

DOI: 10.11779/CJGE2014S2006

中深部含软弱夹层的深基坑土钉支护失稳破坏 数值模拟分析

单仁亮, 董洪国, 陈代昆

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 以中核北京科技园综合楼深基坑项目在分层开挖与分层土钉支护中出现的边坡顶端土体开裂、坡底土体坍塌形式的失稳破坏现象为研究背景, 运用 FLAC^{3D}有限差分软件进行模拟分析。数值模拟分析中考虑土层分布、基坑边坡坡度、土钉的排列方式、钢筋网喷射混凝土面层、含水层的孔隙水压力、分层开挖支护等因素, 使模拟分析与实际相接近。根据基坑大小建立相应的基坑边坡三维模型, 采用莫尔-库仑弹塑性模型计算基坑边坡在不同开挖支护阶段的位移变形, 并通过后处理程序显示基坑整体、最大位移截面的位移云图, 记录所设置的关键点处水平位移与沉降量。在工程实际分布开挖过程中, 测量每次开挖支护所引起的边坡水平位移与沉降量。将数值模拟中所得节点水平位移、沉降量与两者的实测数值对比分析, 由此判断基坑潜在滑裂面与可能出现坍塌的大致位置, 为工程设计方案中关于变形量较大区域支护方式的整改提供重要参考。

关键词: 深基坑; 土钉支护; 失稳破坏; 数值模拟; 现场监测

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)S2-0030-06

作者简介: 单仁亮(1964-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: srl@cumtb.edu.cn。

Numerical analysis of instability soil-nailing wall in deep foundation pits containing soft soil layer at middle and deep parts

SHAN Ren-liang, DONG Hong-guo, CHEN Dai-kun

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The FLAC^{3D} software is adopted to simulate and analyze the project based on some unstable and damage phenomena such as fracture of top soils of side slope and collapse of bottom soils of side slope during staged excavating and construction of soil-nailing wall in a deep foundation pit of the building of Beijing Science Park of China National Nuclear Corporation. In order to ensure the reality of the numerical simulation approach, several factors are considered, including distribution of soil layers, gradient of side slope, arrangement pattern of soil nails, reinforced steel shotcrete surface, pore water pressure of aquifer, staged excavation and support. According to the size of the deep foundation pit, the corresponding three-dimensional model is established. The Mohr-Coulomb elastic-plastic model is used to compute the displacement deformation of side slope at different excavation and support stages, and the displacement deformation nephogram of the whole deep foundation pit and the maximum displacement cross-section are acquired through the post-processing procedure. The horizontal displacement and settlement at several key nodes are recorded. The horizontal displacement and settlement of side slope caused by excavation and support in actual project are measured. The numerical results with are compared the measured data to determine the approximate position of potential sliding surface and collapse in the deep foundation pit. Thus it may offer some important reference for improving supporting pattern for the area with large the displacement in the design.

Key words: deep foundation pit; soil-nail wall; instability and damage; numerical simulation; field monitoring

0 引言

随着建筑工程日趋向高层建筑与地下空间方向发展, 深基坑成为一个重要的研究课题^[1-2]。目前关于深基坑的理论计算因地质条件的复杂多样性, 地下含水

层的日益变化性等因素, 导致理论计算在基坑稳定性分析中有一定局限性^[3]。在地质、水文条件, 支护结构以及施工工序与工程实际相符的前提下, 利用

FLAC^{3D} 可以计算得出基坑整体的应力、位移分布云图, 预测最大应力、位移的具体数值与对应位置, 被广泛运用于岩土工程分析^[4]。

1 工程概况及失稳现状

1.1 工程概况

中核北京科技园综合科研楼项目总用地面积 34300 m², 其中基坑场地长约 170 m, 宽约 120 m。工程包括南、北两栋综合办公楼地上 17 层, 地下 2 层, 地面绝对高程为 43.620 m。该场区地貌单元属于第四系冲洪积平原地貌类型, 场区地形较为平坦, 因本工程用 FLAC^{3D} 软件对边坡土钉支护模拟的竖向深度为 14m, 此范围以内土质类型自上而下依次为: 黏质粉土填土、杂填土、黏质粉土砂质粉土、粉质黏土、黏土、细中砂、黏质粉土粉质黏土(具体情况如表 1 所示)。静止水位埋深 7.30~8.80 m, 含水层为细中砂层, 粒径范围: 0.075 mm≤d≤0.5 mm, 其透水性大、压缩性小, 黏聚力与剪切模量可忽略。在基坑工程中, 临近开挖土体的细中砂层往往因应力场重新分配而产生较大的变形以致基坑失稳。

表 1 不同深度土体类型及相关力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土质类型	土层埋深 /m	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)	体积模量 /MPa	剪切模量 /(kN·m ⁻²)
黏质粉土填土	0~0.8	8.0	10	9.3	4.8
杂填土	0.8~1.3	0	8	11.5	4.4
黏质、砂质粉土	1.3~4.4	13.8	21.4	7.2	3.1
粉质黏土	4.4~6.1	27.2	15.8	9.8	6.9
黏土	6.1~7.3	35.6	11	15.2	5.6
细中砂	7.3~8.8	0	28	12.0	0
黏质粉土、粉质黏土	8.8~15.2	15.0	20	17.7	8.3

本工程原计划对基坑的开挖分为 5 层进行, 每层土体开挖后及时插入土钉、注浆、编织钢筋网并喷射混凝土面层。边坡按 1:0.3 放坡, 土钉呈梅花型布置, 孔内注入 M20 的纯水泥浆。为了提高整个边坡的稳定性, 在边坡表面施加钢筋网喷射混凝土面层^[5], 土钉墙面层为 φ6.5@200 mm×200 mm 钢筋网, 喷射厚度为 100 mm 的 C20 细石混凝土。

1.2 失稳破坏现状

中核北京科技园综合楼深基坑项目采用分层开挖(总计 5 层)、分层支护方案, 在完成前 3 层开挖支护后, 连续开挖第 4、5 层坡面至地下 7.6 m 处时, 长边距坡顶约 3.9 m 位置的土体产生了较大的带状开裂, 开裂宽度约为 65 mm(如图 1 所示)。短边坡顶附近

也存在较小的带状开裂, 且坡底出现土体坍塌现象(如图 2 所示), 以致工程无法进行。对产生此问题的初步分析为基坑边坡中层深度土体力学性质较差, 且第四层开挖后未及时支护又继续开挖第五层, 使基坑发生失稳。本文运用 FLAC^{3D} 软件模拟该基坑按工序分层开挖、分层锚喷支护, 经后处理得到边坡在不同开挖阶段最大位移变形分布时段(即可能出现滑裂面的位置), 并结合基坑坡顶及坑底沉降、水平方向位移的实测数据进行对比分析, 为设计方案的整改和安全施工提供参考。



图 1 坡顶附近土体开裂

Fig. 1 Crack of soils at top of side slope



图 2 坡底部分土体坍塌

Fig. 2 Collapse of soils at bottom of side slope

2 数值模拟方案设计

2.1 模拟分析的基本假设条件

在土体自重应力、原始地应力作用下, 基坑土体将产生弹塑性变形, 因此本文在 FLAC^{3D} 数值模拟计算中采用莫尔-库仑模型^[6]。结合工程实际对 FLAC^{3D} 模拟做出一些基本假设: ①在指定深度范围内相同力学参数的土体视为均质体, 不考虑土体、支护结构间的空隙影响; ②土钉与其周围注浆体为理想弹性体, 基坑土体为理想弹塑性体; ③土钉为被动支护, 在边坡土体没有产生位移变形时, 土钉不受作用力; ④考虑距地面以下 7.3~8.8 m 深度范围内地下水位的静水压力作用, 采用无渗流模式计算。

2.2 模拟方案

由于本基坑整体结构大致呈对称性，在 FLAC^{3D} 模拟中只需建立开挖部分的 1/4。模型长×宽×高=255 m×180 m×15.2 m，其中开挖部分长×宽×高=85 m×60 m×7.6 m，模拟基坑开挖按 1:0.3 放坡。限定相应边界条件后，分 4 次开挖：第一次开挖第 1 层土体深度为 2.0 m，第二、三次分别开挖第 2、3 层土体深度均为 1.4 m，第四次连续开挖第 4、5 层土体总深度 2.8 m。前 3 层每层土体开挖完毕后分别设置代表土钉和钢筋网喷射混凝土面层的锚索（cable）单元和壳（shell）单元，第 4、5 层土体开挖后不采取支护措施。考虑地下 7.3~8.8 m 细中砂含水层的实际情况，设置该深度范围的初始孔隙水压力，所建立基坑开挖支护模型如图 3 所示。

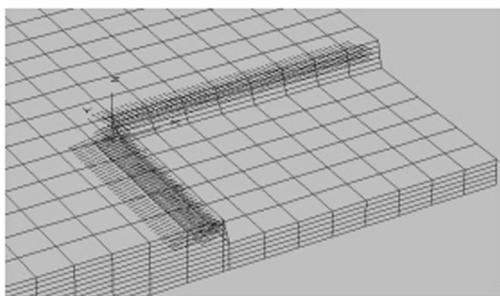


图 3 基坑最终开挖支护模型

Fig. 3 Support model for foundation pit after final excavation

3 水平和竖向位移分析

在基坑稳定性的分析中，基坑水平和竖向位移是两个非常重要的因素，通过对两者的数值模拟结果与实测数据综合分析，比较准确地掌握基坑潜在滑裂面的大致位置以及土体开裂的发展趋势。因基坑土体力学性质的异同决定了其承载能力的不同，并非最大应力区域就是最大变形区域，应力云图显示的信息在工程实际运用中有一定局限性^[7]。本数值模拟分析的重点在于经后处理程序得到可以直接反映基坑各个部位变形情况的位移云图，从而确定最大变形区域的大致位置，为现行方案在软弱土层支护方面的整改提供重要参考。

3.1 基坑长、短边水平位移分析

基于 FLAC^{3D} 可以对分析中各个变量直接进行绘图的优势，本节将水平位移最大的截面在分步开挖支护条件下的位移云图列出（如图 4, 5 所示），以便更加直观的观察分析。从图 4, 5 中可以看出，长、短边的水平位移状况大致相同，随着开挖支护深度的逐渐增加，边坡坡面附近的水平位移也在逐渐增大，并且范围在逐步扩散。在前 3 层开挖支护完成时，最大水平位移所处位置一直位于永久坑底附近，这是因为基坑 7.3~8.8 m 深度为力学性质较差的细中砂含水层，由上层开挖支护造成地应力重新分配对其扰动较大，因此产生很明显的趋向于开挖附近的水平位移，位移云图分布类似于“蘑菇”状。

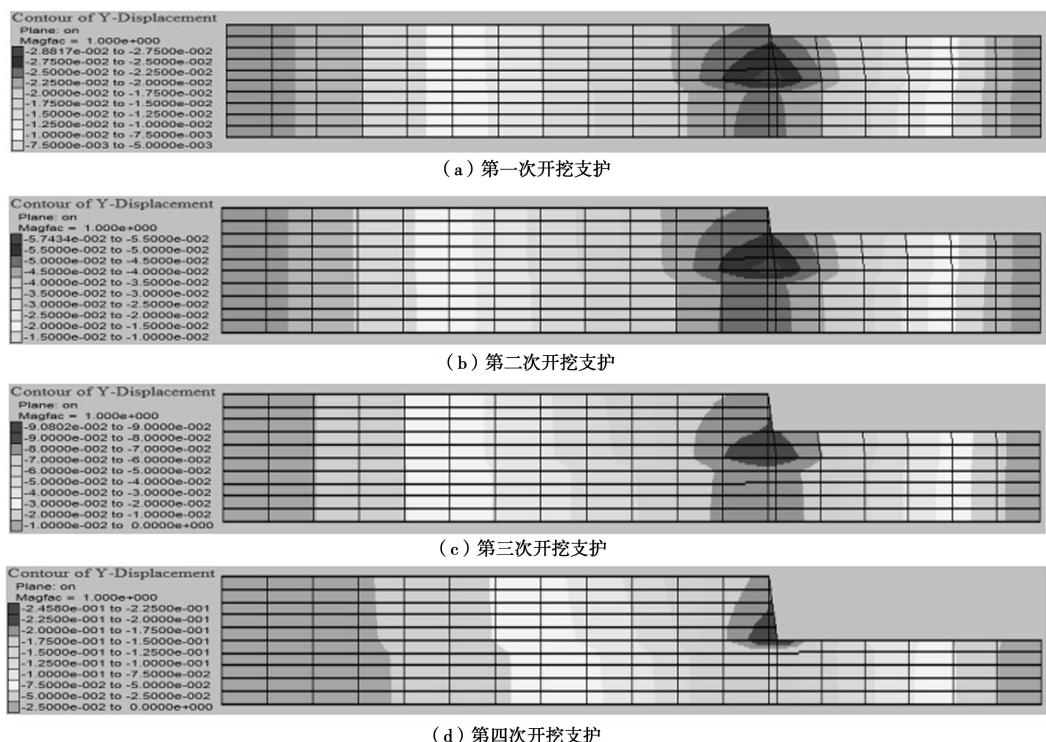


图 4 长边分步开挖（支护）水平位移云图

Fig. 4 The horizontal displacement nephogram of sub-step excavation(support) of longer side slope

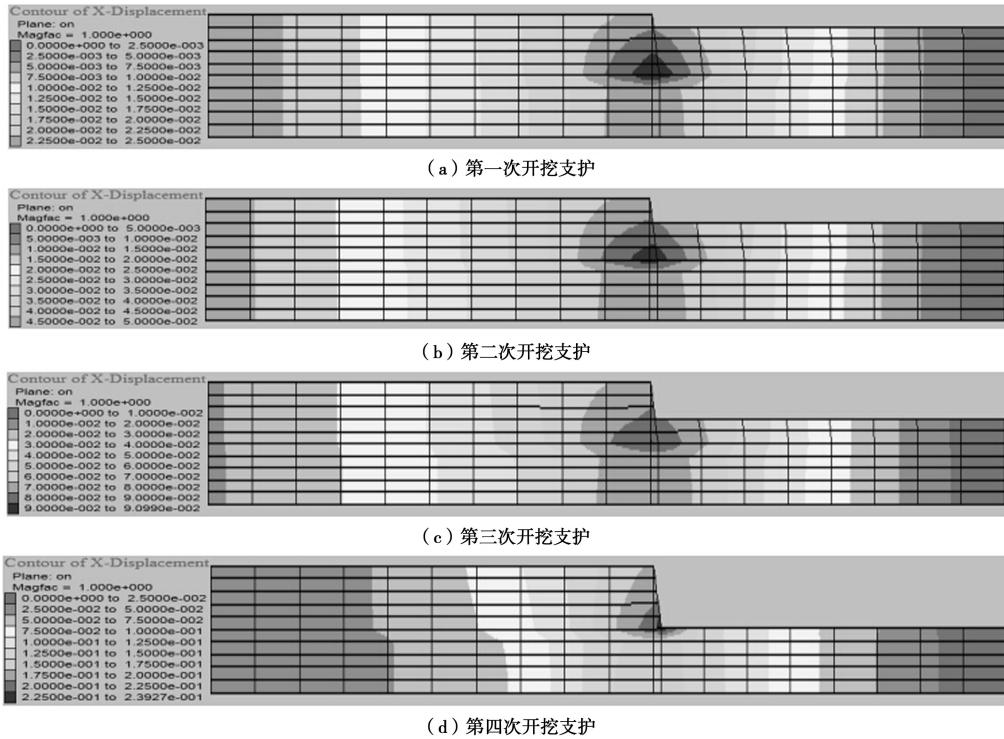


图 5 短边分步开挖(支护)位移云图

Fig. 5 The horizontal displacement nephogram of sub-step excavation(support) of shorter side slope

经后处理程序所得水平位移数据表明: 每开挖支护一步, 边坡内部都有一定的水平位移增量, 且随着开挖支护的逐步进行, 其水平位移增长率在增大。“蘑菇”顶端越来越接近上一层开挖土钉支护位置, 由此可见土钉通过被动受力使一定范围内土体位移达到较为均衡的分布, 在基坑边坡的支护中起重要作用。在前 3 层开挖支护完成时较大的两个水平位移等值区域变小, 初步分析是由于该区域土质的独特性使得第 3 层土体开挖后所产生的应力分布变化对其沿基坑内部水平方向的位移影响较大, 其作用类似于卸载。

基坑在完成第 4, 5 层开挖未支护时, 沿长边方向总体水平位移云图如图 6 所示, 在基坑长边坡底中心向两边各扩展约 60 m 的范围内水平位移达到了 200~245.8 mm, 坡顶中心向两边各扩展约 55 m 的范围内水平位移达到了 175~200 mm, 在此深度基坑工程中属于严重变形。在第 4, 5 层开挖完成但未支护(地下 4.8~7.6 m 深度层)后仅 6 h 内, 在距基坑边坡顶部约 3.9 m 位置出现了带状开裂, 且随时间延续裂缝宽度也逐渐增大, 在 8 d 之后基本达到稳定。图 7 为基坑长边中心坡顶处水平位移的实测数据与数值模拟结果对比图, 由图 7 可知, 随开挖逐次进行, 长边坡顶水平位移增量在不断增大, 且每次开挖支护完成后随时间延长, 水平位移趋于稳定。由于临近细中砂含水层且未能及时支护, 第四次开挖后, 坡顶水平位移量

达到第三次开挖的两倍, 导致了基坑的失稳。

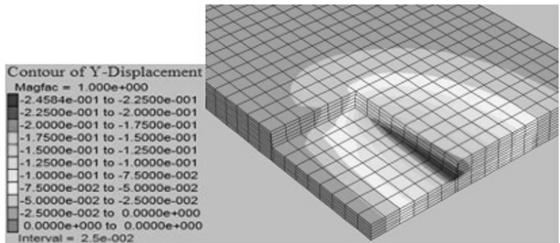


图 6 长边总体水平位移云图

Fig. 6 Horizontal displacement nephogram of whole long side slope

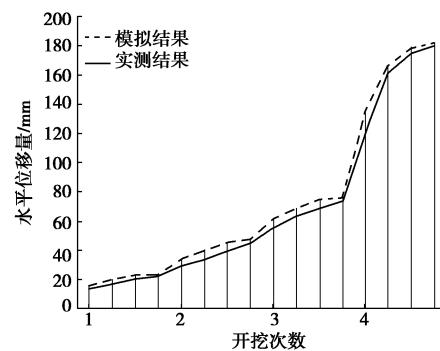


图 7 长边坡顶水平位移图

Fig. 7 Horizontal displacement at top of long side slope

在完成第四次开挖但未支护时, 基坑短边整体水平位移如图 8 所示, 在基坑短边坡底中心向两边各延

伸约 45 m 范围内水平位移达到了 200~239.3 mm, 基坑坡顶中心向两边各延伸 40 m 范围内水平位移达到了 150~175 mm。在第四次开挖未结束支护 2 d 后, 基坑短边中心偏西位置(深度范围: 4.2~6.0 m) 土体发生大面积坍塌, 甚至有些位于第 3 层已支护的土体因挤压强度过大, 将钢筋网喷射混凝土面层撕裂, 使得工程安全与施工进度都受到很大影响。为抑制坡面土体坍塌与坡顶附近土体开裂程度增加, 将第 4、5 层已开挖土层沿基坑坡面回填。短边中心坡顶的数值模拟结果与实测数据如图 9 所示, 图中前 3 次土体开挖与支护完成时, 数值模拟结果与实测数据比较接近。第四次土体刚开挖完毕未支护时发生局部土体坍塌事故, 事故发生后得到及时回填处理, 数值模拟中并未考虑局部土体回填的因素, 因此实测数据所测得水平位移比数值模拟结果小一些。

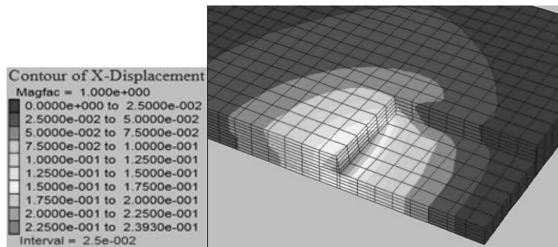


图 8 短边总体水平位移云图

Fig. 8 Horizontal displacement of whole short side slope

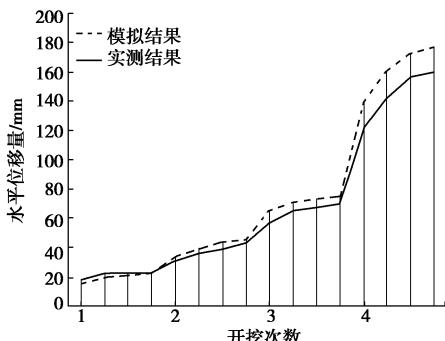


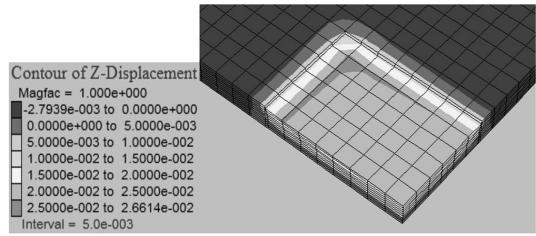
图 9 短边坡顶水平位移图

Fig. 9 Horizontal displacement at top of short side slope

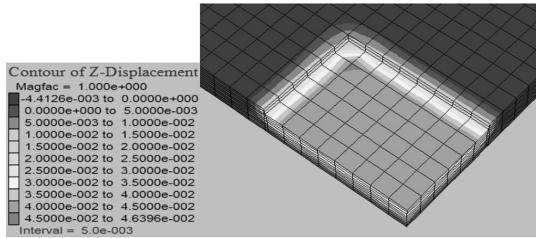
3.2 基坑竖向位移分析

基坑土体的开挖与支护作用会造成边坡附近区域产生一定程度的竖向位移, 主要包括坡顶竖向位移与坑底隆起。图 10 为数值模拟基坑在每次开挖(支护)结束后的总体沉降云图, 从图中可见第一次开挖支护后, 坡面及坡顶边缘竖向升高 5~10 mm, 坑底最大隆起区域范围在距离坑边 10~13 m, 且在基坑底部拐角附近隆起范围较大, 向边坡中心位置逐渐靠近时, 隆起范围呈减小趋势。第二次开挖支护后坑底最大隆起区域出现在坑底拐角附近, 别的区域竖向位移分布

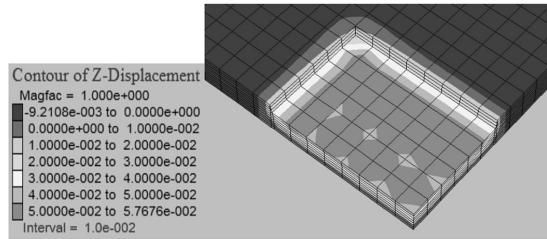
较为均匀。第三次开挖支护后坑底最大隆起范围扩展至距离长、短边坡 10 m 外的绝大部分区域。第四次开挖后, 距边坡顶部 7~30 m 范围内竖向下沉 20.0~25.4 mm, 逐渐靠近坡顶拐角处时最大下沉区域收敛。与前三次开挖支护完成时坡顶边缘竖向位移方向向上不同的是, 第四次开挖完成时坡顶边缘竖向位移方向向下。土体开挖所产生卸载效应是引起坑底隆起的主要原因^[8]。



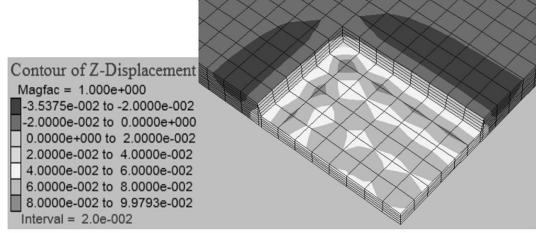
(a) 第一次开挖



(b) 第二次开挖



(c) 第三次开挖



(d) 第四次开挖

图 10 基坑总体竖向位移云图

Fig. 10 Vertical displacement nephogram of whole foundation pit

4 结 论

(1) 数值模拟与监测数据表明, 在土体失稳前坡脚先形成塑性区, 随后在距离坡顶一定范围处产生一段张拉裂缝及剪切塑性带, 坡脚和坡顶的塑性带都向边坡中部发展, 当两段塑性带连通后则会形成边坡滑动面, 基坑整体发生滑动破坏。

(2)由基坑边坡水平位移云图结合实际开裂带分布位置, 初步判定长边潜在滑裂面呈圆弧型, 滑裂面始端位于距坡顶水平距离约 3.9m 处, 潜在末端处于地下深度范围为 6.0~7.6 m。

(3)从基坑长、短边分部开挖位移云图可以看出, 细中砂含水层受开挖影响产生较大的变形, 成为基坑失稳的主要原因。此外, 工程施工中将第 4, 5 层土体同时开挖且未能得到及时的支护也是导致基坑失稳的重要因素。

(4) FLAC^{3D} 能够以莫尔-库仑弹塑性模型较为接近实际的模拟基坑分步开挖支护, 并反映土体变形效果, 在工程运用中有一定的参考和指导意义。

参考文献:

- [1] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (CHEN Zhao-yuan, CUI Jing-hao. Application of soil nailing in foundation pit engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese))
- [2] 连镇营, 韩国城, 吕凯歌. 土钉支护弹塑性数值分析及稳定性探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, 23(1): 85~89. (LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, LÜ Kai-ge. Elastoplastic numerical analysis and stability study of soil-nailed wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 23(1):85~89.(in Chinese))
- [3] 张明敏. 深基坑复合土钉墙支护 FLAC^{3D} 模拟与现场测试研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011. (ZHANG Ming-min. FLAC^{3D} Simulation and field testing of deep excavation supported by soil nail walls[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese))
- [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): 505~508. (LIU Ji-guo, ZENG Ya-wu. Application of FLAC^{3D} to simulation of foundation excavation and support[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3):505~508. (in Chinese))
- [5] 丁勇春, 王建华, 徐斌. 基于 FLAC^{3D} 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): 976~980. (DING Yong-chun, WANG Jian-hua, XU Bin. Three-Dimensional numerical analysis of braced excavation based on FLAC^{3D}[J]. Journal of Shanghai Jiao tong University, 2009, 43(6): 976~980. (in Chinese))
- [6] 吴忠诚, 汤连生, 廖志强, 等. 深基坑复合土钉墙支护 FLAC-3D 模拟及大型现场原位测试研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28: 1460~1465. (WU Zhong-cheng, TANG Lian-sheng, LIAO Zhi-qiang, et al. FLAC-3D simulation of deep excavation with compound soil nailing support[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28: 1460~1465. (in Chinese))
- [7] 俞登华, 尹骥. 复合土钉支护基坑位移和稳定性的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 161~165. (YU Deng-hua, YIN Ji. Finite element analysis of the displacement and stability of composite soil nailed foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 161~165. (in Chinese))
- [8] 赵延林, 安伟光. 基于可靠性的复合土钉支护基坑稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 32(10): 1300~1304. (ZHAO Yan-lin, AN Wei-guang. Reliability-based stability analysis of a foundation pit supported by composite soil nailing[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(10): 1300~1304. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)