

山区边坡崩塌地质灾害治理工程设计案例分析

——以广宁县某崩塌项目为例

施春辉

(广东省地质局肇庆地质调查中心, 广东 肇庆 526020)

摘要:为解决广宁县螺岗学校后山因强降雨引发的崩塌灾害问题,针对该区域离教学楼近、降水集中、需保障正常教学等治理难点,以保障全校师生安全为目标,开展边坡治理工程设计研究。通过现场踏勘明确地质条件,采用瑞典条分法结合正岩土计算软件进行稳定性分析,最终确定“削坡减载+锚杆框架梁+混凝土挡墙+绿化+截排水”综合治理方案。治理后边坡安全系数达 1.45-1.50,满足一级安全等级要求,有效解决了复杂环境下的边坡治理难题。该案例可为山区学校及新建(构)筑物区域的崩塌灾害治理提供技术参考。

关键词:削坡减载;混凝土挡墙;锚杆框架梁

中图分类号:P642.21

文献标志码:A

文章编号:1672-2736(2025)12-0086-11

0 引言

山区边坡崩塌地质灾害主要包括岩崩和土崩两个主要类型,其中岩崩多发生于陡峭的岩质边坡,土崩则常见于松散土层堆积区;其危害包括破坏道路、桥梁等基础设施,导致交通中断,掩埋房屋造成财产损失,甚至引发人员伤亡,同时可能阻塞河道形成堰塞湖,威胁下游地区安全^[1]。山区边坡崩塌地质灾害防治需求迫切,需综合考量地质条件、气候因素及人类活动影响,通过科学评估边坡稳定性,采用工程治理(如挡土墙、锚固、排水系统)与生态修复(植被恢复、水土保持)相结合的措施,构建多层次防护体系,同时加强监测预警和应急管理,以降低灾害风险,保障人民生命财产安全及区域可持续发展。

通过专项防治工程加强对风险区域的保护是有效降低地质灾害风险的措施。山区边坡崩塌地质灾害防治需采取多层次工程措施:首先通过地质勘查识别不稳定区域,结合生态防护如种植根系发达的植被以固土减蚀;其次实施工程加

固,包括抗滑桩、挡土墙及预应力锚索等结构增强边坡稳定性^[2];同时完善排水系统,如坡顶截水沟和地下排水廊道,减少水分渗透软化岩体;最后建立监测预警体系,利用 GNSS 位移计、裂缝计等设备实时追踪边坡形变,结合雨量监测实现动态预警,确保综合防御效果。

1 研究现状

山区边坡崩塌地质灾害治理研究的历史可追溯至古代对山体滑坡的朴素认知,如《汉书》记载的犍为柏江山崩事件,但系统治理始于 20 世纪地质力学理论的发展。1980 年湖北盐池河磷矿崩塌致 284 人死亡后,我国将崩塌防治纳入国家地质安全体系,通过坡面清危、排水工程等被动防护技术降低灾害风险^[3]。21 世纪以来,随着青藏高原等复杂地形区工程建设的推进,治理转向主动防护与监测预警结合,如 2023 年陕西紫阳崩塌避险案例中,群测群防机制成功避免人员伤亡。当前研究聚焦于黄土高原等特殊地质区的应急治理,通过裂缝封填、锚索加固等综合措施提升边坡稳定性,形成“预防—治理—监

测”的全链条管理体系。

山区边坡崩塌地质灾害工程治理是一个涉及多学科、多技术的复杂领域,其核心观点在于通过科学方法识别、评估和治理边坡失稳问题,以保障人民生命财产安全和生态环境稳定。根据岩体结构采用针对性措施加强治理,是山区边坡崩塌治理的基本观点之一,孙广忠^[4]提出的“岩体结构控制论”以及孙玉科^[5]提出的应用赤平投影法分析结构面特征来评估边坡稳定性都属于该理论范畴;分形理论的应用对崩塌治理同样起到了一定作用,分形理论用于描述岩体结构面的不规则性,通过分维数定量分析结构面形态及分布规律,为边坡稳定性预测提供新方法;结合地理信息系统(GIS)、遥感(RS)和全球定位系统(GPS)的3S系统则是信息化时代用于边坡崩塌监测的重要技术措施;我国研究者则提出了韧性防控的理念,全国人大代表冯远提出,需加强地质灾害隐患的早期识别、智能监测预警及韧性防控技术研发,同时推动高风险区治理和避险搬迁^[6]。

2 工程概况

广宁县地质构造复杂,位于两个大型断裂带相交位置,受区域地质活动影响显著。本县北部螺岗镇处于盆地内,地势由东北向西南倾斜,山地与丘陵占全县总面积的80%,特殊地形在强降水或人类活动扰动下易诱发边坡崩塌灾害^[7]。广宁县属亚热带气候,年均降雨量达1738.2mm,且80%集中于3-9月,降水通过风化土层毛细管孔隙渗入基岩面,形成软弱带,直接降低岩土体抗剪强度,为崩塌灾害提供了必要诱发条件。

受强降雨及岩土体自身稳定性不足影响,广宁县螺岗镇螺岗学校后山发生多处崩塌,灾害区域集中于教学楼后侧及操场周边,直接威胁全校280名师生的生命财产安全,亟需开展专项治理。经现场踏勘与地质勘察明确,教学楼段边坡高度5-15m,坡度40-60°,为土质边坡(第四系坡残积粉质粘土),坡面植被较发育,坡脚与教学楼水平距离仅1-3m,这一近距离特征限制了

大型施工设备的进场与作业范围,决定了后续需采用人工修坡为主的精细化施工方案;操场段边坡高度4-12m,坡度50-70°,坡面裸露,坡顶原有简易截水沟排水能力不足,出露面以坡残积土和强风化泥质粉砂岩为主,岩土体天然容重 $1.82-1.87\text{g}/\text{cm}^3$,内摩擦角仅 $13.8-17.7^\circ$,粘聚力 $25.5-27.6\text{kPa}$,饱和状态下力学参数进一步衰减(饱和内摩擦角 $11-14.2^\circ$,饱和粘聚力 $20.5-22.1\text{kPa}$),属于典型低强度易失稳边坡,直接主导了“削坡减载+锚杆框架梁”的核心加固设计思路^[8]。

基于灾害风险评估结果,本工程安全等级确定为一级,设计使用年限50年,需满足治理后安全系数 ≥ 1.40 的规范要求(依据GB50330-2013《建筑边坡工程技术规范》)^[9]。治理区域的特殊环境条件明确了三大设计约束:一是近建筑施工限制,要求治理措施需兼顾结构稳定性与建筑安全距离,避免施工对教学楼地基造成扰动;二是高降水环境适应性,需强化截排水系统设计,阻断雨水入渗路径;三是教学活动保障需求,决定了施工工艺需优先选择低噪声、低粉尘类型,并采用分区域错峰施工模式。上述地质条件、灾害特征及环境约束,共同构成了“削坡减载+锚杆框架梁+混凝土挡墙+绿化+截排水”综合治理方案的核心设计依据,确保治理措施既符合力学稳定要求,又具备现场实施可行性^[10]。

3 治理区地质背景

3.1 气象和水文

治理区域属南亚热带气候。季风性气候,四季区分显著,春季降水较多且可能出现集中降水,冬季低温并可能出现霜冻。该地区总体年均温较高,且降水相对较多,本县的年平均温度为 $20-22^\circ\text{C}$,平均年降雨量为1738.2mm(2006-2021年统计值)^[11]。降雨量多集中在3-9月,是地质灾害的多发期。

3.2 区域地质构造

工作区出露的地层以元古界、古生界为主,

表 1 工程概况与设计方案的关联性对照表

关联维度	工程概况关键信息	对应设计方案措施	关联逻辑(依据/目的)
地质条件—教学楼段边坡	1. 高度 5-15m, 坡度 40-60°, 土质边坡(第四系坡残积粉质粘土) 2. 坡脚距教学楼 1-3m, 限制大型设备进场	1. 削坡减载: 设计坡率 1:1.25, 采用人工修坡 2. 锚杆框架梁: 锚杆长度 6-12m, 水平/垂直间距 2.5m	1. 人工修坡避免大型设备对教学楼地基扰动, 1:1.25 坡率降低边坡自重荷载 2. 锚杆框架梁增强粉质粘土边坡抗滑力, 适应近距离施工空间限制
地质条件—操场段边坡	1. 高度 4-12m, 坡度 50-70°, 坡面裸露, 出露面为坡残积土+强风化泥质粉砂岩 2. 岩土体力学参数低(天然内摩擦角 13.8-17.7°, 粘聚力 25.5-27.6kPa; 饱和状态参数进一步衰减) 3. 原有简易截水沟排水能力不足	1. 削坡减载: 局部人工修坡, 坡率 1:0.76-1:1.16 2. 锚杆框架梁+混凝土挡墙(B型) 3. 截排水: 坡顶设 A 型倒梯形截水沟(30cm×70cm), 操场周边设 B 型加盖排水沟(50cm×40cm)	1. 差异化坡率平衡边坡稳定性与场地空间, 人工修坡减少对软弱岩土体的扰动 2. 锚杆+挡墙双重加固, 弥补低力学参数岩土体的抗剪不足, 满足安全系数要求 3. 强化排水阻断雨水入渗, 避免岩土体饱和软化
环境约束—降水条件	1. 亚热带气候, 年均降雨量 1738.2mm, 80% 集中于 3-9 月 2. 降水易渗入基岩面形成软弱带, 降低抗剪强度	1. 截排水系统: 增设沉砂池(120cm×120cm×120cm, C25 混凝土) 2. 排水沟采用 C25 钢筋混凝土浇筑	1. 沉砂池过滤泥沙, 防止排水沟堵塞, 保障排水通畅 2. 钢筋混凝土材质适应多雨环境, 避免沟体损坏导致雨水漫流渗入边坡
环境约束—教学保障需求	施工需保障学校正常教学, 需控制噪声、粉尘污染	1. 施工工艺流程: 先平整场地/修坡→坡顶截水沟→锚杆/框架梁→挡墙→绿化(分区域作业) 2. 优先选择低噪声工艺(干钻法成孔)	1. 分区域错峰施工减少施工面集中干扰, 绿化环节后置降低后期粉尘 2. 干钻法替代湿钻, 减少施工噪声与泥浆污染, 适配教学环境
工程安全标准	1. 一级安全等级, 设计使用年限 50 年 2. 依据 GB50330-2013 规范, 要求治理后安全系数 ≥ 1.40	1. 稳定性计算: 采用瑞典条分法+理正岩土软件 6.5BP1.0 版, 反求岩体强度参数 2. 材料标准: 锚杆用 1φ28HRB400 螺纹钢, 框架梁/C25/C30 混凝土, 锚杆注浆用 M30 水泥浆(水灰比 0.45)	1. 规范计算方法确保安全系数达标(治理后 A-D 段 1.45、MN 段 1.50) 2. 高标准材料保障 50 年使用年限, 符合一级安全等级耐久性要求
地质条件—整体岩土特性	残坡积土浸水易软化崩解, 强风化泥质粉砂岩遇水软化	绿化: 框架梁内阶梯式嵌套种植槽(15-20cm), 采用植生袋/模块化植草框/三维植被网, 植被组合为狗牙根+紫花苜蓿(70%)+马桑+糯米条(25%)+刺槐+香樟(5%)	1. 植被固土减少雨水对坡面冲刷, 缓解岩土体软化 2. 差异化绿化形式适配不同坡面条件(破碎岩坡/复合边坡/破损边坡), 兼顾生态修复与稳定性

仅在西北部有小范围的中生界,第四系分布绥江及各大支流两岸及河漫滩。从老到新主要有震旦系、第四系;在岩浆发育活动的影响下,本县主要岩石类型为以黑云母形成的花岗岩,此类岩石普遍分布于广宁县除西部外的大部分地区。对处于裂缝交接位置的广宁县而言,复杂的地质结构以及活跃的地质条件使得本地区长期受岩浆活动的影响。但从该项目勘察结果来看,岩石总体稳定性较好,基岩内部并未检出明显的断裂痕迹,根据检测结果本次工程无需考虑断裂构造的影响^[12]。

3.3 工程地质条件

根据现场踏勘,3个代表性钻孔(钻孔编号:ZK1-教学楼后侧崩塌区、ZK2-操场东侧边坡、ZK3-坡顶潜在失稳区,孔深均为15.0m)勘查报告及周边区域地质资料,场地内地层主要为第四系坡残积土(Q_4^{dl+el})与下伏震旦系坝里组(Z_2b)泥质粉砂岩,按成因、物理力学性质及风化程度划分为3个工程地质层(含2个亚层),修正原标注混乱问题,自上而下分述如下:

(1) 第四系坡残积土(Q_4^{dl+el})

厚度范围:1.5-5.0m(ZK1:3.2m、ZK2:4.5m、ZK3:2.8m),厚度随地形起伏变化显著,教学楼段因坡脚受人工堆填影响厚度较大(3.0-5.0m),操场段因坡面侵蚀厚度较小(1.5-3.0m)。

岩性特征:褐黄色,湿,可塑-硬塑状,风化不均匀,含5%-8%石英砂粒,坡残积成因(由上部基岩风化堆积形成),浸水后48h内易软化(含水率升至25%以上时塑性指数从18降至12)、崩解(崩解量达30%),干缩后易产生竖向裂隙(裂隙宽度2-5mm,间距0.5-1.2m)。

工程力学参数(依据表1及钻孔试验数据):天然密度 $1.82g/cm^3$,饱和密度 $1.87g/cm^3$;天然状态下粘聚力25.5kPa、内摩擦角 13.8° ,饱和状态下粘聚力降至20.5kPa、内摩擦角降至 11° ;地基承载力特征值160kPa,与锚固体极限粘结强度标准值45kPa。

工程意义:该层为边坡表层易失稳地层,其

厚度较大且力学参数低(内摩擦角小于教学楼段边坡坡度 $40^\circ-60^\circ$),是导致坡面局部崩塌的主要原因,直接决定下文需采用“人工修坡(坡率1:1.25)+锚杆框架梁(锚杆入岩深度 $\geq 2.0m$,穿透该层进入下部稳定基岩)”的加固方案。

(2) 下伏基岩——震旦系坝里组(Z_2b)泥质粉砂岩

按岩石风化程度划分为2个地质亚层,修正原“2个地质亚层”表述与标注不匹配问题,明确亚层分别为全风化泥质粉砂岩、强风化泥质粉砂岩:

①全风化泥质粉砂岩

厚度范围:2.0-6.0m(ZK1:3.5m、ZK2:5.2m、ZK3:4.0m),分布连续,厚度从坡顶至坡脚逐渐增加(坡顶约2.0-3.0m,坡脚约4.5-6.0m)。

岩性特征:褐黄色,原岩砂质结构清晰但胶结物已完全风化,呈坚硬土柱状(手捏可碎),风化不均匀,普遍夹5%-10%强风化粉砂岩碎块(块径2-5cm),碎块分布无规律,局部存在透镜状粉质粘土夹层(厚度0.3-0.8m)。

工程力学参数(依据表1及钻孔试验数据):天然密度 $1.87g/cm^3$,饱和密度 $1.92g/cm^3$;天然状态下粘聚力27.6kPa、内摩擦角 17.7° ,饱和状态下粘聚力降至22.1kPa、内摩擦角降至 14.2° ;地基承载力特征值300kPa,与锚固体极限粘结强度标准值200kPa。

工程意义:该层虽力学参数优于残坡积土,但饱和状态下抗剪强度仍衰减18%-20%,且厚度较大(最大6.0m),需通过锚杆(长度6-12m,其中2.0-3.0m位于该层)提供额外锚固力,避免沿该层与残坡积土界面发生滑动,为下文锚杆长度设计提供厚度依据。

②强风化泥质粉砂岩

厚度范围:3.0-8.0m(ZK1:4.8m、ZK2:7.5m、ZK3:6.2m),为本次勘查控制的主要稳定基岩层,钻孔未揭穿该层(最大孔深15.0m时仍未达中风化层)。

岩性特征:褐黄色~灰黄色,粉砂质结构,层

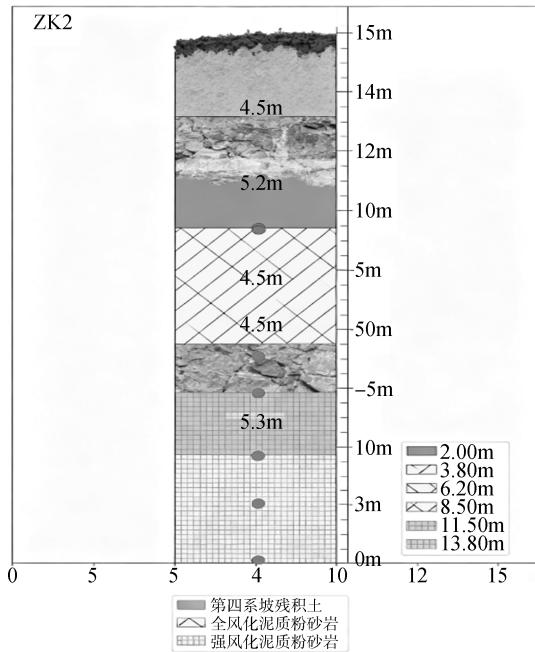


图 1 钻孔柱状图

状构造,岩石风化强烈但保留部分岩芯完整性,岩芯多呈半岩半土状(长度 5-15cm)、碎块状(块径 5-10cm),风化不均匀,夹 10%-15% 中风化粉砂岩碎块(块径 8-15cm,质地坚硬),层面倾角 15-20°,局部与边坡坡向(30-40°)一致。

工程力学参数(依据表 1 及钻孔试验数据):天然密度 2.3g/cm³,饱和密度 2.35g/cm³;天然状态下粘聚力 50kPa、内摩擦角 26.0°,饱和状态下粘聚力降至 40kPa、内摩擦角降至 20.8°;地基承载力特征值 500kPa,与锚固体极限粘结强度标准值 250kPa。

工程意义:该层为锚杆锚固的核心稳定层,其较高的力学参数(内摩擦角 26.0°>边坡坡度 50-70°)和较大厚度(3.0-8.0m)确保锚杆锚固力满足设计要求(抗拉强度 10kN/m),同时层面倾角与坡向局部一致的特征,决定下文需在操场段增设混凝土挡墙 B 型),阻断潜在顺层滑动路径。

第四系坡残积土作为松散堆积物,其力学强度受岩性(含砂量)、含水量(饱和后强度衰减 20%)及结构面(裂隙发育)影响显著,当坡面角度(40-70°)大于土体摩擦角(11-13.8°)时易失稳;全风化与强风化泥质粉砂岩遇水软化后抗剪

强度分别衰减 18%、20%,尤其强风化泥质粉砂岩局部层理面与坡向一致(倾角 15-20°接近内摩擦角 20.8°),形成潜在滑动带。三类岩土体在暴雨作用下,水分入渗导致容重增加(第四系坡残积土从 1.82 增至 1.87g/cm³)与强度衰减,共同触发牵引式崩塌,上述厚度与力学参数直接为下文“削坡减载(降低第四系坡残积土荷载)、锚杆框架梁(锚固至强风化泥质粉砂岩)、混凝土挡墙(阻断强风化泥质粉砂岩顺层滑动)”设计提供地质依据。

3.4 水文地质条件

广宁县地质构造复杂,位于两个大型断裂带相交位置,受区域地质活动影响显著。本县北部螺岗镇处于盆地内,地势由东北向西南倾斜,山地与丘陵占全县总面积的 80%,特殊地形在强降雨或人类活动扰动下易诱发边坡崩塌灾害。广宁县属亚热带气候,年均降雨量达 1738.2mm,且 80% 集中于 3-9 月,降水通过风化土层毛细管孔隙渗入基岩面,形成软弱带,直接降低岩土体抗剪强度,为崩塌灾害提供了必要诱发条件。

受强降雨及岩土体自身稳定性不足影响,广宁县螺岗镇螺岗学校后山发生多处崩塌,灾害区域集中于教学楼后侧及操场周边,直接威胁全校 280 名师生的生命财产安全,亟需开展专项治理。经现场踏勘与地质勘查明确:教学楼段边坡高度 5-15m,坡度 40-60°,为土质边坡(第四系坡残积粉质粘土),坡面植被较发育,坡脚与教学楼水平距离仅 1-3m,这一近距离特征限制了大型施工设备的进场与作业范围,决定了后续需采用人工修坡为主的精细化施工方案;操场段边坡高度 4-12m,坡度 50-70°,坡面裸露,坡顶原有简易截水沟排水能力不足,出露面以坡残积土和强风化泥质粉砂岩为主,岩土体天然容重 1.82-1.87g/cm³,内摩擦角仅 13.8-17.7°,粘聚力 25.5-27.6kPa,饱和状态下力学参数进一步衰减(饱和内摩擦角 11-14.2°,饱和粘聚力 20.5-22.1kPa),属于典型低强度易失稳边坡,直接主导了“削坡减载+锚杆框架梁”的核心加固设计思路。

基于灾害风险评估结果,本工程安全等级确定为一级,设计使用年限 50 年,需满足治理后安全系数 ≥ 1.40 的规范要求(依据 GB50330-2013《建筑边坡工程技术规范》)。治理区域的特殊环境条件明确了三大设计约束:一是近建筑施工限制,要求治理措施需兼顾结构稳定性与建筑安全距离,避免施工对教学楼地基造成扰动;二是高降水环境适应性,需强化截排水系统设计,阻断雨水入渗路径;三是教学活动保障需求,决定了施工工艺需优先选择低噪声、低粉尘类型,并采用分区域错峰施工模式。上述地质条件、灾害特征及环境约束,共同构成了“削坡减载+锚杆框架梁+混凝土挡墙+绿化+截排水”综合治理方案的核心设计依据,确保治理措施既符合力学稳定要求,又具备现场实施可行性。

4 治理工程特点及难点分析

根据项目区域地质条件以及其他影响因素的勘测结果,该项目需要着重解决下述问题:

(1) 治理区部分区域离教学楼距离很近,不便于大型设备的出入,设计方案的选择受到限制,加大了治理难度。且由于学校周边区域交通基础设施并不完善,因此尝试开放多条进出通道时,大型设备、车辆甚至人员由其他通道进入同样存在较大的实现难度。

(2) 治理区的降水集中性高,且降水总量大、可能对原本稳定性较低的地质结构造成一定破坏冲击,并使得边坡原本较低的抗剪强度进一步下降。根据降水对该区域的影响,工程应采用强度较高的永久性设施达到加强边坡强度的目的,但同时由于学校所处区域的工程地质结构并不稳定,部分永久性设施可能对现有地质环境造成损害,并不适用,因此学校实现边坡长期治理难度较高。

(3) 工程治理施工的同时要保证学校的正常教学,对安全施工与文明施工的要求较高。在大部分施工模式均需要封闭现场,且几乎所有主要工程均必然产生噪声以及粉尘污染的情况下,避免教学受影响存在较大的难度。

5 治理工程设计方案及措施

5.1 边坡支护方案设计整体思路原则

按照边坡的永久设计标准,本项工程的使用年限为 50 年,安全等级一级。本项目要求按照安全第一的基本标准设计,同时工程需符合使用以及美观的基本要求。

5.2 总体治理支护方案

在综合考虑安全、经济、可行性、环保、工期、施工难度等多方面因素下,该区段治理总体方案为:削坡减载+锚杆框架梁+混凝土挡墙+绿化+截排水措施^[3-5]。灾害治理总平面布置见图 2 所示。

5.3 主要施工工艺流程

平整场地、修整坡面→坡顶截水沟施工→锚杆施工→框架梁施工→混凝土挡墙施工→排水沟施工→植草绿化。

5.4 具体支护工程措施

综合确定该区域地质灾害防治工程等级为 I 级。按照该要求一般工程的安全系数取值为 1.40,校核工况则要求高于 1.14。边坡是否存在边坡风险需按照瑞典条分法计算。

5.4.1 边坡稳定性计算

$$K_f = \frac{\sum \{ [W_i(\cos a_i - A \sin a_i) - N_{w_i} - R_{D_i}] \tan \phi_i + C_i L_i \}}{\sum \{ W_i(\sin a_i + A \cos a_i) + T_{D_i} \}} \quad (1)$$

式中,孔隙水压力 $N_{w_i} = \gamma_w h_{i_w} L_i$,该公式通过浸润面以下的面积与水的容量计算压力。此外上述公式中渗透压在滑面的分力 T_{D_i} ,计算公式如下:

$$T_{D_i} = \gamma_w h_{i_w} L_i \tan \beta_i \cos(\alpha_i - \beta_i) \quad (2)$$

式中, W_i 为第 i 条块的重量(kN/m); C_i 为第 i 条块的内聚力(kPa); ϕ_i 为第 i 条块内摩擦角($^\circ$); L_i 为第 i 条块滑面长度(m); a_i 为第 i 条块滑面倾角($^\circ$); β_i 为第 i 条块地下水流向($^\circ$); A 为地震加速度(重力加速度 g); K_f 为稳定系数。

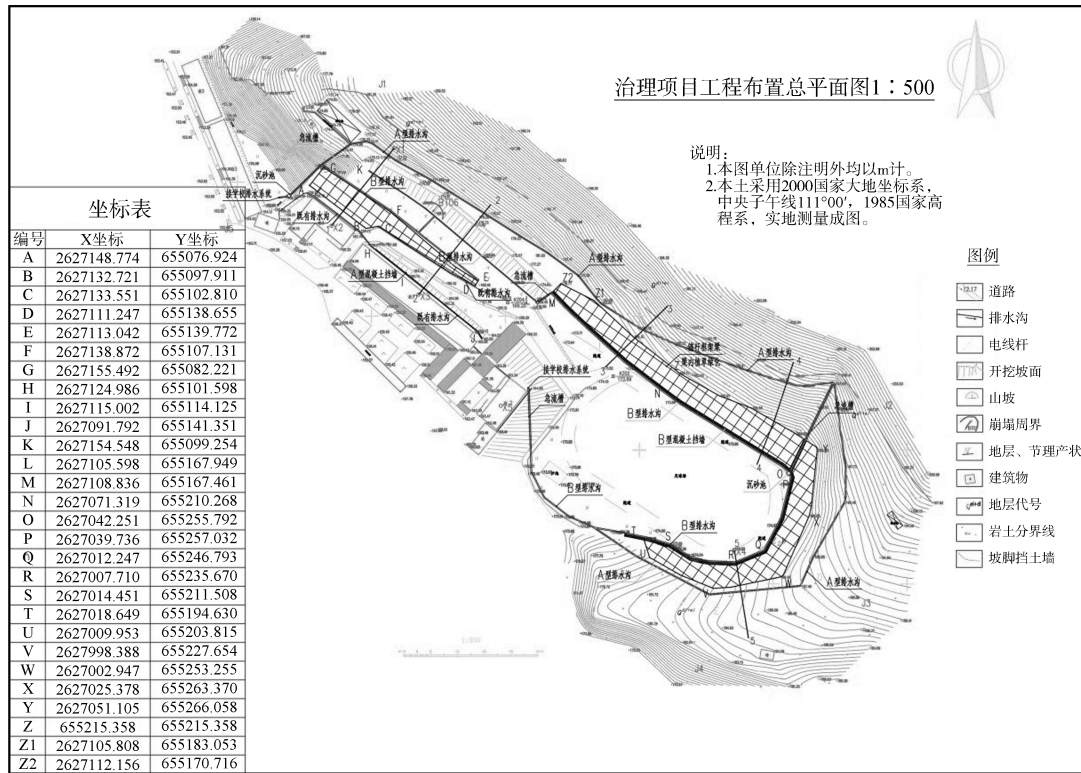


图 2 灾害治理总平面布置图

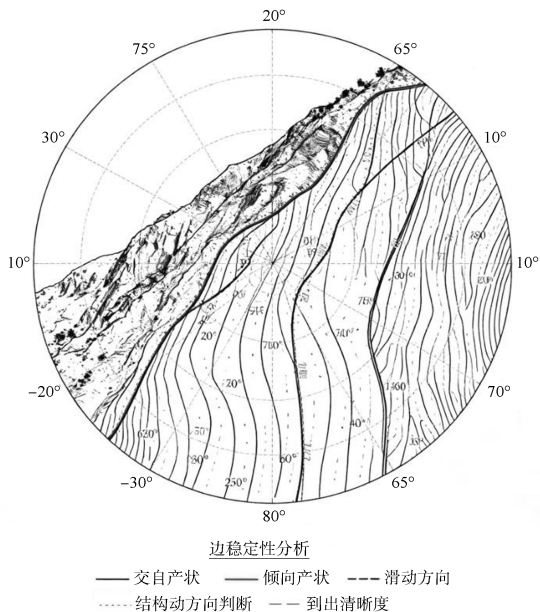


图 3 边坡与结构面赤平投影图

治理工程措施之后的边坡稳定性计算,采用理正岩土计算软件 6.5BP1.0 版进行设计计算。设定目前边坡实际处于临界状态,边坡稳定性安全系数为 1.0,反求体的强度参数,从而确定最终的边坡治理方案。计算选用的岩土工程参数

如表 2 所示。

选取两个最不利剖面计算各区段治理后的安全系数见表 3 所示。

5.4.2 各区段治理工程措施

(1) 削坡设计

① 设计参数

边坡 ABCD 段设计坡率 1 : 1.25 (竖直高度 : 水平投影), 削坡高度 3-8m, 按原始坡面高程差控制 ; 操场 M-P-T 段采用人工修坡, 设计坡率 1 : 0.76-1 : 1.16, 沿原始等高线平顺调整, 局部最大削方量 $\leq 1.5\text{m}^3/\text{m}$, 且严禁机械开挖, 采用人工分层修坡 (每层厚度 $\leq 0.5\text{m}$), 避免扰动坡体岩土体结构。

② 设计依据与参数选择逻辑

依据场地勘察报告中岩土体参数 (粉质粘土 $c=25.5\text{kPa}$ 、 $\phi=13.8^\circ$; 全风化泥质粉砂岩 $c=27.6\text{kPa}$ 、 $\phi=17.7^\circ$), 采用瑞典条分法计算, 1 : 1.25 坡率下 ABCD 段天然稳定安全系数 $F=1.02$ (\geq 规范 1.0), 叠加锚杆后 $F=1.43$ (满足 I 级边坡 ≥ 1.4 要求, 依据《建筑边坡工程技术

表 2 岩土工程参数表

成因	土(岩)层		天然	饱和	粘聚	内摩	饱和粘	饱和内	地基岩土	岩土体于	岩土体与锚固
	层号	岩性	密度	密度	力	擦角	聚力	摩擦角	承载力特	挡墙底面	体极限粘结强
			ρ_0	ρ_{sat}	C	ϕ	C	ϕ	征值	摩擦系数	度标准值
			g/cm^3	g/cm^3	kPa	度	kPa	度	fak	μ	frbk
									kPa		kpa
Q ^{dl+el}	①	粉质粘土	1.82	1.87	25.5	13.8	20.5	11	160	0.25	45
	②1	全风化泥质粉砂岩	1.87	1.92	27.6	17.7	22.1	14.2	300	0.40	200
Z ^{2b}	②2	强风化泥质粉砂岩	2.3	2.35	50	26.0	40	20.8	500	0.45	250
	②3	中风化泥质粉砂岩	2.5	2.45	500	30.0	200	25.0	1500.0	0.6	800

表 3 各区段治理后的安全系数计算

序号	区域	治理后安全系数	主要治理措施
1	A-D 段 (1-1 剖面)	1.45	锚杆框架梁
2	MN 段 (3-3 剖面)	1.50	锚杆框架梁+ 混凝土挡墙

规范》GB50330-2013 第 3.2.1 条)。从场地适配性看,ABCD 段坡脚距教学楼 1-3m,缓坡率可降低坡体侧向变形,避免附加应力影响建筑基础;M-P-T 段原始坡度 50°-70°,变坡率设计可减少削方量约 2800m³,兼顾成本与生态保护,同时消除陡坎崩塌风险。

(2) 锚杆设计

① 设计参数

布置范围为 A-D 段(120m)及 M-T 段(85m)坡面,覆盖坡高 5-10m 区域;核心尺寸方面,锚杆长度 6m、8m、10m、12m(孔深与锚杆长度一致,含锚固段+自由段),成孔直径 $\phi 110$ mm,其中 6m 锚杆(锚固段 4m+自由段 2m)用于坡高 5-6m 区域,8m 锚杆(锚固段 5m+自由段 3m)用于 6-7m 区域,10m 锚杆(锚固段 6m+自由段 4m)用于 7-8m 区域,12m 锚杆(锚固段 8m+自由段 4m)用于 8-10m 区域;锚杆与水平面夹角 15°(定义为“锚杆倾角”),符合 GB50330-2013 第 8.4.3 条 10°-30°最优区间;其他参数为水平

与垂直间距均 2.5m(矩形布置),采用 1 $\phi 28$ HRB400 螺纹钢($f_y = 400$ MPa),孔内注 M30 水泥浆(P. O42.5 水泥,水灰比 0.45,注浆压力 1.0MPa),孔口设 1m 长土工布止浆塞,预留 $\phi 20$ mm 排气管。

② 设计依据与参数选择过程

孔深确定:依据 GB50330-2013 第 8.2.2 条,锚固力 F_a 需 \geq 设计拉力 F_d ($F_d = 10kN/m \times$ 锚杆长度),通过公式 $L_a \geq F_d / (\pi d_r f_r)$ 计算,粉质粘土 $f_r = 45kPa$,全风化泥质粉砂岩 $f_r = 200kPa$,以 12m 锚杆为例,需 $L_a \geq 1.73m$,设计取 8m 确保安全储备;同时孔深需穿透坡残积土(①层,1.5-3m)进入全风化/强风化泥质粉砂岩(②1/②2 层) $\geq 1.5m$,利用基岩高粘结强度避免锚固失效。

倾角设计:15°倾角通过力学效应、施工可行性与应力控制耦合确定,可增大与潜在滑动面(倾角 35°)的法向压力,提升抗滑力 22%,同时便于干钻法排渣(孔内积土率 $\leq 5\%$),避免倾角 $> 20^\circ$ 导致锚杆端部应力集中系数 > 1.3 引发混凝土开裂。

(3) 框架梁设计

① 设计参数

布置范围与锚杆支护段完全对应,节点与锚杆端部焊接(焊缝高度 8mm);尺寸参数为纵梁/横梁间距 2.5m(与锚杆间距匹配),截面

30cm(高)×30cm(宽),顶面高出坡面 5cm(预留种植槽);材料配筋采用 C30 混凝土($f_u, k = 30\text{MPa}$,依据 GB50010-2010 第 4.1.3 条),纵梁主筋 $6\Phi 20(f_y = 400\text{MPa}) + 2\Phi 12$ (架立筋),横梁主筋 $6\Phi 16 + 2\Phi 12$,箍筋 $\phi 8 @ 200$ (节点加密区 $\phi 8 @ 100$,长度 50cm)。

②设计依据与参数选择

基于锚杆拉力传递的受弯承载力需求,采用 GB50010-2010 第 6.2.10 条公式计算,单根 12m 锚杆拉力 120kN,框架梁跨中弯矩 $37.5\text{kN} \cdot \text{m}$,代入参数得所需截面宽度 $\geq 28\text{cm}$,设计取 30cm 预留 10% 安全储备;配筋上,纵梁跨中弯矩 ($37.5\text{kN} \cdot \text{m}$) 大于横梁 ($28.8\text{kN} \cdot \text{m}$),故纵梁用 $\Phi 20$ 主筋(配筋率 1.02%),横梁用 $\Phi 16$ 主筋(配筋率 0.68%),箍筋 $\phi 8 @ 200$ 满足受剪承载力要求,节点加密区抵抗集中力。

(4)绿化设计

①设计参数

种植结构为框架梁预留 15-20cm 深种植槽(宽 25cm,与梁体同长),采用“植生袋+模块化植草框+三维植被网”分级体系;基质配比为客土(有机质 $\geq 2\%$):保水剂(吸水倍率 ≥ 300 倍) = 3 : 1(质量比),压实密度 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ (孔隙率 45%-50%);植被组合为先锋植物(狗牙根、紫花苜蓿);灌木(马桑、糯米条);乔木(刺槐、香樟) = 70 : 25 : 5(株数比),目标覆盖率 $\geq 90\%$ (第 2 生长周期);适用分区为破碎岩坡(节理裂隙密度 ≥ 3 条/m)用植生袋(聚丙烯土工布材质),复合边坡(坡度变异系数 > 0.2)用模块化植草框(PP 材质, $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 15\text{cm}$,榫卯连接),水土流失边坡(侵蚀模数 $> 5000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)用三维植被网(聚乙烯材质, $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 网孔,3 层)。

②设计依据与参数选择

生态与力学协同:种植槽深度依据《边坡生态修复技术规范》SL/T395-2007 第 5.2.3 条,满足先锋植物根系生长且避免削弱梁体承载力(抗弯承载力下降 $\leq 5\%$);基质配比参考该规范干旱区配方,保水剂掺量 0.33% 可使保水率 $\geq 25\%$,压实密度平衡透气性与抗冲刷性。

植被选择:物种均为乡土种,狗牙根、紫花苜蓿成活率 $\geq 85\%$,马桑、糯米条固土性强,刺槐、香樟生态稳定,符合“先锋-过渡-稳定”演替理论;70 : 25 : 5 比例基于生态位互补,确保快速覆盖与立体群落构建,提升土壤抗剪强度 15%-20%。

(5)排水设计

①设计参数

排水沟中 A 型(坡顶)为倒梯形,净空 30cm(底)×70cm(口)×50cm(深),壁厚 15cm(C25 混凝土,保护层 25mm);B 型(操场周边/坡脚)为矩形,净空 50cm(高)×40cm(宽),壁厚 12cm,加盖(C25 混凝土盖板,厚 8cm,配筋 $\phi 6 @ 150$);沉砂池净空 $120\text{cm} \times 120\text{cm} \times 120\text{cm}$,壁厚 20cm(C25 混凝土),池底 5% 坡度,内置 30cm 深沉砂斗;排水坡度 A 型沟 3‰、B 型沟 2‰,满足 GB50014-2021 第 4.2.5 条“最小流速 $\geq 0.6\text{m}/\text{s}$ ”(A 型 0.85m/s、B 型 0.72m/s)。

②设计依据与参数选择

截面尺寸基于坡面汇水量计算(推理公式 $Q = \psi Fq, \psi = 0.6$, ABCD 段 $F = 0.8\text{hm}^2, q = 300\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$),A 型沟设计流量 144L/s,过流能力 152L/s;B 型沟 $F = 0.5\text{hm}^2, Q = 90\text{L}/\text{s}$,过流能力 98L/s;材料选用 C25 混凝土,依据 GB50014-2021 第 4.10.2 条,满足抗冻 F100(最低温 -5°C)、抗渗 P6(地下水位 1.2m)要求。

(6)混凝土挡墙设计

①设计参数

A 型挡墙(HIJ 段坡脚,长 60m,坡高 8-10m):地下结构为埋深 1.0m 台阶式基础(台阶高 0.5m、宽 0.3m),截面 $1.2\text{m}(\text{宽}) \times 0.8\text{m}(\text{高})$,基础与地基间设 20mm 厚 M10 水泥砂浆找平层;地上结构高度 2.5m,墙顶宽 0.6m、底宽 1.0m(边坡系数 0.2),设 2 道水平错台(间距 1.25m、宽 0.1m);排水系统为墙身 $\phi 100\text{mm}$ PVC 排水孔(外包 $200\text{g}/\text{m}^2$ 土工布),水平间距 2.0m、垂直 1.5m(梅花形),倾角 5° ,墙后 30cm 厚碎石盲沟(粒径 20-40mm,渗透系数 $\geq 1 \times 10^{-3}\text{cm}/\text{s}$)。

B型挡墙(操场周边M-T段,长75m,坡高5-7m);地下结构埋深0.8m,矩形基础(宽1.0m、高0.7m),20mm厚M10水泥砂浆找平;地上结构高度1.8m,墙顶宽0.5m、底宽0.8m,外侧1:0.1坡度;排水系统为墙身 $\phi 80\text{mm}$ PVC排水孔(外包土工布),水平间距2.5m、垂直1.5m(梅花形),倾角 5° ,墙后25cm厚碎石盲沟(粒径15-30mm)。

共性参数:墙身与基础均用C30混凝土($f=14.3\text{MPa}$, $f=1.43\text{MPa}$,依据GB50010-2010第4.1.3条),满足抗冻F100、抗渗P6;稳定性上,A型挡墙抗滑 $K=1.65$ 、抗倾覆 $K_0=2.1$,B型 $K=1.58$ 、 $K_0=1.95$ (均依据GB50007-2011第6.7.5条,朗肯土压力理论, $K_a=0.33$)。

②设计依据与参数选择

基础埋深依据GB50007-2011第5.1.8条,低于当地冻结深度0.5m(最大冻结深度0.5m),避免冻胀破坏;基础宽度按地基承载力确定(HIJ段 $f_a=200\text{kPa}$ 、M-T段 $f_a=180\text{kPa}$),A型基础宽1.2m满足基底压力 $158\text{kPa}\leq 200\text{kPa}$ 。墙身尺寸基于重力式挡墙稳定性计算,A型挡墙2.5m高度对应底宽1.0m,抗滑力与抗倾覆力矩均满足规范要求。排水系统中,孔尺寸按渗水量计算(达西定律),梅花形布置减少排水盲区,外包土工布依据GB50014-2021第4.5.3条,防止细颗粒流失堵塞孔道。

6 结论

由于强降雨等原因导致该学校后山发生多处崩塌。部分区域离教学楼距离较近、边坡高度较高、治理过程要保证学校正常教学等原因都大大增加了治理难度。结合现场实际情况,综合多方面因素,最终选用锚杆框架梁+混凝土挡墙+截排水系统的设计方案,很好地解决了设计难题,保护了全体在校师生的安全。不仅取得良好的经济效益,更重要的是间接助力了社会的稳定,取得了非常可观的社会效益。可为类似工程提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 高文韬. 山区高速公路某高边坡崩塌成因与治理[J]. 山西建筑, 2017, 43(05): 179-180.
- [2] 闫忠梅. 山区公路边坡崩塌的成因分析及处置措施[J]. 城市道桥与防洪, 2017, 34(06): 177-179+22.
- [3] 顾良军, 石家福. 山区公路边坡崩塌的成因及处理[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2018, 8(11): 84.
- [4] 院地学部孙玉科副主任到院兰州图书馆参观[J]. 中国科学院地学情报网网讯, 1986, (01): 35.
- [5] 许兵. 关于岩体结构力学基本观点探讨——试论孙广忠教授的岩体力学道路[J]. 工程地质学报, 1997, 5(04): 8-11.
- [6] 肖明建. 山区公路边坡崩塌的成因分析及处置措施[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(03): 36+38.
- [7] 汤天赐. 城市化进程中人为活动对地质灾害的诱发机制与防控体系研究[J]. 黑龙江国土资源, 2025, 23(11): 86-92.
- [8] 朱磊. 近水平岩层高陡边坡崩塌机理及风险评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [9] 陈俞嘉, 康孝先, 周子豪, 等. 某山区干线公路灾害恢复重建对策及实践[C]//中国公路学会, 世界交通运输大会执委会, 西安市人民政府, 陕西省科学技术协会. 世界交通运输工程技术论坛(WTC2021)论文集(上). 西南科技大学; 绵阳市交通运输局, 2021: 144-148.
- [10] 冯振, 路璐, 张长敏, 等. 降雨诱发山区公路边坡危岩崩塌机理研究[J]. 防灾减灾学报, 2021, 37(04): 1-8+15.
- [11] 金鹏, 梅本强, 何恩怀, 等. 川西山区公路危岩发育特征及崩塌防治措施[J]. 科技和产业, 2025, 25(01): 56-61.
- [12] 赵江. 如何加强岩土工程地质勘查技术措施[J]. 西部资源, 2021, 7(06): 84-86.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 施春辉, 1987年生, 男, 河北正定人, 广东省地质局肇庆地质调查中心, 工程师, 主要研究方向为地质岩土工程。Email: 601340117@qq.com

Case Study on the Design of Mountainous Slope Collapse Geological Disaster Control Engineering: A Project in Guangning County

SHI Chunhui

(Zhaoqing Geological Survey Center, Guangdong Geological Bureau, Zhaoqing 526020, China)

Abstract: In order to solve the slope collapse disasters triggered by heavy rainfall on the slope behind Luogang School in Guangning County, and to address control difficulties such as the short distance to the teaching building, concentrated rainfall, and the need to ensure normal teaching, a slope control engineering design study was carried out with the goal of ensuring the safety of all teachers and students. Through on-site investigation to clarify the geological conditions, slope stability was analyzed using the Swedish slice method combined with Lizheng geotechnical calculation software, and a comprehensive treatment scheme of “slope cutting and load reduction+anchor frame beams+concrete retaining wall+greening+interception and drainage” was finally determined. After treatment, the safety factor of the slope ranges from 1.45 to 1.50, meeting the requirements of the grade I safety standard and effectively solving the problem of slope control in a complex environment. This case can provide technical reference for collapse disaster control in mountainous schools and in areas near buildings and structures.

Key words: slope cutting and load reduction; concrete retaining wall; anchor frame beam