コンピュータおよび攪拌・混合模型実験による 相対攪拌式深層混合処理工法の可視的性能評価†

稲積 真哉* 高植 俊彰** 田中 重明*** 篠井 隆之****

Visual Performance Evaluation of Relative Agitating Type of Deep Mixing Method by Computer Simulation and Agitation Model Experiment

by

Shinya INAZUMI*, Toshiaki TAKAUE**, Shigeaki TANAKA*** and Takayuki SHINOI****

One of the common issues related to the ground improvement methods is that it is difficult to properly design and manage the construction process of improved soil body because the condition inside the target ground cannot be directly confirmed (visualized) during the construction. If the target ground can be modeled using a computer and the excavation and agitation can be reproduced by the ground improvement method, it is possible to predict what kind of ground improvement is performed in the target ground. As the result, more efficient ground improvement can be considered. In this study, the process of excavation and agitation is three-dimensionally modeled on a computer, and the behavior inside the target ground and its influence on the surrounding ground are visualized. The purpose of this is to evaluate the excavation and agitation by the DCS blades while confirming the condition inside the target ground. For the purpose of experimentally and visually confirming the condition of excavation and agitation by the DCS blades, an excavation and agitation model experiment by the DCS blades using pellets colored in each color is carried out.

Key words:

Excavation and agitation, Ground improvement method, MPS-CAE analysis, Relative agitating type of deep mixing method, Visualization

1 結 言

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、特に都市臨海部においては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。Fig. 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、軟弱地盤に対して安定性、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が実施されている状況にある。

地盤改良工法に関する共通課題の一つとして、当該施工中、対象地盤内部の状況を Fig. 2 のように直接確認(可視化)が難しいことが挙げられる。そこで、コンピュータを用いて対象地盤をモデル化し、地盤改良工法による攪拌・混合を再現することができれば、対象地盤において実際に如何なる地盤改良が行われているかを予測し、その結果としてより効率的な地盤改良を検討することができると考えられる。

本論文では上記のように施工中の地盤内部を可視化することによって、費用や時間等を削減、また予め再現することによって作業効率等の見直しができるのではないかと考えている。そこで、地盤内部を可視化するにあたって地盤改良工法の一つである相対攪拌式深層混合処理地盤

Fig. 1 Various negative effects caused by soft ground.

Fig. 2 Example of issues in ground improvement (visualization of the process).

† 原稿受理 令和2年10月23日 Received October 23, 2020 ©2021 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 芝浦工業大学 〒135-8548 東京都江東区 Shibaura Institute of Technology, Koto-ku, Tokyo, 135-8548.

** 青山機工(株) 〒110-0014 東京都台東区 Aoyama Kiko Co. Ltd., Taito-ku, Tokyo, 110-0014.

*** 伊吹産業(株) 〒533-0033 大阪市東淀川区 Ibuki Sangyo Co. Ltd., Higashiyodogawa-ku, Osaka, 533-0033.

**** 日本海工(株) 〒650-0032 神戸市中央区 Nihon Kaiko Co. Ltd., Chuo-ku, Kobe, 650-0032.

改良工法の内、DCS 攪拌翼（枠型複合相対攪拌翼）を用いた相対攪拌式深層混合処理工法に着目する²⁾⁶⁾。本工法はDCS 攪拌翼を外翼と内翼で逆方向に回転させ対象地盤を掘削しつつ、スラリー状の固化材を攪拌翼の先端から吐出し掘削攪拌を行う工法である。本論文では、DCS 攪拌翼を用いた相対攪拌式深層混合処理工法による掘削攪拌の工程をコンピュータ上で3次元的にモデル化し、対象地盤内部の挙動および周辺地盤への影響を可視化する。それによって、対象地盤内部の状況を確認しながら相対攪拌式深層混合処理工法による掘削攪拌を評価することを目的にしている。さらに、DCS 攪拌翼を用いた相対攪拌式深層混合処理工法による攪拌状況を実験的且つ視覚的に確認する目的の下、各色に着色された樹脂ペレットを用いた本工法による攪拌・混合模型実験を実施する。

2 相対攪拌式深層混合処理地盤改良工法

地盤改良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。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、対象地盤の特性や改良目的に合わせて選択されている。

Fig. 3 に示すように地盤改良工法、更には固結工法の一つとして、深層混合処理地盤改良工法が挙げられる。深層混合処理地盤改良工法はセメント系および石灰系の固化材を対象地盤中に供給し、対象地盤と攪拌・混合することで対象地盤内に安定した改良体（改良柱）を造成する工法である。なお、深層混合処理地盤改良工法には供給する固化材の性状に応じてスラリー攪拌工法および粉体噴射攪拌工法の2種類があり、本論文で着目しているDCS 攪拌翼を用いた工法はスラリー攪拌工法の一つである相対攪拌式深層混合処理地盤改良工法²⁾⁶⁾として位置付けられる（Fig. 3）。

対象地盤内において攪拌翼を回転しながら掘削攪拌する深層混合処理地盤改良工法では、掘進中にセメント系固化材と水とを混合したスラリー（セメントスラリー）を注入する。ここで、対象地盤の土質によっては軸に取り付けられた同一に回転する掘削翼と攪拌翼により、対象地盤の一部も同一に回転する共回り現象が発生する可能性がある。そこで、相対攪拌式深層混合処理地盤改良工法は、Fig. 4 に示されるように回転方向および回転速度（角速度）の異なる相対式攪拌翼を対象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つつ掘削攪拌・混合を行う。これにより、対象土に対する共回りやつれ廻り現象を解消しつつ、3次元的に対象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Fig. 5 で表される盛土の安定、地盤のすべり防止、擁壁の安定ならびに液状化対策等において適用されている。さらに、相対攪拌式深層混合処理地盤改良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⁾。なお、Fig. 6 は相対攪拌式深層混合処理地盤改良工法の施工順序を示している。

Fig. 3 Classification of ground improvement methods.

Fig. 4 Agitating blade used in relative agitating type of deep mixing method.

Fig. 5 Examples of application with relative agitating type of deep mixing method.

Fig. 6 Construction procedure of relative agitating type of deep mixing method.

3 MPS-CAE によるコンピュータシミュレーション

3-1 MPS-CAE の概要

CAE とは、「ものづくり」の研究・開発工程において、従来から行われている試作品を用いた室内や原位置での大規模実験の代替として、CAD (Computer Aided Design) 等で作成されたコンピュータ上の試作品ならびに現場条件を用いてシミュレーションを実施し、それを分析する技術の総称である⁷⁾¹⁰⁾。同時に、コンピュータによって支援された、工法も含む製品の設計・製造や工程設計の事前検討等といった工学的な作業あるいはそのツールなどを

指す場合もある。地盤工学分野においては、CAE を活用することで地盤内の様子や地盤内部に作用する応力の可視化、莫大なコストを要する実験や再現困難な現象の把握が可能と成り得る。また、適切なポスト処理を行うことで、専門家以外にも視覚的にわかりやすく伝えることができる。

本論文では、地盤改良施工中の地盤内の様子の可視化や一連の施工の再現について、要素技術として 3 次元 CAD ならびに粒子法のひとつである MPS 法を用いた CAE の適用を試みる¹¹⁾⁻¹⁴⁾。具体的には、MPS-CAE による深層混合処理地盤改良工法の再現を基に、攪拌翼の違いに伴う対象地盤の攪拌・混合性能を検討するとともに、DCS 攪拌翼を用いた深層混合処理地盤改良工法の性能設計・性能評価における CAE の可能性を考察する。

3.2 設定する部材パラメータ

本論文の対象は軟弱地盤（粘性土地盤）として考え、DCS 攪拌翼、対象地盤である粘性土および吐出するセメントスラリーのパラメータをそれぞれ与えた。ここで、粘性土およびセメントスラリーのレオロジーパラメータは Bingham 流体として設定し、既実施のレオロジー特性に関する試験結果を参考にして傾域値を採用した¹⁵⁾⁻¹⁶⁾。材料パラメータおよび DCS 攪拌翼に与えるパラメータは Table 1, Table 2 および Table 3 に記載する。

3.3 設定する対象断面

対象として粘性土地盤を仮定し、直径 2 m および高さ 3 m の円柱領域に 0.04 m の粒子間距離（計算点間隔）で計算点粒子を配置設定した。なお、DCS 攪拌翼による掘削攪拌時、対象地盤ならびに吐出する固化材（セメントスラリー）の攪拌・混合の様子を評価しやすいように対象地盤は予め 4 分割して色分けした（Fig. 7 (a)）。また、対象として DCS 攪拌翼は Fig. 7 (b)を用い、DCS 攪拌翼の外翼と内翼は Fig. 7 (c)および Fig. 7 (d)である。なお、攪拌翼は対象地盤の表面から深度方向へ 0.1 m/s で掘削攪拌を進行し、対象地盤の最下部に到達した後 2 分間攪拌を行った。

本論文では、Fig. 7 (a)で示された対象地盤における DCS 攪拌翼（Fig. 7 (b)）による掘削攪拌の様子を MPS-CAE 解析によって再現する。ここで、DCS 攪拌翼の特徴の一つである相対攪拌式攪拌の性能を検討するため、DCS 攪拌翼の内翼のみ（Fig. 7 (d)）で掘削攪拌を再現した場合を比較対象とする。

解析終了時、様々な断面を切り取り、粒子の挙動を視覚的に評価した。特に、相対攪拌式と内翼のみで解析を行った時、周辺地盤への影響、地盤内部の攪拌翼による攪拌・混合性能の違い、攪拌翼周辺の粒子の挙動および共回りによる地盤の攪拌・混合の違いを重点的に評価した。

3.4 掘削攪拌性能の評価

DCS 攪拌翼（相対攪拌）による掘削攪拌工程を再現する MPS-CAE 解析終了時における地盤内部の様子について、縦断面で捉えた結果を Fig. 8 (a)および DCS 攪拌翼の内翼のみでの掘削攪拌を再現した MPS-CAE 解析結果を Fig. 8 (b)に示している。内翼のみの掘削攪拌では内翼周辺

Table 1 Parameters of component materials set by MPS-CAE analysis.

	Yield value	Plastic viscosity	Density
Target ground	1×10^6 Pa	1000 Pa·s	1600 kg/m ³
Cement slurry	10 Pa	0.28 Pa·s	1500 kg/m ³

Table 2 Parameters of agitating blade set by MPS-CAE analysis (for relative agitating).

	Rotational speed (Outer blade)	Rotational speed (Inner blade)	Excavating speed
Blade	5 rpm	-10 rpm	0.1 m/s

Table 3 Parameters of agitating blade set by MPS-CAE analysis (for agitating only with inner blade).

	Rotational speed (Outer blade)	Rotational speed (Inner blade)	Excavating speed
Blade	-	-10 rpm	0.1 m/s

Fig. 7 Analysis target set by MPS-CAE analysis.

に吐出したセメントスラリーの計算点粒子（灰色粒子）が集まっており、DCS 攪拌翼（相対攪拌）の方がセメントスラリーの計算点粒子はより全体的に散乱している。これは、内翼のみでの掘削攪拌では対象地盤の共回り現象が生じていると推測できる。共回りは対象地盤がその付着力および粘着力により攪拌翼に付着したまま団子状を呈し、攪拌翼と共に対象地盤の一部が回転する現象である。共回り現象が発生すると攪拌性能は著しく低下する。相対攪拌は内翼と外翼が対象地盤の付着力および粘着力を交互に掻き出すことにより、対象地盤の粒子同士を断ち切り、結果として共回りを防いでいると考えられる。また、攪拌終了後の地表横断面を 4 分割した内 1 区画を表示すると、相対攪拌（Fig. 9 (a)）は内翼のみでの攪拌（Fig. 9 (b)）と比較して改良径が大きいにも係わらず攪拌前の

区画形状 (Fig. 7 (a)) を残しており、共回りによる周辺地盤への影響が少ないように判定できる。さらに、地表面から深さ 1 m を横断面として切り出した対象地盤内部の様子では、相対攪拌での解析結果 (Fig. 9 (c)) が内翼のみでの攪拌 (Fig. 9 (d)) と比べて改良体をより大きく造成できており、且つセメントスラリーの計算点粒子の散乱が的確に行われている。

Fig. 8 および Fig. 9 より、実施した MPS-CAE 解析条件に限っては DCS 攪拌翼による掘削攪拌は対象地盤の周辺地盤への影響が小さく、吐出するセメントスラリーと対象地盤との攪拌・混合の観点においても理想的な改良体を造成できている。よって、相対攪拌を採用する DCS 攪拌翼は共回り現象の抑制に効果的であり、且つ対象地盤内における攪拌・混合処理性能も高いと考察できる。

3・5 MPS-CAE の適用性

本論文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地盤改良工法の内、DCS 攪拌翼を用いた相対攪拌式深層混合処理工法に着目し、CAE 技術の粒子法を用いた数値シミュレーションを試みた。その結果、本工法による改良体造成状況を視覚的にわかりやすく、定量的に性能評価できることを確認した。

DCS 攪拌翼を用いた相対攪拌式深層混合処理工法は有効な地盤改良工法の一つであるが、その設計や施工には従来からの経験則に培われている部分が多く、これは主として施工前、施工中および施工後の地盤内部を目視することが困難であることに起因している。そのため、DCS 攪拌翼を用いた相対攪拌式深層混合処理工法に限ることなく地盤改良技術全般に関して、CAE を駆使した設計・性能評価は、地盤改良工法の信頼性や経済性の向上において重要な役割を担うと考えられる。また、地盤改良工法への CAE の導入はコンピュータ上ではあるが、地盤の可視化への寄与も期待でき、将来的には地盤改良施工の可視的管理およびライフサイクルにおける改良地盤の維持管理等において有効なツールになると考えている。

4 攪拌・混合模型実験による攪拌・混合状況の可視化

DCS 攪拌翼を用いた相対攪拌式深層混合処理工法による相対攪拌のメカニズムを 3 次元的且つ視覚的に確認する目的の下、各色に着色された樹脂ペレットを用いた DCS 攪拌翼による攪拌・混合模型実験を実施している。ただし、前章で述べた MPS-CAE 解析と本実験は対象地盤の特性や DCS 攪拌翼による回転攪拌の条件において完全に一致しておらず、そのため、両者の結果を直接比較することはできないことに注意を要する。

Fig. 10 に示す DCS 攪拌翼の模型を高さ 0.4 m × 幅 0.4 m × 奥行 0.4 m × 板厚 0.02 m のアクリル容器内に乾燥した樹脂ペレット (最大粒径約 0.002 m の米粒状) を敷き詰めた模型地盤へ回転貫入ならびに回転引抜きを行い、攪拌水平断面ならびに攪拌鉛直断面の攪拌・混合状況を撮影している。

(a) DCS blades (relative agitation) (b) Inner blade of DCS blades

Fig. 8 Reproduction result of excavation and agitation by MPS-CAE analysis (cross section).

(a) DCS blades (relative agitation) (b) Inner blade of DCS blades

(c) DCS blades (relative agitation) (d) Inner blade of DCS blades

Fig. 9 Reproduction result of excavation and agitation by MPS-CAE analysis (surface).

4・1 実験手順

4・1・1 攪拌水平断面を評価する攪拌・混合模型実験

- (1) アクリル容器内に 4 色 (赤, 青, 黄, 緑) に各々着色した樹脂ペレットを縦割り 4 分割して敷き詰める (Fig. 11 (a)).
- (2) DCS 攪拌翼模型をアクリル容器天端から樹脂ペレット深さ 0.3 m まで回転掘削攪拌を行う (貫入速度: 0.83 sec/cm).
- (3) なお、DCS 攪拌翼模型の回転速度および静止攪拌時間は実物に即し、回転速度は 12 sec/周 (外翼) および 6 sec/周 (内翼) であり、樹脂ペレット深さ 0.3 m の最下部で 1 分間静止攪拌後、回転引抜き攪拌 (引抜き速度: 0.83 sec/cm) を行う。
- (4) アクリル容器を密閉し、側面アクリル板が上部に位置するように横転後、側面アクリル板を取り外す。
- (5) アクリル容器天端から深さ 0.05 m, 0.1 m, 0.175 m, 0.25 m および 0.3 m で順次樹脂ペレットを吸引除去し、各深度の攪拌・混合状況を撮影・確認する。

4・1・2 攪拌鉛直断面を評価する攪拌・混合模型実験

- (1) アクリル容器内に 5 色 (赤, 青, 黄, 緑, 白) に着色した樹脂ペレットを横割り 5 分割 (各色 0.08 m, ただし白は 0.03 m) して敷き詰める (Fig. 11 (b)).

Fig. 10 Outline of DCS blades model and agitation model experiment.

(a) Divided into 4 vertically (b) Divided into 5 horizontally

Fig. 11 Laying conditions of pellets.

- (2) DCS 攪拌翼模型をアクリル容器天端から樹脂ペレット深さ 0.3 m まで回転掘削攪拌を行う (貫入速度: 0.83 sec/cm)。
- (3) なお, DCS 攪拌翼模型の回転速度および静止攪拌時間は実物に即し, 回転速度は 12 sec/周 (外翼) および 6 sec/周 (内翼) であり, 樹脂ペレット深さ 0.3 m の最下部で 1 分間静止攪拌後, 回転引き攪拌 (引き抜き速度: 0.83 sec/cm) を行う。
- (4) アクリル容器を密閉し, 側面アクリル板が上部に位置するように横転後, 側面アクリル板を取り外す。
- (5) アクリル容器天端から樹脂ペレット深さ 0.05 m, 0.1 m, 0.15 m および 0.2 m で順次樹脂ペレットを吸引除去し, 各深度における攪拌・混合状況を撮影・確認する。

Fig. 12 Agitating condition by DCS blades (horizontal cross section).

Fig. 13 Agitating condition by DCS blades (vertical cross section).

4・2 攪拌・混合状況

Fig. 12 は, 攪拌水平断面を評価する攪拌・混合模型実験から得られた各深度における攪拌・混合状況を示している。また, Fig. 13 は攪拌鉛直断面を評価する攪拌・混合模型実験から得られた各深度における攪拌・混合状況である。これらより, 攪拌水平断面および攪拌鉛直断面ともに各色の樹脂ペレットがほぼ均一に攪拌・混合していることが判明した。ただし, DCS 攪拌翼における外翼径を境界として攪拌範囲が明確に区別できており, 粘性のない乾燥した樹脂ペレットを用いて模した場合には DCS 攪拌翼の共回り現象に対する抑制効果を評価することができなかった。一方, Fig. 13 で示される攪拌鉛直断面では, 比較的上層の赤および青の樹脂ペレットは下方向へ, 比較的下層の黄および緑の樹脂ペレットが上方向へ移動しながら攪拌・混合されており, すなわち, 鉛直方向において攪拌・混合の対象である樹脂ペレットは循環移動していることが判る。これは, DCS 攪拌翼が対象地盤内を全方向において効果的に攪拌・混合することを示している。

5 結 言

本論文では, DCS 攪拌翼を用いた相対攪拌式深層混合処理工法による掘削攪拌ならびに対象地盤内部の様子を,

MPS-CAE 解析上で視覚的に捉えることができた。ただし、MPS-CAE 解析結果に基づいた定量的な評価にまで至っておらず、今後は掘削攪拌ならびに対象地盤内部を可測的に再現・評価しなければならない。その上で、地盤内部の様々な外的要因を MPS-CAE 解析に取り入れることができれば共回りメカニズムの究明、効果的な地盤改良工法の設計・開発を行うことが期待できる。

上記に加え、本論文では樹脂ペレットを用いた DCS 攪拌翼の攪拌・混合模型実験の実施により、相対攪拌のメカニズムを 3 次元的且つ視覚的に確認することができ、各色の樹脂ペレットがほぼ均一に攪拌・混合していることが判明した。ただし、樹脂ペレットによって対象地盤を模したため、本論文では実現場の対象地盤で生じ得る共回り現象を含む諸現象を再現・評価することができなかった。そのため、今後は当模型実験に更なる工夫を凝らし、実際の対象地盤をより一層模した条件・環境下で当該実験を実施する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Y. Adachi, T. Kizuki, J. Tsuchiya and S. Inazumi, "Visualization of pile and ground improvement work by introducing ICT construction", *Geotechnical Engineering Journal*, Vol.66, No.1, pp.24-25, (2018).
- 2) T. Suzuki, "Characteristics and construction method of DCS method (relative stirring type deep mixing method)", *Construction Machine*, Vol.51, No.1, pp.43-47, (2015).
- 3) JSMS (The Society of Materials Science, Japan), "DCS method (2nd updated version)", *Technical Evaluation Certificate*, No.1006, (2015).
- 4) Y. Mise, T. Takahashi, T. Hara and R. Okuno, "Construction example of large-diameter relative stirring method KS-S and MIX method", *Japan Society of Engineers 2016 Annual Meeting*, pp.1329-1330, (2016).
- 5) S. Shimizu, "Construction example of self-standing wall construction method on soft ground (DCS method)", *The Foundation Engineering & Equipment*, Vol.31, No.12, pp.46-49, (2003).
- 6) T. Yokoi, R. Okuno and K. Ookori, "Construction case of large diameter relative mixing method", *The Foundation Engineering & Equipment*, Vol.45, No.6, pp.41-43, (2017).
- 7) S. Inazumi, A. Jotisankasa, K. Nakao and S. Chaiprakaikeow, "Performance of mechanical agitation type of ground-improvement by CAE system using 3-D DEM", *Results in Engineering*, Vol.6, doi: 10.1016/j.rineng.2020.100108, (2020).
- 8) K.H. Chang, "Product Design Modeling using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series", Elsevier, (2014).
- 9) Z. Pan, X. Wang, R. Teng and X. Cao, "Computer-aided design-while-engineering technology in top-down modeling of mechanical product", Vol.75, pp.151-161, (2016).
- 10) S. Inazumi, S. Kuwahara, A. Jotisankasa and S. Chaiprakaikeow, "MPS-CAE simulation on dynamic interaction between steel casing and existing pile when pulling out existing piles" *International Journal of GEOMATE: Geotechnique, Construction Materials and Environment*, Vol.18, Issue 70, pp.68-73, (2020).
- 11) A.L.B. Vieira-e-Silva, C.J.S. Brito, F.P.M. Simões and V. Teichrieb, "A fluid simulation system based on the MPS method", *Computer Physics Communications*, Vol.258, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2020.107572>, (2021).
- 12) Z. Kamalova and S. Hatanaka, "Moving particle simulation for a simplified permeability model of pervious concrete", *Computers and Concrete*, Vol.24 Issue 6, pp.571-578, (2019).
- 13) M. Yamanoi and T. Kasahara, "Basics of particle based CFD software, "Particleworks" and our approach into casting engineering", *Journal of Japan Foundry Engineering Society*, Vol.86, No.12, pp.965-969, (2014).
- 14) S. Koshizuka and Y. Oka, "Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid", *Nuclear Science and Engineering*, Vol.123, 1996-Issue 3, pp.421-434, (2017).
- 15) S. Inazumi, S. Kuwahara, T. Ogura, S. Hamada and K. Nakao, "Visualization and performance evaluation of existing pile pulling method with pile tip chucking by MPS-CAE", *Japanese Geotechnical Journal*, Vol.15, No.2, pp.383-393, (2020).
- 16) T. Komaki, Y. Nakanishi, D. Futaba and S. Inazumi, "Visualization and performance evaluation of ground improvement method using middle pressure injection system by CAE", *Proceedings of the 14th National Symposium on Ground Improvement*, pp.445-450, (2020).