

库区公路 K243 滑坡形成机制及治理措施

王有昌

(国家林业和草原局昆明勘察设计院, 昆明 650031)

摘要:依托澜沧江黄登水电站库区沿江公路 K243 滑坡工程实例,对新生工程滑坡和古滑坡的成因机制、变形破坏模式及治理措施进行研究,分析滑坡多工况组合条件下的稳定状态和剩余下滑力;运用 GEO5 软件建立滑坡模型,分析抗滑桩内力及位移变化,以及不同治理施工过程中的滑坡稳定性变化规律。研究结果表明:K243 滑坡采用双排刚架抗滑桩、锚索桩板墙、填土反压及截排水等措施进行治理,效果显著;新生工程滑坡后排桩剪力和弯矩均大于前排桩,后排桩桩顶位移大于前排桩,而古滑坡前排桩的剪力及位移均大于后排桩;新生工程滑坡在不同施工过程中的稳定系数提高比例约为古滑坡的一倍。实践证明,K243 滑坡治理是成功的,可为库区公路滑坡分析与治理提供参考。

关键词:库区公路;古滑坡;成因机制;双排刚架抗滑桩;治理措施

中图分类号:U416.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)11-0265-09

随着澜沧江上游河段梯级水电站陆续开发建设和正常蓄水运营,库区公路路堑开挖引发了较多滑坡、崩塌等地质灾害问题,库岸再造致使岸坡坍塌变形,影响公路路基稳定和运营安全。因此,研究库区公路滑坡的成因机制和变形机理非常关键,而成功有效的治理措施和经验对保障库区公路路基稳定和运营安全至关重要。

众多学者对滑坡的成因机制、变形机理、治理措施、数值模拟、监测与预警等开展了大量研究,取得了较多成果。殷跃平等^[1]、成永刚等^[2]对滑坡的识别与机理分析、滑坡勘察与稳定性评价、防治工程设计理论与实践等进行了深入研究。王浩等^[3-4]对滑坡孕育过程进行数值仿真反演分析,揭示滑坡形成的复杂力学机制,开展施工动态模拟预测及过程优化控制。许泰等^[5]、吴冠仲^[6]、丁恒^[7]对滑坡影响因素、形成原因、变形机理进行研究,评价滑坡其稳定性。申永江等^[8]、肖世国和何洪^[9]、叶四桥和潘新恩^[10]和邹盛堂和戴自航^[11]提出了不同的双排桩计算模型,通过三维数值分析软件对双排桩的滑坡加载方式和受力体系进行研究,分析桩身内力及变形。于洋等^[12]、李松林等^[13]和顾中华^[14]对双排桩结构设计参数进行分析,建立无连梁和有连梁双排抗滑桩有限差分模型,研究不同锚固深度组合时对双排抗滑桩变形、内力和抗滑

力的影响规律,讨论双排刚架圆截面抗滑桩的计算方法。李松林等^[15]、江强强等^[16]和朱权威等^[17]、李厚芝等^[18]研究了库区滑坡成因机制、变形机理,分析库岸滑坡在不同水位波动、降雨强度及其联合作用下的变形演化特征和稳定性变化规律,提出滑坡治理对策。

现依托澜沧江黄登水电站库区沿江公路 K243 滑坡实例工程,对滑坡成因机制及治理措施进行研究,运用 GEO5 软件建立 K243 滑坡计算分析模型,对抗滑桩变形、抗剪与抗弯承载力进行分析,评价滑坡治理整体稳定性,对库区公路滑坡分析与治理具有重要意义。

1 工程实例

1.1 滑坡概况

澜沧江沿江公路 K243+200~K243+450 段位于维西县维登乡以南约 4 km,距黄登水电站坝址约 75 km,公路沿库区左岸岸坡展布,黄登水电站正常蓄水水位为 1 619.00 m,K243 位于库尾,回水水位按 1 622.00 m 考虑。沿江公路从古滑坡前缘部位通过,因路堑边坡开挖形成连续、坡高大于 20 m 的临空面,2011 年 7 月中旬,K243+240~K243+390 段边坡发生变形坍塌,清方后路堑仍持续滑坍,边坡变形加剧,古滑坡中前部位发生整体滑移,形成滑坡。K243 滑坡由古滑坡及新生工程滑坡组成,

收稿日期:2023-01-28

作者简介:王有昌(1982—),男,云南祥云人,国家林业和草原局昆明勘察设计院,硕士,高级工程师,注册岩土工程师,研究方向为公路地基与基础、地质灾害、隧道工程等。

滑坡全貌如图 1 所示。

古滑坡后缘壁呈“圈椅”状,后缘壁坎高为 50~70 m,水平滑移距离为 50~100 m;滑坡后缘高程约 1 803 m,前缘剪出口高程约 1 584 m,地面落差约 219 m;滑坡体平面周长为 1 102 m,平均宽度为 335 m,平均厚度为 21 m,滑体最大厚度为 27.1 m,属深层滑坡;滑坡体积为 $189.65\times 10^4\text{ m}^3$,属巨型滑坡。古滑坡两侧基本以基岩为界,中后部存在多处台地,古滑坡周界不清晰、变形痕迹不显著,近期无活动痕迹。

新生工程滑坡后缘壁呈“圈椅”状,后缘壁坎高为 2~3 m,后缘裂缝宽度为 30~40 cm,前缘面状渗水,坡体坍塌严重;滑坡后缘高程约 1 698 m,前缘剪出口高程约 1 621 m,地面高差约 76 m;滑坡体平面周长为 504 m,平均宽度为 155 m,平均厚度为 11 m,最大厚度为 16.2 m,属中层滑坡;滑坡体积为 $16.67\times 10^4\text{ m}^3$,属中型滑坡。新生工程滑坡两侧基本以变形土体为界,周界清晰,变形特征明显、痕迹显著,为近期活动滑坡,其现状变形特征如图 2 和图 3 所示。

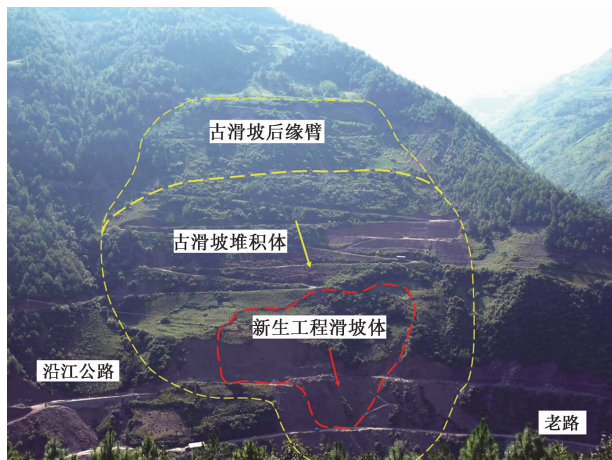


图 1 K243 滑坡全貌

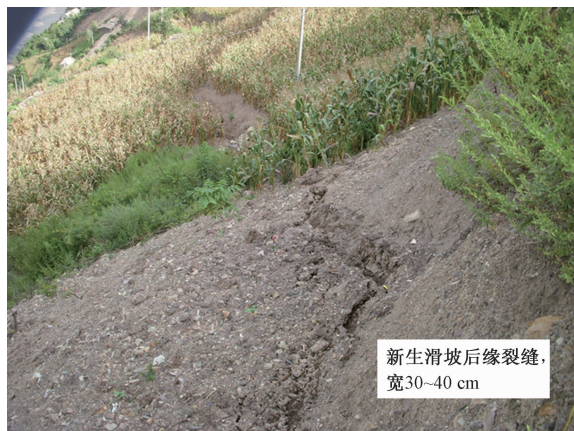


图 2 新生工程滑坡后缘特征

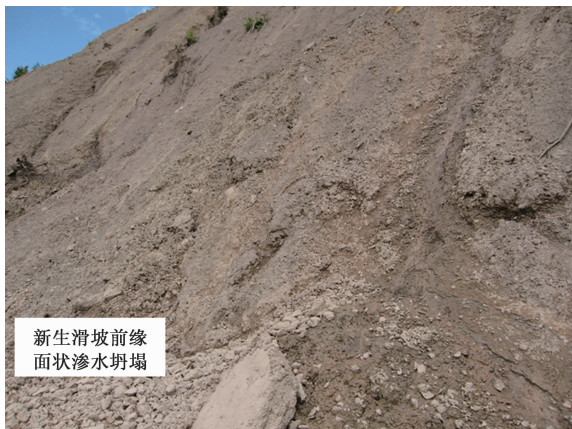


图 3 新生工程滑坡前缘特征

1.2 滑坡地质环境特征

1.2.1 地形地貌

滑坡区位于云贵高原西部、澜沧江上游地带的横断山脉南段,地处滇西北纵谷山原地貌单元,属澜沧江高山峡谷深切地貌,构造侵蚀强烈,地形起伏大,岸坡上缓下陡。

1.2.2 地质构造

滑坡区位于青藏、滇缅、印尼巨型“歹”字形构造体系东支中段偏北与三江南北向经向构造体系复合部位,以北西向构造带与南北向构造带为主体的区域构造基本骨架。滑坡区附近无明显断裂构造。

1.2.3 地层岩性

地层岩性以第四系覆盖层和侏罗系砂泥岩地层组成。滑体物质为褐灰色、黄灰色混碎石粉质黏土、碎石土、碎块石层,碎石成分以砂岩、砂泥岩为主;滑带为黄灰、紫灰色含砾粉质黏土。滑床主要为黄灰色、灰色的碎石土和紫红色、紫灰色的全-强风化砂泥岩组成。

1.2.4 地震及区域稳定性

滑坡区地震基本烈度为 7 度,地震动峰值加速度为 $0.10g$ (g 为重力加速度),地震动反应谱特征周期为 0.45 s。滑坡区域地壳稳定性分区为Ⅲ区,属次稳定区。

1.3 水文地质条件

滑坡区地下水属第四系松散孔隙水、基岩裂隙水。孔隙水分布于第四系冲洪积、坡残积层及滑坡堆积层中,主要接受大气降水、地表水补给,水量随季节变化大;基岩裂隙水主要赋存于侏罗系上统坝注路组砂泥岩地层中,以大气降水补给为主。滑坡区中前部有多处泉点出露,稳定水位埋深为 9.0~27.0 m,水位高差极大。

2 滑坡成因机制及变形破坏模式

2.1 滑坡成因机制

滑坡形成机制包括地质环境因素和诱发因素两个方面,地质环境因素包括地形地貌、岩土性质、地质构造、水文地质等;诱发因素包括持续强降雨及水流作用、地震、人类活动等。

2.1.1 地质环境因素

滑坡地貌上属于澜沧江高山峡谷岸坡地貌,岸坡陡峻,斜坡整体平衡状态脆弱,澜沧江长期冲刷,创造了临空面和滑动空间,也提供了滑动势能。地层岩性以第四系覆盖层和侏罗系砂泥岩地层组成,覆盖层结构松散,基岩风化强烈、岩性破碎,倾向河谷拉张卸荷裂隙十分发育,为滑坡形成创造了物质和结构条件。受澜沧江深大断裂影响,加剧了基岩地层破碎程度,局部小断裂、揉皱构造发育,为地下水渗透和运动创造了条件。地下水长期向下径流、侵蚀,软化岩土体,使其力学性质降低,是滑坡形成的重要条件。

2.1.2 诱发因素

持续降雨或强降雨,使斜坡内动水压力激增,岩土体重量增加,抗滑力降低,是滑坡发生的主要诱发因素。滑坡区处于强震区,地震能显著增加斜坡岩土体的下滑力,是滑坡发生偶然性、突发性的诱发因素。沿江公路从古滑坡体上通过,路堑开挖极为不利;地表开荒、植被破坏,进村道路施工及矿区堆载,也是滑坡变形的诱发因素。

2.2 滑坡变形破坏模式

澜沧江峡谷岸坡的地形地貌、地层岩性和地质构造为古滑坡形成创造了势能、物质和结构条件。澜沧江河谷深切,江水冲刷,形成超高临空面,为坡体滑动提供了空间;地表水和地下水长期作用,沿风化壳下渗,导致岩土体软化,且重量增加,加之暴雨、地震等多方面的影响,逐步形成软弱带,致使古滑坡孕育演化形成,因此古滑坡体属于牵引推动复合型滑坡。滑坡钻探勘察揭示了古滑坡特征。

沿江公路通过古滑坡体前缘,古滑坡水平滑移距离大,堆积体扰动强烈、结构松散,虽然古滑坡已经趋于稳定,但表层堆积体结构松散,开挖极易滑塌。路堑边坡切脚开挖,坡脚支撑力严重削弱,在古滑坡体前部形成连续、高陡的临空面,改变了坡体应力状态和地下水渗透路径,坡面大面积渗水、坍塌;在路堑开挖施工期间,滑坡区历经 30 年一遇的降雨量,持续降雨是滑坡形成的重要影响因素;在局部清方后持续滑塌,使岩土体进一步软化,抗剪强度持续降低,导致边坡失稳,沿最薄弱面形成

贯通滑带,最终形成新生工程滑坡,属于牵引式滑坡。新生工程滑坡是多种因素共同作用形成的。

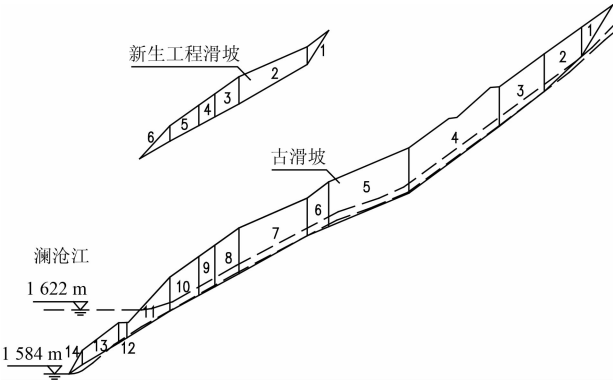
古滑坡前缘处于水库回水区,水库蓄水后,滑坡体前缘将被淹没,库区水位调节、波浪侵蚀可能引起库岸再造,将进一步改变坡体应力状态,使前缘抗滑力大幅降低,必将引起滑坡复活。

3 滑坡稳定性与剩余下滑力分析

3.1 滑坡计算参数反演分析

3.1.1 滑坡参数反演分析模型

根据滑坡现状变形特征、古滑坡变形行迹,以及钻探揭露滑动面位置,结合滑坡主轴地质剖面,划分条块,通过分析和试算合理确定新生工程滑坡和古滑坡的计算模型,如图 4 所示。



注:1~14 为条块 N 的编号

图 4 滑面参数反演计算模型

3.1.2 滑坡计算参数反演

依据土工试验、原位测试所确定的滑体重度、滑带抗剪强度指标,结合经验数据类比,滑动面按折线形考虑,采用传递系数法进行参数反演分析,综合确定滑体及滑带不同工况下滑体重度和滑带参数建议值,如表 1 所示。

3.2 滑坡稳定性分析

滑坡稳定状态根据滑坡稳定系数进行划分,滑坡稳定系数 $F_s < 1.00$,滑坡稳定状态为不稳定; $1.00 \leq F_s < 1.05$,为欠稳定; $1.05 \leq F_s < 1.15$,为基本稳定; $F_s \geq 1.15$,为稳定。滑坡稳定性分析考虑正常工况(天然)、非正常工况 I(饱和)、非正常工况 II(地震)等三种工况,并考虑低水位和高水位(按回水水位 1 622 m 考虑),对滑坡进行多工况组合条件下的稳定性分析评价。

由表 2 可知,新生工程滑坡位于蓄水位以上,低水位和高水位状态下时稳定性系数一致;天然状态下滑坡为基本稳定状态,天然+地震状态下为欠稳定状态,饱和状态下为不稳定状态。而古滑坡前缘位于正

表 1 滑体及滑动面参数反演分析成果

滑坡名称	反演工况	判别稳定状态	稳定系数	滑体重度/(kN·m³)	滑带摩擦角/(°)	滑带内聚力/kPa
新生工程滑坡	天然状态	基本稳定	1.08	20.0	25.6	23.5
	饱和状态	不稳定	0.98	20.4	23.9	20.5
古滑坡	天然状态	稳定	1.20	20.0	32.8	24.5
	饱和状态	基本稳定	1.10	20.5	30.8	21.5

表 2 滑坡主剖面稳定性计算成果

滑坡类型	计算工况	稳定系数	稳定状态
新生工程滑坡	天然+低水位	1.079	基本稳定
	天然+高水位	1.079	基本稳定
	天然+地震+低水位	1.023	欠稳定
	天然+地震+高水位	1.023	欠稳定
	饱和+低水位	0.981	不稳定
	饱和+高水位	0.981	不稳定
	饱和+地震+低水位	0.930	不稳定
	饱和+地震+高水位	0.930	不稳定
古滑坡	天然+低水位	1.199	稳定
	天然+高水位	1.116	基本稳定
	天然+地震+低水位	1.135	基本稳定
	天然+地震+高水位	1.053	基本稳定
	饱和+低水位	1.098	基本稳定
	饱和+高水位	1.036	不稳定
	饱和+地震+低水位	1.039	不稳定
	饱和+地震+高水位	0.990	不稳定

常蓄水位以下,高水位工况下滑坡的稳定性分析比低水位工况下要低;天然状态下,在低水位、高水位或地震作用时滑坡稳定系数为 1.053~1.199,滑坡处于基本稳定至稳定状态;饱和状态下,低水位时为基本稳定,高水位或地震作用时为不稳定。

3.3 滑坡推力计算

3.3.1 滑坡剩余下滑力分析

根据《公路滑坡防治设计规范》,滑坡防治工程设计稳定安全系数 K_s ,新生工程滑坡在正常工况时 K_s 取 1.20,非正常工况I时 K_s 取 1.15,非正常工况II时 K_s 取 1.10;古滑坡在正常工况时 K_s 取 1.25,非正常工况I时 K_s 取 1.15,非正常工况II时 K_s 取 1.10。根据滑坡变形行迹和稳定性分析,综合黄登水电站正常运行时库区公路路基稳定,考虑最不利条件高水位工况,新生工程滑坡和古滑坡的滑坡推力按正常工况、非正常工况I、非正常工况II进行计算。

由图 5、图 6 可知,新生工程滑坡的剩余下滑力在非正常工况 II (饱和+地震+高水位) 条件下的剩余下滑力最大,正常工况条件下剩余下滑力最小,故考虑非正常工况 II 为最不利设计工况,古滑坡的剩余下滑力也基本一致。新生工程滑坡的剩余下滑力曲线正常工况下低于其他工况,其中条块 5 在非正常工况 II 下的最大剩余下滑力为 2 393.62 kN,大于其他工况的 2 335.91 kN、

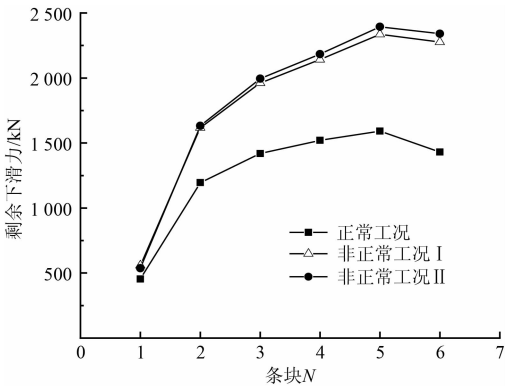


图 5 新生工程滑坡不同工况下的剩余下滑力

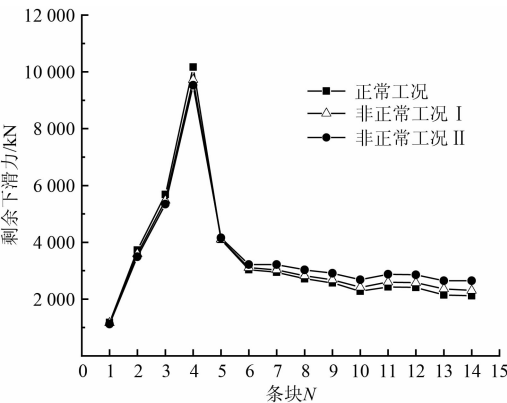


图 6 古滑坡不同工况下的剩余下滑力

1 591.36 kN。古滑坡各工况条件下的剩余下滑力曲线基本一致,条块 4 的剩余下滑力最大,条块 6 以后逐渐降低趋于平缓。

3.3.2 滑坡设计推力确定

根据滑坡防治工程设计稳定安全系数下的滑坡剩余下滑力分析,确定新生工程滑坡及古滑坡设置支挡工程部位的最大水平设计推力 T 。K243 滑坡治理考虑多排桩分级支挡,其中第 1 排抗滑桩位于新生工程滑坡的第 3 条块,设计推力 $T_{1-1}=1\,761\text{ kN}$,而位于古滑坡第 8 条块,设计推力 $T_{1-2}=2\,678\text{ kN}$,桩前剩余抗力 781 kN。第 2 排桩设计推力分段计算,并考虑填土反压填方荷载,第 2 排抗滑桩位于新生工程滑坡前缘外,填土后设计推力 $T_{2-1}=510\text{ kN}$,古滑坡第 11 条块设计推力 $T_{2-2}=305\text{ kN}$,填土主动土压力为 1 132 kN。

4 滑坡治理设计与稳定性分析

4.1 滑坡治理原则

K243 滑坡新生工程滑坡为中型滑坡,古滑坡为巨型滑坡,公路以路堑型式通过滑坡前部,新生工程滑坡危害程度为严重,古滑坡危害程度为特严重;沿江公路等级为三级公路,且位于黄登水电站库区,滑坡防治安全等级按Ⅱ级考虑。沿江公路从古滑坡前缘部位通过,不具备路线改移绕避条件,对滑坡进行综合治理。滑坡治理按永久性防护工程考虑,本着安全可靠、技术可行、经济合理、动态设计的原则,充分考虑黄登水电站库区水位变化对滑坡稳定性的影响,确保库区沿江公路路基整体稳定。

4.2 滑坡治理措施

K243 滑坡综合考虑采取多排抗滑桩分级支挡,经多方案计算分析论证,采用双排刚架抗滑桩、锚索桩板墙、填土反压、混凝土挡墙、浆砌片石护坡、植物防护和截排水等措施进行综合治理,滑坡治理平面布置和主剖面设计如图 7 和图 8 所示。

4.2.1 路基右侧治理措施

在沿江公路路基右侧布设桩径 $D=1.8\text{ m}$ 的双排圆形截面抗滑桩,桩间距为 $5\sim 6\text{ m}$,前后排桩间

距 5 m 呈品字型布置,桩顶设冠梁纵横向连接,形成双排刚架抗滑桩,前排桩顶至护坡间设现浇挡土板;冠梁 1 m 处设 6×15.24 型预应力锚索,锁定荷载为 600 kN ;坡脚设高度 3.5 m 的 C25 混凝土挡土墙,墙顶至抗滑桩间采用 30 cm 厚的 M10 浆砌片石护坡,预留泄水孔。小里程方向设置 $2.0\times 2.5\text{ m}$ 锚索抗滑桩,大里程方向布设高 4 m 的 C20 片石砼抗滑挡墙。坡面上设置仰斜排水孔,长度为 $10\sim 20\text{ m}$,孔间距为 4 m 。对坡面采用乔灌草混合植物防护。对坡面裂缝用黏土进行封闭,沿通村路设多条排水沟截排地表水。

4.2.2 路基下方治理措施

在路基左侧下方老路内侧布设 $2.0\times 3.0\text{ m}$ 锚索抗滑桩,桩间距为 $5\sim 6\text{ m}$,距桩顶 1 m 、 4 m 处设两排 6×15.24 型预应力锚索,设置桩后预制挡土板。板后填土反压形成路堤,第一级边坡坡率为 $1:1.5$,高度为 9.1 m ,第二级坡率为 $1:2$,高为 8 m ,边坡间设置 2 m 宽平台, $1\,622\text{ m}$ 高程以下采用透水性材料填筑。

4.3 滑坡治理设计分析

结合 K243 滑坡治理主剖面设计,运用 GEO5 软件中抗滑桩设计模块进行计算分析,建立双排圆

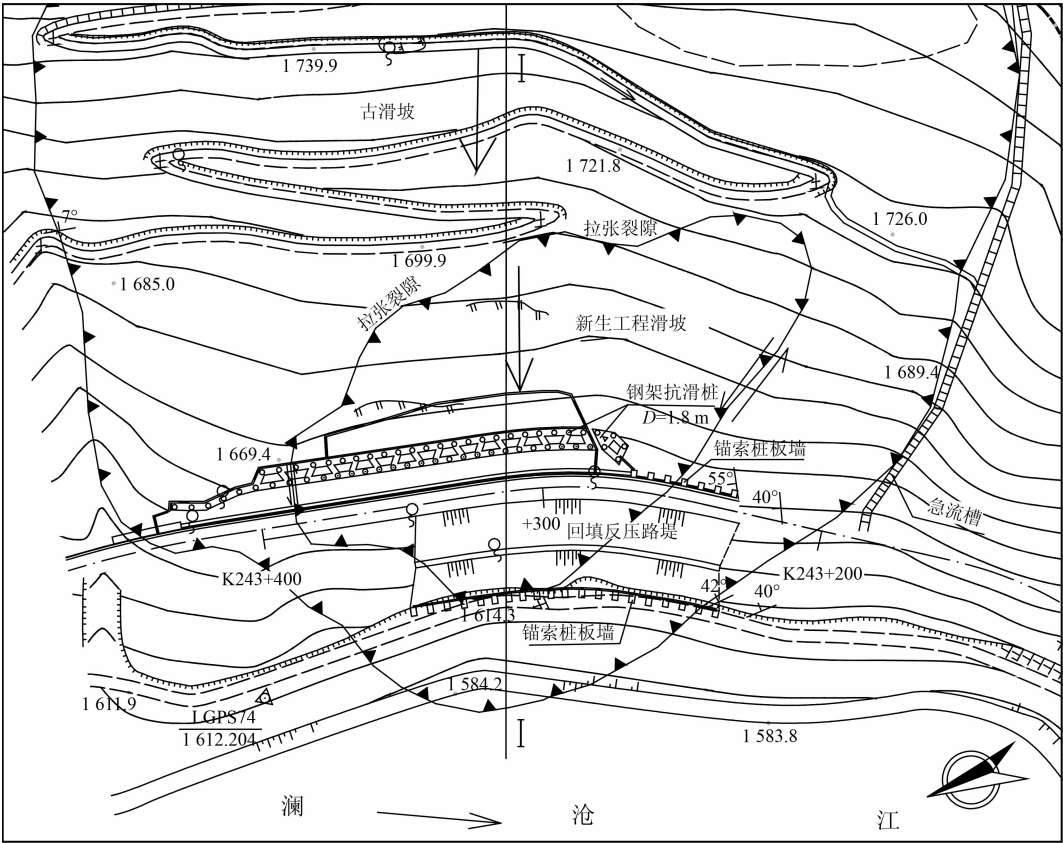


图 7 滑坡治理工程布置平面

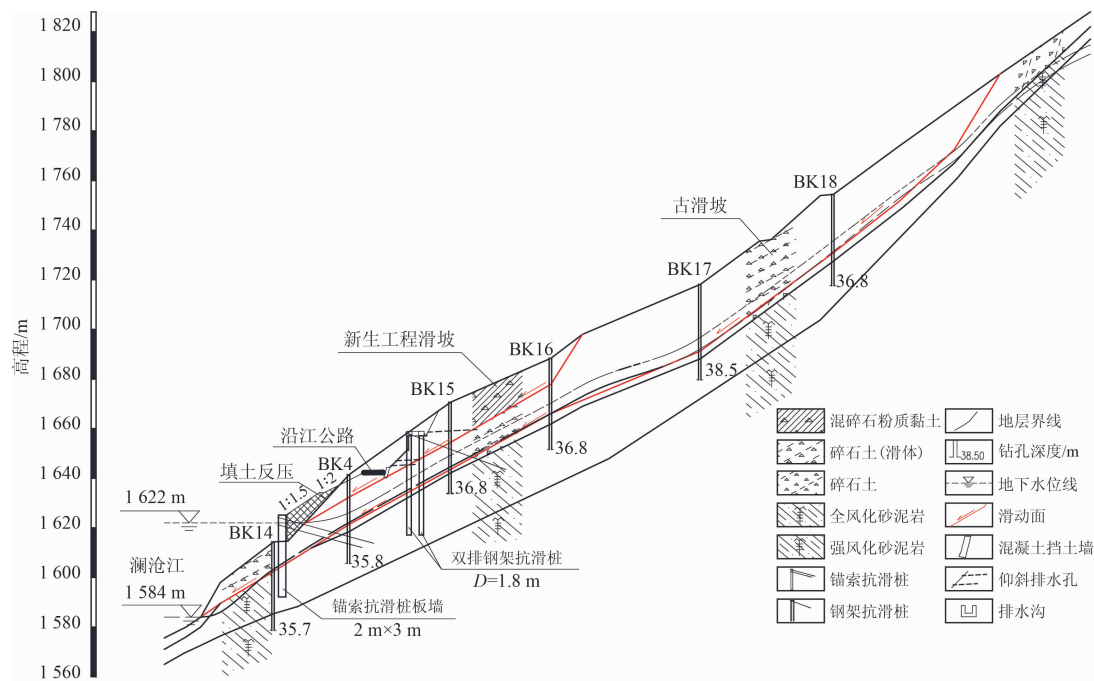


图 8 滑坡治理主剖面设计断面

截面抗滑桩和锚索抗滑桩模型,根据其所受荷载,分析其变形、抗剪承载力、抗弯承载力和嵌固端岩土体的承载力,并进行配筋校核;锚索施加在抗滑桩上,推力通过作用在抗滑桩上锚索传递到稳定地层中,计算模型如图 9 所示。

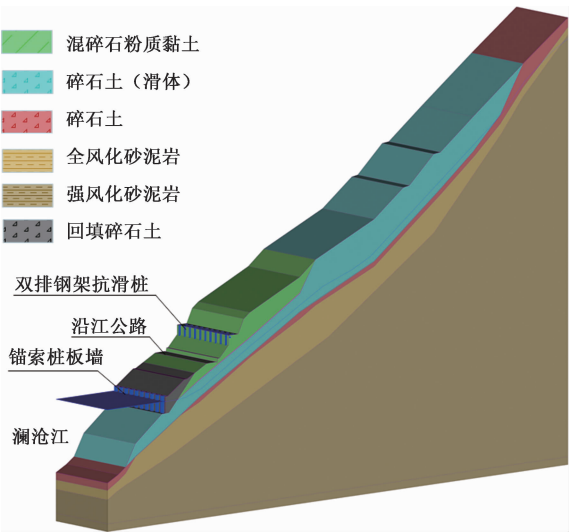


图 9 滑坡计算模型 3D 视图

4.3.1 双排刚架抗滑桩计算分析

新生工程滑坡双排桩按设计推力值进行验算,由验算结果图 10 和图 11 可知,前排桩剪力最大值为 735.82 kN/m,弯矩最大值为 2 494.73 kN·m/m,位移最大值为 38.18 mm;后排桩剪力最大值为 743.18 kN/m,弯矩最大值为 2 575.22 kN·m/m,位移最大值为 38.53 mm,滑面处结构位移为 9.1 mm。

古滑坡按设计推力值适当折减进行验算,前排桩剪力最大值为 878.57 kN/m,弯矩最大值为 4 360.15 kN·m/m;后排桩剪力最大值为 519.48 kN/m,弯矩最大值为 2 292.65 kN·m/m,滑面处结构位移为 3.2 mm。

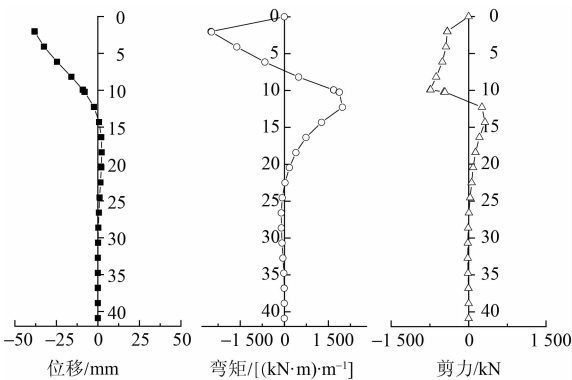


图 10 前排桩内力

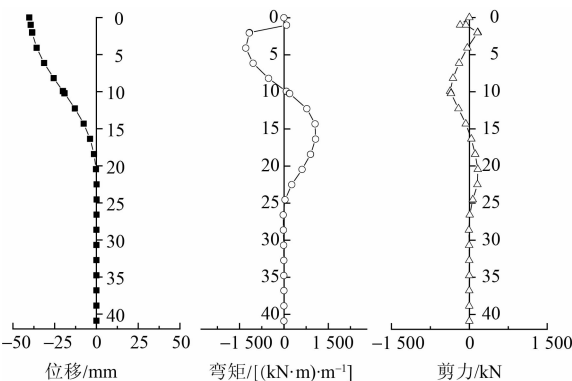


图 11 后排桩内力

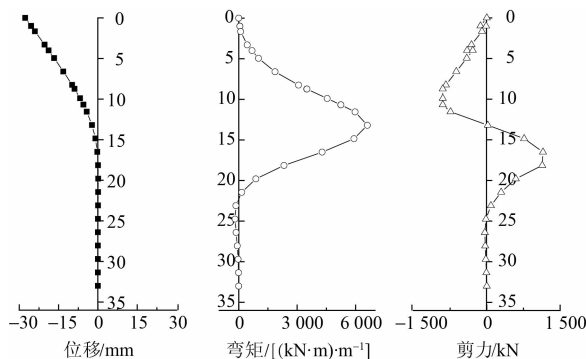


图 12 锚索抗滑桩内力

4.3.2 锚索抗滑桩计算分析

新生工程滑坡锚索抗滑桩按设计推力值进行验算,设计时考虑桩后主动土压力,而古滑坡分段设计推力值较小。由验算结果图 12 可知,桩身剪力最大值为 1 204.98 kN/m,弯矩最大值为 6 606.15 kN·m/m,位移最大值为 27.7 mm,滑面处结构位移为 8.9 mm。

4.4 滑坡治理稳定性分析

K243 滑坡治理稳定性分析考虑施工前、锚索桩板墙+填土反压、双排抗滑桩、桩前路堑开挖 4 m、路堑全部开挖完成等 5 个不同施工过程,在高水位条件下按正常工况、非正常工况 I、非正常工况 II 等三种工况,对滑坡治理施工前后整体稳定性评价。图 13 为新生工程滑坡稳定性计算简图。

由图 14 可知,新生工程滑坡非正常工况 I 时,在锚索抗滑桩+填土反压施工完成后稳定系数为 1.08,双排抗滑桩施工完成后为 1.22,路堑开挖完成后达到 1.28,治理完成后滑坡稳定系数提高约

32.0%;滑坡施工完成后整体稳定性正常工况时为 1.33,非正常工况 II 时为 1.19,滑坡稳定系数提高分别为 30.8%、23.2%,均满足滑坡设计稳定系数。而古滑坡施工完成后在正常工况、非正常工况 I、非正常工况 II 下稳定系数分别为 1.29、1.20 和 1.12,滑坡稳定性提高比例分别为 15.6%、15.8% 和 13.1%。综合分析认为,K243 滑坡治理稳定性满足规范要求,新生工程滑坡在不同施工过程中稳定性提高较快,而古滑坡相对平缓。

5 滑坡治理效果评价

K243 滑坡是澜沧江沿江公路规模和治理投资较大的典型滑坡,治理施工自 2012 年 6 月开始,至 2014 年 12 月底竣工,图 15 为滑坡治理竣工后全景效果。

根据施工过程滑坡变形监测,在下部锚索桩板墙与回填反压实施后,有效地抑制了新生工程滑坡变形;路基右侧双排抗滑桩施工完成,坡体抗力逐渐提高,地表位移减小逐渐趋于稳定。2017 年 11 月 28 日黄登水电站导流洞下闸蓄水,2018 年 8 月 17 日水库蓄水至正常蓄水位 1 619.00 m,双排刚架抗滑桩与锚索抗滑桩受力稳定正常,路面稳定;2022 年 1 月,经现场排查滑坡整体无变形迹象,图 16 为库区蓄水运营后滑坡全景。因此,沿江公路 K243 滑坡治理是成功的,对新生工程滑坡重点治理的同时兼顾古滑坡治理,有效保障沿江公路运营安全,积累了较为可靠的成功经验。

6 结论

通过对库区公路 K243 滑坡的成因机制及治理措施的研究,得出以下结论。

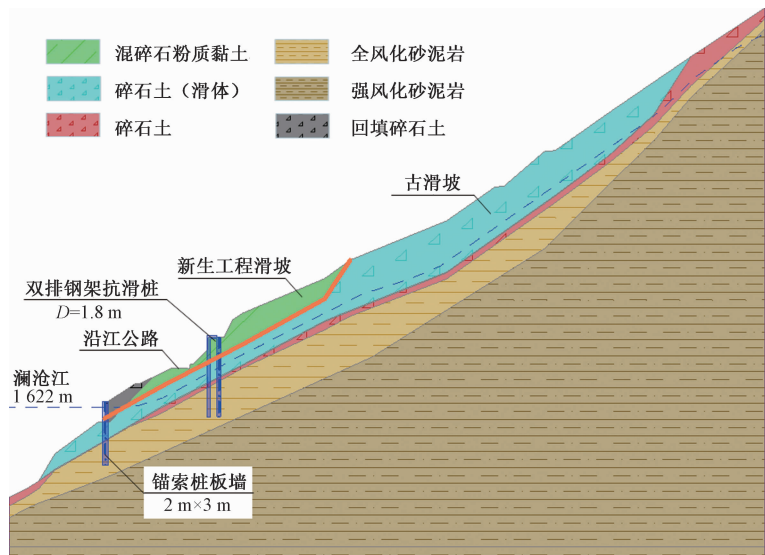
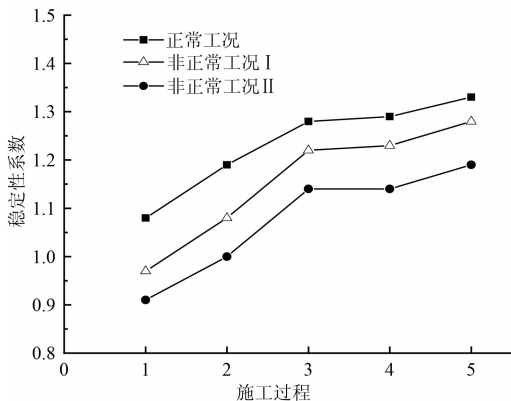


图 13 新生工程滑坡稳定性计算



注:1 为施工前;2 为锚索桩板墙+填土反应;3 为双排抗滑桩;
4 为桩前路堑开挖 4 m;5 为路堑全部开挖完成

图 14 新生工程滑坡不同施工过程的稳定性系数



图 15 滑坡治理竣工后全景(2014 年 12 月)



图 16 库区正常蓄水运营后滑坡全景(2022 年 1 月)

1)K243 滑坡由古滑坡及新生工程滑坡组成,古滑坡堆积体结构松散、地下水丰富,路堑开挖切脚,形成连续高陡临空面,改变了坡体应力状态和地下水渗透路径,坡体变形失稳沿薄弱面整体贯通,进而牵引形成新生工程滑坡。

2)通过滑坡多工况组合条件下的稳定性分析和滑坡推力计算,确定多排抗滑桩分级支挡,采用双排刚架抗滑桩、锚索抗滑桩、填土反压、混凝土挡土墙、植物防护及截排水等措施进行综合治理。

3)建立抗滑桩计算模型分析抗滑桩位移及内力,新生工程滑坡后排桩剪力和弯矩均大于前排桩,后排桩桩顶位移大于前排桩;而古滑坡前排桩的剪力及位移均大于后排桩。桩顶位移为 27.7~38.53 mm,均小于 50 mm,满足允许值要求。

4)滑坡整治不同施工过程中,新生工程滑坡治理后稳定性系数提高了 23.2%~32.0%,古滑坡稳定性系数提高了 13.1%~15.8%。K243 滑坡历经 8 年多的实践检验,滑坡治理效果显著。

参考文献

[1] 殷跃平,胡时友,石胜伟,等. 滑坡防治技术指南[M]. 北京:地质出版社,2018.

[2] 成永刚. 公路工程斜坡病害防治理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.

[3] 王浩,王晓东,泮俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究 I: 边坡失稳机制模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报,2017, 36(4):899-909.

[4] 王浩,王晓东,泮俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究 II: 治理对策及其过程控制[J]. 岩石力学与工程学报,2017, 36(5):1152-1161.

[5] 许泰,鄂崇毅,蒋兴波. 甘肃省东乡县下坪山滑坡特征及稳定性评价[J]. 科学技术与工程,2022,22(19):8225-8235.

[6] 吴冠仲. 舟曲县瓜垭坝 3 号滑坡成因机理分析及防治对策[J]. 科学技术与工程,2020,20(9):3414-3419.

[7] 丁恒,李阳春,李海军. 贵州水城县尖山营滑坡破坏机制及稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(25): 10903-10908.

[8] 申永江,邓彪,杨明,等. 门架式双排抗滑桩的弹塑性模型与计算分析[J]. 岩土力学,2014,35(S1):149-155.

[9] 肖世国,何洪. 双排抗滑桩上滑坡推力近似解析方法[J]. 岩土力学,2015,36(2):376-380.

[10] 叶四桥,潘新恩. 双排抗滑桩承台的优化设计研究[J]. 重庆交通大学学报,2017,36(3):65-70.

[11] 邹盛堂,戴自航. 双排抗滑桩与门架抗滑桩的有限元分析对比[J]. 广西大学学报,2012,37(4):769-774.

[12] 于洋,孙红月,尚岳全. 锚固深度对双排抗滑桩力学性能影响[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(10):1999-2007.

[13] 郭春梅,苏谦,刘杰,等. 框架式抗滑支挡结构力学特性及其关键设计参数研究[J]. 路基工程,2019(6):13-17.

[14] 顾中华. 刚架抗滑圆桩在富水滑坡治理中的应用研究[J]. 路基工程,2019(3):183-188.

[15] 李松林,许强,汤明高,等. 库水位升降作用下不同滑面形态老滑坡响应规律[J]. 工程地质学报,2017,25(3): 841-851.

[16] 江强强,焦玉勇,宋亮,等. 降雨和库水位联合作用下库岸滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学,2019,40(11): 4361-4370.

[17] 朱权威,于维刚,蔡建华,等. 三峡库区旧县坪滑坡变形

机理及稳定性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2634-2640.

分析及稳定性评价[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 10876-10883.

[18] 李厚芝,叶霄,朱鸿鹄,等. 三峡库区大坡滑坡成因机制

The Formation Mechanism and Treatment Measures of K243
Landslide on Highway in Reservoir Area

WANG Youchang

(Kunming Survey & Design Institute of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650031, China)

Abstract: Based on the example of landslide project K243 along the river road in the reservoir area of Lancang River Huangdeng Hydropower Station, the study was conducted on the formation mechanism, deformation and failure mode, and treatment measures of the freshman engineering landslide and the ancient landslide, and the stable condition and residual sliding force of the landslide under the combination of multiple working conditions. The GEO5 software was used to establish the landslide model and analyze the changes in the internal force and displacement of the anti-slip pile, as well as the variation in the landslide stability during different treatment construction processes. The results show that the K243 landslide is effectively managed by using the double-row rigid frame anti-slide pile, anchored sheet pile wall, filling earth counter pressure, and water interception and drainage measures. The shearing force and bending moment of the back row pile of the freshman engineering landslide are greater than front row pile, and the displacement of pile top of the back row pile is greater than that of the front row pile, while the shearing force and displacement of the front row piles of the ancient landslide are greater than that of back row pile. The percentage increase in the stability coefficient of the freshman engineering landslide during different construction processes is approximately double that of the ancient landslide. The K243 landslide treatment has proved to be successful and can provide a reference for the analysis and treatment of road landslides in the reservoir area.

Keywords: highway in reservoir region; ancient landslide; genesis mechanism; double-row rigid frame anti-slide pile; treatment measures