粗粒土の各種締固め密度推定法に関する一考察

立命館大学大学院　学生員　○齋藤章人　（株）積水樹脂　赤津健太郎
立命館大学大学院　学生員　藤代浩二　御所工業高等学校　正生員　増井久
積水不動産シスコン（株）　児玉一弘　立命館大学理工学部　正会員　福本武明

１．はじめに　近年、大規模土木工事等を行う際、かなり大きな礫を含む粗粒土が頻繁に用いられるようになっており、その密度管理が重要な問題になっている。粗粒土の締固め密度は直接室内試験で求められないため、これまで種々の締固め密度推定法、すなわち①式から推定する方法、②相関関係から外挿する方法、③重回帰分析による方法などが提案され、利用されている。既報[1)]では、それらのうちで式から推定する種々の方法の比較検討結果が公表され、福本の式の有用性が報告されている。しかし、他の方法も含め総合的な比較検討は未だ行われておらず、どの方法が最も実用的であるかの解決を見ていない。

そこで本報では、その解決に向けての一考察として、今回、著者らの大型締固め試験の実測データに基づき、上記①、②の推定法について比較検討を行ったので、その結果について報告する。その際、①では既報[1)]の結果を尊重して福本が提案した密度推定式を、②では、主に森らの提案したゆる詰め密度からの外挿法と、当研究室で提案しているふるい引上げ法により求めたゆる詰め密度からの外挿法をそれぞれ取り上げて詳しく比較検討する。

２．各種密度推定方法の概説

２．１　密度推定式を用いる方法　従来、Walker-Holtz 式[2)]（式(1)）が、一般的に広く用いられてきたが、適用範囲の狭さが以前から指摘されていた。福本らは、式(1)に含まれる不合理な点を改善し、礫混入率 P の広い範囲にわたって適用できるような式(2.a)を提案した[1),3)]。ここで、ρ_{d1} は土のみを締固めた場合に得られる乾燥密度、ρ_{d2} は礫のゼロ空気間隙状態の乾燥密度、ρ_{dg} は礫のみの場合の実測乾燥密度である。

$$\rho_d = \frac{\rho_{d1}\cdot\rho_{d2}\cdot\left(1-\alpha\cdot P^{\beta}\right)}{P\cdot\rho_{d1}+(1-P)\cdot\rho_{d2}}\cdots(1)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_{d1}\cdot\rho_{d2}}{P\cdot\rho_{d1}+(1-P)\cdot\rho_{d2}}\cdots(2.a)$$

$$\alpha = 1-\frac{\rho_{d1}}{\rho_{d2}}\cdots(2.b),\quad \beta=\left(\frac{D_{50}}{\mathrm{d}_{50}}\right)^{\xi}\cdots(2.c)$$

$$\xi = \left(\frac{\rho_{d1}}{\rho_{dg}}\right)\cdot\left(1-\frac{\rho_{d1}}{\rho_{d2}}\right)\cdots(2.d)$$

他にも種々の密度推定式が提案されているが、それら諸式の中で式(2)は、既報[1)]で述べたように実測値との適合性が概ね良好で、式中の係数 α と β が礫と土との粒径比(D_{50}/d_{50})と材料特性値($\rho_{d1},\rho_{d2},\rho_{dg}$)さえ既知であれば容易に求められる。したがって、本文中では、式(2)からの推定値を基に後述の推定法との比較検討を行う。

２．２　相関関係から外挿する方法　中岡ら[4)]の外挿法については既に検討の結果を報告済み[5)]なので、ここではゆる詰め密度を用いる外挿法として、次の２つの方法を取り上げる。

２．２．１　森ら[6)]の外挿法　この方法は、礫混じり土の締固め密度と、ゆる詰め密度との関連性に着目し、両者が直線関係であることを利用し、それを外挿して礫混じり土の締固め密度推定する方法である。

２．２．２　ふるい引上げ法[7)]を基とした外挿法　森らのゆる詰め密度が結果的に大きめの最小密度となることから、その対案として当研究室で提案しているふるい引上げによる最小密度試験法に基づく測定値を用いて外挿する方法である。なお、著者らの最小密度測定法の要領については既報[7)]を参照されたい。

３．試料と実験方法

３．１　試料　今回の試料は、滋賀県栗太郡栗東町丸塚の土(以下、栗東土)、兵庫県芦屋市芦有道路周辺の土(以下、六甲土)の２種類である。栗東土(原土の最大粒径:75mm)、六甲土(原土の最大粒径:112mm)の最大粒径をそれぞれ 37.5mm,19mm,9.5mm,4.75mm のせん頭試料となるよう粒度調整を行ったものを用いた。

キーワード；粗粒土、締固め、密度、室内試験
住所；滋賀県草津市野路東 1-1-1,電話；077-566-1111（内線 8717）,FAX；077-561-2667

３．２　実験方法　本実験は、突固めによる締固め試験により非繰返し法[8] で締固めた。直径 30cm,高さ 30cm のモールドを使用し、普通の締固め試験の規定にないので、現行規定の 15cm 径及び 10cm 径モールドと同一の締固め仕事量（E_c　550kJ/m^3）となるように各要素を設定し（表-１参照)、大型締固め試験装置[9] を用いて行った。

表‐１　締固め仕様

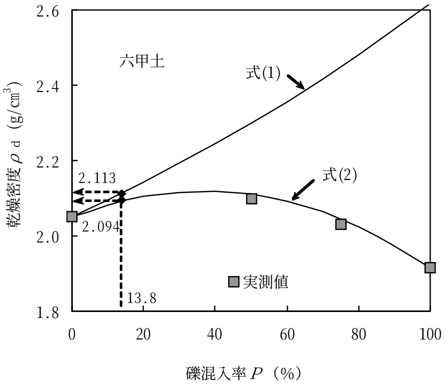
モールド	直径30cm×高さ30cm
突固め条件	ランマー重量 79.4 N, 落下高 45cm
突固め方法	７層×46回／層

４．実験結果と考察

今回の実験結果に基づき、まず、密度推定式(式(1), 式(2))の計算に必要な諸量及び推定乾燥密度を表-２に記す。

表‐２　推定式で用いた諸量及び推定乾燥密度

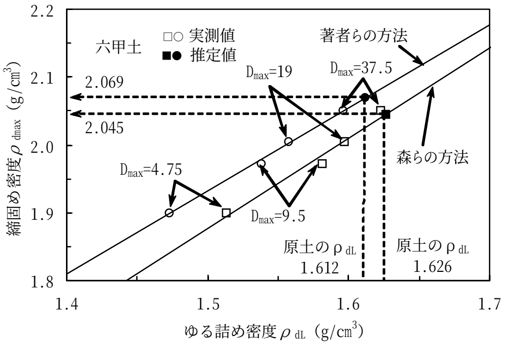
試料	細粒と粗粒の境界 (mm)	粒径比 D_{50}/d_{50}	係数 α	係数 β	材料特性値 ρ_{d1} (g/cm^3)	材料特性値 ρ_{d2} (g/cm^3)	材料特性値 ρ_{dg} (g/cm^3)	礫混入率 P (%)	乾燥密度 ρ_d(g/cm^3) 式(1)	乾燥密度 ρ_d(g/cm^3) 式(2)
栗東土	37.5	10.4	0.331	1.702	2.175	2.676	1.791	11.9	2.225	2.205
六甲土	37.5	10.0	0.269	1.708	2.050	2.618	1.914	13.8	2.113	2.094



図‐１　推定式から得られる推定密度（六甲土の場合）

図‐１は式(1)と式(2)を比較したものである。図から明らかなように、式(1)は礫混入率 P が大きくなるにつれ、乾燥密度 ρ_d が右肩上がりに上昇し続け、実測値とかけ離れてしまうのに対し、式(2)は実測値との適合性が概ね良好である。よって文中では、式(2)からの算定値を用い、外挿法との比較を行う。

図‐２は森らと著者らの両方法から得られたゆる詰め密度の実測値と締固め密度との関係を図示したものである。図‐２から、いずれの方法もゆる詰め密度と締固め密度の間にほぼ比例関係が認められること、及び森らに比べ著者らの方が図中の直線の位置が上部にくることなどが分かる。そこで、この直線関係を外挿して六甲土の場合の締固め密度を推定してみると、P=13.8%の時、森らの場合 ρ_d ＝2.045 g/cm^3、著者らの場合 ρ_d ＝2.069 g/cm^3 となり、どちらも式(2)の推定密度 ρ_d ＝2.094 g/cm^3 よりかなり小さな値をとり、実務的に不都合である。特に森らの方法の推定値は六甲土の ρ_{d1} ＝2.050 g/cm^3 をも下回り、極めて不都合な値といわざるを得ない。このようにゆる詰め密度からの外挿法は、常に適正値が得られる方法とは言い難く、実務的な利便性から見ても、大型締固め試験を数多く行う必要があり、それに費やす時間と労力は多大である。



図‐２　ゆる詰め密度からの外挿法（六甲土の場合）

５．結び

以上より、式(2) は礫率 P の広い範囲で適合性も良く、粒径比と材料特性値さえ既知であれば容易に求められるため実用的であるのに対し、ゆる詰め密度を用いた外挿法は、式(2)よりも今回かなり小さな推定密度をとり、適正値が常に得られる保証がなく、実務的に不安である。今後、更に試料の条件等を変えて多くの実験を行い、実証的検討を深めてゆきたい。

【参考文献】1) 増井久,福本武明：粗粒土の締固め密度推定式の比較,土木学会論文集,No.701/III-58,pp.135-143,2002. 2) Walker,F.C and Holtz,W.G.:Control of Embankment Material by Laboratory Testing Proc.ASCE,No.180,pp.1-25,1951. 3) 福本武明,増井久:二要素混合問題における粒径比の影響,第 36 回地盤工学研究発表会講演集,pp.549-550,2001. 4) 中岡時春,望月秋利,阪口理:粗粒材を含む盛土材料の締固め密度の推定,土木学会論文集 No.499/III-28,pp.177-185,1994. 5)齋藤章人,藤代浩二,増井久,福本武明：粗粒土の締固め密度推定法に関する検討,土木学会第 56 回年次学術講演会概要集,pp.558-559,2001. 6) 森満雄,阿部道雄,森麟：礫まじり土の締固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. 7)増井久, 齋藤章人,藤代浩二,福本武明：礫質土の最小・最大密度試験法の一提案,礫質土の力学的特性に関するシンポジウム発表論文集,地盤工学会研究委員会,pp.165-170,2001. 8)地盤工学会編：土質試験の方法と解説-第一回改訂版-,pp.252-263,2000. 9)増井久,小川聖治,福本武明:粗粒土を用いた大型室内締固め試験, 第 35 回地盤工学研究発表会講演集,pp.979-980,2000.