

円柱容器と四角柱容器を用いた均一ステンレス球の充填実験の比較

名城大学理工学部 学生員○佐藤悠介 学生員 森 隆
学生員 内藤充則 正会員 板橋一雄

1. はじめに 著者らの研究グループは、均一ステンレス球や粒度幅の狭い粗粒土質材料を用いて、最も密に詰まる状態に関する特徴を明らかにすることを目的として、ランダム充填実験や数値シミュレーションを行ってきた。現在のところ、最密間隙率に対しては、容器壁の影響（壁効果）や充填材料の粒子形状の影響が現われることがわかってきている¹⁾。ここでは、容器の形状のみに注目し、詳細な分析を試みた。すなわち、形状の異なる2種類の容器と種々の粒径の均一ステンレス球を用いてランダム充填実験を実施し、これらの結果と菱面体充填シミュレーション結果との比較を行ったので、報告する。

2. 容器形状係数と極限間隙率の提案 著者らは、種々の条件で充填実験を実施してきているが、その結果の整理方法として、容器形状係数と極限間隙率を提案してきている¹⁾。今まで提案してきたことを簡単にまとめると次のようになる。①容器の全表面積 A と体積 V の比として、容器形状係数 $R_v = A/V (\text{cm}^{-1})$ を定義した。②間隙率 n と R_v との間には特徴的な関係が現われ、その平均的な関係は直線関係 ($n = a + bR_v$) となる。③この直線より、容器高さが無限大となった場合の間隙率が代表値として得られ、極限間隙率 n_∞ と定義した。

3. 充填実験方法 充填容器にはステンレス製の角柱容器（一辺 15cm、深さ 8cm）と円柱容器（内径 5cm、深さ 8cm）の2種類を用いた。また、充填材料は6種類の粒径 ($d=2, 3, 4, 5, 6, 8\text{mm}$) の均一ステンレス球を用い、ランダム充填実験を行った。まず試料が一層目に完全に充填される重量ならびに高さを測定し間隙率を計算した。その後は、数グラムの試料を増やし、容器をフロー試験機に載せ、50回（1回/秒）の衝撃を与えた。さらに、落とし蓋をのせ150回（1回/秒）の衝撃を加えた。これによって、最も密な状態が形成されることが確認してある。そして、供試体高さを測定しその都度間隙率を計算した。この操作を繰返し、供試体高さが約8cmとなる間に約400点のデータを取った。これにより、詳細な最密間隙率の変化を明らかにすることができる。

4. 充填実験結果 図-1には、3種類の粒径のステンレス球を2つの容器に詰めた場合の結果を間隙率と供試体高さとの関係で示している。どの場合でも菱面体充填の理論間隙率 25.95%よりかなり大きな値となっていることが注目に値する。また、角柱容器では、菱面体シミュレーションの結果と類似しており、供試体高さが高くなるにつれて規則正しい増減を示しながら徐々に減少している。一方、円柱容器では供試体高さがある程度になるまでは角柱容器と同様な規則正しい増減を繰り返しながら間隙率の減少を示しているが、それ以降の供試体高さでは測定誤差と考えられる微小な変動を示すのみとなっている。これは、角柱容器では供試体高さが高くなっても菱面体充填構造が形成され易いが、円柱容器では容器側壁の影響が供試体高さの低いうちから現われ菱面体充填構造から乖離することが最大の原因として考えられる。図-2には図-1に示したデータを容器形状係数との関係で示してある。この表現方法であれば、どの場合の間隙率も二本の直線

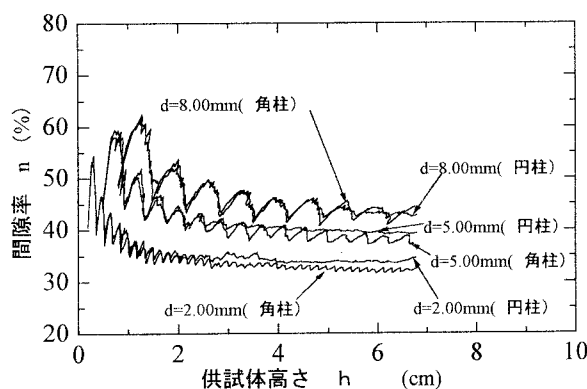


図-1 間隙率 n と供試体高さ h の関係

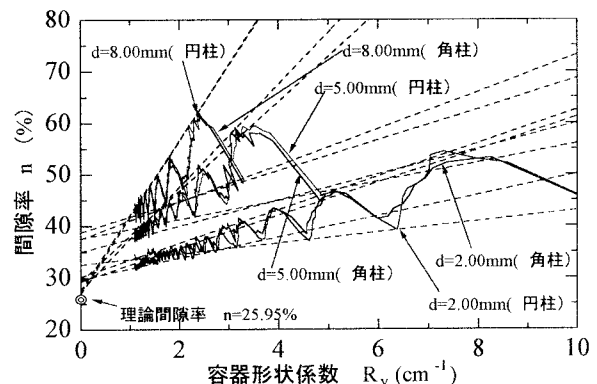


図-2 間隙率 n と容器形状係数 R_v の関係

の間を、増減を繰返しながら減少しており、容器形状係数による整理方法の有効性が感じられる。ここでは、この二本の直線を最疎間隙率直線と最密間隙率直線と名付け、これらの直線の勾配やそこから得られる極限間隙率の特徴を探ってみた。

5. 最疎・最密間隙率直線の勾配と極限間隙率の特徴

二本の直線の勾配 b を粒径との関係で図-3 に描いた。粒径の増加とともに勾配 b が増加する関係を示し、容器形状の相違の影響は少ない。しかし、菱面体充填シミュレーション結果²⁾と比較すると、最密側はほぼ同様であるが、最疎側の勾配はかなり小さな値となっている。これは、最疎側の間隙率が実験によって求めづらいことが原因と考えられる。

図-4 には、最密・最疎間隙率直線と容器形状係数の極限值 ($h \rightarrow \infty$ の時の R_v) から求めた極限間隙率 n_∞ が粒径 d との関係で描いてある。大きなばらつきが認められるが、粒径 d の増加に伴って極限間隙率が増加する傾向が明確に現われている。また、菱面体充填シミュレーションの結果では、容器の大きさ L が異なると、異なる関係を描いている²⁾。充填実験結果でもわずかに円柱の方が大きな値を取る場合が多くなっているが、その相違は明確ではない。実験上の誤差であるかどうかも含め今後の検討課題としたい。

菱面体充填シミュレーションでは、極限間隙率と粒径・容器径比 ($r_{pv} = d/L$) の関係が容器の大きさに無関係になることがわかっており、次式 ($n_\infty = 25.95 + 74.13 \cdot r_{pv}$) が得られている²⁾。そこで、充填実験結果も粒径・容器径比 ($r_{pv} = d/L$ あるいは d/D) によって再整理し、図-5 を描いた。容器の形状に関わらず全データを一組として回帰分析をした結果、次式を得た。 $n_\infty = 30.13 + 63.61 \cdot r_{pv}$ (相関係数 0.891)

6. まとめ 本研究で得られた結果を要約すると以下になる。①最密・最疎間隙率直線の勾配は粒径に依存する。②極限間隙率も粒径に依存するが、容器の相違による違いは明確ではないので、今後の検討課題である。③極限間隙率は菱面体充填の理論間隙率 25.95% よりもかなり大きい。④極限間隙率を粒径・容器比で整理すると、容器形状の相違が現われにくくなる。

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，地盤工学会論文報告集，第43巻第1号，2003。 2)森隆・佐藤悠介・神谷圭吾・板橋一雄：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，平成14年度研究発表会講演概要集，土木学会中部支部，2003(投稿中)。

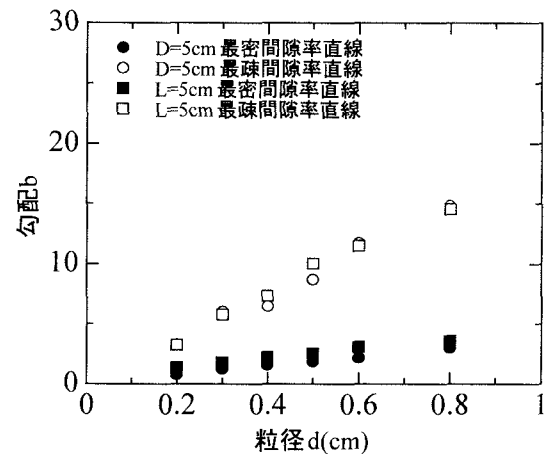


図-3 勾配 b と粒径 d の関係

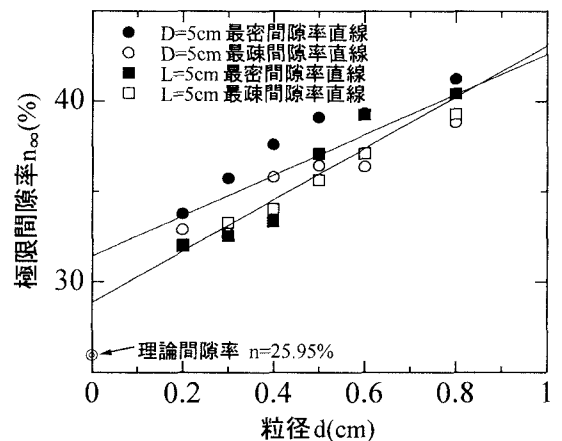


図-4 極限間隙率 n_∞ と粒径 d の関係

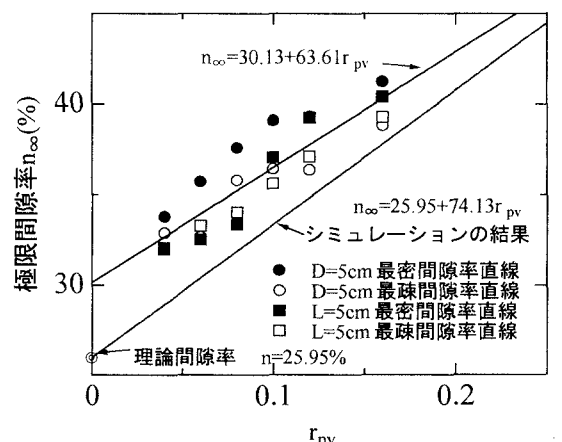


図-5 極限間隙率 n_∞ と r_{pv} の関係