

礫質土のふるい引上げ方式による 最小密度試験法の提案

増井久¹・福本武明²・藤代浩二³・齋藤章人³

¹学生会員 工修 立命館大学大学院 理工学研究科博士後期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

³学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科博士前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

石分や岩砕を含む粗粒材料の使用頻度が増えるに伴い、このような礫質土の力学特性の適切な把握が重要な課題となっている。ところが、力学特性に大きな影響を及ぼすと考えられる相対密度(最小・最大密度)の試験法が礫質土について未だ確立されておらず、種々の工学的判断に際し多くの人々が不便を感じている現状である。そこで本論文では、相対密度のうち最小密度を取り上げ、粗い粒子を多量に含む礫質土に対して有効な最小密度試験法の開発を行い、粒径が100mmにも及ぶ礫質土にも適用できるような最小密度試験方法を提案している。そして、ハンドスコップを用いる方法との実証的な比較検討を行い、提案法がハンドスコップ法よりも優れていることを示している。

Key Words : gravelly soil, minimum density test, relative density

1. はじめに

近年、宅地造成や大規模な埋立工事、フィルダムや河川堤防などの築堤工事、道路・鉄道などの盛土工事等を行う際、粒径2mm以上の礫、ときには75mmを超える石分を含む地盤材料が頻繁に用いられるようになってきており^{1)~4)}、このような礫質土の強度・透水性・圧縮性等の力学特性の適切な把握が以前にも増して重要となっている。ところが、力学特性に大きな影響を及ぼすと考えられる相対密度の試験法が礫質土について未だ確立されておらず、種々の工学的判断に際し多くの人々が不便を感じている現状である。最大粒径2mm未満、細粒分(0.075mmふるい通過分)5%以下の砂に対しては、試験法が既に規格化されており⁵⁾、液状化の判定等に広く便利に利用されている。

粒径が2mm以上の礫を含む粗粒材料に対しても、最近、力学特性との関連において相対密度試験法の必要性の指摘や具体的方法の提案が行われるようになり^{6)~11)}、またここ数年の地震で礫質地盤の液状化が問題となるに及び、いよいよ礫についても早期に試験法の基準化が切望されるようになってきた。

このような背景から、1998年に地盤工学会におい

て「礫質土の力学特性についての研究委員会」が発足し、この委員会を中心に1999年9月より、参加の多数の研究機関が次の目的で、すなわち1)各機関の試験状況の現状を調査する、2)同じ試料に対して異なる方法で求めた最小・最大密度のばらつきを調べる、3)規格化・基準化する上での基礎データとする、という目的で同一礫試料を用いて「礫の最小密度・最大密度試験方法に関する一斉試験」が実施された。このように試験法の規格化・基準化に向けての活発な活動が始まったところであり、その成果が目される。

著者らは数年前から、粗い粒子を多量に含む礫質土に対して有効な相対密度(最小・最大密度)試験法の開発を試み^{12)~14)}、現在、著者らなりにほぼ満足のいく段階にまで至っている。最大密度試験方法については既に報告済み¹⁴⁾であるので、本論文では、最小密度試験方法に限定し、その要領を説明ののち、提案法の実証実験及びハンドスコップ法との比較検討を行った。その結果、著者らの提案した最小密度試験方法が、ハンドスコップを用いる方法よりも短時間でかつ簡単な操作で行え、試験値や個人差の小さい安定した値が得られる方法であることが判明したので、その詳細をここに報告する。

表-1 使用した試料の物性一覧

礫質試料			土粒子の密度* (g/cc ³)	礫分吸水率* (%)	最大粒径 (mm)	均等係数	細粒分含有率 (%)	粒度分布
名称	産地, 材質等	略称						
委員会試料	自然堆積河床土 硬質粒子	A	2.661	0.63	106	99.7	0	図-1(a)参照
		B	2.649	0.92	37.5	47.4	0	
		C	2.650	1.18	9.5	17.3	0	
栗東土	地山掘削土 (滋賀県栗東郡栗東町丸塚) 比較的硬質粒子	D	2.676	1.94	37.5	66	8.8	図-1(b)参照
		E	2.676	2.05	19	177	10.4	
		F	2.676	2.19	9.5	246	13.5	
		G	2.674	2.42	4.75	545	18.8	
六甲土	崩積土(崖錐) (兵庫県芦屋市芦有道路周辺) 軟質粒子	H	2.618	2.33	37.5	17.3	3.5	図-1(c)参照
		I	2.619	2.47	19	17.0	4.1	
		J	2.618	2.84	9.5	18.1	5.6	
		K	2.620	3.44	4.75	18.6	8.1	

*土粒子の密度と礫分吸水率は、それぞれ各粒径に対して求めた値の加重平均である。

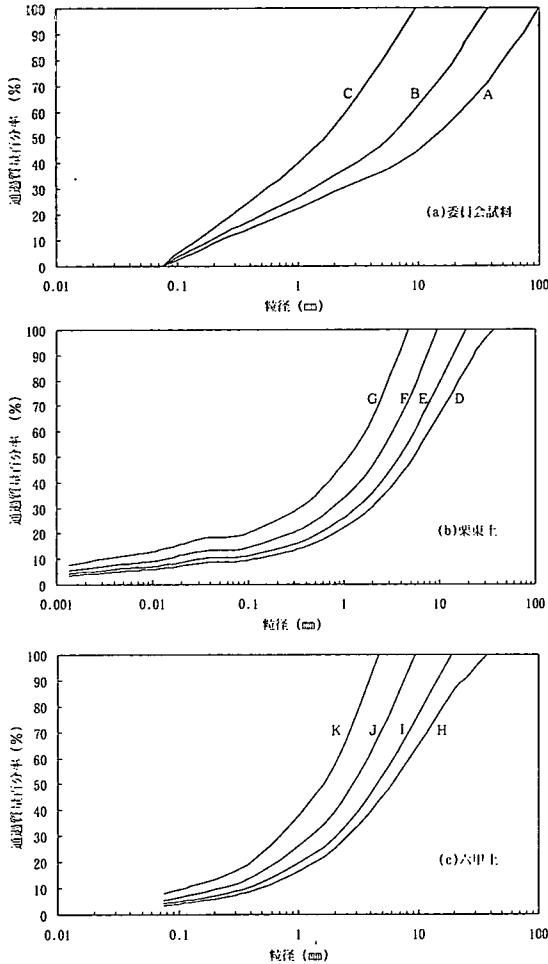


図-1 試料の粒径加積曲線

2. 試料と試験要領

(1) 試料

試料は、材質の異なる3種類の粗粒材料を用いた。表-1に試料の主な物理的性質を示す。なお、表中の土粒子の密度は JIS A 1202¹⁵⁾と JIS A 1110¹⁵⁾に準

拠して測定したものである。3つの粗粒材料のうち、委員会試料は、「礫質土の力学特性についての研究委員会」から配送された上述の一斉試験用の試料であり(以下、委員会試料と呼ぶ)、破碎性の少ない自然堆積河床土である。委員会試料の粒径加積曲線は図-1(a)に示すように最大粒径が106mm, 37.5mm, 9.5mmのせん頭試料となるように粒度調整され、0.075mm以下の細粒分を含まないものである。文中では、それぞれ試料A, B, Cと呼び、今回のすべての実験項目に、つまり提案法の実証実験用及びハンドスコップ法との比較実験用として使用した。

また、礫質土の種類を変えてハンドスコップ法との比較実験を行う目的で、さらに2種類、つまり栗東土と六甲土を追加して使用した。栗東土は滋賀県栗東郡栗東町丸塚の地山掘削土で、原土の最大粒径が75mmで比較的硬質である。六甲土は兵庫県芦屋市芦有道路周辺で採取された崩積土(崖錐)で、原土の最大粒径が125mmで軟質である。栗東土、六甲土ともに最大粒径が37.5mm, 19mm, 9.5mm, 4.75mmのせん頭試料となるように粒度調整したもので(図-1(b), (c)参照)、文中ではそれぞれ試料D, E, F, G(栗東土)、試料H, I, J, K(六甲土)と呼ぶ。

委員会試料、栗東土、六甲土とも原土を室内乾燥し、2mmふるいでふるい分け、2mm以上の粒子については各粒径毎に粗粒子に付着している細粒分を水洗いにより除去したものを、また2mm以下については水洗いをせず乳鉢で(粒子を破碎しないよう注意しながら)よくときほぐしたものを、それぞれ炉乾燥させデシケータで冷ました後粒度配合した。その後含水比変動のないよう大型ポリ容器に密閉保存したものをを用いた。したがって、試料調整時によく問題となる団粒化の影響は、この場合、ほとんどないものと考えられる。

(2) 試験要領

著者らが考案したふるい引上げ方式による最小密

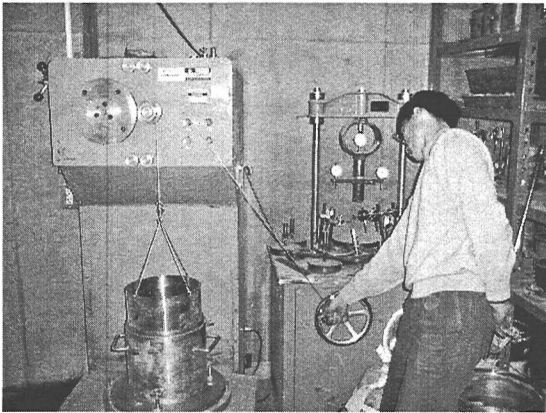


写真-1 最小密度試験装置

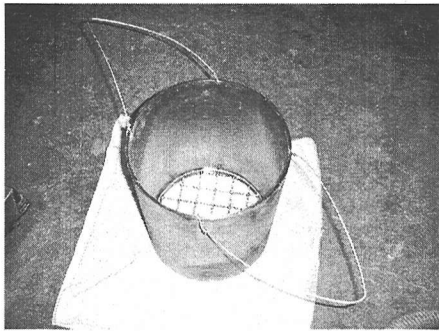


写真-2 ふるい引上げ用円筒

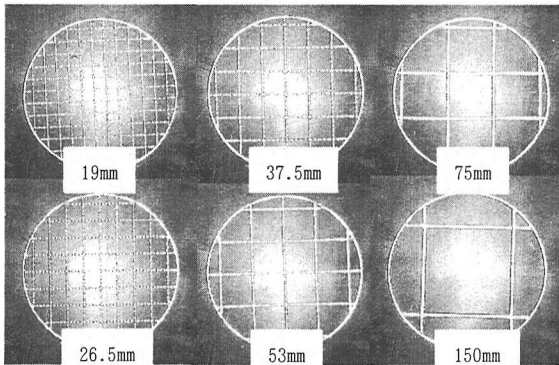


写真-3 ふるい目の大きさ一覧

度試験法は、写真-1に示すような装置を用い以下に述べる手順に従って行う。

- ①内径 30cm モールド(高さ 30cm)の中に、写真-2に示すような底部がふるいになっている外径 29cm、高さ 35cm の鋼鉄製円筒を設置する。なお、使用したふるいの 6 種類の目開きを写真-3に示す。
- ②円筒の底部にセットするふるいの目開きの大きさは、表-2に示すように試料の最大粒径の 4 倍とし(後述 3.(1)a 参照)、最大粒径に応じて取り替える。最大粒径が 37.5mm を超える場合はふるい

表-2 ふるい目の大きさ

試料の最大粒径 (mm)	4.75	9.5	19	37.5	37.5以上
ふるい目の大きさ (mm)	19	37.5	75	150	ふるいなし

を装着せず円筒のみの設置とする。

- ③円筒の中に試料をスコップ等でゆる詰めの状態ではぼいっぱいに入れる。
- ④円筒を一定の速度で鉛直に引上げ、円筒内のすべての試料がモールド内に入るようにする。その際、円筒を 30cm 引き上げるのに要する時間を 20~30 秒とする(後述 3.(1)b 参照)。
- ⑤円筒を引き抜いた後、試料の入った内径 30cm モールドの表面をできる限り圧力を与えないように平らに整形する。
- ⑥モールド内部の試料の質量をはかり、乾燥密度を求め。
- ⑦この実験を 3 回繰り返して、乾燥密度の平均値を求め、最小密度 ρ_{dmin} とする。

3. 実験結果と考察

まず委員会試料を用いてふるい引上げ法の試験条件を設定するための実験を行った結果について述べ、次に材質の異なる 3 種類の試料を用いて行ったハンドスコップ法とふるい引上げ法との比較実験の結果について述べる。

(1) 試験条件の設定

ふるい引上げ方式による提案法において、試験に先立ち 2 つの試験条件を確定しておかなければならない。1 つは円筒の底面に設置するふるいの目開きの大きさをどの程度にするかという課題、もう 1 つは円筒を引き上げる速度をどの程度にするかという課題である。

a) ふるい目の大きさの決定

円筒を高さ 30cm まで引き上げるのに要する時間を約 20 秒と一定にし、ふるい目の大きさを試料の最大粒径に対し 2 倍、3 倍、4 倍、6 倍、8 倍に変え試料 C(最大粒径 9.5mm)を用いて実験した結果が図-2 である。なお、最大粒径が 19mm 以上の他試料についてもほぼ同傾向の結果となることを付記しておく。図から、次のようなことがわかる。すなわち、ふるい目の大きさを試料の最大粒径の 2 倍とした場合、測定された乾燥密度 ρ_d の値は小さくなっている。これは目視から明らかに、試料が粗い粒子と細かい粒子とに分離されて供試体の均一性が失われることに起因するもので、良い結果といえない。ふるい目

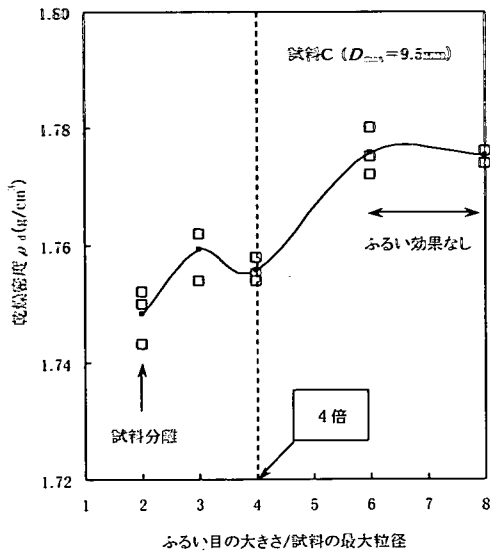


図-2 乾燥密度 ρ_d とふるい目の大きさとの関係 (委員会試料)

の大きさを最大粒径の4倍にすると試料分離はほとんど見られず、3回の測定で生じるばらつきが小さく安定した値が得られる。ふるい目の大きさを最大粒径の6倍以上にするとふるい効果なくなり、 ρ_d の値は大きくなってしまふ。したがって、ふるい目の大きさは試料の最大粒径の4倍に設定するのが妥当と判断される。ただし、最大粒径が37.5mm以上になると、ふるいの設置なしで試験を行うことになるが、その場合、上記の試験要領の項目③を一層綿密に実行する、つまりあまり不均一にならない程度に、落下高さを与えないよう静かに投入することが望まれる。

b) ふるい引上げ速度の決定

ふるい目の大きさを試料の最大粒径の4倍と一定にし、ふるい引上げ速度 v を5通りに変え試料A、Cを用いて実験を行った。得られた乾燥密度 ρ_d とふるい引上げ速度 v との関係を図示すれば、図-3のようになる。この図によれば、 $v < 1.5 \text{ cm/s}$ の場合、乾燥密度 ρ_d はほぼ一定値を示す。しかし、それより速くなると ρ_d は徐々に大きくなる。これは、ふるいを速く引き上げるとふるいに接する粒子、あるいは円筒内壁に接する粒子が一瞬持ち上げられ、落下高さが生じてしまい、部分的に締め固まることによるものと推察される。その傾向は粒径の大きい試料Aの方が顕著に現れている。したがって、ふるい引上げ速度 $v < 1.5 \text{ cm/s}$ 、つまり円筒を30cm引き上げるのに要する時間は当装置の場合、20~30秒が良いと判断される。

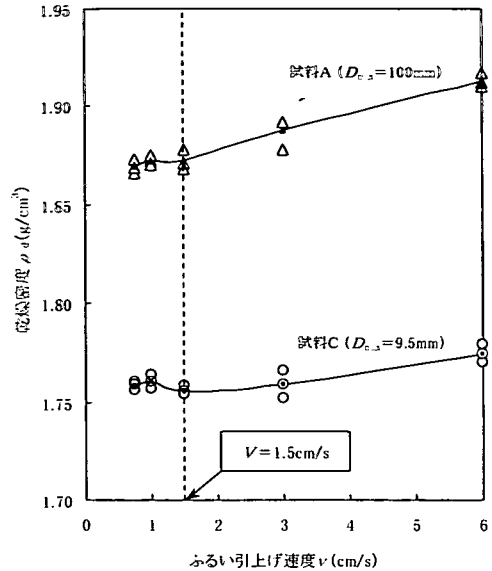


図-3 乾燥密度 ρ_d とふるい引上げ速度 v との関係 (委員会試料)

(2) ハンドスコップ法との比較

著者らが提案したふるい引上げ法を用いた場合の最小密度 ρ_{dmin} の試験値と、従来のハンドスコップを用いて注入する方法 (例えば文献16) 中のゆる詰め密度測定方法を参照) を用いて得られた ρ_{dmin} の試験値との具体的な比較検討を行う。

a) ρ_{dmin} 値と個人差

図-4~図-6は、それぞれ材質の異なる3種類の礫質土を用い、ハンドスコップ法とふるい引上げ法における個人差の影響を主として調べるために、定められた同一手順に従い、5人の試験者(M, S, F, O, H氏)が行った試験結果をまとめて示したものである。これらの図からわかるように、5者ともに試料A~Kのほとんどにおいて最小密度 ρ_{dmin} (平均値) は、ふるい引上げ法で試験した場合の方が小さな値となっている。この原因は、ハンドスコップ法の場合、ハンドスコップで試料を静かに注ぎ込む作業を何度も繰り返す過程で、その都度少しずつ加わる衝撃によって徐々に締め固まり、密度が大きくなるからであると推察される。これに対し、ふるい引上げ法の場合、余分な落下高さを与えることなく、より正確な値が得られる方法と考えられる。一方、各試験者の3回測定でのばらつき度合は、すべての試料において概ねふるい引上げ法とハンドスコップ法とでほぼ同程度と見なせる。

次に、個人差の影響について考察する。表-3は、測定した5人の試験者の ρ_{dmin} の平均値と変動係数を、3種類の礫質土すべてについて一括表示したも

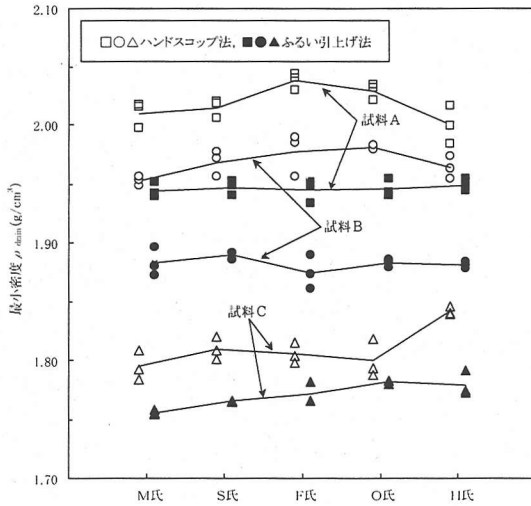


図-4 ハンドスコープ法とふるい引上げ法の個人差の比較(委員会試料)

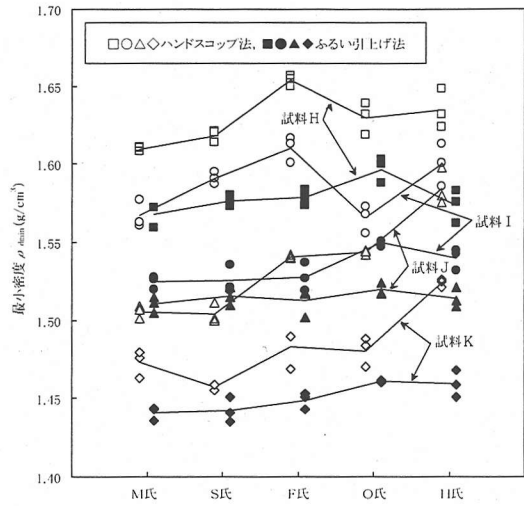


図-6 ハンドスコープ法とふるい引上げ法の個人差の比較(六甲土)

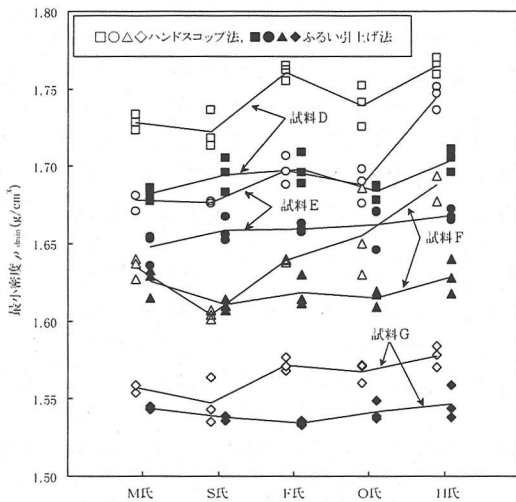


図-5 ハンドスコープ法とふるい引上げ法の個人差の比較(栗東土)

表-3 ハンドスコープ法とふるい引上げ法による測定値 ρ_{min} の個人差データ

試料		ハンドスコープ法		ふるい引上げ法	
		平均値 (g/cm ³)	変動係数	平均値 (g/cm ³)	変動係数
委員会 試料	A	2.018	0.0068	1.946	0.0009
	B	1.968	0.0051	1.882	0.0025
	C	1.810	0.0091	1.771	0.0054
栗東土	D	1.743	0.0098	1.692	0.0050
	E	1.697	0.0148	1.659	0.0040
	F	1.644	0.0168	1.620	0.0042
六甲土	G	1.564	0.0069	1.541	0.0029
	H	1.629	0.0093	1.579	0.0062
	I	1.587	0.0112	1.533	0.0064
	J	1.536	0.0193	1.514	0.0021
	K	1.484	0.0148	1.451	0.0057

注) 平均値, 変動係数の小さい方に網掛けしてある。

のである。この表から、すべての試料においてふるい引上げ法で試験した方がハンドスコープ法に比べて ρ_{min} の平均値も変動係数も明らかに小さな値となっている。したがって、ふるい引上げ法は誰が試験しても常にばらつきの少ない安定した値を、しかも小さ目の ρ_{min} 値を得ることができる方法であるといえる。

b) 所要試験時間

ハンドスコープ法とふるい引上げ法において1回の測定値を得るのに要する時間は、ハンドスコープ

法では10~20分程度であるのに対し、ふるい引上げ法では概ね5分程度である。したがって、ふるい引上げ法はハンドスコープ法のおよそ半分ないし4分の1の時間で試験が行えて便利な方法である。しかも、ふるい引上げ法の場合、今回扱ったような粒径100mmにも及ぶ石分を含む試料であっても、それに見合った目開きのふるいを選んで試験しさえすれば、試験者の熟練度にほとんど左右されることなく簡単な操作で安定した ρ_{min} 値を、上述した短い所要時間で測定できる強みがある。

4. 結論

本論文では、著者らが提案したふるい引上げ方式による最小密度試験方法の適用性について、材質の異なる3種類の礫質土を対象に試験者を変えてハンドスコップを用いる方法との比較実験を行い、その結果に基づいて詳細な実証的検討を行った。結論として、今回対象とした礫質土に対し、提案法はハンドスコップ法に比べて短時間でかつ簡単な操作で試験が行えること、試験値及び個人差の小さい安定した値が得られること、粒径が100mmにも及ぶ石分を含む粗粒材にも適用できることなど、幾つもの特徴を持つ効果的な方法であることが明らかとなった。

今後は、さらに広範な粒径域の多種多様な礫質土を用いて実験を積み重ね、ふるい引上げ法の適用範囲や影響要因などの検討を続行してゆくとともに、砂の粒径域に近い礫質土に対し現行JIS法との比較検討なども行ってゆきたい。近い将来、本試験法が礫質土を扱う実務者にとって工学的判断の際のよりどころとして広く利用されることを望むものである。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、試験試料の入手に協力して頂いた大豊建設株式会社大阪支店の本田宏和氏、芦有開発株式会社奥山事務所の藤枝哲士氏に深謝の意を表します。また、最小密度に及ぼす個人差の影響を調べるための実験に、労力を惜しまず協力していただいた立命館大学大学院理工学研究科地盤研究室の小川雄一郎氏、橋口正悟氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土質工学会編：粗粒材料の変形と強度，1986。
- 2) 土質工学会編：粗粒材料の現場締め，1990。
- 3) 地盤工学会編：地盤工学ハンドブック，pp.297-298，1999。
- 4) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説(第一回改訂版)，pp.260-261，2000。
- 5) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説(第一回改訂版)，pp.136-145，2000。
- 6) 池見元宣，工藤康二，國生剛治：砂礫材料の相対密度試験について，第19回土質工学会研究発表会講演集，pp.127-128，1984。
- 7) 國生剛治，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。
- 8) 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，No.638/Ⅲ-49，pp.11-27，1999。
- 9) 地盤工学会研究委員会：礫質土の力学特性についての研究委員会報告，第34回地盤工学会研究発表会講演集，pp.117-118，1999。
- 10) 地盤工学会：第35回地盤工学会研究発表会，ディスカッションセッションー 礫質土の力学特性と相対密度，pp.39-58，2000。
- 11) 地盤工学会：第36回地盤工学会研究発表会，ディスカッションセッションー 礫質地盤の液状化を相対密度や年代などで評価できるか，pp.2109-2118，2001。
- 12) 小川聖治，増井久，福本武明：礫の最小密度試験法についての提案，土木学会第55回年次学術講演会概要集，pp.570-571，2000。
- 13) 藤代浩二，齋藤章人，増井久，小川聖治，福本武明：礫のふるい引き上げによる最小密度試験法，平成13年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集，pp.Ⅲ-27-1-2，2001。
- 14) 増井久，小川聖治，福本武明：礫質土の最大密度試験法の提案，立命館大学理工学研究所紀要第59号，pp.123-128，2000。
- 15) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説(第一回改訂版)，pp.54-57，2000。
- 16) 森満雄，阿部道雄，森麟：礫まじり土の締め密度の推定に関する研究，土木学会論文集，No.541/Ⅲ-35，pp.159-171，1996。

(2001.9.19 受付)

PROPOSAL FOR A TEST METHOD FOR DETERMINING THE MINIMUM DENSITY OF GRAVELLY SOILS BY PULLING UP A SIEVE

Hisashi MASUI, Takeaki FUKUMOTO, Koji FUJISHIRO and Akito SAITO

Coarse-grained materials containing very large gravels are frequently used. Consequently, it is important to grasp the mechanical characteristics of the materials. However, test method for relative density - having the greatest influence on the strength characteristics, etc. - has not been established. As a result, it is inconvenient for us to make engineering decisions for various phenomena. In this paper, a test method for determining the minimum density of gravelly soils is proposed. The proposed method gave better results than the traditional method. In addition it was easier to carry out the experiments using the proposed method.