

粒状集合体の三次元座標の計測・分析手法の開発

前橋工科大学 学生会員 ○渡辺 純平

前橋工科大学 正会員 森 友宏

前橋工科大学 学生会員 小山 悠

1. 研究の背景と目的

現在、不飽和土の強度推定は災害後に行われる現地調査に依るのが主流である。豪雨時の斜面崩壊に対する余裕度を把握するために、飽和度ごとに強度推定を行いたい。不飽和土の強度は、主に土粒子間のサクシオンによって発揮される。サクシオンは土粒子間の間隙に懸架するメニスカス水の曲率半径に影響を受ける。そのため、サクシオンを直接的かつ定量的に評価するためには、対象とする地盤内部の土粒子の三次元配列を知る必要がある。本研究では、発泡ビーズを用いた球の中心座標の悉皆調査を行い、不飽和土の構造をミクロの視点から明らかにする。

2. 研究の流れ

はじめに、ガラスビーズを用いて疑似的な最大密度試験を行う。これは、発泡ビーズを用いて供試体（図1）を作成する際に、球体充填に係る壁面の影響を考慮するためである。供試体作成後、供試体の外郭部分に印をつけ、フライス盤とレーザー距離計（図2）を用いて、供試体の中心座標の悉皆調査を行う。このとき最外郭の球は区別し配位数を持つ球としない。

3. 壁面の影響範囲の調査

$\phi=0.8\text{mm}$ のガラスビーズを用いて疑似的な最大密度試験を行った結果を図3に示す。容器の幅をガラスビーズの2～32倍に変化させて締固めを行い、壁面の影響が生じる範囲を検討した。図4のように

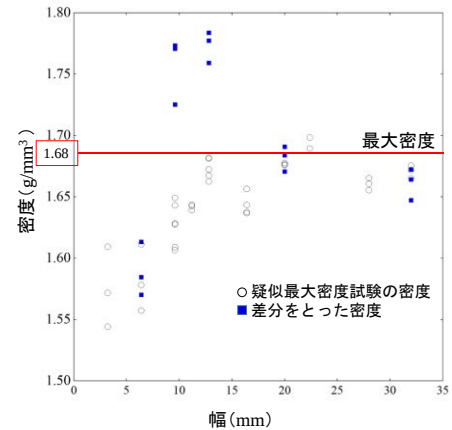


図3 $\phi=0.8\text{ mm}$ の最大密度試験

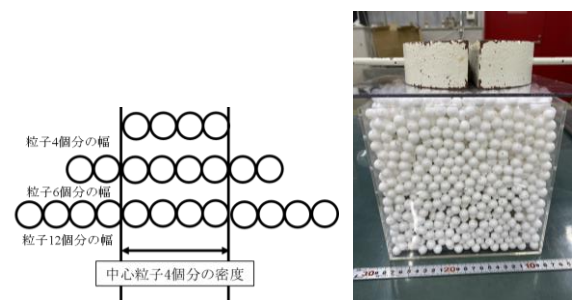


図4 壁面の影響の模式図 図5 供試体作製

変化させた幅の差分と容器内のガラスビーズの質量の差分から求めた密度を供試体の最中央部の密度とした。供試体の最中央部のガラスビーズ4個分の幅における密度のみをプロットしたのが、図3の青四角点である。容器幅がガラスビーズの10～12倍になった時に、最中央部の密度が最大となり、その後一定値（ 1.68g/cm^3 ）に収束した。これより、球体充填に関わる壁面の影響は3～4個分程度であると考えられる。



図1 供試体



図2 試験器具

4. 粒状集合体の三次元座標の計測

(1) 供試体作製

供試体を作製は以下の手順で行う。まず、伸縮性に富んだネットを用意し、その中に必要な粒子数を確保できる数の粒子を液体状の糊をまぶしてから入れる。前述の壁面の影響を考慮して、十分な大きさの箱を用意し、その中を供試体と粒子で満たす。このとき、

キーワード 不飽和土、三次元配列、三次元座標、球体充填、配位数

連絡先 〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460番地1 前橋工科大学 TEL: 027-265-7308 E-mail: mori@maebashi-it.ac.jp

供試体は箱の中心に位置するように埋める．最後に、図 5 のように箱の上に蓋とおもりを載せ、上載圧をかけて糊を固める．作製された供試体は図 1 の通り．

ここで、供試体を作製する上で統計的に必要なサンプル数について述べる．表 1 左に示すとおり、母集団が大きくなるにつれて必要なサンプル数は大きくなるが、一定の値で上限を迎える．そして、信頼区間 95% で、許容誤差を変動させると表 1 右のようになる．本研究では、信頼区間 95% で許容誤差が 10% を上回らないよう粒子を用意した．

(2) 試験手順

三次元座標の調査に用いる試験装置はフライス盤とレーザー変位計を用いて自作した (図 2)．X、Y 座標はフライス盤に取り付けたノギス方式の目盛 (図 6) によって測定し、Z 座標はレーザー測距計によって測定する．X、Y、Z 座標すべてを 0.1 mm 単位で測定することができる．作製した供試体の最外郭部分に印を付けておき、内部の粒子と区別できるようにしておく．また、供試体が測定可能範囲よりも大きかった場合、供試体を平行移動することで計測をした．

(3) 球の接触条件

供試体作製に使用する $\phi=6\text{mm}$ 、 12mm の発泡ビーズの直径が一定ではないため、無作為に取り出し直径を計測した結果を表 2 に示す．平均値 μ と標準偏差 σ 及び度数の間には

$$\mu \pm 2\sigma \tag{1}$$

の中に入る度数の割合が 95.45% という関係が成り立っている．私たちの計測誤差、発泡ビーズの大きさのばらつきにより、本来接触しているが接触していない判定になっている球、球にめり込んでしまっている球を考慮しなくてはならない．今回は式 (1) から球の接触条件 h を

$$h \leq \mu + 2\sigma \tag{2}$$

として、それぞれの配位数を数える．

(4) 計測結果と考察

上記の方法で粒状集合体の三次元座標の計測、分析を行った結果を図 7 に示す．また、計測した三次元座標からボロノイ分割を行い、求めた供試体の充填率を表 3 に示す．Chaoming Song ら¹⁾は、等粒径の粒子のランダム配置において、充填率は約 54~63% 程度まで変化するとしている．これより、本研究によって求めた充填率は上記の範囲内であるということ

表 1 各条件の統計的に必要なサンプル数

母集団の数	必要なサンプル数	許容誤差 (%)	必要なサンプル数
1000	279	5	384
10000	370	6	267
100000	383	7	195
1000000	384	8	150
10000000	384	9	118
100000000	384	10	96

許容誤差±5%
信頼区間95%

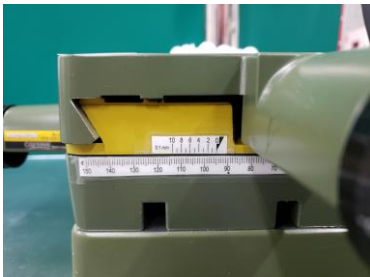


図 6 X 軸の計測用目盛

表 2 発泡ビーズの直径のばらつき

	n	平均値 μ	標準偏差 σ
6mm 球	600	6.25	0.27
12mm 球	600	11.91	0.11

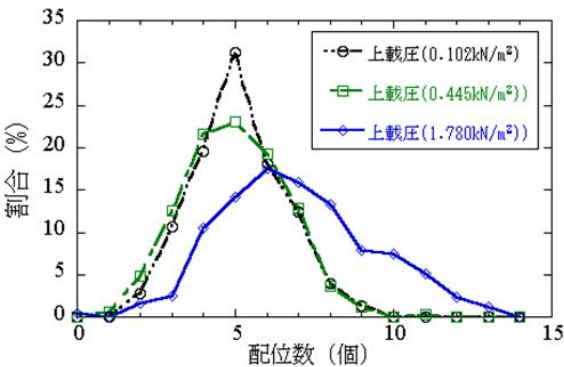


図 7 単一粒径の粒子群の配位数

表 3 上載圧に応じた充填率の変化

上載圧(kN/m2)	0.102	0.445	1.78
充填率(%)	59.781	61.450	62.373

から、計測結果は妥当な結果であると考えられる．

5. まとめ

発泡ビーズを用いた球の中心座標の悉皆調査法を考案し、その結果から粒状集合体の配位数を求めることができた．

参考文献

1) Chaoming Song, Ping Wang & Herna'n A. Makse, A phase diagram for jammed matter, Nature, vol. 453, pp.629-632, 2008.