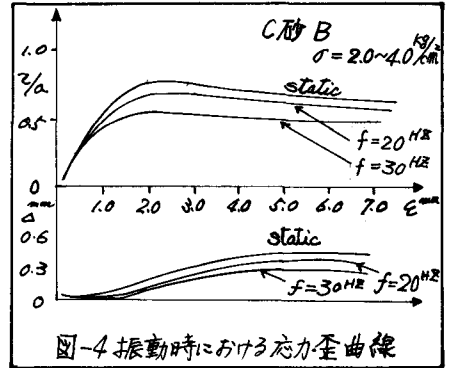


図-4 振動時における応力歪曲線

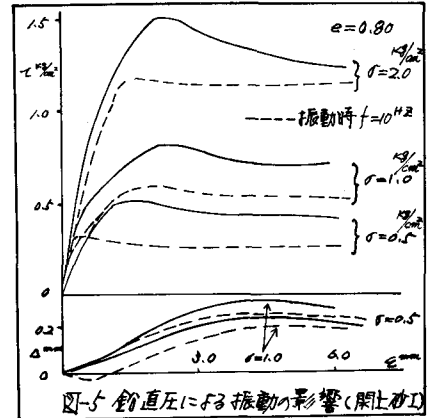


図-5 鉛直圧による振動の影響(閉止砂)

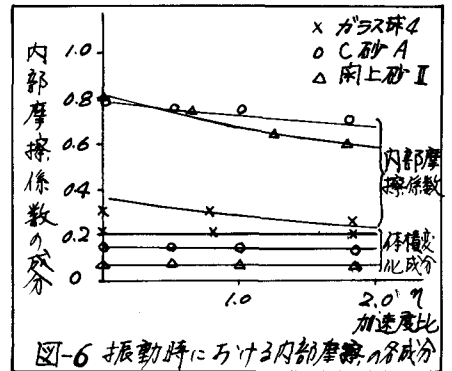


図-6 振動時における内部摩擦の各成分

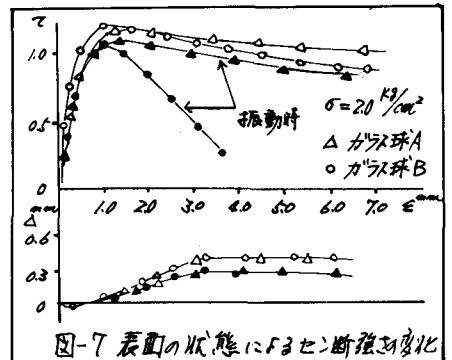


図-7 表面の状態によるセン断強度変化

3-4 粒径と内部摩擦係数の関係

粒径の異なるガラス球による実験結果を図-8に示すが、これによると粒径が大きくなるにつれ内部摩擦係数は増加していく。これは、ある限られた大きさのセン断箱内では、粒径の小さい場合にはセン断時に粒子の乗り上りが容易であるのに比して、粒径が大きくなるにつれ粒子相互の乗りこえが不可能になり、マツク為と考えられる。

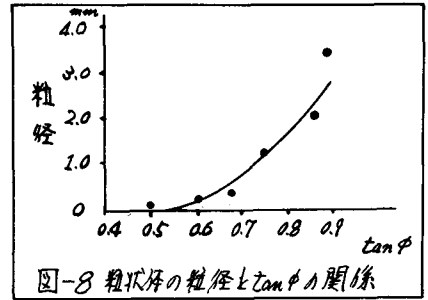


図-8 粒状体の粒径と $\tan \phi$ の関係

3-5 粒径の相違による振動の効果

実験結果図-9に示す様に、粒径が大きくなるに従い、ほぼ直線的に振動の効果δと静的な内部摩擦係数に対して振動中に減少する内部摩擦係数の割合が大きくなる。この理由としては、粒径が小さい程安定な粒子構造をとりやすく、粒径が大きくなるに従い粒子構造が不安定なものとなり、マツク為と思われるが、実際の地盤の様に境界が非常に大きい場合には、粒径による振動の影響は小さいと考えられる。

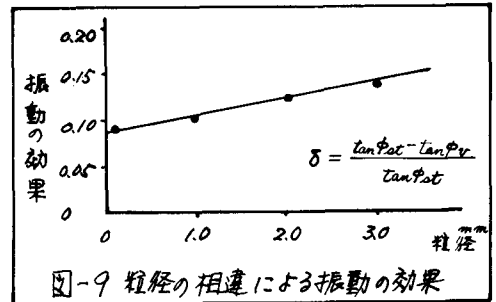


図-9 粒径の相違による振動の効果

3-6 セン断強さに及ぼす粒子形状の影響

粒度組成が同一で、平均径のほぼ等しく、angularity* (ここで用いた angularity* とは、任意抽出した数十個の粒子について、鉱物顕微鏡で写真にとり図-10の様にして求めたもの。)の非常に異なる2種のC砂についてセン断試験をした結果を表-3に示してあるが、これによると全マについて角ばっている材料の方が大きな値を示している。これは、丸いものより角ばっている粒状体の方が、かみ合わせの抵抗が大きい為と思われる。また、振動の効果については、はっきりした違いはなかったが、この原因としてセン断面での粒子の配向性などが考えられる。

項目	種類	C砂B	C砂c
セン断強さ(kg/cm^2)		1.50	1.38
Dilatancy量(mm)		0.44	0.38
初期セン断弾性係数		100	63
表-3 $\sigma = 20 \text{ kg/cm}^2$ の場合			

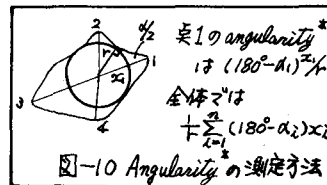


図-10 Angularity* の測定方法

4. 粒状体の応力・歪曲線について

ある1つの系に力が働き変形が起こるときに、熱の出入りがあるとすると、

$$P \cdot dV = dU + dQ \quad (1)$$

P : 圧力 dV : 容積変化 dU : 内部エネルギーの増高 dQ : 外への熱量

上式はエネルギー保存則であり、粒状体の変形について考えで見ると、 dU は主として弾性変形によるものであり、直接セン断の際に起こるような変形を考えると弾性変形は無視できる。一で dQ は熱の

出入りによるもので、粒子のこすり合いなどによって発生する熱にちがうものである。そこで(1)式を直接せん断の場合に適用すると次式が成立する。

$$2A \cdot \Delta x - \sigma A \cdot \Delta y = \mu \cdot \sigma A \cdot \Delta x \quad (2)$$

A : 試料断面積 $\mu = \tan \delta$

ここで無次元変位パラメーターとして $z = x/h_s$ を導入すると (h_s : 試料厚),

$$\left. \begin{aligned} A \cdot \Delta x &= V_s / h_s \cdot \Delta x = V_s \cdot \Delta z \\ A \cdot \Delta y &= \Delta V = V_s \cdot \Delta e \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(3)式を(2)式へ代入し極限をとると,

$$z/\sigma = \mu + de/dz \quad (4)$$

さらに間隙比が次式の様に变化すると仮定して(図-3)

$$e - e_0 / e_0 - e_t = (1 + gz) \cdot e^{-pz} \equiv F(z) \quad (5)$$

次にせん断力と全の間隙比について考察を進める。(5)式を z で微分すると,

$$D_0 \cdot F'(z) = de/dz \quad \text{ただし } D_0 = e_0 - e_t \quad (6)$$

(6)式を(4)式へ代入して,

$$z/\sigma = \mu + D_0 \cdot F'(z) = \mu + D_0 \cdot (g - p - pgz) \cdot e^{-pz} \quad (7)$$

試験開始時では, $z = z_0 = 0$ として(7)式より

$$\mu = D_0 \cdot (p - g) \quad (8)$$

ここで粘着性のない粒状体では, どんな物質でも p は一定と考える。

実験結果より係数 p, g, μ を求めた結果を表-2に示してある。

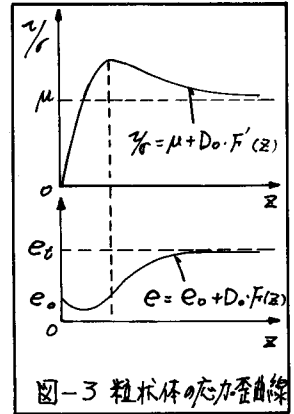


図-3 粒状体のたが登曲線

材料	g	μ
ガラス球	1	45.3
	2	0.593
	3	53.7
	4	0.678
	5	67.5
	6	0.725
C砂	5	180.0
	6	0.865
	6	0.875
開上砂	A	57.5
	B	0.707
	C	21.4
開上砂	I	28.7
	II	0.647
I		46.2
II		0.550
I		67.2
II		0.673

$p=7.4$ 表-2

5. あとがき

粒状体に関する振動直接せん断試験を行った結果、片振りの 0.5^{mm} 、振動数 $0 \sim 30^2$ 、鉛直圧 $1.0 \sim 40^{kg/cm^2}$ の範囲では、振動により初期せん断弾性係数は減少し、より早く限界間隙比に近づくこと、振動時における内部摩擦の変化については、体積変化成分は一定であり、摩擦成分だけが減少すること、*angularity*の大きい材料ほど表面摩擦が大きく振動時にせん断強さの減少が小さいこと、等が分かった。なお、実際の地盤では、形状、粒径のほかに粘着力、間隙水圧等の要素について考慮を払う必要があり、粒状体の変形機構を決定する方法は非常に難しいと思われる。さらにせん断箱の大きさによっても結果に大きな影響を及ぼすと考えられるので、この辺について装置を改良して実験を進める必要を感じている。

参考文献

1. 最上武雄 土質力学
2. C.P. Wroth A stress strain relationship for the shearing behavior of a sand Geotech. 1965
3. Barkan Dynamics of bases and foundations