

# 弃土场边坡稳定性降雨预警标准及 锚固排水耦合处治研究

彭楠琦<sup>1</sup>, 高惠瑛<sup>1</sup>, 吕文舒<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中交水运规划设计研究院, 北京市 100006)

**摘要:**该文以某山区公路旁弃土场边坡作为研究对象,首先从理论角度分析降雨对边坡稳定性的影响,其次结合 Geo-Studio 软件中的 Slope/W 模块与 Seep/W 模块对边坡进行天然状态与降雨状态下稳定性的数值模拟,得出安全系数与降雨时间的关系,从而建立弃土场边坡稳定性降雨预警标准;探究不同处治方式对边坡安全系数的提高效果,合理优化锚固排水耦合处治条件下排水段和锚固段长度。研究表明:① 弃土场边坡在降雨条件下,孔隙水压力升高,随着暂态饱和区的扩大,部分区域孔隙水压力逐渐发展为正值,引起基质吸力下降和抗剪强度衰减;② 持续大~暴雨会降低边坡稳定性,在降雨 20 d 条件下,该弃土场边坡安全系数由天然状态下的 1.373 衰减为 1.032,可以采用 9、19、21 d 作为降雨预警等级阈值;③ 不同处治措施的效果如下:排水与锚固耦合>仅排水>仅锚固>天然状态,在总长一定的前提下,排水段长度与锚固段长度存在最优长度比 3/7。

**关键词:**弃土场边坡;降雨;渗流;排水;锚固;预警等级

随着目前公路交通建设的发展,形成了一定数量的弃土场边坡。弃土场边坡的物理性质较差,在外界条件影响下,若边坡内的力学平衡发生了破坏,便有可能发生失稳滑坡灾害<sup>[1-2]</sup>。关于弃土场边坡稳定性的分析、预警及相关处治成了工程技术人员需要面临的问题。

随着数值仿真软件的发展,目前大量的边坡稳定性研究均采用计算机完成。李长冬等<sup>[3]</sup>以三峡库区的二里半滑坡为例,依据实际问题建立模型,利用开发的 Slope Designer 对滑坡进行了稳定性分析;ZHANG 等<sup>[4]</sup>运用数值分析软件对边坡进行分析,计算结果与实测结果吻合较好,验证了数值分析的准确性。为了对影响弃土场边坡稳定性的因素进行合理分析,需要在分析时考虑雨水渗流的影响。目前开展降雨条件下边坡稳定性的研究较多。杨欣<sup>[5]</sup>采用 Geo-Studio 软件研究了降雨强度与降雨持时对边坡稳定性的影响;陈华梁等<sup>[6]</sup>分析表明降雨对边坡稳定性具有“劣化作用”。关于边坡的防治措施,欧美国家从 19 世纪便通过布置排水管开展了边坡处治工作,措施主要以地表(地下)排水工作为主。中国幅源辽阔,各种地质条件

复杂,边坡失稳现象较为严重。通过引进国外处治措施,也迅速发展了一系列处治体系。

湖南省属于大陆性亚热带季风湿润气候,多年平均降水量为 1 450 mm。弃土场为人工堆积体,受到降雨引起的渗流、地下水升高等影响,内部有效应力状态容易发生较大变化。因此,结合降雨条件下土体渗流场的变化对弃土场稳定性进行研究,并提出相应的预警标准和处治措施具有重要的实际意义,但目前此方面的研究报道较少。该文以湖南省某山区公路弃土场边坡为例,利用 Geo-Studio 软件中的 Slope/W 模块对天然状态下边坡的稳定性进行求解,然后加入降雨边界条件,通过 Seep/W 和 Slope/W 模块相互耦合,分析天然弃土场边坡不同降雨时间下安全系数的变化情况,尝试获取有关弃土场边坡稳定性的降雨时间预警标准。还针对降雨对弃土场边坡的劣化作用,分析不同处治方式(仅排水、仅锚固、排水与锚固耦合)对边坡安全系数的提高效果,探讨排水段长度与锚固段长度之比对弃土场边坡稳定性的影响,合理优化排水段长度与锚固段长度,为其他多雨地区弃土场边坡稳定性预警及处治提供参考。

收稿日期:2020-07-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41906185)

作者简介:彭楠琦,女,硕士研究生,助理工程师。E-mail:819507102@qq.com

## 1 降雨对边坡稳定性的影响

### 1.1 降雨入渗的影响

通过对边坡失稳的案例分析可以发现:边坡失稳情况主要发生在降雨过程中或降雨后,这在一定程度上揭示了降雨入渗与边坡失稳存在一定的联系。弃土场边坡失稳引发的道路行车危害主要表现为:①破坏线路,导致交通运输被迫中断;②危害站场并砸坏站房;③边坡失稳造成行车事故,给国家和人民生命造成巨大的损失;④增加基建投资,加大维修费用。因此研究降雨入渗对边坡稳定性的作用机理显得尤为重要。

降雨条件下,土体的含水率会在一定程度上有所增加。一般降雨条件下土体条块从上到下可以划分为4个区域,分析时将4个区域简化为2个区域进行分析,以湿润锋为分界线,分界线之上为饱和区,分界线之下为非饱和区(图1)。

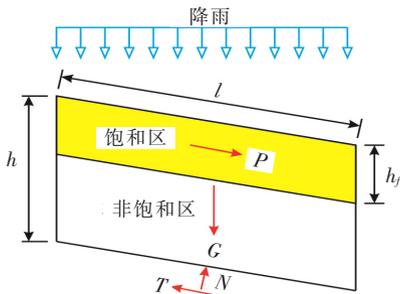


图1 条块受力模型

分析时,主要从两方面进行考虑:①岩土体的力学性质随边坡内含水率的变化规律;②随着雨水的渗入,边坡内暂态饱和区的形成。在对降雨条件下的边坡进行分析时,将降雨作为流量边界进行处理。荣冠<sup>[7]</sup>在对流量边界处理时,将单元上的流量转化成节点的入渗。实际情况往往受多种不同因素的影响,因此实际入渗量受降雨强度及降雨持时的影响。降雨强度与实际入渗量的表达式为:

$$\left. \begin{aligned} q_n(t) > R(t) \text{ 时, } q_s(t) &= R(t) \\ q_n(t) \leq R(t) \text{ 时, } q_s(t) &= q_n(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $q_n(t)$ 为坡面法向入渗量; $R(t)$ 为坡面法向上的入渗能力; $q_s(t)$ 为实际降雨入渗量。

### 1.2 降雨对边坡稳定性的影响

分析降雨条件下的边坡稳定性时,利用极限平衡法对稳定性随时间的变化规律进行研究。非饱和和土体的抗剪强度会随着饱和度的变化发生改变,土体在天然状态下处于非饱和状态,Fredlund<sup>[8]</sup>提出了应用到

非饱和土抗剪强度的摩尔库仑准则:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为正应力; $c'$ 为土体有效黏聚力; $\varphi'$ 为土体有效内摩擦角; $u_a$ 和 $u_w$ 为孔隙气压力和孔隙水压力; $u_a - u_w$ 为基质吸力; $\varphi^b$ 为反映基质吸力增加程度的摩擦角。

土体抗剪强度参数随含水率的变化而不同。通过图2、3的统计可知:含水率的增加,对土体抗剪强度参数( $c'$ 、 $\varphi'$ )存在“劣化作用”。其中土的有效黏聚力、有效内摩擦角与含水率关系可分别按二次抛物线关系与对数关系进行拟合:

$$\left. \begin{aligned} c' &= A\omega^2 + B\omega + D \\ \varphi' &= E \ln \omega + F \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:参数A、B、C、D、E和F可以通过试验确定。

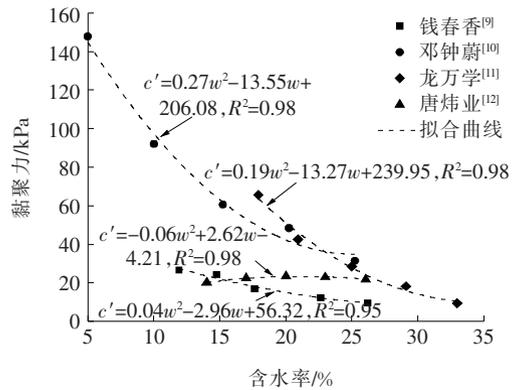


图2 黏聚力与含水率的关系曲线

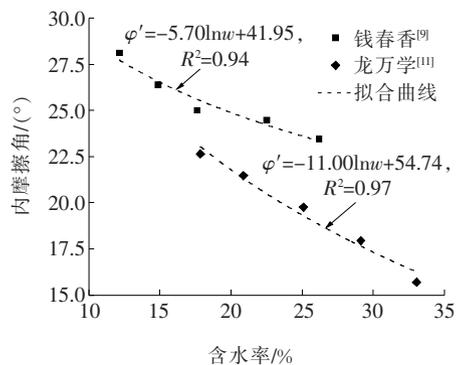


图3 内摩擦角与含水率的关系曲线

降雨条件下,随着雨水的持续入渗,基质吸力不断减小,导致土体抗剪强度也减小。

## 2 工程概况

### 2.1 场地区域地质条件

场地现为无序乱填区,地形及坡形较零乱,低洼处

建有护堤,弃土场区域呈东西向的带状分布,场地内东、南、北侧自然山坡植被发育,坡顶高程81~137 m,坡度 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。坡体组成主要为坡、残积土,局部为全、强风化花岗片麻岩。场地地面相对高程较大,地面高程28~80 m。

## 2.2 场地水文条件

弃土场未见地表水,但场地内局部地段分布有雨水冲刷形成的冲沟,暴雨期存在临时性的地表径流。场地内地下水主要来源于大气降雨,因此地下水位呈周期性变化。场地内杂填土与强风化岩为中等透水性地层,素填土、黏土及粉质黏土为弱透水性地层,场地环境类别属于II类。钻孔稳定水位埋深为0.20~10.30 m。

## 2.3 气象条件

湖南地区属于亚热带季风性气候,主要特点为气候比较适宜,降雨量充足。夏季高温多雨,冬季低温干旱。降雨量与季节相关,其中每年4—9月为降雨量较充沛的季节,多年平均降水量为1 450 mm。

# 3 降雨条件下边坡稳定性

## 3.1 边坡计算模型

山区公路旁典型弃土场边坡主要由人工填土、冲洪积层、残积层组成,下部为花岗片麻岩,弃土场边坡现场如图4所示。



图4 弃土场边坡现场图

该文选择某段具有代表性的边坡地质剖面进行弃土场边坡稳定性分析。绘制边坡地质剖面如图5所示,边坡由5种性质不同的土层组成,从上至下依次为:杂填土、素填土、冲洪积层黏土、残积层粉质黏土、全风化花岗片麻岩与强风化花岗片麻岩。

依据勘察点的数据,弃土场边坡地下水位高程37.5 m。进行降雨分析时需运用Seep/W模块,对边坡模型的有限元区域进行网格划分(网格选择四边形和三角形)。为充分考虑计算时的计算效率与计算精

度,将模型的网格边长设置为1.0 m,将模型划分为2 899个节点和2 790个单元;并在坡顶、坡中与坡脚不同高度位置分别设置了监测点。同时在计算中假设下部花岗片麻岩为弱透水状态,入渗的雨水会使地下水抬升。模型的边界条件是数值分析的一个关键组成部分,为探究锚固排水耦合措施对边坡渗流场的影响,需定义水力边界条件:①模型两侧地下水位以下按给定总水头边界处理,地下水位以上按零流量边界处理;②模型底部设置为不透水边界;③模型坡面设置为降雨入渗,根据降雨强度、降雨持时及入渗面坡率之间的关系,建立相应的流量边界函数,即单位流量边界条件。

建立弃土场边坡模型如图6所示。

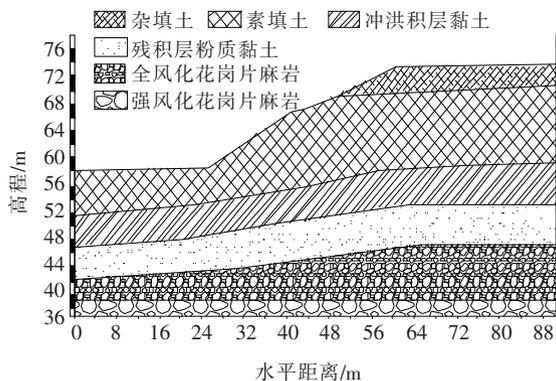


图5 弃土场边坡地质剖面

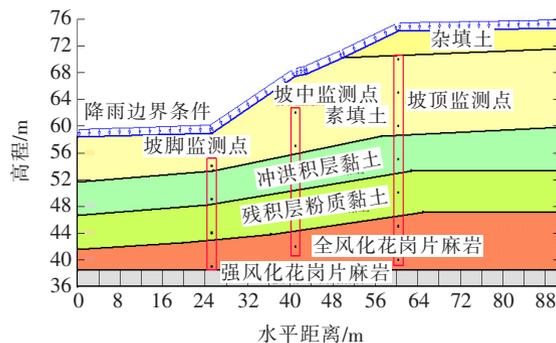


图6 弃土场边坡模型

## 3.2 计算条件

通过现场取样进行土样类别鉴定,再根据相关土工试验和软件自带材料库,确定土样的基本物理性质参数见表1。

受试验条件的影响,该文未测试土样的土—水特征曲线,而是结合土样的饱和和体积含水率与Seep/W中的样本函数估算得到(图7)。渗透系数函数则是基于土样的渗透系数和土—水特征曲线,配合Van Genuchten<sup>[13]</sup>模型预测方法获取(图8)。

表 1 土样的基本物理参数

土样名称	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	饱和体积 含水率	渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
杂填土	19.0	13.5	16	0.450	$5.755 \times 10^{-8}$
素填土	19.5	15.6	17	0.433	$5.738 \times 10^{-8}$
冲洪积层黏土	18.0	20.0	16	0.395	$4.096 \times 10^{-8}$
残积层粉质黏土	18.5	28.0	25	0.426	$5.175 \times 10^{-8}$
全风化花岗片麻岩	18.8	35.0	30	0.240	
强风化花岗片麻岩	19.1	50.0	35	0.160	

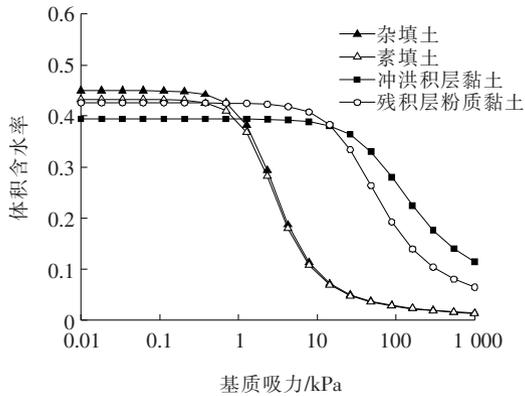


图 7 土体土-水特征曲线

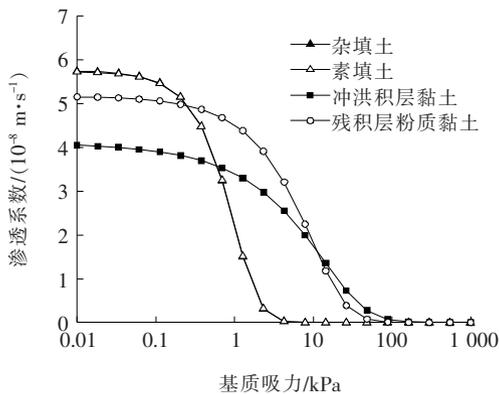


图 8 土体渗透系数函数

在边坡稳定性分析中,影响边坡稳定性的因素很多,如:结构面的破坏、边坡外形的改变、岩土体力学性质的改变以及各种外力直接作用的影响。其中降雨是影响边坡稳定性、导致边坡失稳破坏的重要因素。利用 Seep/W 模块可以对边坡进行降雨工况下的边坡稳定性和渗流分析。中国气象部门将雨量划分为 6 个等级:①  $<10 \text{ mm/d}$  为小雨;②  $10 \sim 25 \text{ mm/d}$  为中雨;③  $25 \sim 60 \text{ mm/d}$  为大雨;④  $60 \sim 100 \text{ mm/d}$  为暴雨;⑤  $100 \sim 250 \text{ mm/d}$  为大暴雨;⑥  $>250 \text{ mm/d}$  为特大暴雨。该文主要研究强降雨对山区公路旁的弃土场边

坡稳定性的影响,考虑到当地夏季长期暴雨情况,选择降雨强度值为  $100 \text{ mm/d}$ ,同时将降雨时长设置为  $20 \text{ d}$ 。

### 3.3 降雨过程中渗流场变化

图 9 为模拟降雨  $20 \text{ d}$  时间内,弃土场边坡各个时间段孔隙水压力等势线分布图(降雨量  $150 \text{ mm/d}$ )。

绘制坡顶、坡中与坡脚位置处不同时刻监测点的孔隙水压力随高程变化曲线如图 10 所示。

结合图 9、10 对弃土场边坡的渗流场随降雨持时的变化情况进行分析。边坡内部含水率随着降雨的持续而增高,孔隙水压力也随之不断增加。随着雨水的入渗,边坡浅层孔隙水压力逐渐增大。在降雨第 4 天时,弃土场边坡靠近坡脚的位置出现了暂态饱和区,相较于天然状态,负孔隙水压力向正孔隙水压力发展,随着降雨的继续进行,边坡的表层范围内暂态饱和区面积不断扩大。

由监测点处孔隙水压力可知:降雨条件下,不同位置监测点孔隙水压力均会随着降雨的持续发展而增大。随着暂态饱和区的形成,部分监测点处的孔隙水压力  $\geq 0 \text{ kPa}$ 。

### 3.4 降雨预警等级分析

Geo-Slope 计算边坡稳定性时采用极限平衡理论。在进行边坡稳定性计算时,可以采用条分法、简布法、毕肖普法和 Morgenstern-Price (M-P 法)。其中 M-P 法不仅满足力的平衡条件,同时也满足力矩的平衡条件,而且滑动面的形状也是任意形状。因此,在进行弃土场边坡稳定性分析时选取 M-P 法作为边坡稳定性的研究方法(图 11)。

为分析不同降雨状态对边坡稳定性的影响,绘制不同工况下边坡稳定性变化趋势如图 12 所示。由图 12 可知:天然状态下弃土场边坡的安全系数为  $1.373$ ,处于稳定状态。降雨第 1 天至第 3 天,边坡安全系数从  $1.373$  下降至  $1.366$ ,安全系数基本保持不变;随着

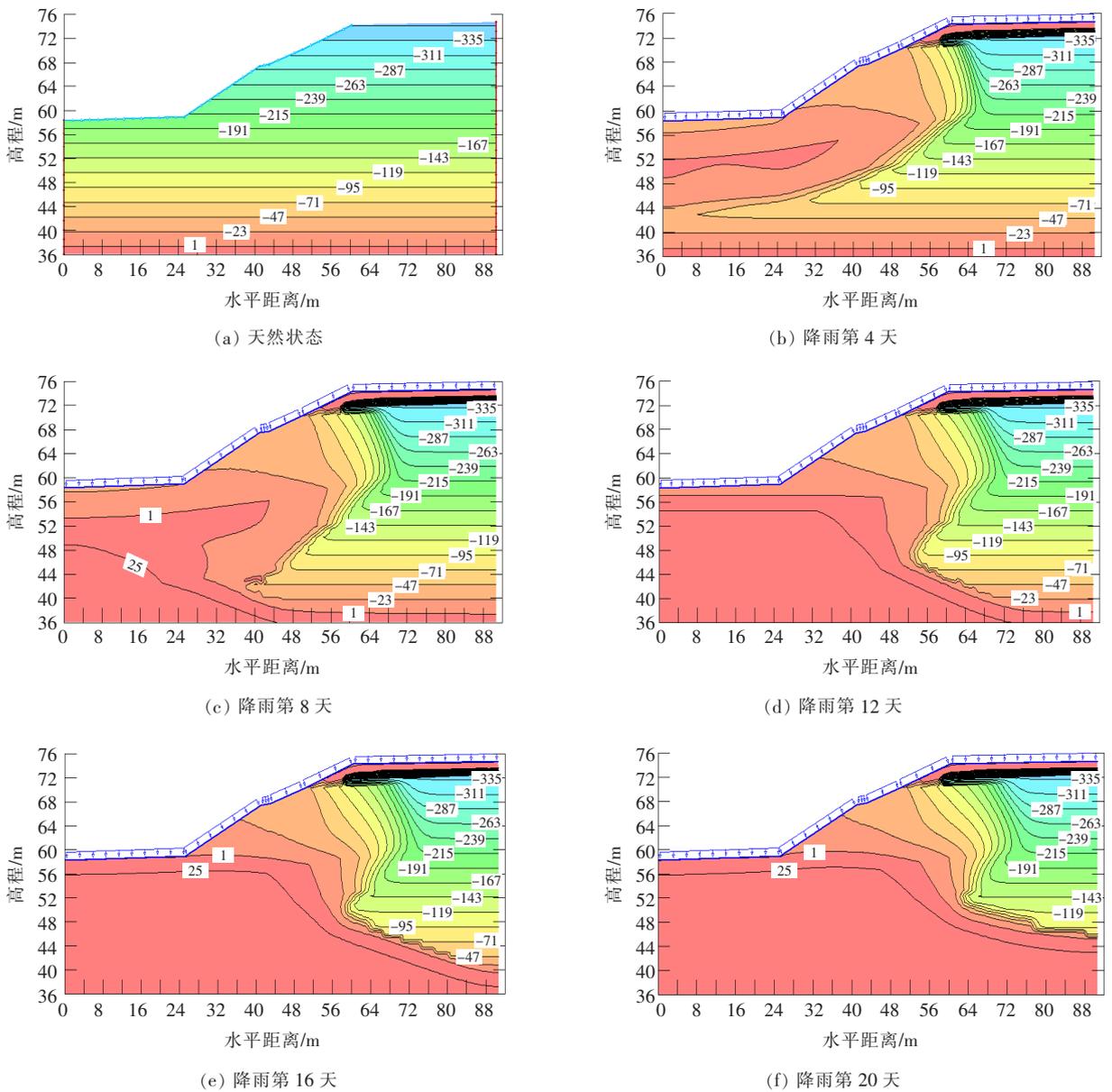


图9 孔隙水压力等势线(单位:kPa)

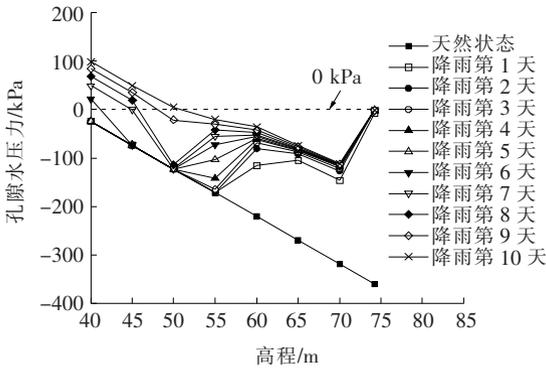
降雨时间的继续增加,从第3天至第20天,入渗的雨水在边坡内形成暂态饱和区,同时随着时间的增加,暂态饱和区的范围不断增加,造成边坡稳定性系数的降低。在此期间,边坡的安全系数由1.366降低至1.032(小于1.05),安全系数值降低幅值达到24.45%,边坡稳定状态属于欠稳定,不利于边坡稳定性的发展。

将该弃土场安全等级判定为二级并作为永久边坡考虑,其稳定安全数 $F_{st}$ 应达到1.30,根据边坡稳定状态的划分(表2),假设平均降雨强度保持在100 mm/d,则可以推算建立有关弃土场稳定性的雨季降雨时间预警等级(表3),预警等级越高,表明边坡稳定性越低。

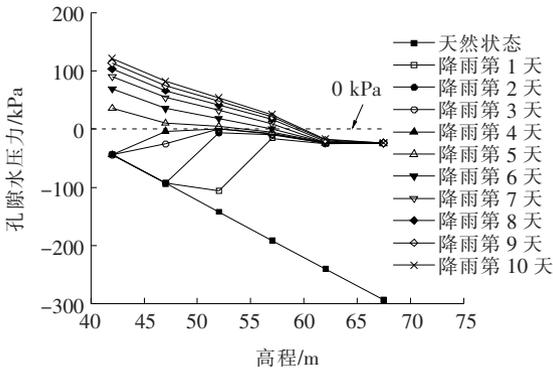
## 4 弃土场边坡锚固与排水耦合处治研究

### 4.1 不同处治措施对比研究

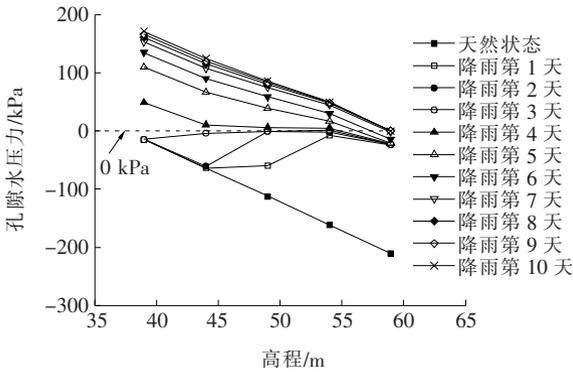
对边坡进行降雨研究可以发现雨水的入渗对边坡的稳定性具有不利的影 响(边坡稳定状态属于欠稳定),因此需要对边坡进行治理。目前,常见的处治措施主要有:边坡支护、边坡排水及虹吸法排水等<sup>[14]</sup>。为验证排水与锚固耦合处治相较于单一处治方法的优越性,分别进行了4种工况下(工况Ⅰ:天然状态;工况Ⅱ:仅排水;工况Ⅲ:仅锚固;工况Ⅳ:排水与锚固耦合)



(a) 坡顶位置



(b) 坡中位置



(c) 坡脚位置

图 10 监测点处孔隙水压力随高程变化曲线

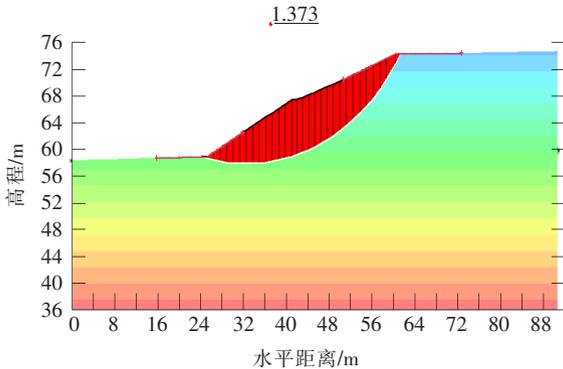


图 11 天然状态下边坡安全系数

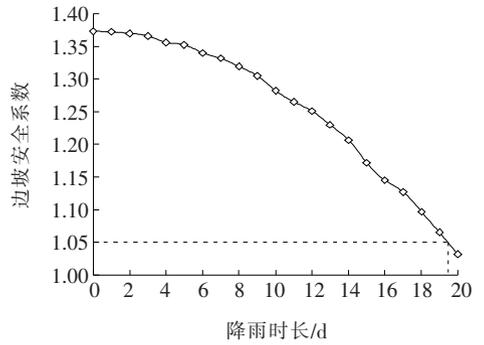


图 12 不同降雨时长下边坡稳定性变化趋势

表 2 边坡稳定性状态划分

稳定性系数 $F_s$	稳定状态
$F_s < 1.00$	不稳定
$1.00 \leq F_s < 1.05$	欠稳定
$1.05 \leq F_s < F_{st}$	基本稳定
$F_s \geq F_{st}$	稳定

表 3 降雨时间预警等级

降雨时间/d	预警等级	降雨时间/d	预警等级
9	一级	21	三级
19	二级		

边坡稳定性规律的研究。对应 4 种模拟工况建立的边坡加固模型如图 13 所示,工况 II、III、IV 中的管道布设在坡中位置,管长均为 10 m,埋设倾角为 5°,管道口距离坡脚垂直高度为 4 m。其中 IV 工况,排水段长度与锚固段长度均为 5 m。降雨强度为 100 mm/d,降雨持续时为 20 d。

Gureghian 等<sup>[15]</sup>在进行排水分析时,将排水孔作为定水头边界从而利用有限元进行求解,该文分析时,采用单排排水管对边坡进行排水处理,降雨入渗会随着排水管道流出。锚杆选择 SIGMA/W 模块中的锚杆加固方法,其中锚杆弹性模量  $E = 2.5 \times 10^7$  kPa,截面积  $C = 1.7 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>,惯性矩  $M = 2.4 \times 10^{-5}$  m<sup>4</sup>。

#### 4.2 不同处治措施对边坡稳定性的影响

图 14 为 4 种工况下边坡安全系数随时间变化曲线。

从图 14 可知:随着雨水的入渗,边坡安全系数均不断降低。降雨 20 d 后,各工况最小安全系数大小如下:排水与锚固耦合(1.27) > 仅排水(1.25) > 仅锚固(1.11) > 天然状态(1.03)。数据表明:仅锚固工况下,初始边坡安全系数大于仅排水工况,但随着雨水的入渗,其下降幅度较大,边坡仍可能发生失稳。而在仅排

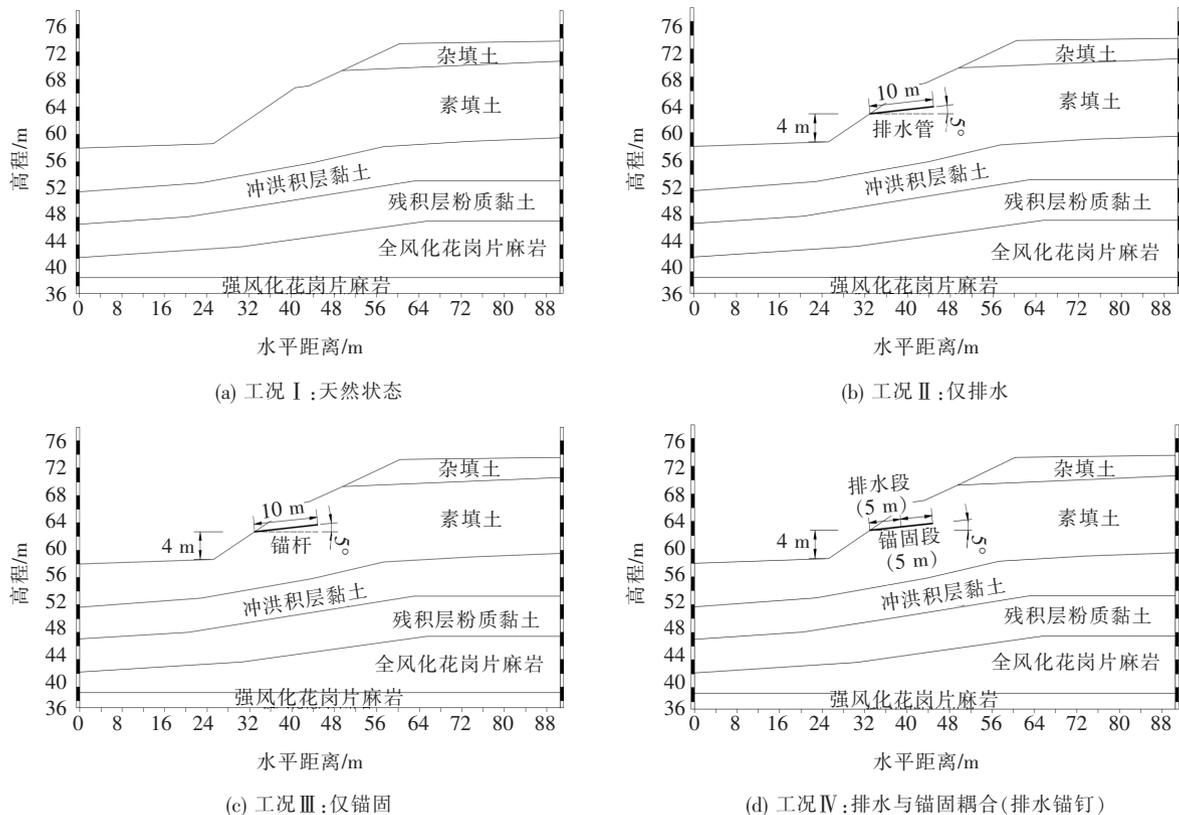


图 13 不同处治措施

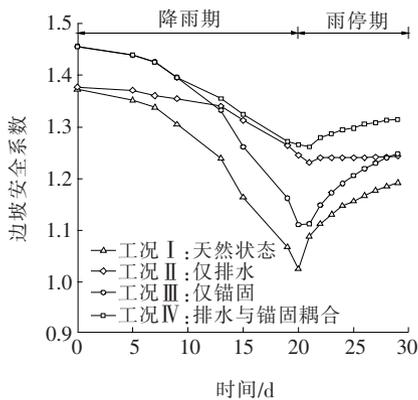


图 14 安全系数变化曲线

水工况下,边坡安全系数下降幅度变小。因此,采取将锚固与排水措施相结合,既能在天然状态下加固边坡,提高边坡初始状态的安全系数,又能在降雨过程中将入渗的雨水排出弃土场边坡系统,使得非饱和区的含水率上升速度较慢,边坡稳定性在排水作用下得到了明显改善,可以达到更优的边坡加固效果。

### 4.3 排水段与锚固段最优长度研究

由 4.2 节可知,排水与锚固耦合处治弃土场边坡效果较好。为探究总长度(排水段+锚固段)一定条件下,排水段长度与锚固段长度比例对边坡安全系数的

影响,将总长度定位 10 m,设置不同工况(排水段长度/锚固段长度分别为:2/8、3/7、4/6、5/5、6/4、7/3、8/2,在降雨(100 mm/d)20 d后,不同工况下边坡安全系数如图 15 所示。

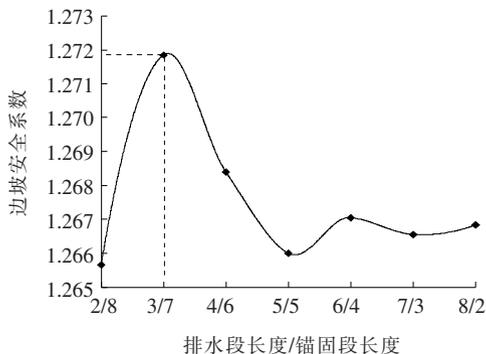


图 15 安全系数与排水段长度的关系

由图 15 可知:在总长度一定的前提下,边坡安全系数随排水段长度增大呈先增大后减小的趋势,表明在一定排水段长度内,排水效果对边坡稳定性起到的有利作用较锚固段显著。继续增加排水段长度,锚固的效果将得不到发挥,弃土场边坡的稳定性系数反而降低,在排水段长度/锚固段长度取 3/7 工况下安全系数达到最大值。

## 5 结 论

该文主要研究了某山区公路旁典型弃土场边坡在降雨条件下边坡内孔隙水压力变化情况及排水管道对边坡稳定性的影响规律,得到如下结论:

(1) 边坡内孔隙水压力会随着降雨的持续发展而增大,非饱和区会发展成为暂态饱和区,区内孔隙水压力由负值逐渐发展成正值,导致基质吸力降低及抗剪强度衰减,这是弃土场边坡发生失稳破坏的一般内在机理。

(2) 降雨强度 100 mm/d 下,弃土场边坡在降雨前期,边坡安全系数基本保持不变。降雨后期,随着暂态饱和区的形成,边坡安全系数逐渐降低,降雨 20 d 后安全系数由 1.37 降为 1.032,因此雨季持续大~暴雨对弃土场边坡稳定性的负面影响是非常显著的。

(3) 建立了一种根据降雨时间判断雨季弃土场稳定性的方法和预警等级标准,将 9、19、21 d 作为降雨预警等级阈值。

(4) 降雨强度 100 mm/d 下,20 d 后不同边坡处治方案下安全系数为:排水与锚固耦合(1.27) > 仅排水(1.25) > 仅锚固(1.11) > 天然状态(1.03),表明将排水与锚固相耦合优于传统单一的处治措施。同时,通过建立不同长度排水段工况(总长度保持定值)可知,排水段长度与锚固段长度存在最优长度比 3/7,处治效果最优。

### 参考文献:

- [1] 韦宏宽,曾超,夏侯云山,等. 充气截排水对弃土场边坡稳定性影响的数值模拟研究[J]. 中外公路,2020,40(1): 11-16.
- [2] 李志强,杨涛,王亚平,等. 边坡稳定性动态辨识及工程应用[J]. 中外公路,2018,38(5):7-13.

- [3] 李长冬,胡新丽. 滑坡稳定性评价及处治工程设计软件 Slope Designer[J]. 地质科技情报,2006,4(1):95-98, 103.
- [4] Zhang Yongxing, Yang Junshang, Yang Feng. Field Investigation and Numerical Analysis of Landslide Induced by Tunneling[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 47: 25-33.
- [5] 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,2020,40(4):38-42.
- [6] 陈华梁,何忠明. 不同降雨状态对坡积土边坡含水率分布及稳定性影响分析[J]. 中外公路,2016,36(2):1-6.
- [7] 荣冠,张伟,周创兵. 降雨入渗条件下边坡岩体饱和和非饱和渗流计算[J]. 岩土力学,2005,26(10):24-29.
- [8] Fredlund D. G., Morgenstern N. R., Widger R. A.. The Shear Strength of Unsaturated Soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [9] 钱春香,刘建坤,肖军华. 铁路粉土路基土的变形与强度特性试验研究[J]. 铁道建筑技术,2007(6):66-69.
- [10] 邓钟蔚. 基于三轴试验的非饱和土抗剪强度影响因素分析[J]. 城市勘测,2014(6):164-168.
- [11] 龙万学,陈开圣,肖涛,等. 非饱和红黏土三轴试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(S2):28-33.
- [12] 唐炜业,简文彬. 花岗岩残积土抗剪强度参数影响试验研究[J]. 土工基础,2017,31(4):516-520.
- [13] VAN GENUCHTEN M T. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils[J]. Soil Science of America Journal. 1980, 44(5):892-898.
- [14] 唐晓松,郑颖人,刘亮,等. 水平排水孔在岸坡处治工程中的应用[J]. 重庆大学学报,2010,33(4):80-87.
- [15] Gureghian A. B., Youngs E. G.. The Calculation of Steady-State Water-Table Heights in Drained Soils by Means of the Finite-Element Method[J]. Journal of Hydrology, 1975, 27(1-2):15-32.