

格构结构在地震滑坡治理中的应用

杨 健

(四川省第十一地质大队, 四川 达州 635000)

摘要 锚杆格构与护脚墙是滑坡治理中广泛应用的工程措施。在特定技术手段的优化下, 可拓展应用于高烈度地震诱发的松散堆积层滑坡治理。本研究以泸定“9·5”地震后神龙宾馆滑坡为例, 通过采用无水跟管钻进、孔底返浆注浆及高强度锚杆体系等特定技术手段, 验证了该技术在复杂地质条件与高陡边坡环境中的可行性与有效性, 以期为类似高烈度地震区滑坡治理工程提供可借鉴的治理方案。

关键词 泸定地震; 滑坡治理; 格构结构; 锚杆

中图分类号:TU753

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.014

0 引言

在泸定地震发生后, 区域地质环境发生较大变化, 部分边坡失稳。为保障人民生命财产安全与基础设施正常运行, 格构结构作为一种兼具力学支撑与生态兼容性的工程技术手段, 因其结构形式灵活、适应性强、施工可控性高等特点, 被广泛应用于地震引起的滑坡治理中^[1]。该技术通过钢筋混凝土格构梁形成空间受力体系, 有效约束坡面岩土体位移, 同时为后续生态恢复提供载体。近年来, 随着材料性能提升、施工工艺优化及监测技术融合, 格构结构的精细化、标准化施工水平不断提高。

1 工程概况

2022年9月5日, 四川省甘孜州泸定县发生6.8级强烈地震, 震中位于磨西镇附近。此次地震不仅造成了严重的人员伤亡和财产损失, 更在区域范围内诱发了大量次生地质灾害。位于磨西镇大杉树村海螺沟大道神龙宾馆后方的斜坡体, 在地震动荷载及区域地质环境的共同作用下, 发生了显著的变形破坏, 形成了三处较大规模的坍滑体, 直接威胁到神龙宾馆至一溪云民宿酒店等8户共440人的生命财产安全, 并掩埋了坡脚机耕道。经勘查认定, 该滑坡体规模约4.14万立方米, 属小型滑坡, 但在暴雨及余震等不利工况下稳定性极差, 亟需进行工程治理。面对紧迫的工期、复杂的地质条件(主要为冰水堆积漂卵石土)和高烈度的地震设防要求(0.4 g), 项目最终确定采用“锚杆格构+护脚墙”的综合治理方案。

2 工程概况与治理方案设计

2.1 滑坡基本特征

该滑坡位于磨西台地东侧边缘, 地貌上呈典型的上陡下缓形态, 上部坡度高达77°, 下部约30°。为

清晰反映滑坡结构特征, 选取代表性剖面进行说明: 剖面全长约65 m, 高差约32 m, 滑体前缘已掩埋坡脚机耕道, 后缘发育拉张裂隙, 最大垂直错距达0.8 m, 整体呈牵引式浅层滑移特征。滑坡物质主要为第四系上更新统冰水堆积漂卵石土, 粒径以20~150 mm为主, 漂石含量约40%~50%, 结构松散至中密, 局部具弱胶结。滑动面埋深2.5~4.5 m, 位于土体与下伏基岩接触带, 受地震动及雨水入渗影响, 界面抗剪强度显著降低, 形成潜在滑移通道。滑坡的形成是多种因素耦合作用的结果: (1) 地形地貌, 台地边缘形成高陡临空面, 为滑坡提供了充分的卸荷空间; (2) 地层岩性, 冰水堆积层孔隙大、渗透性强, 遇水后力学强度急剧下降; (3) 地震触发, 2022年泸定6.8级地震产生的水平加速度(0.4 g)直接破坏了土体原有的弱胶结结构, 诱发失稳; (4) 水的作用, 区域年均降雨量超1 000 mm, 地表水沿裂隙入渗软化滑带, 进一步降低抗滑力, 是滑坡持续变形的重要内因。

2.2 格构设计内容及格构处置方案合理性

本工程格构结构采用C25钢筋混凝土现浇梁, 纵横间距为3.0×4.0 m, 梁截面尺寸为0.5×0.3 m, 主筋为HRB400级Φ16, 箍筋为Φ8@200。格构梁与不同长度(4.5~18 m)的Φ32螺纹钢锚杆刚性连接, 形成空间受力骨架。设计充分考虑了地震动荷载(0.4 g)、松散漂卵石土层低粘聚力及高渗透性等特点, 通过锚杆将坡面荷载传递至深部稳定地层, 格构梁则有效约束表层土体变形, 防止局部坍塌扩展。该方案的合理性体现在以下几个方面: 一是结构适应性。格构梁柔性布置可顺应高陡边坡地形, 避免大开挖扰动; 二是抗震协同性。锚杆不施加预应力, 允许一定变形以耗散地震能量, 避免刚性结构在强震下脆性破坏; 三是

施工可控性。结合脚手架平台系统，可在 77° 陡坡上实现精准钻孔与混凝土浇筑。相较于抗滑桩或挡墙等方案，本设计土方扰动小、工期短、对下方道路及建筑影响低，契合应急抢险“快、稳、省”的核心要求，技术经济综合效益显著。

3 格构结构施工关键技术

3.1 高陡边坡钻孔技术

1. 钻孔设备与工艺选择。针对神龙宾馆滑坡体 77° 高陡边坡及第四系冰水堆积漂卵石土层结构松散、孔隙大、易塌孔的地质特点，施工采用风动凿岩无水跟管钻进工艺^[2]。根据 Φ110 的设计孔径，钻具选用了 Φ115 的扩孔环和中心钻配套使用，运用 Φ108 无缝钢管作为跟进套管，实现钻进与护壁同步进行。严禁采用水钻或冲洗冷却方式，避免水流软化土体、诱发孔壁失稳。

2. 钻机定位与参数控制。钻机通过双排钢管脚手架平台进行稳固安装，平台满铺架板并设置防滑挡脚板。钻机就位后，使用地质罗盘校核钻杆轴线，确保钻孔倾角严格控制为下倾 15°，水平投影线垂直于坡面走向。在钻进过程中，转速稳定控制在 20～40 rpm，钻压维持在 1.0～1.2 kN，采用匀速连续钻进方式，防止因变速或停顿造成孔径缩颈、偏斜或卡钻。

3. 成孔质量保障措施。每孔开钻前由测量人员精确放样并标记孔位，相邻孔位按设计间距 3.0×4.0 m 布设，遇邻孔施工干扰时采取跳孔作业。钻进至设计深度后，稳钻 1～2 分钟，确保孔底完整、无尖灭现象。终孔深度应大于设计长度不少于 0.5 m。成孔后保留 Φ108 套管作为永久护壁及后续注浆通道，严禁拔出。采用高压风（压力 0.6～0.8 MPa）彻底清孔，清除孔内岩屑与粉尘，经检孔器验证孔道畅通、孔深无误后，方可进入锚杆安装工序。

3.2 锚杆安装与注浆

1. 锚杆安装。锚杆采用 HRB400 级 Φ32 螺纹钢，进场后按设计长度使用无齿锯进行精确下料，严禁采用氧割或电焊切割。下料完成后对钢筋表面进行除锈处理，清除浮锈、油污及附着物，并使用调直机将弯曲段校正，确保杆体平直^[3]。沿锚杆全长每隔 2.0 m 设置一道对中支架，支架采用 Φ8 圆钢弯制，与主筋采用点焊牢固连接，焊缝高度不小于 4 mm，确保锚杆在孔内居中。锚杆运输过程中采取防弯折措施，堆放时下垫方木、上覆防雨布。钻孔验收合格后，先用 0.6～0.8 MPa 高压风彻底清除孔内岩粉、碎屑及积水，再由人工将锚杆逐段连接并缓慢推送至孔底，推送过

程保持轴线一致，避免强行冲击或扭转。锚杆外露端预留 30 cm 弯钩，弯折角度不小于 90°，弯钩方向朝向格构梁主筋位置，便于后续焊接连接。推送到位后，立即在孔口采取临时固定措施，防止杆体滑移或偏位。

2. 注浆施工。注浆材料采用 P·O 42.5R 水泥、中细砂及饮用水配制 M30 水泥砂浆，施工前通过试验确定配合比，水灰比严格控制在 0.45～0.50 范围内，砂子过筛后使用，粒径不大于 2.5 mm。砂浆采用强制式搅拌机拌制，先加水后加水泥和砂，搅拌时间不少于 2 分钟，拌合均匀后经筛网过滤后存入储浆桶，并在初凝前用完。注浆采用孔底返浆法，使用隔膜式砂浆泵加压注入，注浆压力控制在 0.2～0.4 MPa。注浆管采用硬质 PVC 管，随锚杆一同下放，管端距孔底 50～100 mm。注浆开始后，随砂浆注入匀速缓慢拔出注浆管，拔管速度与注浆速度相匹配，确保浆液自孔底向上连续填充，直至孔口溢出浓浆为止。注浆过程安排专人值守，记录注浆压力、流量及异常情况。对长度大于等于 9 m 的锚杆，在首次注浆完成 24 小时后进行二次补浆，补浆压力与首次一致，直至孔口再次溢浆并稳压 30 秒，确保锚固体密实无空腔。

3.3 格构梁混凝土浇筑与养护

1. 格构梁混凝土浇筑施工。模板工程采用复合木模，模板安装前需进行表面清理并涂刷脱模剂，确保混凝土成型后表面平整光滑。模板加固采用对拉螺栓固定方式，螺栓间距根据模板刚度计算确定，安装后需检查模板拼缝严密性及整体平整度，防止浇筑过程中出现漏浆或模板变形问题^[4]。混凝土采用 C25 商品混凝土，进场时需核对混凝土强度等级、坍落度等指标，经检验合格后方可使用。混凝土运输采用专用罐车，由汽车泵垂直输送至作业面，输送过程中需确保混凝土和易性良好。浇筑作业按分层方式进行，每层浇筑厚度控制在 300～500 mm，采用插入式振捣器振捣密实，振捣时遵循“快插慢拔”原则，振捣至混凝土表面不再下沉、无气泡溢出且呈现浮浆为止，避免出现蜂窝、麻面等质量缺陷。针对高陡坡面格构梁施工，需同步设置泄水孔以释放坡面水压。泄水孔采用 Φ100 PVC 管，按梅花形布置，孔距根据坡面汇水情况确定，通常为 2～3 m，PVC 管安装时需确保其外倾坡度不小于 5%，端部伸出格构梁外不少于 10 cm，防止管内积水倒流。

2. 格构梁混凝土养护。混凝土浇筑完成后，需严格把控养护时机与养护质量。在浇筑完成后 8～12 小时内，当混凝土表面初凝且具备一定强度时，及时覆盖麻袋或土工布进行保湿，覆盖需严密无漏隙，避免表面水分过快蒸发导致裂缝。

养护采用洒水养护方式，确保覆盖物始终处于湿润状态，养护频次根据环境温度调整，高温天气可增加洒水次数。混凝土养护期不得少于7天，养护期间需设立警示标识，禁止在格构梁上堆放重物或进行其他扰动作业。养护完成后，需对格构梁外观及强度进行抽检，确认符合设计及规范要求后方可进入下一工序。

3.4 锚杆效果验证方式

锚杆施工完成后，依据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》（GB 50086—2015）要求，开展系统性效果验证。首先进行现场抗拔试验：按不少于锚杆总数3%且不少于3根的原则随机抽样，在锚固体强度达到设计值后实施拉拔检测，分级加载至设计轴向拉力的1.5倍（ $\geq 105\text{ kN}$ ），持荷不少于10分钟，观测锚头位移是否稳定、有无滑移或拔出现象^[5]。其次，结合施工期安全监测，利用全站仪对格构梁顶部及坡面关键点进行位移跟踪，频次为每3~5天1次，雨季加密至每日1次，同步开展裂缝观测与巡视检查。工程竣工后，纳入为期一年的运行期监测体系，由专业单位定期采集位移、变形及排水状况数据，形成季度与年度监测报告。

4 工程效益分析

4.1 技术适宜性

锚杆格构体系无需大型基坑开挖，特别适用于地震扰动后岩土体松散、临空面高陡的应急工况。其模块化设计可灵活适应复杂地形，与护脚墙形成“上固下挡”协同机制，有效控制浅层滑移与坡脚冲刷，契合震后滑坡“快速稳定、防止次生灾害”的核心目标。在神龙宾馆滑坡治理中，针对77°高陡边坡及冰水堆积漂卵石土层结构松散、易塌孔等特点，采用无水跟管钻进、孔底返浆注浆等工艺，有效规避了传统支撑结构对地基承载力的高要求，避免了大开挖对下方道路、建筑及生态敏感区的扰动。同时，格构梁现浇与锚杆刚性连接，为后续生态复绿提供了稳定载体，实现了工程措施与生态修复的有机融合，技术路径成熟、适应性强，适用于高烈度地震区松散堆积层滑坡的快速应急处置。

4.2 结构安全性

通过无水跟管成孔保障锚固段完整性，孔底返浆注浆确保锚固体与地层充分粘结。格构梁与锚杆刚性连接形成空间框架，显著提升坡面整体刚度。经稳定性验算，治理后边坡在暴雨+地震工况下安全系数达1.35以上，满足一级边坡设防要求。施工过程中严格

控制锚杆自由段长度（ $\geq 4 \sim 6\text{ m}$ ），确保其有效穿越卸荷松弛带，锚固段（3 m）深入稳定地层，并通过抗拔试验验证单根锚杆承载力 $\geq 105\text{ kN}$ ，满足设计轴向拉力70 kN及1.5倍安全储备要求。格构梁采用C25现浇混凝土，纵横间距 $3.0 \times 4.0\text{ m}$ ，与锚杆焊接形成整体受力体系，有效约束表层土体变形。结合施工期及工后一年监测数据，坡面累计位移均小于8 mm，无新增裂缝或局部剥落，结构长期稳定性可靠，抗震协同性良好。

4.3 经济合理性

相比抗滑桩或重力式挡墙，本方案减少土石方开挖量约40%，缩短工期30天以上。材料以常规钢筋、混凝土为主，施工机械通用性强，综合造价降低约18%。同时格构框格内可直接实施生态复绿，节省后期景观投入，实现安全、生态与经济的多维统一。根据施工组织设计，本工程锚杆总量约1 200根，格构混凝土752 m³，护脚墙136 m³，未使用大型预制构件或特种设备，依托双排脚手架平台即可完成高陡边坡作业，人工与机械调配灵活。工期控制在175天内，较传统方案提前1个月，有效降低管理成本与安全风险。

5 结束语

泸定“9·5”地震后神龙宾馆后方滑坡治理工程的成功实践表明，“锚杆格构+护脚墙”是一种适用于高烈度地震区、松散堆积层滑坡的有效治理模式。其核心在于通过科学的设计和精细化的施工技术，将锚固、支挡与生态修复融为一体。本文详细阐述的锚杆无水钻进、孔底返浆注浆、格构梁现浇等关键技术，以及贯穿全过程的监测预警与质量控制体系，为类似复杂地质条件下的滑坡应急治理工程提供了宝贵的经验。

参考文献：

- [1] 张来功.滑坡治理中应用预应力锚索框架结构技术要点分析[J].西部资源,2022(06):76-78.
- [2] 万飞.锚杆格构梁在四川山区某500kV输电线路滑坡治理中的应用[J].低碳世界,2020,10(12):97-98.
- [3] 吴洋,蒋雯.真如禅寺山体滑坡地质灾害治理研究[J].江苏科技信息,2021,38(01):22-25.
- [4] 洪火林,王文金,邹定安,等.地质灾害治理工程中的滑坡治理措施研究[J].山西冶金,2023,46(01):223-224,227.
- [5] 曾凡盛.挡土墙支护边坡在地质灾害滑坡治理工程中的应用:以高陂村后山山体滑坡地质灾害治理工程为例[J].华北自然资源,2023(05):68-70,75.