深基坑开挖变形监测与数值模拟分析

任　博[1]　任志远[2]
1. 神木市水务集团有限公司　陕西　榆林　719300
2. 神木市水务集团瑶镇水库供水有限公司　陕西　榆林　719300

摘　要：随着城市高层建筑、地下轨道交通工程快速发展，深基坑工程施工规模持续扩大、开挖深度不断增加。基坑开挖会打破土体原有应力平衡，极易引发墙体位移、地表沉降等变形问题，威胁施工安全与周边构筑物稳定。本文围绕深基坑开挖变形监测与数值模拟展开研究，阐述监测工作核心价值、主流监测技术，系统探究数值模拟分析方法与应用要点，为深基坑工程安全施工、变形管控提供理论支撑与技术参考。

关键词：深基坑；开挖变形；变形监测；数值模拟

引言

城市化进程推进促使地下空间开发利用率大幅提升，深基坑作为地下工程基础环节，施工环境复杂、土体扰动风险高。基坑开挖卸荷引发的土体变形具有隐蔽性、突发性特征，一旦变形失控将引发坍塌、管线破损等安全事故。传统经验施工模式难以适配复杂基坑工况，精准监测与科学数值模拟成为把控施工风险的核心手段。为规范基坑变形管控、提升工程安全性，本文系统性开展深基坑开挖变形监测与数值模拟相关研究。

1 深基坑开挖变形监测的重要性

深基坑工程属于高风险岩土工程，开挖施工是逐层卸荷、逐步扰动土体的动态过程，原本稳定的土体应力场、位移场会随开挖进程持续重构，不可避免产生各类变形问题。开展系统化、常态化的变形监测工作，是保障深基坑施工全过程安全、控制工程质量风险、优化施工工艺的核心举措，具备极强的工程实用价值与必要性。首先，变形监测可实现施工风险动态预警。深基坑变形发展是循序渐进的过程，微小变形累积将引发结构性安全隐患，通过实时监测基坑围护结构、周边土体、地表地貌的变形数据，能够精准捕捉变形发展趋势，及时发现超阈值变形、异常位移等风险隐患，提前预警坍塌、沉降等安全事故，为施工人员调整施工方案、采取加固防护措施预留充足时间，最大限度降低安全事故发生率与工程损失。其次，变形监测可验证施工设计方案的合理性。深基坑施工设计多基于地质勘察数据与理论计算制定，实际施工中，场地地质条件、周边环境、施工荷载等因素存在不确定性，极易出现设计参数与现场工况不匹配的情况。监测获取的实时变形数据可直观反馈设计方案的适配性，帮助技术人员及时修正设计缺陷、优化支护参数与开挖节奏，避免因设计偏差导致的施工质量问题。再次，变形监测可保障周边构筑物与市政设施安全。城市区域深基坑工程多毗邻既有建筑、地下管线、道路桥梁等设施，基坑开挖引发的土体变形会间接影响周边构筑物稳定性。精准的变形监测能够严格把控变形影响范围与变形量级，通过数据管控将施工扰动控制在安全范围内，有效保护周边市政设施与民用建筑完好性，减少工程施工对城市环境的负面影响[1]。最后，变形监测可为同类工程积累数据经验。通过长期监测获取的完整变形数据、变形规律，能够丰富深基坑工程数据库，为后续复杂地质、复杂工况下的深基坑施工设计、风险管控、工艺优化提供可靠的数据支撑，推动岩土工程施工技术的规范化、科学化发展。

2 深基坑开挖变形监测技术

2.1 围护结构变形监测技术

围护结构是深基坑抵御土体压力、阻挡土体位移的核心结构，其变形状态直接决定基坑整体稳定性，是变形监测的核心对象。目前工程中主流的围护结构变形监测以测斜监测技术为主，适配混凝土围护桩、地下连续墙等各类围护结构的深层位移监测。该技术核心原理是将高精度测斜管预埋于围护结构内部，跟随围护结构同步产生位移与形变，通过测斜仪沿测斜管竖向逐段测量倾斜角度，结合仪器校准参数与计算公式，精准推算出围护结构不同深度的水平位移量、位移速率与变形趋势。在实际监测工作中，需严格把控测斜管的预埋质量，保证管道竖向顺直、固定牢固，避免浇筑混凝土、土方开挖过程中出现管道偏移、破损等问题，保障监测数据的连续性与准确性。同时，需根据基坑开挖深度、支护结构尺寸合理设置监测点位与监测间距，浅层区域

可加密监测点位，深层区域可适当放宽间距，实现围护结构全深度变形全覆盖监测。该技术能够精准捕捉围护结构局部鼓胀、整体偏移、不均匀变形等问题，为支护结构受力状态分析、变形风险预判提供核心数据支撑，适配绝大多数中大型深基坑工程的监测需求。

2.2 地表沉降监测技术

深基坑开挖引发的土体应力重构，会逐步传递至基坑周边地表，引发地表沉降、不均匀塌陷等问题，直接影响基坑周边施工场地、道路的平整度与安全性，地表沉降监测是基坑周边环境监测的基础内容。现阶段工程应用最广泛的为水准沉降监测技术，依托高精度水准仪、沉降观测点完成数据采集，操作便捷、数据精度高、适配性强。施工前期，技术人员需在基坑周边稳定区域布设基准点，基准点需远离施工扰动范围、地质稳定且不易被破坏，作为沉降数据测算的参照基准。同时，根据基坑开挖影响半径、周边环境复杂程度布设地表沉降监测点，监测点均匀分布于基坑边缘至影响范围边界的区域，重点覆盖道路、施工平台、构筑物周边等关键位置[2]。监测过程中，定期对各监测点高程进行重复测量，通过对比不同时段的高程数据，计算地表沉降量、沉降速率与沉降差值，判断地表变形的均匀性与稳定性。针对地质松软、沉降风险较高的区域，需缩短监测周期、提高监测频次，实时跟踪沉降变化规律，及时发现不均匀沉降、沉降突变等异常情况，为地表防护、土体加固施工提供数据依据。

2.3 周边构筑物变形监测技术

城市核心区深基坑工程周边构筑物密集，建筑墙体、梁柱、基础的变形开裂，以及管线的位移变形，是基坑施工扰动的主要危害形式，因此需针对性开展周边构筑物变形监测。该监测技术主要包含竖向沉降监测与水平位移监测两大维度，同时兼顾构筑物裂缝监测。对于建筑物基础、地下管线等隐蔽结构，延续高精度水准测量方式监测竖向沉降，把控构筑物整体沉降均匀性，避免不均匀沉降引发的结构开裂、管线断裂问题。对于建筑物墙体、外立面、桥梁墩柱等外露结构，主要采用全站仪极坐标法开展水平位移监测，通过精准测量监测点坐标变化，计算结构水平位移量与位移方向，判断构筑物受基坑开挖的扰动程度。同时，针对构筑物出现的细微裂缝，采用裂缝宽度观测仪开展常态化监测，记录裂缝宽度、长度、开度的变化情况，精准判断裂缝发展趋势，区分原生裂缝与施工扰动引发的新生裂缝。该类监测技术针对性强，能够精准捕捉周边构筑物的细微变形，实现对构筑物安全状态的全方位把控，有效规避基坑施工引发的周边设施损坏风险。

2.4 土体深层位移监测技术

基坑开挖过程中，基坑内部及周边原状土体的深层位移是引发围护结构变形、地表沉降的根本诱因，土体深层位移监测能够从源头掌握土体扰动规律，弥补表层监测数据的局限性。该技术主要通过预埋土体位移监测孔，利用专用位移监测设备采集不同土层深度的位移数据，精准监测土体竖向与水平向的深层位移变化。施工布设阶段，需结合场地地质剖面，在基坑边坡、周边土体关键位置布设监测孔，监测孔深度需超出基坑开挖底面一定范围，覆盖主要扰动土层与稳定土层，确保能够完整捕捉土体分层变形特征。监测作业时，按照固定深度间隔采集位移数据，对比不同开挖阶段、不同土层的位移变化，分析土体扰动范围、变形速率与稳定状态[3]。相较于表层变形监测，土体深层位移监测能够直观反映土体内部应力释放与位移发展规律，精准定位变形集中土层，帮助技术人员明确基坑变形的核心诱因，为分层开挖、分层支护施工工艺优化、土体加固方案制定提供深层次的数据支撑，大幅提升基坑变形风险管控的精准度。

3 深基坑开挖变形数值模拟分析

3.1 数值模拟分析的核心原理

深基坑开挖变形数值模拟是以岩土力学、弹塑性力学、有限元理论为核心基础，依托计算机仿真技术，将复杂的基坑开挖岩土工程问题转化为可量化、可模拟的数值计算模型，实现对基坑变形规律的精准预判与分析。其核心原理是对真实基坑工程场地进行模型简化与参数赋值，将连续的土体、支护结构离散为若干有限单元，通过单元节点的应力、位移关联方程，模拟土体在开挖卸荷、应力重分布过程中的受力状态与变形特征。在模拟过程中，首先基于场地地质勘察报告，明确土体含水率、黏聚力、内摩擦角、弹性模量等岩土物理力学参数，同时结合基坑支护形式、结构尺寸、开挖方案，构建贴合实际工况的三维数值模型。随后通过计算机迭代计算，求解不同开挖工况下土体与支护结构的应力场、位移场分布规律，精准模拟围护结构位移、地表沉降、土体深层变形等各类变形问题的产生与发展过程。该原理突破了传统经验分析、单一监测数据的局限性，能够全方位、可视化展现基坑内部变形机制，弥补现场监测无法覆盖深层土体、隐蔽结构变形的短板。

3.2 数值模拟模型的构建流程

科学规范的模型构建是保障数值模拟结果精准可靠

的核心前提，完整的深基坑开挖数值模拟模型构建流程分为数据收集、模型建模、参数赋值、网格划分、边界条件设定五大核心环节。一是基础数据收集，全面整理场地地质勘察资料、基坑施工设计图纸、周边环境参数，明确土层分布、岩土参数、支护结构类型、开挖分层厚度、施工荷载等核心数据，为模型构建提供基础依据。二是模型几何建模，结合工程实际尺寸，利用数值模拟软件构建基坑、土体、支护结构的几何模型，在保证模拟精度的前提下，对次要细节进行合理简化，减少模型计算量，提升运算效率。三是岩土参数赋值，根据地质试验数据与行业规范，为不同土层、支护结构赋值对应的物理力学参数，精准还原土体与结构的受力变形特性。四是网格划分，对模型整体进行精细化网格划分，基坑核心变形区域、支护结构周边采用加密网格，远端稳定土体采用稀疏网格，平衡模拟精度与计算效率[4]。五是边界条件设定，固定模型底部与侧向边界位移，模拟场地土体的天然约束状态，同时施加施工荷载、水土压力等外部荷载，完全贴合现场施工工况。

3.3 数值模拟的核心分析内容

深基坑开挖变形数值模拟的核心分析内容围绕施工全过程变形与受力特征展开，全方位覆盖基坑施工的核心风险点，主要包含三大核心内容。一是围护结构变形分析，通过模拟计算获取不同开挖阶段围护结构的水平位移、竖向沉降数据，分析结构最大变形位置、变形量与变形发展趋势，判断支护结构的受力稳定性，排查局部变形超标、受力不均等风险问题。二是土体变形与应力分析，模拟基坑开挖过程中土体应力释放、重分布的全过程，分析基坑边坡、周边土体的位移变化、应力集中区域，明确土体扰动范围与变形核心区域，掌握土体失稳的潜在风险点位。三是周边环境变形分析，模拟基坑开挖对周边地表、构筑物、管线的变形影响，计算不同距离区域的沉降差值、位移量级，量化基坑施工对周边环境的扰动程度，为周边防护方案、施工优化措施的制定提供量化依据。通过多维度的模拟分析，能够提前预判施工全过程的变形风险，明确最优施工节奏与支护方案，从源头管控基坑变形问题。

3.4 数值模拟与现场监测的协同应用

数值模拟具备预判性、全方位的优势，现场监测具备真实性、实时性的特点，二者协同应用可实现深基坑变形风险的全方位、全周期管控，大幅提升工程施工安全性。数值模拟可在施工前期开展预模拟分析，提前预判不同开挖工况下的基坑变形规律，预判潜在风险点位，为监测点位布设、监测频次设定、施工方案优化提供指导，让现场监测工作更具针对性、科学性。施工过程中，可将现场监测获取的真实变形数据与数值模拟结果进行对比校核，验证模型参数的合理性，针对数据偏差部分及时修正岩土参数、优化模型结构，提升数值模拟的精准度。同时，当现场监测发现变形异常时，可通过数值模拟反向推演变形诱因，分析变形发展趋势，预判后续施工的变形风险，为应急处置、方案调整提供技术支撑[5]。二者相辅相成，既解决了现场监测滞后性、局部性的问题，又弥补了数值模拟理想化、偏差性的缺陷，形成“预判模拟 – 实时监测 – 校核优化 – 风险管控”的闭环管控体系，全面提升深基坑工程变形管控水平。

结语

综上，深基坑开挖变形管控是城市岩土工程施工的核心重难点。系统化变形监测可精准捕捉基坑及周边结构形变特征，实时把控施工安全风险。数值模拟技术能够可视化还原土体与支护结构变形受力规律，预判施工隐患。二者协同运用，可形成全周期风险管控体系，有效弥补单一技术的应用短板，为深基坑施工优化、风险防控及安全保障提供重要技术支撑。

参考文献

[1] 王晓健. 复杂环境下超大深基坑开挖变形监测数值模拟研究 [J]. 邢台职业技术学院学报,2023,40(5):80-86.

[2] 刘学邦. 深基坑开挖变形监测与数值分析 [J]. 江西建材,2023(3):276-278,284.

[3] 崔帅臣, 庞瑞艳, 马文亮. 深基坑开挖变形数值模拟及影响因素分析 [J]. 河南城建学院学报,2024,33(6):41-47,84.

[4] 姚丙生. 深基坑开挖支护后数值模拟及地表监测分析 [J]. 建筑机械,2023(5):48-51.

[5] 戴清宝. 深基坑变形数值模拟结果与监测数据对比分析 [J]. 陶瓷,2023(11):173-175.