

2.2 砂堵核心机理

基于施工分析、物性数据及数值模拟，揭示砂堵的两大核心机理：

2.2.1 非均质性诱导裂缝失衡转向与缝宽骤缩：

层间渗透率差异巨大（如层 4/层 7 相差 226 倍>100 倍）是主因。当主裂缝延伸至高、低渗层界面时，裂缝尖端应力场失衡，被迫转向低应力或低强度路径。

关键危害：裂缝转向区域应力集中，导致缝宽急剧缩窄（模拟及诊断显示可<2mm）。当缩窄后的缝宽接近或小于支撑剂粒径的 5 倍时，支撑剂运移受阻，在转向入口处快速富集，形成砂桥堵塞。数值模拟表明，渗透率差异>100 倍时，转向区缝宽萎缩风险激增。

2.2.2 高泥质层塑性变形致缝宽萎缩与导流能力损失：

泥质含量>15%的层段（如层 8，18.29%），岩石塑性指数升高（>0.35），在高闭合应力下易发生显著塑性变形。

关键危害：支撑剂颗粒嵌入塑性软地层，不仅减小了有效支撑缝宽，更大幅提高了缝宽闭合速率。实验及模拟表明，在同等应力下，高泥质层段有效导流能力损失率可达低泥质层的数倍。缝宽的快速萎缩使支撑剂从可运移状态迅速转变为堵塞态。

酸蚀形成的高渗漏失通道未被有效暂堵，加剧了压裂液及支撑剂向高渗层的分流，破坏了流体在缝内的均衡分配，间接促进了低渗/高泥质层段附近裂缝的不稳定扩展和砂堵风险。

综上，曙二区杜家台粉砂岩压裂砂堵本质是“强非均质性诱导的流体动力失稳”与“高泥质层地质力学失效（塑性变形）”耦合作用的结果。

3.防治对策与优化建议

针对上述砂堵机理，提出以下综合优化方案：

3.1 材料优化

支撑剂：优先采用小粒径（40/70 目，0.212~0.425 mm）树脂涂层砂替代常规 20/40 目（0.425~0.85 mm）石英砂。小粒径降低了对最小缝宽的要求；树脂涂层增强了颗粒抗破碎能力，并显著减少支撑剂嵌入深度（实验与模拟表明可降低约 60%），维持更稳定的长期导流能力。

3.2 工艺优化

（1）暂堵转向：前置液阶段在酸液中或酸后注入 40~70 目石英砂段塞或纤维暂堵剂，旨在有效封堵酸蚀沟通的高渗漏失通道，迫使后续压裂液更均匀进入各层段，降低非均质性影响，并可能促进多裂缝均衡扩展。

（2）变排量动态调控：摒弃恒定排量（原 4.5 m³/min）模式，实施动态排量调控（4.0~5.8 m³/min）。通过实时监测

压力响应，在预测裂缝转向或进入高风险层段（高泥质）时，适时提高排量以增加净压力、维持缝宽>4.5mm，保障支撑剂顺利通过。

（3）砂比优化：将线性递增砂比改为阶梯式平稳增加（如起始 12%，逐步提升至目标 18%+），避免砂比突变诱发局部浓度富集。

（4）压裂层段优选：在条件允许时，优先选择改造脆性较高（石英含量高）、泥质含量低（<10%）的层段，从源头上降低非均质性和塑性变形风险。

4.结论

（1）辽河油田曙二区杜家台粉砂岩地层压裂砂堵的主要原因为：层间强非均质性（渗透率差异>100 倍）诱发裂缝失衡转向，导致转向区缝宽骤缩至临界值以下（<2mm）；以及高泥质含量层段（>15%）塑性变形显著，支撑剂嵌入深度大、缝宽闭合速率快。两者耦合作用引发支撑剂流体动力失稳与几何堵塞。

（2）前置液酸蚀形成的高渗漏失通道若未有效暂堵，将破坏压裂液均衡分配，加剧主裂缝在高、低渗界面处的失稳转向风险。

（3）针对性地提出了“小粒径树脂涂层支撑剂+变排量动态调控+暂堵转向”三位一体的优化工艺方案。该方案通过材料优选（降低嵌入、适应窄缝）、工艺改进（维持缝宽、均衡进液、平稳加砂），可有效降低强非均质性、高泥质粉砂岩地层的压裂砂堵风险。

（4）建议在后续施工中结合地应力精细测试及 XRD 矿物组分分析，进一步优化层段选择与施工参数设计。

[参考文献]

- [1]ECONOMIDES M J.NOLTE K G.Reservoir Stimulation[M]. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2000.
- [2]张士诚，王雷，马新仿.压裂裂缝扩展与砂堵预测模型[J].石油勘探与开发，2020，47（6）：1318-1326.
- [3]American Petroleum Institute.Recommended Practice for Measurement of Proppant Embedment Conductivity Damage under Cyclic Loading: API RP 19D[S]. Washington, DC: API, 2019.
- [4]中国石油天然气集团有限公司辽河油田分公司.辽河油田公司井下作业井控实施细则：中油辽宁〔2023〕109 号[A].2023.
- [5]中华人民共和国能源行业标准.水力压裂用支撑剂性能测试方法：SY/T 5108-2014[S]. 北京：石油工业出版社，2014.

埋石混凝土挡墙在生态护岸工程中的应用与性能评估

吴棋焱

福建省福州市福清市人民政府音西街道办事处综合技术保障中心 福建福清 350300

DOI:10.12238/jpm.v6i8.8290

[摘要] 埋石混凝土挡墙作为一种创新的生态护岸技术，在水利工程领域展现出显著的技术优势。该技术通过科学配比设计与精细施工工艺，实现了工程结构与生态环境的有机融合。其独特的结构形式既保证了防洪安全的基本需求，又兼顾了水体交换和生物栖息等生态功能。在长期运行过程中，该挡墙表现出优异的稳定性和环境适应性，为解决传统护岸工程中生态效益与工程效益难以兼顾的问题提供了有效方案。

[关键词] 生态护岸；埋石混凝土；结构优化；环境协调

Application and performance evaluation of buried stone concrete retaining wall in ecological revetment engineering

Wu Qiyao

Comprehensive Technical Support Center of Yinxi Street Office,
Fuqing City People's Government, Fuzhou City

[Abstract] As an innovative ecological revetment technology, buried stone concrete retaining walls have demonstrated significant technical advantages in the field of water conservancy engineering. This technology achieves the organic integration of engineering structure and ecological environment through scientific proportioning design and refined construction techniques. Its unique structural form not only ensures the basic needs of flood control safety, but also takes into account ecological functions such as water exchange and biological habitat. During long-term operation, the retaining wall exhibits excellent stability and environmental adaptability, providing an effective solution to the problem of balancing ecological and engineering benefits in traditional revetment projects.

[Key words] ecological shoreline protection; Buried stone concrete; Structural optimization; Environment Co-ordination

引言

近年来，埋石混凝土不仅仅在国内工程建设中得到广泛应用，在国际水利水电工程中同样受到青睐。埋石混凝土也称抛石混凝土，是通过混凝土与石料的充分浇筑而形成的一种独特的结构形式，具有良好的耐久性、稳定性和抗冲刷性，广泛应用于道路、桥梁、水利水电工程等多个领域。埋石混凝土的合理运用，成功解决了水下浇筑、复杂裂隙充填等一系列施工难题^[1]。在河道治理相关工程中，埋石混凝土常用于挡墙设计，需综合考虑地质条件等多方面因素，在保证工程安全的前提下，优化挡墙设计尺寸，确保挡墙稳定性，可以满足工程的安全性要求。但对于某些经济性要求较高的工程，可能并不适用。鉴于此，本文以古路溪护坡修复工程、太城溪菜安村护岸修复工程为研究对象，在现状河道地质勘察成果的基础上，因地制宜选择埋石混凝土挡墙设计型式，并针对不同地质河段挡墙设计最小安全埋深、施工方法及工艺等提出要求，以期为类似相关河道治理工程设计提供指导^[2]。

1 埋石混凝土挡墙概述

1.1 埋石混凝土的定义与特点

埋石混凝土是一种在普通混凝土中掺入 20%~50%块石（粒径通常大于 15cm）的复合材料，兼具混凝土的结构强度和块石的生态适应性。其抗压强度可达 C20~C30，弹性模量较普通混

凝土降低 15%~20%，具有较好的抗裂性和变形适应能力。由于块石的掺入，其渗透系数显著高于常规混凝土，有利于水体交换和生态功能发挥。此外，埋石混凝土的耐久性表现优异，在冻融循环、冲刷侵蚀等环境下仍能保持较高稳定性，适用于长期暴露于水环境的护岸工程^[3]。

1.2 挡墙的结构与设计原理

埋石混凝土挡墙通常由基础、墙身和排水系统三部分组成。基础采用扩大式或桩基结构，埋深不小于墙高的 1/10，以确保抗滑移稳定性；墙身多采用梯形或重力式断面（坡比 1:0.3~1:0.5），通过自重力抵抗土压力和水流冲击。设计时需遵循极限平衡理论，验算抗滑移（安全系数 ≥ 1.3 ）、抗倾覆（安全系数 ≥ 1.5 ）及地基承载力等关键指标。同时，挡墙需设置排水孔（间距 2~3m，孔径 5~10cm）以降低静水压力，并在临水侧采用糙面处理或生态孔洞设计，增强生物附着能力^[4]。

2 生态护岸工程需求分析

2.1 生态护岸的功能与目标

2.1.1 防洪功能

生态护岸的首要目标是确保河岸的防洪安全，需满足设计洪水水位下的结构稳定性。与传统刚性护岸相比，生态护岸通过柔性结构和透水材料降低水流冲击力，减少局部冲刷风险。同时，其坡面糙率可减缓流速，促进泥沙沉积，增强河床稳定性。

防洪标准通常要求达到20~50年一遇洪水防御能力，并在极端水文条件下保持整体结构完整性。

2.1.2 生态保护功能

生态护岸的核心目标是恢复河岸带生物栖息环境，提升水体自净能力。其结构设计需考虑孔隙率(15%~30%)和表面糙度($R_n \geq 0.025$)，以促进植物生长、微生物附着及鱼类栖息。研究表明，合理的生态护岸可使底栖生物多样性提高30%~50%，并有效降低水体中的氮磷含量(TP去除率15%~25%)。

2.1.3 景观与亲水功能

现代生态护岸强调人与自然的和谐互动，需兼顾景观美学和公共使用需求。通过阶梯式、缓坡式或湿地式设计，增强岸线的可达性和观赏性。景观目标包括植被覆盖率($\geq 60\%$)、视觉通透性及休闲设施配套，使护岸成为城市滨水空间的重要组成部分。例如，采用天然石材与本土植物搭配，可营造季节性的景观变化，提升环境亲和力。

2.2 工程对挡墙的要求

2.2.1 结构稳定性要求

挡墙需具备足够的抗滑移和抗倾覆能力，安全系数分别不低于1.3和1.5。设计时需考虑土压力、水流冲击及地震荷载的组合作用，并通过基础埋深($\geq 1/10$ 墙高)和断面优化(如梯形重力式)确保长期稳定性。此外，挡墙应适应地基不均匀沉降，避免因变形过大导致结构开裂或功能失效^[5]。

2.2.2 透水性生态兼容性要求

生态护岸要求挡墙具备一定的透水能力，以维持地下水交换和减少静水压力。结构上需设置排水孔(间距2~3m)或采用多孔混凝土材料，同时表面应设计生态孔洞或糙面处理(生物附着面 $\geq 30\%$)，促进植物根系固着和水生生物栖息。

2.2.3 耐久性与维护便利性要求

挡墙需在长期浸水、冻融循环及冲刷环境下保持性能稳定，设计寿命一般不低于30年。材料应具备抗侵蚀、抗冻融(冻融循环次数 ≥ 100 次)及抗生物腐蚀能力。此外，结构设计需便于后期维护，如采用模块化拼装、可更换的生态构件等，以降低全生命周期内的养护成本。

3 埋石混凝土挡墙在生态护岸工程中的应用

3.1 应用案例介绍

以福建省福清市龙溪村古路溪护坡修复工程为例，该工程因台风“海葵”引发洪水导致原土质护坡严重损毁，采用埋石混凝土挡墙进行修复。挡墙总长220.14m，设计为重力式断面，埋石率20%，墙身采用C20埋石混凝土，基础埋深1.2m以抵抗20年一遇洪水的冲刷。工程通过设置DN75PVC排水管(间距2m $\times$ 2m)和抛石护脚(单块石重 >30 kg)增强透水性及抗冲能力，同时结合仿木栏杆及透水砖步道提升景观亲水性。项目总投资186.42万元，工期3个月，建成后有效保障了沿岸村民生命财产安全，并改善了河道生态功能。

3.2 施工工艺与流程

3.2.1 石料选择与预处理

工程选用新鲜块石，单块粒径大于15cm，强度等级不低于MU30，含泥量小于5%。石料就近采购自阳下北山花岗岩料场，运输前需清除表面风化层及杂质。施工中按埋石率20%分层投放，石块间距不小于10cm，确保混凝土包裹均匀。抛石护脚采用级配块石(100~300kg占比70%)，孔隙率控制在30%以内，以增强抗冲刷稳定性。

3.2.2 混凝土浇筑与振捣

采用C20埋石混凝土，配合比为水泥：砂：碎石=1：2.5：

4(重量比)，水灰比0.45。浇筑前基础需铺设150mm厚C20素混凝土垫层。施工采用分层浇筑(每层 ≤ 1.5 m)，先浇筑底层混凝土至30cm厚，再人工投放块石，随后继续浇筑覆盖。振捣使用插入式振动棒(功率2.2kW)，遵循“快插慢拔”原则，间距不超过40cm，确保密实度。面层采用M10浆砌块石贴面(厚300mm)，外露部分勾缝处理以增强美观性。

3.2.3 排水系统与养护

墙身按梅花形布置DN75PVC排水管，进口处设砂碎石反滤包(粒径5~20mm)防止淤堵。混凝土终凝后12小时内覆盖麻袋保湿养护，每日洒水4~5次，养护期不少于7天。施工期间避开雨季，并采用土袋围堰(高2m)导流，确保基坑干燥。

3.3 应用优势与局限性

3.3.1 应用优势

埋石混凝土挡墙在生态护岸工程中具有显著的经济性、生态兼容性和结构适应性。其综合造价(5288元/延米)较悬臂式挡墙降低9.6%，且利用本地石料减少运输成本。结构上，20%~30%的孔隙率设计促进水体交换，结合排水孔及糙面处理，实测藻类附着密度提升3倍，增强生态功能。同时，该挡墙适用于卵石层及风化岩地基，抗冲刷深度达1.18m(20年一遇洪水)，抗震设防烈度7度条件下抗滑稳定安全系数1.32，满足长期稳定性需求。

3.3.2 局限性

该技术亦存在施工效率低、质量控制难及景观协调性不足等局限。人工投石及分层浇筑工艺导致日均进度仅8~10m，较纯混凝土挡墙效率降低30%。块石分布不均易引发局部强度离散(变异系数0.15)，需严格振捣与养护管理。此外，刚性结构与自然岸线视觉差异较大，需通过表面绿化或仿生贴面(如浆砌石饰面)弥补景观缺陷，增加额外成本。

4 埋石混凝土挡墙性能评估

4.1 评估指标体系构建

4.1.1 力学性能指标体系

力学性能评估是挡墙结构安全的核心指标，主要包括抗压强度、抗滑稳定性、抗倾覆稳定性、基底应力和抗冲刷能力五大类。根据龙溪村工程设计要求，挡墙混凝土抗压强度需达到C20-C30标准；抗滑稳定安全系数在基本组合工况下不低于1.20，特殊组合工况下不低于1.05；抗倾覆安全系数要求达到1.40-1.45；基底最大应力不得超过地基承载力350kPa；同时需满足20年一遇洪水冲刷深度(1.18m)下的稳定性要求。

4.1.2 生态性能指标体系

生态性能评估重点关注挡墙对周边生态环境的影响，包含水文连通性、水质净化能力和生物栖息环境三大方面。具体指标包括：孔隙率控制在15%-25%以维持水体交换；渗透系数保持在 10^{-4} - 10^{-3} cm/s范围；水质改善效果要求TP去除率达到18%-25%；生物多样性指标要求藻类附着密度提升3-5倍，同时为鱼类等水生生物提供栖息空间。此外，表面糙度($R_n \geq 0.025$)和生态孔洞设置($\geq 30\%$ 覆盖率)也是重要的评估内容。

4.1.3 耐久性指标体系

耐久性评估着眼于挡墙的长期服役性能，主要考察材料抗老化能力和结构完整性。关键指标包括：混凝土抗冻融循环次数 ≥ 100 次；氯离子渗透系数 ≤ 0.023 ；抗侵蚀性能要求在水流速度4.75m/s条件下年磨损率 <1 mm；结构裂缝宽度限制在0.2mm以内。同时需监测抛石护脚的稳定性，要求单块石重 >30 kg且年位移量 <5 cm。

4.2 力学性能评估

基于龙溪村工程现场检测和数值模拟结果，埋石混凝土挡墙的力学性能指标均满足设计要求。通过 FLAC3D 软件模拟和现场载荷试验，获得了挡墙在不同工况下的力学响应数据，具体测试结果如下表所示：

表1 力学性能测试结果

评估指标	测试值	设计要求	合格标准
抗压强度 (28d)	C22-C28	$\geq C20$	合格
抗滑安全系数	1.32-2.98	≥ 1.20	合格
抗倾覆安全系数	1.69-2.88	≥ 1.40	合格
基底最大应力 (kPa)	75.42-118.52	≤ 350	合格
冲刷深度 (m)	1.18	≤ 1.20	合格

分析表明，挡墙结构在完建、设计和骤降三种工况下均表现出良好的力学性能。特别是在 20 年一遇洪水条件下，实测抗滑安全系数达 2.98，远超规范要求的 1.20，证明挡墙具有足够的安全储备。基底应力分布均匀，最大应力 118.52kPa 仅为地基承载力 350kPa 的 34%，说明基础设计合理。冲刷深度 1.18m 与设计值 1.20m 基本吻合，验证了基础埋深 1.2m 的抗冲刷效果。

4.3 生态性能评估

通过对工程运行 1 年后的跟踪监测，获得了挡墙生态性能的实际效果数据，具体监测结果如下表所示：

表2 生态性能监测结果

评估指标	监测值	基准值	改善效果
孔隙率 (%)	18-22	原河道 5-8	显著提高
TP 去除率 (%)	20-23	原河道 10-12	提升 83%
藻类密度 (个/cm ²)	35-42	原河道 8-12	增加 3.5 倍
底栖生物种类	9 种	原河道 3 种	增加 200%

监测数据显示，埋石混凝土挡墙显著改善了河道生态环境。孔隙结构使水体交换量增加，TP 去除率达到 20-23%，较修复前提升 83%。挡墙表面形成的生物膜为藻类和底栖生物提供了良好栖息环境，藻类密度达到 35-42 个/cm²，底栖生物种类由 3 种增加到 9 种。排水孔和糙面处理有效促进了生物附着，NBS 指数提升 0.28，实现了工程结构与生态环境的和谐共生。

4.4 耐久性评估

经过 2 年的运行观测和实验室加速试验，挡墙耐久性评估结果如下表所示：

表3 耐久性评估结果

评估指标	测试结果	标准要求	评价等级
冻融循环 (次)	120-150	≥ 100	优良
氯离子渗透系数	0.021-0.023	≤ 0.030	合格
表面磨损率 (mm/a)	0.8-1.0	≤ 1.2	良好
裂缝宽度 (mm)	0.1-0.15	≤ 0.2	优良
抛石位移量 (cm)	3.2-4.8	≤ 5.0	合格

耐久性评估结果表明，挡墙材料性能稳定，混凝土经 120-150 次冻融循环后强度损失率 $<15\%$ ，满足严寒地区使用要求。氯离子渗透系数 0.021-0.023 显示混凝土密实度良好，预计使用寿命可达 30 年以上。抛石护脚年位移量 3.2-4.8cm，在允许范围内，结构整体完整性保持良好。表面磨损率 0.8-1.0mm/a 与设计预期相符，证明挡墙具有优异的抗水流侵蚀能力。

5 提升埋石混凝土挡墙性能的措施

5.1 材料优化

材料优化是提升挡墙性能的基础措施。可以采用掺入 5-8%

稻壳灰的混凝土配方，可显著提高抗渗性能（渗透系数降低 25%），同时利用再生骨料替代部分天然骨料（替代率 $\leq 30\%$ ）以降低环境影响。石料选择应严格控制质量，采用新鲜花岗岩或凝灰岩，单块粒径控制在 15-30cm，抗压强度 $\geq MU30$ ，含泥量 $<3\%$ 。混凝土配合比优化为水泥：砂：碎石=1：2.2：3.8（重量比），水灰比 0.42，并添加高效减水剂（掺量 0.8-1.2%）以提高工作性和早期强度。针对腐蚀环境，可采用抗硫酸盐水泥或掺入硅灰（5-10%）来提高耐久性，使氯离子渗透系数降至 0.015 以下。

5.2 结构改进

结构改进应着重提升挡墙的生态功能和稳定性。采用曲面组合式设计可使水力效率提升 12%，减少局部冲刷风险。建议将传统重力式断面优化为阶梯式生态断面，设置宽度 30-50cm 的生态平台（间距 1.5-2m），种植耐水植物以增强护坡效果。在墙身增设生态孔洞模块（孔径 15-20cm，占比 $\geq 30\%$ ），为水生生物提供栖息空间。基础部分可采用扩大式桩基联合基础，将埋深从 1.2m 增至 1.5m，并设置防冲刷齿墙（深 0.8m）。排水系统改进为三层反滤结构（砂层+碎石层+土工布），排水管道间距加密至 1.5m $\times$ 1.5m。

5.3 施工质量控制

施工质量控制是确保挡墙性能的关键环节。建立 BIM-QC 联动系统，实现从材料进场到养护的全过程数字化管理。采用振动拌和工艺（频率 50-60Hz）可使混凝土强度离散性降低 25%。石料投放实行“三定”原则：定时（混凝土初凝前）、定量（埋石率 20 $\pm$ 2%）、定位（间距 ≥ 10 cm）。浇筑时严格控制分层厚度（ ≤ 1.2 m）和振捣参数（插入式振动棒，间距 ≤ 35 cm）。创新采用生态模袋混凝土包裹工艺处理临水面，增强抗冲刷性。养护阶段实施“双覆盖”法：先铺土工布保湿，再加塑料薄膜保温，养护期延长至 14 天。关键工序如基础开挖、混凝土浇筑等实行“三检制”，并采用三维激光扫描（误差 <3 mm）进行成品验收。

结论

埋石混凝土挡墙作为一种新型生态护岸结构，成功解决了传统护岸工程中生态功能与结构安全的矛盾问题。工程实践表明，该技术具有施工便捷、造价合理、适应性强的特点，其力学性能和耐久性完全满足工程要求。特别在改善水体交换、促进生物多样性等生态功能方面表现突出。通过优化材料配比、改进结构设计和严格施工控制，可进一步提升挡墙的综合性能。

[参考文献]

- [1]管飞, 黄天元, 刘飞. C20 埋石混凝土在河道治理工程中的应用与研究 [J]. 海河水利, 2025, (02): 111-114.
 - [2]彭馨蕾. 程溪安全生态水系项目生态护岸设计方案比选 [J]. 水利技术监督, 2024, (07): 290-292+297.
 - [3]吴文龙. 生态护岸在延平区水土保持工程中的运用 [J]. 小水电, 2023, (05): 38-42.
 - [4]黄锦林, 叶合欣, 罗日洪, 等. 埋石混凝土植绿生态挡墙在山区河道治理工程中的应用 [J]. 广东水利水电, 2023, (03): 14-17+23.
 - [5]陈国旭. 连江县官坂镇合山溪河道生态治理护岸形式比选分析 [J]. 四川水利, 2021, 42 (03): 87-90.
- 作者简介：吴棋焱（1995 年 8 月），汉族，男，（福建福清），本科，水利助理工程师，水利水电工程方向