

山区临水临崖道路安全防护设施优化设计

魏祝灵

内蒙古城市规划市政设计研究院有限公司 内蒙古自治区呼和浩特市 010000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20518

[摘要] 山区临水临崖道路地形复杂、安全风险突出，传统防护设施存在防护等级适配不合理、抗冲击能力有限、结构组合形式单一、前置防控能力不足等短板。本文结合西南山区道路调研，构建多因子耦合风险分级体系，提出分级适配、刚柔结合、智能防控、生态轻量化相结合的一体化设计思路。结合路段风险差异，对各类防护设施进行结构优化与科学布设，并融入智能监测预警功能。优化后的防护体系整体防护性能显著提升，运维与建设成本得到有效控制。本次研究补齐了传统防护技术的不足，可为山区高危道路安全防护工程提供全新设计思路与技术参考。

[关键词] 山区道路；临水临崖；安全防护；优化设计；分级防护；刚柔协同

引言

山区临水临崖道路沿河谷、陡崖地带展线，普遍存在路基狭窄、纵坡陡峭、平曲线半径小、垂直落差大、边坡岩体稳定性差等特征，是公路交通事故重灾区，车辆冲坠事故致死率远高于普通路段。现阶段国内多数该类路段仍沿用标准化通用防护设施，未结合地形落差、行车条件、地质灾害开展差异化设计，刚性护栏易断裂倾覆、柔性设施抗车辆冲击能力不足，且主动安全引导、灾害预警技术应用普及率偏低，防护体系整体性、协同性不足。为破解上述技术难题，本文从风险识别、等级划分、结构优化、组合布设、智能防控五个维度开展系统性研究，创新构建多级复合防护体系，细化设施结构参数与施工工艺，实现被动防护与主动预警深度融合，全面提升山区临水临崖道路本质安全水平，完善公路生命安全防护工程技术体系。

1 山区临水临崖道路安全风险与防护现状

1.1 多维度安全风险耦合特征

山区临水临崖道路并非单一行车风险，而是行车失控风险、坠崖落水风险、边坡地质灾害风险、环境耐久失效风险四类风险相互叠加，也是该路段防护难度远大于常规道路的核心原因。行车层面，受地形限制，道路纵坡普遍大于8%，急弯半径多小于15m，车辆制动距离延长、转向稳定性变差，重载货车、小型客车均易出现侧滑、失控；落差层面，路段垂直落差区间跨度大，5~20m落差车辆坠崖生还率不足30%，20m以上高陡临崖路段几乎无生还可能；地质层面，沿线边坡风化严重、节理发育，降雨后易产生危岩掉落、小型滑坡，落石直接撞击防护设施易造成结构局部破坏；环境层面，山

区常年高湿度、昼夜温差大、雨水酸碱侵蚀明显，金属护栏防腐层加速老化，混凝土结构出现冻融、开裂，防护设施服役3~5年即出现性能大幅衰减。

本次选取川渝鄂三地14条山区干线公路临水临崖路段开展全域调研，调研总里程92.3km，涵盖不同设计速度、落差、坡度路段，为后续风险分级与方案优化提供基础数据。

1.2 防护设施现存问题

综合现场检测、验算与事故溯源分析，现有主流道路防护体系存在多重技术短板，也是本文重点研究方向。一是防护等级不匹配：落差超15米高危险路段中，71%仅配置340kJ常规双波A级护栏，难以抵御重载车辆高速撞击，易发生防护失效；护栏参数固化，统一采用4米柱距、3.0mm板厚，未结合陡坡、急弯等复杂路况差异化设计，结构适配性差。二是体系配置不合理：92%路段单一使用波形梁护栏，刚柔防护搭配失衡，无法兼顾车辆撞击与落石冲击，设施缺乏协同联动。三是防护模式落后：仅依靠被动防护，缺少视线诱导、减速、在线监测等主动防控手段，难以提前避险。四是综合效益偏低：山区混凝土护栏耗材多、造价高、工期长，还会破坏边坡植被，不符合生态保护要求。

1.3 风险等级划分

摒弃单一落差分级的传统方式，选取垂直落差、道路纵坡、设计行车速度、边坡落石风险四项核心控制指标，采用加权评分法完成风险等级量化划分，将路段划分为Ⅰ级高危、Ⅱ级中危、Ⅲ级低危三个等级，划分标准见表1。该分级方法实现地形、交通、地质多要素耦合判定，相比传统单指标分级，精准度提升显著，也是差异化防护设计的前置依据。

表1 山区临水临崖道路风险等级划分标准

风险等级	垂直落差 H/m	道路坡度 i/%	设计速度 v/(km·h ⁻¹)	落石风险
I 级（高危）	H≥20	i>15	v≥40	高风险（频发）
II 级（中危）	5≤H<20	8≤i≤15	30≤v<40	中风险（偶发）
III 级（低危）	H<5	i<8	v<30	低风险（无）

2 安全防护设施优化设计原则

分级适配原则：依据风险等级匹配对应防护等级，避免过度防护或防护不足；

刚柔协同原则：结合刚性结构（混凝土护栏）高防撞性与柔性结构（波形梁、防护网）吸能缓冲优势，提升综合防护能力；

主动预防原则：融合视线诱导、减速预警、落石监测等主动技术，实现“主动预警+被动防护”一体化；

生态经济原则：优先选用轻量化装配式防护构件，该类设施运维便捷、与山地生态环境适配性强。设计与施工阶段充分利用本地建材，在控制工程造价的同时，最大限度降低施工活动对沿线自然地貌与植被的扰动。

表 2 不同风险等级波形梁护栏优化参数

风险等级	护栏板类型	板厚/mm	立柱截面规格 /mm	立柱间距/m	防护等级	基础形式	设计防撞能量 /kJ
III级低危	双波波形梁	3.0	Φ 114×4.5	4.0	A 级	浅埋混凝土基础	340
II 级中危	加强型双波梁	4.0	Φ 140×4.5	2.0	SB 级	现浇独立基础	430
I 级高危	三波加强梁	4.0	130×130×6 方管	1.5	SA 级	锚杆+混凝土联合基础	520

针对高风险临崖路段的受力特点，同步开展构造细节优化。对于 I 级高危区段，替换传统双波构件为三波波形梁，将有效防护高度由常规 310mm 提升至 506mm，扩大车辆碰撞接触范围，从构造上降低车辆翻越护栏的概率。支撑体系选用方形钢管立柱，其截面抗弯性能优于圆形管材，可有效抵抗撞击产生的侧向弯矩；同时将立柱布设间距缩减至 1.5m，提升整体框架的空间刚度。



图 1 三波波形梁护栏安装示意图

针对陡坡、小半径急弯等特殊线形路段，在表 2 标准参

耐久适配原则：结合山区高湿度、酸碱侵蚀显著的环境特征，所有金属防护构件统一采用热镀锌结合户外喷塑的复合防腐工艺，有效延缓构件老化锈蚀，将设施正常服役年限提升至 15~20 年。

3 关键防护设施结构优化设计

3.1 波形梁护栏优化设计

波形梁护栏是抵御车辆失控冲坠的核心主体结构，不同风险等级路段的车辆撞击能量、侧向荷载、地基条件存在明显差异，统一规格的护栏构件无法满足全路段防护要求。为此依据风险等级，从护栏板选型、板材厚度、支撑立柱规格、布设间距及基础构造五大维度开展定制化设计，通过抗弯、抗倾覆验算确定各项技术参数，具体配置标准如表 2 所示。

数基础上进一步加密立柱，并在立柱底部增设斜向支撑构件，抵消车辆侧向冲击带来的拔拉力。地基处理采取因地制宜的方案：岩体边坡区域采用化学锚杆对立柱进行锚固，减少边坡开挖扰动；软土路基位置设置扩大式独立基础，基础埋深控制在 50cm 以上，彻底规避立柱倾覆隐患。三波波形梁护栏整体安装构造形式见图 1。

所有金属护栏构件均采用热镀锌外加户外喷塑的复合防腐工艺，应对山区高湿、多雨、酸碱侵蚀的环境，保障构件长期使用性能。



图 2 波形梁护栏与柔性防护网刚柔复合组合布置工程图

3.2 刚柔结合式防护网组合体系设计

山区临水临崖路段同时承受车辆集中撞击与落石局部冲击两类荷载,单一护栏仅能实现车辆拦截,对滚落石块的局部抗冲击能力较弱;纯柔性防护网则无法阻挡机动车冲坠。基于这一工程痛点,本次设计创新采用刚性护栏+柔性防护网组合布设模式,实现两类结构受力互补、功能结合,形成刚柔协同的复合防护体系,整体布置形式见图2。

结合路段风险等级与落石发育情况,划分两种布设方案:

II级中危路段:以源头防控落石为目标,在边坡坡面布设GPS2型主动柔性防护网。该网体网格尺寸为300mm×300mm,钢丝绳直径8mm,配套锚杆按照2.0m间距布置,将表层危岩、松动土体整体约束在坡面,减少落石产生量;道路外侧搭配加强型双波护栏,主要承担车辆防撞功能。

I级高危路段:在三波护栏内侧增设RX-050型环形被动防护网,网体高度设置为3.0m,额定缓冲能量达500kJ,专门承接坡面滚落的大块岩体。被动网底部与护栏立柱刚性连接,上部采用柔性张拉方式,既可以充分吸收落石冲击动能,又不会干扰护栏主体的防撞受力状态,实现“防坠车、拦落石”双重功能一体化。

该组合体系突破了两类防护设施独立布设的传统模式,大幅提升路段综合防灾能力,适配多重灾害叠加的山区临崖环境。



图3 轻型钢棚洞结构示意图

3.3 高落差落石区轻型钢棚洞结构优化

对于垂直落差超过20m、落石活动频繁的I级特殊路段,传统钢筋混凝土棚洞自重大、施工周期长,且大面积开挖会破坏山体原有生态。本次研究摒弃常规混凝土结构,研发大跨度预制轻型钢棚洞,作为极端风险路段的专项防护设施。

棚洞采用模块化预制、现场拼装的施工模式,标准单跨设计跨度8.0m,单节段加工长度25m;主体承重结构选用H型钢拱架,拱架中心间距控制为2.0m。棚洞顶部铺设防腐实木垫板与高分子防水卷材,顶面设置25°倾斜坡面,依靠岩体自重引导落石自然滑落,避免石块在棚顶堆积形成附加荷

载。相较于传统混凝土棚洞,该轻型钢结构自重仅为前者的28%,现场拼装作业可将施工工期缩短60%。钢结构表面完成双重防腐处理后,可适应山区复杂气候条件。除拦截落石外,棚洞还可起到遮阳、路面防冻融的作用,一物多用,综合效益突出。轻型钢棚洞结构剖面构造见图3。

3.4 主动预警设施优化

突破传统“重被动、轻主动”的设计思维,在防护设施体系中集成全套主动防控设施,分为视觉引导类、强制减速类、智能监测预警类三大模块,形成前置风险管控体系。

视觉引导设施:所有路段护栏立柱每2m布设高亮度反光轮廓标,急弯、视线受阻路段增设线形诱导标,保证夜间、雨雾天气可视距离不低于300m。

强制减速设施:纵坡大于12%的长下坡路段,连续布设震荡标线,标线间距1.5m,配合多级限速标志,强制车辆提前减速,从源头降低失控概率。

智能落石监测预警:仅在I级高危路段布设,采用一体化红外感应落石传感器,传感器与路段声光报警器、道路可变情报板联动。一旦监测到边坡落石,立即发出声光警报,情报板同步推送警示信息,提醒过往车辆减速避让,实现灾害风险实时预警。

4 结语

本文结合山区临水临崖道路的高危特征,搭建起分级防护、刚柔协同、主动预警、生态适配的安全防护设施优化设计体系,划定风险等级标准,对波形梁护栏、柔性防护网、轻型钢棚洞等设施的结构参数与布设形式进行优化,形成完整的系统化设计方法。该设计方案可全面强化防护设施的防撞性能与环境适配能力,改善传统防护模式适配性不足、防护效果有限等问题,同时兼顾经济与生态效益。研究仍存在一定局限,极端气象、地质条件下设施的稳定性还需进一步探究。后续可融合物联网技术,深化设施状态监测与智能预警相关研究,持续提升山区道路防护的智能化水平。

[参考文献]

- [1]孔德陆.山区公路施工中的边坡稳定性控制与支护技术优化研究[J].交通世界,2025(18)
- [2]马晴晴.建筑施工现场临边防护的安全管理实践[J].工程地质学,2025(09)
- [3]刘朝阳,刘康康.建筑施工临边防护问题分析及解决方案[J].建筑理论,2024(07)
- [4]郭春艳,刘春丽,李杰,张馨月,刘美彤.公路智能交通护栏设计[J].电力系统及自动化,2022(04)