

水泥搅拌桩在水利工程护岸挡墙基础处理中的应用探究

王 博 申 晨

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430000

摘 要：水利工程护岸挡墙作为河道治理的重要设施，其基础稳定性直接影响工程整体安全。传统基础处理方式在软弱土层中常面临承载力不足、沉降变形等问题。水泥搅拌桩技术通过原位固化改良土体，形成强度高、抗渗性好的复合地基，为解决护岸工程基础处理难题提供了新思路。本文针对该技术在护岸挡墙基础处理中应用进行系统分析，以为优化水利工程地基处理方案提供理论支撑。

关键词：水泥搅拌桩；水利工程；护岸挡墙

水利工程护岸挡墙在抵御水流冲刷、维持岸线稳定方面具有关键作用，但其基础常需穿越软弱土层，对结构耐久性构成严峻考验。常规地基加固方法在深部土层改良中存在效率低、扰动大等局限性，难以满足复杂水文地质条件下的工程需求。水泥搅拌桩技术依托深层搅拌工艺，将水泥浆液均匀掺入地基土体，形成连续致密的加固层，不仅显著提升地基抗剪强度，同时增强了结构的整体防渗能力。此技术路径的创新应用，为水利工程护岸基础处理开辟了新的技术方向，对保障水工建筑物长期安全运行具有重要意义。

1 水泥搅拌桩技术概述

水泥搅拌桩是以深层搅拌机械为核心的地基处理技术，通过钻头叶片将水泥浆液或干粉与原位土体强制搅拌，使水泥与土颗粒发生物理化学反应，形成强度高、水稳定性好的桩体。其核心工艺涵盖钻杆下沉、喷浆搅拌、复搅提升等环节，通过“四搅两喷”等工法确保桩身均匀连续。该技术形成的桩体与周围土体共同构成复合地基，可显著改善软土、粉砂等不良地基的力学性能。在水利工程护岸挡墙基础处理中，水泥搅拌桩通过调整水泥掺入比、桩长及桩间距等参数，针对性提升地基承载力与抗渗性，同时减少水流冲刷引起的土体流失，满足护岸结构对基础抗变形、抗渗漏及长期稳定性的特殊需求^[1]。

2 水泥搅拌桩在护岸挡墙基础处理中的应用优势

2.1 地基改良效果显著，适应复杂水文地质条件

水泥搅拌桩通过原位固化改良软弱土层，将水泥与地基土体充分混合后，形成兼具强度和刚度的水泥土桩体。其水化反应生成的胶凝物质可填充土体孔隙，降低地基渗透系数，有效改善软土、淤泥土等不良土层的压缩性和液化风险。针对护岸工程中常见的地下水位高、土体松散等问题，该技术可通过调整水泥掺入量、桩体

布置形式等参数，形成连续加固层，增强地基整体性和抗变形能力。相较于传统换填法，其无需开挖土方即可完成深层土体改良，尤其适用于临水区域地下结构复杂、施工空间受限的护岸工程。

2.2 抗渗防冲刷性能突出，提升结构耐久性

水泥搅拌桩形成的复合地基具有低渗透性和高抗剪强度，可有效阻隔水流渗透路径，减少地基土体的潜蚀和管涌风险。桩体与周围土体结合后，形成致密的防渗帷幕，降低地下水对护岸挡墙基础的侵蚀作用。同时，桩体自身抗冲刷能力显著高于原状土，可缓解水流对岸坡基础的直接冲刷破坏。在潮汐频繁或水位波动剧烈的水利工程中，该技术通过优化桩体排布密度和深度，进一步增强地基的整体抗渗稳定性，从而延长护岸结构的服役寿命^[2]。

2.3 施工扰动小，兼具环保性与经济性

水泥搅拌桩采用原位搅拌工艺，施工过程中无需大规模土方开挖和置换，显著减少对周边土体的扰动，避免传统桩基施工引起的挤土效应或振动危害。其作业过程无泥浆排放，对临近水体污染风险低，符合生态护岸工程环保要求。此外，该技术通过机械化连续施工可缩短工期，且水泥掺量、桩长等参数可根据地质条件灵活调整，避免材料浪费。相较于钢筋混凝土桩或板桩墙等方案，其综合成本更低，在水利工程护岸基础处理中具有较高的性价比优势。

3 水泥搅拌桩在水利工程护岸挡墙基础处理中的应用

3.1 软弱地基加固与承载力提升

随着水利工程护岸挡墙建设向复杂水文地质区域延伸，软弱地基承载力不足、压缩变形大等问题日益凸显。水泥搅拌桩通过原位固化改良技术，将水泥浆液与地基土体强制搅拌形成连续桩体，使松散软土转化为高强度水泥土复合地基，为护岸挡墙提供稳定的基础支

撑。其核心机理在于水泥水化反应生成的胶凝物质与土颗粒结合,填充土体孔隙并形成网状结构,显著提升地基的抗压、抗剪性能。在护岸工程中,通过优化桩长、桩径及平面布置形式,形成密集桩群或格栅式加固体系,可有效约束软土侧向位移,降低地基压缩变形,满足挡墙对基础沉降控制的严苛要求。针对护岸挡墙基础下方淤泥质土、粉细砂等软弱层,水泥搅拌桩施工采用“四搅两喷”工艺,通过钻杆下沉喷浆、复搅提升等工序,确保桩体均匀性和连续性^[3]。施工过程中,根据土层含水量、有机质含量等参数动态调整水泥掺入比,避免因土体性质差异导致桩身强度不足。在临水区域,桩体深入持力层形成竖向加筋结构,将挡墙荷载传递至深层稳定地层,同时通过桩-土协同作用增强地基整体刚度,防止基础因水位波动或水流冲刷产生局部失稳。

此外,水泥搅拌桩复合地基的防渗性能进一步提升了护岸结构的耐久性。桩体固化后形成的低渗透屏障可阻断地下水渗流路径,减少渗透压力对挡墙基础的侵蚀,避免管涌、流土等渗透破坏。在潮汐频繁或地下水位变化剧烈的河岸段,通过加密桩体排距、增加桩长穿透透水夹层,构建多道防渗加固带,实现承载力提升与渗流控制的双重目标。相较于传统换填法或预制桩方案,该技术无需大规模开挖土方,对周边既有护岸结构扰动小,且能适应狭窄临水作业空间,为软弱地基条件下的护岸工程基础处理提供了高效解决方案。

3.2 防渗帷幕与护岸结构协同设计

在水利工程护岸挡墙建设中,水泥搅拌桩通过连续桩体形成的防渗帷幕,与护岸挡墙结构形成协同防护体系,有效阻断渗流路径并降低水力梯度,成为抵御渗透破坏的核心技术手段。防渗帷幕的构建需紧密结合护岸工程地质条件。针对砂性土、卵石层等透水性较强的地层,沿护岸挡墙轴线或渗流敏感区域布设单排或多排水泥搅拌桩,通过控制桩体搭接宽度和桩长穿透透水层,形成连续的防渗截水体。对于存在承压水或层间渗流的复杂地层,采用阶梯形或折线形桩体布置,延长地下水绕渗路径,降低渗透压力对护岸基础的抬升作用。施工中通过调整水泥掺入量(通常12%~20%)和复搅次数,确保桩体渗透系数降至 10^{-6} ~ 10^{-7} cm/s量级,达到黏土等效防渗效果。

在协同设计层面,防渗帷幕需与护岸挡墙的排水系统、反滤层等结构无缝衔接。将水泥搅拌桩顶部嵌入挡墙基础混凝土底板内,利用桩体刚性支撑与防渗功能的叠加效应,既防止基础底部渗流掏空,又增强挡墙整体抗浮稳定性。对于采用悬臂式或扶壁式挡墙的护岸工

程,在墙后主动区布设水泥搅拌桩群,既可抑制墙后填土渗流,又能通过桩-土相互作用减小土压力对挡墙的侧向推力。此外,在潮汐区或水位骤降频繁的河段,通过增加帷幕纵深(桩体向水域侧外延3~5m),形成立体防渗体系,削弱动水压力对护岸基础的周期性冲击。针对地下水流速较大的区域,采用“先喷浆后搅拌”工艺,通过预注浆形成局部阻水带,减少浆液流失;在粉细砂地层中实施间歇式复搅,延长水泥与土体的化学反应时间,提升桩体防渗均质性。

3.3 富水地层施工工艺优化

在临水区域护岸挡墙施工中,富水地层的高地下水位、强渗透性等特性常导致水泥搅拌桩成桩质量不稳定,甚至出现浆液流失、桩体松散等问题。针对此类水文地质条件,需通过施工工艺的系统性优化,确保桩体强度与连续性满足护岸基础加固需求。施工前需根据地层渗透系数和地下水流速,优化水泥浆液的水灰比及外加剂掺量。采用增稠剂或缓凝剂调节浆液黏度,降低浆液在富水地层中的稀释速率;同时添加抗分散剂增强浆液抗渗性,减少地下水冲刷造成的浆液流失。对于粉细砂或砂砾石层,采用双液注浆工艺(水泥浆与速凝剂交替注入),通过浆液快速初凝缩短地下水干扰窗口期,确保桩体有效成型。施工中通过钻杆下沉速度与喷浆压力的动态匹配,实现浆液在含水层中的均匀扩散,避免局部浆液富集或缺失^[4]。

在搅拌工艺方面,针对富水地层土体易塌孔、桩周土扰动大的特点,采用“三搅三喷”工艺强化搅拌效果。钻头下沉至设计深度后,先进行预搅疏松土体并注入部分浆液形成临时阻水帷幕;提升过程中通过二次喷浆和复搅,补偿因地下水流动造成的浆液损失,增强桩体芯部密实度。对于渗透性极强的卵石层,增设气幕隔离装置,利用压缩空气在桩周形成局部负压区,抑制浆液径向扩散,提高水泥与土体的结合效率。在此基础上,还应根据地层含水量动态调整钻杆转速,在饱和软土中降低转速以减少桩周土体液化扰动;在砂层中提高转速并增加叶片切削角度,确保土体破碎与浆液掺混充分。此外,还应采用实时监测系统跟踪钻杆扭矩、提升速度等参数,再基于数据反馈及时修正施工方案。例如,当钻杆扭矩异常升高时,判定为土层密实度突变,随即调整喷浆量或复搅次数,避免桩体断裂或缩径。

3.4 抗冲刷复合地基构建

水泥搅拌桩核心机理在于桩体固化后形成的高强度水泥土结构,可有效抵抗水流剪切力与局部掏刷作用,同时通过桩-土复合效应改善地基整体性,分散水流冲击

荷载。抗冲刷复合地基的构建需结合护岸挡墙基础形式及水流动力学特征。针对基础底部易受冲刷区域,采用密排桩体形成水平加固层,桩顶嵌入挡墙基础底板内,形成刚性连接;临水侧坡脚处布设倾斜桩群,深入河床冲刷线以下,形成“桩体护坦”,削弱水流对基础底部的直接冲击。桩体布置密度根据水流速度、含沙量等参数动态调整,在主流冲刷区采用桩间距小于1m的密集布置,非主流区适当放宽至1.2~1.5m,兼顾经济性与防护效果。

此外,水泥搅拌桩的抗冲刷性能源于水泥石材料的抗剪强度与抗冲刷特性。通过优化水泥掺入量(通常15%~22%)及养护龄期,桩体无侧限抗压强度可达1.5MPa以上,其抗冲刷能力较原状土提升3~5倍。在粉细砂地层中,桩体表面形成的致密水泥胶结层可有效抑制砂粒启动,减少水流携沙造成的磨蚀破坏。施工中采用“二次喷浆”工艺,在桩体表层形成2~3cm厚的高水泥含量保护壳,进一步增强抗冲刷耐久性。最后,复合地基的抗冲刷效能还体现在其对水流能量的耗散作用。密布桩群改变局部流态,形成紊流区降低水流流速,减轻对基础底部的冲刷强度。同时,桩体与周围土体形成的网格状结构可约束土颗粒迁移,防止冲刷坑向挡墙基础下方扩展。在潮汐区或汛期高流速河段,通过增加桩体长度(穿透冲刷深度2m以上)和直径($\geq 600\text{mm}$),构建纵深防护体系,确保护岸基础在极端水文条件下的稳定性。

3.5 复杂地层参数化设计实践

在水利工程护岸挡墙建设中,参数化设计依托精细化地质勘察数据,划分地层渗透性、压缩模量及抗剪强度分区,构建三维地层力学模型。针对护岸挡墙基础穿越的软硬互层、含砾黏土等非均质地层,通过数值模拟分析不同桩长、桩径及布桩形式下的应力传递规律,优选穿透软弱夹层或局部分隔透水层的桩体布置方案。例如,在砂层与黏土交替地层中,采用变径桩设计,平衡桩体抗压与抗拔性能;对于含孤石或硬壳层区域,通过钻头扭矩实时反馈调整钻进速度,避免桩体偏位或断裂^[5]。同时,根据地层含水量、有机质含量等参数,建立

水泥掺入比、水灰比与桩体强度的量化关系模型。在腐殖土或泥炭土地层中,通过增加水泥掺量(18%~25%)并掺入矿粉类活性剂,抑制有机酸对水泥水化的抑制作用;在粉细砂与粉质黏土互层中,采用分层差异喷浆工艺,针对高渗透性砂层提高喷浆压力(0.4~0.6MPa),黏性土层则延长复搅时间,确保浆液与土体充分融合。

该设计体系还注重环境荷载的长期影响。结合护岸挡墙运行期的水位波动、波浪冲击等动态荷载特征,在参数模型中引入疲劳损伤因子,优化桩体抗渗与抗裂性能。例如,在潮汐区护岸工程中,通过增加桩顶2~3m范围内的水泥掺量,增强桩体上部抗干湿循环劣化能力;在冻融交替区域,采用引气剂改性水泥石,使桩体孔隙率控制在5%~8%,显著提升抗冻胀性能,同时建立多场耦合分析模型,可预测复合地基在服役期的性能演变,指导全生命周期内的维护策略制定。

结束语

水泥搅拌桩技术通过复合地基构建、渗流协同控制及参数化设计等创新应用,有效解决了水利工程护岸挡墙基础处理中软弱土改良、抗渗抗冲刷等核心难题。其工艺适应性、经济性和环保优势,为复杂水文地质条件下的护岸工程提供了可靠技术路径。随着设计理论与施工工艺的持续优化,该技术将进一步推动水利工程地基处理向高效化、精准化方向发展,为水工结构长效安全运行奠定坚实基础。

参考文献

- [1]罗丽金.水泥搅拌桩在水利工程护岸挡墙基础处理中的应用[J].工程技术研究,2024,9(16):78-80.
- [2]樊佳男,周洁,杨波,等.水利工程护岸挡墙基础施工运用水泥搅拌桩的解析[J].中华建设,2024,(02):148-150.
- [3]董志鹏.清远市清新区滨江河浸潭段碧道工程护岸挡墙比选研究[J].云南水力发电,2024,40(03):122-125+134.
- [4]聂俊红.基于护岸底部挡墙基础处理的水泥搅拌桩技术研究[J].内蒙古水利,2023,(03):27-28.
- [5]刘海涛.水泥搅拌桩在水利工程护岸挡墙基础处理中的应用[J].人民黄河,2021,43(S2):201-202+204.