

ステンレス球・砂・礫の最密充填特性と粒子形状

名城大学理工学部 正会員 板橋一雄
学生員 岩田洋明・大嶽信二郎・岩間美樹

1. はじめに

筆者らは、礫材料の相対密度を求めることを最終目的として、壁効果を考慮した礫材料の最密状態、最疎状態に関する研究を実施してきた。その中で壁効果を考慮した均一球の菱面体充填シミュレーションや種々の材料の充填実験を行ってきた¹⁾。その結果として、間隙率に対する壁効果の程度やその表現方法に対する提案、得られる間隙率が試料の粒子形状によって影響されることなどを明らかにしてきた。今回は、15種類の粒径のステンレス球と12種類の粒径の砂礫試料(堆積環境の異なる5地点から採取)とを用いて最密充填実験を実施し、詳細な検討を行ったので、ここに報告する。

2. 容器形状係数と極限間隙率の提案

粒状体の充填密度には、充填容器の大きさの影響が指摘されており、その影響が壁効果と呼ばれている。この壁効果は、二つの作用に分けて考えられている²⁾。①容器壁に接する部分の間隙率が粒子同士の接触部分と異なること、②粒子に比べ容器が比較的小さい場合には、充填の仕方自身にも影響を及ぼすこと、と示されている。すなわち、壁効果は供試体の内部構造の相違までも考慮する効果と考えられるが、今回は供試体内部の間隙率の空間分布や変動には着目せず、供試体の大きさに伴う供試体全体での間隙率の変化を考えることにする。そして、従来からの提案と同様、容器(供試体)の大きさを評価できる単一の指標として容器形状係数 R_v を用いることとする。

$$R_v = \frac{A}{V} = \frac{2}{h} + \frac{4}{D} \quad \dots (1)$$

$$\lim_{h \rightarrow \infty} R_v = \lim_{h \rightarrow \infty} \left(\frac{2}{h} + \frac{4}{D} \right) = \frac{4}{D} \quad \dots (2)$$

ここで、 A : 供試体表面積、 V : 供試体体積、 h : 供試体高さ、 D : 容器内径である。 R_v の特徴として供試体が大きくなるほど値は小さく、供試体の小ささを表現している。土質実験では一般に供試体作成用のモールド内径が決められており、一定試料を投入した後、供試体高さを測定し、密度を計算することになっている。後述するように、供試体高さが大きくなるに伴って間隙率が一定の傾向で変化するとともに、 R_v は式(1)に従って減少することになる。したがって、その容器内径 D における代表的な間隙率を決める必要がある。そこで、 $h \rightarrow \infty$ とした時の R_v の極値を式(2)で求め、極限容器形状係数 $R_{v\infty}$ と定義した。この値は容器内径 D のみに依存し、今回 $D=6\text{cm}$ であるから、 $R_{v\infty}=0.667$ となる。後述するが、測定間隙率 p と容器形状係数 R_v の間には相関性の高い一次回帰式が成立するので、得られた一次式と $R_{v\infty}$ とから、対応する間隙率が得られることになる。この間隙率を、供試体の高さが無限大になった場合の間隙率、極限容器形状係数に対応する間隙率という意味で極限間隙率 p_∞ と定義した。この値のみがこの容器内径に対応する唯一の代表値と考えられる。

3. 粒子形状の評価方法

粒状体などの粒子形状の表現に関する研究は、堆積学の分野によって始められている³⁾。この堆積学の分野では、三軸径による表現がなされているが、これは粒子が収まる細長い直方体の箱を考え、その各辺の長さで表現する方法である。また、Wadell⁴⁾は粒子の表面積と同体積の球の表面積との比として、球形度 S を定義している。これらの表現方法は、礫のような粒径の大きなものについては可能であるが、細粒土に対しては困難であると思われる。吉村・小川⁵⁾は金属学の分野の形状表現方法を参考にし、平面図形の面積と外周長の比を考えている。円の場合を1となるように基準化し、凹凸係数 FU を

Dense Packing Properties and grain shape of stainless steel ball, sands and gravels.

Kazuo ITABASHI, Hiroaki IWATA, Shinjiro OTAKE, Haruki IWAMA (MEIJO University)

定義している。また、Schwarcz・Shane⁶⁾は、粒子の平面図形をフーリエ解析し、フーリエ係数の二乗和や絶対値の和、ある特定の次数などを形状パラメーターとして提案している。さらに、Mandelbortがフラクタル幾何学を提案して以来、海岸線の評価や岩盤などの亀裂の評価、粒子形状などの評価にフラクタル解析が実施され、種々の対象物のフラクタル次元FDが求められている。

このように種々の形状パラメーターが提案されているが、筆者らの研究において、変動係数 δ 、細長比EL、球形度S、フーリエ級数による残差一定次数Mi、凹凸係数FU、フラクタル次元FDの比較などを行った結果、Mi、FU、FDの三者が有効であることがわかってきた⁷⁾。そこで、紙幅の都合もあり、本論ではフラクタル次元FDと極限間隙率 p_∞ の関係のみを述べることにする。

4. 実験方法

実験材料は、ステンス球と5地点から採取した砂礫である。ステンス球は均一粒度であり、それらの粒径は1, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 29, 15, 87, 17, 46, 19, 0mmの計15種類とした。また、砂礫としては安倍川(河口から30Km地点)、静岡海岸(安倍川河口付近)、熊野灘(鬼ヶ城付近)、木曾川(河口から42Km地点)、藤岡町(花崗岩・まさ土)の5箇所から採取したもので、堆積環境が大きく異なっていることに対応して、粒子形状も大きく異なった材料である。採取試料をJISふるいでふるい分け、JISふるい一つ分である1.0~1.18, 1.4~1.7, 2.0~2.36, 2.8~3.35, 4.0~4.75, 5.6~6.7, 6.7~8.0, 8.0~9.5, 9.5~11.2, 11.2~13.2, 13.2~16.0, 16.0~19.0mmの計12種類とした。これらの砂礫試料では若干の粒度幅を持っているが、均一として考えることとした。また、今回使用した砂礫の土粒子密度を表-1に示してある。すべての土粒子密度は2.6g/cm³前後となっているが、藤岡(花崗岩・まさ土)はやや小さい値となっている。試料重量や供試体高さの僅かな変化に伴う間隙率の変化を捉えることを目的として次のような充填実験の手順をとった。充填容器は内径D=6cm、深さh=8cmのステンス製の円筒形容器であり、少量の試料を投入し落とし蓋をした容器を土壌振動器の上に置き、120回/分の振動数で150秒間の衝撃を与えた後、供試体高さをギス(最小読み0.01mm)で測定し、試料重量を測定した。なお、供試体高さは3箇所測定しその平均値をとった。この一連の操作を容器に試料が一杯になるまで繰り返した。その繰り返し回数はステンス球では約800回、砂では約400回となった。ただし、粒径の大きな礫試料では、1粒子ずつを投入し上記の操作を行った。

5. 実験結果と考察

図-1には均一ステンス球の6つの試験結果を間隙率と供試体高さの関係で図示してある。どの粒径の結果でも供試体高さの増加に伴って、間隙率は明確な増減を繰り返している。また、供試体高さの増加に伴って一つ一つの山と谷の値が徐々に低減していること、増減が不明確になっている場合のあることもわかる。ただし、d=14.29mmの場合のみは、供試体高さの低いところから山と谷が不明確になっている。これは、容器内径と粒子径との関係が菱面体充填になりづらい状況にあったことが要因の一つとして考えられる。

また、ステンス球の粒径ごとに見ると、粒径が大きいほど間隙率が大きくなっていることも特徴的な点である。これは、壁効果を考慮した菱面体充填のシミュレーションの結果¹⁾に対応しており、一定の容器では、粒径が小さくなるほど密に詰まることを示している。ただし、この図からは、供試

表-1 5試料の土粒子密度

粒径(mm)	土粒子密度(g/cm ³)				
	熊野灘砂・礫	静岡海岸砂・礫	安倍川砂・礫	木曾川砂・礫	藤岡まさ土
16.0~19.0	2.637	2.640	2.662	2.617	2.556
13.2~16.0	2.644	2.643	2.666	2.598	2.551
11.2~13.2	2.648	2.649	2.669	2.617	2.539
9.5~11.2	2.648	2.648	2.668	2.614	2.557
8.0~9.5	2.645	2.648	2.672	2.614	2.558
6.7~8.0	2.646	2.654	2.673	2.633	2.562
5.6~6.7	2.650	2.672	2.696	2.613	2.558
4.0~4.75	2.650	2.714	2.721	2.664	2.605
2.8~3.35	2.665	2.695	2.730	2.658	2.607
2.0~2.36	2.645	2.696	2.735	2.654	2.603
1.4~1.7	2.646	2.685	2.706	2.641	2.601
1.0~1.18	2.650	2.682	2.708	2.646	2.604

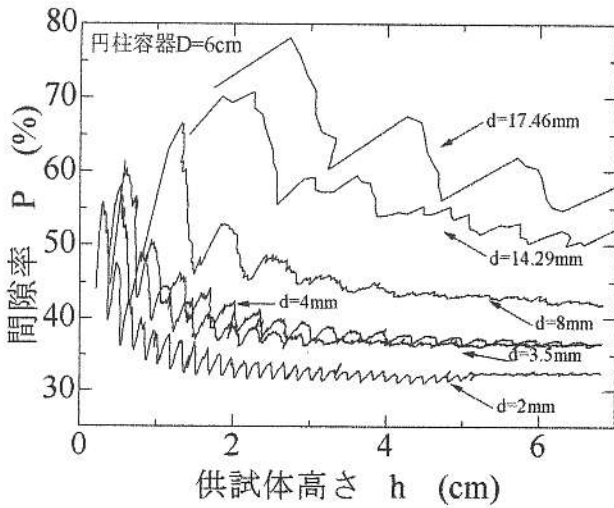


図-1 間隙率と供試体高さの関係

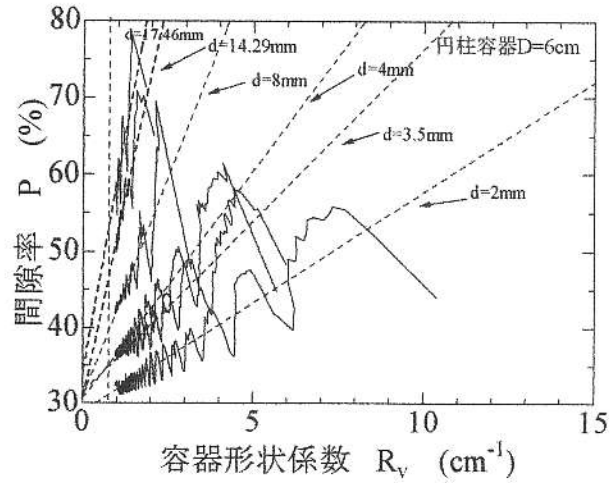


図-2 間隙率と容器形状係数の関係

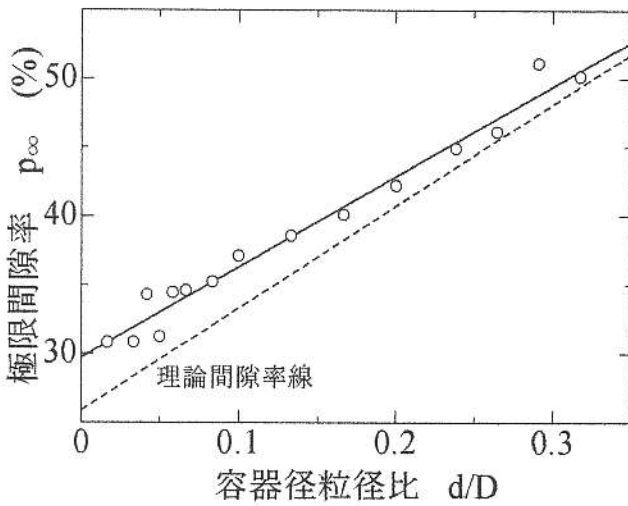


図-3 極限間隙率と容器径粒径比の関係

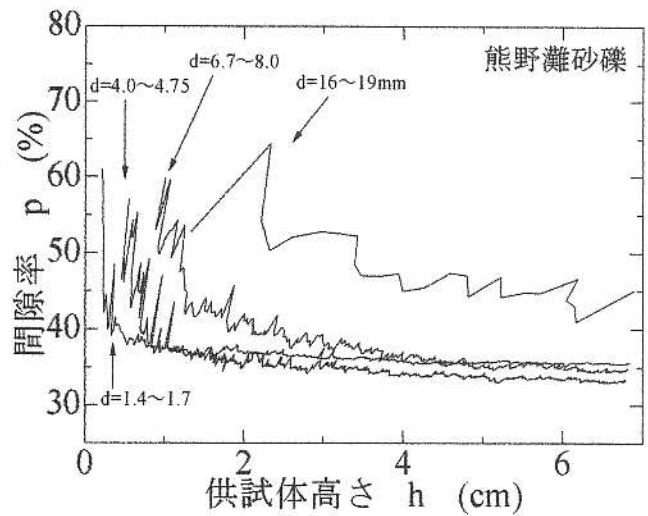


図-4 間隙率と供試体高さの関係

体高さが7cmになっても間隙率の減少が認められ、供試体高さの増加に伴ってどこまで間隙率が減少するのか、また、収束する間隙率の有無さえもわからない。そこで、図-2には、同じ試験結果を前述した容器形状係数 R_v によって再整理した結果を示してある。 R_v の減少に伴い間隙率が増減を繰り返しながら減少する様子がわかる。さらに特徴的なことは、どの粒径の $p \sim R_v$ 間も相関性の高い一次式で回帰できることであり、それぞれの回帰式が破線で示してあり、その勾配は粒径が大きくなるほど大きくなる傾向を示している。

前述したように R_v には極限值(最小値 $R_{v\infty}=0.667$)があるため、この一次回帰直線から、対応する間隙率を得ることができる。この間隙率を極限間隙率 p_∞ と定義したが、この値は容器径 $D=6\text{cm}$ のときの値であり、シミュレーション結果を考慮してより一般化するために、容器径粒径比 (d/D) と p_∞ との関係を図-3に示した。なお、図中には実験結果の回帰式と壁効果を考慮した菱面体充填の理論線が示してある。この図より、円筒形容器に対するステンレス球の極限間隙率は、壁効果を考慮した菱面体充填の理論線に近い関係を描いていることがわかる。ただし、僅かに上側の関係を示しており、完全には菱面体構造を形成していないことになる。図-4には、実際の砂礫粒子の例として、熊野灘砂礫の4種類の粒径の結果を供試体高さとの関係で示してある。ステンレス球の場合と比較すると不規則であるが、供試体高さの増加に伴って、間隙率は不規則な増減を繰り返し、低下する様子がわかる。しかし $d=4.0\sim 4.75$ 、 $6.7\sim 8.0\text{mm}$ では $1.4\sim 1.7\text{mm}$ よりも最終的に密に詰まってしまうというステンレス球の場合とは異なった結果になった。こ

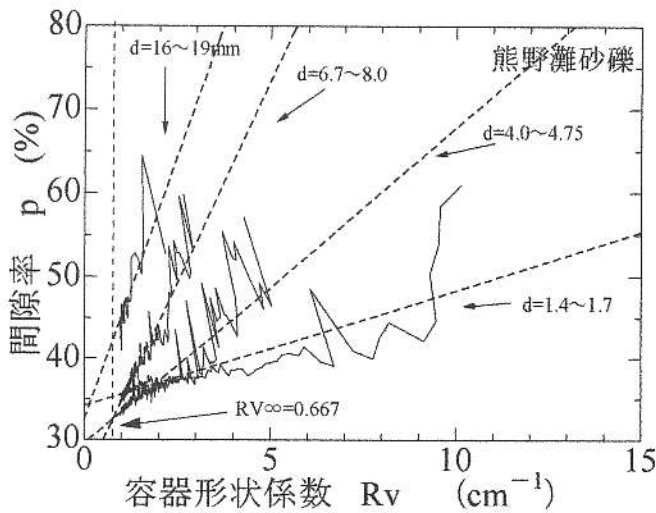


図-5 極限率と容器形状係数の関係

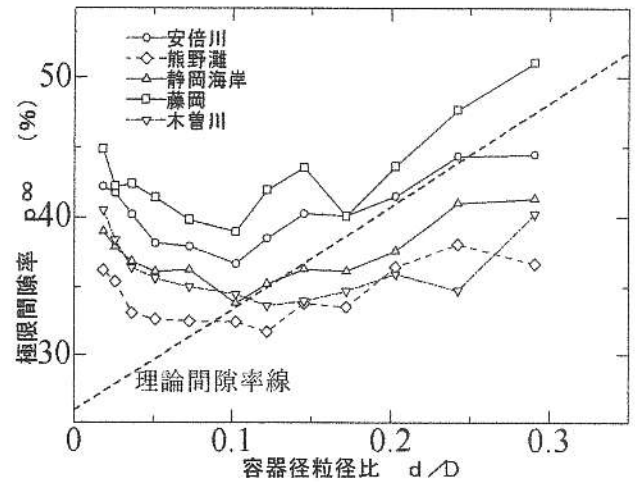


図-6 極限間隙率と容器径粒径比の関係

これらの相違の原因は、粒子形状や粒度幅のあることなどが考えられる。図-5には図-4に示した結果が R_v によって整理して示してある。ステンス球の場合と同様に一次の回帰式を破線で示してある。その回帰直線と $R_{v\infty}$ の交点から極限間隙率を求めた。得られた極限間隙率を容器径粒径比(d/D)との関係で描いて、図-6が得られた。この図より、ステンス球の場合と大きく異なる傾向のあることがわかる。すなわち、(d/D) >0.1 の範囲では(d/D)の増加に伴って p_{∞} が増加する傾向を示すが、試料によって大きく異なる値を示している。

さらに、(d/D) <0.1 の範囲では(d/D)の減少に伴って p_{∞} が増加する傾向を示し、ステンス球の場合とまったく逆の傾向を示している。図-7には粒子形状を表現する代表値としてフラクタル次元FDを取り上げ、 p_{∞} との関係を示している。なお、粒子形状はそれぞれ20粒子を測定したので、FDは平均値と±標準偏差として表してある。この図より、FDが増加すると p_{∞} が増加する明確な傾向のあることがわかった。

以上の結果を総合すると、次のようなことが明らかになった。

①供試体高さの増加に伴って間隙率は大きく変化するが、その変化は容器形状係数によって適切に表現できる。②ステンス球の場合には、ほぼ菱面体構造が形成されており、壁効果を考慮した理論間隙率線に近い関係が得られた。③砂礫材料の場合には、ステンス球の場合と比較して、大きく異なる結果が得られた。その相違が現れる原因として考えられることは、粒子形状の相違、粒子密度の相違、僅かな粒度の存在などが考えられる。

参考文献 1)板橋一雄他：粗粒材料の最大・最小間隙率に対する影響因子，第14回地盤工学シンポジウム論文集，地盤工学会中部支部 pp. 45-50, 2002. 2)井伊谷剛一：粉体工学ハンドブック(朝倉書店)，第I編 7，充填特性，pp. 93-105, 1967. 3)庄司力偉：堆積学，(朝倉書店)1971. 4)Wadell, H. A. :Volume, Shape and Roundness of Rock Particles, Jour. of Geol., Vol. 40, pp. 443-451, 1932. 5)吉村優治・小川正三：砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法，土木学会論文集 No. 463/III-22, pp. 95-103, 1993. 6)Schwarcz, H. P. and K. C. Shane:Measurement of Particle Shape by Fourier Analysis, Sedimentology, Vol. 13, pp. 213-231, 1969. 7)板橋一雄他：粒子形状に関する視覚印象図のフラクタル解析と形状パラメータの比較，地盤工学会論文報告集，Vol. 44, No. 1, pp. 143-156, 2004.

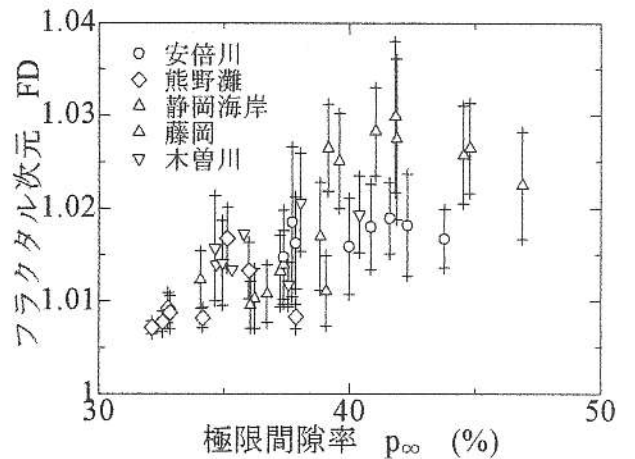


図-7 フラクタル次元FDと極限間隙率の関係