

人类活动影响高速公路滑坡的发灾机理和致灾模式研究

——以余家海滑坡成因机理为例

郑鹏韬¹, 师 晋¹, 陈 粟¹, 魏悦翔¹, 余 涛²

(1. 云南安晋高速公路开发有限公司, 昆明 650200; 2. 昆明安博建筑工程有限公司, 昆明 650501)

摘要:高速公路桥梁横跨滑坡体导致公路安全运营问题突出,经济损失严重。以余家海互通立交 BK0+601 桥滑坡体为例,通过现场调研和钻孔调查,分析该类型滑坡的发灾机理和致灾模式,计算在不同工况下边坡稳定性,提出该类型滑坡的针对性治理方案。结果表明,导致该滑坡发灾的主要因素为不合理的堆载与边坡前缘开挖后支护不及时的人类活动,在降雨的耦合作用下导致滑坡发生。揭示该滑坡致灾机理,是由于前缘水库清淤导致临空面增加,在滑坡的牵引-拉裂作用导致承压体受损。降雨与库水位波动耦合加剧滑坡的灾变,使桥墩发生位移,威胁行车安全。致灾模式包括排水槽损坏、桥墩基础拉裂以及上部结构破坏和堵河次生灾害。通过稳定性计算与分析表明该滑坡为欠稳定,未来在降雨作用下会出现局部滑动。提出格宾挡墙与护坦的针对性治理措施,能防止库水波动影响,起到拦挡作用。

关键词:高速公路;滑坡;发灾机理;致灾模式;稳定性计算;治理措施

中图分类号:U416.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)06-0255-09

随着高等级公路的规划建设进程加快和营运需求的不断提升,以及不断增长的高等级公路里程建设规划与日益增长的土地需求之间矛盾突出,公路不可避免地穿越地质复杂区域和不良工程地质体,导致威胁公路安全运营问题突出。例如滑坡导致桥梁墩、台出现基础偏移、裂缝等病害,影响桥梁公路的结构和功能。

滑坡在很多工程安全领域普遍存在,对人们生命和财产安全造成巨大损害。对于滑坡的研究主要围绕:①滑坡勘察技术^[1];②地质与诱发要素成因分析^[2];③滑坡灾害评估^[3-4];④灾变力学机制^[5];⑤滑坡安全监测^[6];⑥滑坡的治理措施^[7]。然而,危害桥墩、台的滑坡多为人工填筑的近水平滑坡。国内外对近水平滑坡的变形破坏机制及工程应用已取得了丰富的成果。诸多学者从其发育规律^[8]、发灾机理^[9]、致灾机理^[10]和启动判据^[11]等方面进行了相应的研究,得出该类型滑坡是典型的水动力诱发型的结论^[12]。但是近些年,剧烈的人类活动将原有地质平衡打破,其带来的加卸载效应会引起应力的

重分布,从而导致边坡位移的产生,通常在降雨的情况下加剧滑坡灾变的发生。然而,对于滑坡导致桥梁基础致灾情况,常被忽略。而纠正这种“人类活动”引起的桥梁病害的偏移和加固措施比原设计桥梁的造价还高^[13]。此外,这种关于人类活动为主要因素引起的平推式滑坡的致灾模式研究成果还较少。因此,正确厘清工程和环境要素耦合下滑坡的变形破坏机制,提出合理的治理措施,能够减少该类滑坡给公路桥梁带来的危害。

由于线域工程的特殊性,导致一点受灾,全线受阻,即局部灾害“点”可控制整体运营“线”。因此,研究滑坡导致桥梁受损的发灾机理,聚焦于滑坡导致道路工程受损的致灾机理与模式,为高速公路、桥梁的安全运营提供参考。因此,本文通过对余家海互通立交 BK0+601 桥滑坡体(简称余家海滑坡)成因机理进行分析,研究由于病害致使桥墩受损的致灾模式,并基于成灾和致灾机理的分析,提出该类型病害体的合理处置方法以及桥梁受损桩基础和桥梁结构加固方案。

收稿日期:2022-12-24

作者简介:郑鹏韬(1971—),男,云南陆良人,云南安晋高速公路开发有限公司,工程师,硕士,研究方向为公路工程;;师晋(1980—),男,云南保山人,云南安晋高速公路开发有限公司,工程师,研究方向为高速公路养护管理;陈粟(1985—),男,浙江嘉兴人,云南安晋高速公路开发有限公司,工程师,研究方向为高速公路养护管理;魏悦翔(1988—),男,云南玉溪人,云南安晋高速公路开发有限公司,工程师,研究方向为高速公路养护;通信作者余涛(1980—),男,云南昆明人,昆明安博建筑工程有限公司,高级工程师,研究方向为桥梁隧道维修加固设计、施工及咨询。

1 工程概况

余家海互通立交位于安宁至晋宁高速公路余家海段,涉事段路面宽度 10.5 m,设计速度 100 m/h。桥梁上部构造为 20 m 的预应力混凝土简支 T 梁。涉事位置为(桩)墩地基、基础,其下部结构为双柱式空心薄壁墩。

根据工程地质调查、测绘和钻探结果得知,余家海滑坡前缘高程 1 961 m,后缘高程 1 970 m,滑坡宽度 155 m,坡度约 6°,面积 3 686.38 m²,滑坡主滑面长度 44 m,属于横长式滑坡体(图 1),滑面平均厚度

6.5 m,滑面最大厚度 8.6 m,属中层变形体,体积约 2.4 万 m³,为小型滑坡体。滑坡后缘发育多条张拉裂缝,长 3~10 cm,宽 0.5~10 cm,但裂缝并未完全贯通。两侧边界不清晰,但未见坡体两侧土体剪切裂缝,仅可见排水沟错断变形。认为周界未完全形成、后缘裂缝未完全贯通,但滑动面已基本形成,裂缝及沉降变形痕迹显著,为近期有变形的坡体。该滑坡导致 B 匝道桥面发生偏移,墩柱出现裂缝(图 2),桩间系梁底部沉降脱空等变形特征,表明从 C 匝道、B 匝道至余家海水库间的地表坡体处于明显的欠稳定状态。

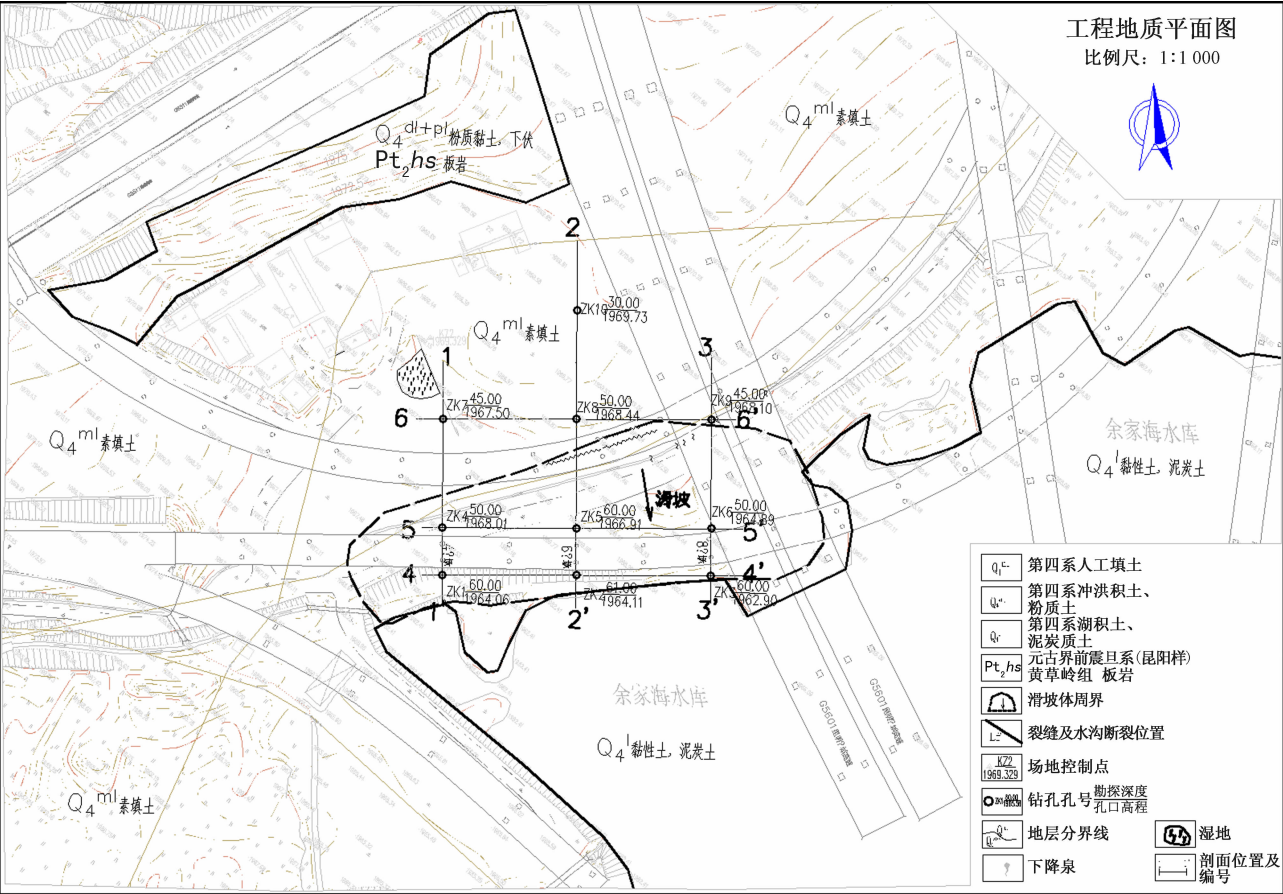


图 1 余家海滑坡地形图(1:1 000)



图 2 B 匝道桥墩裂缝

1.1 工程地质条件

研究区地质构造运动强烈,位于扬子地台西部之康滇地轴南段东缘,其主要控制的断裂带有:①小江断裂带(F7)属于区域大断裂带,为距场地最近的强烈全新活动断裂和发震断裂,距离项目地约23 km;②普渡河断裂(F54)属于主要断裂带,属晚更新世活动断裂,距离项目地约5 km;③大春河断裂(F154)最新活动时间为晚更新世早期,距离项目地约300 m,对项目区有较大影响,根据《云南省区域地壳稳定性评价图》得出^[14],研究区地属于次不稳定地区(Ⅱ2区)。

研究区钻探揭露61.00 m深度范围内的土层按成因分为第四系全新统素填土层(Q_4^{pl})、第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})和湖积层(Q_4^l),以及元古界前震旦系(昆阳群)黄草岭组(Pt_2hs)薄-中层状板岩。按岩土体成因、结构和物理力学性质特征可划分为5个大层,滑坡体包含岩层包括(自上而下):①素填土主要为褐黄色、杂色,稍湿,呈松散~稍密状,主要由角砾、碎石组成,粉质黏土充填,碎砾石含量为30%~65%,粒径10~40 mm,碎石成分为强风化板岩,强度偏低,平均厚度3.91 m。②含砾粉质黏土主要为褐黄、褐色、褐灰色及褐红色,呈软塑~可塑状,强度中等,韧性好;其中砾石含量为5%~20%,粒径5~20 mm,平均厚度2.03 m。③泥炭土,为黑色,湿,软塑,含植物腐殖质残骸,干缩现象明显,有腥臭味,干强度低,局部夹薄层黏土,平均厚度5.04 m。钻孔揭露滑坡厚度4.8~8.6 m,素填土压缩模量 E_s 为3.5 MPa,含砾粉质黏土 E_s 为2.7~5.6 MPa,标准值为4.33 MPa,泥炭土 E_s 为0.6~3.8 MPa,标准值为1.12 MPa。不同深度的岩层由于结构面发育、风化程度差异和胶结物类型导致其岩层的完整性和力学性质差异较大。其地质剖面如图3所示。

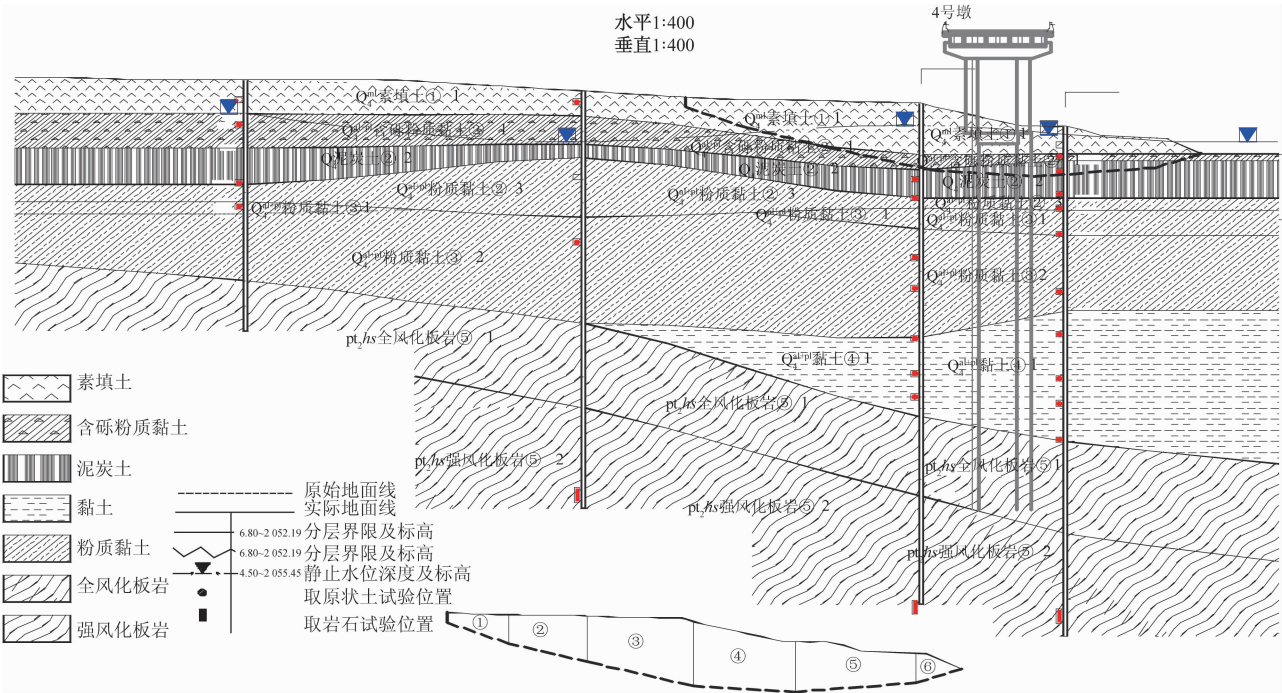


图3 余家海地质剖面图(1:400)

1.2 水文气象条件

晋宁区属低纬度高原北亚热带季风气候区,年平均气温14.8℃,最大温差11.9℃,气温年际变化小,年平均降雨量991.7 mm,无霜期223 d。柴河发源于六街上游新寨、干海孜流经六街汇入柴河水库,为昆明市饮用水源,全长32.1 km,径流面积306.18 km²。受季节性集中降雨水量变化较大。研究区位于柴河流域的余家海水库旁,勘察期间实

测水位高程为1962.41 m。

研究区地下水发育,根据钻探结果将区内地下水类型划分为:①第四系松散岩类孔隙水主要分布于第四系素填土、冲洪积层的斜坡地带及湖积的山间盆地内。受岩性、地形及补给条件控制,孔隙水多在雨季存在,与大气降水关系密切。②基岩裂隙水主要有变质岩类裂隙水,基岩地层为元古界前震旦系(昆阳群)黄草岭组(Pt_2hs)灰色、灰紫色板岩、

粉砂质板岩及少量粉砂岩等地层之中,裂隙率为 $0.5\%\sim 1\%$,富水性微弱,基岩裂隙水主要接受大气降水渗透补给^[15-16],径流受构造裂隙、风化裂隙、地形切割等因素控制,以泉形式向低洼沟谷或缓坡排泄为主。

1.3 人为因素扰动因素

由于昆明绕城高速公路东南段余家海枢纽立交上跨B匝道、C匝道的上跨桥梁施工过程及结束后,对研究区进行地表填土加载和余家海水库清淤工作是主要的人为因素扰动因素。分述如下:①自余家海互通枢纽立交施工开始,开始地表填土加载、对便道进行施工、对上跨桥梁群桩基础施工以及对承台基坑开挖等,均对地基土进行扰动和产生地表加载,且加载具有多期性,后期又在B匝道墩台附近弃土堆载。②余家海村对余家海水库开展清淤工作,增加水库容量。清淤工作包括清除水库内桥梁施工的填土围堰、便道及场地堆填土,在清除场地内填土同时对库底淤泥也一并清除,水库清淤形成4~6 m高的边坡,形成临空面。

2 滑坡发灾机理分析

结合该滑坡的发育特征与规模、工程地质条件、水文气象条件水文地质、人为扰动等因素,判断该病害滑坡为平推式滑坡,该类型滑坡滑带土内摩擦角大于滑面倾角(6°),为近水平滑动^[17]。根据滑坡的变形特征判断其为单级平推式滑坡,其滑体的较为完整,未被裂隙切割,在诱发因素的影响下发生单级整体平推式滑动。

2.1 孕灾环境因素

1)地形地貌条件。该滑坡地形起伏变化小,最大高差9 m,地面坡度约 6° ,由于滑坡后缘大量出现拉张裂缝(图4),为降雨提供入渗通道,场地内局部为缓坡平台,成为地表水、地下水的有利汇集区^[18]。



图4 余家海滑坡后缘拉张裂缝

2)地层岩性。该滑坡下伏岩层为素填土及软土。素填土未完成自重固结,为欠固结土,且多为板岩风化的粉质黏土、角砾,局部为全风化板岩或碎石土,地表水渗入易软化、失水易崩解和导致岩性软弱。软土(含砾粉质黏土和泥炭土)在该地层含水率极高,有机质含量高,孔隙比较大,压缩性极高,承载力低,但其分布较均匀,地表加载或地下水位变化引起地基土有效应力增加,可能导致该地层发生固结沉降。此外,在荷载作用下,软土应力发生重分布^[19],孔隙水压力迅速升高并接近于围压,黏土颗粒由胶结作用等形成的黏聚力丧失,导致滑面形成。

3)水文地质条件。分布于第四系松散堆积体中的孔隙水,以下降泉形式分布于冲沟或缓坡,表现为泉水或小型湿地,旱季地下水贫乏,孔隙水多在雨季存在,与大气降水关系密切;地下水出露于地表雨季大气降水的渗入,造成岩土体饱和,从而降低斜坡土体的抗剪强度,并产生静水压力、动水压力,增加土体自重,易造成斜坡土体的失稳。同时,富水性较强(形成储水通道),便于携带碎屑沿构造裂隙面迁移且易发生滑动。对桥梁基础稳定不利。

2.2 诱发灾害因素

1)不合理的堆载与卸载活动。①堆载活动指的是施工期间对地基土进行弃土堆载。由于其使得坡体内土体应力重分布,竖向应力增大,导致坡体积蓄的应变能增大,导致应力较为集中的部分首先发生变形,随着荷载的增加,并超过极限荷载时,变形量加大、塑性区贯通,导致边坡增提失稳,且变形破坏的范围随荷载增加而增大^[20]。②对滑坡前缘淤泥土进行开挖(抗滑部分被清除),导致开挖施工过程中在边坡坡脚前缘形成临空面,减少滑坡的自稳性。强烈的施工扰动破坏土体原有的应力平衡,在地下水等因素共同作用下极易在坡脚开挖位置形成剪出口,导致滑坡病害。

2)降雨诱发。降雨增加土体自重,进一步软化构造裂隙面,造成其物理力学性质改变。当构造裂隙面摩擦力不足以支撑上部土体自重时,上部土体即下滑形成滑坡。或者通过渗透力的影响,将坡体内的细颗粒迁移逐渐汇集到土体下部和土坡坡脚,形成滑动面,细颗粒的迁移还会改变坡体内局部的孔隙率和渗透性,降低滑坡的稳定性。降雨还通过地表径流等方式深入岩土体内部,使得土体内部孔隙水压力迅速增加,也使土体

的重度加大,从而导致边坡下滑力增加,并且水在土地流动,会产生动水压力,导致土体的性能变差。土地的含水量增加导致坡体抗剪切能力下降,从而引发滑坡。

3)库水波动诱发。①水库水位上升导致土壤饱和、地下水位的升高、边坡的饱和面积增加和静水压力的增大,进一步导致土壤有效应力和抗剪强度降低。此外,水分还会沿着裂缝渗入坡体内部,不仅加大了孔隙水压力,减少了结构面上的有效应力,还起到了润滑作用,导致滑坡的稳定性减少。②当水库水位下降时,如果孔隙水压力不能及时消散,边坡将产生较大的剪切力,从而降低边坡的稳定性。此外,由于水位的快速下降,导致坡体内保持较高的浸润面,产生对路基稳定性不利的非稳定渗流,其产生的渗透力会使得颗粒之间的有效应力减小,从而减低抗剪强度。由此可见,水库水位的波动不仅改变了滑坡土体性质,而且软化了坡脚的土壤,还使滑坡产生裂缝,产生不利于滑坡稳定的渗透力,最终造成滑坡失稳^[21]。

3 滑坡致灾机理分析

滑坡(致灾体)的形成与发展未必会引起桥梁墩台、桥面和滑坡工程措施(承灾体)的结构破坏,即灾害的灾发未必造成致灾,只有造成承灾体的破坏,便发生致灾。由于交通干线——“线域工程”的特殊性,使得人们不单单关注灾害体本身的成灾机理,而更多的关注承灾体结构和运营功能受损的情况。由于其特殊性,使得其一点受灾,全线受阻,即局部灾害“点”可控制整体运营“线”。而由于滑坡等地质灾害引起的“线域工程”结构和功能受损,可能会导致基础设施运营安全受到威胁,甚至会造成人员财产安全受到损害。因此,对滑坡导致桥梁的致灾模式研究,有助于为高速公路防灾和减灾提供理论指导工作。根据现场调查与分析研究存在的致灾模式包括:

1)排水沟损坏。排水沟主要通过改变降雨入渗来达到减少坡体含水量,但研究发现仅对于短时、低强度降雨时起作用,然而余家海滑坡发现排水沟多处产生断裂,排水沟的剪切裂缝变形值小于 $0.2\sim 0.8\text{ cm}$ 。徐家海排水沟的修建位置于滑坡后缘(当时未形成滑坡体),与滑坡的滑动方向近乎垂直,出现排水沟“横穿”滑坡的现象,由于平推式滑坡具有牵引-拉裂作用,滑坡滑动产生的牵引力导致排水沟错断,从而使排水沟存在多处拉裂缝(裂缝宽度约 $0.2\sim 0.8\text{ cm}$)(图5)。



图5 排水沟拉张裂缝

裂缝的产生一定程度上削弱了坡面径流能力,改变了径流场,使得降雨沿着裂缝入渗进坡体。同时也使得雨停后的雨水疏干时间增加,相应的坡体入渗量也增加,从而影响边坡稳定性。此外,调查发现由于场地内排水沟因地基土沉降,使得排水沟整体下沉,形成沟内积水,导致排水不畅,一定程度上也削弱了排水能力。因此,排水沟排水能力除了与结构设计(尺寸和长度等)有关,还与布设位置相关,合理的布设位置能够使得排水效果达到理想状态,反之效果差。

2)桥墩基础拉裂以及上部结构破坏。桥墩作为多跨桥梁中间的支撑结构,直接承担桥跨结构荷重,而桥基础对整个桥梁的质量和正常使用起到根本作用,它们的服役状态直接影响桥梁运营安全。由于在桥梁建设过程中在该地堆积了大量回填土,但初期墩柱与基础并未发生位移,但在车辆动载作用下(通车运营后),以及水库清淤坡体前缘抗力减弱,临空面增加。随着雨季来临,库水位波动导致稳定性减弱,填土受降雨侵蚀,加上松散填土,导致滑坡发生。因此,在该平推式滑坡的牵引作用(向下的水平作用力),导致余家海立交B匝道桥梁墩柱受到滑坡体挤压而产生裂缝,以及因地表填土加载使地基土发生固结沉降,使桩间系梁底部沉降脱空[图6(a)]。最终导致B匝道桥梁桥墩发生严重偏移,使得桥面伸缩缝型钢断裂,护栏错开、挡块断裂[图6(b)]。其原因是堆积土滑动产生的主动土压力使得桥墩-边坡的应力场发生变化,从而导致桥墩发生位移,威胁行车安全。

3)堵河次生灾害。滑坡堵塞河流可能会引起次生泥石流灾害和引发环境效应^[22],造成灾害损失。余家海滑坡体积为 2.4 万 m^3 ,由于地形物源限制不会存在泥石流发生的可能,但该地区临近余家



图 6 滑坡导致桥梁梁底脱空和挡块断裂

海村的耕田(苗圃种植基地),若滑坡体滑动会导致前缘余家海水库的水位壅高,形成高于右岸的“反翘”地形,会导致河流变道,且容易形成地表水易汇集。当暴雨后,水位涨幅,由于地形原因,导致地表水和库水引向耕田排泄,进而引发环境效应,造成经济损失。

4 滑坡稳定性计算与发展趋势评价

采用《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中推荐的传递系数法对滑体稳定性进行定量评价,该方法适用于余家海平推式滑坡。并考虑滑坡自重、地下水产生的净水压力和动水压力、附加荷载等影响。根据钻孔、测绘和调查结果,基于主滑剖面,采用的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 是基于反分析与室内土工试验成果(直剪试验)及工程经验综合选取。计算稳定性公式如式(1)~式(5),计算下滑力如式(6)所示。

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(R_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right) + T_n} \tag{1}$$
$$\psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_{i+1} \tag{2}$$
$$\prod_{j=1}^{n-1} \psi_j = \psi_i \psi_{i+1} \psi_{i+2} \cdots \psi_{n-1} \tag{3}$$
$$R_i = N_i \tan \varphi_i + c_i L_i \tag{4}$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i \tag{5}$$
$$E_i = k w_i \sin \alpha_i + \phi_i E_{i-1} \omega_i \cos \alpha_i - c_i L_i \tag{6}$$

式中: F_s 为稳定系数; R_i 为作用在第 i 块段的抗滑力,kN/m; φ_i 为第 i 块段滑带土的内摩擦角,(°); c_i 为第 i 块段滑带土的黏聚力,kPa; L_i 为第 i 块段滑动面长度,m; T_i 为作用于第 i 块滑动面上的滑动分力,kN/m; ϕ_i 为传递系数; E_i 为第 i 块段剩余下滑力,kN/m。计算结果见表 1。

表 1 滑坡稳定性计算结果				
滑坡坡面	计算工况	稳定系数	安全系数	剩余下滑力/(kN·m ⁻¹)
I-I 剖面	自然	0.957	1.3	95.02
	暴雨	0.936	1.2	131.52
II-II 剖面	自然	1.024	1.3	129.89
	暴雨	0.953	1.2	179.09
III-III 剖面	自然	1.035	1.3	104.82
	暴雨	0.985	1.2	146.20

研究区公路等级为高速公路互通立交匝道桥梁,考虑公路桥梁重要性及滑坡体地质条件复杂,设计工况及参数包括:①天然设计工况。以天然重度和天然抗剪强度为主要计算参数,按规范要求,自然工况下的边坡设计安全系数为 1.3,滑动面强度参数 $c=8.0$ kPa,滑动面的天然内摩擦角 $\varphi=4.0^\circ$ 。滑体的天然容重取 19.2 kN/m³。②暴雨设计工况。考虑到暴雨或连续降雨情况,以饱和重度和饱和抗剪强度为主要计算参数。按规范要求,非自然工况设计安全系数为 1.2,滑体的饱和容重取 20.2 kN/m³。

现场勘察可知,坡体发生变形后,处于欠稳定状态。受雨季期强降雨影响,坡体左后缘外有湿地,以及周边地表水汇入形成多处积水,后缘裂缝在持续缓慢发展,后缘裂缝勘察期间观测变形值为 $0.5\sim5$ cm,排水沟的剪切裂缝变形值为 $0.2\sim0.8$ cm,且坡体前缘紧临余家海水库,滑坡整体在缓慢蠕动变形。处于欠稳定状态。从滑坡的稳定性计算结果来看,滑坡 I 剖面在天然条件下处于不稳定,滑坡 II、III 剖面属于欠稳定。但暴雨情况下,I、II 和 III 剖面均属于不稳定状态。根据计算结果综合评价该滑坡为不稳定状态,虽坡体滑面未完全贯通,周界未完全形成,但滑面已基本形成,导致 B 匝道桥梁桥面变形、墩柱开裂,对余家海互通立交安全运营及 B 匝道桥梁结构安全有较大影响。

滑坡未来发展趋势预测:依据 I-I 剖面、II-II 剖面、III-III 剖面现状滑坡计算结果,未来滑坡在地

貌形态没有大的变化的条件下,旱季将处于基本稳定状态;在持续强降雨或地表水大面汇入条件下,随着土体重量增加,地基土沉降增大,后缘裂缝进一步发展,滑面逐渐贯通,滑坡将可能出现局部滑动,导致C匝道、B匝道桩基受横向推力作用而产生变形,产生过大的水平位移,坡体失去桩基的嵌固作用,坡体前部抗力将进一步降低,从而形成滑坡,可能进一步导致C匝道、B匝道桩基变形过大而剪断。

5 滑坡防治建议与桥梁结构处治方案

5.1 滑坡体防治方案

滑坡为小型滑坡,周界未完全形成,后缘裂缝未完全贯通,滑动面已基本形成,裂缝及沉降变形痕迹显著,为缓慢蠕动滑坡体。因此通过对滑坡体的变形特征和成因机制分析,地表填土加载和余家海水库清淤是引起滑坡形成和变形的主要原因,滑坡体防治方案建议如下:①地表截排水工程。地表

截排水措施主要有截水沟、排水沟和钢波纹管涵等,建议在滑坡后缘外设置环形截水沟,以免地表水渗入坡体内部;针对滑坡左后缘处泉水及后缘外场地汇水,在滑坡两侧设置排水沟;环形截水沟和排水沟应加大沟底纵坡以保证排水顺畅。②清方减载工程。因地表填土导致滑坡变形,建议在C匝道外侧适当位置到余家海水库边范围的现状填土全部清除,消除地表填土对B匝道墩柱、桩基础的水平作用影响。③岸坡防护工程。因B匝道紧邻余家海水库,库水位变化及岸坡土体软化易形成水库坍岸;另外,B匝道基础加固施工需要工作平台,现状平台宽度不足;建议采用格宾挡墙和护坦进行防护(图7),防治库水位变化引发库岸再造变形。④植被恢复工程^[23]。在清方减载以后,建议对裸露坡面采取相应的植物防护措施,美化环境,改善滑坡体土体性质并减少地表水入渗坡体,增强滑坡稳定性。

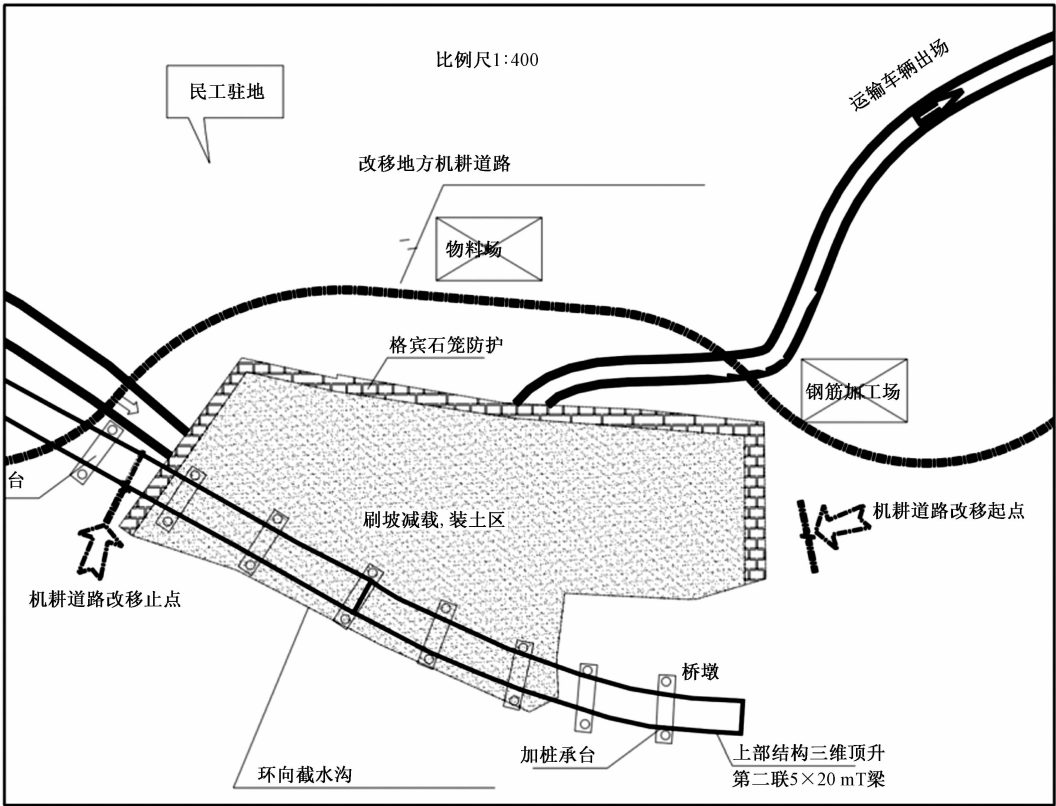


图7 格宾挡墙防护措施示意图(1:400)

5.2 桥梁受损桩基础加固方案

因地表填土加载或水库清淤形成滑坡体,致使现状桥梁桩基受损,需恢复受损桥墩的桩基承载力,恢复桥墩刚度,保证墩柱稳定性。需对3#墩~10#墩的桩基进行加固处治,在3#~10#墩横桥

向在原有桩基的两侧各增加一根基桩,新增基桩通过新增的横系梁和承台与原有桩基及承台相连。新增的新旧桩间承台和系梁能有效地分配原桩竖向力,原桩间承台主要为了顶升上部主梁搭设支架而设。

根据场地的土层条件和工程的特点、地下水埋深情况,结合B匝道桥梁桥台具体部位和上部荷载特点,新增基桩型式建议采用水下钻孔灌注桩基础,以强风化板岩为桩端持力层,并根据上部荷载及沉降要求合理确定桩长及桩径。

5.3 桥梁结构变形处治方案

针对专项检测的结构变形,采取相应的加固处治措施。墩柱进行外包20 cm厚自密实混凝土;对变位较大的第一联、第二联采用三维顶升系统进行调整上部结构线性,使该联与相邻两联顺接平顺;对破损开裂的挡块需要拆除更换,上部结构复位需要拆除盖梁顶主梁两侧的挡块,主梁复位后,种植钢筋重新在原位置立模浇筑新的挡块;对盖梁等部位的混凝土破损区域,用聚合物水泥进行修补;受损区域支座剪切变形较为严重,对第一联、第二联的全部支座进行更换;对0#、6#、11#墩顶的3道伸缩缝进行更换,需拆除原伸缩缝预留槽内的混凝土,种植钢筋安装新伸缩缝;裂缝宽度 ≥ 0.15 mm的裂缝采用压浆法进行修补;宽度 < 0.15 mm的裂缝采用封闭法进行修补。

6 结论

1)余家海滑坡根据滑面形状为长式滑坡体,根据体积划分为小型滑坡体,坡度较缓(6°),滑坡主要为拉裂破坏,该滑坡是由于人类堆载与削坡和降雨诱发型平推式滑坡。主要威胁对象是跨B匝道、C匝道的上跨桥梁及其基础,以及余家海水库和余家海村的耕田(苗圃种植基地)等环境问题。已造成排水沟和墩柱出现拉裂缝,桩间系梁底部沉降脱空。

2)导致滑坡发灾因素主要分为:①孕灾环境因素。包括地形地貌、地层岩性和水文地质条件。②诱灾因素。包括不合理的堆载与卸载活动、降雨诱发和库水波动诱发灾害。其中不合理的堆载与卸载活动导致的坡体竖向应力增大和边坡坡脚前缘形成临空面,破坏了原有应力平衡,是降低滑坡自性的主要原因。在与降雨耦合作用下,土体自重增大,进一步软化构造裂隙面,以及在渗透力将坡体内的细颗粒迁移逐渐汇集到土体下部和土坡坡脚,形成滑动面,两者均改变坡体物理力学性质,诱发滑坡。

3)余家海滑坡致灾模式包括:①排水槽损坏。排水沟的修建方向与滑坡的滑动方向近乎垂直,在滑坡的牵引-拉裂作用下,滑坡滑动产生的牵引力导致排水沟错断,从而使排水沟存在多处拉裂缝,造

成排水沟致灾破坏。②桥墩基础拉裂以及上部结构破坏。主要为滑坡导致B匝道桥梁墩柱受到挤压产生裂缝,及因地表填土加载使地基土发生固结沉降,使桩间系梁底部沉降脱空。最终导致B匝道桥梁桥墩发生严重偏移,使得桥面伸缩缝型钢断裂,护栏错开、挡块断裂。③堵河次生灾害。滑坡滑入水库会导致余家海水库的水位壅高,形成高于右岸的“反翘”地形,会导致河流变道,导致地表水和库水引向耕田排泄,进而引发环境效应,造成经济损失。

4)通过稳定性计算结果和现场调查表明,该滑坡为不稳定状态,虽坡体滑面未完全贯通,周界未完全形成,但滑面已基本形成,导致B匝道桥梁桥面变形、墩柱开裂,对余家海互通立交安全运营及B匝道桥梁结构安全有较大影响。未来在持续强降雨或地表水大面汇入条件下,滑坡将可能出现局部滑动,威胁C匝道、B匝道桩基安全上跨桥梁及其基础安全。

5)对滑坡处治建议包括:①地表截排水工程。建议在滑坡后缘外设置环形截水沟。②清方减载工程。对滑坡体进行反压覆道措施增加其稳定性。③格宾挡墙和护坦进行防护。防治库水位变化引发库岸再造变形。④植被恢复工程。在清方减载以后,建议对裸露坡面采取相应的植物防护措施。桥梁受损桩基础加固处治内容包括:需对3#墩~10#墩的桩基进行加固处治,在3#~10#墩横桥向在原有桩基的两侧各增加一根基桩。桥梁结构变形处治建议包括墩柱进行外包20 cm厚自密实混凝土、采用三维顶升系统进行调整上部结构线性使该联与相邻两联顺接平顺、对破损开裂的挡块需要拆除更换、对盖梁等部位的混凝土破损区域用聚合物水泥进行修补等。

参考文献

- [1] RAHIMI S, WOOD C M, BERNHARDT-BARRY M. The MHVSR technique as a rapid, cost-effective, and noninvasive method for landslide investigation: case studies of Sand Gap and Ozark, AR, USA[J]. Landslides, 2021, 18(8): 2705-2720.
- [2] 李海军, 董建辉, 朱要强, 等. 贵州织金垮坡组滑坡成因分析及稳定性评价[J]. 科技和产业, 2020, 20(5): 156-160.
- [3] DIAS H C, GRAMANI M F, GROHMANN C H, et al. Statistical-based shallow landslide susceptibility assessment for a tropical environment: a case study in the south-eastern Brazilian coast[J]. Natural Hazards, 2021, 108(1): 205-223.

- [4] 唐凤娇,祁生文,郭松峰,等.金沙江溪洛渡库区水库诱发滑坡时空分布规律及易发性研究[J].工程地质学报,2022,30(3):609-620.
- [5] MONTRASIO L, VALENTINO R. A model for triggering mechanisms of shallow landslides[J]. Natural Hazards and earth System Sciences,2008,8(5):1149-1159.
- [6] 邓李政,袁宏永,张鸣之,等. 滑坡变形监测预警技术研究进展[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版):1-16[2022-12-11]. DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.22.002.
- [7] 李洋溢,袁通,秦鲜卓. 山岭隧道洞口浅层滑坡处治关键技术研究[J]. 科技和产业,2021,21(11):326-332.
- [8] DU Y, XIE M, JIA J. Stepped settlement: a possible mechanism for translational landslides[J]. Catena,2020,187:104365.
- [9] 闫杰,霍中刚,李宏艳,等. 裂隙水作用下近水平边坡渗流滑动分析及稳定性研究[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(3):607-614.
- [10] 方贻立,马明,李聪,等. 平推式滑坡致灾机理与减灾方法研究进展[J]. 长江科学院院报,2013,30(12):20-27.
- [11] 缪海波,殷坤龙,李远耀. 近水平地层滑坡平面失稳模型与破坏判据研究[J]. 水文地质工程地质,2009,36(1):69-74.
- [12] 范宣梅,许强,张倬元,等. 平推式滑坡成因机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3753-3753.
- [13] 任俊甫. 滑坡对桥梁结构的影响及处治技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2007(8):133-135.
- [14] 梁锦陶. 吴家庄水库枢纽工程施工组织设计简述[J]. 山西建筑,2014(23):253-254.
- [15] 许建聪. 碎石土滑坡变形解体破坏机理及稳定性研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [16] NG C, SHI Q. Influence of rainfall intensity and duration on slope stability in unsaturated soils[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, 1998, 31(2):105-113.
- [17] 范宣梅. 平推式滑坡成因机制与防治对策研究[D]. 成都:成都理工大学,2007.
- [18] 肖尧. 地下水对××处置场Ⅰ区边坡稳定性影响分析及排水治理研究[D]. 成都:成都理工大学,2016.
- [19] 王其宽,何君旭,汪航,等. 不同间距双荷载作用下土质边坡稳定性研究[J]. 低温建筑技术,2021,43(3):111-114.
- [20] 梁月华. 边坡上桥梁桩基的受力分析及其在抗滑支护中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.
- [21] 陈颖骐. 斜坡区桥梁地基灾变风险评估与控制[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.
- [22] 杨啡,邓辉,曾阳益. 云南古水电站巨型堆积体堵江预测研究及数值稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2016,16(28):25-32.
- [23] 张国辉,杨汉忠,宋桂锋,等. 高速公路边坡植被恢复措施比较[J]. 福建林业科技,2018,45(3):82-86.

Influence of Human Activities on Development Mechanism and Disaster Mode of Landslide of Highway:

Taking the formation mechanism of Yujiahai Landslide as an example

ZHENG Pengtao¹, SHI Jin¹, CHEN Su¹, WEI Yuexiang¹, YU Tao²

(1. Yunnan Anjin Expressway Development Company Limited, Kunming 650200, China;

2. Kunming Anbo Construction Engineering Company Limited, Kunming 650501, China)

Abstract: The highway bridge crossing the landslide leads to highway safety operation problems and serious economic losses. The landslide of BK0+601 bridge of Yujiahai was adopted as an example. Field investigation and borehole analysis are the main means to analyze the development mechanism and disaster mode of landslide. A treatment plan is proposed for this landslide. The results show that increase of accumulation loading of landslides and cutting slope in the front edge of landslide reduced the stability of the slope, which led to the occurrence of disaster under the coupled of rainfall. Engineering facilities were damaged by pulling function of landslide caused by the toe cutting due to reservoir dredging. And disaster modes of landslide were revealed, including the damage of drainage channel, the tension crack of pier foundation, the damage of superstructure and the river-blocking event. The stability calculation were showed that the landslide was in an unstable state. Local sliding would occur under rainfall in the future. The suggestions of targeted treatment and bridge reinforcement treatment are put forward.

Keywords: highway; landslide; development mechanism of landslide; disaster mode of landslide; stability calculation; treatment suggestions