

|| 投稿論文 ||

改良型エアリフトによる既存杭抜跡地盤の埋戻し処理工法の性能評価

稲積 真哉¹・浜口 伸一²・桑原 秀一³

¹ 芝浦工業大学 准教授 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail: inazumi@shibaura-it.ac.jp

² 横浜ライト工業株式会社 代表取締役 (〒240-0035 神奈川県横浜市保土ヶ谷区今井町 870)

E-mail: s-hamaguchi@y-wright.com

³ 株式会社マルシン 代表取締役 (〒152-0004 東京都目黒区鷹番 2-20-11)

E-mail: zero-marushinn@nifty.com

近年では高度経済成長期に建設された大量の社会基盤構造物の高齢化、人口減少に伴う宅盤住宅・住居マンションを含む社会基盤構造物利用の減少、さらに東日本大震災を契機とした防災基準に不適合な構造物の取壊しが増加している。そのため、既存杭の撤去工事が増加している。既存杭を引き抜く工程における既存杭抜跡地盤(引抜孔)上部(地表面)から充填材の流し込み注入では、引抜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る。これを克服するため、一連の研究では引抜孔の埋戻し処理工法としてエアリフト工法に着目し、ロッド先端に取り付けた攪拌翼の回転とともに攪拌翼から空気(エア)を吐出する改良型エアリフト工法の開発・検討を行っている。また、これまで改良型エアリフト工法が引抜孔の埋戻し処理に効果的であることを現場において実証している。

本研究では、改良型エアリフト工法の攪拌混合処理過程の検証・解明について、個別要素法による粒状体解析の実施によって検討するものである。

キーワード: *Airlift method, Backfilling, Distinct element method, Granule analysis, Pile pull-out hole*

1. はじめに

近年では高度経済成長期に建設された大量の社会基盤構造物の高齢化、人口減少に伴う宅盤住宅・住居マンションを含む社会基盤構造物利用の減少、さらに東日本大震災を契機とした防災基準に不適合な構造物の取壊しが増加している^{1), 2)}。同時に、近年における好景気も相まって上記した構造物の建替え需要も高まっている^{1), 2)}。

図-1は構造物を取り壊す際、構造物を支持していた杭基礎(既存杭)は産業廃棄物に指定されることを示している。よって、原則として既存杭は地中から撤去しなければならない。なお、既存杭の撤去は地中において破碎・現地土と混合する工法も存在するものの、上記したとおり既存杭は産業廃棄物に指定されることから、地中内で破碎・残置することは適当でない。そのため、既存杭の撤去は、主として既存杭の引抜き撤去を指すことになる²⁾。

既存杭を引き抜いた状態では地盤内に孔が形成し、地盤が不良化する原因になり得るため、既存杭引抜き工は既存杭抜跡地盤(引抜孔)の埋戻し処理までを包含しなければならない。例えば、図-2のように引抜孔に対して

充填材等で埋戻し処理を行わない場合は、引抜孔周辺の地盤沈下、新設杭打設時における新設杭のズレや傾斜発生をもたらす等の地盤不良を誘発する^{2), 3)}。

既存杭引抜き工における引抜孔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)から引抜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^{3), 4)}。しかしながら、既存杭を引き抜く工程において、引抜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、図-3に示されるように既存杭を引

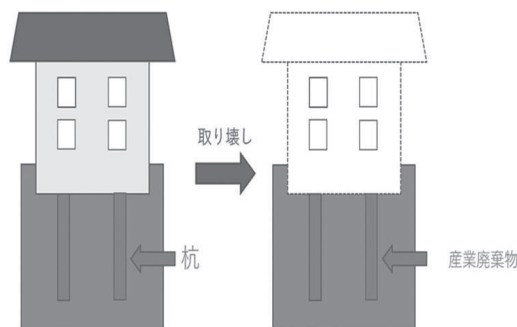


図-1 産業廃棄物に指定される既存杭 (構造物取壊し後)

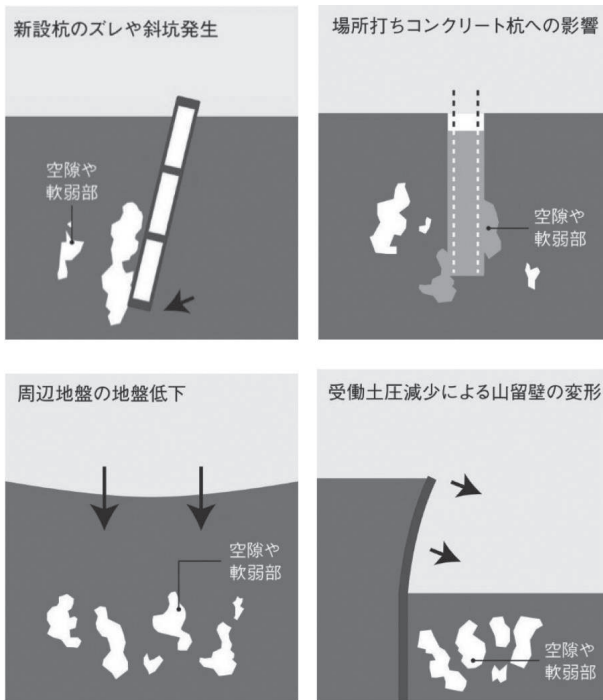


図-2 引抜きに起因する地盤の不良化例

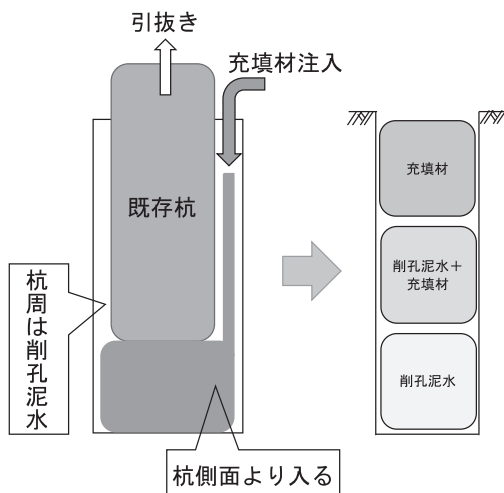


図-3 引抜き孔内での充填材の充填状況

き抜く工程の最後に行う引抜き孔上部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。

上記した既存杭引抜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。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ならびに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(Granule Analysis using Distinct Element Method;以降“DEMによる解析”と略称)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。さらに、攪拌翼の回転速度、攪拌時間ならびに空気(エア)の吐出圧(エアブロー圧)等、改良型エアリフト工法の設計・施工における仕様を検討する。

2. 既存杭引抜き工法および既存杭抜跡地盤

2.1 既存杭の現状

上部構造物の建替えや取壊しにおいては、既存杭が廃棄物処理法上の産業廃棄物に指定され、適切に引抜き撤去を行う必要がある。しかしながら、既存杭の引抜きでは引抜き工程において既存杭の地中残置といった問題が顕在化している³⁾。

既存杭の地中残置は、残置した杭が地中障害物となり、跡地における新設基礎工の工期遅延や新設杭の芯ズレ発生の原因となる。すなわち、既存杭の地中残置は新設杭の打設に悪影響を及ぼすことになる。既存杭の地中残置の原因として、既存杭引抜きの工法的な問題(すなわち、引抜き工程において既存杭を破壊し、折れた杭が地中に残置する可能性)も指摘できるものの、同時に図-4に示す不健全な状態で埋設されている既存杭が多く存在していることも挙げられる^{2), 3)}。また、既存杭の種類によっては杭構造自体に分離しやすい箇所が存在し、それが原因で地中残置する場合もある。

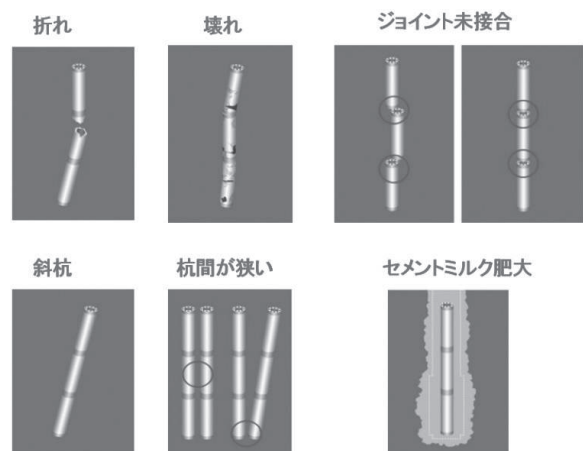


図-4 不健全な状態で埋設される既存杭の一例

2.2 既存杭引抜き工法

現在、既存杭の引抜きでは主に2種類の工法(振動工法およびケーシング縁切り工法)が使用されている⁵⁾。

振動工法は、振動を用いて既存杭を引き抜く工法である。振動による引抜き工法は扱いが容易であり、削孔土砂や泥水を発生させない利点がある。しかしながら、振動工法は、欠点としては杭を把持する工法であるため、杭上部が破損しやすく、そのため鋼製既存杭の引抜きに限定され、且つ騒音や振動が大きい。そのため、住宅地等では適用することができない⁵⁾。

ケーシング縁切り工法(図-5 参照)では、既存杭の外径よりも大きな内径を持つケーシングを既存杭に被せ、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、杭周囲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。

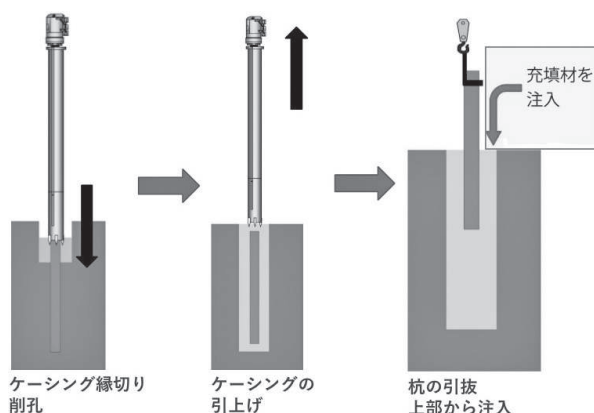


図-5 ケーシング縁切り工法の概略手順

振動工法ならびにケーシング縁切り工法における引抜き孔の処理について、いずれの工法ともその工程上、引抜き孔の最深部からの下部注入が不可能であり、引抜き孔の上部から充填材を流し込み注入する埋戻し処理となる。しかしながら、引抜き孔上部からの流し込み注入による埋戻し処理では引抜き孔の全長にわたり均一な注入が難しく、不均一な埋戻しとなり、結果的に引抜き孔内では空隙や軟弱部が発生する。これらは周辺地盤の沈下、隣接構造物の傾斜・倒壊、新設杭のズレ、新設杭の傾斜の発生や作業重機の転倒等、様々な重大事態の原因となる^{3)~5)}。

2.3 既存杭抜跡地盤(引抜き)

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、碎石、セメントミルクならびに流動化処理土が挙げられる。

2.3.1 引抜き孔の埋戻し処理における攪拌混合の必要性

振動工法ならびにケーシング縁切り工法で採用される引抜き孔の処理(既存杭を引き抜きつつ、引抜き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き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、様々な課題がある。そのため、引抜き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、引抜き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^{3)~7)}。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、引抜き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にタイムリーな埋戻しが実施でき、そのため、引抜き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⁷⁾。

既存杭を完全に引き抜いた後の引抜き孔を充填材で埋戻し処理を実施する場合、一般的に図-3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、引抜き孔上部より充填材で埋戻し処理を行う以前に、引抜き孔内では既に既存杭周囲に付着していた土砂ならびにケーシング削孔時の削孔液(削孔泥水)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-3に示される埋戻し状態では、引抜き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、引抜き孔内の攪拌混合等によって、引抜き孔内の全深度にわたって均一な埋戻し層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。

2.3.2 エアリフト工法による引抜き孔の埋戻し処理

引抜き孔の埋戻し処理に付随する引抜き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、数少ない引抜き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-3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き孔内へロッドを引抜き孔下端付近まで挿入し、ロッド先端から空気を吐出することで堆積土砂や削孔泥水を浮上させつつ、引抜き孔内で循環さ

せる工法である。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、予めサクショ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。図-6(a)は、エアリフト工法による引抜孔内での充填材を含む土砂の循環移動のイメージを示している。

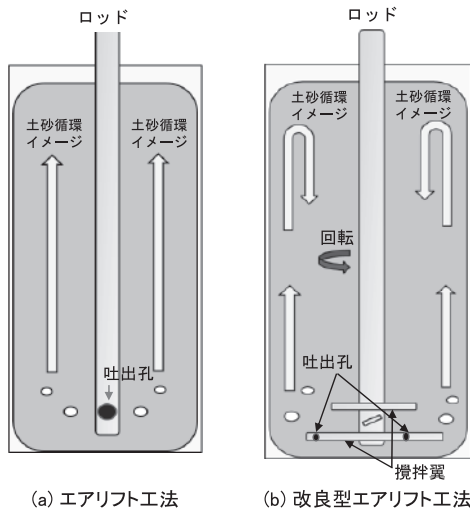


図-6 エアリフト工法および改良型エアリフト工法による引抜孔内の土砂循環イメージ

2.3.3 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-3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空気を吐出することで堆積土砂や削孔泥水を浮上させつつ、引抜孔内で循環させる工法である。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ョ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。図-6(b)は、改良型エアリフト工法による引抜孔内での充填材を含む土砂の循環移動イメージを示している。

本研究は、改良型エアリフト工法による攪拌混合を、DEMによる解析を用いて再現する。これより、引抜孔内にて層構造を成す埋戻し状態(図-3参照)に対して、DEMによる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。

3. 個別要素法による粒状体解析と引抜孔の埋戻し処理に関するモデル化

3.1 個別要素法による粒状体解析

埋戻し処理は当該施工中において地中を直接見ることができないため、施工状況の「可視化」が困難である。そこで、コンピューターを用いて地盤をモデル化し、攪拌混合シミュレーションを行うことができれば、原位置において如何に埋戻し処理が実施されているかを予測し、より効率的な埋戻し処理を検討することができると考えられる。コンピューターを用いて仮想的に埋戻し処理を行うことは、実際に行われている埋戻し処理とは相違が生じるため、より実問題に近い地盤のモデル化が必要となる。対象のモデル化には対象を連続体と仮定するものと不連続体と仮定して解析するものがあるものの、地盤は不連続体であるため、本研究は対象を不連続体と仮定する方法のひとつである個別要素法による粒状体解析(DEMによる解析)を用いる。

DEMは、剥離・滑り・要素間の接触といった連続体ベースの解析手法では追跡することができない現象を計算することができる数値解析手法のひとつであり、土粒子や砂、粉体の流動・混合挙動をシミュレーション解析することに特化している。よって、地盤をモデル化し、攪拌混合する埋戻し処理をシミュレーションすることに向いている数値解析手法のひとつである。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(Finite Element Method; FEM)で代表される連続体解析でも可能であるものの、DEMによる解析を用いることでマイクロメカニク的な解釈が一層進んでいる^{8), 9)}。

DEMによる解析では、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^{8), 9)}。図-7はDEMによる解析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-8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^{8), 9)}。

図-9では、重力下における球要素同士の接触を表したものである。1つの球要素は空間に固定されているも

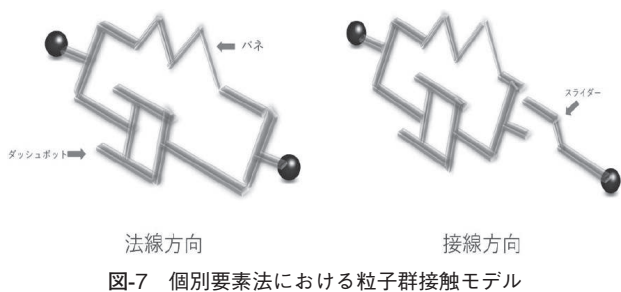


図-7 個別要素法における粒子群接触モデル

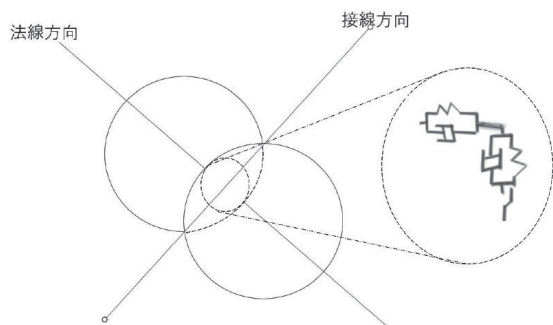


図-8 粒子群接触モデルの作用イメージ

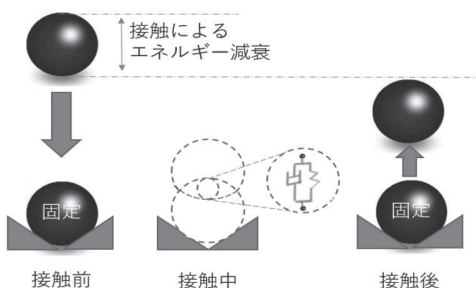


図-9 粒子群接触のイメージ

のとする。固定されていない球要素は落下して、固定されている球要素に接触し跳ね上がる。この時、接触時にエネルギー損失が発生するため、もとの高さよりも低く跳ね上がる。この1連の運動の中で、バネ定数とダッシュポットの粘性係数の役割を表している。まず、バネ定数については接触時の接触面及び接触時間に関係する。大きなバネ定数を用いれば、接触面は小さくなり、接触時間が短くなる。反対に小さなバネ定数を用いれば、接触面は大きくなり接触時間が長くなる。つまり、バネ定数が大きいほど固い材料の挙動を表現することになる。バネ定数が大きいから、高く跳ね上がるというわけではない。バネ定数は接触面と接触時間をコントロールしているだけで、接触後にどの程度跳ね上がるかであり、つまり接触時にどの程度エネルギー損失するかは無関係である。エネルギー損失と関係するのがダッシュポットの粘性係数である^{8), 9)}。

本研究では目的に応じた任意の試験・手法によって決定していくうえでフロー試験を採用し弾性係数、減衰定数を決定する。

3.2 エアリフト工法・改良型エアリフト工法のモデル化

エアリフト工法ならびに改良型エアリフト工法をDEMによる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-10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。また、本解析では空気孔の孔径が35mm、吐出圧力が0.25MPa、吐出空気量が5.0m³/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-11は実際の改良型エアリフト工法における攪拌翼の形状・寸法を3D-CADによって再現したものであり、下から1段目の翼の横幅は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空気が2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0.25MPa、吐出空気量5.0m³/min、最下部にて60分間吐出することとし、攪拌翼の回転は12rpmに設定している。

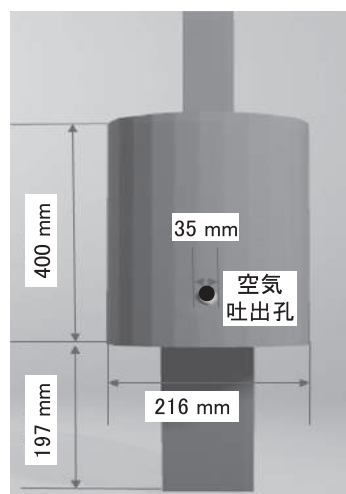


図-10 エアリフト工法におけるロッドの再現

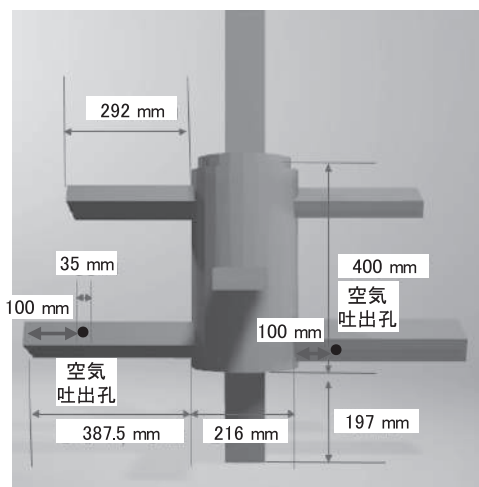


図-11 改良型エアリフト工法における攪拌翼の再現

3.3 充填材で埋め戻された引抜孔のモデル化

図-12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。表-1は、引抜孔内のモデル化において設定した各層の諸条件を示している。なお、各々の層厚ならびに直径は現場実績を考慮して6000mmならびに2050mmとしている。

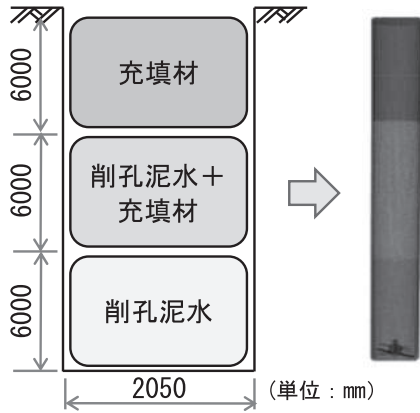


図-12 既存杭抜跡地盤(引抜孔)のモデル

表-1 DEMによる解析に用いる各層の諸条件

	削孔泥水	削孔泥水+充填材	充填材
各層寸法 (mm)	φ : 2050 h : 6000	φ : 2050 h : 6000	φ : 2050 h : 6000
各層粒子群*寸法 (mm)	4 ~ 6	4 ~ 6	4 ~ 6
粒子群数 (個)	10000	5000 + 5000	10000

削孔泥水 : 高含水比粘性土
充填材 : セメントミルク

*粒子群 : DEMによる解析上における粒子の集合体であり、FEMによる解析におけるメッシュサイズに相当

DEMによる解析の実施に際しては充填材、充填材+削孔泥水および削孔泥水のパラメータを設定しなければならない。そのため、充填材や削孔泥水の材料パラメータである粒子の密度、ばね定数、減衰定数、摩擦係数および転がり抵抗係数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^{10)~12)}。

そこで、本研究ではφ 80 mm × h80 mm 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DEMによる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。なお、粒子の密度に関しては、定量の容器を用い測定した結果を使用する。

3.3.1 充填材を含む各材料のフロー試験

材料パラメータの決定方法として、φ 80 mm × h80

mm のエアシリンダを用いたフロー試験(JHS A313-1992)を実施する。フロー試験は充填材や高含水比粘性土の流動挙動を定量的に可視化できるため、本研究で引抜孔の充填材および削孔泥水の再現が可能であると考えている。

フロー試験では、充填材としてセメントミルク(水セメント比 : 60%)および削孔泥水として高含水比粘性土(含水率 : 55%)に対して実施し、フロー試験の様子を直上から動画で撮影している(一例として図-13参照)。さらに、撮影した動画を解析することで、経時時間に対するセメントミルクならびに高含水比粘性土のフロー値を求めている。

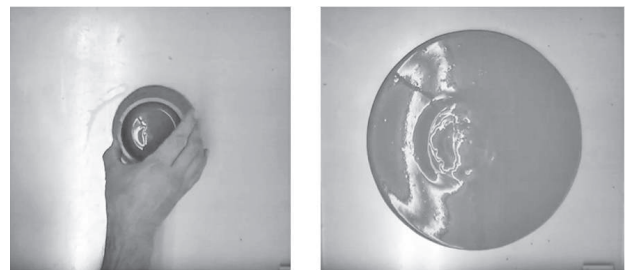


図-13 フロー試験に対する動画撮影の一例

3.3.2 充填材等のフロー試験に対する粒状体解析によるフィッティング

本研究では充填材を含む各材料に対するフロー試験で得られる流動挙動をDEMによる解析で再現(フィッティング)するため、フロー試験から得られる流動挙動を動画撮影し(一例として図-13参照)、撮影した動画に対して解析を実施している。DEMによる解析のパラメータ設定方法については数多くの研究が実施されており、様々な理論や式が提案されてきたものの、未だ明確な設定方法は定められていない。一般的には実試験での集合体の挙動と一致するようパラメータを変化させ、試行錯誤的に決定されている。本研究では既往のDEMによる解析事例を参考に、ばね定数、減衰定数、転がり摩擦および摩擦係数を設定し、各材料のモデル化を試みている。

(1) ばね定数

線形ばね係数を試算する方法は、伯野⁸⁾によって、多質点-ばね連結系の一次元波動伝播速度の考察に基づいて、粒状体中の弾性波(P波・S波)の速度($V_p \cdot V_s$)を用いることで、式(1)および(2)のように提案されている。

$$k_n = 1/4 \pi \rho V_p^2, \quad k_s = 1/4 \pi \rho V_s^2 \tag{1}$$

$$V_p/V_s = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)} \tag{2}$$

ここで、 ρ および ν はそれぞれ粒状体全体の密度およびポアソン比である。また、ポアソン比を $1/3$ とすると $V_p/V_s = 2$ となるため、 $k_s/k_n = 1/4$ となる。本研究では簡単のため上式を援用する。

なお、岩石のように $V_p = 1000 \text{ m/s}$ を超えるような材料では、 k_n を 10^9 N/m 以上などの大きな桁数で設定することになる。しかしながら、 k_n が大きくなると計算時間刻みを小さくせざるを得ないため、結果的に計算時間を増大させる原因となる。一方、粒状体の変形・破壊挙動、流れ挙動および衝撃力の挙動では、ばね定数が 10^6 N/m 以下では粒子要素の重なりによる圧縮性が顕著になり、粒状体本来の挙動とはかけ離れることが判明している¹⁰⁾。 k_n が 10^7 N/m 程度以上であれば、計算で得られる特性に大きな差が生じない結果も得られている。以上より、計算負荷を避けるために、 10^7 N/m を超えるばね定数を用いれば良いとみなせる。そこで、本解析ではばね定数を $k_n = 2 \times 10^8$ および $k_s = 5 \times 10^7$ とし、各材料ともに同じ値に設定する。

(2) 減衰定数

フレッシュコンクリートに関する研究¹³⁾により、減衰定数はスランプ試験での試料の変形速度を決定するパラメータであることが報告されている。また、減衰定数の影響は、流動の最終状態においてほぼ見られないことから、本解析では実挙動の流動停止時間に合致するように減衰定数を設定する。

(3) 転がり摩擦

本解析で流動化処理土をモデル化する際、計算負荷との兼ね合いから解析を円滑に行うため、要素形状は球形を用いる。しかしながら、円形要素を用いると粒子間衝突が点接触となり、転がり時に発生する抵抗が考慮できないため、粒子の回転が過剰になることが示されている。ただし、このような過剰な回転を避けるため、転がり摩擦モデルを導入したところ、粒子の過剰な回転を抑制できることが判明している¹⁴⁾。そこで、本解析においても既往研究を参考にし、転がり摩擦を設定する。

(4) 摩擦係数

フレッシュコンクリートに関する研究¹³⁾により、摩擦係数はスランプフローと直線的な関係があることが示されており、各材料においても同様の関係が存在すると考えられる。本解析では、摩擦係数を微調節しつつ、最終のフロー値が実試験と一致するよう逆解析的に決定する。

本解析で設定した各パラメータは表-2に示し、その解析結果と実際のフロー試験による流動挙動を合わせて示したものを、セメントミルク(充填材)に関しては図-14に、高含水比粘性土(掘削泥水)に関しては図-15に

表-2 DEM による解析において設定したパラメータ

	充填材	掘削泥水	空気	攪拌翼
密度 (kg/m ³)	1720	1270	1.205	-
法線方向のばね定数(N/m)	2.0×10^8	2.0×10^8	2.0×10^8	1.0×10^{11}
接線方向のばね定数(N/m)	5.0×10^7	5.0×10^7	5.0×10^7	2.5×10^{10}
法線方向の減衰定数	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	-
接線方向の減衰定数	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	-
転がり抵抗係数	0.1	0.1	-	-
摩擦係数	0.210	0.175	-	-

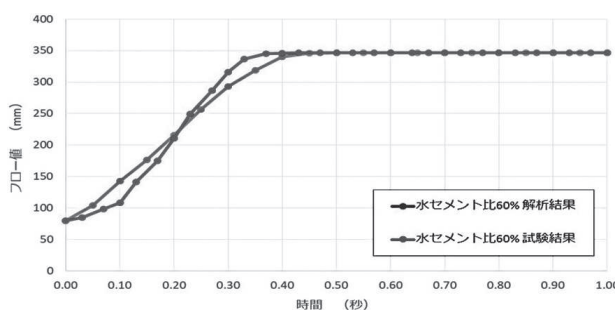


図-14 セメントミルクに対するフロー試験結果と解析結果の比較

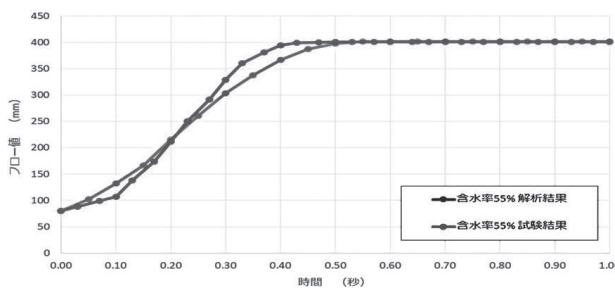


図-15 高含水比粘性土に対するフロー試験結果と解析結果の比較

示す。各材料において、流動停止後のフロー値は、DEMによる解析結果とフロー試験結果とほぼ同一の値であるが、ともに一見すると解析結果とフロー試験結果は異なる挙動を持つようにみえる。しかしながら、いずれに関しても通常の施工等においては考慮されないようなミクロな視点での流動挙動の比較である。そのため、実際の施工等においての理論的な知見としての利用を考慮に入れる必要がある。すなわち、施工において取り扱うのは距離および時間においても、本研究で得られた流動挙動よりも大きな値であり、これを考慮すると流動挙動はよく合致していると判断できる。

なお、表-2で示している空気のパラメータについて、一般的に空気は流体であり、温度変化とともにその物理的性質も異なる。また、空気の物理的特性として密度、粘度ならびに弾性率等も温度変化に依存している。そこで、本研究では空気の温度が常温である 20°C と仮定し⁸⁾、空気の密度は 20°C で $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$ となる。なお、空気に関する粒子群径は掘削泥水や充填材と同等として

(表-2 参照), 4~6 mm に設定している。

また, DEM による解析を行う際には, 壁や面を設定する必要もある。この要素と壁の接触にも要素間に設定したようなバネ定数, 減衰定数などを設定する必要がある。もし, この設定が適切でなかった場合には, 壁に要素が吸着されたり, 壁を通過して要素が解析領域外に発散する可能性がある。この設定方法にも様々な理論や式が提案されており, 本研究はそのような理論や式に基づいて解析を行った過去の論文を参考にして要素が攪拌翼を通過しないように係数を設定する。

4. 改良型エアリフト工法による引抜孔の攪拌混合処理性能

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

エアリフト工法ならびに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, 既存杭引抜跡地盤内(引抜孔内)の土砂(充填材ならびに削孔泥水)が吐出された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空気を吐出するのみによって, 引抜孔内の土砂を攪拌混合する。しかしながら, DEM による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-16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(空気の吐出圧力: 0.25 MPa, 攪拌混合時間: 60 minutes)。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, 引抜孔内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っ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, 空気を吐出するときは回転しながら吐出するものである。図-17では DEM による解析結果として, 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: 12 rpm, 空気の吐出圧力: 0.25 MPa, 攪拌混合時間: 60 minutes)。図-18は図-17を基に引抜孔内の土砂移動の外観を示しており, 空気の揚圧力によって削孔泥水層が持ち上がり, 一方, 揚圧力の作用が相対的に小さい充

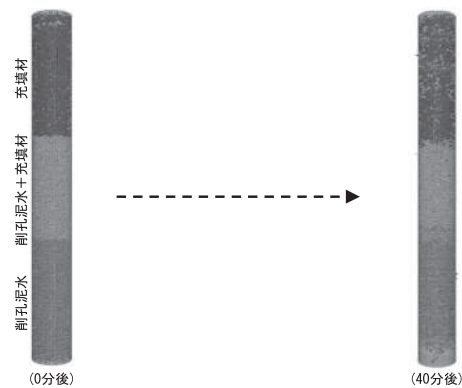


図-16 DEMによる解析に基づくエアリフト工法を用いた引抜孔内の土砂攪拌・混合状況

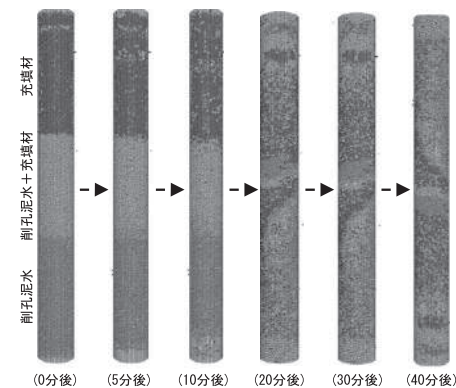


図-17 DEMによる解析に基づく改良型エアリフト工法を用いた引抜孔内の土砂攪拌・混合状況

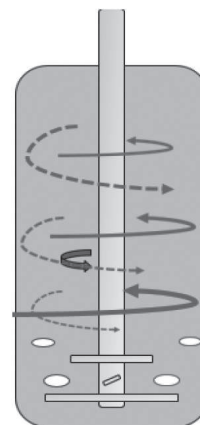


図-18 改良型エアリフト工法による引抜孔内の土砂循環移動の外観

填材層は削孔泥水層とは逆方向(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削孔泥水は上方へ, 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群の移動特性

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-19および図-20は引抜孔内下

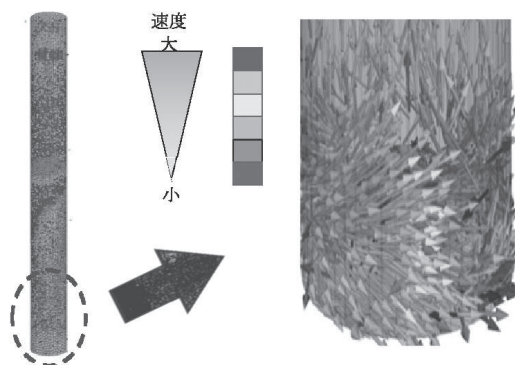


図-19 引抜孔下部における土粒子の群速度ベクトル (30分後) (改良型エアリフト工法)

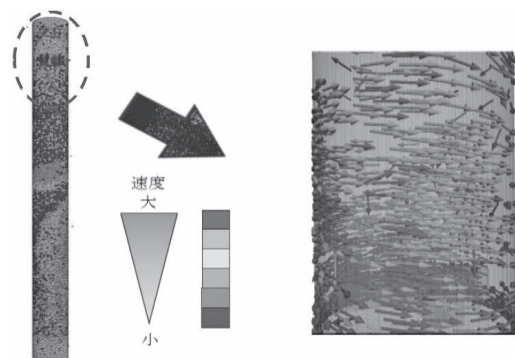


図-20 引抜孔上部における土粒子の群速度ベクトル (30分後) (改良型エアリフト工法)

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: 12 rpm, 空気の吐出圧力: 0.25 MPa)。これらより、引抜孔内下部では攪拌翼から吐出された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ならびに削孔泥水+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。

4.3 改良型エアリフト工法の諸仕様が攪拌混合処理に及ぼす影響

図-21は、空気の吐出圧力を図-19の場合と比較して2倍にしたものである(攪拌翼の回転速度: 12 rpm, 空気の吐出圧力: 0.5 MPa)。これより、削孔泥水層は斜め上方向に安定的な速度ベクトルを保ちながら移動している。土粒子群の速度ベクトルが充填材層までの速度を保ちながら上がっていき、上がってきた空気が下方に流れる際にも速度は落ちるが改善前の改良型エアリフト工法に比べ速度ベクトルより大きく引抜孔内は混ざると推測される。また、図-22は、攪拌翼の回転速度を図-19の場合と比較して2倍にしたものである(攪拌翼の回転速度: 24 rpm, 空気の吐出圧力: 0.25 MPa)。これより、攪拌翼の回転速度を上げることによって改善前の改良型エアリフト工法よりも土粒子群の挙動が斜め上方に進んでいるが、図-21に比べて平行に土粒子群が動いている速度ベクトルが存在している。

改良型エアリフト工法による引抜孔内の攪拌混合処理性能を更に効率的に実施するための方策を検討する。改良型エアリフト工法による攪拌混合処理を効率化する第一としては、空気の吐出圧力を大きくすることが考えられる(図-19および図-21参照)。また、第二としては攪拌翼の回転速度を増大することが考えられる(図-19および図-22参照)。

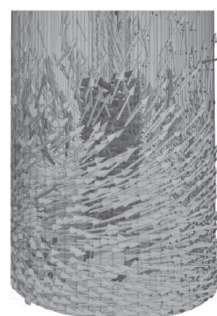


図-21 空気の吐出圧力が増大した場合の引抜孔下部における土粒子群の速度ベクトル (30分後) (改良型エアリフト工法)

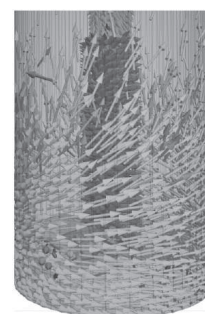


図-22 攪拌翼の回転速度が増大した場合の引抜孔下部における土粒子群の速度ベクトル (30分後) (改良型エアリフト工法)

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ならびに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、DEMによる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に対するエアリフト工法ならびに改良型エアリフト工法の適用性について、DEMによる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、DEMによる解析において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、DEMによる解析では引抜孔内において空気の揚圧力によって削孔泥水層が持ち上がり、一方、揚圧力の作用が相対的に小さい充填材層は削孔泥水層とは逆方向へ移動し、徐々に3つの層が螺旋状に入り交じることを明らかにした。
- (4)DEMによる解析では、改良型エアリフト工法による攪拌混合処理を効率化するため、空気の吐出圧力の増大ならびに攪拌翼の回転速度の増大を解析的に提案することができた。

ただし、本研究では4.2ならびに4.3にて改良型エアリフト工法における空気の吐出圧力や攪拌翼の回転速度等の初期条件が土粒子群の移動特性に与える影響を相対的・定性的に考察したものの、定量的な考察・説明には至らなかった。今後、DEMによる解析を用いて引抜孔の埋戻し処理工法をより詳細に評価し、さらに設計に援

用するためには、上記した初期条件に対する土粒子群の移動特性を定量的に評価する必要がある。

参考文献

- 1) 総務省：公共施設等の解体撤去事業に関する調査結果，総務省，2012。
- 2) 村上隆生：基礎杭の残置，埋戻し部分の地盤支持力の瑕疵を否定し，代理業者の説明義務違反も否定した事例，RETIO，No.82，pp.166-167，2011。
- 3) 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事例，月刊基礎工，平成29年2月号，pp.83-86，2017。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 酒井幹夫：粉体の数値シミュレーション，丸善出版，2013。
- 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，Vol.63，No.8，pp.71-78，2015。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 鍋田克己，町田篤彦，岩下和義，佐々木尊廣：個別要素法を用いたフレッシュコンクリートの流動シミュレーション，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.479-484，1994。
- 14) 長田健吾，清水義彦，若井明彦：個別要素法における粒子の回転と転がり摩擦が土石流の流動・堆積過程に及ぼす影響，水工学論文集，第49巻，pp.889-894，2005。

(2018.3.26 受付，2018.7.2 採用決定)

PERFORMANCE EVALUATION OF BACKFILLING METHODS BY IMPROVED AIR-LIFT ON PULLING-OUT HOLES OF EXISTING PILES

Shinya INAZUMI¹, Shin-ichi HAMAGUCHI² and Shuichi KUWAHARA³

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology

² Representative Director, Yokohama Wright Industries Co. Ltd.

³ Representative Director, Marushin Co. Ltd.

In recent years, a large number of social infrastructures constructed during the period of high economic growth are aging. At the same time, the use of social infrastructures including housing and residential condominiums is decreasing due to the declining population, and the demolition of structures that are incompatible with disaster prevention standards triggered by the Great East Japan Earthquake is increasing. Therefore, removal work of existing piles is increasing. It is difficult to achieve a uniform backfill over the entire depth of the pulling-out hole by filling material from the upper part of the pulling-out hole. In order to overcome this, in a series of studies, focusing on the air lift method as a method of backfilling pulling-out holes, the authors developed an improved air lift method in which air is discharged from stirring blades along with the rotation of stirring blades attached to the rod tips. Also, it has been demonstrated in the field that the improved air lift method has been effective for filling holes.

In this paper, the authors examine the verification and elucidation of the stirring and mixing process of the improved airlift method with carrying out the granule analysis by the distinct element method (DEM). As an example of the results, regarding the applicability of the air lift method and the improved air lift method, the analysis by DEM could clarify those stirring mixing processes.