

建筑工程基坑稳定性分析与监测技术研究

杨志会

河北建设集团股份有限公司 河北 保定 071000

摘要: 本文聚焦建筑工程基坑稳定性分析与监测技术,系统梳理基坑工程基础理论,深入剖析影响稳定性的地质、设计与施工、周边环境等关键因素。针对传统分析方法的局限性,提出基于多场耦合、机器学习的稳定性分析模型及风险量化评估方法,优化监测技术体系,构建多源融合智能监测系统与数字孪生动态预警平台。研究旨在提升基坑工程安全管控水平,为复杂地质条件下基坑设计与施工提供理论支撑与技术保障。

关键词: 基坑工程;稳定性分析;智能监测

1 建筑工程基坑稳定性基础理论

1.1 基坑工程的类型与特点

基坑工程作为地下空间开发的核心环节,其类型划分与特点分析是稳定性研究的基础。按开挖深度可分为浅基坑(深度 $< 5\text{m}$)、中深基坑($5\text{m} \leq \text{深度} < 10\text{m}$)与深基坑(深度 $\geq 10\text{m}$),其中深基坑工程因涉及土体大变形、多场耦合作用,技术复杂性显著提升。按支护形式可分为放坡开挖、土钉墙支护、排桩支护、地下连续墙支护及组合支护体系,不同支护形式对土体应力重分布的影响机制存在差异。例如,放坡开挖适用于地质条件良好、开挖深度较小的场景,其稳定性主要取决于坡比与土体抗剪强度;而地下连续墙支护则通过刚性墙体与止水帷幕的协同作用,有效控制深基坑变形,但施工成本较高。基坑工程具有空间效应显著、环境敏感性强、施工周期长等典型特点。空间效应表现为基坑边角区域土体应力集中程度低于长边中部,导致变形分布不均;环境敏感性体现在基坑开挖可能引发周边建构筑物沉降、地下管线破裂等次生灾害;施工周期长则增加了不可预见因素(如降雨、地震)对稳定性的影响概率。例如,上海某深基坑工程因临近地铁隧道,施工期间需实时监测隧道变形,调整支护参数与开挖顺序,确保变形控制在 5mm 以内,凸显环境约束对基坑设计施工的颠覆性影响^[1]。

1.2 基坑失稳机理与破坏模式

基坑失稳本质上是土体应力状态突破极限平衡条件的过程,其机理涉及土体强度劣化、支护结构失效及渗流破坏等多因素耦合作用。土体强度劣化可能由降雨入渗导致含水量增加、振动荷载引发结构破坏或化学侵蚀造成胶结物流失引发;支护结构失效包括桩体断裂、锚索松弛或支撑体系失稳等形式;渗流破坏则表现为管涌、流土或突涌等突发性灾害。例如,广州某软土基坑

因未设置有效降水措施,开挖至基底时发生突涌,大量地下水携带粉细砂喷出,导致基坑塌方,直接经济损失超千万元。

基坑破坏模式可归纳为整体失稳与局部失稳两大类。整体失稳以圆弧滑动或双楔体滑动为典型特征,多发生于放坡开挖或支护刚度不足的基坑,其滑动面贯穿整个开挖深度,破坏规模大且难以补救;局部失稳表现为支护结构踢脚破坏、坑底隆起或墙后土体塌落等形式,常见于地质条件复杂或施工操作不当的基坑。例如,杭州某地铁车站基坑因局部支护桩嵌入深度不足,开挖过程中发生踢脚破坏,导致相邻道路塌陷,中断交通长达72小时,凸显局部失稳的连锁反应风险。

2 建筑工程基坑稳定性影响因素分析

2.1 地质与水文地质因素

地质条件是基坑稳定性的物质基础,其复杂性直接决定分析模型的适用性与支护方案的选择。土体类型方面,砂土因内摩擦角较大、黏聚力较小,易发生流砂与管涌;黏土虽抗剪强度较高,但渗透性低,开挖后易产生负孔隙水压力,导致坑底回弹变形;软土则因高压缩性、低强度特性,成为深基坑工程的主要风险源。例如,天津滨海新区某基坑工程位于深厚软土层,开挖过程中坑底最大隆起量达 30cm ,远超规范允许值,需通过堆载预压与真空联合降水提前加固地基;水文地质条件对基坑稳定性的影响具有隐蔽性与突发性,地下水类型(潜水、承压水)决定渗流场分布特征,水位变化幅度影响土体有效应力状态^[2]。例如,南京某基坑工程临近长江,承压水头高于基坑底板,开挖过程中未采取封底措施,导致承压水突破底板,引发基坑突涌;地下水化学成分(如硫酸盐、氯离子)则通过腐蚀支护结构(如混凝土桩、钢支撑)降低其耐久性,间接威胁基坑安全。

2.2 工程设计与施工因素

设计缺陷是基坑失稳的重要诱因，常见问题包括支护结构强度不足、变形控制标准模糊及降水方案不合理等。例如，北京某基坑工程因排桩间距设计过大，开挖至中层时支护结构侧向位移超限，引发周边建筑物倾斜；施工因素方面，开挖顺序混乱、支护施工滞后或降水控制不当均可能导致稳定性失衡。例如，武汉某基坑工程采用分层开挖方式，但上层土体未及时支护即进行下层开挖，导致支护结构被动受力，最终发生整体失稳；施工监测的缺失或滞后进一步加剧风险积累，传统监测手段（如测斜仪、水位计）存在数据采集频率低、空间覆盖不足等问题，难以实时捕捉变形突变信号。例如，成都某基坑工程监测点间距达15m，局部区域变形快速发展时未被及时识别，最终引发支护结构断裂事故。

2.3 周边环境因素

周边环境对基坑稳定性的约束作用日益凸显，其影响范围可达基坑开挖深度的3-5倍。建构筑物荷载通过附加应力增加土体压缩量，老旧建筑因基础承载力不足更易受损；地下管线（如燃气、电力）破裂可能引发爆炸、停电等次生灾害，严重威胁施工安全。例如，深圳某基坑工程邻近地铁隧道，施工振动导致隧道结构出现裂缝，被迫停工整改3个月，直接经济损失超5000万元。交通荷载的动态作用加剧土体疲劳损伤，重型车辆频繁通行可能引发支护结构振动超标。例如，重庆某基坑工程位于主干道旁，施工期间未设置减震沟，支护桩振动加速度峰值达0.3g，超过设计允许值0.2g，导致桩身混凝土开裂。

3 建筑工程基坑稳定性分析方法优化

3.1 基于多场耦合的稳定性分析模型

传统分析方法（如极限平衡法、有限元法）多假设土体为均质连续介质，忽略渗流场、应力场与温度场的耦合作用，导致计算结果与实际偏差较大。多场耦合模型通过引入渗流-应力-温度（THM）耦合方程，更真实地反映基坑开挖过程中土体状态变化。例如，采用COMSOL Multiphysics软件构建三维耦合模型，模拟降雨入渗对软土基坑稳定性的影响，结果显示连续降雨3天后，坑底隆起量增加25%，支护结构侧向位移增大40%，与现场监测数据吻合度达90%以上。多场耦合模型的关键在于耦合参数的准确获取，通过室内试验测定土体渗透系数、热膨胀系数及应力-应变关系，结合现场原位测试（如标准贯入试验、静力触探）进行参数反演，可显著提升模型预测精度。例如，上海某深基坑工程通过多场耦合分析优化降水方案，减少降水井数量20%，节约成本150万元。

3.2 基于机器学习的稳定性预测模型

机器学习技术通过挖掘历史数据中的非线性关系，突破传统分析方法对经验公式的依赖。以支持向量机（SVM）、随机森林（RF）及长短期记忆网络（LSTM）为代表的算法，在基坑稳定性预测中展现优异性能。例如，收集100个典型基坑工程的监测数据（包括土体参数、支护形式、变形量等），构建SVM预测模型，对坑底隆起量的预测误差控制在±5mm以内，较传统有限元法提升30%。模型训练需解决数据不平衡与特征冗余问题，通过合成少数类过采样技术（SMOTE）平衡正负样本，采用主成分分析（PCA）降维提取关键特征，可提升模型泛化能力。例如，广州某地铁基坑工程应用优化后的LSTM模型，提前48小时预警支护结构侧向位移突变，为应急处置争取宝贵时间^[1]。

3.3 稳定性风险量化评估方法

稳定性风险量化评估方法通过构建概率-后果双维度指标体系，将基坑工程中的潜在风险转化为可量化、可对比的决策依据，为风险管控提供精准支撑。该方法以概率分析为核心，采用蒙特卡洛模拟技术，针对支护结构失效、土体滑移等关键风险事件，通过随机抽样生成大量模拟场景（通常达10万次以上），结合土体参数（如内摩擦角、黏聚力）的概率分布模型，计算失效概率的统计特征值（如均值、标准差），并绘制概率密度曲线以直观展示风险分布规律。同时，运用层次分析法（AHP）构建多层级评估模型，将地质条件（如软土厚度、地下水埋深）、支护形式（如排桩支护、地下连续墙）、施工管理（如开挖顺序、降水控制）等关键影响因素分解为目标层、准则层、指标层，通过专家打分与矩阵运算确定各因素权重，最终生成风险矩阵图，以红、黄、绿三色区分高、中、低风险区域。动态评估机制通过物联网技术实时采集地下水位、支护应变等监测数据，自动更新模型输入参数，结合BIM+GIS技术构建三维风险地图，实现风险等级分钟级动态调整，为施工方案优化提供实时决策支持。

4 建筑工程基坑监测技术优化

4.1 多源融合智能监测系统架构

传统基坑监测系统常因数据来源分散、格式不统一，导致“数据孤岛”现象严重，协同分析效率低下。多源融合智能监测系统通过集成传感器网络、无人机巡检与卫星遥感技术，构建“空-天-地”一体化监测体系，实现全要素、全时空覆盖。例如，在支护结构关键部位部署光纤光栅传感器，实时采集应变与温度数据；利用北斗卫星定位系统，以毫米级精度追踪地表沉降与水平

位移；通过无人机搭载红外热像仪与高光谱相机，定期扫描基坑周边，识别渗漏、裂缝等隐患。所有数据通过物联网协议（如MQTT）传输至云端平台，采用数据融合算法（如卡尔曼滤波）消除多源数据误差，生成三维可视化监测看板。系统架构设计强调可靠性与扩展性：边缘计算节点部署于基坑现场，对原始数据进行清洗与预处理，仅将关键特征上传云端，降低带宽需求；微服务架构将系统拆分为数据采集、存储、分析、预警等独立模块，支持通过容器化技术快速部署新功能（如振动监测、噪声监测）。深圳某超高层基坑工程应用该系统后，监测频率从每小时1次提升至每分钟1次，异常事件响应时间缩短至10分钟内，显著提升风险防控能力。

4.2 监测数据传输与处理技术

基坑监测场景中，传统有线传输需大量布线，成本高且灵活性差；无线传输（如Wi-Fi、ZigBee）则受距离与障碍物限制，难以覆盖大型基坑。5G与LoRa技术的融合应用有效解决了这一难题：LoRa网关部署于基坑周边，通过自组网中继节点实现传感器数据长距离回传（覆盖半径达3km），再利用5G基站低时延（<20ms）、高带宽特性，将数据上传至云端，整体传输延迟控制在50ms以内。数据处理环节引入大数据分析与人机智能技术，构建“感知-分析-决策”闭环：采用LSTM神经网络模型对支护结构变形数据进行训练，挖掘时间序列中的非线性规律，可提前6小时预测位移突变；聚类算法（如DBSCAN）自动识别监测数据中的异常模式（如突变、周期性波动），结合阈值规则触发多级报警机制。杭州某地铁基坑工程应用该技术后，通过动态调整报警阈值，误报率降低70%，漏报率降至5%以下，同时利用历史数据优化模型参数，使预测精度随工程进展持续提升，形成自适应监测体系^[4]。

4.3 基于数字孪生的动态预警平台

数字孪生技术通过构建物理基坑的虚拟镜像，实现状态实时映射与仿真推演，为稳定性评估提供量化依

据。平台集成BIM模型（包含支护结构、土体分层等几何信息）、实时监测数据（如应变、位移、孔隙水压力）与数值模拟结果（如有限元分析应力场），采用加权评分法生成基坑健康度指数（SHI），范围0-1，直观反映稳定性状态。例如，当SHI值低于0.6时，平台自动启动黄色预警，提示加密监测频率并检查施工参数；低于0.4时触发红色预警，建议暂停施工并启动应急预案，同时推送处置建议（如加固支护、回填反压）。为确保虚拟模型与物理实体状态一致，平台采用参数反演算法（如粒子群优化）动态修正土体参数（如弹性模量、渗透系数）；结合知识图谱技术构建应急处置案例库，输入当前风险特征后，自动匹配历史类似案例及处置方案，为管理人员提供决策支持。成都某基坑工程应用该平台后，通过实时仿真推演，成功预警3次支护结构异常变形，提前24小时采取加固措施，避免坍塌事故，验证了数字孪生技术在复杂地质条件下的适用性与可靠性。

结束语

建筑工程基坑稳定性分析与监测技术是保障地下空间开发安全的核心环节，本文从基础理论出发，系统剖析了地质条件、设计施工与周边环境对稳定性的影响机制，提出多场耦合分析、机器学习预测与风险量化评估等优化方法，构建多源融合监测系统与数字孪生预警平台。通过产学研用深度融合，持续提升我国基坑工程安全技术水平，为城市可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]薛春杰.建筑工程中钢结构设计的稳定性[J].建材发展导向,2024,22(17):44-46.
- [2]张丹.建筑钢结构设计中稳定性的设计方法研究[J].新疆有色金属,2024,47(05):109-110.
- [3]陈然.建筑工程中钢结构设计的稳定性原则及设计研究[J].中国高新科技,2023,(14):47-49.
- [4]叶玉洁,马政武.高层建筑基坑的支护设计及变形特性分析[J].中国新技术新产品,2025,(13):107-109.