

ICT-CAE を搭載する既存杭撤去工法の開発による 持続可能な地盤環境保全に関する研究

Sustainable conservation for geo-environment by
developing removal method of existing piles with ICT-CAE

芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 稲積真哉

（研究計画ないし研究手法の概略）

【研究背景と目的】

我が国では、1964年の東京オリンピックに向け整備された東京国際空港、首都高速道路ならびに東海道新幹線等をはじめ、高度経済成長期に整備された社会基盤構造物および建築構造物の老朽化が進み、その対策が喫緊の課題となっている。さらに、東日本大震災（2011年3月11日）等の巨大自然災害による防災意識の高まりや復興に向けた建物の再建、少子高齢化と人口減少による世帯数や公共施設の減少、2020年の東京オリンピックに向けた再開発等に伴い、建物の解体需要は今後ますます高まると予想されている。

我が国の多くの都市は軟弱地盤に位置し、杭基礎を用いた構造物が多い。そのため、既設構造物が存在する場所で新たな土地活用を図る場合、建物の解体と同じく構造物を支持していた杭も撤去する必要がある。既設構造物の解体撤去後、地中に放置された杭は既存杭と呼ばれ、打設された当時の施工法・品質により途中で折れていたり壊れていたり等、様々な状態で埋設されている。そのような既存杭を撤去することは容易でない。撤去されずに地中に放置された既存杭は産業廃棄物と扱われ、土地売却取引における隠れた瑕疵となる。よって、多くのトラブルの原因を防ぐためにも既存杭の引抜きは必須である。

その一方、既存杭の引抜き工では既存杭の残置、周辺地盤の沈下ならびに跡地利用時の地盤環境の悪化等、様々な問題が生じているにも係わらず、既存杭を引き抜いた後に形成される引抜き孔に注入する充填材や既存杭を引き抜く工法自体に基準・規程等の統一的な決まりがない。

上記を踏まえ、本研究では既存杭引抜き工法のひとつである杭先端チャッキング式引抜き工法（パワーチャッキング工法；PG工法）を対象とし、MPS-CAEを用いて視覚的かつ定量的に特徴づけることによって工程評価を行う。具体的には、地盤内の粒子の挙動や削孔工程から引抜き工程までの一連の様子を解析的に可視化し、粒子数を用いて新たな指標を用意し定量的な評価を行う。

【研究方法の概略】

[1] CAE

CAE（Computer Aided Engineering）とは、「ものづくり」の研究・開発工程において従来より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。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等を指す場合もある。

CAE の適用は、複雑かつ巨大な対象形状に対する高速計算、物体内部や断面の可視化、実験や現象のシミュレーションが可能となる。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危険を伴う実験、災害発生時等再現困難な現象の把握が可能となり得る。また、CAE において適切なポスト処理を行うことで、専門家以外にも結果を視覚的にわかりやすく伝えることができる。

本研究では、PG 工法を用いた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 (Moving Particle Semi-implicit Method) を用いた CAE の適用を試みる。具体的には、ある現場での PG 工法を用いた既存杭引抜き工の実績において、当該工法を一部変更して施工した場合や充填材注入量を増やした場合等、それにより重大事故や施工不良につながる恐れのある実験不可能な場合の再現を行う。

[2] 粒子法

近年におけるコンピュータ技術の目覚ましい発展とともに、粒子法と呼ばれる解析手法が開発・発展している。ここで、有限要素法や差分法は格子法と呼ばれ、空間を格子によって分割し、各格子に物理量を変数として割り当て計算を行う。一方、粒子法は有限要素法や差分法とは異なり格子を用いず、代わりに各計算点を物理量とともに移動する粒子として連続体を離散化する。粒子法には、離散化手法に違いがある MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit Method) ならびに SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics Method) が代表的であるが、本研究では MPS 法を用いる。

粒子法の大きな特徴は上記のとおり格子を用いないことであるが、これが支配方程式に大きな違いをもたらす。連続体の挙動を記述する場合には、オイラー法 (格子有: 差分法, 有限要素法等) とラグランジュ法 (非格子: 粒子法) がある。ラグランジュ法では計算点が物体の移動・変形とともに移動するため、対流項が支配方程式からなくなることになる。式(1)および式(2)は、オイラー法とラグランジュ法によるナビエ・ストークス方程式を示す。

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + (u(x,t) \cdot \nabla)u(x,t) = -\frac{1}{\rho} \nabla P(x,t) + \nu \nabla^2 u(x,t) + g(x,t) \quad (1)$$

$$\frac{Du(X,t)}{Dt} = \frac{1}{\rho} \nabla P(x,t) + \nu \nabla^2 u(X,t) + g(X,t) \quad (2)$$

ここで、 u : 速度, P : 圧力, g : 外力, ρ : 密度, ν : 動粘性係数である。

有限要素法や差分法では、式(1)の左辺第 2 項 (移流項) の取扱いが計算上の大きな障害となっており、当該項の取扱い手法が解析結果に大きな影響を及ぼす。特に自由表面を有するような流体の表面挙動を記述する手法が様々提案されている。一方、粒子法ではこのような問題がないため、大変形を伴うような自由表面を有する流体の解析に向けた手法であるといえる。

MPS 法では式(2)で示されるような支配方程式を離散化する際、各微分演算子 (勾配, 発散およびラプラシアン) に対して、各々粒子間相互作用モデルを用意し適用する。具体的には重み関数 (式(3)参照) を用いて、各粒子間相互作用モデルを記述する。式(3)の R は相互作用を起こす粒子間距離であり、各粒子は各々当該半径内の粒子からのみ影響を受けるとして計算する。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{R}{r} - 1 & (0 \leq r \leq R) \\ 0 & (R \leq r) \end{cases}$$

(3)

非圧縮性流体に対する支配方程式は、式(2)のナビエ・ストークスの方程式と式(4)に示す連続の式である。まず初期の粒子位置、粒子速度および圧力分布から式(2)の粘性項および外力項を陽的に解くことにより、仮の粒子位置・粒子速度を得る。ここで得られる粒子の分布は式(4)の連続の式を満たさない。そこで、ここで得られた粒子位置および粒子速度に対して式(4)を満足するように、圧力項を用いて修正を図る。当該手順を順次繰り返すことによって計算が進んでいく。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0$$

(4)

本研究では、非圧縮性流れの計算アルゴリズムとして半陰的なアルゴリズムを適用する。

(実験調査によって得られた新しい知見)

【MPS-CAE による PG 工法の工程評価】

既存杭引抜き工事ではその工法や杭引抜き孔に注入する充填材に明確なルールがないため、既存杭引抜き工法の一つである PG 工法を MPS-CAE により視覚的且つ定量的に特徴づけることで工程評価を行う。

[1] PG 工法および対象のモデル化

ある現場における PG 工法による既存杭引抜き工事を再現し、その施工手順を図-1に示す。ケーシングを時計回りに回転させながら先端より削孔液を吐出し削孔する(図-1(c)(d)参照)。杭最深部でケーシング先端部からチャック爪を内側に突き出し(図-1(e)参照)、杭を内包したままケーシングを時計回りに回転させながら先端より充填材を注入し引き上げる(図-1(f)参照)。

PG 工法における削孔工程の解析条件を図-6 ならびに表-1 のように設定した。周辺地盤と削孔液のパラメータは Bingaman モデルを採用し表-2 に示す。Bingaman 流体は降伏応力を超えると流動し始める性質をもつため、降伏値には現場から採取した土の一軸圧

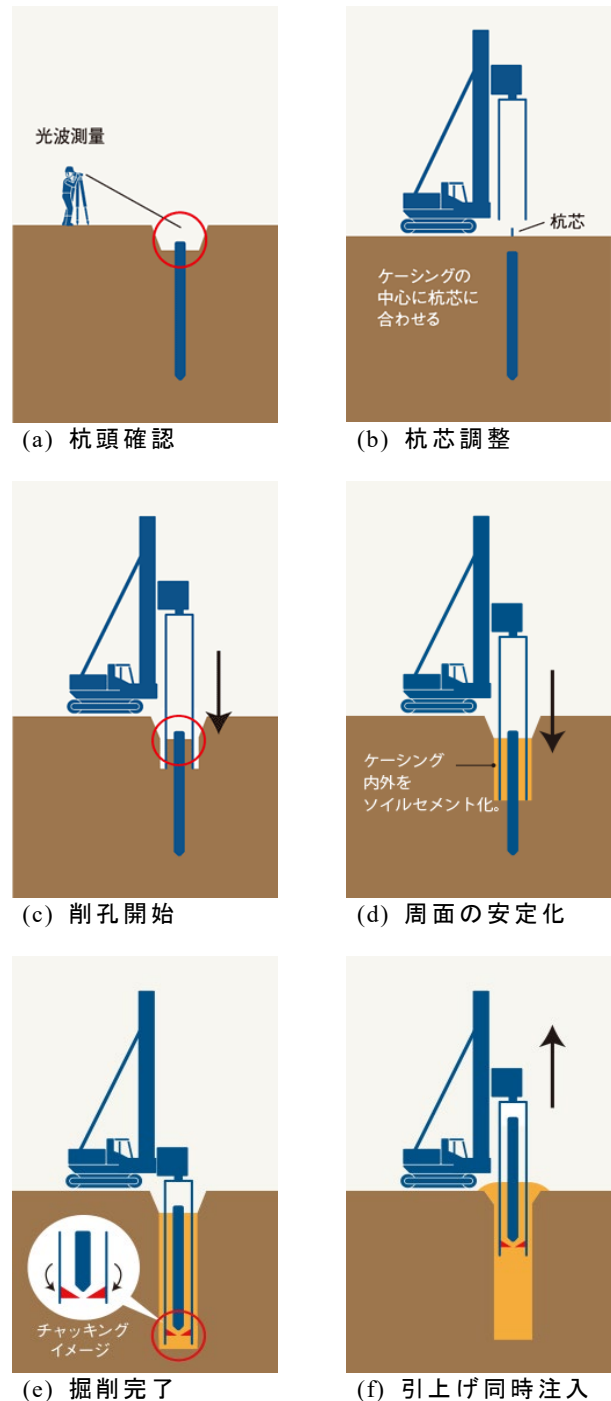


図-1 PG 工法の施工手順

縮強度を与え塑性粘度には削孔泥水の粘性係数を与えることで、ケーシング削孔の回転の力により降伏値をこえ流動し始めたときの乱された土の挙動を表現した。粘性係数は現場から採取した削孔泥水を Brookfield 社の B 型粘度計で測定した。ケーシングの貫入速度や回転速度、削孔液の流入量は現場と同じ条件を与え表-3 に示す。

PG 工法における引抜き工程の施工手順を図-1(f)に示す。詳細手順として、(i)杭を内包し最深部で充填材を注入する、(ii)充填材を吐出しながら最深部から 2m を上下に攪拌し、(iii)一定速度で引き上げる、(iv)最上部まで引き上げ(ii)と同様に 2m の上下攪拌を行う。削孔泥水の領域は、削孔によってケーシング刃先外径体積分が泥水化されると想定し、直径 1.6m、高さ 21.3m の円柱とした。杭とケーシングの形状は図-2 で示された削孔時と同様である。削孔泥水と充填材のパラメータは削孔時と同様、Bingaman モデルを採用し表-4 に示す。降伏値は既往の研究を参考に決定した 13)。泥水の塑性粘度には削孔工程と同じ値を与え、充填材には水の塑性粘度を与えた。ケーシングの貫入速度や回転速度、削孔液の流入量は現場と同じ条件を与え表-5 に示す。

[2] PG 工法のキャラクターゼーション

削孔工程の解析結果を図-3 と図-4 に示す。図-3 は削孔開始から 4 秒後、図-4 は 14 秒後であり地表面付近をトリミングした。灰色の粒子が周辺地盤、黒色の粒子が削孔液を表す。ケーシング周辺で徐々に削孔液と周辺地盤が混じり周囲が泥水化されている。また削孔に伴いケーシング周辺の地盤が乱され、図-4 においてケーシングの直径 1.25m に対し直径 1.5m まで周辺の地盤が乱されている。

引抜き工程の解析結果を図-5 に示す。灰色の粒子が充填材、黒色の粒子が削孔泥水を表す。ここで全粒子数に対する充填材の粒子数の割合を置換率と定義する。図-5 は引抜き完了時の深度に対する置換率の変化とそのときの解析結果である。図-5 より深度 4~11m で置換率が減少していることがわかる。これは杭引き上げ時に削孔泥水をケーシング内に内包したまま一緒に抱え上げたため、充填材の注入量が足りずに杭引き上げによって発生する空隙を補完できなかったためである。そこで充填材の注入量をケーシング体積分に増やしその他条件を変えずに解析した。その結果が図-6 である。全体を通じて置換率が 96% を超え、均一な充填ができた。ムラのない均一な充填と高い置換率には充填材の注入量が関係していることがわかる。

表-1 解析条件

既存杭	
杭長	19.1m
根固め長	5.0m
根固め径	1.2m
軸径	0.6m
ケーシング	
高さ	22.0m
内径	1.25m
厚さ	0.009m

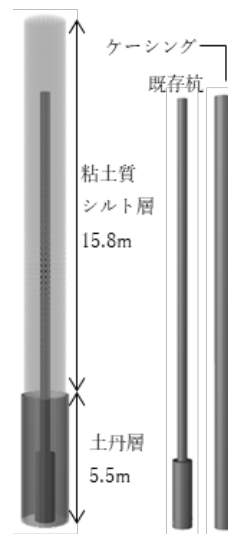


図-2 解析形状

表-2 削孔工程における材料パラメータ

	密度 (kg/m ³)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)
周辺地盤	1,266	100000	6.92
削孔液	1,000	10.0	6.92

表-3 削孔工程における諸条件

ケーシング	貫入速度	30.0m/h
	回転速度	15rpm
削孔液	流入量	15m ³ /h×2か所

[3] 成果と課題

本研究では、既存杭引抜き工法のひとつである PG 工法を MPS-CAE を用いて視覚的に特徴づけ、定量的な工程評価を行った。得られた成果は下記のとおりである。

(1) PG 工法における削孔工程について、MPS-CAE を用いて地盤内での削孔液と周辺地盤が混ざり泥水化されていく様子を解析的に可視化することができた。そこでは、削孔工程の経過時間ごとに周辺地盤が乱れる範囲を定量化することができた。

(2) 削孔工程における材料パラメータの設定では、周辺地盤と削孔液を **Bingaman** 流体として、降伏値には土の一軸圧縮強さを、塑性粘度には削孔泥水の粘性係数を与えた。これにより、ケーシングによる削孔の回転力により降伏値を超え流動し始めたときの乱れた土の様子を再現することができた。

(3) PG 工法における引抜き工程について、MPS-CAE を用いて粒子数による定量的な評価と地盤内での削孔泥水が充填材に

置換されていく様子を解析的に可視化することができた。PG 工法による既存杭引抜き施工後の引抜き孔を粒子数による置換率で定量的な評価から、一軸圧縮強さとの相関を見出し、回帰式を導いた。その結果、PG 工法による既存杭引抜き工の事前のシミュレーションにより目標強度にあった充填材量や工法の選択が行えるようになった。

(4) 対象現場における深度に対して置換率が不均一となった要因を追究するため、上下振動および充填材注入量を変更した場合の引抜き工程の再現を行った。その結果を置換率によって定量的に評価し、その要因を明らかにすることができた。本来、このような実験を実施する場合には莫大なコストを要し、危険を伴う場合もある。また、全く同じ環境

表-4 引抜き工程における材料パラメータ

	密度 (kg/m ³)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa・s)
削孔泥水	1,200	10.0	6.92
充填材	1,173	0.0	0.001

表-5 引抜き工程における諸条件

ケーシング	引抜速度	25.2m/h
	回転速度	7rpm
充填材	合計流入量	34.157m ³

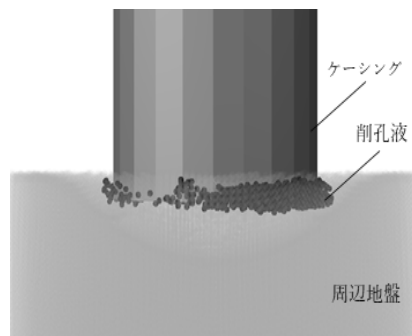


図-3 削孔工程の解析結果 (4 秒後)

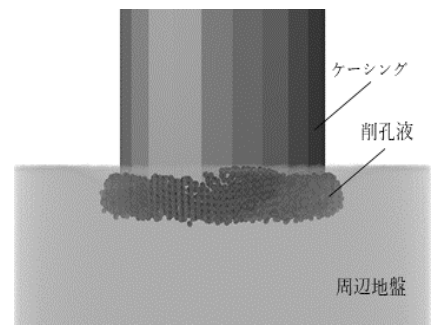


図-4 削孔工程の解析結果 (14 秒後)

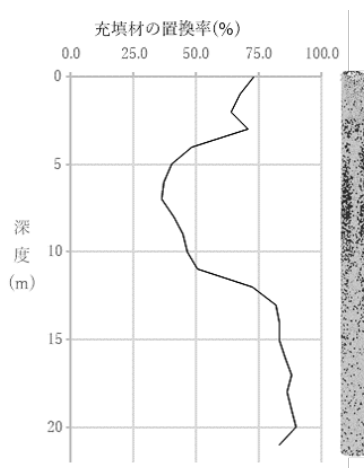


図-5 引抜き工程の解析結果

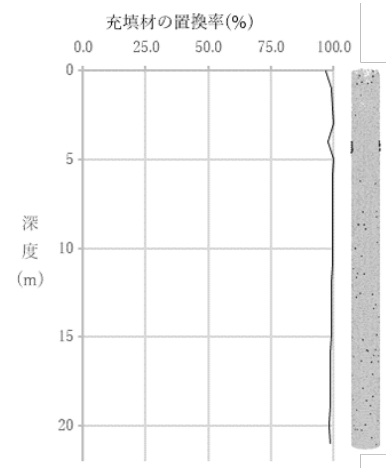


図-6 引抜き工程の解析結果

条件の下で繰り返し引抜き工程を実験実施することは不可能である。しかし、MPS-CAEを活用したことで解析的に再現が可能となった。

本研究の課題は、周辺地盤の再現と再現サンプル数である。周辺地盤の再現に関して、本研究では Bingaman 流体モデルを用いた。今後は周辺地盤の再現性を更に高めるために、MPSとDEMの連成等、新たな手法からの再現・提案も必要となる。その新たな手法の提案においても、計算負荷の増大や再現のためのパラメータの測定および決定方法等、想定しうる課題が他にも多くある。

計算負荷の増大は粒子数の多さに依存し、粒子数は解析領域と粒子間距離に依存する。既存杭やケーシング等の解析形状に対し、考慮すべきクリアランスが小さいため粒子間距離が小さくなり、粒子数が多くなる。その結果、計算負荷への増大へとつながる。周辺地盤の新たな手法の提案において、計算負荷の面から実質的に粒子数に制限がある問題をクリアしなくてはならない。

再現のためのパラメータの測定および決定方法は、妥当性がなくてはならない。本研究では、土の一軸圧縮強さを Bingaman 流体の降伏値であると仮定し MPS-CAE を行った。パラメータの測定も一軸圧縮強度試験と粘性測定を行い測定することができた。周辺地盤の新たな手法の提案において、簡便且つ妥当性をもったパラメータの測定および決定方法を考える必要がある。

再現サンプル数に関して、本研究ではひとつの現場における PG 工法の一連を再現した。1.でも述べたように、今後も既存杭の引抜きは大きな問題となり、その重要性は益々高まる。そのためにも、再現サンプル数を増やし、評価や再現の信頼性を高めていかななくてはならない。5.2.1 に示した PG 工法による既存杭引抜き工後の引抜き孔に対する粒子数による置換率を用いた定量的な評価から、一軸圧縮強さとの相関を見出し、回帰式を導いた。これはひとつの現場での 20 サンプルの相関であり、サンプル数を増やすことでより信頼性の高い相関を見出す必要がある。現時点で、MPS 法を適用した周辺地盤および PG 工法を再現した事例は少なく、今後の更なる発展に期待する。

(発 表 論 文)

1. Shakya, S., Inazumi, S. and Nontananandh, S.: Potential of computer-aided engineering in the design of ground improvement technologies, Applied Sciences, MDPI, Vol. 12, Issue 19, 9675, 2022-10.
2. Nontananandh, S., Kuwahara, S. Shishido, K. and Inazumi, S.: Influence of perforated soils on installation of new piles, Applied Sciences, MDPI, Vol. 12, Issue 15, 7712, 2022-7.
3. Nakao, K., Inazumi, S., Takahashi, T. and Nontananandh, S.: Numerical simulation of the liquefaction phenomenon by MPSM-DEM coupled CAES, Sustainability, MDPI, Vol. 14, Issue 12, 7517, 2022-6.
4. Inazumi, S., Kuwahara, S., Nontananandh, S., Jotisankasa, A. and Chairakaikeow, S.: Numerical analysis for ground subsidence caused by extraction holes of removed piles, Applied Sciences, MDPI, Vol. 12, Issue 11, 5481, 2022-5.