

ポリマー懸濁液の砂地盤における注入・充填現象を対象にした三次元 DEM による解析

早稲田大学 学生会員 ○水原 祐哉 早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一
早稲田大学 学生会員 北村 真歩 早稲田大学 学生会員 中村 裕貴

1. はじめに

注入工法は Berigny がセメント火山灰を用いた石積護岸の修理に初めて使用したとされる 1802 年から 200 年以上が経過し、これまでに様々な特徴を持つ材料が開発・実用化されてきた。本研究グループでは高吸水性ポリマーを注入材に用い、遮水効果を得る工法の開発を行っている^[1]。しかしながらポリマー粒子と水からなる懸濁液の注入となるため均等な注入充填が困難であり、また遮水のメカニズムも明らかにはなっていない。そこで、近年地盤材料への適用が活発に行われている個別要素法 (Distinct Element Method: 以下, DEM) を用いて、解析的なアプローチで懸濁液の注入充填現象を解釈することを試みた。すなわち、土粒子とポリマー粒子を微視的要素としてとらえ、要素同士の相対的な運動方程式を解くことで、注入・充填現象を再現した。

2. 注入実験の手順

円筒容器中(直径 50mm 高さ 500mm)に空中落下法で模擬地盤を作製する。容器下端より水を水頭差により注入し、模擬地盤を飽和させる。高吸水性ポリマーと水を混合した液体を 300kPa の注入圧で容器下端より注入する。注入量に収束が見られた時点で停止し、脱型後注入状態を観察する。この際実際にポリマー粒子が間隙に充填している区間を触診により判断し充填長とする。

3. 三次元 DEM の解析条件および解析手順

注入現象を計算により再現するためには DEM による接触力計算のほかに、流体の運動についても考慮する必要がある。流体の計算については、粒子法や格子ボルツマン法などさまざまなモデルで研究が行われている。しかしながらどの手法においても流体の計算のコストは大きく、微小時間で計算を繰り返す DEM と連成すると解析が終わるまでに多くの時間がかかってしまう。そこで本研究では、ケース数を増やすことを優先して、注入による挙動を粒子に一定の掃力を与えることのみで再現することにする。また土粒子骨格を破壊するような注入は行われたいものとして、計算中土粒子は座標上に固定されたものとして扱うこととする。今回解析で用いる諸定数を表 1 に示す。法線ばね係数・接線ばね係数は Hertz^[2]および Mindlin^[3]の接触理論を参考に求めた。解析モデルの寸法は試料土の粒径と計算時間を考慮して、10mm×10mm×10mm とする。注入材粒子同士の接触、注入材粒子と土粒子の接触、注入材粒子と壁の接触の 3 種類を定義し、それぞれ係数を定めた。送る注入材粒子は、下端領域外に濃度を一定に保つように乱数で与えられた座標に出現させた。解析終了時の下端から注入材粒子の平均距離を平均到達距離として整理した。

表 1 解析条件

項目	値
注入材粒子の粒径(mm)	0.1
注入材粒子の弾性係数(N/mm ²)	8000
土粒子の弾性係数(N/mm ²)	280000
壁の弾性係数(N/mm ²)	280000
注入材粒子のポアソン比	0.25
土粒子のポアソン比	0.25
壁のポアソン比	0.25
粘性係数	0.1
摩擦係数 μ	0.18
ローカルダンピング減衰係数	0.1
時間刻み幅 Δt (s)	0.000002
解析時間(s)	0.2

4. 結果の比較

図 1 に示す 3 種類の粒度分布を有する模擬地盤を作成して解析を行った。図中の破線は解析に使用するためにモデル化した粒度分布である。実験の条件と結果および解析結果を表 2 に、解析終了時の粒子の配置を図 2～図 7 に示す。Case2 では注入が収束せず充填長が測定できなかった。スケールが違うため実験結果と解析結果を単純に比較することは困難であるが、充填長が大きいほど平均到達距離が長くなり、実験結果と解析結果が同傾向を示すことが確認できた。

キーワード DEM, 注入工法, 懸濁液, 三次元, ポリマー

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58 号館 205 号室 TEL 03-5286-3405

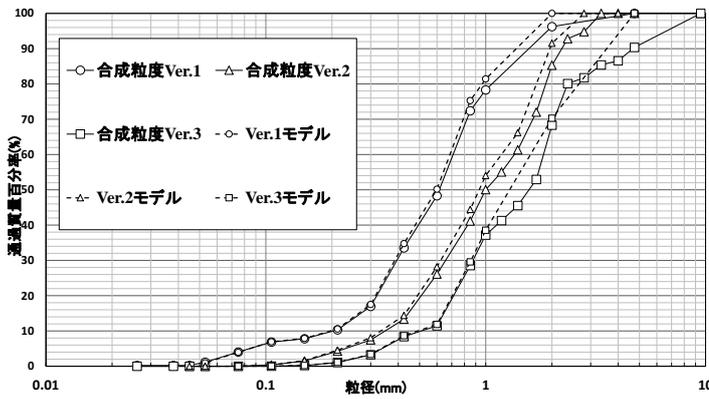


図 1 粒径加積曲線

5. 地盤材料の粒度分布が充填性を与える影響の検討

上記条件以外のさまざまな粒度分布で合計 14Case 解析を行った。一般に均等係数が大きいほど土が締まりやすく間隙比が小さくなるが、解析では間隙比を全て 0.7 程度に統一して粒度分布のみの影響を調査した。各 Case の粒度分布と平均到達距離を表 3 に示す。表中の粒子数とは、作成したモデルの解析寸法(10mm×10mm×10mm)中に含まれる地盤粒子の総数である。粒子数と平均到達距離を比較する粒子数が多いほど平均到達距離が短い傾向にあることがわかる。

6. まとめ

流体計算を行わず、土粒子も座標上に固定するという極めてシンプルな解析でありながら、実験の結果と同傾向を得ることができた。また粒子数は代表的な粒径を決めれば粒径加積曲線から単純な計算で求めることができるので、懸濁液の注入可否を示す新しい指標として扱える可能性を見出すことができた。今後の課題としては、流体計算を複合してさらに実現象に近づけることと、さらに Case 数を増やし粒子数を正規化して注入可否の指標をつくることがあげられる。

表 3 粒度分布と解析結果

No.	D ₁₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₇₀	D ₈₀	D ₉₀	均等係数U _c	曲率係数U _s	粒子数	平均到達距離(mm)
1	0.20	0.32	0.39	0.48	0.60	0.69	0.79	0.96	1.38	3.49	1.10	186194	0.14
2	0.08	0.13	0.34	0.77	1.29	2.03	2.51	3.11	3.84	26.49	0.75	431414	0.05
3	0.49	0.70	0.86	1.03	1.28	1.60	1.99	2.65	3.55	3.26	0.94	4083	3.71
4	0.33	0.49	0.62	0.77	0.93	1.18	1.18	1.18	1.18	3.53	0.99	14534	1.58
5	0.16	0.55	1.12	1.78	2.81	3.12	3.12	3.12	3.12	19.69	2.54	78622	0.41
6	0.12	0.24	0.53	1.06	1.80	2.82	2.82	2.82	2.82	23.98	0.85	99098	0.27
7	0.11	0.26	0.61	1.04	1.61	2.20	2.67	3.24	3.92	19.29	1.47	91343	0.45
8	0.10	0.18	0.49	1.08	1.84	2.33	2.78	3.32	3.97	23.23	1.05	201484	0.28
9	0.10	0.17	0.50	1.35	2.25	2.62	3.04	3.52	4.09	26.08	0.95	202548	0.26
10	0.22	0.37	0.47	0.57	0.68	0.82	0.94	1.15	1.52	3.69	1.23	95450	0.72
11	0.38	0.63	0.78	0.96	1.15	1.38	1.66	1.99	3.06	3.60	1.13	25260	1.25
12	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00	1.00	1061	7.11
13	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1.00	1.00	4912	4.90
14	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1.00	1.00	39297	1.19

表 2 実験結果と解析結果

Case	試料土	実験条件		実験結果	解析結果
		間隙比 e	相対密度 D _r (%)	充填長 (cm)	平均到達距離 (mm)
1	Ver.1	0.58	50.1	7	0.14
2	Ver.2	0.62	50.3	45	1.58
3	Ver.3	0.60	49.9	-	3.71

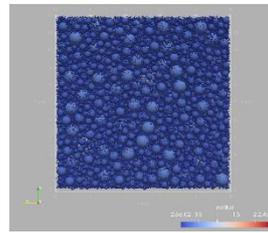


図 2 Ver.1 解析結果

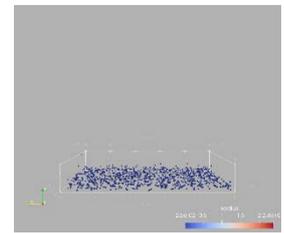


図 2 Ver.1 注入材のみ

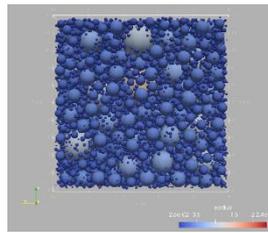


図 4 Ver.2 解析結果

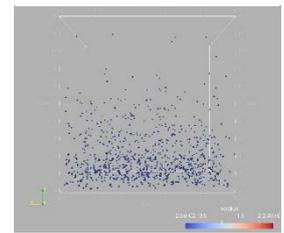


図 5 Ver.2 注入材のみ

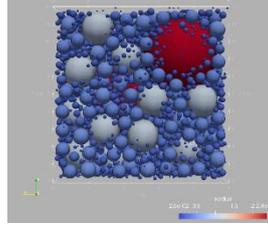


図 6 Ver.3 解析結果

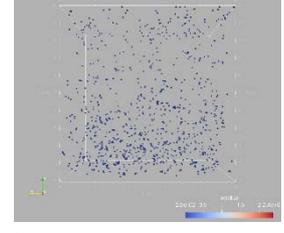


図 7 Ver.3 注入材のみ

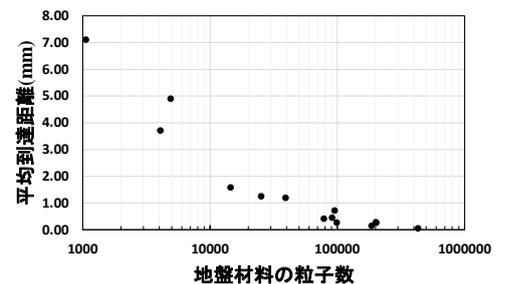


図 8 粒子数と平均到達距離の関係

参考文献

[1]北村真歩他, ”母材粒度を変化させた地盤における高吸水性ポリマーの注入特性および遮水性能について” 第 47 回関東支部技術研究発表会, 投稿中

[2]H. Hertz, “On the contact of elastic solids,” J. Reine Angewandte Math, vol. 92, pp. 156-171, 1882.

[3]R. D. Mindlin, “Compliance of Elastic Bodies in Contact,” Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 16, pp. 259-268, 1949