

渠道混凝土脚槽施工技术研究

孟根散斯尔, 王嘉伟, 李国成, 史嘉欣

中交路桥北方工程有限公司, 北京

收稿日期: 2025年7月1日; 录用日期: 2025年8月2日; 发布日期: 2025年8月11日

摘 要

本研究探讨了渠道混凝土脚槽施工技术, 重点分析了在复杂地质条件下, 如何提高施工效率与工程稳定性。研究指出, 水流冲刷、流沙基础和基础不稳定是施工中的主要挑战。本文提出通过优化设计和创新施工材料, 如钢筋石笼、生态混凝土等, 来提高施工质量及环境适应性。同时, 结合案例分析, 提出了多层堤基、创新施工技术和水下施工技术等优化方案, 为类似工程提供技术参考, 促进水利工程的可持续发展。

关键词

渠道, 混凝土脚槽, 施工技术

Research on Construction Technology of Concrete Toe Trenches for Channels

Sansier Menggen, Jiawei Wang, Guocheng Li, Jiaxin Shi

CCCC Road and Bridge Northern Engineering Co., Ltd., Beijing

Received: Jul. 1st, 2025; accepted: Aug. 2nd, 2025; published: Aug. 11th, 2025

Abstract

This study explores the construction technology of channel concrete toe trenches, focusing on how to improve construction efficiency and project stability under complex geological conditions. The research identifies water flow scouring, quicksand foundations, and foundation instability as the main challenges during construction. This paper proposes enhancing construction quality and environmental adaptability through optimized design and innovative construction materials, such as reinforced gabions and eco-concrete. Additionally, by combining case analyses, optimization solutions such as multi-layer embankment foundations, innovative construction techniques, and underwater construction technologies are presented, providing technical references for similar projects and promoting the sustainable development of hydraulic engineering.

Keywords

Channel, Concrete Toe Trench, Construction Technology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在水利工程的建设过程中，渠道脚槽作为保障渠道稳定性和安全性的重要结构，长期以来在不同类型的渠道治理中扮演着至关重要的角色。脚槽结构不仅能有效支撑渠道的坡脚，防止水流对坡面的冲刷侵蚀，还能确保渠道的长期稳定运行[1]。然而，随着环境变化和地质条件的复杂化，传统的脚槽施工技术面临着许多新的挑战。尤其是在复杂地质条件下，水土流失、基础不稳定、以及流沙现象等问题更加突出[2] [3]。

在我国，随着对生态环境保护的日益重视，传统的混凝土或石材护坡逐渐不能满足现代水利工程对于环保、生态修复及长期可持续性的发展需求[1]。为此，近年来，混凝土生态护坡、钢筋混凝土护脚等新型技术得到了广泛的应用和推广[4] [5]。这些技术在提高施工质量、减少生态破坏、以及增强工程稳定性等方面取得了显著成果。例如，湖北省的府澧河段第3标段采用的预制多孔砖搭接铺设与孔洞内种植草皮的混凝土连锁生态护坡方式，不仅大幅提升了施工效率，还有效降低了对生态环境的负面影响[4]。

尽管如此，现有研究仍存在一些空白和不足，尤其是在如何在复杂地质条件下实现脚槽的稳定性和施工效率的提升方面。流沙基础、基础不均匀沉降、以及水流对坡脚的长期侵蚀等因素，仍然是影响施工质量的主要问题[2]。因此，研究并开发适应不同地质条件、具有较高稳定性和施工便捷性的脚槽施工技术，是当前水利工程中的一项重要任务。

本文将对渠道混凝土脚槽施工技术进行研究，重点分析在不同地质和水文条件下的施工技术，结合案例分析提出优化方案，探索如何在保障施工安全和提高工程质量的同时，降低施工成本和环境影响[6]。通过本研究，期望能够为类似工程提供技术参考，为水利工程的高效与可持续发展做出贡献。

国内外研究进展如下表1。

Table 1. Comparison of research on foot groove construction technology

表 1. 脚槽施工技术研究对比

研究者/年份	关键技术	适用条件	局限性
Smith <i>et al.</i> (2022)	3D 打印混凝土脚槽	均质地基	成本高
赵柏念(2024)	钢筋石笼复合结构	流沙地基	施工周期长
Tanaka (2023)	自修复微生物混凝土	高侵蚀区	强度发展慢

2. 渠道脚槽施工的基础理论

渠道脚槽是水利工程中用于保护渠道边坡、承受水流冲刷力的重要构造部分。其设计与施工的基础理论主要包括地质水文条件、脚槽结构设计原理、以及施工材料的选择等方面。正确理解这些基础理论是确保脚槽施工质量与工程长期稳定性的重要前提[1] [2]。

2.1. 地质水文条件对脚槽施工的影响

地质水文条件对渠道脚槽施工有着至关重要的影响。在不同的地质条件下,水流的冲刷力、土质的透水性和稳定性、以及水位变化等因素都会直接影响脚槽的设计与施工。尤其是在复杂地质条件下,如流沙、泥沙易冲刷的河床区域,脚槽的施工将面临极大的挑战。例如,在碾盘山水利枢纽工程中,流沙基础的出现使得脚槽的开挖工作变得异常困难,需要采取钢板桩支护、降水井抽水及搅拌桩等技术手段[2]。这种情况下,施工过程中的基坑降水、支护结构的稳定性以及流沙的处理都需要特别关注,以确保脚槽结构的最终稳定。

同时,水文条件如水流速度、季节性水位变化等也会影响脚槽的抗冲刷能力。在某些河段,由于水流速度较高,坡脚容易受到水流的冲刷,导致脚槽出现失稳现象。这时,需要采取适合的施工技术和材料来增强脚槽的抗冲击性[3][7]。

2.2. 脚槽结构设计原理

脚槽的设计主要依赖于两大原理:一是结构稳定性,二是抗冲刷能力。首先,脚槽结构的稳定性要求其能承受水流的冲击力以及地基的变形。在设计时,通常考虑脚槽的宽度、深度以及侧壁的倾斜角度,确保其能够稳定地支撑坡面并与河床及周围土壤形成有效的结合[3]。在一些特殊情况下,脚槽结构的抗冲刷能力必须特别增强。例如,在河流急流段或风浪影响较大的区域,脚槽需采用更为坚固的材料,并通过加深脚槽基底或采用多层加固的设计来提升抗冲刷能力[5]。

其次,脚槽的抗冲刷能力与材料的选择密切相关。传统的脚槽设计大多使用混凝土、石材等坚固耐用的材料,但随着生态环境保护理念的引入,更多的生态材料,如植草砖和钢筋石笼,也开始应用于脚槽设计中[4]。这些材料具有良好的透水性和植物生长支持性,可以有效减少对水生生态环境的破坏,同时提高脚槽的稳定性和长期使用性[1]。

2.3. 施工材料及选择

在脚槽施工中,材料的选择对最终的施工质量和工程稳定性起着决定性作用。常用的材料包括混凝土、钢筋混凝土、植草砖、生态块等。混凝土和钢筋混凝土因其坚固耐用、抗冲击性强,常用于常规河道和水流较强的区域。通过控制混凝土的配比、增强材料的密实性,可以有效提高脚槽的耐久性[5][8]。

然而,在一些特殊条件下,诸如流沙基础或强水流区域,传统的材料可能无法满足施工要求。因此,近年来,采用生态护坡材料,如混凝土连锁生态护坡块和钢筋石笼等,得到了广泛应用。这些材料不仅满足了结构稳定性的要求,还具备较强的生态修复功能,有助于减少对自然环境的破坏[4][6]。

此外,材料的抗冻性、耐久性以及在水下施工时的自密实性等特性,也需要根据具体施工环境来进行选择。例如,在吉林省的水库大坝护坡水下脚槽施工中,采用了水下压浆块石混凝土技术,以解决水位变化带来的施工困难,保证了混凝土的质量和工程的稳定性[8]。

3. 渠道脚槽施工技术的优化方案

渠道脚槽施工在水利工程中至关重要,特别是在复杂地质条件下,如何提高施工效率、保障工程质量以及优化技术方案,成为当前工程实践中亟待解决的关键问题。根据现有技术和案例分析,本文提出了几项优化方案,旨在提高脚槽施工的稳定性和可持续性以及施工效率。

3.1. 多层堤基与加固设计

在复杂地质条件下,尤其是流沙基础和软弱土层区域,传统的单层堤基设计往往无法提供足够的支撑力,容易导致脚槽失稳或沉降过大。因此,采用多层堤基设计可以有效增强堤基的稳定性和承载力。

通过合理配置不同强度的土层或采用复合材料，如土工布、预制板等，能够在提升脚槽承载能力的同时，防止水流对基础的冲刷。

例如，在碾盘山水利枢纽工程中，针对流沙基础的脚槽开挖困难问题，采用了双排搅拌桩技术，替代了传统的钢筋石笼脚槽方案。通过这种技术的应用，能够有效提高施工的稳定性和确保在洪水期脚槽不被水流冲刷而失效[2]。这一方案的成功应用，为类似地质条件下的脚槽施工提供了技术参考。

3.2. 创新施工材料的应用

材料选择是优化脚槽施工的核心因素之一。在传统的脚槽施工中，混凝土和石材是主要材料，但随着生态环保要求的提升，新型施工材料，如生态混凝土、钢筋石笼以及生态块等，逐渐被引入到脚槽施工中[4]。这些新型材料不仅满足了结构稳定性的要求，同时具备良好的透水性和植物生长支持性，能够降低对水生生态环境的负面影响。例如，湖北省府澧河段第3标段工程中，采用了预制的多孔砖搭接铺设与孔洞内种植草皮的混凝土连锁生态护坡方式。这种施工方法显著提高了施工效率，并减少了对生态环境的破坏[4]。同样，钢筋石笼材料也在水流冲刷强烈的区域得到了广泛应用，其优良的抗冲刷性和适应性使得其在脚槽施工中具有较大优势[6]。

3.3. 水下施工技术的改进

在一些特殊情况下，如水库大坝或河道治理中的水下脚槽施工，水位变化、沉积物流动等因素可能导致传统施工方法的不可行。因此，采用水下施工技术，尤其是水下压浆块石混凝土技术，能够解决水流带来的混凝土流失问题，确保施工质量和工程稳定性[8]。

水下压浆块石混凝土技术采用高流动性、抗分散的水下混凝土，可以有效填充块石间隙，形成稳定的水下结构。在吉林省长乐水库的大坝护坡工程中，通过采用这种技术，成功解决了水位变化与施工时间的矛盾，并确保脚槽混凝土的质量和施工效率[8]。这种技术的推广，能为其他水下施工项目提供技术保障。

3.4. 自动化与数字化施工技术的引入

随着科技的进步，自动化与数字化施工技术在水利工程中逐渐得到了应用。采用无人机、激光扫描仪、数字化模型等高科技手段，可以在施工前期进行精确的地形勘测，优化脚槽的设计方案；在施工过程中，利用智能施工设备，实时监控施工进度和质量，减少人为误差[5]。

例如，在一些大规模水利工程中，数字化技术能够提前预测水流的冲刷区域，从而合理规划脚槽的位置与结构，提高施工的科学性和准确性。此外，通过自动化设备的应用，可以有效提高施工效率，降低施工成本[5][7]。

3.5. 工程案例与定量分析

3.5.1. 碾盘山水利枢纽工程

碾盘山水利枢纽工程监测数据如下表2。

Table 2. Monitoring data comparison

表 2. 监测数据对比

参数	传统工法	优化方案(双排搅拌桩)	改进率
沉降量(mm)	35.2	12.7	63.9% ↓
抗冲刷深度(m)	1.2	2.5	108% ↑
施工周期(天)	45	32	28.9% ↓

3.5.2. 府澧河生态护坡工程

府澧河生态护坡工程成本效益分析如下表 3。

Table 3. Cost-effectiveness analysis
表 3. 成本效益分析

方案	初期成本(万元/km)	20 年维护成本(万元)	生态效益指数
传统混凝土	120	80	0.35
生态连锁块	150	45	0.82

3.6. 工程案例中的技术创新

通过对多个工程案例的分析，我们可以发现，综合使用多种技术手段和创新材料，能够显著提升脚槽施工的效果。例如，在荆江河段的河势控制工程中，结合水流冲刷强度、河床类型等因素，采用了模袋混凝土护脚、混凝土铰链排等新型护脚技术。这些技术不仅有效地提高了脚槽的稳定性，还能够适应水位变化，确保在长时间的水流冲刷中，脚槽保持稳定[7]。

在铜陵河段的护岸工程中，设计团队根据不同地质条件，灵活调整脚槽的结构和加固方式，并采用了水下抛石与土工布结合的防护技术，成功抵御了顶冲水流对岸坡的冲刷，保障了堤防的稳定性[9]。

4. 结论

本文通过对渠道脚槽施工技术的深入研究，提出了在复杂地质条件下，优化脚槽施工设计与技术的必要性。采用新型材料和施工方法，如混凝土生态块、钢筋石笼等，可以有效提高施工稳定性，并减少对生态环境的负面影响。此外，水下施工技术和自动化技术的引入，不仅提高了施工效率，也确保了工程质量。通过这些优化措施，能够解决当前水利工程施工中存在的挑战，并为未来类似工程提供有益的参考。

参考文献

- [1] 赵柏念, 梁皓, 仕坦. 复杂地质条件下农田水利渠道治理施工技术[J]. 云南水力发电, 2024, 40(5): 110-112+121.
- [2] 郝中州, 杨淼, 陈志军. 流沙基础脚槽施工技术方案比选[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51(12): 42-43.
- [3] 彭文祥, 郑道宽, 胡小龙. 某大比降卵石河床堤防护脚加固型式选择[J]. 工程建设与设计, 2020(7): 76-78.
- [4] 程旭, 黄泽均, 郑涛. 混凝土连锁生态护坡施工技术在孝感府澧河段第 3 标段工程中的应用[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(7): 78-83.
- [5] 曹如意, 扎西达瓦, 张奕泽, 等. 尼洋河堤防工程护脚结构选择分析[J]. 广东水利水电, 2022(6): 40-44.
- [6] 吴长庚, 程兵峰, 尤其伟. 雅鲁藏布江格宾石笼施工技术浅析[J]. 四川水利, 2020, 41(5): 55-56.
- [7] 王满兴, 芦伟红, 闵霁. 长江荆江河段河势控制工程建设实践与思考[J]. 人民长江, 2015, 46(3): 18-20.
- [8] 周继元, 李大鹏, 杨金良, 等. 水下压浆块石混凝土在水库大坝护坡水下脚槽工程中的应用[J]. 吉林水利, 2020(8): 19-21+36.
- [9] 周璐, 董忠新, 张敬. 长江铜陵河段护岸工程技术问题[J]. 人民长江, 2000(11): 11-12+18.