

メソジグ-反転法による礫の最大間隙率

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 石井亮介・荒金聡

大嶽信二郎

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が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⁾。著者らは、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)試験法としてメソジグ-反転法を学会基準の方法と比較しその有用性を示してきた³⁾。そこで、本研究では2種類の礫質材料を用いてメソジグ-反転法を実施したのでここに報告する。

2. 「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、粒子に較べ容器が比較的小さい場合には充填の仕方自身に影響を及ぼすことの両者を意味する⁴⁾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⁵⁾。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⁶⁾。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⁷⁾。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、この係数の値が細粒砂を試料に用いたメソジグ-反転法による最小密度(最大間隙率)に対しても特徴的な関係を描くことを示している³⁾。そこで、ここでは礫を試料に用いたメソジグ-反転法による最小密度(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。

3. メソジグ-反転法

3.1 試験方法

メソジグ-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メソジグ-を準備する(a)。なお、予備試験を実施した結果、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、使用するメソジグ-の内面には静電防止剤を塗布しきれいに拭いてある。そのメソジグ-に重量を測定した試料を投入し十分に攪拌し、蓋をした状態でメソジグ-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、机上でメソジグ-に振動を与えず、ゆっくりと立ててゆく(d)。メソジグ-が立った状態で試料の表面形状が直線状であることを確認した後、その上側と下側のメソジグ-の目盛りを読む(e)。この操作を10

The maximum porosity of unified granular materials considering the wall effect

ITABASHI Kazuo, ISHII Ryosuke, ARAKANE Satoshi and OTAKE Sinziro (Meijo Univ.)

回繰り返す。なお、メシリンダーの大きさの影響を見るために、2種類のメシリンダー(ガラス製, スターグレート)を用いた。用いたメシリンダー容量と許容誤差はそれぞれ $300 \pm 1.50 \text{ ml}$ 、 $500 \pm 2.00 \text{ ml}$ である。また、投入する試料の量の影響を見るために、試料を規則的に増加させた。

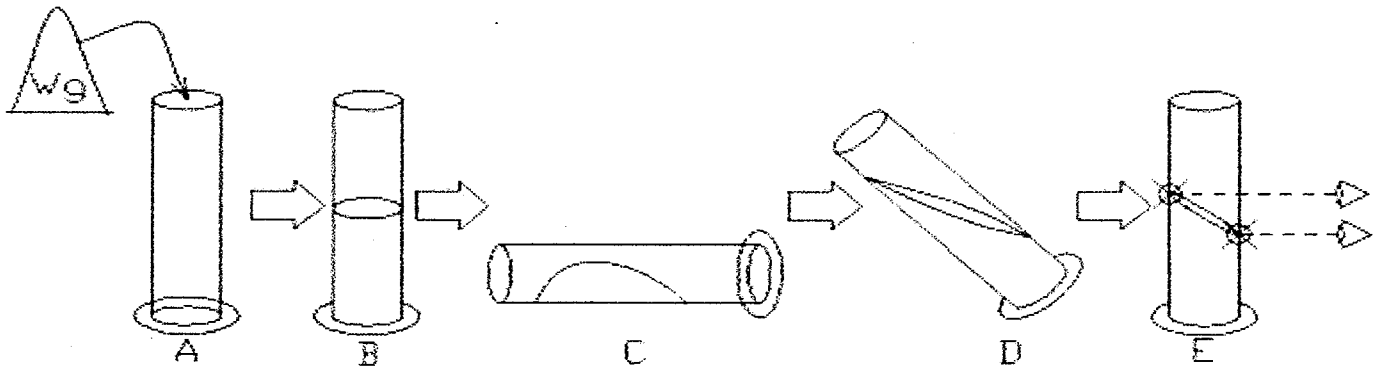


図-1 メシリンダー-反転法の模式図

3.2 細粒砂を用いたメシリンダー-反転法

3.2.1 試料

用いた試料は、粒径 $0.212 \sim 0.250 \text{ mm}$ (JIS ふるい一つ分) の①豊浦標準砂、②相馬標準砂、③木曾川砂、④フリマントル砂、⑤フラタリー砂、の5種類である。木曾川砂は河口から 42 km 地点の川原から採取したものである。またフリマントル砂とフラタリー砂はオーストラリアの海岸から採取されたものであり、シリカ質に富み、ガラス用原料として輸入されたものである。また、投入する試料の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、試料重量範囲は、 300 ml メシリンダーでは $40 \sim 300 \text{ g}$ 、 500 ml メシリンダーでは $75 \sim 500 \text{ g}$ の範囲となった。これらの試料の土粒子密度はそれぞれ① 2.650 g/cm^3 、② 2.648 g/cm^3 、③ 2.663 g/cm^3 、④ 2.652 g/cm^3 、⑤ 2.646 g/cm^3 であり、それほど大きな差異はなかった。

3.2.2 試験結果と考察

図-2には、5種類の砂について、試験結果の間隙率と供試体高さの関係で示してある。どの試料の場合も多少のばらつきと思われる変動はあるが、供試体高さの増加に伴う間隙率の直線的な減少傾向が認められる。重要なことは、同一粒度にもかかわらず、試料によって間隙率が異なっていることである。これの原因としては、過去の研究成果²⁾を考慮すれば、粒子形状の相違と壁効果の影響と考えられる。

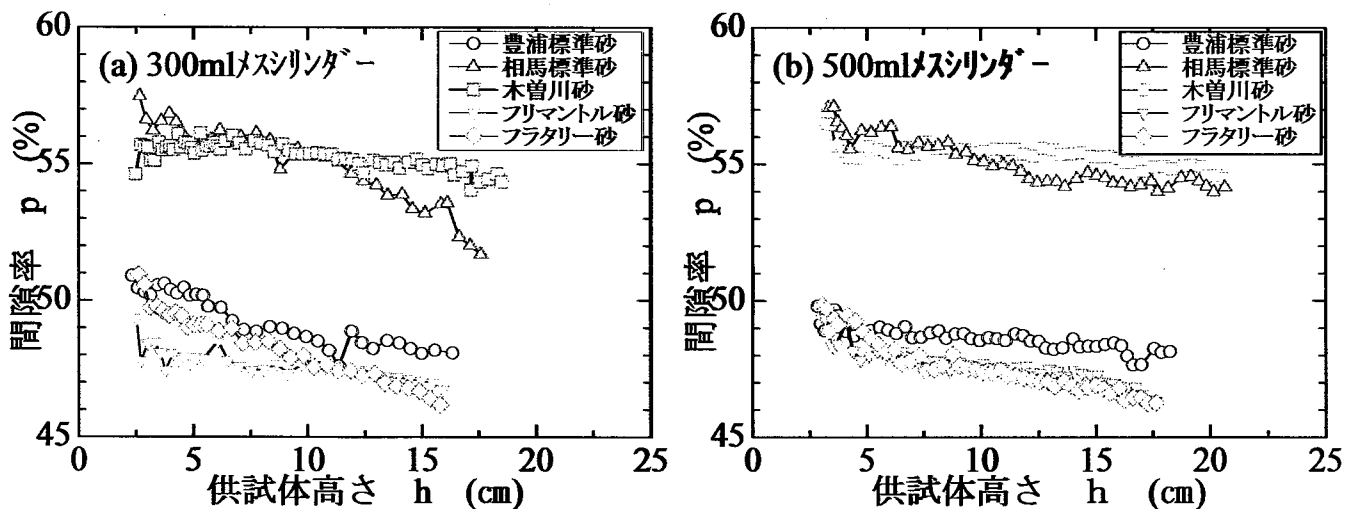


図-2 細粒砂を用いた場合の間隙率 $p(\%)$ と 供試体高さ $h(\text{cm})$ の関係

図-3には、図-2に示した結果を容器形状係数 R_v との関係で描いてある。直径 D 、高さ h の円柱形容器の場合には、 $R_v = (A/V) = (2/h) + (4/D)$ となり、容器の小ささを表現する指標であるため、容器直径が小さいほど大きな値を取る。そして、供試体高さが高くなるにつれて値が小さくなる。したがって、図-3(a)、(b)の R_v を比較するとわかるが、上述したようにメシリンダーごとで R_v のプロットされる位置が異なることが特徴の一つである。

また、ある容器形状係数 R_v までは、一定の緩やかな勾配での減少傾向であるが、その値を超えると大きな勾配で急激な減少傾向を読み取ることが出来る。この間隙率の急激な減少は試料重量の増加に伴い、自重の影響に耐えられなくなったと考えられる。これは、図-2 では明確には読み取れないことである。そこで、図-3 の関係が二本の直線で表現できると仮定し、折れ点の間隙率を求めてみた。視覚的に引いた二本の直線の例が図中に示してある。ここではこの折れ点の間隙率を限界の値と考え、限界間隙率 p_{∞} (%) と呼ぶこととする。

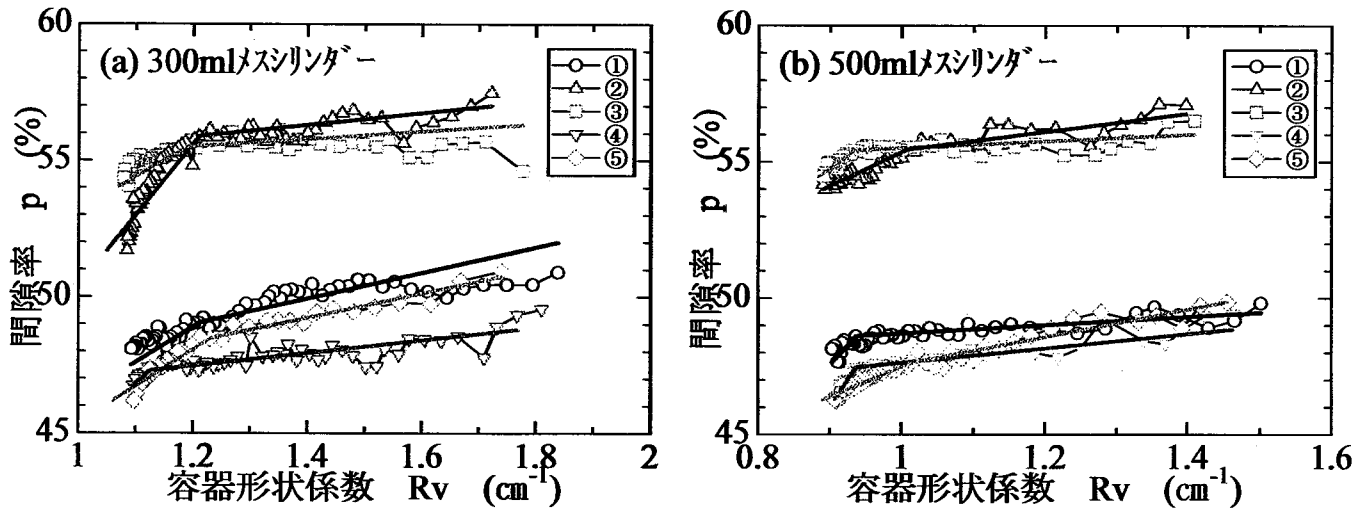


図-3 細粒砂を用いた場合の間隙率 p (%) と 容器形状係数 R_v (cm^{-1}) の関係

3.3 礫を用いたメシリンダ-反転法

3.3.1 試料

用いた試料は、⑥熊野灘礫の粒径 $2.00\sim 2.35\text{mm}$ (JIS ふるい一つ分)、⑦熊野灘礫の粒径 $4.00\sim 4.75\text{mm}$ (JIS ふるい一つ分)、⑧木曾川礫の粒径 $2.00\sim 2.35\text{mm}$ 、⑨木曾川礫の粒径 $4.00\sim 4.75\text{mm}$ と、4種類である。それぞれの試料は水洗い後ふるい分けをし、均一粒径に粒度調整したものを用いた。なお、木曾川礫は木曾川砂と同じ地点の川原から、熊野灘礫は三重県伊勢半島七里ヶ浜北端の鬼ヶ城の海岸で採取したものである。また、投入する試料重量の影響を見るために、試料を 10g ずつ規則的に増加させた。その結果、試料重量範囲は、 300ml メシリンダ-では $100\sim 400\text{g}$ 、 500ml メシリンダ-では $200\sim 600\text{g}$ となった。これらの試料の土粒子密度はそれぞれ⑥ $2.665\text{g}/\text{cm}^3$ 、⑦ $2.650\text{g}/\text{cm}^3$ 、⑧ $2.655\text{g}/\text{cm}^3$ 、⑨ $2.655\text{g}/\text{cm}^3$ であり、それほど大きな差異はなかった。

3.3.2 試験結果と考察

図-4 には、2種類のメシリンダ-容器を使用し、2種類の粒径の試験結果を間隙率と供試体高さの関係で試料ごとに示してある。図-2 と同じ間隙率の範囲で示すと次のことが明らかになる。①細粒砂より少々ばらつきが

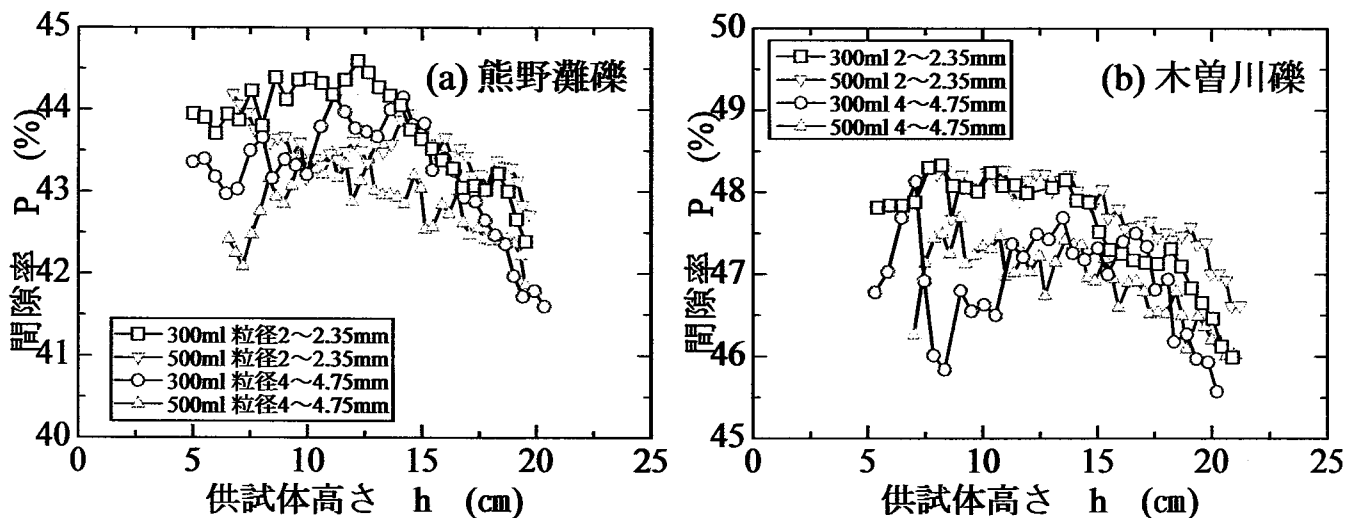


図-4 礫を用いた場合の間隙率 p (%) と 供試体高さ h (cm) の関係

認められる。②細粒砂と同じように供試体高さの増加に伴う間隙率の減少傾向が認められる。

しかし、試料⑨の 300ml マシシグ-容器を使用した試験結果（同図(b)の○印）は供試体高さが低いうちは大きくばらつきが認められる。この要因としては粒子が大きく、容器が小さいため壁効果の影響を大きく受けるため、アーチング現象の発生の有無によるものと考えられる。今回、粒径 4~4.75 mmを試料に用いて 300ml マシシグ-容器による試験はマシシグ-底部や図-1(E)での右側の側面にアーチング現象の発生率が高かったため、現象が起こってもやり直しはしなかった。これより、試料粒径が大きい場合、300ml マシシグ-は適当ではないことが考えられるので、更に大きなマシシグ-を用いての試験結果の検討を今後の課題とする。

また試料ごとの間隙率の相違が現れる原因として、細粒砂と同じように粒子形状の相違が考えられる。

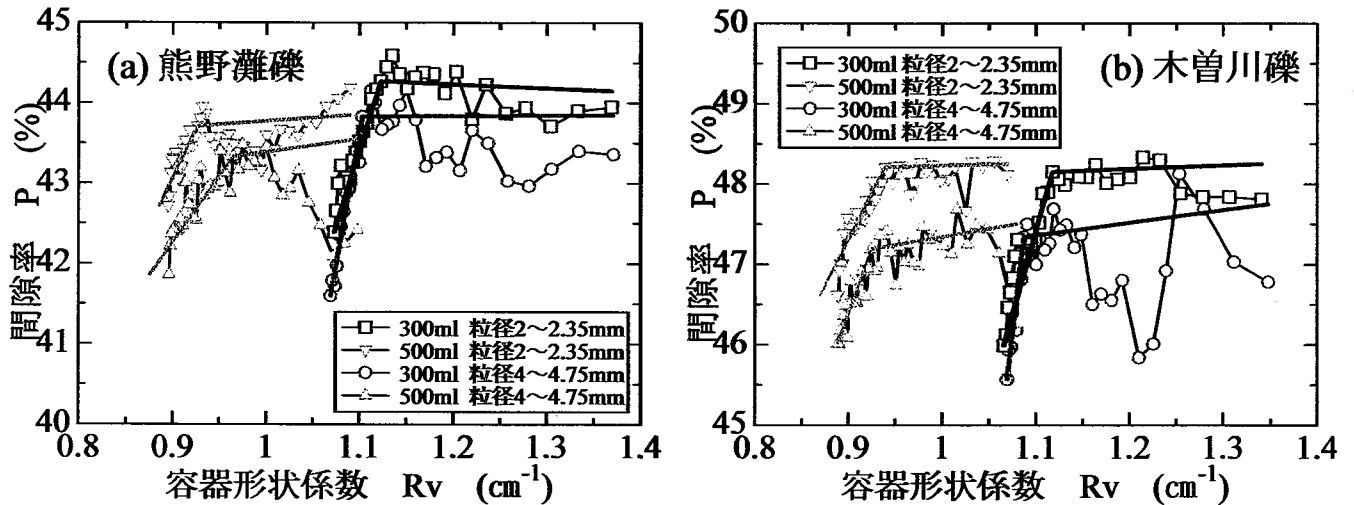


図-5 礫を用いた場合の間隙率 p (%) と 容器形状係数 R_v (cm^{-1}) の関係

図-5 には、図-4 に示した結果を容器形状係数 R_v との関係で描いてある。図-3 と同じように二本の直線で表現できると仮定し、視覚的に二本の直線を図中に引き、限界間隙率 p_{∞} (%)を求めてみた。しかし、試料⑦の 300ml と 500ml マシシグ-容器を用いた場合と試料⑨の 300ml マシシグ-容器を用いた場合、試料重量がすくないうちはばらつきが大きく直線を引けないので、ばらつきの大きい範囲は省いて考えてある。

図-3 と見比べてばらつきは大きい、 R_v の減少に伴い間隙率が減少し、ある点から小さな R_v の範囲では、細粒砂より大きな勾配で間隙率が減少するという同じような特徴を読み取ることができる。

今回の試験結果で特徴的な点は、どちらの試料でも粒径が大きい方が間隙率はだいたい小さくなっていることである。このような現象が起こる要因としては、2つ考えられる。1つは細粒砂の 10 倍、20 倍の粒径の礫を試料として用いていることと、もう 1つは礫にとっては 300ml、500ml マシシグ-の容器の内径が小さくて壁効果が大きいこと 2つの要因が、相乗効果を起こして試料重量の影響を大きくした結果と考えられる。実際、図-3 と図-5 の縦軸と横軸を揃えて比較すると、2本目の直線は細粒砂より礫の方が急な勾配である。つまり、粒径が大きくなれば 1つの粒子における重量が増え、試料重量の影響が大きくなると考えられる。また、図-5 で 300ml と 500ml のマシシグ-を用いた試験結果を見比べると容器の小さい 300ml マシシグ-の方が、より急な勾配で減少している。つまり、この場合は容器（内径）の大きさが壁効果の影響を大きくし、試料重量の影響が大きくなると考えられる。結果、粒子の詰まり方の要因として粒子形状などの要因も考えられるが、それ以上に上述した 2つの要因による試料重量の影響が大きくなったと考えられる。

3.4 粒子形状の影響

著者らの過去の研究成果を考慮して²⁾、図-6 には、粒子形状パラメタの代表値として、 $7\mu\text{m}$ 次元 FD を考え、限界間隙率 p_{∞} との関係を示してある。なお、粒子形状に関しては、それぞれ 20 粒子を測定したので、その平均値と土標準偏差(×印)の範囲で示してある。過去の研究成果³⁾では、均一で細粒な砂ではマシシグ-の大きさが異なっても各試料によってほぼ同様の p_{∞} が得られること、さほど明確ではないが粒子形状パラメタと p

∞ との関係が得られる特徴がわかっている。すなわち、丸い粒子ほどFDが小さく、それに対応して p_{∞} が小さくなっている。図-6では、今回実施した礫試料についても重ねて示してあるが、細粒砂と同じ傾向を示していることがわかる。

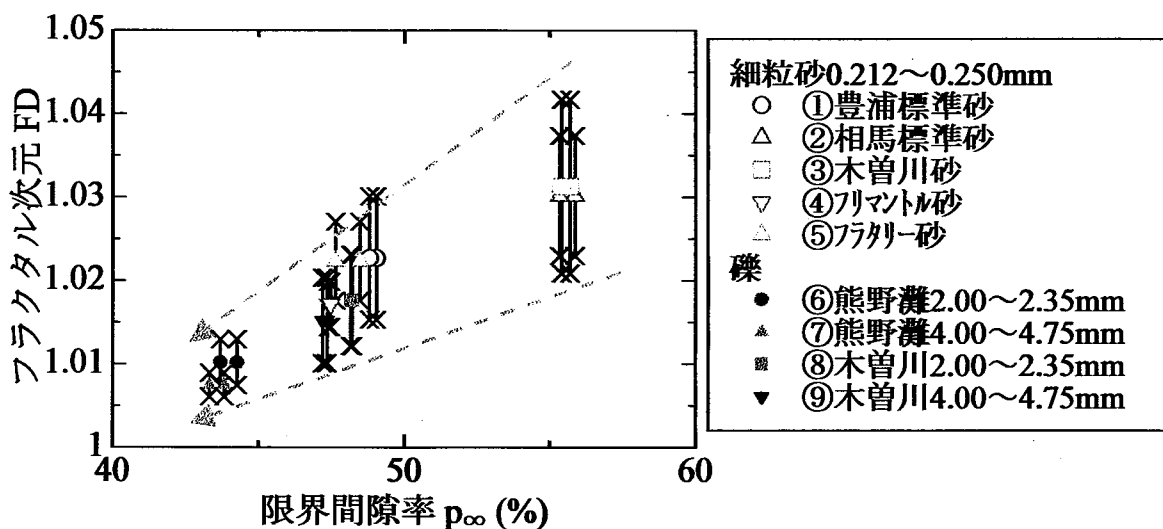


図-6 フラクタル次元FDと限界間隙率 p_{∞} (%)の関係

表-1 各試料のフラクタル次元FDと限界間隙率 p_{∞} (%)の関係

No.	試料	粒径 d(mm)	フラクタル次元FD		メシシガー の容量(ml)	限界間隙 率 p_{∞} (%)	限界間隙率 の p_{∞} 平均値 (%)
			平均値	標準偏差 σ			
①	豊浦標準砂	0.212~0.250	1.0227	0.00739	300ml	49.04	48.92
					500ml	48.80	
②	相馬標準砂		1.0302	0.00720	300ml	55.88	55.62
					500ml	55.36	
③	木曾川砂		1.0313	0.01042	300ml	55.71	55.57
					500ml	55.42	
④	フイマントル砂		1.0171	0.00272	300ml	47.40	47.43
					500ml	47.46	
⑤	フタケ-砂		1.0223	0.00473	300ml	48.47	48.06
					500ml	47.64	
⑥	熊野灘礫	2.00~2.35	1.0075	0.00142	300ml	44.27	43.99
		500ml			43.71		
⑦	熊野灘礫	4.00~4.75	1.0102	0.00275	300ml	43.83	43.58
		500ml			43.33		
⑧	木曾川礫	2.00~2.35	1.0152	0.00513	300ml	48.15	48.18
		500ml			48.21		
⑨	木曾川礫	4.00~4.75	1.0176	0.00547	300ml	47.34	47.27
		500ml			47.19		

木曾川砂と木曾川礫は、同じ場所から採取したものだが粒子形状に差があるので安易に比較は出来ない。しかし、試料④ワットル砂（粒径 0.212～0.250 mm）と試料⑨木曾川礫（粒径 4.00～4.75 mm）の FD と p_{∞} の関係が似ていることが示されている。表-1 は各試料の FD と p_{∞} の値をまとめたものである。この表からも、試料④と⑨の FD の平均値の差は非常に小さく、300ml メシリンガーを用いた p_{∞} の値の差もわずかである。この結果より粒径は異なっても粒子形状が非常に近いものなら、間隙率も同じような結果となる可能性が示唆される。

熊野灘は、どの試料よりも粒子形状が丸いため比較できる試料はないが図-6 より丸い粒子ほど FD が小さく、それに対応して p_{∞} が小さくなっている傾向に沿っている。

今後も粒子形状の異なる様々な材料の種々の粒径の試料を用いて研究する必要性がある。

4. まとめ

本研究では、2種類の均一粒径な2種類の礫を用いメシリンガー反転法を実施した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 間隙率 p と供試体高さ h の関係は、礫の場合は細粒砂より少々ばらつきがあるが、同じように供試体高さの増加に伴う間隙率の減少傾向が認められる。粒径 4～4.75 mm の試料では 300ml メシリンガー容器を使用した場合、アーチング現象の発生率が高くばらつきが大きい。そのため、粒径 4 mm 以上の試料では 300ml メシリンガーは適当ではないと考えられる。
- 2) 間隙率 p と容器形状係数 R_v の関係は、細粒砂と同じように容器形状係数の減少に伴い間隙率が減少し、ある点から小さな容器形状係数の範囲では、間隙率が大きな勾配で急激に減少するという特徴を読み取ることが出来た。そして自重の影響と考えられる間隙率が減少する勾配は細粒砂よりも礫の方がより急激な勾配であるのが確認出来た。しかし、試料重量が少ない範囲では細粒砂よりもばらつきが大きい。
- 3) どちらの礫試料でも粒径が大きい方が間隙率はだいたい小さくなっている。これは、粒子1つの重量が大きいことと、粒径が大きくなったため容器が礫にとっては小さいことの2つの要因が考えられる。
- 4) フラクタル次元 FD と限界間隙率 p_{∞} の関係は、礫も細粒砂と同様に丸い粒子ほどフラクタル次元が小さく、それに対応して限界間隙率が小さくなる傾向が認められる。

今後の研究課題として、多くの種類の礫材料と様々な大きさの粒径を試料として用いてメシリンガー反転法を実施し検討する必要性がある。また、更に大きな容器を使用して検討することも今後の課題である。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年度の文部科学省の科学研究費補助金(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)石井亮介・板橋一雄・荒金聡：メシリンガー反転法による細粒砂の最大間隙率、平成15年度研究発表会、pp.217-218, 土木学会中部支部, 2004. 4)井伊谷鋼一編集：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. 5)McGeary, R.K. : Mechanical packing of spherical particles, J. of the American Ceramic Society, 44, 10, pp.512-522, 1961. 6)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. 7)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.