工程科学与实践
Evidence in Engineering Science and Practice

综述论文

DOI: 10.63221/eesp.v2i03.1-6

亮点:

- 系统综述栅栏式与不规则互锁式连锁块的结构形式及几何特征
- 揭示栅栏式连锁块的增糙消浪与空间连锁协同效应
- 分析不规则互锁式连锁块的立体咬合机理及湿法施工工艺

*通讯作者邮箱:

man200177@163.com

英文引用: Duan Yongqiang et al., 2026. Summary of development and application of concrete interlocking block slope protection technology. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (03), 1-6.

中文引用: 段永强等., 2026. 混凝土连锁块护坡技术发展及应用综述. 工程科学与实践, 2 (03), 1-6.

稿件处理节点:

接收	2026 年 9 月 2 日
修订	2026 年 9 月 9 日
接受	2026 年 9 月 10 日
发表	2026 年 9 月 11 日

基金资助:

本研究未受到基金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

混凝土连锁块护坡技术发展及应用综述

段永强 [1]，谷彤彤 [2]，黄小斌 [1]，韩祐强 [3]，丁轶龙 [1]，冯俊祥 [2]，孙妍 [4]，陈守开 [4,*]

[1] 河南省水利第二工程局集团有限公司，信阳 464000

[2] 河南水投袁湾水库工程有限公司，信阳 464000

[3] 光山县袁湾水库事务中心，信阳 464000

[4] 华北水利水电大学，郑州 450046

摘要 大坝护坡对于保障坝体结构稳定与防洪安全具有重要意义，而混凝土连锁块作为一种高效、经济的护坡材料，近年来得到广泛应用。本文系统综述了混凝土连锁块在大坝护坡工程中的结构形式、几何特征及工程应用进展。首先，明确了护坡对坝体结构的重要性，在此基础上，重点阐述了栅栏式、互锁式连锁块结构形式的特点与几何构造，分析不同几何构造对护坡整体性、透水性及抗冲刷能力的影响。进而，结合工程案例，分析不同形式连锁块在大坝护坡工程中的应用场景、施工要点及应用效果。最后，总结当前混凝土连锁块在大坝护坡应用中存在的问题，并对其未来发展趋势进行展望，为后续大坝护坡混凝土连锁块的结构优化、性能提升及工程应用提供参考与借鉴。

关键词： 混凝土连锁块；大坝护坡；栅栏式连锁块；不规则互锁式连锁块；

Summary of development and application of concrete interlocking block slope protection technology

Duan Yongqiang [1], Gu Tongtong [2], Huang Xiaobin [1], Han Youqiang [3], Ding Yilong [1], Feng Junxiang [2], Sun Yan [4], Chen Shoukai [4,*]

[1] Henan Water Conservancy No.2 Engineering Bureau Group Co..Lt, Xinyang 464000, China

[2] Henan Shuitou Yuanwan Reservoir Engineering Co., Ltd., Xinyang 464000, China

[3] Yuanwan Reservoir Affairs Center, Yuanguangshan County, Xinyang 464000, China

[4] North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

Abstract Dam slope protection is of great significance to ensure the stability of dam structure and flood control safety. As an efficient and economical slope protection material, concrete interlocking block has been widely used in recent years. This paper systematically reviews the structural form, geometric characteristics and engineering application progress of concrete interlocking blocks in dam slope protection projects. Firstly, the importance of slope protection to dam structure is clarified. On this basis, the characteristics and geometric structures of fence-type and interlocking block structures are emphatically expounded, and the influence of different geometric structures on the integrity, permeability and erosion resistance of slope protection is analyzed. Furthermore, combined with engineering cases, the application scenarios, construction points and application effects of different forms of interlocking blocks in dam slope protection projects are analyzed. Finally, the problems existing in the application of concrete interlocking blocks in dam slope protection are summarized, and the future development trend is prospected, which provides reference for the structural optimization, performance improvement and engineering application of concrete interlocking blocks in dam slope protection.

Keywords: Concrete interlocking blocks; dam slope protection; Palisade chain block; Irregular Interlocking Chain Blocks

1. 引言

大坝上游护坡作为水利工程防渗、抗冲、确保坝体稳定的第一道防线[1]，对整个水利工程的长效服役具有不可替代的重要意义。护坡能够有效抵御波浪冲刷、水流淘蚀、雨水侵蚀及水位骤变等水力因素的破坏作用[2]，防止坝坡土石料发生滑移、崩塌或细颗粒流失，从而维持坝坡的整体稳定性。同时，完整的护坡结构还能有效防止水流冲刷和泥沙沉积[3]，阻断地表水下渗路径，降低坝体内浸润线高度，避免渗透压力引发管涌或流土等渗透破坏现象。此外，护坡能够防止土体受到风化、溶蚀和动植物破坏等因素的影响，提高土体的稳定性[4]。

目前，大坝护坡工程中混凝土连锁块技术已逐渐成为一种兼具结构稳定性与施工高效性的主流防护形式[5]。混凝土连锁块护坡具有整体性强、柔性好、适应地基不均匀变形，以及有较好的耐久性和防冲刷功能[6]，其表现出的综合性能要显著优于传统砌石护坡或现浇混凝土更便捷的预制化施工工艺。大坝护坡混凝土连锁块的材料主要以干硬性混凝土为主[7]，该材料具有极低的坍落度、较高的骨胶比和较少的拌合用水量，经高频振动与压力复合作用后即可快速成型，脱模成型与脱模连续且效率高，从而赋予块体高密实度、高早期强度及优异的抗冻融性能[8]。在此基础上，还会根据性能需求掺入适量的矿物掺合料以提高抗冻性与耐久性[9]，以及掺入纤维增强块体的抗裂性与韧性[10]。此外，部分生态型连锁块采用透水性干硬性混凝土或多孔无砂混凝土作为基材，在保证块体结构强度的同时形成连续孔隙，以利于植被生长和生态恢复[11]。连锁块在施工工艺方面以振动压制成型为主，振动压制工艺借助高频振动与压力使干硬性混凝土在模具内快速密实成型，具有生产效率高、块体强度均匀且表面粗糙度可控等优点。综上所述，材料与工艺的选择需根据工程的环境条件、力学要求及生态目标综合确定。

为此，本文围绕混凝土连锁块的结构形式、几何构造以及工程实际案例分析，从大坝护坡发展历程出发，综述典型连锁块的结构类型与几何特征，总结其在不同工程条件下的应用效果，并探讨未来的优化方向。

2. 混凝土连锁块的结构形式及特点

大坝护坡混凝土连锁块从早期形态的传统混凝土预制块或块石护坡逐步演进为经过升级的混凝土连锁块[12]。当前，根据现有资料及文献调查，现有的连锁块结构形式有互锁式、栅栏式、铰接式、网格式、平板连锁式以及植生互锁式，本文主要以栅栏式和互锁式两种类型的结构形式展开论述。

2.1. 栅栏式连锁块概述

栅栏连锁块在大坝工程中可以有效的保证水利工程修建的质量，因为栅栏连锁块的使用可以减小护坡的厚度与坡高。这样的优势在于可以增强大坝坡度与坡顶上消浪的效果，与此同时还提高了大坝结构的稳定性[13]。栅栏连锁块将增糙消浪、栅栏板消浪、空间连锁 3 个方面有机结合，不仅提高了护坡稳定性，能较好地适应坝坡变形，减小波浪爬高，比普通混凝土砌块减小厚度 50%以上，节省投资，而且由于砌块的尺寸比较规则，可采用工厂化、标准化生产，施工方便，缩短工期。栅栏连锁块的轮廓为矩形块，左、右两个对称侧面为平面，前、后两个对称侧面为连锁面，底面为平面，顶面为平面或带有加糙坎的平面；栅栏连锁块从顶面至底面设有贯通性的栅栏透水条孔；连锁面包括中间段、两端段，中间段为上凸下凹或上凹下凸，两端段为上凹下凸或上凸下凹，两端段的每一段形体长度是中间段形体长度的 1/2。栅栏连锁块的生产工艺原理是利用通过试验确定好的低用水量、合理水灰比的干硬性混凝土配合比，采用改造定制的液压、气动系统连锁块挤压机，使干硬性混凝土在模具内快速成型、出模，且出模后不变形、无缺陷，外观平整，楞角完整，生产量满足养护和施工强度需求[14]。

栅栏连锁块区别于其他类型连锁块的核心特征在于其条形开孔结构所带来的独特水力学与生态效应：孔洞通过紊动耗散有效削减波浪爬高，并降低波浪上托力的峰值；同时，贯通的竖向孔道提供了高效的排水路径与连续的植生空间，避免了传统块体仅依赖接缝排水的局限性。然而，栅栏连锁块也存在不容忽视的局限性。首先，该结构对基础垫层的施工质量提出了较高要求[13-14]，若碎石垫层或反滤层铺设厚度不均、压实度不足，局部土体沉陷将导致连锁块间的卡槽脱开，进而形成坡面凹陷或整体松散，这种破坏模式在强降雨或水位骤降条件下尤为突出；其次开孔结构也导致局部断面收缩，使其抗集中荷载与抗冻胀能力弱于同厚度实心块，且根系贯穿与冻胀力可通过孔洞直接作用于块体内部，形成独特的耦合破坏机制。因此，栅栏连锁块的优势在风浪主导、兼顾生态的大型护坡工程中尤

10.63221/eesp.v2i03.1-6

为突出，而在推移质撞击频繁或强冻融区域则需谨慎选用。

2.2. 互锁式连锁块概述

互锁式连锁块根据外形结构、使用场景与功能差异，主要可分为工字型、菱形、六角形、S 形重载型及生态植草型等多种常用类型，其中本文介绍一种新型不规则互锁式连锁块。不规则互锁式连锁块主要用于大坝上游坝面护坡工程，其核心作用主要依靠块体之间的立体咬合与自锁结构，形成整体性强、抗冲刷能力高的防护层，有效抵御库水波浪冲刷、水位骤变及冻融循环等自然因素的破坏作用，保障坝体结构的长期安全与稳定。不规则互锁式连锁块的几何构造以非对称、自锁定的立体咬合为特征，其左、右两侧为平面，前、后两侧为连锁面，顶面设置加糙坎，中间部位设有贯通式栅栏透水条孔；连锁面按中间段与两端段各为 1/2 长度进行划分，分别形成上凸下凹与上凹下凸的互补形态，且同一水平高度处凸起与凹陷的高度相等，模具结构图如图 1 所示。该构造适配湿法生产工艺：采用聚丙烯（PP）材质定制模具，其竖直方向连锁面处设独立可抽离模块，结合上宽下窄的倒梯形定型设计，在混凝土经容积式自动定量布料、高频低幅振动密实后，先抽离模块以释放局部包裹应力，再通过液压振动产生的高频低幅震动破除混凝土与模具内壁的附着力，实现复杂异形结构的快速、完整脱模。

相较于常规的矩形或规则形状连锁块，不规则互锁式连锁块的核心优势首先在于其非对称、变截面的立体咬合构造能够实现多向限位与应力分散，块体间通过上凸下凹与上凹下凸的互补嵌合形成整体性更强的空间锁固体系，从而显著提升护坡抵抗波浪往复冲刷和不均匀沉降的能力；其次是施工生产效率高、人工投入少、模具周转次数多，且因振动密实充分、脱模应力可控，能有效避免异形部位出现气泡、蜂窝、脱皮及掉角等质量缺陷，成品表面光洁、尺寸精确，抗冻抗渗性能显著优于传统挤压成型工艺。然而，这种不规则几何构型也带来了常规连锁块所不具备的施工复杂性：其异形凸齿、增糙坎及透水条孔等构造对模具设计与脱模工艺提出了更高要求，湿法生产阶段必须依赖可拆卸模块与高频低幅振动才能实现完整成型，一旦控制不当便容易出现掉角、卡模或局部密实不足等质量缺陷，而传统规则连锁块则可借助挤压成型实现更简洁高效的生产流程。综上所述，不规则互锁式连锁块适用于水利工程大坝上游坡面中对抗冻性、抗渗性及外观质量要求较高的不规则互锁式连锁块护坡施工。

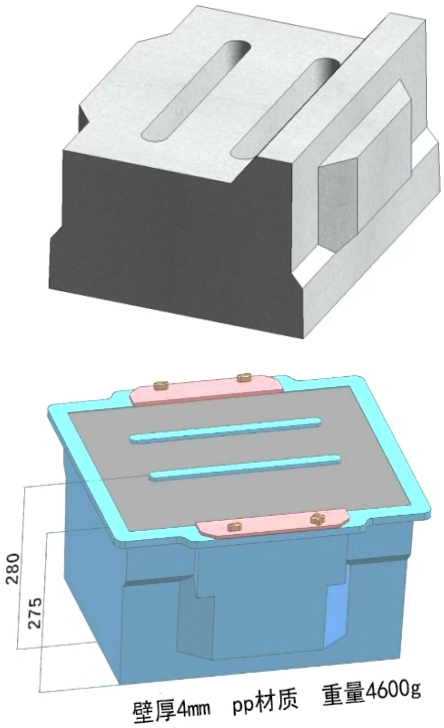

图 1 模具结构图

3. 混凝土连锁块的工程应用

栅栏式连锁块和不规则互锁式连锁块均有实际的工程实例应用，其中以鸭河口水库和袁湾水库为例介绍在实际工程中的应用。

3.1. 栅栏连锁块在鸭河口水库中的应用

鸭河口水库位于河南省长江流域汉江支流唐白河水系白河上游，控制流域面积 3030km^2，总库容 13.16 亿 m^3。该大坝上游护坡原为干砌块石结构，经多年运行后出现不均匀沉陷、块石松动、反滤料流失等病害，亟需拆除重建。受料源、施工工期及环境移民条件限制，传统块石护坡难以满足工程要求。面对上述问题，经多方案比选与水工模型试验验证，最终采用新型栅栏混凝土连锁块护坡方案，砌块总数达 50 万块，设计厚度 240 mm，较普通混凝土砌块厚度减少 50%以上。该工程采用的连锁块平面尺寸为 500 mm×400 mm×240 mm，开孔率 7.0%，混凝土强度等级 C20，抗冻标号 F100，垫层采用 250 mm 厚（20~40 mm）与 150 mm 厚（2~20 mm）两级碎石反滤料，压实度不低于 0.7，并沿坝坡每 50 m 设置一道横向锚固梁。施工采用干硬性混凝土挤压成

型工艺，连锁块自下而上错缝铺砌。工程实践表明，尽管栅栏连锁块单价为 460 元/m³，单方造价会高于干砌块石及普通混凝土预制块，但由于其厚度显著减小、施工周期缩短、模具使用量与人工投入降低，整体节省投资近 1000 万元。同时，该护坡型式避免了传统块石护坡对生态环境的影响，护砌质量易于控制，铺筑后块体之间无松动现象，护坡表面平整、稳定性良好，显著提升了工程度汛安全性与大坝长期服役性能。

3.2. 不规则互锁式连锁块在袁湾水库中的应用

袁湾水库位于河南省信阳市光山县属于淮河流域潢河支流上游，总库容达 2.43 亿 m^3，控制流域面积 480 km^2，是一座以防洪为主，结合供水、灌溉，兼顾发电、改善生态等综合功能的水库[15]。该工程土坝标段上游护坡设计采用不规则互锁式混凝土连锁块，设计强度等级为 C30，抗冻标号 F150，连锁块总数约 22 万块，混凝土用量约 1×10^4 m^3。工程于 2024 年 3 月开工，目前仍在施工中。

针对不规则互锁式连锁块结构复杂，包含连锁凸齿、增糙坎及贯穿式栅栏透水条孔等异形部位，传统挤压成型工艺难以满足高抗冻抗渗要求的施工难题，工程创新性地采用了湿法生产工艺及配套工法。不规则互锁式连锁块的成功应用在于：采用聚丙烯（PP）材质定制模具，模具设置独立可抽离模块，并采用上宽下窄的倒梯形定型设计；施工过程中，通过自动定量分料机实现精准布料，经高频低幅振动密实后，先抽离模块，再借助液压振动实现复杂异形结构的快速、完整脱模。配合优化的常态混凝土配合比（水胶比 0.46、砂率 41%），试配强度达 38.4 MPa，且经 150 次冻融循环后相对动弹模量大于 60%、质量损失小于 5%，满足 F150 抗冻指标要求。工程实践表明，该湿法生产工艺取得了显著的应用效果，袁湾水库的铺设效果如图 2 所示。首先，在质量方面，成品连锁块外观光洁、色泽一致，异形结构成型完整，无传统挤压工艺常见的脱皮、掉角、蜂窝麻面等缺陷，实体质量与外观质量均优于设计要求；其次，在施工效率与成本方面，PP 模具周转次数可达 40 次，配合自动化生产流程，设备与模具总投入约 82 万元，较传统振动挤压成型工艺（约 150 万元）减少成本约 68 万元。

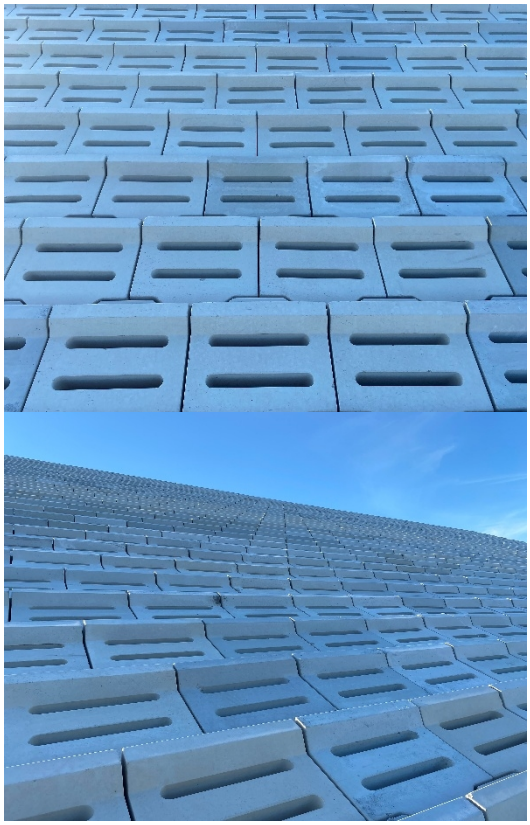

图 2 袁湾水库湿法生产连锁块铺设效果

4. 结论

本文重点分析了栅栏式与不规则互锁式两类新型连锁块的结构形式、几何特征及其在大坝护坡工程中的应用效果。当前，混凝土连锁块护坡技术在材料、结构及施工工艺方面已取得重要进展，但仍然存在连锁块对其地基沉降不均匀、修复难度大且成本高；消浪效率不足，波浪爬高较大，增加越浪风险；基础垫层施工质量要求高、异形结构脱模工艺复杂、抗冻胀与抗集中荷载能力有限等问题。未来研究应进一步优化连锁块几何构型与材料配比，发展智能化、模块化施工装备，强化生态功能与耐久性能的协同设计，推动混凝土连锁块护坡技术向更高效、更耐久、更生态的方向发展。

参考文献

[1] 柴换成. 山东大型水库工程老化程度分析研究[D]. 中国海洋大学, 2009.

[2] 雍磊. 水利工程施工中护坡工程技术[J]. 大众标准化, 2026, (08):49-51.

[3] 陈瑶. 蓝田县灞源镇北川河沟口村段及青坪村上游段防洪工程设计[J]. 地下水, 2026, 48(02):267-269.

[4] 张永辉, 王健, 黄明, 等. 水库土石坝堤防透水渗流控制措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (17):193-195.

[5] 卢俊峰. 港口高强连锁块面层施工中的铺设工艺与抗压性能优化[J]. 珠江水运, 2025, (05):59-61.

[6] 蔡军, 蔡建成. 城市河道黑臭水体暨污染底泥治理技术及标准探讨[J]. 冶金管理, 2021, (09):155-156.

[7] 孙立强. 成型工艺参数对联锁块混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2018, (06):108-111.

[8] 唐兴滨, 陈强, 刘海滨, 等. 干硬性混凝土力学性能及增韧改性研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2025, (05):33-38.

[9] 崔恩彤. 干硬性混凝土抗冻配合比及低温性能试验研究[D]. 东北农业大学, 2019.

[10] 梁宁慧, 毛金旺, 刘新荣, 等. 玄武岩-粗聚丙烯纤维干硬性混凝土拉压性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(06):1946-1954.

[11] 马法珍. 河湖护坡工程中生态联锁块护坡技术的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(07):50-51.

[12] 林捷. 市政道路桥梁施工中现场施工技术的运用及管理初探[J]. 居舍, 2022, (06):52-54+99.

[13] 高欣. 试析新型栅栏连锁块在大坝护坡中的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2017, (02):240.

[14] 刘兰勤, 袁清超, 董振锋. 新型栅栏连锁块在鸭河口大坝护坡中的应用[J]. 人民长江, 2012, 43(10):14-16.

[15] 赵一帆, 彭可. 袁湾水库正式下闸蓄水[N]. 河南日报, 2025-10-31(002).