

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.02.017

# 路基边坡滑坡风险评估及治理方案研究

于浩楠, 周 维

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

**摘 要:** 为防范高等级公路营运期间路基边坡滑坡风险, 立足于风险评估理论模型, 依托某高速公路路基失稳事件实例, 结合现场勘察检测数据和数学仿真计算, 得出路基边坡滑坡发生率为21%、安全系数为1.04; 在风险评估的基础上, 分别从滑体上、中、下部三个角度提出对应的三类路基边坡滑坡治理方案; 对比治理后滑坡发生率和经济效益等因素, 优选出最佳的坡面锚索框架梁支护结合预应力锚索抗滑桩支挡综合治理方案; 最后对治理后的路基边坡效果进行评价。研究结果可为相关公路路基边坡滑坡灾害风险评估及治理提供完善的经验参考。

**关键词:** 路基; 边坡滑坡; 仿真; 安全系数; 治理方案

**中图分类号:** U417.2

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2022)02-0061-03

## 0 引言

在连续极端天气的影响下, 山西某高速公路路基边坡发生了失稳, 导致一侧半幅路基垮塌, 引起路面整体沉降, 同时面层多处开裂, 上行方向交通中断。经现场勘察检测, 认为该段公路路基将可能演变为滑坡灾害, 进而破坏公路上方景观设施, 造成更大的经济损失以及不良的社会影响, 须立即采取相关措施进行治理。

关于路基边坡滑坡风险评估方面已有诸多研究, 冯忠居<sup>[1]</sup>等人分析了堆载对桥梁墩台基础的不利影响, 评估了已有工程的受损状态, 并给出针对性的纠偏措施; 部分科研工作者<sup>[2-4]</sup>则基于模糊综合模型分析方案, 从不同角度评估了路基边坡滑坡风险状况, 并给出相应的结论与建议; 类似地, 也有专家学者<sup>[5-6]</sup>通过层次分析法分析路基边坡滑坡风险状况, 各自建立了有关评价体系。

综上所述可知, 在从定量角度的数值仿真分析角度进行的路基边坡风险评估研究方面还存在一定空白。本文立足于风险评估理论模型, 依托路基失稳事件实例, 结合现场勘察检测数据和数学仿真计算, 研究路基边坡滑坡的发生率和安全系数, 评估滑坡带来的财产损失, 综合对比治理后滑坡发生率和经济效益等因素, 优选出最佳的坡面综合治理方案。

## 1 道路线形对车辆行驶的影响

### 1.1 地质分析

本文所述高速公路边坡失稳发生段落为南北走向, 公路西临沟谷, 深度达25 m, 所处范围内地势西低东高, 高程范围为1 269.5~1 336.3 m, 属低山丘陵区地貌。公路所处范围内的地质构造, 整体呈现为北向断裂, 属小规模断层结构, 断距不超过90 m, 平均以15~35 m为主。公路路基边坡南北侧均可观察到出漏基岩, 产状是 $265^{\circ}\angle 19^{\circ}$ 其质属石灰系泥岩, 且侵蚀风化程度较高, 强度较低, 稳定性不足。

### 1.2 灾害分析

根据现场勘察检测数据可知, 路基边坡从北向南长350 m, 东西向侧宽约250 m, 边坡滑体主要滑动方向为SW $265^{\circ}$ , 均厚达11.0 m, 下方岩体倾向与主滑方向整体同向。对灾害发生时的有关目击人员进行调查访问, 表明边坡失稳发生过程始于边坡上部土体开裂, 后续出现整体滑坡灾害。

### 1.3 岩性分析

为判定边坡滑体滑动面准确深度以及地质分布状况, 研究人员采用钻孔检测方案, 取ZK1~ZK6共6处点位, 如图1所示, 其中钻孔深度在11.8~28.3 m范围内, 总进尺达124.1 m。分析获取的边坡滑体岩体结构分布情况见表1。

## 2 风险评估分析

### 2.1 理论模型基础

本文依托路基边坡风险评估理论模型展开风险

收稿日期: 2021-05-15

作者简介: 于浩楠(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事路桥设计工作。

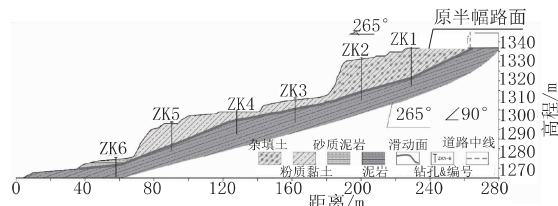


图1 边坡滑体钻孔位置示意图

表1 试验段地质勘察情况

| 土质   | 特征                                                                    | 颜色   | 层厚/m     |
|------|-----------------------------------------------------------------------|------|----------|
| 杂填土  | 由建筑废弃物和原本路基填料混合组成,碎石土总体占比超过65%,掺杂炭质页岩、泥岩以及砂岩,风化程度较高,整体较为松散,以黏土和粒状土为主。 | 灰绿-灰 | 0.9~24.6 |
| 粉质黏土 | 土质相对均匀,绝大部分为粉质黏土,夹杂少量细小页岩、砂岩和粉土。                                      | 褐黄-棕 | 0.6~15.2 |
| 砂质泥岩 | 取岩芯样呈破碎状态,风化程度高,呈软湿可塑性状。                                              | 黄绿-灰 | 0.5~3.2  |
| 基岩   | 主要成分为石炭系泥岩,掺杂少量页岩,胶结成分主要为硅钙质,风化程度较高。                                  | 深灰-灰 | —        |

评估分析,分为风险分析阶段、评估阶段及管理阶段,如图2所示。

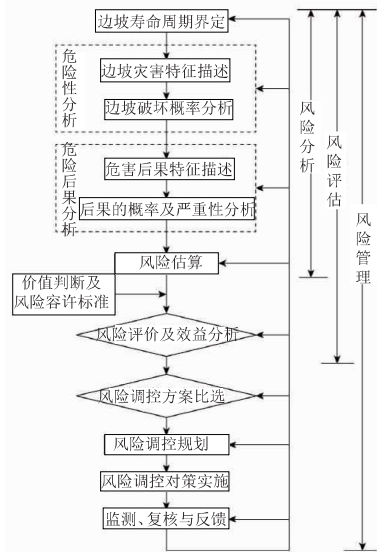


图2 路基边坡风险评估理论模型

首先开展边坡滑坡风险分析,内容包括路基边坡滑坡危险性分析和危害后果分析。之后评估阶段主要是将分析阶段得到的滑坡风险分析结果与风险容许标准相比对,进而进行风险评价和效益分析,得出风险等级是否处于接受或容忍范围内。最后的管理阶段则须通过一定的方案进行风险调控规划,治理路基边坡灾害。

2.2 滑坡发生率分析

科研人员判断认为现场路基边坡处于临界状

态,短期内可保持稳定,但在外在环境影响下仍有进一步滑坡的发生率。选取 GeoStudio-2021 数学仿真计算软件作为研究工具,选择其中的 Monte Carlo 试验模组进行仿真分析,可通过调整边坡土体抗剪强度、折减重度等参数来实现风化和降雨状态模拟。以高斯分布密度函数划分边坡土体的重度、内摩擦角以及黏聚力指标。为满足将各指标置于不同置信区间的稳定性,本文确定了3 000次计算步,同时结合勘测数据,得到滑体土体参数(见表2)。

表2 滑体土体参数表

| 土质   | 重度 $\gamma$ /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |      | 内摩擦角 $\varphi$ ( $^{\circ}$ ) |      | 黏聚力 $c$ /kPa |      |
|------|------------------------------------------------|------|-------------------------------|------|--------------|------|
|      | 平均值                                            | 标准差  | 平均值                           | 标准差  | 平均值          | 标准差  |
| 杂填土  | 18.3                                           | 0.25 | 10.0                          | 1.10 | 7.5          | 0.50 |
| 粉质黏土 | 20.2                                           | 0.20 | 13.7                          | 1.00 | 15.0         | 1.00 |
| 砂质泥岩 | 24.2                                           | 0.05 | 22.5                          | 1.50 | 101.3        | 2.26 |

将各参数输入数学仿真计算软件可得到仿真结果,如图3所示,路基边坡平均安全系数为 $1.04 < 1.05$ ,表明路基边坡滑体处于临界稳定状态。 $P$ (失效)计算结果为21%,表明路基边坡土体滑坡的发生率为21%。考虑到该段公路车流量大且为主干道,确定可接受路基边坡滑坡发生率应不超过5%。

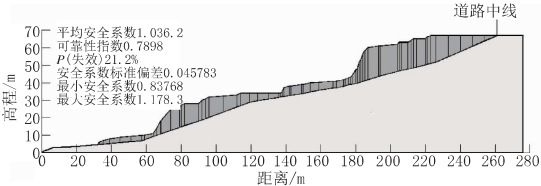


图3 仿真模拟结果

3 治理方案分析

3.1 治理方案措施

在上文风险评估的基础上,分别从滑体的上、中、下部三个角度,初步提出对应的三类路基边坡滑坡治理方案,分别如图4至图6所示。

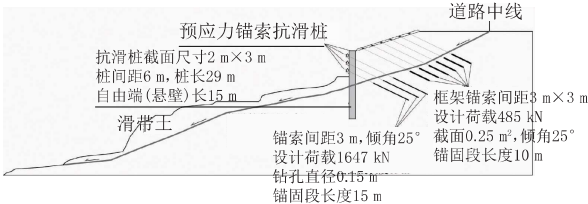


图4 治理方案措施1

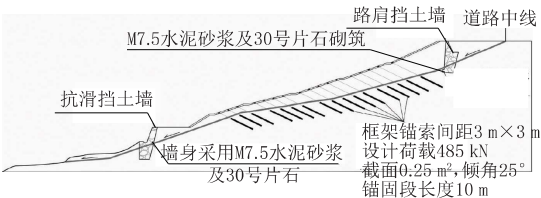


图5 治理方案措施2

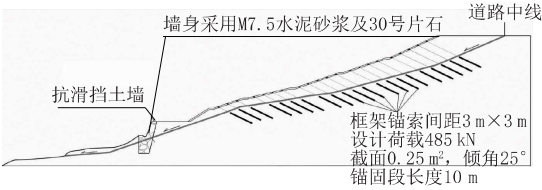


图 6 治理方案措施 3

3.2 治理效果分析

本文通过反算参数的方法，获得内摩擦角以及黏聚力  $c$  参数： $\varphi=30^\circ$ 内摩擦角，黏聚力  $c=20.3\text{ kPa}$ 。各治理方案仿真计算得出的路基边坡平均安全系数和  $P$ (失效)结果见表 3。其中方案 3 的平均安全系数

为 1.19，低于规范要求的 1.25，土体滑坡发生率为 6.33%，超过可接受 5% 阈值。

表 3 各治理方案计算结果表

| 治理方案       | 1    | 2    | 3    |
|------------|------|------|------|
| 平均安全系数     | 1.25 | 1.28 | 1.19 |
| $P$ (失效)/% | 3.25 | 0.83 | 6.33 |

3.3 经济效益对比分析

将治理方案 1 和治理方案 2 的工程量、单价和总体费用进行计算,结果见表 4、表 5。

表 4 治理方案 1 费用明细表

| 名称   | 挖方                    | 抗滑桩预应力锚索    | 坡面预应力锚索     | 混凝土框架梁                  | 抗滑桩身                    |
|------|-----------------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| 工程量  | 91 246 m <sup>3</sup> | 6 582 m     | 11 348 m    | 1 864 m <sup>3</sup>    | 9 846 m <sup>3</sup>    |
| 单价   | 20 元 /m <sup>3</sup>  | 330 元 /m    | 250 元 /m    | 1 420 元 /m <sup>3</sup> | 1 560 元 /m <sup>3</sup> |
| 总体费用 | 1 824 920 元           | 2 172 060 元 | 2 837 000 元 | 2 646 880 元             | 15 359 760 元            |

表 5 治理方案 2 费用明细表

| 名称   | 挖方                     | 坡面预应力锚索      | 混凝土框架梁                  | 浆砌片石挡土墙               |
|------|------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|
| 工程量  | 115 876 m <sup>3</sup> | 56 418 m     | 13 576 m <sup>3</sup>   | 56 247 m <sup>3</sup> |
| 单价   | 20 元 /m <sup>3</sup>   | 250 元 /m     | 1 420 元 /m <sup>3</sup> | 450 元 /m <sup>3</sup> |
| 总体费用 | 2 317 520 元            | 14 104 500 元 | 19 277 920 元            | 25 311 150 元          |

方案 1 总体费用成本 2 484 万元,方案 2 总体费用成本 6 101 万元。从效果上来看,方案 2 滑坡发生率低于方案 1,平均安全系数略高于方案 1,治理效果更佳,但成本投入也同样远高于治理方案 1。此外,方案 2 中涉及到大量圬工,在临界稳定状态边坡土体上施工具有较大风险和难度;而方案 1 施工难度较低、工期较短、引起扰动小且成本费用更低,是更为合理的选择。

3.4 治理效果评价

在采用坡面锚索框架梁支护结合预应力锚索抗滑桩支挡的方案对路基边坡进行综合治理后，跟踪监测抗滑桩顶水平位移数值情况，监测时长为 3 个月,其中监测点的布置情况如图 7 所示。可以发现，30 d 之后的桩顶水平位移已趋于稳定，路基边坡滑坡治理效果良好,如图 8 所示。

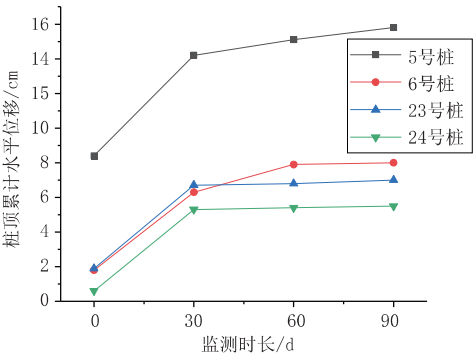


图 8 桩顶水平位移变化情况

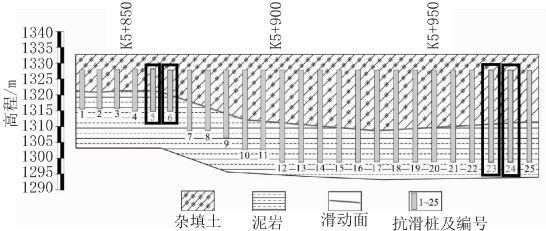


图 7 抗滑桩位移监测布点示意图

4 结 语

本文结合现场勘察检测数据和数学仿真计算，研究路基边坡滑坡的发生率和安全系数，评估滑坡带来的财产损失,从滑体的上、中、下部三个角度提出对应三类路基边坡滑坡治理方案，综合对比治理后滑坡发生率和经济效益等因素，优选出最佳的坡面综合治理方案，并对治理后的路基边坡效果进行评价,得出以下主要结论：

(1)失稳后路基边坡平均安全系数为 1.04,滑体处于临界稳定状态, $P$ (失效)计算结果为 21%,路基边坡土体滑坡的发生率为 21%；

### 5.3 检修车

主桥设桥梁检修车,检修车分桥上检修车与桥下检修车两种,各一部,全桥共两部,均为桁式检修车,检修范围覆盖全桥。桥上检修车轨道位于主桥上弦杆顶部,用于检修上弦杆、腹杆、上平联等桥面以上的结构;桥下检修车悬挂于桥面系下方,用于检修梁底。

## 6 施工方案

主桥施工比选了悬臂拼装、中跨大节段吊装及转体施工方案,综合主墩基础规模、对两岸大堤的影响、对航道的影响、施工风险及费用等因素,最终采取中跨节段悬臂拼装、边跨散拼的施工方案。

下部结构采用先钻孔灌注桩后浇筑承台及墩柱的陆上桥梁下部结构常规施工方案,上部结构施工先从主墩墩顶处及边跨施工开始。边跨桥面系采用支架施工,桥面系及主桁杆件在工厂分段加工制造,船运至施工现场,利用运梁小车将桥面系逐段滑移至安装位置。桥面系安装完毕后自墩顶位置逐段焊接拼装桁梁杆件,边跨安装完毕后分批次浇筑压重

混凝土,中跨钢桁梁由桥面吊机按每15 m一个节段逐段安装直至中跨合龙。为改善体系受力,在安装前预先将边墩支点下压0.8 m,待中跨合龙后顶升至原位。主桥施工步骤示意图见图7。

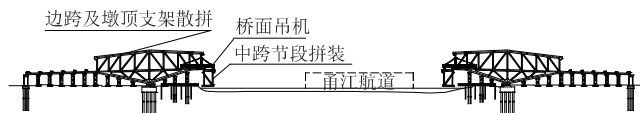


图7 主桥施工步骤示意图

## 7 结 语

三官堂大桥主桥采用大跨径三跨连续钢桁梁桥桥型,整个桥梁外观简洁舒展,大桥犹如金龙腾飞,以独特的结构体系、精致的构造细节、优美的景观造型、创记录的全焊接制造工艺,为同类型桥梁在结构设计、工厂制造、施工架设等方面积累了丰富的经验。本桥目前已建成通车,其优美的造型使该桥成为宁波市新的地标性桥梁之一。

### 参考文献:

- [1] 吴冲.现代钢桥(上册)[M].北京:人民交通出版社,2006
- [2] 刘承虞,赵廷衡.孙口黄河大桥整体节点钢桁梁的设计与制造[J].桥梁建设,1996(3):44-48.

(上接第63页)

(2)经过比对,优选出坡面锚索框架梁支护结合预应力锚索抗滑桩支挡的综合治理方案;

(3)该治理方案施工难度合理、治理效果良好、成本投入可控,30 d后桩顶水平位移趋于稳定。

### 参考文献:

- [1] 冯忠居,张永清,李晋.堆载引起桥梁墩台与基础的偏移及防治技术研究[J].中国公路学报,2004(3):77-80.
- [2] 张勇慧,李红旭,盛谦,等.基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性

性分级研究[J].岩土力学,2010,31(10):3151-3156.

- [3] 杨文东,杨栋,谢全敏.基于云模型的边坡风险评估方法及其应用[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(4):30-34.
- [4] 王思长,折学森,周志军,等.基于层次分析法的工程模糊集理论在公路边坡稳定性评价中的应用[J].安全与环境学报,2010,10(5):189-192.
- [5] 何海鹰,胡甜,赵健.基于AHP的岩质高边坡风险评估指标体系[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2861-2868.
- [6] 赵欢,田伟平,齐洪亮,等.陕西公路边坡灾害危险性分区研究[J].灾害学,2016,31(4):75-81.