

# 基坑开挖对抗拔桩承载特性影响的数值分析

林敏博<sup>1</sup>, 刘 润<sup>1</sup>, 徐 余<sup>2</sup>, 李 然<sup>1</sup>

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津市建筑设计院, 天津 300074)

**摘要:** 基坑开挖导致地基土体整体处于卸荷状态, 从而改变了抗拔桩原有的受力特点。采用数值分析方法, 系统研究了基坑开挖导致的原地基中抗拔桩承载特性改变, 从基坑开挖的范围、桩的相对位置等方面探讨了对桩的极限抗拔承载力、桩侧摩阻力、桩身轴力的影响规律。结果表明, 开挖导致坑底以下土体卸荷回弹, 在桩身上部产生正摩阻力, 下部产生负摩阻力, 桩身产生轴向拉力, 极限抗拔力降低, 减低程度与基坑开挖的规模成比例; 基坑开挖所导致的群桩桩侧摩阻力与桩身轴力变化程度依次为: 中心桩>边桩>角桩; 群桩的遮帘作用在很大程度上影响中心桩极限抗拔承载力。

**关键词:** 抗拔桩; 基坑开挖; 侧摩阻力; 极限抗拔力

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0735-05

**作者简介:** 林敏博(1989-), 男, 山西临汾人, 硕士, 主要从事桩基工程与岩土数值分析方面的研究。E-mail: linminbo241@163.com。

## Numerical analysis of bearing behaviors of uplift piles during pit excavation

LIN Min-bo<sup>1</sup>, LIU Run<sup>1</sup>, XU Yu<sup>2</sup>, LI Ran<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin

Architecture Design Institute, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** The excavation results in unloading state of the soils, which influences the original loading characteristics of uplift piles. Based on the numerical simulation method, change of the bearing behaviors of the uplift piles caused by excavation is systematically studied. The rules of ultimate uplift capacity, side friction and axial force are discussed by comparing different excavation scopes and relative locations. The results show that, excavation leads to soil rebound under the bottom, induces positive side friction in the upper part of the piles and negative side friction in the under part, and reduces the ultimate uplift capacity of the piles. Moreover, the degree of decrease is proportional to the size of the foundation excavation. The variation of side friction and axial force of the center pile caused by foundation pit excavation is more obvious than that of side pile and corner pile and change of corner pile is the minimum. The ultimate uplift capacity of the center pile is largely affected by the curtain effect of group piles.

**Key words:** uplift pile; excavation of foundation pit; side friction; ultimate uplift capacity

## 0 引言

沿海地区地下水位较高, 地下结构通常需要承受巨大的浮力作用, 例如上海世博 500 kV 地下变电站项目, 整个工程承受的上拔力标准值达  $4.22 \times 10^6$  kN, 除去结构自重, 还需要增加  $1.73 \times 10^6$  kN 的抗力才能够平衡浮力<sup>[1]</sup>, 可见深基坑工程抗浮设计的重要性。

传统的抗浮设计以在结构底面设置抗拔桩来实现。由于受到施工条件的限制, 抗拔桩通常在基坑开挖前就已经打入土体。随着施工的开展, 大面积土方开挖必然会导致开挖面以下土体竖向应力降低, 从而使得桩土界面法向应力减小。同时, 桩周土体处于卸荷状态, 其应力场和位移场也会随之发生改变。开挖

面以下的土体将产生回弹, 对桩身在桩顶以下很大长度内产生上拔作用, 而桩身下部土体不受坑底卸荷回弹的影响, 这样就使得桩身产生轴向拉力(如图 1 所示), 严重的还会造成断桩, 据文献[2]报道: 上海某工程基坑开挖 13 m, 工程桩有效桩长 37 m, 基坑开挖完毕后发现 30% 的工程桩在钢筋笼底处断裂。

目前工程设计中采用未开挖时的试桩承载力扣除开挖面以上侧摩阻力的方法来计算抗拔桩实有承载力。其无法反映桩土界面法向应力的降低及土体回弹

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51021004);  
天津市自然科学基金面上项目(12JCYBJC14700)

收稿日期: 2013-07-17

对抗拔桩承载性状的影响，从而不能正确估算基坑开挖所引起的抗拔桩轴向应力的变化与承载力的损失。为此，众多学者在理论研究、模型试验以及数值模拟等方面都进行了较深入的研究<sup>[3-7]</sup>。

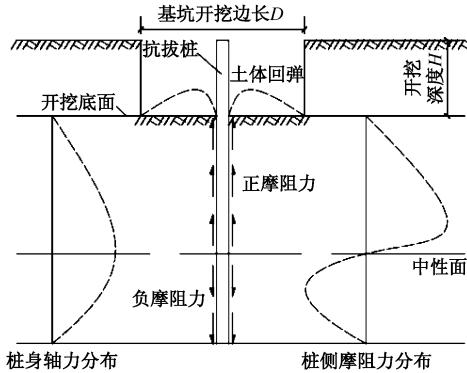


图 1 基坑开挖对抗拔桩的影响

Fig. 1 Influence of excavation on uplift pile

本文基于天津站主广场地下工程项目，分别对抗拔单桩和抗拔群桩进行研究，开展了不同开挖范围下的单桩抗拔承载特性研究；对比了群桩效应下中心桩、角桩与边桩由于基坑开挖引起的轴力、摩阻力的变化规律，分析了群桩遮帘效应对中心桩抗拔承载力的影响，进而提出对工程设计有参考价值的建议。

## 1 有限元模型及参数

### 1.1 工程实例及土层参数

天津站交通枢纽主广场地下工程位于天津站大楼与龙门大厦及海河东路之间地带，总面积约为 2.45 万 m<sup>2</sup>。基坑采用明挖法施工，宽约 30 m，最深处约 15 m。由于毗邻天津海河，该工程地下水水位较高，约为天然地面以下 1.3 m，所承受的地下水浮力大，故采用了长 30 m，直径 1.2 m 的钻孔灌注桩抗浮。

本文采用有限元软件 ABAQUS 对基坑开挖下抗拔桩的承载特性进行研究。并以勘察报告中 S19 孔为例，提取土层参数如表 1 所示。

表 1 土层参数

Table 1 Soil parameters

层号	名称	厚度 /m	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	弹性模量 /MPa	泊松比
1	粉质黏土	8.3	18.5	22.0	11.0	14.4	0.33
2	粉土	7.1	18.8	23.0	10.0	18.0	0.31
3	粉质黏土	7.6	20.0	18.0	18.5	23.1	0.30
4	粉砂	15.3	20.1	28.7	3.5	32.0	0.25
5	中砂	21.7	20.9	33.6	2.1	50.0	0.20

### 1.2 计算模型参数

为真实模拟开挖作用下的抗拔桩承载特性，模型采用 1:1 的比例，即选取桩长 30 m，桩径 1.2 m。C40

混凝土弹性模量取 32.5 GPa，泊松比 0.2；钢的弹性模量为 200 GPa，配筋率为 0.8%，按照刚度等效原则计算得到模型用桩的弹性模量为 33.84 GPa。土体本构模型采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型，并且为消除边界效应的影响，土体模型尺寸采用长宽各 90 m，高 60 m 的长方体，如图 2 所示。桩土之间的接触通过设置接触对来实现，并且采用有限滑移的 Coulomb 摩擦模型来描述接触面的摩擦行为，摩擦系数取 0.35<sup>[5]</sup>。桩、土、围挡皆采用三维八结点缩减积分单元。

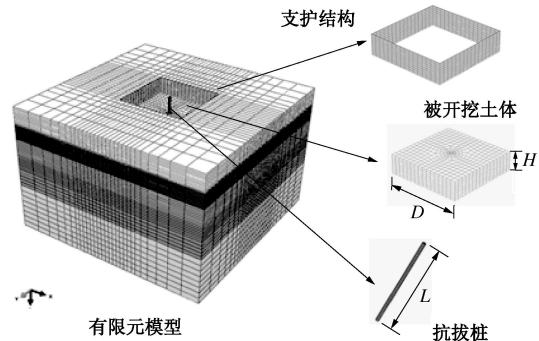


图 2 单桩有限元分析模型

Fig. 2 Finite element model of single uplift pile

## 2 基坑开挖对单桩承载特性影响分析

### 2.1 开挖前后抗拔桩承载特性对比分析

开挖后桩侧土经历竖向卸荷，桩土界面法向应力较开挖前有所降低。从而导致桩侧摩阻力变化，在桩身内部产生轴向应力。图 3, 4 分别是基坑开挖及施加上拔力过程中的桩侧摩阻力及桩身轴力分布曲线。其中，规定沿桩身竖直向上的侧摩阻力为正摩阻力，沿桩身竖直向下的侧摩阻力为负摩阻力， $h$  表示从基坑开挖后底面算起的深度。

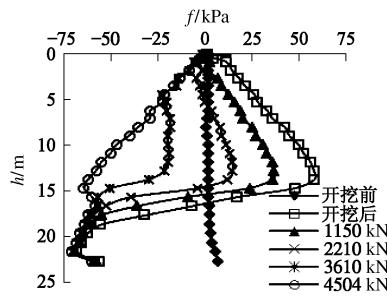


图 3 基坑开挖及施加上拔力过程中的桩侧摩阻力

Fig. 3 Side friction due to excavation and loading

由图 3, 4 可知，基坑开挖之前，桩身产生较小的轴向压力及正摩阻力，并且随着深度线性增加。这是由于抗拔桩在自重作用下发生沉降，在桩侧产生向上的摩阻力所致。基坑开挖后，距坑底一定范围内的土体卸荷回弹，从而土体相对于桩产生向上的位移，桩

侧产生正摩阻力。而距坑底较远的桩侧土体回弹量小于桩的回弹量, 土体相对于桩产生向下的位移, 在桩侧产生负摩阻力。二者以中性面作为过渡面, 在中性面处, 桩土相对位移为 0, 摩阻力为 0。同时, 由于桩上部与下部摩阻力的影响, 将在桩身产生轴向拉力, 典型曲线如图 4 中“开挖后”时所示。摩阻力曲线呈“S”形分布, 轴力曲线成“C”形分布。

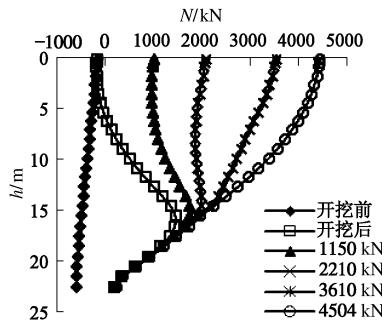


图 4 基坑开挖及施加上拔力过程中的桩身轴力

Fig. 4 Axial force due to excavation and loading

开挖后对抗拔桩施加一定的上拔荷载, 随着荷载的增加, 桩身上部桩土界面呈现反向剪切过程, 表现为正摩阻力逐渐变小, 进而变为负摩阻力并发挥至极限, 桩身下部负摩阻力逐步发挥, 其中已进入负摩阻力极限值的桩土界面摩阻力保持不变。桩身上部轴力逐步变大, 下部已达负摩阻力极限值的桩身轴力保持不变, 直至上拔荷载达抗拔桩极限承载力。

## 2.2 基坑开挖范围的影响

在工程实际中, 基坑的平面尺度对抗拔桩承载特性影响较大, 本文假设一正方形基坑, 基坑深度  $H=7.5$  m, 只改变基坑的边长, 分别取  $D=7.5, 15, 30, 60$  m 四种工况进行模拟。

图 5 给出了不同开挖范围下的桩侧摩阻力分布曲线, 可知不同基坑开挖边长下侧摩阻力分布形式大体相同, 上部承受正摩阻力, 下部承受负摩阻力。随着基坑开挖边长的增加, 桩身承受正摩阻力范围逐渐增大, 负摩阻力范围相应减小, 中性点位置逐渐下移, 由基底以下 11 m 下移到 17 m 左右。

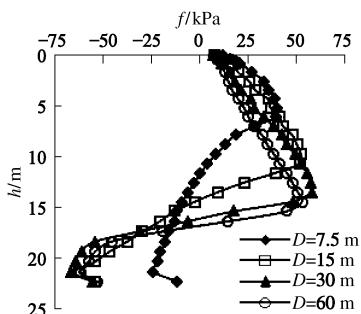


图 5 不同开挖范围下桩侧摩阻力

Fig. 5 Side frictions under different excavation scopes

受桩侧摩阻力的影响, 桩身轴力产生相应的变化, 如图 6 所示: 开挖后坑底面位置处的桩身轴力都约为 193 kN, 表现为压力, 这是由于开挖段桩的自重作用所引起的。随后由于桩身摩阻力的影响, 轴力由压力逐渐变为拉力, 并且呈现出不同的峰值大小。桩身最大轴力在基坑开挖边长  $D=7.5$  m 时最小, 为 505 kN, 随着开挖边长的增大, 最大轴力也在增大, 当  $D=30$  m 时, 最大轴力为 1407 kN, 随后基坑开挖边长增大, 最大轴力反而略有下降。对比图 5, 6, 可知峰值轴力的位置恰好就是桩侧摩阻力中性点的位置。

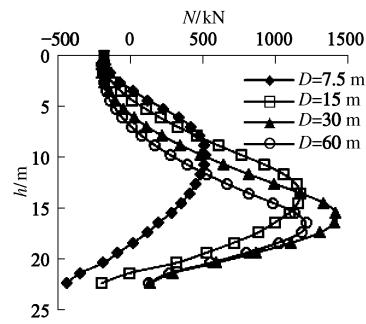


图 6 不同开挖范围下桩身轴力

Fig. 6 Axial forces under different excavation scopes

基坑开挖后, 对抗拔桩施加一定的上拔力, 得到不同开挖范围下的桩顶  $Q-s$  曲线, 如图 7 所示。

由图可知, 上拔初期  $Q-s$  曲线呈线性增长, 到达一定位移后, 上拔力不再随位移的增大而增大, 而是缓慢减小, 这说明在该位移处桩侧摩阻力达到极限状态, 桩周土体进入屈服, 该位置所对应的上拔力即为极限抗拔承载力。

从图 7 中可以得出不同开挖范围下桩的极限抗拔承载力, 与未开挖时进行对比, 得到不同基坑开挖边长下极限抗拔承载力及损失百分比曲线, 如图 8 所示。其中  $Q_u$  表示开挖后桩的极限抗拔承载力,  $\zeta$  表示开挖前后桩的极限抗拔承载力损失百分比。

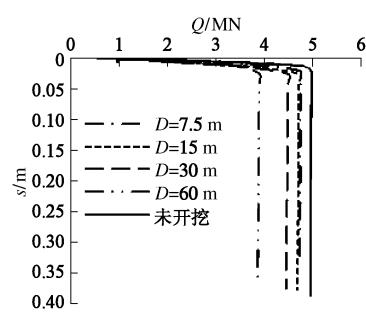


图 7 不同开挖范围下桩顶  $Q-s$  曲线

Fig. 7  $Q-s$  curves under different excavation scopes

由图 8 可知, 随着基坑开挖边长的增大, 极限抗拔承载力逐渐减小。与基坑未开挖时桩的极限抗拔承

载力(未开挖条件下的桩极限抗拔承载力约为  $5.0 \times 10^6$  N)相比,开挖边长  $D=7.5, 15, 30, 60$  m时承载力损失分别为 4.5%, 5.24%, 9.95%, 21.7%。

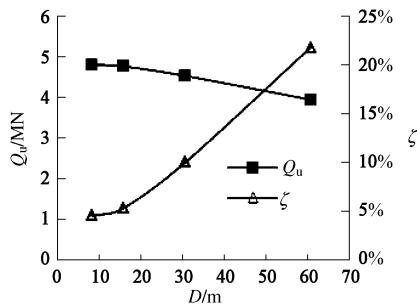


图 8 不同开挖范围下极限抗拔承载力及损失百分比

Fig. 8 Ultimate uplift capacity and loss proportion under different excavation scopes

### 3 基坑开挖对群桩承载特性影响分析

在实际工程中,抗拔桩多为群桩,由于群桩的遮帘效应及桩-土相互作用,大面积深开挖后群桩中基桩的桩身轴力与桩侧摩阻力分布规律与单桩有很大不同,进而影响到群桩在承载阶段的受力变形特性。本文以  $3 \times 3$  及  $5 \times 5$  群桩为模型,对基坑开挖下的承载特性进行研究。 $3 \times 3$  模型如图 9 所示,其中基坑开挖边长 30 m,开挖深度 7.5 m。

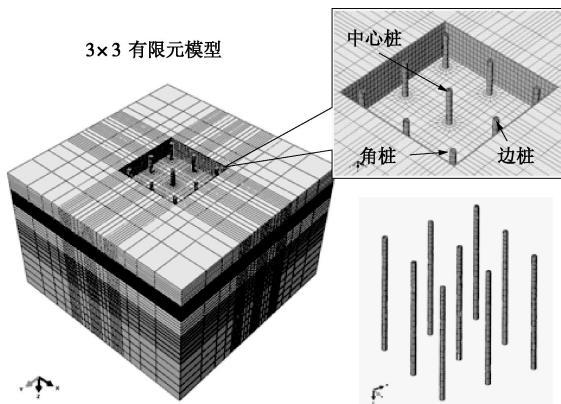


图 9 群桩有限元分析模型

Fig. 9 Finite element model of group piles

#### 3.1 不同位置基桩承载特性分析

采用  $3 \times 3$  群桩模型对开挖引起的中心桩、边桩以及角桩的承载特性进行分析,位置如图 9 所示。

对比不同位置处的抗拔桩,得到开挖后桩侧摩阻力及桩身轴力变化规律。

由图 10, 11 可知,中心桩侧摩阻力中性点位置最深,边桩次之,角桩最浅。说明离基坑开挖中心越近,桩身所受正摩阻力范围越大。由于开挖的影响,群桩各桩身产生轴向应力,中心桩产生的轴力最大,为

1349 kN,边桩次之为 1232 kN,角桩最小,仅为 869 kN。

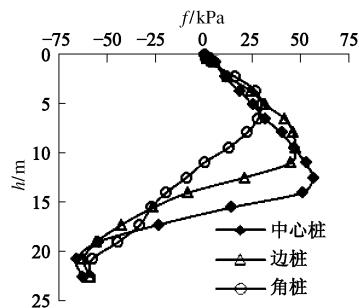


图 10 群桩不同位置处桩侧摩阻力

Fig. 10 Side frictions at different locations

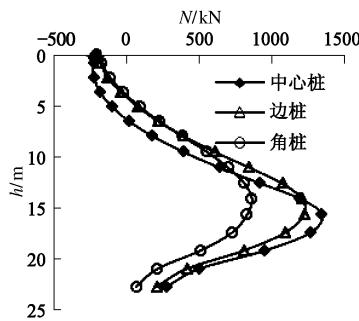


图 11 群桩不同位置处桩身轴力

Fig. 11 Axial forces at different locations

#### 3.2 群桩遮帘效应的影响

为研究群桩遮帘效应对桩的承载特性的影响,在相同基坑开挖边长与开挖深度下,将单桩, $3 \times 3$  群桩及  $5 \times 5$  群桩中的中心桩做对比分析,如图 12, 13 所示。

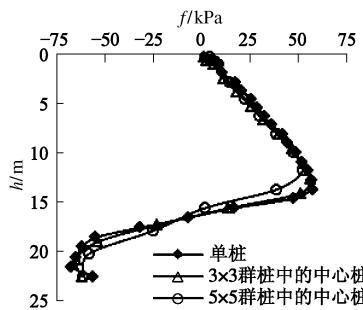


图 12 不同桩数下桩侧摩阻力

Fig. 12 Side frictions considering different pile numbers

由图 12, 13 可知,单桩情况下桩身的正负摩阻力最大, $3 \times 3$  群桩的中心桩次之, $5 \times 5$  群桩的中心桩最小,并且,随着坑内桩数的增多,摩阻力中性点位置由 16.5 m 深度略微上升到 15.5 m 位置处。从桩身轴力曲线来看,桩上部轴力分布大体相同,在深度超过 13 m 后,桩身轴力相继达到最大值。并且,随着桩数的增多,其中心桩所受到的最大轴力逐渐减小。这是

由于在相同的开挖条件下, 坑内桩数越多, 对土体的约束作用越明显, 基坑中心土体产生的回弹量越小, 桩土界面相对位移减小, 从而在桩身产生的摩阻力及轴力降低。

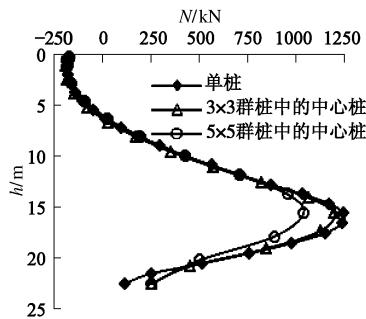


图 13 不同桩数下桩身轴力

Fig. 13 Axial force considering different pile number

对模型桩施加上拔力, 测得单桩的  $Q_u=4.504 \text{ MN}$ ,  $3\times 3$  群桩的中心桩  $Q_u=4.491 \text{ MN}$ ,  $5\times 5$  群桩的中心桩  $Q_u=4.488 \text{ MN}$ 。由此可见, 随着桩数的增加, 中心桩的极限抗拔承载力反而减小, 这是由于桩数的增多使得桩土之间的相互作用越来越显著, 在群桩上拔过程中, 桩侧土体受到向上的剪应力增大, 降低了土体的竖向应力, 从而降低桩土界面法向应力, 导致抗拔承载力降低。

## 4 结 论

(1) 基坑开挖将导致坑内土体产生卸荷回弹, 从而带动抗拔桩回弹, 桩身上下部分分别承受正、负摩阻力, 并在桩身产生轴向拉力。同时, 桩土界面法向应力降低, 导致桩的极限抗拔承载力降低。

(2) 不同开挖范围的计算结果表明, 随着基坑开挖边长  $D$  的增长, 桩土相对位移增大, 摩阻力中性点位置下移。桩身最大轴力先由小变大, 到  $D=30 \text{ m}$  时达到最大, 随后减小。开挖前后极限抗拔承载力损失随  $D$  的增大由 4.5% 增大到 21.7%。

(3) 群桩中, 开挖导致的桩身侧摩阻力和轴力的变化由大到小依次为: 中心桩、边桩、角桩。由于群桩的遮帘作用, 使得基坑开挖后中心桩的极限抗拔承载力较单桩有所降低, 并且, 随着桩数的增多, 极限抗拔承载力有继续降低的趋势。

## 参考文献:

- [1] 陈锦剑, 王建华, 范巍, 等. 抗拔桩在大面积深开挖过程中的受力特性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 402 -

407. (CHEN Jin-jian, WANG Jian-hua, FAN Wei, et al. Behavior of up-lift pile foundation during large-scale deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 402 - 407. (in Chinese))
- [2] 朱火根, 孙加平. 上海地区深基坑开挖坑底土体回弹对工程桩的影响[J]. 岩土工程界, 2005, 8(3): 43 - 46. (ZHU Huo-gen, SUN Jia-ping. The impact of bottom plies due to unloading of deep foundation pit excavation in Shanghai[J]. Geotechnical Engineering World, 2005, 8(3): 43 - 46. (in Chinese))
- [3] 黄茂松, 邝建俊, 王卫东, 等. 开挖条件下抗拔桩的承载力损失比分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1291 - 1297. (HUANG Mao-song, LI Jian-jun, WANG Wei-dong, et al. Bearing capacity loss ratio of uplift pile under deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1291 - 1297. (in Chinese))
- [4] 罗耀武, 胡琦, 陈云敏, 等. 基坑开挖对抗拔桩极限承载力影响的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 427 - 432. (LUO Yao-wu, HU Qi, CHEN Yun-min, et al. Model tests on ultimate uplift capacity of piles under excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 427 - 432. (in Chinese))
- [5] 郑刚, 张立明, 刁钰. 开挖条件下坑底工程桩工作性状及沉降计算分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 32(10): 3089 - 3096. (ZHENG Gang, ZHANG Li-ming, DIAO Yu. Analysis of working performance of piles beneath excavation bottom and settlement calculation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 32(10): 3089 - 3096. (in Chinese))
- [6] 徐余, 刘润. 应用断裂强度理论模拟基坑开挖过程及实测数据分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2573 - 2578. (XU Yu, LIU Run. Simulation on foundation pit excavation with fracture strength theory and interpretation of observed data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2573 - 2578. (in Chinese))
- [7] 王成华, 刘庆晨. 考虑基坑开挖影响的群桩基础竖向承载性状数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1851 - 1856. (WANG Cheng-hua, LIU Qing-chen. Numerical analysis of vertical bearing behavior of group pile foundation considering pit excavation effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1851 - 1856. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)