

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.05.012

# 巫山神女峰机场高填方边坡稳定性分析方法研究

贺林林<sup>1,2,3</sup>, 钱进<sup>3</sup>, 赵陈雨<sup>3</sup>, 李志松<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:**以西南地区巫山神女峰机场高填方边坡为例,文章采用不平衡推力法、简化 Bishop 条分法和有限元强度折减法对某典型剖面在天然、暴雨、清坡天然和清坡暴雨 4 种不同工况下的稳定性进行对比分析。分析结果表明:该典型剖面暴雨工况下所得的安全系数为 1.163,小于建筑边坡工程技术规范规定的安全稳定系数 1.35,表明暴雨工况下存在边坡滑移的风险;其他 3 种工况下计算所得安全系数均大于规范值,表明边坡处于稳定状态。对于天然与暴雨工况,清表糙坡处理后 3 种方法下的安全系数较未清坡时分别增加了 98%、88%、73%和 118%、109%、118%。由此表明,在实际工程中,清表糙坡的工程措施能够显著加强高填方边坡稳定性。

**关键词:**高填方边坡;极限平衡条分法;强度折减法;ABAQUS 软件;稳定性分析

**中图分类号:**TU411.93 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)05-0646-07

## Study on stability analysis method of high fill slope of Wushan Shennü Peak Airport

HE Linlin<sup>1,2,3</sup>, QIAN Jin<sup>3</sup>, ZHAO Chenyu<sup>3</sup>, LI Zhisong<sup>3</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** This paper takes the high fill slope of Wushan Shennü Peak Airport in southwest China as an example, adopting unbalanced thrust method, simplified Bishop strip method and finite element strength reduction method to conduct comparative analysis on the stability of a typical profile under four different working conditions: nature, rainstorm, nature with cleared slope and rainstorm with cleared slope. The analysis results show that in rainstorm condition, the safety factor of the typical profile is 1.163, which is below the security and stability factor of 1.35 in the technical code for building slope engineering, indicating that rainstorm carries the risk of slope sliding. The safety factors calculated under the other three working conditions exceed the core value, indicating that the slope is in a steady state. For natural and rainstorm conditions, the safety factors of the three methods after slope surface roughness treatment increase by 98%, 88%, 73% and 118%, 109%, 118%, respectively, compared with untreated slope. The results show that in practical engineering, the measures to remove surface roughness can significantly enhance the stability of high fill slope.

**Key words:** high fill slope; limit equilibrium method; strength reduction method; ABAQUS software; stability analysis

收稿日期:2021-12-22;修回日期:2022-05-28

基金项目:重庆市基础研究与前沿探索专项资助项目(cstc2018jcyjAX0559);重庆市博士后科研项目特别资助项目(Xm2017188)和重庆交通大学研究生科研创新资助项目(2021S0028)

作者简介:贺林林(1983—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士,重庆交通大学副教授,硕士生导师。

西南地区的机场建设随着西部大开发战略的实施已经得到空前的发展,但因为地形地貌复杂、场地平整和净空条件等要求得不到满足,所以经常需要对原有场地深挖高填,形成高度超过 20 m 的高填方边坡<sup>[1]</sup>。在机场建设和运营过程中,经常会遇到高填方边坡发生变形甚至失稳的问题,如贵阳龙洞堡机场的高填方边坡曾经发生明显的变形,攀枝花机场共发生过 7 次滑坡事故<sup>[2-3]</sup>。以上所述的工程事故表明,高填方边坡的安全稳定性不容忽视且具有研究的必要性,需要明确此类边坡是否处于安全稳定状态,并指导具有安全隐患的边坡工程采取加固与治理措施。

目前,定量分析边坡稳定性的方法较多,其中极限平衡条分法和有限元强度折减法的应用最为广泛。前者是根据不同的假定将边坡进行垂直条分,并搜索潜在滑移面,确定最有可能发生边坡破坏的滑移面位置和对应的安全系数;后者是在有限元分析中不断减小土体的剪切强度参数直至边坡产生滑移破坏,从而得到边坡的稳定安全系数与滑动面位置<sup>[4]</sup>。有关高填方边坡稳定性分析及边坡治理方面,学者们已开展较多研究工作,文献<sup>[5]</sup>通过以上两类方法开展研究并相互验证,共同评价边坡的安全稳定性;文献<sup>[6]</sup>采用有限元强度折减法全面分析了金立交高填方边坡的安全系数和可能滑动面;文献<sup>[7]</sup>对不同填筑方法下机场高填方边坡的变形和稳定性进行了研究;文献<sup>[8]</sup>对降雨工况下重庆某高速公路填方边坡的稳定性进行了重点分析;文献<sup>[9]</sup>分析了在不同工况下的西南某机场高填方边坡稳定性。上述的研究成果为高填方边坡分析与治理提供了必要的参考与建议,保证了工程的顺利实施。

本文采用不平衡推力法、简化 Bishop 条分法、有限元强度折减法,对巫山神女峰机场高填方边坡某典型剖面进行稳定性分析。通过以上 3 种方法的对比分析,明确该高填方边坡稳定性特性,并通过分析不同工况下边坡稳定性的差异性提出加固边坡的工程措施,为解决此类山区机场高填方边坡的稳定性问题提供参考与借鉴。

## 1 工程及地质概况

为满足航空客货物流业务迅速增长的需要,拟建重庆巫山神女峰民用机场作为重庆市三峡库区金三角地区对外开放的窗口。

该机场位于巫山—奉节—巫溪三县地域的几何中心,场地地层主要分布于泥质灰岩、石灰岩和

白云岩,出露的土层主要为红黏土及表层的植物土。场地地表红黏土厚度分布不均匀,多呈硬塑状,下部红黏土呈可塑状,植物土结构松散,力学性质较差,为填方体沿基岩面滑移创造了条件。机场场地地下水处于较深位置且水量稀少,因此,在分析时不考虑机场场地地下水对高填方边坡安全稳定性的影响。

机场场地整平后,内部平坦,但场地周围分布大量的高填方边坡。高填方边坡位于原始斜坡地带,最大高度为 71.37 m,地形坡角一般为 15°~30°,局部陡坡坡脚超过 35°。按照设计方案,高填方边坡区采用 1:2 坡率,按 10 m/阶进行分阶放坡。填土填料可以就地取材,使用石灰岩和泥质灰岩碎石块进行填筑,节省填筑边坡的成本,按照重庆地区经验对填土强度参数取值。本场地高填方边坡主要是顺坡填筑,边坡稳定性较差,容易沿着原有坡面产生滑动破坏。因此本文选取具有代表性的 A1 段边坡剖面进行稳定性分析,其剖面计算示意图如图 1 所示。图 1 中的填土剖面被分成 6 个条块,编号为 E1~E6,各个条块的填土面积、长度和倾角见表 1 所列。

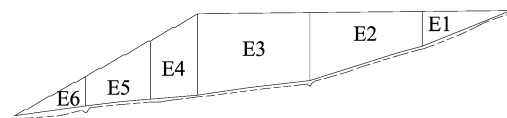


图 1 A1 段剖面计算示意图

表 1 不同条块计算参数

条块编号	填土面积/m <sup>2</sup>	长度/m	倾角/(°)
E1	999.44	82.95	18.3
E2	3 717.04	103.09	14.1
E3	5 422.25	100.57	6.1
E4	2 139.04	42.10	3.9
E5	1 853.24	58.20	4.9
E6	671.79	63.23	6.4

边坡岩土体力学参数根据勘察资料和地区经验值综合选取,具体参数取值见表 2 所列。在本文边坡稳定性分析中,先选取天然和暴雨 2 种工况进行边坡稳定安全系数计算,边坡上部填土与红黏土接触面为潜在滑动面;在清除边坡地表植物土和红黏土并进行糙坡处理后,边坡的潜在滑动面为填土与石灰岩的接触面,此时选取清坡天然和清坡暴雨 2 种工况进行计算。该边坡工程属于一级工程,查询文献<sup>[10]</sup>可知,边坡稳定安全系数规范取值为 1.35。

表 2 边坡岩土体力学参数

材料参数	计算工况	红黏土	填土	石灰岩
容重 $\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	天然状态	21.0	21.0	26.8
	暴雨状态	22.0	22.0	27.0
内摩擦角 $\varphi_c/(\circ)$	天然状态	11.0	30.0	39.8
	暴雨状态	8.0	28.0	39.8
	清坡天然	25.0	30.0	39.8
	清坡暴雨	20.0	28.0	39.8
黏聚力 $c_c/\text{kPa}$	天然状态	34.5	5.0	2 880.0
	暴雨状态	22.5	2.0	2 880.0
	清坡天然	8.0	5.0	2 880.0
	清坡暴雨	5.0	2.0	2 880.0
弹性模量 $E/\text{MPa}$		12	12	2 100.0
泊松比		0.15	0.15	0.15

## 2 极限平衡条分法

极限平衡条分法主要包含以下 2 个方面:

① 对条块间作用力采用不同的假定,从而建立各种简化和严密的具体方法,不同方法的计算结果准确性取决于假定的合理性;② 针对所有潜在的滑动面,确定最临界破坏状态时的滑移面和安全系数<sup>[11]</sup>。根据条块间作用力的假定所满足的力和力矩平衡条件不同,极限平衡条分法主要分为瑞典条分法、简化 Bishop 条分法、不平衡推力法、Janbu 普遍条分法和 Spencer 法等。目前,极限平衡条分法在分析边坡安全稳定性方面已经相当成熟和完善,不仅考虑到降雨、地震和外部荷载对边坡稳定安全系数结果的影响,同时还可以计算剩余下滑力等。其中,不平衡推力法和简化 Bishop 条分法在实际工程边坡稳定性分析中被广泛认可和应用,因此本文采用这 2 种方法计算稳定安全系数。

### 2.1 不平衡推力法

不平衡推力法分为显式解法和隐式解法 2 种,在计算条块间推力时,两者的区别在于前者将下滑力乘以安全系数,后者将抗滑力除以安全系数。此方法求解的过程是将假定滑动面上的填土剖面划分成不同的垂直条块,对各个垂直条块进行受力分析并建立力的平衡方程,求解抗滑力与下滑力,两者的比值被定义为边坡土体的稳定安全系数  $F_s$ 。上述方法需要满足以下假定:土体沿着坡面整体下滑,忽略不计条块间产生的变形和摩擦力;条块之间无法承受拉力,只能够传递推力;若计算的条块推力为负值,则推力无法向下传递,且取值为 0;条块间合力的方向平行于上一块底面方向<sup>[12]</sup>。不平衡推力法的条块受力分析

图如图 2 所示。

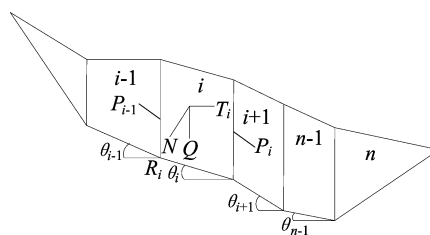


图 2 不平衡推力法的条块受力分析图

计算公式如下:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} \quad (1)$$

$$R_i = N_i \tan \varphi_i + c_i L_i \quad (2)$$

$$T_i = W_i \sin \theta_i \quad (3)$$

显式解法:

$$\psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_{i+1} \quad (4)$$

隐式解法:

$$\psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_{i+1} / F_s \quad (5)$$

其中:  $K$  为稳定系数;  $\theta_i, \theta_{i+1}$  分别为第  $i, i+1$  条块底面和水平方向的夹角;  $R_i$  为作用于第  $i$  条块上的抗滑力;  $N_i$  为第  $i$  条块在滑动面上的法向分力;  $T_i$  为作用于第  $i$  条块上的下滑力;  $\varphi_i$  为第  $i$  条块的内摩擦角;  $\psi_j$  为传递系数;  $c_i$  为第  $i$  条块的黏聚力;  $L_i$  为第  $i$  条块在水平方向上的长度。

针对本文选取的 A1 段边坡剖面,采用本节所述的不平衡推力法进行计算,结果表明:在天然、暴雨、清坡天然和清坡暴雨 4 种工况下,显示解法计算所得的边坡稳定安全系数分别为 1.662、1.165、3.286、2.538;隐式解法计算所得的边坡稳定安全系数分别为 1.658、1.163、3.268、2.527,2 种解法计算结果之间的误差不超过 0.6%,表明在采用不平衡推力法计算边坡稳定安全系数时可以选取其中一种解法。另外,在暴雨工况下,边坡的安全系数低于规范稳定安全系数值 1.35,存在边坡滑移风险,另外 3 种工况下边坡处于稳定状态。经过清表糙坡处理后,边坡的安全稳定性得到加强,在天然和暴雨工况下,边坡稳定安全系数较未清坡时分别增加了 98%、118%。

### 2.2 简化 Bishop 条分法

与传统的瑞典圆弧法相比,简化的 Bishop 条分法作出了相应的改进,且被认为是最标准的圆

弧条分法,目前已被各国工程界广泛采纳。此方法满足以下假设:条块间存在水平力,而不存在竖向剪切力;忽略每个条块的力矩平衡条件,只考虑条块竖向力的平衡<sup>[13]</sup>;不考虑实际工程中的变形协调问题。上述方法的求解过程需要计算出条块底部的法向力,然后建立条块竖向力和整体力矩平衡方程,将以上方程联合求解,从而推导出边坡稳定安全系数的表达式为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \{[(W_i - u_i b_i) \tan \varphi_i + c_i b_i] / (\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \tan \varphi_i)\}}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (6)$$

其中:  $W_i$  为条块  $i$  的自重;  $u_i$  为条块  $i$  的孔隙水压力,取值为 0;  $b_i$  为条块  $i$  水平方向上的长度;  $\varphi_i$  为条块  $i$  的内摩擦角;  $c_i$  为条块  $i$  的黏聚力;  $\alpha_i$  为条块  $i$  底部与水平方向的夹角;  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

针对本文选取的 A1 段边坡剖面,采用本节所述的简化 Bishop 条分法进行计算,结果表明:在天然、暴雨、清坡天然和清坡暴雨 4 种工况下,简化 Bishop 条分法计算所得的边坡稳定安全系数分别为 1.640、1.161、3.087、2.430。其中,暴雨工况下存在边坡滑移风险,其他 3 种工况下边坡处于稳定状态。对于天然和暴雨工况,清表糙坡处理后的安全系数较未清坡时分别增加了 88%、109%,边坡的安全稳定性得到显著加强。

综合上述 2 种方法的计算结果可知,暴雨工况与天然工况相比,边坡稳定性安全系数偏小且滑动区域增大,主要是由于降雨导致边坡土体的强度降低,同时迅速增大了滑移面的剪应力导致边坡产生滑移破坏。因此,边坡坡面需要采取格沟护坡和及时排水的工程措施。地表植物土和红黏土力学性质较差,对原有植被进行清除和糙坡处理后,会增大土体颗粒间的表面摩擦力和咬合力,从而使得土体抗剪强度增大,致使边坡不易发生滑动。显而易见,清表糙坡处理的工程措施能够极大地提高高填方边坡的安全稳定性。

### 3 有限元强度折减法

与极限平衡条分法相比,有限元强度折减法不需要对边坡进行垂直条分和满足相关假定,计算结果不仅简单精确,还可以对边坡的屈服破坏过程进行表达,分析内摩擦角、黏聚力等不同因素对边坡稳定性的影响程度,为解决此类高填方边

坡工程问题奠定了理论基础。

#### 3.1 有限元强度折减法理论

强度折减的实质就是将土体的抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$  同时除以一个不断变化的折减系数,得到很多组新的参数  $c_m$ 、 $\varphi_m$ ,然后将新参数作为土体的强度指标进行反复试算,当边坡发生破坏时的折减系数  $F_r$  就是稳定安全系数  $F_s$ <sup>[14]</sup>。

本文选取 Mohr-Coulomb 本构模型,依据其强度理论,黏聚力和摩擦角折减后的表达式分别为:

$$c_m = c / F_r \quad (7)$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi / F_r) \quad (8)$$

在 ABAQUS 有限元软件中通过定义场变量的方式实现上述过程,具体步骤如下<sup>[15]</sup>:

(1) 定义折减系数为一个场变量,场变量取值范围为 0.1~3.5。

(2) 通过(7)式、(8)式计算折减后的岩土体强度参数,包括黏聚力和内摩擦角。

(3) 在初始分析步对整个有限元计算模型施加重力荷载,建立地应力平衡状态,此分析步中不对岩土体强度参数进行折减。

(4) 在材料编辑模块输入折减后的黏聚力、内摩擦角以及场变量数值,并编辑场变量关键字。有限元计算后输出场变量与位移关系云图,根据本文采用的边坡失稳判别依据确定稳定安全系数。

#### 3.2 有限元计算模型

本文需要对 ABAQUS 有限元软件中的三维高填方边坡数值模型采用如下假定:上部填土体为理想弹塑性材料;下部石灰岩层为理想弹性材料,已经完成固结过程;不考虑地下水的作用<sup>[16]</sup>。

为消除边界效应给边坡稳定性计算带来的不利影响,在保证填方边坡坡度和原始地面线位置不变的情况下,需将原始边坡尺寸适当增大。若填方边坡的坡高为  $H$ ,填方边坡可从边坡坡脚向外延伸  $1.5H$ ,坡底向下延伸  $1.5H$ ,坡肩向外延伸  $2.5H$ ,处理后的填方边坡模型剖面如图 3 所示。

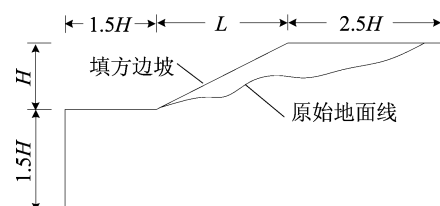


图3 延伸后填方边坡有限元模型示意图

模型主要分为如下 2 个部分:上部土层为填土层;下部为石灰岩层。边坡的填土层与石灰岩

层中间分布有一层较薄的红黏土层,其材料示意图如图 4 所示。

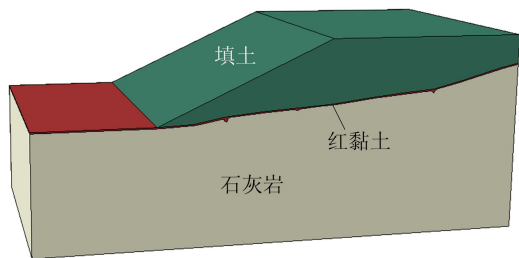


图 4 模型材料示意图

### 3.2.1 土体本构模型与边界条件设置

土体的抗剪强度是边坡稳定性评价的关键因素,因此选用 Mohr-Coulomb 本构模型能够较好地模拟边坡土体的应力-应变关系。在 ABAQUS 有限元软件中需要确定弹性模量、泊松比、黏聚力和内摩擦角等参数,定义土体的本构模型。根据有限元计算模型和实际的工程地质条件,设置的边界条件如下:模型左右两侧为竖向滑动的水平位移约束,顶部为自由边界,底部为固定端约束。

### 3.2.2 网格划分及单元类型选择

ABAQUS 有限元软件提供了很多种网格划分方法和算法,本文的计算模型采用结构化划分网格的方式和 Medial axis 算法,能够很好地控制网格质量,采用八节点线性六面体单元,共生成 9 350 个网格单元。

### 3.3 边坡失稳判别依据

目前,有限元强度折减法主要采用 3 种边坡失稳判别标准<sup>[10,17]</sup>:① 有限元计算结果不收敛;② 边坡顶部的位移产生突变;③ 土体内部形成连续的塑性贯通区。人为因素和收敛准则对数值计算的收敛性影响很大,计算结果会有一定误差,且缺乏物理意义。边坡形成连续的塑性贯通区不代表土体就一定发生破坏,还要看产生的塑性变形是否不限制地发展下去。边坡顶部位移拐点法物理意义十分明确,能够与实际边坡工程中的位移监测相结合,具有重要的工程意义。因此本文采用边坡顶部位移拐点法作为边坡失稳的判别依据。

### 3.4 有限元计算结果分析

在 ABAQUS 有限元软件完成数值计算后,对其结果进行函数处理,绘制出边坡坡面顶点的水平位移与强度折减系数间的变化关系,如图 5 所示。图 5 中坡顶水平位移  $U_1$  发生拐点突变时,对应的折减系数  $F_r$  即为边坡稳定安全系数  $F_s$ 。

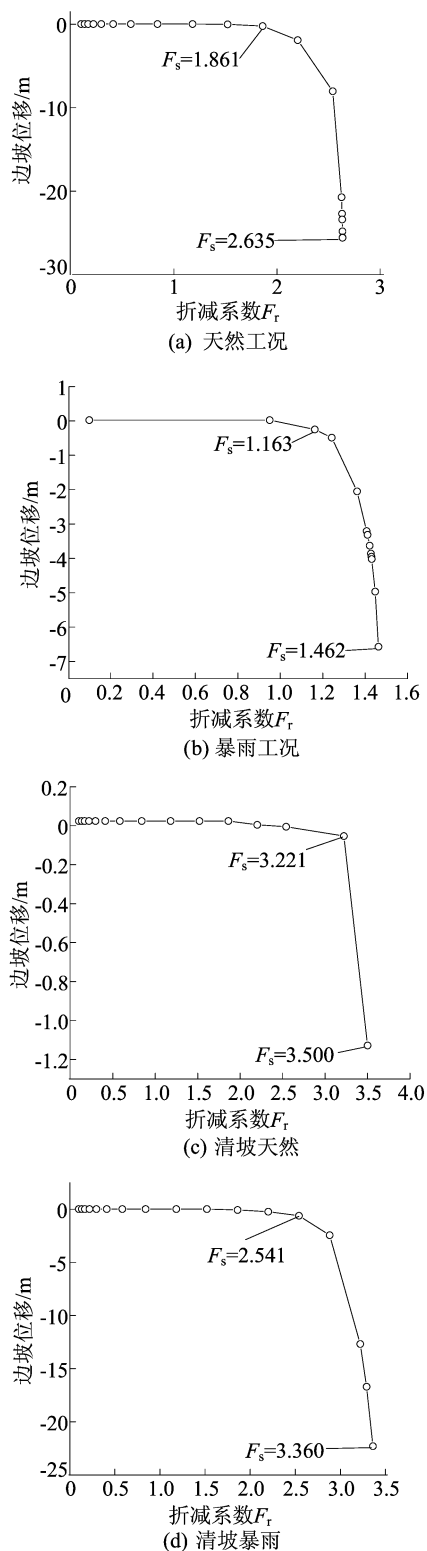


图 5 坡顶水平位移  $U_1$  与折减系数  $F_r$  关系曲线

由图 5 可知,天然状态、暴雨状态、清坡天然和清坡暴雨工况下,经过有限元强度折减法计算出的边坡稳定安全系数分别为 1.861、1.163、3.221、2.541。其中暴雨工况下计算所得的安全系数为 1.163,小于规范的安全稳定系数值 1.35,表明暴雨工况下存在边坡滑移的风险,其他工况

下稳定安全系数均大于规范允许值,边坡处于整体稳定状态。

在 ABAQUS 计算过程中,通过以下 2 种方法确定滑动面位置<sup>[18-20]</sup>:① 根据边坡塑性应变区分布云图即 PEMAG 云图进行判断;② 根据计算终止时的边坡总位移云图进行判断。因为暴雨工况下边坡产生滑移的可能性较大,所以本文只选取暴雨工况、清坡暴雨工况下的塑性应变云图和位移云图进行对比分析,由此确定 2 种工况下的滑移面位置,如图 6、图 7 所示。

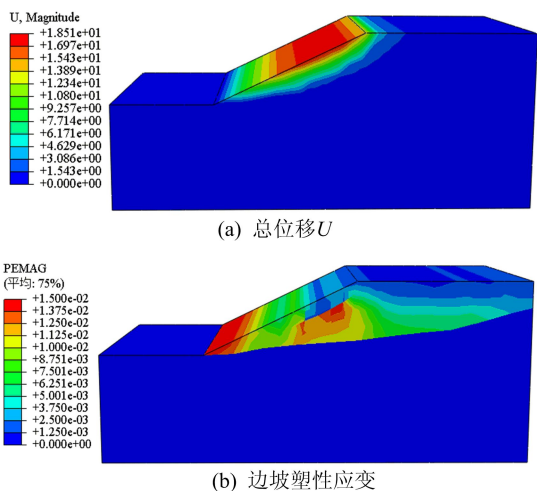


图 6 暴雨工况下边坡总位移 U、塑性应变等值线云图

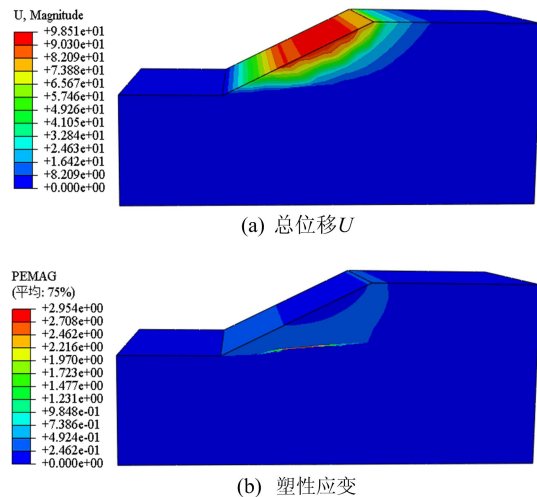


图 7 清坡暴雨工况下边坡总位移 U、塑性应变等值线云图

由图 6 可知,暴雨工况下边坡发生失稳破坏时,塑性应变主要集中于填土中部位置和填土与红黏土交界处,红黏土遇水容易软化,抗剪强度会迅速降低,坡面剪应力急剧增大,此时边坡容易沿填土与红黏土交界处滑动。从塑性应变区的开展情况分析可知,当该边坡发生失稳破坏时,其破坏模式为牵引渐进式破坏,即从坡脚处开始发生破坏,

逐渐向上贯通,坡角处产生最大的塑性应变。由图 7 可知,在清除地表植物土和红黏土并进行糙坡处理后,填土与石灰岩层直接接触,此时边坡不易发生潜在滑动。因此,清坡暴雨工况下土体内部塑性应变开展区域减少,且主要集中在填土与基岩面交界处。在填土与石灰岩接触面的坡脚处,容易产生应力集中,因此会先在坡脚处产生塑性变形。

### 3.5 计算结果对比分析

本文采用了不平衡推力法、简化 Bishop 条分法和强度折减法计算边坡稳定安全系数,3 种计算方法在各工况下稳定安全系数的汇总结果见表 3 所列。

表 3 不同工况下稳定安全系数结果

计算工况	强度折减法	不平衡推力法		简化 Bishop 条分法
		显式解	隐式解	
天然状态	1.861	1.662	1.658	1.640
暴雨状态	1.163	1.165	1.163	1.161
清坡天然	3.221	3.286	3.268	3.087
清坡暴雨	2.541	2.538	2.527	2.430

从表 3 可以看出,3 种方法计算得到的边坡稳定安全系数都比较接近,可以相互验证其合理性。在上述 4 种工况下,与不平衡推力法和有限元强度折减法相比,简化 Bishop 条分法计算的稳定安全系数值偏小,但计算结果误差不超过 6%,原因是不同方法的假定导致计算结果产生误差,这种误差仍然处于合理范围内。

该剖面边坡在暴雨工况下的稳定安全系数为 1.163,处于不稳定状态,为防止边坡发生失稳破坏,应加强对边坡的实时监测并采取有效的排水措施。天然与暴雨工况下,经过清表糙坡处理后,3 种方法计算的安全系数分别增加了 98%、88%、73%和 118%、109%、118%,验证了清表糙坡处理的措施可以极大地加强高填方边坡稳定性<sup>[21-22]</sup>。本机场场地的高填方边坡还可以采用放缓坡率、有效支挡、填筑大块石或块石砌筑等工程措施加强边坡安全稳定性,但清表糙坡处理相比以上措施,施工简单,节省材料,减少成本,且提高边坡安全稳定性的能力较强。因此,在解决此类高填方边坡安全稳定性问题时可优先考虑采用清表糙坡处理的工程措施。

## 4 结 论

针对巫山神女峰机场高填方边坡,本文采用  
(下转 703 页)

- biotrophic fungus bipolaris sorokiniana[J]. Mol Plant Microbe Interact, 2004, 17(4): 366-373.
- [10] ROJAS C M, MYSORE K S. Glycolate oxidase is an alternative source for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> production during plant defense responses and functions independently from NADPH oxidase [J]. Plant Signaling & Behavior, 2012, 7(7): 752-755.
- [11] ROJAS C M, SENTHILKUMAR M, WANG K, et al. Glycolate oxidase modulates reactive oxygen species-mediated signal transduction during nonhost resistance in *Nicotiana benthamiana* and *Arabidopsis* [J]. The Plant Cell, 2012, 24(1): 336-352.
- [12] KERCHEV P, WASZCZAK C, LEWANDOWSKA A, et al. Lack of glycolate oxidase1, but not glycolate oxidase2, attenuates the photorespiratory phenotype of Catalase2-Deficient *Arabidopsis* [J]. Plant Physiology, 2016, 171(3): 1704-1719.
- [13] NEILL S, DESIKAN R, HANCOCK J, et al. Hydrogen peroxide signaling [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2002, 5(5): 388-395.

(责任编辑 闫杏丽)

**(上接第 651 页)**

不平衡推力法、简化 Bishop 条分法和有限元强度折减法对机场某典型剖面进行了综合分析比较,得到如下结论:

(1) 以上 3 种方法计算所得的边坡稳定安全系数相接近,计算结果误差不超过 6%。该剖面边坡在暴雨工况下的稳定安全系数为 1.163,处于不稳定状态。其他工况下稳定安全系数大于 1.35,具备一定的安全储备,边坡处于整体稳定状态。

(2) 天然与暴雨工况下,经过清表糙坡处理后,3 种方法计算的安全系数分别增加了 98%、88%、73% 和 118%、109%、118%。根据拟建工程特征,可以对边坡地表土层进行清除和糙坡处理,加强高填方边坡的安全稳定性。

**[参 考 文 献]**

- [1] 侯俊伟,唐秋元,李杨秋,等. 西南某山区机场高填方边坡稳定性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 82-88.
- [2] 高奋飞,严克渊,潘盛泽. 西南某机场高填方边坡稳定性分析[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(4): 386-389.
- [3] 胡勇生,燕俊松,唐宁. 贵州某拟建机场高填方边坡破坏模式及稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(3): 40-44.
- [4] 刘子振. 边坡稳定性极限平衡法和有限元法综合分析[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2007.
- [5] 贾伟. 基于极限平衡法和强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 云南冶金, 2014, 43(4): 1-6.
- [6] 唐薇,廖义玲,梁风. 基于强度折减理论对金工立交高填方边坡的稳定性分析[J]. 路基工程, 2013(1): 56-59.
- [7] 陈金明,李哲,韩映,等. 斜坡地基上高填方边坡的变形及稳定性研究[J]. 路基工程, 2017(4): 52-56.
- [8] 赵建军,余建乐,解明礼,等. 降雨诱发填方路堤边坡变形机制物理模拟研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2933-2940.
- [9] 何成兵,喻兴,刘宏. 西南某高填方机场不同工况下的边坡稳定性分析[J]. 水利科技与经济, 2018, 24(2): 34-38.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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, 2014: 1-32.
- [11] 栾茂田,武亚军,年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1-8.
- [12] 黄昱清. 某露天矿高陡边坡稳定性分析与治理工程研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2012.
- [13] 陈建平. 边坡强度折减法判据及点安全系数研究及工程应用[D]. 赣州: 江西理工大学, 2012.
- [14] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [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.
- [16] 李月峰. 高填土边坡稳定性分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [17] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
- [18] 姜立新. 基于强度折减的有限元方法求边坡稳定安全系数[J]. 建筑技术, 2009, 40(6): 535-538.
- [19] 陶宇,梁伟桥,谢卫兵. 有限元强度折减法分析边坡稳定性的判据研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(2): 103-106.
- [20] 杨光华,张玉成,张有祥. 变模量弹塑性强度折减法及其在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1506-1512.
- [21] 唐宁. 贵州某机场高填方边坡稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [22] 吴丹泽. 山区机场高填方边坡稳定性分析及处治方案研究[J]. 北方交通, 2017(8): 64-67.

(责任编辑 张 镛)