

基于数值模拟的水利工程深基坑支护结构优化设计与稳定性分析

韩陈立

新疆轻工职业技术学院

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6769

[摘要] 随着水利工程往复杂地质条件与大型化方向发展,关键环节为深基坑工程,其支护结构的设计及稳定性直接关联工程安全及经济效益。基于此,本文围绕水利工程深基坑展开,综合采用有限元数值模拟方法,优化设计支护结构并全面评估稳定性。研究表明,通过数值模拟推进的优化设计,能明显提升支护结构的安全性和经济性,为同类工程供给科学的理论和技术参考。

[关键词] 水利工程; 深基坑; 支护结构; 数值模拟; 优化设计; 稳定性分析

中图分类号: TV5 **文献标识码:** A

Optimization Design and Stability Analysis of Deep Foundation Pit Support Structures in Hydraulic Engineering Based on Numerical Simulation

Chenli Han

Xinjiang Industry Technical College

[Abstract] With the development of complex geological conditions and large-scale water conservancy engineering, the key link is deep excavation engineering, and the design and stability of supporting structures are directly related to engineering safety and economic benefits. This article focuses on deep foundation pits in hydraulic engineering, using finite element numerical simulation methods to optimize the design of support structures and comprehensively evaluate their stability. Research has shown that optimizing design through numerical simulation can significantly improve the safety and economy of support structures, providing scientific theoretical and technical references for similar projects.

[Key words] water conservancy engineering; Deep foundation pit; Supporting structure; Numerical simulation; Optimize design; stability analysis

引言

在大型水利枢纽、泵站、船闸等工程建设中,深基坑工程普及度持续提升,还常面对高地下水位、复杂地层、紧邻既有建筑物等严峻挑战。基坑支护结构属于临时挡土止水装置,设计合理可靠,是保障施工安全、控制环境影响、节约工程投资的关键。传统设计方法多依靠经验和简化理论,不能精准呈现复杂地质条件中基坑开挖的动态变化,以及支护结构和土体的相互影响。有限元法这类数值模拟技术,可兼顾材料非线性、施工工序、水土耦合等复杂因素,已是深基坑工程分析和设计的核心手段。本文将打造高保真数值模型,系统分析水利工程深基坑支护结构开挖全流程的力学特征,依据模拟结果优化支护方案多目标参数,完成它的整体和局部稳定性定量评估,构建一套科学、精细化的设计分析流程,增强水利工程深基坑施工能力。

1 深基坑支护结构数值模型的建立与验证

1.1 工程概况与地质条件概化

以某典型水利枢纽泵站深基坑工程作为研究依托,这个基

坑开挖深度约25米,平面为不规则矩形,长度超出150米,宽度约为80米,是典型大面积深基坑工程。工程建在江河沿岸冲积平原,地质条件繁复,从上到下主要包含:顶部为1—2米厚的人工填土层,下方分布着厚度5—8米、排布不均的粉质粘土层,往下是厚度10—12米的砂卵石层,底部为风化程度不同的中风化岩层。场区地下水位埋藏浅,常年位于地表下1—2米,且与邻近河道有紧密水力关联,变化动态性强,处于构建数值模型阶段。依托完备的勘察资料和地质剖面,对上述地层做合理概化:把物理力学性质相近的亚层合并,确定各主要土层空间分布厚度及关键参数的变异范围^[1]。明确支护体系初始设计参数:选厚度1.0米、嵌入风化岩层深度不低于5米的地下连续墙做围护体;配置5道钢筋混凝土内支撑,水平间距和截面尺寸按设计刚度设定;在局部地段提前布设预应力锚索,作为补充加固办法,为后续数值分析夯实精准的几何和材料基础。

1.2 本构模型选取与参数确定

针对土体材料的非线性特性,选用岩土工程中普遍应用、可

较好模拟土体剪切变形特性及强度随围压变化关系的摩尔-库仑弹性本构模型。模型必备的关键力学参数,涉及各土层弹性模量、粘聚力、内摩擦角、泊松比及重度等,全部通过系统的室内土工试验(如三轴剪切试验、直剪试验、压缩试验),结合现场原位测试(如静力触探、标准贯入试验)数据做综合分析统计标定,进而得到数值计算用的代表性参数值。针对地下连续墙、钢筋混凝土内支撑等支护结构,采用线弹性本构模型开展模拟,并参照设计图纸标注的实际截面形状、尺寸及混凝土强度等级,准确算出并赋予截面面积、惯性矩及弹性模量等参数。为真实呈现开挖过程中水土的相互作用,在构建模型时,全面纳入渗流场和应力场的耦合效应,按河道水位变化情况设定边界水力条件,以动态模拟手段展现基坑降水造成的孔隙水压力消散与重新分布过程。

1.3 三维模型构建与施工工序模拟

采用专业岩土工程有限元分析软件,搭建了可精准还原工程实情的3维数值模型。在划定模型范围时,充分纳入基坑开挖影响区域,沿基坑周边向外拓展约3倍开挖深度,消除边界效应,整体模型涵盖所有概化后的主要地层、地下连续墙、各道内支撑体系及锚索构件。采取六面体主导的网格划分方案,在基坑周边、支护结构接触区域及土层交界面开展局部加密作业,既要保证计算精度又要兼顾求解效率,严格按实际施工工况的时空顺序开展施工过程的数值模拟:第一步开展初始地应力场平衡计算,拿到贴合现场原始应力状态的结果,作为后续分析的基准;随后模拟地下连续墙分段施工及硬化过程;按步骤模拟基坑分层开挖,每开挖完一层,马上“激活”相应标高的内支撑或锚索结构,按“先撑后挖”原则开展模拟;每步开挖同时模拟坑内降水作业,实时更新孔隙水压力场。依靠这一整套连续步骤,如实呈现深基坑开挖时,土体应力释放、支护结构受力、周边土体变形和地下水渗流相互作用的复杂动态过程和时空效应。

2 基于模拟响应的支护结构多目标优化设计

2.1 支护参数敏感性分析与初始评估

依托经工程实测数据验证的高精度数值模型,按系统流程开展支护设计参数敏感性分析是优化工作的科学开端。研究围绕地连墙插入比、各道支撑的竖向间距、预应力值、墙体厚度等核心设计变量展开,定量评定这些参数变动对基坑关键响应指标(如墙体最大侧向位移、坑底隆起量、支撑轴力峰值、地表最大沉降)的影响强弱。运行一系列经设计的单变量或多变量组合的数值模拟工况,演算各参数调整后的响应输出,用敏感性系数、方差分析等方法开展量化排序^[2]。这一步的目的是精准定位对围护体系变形与内力控制起核心作用的“敏感参数”,相关分析可发现,插入比对控制坑底隆起的作用敏感度极高,首道支撑预应力筋对控制墙体侧移早期发展起关键作用,理清这些参数的影响走向和规律,指明后续针对性优化的具体路径和技术方向。

这一阶段的分析不只是排序,关键是吃透参数间的耦合效应和工程意义。例如,增加墙体厚度可增强刚度,但成本急剧上

升;提升支撑预应力可有效降低位移,但或许会提升支撑设计荷载,实施敏感性分析,可划定各参数的有效调节范围,防止优化陷入盲目堆砌材料的错误。这一评估结合工程经验与数值量化,选出调整空间足、效果显著的关键参数作为优化变量,为构建高效率优化模型夯实关键底座,保证后续优化工作聚焦重点、靶向推进。

2.2 多目标优化模型的建立与求解

基于敏感性分析结果,打造兼顾安全、可靠和经济性的多目标优化数学模型是关键步骤。此模型将以下三项作为综合优化目标:压缩基坑最大侧向位移与地表沉降,保障基坑自身及周边环境安全;降低支护结构(如墙体弯矩、支撑轴力)最大内力,提升结构可靠度与耐久性;同步削减支护体系混凝土与钢材总用量,管控工程造价。模型严格纳入各类约束条件,包含设计参数的上下限(如插入比规范最小值、支撑最小间距)、结构强度及变形规范限值,以及施工可行性准则,这属于一个典型的、可能出现目标冲突的多约束多目标优化问题。

要高效处理这一复杂问题,多采用代理模型和智能优化算法结合的方法。采用试验设计(DOE)支撑的数值模拟样本,借助响应面法或克里金法,构建关键响应(如位移、内力)对应设计参数的近似代理模型,大幅压缩后续直接调用耗时数值计算的成本^[3]。采用多目标遗传算法(如NSGA-II)这类智能算法,依托代理模型和约束条件开展大规模、多轮迭代的全局寻优,算法最终输出帕累托最优解集,提升所有解中任意一个的任意一项目标性能,必定造成其他至少1个目标性能下滑。该解集列出多套在多个竞争目标间实现不同平衡的非劣化优化设计方案,给决策者配齐丰富的备选方案集。

2.3 优化方案的综合比选与确定

得到帕累托最优解集后,需从其中筛选出最终可执行的优化设计方案。该过程兼顾工程判断与多准则决策,从帕累托前沿筛选分布均匀、具有代表性的若干个(通常3—5个)优势方案,按严格标准做全工况数值模拟复验,核查代理模型精度,对各方案在极端荷载、复杂地质等极限工况下的实际性能与安全储备做全面评估。复验不光紧盯基坑自身稳定性,还着重分析各方案对邻近管线、建筑物、道路等环境设施的影响区别。

构建包含技术、经济、施工多层面的综合比选指标体系。技术模块覆盖安全系数、变形控制水平、结构可靠性;经济维度紧盯材料成本、总工程造价;施工环节重点考量工序复杂度、工期影响、施工风险^[4]。用专家打分法、层次分析法(AHP)或熵权法等设定各指标权重,之后对各候选方案开展量化评分与加权评估。某方案位移控制效果最优,但投入成本偏高,另一套方案成本最低,但需要更精准地施工控制。经系统比对筛选,最后选定一个符合所有安全和规范硬性约束的选项,平衡技术先进性、经济合理性及施工可操作性的最优支护结构优化设计方案,完成优化分析到工程实施的全链路覆盖。

3 优化后基坑支护体系的稳定性综合评价

3.1 整体稳定性强度折减分析

强度折减法按步骤降低土体黏聚力和内摩擦角, 检验优化后基坑支护体系的整体稳定性极限状态。依托数值模型, 逐步减小抗剪强度参数, 复现土体强度逐步衰减的过程, 直到计算不收敛或支护结构位移出现突变, 表明基坑进入整体失稳临界状态。通过该方法求出的强度储备安全系数, 可全面反映支护体系抵御整体滑移和倾覆的能力。将该系数和《建筑基坑支护技术规范》等相关规范设定的安全系数下限做对比, 可借助定量方式严格核查优化方案在极端荷载、水位骤变等不利工况下整体稳定性是否合格, 分析结果全面验证支护结构整体可靠性, 还为工程风险防控给出明确的数值依据。

3.2 支护结构自身强度与变形稳定性校核

按优化方案完成全施工工序的数值模拟结果, 提取支护结构(如地下连续墙、各道混凝土或钢支撑)的最终内力分布, 含弯矩、剪力、轴力。按照混凝土结构设计规范或钢结构设计规范, 校验支护构件截面强度, 让最大内力组合值不超过材料抗力设计值, 以此避免结构性压屈、剪切或弯拉破坏^[5]。核验基坑开挖到坑底后的最大侧向位移、坑底隆起量等关键变形指标, 同控制标准或设计预警值(如0.3%H或绝对位移阈值)做对比, 保障支护体系维持正常使用极限状态, 符合施工和使用阶段的变形稳定标准, 防止变形过大损害基坑正常功能或触发次生灾害。

3.3 周边环境变形影响与控制效果评估

借优化方案实施数值模拟, 收集基坑周边地表沉降槽曲线、邻近建(构)筑物及地下管线的差异沉降, 以及因降水或渗流引起的地下水位变化等环境响应数据。依照项目匹配环境保护等级的控制标准, 判定施工对周边环境的影响是否在允许界限内, 再将优化后的模拟结果和原始方案做对比, 像地表最大沉降减少百分比、建筑差异沉降降低幅度、水位影响范围缩小程度这类指标, 属于定量分析范畴。梳理优化设计(如调整支撑刚度、改

进降水方案、增设隔离措施)对控制基坑变形、减小土体扰动、保护周边设施的实际作用。该次测评证明优化方案兼顾工程安全, 明显提高环境友好性与社会综合效益。

4 总结

本文构建纳入水土耦合效应的精细三维有限元模型, 成功模拟水利工程深基坑开挖的动态流程。依据数值模拟结果, 系统研判支护设计参数敏感度, 采用多目标优化方法, 敲定兼具安全属性与成本平衡的优化支护方案, 补充稳定性分析说明, 优化后的支护体系整体稳定安全系数达标, 支护结构自身强度达标, 还能切实把控基坑变形和周边环境影响。本次研究验证, 数值模拟技术在深基坑支护设计优化与稳定性评价方面作用显著, 这类系统性的分析方法和流程, 可给同类水利工程深基坑的设计和施工提供重要借鉴, 助力基坑工程朝着更精细化、科学化的方向迈进。

[参考文献]

- [1]孙慧.基于离心机数值模拟的深基坑开挖支护结构受力和变形研究[J].岩土工程学报,2024,46(S02):114-118.
- [2]陈锦涛,韩爱果,任光明.基于应力监测的软岩隧道支护结构稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(1):5.
- [3]孙东哲,钟兴荣,何浩林.基于MIDAS深基坑内支撑支护数值模拟分析[J].云南水力发电,2023,39(4):102-104.
- [4]仇建春,房彬,曹睿哲.深基坑中新型双排复合支护结构的三维空间有限元分析[J].南水北调与水利科技,2017,15(6):8.
- [5]姬彦雷.粉土地区地铁明挖下沉段支护结构数值分析及优化设计[J].黑龙江科技信息,2020,(018):129-130.

作者简介:

韩陈立(1990--),男,汉族,河南南阳人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:水利工程建设。