

円筒形容器によるシミュレーションと充填実験の比較

名城大学理工学部

学生員○姫野 圭

学生員 松井 晋一

学生員 立松 篤明

学生員 木村 哲晃

正会員 板橋 一雄

1. はじめに 本研究室では、供試体の大きさの変化に伴う均一粒状体の間隙率の変化傾向を明らかにすることを目的とし、四角柱容器を用いて、簡単な仮定の下での定式化とシミュレーション¹⁾を行ってきた。しかし一面せん断試験などの土質試験において用いられるのは円筒形容器である。そこで今回は、円筒形容器を用い、簡単な仮定の下での均一粒状体による充填シミュレーションを行うとともに、均一ステンレス球を用いたランダム充填実験を行ったので、比較・検討し、ここに報告する。

2. 形状係数の提案²⁾ 容器形状（高さ、内径など）や粒子径の異なる材料の充填において間隙率の変化傾向は、一般に容器高さや容器内径との関係で整理されるが、一定の変化傾向は読み取れるものの、その表現方法は簡単ではない。そこで、容器の大きさを評価できるような単一の指標を考えた。容器に粒子を詰めていくと、容器と粒子との境界面により、粒子の詰まり方が乱される。そこで、容器形状を表現する一つの係数を形状係数として、以下のように定義した。

形状係数： $R(\text{cm}^{-1})=A/V=2/h+4/D$ ここに、 $D(\text{cm})$ は容器内径、 $h(\text{cm})$ は高さ
この定義から、形状係数 $R(\text{cm}^{-1})$ は小さい容器ほど大きな値となり、大きな容器ほど小さな値をとることとなる。つまり、容器の小ささを表す係数と考えられる。

3. 円筒形容器への充填シミュレーションの定義 粒状体の充填特性は、個々の粒子の形状特性、表面特性ならびに粒度特性などによって影響され、複雑な挙動を示すことが予想される。そこで、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考える。まず、円形底面の直径部分に奇数個の粒子が並ぶ円筒形容器の場合を考える。この場合には、容器底面の第一層の配列を正方配列あるいは単斜方配列としても、容器周辺に空間ができるため、立方体充填や菱面体充填にはならない。そこで、外周部にならぶ粒子は容器中心軸から同心円状に等間隔にならぶこと、また、その上部には、同じ同心円状の最も安定する高さに位置することを仮定した(図-1)。本来なら、上位の粒子はわずかに異なる同心円状より低い位置に落ちるので、この仮定ではわずかに大きい側の間隙率を計算することになるが、簡単に表現するために第一次近似としてこの仮定を設けた。なお、二層目の粒子は最も低い位置 C' から順次 B' 、 A' に充填した。

4. 充填実験方法 内径5.0cm、高さ8.0cmの円筒形容器と、 $d=5\text{mm}$ の均一ステンレス球を用いてランダム充填実験を行った。最初に、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。(一層に詰まる粒子個数 80 個) その後の充填では、一定試料重量ずつ増加させて、試料重量と高さを測定した。なお、粒子増加個数を 3 個(増加重量を1.563g)とした。充填に当たっては、容器に落とし蓋をせずフロー試験機に載せ、衝撃を50回(1回/秒)与えた。その後、落とし蓋を載せ150回の衝撃を与え、最密な状態を作りだしている。

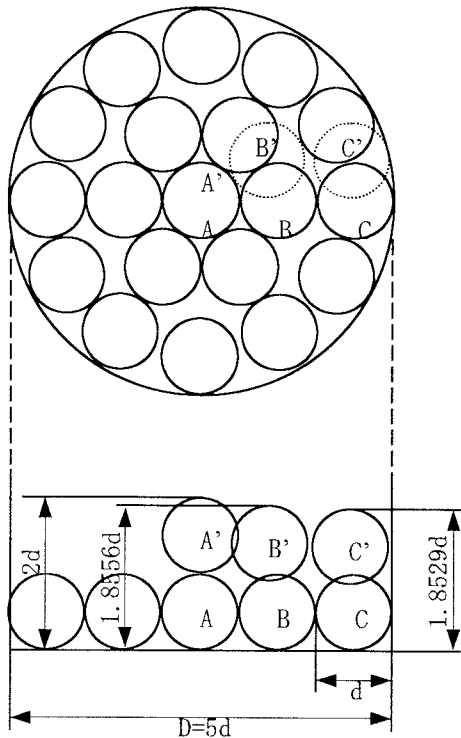


図-1 円筒形容器充填シミュレーション模式図
(底面直径部分に5粒子ならぶ場合)

5. シミュレーション結果と充填実験結果の比較 今回行った充填実験に近い条件でのシミュレーションは、先に説明した条件から、直径部分に 9 個の粒子が並ぶ場合 ($D=5.004\text{cm}$, $d=0.556\text{cm}$) となった。また、その他のシミュレーション結果と比較するために、粒子径の異なる場合も計算した ($D=4.997\text{cm}$, $d=0.263\text{cm}$)。シミュレーションでは、粒子を一万個まで充填し、その結果を間隙率～供試体高さの関係で図-2 に示した。なお、図中には、充填実験結果も併記してある。シミュレーション結果を比較すると、粒子径の小さい方が間隙率は小さく、変化の幅も小さいことから密に詰まっていることが読み取れる。一方、充填実験では、充填が進むにつれて間隙率が周期的な変化をしながら減少し、供試体高さ 2.5cm を越えた辺りからは一定値に収束していく傾向にあるが、シミュレーションでは、周期的な大きな増減を繰り返しており、充填実験に見られるような収束は認められない。ただし、両者の間隙率が最も密になる点（最密間隙率）の関係は、ほぼ類似した変化傾向を示している。

図-3 には前の結果を、間隙率～形状係数の関係で示してある。前述したように、形状係数は容器の小ささを表すため、供試体高さが高くなるにつれて形状係数は小さくなる。つまり図上において、シミュレーションと充填実験の結果は右から左へとプロットされることになる。両者の結果を見ると、間隙率の変化は、実験の方で多少のばらつきは見られるものの、規則的な増減を繰り返しながら、ある一定値に収束する傾向にある。この両者のそれぞれの間隙率が最も疎になる点（最疎間隙率）と最密間隙率は一次式の直線で近似でき、その勾配はシミュレーションで比較すると、粒子径が小さい方が小さく現れている。このことは、容器の高さが大きくなると間隙率が減少することに対応しており間隙率に対する容器形状の効果（壁効果）を表している。また、充填実験の最疎・最密間隙率直線を見ると勾配の傾向は、シミュレーションの粒子径に近い条件 ($D=5.004\text{cm}$, $d=0.556\text{cm}$) と平行な関係にあることが見られる。このことにより、形状係数での整理方法に意味合いが感じられる。

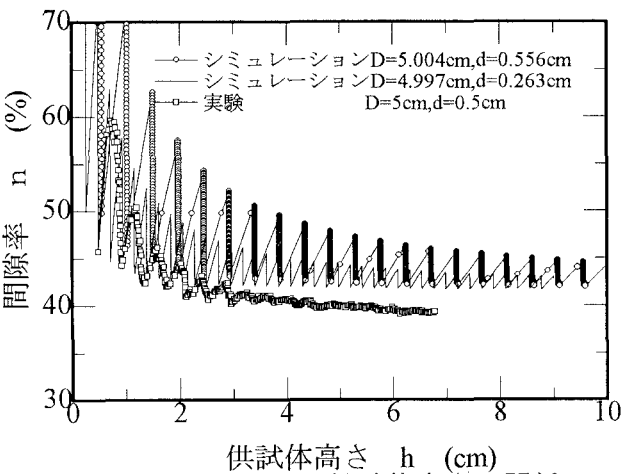


図-2 間隙率～供試体高さの関係

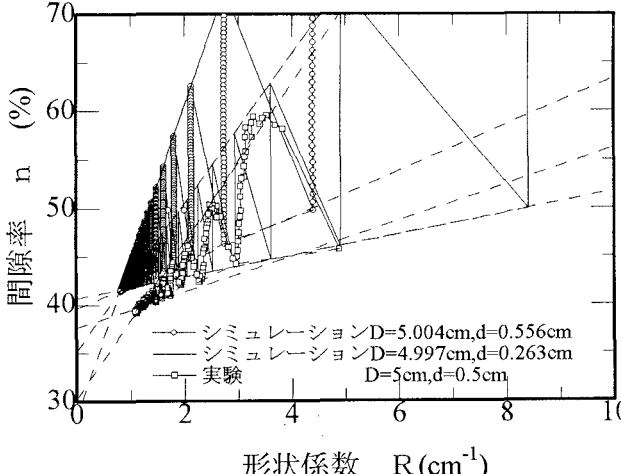


図-3 間隙率～形状係数の関係

6. まとめ 今回、簡単な仮定の下での円筒形容器による規則的な充填シミュレーションを定義し、ランダム充填実験結果の比較を行った。その結果、間隙率変化の全体的な傾向は類似していたが、シミュレーション結果の間隙率はかなり大きくなってしまった。これは、図-1 に示した規則充填を考えたためと思われるので、今後の課題として、円筒形容器へのランダム充填のシミュレーションを考える必要がある。

参考文献

- 1) 木村哲晃・板橋一雄・姫野圭：均一粒状体の間隙率に対する壁効果の分類～その定式化と数値シミュレーション～，地盤工学会中部支部第 12 回地盤工学会シンポジウム論文集，pp. 87-94, 2000.
- 2) 牧岳志・板橋一雄・和田英孝：均一粒状体の間隙比に対する壁効果の分類～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.