

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.002

# 水力环境变化条件下夹软岩顺层边坡稳定性分析

潘荣建<sup>1</sup>, 钟启锋<sup>2</sup>, 刘先林<sup>2,3</sup>, 吕玺琳<sup>2\*</sup>

(1. 广西新发展交通集团有限公司, 广西南宁 530029; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海市 200092;

3. 广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530029)

**摘要:**为研究含水率变化及降雨入渗对含软岩夹层顺层边坡稳定性的影响,以广西某高速公路边坡为例,考虑夹层软岩强度参数随含水率的变化特性,分析顺层边坡含水率变化及降雨入渗条件对边坡安全系数的影响规律。结果表明:夹层软岩强度参数与含水率呈近似负指数关系,且存在一个临界含水率,当夹层软岩含水率超过该临界值时,最危险滑动面将由坡脚圆转变为沿软弱夹层滑动。降雨入渗条件下,降雨初期导致的下滑力增大对边坡安全系数影响不明显,随着降雨的持续,边坡浅表层受降雨入渗作用较大的区域更易失稳。

**关键词:**边坡;稳定性;极限平衡;软弱夹层;含水率

**中图分类号:**U416.14

**文献标志码:**A

## 0 引言

广西境内地质条件复杂,在公路沿线常遇到含软岩夹层边坡的情形。受施工扰动及降雨入渗等多种条件影响,公路边坡滑坡灾害频发。因而,不论是在公路建设期还是运营期,开展含软岩夹层边坡稳定性分析对于工程安全具有重要意义。

边坡中的软弱夹层一般是一个带状薄层,包括软弱结构面和裂隙破碎面,按碎裂程度可分为软岩夹层、碎块夹层、碎屑夹层和泥化夹层<sup>[1]</sup>。软弱夹层土水敏感性强,含水率增大将导致抗剪强度大幅降低,影响边坡的稳定性<sup>[2]</sup>。Ma等<sup>[3-4]</sup>通过环剪试验发现,重塑软岩夹层土强度参数与含水率呈负指数关系,含水率增加使软弱夹层更易产生并积累蠕变。在含软岩夹层边坡稳定性分析方面,软弱夹层力学特性常常是边坡稳定性的主要控制因素<sup>[5-9]</sup>;王保林等<sup>[10]</sup>研究了软弱夹层出露面对黏性土坡稳定性的影响,结果表明:当软弱夹层在坡面出露时,滑裂面沿软弱夹层出露位置滑出,不出露时,滑裂面在坡脚滑出;Huang等<sup>[11]</sup>基于转动-平动组合破坏机构,认为软

弱夹层会改变边坡的破坏模式;杨欣<sup>[12]</sup>研究了含软弱夹层路堑高边坡在不同降雨条件下的渗流特性,认为软弱夹层的存在将使降雨过程中该类高边坡滑坡进程提前;刘新喜等<sup>[13]</sup>研究了岩质边坡中软弱夹层的蠕变特性,并建议采用边坡长期稳定性系数作为支护前的设计参数。这些研究成果为解决实际工程问题提供了理论依据,但从软弱夹层含水率角度定量分析其对边坡安全系数影响的研究还不够深入。

本文以广西夹层软岩分布区某公路边坡为研究对象,首先研究含水率与夹层软岩强度参数的关系,然后结合极限平衡分析理论,研究软弱夹层含水率变化对边坡安全系数及破坏模式的影响,进一步研究不同降雨持时条件下积水入渗对边坡稳定性的影响,以期为广西高速公路沿线边坡工程稳定性评估及滑坡防治提供参考。

## 1 含软弱夹层顺层边坡工程概况

以广西百色西林县某公路边坡为研究对象,该边坡是一个由不同风化程度砂岩夹强风化泥岩构成的顺层边坡。边坡坡高20~30 m,坡度25°~35°。边

收稿日期:2023-05-10(修改稿)

基金项目:交通运输行业重点科技项目(编号:2019-ZD5-026)

作者简介:潘荣建,男,高级工程师.E-mail:2950235361@qq.com

\*通信作者:吕玺琳,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:xilinlu@tongji.edu.cn

坡表层覆盖残坡积土,其下方为风化程度随深度不断降低的砂岩,砂岩中存在高风化的薄层泥岩。该顺层边坡内砂岩裂隙发育良好,是地下水主要贮藏区域,而以泥岩为主的软夹层渗透性相对较低,客观上形成了隔水层,泥岩层相对其他岩层湿度更高。

根据边坡实际情况选取一个典型截面,建立夹软岩顺层边坡的分析模型(图1)。边坡左侧高45 m,右侧高16 m,水平宽度65 m,按照地层分布情况由上到下依次为残坡积土、全风化砂岩、软弱夹层、强风化砂岩、中风化砂岩和弱风化砂岩,软弱夹层两侧外露,其主体距地表一定距离。结合地质情况并参考

文献[14-15],各土层的相应参数见表1,其中夹层软岩强度参数随含水率变化见表2。

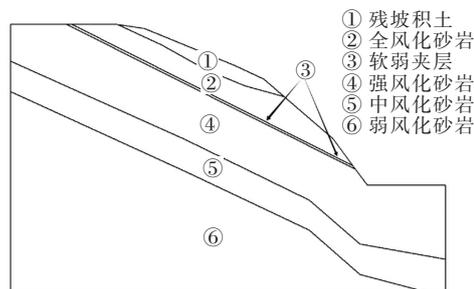


图1 夹软岩顺层边坡计算模型

表1 各土层材料参数

土体类别	天然重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	饱和重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	饱和渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	饱和体积含水率/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )
残坡积土	18.7	19.9	20.5	18.6	$6.0 \times 10^{-5}$	0.42
全风化砂岩	20.4	21.3	48.8	20.7	$1.5 \times 10^{-6}$	0.38
强风化砂岩	22.6	23.3	93.3	24.5	$9.5 \times 10^{-7}$	0.31
中风化砂岩	25.3	25.6	845.2	33.7	$5.2 \times 10^{-7}$	0.29
弱风化砂岩	26.5	26.7	1 502.3	39.1	$3.6 \times 10^{-6}$	0.28
软弱夹层	19.6	20.3	变量	变量	$6.0 \times 10^{-8}$	0.33

表2 夹层软岩强度参数

含水率/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	饱和度/ %
17.9	61.2	23.2	74.2
19.6	56.3	22.8	78.3
21.7	51.1	21.2	83.0
23.6	38.0	18.4	86.9
25.6	33.9	16.6	90.6
29.2	22.6	16.3	96.8

根据地下水位勘察资料,设定模型左侧地下水位距底部31 m,右侧距底部6 m,底部边界不透水。各层土体的土水特征曲线通过体积含水量和水力传导率求得,体积含水量函数通过软件内置的样本函数库计算得到,水力传导率函数在体积含水量函数的基础上结合 Van Genuchten 方法<sup>[16]</sup>进行计算。计算模型中,全局单元尺寸取为0.8 m,软弱夹层处的网格需细化,按照单元边界长度乘以0.2的比例系数生成。计算得到边坡地下水位线如图2虚线所示。

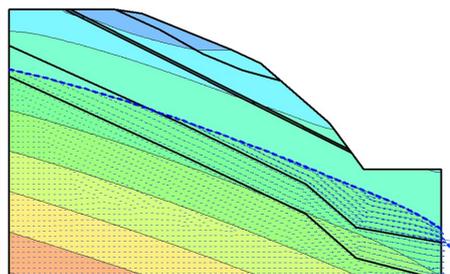


图2 边坡地下水位线

## 2 含水率对夹层软岩强度特性的影响

含水率对夹层软岩抗剪强度的影响较大,在降雨入渗或地下水浸润作用下,边坡中的软夹层泥岩遇水后含水率增大,强度参数将出现较大程度降低,导致边坡极易沿软夹层发生顺层滑动破坏。基于现有研究成果,建立夹层软岩强度参数与含水率的关系为:

$$y = ae^{bw} \quad (1)$$

式中: $y$ 为强度参数 $c$ 或 $\varphi$ ;  $a$ 和 $b$ 为材料参数; $w$ 为含水率。

对式(1)两边取对数,可得到:

$$\ln y = \ln a + bw \quad (2)$$

将表2的强度参数代入式(2)进行最小二乘法分析,可得参数 $a$ 、 $b$ 的值。经计算,软弱夹层的强度参数 $c$ 、 $\varphi$ 分别满足如下公式:

$$c = 331.738e^{-0.0906w} \quad (3)$$

$$\varphi = 45.4084e^{-0.0357w} \quad (4)$$

根据试验结果,通过式(3)、(4)得到的强度参数拟合曲线如图3所示。

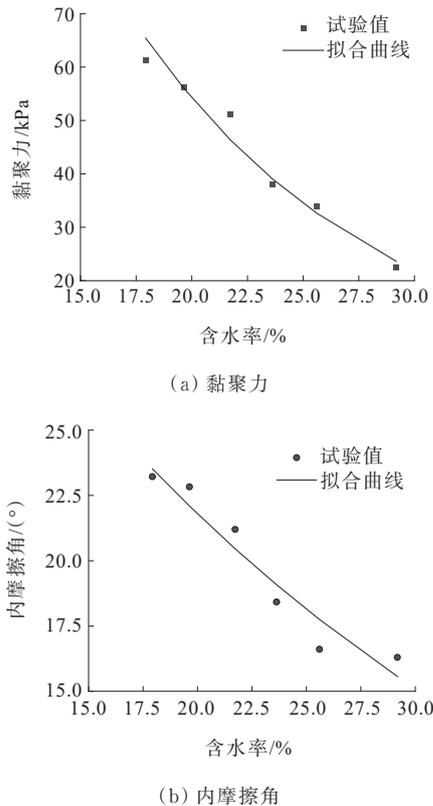


图3 强度参数拟合曲线

从图3可看出:黏聚力拟合曲线与试验值吻合较好( $R^2=0.9604$ ),而内摩擦角与试验值则存在一定偏差( $R^2=0.9268$ )。

### 3 含软岩夹层边坡稳定性分析

含软岩夹层边坡稳定性与夹层软岩强度密切相关,而夹层在降雨等水力作用下,强度降低明显,将显著影响边坡安全系数。研究土层含水率、降雨因素与边坡安全系数的关系,可得到夹层软岩强度特性变化对含软岩夹层边坡安全系数的影响规律,并获得含软岩夹层边坡破坏机制,从而为此类边坡灾

害防治提供依据。

采用Morgenstem-Price极限平衡法,计算含软岩夹层边坡的安全系数。通过假设条间力函数的表达式,将前述地下水作用下的稳态渗流计算结果导入极限平衡分析模块,即可得到边坡安全系数并确定其最危险滑动面。为获得夹层含水率变化及降雨入渗对边坡稳定性的影响,分两种工况进行分析:①工况1仅考虑软弱夹层含水率变化对边坡稳定性的影响;②工况2不考虑夹层土体强度变化,仅分析降雨入渗对边坡稳定性的影响。

#### 3.1 夹层软岩含水率变化对边坡稳定性的影响

为分析边坡安全系数随夹层软岩含水率的变化,根据式(3)、(4),采用不同含水率对应的强度参数进行极限平衡分析,并保持计算过程中其他岩层力学性质不变,得到夹层软岩含水率与边坡安全系数的关系见图4。

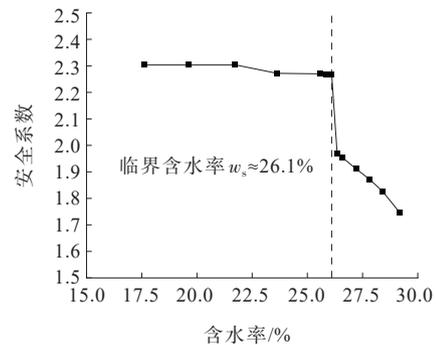


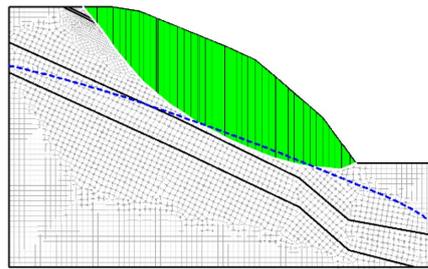
图4 边坡安全系数随夹层软岩含水率变化

由图4可知:当夹层含水率在26.1%附近时,边坡安全系数出现陡降,从2.269迅速下降到1.968,且此时滑动面转变为主要穿过软弱夹层(图5)。因此,边坡的夹层软岩存在一个约26.1%的临界含水率 $w_s$ ,当含水率大于 $w_s$ 时,边坡的最危险滑动面从坡脚圆转变为由软弱夹层控制的滑动面,且安全系数也出现较大幅度的下降。

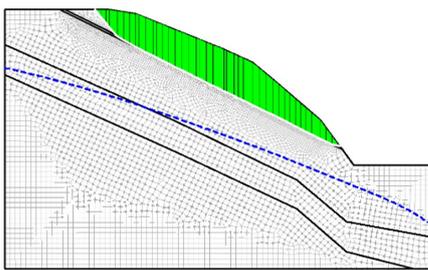
#### 3.2 降雨入渗对边坡稳定性的影响

为了进一步研究持续降雨对边坡安全系数的影响。软弱夹层取含水率29.18%对应的强度参数,并假定在计算过程中保持不变。在不同降雨持续时间条件下,通过渗流计算得到孔隙水压力,将其导入极限平衡分析模块进行稳定性计算,得到边坡安全系数随降雨时间的变化。本文取大暴雨条件进行分析,降雨强度设为10 mm/h,采用的降雨幅值曲线如

图 6 所示。为了更真实地模拟实际降雨情况,在前 3 h 降雨强度设为线性增加,其后保持稳定,总降雨时间设为 24 h。



(a) 含水率 $\le 26.1\%$



(b) 含水率 $> 26.1\%$

图 5 含水率变化条件下典型滑动面

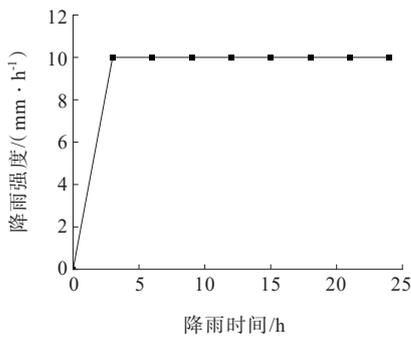


图 6 强降雨幅值曲线

计算得到的边坡安全系数与降雨时间的关系如图 7 所示。在软弱夹层参数不变的情况下,降雨入渗引起下滑力增大,在降雨 1~18 h 内,边坡破坏面集中在软弱夹层,典型滑动面如图 8(a)所示,安全系数随降雨时间变化不明显。持续降雨 18 h 后,边坡破坏模式改变,滑动面将穿过表层坡积土、位于软弱夹层部分减少,典型破坏模式如图 8(b)所示,安全系数随降雨时间增大下降幅度更快。降雨前、后土层饱和度变化如图 9 所示,边坡表面残坡积土受降雨入渗影响明显,降雨 24 h 后该土层饱和度急剧上升,地表附近土体接近饱和。地层饱和度增大将增加滑动面上

方坡体的自重,从而导致边坡下滑力增大和安全系数降低。

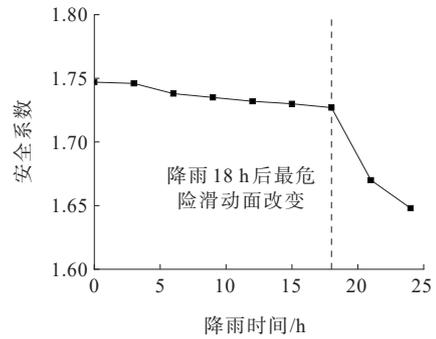
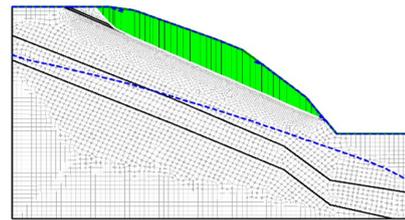
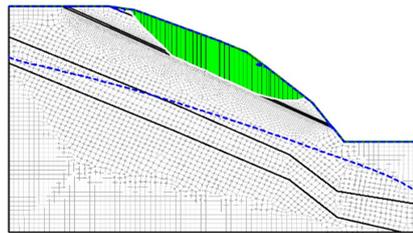


图 7 边坡安全系数随降雨时间变化情况

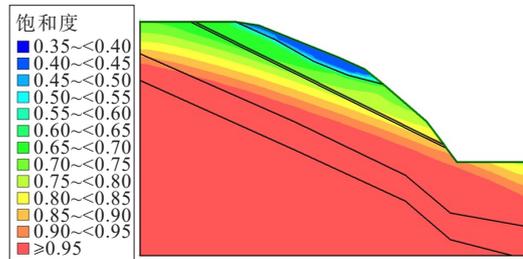


(a) 降雨 0~18 h 滑动面

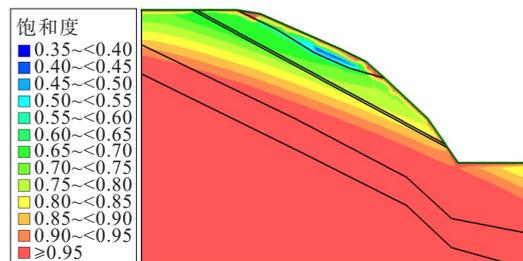


(b) 降雨 18~24 h 滑动面

图 8 降雨入渗条件下典型滑动面



(a) 降雨前饱和度分布



(b) 降雨 24 h 后饱和度分布

图 9 降雨前后饱和度变化情况

综上,可推断出降雨入渗透发含软岩夹层边坡安全系数下降的主要原因为:含水率增大导致软弱夹层土体强度参数降低,继而使抗滑力显著减小。而降雨入渗在早期对边坡稳定性影响较小,当降雨入渗累积到一定程度导致坡体自重增大后,降雨对边坡稳定性的影响比较明显。

## 4 结论

针对广西百色西林县某含软岩夹层公路边坡,研究软弱夹层强度参数随含水率的变化规律,并据此通过极限平衡法,分析含水率变化和降雨入渗条件下含软弱夹层顺层边坡的稳定性,获得边坡安全系数变化规律。得出的主要结论如下:

(1) 软夹层强度参数与含水率呈近似负指数关系,含水率增加导致软弱夹层强度参数降低。

(2) 对于边坡中的软弱夹层,存在一个临界含水率 $w_s$ ,当含水率低于 $w_s$ 时,边坡最危险滑动面为常见的坡脚圆模式;当含水率高于 $w_s$ 时,滑动面主要穿过软弱夹层,边坡安全系数明显降低。

(3) 分析降雨入渗对含软岩夹层顺层边坡的稳定性影响表明:随着雨水入渗导致的表层土体饱和度提高,滑面上方坡体自重增大,进而引发安全系数降低。当降雨时间达到一定值时,安全系数随降雨时间减小的速度明显增大,其破坏模式发生改变。

### 参考文献:

[1] 葛修润.岩体中节理面、软弱夹层等的力学性质和模拟分析方法(一)[J].岩土力学,1979(1):54-75.  
 [2] LU H F, LIU Q S, CHEN C X, et al. Experimental study on mechanical characteristic of weak interlayer in red-bed soft rock slope[J]. Energy Education Science and Technology Part A-Energy Science and Research, 2012, 30(1):467-474.  
 [3] MA C, ZHAN H B, ZHANG T, et al. Investigation on shear

behavior of soft interlayers by ring shear tests[J]. Engineering Geology, 2019, 254: 34-42.  
 [4] MA C, ZHAN H B, YAO W M, et al. A new shear rheological model for a soft interlayer with varying water content[J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(2): 131-138.  
 [5] 徐庆强,高起林,吴继敏,等.含薄层硬岩的软弱夹层力学特性研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(S2): 548-554.  
 [6] 夏怡,柳治国,邹飞,等.降雨对山区高速公路弃土场边坡稳定性影响分析[J].中外公路,2022,42(1):7-11.  
 [7] 陈贺,鲁志强,李果,等.滇西北高原山区不同降雨条件下斜坡深部响应的试验研究[J].中外公路,2023,43(1): 11-18.  
 [8] 彭楠琦,高惠瑛,吕文舒.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[J].中外公路,2022,42(2): 7-14.  
 [9] ZHENG Y, CHEN C X, LIU T T, et al. Analysis of a retrogressive landslide with double sliding surfaces: A case study[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(1): 1-23.  
 [10] 王保林,何忠明,胡庆国,等.降雨工况下不同软弱夹层出露面对黏性土坡稳定性影响分析[J].中外公路,2017, 37(6):15-19.  
 [11] HUANG M S, FAN X P, WANG H R. Three-dimensional upper bound stability analysis of slopes with weak interlayer based on rotational-translational mechanisms[J]. Engineering Geology, 2017, 223: 82-91.  
 [12] 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.  
 [13] 刘新喜,侯勇,戴毅,等.软弱夹层岩质边坡长期稳定性研究[J].中外公路,2017,37(4):21-24.  
 [14] 李健.广西碎屑岩典型区域软弱夹层强度特性及其对边坡稳定性影响研究[D].南宁:广西大学,2017.  
 [15] 张永闯.基于全尺寸斜面模型试验的降雨边坡破坏机理研究[J].中外公路,2023,43(2):43-50.  
 [16] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.