DOI: 10.7672/sgjs2025180113

复杂环境下车站深基坑施工监测与风险管理研究*

李嘉俊[1],王鑫娟[1,2],朱金鹏[1],潘鑫波[2],刘忠华[1],韩路平[1]
(1. 陕西省建筑科学研究院有限公司,陕西 西安 710082;
2. 陕西建科建设特种工程有限公司,陕西 西安 710082)

[摘要] 为解决复杂地质条件下深基坑施工过程中因地质不均、地下水渗流及外部荷载作用而引发的结构失稳等问题,提出了一种现场实测、数值模拟与数据分析相结合的深基坑多维监测与动态风险管理体系,对基坑水平位移、地表沉降、支撑内力及地下水位等关键参数进行实时采集与动态评估,并建立基于监测数据的分级预警与应急响应机制。结果表明,该体系能在一定程度上反映基坑变形发展趋势及潜在风险特征,通过动态调整支护措施和施工工序,可有效降低变形速率和沉降量,保证基坑整体稳定,实现深基坑施工安全、高效、可控。

[关键词] 基坑;监测;工程管理;风险控制;施工技术
[中图分类号] TU753 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2025)18-0113-05

Monitoring and Risk Management of Station Deep Foundation Excavation Construction in Complex Environment

LI Jiajun[1], WANG Xinjuan[1,2], ZHU Jinpeng[1], PAN Xinbo[2], LIU Zhonghua[1], HAN Luping[1]
(1. *Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710082, *China*;
2. *Shaanxi Jianke Construction Special Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710082, *China*)

Abstract: To address structural instability caused by geological heterogeneity, groundwater seepage, and external loading during deep foundation excavation construction in complex geological conditions, this paper proposes a multidimensional monitoring and dynamic risk management system. The system integrates field measurements, numerical simulation, and data analysis, and incorporates a tiered early warning and emergency response mechanism based on real-time monitoring data. Key parameters monitored include foundation excavation displacement, ground surface settlement, support internal forces, and groundwater levels. The results show that the proposed system can capture the development trends of foundation excavation deformation and potential risk characteristics. By dynamically adjusting support measures and construction sequences, the system reduces deformation rates and settlement, thereby enhancing foundation excavation stability and realizing the safe, efficient and controllable construction of the deep foundation excavation.

Keywords: foundation excavation; monitoring; engineering management; risk control; construction

0 引言

随着我国城市轨道交通及超高层建筑的快速发展,结构基础埋深越来越深,施工周边环境愈发复杂敏感,对基坑开挖过程中的风险控制要求越来越高[1]。施工过程中的地层扰动可能导致周边建筑物和市政设施沉降、开裂甚至失稳[2-3]。复杂地质条件对监测与风险控制提出的新要求显著增加了深基坑施工难度。软土场地土体压缩性大、灵敏度高,该区域的深基坑工程在开挖过程中易产生过大变形[4-5]。而硬岩层则可能导致围护结构应力集中及破坏。软硬相接岩层在开挖卸荷作用下往往出现不协调蠕变变形,岩层间接触面错动可能导致

*陕西省省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目(ZXZJ-2024-015);陕西省重点研发计划专项(2022LL-JB-10)
[作者简介] 李嘉俊,工程师,E-mail: 292623992@qq.com
[收稿日期] 2025-05-18

结构失稳或坍塌[6]。此外,地下水渗流、涌水问题处理不当可能引发基坑失稳或施工延误[7]。在施工操作层面,深基坑开挖还涉及爆破、支撑安装、土方运输等多种高风险作业,施工安全压力显著增加。因此,复杂施工环境下,基坑监测需实现更高精度和更广覆盖范围[8-9]。基坑水平位移、地表沉降、支撑内力及地下水位等多维参数应进行实时采集和分析,以识别可能的异常变化,调整基坑开挖顺序、支护结构参数及排水措施等。综上所述,深基坑开挖工程的高风险性和复杂地质条件的多变性决定了监测与风险控制技术需不断精进,以满足城市和轨道交通建设的更高要求。本文以广州市某半地下车站深基坑工程为背景,探讨多维监测技术在复杂地质条件下的应用情况,展示其在复杂环境中的工程价值。

1 工程概况

该工程位于广州市番禺区,属半地下车站,基坑标准段深度 17.1m,端头井最大深度 19.6m,车站主体结构地下 1 层、地上 1 层(局部 2 层为设备用房)。工程地处珠江三角洲冲积平原,地质条件复杂,自上而下分布人工填土、淤泥质黏土、砂层及全风化~中风化花岗岩,局部存在软土地层与强透水砂层,地下水具有承压性,施工中易引发地面沉降、基坑失稳等风险,项目周边环境敏感,邻近分布既有建(构)筑物及交通干线。在深基坑开挖工程中需爆破辅助施工,爆破和人工挖孔均为有安全风险的工作,可能引发事故。针对复杂环境下的施工挑战,该项目引入多维监测与动态风险管理体系,形成了“监测-预警-响应”闭环管理机制。

2 施工监测内容与技术实施

2.1 监测主要目的

施工监测的主要目的包括 4 部分:①通过实时跟踪基坑及周边环境变形数据,动态评估基坑稳定性,预判潜在风险;②结合施工反馈数据验证围护结构设计合理性,优化施工参数及工艺;③依托水土压力、地下水位及结构内力监测,量化施工对周边建筑、管线及社会设施的影响,保障多方利益;④系统性积累区域性施工参数,为同类工程提供经验支撑。监测项目涵盖三大类,共 13 个专项,包括地表沉降、墙顶水平和竖向位移、地下管线变形等环境响应参数,以及墙体深层水平位移(测斜)、水土压力、支撑轴力、墙体钢筋应力等力学指标,同时覆盖地下水位、建筑物(桥墩)沉降、裂缝发展等综合风险因子,并辅以目测调查形成全维度监测网络。

2.2 监测方案具体实施

1)监测设计(见表 1)

表 1 监控量测设计

Table 1 Monitoring and measurement design

序号	量测项目	位移或监测对象	测试仪器	仪器量测精度	控制值
1	墙顶水平位移	围护结构上端部	经纬仪,水准仪	±1mm	20mm,且≤0.25%H
2	地面沉降	基坑周围地面	经纬仪,水准仪	±1mm	≤0.1%H
3	土体侧向位移	围护结构周边土体	测斜管,测斜仪	±1mm	20mm,且≤0.25%H
4	地下水位	基坑内外	水位管,水位计	±5mm	基坑内控制在坑底下 1m
5	邻近建筑物沉降倾斜	基坑周边需保护的建筑物	水准仪,经纬仪	±1mm	倾斜率
6	钻孔桩内力	钻孔桩外侧钢筋	钢筋测力计	≤1/100(Fs)	—
7	土压力	围护结构内	土压力计	≤1/100(Fs)	—
8	孔隙水压力	围护结构内	孔隙水压力计	≤1Pa	—

注:H 表示基坑深度

2)车站监测项目及测点布置(见表 2)

表 2 基坑监控量测项目

Table 2 Monitoring and measuring item of foundation excavation

序号	监测项目	监测范围	测点断面及间距	备注
1	地面沉降	周围 1 倍基坑开挖深度	长短边中点,且间距为 20m 范围	不少于 3 处
2	钻孔桩水平位移	桩顶冠梁	长短边中点,且间距为 20m 范围	—
3	地下水位	基坑周边	基坑四角点长、短边中点	同上
4	钻孔桩变形	钻孔桩全高	长短边中点竖向间距 1m	同上
5	支撑轴力	支撑端部或中部	每层长短边中点且间距<15m	同上
6	孔隙水压力	围护结构后、围护结构前	长短边中点竖向间距 5m	同上
7	围护结构侧土压力	围护结构后、嵌固段围护结构前	长短边中点竖向间距 5m	同上
8	重要建筑物沉降、倾斜	基坑两侧需保护的建(构)筑物	—	同上
9	地下管线沉降与位移	基坑两侧	—	同上
10	立柱沉降及变形	立柱	—	—

2.3 监测项目基本要求

施工监测须贯穿工程全周期,监测频率应根据施工进度动态调整,遇结构变形超限、场地条件变

化或事故征兆时实施加密至连续性监测。各监测项目须及时提交数据报告及处理建议,突发情况需同步加密监测并启动应急响应程序。基坑围护施工前应完成第三方既有建(构)筑物检测鉴定,作为施工监测、应急抢险及纠纷处置的法定依据。

专项监测技术要求如下。

1)围护结构监测,实施变形与受力双参数监测,测点间距 10~20m(邻近建筑物加密至 5~10m),基频 2 次/d,邻近敏感建(构)筑物时提升至 4 次/d。

2)地表沉降监测,采用精密水准仪实施道路及环境监测,标准测距 20m,基频 0.5 次/d;特殊工况下加密至 1 次/d,测距缩短至 10m。

3)支撑体系监测,对基坑钢支撑系统进行轴力、变形及稳定性多维度监测,配置振弦式传感器,基频 2 次/d;临界状态实施连续性监测。

4)建(构)筑物监测,施工影响半径内对建筑物实施变形、沉降、裂缝及倾斜四维监测,基坑阶段 1 次/日,主体结构阶段 0.5 次/d;重点保护建筑物监测频率提升至 2 次/d。

5)水土压力监测,全周期实施孔隙水压计监测地下水位,基频 0.5 次/d。选取 1~2 个典型断面布设土压力盒,标准频率 0.5 次/d,试验工况可加密至 2 次/d。

2.4　监测仪器、设备安装埋设

测点布置须全面覆盖基坑围护结构及周边建筑物、管线的位移、变形与受力状态,重点突出支护系统安全关键指标。部分仪器设备安装埋设细节如下:围护结构顶面每 10~15m 布设水平位移测点,墙体内预埋与墙体等长且高出 150mm 的测斜管(管口设保护套),沿基坑两侧按 15~20m 间距布设内力监测点;基坑主体结构区布设 30 个土体侧向位移监测孔,南、北侧同步设置 7 组土压力盒;地面沉降监测按 20m 间距布置监测断面,每断面两侧各设 3 个测点;钢支撑轴力监测按 10 根支撑间隔设置轴力计测点;地下水位观测孔沿基坑中线每 30m 布设 1 个,形成涵盖围护体系、土体内力、支撑结构及水文环境的立体监测网络。

2.5　变形监测信息反馈管理及预警机制

1)监测管理与组织。施工监测管理流程如图 1 所示。

2)监控量测数据分析。量测成果收集与数据处理需系统执行:每次监测后及时整理原始数据并形成正式记录,包括原始记录表、实际测点布置图,以及位移(应力)随时间、开挖面距离变化图,同步

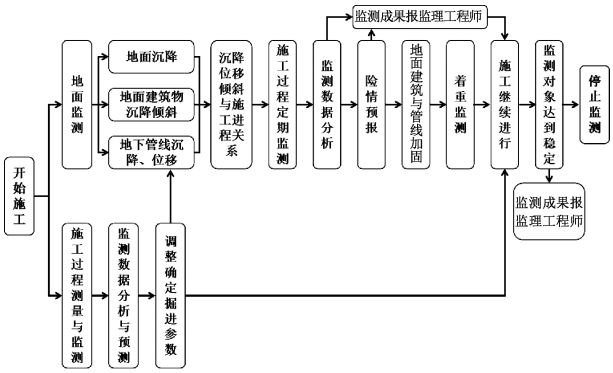

图 1　施工监测管理流程

Fig. 1　Construction monitoring management process

绘制位移速度、加速度随时间及开挖面变化动态曲线;数据处理阶段需快速生成位移或应力时态散点图,通过回归分析选取适配函数预测测点最大位移值或应力值,评估结构及建筑物安全风险;监测数据全程由计算机管理以保障质量与反馈效率,每日上报监测结果及日报表,定期向监理、设计单位提交含时态曲线图的监测月报,结合当月施工情况提出安全评价与优化建议,形成闭环信息反馈机制。

3)警戒值控制标准。在基坑工程施工中,当监测数据出现变形及内力异常时,须立即向建设、设计、施工和监理单位进行多级预警,对于严重异常情况应实施实时连续性监测。报警指标如表 3 所示。监测报警体系依据设计文件确定的双控指标执行,即以累计变化量和变化速率作为核心判定参数,其中累计变化量限值不应突破设计允许值。当达到设计报警值时,须采取分级响应机制,首先通过即时通信方式向各参建方进行口头预警,随后在正式监测报告中予以书面确认。周边建(构)筑物及地下管线的变形控制需综合既有沉降与基坑开挖附加变形的叠加效应。当出现以下 5 种情形之一时,必须立即启动应急响应程序:①监测数据达到报警累计值;②支护体系或周边土体位移速率陡增,或出现流砂、管涌、基底隆起等险情;③支撑系统出现过大挠曲、屈曲、断裂或锚杆失效迹象;④毗邻建筑物产生结构性裂缝或地面突发沉陷裂缝;⑤基于区域工程经验判定需紧急处置的特殊工况。应急处置应同步采取支护结构加固与周边环境防护措施。

3　施工风险分析与管理

3.1　风险汇总

该工程主要风险源汇总情况如表 4 所示。

3.2　风险等级评定

风险评定等级如表 5 所示。

表 3 报警指标

Table 3 Alarming indicators

监测项目	报警指标	监测项目	报警指标
地下管线垂直位移	累计 30mm,3mm/d	坑外地下水位	下降 1000mm,500mm/d
建(构)筑物垂直位移	累计 35mm,2mm/d 基础倾斜允许值 0.25%	支撑内力 围护结构内力 立柱内力	构件承载力的 70%
周边地表垂直位移	累计 35mm,3mm/d		
围护结构顶部水平位移	累计 30mm,3mm/d	立柱垂直位移	沉降 20mm,隆起 10mm, 3mm/d;立柱桩间沉降 10mm
围护结构顶部垂直位移	累计 20mm,3mm/d		
围护桩深层水平位移	累计 50mm,3mm/d	坑外土体分层沉降	累计 30mm,3mm/d
基坑回弹监测	累计 35mm,3mm/d		

表 4 主要风险源汇总

Table 4 Summary of main risk sources

序号	风险源名称	风险源位置 (车站主体、车站附属)	风险源基本状况描述(含风险源状况、风险源与工程关系状况、地质情况等)	风险源类别	后果
1	车站主体基坑	车站主体	地下 1 层车站,标准段基坑深 15.2m,围护结构采用 ϕ800@1 200mm 钻孔桩+内支撑支护。主体基坑开挖引起土体坍塌,周边地表沉降	设计、施工因素	工期延误、投资增加、人员伤亡
2	全、强风化混合花岗岩(W4,W3 层)	明挖基坑	全、强风化混合花岗岩(W4,W3 层)遇水软化崩解、强度降低	设计、施工因素	投资增加、人员伤亡
3	人工挖孔桩	车站主体	车站抗拔桩采用人工挖孔桩,施工引起的孔壁坍塌、涌水等风险	设计、施工因素	工期延误、投资增加、人员伤亡
4	车站左、右线岩面起伏较大,地质情况复杂	明挖基坑	左、右线中风化花岗岩面起伏较大,岩面较浅部分采用吊脚桩,需确保围护结构稳定	设计、施工因素	工期延误、投资增加、人员伤亡
5	主体结构超长,结构开裂	车站主体	车站主体结构超长,混凝土收缩、温度应力引起开裂	设计、施工因素	工期延误、投资增加
6	地下管线	明挖基坑	车站范围的污水、电力等管线	环境、施工因素	工期延误、投资增加

表 5 风险评定等级

Table 5 Risk rating scale

序号	风险事件	概率等级	后果等级	风险等级
1	车站主体基坑	4	3	高度
2	全、强风化混合花岗岩(W4,W3 层)	3	2	中度
3	人工挖孔桩	4	3	高度
4	车站左、右线岩面起伏较大,地质情况复杂	3	2	中度
5	主体结构超长,结构开裂	3	2	中度
6	地下管线	3	2	中度

3.3 风险处理措施

1)车站主体基坑。车站主体基坑采用 ϕ800@1 200mm 钻孔灌注桩+内支撑体系,围护结构选用刚度较大的灌注桩支护,以有效控制基坑变形。严格按设计要求进行基坑施工,标准段基坑共设 3 道支撑(含 1 道换撑),开挖至每道支撑下方 0.5m 后架设支撑,直至基底,拆撑依序进行,确保基坑稳定性。

2)全、强风化混合花岗岩(W4,W3 层)。在全、强风化混合花岗岩(W4,W3 层)地层,围护桩入岩深度严格受控,其中强风化花岗岩层≥4.5m,中风化花岗岩层≥4.0m,避免破坏基岩。施工中应进行岩面观测,崩裂部位需加固修复,并对水敏感岩体采取防水措施,结构与岩体间缝隙采取注浆填实。

3)人工挖孔桩。基底抗拔桩采用 1.2m 直径人工挖孔桩,施工需满足 JGJ/T 225—2010《大直径扩底灌注桩技术规程》等相关规范,确保施工安全性与规范性,并按地方建设管理要求进行专项审查及报批。

4)车站左、右线岩面起伏较大,地质情况复杂需加强勘察,校核岩面标高、分布及水文条件,重点关注吊脚桩范围与嵌岩深度。若地质条件与设计不符,应及时反馈设计单位调整围护及基础设计。

5)主体结构超长,结构开裂。主体结构因超长易产生温度应力及混凝土收缩裂缝,设计采取变形缝划分仓段(18~27m),采用跳仓法浇筑,并掺加混凝土微膨胀剂增强抗裂性。混凝土材料及施工养护需符合 GB/T 50476—2019《混凝土结构耐久性设计标准》(耐久性 100 年)及相关标准。侧墙、顶板及底板适当提高纵向分布钢筋配筋率,增强抗裂能力。

6)地下管线。地下管线施工前需明确车站范围内给排水、电力管线分布,施工期间相关管线临时改迁,主体结构完成后与产权单位协商复建。管

线控制指标包括位移、倾斜率、曲率、弯矩及轴向应变,确保施工安全并减少对周边设施的影响。控制指标参考值如表 6 所示。

表 6　地下管线控制指标参考值

Table 6　Reference values of underground pipeline control indicators

重要性等级	位移控制值/mm	倾斜控制值
Ⅰ(有压管线)	≤10	≤0.002
Ⅱ(无压雨水、污水管)	≤20	≤0.005
Ⅲ(无压其他管)	≤30	≤0.004

7)其他注意事项。基坑施工须严格遵循设计工况及“开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖”原则。基坑底部位于强、中风化花岗岩层,开挖应采用控制爆破等低噪声、低振动方式,减少对周边环境的不利影响。开挖至基底以上 0.3m 时需进行验收,并采取人工开挖至基底,及时封底以降低扰动。

钢筋混凝土支撑拆除可采用机械或爆破方式,拆除前应设置安全防护,并对永久结构及周边环境进行隔离。基坑周边施工荷载不得超限。开挖前 20d 内需进行井点降水,降水深度应低于基坑最低处 1.5m,降水方案须专项审查。施工期间需加强基坑及周边建筑监测,监测指标按 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》执行,报警值设为 0.8 倍容许值,超限时应加密监测或暂停施工并优化方案。监测点布置依据 GB 50497—2009《建筑基坑工程监测技术规范》,建筑物变形控制值需专项评审并经产权单位同意后实施,以确保施工安全及周边结构稳定。

4　结语

该半地下车站的深基坑施工面临复杂地质条件与高风险挑战,通过对该工程施工监测与风险控制进行研究可得到以下结论。

1)为保障施工安全与稳定性,该工程引入多维监测与动态风险管理体系,构建“监测-预警-响应”闭环机制。监测内容涵盖基坑水平位移、地表沉降、支撑内力、地下水位等多维参数,并采用高精度测量设备实现全周期监测。监测数据用于优化施工参数、评估围护结构稳定性,有效降低施工风险。

2)建立了分级预警机制,以变形速率与累计变化量为核心判定指标。超过预警阈值时,迅速启动应急响应,包括加密监测、优化支护结构、调整开挖顺序等措施。结合区域工程经验,制订突发险情应对方案,如地面沉降超标、支撑系统失效等情况,确保施工过程可控。

参考文献:

[1] 王卫东,高文生,龚维明,等. 基础工程技术的发展与创新[J]. 土木工程学报,2025,58(2):97-117.
WANG W D, GAO W S, GONG W M, et al. Development and innovation of technologies in foundation engineering[J]. China civil engineering journal, 2025, 58(2): 97-117.

[2] 刘凤洲,谢雄耀. 地铁基坑围护结构成槽施工对邻近建筑物沉降影响及监测数据分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S1):2901-2907.
LIU F Z, XIE X Y. Influence of trenching construction of metro foundation pit retaining structure on settlement of adjacent buildings and analysis of monitoring data[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(S1): 2901-2907.

[3] 覃卫民,逄铁铮,王浩,等. 深基坑附近房屋出现裂缝的施工监测分析[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3):533-540.
QIN W M, PANG T Z, WANG H, et al. Analysis of excavation monitoring for house cracking nearby deep pit foundation[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(3): 533-540.

[4] 金钰寅,狄宏规,周顺华,等. 坑底加固对伺服钢支撑基坑变形特性的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(7):3037-3048.
JIN Y Y, DI H G, ZHOU S H, et al. Impact of basal reinforcement on deformation characteristics of servo-steel-strut-supported foundation pits[J]. Journal of railway science and engineering, 2025, 22(7): 3037-3048.

[5] 应宏伟,杨永文. 杭州深厚软黏土中某深大基坑的性状研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(12):1838-1846.
YING H W, YANG Y W. Characteristics of a large and deep soft clay excavation in Hangzhou[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(12): 1838-1846.

[6] 陈星,李建林,邓华锋,等. 卸荷蠕变条件下软硬相接岩层非协调变形规律研究[J]. 岩土力学,2023,44(1):303-316.
CHEN X, LI J L, DENG H F, et al. Uncoordinated deformation of soft and hard interconnecting strata under unloading creep conditions[J]. Rock and soil mechanics, 2023, 44(1): 303-316.

[7] 邱明明,李晓敏,杨果林,等. 挡墙渗漏对富水砂层基坑变形性状的影响[J]. 水文地质工程地质,2025,52(1):85-96.
QIU M M, LI X M, YANG G L, et al. Effect of retaining wall leakage on the deformation behavior of foundation pit in water-rich sandy strata[J]. Hydrogeology & engineering geology, 2025, 52(1): 85-96.

[8] 赖国梁,张松波,陈国,等. 基坑自动化监测数据分析及预警系统应用研究[J]. 施工技术,2021,50(1):49-52.
LAI G L, ZHANG S B, CHEN G, et al. Application research of automatic monitoring data analysis and early warning system for foundation excavation[J]. Construction technology, 2021, 50(1): 49-52.

[9] 陈元林,孙斌,李卫华. 深基坑监测成果分析及基于灰色预测模型的优化研究[J]. 施工技术,2019,48(S1):7-12.
CHEN Y L, SUN B, LI W H. Analysis of monitoring results of deep foundation excavation and optimization research based on grey prediction model[J]. Construction technology, 2019, 48(S1): 7-12.