

ABAQUS 在深基坑设计及应用

付培帅¹, 王曙光¹, 唐小微², 刘 强¹

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 610024)

摘 要: 以大连地铁某车站基坑开挖为研究背景, 综合考虑深基坑降水、开挖、内支撑架设及预加轴力等施工过程, 以大型有限元软件 ABAQUS 为平台, 采用相应的数值模拟技术对支护桩系统简化, 对施工过程进行合理模拟, 建立能够反应实际开挖施工的有限元模型, 对各个施工过程进行计算; 将有限元计算值与实际开挖过程中的监测值比较分析, 验证模拟方法的正确性, 得到支护系统的变形及内力随开挖过程变化的规律; 支护桩最大水平位移随开挖深度的加深向下移动呈凸形, 内支撑轴力在架设后一层时发挥作用最大。研究得到了基坑的数值计算方法的建模思路, 可为类似基坑工程提供参考。

关键词: 深基坑; 开挖; 数值模拟; 有限元分析

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)02-0161-05

Application of ABAQUS in Deep Foundation Design and Construction

FU Peishuai¹, WANG Shuguang¹, TANG Xiaowei², LIU Qiang¹

(1. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 610024, China)

Abstract: Taking the foundation pit excavation of a subway station in Dalian as an example, ABAQUS was adopted to simulate the deep foundation pit construction process with comprehensive consideration of precipitation, excavation, supporting construction and additive axial force. By selecting reasonable mechanical parameters of the soil, a comparative analysis model with the actual excavation process was developed. The calculated values were compared with monitored ones in the excavation process to verify the correctness of simulation method. The maximum horizontal displacement of supporting pile is moved downward with the depth of excavation, and the axial force of internal support plays an important role in the construction of the later layer of the support pile.

Keywords: deep foundation; excavation; numerical simulation; finite element analysis

社会的发展推动着城市建设进程快速进展, 高层建筑与城市轨道的兴建, 促使近年来基坑工程的规模与深度逐渐增大, 所处环境愈加复杂, 然而由于岩土体物理力学性质较复杂, 且区域性质很强, 目前基坑支护工程设计的理论依据也不十分精确和严谨。甚至某些工程施工时盲目开挖, 存在诸如施工管理规范问题, 导致了很多重大工程事故, 如 2005 年 7 月 21 日的珠海城广场基坑坍塌^[1]; 2008 年 11 月 15 日, 正在施工的杭州某地铁站深基坑发生现场坍塌事故, 造成 45 人伤亡, 直接经济损失高达 5000 万元^[2]; 2014 年 11 月 12 日, 南海盐步新怡智逸大厦

1-3 栋基坑工程坍塌^[3]。也有许多设计人员在进行基坑设计时, 盲目进行保守设计, 随意增加安全系数, 提高安全冗余度, 造成成本的提高及不必要的浪费。20 世纪 90 年代至今, 借助计算机计算能力的提升, 有限元程序计算逐渐应用到基坑设计计算中, 1993 年, 通过有限元软件, Whittle A J 等^[4]对位于美国东北部地下停车场的开挖支护施工进行模拟, 通过检测数据表明有限元软件对地表沉降、坑周土体变形和地下水动态能够合理较为准确预测。宋二祥等^[5]编制基于强度折减法的三维有限元计算程序, 对基坑开挖过程土钉支护施工进行模拟并结合相应

工程验证程序的可靠性。向先超等^[6]将支护桩桩间土作为颗粒体,采用 PFC^{2D} 软件对基坑开挖过程桩的水平变形过程进行模拟,得到桩间土拱的形成原因,并对支护桩桩距、截面、桩土的变形速度等对基坑土拱效应影响及对基坑的破坏进行了研究。朱合华等^[7]以上海某大型深基坑工程开挖施工为研究背景,对基坑过程开挖动态信息,结合反分析法,确保了基坑开挖过程中的稳定性,保证了基坑安全。王浩然等^[8]采用土体硬化模型对上海某深基坑进行三维有限元分析,分析了基坑开挖和支护结构变形和对周边建筑物的影响。郑刚等^[9]认为应采用数值分析方法确定支护水平位移的最大允许量及预警值,而不宜简单按照规范规定值确定变形允许值。吴其刚等^[10]以深圳某深大基坑工程施工为研究背景,建模并分析新建基坑与临近基坑变形规律,得到相应关系。汤彬彬等^[11]利用 ABAQUS 有限元软件对南京某大型深基坑工程开挖过程模拟分析,认为 T 形组合地下连续墙增加整体抗弯能力。贾金青等^[12]利用有限元软件建立考虑支护结构与土体共同作用的无根护壁桩三维有限元模型,认为推广无根桩支护在岩质深基坑中的应用将具有积极意义。周晋^[13]运用有限元分析软件 PLAXIS,分析上海某医院基坑开挖对邻近建筑物及地下污水池的影响,认为基坑开挖使土体应力重分布,产生水平和竖直位移。朱延鹏等^[14]依托采用 FLAC^{3D} 软件对兰州某地铁基坑施工过程进行三维数值模拟分析,总结了支护桩变形规律并提出了降水措施。

本文基于大型有限元 ABAQUS 以大连地铁某深基坑排桩结构支护设计及施工过程为研究背景,采用了规范设计、基坑开挖现场检测和数值模拟相结合的手段,按实际地层分布,采用相应模拟方法,建立了计算模拟,分析研究了深基坑工程排桩-内支撑支护体系下深基坑开挖施工时的变形规律。

1 工程概况

该工程为大连地铁二号线某地铁站的深基坑工程,基坑开挖范围内,根据岩土的时代成因及其工程特征,可分为 4 个主层 9 个亚层,上覆第四系人工堆积层(Q_4^{ml})、全新统海积层(Q_4^m)、上更新统坡洪积层(Q_3^{dl+pl})、下伏震旦系长岭子组板岩(Z_{whc})。在数值计算中土层分布见图 1。

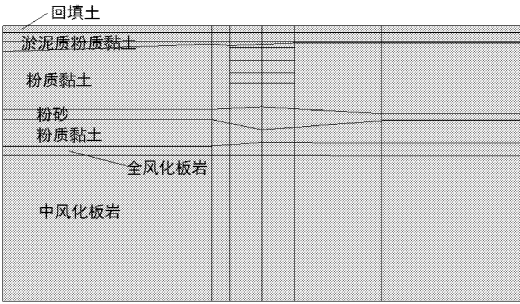


图 1 数值计算模型土层示意图

基坑开挖深度 16.8 m, 基坑开挖宽度 18.8 m。基坑安全等级为一级, 最大水平位移允许值控制到 0.15% H 。

车站基坑围护结构见图 2, 主体工程采用钻孔灌注排桩加网喷作为支护结构。排桩采用直径为 1 200 mm 的全套管咬合桩, 兼做止水帷幕, 标准段一序桩与二序桩交错布置, 咬合厚度 250 mm, 桩中心距 950 mm, 其中一序桩为素混凝土, 二序桩内配置圆形钢筋笼。围护桩桩长以 36 m 为主, 桩的实际长度根据实际地质情况进行调整, 需满足进入粉质黏土大于 4 m 或强风化岩 2 m 或中风化 0.5 m。基坑主体设 4 道支撑, 第一道支撑为混凝土支撑, 间距 8 m, 第二、第三、第四道支撑均为钢支撑, 支撑水平间距为 2 m。钢支撑采用直径 609 mm、壁厚 16 mm 的钢管, 钢围檩采用双拼 150c 组合腰梁。桩间的支护采用 C25 网喷混凝土, 钢筋网为 $\Phi 6 @ 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。

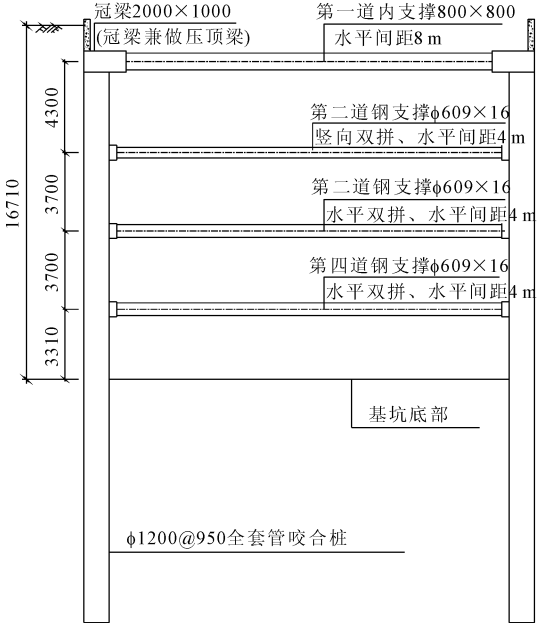


图 2 基坑维护结构图

2 模型建立与计算

2.1 土层参数

本文选取基坑一标准段进行分析。选取第一标

准段的标准地质条件,建立二维计算模型,单元均采用二维平面四节点减缩积分应变单元,土体本构模型为摩尔库仑模型,参数见表 1。

表 1 土层物理力学性质参数

土质	年代	厚度 /m	密度 /(10 ³ kg·m ⁻³)	压缩模量 /MPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	黏聚力 <i>c</i> /kPa
素填土	第四系全新统人工堆积层	2	1.80	6.00	0.40	15.0	10.0
粉质黏土	第四系全新统海相积层	5	1.78	2.60	0.40	2.6	7.1
粉砂	第四系上更新统坡洪积层	8~10	1.80	10.00	0.30	28.0	5.0
粉质黏土	第四系上更新统坡洪积层	8	1.96	4.95	0.33	20.3	11.1
全风化板岩	震旦系长岭子组板岩	3	1.95	12.00	0.25	23.0	45.0
中风化板岩	震旦系长岭子组板岩		2.70	50.00	0.20	28.0	80.0

2.2 模拟方法

2.2.1 咬合桩模拟

根据混凝土设计规范,咬合桩主要承受弯矩,二维建模需要将咬合桩等效为宽度为某一定值的矩形结构支护桩,作为支护体系,咬合桩主要承担基坑周围土体对其施加的土压力及静水压力,桩身产生的内力为剪力与弯矩。本文主要研究的内容是支护桩的水平位移,其竖向位移不作为研究重点,所以在二维模型中,若要能够反映这些特征,则必须要保证等效前后的抗弯刚度相等。保证抗弯刚度相等的条件,则采用公式(1)进行计算:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = E_3 I_3 \tag{1}$$

式中: E_1 为混凝土 C15 的弹性模量; E_2 为混凝土 C30 的弹性模量; E_3 为矩形截面刚度,为未知数; I_1 为 C15 混凝土对应截面惯性矩; I_2 为 C30 混凝土对应截面惯性矩; I_3 为等效后的矩形混凝土截面的惯性矩。

2.2.2 内支撑模拟

主体基坑的四道内支撑为拉压构件,故二维等效简化时,混凝土的实际截面抗压刚度与等效后截面抗压刚度一致,根据式(2) 进行等效:

$$E_1 A_1 = E_2 A_2 \tag{2}$$

式中: A_1 为混凝土支撑实际面积; A_2 为二维等效后的面积,可令 $A_1 = A_2$; E_1 为混凝土支撑的弹性模量; E_2 为等效后混凝土支撑的弹性模量。

第二、第三、第四道钢支撑内在支撑后要对称施加预加轴力,预加轴力分别为 300 kN、400 kN、450 kN,采用降温法计算得出在内支撑施工步骤时各个钢管的温度。这里钢支撑的膨胀系数 α 取 10^{-5}°C ,由于内支撑主要承受轴力,选取为杆单元模拟计算。

2.2.3 接触模拟

对于基坑开挖过程中桩土的接触采用小滑移计

算是比较符合实际情况^[15]。在基坑开挖过程中,最关心的是支护桩的水平位移而不是竖向的位移,可认为桩土接触位置不出现滑移,因为若出现较大的滑移的话,桩周土的性质会发生变化,此时基坑支护结构体系出现危险面,故一般认为桩土不会出现大滑移。

另外基坑开挖与支护的数值模型中还涉及到了内支撑与支护桩的接触,在数值模型中不考虑腰梁,将内支撑与支护桩采用 ABAQUS 中的 PIN 连接方式连接。

2.2.4 降水、开挖与内支撑架设模拟

不考虑由于渗流造成的基坑失稳,降水对基坑支护体系变形的影响主要体现在基坑内外静水压力差的变化,采用激活荷载与杀死荷载的方式进行模拟。

开挖采用生死单元进行控制,依照设计与施工情况,对开挖区域单元进行分层开挖。

内支撑架设采用有应变方式进行激活,即内支撑架设时,其长度依据此时的架设位置处支护桩的变形而变化。采用升温法模拟内支撑预加轴力,温度的大小可以根据设计轴力进行计算,可按式(3)、式(4)进行计算:

$$F = \sigma A \tag{3}$$

$$\sigma = E\alpha\Delta t \tag{4}$$

式中: F 为内支撑预加轴力数值; A 为内支撑截面面积; σ 为内支撑轴向应力; α 为内支撑钢管的热膨胀系数; Δt 为内支撑预加轴力所对应升温度数。

3 基坑开挖及监测

本基坑位于填海区,距近海岸线约 260 m,周边空旷,采用明挖法施工,分段分层对称平衡,自近海

岸位置向陆地方向开挖,分层高度 2.5 m,分段长度约 20 m,纵向放坡比例不大于 1:3。开挖至支撑下 0.5 m 处及时架设支撑,严禁超挖。根据相关基坑支护设计及监测规范,本工程的基坑工程现场监测内容如下:(1) 桩体水平位移(变形);(2) 钢支撑轴力;(3) 桩顶(冠梁)水平位移;(4) 支护桩周边土的土压力。开挖前量测三次,自开挖 15 d 内,各监测项目每天量测 2 次,15 d~30 d 内,各监测项目每天量测 1 次。如遇雨天、围护结构位移较大或增加较快、测点监测数据异常变化、基坑附近有突然增大的异常荷载等情况,应加密监测频率至正常的 2 倍~3 倍。

4 数值计算与监测结果分析

为更好比较数值计算结果与监测结果,采用施工步代替计算分析步及对应施工过程时的监测结果:

- 施工步 1:开挖至第一道撑处;
- 施工步 2:施做钢筋混凝土撑;
- 施工步 3:降水至开挖二道撑下 1 m 处;
- 施工步 4:开挖深度至二道撑下 0.5 m;
- 施工步 5:架设二道撑,并施加预加轴力 100 kN;
- 施工步 6:降水至三道撑 1 m 处;
- 施工步 7:开挖深度至三道撑下 0.5 m 处;
- 施工步 8:架设三道撑,并施加预加轴力 400 kN;
- 施工步 9:降水至四道撑下 1 m 处;
- 施工步 10:开挖深度至四道撑下 0.5 处;
- 施工步 11:架设第四道支撑,并施加预加轴力 450 kN;
- 施工步 12:降水至坑底下 1 m 处;
- 施工步 13:开挖深度至坑底。

4.1 支护桩水平位移分析

将支护桩在不同开挖面时水平位移的计算值输出,见图 3;整理实际监测值并输出,使之与输出的计算值时刻对应,计算值见图 4,通过对开挖过程中支护桩的监测值与计算值比较可得:

(1) 对于支护桩桩顶水平位移:开挖至钢筋混凝土撑下后,未施工钢筋混凝土撑,支护桩顶端向坑内有少量位移,计算值为 2.04 mm,实际监测位移 1.74 mm。随着开挖深度增大和内支撑架设,桩顶向基坑外移动,在开挖到第三道支撑附近时,支护桩桩顶位于基坑外,此时第一道支撑承受拉力。此外,

监测值显示,支护桩顶向坑外的位移量大于计算值。

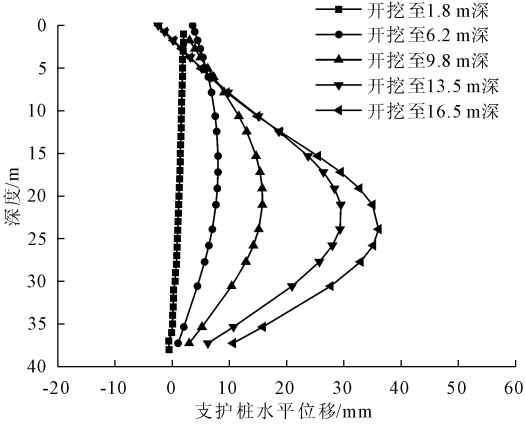


图 3 支护桩水平位移计算值

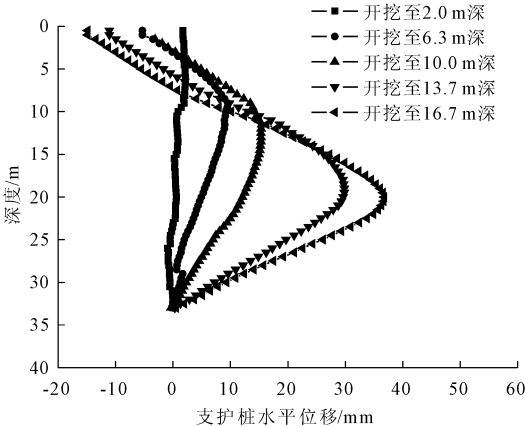


图 4 支护桩水平位移监测值

(2) 对于开挖过程桩体位移变化:计算值与监测值都表明,支护桩的最大位移随开挖深度的增加而增大,位移最大值基本接近,最大位移位置处随着开挖深度增加向下移动,且位于开挖面以下。桩体向坑内的位移形状呈现大肚子的“凸”形状。

计算值与监测值不同的是,监测值最大位移位置随开挖深度的增大变化明显,且基本处于开挖面处,而计算的最大位移位置变化不明显。

(3) 对于桩体水平位移曲线:计算值较为平滑,变形分布均匀,利于支护桩抵抗较大弯矩;监测值显示支护桩变形曲线不平滑,在某些部位曲率过大,后经计算分析,该工程咬合桩不足以抵抗监测水平位移曲线产生的弯矩,故认为监测值存在误差,尤其是水平位移曲线曲率过大位置处。实际桩身水平位移曲线应平滑,监测显示支护桩水平位移曲线不平滑的主要原因有两方面:一方面,该区域为回填土,现场勘察,填土内分布有大块孤石,填土不均匀;另一方面是监测过程产生的误差。

4.2 内支撑轴力变化

分别依据开挖、降水、支撑施工步骤将各个过程的计算值与监测输出,第一道支撑是混凝土支撑,无监测值,见图 5,横坐标为施工步,开挖过程中的监测值见图 6,横坐标为施工步。分析图 5、图 6,可知:

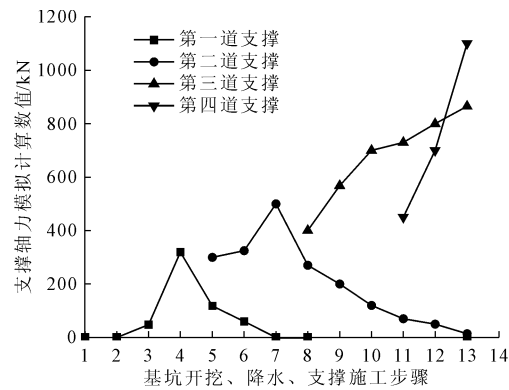


图 5 内支撑轴力计算值

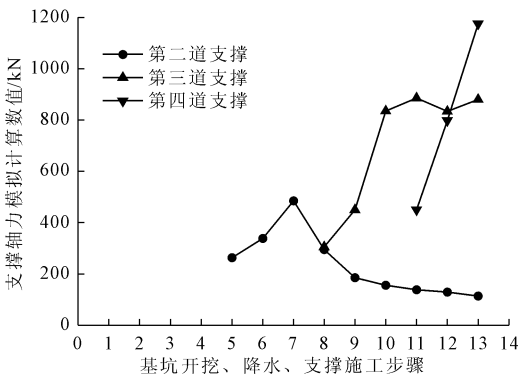


图 6 内支撑轴力监测值

(1) 内支撑轴力变化趋势:模拟计算值与监测值均表明,各道内支撑架设后,轴力基本上先增大后减小;在内支撑架设后的下一步开挖结束时,轴力最大。可认为内支撑在下一道支撑架设前发挥作用最大,轴力最大,之后轴力逐渐减小。第一道支撑在第三次开挖后轴力降至 0,在后续的开挖时承受拉力。

(2) 内支撑轴力监测值与计算值比较:监测数值的结果与数值模型计算结果相近。第二道支撑的监测值略大于模拟计算值;第三道支撑与第四道支撑的监测数值略小于模拟计算值。监测值与模拟计算值结果相差很小,所以可认为模拟值与实测数值基本一致。

4.3 桩侧土压力计算值

将开挖过程中的桩侧坑外土压力输出见图 7,得到如下结论:沿支护桩坑壁外侧土压力大小与分布是随着基坑的开挖、支撑、降水等施工步而变化

的,呈“S”形。基坑设计一般采用朗肯土压力理论进行计算,数值模拟得到的桩侧土压力与朗肯土分布形式不大相同。经比较,朗肯土压力值大于数值计算值。表明基坑工程设计时采用朗肯土压力理论是偏于保守的;当开挖相应层底时,支护桩桩侧的土压力会发生转折,数值减小,这是因为开挖至层底时候,由于基坑内侧土体被取走,基坑内侧缺少约束,使得支护桩向坑内侧移动造成的,此结果与基坑开挖过程及支护桩的变形也是相适应的。

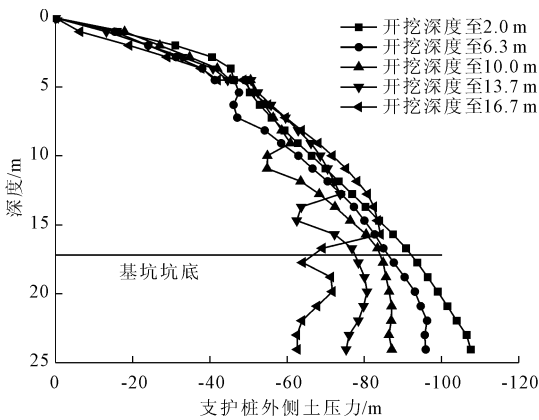


图 7 支护桩外侧土压力计算值

5 结 论

本文以大连地铁某深基坑工程为背景,以有限元软件 ABAQUS 为计算模拟平台,阐述了基坑开挖、降水、内支撑架设等施工各施工步骤的模拟方法。对该深基坑工程进行模拟,将模拟计算值与施工监测值对比分析,得到了以下结论:

- (1) ABAQUS 有限元软件可实现基坑的开挖、降水、内支撑架设等复杂的施工过程,并得到验证;
- (2) 随着开挖深度增大,支护桩最大水平位移增大,最大位移位置处向下移动,位于开挖面以下。桩体向坑内的位移形状呈现大肚子的“凸”形。
- (3) 各道支撑架设后,支撑轴力基本上先增大在减小;在内支撑架设后的下一步开挖结束时,轴力最大。
- (4) 支护桩沿坑壁外侧的土压力的大小与分布是随着基坑的开挖、支撑假设、降水等施工而变化的,且呈近似“S”形。

综上,采用 ABAQUS 相应的模拟方法可应用于基坑设计,或在基坑设计过程中能够采用数值方法进行验算,也可供施工实施参考。

(上接第 165 页)

参考文献:

- [1] 韩庆文.“7·21”广州海珠城基坑坍塌事故性质尘埃落定[N].广东建设报,2005-09-27(A01).
- [2] 周红波,蔡来炳,高文杰.城市轨道交通车站基坑事故统计分析[J].水文地质与工程地质,2009,36(2):67-71.
- [3] 曾群善.“南海工地坍塌事故”追踪[N].南方都市报,2014-11-13.
- [4] Whittle A J, Hashesh Y M A. Analysis of a deep excavation in Boston[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1993,36(14):35-39.
- [5] 宋二祥,高翔,邱玥.基坑土钉支护安全系数的强度参数折减有限元方法[J].岩土工程学报,2005,27(3):258-263.
- [6] 向先超,张华,蒋国盛,等.基于颗粒流的抗滑桩土拱效应研究[J].岩土工程学报,2011,33(3):386-391.
- [7] 朱合华,崔茂玉,刘学增.大型深基坑动态施工反演及稳定性分析[J].建筑结构学报,2000,21(6):74-79.
- [8] 王浩然,王卫东,徐中华.基坑开挖对邻近建筑物影响的三维有限元分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(S2):1512-1517.
- [9] 郑刚,焦莹,李竹.软土地区深基坑工程存在的变形与稳定问题及其控制——软土地区深基坑坑底隆起变形问题[J].施工技术,2011,40(10):10-15.
- [10] 吴其刚,何娜,郭红燕.复杂环境下深基坑开挖过程的维有限元分析[J].土工基础,2014,28(2):87-94.
- [11] 汤彬彬,高明军,孙召花,等.T形组合地下连续墙开挖及三维数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(2):117-120.
- [12] 贾金青,曹静,高军程.无根护壁桩支护三维有限元分析研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):5-10.
- [13] 周晋.基坑开挖对邻近建筑物影响的数值分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(5):162-166.
- [14] 朱彦鹏,杨校辉,周勇,等.兰州地铁车站深基坑支护选型分析与数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(1):55-59.
- [15] 费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.