

菱面体充填シミュレーションに基づく壁効果の整理法の提案

名城大学 理工学部 学生員 ○森 隆 学生員 佐藤悠介
学生員 神谷圭吾 正会員 板橋一雄

1. はじめに

土の密度や間隙比は、その工学的性質と密接な関係があり、特にせん断強度をはじめとする種々の力学的特性を支配する重要な要素である。また、ある容器への粒子の充填状態は、容器の形状と大きさ、粒子の形状特性と表面特性ならびに粒度特性に影響されるが、それらの要因が複雑に絡み合って充填構造が形成される。そこで、本研究では、均一球の規則的充填という簡単な仮定の下でのシミュレーションを実施し、間隙率変化に対する壁効果（容器壁面の影響）を調査したので、ここに報告する。

2. 均一粒状体の最密充填挙動とその整理方法

著者らは、均一粒状体の充填実験を継続的に行ってきており、間隙率と供試体高さの間に特徴的な関係のあることを示してきた¹⁾。また、充填挙動を整理する考え方として、容器の大きさ(高さ h , 一辺 L)を評価できる単一の指標(容器形状係数 $R_v = A/V = 2/h + 4/L (\text{cm}^{-1})$)を定義し、間隙率 n と R_v の間には平均的な直線関係 ($n = a + b \cdot R_v$) の存在することを明らかにしてきた²⁾。さらに、容器高さ h が無限大となった場合の容器形状係数の極限值($R_{\infty} = 4/L (\text{cm}^{-1})$)と回帰直線の両者から、一辺 L の容器への充填特性の代表値となる極限間隙率 n_{∞} の提案を行ってきた²⁾。

3. 菱面体充填シミュレーションの定義

均一球を仮定し、比較的簡単な条件下でのシミュレーションを行なった。均一球の基本的な充填構造の要素には、最も緩い立方体充填と最も密な菱面体充填があるが、今回は、最も密に詰まる菱面体充填でのシミュレーションを考えた。まず、ある一定の容器内でこれらの単純な充填構造の繰り返しを考えるためには、容器形状に制限が設けられなければならない。なぜなら、任意の大きさの容器では、壁面の影響のために充填構造が大きく乱されるからである。そこでここでは、容器底面に直径 d の粒子が N 個 $\times$ $(N+1)$ 個ならびに長方形の容器(図-1)を考えた。この容器に、1 個ずつ充填し、その都度供試体高さを算出し間隙率および容器形状係数を求めるシミュレーションを行った。なお、最終粒子個数は 5 万個まで実施した。上の粒子配列の充填を考え、定量化を行った。

4. シミュレーション結果

容器の一辺の大きさが $L \approx 5\text{cm}$ の場合 ($4.36 \sim 5.0\text{cm}$) と $L \approx 6\text{cm}$ の場合 ($5.25 \sim 6.0\text{cm}$) に、大きさの異なる 8 種類の粒子 ($d=1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10\text{mm}$) を充填するシミュレーションを行った。

図-2 には、上記のシミュレーション結果のうち一辺 $L \approx 5\text{cm}$ 、粒径 $d=2, 5, 8\text{mm}$ のものを間隙率 n と容器形状係数 R_v の関係で示す。前述したように容器形状係数は容器の小ささを表すので、供試体高さが高くなると、小さな値を示すこととなり、図上のプロットは右から左へ移動することとなる。図より、容器形状係数の減少に伴い、間隙率は規則的な増減を繰り返しながら一定値に収束していく傾向がある。しかし、容器の大きさがほぼ同じでも、粒子径が小さいほど、間隙率の変化幅および収束する値も小さくなっている。つまり、最密間隙率は同一の値を示さないことから、粒子径が小さいほど、密に詰まりやすいことが明らかに読み取

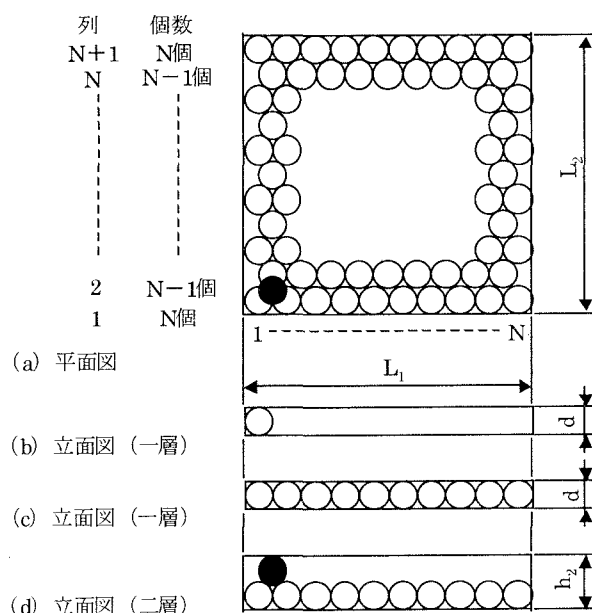


図-1 菱面体充填シミュレーションの模式図

れる。収束する間隙率の値を見ると、菱面体充填の理論間隙率 $n_0=25.95\%$ までは詰まっていない。その原因として、菱面体の充填構造により、容器壁付近に粒子が入らない空間ができているためであると考えられる。

図-3 には、最疎・最密間隙率直線の勾配 b と粒径 d の関係を示す。最疎・最密間隙率直線は図-2 に破線で示してあり、最疎間隙率ならびに最密間隙率を一次式によって表現したものである。図より、2種類の容器 ($L=5,6\text{cm}$) のシミュレーション結果から得られる直線勾配は粒径ごとにほぼ同じ値を示した。また、その勾配は、最疎・最密間隙率直線ともに粒子径が大きくなるに伴い増加している。しかし、最密間隙率直線の増加量に比べ最疎間隙率直線の増加量は非常に大きい。この結果により、前述したような、間隙率の変化幅は粒径が小さくなるほど減少することが明確に読み取れる。

図-4 には、極限間隙率 n_∞ と粒径 d の関係を示す。図より、極限間隙率は、粒径が大きくなるにつれその値は菱面体構造の理論間隙率より徐々に大きくなる。これは、粒径が大きくなるにつれ壁効果（容器壁面の影響）を大きく受けるために起こる結果であると考えられる。また、2種類の容器での比較をしてみると、 $L=5\text{cm}$ の極限間隙率は、どの粒径においてもその値は $L=6\text{cm}$ より大きくなっている。このように、容器の大きさにより、極限間隙率の示す値が異なる。

そこで、図-5 には、容器の大きさを考慮するため、粒径を容器一辺の長さで割った値 (d/L_2) と極限間隙率 n_∞ の関係を示す。図より、図-4 とは異なり、2種類の容器の大きさの結果が直線上に一定の傾向を示しプロットされていることがわかる。そこで、全データを回帰分析した結果、図に示した相関性の高い直線が得られた。この直線式より、ほぼ理論間隙率の値から d/L_2 が大きくなるにつれ、極限間隙率は徐々に大きな値を示すことが明確に現れた。

5. まとめ

菱面体充填シミュレーションを実施した結果、容器形状係数で結果を整理することにより、間隙率の変化に特徴的な傾向があることが明確となった。また、極限間隙率を d/L_2 で整理した結果、均一球において、粒径が大きく、容器が小さくなるほど壁効果が大きく、その間隙率は菱面体構造の理論間隙率よりも徐々に大きな値を示すことが明確になり、この整理方法に大きな意味合いがあることを示した。

参考文献 1) 牧岳志他:均一粒状体の間隙比に対する壁効果

の影響～その定式化と数値シミュレーション～,第10回地盤工学シンポジウム論文集,地盤工学会中部支部,pp.1-6,1998. 2) 神谷圭吾他:容器に充填した粗粒な均一粒状体の間隙率変化の表現法～許容最大粒径を決定するための基礎的研究～,礫質土の力学特性に関するシンポジウム論文集,地盤工学会,pp.191-198,2001.

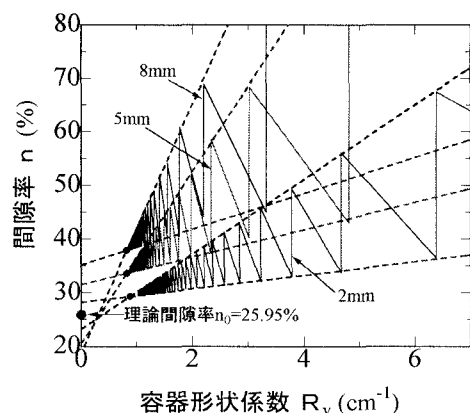


図-2 間隙率 n と容器形状係数 R_v の関係

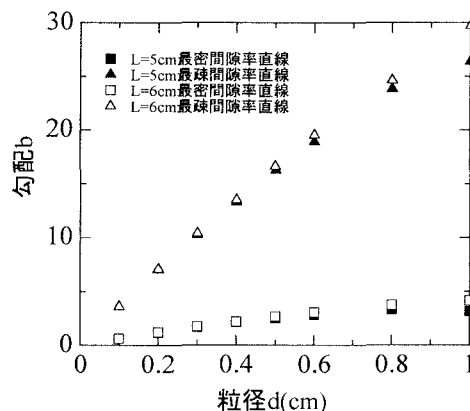


図-3 勾配 b と粒径 d の関係

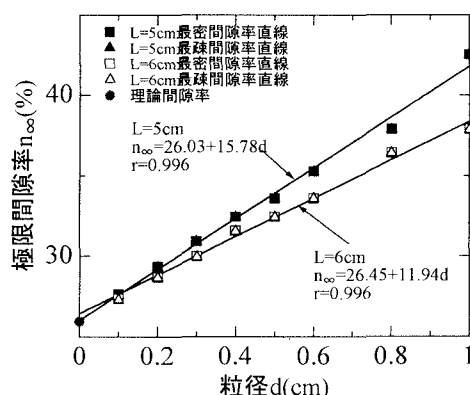


図-4 極限間隙率 n_∞ と粒径 d の関係

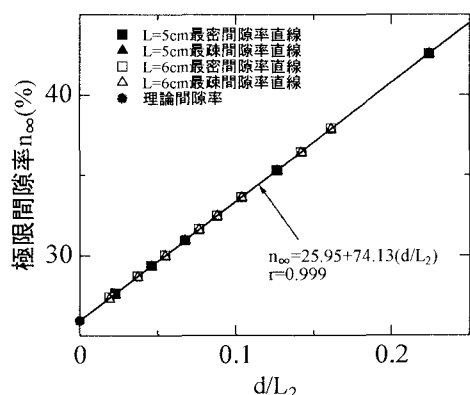


図-5 極限間隙率 n_∞ と d/L_2 の関係