

壁効果を考慮した均一土質材料の最大間隙率

名城大学理工学部建設システム工学科

正会員 板橋一雄

名城大学理工学研究科建設システム工学専攻

学生会員 内藤充則・森 隆

荒金 聡・石井亮介

1. はじめに

阪神淡路大震災などにおいて、礫質地盤の液状化が確認されて以来、その液状化判定を目的として、礫質材料の最大・最小密度(相対密度)を知る必要が出てきた。しかしながら、現行の最小密度・最大密度試験方法(JIS A 1224)では、砂(最大粒径は2 mmに限定)を対象とし、容器の大きさが直径6 cm、高さ4 cmと小さいため、粗粒な礫質材料に使用するには種々の問題の生じることが予想される。そこで、現在「砂礫の最小・最大密度試験方法検討委員会」において、大きなモールド(直径)を用いた種々の検討が進められている¹⁾。また、著者らの研究グループは、均一な粗粒土質材料の最大密度に対して、「壁効果」を考慮する必要性を指摘し、その「壁効果」が容器形状係数(著者らの提案)によって評価できることを示している²⁾。そこでここでは、研究の第一段階として、標準砂などの細粒砂の最小密度(最大間隙率)に対する容器形状係数の適用性を研究目的とした。さらに、最大間隙率を求める現行法では、容器上部に残った円錐部分をカットすることになっているが、この操作によって粒子配列が乱され、本来の最大間隙率が求められていない可能性があるため、本研究では、メソジング-反転法を用い、学会基準の方法と比較検討を行っている。

2. 最小密度試験方法に関する従来の研究

最小密度試験に関しては、陶野・吉見などによる一連の研究がある^{3)~6)}。この一連の研究では、その試験方法として、体積一定法と重量一定法が示されている。前者は、体積一定の容器を用い、そこに入った試料の重量を測定する方法(スプーン法、漏斗法、ふるい引き上げ法)である。後者は、試料重量を一定として、それが詰まる体積を測定する方法(メソジング-反転法)である。スプーン法は砂を少量ずつスプーンで静置していく方法、漏斗法は試料の詰まった漏斗を徐々に引き上げ容器内に円錐形状の堆積物を形成する方法、ふるい引き上げ法は容器底部にあらかじめ設けられたふるいを静かに引き上げる方法、メソジング-反転法は試料を入れたメソジング-反転法を静かに反転し体積を測定する方法である。ただし、現在基準となっている漏斗法では、容器上部に形成された円錐部分の除去のために直ナイフでのカットが必要となるが、この操作の良否によって測定値にばらつきの現れる可能性が残されている。

陶野・吉見³⁾は、重量一定法(メソジング-反転法)と体積一定法(詰める器具：じょうご・スプーン・ビーカー・蒸発皿の4種類)を比較し、メソジング-反転法ではあまり緩くならず変動係数も高いこと、漏斗法ではじょうごの口径によって得られる値の異なること、スプーン法では少量ずつ入れる必要があり時間がかかること、変動係数が低く密度の最小値が得られ方法は蒸発皿を用いた方法であること、などを示している。また、陶野⁵⁾は、メソジング-反転法やふるい引き上げ法では最小密度の値が高くばらつきも大きいため望ましくないこと、漏斗法では、漏斗の形状や紙の質によって値が異なることなどを指摘している。さらに、吉見⁴⁾は、最大・最小密度試験法に要求される事項として、①簡便であること、②ばらつきの少ないこと、③粒子破碎が生じないこと、④分級作用が生じないこと、などを挙げ、「砂の相対密度測定法小委員会」での議論と多数の機関からのアンケート調査結果に基づいて、試案として漏斗法を、簡便法としてメソジング-反転法を提案している。

しかしながら、以上の研究では、容器の大きさの影響を積極的には考えていない。すなわち、最初から試料の最大粒径が規制されているため、充填間隙率に対する「壁効果」の影響が現れないと考えている。したがって、礫材料に対して漏斗法やメソジング-反転法がどの程度利用できるかが、大きな問題として残される。

The maximum porosity of unified granular materials considering the wall effect

ITABASHI Kazuo, NAITO Mitsunori, MORI Takashi and ARAKANE Satoshi (Meijo Univ.)

3. 「壁効果」の整理方法

「壁効果」とは、容器壁に接する部分の間隙率が粒子同士の接触部分とは異なること、粒子に比べ容器が比較的小さい場合には充填の仕方自身の影響を及ぼすことの両者を意味する⁷⁾が、ここでは、その影響を供試体の大きさの変化に伴う供試体全体の間隙率の変化によって評価することとする。

この「壁効果」の整理方法には、従来から種々の方法が提案されている。McGeary は容器内径 D と粒子径 d の比による整理を提案している⁸⁾。また、Eastwood らは、容器内径 D の影響と粒子径 d の影響は別々であることを指摘している⁹⁾。さらに、奥山らは、容器内径 D や供試体高さ h によって、間隙率が大きく変化することを指摘している¹⁰⁾。また、供試体内径や高さによって間隙比の急変する粒径を求め、許容粒径と定義している。

一方、著者らの研究グループは、供試体の体積 V と全表面積 A との比を「容器形状係数 $R_v=(A/V)$ 」と定義し、この係数の値と均一粒度の礫試料やステンレス球の最大密度(最小間隙率)の特性が特徴的な関係を描くことを示している²⁾。そこで、ここでは最小密度(最大間隙率)に対しても容器形状係数による整理法が有効かどうかを調査目的とした。

4. マスリッガー-反転法の再検討

4.1 試料と試験方法

用いた試料は、①豊浦標準砂、②相馬標準砂、③木曾川砂の3種類である。それぞれの試料は水洗い後ふるい分け、粒径 $0.212\sim 0.250\text{mm}$ (JIS ふるい一つ分)の均一粒度とした。なお、木曾川砂は、河口から 42Km 地点(笠松町地内)の川原から採取したものである。また、土粒子密度試験の結果は、それぞれ① 2.650g/cm^3 、② 2.648g/cm^3 、③ 2.663g/cm^3 であり、それ程大きな差異はなかった。更に、各20粒子の形状のフラクタル解析を実施した結果、その平均値±標準偏差の値は、それぞれ① 1.02269 ± 0.0074 、② 1.03030 ± 0.0072 、③ 1.03127 ± 0.0104 であった。豊浦標準砂のフラクタル次元のみが小さいこと、木曾川砂の標準偏差の大きいことがわかる。

マスリッガー-反転法の試験方法の模式図を図-1に示してある。十分に炉乾燥し常温に冷ました乾燥試料とマスリッガーを準備する(a)。なお、予備試験を実施した結果、細粒の砂の場合には、静電気が発生しガラス表面に付着する様子が見られたので、使用するマスリッガーの内面には静電防止剤を塗布しきれいに拭いてある。そのマスリッガーに重量を測定した試料を投入し十分に攪拌し、蓋をした状態でマスリッガーをほぼ水平にする(b~c)。次いで、砂試料がゆっくりと移動・堆積するよう、机上でマスリッガーに振動を与えず、ゆっくりと立ててゆく(d)。マスリッガーが立った状態で砂試料の表面形状が直線状であることを確認した後、その上側と下側のマスリッガーの目盛りを読む(e)。この操作を10回繰り返す。なお、マスリッガーの大きさの影響を見るために、5種類のマスリッガー(ガラス製,スパークレド)を用いた。用いたマスリッガー容量と許容誤差はそれぞれ $25\pm 0.15\text{ml}$ 、 $50\pm 0.25\text{ml}$ 、 $100\pm 0.4\text{ml}$ 、 $200\pm 1.0\text{ml}$ 、 $300\pm 1.5\text{ml}$ である。また、投入する試料重量の影響を見るために、試料を $2.5\sim 5.0\text{g}$ ずつ規則的に増加させた。その結果、試料重量間隔は、 25ml マスリッガーでは $10\text{g}\sim 30\text{g}$ 、 300ml マスリッガーでは $40\text{g}\sim 150\text{g}$ となった。

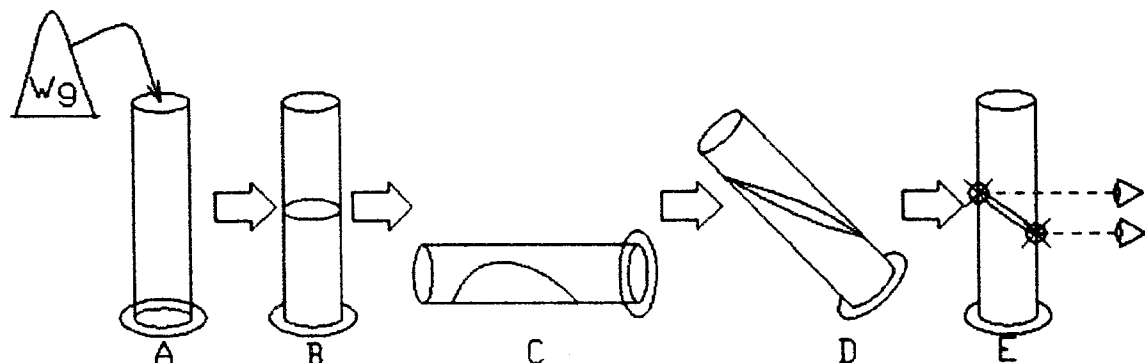


図-1 マスリッガー-反転法の模式図

なお、上述の結果と学会基準の結果とを比較するために、3者の砂の最小密度試験(JIS A 1224)を多数回実施した。

4.2 試験結果

表-1には、学会基準の方法による試験回数 10 回の最大間隙率の平均値と標準偏差、が示してある。3者の砂ともに、ばらつきが少なく、適切な試験結果であることがわかる。ただし、豊浦標準砂の最大間隙率が小さく、相馬標準砂と木曾川砂はほぼ同様の大きな値を示している。また、ばらつきの大きなものは、相馬標準砂と木曾川砂となっている。これらの相違が現れる原因として、粒子形状の相違が考えられる²⁾。

すなわち、フラクタル次元の最も小さな豊浦標準砂では、最も小さな最大間隙率が得られ、フラクタル次元の大きな相馬標準砂と木曾川砂では、小さな最大間隙率が得られており、フラクタル次元との対応の良いことが予想される。

表-1 学会基準法による最大間隙率

	平均値	標準偏差
豊浦標準砂	50.16	0.0546
相馬標準砂	56.29	0.0862
木曾川砂	55.46	0.0850

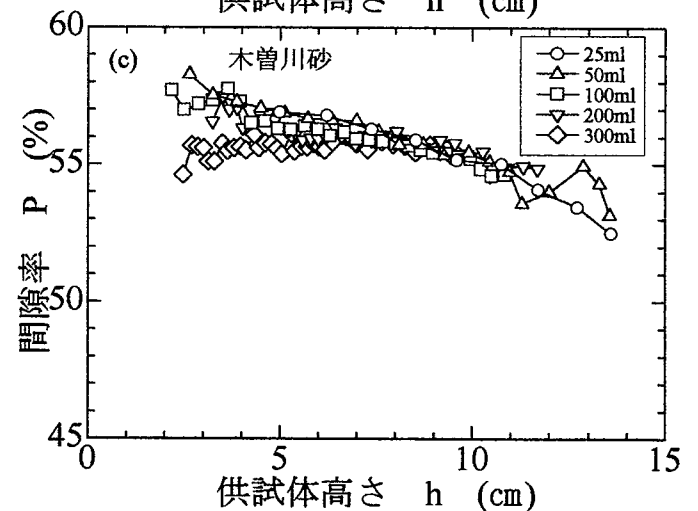
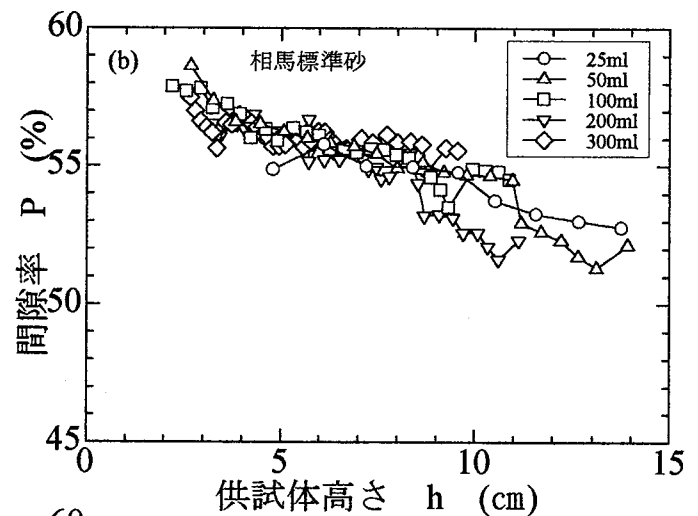
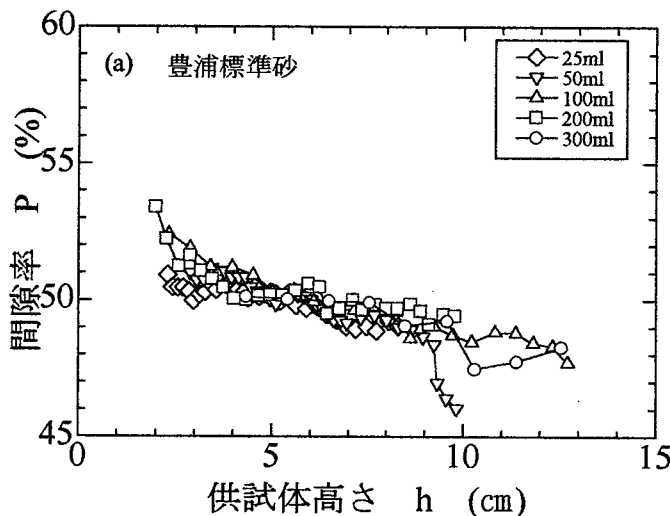


図-2には、メシリンガー反転法の結果を間隙率と供試体高さとの関係で試料別に示してある。それぞれメシリンガーの大きさ別の記号で示してあり、試料毎で多少のばらつきと思われる変動はあるが、試料別に見れば、変化傾向の大きな差異は認められない。すなわち、どの試料でも、供試体高さの増加に伴い得られる間隙率は、図上でほぼ直線的に減少する傾向がある。ただし、重要なことは、供試体高さの低い間では、学会基準の方法で得られる値より大きな値を取っていることである。

図-2 供試体高さと同隙率の関係

また、図-3には、容器形状係数との関係で試料別に描いてある。容器形状係数は容器の小ささを表現する指標であるため、小さな供試体ほど大きな値を取る。したがって、この図の表現方法を用いると、図-2と比較すると、メシリンガーの大きさによって得られるデータのプロット位置が大ききずれることになる。また、どの試料、メシリンガーの場合でも、特徴的な傾向を読み取ることができる。すなわち、ある容器形状係数の値までは、

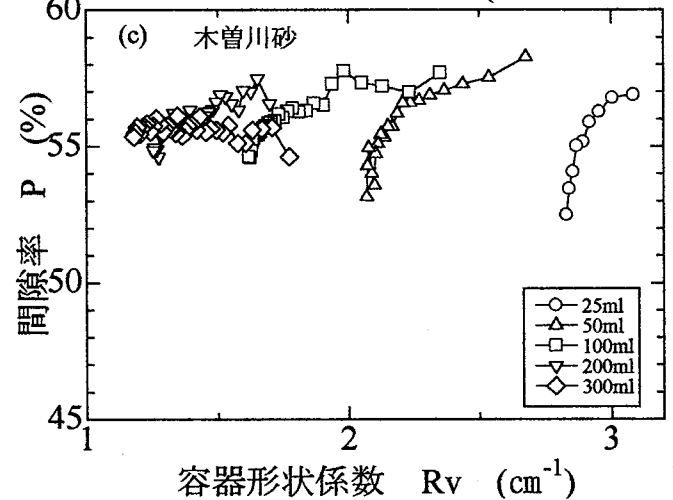
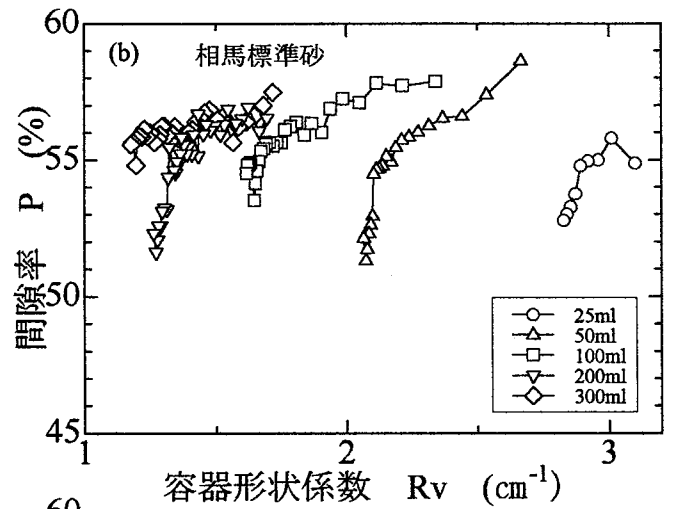
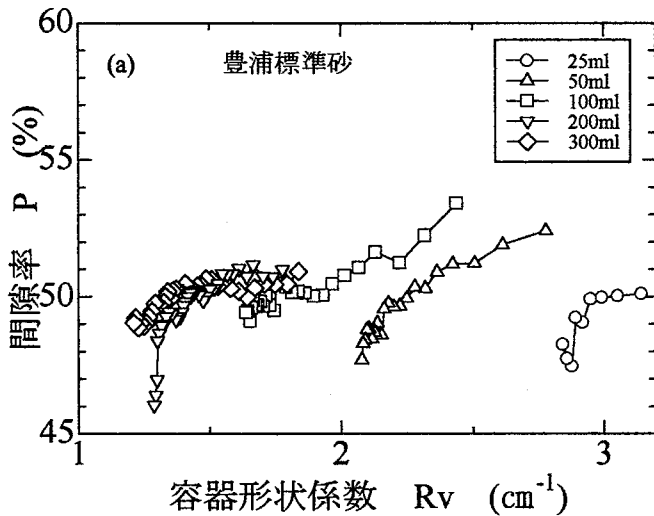


図-3 容器形状係数と間隙率の関係

一定の勾配で減少するが、その値を越えると急激な減少を示している。この原因として、供試体の高さの増加に伴う自重の影響が考えられる。

5. まとめ

本研究では、均一で細粒な砂を用い、学会基準の方法と種々の大きさのメシリンガーを用いたメシリンガー反転法によって、最大間隙率を求めた。得られた結論は、次の通りである。

1) メシリンガー反転法で得られた値を供試体高さとの関係で示すと、メシリンガーの大きさによる差異は左程認められないが、従来から著者らが提案している容器形状係数によって整理すると、その差異が明確になり、このような最疎充填実験の結果にも、容器形状係数が利用できる可能性が明らかとなった。

2) また、条件によっては、学会基準の方法よりもメシリンガー反転法の方が大きな最大間隙率が得られることも明らかとなった。

今後の検討課題としては、礫質のより粗い材料を用いた実験を実施し、メシリンガー反転法と容器形状係数による整理法が利用可能であることを実証して行くことである。なお、本研究の実施に当たっては、本学4年生の協力を得た。また、平成15年度の文部科学省科学研究費(萌芽研究)の補助を受けた。記して、謝意を表す。

参考文献 1)例えば、國生剛治・伏木田達朗・村端敬太：砂礫の最小最大密度に与える種々の影響因子の検討、第38回地盤工学研究発表会、pp.567-568, 2003. 2)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、43(1), pp.117-129, 2003. 3)陶野郁雄・吉見吉昭：砂の最小密度、第7回土質工学研究発表会、pp.93-96,1972. 4)吉見吉昭・砂の相対密度測定法小委員会：砂の相対密度測定法の試案、第12回土質工学研究発表会、pp.157-160,1977. 5)陶野郁雄・砂の相対密度測定法小委員会：紙漏斗による砂の最小密度試験、第12回土質工学研究発表会、pp.161-164,1977. 6)広瀬誠・砂の相対密度測定法小委員会：相対密度測定法の現状と一斉試験結果、第12回土質工学研究発表会、pp.165-168,1977. 7)井伊谷綱一編集：粉体工学ハンドブック(朝倉書店)、第I編7,充填特性、pp.93-105,1967. 8)McGeary, R.K. : Mechanical packing of spherical particles, J. of the American Ceramic Society,44,10,pp.512-522, 1961. 9)Eastwood, J., Matzen,E.J.P., Young, M.J. and Epstein,N. : Random loose porosity of packed beds, British Engrg. 14,11,pp.1542-1545,1969. 10)奥山一典・藤原身江子・越智洋秀・井上真理子：砂の最大・最小密度試験における最大粒径制限値の拡大に関する研究、土木学会論文集、638/III-49,pp.11-27,1999.