

III-14 粒状体の流出について

(株)大林組・技術研究所 正会員 李 相 一

1. まえがき —— 粒状体の流出という問題は、直接にはサイロや骨材ビンなどのように、粒状体を保存したり取り出したる構造物の流出口の設計や、砂質土中を掘削するトンネルの切羽に於る砂質土の流出量を推定するのに役立つものである。この方面の研究では、サイロ内の側面に作用する土圧とかトンネルに作用する土圧の計算法はよく研究されているが、流出量の問題は未だ十分には研究されていない。また一方、粒状体の研究に於て、粒状体と連続体との比較、とくに粒状体と液体との相似性と相異性に着目することは一つの方法である。両者の本質的相異は、前者がマサツ性物質であつて、後者が粘性物質であるという点にある。この差違が両者の運動機構にどのように反映するかは重要な課題と思われる。本研究は以上の両側面から、サイロ状の貯蔵ビンにつめた砂を下部の流出口から流出させ、その流量を測定し、結果に対して考察を加えたものである。

2. 試験装置・方法ならびに記号 —— 試験装置の概略図を図-1に示す。内径6.0cm、高さ90.0cmの円筒形の器に、下に円形の流出口をつけたものである。流出口の直径(ϕ)は、2, 4, 6, 8, 10 mmの各々5段階に変化させた。流出した砂は、その下にとりつけた受け皿で受け、流出量の重さはハカリで計量し、体積は試料高さ(h)の減少により測定する。試験方法は、まず流出口を閉じておき、試料砂を上部からホッパーで静かに落下させ、容器内に堆積させる。この時点での試料の高さを測っておき、次に流出口を開いて流出量の重さ(Q_w)とそれに要する時間(t)を測定し、 $Q_w/t = (q_w)$ をこの試料高さでの重量の流量と定義する。また、試料高さの変化から体積変化(Q_v)を測定し、 $Q_v/t = (q_v)$ を体積での流量と定義する。これを各試料高さについて行なった。また、各流口径を変化させて行なった。試料として豊浦標準砂を用いた。これは平均径 $D_{50} = 0.18$ mm、真比重 $G_s = 2.67$ 、均等係数 $U_c = 1.14$ であり、きわめて均等な砂と言える。これを乾燥して用いた。

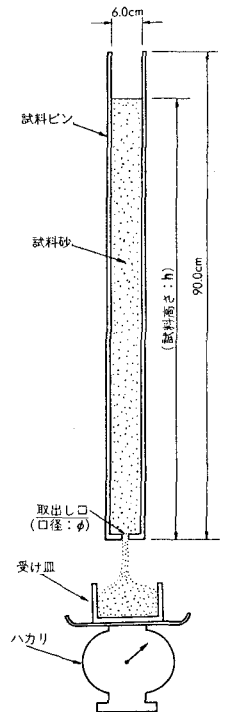


図-1 試験装置の概略図

3. 試験結果とその解釈 —— 供試体の流出時の状態は大きく分けて、図-2の3区分に分かれる。固定部とは流出時に土粒子が動かず固定したままのものであり、流出部は各粒子が相互の拘束なく自由落下している部分であり、流動部とは各粒子が相互に拘束しあいながら静かに動いている部分である。図-3に示すのは試料高さ $h = 90$ cm の高さから流出させ、 h の減少量と時間の関係を各流口径につき示したものである。この図から分ることは、 h が等速度で減少していることである。もしこれが液体ならば、 h が大きいほどその減少量が大きく、 h が小さいほどそれが小さい筈である。この差異は粒状体の一つの特徴を示しているものと思われる。また、この勾配は流量に比例する量であるが、液体ならそれが ϕ^2 に比例する量であるが、粒状体の場合にはそうはなっていない。これも特徴的である。図-4に示すのは、試料高さと重量の流量の関係である。これらは、10回の計測値を平均したものである。これから q_w は h に無関係で一定であり、 $\phi = 2$,

4, 6, 8, 10 mm の各

々につきそれが言える。

この平均値をとるに当っ

てのデータのバラツキは

ϕ が小さくなるほど大

きくなる。この理由とし

て、 ϕ が小さくなると

流口径に対する試料粒径

の比が大きくなり、アー

チングが作用してそれが

形成されたり破壊され

りすることがくり返されてい

ると思われる。

図-5 に示すのは、試料高さ

と体積の流量の

関係である。この関係は重量

の場合と全く同様

であり、デ

ータのバラ

ツキ、即ち

不確定性

についても同

じことが言

える。

g_w と

g_v は同じ

傾向を示す

のみならず

比例してい

るようであ

る。これを

図-6 に示

す。両者が

比例するこ

とは、流出

時に流動部分

が緩んでい

ないことも

意味する。

何故なら、

もし緩んでい

ると g_w が増加

しても g_v はさ

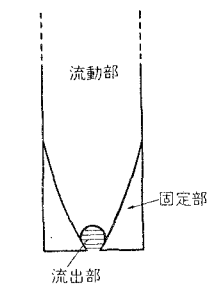


図-2 供試体内の3区分

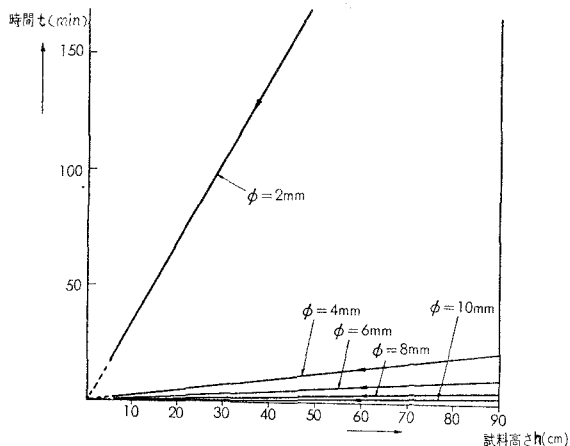


図-3 試料高さの時間変化

流量 q_w (gr/sec) (重量)

	ϕ
○	10mm
□	8mm
△	6mm
●	4mm
■	2mm

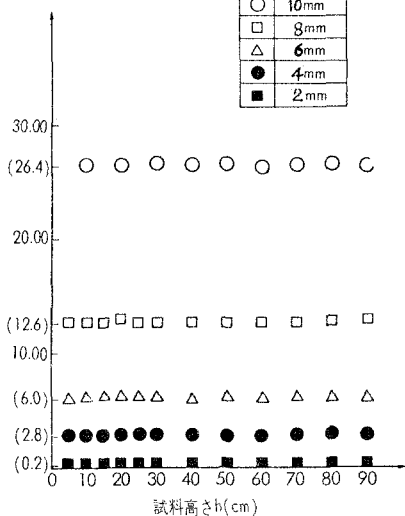


図-4 各試料高さに於る流量(重量)(平均値)

流量 q_v (cm³/sec) (体積)

	ϕ
○	10mm
□	8mm
△	6mm
●	4mm
■	2mm

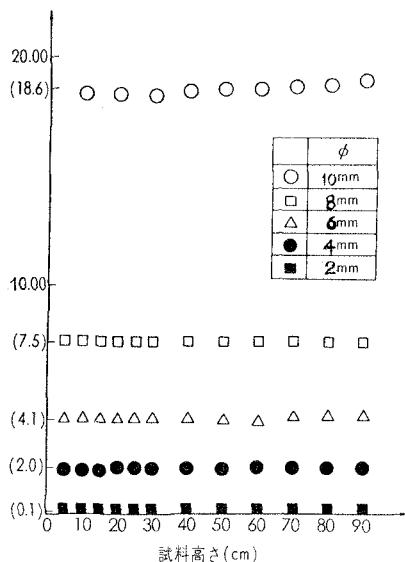


図-5 各試料高さに於る流量(体積)(平均値)

図-7に ϕ と g_w の関係を示す。両者には次の関係式が成立する。

$$g_w = \text{const.} \cdot \phi^3 \quad (1)$$

流出口通過時の各粒子の平均落下速度を v とすると、それが占める単位時間の体積は図-8より

$$g_w = \frac{\pi \phi^2}{4} v (1-n) G_s \quad \text{---(2)}$$

これに $n = 0.45$, $G_s = 2.67$ を代入して

$$v = 0.87 \frac{g_w}{\phi^2} \quad \text{---(3)}$$

が得られる。従って、(1)式から $v \propto \phi$ が予想される。

図-9に v と ϕ の関係もプロットした。両者は比例関係にあり、

$$v = 0.41 \frac{\phi}{D_{50}} \quad \text{---(4)}$$

の関係にある。

流出部の範囲も推定してみる。図-10の如く、仮に h_0 の高さから粒子が相互の拘束を離れて自由落下しているものと見なすと、流出口での速度は $v_0 = \sqrt{2gh_0}$ であり、これから流出部分の高さが推定でき、それを換算自由落下高 h_0 と名づけると、

$$h_0 = \frac{v_0^2}{2g} \quad \text{---(5)}$$

となり、 $h_0 \propto \phi^2$ の関係にあることが分る。これを示したのが図-11である。もっとも、自由落下している部分とそうでない部分がかようにはっきりと区分できるものでもないが、一応このような仮定のもとでは h_0 はきわめて小さく、はつ離れているといった様子である。

図-12に於て、1から2まで粒子が流下するまでのエネルギーロスをも h_L とすると、ベルヌーイの定理より、

$$h_L = \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_1} + z_1 \right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_2} + z_2 \right) > 0 \quad \text{---(6)}$$

(この式で v は速度、 g は重力加速度、 p は圧力、 γ は密度、 z は高さを表わす) 1と2の間で、

$$z_1 - z_2 = h, \quad v_2 \gg v_1, \quad p_1, p_2 = 0 \quad \text{であるから}$$

$$v_2 = \sqrt{2g(h - h_L)} \quad \text{---(7)}$$

となり、(4)式と(7)式は等しいからこれを等置すると

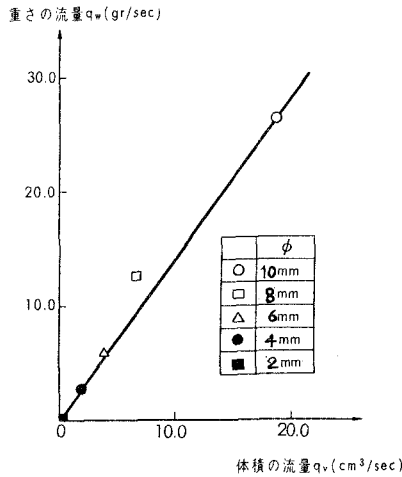


図-6 g_w と g_v の比例性

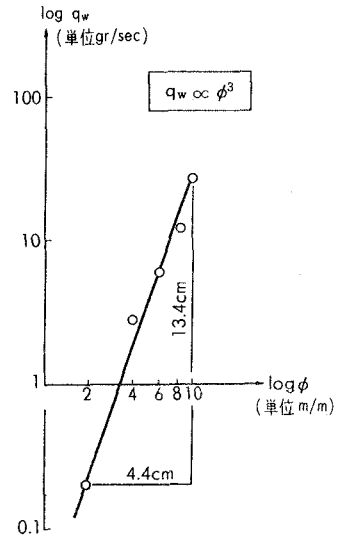


図-7 $\log g_w$ と $\log \phi$ の関係

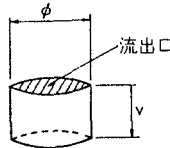


図-8 単位時間の流出体積

平均落下速度
 V (cm/sec)

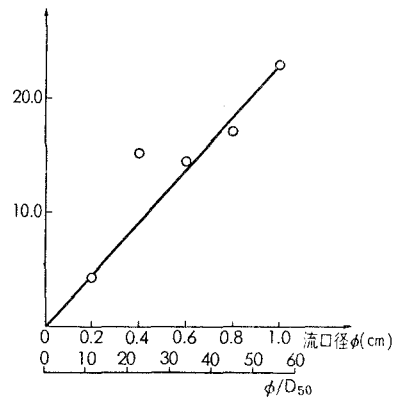


図-9 平均落下速度と流口径の関係

$$h-h_L = \left(0.41 \frac{\phi}{D_{50}}\right)^2 / 2g \quad \text{----- (8)}$$

となり、この式の変分をとると

$$\delta h - \delta h_L = \frac{1}{g} \left(\frac{0.41}{D_{50}} \right)^2 \phi \delta \phi \quad \text{----- (9)}$$

であり、従って ϕ が一定なら $\delta \phi = 0$ で

$$\delta h = \delta h_L \quad \text{----- (10)}$$

である。この式の意味は、粒子が δh 流下する間にそれと同じ量のエネルギーロス δh_L があるということである。即ち、完全流体の流下の場合には位置のエネルギーが運動エネルギーに転化されるが、粒状体の場合には、流動部分の位置のエネルギーがそのまま失われている。失われなくなる高さは(8)式の $h-h_L$ であり、これは換算自由落下高 h_0 に等しいものと見なされる。

$$h-h_L = h_0 \quad \text{----- (11)}$$

以上のことから、流下時の流動部分の一つの粒子に加わる拘束圧に関して推論を行なう。一つの粒子が図-12の δz 流下する間にそれが失なうマサツエネルギーは $\bar{f} \cdot \bar{u} (\delta z)$ である。(ここで、 $\bar{f}$ はその粒子にかかる平均拘束圧、 $\bar{u}$ は平均マサツ係数)これが位置のエネルギーの減少に等しいのであるから、

$$\bar{f} \cdot \bar{u} (\delta z) = G_s \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_{50}}{2} \right)^3 g (\delta z) \quad \text{----- (12)}$$

これから

$$\bar{f} = \pi G_s D_{50}^3 g / 6 \bar{u} \quad \text{----- (13)}$$

となり、一つの粒子が鉛直方向に流下している場合に、マサツ係数が一定なら流動部分の平均拘束圧は深さにかかわらず一定であるという結論になる。

次に、流出から静止に移行した場合の考察を行なう。(6)式から

$$-(h-h_L) = -h_0 = \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_1} \right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_2} \right)$$

となり、静止時では $v_1 = v_2 = 0$, $p_1 = 0$ であるから

$$p_2 = \gamma_2 h_0 = \text{const. } \gamma_2 \phi^2 \quad \text{----- (14)}$$

となる。静止時には流出口の板に作用する圧力は γh であるが、一度それを流下させてから静止させると、その板にかかる圧力は減少して $\gamma_2 h_0$ に等しくなり、流口径との関係は $p_2 \propto \phi^2$ となる。

4. あとがき —— 粒状体の流出というテーマに関しては、液体のそれとは性質の異なる面が多く、未知の部分が多い。以上の報告は、実験結果をそのまま記した部分とそれより演繹した部分よりなるが、後者については、今後の実験より検証していかねばならないものと思われる。

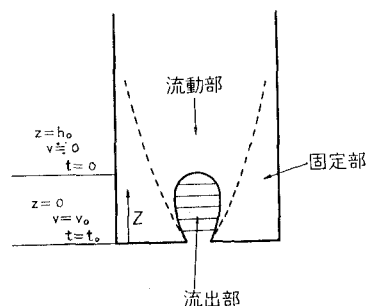


図-10 流出部分の模式図

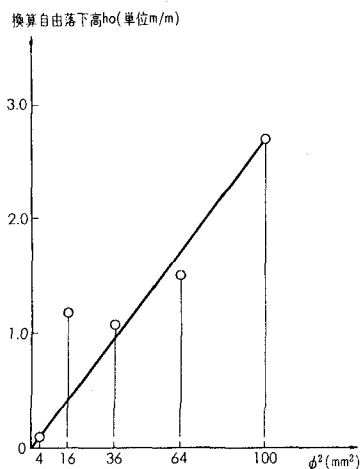


図-11 換算自由落下高と流口径の関係

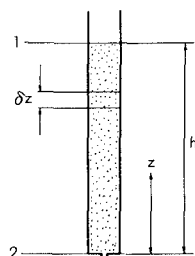


図-12 計算用模式図