

水利工程

水运工程高边坡防护锚固排水技术研究

赵现可

中国电建集团港航建设有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8537

[摘要] 水运工程建设期间，高边坡常因水文状况、地质构造及施工干扰等因素，出现失稳、渗水等隐患，直接威胁工程安全与使用寿命。本文以西部陆海新通道（平陆）运河航道工程等实际项目为依托，阐述水运工程高边坡的工程属性及防护诉求，剖析当前锚固与排水技术的应用现状及现存问题，重点探究锚杆（索）锚固技术、排水系统（浅层/深层排水管、盲沟）的设计关键与施工流程，结合工程实例验证技术应用成效，提出技术改进建议，为水运工程高边坡防护提供理论依据与实践参考，助力提升边坡稳定性及长期安全性。

[关键词] 水运工程；高边坡防护；锚固技术；排水系统；边坡稳定性

Research on Anchoring and Drainage Technology for High Slope Protection in Water Transport Engineering

Zhao Xianke

China Power Construction Group Port and Shipping Construction Co., Ltd.

[Abstract] During the construction of water transportation projects, high slopes often encounter hidden dangers such as instability and seepage due to hydrological conditions, geological structures, and construction interference, which directly threaten the safety and service life of the project. This article is based on practical projects such as the Western Land Sea New Channel (Pinglu) Canal Channel Project, and elaborates on the engineering properties and protection requirements of high slopes in water transportation engineering. It analyzes the current application status and existing problems of anchoring and drainage technologies, focuses on exploring the key design and construction processes of anchor rod (cable) anchoring technology and drainage systems (shallow/deep drainage pipes, blind ditches), and verifies the effectiveness of technology application through engineering examples. Technical improvement suggestions are proposed to provide theoretical basis and practical reference for high slope protection in water transportation engineering, and to help improve slope stability and long-term safety.

[Key words] water transportation engineering; High slope protection; Anchoring technology; Drainage system; slope stability

一、引言

(一) 研究背景

航道、港口、运河等水运工程中的高边坡，普遍具有地形复杂、地势起伏大的特征，且地质条件多样，如存在全风化岩与强风化岩夹层等不同地质构造，各类地质体的力学性能与稳

定程度差异明显。同时，这类高边坡长期受水流冲刷和降雨入渗影响，水流持续侵蚀会弱化边坡表层稳定性，降雨入渗则会改变岩土体物理力学性质，增加含水量并降低抗剪强度。

以平陆运河航道工程为例，部分路段边坡高度达 22~100m，且存在不稳定边坡段，加之地下水具备弱腐蚀性，会侵蚀岩土

体及防护结构。若防护措施不合理，极易引发滑坡、坍塌等事故，损害工程本体并威胁周边安全及人员财产安全。因此，需采用科学的锚固与排水技术组合，通过锚固技术增强岩土体整体性，借助排水技术降低地下水负面影响，共同保障高边坡安全稳定。

（二）研究意义

理论层面，针对水运工程高边坡防护专项技术开展深度研究。鉴于水运工程高边坡受水流、地质等多因素综合作用，现有理论体系存在不足，需系统补充相关理论，尤其完善锚固与排水协同作用机制。当前二者协同作用的内在原理、相互影响规律等研究尚不深入，亟需强化理论支撑。

实践层面，结合水运工程高边坡临水、水位变化影响大、水流冲刷力强的独特属性，构建适配技术方案。传统技术在抗渗、抗冲刷及长期稳定性方面存在明显缺陷，如抗渗能力不足导致边坡内部积水、抗冲刷性能差难以抵御长期侵蚀、长期稳定性设计考虑不全面等。通过针对性技术方案设计，解决传统技术弊端，为同类项目提供可行技术参考，推动防护技术发展。

（三）国内外研究现状

1. 国内研究：梳理国内学者在水运工程边坡锚固领域的研究成果，重点分析预应力锚索在不同地质条件和工程规模下的应用方式及效果，深入探讨锚杆抗拔试验的设计方法、操作流程及数据结论。排水系统研究聚焦盲沟布局、尺寸设计及透水管材质选择、铺设间距等关键内容。总结平陆运河、长江航道等重大工程的技术应用经验，剖析存在的锚固与排水协同设计缺失等问题，及其对工程稳定性和耐久性的影响。

2. 国外研究：分析欧美、日本等发达国家的水运高边坡防护先进技术，以新型防腐锚杆和智能化排水监测系统为研究重点。探究新型防腐锚杆的材料特性、防腐机理及在恶劣环境中的使用寿命与性能优势；研究智能化排水监测系统的工作原理、数据采集传输方式及智能分析预警机制。通过借鉴国外技术经验，为国内技术优化升级提供针对性参考。

（四）研究思路与方法

1. 研究思路：以水运工程高边坡受水流冲刷、水位变化影响的独特特性为切入点，先分析锚固与排水技术的核心需求——锚固技术需保障复杂环境下抗外力能力，排水技术需防范积水引发的滑坡风险。进而深入研究两项技术的设计参数与施工关键环节，设计阶段综合考量地质、水文条件制定方案，施工阶段强化工艺控制与质量监管。最后结合平陆运河等实际案例，验证技术应用效果并提出优化方向。

2. 研究方法：采用文献研究法，系统梳理国内外相关理

论与技术资料，包括学术论文、行业报告等，掌握研究现状与发展动态，奠定理论基础。结合工程案例分析法，以平陆运河等典型项目为研究对象，剖析锚固与排水技术的实际应用方式及经验。通过定性分析法归纳理论与实践资料，提炼技术优化策略。

二、水运工程高边坡的工程特性与防护需求

（一）高边坡工程特性

1. 地质复杂性：涉及岩浆岩、砂岩、泥岩等沉积岩夹层，存在全风化、强风化岩层，岩体完整性差，易产生裂隙渗水现象。

2. 环境特殊性：长期受水位波动、水流冲刷作用，汛期等降雨集中时段易发生雨水入渗，加剧边坡孔隙水压力。

3. 施工挑战性：边坡开挖规模庞大，如平陆运河单标段土石方开挖量超 2900 万 m^3 ，施工扰动易破坏原有地质结构，需同步实施防护施工。

（二）防护核心需求

1. 稳定性需求：通过锚固技术提升边坡岩体抗滑能力，防止沿软弱夹层滑动。

2. 抗渗需求：借助排水系统降低孔隙水压力，减少地下水对岩体的软化作用。

3. 耐久性需求：针对水运工程潮汐、盐分侵蚀环境，保障锚固与排水构件的防腐性能。

三、水运工程高边坡防护锚固技术研究

（一）锚固技术类型与适用场景

1. 普通锚杆：适用于高度 $<30\text{m}$ 的中低边坡，如平陆运河护岸工程采用的 $\phi 25\text{mm}$ 、长 3-6m 锚杆，通过水泥砂浆全长锚固工艺，增强表层岩体稳定性。

2. 预应力锚索：适用于高度 $>30\text{m}$ 的高陡边坡或不稳定边坡段，如直立挡墙防护中应用的 1000KN 级锚索，采用多根钢绞线组合，通过锚墩固定提供长期抗拔力。

（二）锚固技术设计要点

1. 参数设计：依据边坡高度、岩体强度确定锚杆（索）间距（通常 3-5m）、孔径（80-150mm）及锚固深度（需深入稳定岩层 $\geq 1.5\text{m}$ ），设计过程符合《水运工程混凝土施工规范》（JTS202-2011）要求。

2. 防腐设计：采用镀锌钢筋、防腐涂层等措施，抵御水运环境中弱腐蚀性地下水与盐分的侵蚀。

（三）锚固施工关键工艺

1. 钻孔控制：使用潜孔钻按设计角度钻孔，控制孔斜偏差 $\leq 1^\circ$ ，钻孔后采用高压风清理岩粉，避免影响锚固效果。

2. 注浆施工：采用水灰比 0.4-0.45 的纯水泥浆或水泥砂浆注浆，确保注浆饱满，注浆压力控制在 0.2-0.3MPa，参考平陆运河施工经验，注浆后养护时间 ≥ 7 天。

3. 张拉与锁定：预应力锚索采用分级张拉方式（设计荷载的 10%-105%），稳压 10-20min 后锁定，经补偿张拉后实施封锚，保障长期锚固力。

四、水运工程高边坡防护排水技术研究

（一）排水系统组成与功能

1. 浅层排水：采用 $\phi 50\text{mm}$ HDPE 透水管，间距 3-6m，包裹 $400\text{g}/\text{m}^2$ 土工布防止堵塞，主要用于排除边坡表层渗水。

2. 深层排水：针对地下水富集区域，布设 $\phi 100\text{mm}$ 深层排水管，深度 20-40m，结合孔隙率 $\geq 25\%$ 的块石盲沟，降低深层孔隙水压力。

3. 截排水设施：边坡顶部设置 C20 混凝土截水沟，底部铺设碎石垫层，阻断坡顶雨水入渗；马道位置设置排水沟，将雨水引入下游排水系统。

（二）排水技术设计与施工要点

1. 布置原则：遵循“上截下排、深浅结合”原则，如平陆运河堆存场边坡，通过坡顶截水沟、坡身浅层排水管、坡底盲沟的组合布局，构建立体排水网络。

2. 施工控制：排水管安装前检查孔内清洁度，透水管包裹土工布时确保搭接长度 $\geq 20\text{cm}$ ；盲沟采用 10-50mm 粒径块石分层填筑，保障排水通畅。

（三）锚固与排水协同设计

锚固技术提升边坡抗滑能力，排水系统降低水压力，二者需协同优化。高边坡锚固段需同步布设排水管，避免锚固区域积水软化岩体；排水盲沟布设需避开锚杆（索）位置，防止影响锚固力传递效果。

五、工程案例应用与效果验证

以西部陆海新通道（平陆）运河航道工程 HD2 标段为实例，该标段部分高边坡采用“锚杆+预应力锚索”组合锚固方案，配套 $\phi 50\text{mm}$ （间距 5m）浅层排水管与 $\phi 100\text{mm}$ （深度 30m）深层排水管。施工后监测数据显示，边坡水平位移 $\leq 2\text{mm}/\text{d}$ 、垂直位移 $\leq 2\text{mm}$ ，孔隙水压力下降 30%-50%，边坡稳定性显著提升，未出现渗水、滑坡等问题，验证了该锚固排水技术体系对水运工程高边坡防护的适配性。

六、现存问题与优化建议

（一）现存问题

1. 技术协同不足：部分工程中锚固与排水设计相互独立，未考虑二者交互影响，如排水管堵塞易导致锚固区域积水，降

低锚固效果。

2. 长期耐久性待提升：水运环境下锚固构件易受腐蚀，部分排水系统存在后期堵塞隐患，影响长期防护效果。

（二）优化建议

1. 强化协同设计：建立锚固与排水参数联动计算模型，结合边坡地质与水文条件，同步优化锚固间距与排水密度，提升整体防护效能。

2. 推广新型材料与技术：采用环氧涂层锚杆等防腐性能更优的构件，应用土工合成材料盲沟等透水性能更佳的排水设施；引入智能化监测系统，实时监测排水流量与锚固力变化，及时预警隐患。

七、结论与展望

（一）研究结论

水运工程高边坡防护需以“锚固抗滑、排水减压”为核心原则，通过合理选择锚杆/锚索等锚固类型、优化浅层/深层排水与截排水系统组合及强化二者协同设计，可有效提升边坡稳定性。工程案例表明，适配的锚固排水技术体系能够满足水运工程复杂环境下的防护需求。

（二）未来展望

未来可深入研究 BIM+监测系统等智能化防护技术，实现高边坡锚固排水的动态管控；探索新型环保材料在锚固排水领域的应用，提升技术的耐久性与可持续性，为水运工程高质量发展提供支撑。

[参考文献]

- [1]中华人民共和国交通运输部. 水运工程混凝土施工规范[S]. JTS202-2011, 北京：人民交通出版社，2011.
- [2]中华人民共和国交通运输部. 水运工程爆破技术规范[S]. JTS204-2023, 北京：人民交通出版社，2023.
- [3]王印，代宝龙. 平陆运河航道工程高边坡防护施工技术[J]. 中国港湾建设，2024，44（3）：45-50.
- [4]刘志强. 水运工程高边坡预应力锚索锚固技术应用研究[J]. 水运工程，2022，（8）：123-128.
- [5]张敏. 水运工程边坡排水系统优化设计与实践[J]. 工程技术研究，2021，6（15）：89-91.
- [6]Brown K A. Standardized Slope Protection for Maritime Engineering: Anchorage and Drainage Systems[J]. Journal of Coastal Research，2020，36（4）：890-898.
- [7]Smith J D. Durability Analysis of Anchoring Materials in Marine Environment[J]. Marine Structures，2019，65：106-118.