

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.08.047

超大面积深基坑盆式开挖的工程实例分析

唐韶军

(上海建工集团股份有限公司,上海市 200080)

摘要: 基坑回弹变形是基坑开挖卸载过程影响基坑安全较大的因素之一。基坑回弹量与卸荷量、基坑面积、支撑和围护结构等方面有关,基坑回弹量过大时,会带动立柱桩上抬,将降低混凝土内支撑的承载力或使钢支撑失稳破坏,超大型基坑回弹变形尤其明显。除对基坑支护结构采取针对性措施外,通过基坑土方开挖工序的优化,也可以达到降低基坑回弹量的目的。结合上海宝山区某全地下污水厂超大面积深对基坑工程实例,分析盆式开挖方式对超大面积深基坑回弹的影响。最终计算及实测数据表明:由于底板提前分块形成,充分发挥了工程抗拔桩的作用,基坑回弹变形量显著减小。

关键词: 轨道交深基坑;盆式开挖;坑底回弹;立柱上抬;分区分块浇筑

中图分类号: TU46⁺3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)08-0200-05

0 引言

深基坑的平面尺寸对内支撑的变形及坑底回弹有着直接的影响,而坑底回弹量的大小又会对支撑产生附加内力,影响支撑的承载力或者增大支撑的配筋。一般而言,为控制深基坑开挖过程中的基坑变形,通常采取将超大面积基坑分割成 10 000 m² 左右独立的小坑的方式,并依次进行开挖、支护及结构回筑,以达到控制内支撑长度、减小坑底暴露面积的目的,减小支撑变形及坑底回弹量,避免立柱的过量上抬而对支撑产生附加应力造成支撑承载力降低。相对整坑方式,分坑方式在通常投资、工期、分隔墙的后期处理等方面存在着劣势,在环境条件允许时,采用整坑方案也是经济技术等综合比选时的可选方案之一。整坑方案需要结合工程自身特点、要求,辅以必要的基坑变形控制措施来弥补和减小大面积基坑开挖所造成超过环境要求许可时变形。

李颖菲^[1]研究表明工程桩周围土体的回弹量显著低于邻近土体,靠近基坑中心的工程桩周围土体回弹减小明显;BoseSK 等^[2]认为基坑开挖的宽度、挡土墙的插入深度以及支护结构的刚度对基坑地表沉降变形、坑底回弹变形以及支护结构变形均存在影响。Gu X 等^[3]的研究表明基坑的抗隆起稳定系数对于基坑的回弹变形和围护结构的水平位移具有明显

的影响。陈永福^[4]提出了土体非线性固结模型,研究了基坑的形状、开挖深度以及支护结构刚度对坑底回弹变形规律的影响;潘林有等^[5]认为回弹区的深度与基坑宽度相关,基坑的宽度越小,回弹区深度也越小;庞贵磊等^[6]以上海某项目现场监测数据为依据,提出了一种半理论的回弹变形计算方法;张耀东等^[7]在基坑抗隆起稳定性的典型计算方法的基础上,综合考虑了基坑的形状、大小、开挖深度、挡土墙埋深、坑底被动区地基加固处理及工程桩等因素对坑底回弹变形量计算结果的影响,修改完善了计算方法。

本文以上海宝山区某全地下污水厂超大面积深基坑工程为实例,选取控制基坑坑底回弹、立柱上抬为目标,在整坑开挖条件下,优化土方开挖方案,限制基坑回弹量,指导基坑开挖施工。

1 工程概况

上海某全地下污水处理厂工程污水处理地下箱体结构平面尺寸约 360 m × 227 m,基坑面积约 75 000 m²,如图 1 所示。基坑开挖深度 14.4 ~ 15.7 m,局部深坑 17.60 m,如图 2 所示。基坑采用地下连续墙作为围护结构,设置 3 道钢筋混凝土内支撑,局部深区设置 4 道钢筋混凝土支撑,坑底搅拌桩裙边加固。基坑采用临时钢格构柱作为水平支撑系统的竖向支承构件,柱下支承桩采用直径 1 000 mm 的钻孔灌注桩。地下箱体结构采用直径为 800 mm 钻孔灌注桩承载及抗拔,平均桩长 28 m,桩间距约 3.8 m。

收稿日期: 2023-10-03

作者简介: 唐韶军(1974—),男,本科,高级工程师,从事市政工程施工工作。

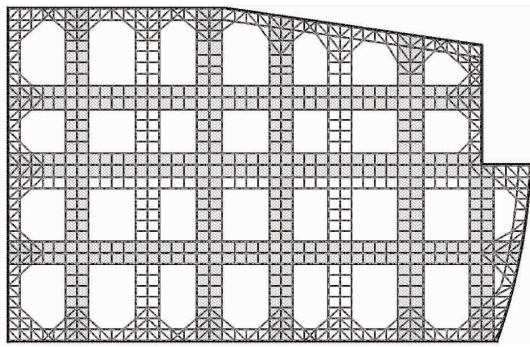


图1 基坑平面图

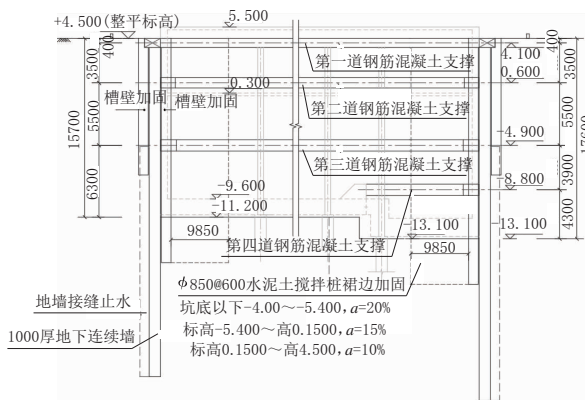


图2 基坑剖面图(单位:mm)

本工程基坑开挖范围内土层主要包括：①₁ 填土、①₂ 浜底淤泥、② 粉质黏土、③ 淤泥质粉质黏土、③₁ 砂质粉土、④ 淤泥质黏土及⑤₁ 黏土，坑底以下土层主要为⑤₃ 粉质黏土夹砂质粉土、⑤₄ 层粉质黏土、⑥ 层粉质黏土、⑦₁₁ 砂质粉土、⑦₁₂ 粉质黏土夹砂质粉土及⑧₁ 黏土。典型地质剖面如图3所示，各土层性质参数见表1。

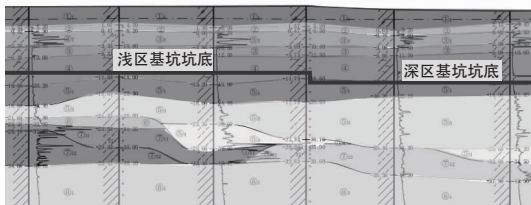


图3 典型地质剖面图

表1 基坑开挖涉及地层土层性质表

层序	地层名称	Ps 值 / MPa	重度 / (kN·m ⁻³)	直剪固快峰值强度		地基承载力特征值 / kPa
				c/kPa	φ/(°)	
②	粉质黏土	0.944	18.8	20.4	18.5	80
③	淤泥质粉质黏土	0.708	17.4	11.2	15.7	55
③ ₁	砂质粉土	3.042	18.6	3.7	30.1	90
④	淤泥质黏土	0.711	16.8	10.9	11.6	50
⑤ ₁	黏土	0.937	17.4	13.8	13.5	60
⑤ ₂	砂质粉土	8.295	18.2	2.9	30.6	95

2 基坑挖土方案比选

2.1 分层支撑开挖方案

如图4所示，此方案按常规顺作法依次按支撑浇筑、土方开挖的方式开挖至坑底，浇筑底板。总体施工顺序如下：场平→地墙、立柱桩、工程桩施工→冠梁施工→土方开挖→第一道支撑施工→土方开挖→第二道支撑施工→土方开挖→第三道支撑施工→土方开挖至浅区坑底→浅区底板和深区第四道支撑施工→深区开挖至坑底、底板浇筑→结构回筑、支撑拆除。

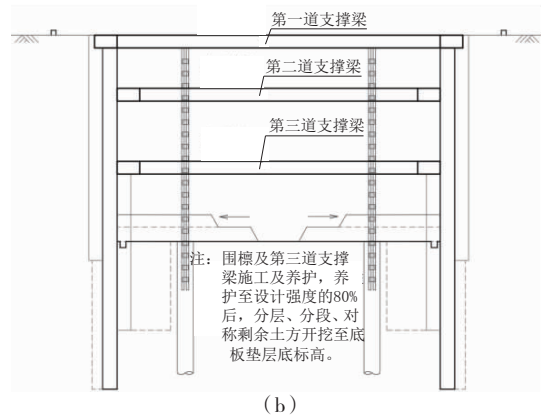
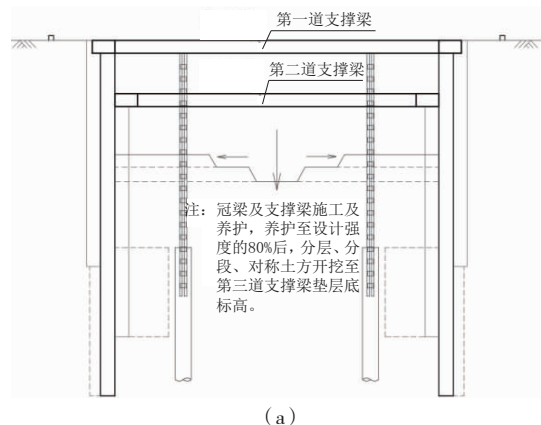


图4 分层支撑开挖方案示意图

此方案在基坑整体开挖至坑底、底板浇筑前，土体卸荷回弹持续产生及累积，没有充分利用工程桩的抗拔作用，无法在底板浇筑前限制土体回弹。

2.2 盆式开挖方案

为充分发挥工程桩的抗拔作用，最大限度减少坑底土回弹的时间跨度，需提前进行垫层封底、底板浇筑。由此，在基坑第一、二道支撑形成后，第三、四层土采取盆式开挖，分块浇筑第三道支撑并继续向下盆式开挖至坑底，并提前形成局部底板，如图5所示。本工程中对整个基坑采用盆式开挖，开挖顺序示意图如图6所示，第三、四层土均逐步按照分块1至分块9的顺序开挖；且当第三层土挖至分块4

时,第四层土开挖分块1。第三层土开挖工期为58d,第四层土开挖工期为55d,第三、四层土开挖工期搭接20d。

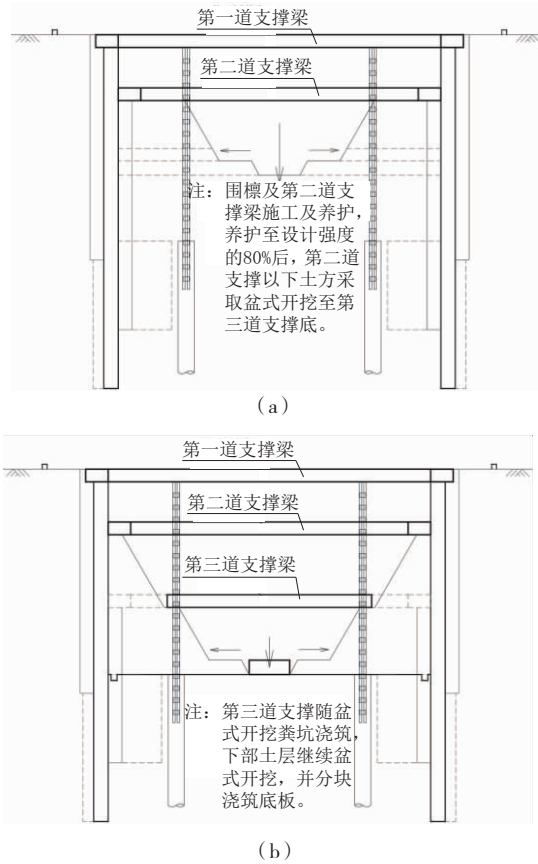


图5 盆式开挖方案示意图

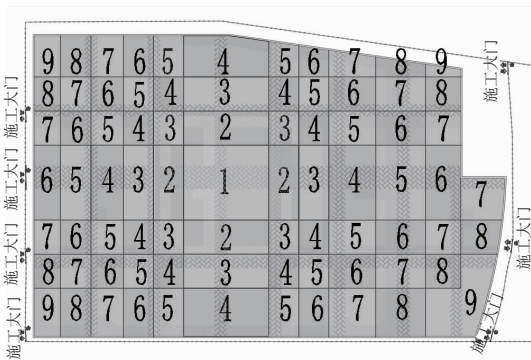


图6 盆式开挖顺序示意图

此时,坑底土的回弹时间跨度相当于减少了等待第三道支撑整体形成的时间段,平均减少约45d。同时,先行完成的底板又对周边尚在开挖的土体形

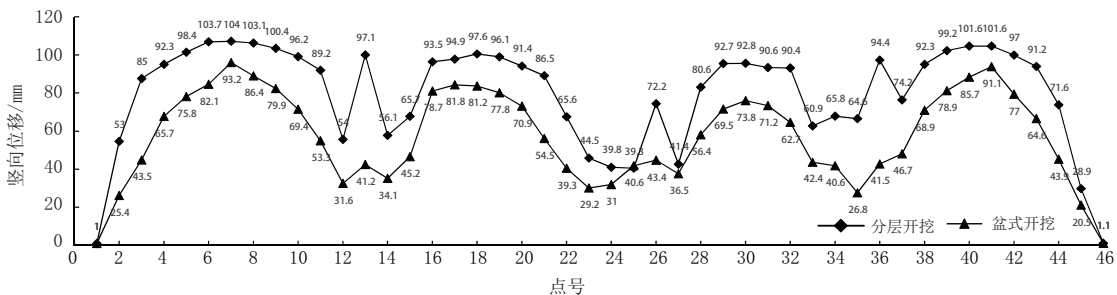


图9 两方案坑底回弹量对比图(单位:mm)

成一定约束,限制其回弹。

2.3 基坑坑底回弹有限元分析

针对两种基坑开挖方案,采用MIDAS有限元分析软件对基坑及周边环境进行三维的有限元计算分析。如图7所示,基坑深度为14.6、17.4m,长度约为336m,宽度约为227m;计算模型取长边方向取458.4m,短边方向取361.1m,深度为60m;围护采用1000mm厚地下连续墙,深39.3m;对底部及四周边界施加固定约束,混合网格生成器划分模型实体单元。

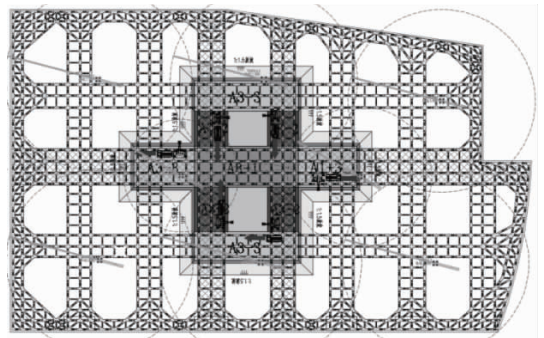


图7 盆式开挖施工方案示意图

根据图8有限模型计算所得数据绘制图9,分层开挖方案坑底回弹最大值141mm,多数在50~100mm之间,平均值约77.2mm。盆式开挖方案坑底回弹最大值93mm,多数在40~85mm之间,平均值约为55.6mm。后者平均回弹量降低约28%,坑底土体产生的回弹得到了有效减小,而两者的地下连续墙水平位移基本一致。此外,曲线中间三处回弹量低点,反应的是立柱桩处的上抬量,盆式开挖方式的上抬量平均值约40.8mm。

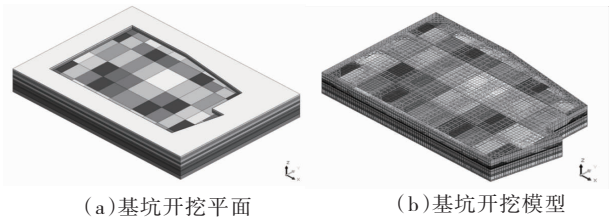
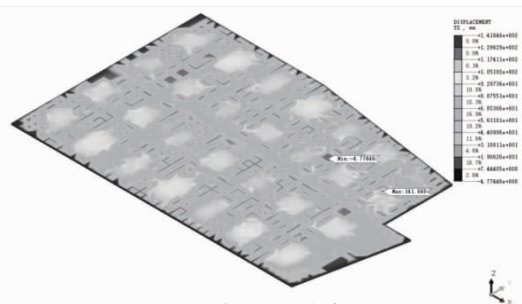


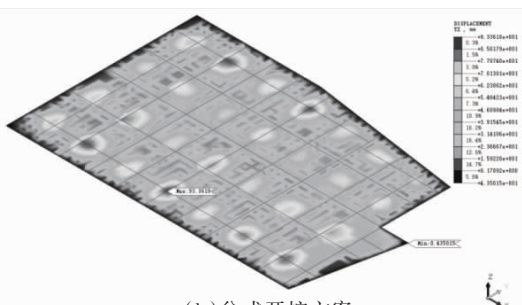
图8 有限元模型示意图

如图10所示,分层开挖方案地墙最大变形量为44.5mm,位于基坑长边两侧中部;采用盆式开挖方案后地墙最大变形量为45.4mm,位于基坑端边两侧

中部。两个方案所产生的地墙最大变形基本是一致的,可以认为采用盆式开挖方案不会对地墙变形产生影响。

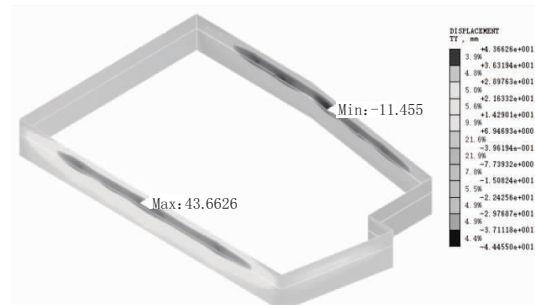


(a)分层开挖方案

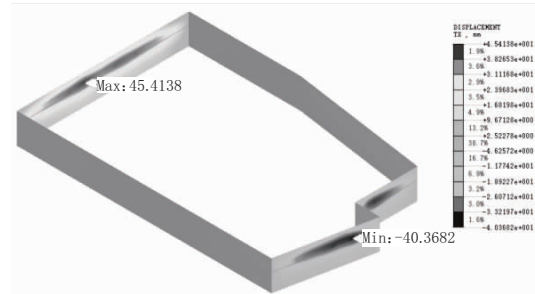


(b)盆式开挖方案

图 10 有限元坑底回弹计算结果(单位:mm)



(a)分层开挖方案



(b)盆式开挖方案

图 11 地墙变形计算结果(单位:mm)

综上所述,顶部两道支撑形成后,对深部土体采取盆式开挖方法,提前分块浇筑底板,对于控制坑底土体的回弹量具有较显著的效果。

2.4 风险分析及应对措施

陆培毅^[8]通过分析指出,基坑形状、开挖面积及基坑开挖深度等因素对坑底隆起有显著影响;最大回弹量随开挖面积的增加而增大,对于相同的基坑形

状和开挖面积,最大回弹量随开挖深度的增加而增大。本工程地下箱体结构平面尺寸约 360 m × 227 m,基坑面积约 75 000 m²,为超大面积基坑,容易产生大幅的坑底回弹。针对施工过程中发生大幅度坑底回弹的风险,将采取以下应对措施。

(1)检查坑底是否有积水,排干积水。加快垫层施工,坑外四周地面尽量卸载。将现场状况汇报设计单位,按设计要求进行坑底地基土加固。

(2)基坑外卸载。

(3)坑底加压重:如堆砂石袋或其它压重材料,对基坑进行压浆加固。

(4)用水泵进行深层降水减压。

3 工程实测数据分析

本工程于 2022 年 11 月开始土方开挖,2023 年 2 月第二道支撑系统形成(见图 12),此后开始按盆式开挖方案开挖至底板,逐渐形成第三道支撑及底板(见图 13)。2023 年 5 月第三道支撑全部形成,浅区底板则于 2023 年 7 月全部形成。本工程在首道支撑立柱顶共设置了 95 个立柱竖向位移监测点,进行严密监测(见图 14)。



图 12 第一、二层土开挖施工图



图 13 第四层土开挖施工图

根据第三方监测数据,选取第二道支撑形成、第三道支撑全部形成、浅区底板全部形成及结构回筑至地面 4 个时间点,统计所有立柱竖向位移数据的最大值和平均值,具体见表 2。最终的立柱最大上抬量为 85 mm,位于基坑中部区域,立柱上抬平均值约 50 mm。底板形成后,立柱上抬趋于稳定,随着结构回筑,总体上略有下沉。总体而言,实测数据的立柱上

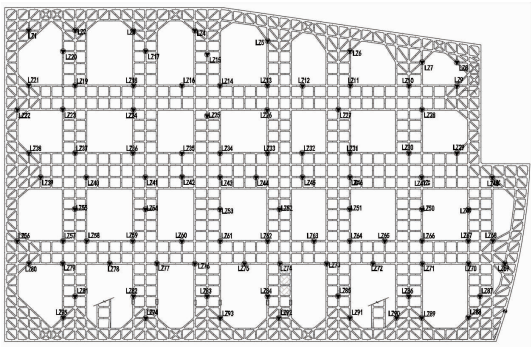


图 14 立柱竖向位移监测点布置平面图

抬量与有限元分析的数据较为接近。

表 2 立柱竖向位移监测值统计表

工况	立柱竖向位移		
	测点	最大值	平均值
第二道支撑形成 (开挖至 4.5 m 深)	LZ59、LZ77、LZ35	29.51	11.81
第三道支撑全部形成 (开挖至 10 m 深)	LZ45、LZ64、LZ44	56.67	31.01
浅区底板全部形成 (开挖至 14.4 m 深)	LZ61、LZ53、LZ44	85.07	49.92
支撑拆除、结构回筑至 地面	LZ61、LZ44、LZ 53	83.67	47.83

以下选取基坑中部区域立柱竖向位移最大的测点进行分析,表 2 为立柱竖向的统计,图 15 所示为基坑中部区域立柱竖向位移随时间变化曲线。

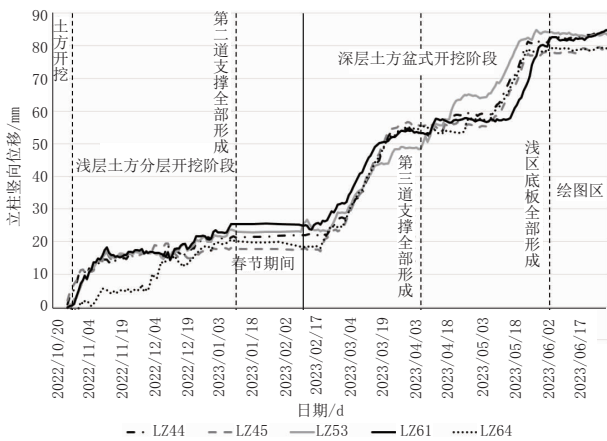


图 15 基坑中部区域立柱竖向位移随时间变化曲线图

(1)在浅层土方开挖完成后,春节假期停工及浅区底板形成后的两个时间段的平滑的曲线可以看出,立柱上抬随着基坑土方开挖的进行而发生,土方开挖暂停期间或者结束后,立柱上抬便很快趋于稳定。由此,可以近似认为基坑回弹引起的立柱上抬是

土体卸荷后瞬时发生的,由于立柱桩的抗拔作用,土体的蠕变效应产生的立柱上抬量较小,与一般的概念有一定偏差。

(2)在第三道支撑全部形成的时间点前后,立柱上抬量有一小段为平段。该时间段主要工况为盆式开挖至坑边时,暂定了继续向下开挖,而进行坑边一圈剩余的第三道支撑浇筑、养护施工。曲线的平段正是反应了该段时间基坑没有开挖的工况。

(3)各立柱上抬曲线形态与常规分层开挖方式基本一致,说明盆式开挖是可行的。本工程超大面积整坑盆式开挖相当于在地墙及浅部两道支撑的支护下,在坑内进行放坡施工。在保证坡顶足够的留土宽度及坑内裙边加固后(本工程留土宽度约 20 m,裙边加固宽度约 10 m),第三道支撑分块形成对围护墙的侧向变形影响较小。

4 结 语

本工程对土方开挖方案进行了分析比选,采用了在浅部第一、二道支撑形成后,第三、四层土采取盆式开挖,分块浇筑第三道支撑并继续向下盆式开挖至坑底,并提前形成局部底板的开挖方式,充分发挥了工程桩的抗拔作用,有效控制了坑底回弹,确保了支撑体系的安全。

参考文献:

- [1] 李颖菲. 超载作用下考虑坑底工程桩的基坑变形特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
- [2] Bose S K, Som N N. Parametric study of a braced cut by finite element method[J]. Computers & Geotechnics, 1998, 22(2): 91-107.
- [3] Gu X, Hu J, Huang M. K0 of granular soils: a particulate approach[J]. Granular Matter, 2015, 17(6): 703-715.
- [4] 陈永福. 深基坑开挖回弹计算的探讨[C]// 首届全国岩土工程博士学位论文讨论会论文集. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- [5] 潘林有, 胡中雄. 深基坑卸荷回弹问题的研究[J]. 岩土工程学报, 2002(1): 101-104.
- [6] 庞贵磊, 刘庆华, 刘国彬, 等. 分条开挖时土条宽度影响基坑隆起的研究[J]. 建筑技术, 2004, 35(12): 931-933.
- [7] 张耀东, 龚晓南. 土基坑抗隆起稳定性计算的改进[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 1): 1378-1382.
- [8] 陆培毅, 余建星, 肖健. 深基坑回弹的空间性状研究[J]. 天津大学学报, 2006, 39(3): 301-305.