

DOI: 10.11779/CJGE2022S1040

地下管廊基坑开挖对 CFG 桩受力变形特性的影响研究

刘 涛, 胡柏春, 杨 迅

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 558801)

摘 要: 在先施工工程桩再进行开挖的基坑工程中, 坑底土体在基坑开挖卸荷的过程中产生的回弹变形会导致基坑底部土体产生相对于桩体向上的位移, 此时桩体可能因较大的拉力断裂, 从而大大减弱地基承载力。以贵州某地下综合管廊项目为依托, 利用有限元计算软件 MIDAS GTS NX 模拟了基坑开挖的施工过程, 研究了桩长和桩体弹模对 CFG 桩受力及变形的影响规律。结果表明: 桩长对 CFG 桩受力及变形有着较为明显的影响, 而桩长超过一定范围后影响显著降低; 增加桩体弹模会让桩体承受更大的拉应力, 但是能使桩体处于更加安全的状态。

关键词: 基坑开挖; CFG 桩; 回弹变形; 拉应力; 数值模拟

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0226-05

作者简介: 刘 涛(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事地下综合管廊方向研究及相关工程设计研究工作。E-mail: 1500492441@qq.com。

Influences of excavation of foundation pit of underground pipe gallery on mechanical deformation characteristics of CFG piles

LIU Tao, HU Bo-chun, YANG Xun

(PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 558801, China)

Abstract: In the foundation pit in which the engineering piles are constructed first and then excavated, the rebound deformation of the soil at the bottom of the pit in the process of excavation and unloading will lead to the upward displacement of the soil at the bottom of the pit relative to the piles. At this time, the piles may be broken due to large tensile force, which will greatly reduce the bearing capacity of the foundation. Based on an underground comprehensive pipe gallery project in Guizhou, the construction process of excavation of foundation pit is simulated by using the finite element software MIDAS GTS NX, and the influence laws of length and elastic modulus of the piles on the stress and deformation of the CFG piles are studied. The results show that the length of the piles has obvious influences on the stress and deformation of the CFG piles, and the influences decrease significantly when the pile length exceeds a certain range. Increasing their elastic modulus will make the piles bear greater tensile stress, but it can make them be in a safer state.

Key words: excavation of foundation pit; CFG pile; rebound deformation; tensile stress; numerical simulation

0 引 言

随着中国经济的发展、城镇化水平不断提高, 城市地下空间得到大规模开发和利用, 各种基坑工程和其伴随而来的问题不断涌现, 坑底土体回弹对工程桩的影响就是其中之一^[1]。对于工程桩而言, 如果采用先开挖后施工的方法, 桩基的承载力会下降, 且基坑较深, 施工设备不易达到指定位置, 所以在实际工程中往往先施工工程桩再开挖基坑。坑底土体在基坑开挖卸荷的过程中会产生回弹变形, 导致基坑底部土体产生相对于桩体向上的位移, 此时桩体会受到较大的拉力。对于混凝土材料而言, 其抗拉强度远小于抗压强度, 桩体可能会在基坑开挖的过程中就发生断裂, 严重影响其力学性能, 导致在后续建(构)筑物施工

以及基坑回填的过程中由于基础承载力的不足而发生严重的工程事故, 这一负面影响在没有配筋的素混凝土桩和 CFG 桩上尤为常见。

国内外专家学者就基坑底部土体回弹变形对工程桩的影响这一问题进行了研究。Iwasaki 等^[2]较早对坑底土体竖向回弹会导致坑底桩基受拔这一工程现象做了报道。朱火根等^[3]通过工程实例, 分析了基坑开挖坑底土体产生回弹将工程桩拉断的原因, 并提出在桩基设计时, 应增加深基坑开挖后土体回弹对工程桩桩身抗拉能力的验算。郑刚等^[4]用经实际工程算例验证的土参数、桩身材料参数和桩土接触面参数, 在均质

基金项目: 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2019]2853号)

收稿日期: 2022-09-25

土中建立了轴对称模型, 分析了卸荷效应与回弹效应下工程桩的荷载传递规律。胡琦等^[5]通过试验确定的桩土接触摩擦系数, 研究了不同基坑深度对于工程桩的受力影响, 分析得出在上覆荷载下确定工程桩的承载力偏大, 应考虑开挖土体对工程桩产生的侧摩阻力的影响。张翔等^[6]通过 PLAXIS^{3D} 软件分析了坑底工程桩的桩长、桩径、桩刚度对基坑回弹变形的影响规律。已有的研究^[7-10]同样表明, 受土体回弹效应的影响, 基坑开挖后的桩侧摩阻力呈上部为正, 下部为负的特殊分布, 基坑开挖引起的坑底土卸荷回弹会使既有桩基产生受拉的不利影响, 而桩身拉力在中性点处达到最大值。

本文结合贵州某地下综合管廊建设项目, 运用 MIDAS GTS NX 有限元软件, 采用修正莫尔-库仑 (Modified Mohr-Coulomb) 模型作为土体的本构模型, 并将桩体考虑为实体单元, 对基坑开挖进行数值模拟研究, 分析了 CFG 桩桩长和桩身模量对 CFG 桩受力变形特性的影响规律。

1 工程概况

贵州某地下综合管廊项目位于当地机场高速至市一中段, 共 1.410 km, 综合管廊断面为 7.9 m×3.25 m, 入廊管线有电力、移动、联通、电信、广电、给水 (DN600), 热力 (DN700), 标准段管廊覆土 2.0 m, Z0+000—0+380 段两侧无建筑物、构筑物, Z0+040—0+190 右侧有已建成的施工单位项目部活动板房, 地下无管线; Z0+380—1+410 段两侧房屋较多, 且距离人行道较近, 人行道下方埋设有燃气、给水、通信、电力等管线, 道路中央绿化带下方埋设中水管, 且各交叉路口处管线十分复杂 (见图 1)。



图 1 地下综合管廊施工图

Fig. 1 Construction of underground pipe gallery

本文研究的基坑地层分布较为均匀, 场地内主要为杂填土、黏土 (可塑)、黏土 (软塑)、泥岩等, 设计基坑范围为明挖结构, 采用明挖法施工, 围护结构采

用围护桩, 明挖长 1410 m, 净宽 7.8 m, 基坑深度 5.80~6.80 m, 安全等级为二级。基坑支护为临时支护, 基坑的使用时限满足临时基坑使用规范。

其中 Z0+380—1+410 段地下黏土层较厚, 最深可达 13.5 m, 基底地质条件较差, 无法满足地基承载力要求, 在基坑开挖之前需要先施工 CFG 桩对基底进行加固, 因此基坑开挖卸荷所引起的基底回弹变形对 CFG 桩产生的影响是该项目需要研究的重点。

2 模型建立及分析工况

采用 MIDAS GTS NX 软件建立图 2 所示的三维基坑计算模型, 研究 CFG 桩桩长以及桩身模量对 CFG 桩受力变形特性的影响。考虑到基坑的实际尺寸较长且具有对称性, 为了便于数值计算, 本次建模选取 Z1+397—1+410 标段, 基坑尺寸为 13.0 m×8.0 m (长×宽), 开挖深度为 6.0 m。

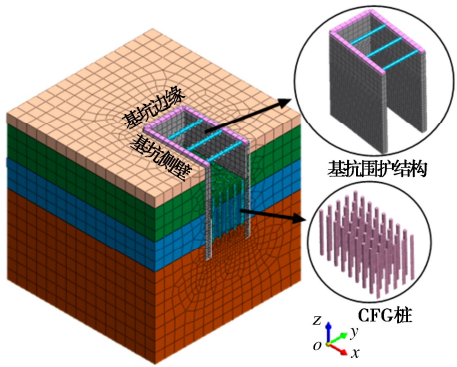


图 2 基坑三维模型图

Fig. 2 3D model for foundation pit

2.1 模型参数取值

地基土采用修正莫尔-库仑 (Modified Mohr-Coulomb) 模型进行模拟, 土层参数取值见表 1, 围护结构、内支撑及 CFG 桩均按弹性材料考虑, 其中: ①桩板墙采用板单元进行模拟, 冠梁采用梁单元进行模拟, 弹性模量取 24 GPa, 重度取 23.5 kN·m⁻³, 泊松比为 0.2; ②内支撑为钢管支撑, 采用梁单元进行模拟, 间距为 4 m, 钢管直径为 609 mm, 壁厚为 14 mm, 钢管弹性模量取 200 GPa, 重度取 78.5 kN·m⁻³, 泊松比取 0.3; ③CFG 桩采用实体单元进行模拟, 桩长为 8.0 m, 桩径为 500 mm, 桩间距为 1.5 m, 正方形布桩, 桩的弹性模量为 25 GPa, 重度为 24 kN·m⁻³, 泊松比取 0.2。考虑桩土间的界面接触, 接触形式为库伦摩擦。计算模型横截面简图如图 3 所示。

2.2 施工步骤

为真实反映施工过程, 根据项目建设时序, 计算模拟过程分十步进行, 具体荷载步设置见表 2。

表 1 土层参数取值表
Table 1 Values of parameters of soil layers

土层	重度/(kN·m ⁻³)	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oe}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	泊松比 ν	黏聚力 c /kPa	摩擦角 φ /(°)
杂填土	19.0	30	30	90	0.32	5	28
黏土(可塑)	18.0	43	43	129	0.34	25	18
黏土(软塑)	17.3	22	22	66	0.34	20	15
强风化泥岩	24.0	120	120	360	0.37	30	20

注：表中 E_{50}^{ref} 为三轴实验割线刚度； $E_{\text{oe}}^{\text{ref}}$ 为主压密加载试验的切线刚度； $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载弹性模量。

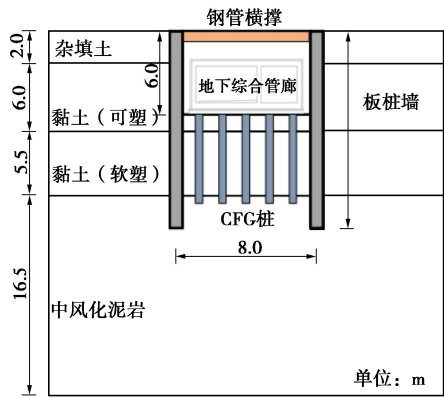


图 3 基坑计算模型横截面简图

Fig. 3 Cross section of model for foundation pit

表 2 计算步骤设置一览表

Table 2 List of calculation steps

施工阶段	施工阶段描述
第 1 步	初始地应力平衡
第 2 步	施工基坑围护结构与 CFG 桩
第 3 步	施工冠梁
第 4 步	施工内支撑(位移清零)
第 5~10 步	开挖至 -6 m(每步开挖 1 m)

3 桩长对桩受力变形特性的影响

研究桩长对 CFG 桩受力及变形特性的影响,分别选取桩长为 6, 7 m(桩端不伸入较硬土层), 8 m(嵌岩 1D), 9 m(嵌岩 3D)共 4 种工况进行对比分析。

3.1 桩长对 CFG 桩变形特性的影响分析

图 4, 5 分别为不同桩长下基坑中心线上桩间土的回弹变形和 CFG 桩桩顶竖向位移曲线,从图中可以看出:①在基坑开挖之前施工 CFG 桩可以在一定程度上降低基坑底部的回弹量,且随着桩长的增加,基坑底部土体的回弹变形量和桩顶竖向位移均逐渐减小;②越接近基坑边缘基坑底部土体的回弹量和桩顶竖向位移越小,当与基坑边缘的距离大于 8 m 之后,基坑底部土体的回弹量和桩顶竖向位移就不再有明显的变化;③基坑底部土体的回弹量大于桩顶竖向位移,此时桩周土相对于桩体产生向上的位移,导致 CFG 桩在基坑开挖的过程中会出现上拔的趋势;④桩端嵌岩之后继续增加嵌岩深度对基坑底部土体的回弹变形量和桩顶竖向位移的影响较小。桩长从 8 m 增加到 9 m 时,

土体最大回弹量从 7.34 mm 减少到 7.07 mm,桩顶最大竖向位移从 3.98 mm 减小到 3.71 mm,变化幅度较小。

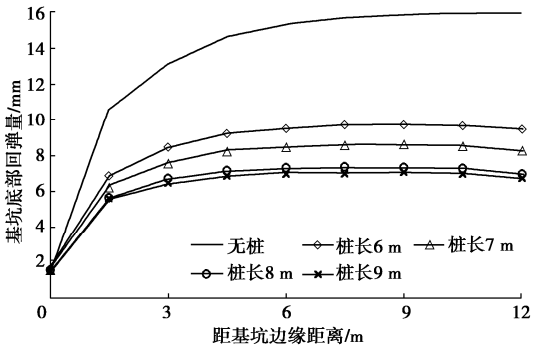


图 4 基坑底部(土体)回弹量变化曲线

Fig. 4 Variation curves of rebound amount at bottom of foundation pit (soil)

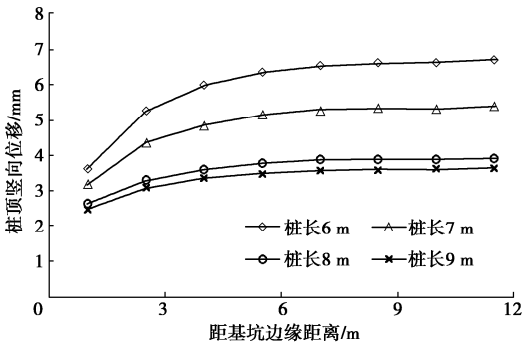


图 5 桩顶竖向位移变化曲线

Fig. 5 Curves of vertical displacement of pile top

3.2 桩长对 CFG 桩受力特性的影响分析

图 6 为基坑不同横截面桩体最大拉应力分布图(俯视图),图中黑色标记表示基坑同一横截面的 5 根桩中受到拉应力最大的桩,灰色标记次之,白色标记最小。从图 6 中可以发现,靠近基坑边缘的#1, #2 截面的最大拉应力出现在截面中部的桩体上,其余截面的最大拉应力均出现在靠近基坑侧壁的桩体上,基坑中心线上的桩周围的土体回弹量虽然最大,但是却最均匀。说明造成桩体承受较大拉应力的主要原因是桩体两侧土体产生的差异回弹量较大。

基坑不同横截面桩体最大拉应力随截面距基坑边缘距离的变化规律如图 7 所示,从图 7 中可以看出,随着桩长的增加,桩体受到的最大拉应力逐渐减小,当桩长达到 8 m 之后继续增加桩长对桩身拉应力的影响不大。

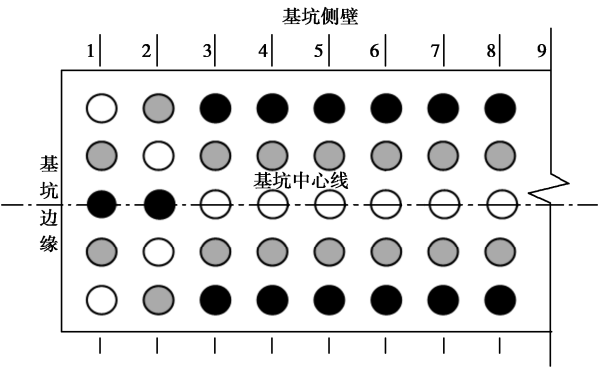


图 6 桩体拉应力分布

Fig. 6 Distribution of tensile stress of piles

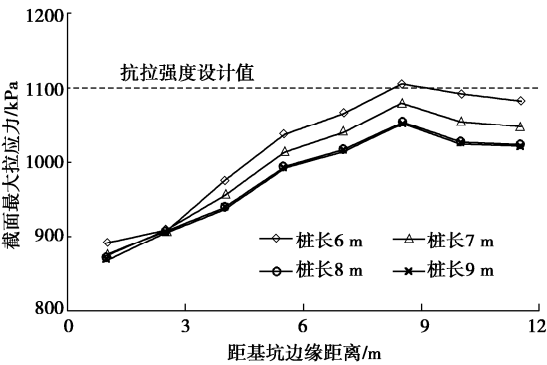


图 7 基坑横截面最大拉应力变化曲线

Fig. 7 Variation curves of maximum tensile stress of cross section of foundation pit

4 桩体模量对桩受力变形特性的影响

研究桩体模量对 CFG 桩受力及变形特性的影响, 分别选取桩体模量为 20, 25, 30, 35 GPa 共 4 种工况进行对比分析。

4.1 桩体模量对 CFG 桩变形特性的影响分析

图 8,9 分别为不同桩体模量下基坑中心线上桩间土的回弹变形和 CFG 桩桩顶竖向位移曲线。从图 8, 9 中可以看出: 随着 CFG 桩桩体模量的增加, 基坑底部土体的回弹量和坑底 CFG 桩顶的竖向位移均逐渐减小, 且减大幅度逐渐降低。

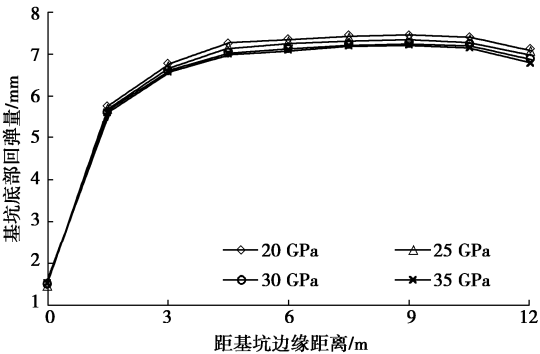


图 8 基坑底部(土体)回弹量变化曲线

Fig. 8 Variation curve of rebound amount at the bottom of foundation pit (soil)

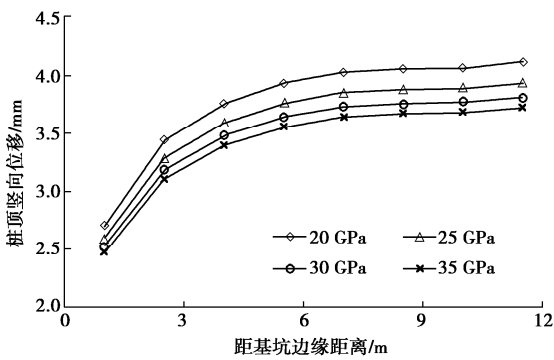


图 9 桩顶竖向位移变化曲线

Fig. 9 Curves of vertical displacement of pile top

4.2 桩体模量对 CFG 桩受力特性的影响分析

不同桩体模量下基坑各横截面桩体最大拉应力如图 10 所示。从图 10 中可以看出, 随着桩体模量的增加, 各横截面最大拉应力逐渐增大, 桩体模量每增大 5 GPa, 各截面最大拉应力增大大约 6%。

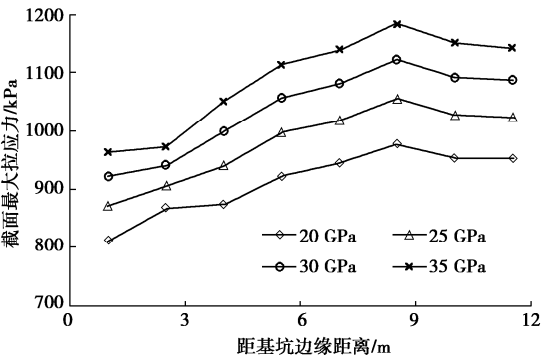


图 10 基坑横截面最大拉应力变化曲线

Fig. 10 Variation curves of maximum tensile stress of cross section of foundation pit

将不同桩体模量所对应的桩体最大拉应力与其对应标号混凝土抗拉强度设计值绘制于图 11。从图 11 中可以看出, 桩体弹模等于 20 GPa 时, 桩体最大拉应力大于对应 C15 混凝土抗拉强度设计值, 桩体可能被拉断。随着桩体弹模的增大, 桩体最大拉应力逐渐小于对应标号混凝土抗拉强度设计值, 且相差幅度越来越大。说明增大桩体模量能使桩体处于更加安全的状态。

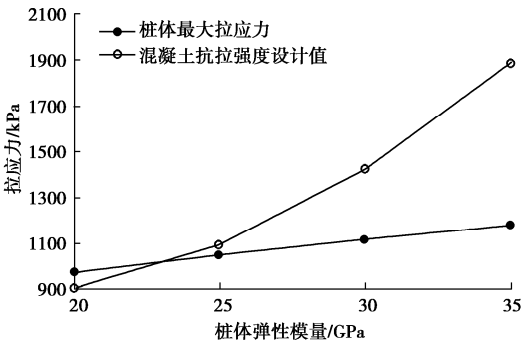


图 11 拉应力与抗拉强度对比图

Fig. 11 Comparison between tensile stress and strength

5 结 论

(1) 基坑开挖完成后, 基坑横截面坑底隆起最大值出现在截面中部, 越靠近基坑侧壁隆起值越小; 基坑纵截面坑底隆起值越接近基坑边缘越小, 当与基坑边缘的距离大于 8 m 之后, 隆起值就不再有明显的变化。基坑底部回弹变形呈四周小中间大的特点。

(2) 在基坑开挖过程中最容易被拉断的 CFG 桩出现在距基坑侧壁最近的一排桩上, 处于基坑中心线上的桩承受的拉应力反而较小。

(3) 随着桩长的增加, CFG 桩的变形及受到的拉应力均有一定程度的降低, 不过当桩长达到 8 m 之后继续增加桩长的影响不大。为了防止桩体在开挖的过程中断裂, 本工程桩体长度应大于 6 m。

(4) 桩体弹模每增大 5 GPa, 桩体最大拉应力增大大约 6% 左右, 远小于对应标号混凝土抗拉强度设计值的增量, 所以在经济允许的范围内应尽量选择相对高标号的混凝土, 本工程桩体弹模应大于 25 GPa。桩体弹模的变化对桩间土的回弹变形和 CFG 桩桩顶竖向位移的影响并不明显。

参考文献:

- [1] 郭德强. 软土地区基坑回弹机理及工程桩受力变形研究[D]. 天津: 天津大学, 2017. (GUO De-qiang. The study of pit resilience mechanism and behavior of pile in soft region[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [2] IWASAKI Y, WATANABE H, FUKUDA M, et al. Construction control for underpinning piles and their behaviour[J]. Géotechnique, 1994, 44(4): 681 - 689.
- [3] 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(3): 43 - 46. (ZHU Huo-gen, SUN Jia-ping. Influence of soil rebound at the bottom of deep foundation pit in Shanghai area on engineering piles[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 2005(3): 43 - 46. (in Chinese))
- [4] 郑刚, 刁钰, 吴宏伟. 超深开挖对单桩的竖向荷载传递及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, ZHENG Gang, DIAO Yu, NG C W W. Finite element analysis on mechanism of effect of extra-deep excavation on vertical load transfer and settlement of a single pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 837 - 845. (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] 张翔, 刘松玉, 吴恺, 等. 工程桩对基坑回弹变形影响的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 2): 11 - 14. (ZHANG Xiang, LIU Song-yu, WU Kai, et al. Numerical analysis of influences of engineering piles on rebound deformation of foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 11 - 14. (in Chinese))
- [7] 罗耀武. 大面积深开挖对抗拔桩承载性状的影响研究[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))
- [8] 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]. 岩土力学, 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]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3089 - 3096. (in Chinese))
- [9] 杜一鸣, 郑刚, 张立明. 考虑深基坑开挖效应的超长灌注桩桩身压缩综合系数的理论分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2019 - 2028. (DU Yi-ming, ZHENG Gang, ZHANG Li-ming. Theoretical analysis of comprehensive coefficient of pile compression for super-long bored pile considering effect of deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 2019 - 2028. (in Chinese))
- [10] 苟尧泊, 俞峰, 杨予. 基坑开挖引起既有桩基侧摩阻力中性点位置分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2681 - 2687. (GOU Yao-bo, YU Feng, YANG Yu. Locating neutral point of excavation-induced skin friction on existing piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2681 - 2687. (in Chinese))

(编校: 孙振远)