

临近地铁线路的基坑施工监测与风险控制措施研究

朱宣奇

浙江华展研究设计院股份有限公司, 浙江 宁波 315000

DOI:10.61369/UAID.2026020059

摘 要 : 为降低临近运营地铁线路基坑开挖对隧道结构与轨道状态的不利影响, 本文以某城市轨道交通邻近深基坑工程为背景, 工程应用表明, 该体系可实现风险前置识别与闭环控制, 降低变形突增与涌水突砂等事件概率, 为同类邻近地铁基坑安全施工提供参考。

关 键 词 : 临近地铁; 深基坑; 施工监测; 变形控制

Research on Construction Monitoring and Risk Control Measures of the Foundation Pit Near the Subway Line

Zhu Xuanqi

Zhejiang Huazhan Research and Design Institute Co., LTD., Ningbo, Zhejiang 315000

Abstract : To mitigate the adverse effects of subway foundation pit excavation on tunnel structures and track conditions, this study investigates a deep foundation pit project adjacent to an urban rail transit line. Engineering applications demonstrate that the proposed system enables proactive risk identification and closed-loop control, effectively reducing the likelihood of sudden deformation surges and water/sand surges. The findings provide valuable references for safe construction practices in similar subway foundation pit projects.

Keywords : proximity to subway; deep foundation pit; construction monitoring; deformation control

一、工程案例概况与风险识别

本研究以某市既有运营地铁区间隧道邻近深基坑为案例, 基坑约65m×42m, 开挖深度H=18.6m; 围护采用800mm地连墙, 嵌固深度约6.0m。支护体系为1道混凝土支撑+3道钢支撑, 钢支撑轴力设计值3.5~6.0MN/道。场地地下水以潜水为主, 初始水位埋深约3.0~3.5m, 地层以粉质黏土—粉砂夹层为主, 局部夹透水砂层, 渗透系数 $k \approx (1 \sim 5) \times 10^{-4} \text{m/s}$ 。既有隧道外缘距围护墙最近水平距离约11.8m, 埋深约15.5~17.0m, 环宽1.5m、管片厚350mm, 处于正常运营状态, 控制目标需同时满足结构安全与运营品质双约束。

风险识别以变形、渗流、施工扰动三类耦合为主线: ①开挖卸荷与围护变形可能促使侧向位移向隧道方向传播, 前置校核可按围护墙最大水平位移 $\leq 0.25\%H$ (约46mm)、地表最大沉降 $\leq 25\text{mm}$ 等指标进行控制边界判定; ②降水导致水位下降与孔压消散, 易推动沉降槽加深并诱发不均匀变形, 应重点跟踪降深、沉降相关性, 当基坑外水位降深超过1.0~1.5m且沉降速率持续上升时, 可判定风险进入高敏感状态; ③施工荷载与振动源可能触发隧道附加响应并驱动轨道不平顺发展, 建议以隧道沉降/收敛累计值5mm/10mm (预警/报警) 及沉降速率 $>0.5\text{mm/d}$ 作为运营敏感阈值^[1]。

二、临近地铁线路的基坑施工监测要点分析

(一) 基坑支护结构监测

1. 围护墙水平位移

围护墙水平位移是判断支护体系稳定性与变形向地铁侧传递强度的主控指标。本案例围护采用800mm地连墙, 在近地铁侧墙段按10~12m/孔加密布设测斜孔4个, 其余侧按15~20m/孔布设6个, 合计10个测斜孔, 孔深26~28m, 满足坑底以下 $\geq 8\text{m}$ 的嵌入控制要求, 读数间距0.5m。监测频率要点为, 降水启动、首道支撑成型与各级开挖到位阶段2次/d, 其余阶段1次/d。实测位移随开挖呈阶段性增长, 开挖至-6.0m时最大水平

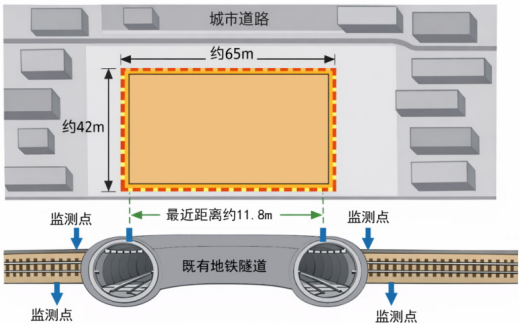


图1: 工程平面与地铁相对位置示意图

作者简介: 朱宣奇 (1998.05-) 男, 汉族, 浙江省宁波市人, 学历: 本科, 职称: 助理工程师, 研究方向: 基坑监测。

位移约6-10mm,至-12.0m增至18-26mm,至-16.0m达到30-38mm,至坑底-18.6m最大位移39-44mm,峰值深度多位于坑底以上约14-17m,向上抬升趋势不明显。

2. 支撑体系受力与构件变形

支撑体系监测以轴力为核心,辅以围檩/节点位移与构件挠度,重点识别预加力损失、受力再分配及局部失稳前兆。本案例采用1道混凝土支撑和3道钢支撑,钢支撑设计轴力 $N_d=3.5-6.0\text{MN/道}$;近地侧铁每道支撑布设轴力点不少于3处,全坑共设置12组轴力监测点,以油压表读数对张拉力进行现场复核。张拉预加力取 $0.6-0.7N_d$,锁定后7d内受节点压缩与接触面调整影响,轴力常见损失8%-12%,随下部开挖受力再分配明显,第二、三道支撑轴力峰值分别达到设计的 $0.78N_d$ 与 $0.85N_d$,个别工序叠加时单日增幅出现>10%。构件变形方面,对围檩跨中挠度与支撑端部滑移实施量测,建议控制值取挠度 $L/400$ (预警)、 $L/300$ (报警),本案例近地侧铁围檩跨中最大挠度约6-9mm($L\approx 3.6\text{m}$),与轴力峰值阶段同步出现^[2]。

(二) 土体与地表变形监测

1. 周边地表沉降与沉降槽演化

周边地表沉降用于刻画开挖卸荷与降水引起的体变效应,是判定影响范围与风险外扩的“先行指标”。本案例在基坑外缘沿近地侧铁布设3条沉降监测断面,断面垂直于围护墙,测点间距5m,距墙外0、5、10、15、20、30、40、60m设置点位,合计24个沉降点,开挖阶段监测频率1次/d,降水启动与坑底开挖阶段加密至2次/d。实测沉降槽呈单峰—外扩演化,开挖至-12.0m时最大沉降约-8~-12mm,沉降影响宽度($|s|\geq 2\text{mm}$)约25-30m,至-16.0m最大沉降增至-16~-20mm,影响宽度扩大到35-40m,至坑底-18.6m最大沉降达到-22~-26mm,沉降峰值位置通常位于距墙外8-12m处。

2. 深部侧移与周边敏感目标变形

深部侧移用于识别土体剪切带发展与变形传递路径,周边敏感目标监测则直接对应“地铁运营与结构安全”的约束条件。本案例除围护墙测斜外,在坑外近地侧铁增设3个土体深部测斜孔(孔深30m,距墙外5m、15m、30m),以分离“围护变形”与“地层整体侧移”。距墙外5m处最大侧移在坑底阶段约12-16mm,距墙外15m降至6-9mm,距墙外30m控制在 $\leq 3\text{mm}$,表明侧移影响边界约在25-35m范围内。敏感目标方面,对地铁隧道上方地表与邻近构筑物布设沉降、倾斜、裂缝组合点位,例如对近地侧铁道路设置8个沉降点与2个倾斜点,对临近管线设置6个沉降点。

(三) 地下水与降水影响监测

1. 地下水位动态与降水影响范围

地下水位监测用于评估降水引起的有效应力变化及其对沉降的驱动强度,本案例设置8口观测井,坑内3口,坑外近地侧铁5口,井深20-25m,采用自动水位计30min/次连续采集。降水前稳定水位埋深约3.2m,分级降水启动后,坑内水位在48h内降至-16.0m,坑外5m处水位降深约1.6-2.1m,10m处约

1.0-1.4m,20m处约0.4-0.7m,30m处普遍 $\leq 0.3\text{m}$,据此可判定降水影响半径约25-35m。

2. 孔压—渗流响应与异常识别

孔隙水压力(孔压)与渗流监测用于识别止水帷幕缺陷、渗透破坏前兆及“突水突砂”风险。本案例在坑底以下2-6m范围布置6个振弦式孔压计,近地侧铁3个、其余侧3个,并在围护墙接头与穿墙管线附近设置重点点位。降水启动后,坑内孔压由初始约+30~+40kPa逐步下降至+5~+10kPa。异常识别建议抓三类特征:①孔压突降(单日下降>10kPa)且外侧水位同步下降,可能提示帷幕渗漏或接头薄弱形成优先渗流通道;②孔压回弹滞后/不降反升,可能意味着局部堵塞、反压回水或土体扰动导致传感异常,应与抽水量、浊度与涌水点巡查联判。

(四) 地铁结构与运营相关监测

1. 隧道结构沉降、水平位移、收敛变形

隧道结构监测以沉降、水平位移、收敛为主控量,直接反映基坑开挖与降水对既有隧道的附加变形效应,本案例在近基坑影响段布设隧道沉降点24个并设置水平位移测点12个,收敛采用断面监测,设置6个收敛断面,开挖关键阶段监测频率1次/d,出现异常加密至2次/d。沉降在开挖至-12m时累计约-1.5~-2.5mm,至-16m增至-3.0~-4.5mm,至坑底阶段最大沉降约-5.5~-7.0mm,水平位移最大约2.0~3.5mm,方向指向基坑侧,收敛变化一般为+1.5~+3.0mm。

2. 管片接缝张开、渗漏水巡查指标

管片接缝状态是运营安全的“薄弱环节”,应采用量测、巡查结合,重点盯控环缝/纵缝张开、错台与渗漏水发展,本案例在影响段选取12环作为重点环,共计72个接缝点,用塞尺/位移计进行张开量测,巡查频率与开挖同步1次/d,降水启动与坑底阶段提高至2次/d。多数接缝张开稳定在0.2~0.6mm,局部受不均匀沉降影响的环缝张开增至0.8~1.2mm,未出现持续扩展。渗漏水按湿痕、滴水、线流、股流分级记录,同步记录渗水位置、长度与流量估计。

3. 轨道几何状态与不平顺趋势

轨道几何状态反映结构变形—运营品质的传导结果,监测重点为轨距、水平/高低不平顺、轨向、扭曲等指标及其趋势。本案例在邻近影响区段设置200m重点监测里程,采用轨检数据与人工复核结合,轨检车数据按运营计划获取(关键阶段建议每周1次),人工精测在敏感工序后24h内复测;同时在基坑最近投影处布设8个轨道控制点用于趋势跟踪。

4. 振动与噪声监测

振动与噪声监测用于评价施工扰动对运营与周边环境的影响,重点识别打拔、破除、吊装等工序引起的瞬态峰值。本案例在隧道拱顶对应地面位置及邻近敏感点布设6套振动监测点(距施工源约15-50m)和4套噪声监测点,振动采用速度峰值PPV(mm/s)与频谱分析,噪声采用等效声级 $\text{Leq}[\text{dB(A)}]$,关键工序实施连续监测。如表1。

表1: 关键指标随施工阶段变化

阶段 (开挖深度)	围护墙最大位移 (mm)	地表最大沉降 (mm)	坑外10m降深 (m)	隧道最大沉降 (mm)	收敛变化 (mm)	PPV 峰值 (mm/s)
-6.0m	8	-10	0.4	-2	1	0.6
-12.0m	22	-18	1.2	-4	2	0.9
-16.0m	34	-23	1.6	-6	2.5	2.2 (破除工序瞬态)
-18.6m	42	-26	1.8	-6.8	3	1

三、临近地铁线路基坑施工风险控制措施

(一) 降水与止水控制

1. 降水分级启动与试抽验证

临近运营地铁条件下, 降水坚持“先验证、再放量、全过程校核”, 避免水位骤降引发沉降槽快速加深。本案例坑内降水井8口、观测井8口, 近地铁侧坑外沿距墙外5/10/20/30/50m布设5口观测井, 形成影响带监测剖面。正式降水前开展24h试抽, 单井抽水量控制在10-15m³/h; 以坑外5m井降深≤0.3m、地表沉降速率≤0.2mm/d为通过判据。试抽达标后分级启动, I级(48h)启动约50%井组, 使坑内水位降至坑底以上2-3m, II级逐步加井, 将坑内水位控制至坑底以下0.5-1.0m; III级仅在坑底开挖与垫层施工期短时维持。

2. 止水帷幕完整性与水位回控

本案例采用800mm地连墙兼作止水帷幕, 接头为钢筋笼锁口、止水带组合, 对近地铁侧墙段实施二次核查, 成槽超声检测合格率要求≥95%, 疑似缺陷段补充钻芯验证(抽检约1%), 提前识别接头与夹泥薄弱带。当坑内外水位差稳定在≥12m时, 坑外5m观测井降深控制为: ≤1.5m(预警)/≤2.0m(报警), 若超限或孔压单日下降>10kPa, 判定可能局部渗漏, 优先对接头、穿墙管线及异常点位实施袖阀管分段注浆。同步建立水位回控, 坑外近地铁侧布设2-3处回灌井/回灌管, 回灌量按抽水量的30%-60%动态匹配, 使外井水位回升至基线-0.5m以内, 待沉降速率回落至<0.2mm/d且外井降深达标后, 再恢复正常抽排, 实现降水、止水、回控稳定闭环^[3]。

(二) 施工扰动控制

1. 振动源与工法管控

临近运营地铁工况下, 振动控制应以识别振动源、限定工法、阈值联动停控为主线, 将瞬态峰值纳入过程管理。本案例将可能产生高振动的工序列为一级管控对象, 近地铁侧设置6个振动监测点, 以速度峰值PPV为判据, 常态控制目标PPV≤1.0mm/s, 预警/报警分别取1.0/2.0mm/s; 噪声Leq夜间控制目标≤55dB(A)。围护与止水优先采用成槽地连墙/旋喷/低扰动钻孔, 禁止在近地铁侧采用强冲击打桩, 结构破除优先使用绳锯/静力切割替代风镐大面积破除, 设备管理实行“近线限重限速”, 距地铁投影线15m范围内禁止>40t设备长时停留, 车辆行驶速度≤5km/h并铺设减振垫层。

2. 开挖与荷载精细化控制

开挖扰动控制强调分区分层、先撑后挖、对称推进、及时封闭, 降低围护位移峰值与沉降外扩。本案例基坑深18.6m, 上部每层1.5-2.0m, 进入-12m以下敏感区后每层0.8-1.0m; 近地铁侧单次先行开挖长度≤8-10m, 采用中部先行、两侧对称推进, 避免单侧长期暴露偏压。支撑要求开挖到位后24h内闭合, 钢支撑预加力按设计60%-70%锁定, 换撑期设置临时支撑保证刚度连续。

(三) 应急预案与抢险措施

1. 变形突增处置

变形突增处置优先保障地铁结构与运营安全, 本案例设置分级围护墙水平位移单日增量>3mm或位移速率连续两天>1.0mm/d, 地表沉降单日增量>2mm或沉降速率>0.8mm/d, 隧道沉降单日增量>0.5mm或累计沉降>5mm进入预警。第一, 停开挖、停降水强抽、停高扰动作业、停近线堆载, 迅速切断扰动源; 第二, 控制开挖面暴露, 采取回填反压或喷锚封闭, 避免继续卸荷; 第三, 控制支撑体系, 复测轴力并将支撑补张拉至0.7-0.8Nd, 必要时增设临时支撑或斜撑保持体系刚度。

2. 渗漏涌水与突水突砂处置

渗漏涌水及突水突砂处置强调先止水、后降压、再加固, 本案例将以下作为触发信号, 坑底或接头处出现连续涌水, 估算流量>5L/s, 出水浊度较基线升高>50%且夹砂明显, 孔压单日下降>10kPa并伴随外井水位快速下降。处置按三步快速展开, 第一步立即停强抽, 仅保留必要小流量排水, 控制水头差继续增大; 第二步对出水点实施快速封堵, 采用速凝材料、反滤土工布、砂袋压盖形成临时止水面, 同时封控作业面与人员通道; 第三步开展降压与加固, 在涌水区外围布置泄压井/减压孔, 将坑底水头降至安全范围, 采用袖阀管分段注浆封堵通道, 对砂层通道可选用双液浆或微细水泥提高可注性。

四、结束语

临近运营地铁线路的深基坑施工风险, 本文以工程案例为背景, 围绕支护结构、土体与地表、地下水与孔压以及隧道结构与轨道状态等关键对象, 提出了分级监测、阈值预警与施工参数联动的控制思路, 从降水止水、施工扰动与应急处置三个层面形成可执行的措施体系。建立快速复核与闭环纠偏机制, 才能在保障隧道结构安全与运营品质的前提下, 实现基坑施工的稳定可控。

参考文献

[1] 李好懿, 谢一鸣, 张平. 济南某地铁线路深基坑降水施工技术 [J]. 建筑机械化, 2024, 45(03): 98-101.
[2] 散文龙, 彭远新, 袁勋, 等. 基坑施工对邻近地铁结构影响数值计算分析 [J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(09): 1-5.
[3] 冯浩. 拟建地铁换乘厅基坑开挖对既有线路影响的数值分析 [J]. 四川水泥, 2023, (02): 238-239+242.