

52. 振動時に形成される粒状体の斜面について

東北大学工学部 正 員 近武正雄
同 学生員 関田欣治

1. まえがき

水平鉛直面内の振動を合成して任意方向の振動を与える試験装置を用い、粒状体(砂, 砂利, 礫石, ガラス球)に振動を与えると、粒状体の特別の性質といえる安定な斜面が形成される。これについて、試料の種類や振動角度, 振動数による影響, また静的な安定角との関連などについて考察を行う。ためのである。

2. 実験

2-1 実験装置 実験に用いた装置と写真-1に示し, その原理を図-1に示す。加振機は電磁式(日本測器517-7-B型)で, 振りはメシロスコープを用いて制御し, また位相差を生じないように位相調整器を使用した。

2-2 試料 粒状体として表-1に示すような試料を用い, 砂利・礫石は篩分けによって粒径で分類した。合計11種類の乾燥した試料により実験を行った。

2-3 実験方法 加振台に写真-1, 図-1に示す容器(60^{cm}×60^{cm}×30^{cm})を装置し, 試料を60kg入れて実験を行った。全振中(1mm)を一定に保ち, 振動方向を水平に対して10°おきに変化させ, 更に45°を加えた。振動数は斜面の形成が顕著である24%, 22%について行い, 振動時間は安定な斜面を得るように8分間振動を加えた。又, 各試料は写真-2で示される安定角測定装置を用いて, 安定角と間ギャ比との関係を調べた。尚, その際エリが起って生じた斜面の角度をエリ角と呼び, 測定した。

試料	粒径(mm)	比重	形状
砂利	I 25~5	2.41	roundness. 0.429
	II 5~10	2.40	0.515
	III 10~15	2.43	0.498
	IV 15~20	2.43	0.531
礫石	I 25~5	2.60	angularity. 738.2
	II 5~10	2.62	755.5
	III 10~15	2.63	755.9
	IV 15~20	2.62	765.3
砂	2.0以下	2.71	angularity. 653.0
ガラス球	I 4.0	2.43	roundness. 1.0
	II 12.4	2.48	1.0

表-1 試料

3. 実験結果

$\theta = 0^\circ$, 90° 以外振動方向に沿って写真-3に示すように, 斜面が形成される。この角度を α で示す。代表的な α と θ との関係を図-2に示す。

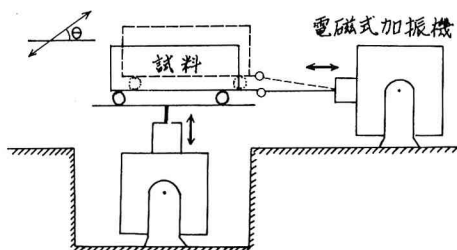


図-1 振動試験装置の原理

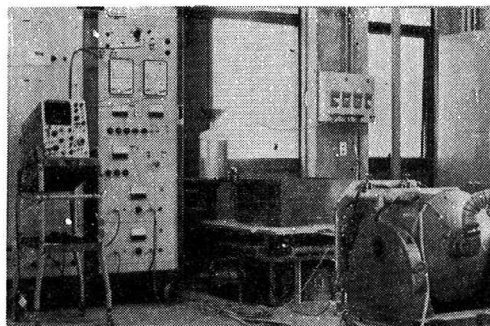


写真-1 振動試験装置

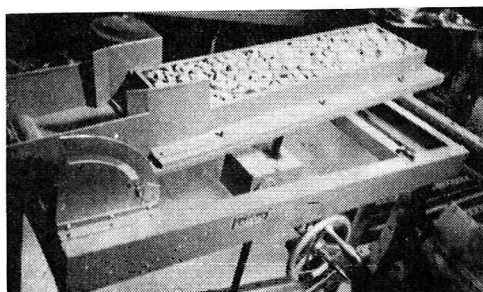


写真-2 安定角測定装置

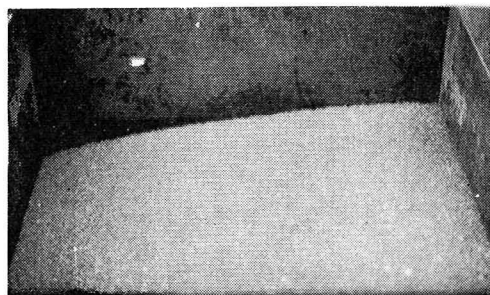


写真-3 形成される斜面

3-1 試料による相異

全体に形成される斜面は砂利、砕石、ガラス球、石の順で大きい。しかし、 $\theta = 10^\circ$ や 20° ではそれ程明瞭でなく逆の場合も認められる。又、増加の仕方は砂利や砕石に較べ、砂やガラス球は緩慢である。ガラス球については粒径が大きい方が、やや大きく斜面が形成されるが、他の試料程差を生じない。

以上の結果は安定角と較べ、粒径による差は類似だが、砂利の方が砕石より小さい事は安定角の場合と異なる。

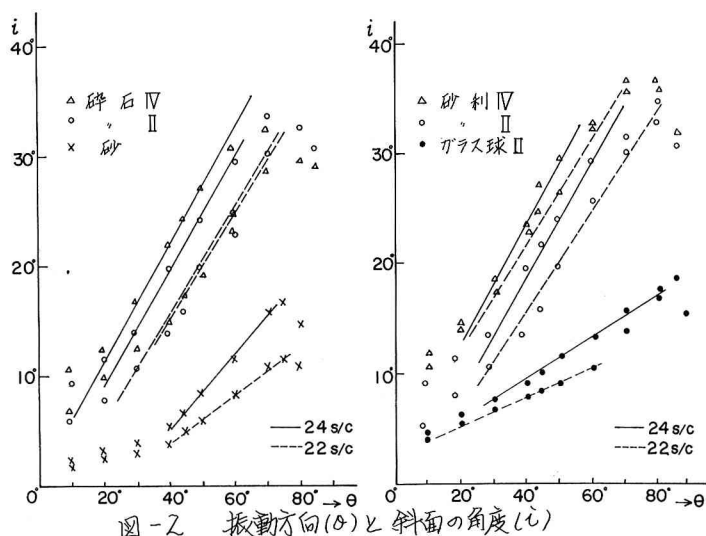


図-2 振動方向(θ)と斜面の角度(α)

3-2 振動方向の影響

一般に θ の小さい範囲で大きく増加し、 $\theta = 20^\circ$ 付近から 70° 位まで直線的に増加し、 70° 、 80° 付近で最大の α を示し、その後急減して 90° で斜面は水平になる。

3-3 振動数の影響

全体に22%より24%の場合の方が α は大きい。又、その差異は砕石において大きく、砂利やガラス球においては小さい事が認められる。

3-4 安定角とリ角との関係

図-3は安定角及びリ角を示すものであるが、斜面が形成される時の間ゲキ比²⁾に対しての安定角より斜面角 α は小さい値をとる。最大の α との関係は表-1の通りで、砕石については、安定角、リ角、最大の α 、砂利については、安定角、最大の α 、リ角、砂やガラス球は砕石の型で、ガラス球は砂利型の順序で小さくなっている。

4 考察

静的な状態でリ角 α_s は、マクロ的リ角線に沿う粒子接触角 β_c を用いて

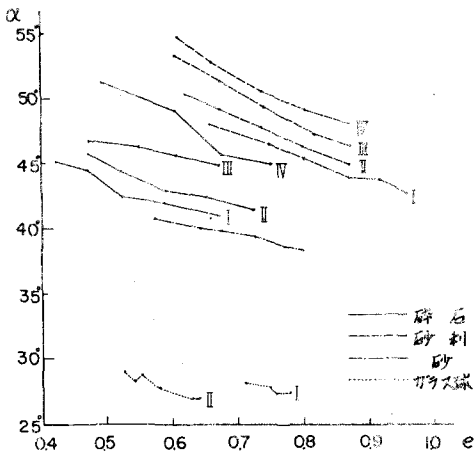


図-3 安定角と間ゲキ比

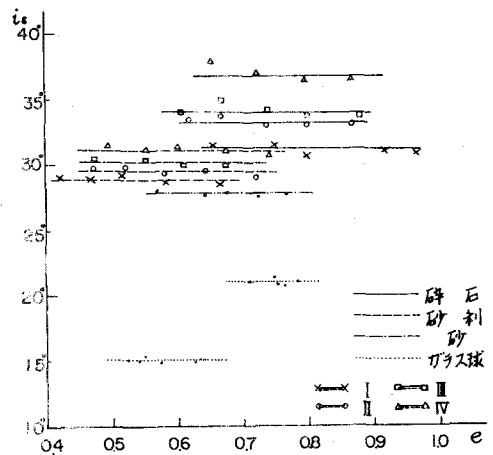


図-4 安定角と間ゲキ比

$$\tan \alpha = \frac{S}{N} = \frac{\sum F_i \sin(\beta + \delta)}{\sum F_i \cos(\beta + \delta)} \quad (4.1)$$

とかける。

図-4のように F は粒子の接触力、 δ は粒子の摩擦角とする。村山等は光學性実験による研究で、 F と β の次数分布 N を求め、更に $F = CN$ なる関係を得ている。この関係を適用すれば

$$\tan \alpha = \frac{\sum N_i \sin(\beta + \delta)}{\sum N_i \cos(\beta + \delta)} \quad (4.2)$$

この場合 N は接触前のものを用いるのが適当で、その結果は、

$$\tan \alpha = \tan \delta \quad (4.3)$$

となる。これは、実際のズリがおこなう方向では接触力の平均値が0になっている事と意味している。

振動時に形成される斜面については、図-5のように水平に対して角度 θ の傾いた座標 u - v を考え、これが中立点 (u_0, v_0) を中心に振幅 a で θ 方向に正弦振動しているとし、この座標に対する粒子の相対運動を考える。

$$S - S_0 = a \sin \omega t \cos(\theta - \phi), u - u_0 = a \sin \omega t \sin(\theta - \phi) \quad (4.4)$$

$$\left. \begin{aligned} m \ddot{u} &= -mg \cos \theta + R \\ m \ddot{S} &= -mg \sin \theta + T \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

したがって

$$m u_0 = m a \omega^2 \sin \omega t \sin(\theta - \phi) - mg \cos \theta + R \quad (4.6)$$

試料名	安定角	最大形成角	ズリ角
碎石	I 53.30 (度)	31 (度)	31 (度)
	52.20	25.30	31
	II 52.20	34	33
	49.30	33	33
	III 50.10	34	34
	49.30	34	34
	IV 53.30	33	37
	52.20	33	37
砂利	I 44.00	29	29
	43.30	28	29
	II 44.50	35	29.30
	44.50	33	29.30
	III 45.50	36	30.30
	46.00	35	30.30
	IV 50.30	37	31
	51.00	37	31
ガラス球	I 28.40	16.30	15
	28.30	17.30	15
	II 29.00	17.30	21
	29.00	18	21
砂	38.30	17.30	28
	28.20	12	28

表-2

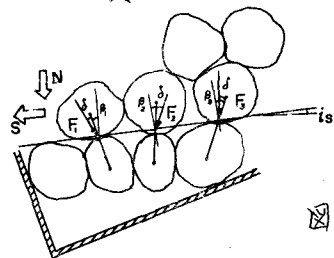


図-4

$$m\ddot{S}_0 = m\omega^2 \sin \omega t (\phi - i) - mg \sin i + T \quad (4.6)$$

粒子が滑動しないとき $\dot{u} = 0, \ddot{S} = 0$ で

$$\left. \begin{aligned} R/mg &= \cos i - \eta \sin \omega t \sin(\theta - i) \\ T/mg &= \sin i - \eta \sin \omega t \cos(\theta - i) \end{aligned} \right\} (4.7)$$

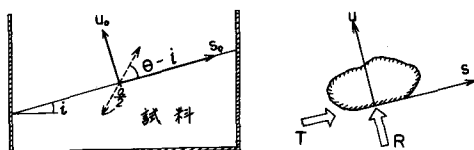


図-5

但し, $\eta = \mu \omega^2/g$ であり, $R/mg > 0$ ならば, 飛びあがらない。この場合斜面の粒子がとり出す限界で, $R \tan \phi = T$ が成立すると仮定すると, 次式が得られる。

$$\sin(\phi - i) = -\eta \sin \omega t \cos(\phi - i + \theta) \quad (4.8)$$

斜面が安定なためには, i はとり得る最小値と考られ ($\sin \omega t = -1$ とする)。

$$i = \phi + \theta - \Theta \quad (4.9)$$

$$\text{但し } \tan \Theta = \frac{\eta}{\cos \theta} + \tan \theta$$

①に対して24%, 22%の場合, 近似的にそれぞれ

$$\theta - \Theta = \frac{24^\circ 40'}{45^\circ} \theta - 49^\circ 15', \quad \theta - \Theta = \frac{22^\circ 10'}{45^\circ} \theta - 44^\circ 15'$$

とおけるので,

$$i = \begin{cases} \phi + \frac{24^\circ 40'}{45^\circ} \theta - 49^\circ 15' \\ \phi + \frac{22^\circ 10'}{45^\circ} \theta - 44^\circ 10' \end{cases} \quad (4.10)$$

が得られる。図-2は実験によって得られる i と θ の関係を図示したものであるが, 図示のようにほぼ直線性があり, 破折, 折断については, その勾配は(4.10)式によるものとはほぼ一致していることがわかる。しかし ϕ は振動方向や加速度により変化するので, 直線性は広い範囲では, 成立しない。

5 あとがき

本文は粒状体の振動時に形成される斜面に関する実験結果と若干の理論的考察を述べた。この考察は粒子の表面だけの運動を考慮している点十分とはいえない。更に中の意味等検討を要すと思われる。又, 実験においても振動数や振中を変化させた場合についても調べる必要があると思うので, 更に検討を続けて行きたい。

参考文献

- 1) 佐武正雄, 浅野照雄: 粒状体の力学的特性に関する実験 土木学会東北支部技術研究発表会講演要集, 昭45, 3 113~116
- 2) 佐武正雄, 田野久貴, 関田欣治: 任意方向振動をうける粒状体の実験について, 土木学会第25回年次学術講演集, 第3部 229~232
- 3) 村山達郎, 松田元: ニ次元モデルによる粒状体のせん断現象の微視的考察 京大防災研究所年報第13号B 昭45, 3 505~523