

文章编号: 1000-7598-(2009) 增 1-0169-06

具有相邻建筑物的岩质基坑支护结构 优化设计的讨论

董 诚¹, 郑颖人¹, 周永红²

(1. 后勤工程学院, 重庆 400041; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410004)

摘 要: 传统岩质基坑支护设计方法通常没有考虑岩质基坑与支护结构相互作用以及相邻建筑物对支挡结构和岩质基坑稳定性的影响。结合实际工程, 采用 PLAXIS 有限元软件, 分别应用有限元强度折减法和有限元法对具有相邻建筑物条件下的岩质基坑的稳定性和变形、岩石侧压力、基坑开挖对相邻建筑物的影响以及支护结构的优化设计等方面进行了分析。结合《高层建筑结构设计规程》和《建筑地基基础设计规范》提出了相邻既有建筑基础变形的控制条件, 并以此作为控制基坑变形的依据, 并根据岩质基坑的变形限值计算岩石侧压力和进行岩质基坑支护设计, 该方法能够有效地节约造价和缩短工期。

关 键 词: 相邻建筑; 岩质基坑; 有限元; 支护结构; 优化设计

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Discussion on the optimization design of supporting structure of rock foundation pit with adjacent buildings

DONG Cheng¹, ZHENG Ying-ren¹, ZHOU Yong-hong²

(1. Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 400041, China; 2. China Construction Fifth Engineering Division Co. Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Traditional supporting design of rock foundation pit often ignores the interaction between rock foundation pit and supporting structure as well as the effects of adjacent buildings on the supporting structure and the stability of foundation pit. Combining with practical engineering, adopting finite element program of PLAXIS, the stability and the deformation of rock foundation pit, rock lateral pressure, the influence of excavation on the adjacent buildings and the optimization design of supporting structure are analyzed respectively through finite element strength reduction method and finite element method. According to the structural design regulations of high building and design standards of foundations, the deformation control conditions of adjacent buildings are put forward, which are taken as the controlling basis, the calculation of rock lateral pressure and the design of supporting structure of rock foundation pit are carried out according to the limit values of deformation. This method can save the construction cost and cut down the construction period effectively.

Key words: adjacent buildings; rock foundation pit; finite elements; supporting structure; optimization design

1 引 言

随着城市现代化的进程, 城市中出现了大量的高层建筑和地下工程, 也带来了具有相邻建筑物条件下的深基坑支护问题。深基坑支护根据岩土性质, 可以分为土质深基坑支护和岩质深基坑支护两类。

基坑支护结构设计一般采用传统的规范方法, 目前也逐渐引入了非线性有限元计算。如段绍伟

等^[1]利用非线性有限元方法计算了深基坑开挖引起的地表沉降量与墙体侧向挠度。戚科骏等^[2]以上海某临近隧道的基坑工程为背景, 采用摩尔-库伦弹塑性模型, 运用有限元方法模拟了基坑开挖的不同阶段, 分析结果与现场实测结果基本吻合, 同时也对不同的施工方案进行了数值模拟。

常银生等^[4]采取 Plaxis 有限元软件分析基坑开挖对临近建筑物基础的影响, 选取了不同开挖深度基坑、基坑与建筑物不同间距作为初始条件, 模拟

收稿日期: 2009-04-21

第一作者简介: 董诚, 男, 1975 年生, 博士研究生, 工程师, 主要从事岩土稳定性分析和数值模拟方面的工作。E-mail: dongcheng75@126.com

基坑开挖的实际过程,讨论基坑开挖对临近建筑物基础承载力和变形的影响。张晓峰^[4]通过有限元计算对开挖所造成的主楼桩基与地基土的相互作用机理的分析,表明桩对土的约束作用限制在一定的范围内。刘继国^[5]等运用 FLAC^{3D} 软件对武汉长江隧道江南明挖段深基坑进行了开挖与支护模拟。

本文对具有相邻建筑的岩质基坑支护结构设计传统计算方法进行了分析,指出了它的不足。由此,提出了基于岩质基坑允许变形量条件下的支护结构优化设计计算方法,分析了基坑的稳定性及支护结构上的岩石侧压力。

2 传统设计方法存在的问题

传统岩质基坑支护设计方法主要依据现行规范^[6]按照极限平衡理论来设计,通常没有考虑岩质基坑与支护结构相互作用以及相邻建筑对支挡结构和岩质边坡稳定的影响。对于具有相邻建筑物的岩质基坑支护设计,规范规定采用静止岩石压力来计算作用在支护结构上的岩石侧压力。主要的思路是假定岩质边坡的水平位移为 0,以减小基坑开挖对相邻建筑物的影响,确保邻近建筑物的安全。

实际上,至今没有计算岩质基坑岩石压力的科学、合理的方法,人们还缺乏这方面的研究成果。规范中所采用的公式,需要求出岩体的泊松比,目前以实验室测得的岩石泊松比并不是岩体真实的泊松比,导致有较大的误差;而且,规范中采用一个范围较大(0.5~0.65)的折减系数也有很大的人为性,所以这种方法还需要研究改进。另外,规范方法假定岩质基坑侧向变形为 0,这样的控制过严而且也难以做到。由于岩体,尤其是无顺层结构面的岩体,基坑变形很小,通常可以保证基坑开挖引起的相邻建筑物基础的变形在相关规范的允许范围内。而岩质基坑一旦出现变形,则岩质基坑支护结构的岩石侧压力将大大减少。

本文结合实际工程,采用 PLAXIS 有限元软件^[7],分别应用有限元强度折减法^[8]和有限元法对具有相邻建筑物条件下的岩质基坑的稳定性、岩石侧压力、岩质基坑的变形、基坑开挖对相邻建筑物的影响等方面进行了分析,并对不同岩质基坑支护方案的进行了对比;结合《高层建筑结构设计规程》和《建筑地基基础设计规范》提出了相邻建筑基础变形的控制条件,并以此作为控制基坑变形的依据,然后根据岩质基坑的变形限值计算岩石侧压力

和进行岩质基坑支护设计。

与规范设计方法相比,本文提出的在满足基坑整体稳定性验算的前提下,根据相邻既有建筑基础变形控制进行岩质基坑支护设计的设计方法能够有效地节约造价和缩短工期。

3 工程实例的有限元分析

3.1 工程概况

某轨道交通拟采用明挖法施工。路段沿线周边建筑密集、情况复杂且有数栋离设计开挖线较近的高层建筑。该路段基坑开挖边坡为工程安全等级为一级。基坑长 1 453 m,宽 40 m,深 30 m,其中上部 6 m 范围为素填土和强风化砂质泥岩,以下 24 m 范围为较为完整的微风化砂质泥岩。本次计算对象基坑断面不存在顺层结构面,故在有限元计算时不考虑结构面影响。相邻既有建筑为 15 层框架结构,采用桩基础,桩长为 15 m,相邻桩间距为 5.65 m,桩距基坑开挖面最小距离为 6 m。

由地勘报告提供的岩土参数内聚力 c 为 556 kPa,内摩擦角 ϕ 为 31.6° ,岩体的弹性模量为 1 403 MPa。岩石的泊松比根据工程经验和《工程岩体分类标准》中的相关规定确定,通常在 0.35~0.4 之间。为了对比泊松比对岩石侧压力的影响,本文分别取泊松比为 0.35 和 0.4。岩体的重度为 25.9 kN/m^3 。

选择三种支护方案进行比较:

(原设计方案)采用传统方法进行设计,为桩锚支护体系,抗滑桩宽 1 000 mm,高 1 000 mm,桩长 33 m,嵌入段长 2 m,桩间距为 4 m,锚索每隔 3 m 设置一道,共设置 7 道锚索,每道锚索施加的预应力为 2 624 kN。

施工监测中,发现在基坑开挖到底且最下面两道锚索未设置时,基坑变形很小,相邻既有建筑也没有出现危险征兆。因此,本文提出了第二种支护方案,即在方案一的基础上取消最下面两道锚索,其他条件均与方案一相同。

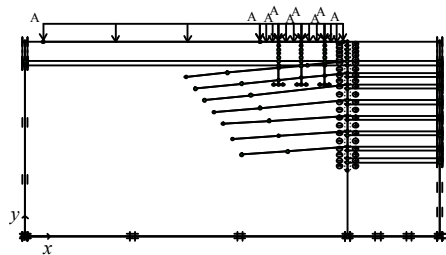


图 1 方案一的有限元模型示意图
Fig.1 Sketch map of finite element model of plan I

方案三主要是分析岩石基坑无支护时的变形和稳定性,故数值模拟时考虑将基坑与既有建筑物之间 6 m 厚的土层替换为岩石来解决这部分土体的稳定性。

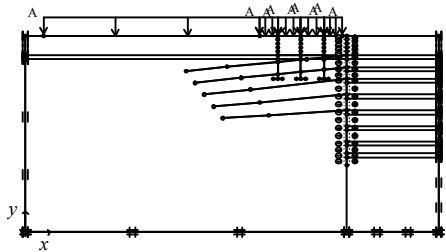


图2 方案二的有限元模型示意图

Fig.2 Sketch map of finite element model of plan II

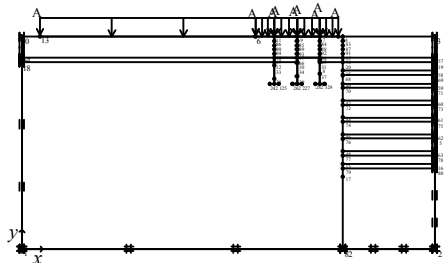


图3 方案三的有限元模型示意图

Fig.3 Sketch map of finite element model of plan III

3.2 有限元模型的建立

根据地勘报告, 该段基坑岩体无外倾结构面, 因此有限元分析时将边坡岩体等效为均质体。

在 PLAXIS 模型中,有限元模型采用 15 节点单元的平面应变模型,岩土采用摩尔—库伦弹塑性本构模型,桩采用板单元模拟,预应力锚索的锚固段采用隔栅模拟,非锚固段采用点对点锚杆模拟;由于不考虑地下水的影响,地下水水位定义在模型底部。在有限元模型中通过调整支护结构的刚度来达到控制基坑变形的目的。

3.3 地面荷载的考虑

为了与规范方法比较, PLAXIS 程序中均按照两种情况设置地面荷载。(1) 地面荷载分为三段考虑: 距基坑 6 m 范围内, 考虑消防车荷载 20 kN/m^2 ; 距基坑 6~17 m 范围内, 在模型中真实地模拟建筑物的桩基础, 将建筑物二层以上的荷载作为集中力作用在桩上, 将一层的地面荷载 15 kN/m^2 均布在基坑边坡顶部; 距基坑 17 m 以外, 只考虑 10 kN/m^2 的地面荷载 (图 1)。(2) 同传统设计方法, 在坡顶均布建筑物荷载 225 kN/m^2 , 显然这是偏于保守的

荷载工况。

3.4 计算参数的选取

为了更加真实的模拟基坑受力和变形情况,基坑和相邻既有建筑物基础的变形计算均采用荷载方式一,泊松比选用 0.35。

为了对比不同荷载方式对岩石侧压力的影响,计算岩石侧压力时分别选用了两种荷载方式。

3.5 施工过程的模拟

为了更好地模拟基坑施工过程，以方案一为例，有限元分析时将基坑开挖过程分为 15 步。具体步骤如下：

第一步：基坑开挖至 6 m，并设置抗滑桩；

第二步：设置第 1 道锚索，施加预应力
656 kN/m；

第三步：基坑开挖至 9.4 m:

第四步：设置第 2 道锚索，施加预应力 656 kN/m；

第五步：基坑开挖至 12.8 m:

第六步：设置第 3 道锚索，施加预应力 656 kN/m；

第七步：基坑开挖至 16.2 m；

第八步：设置第 4 道锚索，施加预应力为 656 kN/m；

第九步：基坑开挖至 19.6 m:

第十步：设置第 5 道锚索，施加预应力 656 kN/m；

第十一步：基坑开挖至 23m;

第十二步：设置第 6 道锚索，施加预应力 656 kN/m；

第十三步：基坑开挖至 26.4 m；

第十四步：设置第 7 道锚索，施加预应力 656 kN/m；

第十五步：基坑开挖至 31 m。

方案二取消了设置第6道和第7道锚索的步骤,其他与方案一相同。

方案三则取消了所有设置锚索的步骤，其他与方案一相同。

4 计算结果的分析

4.1 基坑和相邻建筑物基础变形的分析

相邻建筑物的基础位移控制是一直基坑支护设计的难点。当前,建筑物基础变形的限值标准主要是控制建筑物基础的沉降差,即控制不均匀沉降的

程度。表 1、2 分别列出了不同方案的基坑和相邻既有建筑基础的最大水平位移和竖向沉降以及相邻桩基础的最大位移差。表中“1”表示的是基坑坡顶的最大水平位移和最大沉降，“2”表示的是既有建筑物（农行）基础的最大水平位移和最大沉降，“3”表示的是既有建筑物（农行）基础的最大水平位移差和最大沉降差，“4”表示的是岩石与填土接触面的最大水平位移和最大沉降。表中的水平位移均为基坑开挖方向，负值表示向基坑外侧变形；竖向沉降均为向下为正，向上为负。

从表 1 和表 2 可以看出：

(1) 在开挖初期阶段时，设置预应力锚索能够使岩体产生向基坑外的变形。因此，对比表 1（方案一和方案二）和表 2（方案三），设置预应力锚索能够有效地控制基坑和相邻既有建筑物基础的变形。

(2) 在取消了最下面两道锚索后，既有建筑物基础水平位移和竖向沉降变化较小，基坑的水平位移和竖向沉降也变化不大。

(3) 方案三（无支护时）的基坑和相邻既有建筑物基础的位移和位移都最大，其中相邻基础的最大水平位移差为 3.95 mm，相邻基础的最大沉降位移差为 3.15 mm。

(4) 根据《建筑地基基础设计规范》的相关规定，本工程中，相邻建筑物的柱距为 5 500 mm，倾斜度为沉降差/柱距=3.15/5 000=1/1 587，远小于《建筑地基基础设计规范》的限值（1/500），满足规范要求。

由于我国目前还没有关于建筑基础水平位移的

相关规定，根据《高层建筑设计规程》关于层间位移的规定，层间位移限值通常为层高的 1/800。本工程中，建筑地下室的层高为 4 200 mm，则层间位移限值为 5.25 mm，而相邻建筑物基础的最大水平位移差仅为 3.95 mm，满足规范要求，并有一定的富裕量。

另外，从表 1 可以看出，即使采用方案一（原设计方案），基坑岩石最大水平位移也有 2.56 mm，说明在实际工程中基坑最大水平位移为 0 的条件是很难达到的。因此，在进行具有相邻建筑物条件下的基坑支护设计时，应先根据相邻建筑物的结构类型来确定基础水平位移和沉降差的限值，然后根据该限值确定基坑边坡的最大水平位移允许值，最后将其引入有限元程序中分析得到较为合理的岩石侧压力。

4.2 不同基坑水平位移时岩石侧压力的计算

为了研究基坑水平位移对岩石侧压力的影响，本文通过调整桩的刚度来控制基坑水平位移，计算了位移为 0、1.5、3 mm 3 种条件下的岩石侧压力（表 3）。计算结果表明：

(1) 当位移增大时，岩石侧压力迅速减小。当水平位移为 3 mm 时，荷载方式一的岩石侧压力减小至约 1 000 kN，仅有位移为 0 时的 1/3，而荷载方式二的岩石侧压力也减少了一半左右。

(2) 从表 3 看出，泊松比对岩石侧压力有一些影响，当泊松比增大时，岩石侧压力随之增大。因此，在计算岩石侧压力时应充分考虑基坑变形和泊松比的影响。

表 1 方案一和方案二的位移计算结果
Table 1 Displacements of plan I and plan II

施工 步骤	方案一								方案二							
	最大水平位移 /mm				最大沉降 /mm				最大水平位移 /mm				最大沉降 /mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	7.14	0	0	0.29	5.43	0	0	0.02	7.14	0	0	0.29	5.43	0	0	0.02
2	3.73	0	0	-0.5	4.99	0	0	0.04	3.73	0	0	-0.5	4.99	0	0	0.04
3	3.64	0	0	-0.4	4.97	0	0	0.03	3.64	0	0	-0.4	4.97	0	0	0.03
4	3.64	0.26	0.15	-0.8	5.01	0.23	0.10	0.10	3.64	0.26	0.15	-0.8	5.01	0.23	0.10	0.10
5	3.77	0.26	0.26	-0.7	5.03	0.23	0.10	0.12	3.77	0.26	0.26	-0.7	5.03	0.23	0.10	0.12
6	3.78	0.40	0.28	-0.8	5.09	0.23	0.17	0.20	3.78	0.4	0.28	-0.8	5.09	0.23	0.17	0.20
7	3.86	0.43	0.43	-0.4	5.35	0.38	0.31	0.50	3.86	0.43	0.43	-0.4	5.35	0.38	0.31	0.50
8	4.17	0.78	0.39	-0.4	5.43	0.56	0.12	0.60	4.17	0.78	0.39	-0.4	5.43	0.56	0.12	0.60
9	4.27	0.80	0.53	0.24	6.00	0.78	0.69	1.19	4.27	0.8	0.53	0.24	6.00	0.78	0.69	1.19
10	4.92	1.34	0.42	0.27	6.19	0.78	0.74	1.30	4.92	1.34	0.42	0.27	6.19	0.78	0.74	1.30
11	5.67	2.04	0.31	1.03	6.96	1.52	1.30	2.21	5.67	2.04	0.31	1.03	6.96	1.52	1.30	2.21
12	5.73	2.04	0.30	1.07	6.97	1.48	1.22	2.22	6.70	2.96	0.21	2.05	8.81	3.19	1.98	4.10
13	6.69	2.89	0.23	2.00	8.84	3.10	2.04	4.16	7.35	3.50	0.17	2.66	9.09	3.43	2.10	4.40
14	6.73	2.89	0.21	2.03	8.83	3.07	2.05	4.16								
15	7.29	3.19	0.17	2.56	10.1	4.21	2.61	5.54								

表 2 方案三的位移计算结果
Table 2 Displacements of plan III

施工 步骤	最大水平位移 /mm				最大沉降 /mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1		0	0	0		0	0	0
2		0	0	0		0	0	0
3	1.80	0	0	1	1.1	0.18	0.14	1
4	3.98	0.58	0.18	3	2.44	0.88	0.84	2
5	6.69	1.78	0.52	5	4.25	2.23	1.80	3
6	9.38	3.45	2.35	7	6.22	3.94	1.61	4
7	12.30	5.53	3.43	10	8.35	5.86	2.05	5
8	13.70	6.57	3.95	12	9.50	6.82	3.15	6

表 3 不同位移条时的岩石侧压力
Table 3 Rock lateral stresses under different displacements

坡顶水平位移 /mm	荷载形式	泊松比	岩石侧压力 /kN	安全系数
0	(1)	0.35	2 876	1.937
	(1)	0.40	3 046	2.020
	(2)	0.35	2 484	2.162
	(2)	0.40	2 969	2.159
1.5	(1)	0.35	1 407	1.937
	(1)	0.40	1 518	2.020
	(2)	0.35	1 957	2.162
	(2)	0.40	2 054	2.159
3	(1)	0.35	850	1.937
	(1)	0.40	941	2.020
	(2)	0.35	1 179	2.162
	(2)	0.40	1 591	2.159

4.3 不同荷载方式和支护方案的基坑稳定性分析

为了便于对比,不同荷载方式的稳定性分析均按照无支护条件考虑。从表 3 可以看出,荷载方式对安全系数影响较大,不同的荷载方式得到的安全系数最大差值在 15 %左右。总的来看,考虑桩基础的荷载方式一计算得到的安全系数最小,表明桩基作用下基坑稳定性最差,因而应按真实情况施加荷载。

从图 4、5 可以看出,中,方案一的安全系数最大为 4.523,方案三的安全系数最小为 1.937,均满足规范要求。

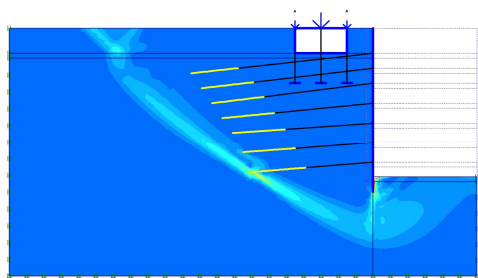


图 4 方案一的滑动面示意图 (安全系数: 4.523)
Fig.4 Sketch map of slip surface of plan I
(safty coefficient: 4.523)

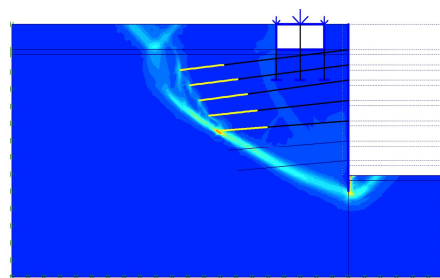


图 5 方案二的滑动面示意图 (安全系数: 4.081)
Fig.5 Sketch map of slip surface of plan II
(safty coefficient: 4.081)

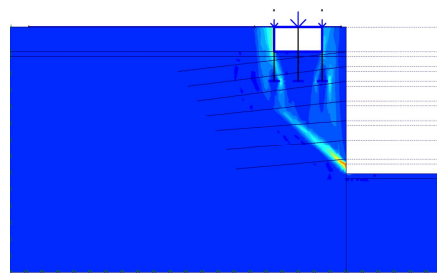


图 6 方案三的滑动面示意图 (安全系数: 1.937)
Fig.6 Sketch map of slip surface of plan III
(safty coefficient: 1.937)

5 现场监测数据结果分析

为了观察相邻建筑物和基坑的变形情况,在建筑物内设置了两个水平位移和沉降观测点,在基坑边设置了 6 个水平位移和沉降观测点,具体位置见图 7。从监测数据可知,在施工完成后,基坑最大水平位移为 7 mm,与方案一有限元分析得到的最大水平位移 7.29 mm 较为接近。

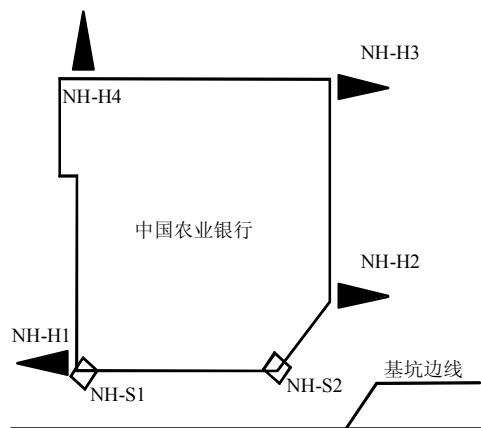


图 7 变形观测点布置图
Fig.7 Diagram of deformation observation points

现场基坑沉降监测数据大都为负值,只有最后一次的沉降监测数据为 0.33 mm; 相邻建筑物的位移观测数据也均为负值,说明由于某种原因导致监测数据失真。从实际现场观测来看,基坑和相邻建筑物的变形均很小,相邻建筑物和基坑均没有出现异常现象。

6 结 论

本文结合工程实例,利用有限元强度折减法和有限元法对具有相邻建筑物条件下的岩质基坑支护设计进行了讨论,分析了现行规范设计方法的不足。得到如下结论:

(1) 有限元分析方法可以真实地模拟相邻建筑物的基础和受力形式,较好地考虑岩质基坑与支护结构相互作用以及相邻建筑物对支护结构和岩质基坑稳定性的影响。

(2) 本文结合《建筑地基基础设计规范》和《高层建筑结构设计规程》对相邻建筑物的基础位移进行了合理判断,提出了相邻建筑物基础位移的控制限值。

(3) 岩质基坑支护设计时,应考虑岩质基坑变形对岩石侧压力的影响。

(4) 有限元分析结果表明,方案三(无支护)的整体稳定性以及基坑位移和相邻建筑物基础位移均满足规范要求。在实际工程中,可以考虑采用锚杆来代替预应力锚索,从而大大节约造价和缩短工期。

参 考 文 献

- [1] 段绍伟. 基坑开挖引起邻近管线破坏分析[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 79—83.
- [2] 戚科骏. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 5485—5489.
- [3] 常银生. 开挖对周边建筑物基础影响的有限元分析[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2006, 19(1): 9—13.
- [4] 张晓峰. 紧邻在建主楼桩基的地下室基坑围护设计实例[J]. 上海地质, 2006, (1): 41—44.
- [5] 刘继国. 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—508.
- [6] 中国建筑科学研究院. (JGJ120—99) 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [7] PLAXIS 中文用户手册[M].
- [8] 重庆市设计院. (GB 50330—2002) 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.