

FLAC3D 在建筑边坡稳定性分析中的应用

周 斌, 张 超, 邵 迟, 张云飞

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 基于有限差分法的 FLAC3D 软件并以刘屋山后山边坡为例, 建立边坡三维数值模型; 采用 Mohr-Coulomb 准则同时结合抗剪强度折减理论, 进行了边坡稳定性分析, 模拟边坡应力状态, 找出边坡失稳的机理与破坏形态, 分析边坡失稳的主要影响因素, 求出边坡的安全系数。研究结果与极限平衡法得到的结果基本一致, 这表明采用基于有限差分法的 FLAC3D 软件进行边坡安全系数求解是合理可行的。将数值模拟结果与现场实地考察结果相结合, 提出了合理有效的边坡加固措施。

关键词: FLAC3D 软件; 边坡稳定性; 安全系数; 数值分析

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)02-0013-06

Application of FLAC3D in the Stability Analysis of Building Slopes

ZHOU Bin, ZHANG Chao, SHAO Chi, ZHANG Yunfei

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: With the mountains behind the Liu's as the object of study, and by utilizing FLAC3D software based on finite difference method, a three-dimensional numerical model of the slopes has thus been established. By adopting the Mohr-Coulomb criterion as well as the shear strength reduction theory, a stability analysis has been carried out to simulate the stress state of the slopes and find out the mechanism of the slope instability and failure patterns, followed by an analysis of the major affecting factors of the slope instability, thus obtaining the safety factor of the slopes. With the results of the numerical simulation combined with the field investigation results, some reasonable and effective measures for the slope reinforcement has thus been put forward.

Keywords: FLAC3D software; slope stability; safety factor; numerical analysis

0 引言

随着我国经济的持续、快速发展, 城市建设和相应的基础设施建设也得到了快速发展。然而, 在工程建设过程中, 由于不同的工程需求, 不可避免地需要进行开挖、破坏或扰动原有边坡的岩体或土体, 从而形成新的边坡。这在一定程度上破坏了原有的地质环境, 为崩塌、滑坡等地质灾害的发生留下了隐患。滑坡是危害程度仅次于地震、洪水的地质灾害, 一旦

发生滑坡将会造成巨大的财产损失和人员伤亡。因此, 正确分析评价边坡的稳定性和选择合理可靠的处置措施非常重要^[1-2]。对边坡进行稳定性分析, 可以清楚地了解边坡是否处于稳定状态, 或者在边坡开挖的过程中, 岩土体所产生的岩土压力是否会影响边坡的整体稳定性。这不仅关系到边坡支护方案的选择, 同时也为支护结构的设计提供科学的依据。

目前, 边坡稳定性分析主要采用极限平衡分析和数值分析 2 类方法。极限平衡分析方法是以前平

收稿日期: 2017-06-21

作者简介: 周 斌 (1972-), 男, 湖南新化人, 湖南工业大学副教授, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程等方面的教学与研究, E-mail: 280459071@qq.com

衡理论为基础,考虑结构面的控制作用,将岩土体划分为某种规则的块体,通过建立边坡的平衡方程来分析边坡的稳定性^[3-5]。然而,对于极限平衡分析法来说,需要作出边坡中存在滑动面的假设,不能考虑土体与支护结构之间的相互关系,也不能计算边坡和支护结构的位移。数值分析方法是伴随着计算机软件、硬件技术的不断发展而逐渐应用于边坡稳定性分析中的。数值分析方法主要有:有限单元法(finite element method, FEM)、有限差分法(finite difference method, FDM)、离散单元法(discrete element method, DEM)、边界单元法(boundary element method, BEM)、数值流形元法(numerical manifold method, NMM)等^[6-8]。

基于有限差分法的FLAC(fast Lagrangian analysis of continua)是美国ITASCA公司研发推出的连续介质力学分析软件,FLAC有二维和三维计算软件2个版本,即FLAC2D和FLAC3D。相对于其它有限元软件,采用混合离散法模拟材料的塑性破坏和塑性流动是FLAC的主要优点。FLAC3D能够较好地模拟岩土体在材料到达强度极限或屈服极限时发生破坏或塑性流动的特性,且计算过程简单、快捷。FLAC3D已被应用于土木建筑、交通、水利、地质、石油及环境工程等领域,并成为这些专业领域进行分析和设计不可或缺的工具^[9-10]。

本文以刘屋山滑坡、崩塌特大地质治理工程为例,以FLAC3D为工具进行数值模拟,阐述FLAC3D软件在边坡稳定性分析中的应用,并分析边坡失稳的主要影响因素^[11]。

1 强度折减理论

强度折减法主要被应用于安全系数的求解,它是通过不断减小材料强度使边坡达到极限平衡状态。根据Mohr-Coulomb破坏准则,安全系数通过下列方程来定义:

$$c_{\text{trial}} = \frac{1}{F_{\text{trial}}} c, \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{trial}} = \arctan\left(\frac{1}{F_{\text{trial}}} \tan \varphi\right). \quad (2)$$

式(1)~(2)中: c_{trial} 为折减后的黏聚力;

c 为黏聚力;

φ_{trial} 为折减后的内摩擦角;

φ 为内摩擦角;

F_{trial} 为折减系数。

对边坡稳定性进行数值分析时,通过调整岩土体的抗剪强度指标,使折减系数不断增大,直至边坡达

到临界破坏状态,这时的折减系数 F_{trial} 即为边坡的安全系数。

在FLAC3D 5.0版本中,若给出SOLVEfos命令,除了可满足库伦-摩尔强度特性,也可自动适用遍布节理强度特性和Hoek-Brown强度特性的折减^[12]。

在FLAC3D中,通过SOLVEfos命令执行强度折减程序的步骤如下:

1) 设置大值黏聚力 c ,使内部应力发生变化,找到体系达到平衡时的步数 Nr , Nr 默认值为50 000。

2) 确定 Nr 后,对给定的折减系数,运行 Nr 步。若运行 Nr 步后体系不平衡比率 R 小于 10^{-5} ,说明体系达到平衡状态;若不平衡比率 R 不小于 10^{-5} ,就继续运行,直到满足条件。

2 工程实例

2.1 工程概况

边坡位于惠州市城区密集居民区,边坡高度15~35 m,长约200 m,汇水面积约2 5476 m²。目前边坡坡率约为1:0.5,坡面裸露,无任何植被,且无任何支护。边坡局部坡面已喷混凝土护面,无泄水孔。由于城区的发展建设,从20世纪90年代开始对山体边坡不断开挖,渐渐形成现在的带状边坡。由于连年降雨及山坡植被破坏,造成该区域边坡局部出现垮塌、滑坡等现象。

2.2 地质条件

边坡工程地质图如图1所示。

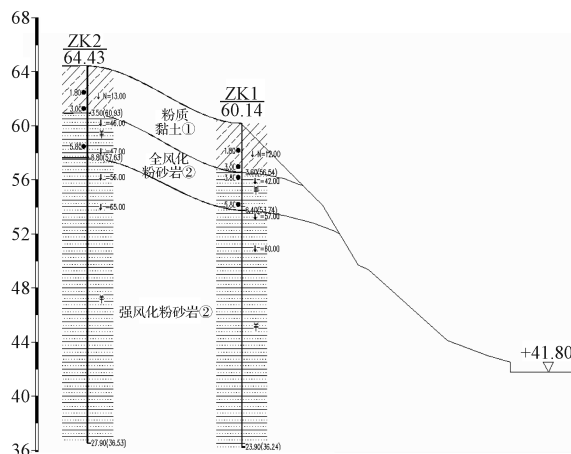


图1 边坡工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological profile

边坡地貌类型为剥蚀丘陵,属刘屋山山脉分支,边坡场地山体标高为41.81~130.48 m,山体自然斜坡坡脚为35~40°,局部较陡,有65~70°的陡坎;山体植被整体覆盖较好,主要为高大乔木和低矮灌木。坡脚兴建了大量居民居住区,场地地貌受到一定程度的破坏。

边坡土体分3层,上层为粉质黏土①:褐黄、黄褐、褐红,硬塑,土质较均匀,局部夹有中风化粉砂岩。揭露厚度为1.30~4.30 m,平均厚度为2.85 m。中间土层为全风化粉砂岩②:褐黄、黄褐、灰褐、褐红,岩芯呈土状,局部夹有中风化粉砂岩。揭露厚度为1.30~5.00 m,平均厚度为2.81 m。下层为强风化粉砂岩③:褐黄、黄褐、灰褐、褐红,岩芯呈土状、砂砾状,局部呈碎块状。

2.3 水文条件

边坡场地所在地惠州市位于广东省中南部,是低纬度地区。该地雨量充沛、阳光充足、气候温和,属亚热带季风气候。年平均气温为19.5~22.5℃;年均降雨量为2 200 mm,1 h最大降雨量为80.7 mm,年降雨120~150 d;降雨主要集中在6~9月,降雨量占全年的83.9%。

3 数值模拟分析

3.1 模型建立

根据边坡工程地质剖面图(如图1所示)建立数值计算模型,并以边坡水平滑动方向为 x 轴,边坡宽度方向为 y 轴,边坡高度方向为 z 轴,模型尺寸为58 m×28 m×3 m(长×高×宽),如图2所示。模型计算时,先将各土层设为线弹性模型,初始状态下不考虑构造应力,只考虑有自重产生的应力场;然后将各方向位移、速率清零;再进行各土层基本参

数设定,求出其安全系数。根据工程勘察资料,边坡滑动面在地下水位以上,因此计算时岩土体的强度在天然状态下取天然状态强度值,在连续降雨状态下取饱和强度值。

本次模拟分析主要考虑自重作用下边坡的失稳情况,水平方向应力未施加,对模型中所有节点的 y 方向速度进行约束,左右侧面边界进行单向水平约束,模型底部固定约束。将模型共划分为5 025个单元,共计7 040个节点。

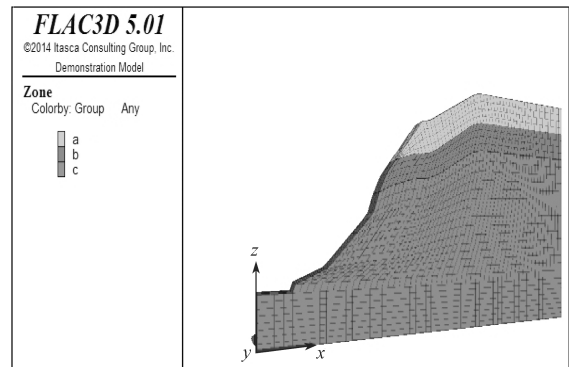


图2 数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model

3.2 力学参数的选取

边坡体岩性主要为粉质黏土、全风化粉砂岩和强风化粉砂岩3种。根据所提供的土工试验及岩土试验结果,经综合分析,确定边坡岩土体在进行数值模拟时的物理力学参数如表1所示。

表1 岩土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the rock-soil

岩土名称	弹性模量 / MPa	泊松比	重力密度 / (kN·m ⁻³)	饱和重度 / (kN·m ⁻³)	天然状态		饱和状态	
					黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
粉质黏土	19.35	0.35	18.1	19.2	20	16	19	15
全风化粉砂岩	13.41	0.31	18.6	19.7	18	19	16	17
强风化粉砂岩	11.22	0.28	19.5	20.5	22	32	20	30

3.3 模拟计算结果分析

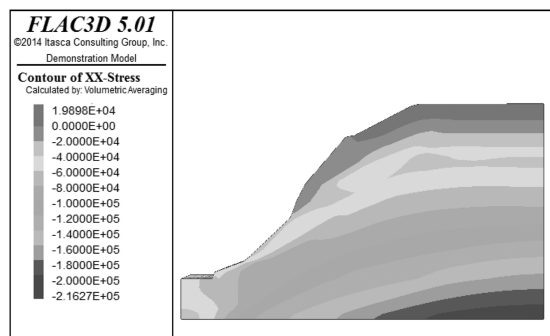
3.3.1 应力结果分析

通过对边坡天然状态与饱和状态下数值模拟计算,得出了边坡两种状态下 x 方向与 z 方向的应力分布云图,分别如图3和图4所示。

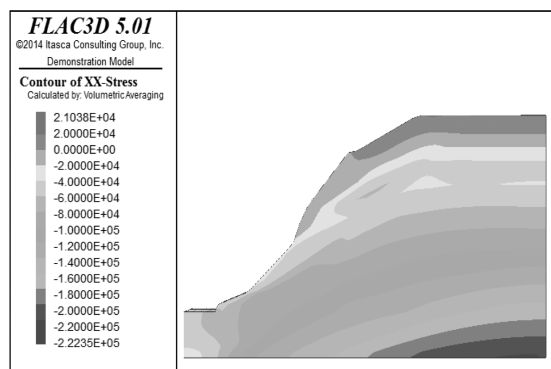
由图3可以看出,天然状态下 x 方向的最大应力值为216.27 kPa,饱和状态下 x 方向的最大应力值为222.35 kPa,后者大于前者。两种状态下的应力变化都呈现出相似的规律,都随着深度的增大而增大,应力集中于边坡坡脚处。这表明坡脚土体支撑整个边坡土体。

由图4可以看出, z 方向的最大应力值出现在计算模型底部,天然状态下最大应力值为527.86 kPa,

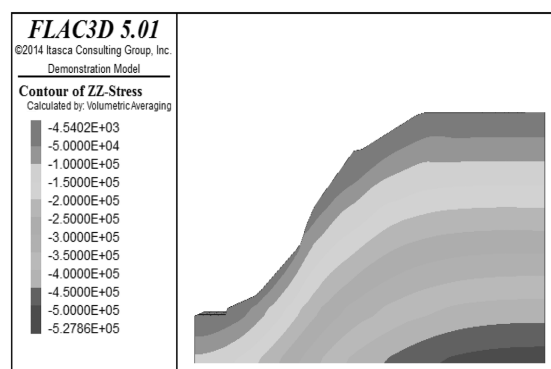
饱和状态下最大应力值为555.71 kPa。两种情况下的应力分布都符合地应力变化规律,也即随着土层厚度的增大而增大。



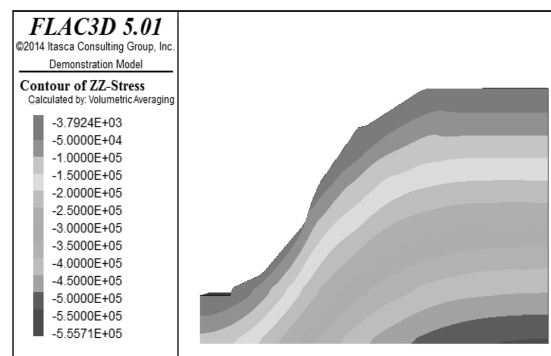
a) 天然状态



b) 饱和状态

图3 x 方向应力分布云图Fig. 3 Stress distribution map in x direction

a) 天然状态



b) 饱和状态

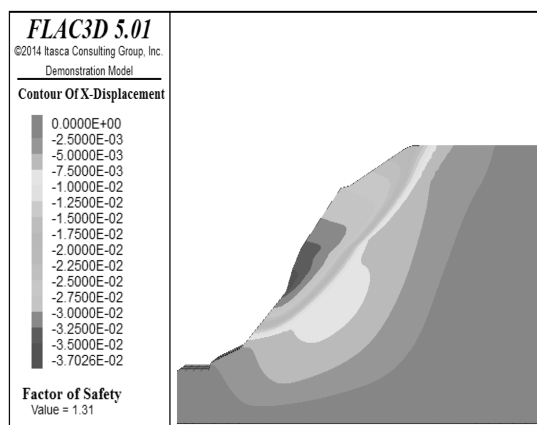
图4 z 方向应力分布云图Fig. 4 Stress distribution map in z direction

3.3.2 位移结果分析

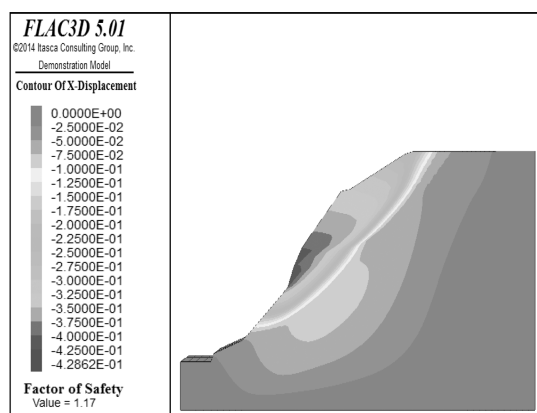
通过对边坡天然状态与饱和状态下数值模拟计算, 得出了边坡两种状态下 x 方向与 z 方向的位移分布云图, 分别如图5和图6所示。

由图5可以看出, 坡体天然状态下水平位移量最大值为3.70 cm, 饱和状态下水平位移量最大值为42.86 cm。两种状态下, 边坡水平位移变化的相同之处: 水平位移最大值均发生在边坡前缘中部, 位移量呈现出由边坡的前缘向后缘逐渐减小, 由边坡表面向边坡体内部逐渐减小的趋势。不同之处: 位移量后者

远大于前者, 约是前者的11.58倍。



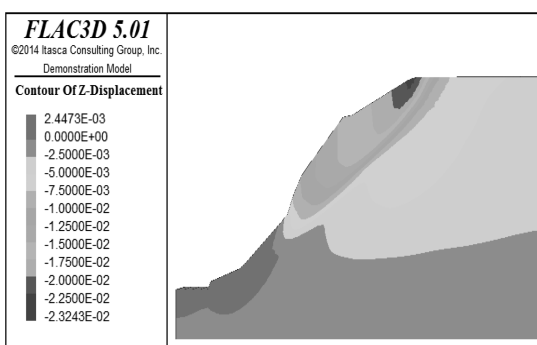
a) 天然状态



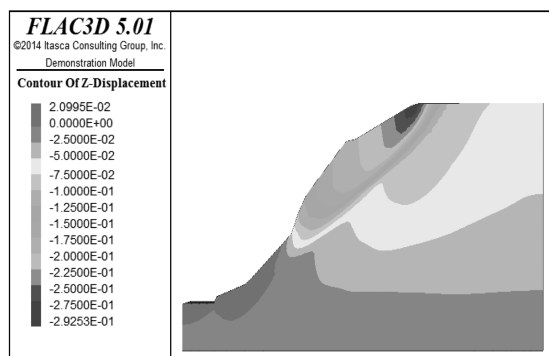
b) 饱和状态

图5 x 方向位移分布云图Fig. 5 Displacement distribution map in x direction

由图6可以看出, 两种状态下, 边坡竖直方向的位移分布规律的相同之处: 位移最大值均发生在边坡坡顶处, 向下的位移由坡顶向边坡底部逐渐减小。不同之处: 天然状态下位移最大值为2.32 cm, 饱和状态下最大值为29.25 cm。此外, 两种状态下边坡的坡脚处均出现向上的位移, 天然状态下坡脚位移量为0.24 cm, 饱和状态下坡脚位移量为2.1 cm。这表明在自重应力作用下, 使边坡向下的应力增加, 从而导致坡脚处受到向上的应力, 使边坡坡脚出现隆起现象。



a) 天然状态



b) 饱和状态

图6 z方向位移分布云图

Fig. 6 Displacement distribution map in z direction

3.3.3 剪应变增量与速度矢量分析

通过FLAC3D数值模拟软件,绘制饱和状态下剪应变增量与速度矢量图,并在图中显示边坡安全系数,如图7所示。

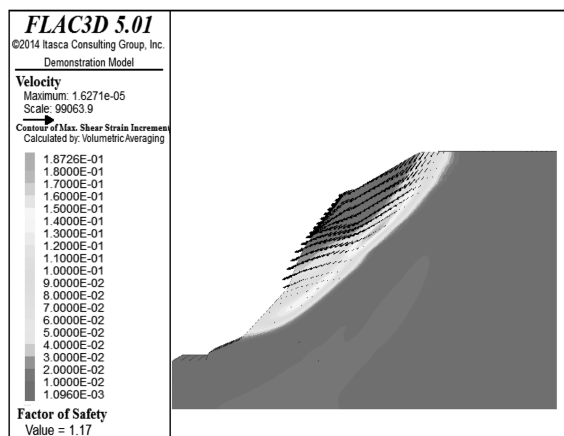


图7 饱和状态下的剪应变增量及速度矢量

Fig. 7 Shear strain increment and velocity vector under the saturation state

从图7可以明显看出边坡潜在的滑动面。因塑性贯通区域外侧边坡网格各点速度明显大于塑性区域内侧各网格节点的速度,说明塑性区外侧发生明显的位移变化,即边坡发生明显的滑动,边坡已经出现失稳破坏。

4 边坡的稳定性结论与处理

4.1 稳定性分析结果

通过数值分析并结合工程实际情况与现场勘查,可以得到如下结论:

自重应力在边坡应力场中起举足轻重的作用。饱和状态下应力变化与天然状态下的变化规律相同,只是数值增大了数倍。根据极限平衡理论中的瑞典条分法求出的边坡稳定系数为1.19,采用基于有限差分法的FLAC3D软件求出的安全系数为1.17,二者相差

不大。根据GB 50330—2013《建筑边坡工程技术规范》的规定,一级边坡的安全系数为1.3时为安全状态^[13]。因此,应该对该边坡进行加固处理。

现场勘查与钻探勘查资料显示,边坡场地环境条件复杂,边坡高陡,坡体风化不均匀,坡面裸露,已发生局部崩塌。由于部分坡面没有植被,坡面裸露,流水冲刷坡面,导致水土流失灾害现象较严重;且边坡未设置专门有效的排水系统,排水不畅,雨季时水量较大;边坡在强降雨作用下,部分位置已经发生失稳。因此,随时都有可能发生崩塌、滑坡等地质灾害,应该及时对边坡进行加固处理。

4.2 边坡的处理

根据4.1节的结论,对边坡进行如下加固处理:

1) 支护形式。根据实地勘察发现,边坡与建筑物、构筑物距离较近,工作面较窄,边坡高度较高,建议采用锚杆(索)加格构梁进行加固,边坡坡底采用重力式挡土墙支护。

2) 排水系统设置。在边坡坡顶处设置截水沟,对于汇水面积较大处,还应设置跌水沟,以便将水引入坡底排水沟中,最终一并汇入城市排水系统。跌水沟终端还应设置消能池。挡土墙墙面应设置排水孔。坡底设置排水沟,排水沟设置距挡土墙底部40 cm,排水沟与挡土墙之间需硬化处理,排水沟应与城市排水系统相连。

3) 坡面支护。格构梁网格内应植草绿化,对于靠近道路边缘或距居民房屋较近处采用喷砼硬化处理,硬化部位可书写城市宣传标语等,使之与城市绿化有机结合。

参考文献:

- [1] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope Stability Analysis by Finite Elements[J]. Géotechnique, 1999, 51(7): 653-654.
- [2] 佺 磊, 徐 燕, 代树林. 边坡工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 259-264.
- [3] ER Lei, XU Yan, DAI Shulin. Slope Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2010: 259-264.
- [4] 黄小龙, 王志斌, 姚 亮, 等. 水平成层土质边坡破坏机理研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(2): 26-30.
- [5] HUANG Xiaolong, WANG Zhibin, YAO Liang, et al. Mechanism of Horizontal Layered Soil Slope Failure[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(2): 26-30.
- [6] 赵胜杰, 苏 健. 边坡稳定性分析方法现状及发展简述[J]. 土工基础, 2013, 26(6): 92-95.

- ZHAO Shengjie, SU Jian. State-of-the Art and Development of Slope Stability Analysis Methods[J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, 26(6): 92-95.
- [5] 丁参军, 张林洪, 于国荣, 等. 边坡稳定性分析方法研究现状与趋势 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 112-114.
- DING Canjun, ZHANG Linhong, YU Guorong, et al. Research Current Situation and Development Trend of Slope Stability Analysis Method[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(8): 112-114.
- [6] 刘 金, 李勤昌, 马秀媛. 有限元强度折减法在边坡稳定分析中的应用 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2016, 46(4): 83-88.
- LIU Jin, LI Qinchang, MA Xiuyuan. Application of Strength Reduction FEM Method in Slope Stability Analysis[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2016, 46(4): 83-88.
- [7] LIANG G L, XU Z H, DONG X H. Summary and Application of Slope Stability Analysis Based on GIS[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 204/205/206/207/208: 590-593.
- [8] 侯文萃. 基于强度折减法的非均质多级边坡稳定性分析 [J]. 路基工程, 2016(2): 118-123.
- HOU Wencui. Stability Analysis of Inhomogeneous and Multi-Step Slope Based on Strength Redaction Method[J]. Subgrade Engineering, 2016(2): 118-123.
- [9] 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, 2013: 2-7.
- CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC3D Basis and Engineering Example[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 2-7.
- [10] 何 欢, 付成华, 钟学梅, 等. 强度折减法在边坡稳定性分析中的应用 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2015, 32(3): 31-33.
- HE Huan, FU Chenghua, ZHONG Xuemei, et al. Application of Slope Stability Based on Local Strength Reduction Method[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2015, 32(3): 31-33.
- [11] 卫高明, 张 勇. 基于强度折减法的均质高边坡稳定性分析 [J]. 路基工程, 2013(5): 65-68.
- WEI Gaoming, ZHANG Yong. Analysis on Stability of Homogeneous High Slope Based on Strength Reduction Method[J]. Subgrade Engineering, 2013(5): 65-68.
- [12] 王 涛, 韩 焯, 赵宪宇, 等. FLAC3D 数值模拟方法及工程应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 330-332.
- WANG Tao, HAN Xuan, ZHAO Xianyu, et al. Numerical Simulation Method and Engineering Applications of FLAC3D[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015: 330-332.
- [13] 重庆市城乡建设委员会. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 24-25.
- Chongqing Urban and Rural Construction Commission. Technical Code for Building Slope Engineering: GB 50330—2013[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013: 24-25.
- (责任编辑: 邓光辉)