

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.03.03

复杂路堑高边坡施工期多次滑动机理分析与讨论

王 浩¹, 王明哲¹, 陈秀晖², 泮 俊²

(1. 福州大学环境与资源学院资源与城乡建设系, 福建 福州 350116;

2. 中国公路工程咨询集团有限公司中咨华科交通建设技术有限公司, 北京 100195)

摘要: 工程开挖及降雨等因素诱发高边坡在施工过程中产生多次滑动, 由“小变形”演变为“大灾害”, 充分体现滑坡成因的复杂性、多样性, 以及滑坡防治方案比选、优化及实施过程中面临的困难。本文依托典型路堑高边坡病害防治案例研究, 首先, 概要介绍了边坡工程地质模型、先后产生 3 次滑动的变形破坏特征, 以及相应阶段的工程控制对策; 然后, 采用节理有限元法模拟在工程开挖及地下水位变化条件下边坡渐进变形破坏演化过程, 分析多次滑动的成因及降雨触滑机制; 最后, 从破坏模式预测与修正、失稳因素识别与控制、支护方案比选与调整、施工时机选择与规避、工程质量管理与控制等方面讨论了该滑坡治理的经验与教训。研究指出: 工程开挖阶段是边坡处于欠稳定状态的敏感时期, 在此期间遭遇反复降雨抬升地下水位, 将使边坡稳定性骤降, 进而演化为多次累进式滑动变形。滑坡防治是包含边坡稳态的定性判断、定量计算和动态评估, 有针对性的优选滑坡防治方案, 合理规划治理方案实施时机与过程, 严格管理和监控工程质量的系统性工程风险调控过程。

关键词: 路堑高边坡; 降雨; 滑坡; 滑坡成因; 滑坡防治

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)03-0014-08

Analysis and discussion on the mechanism of multiple sliding for cutting high slope during construction

WANG Hao¹, WANG Mingzhe¹, CHEN Xiuhui², PAN Jun²

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

2. China Highway Engineering Consulting Corporation, Zhong Zi Hua Ke Traffic Construction Technology Co., Ltd, Beijing 100195, China)

Abstract: Slide of cutting high slope was frequently induced by rainfall during excavation, which gradually turned the small deformation of slope to large hazard. It embodies the complexity, diversity of landslide mechanism, the difficulty in selection, optimization and implementation of control scheme. Based on the case analysis of disaster control to typical cutting high slope, this paper summarily introduced the engineering geological model of slope, the characteristics of deformation and failure of triple sliding, and the corresponding measures. The evolutionary process of progressive deformation and failure inside slope under the condition of excavation and water level variation were simulated using finite element method. The causes of sliding and triggering mechanism by rainfall were analyzed. Finally, the experiences and lessons of landslide control was concluded, as the forecast and fix of failure mode, identification and control of unstable factor, optimization and adjustment of supporting measures, selection and avoidance of construction occasion, management and control of engineering quality were discussed. It was summarized that engineering excavation stage was a

收稿日期: 2015-09-19; 修订日期: 2015-09-27

基金项目: 福建省自然科学基金(2013J01159); 交通运输部建设科技项目(201331849A130); 福建省交通运输科技发展项目(201242)

第一作者: 王 浩(1978-), 男, 江苏盐城人, 博士, 副教授, 主要从事边坡工程及地质灾害防治方面的研究。E-mail: h_wang@126.com

sensitive condition of the slope instability, groundwater level raising caused by continuous rainfall simultaneously decreased the stability of slope, which resulted into frequent progressive sliding deformation. Landslide control is a systematic process of engineering risk regulation which consists of qualitative judgment, quantitative calculation and dynamic assessment of slope stability, targeted optimization of landslide control schemes, reasonable plan in occasion and process of treatment, strict management and monitor of engineering quality.

Keywords: cutting high slope; rainfall; landslide; landslide mechanism; landslide control

0 引言

近年来,伴随国内山区公路和铁路建设的跨越式发展,路堑高边坡的工程数量、建设规模和灾害严重性均备受关注。路堑高边坡的开挖及加固一般需经历较长施工周期;在此期间,开挖坡体不仅经历卸荷松动及伴生的岩土强度劣化过程,还经常遭遇雨水入渗及地下水位剧烈变幅等恶劣工况,导致边坡稳定性逐步降低并产生渐进变形,甚至多次滑动破坏。这种情况在工程建设过程中相当普遍,例如:京珠高速公路 K108 滑坡开挖后发生 4 次大变形,多次变更设计,施工过程中的降雨是多次滑动的重要诱因^[1];渝黔高速公路向家坡滑坡在 1998 至 2004 年间,因开挖和降雨等因素先后诱发 5 次大变形,危及公路安全运营,多次修建抗滑工程,损失难以估量^[2];永安箭丰尾滑坡不仅在永武高速公路建设时产生多次滑动,而且在 2010 年福建地区特大水灾的持续强降雨触发下,该滑坡在建成运营不到一年就整体复活,最终演化成为总体积约 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的超大型滑坡^[3]。因此,工程开挖的扰动和施工过程中的降雨触滑机制十分复杂,不仅导致巨额的经济损失,并造成严重的社会影响,深入开展这方面的研究具有重要的研究意义与工程价值。

影响路堑高边坡稳定性的因素众多,但实践表明降雨是工程滑坡的关键诱因之一(卿三惠^[4],2005;吴树仁等^[5],2013),这一领域的研究近年来也备受重视。Peters R R 和 E A Klavetter (1998)^[6]、戚国庆(2004)^[7]、徐平(2010)^[8]在非饱和土力学理论上研究了降雨入渗导致浅层岩土基质吸力变化和强度损伤规律,及其对边坡稳定性的影响。殷坤龙(2002)^[9]、许建聪(2005)等^[10]、吴火珍(2010)等^[11]研究降雨导致地下水位变化诱发滑坡活动的规律,并引入滑体饱水面积比指标作为降雨条件下滑坡稳态变化的特征指标。近年来,大型离心机试验平台及降雨模拟设备的改装,为开展降雨诱发滑坡机理的试验模拟提供了强有力的途径(Take^[12],2002;詹良通^[13],

2011)。这些研究成果为解释降雨诱发滑坡机理奠定了理论基础,但对于路堑高边坡在施工过程中经历持续降雨,进而产生累进式变形破坏的复杂机制,却因为研究案例及监测资料的缺乏而存在研究不足。

沈海复线高速公路漳州段 K65 滑坡在路堑开挖后触发滑坡,在滑坡治理过程中遭遇征地延误、锚索锚固力不足和抗滑桩挖桩困难,屡次延误施工良机,导致滑坡在多次降雨过程中变形解体并逐步牵引发展,先后实施了 3 次变更设计,变形性质复杂。作者基于该滑坡治理工程中设计、施工、监测和管理等方面问题的研究,力图解释路堑高边坡施工过程中的降雨触滑机制,为类似工程灾害的防控提供参考和依据。

1 边坡变形破坏特征及工程对策

1.1 边坡工程地质模型

K65 滑坡位于沈海复线高速公路漳州市平和县境内,里程桩号为 K64+875~K65+130。该边坡上部为凝灰质砂岩风化坡残积土及全风化、砂土状强风化层,下部为碎块状强风化、弱风化凝灰质砂岩,为典型二元结构边坡(图 1、图 2)。

该边坡原设计为 5 级挖方边坡,稳定性评价认为开挖后边坡处于欠稳定状态,采用第 1、2 级预应力锚杆框架和第 4 级预应力锚索框架,结合坡脚排水的综合治理方案(图 3)。

1.2 第一次滑动变形特征及工程对策

2011 年底,该边坡在漳州地区降雨不断持续的气候背景下陆续开挖,至 3 月初形成了上部 3 级裸露坡面(图 4)。由于开挖过程中,坡表植被破坏和地形改造,特别是边坡平台没有及时硬化,坡表积水非常严重,且未及时施作必要的加固工程或应急措施。3 月中旬,边坡后缘陆续产生 3 道张裂缝,边坡前缘沿基覆界面剪出变形,产生整体滑动(图 4)。

滑坡发生后,设计单位综合分析确定了图 5 所示的治理方案,即以卸载反压提高边坡稳定性,第 3、5 级锚索框架重点加固,第 2、4 级钢锚管框架注浆固结滑

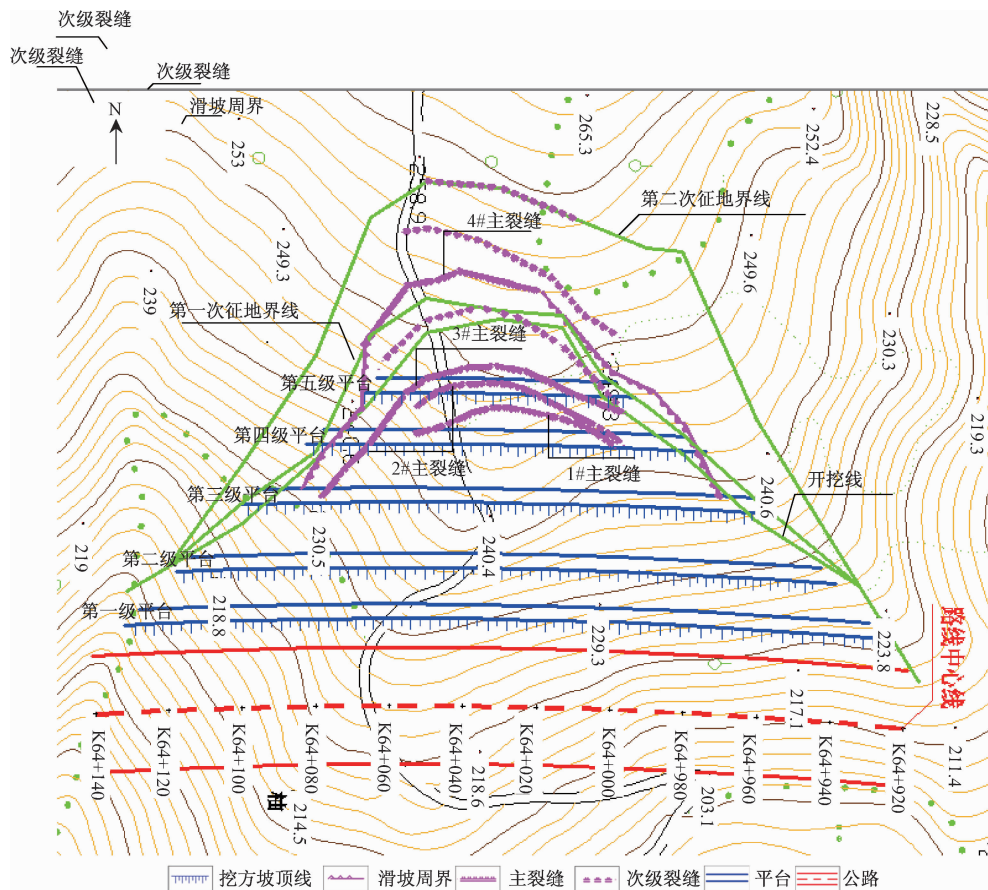


图1 K65 滑坡平面分布图

Fig.1 Plane distribution graph for K65 landslide

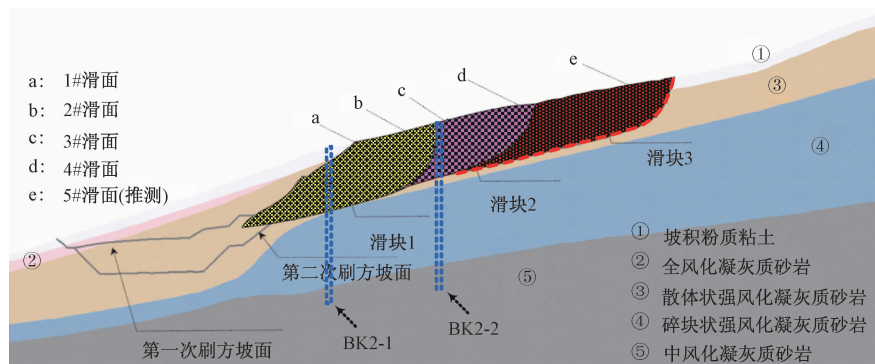


图2 K65 滑坡典型工程断面图

Fig.2 Typical engineering sectional drawing for K65 landslide

体并兼以加固,结合坡脚支挡及排水的综合治理对策。

但是由于征地困难,加固和应急措施难以实施,并且延误时间过长,随着降雨过程的持续,该部分滑体变形充分发展,并伴随大量水土流失(图6),对滑坡的牵引发展埋下了隐患。

1.3 第二次滑动变形特征及工程对策

2012年9月,建设单位才完成卸载刷方的征地,此时前缘滑体已变形解体,后缘裂缝依次下错,并在既

有张裂缝后部30 m处发现一条环形张裂缝(图7)。

为控制滑坡变形发展,施工单位陆续开始了卸载刷方和锚固工程施工。2012年11月对第5级坡面的锚索框架进行了拉张。然而,应急工程实施的滞后,难以控制既有滑体变形发展的趋势,不仅4#牵引裂缝继续张开并下错,在其后40 m位置又发现疑似断续分布的地表拉裂现象(图8)。同时,也发现锚索锚固力严重不足和注浆钢锚管压浆质量差等工程质量问题。

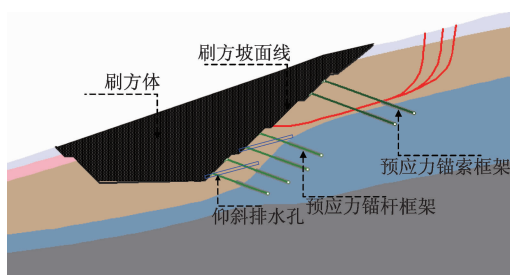


图3 初始设计方案
Fig. 3 Initial design scheme

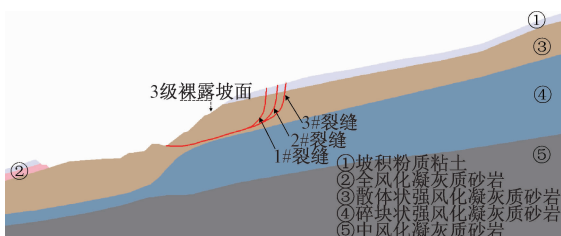


图4 第一次滑动变形特征示意图
Fig. 4 Deformation characteristic of first sliding

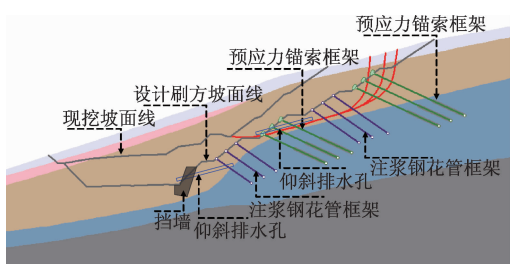


图5 第一次变更设计方案
Fig. 5 First change design scheme



图6 持续降雨诱发的水土流失
Fig. 6 Soil erosion induced by sustained rainfall

为根治滑坡,设计单位紧急对注浆与锚固工程的布置范围进行了优化,并在边坡中部布设了一排埋入式抗滑桩,调整的设计方案见图9。

1.4 第三次滑动变形特征及工程对策

抗滑桩工程是保证该工程整体安全的重要措

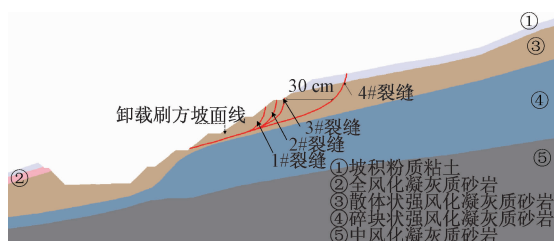


图7 第二次滑动变形特征示意图
Fig. 7 Deformation characteristic of second sliding

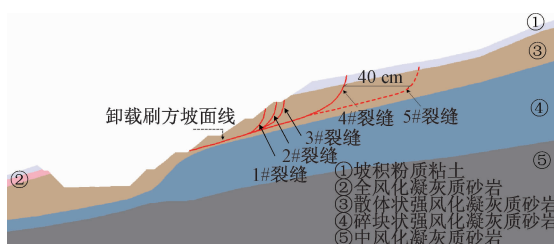


图8 地表拉裂示意图
Fig. 8 Diagram of surface crack

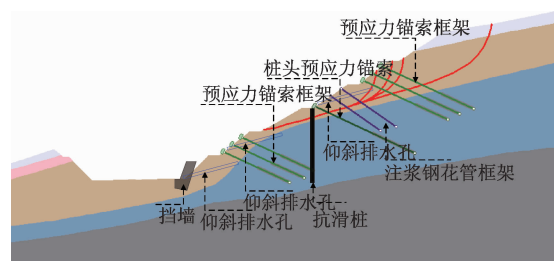


图9 第二次变更设计方案
Fig. 9 Second change design scheme

施,但是挖桩施工却由于年关将近的施工队伍短缺和第一批施工队伍的半途而废,耽误了最佳施工季节。2013年3月,在雨季挖桩的恶劣工况下,边坡上部的残留滑体产生大变形,从抗滑桩上部坡体越顶剪出变形,甚至剪断了挖孔桩上段的桩坑护壁,造成施工安全风险。

因此,设计单位不得不对该滑坡的治理方案再次调整,即在对桩坑后部设置微型桩群保证施工安全,在抗滑桩上部的第4级坡面增设锚索框架提高边坡整体稳定性(图10)。

2 降雨诱发边坡渐进破坏机理分析

2.1 第一次滑动的机理分析

边坡第一次滑动是在边坡开挖裸露2个多月,由持续降雨触发产生的典型工程滑坡。滑坡治理过程中对典型断面的监测孔BK2-1和BK2-2进行持续的地下水位监测,发现这两个监测孔的地下水位随降雨时程分别有最大3 m和7 m的变幅,可以推测降雨诱

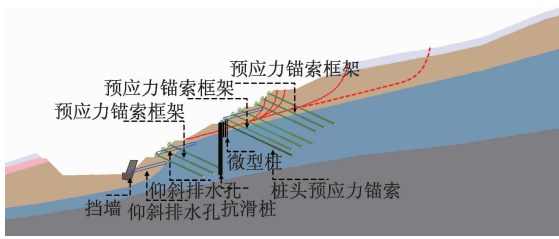


图 10 第三次变更设计方案

Fig. 10 Third change design scheme

发的地下水位变化是边坡渐进破坏的重要诱因。

基于滑坡极限状态的稳定度反分析方法,对图 2 所示的边坡工程地质模型进行有限元网格离散(图 11),根据 BK2-1 和 BK2-2 实测地下水位深度调整水位高度,采用 Phase² 软件的节理有限元法模拟该滑坡的孕育过程,采用强度折减法计算地下水位变幅条件下边坡安全系数变化规律,计算参数见表 1。

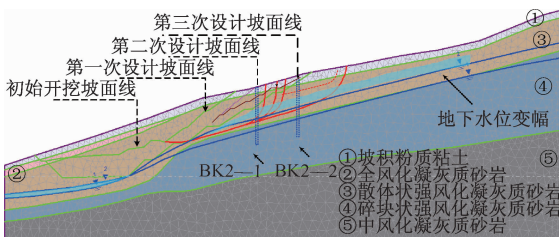


图 11 K65 滑坡有限元数值计算模型

Fig. 11 Finite element numerical model for K65 landslide

表 1 岩土层物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock or soil

土层	容重/(kN/m ³)	C/kPa	$\Phi/(^{\circ})$
坡积粉质黏土	17	25	22
全风化凝灰质砂岩	18	18	23.5
散体状强风化凝灰质砂岩	19	25	26
碎块状强风化凝灰质砂岩	22	30	35
中风化凝灰质砂岩	25	200	40

由图 12 所示模拟结果分析,开挖卸荷松弛使得边坡岩土体在坡顶产生拉张屈服,在坡体中部发育剪切带,并逐步沿土岩风化界面向坡脚延伸,最终形成差异风化界面及上部土体内弧形张剪裂面构成的复合滑面。在开挖应力调整过程中,当边坡稳定系数 $F_s \approx 1.03$ 时,坡体内形成明显的侧向滑移机构;此时因降雨导致坡体内地下水位急剧升高约 2 m 时,边坡稳定系数 $F_s = 0.995$,即边坡趋于极限状态;此后,地下水位进一步小幅抬升 1 m,边坡稳定系数 $F_s = 0.97$;水位继续抬升时,边坡迅速产生大变形,模拟计算不收敛,即无法得到确切的安全系数。数值模拟计算充分说明当滑体处于极限平衡状态时,降雨渗入边坡后部张裂缝产生较大的水平推力,在底部滑动面形成浮托力,可以迅速促使大变形产生,诱发滑坡。

因此,第一次滑动的破坏机理可以概括为开挖形成侧向滑移机构,应力调整产生岩土张剪屈服和变形积累,降雨抬升地下水位使边坡稳定性骤降,共同触发滑坡的联合作用机制。

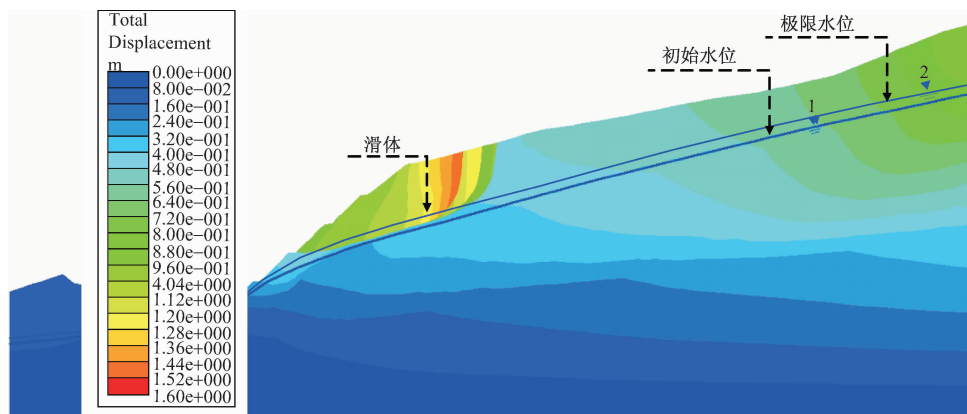


图 12 第一次滑动总位移分布图

Fig. 12 Total displacement diagram of first sliding

2.2 第二次滑动的机理分析

边坡第二次滑动发生时,第 5 级锚索框架已施工完成,但由于锚孔注浆质量较差,锚索张拉时实测锚固力仅 100 ~ 200 kN (模拟计算取 100 kN)。采用节理有限元法模拟实测地下水位变幅范围内边坡渐进变形,并逐步牵引产生 4#裂缝的破坏过程,工程地质模型见

图 13,计算结果见图 14。

模拟结果显示,在持续降雨作用下,既有滑体充分变形破坏,并牵引产生新的变形体,牵引滑体的变形量值约为既有滑体变形量的 1/3,体现了锚索框架对于后部变形体仍存在一定的控制作用。

由于征地问题使施工严重滞后,在持续降雨甚至

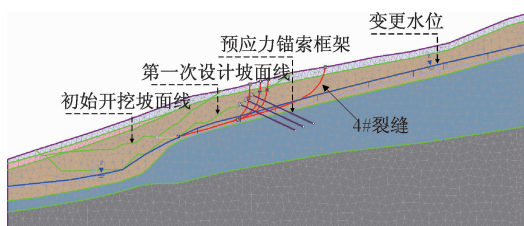


图13 第二次滑动数值计算模型

Fig. 13 Finite element numerical model for second sliding

台风暴雨时产生动、静水压联合作用,已滑动的块体充分解体,相应的滑体不平衡力也成倍增长,边坡稳定性急剧降低,将不可避免导致滑坡灾害规模的扩大,使得

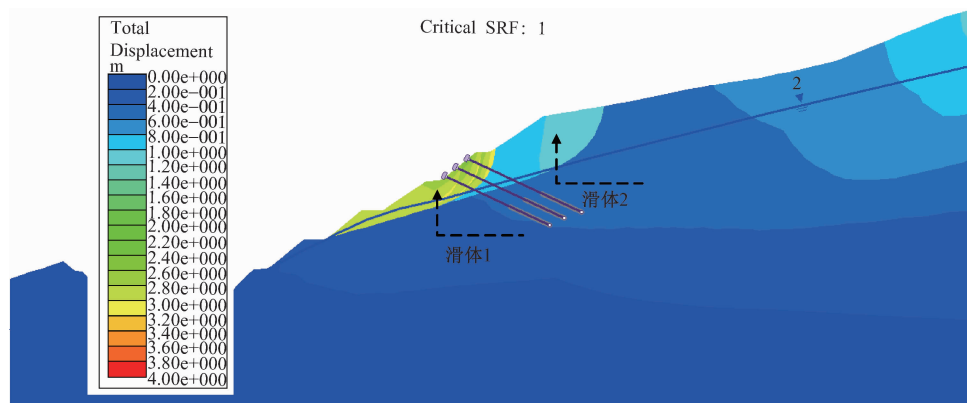


图14 第二次滑动总位移分布图

Fig. 14 Total displacement diagram of second sliding



图15 抗滑桩护壁错位

Fig. 15 The dislocation of anti-slide pile wall

本次滑动虽然范围没有明显扩展,但是由于滑坡变形将部分桩坑护壁剪断(图15)。因此,抗滑桩的挖桩作业将面临严重的安全风险,不得不增加了微型桩群的临时支挡工程,并将第4级的钢锚管注浆工程废弃,增设锚索框架重新加固。

3 降雨型工程滑坡灾害防治的几点讨论

毫无疑问,当工程开挖形成欠稳定的路堑边坡时,

原有的工程措施难以保证边坡安全,不得不再次变更工程方案,尤其是在边坡中部增加一排锚索抗滑桩,大幅提高了滑坡病害治理的施工难度和工程造价。

2.3 第三次滑动的机理分析

第三次滑动是在已实施的上部加固工程已基本控制残留滑体变形的条件下,在抗滑桩施工阶段发生的。在持续降雨的作用下使得滑体不平衡力被迅速放大,使已施作完成但是质量欠佳的第4级钢锚管和第5级锚索框架的加固工程逐步失效;抗滑桩挖桩过程中,桩坑内也形成了断续的临空面,进一步削弱了残留滑体的稳定性,使得滑坡产生局部的第三次变形活动。

特别是地表径流条件被破坏,且未及时完善地表排水系统时,若遭遇持续的降雨入渗,以及工程中常见的边坡开挖过快而加固工程施工滞后时,将不可避免的面临边坡局部或整体变形破坏的风险。总结本文研究案例的工程实践经验与教训,在以下几点展开讨论。

3.1 边坡破坏模式的预测及修正

边坡第一次滑动后,设计单位采用 slide 软件对滑坡稳定性分析的计算结果(图16)较客观地反应了当时上部滑体变形破坏的空间特征和滑面形态,同时对下部坡体开挖后的破坏模式进行了预测分析,较好的指导了工程对策的布置思路。

但是,由于征地延误、施工组织不力和工程质量不良等因素作用,滑体充分解体破坏,开挖边坡在持续降雨或台风暴雨的触发下,产生大量水土流失(图6),导致后部山体稳定性逐步降低,产生后退式牵引变形(图14),变形规模不断扩大,对工程治理造成了较大的难度。

3.2 边坡失稳关键因素的识别与控制

该边坡主体由力学性质较差的凝灰质砂岩风化壳构成,是滑坡产生的重要地质基础条件。初始的设计

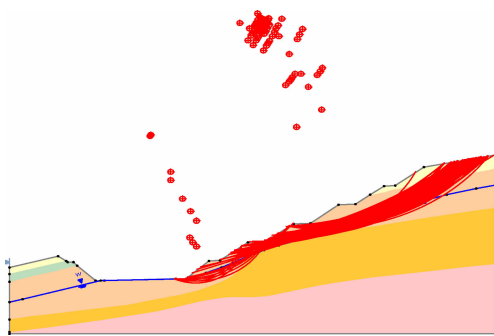


图 16 边坡开挖后破坏模式预测示意图

Fig. 16 Predicted diagram of failure model after excavation

方案考虑了这一不利条件,对 5 级边坡实施了 3 级加固工程,体现了设计人员对该边坡的重视。但是,设计说明中提到“建议每次分步开挖施工阶段为 2 级坡面,严禁全坡面大开挖和长期裸露,以控制施工病害”的注意事项等条文却没有得到施工单位的重视,未能严格控制开挖进度,为滑坡的产生埋下了隐患。

另一方面,该滑坡区域总体呈上陡、中缓、下陡的地形,特别是挖方堑顶有较宽缓的台地,凝灰质砂岩风化壳较松散,接受降雨入渗的补给较充分,而且上土下岩的坡体结构特征,雨水入渗至基岩顶面时,由于基覆界面存在渗透系数的明显差异,可以短时显著抬升坡体内的地下水位,是边坡失稳最重要的触发因素。然而,这个关键因素在小范围地形实测提交的设计资料中很容易被忽略,导致对施工期间降雨工况考虑不足。

因此,边坡设计阶段开展详细的资料分析、地质调查和计算论证,充分考虑各种不利条件,对影响边坡稳定性的关键因素进行识别,并针对性提出治理方案和施工控制要求是减轻工程滑坡灾害的重要保障。

3.3 边坡支护方案的比选与调整

边坡第一次滑动后,设计方案对滑坡性质和变形范围的把握总体是正确的,基于“治早治小”的处治思路,采用的注浆钢锚管结合锚索框架的加固方案针对性强,且施工简便。但是,由于征地严重滞后,使得本应迅速实施的抢险工程被长时间延误,不得不面临滑坡变形恶化的不利局面。

边坡第二次滑动后,由于滑体范围明显扩大,而且两侧土层较厚的开挖段落,均发现滑面沿基覆界面的变化向深部转移的趋势,为保证边坡的永久安全,在边坡中部布设了锚索抗滑桩工程。设计变更既体现设计人员对边坡稳态预测不够乐观,也反应了其对施工单位执行效率和工程质量的担忧。

边坡第三次滑动后,充分暴露了前期工程措施质

量不佳,导致卸载后残留的少量滑体在降雨及挖桩的不利工况作用下变形复活,严重威胁挖桩施工安全。对第 4 级坡面布置锚索框架,并废弃已实施的钢锚管注浆工程,确是“杀鸡用牛刀”的无奈之举。

3.4 边坡加固施工时机的选择与规避

从上述分析很容易获知,路堑高边坡的施工应控制开挖进度,在保证阶段性边坡安全的前提下,选择良好的施工时机,及时推进加固工程实施的进度。但是,这一技术控制要求常常与施工现场的整体进度或技术管理人员安全知识的欠缺相矛盾。合理选择边坡开挖及加固的施工时机和工程进度对于保障施工过程安全是非常重要的。

由于施工过程中路堑高边坡的稳定状态对降雨极为敏感,因此在开挖进度控制、锚固工程施工和支挡结构开挖等关键施工工序中,规避雨季实为上策,这需要建设各方,尤其是施工单位有清醒的认识。

3.5 边坡加固工程质量管理与控制

边坡加固的施工是专业性很强的工作,特别是岩土锚固工程隐蔽性较强,而且其施工质量好坏对于工程治理措施的成败具有决定性的影响。技术力量不强的施工单位难以保证施工顺利实施及工程安全性。

第一次变更设计在延误半年多才完成的第 5 级锚索框架的混凝土及锚孔注浆质量较差,实测极限锚固力仅达到设计锚固力的 40%,与碎块状强风化岩层一般能提供的锚固力值相距甚远。第 4 级钢锚管注浆也存在严重的漏浆、不饱满等质量问题。因此,即使在卸除大部分滑体之后,第 4、5 级的锚固工程仍然难以抵挡残留滑体的下滑力,甚至产生了部分锚索框架节点的变形破坏。

因此,滑坡治理中遴选专业的施工单位,对施工质量开展严格的管控十分必要。

4 结论

本文基于降雨诱发典型路堑高边坡多次滑动的案例研究,概要介绍该滑坡 3 次滑动的变形特征,研究各阶段滑坡的变形破坏机理,讨论该类滑坡灾害治理中经验与教训,研究成果总结如下。

(1) 工程开挖扰动导致边坡岩土体张剪屈服和变形积累,边坡逐步进入欠稳定状态的敏感时期,是工程滑坡触发的地质基础;在此期间遭遇多次降雨抬升地下水位使边坡稳定性骤降,是滑坡变形进一步演变,产生多次累进式滑坡的触发因素。

(2) 应重视路堑高边坡的动态设计及信息化施

工。不仅要在设计阶段中重视边坡地质调查、破坏模式预测及支护方案比选,还应根据施工信息反馈和监控量测成果,及时对计算模型和设计参数进行调整,优化设计方案,有效控制施工过程中的次生灾害,实现信息化施工。

(3)开展边坡治理施工过程的科学规划,规避雨季等不利施工季节,选择技术实力强的专业单位进行施工,并严格管控工程施工质量,是边坡工程长期安全的质量保障。

参考文献:

- [1] 张玉芳. 京珠高速公路 108 滑坡及防治工程分析[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(6): 633-637.
ZHANG Yufang. Analyses of No. 108 landslide in Beijing—Zhuhai highway and its treatment measures [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(6): 633-637.
- [2] 于贵. 向家坡大型复杂滑坡的坡体结构和变形机理[J]. 工程勘察, 2009, 12: 49-53.
YU Gui. Structure of the slope and deformation mechanism of the large and complex Xiangjiapo landslide [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 12: 49-53.
- [3] 陈开良. 箭丰尾超大型滑坡的工程地质特征及其稳定性评价[J]. 公路, 2011, (3): 91-97.
CHEN Kailiang. Engineering geological characteristics and stability evaluation of large-scale landslide in Jian Feng Wei [J]. Highway, 2011, (3): 91-97.
- [4] 卿三惠, 黄润秋. 工程滑坡形成机理及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 1-4.
QING Sanhui, HUANG Runqiu. Formation mechanism of engineering landslide and control counter measures [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(3): 1-4.
- [5] 吴树仁, 王涛, 石菊松, 等. 工程滑坡防治关键问题初论[J]. 地质通报, 2013, 12: 1871-1880.
WU Shuren, WANG Tao, SHI Jusong, et al. Preliminary discussion on key issues of engineering landslide control [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 12: 1871-1880.
- [6] Peters R R and E A Klavetter. A continuum model for water movement in unsaturated fractured rock mass [J]. Water Resour. Res, 1998, 24(3).
- [7] 戚国庆, 黄润秋. 降雨引起的边坡位移研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 379-382.
- [8] 徐平, 李同录, 李萍. 考虑非饱和渗流作用下三峡库岸滑坡稳定性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 7-12.
XU Ping, LI Tonglu, LI Ping. Stability study on Majiagou landslide in Three Gorges Reservoir area with consideration of unsaturated seepage [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 7-12.
- [9] 殷坤龙, 汪洋, 唐仲华. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报, 2002(1): 75-78.
YIN Kunlong, WANG Yang, TANG Zhonghua. The mechanism and dynamic simulation of rainfall on landslide [J]. Geological Science and Technology Information, 2002(1): 75-78.
- [10] 许建聪, 尚岳全, 陈侃福, 等. 强降雨作用下的浅层滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 18: 3246-3251.
XU Jiancong, SHANG Yuequan, CHEN Kanfu, et al. Analysis of shallow landslide stability under intensive rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 18: 3246-3251.
- [11] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2010(S1): 324-329.
WU Huozhen, FENG Meiguo, JIAO Yuyong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(S1): 324-329.
- [12] TAKE W A, BOLTON M D. An atmospheric chamber for the investigation of the effect of seasonal moisture changes on clayslopes [C]// Proc Int Conf on Physical Modeling in Geotechnics. Rotterdam Netherlands: Balkema, 2002: 765-770.
- [13] 詹良通, 刘小川, 泰培, 等. 降雨诱发粉土边坡失稳的离心模型试验及雨强-历时警戒曲线的验证[J]. 岩土工程学报, 2014, 10: 1784-1790.
ZHAN Liangtong, LIU Xiaochuan, TAI Pei, et al. Centrifuge modelling of rainfall-induced slope failure in silty soils and validation of intensity-duration curves [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 10: 1784-1790.