

水利工程施工中护坡工程施工分析与研究

张 顶 刘 奎 奎

邓州市水利工程建设有限责任公司 河南 南阳 473000

摘 要：水利工程护坡工程是保障河道安全、维护生态稳定的关键环节。本文系统分析护坡工程的功能分类、设计原则及力学基础，结合混凝土、生态材料、土工织物等施工技术，探讨基础处理、坡面防护及生态修复等关键环节的工艺要点。通过案例研究提出智能化监测、绿色施工及精细化管理等优化策略，为提升护坡工程稳定性、经济性与生态效益提供理论支撑与实践参考。

关键词：水利工程施工；护坡工程施工；优化策略与建议

引言：水利工程中，护坡工程是保障堤防稳定、防止水土流失的关键防线，其施工质量直接影响工程安全与生态效益。随着气候变化与极端天气频发，传统护坡结构面临冲刷破坏、生态退化等挑战。本文聚焦护坡工程施工技术，结合材料革新、工艺优化及智能化监测手段，系统分析其设计原则、施工要点及创新策略，为提升护坡工程抗灾能力与生态适应性提供理论支撑与实践参考。

1 水利工程施工中护坡工程基本理论分析

1.1 护坡工程的功能与分类

护坡工程核心功能是抵御水流冲刷、防止边坡坍塌，同时兼顾生态保护与景观协调，为水利工程主体结构安全提供重要保障。(1)按材料分类：混凝土护坡采用现浇或预制混凝土构件，具有强度高、抗冲刷能力强的特点，适用于水流湍急、冲刷严重的河段，但生态兼容性较差；生态护坡以植物、生态袋、多孔混凝土等为材料，能实现植被恢复，促进水土交换，保护生物多样性，多用于生态敏感区域；土工织物护坡利用土工布、土工格栅等材料，通过增强土体稳定性、过滤渗水，适用于软土地基或临时护坡工程，施工便捷且成本较低。(2)按结构形式分类：刚性护坡以混凝土、浆砌石等刚性材料为主，结构整体性强，变形小，适用于坡度较陡、荷载较大的边坡，但对地基沉降适应性差；柔性护坡采用土工合成材料、植物群落等柔性结构，能适应边坡变形，缓冲水流冲击，生态效益显著，但承载能力相对较弱；复合护坡结合刚性与柔性结构优势，如“混凝土框架+植被”组合形式，既保证结构稳定性，又兼顾生态功能，在复杂工况下应用广泛^[1]。

1.2 护坡工程的设计原则

(1)稳定性原则：核心是确保护坡结构在水力、重力等荷载作用下，具备足够的抗滑移和抗冲刷能力。设

计中需结合边坡坡度、土体物理力学性质及水流速度，通过验算边坡稳定系数、设置抗滑桩或护脚等措施，防止边坡失稳破坏。(2)生态性原则：注重植被恢复与生物多样性保护，优先选用本土植物品种，避免使用有毒有害材料。通过构建透水、透气的护坡结构，为水生和陆生生物提供栖息环境，减少工程对生态系统的干扰。(3)经济性原则：平衡成本与效益，在满足工程安全和生态要求的前提下，优化设计方案。综合考虑材料采购、施工难度及后期维护费用，选择性价比高的护坡形式，避免过度设计导致成本浪费。

1.3 护坡工程的力学分析

(1)边坡稳定性分析方法：极限平衡法通过假设边坡滑动面，计算滑动面上的抗滑力与滑动力，判断边坡稳定性，计算简便、应用广泛，适用于简单边坡工况；有限元法基于连续介质力学理论，模拟边坡应力应变分布，能考虑土体非线性、渗流等复杂因素，精度较高，多用于大型或复杂边坡的稳定性分析。(2)水力作用下的护坡受力模型：水流冲刷作用下，护坡结构需承受水流剪切力，需通过计算水流摩阻应力，确定护坡材料的抗冲刷强度；波浪力作用下，需考虑波浪破碎产生的冲击力和浮托力，通过建立波浪力计算公式，验算护坡结构的承载能力，防止波浪导致护坡破损。

2 水利工程施工中护坡工程施工关键技术分析

2.1 施工材料选择与优化

(1)传统材料的性能与适用性：混凝土材料具有高强度、高密实性及抗渗抗冲刷能力强的特点，在水流湍急、荷载较大的护坡工程中应用广泛，如河道堤防迎水侧护坡。其中，C25-C30标号的现浇混凝土适用于整体式护坡结构，预制混凝土块则便于标准化施工，可提高效率，但混凝土材料存在生态兼容性差、易因温度应力开裂的问题，需通过添加抗裂纤维、设置伸缩缝等方式

优化。石料（如花岗岩、石灰岩）常用于浆砌石或干砌石护坡，天然石料抗风化能力强、耐久性好，且与自然协调性较高，适用于山区河道或生态要求适中的区域。不过，石料质量受产地影响较大，需严格筛选强度 $\geq 30\text{MPa}$ 、风化程度低的石料，同时控制砌筑缝隙宽度，避免因缝隙过大导致雨水渗入引发边坡失稳。（2）新型生态材料的应用：植被混凝土由水泥、腐殖质、植物种子及外加剂混合而成，兼具混凝土的强度与植被生长的条件，适用于岩质边坡或生态敏感区域，能有效防止水土流失并恢复植被覆盖。施工时需控制水泥用量（通常占比8%~12%），避免影响种子发芽，同时需覆盖无纺布保湿，提高植被成活率。土工格室为三维立体网格结构，由高强度聚乙烯材料制成，铺设后可固定土体或填料，增强边坡整体稳定性，尤其适用于填方边坡或软土地基护坡。其优势在于施工便捷、重量轻，且能与植被结合形成复合护坡系统，通过格室约束土体位移，同时为植物生长提供支撑，在公路边坡、水库岸坡等工程中应用效果显著^[2]。

2.2 施工工艺与流程

（1）基础处理：清基需彻底清除边坡表面的杂草、腐殖土、碎石等杂物，确保基础面平整且承载力均匀，对于软土地基，需采用换填砂石或夯实处理，使地基承载力不低于 120kPa 。夯实采用蛙式打夯机或压路机，分层夯实厚度控制在 $20\text{--}30\text{cm}$ ，压实度需达到93%以上，防止后期地基沉降导致护坡结构开裂。排水环节需在边坡坡脚设置排水沟，或在基础内部铺设透水管，及时排出边坡内部积水，避免积水产生的静水压力破坏护坡基础，排水沟纵坡应不小于0.5%，确保排水通畅。（2）主体结构施工：浇筑施工（如混凝土护坡）需按设计分缝分段进行，模板采用钢模板，安装偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 内，混凝土浇筑时采用振捣棒分层振捣，振捣时间以表面出现浮浆为准，防止出现蜂窝麻面；砌筑施工（如浆砌石护坡）需采用坐浆法砌筑，砂浆强度等级不低于M7.5，灰缝饱满度 $\geq 80\%$ ，且需按设计设置沉降缝，缝宽 $2\text{--}3\text{cm}$ ，填充沥青杉木板止水；植被种植施工（如生态护坡）需选择适宜当地气候的植物品种（如狗牙根、紫花苜蓿），种植时间优选春秋两季，种植后及时浇水，确保根系与土壤紧密结合，种植密度根据植被品种确定，通常为 $20\text{--}30\text{株}/\text{m}^2$ 。^[3]（3）后期养护与监测：混凝土护坡养护需在浇筑完成后12h内覆盖洒水，养护时间不少于7d，避免阳光直射导致表面开裂；植被护坡需定期浇水、施肥，前3个月每周浇水1~2次，确保植被成活率 $\geq 85\%$ 。监测工作包括边坡位移监测与结构状态监测，位移监测采用全站仪或GPS，每季度监测1次，位移量超过 5mm 需及时预警；结

构状态监测通过目视检查或无人机巡检，重点关注护坡是否出现裂缝、沉降、块体松动等问题，发现异常及时采取修补措施（如裂缝灌注环氧树脂、松动块体重砌）。

2.3 施工质量控制要点

（1）常见质量问题：开裂多因混凝土配合比不当、养护不及时或基础不均匀沉降导致，需优化混凝土水灰比（控制在 $0.45\text{--}0.55$ ）、加强养护管理，并确保基础处理达标；沉降主要源于地基压实度不足或填料不均匀，施工中需严格控制地基压实质量，填料分层铺设且每层压实度检测合格后方可继续施工；植被成活率低多因种子选择不当、种植后保湿不当或土壤肥力不足，需筛选本土耐候性种子，种植后覆盖保湿材料，并在土壤中添加有机肥提高肥力。（2）质量检测方法：无损检测适用于混凝土护坡结构，采用超声波检测法检测混凝土内部密实度，声波速低于 3500m/s 需判定为不合格；采用回弹法检测混凝土强度，回弹值需结合碳化深度修正，确保强度达到设计要求。原位试验包括地基承载力试验与抗滑稳定性试验，地基承载力采用平板载荷试验，加载至地基沉降稳定，确定承载力特征值；抗滑稳定性采用原位直剪试验，在边坡现场选取代表性土体，测定土体抗剪强度指标（黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ ），验证边坡稳定系数是否满足设计要求（通常 ≥ 1.25 ）。此外，植被护坡需进行成活率检测，在种植后1个月、3个月分别抽样检测，抽样比例不低于5%，确保成活率符合设计标准^[4]。

3 水利工程施工中护坡工程施工优化策略与建议

3.1 技术优化方向

（1）智能化施工技术：BIM技术可构建护坡工程三维模型，实现设计、施工与运维的全流程可视化管理。在设计阶段，通过BIM模型模拟边坡应力分布，优化结构参数；施工阶段，将模型与现场施工进度关联，实时对比设计与实际偏差，如混凝土浇筑厚度、石料砌筑位置等，偏差超 $\pm 2\text{cm}$ 时自动预警，减少施工失误。无人机监测可替代传统人工巡检，搭载高清摄像头与激光雷达，每周对护坡工程进行全覆盖扫描，快速识别裂缝、沉降等隐患，生成三维点云数据，精度可达厘米级，大幅提升监测效率与范围，尤其适用于大型水库或长距离河道护坡工程。此外，可结合物联网技术，在护坡结构内植入传感器，实时采集温度、位移、渗压等数据，通过云端平台分析数据，提前预判结构风险。（2）绿色施工理念：优先选用低碳环保材料，如将工业固废（粉煤灰、矿渣）按30%~40%比例掺入混凝土，降低水泥用量，减少碳排放，同时保证混凝土强度不低于设计标准；推广可降解土工材料，如玉米淀粉基土工布，替代传统聚乙烯材料，

避免后期环境污染。施工废弃物循环利用方面,对开挖产生的土方进行筛分,合格土方用于护坡回填或植被种植土,浆砌石施工中产生的边角料破碎后用作垫层材料,利用率需达到80%以上,减少资源浪费。此外,优化施工设备能源结构,采用电动压路机、太阳能洒水车等低碳设备,降低施工阶段能耗与尾气排放。

3.2 管理优化措施

(1) 施工组织设计优化:工期安排采用“分段流水施工”模式,根据护坡工程长度与结构类型,划分3-5个施工段,同步开展基础处理、主体施工与养护作业,如第一段进行基础夯实的同时,第二段开展混凝土浇筑,缩短总工期15%-20%。资源调配建立动态管理机制,依据施工进度实时调整人力、材料与设备投入,例如在混凝土浇筑高峰期,增加搅拌设备与运输车辆数量,确保混凝土供应连续;采用“互联网+供应链”模式,通过平台实时监控材料库存,当石料、水泥等关键材料库存低于3天用量时,自动触发采购预警,避免停工待料^[5]。(2) 风险管理与应急预案:建立风险识别清单,针对暴雨、滑坡、材料短缺等常见风险,制定分级响应预案。暴雨天气前,提前加固边坡临时防护,疏通排水系统;配备抽水泵、沙袋等应急物资,现场安排24小时值班人员,降雨量超50mm时启动应急响应。针对边坡滑坡风险,在施工前评估滑坡概率,对高风险区域设置监测点,位移速率超3mm/天及时停工,采用抗滑桩或锚索加固。同时,定期组织应急演练,每年不少于2次,提升施工人员应急处置能力,确保风险发生时能快速响应,减少损失。

3.3 政策与标准建议

(1) 完善护坡工程规范与验收标准:现行规范需细化生态护坡技术要求,明确植被混凝土配比、土工格室铺设间距等关键参数;补充智能化监测设备安装与数据标准,统一无人机监测精度、传感器数据传输格式等要求,避免因标准不统一导致数据无法共享。验收标准方面,增加生态效益指标,如植被护坡成活率需 $\geq 90\%$ 、生物

多样性恢复率需纳入验收范畴;严格混凝土护坡裂缝控制标准,表面裂缝宽度不得超过0.2mm,内部空洞体积占比需 $< 1\%$,确保工程质量与生态效果双重达标。(2) 推动产学研结合的技术创新体系:政府牵头搭建企业、高校与科研机构合作平台,设立专项科研基金,支持护坡工程新技术研发,如新型生态材料、智能施工装备等。鼓励施工企业与高校共建实验室,开展技术攻关,例如研发耐冲刷、高透气性的生态护坡材料;建立技术成果转化机制,对成功落地的创新技术给予税收优惠或补贴,如企业采用自主研发的智能化施工技术,可享受3年减半征收企业所得税政策,加快技术从实验室走向施工现场,推动护坡工程施工技术迭代升级。

结束语

水利护坡工程作为防洪减灾与生态修复的关键载体,其施工技术需兼顾稳定性、经济性与生态性。本文通过理论分析与实践研究,验证了新型生态材料、智能化监测技术及精细化施工管理在提升护坡性能中的显著作用。未来,应进一步推动产学研协同创新,加速低碳材料与数字技术的工程化应用,构建“结构安全-生态友好-智能运维”三位一体的护坡体系,为水利工程建设高质量发展提供可持续解决方案。

参考文献

- [1]曹凌敏,王斌.水利工程中河道生态护坡施工技术研究[J].工程技术研究,2022,7(6):97-99.
- [2]朱以明,陈允生,陆红.水利工程河道生态护坡施工技术[J].珠江水运,2022(5):111-113.
- [3]朱爱林.水利工程施工中护坡工程施工分析与研究[J].黑龙江水利科技,2024(12):153-154.
- [4]徐伯其.水利工程施工中护坡工程施工分析与研究[J].城市建设理论研究,2023(4):75-76.
- [5]王力.水利工程施工中护坡工程施工分析与研究[J].建筑·建材·装饰,2023(24):87.