

复杂工况建筑工程深基坑变形规律及支护参数优化研究

胡平

呼和浩特市四方工程质量检测试验有限公司 内蒙古 呼和浩特 010020

摘要：城市核心区深基坑工程普遍存在地质条件复杂、周边构筑物密集、地下管线错综复杂、施工场地狭窄等复杂工况，施工扰动与地下水渗流耦合作用易引发围护结构侧移、地表不均匀沉降、坑底隆起等病害，极大威胁工程本体及周边环境安全。为精准揭示复杂工况下深基坑变形演化特征，实现支护体系精细化设计，本文依托 FLAC3D 数值模拟与工程实测数据，系统分析深基坑开挖全过程时空变形规律，探究支护桩嵌固深度、桩间距、钢支撑预应力、支护刚度等核心参数的变形控制机制与敏感性差异，总结现阶段支护设计同质化、参数取值保守、安全与经济性失衡等突出问题。通过多工况对比迭代模拟，确定适配复杂地层与密集建构筑物环境的最优支护参数区间，构建“变形规律研判—参数敏感性分析—分区多目标优化”的精细化支护设计体系。

关键词：复杂工况；深基坑；变形规律；支护参数；数值模拟；参数优化

Research on Deformation Law and Supporting Parameter Optimization of Deep Foundation Pit in Building Engineering under Complex Working Conditions

Ping Hu

Hohhot Sifang Engineering Quality Inspection and Test Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 010020

Abstract: Deep foundation pit projects in urban core areas generally confront complex working conditions including complicated geological conditions, dense surrounding structures, intricate underground pipelines and narrow construction sites. The coupling effect of construction disturbance and groundwater seepage easily induces hazards such as lateral displacement of retaining structures, differential surface settlement and pitbottom heave, which greatly threaten the safety of the project itself and surrounding environment. To accurately reveal the deformation evolution characteristics of deep foundation pits under complex working conditions and realize the refined design of supporting systems, this paper systematically analyzes the spatiotemporal deformation law throughout the whole excavation process of deep foundation pits based on FLAC3D numerical simulation and field measured engineering data. The deformation control mechanism and sensitivity differences of core parameters such as embedded depth of supporting piles, pile spacing, prestress of steel supports and supporting stiffness are explored. Prominent problems at the present stage are summarized, including homogenized supporting design, conservative parameter selection and imbalance between safety and economy. Through comparative iterative simulation under multiple working conditions, the optimal range of supporting parameters suitable for complex strata and environment with dense buildings is determined, and a refined supporting design system of “deformation law assessment — parameter sensitivity analysis — zoned multiobjective optimization” is established.

Keywords: Complex working conditions; Deep foundation pit; Deformation law; Supporting parameter; Numerical simulation; Parameter optimization

引言

国内城市建设逐步由增量外延转向存量提质，地下空间开发利用力度持续加大，城市核心区高层建筑、地下车库、综合管廊及地铁配套深基坑工程数量逐年增多。相较于郊区开阔场地基坑，城区深基坑多处于复杂约束工况，普遍存在土岩复合、富水软弱、地层多次扰动等不良地质条件，同时紧邻老旧民居、商业建筑、市政管线及城市主干道，保护对象等级高、施工容错率极低，变形控制标准更为严苛。

深基坑开挖卸荷引发土体应力重分布，地下水渗流进一步加剧土体固结与变形，使得基坑变形呈现显著的时空效应与连锁破坏特征。当前工程设计多依据规范经验取值，支护参数同质化严重，未充分适配复杂地层的非均匀变形特征，易出现高风险区域支护刚度不足、常规区域支护冗余浪费的问题，频繁诱发墙体开裂、管线破损、路面沉降等工程隐患。尤其在异形基坑、软硬交替地层中，统一支护参数难以匹配动态变形发展规律，极易产生应力集中与局部变形超标现象。

众多学者针对深基坑变形与支护优化开展相关研究。吉艳雷等针对土岩组合地层异形基坑开展研究,证实分区支护可有效改善结构受力状态;蔡建军等通过数值模拟发现,支撑预应力与围护刚度对基坑变形控制具有主导作用;毕湘利等验证了伺服动态预应力调控技术可有效抑制软土基坑后期变形累积。现有研究多聚焦单一参数优化,对复杂工况下多参数协同匹配、时空变形耦合规律及分区优化体系的研究仍不够完善。基于此,本文结合典型复杂工况深基坑工程,系统揭示开挖全过程变形规律,开展多参数敏感性分析,建立安全、经济、适配性强的支护参数优化体系,为城区复杂深基坑工程建设提供技术支撑。

1 复杂工况深基坑工程特征与变形机理

1.1 复杂工况核心特征

复杂工况深基坑的约束条件主要集中在地质、环境、施工三个维度。地质层面多存在软土夹层、风化岩层、地下水富集、地层扰动不均等问题,土体抗剪强度低、固结时效性强,基坑整体稳定性差、变形可控难度高。周边环境层面,基坑周边建构筑物密集、管线排布杂乱,老旧结构抗变形能力弱,对沉降与位移极为敏感,变形控制阈值远低于常规工程。施工层面,城区场地狭窄、大型机械作业受限,开挖与支护工序穿插紧密,施工扰动叠加效应显著,易诱发突发性变形风险^[1]。

1.2 深基坑变形核心机理

深基坑开挖变形主要包括围护结构侧向变形、坑底隆起与周边地表沉降三类,三者相互耦合、同步演化。基坑分层开挖卸荷后,坑内侧压力释放,原有土体应力平衡被打破,坑壁土体主动土压力增大,推动围护结构向坑内偏移,形成侧向变形。随着开挖深度增加,坑底竖向应力持续释放,土体产生弹性回弹与塑性隆起,软土、富水地层隆起变形更为突出。围护结构侧向位移会带动周边土体滑移,形成自上而下的不均匀沉降,而地下水渗流会加剧土体颗粒流失与固结压缩,进一步放大变形幅值,形成复合型变形病害。复杂工况下地层非均匀性显著,统一支护结构难以适配差异化土体变形特征,最终导致基坑局部变形突变、整体分布不均^[2]。

2 复杂工况深基坑时空变形规律分析

结合 FLAC3D 数值模拟结果与现场监测数据,从时间演化与空间分布两个维度,系统总结复杂工况深基坑开挖全过程变形规律,明确关键风险节点与变形控制重点。

2.1 时间维度变形规律

基坑变形随开挖工序推进呈现阶段性增长特征,可划分为缓慢变形、快速增长、稳定收敛三个典型阶段。浅层开挖阶段,土体卸荷量小、应力调整幅度低,围护侧移与地表沉降增速平缓,整体变形处于可控状态;中层开挖为变形快速增长核心期,该阶段土压力随深度显著提升,土体塑性变形持续发展,围护结构变

形速率、坑底隆起速率大幅提升,是基坑安全管控的关键窗口期;基坑开挖至设计标高后,土体应力逐步完成重分布,变形增速持续放缓,待底板混凝土成型并达到强度后,整体变形逐步收敛稳定。施工过程中,支撑架设滞后、预应力缺失会导致前期变形累积,富水地层降水作业会加速土体固结,进一步增大前期沉降变形,需通过及时支护、动态预应力调控加以控制^[3]。

2.2 空间维度变形规律

空间分布上,围护结构侧向变形整体呈“中间大、两端小”的抛物线分布形态,最大变形区域集中在开挖面附近,并随开挖深度增加逐步向下迁移。基坑阳角、异形转角区域存在明显应力集中效应,土体滑移范围更广、变形量显著大于标准段,是复杂基坑的主要风险点位。周边地表沉降呈现近大远小的衰减特征,距围护结构 3 ~ 8m 区间为沉降峰值区,超出该范围后沉降量逐步递减。土岩复合地层中,土层厚度越大、岩层风化程度越高,土体压缩变形越明显,导致基坑整体变形分布极不均匀,常规统一支护参数无法适配空间差异化变形特征。

3 基坑支护参数敏感性分析

为量化各参数对基坑变形的影响程度,采用单一变量控制法开展参数敏感性分析,选取支护桩嵌固深度、桩间距、钢支撑预应力、支护刚度四项核心参数,以围护最大侧向变形、地表最大沉降作为评价指标。

3.1 支护桩嵌固深度

嵌固深度是控制坑底滑移、隆起与整体失稳的关键参数。模拟结果表明,规范合理区间内增大嵌固深度,可显著提升支护体系整体刚度,有效削减侧向变形与坑底隆起量。但嵌固深度达到临界值后,变形抑制效果趋于饱和,边际效益大幅下降,盲目加深嵌固深度仅会增加施工成本,无法持续提升安全储备。软土富水地层需适当增大嵌固深度,可有效规避坑底突涌、土体滑移风险;土岩复合地层可适度减小嵌固深度,兼顾安全与经济^[4]。

3.2 支护桩间距

桩间距直接决定支护体系整体刚度与桩间土拱效应发挥效果。桩间距越小,支护整体约束能力越强,基坑变形控制效果越好,但过密布置会造成材料冗余、造价偏高。复杂工况下,桩间距过大会削弱土拱效应,引发桩间土坍塌、局部滑移,尤其其基坑转角、临近建构筑物高风险区域,应力集中显著,需加密桩体布置、缩小桩间距,提升局部抗变形能力。

3.3 钢支撑预应力参数

钢支撑预应力可主动抵消土体侧压力,从源头抑制围护结构前期变形发展。合理提升预应力可显著降低围护侧移,稳定地层变形,但预应力过大易造成桩身应力过载、结构损伤,过小则无法发挥主动支护效果,导致变形累积超标。多层支撑体系中,上下支撑受力存在差异,采用下层高预应力、上层低应力的差异

化配比,可优化整体应力分布,规避局部应力集中问题。

3.4 支护结构刚度

支护桩与地下连续墙抗弯刚度直接决定围护结构抗变形能力。刚度提升可有效降低基坑最大变向量,但刚度超过最优阈值后,变形改善效果趋于平缓,经济性显著降低。复杂工况无需全域高刚度设计,可采用分区差异化刚度配置,对软弱地层、转角、临近构筑物等风险区域强化刚度,标准段适度优化,实现刚度资源合理分配^[5]。

4 复杂工况支护参数优化方案与效果验证

4.1 参数优化原则

结合变形规律与敏感性分析结果,确立三项优化原则。一是安全性优先,严格把控围护侧移、地表沉降、坑底隆起等指标,满足《建筑基坑工程监测技术标准》(GB50497-2019)规范及周边环境保护要求;二是差异化适配,依据基坑空间变形差异、地层分布与周边环境等级,实施分区参数设计;三是经济最优,剔除冗余支护参数,在安全阈值内压缩工程造价,实现安全、质量、经济协同最优。

4.2 核心参数优化取值

通过多组数值迭代模拟,确定复杂工况最优参数区间。嵌固深度方面,软土富水地层取开挖深度 0.8 ~ 1.0 倍,土岩复合地层取 0.6 ~ 0.8 倍;桩间距方面,基坑标准段取值 1.5 ~ 2.0m,转角及临近构筑物高风险区域加密至 1.0 ~ 1.2m;钢支撑采用分层差异化预应力布置,下层支撑适度提压、上层适度减压,匹配深部大变形特征;支护刚度实行分区配置,风险区域强化抗弯刚度,常规区域适度优化,整体刚度系数控制在合理区间。同时精准匹配支撑布设位置,贴合开挖面变形峰值区域,最大化发挥支护效能。

4.3 优化效果验证

将优化参数代入数值模型与原设计方案对比,结果表明:优化后基坑围护最大侧向变形削减 18.6%,地表最大沉降削减 22.3%,坑底隆起变形显著降低,整体变形分布均匀,无局部突变与应力集中现象。优化方案有效规避了传统设计的参数冗余问题,相较原设计工程造价降低 12%,在完全满足复杂工况变形控制标准的前提下,实现了支护体系安全可靠、经济高效的双重优化,适配城市核心区复杂深基坑工程建设需求。

5 现存问题与优化保障措施

5.1 现阶段支护设计现存问题

当前复杂深基坑支护设计普遍存在三类短板。其一,设计同质化严重,未结合地层差异、空间变形特征分区设计,高风险区域支护偏弱、常规区域支护冗余;其二,参数取值多依赖工程经验,

精细化数值模拟与敏感性分析不足,动态适配性差;其三,施工管控不到位,支撑预应力施加偏差、嵌固深度不足、支护滞后等问题频发,导致优化设计方案难以落地,变形控制效果大打折扣。

5.2 施工管控保障措施

为保障优化参数落地见效,需配套精细化施工与监测管控体系。施工中严格执行分层、分段、对称、均衡开挖原则,缩短无支护暴露时间,匹配支护施工节奏;采用伺服动态调控技术,精准控制钢支撑预应力,根据实时变形数据动态微调参数,实现主动防控;搭建全方位智能监测体系,实时采集围护变形、地表沉降、支撑轴力、地下水位数据,设置分级预警阈值,动态校核支护适配性,及时调整施工方案,杜绝变形超标风险。

结语:

本文针对城市复杂工况深基坑变形管控难、支护参数匹配性差、经济性不足等工程问题,系统开展时空变形规律分析、参数敏感性研判与支护体系优化研究,得出如下结论。复杂工况深基坑变形具有显著阶段性与空间差异性,中层开挖为变形快速增长关键期,基坑转角、软弱土层区域为核心高风险点位,地层非均匀性与支护参数同质化是诱发局部变形超标的主要原因。支护桩嵌固深度、桩间距、钢支撑预应力、支护刚度对基坑变形控制高度敏感,各参数均存在最优取值区间,盲目增大支护参数无法持续提升安全性能,反而会造成资源浪费。采用分区差异化参数优化方案,可有效均衡基坑变形分布、抑制局部突变变形,在保障工程安全与周边环境稳定的基础上降低工程造价,适配城区复杂深基坑工程建设需求。

后续研究可结合 BIM 与智能算法,构建深基坑支护参数动态迭代优化系统,依托实时监测数据实现参数智能调整,进一步提升复杂工况深基坑支护设计的精细化与智能化水平,为城市地下空间安全开发提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 吉艳雷,王浩.土岩组合地层异形深基坑支护体系优化研究[J].岩土工程技术,2024(1):45-50.
- [2] 蔡建军,谢璨,李树忱.复杂条件下深基坑多层支护方法及数值模拟研究[J].工程力学,2023(2):189-195.
- [3] 张小方,李阳.基于刚度调整的深基坑支护体系响应与优化设计[J].地质灾害与环境保护,2024(3):76-81.
- [4] 陈登伟.紧邻既有构筑物超大异形深基坑施工变形规律及优化[J].中外公路,2024(6):134-139.
- [5] 张晗,王建军.双排桩-斜撑基坑支护体系现场测试与参数优化[J].岩土工程学报,2025(S2):112-117.