

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-11

不当钻探施工引发的滑坡变形加剧机理 ——以浙江松阳范山头滑坡为例

罗晓娟

(浙江公路水运工程咨询有限责任公司, 浙江 杭州 310006)

摘要:浙江省松阳县范山头滑坡是具有两层滑动带的中型土质滑坡,地质条件复杂,2010年初次发现之后,一直处于蠕变变形阶段。2018年7月开始对其采取虹吸排水工程治理。在治理施工过程中,钻探用水大量漏失,导致滑坡深部出现57~74 mm的累计变形量直至测斜孔剪断,滑坡地表裂缝最大宽度达到了17.5 mm。停止钻探,启动虹吸排水之后,滑坡裂缝停止扩大,深部位移量控制在1 mm之内。本文基于此次实际抢险过程中的各项监测数据,分析蠕变型滑坡对地下水径流场变化的双向响应过程,并应用水力学和有效应力原理对这个响应过程进行机制分析。得出了在设计计算和工程实践中,必须充分考虑地下水径流渗透力,不可盲目忽略不计的结论,并再次验证排出滑坡体内的地下水是增强滑坡稳定性的快速有效手段之一。

关键词:蠕变型滑坡;钻探漏水;滑坡响应;地下水径流;渗透力

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0084-07

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

LUO Xiaojuan

(Zhejiang Highway & Water Transportation Engineering Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310006, China)

Abstract: Fanshantou landslide in Songyang is a medium-sized soil landslide with two sliding belts. The geological conditions are complex. After the first discovery in 2010, it has been in a period of peristaltic deformation. In July 2018, it began to adopt siphon drainage engineering. During the process of treatment and construction, a large amount of drilling water was lost, resulting in a cumulative deformation of 57 to 74 mm in the depth of the landslide until the oblique hole was cut, and the maximum width of the landslide surface crack reached 17.5 mm. After stopping drilling and starting siphon drainage, the landslide cracks stopped expanding, and the deep area displacement was controlled within 1 mm. Based on the monitoring data of the emergency rescue, this paper analyzes the bidirectional response process of moving landslide to the changes of groundwater flow field, and analyzes the mechanism of the response process by means of hydraulics and effective stress principle. It is concluded that groundwater runoff permeability must be fully considered in design calculation and engineering practice, and can not be ignored blindly.

Keywords: moisturing landslide; drilling leaks; landslide response; groundwater runoff; permeability

0 引言

蠕变型滑坡,是滑坡演化的一个发展阶段,可以持

续几个月失稳,也可以长达数十年始终不进入剧滑破坏

阶段^[1-2]。蠕变型滑坡的变形演化和稳定性,是滑坡系

收稿日期: 2020-08-18; 修订日期: 2020-12-21

作者简介: 罗晓娟(1982-),女,湖北宜昌人,硕士,高级工程师,主要从事高边坡与地质灾害防治相关研究。E-mail: 253885502@qq.com

统对环境输入的响应,其中地下水又是各项输入因子中最为敏感的一项。这个响应是双向的,研究这个响应过程,对实施滑坡防治工程有十分重要的应用价值。

目前,我国关于这种蠕动型滑坡对地下水的响应研究,大部分集中在水库水位波动和降雨的自然条件下^[3-6]。鲜少见到蠕动型滑坡对于施工中钻探漏水的响应特征相关论述,这种扰动特征与自然条件截然不同。相对而言,不考虑地表水与地下水之间的人渗转化关系,对地下水径流场的扰动更直接、更密集,类似于原位试验,因而有着更好的研究条件。

浙江省松阳县范山头滑坡具有两层滑动带,结构复杂。2010年初次发现之后,一直处于蠕动变形阶段,是一个典型的复杂蠕动型滑坡。2018年采用虹吸排水工程对该滑坡治理。在虹吸排水孔钻探施工过程中,由于钻孔循环液(水循环)大量漏失,导致滑坡出现较大变形,施工场地出现重大风险。在采取紧急措施降低水位之后,滑坡趋于稳定。

本文基于这次抢险的实际地下水位、裂缝、深层位移监测数据,结合钻探、物探、岩土测试、室内反演等工作,研究蠕动型滑坡对地下水径流场变化的双向响应过程,为揭露地下水在滑坡中的作用提供宝贵案例。

1 滑坡特征

浙江省松阳县范山头滑坡周界呈圈椅状(图1),前宽后窄,后缘为斜坡陡坎-梯田区域,高程490~498 m,前缘为道路切坡和沟谷自然陡坡,高程在442~445 m,两侧以自然冲沟为界。滑坡纵长约182 m,横宽143 m,面积20 436 m²。滑坡地形前陡中缓后陡,后部坡度35°,中部较缓约5°,前部坡度32°~40°。主滑方向

190°。

滑体厚度20~30 m,滑坡体积约35×10⁴ m³。滑体物质可分为结构差异明显的上、下两层(图2),上层为灰黄色含角砾粉质黏土,角砾含量在5%~20%之间,粒径0.2~2.0 cm,饱和,可塑,切面粗糙,其余为黏性土,干强度中等~高,层厚1.4~9.4 m;下层为灰黄色碎石土,湿,中密~密实,颗粒级配分选性差,变化大,碎石含量在50%~80%之间,粒径2~15 cm不等,个别达到18 cm,碎石母岩成份为凝灰岩,层厚12.0~23.3 m。滑

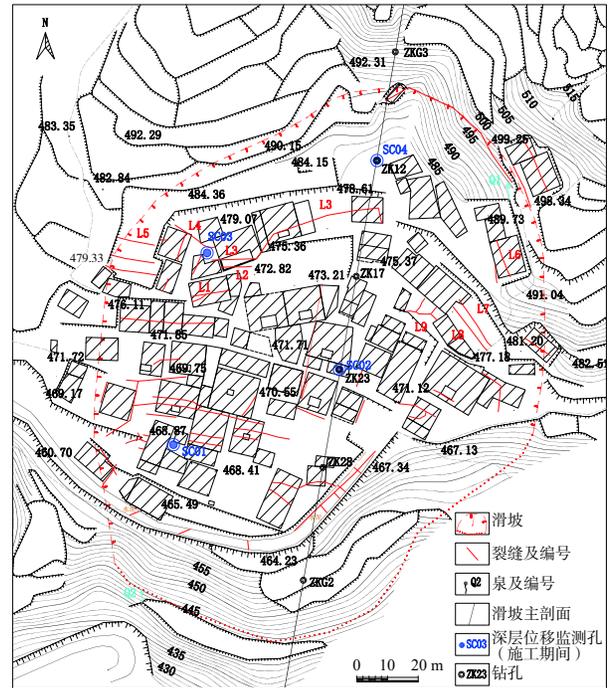


图1 范山头滑坡平面图

Fig. 1 Map of Fanshantou Landslide

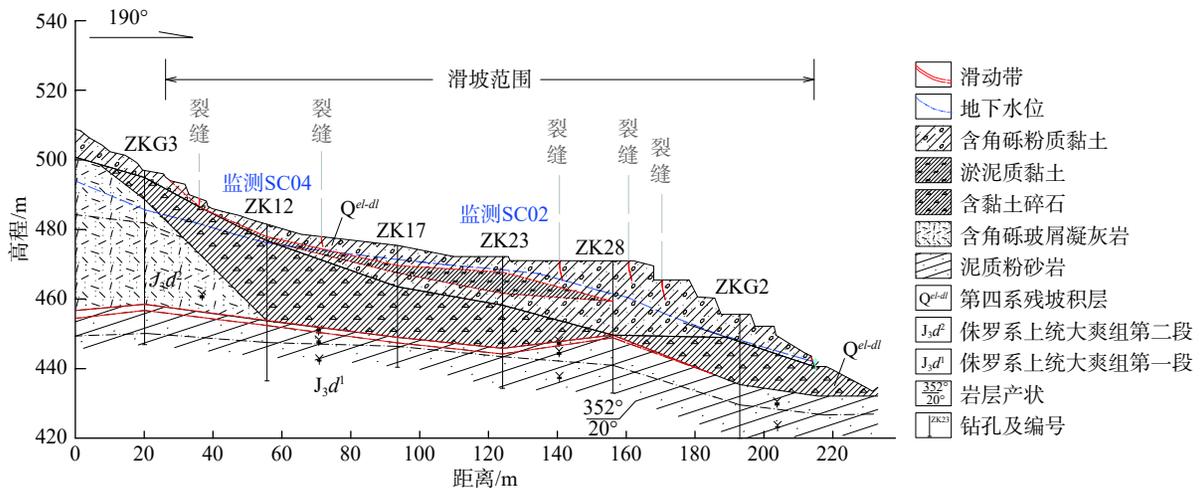


图2 范山头滑坡主剖面图

Fig. 2 Main Profile of Fanshantou Landslide

坡体中零星分布碎石土或黏土透镜体。

滑坡中发育两层滑动带(图 2):上部滑动带发育于含角砾粉质黏土中,为青灰色软可塑淤泥质黏土,饱和快剪黏聚力 28.3 kPa,内摩擦角 18.8°,反演黏聚力值 9 kPa,内摩擦角 12°,该层层顶埋深在 0.3~12.2 m,层厚 0.9~6.1 m;下部滑动带发育在土岩结合面上,为饱和、软塑状全风化泥质粉砂岩,反演黏聚力值 18.5 kPa,内摩擦角 8°,层顶埋深 14.2~27.8 m,层厚 0.4~1.6 m。

滑床为侏罗系上统大爽组第一段(J₃d¹)灰黑色、灰

白色沉凝灰岩、凝灰质粉砂岩、泥质粉砂岩,凝灰质、粉砂质结构,层状构造,泥质粉砂岩单层厚度 0.5~1.0 cm,沉凝灰岩单层厚度 15~20 cm。整体呈舒缓波浪状起伏,总体倾向北侧,倾角约 5°~20°。

与滑坡体地质结构相对应,滑坡区上部含角砾粉质黏土渗透性较差,为弱含水层,含水层渗透系数为 2.528×10⁻³ m/d;下部碎石土渗透系数较好,为主要含水层,对应物探低阻区(图面为蓝色,如图 3);下层软弱带渗透性差,为隔水层,对应物探高阻区(图面为黄色)。

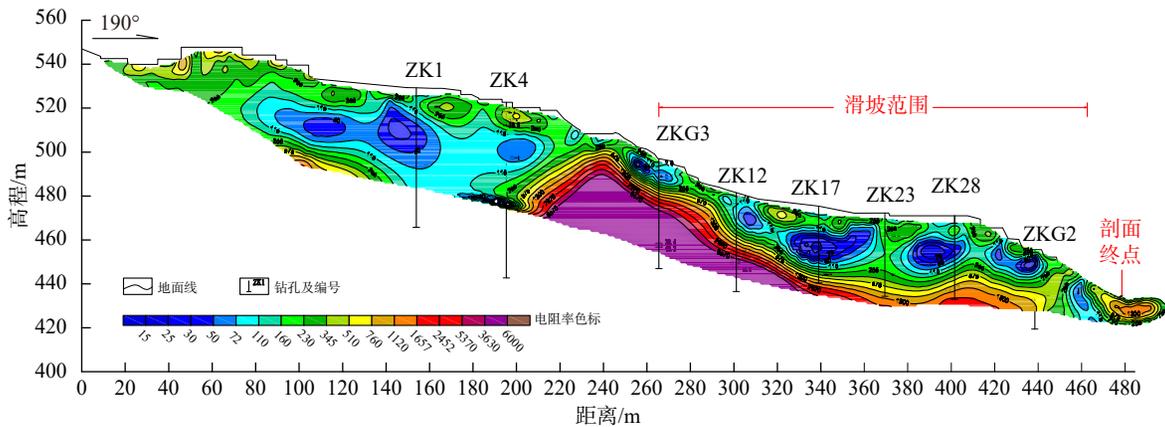


图 3 范山头滑坡物探剖面

Fig. 3 Projective Profile of Fanshantou Landslide

滑坡前、后缘水位埋深较大,在 11~14 m 之间,滑坡中部水位埋深均较浅,在 2~6 m 之间,与上层滑动带基本吻合。滑坡勘查时间为 2017 年 4 月 19 日—2017 年 5 月 18 日,降雨量普遍较小,为平水期,水位变动幅度不大,普遍在 1 m 之内。滑坡区有两处地下水露头:滑坡后缘的泉 Q1 流量在 7.6~12.1 m³/d 之间波动;滑坡前缘的泉 Q2 流量在 4.2~17.0 m³/d 之间波动。

2 滑坡变形特征

2.1 施工前滑坡变形特征

该滑坡发现于 2010 年 7 月,多处民房墙体和地面出现裂缝,裂缝宽度 5~15 cm,大小不一,村庄中间出现一条基本连通弧形裂缝 L1,走向 70°~80°,裂缝最宽处 10 cm,最大错落 6 cm。2010 年 7 月—2013 年 11 月,是该滑坡变形最为显著的时间,滑坡体上方共发育裂缝 62 条,滑坡体后缘、中部以拉张裂缝为主,两侧以剪切裂缝为主,前缘裂缝发育不明显(图 1、表 1)。

该滑坡变形受降雨量影响十分明显,其中 2012 年 2 月 17 日—2 月 23 日的短暂监测数据(图 4)表明,在强降雨(59 mm)后,滑坡地表有 10 mm 的位移。

2013 年底,滑坡采取砌筑截、排水沟,水改旱,搬迁等措施,该滑坡变形逐渐得到控制,裂缝不再发展。截止到 2018 年 6 月,该滑坡地表变形特征不明显,处于基本稳定状态。

2.2 钻探漏水后滑坡变形特征

2018 年 10 月该滑坡区降雨量较小(图 5),仅在 10 月 10 日、14 日有大于 10 mm 的降雨,其余时间段降雨均在 5 mm 以下。根据之前滑坡监测数据(图 4)认为,10 月份的降雨量不足以导致滑坡产生大的变形。换句话说,本次施工期变形跟地表降水关系不大。

该滑坡采用虹吸排水工程降低水位,共布设两级虹吸排水孔,其中第一级虹吸排水孔位于滑坡中部,孔口

表 1 范山头滑坡裂缝统计表

Table 1 List of Characteristics of Cracks

裂缝走向/(°)	条数	比例/%	发育部位	形态
100~120	32	51.6	滑坡体中部、后缘	直线形
5~30	17	27.4	滑坡体右翼和前部	直线形
150~175	11	17.7	滑坡体左翼	直线形
81	1	1.61	滑坡体后缘	弧形
130	1	1.61	滑坡体后缘	弧形

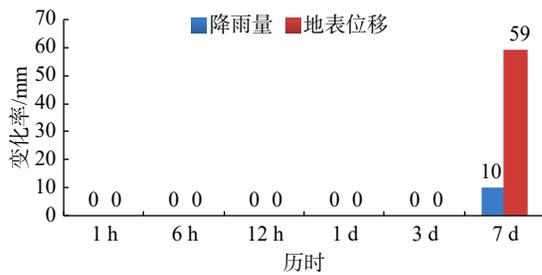


图4 位移、降雨量监测数据

Fig. 4 Surface displacement monitoring and rainfall monitoring data

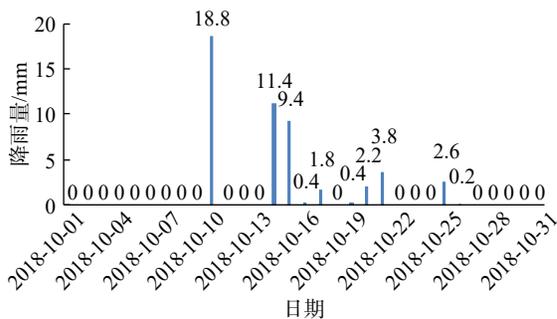


图5 降雨量方格图 (2018年10月)

Fig. 5 Chart of rainfall distribution in October 2018

标高位于高程 470.0~477.9 m,成孔竖直角 20°,孔距 3 m,孔深 50 m;第二级虹吸排水孔位于滑坡周界后缘山体斜坡,孔口标高位于高程 517.8~529.2 m。布设虹吸排水斜孔 141 个,采用潜孔钻进行钻进,水经过增压后到孔内作为循环液和冷却液。

2018年10月7日—18日,在第一级虹吸排水孔钻进过程中,由于地层破碎,钻探用水在地下 13~20 m 左右大量漏失,无返水,漏失量达到 70~80 m³/d,对应地层为滑坡下部灰黄色碎石土层,该层碎石含量高,粒径较大,容易形成局部空隙,利于地下水下渗,径流速度较快。漏水位置地下水位未见明显上升,但是滑坡前缘泉 Q2 流量显著增多。10月18日开始,滑坡地表、深层位移监测同时出现明显变形迹象。

(1) 滑坡地表位移

在滑坡中后缘 L1 裂缝附近再次出现断续相连的九条裂缝,整体呈弧形,其中发展最快的一组裂缝(最中间裂缝 9)10月30日出现,在11月4日宽度达到了 17.5 mm;其余 8 组裂缝发展趋势基本相同,基本都是在 11月4—9号左右达到裂缝最大宽度(图 6)。滑坡其余部位未见裂缝变形现象发生。

(2) 滑坡深部位移

由于滑坡活动显著,监测 SC02 孔于 2018 年 10 月 20 日失效,剪断位置位于孔内-26 m 处。SC01 监测孔数据显示,从 2018 年 10 月 21 号至 10 月 29 号,该孔显

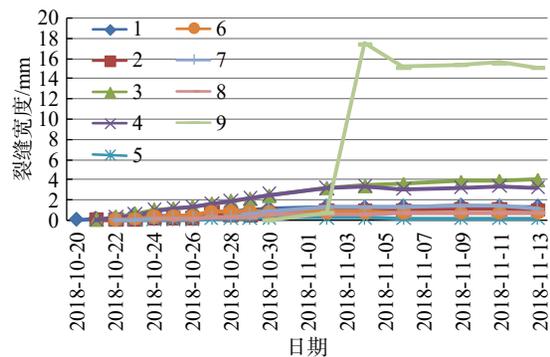


图6 施工期裂缝宽度曲线图

Fig. 6 Chart of cracks during construction

著位移发生于孔内-19.5 m 处,单次测量变形最大量 40.07 mm,累计最大变形量 74.04 mm,直至 11 月初在 19.5 m 深度处剪断。这两个监测孔位于滑坡中前缘(图 1),发生变形最大位置对应深层滑动带(土岩结合面,全风化泥质粉砂岩)(图 7)。

滑坡中后缘监测孔 SC03 和 SC04 明显位移出现在浅部滑动带(青灰色软可塑淤泥质黏土),约在孔内-3~-5 m 位置(图 7)。单次测量变形最大量分别为 29.41 mm 和 35.65 mm,累计最大变形量 57.18 mm 和 57.93 mm。

通过图 7 可以知道,本次施工扰动导致的变形,是深层滑动带位移量大于浅层,滑坡前缘的深部位移大于滑坡后缘,变形时间上来看也是深层早于浅层。

值得注意的是,本次施工扰动变形穿过两层软弱带,在滑坡中后缘的碎石土层中形成了新的滑动带(图 8)。

2.3 虹吸排水后滑坡变形特征

滑坡险情发生之后,为了控制滑坡进一步发展,立即停止钻探,并启动所有已经施工完成的虹吸排水孔,开始向坡体外部排水,日排水量达到 100 m³/d,逐渐增大。经过一个星期的抽水,虹吸排水孔内的水位平均下降 2~5 m(图 9)。滑坡裂缝没有进一步发展扩大(图 10),也无其他变形迹象。

3 滑坡响应机制分析

3.1 钻探漏水-变形响应机制分析

本采用有效应力原理对漏水-变形这个响应过程进行机制分析。

以滑坡体单元作为研究对象,采用水土分算法,滑坡体骨架单元受到的作用力共有土颗粒重力、浮力、渗透力等。

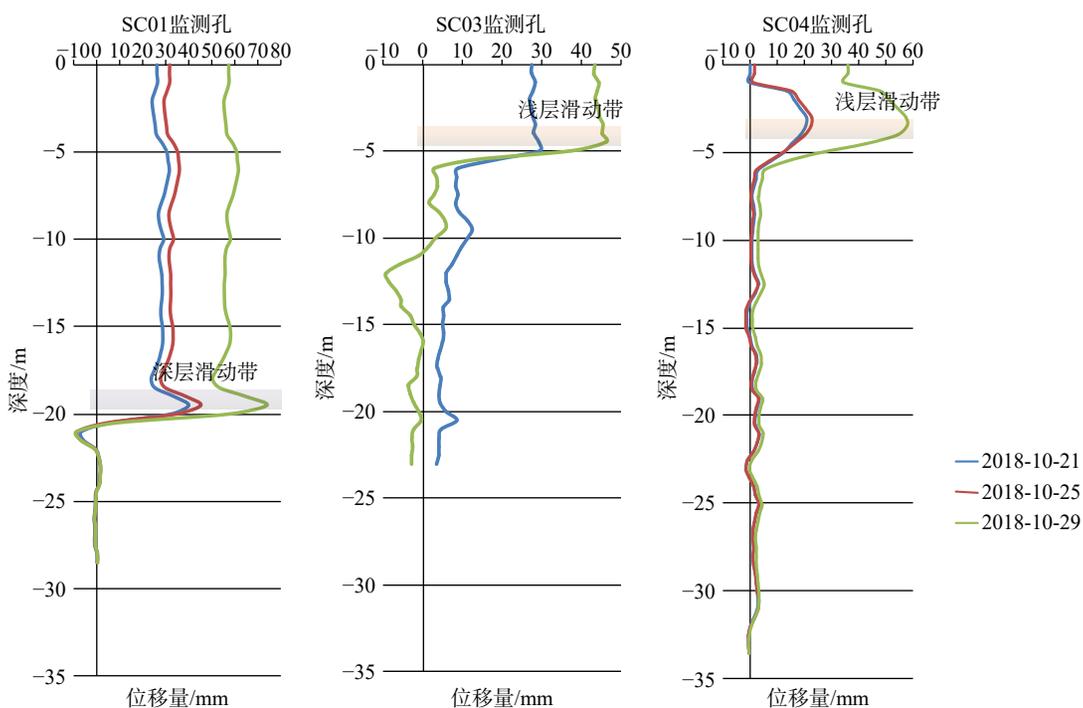


图 7 钻孔深部位移曲线图

Fig. 7 Variation of the accumulative subsurface displacement with depth measured using a borehole inclinometer

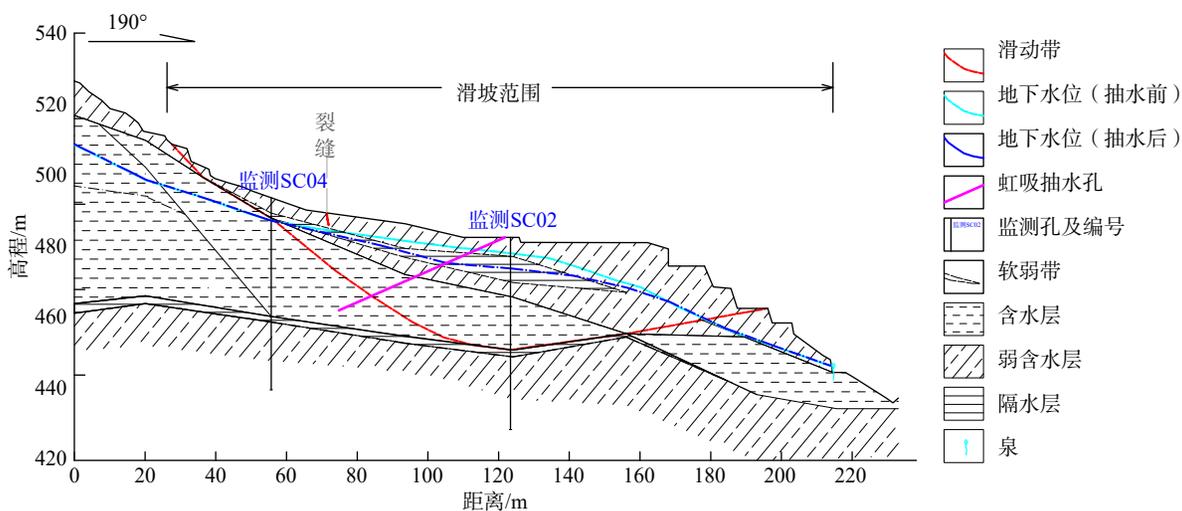


图 8 范山头滑坡水文地质剖面图

Fig. 8 Hydrogeology profile of Fanshantou landslide

根据水力学原理,某点受到的孔隙水压力表示为:

$$H = z + \frac{p}{r_w} + \frac{u^2}{2g}$$

式中: H ——该点总水头;

z ——位置水头;

$\frac{p}{r_w}$ ——压力水头;

$\frac{u^2}{2g}$ ——速度水头。

一般情况下,由于地下水实际流速较小,速度水头忽略不计^[6]。

本次滑坡施工过程中,由于地层破碎导致大量钻探用水直接进入滑坡下部碎石土层,坡体内地下水位未见明显上升,下方泉流量急剧增大。这种短期急剧变化的渗流场,产生了非稳定渗流,渗流途径短,渗流量大,因而地下水径流速度较快,速度水头较之初始稳定渗流场有了明显增加,因此,滑坡体单元总水头增加,孔隙水压

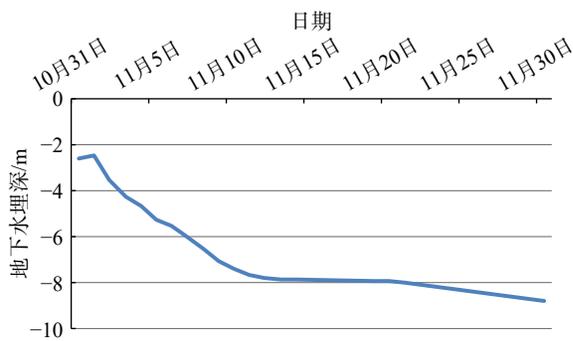


图9 虹吸排水后滑坡地下水位变化图(监测SC02孔)

Fig. 9 Changes of groundwater level after siphon drainage

力增加。

根据饱和土有效应力原理,单位断面积的饱和土体受到的总应力 σ 为有效应力 σ' 与孔隙水压力 u_w 之和,即

$$\sigma = \sigma' + u_w$$

本次滑坡险情,除了地下水径流场受到干扰,其余条件未发生变化,因此可以认为滑坡的总荷载恒定。

钻探用水大量漏失导致地下水径流场改变后,孔隙水压力急剧增加,总应力不变,有效应力急剧降低^[7]。土体的有效抗剪强度因此也急剧降低。

利用理正软件,根据简布法对滑坡进行稳定性计算可知,滑坡稳定系数从1.134降低到0.965,从基本稳定状态直接到了临界失稳状态,与本次滑坡险情的实际情况相符。

从滑坡的变形位置来看,滑坡中部钻探漏水位于浅层滑动带以下,短期急剧增加的地下水渗流对滑坡中前部的土颗粒产生了明显的拖拽力,也就是渗透力^[8],使得土体沿着原深层软弱带产生滑动,因此最初变形就是滑坡前缘的SC01和SC02监测孔的深层滑动带位移增大(图7),直至测斜孔剪断,浅层滑动带位移量较小。滑坡中前部受到渗透力拖拽产生蠕动之后,后部滑坡体因为失去侧向支撑而发生主动土压破裂^[1],从而沿原浅层软弱带发生再次滑动(图7),并形成拉张裂缝。所以滑坡后缘的变形从时间上出现较晚,从规模上也较前缘小。

这种响应机制说明了地下水渗透力是本次滑坡出现险情的主要因素。虽然目前受到各种条件限制,我们还无法测得非稳定渗流场的孔隙水压力值,但是在工程实践中必须充分考虑渗透力的影响,而不能盲目忽略不计。

3.2 虹吸排水-稳定响应机制分析

通过虹吸排水工程排出滑坡体内部地下水后,滑坡中部地下水位降低了2~5m,滑坡体单元的压力水头明显下降。停止继续向滑坡体内部钻探之后,漏水问题

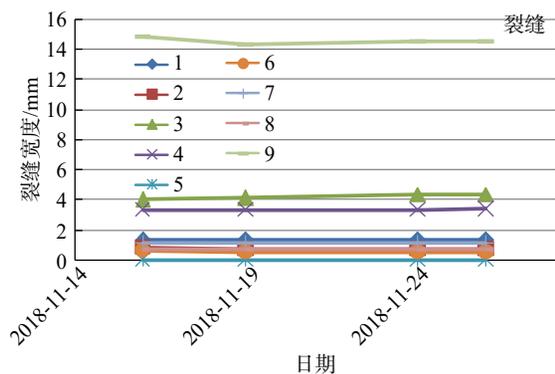


图10 虹吸排水后裂缝宽度曲线图

Fig. 10 Chart of cracks after siphon drainage

得到解决,地下水渗流速度下降,速度水头减小,滑坡体单元总水头减小,孔隙水压力减小,从而有效应力明显增加。

经计算,滑坡稳定系数从0.965增加到1.320,与排除后滑坡监测数据相吻合,滑坡达到稳定状态。

这种反向响应机制再次证实了排出坡体内的地下水是增强滑坡稳定性最为有效也最为简便的手段^[9-12]。

4 结论

本次施工险情-抢险过程只针对滑坡内部地下水径流场进行干扰,可以看作是一次关于滑坡地下水与变形双向响应的原位试验:

(1)虹吸排水施工的钻探用水在地下13~20m左右的碎石土层大量漏失后,监测到地下水位并未明显上升,剪出口附近泉流量急剧增大。3天后,滑坡深部开始出现位移,2周后深部出现57~74mm的累计变形量直至3周左右时将测斜孔剪断,与之对应,滑坡地表2周后开始出现裂缝,3周后裂缝最大宽度达到17.5mm。

(2)施工漏水改变了滑坡原有地下水径流场,产生了非稳定渗流,径流速度较快,速度水头较之初始稳定渗流场有了明显增加,滑坡体单元总水头增加。滑坡总荷载不变的情况下,有效应力急剧降低,导致土体的有效抗剪强度因此也急剧降低,这是滑坡出现险情的原因。

(3)从滑坡的变形位置来看,钻探漏水主要影响滑坡中前缘的深层滑动带,并形成渗透力,使得土体产生滑动。滑坡中前部蠕动之后,后部滑坡体因为失去侧向支撑而发生主动土压破裂,从而沿原浅层软弱带发生再次滑动,形成拉张裂缝。所以滑坡后部的浅层滑动带变形从时间上出现较晚,变形量也较小。本次险情是一个典型的牵引式蠕动。

(4)发现险情后,立即停止了地下水补给,并开始向坡体外部排水,日排水量达到100m³/d,1周后,地下水

位平均下降 2 ~ 5 m, 滑坡变形停止并趋于稳定。

(5) 通过虹吸排水工程排出滑坡体内部地下水后, 滑坡体的压力水头明显下降, 地下水渗流速度下降, 速度水头减小, 滑坡体单元总水头减小, 从而使得有效应力明显增加, 土体的有效抗剪强度增加。这次抢险过程证实了排出坡体内的地下水是增强滑坡稳定性最为有效也最为简便的手段。

参考文献 (References) :

- [1] 王恭先. 滑坡学与滑坡防治技术文集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010: 130-131. [WANG Gongxian. Anthology of landslide science and landslide prevention technology[M]. Beijing: China Communication Press, 2010: 130-131. (in Chinese)]
- [2] 孙森军, 唐辉明, 王潇泓, 等. 蠕变型滑坡滑带土蠕变特性研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 385-392. [SUN Miaojun, TANG Huiming, WANG Xiaohong, et al. Creep properties of sliding-zone soil from a creeping landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 385-392. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 夏敏, 任光明, 马鑫磊, 等. 库水位涨落条件下滑坡地下水渗流场动态特征 [J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 399-405. [XIA Min, REN Guangming, MA Xinlei, et al. Dynamic responses of groundwater seepage of landslide influenced by fluctuation of reservoir water level [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(3): 399-405. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 许旭堂, 简文彬. 滑坡对降雨的动态响应特征及其监测预警研究 [J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 203-210. [XU Xutang, JIAN Wenbin. Dynamic response of pengkeng landslide to rainfall and its monitoring and early warning [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(2): 203-210. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 向家松, 文宝萍, 陈明, 等. 结构复杂滑坡活动对库水位变化的响应特征——以三峡库区柴湾滑坡为例 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 71-84. [XIANG Jiasong, WEN Baoping, CHEN Ming, et al. Activity response of a landslide with complex structure to fluctuation of reservoir water level: a case study of the Chaiwan landslide in the Three Gorges Reservoir [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 71-84. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 尹晓萌, 晏鄂川, 杜毅, 等. 库水位下降条件下堆积层滑坡稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(3): 8-15. [YIN Xiaomeng, YAN Echuan, DU Yi, et al. Stability of colluvial landslide with drawdown of reservoir water level [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(3): 8-15. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 尹晓萌, 晏鄂川, 刘旭耀, 等. 对土体稳定性计算中地下水作用力的探讨 [J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-9. [YIN Xiaomeng, YAN Echuan, LIU Xuyao, et al. Study on force of underground water in the soil stability calculation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李广信. 关于有效应力原理的几个问题 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 315-320. [LI Guangxin. Some problems about principle of effective stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 315-320. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 56-60. [CHEN Zhongyi, ZHOU Jingxing, WANG Hongjin. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 56-60. (in Chinese)]
- [10] 殷跃平. 中国滑坡防治工程理论与实践 [J]. 水文地质工程地质, 1998, 25(1): 5-9. [YIN Yueping. Theory and practice of Chinese landslide prevention and control engineering [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1998, 25(1): 5-9. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 苏永华, 蹇宜霖, 张航. 基于滑带软化的滑坡渐进破坏机制分析 [J]. 公路工程, 2019, 44(1): 32-37. [SHU Yonghua, JIAN Yilin, ZHANG Hang. Analysis of landslide progressive failure mechanism based on sliding zone softening [J]. Highway Engineering, 2019, 44(1): 32-37. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 屠义伟. 公路浅表型滑坡检测技术选用及施工技术应用研究 [J]. 公路工程, 2018, 43(3): 297-302. [TU Yiwei. Study on selection of highway shallow phenotypic landslide detection technology and application of construction technology [J]. Highway Engineering, 2018, 43(3): 297-302. (in Chinese with English abstract)]