路基边坡防护施工技术与稳定性提升路径

谢昌志

（四川路航建设工程有限责任公司，四川 成都 610041）

摘 要 路基边坡是公路工程的重要组成部分，其稳定性直接关系到公路的运营安全与使用寿命。受地质条件、气候环境和施工扰动等因素影响，路基边坡易发生滑坡、崩塌等病害，不仅会中断交通，还可能造成人员伤亡和财产损失。传统边坡防护技术多侧重工程结构加固，对生态环境保护重视不足，且存在长期稳定性差的问题。本文系统分析路基边坡失稳的机理与影响因素，梳理各类防护施工技术的适用条件与要点，从设计、施工、监测等多个维度提出稳定性提升路径，以期为促进公路路基边坡工程建设提供参考。

关键词 路基边坡；工程防护技术；生态防护技术；复合防护技术；排水系统

中图分类号：U417.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.016

0 引言

随着我国公路建设向山区和复杂地质区域延伸，路基边坡的高度和坡度不断增加，边坡稳定性问题日益突出。据统计，我国公路边坡失稳事故占公路工程地质灾害总数的60%以上，每年用于边坡病害整治的费用超过百亿元[1]。传统边坡防护多采用浆砌片石、喷射混凝土等刚性防护方式，虽然短期防护效果较好，但破坏了自然生态环境，且随着时间推移易出现开裂、脱落等问题。山区公路边坡多处于地形陡峭、岩土破碎区域，加之强降雨、冻融循环等自然作用叠加，边坡病害呈现多发性、反复性特征，不仅提升公路养护成本，还会对沿线生态环境造成持续性破坏，推动边坡防护技术迭代与稳定性管控升级，已成为山区公路建设与运维阶段的重要管控内容。因此，研究路基边坡防护施工技术与稳定性提升路径，对保障公路运营安全、实现工程建设与生态环境协调发展具有重要的现实意义。

1 路基边坡失稳机理与主要影响因素

1.1 边坡失稳的形成机理

路基边坡失稳是土体或岩体在重力作用下沿软弱结构面发生剪切破坏的过程。根据破坏形式的不同，可分为滑动、崩塌和泥石流三种主要类型。滑动是最常见的失稳形式，边坡土体在水的作用下强度降低，沿圆弧状或平面状滑动面发生整体下滑。崩塌多发生在岩质边坡或高陡土质边坡，岩体或土体突然脱离母体，向下倾倒、翻滚。泥石流则是在暴雨作用下，松散土体与水混合形成的流体，沿沟谷快速流动，具有极强的破坏力[2]。

边坡失稳的本质是边坡内部的剪应力超过了岩土体的抗剪强度。当边坡开挖后，原有应力平衡被打破，坡体内部产生应力重分布，在坡脚处形成应力集中区。如果岩土体的抗剪强度不足以抵抗剪应力，就会产生剪切变形，随着变形的不断发展，最终形成贯通的滑动面，导致边坡失稳。水的作用是加速边坡失稳的重要因素，雨水渗入会增加土体重量，降低土体强度，同时产生孔隙水压力，进一步降低有效应力。冻融循环、干湿交替会持续弱化岩土体结构联结，使土体孔隙扩大、岩体裂隙扩张，逐步削弱边坡自身承载能力，这类渐进式损伤在季节性温差较大的山区尤为明显，也是边坡长期稳定性衰减的重要诱因。

1.2 影响边坡稳定性的主要因素

地质条件是决定边坡稳定性的内在因素。岩土体的性质直接影响其抗剪强度，坚硬岩石的抗剪强度高，边坡稳定性好；软弱土体和破碎岩体的抗剪强度低，易发生失稳。地质构造如断层、节理、裂隙等，是边坡的潜在滑动面，其产状和发育程度对边坡稳定性有决定性影响。地下水的存在会降低岩土体强度，产生动水压力和静水压力，是诱发边坡失稳的最主要外部因素。

工程因素和气候因素也会对边坡稳定性产生重要影响。路基开挖会改变边坡的原有形态，增加坡高和坡度，破坏应力平衡。施工过程中的爆破、碾压等作业，会产生振动，使岩土体产生裂隙，降低其强度。暴雨、

作者简介：谢昌志（1994-），男，本科，工程师，研究方向：工程管理。

洪水、地震等自然灾害，会直接诱发边坡失稳。植被覆盖度作为易被忽视的关键因素，直接影响边坡水土保持能力，原生植被破坏后，坡面缺乏根系固持与茎叶挡护，雨水冲刷与入渗速度大幅加快，边坡失稳概率随之显著上升，这也是生态防护理念逐步融入边坡工程的重要原因。

2 路基边坡常用防护施工技术

2.1 工程防护技术

工程防护技术主要依靠结构物的强度来抵抗边坡变形，适用于地质条件差、坡度陡、稳定性要求高的边坡。挡土墙是最常用的工程防护形式，通过自身重量抵抗土压力，防止边坡滑动。重力式挡土墙结构简单、施工方便，适用于高度小于 8 m 的边坡；悬臂式和扶壁式挡土墙采用钢筋混凝土结构，适用于高度较大的边坡[3]。

锚杆框架防护适用于岩质边坡和破碎土质边坡，通过锚杆将边坡深部稳定岩体与表层框架连接，形成整体受力体系。锚杆采用螺纹钢筋，长度根据滑动面深度确定，一般为 6 m～12 m。框架采用钢筋混凝土浇筑，网格尺寸为 2 m～3 m，框架内可植草绿化。喷射混凝土防护适用于易风化的岩质边坡，通过高压将混凝土喷射到边坡表面，形成封闭层，防止岩体风化剥落。喷射混凝土厚度一般为 5 cm～15 cm，可配合锚杆和钢筋网使用，提高防护效果。抗滑桩防护适用于深层滑动的边坡工程，通过在边坡坡脚或滑动面位置设置钢筋混凝土抗滑桩，阻断滑动面延伸，配合连系梁形成整体抗滑体系，在高陡填方与深挖路堑边坡中应用效果突出，可有效遏制边坡深层滑移变形。

2.2 生态防护技术

生态防护技术利用植物的根系固土作用和茎叶覆盖作用，达到防护边坡和恢复生态的目的。植草护坡是最简单的生态防护方式，适用于坡度小于 1:1.5、高度小于 6 m 的土质边坡。可采用撒播、喷播或铺草皮的方式进行施工，选择根系发达、耐旱耐贫瘠的草种，如狗牙根、黑麦草等。

灌木护坡适用于坡度较缓的边坡，灌木根系较深，固土效果更好，且能形成多层次的植被群落。可采用穴植或沟植的方式，株行距为 1 m～2 m，选择紫穗槐、荆条等乡土灌木品种。客土喷播技术适用于岩石边坡和贫瘠土质边坡，将含有草种、肥料、保水剂、黏合剂的客土混合物喷射到边坡表面，形成适合植物生长的土壤层。该技术能在短时间内实现边坡绿化，且防护效果持久。

2.3 复合防护技术

复合防护技术结合了工程防护和生态防护的优势，既保证了边坡的稳定性，又实现了生态恢复。锚杆框架植草防护是最常用的复合防护形式，在锚杆框架的网格内种植草灌，既利用锚杆框架的结构强度保证边坡稳定，又通过植物根系进一步加固表层土体，同时美化环境[4]。

土工格栅加筋土防护适用于填方边坡，就是在土体中分层铺设土工格栅，提高土体整体强度、稳定性。土工格栅与土体之间摩擦力、咬合力可以分散土体应力，减小土体变形。加筋土边坡坡度可达 1:0.5，比普通填方边坡占地少很多。生态袋防护适合于填方边坡、挖方边坡，将装有种植土的生态袋堆叠在边坡表面，形成柔性防护结构。生态袋具有较好的透水性、透气性，植物可以从袋中生长出来，实现边坡绿化。

2.4 新型防护技术

随着材料科学、工程技术的发展，一些新的边坡防护技术被采用。三维植被网防护是土工合成材料和植物相结合的防护技术，三维网有三维立体结构，可以很好地固定土壤，防止水土流失。植物根系穿入网孔生长，与三维网一起构成一个整体，提高边坡的稳定。生态混凝土防护采用多孔混凝土作为基材，内部孔隙可填充种植土和草种，植物可在混凝土中生长。生态混凝土具有一定的强度，能抵抗雨水冲刷，同时具有良好的透水性和透气性，适合植物生长。该技术适用于城市道路边坡和景区道路边坡，兼具防护和景观功能。纤维加筋生态防护技术将植物纤维、合成纤维掺入坡面固化材料中，提升表层土体抗拉强度与抗冲刷能力，同时不影响植物生长，适配南方多雨地区边坡防护需求；柔性防护网技术以钢丝绳网为主体，覆盖在岩质边坡表面，可有效拦截落石、减缓风化侵蚀，安装便捷且对边坡原貌扰动较小，在山区岩质高边坡中应用愈发广泛。

3 路基边坡稳定性提升路径

3.1 优化边坡设计方案

合理的设计是保证边坡稳定性的前提。设计前应进行详细的工程地质勘察，查明边坡的地层分布、岩土性质、地质构造和地下水情况，根据地质条件确定合理的边坡形式和坡率。对于土质边坡，坡率一般不宜大于 1:1；对于岩质边坡，可根据岩体完整性适当提高坡率，但不宜大于 1:0.3。

边坡高度不宜过大，边坡高度大于 20 m 时应设分级平台，平台宽度不小于 2 m，每级边坡高度不大于 15 m。分级平台可以减小边坡坡度，还可以拦截上部

边坡的雨水和落石，提高边坡整体稳定性。同时还要根据边坡重要性、地质条件来选择防护形式。稳定性差的边坡先用工程防护或者复合防护，稳定性好的边坡用生态防护。

3.2 加强施工过程质量控制

施工质量影响边坡稳定性。路基开挖应自上而下分层进行，分层防护，不得掏底开挖。开挖时尽量减少对边坡土体的扰动，防止破坏原有的植被和地质结构。对软弱土层、破碎岩层采用短开挖、快支护的方法，防止边坡坍塌。

防护工程施工要按设计要求进行。挡土墙基础应设在稳定的地基上，基础埋深不小于1 m。锚杆施工时钻孔深度、角度应满足设计要求，锚杆注浆饱满，确保锚杆与岩体有良好的黏结力。喷射混凝土施工时，应控制喷射压力和喷射距离，保证混凝土厚度均匀、密实。生态防护施工中选草种、灌木，保证种植土质量，提高植物成活率。施工阶段要同步做好坡面临时防护，开挖后及时覆盖防尘布、防水膜，防止裸露坡面长期受雨水冲刷和阳光暴晒，雨季施工时要提前布设临时排水槽，减少雨水入渗对坡体的软化影响，保证边坡施工期间的临时稳定[5]。

3.3 完善边坡排水系统

水是引起边坡失稳的主要因素，完善的排水系统可以有效地减小地下水对边坡的影响。边坡排水系统由地表排水和地下排水两部分组成。地表排水主要采用截水沟、排水沟、急流槽等设施将边坡范围内雨水迅速排出，防止雨水渗入边坡土体。截水沟设于边坡坡顶外5 m处，排水沟设于边坡平台及坡脚处，急流槽设于坡度较陡处。

地下排水主要用于降低地下水位，排除边坡内部的地下水。常用的地下排水设施有渗沟、盲沟和排水孔。渗沟适用于拦截浅层地下水，采用透水性材料填充，外包土工布防止泥沙堵塞。盲沟适用于排除深层地下水，采用穿孔塑料管作为排水通道。排水孔适用于岩质边坡，通过钻孔将边坡内部的地下水排出，降低孔隙水压力。排水系统施工需注重衔接顺畅，截水沟、排水沟的转弯处采用圆弧过渡，沟底设置合理纵坡，防止积水淤积渗漏；对于地下水丰富的边坡，可组合采用渗沟与排水孔联合排水方式，提升地下水疏导效率，从水文条件层面削弱边坡失稳的诱发条件。

3.4 建立长期监测与预警体系

边坡失稳是一个渐进的过程，通过长期监测可以及时发现边坡变形迹象，提前采取措施，防止事故发生。监测内容主要包括边坡表面位移、深部位移、地下水位和降雨量等。表面位移监测采用全站仪或GPS，监测点布置在边坡顶部和平台处，每20 m～50 m设置一个监测点。深部位移监测采用测斜仪，在边坡内部埋设测斜管，监测不同深度的土体位移。

建立边坡预警体系，根据监测数据设定不同等级的预警阈值。当边坡位移速率超过预警阈值时，及时发出预警信号，组织人员撤离，并采取应急加固措施。同时，利用物联网和大数据技术，实现边坡监测数据的实时传输和分析，提高预警的准确性和及时性。对于重要的高陡边坡，可安装视频监控系统，实时观察边坡的变化情况。监测设备安装后需定期校准维护，避免因设备故障、数据漂移导致预警失效，运维阶段可结合公路巡检工作，开展人工复核监测，形成自动化监测与人工巡检互补的管控模式，进一步提升边坡风险识别的全面性。

4 结束语

本文系统分析了路基边坡失稳的机理与影响因素，详细介绍了工程防护、生态防护、复合防护和新型防护等各类施工技术的适用条件与要点，从设计优化、施工控制、排水系统完善和监测预警体系建立四个方面提出了边坡稳定性提升路径。路基边坡防护是一项系统性工程，需要兼顾工程安全与生态保护，采用综合防护措施，实现边坡的长期稳定。在“双碳”目标与生态公路建设导向下，路基边坡防护需进一步强化绿色化、智能化融合，推广低影响施工工艺与可降解防护材料，推动边坡防护从被动加固向主动预防、从单一结构防护向生态结构协同防护转变，持续提升公路边坡全生命周期稳定性。未来，随着智能化技术和新材料的不断发展，路基边坡防护将向智能化、绿色化方向发展。应进一步加强边坡失稳机理的研究，开发新型环保防护材料和智能监测设备，建立基于大数据的边坡稳定性预测模型，不断提高路基边坡防护技术水平。

参考文献：

[1] 项崇松,解金.山区公路路基边坡防护工程设计与施工技术研究[J].运输经理世界,2026(02):51-53.
[2] 刘永仁,申铁军.路基边坡防护工程常见类型与施工注意事项[J].交通建设与管理,2025(05):139-141.
[3] 程启根,费桢垄.高速公路路基边坡防护施工技术研究[J].时代汽车,2026(10):121-123.
[4] 杨倩.路基边坡生态防护技术的应用[J].汽车画刊,2024(12):120-122.
[5] 陈信源.市政道路路基边坡防护施工技术设计[J].中国建筑金属结构,2025,24(19):57-59.