

乾いた粒子の均一充填をめぐる

安 中 武 幸*

On Homogeneous Packing of Dry Particles

Takeyuki ANNAKA*

* Faculty of Agriculture, Yamagata University, 1-23 Wakaba-machi,
 Tsuruoka, Yamagata, 997-8555, Japan

1. はじめに

筆者はこれまで、浸潤前線不安定性に起因するフィンガー流のメカニズムを明らかにする目的で、ガラスビーズと砂を用いた実験的検討を行ってきた (Annaka and Hanayama, 2005, 2007; 安中・川島, 2006)。これらの実験では、円筒や2次元チャンパーに乾いた試料を均一に充填することが不可欠である。当初用いたガラスビーズでは、ロートを用いて落下充填し、時おり円筒・チャンパーの側面に打撃を加えてやれば浸潤実験を問題なく実施できた。しかし試料を砂に変えたとき、困難に直面した。乾いた砂をガラスビーズと同じ方法で充填すると、明らかに不均一な構造の形成が認められ、浸潤実験がうまくいかなかった。また、撥水处理砂と無処理砂との混合砂をチャンパーに充填する際、側面に打撃を加えると撥水处理によって着色した粒子と無処理の白い粒子が分離し、縦じま模様が生じることも観察された。

乾いた砂を充填する際に生じたこれらの事態は、微視的成層化 (micro-layering) や偏析 (segregation) として知られている現象が原因である (例えば, Lebron and Robinson, 2003)。これらを軽減するために、ランドマイザー (randomizer) (Glass *et al.*, 1989) を用いた充填が有効であった。本資料では、乾いた粒子を充填する際に問題となる、試料調整や充填方法による充填密度の変動性、乾いた粒子を落下充填する際に生じる微視的な不均一性の事例と、それを改善する手段であるランドマイザーの構造と効果を紹介する。

2. 充填密度の変動性

2.1 充填方法と密度

表-1 は、粒径 0.3~0.6 mm の乾いた海砂 (和光純薬工

業) を、内径 1.7 cm のアクリル円筒にロートを通して落下充填した時の密度を示したものである。「3層で振動なし」から「少量ずつで振動なし」の4つの方法を比較した (それぞれ3反復)。「3層」とは、試料を3回に分けて充填したという意味であり、試料の3分の1量を加えた後の振動回数を変えた。また、「少量ずつ」とは、文字通り砂粒子を少しずつゆっくりと落下充填させることである。この結果が示していることは明らかである。すなわち、① 充填方法が異なれば密度は異なる、② その際、充填方法が同じである限り密度の変動は非常に小さい、③ 振動には密度を大きくする効果があり、回数と密度には正の相関がある、④ 少量ずつゆっくり充填すると大きな密度が得られる、⑤ 少量ずつ落下させる方法は、振動を与えずとも、一度に多量の試料を落下させ振動を与える方法より高い密度が得られる。

ここで注目すべきことは、振動を多く加えるとより大きな密度が得られるが、粒子を落下させる速さがそれ以上に重要な要因となっていることである。容器に注ぎ込まれた粒子層に振動 (打撃) を加えることは、重力による粒子移動を阻害する摩擦力を軽減するという意味を持つ。そのため、砂の最大充填密度を得るための試験法として打撃 (振動) を加えることが一般的に行われている (地盤工学会, 2000)。また、空気中での落下充填に関して、落下高さや充填にかかる時間、すなわち充填速度が充填密度に影響し、特に「時間」が短いと密度が小さく、長いと密度が大きくなることは古くから知られている実験事実である (Kolbuszewski, 1948)。この事実は、砂質土の力学的特性を測定するための供試体作成技術に応用されてきた (Miura and Toki, 1982; Rad and Tumay, 1987)。

2.2 試料の調整方法の影響

表-2 は、同じ海砂について、試料の調整方法が落下充

表-1 乾いた砂の充填方法と密度の関係

Table 1 Bulk densities of differently packed, dry sand.

充填方法	充填密度 (g cm^{-3})	
	平均	標準偏差
3層で振動なし	1.277	0.006
3層×10回振動	1.413	0.006
3層×20回振動	1.443	0.006
少量ずつで振動なし	1.530	0.010

- ・粒径 0.3 mm~0.6 mm の海砂 (粒子密度 2.65 g cm^{-3} ; 無処理) 使用
- ・内径 1.7 cm 高さ 25 cm のアクリル円筒の上端から、ロートを通して試料高さ 20 cm まで落下充填
- ・3反復

表-2 調整方法の異なる乾いた砂の充填密度

Table 2 Bulk densities of differently prepared, packed dry sand.

処理方法	年度	反復	充填密度 (g cm^{-3})	
			平均	標準偏差
無処理	2004	27	1.551	0.026
	2005	15	1.510	0.015
水洗い	2004	36	1.575	0.019
	2005	18	1.582	0.013
H_2O_2 処理	2004	55	1.556	0.022
	2005	35	1.523	0.021

「無処理」とは購入した海砂をそのまま風乾したもの、「水洗い」とは水道水および蒸留水でよく洗ったもの、「 H_2O_2 処理」とは水洗い後 5% H_2O_2 水で有機物分解したものの

充填密度に与える影響を示したものである。無処理・水洗い・ H_2O_2 処理砂について、内径 1.7 cm のアクリル円筒に少量ずつゆっくりと落下充填した。この結果は、水洗い砂が無処理と H_2O_2 処理より充填密度が若干大きいことを示唆している。また、年度による平均の違いが認められるとともに、同一年・同一試料での変動が表-1と比較して大きい。このことは、測定を行なう日の違いが変動要因となっていること、すなわち、試料・容器の状態に影響を与え得る温度・湿度や試験者の操作が全く同じではないことを反映しているものと考えられる。

2.3 充填容器の影響

図-1は、内径 1.7 cm のアクリル円筒への充填密度と幅 10 cm × 奥行 0.6 cm のアクリルチャンバーへの充

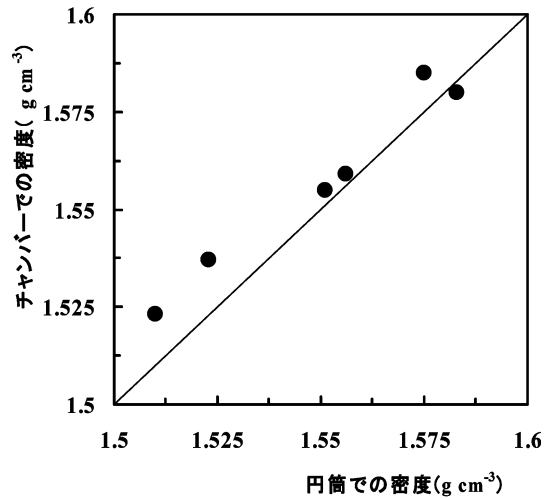


図-1 乾いた砂の円筒およびチャンバーへの落下充填密度の比較

年度および調整方法により 6 グループに分け平均を求めて作成

Fig. 1 Comparison of sand bulk densities packed in the column and chamber.

填密度を比較した散布図である。表-2で示した様に、年度および調整方法で試料を 6 グループに分け、それぞれの充填密度の平均を用いてプロットした。図中の直線は両者が等しい場合を示している。全体的にチャンバーへの充填密度が大きめとなっているが、その差は小さいものである。用いた海砂の粒径は 0.3~0.6 mm なので、2つの容器とも断面の大きさは粒子に対して十分大きいため、特に違いが生じなかったものと考えられる。

3. 充填層の微視的不均一性

3.1 浸潤時に可視化する微視的不均一性

乾いた砂層への浸潤実験では、充填密度の再現性のみならず、充填時に形成する微視的な不均一性の解決が重要である。図-2は、0.4 mm ガラスビーズと 0.3~0.6 mm 海砂を幅 10 cm × 高さ 30 cm × 奥行き 1.0 cm のアクリルチャンバーに充填した後、点滴給水した時の流路形成を示したものである。この時の充填のしかたは、ロートを通して乾いた試料を落下させ適宜チャンバー側面をたたいて振動を与えるというものであった。ガラスビーズでは、ロートを通じた落下+振動でほぼ均一な充填が可能であったことが、流路の状況から判断できる。しかし海砂では、浸潤過程で前線が一時停滞して水が水平方向に広がることしばしば生じ、図のような流路が形成された。これは、落下充填時に微視的な成層が形成され、相

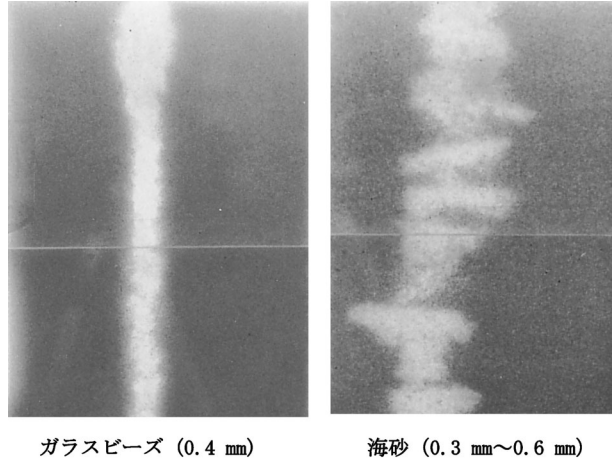


図-2 ガラスビーズと砂の充填層への浸潤時の微視的不均一性の可視化
ガラスビーズ充填層では浸潤時に特に問題はないが、海砂充填層
では浸潤時に微視的な不均一性が可視化される。

Fig. 2 Visualized heterogeneity of packed glass beads and sand

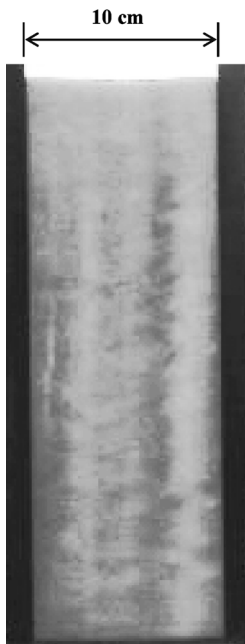


図-3 混合砂偏析の様子
明暗の縦じま模様が認められる。
暗い部分にはOTS処理砂が多い
ものと考えられる。

Fig. 3 Segregation of mixed sand.

対的に水が浸入しやすいところとしにくいところが生じたことを示唆している。

3.2 混合砂の充填に伴う偏析

図-3は、撥水処理砂と無処理砂の混合砂をチャンバーに充填した際に形成された縦じま模様を示したものである（暗い部分に撥水処理砂が多い）。この時には、微視的な成層化を防ぐために、後述のランドマイザーを用いている。しかし、粒子の落下を促すためにランドマイザー側面に打撃を加えたことが、この様な結果をもたらしたと思われる。

粒径や形状などが異なる2種類以上の粒子を混合した試料を充填する際に、微視的成層化（micro-layering）および偏析（segregation）が生じることは良く知られている（田口, 1995; Makse *et al.*, 1997; Lebron and Robinson, 2003）。図-3に示されている縦じま模様は、異なる粒子が分離する現象である偏析によるものである。これに関しては、径や形の異なる粒子が回転円筒内で縦じま模様に分離する「大山の円筒」（Oyama, 1939）が有名であるが、そのメカニズムはいまも良く分かっていない（デュラン, 2002）。

4. 「ランドマイザー」について

乾いた砂の落下充填時に斜面が形成されると、粒子が斜面に沿って移動し、微視的成層化および偏析がこの過程で生じる。このことは、チャンバーの堆積断面全体に一樣な速さで粒子を堆積させ斜面を形成しないように充填ができれば、微視的不均一性の形成を防止し得ることを示唆している。そのため的手段がランドマイザー（randomizer）である。筆者が作成し、実験に用いたラ

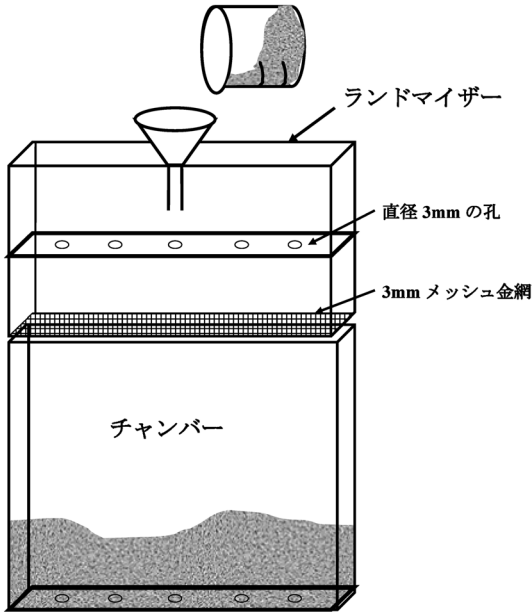


図-4 ランドマイザーの例とそれをを用いた充填
 Fig. 4 Illustration of the randomizer used in the chamber experiment.

ンドマイザーを、例として図-4 に示した。丸孔のあいた板(上段)と金網(下段)が2段式のスクリーンを構成している。これに砂を注ぎ込むことにより、チャンバーの断面全体に様な速さで堆積させることが可能となる。

図-5 は、ランドマイザーを用いた充填によって微視的な成層の形成がどれ位抑えられたかを示す例である。ランドマイザーを用いないロートを通しての落下充填層への浸潤では、流路の形状に微視的な成層が可視化されている。一方、ランドマイザーを用いた落下充填の場合微視的な成層は認められず、浸潤前線が滑らかな曲線となっている。

フィンガー流の研究においてランドマイザーを最初に用いたのは Glass *et al.* (1989) である。彼らは、乾いた砂を用いたチャンバー浸潤実験を実施したが、実験方法の説明において“Filling and Packing Apparatus”を非常に詳しく丁寧に記述している。それは、チャンバーに乾いた砂を充填する際に生じる不均一さがフィンガー流の形状に多大な影響を及ぼすからであった。すなわち、供試砂は同じ大きさの粒子だけから構成されておらず一般に粒径分布を持っているため、落下充填の際に偏析と微視的な成層化を生じることが問題となったのである。また Glass *et al.* (1990) では、3次元カラム実験で

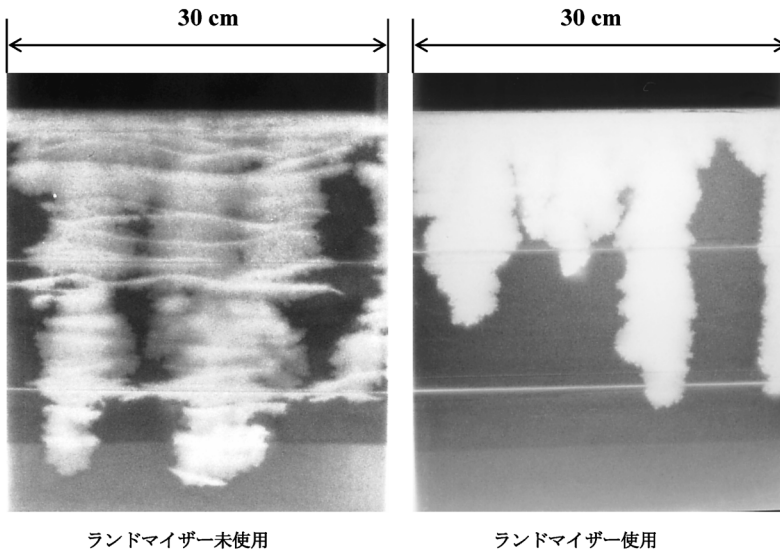


図-5 ランドマイザー使用有無による微視的均一性の違い
 海砂 (0.3mm~0.6mm) 充填層に生じたフィンガー流。左図はランドマイザーを用い
 ず落下充填した場合であり微視的な成層化の影響が顕著である。右図はランドマイザー充
 填の場合であるが、滑らかな浸潤前線を生じており均一な充填を示唆している。

Fig. 5 Effect of a randomizer on packing homogeneous sand layer.

用いたランドマイザーの構造を図解している。ところで、Geiger and Durnford (2000) は、ランドマイザーの典拠として Rad and Tumay (1985) を引用しているが、そこでは“raining”と呼ばれる供試体作成時の砂充填方法についての系統的な実験的検討がなされていた。この“raining”に関しては、既に Kolbuszewski (1948) が「均一で、望まれる相対密度の供試体作成、かつ自然の堆積層における粒子配列構造に近いものを模擬しようする方法として優れている」充填方法であると報告している。

最後に、ランドマイザー使用上の問題として、粒子の大きさに合わせてスクリーンの隙間の大きさを調整する必要があることを指摘しておく。スクリーンの隙間は粒径に対して小さすぎても大きすぎてもうまくいかない。それが粒径の6倍より小さいと目詰まりを起こしやすい(田口, 1995)。一方大きすぎると、注ぎ込んだ位置にすばやく落下してしまうため、粒子の様な堆積を実現できない。また、上段の丸孔より下段の金網の隙間を小さくしてはならない。下段に目詰まりを生じてしまうからである。

5. おわりに

マクロポアや成層の存在により土壌が不均一であることは常識となっている。土壌の中では、砂層は均一で単純なものとしてとらえられてきたと思う。しかし、乾いた砂の落下充填における微視的不均一性の形成やすさを考慮すると、自然の砂層が果たして均一ととらえられるのか疑問である。また、撥水性を示す砂が多く報告されているが、これによる表層砂層の不均一さもこの疑問を助長する。実態を丁寧に観察・把握することが求められる。

引用文献

- 安中武幸・川島麻里枝 (2006) : 砂層のみかけの接触角が降雨浸潤時に形成するフィンガー流路の性状に及ぼす影響. 農業土木学会論文集, **241** : 149-150.
- Annaka, T. and Hanayama, S. (2005) : Dynamic water-entry pressure for initially dry glass beads and sea sand. *Vadose Zone J.*, **4** : 127-133.
- Annaka, T. and Hanayama, S. (2007) : Pressure head profile within growing fingers in initially dry glass beads. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **71** : 901-908.
- デュラン著 中西 秀・奥村 剛訳 (2002) : 粉粒体の物理学. pp. 205-244, 吉岡書店, 京都.
- Geiger, S.L. and Durnford, D.S. (2000) : Infiltration in homogeneous sands and a mechanistic model of unstable flows. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64** : 460-469.
- Glass, R.J., Steenhuis, T.S. and Parlange, J-Y. (1989) : Wetting front instability : 2. Experimental determination of relationships between system parameters and two-dimensional unstable flow field behavior in initially dry porous media. *Water Resour. Res.*, **25** : 1195-1207.
- Glass, R.J., Cann, S., King, J., Baily, N., Parlange, J-Y. and Steenhuis, T.S. (1990) : Wetting front instability in unsaturated porous media : A three-dimensional study in initially dry sand. *Transport in Porous Media*, **5** : 247-268.
- 地盤工学会 (2000) : 土質試験の方法と解説 (第一回改訂版). 第8章 砂の最大密度・最小密度試験. pp. 136-145, 東京.
- Kolbuszewski, J.J. (1948) : An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands. *Proc. 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering vol. 1, London* : 158-165.
- Lebron, I. and Robinson, D.A. (2003) : Particle size segregation during hand packing of coarse granular materials and impacts on local pore-scale structure. *Vadose Zone J.*, **2** : 330-337.
- Makse, H.A., Havlin, S., King, P.R. and Stanley, E. (1997) : Spontaneous stratification in granular mixtures. *Nature*, **379** : 379-382.
- Miura, S. and Toki, S. (1982) : A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand. *Soil and Foundations*, **22** : 61-77.
- Oyama, Y. (1939) : The motion of binary particle in a horizontally rotating tube. *Bull. Inst. Phys. Chem. Res. Jpn. Rep.*, **18** : 600-639.
- Rad, N.S. and Tumay, M.T. (1985) : Factors affecting sand specimen preparation by raining. *Geotechnical Testing J.*, **10** : 31-37.
- 田口善弘 (1995) : 砂時計の七不思議. 中央公論社, 東京.

受稿年月日 : 2007年8月29日
受理年月日 : 2007年10月5日