

地盤材料の攪拌過程の評価及び混合度の定量化に関する個別要素法解析

東京大学生産研究所 正会員 ○大坪 正英 学生会員 Ali Naqi フェロー会員 桑野玲子
鹿島建設(株) 正会員 永谷英基 川野健一 劉 偉晨

1. はじめに

地盤材料の粒度調合、固化材の添加による地盤改良土の作製過程、深層混合処理工法施工時、シールドチャンバ一内の土砂攪拌に見られるように、人工的に地盤材料の攪拌が必要になる場合がある。しかし、地盤工学分野において攪拌現象に着目した研究事例は限定的であり、スランプ試験に代表されるような指標、あるいは技術者の経験により攪拌が十分か否かを評価する機会が多いのが現状である。本研究では個別要素法を用いることで、地盤材料の攪拌特性を調べ、混合の度合いを定量化するための基礎的な検討を行った。

2. 解析手法

LAMMPS¹⁾を用いた個別要素法解析を行い、Oakbridg-CX システム上で並列計算を実施した。直径が 2.0 mm - 2.2 mm の球形粒子を用いた。材料物性は一般的な砂を参考に、ヤング率 71.6 GPa, ポアソン比 0.23, 比重 2.65 とした。粒子間および粒子-壁面の接触計算には Hertz-Mindlin 理論を適用した。

3. 模型地盤作製

図-1 に地盤の作製手順を示す。(i) 幅 30 cm, 奥行 2 cm, 高さ約 100 cm の空間に接触がないように粒子群を発生させ、自由落下させた。(ii) 堆積後の地盤高さは約 35 cm であった。この際の粒子間摩擦係数は 0.05 と設定した。(iii) 地盤を直径 30 cm の円柱型に切り抜き、壁面を設置した。(iv) 攪拌翼(二本の剛な円柱ロッド)を挿入する位置にある粒子群を削除し、奥行き方向に攪拌翼を貫通させた。攪拌翼直径(ϕ)は 3 cm あるいは 1 cm とした。この過程で地盤頂部が落ち込む様子が確認された。攪拌解析に用いた粒子数は約 17 万であった。(v) 円柱地盤の中心を軸として攪拌翼を 20, 100, 500 RPM の三ケースの速度で回転させた。(vi) 本検討では回転数は 25 回とした。なお、壁面摩擦の影響を無視するために、壁面摩擦係数は 0 とした。

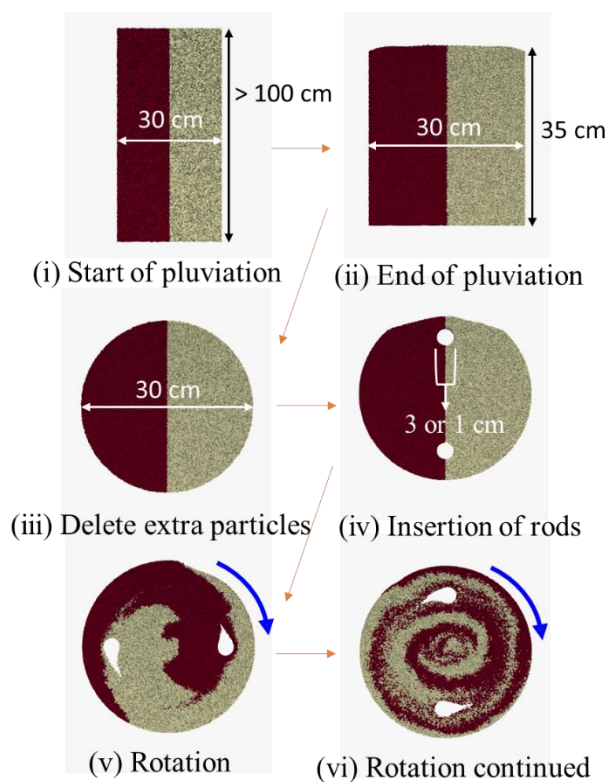


図-1 DEM 模型地盤の作製手順

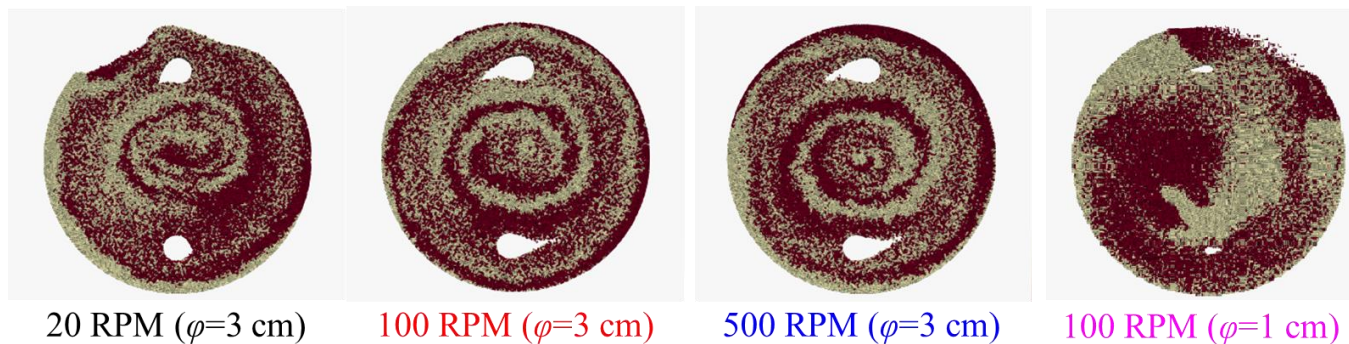


図-2 攪拌特性に及ぼす回転速度及び攪拌翼径(ϕ)の影響 (25 回転後の様子)

キーワード 攪拌, 個別要素法, 動的挙動

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5452-6843

4. 解析結果

表-1 に示すように、 ϕ 3cm で攪拌速度を変化させた場合と、攪拌速度 100 RPM で ϕ を変化させた場合の計 4 ケースに対して解析を実施した。図-1 に示すように、攪拌前の粒子座標に応じて粒子の色を二値化し、その後の攪拌過程を観察した。図-2 には 4 ケースに対する 25 回転時の地盤の様子を示す。回転速度による顕著な攪拌性状の違いは確認されなかったが、攪拌翼径による攪拌性状の差異は明確であった。

5. 混合度の定義

地盤工学分野では混合度の定量的評価に関する研究は少ないが他分野では先行研究が存在する²⁾。本研究では Naqi ら³⁾ が提案する混合度(d_m)を用いた。図-3 に示すように地盤を 100 分割し、各々の領域における二値化した粒子群の混合率を定量化した。攪拌前はすべての分割領域において 1 種類の粒子のみ存在するため、 $d_m=0\%$ である。対照的に 2 種類の粒子数が等しくなる時に $d_m=100\%$ となる計算手法である。

図-3 に 100 RPM の攪拌速度に対し、攪拌翼径の異なる 2 ケースの混合度(d_m)の分布を示す(これらは図 2 の状態に対応している)。 ϕ 1 cm の場合は中心部の混合度が著しく低いことが確認され、図-2 の様子と整合する。攪拌翼径が小さい場合、攪拌領域が狭まることが要因だと考察される。

続いて、粒子数がゼロではない領域の d_m を平均した値を平均混合度(m)と定義することで、攪拌翼回転数との関係を図-4 に整理した。すべてのケースにおいて、攪拌翼回転数の増加に伴う平均混合度の上昇が確認された。攪拌速度による影響は限定的であるが、攪拌翼径の影響は顕著に現れている。いずれのケースにおいても、25 回転以降も平均混合度の上昇が見込まれるため、今後の検討が必要である。

6. まとめ

本研究では地盤材料の攪拌過程の評価及び混合度の定量化に関する個別要素法解析を実施した。今回の検討では攪拌翼の回転速度よりも翼径の影響の方が大きいという知見を得た。今後は間隙水や土質の影響を考慮する予定である

参考文献

- (1) Plimpton, S., (1995). Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. J. Comput. Phys. 117 (1), 1-19.
- (2) Naqi ら (2022). Evaluating degree of mixture of soil particles using DEM analysis. 令和 4 年度土木学会全国大会.
- (3) 中田ら (2017). シャノン・エントロピーによる粉粒体の混合度の定量評価. 粉体工学会誌, 54 (5), 296-304 (2017)

表-1 解析ケース

解析ケース	攪拌速度 [RPM]	攪拌翼径 ϕ [cm]	粒子数
1	20	3	165,919
2	100	3	165,919
3	500	3	165,919
4	100	1	169,398

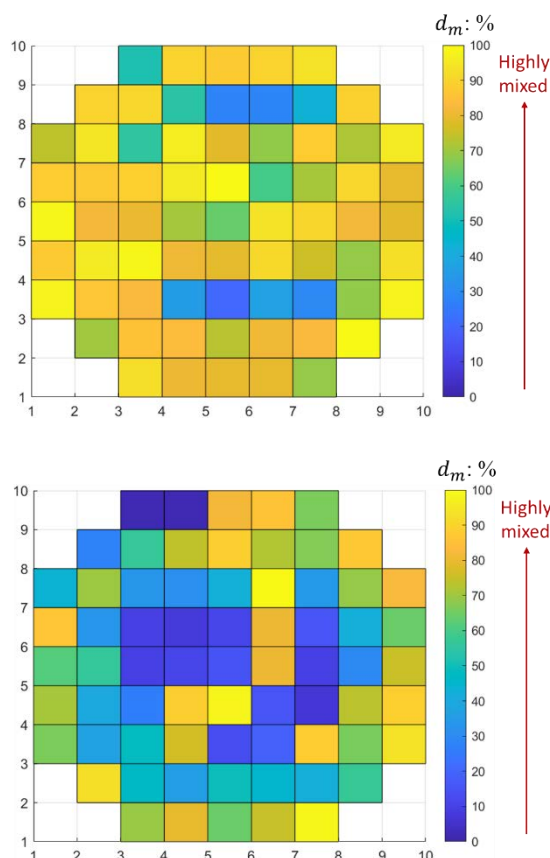


図-3 混合度 (d_m) に及ぼす攪拌翼径 (ϕ) の影響 (100 RPM にて 25 回転後の様子)
上: $\phi=3$ cm; 下: $\phi=1$ cm

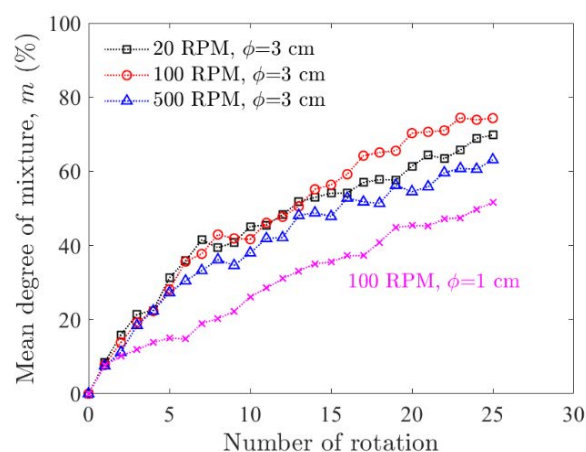


図-4 攪拌翼回転数と平均混合度 (m) の関係