

Ⅲ-A8

粒子集合体の混合の問題に関する一見解

立命館大学理工学部 正会員 福本武明

1.はじめに

地盤工学の分野において、特に粗粒土を扱う場合、密度管理の実務とかかわって「礫補正」の問題が重要である。また舗装工学やコンクリート工学などの分野では、粒状材料の強度など力学特性と関連して、古くから「連続粒度と不連続粒度の優劣」の問題や「つめこみ」の問題が議論されている。あるいは工業化学工学分野など粉粒体を扱う他の分野でも、以前から「最密充填（最小間隙）構造系」の探究が盛んに行われている。著者は、「礫補正」の問題と多少かかわりを持ってきたが、これまでの研究活動を通じて、前掲の各問題がいずれも根元を同じくし“粗粒”と“細粒”の混合の問題として同一視できるのではないか、と考えるようになった。今回、その思考経緯を簡潔に述べ、この課題に関心ある諸氏の御批判を仰ぎたい。

2.粗粒土の礫補正の問題

地盤工学の分野では、室内締固め試験方法¹⁾で規定の許容最大粒径よりも粗な粒子を多量に含む土質材料を実際に扱う機会が多い。このような粗粒土（図-1参照）に対し設計や施工管理に必要な基準値を求める場合、許容最大粒径 d_{max} よりも粗い粒子（文中では“粗粒”と仮称）を除去した土（文中では“細粒”と仮称）の試料を用いて室内試験を行い、その結果を“粗粒”の混入割合 P に応じて補正する手段が採られている。その際、Walker-Holtz の方法^{1)~3)}、すなわち式（1）が従来よく用いられてきた。式（1）は、“粗粒”の間隙が“細粒”で満たされ、かつ間隙内の“細粒”の密度が“細粒”のみを同一締固め仕事量で締固めた場合の乾燥密度 ρ_{d1} に等しい、と仮定して導かれている。式中、 ρ_{d2} は“粗粒”のみの場合のゼロ空気間隙状態の密度に相当する。しかし、この方法は、適用範囲が狭く $P < 30 \sim 40\%$ でしか成り立たないと言われている。著者^{4), 5)} は、式（1）がもっと広い範囲に適用できるようにするため式中含まれる不合理な点を改善し、式（2）のような修正式を提案している。式（2）中の α と β は係数であって、それぞれ式（3）と式（4）から求まる⁵⁾。なお、式（3）、（4）中の ρ_{dg} は“粗粒”のみの場合の実測乾燥密度であり、 λ は係数でその物理的意味を目下、“粗粒”の混入による“細粒”の構造の攪乱度（換言すれば“粗粒”の干渉度）と解釈している。この新しい方法を図示すれば、図-2 のようになる。なお、諸家の実験データに当てはめて検証が行われ、式（2）の適合性の良いことが報告されている^{6)~8)}。

3.不連続粒度を持つ路盤材の最密配合

道路舗装分野では（コンクリート骨材分野でも）、古くから不連続粒度と連続粒度の比較検討が盛んで⁹⁾、道路舗装要綱¹⁰⁾中に現在、アスファルト混合物の標準配合として連続粒度だけでなく不連続粒度の規定も少し盛り込まれている。しかし、路盤材としては不連続粒度の規定がない。そこで、良質な粒状材料の不足している今日、中間部を取って残った粗粒材と細粒材の有効利用の観点からも、路盤材への不連続粒度の適用は重要な検討課題だとして最近、研究が行われている。一例として、図-3 のような不連続粒度をもつ路盤材の乾燥密度 ρ_d を測定した結果の報告¹¹⁾があるので、それを図-4 に示しておく。図中の実線（太線）は、式（2）を当てはめた線である⁵⁾。このことから（ほんの一例に過ぎないが）、不連続粒度をもつ粗・細粒状材料 混合 礫補正 不連続粒度 最密充填系

〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 TEL 077-561-2731 FAX 077-561-2731

混合物にも式（2）がうまく当てはまる。なお、この種の工学的問題の場合、最密配合状態を特定することがしばしば行われるが、この点、式（2）を微分してゼロとおき、曲線のピーク位置さえ押さえれば果たせることになる。

4. 最密充填系の問題

コンクリート工学の分野では「詰めこみ」の問題として、また粉粒体工学などの分野では「最密充填系」の問題として、盛んに研究が行われてきた。いずれもそれらの研究目的は、粒子集合体の空隙を最小にして強度や透水性などの力学的性質を利用に最適な状態にすることにある、と言ってよい。一例として、2要素配合（図-5参照）の場合の実績率 G と“粗粒”の割合 P との関係を実測した例を図-6に示す。このデータに式（2）を当てはめるために、乾燥密度 ρ_d を実績率 G に直すと、次式が得られる。式中、 n は空隙率である。図-6中の実線（太線）は、この式（5）

$$G = 1 - n = \frac{(1 - n_1)}{1 - n_1 \cdot P} (1 - \alpha P^\beta) \dots\dots (5)$$

を当てはめた線であって、実験値とよく合致している。図-7は、粒体工学の教科書等^{15), 16)}に紹介されているデータで、粒径比（ $=d_2/d_1$ ）を異にする場合の充填密度の変化状況が空隙率 n で表されている。このようなデータにも式（2）の適用が可能と思われる。

5. まとめ

以上より、礫補正の問題、不連続粒度の問題、詰めこみの問題、最密充填系問題などは、いずれも“粗粒”と“細粒”の混合の問題として同一視でき、式（2）を用いて同じ土俵上で議論できるのではないかと考えられる。

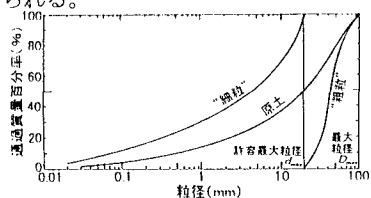


図-1 粗粒土と粒径分布の例

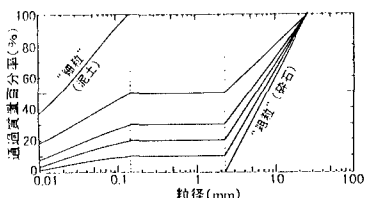


図-3 不連続粒度配合の例

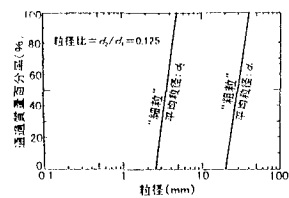


図-5 2要素配合の例

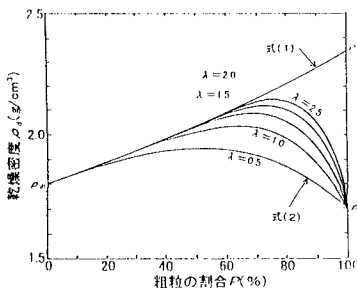


図-2 説明図

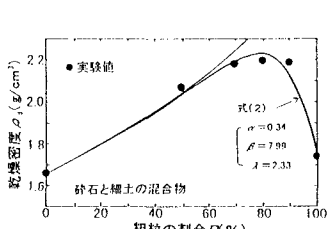


図-4 ρ_d - P 関係

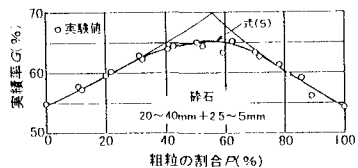


図-6 2要素の詰めこみ実験例⁽⁴⁾

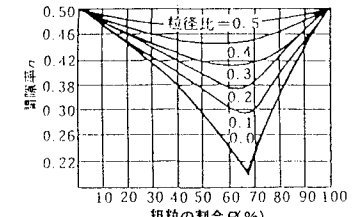


図-7 粒体の混合と空隙率⁽¹⁰⁾(Furnasによる)

6. 参考文献 1) 土質学会編：土質試験の方法と解説，1980 2) Walker, F.C and Holtz, W.G.: Control of Embankment Material by Laboratory Testing, Proc. ASCE, No.180, 1951 3) 土質学会編：土質試験法（第2回改訂版），1985 4) 福本：新しい密実化法の提案，立命館大学地盤研究室発表資料，1984 5) 福本・増井・松田：締固められた粗粒土の新設地盤工式，第33回地盤工学研究発表会，1998 6) 増井・福本：粗粒土の密実化と粗粒粒子の最密，土木学会第53回年次学術講演集，1995 7) 松田・福本・増井：粗粒土の密実化に関する研究，平成8年度土木学会関西支部年次学術講演集，1996 8) 松田・福本：粗粒土の密実化工式の適用性，平成9年度土木学会関西支部年次学術講演集，1997 9) 例えび，巻下・青沢・豊沢：碎石の粒実構成と最大密度について，第31会日本道路学会論文集，1955 10) 日本道路学会編：アスファルト舗装要綱，1992 11) 田崎：道路材への不連続粒度の適用性に関する研究，立命館大学修士論文，1994 12) 例えび，水野・徳光：粉体の詰めこみに関する研究（第1報），九大工学集報，第30巻，第3号，1957 13) 例えび，三輪：粉粒体工学，朝倉書店，1972 14) 徳光：粗粒の詰めこみに関する研究，材料，第13巻，第135号，1964 15) 川北・小石・種谷：粒体工学（基礎編），横倉書店，1979 16) 橋本・浜野：セラミックスの基礎，共立出版，1975