

围堰工程设计与施工关键技术及稳定性研究

廖浩

温州市兴海水利建设有限公司 浙江 温州 325000

摘要: 本文系统阐述了围堰工程的核心内涵,深入剖析了土石围堰、混凝土围堰、钢板桩围堰及双壁钢围堰等主流类型的结构特点、适用条件与关键技术参数。重点聚焦于围堰的稳定性问题,详细论述了抗滑稳定、抗倾覆稳定、渗流稳定及整体沉降控制等核心验算内容,并对比分析了极限平衡法与有限元法在稳定性分析中的应用。在此基础上,全面梳理了围堰施工中的关键环节,包括基础处理、防渗体系构建、接缝处理以及针对双壁钢围堰的浮运下沉工艺。文章最后展望了技术发展趋势,旨在为提升我国围堰工程技术水平提供理论参考与实践指导。

关键词: 围堰工程;设计与施工;关键技术;稳定性分析;防渗处理

引言

从三峡大坝宏伟的碾压混凝土围堰,到跨江大桥深水基础所依赖的双壁钢围堰,再到城市河道治理中常见的土石围堰,围堰工程贯穿于各类涉水基础设施建设的始终。尽管其“临时”属性决定了其最终会被拆除或融入永久结构,但其重要性却丝毫不亚于任何永久性工程。一旦围堰失稳或失效,轻则导致工期延误、成本激增,重则引发灾难性的安全事故,造成无法挽回的生命财产损失和生态环境破坏。随着我国基础设施建设向深水、复杂地质和高环保要求方向发展,对围堰工程的设计理念、材料选择、施工工艺及安全保障均提出了更高、更精细化的要求。因此,系统性地研究围堰工程的设计原理、施工关键技术及其稳定性保障措施,对于推动行业技术进步、确保重大工程安全具有深远的现实意义。

1 围堰工程类型与选型依据

1.1 主要围堰类型及其结构特点

根据建筑材料和结构形式的不同,围堰主要可分为以下几类:

1.1.1 土石围堰

这是历史最悠久、应用最广泛的围堰形式,由当地易得的土料、石料或混合料分层填筑而成。其最大优势在于成本低廉、施工简便、能充分利用开挖弃料,且对地基适应性强。然而,其占地面积大、抗冲刷能力弱,必须配合有效的防渗体(如黏土心墙、斜墙、土工膜或混凝土防渗墙)和护面(如抛石护脚)才能满足工程要求。适用于河谷宽阔、水流平缓、覆盖层较厚的工程场景,水深一般不宜超过20米,流速不超过3米/秒。

1.1.2 混凝土围堰

包括常态混凝土围堰和碾压混凝土(RCC)围堰。此类围堰强度高、刚度大、防渗性能优异、耐久性好,且可

与永久性建筑物(如大坝)相结合,实现永临结合。三峡三期围堰便是碾压混凝土围堰的杰出代表,其最大高度达121米,工程量巨大。但其缺点也十分明显:造价高昂、施工周期长、需要复杂的模板和温控措施,且拆除困难。通常用于大型水利枢纽工程或作为永久结构的一部分。

1.1.3 钢板桩围堰

由一系列带有锁口的U型或Z型钢板桩通过振动锤连续打入河床形成封闭的挡水结构。其整体性强、施工速度快、可重复利用,特别适用于软土地基、深水(可达30米以上)及流速较大的河段^[1]。钢板桩围堰的防渗效果很大程度上取决于锁口的紧密程度,必要时需在锁口处注浆止水。其内部通常设置多层内支撑或拉锚系统以抵抗巨大的水土压力。

1.1.4 双壁钢围堰

这是一种专为桥梁深水基础施工而设计的特种围堰。其结构由内外两层钢板、竖向加劲肋和水平桁架构成,形成一个中空圆筒形或矩形密封结构。施工时,可在空腔内注水使其自浮,浮运至墩位后,通过吸泥、注水压重等方式精确下沉至设计标高。其优点在于可承受极大的水头差、定位精准、可工厂化预制、施工效率高,是跨越大江大河桥梁建设的关键技术。例如,在浮运和下沉过程中,规范要求围堰露出水面的高度不得小于1米,以确保足够的储备浮力和稳定性。

1.2 围堰选型的关键考量因素

围堰的选型是一个多目标决策过程。首先,必须满足防洪安全标准,即围堰顶高程应高出施工期可能出现的最高水位(含浪高)0.5至0.7米。其次,需充分评估水文地质条件,包括水深、流速、河床覆盖层性质、基岩埋深及渗透性等。例如,在深厚软基上,土石围堰可能

因沉降过大而不适用，而钢板桩或双壁钢围堰则更具优势。再次，经济性与工期是重要的约束条件，需在初期投资、施工速度和后期拆除成本之间取得平衡。最后，还需考虑环境影响和通航要求，尽量减少对河流生态和航运的干扰。

2 围堰稳定性分析理论与方法

2.1 稳定性验算的核心内容

围堰在服役期间主要承受静水压力、动水压力、土压力、自重及施工荷载等作用。其稳定性验算需确保在各种不利工况组合下，安全系数满足规范要求。(1) 抗滑稳定性：验算围堰沿基底或深层软弱夹层发生水平滑动的可能性。计算时，将所有促使围堰滑动的水平力（主要是水压力）作为滑动力，将基底摩擦力和凝聚力作为抗滑力。根据《水工建筑物荷载设计规范》，采用抗剪强度公式计算时，其安全系数通常不得小于3.0。(2) 抗倾覆稳定性：验算围堰绕其趾部（下游侧）发生转动倾覆的可能性。计算时，将所有使围堰产生倾覆力矩的力（如上游水压力）作为倾覆力矩，将围堰自重及下游水压力等产生的稳定力矩作为抗倾覆力矩。其安全系数一般要求不小于1.5^[2]。(3) 渗流稳定性：这是土石围堰设计的重中之重。渗流会在堰体内产生渗透压力，并可能导致管涌或流土破坏。设计时需通过延长渗径（如设置心墙、铺盖）或降低渗透系数（如设置防渗墙）来控制渗流量和渗透坡降。关键指标是出口处的实际渗透坡降必须小于允许渗透坡降。(4) 基底承载力与沉降：围堰的巨大重量会对地基产生附加应力，需验算地基承载力是否足够，并预测其沉降量，特别是不均匀沉降，以免导致围堰开裂或倾斜。

2.2 稳定性分析的主要方法

目前，围堰稳定性分析主要采用两种方法。(1) 极限平衡法：这是一种经典的、基于静力平衡原理的分析方法。它将潜在的滑动体视为刚体，通过假定滑裂面（如圆弧、折线），建立力或力矩的平衡方程来求解安全系数。该方法概念清晰、计算简便、结果直观，被广泛应用于初步设计和常规工程中。但对于复杂几何形状、非均质地基或需要考虑变形的情况，其局限性较大。(2) 有限元法（FEM）：这是一种基于连续介质力学的数值分析方法。它将围堰-地基系统离散为大量单元，通过求解每个单元的应力-应变关系，得到整个系统的应力场、位移场和渗流场。有限元法能够真实模拟材料的非线性、接触面行为以及复杂的边界条件，不仅能进行稳定性验算，还能预测围堰的变形过程，为优化设计和施工监控提供更丰富的信息。随着计算机技术的发展，有限元法已成

为大型、复杂围堰工程不可或缺的分析工具。

3 围堰施工关键技术环节

3.1 基础处理技术

在深厚软粘土地基上，常采用排水固结法，通过设置塑料排水板（SPB）或砂井形成竖向排水通道，并施加分级预压荷载，以加速孔隙水压力消散和土体固结。例如，塑料排水板的间距通常设计为1.0至1.5米，呈正三角形或矩形布置，其穿透深度需进入下卧硬土层不少于0.5米，以确保有效的排水路径。对于承载力不足的松散砂性土地基，则可采用振冲挤密法，利用振冲器高频振动和高压水射流在地基中成孔，再回填碎石形成密实的桩体，桩径一般为0.8至1.2米，置换率控制在10%至20%之间，从而与原地基共同构成复合地基，显著提升其承载力和抗液化能力。在局部存在淤泥包或软弱夹层的区域，还需进行换填处理，挖除软弱土体后，分层回填级配良好的砂砾料，并严格控制每层虚铺厚度（通常不超过30厘米）和压实度（相对密度 $D_r \geq 0.7$ ），以形成均匀、稳固的持力层。

3.2 防渗体系构建技术

针对强透水覆盖层，垂直防渗墙是最有效的解决方案。塑性混凝土防渗墙因其低弹性模量和高应变能力，能较好地适应围堰的变形，被广泛应用。其施工多采用液压抓斗或冲击钻机成槽，槽宽通常为0.6至0.8米，墙体需嵌入相对不透水层（如基岩或黏土层）至少0.5米。塑性混凝土的配合比设计极为关键，膨润土掺量一般为40至80 kg/m^3 ，水泥用量为80至150 kg/m^3 ，水胶比控制在1.0至1.5之间，以确保其渗透系数达到 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{cm}/\text{s}$ 的严苛要求。对于更深或更复杂的地层，可采用高压喷射灌浆（Jet Grouting）形成帷幕，通过高压喷射水泥浆切割、搅拌并置换原位土体，形成直径可达1.5米以上的高强度、低渗透性圆柱体，相邻桩体相互咬合形成连续防渗屏障^[3]。水平防渗铺盖则常用于上游侧，铺设一层厚度不小于1.0米的黏土或复合土工膜（如两布一膜），其与垂直防渗墙需可靠连接，形成完整的“L”型或“U”型防渗系统。施工完成后，必须采用双环注水试验或压水试验对防渗体的完整性及渗透性能进行严格检验。

3.3 接缝与连接处理技术

对于常态混凝土围堰，施工缝需在初凝后及时凿毛处理，形成深度不小于5毫米的粗糙面，并彻底清除浮渣和积水，在浇筑新混凝土前涂刷一层水泥净浆或专用界面剂，以增强新旧混凝土间的粘结力。钢板桩围堰的锁口是防渗的关键，插打前需在锁口内涂抹黄油与锯末按1:1比例混合而成的润滑止水膏，既能减少插打阻力，

又能填充锁口间隙。对于高水头或重要工程,还需在围堰合龙后,从顶部向锁口内注入水泥-水玻璃双液浆,利用其快速凝结特性封堵微小缝隙。土工膜的连接则需采用热熔焊接工艺,通常采用双焊缝形式,两条焊缝间留有约10毫米的空腔^[4]。焊接完成后,必须对每条焊缝进行严格的非破坏性检测:首先进行目视检查,确保焊缝平顺、无烧焦;其次进行真空盒检测或气压检测,向空腔内充气至0.2MPa并稳压5分钟,若压力无明显下降,则判定焊缝密封良好,其焊缝强度不得低于母材强度的80%。

3.4 双壁钢围堰浮运下沉关键技术

双壁钢围堰的施工是技术密集型过程,其核心在于浮运与下沉的精准控制。制造与拼装通常在岸边的专用胎架上进行,需严格控制几何尺寸偏差(平面尺寸误差 $\leq \pm 10\text{mm}$,高度误差 $\leq \pm 5\text{mm/节}$)和焊接质量。所有主焊缝均需进行100%超声波探伤(UT)检测,达到II级及以上合格标准,并进行满水试验以验证其水密性。浮运阶段,利用其自身浮力,通过拖轮牵引至墩位,此过程需精确计算吃水深度和干舷高度,确保围堰露出水面的高度始终不小于1米,以提供足够的储备浮力应对风浪。到达墩位后,通过GPS-RTK和全站仪进行精确定位,平面位置偏差需控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内。下沉初期依靠自重,当遇到阻力时,需在围堰内部对称布置多台空气吸泥机(通常4至8台),边吸泥边向隔舱内注水压重,实现平稳、垂直下沉。下沉速度需严格控制,一般不宜超过0.5米/小时,以避免因过快下沉导致姿态失控。下沉过程中,通过安装在围堰四角的倾角传感器和全站仪实时监测其平面位置、高程及垂直度(倾斜度 $\leq 1/200$)。一旦出现偏斜,立即采取纠偏措施,如在偏斜反方向增加吸泥量、调整压舱水分布,甚至采用千斤顶进行强制纠偏。下沉到位后,需进行彻底清基,确保基底平整度和承载力满足设计要求,随后进行水下混凝土封底,最终形成一个坚固、干燥的施工环境。

4 未来发展趋势与对策建议

未来围堰工程的发展将呈现以下趋势:(1)设计标准化与性能化:加快制定和完善涵盖各类围堰的专项技

术标准,推广基于性能的设计理念,明确不同服役性能目标下的设计参数。(2)施工装备与工艺智能化:研发和应用智能打桩船、无人吸泥船、自动化焊接机器人等先进装备,提升施工精度和效率。同时,大力推广BIM+GIS技术,实现围堰全生命周期的数字化管理。(3)监测预警系统智慧化:构建集物联网传感器(如光纤光栅、倾角计、渗压计)、无人机巡检和大数据分析于一体的智慧监测平台,实现对围堰健康状态的全天候、全方位感知与风险预警。(4)绿色生态化:探索可降解、可循环利用的围堰材料,以及施工后易于恢复河床生态的工艺,最大限度减少工程对环境的扰动。

5 结语

围堰工程虽为临时,其技术含量与安全责任却不容小觑。本文通过对围堰类型、稳定性理论、施工关键技术及未来挑战的系统梳理,揭示了现代围堰工程的核心要义。研究表明,成功的围堰工程必然是地质勘察、科学设计、精细施工与智慧管控的完美结合。从土石围堰的因地制宜,到混凝土围堰的坚不可摧,再到双壁钢围堰的精准灵动,每一种形式背后都是对自然规律的深刻理解和对工程技术的极致追求。面向未来,唯有持续创新设计理念、突破关键技术瓶颈、拥抱智能化浪潮,才能确保每一座围堰都成为守护重大工程安全的坚实屏障,为国家基础设施建设的高质量发展保驾护航。

参考文献

- [1]彭淞.水利设计中围堰技术的应用研究[J].现代工程科技,2026,5(01):129-132.
- [2]陈冉.深水基础钢套筒围堰设计及施工[J].工程技术研究,2026,11(03):202-204.
- [3]王天培.水利水电工程围堰施工技术要点[J].科技与创新,2026,(06):127-129+132.
- [4]何承旺.水利工程施工中围堰施工技术研究[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——实践路径探索与案例分享专题论文集(第一册).江西省赣州市兴国县行政审批局,;2026:46-49.