

湖南省桑植县碎屑岩切坡参数特征 与稳定性数值模拟研究

李江, 王潇*, 何阳, 姚海鹏, 曹顺红
湖南省地质调查所, 湖南 长沙 410114
DOI:10.61369/ME.2026010023

摘 要 : 湘西北桑植县一带出露的志留系、泥盆系碎屑岩地层是该地区滑坡地质灾害频发的主要地层之一, 属易滑易崩地层, 本文通过对桑植县内的建房切坡点数据进行统计分析, 得出不同切坡参数参与与稳定性之间的关系, 并在此基础上, 利用 Geo-Studio 软件对典型的碎屑岩滑坡进行切坡距离 + 切坡坡度不同工况的数值模拟, 探索其稳定性的变化规律。通过研究提出该地区碎屑岩切坡的稳定切坡参数建议值, 为该地区农村居民切坡建房管理、地质灾害防治管理提供科学的指导及参考意义。

关 键 词 : 切坡; 滑坡; 稳定性分析; 数值模拟

Study on the Characteristics of Slope Cutting Parameters and Numerical Simulation of Stability of Clastic Rocks in Sangzhi County, Hunan Province

Li Jiang, Wang Xiao*, He Yang, Yao Haipeng, Cao Shunhong
Hunan Institute of Geological Survey, Changsha, Hunan 410114

Abstract : The Silurian and Devonian clastic rock strata exposed in Sangzhi County in northwestern Hunan are among the main strata prone to landslide geological disasters in the region and belong to landslide- and collapse-prone strata. This paper conducts statistical analysis on the data of slope cutting points for house construction in Sangzhi County to obtain the relationship between different slope cutting parameters and slope stability. On this basis, the Geo-Studio software is used to carry out numerical simulations of typical clastic rock landslides under different working conditions of slope cutting distance and slope cutting gradient, so as to explore the variation law of their stability. Through the research, the recommended values of stable slope cutting parameters for clastic rock slope cutting in the region are proposed, which provide scientific guidance and reference significance for the management of slope cutting for rural residential house construction and the prevention and control of geological disasters in the region.

Keywords : slope cutting; landslide; stability analysis; numerical simulation

引言

碎屑岩是由砾石、砂、泥等碎屑物质经固结作用形成的沉积岩, 主要形成砂岩、泥岩、页岩等。由于其具有显著的非均质性和各向异性。近年来, 碎屑岩边坡稳定性问题日益突出, 关于切坡参数与边坡的稳定性关系, 受到学者关注。

胡丁水^[1]对甘肃靖远县417户切坡建房点进行了系统研究, 发现随着开挖高度和坡度的增大, 边坡稳定性显著降低, 而开挖宽度影响相对较小。秦萌萌等^[2]发现切坡坡高对稳定性的影响大于坡度。毕晨洁^[3]对江西上饶土质边坡的模拟表明, 切坡角度增大导致边坡卸荷回弹或应力集中, 稳定性显著降低。张玉玺^[4]研究了马迹山港岩质边坡的稳定性, 发现人工切坡形成的裂隙破坏了岩体完整性, 导致局部块体滑移。郭志明等^[5]针对三峡库区顺向切坡的灰岩边坡, 提出结构面产状和力学性质是稳定性的主控因素。吴述或^[6]通过 CSMR 法和极限平衡法分析了竹子坝料场岩质高边坡的稳定性, 指出人工切坡诱发的楔形体滑动是主要破坏模式。在切坡参数的系统性研究方面, 胡丁水^[1]通过统计分析得出, 开挖高度超过9m、坡度超过60° 时边坡风险显著增加。黄德国等^[7]对金寨县切坡引发的崩塌统计发现, 坡度50° 的切坡最易失稳。韦文智^[8]通过主应力和偏应力增量界定了切坡卸荷带范围, 提出应力衰减区可作为切坡稳定性的评价指标。目前国内学者普遍认为合理控制切坡参数是预防边坡失稳的关键。

资助项目: 湖南省自然科学基金项目(编号: 2025JJ80053)、湖南省自然科学基金项目(编号: 2025JJ80042)。

作者简介: 李江(1989-), 男, 湖南永州人, 工程师, 主要从事水工环地质工作。

通讯作者: 王潇(1987-), 男, 湖南保靖人, 高级工程师, 主要从事水工环地质工作。

一、碎屑岩区切坡参数特征

本次研究共计针对桑植县的3499个建房切坡点进行系统研究。切坡特征主要较多，本文从切坡高度、坡度、坡脚距离、斜

坡结构、剖面形态5个切坡自身参数方面进行统计，论述与边坡稳定性之间的关系。本次碎屑岩切坡一共3499个，其中中高风险切坡403个。

表1 研究区碎屑岩切坡参数特征统计表

切坡特征	特征分类	总数量（处）	占总数比	中高风险数量（处）	中高风险占比
切坡高度	≤3m	1369	39.13%	74	5.41%
	3-5m	1547	44.21%	192	12.41%
	5-7m	377	10.77%	79	20.95%
	7-9m	130	3.72%	37	28.46%
	>9m	76	2.17%	21	27.63%
切坡坡度	≤30°	97	2.77%	3	3.09%
	30-40°	86	2.46%	5	5.81%
	40-50°	366	10.46%	27	7.38%
	50-60°	860	24.58%	91	10.58%
	60-70°	1322	37.78%	194	14.67%
	>70°	768	21.95%	83	10.81%
坡脚距离	0-1m	2268	64.82%	276	12.17%
	1-2m	976	27.89%	110	11.27%
	2-3m	143	4.09%	15	10.49%
	3-5m	40	1.14%	2	5.00%
	>5m	72	2.06%	0	0.00%
斜坡结构	横向坡	1015	29.01%	118	11.63%
	近水平层状坡	32	0.91%	2	6.25%
	逆向坡	411	11.75%	43	10.46%
	切向坡	1029	29.41%	118	11.47%
	顺向坡	716	20.46%	102	14.25%
	块状岩体斜坡	26	0.74%	1	3.85%
剖面形态	土质斜坡	269	7.69%	19	7.06%
	凹	40	1.14%	14	35.00%
	阶	254	7.26%	14	5.51%
	凸	73	2.09%	20	27.40%
	直	3132	89.51%	355	11.33%

1.切坡高度：其中切坡高≤3m，占比39.13%；切坡高3-5m，占比44.21%；切坡高5-7m，占比10.77%；切坡高7-9m，占比3.72%；切坡高于9m，占比2.17%。可知，切坡高度一般在<7m的范围之内，为区内主要切坡高度。每个切坡分段中高风险切坡的占比整体呈线性升高的趋势，充分的说明在研究区切坡高度越高，风险性越高，对坡体稳定性影响越大，即稳定性越差。

2.切坡坡度：切坡坡度≤30°占比2.77%；30-40°占比2.46%；40-50°占比10.46%；50-60°占比24.58%；60-70°占比37.78%；>70°占比21.95%。可知，坡度总体逐步增高的趋势，到60-70°为峰值。这是由于切坡坡度越大，切坡水平距离越大，所占用的面积越小，居民也更容易开挖。中高风险占比基本也是60-70°最多。总体上切坡坡度越大，风险性越高，对坡体稳定性影响越大，即稳定性越差。

3.切坡坡脚距离：坡脚距离0-1m占比64.82%；1-2m占比27.89%；2-3m占比4.09%；3-5m占比1.114%；>5m占比2.06%。区内切坡的坡脚距离总体上距离越大，数量越小，多数集中在<1m的距离，由于研究区的碎屑岩多为山区，说明老百姓大

部分的切坡临坡切坡。重要的一个原因就是房屋建筑面积小，想要尽量的节省屋后空间，且开挖面积小。在坡脚距离各区间中，中高风险的占比是逐步减少的，总体上当坡脚距离小于3m的时候，切坡的风险性相对较高，当大于3m的时候，说明一般小的切坡即使发生变形破坏，对房屋及人员的威胁相对较小。

4.切坡斜坡结构：横向坡占比29.01%；近水平坡占比0.91%；逆向坡占比11.75%；切向坡占比29.41%；顺向坡占比20.46%；块状岩体坡占比0.74%；土质坡占比7.69%。总体上以横向坡、切向坡以及顺向坡为主。在各种斜坡结构类型中，中风险切坡占比最高为顺向坡（14.25%），最少为块状岩体斜坡（3.85%）。

5.切坡剖面形态：切坡剖面形态中凹形坡占比1.14%；阶梯形占比7.26%；凸形坡占比2.09%；直线形坡占比89.51%。可见以直线形坡为主，主要原因是切坡的高度不高，且多数居民没有分级切坡的意识。在各种的切坡形态当红，中高风险占比依次为凹形坡（35%），凸形坡（27.4%），直线形坡（11.33%），阶梯形坡（5.51%）。凹形坡导致边坡失稳的可能性最大，说明在研究区域碎屑岩切坡表层受风化剥蚀，形成凹面，有利于汇水，导致边坡失稳。

二、典型碎屑岩切坡稳定性数值模拟

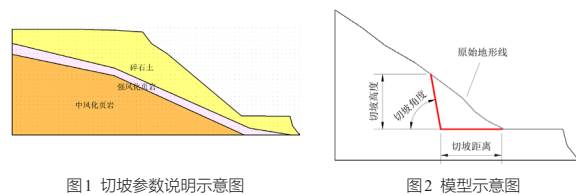
选择区内典型的泥页岩边坡为研究对象,采用 Geo-Studio 软件的 SLOPE/W 模块进行滑坡的稳定性数值模拟。

(一) 模拟点特征

选择桑植县八大公山镇笔架山村安家界组滑坡,该是区内典型的在切坡作用下引发的滑坡,滑坡体纵长31.0m,横宽平均53.0m,平面面积约1440m²,滑体厚度2.60~6.30m,平均滑体厚度4.26m,总体积约6000m³,主滑方向84°,滑动面为碎石土中下部及强风化岩接触面,属于小型浅层牵引式土质滑坡。滑坡处物质组成从上到下分别为碎石土,强风化泥页岩,中风化泥页岩。

(二) 模型构建及参数选取

1.根据收集勘察报告,选择滑坡的主剖面构建二维模型,模型尺寸包含滑坡区及周边,比滑坡范围大,分析模型简化为长67m,高24.6m,见图1。



2.根据工程上常用的切坡角度和切坡距离,本次的切坡角度 α 取40°、50°、60°、70°和80°,切坡距离L取3m、5m、

7m、9m。探索不同切坡距离及切坡坡度组合工况下,边坡的稳定性变化,本次仅考虑单一切坡的影响,不考虑降雨等其他影响因素的影响,切坡距离指的是从原始地形线坡角垂直开挖进斜坡的水平距离,见图2。

3.根据滑坡勘察报告以及反演分析得到滑坡模型的分层信息以及各层岩土体物理力学参数。具体参数见表2。

表2 典型滑坡点岩土体主要物理力学参数

分层编号	岩土体名称	重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 C (kPa)	内摩擦角 Φ (°)
第一层	碎石土	22	13.5	25.5
第二层	强风化泥页岩	23.5	45	18.0
第三层	中风化泥页岩	24.5	180	22.5

(三) 模拟结果分析

在 Geo-Studio 软件,构建模型及填充材料后,自动选择最不利滑面,得到不同切坡角度,不同切坡距离下滑坡潜在滑动面及对应的稳定系数,见图3。可见切坡距离3m,切坡角度从40°~80°,稳定系数从1.228减少到1.098。切坡距离5m,切坡角度从40°~80°,稳定系数从1.221减少到0.937。切坡距离7m,切坡角度从40°~80°,稳定系数从1.206减少到0.891。切坡距离8m,切坡角度从40°~80°,稳定系数从1.047减少到0.870。同时可以看出,不同的切坡组合工况下,边坡潜在的滑动面是不一致的,但总体上剪出口均位于坡脚一带,且随着切坡坡度的增加,剪出口越靠近坡脚水平地面。

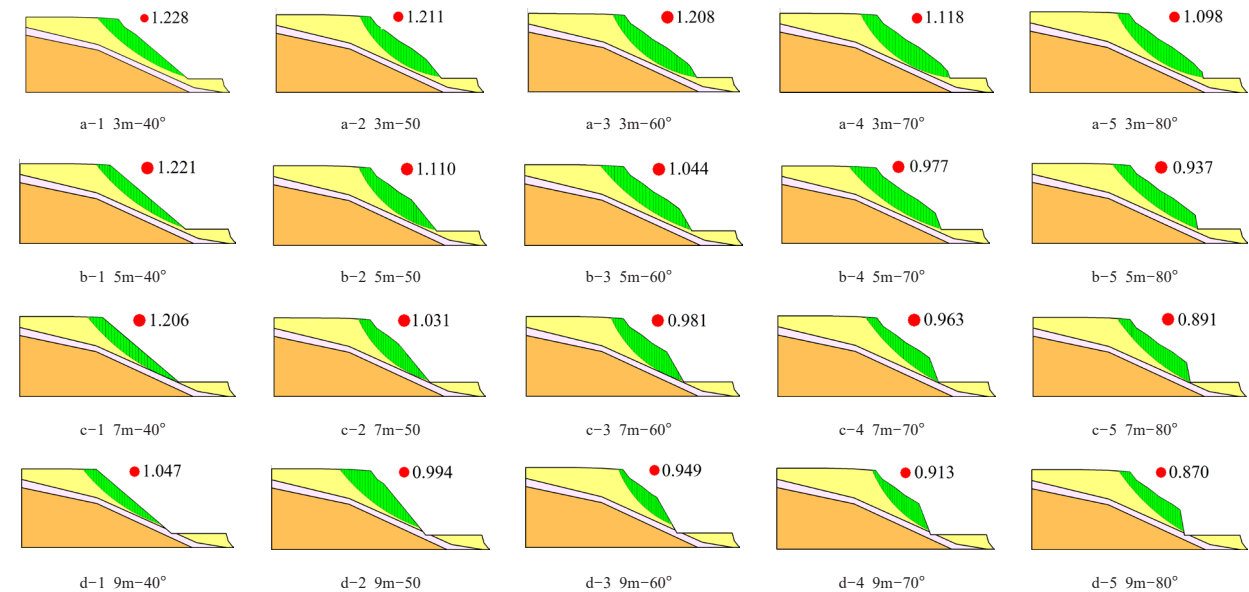


图3 不同切坡距离和切坡角度工况下滑坡模拟结果

根据计算的结果,绘制切坡角度变化、切坡距离变化对稳定系数的影响曲线图,见图4。图4-a中,随着切坡角度的增大,不同的切坡距离(3m、5m、7m和9m)稳定系数均减小趋势,其中在3m的切坡距离下,40~60°的切坡坡度下,稳定系数降低较慢,大于60°以后,极速减小,而9m的切坡距离下,总体稳定系

数减小呈直线型。可以说明,切坡距离越大,边坡的稳定系数减小的约越明显,这表明较大的切坡角度和切坡距离会导致边坡稳定性显著降低。图4-b中,同样可以看出,切坡坡度越大,稳定系数变化的约明显。从两者对稳定系数影响的程度来看,切坡角度的影响是大于切坡距离的。

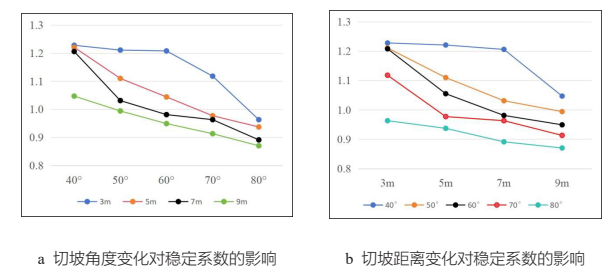


图4 稳定系数与切坡角度和切坡距离的关系

三、切坡参数优化建议

(一) 切坡参数优化

参考《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864-2016)表7之规定,对于边坡稳定性的判别标准如下表。

表3 滑坡稳定状态划分

滑坡稳定系数 F_s	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < 1.15$	$F_s \geq 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

根据表3,结合图3,看出该滑坡在切坡距离3m,切坡角度达到80°时处于欠稳定状态,切坡距离5m,切坡角度达到60°时处于欠稳定状态,切坡距离7m,切坡角度达到50°时处于欠稳定状态,而切坡角度9m,切坡角度40°时已处于欠稳定状态。

通过前面的统计分析数值模拟结果,提出泥页岩切坡稳定状态($F_s \geq 1.15$)的切坡参数建议表,见表4。

表4 泥页岩切坡参数建议表

切坡距离	建议切坡角度	折算坡比	备注
3m	$\leq 60^\circ$	$\leq 1:0.577$	
5m	$\leq 40^\circ$	$\leq 1:1.192$	
7m	$\leq 40^\circ$	$\leq 1:1.192$	
9m	$\leq 30^\circ$	$\leq 1:1.732$	

(二) 切坡参数校核

选择筛选切坡为主要诱发因素的33个泥页岩滑坡、189个中高风险切坡。利用斜坡距离、切坡坡度对表4切坡参数建表进行检验。检验结果(表5,表6):滑坡中有29个滑坡的切坡距离及切

坡坡度在表4建议值之外,占比93.55%;中高风险切坡建房中,有178个中风险以上的切坡切坡距离及切坡坡度在表4建议值之外,占比94.18%。

表5 泥页岩切坡引起的滑坡统计表

切坡距离	切坡坡度°					备注
	30-40°	40-50°	50-60°	60-70°	> 70°	
1-3m	0	0	1	1	2	
3-5m	1	2	4	4	0	
5-7m	1	0	2	0	2	
7-9m	1	1	1	1	1	
> 9m	0	2	2	3	1	

表6 中高风险泥页岩切坡统计表

切坡距离	切坡坡度°					备注
	30-40°	40-50°	50-60°	60-70°	> 70°	
$\leq 3m$	0	1	8	39	30	
3-5m	0	6	26	43	9	
5-7m	0	3	8	9	0	
7-9m	1	1	1	2	0	
> 9m	1	0	1	0	0	

通过表5及表6的验证结果。可以看出表4提出的稳定切坡参数建议值有效,能较好的代表该地区泥页岩切坡的取值范围。

四、结论

1.区内的中高风险切坡中,坡度越高风险性增加,坡高>5m时,风险性显著增加;坡度以60-70°区间为主;坡脚距离以<1m为主,坡脚距离越大,风险性逐步减小;斜坡结构中,中高风险发育数量依次为顺向坡,横向坡,切向坡,逆向坡,土质类斜坡,近水平坡,块状岩体斜坡;坡形中,中高风险发育数量依次为凹形坡,凸形坡,直线形坡,阶梯形坡。

2.区内碎屑岩中的泥页岩切坡,其切坡参数宜控制在切坡距离3m时,切坡坡度 $\leq 60^\circ$;切坡距离5-7m时,切坡坡度 $\leq 40^\circ$;切坡距离9m时,切坡坡度宜 $\leq 30^\circ$ 。经切坡引起的滑坡、中高风险切坡验证,切坡参数建议值基本适宜本区,可以作为本区泥页岩地层的切坡参数建议值。

参考文献

[1] 胡丁水.黄土区乡镇切坡建房调查及其对边坡稳定性的影响研究[D].兰州:兰州大学,2023.
[2] 秦萌萌,岳豪康.人工切坡对双峰县土质边坡稳定性的影响[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2025,35(1):21-24,38.
[3] 毕晨洁.江西上饶地区典型土质边坡稳定性有限元数值模拟[D].南昌:东华理工大学,2022.
[4] 张玉玺.马迹山港东山岩质边坡稳定性研究[D].武汉:中国地质大学,2009.
[5] 郭志明,陈加红,铁春瑞.岩质顺向人工切坡稳定性分析和治理方案分析——以三峡库区湖北省巴东县溪丘湾集镇居民点高切坡为例[J].才智,2009(4):30-31.
[6] 吴述斌.官地水电站竹子坝料场岩质高边坡稳定性研究[D].武汉:中国地质大学,2011.
[7] 黄德国.金寨县地质灾害特征及典型灾害形成机理研究[D].西安:长安大学,2013.
[8] 韦文智.容县花岗岩残积土边坡切坡卸荷带和失稳机制研究[D].南宁:广西大学,2022.