

基于 FLAC3D 的深基坑支护三维数值模拟分析

程泽海,于振帅

(浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023)

摘 要: 为研究基坑不同支护方式对围护结构变形及稳定性的影响,利用 FLAC3D 三维快速拉格朗日差分方法对某地铁深基坑分步开挖与支护进行数值模拟,并对两种支护方案进行对比分析。研究表明:地下连续墙最大水平位移出现在墙顶,且位于地下连续墙长度方向的中部;在分步开挖时,第一步开挖时地下连续墙的位移变化率与第二步开挖时的位移变化率相同。研究还发现,采用地下连续墙加内支撑的支护方案对地下连续墙的侧向位移有较明显的抑制作用。

关键词: 深基坑;支护结构;数值模拟分析;FLAC3D

中图分类号: TU476.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2017)01-0037-06

Three-dimensional numerical simulation analysis of deep foundation pit supporting based on FLAC3D

CHENG Zehai, YU Zhenshuai

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: To study the influence of different supporting methods of foundation pits on the deformation and stability of a retaining structure, FLAC3D was adopted to conduct a numerical simulation on the stepwise excavation and support of a certain subway deep foundation pit, accompanied with comparison of two supporting schemes. The results show that the maximum horizontal displacement of the underground diaphragm wall appears at the top and the center along the length of the wall. Moreover, the displacement rate of the wall in the first-step excavation is the same as that of the second-step. It is also found that the inhibitory effect of lateral displacement of the underground diaphragm wall is relatively obvious when the wall is internally supported as adopted in one supporting scheme.

Keywords: deep foundation pits; supporting structure; numerical simulation analysis; FLAC3D

随着中国轨道交通的兴建和发展,地铁车站基坑的开挖深度越来越深,其地质条件和周边环境也越来越复杂。由于地铁轨道穿过的地段城市交通流量较大,且地下市政工程比较密集,这就要求深基坑支

收稿日期: 2016-12-27

通信作者: 程泽海(1967—),男,安徽省宣城人,教授,博士,主要从事基础工程研究。E-mail:chengzh2008@163.com。

护既要保证坑内的正常安全作业,又要预防坑底变形过大及周围土体产生过量位移,在保证自身稳定的同时又要兼顾基坑相邻建筑物、构筑物及地下管网的安全。这对地铁车站深基坑工程的基坑围护设计和施工提出了更高的要求。因此,深基坑开挖与支护问题已经成为岩土工程界的热点问题之一^[1]。

目前,基坑工程逐渐向深度更深与规模更大的方向发展,对不同的工程特点要选用合理的支护形式,否则容易引起土体严重滑移,基坑严重失稳变形等工程事故,这就对深基坑支护体系的设计理论和施工技术提出了更高的要求^[2]。丁勇春等^[3]认为基坑与土体的变形相互关联,具有明显的空间特性;刘继国等^[4]通过模拟基坑开挖发现,坑底墙后土体水平位移最大,墙后土体最大沉降位于墙后 15 m 左右处。为了对可能发生的危险作出预测,需研究支护结构的内力与变形,笔者对某地铁车站深基坑支护进行模拟并作对比分析,讨论了在地下连续墙和地下连续墙加内支撑 2 种方案下,地下连续墙侧向位移的变化规律,可作为类似基坑工程的设计和施工之参考。

1 弹塑性分析理论

1.1 力学分析软件 FLAC3D

FLAC3D(fast lagrangian analysis of continua 3D)是 20 世纪 90 年代美国 ITASCA 公司研发出的连续介质力学分析软件^[5],能够运用岩石力学理论模拟材料在达到强度极限或塑性流动时的三维力学性质,适用于模拟施工过程和结构失稳问题,具有在大变形问题求解过程中可采用小变形的本构关系等优点^[6]。FLAC3D 包含非线性弹性、Mohr-Coulomb 和剑桥模型等 10 种弹塑性本构模型及 5 种计算模式,可以模拟岩土工程中桩基、衬砌和土工织物等多种结构,采用显式差分法和混合离散法使得求解更准确,是目前重要的数值方法之一,可以模拟复杂的岩土工程或力学问题^[7-8]。

1.2 弹塑性本构关系

在基坑开挖过程中,土体内部屈服会形成一定范围的塑性区并产生塑性变形,对此,笔者选用 Mohr-Coulomb 模型来模拟土的本构关系^[9]。Mohr-Coulomb 模型以 Mohr-Coulomb 强度包线作为屈服线,屈服面函数为:

$$F = R_{mc}q - p \tan \varphi - c, \quad (1)$$

式(1)中: φ 为材料的内摩擦角; c 为材料的黏聚力; p 为平均正应力; q 为广义剪应力。 R_{mc} 的表达式如下。

$$\begin{cases} R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin \left(\Theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left(\Theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \varphi, \\ \cos(3\Theta) = \frac{J^3}{q^3}, \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: Θ 为极偏角; J 为第三偏应力不变量。Mohr-Coulomb 模型中的屈服面如图 1 所示。

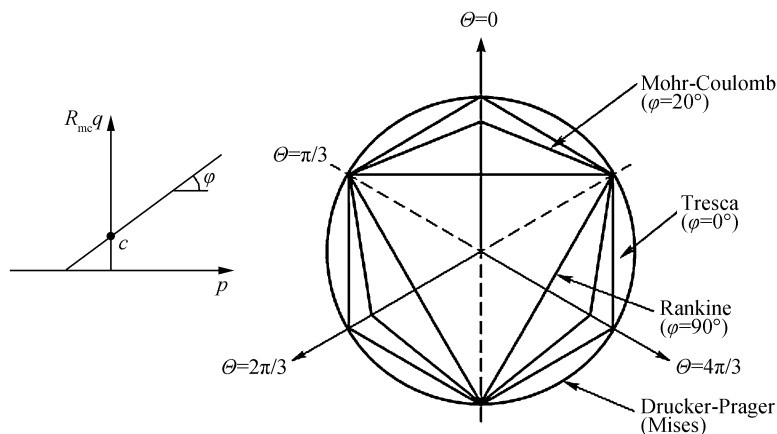


图 1 Mohr-Coulomb 模型屈服面

Fig. 1 Yield surface of Mohr-Coulomb model

1.3 接触面单元模型

FLAC3D 中的接触面单元可以用来模拟岩土体中的节理、断层,地基与土体之间的接触,相互碰撞物体之间的接触面,以及空间中的障碍边界条件等^[10]。在基坑支护与开挖分析中,支护结构与土体之间的接触行为用接触单元模拟。其基本方法是:当接触面上的切向力小于最大切向力 $|F_s| < F_{smax}$ 时,接触面处于弹性阶段;当 $|F_s| = F_{smax}$ 时,接触面进入塑性阶段^[11]。其中 F_{smax} 表达式为:

$$F_{smax} = c_{if}A + \tan\varphi_{if}(F_n - uA), \quad (3)$$

式(3)中: c_{if} 为接触面的黏聚力; A 为接触面的面积; φ_{if} 为接触面的摩擦角; u 为孔隙水压力。

2 工程实例介绍

2.1 工程概况

某地铁车站基坑长 180 m,标准断面宽度为 18 m,为地下 2 层式结构,顶板覆土厚度大于 3 m,开挖深度 12 m。该工程主体建筑面积 25 194.9 m²,车站为地下 2 层箱型结构。基坑场地狭小,两旁为密集的中高层建筑物,且紧邻城市道路,车站所处站址位置周边环境复杂,交通流量大。

2.2 工程地质与水文地质条件

根据岩土工程勘察报告,该地区基岩为泥盆系下统与白垩系下统的碎屑岩,分布于该地区中部、南部的低山和丘陵地带,拟建地区未发现岩溶、危岩和液化土层等不良地质条件。人工填土层结构松散,强度较低,粉质黏土层可塑状态具有弱膨胀性。

该地区浅层地下水属于第四系孔隙潜水,主要赋存于砂砾层中,补给来源主要为地表径流和大气降水,是该区富水层位,潜水位埋深 2.9~3.6 m,具微承压性;上覆多层粉质黏土,层厚 2.0~7.0 m。该地区砂砾和圆砾层为强透水层,其余各层为弱透水层,土层力学性质参数见表 1。

表 1 土层力学性质参数

Table 1 Mechanical parameters of soil layer

土层名称	层厚/m	重度/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	土层描述
人工填土	1.10~1.90	19.9	10	10	灰黄色,较松散
粉质黏土	10.0~20.0	18.9	19.4	17	棕红色,可塑,土质随深度变软
淤泥质黏土	5.80~9.50	17.6	14.2	13.7	灰黑色,流塑状,夹薄层粉砂
粉土	2.00~5.80	18.4	22	18	黄褐色,松散,含少量腐殖质
粗砂及粗砾砂层	2.30~3.90	19.8	34	0	松散,含砾、云母屑
泥岩	19.12~32.0	24	35.5	798	紫红色

3 三维数值计算

3.1 基坑支护结构方案选择

悬臂式排桩墙支护结构适用于基坑开挖深度较浅、土质较好,而且可允许产生较大变形的基坑,软黏土地基的基坑深度一般小于 6 m;内支撑式支护结构,围护体系可采用排桩或地下连续墙,此方法应用最为广泛,对各种土层均适用,若采用排桩墙围护体系,基坑深度一般大于 6 m,并辅以水泥土止水帷幕;地下连续墙加内支撑式支护结构适用于建筑物密集地区,侧压承受能力强,开挖后变形小,对周边建筑物影响较小;加筋水泥土墙加内支撑式支护结构根据水泥土施工方法分为 SMW(soil mixing wall,新型水泥土搅拌桩墙)工法和 TRD(trench-cutting and re-mixing deep wall method,混合搅拌壁式地下连续墙)工法,前者构造简单,工期短,对周围环境影响小,适用于黏性土和砂性土,后者则适用于各种土层,且形成的连续墙厚度一致,均匀性好,造价更低,对周边构筑物或管线影响较小,施工深度可达 60 m;排桩墙加拉锚式支护结构适用于可提供较大的锚固力地基中的基坑,保证围护结构有较大的刚度,基坑面积大,优越性显著,通常采用注浆法增加锚杆锚固力^[12]。该工程开挖深度为 12 m,车站所处位置周边环境复杂,交通流量大,土层以黏土为主,综合考虑,该深基坑工程采用地下连续墙加内支撑式支护结构的支护方案。

3.2 支护结构

围护结构为 1 000 mm 厚地下连续墙加内支撑(两道内支撑加一道换撑)的支护体系。地下连续墙嵌固深度为 20 m,混凝土强度为 C35,第一道和第二道支撑均采用直径 D 为 600 mm,壁厚 t 为 16 mm,水平间距为 3 m 的钢管支撑。冠梁同时作为支撑的围檩,钢围檩为双拼工字型钢。

3.3 模型建立

由于该基坑整体形状是规则布置,根据对称性原理,取实际基坑工程尺寸的一半进行研究,此外,基坑长 180 m,参考平面应变模型分析,长度方向处于相同的受力状态,若选取实际模型会产生重复计算并降低计算效率,故截取一部分进行研究。基坑开挖的影响范围约为开挖深度的 2~3 倍,根据初步计算结果和经验,最终确定的模型尺寸为 90 m×150 m×40 m。在建模过程中,地下连续墙和周边土体采用实体单元模拟,钢支撑采用梁单元模拟,计算模型如图 2 所示。

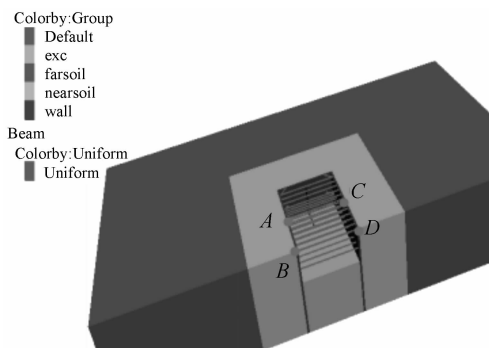


图 2 计算模型

Fig. 2 Numerical model

3.4 数值模拟结果分析

在基坑开挖后,为了研究地下连续墙的位移,简化地下连续墙的模型,取图 2 中的 A、B、C、D 点所对应的水平位移进行研究。第一步开挖即开挖 6.7 m 后,施加第一道支撑,得到竖直方向的位移云图(图 3),当基坑开挖时,坑底会出现部分回弹,这是由于开挖卸载导致原来的应力平衡被打破,从而引起应力重分布。开挖完成后基坑坑底回弹曲线如图 4 所示,随着基坑开挖深度的增加,基坑底部土体因卸荷回弹,回弹量随着距地下连续墙的距离呈非线性增长,具有一定的空间效应^[13],各步开挖后,基坑中心处的最大变形量分别为 54.1、77 mm。基坑底部隆起会引起土体应力重分布,在基坑设计时应进行抗隆起验算,并在施工过程中采取一定的加固措施,以避免基坑和地下结构被破坏。

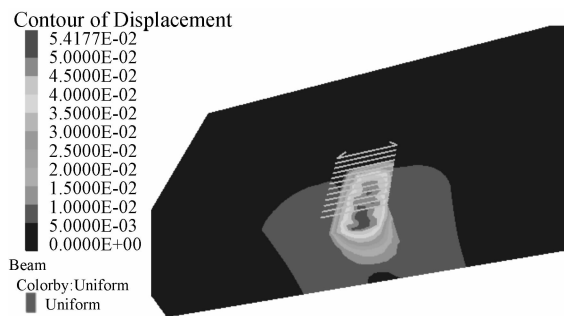


图 3 第一步开挖后位移云图

Fig. 3 Contour of displacement after first-step excavation

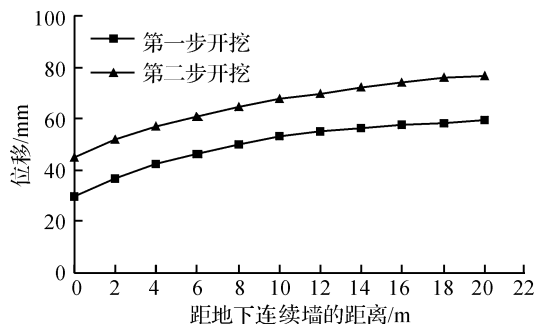


图 4 基坑坑底回弹曲线

Fig. 4 Curves of pit bottom upheaval

在初始应力平衡时,所需的计算步为 4 215 步。进行开挖前,定义土体初始位移、速度和塑性区为零,所以计算从第 4 220 步开始运算。建立模型时,定义最大不平衡力比率小于 10^{-5} 时计算终止。

仅有地下连续墙而不设内支撑时,地下连续墙墙顶水平位移如图 5 所示;当采用地下连续墙加内支撑支护形式时,地下连续墙墙顶水平位移如图 6 所示。

由图 5 可以看出,随着基坑开挖深度加深,地下连续墙墙顶位移逐渐增大。当第一步开挖完成即开挖 6.7 m 后,地下连续墙墙顶最大位移为 14.1 mm,基坑开挖时,地下连续墙会发生向基坑内侧偏移。通过对比图 5(a)、(b)发现,地下连续墙沿长度方向的中部受力最大,发生的侧向位移最大,B 点偏移量比 A 点多 35.6%。第二步开挖完成后,得到类似结论,即地下连续墙墙顶位移最大为 24.3 mm,位于地下连续墙中部,A 点最大侧向位移为 17.7 mm,较地下连续墙中部少 37.3%。由图 5(a)可知,在第一步开挖过程和第二步开挖过程中,地下连续墙 A 处的位移增长率相同,在 B、C、D 处也能得到相同的结论。

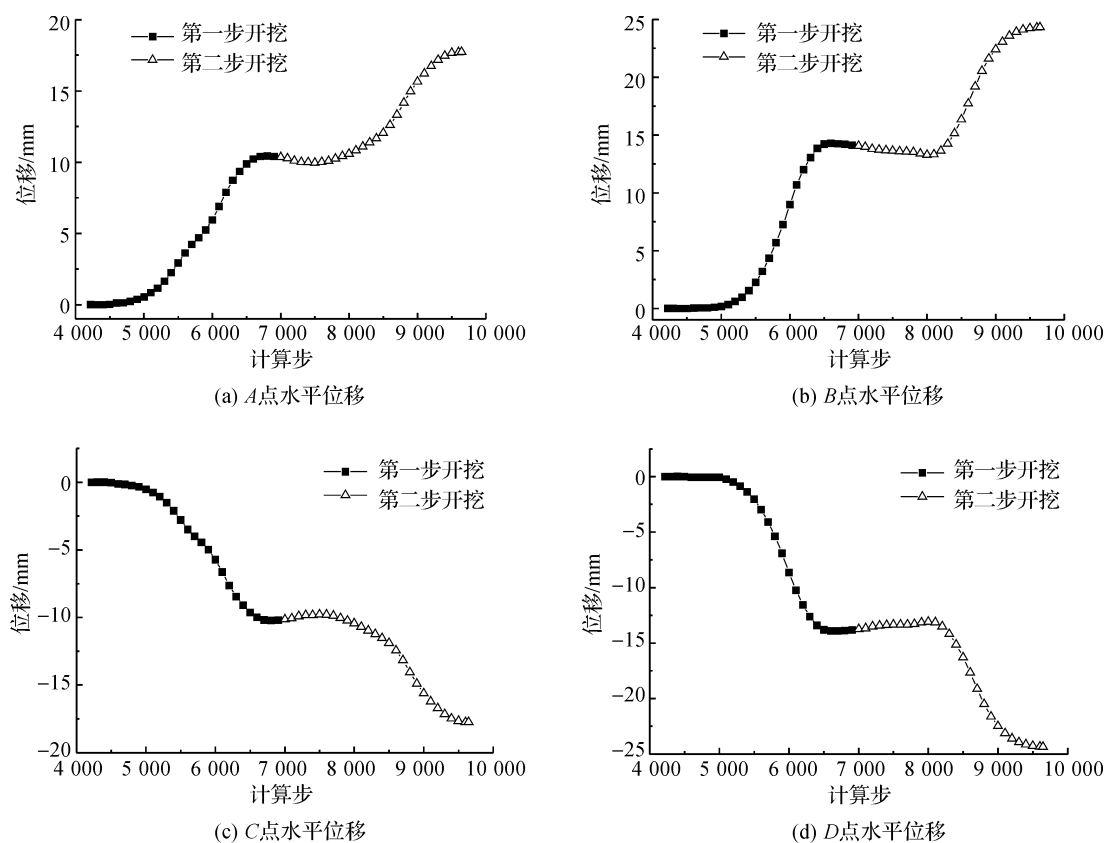


图 5 地下连续墙墙顶水平位移(无支撑)

Fig. 5 Horizontal displacement at the top of underground diaphragm walls (without brace)

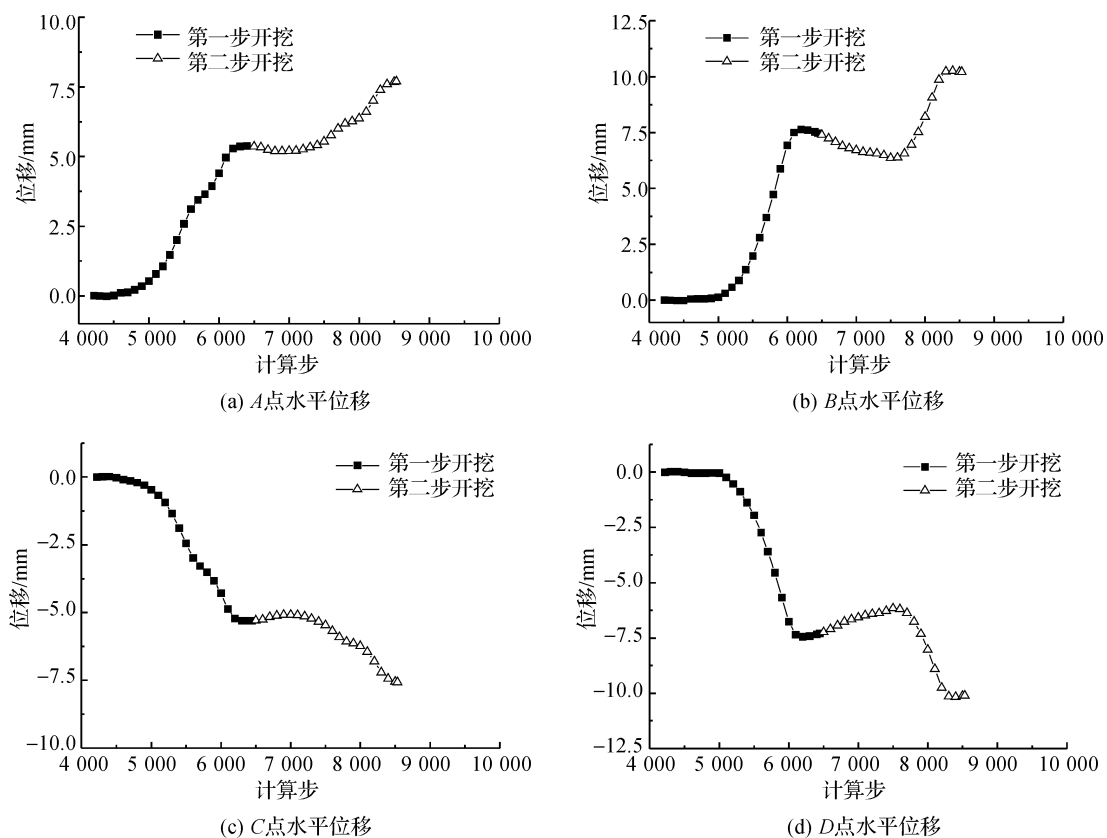


图 6 地下连续墙墙顶水平位移(有支撑)

Fig. 6 Horizontal displacement at the top of underground diaphragm walls (with brace)

当支护结构为地下连续墙加内支撑时,计算能达到同样的精度,但计算步明显减少,第一步开挖仅需计算到 6 445 步,第二步开挖仅需计算到 8 530 步,这说明内支撑使地下连续墙支护结构的整体位移变化很小。由图 6 可知,第一步开挖时墙顶位移最大为 7.3 mm,第二步开挖时墙顶位移最大为 10.2 mm,位于地下连续墙中部,这一结果与图 5 无支撑方案时相同。

此外,比较图 5 与图 6 可知,当只有地下连续墙作支护结构时,位移增加速率较大;而采用地下连续墙加内支撑时,位移增加速率相对较小,墙顶最大侧向位移减少 58%。

4 结 语

深基坑支护工程是一个系统工程,在进行支护方案选择时需综合考虑多方面的因素,在保证安全的前提下,选择更加经济、合理的方案。基坑事故的发生由许多因素引起,但多是由于选择了不合理的支护方案。本研究探索了仅有地下连续墙和地下连续墙加内支撑 2 种支护方案时地下连续墙墙顶位移的变化规律,得到如下结论:

1) 基坑开挖后,由于卸荷作用基坑坑底会出现土体隆起现象,隆起位移随着开挖深度和距地下连续墙距离的增加而增大,基坑中心处最大隆起位移达 77 mm,建议对坑底进行加固以减小隆起量。

2) 本研究中 2 种支护方案结果均显示最大水平位移位于地下连续墙长度方向的中部。

3) 选用地下连续墙加内支撑方案,地下连续墙墙顶位移变化幅度和变化率较小,墙顶最大侧向位移减少 58%,内支撑对墙体变形影响明显。

采用何种支护形式关系到基坑的稳定与安全,所以还有必要深入研究地下连续墙加锚杆或土钉墙加锚杆等支护结构的位移应力变化情况。此外,支撑刚度是影响基坑变形的关键因素之一^[14],要以杭州地铁湘湖车站坍塌事故为鉴^[15-16]。目前,基坑第一道支撑均采用钢筋混凝土支撑,不同支护形式、围护结构嵌固深度对基坑受力变形的影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997,6.
- [2] 于丹,郭举兴,庄岩,等. 某停车场深基坑支护方式的 FLAC^{3D} 模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015,31(1):38.
- [3] 丁勇春,王建华,徐斌. 基于 FLAC3D 的基坑开挖与支护三维数值分析[J]. 上海交通大学学报,2009,43(6):976.
- [4] 刘继国,曾亚武. FLAC^{3D} 在深基坑开挖与支护数值模拟中的应用[J]. 岩土力学,2006,27(3):505.
- [5] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009:2.
- [6] 杨春英,任强. 基于 FLAC3D 的基坑开挖与支护分析[J]. 西部探矿工程,2013(5):11.
- [7] 黎科. 深基坑开挖对邻近桥桩的影响研究[D]. 天津:天津大学,2007:41.
- [8] 胡浩军,王元汉. 深基坑开挖与支护模拟仿真分析[J]. 岩土力学,2007,28(增刊):669.
- [9] 王凯,刁心宏,赖建英,等. FLAC3D 应变软化与摩尔库伦模型工程应用对比[J]. 中国科技论文,2015,10(1):55.
- [10] 孙书伟,林杭,任连伟. FLAC3D 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011:272.
- [11] 王孝兵,文松霖,徐文强. 大直径长桩接触面参数的敏感性分析[J]. 长江科学院院报,2011,28(2):38.
- [12] 冯雪威. 长春市中心医院基坑支护工程槽式地下连续墙数值模拟研究[D]. 长春:吉林大学,2012:2.
- [13] 周健华. 深基坑开挖卸荷回弹、隆起的影响因素及防治措施[J]. 中国水运,2011,11(9):240.
- [14] 童华炜,邓祎文. 考虑卸荷应力路径的基坑开挖土体变形研究[J]. 建筑科学,2008,24(7):35.
- [15] 陈云敏,胡琦,陈仁朋. 杭州地铁湘湖车站基坑坍塌引起的基底土深层扰动与沉降分析[J]. 土木工程学报,2014,47(7):110.
- [16] 刘雪珠,张艳书,顾蒙娜,等. 坑底加固置换率对杭州地铁湘湖站深基坑安全的影响分析[J]. 岩土工程学报,2016,38(增刊):136.