

井-孔联合疏排高填方滑坡地下水典型案例分

赖国泉, 焦海平

Analysis of typical cases of groundwater in high fill landslide with combined well-hole drainage

LAI Guoquan and JIAO Haiping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306020>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不当钻探施工引发的滑坡变形加剧机理

Mechanism of the landslide deformation due to drilling of boreholes: A case study of Fanshantou landslide at Songyang County of Zhejiang Province

罗晓娟 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 84-90

地下水渗流对崩坡积滑坡稳定性和变形的影响——以湖南安化春风滑坡群为例

Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: taking Chunfeng Landslide group in Anhua County of Hunan Province as an example

贺小黑, 彭鑫, 谭建民, 裴来政 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 96-103

黄土高填方场地裂缝的发育特征及分布规律

Development and distribution characteristics of ground fissures in high loess filled ground

于永堂, 郑建国, 张继文, 刘智 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 85-92

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

水平分支孔定向钻探技术及其在煤矿水害防治中的应用——以东庞煤矿ZKxx3孔钻探施工为例

Application of directional drilling technology of horizontal branch hole in the drilling of ZKxx3 hole in Dongpang Coal Mine water disaster prevention and control

叶兰肃, 马卫东, 王雷浩, 南方 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 105-111



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202306020

赖国泉, 焦海平. 井-孔联合疏排高填方滑坡地下水典型案例分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 106-114.

LAI Guoquan, JIAO Haiping. Analysis of typical cases of groundwater in high fill landslide with combined well-hole drainage[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 106-114.

井-孔联合疏排高填方滑坡地下水典型案例分析

赖国泉, 焦海平

(中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以攀枝花机场 13#滑坡治理工程为例,在简述滑坡基本概况的基础上,着重论述了研究区水文地质条件。研究区雨季降水量占全年降水量的 95%,中-大暴雨、3 d 及以上降雨天数出现次数集中于 7—9 月,占总数的 95% 以上。研究区降雨具有雨季降水量强度大且集中的特点。物探及钻探揭示,滑坡后缘场坪填方区地下水丰富,具有“窝”状不连续分布特征,有明显的成层性;含水层具有黏土含量高、赋水性较好、孔隙连通性差、径流不畅,坡内地下水难以快速消散等特点。基于该滑坡地下水丰富的突出特点,提出了抗滑桩支护与集水井联合井内仰斜排水孔疏排地下水并重的治理方案。治理工程竣工后,评估了井孔联合疏排地下水措施的排水效果,证明排水效果良好。

关键词:高填方滑坡;滑坡;地下水;集水井;仰斜排水孔

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)04-0106-09

Analysis of typical cases of groundwater in high fill landslide with combined well-hole drainage

LAI Guoquan, JIAO Haiping

(Northwest Research Institute Co. Ltd. of C.R.E.C., Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Taking the landslide control project of landslide No.13 at Panzhihua airport as an example, this paper briefly describes the basic situation of the landslide and focuses on the hydrogeological conditions of the study area. The rainy season rainfall accounts for 95% of the annual rainfall in the study area, and the occurrence times of moderate to heavy rain and rainfall days of 3 days or more are concentrated in the rainy season from July to September, accounting for more than 95% of the total. The rainfall in the study area is characterized by high intensity and concentration during the rainy season. Geophysical exploration and drilling revealed that the ground water in the field filling area at the rear edge of the landslide was abundant, with a "nest" -shaped discontinuous distribution and obvious stratification. Aquifers are characterized by high clay content, good water-bearing properties, poor pore connectivity, and poor drainage, making it difficult to dissipate quickly. Based on the prominent feature of abundant groundwater in the landslide area, a remediation scheme combining anti-slide piles and joint drainage by well and inclined drainage holes is proposed. After the completion of the treatment project, the drainage effect of the joint drainage measures by well and drainage hole was evaluated, and the practical results demonstrated excellent drainage effectiveness.

Keywords: high fill landslide; landslide; ground water; water collecting well; oblique drainage hole

收稿日期: 2023-06-15; 修订日期: 2024-01-08

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划 (2022-重大专项-07); 中铁九局科技开发计划 (YGSJSZX202308-01)

第一作者: 赖国泉(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程研究工作。E-mail: 273085646@qq.com

0 引言

大量研究表明,滑坡体内地下水赋存与运移是引起滑坡体失稳破坏的主要因素之一^[1-4]。目前滑坡治理措施中,截排水技术分地表截排水和地下疏排水两大类。地表截排水工程主要为截水沟、排水沟等。地下疏排水结构主要有盲沟、钻孔排水、截水隧洞、集水井、虹吸排水等^[5-7]。

目前,研究滑坡地下水疏排对滑坡稳定性的研究大多集中于截排水隧道、虹吸排水、仰斜孔排水等。孙红月等^[8]研究了地下排水洞在浙江上三公路 6#滑坡中的作用与控制,研究表明地下排水洞能有效控制地下水位的上升,特别是有效防止前期降水在坡体中的积累。赵杰^[9]通过研究截水隧道在箭丰尾滑坡中应用,阐述了排水隧洞的设计理念,通过现场的监测资料对比分析修建截水隧洞前后降水量与地下水位埋深的关系,客观评价了截水隧洞的工程效果。近年来,一些研究者^[10-13]在虹吸排水在滑坡地下水排出中的研究做了大量有意义的探索。

井-孔联合排水是指当地下水埋深较大或有多层地下水需要排出时,使用仰斜排水孔效果不佳时,采用仰斜孔结合集水井联合排出滑坡地下水的一种技术。目前国内采用此技术在滑坡治理中的应用鲜见报道。本文依托攀枝花机场 13#滑坡治理工程,探讨井-孔联合排水技术在高含水填方滑坡治理中的应用,值得同类工程借鉴。

1 滑坡概况

1.1 工程地质环境条件

研究区为中山丘陵、山区峡谷地貌,见图 1。受区域地质构造及机场建设等因素影响,地形起伏变化较大,高差悬殊大。机场建设前整体为一走向 N—S 向条形山脊。机场建设后东侧填筑形成高填方区,高达八级,最大高度 66 m^[14]。



图 1 地形地貌
Fig. 1 The topography and landform

钻探揭露研究区地层自上至下为第四系人工填土层(Qh^{ml}),母岩以强风化砂岩、炭质泥岩角砾、碎石为主,黏土充填,最大厚度达 33 m。第四系全新统残坡积层(Qh^{el+dl}),主要为角砾土、碎石土,黄褐—灰褐色,黏土充填,含水量较高,呈可塑—坚硬状,层厚度变化较大,最大可达 12 m。下伏侏罗系下统益门组(J_1y)炭质泥岩、砂岩,缓倾互层状产出,岩层倾向与坡体倾向相近,倾角 $18^{\circ} \sim 21^{\circ}$ 。典型工程地质断面图见图 2。

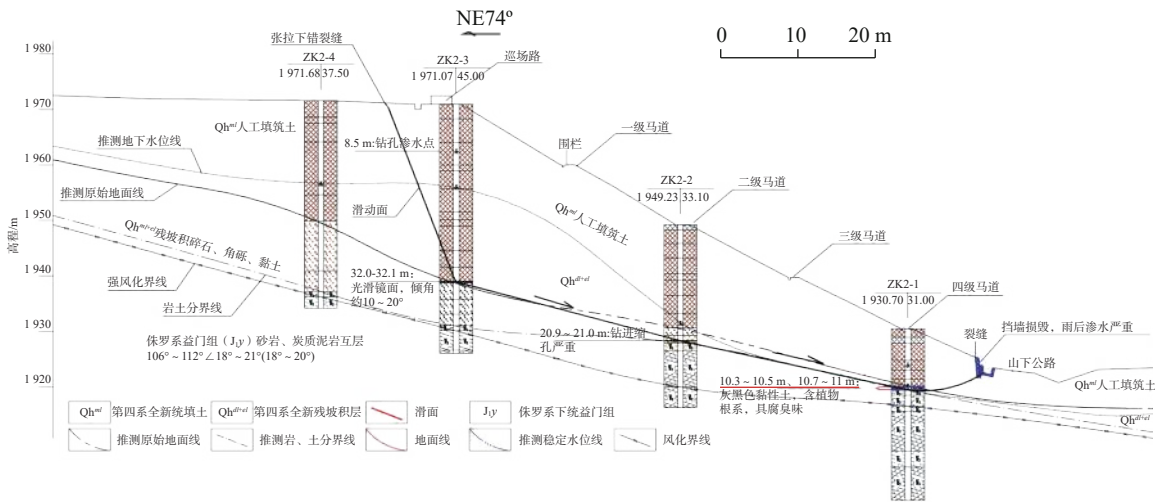


图 2 典型工程地质断面
Fig. 2 The typical engineering geology cross-section

研究区内存在一鱼塘向斜,向斜轴走向 NNW,向 SSE 倾伏,其轴部通过跑道中心点附近,滑坡所在区在该向

斜东北翼,地层产状 $106^{\circ} \sim 112^{\circ} \angle 18^{\circ} \sim 21^{\circ}$,见图 3。岩层中发育有两组张节理,J1 节理: $65^{\circ} \sim 87^{\circ} \angle 85^{\circ} \sim 87^{\circ}$,间

距 3 ~ 5 m, 闭合—微张开; J2 节理: $264^{\circ} \sim 280^{\circ} \angle 82^{\circ} \sim 86^{\circ}$, 间距 5 ~ 15 m, 闭合—微张, 两组节理均黏土或硅质充填。



图 3 坡脚基岩露头

Fig. 3 Outcrop of bedrock at the slope toe

1.2 滑坡基本特征

该滑坡平面形态呈“簸箕”状, 见图 4。且前缘不对称。滑坡纵向长约 162 m, 横向宽约 246 m, 后缘至剪出口高差最大 68 m, 钻孔揭露滑体最大厚度 32.3 m, 滑体总体积约 $50.42 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为一大型填筑体滑坡。



图 4 滑坡全貌^[14]

Fig. 4 Overall view of the landslide^[14]

该滑坡周界清晰, 后缘位于土面区张拉下错裂缝处, 裂缝走向 $NE24^{\circ} \sim NE33^{\circ}$, 与巡场路(坡口线)走向基本一致。左侧界依附于巡场路至一级马道处剪切裂缝, 走向 $SW21^{\circ} \sim SE33^{\circ}$ 滑坡右侧以巡场路张开裂缝北端至五级马道截水沟沟壁外倾变形段为界。滑坡剪出口在坡体南侧沿坡脚便道、截水沟沟底展布, 至五级马道截水沟倾倒损毁处沿该平台向北延伸。

该滑坡发育有一层滑带(面), 主滑段滑动带(面)依附于全风化残、坡积层。滑带土以残坡积层中灰白色黏土夹层为主, 含水量高, 呈软塑状, 泥膜呈灰白色, 滑面泥膜处可见明显粗粒土擦痕, 见图 5。揉皱严重, 倾角随滑面位置的不同而略有变化, 主滑段滑面倾角 $12^{\circ} \sim 17^{\circ}$ 滑面埋深最大达 32.3 m, 横向呈中间深、两侧浅, 在南、北两侧受老地面控制。

1.3 水文地质条件

1.3.1 大气降雨时空分布特征

根据机场气象台 2007 年至 2019 年年平均降水量

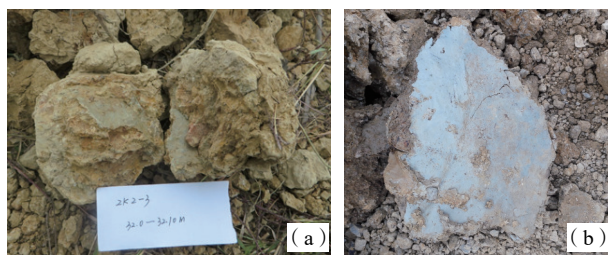


图 5 钻孔(a)、桩坑(b)中揭露滑面

Fig. 5 Exposed sliding surfaces in boreholes (a) and pile pits (b)

图(图 6)可知, 研究区年平均降水量为 792 mm, 年最大降水量发生于 2017 年, 为 1 025.2 mm。年最小降水量发生于 2012 年, 为 496 mm。年平均降水天数 97 d。由图 7 可知, 研究区雨季为 5—10 月, 平均降水量为 737.16 mm, 占全年降水量的 95%。前汛期(5—7 月)多年平均降水量为 385.13 mm, 占雨季降水量的 52%。后汛期(8—10 月)多年平均降水量为 352.03 mm, 占雨季降水量的 48%。旱季 6 个月, 年平均降水量仅为 54.84 mm, 仅占全年降水量的 5%。以上数据充分说明滑坡区雨季降雨集中, 降雨强度大。

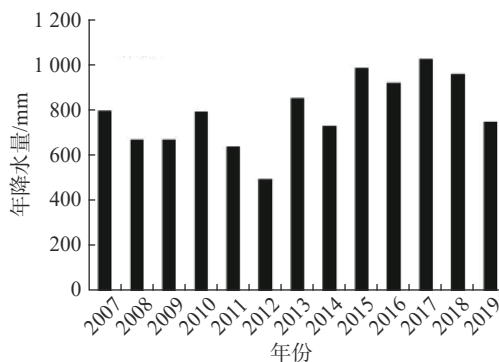


图 6 2007—2019 年年降水量分布图

Fig. 6 Distribution map of annual average rainfall from 2007 to 2019

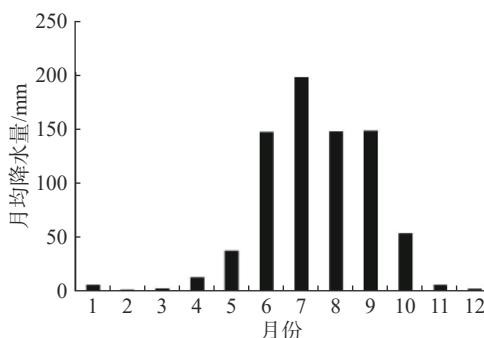


图 7 2007—2019 年月平均降水量分布图

Fig. 7 Distribution map of monthly average rainfall from 2007 to 2019

1.3.2 持续降雨、暴雨分布特征

大量研究表明^[15-17], 大量滑坡发生于中雨—暴雨、

持续降雨之后。攀枝花机场每年均出现大量中—暴雨及持续降雨,对机场降雨数据的详细统计分析后,得到了 2010—2019 年每年中雨及以上出现次数及每年连续 3 d 出现降雨次数,具体见图 8。由图 8 分析可知,按日均降水量标准计算,中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)及暴雨(≥ 50 mm)出现次数,年平均为 24.5 次,每年平均连续 3 d 及以上出现降雨天数为 14 次。中—大暴雨、3 d 及以上出现降雨天数出现次数集中于雨季 7—9 月,占总数的 95% 以上。充分说明滑坡区降雨具有雨季降水量强度大且集中的特点。

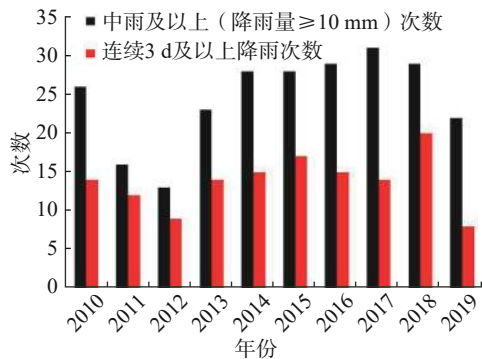


图 8 2010—2019 年中雨及以上次数、连续 3 d 降雨次数分布图
Fig. 8 Distribution map of the frequency of moderate rain or more for consecutive 3-days rainfall events from 2010 to 2019

1.3.3 地下水类型及赋存

研究区内存在两种类型的地下水,分别为赋存于松散堆积层的孔隙水和基岩中的裂隙水。根据物探及钻孔揭示,区内松散堆积层孔隙水包含上层滞水及孔隙潜水。松散堆积层孔隙水主要赋存于人工填筑土及第四系残坡积层、滑坡堆积层中,其分布受填料类型及填料密实度的影响,以上层滞水的类型赋存,上层滞水位于地下水位线以上填土中,由于填料及压实度差异导致该层水分分布不均,无统一水面,且各水体间地下水连通性较差。

物探成果(图 9)表明,二级马道以上至场坪土面区地段电阻率明显偏低,说明该处为滑坡体主要富水区域,具有“窝”状不连续分布特征,具有明显的成层性。通过钻孔中含水层段岩芯分析表明,含水层具有黏土含量高、赋水性较好、孔隙连通性差、径流不畅,坡内水难以快速消散等特点。孔隙潜水分布于基岩顶面原始地层中。现场调查,填筑体 4 级、5 级马道平台截水沟及坡脚挡墙损坏段可见地下水渗出,见图 10。坡脚鱼池处可见基岩与覆盖层界限处亦有地下水渗出。主要受上游降雨入渗、浅层基岩裂隙水沿层面运移及上层滞水沿隔水底板边缘下渗补给,沿基岩顶面向下游径流至鱼塘排泄。

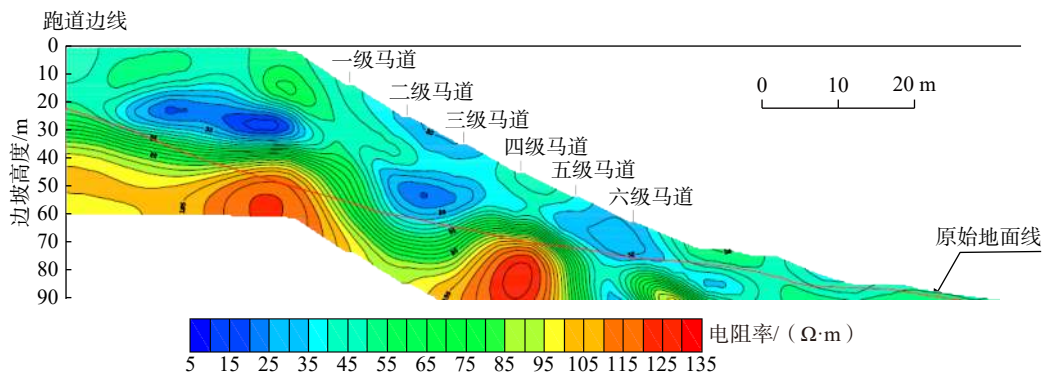


图 9 典型剖面物探成果
Fig. 9 Typical section geophysical survey results

2 治理方案

2.1 治理难点与关键

(1)滑坡的变形具有启动突然,启动后变形加速发展的特点,是一高风险滑坡,治理工程属应急抢险工程。

该滑坡自发现地表宏观变形迹象,立即采取地表变形监测。典型位移/沉降—时间曲线见图 11。由图 11 分析表明,坡体处于等速变形阶段,且变形发展迅速。



图 10 坡脚、平台水沟地下水出露
Fig. 10 The underground water emergence from slope foot, platform ditch

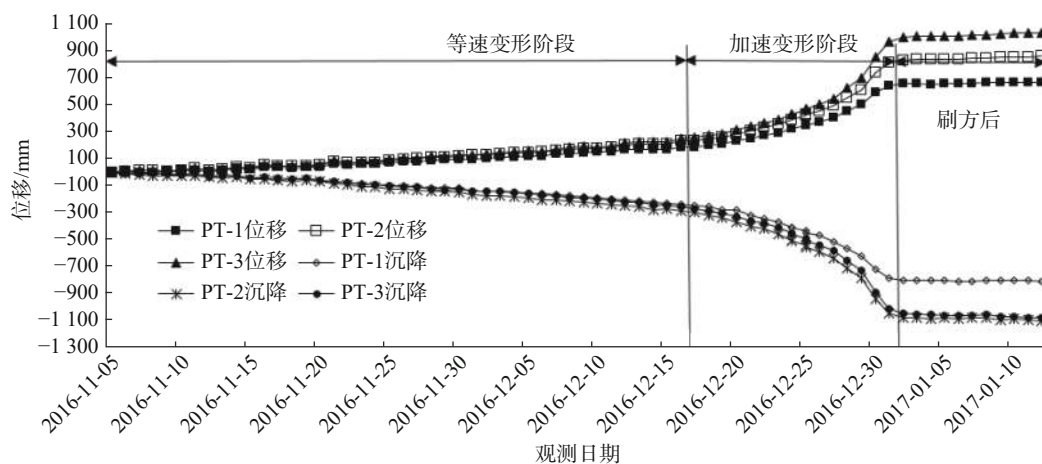


图 11 一级马道监测点累计位移/沉降-时间曲线

Fig. 11 Cumulative displacement/settlement - time curve of level 1 monitoring point

因此,该滑坡的勘察设计及施工不能按常规的一般滑坡进行,应按应急抢险治理工程对待,对勘察设计及施工提出了挑战。

(2)滑坡具有有利于地表水下渗但不易排出的结构特征。

该滑坡发育在斜坡上填筑的超高(最高达 68 m)填筑体边坡上。填筑体下伏基岩为缓倾顺层侏罗系炭质泥岩、砂岩。研究区地层结构示意图见图 12。由图 12 分析可知,受特殊的上软下硬单斜顺倾坡体结构影响,使地下水向同一个方向的汇集具有了沿层面渗流的条件,基岩中发育的两组张性节理,形成了基岩中的裂隙水渗流通道,使得基岩裂隙水从机场西侧甚至机场山梁西侧直接进入滑体有了地下通道。机场填筑边坡时,由于底部及填筑体内设置的排水措施偏少,地下水不能及时排除。

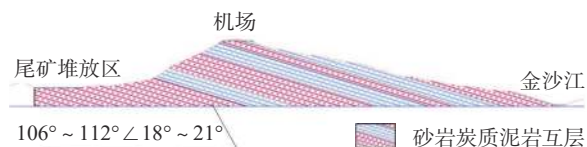


图 12 滑坡区地层结构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of strata structure in the landslide area

(3)降水量大、降雨集中,坡体地下水丰富,如何疏排地下水是滑坡治理成败关键。

由前述水文地质条件分析可知,滑坡区降雨充沛,且主要集中在 5—10 月,雨季降水量平均占年降水量的 95% 左右,降雨具有“集中”“量大”“暴雨多”等特点。坡体地下水位高。该段填筑体高边坡在 13 年后产生滑坡,突出原因是滑坡地下水丰富且排水不畅,并且

地下水位逐年增高,导致滑体自重的增加,滑带土长期浸泡后,强度衰减,产生了滑动变形。因此,如何设置地下排水措施是该滑坡治理成功的关键。

2.2 治理理念

由于该滑坡地下水丰富且难以排出,地下水的来源主要有两个方面,一是滑坡区及后侧宽阔机场场坪汇集的降水。除少部分经地表排水系统排走,大部分降水下渗至坡体内,再向水位较低的临空方向渗流。而研究区钻探揭露滑体填土层具有的黏土含量高、赋水性较好、孔隙连通性差、径流不畅的性质,导致由场坪下渗的地下水在坡体内难以得到及时的消散。二是研究区地层为一典型的砂泥岩互层单斜地层结构,滑坡西侧机场以外的部分地下水沿砂岩层面、裂隙及泥岩顶面向填方区坡体渗流,地层中有张开的节理裂隙较发育,为地下水的补给提供了途径,是该段地层中的地下水通道,顺层面、节理裂隙方向从西向东流动,向滑坡体不断补给。因此考虑在滑体内设置排水工程措施。工程设计应充分考虑如何疏排地下水,应采取支挡与疏排地下水并重的治理理念。

2.3 治理方案

基于该滑坡的特点与难点,治理工程采用应急工程与永久工程相结合、支挡与疏排地下水相结合的方式

进行。应急治理主要为滑坡后缘减载和疏排滑坡地下水,具体采用仰斜排水孔排水。

永久工程治理方案采用支挡工程与排水工程相结合的方式进行。支挡结构根据滑坡推力大小,采用普通抗滑桩、预应力锚索抗滑桩强支挡。地下排水结构措施采用集水井联合井内仰斜排水孔疏排地下

水。具体工程平面布置图见图 13,工程断面布置图见图 14。

具体集水井设置在一级马道围栏外坡面,设置 6 个集水井,直径 4m,采用 C30 钢筋砼浇筑。为加大集水井疏排地下水的范围及能力,在井壁设置 1~4 排放射状集水斜孔以疏排滑体中的地下水,将地下水引至集水井内,然后通过井间导流管将水引至下一个集水井,最终将坡体中地下水排至滑坡体以外。具体集水井设置见图 15。

3 排水工程效果分析

该滑坡应急治理及永久治理工程实施后,对其稳定性进行了综合评估与长期位移监测,综合评估结果见表 1,长期位移监测见图 16。由表 1 可知,该滑坡体采用支挡与排水并重的方式治理后,坡体处于稳定状态。排水工程的实施,使得坡体中地下水及时疏排与水位降低且雨季不再,保证了岩土体抗剪强度不衰减,有利于坡体的长期稳定。由图 16 可知,治理工程实施后,坡体

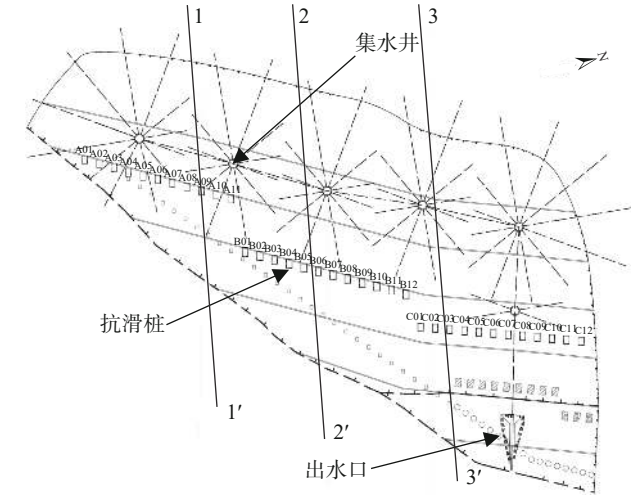


图 13 滑坡治理平面布置简图

Fig. 13 Schematic diagram of landslide control layout

位移无增大趋势,水平位移及沉降曲线均呈水平状,坡体处于稳定状态。

为评价集水井联合仰斜排水孔排水效果,在两个排水口水口(图 17)进行了出水量监测。图 18、19 为两个排水

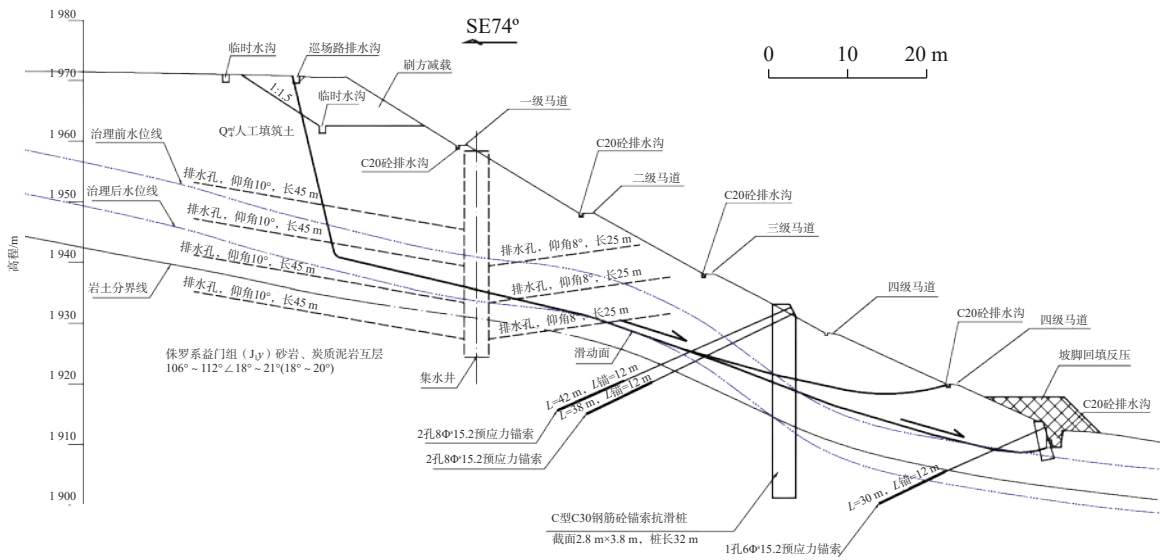


图 14 典型工程治理断面图

Fig. 14 The cross-section of typical engineering governance

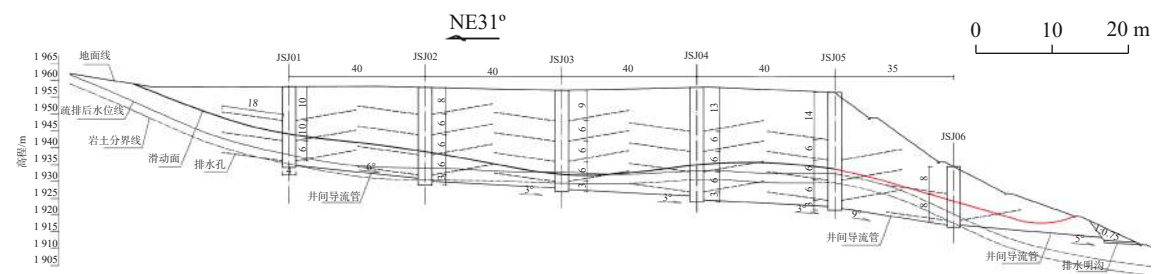


图 15 集水井横断面布置图

Fig. 15 The cross section layout of water collection wells

表 1 治理前后稳定性评估结果

Table 1 Stability assessment results before and after treatment

序号	断面 编号	治理前稳定系数			应急刷 体积/m ³	设支护结构后增加 抗滑力/(kN·m ⁻¹)	设集水井后地下水 降低高度/m	治理后稳定系数		
		自然工况	暴雨工况	地震工况				自然工况	暴雨工况	地震工况
1	1-1'	1.03	1.00	0.86	23 516	1 740	5.8	1.35	1.31	1.25
2	2-2'	1.03	1.00	0.85		2 730	6.5	1.34	1.33	1.26
3	3-3'	1.02	0.99	0.82		2 609	7.2	1.35	1.32	1.26

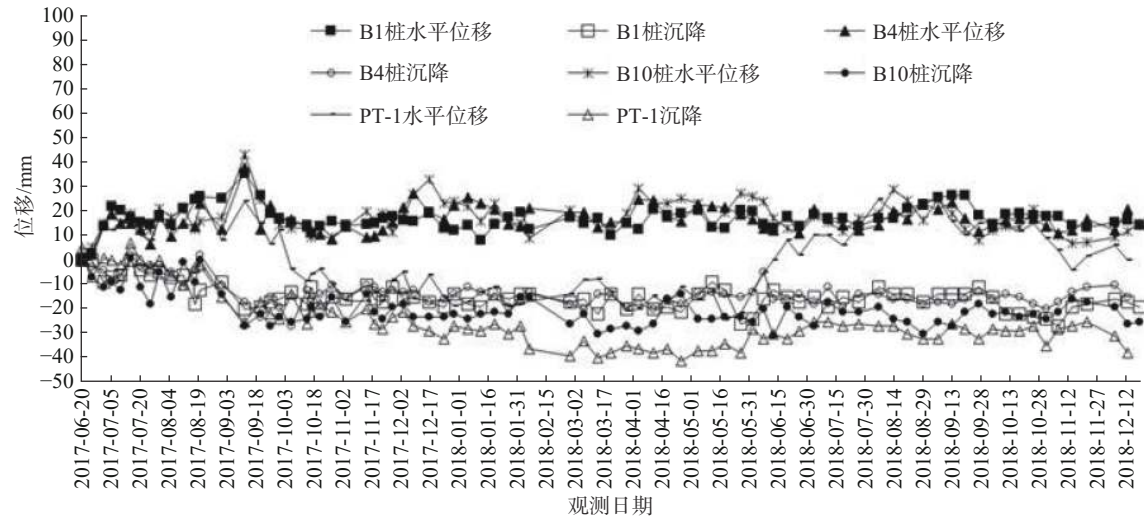


图 16 累计位移(沉降)—时间曲线

Fig. 16 Accumulated displacement (settlement) - date curve



图 17 集水井出水口(左:出水口 1;右:出水口 2)

Fig. 17 The collection well outlet (left: water outlet 1; right: water outlet 2)

口流量-日降水量-时间曲线图。

图 18 为出水口 1 涌水量—降水量—时间曲线。分析表明,排水初期,由于为雨季,降水量较大,涌水量较大,在 250 ~ 500 mL/s。2017 年 10 月后随着降水量的锐减,涌水量也呈迅速下降趋势,涌水量基本小于 50 mL/s。2018 年进入雨季后,降水量增多,但出水口 1 涌水量没有明显的增加,基本稳定在 10 mL/s。图 19 为出水口 2 涌水量—降水量—时间曲线。分析表明,出水口 2 涌水量基本随降水量变化而变化。表现为,降水量大,涌

水量大,降水量小,涌水量小。但排水口 2 总体涌水量没有排水口 1 大。综合比较可以得出,排水初期,坡体内长期蓄存的地下水,基本通过排水口 1 在近两个月的时间排出,2018 年 1 月后,两个排水口基本响应了大气降雨,及时排走了坡体内下渗的地下水。

4 结论

以攀枝花机场 13#滑坡治理工程为例,在简述滑坡基本概况的基础上,着重论述了研究区水文地质条件,基于该滑坡治理难点及特性,探讨了滑坡治理方案,提出了基于支护与疏排地下水并重的治理方案,并评估了井孔联合疏排地下水措施的排水效果,得到了以下几条结论。

(1)研究区雨季降水量占全年降水量的 95%,中—大暴雨、3d 及以上出现降雨天数出现次数集中于雨季 7 ~ 9 月,占总数的 95% 以上。充分说明研究区降雨具有雨季降水量强度大且集中的特点。

(2)物探及钻探揭示,滑坡后缘场坪填方区地下水丰富,具有“窝”状不连续分布特征,明显的成层性;含水层具有黏土含量高、赋水性较好、孔隙连通性差、径流不畅,坡内地下水难以快速消散等特点。

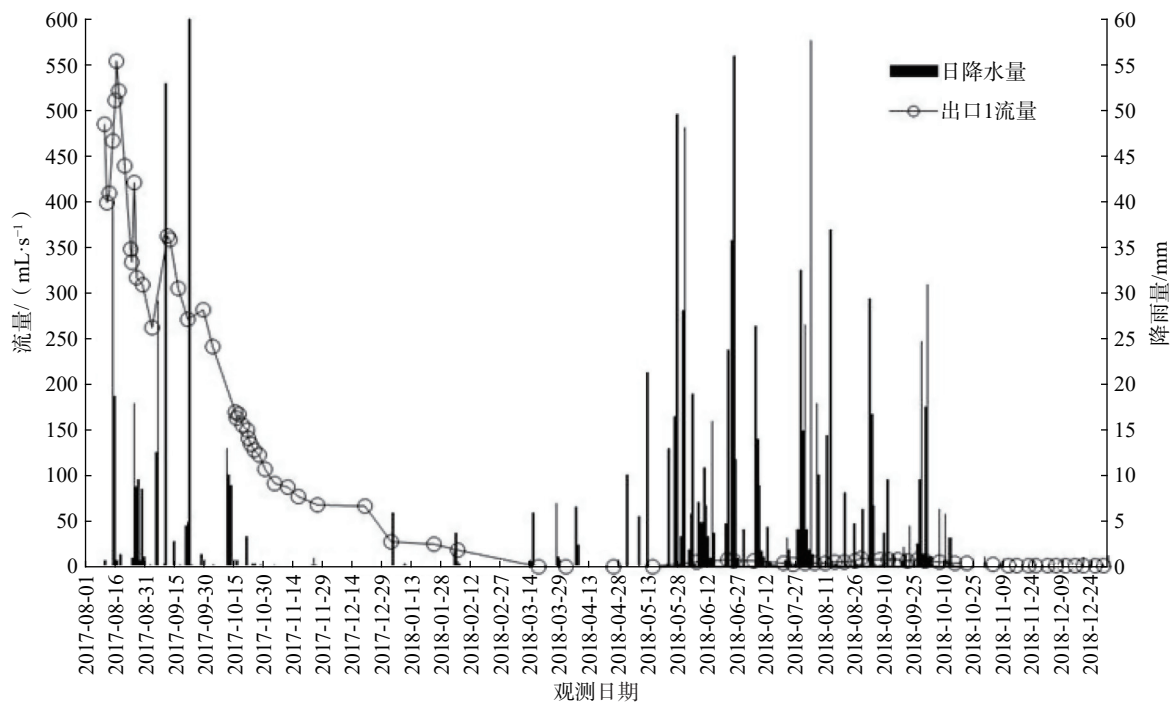


图 18 排水量—降水量—时间曲线(出口 1)

Fig. 18 Water inflow – rainfall – time curve (outlet 1)

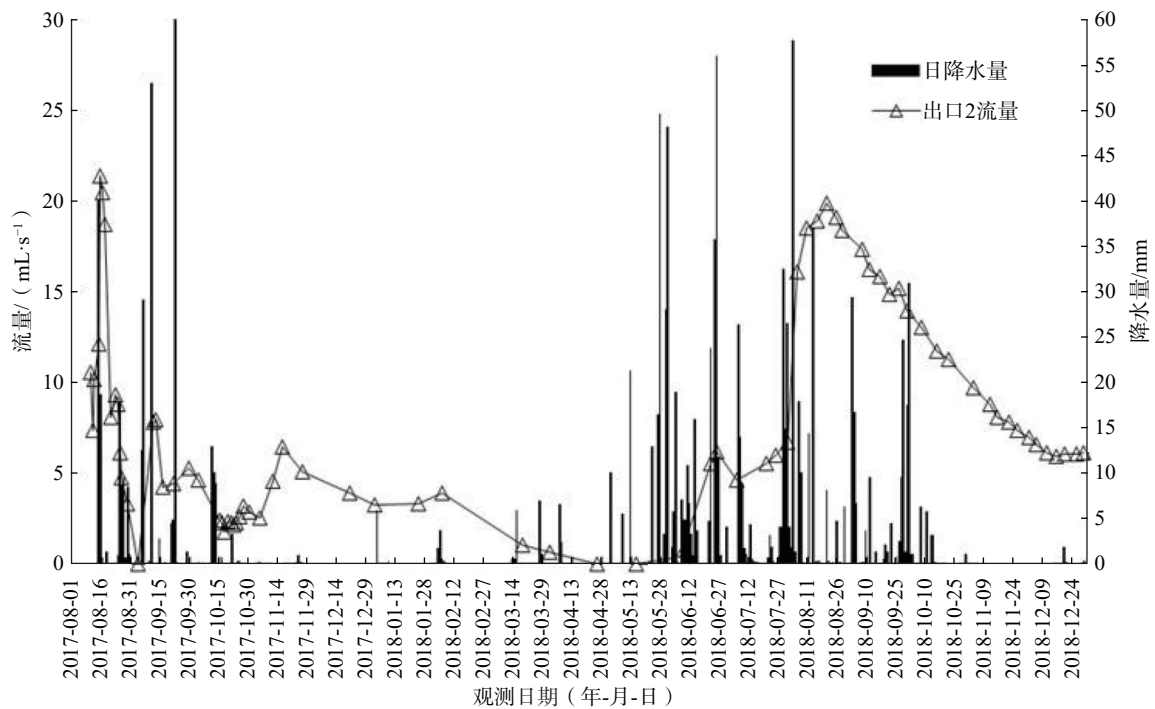


图 19 排水量—降水量—日期曲线(出口 2)

Fig. 19 Water inflow – rainfall – time curve (outlet 2)

(3)采用支挡与疏排滑坡地下水整治理念治理滑坡。采用集水井联合孔内仰斜排水孔疏排地下水,竣工后通过测试其排水量,效果良好,滑坡体长期处于稳定状态。

参考文献(References):

[1] 张作辰. 滑坡地下水作用研究与防治工程实践 [J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 80 – 85. [ZHANG Zuochen. Study on groundwater action of landslide and its prevention engineering

- practice [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1996, 4(4): 80–85. (in Chinese with English abstract)
- [2] 魏丽敏, 何群, 林镇洪. 考虑地下水影响的滑坡稳定性分析 [J]. *岩土力学*, 2004, 25(3): 422–426. [WEI Limin, HE Qun, LIN Zhenhong. Stability analysis of landslide under influence of groundwater [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(3): 422–426. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王文沛, 殷跃平, 王立朝, 等. 排水抗滑桩技术研究现状及展望 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(2): 73–83. [WANG Wenpei, YIN Yueping, WANG Lichao, et al. Studies on status and prospects of anti-slide shaft technology [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(2): 73–83. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 瞿生军, 赵建军, 丁秀美, 等. 降雨诱发缓倾顺层滑坡机制离散元模拟 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 120–126. [QU Shengjun, ZHAO Jianjun, DING Xiumei, et al. Discrete element simulation of rainfall induced shelving bedding landslides [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 120–126. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘礼领, 殷坤龙. 暴雨型滑坡降水入渗机理分析 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(4): 1061–1066. [LIU Liling, YIN Kunlong. Analysis of rainfall infiltration mechanism of rainstorm landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(4): 1061–1066. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 徐邦栋. 高壑坡设计及病害分析与防治 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011. [XU Bangdong. Design of high cutting slope, disease analysis and prevention [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011. (in Chinese)]
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 滑坡防治设计规范: GB/T 38509—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. [State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for the design of landslide stabilization: GB/T 38509—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)]
- [8] 孙红月, 尚岳全. 浙江上三公路 6# 滑坡的地下水作用与控制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 505–510. [SUN Hongyue, SHANG Yuequan. Groundwater effect on landslide and its control along Shangyu-Sanmen highway in Zhejiang Province [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 505–510. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 赵杰. 截水隧洞在箭丰尾滑坡治理工程中的应用 [J]. *甘肃科技*, 2014, 30(15): 112–115. [ZHAO Jie. Application of intercepting tunnel in Jianfengwei landslide treatment project [J]. *Gansu Science and Technology*, 2014, 30(15): 112–115. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 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 Yuequan, CAI Yueliang, WEI Zhenlei, et al. Siphon drainage method for landslide prevention [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(4): 706–711. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 孙红月, 帅飞翔, 尚岳全, 等. 边坡俯倾排水孔负压排水法研究 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(3): 585–591. [SUN Hongyue, SHUAI Feixiang, SHANG Yuequan, et al. Study on negative pressure drainage method of downdip borehole in slope [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(3): 585–591. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 任姗姗, 尚岳全, 何婷婷, 等. 边坡虹吸排水数值模拟方法及应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(10): 2022–2027. [REN Shanshan, SHANG Yuequan, HE Tingting, et al. Numerical simulation method for siphonic drainage in slope and its application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(10): 2022–2027. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 汪磊, 尚岳全, 吕俊俊, 等. 虹吸排水抗淤堵能力模型试验与理论分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(2): 384–389. [WANG Lei, SHANG Yuequan, LYU Junjun, et al. Model test and theoretical analysis of anti clogging capacity of siphon drainage [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(2): 384–389. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 马翔, 赖国泉. 某山区机场高填方滑坡变形特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(4): 16–23. [MA Xiang, LAI Guoquan. Analysis on deformation monitoring of a high fill landslide in a mountain airport [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(4): 16–23. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张珍, 李世海, 马力. 重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3185–3191. [ZHANG Zhen, LI Shihai, MA Li. Probability analysis of relationship between landslide and rainfall in Chongqing area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3185–3191. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 蒋涛, 崔圣华, 冉耀. 开挖和降雨耦合诱发滑坡机理分析——以四川万源前进广场滑坡为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(3): 20–30. [JIANG Tao, CUI Shenghua, RAN Yao. Analysis of landslide mechanism induced by excavation and rainfall: A case study of the Qianjin Square landslide in Wanyuan City, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(3): 20–30. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 孟生勇, 江兴元, 杨义, 等. 降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(1): 104–112. [MENG Shengyong, JIANG Xingyuan, YANG Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1): 104–112. (in Chinese with English abstract)]