

# 降雨对山区高速公路弃土场边坡稳定性影响分析

夏怡<sup>1</sup>, 柳治国<sup>1</sup>, 邹飞<sup>2,3</sup>, 罗红明<sup>4\*</sup>, 罗世鑫<sup>3</sup>

(1. 贵州宏信创达工程检测咨询有限公司, 贵州 贵阳 550014; 2. 贵州省交通运输厅, 贵州 贵阳 550001;  
3. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所  
岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**弃土场是山区高速公路建设的附属工程,其稳定性是工程设计人员重点关注的技术难题。该文采用饱和-非饱和渗流分析方法对贵州省六盘水至威宁高速公路 YK53+750 右侧 40 m 弃土场边坡降雨条件下的渗流场进行数值模拟计算,在此基础上采用刚体极限平衡法对其安全系数进行计算,并探讨降雨对弃土边坡稳定性的影响。研究表明:在降雨条件下弃土边坡的基质吸力减小,并随着降雨的持续,在弃土边坡表面部分区域会形成暂态饱和区,但雨停之后边坡表面的暂态饱和区逐渐消散,基质吸力逐渐增大,坡体内的基质吸力先减小后缓慢增大;降雨对边坡稳定性的影响是显著的,降雨会导致弃土抗剪强度参数降低,引起弃土场边坡的安全系数减小,进而降低弃土场边坡的稳定性;采用假定岩土体全部饱和来进行暴雨工况条件下弃土边坡的安全系数计算,得到的边坡安全系数相比采用渗流稳定计算的偏小,相对工程而言该方法偏于安全。

**关键词:**山区高速公路;弃土场;降雨入渗;饱和-非饱和渗流;边坡稳定性

## 1 引言

山区高速公路建设受地形和地质及生态环境条件的限制,不可避免地产生大量弃土,必须设置弃土场来满足弃土处置的需要。弃土场是一种人工倾填形成的,具有密度小、固结性差、非饱和等特点,其稳定性比自然边坡差,在降雨尤其是特大暴雨、连续降雨等条件下易产生滑坡、泥石流等地质灾害,将会对弃土场周边的居民、重要基础设施等构成严重的威胁。因此,弃土场边坡的稳定性是涉及到弃土场长期安全的关键技术难题,尤其是降雨条件下边坡的稳定性问题<sup>[1]</sup>。

目前,中国学者对降雨条件下边坡的稳定性进行了系统的研究,取得了非常丰富的成果。李焕强等<sup>[2]</sup>采用物理模型试验研究了降雨条件下不同坡度边坡的变形失稳规律,揭示了边坡稳定性随降雨入渗的动态演化规律;谭文辉等<sup>[3]</sup>采用有限元方法研究了降雨入渗条件下边坡的渗流场、应力场和位移场,研究了降雨入渗对边坡稳定性的影响规律;唐栋等<sup>[4]</sup>采用有限元

法研究了不同初始条件对不同土体边坡稳定性的影响,探讨了前期降雨对不同土体边坡稳定性的影响规律等。但弃土场边坡在降雨条件下稳定性一般选用假定渗流场来进行分析,而对不同降雨入渗条件下弃土场边坡的渗流场分析方法研究甚少<sup>[5]</sup>,这将是弃土场稳定性分析需要重点考虑的内容。

该文以贵州省六盘水至威宁高速公路 YK53+750 右侧 40 m 弃土场为例,结合现场调查,运用饱和-非饱和数值方法对不同降雨入渗条件下的弃土场边坡渗流场进行计算分析,在此基础上采用刚体极限平衡法对其安全系数进行计算,讨论不同降雨工况条件下弃土边坡渗流场的变化及其对边坡稳定性的影响,研究成果将为弃土场边坡的防护设计及后期安全管理提供技术支撑。

## 2 弃土场边坡降雨入渗分析方法

### 2.1 弃土边坡降雨入渗分析方法

降雨入渗过程实际上是水分从地表非饱和区向坡

收稿日期:2021-09-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41402318);贵州省交通运输厅2020年度科技项目(编号:2020-143-028)

作者简介:夏怡,女,大学本科,高级工程师. E-mail:55569132@qq.com

\* 通信作者:罗红明,男,博士,副研究员. E-mail:hmluo@whrsm.ac.cn

体内饱和区的流动过程。降雨入渗就是一个流量边界,但入渗流量并不是一直未变,而是在渗流模拟计算中须根据地表含水率变化而不断调整入渗流量,从而实现降雨入渗的模拟分析。因此,降雨入渗就是典型的饱和-非饱和渗流问题<sup>[6]</sup>,应采用饱和-非饱和渗流理论来进行求解,从而获得不同降雨条件下弃土场边坡渗流场的动态变化。

饱和-非饱和水流运动可用下列 Richards 方程表述:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $k_x$ 、 $k_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的渗透系数(m/s); $H$  为总水头(m); $m_w$  为土水特征曲线斜率; $\gamma_w$  为水的重度(kN/m<sup>3</sup>); $t$  为时间(s)。

土水特征曲线一般通过试验确定,但在实际中常采用基于统计分析理论提出的 Fredlund&Xing 模型,土水特征曲线模型如下:

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left[ 1 - \frac{\ln(1+\psi/\psi_r)}{\ln(1+1 \times 10^6/\psi)} \right]^c \times \frac{1}{\{\ln[e+(\psi/a)^b]\}^c} \quad (2)$$

式中: $\theta$  为非饱和土体的体积含水量; $\theta_s$  为饱和体积含水量; $\psi$  为基质吸力(kPa); $\psi_r$  为残余含水量所对应的基质吸力(kPa); $a$  为与进气值有关的参数(kPa); $b$  为与土水特征曲线斜率有关的参数; $c$  为与残余含水率有关的试验参数。

## 2.2 饱和-非饱和渗流数值求解

饱和-非饱和渗流求解时,将渗流场划分为有限单元,并对这些单元进行迭代计算,从而得到降雨入渗条件下弃土边坡的渗流场,其迭代方程为:

$$(\Delta t [D] + [E]) \{H_{t+\Delta t}\} = \Delta t [F] + [E] \{H_t\} \quad (3)$$

式中: $\Delta t$  为时间增量; $D$  为单元渗透系数矩阵; $E$  为单元储水矩阵; $H_{t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻水头; $H_t$ 、 $F$  为  $t$  时刻水头、边界流量。

在饱和-非饱和求解中,降雨入渗边界条件处理方法如下:① 当降雨强度小于地表土体的入渗能力时,此时降雨全部入渗土体内,入渗量等于降雨强度,按流量边界处理,随着降雨持续,土体表层含水率将逐渐增加,直到达到某一稳定值;② 当降雨强度超过地表土体的入渗能力时,此时降雨一部分转化为地表径流,另一部分渗入坡体,地表入渗边界点达到饱和状态,按压力水头边界处理。

## 2.3 非饱和土抗剪强度

降雨时边坡由非饱和状态逐渐向饱和状态转变,降雨结束后又向非饱和状态转变,边坡土体抗剪强度受基质吸力影响先减小后增大,对边坡的稳定性有影响。因此,需应用非饱和抗剪强度理论来进行边坡稳定性分析,非饱和抗剪强度计算公式如下:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (4)$$

式中: $c'$  为有效内摩擦角( $^\circ$ ); $\varphi'$  为有效黏聚力(kPa); $(\sigma - u_a)$  为净法向应力(kPa); $(u_a - u_w)$  为基质吸力(kPa); $\varphi^b$  为随基质吸力变化的内摩擦角( $^\circ$ )。一般来说, $\varphi^b$  随着基质吸力的增大而减小,在边坡稳定性分析中将其假定为一常数。

## 3 弃土场降雨入渗数值分析

### 3.1 工程概况

贵州省六盘水至威宁高速公路 YK53+750 右侧 40 m 弃土场位于路线左侧冲沟,沟底相对平缓,原地表覆盖角砾土,下伏基岩。弃土场边坡高度为 16.5 m,弃方量为 6.0 万 m<sup>3</sup>,弃土场下游为冲沟,无其他危害对象,根据有关规范,该弃土场级别属于 5 级<sup>[7]</sup>。弃土场典型地质剖面见图 1。

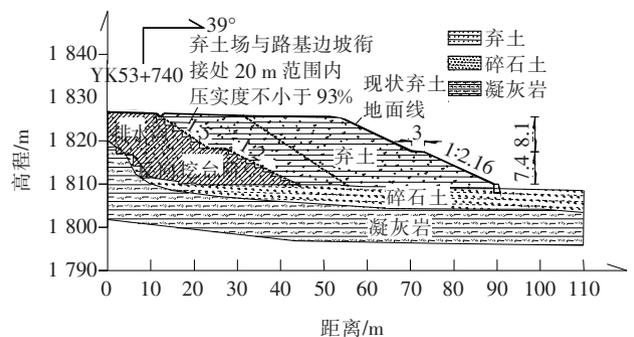


图 1 弃土场典型地质剖面

### 3.2 计算模型与参数

选取弃土场现状边坡的典型剖面,建立有限元模型,采用四边形和三角形混合单元进行有限元网格剖分,共剖分为 4 768 个单元,4 886 个节点,见图 2。

弃土边坡岩土体渗流、力学参数根据资料类比选取,具体见表 1。

### 3.3 计算工况与边界条件

根据现场调查与地质勘探资料,在勘察范围内未见地下水位,渗流计算不考虑地下水,只考虑降雨入渗。降雨入渗渗流计算则选取短时暴雨和连续降雨等类型进行渗流计算<sup>[8]</sup>。因此,弃土场边坡的稳定性计

算考虑 4 种工况,其中降雨工况考虑 3 种工况(表 2)。

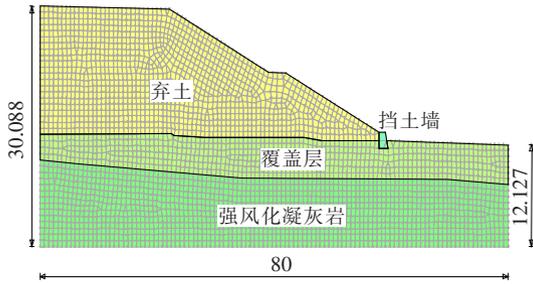


图 2 弃土场边坡渗流分析有限元计算模型(单位:m)

表 1 弃土场边坡岩土体参数取值

岩土类型	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	内摩擦 角/( $^\circ$ )	黏聚力/ kPa	$\varphi^b$ / ( $^\circ$ )
弃土渣料	20.5	$1.5 \times 10^{-5}$	17.4	10	12
覆盖层	19.0	$6.0 \times 10^{-7}$	20.0	25	15
强风化 凝灰岩	21.8	$3.0 \times 10^{-6}$	28.0	60	0

表 2 渗流计算工况

计算 工况	降雨情况	降雨条件
正常 工况	不考虑	无
降雨 工况	考虑降雨	不考虑降雨过程,假定降雨后岩土体饱和
	短时暴雨	降雨强度 50 mm/h,持续 6 h,计算 24 h
	连续降雨	降雨强度 20 mm/d,持续 7 d,计算 10 d

(1) 正常工况:不考虑降雨的影响,同时为后续降雨条件下渗流计算分析提供初始渗流场。

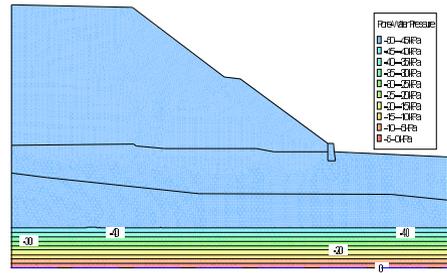
(2) 降雨工况分 3 种情况:第 1 种是只考虑经历降雨后岩土体饱和,计算参数采用饱和状态参数即采用总应力抗剪强度参数,不形成暂态饱和和地下水位;第 2 种是在正常工况的基础上进行短时暴雨条件下边坡渗流场计算,计算参数采用有效抗剪强度参数,并考虑基质吸力影响;第 3 种是在正常工况的基础上进行连续降雨对边坡渗流场的影响,计算参数选用与第 2 种情况一样。

弃土边坡表面为降雨流量边界,模型底面为零流量边界,两侧地下水位以上为零流量边界,地下水位以下为定水头边界。

### 3.4 边坡降雨入渗数值模拟计算结果

采用 GeoStudio 软件 Seep 模块对弃土场边坡在不同降雨条件下的饱和-非饱和和渗流场进行计算,得到不同降雨条件下弃土场边坡的渗流场,见图 3、4,典

型节点的孔隙水压力随时间的关系曲线见图 5、6。



(a) 初始孔隙水压力

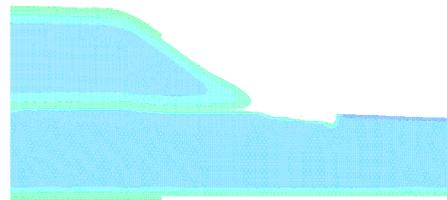
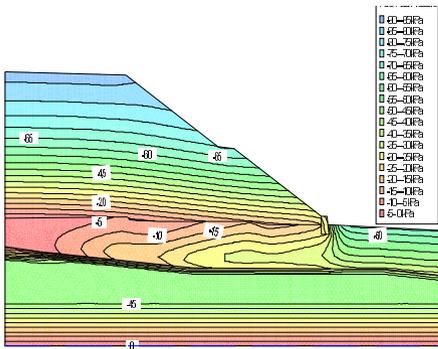


图 3 短时暴雨条件下弃土场边坡孔隙水压力等值线图(单位:kPa)

从图 3、5 可以看出:短时暴雨时,弃土饱和和渗透系数略小于降雨强度,降雨入渗使边坡地表的基质吸力先减小至 0,并在表层形成暂态饱和和区,坡体内一定深度范围内的基质吸力减小;在降雨结束后,边坡地表的暂态饱和和区消失,基质吸力逐渐增大,而在覆盖层顶面位置(坡顶以下 15.6 m)一定范围内的基质吸力减小,覆盖层底面位置(坡顶以下 20.4 m)的基质吸力几乎不变。

从图 4、6 可以看出:连续降雨时,弃土饱和和渗透系数大于降雨强度,降雨能全部渗入坡体,坡体内的基质吸力减小,未能在地表形成暂态饱和和区,覆盖层顶面位置(坡顶以下 15.6 m)一定范围内的基质吸力减小到 -5 kPa,土体接近于饱和状态;降雨结束 3 d 后,边坡

表层基质吸力逐渐增大,覆盖层顶面位置的基质吸力几乎不变,而覆盖层底面位置(坡顶以下 20.4 m)基质吸力缓慢增大。



(a)7 d 降雨后孔隙水压力

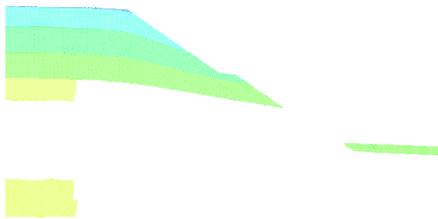


图 4 连续降雨条件下弃土场边坡孔隙水压力等值线图(单位:kPa)

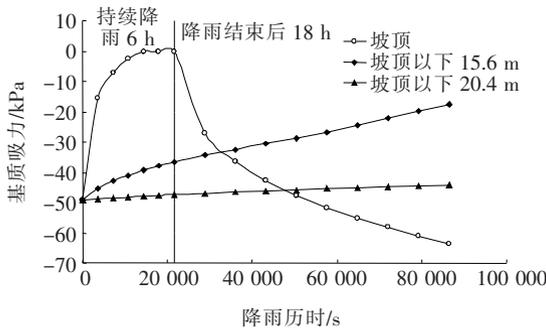


图 5 短暂暴雨条件下坡顶不同位置基质吸力随时间变化曲线

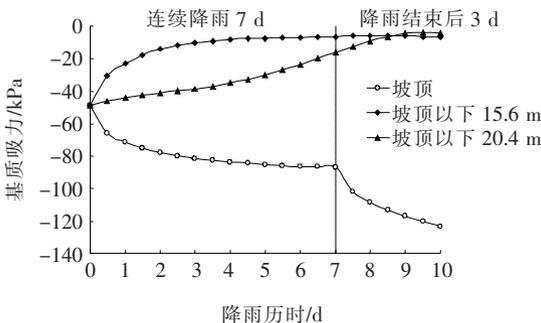


图 6 连续降雨条件下坡顶不同位置基质吸力随时间变化曲线

## 4 降雨入渗对弃土场边坡稳定性影响

### 4.1 弃土边坡稳定性计算结果

以弃土场边坡降雨后的渗流场计算结果作为边坡稳定性计算的初始条件,利用 GeoStudio 软件 Slope 模块采用 Bishop 法对弃土场边坡的稳定性进行计算,搜索到弃土场边坡最小安全系数的滑动面,得到弃土边坡安全系数,计算结果见表 3。

表 3 不同降雨工况条件下边坡安全系数计算结果

计算工况	计算条件	降雨过程	安全系数	允许安全系数
正常工况	不考虑降雨		1.806	1.15
	考虑降雨	不考虑降雨过程	1.281	
降雨工况	短时暴雨	6 h 降雨	1.573	1.05
		降雨停止 18 h	1.530	
	连续降雨	7 d 连续降雨	1.448	
		降雨停止 3 d	1.519	

### 4.2 降雨入渗对弃土场边坡稳定性的影响

从表 3 可以看出:在正常工况条件下弃土边坡的安全系数为 1.806,明显高于边坡在降雨工况条件下的安全系数;若不考虑降雨过程,假定降雨后弃土完全饱和,此时边坡的安全系数为 1.281,低于短时暴雨和连续降雨条件下边坡的安全系数。

若在短时暴雨条件下边坡的安全系数为 1.573;待降雨停止 18 h 后边坡的安全系数为 1.530,比降雨结束时边坡安全系数略有减小。

若在连续降雨条件下边坡的安全系数为 1.448;待降雨停止 3 d 后边坡的安全系数为 1.519,相比降雨结束时边坡的安全系数略有增大。

综上所述:降雨对弃土场边坡稳定性的影响是显著的,并且连续降雨条件下边坡的安全系数要低于短时暴雨条件时的边坡安全系数。采用假定岩土体饱和的方法来计算降雨工况条件下边坡的安全系数相对考虑降雨入渗影响的结果是偏小的,对工程而言偏于安全,对于弃土场稳定性评价可以采用这种假定方法来计算降雨条件下弃土场边坡稳定性。

## 5 结论

以贵州省 YK53+750 右侧 40 m 弃土场为例,采用非饱和渗流分析方法对不同降雨条件下弃土场边坡

的渗流场进行了分析,并探讨了降雨入渗对弃土边坡稳定性的影响,得到以下结论:

(1) 在短时暴雨条件下,弃土边坡表层的基质吸力减小,随着降雨的持续,边坡表面部分区域会形成暂态饱和区;但降雨停止后,弃土边坡表面的暂态饱和区逐渐消散,基质吸力逐渐增大,而坡体内基质吸力先减小后缓慢增大,雨停后边坡的安全系数略有减小。

(2) 在连续降雨条件下,降雨能全部渗入坡体,在降雨期间边坡表面无暂态饱和区,入渗使得坡体内的基质吸力减小;但降雨结束3 d后,边坡浅表层基质吸力逐渐增大,坡体内的基质吸力也缓慢增大,边坡的安全系数略有增加,但低于短时暴雨条件下边坡的安全系数。

(3) 降雨入渗引起弃土边坡的基质吸力减小、弃土的抗剪强度参数降低,从而导致弃土边坡的安全系数逐渐减小和边坡稳定性下降。由此可见,降雨对边坡稳定性的影响显著。

(4) 相对于采用渗流稳定计算,采用假定岩土体全部饱和的方法来进行降雨条件下弃土边坡安全系数计算,得到的边坡安全系数小于短时暴雨和连续降雨条件下的边坡安全系数,结果相对偏于保守,相对工程而言偏于安全,可以采用这种假定方法来评价降雨条件下弃土场边坡的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 沈明祥,罗红明,刘志鹏,等. 贵州省六盘水至威宁高速公路弃土场稳定性评估[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 559—564.
- [2] 李焕强,孙红月,孙新民,等. 降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 589—594.
- [3] 谭文辉,璩世杰,高丹青,等. 降雨入渗对边坡稳定性的影响分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(15): 39—43.
- [4] 唐栋,李典庆,周创兵,等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3 240—3 248.
- [5] 吴志斌,王陈琦,曾江波,等. 不同降雨强度下渣土受纳场边坡地下水渗流和稳定性的数值模拟分析[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(4): 148—153.
- [6] 于玉贞,林鸿州,李荣建,等. 非稳定渗流条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2008(11): 2 892—2 898.
- [7] GB 51018—2014 水土保持工程设计规范[S].
- [8] 王贺,张洁,陈飞扬. 强降雨条件下花岗岩残积土边坡的时变可靠度[J]. 武汉大学学报(工程版), 2016, 49(5): 763—767.
- [9] 抗兴培,孟凡成,曾超,等. 强降雨条件下弃土场边坡稳定性历程分析[J]. 中外公路, 2019(3).
- [10] 杨欣. 降雨入渗条件下含软弱夹层路堑高边坡渗流特性数值分析[J]. 中外公路, 2020(4).

## 投稿须知

1. 征稿范围:国内外公路概况;国外公路考察见闻;公路路线设计;路基路面工程;桥梁与隧道工程;材料试验与应用;交通工程与管理;公路景观与环保等。

2. 稿件要求:① 请提供 word 文档。文稿以 6 000 字左右为佳;② 投稿网址: <http://zwgl.csust.edu.cn/zwgl/home>,本刊审稿周期 1~2 个月。3 个月未收到通知,作者可另行处理。请勿一稿多投,否则后果自负;③ 题目应简洁明晰,字数不能多于 20 个中文字;④ 作者单位必须注明邮政编码。第一作者须注明出生年、性别、学历、职称、研究方向、电子信箱和联系电话;⑤ 摘要、关键词。摘要请务必按“研究目的、方法、结果、结论”四要素撰写。关键词:3~8 个;⑥ 基金项目必须写明基金项目名称和编号;⑦ 图表。图表要与文中相对应,(示例:\*\*\* 如表 1 所示)。图表要有图名和表名。除照片外,其余图均需提供 excel 或 origin 或 cad 源文件。表格采用三线表。所有图、表中的字体为小 5 号或 6 号;⑧ 文后必须要有参考文献。参考文献参考格式如下:[1]期刊:作者姓名(列三位,等(姓在前,名在后)). 文章题目[J]. 刊名,出版年份,卷(期):页码;[2]专著:作者姓名(列三位,等). 专著名称[M]. 版本(第一版不标注). 出版地:出版单位,出版年:页码;[3]论文集:作者姓名(列三位,等). 题名[C]. 论文集名,出版年:页码;[4]学位论文:作者姓名. 题名[D]. 单位[硕士(博士)学位论文],年份:页码;[5]专利:专利申请者姓名(列三位,等). 题名:国别,专利号[P]. 公告日期或公开日期[引用日期];[6]技术标准:标准代号 标准名称[S].