

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

奥山一典¹・藤原身江子²・越智洋秀²・井上真理子³

¹正会員 工修 株式会社ウエスコ 地盤調査部 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

²正会員 株式会社ウエスコ 地盤調査部 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

³株式会社ウエスコ 地盤調査部 (〒700-0033 岡山市島田本町 2-5-35)

砂の最大・最小密度試験(JGS T 161-1990)では、最大粒径が2mmを超える砂は適用範囲外である。しかし、実務においては、最大粒径が2mmを超える砂を取り扱うことが多く、最大粒径制限値の拡大が望まれている。そこで、本研究では、最大粒径制限値の拡大に関する2、3の基礎的問題点を解決した上で、①モールドの大容量化、②粒度分布を考慮した最大粒径の制限法の適用という二つの方法で最大粒径制限値の拡大を図り、最大粒径が2mmを超える砂礫に適用できる最大・最小密度試験法を提案した。そして、提案法の検証実験を行い、提案法が十分実用に供することを示した。

Key Words : maximum density, minimum density, sand, maximum particle size, application of test method

1. はじめに

異なった種類の砂の力学的特性を定量化する際、相対密度は基本的な媒介変数としてよく用いられ、砂地盤のせん断・変形特性および液状化現象などに関する研究が、この相対密度を仲立ちにして数多く行われている。しかし、これらの研究は、砂地盤を対象としたものが多く、いわゆる砂礫地盤を対象としたものは少ない。これは、一つには、砂礫地盤の相対密度を求める際につぎのような問題があるためと考えられる。それは、原位置の密度測定方法と砂の最大・最小密度試験の適用範囲である。前者は、主に密度の測定精度の問題であるが、近年の凍結サンプリング、大口径サンプラー等によるサンプリング技術の著しい進歩により、ほぼ問題は解決される状況にあると言えよう。後者は、現行試験法(JGS T 161-1990)¹⁾が2mmふるいを通過し75μmふるいに95%以上残留する砂を対象とするため、現行試験法を砂礫試料に適用できないという問題である。

砂の最大・最小密度試験の適用範囲に関する研究を概観すると、その現状は以下のようである。細粒分含有率が5%以上の砂の場合、「試料の調整法を工夫することで、シラスなどの特殊土を除けば、現行試験法は細粒分含有率15%までの土について適用が

可能である。」といった報告²⁾があるが、基準化には至っていない。一方、最大粒径が2mmを超える砂の場合、いろいろな試験方法が提案されているが、標準化された方法は未だに確立されていない³⁾。

細砂が液状化した1964年の新潟地震とは異なり、1995年の兵庫県南部地震では、粘土から礫混じり砂までの非常に広い範囲の土が液状化しており⁴⁾、今後の研究や実務においては、砂の最大・最小密度試験の適用範囲の拡大がいよいよ必要になろう。

このような背景から、本論文では、現行試験法の適用範囲すなわち試料の粒度に関する制限(細粒分含有率と最大粒径)のうち、最大粒径制限値の拡大を図り、最大粒径が2mmを超える砂礫に適用できる実用的な最大・最小密度試験法の提案を目的とした研究を行った。

本研究では、まず、最大粒径制限値の拡大に関する基礎的問題点(①最小間隙比に及ぼす上載圧の影響、②最大・最小間隙比の粒径依存性、③粒子の充填構造、④漏斗口径の影響)の検討を行う。つぎに、最大粒径制限値の拡大方法(①モールドの大容量化、②粒度分布を考慮した最大粒径の制限法の適用)について検討する。最後に、これらの検討結果を踏まえ、砂礫に適用できる最大・最小密度試験法の提案とその検証を行うことにした。

表-1 最大・最小密度への影響

最大・最小密度を支配する要因	影 韵 因 子		本研究における影響因子の制御法	基礎的問題点
i) 材料特性	①粒子の材質	微視的粉碎との関係	制御不能.	粒径依存性
		巨視的粉碎との関係	粒子破碎しない試料を用いる.	
	②微視的な表面構造		制御不能.	
	③粒子形状		凹凸係数 FU で評価し, FU の揃った同材質の相似粒度試料を用いる.	
	④粒度分布		JIS全標準ふるいいで粒度調整する.	
ii) 試験方法	a) 試験装置	①容 器	_____	粒子の充填構造
		②打撃・振動装置(最大密度試験)	JGS T 161-1990に従う.	_____
		③注入器具(最小密度試験)	_____	漏斗の口径
	b) 試験条件	①最大粒径の制限	_____	粒子の充填構造
		②細粒分含有率の制限	JGS T 161-1990に従う.	_____
		③載荷の有無(最大密度試験)	_____	上載圧の影響
		④乾燥・飽和	JGS T 161-1990に従う.	_____
		⑤操作方法	JGS T 161-1990に従う.	_____
iii) 試験誤差		試験者の熟練と自動試験装置の使用により極力誤差を低減させる.	_____	

2. 最大粒径制限値の拡大方法と基礎的問題点

(1) 最大・最小密度への影響

砂のような粒状体の最大・最小密度は、材料そのものの物理的性質、試験条件など、多くの要因の影響を受けていることはよく知られている。これらのうち重要と考えうる因子について文献^{7), 8), 9)}を参考に整理したものと本研究における影響因子の制御法を表-1に示す。

表-1の粒子の材質および微視的な表面構造は、粒子間摩擦との深い関連が予想され、粒子間摩擦として最大・最小密度に大きな影響を及ぼすと考えられる。この粒子間摩擦を直接的に評価できる摩擦角として粒子間摩擦角 ϕ_{μ} がある。しかし、 ϕ_{μ} については、必ずしも十分な検討がなされていない¹¹⁾。そこで本研究では、少々強引ではあるが、平面摩擦角 ϕ_p ²³⁾によって粒子の材質および微視的な表面構造を評価する。

また、粒子形状の定義は研究者によって異なるこ

とがあるが、ここで言う粒子形状は、粒子表面の巨視的な凹凸と粒子の平均的な粒形のことである。前者を表す物理量として Wadde¹⁰⁾の roundness, Lees¹¹⁾の angularity などがある。また、後者を表す指標として, Lees¹²⁾の定義した elongation ratio, flatness ratio, shape factor や Wadde¹⁰⁾の sphericity などがある。本研究では、吉村ら¹³⁾が次式で定義した凹凸係数 FU を用いて粒子形状を定量的に評価する。

$$FU = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (1)$$

ここに、A : 粒子投影断面積, L : 粒子投影断面の外周長である。

(2) 最大粒径制限値の拡大方法

最大粒径制限値の拡大すなわち砂礫の最大・最小密度試験法の提案にあたっては、できるだけ現行試験法(JGS T 161-1990)に準ずるという立場をとることにした。それは、最大・最小密度に影響を与える

因子が多いため、試験方法を大きく変えれば試験の制御が非常に複雑となり、現行試験法によって求められる最大・最小密度と同じものを得ることが困難になるからである。

この立場から着想される最大粒径制限値の拡大方法はつぎの二つである。

① モールドの大容量化

最大粒径に見合った大きさの容器を用いて現行試験法の標準モールド(内径60mm, 深さ40mm)を用いた場合と同等の最大・最小密度が得られるような試験法を設定すれば、最大粒径制限値の拡大が可能となるであろう¹⁾。しかし、そのような試験方法として標準化されたものは確立されていない。本研究では、モールドの大容量化により生ずる2, 3の問題点(試験方法に関する最大・最小密度への影響)を解決し、最大粒径制限値の拡大方法の確立を図る。

② 粒度分布を考慮した最大粒径の制限法

現行試験法における最大粒径の制限値は2mmに規定されているため、最大粒径が2mmを超えた試料への現行試験法の適用はできないのが実情である。しかし、最大粒径が2mmを超える粒子の割合が小さい試料の場合には現行試験法を適用できる可能性がある^{5), 6)}。本研究では、モールド内の粒子の充填構造に着目し、試料の粒度分布に応じて試料の最大粒径を制限するといった合理的な最大粒径の制限法を開発し、最大・最小密度試験への適用を試みる。この制限法は、最大粒径が2mmを超える試料でも、その粒度分布によっては現行試験法の適用を可能とする。また、本制限法は、モールドの大容量化と組み合わせれば最大粒径制限値の拡大に対してより有効に寄与するであろう。

(3) 最大粒径制限値の拡大に関する基礎的問題点

前述した最大粒径制限値の拡大方法の確立にあたっては、つぎのような基礎的問題点が考えられる。

① 最小間隙比に及ぼす上載圧の影響

砂の最大密度試験においてモールドを大容量化して試験を行った際、モールドが深くなることによって試料自身が上載圧となり、その試験結果は現行試験法のそれと異なることが予想される。

② 最大・最小間隙比の粒径依存性

相似粒度をなす粒状体では、「粒径が大きくなると最大・最小間隙比が小さくなる。」という最大・最小間隙比の粒径依存性が報告されている。しかし、この粒径依存性の原因は明確にされておらず、粒径依存性がどのような粒径範囲で成立するかも定かではない。このことは、つぎの③に述べる間隙比急増現象に粒径依存性が混在し、最大粒径制限値の拡大

に支障をきたすことが懸念される。

③ モールド内の粒子の充填構造

相似粒度をなす粒状体では、ある最大粒径を越えると最大・最小間隙比が急増する。そのため、砂の最大・最小密度試験では最大粒径制限がなされている。この最大・最小間隙比急増現象はモールド内の粒子の充填構造に起因すると考えられる。したがって、粒度分布を考慮した最大粒径制限法の開発を行うためには、この充填構造を明らかにしておく必要がある。

④ 最大間隙比に及ぼす漏斗口径の影響

現行の最小密度試験法では、モールドに試料を注入する器具として口径12mmの円錐形漏斗を用いることが定められている。しかし、最大粒径が2mmを超える試料の場合、最大粒径によっては試料が漏斗内に詰まるため、漏斗口径を12mmより大きくしなければならない。そのため、漏斗口径が最大間隙比に及ぼす影響を事前に吟味する必要がある。

3. 基礎的問題点の検討

(1) 最小間隙比に及ぼす上載圧の影響

砂の最大密度試験では、「上載圧を試料に作用させた場合よりも、無載荷の方が高い密度が得られた。」という畠中らの研究¹⁴⁾に基づき、無載荷で試験するように定められている。一方、砂の相対密度試験方法基準化委員会には、「無載荷よりも、圧密試験の加圧板を載せて試験を行った方が、高い密度が得られた。」という報告¹⁵⁾が寄せられている。また、筆者ら^{16), 17)}は、「ガラスビーズを用いた最大密度試験では上載圧を作用させた方が密度が高くなる。」と報告している。これらは畠中ら¹⁴⁾の研究報告とは全く反対の内容であるが、上載圧が最小間隙比に及ぼす影響は材料特性によって異なるのではと思われる。そこで本節では、表-1に示す材料特性の影響因子のうち粒子形状と粒度分布に着目し、それらが異なる試料を用い、上載圧を種々変えた一連の実験を行い、材料特性との関連から最小間隙比に及ぼす上載圧の影響を明らかにする。

a) 実験用試料と実験方法

市販のガラスビーズ(GB), 直径12mmのGBを粉碎したもの(粉碎GB), 吉井川砂および碎石をJISの全標準ふるいで図-1のように粒度調整したものと豊浦標準砂を実験用試料とした。試料の物理的性質を表-2に示す。表中のFUは、試料毎に粒子の顕微鏡写真を撮り、距離・面積計で粒子の投影断面積と投影断面の外周長を計測し、式(1)を適用して算出している。なお、同表のFUは各試料から任意に選んだ粒

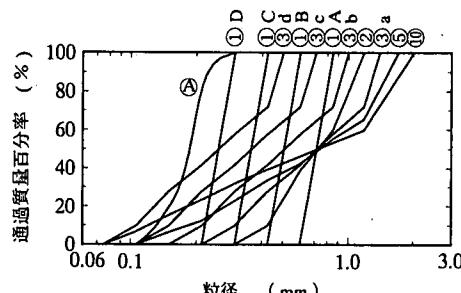


図-1 試料の粒度分布

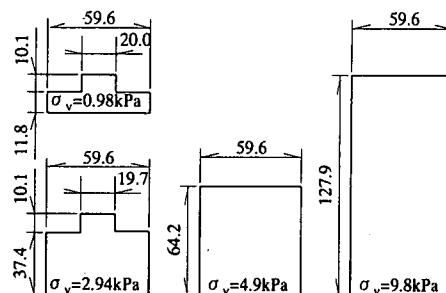


図-2 加圧板(mm)

子 100 個の平均値である。

これらの試料に上載圧 σ_v (= 0, 0.98, 2.94, 4.9, 9.8 kPa) を作用させ、JCS T 161-1990 に従って砂の最大密度試験を行った。上載圧としては図-2 に示すステンレス製の円筒状加圧板を使用した。本試験では、カラーを装着したモールドに試料を 10 層に分けて注入・締固めするが、各層の試料を注入する毎に加圧板を載せてモールドを打撃して試料を締固めた。また、打撃による誤差を減少させるため、最大密度自動測定装置を用いた。

b) 実験結果と考察

図-3(a)は、单一粒径に近い試料の最小間隙比 $e_{min} \sim \sigma_v$ 関係である。これらの試料のうち吉井川砂、粉碎 GB、碎石および豊浦標準砂は、 σ_v に対して e_{min} は単調増加傾向にあり、畠中らの研究¹⁴⁾と同じ傾向を示している。これは、打撃によって粒状体が高密度化する際に、拘束圧が粒子の移動を妨げるためと考えられる。この結果から、FU が 0.8 程度の单一粒径に近い粒状体では、無載荷の場合に e_{min} が最小になると言える。ところが、GB では $\sigma_v = 0.98$ kPa で e_{min} が最小になっている。これは、粉碎 GB との比較から、FU が著しく異なることに起因すると言えよう。すなわち、GB の粒子形状は球に近いため、上載圧が無いと粒子が踊って締まりにくいが、適当な上載圧を与えることで粒子の踊りが抑制されて締まりやすくなると思われる。そしてその適当な上載圧以上に

表-2 試料の物理的性質

試料名	粒径加積曲線番号	U_c	G_s	D_{50} (mm)	FU
吉井川砂	①A	1.19	2.656	0.718	0.834
	①B	"	2.647	0.510	0.824
	①C	"	2.654	0.360	0.830
	①D	"	2.653	0.252	0.825
	②	2.00	2.658	0.718	0.830
	③a	3.00	2.658	0.718	0.828
	③b	"	2.657	0.510	0.822
	③c	"	2.655	0.360	0.826
	③d	"	2.655	0.252	0.819
	⑤	5.44	2.659	0.718	0.828
	⑩	9.83	2.661	0.718	0.817
碎石	①A	1.19	2.647	0.718	0.796
	①B	"	2.648	0.510	0.771
	①C	"	2.650	0.360	0.808
	①D	"	2.650	0.252	0.811
	②	2.00	2.652	0.718	0.785
	③a	3.00	2.652	0.718	0.804
	③b	"	2.651	0.510	0.807
	③c	"	2.646	0.360	0.801
	③d	"	2.643	0.252	0.787
	⑤	5.44	2.651	0.718	0.799
	⑩	9.83	2.648	0.718	0.786
GB	①A	1.19	2.488	0.718	0.980
粉碎 GB	①A	1.19	2.502	0.718	0.769
豊浦標準砂	①	1.46	2.638	0.180	0.792

σ_v が増加すると、再び拘束圧が粒子の移動を妨げて e_{min} が大きくなると考えられる。

図-3(b)は、平均粒径 D_{50} が同じ試料の $e_{min} \sim \sigma_v$ 関係である。同じ σ_v でみると均等係数 U_c が大きくなると e_{min} は小さくなるという一般的な傾向を示している。しかし、 U_c が 2 程度以上になると、 e_{min} と σ_v の関係は、図-3(a)の GB と同様の傾向を示している。これは、大きい粒子の間隙に小さい粒子が配位されて試料が高密度化する際、適当な上載圧が粒子の移動を無載荷の場合よりも容易にするためであろう。

図-3(c)は、相似粒度に調整した試料の $e_{min} \sim \sigma_v$ 関係である。 $U_c = 1.19$ の試料群では σ_v に対して e_{min} は単調増加傾向にあり、 $U_c = 3.0$ の試料群では図-3(a)の GB と同様の傾向にあり、どちらも前述の傾向を示している。また、同図から、 D_{50} が $e_{min} \sim \sigma_v$ 関係の傾向に及ぼす影響は伺えない。ただし、吉井川砂の $U_c = 1.19$ の場合には、各 σ_v において「 D_{50} が大きくなると e_{min} が小さくなる。」という顕著な粒径依存性が伺える。この粒径依存性については次節で論じる。

本節の実験結果から、以下のことが判明した。

- 砂、碎石および粉碎 GB 試料の FU は 0.8 前後である。このような角張った单一粒径に近い粒状体で

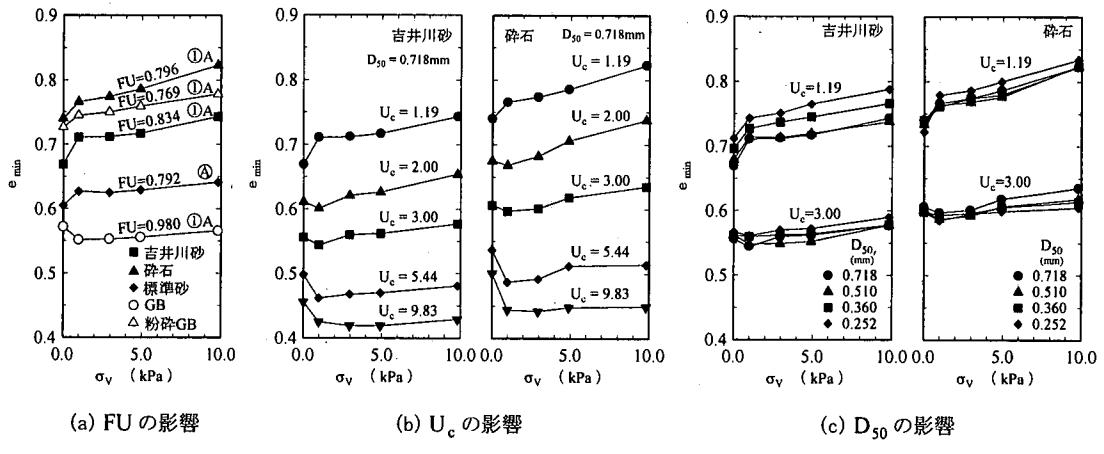


図-3 e_{\min} ~ σ_v 関係

は、無載荷の場合に e_{\min} が最小になり、畠中ら¹⁴⁾の研究結果と一致する。しかし、単一粒径かつ球形に近い GB ($FU = 0.98$) では、 $\sigma_v = 0.98 \text{ kPa}$ で e_{\min} が最小になる。したがって、GB のように砂や碎石などとは粒子形状が著しく異なる場合、上載圧が e_{\min} に及ぼす影響は大きく異なると言えよう。

② 単一粒径に近い砂や碎石試料の場合、無載荷の場合に e_{\min} が最小になる。しかし、 U_c が 2 程度以上になると、適当な上載圧 ($\sigma_v = 0.98 \sim 4.9 \text{ kPa}$) が与えられた場合に e_{\min} が最小になっている。これは、畠中ら¹⁴⁾の研究結果とは異なるが、彼らの結論は単一粒径に近い試料を用いた実験から得られたことを付言しておく。

以後の実験では、単一粒径に近い GB あるいは U_c が 2 以上の砂を試料として深さ 40mm のモールドを用いた最大密度試験を行う場合に限り、試料に $\sigma_v = 0.98 \text{ kPa}$ を作用させることにする。なお、上載圧として $\sigma_v = 0.98 \text{ kPa}$ を採用した理由は、本研究で検討する大容量モールドを用いた最大密度試験におけるモールド内の平均土被り圧が概ね 0.98kPa 前後になるためである。

(2) 最大・最小間隙比の粒径依存性

相似粒度をなす砂の最大・最小密度試験を行った場合、「粒径が大きくなると最大・最小間隙比が小さくなる。」とした報告例^{18), 19)}がある。この粒径依存性は、粗粒材料を用いた最大・最小密度試験結果においても報告されており、粒子形状が粒径によって異なることに起因すると考えられている²⁰⁾。しかし、筆者ら^{21), 22)}の砂や碎石を用いた実験では、粒子形状が粒径によってあまり変わらなくても、顕著な粒径依存性が認められた。本節では、この粒径依存性の原因を明らかにするため、平面摩擦角 ϕ_p^* ²³⁾に着目

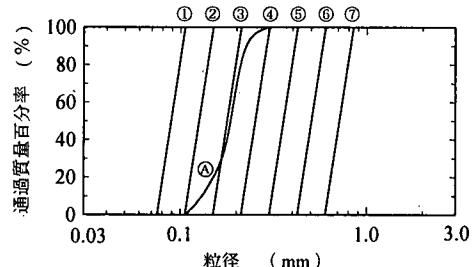


図-4 試料の粒度分布

表-3 試料の物理的性質と ϕ_p^*

試料名	粒径加積 曲線番号	U_c	G_s	D_{50} (mm)	FU	e_{\max}	e_{\min}	ϕ_p^* (度)
吉井川砂	①	1.19	2.673	0.090	0.810	1.330	0.799	24.94
	②	"	2.658	0.127	0.831	1.254	0.758	24.28
	③	"	2.660	0.180	0.818	1.204	0.739	22.61
	④	"	2.653	0.252	0.825	1.131	0.712	22.51
	⑤	"	2.654	0.360	0.830	1.098	0.713	21.41
	⑥	"	2.647	0.510	0.824	1.038	0.679	19.95
	⑦	"	2.656	0.718	0.834	1.018	0.669	18.98
碎石	①	1.19	2.623	0.090	0.777	1.273	0.755	23.65
	②	"	2.631	0.127	0.794	1.237	0.746	23.44
	③	"	2.645	0.180	0.809	1.215	0.733	22.27
	④	"	2.650	0.252	0.811	1.188	0.722	22.44
	⑤	"	2.650	0.360	0.808	1.196	0.740	21.78
	⑥	"	2.648	0.510	0.771	1.190	0.734	21.16
	⑦	"	2.647	0.718	0.796	1.186	0.740	20.56
豊浦標準砂	⑧	1.46	2.638	0.180	0.792	0.980	0.605	19.20

した実験を行う。

a) 実験用試料と実験方法

吉井川砂および碎石を JIS の全標準ふるいで図-4 のように粒度調整したものと豊浦標準砂を実験用試料とした。試料の物理的性質を表-3 に示す。

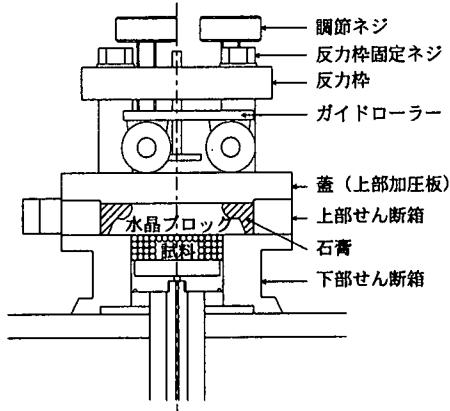


図-5 平面摩擦測定装置

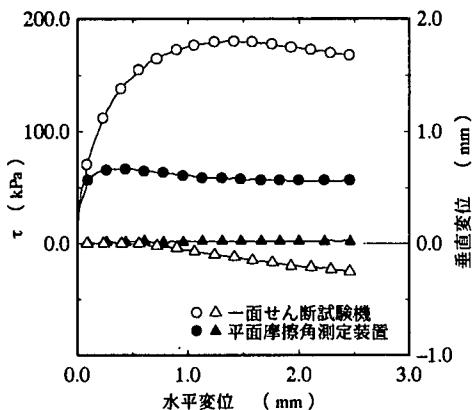


図-6 水平変位～せん断応力、垂直変位関係
(豊浦標準砂)

まず、JGS T 161-1990 に従い、最大密度自動測定装置および最小密度自動測定装置を用いて、各試料の最大間隙比 e_{\max} 、最小間隙比 e_{\min} を求めた。つぎに、図-5 に示す装置で、水晶ブロック面とそれにポイントで接する多数の粒子との間での摩擦を測定し、乾燥状態の各試料のピークせん断応力時の平面摩擦角 ϕ_p を求めた。この装置は、一面せん断試験の機構を利用しておらず、Rowe²³⁾が ϕ_p の測定に用いたものと同様である。 ϕ_p は密度や垂直応力 σ_n の影響をほとんど受けないため²⁴⁾、各試料の初期相対密度は 50% とし、 $\sigma_n = 196 \text{ kPa}$ とした。また、平面摩擦測定装置の水晶ブロック面は 320 メッシュ仕上げ(磨りガラス程度)である。なお、豊浦標準砂については定圧式の一面せん断試験を行った。

b) 実験結果と考察

図-6 は、豊浦標準砂の一面せん断試験と平面摩擦測定から得られた水平変位～せん断応力 τ 、垂

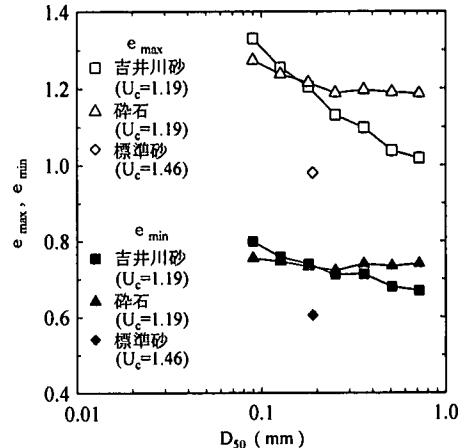


図-7 $D_{50} \sim e_{\max}, e_{\min}$ 関係

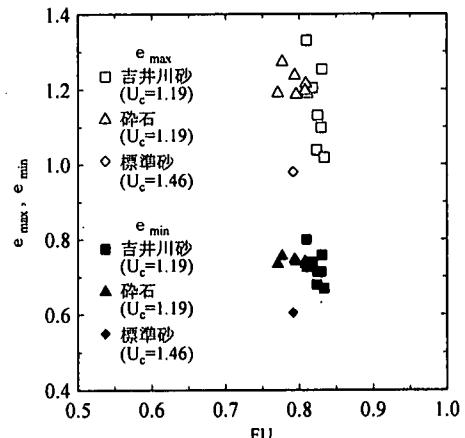


図-8 $FU \sim e_{\max}, e_{\min}$ 関係

直変位関係である。一面せん断試験ではダイレイタシーやによる体積膨張が生じているが、平面摩擦測定では体積変化はほとんどない。このことから、下部せん断箱内の粒子の移動はなく、測定される τ は、水晶ブロック面とそれにポイントで接する粒子との間の摩擦であることが推察される。そして、この摩擦の大きさは、粒子の材質や粒子表面の微視的構造および水晶ブロック面の微視的構造によって決まるることは想像に難くない。したがって、水晶ブロック面の微視的構造が一定とすれば、 ϕ_p は粒子の材質や粒子表面の微視的構造を表す摩擦角と考えることができよう。なお、 ϕ_p は水晶ブロック面の研磨度によって異なるため²⁴⁾、今回の 320 メッシュ仕上げにおける ϕ_p という意味で以後は ϕ_p^* と記す。

図-7 に $D_{50} \sim e_{\max}, e_{\min}$ 関係を示す。吉井川砂、碎石ともに前述の粒径依存性が認められ、吉井川砂のそれはとくに顕著である。なお、標準砂は、参考

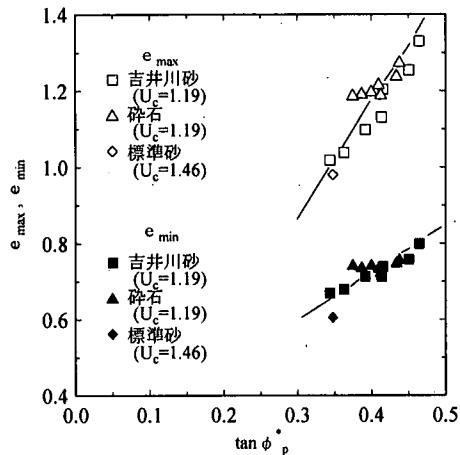


図-9 $\tan \phi_p^*$ ~ e_{\max} , e_{\min} 関係

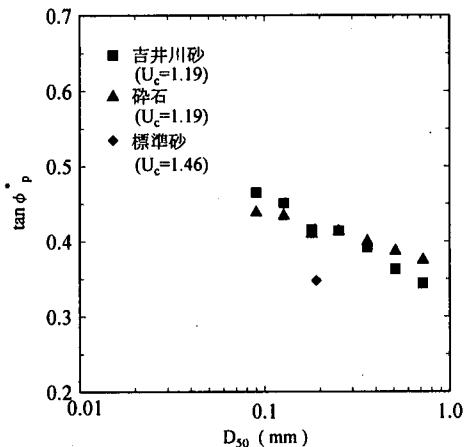


図-10 D_{50} ~ $\tan \phi_p^*$ 関係

データとして示している。

図-8 に F_U ~ e_{\max} , e_{\min} 関係を示すが、相関性は全く認められない。したがって、粒子形状では e_{\max} , e_{\min} の粒径依存性は説明できないと結論される。

図-9 に $\tan \phi_p^*$ ~ e_{\max} , e_{\min} 関係を示すが、非常に良い直線関係が認められる。実験用試料は相似粒度であるので、 e_{\max} , e_{\min} に影響を及ぼす因子は、表-1 のうち粒子形状、粒子の材質および微視的な表面構造である。このうち、図-8 の結果から、粒子形状を棄却すれば、残る因子は粒子の材質と微視的な表面構造である。これらは ϕ_p^* の影響因子もあるから、 $\tan \phi_p^*$ ~ e_{\max} , e_{\min} が強い相関を示すと思われる。

図-10 に D_{50} ~ $\tan \phi_p^*$ 関係を示すが、吉井川砂と碎石にはそれぞれ非常に良い直線関係が伺える。この直線関係と図-9 に示す $\tan \phi_p^*$ と e_{\max} , e_{\min} との直

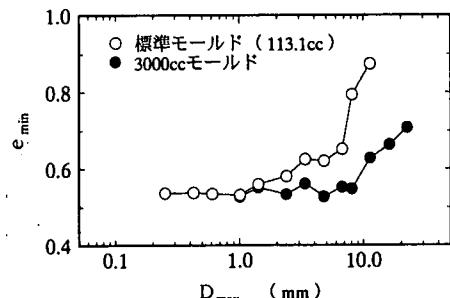


図-11 ガラスビーズの最小間隙比急増現象

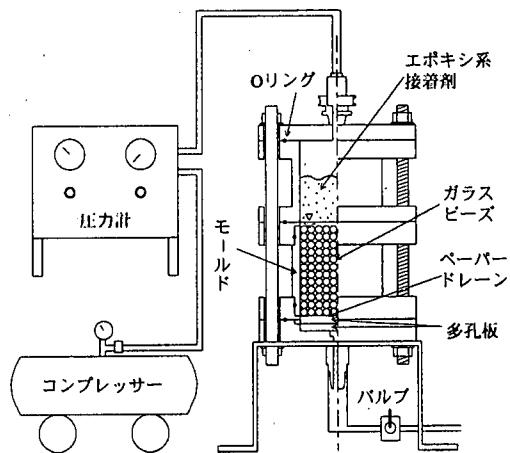


図-12 固結剤注入装置

線的関係から、「 U_c が小さい場合、相似粒度をなす砂の最大・最小間隙比に粒径依存性が生じるのは、 ϕ_p^* が粒径によって異なることが重要な原因の一つである」と言えよう。

この最大・最小間隙比の粒径依存性が最大粒径制限値の拡大に及ぼす影響については、本節の知見を踏まえ、次節で考察する。

(3) 粒子の充填構造

図-11 に図-21 の一部を示す。これは、相似粒度をなす単一粒径に近いガラスビーズの最大粒径 D_{\max} ~ e_{\min} 関係であり、現行試験法の標準モールドでは D_{\max} が 1 mm、容量が 3000cc 程度の締め固め試験用モールドでは D_{\max} が 8 mm より大きくなると e_{\min} が急増している。この現象は、相似粒度をなす单一粒径に近いガラスビーズの D_{\max} ~ e_{\max} 関係においても発生する¹⁶⁾。その原因は、試料の余盛り除去のために表面をならす際、表面付近の粒子が取り除かれて空隙が増加するためと考えられている¹¹⁾。しかし、筆者ら²⁵⁾は、モールド内壁付近の試料の局所充

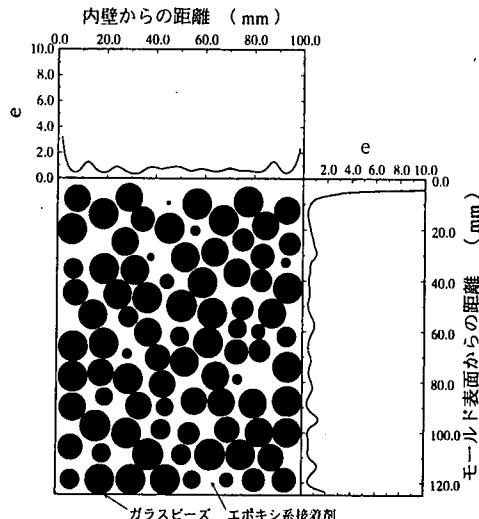


図-13 モールドの切断面と間隙比分布（呼び径 12mm）

填構造²⁶⁾もその原因の一つと考えている。本節では、モールド内のガラスビーズの間隙比分布を求める実験を行い、最大・最小間隙比急増現象の原因を明らかにし、次章で最大粒径制限値の拡大方法を検討する際の基底とする。

a) 実験用試料と実験方法

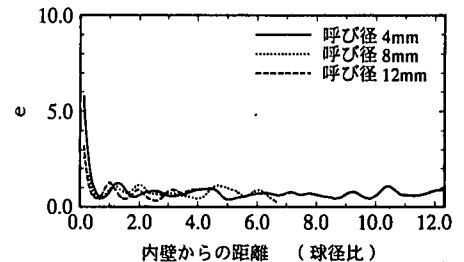
呼び径 4mm, 8mm および 12mm の市販の単一粒径に近いガラスビーズを実験用試料とした。

塩化ビニール製の容量約 1000cc のモールド（内径 100mm, 深さ 127.3mm）に試料を最大密度となるよう現行試験法に準じて充填し、図-12 に示す装置で試料の間隙にエポキシ系接着剤を注入した。1 日間の養生後、コンクリートカッターで鉛直方向にモールドを切断した。切断面の写真を撮り、鉛直方向に呼び径の $\frac{1}{4}$ の幅で分割した断面毎の間隙比から半径方向の間隙比分布を求めた。同様に、水平方向に断面を分割して深さ方向の間隙比分布を求めた。

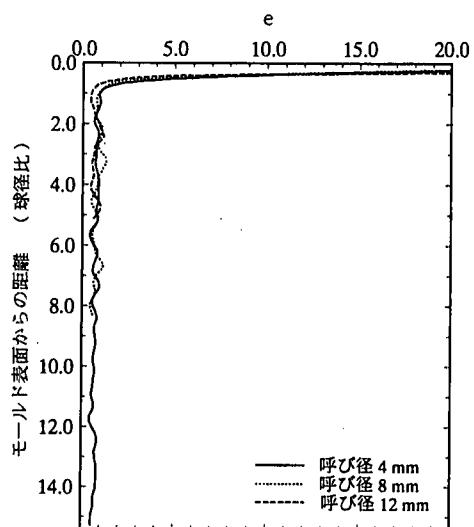
b) 実験結果と考察

図-13 に呼び径 12mm のガラスビーズを充填したモールドの切断面の間隙比分布を示す。モールドの表面では、試料の余盛り除去の際に表面付近の粒子が取り除かれ、粒子の緩詰まり領域が形成されていることが分かる。また、半径方向の間隙比分布をみると、モールド内壁付近の間隙比がかなり大きくなっている。これは、内壁と粒子との摩擦や幾何学的条件などにより、モールド中心部に比べて内壁付近では粒子が緩く詰まった状態（局所充填構造）になっているためと考えられる。

図-14 はモールド表面あるいは内壁からの距離を呼び径で除して無次元化したもの（球径比）と間隙比の関係である。呼び径 4mm, 8mm および 12mm の間隙



(a) 半径方向



(b) 深さ方向

図-14 ガラスビーズの間隙比分布

分布は概ね相似形になっており、ガラスビーズの直径を D とすると、モールド表面から約 $1 D$ の深さまでと内壁から約 $0.5 D$ までが粒子の緩詰まり領域と言えよう。これは、相似粒度試料の最大・最小間隙比急増現象が粒径とモールド形状に応じて系統的に生じることを意味している。ちなみに、各試料の切断面の間隙比は、0.556（呼び径 4mm）、0.616（8mm）、0.685（12mm）であった。

以上のことから、前節に述べた相似粒度試料の最大・最小間隙比の粒径依存性には、図-15に示すように μ_p^* による粒径依存性と試料の余盛り除去や粒子の局所充填構造による最大・最小間隙比増分の粒径依存性が混在していると言えよう。とは言え、試験法の目的は後者の影響も含んだ密度を調べることであるから、あえて前者と後者を厳密に分離して以後の議論を進める必要はないと思われる。ただし、後者の影響が著しくなるまで、すなわち最大・最小間隙比急増現象が発生する粒径までを試験法の適用限界とする必要はある。そこで、次章以降の相似

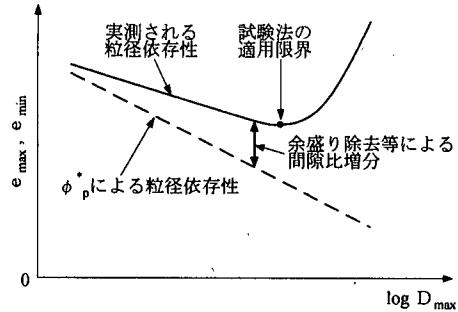


図-15 相似粒度試料における最大・最小間隙比の粒径依存性(概念図)

粒度試料を用いた実験で得られる $D_{\max} \sim e_{\max}, e_{\min}$ 関係においては、明らかに最大・最小間隙比急増現象が始まると思われる最大粒径を試験法の適用限界とする。その具体的な判定基準は第4章第1節に述べる。

(4) 最大間隙比に及ぼす漏斗口径の影響

現行の最小密度試験法では、口径12mmの円錐形漏斗を用いて標準モールド(内径60mm、深さ40mm)に試料を注入するよう定められている。しかし、最大粒径が2mmを超える試料、ましてや12mmを超える試料の場合、漏斗口径を12mmより大きくする必要がある。そこで本節では、試料の最大粒径に対して漏斗口径をどの程度大きくすればよいか、漏斗口径が最大間隙比にどの程度影響するか等を検討する。

a) 実験用試料と実験方法

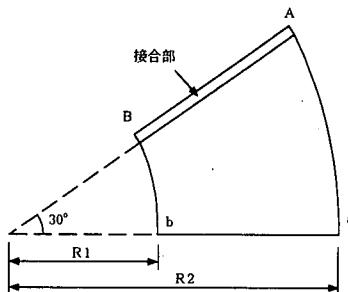
図-19に示す单一粒径に近いガラスビーズと図-26に示す $U_c = 1.19$ の相似粒度をなす碎石および標準砂を実験用試料とした。

口径12, 20, 30, 40, 50, 60, 70mmのステンレス製の漏斗を図-16の仕様で準備した。これらの漏斗を用い、容量約1000ccの締固め試験用モールドに、各種実験用試料を最小密度となるよう現行試験法に準じて充填した。

b) 実験結果と考察

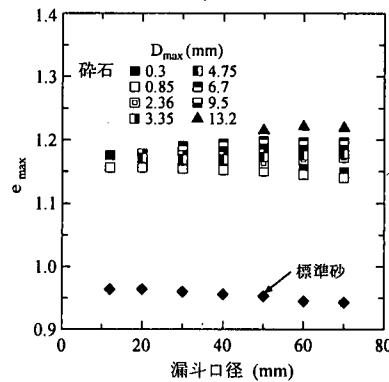
図-17に漏斗口径～ e_{\max} 関係を示す。図中の同じ試料で漏斗口径に対して e_{\max} のデータが欠落しているのは、試料が漏斗内部に詰まり、実験ができなかったためである。その原因は、① 試料の D_{\max} が漏斗口径よりも大きい、② 漏斗内部で一種のサイロ効果が生じたことが考えられる。図-17から、試料が漏斗に詰まらない条件は、ガラスビーズでは漏斗口径が D_{\max} の3倍以上、碎石のそれは3～4倍以上であることがわかる。

図-17において D_{\max} が2.36～9.5mmの試料の場合、漏斗口径～ e_{\max} 関係はほぼ一定である。一方、

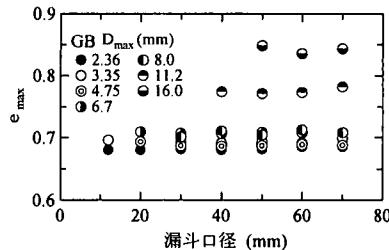


No.	口径 ϕ	R1	R2
1.	12	72	600
2.	20	120	600
3.	30	180	600
4.	40	240	610
5.	50	300	620
6.	60	360	640
7.	70	420	660

図-16 漏斗の展開図(単位:mm)



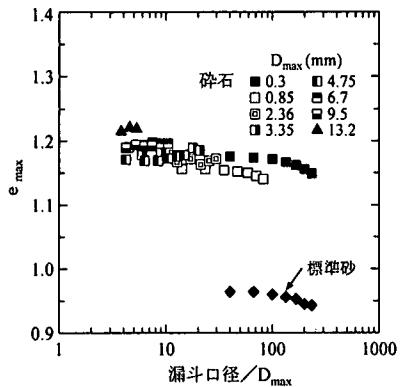
(a) 碎石および標準砂



(b) ガラスビーズ

図-17 漏斗口径～ e_{\max} 関係

D_{\max} が2.36mm未満の試料、すなわち碎石の $D_{\max} = 0.3, 0.85\text{mm}$ および標準砂の場合、漏斗口径が大きくなると e_{\max} が小さくなる傾向が伺える。図-17の漏斗口径を D_{\max} で除し、(漏斗口径/ D_{\max})～ e_{\max} 関係としたものを図-18に示す。図-18から、漏斗口径が D_{\max} の20～数十倍以上になると漏斗口径は



(a) 碎石および標準砂

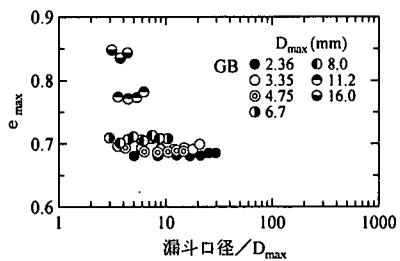


図-18 (漏斗口径/ D_{\max}) ~ e_{\max} 関係

e_{\max} に影響を及ぼすと言えよう。

以上の結果から、 D_{\max} が 2mm より大きい試料を用いる次章以降の最小密度試験では、漏斗口径が D_{\max} の 3~4 倍程度の漏斗を用いることにする。

4. 最大粒径制限値の拡大方法の検討

(1) モールドの大容量化

最大粒径制限値の拡大方法の一つとして、現行試験法の標準モールド（内径 60mm、深さ 40mm）よりも容量の大きいモールドを用いて現行試験法と同等の最大・最小密度が得られる試験法の設定が考えられる¹⁾。本研究では、試験方法は原則的に現行試験法に準じ、モールドの大容量化による最大粒径制限値の拡大を試みる。ところで、大容量モールドを用いた最大・最小密度試験を行う場合、試験に要する労力、試料に与える打撃エネルギーおよび各種サンプラーによる試料の採取量等を勘案するとモールドの容量は 3000cc 程度が限度と想定される。そこで本節では、最大・最小間隙比急増現象に着目して容量 3000cc 程度以内の各種モールドの最大粒径制限値を求め、最大粒径制限値の拡大に寄与できる最適なモールドを選定する。

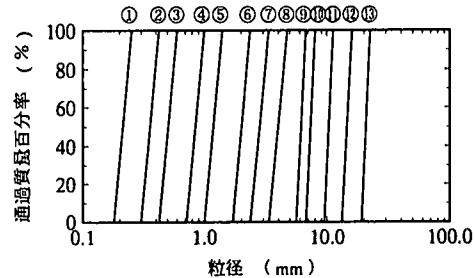


図-19 ガラスピーツ試料の粒度分布

表-4 ガラスピーツ試料の物理的性質

粒径加積 曲線番号	U_c	G_s	D_{\max} (mm)	D_{50} (mm)	FU
①	1.19	2.484	0.250	0.212	0.975
②	"	2.492	0.425	0.360	0.982
③	"	2.490	0.6	0.510	0.978
④	"	2.485	1.0	0.850	0.979
⑤	"	2.489	1.4	1.18	0.982
⑥	"	2.482	2.36	2.0	0.962
⑦	"	2.510	3.35	2.8	0.976
⑧	"	2.502	4.75	4.0	0.996
⑨	1.09	2.521	6.7	6.15	0.982
⑩	"	2.518	8.0	7.35	0.958
⑪	"	2.509	11.2	10.35	0.978
⑫	"	2.499	16.0	14.6	0.985
⑬	"	2.488	22.4	20.7	0.982

a) 実験用試料と実験方法

市販のガラスピーツを JIS の全標準ふるいで図-19 のように粒度調整したものを実験用試料とした。実験用試料の物理的性質を表-4 に示す。

図-20 に示すような深さと内径の異なる 9 種類の円筒状モールドを準備し、モールドごとに最大・最小密度試験を行った。容器以外の試験方法は原則的に JGS T 161-1990 に従っている。しかし、最大密度試験では、上載圧の影響を考慮して、深さ 40mm のモールドの場合は、試料に $\sigma_v = 0.98 \text{ kPa}$ を作用させた。また、最小密度試験では、それぞれのモールドに見合う漏斗をステンレスで作製し、口径が最大粒径の 3 倍以上の漏斗を用いた。

b) 実験結果と考察

図-21 は、最大粒径 D_{\max} ~ e_{\max} , e_{\min} 関係をモールドの深さごとに整理したものである。同図より、各ケースの間隙比が急増していない部分の e_{\max} あるいは e_{\min} の値は概ね等しいことが分かる。また、内径が等しいモールドを比較すると、浅いモールドほど間隙比急増の度合いが大きい傾向がわかる。同様に、深さが等しいモールドであれば、内径が小さ

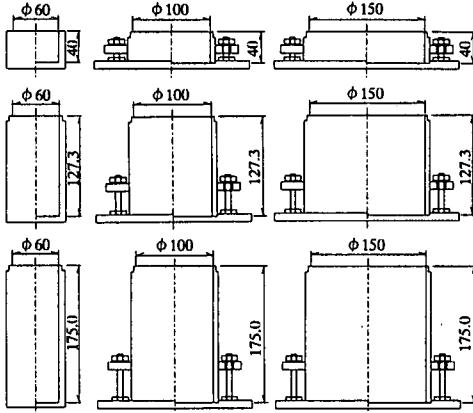


図-20 実験用モールド (mm)

表-5 限界最大粒径 D_{max}^u (表中のハッチ部分は基準最大粒径 D_{max}^* である。)

モールド深さ (mm)	密度試験	モールド内径 (mm)		
		φ 60	φ 100	φ 150
40.0	最小	1.40	1.40	1.40
	最大	1.00	1.00	1.40
127.3	最小	2.36	8.00	8.00
	最大	2.36	8.00	8.00
175.0	最小	3.35	8.00	8.00
	最大	2.36	8.00	8.00

いほど間隙比急増の度合いが大きい。これは、前章第3節に述べた試料の余盛り除去および内壁付近の粒子の局所充填構造に起因していると思われる。

図-21 の各ケースにおいて e_{max} あるいは e_{min} が連続して増加し始める D_{max} を限界最大粒径 D_{max}^u と定義し、これを図中に矢印で示す。 D_{max}^u の値を表-5 にまとめて示すが、どのモールドにおいても最大密度試験から得られる D_{max}^u と最小密度試験から得られる D_{max}^u の差はあまりない。ここで、同じモールドを用いた最大・最小密度試験から得られる D_{max}^u の小さい方を基準最大粒径 D_{max}^* と定義し、その D_{max}^* の値を表-5 に示す。 D_{max}^* は単一粒径に近い試料における各モールドの最大粒径制限値とみなしてよいであろう。

表-5 をみると、モールドの深さが 127.3mm 以上かつ内径が $\phi 100$ 以上のケースでは、 D_{max}^* は同じ値 ($=8\text{mm}$) になっている。ただし、同じ D_{max}^* の場合、モールド容量が大きいほど e_{max} , e_{min} は小さく、余盛り除去等の影響が小さいと思われる。したがって、本実験で用いたモールドの中では、最大容量のモールド(深さ 175mm, 内径 150mm)を最大粒径制限値の拡大に用いるべきであろう。しかし、試験に要する労力等を考慮すると、深さ 127.3mm, 内径 100mm の締固

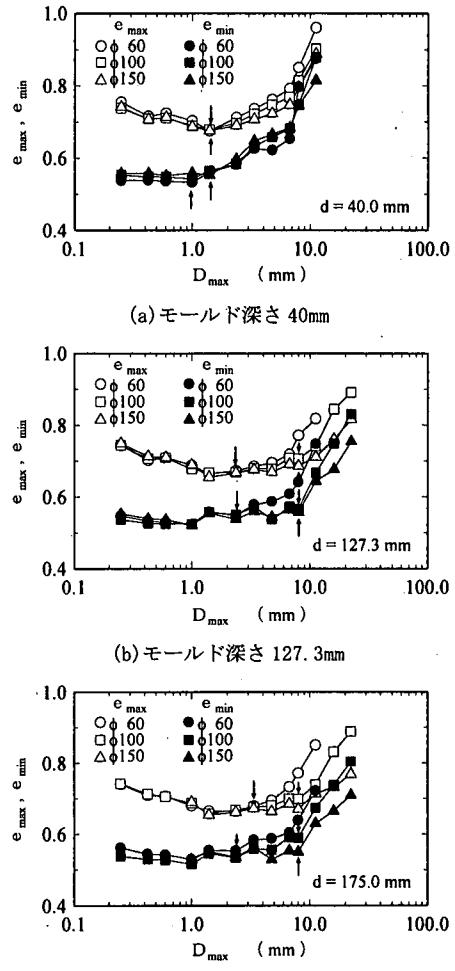
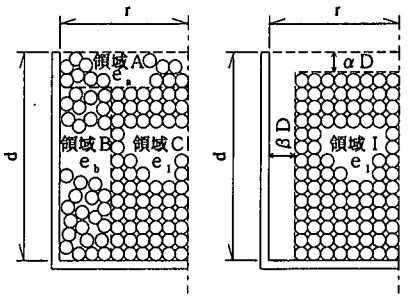


図-21 $D_{max} \sim e_{max}$, e_{min} 関係

め試験用モールド(以後、1000cc モールドと称す)を用いるのが最も実用的かつ効果的と考えられる。

(2) 粒度分布を考慮した最大粒径の制限法

社本ら⁵⁾は、2mm 以上の粒径を含む試料を調べ、少なくとも 95% 粒径 D_{95} が 4mm までは、現行の最大密度試験の適用範囲を拡大することが可能と述べている。また、陶野⁶⁾は、最大粒径が 4.76mm までの試料に現行の最小密度試験は適用可能としている。これらは、最大粒径が 2mm を超える粒子の割合が小さい試料の場合には、現行試験法を適用できる可能性を示唆している。そこで本節では、ガラスピーブのような球体からなる粒状体の最大・最小間隙比急増現象をモデル化して最大・最小密度試験法の試料への適用の可否に関する判定式を誘導し、粒度分布を考慮した合理的な最大粒径の制限法を提案する。なお、提案法の妥当性の検証は次章で行う。



(a) 現実に近い状態 (b) 理想化した状態
図-22 単一粒度試料の間隙比分布モデル

a) 最大・最小間隙比急増現象のモデル化

① 単一粒度の場合

直径 D の球体粒子からなる单一粒径の粒状体を試料として深さ d , 半径 r のモールドに詰めた際, この粒状体の間隙比は概ね図-22(a)のように分布するであろう。同図では、試料の余盛り除去や局所充填構造の影響を受けない中央部分(領域C)の平均的な間隙比を e_l とし, モールドの表面付近(領域A)および内壁付近(領域B)では粒子が緩く詰まり, それぞれの平均的な間隙比を e_a ($> e_l$), e_b ($> e_l$) と考えている。さて, この領域A, Bの e_a , e_b を空隙と e_l に分け, 領域Cと合わせたものが図-22(b)である。同図では, 粒子実質部分の体積が図-22(a)のそれと等しくなるよう, 深さ方向に αD , 半径方向に βD の厚みをもつ空隙領域を設定している。なお, 係数 α および β は, e_l の値によって若干変化すると思われるが, ここでは一定値と仮定する。

モールドの容積を $V (= \pi dr^2)$ とすると, 図-22(b)の領域Iの体積 V_I は次式で与えられる。

$$V_I = \pi dr^2 \left(1 - \frac{\alpha D}{d}\right) \left(1 - \frac{\beta D}{r}\right)^2 \quad (2)$$

高次の項を無視すると, V_I は近似的に,

$$V_I \approx \pi dr^2 \left\{1 - \left(\frac{\alpha D}{d} + 2 \frac{\beta D}{r}\right)\right\} \quad (3)$$

となる。また, 粒子実質部分の体積 V_{ls} は, 次式で与えられる。

$$V_{ls} = V_I / (1 + e_l) \quad (4)$$

図-22の空隙領域も含めたモールド内の平均間隙比 \bar{e}_l は次式で表される。この \bar{e}_l は最大・最小密度試験で実測される間隙比にあたる。

$$\bar{e}_l = \frac{\pi dr^2 - V_{ls}}{V_{ls}} \quad (5)$$

余盛り除去や局所充填構造に起因する間隙比増分を $\Delta e_l (= \bar{e}_l - e_l)$ とすれば, 式(3)～(5)より,

$$\Delta e_l = (1 + e_l) \frac{\left(\frac{\alpha D}{d} + 2 \frac{\beta D}{r}\right)}{1 - \left(\frac{\alpha D}{d} + 2 \frac{\beta D}{r}\right)} \quad (6)$$

となる。上式は, D が大きくなると Δe_l が大きくなっている間隙比増加現象が生じること, あるいはモールドを大きくすれば試料の Δe_l が減少することを表している。

② 任意粒度の場合

球体粒子からなる任意粒度の粒状体を試料として深さ d , 半径 r のモールドに詰めた際, この粒状体の間隙比の分布は, 単一粒度の場合と同様に図-23左辺のように考える。図中の D_m は任意粒度の粒状体の平均粒径 ($\neq D_{50}$) であり, 間隙比 e_2 は単一粒度における最も密な状態(pyramidal or tetrahedral packing)の間隙比 ($= 0.3504^{27}$) 以上とする。また, 図-23左辺の状態は, 右辺のように各粒径 D_i 每に単一粒度の試料を間隙比 e_2 で同じモールドに充填したものに質量残留率 p_i ($\sum p_i = 1$) を乗じて重ね合わせた状態と等価であると仮定する。なお, 質量残留率は, 最小粒径から数えて i 番目のふるい径を通過し ($i-1$) 番目のふるい径に留まる試料の質量を試料の全質量で除したものと定義する。

図-23右辺の各モールドの領域Iの体積 V_{Ii} および領域Iにおける粒子実質部分の体積 V_{ls_i} は, 単一粒度の場合と同様に考えると, それぞれ次式で表される。

$$V_{Ii} = \pi dr^2 \left\{1 - \left(\frac{\alpha D_i}{d} + 2 \frac{\beta D_i}{r}\right)\right\} \quad (7)$$

$$V_{ls_i} = V_{Ii} / (1 + e_2) \quad (8)$$

図-23左辺のモールドの空隙領域も含めたモールド内の平均間隙比 \bar{e}_2 は, 右辺との関係から,

$$\bar{e}_2 = \frac{\pi dr^2 - \sum p_i V_{ls_i}}{\sum p_i V_{ls_i}} \quad (9)$$

となる。

試料の余盛り除去や局所充填構造に起因する間隙比増分を $\Delta e_2 (= \bar{e}_2 - e_2)$ とすれば, 式(7)～(9)より,

$$\Delta e_2 = (1 + e_2) \frac{\left(\frac{\alpha \sum p_i D_i}{d} + 2 \frac{\beta \sum p_i D_i}{r}\right)}{1 - \left(\frac{\alpha \sum p_i D_i}{d} + 2 \frac{\beta \sum p_i D_i}{r}\right)} \quad (10)$$

となる。上式中の $\sum p_i D_i$ は, 図-23左辺の平均粒径 D_m に相当し,

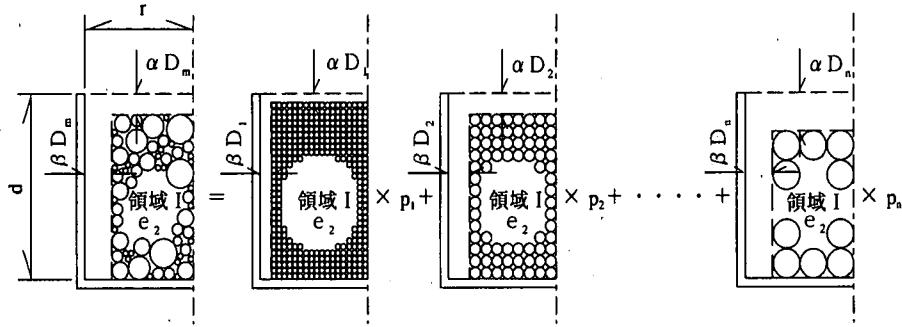


図-23 任意粒度試料の間隙比分布モデル

$$D_m = \sum p_i D_i \quad (11)$$

である。

b) 試験法の試料への適用の可否に関する判定式

粒状体の U_c が大きくなると e_{max}, e_{min} は小さくなる傾向があるので、 $e_1 \geq e_2$ という条件を仮定すれば、ある大きさのモールドにおける式(6)の $\Delta e_1 \sim D$ 関係と式(10), (11)から得られる $\Delta e_2 \sim D_m$ 関係は図-24 のようになり、

$$D^* \geq D_m \text{ ならば } \Delta e_1^* \geq \Delta e_2 \quad (12)$$

の関係が成立する。ここに、 D^* は単一粒径の粒状体を用いた最大・最小密度試験における最大粒径の制限値(d, r によって異なる)であり、 Δe_1^* は式(6)に D^* を代入して得られる間隙比増分である。

式(12)の関係は、「球体粒子からなる任意粒度の粒状体に式(11)を適用して平均粒径 D_m を求めた時、 $D^* \geq D_m$ であれば、その粒状体は最大・最小密度試験において最大粒径の制限を受けない」ことを意味し、次式が最大・最小密度試験法の試料への適用の可否に関する判定式となる。

$$D^* \geq D_m \text{ ならば 適用可} \quad (13a)$$

$$D^* < D_m \text{ ならば 適用不可} \quad (13b)$$

上式を用いれば、試料の粒度分布に応じて最大粒径を制限することができ、最大粒径制限値の拡大が可能となろう。なお、以後の議論は実験データに基づいて行うので、当初仮定した係数 α および β は数値として取り扱わない。

5. 砂礫の最大・最小密度試験法の提案

(1) 砂礫の最大・最小密度試験法

モールドの大容量化、粒度分布を考慮した最大粒

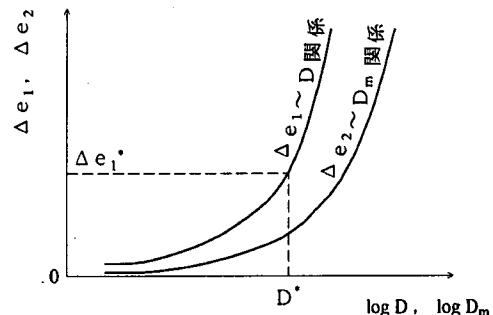


図-24 $\Delta e_1 \sim D$ 関係と $\Delta e_2 \sim D_m$ 関係

径の制限法の適用、あるいはこれらの組み合わせにより、最大粒径が 2mm を超える砂礫に適用できる最大・最小密度試験法を以下のように提案する。

a) 試験方法

試験方法は原則的に現行試験法(JGS T 161-1990)に従うが、モールドは試料の粒度分布に応じて標準モールドあるいは 1000cc モールドを使用する。ただし、 U_c が 2 以上の砂礫を試料として標準モールドを用いて最大密度試験を行う場合に限り、試料に上載圧 $\sigma_v = 0.98 \text{ kPa}$ を作用させる。また、1000cc モールドによって最小密度試験を行う場合、試料の量に見合う大きさで口径 12, 20, 30, 40, 50, 60, 70mm のステンレス製の漏斗を準備し、最大粒径の 3~4 倍程度の口径を目安として用いる。その際、事前に予備試験を行い、試料が詰まらない最小口径の漏斗を選定しておくことが望ましい。

b) 適用範囲

地盤工学会の砂の試験法の基準にならい、細粒分含有率が 5%未満の砂礫を対象とし、砂礫の粒度分布から式(11)で定義される平均粒径 D_m を求め、 $D^* \geq D_m$ となれば試験法の適用が可能と判断する。

ここで、 D^* として表-5 に示す基準最大粒径 D_{max}^*

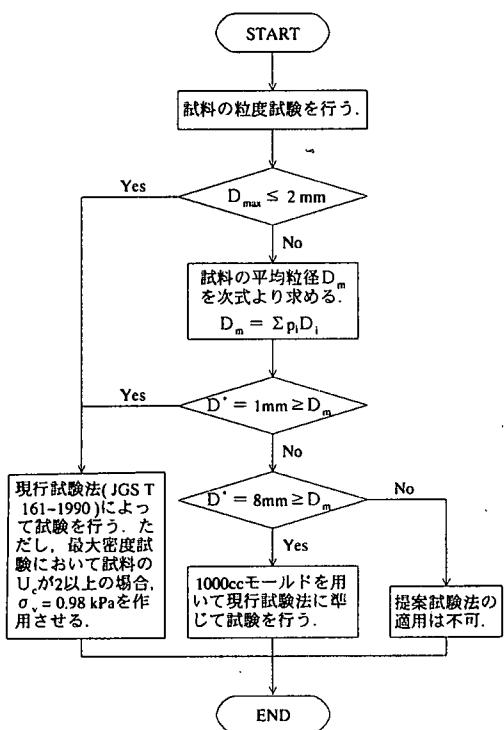


図-25 提案試験法のフロー

を用いる。なお、標準モールドの D^* (=1mm) と 1000cc モールドの D^* (=8mm) は異なるため、使用するモールドによって最大粒径 D_{max} に関する試験法の適用範囲は大きく変わる。

図-25 に上記の提案試験法のフローを示す。

(2) 提案試験法の検証

ここでは、前節で提案した砂礫の最大・最小密度試験法の妥当性を検証するため、相似粒度の砂礫試料を用いた実験を行う。

a) 実験用試料と実験方法

吉井川砂および碎石を JIS の全標準ふるいで図-26 のように粒度調整したものを実験用試料とした。図-26 中の $U_c = 1.19$ の相似粒度試料の物理的性質を表-6 に示す。なお、 $U_c = 3.33, 5.58, 11.19$ の相似粒度試料は、 $U_c = 1.19$ の相似粒度試料をベースに作製した。

標準モールドおよび 1000cc モールドを準備し、モールドごとに実験用試料の最大・最小密度試験を前節に述べた試験方法で行った。

b) 実験結果と考察

図-27、図-28 に吉井川砂および碎石の $D_{max} \sim e_{max}, e_{min}$ 関係を示す。図中の矢印は、 e_{max} あるいは e_{min} が急増し始める最大粒径、すなわち限界最大

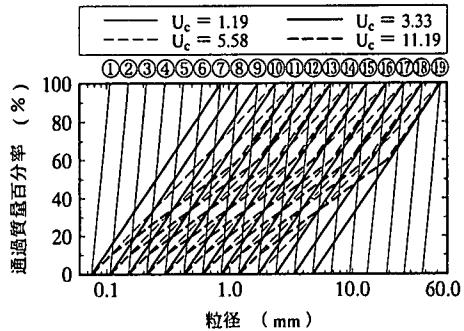


図-26 試料の粒度分布

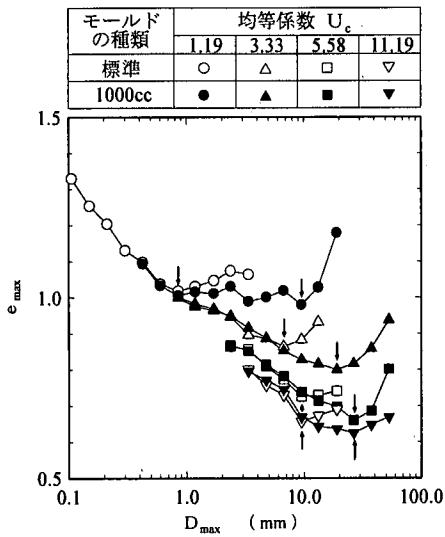
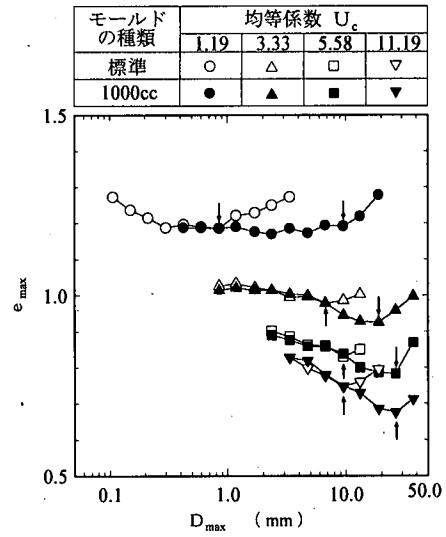
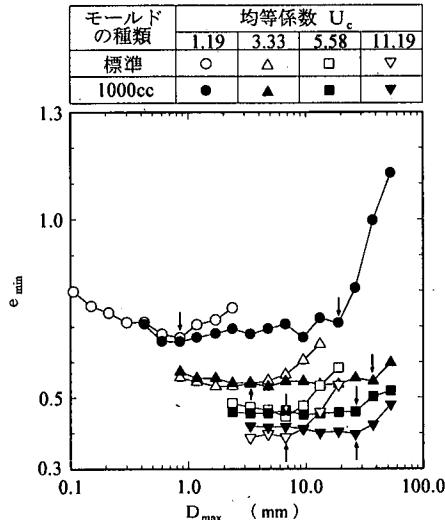
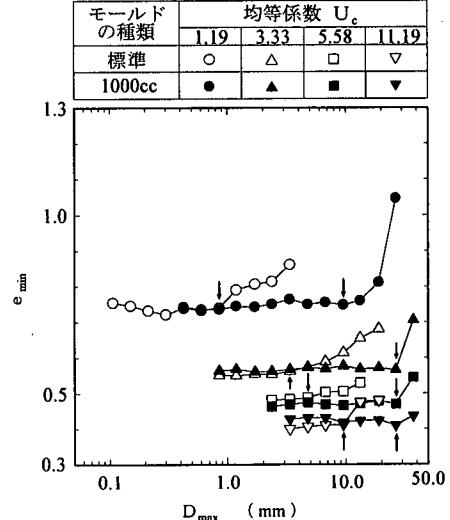
表-6 相似粒度試料 ($U_c = 1.19$) の物理的性質

粒径加積 曲線番号	C_s		D_{max}	D_{50}	FU	
	吉井川砂	碎石	(mm)	(mm)	吉井川砂	碎石
①	2.673	2.623	0.106	0.090	0.810	0.777
②	2.658	2.631	0.150	0.127	0.831	0.794
③	2.660	2.645	0.212	0.180	0.818	0.809
④	2.653	2.650	0.300	0.252	0.825	0.811
⑤	2.654	2.650	0.425	0.360	0.830	0.808
⑥	2.647	2.648	0.600	0.510	0.824	0.771
⑦	2.656	2.647	0.85	0.718	0.834	0.796
⑧	2.667	2.659	1.18	1.0	0.859	0.769
⑨	2.663	2.657	1.7	1.42	0.863	0.786
⑩	2.673	2.650	2.36	2.0	0.857	0.836
⑪	2.677	2.657	3.35	2.80	0.853	0.788
⑫	2.682	2.631	4.75	4.0	0.843	0.813
⑬	2.689	2.648	6.7	5.6	0.872	0.809
⑭	2.616	2.611	9.5	8.0	0.861	0.788
⑮	2.662	2.627	13.2	11.2	0.855	0.808
⑯	2.645	2.631	19.0	16.0	0.875	0.789
⑰	2.667	2.643	26.5	22.5	0.877	0.836
⑱	2.738	2.637	37.5	31.5	0.844	0.816
⑲	2.719	-	53	45	0.850	-

粒径 D_{max}^u を示している。

図-27、図-28 から、 e_{max} が急増していない部分では、1000cc モールドによる最小密度試験から得られた e_{max} と現行試験法のそれは同等であることが分かる。また、 e_{min} が急増していない部分では、1000cc モールドによる最大密度試験から得られた e_{min} と標準モールドのそれは、若干のバラツキはあるが、概ね同等と言えよう。

図-29 に実測 $D_{max}^u \sim$ 推定 D_{max}^u 関係を示す。ここに、実測 D_{max}^u は、相似粒度試料ごとに最大密度試験と最小密度試験から得られる D_{max}^u のうち、値の小さい方である。また、推定 D_{max}^u は以下の手順で求めている。まず、図-26 に示す各相似粒度の粒度分布ごとに式(11)から算出した D_m を D_m^{cal} とする。つぎに、 D_m^{cal} と D_{max} を両対数紙にプロットすると直線関係が得られる。この直線関係において $D_m^{cal} = D^*$ に対応

(a) $D_{\max} \sim e_{\max}$ 関係(a) $D_{\max} \sim e_{\max}$ 関係(b) $D_{\max} \sim e_{\min}$ 関係図-27 吉井川砂の $D_{\max} \sim e_{\max}$, e_{\min} 関係(b) $D_{\max} \sim e_{\min}$ 関係図-28 砕石の $D_{\max} \sim e_{\max}$, e_{\min} 関係

する D_{\max} を推定 D_{\max}^u とする。

図-29をみると、ほぼ全てのケースで推定 D_{\max}^u よりも実測 D_{\max}^u の方が大きく、 $D^u \geq D_m$ となる試料は、充填構造の影響を受けず、最大・最小密度試験法の適用が可能と言えよう。このことは、球体粒子からなる粒状体のモデルから誘導した式(13)の関係が砂礫においても成立することを意味している。

6. おわりに

本研究で得られた主要な結論をまとめると以下の

ようである。

① 砂、碎石および粉碎 GB 試料のように角張った単一粒径に近い粒状体では、無載荷の場合に e_{\min} が最小になる。しかし、単一粒径かつ球形に近いガラスビーズは、 $\sigma_v = 0.98 \text{ kPa}$ で e_{\min} が最小になる。また、砂や碎石試料の場合でも、 U_c が 2 程度以上になると、適当な上載圧 ($\sigma_v = 0.98 \sim 4.9 \text{ kPa}$) が与えられた場合に e_{\min} が最小になる。

② 相似粒度をなす砂の最大・最小間隙比の粒径依存性は、主に、粒径ごとに ϕ_p^* が異なることに起因すると考えられる。そして、この粒径依存性が最大粒

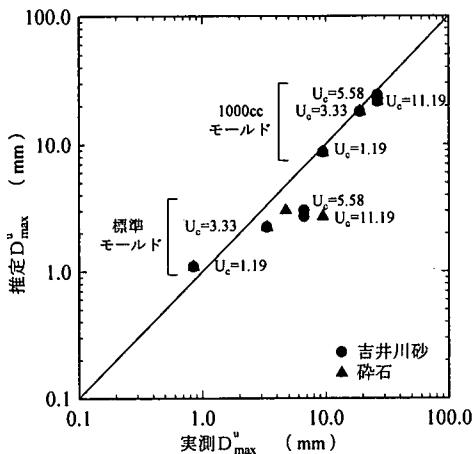


図-29 実測 D_{\max}^u ~ 推定 D_{\max}^u 関係

径制限値の拡大に及ぼす影響は、各種実験結果から、ほとんどないと考えられる。

③ 相似粒度試料の D_{\max} ~ e_{\max} , e_{\min} 関係における最大・最小間隙比の急増現象は、試料の余盛り除去およびモールド内壁付近の粒子の局所充填構造に起因していると思われる。

④ 1000cc モールドを用いた最小密度試験において D_{\max} が 2.36~9.5mm の单一粒径に近い砂礫の場合、漏斗口径が D_{\max} の 3~4 倍以上かつ 20~数十倍以下であれば、漏斗口径は e_{\max} に影響を及ぼさないと考えられる。

⑤ モールドの大容量化によって現行試験法の最大粒径制限値を拡大する場合、実用的観点から締固め試験用の 1000cc モールドが最適である。

⑥ 本研究で提案した砂礫の最大・最小密度試験法から得られる e_{\max} は現行試験法のそれと同等である。しかし、 U_c が 2 以上の試料の e_{\min} は、提案法に上載圧の影響を考慮しているため、現行試験法よりも小さな値となることに注意しなければならない。

⑦ 粒度分布を考慮した最大粒径の制限法は最大粒径制限値の拡大に極めて有効であり、この制限法とモールドの大容量化を組み合わせた提案法は十分実用に供することができる。そして本提案法は、粒度分布にもよるが、標準モールドでは最大粒径が 3~5mm 程度、1000cc モールドでは最大粒径が 20~30mm 程度までの砂礫に適用可能と想定される。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、愛媛大学工学部教授 八木則男先生には、非常に有益な助言と激励を頂きました。末筆ながらここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土質試験法(第3回改訂版)編集委員会編：土質試験の方法と解説、土質工学会、pp. 106~115, 1994.
- 2) 平間邦興：相対密度の適応に関する 2, 3 の私見、砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp. 53~56, 1981.
- 3) 国生剛治、原 忠：礫質土の最大・最小密度試験法の検討、土木学会第52回年次学術講演会概要集、第3部(A), pp. 20~21, 1997.
- 4) 沢田好幸、小野寺功：兵庫県南部地震による地盤の液状化事例報告、土と基礎、Vol. 44, No. 2, pp. 51~53, 1996.
- 5) 杜本康弘、陶野郁雄：水平打撃による砂の最大密度試験方法の適用性、砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp. 37~38, 1981.
- 6) 陶野郁雄：漏斗を用いた最小密度試験の自動化、砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp. 41~42, 1981.
- 7) 小田匡寛：粒状体の基本的特性とその土質工学的意義、講座「粒状体力学の現状とその応用」第3章、土と基礎、Vol. 26, No. 8, pp. 63~70, 1978.
- 8) 粒状体力学に関する国内委員会編：粒状体の力学、土質工学会、pp. 61~74, 1993.
- 9) 土質試験法改訂編集委員会編：土質試験法(第2回改訂版)、土質工学会、pp. 172~188, 1979.
- 10) Wadell, H. A. : Volume, Shape and Roundness of Rock Particles, Jour. Geol., Vol. 40, pp. 443~451, 1932.
- 11) Lees, G. : A New Method for Determining the Angularity of Particles, Sedimentology, 3, 1964.
- 12) Lees, G. : The Measurement of Particle Shape and its Influence in Engineering Materials, Journ. Brit. Granite and Whinstone Federation, Vol. 4, No. 2, 1964.
- 13) 吉村優治、小川正二：砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法、土木学会論文集、No. 463/III-22, pp. 95~103, 1993. 3.
- 14) 畑中宗憲、陶野郁雄：砂の最大密度測定法、第9回土質工学研究発表会講演集、土質工学会、pp. 65~68, 1974.
- 15) 松本一明、岡本敏郎、牧原依夫：砂の相対密度に関するアンケート結果について、砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp. 21~34, 1981.
- 16) 正分典夫、藤原身江子、奥山一典：最大粒径が最大・最小間隙比に及ぼす影響－单一粒径に近いガラスビーズの場合－、土木学会第49回年次学術講演会概要集、第3部(A), pp. 22~23, 1994.
- 17) 井上真理子、藤原身江子、奥山一典：砂の最小間隙比に及ぼす上載圧の影響、第31回地盤工学研究発表会講演集、地盤工学会、pp. 507~508, 1996.
- 18) 立元 勉：砂質土の粒度粒径などが最大・最小間隙比におよぼす影響について、砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp. 71~78, 1981.
- 19) 吉村優治、小川正二：粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響、土木学会論文集、No. 487/III-22, pp. 95~103, 1993. 3.
- 20) 粗粒材料の現場締固め編集委員会：粗粒材料の現場

- 締固め, 土質工学会, pp. 83, 1990.
- 21) 藤原身江子, 奥山一典, 井上真理子: 砂の最大・最小密度試験の適用範囲の拡大について, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, 第3部(A), pp. 30~31, 1995.
 - 22) 越智洋秀, 藤原身江子, 奥山一典: 相似粒度をなす砂の最大間隙比の粒径依存性について, 土木学会第52回年次学術講演会概要集, 第3部(A), pp. 18~19, 1997.
 - 23) Rowe, P.W. : The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact, *Proc. Royal Society, Vol. A269*, pp. 500~527, 1962.
 - 24) 越智洋秀, 岡田歩, 奥山一典: 平面摩擦角の粒径依存性について, 第32回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, pp. 507~508, 1997.
 - 25) 井上真理子, 藤原身江子, 奥山一典: 砂の最大・最小密度試験における最大粒径制限とモールド形状の関係, 第32回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, pp. 311~312, 1997.
 - 26) 粉体工学の基礎編集委員会編: 粉体工学の基礎, 日刊工業新聞社, pp. 154, 1992.
 - 27) 最上武雄編著: 土質力学, 技報堂出版, pp. 906~908, 1982.

(1998.3.25 受付)

EXPANSION OF MAXIMUM PARTICLE SIZE LIMITATION VALUE IN TEST FOR MAXIMUM AND MINIMUM DENSITIES OF SANDS

Kazunori OKUYAMA, Mieko FUJIWARA, Hirohide OCHI and Mariko INOUE

In test for maximum and minimum density of sands(JGS T 161-1990), the sand of which the maximum particle size exceeding 2mm is outside coverage. However, there are many occasions to handle such sand exceeding 2mm in practice. Therefore, we propose the test method for maximum and minimum density of the sand of 2mm or more in the maximum particle size by the following two methods. ①Using the larger mold. ②Application of the limitation method of the maximum particle size where the particle size distribution of sand is considered. And we prove that the proposed method serves enough to practical use.