

高速公路路基边坡防护结构优化设计研究

聂晨泽 毕红全

云南交投公建隧道工程有限公司 云南 昆明 650000

【摘要】：作为高速公路工程的核心组成部分，路基边坡的稳定状况会直接影响道路运行的安全性能和持久力，国内某些路段的边坡防护系统存在设计缺陷和适应性欠佳的现象，很容易引发失稳坍塌或者冲刷侵蚀等潜在危险，鉴于此情形，此次研究把重心放在高速公路路基边坡防护的关键需求之上，仔细分析当下防护体系所面临的技术瓶颈，并且从中提炼出改进设计的准则，从结构形式的选择，参数的设定以及材料性能的加强等诸多方面出发，提出系统的改善方案，经由典型的工程案例来考察所提策略的可行性和有效性，从优化后的防护措施在安全性，耐久性和经济效益等方面均达到明显提升这一结果可以看出，这项研究给类似项目的设计和施工供应了理论根据和技术依据。

【关键词】：高速公路；路基边坡；防护结构；设计优化；稳定性

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.035

1 引言

近些年来，高速公路建设不断向山区，丘陵地带扩展，边坡的地质环境变得更为复杂，这对防护结构的设计提出了更高的要求，传统的防护形式，诸如浆砌片石护坡，喷混凝土护坡等，虽然具有一定的防护功能，但是其刚性特点较为突出，生态适应性较差，而且后期维护成本比较高，在这样的背景下，针对高速公路路基边坡防护结构展开系统化的优化研究显得尤为重要，联系边坡地质特点，气候状况以及工程实际需求，制定出科学，合理的优化方案，这对于提升道路工程质量，缩减运营养护成本有着重要的实践价值。

2 现有高速公路路基边坡防护结构设计存在的问题

2.1 防护类型选型缺乏针对性

目前高速公路边坡防护设计多以“一刀切”形式出现，未从坡度、岩土特点、降雨量这几个要素出发去考虑方案是否具有针对性，在易发生地质事件的山区路段地面，传统喷混凝土防护方式较多，其刚硬特征无法应对岩土体小幅度转变所带来的麻烦，出现表面破裂降低防护效能的问题；而遇到降雨规模较大的地段里往往只利用植被杂草做的事情，可草类发芽的时间周期很长因而无法在短期间内提升对于侵蚀力强的威力抵抗，极易出现坡面冲沟生成的相关情况。

2.2 结构参数设计不合理

结构参数作为防护工程整体稳定性的主要指标，其是否合适直接影响到工程的整体好坏。设计的边坡坡率较陡，没有结合岩土体的抗剪强度进行精确的计算，稳定性较差；设计的防护层厚度、锚杆间距、排水系统规格等参数也没有科学的设计依据，设计的浆砌片石护坡厚度偏小，难以发挥抵抗岩土体侧向压力的作用；设计的排水盲沟间距偏大，不能及时排出坡体内积水，岩土体饱和度提高，抗剪强度降低，存在失稳的危险。

2.3 材料选择与适配性不足

防护材料的好坏，直接影响防护结构的耐久性和防护效

果，有些工程只重视经济成本，用强度不够，抗老化能力差的材料，低标号水泥砌片石，长期受风雨侵蚀，容易风化剥落，有些材料和区域气候环境不适应，在寒冷地区用普通混凝土，容易冻融剥落，有些在盐碱地带没用耐腐蚀材料，防护设施提前失效。

2.4 生态防护理念融入不足

传统防护体系大多依靠刚性材料创建，这种模式严重破坏生态环境，而且不能做到自然恢复，部分方案试图融合植草，植树等生态修复技术，但是没有针对特定区域气候条件和土壤特性挑选适合的植物，造成植被存活率低，而且刚性防护和生态化措施之间缺乏协同效应，比如在陡峭边坡上只依靠植草固土，没有设置必要的支护结构，容易引发植被连同表层土体滑坡等地质灾害。

3 高速公路路基边坡防护结构设计优化原则

3.1 安全性优先原则

路基边坡防护设计的主要目的就是保障其稳定性，其中安全性处于优先考量的地位，在方案制定期间，需要全面地对边坡地质条件，岩土体物理力学性能，降雨强度以及地震烈度等关键要素实施勘查工作，准确评定潜在的失稳风险，进而依照这些要素来确定防护结构的设计承载能力和安全储备指标，从而使得其能够应对复杂的环境变化。

3.2 因地制宜原则

根据工程所在地地形地貌特点、地质状况、气候环境以及生态修复要求，科学选定防护形式和材料类别，山地岩质边坡宜采取锚杆框架加生态植被防护形式，平原地区土质边坡则宜采取土工格栅加固加植草护坡，降水丰富地区要加强排水系统设计规划，提升防护结构抗冲刷能力。

3.3 经济性与耐久性平衡原则

工程设计阶段要兼顾全生命周期的成本因素，防止出现过

上, 优先采用经济性好且有长期服役潜力的建筑材料和构造方案, 通过对结构参数的合理调节来缩减材料用量和简化施工步骤, 从而控制初始建设成本, 也要充分考虑防护系统的耐久性要求, 选用耐候性好, 抗腐蚀, 抗冻融性能佳的材料, 以此缩减运维周期里的检修次数和费用。

3.4 生态兼容性原则

践行生态防护理念时, 要首选生态友好型防护技术, 刚性材料的使用量应得到合理控制, 根据区域特点选择适宜的植被种类, 形成乔木, 灌木, 地被植物相搭配的多层次复合防护体系, 在保障工程安全的前提下, 完成边坡生态恢复的任务, 而且要重视防护设施同周边环境生态的协调, 尽可能缩减对生态系统功能的干扰和破坏。

4 高速公路路基边坡防护结构设计优化方案

4.1 防护类型精准选型优化

根据边坡岩土体类型、坡度、高度及风险等级, 建立防护类型选型体系, 实现精准选型。具体选型建议如下表所示。

表1 具体选型建议

边坡类型	边坡特征	推荐防护类型	核心优势
岩质边坡	岩石完整, 坡度 30° - 45° , 高度 $\leq 15\text{m}$	锚杆框架+植草防护	刚性支护保障稳定, 生态植被提升兼容性
岩质边坡	岩石破碎, 坡度 $>45^{\circ}$, 高度 $>15\text{m}$	锚索格构+喷混植生防护	承载能力强, 适应大坡度, 植被成活率高
土质边坡	粉质黏土, 坡度 25° - 35° , 高度 $\leq 10\text{m}$	土工格栅加筋+植草护坡	提升土体抗剪强度, 柔性好, 成本低
土质边坡	砂质土, 坡度 $>35^{\circ}$, 降雨充沛区域	浆砌片石拱形骨架+植草防护	抗冲刷能力强, 骨架支护保障稳定
软土边坡	软土厚度 $>5\text{m}$, 边坡高度 $\leq 8\text{m}$	CFG桩复合地基+土工膜防护	提升地基承载力, 防止软土沉降变形

4.2 核心结构参数优化设计

4.2.1 边坡坡率参数优化

设计优劣直接影响其整体稳定程度, 务必结合岩土体抗剪强度参数进行精确计算, 岩质边坡方面, 按照岩石抗压强度及完整系数来确定坡率数值, 完整岩质边坡推荐 $1:0.5-1:1.0$, 破碎岩质边坡则要放缓到 $1:1.0-1:1.5$, 土质边坡要依照土体黏聚力与内摩擦角特点, 粉质黏土边坡一般控制在 $1:1.2-1:1.5$, 砂质土边坡则应放宽到 $1:1.5-1:2.0$ 。边坡高度超出10米时, 最好分层分级放坡, 每级高度设为8-10米, 还要保证平台宽度不少

于1.5-2.0米, 从而增强边坡的整体稳定性能。

4.2.2 支护结构参数优化

设计要对不同防护方式展开专项研究。锚杆框架防护锚杆直径要按照边坡高度和岩土体强度综合确定, 边坡高度小于等于10米时, 锚杆直径取 $\Phi 22-25$ 毫米; 边坡高度大于10米时, 锚杆直径取 $\Phi 28-32$ 毫米; 其间距宜取2.0-3.0米, 长度宜取6-10米, 锚固深度不宜小于3米; 框架梁截面尺寸宜取30厘米 \times 40厘米-40厘米 \times 50厘米, 混凝土强度等级不宜低于C30。锚索格构防护锚索直径统一取 $\Phi 15.24$ 毫米, 间距取3.0-4.0米, 长度取15-25米, 锚固深度取5米以上; 格构梁截面尺寸宜取40厘米 \times 50厘米-50厘米 \times 60厘米, 混凝土强度等级不宜低于C35。

4.2.3 排水系统参数优化

用于加强坡体的稳定性, 去除坡内积水隐患, 坡面排水方面, 采用梯形截水沟和急流槽相结合的方式, 截水沟设在坡顶5到8米处, 断面规格40cm \times 50cm到60cm \times 80cm, 纵坡2%到5%, 急流槽间隔20到30米设置, 和截水沟连通, 截面30cm \times 40cm到50cm \times 60cm, 底部用C25混凝土浇筑, 增设防滑设施, 坡内排水依靠盲沟和渗沟共同完成, 盲沟间距8到12米, 深度1.5到2.0米, 用碎石填筑, 外包土工布防止淤积, 渗沟设在边坡分层平台处, 与盲沟相接, 坡内水分得以排出。

4.3 防护材料优选与适配优化

4.3.1 支护材料选择

注重力学性能和耐久性, 锚杆锚索宜选用高强度低松弛预应力钢材, 抗拉强度达或超1860MPa, 框架梁、骨架可用耐腐蚀混凝土, 普通混凝土加阻锈剂、抗冻剂, 严寒F200级抗冻、盐碱P8级抗渗, 生态防护区用环保材料, 可降解土工布、生态友好土工格栅, 减少施工污染。

4.3.2 植被材料适配优化

依据工程所在地气候特点及土壤状况, 选择适宜植被类型, 做到“本土优先、乔灌木结合”, 北方寒冷地区选用紫穗槐、沙棘、早熟禾等耐寒耐旱植物, 南方湿润地区选用狗牙根、百喜草、爬山虎等适应性强的湿生植物, 山区边坡施工选择侧柏、油松等根系发达的乔木树种, 混播技术的实施, 不仅提高植被成活率和覆盖度, 而且增强生态防护能力。

4.4 生态与刚性防护复合优化

创建“刚性支护+生态修复”相协同作用的综合防护体系, 达成结构稳定与生态环境的协调统一, 对于岩质边坡, 应当首先使用锚杆或者锚索框架实施刚性加固, 再在内部填充种植土, 播撒草籽并覆盖植生膜, 促使植被自然生长, 针对土质边坡, 要事先铺设土工格栅来提升其力学性能, 之后把改良过的土壤和草籽装入生态袋之中, 分层堆叠形成生态护坡面, 在坡

脚增设浆砌片石护脚设施，以避免坡脚遭到侵蚀破坏，在坡顶栽种乔木植物，形成起多层次立体防护体系，从而全方位提升工程防护效能和生态景观品质。

5 工程实例验证

5.1 工程概况

关于某高速公路 K23+100-K23+500 路段粉质黏土边坡遇到的实际问题，在其原有设计坡比 1:1.2 的情况下，实施了喷射混凝土护面与截水沟排水的方式，在三年的正常运行中，该边坡出现了许多细缝，坡面上的土壤受到了侵蚀，在坡脚处汇集了大量积水，这个整体存在继续陷入险境的可能性。在遇到这些问题之后，这个方案都做了很多的尝试与研究，进行了深度的修复工作。

5.2 优化设计方案

针对该边坡的地质情况及病害特点，给出如下优化方案：将坡度调整为 1:1.5，采用分层分级形式，每级高度设为 8 米，平台宽度保持 1.5 米不变；采取土工格栅加筋加上生态袋防护的技术手段，所选土工格栅要具备双向拉伸特性，抗拉强度不能低于 80kN/m，生态袋内装改良后的土壤，撒上狗牙根种子，规划好坡面的排水系统，在坡顶设置 60cm×80cm 的截水沟，每隔 25 米在坡面上布置 50cm×60cm 的急流槽，坡体内按 10 米间距埋设深度达到 1.8 米的盲管，保证盲管能够顺畅地与急流槽相衔接，在坡脚处设置 50cm×80cm 的浆砌片石护脚设施，坡顶处种植紫穗槐。

5.3 优化效果分析

整改完成后，需对边坡进行两年的动态监测，以便系统评估优化方案的实际效果，现将优化前后边坡核心指标的对比数据整理如下表所示。

表 2 优化前后边坡核心指标对比

对比指标	原设计方案	优化设计方案	改善情况
最大沉降量 (mm)	12.5	3.2	降低 74.4%
最大水平位移 (mm)	9.8	2.1	降低 78.6%

参考文献:

- [1] 徐正.高速公路高填路基及边坡防护施工技术探讨[J].交通科技与管理,2025,6(07):152-154.
- [2] 王军.高速公路路基高边坡防护施工技术研究[J].运输经理世界,2024,(28):47-49.
- [3] 蒙礼超.山区高速公路路基边坡防护方案比选分析[J].西部交通科技,2023,(02):58-60.
- [4] 张驰.高速公路路基边坡防护设计问题研究[J].交通科技与管理,2023,4(03):71-73.
- [5] 张红彬.高速公路路基高边坡防护措施分析[J].交通世界,2022,(36):96-98.

对比指标	原设计方案	优化设计方案	改善情况
植被成活率 (%)	无植被防护	92	实现全面生态覆盖
建设成本 (万元/公里)	85	95.2	增加 12%
年维护成本 (万元/公里)	12	4.2	降低 65%
预计使用寿命 (年)	10	20 以上	延长 1 倍以上
坡面病害情况	多处裂缝、冲刷沟槽	无病害，坡面平整	病害彻底消除

依据监测数据，经过分析统计可以表明，改进后的边坡工程其最大沉降量及最大水平位移量变化均有所减小，均符合现行技术规范的规定要求；植被存活率较高，生态系统恢复较显著。初始投入略有增加，不过后期运营维护成本下降很多，服役寿命大大增加，整体经济效益较大程度上升。

6 结论与展望

本研究着重解决目前我国现有高速公路路基边坡防护结构设计存在选型不科学，防护结构参数设定不合理，材料匹配性差及没有将生态理念融合等问题，在尽可能保障公路路基边坡安全的基础上，因地制宜，同时兼顾经济性和耐久性的改进设计思想为原则；在防护形式、结构参数、材料以及综合防护体系等方面给出具体的改进措施。从工程实践角度出发，优化的防护结构不仅大大提高了边坡的稳定性和减小了病害隐患且降低了后期养护费用，同时提高了环境的适应性。具有重要的应用价值。未来高速公路路基边坡防护结构的设计要充分融合新技术、新材料的发展趋势，着重推进智能化设计理念和技术的应用，利用 BIM 技术创建三维可视化模型，准确优化设计方案，利用物联网设备布置动态监测系统，及时获取边坡位移、沉降、水分变化数据，及时预警潜在失稳风险，开发生态友好型新材料，增强防护设施的耐久性与环境适应能力，针对不同地质条件与气候特征开展专门的研究，完善相关设计标准和技术规范，给路基边坡防护工程给予可信的技术支持。