

水利工程基坑支护中预应力锚索地连墙的应用研究

张纯天¹ 窦明志²

1. 开封黄河河务局兰考黄河河务局 河南 开封 475300

2. 开封祥符黄河水利工程维修养护有限公司第三分公司 河南 开封 475300

摘要: 随着我国水利工程建设规模不断扩大、深度不断加深,深基坑开挖过程中的支护安全问题日益突出。传统支护结构在复杂地质条件和高水头压力下常面临变形控制难、稳定性不足等挑战。预应力锚索与地下连续墙(简称“地连墙”)组合形成的复合支护体系,因其高承载力、良好变形控制能力和适应复杂工况的优势,在大型水利枢纽、泵站、船闸等工程中得到广泛应用。本文系统分析了预应力锚索地连墙支护体系的工作机理,结合典型水利工程案例,对其设计参数优化、施工关键技术、监测反馈机制及数值模拟验证等方面进行深入研究。结果表明,合理布置预应力锚索可显著提升地连墙的整体刚度与抗倾覆能力,有效控制基坑变形;同时,信息化施工与动态设计是保障该支护体系安全高效实施的关键。研究成果可为类似水利工程深基坑支护提供理论支撑与工程参考。

关键词: 水利工程;深基坑;支护结构;预应力锚索;地下连续墙;复合支护

引言

水利工程作为国家基础设施的重要组成部分,其建设质量直接关系到防洪安全、水资源调配及能源供应。近年来,随着高坝大库、大型泵站、深埋输水隧洞等工程项目的推进,基坑开挖深度普遍超过20米,部分甚至达到40米以上。此类深基坑通常位于河谷、湖滨或地下水丰富区域,面临高水位、软弱土层、岩土交界面复杂等不利地质条件,对支护结构的安全性、稳定性和变形控制提出了极高要求。传统的支护形式如排桩+内支撑、土钉墙等,在超深基坑或高水压环境下存在明显局限:内支撑占用施工空间、影响主体结构施工效率;土钉墙则难以满足大变形控制需求。在此背景下,地下连续墙(Diaphragm Wall)因其良好的挡土、止水性能及整体刚度,成为深基坑支护的首选结构之一。然而,单纯依靠地连墙在超深基坑中仍可能因弯矩过大导致墙体开裂或位移超标。为解决上述问题,工程界广泛采用“地连墙+预应力锚索”的复合支护体系。预应力锚索通过主动施加拉力,对地连墙施加反向弯矩,有效减小墙体变形与内力,提升整体稳定性。该技术已在地铁、高层建筑基坑中成熟应用,但在水利工程领域,由于其特殊的水文地质条件、长期服役要求及防渗性能需求,其应用仍需针对性研究。

1 预应力锚索地连墙支护体系工作机理

1.1 地下连续墙的受力特性

地下连续墙是一种现浇钢筋混凝土墙体,具有连续性好、刚度大、防渗性能优等特点。在基坑开挖过程中,地连墙主要承受由土压力和水压力引起的侧向荷

载。其受力模式可简化为底部嵌固、顶部自由的悬臂梁或带支撑的连续梁。随着开挖深度增加,墙体弯矩和剪力显著增大,尤其在软土地区,墙体位移易超出允许值。由于水利工程基坑往往处于高地下水环境中,水土压力耦合作用进一步加剧了墙体的受力复杂性,使得单纯依赖墙体自身刚度难以满足变形控制目标。

1.2 预应力锚索的作用机制

预应力锚索由锚固段、自由段和锚头三部分组成。通过张拉设备对钢绞线施加预拉力,并锁定于地连墙上的腰梁或冠梁上,形成对墙体的主动反力。这种主动施加的反力能够有效抵消部分外部土水压力,从而降低墙体所承受的最大弯矩。更重要的是,预应力锚索通过对墙体施加约束,显著抑制了墙体中部及底部常见的“鼓肚”变形,使整体位移分布更加均匀^[1]。此外,锚索将部分荷载传递至深层稳定地层,不仅提高了支护体系的抗倾覆与抗滑移能力,还改善了墙体内部的应力分布状态,避免局部应力集中引发裂缝,从而延长结构服役寿命。

1.3 复合体系协同工作机制

预应力锚索与地连墙构成“主动-被动”协同支护体系。地连墙作为被动挡土结构,提供初始刚度;锚索作为主动加固元件,通过预应力调节墙体受力状态。二者通过腰梁实现力的传递与协调。在开挖过程中,随着土压力逐步释放,锚索预应力可进行分级张拉与补偿,实现动态调控,确保支护体系始终处于安全受力状态。这种协同机制使得整个支护系统不仅具备较高的承载能力,还能根据施工进度和监测反馈灵活调整受力状态,

从而在复杂多变的水利工况下维持良好的稳定性与可控性。

2 设计方法与参数优化

2.1 设计流程

预应力锚索地连墙支护体系的设计应遵循“地质勘察→荷载计算→结构选型→参数确定→稳定性验算→细部构造”的流程。首先，必须基于详尽的工程地质与水文地质勘察资料，准确识别土层分布、渗透特性、地下水位变化规律以及是否存在承压水等关键因素。在此基础上，选择合适的土压力计算模型，如考虑时间效应和空间效应的修正朗肯或库仑模型，以更真实地反映实际荷载状态。随后，根据基坑深度、周边环境敏感度及施工条件，确定是否采用多道锚索，并初步拟定地连墙厚度、嵌固深度及配筋方案。最终，需对整体结构进行抗倾覆、抗滑移、抗隆起及锚索抗拔承载力等多维度验算，并对连接节点、防腐措施等细部构造进行专项设计，确保结构安全与耐久性。

2.2 关键参数优化

2.2.1 锚索倾角与长度

锚索的倾角直接影响其水平分力的有效性及施工可行性。一般而言，倾角宜控制在 15° 至 35° 之间。若角度过小，不仅会增加与地连墙的干涉风险，还可能导致钻孔轨迹难以控制；若角度过大，则水平分力显著减小，削弱支护效果^[2]。锚索长度则需确保锚固段深入稳定持力层，如中风化岩层或密实砂层，且满足最小锚固长度要求（通常不少于6米）。在水利工程中，还需特别注意避开承压水层，防止高压水冲刷注浆体，造成锚固失效。因此，锚索长度的确定必须综合考虑地质剖面、水文条件及结构受力需求。

2.2.2 预应力值确定

预应力值的设定需在结构安全与地层扰动之间取得平衡。过高的预应力可能引起周围土体压缩甚至开裂，特别是在软土地区，反而加剧变形；而过低的预应力则无法有效发挥主动支护作用。工程实践中，通常将初始锁定值设定为锚索极限承载力的30%至50%，并通过现场张拉试验进行校核。更为科学的做法是采用“分级张拉、动态调整”策略：在基坑开挖不同阶段，根据实时监测数据对预应力进行补偿张拉，以应对土压力释放带来的位移增长，从而实现精细化控制。

2.2.3 锚索间距与层数

锚索的水平与竖向布置密度直接关系到支护体系的整体刚度与经济性。水平间距通常控制在2至3米之间，既能保证墙体受力均匀，又避免过度密集导致施工困

难；竖向间距则多为3至5米，一般每6至8米开挖深度设置一道锚索。在软土深厚或地下水位极高的区域，可适当加密布置，以增强约束效果。但需注意，过多的锚索不仅增加成本，还可能因钻孔交叉干扰影响成孔质量，因此应在保证安全的前提下优化布置方案。

2.2.4 地连墙厚度与嵌固深度

地连墙的截面尺寸是决定其抗弯与抗剪能力的核心参数。在水利工程深基坑中，墙体厚度多采用0.8至1.2米，混凝土强度等级不低于C30，抗渗等级应达到P8以上以满足长期防渗要求。嵌固深度则需综合考虑抗隆起与抗倾覆稳定性，通常取开挖深度的0.7至1.0倍。当存在高承压水头时，还需验算坑底土体的管涌稳定性，必要时采取封底混凝土或降水措施，防止突涌事故发生。

3 施工关键技术

3.1 地连墙施工

地连墙施工通常采用液压抓斗或铣槽机进行成槽作业，辅以优质膨润土泥浆护壁，防止槽壁坍塌。成槽垂直度是控制墙体质量的关键指标，规范要求偏差不得超过 $1/300$ 。接头处理直接影响墙体的整体性和止水效果，常用形式包括锁口管、H型钢或十字钢板接头，需确保接缝密实、无渗漏通道^[3]。混凝土浇筑采用导管法水下灌注，要求连续、均匀，避免断桩或夹泥。施工过程中应严格控制混凝土配合比与坍落度，确保墙体强度与耐久性满足设计要求。

3.2 预应力锚索施工

预应力锚索施工流程包括定位、钻孔、清孔、下索、注浆、张拉与锁定。钻孔是关键环节，需根据地质条件选择潜孔锤冲击或回转钻进工艺，确保孔径不小于150毫米，并有效穿越软弱夹层。清孔后及时下放钢绞线束，随后进行注浆作业。注浆材料通常采用纯水泥浆，水灰比控制在0.4至0.5之间，首次注浆后待初凝再进行二次高压注浆（压力 $0.5 \sim 2.0$ MPa），以充分填充锚固段空隙，提高粘结强度。张拉作业须在注浆体强度达到设计值的75%以上方可进行，按1.1倍设计拉力超张拉后锁定，以补偿后续松弛损失。为保障长期服役性能，自由段应涂覆黄油并套入高密度聚乙烯（PE）护套，锚头部位则需用混凝土封闭，防止腐蚀。

3.3 协同施工组织

预应力锚索与地连墙的施工必须紧密协同，与基坑分层开挖节奏高度匹配。通常在开挖至某道锚索设计标高以下约0.5米时，立即组织该层锚索施工，严禁超挖，以免墙体在无支撑状态下失稳。地连墙施工时应在锚索位置预埋钢板或设置加强型钢筋混凝土腰梁，确保锚索

拉力能有效传递至墙体^[4]。此外,施工顺序应遵循“先墙后锚、随挖随支”的原则,避免因工序脱节导致安全隐患。在整个施工周期中,应建立严格的工序交接与质量验收制度,确保各环节无缝衔接。

4 工程案例

4.1 工程概况

某大型水利枢纽泵站基坑位于长江中下游冲积平原,开挖深度达28米,平面尺寸为80米×60米。场地地层自上而下依次为:杂填土(厚约2米)、淤泥质黏土(厚10米,黏聚力 $c = 12 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 8^\circ$)、粉质黏土(厚8米)及强风化砂岩(厚度大于15米)。地下水位埋深仅1.5米,且下伏承压含水层水头高达8米,对基坑稳定性构成严重威胁。

4.2 支护方案

针对上述复杂条件,工程采用1.0米厚C35混凝土地下连续墙作为主挡结构,嵌固深度22米,确保深入强风化岩层。同时设置四道预应力锚索,倾角统一为 20° ,水平间距2.5米,竖向间距6米。锚索采用7根 $\Phi_s 15.2$ 高强度低松弛钢绞线,设计极限拉力800 kN,初始锁定值600 kN。锚固段长度不少于8米,全部进入强风化砂岩,以保障锚固可靠性。为应对高水压,地连墙接头采用H型钢,并在坑内设置管井降水系统,将水位降至开挖面以下。

4.3 监测与反馈

施工期间布设了墙体测斜仪、锚索轴力计及地表沉降观测点,实施全过程信息化监测。监测数据显示,墙体最大水平位移为32毫米,出现在开挖面中部,低于40毫米的预警阈值;锚索实测轴力稳定在580至620 kN之间,与设计值高度吻合;周边地表最大沉降为18毫米,未对邻近构筑物造成影响。在第三道锚索施工后,监测发现位移速率略有加快,项目团队立即启动应急预案,对该层锚索进行了60 kN的补偿张拉,成功抑制了变形发展趋势,体现了动态设计与信息化施工的优越性。

4.4 效果评价

该复合支护体系成功应对了软土、高水位、深开挖等多重挑战,保障了泵站主体结构的安全施工。相较于传统内支撑方案,不仅节省了大量内部支撑材料与拆除工期,还为主厂房钢结构吊装提供了无障碍作业空间,整体工期缩短约30天,经济效益与社会效益显著。

5 存在问题与对策建议

尽管预应力锚索地连墙体系优势明显,但在水利工程应用中仍面临若干技术挑战。高承压水环境可能造成锚固段注浆体离析或被冲刷,影响长期锚固性能,建议在锚固区采用高压旋喷桩进行预加固,或选用自钻式中空注浆锚杆以提高成锚可靠性。此外,预应力在长期服役过程中可能因材料徐变、钢绞线松弛及腐蚀等因素发生衰减,应强化防腐设计,如采用双层PE护套、环氧涂层钢绞线,并配置可重复张拉锚具以便后期维护。在邻近既有构筑物区域施工时,锚索钻进可能引发微振动或土体扰动,需采用低扰动钻机并严格控制注浆压力。最后,部分工程项目仍依赖经验施工,缺乏系统化的信息集成平台,未来应全面推行BIM技术与智能监测系统融合,实现支护状态的实时感知、智能预警与动态优化设计。

6 结语

本文围绕水利工程深基坑支护中预应力锚索地连墙的应用展开系统研究,得出以下结论:预应力锚索与地连墙组成的复合支护体系,通过主动施加反力有效改善墙体受力状态,显著提升支护结构的整体刚度、稳定性和变形控制能力,适用于软土、高水位等复杂水利工况。合理设计锚索参数(倾角、长度、预应力值、间距)是确保支护效果的关键。建议结合地质条件采用“分级张拉、动态调整”策略,并通过现场试验验证设计参数。施工过程中需严格控制地连墙成槽质量、锚索注浆密实度及张拉时机,确保结构协同工作。信息化监测与反馈机制是保障施工安全的核心手段。未来研究可进一步探索智能锚索、自感知地连墙等新型材料与技术的融合,推动水利工程基坑支护向智能化、绿色化方向发展。

参考文献

- [1]陈伟.预应力锚索在水利工程基坑支护中的应用研究[J].内蒙古水利,2021,(10):37-38.
- [2]孙洪秀.水利工程基坑支护中预应力锚索地连墙的应用[J].四川水泥,2021,(05):73-74.
- [3]吴胜文.预应力锚索地连墙在水利工程基坑支护中的应用[J].河南水利与南水北调,2020,49(11):36-37.
- [4]连福宝.复杂地质条件下预应力锚索高边坡设计与施工技术研究[J].工程建设与设计,2025,(21):200-203.