

均一ステンレス球の充填実験と充填シミュレーションとの比較

名城大学理工学部 学生員○木原 稚登 学生員 牧 岳志
学生員 吉田 隆典 正会員 板橋 一雄

1. はじめに 著者らは、供試体に許される最大粒径の提案を最終目的として、ステンレス球の充填実験ならびにシミュレーションを実施し、粒状体を容器に詰めていくときの間隙比の変化傾向を明らかにしてきた¹⁾²⁾。今回、円柱容器と四角柱容器を用いたステンレス球の充填実験ならびにそれに近い条件のシミュレーションを行い、比較検討を行ったので、ここに報告する。

2. 形状係数と形状粒径比の提案 著者らは、供試体の大きさを表現する単一の指標（形状係数 R ）を提案している。形状係数： $R=A/V=2/h+4/D=2/h+4/L$ (cm^{-1}) (1)
ここに、 A は供試体表面積、 V は供試体体積である。さらに、 $D(\text{cm})$, $h(\text{cm})$ はそれぞれ円柱供試体の直径と高さ、 $L(\text{cm})$, $h(\text{cm})$ はそれぞれ四角柱供試体の一辺の長さとし高さを示す。

また、この係数を無次元化すること、詰める粒子の径 $d(\text{mm})$ との相対関係を示すことを目的として、形状粒径比 Rd を次式で定義している。形状粒径比： $Rd=R \times d$ (無次元) (2)

3. シミュレーション条件と均一ステンレス球の充填実験方法 シミュレーションでは、図-1の模式図に示すような菱面体充填を考えた。粒子配列の都合上、直径 5mm の粒子を容器底面 $5.0\text{cm} \times 4.83\text{cm}$ の、わずかに長方形の容器に、粒子を1個ずつ1

万個まで充填する場合を考えた。充填実験では、容器内径 5cm 、深さ 8.0cm の円柱容器と、一辺の長さ 5cm 、深さ 8.0cm の正方形底面を持つ四角柱容器に、直径 5mm の粒子を充填しており、シミュレーションに近い条件として比較を試みた。また、充填実験はランダム充填であり、最初に、一層目に最も密に入る粒子数とその重量ならびに高さを測定した。一層目以降の充填に関しては粒子数を規則正しく増加（3個あるいは7個）させ、粒子重量と占める高さを測定し、単位体積重量・間隙比を計算した。なお、充填に当たっては落とし蓋を載せた後、試験者による誤差が生じないように、フロー試験器を用いて上下方向に200回の衝撃を与え、密詰めとなるようにした。

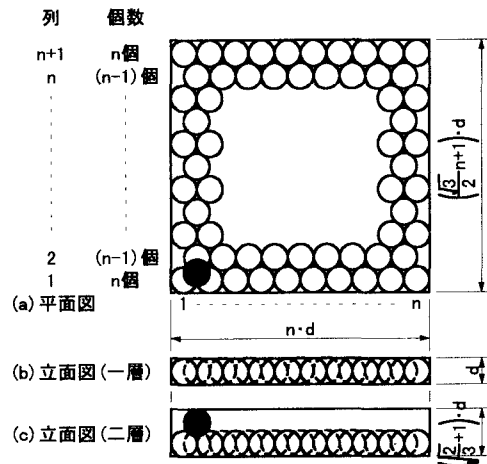


図-1 菱面体充填のシミュレーションの模式図

4. 充填シミュレーションと充填実験の結果の比較 図-2には、シミュレーション結果と二つの容器の充填実験結果を重ねて、供試体高さ～間隙比の関係で示してある。シミュレーション結果では、粒子数の増加に伴って間隙比が単調に減少するのではなく、大きな増減を繰り返しながら、一定値に収束する傾向が認められる。また、供試体高さが 7cm となっても、間隙比変化の幅が 0.1 程度あること、理論間隙比 $e_0 \approx 0.351$ にはほど遠いことなども認められる。そこで、ここでは、間隙比の大きくなる側を最疎間隙比、小さくなる側を最密間隙比と呼ぶことにする。

一方、充填実験結果では、供試体高さが 2.5cm 程度までは、シミュレーション結果に比べ間隙比変化の幅はかなり小さいが、シミュレーション結果と類似した変化傾向を示している。また、供試体高さが 2.5cm

を越えるあたりから、間隙比の減少傾向は認められるものの、シミュレーション結果のような明瞭な増減は認められなくなっている。さらに、供試体高さが 5.0cm を越えるあたりから、シミュレーション結果の最疎間隙比よりも大きな間隙比を示すようになっていく。これは、充填層数が増すにしたがって菱面体充填から大きく外れる充填構造になっていることを示唆している。また、円柱容器と四角柱容器の比較では、四角柱容器の場合の方が全体的に小さな間隙比を示しており、より菱面体充填に近いことを伺わせる。

図-3 には、図-2 に示したデータを形状係数によって示してある。粒子の増加に伴い形状係数は減少し、間隙比は規則的な増減を示しながら一定値に収束していく。形状係数との関係で整理すると、最密間隙比は直線関係を示す。図中には、最密間隙比の直線関係を仮定して回帰式を示した。この式に勾配が出ることは、供試体高さが大きくなると間隙比が減少することに対応しており、間隙比に対する壁効果の一つを表している。ここで、シミュレーション結果と四角柱容器の充填結果を比較してみる。粒子数の増加に伴い、四角柱容器の最密間隙比の減少傾向は小さくなり、シミュレーションとの差は徐々に広がっていく。容器形状が似ている四角柱容器でも、供試体高さの増加に伴い粒子

配列は徐々に乱れていくことを示している。また、充填初期段階の円柱容器の最密間隙比は、四角柱容器のものよりも大きな値を示す。しかし、粒子増加に伴いその差は徐々に減少していく。このことから、供試体高さが低い場合には、容器形状が得られる間隙比に影響するため注意が必要となる。ただし、供試体高さの増加に伴い容器形状の影響による間隙比の違いは無視できるものとなる。

次に、図-3 の式などの間隙比の収束点について考えてみた。式(1)の関係から、供試体高さの増加に伴い形状係数は $R=0.8$ の値に収束する。このとき、シミュレーションの間隙比は $e \approx 0.51$ 、充填実験の間隙比は $e \approx 0.66 \sim 0.67$ に収束する。菱面体充填の理論間隙比が $e_0 \approx 0.351$ なので、ここには容器底面の大きさが決められているために、無くなることのない壁効果がある。

5. まとめ 簡単な仮定の下での充填シミュレーションと充填実験結果を比較し、次のことが明らかになった。①充填実験では供試体高さが高くなるほど、理論的な菱面体充填の間隙比から離れること。②供試体高さが低い場合には、得られる間隙比に容器形状が影響すること。

参考文献 1) 宮地純朗, 牧岳志, 安藤中雄, 板橋一雄: 円筒容器へのステンレス球の最密充填に対する容器高さとの影響, 平成9年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp513-514, 1998. 2) 牧岳志, 大脇忠雄, 宮地純朗, 板橋一雄: 均一球の充填に対する壁効果の影響に関するシミュレーション, 平成9年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp515-516, 1998.

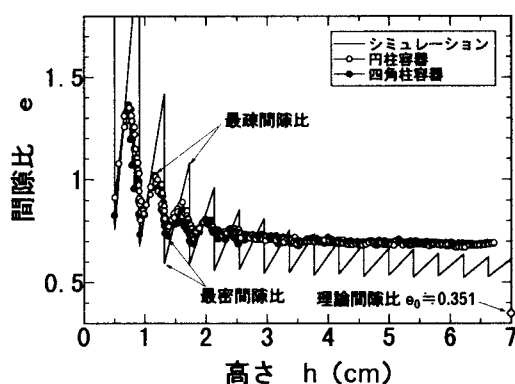


図-2 供試体高さ～間隙比関係

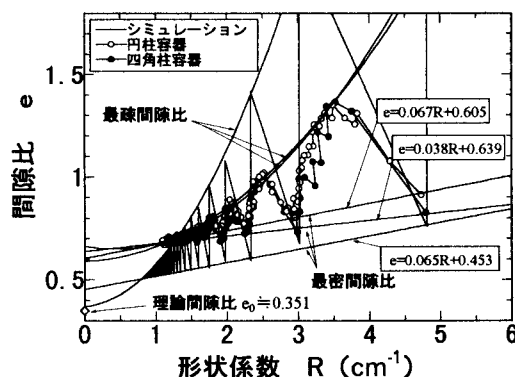


図-3 形状係数～間隙比関係