

## 既存杭抜跡地盤の埋戻し処理工法に関する CAE を用いた性能評価

○浜口伸一<sup>1</sup>・桑原秀一<sup>2</sup>・稲積真哉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>横浜ライト工業・<sup>2</sup>マルシン・<sup>3</sup>芝浦工業大学

### 1. はじめに

既存杭引き工法における既存杭抜跡地盤（以下、引抜き孔と称す）の埋戻し処理について、一般的には既存杭を引き抜きつつ、上部（地表面）からの引抜き孔内へセメントミルクや流動化処理土で代表される充填材の流し込み注入を行う<sup>1),2)</sup>。しかしながら、既存杭を引き抜く工程において、引抜き孔にはケーシング削孔時の削孔泥水や乱された現地土砂が層を成して堆積している。そのため、既存杭を引き抜く工程の最後に行う引抜き孔上部（地表面）から充填材の流し込み注入では、引抜き孔の全深度にわたって均一な埋戻し処理を達成することが困難であり、結果的に引抜き孔内では図-1に示されるように各層に分割・構成される。よって、引抜き孔へ充填材の単純注入では引抜き孔内の全深度にわたって均一な埋戻しは達成できず、引抜き孔内で充填材が深度方向へ均一に埋め戻されるように工夫する必要がある。上記した既存杭引き工における引抜き孔の埋戻し処理の課題を克服するため、一連の研究では引抜き孔の埋戻し処理工法としてエアブローを伴うエアリフト工法に着目し、エアブロー箇所には攪拌翼を設け、攪拌翼の回転とともにエアブローを行う改良型エアリフト工法の開発に着手している。本研究ではケーシング縁切り工法を対象に行った。ケーシング縁切り工法のケーシング削孔から攪拌翼回転までの施工手順を図-2に示す。既存杭の外径よりも大きな内径を持つケーシングで既存杭に被せ、杭芯・杭頭にケーシングの中心を合わせる。その後、ケーシングの先端ヘッドより削孔液を噴出しながらケーシングによる回転削孔を開始する。これより、杭周面の摩擦抵抗は開放され、既存杭と周面地盤は切り離される。次に、ケーシングを引き上げた後、既存杭の上部にワイヤーロープを取り付け、同時に上部から充填材を注入しながら既存杭を引き抜く。その後上部から攪拌翼を挿入し指定の位置まで挿入後回転させる。

なお、改良型エアリフト工法が引抜き孔の埋戻し処理に効果的であることは現場において実証されているものの、その攪拌混合処理過程（処理メカニズム）の検証・解明には至っていない。

本研究では引抜き孔の埋戻し処理としてエアリフト工法および改良型エアリフト工法の攪拌混合処理過程（処理メカニズム）を明確にすることを目的として、個別要素法による粒状体解析を用いて両工法による引抜き孔の攪拌混合処理過程を再現するものである。

### 2. 引抜き孔

引抜き工法を用いて既存杭を引き抜いた際には、引抜き孔の処理が必要不可欠である。引抜き孔を適切に処理しない場合、引抜き孔は不良地盤となり、様々な問題が誘発することになる。そのため、引抜き孔の処理として、充填材等による埋戻し処理が実施される。なお、埋戻し処理における充填材には、砂、砕石、セメントミルクおよび流動化処理土が挙げられる。

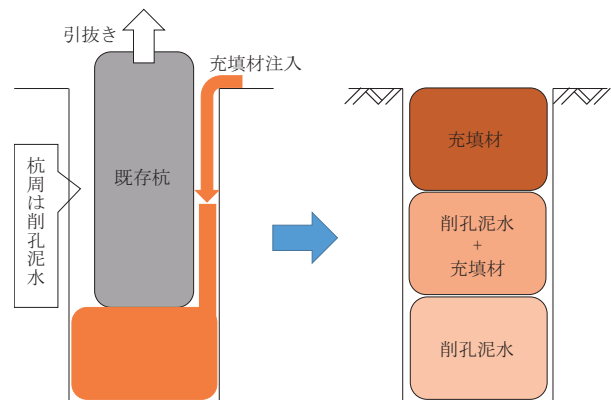


図-1 引抜き孔内での充填材の充填状況

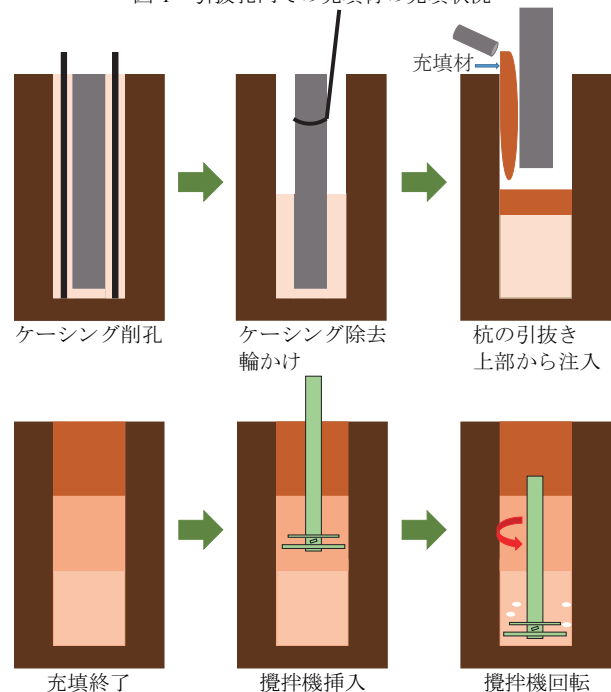


図-2 施工手順

## 2.1 引抜孔の埋戻し処理における攪拌混合の必要性

振動工法およびケーシング縁切り工法で採用される引抜孔の処理（既存杭を引き抜きつつ、引抜孔上部から充填材で埋め戻す処理工法）において、充填材としての砂は所定量を引抜孔に埋め戻すことができない、且つ締め固めることも困難である等、様々な問題がある。そのため、引抜孔の処理として砂で埋め戻した場合、周辺地盤の沈下や地割れ、引抜孔内において充填材である砂の陥落等の問題が多く生じている<sup>1)~5)</sup>。しかしながら、砂は安価であり且つ天然物であるため、充填材として多く採用されている。一方、近年では流動化処理土やセメントミルクが充填材として多く採用されている。ただし、引抜孔の充填材として流動化処理土は全国的にみると流動化処理土製造プラントが存在しない地域がある。セメントミルクは汎用の混練プラント設備により現場で混練製造できるため、施工において工程遅延を及ぼさずタイムリーな埋戻しが実施できるため、引抜孔の処理に止まらず杭打設や山留め、地盤改良等でも多く採用されている<sup>5)</sup>。

既存杭を完全に引き抜いた後の引抜孔を充填材で埋戻し処理を実施する場合、一般的に図-1で示されるような層構造を成す埋戻し状態を呈する。これは、引抜孔上部より充填材で埋戻し処理を行う以前に、引抜孔内では既に既存杭周囲に付着していた土砂およびケーシング削孔時の掘削液（掘削泥水）が、それらの比重に依存して沈降堆積しているためである。そのため、図-1に示される埋戻し状態では、引抜孔の全深度において均一な埋戻し処理が完了したとは判断し難い。すなわち、充填材による埋戻し処理では、充填材を注入した後、引抜孔内の攪拌混合等によって、引抜孔内の全深度にわたって均一な埋戻しが達成できるように努めなければならないと考えられる。

## 2.2 エアリフト工法による引抜孔の埋戻し処理

引抜孔の埋戻し処理に付随する引抜孔の攪拌混合処理については、これまで技術開発の対象でなかった。しかしながら、数少ない引抜孔の攪拌混合処理技術としてエアリフト工法を挙げることができる。エアリフト工法は、図-1で示されるような層構造を成す埋戻し状態を呈する引抜孔内へロッドを引抜孔下端付近まで挿入し、ロッド先端からエア（空気）を吐出することで堆積土砂や掘削泥水を浮上させつつ、引抜孔内で循環させる工法である（図-3参照）。ただし、引抜孔内最下部で沈降堆積している堆積土砂はエアリフトによって循環させることが実務上困難であるため、予めサクシオンポンプ等で当該堆積土砂は吸引除去する措置が取られている。

## 2.3 改良型エアリフト工法による引抜孔の埋戻し処理

エアリフト工法では、土粒子群が局所的な移動に偏り、引抜孔内全体が均一に攪拌混合できない可能性がある。そこで、一連の研究ではエアリフト工法を改良することで、引抜孔内においてより効果的な攪拌混合処理工法を開発している。改良型エアリフト工法では、図-1で示されるような層構造を成す埋戻し状態を呈する引抜孔内へ攪拌翼を取り付けたロッドを引抜孔下端付近まで挿入し、攪拌翼の回転とともに攪拌翼の先端付近からエア（空気）を吐出することで堆積土砂や掘削泥水を浮上させつつ、引抜孔内で循環させる工法である（図-4参照）。ただし、引抜孔内最下部で沈降堆積している堆積土砂は攪拌翼を取り付けた改良型エアリフトの挿入を阻害し、且つ当該堆積土砂を強制循環させることが実務上困難であるため、エアリフト工法と同様に予めサクシオンポンプ等で当該堆積土砂は吸引除去する措置が取られている。

本研究は、改良型エアリフト工法による攪拌混合を、個別要素法による粒状体解析を用いて定量的に再現する。これにより、引抜孔内にて層構造を成す埋戻し状態（図-1参照）に対して、個別要素法による粒状体解析の実施によって引抜孔内における充填材を含む土砂の循環移動を定量的に明らかにする。

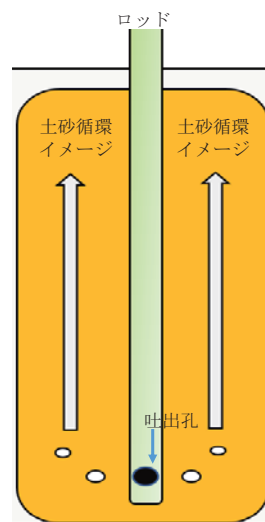


図-3 エアリフト工法による引抜孔内の土砂循環イメージ

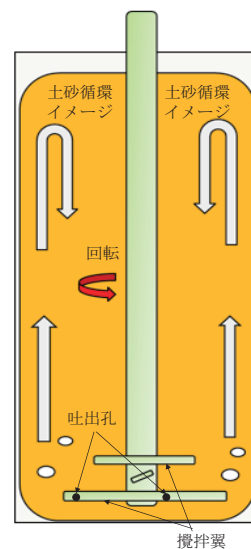


図-4 改良型エアリフト工法による引抜孔内の土砂循環イメージ

### 3. 個別要素法による粒状体解析と引抜孔埋戻し処理のモデル化

#### 3.1 個別要素法による粒状体解析

個別要素法は個々の要素の運動を評価できる解析手法であり、粒状体としての挙動を可視的に評価することも可能である。すべての粒子と配置、粒子間の力学的特性を忠実に再現すれば、粒子や粒子集合体の正確な挙動を再現することができる。これは有限要素法のような連続体解析でも可能であるものの、個別要素法を用いることでマイクロメカニクス的な解釈が一層進んでいる<sup>6),7)</sup>。個別要素法は連続体力学に基づく有限要素法とは異なり、不連続体もモデルに基づく解析手法である<sup>6),7)</sup>。要素同士が接触した場合に接触力が働き、その力に基づいて各要素の運動を解くことで不連続体の集合体の挙動を表現することができる。

個別要素法では、各要素は剛体として表現され要素間に接触モデルを考える<sup>6),7)</sup>。図-5は個別要素法で使用される一般的な接触モデルである。法線方向にバネとダッシュポット、接線方向にはそれらを加えてスライダーを考える。接線方向と法線方向は具体的に図-6に表現される。つまり、法線方向は球要素の中心点を結んだ方向であり、接線方向とはそれに直交する方向である。基本的には、法線方向のモデルは要素間の反発力を接線方向は要素間の摩擦力を表現するために存在する。バネは反発力や摩擦力を発揮するために存在し、ダッシュポットはエネルギーを減衰させるための粘性的な挙動を表現する。また、スライダー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担っている<sup>6),7)</sup>。

#### 3.2 エアリフト工法・改良型エアリフト工法のモデル化

エアリフト工法および改良型エアリフト工法を個別要素法による粒状体解析でモデル化する。そのために、3D Computer-Aided Design (3D-CAD) を使用し攪拌翼の形状・寸法を再現する。図-7は3D-CADによってエアリフト工法における攪拌翼の形状・寸法を3D-CADで再現したものである。ロッドの高さは597mm。ロッドの直径は216mmである。また、本解析では空気孔の孔径が35mm、吐出圧力が5.0kgf/cm<sup>2</sup>、吐出空気量が5.0m<sup>3</sup>/min、吐出空気が最下部にて60分間吐出するように設定する。

図-8は3D-CADによって改良型エアリフト工法における攪拌翼の形状・寸法を再現したものであり、下から1段目の翼の出幅は387.5mm、2・3段目の翼は292mm、高さが597mmである。なお、1段目の攪拌翼からはエア（空気）が6つの孔から噴出するようになっている。また、本解析においては空気孔の孔径35mm、吐出圧力5.0kgf/cm<sup>2</sup>、吐出空気量5.0m<sup>3</sup>/min、最下部にて60分間吐出することとし、攪拌翼の回転は8rpmに設定している。

#### 3.3 充填材で埋め戻された引抜孔のモデル化

図-9は本研究で扱う引抜孔のモデルであり、上部から1層目を充填材、2層目を充填材+削孔泥水、更に3層目（最下部層）を削孔泥水として仮定している。また、各々の層

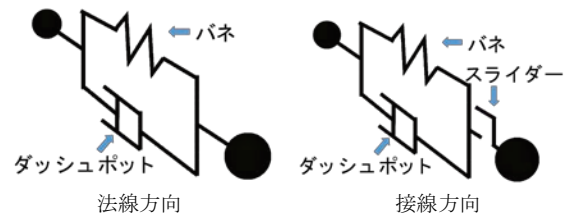


図-5 個別要素法における粒子群接触モデル

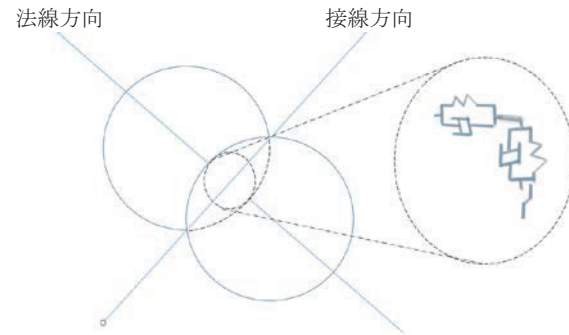


図-6 粒子群接触モデルの作用イメージ

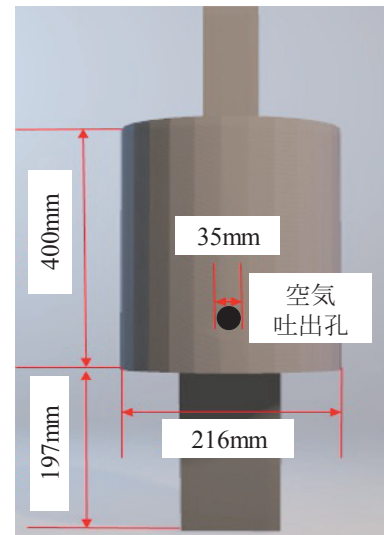


図-7 エアリフト工法におけるロッドの再現

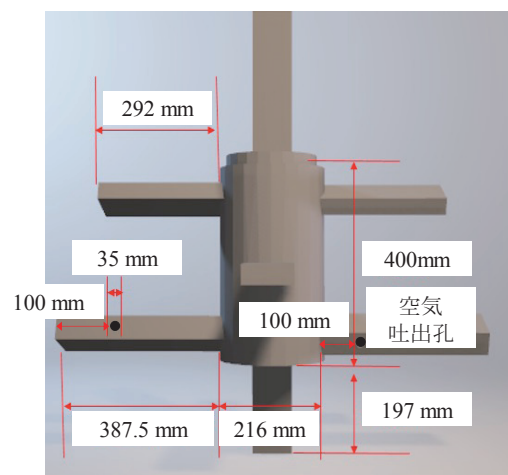


図-8 改良型エアリフト工法における攪拌翼の再現

厚は 6000mm とする。

個別要素法による粒状体解析の実施に際しては充填材、  
充填材+削孔泥水、削孔泥水のパラメータを設定しなければ  
ならない。よって、充填材や掘削泥水の材料パラメータ  
である粒子の密度 (density), ばね定数に関する値 (emod  
および kratio), 減衰定数に関する値 (damp, dp\_ratio およ  
び dp\_sratio), 転がり抵抗係数 (rr\_fric), および摩擦係数  
(fric) を目的に応じた任意の試験・手法によって決定して  
いく必要がある<sup>8)~10)</sup>。

そこで、本研究ではφ80mm×h80mm のエアシリンダを用  
いたフロー試験 (JHS A313-1992) から得られた充填材を含  
む各材料の流動挙動を個別要素法による粒状体解析でフ  
ィッティングすることで、上記した材料パラメータを決定  
する。その結果として、個別要素法による粒状体解析で設  
定したパラメータを表-1 に示している。なお、一般的にエ  
アは流体であり、温度変化とともにその物理的性質も異な  
る。また、エア (空気) の物理的特性として密度、粘度、  
弾性率等も温度変化に依存している。そこで、本研究では  
エア (空気) の温度は常温である 20°C と仮定し<sup>6)</sup>, エア  
(空気) の密度は 20°C で  $\rho=1.205\text{kg/m}^3$  となる。また、気体  
の弾性率とは物体に圧力が作用した際の圧縮程度を示し、  
常温の場合、エア (空気) の弾性率は  $K=0.14\text{MPa}$  である (表  
-1 ではばね定数に関連)。さらに、エア (空気) の粘度とは  
流体と流体または流体と固体に働く摩擦力のことを表す  
(表-1 では摩擦係数および減衰定数に関連)。20°C 下での  
エア (空気) の粘度は  $1.822\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$  となる<sup>7)</sup>。表-1 ではエ  
ア (空気) に対する個別要素法による粒状体解析で設定し  
たパラメータも併記している。

#### 4. 改良型エアリフト工法による引抜孔攪拌混合処理性能

実務上では引抜孔が充填材、削孔泥水+充填材、削孔泥水  
の3層に分かれたのち、上部から攪拌翼を挿入し指定の深  
度に到達させる。その後攪拌翼を深度を変えずに回転させ  
る。本研究では引抜孔を3層に分け攪拌翼の貫入を省き、  
始めから指定の深度に攪拌翼を設定し解析を行った。

##### 4.1 エアリフト工法および改良型エアリフト工法による 攪拌混合処理性能

エアリフト工法および改良型エアリフト工法による引  
抜孔内の攪拌混合処理の原理は、引抜孔内の土砂 (充填材  
および掘削泥水) が吐出されたエア (空気) によって揚圧  
力を受け、引抜孔内を循環することに依る。

エアリフト工法は、攪拌翼が未装着且つ無回転のロッド  
からエア (空気) を吐出することによって、引抜孔内の土  
砂を攪拌混合する。しかしながら、個別要素法による粒状  
体解析を用いてエアリフト工法による引抜孔内の攪拌混  
合処理を再現した図-10 では、引抜孔内の土砂は十分に混  
合することなく、引抜孔内の土砂は不均一な状態を維持  
している (エア (空気) の吐出圧力: 0.25MPa)。よって、引  
抜孔内全体が効率的に攪拌混合することが困難であった  
ため、エアリフト工法による均一な攪拌混合処理は困難で

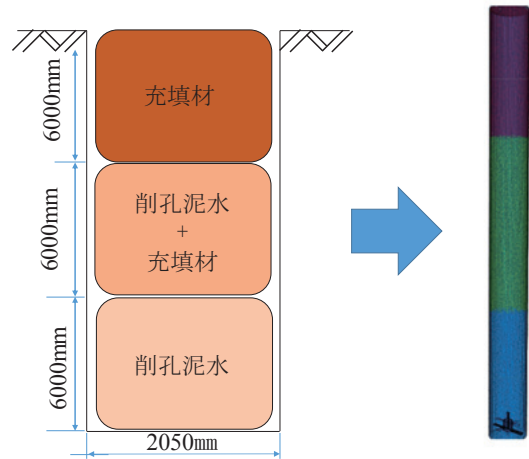


図-9 引抜孔のモデル

表-1 個別要素法による粒状体解析にて設定したパラメータ

	密度(kg/m <sup>3</sup> )	摩擦係数	減衰定数	ばね定数
充填材	33	0.5	0.029	2.9
粘性土	25			
エア (空気)	1.205	0.00002	0.034	0.14

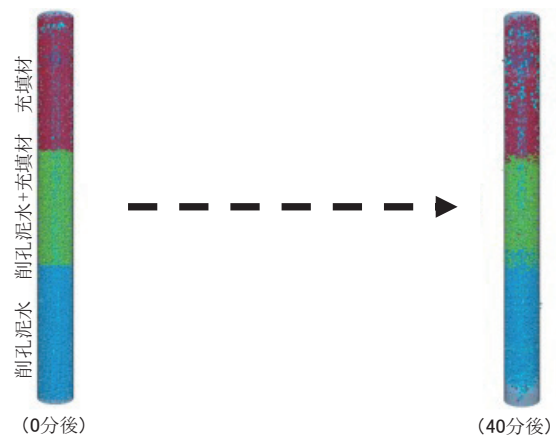


図-10 個別要素法による粒状体解析に基づくエアリフト工法  
による既存杭抜跡地盤 (引抜孔) 内の土砂攪拌・混合状況

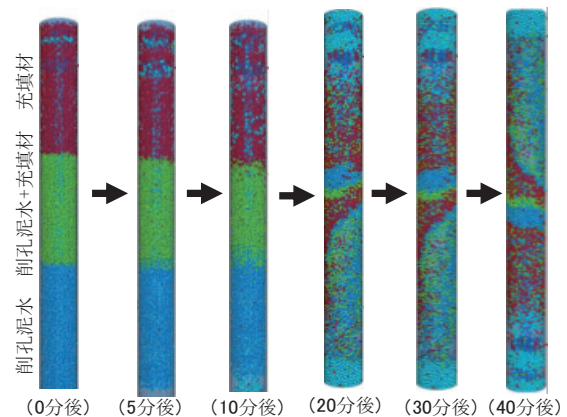


図-11 個別要素法による粒状体解析に基づく改良型エアリフト  
工法による既存杭抜跡地盤 (引抜孔) 内の土砂攪拌・混合状況



あると考えられる。この要因のひとつには、エアリフト工法を適用した際、引抜孔内の土砂の移動方向が挙げられる。すなわち、引抜孔内の土砂は、引抜孔壁を下部から上部へ伝う空気流によって揚圧力が作用するものの、その揚圧ベクトルの方向が単に上向きであるため、揚圧力が作用した土砂が循環することができなかつたことが考えられる。

一方、改良型エアリフト工法ではロッドに三段組の攪拌翼を取り付け、エア（空気）を吐出しながら回転するものである。図-11 では個別要素法による粒状体解析による結果として、改良型エアリフト工法を適用した場合の引抜孔内の土砂の攪拌混合処理を表している（攪拌翼の回転速度：20rpm、エア（空気）の吐出圧力：0.25MPa）。図-12 は図-11 を基に引抜孔内の土砂移動の外観を示しており、エア（空気）の揚圧力によって削孔泥水層が持ち上がる。一方、揚圧力の作用が相対的に小さい充填材層は掘削泥水層とは逆方向（下部方向）へ移動し、徐々に2つの層が螺旋状に入り交じる。よって、引抜孔内の下部層であった掘削泥水は上方へ、上部層であった充填材は下方へ移動するため、結果的に引抜孔内の3層は、程よく均一層に攪拌混合される。

#### 4.2 改良型エアリフト工法による攪拌混合に伴う各粒子の移動特性

改良型エアリフト工法における各層を構成する土粒子群の移動特性として、図-13 および図-14 は引抜孔内下部および上部における土粒子群の速度ベクトルを示している（攪拌翼の回転速度：20rpm、エア（空気）の吐出圧力：0.25MPa）。これらより、引抜孔内下部では攪拌翼から吐出されたエア（空気）の揚圧力によって削孔泥水層の速度ベクトルが斜め上方を向いており、且つ相対的に速度も大きく、削孔泥水層は螺旋状に持ち上げられている。一方、引抜孔内上部では充填材の速度ベクトルは斜め下方を向いており、同時に速度は比較的小さい。すなわち、引抜孔内下部にて吐出されたエア（空気）は攪拌翼の回転に伴い、螺旋状に削孔泥水を上方へ持ち上げ、上部付近では充填材と持ち上げられた削孔泥水および削孔泥水+充填材層の比重と揚圧力とのバランスにより斜め下方へ移動し、引抜孔内全体として循環することになる。

これまで、改良型エアリフト工法を適用した引抜孔内の攪拌混合処理について、施工後のボーリングコアの室内強度試験より、その攪拌混合処理性能は現場レベルにて実証されている。しかしながら、改良型エアリフト工法による攪拌混合処理のメカニズムを定量的に追究した事例は皆無であり、すなわち、本研究により改良型エアリフト工法による引抜孔内の攪拌混合処理のメカニズムが明らかになった。これにより、引抜孔内の攪拌混合処理における改良型エアリフト工法の最適設計が可能になると考えられる。

#### 5. おわりに

本研究では引抜孔の埋戻し処理としてエアリフト工法および改良型エアリフト工法の攪拌混合処理過程（処理メカニズム）を明確にすることを目的として、個別要素法による粒状体解析を用いて両工法による引抜孔の攪拌混合処理過程を再現した。得られた成果は以下のとおりである。

(1) 引抜孔の埋戻し処理（引抜孔内における攪拌混合処理）に対するエアリフト工法および改良型エアリフト工法の適用

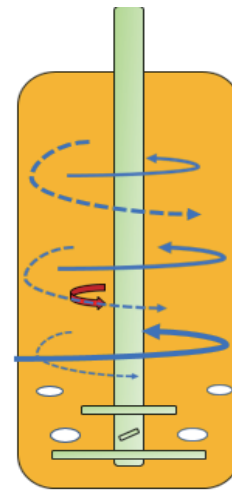


図-12 改良型エアリフト工法による既存杭抜跡地盤（引抜孔）内の土砂循環移動の外観

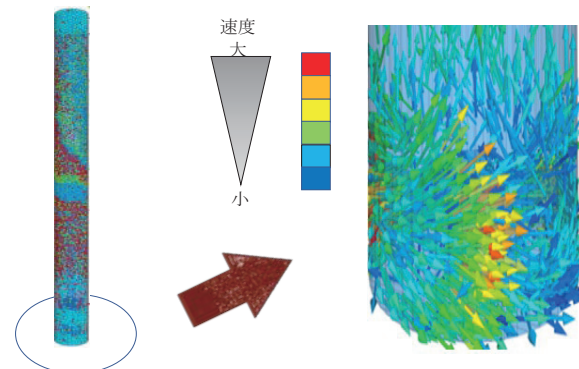


図-13 既存杭抜跡地盤（引抜孔）下部における粒子群速度ベクトル（改良型エアリフト工法）

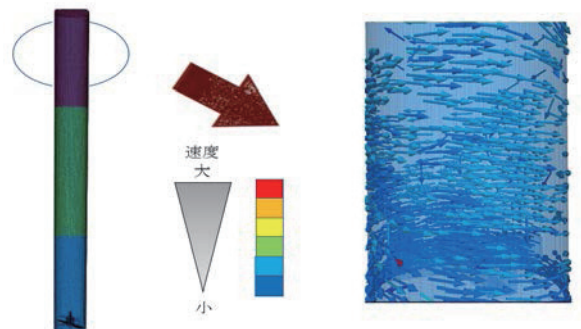


図-14 既存杭抜跡地盤（引抜孔）上部における粒子群速度ベクトル（改良型エアリフト工法）

性について、個別要素法による粒状体解析は、その攪拌混合処理過程（処理メカニズム）を明確にすることが可能である。

- (2) エアリフト工法は攪拌翼が未装着且つ無回転のロッドからエア（空気）を吐出することによって、引抜孔内の土砂を攪拌混合するものである。しかしながら、個別要素法による粒状体解析によると、引抜孔内の土砂は十分に混合することなく、引抜孔内の土砂は不均一な状態を維持していることが明らかになった。
- (3) 改良型エアリフト工法はロッドに三段組の攪拌翼を取り付け、エア（空気）を回転しながら吐出するものである。個別要素法による粒状体解析では、引抜孔内においてエア（空気）の揚圧力によって削孔泥水層が持ち上がる。一方、揚圧力の作用が相対的に小さい充填材層は掘削泥水層とは逆方向（下部方向）へ移動し、徐々に2つの層が螺旋状に入り交じることを明らかにした。よって、結果的に引抜孔内の3層は、改良型エアリフト工法の適用によって程よく均一な1層に攪拌混合される。すなわち、本研究により改良型エアリフト工法による引抜孔内の攪拌混合処理のメカニズムが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) 桑原秀一：PG工法・大口径フライヤー工法の開発と既存杭撤去工事例，月刊基礎工，平成29年2月号，pp.83-86，2017.
- 2) 桑原秀一，濱田聡一郎，鳥越友輔，稲積真哉：既存杭の引抜工法の開発と引抜孔が周辺地盤に及ぼす影響について，第71回土木学会年次学術講演会概要集，第VI部門，pp.41-42，2016.
- 3) 桑原秀一，濱田聡一郎：構造物とりこわし工における既存杭の引抜工事について，平成27年度近畿地方整備局研究発表会論文集，DVD-ROM，2015.
- 4) 阪南基礎工事株式会社：ロックオーガーおよびそれを使用した既存杭などの鉄筋コンクリート破壊工法，<<http://astamuse.com/ja/published/JP/No/2008169603>>，2018.3.31 参照.
- 5) 橋本 功，桑原秀一，内田幸生，江口忠臣，稲積真哉：地盤の杭引抜孔を対象としたセメントベントナイト系充填材の適用性，第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.541-546，2017.
- 6) 伯野元彦：破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー，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) 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ーパラメータの設定と土と地盤の作り方ー，地盤工学会誌，Vol.63，No.8，pp.71-78，2015.
- 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1）粒状体の要素試験のシミュレーション解析，大林組技術研究所年報，No.48，pp.49-54，2008.
- 10) 桑原秀彦，麻原稔彦，弘中雅志：個別要素法を用いた杭の打込み解析に関する研究，山口大学工学部研究報告，Vol.53，No.1，pp.53-59，2002.