

房建工程中深基坑支护方案优化与安全性评估方法

张翼飞

甘肃省建设监理有限责任公司 甘肃 兰州 730070

摘要:我国城市化加速、土地资源趋紧,高层、超高层建筑及地下空间开发成主流,深基坑工程作为关键前置环节,其施工安全与稳定性关乎工程成败、周边环境安全及社会公共利益。但深基坑工程地质条件复杂、荷载多变、施工扰动大、风险集中,事故后果严重。因此,科学高效优化深基坑支护方案、建立可靠安全性评估方法,是岩土工程领域亟待解决的核心问题。本文系统剖析影响支护方案选择的关键因素,提出融合多目标决策、数值模拟分析、信息化施工反馈和全生命周期成本理念的综合优化策略,同时构建涵盖设计理论验算、施工实时监测预警、基于风险概率-后果矩阵的动态安全性评估体系,为提升我国深基坑工程技术水平、保障施工安全、控制成本提供理论与实操指导。

关键词:深基坑;支护方案;优化策略;安全性评估;数值模拟;信息化施工

引言

城市中心寸土寸金,向高空和地下拓展空间成必然,深基坑开挖深度常超5米(部分地区3米),其规模大、深度深、环境复杂,给传统岩土工程技术带来巨大挑战。深基坑开挖会打破地层应力平衡,引发复杂力学响应,且周边多邻近重要基础设施,变形控制要求严苛。近年来,国内外深基坑坍塌事故频发,如上海“楼倒倒”、杭州地铁湘湖站事故等,警示其安全性不容忽视。传统支护设计依赖经验与规范,面对复杂工况,存在方案保守、成本高或风险识别不足等问题。如今,随着计算、监测技术及风险管理理论发展,深基坑工程向精细化、智能化、全过程管理演进。支护方案优化需在安全、经济、工期、环境等多目标间寻最佳平衡,安全性评估也由静态事后验算转为动态前瞻性风险管控。本文将围绕“优化”与“评估”两大主题展开论述。

1 影响深基坑支护方案决策的关键因素

支护方案的最终确定是多种因素博弈与权衡的结果,主要包括以下几个方面:

1.1 工程地质与水文地质条件

这是最根本的制约因素。土层的物理力学参数(如内摩擦角 φ 、粘聚力 c 、压缩模量 E_s 、渗透系数 k 等)直接决定了土压力的大小和分布形态。软土地区(如淤泥、淤泥质土)强度低、压缩性高、流变性强,对支护结构的变形控制提出严峻挑战,通常需要刚度大的支护形式(如地下连续墙)^[1]。砂性土地区则需重点考虑地下水的管涌、流砂风险,可靠的止水帷幕(如TRD工法、CSM工法、地下连续墙)不可或缺。岩石地层中,基坑稳定性相对较好,但需注意岩体结构面的影响。

1.2 基坑的几何特征

基坑的平面形状(规则/不规则)、开挖深度、长宽比等直接影响支护结构的受力模式和内力分布。超深基坑($>20\text{m}$)对支护结构的强度和刚度要求极高;狭长形基坑两端的“空间效应”可以利用,而方形或圆形基坑则需考虑整体的空间协同作用。

1.3 周边环境敏感度

这是决定变形控制标准的核心。基坑边缘距离既有建筑物、重要道路、历史保护建筑、地铁隧道、生命线管线(燃气、供水、通信)的距离越近,允许的变形值就越小。此时,必须优先选择变形控制能力强的支护方案,如地下连续墙配合多道混凝土内支撑,或采用逆作法等特殊工法。

1.4 工期与施工组织

不同的支护方案对应着截然不同的施工周期。例如,混凝土内支撑体系虽然性能优越,但其浇筑、养护、拆除过程耗时较长;而钢支撑则可以实现快速安装和拆卸,有利于缩短工期。此外,支护方案还需与主体结构的施工顺序相协调,避免相互干扰。

1.5 经济成本

成本始终是业主关注的重点。支护工程的成本不仅包括直接的材料费、人工费、机械费,还应考虑间接成本,如因支护方案导致的工期延长费用、对周边环境造成损害的赔偿费用、以及后期维护费用等。一个看似便宜的方案,如果因变形过大导致邻近房屋开裂,其总成本可能远超一个初期投入较高的优质方案。

1.6 技术成熟度与地方经验

施工单位的技术装备水平、类似工程经验以及地方性的施工习惯,也会对方案选择产生影响。一个理论上完美的方案,如果当地缺乏成熟的施工队伍或专用设备,

其实施风险会大大增加。

2 深基坑支护方案的综合优化策略

2.1 多目标决策优化模型

深基坑支护方案的优化本质上是一个典型的多目标决策问题。我们可以将安全性（以围护结构最大位移、关键构件应力等指标表征）、经济性（以工程总造价表征）、工期（以关键路径持续时间表征）和环境友好性（以对周边建筑及设施的影响程度表征）确立为四个核心优化目标^[2]。在此基础上，可以运用层次分析法（AHP）或模糊综合评价法等成熟的决策工具，邀请领域内的专家对各目标的重要性进行科学赋权。随后，对初步筛选出的若干个技术上可行的备选方案进行量化打分和综合评价，最终得出一个能够兼顾各方诉求的综合最优解。这种方法成功地将工程师定性的经验判断转化为定量的数学比较过程，使得决策结果更加客观、透明且具有说服力。

2.2 基于数值模拟的精细化分析与比选

传统的极限平衡法和弹性地基梁法（如“m”法、“K”法）虽然计算过程相对简便，但其在模拟土-结构之间的非线性相互作用、真实反映分步开挖的时空效应以及处理复杂边界条件等方面存在明显局限。现代岩土工程已广泛采用有限元法（FEM）或有限差分法（FDM）进行三维精细化数值模拟。在这一过程中，工程师可以在计算模型中精确地反映地质分层情况、地下水位分布、周边建筑物的基础形式以及既有的地下构筑物等关键信息。更重要的是，数值模拟能够全过程地再现从第一层土方开挖直至基坑封底的每一个施工步序，动态地展示土体应力、应变、位移以及孔隙水压力的演化全过程。通过对不同支护方案（例如调整支撑的道数、位置、预加轴力的大小或围护墙体的厚度等）进行“虚拟施工”对比，可以清晰地揭示各方案在关键性能指标上的优劣，从而为找到性能与成本的最佳契合点提供强有力的科学依据。

2.3 融合信息化施工（IMS）的动态反馈优化

深基坑工程最大的不确定性源自于地质条件的“灰箱”特性——勘察工作所能获取的数据仅仅是离散的点，无法完全、精确地描绘出整个场地作为连续介质的真实状态。因此，任何基于前期勘察资料的设计都不可避免地带有理想化的假设。信息化施工（IMS）正是应对这一固有不确定性的有效手段。该策略要求在施工前就建立起一个完善的自动化监测网络，对围护墙（桩）的深层水平位移、顶部沉降与水平位移、支撑轴力、立柱隆沉、周边地表沉降、邻近建筑物的倾斜与裂缝发展以及地下水位变化等关键参数进行全方位监控。通过实时

采集和分析这些数据，并将其与数值模拟的预测值进行动态对比，一旦发现显著偏差（例如位移速率突然加快），便能迅速判断出现场实际地质条件或土体力学参数与设计假定不符。此时，应立即启动应急预案，并利用反演分析技术修正土体参数，重新进行数值模拟，进而对后续的施工方案（如调整开挖顺序、增设临时支撑或进行补充注浆加固等）进行动态优化。这种“设计-施工-监测-反馈-再设计”的闭环管理模式，构成了确保深基坑工程安全的核心保障机制。

2.4 全生命周期成本（LCC）理念的引入

传统的成本核算方法通常只关注工程建设期内的直接投入。而全生命周期成本（LifeCycleCost,LCC）理念则将评估的视角延伸至工程项目的整个寿命周期。这一理念下的成本构成不仅包括初始的建设成本，还涵盖了施工期间因特定支护方案而产生的额外管理与监测费用、因支护失效或变形超标所导致的周边环境损害赔偿及工期延误罚款等风险成本，以及工程结束后支护结构的拆除、清运和场地环境修复等处置成本^[3]。通过引入LCC分析，可以更全面、更真实地评估不同支护方案的经济性，有效避免“省小钱、花大钱”的短视决策行为。例如，一个采用可回收钢支撑的方案，尽管其初期采购成本可能略高于一次性使用的混凝土支撑，但其在工程结束后的残值回收以及便捷、低成本的拆除特性，很可能使其在整个生命周期内的总成本低于后者。

3 深基坑工程安全性评估方法体系

3.1 设计阶段的理论安全性评估

此阶段的安全性评估主要依据国家及地方的相关技术规范（如《建筑基坑支护技术规程》JGJ120）进行，是保障工程安全的第一道防线。评估工作主要围绕两个核心状态展开：一是承载能力极限状态验算，即对支护结构体系中的各个组成部分（包括围护墙、支撑、立柱、锚杆等）进行抗弯、抗剪、抗压、抗拔等承载力的复核，同时验算基坑整体滑动、坑底隆起、管涌等宏观失稳模式的安全系数是否满足规范的最低要求；二是正常使用极限状态验算，重点在于验算围护结构的最大水平位移以及由此引发的周边地表沉降是否控制在允许的范围内，以确保周边环境设施的安全与正常使用。需要指出的是，此阶段的评估是建立在理想化计算模型和相对保守的土体参数基础之上的，其结果具有一定的安全裕度，但也存在与现场实际情况脱节的风险。

3.2 施工阶段的实时监测与预警评估

为了实现有效的安全管控，必须根据设计计算结果、相关规范要求以及周边环境的承受能力，为各项监测指

标科学设定三级预警阈值：黄色预警（通常指累计变形值达到设计允许值的70%或日变量速率出现异常波动）、橙色预警（累计值达到85%）以及红色预警（累计值达到100%或监测数据出现突变）。在评估过程中，绝不能孤立地看待单一监测数据的变化。例如，某道支撑轴力的突然损失，往往与围护墙在该位置的位移加速密切相关；而地下水位的异常下降，则可能是止水帷幕存在渗漏通道的直接信号^[4]。因此，必须通过对不同监测项目时空变化规律的关联分析，才能更准确地诊断险情的根源并预判其发展趋势。一旦监测数据触发任一级预警，就必须有一套清晰、高效的应急响应机制立即启动，包括组织现场紧急巡查、进行数据深度分析、召集专家会诊，并果断采取回填反压、注浆加固或架设临时支撑等应急措施，将风险扼杀在萌芽状态。

3.3 基于风险概率-后果矩阵的动态安全性评估

其实施过程始于对深基坑施工全过程中可能发生各类风险事件（如围护结构断裂、支撑体系失稳、坑底突涌、周边建筑倒塌等）进行系统性的识别。随后，需要结合地质勘察的不确定性、施工质量的波动性以及人为操作失误等因素，运用蒙特卡洛模拟、贝叶斯网络等概率分析工具，对各风险事件发生的可能性进行科学估算。与此同时，还需对每个风险事件一旦发生所造成的经济损失、人员伤亡和社会负面影响等后果进行等级量化。最终，将风险事件的发生概率与其后果等级在预先设定的风险矩阵中进行交叉定位，从而确定每个风险事件的具体风险等级（高、中、低）。最关键的是，这套评估体系并非一成不变，而是随着施工的不断推进和监测数据的持续积累，动态地更新各风险事件的发生概率，实现对工程风险的实时、动态评估与分级精准管控。对于被

评定为高风险的事件，必须投入足够的资源进行重点防范和预案演练。

4 结语

深基坑工程作为岩土工程领域极具挑战性的课题，本文对其支护方案优化策略与安全性评估方法展开系统探讨并得出结论：深基坑支护方案选择是复杂系统工程，需综合地质、环境、经济、工期等因素，摒弃单一维度决策；优化应采用集成化策略，以多目标决策模型为框架、精细化数值模拟为工具、信息化施工反馈为驱动，融入全生命周期成本理念，实现综合效益最大化；安全性评估要贯穿工程全周期，构建“理论验算-实时监测-风险评估”三位一体动态评估体系，实时预警和风险动态管理是提升安全管控水平关键。展望未来，随着BIM、物联网、大数据和AI技术深度融合，深基坑工程将更智能化，BIM模型集成全要素信息形成数字孪生体，AI算法实现风险智能识别与预警，自动化施工装备自主调整参数，提升工程安全性、效率和智能化水平，为城市可持续发展筑牢安全根基。

参考文献

- [1]王德志,杨江.房建工程中深基坑开挖与支护施工关键技术研究[J].建筑机械,2025,(11):272-277.
- [2]刘江.房建工程深基坑支护施工安全风险与控制措施[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十二届工程技术与数字化转型学术交流会论文集.中国水利水电第八工程局有限公司,;2025:365-367.
- [3]朱佳富,刘丽娜.深基坑支护施工技术在房建工程管理中的应用研究[J].中国建筑装饰装修,2025,(19):157-160.
- [4]王朝兴.房建项目深基坑支护技术施工问题深度研究及实践优化[J].工程机械与维修,2025,(07):53-55.