

程鹏翔,李宗发. 贵州武陵山区中二叠统崩塌地质灾害形成机理研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 565-572.
DOI:10.11932/karst20190414

贵州武陵山区中二叠统崩塌地质灾害 形成机理研究

程鹏翔¹, 李宗发^{2,3}

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省地质环境监测院,
贵阳 550081; 3. 贵州省地质矿产勘查开发局 111 地质大队, 贵阳 550081)

摘要:为掌握贵州武陵山区中二叠统地层崩塌地质灾害发生机理,通过实地调查,结合原有地质资料,发现中二叠统主要分布在乌江及其支流两岸,典型的河谷地形为地层崩塌提供条件。分析认为,卸荷作用导致河谷岩体形成垂向的卸荷裂隙,卸荷裂隙在自重、水的侵蚀及溶蚀等外力的共同作用下,不断扩展,形成危岩体的边界,同时卸荷裂隙与层面、节理等结构面将岩体切割成独立的危岩体,从而导致崩塌灾害发生。指出该区域内二叠系中统三种崩塌破坏模式:卸荷—拉裂—倾倒式、卸荷—拉裂—滑移式、卸荷—拉裂—坠落式,而研究区内主要破坏方式为卸荷—拉裂—倾倒式。

关键词:中二叠统;崩塌;机理分析;变形破坏机理;武陵山区

中图分类号:P642.2 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2019)04-0565-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

贵州武陵山区主要位于贵州省铜仁市,由于处于多山地区,该区域内地质灾害多发,其中崩塌是一种常见的突发性地质灾害,每年都会给当地造成大量的财产损失和人员伤亡。而发生于中二叠统的崩塌地质灾害从其地形地貌、岩体结构、破坏类型及引发原因等方面都具有发生岩溶区崩塌地质灾害的典型特征,因此本文研究内容对于岩溶区崩塌地质灾害的研究及防治具有重要意义。

国内关于崩塌已经进行了大量的研究,如詹亚辉等^[1]做了矿山岩质边坡崩塌机制的研究,主要进行矿山开采对崩塌形成的影响的研究;胡厚田^[2]对岩体蠕变变形过程与崩塌形成的实例进行了研究;林锋等^[3]研究了强烈岩溶控制型崩塌的形成机制;曾芮^[4]研究了强降雨作用下崩塌的形成机制;李霍等^[5]研究了拉裂—倾倒型崩塌的破坏机理;以上研究已经形

成了比较系统成果以及理论。

贵州武陵山区属于地质灾害多发地区,且该区域二叠系中统崩塌地质灾害具有较为典型的特征,根据李宗发等^[6]人的研究发现,武陵山地区二叠系中统主要分布在乌江及其支流两岸,具有明显的区域分布特点,且关于该区域崩塌地质灾害目前并没有进行系统的研究,因此,本文仅从该区域内二叠系中统崩塌地质灾害这一小范围内进行研究,系统研究其基本的规律及特征,为该区域该地层崩塌地质灾害的研究和防治提供参考依据,同时也为该区域岩溶崩塌地质灾害的研究抛砖引玉,提供必要的研究基础。

1 研究区工程地质条件

1.1 地形地貌

研究区内以中低山溶蚀—侵蚀地貌,沟谷、斜坡

资助项目:贵州省科技计划(社会攻关计划)项目(黔科合[2016]支撑2843)

第一作者简介:程鹏翔(1993—),男,硕士研究生,研究方向为地质灾害治理与评价。E-mail:1150695515@qq.com。

收稿日期:2019-04-30

地形为主,区内溶蚀作用强烈,侵蚀作用次之,形成岩溶区内典型的峰丛林立,沟谷纵横的地貌特征。

1.2 地层岩性

区内中二叠统发生崩塌地质灾害的相关地层包括第四系、二叠系(茅口组、栖霞组)、志留系韩家店组,详细各地层详细描述如下;

第四系(Q):粉质黏土和块碎石混杂堆积,结构松散;碎石岩性多为灰岩块体,呈次棱角—棱角状,主要分布于崩塌区下部较平缓地带;

二叠系:研究区内主要分布在石阡、思南、印江、沿河及德江、松桃等县境内,往往组成向斜轴部及翼部地层,从空间上看主要分布于乌江及其支流两岸斜坡上部主要由灰岩构成陡岩带^[6];其下为泥岩、页岩,形成上陡下缓、上硬下软的斜坡。其地层岩性由上至下为:

(1)二叠系中统茅口组(P_2m):中厚层至块状含燧石灰岩,厚度70~210 m,结构面发育;

(2)二叠系中统栖霞组(P_2q):中厚层,厚层状石灰岩,厚度130~221 m,局含有燧石,间夹钙质泥岩、页岩等;

志留系下统韩家店组(S_1h):主要为泥岩、页岩局部夹粉砂岩,泥岩按岩性及组合特征分为:(1)强风化泥岩:黄褐色、黄绿色,岩石节理裂隙发育,岩石破碎,岩芯呈土状、碎块状;(2)中风化泥岩:黄绿色,薄层状,含绢云母碎片,节理裂隙较发育,结构面结合差,贯通性好,无充填;泥岩中夹灰岩透镜体,局部夹灰色中厚层泥灰岩。岩芯呈碎块状、块状、柱状,偶见长柱状,透水性弱。

上述地层中的二叠系茅口组、栖霞组灰岩构成上部主要崩塌体,志留系泥岩、页岩及钙质泥岩等构成下部软弱基座,如此就形成了“上硬下软”的典型地层结构。

1.3 构造和地震

研究区内整体上构造复杂,受构造影响岩体节理裂隙较发育,部分地区岩层产状变化较大;区域内地震加速度为0.05 g,相应的地震烈度基本小于Ⅵ,区域地壳属于稳定区域。

1.4 水文地质条件

研究区处于乌江流域,区内地表水系主要是乌江及其支流分布,以及降雨情况下的坡面径流等。

区内地下水主要有松散孔隙水、基岩裂隙水、岩溶水3类:

(1) 松散孔隙水 赋存于斜坡第四系残坡积层孔隙中。主要分布于斜坡上,为粉质黏土夹碎石土,结构松散,其孔隙较大,地下水主要接受大气降雨入渗补给,自斜坡顶部径流向低洼沟谷排泄。

(2) 基岩裂隙水 赋存于志留系泥岩中,富水性较差。该类地下水受大气降雨下渗和地下水侧向补给,由高处岩层面或者结构面向低洼处排泄,其涌水量一般较小。

(3) 岩溶水 赋存于二叠系中统栖霞组和茅口组的灰岩中,下伏地层为相对隔水层,在该类型的地层中,地表形成岩溶峰丛、洼地、谷地等岩溶地貌,含水量受到降雨量的影响较大,含水性不均一,动态变化大,埋藏较深。

2 研究区危岩带基本特征

2.1 危岩带地层结构特征

研究区内危岩带具有以下基本特征:

(1)崩塌危岩带上部为中二叠统栖霞组和茅口组的灰岩,岩体比较完整,为崩塌体的主要部分;

(2)崩塌危岩带下部为志留系韩家店组泥岩、页岩及粉砂质泥岩等;如此就形成了“上硬下软”的典型地层结构。在这样的地层结构下,上部硬质岩抗风化能强,往往形成陡岩带,下部软岩抗风化能力弱,于是形成缓坡,缓坡上一般堆积上部岩体的崩积物和下部岩体的风化堆积物,这样就形成常见的“近直立—较陡—缓坡”结构^[7]。

2.2 岩体结构特征

研究区内灰岩为中厚层状至块状,岩层产状有平缓,亦有陡倾。受构造、风化及溶蚀作用岩体内分布大量节理裂隙,这些节理裂隙和岩层面组合将岩体分割形成一个个危岩体,多个危岩体在一定的空间上形成危岩带。

危岩带一般分布于陡崖中上部,陡崖坡度70°~90°,岩体受节理裂隙及层面切割形成危岩体,陡倾的陡崖为危岩体提供了向外崩落的临空条件,此时控制危岩体稳定性的一般是一条陡倾的,倾向与危岩体崩落方向或者临空方向一致的结构面,一般称之为主控结构面,表1为统计的研究区部分危岩体主控结构面产状。

表 1 部分危岩体主控结构面情况

Table 1 Some structural planes of the dangerous rock mass

编号	崩落方向/°	主控结构面/°	
		倾向	倾角
WYT1	110	115	75
WYT2	110	100	80
WYT3	130	135	65
WYT4	130	125	75
WYT5	135	120	65
WYT6	100	90	75
WYT7	100	95	75
WYT8	100	90	75
WYT9	100	70	75
WYT10	100	85	75
WYT11	120	120	65
WYT12	120	120	70

由表 1 可看到,危岩体主控结构面倾向与崩落方向一致,且陡倾,倾角为 65°~80°。

主控结构面通常是一些竖向的卸荷裂隙,由于水、植物根系以及岩体自身重力卸荷的作用,某一裂隙逐渐扩展,最终达到一定规模后将某一块岩体切割成为危岩体且控制其稳定性,成为主控结构面^[8]。

研究区处于岩溶区,危岩体均为可溶岩,溶蚀作用对于裂隙的扩张有重要的促进作用,根据调查,研究区贯通性裂隙或者危岩体主控结构面绝大多数存在溶蚀作用^[9]。

溶蚀作用对于危岩体裂隙扩张的作用主要体现在两方面:

(1)卸荷裂隙、风化裂隙、溶蚀裂隙等^[10]在溶蚀作用下逐渐扩展,在这些裂隙不断扩展过程中,岩体内部应力随之不断调整,最终裂隙贯通或者应力超过岩体的承受极限而导致岩体失稳破坏;

(2)强烈的溶蚀作用破坏岩体结构的完整性,会大大降低岩体强度,岩体变形过程中更容易受拉破坏^[11],造成裂隙的进一步扩展。

2.3 岩体结构分区

研究区内岩体结构除受各种节理裂隙影响而体现不同的结构特点外,还受到其他因素,如风化,溶蚀发育等情况影响。本文将研究区内岩体划分为以下几个区域,方便更好的表现崩塌地质灾害的发展规律;

(1)强风化区:该区域主要存在于下部的软质岩,由于下部软质岩抗风化能力弱,一般在下部存在



图 1 危岩体错坎面溶蚀

Fig. 1 Dissolution on the structural plane of dangerous rock mass



图 2 裂缝严重溶蚀

Fig. 2 Heavy dissolution of fractures

强风化的泥页岩,同时该区域也存在崩塌堆积物,该部分可有效消减上部危岩体脱落后能量,减小脱落岩体的影响范围;

(2)强构造区:该区主要受构造影响,节理裂隙分布密集,岩体较破碎,该部位岩体经常发生掉块;

(3)强溶蚀区:该区域主要受降雨、地下水补径、排,以及岩性及岩体结构的影响,导致溶蚀作用强烈,岩体完整性和强度较差;

(4)岩体相对完整区:该部分区域的岩体相对来说比较完整,节理裂隙分布稀疏但通常呈深大的特点,溶蚀作用相对较弱,该部分岩体容易发生大规模崩塌。

3 研究区崩塌岩体变形破坏过程

岩体的长期蠕变与不稳定因素的不断积累导致崩塌的突然发生^[12],其形成原因不仅包括地形地貌、地层岩性、地质构造以及新构造运动等内部因素,还包括温度、水的作用、地震、人类活动及动植物活动等外部因素。崩塌现象是岩体变形破坏的最终显现,历经发育形成阶段、危岩变形阶段、危岩崩塌破坏阶段。

3.1 发育形成阶段

研究区内所有崩塌发生均为中低山溶蚀—侵蚀地貌,沟谷地形。从地质历史发展的角度来说,

位于此处的厚层岩体在沟谷形成的过程中首先会形成竖直或近似平行于沟谷侧壁的卸荷裂隙。由于崩塌是属于典型的上硬下软结构,下部软弱岩体在上部硬岩重力作用下发生塑性流动,岩体会向临空方向挤出,在此种塑流—拉裂^[13]作用下,上部卸荷裂隙受到拉应力作用进一步向下扩展,形成深大卸荷裂隙,这些裂隙和层面及其他节理将岩体切割成危岩体,此类卸荷裂隙一般对危岩体稳定性起主要控制作用。卸荷裂隙的发展见下图。

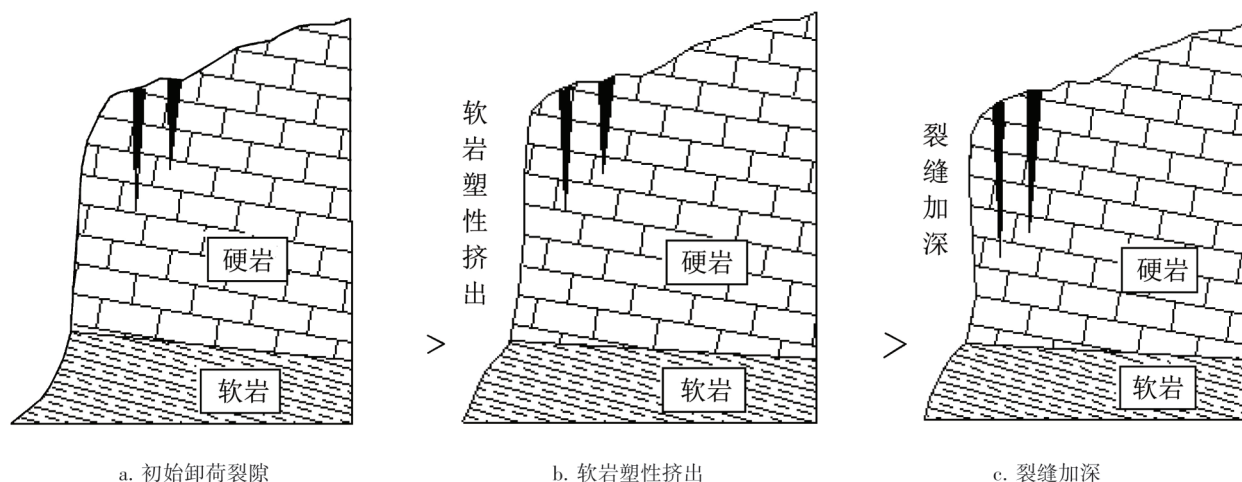


图3 卸荷裂隙的发展

Fig. 3 Development of unloading fractures

3.2 危岩变形阶段

在上一阶段形成了崩塌的基本形态以及初步形成竖向的节理裂隙,在自重应力的作用下,岩体持续发生重力卸荷和重力蠕变^[14],岩体变形过程中某些软弱部分应力集中导致破裂,包括卸荷上一步形成的卸荷裂隙在内的节理裂隙沿软弱部位扩展,与此同时,由于溶蚀作用^[15]等其他外部作用促进裂隙的发展,裂隙发展加速岩体变形,如此互相作用,岩体变形量逐渐增大。

在岩体变形过程中,危岩体下部会形成大小不一的凹岩腔,这些凹岩腔加剧了危岩体的变形和失稳。

根据研究凹岩腔形成有如下几方面的原因:

(1)栖霞组下部间夹钙质泥岩、页岩等,由于差异性风化,易风化的泥页岩风化脱离,形成凹岩腔;



图4 危岩体下部凹岩腔

Fig. 4 Concave rock cavity in lower part of dangerous rock mass

(2)岩体被岩层面及其他节理裂隙分割,形成独立的危岩体,该危岩体失稳掉落后在原位置形成凹岩腔;

(3)下部基座软质岩,在上部岩体重力作用、风化作用及流水的侵蚀作用下,局部脱落或者被掏空形成凹岩腔。

3.3 危岩崩塌破坏阶段

危岩体主控裂隙的发展逐渐贯通,或者岩体某些关键部位所承受的应力超出岩体极限而破坏^[16],危岩体最终脱离母岩发生崩塌破坏。

4 研究区崩塌破坏模式及破坏机理

研究区内发生在中二叠统的崩塌破坏模式主要由以下几种:卸荷—拉裂—倾倒式、卸荷—拉裂—滑移式、卸荷—拉裂—坠落式。

4.1 卸荷—拉裂—倾倒式

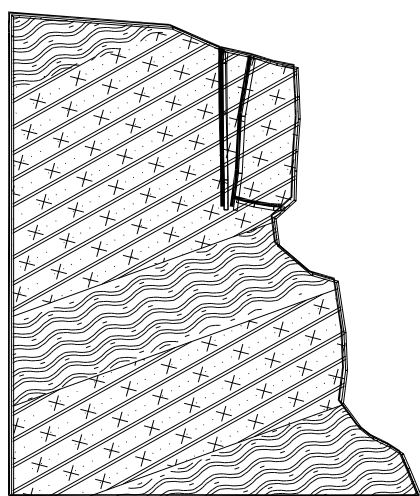


图5 倾倒式

Fig. 5 Overturn collapse

研究区内绝大多数崩塌属于此类。区内较为典型者为沿河县中界乡谭家坨崩塌。谭家坨崩塌带长290 m,高110余m,主崩方向243°,临空方向近乎直立,出露的地层主要为二叠系栖霞组(P_2q),岩层产状 $173^\circ\angle 34^\circ$ 岩性以灰岩为主,岩体比较完整,但在垂向上明显发育3组节理裂隙。第一组裂隙,发育在 135° 方向上,密度 $0.2\text{条}\cdot\text{m}^{-1}$,张开度2~10 mm,内无填充物质;第二组裂隙,发育在 155° 方向上,密度 $0.3\text{条}\cdot\text{m}^{-1}$,张开度1~5 mm,内无填充物质;第三组裂隙发育在 235° 方向上,密度 $0.4\text{条}\cdot\text{m}^{-1}$,张开度2~6 mm,未被填充。除了这三组节理裂隙外,未见大型贯通性好、宽度大的裂隙,所以目前危岩体的整体还是稳定的。

根据现场调查及分析第一组裂隙为该危岩体主控结构面,该结构面为卸荷裂隙,而且裂缝贯通性较好,裂隙面粗糙,贯通性良好,延伸长,为崩塌(危岩体)的形成创造了有利条件。

该区岩石单体主要为中厚层状灰岩,下部为志留系顶部的页岩、泥岩,抗风化能力弱,形成典型的上硬下软的地层组合特征,是形成危岩带的岩层组合情况。

该危岩带由于三组竖向结构面主要将岩体切割为条状危岩体,条状危岩体受层面切割局部形成小块孤石,局部坠落;根据调查显示该危岩带治理前整体处于稳定状态,竖向裂隙并未完全贯通。在重力卸荷、下部软岩蠕变以及其他作用下,上部卸荷裂隙受到拉应力向下扩张,其他竖向裂隙也逐渐向下扩展,当裂隙发育到某种程度时,条状危岩体倾覆力矩大于抗倾覆力矩,危岩体发生倾倒崩塌^[17],这种破坏模式就是卸荷—拉裂—倾倒式破坏。

4.2 卸荷—拉裂—滑移式

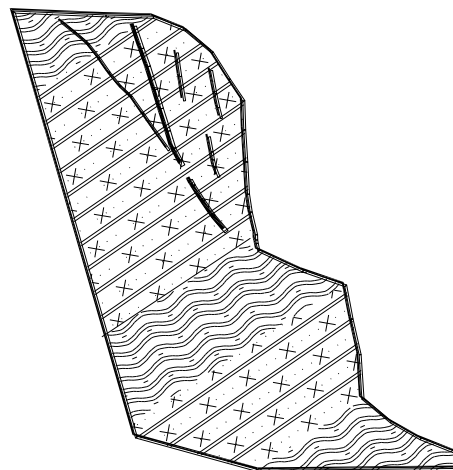


图6 滑移式

Fig. 6 Sliding collapse

该种类型在研究区内较为少见,典型的是思南县凉水井崩塌带中其中一个危岩体具有明显滑移式崩塌特征。该危岩体平均宽度26 m,高差12 m,方量约 $2\,148\text{ m}^3$,坡度 78° 。危岩所处斜坡基岩出露主要为二叠系中统栖霞组灰岩,岩性特征为:灰色、灰黑色、石灰岩夹燧石团块,下部为二叠系下统梁山组灰色粉砂岩,局部夹0.4 m厚煤层,下覆志留系下统秀山组泥页岩,下部的泥页岩易风化,形成危岩体岩腔;上部灰岩为巨厚层状,典型溶蚀现象发育,溶蚀

作用加宽原有节理裂隙,形成的宽大裂缝可作为岩体破坏边界^[20-22],为灾害发生提供条件。灰岩富水性强,属硬质岩组,产状 $N20^{\circ}\sim60^{\circ}E/NW\angle9^{\circ}\sim25^{\circ}$,厚度大于150 m。岩体主要发育有3组节理裂隙:第一组产状 $165^{\circ}\sim180^{\circ}\angle70^{\circ}\sim75^{\circ}$,垂直坡向,间距,间距10~30 cm,迹长30~40 m,结构面闭合~张开,张开度10~15 cm,结构面起伏粗糙,局部可见碎石充填;

第二组产状 $210^{\circ}\sim220^{\circ}\angle75^{\circ}\sim82^{\circ}$,陡倾坡向,间距20~50 cm,迹长10~30 m,结构面闭合—张开,张开度5~10 cm,结构面起伏粗糙,无充填,但局部可见有擦痕;

第三组产状 $280^{\circ}\sim290^{\circ}\angle20^{\circ}\sim30^{\circ}$,缓倾坡向,间距20~40 cm,迹长10~30 m,结构面闭合,表面起伏粗糙;

岩层面产状 $305^{\circ}\angle18^{\circ}$,上述结构面控制危岩体破坏形式。危岩顶部和侧缘均有裂缝可见,地形上危岩体前缘临空,卸荷作用较为强烈,卸荷主要沿 $210^{\circ}\sim220^{\circ}\angle75^{\circ}\sim82^{\circ}$ 和 $280^{\circ}\sim290^{\circ}\angle20^{\circ}\sim30^{\circ}$ 两组结构面张开,卸荷作用使岩体完整性变差,表部块体稳定性降低。裂隙倾向与坡向相同时,危岩体在自重作用下,危岩体沿倾坡外裂隙向临空面发生剪切滑移破坏。岩体重心一旦滑出陡坡,将产生突然崩塌。除重力外,降雨渗入岩体裂缝,产生的静水压力和动水压力也是岩体滑移的重要诱因^[18-19];在某些条件下,地震也可能引起这类崩塌。

由于岩体中发育一组陡倾坡外的节理($N25^{\circ}W/SW\angle59^{\circ}$),因此产生这种失稳的可能性极大,陡坎中已形成的崩塌可见这种倾坡外裂隙形成的底滑面。

4.3 卸荷—拉裂—坠落式

该种破坏模式在研究区内较为常见,而且该种破坏模式下的危岩体规模一般较小^[20],较为典型者亦是思南县凉水井崩塌带某一危岩体,该危岩体平均宽度23 m,高差18 m,方量约为 $2\,752\text{ m}^3$,其他条件和上面相同。危岩顶部和侧缘均有裂缝可见,地形上危岩体前缘临空,卸荷作用较为强烈,卸荷主要沿 $210^{\circ}\sim220^{\circ}\angle75^{\circ}\sim82^{\circ}$ 和 $280^{\circ}\sim290^{\circ}\angle20^{\circ}\sim30^{\circ}$ 两组结构面张开,卸荷作用使岩体完整性变差,表部块体稳定性降低。

当陡坡由软硬相间的岩层组成时,由于差异风化作用或塑性挤出,上部坚硬岩层在断面上常以悬臂梁形式突出^[21-22]。在突出的岩体上,通常发育有构造节理、卸荷节理和风化节理,在长期重力作用下,节理会逐渐扩大发展,因此,拉应力更进一步集

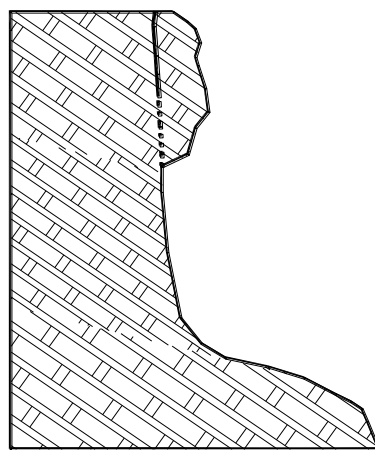


图7 坠落式

Fig. 7 Falling collapse

中在尚未产生节理裂隙的部位;一旦拉应力大于这部分岩石的抗拉强度时,拉裂缝就会迅速向下发展,突出的岩体将突然向下崩落。该危岩体就是因为下部软岩塑性挤出加之差异风化^[23-24],掏空致使上部硬岩在三组结构面综合作用下发生从下到上逐渐坠落,最终形成。

除以上三种主要的破坏形式外,还存在一些小规模的零星的掉块滚落现象,此类现象的原因是一些破碎岩体在外界刺激下发生脱落。

4.4 各类破坏模式统计分析

通过分析研究区各类崩塌地质灾害破坏方式,建立上述三种破坏模式,通过统计该区域内危岩体破坏模式,进一步了解武陵山区中二叠统崩塌地质灾害的破坏规律。

本次共统计研究范围内33个危岩体(带),破坏模式及数量见表2;

表2 破坏模式数量统计表

Table 2 Statistics on failure modess

破坏模式	危岩体(带)数量
卸荷—拉裂—倾倒式	24
卸荷—拉裂—滑移式	1
卸荷—拉裂—坠落式	8

通过以上统计结果分析,研究区内崩塌主要破坏模式为卸荷—拉裂—倾倒式破坏,卸荷—拉裂—坠落式破坏较为常见,而卸荷—拉裂—滑移式破坏

比较少见。之所以出现这种情况,与该区域地层岩性及产状及构造有关,此方面的问题留待以后研究。

5 崩塌形成原因分析

5.1 内部原因

(1)研究区域内,中二叠统崩塌具有典型的上硬下软特征,如此易形成上部陡峭下部平缓的形态,为崩塌的发生提供了物质和空间条件;

(2)中厚—巨厚层的灰岩节理裂隙发育,岩体被岩层面及节理裂隙切割形成危岩体;

(3)研究区属于低山溶蚀—侵蚀地貌,沟谷地形,在沟谷形成过程中由于卸荷作用形成大量陡倾的外倾结构面,这些外倾结构面经过进一步发展贯通,成为危岩体的主控结构面;

5.2 外部原因

(1)武陵山区植被茂密,植物根系的根劈作用促进岩体裂隙的发展,从而加剧岩体的失稳破坏;

(2)水的作用:a. 水进入裂隙中一方面会带走裂隙中的部分物质,降低其胶结强度,另一方面会在裂隙内形成水压力,促进裂隙的扩张和岩体的失稳;b. 水软化下部基座,导致发生塑性压缩,上部岩体拉张应力增大,裂隙向下扩展,加剧岩体失稳破坏;c. 水的溶蚀作用一方面直接溶蚀岩体导致裂隙扩展,另一方面溶蚀作用降低岩体完整性和强度有利于拉裂缝的扩张以及应力集中部位的破坏。

6 结论与讨论

贵州武陵山区二叠系地层崩塌地质灾害主要发生在栖霞、茅口的厚层灰岩中,并且与下部志留系泥岩、页岩及粉砂质泥岩组成典型的上硬下软结构。

(1)研究目标地形地貌均为溶蚀—侵蚀低山地貌,沟谷地形。有利于发育竖向的卸荷裂隙,该类裂隙容易在水、植物以及重力作用下扩展,形成崩塌的主控结构面。主控结构面的发展决定了危岩体的变形破坏模式。

(2)根据研究区域内崩塌地质灾害的变形破坏情况,建立了卸荷—拉裂—倾倒式、卸荷—拉裂—滑移式、卸荷—拉裂—坠落式3种破坏模式,研究区中二叠统崩塌地质灾害主要的破坏模式为卸荷—拉裂—倾倒式。

(3)由于作者水平及资料及研究范围有限,对某些问题认识不够全面,如为什么研究区域内主要破坏方式是倾倒式?崩塌破坏过程中主控结构面的发展受到那些因素影响?水对崩塌的具体影响有多大?如何将中二叠的崩塌地质灾害规律扩展到整个岩溶区等问题还需要进一步进行研究。

参考文献

- [1] 詹亚辉,杨国华,钱建立,等.作龙寺矿山岩质边坡崩塌形成机理研究[J].陕西水利,2018(5):112-114.
- [2] 胡厚田.岩体蠕变和崩塌形成机理的实例剖析[J].路基工程,1989(5):5-9.
- [3] 林锋,冯亮,孙赤,等.强烈岩溶控制型崩塌形成机理研究[J].工程地质学报,2015,23(3):408-414.
- [4] 曾芮,姜明顺,孙琳旭,等.强降雨条件下岩质边坡倾倒崩塌破坏机理:以鄂西赵家岩崩塌为例[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(3):12-17.
- [5] 李霍,巨能攀,郑达,等.贵州上洋水河流域拉裂—倾倒型崩塌机理研究[J].工程地质学报,2013,21(2):289-296.
- [6] 李宗发,谯文浪.贵州乌江下游地质地貌[M].贵阳:贵州科技出版社,2014.
- [7] 张国林,徐智.危岩崩塌破坏机理及二次破坏研究[J].工程技术研究,2018(14):6-8.
- [8] 张倬元,王士天,王兰生,等.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,2016.
- [9] 熊清远,杨宁,郑勇,等.崩塌灾害智能化监测预警的终端前置模式及其应用[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(1):125-129.
- [10] 邓艳,蒋忠诚,徐烨,等.典型表层岩溶泉域植被对降雨的再分配研究[J].中国岩溶,2018,37(5):714-721.
- [11] 骆银辉,胡斌,朱荣华,等.崩塌的形成机理与防治方法[J].西部探矿工程,2008(12):1-3.
- [12] 杨元丽,杨荣康,孟凡涛,王乾.黔中高原台面浅覆盖型岩溶塌陷分布及影响因素浅析[J].中国岩溶,2017,36(6):801-807.
- [13] 申太奇,李嘉雨.贵州紫岭镇崩塌形成机理研究[J].科技创新与应用,2015(35):19-20.
- [14] 刘传正,郭强,陈红旗.贵州省纳雍县岩脚寨危岩崩塌灾害成因初步分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004(4):123-144.
- [15] 王根龙,叶万军,伍法权.崩滑地质灾害稳定性评价方法研究[M].上海:上海交通大学出版社,2013.
- [16] 武中鹏,刘宏,董秀群,等.单体危岩崩塌灾害危险性评价:以贵州威宁县新发乡樊家岩为例[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(2):30-34.
- [17] 徐伟,冯文凯,郭少文,等.彝良县大石盘组崩塌机理及防治对策[J].安全与环境工程,2018,25(4):33-40.
- [18] 毛亮,于青春,王敬霞,等.降雨对裂隙型岩溶含水系统演化影响的数值模拟研究[J].中国岩溶,2017,36(1):42-48.

- [19] 龙健,郭琴,廖洪凯,等.喀斯特山区浅层地下水的季节变化特征及影响因素:以普定后寨河为例[J].中国岩溶,2017,36(4):518-525.
- [20] 敬广秀,吴绍英.琼库什台冰碛物阶地崩塌灾害形成条件及防治思路分析[J].地质灾害与环境保护,2018,29(1):13-16.
- [21] 陈洪凯,秦鑫.危岩稳定性分析研究现状及趋势[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(10):49-60.
- [22] 刘传正.湖北省南漳县城关镇便河村山体崩塌地质灾害[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(1):12.
- [23] 殷超,周忠发,潘艳喜,等.织金洞洞穴环境变化及成因分析[J].中国岩溶,2017,36(4):591-597.
- [24] 王宇.岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J].中国岩溶,2018,37(1):1-8.

Mechanism of geological hazards in the middle Permian collapse in the Wulingshan mountains of Guizhou Province

CHENG Pengxiang¹, LI Zongfa^{2,3}

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Guizhou Provincial Geological Environment Monitoring Institute, Guiyang, Guizhou 550081, China; 3. Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development 111 Geological Brigade, Guiyang, Guizhou, 550081, China)

Abstract The objective of this work is to analyze the mechanism of geological hazards of middle Permian collapse in the Wulingshan mountains, Guizhou Province. Based on field investigation and available geological data, it is found that the middle Permian strata in this area is mainly distributed on both banks of Wujiang river and its tributaries. The typical river valley terrain essentially causes the collapse. According to the analysis, the unloading action leads to the formation of vertical fractures in rock mass. These unloading fractures expand steadily under the combination of gravity, water erosion and dissolution, and other external forces, forming the boundary of dangerous rock mass. In the meantime, the unloading fractures together with independent structural planes such as layers and joints cut rock mass into independent dangerous rock masses, which leads to collapse. Three main types of failure modes of the Permian collapse in the region are proposed, unloading-stretching-overturn, unloading-stretching-sliding, and unloading-stretching-falling, of which the first type dominates the collapse in the study area.

Key words middle Permian, collapse, mechanism analysis, deformation and failure, Wulingshan mountains

(编辑 张玲)