

# 壁効果を考慮した均一ステンレス球の最小間隙率

## ～理論と実験結果の比較～

名城大学理工学部 学生員○古谷祐樹

名城大学理工学部 正会員 板橋一雄

名城大学理工学部 正会員 小高猛司

名城大学大学院 学生員 水野裕介

**1. はじめに** 筆者らは、礫質材料の相対密度を求めることを最終目的として、礫質材料の最密・最疎状態ならびに粒子形状に関する基礎的研究を実施し、充填特性に対する壁効果や粒子形状などの影響を明らかにしてきた<sup>1),2)</sup>。今回は、容器の大きさに対する壁効果の影響を明らかにすることを目的として、3種類の異なる大きさの充填容器を用いて、均一ステンレス球の最密充填実験を行い、実験結果と理論値を比較し、考察し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** まず、図-1に示すような考え方で壁効果を考慮した理論式を導いた。その理論式より、筆者らは容器の大きさを評価できる単一の指標として容器形状係数  $R_v (=A/V=2/h+2/L_1+2/L_2)$  を提案している。ここでは  $A$  : 供試体表面積、 $V$  : 供試体体積、 $h$  : 供試体高さ、 $L_1$ 、 $L_2$  : 容器幅であり、 $R_v$  の特徴として供試体が大きくなるほど値は小さくなる。そして、 $L_1$ 、 $L_2$  は一定であるから、供試体高さ  $h$  が  $h \rightarrow \infty$  の時、 $R_v$  は極値を持ち  $R_{v\infty}=2/L_1+2/L_2$  となり、それに対応する間隙率を極限間隙率  $P_{\infty}$  と定義した。また、理論式より極限間隙率の式は、最終的に  $P_{\infty}=25.95+74.05(d/L_2)$  で表すことができ、極限間隙率は容器径粒径比( $d/L_2$ )のみで評価することができる。しかし、今回は充填容器として円柱体容器を使用するため、 $L_1$ 、 $L_2$  を容器内径  $D$  と置き換えることにする。

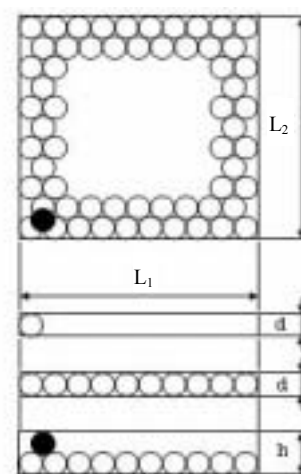


図-1 菱面体充填の模式図

**3. 試験方法** 充填容器は容器内径と容器高さの異なる小モールド( $D=6\text{cm}$ 、 $H=8\text{cm}$ )、中モールド( $D=8\text{cm}$ 、 $H=12\text{cm}$ )、大モールド( $D=10\text{cm}$ 、 $H=14\text{cm}$ )の3種類を用いた。また、試験で用いた試料は、小モールドでは、1、2、2.5、3、3.5、4、5、6、8、10、12、14.29、15.87、17.46、19.05mmの15粒径。中モールド、大モールドでは8～19.05mmまでの7粒径のステンレス球を用いた。また試験を行う上で、はじめに容器の一層目が完全に充填されるように試料を敷き詰め、その後、落とし蓋をし、蓋を含めた供試体高さをノギス(最終読み 0.01mm)で測定し、その重量を計測する。なお、供試体高さは、計測した3箇所の平均値とした。次に一粒子を投入したモールド容器を土壌振とう器によって150秒間で300回振動するように設定し、衝撃を与え、その供試体高さを測定した。この一連の作業を試料が容器に満杯になるように繰り返した。このような工程を行った最大の理由は、供試体の僅かな増加に対して間隙率がどのように挙動するのかを明確にするためである。

**4. 試験結果** 図-2には、間隙率と供試体高さの関係の一例( $d=12\text{mm}$ )を示した。この図より、どの容器の結果も供試体高さの増加に伴って、間隙率は増減を繰り返しながら減少していくことがわかる。容器ごとに比較すると、容器が小さくなるほど、より間隙率が高くなることがわかる。ただし、この図からは、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を読み取ることが困難である。そこで、図-3には同じ試験結果に対し、縦軸を間隙率のまま、横軸を容器形状係数  $R_v$  で整理したものを示した。この図より、図-2と同様に、間隙率は増減を繰り返しながら減少していくが、 $R_v$  で表したことで間隙率が直線的に収束していくことがわかる。ここでは、各々の間隙率に対し、一次の回帰分析を行い、図中にそれぞれ回帰直線を示した。この回帰直線は、容器が小さくなるほど、傾きが大きくなる傾向が見られた。また、前述したように、 $R_v$  は極限

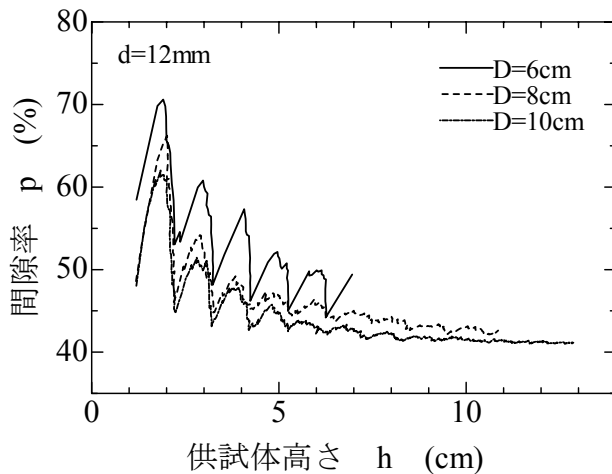


図-2 間隙率と供試体高さの関係

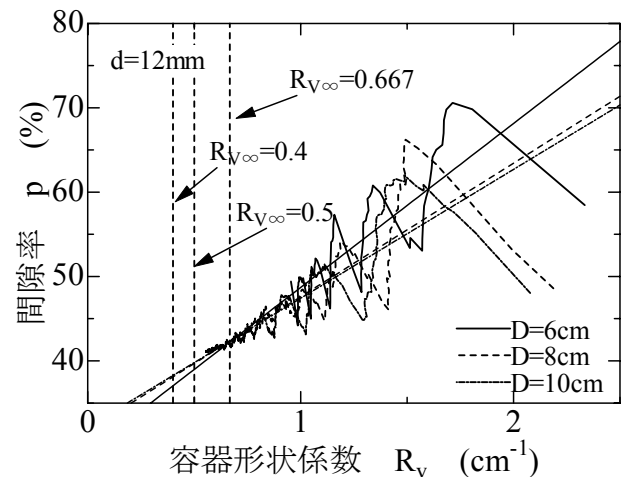


図-3 間隙率と容器形状係数の関係

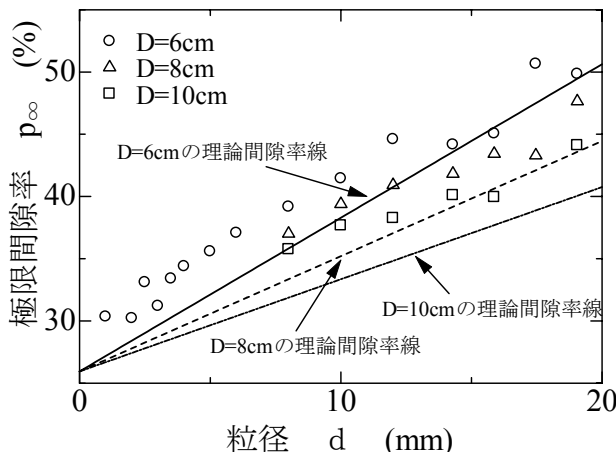


図-4 極限間隙率と粒径の関係

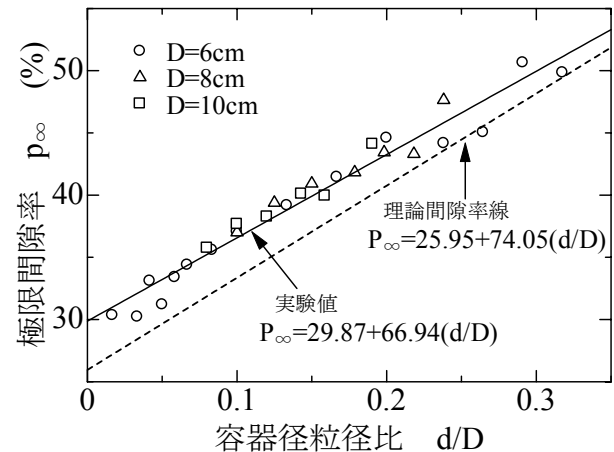


図-5 極限間隙率と容器径粒径比の関係

値( $=4/D$ )を持つため、内径  $D=6\text{cm}$  の容器では  $R_{V\infty}=0.667$ 、 $D=8\text{cm}$  では  $R_{V\infty}=0.500$ 、 $D=10\text{cm}$  では  $R_{V\infty}=0.400$  となり、この一次回帰直線から、対応する極限間隙率  $P_{\infty}$  を得ることができる。図-4 には粒径  $d$  と極限間隙率  $P_{\infty}$  の関係を示した。試験方法の通りに容器内径  $6\text{cm}$  の場合のみ  $15$  粒径について検討し、容器内径  $8\text{cm}$  と  $10\text{cm}$  については  $7$  粒径を検討したものを示してある。図の直線は、それぞれの容器における壁効果を考慮した菱面体充填の理論間隙率線である。試験結果では、理論間隙率線よりも上の位置にほぼ平行に並んでいるが、粒径が大きくなると少しばらつきが見られる。このようなばらつきが生じた要因として、粒径が容器に対して大きく、データ数が少ないためだと考えられる。また、容器内径が小さくなると、極限間隙率は大きくなることがわかった。そこで、図-5 には、前述の容器径粒径比  $d/L_2$  を容器幅  $L_2$  の代わりに代表値として容器内径  $D$  を用い、 $d/D$  で整理し、極限間隙率との関係を示した。それによって、各容器の理論間隙率線は、図に示すとおり、一本の直線に集約された。そして、実験値の一次回帰直線は理論間隙率線と比べると間隙率は大きくなるが、ほぼ平行に並ぶことがわかった。つまり、この容器径粒径比を用いることにより、容器の影響を受けずに、極限間隙率は容器径粒径比のみで評価することができた。

**5. まとめ** 今回の試験結果より、粒径が大きくなるほど間隙率は大きい値をとり、容器が小さいほど間隙率は大きくなることがわかった。また、容器径粒径比を用いることで、極限間隙率は容器の影響を受けずに評価することができた。そして、実験値と理論間隙率を比較すると、全体的に理論値より大きい値となったが、実験値の一次回帰直線と理論間隙率線は、ほぼ平行に並んだ。

**参考文献** 1)板橋一雄・松尾稔・内藤充則・神谷圭吾：均一な粗粒材料の粒子形状評価と充填特性、地盤工学会論文集、43(1)、pp.115-127、2003。 2)板橋一雄・松尾稔・内藤充則・森隆：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、地盤工学会論文集、44(1)、pp.143-156、2004。