

开挖状态下既有托换桩基变形有限元分析

李德超^{1,2}, 钱建固^{1,2*}, 吴世明³, 刘冠水³

(1. 同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 浙江浙大网新集团有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 采用有限元数值方法分析开挖施工对开挖区域内托换桩影响特性。对上部结构与地基进行整体建模, 侧重分析桩的回弹变形, 以评估其对上部结构的不利影响, 进而依据桩顶回弹变形与承载特性确定千斤顶的变形调整方案。分析表明, 为控制开挖过程中顶板“零”变形状态, 需维持桩顶某常值加荷状态。在此托换调节过程中, 随着开挖深度的增加, 桩基浅埋部位轴力增大, 但深部桩身轴力减小。当开挖较深(超过5 m)时, 桩身底部出现负摩阻力从而该桩身区域出现局部受拉。

关键词: 托换桩; 基坑开挖; 有限元法; 回弹

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0238-05

作者简介: 李德超(1987-), 男, 河北廊坊人, 硕士研究生, 研究方向为基坑工程及桩基工程。E-mail: lidechao_1987@126.com。

Numerical analysis of deformation behaviors of underpinning piles during excavation

LI De-chao^{1,2}, QIAN Jian-gu^{1,2}, WU Shi-ming³, LIU Guan-shui³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Insigma group Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: The finite element method is used to analyze the effects of excavation on the behaviors of underpinning piles in excavation area. First, numerical model is adopted to simulate the interaction of structure-foundation-soil and estimate negative effects of the rebound deformation of underpinning piles on the top plate. Based on the deformation and bearing state of the underpinning piles, the adjusting deformation from oil jack is available. It is demonstrated that a constant level of load should be applied to the top of the underpinning piles so that the top plate has the “zero” additional deformation. During the process of loading adjustment, the axial force at the upper part of the underpinning pile increases and the axial force at the lower part decreases as the depth of excavation increases gradually. When the depth of excavation is over 5 meters, negative skin friction occurs at the lower part of pile and results at the axial tension in the bottom.

Key words: underpinning pile; pit excavation; finite element method; rebound deformation

0 引言

托换技术是一项难度大、费用高的工程施工技术。托换技术已在发达国家积累了丰富的经验^[1-3]并形成了专项的技术规范^[4]。近年来, 随着中国大型隧道和深埋地下结构物建造, 托换技术得到了广泛的应用并初步形成指导性的技术规程^[5]。然而中国现有的技术规程涉及桩基托换的关键性技术甚少, 定量评估复杂的桩基托换过程, 仍需借助于合理的数值手段^[6-7]。

地下穿越工程涉及的托换施工过程中往往随着开挖施工同时进行。基坑开挖使得坑内土体应力释放, 坑底土体会产生回弹隆起, 从而使开挖影响区域的托

换桩产生附加变形, 最终可能影响托换桩乃至上部结构的安全。Iwasaki等^[8]基于现场观察详细分析了基坑开挖对托换桩的影响, 得到随基坑开挖过程桩身轴力变化规律(见图1)。由分析可知随着基坑的开挖深度的不断增加, 桩身逐渐出现拉力且拉力不断增大。同时由于桩顶受到固端约束, 在开挖过程桩顶附近的压力也同时不断增大。

既有的托换桩问题研究主要集中在托换技术及托换过程中结构的荷载传递, 而基坑开挖对托换桩的影

响研究较少。本文从基坑开挖对托换桩的影响特性着手, 结合地基 - 桩 - 上部结构共同作用机理, 侧重探讨开挖状态下托换桩内力的演化及承载性能, 相关研究对类似工程具有指导性意义。

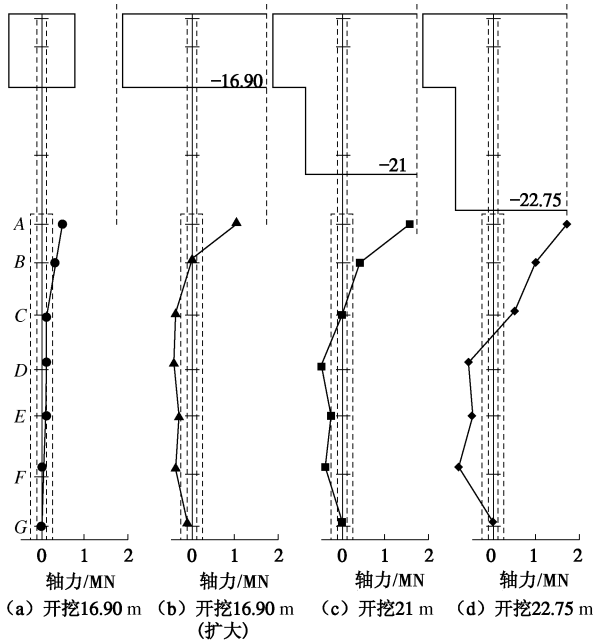


图 1 开挖过程中桩身轴力变化^[8]

Fig. 1 Change of axial load during excavation

1 工程概况

杭州某亲水平台位于钱塘江之江路上, 拟建运河隧道工程出口变坡段将从该平台底穿过。为了便于施工, 需将现有亲水平台下 11 个墩柱进行截断, 并新增 22 根托换柱, 然后进行隧道的开挖施工。托换桩的平面布置如图 2 所示。

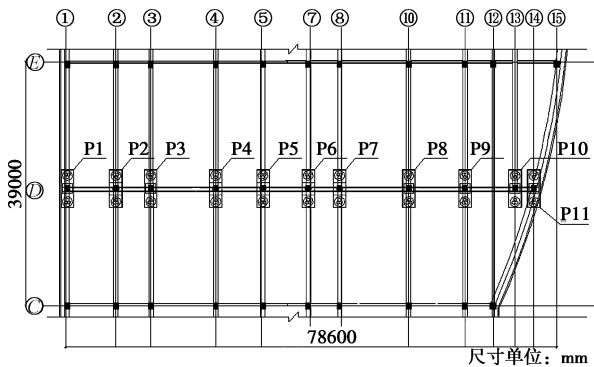


图 2 亲水平台结构平面图

Fig. 2 Structural plan of platform

亲水平台为地上一层建筑, 高度约 7.6 m。结构为典型的钢筋混凝土梁板结构。框架柱高 6.13 m, 截面尺寸为 800 mm×1000 mm; 桩基分别为 800 mm 和 1000 mm 的钻孔灌注桩, 有效桩长 40 m。

理论分析时, 本托换工程涉及两个方面问题: ①托换施工对结构的影响分析, 基于上部结构可允许的附加变形确定托换过程中千斤顶的加载方案, 此分析已经结束, 本文将不再分析讨论; ②开挖对托换桩及结构的影响分析, 确定开挖过程中托换桩的受力变形特性并评估上部结构所受的不利影响, 从而确定开挖施工过程中千斤顶的加载方案。本文将重点分析此过程。

2 有限元数值模拟

2.1 分析方法

本工程技术关键属于复杂的地基 - 桩 - 上部结构共同作用问题, 采用整体有限元数值方法是最合理的分析途径。为了确保开挖施工过程中平台结构及托换桩的安全, 需要评估基坑开挖后诱发托换桩的附加变形及其受力特性, 进而制定千斤顶加载调整方案。

数值分析过程中初始应力场的模拟非常重要, 包括结构原始应力及土体的初始应力状态。这里首先将根据土体自重及结构初始荷载状态计算地基及结构的初始应力场, 在初始应力场状态下进行开挖施工模拟, 进而得到开挖施工期的附加应力场。

2.2 模型及参数

计算采用弹塑性模型, 其中弹性考虑为各向同性, 各土层计算参数见表 1 (注: 由于土层可恢复变形一般为总体变形的 0.1~0.2 倍, 这里将弹性模量近似为 10 倍压缩模量)。根据土层参数, 桩土接触面的摩擦系数取 0.3^[9]。

表 1 土层参数

Table 1 Soil parameters

地层编号	土层	h/m	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	ν	E_s/MPa
① ₁	杂填土	2.7	6.0	20.0	0.31	3
① ₂	素填土	2.3	8.0	18.0	0.32	2.5
① ₃	淤填土	1.4	7.0	5.0	0.33	1
② ₁	砂质粉土	1.7	7.0	26.0	0.32	7
② ₂	砂质粉土	3.5	8.0	25.0	0.32	6
② ₃	砂质粉土	5.5	8.5	30.0	0.30	10
② ₃₁	粉砂	3.2	6.0	33.0	0.26	13
② ₄	砂质粉土	2.7	7.0	26.0	0.31	7
③ ₁	粉砂	5.1	6.0	34.0	0.26	15
③ ₂	粉质黏土	2.4	7.0	29.0	0.26	8
⑤	粉质黏土	2.3	15.0	17.0	0.36	4
⑥	粉质黏土	7.4	30.5	17.5	0.30	11

平台结构为典型的钢筋混凝土梁板结构, 其计算参数取为: 弹性模量 $E=2.5 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu=0.2$, 重度 $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$ 。

对亲水平台结构进行整体建模分析, 其尺寸为 80 m×42 m。平台板厚 0.2 m, 主梁截面尺寸为 0.7 m×1.2 m, 次梁为 0.35 m×0.75 m, 框架柱为 1.0 m×0.8

m, 桩入土深度为 40m, 平台净空高度为 7 m, 地基平面尺寸 260m×130m。

边界条件设置为: 地基地部为固定端约束, 4 个侧面水平方向位移约束; 平台顶均布荷载 (由覆土重与活载引起) 为 14.3 kPa。整体模型如图 3。

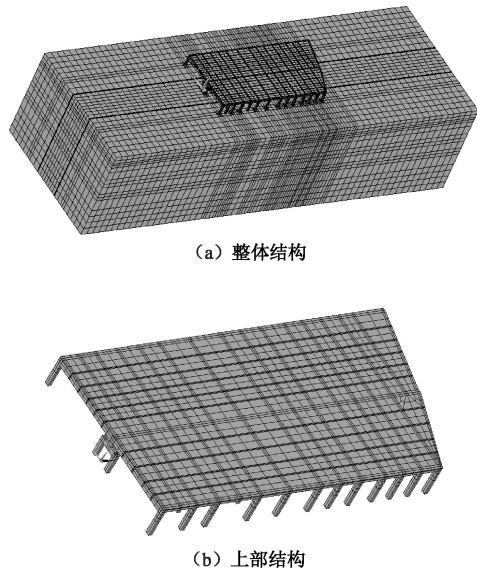


图 3 有限元单元网格

Fig. 3 Mesh of finite element

3 有限元分析

3.1 开挖对托换桩的影响

基坑开挖分 5 个开挖步, 开挖步 1: 开挖至地表下 0.9 m; 开挖步 2: 开挖至地表下 1.8 m; 开挖步 3: 开挖至地表下 3.8 m; 开挖步 4: 开挖至地表下 5 m; 开挖步 5: 开挖至地表下 6.5 m。

由于只有该基坑开挖范围内, 开挖施工对托换桩产生影响, 对其它既有桩影响不明显, 故本文只着重分析基坑开挖对托换桩的附加变形及其受力特性的影响。

(1) 桩顶回弹

各开挖步下, 桩身回弹值见表 2, 正值表示向上的位移。这里选取各托换桩最大回弹值。

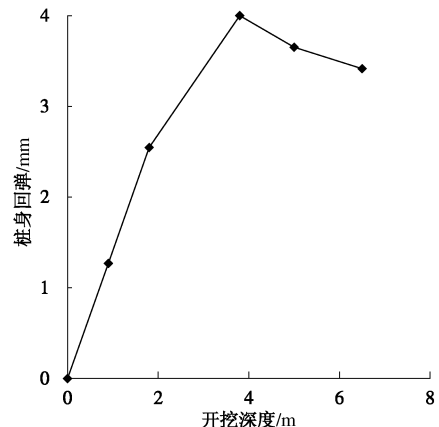
表 2 各开挖步下的桩身回弹

Table 2 Pile displacements at different excavation steps

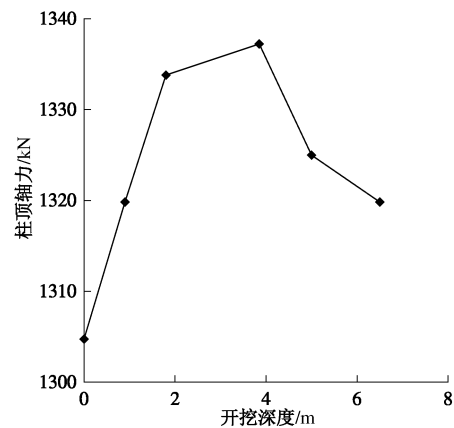
开挖步	1	2	3	4	5
桩顶位移/mm	1.2	2.5	4.0	3.7	3.4

此外, 桩身回弹及轴力随开挖深度的变化规律如图 4 所示。由图 4 (a) 可以看出, 在开挖步 4 之前随着开挖深度的增加, 桩身回弹量不断增加, 但增加的趋势逐渐平缓, 在开挖步 5 的时候桩开始出现下沉趋势, 这是由于土的承载力减小的缘故。本工程要求开

挖施工期间上部结构顶板附加变形需控制在±3 mm 以内, 否则必须设置千斤顶进行变形调节。



(a) 桩身回弹与开挖深度关系图



(b) 桩身轴力与开挖深度关系图

图 4 桩身回弹及轴力与开挖深度关系图

Fig. 4 Relationship among displacement, axial force of pile and excavation depth

由图 4 (b) 可以看出, 在开挖步 1 及开挖步 2 下, 柱顶轴力随开挖深度的增加不断增长。开挖步 3 以后柱顶轴力随开挖深度的增加开始出现下降趋势, 这是由于在开挖步 1 及开挖步 2 的情况下, 桩身回弹的原因, 导致托换柱与结构板产生挤压, 从而导致托换柱轴力增大。而开挖步 3 以后, 随更深范围的桩周土逐渐被开挖, 托换桩的承担荷载开始减小, 从而桩顶由回弹开始转为沉降, 但开挖结束状态的桩身轴力依然大于开挖前轴力。

(2) “零”变形控制状态下的受力分析

有限元分析表明, 开挖过程中, 托换桩回弹变形大于允许极限值, 为了减小托换桩基回弹变形对结构顶板的不利影响, 有必要在开挖过程中对托换桩桩顶荷载 (或变形) 进行合理的调节。为了最大程度减小作用于顶板的附加顶力, 最理想的状态是维持整个开挖过程中桩顶轴力保持不变, 从而让顶板处于所谓的“零”附加变形的理想状态。故在有限元模拟开挖过称中, 在每步开挖后都将对桩身轴力进行适当调整,

使其在各开挖工况下, 尽可能维持顶板处于“零”变形状态, 由图 4 不难看出, 欲维持上部结构“零”变形状态, 需维持托换桩桩顶荷载约为 1300 kN, 此荷载值将作为实际托换桩顶升加载的依据。

在维持这一恒载状态下, 随着开挖深度的增加, 桩身轴力变化规律如图 5 所示。

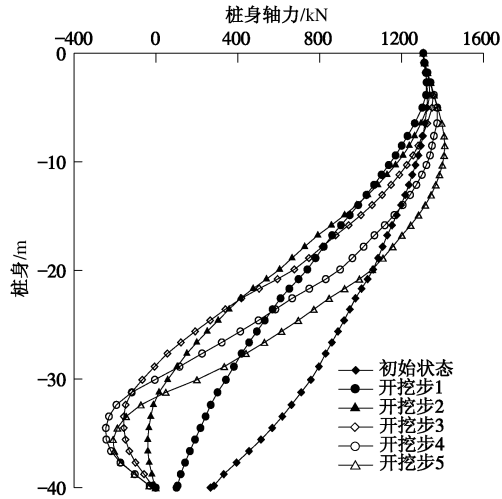


图 5 各开挖步下的桩身轴力

Fig. 5 Axial forces of pile at different excavation steps

从图 5 可以看出, 边桩受结构的初始压力为 1300 kN, 且沿桩身较均匀减小, 桩底轴力为 266 kN。随着基坑开挖的进行, 桩身轴力不断减小, 当开挖深度为 1.8 m 时, 桩身在距地面约 31 m 处出现拉力, 并在距地面约 35 m 处产生拉力峰值为 40 kN, 随后减小为零; 当开挖至 3.8 m 时, 拉力出现位置上移至桩身距地面 28.5 m 处, 拉力峰值出现在距地面 33.5 m 处, 为 157 kN; 当开挖深度达到 5 m 时, 拉力出现位置下移至桩身距地面 30 m 处, 且拉力峰值达到整个开挖过程的最大值为 245 kN, 出现在距地面 34.5 m 处, 当开挖至 6.5 m 时, 拉力出现位置继续下移至 32 m 处, 拉力峰值减小至 209 kN。这一桩身轴力的演化与 Iwasaki 等人^[8]实测数据结果基本相符, 但由于开挖深度较其较浅, 故桩身产生的轴向拉力相对较小。

同时, 由于地基-桩-结构共同作用及开挖后裸露出来的桩周摩阻力消失等原因, 随着基坑的不断开挖, 每个开挖步从地面以下至开挖面以上的桩都会出现轴力先增长后减小的变化趋势。

图 6 给出了不同开挖步下桩侧摩阻力变化曲线, 这里规定向上的摩阻力为正。在初始状态及开挖步 1 情况下, 桩侧摩阻力始终为正, 而开挖步 2 以后在桩身下部开始出现负摩阻力, 而中性点随着开挖的进行不断下移。同时, 初始桩侧摩阻力随深度缓慢增加。伴随开挖深度的增加, 桩侧摩阻力普遍表现为先增大后减小的趋势。

综合图 5, 6 可以看出, 托换桩在基坑开挖过程中, 浅埋桩身侧摩阻力增加, 深埋桩身侧摩阻力先增加后减小, 桩身中性点(即桩身在此受到最大了拉力值)逐渐下移, 致使桩身轴力不断减小, 甚至产生深埋段出现拉应力。故对于边桩, 应实时监测其底部的裂缝问题, 设计时有必要考虑桩身的抗拔特性。

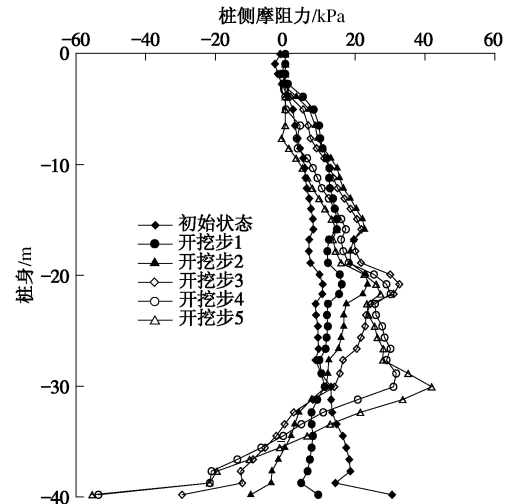


图 6 各开挖步下的桩侧摩阻力

Fig. 6 Side frictions of pile at different excavation steps

同边桩分析, 开挖前中桩桩顶初始轴力约为 2000 kN, 在维持这一荷载状态下进行开挖, 各工况下轴力变化规律如图 7 所示。由图可以看出, 受结构的初始压力为 2000 kN, 且随桩身较均匀减小, 桩底受轴力为 350 kN。随着开挖的进行, 桩顶轴力不断增大, 其变化趋势与边桩相似。各开挖步下桩身轴力变化趋势与边桩相仿, 但由于桩身所受的初始轴力较大, 故在基坑开挖过程中并没产生明显的拉力, 只是在开挖到 5 m 的时候, 在距开挖面 38 m 处出现峰值 13 kN 的拉力, 在开挖至 6.5 m 的时候产生 7 kN 的拉力, 这一较低水平的拉应力对桩身变形的影响很小。

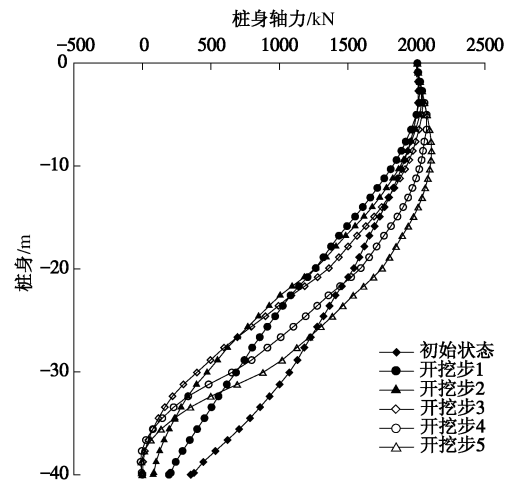


图 7 各开挖步下的桩身轴力

Fig. 7 Axial forces of pile at different excavation steps

图8给出了桩侧摩阻力变化规律。其变化趋势与边桩相似,只是在各开挖步下无明显负摩阻力的产生。无疑,这与轴力分布规律相吻合。

综合图7,8可以得出,结构中间桩在开挖过程中一直受向下的轴向压力,只是在开挖至开挖面的时候在桩底部产生微小的拉力,故整个开挖过程中桩应力特性较为安全,建议施工时注意控制位移即可。

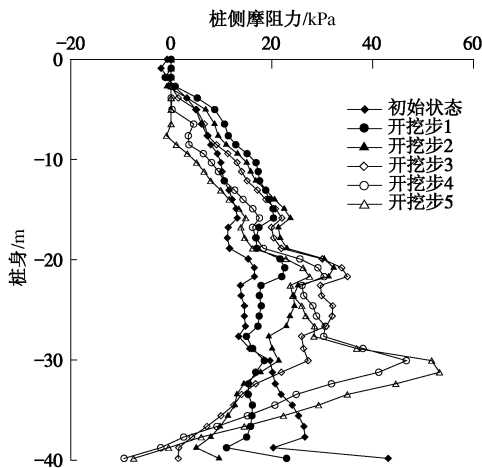


图8 各开挖步下的桩侧摩阻力

Fig. 8 Side frictions pile at different excavation steps

4 结 语

本文对地基-桩-上部结构进行整体有限元建模,并将地基考虑为弹塑性材料。数值分析侧重于模拟基坑开挖状态下托换桩的力学特性,定量评估了诱发托换桩轴力及摩阻力的演化特性。分析表明:

托换桩在基坑开挖过程中的轴力变化主要受两方面的因素影响:基坑开挖深度和托换桩初始状态下的轴力值。开挖会使桩底受拉,开挖越深产生的拉力越大。同时桩的初始轴力越大会使桩随开挖产生的拉力值变小。

在开挖过程中,结构外边界的托换桩的桩底将产生较大的(约245 kN)拉力,因此,托换桩的设计应该考虑桩身底部区段的抗拔受力特性;而结构中部的托换桩在开挖过程中受到的拉了很小,可按抗压桩进行设计施工。

参考文献:

- [1] THORBURN S, HUTCHISON J. Underpinning[M]. Glasgow: Surrey University Press, 1985.
- [2] TURNER J P, STEELE J A, MAHER W F et al. Design, construction, and performance of an anchored tangent pile wall for excavation support[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 2004, 124: 322-333.
- [3] POULOS H G. Design of underpinning piles to reduce settlements[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 1994, 40(2): 1000 - 1010.
- [4] DIN-4123. Excavations foundations and underpinnings in the area of existing buildings[S]. Germany, Ersatz, 2000.
- [5] CECS 295:2011 建(构)筑物托换技术规程[S]. 2011. (CECS 295:2011 Technical specification for underpinning for buildings and structuring[S]. 2011. (in Chinese))
- [6] 熊小刚, 江见鲸. 桩基托换对上部结构影响的非线性有限元分析[J]. 特种结构, 2003, 20(1): 8 - 10. (XIONG Xiao-gang, JIANG Jian-jing. The nonlinear finite element analysis of the affect of superstructure with pile underpinning[J]. Special Structures, 2003, 20(1): 8 - 10. (in Chinese))
- [7] 贾强一, 张鑫, 应惠清. 桩基础托换开发地下空间不均匀沉降的数值分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3500 - 2504. (JIA Qiang-yi, ZHANG Xin, YING Hui-qing. Numerical analysis of settlement difference for pile foundation underpinning for constructing underground space[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3500 - 2504. (in Chinese))
- [8] IWASAKI Y, WATANABE H, FUKUDA M, et al. Construction control for underpinning piles and their behaviour during excavation[J]. Géotechnique, 1994, 44(4): 681 - 689.
- [9] 钱建固, 贾鹏, 程明进, 等. 注浆桩土接触面试验研究及后注浆抗拔桩承载特性数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 662 - 668. (QIAN Jian-gu, JIA Peng, CHENG Ming-jin, et al. Experimental study of grouting pile-soil interface and numerical simulation of bearing behavior of side-grouting uplift pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 662 - 668. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)