

深基坑开挖与支护模拟仿真分析

胡浩军^{1, 3}, 王元汉^{1, 2}

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 控制结构湖北省重点实验室, 武汉 430074;
3. 北京军区空军勘察设计院, 北京 100022)

摘 要: 运用 FLAC^{3D} 软件中的 Mohr-Coulomb 本构模型对北京市某高层住宅楼基坑工程进行了数值模拟分析, 对基坑开挖、失稳破坏、边坡支护进行了评价, 并对模拟结果与实测结果进行了对比, 分析了基坑变形、失稳破坏和支护过程。研究表明, FLAC^{3D} 软件中的 Mohr-Coulomb 本构模型能够方便、准确地模拟基坑开挖、边坡的大位移失稳破坏、边坡的支护过程, 其计算结果安全可靠。分析结果也证实了 FLAC^{3D} 在基坑工程数值模拟方面具有良好的适应性。

关 键 词: FLAC^{3D}; Mohr-Coulomb 模型; 基坑开挖; 支护; 数值模拟

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Simulation and analysis of foundation excavation and support

HU Hao-jun¹⁻³, WANG Yuan-han^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;
3. Survey and Design Institute, Beijing Military Region Air Force, Beijing 100022, China)

Abstract: The simulative analysis with the Mohr-Coulomb model of FLAC^{3D} program is carried out based on the development of deformation for foundation pits of a high-rise building in Beijing. Comparing with the results of the in-situ monitoring, the deformation, collapse and support for the foundation pits are discussed. It can be shown that the Mohr-Coulomb model of the FLAC^{3D} program can be used to simulate the foundation excavation and the collapse and the slope support very conveniently and accurately. The results obtained are safe and reliable. The FLAC^{3D} program can be widely used in the simulation of foundation pits.

Key words: FLAC^{3D}; Mohr-Coulomb model; foundation excavation; support; simulation

1 引 言

在高层建筑及其他工程深基坑施工过程中, 深基坑开挖时应力-应变过程很复杂。基坑边坡开挖引起的土体卸荷, 将导致边坡变形和应力的重新分布, 对土坡的稳定性产生影响。基坑土是松散的集合体, 呈现非均质、各项异性的特征, 它既不是理想弹性体, 也不是理想塑性体。不同工程性质的土, 在加载和卸载过程中, 会出现应变硬化和应变软化现象。因此, 要想准确的计算基坑边坡的应力和变形非常困难。本文使用 FLAC^{3D} 三维快速拉格朗日差分程序, 针对北京某高层住宅楼基坑开挖、边坡破坏、后期支护过程进行数值模拟, 据此分析边坡的位移及支护结构与土的相互作用。

2 计算模型

FLAC^{3D} 三维快速拉格朗日差分程序采用了显

式有限差分格式求解场的控制微分方程, 并根据构形的变化不断更新坐标系, 以此模拟岩土介质的有限变形和大位移行为。计算过程中不需要形成刚度矩阵, 不用求解大型方程组, 因此, 占用内存少, 求解速度快。而且 FLAC^{3D} 应用了混合单元离散模型, 可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形, 尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等领域有其独特的优势。针对不同的材料, FLAC^{3D} 软件提供了弹性各向同性、Drucker-Prager 弹塑性、Mohr-Coulomb 弹塑性等多达 11 种内置的材料模型, 有静力、动力、蠕变、渗流、温度等 5 种计算模式, 可以进行多模式的耦合分析, 而且在 FLAC^{3D} 程序中带有多种结构单元, 如梁 (Beam) 单元、锚索 (Cable) 单元、桩 (Pile) 单元、衬砌 (Liner) 单元等, 这些结构单元能够快捷、方便、准确地模拟不同结构体对岩土体进行加

固的作用过程。

土是一种极为复杂的复合体, 具有很复杂的力学行为。在外力的作用下, 土体不仅产生弹性变形, 而且还会产生不可恢复的塑性变形。本文运用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型进行计算。

Mohr-Coulomb 屈服准则为

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (1)$$

式中: $N_\phi = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}$; c 为凝聚力; ϕ 为摩擦角。

拉应力屈服函数定义为

$$f_t = \sigma_t - \sigma_3 \quad (2)$$

式中: σ_t 为抗拉强度。

在屈服之后, 土体的特性将是部分弹性和塑性的, 在任一应力增量过程中, 其应变由弹性分量和塑性分量两部分组成, 因此有:

$$d\varepsilon_{ij} = (d\varepsilon_{ij})_e + (d\varepsilon_{ij})_p \quad (3)$$

弹性应变分量比较容易求得, 而塑性应变分量与塑性势函数 g 有如下关系:

$$(d\varepsilon_{ij})_p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

在 FLAC^{3D} 里, 对剪切塑性流动和拉应力塑性流动分别进行定义, 并且对应不同的流动法则。剪切势函数 g_s 对应于非关联的流动法则, 其表达式为

$$g_s = \sigma_1 - \sigma_2 N_\psi \quad (5)$$

式中: $N_\psi = \frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi}$; ψ 为剪胀角。

势函数 g_t 对应于拉应力破坏的相关联流动法则, 起表达式为

$$g_t = -\sigma_3 \quad (6)$$

3 工程概况

本工程为位于北京市朝阳区小红门乡龙爪树南里, 处于南三环与南四环之间, 地上 18 层地下两层, 基坑开挖面为 22.01 m×22.01 m, 基坑深度为 6.7 m, 分两步开挖, 第一步先开挖 5.4 m, 第二部开挖 1.3 m。

3.1 地质条件

根据工程地质勘察报告可知, 本工程场地比较平坦, 本工程场地底层分布为第四纪全新世地质时期由于冲积形成的第 II, III, IV 类土, 模拟的各层土体的材料性质由上向下列于表 1。

在勘探深度范围内共探露 2 层地下水, 其中第 1 层埋深为 7.5~8.0 m, 地下水类型为上层滞水, 是由于第 3 层粉质黏土的弱透水性形成的, 主要补给来源为大气降水和生活污水的渗漏。第 2 层埋深在

21~22 m 之间, 地下水的类型为承压水, 主要补给来源是相邻水源, 大气降水的补给为少部分。

表 1 物理力学参数表

Table 1 Physical-mechanical parameters of model

土层 编号	土层 名称	平均厚度 /m	γ /kN·m ⁻³	c /kPa	ϕ / (°)	E_s /MPa	泊松比
①	粉质黏土填土	0.9	18.40	70	20.5	20.7	0.25
②	砂质粉土	5.1	19.70	16.7	37.5	20.7	0.25
③	粉质黏土	10.0	20.50	39	19.5	14.1	0.25

3.2 施工过程

基坑原计划开挖放坡按 1:0.3 放坡, 分两步施工, 第 1 步开挖深度为 5.4 m, 然后进行 CFG 桩施工; 第 2 步开挖至基础底面, 开挖深度为 1.3 m。第 1 步施工完后, 停工两个月后复工。在进行第 2 步施工前, 由于场地限制, 在基坑南侧堆放有部分施工材料, 使南侧边坡中部出现塌方, 塌方最大宽度达到 50 cm 左右, 经过修坡和护坡, 才进行第 2 步开挖施工。护坡方案为沿边坡梅花形打入钢筋土钉, 钢筋土钉直径为 25 mm, 间距为 1.50 m, 深度为 4.00 m; 然后满挂 $\Phi 6$ mm@200 mm 的钢筋网片, 并与钢筋土钉绑扎牢固; 最后, 用 150 mm 厚 C20 混凝土护壁。至本工程施工完成, 基坑没有再出现问题。

4 FLAC^{3D} 模拟

4.1 计算模型及参数

基坑为方形基坑, 模型长、宽均取 80 m, 计算深度取 15 m, 开挖深度第 1 步为 5.4 m, 第 2 步为 1.3 m。模型共划分为 32 400 个单元, 见图 1。护坡结构采用锚索 (Cable) 单元和衬砌 (Liner) 单元来模拟。各土层计算参数详见表 1、锚杆设计参数详见表 2、衬砌设计参数详见表 3。

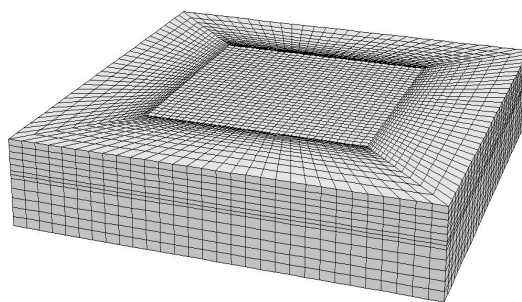


图 1 模型单元图

Fig.1 Elements of model

4.2 模拟方案

根据原施工方案以及工程实际施工过程, 将开挖、支护过程模拟共分成 5 个步骤进行: 第 1 步为

表 2 锚杆设计参数表

Table 2 Parameters of cable

直径 /mm	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	砂浆凝聚力 /kN·m ⁻¹	锚杆砂浆刚度 /kN·m	锚杆长度 /m
25	200	300	25	6 330	4.0

表 3 衬砌设计参数表

Table 3 Parameters of liner

混凝土 等级	厚度 /mm	弹性模量 /GPa	泊松比	重度 /kN·m ⁻³	弯曲抗压 强度/MPa	抗拉强度 /MPa
C20	150	21	0.15	25	11	1.0

基坑开挖至-5.4 m 时的数值模拟；第 2 步为基坑开挖至-6.7 m 时的数值模拟；第 3 步为基坑开挖至-5.4 m、基坑南侧加载时，南侧基坑边坡破坏的模拟；第 4 步为在基坑南侧加载条件下基坑开挖至-5.4 m 时，南侧边坡加设护坡后的数值模拟；第 5 步为在基坑南侧加载条件下，南侧边坡加设护坡后基坑开挖至-6.7 m 时的数值模拟。

5 模拟结果及分析

以基坑的中心点为原点，取 $y=0$ ， $-40 \leq x \leq 0$ 的一个面域作为主要分析面。经过建模计算，各步计算结果如图 2~6 所示。

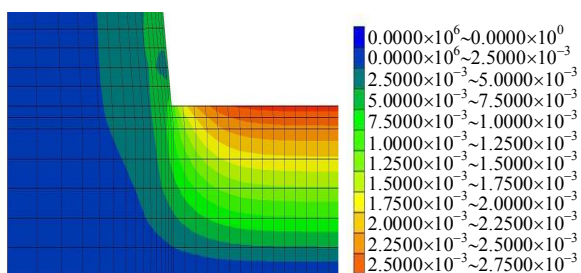


图 2 第 1 步开挖位移图 (单位: m)

Fig.2 Displacement of the first construction step(unit: m)

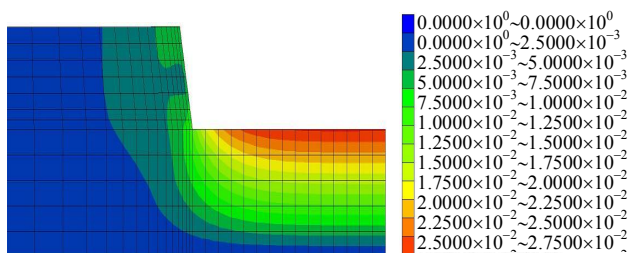


图 3 第 2 步开挖位移图 (单位: m)

Fig.3 Displacement of the second construction step(unit: m)

由图 2 和图 3 知，基坑南侧没有堆载时，基坑的主要变形位基坑底部隆起变形，而基坑边坡的变形量很小。应用 FLAC^{3D} 中的强度折减法计算此时的边坡稳定系数为 1.38，这也进一步证明按原施工方案进行施工是安全可靠的。由于基坑南侧出现堆

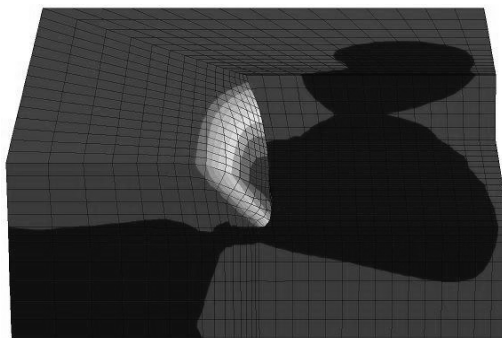


图 4 加载破坏图

Fig.4 Destroyed model in loading

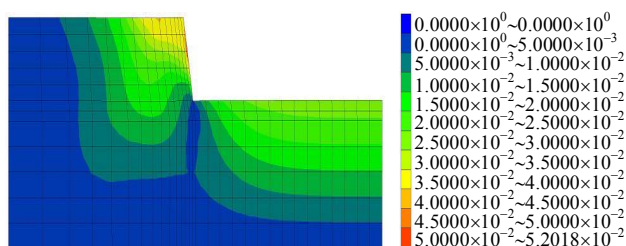


图 5 加载护坡后位移图 (单位: m)

Fig.5 Displacement of the first step after being supported(unit: m)

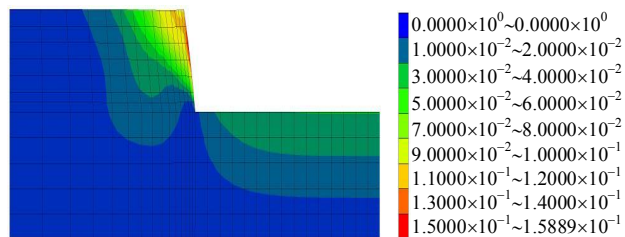


图 6 加载护坡后第 2 步开挖位移图 (单位: m)

Fig.6 Displacement of the second step after being supported (单位: m)

载，使得南侧边坡的变形出现变化。在第 1 步开挖模拟完成后，在模型南侧施加荷载，荷载施加范围为 $-25 \leq x \leq -24$ 、 $-22 \leq y \leq 22$ ，荷载为 10 kPa。经过 10 100 计算，基坑南侧边坡位移计算达到 2.5 m，这说明基坑边坡早已破坏，就人为中止程序运算。图 4 为人为中止计算后的南侧 1/4 模型的位移立体图。由图中可以看出，南侧边坡的东西向角还是稳定的，边坡的位移较小，但是中部产生了很大的位移，而且坡顶单元出现了很大的变形，这说明边坡已经产生了滑移破坏。实际工程中，基坑南侧边坡中部出现了大面积塌方，塌方最大宽度达到了 50 cm 左右。由此看出，计算模拟与实际工程是基本一致的。由图 4 可以看出，产生滑移破坏的宽度比较大，而实际的工程中产生的塌方宽度要小于计算结果，这说明应用 FLAC^{3D} 程序计算边坡的位移还是偏于安全的。

图 5 和图 6 为在有堆载条件下, 南侧边坡经过修坡和护坡后的第 1 步开挖和第 2 步开挖的位移图。将图 4 和图 5 比较, 可以看出南侧边坡在支护的条件下, 边坡的位移大幅度减小, 边坡在进行支护后又恢复到稳定状态。将图 5 与图 2 比较, 可以看出在基坑南侧堆载对基坑底部地基土的隆起变形没有影响, 但是对堆载附近边坡的位移影响很大。由图 5 可以看出, 在堆载和护坡后, 整个基坑的最大位移出现在南侧边坡的顶部附近, 最大位移量约为 52 mm, 在边坡变形的安全范围内。从图中还可以看出, 从边坡顶部开始, 随着深度的增加, 边坡的位移等值曲线愈加趋向一个勺形。这说明基坑南侧堆载后, 先是堆载部位土体产生较大变形, 随着时间的推移, 变形向四周及土体下部发展。当位移发展到边坡处时, 由于支护结构在边坡顶端的加固作用较小, 因此边坡顶部附近产生最大位移。随着开挖深度的增加, 从图 6 可以看出, 边坡的位移等值曲线由勺形变为弧形, 而且最大位移与图 5 比较, 增加了 2 倍, 达到 160 mm。随着开挖深度的增加, 支护结构端部的加固作用减弱, 因此边坡端部的位移进一步增加。虽然边坡的计算位移量较大, 但还是在边坡变形的安全范围内。边坡的变形形态也与实际工程的边坡变形形态基本一致, 而实际工程中的边坡位移量较小, 这也说明了 FLAC^{3D} 进行边坡变形模拟时是偏于安全的。

6 结 语

(1) FLAC^{3D} 能够很好地对基坑分步开挖、边坡破坏及支护进行模拟, 而且它自带的 Mohr-Coulomb 弹塑性模型, 能很好地反映土的特性。

(2) 基坑在没有堆载的条件下按照原计划施工也是安全的, 而且基坑边坡的位移也很小。由于堆载导致了边坡产生滑坡破坏, 这在以后的施工中应当注意。在堆载前, 应对边坡进行验算, 不能满足要求时应当加设支护措施。

(3) 本文对工程基坑施工过程的模拟与实际施工情况基本一致, 其计算结果可以为其他同类工程设计及施工提供参考。

参 考 文 献

- [1] 余志成, 施文华. 深基坑支护设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 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.
- [3] 万林海, 殷玉驰, 刘志敏. 深基坑工程稳定性的 FLAC^{3D} 分析[J]. 水科学与工程技术, 2005, (1): 42—44.
WAN Lin-hai, YIN Yu-chi, LIU Zhi-min. Study on stability of deep foundation pit by FLAC^{3D} modeling[J]. **Water Sciences and Engineering Technology**, 2005, (1): 42—44.
- [4] 唐朝生, 施斌, 吴传斌, 等. 南京某住宅小区基坑开挖和支护稳定性数值模拟分析[J]. 工程勘察, 2005, (3): 1—4.
TANG Chao-sheng, SHI Bin, WU Chuan-bin, et al. Simulation of one foundation excavation and support in Nanjing[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2005, (3): 1—4.
- [5] 艾志雄, 罗先启, 刘波, 等. FLAC 基本原理及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 灾害与防治工程, 2006, (1): 19—24.
AI Zhi-xiong, LUO Xian-qi, LIU Bo, et al. Fundamental theory of FLAC and its application in slope stability analysis[J]. **Disaster and Control Engineering**, 2006, (1): 19—24.
- [6] 王燕. 某基坑土钉支护的三维数值分析[J]. 武汉化工学院学报, 2005, 27(4): 30—33.
WANG Yan. 3D numerical analysis on soil nailing of foundation pit[J]. **Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology**, 2005, 27(4): 30—33.
- [7] 史晨晓, 史庆忠, 杨立辉, 等. 基坑开挖支护的数值模拟分析[J]. 安徽建筑, 2006, 13(5): 118—119.
SHI Chen-xiao, SHI Qing-zhong, YANG Li-hui, et al. Numerical analysis of the support of foundation pit excavation[J]. **Anhui Architecture**, 2006, 13(5): 118—119.
- [8] 李新平, 郭运华, 彭元平, 等. 基于 FLAC^{3D} 的改进边坡极限状态确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 5287—5291.
LI Xin-ping, GUO Yun-hua, PENG Yuan-ping, et al. Improved method to determine the critical state of slopes based on FLAC^{3D} method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(2): 5287—5291.
- [9] 高华东, 霍达, 陶连金. 深基坑开挖 FLAC 数值模拟计算及分析[J]. 河南科学, 2005, 23(6): 859—862.
GAO Hua-dong, HUO Da, TAO Lian-jin. Numerical calculation and analysis in deep excavation with FLAC[J]. **Henan Science**, 2005, 23(6): 859—862.
- [10] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.