

文章编号: 1007-2993(2025)01-0082-07

广东煤系地层基岩滑坡成因机理分析 ——以佛山市里水文头岭山体滑坡为例

韩庆定¹ 易守勇¹ 刘慧芬² 庞志刚¹ 杨晓聪¹ 邓飞¹ 罗锡宜¹ 田才正¹

(1. 广东省佛山地质局, 广东佛山 528000; 2. 佛山科学技术学院, 广东佛山 528000)

【摘要】 以佛山市里水文头岭山体滑坡为例, 通过调查、钻探和监测等手段, 查明滑坡区地质环境条件和灾害特征, 分析了影响因素和滑动机理。结果表明: (1) 总体呈雨量越大滑动越快特点, 滑动雨量阈值约 30 mm; (2) 煤系地层发育、顺向坡和褶皱构造作用是滑坡形成的内在因素, 反倾粗砂岩条带被开挖和长期雨水入渗在粗砂岩条带位置积蓄形成静水压力作用是滑坡形成的间接诱发因素, 强降雨作用是滑坡形成的直接诱发因素; (3) 滑动机理模式为: 早期雨水入渗并沿炭质泥岩界面径流, 软化并加速滑动面形成; 中期坡脚开挖临空, 叠加坡上岩土体重力和坡脚静水压力, 共同向下作用贯通滑面; 后期强降雨诱发滑坡。研究成果可供同类煤系地层滑坡的调查评价、监测预警和后续防范治理参考。

【关键词】 煤系地层; 基岩滑坡; 成因机理

【中图分类号】 P642.22

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2023-0820

Mechanism analysis of bedrock landslides in coal measures of Guangdong Province: a case study of the Lishui Wentouling landslide, Foshan City

Han Qingding¹ Yi Shouyong¹ Liu Huifen² Pang Zhigang¹ Yang Xiacong¹
Deng Fei¹ Luo Xiyi¹ Tian Caizheng¹

(1. Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, Foshan 528000, Guangdong, China;

2. Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China)

【Abstract】 The Lishui Wentouling landslide, Foshan City was investigated through investigation, drilling, and monitoring methods. The geological environmental conditions and disaster characteristics of the landslide area were identified, and the influencing factors and sliding mechanism were analyzed. The results show that: (1) the overall trend is that the larger the rainfall, the faster the sliding, with a sliding rainfall value of about 30 mm; (2) The development of coal bearing strata, along slope and fold structures are inherent factors in the formation of landslides. The excavation and long-term infiltration of rainwater into the coarse sandstone belt, resulting in static water pressure, are indirect triggering factors for landslide formation. Heavy rainfall is the direct triggering factor for landslide formation; (3) The sliding mechanism mode is characterized by early infiltration of rainwater and accelerated formation of sliding surfaces along the interface of carbonaceous mudstone due to softening of runoff. In the middle stage, excavation at the foot of the slope, combined with the gravity of the rock and soil mass on the slope and the static water pressure at the foot of the slope, acts downwards to penetrate the sliding surface. In the later stage, heavy rainfall induces landslides. This research can provide reference for the investigation, evaluation, monitoring, early warning, and subsequent prevention and control of landslides in similar coal bearing strata.

【Key words】 coal-bearing strata; bedrock landslide; formation mechanism

0 引言

广东省位于岭南以南、南海之滨, 丘陵山地多, 地势起伏大, 地质构造较为复杂, 雨水侵蚀作用强烈, 人类工程活动强烈, 地质灾害易发多发。截止 2020

年底, 广东省在册地质灾害隐患点 4744 处中有滑坡 1654 处, 占比达 34.86%^[1], 滑坡已成为广东地区最为发育的地质灾害类型之一, 对其成因机理进行深入研究分析具有重要的现实意义。

基金项目: 佛山市财政项目(X20230258; X20190517)

作者简介: 韩庆定, 男, 1987 年生, 硕士, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: hanqingding@126.com

目前,滑坡成因机理研究已取得大量成果。黄润秋^[2]系统总结了20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制,指出70%以上大型滑坡的发生与人类活动有密切关系,并将大型滑坡演化机制及过程的典型地质-力学模式概括为:滑移—拉裂—剪断“三段式”模式、“挡墙溃决”模式、近水平岩层的“平推式”模式、反倾岩层大规模倾倒变形模式、顺倾岩层的蠕滑(弯曲)—剪断模式等6种。邹正盛^[3]以西宁市林家崖滑坡为例,认为控制其滑坡稳定性的主要因素为大气降水、人类工程活动和地震。张加桂^[4]对三峡库区巫山县新城址工业区滑坡的成因机制进行了研究,认为该滑坡是先期滑动和后期次生滑动、改造共同作用形成的。成国文等^[5]以重庆涪陵五中滑坡为例,分析了中倾坡外的顺层结构、碎裂结构的岩体是滑坡发生的结构性因素,泥化夹层含膨胀性黏土矿物蒙脱石和伊利石是造成滑坡发生的控制性因素,诱发因素是水的作用和修路削坡形成有效临空面。张伟锋等^[6]以大光包滑坡为例,基于滑坡体运动—堆积特征的现场调查与分析,认为其运动过程分为4个主要阶段:快速启动→高速滑坡→“急刹车”制动→拆离滑动。许强等^[7]通过地面调查、卫星遥感、无人机航拍、地面合成孔径雷达监测等技术手段,对四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机理进行了初步研究,认为该滑坡源区山体在1933年叠溪地震中被震裂产生拉张裂缝,之后在多次地震、长期重力以及降雨作用下,最终整体失稳破坏。朱赛楠等^[8]以重庆武隆鸡尾山滑坡为例,采样分析了原生软岩、层间剪切带和滑带三个阶段中岩矿组分含量、物理性质、微结构、物理力学性质和蠕变力学性质等演化特征,揭示了受软弱夹层控制的层状基岩滑坡的发育发展过程和失稳机理机制。郝念学等^[9]以永善县城东部滑坡为例,分析了演化过程及复活滑坡机理。胡莹等^[10]以延吉市小河龙滑坡为例,研究了该滑坡形成的影响因素及变形过程,认为小河龙滑坡影响因素包括地形地貌、地层岩性等内部因素,以及气象条件、人类工程活动等外部诱导因素。由此可见,野外调查、钻探揭露、监测以及综合研究等是分析研究滑坡成因机理的重要有效手段。

佛山市南海区里水文头岭山体滑坡是近年发生在广东省内较为典型的煤系地层基岩滑坡,广东省内煤系地层通常由石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系薄层—中层状砂岩、页岩夹炭质页岩、炭质灰岩和煤层、煤线构成,为一套滨海泻湖及海陆交替环境形成的含煤建造,广泛分布在珠三角地区,尤以广州、佛山、东

莞等低山丘陵区最为常见。由于煤系地层中岩石普遍软弱、含炭成分高、极易风化、易软化崩解、干湿交替变化极易活化且不可逆^[11-12],多呈多层间断分布,常与粉砂岩、砂岩等岩层交互产出,形成软硬相间的多层软弱夹层,其弹性模量和强度都要比围岩要低,在内外动力作用下,常沿着软弱夹层面滑动,从而诱发顺层岩质滑坡,由此可见,查明滑坡变形破坏的地质力学模式是滑坡地质灾害防治的基础。选取佛山市南海区里水文头岭山体滑坡作为研究对象,通过野外调查、钻探揭露和监测桩监测等技术手段,查明水文头岭山体滑坡区的地质环境条件和灾害现状特点,分析了滑坡发育的影响因素和滑动机理,为同类滑坡的调查评价、监测预警和后续防范治理提供参考。

1 滑坡区地质环境概况

1.1 气象与地貌条件

滑坡位于广东珠三角腹地佛山市南海区里水镇文头岭西侧山坡上,地处北回归线以南,属亚热带海洋性季风气候,全年气候温和温暖,夏长冬短,日照充足,干湿分明,雨量充沛,历年平均降雨量1627.2 mm,最大年降雨量2257 mm,最大月降雨量893.7 mm,最大日降雨量283.1 mm。

滑坡区地貌类型包括剥蚀残丘和山前平原两种,最大高差约97 m,坡脚因早期采石和修建厂房开挖形成岩质陡坡,开挖高度14~18 m,开挖坡度50°~80°,局部近直立,自然坡度10°~30°,植被较发育。

1.2 地层岩性条件

通过岩性填图、灾害调查、钻探揭露等手段,查明滑坡区内出露及隐伏地层有晚三叠世小坪组(T_3x)、第四系残坡积层(Q^{ed})及人工填土层(Q^{ml})(见图1)。

由图1可知,滑坡区平面上岩性自西向东分别是软质泥岩(包括粉砂质泥岩、炭质泥岩、泥岩)与硬质砂岩(包括粗砂岩、泥质粉砂岩、粉砂岩)呈条带状交替展布,地层倾向向西与向东交替变化,形成复式向背斜构造,地层倾角则由85°向30°逐渐变缓。

由图2可知,滑坡所在坡体纵向上地层岩性主要由残坡积土,强风化—中等风化粗砂岩、粉砂岩、泥岩、泥质粉砂岩及炭质泥岩组成。其中,残坡积土主要由粉质黏性土组成,夹少量岩石碎块,硬塑,遇水易软化、崩解,厚度0.5~1.40 m;下伏基岩岩石多呈碎块状,软弱夹层明显,地层产状总体为260°~290°∠40°~65°,与坡面倾向基本一致,属顺向坡,有利于滑坡发育。

滑坡区受南北向环山断裂影响,褶皱发育,岩层产状变化大。滑坡所在边坡上部总体呈一“W”型褶

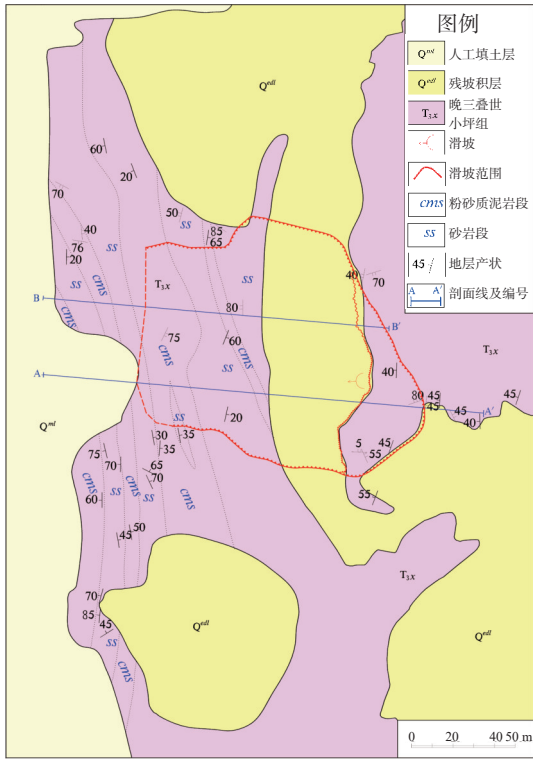


图1 滑坡区所在区域地质图

皱,褶皱枢纽均为南北向,近直立;其下部发育一同斜倒转褶皱,褶皱枢纽为南北走向,倾向向东,倾角约30°。

1.3 地质构造条件

滑坡区受南北向环山断裂影响,褶皱发育,岩层产状变化大。滑坡所在边坡上部总体呈一“W”型褶皱,褶皱枢纽均为南北向,近直立;其下部发育一同斜

倒转褶皱,褶皱枢纽为南北向,倾向向东,倾角约30°。

2 滑坡特征

2.1 滑坡规模及危害情况

滑坡体平面形状为马蹄形,总体呈上大下小状,主滑方向约275°,剪出口位于开挖坡脚处,滑坡体南北最大宽约120 m,东西轴最大长约130 m,滑体厚度9.5~13.5 m,体积约9.5×10⁴ m³,按广东省地质灾害认定标准判定其属中层大型滑坡。

该滑坡直接威胁坡脚两处厂房(价值约1.3亿元)和81人的人身安全,危害程度和社会影响大。

2.2 滑坡现状裂缝发育特征

2019年4月21日,该滑坡因前期多次强降雨作用再次发生明显滑移,其后缘下错达1.26 m,在滑坡中部及前缘也出现多处新裂缝。经调查统计,滑坡体上主要裂缝共计56条。按裂缝形成的时间可分为三类,即2008年以前形成的裂缝(1条)、2008年至2014年间形成的裂缝(14条)和2014年以后形成的裂缝(41条)(见图3)。

2.3 滑带特征

通过干钻取芯揭露到1~3层滑带土,说明该滑坡滑带具有多层性,与坡体裂缝阶梯状多级分布较为吻合。滑带土厚度0.3~1.2 m,主要由粉质黏土组成,为炭质泥岩风化形成。从现场岩芯可以看出滑带土的含水率明显高于其两侧滑体和滑床岩土体的含水率,呈湿润饱水状态,说明坡面雨水入渗主要积蓄在

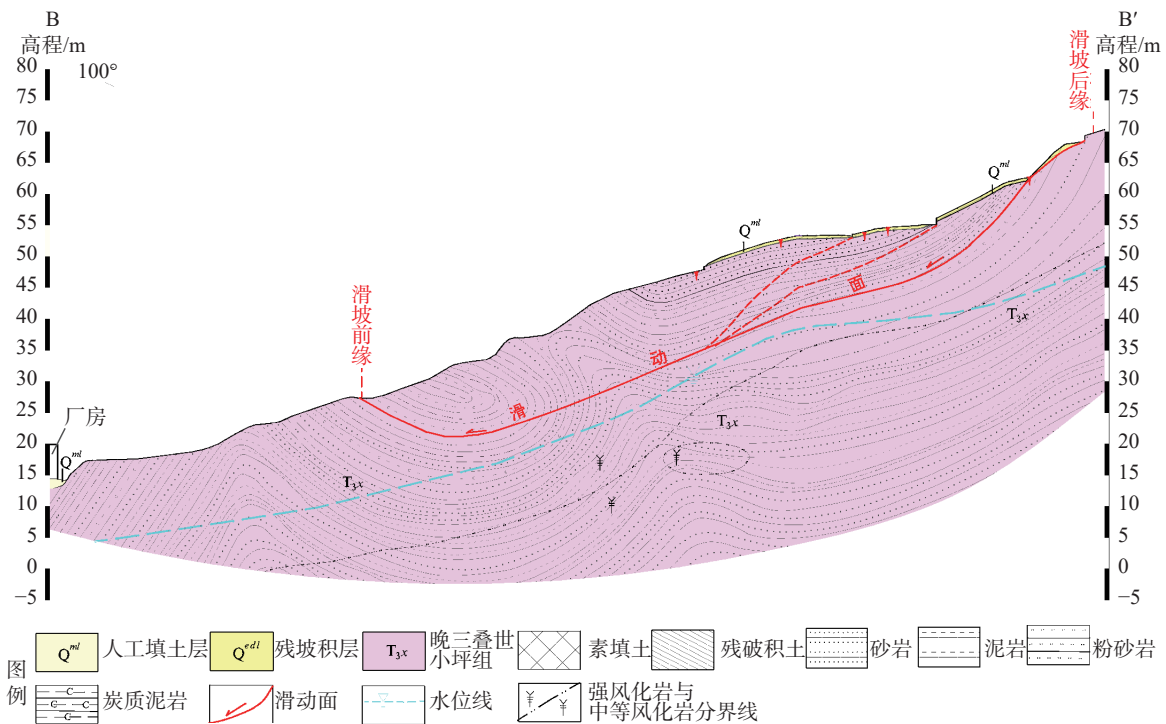


图2 B-B'断面地质剖面图

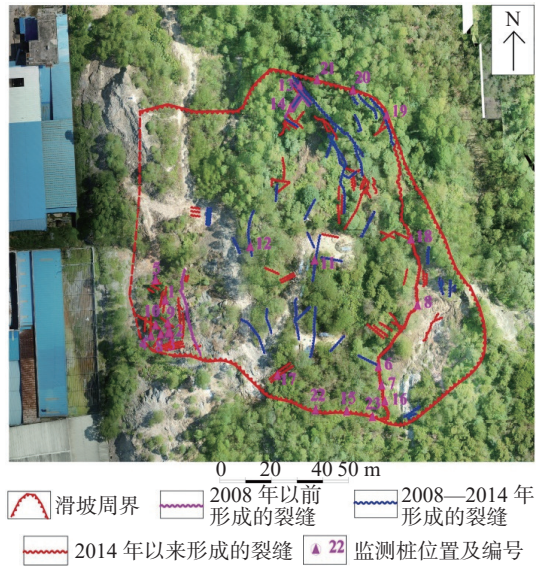


图3 滑坡主要裂缝及监测桩分布图

滑带位置,并沿着滑带界面向下径流,滑带界面起到隔水和径流通道等作用。试验测得滑带土黏聚力 c 为 12 kPa,内摩擦角 φ 为 12.3° ,其力学性质差。

2.4 滑坡变形规律

为获取文头岭滑坡实时变形规律情况,勘查设计工作期间在滑坡坡脚前缘、坡体中部、两侧周界和坡顶后缘先后分别设置 23 处人工监测桩(见图 3),监测频率每日 1 次,监测时间从滑坡启动的 2019 年 4 月 20 日开始到勘查设计工作完工的 6 月 11 日(见表 1),将近两个月的监测时间内,可以从图 4 中清晰地看到该滑坡两次发生明显的整体滑动变形现象,揭示了滑坡区地表变形与降雨之间的关系:(1)滑坡滑动变形与降雨量具总体上具有降雨量越大、滑坡滑动变形越快等特点,即最大单日位移为 2019 年 5 月 29 日的 16.7 cm,少雨或无雨状态下滑坡基本不动,其中,整个滑坡区累计最大位移是 8 号监测桩测到的 125.1 cm;(2)滑坡滑动具有较为明显的滞后性,发现在雨后 2~3 天内仍会出现不同程度的滑动,比如 4 月 20 日和 21 日降雨后 4 月 23 日滑坡开始滑动、5 月 29 日降雨后 6 月 1 日滑坡开始滑动等,可为坡脚威胁对象应急撤离安全返回提供依据;(3)一旦降雨量超过 30 mm(大雨),该滑坡就容易出现滑动,可认为该滑坡滑动的雨量限值约 30 mm,可为该区域同类地层地质灾害预警提供参考依据。

3 滑坡成因机理分析

3.1 影响因素分析

3.1.1 地质因素

由于煤系地层(炭质泥岩)岩质较软、极易风化、物理力学性质差、风化土隔水性好且润滑性强等特

表 1 各监测桩基本情况表

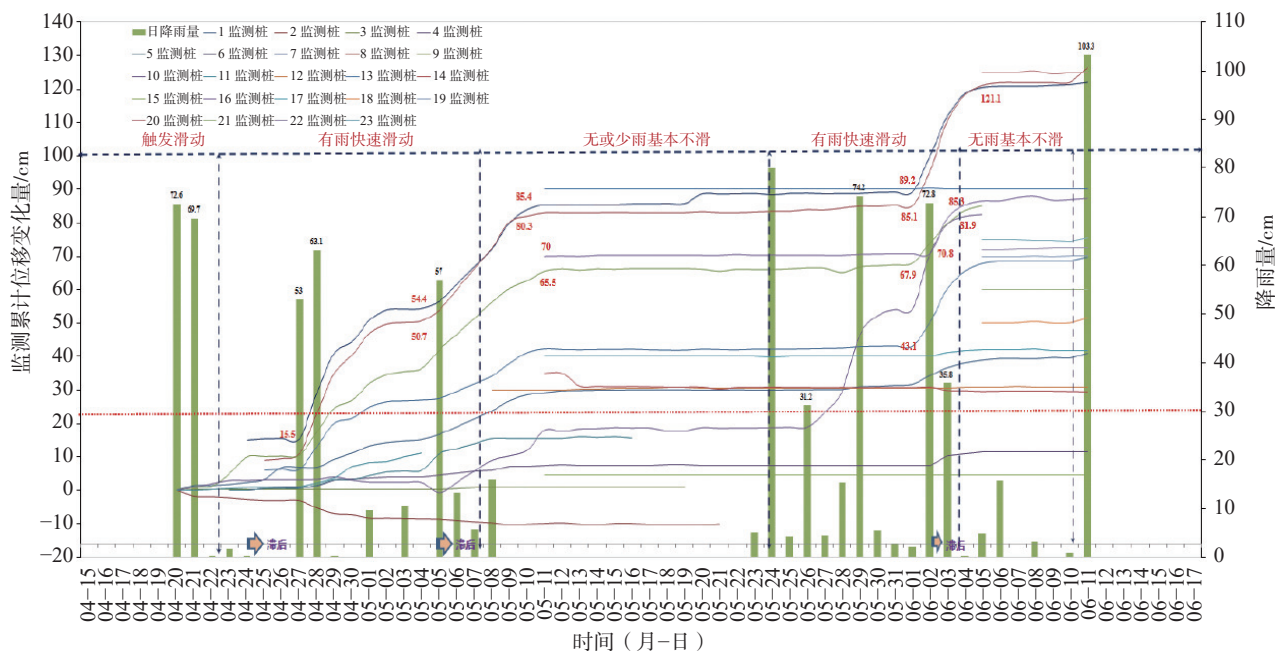
所在滑坡位置	监测桩编号	监测时间(月-日)
坡脚前缘	1号	04-20—06-11
	2号	04-20—05-20, 之后损坏
	3号	04-20—05-19, 之后损坏
	4号	04-23—06-11
	5号	04-23—05-17, 之后损坏
	9号	04-20—06-06, 之后损坏
	10号	04-20—06-06, 之后损坏
坡体中部	11号	04-20—05-05, 之后损坏
	12号	05-08—06-11
	13号	05-11—06-11
	14号	05-11—06-11
	15号	05-11—06-11
	17号	05-11—06-11
	19号	06-05—06-11
两侧周界	20号	06-05—06-11
	21号	06-05—06-11
	22号	06-05—06-11
	23号	06-05—06-11
坡顶后缘	6号	04-23—06-11
	7号	04-25—06-11
	8号	04-25—06-11
	16号	05-11—06-11
	18号	06-06—06-11

性,以及坡体内炭质泥岩等软质岩与粗砂岩等软硬岩质互层,为滑坡软弱滑动面的形成提供了地质基础。其次,坡体上部地层产状与坡向基本一致,总体为顺向坡,长期在岩土体重力作用下产生下滑力,为滑坡的形成和启动提供了动力来源。此外,滑坡区及其周边地质构造作用强烈,坡体岩石破碎,物理力学性质较差,对坡体稳定性不利。由此可见,滑坡区的地质因素是滑坡形成的最重要内在因素。

从图 2 可以看出,坡体下部较高角度反倾的中等风化粗砂岩条带在未被开挖和上部滑体下错剪切破坏之前,可以起到天然抗滑桩作用,能够阻挡上部滑体向下滑动,有助于坡体整体稳定。

3.1.2 降雨因素

滑坡区常年雨量充沛,雨水长期通过裂隙或孔隙渗入坡体,湿润软化岩土体,降低其物理力学性质与抗滑能力,同时增加坡体岩土体容量,增大上部岩土体下滑力;其次,雨水长期沿煤系地层软弱面径流润滑还会加速滑动面的形成,径流至坡体下部反倾粗砂岩条带隔水滞留形成高水头的静水压力,从而增加



(监测桩分布位置: ① 1—5 号和 9—11 号监测桩位于滑坡坡脚前缘; ② 12—15 号和 17 号监测桩位于滑坡坡体中部; ③ 19—23 号监测桩位于滑坡两侧界; ④ 6—8 号、16 号和 18 号监测桩位于滑坡坡顶后缘)

图 4 2019 年 4 月 20 日至 6 月 11 日文头岭滑坡各监测桩累计位移量—降雨量的关系曲线图

滑坡的下滑力,加剧诱发滑坡的发生;此外,2019年4月19日和4月20日的日降雨量分别为148.7 mm,72.6 mm,直接诱发了该滑坡4月21日的滑动。由此可见,滑坡区的降雨因素是滑坡形成的直接诱发因素。

3.1.3 人类工程活动因素

滑坡前缘坡脚因早期采石和厂房修建而开挖切坡,在坡脚形成高陡临空面,导致坡体内部应力释放,破坏了自然山体的应力平衡;此外,坡脚反倾的粗砂岩条带被开挖,导致原本的天然抗滑桩作用失效;在强降雨等外在诱发作用下,地表水下渗,岩土体强度或结构性条件发生变化,下滑力大于抗滑力,坡体表层产生拉张裂缝或剪切裂缝,加上缺少坡脚反倾粗砂岩条带的阻挡,最终诱发滑坡地质灾害。总之,滑坡区的人类工程活动是滑坡形成的间接诱发因素。

3.2 滑动机理分析

查明滑坡变形破坏的地质力学模式是滑坡地质灾害防治的基础。滑坡的滑动机理可认为是主滑带岩土体的剪应力与其抗剪强度之间的不平衡关系。文头岭山体滑坡滑体的岩性以全—强风化粗砂岩、泥岩、泥质粉砂岩为主,岩体破碎,节理裂隙极发育,有利于地表水的入渗;滑带为炭质泥岩风化形成的粉质黏土层,透水性差且润滑性强,物理力学性质差,是良好的隔水层和软弱带;而滑床为一层较为完整的强—中等风化粗砂岩、粉砂岩。综合分析,认为文头岭山体滑坡的滑动机理可分为三个阶段(见图5)。

(1) 早期形成滑面阶段

该阶段雨水长期沿裂隙或岩土体孔隙入渗滑坡坡体,并在炭质泥岩层位置积蓄浸泡软化作用,降低其物理力学性质,同时部分雨水沿着炭质泥岩隔水界面向下径流,逐渐形成润滑面,最终发展成为滑动面。

(2) 中期滑面贯通阶段

首先,因沿滑动面向下径流的雨水在坡体下部反倾的粗砂岩条带隔水阻挡而滞留积蓄,则在坡体内部形成较大的静水压力作用于反倾粗砂岩条带上;其次,坡体上部顺向地层长期产生下滑力向下挤压破坏;再者,坡脚起到天然抗滑桩作用的反倾粗砂岩条带被人为开挖形成临空面。因此,在静水压力、顺向重力等双重应力作用下,加上坡脚开挖临空作用,坡体上部岩土体沿着软弱面下滑并切割坡体下部反倾粗砂岩条带,导致滑坡主滑面逐渐贯通,并且在坡脚开挖临空区域形成应力集中释放区(即剪出口)。

(3) 后期发生滑坡阶段

在极端强降雨作用和坡脚天然抗滑桩失效等条件下,主滑带岩土体的剪应力大于其抗剪强度,最终沿着贯通的滑动面发生滑坡,并且滑坡整体向其南侧开挖临空区域方向剪出,这也是文头岭山体滑坡平面上形成“上大下小”特殊形态的原因。

总而言之,文头岭山体滑坡的滑动机制类似黄润秋提出的“挡墙溃屈”机制^[2],即坡脚反倾粗砂岩条

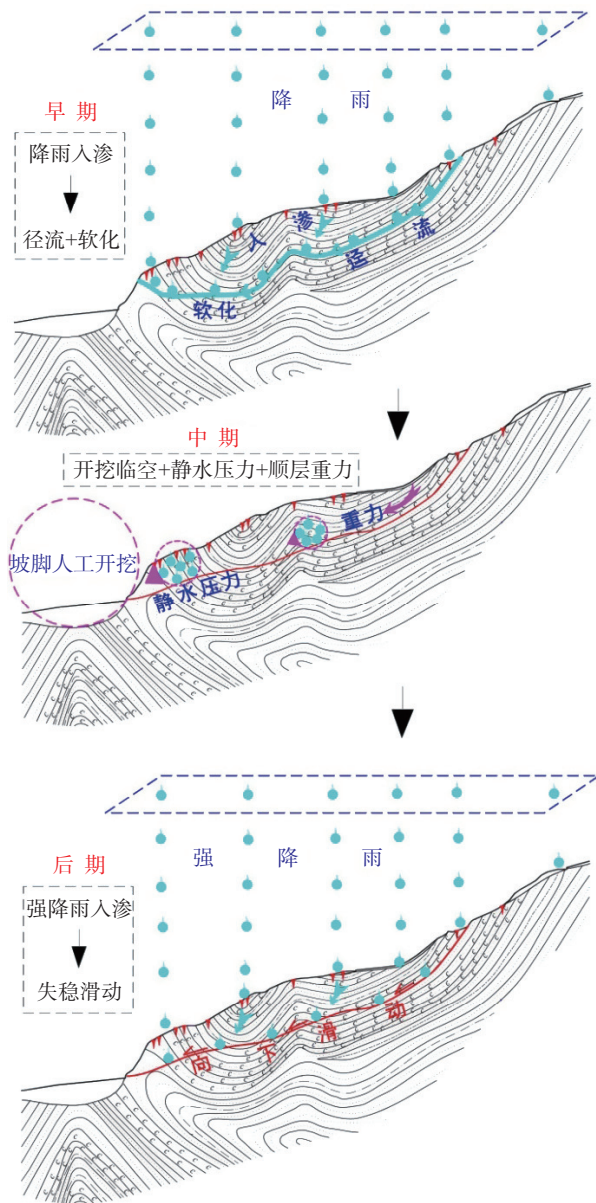


图5 滑坡形成演化过程

带“锁固段”在人为开挖破坏条件下,最终因坡体上部应力的过量积累而产生突发性的脆性破坏切割反倾地层从而发生滑坡。

4 结论与讨论

以佛山市南海区里水文头岭山体煤系地层滑坡为例,分析了滑坡区地质环境条件以及滑坡发育的影响因素与滑动机理,得到如下结论:

(1)滑坡形成的内在因素为顺坡向地层、炭质泥岩发育、构造作用强烈,间接诱发因素是坡脚起到天然抗滑桩作用的反倾粗砂岩条带被人为开挖,直接诱发因素为强降雨作用。

(2)滑坡的滑动机理模式为:早期降雨入渗在滑带位置积蓄软化滑带,水体沿滑带径流加速形成滑动面;中期因坡脚人为开挖临空,叠加坡体上部顺向岩

土体产生的下滑力和坡脚粗砂岩条带积水产生的静水压力,共同向下作用切割反倾地层贯通滑面;后期在极端降雨作用下导致下滑力大于抗滑力,最终诱发滑坡。

(3)通过地质测绘、灾害调查、钻探揭露、地表裂缝+坡体测斜立体监测等手段,可以有效查明滑坡所在煤系地层区域地质环境条件和灾害现状特点,有助于快速准确分析煤系地层滑坡的成因机理。本文的研究方法可为同类煤系地层滑坡的调查评价、监测预警和防治提供参考。

致谢:本项目野外工作过程得到本单位刘建雄教授级高级工程师、黄继春高级工程师和李文辉高级工程师的多次指导,并在本文初稿完成后进行了审查和给出了宝贵的修改意见,在此表示感谢!感谢南海区里水文头岭山体滑坡应急抢险治理工程项目组全体成员,他们为本文的完成提供了重要的帮助。

参考文献

- [1] 广东省自然资源厅. 广东省地质灾害防治“十四五”规划[S]. 2022年. (Guangdong Provincial Department of Natural Resources. The 14th Five Year Plan for Geological Disasters in Guangdong Province (2022). (in Chinese))
- [2] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454. (HUANG R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese))
- [3] 邹正盛, 方斌, 张征. 西宁市林家崖滑坡稳定性研究[J]. 工程地质学报, 1998, 6(3): 199-204. (ZOU Z S, FANG B, ZHANG Z. Research on stability of Linjiaya landslide, Xining city[J]. Journal of Engineering Geology, 1998, 6(3): 199-204. (in Chinese))
- [4] 张加桂. 三峡库区巫山县新城址工业区滑坡的成因机制研究[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 237-242. (ZHANG J G. Occurrence mechanism of landslide industrial zone of in the new town of Wushan county, the Three-Gorges reservoir region[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(3): 237-242. (in Chinese))
- [5] 成国文, 李晓, 许家美, 等. 重庆涪陵五中滑坡特征及成因分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 220-227. (CHENG G W, LI X, XU J M, et al. Characteristics and causes of landslide at fuling fifth middle school in Chongqing[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 220-227. (in Chinese))
- [6] 张伟锋, 黄润秋, 裴向军. 大光包滑坡运动特征及其过

- 程分析 [J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 866-885. (ZHANG W F, HUANG R Q, PEI X J. Analysis on kinematics characteristics and movement process of Daguangbao landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 866-885. (in Chinese))
- [7] 许 强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2612-2628. (XU Q, LI W L, DONG X J, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2612-2628. (in Chinese))
- [8] 朱赛楠, 殷跃平, 李 滨. 大型层状基岩滑坡软弱夹层演化特征研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1638-1647. (ZHU S N, YIN Y P, LI B. Evolution characteristics of weak intercalation in massive layered rockslides—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1638-1647. (in Chinese))
- [9] 郝念学, 李星宇. 永善县城东部滑坡演化及复活滑动机理分析 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(S1): 152-159. (HE N X, LI X Y. Analysis of the evolution and resurgence sliding mechanism of landslides in the eastern part of Yongshan county[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(S1): 152-159. (in Chinese))
- [10] 胡 莹, 宋盛渊, 于崇嘉, 等. 延吉市小河龙滑坡成因机制与稳定性分析 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(S1): 144-151. (HU Y, SONG S Y, YU C J, et al. Genesis mechanism and stability analysis of the Xiaohelong landslide in Yanji city[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(S1): 144-151. (in Chinese))
- [11] 易 巍. 广东省煤系地层不同坡体结构的病害模式及防治对策 [J]. 铁道建筑, 2015(9): 94-97. (YI W. Disease modes and control measures of different slope structures in coal measure strata in Guangdong Province[J]. Railway Engineering, 2015(9): 94-97. (in Chinese))
- [12] 赵华鹏. 顺倾向煤系地层边坡稳定性研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2016. (ZHAO H P. Study on the stability of the bedding coal strata slope[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016. (in Chinese))

收稿日期: 2023-10-31