

# 汛期河道高水位环境下钢板桩围堰施工稳定性与防渗技术探讨

刘堂莉

上海奉贤建设发展集团市政公路工程有限公司 上海 201400

**摘要：**钢板桩围堰作为一种高效、可重复利用的临时挡水结构，在桥梁基础、河道护岸、水利枢纽等水利工程中应用广泛。然而，在汛期高水位、强水流、复杂地质等多重不利因素耦合作用下，其施工过程面临严峻的稳定性与防渗挑战，直接关系到工程安全、工期与成本。本文系统分析了汛期高水位环境对钢板桩围堰稳定性的核心影响机制，包括静水压力、动水荷载、渗透破坏及土体软化效应；深入探讨了当前主流的防渗技术体系，涵盖锁口密封、帷幕注浆、内支撑优化及复合防渗墙等方法，并对其适用性与局限性进行评述。在此基础上，提出了一套集“精细化勘察-动态化设计-智能化监测-快速化应急”于一体的综合防控策略。研究表明，通过多技术协同、全过程风险管控，可有效提升钢板桩围堰在极端水文条件下的服役性能，为类似工程的安全高效实施提供理论支撑与实践指导。

**关键词：**钢板桩围堰；汛期；高水位；稳定性；防渗技术；渗透破坏

## 引言

随着我国基础设施建设向江河湖海纵深推进，大量跨江跨海通道、沿江港口及水利水电工程的建设不可避免地需要在河道内进行基坑开挖作业。钢板桩围堰凭借其施工速度快、止水性能好、可回收利用等显著优势，成为此类工程中首选的临时支护与挡水结构。然而，工程建设周期往往难以完全规避自然水文周期，尤其是在南方多雨地区或大江大河流域，施工窗口期常与汛期重叠。汛期河道呈现出水位暴涨、流速增大、水位变幅剧烈、河床冲刷严重以及岸坡土体饱和软化等一系列复杂特征，这些因素共同构成了对钢板桩围堰结构安全的严峻考验。在高水位差作用下，围堰内外巨大的水头压力不仅对钢板桩自身的结构强度和整体稳定性构成威胁，更会诱发复杂的渗流场，导致管涌、流土等渗透破坏现象，进而引发围堰失稳甚至整体倾覆的重大安全事故。历史上，因围堰防渗失效或稳定性不足而导致的工程事故屡见不鲜，造成了巨大的经济损失和不良社会影响。因此，深入研究汛期高水位环境下钢板桩围堰的稳定性机理与高效防渗技术，不仅是保障单个工程项目顺利实施的关键，更是推动行业技术进步、提升基础设施韧性的重要课题。

## 1 汛期高水位环境对钢板桩围堰稳定性的核心影响机制

钢板桩围堰的稳定性主要取决于其抵抗外部荷载（主要是水土压力）的能力。汛期高水位环境通过多种物理力学过程，显著放大了这些荷载并削弱了围堰自身

的抗力，具体体现在以下几个方面：

### 1.1 巨大的静水压力与不平衡荷载

汛期最直观的特征是河道水位急剧上升，导致围堰外侧水位远高于内侧基坑水位，形成巨大的水头差（ $\Delta H$ ）。根据流体静力学原理，作用于围堰迎水面的静水压力呈三角形分布，其合力大小与水头差的平方成正比（ $P \propto \Delta H^2$ ）。这种巨大的侧向推力是导致围堰整体滑移、倾覆以及钢板桩弯曲变形的主要原因。尤其当围堰平面形状不规则或存在局部薄弱环节时，容易产生应力集中，加剧结构损伤。在实际工程中，若设计阶段未能充分考虑汛期可能出现的最高水位，或者施工期间遭遇超标洪水，围堰所承受的实际荷载将远超设计值，极易引发结构性破坏。

### 1.2 复杂的动水荷载效应

与静水压力不同，动水荷载源于水流的运动。汛期河道流速通常较大，高速水流冲击围堰迎水面会产生脉动压力。这种非定常荷载具有随机性和周期性，可能诱发围堰结构的涡激振动，长期作用下会导致材料疲劳，降低结构寿命。此外，水流绕过围堰端部时会产生强烈的绕流和局部冲刷，掏空围堰底部的土体，减小被动土压力区范围，严重削弱围堰的抗倾覆和抗滑移能力<sup>[1]</sup>。若围堰附近存在桥墩或其他障碍物，还可能产生复杂的尾流干扰，进一步恶化受力状态。这种由水流动力学引起的附加荷载，在传统静力分析中常被忽略，但在汛期高流速条件下，其影响不容小觑，必须纳入整体稳定性评估之中。

### 1.3 渗透破坏（管涌与流土）

这是汛期高水位环境下最隐蔽也最危险的失效模式。巨大的水头差驱动地下水从围堰外侧高水位区向内侧低水位区渗流。渗流力会作用于土颗粒，当渗流力超过土体的有效重度时，细颗粒会被水流带走，或整个土体表面被掀起。对于钢板桩围堰而言，渗透破坏主要有两个路径。其一是锁口渗漏。钢板桩之间通过锁口相互咬合连接，但锁口并非绝对密闭。在高水头压力下，水会通过锁口缝隙渗入基坑。初期表现为“线状”渗漏，随着渗流持续，水流会携带锁口周围土体中的细颗粒，形成“管涌通道”，导致锁口间隙不断扩大，渗漏量剧增。其二是底部绕渗。若钢板桩入土深度不足，未能穿透透水性强的砂层或卵石层，地下水会从围堰底部绕流进入基坑。在基坑内侧坡脚处，向上的渗流力与土体重力方向相反，极易引发流土破坏，造成基底隆起，危及内部结构施工安全。这两种渗透破坏形式往往相互关联、互为因果，一旦发生，发展迅速，处置困难。

### 1.4 土体物理力学性质劣化

汛期长时间的高水位浸泡会使围堰周边及基坑底部的土体含水率急剧增加，特别是粉质黏土、淤泥质土等对水敏感的土层。土体饱和后，其有效应力降低，抗剪强度显著下降，内聚力几乎丧失。这直接导致作用于钢板桩上的主动土压力增大，而提供抗力的被动土压力减小，使得围堰的整体稳定性系数大幅降低。同时，软化的土体对钢板桩的嵌固作用减弱，增加了桩身的变形和位移。这种土体力学参数的动态劣化过程，使得基于初始勘察数据的设计模型在汛期工况下可能严重偏离实际，从而埋下安全隐患。因此，在稳定性验算中，必须采用饱和状态下的土体参数，并考虑其随时间变化的可能性。

## 2 主流防渗技术体系及其适用性分析

针对上述挑战，工程界发展了一系列防渗技术，旨在切断或削弱渗流路径，保障围堰安全。这些技术各有侧重，需根据具体工程地质、水文条件及经济性进行选择与组合。

### 2.1 钢板桩锁口密封技术

这是最直接、应用最广泛的防渗措施，目标是提高锁口本身的止水性能。传统的做法是在打设前于锁口内涂抹黄油、沥青或专用密封膏，这种方法成本低廉、操作简单，但对于高水头差或锁口存在制造缺陷的情况，效果有限，易被高压水冲刷失效。现代工程中，普遍采用遇水膨胀橡胶条作为改进方案。将特制的橡胶条嵌入锁口槽内，打桩时被挤压填充缝隙，一旦接触渗漏水，

橡胶条体积可膨胀数倍，实现自愈密封<sup>[2]</sup>。该方法可靠性高，适用于中高水头工况，已成为行业标准做法。然而，其效果仍受限于钢板桩本身的质量，对于老旧或多次周转使用的钢板桩，锁口磨损严重，密封效果大打折扣，无法从根本上解决因打桩过程中锁口变形、扭曲或土块嵌入造成的永久性损伤。

### 2.2 帷幕注浆防渗技术

当锁口密封不足以应对高水头或复杂地层时，需在围堰外围或内部构建一道连续的防渗帷幕。在外围施作一圈水泥土搅拌桩或高压旋喷桩，形成封闭的防渗墙，能有效隔断外部水源，大幅降低作用于钢板桩上的水压力和渗流量，从根本上改善围堰受力状态，尤其适用于砂层、粉土等可注性较好的地层。另一种策略是在围堰内侧靠近钢板桩的位置预埋袖阀管，待围堰合拢抽水后，根据渗漏情况，有针对性地注入水泥-水玻璃双液浆或化学浆液。浆液在压力下沿渗流通道扩散、凝结，封堵渗漏点，该方法灵活性强，可作为应急抢险措施。然而，外围帷幕施工周期长、成本高，且在深厚卵石层或岩溶发育区成桩困难；内侧注浆则属于“亡羊补牢”式措施，难以做到完全预防，更多用于事后的补救。

### 2.3 围堰结构体系优化

通过增强围堰自身的结构刚度和整体性来间接提升防渗和抗渗能力。合理布置多道内支撑或设置外拉锚索，可以有效控制钢板桩的变形，防止因过大位移导致锁口张开或底部土体扰动。在高水位工况下，支撑系统的刚度和预加轴力至关重要，是维持围堰几何形态稳定的基石。此外，在围堰内侧挂设土工膜或喷涂聚脲弹性防水涂料，形成柔性防渗层，能够有效拦截通过锁口和桩身的渗水，施工便捷，但需注意其与钢板桩的连接可靠性，防止被水压鼓破<sup>[3]</sup>。对于超大型、高风险项目，还可采用复合式围堰，将钢板桩与混凝土防渗墙、地下连续墙等刚性结构结合使用，例如先施作地下连续墙作为主防渗体，再在其内侧插打钢板桩作为临时支撑，此方案安全性最高，但造价昂贵。

### 2.4 降水与排水系统协同

有效的内部排水是防渗体系不可或缺的一环。在基坑底部四周设置排水明沟，并在低洼处布置集水井，通过水泵及时排出渗入的少量积水，维持基坑内干燥，这是最基本的要求。在此基础上，可在基坑内部或围堰内侧布置降水井，主动降低基坑内地下水位，从而减小内外水头差。此举不仅能减轻围堰荷载，还能疏干基底土体，提高其承载力。然而，在渗透性极强的地层或环保要求严格的区域，大规模降水可能引发周边地面沉降或

生态问题,因此必须进行严格的环境影响评估,并采取回灌等补偿措施,确保降水与排水系统的实施既能保障工程安全,又符合可持续发展的原则。

### 3 综合防控策略:基于全过程风险管理的解决方案

单一技术往往难以应对汛期高水位环境的复杂性。因此,必须树立全过程、系统化的风险管理理念,构建一个从前端预防到后端应急的闭环防控体系。

#### 3.1 精细化勘察与动态化设计

成功的围堰工程始于精准的前期工作。施工前必须进行详细的水文地质勘察,不仅要查明地层分布、渗透系数,更要准确预测汛期最高水位、最大流速及河床冲刷深度。建议采用孔压静力触探、跨孔CT等先进手段,获取高精度参数,为设计提供坚实的数据基础。在此基础上,应摒弃“一劳永逸”的静态设计理念,建立基于BIM+GIS的数字孪生模型,将实时水文数据(如上游水库泄洪信息、降雨预报)接入模型,动态模拟不同洪水情景下围堰的受力与渗流状态。通过这种动态化设计,可以提前预判风险,并据此灵活调整施工方案和应急预案,例如当预报有特大洪水时,可提前回灌基坑水以平衡水头,或对关键部位进行加固,从而将被动应对转变为主动防御。

#### 3.2 智能化施工监测与预警

在施工及运维阶段,实时掌握围堰的健康状态至关重要。应布设自动化监测网络,实时采集关键数据,包括钢板桩顶水平位移、桩身挠曲、支撑轴力、锁口渗流量、渗水浊度、基坑内外水位以及河道水位、流速、降雨量等环境信息。这些多源异构数据通过物联网技术汇集至云端智能预警平台。平台利用大数据分析和机器学习算法,对围堰稳定性状态进行实时评估和超前预警<sup>[4]</sup>。一旦某项指标接近或超过预设阈值,系统可自动推送警报至管理人员,并启动相应预案。这种从“人盯人防”到“技防智控”的转变,极大地提升了风险响应的时效性和准确性,是保障汛期施工安全的核心技术支撑。

#### 3.3 快速化应急响应机制

即便有万全的预防和监控,也不能完全排除突发险

情的可能性。因此,必须建立一套快速、高效的应急响应机制。首先,应针对可能发生的典型险情,如锁口大量涌沙、基底流土等,制定详细、可操作的应急预案,明确人员分工、物资储备和处置流程。其次,现场必须常备充足的应急物资,如快凝水泥、麻袋、反滤料(瓜子片、黄沙)等。在处置技术上,要熟练掌握快速抢险方法,例如对于锁口涌沙,可采用“反滤围井法”,迅速用土袋在涌口周围筑成围井,井内分层铺设粗砂、碎石等反滤料,既能阻止土颗粒流失,又允许水排出,从而在短时间内稳定险情。通过定期的应急演练,确保所有人员熟悉流程,能够在关键时刻迅速、有序地行动,最大限度地减少损失。

### 4 结语

本文聚焦汛期河道高水位下钢板桩围堰施工难题,指出其稳定性受多重因素耦合影响,单一防渗技术有局限,需组合式、系统化方案。研究表明,成功防控策略要贯穿工程全周期:设计阶段靠精细化勘察与动态模拟提供依据;施工阶段构建多重屏障,辅以降水排水系统;运维阶段依托智能化监测预警早发现风险;应急阶段凭预案和快速响应降损失。展望未来,钢板桩围堰技术发展有新趋势。材料上,将研发高强度、耐腐蚀、带智能传感功能的新型钢板桩;技术层面,数字孪生、人工智能与传统施工融合,推动管理智慧化;同时,绿色施工理念将深入,探索环保防渗浆液和可循环临时结构体系,减少对河流生态的扰动。

### 参考文献

- [1]袁攀峰.基于汛期水位变化的双层高低钢板桩围堰施工技术研究[J].国防交通工程与技术,2022,20(01):37-41.
- [2]李强.钢板桩围堰施工技术在防洪工程中的应用[J].东北水利水电,2026,44(02):19-22+46.
- [3]蒋海波,杜云鹏,罗鸿俊,等.高流速水域钢板桩围堰稳定性控制技术研究[J].建筑机械化,2026,47(01):171-174.
- [4]周海峰,刘芸升,杨胜旭.深水复杂地质下深大钢板桩围堰施工方法[J].西部交通科技,2025,(09):100-103.