

23. 相対式攪拌翼による深層混合処理工法の CAE 解析に基づく性能評価

明石工業高等専門学校
あおみ建設
あおみ建設
芝浦工業大学

○ 中尾 晃揮
大古利 勝己
高橋 強
稲積 真哉

1. はじめに

わが国には主として粘土やシルトのような微細な粒子で構成された軟弱地盤や、特に都市臨海部においては緩んだ砂質地盤などの軟弱地盤が多数存在するため、軟弱地盤対策は重要な技術的課題となっている。図-1 で示されるように軟弱地盤は盛土や構造物の安全性に大きく影響を与えるため、原地盤に対して安定性の確保や強度および支持力等を高める地盤改良が必要となる。同時に、地震大国であるわが国においては、地震による地盤の液状化や沈下等の災害を抑制させるためにも液状化対策として地盤改良工法が必要不可欠である。そのため、様々な軟弱地盤に対して種々の地盤改良工法が実施されている。

地盤改良工法に関する課題の一つとして、当該施工中、原地盤（地中）の状況を目視（可視化）できないため¹⁾、改良体造成工程の適切な設計・管理が困難であることが挙げられる（図-2 参照）。

本研究では地盤改良工法の一つである相対攪拌式深層混合処理工法の攪拌翼ならびに地盤状況を3次元的にモデル化し、数値解析手法の一つである個別要素法（Distinct Element Method ; DEM）による粒状体解析を実施し、コンピュータ上で相対攪拌式深層混合処理工法の一連、特に相対式攪拌翼による地盤の攪拌混合シミュレーション（Computer Aided Engineering ; CAE）を行う。さらに、当該シミュレーション結果より土粒子の挙動を評価し、相対攪拌式深層混合処理工法の性能を評価する。

2. 地盤改良工法と相対攪拌式深層混合処理工法

地盤改良工法は軟弱地盤に対して液状化防止、支持力増加および圧密促進等の様々な効果をもたらす。また、現在、地盤改良工法として置換工法、圧密促進工法、締固め工法、固結工法、補強工法および注入工法等の多くの工法が存在し、それぞれ地盤の特性に合わせて選択されている。

その中の一つとして固結工法の内、深層混合処

理工法が挙げられる。深層混合処理工法はセメント系および石灰系の固化材を原地盤中に供給し、原位置土と攪拌混合することで地中に安定した改良体（改良柱）を造成する工法である（図-3 参照）。

図-3 では深層混合処理工法としてスラリー攪拌工法および粉体噴射攪拌工法の2種類が挙げられ、本研究ではスラリー攪拌工法の一つである相対攪

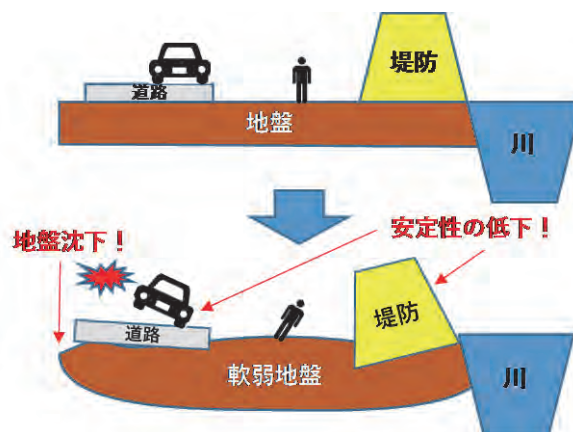


図-1 軟弱地盤に起因する様々な影響

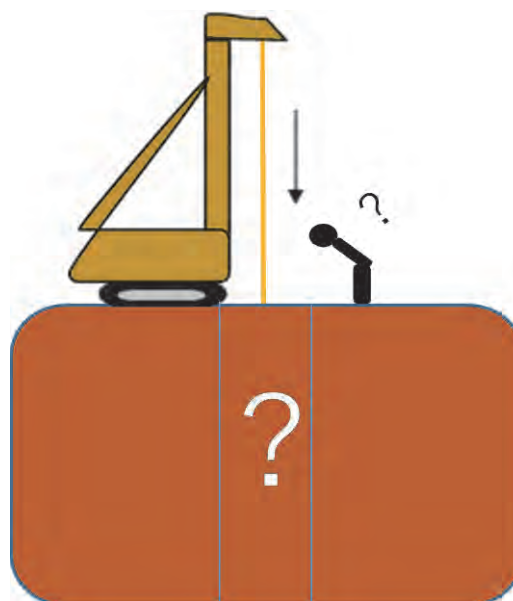


図-2 地盤改良に関する課題の一例（工程の可視化）

拌式深層混合処理工法^{2),3),11),12)}に着目している。

相対攪拌式深層混合処理工法は回転方向、回転速度(角速度)の違う、相対式攪拌翼を原地盤中に貫入させながら内翼・外翼を互いに逆方向に回転させ、先端の掘削ヘッドでスラリー状の固化材を吐出させながら掘削・攪拌混合を行うことで、対象土に対する共回りやつれ廻り現象を解消しつつ、3次元的に原地盤と固化材を攪拌混合することができ、均質な改良体を造成する工法である^{2),3)}。そのため本工法は盛土の安定、地盤のすべり防止、擁壁の安定、液状化対策等において適用されている(図-4参照)。さらに、相対攪拌式深層混合処理工法によって改良された地盤性能は、改良後の品質調査等によって実証されている^{3),4),11)}。なお、図-5は本工法の施工順序を示している。

3. 個別要素法 (DEM) による粒状体解析

DEMによる粒状体解析⁵⁾は剥離、滑りおよび要素間の接触といった連続体ベースでは計算できない現象を解析する手法であり、解析対象を自由に運動できる円形(2次元)や球形(3次元)の集合体をモデル化し、不連続面で区切られた要素の集合体において個々の要素ごと2階常微分方程式を立て解くことにより要素の動きを追跡し、集合体としての変形や動的挙動を解析する。DEMによる粒状体解析では個々の要素の運動を評価できるため、粒状体内部の力学を可視化するのに適した解析手法である^{6),7)}。

DEMによる粒状体解析は土粒子や粉体等の流動・混合攪拌をシミュレーションすることが可能であり、従来、岩盤工学分野において導入され、その後、地盤工学分野においても適用されるようになってきている^{8),9)}。現在では土石流、液状化現象、落石問題等災害や地盤の挙動解析に用いられるようになってきている。

3.1 要素間接触モデル

DEMによる粒状体解析では各球形要素を剛体として表現し、球形要素間に接触条件を与える(図-6参照)。すなわち、法線方向にはバネとダッシュポッド、接線方向にはそれらに加えてスライダを与える。ここで、法線方向は球形要素の中心点を結んだ方向であり、接線方向は法線に直行する方向である。基本的に法線方向は要素間の反発力(斥力)を、接線方向は摩擦力を表現している。また、バネは反発力や摩擦力を発揮するために存在し、ダッシュポッドはエネルギー減衰させるために粘性的な挙動を表現する。さらに、スライダは摩擦則に基づいて摩擦力の大きさをコントロールする役割を有している⁵⁾。

3.2 解析条件

DEMによる粒状体解析の条件として、球形要素

(ball)および面(wall)の材料特性を表すパラメータを与える必要がある。ただし、DEMによる粒状体解析においては材料特性を表すパラメータの決定が困難である。換言すれば、各球形要素の接触特性を数少ないパラメータで表現するため、且つ各球形要素の径が変化すれば材料特性を表すパラメータも変化するため、当該パラメータの決定方法は複雑となり、確実性の高いパラメータを決

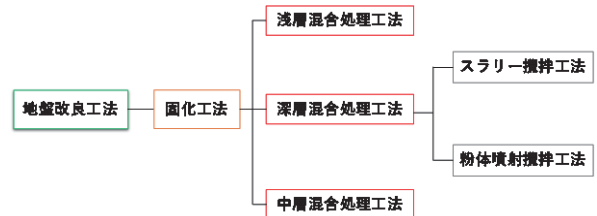


図-3 地盤改良工法の分類

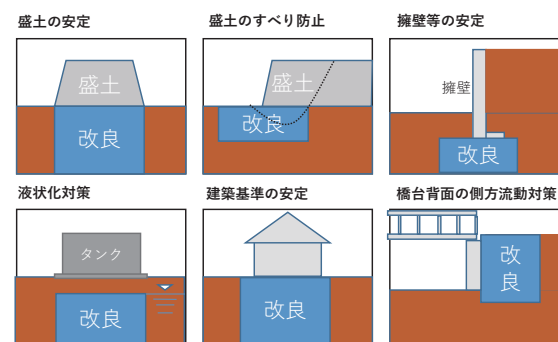


図-4 相対攪拌式深層混合処理工法の適用事例

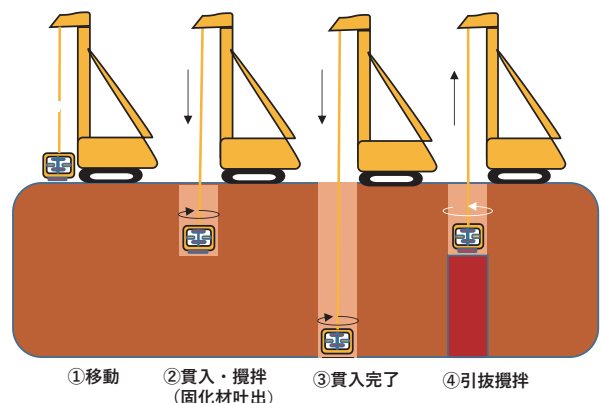


図-5 相対攪拌式深層混合処理工法の施工順序(往復吐出)

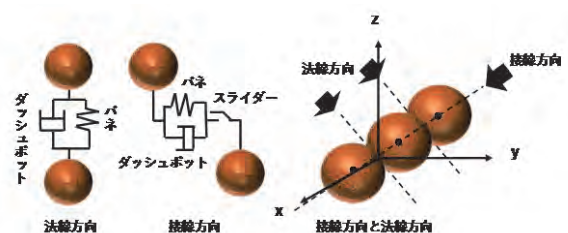


図-6 DEMにおける球形要素の接触モデル

定することは難しい。しかしながら、試験的な根拠に基づいて当該パラメータを決定することができれば、地盤工学的に意味のあるパラメータ設定が可能になる¹⁰⁾。

以下では粒状体（球形要素の集合体）の特徴と球形要素との関係を整理することで、材料特性を表すパラメータを分類する。粒状体の特性 M は、粒状体の種類 P 、粒状体の置かれた環境 C から決定できると考えられる（式(1)参照）。

$$M = fM \{P; C\} \quad (1)$$

ここで、粒状体の種類 P は一次的性質で、粒状体の置かれた環境 C は外部から左右されるもので、粒状体の構造状態 K と粒状体の応力状態 S から成るとする（式(2)および式(3)参照）。

$$P = \{\text{粒状体の種類}\} = fp \{\text{比重, 粒径, 粒度, 粗度, 粒形, 粒子硬度 等}\} \quad (2)$$

$$C = \{\text{粒状体の置かれた環境}\} = fc \{K; S\} \quad (3)$$

さらに、粒状体の構造状態 K と粒状体の応力状態 S は式(4)および式(5)で表される。

$$K = \{\text{粒状体の構造状態}\} = fx \{\text{密度(間隙比), 含水比, 骨格構造}\} \quad (4)$$

$$S = \{\text{粒状体の応力状態}\} = fs \{\text{応力}\} = fs \{P; K\} \quad (5)$$

以上より、粒状体の特性 M は粒状体の種類 P ならびに粒状体の構造状態 K の独立した2つの特性から記述が可能である（式(6)参照）。

$$M = fM \{P; C\} = S = fM \{P; fc \{K; S\}\} = fM \{P; fc \{K; fs \{P; K\}\}\} = fM1 \{P; K\} \quad (6)$$

したがって、地盤を粒状体として仮定する場合、球形要素の特性を表すパラメータ Pm と粒状体地盤の構造状態を表すパラメータ Km の2つに整理できる（式(7)および式(8)参照）。

$$Pm = (Dmax/Dmin, Dmin, \rho, v, kn/ks, kn, h) \quad (7)$$

$$Km = \{\text{構造状態}\} \quad (8)$$

ここで、 $Dmax$ および $Dmin$ ：最大および最小粒径、 ρ ：粒子密度、 v ：粒子摩擦係数、 kn ：法線方向のばね定数、 ks ：接線方向のばね定数および h ：減衰定数である。

4. 相対攪拌式深層混合処理工法のモデル化

4.1 対象地盤のパラメータ

本研究において解析対象に仮定した原地盤は粘性土地盤である。よって、粘性土を再現するパラメータ Pm を設定する必要がある。そこで、粘性土のフロー試験を実施するとともに、DEMによる粒状体解析を用いて当該フロー試験結果をフィッティングすることにより、DEMによる粒状体解析上で粘性土の Pm を決定する。

エアモルタルおよびエアミルクの試験方法（JHSA313-1992、 $\Phi 80\text{mm} \times h80\text{mm}$ のエアシリンダを使用）に準拠し、含水率 45～65%の粘性土に対してフロー試験を実施する。表-1 はフロー試験

表-1 粘性土のフロー試験結果（含水率-フロー値）

含水率(%)	粘性土					
	45%	50%	55%	60%	65%	
フロー値 (mm)	X方向	100	218	400	450	540
	Y方向	102	222	401	448	538
	平均値	101	220	400	449	539

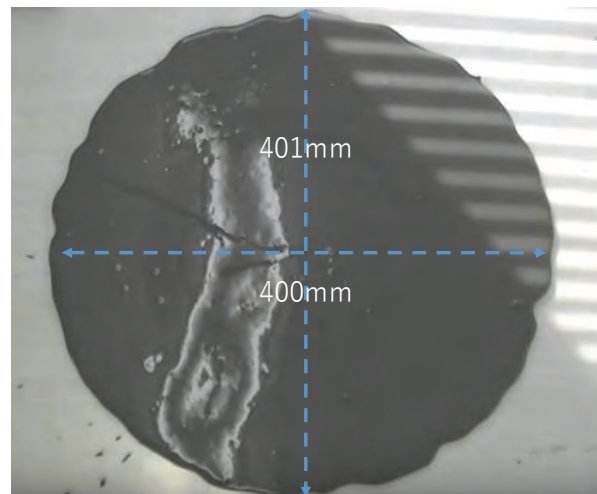


図-7 フロー試験の動画撮影例（粘性土：含水率55%）

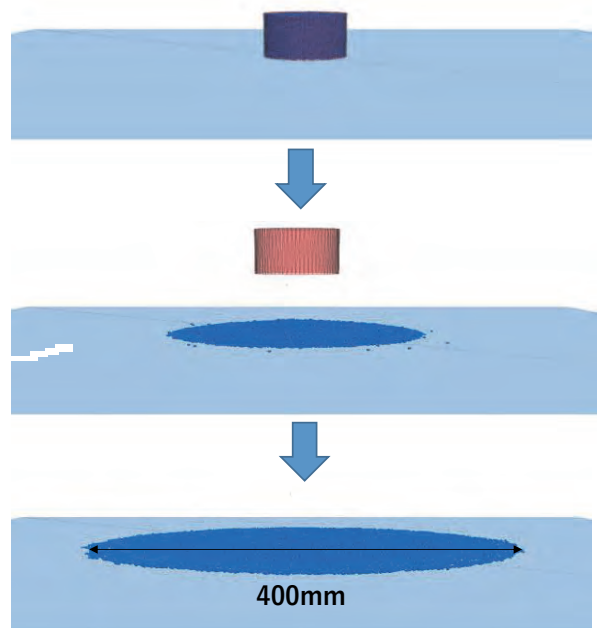


図-8 粘性土（含水率55%）のフロー試験に関するDEMによる粒状体解析を用いたフィッティング

表-2 粘性土（含水率55%）のパラメータ Pm

	density (kg/m ³)	kn (N/m)	ks (N/m)	hn	hs	rr_fric	fric
粘性土	1270	2.0e8	5.0e7	2.0e-3	2.0e-3	0.1	0.175

表-3 相対式攪拌翼のパラメータ

	Zspin (Inner blade) (rad/s)	Zspin (Outer blade) (rad/s)	Zvel (m/min)
攪拌翼	-2.1	0.7	-2.5

の結果を示している。加えて、DEMによる粒状体解析に基づくフロー断面における流動挙動とフロー試験結果を比較するため、フロー試験の真上部から動画撮影も実施し（一例として図-7参照）、経過時間ごとのフロー値を求めている。

DEMによる粒状体解析を用いて、各含水率の粘性土の流動挙動の再現を試みる。一例として、図-8は、含水率55%の粘性土に対してフロー試験で得られた流動挙動（フロー値400mm）を、DEMによる粒状体解析でフィッティングした結果である。さらに、表-2は含水率55%の粘性土に対してフロー試験で得られた流動挙動（フロー値400mm）を、DEMによる粒状体解析でフィッティングした際のパラメータPmである。なお、表-2においてはdensity：密度、kn：法線方向のばね定数、ks：接線方向のばね定数、hn：法線方向の減衰定数、hs：接線方向の減衰定数、rr_fric：転がり抵抗係数およびfric：摩擦係数に相当する。なお、球形要素の径は直接的な土粒子径を設定せず、単位集合体として3mmとしている。図-9は仮定した原地盤（粘性土地盤）の諸元を示しており、直径3000mm・高さ3300mmの円柱内に直径3mmの球形要素を135084個配置している。また、仮定した原地盤は粘性土地盤の空隙率（porosity）は0.36として設定している。なお、図-9では球形要素の挙動を区別しやすいように、X軸100mm毎に3層に色分け（左：赤、中間：白、右：茶）している。

4.2 相対式攪拌翼のパラメータ設定

別途、3次元CAD（Computer Aided Design）ソフトを用いて作成した相対式攪拌翼には、回転、掘削および接触のパラメータを与える必要がある。表-3は、相対式攪拌翼に設定した回転速度（角速度）および掘削速度のパラメータを示している。表-3において、Zspin：Z軸における回転速度（角速度）およびZvel：Z軸における掘削速度を表している。また、相対式攪拌翼における接触のパラメータは鉄製の面要素と球形要素間で設定されるデフォルトのばね定数を与えた。

図-10は3次元CADで作成した相対式攪拌翼の諸元を示している。また、図-11は相対式攪拌翼が解析対象地盤（粘性土地盤）に貫入された際の状況を表している。

5. 相対攪拌式深層混合処理工法に関する攪拌混合シミュレーション

5.1 掘削攪拌における土粒子挙動

図-12は解析対象に仮定した原地盤（粘性土地盤）へ、相対攪拌式深層混合処理工法として相対式攪拌翼で掘削・攪拌することをシミュレーション

した結果の一例である。これより、掘削・攪拌が開始されてから15～30秒経過後、相対式攪拌翼先端の掘削ヘッドによる掘削状況が表現されており、中央層（白）が両側層（赤・茶）へ拡がりつつ攪拌されている。切削ヘッドの回転方向に球形要素（粒子）が混合されているため、切削ヘッドによる切削エネルギーが大きく作用していると判断できる。また、掘削攪拌が開始されてから45～60秒経過後においても掘削攪拌が進行している状況が確認できる。さらに、掘削攪拌が開始されてから75～90秒経過後、中央層（白）が両側層（赤・茶）へ拡がりつつ攪拌されていることと同時に一部の球形要素は上方へ移動している。すなわち、掘削攪拌によって3次的に球形要素が動いていることが確認できる。

5.2 攪拌のみによる土粒子挙動（速度ベクトル）

図-13は解析対象に仮定した原地盤（粘性土地盤）における相対式攪拌翼に掘削方向速度を与えず、相対攪拌のみに球形要素の速度ベクトルを評価した一例である。これより、相対攪拌を開始してから時間の経過とともに球形要素の速度ベクトルが大きくなっており、攪拌が加速されている状況が確認できる。また、相対攪拌により外翼内の球形要素が様々な方向に移動している。すなわち、相対攪拌の期待性能である共回り防止効果を果たしている。また、掘削ヘッド付近は回転方向に大きく速度が与えられ渦を巻いているため、掘削における大きなエネルギーが生じているといえる。さらに、外翼上部、中部、下部から球形要素が大きな速度を持ち移動しており、外翼内の球形要素が混合され、外翼回転の影響によって運動速度が大きくなっていると推測できる。

5.3 攪拌混合シミュレーションの可能性

本研究は目視確認が困難な地盤改良工程を再現し改良効果を事前に予測するため、また地盤改良工法の更なる高度化のため、コンピュータ上で地盤改良工法を試作し、再現・分析する技術（Computer Aided Engineering；CAE）の適用を試みている。大規模な地盤改良工法の研究・開発工程において早い段階でCAEを導入することができれば、手戻りを削減し、試設計や実験の回数を劇的に減らすことが可能になり得る。また、様々な状況や現象を多方面から検証できるため、地盤改良工法の信頼性向上にも貢献することができる。本研究で実施している相対攪拌式深層混合処理工法として相対式攪拌翼による攪拌混合シミュレーションでは、相対式攪拌翼の貫入・回転設計ならびに攪拌翼形状の更なる合理化に将来的に寄与することができる。

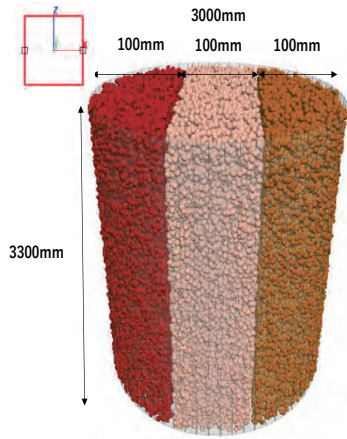


図-9 DEMによる粒状体解析において
仮定した原地盤の諸元

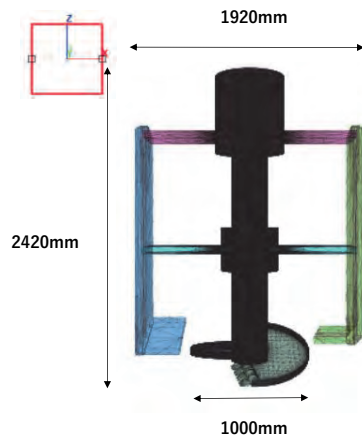


図-10 相対式攪拌翼の諸元

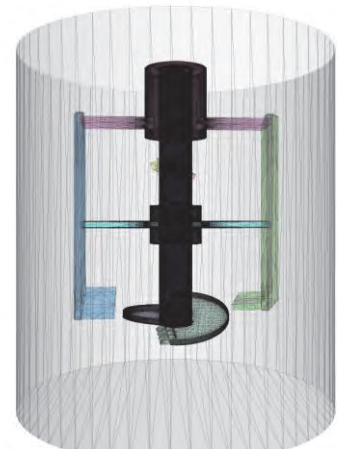


図-11 相対式攪拌翼の地盤内状況

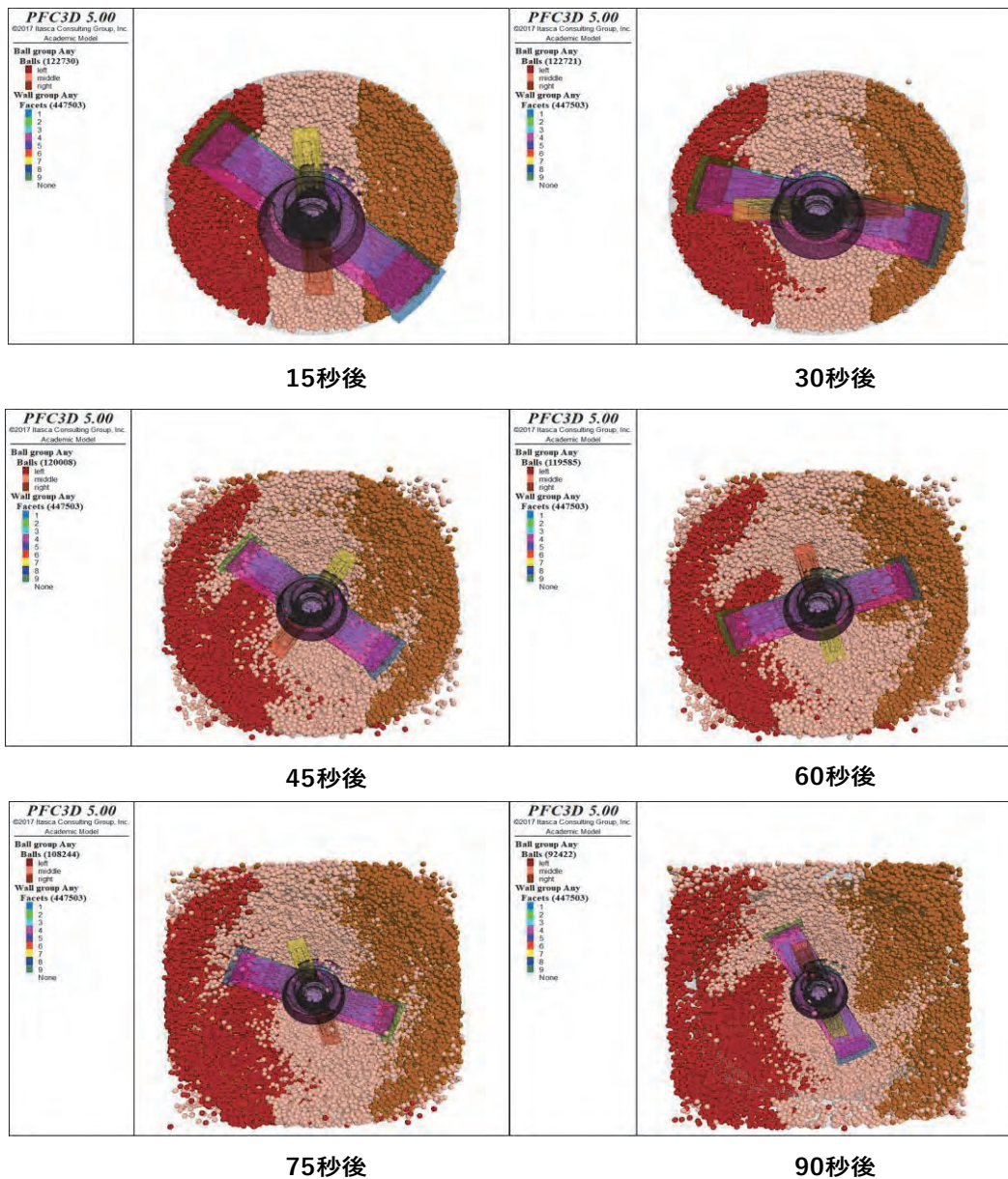


図-12 相対攪拌式深層混合処理工法における相対式攪拌翼の掘削・攪拌シミュレーションの一例（球形要素の挙動）

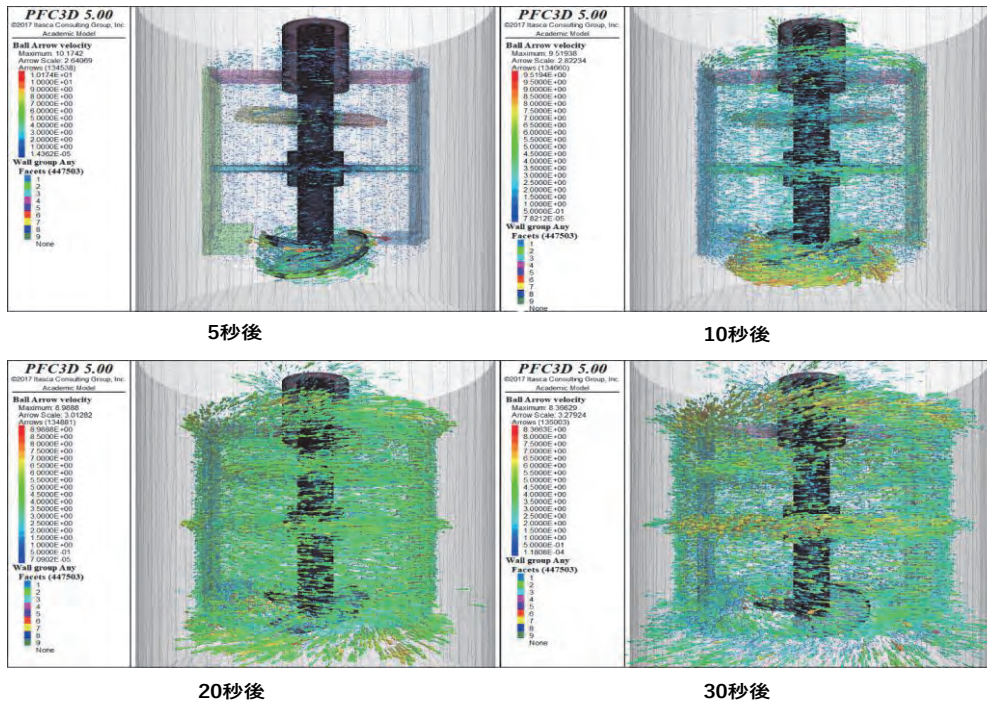


図-13 相对攪拌式深層混合処理工法における相对式攪拌翼の攪拌シミュレーションの一例(球形要素の速度ベクトル)

6. おわりに

本研究では地盤改良工法の一つである相对攪拌式深層混合処理工法に着目し、CAEの適用、すなわち、相对式攪拌翼ならびに施工現場(地中)を3次元的にモデル化し、DEMによる粒状体解析を用いてコンピュータ上で相对式攪拌翼による原地盤の攪拌混合シミュレーションを実施した。

得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 相对式攪拌翼による掘削攪拌では球形要素の拡がり表現することができ、掘削を伴わない攪拌のみでは球形要素の挙動を速度ベクトルによって速度の大きさ、方向および挙動範囲を定量的に表現することができた。すなわち、攪拌混合のシミュレーションは可能であると考えられる。
- (2) DEMによる粒状体解析によって、球形要素(粒子)の挙動や相对式攪拌翼の攪拌特性を把握することができるため、地盤改良工法を可視的に評価できる可能性を明らかにした。
- (3) 相对攪拌式深層混合処理工法として相对式攪拌翼による攪拌混合シミュレーションでは、相对式攪拌翼の貫入・回転設計ならびに攪拌翼形状の合理化に寄与できることを提言した。なお、本シミュレーションにおいて相对攪拌式深層混合処理工法は固化材の吐出の再現および実挙動との対比は今後の課題である。

参考文献

- 1) 足立有史・木付拓磨・土屋潤一・稲積真哉: ICT 施工の導入による杭・地盤改良工事の見える化, 地盤工学会誌

- , 66(1), pp.24~25, 2018
- 2) 鈴木貴史: DCS 工法(相对攪拌式深層混合処理工法) DCS工法の特長と施工方法, 建設機械, 51(1), pp.43~47, 2015
- 3) 清水貞治: 軟弱地盤での自立壁体工法の施工事例(DCS工法), 基礎工, 31(12), pp.46~49, 2003
- 4) 木付拓磨・澤口宏・今井正・高植俊彰・土屋潤一・稲積真哉: 大口径・大深度深層混合処理工法の適用におけるリアルタイム管理システムの導入, 材料, 67(1), pp.93~98, 2018
- 5) ITASC Consulting Group, Inc.: Distinct Element Method, <https://www.itascacg.com/software/pfc/distinct-element-method>, 2018.08.22
- 6) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション -拡張個別要素法で破壊を追う-, 森北出版, 1997
- 7) 酒井幹夫: 粉体の数値シミュレーション, 丸善出版, 2013
- 8) 山本修一: 個別要素法による粒状体の力学的挙動に関する解析的研究(その1), 大林組技術研究所報, 48, pp.49~54, 1994
- 9) 山本修一: 個別要素法による粒状体の力学的挙動に関する解析的研究(その2), 大林組技術研究所報, 52, pp.73~80, 1998
- 10) 前田健一, 森口周二, 松島亘志, 小山倫史: 地盤工学のための個別要素法-パラメータの設定と土と地盤の作り方-, 地盤工学会誌, 63(8), pp.71~78, 2015
- 11) 見世祐樹, 高橋強, 原俊郎, 奥野倫太郎: 大口径相对攪拌工法KS-S・MIX工法の施工事例, 土木学会第71回年次学術講演会, pp.1329~1330, 2016
- 12) 横井勉, 奥野倫太郎, 大古利勝己: 大口径相对攪拌工法の施工事例, pp.41~43, Vol.45, No.6, 基礎工, 2017