

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.005

某高速公路巨型滑坡稳定性分析及处置方案研究

黄洪超

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 430056)

摘要:山区修建高速公路时,由于地质情况复杂容易引发滑坡,造成重大的经济损失乃至人员伤亡,因此滑坡处置方案的研究越来越受到学者们的重视。该文以云南省东南部某高速公路巨型滑坡治理工程为例,分析巨型滑坡形成的过程和原因,再结合地形地质和坡面开挖前后的状态,反演试算确定滑坡稳定性分析参数,最后根据设计坡面剩余下滑力的计算结果拟定了综合治理措施。工后监测资料表明:采取的综合工程治理措施可行、可靠和有效。

关键词:巨型滑坡;路堑边坡;成因;稳定性;处置方案

中图分类号:U418

文献标志码:A

0 引言

滑坡是斜坡上的岩体或土体在自然或人为因素影响下沿带或面滑动的地质现象。随着国家山区高速公路的大规模建设,斜坡上的路堑边坡也越来越多。高速公路作为带状构造物,路线在不同的地质单元中穿越时,由于地质条件复杂,水文和气候对边坡稳定也有较大影响,导致路堑边坡设计、施工存在一定的不确定性,容易发生小型溜滑或者深层滑动,甚至产生巨型滑坡^[1-2],造成重大的经济损失乃至人身伤亡^[3-4]。为确保高速公路运营安全,滑坡处置方案的研究越来越受到学者的重视。

本文以云南省东南部某高速公路巨型滑坡处置为例,该滑坡范围大、厚度深,潜在的破坏性强,为典型的折线形牵引式滑坡,其破坏机制和处置思路在山区高速公路边坡中具有一定的代表性。本文首先论述了滑坡特征及变形机制,然后以边坡开挖前后状态相应的稳定安全系数和推测滑动面进行反演试算,确定符合滑坡实际工况的计算参数,最后综合比选确定滑坡的处置方案,并进行工后监测评价,验证治理工程的可行性和有效性。

1 工程概况

该滑坡位于高速公路左幅的左侧,以冲沟为界,小桩号侧为A区形成3级边坡,最大坡高23.5 m,大桩号侧为B区形成4级边坡,最大坡高32.8 m,如图1所示。各级边坡分级高度均为8 m,平台宽2 m,坡率均为1:1。坡面采用锚杆框格或衬砌拱骨架植草防护,平台及坡顶设置有M7.5浆砌片石截水沟,如图2所示。



图1 滑坡区地形地貌

2018年年初A区边坡开始施工,至4月底部分二级边坡开挖到位。在一场连夜的降雨之后,坡顶60 m处出现贯通的张拉裂缝,坡体中也出现扇状张裂缝。经现场踏勘和补充钻探后,拟定了滑坡清方减载的方案。

收稿日期:2023-03-16(修改稿)

作者简介:黄洪超,男,硕士,高级工程师.E-mail:hhemail@qq.com

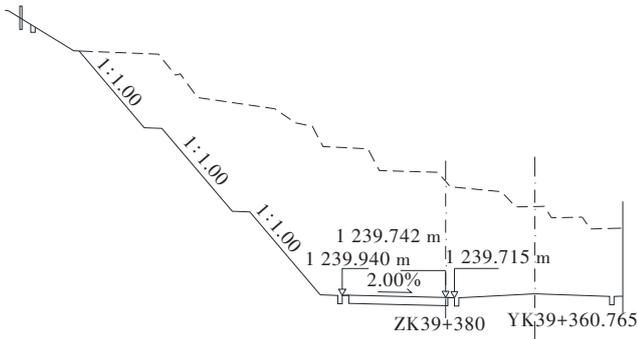


图2 原设计横断面

2018年11—12月,A区按变更处置设计施工图施工,完成了最上一级边坡的衬砌拱骨架防护;同时B区的4级挖方边坡也进行了开挖,完成了上部3级边坡防护。2018年12月23日,在一整天的降雨之后,A区坡顶截水沟附近出现大量裂缝。2018年12月28日,相关单位联合到现场踏勘,查明该滑坡已由A区扩大至B区,后缘张拉裂缝最远到清方后边坡坡顶外90 m,裂缝走向大致与路线走向平行,缝宽一般为3~15 cm,最大垂直落差达40 cm,最长裂缝达160 m,如图3所示。滑坡体已由浅层中型演变为深层巨型,必须进行针对性的处置,以避免滑坡进一步扩大,威胁山顶省道及山脚居民的生命财产安全。

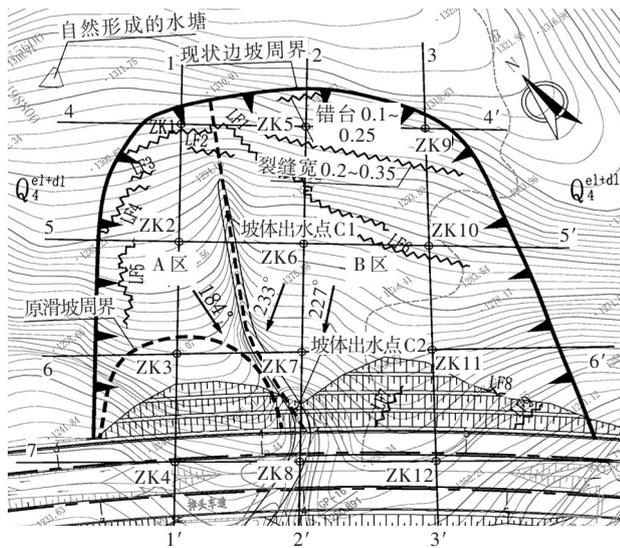


图3 滑坡工程地质平面图(单位:m)

2 滑坡工程地质条件

2.1 地形地貌

该高速公路滑坡位于云南省东南部,区域地貌属构造溶蚀侵蚀低中山地貌,冲沟斜坡地形,植被发

育。目前滑坡范围内地面高程1 240~1 320 m,滑坡前后缘最大高差为80.0 m,地形起伏较大,滑坡在经过数次滑塌后,平面上呈圈椅状地形。

2.2 地质构造

滑坡区位于云南山字形与广西山字形构造之间,应力集中,区域地质构造现象极为复杂,主要以扭动构造体系为主,表现为季里寨山字形构造及文山大形环状旋扭构造。区内新构造运动颇为活跃,迹象较多,体现为阶地与洪积扇发育、深切河曲与山地的抬升、地震活动频繁。滑坡附近发育有两条断层,一条在滑坡小桩号侧500 m处与路线呈65°相交,该断层性质产状不明,为非活动性断裂,走向249°~232°;另外一条断层在滑坡大桩号侧400 m处与线路呈近90°相交,该断层为压扭性断裂,断层走向306°,长约3.2 km。滑坡位于两条断层之间,受断层挤压影响,有局部揉皱,岩体完整性差,节理裂隙发育,强风化基岩破碎,造成岩层承载力有所降低,岩土抗侵蚀能力差。

2.3 地层岩性

根据钻探资料,区内主要地层有第四系全新统残坡积(Q_4^{el+dl})粉质黏土(下层含碎石),下伏基岩为泥盆系下统翠峰山组(D_1c)泥质页岩,如图4所示。各岩土层工程地质基本特征及分布范围如下:

(1) 第四系全新统残坡积(Q_4^{el+dl})

粉质黏土:褐黄色,主要由粉粒、黏粒组成,底部的粉质黏土含碎石;无摇振反应,干强度中等,韧性中等,切面稍有光泽,失水干裂。可塑状,表层见植物根系。该层为滑坡体,揭露厚度10.5~14.0 m。

(2) 泥盆系下统翠峰山组(D_1c)

强风化泥质页岩:灰色,灰黑色,主要矿物成分为黏土物质,泥质结构,局部含炭质,中厚层状构造,节理裂隙较发育,黏性物充填其中;该层表面为上层滑面,强风化泥质页岩中极其破碎处为下层滑面,岩芯相对破碎,岩芯多呈30~160 mm短柱状,少量呈碎块状和柱状。较完整泥质页岩为软石,未揭穿。

2.4 水文地质条件

滑坡区2018年12月份勘察期间冲沟内有地表径流,流量不大,呈小股状,坡体上有自然形成的蓄水池塘。滑坡区地下水可分为第四系松散岩(土)类孔隙水和基岩裂隙水两类,其埋藏深度、地下水径流强度、岩溶水等随地形产生规律性的变化十分明显。

初步估算整个滑坡体蓄水量 $0.9 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，直接影响坡体的稳定。

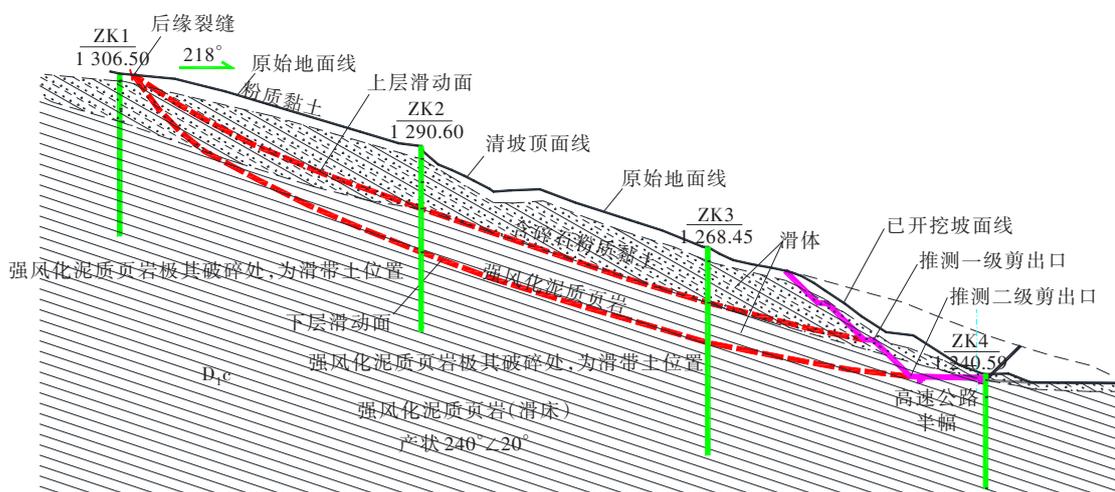


图4 A区滑坡典型地质剖面图(标高单位:m)

3 滑坡特征及变形机制分析

3.1 滑坡体特征

本挖方边坡从2018年年初开始至2018年12月发生数次滑塌,滑动范围逐步由A区发展至B区,表明坡体长期处于不稳定变形阶段。目前滑坡前后缘最大相对高差80 m,主要滑动方向为 227° (冲沟两侧坡体有向冲沟中间滑动的趋势),滑坡坡面平均坡度为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。滑坡后缘张拉裂缝明显,张开 $0.20 \sim 0.35 \text{ m}$,错距 $0.10 \sim 0.25 \text{ m}$,延伸长度 $35 \sim 40 \text{ m}$;滑坡体内裂缝张开 $0.05 \sim 0.35 \text{ m}$,错距 $0.05 \sim 0.40 \text{ m}$,延伸长度差别较大,为 $10.0 \sim 160.0 \text{ m}$ 。坡面变形强烈,土体松散。滑坡在平面上呈圈椅状,纵向上呈阶梯状,滑坡体沿主滑方向长约 205 m ,横向宽约 228 m ,平均厚度 23 m 左右,体积约 107.5 万 m^3 ,为深层巨型岩土混合牵引式滑坡^[5]。

由于斜坡下部坡脚大面积开挖,形成高陡临空面(临空面高约 32 m),使得阻滑段大量卸载,且泥质页岩强度低,节理裂隙发育,风化强烈,另外坡体含水丰富,受地面降水影响,泥质页岩软化后处于饱水状态,抗剪强度大大降低,在公路边坡开挖形成临空面的条件下发生滑塌。根据监测数据显示,滑坡体处于不稳定状态,坡体仍在蠕动滑移。

3.2 滑坡变形机制分析

从地质构造上讲,滑坡位于两条断层之间,受断层挤压影响,岩体有局部揉皱,完整性差,在人类工

程活动时容易形成滑坡。

从地层岩性上讲,滑坡岩体泥质页岩属软岩,岩体破碎,节理裂隙发育,岩面与坡面为顺层关系,且坡体地表及地下水丰富,受雨水长期侵入作用,泥质页岩极易软化,有利于软弱带的形成。

从外界因素上讲,本段边坡在工程开挖扰动,连续雨水入渗的影响下,在第四系覆盖层底部形成了静水压力,此处土体变为可塑~软塑状;同时土体饱水增大了重度,导致边坡的下滑力增大而逐渐进入临界稳定状态。

总之,地质构造、地层岩性加上人工切坡和雨水下渗等外界因素的影响,率先开挖的A区先发生滑塌;由于没有有效治理,加上2018年6月底至10月初的长期连续降雨作用,且B区的坡面开挖导致临空面增大,使A区的滑塌进一步牵引拓展至B区,引起坡体的大范围开裂破坏,必须尽快采取有效的加固措施。

4 滑坡稳定性分析

4.1 思路分析

滑坡稳定性分析中最重要的是确定滑动面和滑面参数。一般岩土分界面就是滑坡的滑面,但本滑坡的滑床基岩为泥质页岩,裂隙发育,受雨水浸泡极易软化,强度下降很快,导致滑面下移,使滑面和参数的确定成为一个非常复杂的问题,因此从地质勘探的取样岩芯中判断滑动面和岩土参数存在一定的

不确定性^[6-7]。

现场踏勘时走访了周边村民,了解到滑坡区山体在高速公路修建前50年内尽管从未发生过整体滑动,但坡体中常年有水外渗,有局部位移的趋势,表明坡体未开挖前在暴雨或连续降雨的非正常工况下边坡稳定安全系数接近规范的安全限值;而坡体开挖后在非正常工况下出现裂缝,表明开挖后的边坡处于临界极限状态,因此可以作为确定不同形态坡面稳定安全系数的重要依据。

通过对勘探成果的分析,覆盖层厚度仅12~15 m,但滑坡上缘与坡脚距离却达到185 m,说明该滑坡至少存在2个滑面,上层滑面位于含碎石粉质黏土与基岩的结合面;下层滑面受雨水下渗程度的影响,位于强风化泥质页岩中极其破碎的层位;另外路基右侧坡体的监测数据证明右侧坡面未发生移动,证明下层滑面的剪出口应该位于挖方碎落台处,但具体的形态和深度未知。

通过上述分析,可以将边坡开挖前后非正常工况下的稳定安全系数和推测的滑面结合起来反演岩土参数,并将反演的参数与取样完成的室内土工试验参数进行验证对比,最终确定滑坡稳定性评价的计算参数。具体的分析步骤如下:

(1) 以边坡未开挖前的原始地面线及上下两个推测滑面建立计算模型,根据规范^[8]高速公路在非正常工况时的边坡稳定系数不得小于1.1~1.2,且上层滑动后下层才会滑动,因此偏安全地规定上层滑面稳定安全系数取1.15,下层滑面取1.2,用传递系数法^[8]计算剩余下滑力为0时各自对应的 c 、 φ 值,然后与室内土工试验成果综合考虑后确定各滑面对应的抗剪强度指标。

(2) 以上述参数计算开挖后现状边坡在非正常工况时的稳定安全系数,要求上下两个滑面对应的稳定性系数均在1.0附近,且上层滑面的稳定安全系数要略小于下层滑面,这样与现状边坡的临界滑动状态相吻合。

(3) 若第(2)步中计算的稳定安全系数不满足要求,则应在第(1)步中重新拟定滑面再次计算,直至满足要求为止。

(4) 最后根据分析确定的滑动面和岩土参数,按设计拟定的坡面线计算边坡下滑力,据此确定边坡加固处置方案。

4.2 计算参数的确定

通过上述的思路分析,岩土参数和滑动面需要采用土工试验法与反算法相结合的方法,经多次反复验算才能确定。计算后的滑带土体物理参数综合取值见表1,现状边坡稳定性计算结果见表2。

表1 滑坡土体物理参数综合取值

滑动面	取值依据	滑体平均重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)		滑面 天然峰值强度		滑面 饱和残剪强度	
		天然	饱和	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
A区	试验值	19.4	20.4	18.3	20.0	15.0	16.1
上层滑面	反演值	—	—	—	—	13.5	15.4
	综合取值	19.4	20.4	17.7	18.3	13.5	15.4
A区	试验值	20.6	21.6	22.2	23.0	17.0	18.3
下层滑面	反演值	—	—	—	—	15.8	16.9
	综合取值	20.6	21.6	19.6	20.3	15.8	16.9
B区	试验值	19.4	20.4	20.3	19.7	14.3	16.0
上层滑面	反演值	—	—	—	—	13.4	15.3
	综合取值	19.4	20.4	17.6	18.4	13.4	15.3
B区	试验值	20.6	21.6	23.0	22.6	17.0	18.5
下层滑面	反演值	—	—	—	—	16.9	18.3
	综合取值	20.6	21.6	19.8	20.9	16.9	18.3

表2 现状边坡稳定性分析汇总

滑动面	计算工况	稳定系数 K_s	剩余下滑力 $F_s/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	
			$K_f=1.25$	$K_f=1.15$
A区 上层滑面	自重	1.238	120.68	
	暴雨	0.999	1 563.25	
	地震	1.191	0	
A区 下层滑面	自重	1.245	84.22	
	暴雨	1.010	2 686.03	
	地震	1.200	0	
B区 上层滑面	自重	1.242	33.15	
	暴雨	0.984	757.22	
	地震	1.196	0	
B区 下层滑面	自重	1.237	195.52	
	暴雨	1.001	2 449.83	
	地震	1.140	186.95	

从表2可知:非正常工况(暴雨)时各滑动区的上下滑面对应的稳定安全系数均在1.0附近,且上层滑面的稳定安全系数略小于下层滑面,说明多次反演后拟定的岩土参数和滑动面符合分析假定和边坡实际情况。

5 滑坡综合处置方案

5.1 方案拟定

根据安全可靠、经济合理的原则,滑坡处置一般可采用减载、支护和排水的综合治理措施。本滑坡范围内现状地面横坡约为 20° ,滑坡上缘之外横坡达 30° ,且坡体较高,若大范围清方减载,可能导致高陡山坡的牵引式整体滑动,因此不宜采用清方减载的方案,推荐采用“局部清方+强支挡+综合排水”的处置方案,强支挡推荐采用单排大尺寸人工挖孔的矩形抗滑桩,并据此拟定设计坡面。

5.2 设计边坡稳定性分析

根据分析确定的岩土参数和滑动面,采用规范规定的传递系数法,对滑坡处置方案确定的设计边坡进行稳定性分析,结果见表3。

表3 设计边坡稳定性分析汇总

滑动面	计算工况	稳定系数 K_s	剩余下滑力 $F_s/(kN \cdot m^{-1})$	
			$K_f=1.25$	$K_f=1.15$
A区 上层滑面	自重	1.233	171.07	
	暴雨	0.996		1 610.19
	地震	1.186		0
A区 下层滑面	自重	1.216	630.36	
	暴雨	0.987		3 190.53
	地震	1.170		0
B区 上层滑面	自重	1.300	0.00	
	暴雨	1.028		546.76
	地震	1.251		0
B区 下层滑面	自重	1.206	647.45	
	暴雨	0.977		2 873.45
	地震	1.110		638.56

由表3可知:按拟定的设计边坡最大的剩余下滑力均出现在暴雨工况下,因此滑坡的强支挡方案应以暴雨工况对应的剩余下滑力进行抗滑桩结构计算。

5.3 滑坡处置综合措施

由于滑坡一直在缓慢蠕动,项目区若连续降雨将导致滑动加速,需尽快对滑坡采取措施。根据设计边坡剩余下滑力的计算分析,确定滑坡的处置设计方案如下:

(1) 刷坡和平台宽度:挖方边坡分级高度均为8 m,第一级挖方平台宽度2 m,其上设置桩板墙;第一

级边坡坡率为1:1.0,桩板墙顶部边坡坡率为1:1.75~1:2.0。

(2) 边坡防护:第一级边坡采用40 cm等厚浆砌片石封闭,桩板墙顶部以上边坡回填后采用三维网植草防护。

(3) 桩板墙支挡:在第一级挖方平台设置人工挖孔的矩形抗滑桩,其中A区抗滑桩尺寸 $3.0\text{ m} \times 4.0\text{ m}$,间距6 m,桩长30.0~31.0 m,悬出第一级平台高度6~8 m;B区抗滑桩尺寸 $2.5\text{ m} \times 4.0\text{ m}$,间距6 m,桩长30.0~30.5 m,悬出第一级平台高度7~8 m;所有抗滑桩顶均设置2根6索预应力锚索。

(4) 排水措施:坡顶设置截水沟,各级平台按原设计要求设置平台截水沟;要求所有平台均采用20 cm厚C20混凝土硬化处理,以防雨水下渗。滑坡中部的冲沟在征地范围内的部分均采用C20混凝土硬化,硬化层的底部设置盲沟,盲沟底部及侧面应采用防水土工布包裹。另外在第一级边坡设置深层导水孔排除坡体内地下水(需注意避开抗滑桩)。

(5) 抗滑桩施工前应首先对坡脚进行填土反压,反压高度按桩板墙顶部标高控制,反压宽度为桩板墙靠道路侧不小于10 m,反压填土坡率不陡于1:2.0;坡脚反压完成且滑坡变形趋稳后才能进行抗滑桩的开挖施工。

A区滑坡处置典型横剖面见图5。

6 实施效果

抗滑桩施工前的坡脚反压防止滑坡规模的进一步扩大;抗滑桩施工后阻断了滑坡推力的逐步下移;桩顶锚索的实施确保抗滑桩不因悬臂过长而倾斜;坡顶、平台及冲沟处的地表排水设施及坡体内的深层排水管,则降低了水对滑坡的影响;最后通过第一级坡面封闭,其余坡面植草固土,稳定陡壁,防止地表侵蚀的进一步发展。

该滑坡治理工程于2019年10月完成。截至2020年12月,通过定期和不定期对抗滑桩、预应力锚索、坡面浆砌片石封闭层以及截排水沟等结构物和坡体地表等进行巡查,未发现工程结构物的变形和坡体地表的开裂变形。另外施工中布设的地表位移监测资料也表明,自治理工程完工后,滑坡整体一直处于稳定状态。

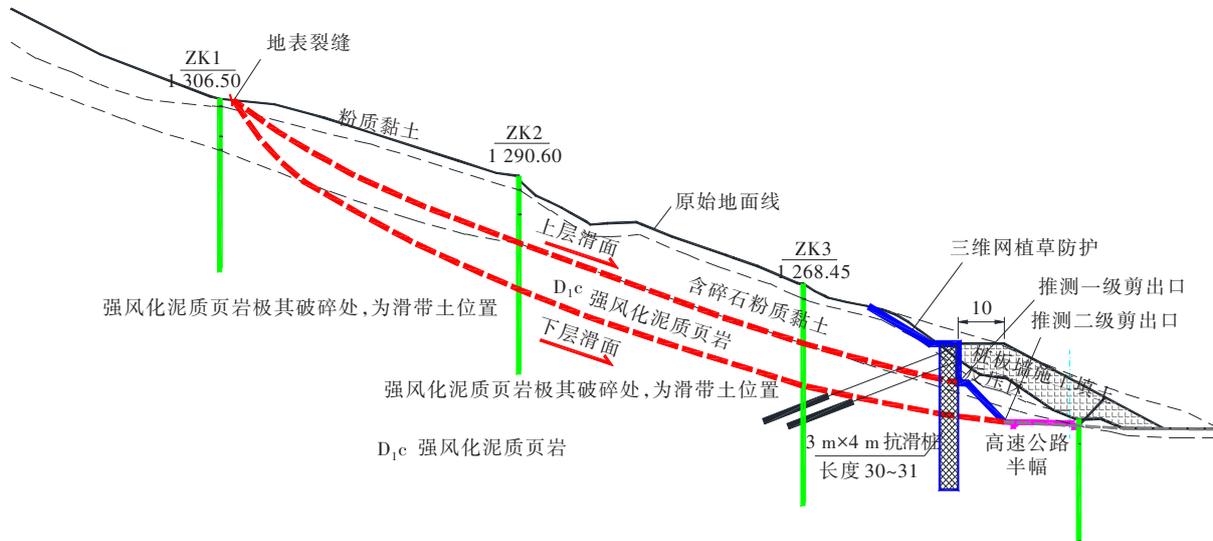


图5 A区滑坡处置典型横剖面图(单位:m)

的处理思路,具有一定的参考价值。

7 结论

本高速公路巨型滑坡规模较大,受力特性复杂,处置不当将导致加固失败或引发更大规模的滑动,因此稳定性分析和处置方案的拟定需严谨慎重。通过该工程案例的分析处理,得到如下结论:

(1) 山区公路边坡在地质构造、地层岩性等内在因素和人工切坡、雨水下渗等外界因素综合影响下极易发生溜滑。若没有对边坡采取有效治理,可能导致滑动面加深而演变为大型甚至巨型滑坡,在工程上要引起重视。

(2) 本巨型滑坡工点采取地质勘察和现场调查相结合的方式,将坡体原始状态与开挖后状况进行对比,通过各状态、各工况下的反演计算确定其最不利时的滑动参数,然后对设计坡面进行稳定性分析,最后提出了针对性的综合处置方案。工后监测表明滑坡处置是成功的。

(3) 本滑坡为典型的折线形牵引式滑坡,其变形破坏过程具有渐进性和强破坏性等特点,在山区高速公路边坡中具有一定的代表性。通过对滑坡破坏机制和处置思路的分析,为类似工点提供了一个新

参考文献:

- [1] 王东,张婧,陈强,等.G4216仁沐新高速公路新市互通区巨型滑坡处治方案[J].西华大学学报(自然科学版),2019,38(1):40-45.
- [2] 王丰,刘天翔,雷航.山区高速公路深厚古滑坡堆积体复活特征机制及防治对策研究[J].中外公路,2021,41(4):15-20.
- [3] 郑光,许强,刘秀伟,等.2019年7月23日贵州水城县鸡场镇滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J].工程地质学报,2020,28(3):541-556.
- [4] 郭富赟,王信,吴正军,等.舟曲磨里巨型滑坡基本特征及破坏模式[J].山地学报,2022,40(4):557-569.
- [5] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路滑坡防治设计规范:JTG/T 3334—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [6] 陈元勇.冉家沟滑坡稳定性影响因素敏感性分析[J].中外公路,2021,41(6):37-39.
- [7] 吴国鹏,于翔鹏,崔凯,等.不同干湿作用下山区公路边坡土体性质劣化研究[J].中外公路,2022,42(5):24-29.
- [8] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.