

# 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<sup>[1]</sup>。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塌体, 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, 后缘发育拉张裂缝, 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, 地表水沿裂缝入渗软化滑带, 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  $77^\circ$  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  $77^\circ$  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<sup>[2]</sup>。根据  $\Phi 110$  的设计孔径,钻具选用了  $\Phi 115$  的扩孔环和中心钻配套使用,运用  $\Phi 108$  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  $15^\circ$ ,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  $20 \sim 40$  rpm,钻压维持在  $1.0 \sim 1.2$  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  $3.0 \times 4.0$  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  $1 \sim 2$  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  $\Phi 108$  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  $0.6 \sim 0.8$  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  $\Phi 32$  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<sup>[3]</sup>。沿锚杆全长每隔  $2.0$  m 设置一道对中支架,支架采用  $\Phi 8$  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  $0.6 \sim 0.8$  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  $90^\circ$ ,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  $0.45 \sim 0.50$  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  $0.2 \sim 0.4$  MPa。注浆管采用硬质 PVC 管,随锚杆一同下放,管端距孔底  $50 \sim 100$  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洞。

#### 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<sup>[4]</sup>。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  $300 \sim 500$  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  $\Phi 100$  PVC 管,按梅花形布置,孔距根据坡面汇水情况确定,通常为  $2 \sim 3$  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  $8 \sim 12$  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 ( $\geq 105$  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<sup>[5]</sup>。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, 有效规避了传统支挡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, 为后续生态修复提供了稳定载体, 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 ( $\geq 4 \sim 6$  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  $\geq 105$  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 3.0×4.0 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修复, 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 m<sup>3</sup>, 护脚墙 136 m<sup>3</sup>, 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.