

DOI: 10.7672/sgjs2026130111

富水砂层邻近敏感建筑物异形深基坑施工技术*

蒋维真,刘俊城,谭 勇

(同济大学土木工程学院地下建筑与工程系,上海 200092)

[摘要] 相较于规则基坑,异形深基坑因其不规则特性面临更大的设计和施工风险,极易对邻近建(构)筑物造成严重损害,尤其在地下水位高、可侵蚀性强的深厚富水砂层中。然而,目前仍缺少关于该特殊地层邻近敏感建筑物异形深基坑施工安全技术研究。基于江苏南通紧邻高耸建筑物的某地铁换乘车站项目,分析了该异形基坑实施期间面临的主要施工难点,包括确保地下连续墙水密性和基坑稳定性、保护邻近建筑物以及降低抽水不利影响。因此,针对性提出了异形地下连续墙施工技术、深基坑稳定性及变形控制技术、邻近敏感建筑物保护关键技术和深厚富水砂层抽水影响控制技术,有效确保了基坑及建筑物安全。

[关键词] 地铁车站;基坑;地下连续墙;富水砂层;变形;风险管控

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0111-06

Construction Technology for Irregular Deep Foundation Excavation Close to Sensitive Building in Water-rich Sand

JIANG Weizhen, LIU Juncheng, TAN Yong

(Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Compared with regular foundation excavation, special-shaped deep foundation excavation face greater design and construction risks due to their irregular characteristics, which are prone to causing serious damage to adjacent buildings (structures), especially in deep water-rich sand layers with high groundwater levels and strong erosion. However, there is still a lack of research on the construction safety technology of special-shaped deep foundation excavation adjacent to sensitive buildings in this special stratum. Based on a subway transfer station project adjacent to a high-rise building in Nantong, Jiangsu Province, the main construction difficulties faced during the implementation of the special-shaped foundation excavation are analyzed, including ensuring the water tightness of the diaphragm wall and the stability of the foundation excavation, protecting the adjacent buildings, and reducing the adverse effects of pumping. Therefore, the construction technology of special-shaped diaphragm wall, the stability and deformation control technology of deep foundation excavation, the key technology of adjacent sensitive building protection, and the control technology of pumping influence in deep water-rich sand layers are put forward, which effectively ensures the safety of the foundation excavation and building.

Keywords: subway stations; foundation excavation; diaphragm wall; water-rich sand layers; deformation; risk management and control

0 引言

深基坑为我国城市地下空间开发的主要形式,由于受限于城市紧张的地面资源和周边密集的老旧敏感建筑,其平面布置通常呈不规则形态,易存

在多个应力集中角点,其内部甚至存在坑中坑^[1-2],比如大体量地铁换乘车站^[3],显著提高了深基坑的设计和施工难度,极易对邻近既有建筑和基础设施造成严重损害,造成经济损失甚至人员伤亡^[4]。

为降低此类异形深大基坑施工风险,目前已有学者对其支护结构设计和受力变形演化规律展开相关研究。姜伟玲等^[1]采用 MIDAS/GTS 对北京某超大异形基坑进行数值仿真分析,探讨了围护结构

[作者简介] 蒋维真,博士研究生, E-mail: jiangweizhen@tongji.edu.cn

[通信作者] 刘俊城,博士研究生, E-mail: liujuncheng@tongji.edu.cn

[收稿日期] 2025-12-14

变形及坑外地表沉降分布规律,证实了异形基坑变形存在非常显著的空间效应。安辰亮等^[2]结合现场监测数据分析了某异形深大基坑开挖期间支护结构的变形演化规律及受力分布特征,同样揭示了支护结构变形空间效应明显,并表明当开挖深度>15m 时支护结构土压力明显小于传统朗肯土压力计算结果。吴坤^[3]基于广州某地铁站基坑工程,对超大异形深基坑支护设计方案展开优化分析,结果表明环形支撑相较传统对撑而言能显著降低成本,便于施工,并且在偏压受力情况下仍能满足支护结构受力要求。然而,上述研究主要聚焦于软土或卵石地层异形深基坑的设计和施工问题,鲜有对深厚富水砂性地层异形深基坑施工技术进行报道。此类地层由于具有地下水位高、渗透性强、可侵蚀性等特点,极易诱发穿墙渗漏、流砂和管涌等渗透破坏,进而造成基坑失稳和坑外严重水土流失,对邻近建筑物安全造成严重威胁^[5-7]。

本文依托南通某邻近既有建筑的异形地铁换乘车站,分析该异形基坑施工期间面临的工程难点和风险,针对性总结了富水砂层异形深基坑施工安全技术,可为类似地层条件异形基坑设计和施工提供有效指导。

1 工程概况

1.1 项目概况

某地铁换乘车站位于南通市崇川区人民中路与濠西路交叉口,为地下轨道交通 1,2 号线换乘站。1 号线车站沿人民中路东西向分布,属于地下 2 层岛式站台车站,总长约 364.17m,标准段净宽 21.3m;标准段基坑开挖深度 $H_e=17.56\text{m}$,西侧与东侧端头基坑开挖深度分别为 19.26,21.08m。2 号线车站沿跃龙路南北向分布,属于地下 3 层岛式站台车站,总长约 205.4m,标准段净宽 21.7m;标准

段基坑与端头井基坑挖深依次为 24.8,26.5m。本换乘车站采用半盖挖顺作法施工,开挖顺序依次为 1 号线标准段及西侧端头井段(基坑 1)、换乘节点及 2 号线南侧端头井段(基坑 3)、1 号线东侧端头井段(基坑 2)以及 2 号线标准段及北侧端头井段(基坑 4),如图 1 所示。其中,换乘节点基坑 3 为异形基坑,且由于 1,2 号线地铁车站设计开挖深度的差异导致坑内还存在局部坑中坑,面临较大的施工难度和风险。此外,在基坑 3 东南方向存在 1 幢短桩筏板基础高耸塔形建筑物,塔体与基坑最近距离仅为 41.87m,位于 2 倍开挖深度范围内,基坑施工期间将面临较大的倾斜及过度沉降风险^[6],应密切监控其变形响应行为。

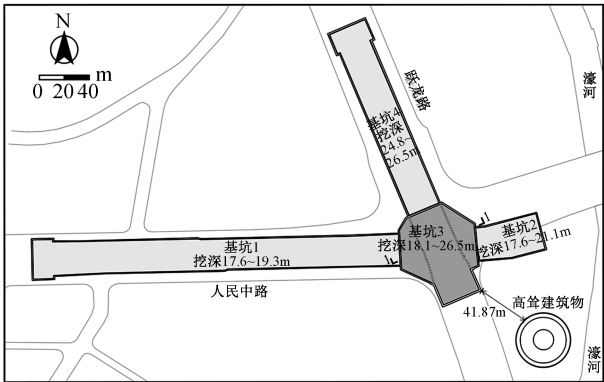


图 1 换乘车站基坑平面

Fig. 1 Plan layout of foundation excavations of the interchange station

1.2 工程与水文地质条件

各土层主要物理力学参数如表 1 所示。基坑挖深范围内主要涉及地层从上至下依次为:①填土、②砂质粉土、③₁ 砂质粉土夹砂、③₂ 粉砂、④₂ 粉质黏土夹粉土、④_{2t} 砂质粉土夹粉质黏土、⑤₁ 粉砂夹粉土、⑤₂ 砂质粉土夹粉质黏土、⑤₃ 粉砂夹粉土以

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层	$\omega/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	e	$E_{s0.1\sim0.2}/\text{MPa}$	抗剪强度		渗透系数	
					c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$K_H/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$K_V/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
②砂质粉土	30.7	18.4	0.870	8.49	7.7	22.0	2.64×10^{-5}	5.22×10^{-5}
③ ₁ 砂质粉土夹粉砂	30.2	18.4	0.867	11.38	4.5	27.5	1.81×10^{-3}	3.94×10^{-3}
③ ₂ 粉砂	29.0	18.6	0.832	12.96	4.6	32.0	1.27×10^{-3}	4.39×10^{-3}
④ ₂ 粉质黏土夹粉土	33.6	18.1	0.968	5.57	11.0	18.5	4.19×10^{-6}	2.78×10^{-5}
④ _{2t} 砂质粉土夹粉质黏土	31.2	18.3	0.898	8.43	6.3	21.0	2.13×10^{-4}	9.79×10^{-4}
⑤ ₁ 粉砂夹粉土	30.0	18.4	0.874	9.67	5.2	30.0	4.83×10^{-4}	2.35×10^{-3}
⑤ ₂ 砂质粉土夹粉质黏土	30.6	18.3	0.893	8.69	6.6	27.0	4.60×10^{-4}	1.75×10^{-3}
⑤ ₃ 粉砂夹粉土	29.9	18.5	0.855	13.69	4.9	32.0	1.69×10^{-3}	3.39×10^{-3}
⑥粉砂	28.0	18.7	0.809	15.38	2.9	35.0	3.22×10^{-3}	6.64×10^{-3}

注: ω 为含水率; γ 为土体重度; e 为孔隙比; $E_{s0.1\sim0.2}$ 为 0.1~0.2MPa 范围内的土体压缩模量; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角;抗剪强度参数由固结快剪试验确定; K_H 为竖向渗透系数; K_V 为水平向渗透系数

及⑥粉砂。

此外,场地涉及的地下水类型主要为潜水和(微)承压水。潜水主要赋存于浅部粉土、粉砂与填土层中,含水层总厚度大,含水量丰富。潜水水位埋深1.2~2.3m,平均埋深1.82m,主要接受大气降水的垂直补给和地表水体(如濠河)侧向补给,水位随季节性变化明显。场地内的承压水头埋深2.0~5.0m,主要赋存于④₂层以下的砂土与粉土层中,承压水位受季节、气候、潮汐等因素影响而呈现季节性变化,主要接受径流及越流补给,且与潜水存在一定水力联系。

1.3 基坑支护方案

该异形换乘基坑采用刚度大、止水效果好的地下连续墙,并沿深度布设数道内支撑。其中,主体部分采用1.0m厚地下连续墙,在南侧2号线端头井局部区域采用1.2m厚地下连续墙进行加固处理。基坑3挖深范围内设置5道内支撑,其中第1~3道为钢筋混凝土支撑(截面尺寸依次为1.0m×1.5m,1.0m×1.8m和1.0m×2.0m),并设置单圆环梁与地下连续墙共同构成组合支护结构。第4,5道支撑均为φ609钢管支撑。地下连续墙深55m,其中下部8m为无构造钢筋的素混凝土段^[8],总插入比约0.86。基坑典型横剖如图2所示。

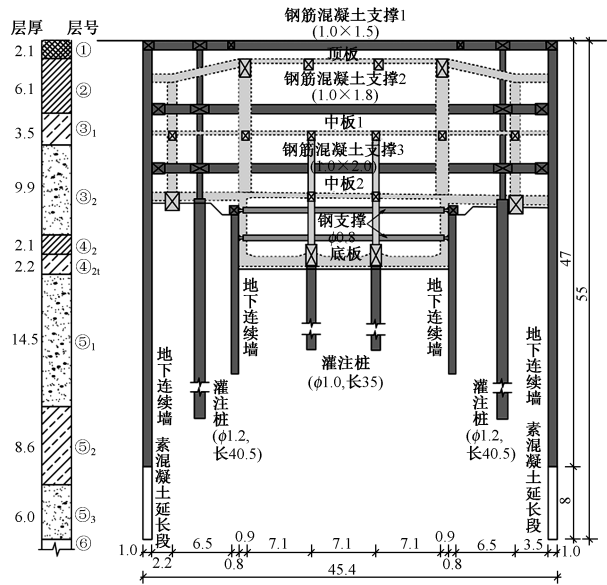


图2 基坑3典型横剖面(单位:m)

Fig. 2 Typical cross-section at foundation excavation 3 (unit: m)

2 施工技术重难点分析

2.1 确保异形地下连续墙水密性

如图1所示,由于换乘基坑3平面形状不规则,地下连续墙并非呈简单的直线形,而是出现如“L”

形、“T”形、“Z”形、“Y”形等形状各异的墙体,这对相邻墙板段间的接头质量要求非常高;其次,墙体设计深度达55m,其端部插入下部承压含水层中,以期隔断潜水含水层坑内外水力联系,便于潜水降水和土方开挖,而这对墙体的垂直度偏差控制提出了很高的要求;此外,由于施工场址内主要地层为黏聚力小、自稳性差的粉土和砂土,地下连续墙成槽时极易发生槽壁坍塌,进而造成墙体夹泥夹砂问题,这对钢筋网下放、泥浆护壁质量及水下混凝土灌注等均提出了极高的工艺要求。然而,现有地下连续墙施工工艺难以满足此类富水砂层超深异形地下连续墙施工的要求。一旦墙体质量存在缺陷(如开裂、空洞等),水密性将无法保证,基坑施工期间的穿墙渗漏事故容易诱发坑外严重水土流失和基底突涌破坏,对周边敏感建(构)筑物造成不可恢复的破坏。

2.2 确保异形深基坑安全稳定性

由于换乘基坑的不规则特性,存在多处阳角(即角部朝向坑内),在基坑开挖期间这些区域是极易出现应力集中的薄弱位置,对基坑支护结构设计提出了很高的要求。目前工程中常见的对撑、正交或斜交的杆系支撑和竖向斜撑等形式主要用于较为规则基坑(如狭长形地铁车站和方形地下室)^[3],通常难以直接用于异形基坑的支护设计。一旦设计方案不合理,容易导致因支护构件断裂诱发的基坑局部或整体倾覆破坏。此外,基坑3内部还存在1个坑中坑,开挖深度达26.5m,土方开挖竖向卸荷导致的基底隆起也容易造成坑中坑支护结构踢脚变形、失稳破坏等一系列严重后果。这再次表明该异形基坑支护结构体系设计难度非常高。

2.3 降低基坑对邻近敏感建筑物不利影响

位于异形基坑3东南方向的高耸电视塔是本工程施工期间最为重要的周边敏感建筑物,上部结构高193.5m,塔楼最大直径24m,含有1层地下室,采用短桩筏基础,预制水泥桩长约11.65m,持力层位于③₂粉砂层。考虑到深基坑围护结构最大侧向位移通常出现在开挖面附近位置^[9],建筑物桩端所在土体(开挖面以上区域)极易受到基坑开挖扰动影响,进而造成高耸塔体产生显著沉降。此外,富水砂层频发基坑穿墙渗漏事故容易造成建筑物下方桩间土体严重流失。一旦建筑物差异沉降超过其变形控制值,塔体可能出现过度倾斜甚至发生整体倾覆破坏。可见,该换乘车站深基坑施工期间保证紧邻塔体的安全至关重要,同时难度也非常大。

2.4 控制坑内抽水不利影响

工程场址详勘报告结果表明,⑤₁层和⑤₃层可分别视为第一和第二承压含水层。通过对坑底抗渗流稳定性进行验算,发现施工期间需同时对上述2个承压含水层进行减压抽水,从而避免坑底发生突涌事故。如图2所示,围护结构兼作止水帷幕虽可以隔断⑤₁层但无法隔断⑤₃层坑内外水力联系,因此⑤₃层抽水会导致坑外水位明显下降,上部土体固结沉降易诱发地表大范围沉陷,进而对抗外紧邻建筑物造成不同程度损坏。因此,非常有必要采取相应措施来减缓富水砂层坑内承压含水层抽水带来的不利影响。

3 紧邻既有建筑异形深基坑施工关键技术

3.1 异形地下连续墙施工技术

为确保本工程异形地下连续墙墙板的水密性,采取了如下对策。

1)按槽段成槽分幅施工,标准槽段采用三抓成槽法施工,避免抓斗两侧受力不均影响槽壁垂直度。成槽机掘进时须做到稳、准、轻放、慢提,并用经纬仪双向监控钢丝绳、导杆的垂直度。完槽后用超声波测壁仪进行检测,确保成槽垂直度≤2‰。

2)成槽时不断往槽内注入新鲜泥浆,保持泥浆面在导墙顶面以下0.2m并高出地下水位1.0m以上。随时检查和严格控制泥浆质量,及时调整参数使其既符合规范指标又能满足特殊地层要求,具体参数如表2所示。

表 2 泥浆质量控制指标

Table 2 Quality-control criteria of slurry

项目	指标	检验方法
密度/(g·cm ⁻³)	1.05~1.15	密度计
黏度/s	20~24	漏斗计
含砂量/%	<3	洗砂瓶
pH值	8~9	试纸
失水量/mL	≤10	失水量仪
滤皮厚度/mm	≤1.5	失水量仪

3)地下连续墙槽段间采取H型钢接头,施工时在H型钢两侧焊接0.2mm厚、0.8m宽的铁皮,防止混凝土绕流和泥浆进入。

4)清槽时采用置换法将尚未沉淀的土渣从槽段上口同泥浆一道带出来,使槽内底部以上0.2m处的泥浆相对密度调至1.15以下,泥浆含砂率≤3%,沉渣厚度<0.1m。

5)异形钢筋笼制作均采用焊接加工成型,焊接需准确坚固,避免起吊时钢筋笼发生变形和脱散,吊点处需另外焊接加固。

6)超深异形地下连续墙浇筑时速度需控制在5~8m/h,遵循“先慢后快”浇筑原则,即开始时以较慢速度浇筑,浇筑后期则可适当加快速度,并随时测量混凝土面高度。

3.2 深基坑稳定性及变形控制技术

为确保异形基坑施工稳定性并有效约束围护结构变形,本工程采用如下对策。

1)人工监测基础上结合自动化监测系统,确保围护结构变形24h动态监测。

2)换乘基坑3南端头并地下2层板采用逆作法施工,形成高强度混凝土板撑来有效增强基坑稳定性,具体布置如图3所示。

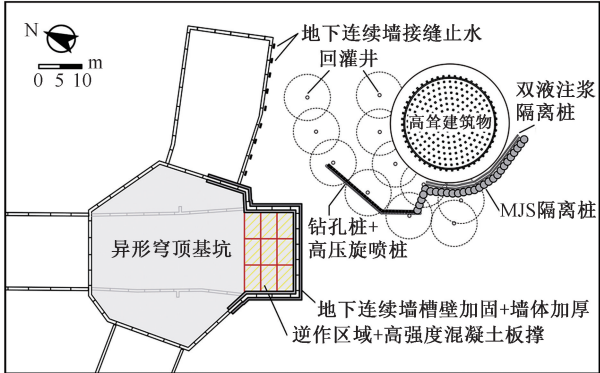


图 3 异形基坑关键施工技术平面布置

Fig. 3 Plan layout of the critical construction technologies for irregular excavation

3)基坑3内部坑中坑垫层设计由“25cm+5cm厚C20早强混凝土”更改为“50cm+5cm厚C35早强混凝土”,对底部垫层进行加强加厚,降低坑底隆起变形,从而避免结构失稳。

4)异形基坑支撑系统采用3道钢筋混凝土支撑和2道钢支撑,如图2所示,其中钢支撑增加伺服控制系统,从而有效平衡开挖期间基坑内外土压力,来最大限度地提高支撑体系抗变形能力。

3.3 邻近敏感建筑物保护关键技术

为有效约束异形基坑施工期间邻近电视塔的变形发展,本工程采用了如下对策。

1)采用自动化监测系统来增强对电视塔沉降和倾斜变形的监测,确保建筑物24h实时监测,实施动态信息化管理和预警。

2)在异形穹顶基坑与电视塔之间设置1排隔离桩来控制坑内土方开挖引起的坑外地层运动,从而降低塔体的变形^[4]。如图3所示,隔离桩由3部分组成:第1部分为φ800@1100的钻孔桩和φ800@500的高压旋喷桩,长度均为32m,其中钻孔桩起到约束土体运动的作用,高压旋喷桩则作为止水帷

幕来封堵钻孔桩间隙;第2部分为 $\phi 2\,400@1\,800$ 的MJS桩,桩长27m;第3部分为双液注浆,注浆深度范围为地表以下6~25m。

3)在建筑物周围布置数口53m深的回灌井,在基坑降水期间采用抽灌一体化控制系统来动态维持建筑物周边水位,从而有效降低因坑外水位下降造成的塔体基础下方地层压缩沉降变形,井点布置如图3所示。

4)异形基坑南端头地下连续墙部分厚度由初始1.0m增加至1.2m,并在墙体两侧实施 $\phi 850@600$ 的三轴搅拌槽壁加固,加固深度从地面至坑底以下3m,增强围护结构强度,减小对电视塔的不利影响。

3.4 深厚富水砂层抽水影响控制技术

为降低异形基坑内抽水对周边环境的不利影响,本工程采用了如下对策。

1)在地下连续墙构造配筋段下方另设8m高素混凝土段,来延长地下水绕流路径^[10],从而降低坑外地下水位下降量。

2)为尽量避免坑内降水期间出现穿墙渗漏事故,在地下连续墙接缝处施作高压旋喷桩进行止水处理,严格控制坑外地下水位。

3)在异形基坑外侧布设一定数量的⑤₃层水位观测井兼作应急回灌井,井间距约20~30m;施工期间对地下水位及地面沉降进行密切监测,一旦指标异常,迅速开启回灌井并调整其参数来减缓地表沉降发展。

4 监测数据分析

为验证上述技术效果,本文对基坑围护结构侧移及邻近电视塔倾斜变形展开分析。

4.1 围护结构侧向位移

基坑3开挖期间墙体侧移如图4所示。由图4可知,基坑开挖至深度18.1m时最大侧移约24mm,而开挖至深度26.5m时最大侧移值增至72mm。这表明异形基坑内部坑中坑开挖会造成墙体侧移的显著增长,但其最大值也仅为0.27% H_e ,低于变形控制标准(0.3% H_e)。

4.2 塔体倾斜

基坑邻近塔体倾斜量随时间变化如图5所示。可见,随着开挖深度增加,建筑物倾斜逐渐趋于稳定,其最大值小于变形控制标准(1.4‰),这表明塔体处于安全状态。

5 结语

1)对于类似地层的异形基坑施工,可借鉴本文总结的异形地下连续墙施工技术、深基坑稳定性及

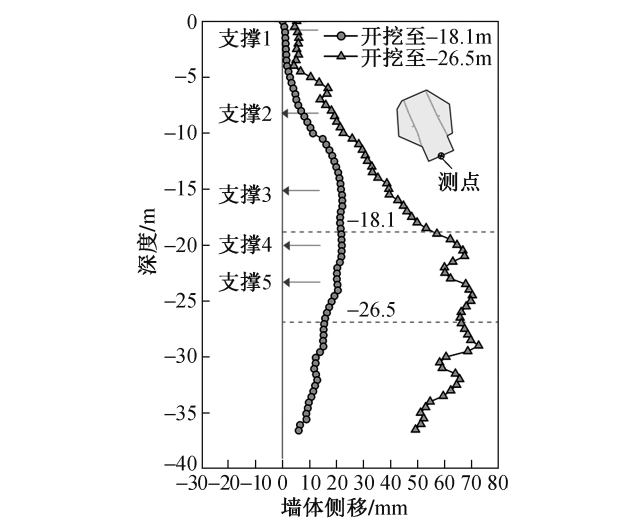


图4 开挖期间墙体侧移发展

Fig. 4 Developments of lateral deflections during excavation

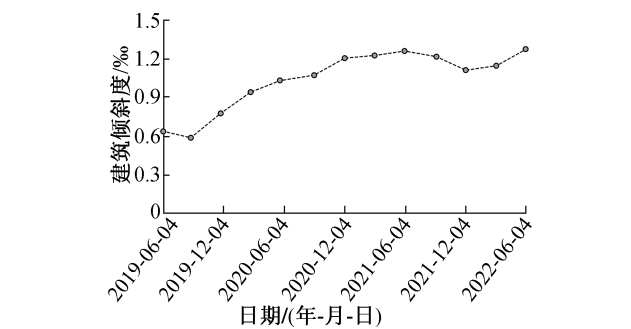


图5 开挖期间建筑物倾斜发展

Fig. 5 Developments of building tilts during excavation

变形控制技术、邻近敏感建筑物保护关键技术以及深厚富水砂层抽水影响控制技术来有效确保异形深基坑本体及紧邻敏感建(构)筑物的安全。

2)通过规范成槽工艺、超声波检测、严格控制泥浆质量、采用H型钢接头、置换法清槽以及控制混凝土浇筑速度等方式能够有效确保成墙期间异形地下连续墙的水密性。

3)通过动态监测、局部逆作法施工、加强加厚底部垫层及伺服支撑等方式能够有效控制异形深基坑的稳定性及变形发展。

4)通过自动化监测、基坑与建筑物间布设隔离桩、建筑物周边施作回灌井、增加挡土墙厚度及槽壁加固等方式能有效约束邻近高耸敏感建筑物变形从而确保其安全。

5)通过设置素混凝土延长段、接缝处施作高压旋喷桩止水以及坑周布设回灌井能有效减缓基坑抽水引起的坑外地下水位下降。

参考文献:

[1] 姜伟玲,李博,徐浩,等.考虑空间效应的大型异形基坑开挖

变形分析[J]. 测绘通报,2024(4):107-111,118.

JIANG W L, LI B, XU H, et al. Deformation analysis of large special-shaped foundation pit excavation based on spatial effect [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2024(4):107-111, 118.

[2] 安辰亮,冯卫星,王道远,等. 车站异形深大基坑施工过程试验研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(1):13-18.

AN C L, FENG W X, WANG D Y, et al. Field test research on the construction process of special-shaped deep and large foundation pit of station[J]. Journal of railway engineering society, 2021, 38(1):13-18.

[3] 吴坤. 环形支撑体系在超大异形深基坑中的应用研究[J]. 铁道工程学报,2022,39(6):50-55.

WU K. Application of circular strut system in large special-shaped deep foundation excavations [J]. Journal of railway engineering society, 2022, 39(6):50-55.

[4] LIU J C, TAN Y, LIAO S M. Protection of a 193.5m high concrete tube-shaped TV tower close to subway excavations[J]. Journal of performance of constructed facilities, 2023, 37(5):04023043.

[5] LIU J C, TAN Y. Review of through-wall leaking incidents during excavation of the subway stations of Nantong Metro Lsine 1 in thick water-rich sandy strata [J]. Tunnelling and underground space technology, 2023, 135:105056.

[6] 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.

LIU J C, TAN Y, SONG X H, et al. Effects of through-wall leaking during excavation in water-rich sand on lateral wall deflections and surrounding environment [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2023, 57(3):530-541.

[7] 刘俊城,谭勇. 富水砂层深基坑墙体渗漏灾害与对策分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(21):63-69.

LIU J C, TAN Y. Analysis and countermeasures of deep foundation excavation walls leaking hazard in water-rich sandy strata [J]. Construction technology, 2023, 52(21):63-69.

[8] 刘祥勇,樊冬冬,景旭成,等. 南通市某地铁车站深基坑施工方案分析[J]. 施工技术, 2020, 49(S1):187-189.

LIU X Y, FAN D D, JING X C, et al. Case study on deep excavation construction of a station in water-rich sand layer area [J]. Construction technology, 2020(S1):187-189.

[9] TAN Y, FAN D D, LU Y. Statistical analyses on a database of deep excavations in Shanghai soft clays in China from 1995—2018 [J]. Practice periodical on structural design and construction, 2022(27):04021067.

[10] 刘帅. 富水地层地铁车站基坑降水开挖变形与控制措施研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(21):103-108.

LIU S. Research on deformation and control measures of dewatering excavation in the subway station foundation excavation in water-rich stratum [J]. Construction technology, 2024, 53(21):103-108.

(上接第 84 页)

[4] 戴斌,胡耘,王惠生. 上海地区相邻基坑同步开挖影响分析与实践[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2):129-132.

DAI B, HU Y, WANG H S. Analysis and practice of influence of synchronous excavation of adjacent foundation pits in Shanghai area [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S2):129-132.

[5] 林楠,刘发前. 填海区邻近基坑开挖施工相互影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S1):278-285.

LIN N, LIU F Q. Research on influence of adjacent foundation pits excavation in reclamation area [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2019, 15(S1):278-285.

[6] 王卫东,沈健,胡耘. 软土超大面积基坑群工程安全与环境控制设计与实践[J]. 建筑结构, 2024, 54(4):30-40.

WANG W D, SHEN J, HU Y. Design and practice of safety and environmental control for super large area foundation pit group project in soft soil areas [J]. Building structure, 2024, 54(4):30-40.

[7] 顾正瑞,徐中华. 缓冲区宽度对同步开挖基坑群变形影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(S1):269-277, 293.

GU Z R, XU Z H. Analysis on the effect of buffer width on deformation of simulations excavation foundation pit group [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(S1):269-277, 293.

[8] 刘念武,龚晓南,俞峰,等. 内支撑结构基坑的空间效应及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8):2293-2298, 2306.

LIU N W, GONG X N, YU F, et al. Analysis of spatial effects in strutted excavation and related influential factors [J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(8):2293-2298, 2306.

[9] 马险峰,林想,王欣杰,等. 间隔型基坑开挖效应的离心机模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S2):92-96.

MA X F, LIN X, WANG X J, et al. Centrifugal model tests on excavation effect of interval foundation pits [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2022, 44(S2):92-96.