

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.06

四川宝轮服务区降雨型滑坡活动过程分析

郭斌¹, 贾燕¹, 梁彧², 纪志阳²

(1. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃, 兰州 730000; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 特殊的顺倾层状坡体结构、不合理的坡脚人工开挖与罕见的强降雨的共同作用, 是公路、铁路沿线降雨型滑坡灾害发生的重要原因。宝轮服务区属于降雨型滑坡, 除具备上述条件外, 还存在相对隔水、遇水极易软化成为滑床的炭质泥岩层。本文基于兰州至海口高速公路服务区滑坡坡体地形地貌、地层岩性、水文地质特征和区域气候条件, 采用FLAC^{3D}软件模拟计算并分析了天然与饱水状态下边坡坡体的变形, 验证了宝轮服务区特殊顺层坡体不合理坡脚人工开挖与罕见强降雨型滑坡诱发机理, 计算表明与滑坡变形特征有着较强的一致性, 同时具有很高的可信度; 提出了宝轮服务区特殊顺层坡体不合理坡脚人工开挖与罕见强降雨降雨型滑坡形成过程及其特征, 对类似滑坡防治具有重要的指导价值。

关键词: 降雨型滑坡; FLAC^{3D}; 数值模拟; 地质力学模型

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0045-07

Analysis on process of rainfall-induced landslide in Baolun service area, Sichuan Province

GUO Bin¹, JIA Yan¹, LIANG Yu², JI Zhiyang²

(1. China Northwest Research Institute Co. Ltd. of CREC, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The combination of special bedding slope structure, unreasonable artificial excavation at the foot of the slope with the unusual heavy rainfall is an important reason for the occurrence of rainfall-induced landslide along highway and railway. Baolun service area is located in the rainfall-type landslide zone. In addition to the above conditions, there are also carbonaceous mudstone layers that are relatively impermeable to water and easily soften into sliding beds. In this paper, based on the topographic, geomorphic, stratigraphic, hydrogeological characteristics and regional climatic conditions of the landslide slope in the service area of Lanzhou to Haikou Expressway, FLAC^{3D} software was used to simulate and analyze the deformation of the slope body below the natural and full water state. It also verified induced mechanism of irrational slope foot excavation and rare heavy rainfall landslide in special bedding slope body in Baolun service area. The results show that it is consistent with the deformation characteristics of the landslide and has a high degree of credibility. This paper puts forward the process and characteristics of unreasonable slope foot artificial excavation and rare heavy rainfall rainfall type landslide in the special bedding slope body in Baolun service area, which has important guiding value for the prevention and control of similar landslide.

Keywords: rainfall landslide; FLAC^{3D}; numerical simulation; geomechanical model

收稿日期: 2019-11-29; 修订日期: 2020-05-15

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFC1504903)

第一作者: 郭斌(1987-), 男, 学士, 工程师, 主要从事岩土工程勘察与灾害防治方面研究工作。E-mail: 258683702@qq.com

通讯作者: 梁彧(1995-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土和边坡工程研究。E-mail: 1138933461@qq.com

0 引言

对于中国而言,滑坡灾害的分布范围相对较广,并且有着严重的危害性。尤其在四川等地区,滑坡灾害的发生受降雨的影响显著,甚至成为该地区诱发滑坡的主要因素。滑坡的产生常常与降雨的作用密切相关^[1]。由于受到降雨条件的影响,大量地表水入渗,导致斜坡土体内部的孔隙水压力急剧增大,在滑动面应力与抗剪强度出现降低的现象^[2-3]。在受到自重力的影响下,滑坡体出现失稳现象,进而引发滑坡灾害^[4-5]。

关于降雨诱发滑坡发生发展方面的研究,国内外一些专家学者展开了深入的研究与分析。其中,邵山等^[6]通过借助 GIS 技术以及系数法研究方式对大量滑坡数据分析之后,并对滑坡的分布、稳定性进行了研究,并提出了不同的致灾因子;另外,文海家等^[7]、苏燕等^[8]、李秀珍等^[9],通过概括降雨型滑坡的主要类型、特征以及控制因素,基于室内人工降雨滑坡试验模型,对不同降雨强度影响滑坡的机理进行了研究;此外,郜泽郑^[10]以不同地区为例,利用数据统计分析,结合监测数据,对滑坡演化阶段进行研究,确定了降雨诱发滑坡的预警阈值。在防治工程措施方面,降雨型滑坡首要控制主控因素-水,完善地表截排水系统^[11]。在滑坡抗滑支挡加固措施方面,抗滑挡墙、普通抗滑桩、锚索抗滑桩、锚索框架及微型桩群等的到了很好的应用^[12-13]。

从降雨诱发滑坡发生发展方面的国内外研究现状分析来看,目前国内外学者研究主要集中在滑坡的致灾因子诱发机制、影响机理及防治工程措施方面,关于运用有限元计算分析降雨型滑坡诱发过程的分析较少。本文以宝轮服务区 1 号滑坡为例,结合工程地质勘查资料,利用 FLAC^{3D} 数值模拟方法分析滑坡诱发机理。在此条件下,对滑坡问题的变形演化过程进行了研究,同时还建立了相应的滑坡力学模型,为该类滑坡治理设计方案提供了重要依据。

1 滑坡工程概况

宝轮服务区滑坡群的影响路线里程是 K51 + 056 ~ + 523。在这一路段内,公路的总体走向大致为 SE70°,路基的宽度为 24.5 m,路基左右两侧为宝轮服务区。原设计右侧服务区宽约 75.0 m,主要以开挖为主,向山侧开挖形成两级边坡,边坡高约 20.0 m;左侧服务区宽约 105.0 m,主要以填方改沟为主,最大填方

高度为 18.0 m。右侧服务区及其匝道开挖而形成的边坡原设计采用锚杆框架进行防护,坡率 1:0.75。由于滑坡范围内宝轮服务区右侧场坪斜坡在开挖较多,且在开挖过程及开挖后受多次强降雨的影响,2009 年 12 月开挖到设计高程后,该滑坡开始部分滑动变形,在 2010 年 7 月 20 ~ 24 日连续暴雨后出现新的变形,浅层前级滑坡部分滑体已堆至原开挖处。目前 1 号滑坡变形明显(图 1)。



图 1 1 号滑坡形态特征图

Fig. 1 1st Landslide morphological characteristics

2 工程地质条件

2.1 地形地貌

该研究路段处于我国四川省境内的东北部,路段地处四川盆地北部边缘位置,同时和秦岭西部山区相毗邻。通过对地貌成因以及组合形态特征做出分析之后,确定了滑坡区内的地貌类型为地处浅切割构造剥蚀沟谷底盖,同时属于斜坡地貌。

该路段的平均高程介于 578 ~ 587 m。另外,由于滑坡群区内部的地形存在着不平顺的问题,因而可以将滑坡区微地貌概括成“两山夹一宽缓沟谷”地貌状态。此外,该路段所经区域的总体地势大体呈现出西南高、东北低的趋势。研究发现,滑坡后缘位置的高程 635 m,前缘低点高程 560 m。该路段的坡面坡度存在着较大的差异,但总体介于 5° ~ 20°。1 号滑坡的后缘位置是一个滑坡平台,并呈现出负地形。

2.2 研究区岩性特征

据区域资料、挖探揭示及工程地质调绘,宝轮滑坡群区的上覆层主要是第四系崩坡积层。另外,还有滑坡堆积层的初露,一些地区存在大量的填筑土。对于新老地层的描述如下:

1. 残坡积成因分析

这一地层呈现出灰褐色以及浅黄色,另外还有少量的紫红色以及浅灰色地层。此外,这一地区的碎石、块石含量达到了 60% ~ 70%,成分主要为微风化砾岩和风化程度不均一的砂岩及少量泥岩。偶见粒径较大的砾岩或砂岩块石。

2. 滑坡堆积成因分析

(1) 碎石土: 主要呈现出灰褐色以及浅黄色, 同时还夹有一定量的紫红色以及浅灰色, 在颜色方面存在着杂乱的特点。另外, 物质的成分不均匀, 表现出松散的状态。其中, 碎石的含量达到了 50% ~ 70%。

(2) 块石土: 主要呈现出浅灰色, 还有一些地区呈现出浅黄色。另外, 物质的成分不均匀, 块石的含量达到了 70% ~ 80%, 粒径地貌也表现出大小不一的特点。该层在滑坡群区内分布较少, 偶见粒径较大的砾岩或砂岩块石。

(3) 粉质黏土: 主要呈现出紫褐色以及浅黄色, 局部地区呈现出灰黑色。另外, 土质相对均匀, 有着较强的可塑性。该地区的角砾、碎石含量达到了 30% 左右。

第四系残坡积主要是由于碎、块石土的分布在其上部所导致, 覆盖的厚度不一, 最深可达 15.2 m。1 号滑坡处该层出露较多。

3. 填筑土

由于宝轮服务区左侧场坪的回填, 在该滑坡群前缘堆有大量填筑土, 最大厚度达到了 18.0 m 左右。另外, 地层中含有大量的碎块石土以及粉质黏土等成分, 表现为浅黄色、紫褐色。

4. 侏罗系中统千佛崖组泥岩、砂岩、砾岩

(1) 砂岩: 主要呈现出浅灰色以及浅灰白色。土层主要以砂质结构为主, 岩石相对坚硬, 有着较高的强度。此外构造方面相对明显, 有着较为清晰的层理。

(2) 泥岩: 主要呈现出深灰色以及紫红色, 另外该地区的土壤主要由黏土矿物质所组成, 在受到强风化条件的影响下, 碎块石土较多, 主要分布在强风化底部, 分布较连续, 较坚硬。

(3) 砾岩: 主要呈现出浅灰色以及浅黄色, 另外该地区的砾石粒度偏大, 卵石、角砾含量大于 60%, 填隙物为砂、粉砂、黏土物质。

2.3 水文地质特征

该地质灾害区域内的年平均降雨量相对较大, 一些地区甚至达到了 1 118.2 mm/a。另外, 在滑坡后缘位置处, 存在着较大面积的汇水区域, 此外由于受到堆积层的影响, 导致了降落在地表的雨水主要沿着坡面排入到左侧的冲沟内, 还有一部分雨水直接渗入到坡体内部进而构成了地下水。现在, 主要对区域内部的水文地质特征进行分述与概括:

(1) 地表水

之所以该区域存在着严重的滑坡、高边坡病害, 主

要与地表水的补给有着重要的关系, 由于该地区的降水量相对较大, 再加之坡体岩层自身因素的影响, 导致了雨季地表有大量的雨水渗入, 进而在滑体的内部形成了大量的孔隙水。另外, 该地区地表存在着四季流水的现象, 水量相对较大, 因而会产生自然冲沟等现象。

(2) 地下水

通过对宝轮服务区的地下水状况进行分析之后, 再结合地下水赋存状况以及当地的水理性质, 发现该区域内的地下水主要以堆积层的孔隙水形式为主, 同时还有大量的基岩裂隙水等等。对于基岩裂隙水的分析表明, 基岩裂隙水的补给大多来自于当地的降雨, 另外大气凝结水也是重要的补给形式之一。

该区域内的地下水, 主要受到断裂、裂隙以及基岩的影响而发生地表径流现象。地下水活动期间, 将导致软弱面岩石出现软化问题, 进而造成了岩土强度的下降, 最终引发了滑坡等一系列的地质灾害。

2.4 气象条件

通过查阅当地的气象资料发现, 这一区域属于典型的亚热带湿润性气候, 区域内常年温和湿润, 四季相对分明。另外, 该区域的多年平均气温甚至达到了 16.0 °C, 还有一些年份的最高温度达到了 16.9 °C, 最低年温度达到了 15.2 °C。总体而言, 一月份的气温最低, 七月份的气温最高。

另外, 研究发现工程区域内的年降水量分配有着显著的季候性特点, 在一些多雨的年份中, 平均降雨量可以达到 1 118.2 mm。最近几年中, 由于受到气候变化等因素的影响, 平均降雨量 985 mm, 这与往年相比有大幅下降。但是, 暴雨季节的来临经常导致洪水灾害的发生, 并进一步造成了边坡崩塌、滑坡以及泥石流等问题。

2.5 滑坡变形特征

由于滑坡后缘位置的裂缝存在贯通性特点, 滑坡的后壁相对明显(图 2), 裂缝(后壁)呈折线型延伸长达 130.0 m, 整体走向为 NW 60° ~ 70°, 主要沿层理面开裂下错, 后壁可见明显滑动擦痕, 指向 NE 30° 左右, 倾角 57° ~ 70°, 后壁高达 9.0 m。滑坡左侧裂缝与后缘裂缝联系, 已发展至坡口线附近, 整体走向为 NE 60° 左右, 下错达 15.0 m, 延伸长达 200.0 m。滑坡右侧变形相对较小, 在滑坡出口一线泥岩、砂岩岩体已沿炭质泥岩层理面张开(图 3), 松弛变形明显。在前级滑坡后缘位置处, 附近区域存在着大量的裂缝, 最大下错深度达到了 1.5 m, 宽度方面达到了 0.8 m, 大体走

向是 NW60°。



图2 滑坡后壁

Fig. 2 Back wall of landslide

由于滑坡的整体滑动变形,滑坡中后部钻孔 ZK2-2、ZK3-2 附近地形下沉明显,略有反翘,形成了滑坡平台,在钻孔 ZK1-2 后部可见积水。前级滑坡变形最为明显,目前已经滑动变形,滑体物质堆于已开挖服务区右侧场坪,且在坡脚及滑坡出口附近可见少量渗水。

3 降雨滑坡诱发机理与滑坡活动过程及特征分析

3.1 有限元模型建立

具体研究过程中,首先进行了详细的地质勘查工作,同时还对滑坡病害的防治措施做出了研究。在此基础上,为进一步明确该降雨型滑坡的变形机理,以便替该处滑坡的治理工作提供可靠的理论依据。本文选取边坡主滑方向 II-II ZK2-0~ZK2-3 剖面为研究对象,计算模型依照工程实例创建,包含该地区的主要地质



图3 滑坡右侧松弛岩体

Fig. 3 The loose rock mass on the right side of the landslide

构造(图4)。借助于 FLAC^{3D} 等相关的软件,建立起相应的滑坡区域计算模型,并对此类问题做出了详细的模拟,对模型边界进行适当的调整,扩大模型范围,并做出了网格划分,模型如图5所示。其中,1 表征的是粉质黏土,2 表征的是碎石土,3 表征的是砾岩,4 表征的是砾岩夹泥岩。

3.2 计算工况及模型参数

本次利用数值计算分析探讨宝轮服务区降雨型滑坡诱发过程。因此,根据滑坡的实际情况,计算中包含如下几种工况:工况一:天然状态下滑坡变形演化计算;工况二:饱水状态下滑坡变形演化计算。

为更合理的确定滑坡的过程计算分析,采用综合手段确定各土层的抗剪强度指标。具体方法为:(1)根据地质勘察报告对土层的描述及现场调查情况,结合室内试验,以及相关规范、经验值等综合因素进行反算,初步判定抗剪强度指标的取值范围;(2)参考相关

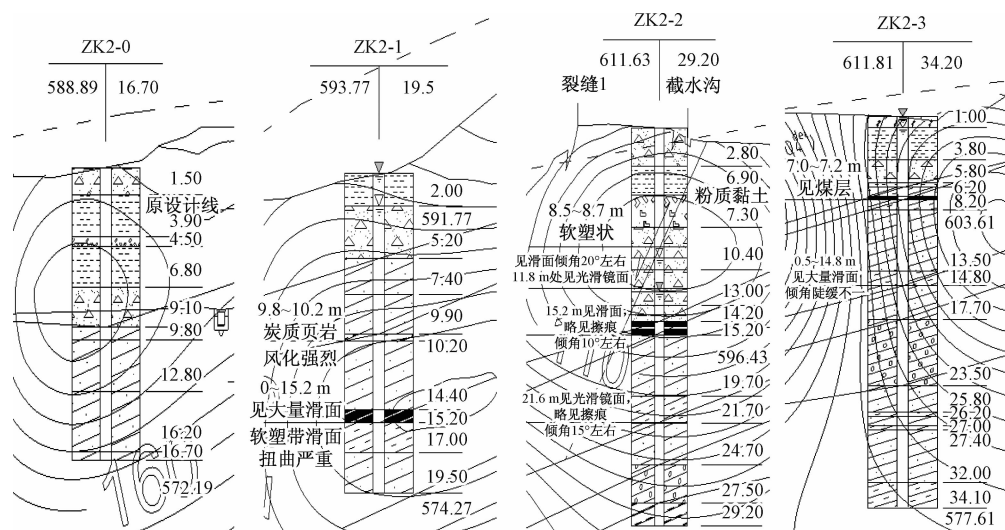


图4 宝轮滑坡 II-II ZK2-0~ZK2-3 剖面图

Fig. 4 Section II-II ZK2-0~ZK2-3 of the baolun Landslide

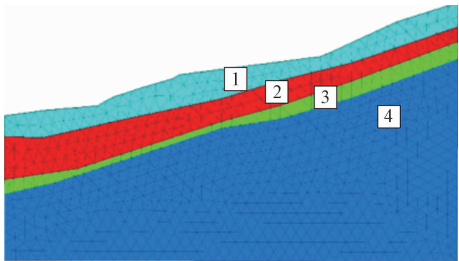


图 5 网格划分图

Fig. 5 Grid map

规范及《工程地质手册》验证其参数是否合理。最终,在上述工作的基础上,对该地区的土层天然重度进行研究,并选取了适当的岩土弹性模量。其中,表 1 为研究过程中不同物理力学参数的取值状况。

表 1 物理力学参数取值

Table 1 Values of physical and mechanical parameters					
工况特点	种类概况	弹性模量/ MPa	泊松比 状况	黏聚力/ kPa	内摩擦角 状况/(°)
天然状态	碎石土	420	0.31	31.42	14
饱水状态		400		29	12
天然状态	粉质黏土	150	0.25	10	20
饱水状态		120		8	18
天然状态	中-微风化砾岩	1 000	0.2	210	30
饱水状态		950		200	30
天然状态	砾岩夹泥岩	1 500	0.22	400	35
饱水状态		1 500		400	35

在本次的模拟过程中,分别将不同滑体的材料以及该区域的基岩材料当作基本的弹塑性材料,同时模拟环节中主要应用了摩尔-库仑模型(图 6)。

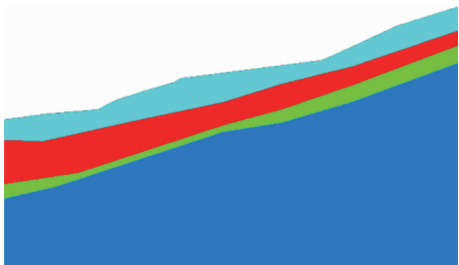


图 6 三维计算模型纵剖面

Fig. 6 3D calculation model longitudinal section

3.3 计算结果及变形机理分析

3.3.1 模拟计算结果

图 7 和图 8 分别采用 FLAC^{3D} 软件计算得到天然和饱水状态下坡体位移云图,图 9 和图 10 分别是天然和饱水状态下坡体剪应变增量云图。

3.3.2 坡体位移分析

由图 7、图 8 位移云图可以看出:在天然状态下,坡体整体位移较小,最大位移值不到 1 cm,坡体位移

最大影响区主要集中在坡体的前缘部;在降雨饱水状态下,边坡整体位移值增大,变形范围加剧,坡体整体位移变形值介于 10 ~ 20 cm,其最大位移值比天然状态下增大 20 倍,坡体位移变化集中在 2 号挡墙的前缘部位。并且滑坡位移呈现出明显的顺层滑坡特征,上层土体基本沿砾岩层表面进行滑动。

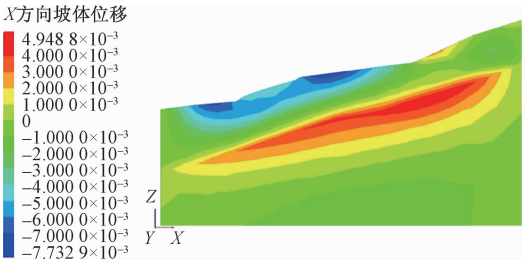


图 7 天然状态下的位移云图

Fig. 7 Displacement cloud map in natural state

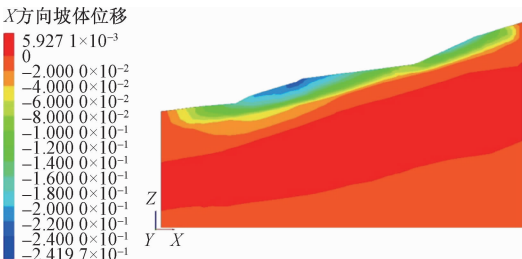


图 8 饱水状态下的位移云图

Fig. 8 Displacement cloud map in saturated state

区域内的降雨量相对较大,同时经常出现一些强降雨等恶劣天气,因而地表有大量的水分会渗入到滑体的内部,进而导致了岩体的容重发生变化,并且在强度方面也有大幅的降低,特别是入渗水对滑带土、岩的软化,使滑带的强度指标降低,为滑体的滑动变形提供了基础。此外,强降雨时,短时间内不能完全的渗透到地下的雨水,以地表径流的方式进行排泄,会对土体造成严重的侵蚀。

3.3.3 剪应变分析

一般条件下,剪应变增量云图多反映的是研究区域内土体的受力情况,即在受到剪应变的作用下,剪切变形可能发生的区域和位置^[14]。在图 8、图 9 剪切应变增量云图中可以看出:天然状态下坡体整体相对稳定,但是滑坡前缘部位下方存在较为明显的潜在滑动面。滑坡后壁岩土体也存在潜在的滑动面。在降雨饱水状态下,滑坡前缘部的滑动带范围较天然状态下更大更长,同时滑坡后壁的滑动带也有增大。

3.4 滑坡形成过程及其特征

显然,滑带及滑面的位置明显表现出顺层滑坡的

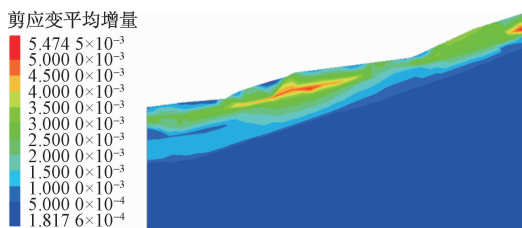


图9 天然状态下的剪切应变增量云图

Fig.9 Cloud map of shear strain incremental in natural state

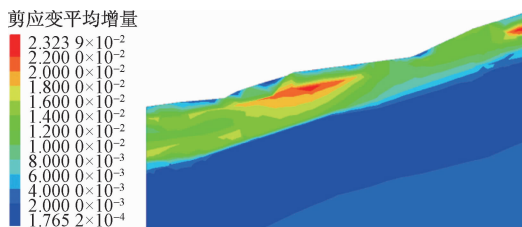


图10 饱水条件下剪切应变的增量云图概况

Fig.10 Cloud map of shear strain incremental in saturated state

特征。

结合现场的地质调查和室内相关土工试验结果,对边坡变形破坏机制进行分析:

(1)边坡变形破坏之前,当地有连续强降雨,并且结合现场的地形地貌,后缘汇水条件良好,同时由于高速公路和宝轮服务区的修建,在滑坡前缘开挖,切断岩层,削弱抗滑段,形成新的临空面,这为边坡发生变形破坏提供一个良好的诱发条件。

(2)在强降雨和雨水汇集的情况下,雨水入渗,坡体内部岩土体含水率增加,增大了坡体的剪切应力,同时雨水对岩土体有润滑软化作用,降低了岩土体的强度,因为黏土夹层对水敏感性强,在被入渗的雨水软化后,其强度降低幅度较大,于是形成了相对隔水但遇水极易软化成为滑床的泥化夹层。这一点可以在(3.3)中FLAC^{3D}的模拟图中反映出来。

(3)随着强降雨的进一步发展,坡体饱水程度增大,此时边坡持续变形。后缘出现拉裂缝,这为降雨的进一步入渗和坡体内部岩土体软化(特别是泥化夹层)提供了条件。从图2和图3可以明显看出。

(4)当强降雨持续进行时,黏土层含水率增加,软化程度增高,塑性变形区增加,此时后缘坡体出现下错,前缘鼓胀隆起,表明坡体变形已经进入累进性破坏。

(5)随着降雨的持续入渗,泥化夹层含水率进一步增加,软化程度进一步提高,而含水量的变化对泥化夹层的强度有很大的影响,在泥化夹层的含水量达到一定程度时,泥化夹层的强度会骤然下降,因而导致边

坡滑动,最终形成滑坡。

4 结论

(1)宝轮服务区降雨型滑坡,属典型存在相对隔水但遇水极易软化成为滑床的炭质泥岩层的特殊顺倾层状坡体在不合理坡脚人工开挖与罕见强降雨的共同作用下诱发滑坡。经过分析可知该服务区的工程开挖和水文气象对边坡内部黏土夹层的形成起到至关重要的作用,工程开挖使得坡体松弛,同时地形地貌为雨水汇聚创造了条件,雨水渗入边坡有了水源,间接增加了边坡位置的雨量,为边坡变形破坏提供了有利条件。在雨水入渗到黏土夹层后,黏土受雨水软化,强度迅速降低,成为边坡的潜在滑动面。

(2)结合FLAC^{3D}模拟以及现场资料分析可以看出宝轮服务区降雨型滑坡具明显的顺层滑坡特征。

参考文献:

- [1] 邹宗兴,唐辉明,熊承仁,等. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(11):2222-2231. [ZOU Z X, TANG H M, XIONG C R, et al. Geomechanical model and stability analysis of progressive failure of large bedding rock landslide [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(11):2222-2231. (in Chinese)]
- [2] 张玉成,杨光华,张玉兴. 滑坡的发生与降雨关系的研究[J]. 灾害学,2007(1):82-85. [ZHANG Y C, YANG G H, ZHANG Y X. Study on the relationship between the occurrence of landslide and rainfall [J]. Journal of Catastrophology, 2007(1):82-85. (in Chinese)]
- [3] 郑亚飞,张璐璐,张洁,等. 基于时变监测数据的降雨滑坡多目标随机反分析[J]. 岩土力学,2017,38(11):3371-3377. [ZHENG Y F, ZHANG L L, ZHANG J, et al. Multi-objective stochastic inverse analysis of rainfall landslide based on time-varying monitoring data [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11):3371-3377. (in Chinese)]
- [4] 尚岳全,蔡岳良,魏振磊,等. 滑坡虹吸排水方法[J]. 工程地质学报,2015,23(4):706-711. [SHANG Y Q, CAI Y L, WEI Z L, et al. Sliding siphon drainage method [J]. Journal of Engineering Geology, 2015,23(4):706-711. (in Chinese)]
- [5] 于洋. 双排抗滑桩受力影响因素研究[D]. 浙江大学,2013. [YU Y. Research on the factors affecting

- the force of double-row anti-slide piles [D]. Zhejiang University, 2013. (in Chinese)]
- [6] 邵山, 汤明高, 聂兵其, 等. 宣汉地区降雨型滑坡空间发育规律及敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(5): 41–46. [SHAO S, TANG M G, NIE B Q, et al. Study on the spatial development law and sensitivity of rainfall-type landslides in Xuanhan area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(5): 41–46. (in Chinese)]
- [7] 文海家, 张岩岩, 付红梅, 等. 降雨型滑坡失稳机理及稳定性评价方法研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 15–29. [WEN H J, ZHANG Y Y, FU H M, et al. Research progress on instability mechanism and stability evaluation method of rainfall landslide [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 15–29. (in Chinese)]
- [8] 苏燕, 邱俊炳, 兰斯梅, 等. 基于室内试验的降雨型滑坡机理研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 118–122. [SU Y, QIU J B, LAN S M, et al. Research on mechanism of rainfall landslide based on indoor experiment [J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2015, 43(1): 118–122. (in Chinese)]
- [9] 李秀珍, 何思明, 王震宇, 等. 降雨入渗诱发斜坡失稳的物理模型适用性分析[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 34–38. [LI X Z, HE S M, WANG Z Y, et al. Applicability analysis of physical model for slope instability induced by rainfall infiltration [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 34–38. (in Chinese)]
- [10] 邵泽郑. 镇江地区降雨诱发滑坡机制与降雨阈值研究[D]. 南京大学, 2019. [GAO Z Z. Study on rainfall induced landslide mechanism and rainfall threshold in Zhenjiang area [D]. Nanjing University, 2019. (in Chinese)]
- [11] 孙红月, 尚岳全, 申永江, 等. 破碎岩质边坡排水隧洞效果监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(11): 2267–2271. [SUN H Y, SHANG Y Q, SHEN Y J, et al. Analysis of the effect of drainage tunnel on broken rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(11): 2267–2271. (in Chinese)]
- [12] 杨铭. 土质滑坡筏板式格构-锚杆-锚索复合抗滑支挡技术及应用[C]//中国力学学会、上海交通大学. 中国力学大会-2015 论文摘要集. 中国力学学会、上海交通大学, 2015: 1. [YANG M. Soil landslide slab-type lattice-anchor-anchor composite anti-sliding retaining technology and its application [C]//Chinese Society of Mechanics, Shanghai Jiaotong University. China Mechanics Conference-2015 Abstracts. Chinese Society of Mechanics, Shanghai Jiao Tong University; Chinese Society of Mechanics, 2015: 1. (in Chinese)]
- [13] 刘滨源. 桩—墙复合抗滑支挡结构工程计算与设计方法研究[D]. 重庆交通大学, 2016. [LIU B Y. Research on engineering calculation and design method of pile-wall composite anti-sliding retaining structure [D]. Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)]
- [14] 王晓瑞. 黄家湾滑坡工程地质特征分析及稳定性研究[D]. 西南交通大学, 2018. [WANG X R. Analysis of engineering geological characteristics and stability of Huangjiawan Landslide [D]. Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)]

(上接第44页)

- [13] 赵华, 李文龙, 卫俊杰, 等. 反倾边坡倾倒变形演化过程的模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 749–757. [ZHAO H, LI W L, WEI J J, et al. Model Test study on toppling deformation evolution process of counter-tilt slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 749–757. (in Chinese)]
- [14] 王飞, 唐辉明. 雅砻江上游互层斜坡倾倒变形破坏机制与演化[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1501–1508. [WANG F, TANG H M. Mechanism and evolution of toppling in interbedded slopes at upstream of Yalong River [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6): 1501–1508. (in Chinese)]
- [15] 黄润秋, 李渝生, 严明. 斜坡倾倒变形的工程地质分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1165–1181. [HUANG R Q, LI Y S, YAN M. The implication and evaluation of toppling failure in engineering geology practice [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1165–1181. (in Chinese)]