

DOI: 10.11779/CJGE2017S2050

超深开挖对坑底桩的抗压承载力及沉降特性的 影响因素研究

刁 钰^{1, 2}, 李光帅^{1, 2}, 郑 刚^{1, 2}

(1. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072; 2. 天津大学土木系, 天津 300072)

摘要: 超深基坑的开挖会对坑底工程桩的抗压承载力和沉降特性产生影响, 但是目前对开挖深、宽度、有效桩长等影响因素的研究较少。通过模拟对比套管试桩和开挖后坑底试桩两种工况, 可以反映开挖对桩的承载力和竖向刚度的影响。研究发现, 以坑底桩的开挖前承载力和刚度为基准进行归一, 得到的相对承载力和相对竖向刚度, 随着相对开挖宽度和相对开挖深度的增大而降低, 随着相对有效桩长的增长而提高。

关键词: 深开挖; 抗压桩; 承载力; 有限元法; 荷载试验

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0207-05

作者简介: 刁 钰(1982-), 男, 副教授, 从事岩土与地下工程的教学与研究。E-mail: yudiao@tju.edu.cn。

Influencing factors of deep excavation on bearing capacity and settlement of piles beneath excavation

DIAO Yu^{1, 2}, LI Guang-shuai^{1, 2}, ZHENG Gang^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The deep excavation has a significant influence on the bearing capacity and settlement of piles beneath excavation. However, there are few researches on the influencing factors, especially the distribution of strata. In this study two types of pile load tests are simulated. One is the pile load tests with pile casing in excavation range (TS), and the other is the pile load tests after excavation (TE). Through analyzing and comparing the results of tests, such as load-settlement relationship and skin friction, the effect of deep excavation on the bearing capacity and vertical stiffness can be obtained. It is found that the relative bearing capacity and relative vertical stiffness decrease with the increase of the relative width and depth of excavation. They increase with the increase of the relative effective pile length.

Key words: deep excavation; compressive pile; bearing capacity; FEM; load test

0 引言

近年来, 我国超高层建筑大量兴建, 在建造过程中必然设置深基坑甚至超深基坑, 这对桩基的承载力和沉降特性将产生重大影响。

例如, Y. Iwasaki 等^[1]观测到在既有地下结构下开挖修建地铁时, 地下结构的托换桩桩身下部出现很大的拉应力, 文献作者认为这是由于开挖导致土回弹, 使桩身上拔引起的。朱火根等^[2]报道了上海某基坑(最大开挖深度 13 m)开挖后, 回弹造成坑底 30% 的工程桩(有效桩长 30 m, 上部 13 m 配筋)受拉破坏。徐情根等^[3]、陈孝贤^[4]亦有类似报道。胡琦等^[5]建立了考虑开挖应力路径对桩土界面影响的模型, 计算表明深开挖可降低抗拉桩和抗压桩的承载力和刚度。

对于开挖对坑底抗拔桩的影响, 黄茂松等^[6-7]用有

限元法和极限平衡法分析了开挖对抗拔桩的影响, 并采用离心机模型试验进行了验证^[8]。陈锦剑^[9]以上海世博地下变电站为工程背景, 对抗拔桩在大面积深开挖过程中的受力特性进行了有限元分析。罗耀武^[10]进行了基坑开挖对抗拔桩极限承载力的模型试验及单桩与群桩的有限元分析。上述研究表明, 各种条件下的超深开挖, 都在不同程度上降低了桩的抗拔承载力。

对于开挖对坑底承压桩的影响, 郑刚、刁钰等^[11-15]通过有限元法分析和离心机模型试验, 对比了地面套管试桩和开挖后坑底试桩的不同, 指出超深基坑的开挖由于其回弹效应和卸载效应, 可影响承压桩荷载传

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308389)

收稿日期: 2017-08-02

递，并可降低其的承载力和轴向刚度，同时在桩身产生较大的初始拉力。

基坑开挖后的回弹效应和卸载效应对桩的作用，与基坑开挖深度、宽度、桩长等因素密切相关，但是目前相关研究较少。因此，本文建立了有限元轴对称模型，可以模拟和对比坑底试桩和地面试桩（以套管试桩为代表）条件下单桩加载过程，在此基础上变化模型中基坑开挖深度、开挖宽度和坑底有效桩长，并且进行了归一化处理，研究超深基坑开挖条件下上述因素对承压桩承载力和竖向刚度的影响。

1 有限元模型的建立

1.1 有限元模型

采用通用有限元软件 ABAQUS 进行建模与分析。单桩荷载试验简化为轴对称模型，轴对称实体单元。模型几何关系见图 1。其中，桩径 $d=1\text{ m}$ ，地连墙厚度 $t=1\text{ m}$ ，插入比为 $1:1$ 。在此基础上，变化开挖宽度 b 、开挖深度 h 、有效桩长 l ，模拟不同的开挖条件。

模型接触本构关系采用有限滑动的库仑摩擦模型模拟，摩擦系数根据文献[11]通过数值反算实际工程的结果，采用 $\mu=0.3$ 。桩和地下连续墙采用线弹性模型模拟。弹性模量 E 均取 2.4 GPa ，泊松比 ν 均取 0.15 ，重度 γ 均取 25 kN/m^3 。土体采用修正剑桥模型模拟，取表 1 中土体参数。

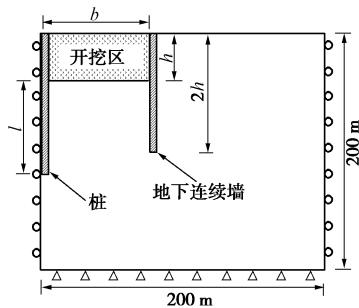


图 1 有限单元模型示意图

Fig. 1 Schematic of finite element method model

表 1 土层的修正剑桥模型参数

Table 1 Soil parameters of MMC model

重度/(kN·m ⁻³)	λ	κ	M	e	ν
18.6	0.07	0.004	1.1	0.72	0.30

1.2 工况模拟

模拟套管试桩法试桩时，约束模型对称轴和土体侧面径向位移，同时约束土体底部径向和轴向位移。同时，约束开挖范围内桩、土接触面处二者的径向位移，不考虑该段摩擦，仅对坑底以下桩、土设摩擦接触。加载时，在位于地面处的桩顶施加荷载。

模拟坑底试桩法时，杀死开挖范围内桩和土单元。

其它边界条件同套管法。加载时，在位于坑底处的桩顶施加荷载。

2 各影响因素参数研究

为了便于对比，对于开挖后坑底试桩情况，首先确立一个基本模型，其有效桩长 $l=L=25\text{ m}$ ，开挖深度 $h=H=25\text{ m}$ ，开挖宽度 $b=B=50\text{ m}$ 。进行参数研究时，仅变化基本模型的某一特定参数，研究桩的承载力和竖向刚度的变化。

对于套管试桩法，地表处加载引起的轴力与坑底处的桩身增加的轴力相同，此外，若将地面处的桩顶沉降扣除坑底以上桩身的压缩量，则可得到不开挖但在坑底处加载的 $Q-s$ 曲线。套管试验 $Q-s$ 曲线通过上述处理，能够反映未受开挖影响的桩在坑底处轴力与沉降的关系，可以作为归一化基准，对比考察各种开挖条件下的桩承载力和竖向刚度受开挖影响的幅度。因此，如无特殊说明，本文提及的套管试桩 $Q-s$ 曲线均做过上述修正。

2.1 基坑开挖宽度的影响

研究基坑开挖宽度的影响时，有效桩长 $l=L=25\text{ m}$ ，开挖深度 $h=H=25\text{ m}$ ，保持不变，作为开挖宽度归一标准。分别模拟相对开挖宽度 $b/H(b/L)$ 为 $0, 1/5, 2/5, 4/5, 2/1, \infty$ 时的工况。图 2 为不同开挖宽度条件下，坑底试桩的 $Q-s$ 曲线。 $b/H(b/L)=0$ 工况即为不开挖情况。所以，其单桩 $Q-s$ 曲线，就是具有相同有效桩长和套管长度等于相应开挖深度的套管试验的 $Q-s$ 曲线。

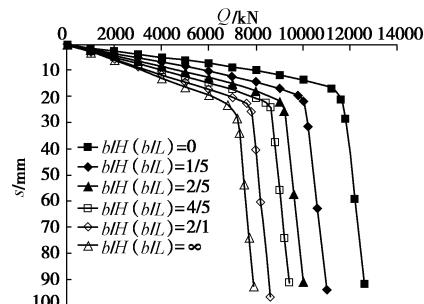


图 2 不同开挖宽度下试桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 2 $Q-s$ curves of pile load tests with different excavation widths

由于 $Q-s$ 曲线均为陡降型，则其拐点处荷载可反映出桩的承载力大小。在图 3 中以套管试桩的拐点荷载 Q_{TS} 为基准，对不同开挖宽度条件下坑底试桩的拐点荷载 Q_{TE} 进行归一化，得到“相对承载力”，反映开挖效应对承载力的影响强度。

由于 $Q-s$ 曲线在拐点荷载之前近似直线，所以引入刚度 $k=Q/s$ (Q 为拐点荷载， s 为对应沉降)，反

映桩的竖向刚度。图 4 中以套管试桩的刚度 k_{TS} 为基准, 对不同开挖宽度条件下坑底试桩的拐点荷载 Q_{TE} 进行归一化, 得到“相对刚度”, 反映开挖效应对刚度的影响强度。

从上述结果中可以发现, 开挖降低了坑底桩的承载力(图 2)和相对承载力(图 3), 并且, 降幅随着开挖宽度(相对于有效桩长和开挖深度)的增大而增大, 但是降低速率逐渐减缓。开挖降低了坑底桩的刚度(图 2)和相对刚度(图 4), 并且降幅随着开挖宽度(相对于有效桩长和开挖深度)的增大而增大, 但是降低速率逐渐减缓。由图 5 可知, 开挖的卸载效应导致桩极限侧阻下降, 降幅随着开挖宽度的增加而增大。而且, 桩下部摩阻降低滞后于上部, 这一方面是由于卸载效应随深度衰减, 另一方面是由于地连墙造成被动土压力的影响, 尤其是当开挖宽度较小、桩与地连墙近时(如 $b/H=1/5$ 或 $2/5$), 桩下部极限摩阻力相对不开挖情况反而增加。由上述分析可知, 与地连墙不同距离的桩, 其刚度和承载力分布不均, 呈基坑边缘处刚度大, 中部刚度小的形态。根据基于沉降控制的桩筏设计理论, 该分布会增加碟形沉降, 不利于控制不均匀沉降。

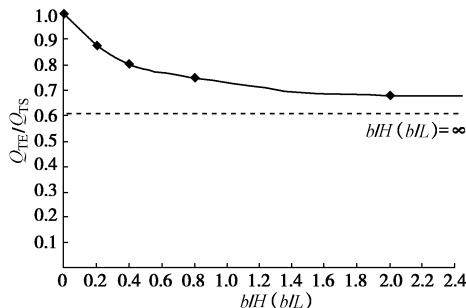


图 3 相对承载力 - 开挖宽度曲线

Fig. 3 Curves of relative bearing capacity-excavation width

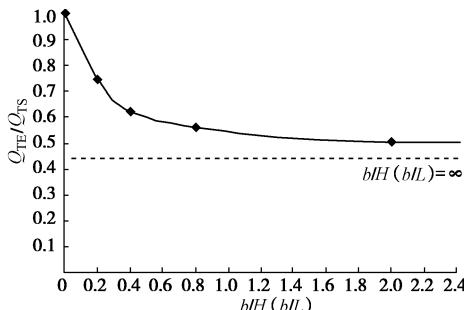


图 4 相对刚度 - 开挖宽度曲线

Fig. 4 Curves of relative stiffness-excavation width

2.2 基坑开挖深度的影响

研究基坑开挖深度的影响时, 有效桩长 $l=L=25$ m, 开挖宽度 $b=B=50$ m, 保持不变。有效桩长 L 作

为开挖深度归一标准。分别模拟相对开挖深度 h/L 为 0, $1/5$, $3/5$, $1/1$, $7/5$ 时的工况。分别以各开挖深度对应的套管试桩的拐点荷载 Q_{TS} 和刚度 k_{TS} 为基准, 对相同开挖深度下坑底试桩的拐点荷载 Q_{TE} 和刚度 k_{TE} 进行归一化, 得到相对承载力和相对刚度, 反映开挖对承载力与刚度的影响见图 6 和图 7。以上述地面常规试桩的拐点荷载 Q_{ho} 和刚度 k_{ho} 为基准, 对各开挖深度的坑底试桩的拐点荷载 Q_h 和刚度 k_h 进行归一化, 得到“承载力比”和“刚度比”, 见图 8 和图 9。

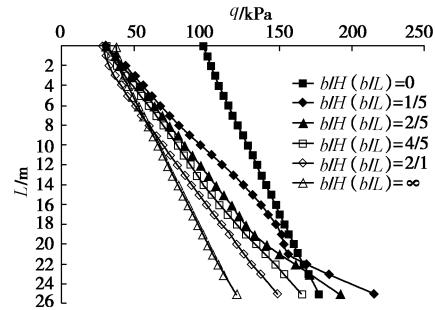


图 5 不同开挖宽度极限摩阻分布

Fig. 5 Distribution of ultimate skin resistance along pile shaft with different excavation widths

由图 6 可知, 随着开挖深度(相对于有效桩长)的增大, 桩相对承载力降低, 但是降低速率逐渐减缓。由图 7 可知, 随着开挖深度(相对于有效桩长)的增大, 桩的相对刚度降低, 但是降低速率逐渐减缓。由图 8 可知, 相同有效桩长的桩, 其开挖深度越大, 承载力比越大。其原因如下: 随着开挖深度的增大, 一方面桩法向应力卸载效应不断增大, 对极限侧摩阻力有降低作用, 但另一方面桩的埋置深度亦不断增大, 对侧摩阻力有提高作用。随深度增加, 前者降低承载力的效应放缓, 而后者的作用始终大于前者的作用, 故而产生了承载力比增长的现象。由图 9 可知, 相同有效桩长的桩, 其开挖深度越大, 竖向刚度比越大。其原因也是由于埋置深度增大对刚度的增加效应大于开挖卸荷和回弹对刚度产生的减小作用。

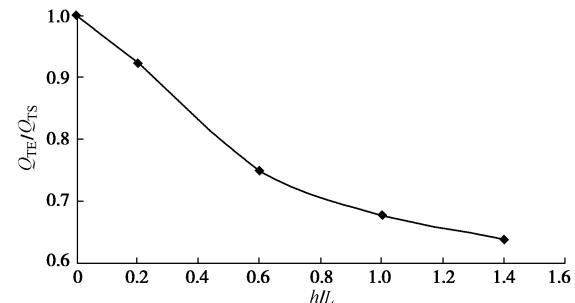


图 6 相对承载力开挖深度曲线

Fig. 6 Curves of relative bearing capacity-excavation depth

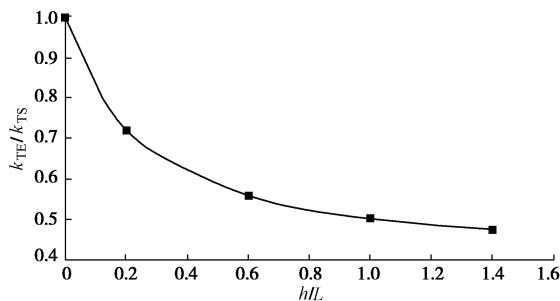


图 7 相对刚度 - 开挖深度曲线

Fig. 7 Curves of relative stiffness-excavation depth

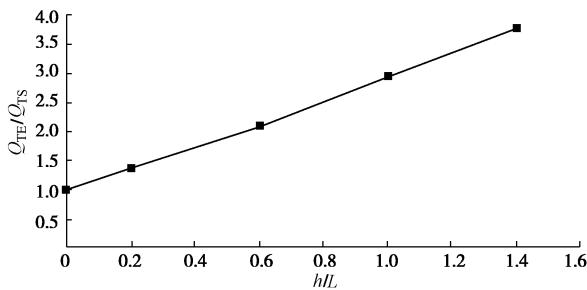


图 8 承载力比 - 开挖深度曲线

Fig. 8 Curves of bearing capacity ratio-excavation depth

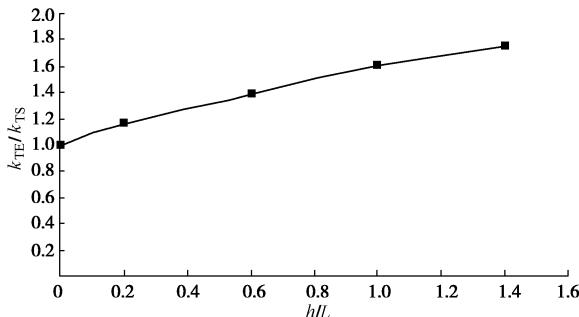


图 9 刚度比 - 开挖深度曲线

Fig. 9 Curves of stiffness ratio-excavation depth

2.3 有效桩长的影响

研究有效桩长的影响时, 开挖深度 $h=H=25\text{ m}$, 开挖宽度 $b=B=50\text{ m}$, 保持不变。开挖深度 H 作为坑底长度归一标准。分别模拟相对有效桩长 I/H 为 $2/5$, $3/5$, $1/1$, $7/5$, $2/1$ 时的工况。图 10 为不同有效桩长的情况下, 坑底试桩和套管试桩的 $Q-s$ 曲线。由图 10 可见: 随着有效桩长的增大, 桩的承载力增加; 刚度增加, 但拐点处的沉降也相应增加。

分别以不同有效桩长的套管试桩的拐点荷载 Q_{TS} 和刚度 k_{TS} 为基准, 对具有相同有效桩长的坑底试桩的拐点荷载 Q_{TE} 和刚度 k_{TE} 进行归一化, 得到相对承载力和相对刚度, 见图 11 和图 12。由图 11 可知, 随着有效桩长(相对于开挖深度)的增大, 坑底桩相对承载力降低。因为受开挖影响较强的区域, 随着有效桩长的增加, 在整个桩长所占比例不断下降, 则开挖效应相对减弱, 对承载力降低作用下降。由图 12 可知,

随着有效桩长(相对于开挖深度)的增大, 坑底桩刚度与不开挖情况刚度相比, 比值上升。原因同样是受开挖影响较强的区域在整个桩长中比例下降, 从而刚度降低作用减弱。

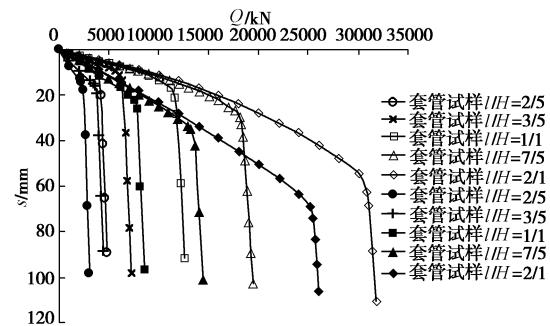
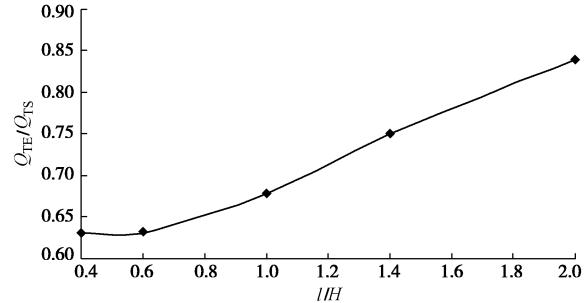
图 10 不同有效桩长试桩 $Q-s$ 曲线Fig. 10 $Q-s$ curves of pile load tests with different effective pile lengths

图 11 相对承载力 - 有效桩长曲线

Fig. 11 Curves of relative bearing capacity-effective pile length

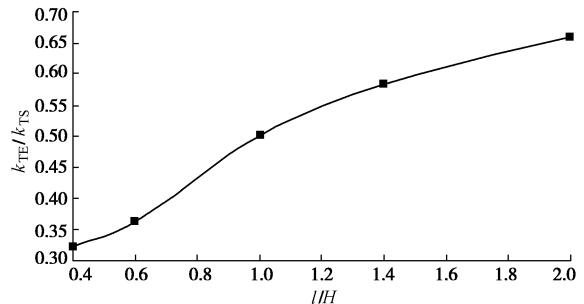


图 12 相对刚度 - 有效桩长曲线

Fig. 12 Curves of relative stiffness-effective pile length

3 结 论

利用有限单元法建立轴对称模型, 针对深开挖对桩承载力和竖向刚度的影响, 进行了开挖深度、开挖宽度、有效桩长、土质和土层分布等参数研究。主要结论如下:

- (1) 开挖后坑底桩的相对承载力和相对刚度, 随着开挖宽度的增大而减小, 但是降低速率逐渐减缓。
- (2) 开挖后坑底桩的相对承载力和相对刚度, 随着开挖深度的增大而减小。而承载力比和刚度比随相

对开挖深度增大而增大。

(3) 坑底桩的相对承载力和相对刚度, 随着有效桩长的增大而增加。而承载力比和刚度比随相对有效桩长的增大而增大。

(4) 开挖后基坑边缘处桩的刚度大, 中部桩的刚度小, 该分布会增加碟形沉降, 不利于控制不均匀沉降。

参考文献:

- [1] IWASAKI Y, WATANABE H, FUKUDA M, et al. Construction control for underpinning piles and their behavior during excavation[J]. *Géotechnique*, 1994, **44**(4): 681 - 689.
- [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, 2004, **8**(3): 43 - 46. (ZHU Huo-gen, SUN Jia-ping. Effect of basal soil heave on piles during deep excavation in Shanghai[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2004, **8**(3): 43 - 46. (in Chinese))
- [3] 徐情根, 徐醒华, 梁朝晖, 等. 深基坑开挖对坑底桩基的影响[J]. 广东土木与建筑, 2006(1): 33 - 34. (XU Qing-gen, XU Xing-hua, LIANG Chao-hui, et al. Influence of the deep excavation on the bottom piles[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2006(1): 33 - 34. (in Chinese))
- [4] 陈孝贤. 深基坑开挖坑底土体隆起对工程桩影响的探讨[J]. 福建建设科技, 2006(3): 116. (CHEN Xiao-xian. The discussion of pile risk for bottom soil resilience with deep foundation pit excavation[J]. *Fujian Construction Science & Technology*, 2006(3): 116. (in Chinese))
- [5] 胡 琦, 凌道盛, 陈云敏, 等. 深基坑开挖对坑内基桩受力特性的影响分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1965 - 1970. (HU Qi, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min, et al. Study of loading characters of pile foundation due to unloading of deep foundation pit excavation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(7): 1965 - 1970. (in Chinese))
- [6] 黄茂松, 任 青, 王卫东, 等. 深层开挖条件下抗拔桩极限承载力分析[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(11): 1689 - 1695. (HUANG Mao-song, REN Qing, WANG Wei-dong, et al. Analysis for ultimate uplift capacity of tension pile under deep excavation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(11): 1689 - 1695. (in Chinese))
- [7] 黄茂松, 那建俊, 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))
- [8] 那建俊, 黄茂松, 王卫东, 等. 开挖条件下抗拔桩承载力的离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 388 - 396. (LI Jian-jun, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong, et al. Centrifuge model tests on bearing capacity of up lift piles under deep excavation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(3): 388 - 396. (in Chinese))
- [9] 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 Jian-jin, 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))
- [10] 罗耀武. 大面积深开挖对抗拔桩承载性质的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (LUO Yao-wu. The influence of large and deep excavation on the bearing behavior of uplift piles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- [11] 郑 刚, 刁 钰, 吴宏伟. 超深开挖对桩竖向荷载传递和沉降的影响机理有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(6): 837 - 845. (ZHENG Gang, DIAO Yu, NG C W W. Finite element analysis on mechanism of effect of super-deep excavation on vertical load transfer and settlement of single pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(6): 837 - 845. (in Chinese))
- [12] ZHENG Gang, PENG Si-yuan, DIAO Y, et al. In-flight investigation of excavation effects on smooth single piles[C]// 7th International conference on physical modeling in Switzerland, 2010: 681 - 689.
- [13] ZHENG G, DIAO Y, NG C W W. Parametric analysis of the effects of stress relief on the performance and capacity of piles in nondilative soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(8): 1354 - 1363.
- [14] ZHENG G, PENG S Y, NG C W W, et al. Excavation effects on pile behaviour and capacity[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, **49**(12): 1347 - 1356.
- [15] 刁 钰. 超深开挖对坑底抗压桩竖向承载力及沉降特性影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2011. (DIAO Yu. Studies on effects of super-deep excavation on the bearing capacity and settlement behavior of compression piles beneath the basement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese))