

九州大学工学部 正員 山内豊聡
同 大学院 学生員 〇久楽勝行

1. まえがき 最近の土質力学の新しい分野として、粒状体の力学という分野が最上教授を始め、多くの方々によって研究されている。本研究では粒状体を箱につめ、その底の一部に流出口と設けた場合、粒状体がどのように流出するかという重力流の問題に対して、若干の考察を加えてみた。重力流は供給装置の容量、寸法、形状、材質によって異なり、又流出口の寸法、形状にも影響する。又粒状体の材質、比重、粒度、粒度分布、粒子形状、密度、含水比、粒子表面の滑らかさに起因する粒状体の摩擦角、粘着力によって重力流は異なるものと考えられる。そこで本研究では、粒状体を粒の集まりとして考え、等しい球の集まりが幾何学的にどのように並び得るか、又発生した空隙がどのように伝播するか、又空隙分布がどのように変化するかなどについて考察し、次にステールボール、砂、シラス、石炭粉の四種類の材料について実験を行い、材質によって異なるすべり面について、若干の考察を行った。

2. 粒の集まりとしての幾何学的考察 等しい球が図-1に示すような配列で箱に収まっているものと考え、下端の中央部に球2個分の流出口を設け、流出口より球が流出するものとする。この場合、次のような仮定を設けて、球がどのように並び得るかを考察した。i) 球の列んでいる下端と流出面と考え、流出面上の球が流出すると、上の球がこの流出面に達する。この状態を第1段階として球の配列を考える。次に又、上の球が流出面に達した時を第2段階と、順次継続的に重力流を考える。ii) 球の落下速度及び球が配列に用する時間等については考慮しない。iii) 球間の摩擦、流出口と球の摩擦等については考慮しない。以上の仮定に基づいて、球の配列を順次図示してみた。これらの図は紙面の都合により当日説明することにする。

(a) セン断面について 図-1のように接触していた球が、図-2に示すような球の集り方として、これがしだいに上部へ広がってゆく。そしてa, b, c, dのように1個の球の上に、1個の球が集まっているような層(A-A)ができ、この層に対して60°の角度を持ったセン断面(B-B), (C-C)ができる。それと同時に、流出口(H-G)に対しても60°の角度を持ったセン断面ができる。球の移動する領域(変動領域)が上部に進むに従い、(A-A)層上に並び球も多くなり、(A-A), (B-B), (C-C)層によって囲まれる三角形に含まれる球も多くなる。図-3に示すような変動領域が形成さ

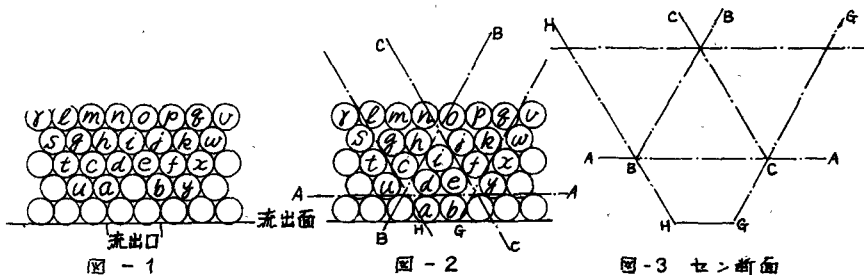


図-1

図-2

図-3 セン断面

れ、これが周期的にある相似形をもつて大きくなり、最上部まで達する。又球の動くことにより生ずる空隙に次の球が入り込むといふ現象が繰り返されて、一つのセリ断面なりと形成するものと考えられる。

(b) 不斉間隙比について

最上教授⁽¹⁾が提議された不斉間隙比⁽²⁾に着目して、変動領域における不斉間隙比の数とその偏差を計算し図示すると、図-4と得た（ここで $\bar{e} = 15\%$ としたのは、図-1の内隙比 $e = 14\%$ からである）。図より、崩壊即ち球の流出が

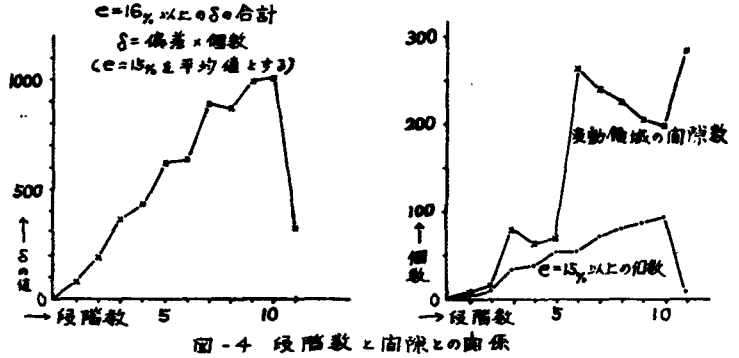


図-4 段階数と空隙との関係

増大するに伴って、不斉間隙比の数も増し、又その偏差も増大する。このことは、同教授のいう粒状体の崩壊の仕方と一致しているように思われる。但し変動領域が上部に達すると、下部の球の動きが最上部の動きに影響するため、粒状体内の空隙が最上部より外界に流出するため、不斉間隙比は減少し、その偏差も小さくなる。

(c) 間隙比変動の周期的変化について

流出口の幅でもって、流出はより上の部分と図-5に示すように分割して、その分割内の間隙率を各段階毎に求めてグラフにしたものが図-6である。BrownとRichards⁽²⁾が実験から得た間隙比変動の周期的変化と同じような変化を図-6は示している。これは崩壊が進むにつれて、各分割内において図-7の(a)の状態にあったものが、図-7の(b), (c), (d), (e)のような集り方とし、又(a)の状態になりたりするため、このような変動が起こるものと考えられる。又流出口の軸上の部分が、そのまわりの部分よりも変動の振幅が大きく、かつ数多い。

図-5

A-8	B-8	C-8
A-7	B-7	C-7
A-6	B-6	C-6
A-5	B-5	C-5
A-4	B-4	C-4
A-3	B-3	C-3
	B-2	
	B-1	

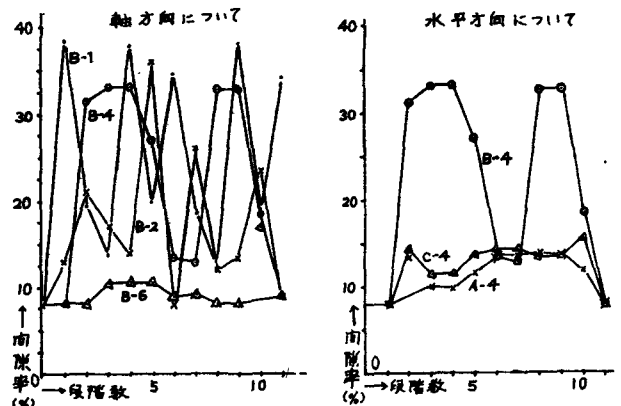
流出口

3. 実験及び結果と考察

80cm×40

cmのガラス板に5cm間隔で格子状に線と引いた2枚のガラスを14cmだけ空けて箱にセットした。底は2枚の板と両側に引張ることによって、上に乗せてあった流出口の板が落ち、そのために試料が流出し始めるような装置と作成し実験を行った。そして始めは3秒毎に、流出時間が長くなるに伴い、時間間隔を長くして、各5秒毎に合図して流出重量を測り、写真撮影を行った。試料はステールボールと砂とシラスと石灰粉の四種類を使い、

図-6 分割内の間隙率の変化



各試料について粒径及び粒径分布の
運・てくることを考慮に入れて、ス
テールボールは16mmのものを、砂、
シラス、石炭粉はフルイ分けとして、

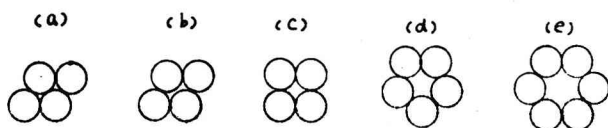


図-7 粒子の配列の仕方

0.84mm~2.00mmのものと使用した。そして上部より自然落下によつて試料を詰めこみ、高さ20cm毎に
着色した試料を1cm程度敷いて、落下状況が目にとまるようにした。実験結果は表-1に示した。

(a) 間隙比及び安息角 自然落下によつて試料を詰めこんだ場合、間隙比はシラスがもっとも大き
く、ステールボールがも

表-1 実験結果

材料名	粒径 (mm)	重量 (g)	体積 (cm ³)	比重 (g/cm ³)	間隙比 (%)	最終時 (sec)	最終角度 (°)	流速 (g/sec)	流速 (cm/sec)
ステールボール	16	20,260	4,132	4.903	7.74	0.58	4.93	31	k=35.4 k=4.57
砂	0.84-200	6,690	4,132	1.619	2.62	0.62	4.80	39	k=10.9 k=4.16
シラス	0.84-200	4,285	4,132	1.037	2.40	1.31	5.43	38	k=7.17 k=2.99
石炭粉	0.84-200	3,157	4,132	0.764	1.34	0.79	4.22	43	k=6.50 k=4.83

がもっとも大きく、ステールボールがもっとも小さい。

(b) 流出時間と流出量との関係 箱に詰めた試料が流出し終る迄の時間はシラスがもっとも長く、
石炭粉がもっとも短い。そして流出時間と流出量との関係は、それぞれの試料について、比例の関係
にある。

(c) 粒子運動及び流出漏斗の角度について Krapil²⁾によると貯槽内の粒子集団を形成する個々の
粒子の動きには、垂直に自身の重さとその上の粒子の荷重によつて
起きるような単にその位置の変る一次運動と、傾き、回転などの運
動が加わって、他の粒子の二次運動には本質的には影響を及ぼさな
く、粒子内の水平方向の距離をつめる混合作用の役をする二次運動
とがある。そして粒子運動を黑白二層の粒子を用いて撮影したもの
で運動を解析すると、写真-1で見られるように流出口の上に一次
運動部分と見なされる楕円の形ができる。この楕円の中に相似形を
した二次楕円があり、出口の近くでしまが急に崩れ、出口へ漏斗状
をなしているのが観察される。この点が二次運動の頂点である。そ
こで、各層の横しまが漏斗状をなした時の角度と時間とを表にした
ものが、表-2である。写真撮影から、一次運動楕円はステールボ
ールがもっとも大きく、シラスと砂はほぼ同じで、石炭粉はシラス
と砂に比べて一次運

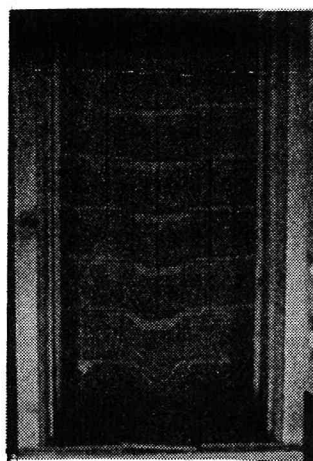


写真-1

表-2 流出漏斗の角度

動楕円はやや小さい
が、大きな差は認め
られない。それ故に
横しまが漏斗状にな
った時の角度は、ス
テールボールがもっ

		才1尺(10cm)			才2尺(20cm)			才3尺(30cm)			才4尺(40cm)			才5尺(50cm)		
		左	右	平均	左	右	平均	左	右	平均	左	右	平均	左	右	平均
スチールボール	角度(°)	63.0	63.0	63.0	70.0	69.0	69.5	75.0	74.0	74.5	78.0	77.0	77.5	79.0	79.0	79.0
	時間(sec)	12			30			60			90			120		
砂	角度(°)	74.5	73.5	74.0	76.5	77.5	77.0	79.5	79.5	79.5	79.5	80.0	79.8	80.5	82.0	81.3
	時間(sec)	6			18			33			60			75		
シラス	角度(°)	74.5	74.0	74.3	77.5	77.5	77.5	79.5	79.0	79.3	80.0	80.0	80.0	80.5	81.5	81.0
	時間(sec)	6			21			39			75			90		
石炭粉	角度(°)	76.0	75.0	75.5	80.0	78.5	79.3	81.0	80.0	80.5	81.5	81.5	81.5	81.5	82.0	81.8
	時間(sec)	6			15			27			42			75		

とも小さく、砂とシラスがほぼ同じで、石炭粉が一番大きい。層が高くなるほどこの角度は大きくなり、材料の相違による角度の変化も小さくなる。漏斗状になるまでの時間はスチールボールが最も長い、これはスチールボールの一次運動槽内の及ぶ範囲が大きいためだと考えられる。一次運動槽内の影響範囲のほぼ同程度の三種のうちでは、シラスが最も長く、石炭粉が最も短い。以上の事から粒子の丸いほど一次運動槽内の及ぶ範囲は広く、漏斗状になったときの角度は小さい。逆に粒子が偏平になるほど一次運動槽内は小さくなり角度も大きくなる。漏斗状になるに用いる時間は、一次運動槽内の及ぶ範囲が同程度であれば、表面がツルツルしているものほど早く、ザラザラでシジ状のものほど遅い。一次運動槽内が最上部に達してからつ流出漏斗の幅の増加は、シラスの表面形状によるものと考えられる。

4. 幾何学的考察と実験結果との対比 図-1, 2において、 i, d, e の球は重力の作用による位置の変わった球で、 g, h, c, j の球は回転又は傾きによって水平移動を起こしている球である。そして (B-B) (C-C) のセリ断面はこの相対的な動きの違いによって出来たセリ断面である。(H-H) (G-G) というセリ断面は、不動の球と回転又は傾きによって移動した球との動きの違いによってできたセリ断面である。このことから沈下曲線が水平な所は、粒子は位置の変化を、ある傾きをなしている所では、粒子は回転なり傾きを起こしていると考えてよからう。以上のことをスチールボールの沈下曲線を撮影した写真について考えてみると、流出口軸中央部には水平な沈下曲線が表われているので、この部分の粒子は垂直落下している粒子で、中央部両側では傾きをなしているので、この部分の粒子は回転や傾きを起こして落下している粒子と考えられる。そしてこのような粒子運動が上部へ伝播していく粒子が観察される。次に砂、シラス、石炭粉の沈下曲線とみると、最初から傾きをなしているので、最初から回転なり傾きを起こして沈下していると考えられる。そこで粒子が球形であるほど垂直落下する粒子が多くなる。逆に粒子が偏平になるほど垂直落下する粒子が少なく、回転したり傾きを起こす粒子が多くなり、個々の粒子の相対的運動の変化が早く起こる。それ故に流出漏斗も早く形成されその角度も急になり、幅も狭くなる。

5. 結び 粒の集まりとしての幾何学的考察においては最上教授のいわれる崩壊理論と似かよった結果が得られたこと、及び Brown と Richards の得た間隙比変動の周期的な変化とも似かよった結果が得られたことから、個々の粒子の動きを考える上において幾何学的考察も意味があるように思われる。又スチールボール、砂、シラス、石炭粉の四種類の粉粒体について実験を行ない、材質により異なる流出機構の違いを定性的ではあるが述べてきた。次に個々の粒子の回転及び傾きやそれが粒子の運動時のセリ断面角度と何らかの関係があると考えられるが、このことは今後検討したい。又 Krapil の考え方は必ずしも一致しない点が見出されるが、これについても検討したい。

付記 紙面の都合より、図を全部掲げることができなかつたので、当日説明させていただきたい。

参考文献

- 1) 最上武雄；粒状体の力学、「土と基礎」Vol. 14, No. 1, 1967
- 2) 粉粒体供給装置委員会編；粉粒体の貯槽と供給装置、日刊工業新聞社
- 3) 田中達夫；貯槽から粉粒体と円滑に流出させる方法について—最近の2, 3の研究紹介—「化学と工業」44, 44, 10月号