

粗粒土の締固め密度推定法

Recent Methods for Estimating the Density of Compacted Soils with Oversize Particles

福 本 武 明 (ふくもと たけあき)

立命館大学教授 理工学部土木工学科

増 井 久 (ますい ひさし)

立命館大学大学院 理工学研究科博士後期課程

1. ま え が き

フィルダムや道路盛土や埋立て造成用の土質材料として、粗礫や岩砕などを多量に含む粗粒土を実際に使用する機会が増えている。このような粗粒土を扱う場合、まず問題となるのは、設計や密度管理に必要な基準値を求めるための室内試験が、原粒度のままの材料を直接用いて極めて実施困難なことである。それゆえ、締固め試験に関しては通常、仕様書中に規定されている許容最大粒径よりも粗な粒子を除去した試料を用いて試験を行い、得られた最大乾燥密度の値を粗な粒子の混入割合 P に応じて補正（いわゆる“礫補正”）するという方法が採られている。

粗粒土の締固め密度の“礫補正”法として、我が国で従来から広く用いられている方法に Walker-Holtz 法 (1951)¹⁾がある。この方法は、相当古い「土質試験法 (1964年版)」²⁾の中で既に詳しく解説されており、その後「試験法」の幾度かの改訂 (2000年改訂版³⁾を含む)においても引き継がれて今日に至っている。しかし Walker-Holtz 法は、式の誘導過程に不合理な点を含むなどの欠陥があり、そのため適用範囲が狭く、粗な粒子の混入割合が $P \leq 30 \sim 40\%$ の範囲でしか成り立たない。このことは、以前から例えば竹下春見博士の教科書 (1955)⁴⁾や先ほどの土質試験法 (1964) の中でもはつきり指摘されていたことである。

こうした背景を踏まえて、従来の礫補正法を見直して、もっと広い範囲にまで適用でき、かつ高い精度で粗粒土の締固め密度が推定できるような方法を模索する動きが現れ始めた。その中には、Walker-Holtz 法を修正して使おうとする立場と全く別な角度から取り組んで最良の方法を開発しようとする立場とがある。いずれにしても現在、こうした研究の動きは、高い礫含有率の粗粒土を扱う機会が増すとともに一層拍車がかかり顕著なものとなりつつあるように思われる。

そこで本稿では、粗粒土の締固め密度に関して、これまでに提案された種々の推定法を著者らなりの視点から、①密度推定式を用いる方法、②重回帰分析による方法、③相関関係から外挿する方法、④その他に分類整理し、今後の検討課題などをも含めて要点の説明を行っている。この小文によって、この分野にかかわりを持つ諸氏に最近の研究の動向が伝わり、実務上の参考になれば幸いである。

2. 密度推定式を用いる方法

Walker-Holtz¹⁾は、粗粒子間の間隙が土によって満たされ、かつ間隙内の土の密度が土のみを締固めた場合に得られる乾燥密度 ρ_{d1} に等しいという仮定に基づいて式 (1) のような密度推定式を誘導している。式中の ρ_{d2} は粗粒子のみの場合のゼロ空気間隙状態の乾燥密度に相当する。

$$\rho_d = \frac{\rho_{d1}\rho_{d2}}{P\rho_{d1} + (1-P)\rho_{d2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Ostermayer (1979)⁵⁾は、式 (1) をより実測値に近づけるために、式中の ρ_{d2} を $0.9\rho_{d2}$ と置き換えたもので、式 (2) で表される。またドイツの DIN (1990)⁶⁾では、式 (3) が用いられている。式 (2), (3) は式 (1) の微調整型の式と考えられる。

$$\rho_d = \frac{0.9\rho_{d1}\rho_{d2}}{P\rho_{d1} + 0.9(1-P)\rho_{d2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_d = (1-P)\rho_{d1} + 0.9P\rho_{d2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

福本 (1984)⁶⁾は、Walker-Holtz 式に含まれる不合理な点を改善し、より実情に即した仮定から出発して式 (4) を誘導している (詳細: 文献 7), 8) 参照)。

$$\rho_d = \frac{\rho_{d1}\rho_{d2}}{P\rho_{d1} + (1-P)\rho_{d2}} (1 - \alpha P^\beta) \quad \dots\dots\dots (4a)$$

$$\text{ただし } \alpha = 1 - \frac{\rho_{dg}}{\rho_{d2}} \quad \dots\dots\dots (4b)$$

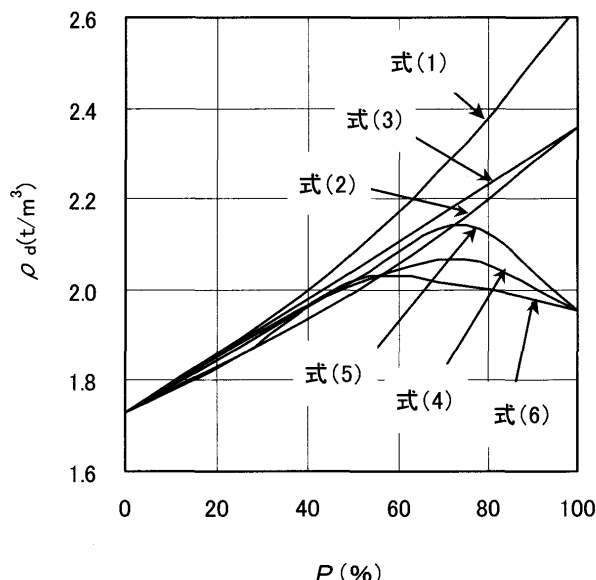
式中、 ρ_{dg} は礫のみの乾燥密度の実測値であり、 α と β は係数である。特に β の求め方が今後の課題であるが、この点に関し最近、似内ら⁹⁾の実務的な立場からの研究があり、その成果が注目されている。

柴田 (1985)^{10), 11)}は、礫混じり土の構造 (2 種の基本構造 I, II の混合比率) を考慮して次のような締固め密度の算定式を提示している。

$$\rho_d = \frac{G_g \cdot \rho_{d1} - (G_g - \rho_{dgc})(\rho_{d1} - \rho_{dvc})c}{G_g(1-P) + \rho_{d1} \cdot P} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中 G_g は礫の比重、 ρ_{dvc} は構造 I 内の細粒分の密度、 c は礫混じり土内における構造 I の占める割合を意味する。このうち特に c , ρ_{dvc} の決定の仕方に検討の余地が残る。

Hsu-Saxena (1991)¹²⁾は、粗粒土の締固め密度 ρ_d を間隙比 e を用いて式 (6a) のように表し、式中の未知量 e を式 (6b) から求める方法を提案している。



図一 各種密度補正式の比較 (模式図)

$$\rho_d = \frac{G_s \cdot G_g \cdot \rho_w}{(1+e) \{P \cdot G_s + (1-P) G_g\}} \quad \text{..... (6a)}$$

$$e = e_0 + AP + BP^2 + CP^3 + DP^4 \quad \text{..... (6b)}$$

これらの式中、 G_s は土の比重、 G_g は礫の比重、 ρ_w は水の密度、そして e_0 は礫を含まない土のみの場合の空隙比である。この方法では、式(6b)中に含まれる定数 A, B, C, D を実験的に決定しなければならない。

図一 1 は上記の各種密度補正式を比較して模式的に描いたものである。図より、それぞれの式の特徴を直感的に理解することができる。

3. 重回帰分析による方法

礫質土の締固め密度 ρ_d を 2 個以上の説明変数で表現して予測する、いわゆる重回帰分析による方法である。

吉田 (1970)¹³⁾ は、説明変数として含水比 w 、混礫率 P 、最大粒径 $D_{\max}$ を採用し、礫質土の締固め密度 ρ_d を式(7)で与えている。混礫率が40%を越える領域であっても、この式の適合性はかなり良いと述べている。

$$\begin{aligned} \rho_d = & 2.208 + 0.0175w + 0.0173P + 0.002D_{\max} \\ & - 0.0068w^2 - 0.0041P^2 + 0.0017D_{\max}^2 \\ & + 0.165wP + 0.01PD_{\max} - 0.0045wD_{\max} \quad \text{..... (7)} \end{aligned}$$

後藤・宮本・玉置 (1984)¹⁴⁾ は、説明変数として、締固めエネルギー E_c 、均等係数 U_c 、最大粒径 $D_{\max}$ 、礫含有率 P を選んで、次のような回帰式を示し、この式を使って精度よく推定可能と述べている。

$$\rho_d = 0.5222 + 0.0836 \ln E_c - 0.109 \ln U_c + 0.0197 \ln D_{\max} \quad \text{..... (8a)}$$

$$\rho_d = 0.2258 + 0.0863 \ln E_c - 0.114P \quad \text{..... (8b)}$$

しかし、こうした重回帰分析による方法は、あくまでも式中の諸係数が特定の試験条件下で求められた数値であって、広く実際に使用される多種多様な粗粒土に常に適用できるとは限らないことに留意すべきであろう。

4. 相関関係から外挿する方法

原粒度を基準に調整した試験試料に対し、締固め特性値である最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ と粒度特性値である最大粒径 $D_{\max}$ や均等係数 U_c などとの間の相関関係を求め、それを利用し外挿して推定しようとする方法である。いわゆる「外挿法」と称されるこの方法に属するものとして、黒島・中岡¹⁵⁾ は次の四つ、つまり① $\log f_{\min} \sim \log D_{\max}$ 法、② $\rho_{d\max} \sim \log D_{\max}$ 法、③ $\rho_{d\max} \sim \log U_c$ 法、④ $e \sim \log U_c$ 法を挙げて詳しく紹介している。要するに、①は最小体積比 $f_{\min}$ ($\propto 1/\rho_{d\max}$) と $D_{\max}$ とが両対数紙上で直線性を示すこと¹⁶⁾、②と③は $\rho_{d\max}$ が $D_{\max}$ の対数、 U_c の対数と比例関係にあること¹⁴⁾、そして④は空隙比 e (絶対比重による e) と U_c とが両対数紙上で直線関係にあること¹⁷⁾、をそれぞれ利用し外挿する方法である。このうち①と②が特に堆積軟岩を盛土材とするような場合の密度推定法として優れている¹⁵⁾、と述べている。しかし、仮に②を例にとれば、必ずしも両者の間に比例関係が常に成り立つとは限らず、粒度分布とか礫質の影響などによって比例関係を示さない場合のあることが報告^{18), 19)} されている。

一方、森^{20), 21)} らは最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ と緩詰め密度 ρ_{dL} との間に比例関係のあることをつきとめ、この関係を利用して外挿する方法を提唱している。この関係が粒度分布とか礫質の影響などに左右されることなく広く成り立つようであれば、有効な方法と言えるかもしれない。いずれにしても外挿するには、実験結果のばらつきなども十分念頭に入れ極めて慎重に対処することが肝要と思われる。

5. その他

Humphres 法 (1957)²²⁾ は、Walker-Holtz 法よりも少し後に開発され、より合理的な方法ではあるが、かなり煩雑な作図法を含むなどの理由で、我が国ではあまり利用されていない。ほかに、体積率表示を用いた礫補正法²³⁾、締固め曲線の実験式²⁴⁾に礫含有率を導入し拡張したもの¹⁴⁾、Walker-Holtz 法に代わるものとして有効空隙比 (粒子内空隙を含まない粒子間のみの空隙) で粗粒土の締固め状態を表すことの効用を説いたもの¹⁸⁾、などが挙げられる。

6. あとがき

以上、粗粒土の締固め密度推定法に関する研究の動向を、筆者らなりの視点から分類整理して記述した。今後は、これらの方法の中で実務上最適な方法を見出すことが必要となり、そのために既往の諸家の貴重なデータを基に、あるいは有効な実験データの集積を待って、総合的に綿密な比較検討を行うことが必要となるであろう。早期に実効ある成果が上がり、乱立でなく統一の方向で収束することを切望してやまない。なお最後に、今般の改訂版中の締固め試験に関する解説に触れて申せば、旧態依然としたものでなく、その時代の研究成果の到達度

事例報告

を適正に織り込んだものであってほしいと願うものである。

参 考 文 献

- 1) Walker, F. C. and Holtz, W. G.: Control of embankment material by laboratory testing, Proc. ASCE, Vol. 77, No. 108, pp. 1~25, 1951.
- 2) 土質工学会編:「土質試験法」, 第6章 締固め試験, pp. 140~144, 1964.
- 3) 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.
- 4) 竹下春見:「道路工学」, 金原出版, pp. 127~129, 1955.
- 5) Schwab, H. H.: A contribution to the examination of hydraulic stability of earth and rock, Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, pp. 307~308, 1993.
- 6) 福本武明:新しい密度補正式の提案, 立命館大学地盤研究室発表会資料, pp. 1~5, 1984.
- 7) 増井 久・福本武明:粗粒土の密度に及ぼす粗粒子の影響, 土木学会第50回年次学術講演集, pp. 772~773, 1995.
- 8) 福本武明・増井 久・松田裕光:締固められた粗粒土の新密度補正式, 第33回地盤工学研究発表会, pp. 403~404, 1998.
- 9) 似内 徹・水鳥隆志・佐藤 優:締固め密度の補正式に関する検討, 第35回地盤工学研究発表会, pp. 981~982, 2000.
- 10) 柴田英明:土に粗粒分を混入した場合の締固め密度の算定式に関する一提案, 第20回土質工学研究発表会, pp. 1581~1582, 1985.
- 11) 柴田英明:砂・粘土混入土の締固め後の構造に関する一提案, 土と基礎, Vol.34, No.12, pp. 17~22, 1986.
- 12) Hsu, T.S. and Saxena, S.K.: A general formula for determining density of compacted soil with oversize particles, Soils and Foundations, Vol.31, No.3, pp. 91~96, 1991.
- 13) 吉田信夫:レキ混じり土の締固め特性について, 第5回土質工学研究発表会, pp. 317~320, 1970.
- 14) 後藤 茂・宮本武司・玉置克之:軟岩ずりの締固め特性に及ぼす粗粒分の影響, 土と基礎, Vol. 32, No. 7, pp. 45~52, 1984.
- 15) 黒島一郎・中岡時春:盛土材料としての堆積軟岩の諸特性と盛土事例, 3. 堆積軟岩材料の締固め特性, 土と基礎, Vol. 44, No. 3, pp. 81~86, 1996.
- 16) 中岡時春・望月秋利・坂口 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.
- 17) 松本徳久:粗粒材の設計定数の決定方法とその適用, 土と基礎, Vol. 33, No. 6, pp. 7~12, 1985.
- 18) 赤司六哉・江藤義孝・江藤芳武・相馬 明・山下伸二:締固められた粗粒土の密度補正に関する一考察, 第20回土質工学研究発表会, pp. 1583~1586, 1985.
- 19) 川村国夫・筒井弘之・熊谷幸博:粗粒土の締固め特性と大型モールド試験の適用性, 土と基礎, Vol. 38, No. 4, pp. 35~40, 1990.
- 20) 森 満雄・阿部道雄:礫混じり土の締固め密度に関する基礎的検討(Ⅱ), 第26回土質工学研究発表会, pp. 1893~1894, 1991.
- 21) 森 満雄・阿部道雄・森 麟:礫混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.
- 22) Humphres, H. W.: A method for controlling compaction of granular materials, H. R. B. Bulletin159, pp. 41~57, 1957.
- 23) 播田一雄・中澤重一・大北康治・袖木孝治:体積率表示を用いたレキ補正法について, 第14回土質工学研究発表会講演集, pp. 693~696, 1979.
- 24) 渡辺 隆・久野悟郎:土の突固めに対する特性及び乾燥密度曲線の実験式, 土木学会誌, 第38巻, 第5号, pp. 5~10, 1953.

(原稿受理 2000.9.25)