

## 拡底杭の引抜特性に関する遠心载荷試験—その3：FEMによる再現解析

拡底杭 引抜き抵抗 有限要素法

京都大学大学院 学生会員 ○Ben M. LEWIS  
 京都大学大学院 学生会員 Bonggab KIM  
 京都大学大学院 国際会員 澤村 康生  
 ジャパンパイル 正会員 藤江 雄大  
 ジャパンパイル 正会員 橋立 健司

### 1. はじめに

同名報告(その1)、(その2)では、遠心力50G場で実施した拡底杭の引抜き試験について示した。本報告(その3)では、3次元弾塑性有限要素法を用いた遠心载荷試験の再現解析について示す。

### 2. 解析の概要

本研究では、3次元弾塑性有限要素解析プログラムDBLEAVES<sup>1)</sup>を用いて遠心模型実験の再現解析を実施した。図-1に解析メッシュを示す。解析領域は遠心模型実験における土槽内部と同様とし、対称性を考慮して1/4断面とした。地盤の構成式には、subloading  $t_j$  model<sup>2)</sup>を用いた。表-1に本構成式における豊浦砂の材料定数を示す。杭は弾性Solid要素でモデル化し、弾性係数は $E = 2.0 \times 10^8$  kN/m<sup>2</sup>とした。杭と地盤の境界部分には、地盤の滑りと剥離を考慮するためにJoint要素を用いた。Joint要素の剛性とMohr-Coulombの破壊規準に関するパラメータは、モルタルと豊浦砂の一面せん断試験<sup>3)</sup>を参考に決定した(表-2)。ただし、 $V_{mc}$ (分離と閉合の変位の判断値)と $\sigma_t$ (引張強度)は直接決定することが困難であるため、パラメトリックスタディにより決定した。引抜き荷重は、杭頭に強制変位として与え、0.01 mm/stepで750 mmまで引き抜いた。

本研究では、特にCase-1：直杭とCase-3：拡底杭(拡底比2)の結果について示し、両者の引抜き抵抗力発現メカニズムについて考察する。

### 3. 実験結果と再現解析

図-2に遠心模型実験と数値解析における杭頭部の荷重変位関係を示す。ここで、 $\delta$ は引抜き変位、 $D$ は杭先端部の杭径(Case-1: 1000 mm, Case-3: 2000 mm)を表している。解析値はCase-1：直杭では実験値よりも小さいが、逆にCase-3：拡底杭では実験値より大きくなり、差異が確認できる。しかし、直杭において最大引抜き力を示した後に荷重が横ばいになる点、拡底杭においては変位の増大に伴って载荷終了時まで引抜き荷重が増加する点については、実験の傾向をとらえていると考えられる。

図-3に引抜き変位 $\delta/D = 0.1$ において杭に発生する軸力の分布を示す。図-2に示した荷重変位関係と同様、軸力の絶対値については実験と解析で相違が見られるが、

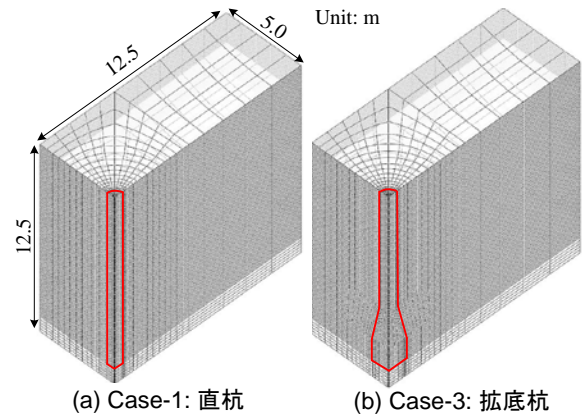


図-1 解析メッシュ

表-1 数値解析に用いた地盤のパラメータ

Principal stress ratio at critical state $R_{cs} = (\sigma_1 / \sigma_3)_{CS(comp.)}$	3.2
Compression index $\lambda$	0.07
Swelling index $\kappa$	0.0045
$N = e_{NC}$ at $p = 98$ kPa & $q = 0$ kPa	1.10
Poisson's ratio $\nu_e$	0.333
Influence of density and confining pressure $a$	60
Shape of yield surface $\beta$	2.0

表-2 Joint要素入力パラメータ

Shear stiffness $K_s$ [kN/m <sup>2</sup> /m]	$1.0 \times 10^5$
Normal stiffness $K_n$ [kN/m <sup>2</sup> /m]	$1.0 \times 10^5$
Cohesion $c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.0
Internal friction angle $\phi$ [deg]	28.0
Tension strength of axial direction $\sigma_t$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-0.5
Separation displacement criterion $v_{mc}$ [m]	$5.0 \times 10^{-6}$

実験の傾向をおおよそ再現していると考えられる。特に拡底杭において、杭先端から拡底部分にかけて急激に軸力が増加している点は実験をよくとられている。

4. 引抜き抵抗力の発現メカニズム：地盤内の応力分布  
以下では再現解析における地盤内部の応力分布を示し、引抜き抵抗力の発現メカニズムについて考察する。

図-4には、引抜き変位 $\delta/D = 0.1$ におけるせん断応力の分布を示す。直杭の場合は、地盤内部のせん断応力は

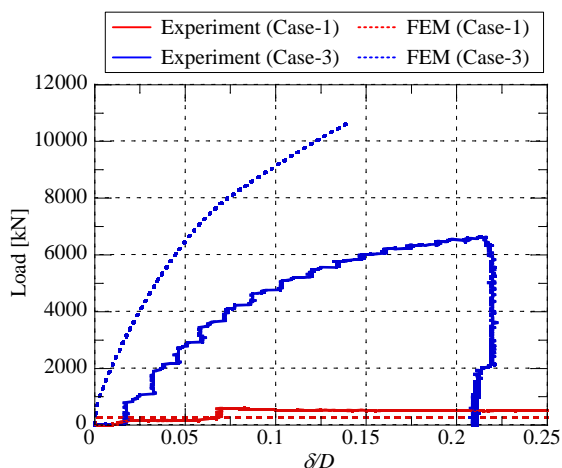


図-2 荷重-変位関係

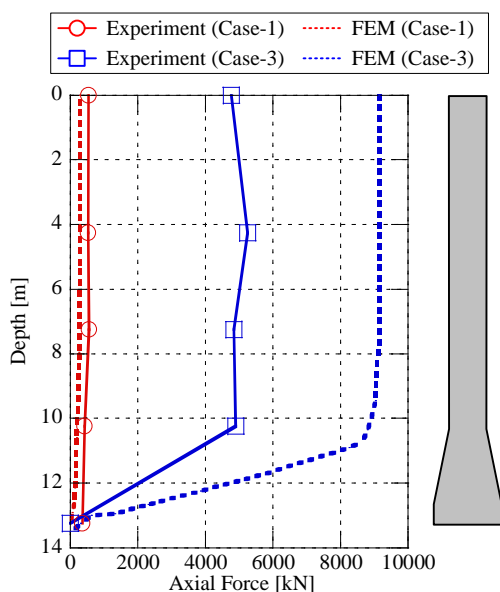


図-3  $\delta/D = 0.1$ における軸力分布

杭の近傍のみで変化し、さらに発生するせん断力も小さい。一方、拡底杭の場合では、拡底部の支圧抵抗により、拡底部を中心に右斜め上方にせん断力が増加している。

図-5には、引抜変位 $\delta D = 0.1$ における鉛直応力の増分を示す。ここで、鉛直応力の増分とは、地盤の初期応力からの増分量を示している。直杭の場合には、引抜抵抗は周面摩擦力のみに起因しているため、図-4に示すせん断応力と同様、応力変化は杭近傍のみで発生しており、地盤内の鉛直応力の増加量は小さい。一方、拡底杭の場合は、拡底部における支圧抵抗が大きいため、拡底部上部の鉛直応力が増加している。これにより、大きな引抜き抵抗を示したのだと考えられる。

### 5. まとめ

本研究では、3次元弾塑性有限要素解析により、遠心力50G場における引抜き試験の再現解析を実施した。本研究により得た知見は以下の通りである。

① 本研究で用いた解析手法により、直杭と拡底杭の定

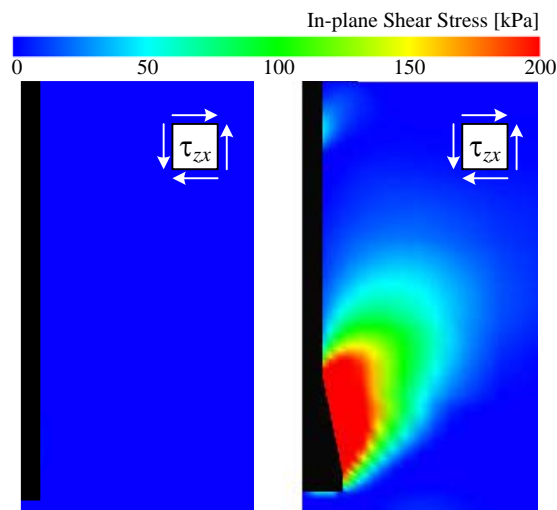


図-4  $\delta/D = 0.1$ におけるX-Z面のせん断応力分布

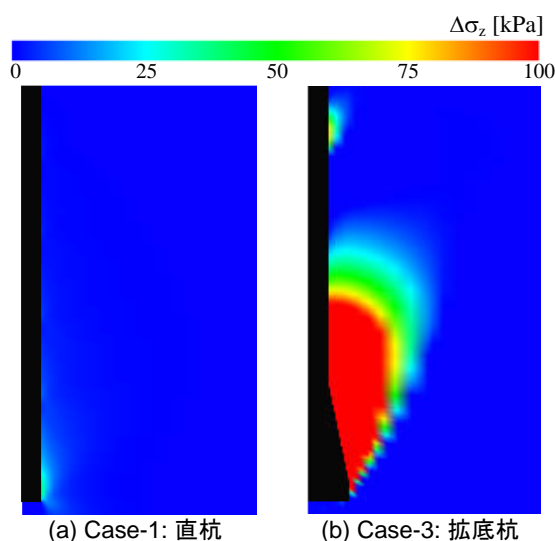


図-5  $\delta/D = 0.1$ におけるX-Z面の鉛直応力増加分布

性的な傾向を再現することが可能である。今後はJoint要素のパラメータなどを再考し、実験の再現性を高める必要がある。

- ② 直杭の引抜き抵抗は周面摩擦力のみに起因しているため、杭近傍のみで地盤の応力が変化する。一方、拡底杭では、拡底部における支圧抵抗が大きく作用し、拡底部上部の鉛直応力が増加する。その結果、直杭と比べて大きな引抜き抵抗を示す。

### 【参考文献】

- 1) Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F. and Yashima, A. : Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, pp.547-558, 2007.
- 2) Nakai, T. and Hinokio, M. : A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.2, pp.53-70, 2004.
- 3) 澤村康生：盛土内に設置されたカルバートの耐震性に関する基礎的研究，京都大学学位論文，2014