

邻近地铁深厚砂层基坑设计与变形控制

张 伟^{1,2}, 王小勇³, 张志毅³, 郭斌强², 杨 雷³, 梁 谊³, 杨少飞³

(1. 陕西建工集团股份有限公司, 陕西 西安 710003; 2. 陕西华山路桥集团有限公司, 陕西 西安 710016;
3. 中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘 要: 为了攻克邻近地铁深厚砂层基坑支护与降水协同控制技术难题, 确保地铁结构变形严格控制, 在规范允许范围内, 以西安地区邻近地铁深厚砂层基坑为例, 通过在围护桩桩间增设旋喷桩固砂, 采用旋喷锚索工艺、局部双排桩、角支撑多种方式满足支护结构对近邻地铁的避让保护要求; 同时采用基坑整体管井降水、坑中坑局部止水的方式, 保证不同深度砂层基坑的降水、隔水要求。结果表明: 近邻地铁工程需采用差异化支护策略, 当常规锚拉式结构无法实施时, 可优先选择双排桩或局部支撑; 深厚砂层通过桩间设置高压旋喷桩(搭接量 50 mm~100 mm)的预加固技术, 可保证开挖后基坑侧壁稳定性; 砂层采用管井降水, 当管井周围水力坡降小于砂层临界水力坡度时, 降水效率可达 90% 以上, 地面沉降可控制在 10 mm 内, 坑中坑加深区优先选择拉森钢板桩隔水方案。现场监测表明, 支护结构最大水平位移不超过 0.2% H (H 为基坑深度), 地铁设施累计位移控制在 3.5 mm 以内, 验证了技术方案的有效性。

关键词: 邻近地铁; 基坑工程; 砂层; 支护; 地下水控制

中图分类号: TU46⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2025)05—0157—08

Design and Deformation Control of Deep Excavation in Thick Sand Layer Adjacent to Subway

ZHANG Wei^{1,2}, WANG Xiaoyong³, ZHANG Zhiyi³, GUO Binqiang², YANG Lei³, LIANG Yi³, YANG Shaofei³

(1. Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710003, China;

2. Shaanxi Huashan Road and Bridge Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China;

3. China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: This research aims to overcome the technical challenges in the coordinated control of foundation pit support and dewatering in thick sandy layers adjacent to the subway, ensuring that the deformation of the subway structure is strictly controlled within the limits permitted by relevant specifications. Taking the thick sandy foundation pit in close proximity to the subway in the Xi'an area as an illustrative case, by inserting jet grouting piles between the retaining piles and implementing various techniques such as jet-grouted anchor cables, local double-row piles, and local corner supports, the supporting structure can satisfy the requirements for protecting the adjacent subway. Simultaneously, the tube well dewatering approach combined with local water stop measures for the inner pit is adopted to ensure the dewatering and water-sealing requirements at different depths of the foundation pit. The results are as follow: Regarding adjacent subway projects, a differentiated support approach is advocated. In cases where the conventional anchor-pulling structure is unfeasible, double-row piles or local support measures are recommended as priorities. By implementing the pre-treatment technique of installing high-pressure jet grouting piles with an overlap of 50 mm~100 mm between pile, the stability of the thick sand layer on the sidewall of the excavated foundation pit can be effectively ensured. Tube wells are employed for dewatering in sand layer. When the hydraulic gradient around the tube well is lower than the

收稿日期: 2025-05-21

修稿日期: 2025-06-29

基金项目: 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2023KXJ-178); 陕西省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目(2023-013); 陕西省交通运输厅 2024 年度交通科研项目(24-53K)

作者简介: 张 伟(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事地下工程施工技术研发与建造管理工作。E-mail: 593601270@qq.com

通讯作者: 王小勇(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事城市地下空间开发及应用技术研究工作。E-mail: tazhong027@sina.com

critical hydraulic gradient of the sand layer, the dewatering efficiency can exceed 90%, and ground settlement can be restricted within 10 mm. For the deepened area of the foundation pit, the water-sealing scheme of Larson steel sheet piles is preferably chosen. On-site monitoring reveals that the maximum horizontal displacement of the support structure does not surpass $0.2\% H$, and the cumulative displacement of subway is controlled within 3.5 mm, thus validating the effectiveness of the technical scheme. These research results can offer references and guidance for analogous foundation pit projects in the Xi'an region.

Keywords: adjacent to subway; foundation pit engineering; sand layer; pit support; groundwater control

伴随着城市轨道交通的快速发展,近邻轨道交通的商业体、交通枢纽等工程应运而生,带动了城市经济的快速发展。在邻近地铁隧道的环境下进行基坑工程施工必然对周边既有地铁区间隧道、车站等结构产生一定影响^[1-3]。

在基坑开挖对邻近地铁影响研究方面,姜兆华^[4]基于室内模型试验研究了基坑开挖过程中邻近隧道内力与变形的变化规律,并进行了数值模拟与实试验验证。李世辉^[5]采用有限元数值分析和现场监测,分析评价了某超大面积深基坑开挖对毗邻既有地铁车站结构的影响。王志杰等^[6]得到开挖深度变化显著影响车站的侧向结构变形,其次为开挖长度、附加荷载和既有车站刚度,强近接单侧基坑开挖影响最危险区域为 $0.59H \sim 0.73H$ 位置。韩晓^[7]以上海核心城区某临地铁站超深基坑工程为背景,采用软土区适宜的支护形式配合分区、分时施工,保证了近邻地铁的安全。

当基坑处于深厚砂层,基坑支护、地下水控制等将加剧周围地质环境的变化^[8-10],李雪齐等^[11]以北京大兴国际机场中南指廊基坑施工为例,给出了不同地下水类型造成的砂层基坑桩间流砂问题及处理措施。于廷新^[12]依托武汉某邻近地铁的深厚粉细砂层基坑实例,基于动态、循环数值模拟调整支撑布置及刚度,并设置超长止水帷幕减小对地铁桥墩的影响。刘俊城等^[13]通过某滨海城市地下轨道交通换乘车站工程 2 次墙体严重渗水事故,分析渗水期间基坑变形特性并总结事故原因。李威等^[14]针对典型富水砂层基坑降水工程,采用不同规范公式和数值模拟对比,并通过现场观测分析了渗透系数取值的合理性。然而,已有文献中鲜有关于邻近地铁深厚砂层基坑支护及地下水控制技术的相关研究。

本文以西安某地块内邻近地铁深厚砂层的两个基坑为背景,分析深厚砂层建筑基坑适宜的基坑支护及降水方案,并基于施工过程中遇到的问题、解决方案和监测数据定量评价基坑开挖对邻近地铁等周边环境的影响,以期为相似工程提供借鉴。

1 工程概况

1.1 基坑概况

本工程为新建住宅项目,分为两独立地块,地块一(DK1)位于地块西南角,地块二(DK2)位于地块东北角,项目平面图如图 1 所示。DK1 基坑平面呈近似 $1/4$ 圆形,基坑深度 9.62 m,坑底标高 363.88 m,支护周长约 620 m;DK2 为不规则五边形,基坑深度 13.47 m,坑底标高 359.93 m,支护周长约 285 m。

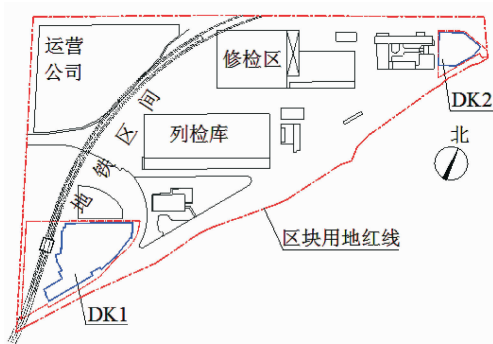


图 1 地块整体平面图及 DK1 和 DK2 的位置

1.2 基坑周边环境

DK1 基坑平面如图 2 所示,东侧邻近地铁车辆段内部试车线,坑外同时分布有雨水、电力、给水及消防等管线;基坑西侧邻近地铁区间风井,基坑开挖边距离区间风井结构外边缘最近距离约 12.2 m;基坑北侧紧邻某综合办公楼(9F/-1F),某综合办公楼为梁板式筏基,基础埋深约 7.2 m,地基处理为 CFG 桩,桩长 18 m;某综合办公楼周边分布有室外雨水、污水、给水、消防及电力等管线,上述管线部分位于基坑开挖范围内,基坑施工前均已按要求进行改迁。

DK2 基坑平面如图 3 所示,基坑范围内及坑边分布有多条既有地下管线,为保证基坑支护结构正常施工和土方开挖,已提前对管线进行改迁;DK2 基坑北侧为地铁某车站,紧邻该车站出入口及风亭结构,风亭结构埋深 12.8 m ~ 15.9 m,距离基坑开挖边最近距离 19.09 m;基坑西侧为某办公楼(3F)

及厨房(2F/1D),办公楼距离基坑最近距离 10.04 m,其基础埋深 1.1 m,采用 $\phi 600/\phi 800$ 灌注桩+承台,桩长 22 m;厨房距离基坑最近距离 5.05 m,其基础埋深 5.2 m,采用 $\phi 600/\phi 800$ 灌注桩+承台,桩长 22 m;基坑南侧为地铁车辆段内部试车线,距离基坑边最近距离 7.76 m,基坑东侧为空旷场地。

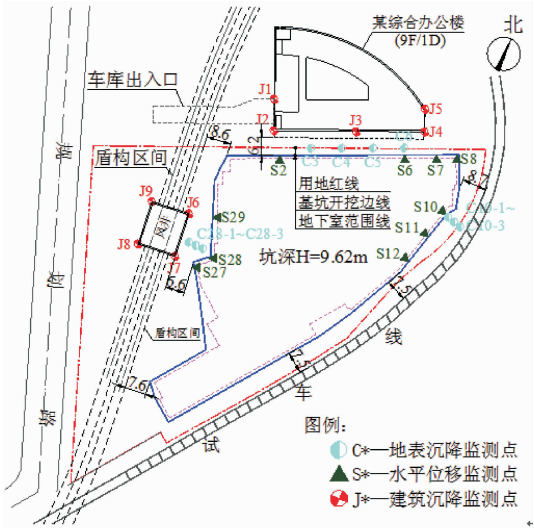


图2 DK1 基坑平面及主要监测点布置图

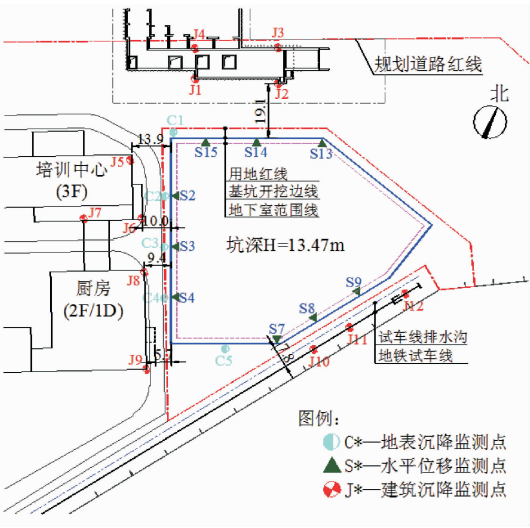


图3 DK2 基坑平面及主要监测点布置图

1.3 工程地质条件

拟建场地地貌单元属渭河高漫滩,场地地层自上而下主要由第四系全新统杂填土(Q_4^{al})、素填土(Q_4^{al})、第四系全新统冲积中砂(Q_4^{al})、中粗砂(Q_4^{al})、上更新统冲击粉质黏土(Q_3^{al})、中粗砂(Q_3^{al})等构成,各层土物理性质指标见表1,典型地层剖面如图4。

表1 场地地层和主要物理力学指标

编号	土层名称	平均厚度/m	平均埋深/m	天然重度/($kN \cdot m^{-3}$)	标贯实测击数/击	颗粒分析(mm)/%					压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	综合渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)
						>2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075				
① ₁	杂填土	0.94	1.26	17.0	—	—	—	—	—	—	—	5	8	—
① ₂	素填土	4.39	4.70	16.0	—	—	—	—	—	—	—	10	12	—
②	中砂	2.11	7.19	18.0	12.5	0.8	10.1	51.6	34.5	3.0	19.0	2	25	32.0
③	中砂	5.19	12.54	19.0	17.3	4.4	23.9	42.5	26.2	2.9	22.0	2	26	
④	中粗砂	7.41	20.90	19.6	42.0	15.5	42.5	27.7	12.9	1.4	30.0	2	26	
⑤	中粗砂	5.98	27.90	19.6	65.0	16.5	52.6	20.2	9.3	1.4	35.0	2	27	

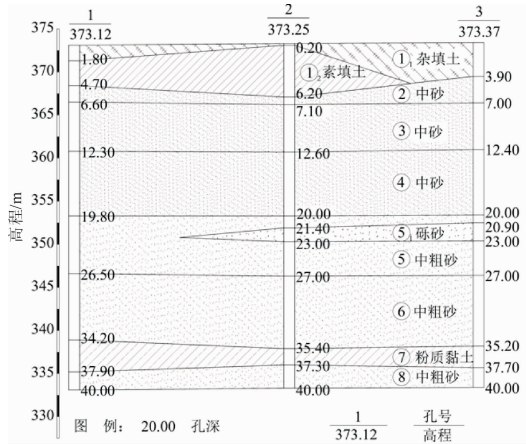


图4 典型工程地质剖面

1.4 水文地质条件

西安市位于关中盆地中部偏南,地势东南高,西北低,海拔 400 m 左右。区域内河流主要有渭河、灞河、泾河、皂河及沣河等。拟建场地距渭河约 1.7 km,拟建场地附近有漕运明渠,距 DK2 约 30.0 m,漕运明渠河床及侧岸均为水泥衬砌,深约 4 m~7 m,目前主要为污水排泄通道,流速约为 2 m/s~4 m/s,水体污浊,有异味。

勘察期间,各钻孔中测得的稳定水位为 11.00 m~13.90 m,相应标高为 359.67 m~360.86 m。场地地下水属孔隙潜水类型,水位年均变幅一般为 1.35 m~2.80 m。

2 基坑支护及降水方案

西安市尚没有像上海、深圳、昆明、宁波等城市出台相关行政法规,禁止基坑支护结构超越红线或限制使用锚杆(索)^[15-18],因此西安地区建筑基坑一般较少采用地下连续墙、全内支撑、逆作法、重力式水泥土墙等支护结构,主要采用放坡、土钉墙、悬臂式结构、锚拉式结构及双排桩等支护结构,经济性好,且保证了基坑内开阔施工空间。

2.1 基坑支护方案

2.1.1 DK1 基坑

综合考虑地铁结构、周边建筑、地下管线及工程造价等因素后,DK1 基坑支护主要采用护坡桩+旋喷锚索的支护方案,桩顶相对标高为-1.5 m,冠梁以上至地面部分采用钢筋混凝土挡土板支护。

基坑北侧紧邻某综合办公楼,为保护办公楼基础,该区域选择双排桩+短锚索支护,桩长 16.0 m,桩径 700 mm,桩间距 1.4 m,桩排距 2.1 m,在桩间竖向设置 3 排旋喷锚索,锚索长度均为 9 m,实现对办公楼地基基础的避让,支护剖面如图 5 所示。

2.1.2 DK2 基坑

DK2 基坑支护同样主要采用护坡桩+旋喷锚索的支护方案,基坑东侧、西侧选择采用锚拉式单排桩支护,桩长 21.0 m,桩径 800 mm,桩间距 1.5 m,桩间设置 3 排旋喷锚索,西侧因避让办公楼工程桩,锚索长度较东侧稍有差异。基坑北侧因距离地铁车站风亭结构最近距离 19.1 m,支护结构可满足地铁管理部门控制要求,支护形式与东侧保持一致。

2.2 基坑降水方案

2.2.1 DK1 基坑

DK1 基坑坑底标高位于最高地下水位以上约 3.8 m,大于年均变幅水位,因此在设计时未考虑基坑降水。

2.2.2 DK2 基坑

DK2 基坑坑底标高位于最高地下水位以下约 1.8 m,考虑水位涨幅为 0.75 m,设计降水深度为 2.55 m。降水范围主要为中砂层,设计采用开放式管井降水,井深自现地面起算深 25.0 m,井底未进入稳定隔水层,按照潜水非完整井模型计算,基坑涌水量为 3 757.42 m³/d,分析计算在坑外布置 25 口井,坑内各点降深可满足要求。

为了保证降水过程中砂层不发生渗透破坏,必须确定临界水力坡降^[20],其计算式为:

$$J_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (1)$$

式中: G_s 为土颗粒比重; e 为孔隙比。

本工程降水主要位于④层砂土,代入相关指标,得到 $J_{cr} = 1.06$,由于管井降水并非一维渗流,完全通过上述经验公式确定的临界水力坡度并不能反映复杂的二维、三维渗流,文献[21]针对西安渭河中砂层,通过模型试验研究得到的渗透破坏的临界水力坡降为 0.6。本文取 $J_{cr} = 0.6$,按照基坑外围布置 25 口井,井间距 12 m,在抽水期间,降水井井中水位和相邻两口井中间位置动水位高差不得超过 3.6 m。

降水引起的地层压缩变形 s 计算式为:

$$s = \psi_w \sum \frac{\Delta \sigma'_{zi} \Delta h_i}{E_{si}} \quad (2)$$

式中: ψ_w 为沉降经验系数,本文参照文献[22]取 0.5; $\Delta \sigma'_{zi}$ 为降水引起地面下第 i 层土平均附加有效应力; Δh_i 为第 i 层土厚度; E_{si} 为第 i 层土压缩模量,按表 1 取值。

计算降水产生的附加沉降最大 0.8 cm,预测降水产生的地层压缩沉降等值线图见图 6,周边建筑

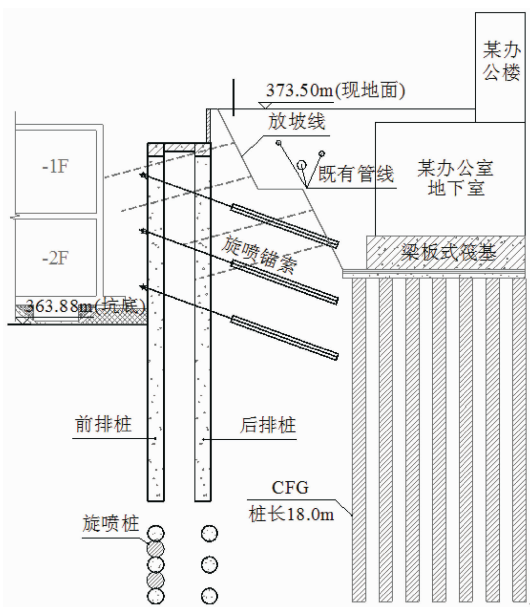


图 5 DK1 北侧基坑支护剖面图

其余部分采用锚拉式单排桩进行支护,桩长 15.0 m,桩径 800 mm,桩间距 1.4 m,桩间竖向设置 2 排旋喷锚索,锚索长度为 14 m。根据规范^[19]相关规定,结合地铁管理部门控制要求,工程设计以控制锚索末端距离地铁结构净距不小于 3 m 为原则,基坑西侧通过调整锚索水平倾角满足对西侧区间风井结构的避让保护。

物各角点间最大倾斜率 0.036‰,满足周边地铁及附属设施容许变形,施工期间,降水效率达到 90% 以上。

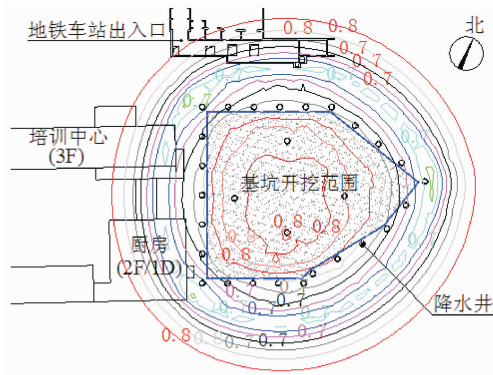


图 6 降水引起 DK2 周边沉降等值线图(单位:cm)

3 设计施工中面临问题及处置

3.1 桩间流砂

因场地开挖范围均为砂层,桩间砂层难以有效形成拱效应,桩间砂层流失往往造成基坑侧壁土压力改变,加剧支护结构变形,严重时会造成桩间坍塌,进而造成对周边地铁结构的不利影响,通过调查走访 DK1 基坑西侧区间风井支护,施工中围护桩桩间存在不同程度流砂情况,对比类似砂层基坑桩间溜砂情况,本项目在围护桩合理桩间距(1.4 m~1.5 m)的基础上,增设桩间高压旋喷桩对砂层进行预加固,高压旋喷桩直径 800 mm,向支护桩两侧搭接 50 mm~100 mm,桩底伸入基坑坑底以下不少于 1 m,充分保证了基坑开挖后桩间砂层的稳定,桩间砂土开挖对比见图 7。

3.2 阳角区锚索群锚效应问题

DK1 基坑西侧因存在局部阳角,锚索锚固段有交叉,进而会产生群锚效应,降低锚索的抗拔力和支护效果^[23],从而影响基坑的整体稳定性。

因此,该部分南侧锚索并未垂直基坑开挖线打入,如图 8 所示,向远离另一侧锚索的方向水平偏移了 15°,有效避免了群锚效应。

3.3 局部内支撑支护设计

DK2 基坑西南角距离厨房基础最近距离 5 m,此范围内尚有改迁电力管沟,双排桩、锚索均不具备施工空间。

因此,借用基坑平面直角,采用单排桩+45°角撑,角撑采用装配式钢管撑,竖向设置两道,并避让主楼范围,最大限度减小支护结构对坑内施工的影响(见图 9)。



(a) 某砂层基坑桩间流砂



(b) DK2 基坑桩间立面实景

图 7 某基坑桩间溜砂与 DK2 桩间立面对比图

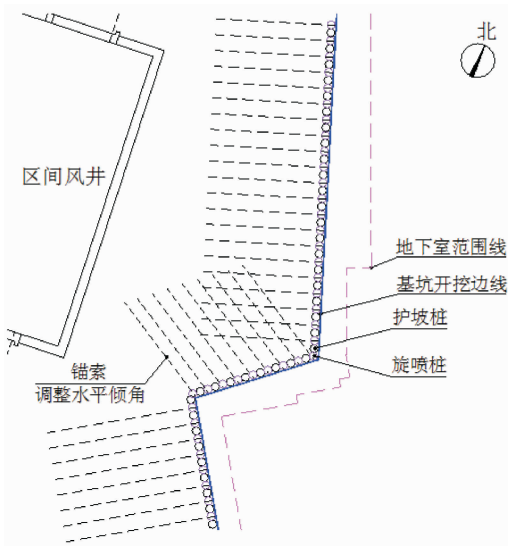


图 8 阳角区锚索偏移

3.4 坑底集水坑隔水

DK1 基坑坑底大面位于地下水位以上,因此,在设计过程中未考虑施工降水。但在主楼开挖电梯井、集水坑时地下水出露,由于砂层渗透性较好,地下水补给速度快,局部抽排无法满足施工要求,且快速抽水使得集水坑侧壁快速垮塌。

针对坑中坑局部加深区采用管井降水,施工工序复杂,短期降水效果不明显,且严重干扰基础施

工。最终采用拉森钢板桩对坑中坑进行支护兼隔水,并结合坑内抽排地下水,降水效果明显,保证了电梯井和集水坑的正常开挖,坑中坑钢板桩隔水后基础施工见图 10。

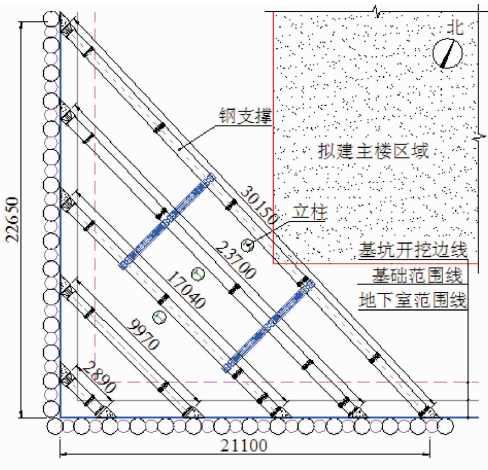


图 9 内支撑支护平面图



图 10 钢板桩隔水实施效果

4 基坑工程监测

选取基坑施工期间代表性监测点(见图 2、图 3)分析,整个基坑开挖及支护施工期间,监测数据总体稳定,支护结构最大水平位移不超过 $0.2\% H$ (H 为基坑深度),地铁设施累计位移控制在 3.5 mm 以内,基坑施工对周围环境影响可控。

4.1 DK1 监测数据分析

DK1 基坑围护桩水平位移、基坑地表沉降、周边建构筑物沉降曲线如图 11、图 12、图 13 所示。图 11 中,基坑西侧及东南侧(S10—S29 监测点)桩顶水平变形最大 4.61 mm,基坑北侧双排桩区域(S2—

S8 监测点)桩顶水平变形最大 16.32 mm,达到控制值 80%。分析北侧桩顶水平变形过大原因,主要是本项目基坑其他区域竖向均设置 2 排锚索,但北侧考虑原有某综合办公楼基槽回填土的不利因素,加之某综合办公楼 CFG 桩影响锚索长度,竖向设计为三排短锚索,在 2023 年 10 月 16 日至 10 月 22 日施工期间,基坑土方开挖较快,整个基坑土方分层高度按照竖向两排锚索标高控制,造成北侧区域存在短期超挖工况,故监测表现出桩顶水平位移有突变,之后锚索及时张拉锁定完成,恢复设计工况,后期桩顶水平变形继续保持平稳。

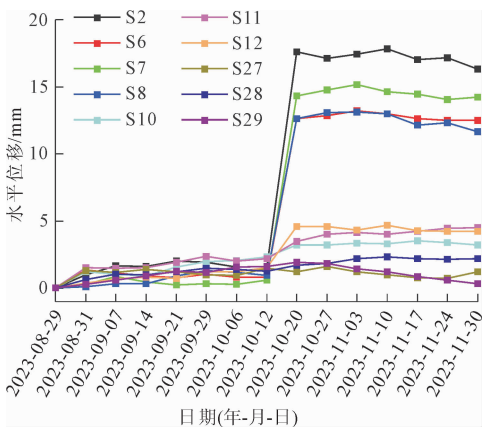


图 11 DK1 支护桩水平位移监测曲线

图 12 中基坑外侧地表变形基本稳定,部分测点表现出隆起,最大隆起量 2.2 mm,部分测点表现出沉降,最大沉降量 1.7 mm。由于前述桩顶水平位移总体较小,实测桩身深层水平位移更小,按照地层损失法^[24]分析,相应桩后土体沉降必然较小,部分测点出现隆起原因,结合勘察报告地层分析,可能是第一排旋喷锚索以上地层较为松散,大范围旋喷锚索高压旋喷施工过程中,对上覆土体有部分挤密抬升作用。

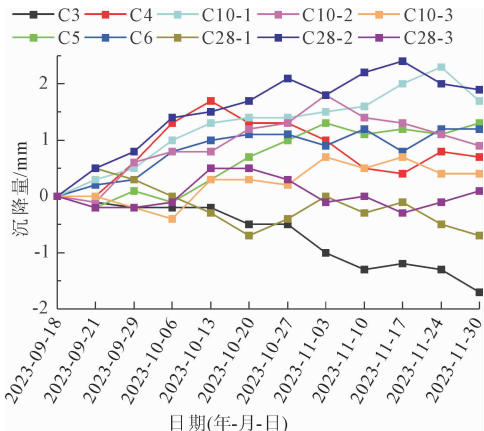


图 12 DK1 基坑地表沉降监测曲线

图 13 中 J1—J5 为北侧某综合办公楼沉降监测点,J6—J9 为西侧地铁区间风井沉降监测点。某综合办公楼最大沉降 2.1 mm,整体倾斜 0.000 03,《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中对于高层建筑的地基整体倾斜允许值为 0.002 5,实测某综合办公楼整体倾斜远小于规范限值。区间风井最大沉降 2.7 mm,《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)附录 B 中城市轨道交通结构安全控制指标值对隧道竖向位移控制值为 < 20 mm,实测区间风井最大沉降小于控制指标,地铁运营正常。

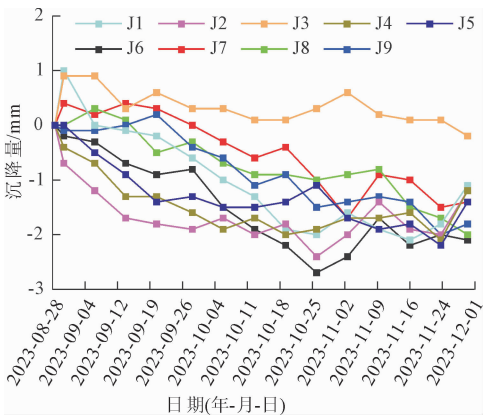


图 13 DK1 周边建筑物沉降监测曲线

4.2 DK2 监测数据分析

DK2 基坑监测结果如图 14—图 16 所示。图 14 中,基坑开挖期间南侧中间位置桩顶水平变形最大,为 3.11 mm,小于设计控制值 25 mm。图 15 中基坑外侧地表的沉降趋势符合深基坑开挖卸荷变形发展规律^[25],实测最大沉降量 2.9 mm,位于基坑西北角。

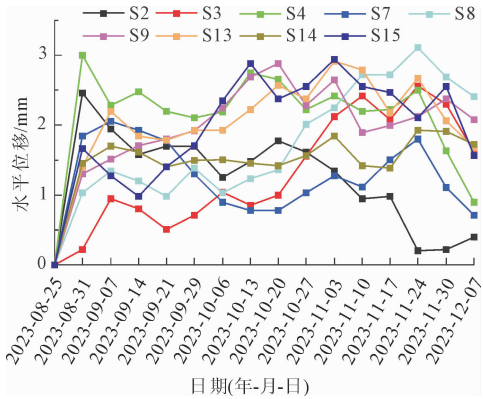


图 14 DK2 支护桩水平位移监测曲线

图 16 中北侧地铁车站风亭最大沉降 2.8 mm,西侧某办公楼、厨房最大沉降 3.2 mm,东南侧地铁试车线最大沉降 1.4 mm,相关监测指标均未超过控

制值。基坑西侧办公楼、厨房及北侧车站出入口沉降量是东南侧试车线沉降量 2.0 ~ 2.2 倍,主要是 DK2 基坑施工内坡道紧贴东南侧基坑侧壁,坡道预留土方为东南侧基坑提供了被动抗力,自 2023 年 11 月坡道土方才陆续开挖,此范围基坑暴露时间更短,引起相应位置试车线沉降更小。

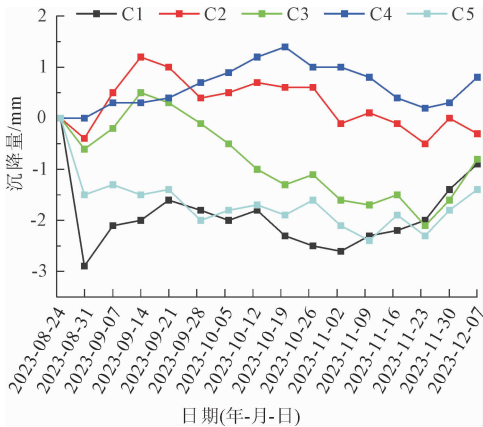


图 15 DK2 基坑地表沉降监测曲线

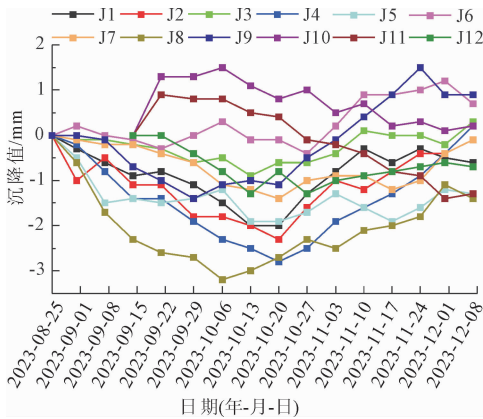


图 16 DK2 周边建筑物沉降监测曲线

5 结 语

- (1) 西安地区邻近地铁基坑工程需采用差异化支护策略,在锚拉式结构受限时,优先选用双排桩支护体系(桩排距建议为 3 倍桩径)或局部角撑系统,可满足地铁结构的变形控制要求。
- (2) 针对砂层稳定性控制,通过桩间设置高压旋喷桩(搭接量 50 mm ~ 100 mm)的预加固技术,可显著改善砂层拱效应缺失问题,实现桩间流砂现象的有效控制。
- (3) 西安砂层采用管井降水时,当管井周围水力坡降小于砂层临界水力坡度(西安砂层约 0.6)时,降水效率可达 90% 以上,地表沉降可控制在 10 mm 内;坑中坑局部加深区,拉森钢板桩可同步实现

支护与隔水功能,显著提升开挖稳定性与降水效果。

(4) 现场监测数据表明,上述技术组合应用下,支护结构最大水平位移不超过 $0.2\% H$,地铁设施累计位移控制在 3.5 mm 以内,验证了技术方案的有效性。

参考文献:

- [1] 王 灿. 基坑开挖对紧邻地铁隧道的的影响研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.
- [2] 王卫东,沈 健,翁其平,等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J]. 岩土工程学报,2006,28(S1):1340-1345.
- [3] 郑 刚,杜一鸣,刁 钰,等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):599-612.
- [4] 姜兆华. 基坑开挖时邻近既有隧道的力学响应规律研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
- [5] 李世辉. 超大面积深基坑开挖对毗邻地铁车站影响的监测与数值分析[J]. 城市轨道交通研究,2018,21(8):115-119.
- [6] 王志杰,周飞聪,周 平,等. 基于强近接大型基坑单侧开挖卸载既有车站变形理论研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(10):2131-2147.
- [7] 韩 晓. 上海紧邻地铁超大深基坑工程设计与实践[J]. 岩土工程技术,2024,38(1):70-74.
- [8] 刘胜利,蒋盛钢,曹成勇. 强透水砂卵地层深基坑地下水控制方案比选与优化设计[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(12):3189-3197.
- [9] 邱明明,杨果林,申 权,等. 深厚富水砂层排桩挡墙深基坑施工变形特性研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2020,59(3):107-117.
- [10] 马加志,廖正根,李 聪. 富水砂层超深基坑开挖突涌应急处置技术[J]. 现代隧道技术,2021,58(S2):160-164.
- [11] 李雪齐,王佳乐,刘长志. 深基坑局部桩间流砂处理技术[J]. 建筑技术,2019,50(9):1120-1122.
- [12] 于廷新. 邻近地铁砂层基坑微变形动态控制及监测研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(12):29-34.
- [13] 刘俊城,谭 勇,宋享桦,等. 富水砂土基坑渗水对侧墙变形和周边环境的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2023,57(3):530-541.
- [14] 李 威,杨学义,孙大钧. 富水砂层潜水非完整井抽水试验及数值模拟研究[J]. 中国港湾建设,2025,45(5):21-26,96.
- [15] 上海市城乡建设和交通委员会. 关于进一步加强本市基坑和桩基工程质量安全管理的通知(沪建交[2012]645号)[EB/OL]. (2012-07-18)[2025-07-15]. <https://zjw.sh.gov.cn/jsgl/20180912/0011-29043.html>.
- [16] 深圳市住房和建设局. 关于加强深基坑工程和降水工程管理的紧急通知(深建质安[2015]102号)[EB/OL]. (2015-09-08)[2025-07-15]. https://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/tzgg/content/post_1512196.html.
- [17] 昆明市住房和城乡建设局. 关于基坑工程中限制使用锚杆(索)的通知(昆建通[2011]363号)[EB/OL]. (2011-12-01)[2025-07-15]. <http://www.yn-sxjl.com/show.aspx?model=content&id=372>.
- [18] 宁波市住房和建设局. 关于基坑支护禁止使用锚杆(索)及加强危大工程勘察设计管理的通知(甬建发[2021]9号)[EB/OL]. (2021-02-08)[2025-07-15]. https://zjw.ningbo.gov.cn/art/2021/2/8/art_1229325543_1630740.html.
- [19] 城市轨道交通结构安全保护技术规范:CJJ/T 202—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [20] 张 力,梁发云,王 琛. 水平渗流作用下无黏性土接触冲刷细颗粒起动机理分析[J]. 工程力学,2021,38(5):143-150.
- [21] 郭亚科. 西安地铁临渭河段穿越富水砂层地下水控制试验与模拟研究[D]. 西安:长安大学,2023.
- [22] 胡长明,林 成. 黄土深基坑潜水区降水诱发地面沉降的简化算法[J]. 中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):76-83,139.
- [23] 张发明,刘 宁,赵维炳. 岩质边坡预应力锚固的力学行为及群锚效应[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(S1):1077-1080.
- [24] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [25] 邱明明,杨果林,申 权,等. 地下连续墙与止水帷幕共同作用下富水砂层深基坑变形性状[J]. 长江科学院院报,2020,37(11):81-88,95.