

縁切引抜工法における既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤の緩みに関する 数値解析を用いた要因検討

NUMERICAL ANALYSIS AFFECTING LOOSENING OF SURROUNDING SOIL CAUSED BY REMOVAL AND BACKFILLING OF EXISTING PILES ON PILE EXTRACTION METHOD WITH SHAFT-SOIL SEPARATION

金田 一広^{*1}, 青木 雅路^{*2}, 森 利弘^{*3},
中井 正一^{*4}, 中井 照夫^{*5}, 須藤 友輔^{*6}

*Kazuhiro KANEDA, Masamichi AOKI, Toshihiro MORI,
Shoichi NAKAI, Teruo NAKAI and Yusuke SUDO*

In recent years, numerous buildings constructed during Japan's period of rapid economic growth have undergone reconstruction or redevelopment. Consequently, the removal of existing piles and the restoration of ground conditions to their original state have become increasingly required. However, several cases have been reported in which the disturbance of the ground caused by pile removal has resulted in a reduction of soil strength. To elucidate this mechanism, a series of numerical analyses were conducted using the Subloading t_b model. This decrease in mean effective stress is considered to be the primary factor contributing to the observed reduction of soil strength.

Keywords : Existing pile, Edge cutting and pulling method, removal method, Subloading t_b model, Soil-water coupled analysis, Numerical simulation

既存杭, 縁切引抜工法, 埋戻し, subloading t_b モデル, 水土連成, 数値解析

1. はじめに

近年高度経済成長期に建てられた建物の建替えや再開発が行われており今後も増加していくと考えられている。既存建物の杭を撤去して原状復帰することが条件になることも多い。ところが、この杭を撤去することによる地盤の乱れによって地盤の強度が下がる事例が報告されてきている。杭の代表的な撤去方法として大きく 2 つがあげられる。ケーシング縁切引抜工法とオールケーシング破碎撤去工法である。山本ら¹⁾は実際に杭の撤去(引抜き)前後で地盤の N 値や一軸圧縮試験を実施して乱れの調査をしている。一般的に縁切引抜工法の方が周辺地盤に乱れが生じ、ケーシングから 2m ほどの範囲で顕著である。 N 値換算で最大半分程度になる場合も示され、低減係数の提案がなされている。しかし、なぜ乱れが生じるかについては言及されていない。杭撤去後の地盤の挙動を合理的評価するためには、乱れが生

じるメカニズムを解明することが求められている。

杭の引抜きを実施する地盤は地下水位以下であることも多い。ケーシングを回転貫入すると同時にケーシング先端から掘削水を噴射しながら杭と地盤の縁を切って掘り抜くため水と土の連成問題となる。またケーシングを引き抜いた後は掘削水と現地盤が混合した泥水で満たされ、その密度は水より大きい。泥水圧と汚水の周辺地盤への浸透の過程を考慮した掘削孔の安定問題となる。さらに杭を引き抜くことによって流動化処理土に置換していくが、杭の引き抜く速度によっては、流動化処理土の充填までに引抜に伴う負圧がかかる可能性がある。他の要因が考えられるが、できるだけ現象を単純化して数値解析によって要因を分析することが本論文の目的である。

^{*1} 千葉工業大学工学部創造工学部 教授・工博

^{*2} (一社) 建築基礎・地盤技術高度化推進協議会 修士(工学)

^{*3} (株) 熊谷組技術研究所 修士(工学)

^{*4} 千葉大学 名誉教授・工博

^{*5} (株) 地域地盤環境研究所名古屋事務所 技術顧問・工博

^{*6} 千葉工業大学創造工学研究科都市環境工学専攻 大学院生・学士(工学)

Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology, Dr.Eng.

Alliance for advanced design and construction of building foundations, M.Eng. Technical Research & Development Institute, Kumagaigumi Co., Ltd., M.Eng. Professor Emeritus, Chiba University, Dr.Eng.

Technical Adviser, Nagoya Office, Geo-Research Institute, Dr.Eng.

Grad. Student, Major in Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Creative Engineering, Chiba Institute of Technology, B.Eng.

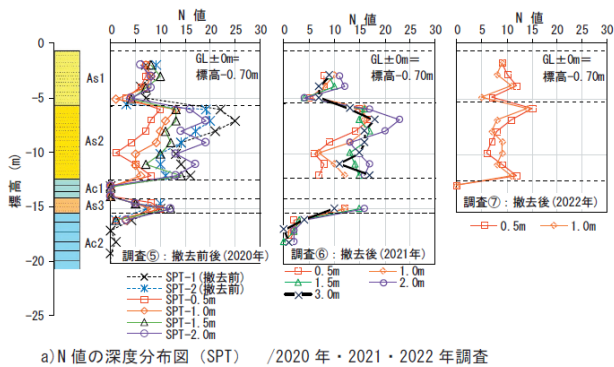


図1 N 値の深度分布（調査結果から）

既存杭に関する論文として田村ら²⁾⁻⁵⁾は遠心模型実験によって地中に残された既存杭の影響について検討しており、宮田⁶⁾は残置された既存杭が新設杭の鉛直支持力に及ぼす影響について数値解析で検討されている。既存杭の撤去に伴う地盤挙動の数値解析の例⁷⁾⁻⁸⁾として、川原らは、杭の引抜き孔に充填材として流動化処理土を用いその強度を変えた3次元弾塑性FEM解析を実施しており、引抜き孔が空洞の場合大きな地表面沈下と水平変位が生じること、充填材の強度が高いほど沈下・変位量が小さくなる傾向があることを示している。ただし、掘削による周辺地盤の乱れの影響には、言及していない。

そこで、本論文では水と土の2相系の解析⁹⁾を実施し、掘削時さらに杭の引抜き時の孔壁の安定を検討するため土の構成モデルとしてSubloading t_{ij} モデル⁹⁾を用いることとした。モールクーロンモデル（以下MCモデル）との違いを示しながら杭の引抜きに伴う周辺地盤の乱れについて検討した。なお本研究では山本ら¹⁾による杭引抜き後の調査報告を参考にして既存杭撤去後の周辺地盤の乱れ（ N 値の低下）のメカニズムの解明を行った。

2. 既往の調査の概要

山本ら¹⁾は4つのサイトで杭の引抜き前後で N 値を調べている。本研究ではその中の1つのサイトである稲敷市のモデルを用いて検討する。ここでは稲敷市での調査結果を簡単に示す。詳細は参考文献¹⁾に詳しい。縁切引抜き工法での現場で、2020年に既存杭の撤去前・撤去後の地盤調査を行っている^{10)~13)}。図1に N 値の深度分布を示す。既存杭はPHC杭で杭径500mm、杭長12m、ケーシング径は内径690mm、外形780mmで、流動化処理土を自然落下させ埋め戻しをしている。目標強度は100kN/m²（受入検査346kN/m²）としている。左の図の凡例でSPT-0.5mなどの距離はケーシングからの距離を示している。As2層に着目すると杭撤去後はケーシングからの0.5m付近は N 値が10近く低下し、2mまで離れると低下がみられなくなっている。また2022年では距離による N 値の低下傾向に違いは見られなかった。

3. 数値解析による検討

(1) 解析手法

本研究では水土連成有限要素解析を実施する。土骨格と間隙水圧で定式化し、要素中心に間隙水圧を設けるクリスチャン流とする。詳細

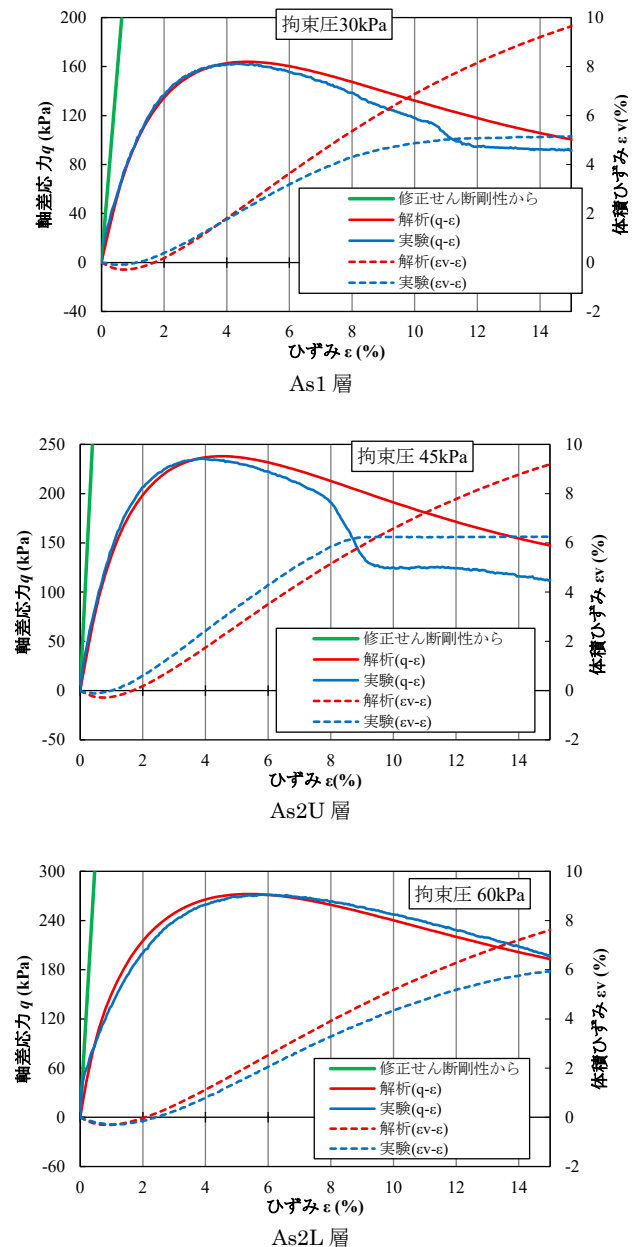


図2 圧密排水三軸圧縮試験結果の同定

は参考文献¹⁴⁾を参照されたい。土骨格の構成式にはSubloading t_{ij} モデルを用いる。これは中井ら⁹⁾によって開発された土の弾塑性構成モデルである。Subloading t_{ij} モデルについてここでは詳しくは述べないが、簡単に特徴を述べておく。Subloading t_{ij} モデルは、Cam-clay model 型のパラメータにいくつかの材料パラメータを追加するだけで、Cam-clay model では説明できない地盤材料の力学特性を説明可能にした構成モデルである。次の3点が主な特徴である。① t_{ij} の概念を用いて、地盤材料の変形・強度特性に及ぼす中間主応力の影響を考慮している点。②下負荷面(Subloading surface)の概念を用いて、地盤材料の変形・強度特性に及ぼす間隙比や拘束応力の影響を考慮している点。③降伏関数やひずみ硬化パラメータを増やすことなく、塑性ひずみ増分方向に及ぼす応力増分方向の影響を考慮している点。中間主応力や土の密度の違いなど考慮できるモデルである。本研究では

表 1 Subloading t_{ij} モデルの各パラメータ

パラメータ	As1	As2U	As2L
圧縮指数 λ	0.10	0.10	0.10
膨潤指数 κ	0.010	0.010	0.010
主応力比 R_s	3.0	3.0	3.0
N ($p=98\text{kPa}$ の時の間隙比)	1.30	1.24	1.28
ポアソン比 ν	0.2	0.2	0.2
β	1.5	1.5	1.5
初期間隙比 e_0	1.02	0.94	0.98
a	420	520	900
k_a	10	12	35

このような解析ができる t_{ij} 研究会所有の FEM t_{ij} -2D プログラムを使って軸対称条件下で解析した。

(2) パラメータの同定

図 1 の地盤構成から乱れが発生している部分は As1 層と As2 層であることが分かる。そこで Subloading t_{ij} モデルはこの 2 つの砂層で設定することとした。As1 層では 1 か所(2.0~4.0m)、As2 層は上部(5.50~7.55m)を As2U 層、下部(9.0~11.0m)を As2L として 2 か所でサンプリングして圧密排水三軸圧縮試験を実施した。図 2 にそれぞれに対して Subloading t_{ij} モデルでパラメータを同定した結果を同時に示す。実線は軸差応力($q=\sigma_1-\sigma_3$)~軸ひずみ ε 関係を、破線は体積ひずみ ε_v ~軸ひずみ ε 関係を示し、青線は実験結果、赤線は解析結果を示す。実験での拘束圧はそれぞれ As1 層、As2U 層および As2L 層では 30, 45 および 60kPa とした。これはおおそ現地の拘束圧に相当する。おおそ軸差応力~軸ひずみ関係を再現できており、ピークを迎える前に体積圧縮から膨張へ遷移する特徴を表現できている。他 Ac1, Ac2 および As3 層に関してはサンプリング後、非圧密非排水三軸試験から強度定数を求めた。表 1 には Subloading t_{ij} モデルのパラメータを、表 2 にはその他室内実験から得られた変形、強度定数を示す。Subloading t_{ij} モデルを用いた解析で Ac1 層、As3 層、Ac2 層は MC モデルの表 2 の値を用いた。As1 層、As2U 層および As2L 層も示しているが比較のため解析する MC モデルの定数となる。せん断剛性は別途実施している PS 検層結果に基づき式(1)に示す波動弾性論から得られた値(せん断剛性と表示)と PS 検層からのせん断剛性は初期剛性を与えるため、解析ではこの値を 1/3 として与えた(修正せん断剛性と表示)。

$$G = \rho V_s^2 \quad (1)$$

ここで G (kN/m²)はせん断剛性、 ρ (g/cm³)は密度、 V_s (m/s)は S 波速度である。これは PS 検層では地盤の初期剛性を表しているためひずみ依存を考慮して剛性を低下させた。なお、比較のために As1, As2 層に関しても強度を示している。表 1 に示すポアソン比は Subloading t_{ij} モデルで用いているもので、ひずみ硬化型弾塑性モデルの弾性成分のポアソン比を意味する⁹⁾。一方、表 2 に示すポアソン比は弾完全塑性モデルである MC モデルで解析するとき用いるものであるが、長期安定を考慮して 0.33 と設定している。

表 2 地盤調査から設定したパラメータ群

層名	層厚(m)	N値	Vs(m/s)	湿潤密度 (g/cm ³)	弾性定数			強度定数	
					せん断剛性 (kN/m ²)	修正せん断 剛性(kN/m ²)	ポアソ ン比	c (kN/m ²)	ϕ (°)
As1	6	8	140	1.78	34888	11629	0.33	13.7	41.6
As2U	3.5	20	200	1.8	72000	24000	0.33	11.3	42.8
As2L	3	15	200	1.83	73200	24400	0.33	29.1	37.5
Ac1	2	1	140	1.63	31948	10649	0.33	35.1	0.3
As3	1.5	10	150	1.65	37125	12375	0.33	21.6	35.1
Ac2	4	1	140	1.63	31948	10649	0.33	35.1	0.3

	密度 g/cm ³
流動化処理土	1.54
泥土	1.3

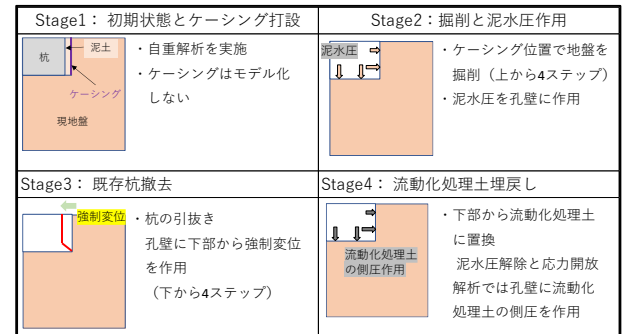


図 3 縁切引抜工法を模擬した解析手順の概要

引き上げ

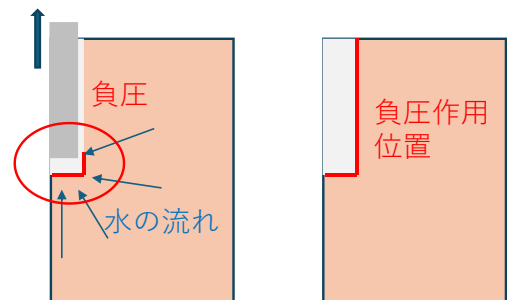


図 4 杭引き抜き時の状態の概念図と負圧作用位置

なお図 2 で緑線(弾性定数から)で示しているものは参考のために表 2 で与えられている修正せん断剛性の挙動である。流動化処理土、泥土の諸元も示す。なお透水係数は現地計測がなかったため、典型的な値として粘性土地盤(Ac1, Ac2)は $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 、砂地盤(As1, As2U, As2L, As3)は $1.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ とした。既存杭が撤去される周辺は砂地盤であり、砂の透水係数に地盤挙動が影響すると思われる。しかし解析では本論では示していないが、過剰水圧の消散など確認すると砂の一般的な透水係数の範囲内では解析結果にほとんど影響がなかった。

(3) 解析の手順

図 3 に縁切引抜工法の解析の概念図を示す。はじめに Stage1 では $K=0.5$ と仮定して地盤の初期応力解析を実施する。既存杭の撤去の解析であるが、既存杭はモデル化しない。Stage2 として既存杭の杭

表 3 解析条件

	解析上の時間
Stage2:掘削と泥水作用	地表面から3mずつ4ステップ
	それぞれ 10分 合計40分
	その後24時間放置
Stage3：杭撤去	底面から3mずつ4ステップ
Stage4：流動化処理土埋戻し	それぞれ 30分 合計2時間
	その後30日放置

討項目をあげる。また、モールクーロンモデルでも実施し Subloading t_{ij} モデルとの違いを述べる。

① 掘削水を噴射してケーシングで掘削する過程 (Stage2)

円筒に掘削して泥土圧を作用させるが、次の 2 つの考え方ができる。泥水の単位体積重量は $\gamma_{\text{泥水}}=13\text{kN/m}^3$ と設定しており、これを(a)単位面積あたりの水圧として作用させる場合(水の場合は $\gamma_w=9.8\text{kN/m}^3$ に相当)と、固体として考え、孔壁壁面に有効荷重 ($\gamma'_{\text{泥水}} = \gamma_{\text{泥水}} - \gamma_w$)として作用させる場合である。これらの違いにより周辺地盤の乱れについて調べる。

(a) 水圧として作用させる解析条件 (水圧条件)

図 3 の Stage2 で掘削時に泥水を作用させ、軸対称で掘削した孔壁に泥水の単位体積重量 $\gamma_{\text{泥水}}=13\text{kN/m}^3$ として、 $\gamma_{\text{泥水}} \times$ 深度の泥水圧を作用させる。この場合水中掘削で、地下水を泥水に置換するため孔壁には水圧との差分の $\gamma_{\text{差分}}=13.0-9.8=3.2\text{ kN/m}^3$ を孔壁境界に水圧として作用させる。

(b) 有効荷重として孔壁に作用させる場合の解析条件 (荷重条件)

(a)と同様であるが、 $\gamma_{\text{差分}}=3.2\text{ kN/m}^3$ を孔壁境界に節点荷重として作用させる。

② 杭を引き抜く過程

図 4 で示しているように孔壁内のどの程度の範囲で、どの程度の強制変位を作用させるかが重要となる。杭を引き抜くことによって坑内に若干の負圧 (圧力低下) が生じると仮定しているため、本研究では孔壁に負の圧力を作用させてその影響範囲を調べる。また強制変位量に関しては 3 つのケース(最大強制変位量 20mm, 50mm および 70mm)を仮定して調べることにした。また地盤が乱れているかどうかについては、その時点での要素の間隙比、応力状態、状態変数から圧密排水三軸圧縮試験を要素試験レベルで解析を実施してその軸差応力 $q(q=\sigma_1 - \sigma_3)$ を比較することとする。なおここでは図 5 の右の図に示す地表から 4m (G.L. -4m) および 8m (G.L. -8m) にある黒線に示す位置(以下 4m, 8m と表記)で、孔壁からの距離における軸差応力を調べる。これは図 1 より撤去前と撤去後の N 値の差が比較的小さい(G.L.-4m)位置と大きい(G.L.-8m)位置を取り上げた。

4. Subloading t_{ij} モデルによる数値解析結果と考察

① 掘削水を噴射してケーシングで掘削する過程(Stage2)

表 4 に掘削後 24 時間経過した後の、深度 4m および 8m の位置でのケーシングから解析要素までの距離におけるそれぞれの深度の平均有効応力 σ'_m および間隙比 e を示す。この間隙比 e と平均有効応力 σ'_m を拘束圧に持つ要素の圧密排水三軸圧縮試験をシミュレートし、軸ひずみ～軸差応力関係図を求めた。例として図 6 に水圧条件で Initial と最終(Final) の① (ケーシング端から 0.255～

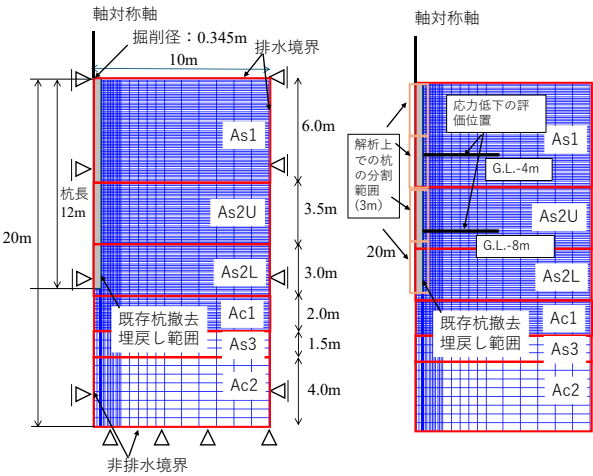


図 5 解析メッシュ

径より大きいケーシングを削孔水とともに打設して既存杭と地盤の摩擦をきる。削孔水と現地盤が混合した泥水で満たされるため、解析では泥土でケーシング内の地盤が置き換わると想定される。ケーシング孔に相当する地盤を掘削し、泥水圧を作用させ、実施工と同等に 24 時間放置する。ケーシング径は現場と同様に直径 0.69m とする。Stage3 として既存杭の引き抜き段階を次のようにモデル化する。ケーシングを引き抜いた後は、杭が原地盤と縁が切れ泥水が周辺地盤に満たされている。その状態で既存杭をおおよそ 0.1m/min 程度のスピードで抜いていく。実際の施工では引き抜くと同時に流動化処理土を地表面から投入して埋めていくが引き抜くスピードが速いため周辺地盤が若干坑内に引き込まれ、その後流動化処理土が充填されると想像される。引き抜くスピードが遅く、流動化処理土の充填が瞬時に可能であれば坑内への変形はほとんどないと考えられる。この坑内の引き込みは図 4 に示すように引き抜くスピードが速い場合坑内に負圧 (圧力低下) が生じると考えられる。そのため、周辺地盤の地下水が坑内に流入する。しかし、本解析は水土連成解析を実施しているが、水の部分は間隙水圧としてモデル化しているため水の変位の解析はできない。そこで水の変位と土骨格の変位が等しいと仮定して、土骨格に強制変位を作用することとする。Stage4 では強制変位を与えた後に境界を応力境界に変更し、その後孔壁には流動化処理土が充填されることを想定して、流動化処理土の側圧を荷重として孔壁に作用させる。図 5 には軸対称条件での解析メッシュを示す。境界条件として底面は固定条件とし、側面は r 方向(半径方向の境界)固定としている。地下水位は地表面に設定し、地表面と右側面は排水境界、底面と軸対称軸は非排水境界としている。孔壁の掘削や強制変位は施工手順を考慮して図 5 に示すように 4 つの深度に分けて実施する。杭長は 12m であるため 3m ずつ分割して解析を行っている。Stage2 の掘削過程では地表面から順に掘削を行い、Stage3,4 の強制変位、流動化処理土埋戻しは杭先端部分から地表面へ行う。表 3 には各段階での時間を整理して示す。

(4) 解析ケース

本研究では縁切引抜工法で地盤が乱れる過程を次の 2 つに分けて検討する。すなわち、①掘削水を噴射してケーシングで掘削する過程 (Stage2)、②杭を引き抜く過程(Stage3)、である。それぞれに関し検

表 4 平均有効応力と間隙比

水圧条件					
解析条件：(a)水圧条件		深度 4.0m		深度 8.0m	
	ケーシング端からの要素両端距離(m)	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e
Initial		20.1	1.020	43.4	0.940
Final ①	0.255~0.355	14.5	1.024	32.2	0.943
Final ②	0.455~0.555	15.1	1.023	33.6	0.943
Final ③	0.955~1.005	15.9	1.023	35.8	0.942
Final ④	1.155~1.655	16.4	1.022	36.9	0.942
Final ⑤	1.655~2.155	17.0	1.022	38.0	0.941

荷重条件					
解析条件：(b)荷重条件		深度 4.0m		深度 8.0m	
	ケーシング端からの要素両端距離(m)	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e
Initial		20.1	1.020	43.4	0.940
Final ①	0.255~0.355	18.2	1.021	40.8	0.941
Final ②	0.455~0.555	19.6	1.020	42.3	0.940
Final ③	0.955~1.005	20.2	1.02	43.1	0.940
Final ④	1.155~1.655	20.3	1.02	43.3	0.940
Final ⑤	1.655~2.155	20.3	1.02	43.4	0.940

0.355m) の要素の挙動を示す。図 7 に図 6 のように解析したそれぞれの結果からケーシングから解析の要素中心までの距離と軸差応力比(q/q_0 , q_0 :掘削前の最大軸差応力、 q :最終時の最大軸差応力)を示す。荷重として与えたものは深度に関わらずほぼ掘削前と同等であった。水圧として与えたものは、泥水圧が作用するため間隙が若干大きくなるものの、軸差応力比を見るとわずかに低下しているだけである。図 8 には水圧を与えた場合の掘削後の間隙比 e の分布を示す。一般的に膨張などで間隙比が増加すると強度低下が見られるが、解析結果では孔壁周辺から若干の間隙比の増加しか見られない。以上から Stage2 の過程で図 1 にみられるような杭引抜き後の N 値の大幅な低下は生じないと考えられる。

② 杭を引き抜く過程

まず、(a)の水圧を作用させた場合について示す。孔壁内部のどの領域まで強制変位を作用させるかについて、Stage2 の掘削過程終了時に図 4 に示すように本来は下部から負圧が作用していくと想定されるが、孔壁側面全体に -30kPa の負圧を 10 秒、30 秒および 60 秒作用させたときの状態を調べる。図 9 に負圧の変化割合をケーシング端からの距離～深度関係で示す。ここで凡例にも示している 90%~100%などの変化割合は、 -30kPa を孔壁に作用させたときに 90%~100%、つまり -27kPa ~ -30kPa の負圧が作用していることを示す。白地部分は 0%を示している。負圧の作用時間が長くなればなるほど領域が広がっていくことが分かる。なお、負圧を -10kPa や -50kPa と変化させて確かめたが、図 9 の割合の領域はほとんど変化がなかった。ここで作用時間 30 秒の分布に着目する。深度が深くなればなるほど領域が広がる。この領域を坑内への強制変位を与える領域と考える。各深度において領域の範囲も加味して次式のように強制変位の割合を決定した。

$$a_z = \sum_r b_{rz} \times s \quad (2)$$

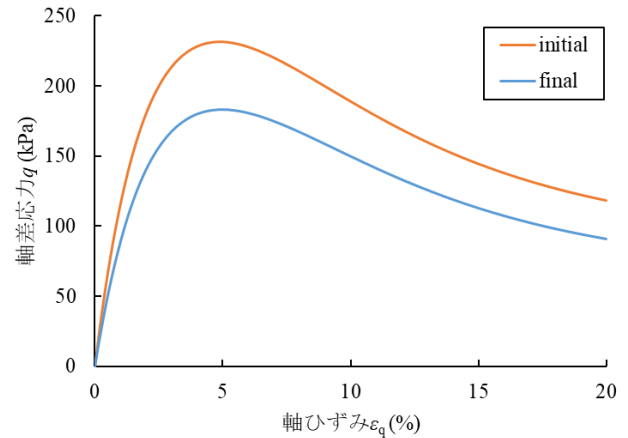


図 6 軸ひずみ～軸差応力関係図

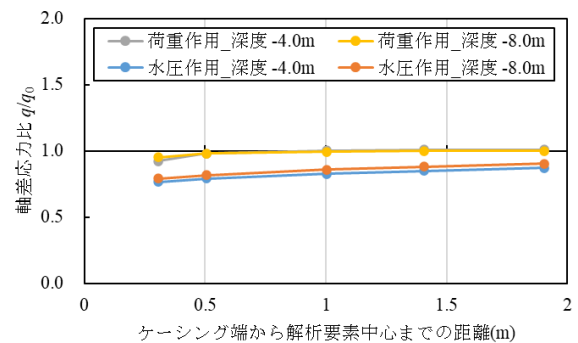


図 7 軸差応力比とケーシングからの距離の関係

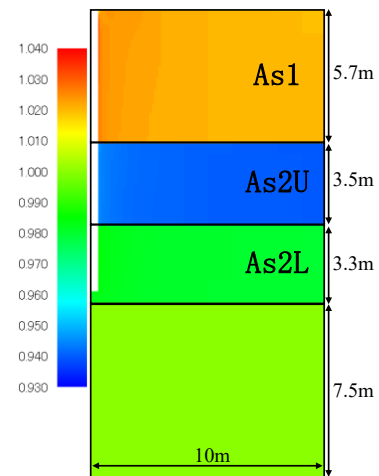


図 8 間隙比の分布

$$a_{\max} = [(a_z), z = 0 \sim 12m]_{\max} \quad (3)$$

$$a_{rz} = \frac{a_z}{a_{\max}} \times b_{rz} \quad (4)$$

ここで b_{rz} は深度 $z(\text{m})$ における孔壁から $r(\text{m})$ の位置の図 9 に相当する負圧作用の変化割合、 $s(\text{m})$ は要素間距離 (ここではメッシュ間隔が一定なので一定) とする。式(2)の a_z はある深度 $z(\text{m})$ における孔壁から $r(\text{m})$ までの $b_{rz} \times s$ の総和である。式(3)の $a_{\max}$ は a_z の $z=0$ から 12m までの最大値とする。式(4)に示す a_{rz} は深度 $z(\text{m})$ における孔壁から

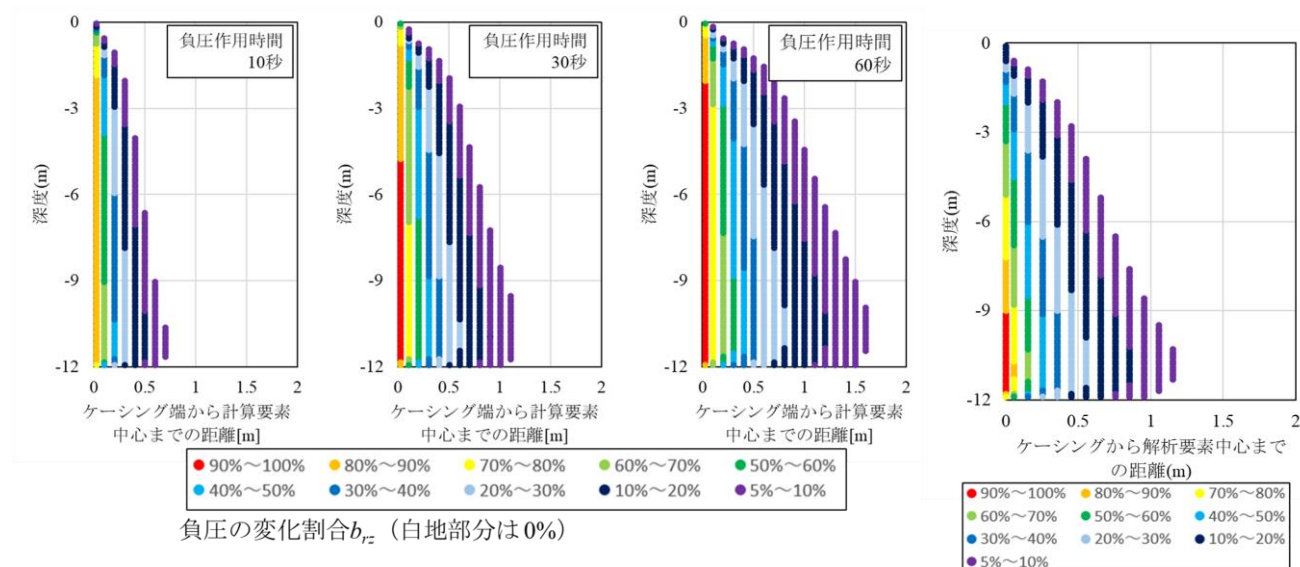


図 9 負圧の影響範囲

図 10 強制変位を作用させる範囲

表 5 平均有効応力と間隙比

深度 4m		強制変位量-20mm		強制変位量-50mm		強制変位量-70mm	
深度 -4.0m	ケーシング端からの 要素両端距離(m)	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e
Initial	-	20.1	1.020	20.1	1.020	20.1	1.020
Final ○	0.255~0.355	7.6	1.030	2.8	1.067	3.1	1.084
Final ○	0.455~0.555	13.2	1.024	5.1	1.035	3.2	1.042
Final ○	0.955~1.005	18.9	1.020	18.5	1.020	18.2	1.020
Final ○	1.155~1.655	19.9	1.019	19.5	1.019	19.3	1.019
Final ○	1.655~2.155	20.6	1.019	20.1	1.019	20.1	1.019

深度 8m		強制変位量-20mm		強制変位量-50mm		強制変位量-70mm	
深度 -8.0m	ケーシング端からの 要素両端距離(m)	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e
Initial	-	43.4	0.940	43.4	0.940	43.4	0.940
Final ○	0.255~0.355	15.0	0.960	14.6	1.001	16.1	1.029
Final ○	0.455~0.555	19.2	0.949	13.0	0.968	13.2	0.983
Final ○	0.955~1.005	37.1	0.941	31.7	0.942	28.7	0.943
Final ○	1.155~1.655	40.8	0.940	38.3	0.941	36.4	0.941
Final ○	1.655~2.155	43.1	0.940	42.4	0.940	41.8	0.940

$r(m)$ の強制変位量の変化割合とする。図 10 にその分布を示す。この変化割合で孔壁内部に最大強制変位量として 20mm, 50mm および 70mm 作用させる。作用時間として、1 区間（全体で 4 区間）で、強制変位部分で 6 分、流動化処理土に置換する 24 分としている。これはおよそ 1 本の杭の引抜きを 2 時間で実施することを想定している。その後、Stage4 のシミュレーションを実施した。なお、水圧条件では Stage2 の水圧が作用しているため、この水圧作用を解除し、埋め戻す流動化処理土はメッシュの追加は行わず、流動化処理土の重量を $\gamma_{\text{流動化}}=15\text{kN/m}^3$ として流体に近い状態 $K_0=1$ と仮定し深度に応じて孔壁に荷重として作用させた。なお、流動化処理土は固化する前は流体に近いと考え側圧 $K_0=1$ とした。表 5 には強制変位量 20mm, 50mm および 70mm のケーシングから解析要素までの距離における Stage4 の最終時のそれぞれの深度の平均有効応力 σ'_m および間隙比 e を示す。次に図 7 を求めた方法と同等な解析を実施し、図 11, 12 に深度 4m および 8m の位置でのケーシングから解析の要素中心までの距離と軸差応力比 q/q_0 を示す。図 11 の深度 4m に関して、ケーシング端から 0.5m では軸差応力比 q/q_0 が 0.5 以下となるが、1.0m 地点以上

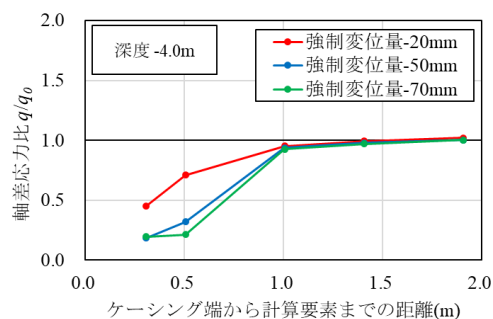


図 11 軸差応力比とケーシングからの距離の関係（深度 4m）

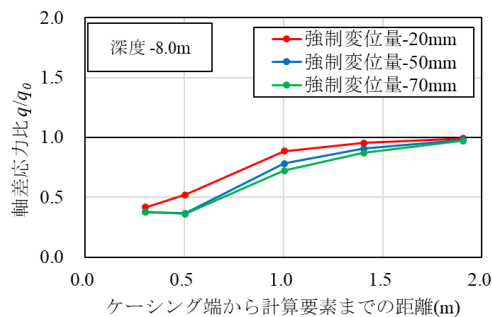


図 12 軸差応力比とケーシングからの距離の関係（深度 8m）

になるとほとんど低下していない。図 12 の深度 8m に関しては、ケーシング端から 1.0m 地点でも低下がみられ、強制変位量が大きくなるほど大きくなっている。

一方、(b)の泥水圧を有効応力として孔壁に作用させた場合について次に示す。図 13 は同様に求めた強制変位を与える変化割合（図 10 に相当）を示す。ほとんど図 10 と差異はなかった。Stage4 ではすでに泥水として荷重が作用しているため、流動化処理土と泥水の重量の差分として $\gamma_{\text{差分}}=2\text{kN/m}^3$ を節点荷重として作用させた。表 6 に強制変位量 20mm, 50mm および 70mm のケーシングから解析要素までの距離におけるそれぞれの深度の平均有効応力 σ'_m および間隙比 e を示す。図 14, 15 に深度 4m および 8m の位置でのケーシングから

表 6 平均有効応力と間隙比

深度 4m							
		強制変位量 20mm		強制変位量 50mm		強制変位量 70mm	
深度	ケーシング端からの要素両端距離(m)	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e
Initial	-	20.1	1.020	20.1	1.020	20.1	1.020
Final ○	0.255~0.355	7.7	1.030	3.7	1.058	3.1	1.077
Final ⊙	0.455~0.555	12.9	1.024	6.4	1.036	3.7	1.049
Final ⊖	0.955~1.005	19.0	1.020	18.5	1.020	17.6	1.020
Final ⊕	1.155~1.655	19.9	1.019	20.2	1.019	19.9	1.019
Final ⊗	1.655~2.155	20.6	1.019	21.0	1.019	21.1	1.019

深度 8m							
		強制変位量 20mm		強制変位量 50mm		強制変位量 70mm	
深度	ケーシング端からの要素両端距離(m)	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e	σ'_m (kPa)	e
Initial	-	43.4	0.940	43.4	0.940	43.4	0.940
Final ○	0.255~0.355	14.9	0.961	17.1	0.999	18.9	1.023
Final ⊙	0.455~0.555	18.4	0.950	12.3	0.974	11.4	0.989
Final ⊖	0.955~1.005	37.3	0.941	32.6	0.942	29.8	0.943
Final ⊕	1.155~1.655	40.8	0.940	38.7	0.941	37.1	0.941
Final ⊗	1.655~2.155	43.1	0.940	42.3	0.940	41.7	0.940

解析の要素中心までの距離と軸差応力比 q/q_0 を示す。(a)と同様に深度 4m に関してはケーシング位置から 1.0m 以上離れたと軸差応力 q/q_0 の低下が見られず、深度 8m に関しては低下が見られる結果となった。(a)の水圧条件、(b)の荷重条件ともほとんど変わらず、強制変位量が大きいほど軸差応力比が低下することが分かった。図 16 には強制変位量が 50mm の場合の、(a)水圧条件、(b)荷重条件の最終時の平均有効応力の分布図を示す。孔壁壁面には図に赤で囲ってある部分で大きな平均有効応力が発生し、その外側は逆に平均有効応力が低下している。これは軸対称条件で孔壁内部の方向に変位を与えることによって孔壁壁面は接線方向の応力が高くなるいわゆる「アーチ効果」が生じているためであり、応力再配分によって周辺地盤の有効応力の低下が生じていると考えられる。図 11、12、14 および 15 の軸差応力の低下は表 5 および 6 から分かるように平均有効応力の低下によって生じている。この両者の結果と図 1 の N 値を見比べると孔壁から 1m 離れると、深度 4m に比べて 8m は N 値の低下が半分程度になっており、解析結果も同様である。なお、図 16 で地表面付近では平均有効応力の増加がみられないが、これは図 13 の強制変位量が地表面になるほど小さくなる影響である。また、平均有効応力が孔壁側面ではなく若干孔壁から内部に入ったところで大きくなっている。これは孔壁側面の節点およびその内側の節点に強制変位を与える量のバランスによって要素に生じる応力の影響であると考えている。

以上の解析から杭撤去による周辺地盤の乱れのメカニズムについて次のように考えられる。ケーシング掘削によって坑内が泥水によって充填されるが、その影響は限定的である。既存杭をある程度の速さで撤去することによって孔壁内に地盤が引き込まれる作用によっていわゆる「アーチ効果」が生じ、その影響でその外側の地盤の平均有効応力の低下が生じる。この有効応力の低下によって軸差応力の低下が引き起こされ N 値の低下が生じていると考えられる。

なお、強制変位量が軸差応力比の低下に寄与しており、実際、強制変位量がどのくらいかは重要であるが実測することも困難である。また今回の検討では負圧を作用させる時間を 30 秒とし強制変位を与える領域を定めている。強制変位量や強制変位を与える領域についてさらに検討する必要もあると考えている。

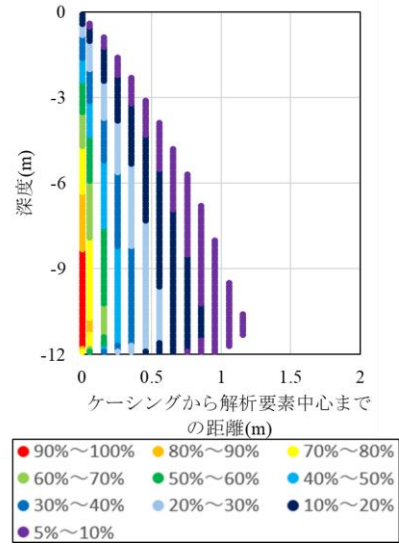


図 13 強制変位を作用させる範囲

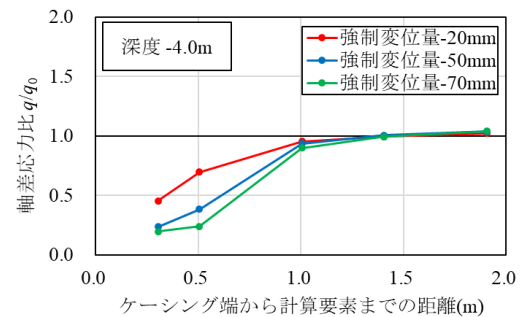


図 14 軸差応力比とケーシングからの距離の関係（深度 4m）

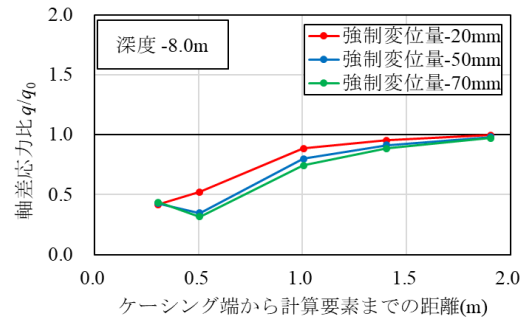
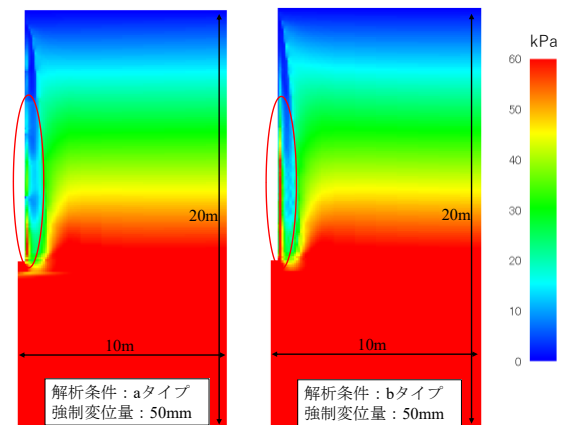


図 15 軸差応力比とケーシングからの距離の関係（深度 8m）



(a) 水圧条件 (b) 荷重条件

図 16 平均有効応力のコンター図

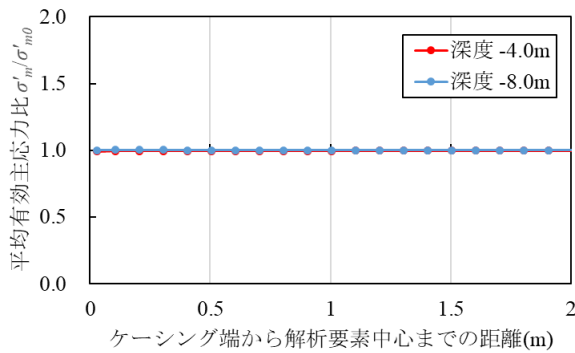


図 17 平均有効応力とケーシングからの距離の関係

5. モールクーロンモデル (MC モデル) による数値解析結果

本章では、土の構成式として全層を、モールクーロンモデルを用いた場合の解析結果を示す。

(1) 解析条件

表 2 に示すパラメータを用い、解析メッシュも図 5 と同等である。弾性定数は修正せん断剛性を使用している。3.(4) で検討したようにここでは荷重条件について調べる。

(2) 解析結果と考察

図 17 に Stage2 の掘削終了時の深度 4m と 8m の位置での平均有効応力比 (σ'_m/σ'_{m0}) とケーシングからの距離の関係を示す。全く平均有効応力比 (σ'_m/σ'_{m0}) の低下が見られない。Stage2 の掘削と泥水圧作用の過程では Subloading t_{ij} モデルと同様に周辺地盤への乱れは生じていない。

次に図 18 に図 10, 図 13 と同様に強制変位を与える変化割合を示す。Subloading t_{ij} モデルに比べて範囲が広がっている。図 19 に強制変位量 1mm の場合の深度 4m および 8m における Stage4 終了時の平均有効応力比 (σ'_m/σ'_{m0}) とケーシングからの距離の関係を、図 20 に平均有効応力 (σ'_m) のコンター図を示す。強制変位を与えた部分ではいわゆる「アーチ効果」による平均有効応力の増加がみられる。図 16 の Subloading t_{ij} モデルの結果は強制変位を作用させた範囲以外にも応力が低下しているが、モールクーロンモデルでは強制変位を与えた領域以外にはほとんど変化が生じない。また、ケーシング端から 1m を超えるとほとんど影響が生じない。モールクーロンモデルは破壊状態になるまでは弾性挙動をするため、破壊している領域以外は破壊による変形は小さくなるためと考えられる。なお解析で強制変位量を 1mm としているのはこれ以上大きな変位を与えると解析の収束が困難であったためである。

6. 結論

Subloading t_{ij} モデルを用いた水土 2 相系解析を実施して、縁切引抜工法における杭の引抜きに伴う周辺地盤の乱れのメカニズムについて検討した。

・掘削水噴射によるケーシング掘削時には泥水圧による影響が孔壁周辺地盤にはあるが、その影響はわずかで周辺地盤の強度を低下させるほどではない。

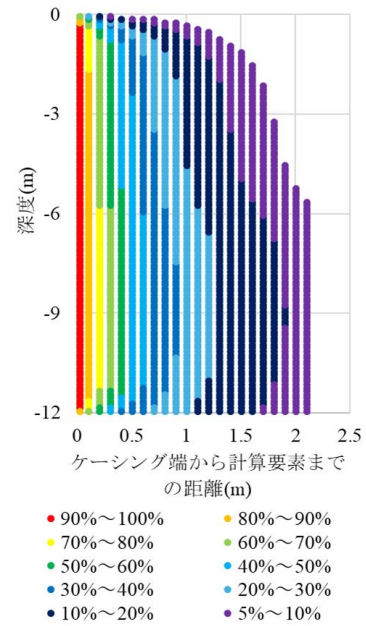


図 18 強制変位を作用させる範囲 (MC モデルの場合)

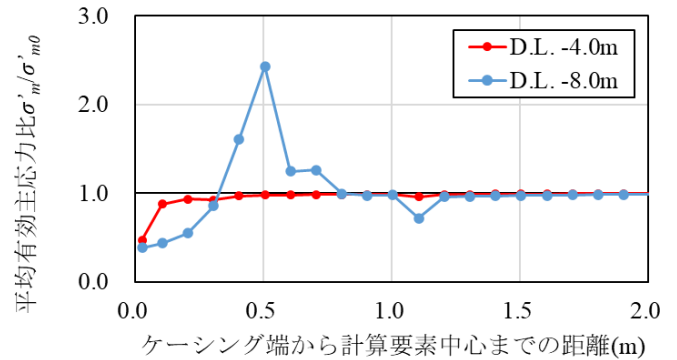


図 19 平均有効応力とケーシングからの距離の関係

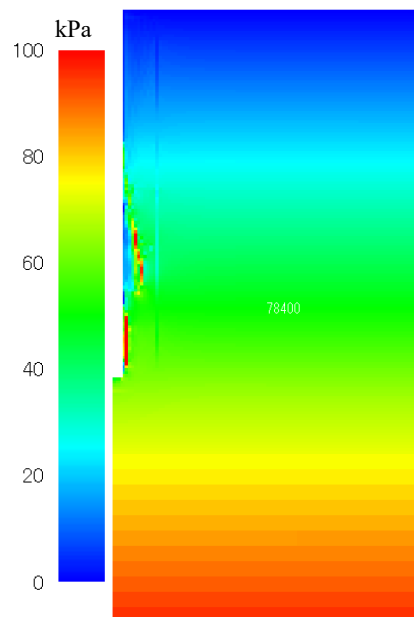


図 20 平均有効応力のコンター図

・早く杭を引き抜くときに、坑内に孔壁地盤が引き込まれることを模擬した解析を実施した結果、引き込まれた孔壁近傍はアーチ効果を發揮して平均有効応力は増加するが、その周辺は逆に低下することが分かった。この平均有効応力の低下が周辺地盤の強度が低下する要因であると考えられる。

・引抜き時に坑内の地盤に与える強制変位量や強制変位を与える領域についてはさらに検討する必要があると考えている。

なお、今回の検討は2次元の軸対称条件での解析であり、施工過程や対称性の乱れなどの影響もあるため3次元での解析を実施してさらに検討していく必要もあると考えている。

謝辞：本研究は科研費 23K26248 の助成を受けて実施しました。また、本解析は、FEM tij-2D プログラム (tij 地盤解析研究会) を用いました。ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) 山本裕司, 青木雅路, 森利弘, 沼本大輝, 本橋悠, 根岸利昌, 沼田俊輔, 二木幹夫: 既存杭撤去・埋戻しに伴う緩み等の調査および地盤調査, 日本建築学会技術報告集, 第31巻77号, 163-168, 2025.
DOI <https://doi.org/10.3130/aijt.31.163>
- 2) 坂本忠, 田村修次, 樋口康仁, 林康裕: 遠心模型実験における地中に残された既存杭が新規杭に及ぼす影響 ―その1 水平載荷の挙動―, 第42回地盤工学研究発表会, pp. 1327-1328, 2007.
- 3) 樋口康仁, 田村修次, 坂本忠, 林康裕, 山崎雅弘: 遠心模型実験における地中に残された既存杭が新規杭に及ぼす影響 ―その2 鉛直載荷時の挙動―, 第42回地盤工学研究発表会, pp. 1329-1330, 2007.
- 4) 樋口康仁, 足立圭佑, 田村修次, 林康裕, 山崎雅弘: 遠心実験における既存杭が新規杭の鉛直支持力に及ぼす影響, 第42回地盤工学研究発表会, pp. 1187-1188, 2008.
- 5) 田村修次, 樋口康仁, 足立圭佑, 林康裕, 山崎雅弘: 遠心実験における残置杭が新規杭の周面摩擦力と先端支持力に及ぼす影響, 第42回地盤工学研究発表会, pp. 1157-1158, 2009.
- 6) 宮田章: 地中に残置された既存杭が新設杭の鉛直支持力に及ぼす影響, 第39回地盤工学研究発表会, pp. 1501-1502, 2004.
- 7) 川原知也, 稲積真哉, 桑原秀一, 江口忠臣: 既存杭抜跡地盤の埋戻し処理と周辺地盤の沈下挙動に関する解析的検討, 第53回地盤工学研究発表会, pp. 867-868, 2018.
- 8) 川原知也, 桑原秀一, 稲積真哉, 江口忠臣: 既存杭引抜孔への埋戻し処理と周辺地盤への影響に関する解析的検討, 日本材料学会第13回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 405-408, 2018.
- 9) Nakai T. and Hinokio M.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils and Foundations, 44(2), 53-70, 2004.
- 10) 金田一広, 青木雅路, 新井寿昭, 沼田俊輔, 高橋順一, 二木幹夫: 既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響 (緩み) に関する研究 (その14), 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 577-578, 2023.
- 11) 青木雅路, 金田一広, 田口智也, 尻無濱昭三, 松江繁尚, 山本裕司: 既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響 (緩み) に関する研究 (その15), 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 579-580, 2023.
- 12) 金田一広, 青木雅路, 中井正一, 森利弘, 須藤友輔: 既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響 (緩み) に関する数値解析的研究 ―軸対称―, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 619-620, 2025.
- 13) 須藤友輔, 金田一広, 青木雅路, 中井正一, 森利弘: 既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響 (緩み) に関する数値解析的研究 ―3次元解析―, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 621-622, 2025.
- 14) 赤井浩一, 田村武: 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, 土木学会論文集, 第269号, pp. 95-104, 1978.

(2025年12月11日原稿受理, 2026年5月7日採用決定)