

既存杭引抜孔における循環式攪拌工法の定量的評価

芝浦工業大学大学院 ○(学)椎名基貴・(学)中尾晃揮・(正)稲積真哉
 横浜ライト工業株式会社 (非)浜口伸一・(正)橋田弘之

1. はじめに

わが国では、高度経済成長期に大量に建設された建築物の老朽化が進んでおり、近年これらは深刻な問題として露呈してきている。既設構造物の多くは杭基礎を採用しているため、既設構造物の解体撤去後において新たな当該土地を図る場合、新設構造物の杭基礎等に既存杭が干渉しないように確実に既存杭を撤去する必要がある。

既存杭引抜工法における既存杭引抜跡地盤（以下、引抜孔と称す）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。その際、引抜孔の埋戻しが不十分であると周辺地盤の陥没や沈下などの問題が発生する可能性がある。しかしながら、最適な埋戻し材料の基準や引抜孔の検証方法に関する標準が未だ確立されていなく、現場の経験則に基づいた施策を重ねていくことで施工管理を行ってきた。さらには施工対象が地盤ということもあり、施工中の内部状況を直接目で確認することが不可能であるため、地盤内の可視化が求められている。

そこで本研究では、埋戻し工法のひとつである循環式攪拌工法に着目し、この工法に関して MPS-CAE 解析を用いて可視的に評価および数値シミュレーションすることで、引抜孔内部の挙動を定量的に評価する。

2. 循環式攪拌工法

本工法における埋戻し手順として、まず既存杭引抜きと同時にベントナイト水を注入し孔壁を保護する。このとき引抜孔の中は上部にベントナイト水、下部に削孔泥水のおおまか2層になっている。ここで循環システムである吸入管を引抜孔の先端まで挿入し、孔内のベントナイト水と杭周辺泥水を比重が安定するまで循環攪拌を行う。その後、引抜孔の全長に合わせたセメント粉体の配合量を添加し、再び比重が安定したら循環攪拌が完了となる。本工法は、下部からの吸引循環で孔内均一攪拌が期待できる。また、下部の混合具合も排出口の比重サンプルにより確認することが可能である（図-1 参照）。

本研究では、引抜後の孔内における2層になっているベントナイト水と削孔泥水の循環攪拌について、MPS-CAE 解析を用いて数値シミュレーションを行う。そこで一現場で得た比重サンプルとその再現解析結果を比較することで、解析の整合性評価する。

3. MPS-CAE 解析

MPS (Moving Particle Simulation) とは、粒子法的一种であり、計算点をともに移動する粒子として連続体を離散化し、流体の流れを粒子自体の挙動で表すことのできる非圧縮性流れの解析手法である。基本的な支配方程式は式-1 に示す連続の式、および式-2 に示す非圧縮性ナビエ・ストークス方程式である^{2),3)}。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (\text{式-1})$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \quad (\text{式-2})$$

ここで、 $\frac{D\vec{u}}{Dt}$ はラグランジュ微分を表し、 ρ は密度、 $\vec{u}$ は速度、 P は圧力、 ν は動粘性係数、 $\vec{g}$ は重力である。

さらに、CAE (Computer Aided Engineering) 技術を適用することで、事象の再現やシミュレーションおよび定量的評価が可能となる。また、CAE において適切なポスト処理を行うことで、専門家以外にも視覚的に分かりやすく伝えることができる。

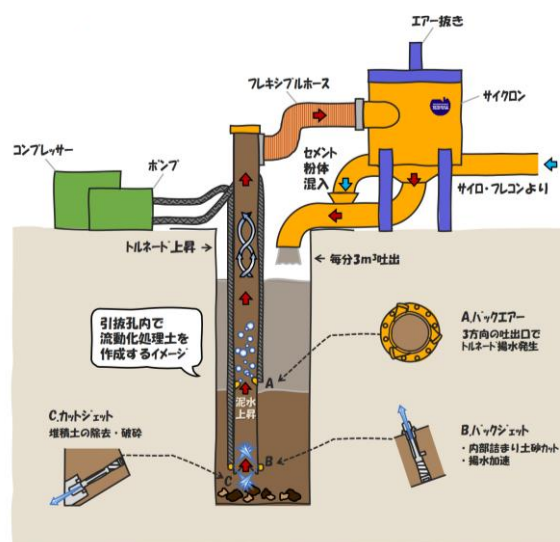


図-1 循環式攪拌工法の施工概要図

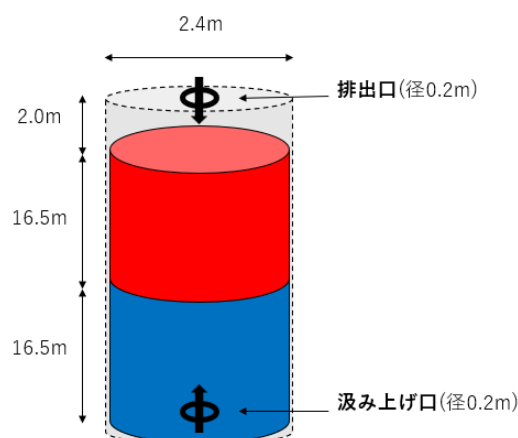


図-2 循環システムにおける解析対象寸法

キーワード：引抜孔、循環システム、MPS-CAE 解析

連絡先：〒135-8548 東京都江東区豊洲3丁目7-5 (TEL：03-5859-8360；FAX：03-5859-8401)

4. 解析対象・条件

本研究では図-2 に示す循環式攪拌工法における循環システムを対象に再現解析を実施する。引抜き孔の全長は 33m とし、ベントナイト水と削孔泥水をそれぞれ 16.5m とした。孔内底部から高さ 0.5m (孔中心) に汲み上げ口を、水面から高さ 2m (孔中心) に排出口を設置し、実施工と同等の汲み上げおよび排出の流量は $3\text{m}^3/\text{min}$ とした。また、汲み上げおよび排出の総時間は 1500 秒間とし、総量としては引抜き孔内総量の半循環相当の 75m^3 とした。

解析条件として、粒子間距離は 0.1m、時間刻み 0.001s とし、ベントナイト水と掘削泥水の物性値はそれぞれ表-1、表-2 に示す。その際、ベントナイト水と削孔泥水の流体モデルとしては、ニュートン流体として扱う。物性値のひとつである動粘性係数に関して、ベントナイト水においては、ファンネル粘性 (24s) から算出した。削孔泥水においては、水の動粘性係数 1.004×10^{-6} を参照した。なお、本解析では引抜き孔の最深部で考慮される堆積土の除去および破碎は再現していない。

5. 解析結果

循環システムの始動から経過時間ごとの結果として、解析断面図 (円柱中心の断面図) を図-3 に示す。循環システムにより、削孔泥水は引抜き孔底部から汲み上げられ、引抜き孔上部から排出される。比較して密度の大きい削孔泥水が、徐々にベントナイト水の間に入り込むように混合していく挙動を示すことが確認された。半循環し終える段階 (1500 秒時点) での解析断面より、引抜き孔全体を通して、ベントナイト水と削孔泥水が程よく混合している状態になることが視覚的に確認された。

また現場検証結果との比較として定量的に評価するため、引抜き孔内を 3 分割し、その領域内での比重を算出する (図-4 参照)。現場検証結果では、循環開始から 1500 秒後には比重が 1.15 となり、その後も安定状態が続くことが確認されている。解析結果における 1500 秒時点での各箇所の比重に関して、上部は 1.17、中部は 1.21、下部は 1.14 となった。比重の算出結果から、特に上部と下部においては 1.15 付近で安定していくことが確認された。しかしながら、中部においては解析断面からも確認できるように削孔泥水の占める割合が大きくなることが分かる。この要因のひとつとして、本来現場ではベントナイト水を排出した際に、引抜き孔内に存在する掘削泥水の表層に関しては、ある程度混合されているが、解析上においては初期断面が完全に 2 層に分かれていることが挙げられる。このように、実現場の細部にわたる再現性に関して、検討の余地があると考ええる。

6. おわりに

本研究では、循環式攪拌工法におけるベントナイト水と削孔泥水の混合挙動に関して、粒子法に基づき可視的再現および数値シミュレーションを試み、現場検証結果と比較した。それにより本工法の循環システムにおける引抜き孔内の比重を十分に再現することができた。このことから、引抜き孔内の混合挙動を定量的に判断することができ、混合が不十分である箇所の特定制や最適な埋戻し材料の判定等、管理を適切に行うことが可能になる。

今後は実現場で適用を念頭に、より整合性を確認するため実現場で各深度の密度を確認し、解析結果との比較を行う。さらに、実現場の再現性を高くするために再現解析においてもベントナイト水の排出から実施する必要があると考える。また本研究ではある一つの物性値での再現解析であったため、今後は様々な物性値においても数値シミュレーションを行う必要がある。

参考文献

- 1) 越塚誠一：粒子法 (計算力学レクチャーシリーズ), 丸善, 2005.
- 2) W, G, Hoover : 粒子法による力学 -連続体シミュレーションへの展開-, 森北出版, 2008

表-1 ベントナイト水の解析物性値

流体モデル	ニュートン流体
密度 (kg/m^3)	1050
動粘性係数 (m^2/s)	1.302×10^{-6}

表-2 削孔泥水の解析物性値

流体モデル	ニュートン流体
密度 (kg/m^3)	1300
動粘性係数 (m^2/s)	1.004×10^{-6}

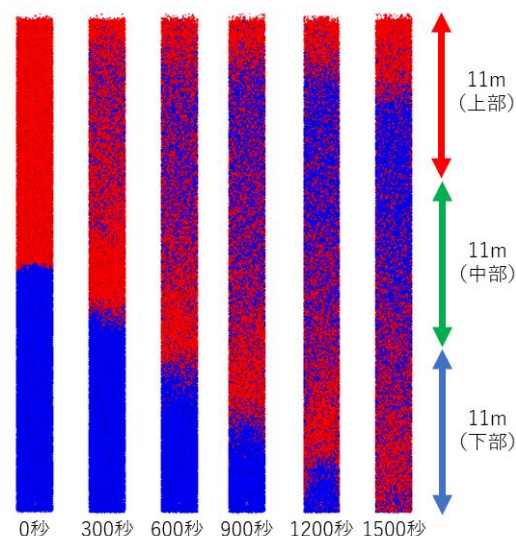


図-3 経過時間ごとの解析断面

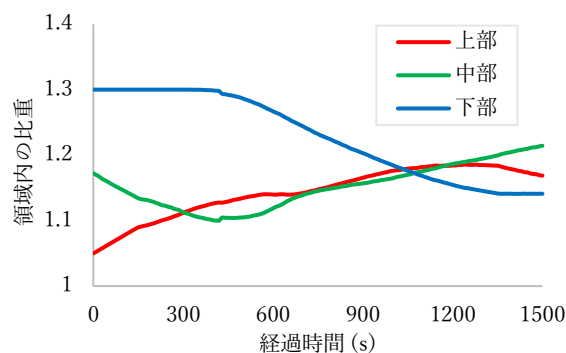


図-4 経過時間ごとの孔内比重の算出結果