

何笃伟, 宿文姬, 张伟, 等. 削坡建房对粤东山区红色砂岩残积土边坡稳定性影响研究[J]. 华南地震, 2022, 42(2): 109-115. [HE Duwei, SU Wenji, ZHANG Wei, et al. Study on the Influence of Artificial Slope Cutting and Building on the Stability of Red Sandstone Residual Soil Slope in Eastern Guangdong Mountainous Area [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(2): 109-115]

削坡建房对粤东山区红色砂岩残积土 边坡稳定性影响研究

何笃伟¹, 宿文姬¹, 张伟², 郑志文², 符诗存²

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510640, 2. 广东省地质环境监测总站, 广州 510510)

摘要: 广东山区残积土边坡广泛分布, 同时由于当地居民大量削坡建房, 破坏了自然残积土边坡的稳定性, 在降雨的诱发条件下, 极易发生边坡失稳破坏, 引发地质灾害, 造成人员伤亡。因此, 研究削坡建房对残积土边坡稳定性的影响具有重要意义。基于粤东山区一典型红色砂岩残积土边坡, 通过室内试验得到土体物理力学参数, 采用有限元数值模拟方法及强度折减法进行边坡稳定性分析, 研究在无雨、梅雨及暴雨条件下, 不同削坡坡度、削坡坡高对红色砂岩残积土边坡稳定性的影响, 得到了山区居民削坡建房时削坡坡度和削坡坡高的限值, 为山区残积土边坡地质灾害防治工作提供参考依据。

关键词: 砂岩; 削坡建房; 边坡稳定性; 数值模拟

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)02-0109-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.02.15

Study on the Influence of Artificial Slope Cutting and Building on the Stability of Red Sandstone Residual Soil Slope in Eastern Guangdong Mountainous Area

HE Duwei¹, SU Wenji¹, ZHANG Wei², ZHENG Zhiwen², FU Shicun²

(1. South China University of Technology, Department of Civil Engineering, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Geological Environment Monitoring Station, Guangzhou 510510, China)

Abstract: The slopes of residual soil in the mountainous areas of Guangdong are widely distributed, and at the same time, due to the large number of local residents cutting slopes to build houses, the stability of the natural residual soil slopes is destroyed. Under the conditions induced by rainfall, it is very easy to occur slope instability and damage, causing geological disasters and casualties. Therefore, it is of great significance to study the

收稿日期: 2022-01-10

基金项目: 广东省自然资源厅科研项目(GDZRYKJ2020002)

作者简介: 何笃伟(1995-), 男, 本科, 主要从事边坡地质灾害防灾减灾研究。

E-mail: duwei_he@163.com

通信作者: 宿文姬(1969-), 女, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害防灾减灾研究。

E-mail: wjsu@scut.edu.cn

influence of slope cutting and building on the stability of the slope of residual soil. Based on a typical red sandstone residual soil slope in the mountainous area of eastern Guangdong Province, the physical and mechanical parameters of the soil body are obtained through laboratory tests, and the slope stability is analyzed by using the finite element numerical simulation method and intensity reduction method. The influence of different slope cutting slopes and slope cutting heights on the slope stability of red sandstone residual soil under the conditions of no rain, plum rain and heavy rain were discussed. The limit values of slope cutting slope and slope cutting height of slope cutting slopes were obtained when the residential buildings were built by slope cutting, which provides a reference for the prevention and control of geological disasters of residual soil slope of mountain residual.

Keywords: Sandstone; Cutting slope to build houses; Slope stability; Numerical simulation

0 引言

近几年来,由于广东地少人多,山区存在有大量的削坡建房活动,据不完全统计,仅广东省削坡建房超过30万处,导致大量崩塌、滑坡等地质灾害。在降雨条件下,削坡后的残积土边坡稳定性急剧下降,极易发生边坡失稳破坏,引发地质灾害,造成人员伤亡。因此,研究削坡建房对残积土边坡稳定性的影响对避免滑坡崩塌等地质灾害具有重要意义。

曾玲玉、方朝丰等^[1-2]人的研究成果表明:广东山区因山多田少,加上当地居民的传统观念——居家讲究“风水”,房子要“靠山”,因此,削坡建房现象屡见不鲜。削坡改变了原有的地质条件,损害了自然坡体的稳定性,此外,削坡的坡度过大,房屋与坡脚之间的距离过小,再加上坡面保护措施不当等问题,削坡建房后形成的人工边坡极易发生山体滑坡、崩塌、泥石流等灾害。吕生弟、赵志祥等^[3]对人工削坡坡度、削坡高度、削坡类型、岩土体结构、变形破坏形态等关系进行了统计分析,总结了李家水电站坝址区层状岩体人工边坡的三种变形破坏模式。一是顺层状边坡的顺层蠕(滑)移——弯曲变形机理;二是横向边坡的楔体滑动型;三是逆(反)倾层状边坡的倾倒(弯曲)—拉裂(折断)—滑移(坍塌)破坏机理。张佳佳^[4]以玉林地区为例,利用数值模拟分析了降雨、削坡对广西壮族自治区花岗岩残积土边坡的综合影响,研究了不同自然坡度、削坡坡高及削坡坡度对花岗岩残积土边坡稳定性的影响。得出了基本结论:削坡坡高越高,坡度越大,花岗岩残积土边坡越不稳定;同时,为广西玉林花岗岩残积土分布区的花岗岩残积土边坡提供了合理的削坡坡高和坡度范围,为地质灾害防治提供了有价值的指导和建议。JQ Zhuang等^[5]以白鹿

台地滑坡和以往滑坡事件的分析,提出了确定临界降水阈值和潜在风险距离的方程式,为认识和研究该类型滑坡的机理提供了重要参考,也为该地区今后的防灾减灾工作提供了指导。王浩等^[6]利用有限元数值分析方法对龙岩市永春至永定高速公路沿线超高切边坡K227的变形过程和破坏特征进行分析,数值结果表明快速开挖引起的扰动导致潜在的薄弱层被充分暴露,并切断了坡脚趾处的机械支撑,岩石的卸荷松弛和强度的减弱导致顶部的拉力裂缝,深层薄弱层的剪切蠕变以及边坡趾部的沿节点的剪切。该坡度总体上接近极限平衡状态,如果进一步开挖或发生强降雨,稳定性可能会突然降低。研究结论为边坡减灾方法提供了思路。综上所述,已有研究为人工削坡及降雨共同影响下边坡的稳定性提供了多种研究思路和分析方法,并对边坡防灾减灾有很好的指导意义。但是已有研究成果主要集中于路堑高边坡的研究,对山区居民削坡建房对残积土边坡稳定性影响的研究较少。

本文基于粤东山区一典型红色砂岩残积土边坡,通过室内试验得到土体物理力学参数,采用数值模拟分析及强度折减法进行边坡稳定性分析,研究在无雨、梅雨及暴雨条件下,不同削坡坡度、削坡坡高对红色砂岩残积土边坡稳定性的影响,得到了山区居民削坡建房时削坡坡度和削坡坡高的限值,为粤东山区残积土边坡地质灾害防治工作提供参考依据。

1 砂岩残积土边坡稳定性分析方法

1.1 典型砂岩残积土边坡工程概况

河源市紫金县上璜坑村滑坡地质灾害隐患点位于广东省东中部的紫金县水墩镇,河源市东南部、东江中游东岸。该隐患点位于丘陵地区,地形起伏

稍大，地形切割强烈，山坡原始坡形坡度 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ，相对高差约为 60 m，为粉质粘土(砂岩残积土)和风化砂岩组成的边坡。紫金县雨量充沛，1980年至2019年，年均降水量 1733.9 mm，大部分地区年均降水量在 1600~1900 mm 之间，最大日降雨量为 225.0 mm。紫金县平均年蒸发量为 1532.6 mm。年蒸发量最多为 1767.7 mm，最少为 1319.1 mm。一年中，7~9月蒸发量最多，平均各月蒸发量在 150 mm 以上；最少是 12月至次年 3月，平均

各月蒸发量均在 100 mm 以下。

1.2 数值分析模型与边界条件

红色砂岩残积土边坡典型地层分布及地形地貌见图 1。

通过该自然边坡地层分布特征，建立图 2 所示数值分析模型。计算模型左右边界采用滚动约束，限制水平位移；底部边界采用铰链约束。

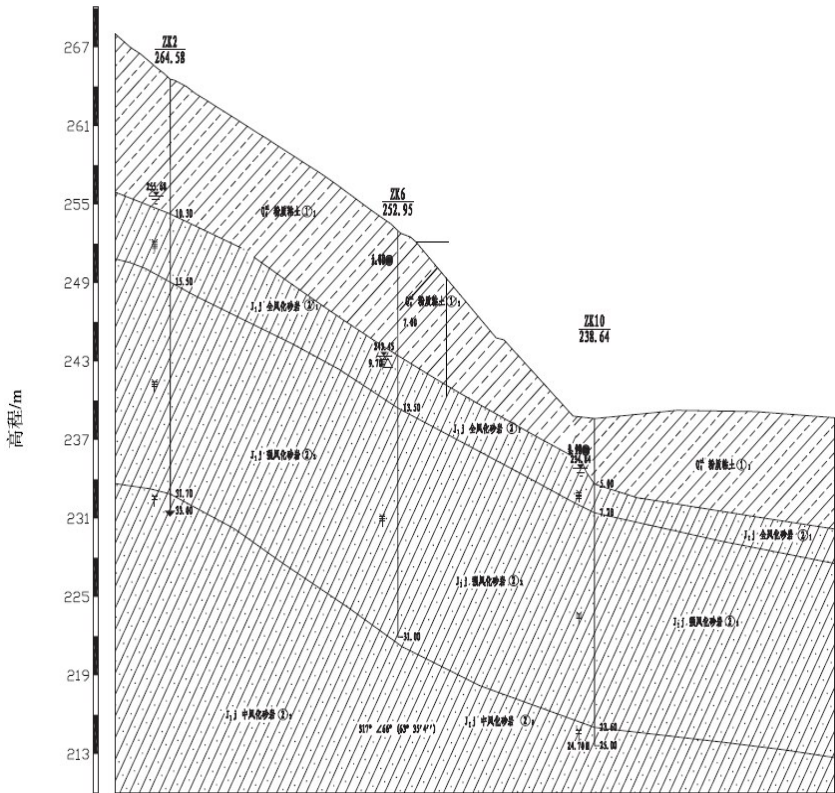


图1 红色砂岩残积土边坡典型地层分布及地形地貌图

Fig.1 Typical strata distribution and topographic landform map of red sandstone residual soil slope

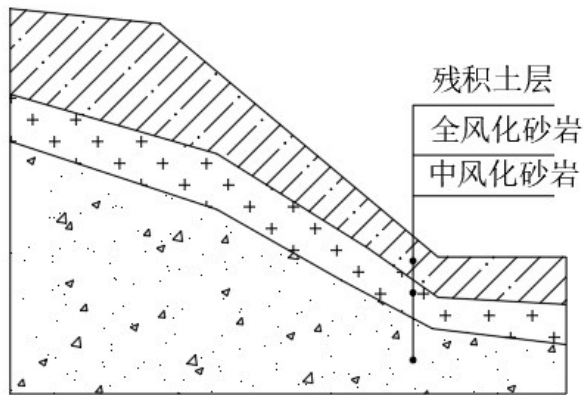


图2 砂岩残积土边坡数值分析模型

Fig.2 Numerical analysis model of red sandstone residual soil slope

该模型需考虑梅雨、暴雨条件下边坡的稳定性，因此，渗流分析方案如下：

(1)入渗初始条件

本文采用Fredlund提出的方法，以年平均降雨量作为边坡模型入渗量，稳态分析计算得到的边坡孔隙水压力分布作为后续瞬态分析的初始渗流场。

(2)边界条件

①边坡上表面为雨水入渗边界；当降雨强度小于土体入渗能力时，假设雨水全部渗入土体，此时降雨强度即为入渗流量；当降雨强度大于土体入渗能力时，假设坡面不产生积水，则为定水头边界，水头值为地表高度。

②在实际中，地下水渗流可能沿着坡面流出，因此需要将坡面定为逸出边界，并在计算中不断检查调整(Potential Seepage Face Review)，最终得到正确的逸出面。

③边坡模型两侧及底侧均为不透水边界。

1.3 降雨及人工削坡数值模拟方案

1.3.1 降雨模拟方案

粤东山区地处亚热带季风山地气候区，一年中呈现出明显的三个降雨特征：3~5月为多雨季，表现为雨区广，强度较大，雨时长，地质灾害频有发生；6~9月为台风暴雨季，表现为台风暴雨或大暴雨，雨量大且集中，强度极大，是地质灾害易发期；10月至翌年2月为少雨季，表现为降雨稀少，地质灾害极少发生。因此，本文选择梅雨和台风暴雨两个典型降雨条件下，研究削坡建房对红色砂岩残积土边坡稳定性的影响，降雨数值模拟方案见表1所示。

表 1 降雨模拟方案 Table 1 Rainfall simulation scheme			
工况	降雨历时/d	雨量/mm	降雨等级
梅雨	6	20	中雨
台风暴雨	1	225	20年一遇暴雨

1.3.2 削坡方案

粤东山区人工边坡地质灾害的调查结果表明，粤东山区居民削坡建房时，削坡高度均在6~15m之间，削坡坡度则在50°~70°之间；直线型人工边坡因其施工方便，操作简单，削坡建房时被大量采用，占比超过人工削坡坡形一半以上；人工削坡特征具体统计情况见表2。

表 2 粤东砂岩残积土边坡人工削坡特征统计
Table 2 Statistics on the characteristics of artificial slope cutting of sandstone residual soil slope in eastern Guangdong

削坡特征	分级标准	占比/(%)
高度	5~10 m	45.60
	10~15 m	19.38
	其它	35.02
坡度	45°~ 55°	12.92
	55°~ 65°	33.82
	65°~ 75°	33.26
	其它	20
坡形	凸形	10.33
	凹形	11.34
	直线形	55.47
	阶梯形	22.86

因此，削坡模拟方案以人工削坡坡形为直线型，削坡坡度为50°、55°、60°、65°以及70°，削坡坡高为：6 m、9 m、12 m、以及15 m的工况进行正交，得出相应的数值分析模型；人工削坡模拟方案见表3所示。

表 3 人工削坡模拟方案 Table 3 Artificial slope cutting simulation scheme		
残积土边坡类型	削坡高度/m	削坡坡度/(°)
红色砂岩残积土边坡	分别按6 m、9 m、12 m、15 m的削坡高度进行模拟分析	分别按50°、55°、60°、65°、70°的削坡坡度进行模拟分析

按照《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509-2020)中，根据滑坡灾害可能造成的经济损失和威胁对象等因素进行划分(见表4)，无特殊情况时人工削坡后形成的人工边坡可归为Ⅲ级滑坡防治工程。

表 4 滑坡防治工程重要性等级划分表 Table 4 Classification of importance level of landslide prevention and control works				
滑坡防治工程等级	特级	I级	Ⅱ级	Ⅲ级
威胁人数(N)	$N \geq 5000$	$500 \leq N < 5000$	$100 \leq N < 500$	$N < 100$
威胁设施	非常重要	重要	较重要	一般

1.4 土体参数

根据室内试验数据, 岩土层计算参数(表 5), 土水特征曲线(SWCC)试验数据(脱湿曲线)(表 6)如下所示。

表 5 红色砂岩岩土体计算参数取值

Table 5 Calculation parameters of red sandstone rock and soil mass

岩土层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\gamma'/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	e	$I_c/(\text{kPa})$	$\varphi/(\text{°})$
红色砂岩残积土	18.8	19.4	0.86	42.1	18.4
全风化红色砂岩	20	21	0.79	30	25
强风化红色砂岩	21	22	0.72	35	30

表 6 各级基质吸力下对应的红色砂岩残积土体积含水率

Table 6 Volume moisture content of red sandstone residual soil under matrix suction at all levels

基质吸力/ (kPa)	含水率/ $(\%)$
0	45.05
10	34.78
20	28.15
100	24.24
500	18.52
1000	15.92

试验数据采用 Van Genuchten 模型进行拟合, 其表达式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + a\psi^n)^m}$$

(1)

式(1)中: θ 为体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; ψ 为基质吸力(kPa); a 、 n 、 m 为拟合参数, 通常可取 $m = (n - 1)/n$, 此时 VG 模型简化为 Mualem 模型只有两个拟合参数, 形式简单, 应用方便, 是岩土工程中常用的模型。

考虑基质吸力对非饱和渗透系数的影响, 非饱和渗透系数函数使用 Van Genuchten-Mualem 模型进行拟合(式(2))。

$$k_w = k_s \frac{\left[1 - (a\psi)^{(n-1)} \left(1 + (a\psi)^n\right)^{-m}\right]^2}{\left(1 + (a\psi)^n\right)^{m/2}}$$

(2)

式(2)中: a 为与进气值有关的参数; n 、 m 为拟合参数, 取 $m = (n - 1)/n$ 。红色砂岩残积土边坡非饱和和渗流分析时各岩土层的计算参数见表 7。

表 7 各岩土层非饱和和渗流计算参数

Table 7 Unsaturated seepage calculation parameters of rock and soil layers

岩土层	土水特征曲线参数				渗透系数参数	
	a/kPa	n	$\theta_s/(\%)$	$\theta_r/(\%)$	n	$K_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
红色砂岩残积土	0.097	1.19	45.05	4.15	1.19	1.95e-7
全风化红色砂岩	0.091	1.22	42.13	8.62	1.22	0.71e-7
强风化红色砂岩	0.083	1.25	39.62	10.26	1.25	4.4e-8

1.5 稳定性评价方法

根据红色砂岩残积土边坡各岩土层抗剪强度参数, 采用强度折减法求取边坡稳定系数, 进行边坡稳定性分析。强度折减法是将岩土体抗剪强度参数 c 、 φ 值同时除以一个折减系数 F , 得到折减后的岩土体抗剪强度 c' 、 φ' 值; 不断改变折减系数 F , 当边坡处于临界状态时, 边坡将发生破坏, 此时的 F 被称为边坡的稳定系数, 具体公式为:

$$c' = \frac{c}{F}$$

(3)

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F}\right)$$

(4)

运用有限元强度折减法研究分析边坡的稳定性时, 得到的稳定安全系数以及临界滑动面等结果与传统的稳定性分析方法得到的结果比较接近, 误差较小, 强度折减法可以作为边坡稳定性分析方法进行运用^[7]。本文采用强度折减法计算边坡稳定系数时, 将岩土体假设成理想弹塑性体, 本构模型采用 Mohr - Coulomb 准则。边坡失稳判定依据为: 当边坡失稳破坏时, 部分岩土体滑出, 产生较大的位移和塑性变形, 边坡破坏的特征为位移和塑性应变处于无限塑性流动状态, 在计算中表现为不收敛。

2 人工削坡对红色砂岩残积土边坡稳定性影响分析

根据前文中降雨及人工削坡数值模拟方案, 采

用Midas GTS NX岩土分析软件,计算各种人工削坡工况下红色砂岩残积土边坡的稳定系数。表8为有无降雨条件下自然边坡的稳定性,表9、表10及表11分别为人工削坡后无雨、梅雨和暴雨条件下人工削坡后红色砂岩残积土边坡稳定系数变化情况。

表 8 红色砂岩残积土自然边坡稳定系数变化表
Table 8 Variation of natural slope stability coefficient of red sandstone residual soil

自然边坡	无雨	梅雨	暴雨
稳定系数	1.427	1.427	1.344

表 9 人工削坡后无雨条件下红色砂岩残积土边坡稳定系数
Table 9 Slope stability coefficient of red sandstone residual soil without rain after manual slope cutting

削坡坡度/(°)	削坡坡高/m			
	6	9	12	15
50	1.301	1.316	1.225	1.173
55	1.277	1.291	1.182	1.128
60	1.255	1.266	1.155	1.11
65	1.234	1.25	1.152	1.088
70	1.131	1.177	1.094	1.019

表 10 人工削坡后梅雨条件下红色砂岩残积土边坡稳定系数
Table 10 Stability coefficient of red sandstone residual soil slope under plum rains condition after artificial slope cutting

削坡坡度/(°)	削坡坡高/m			
	6	9	12	15
50	1.225	1.269	1.175	1.152
55	1.206	1.234	1.143	1.083
60	1.173	1.216	1.131	1.056
65	1.144	1.200	1.127	1.052
70	1.131	1.177	1.094	1.019

表 11 人工削坡后暴雨条件下红色砂岩残积土边坡稳定系数
Table 11 Stability coefficient of red sandstone residual soil slope under rainstorm after artificial slope cutting

削坡坡度/(°)	削坡坡高/m			
	6	9	12	15
50	1.294	1.301	1.213	1.163
55	1.250	1.278	1.166	1.100
60	1.232	1.250	1.145	1.075
65	1.215	1.225	1.138	1.051
70	1.150	1.207	1.119	1.050

由表8、表9、表10及表11可知,红色砂岩残积土边坡经过人工削坡后,边坡的稳定性显著降低;而在梅雨或暴雨条件下,边坡的稳定性系数加剧减小,大部分人工削坡工况下的边坡稳定系数小于边坡稳定安全系数,没有达到《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509-2020)中对Ⅲ级滑坡防治工程的要求(表12),即无雨工况下: $F_s \geq 1.2$;有雨工况下 $F_s \geq 1.15$ 。

表 12 滑坡抗滑稳定设计安全系数取值表
Table 12 Safety factor values for stability design of landslide

防治等级	设计		校核	
	工况 I	工况 II	工况 III	工况 IV
I 级	1.30	1.25	1.15	1.05
II 级	1.25	1.20	1.10	1.02
III 级	1.20	1.15	1.05	不考虑

注:工况 I——基本组合,考虑基本荷载;
工况 II——特殊组合,考虑基本荷载+降雨荷载;
工况 III——特殊组合,考虑基本荷载+地震荷载;
工况 IV——特殊组合,考虑基本荷载+降雨荷载+地震荷载。

2.1 削坡坡高对边坡稳定性的影响分析

由表9、表10及表11可以得到以下结论:
(1)6 m削坡坡高的边坡稳定系数在三种工况下均小于9 m削坡坡高边坡,这是因为削坡坡高较小时,削坡土方量较小,边坡上覆岩土体重量较大,土体的下滑力较大,在坡角处容易形成应力集中,从而在坡脚处更易破坏。因此,6 m削坡坡高的边坡稳定系数更低,边坡稳定性更差,这与实际情况相符。
(2)削坡坡高大于9 m时,在一定削坡坡度下,边坡的稳定系数随着削坡坡高的增大而显著降低,这说明当红色砂岩残积土边坡在较高坡高的人工削坡影响下,边坡稳定较差。
分析以上数值模拟结果可知,削坡坡高显著影响红色砂岩残积土边坡的稳定性;即使在50°削坡坡度、6 m削坡坡高的工况下,红色砂岩残积土边坡的稳定系数也明显减小,即边坡稳定性明显变差。根据《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509-2020)中对Ⅲ级滑坡防治工程的要求,对于自然坡度为40°左右的红色砂岩残积土边坡,可以给出如下人工削坡建议:
(1)应尽量避免在砂岩残积土自然边坡坡角处

进行小于削坡坡高小于6 m的人工削坡;坡角处大坡度、低坡高的削坡活动会大大降低红色砂岩残积土边坡的稳定性。因此,当无法避免在坡角处进行低坡高削坡时,削坡坡度应小于 60° ;

(2)当边坡削坡坡高分别为9 m、12 m时,削坡坡度应分别控制在 70° 、 50° ;

(3)不建议裸坡高度高于12 m的人工削坡建房活动;当削坡高度大于12 m时,应采用分级削坡。

2.2 削坡坡度对边坡稳定性的影响分析

由表9、表10及表11可以发现:

(1)无雨、梅雨及暴雨工况作用下,削坡坡高固定时,边坡稳定系数均随着切坡坡度的增大而逐渐减小,这是因为滑坡易从较陡的临空面的滑出,临空面越陡,临空面处的滑动土下滑力更大。

(2)在无雨、梅雨两种工况下,削坡坡高小于9 m时,红色砂岩残积土边坡稳定系数随着削坡坡度的增大而近似线性减小;削坡坡高大于12 m时,红色砂岩残积土边坡稳定系数随削坡坡度增大而大幅度减小,这说明削坡坡高大于12 m时,削坡坡度对红色砂岩残积土边坡稳定性影响很大;此时,削坡坡度越大,边坡更容易出现失稳破坏,从而引发地质灾害。

(3)在暴雨工况,6 m削坡坡高情况下,在削坡坡度大于 65° 时,红色砂岩残积土边坡的稳定系数急剧减小,这是因为低削坡坡高情况下,边坡表层残积土厚度较厚,利于雨水入渗边坡土体,当削坡坡度较大时,便极易从削坡处形成剪出口,从而导致边坡破坏。

综上所述,人工削坡的坡度对红色砂岩残积土边坡的稳定性影响很大,在一定削坡坡高条件下,削坡坡度越大,红色砂岩残积土边坡的稳定系数越低。根据数值模拟结果,对于自然坡度为 40° 左右的红色砂岩残积土边坡,可以给出如下人工削坡建议:

(1)当削坡坡度分别为 50° 、 55° 、 60° 时,削坡坡高应分别控制在12 m、9 m、9 m以内;

(2)不建议削坡坡度超过 65° 。

3 结论

本文选取了粤东山区一典型红色砂岩残积土边坡,探讨了在无雨、梅雨及暴雨条件下,不同

削坡坡度、削坡坡高在无雨及降雨工况下对红色砂岩残积土边坡稳定性的影响,总结如下:

(1)人工削坡的坡高显著影响红色砂岩残积土边坡的稳定性,应尽量避免在砂岩残积土自然边坡坡角处进行削坡坡高小于6 m的人工削坡;当边坡削坡坡高分别为9 m、12 m时,削坡坡度应分别控制在 70° 、 50° ;并且不建议裸坡高度高于12 m的人工削坡建房活动;当削坡高度大于12 m时,应采用分级削坡。

(2)人工削坡的坡度对红色砂岩残积土边坡的稳定性影响很大,为避免发生滑坡、崩塌等地质灾害,当削坡坡度分别为 50° 、 55° 、 60° 时,削坡坡高应分别控制在12 m、9 m、9 m以内;此外,不建议削坡坡度超过 65° 。

(3)本文选取了粤东山区一典型红色砂岩残积土边坡,计算了在无雨、梅雨及暴雨条件下,不同削坡坡度、削坡坡高对红色砂岩残积土边坡稳定性的影响,研究结果与实际调查结果相符,对实际工程有一定指导意义。

参考文献

- [1] 方朝丰. 广东省地质灾害防治现状和对策研究 [J]. 西部资源, 2018(4): 112-4.
- [2] 曾玲玉. 广东梅州客家居民削坡建房与泥石流灾害 [J]. 四川地质学报, 2007(4): 285-7.
- [3] 吕生弟, 赵志祥, 叶文芳. 李家峡层状岩体人工开挖边坡变形破坏模式研究 [J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(z1): 328-32.
- [4] 张佳佳. 切坡和降雨对广西花岗岩残积土滑坡的影响研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [5] ZHUANG J Q, PENG J B. A coupled slope cutting—a prolonged rainfall-induced loess landslide: a 17 October 2011 case study [J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2014, 73(4): 997-1011.
- [6] WANG H, WANG X D, PAN J. A Case study of super-high cut slope I: simulation and analysis of instability mechanism simulation of slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 899-909.
- [7] 程灿宇, 罗富荣, 戚承志, 等. 有限元强度折减法计算边坡稳定的对比分析 [J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 277-83.