

软土地区超大深基坑地下水防控技术研究

马建峰

(上海市交通建设工程安全质量监督站, 上海市 200030)

摘要: 依托上海市某开挖面积10.9万m²深基坑工程,综合研究城市区域软土地层超大型深基坑工程地下水防控技术。根据基坑水文地质条件、工程特征,梳理了超大深基坑地下水防控的重点和需求。在此基础上,考虑大型基坑安全成本和经济性的前提下,重点研究了大型深基坑分坑和降水井布置方法、围护结构安全防护技术、坑内落深坑地下水处理技术以及基坑开挖降水工艺等内容。为软土地区超大型深基坑地下水防控提供了宝贵的案例分析。

关键词: 超大深基坑;地下水防控;软土地区;降水

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0155-06

Research on Groundwater Prevention and Control Technology for Ultra-large Deep Foundation Pits in Soft Soil Areas

MA Jianfeng

(Shanghai Municipal Traffic Construction Engineering Safety and Quality Supervision Station, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper presents a comprehensive study on groundwater control technologies for an ultra-large deep excavation engineering in soft soil deposits of an urban area, based on a case study in Shanghai with an excavation area of 109,000 m². The critical aspects and specific requirements for groundwater prevention and control in ultra-large deep excavation are identified through the analysis of the hydrogeological conditions and engineering characteristics of the site. With the consideration for both safety and cost-effectiveness in large deep excavation engineering, the research focuses on several key technologies: the methodology for partitioning the large deep excavation and arranging dewatering wells, anti-seepage techniques for the retaining structure, groundwater treatment for local deep excavation zone(Pit-in-Pit), and dewatering procedures during the excavation process. This study provides a valuable case analysis for groundwater control in ultra-large deep excavations in soft soil regions.

Keywords: ultra-large deep excavation; groundwater control; soft soil region; dewatering

0 引言

深基坑是城市基础设施建设的重要施工工艺,地下水防控是深基坑施工的关键问题之一。我国南方软土地区深基坑工程建设受地质、地下水影响严重,地下水控制难度大、控制成本高。特别是近十年来国内大型城市的深基坑工程向着深大方向发展^[1-3],地下水控制消耗的人力、物力不断加大,地下水引发的工程风险和损失呈现线性增长,而深大基坑工程的地下水防护控制问题仍然是工程建设中的核心问题,需要不断进步、探索研究。

目前,国内外深基坑工程技术得到了充分的发

展,积累了大量的设计^[4]、施工经验^[5-6],理论水平同步大幅提升^[7-8]。但是,超大深基坑工程研究案例数量少,少量文献分析了临河^[9]、城市核心区^[10-11]、软土地区^[12]超大型深基坑地下水处理技术,但是经验技术积累有限、分析案例偏少,针对性研究和技术积累薄弱,特别是在超大深基坑地下水防控、基坑渗漏事故损失评估方法、地下水控制最优标准等方面均显不足。

关于超大深基坑地下水方面,不仅需要从多维度发展地下水控制评价方法,而且还需要深入挖掘更多的工程案例,支撑大型、超大型深基坑地下水控制理论及技术发展。本文依托上海市某开挖面积超10万m²的超大型轨道交通地下停车库深基坑工程,进行超大深基坑地下水控制案例分析和工艺研究,为今后类似工程提供施工经验和案例参考。

收稿日期: 2026-03-18

作者简介: 马建峰(1979—),男,学士,高级工程师,从事轨道交通和地下工程技术和质量监督工作。

1 工程概况

1.1 工程简介

目前,国内对深基坑的规模划分并没有权威标准,根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)深基坑通常是指深度超过5 m的基坑,小于5 m通常为浅基坑^[13]。行业内学者对大型、超大型深基坑的定义多数根据深度、基坑规模、施工风险和周边环境控制难度等定义^[14-17]。本文研究依托工程为上海市某轨道交通地下停车库深基坑工程,开挖面积达10.9万m²,周长1 852.4 m,标准段开挖深度14.58 m,局部落深开挖深度19.6 m。本深基坑工程单体规模较大,在国内也较为罕见,并且基坑处于软土地层区域施工风险较大,属于超大型深基坑。

本深基坑总呈长方形,基坑总长729 m,分出入段和标准段两部分。其中,出入段基坑长约为168 m,宽19.8~30.7 m;标准段基坑长约565 m,宽184~197 m,其总体布局如图1所示。



图1 轨道交通地下停车库深基坑总体布置

基坑围护结构采用800 mm厚地下连续墙,出入段基坑支护结构采用首道混凝土支撑+3道 $\phi 609$ mm钢支撑,标准段基坑支护结构采用3道混凝土支撑。

1.2 工程水文地质条件

工程场地处于上海软土滨海冲积平原,地貌为滨海平原地貌,地势平坦,地面高程为4.4~5.8 m。场地土体主要以淤泥质土、黏性土、粉质土等软弱地层组成,主要分7个工程地质土层,根据土层特性又存在诸多亚层,场地主要土层分布特征见表1。

基坑开挖范围内地层主要为①~④号地层,基坑场地地层纵向分布见图2所示。

工程场地河网密布、水系发达,并且降水充沛,场地地下水位较高,常年潜水水位为0.5~0.7 m,最大变化幅度1.0 m,主要以大气降水以及地表径流侧向补给。微承压水赋存于⑤_{3i}层内,该层在场地南部局部分布,水位埋深约4.7 m,低于潜水水位。承压水

表1 基坑主要地层特征及分布

层号	土层名称	层顶标高/m	岩土工程特点
① ₁	填土	5.74~-4.46	结构松散
① ₃	浜填土	3.77~-0.62	结构松散,含有机质
②	粉质黏土	2.98~-1.47	土质较好,明浜、暗浜较厚处缺失
③	淤泥质粉质黏土	2.91~-3.36	土质软弱,具流变、触变性,易变形
③ ₁	砂质粉土	2.00~-3.65	透水性中等,易发生流砂、管涌、潜蚀
④ ₁	淤泥质粉质黏土	-3.97~-8.10	土质软弱,具流变、触变性,易变形
④ ₂	砂质粉土	-7.28~-12.38	透水性中等,易发生流砂、管涌、潜蚀
⑤ _{1a}	粉质黏土	-10.74~-17.97	土质较为软弱,局部流塑,自稳能力差,易变形
⑤ _{1b}	粉质黏土夹粉土	-10.65~-16.69	软塑状,中等压缩性,场地南侧分布
⑤ _{3i}	砂质粉土	-26.91~-30.30	局部分布,夹黏性土,自稳能力较差,易变形
⑤ ₃	粉质黏土	-11.77~-31.25	土质较为软弱,自稳能力差,易变形。有粉土夹层,水平层理,水平向透水性强
⑦ _{21a}	粉砂	-31.38~-56.20	为承压含水层,渗透性较强
⑦ _{21b}	粉质黏土夹砂质粉土	-38.29~-58.67	场地南侧分布,土质不均

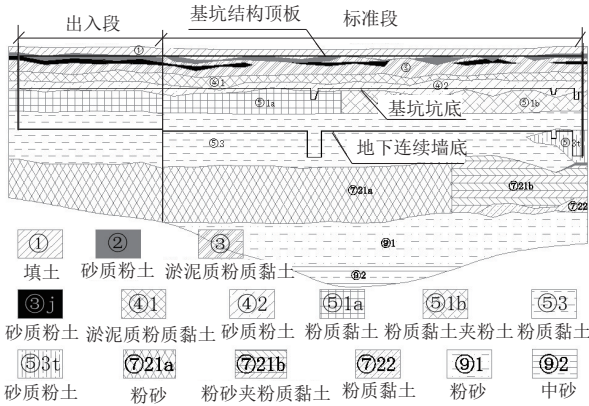


图2 深基坑地层纵断面分布图

主要赋存于⑦_{21a}层粉砂、⑨₁层粉砂及⑨₂层中砂内。⑦层为第一承压含水层,⑨层为第二承压含水层,两层承压水在本工程场地内部分连通,承压水埋深约5.05 m。主要土层渗漏系数见表2。

表2 主要土层渗透系数

序号	土层名称	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	含水层名称
⑤ _{1a}	粉质黏土	5.0×10 ⁻⁶	隔水层
⑤ _{1b}	粉质黏土夹粉土	3.0×10 ⁻⁵	隔水层
⑤ _{3i}	砂质粉土	1.0×10 ⁻⁴	微承压水层
⑤ ₃	粉质黏土	1.0×10 ⁻⁶	隔水层
⑦ _{21a}	粉砂	1.0×10 ⁻³	承压水层
⑦ _{21b}	粉质黏土夹砂质粉土	1.5×10 ⁻⁴	承压水层

1.3 工程地下水防控重点和难点分析

本深基坑工程体量巨大,与常规深基坑相比地下水防控方面有如下特点:

(1)基坑开挖面积巨大,坑内涉及大量的结构施工,需要为坑内结构等施工提供良好的工作环境,便于人员和设备活动,因此要求加强坑内降水,保障坑底地基土充分疏干降水;另外,基坑开挖范围内淤泥质土层厚度较大,疏干降水难度较大,需要加强降水;

(2)基坑场地土层软弱、地下水含量高,围护结构渗漏风险高,结合基坑围护结构长度大,保障基坑所有部位围护结构均不发生渗漏等问题难度成倍提升;另外,基坑体量巨大,围护结构一点渗漏可能导致整个基坑的土方开挖、外运等工作不仅白做,而且需要就近调度大量的回填土方,对基坑工程抢险安全带来严重挑战;

(3)降水工程体量大,降水工作量较大,大规模的坑内降水井布置需要兼顾坑内结构施工、地基加固布置;

(4)相比常规深基坑,超大深基坑工程降水不当引发的基坑突涌等事故产生的损失巨大,需要加强降水管理,特别是承压水降水。本工程⑤_{3t}微承压水层水头在坑底位置处达到了承压水稳定的临界点,并且⑤_{3t}微承压水层和⑦承压水层局部连通,地下水补给量大,需要重点关注。

2 地下水防控关键技术

2.1 地下水防控总体布置

结合基坑开挖、结构回筑等施工组织问题,以及经济分析、施工工期风险,综合考虑基坑地下水防控风险。将整体基坑划分为7个基坑,将整体基坑的渗漏风险分散到各个分级坑之中,通过多阶段施工,将有效的人力、物力和安全保障物资集中于应对单个分级坑渗漏风险上,大幅增强了地下水风险防控能力。针对不同分基坑地层分布情况,制定针对性的降水措施,对各个分基坑进行合理布井。

根据施工场地地层特征、经济性考虑,围护结构及止水帷幕采用地下连续墙,墙深控制在30.23~31.5 m,即约2倍的基坑开挖深度,在局部落地坑位置墙深控制在40~42 m。墙趾进入⑤₃隔水层,在7#基坑部分区域墙趾进入⑤_{3t}微承压水层,因⑤_{3t}层与⑦_{21b}承压水层存在水力连通,完全隔断经济性不佳,因此在⑤₃隔水层分布区域围护结构为悬挂止水。

2.2 分基坑具体划分和降水井布置

整体基坑划分为1~7#基坑。其中,1~2#基坑为出入段基坑,3~7#基坑为标准段深基坑。2#基坑面积较小,呈现方形形状,小基坑的刚性可保护邻近3#基坑安全。3~7#基坑宽度控制在50 m,长度等于总基坑宽度。其中3、7#基坑处于总体基坑两端,风险最大;中间的4~6号基坑受到相邻基坑保护,相邻基坑为其增加了一道保护措施。

根据前面叙述,本基坑工程降水工作主要为坑内潜水降水,以满足开挖需求和坑内工作环境改良需求,局部区域需要考虑承压水控制措施。根据降水、观测等需要基坑共布置7类井,井类型主要为疏干井。疏干井按照每200 m²布置一口(即井纵横间距为14~15 m),布置时扣除坑内加固面积,并避开地基加固区域以及支撑结构。

分基坑划分及各类水井布置方法见图3~5。

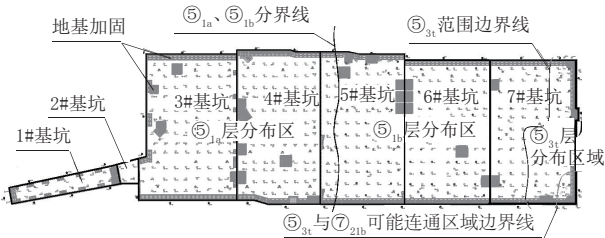


图3 分基坑划分及地层分布

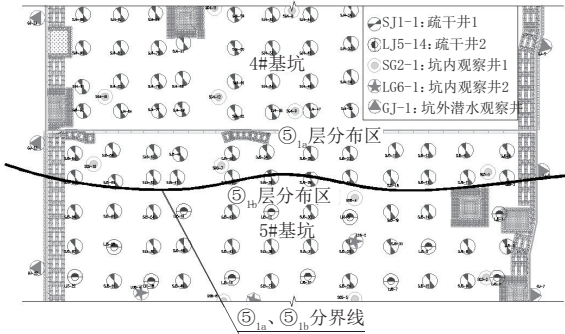


图4 ⑤_{1a}和⑤_{1b}层区域降水井布置情况

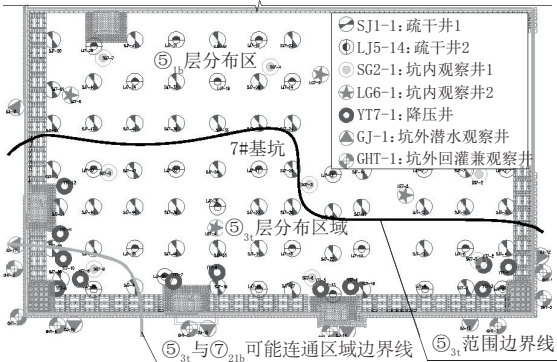


图5 ⑤_{3t}层区域降水井布置情况

由于⑤_{1b}层地基土渗透性略强,在存在该层的5、6、7#基坑区域将三分之一的疏干井进行加深,即疏

干井2,使得疏干范围延伸到⑤_{1b}层,在基坑开挖时卸除该层水压,避免基底隆起问题。疏干井2与疏干井1在基坑内部均匀分布。

7号基坑部分区域存在⑤_{3i}层,该层为微承压水层,基坑开挖到坑底时⑤_{3i}层水头处于安全临界状态,并且⑤_{3i}层在7号基坑东南角局部与⑦_{21b}层存在水力连通。⑦_{21b}层渗透性强,并且地下水补给能力强,增强了⑤_{3i}层承压水突涌风险。7号基坑开挖到底时,理论上⑤_{3i}层可不必进行承压水降压,但为了基坑安全在⑤_{3i}层分布范围内沿着围护结构边缘布置一排降压井屏障,作为承压水应急降水使用,并且承压水降水井应优先布置在基坑落深坑边缘,每个落深坑保障2口降水井;同时,沿着围护结构外布置一排回灌兼观测井,基坑开挖时增强承压水观察,必要时对该层进行回灌补水,降低对周边环境的沉降变形影响。基坑降水井类型及作用见表3。

表3 基坑降水井类型及作用

井类型	井深/m	作用
疏干井1	20	疏干坑内地基土潜水
疏干井2	29	疏干坑内地基土潜水,井底布置于⑤ _{1b} 层,对⑤ _{1b} 层水压进行泄压
观察井1	20	观察坑内潜水水位
观察井2	29	井底布置于⑤ _{1b} 层,主管观察⑤ _{1b} 层的水位变化
降压井	42	井底布置于⑤ _{3i} 层,预备对⑤ _{3i} 层进行降压
坑外观察井	20	观察坑外潜水水位变化
回灌兼观察井	42、59	观察7#基坑位置承压水的变化,必要时对承压水进行回灌

2.3 围护结构防水防渗措施

围护结构采用防渗能力和稳定性较好的地下连续墙结构。其中,标准段深基坑外围地墙采用防渗性能较好的十字钢板接头,坑内封堵墙及出入段1~2#基坑采用锁扣管接头。

施工经验表明地墙浅部渗漏水压小,危害性小,并且易于控制;深部水压大,且渗漏点不易探明,危害大。基坑开挖对围护结构施工持续的扰动,从测斜数据可以看出基坑开挖扰动延伸到基坑坑底以下很大深度范围,甚至可以延伸到地墙墙趾。因此对于地墙控制深部区域围护的渗漏风险尤为关键。

工程在标准段基坑四围地下连续墙坑底位置设置了坑内裙边强加固,加固体宽度为6.85 m,深度为坑底以下4 m,水泥掺量为20%,采用三轴搅拌桩工艺。裙边强加固与地墙槽壁加固接触面采用三重管高压旋喷桩补强。较大体量的裙边加固体具有较强的刚度,其可充分约束各幅地下连续墙之间的不均

匀变形,降低相邻地墙接缝变形不同步产生的开裂、错位渗漏风险,利用围护结构的变形协同降低渗漏风险;同时,强加固改善土体强度和抗渗性能,增强围护抵抗变形作用,其自身提升了基坑抗渗安全性。裙边加固布置情况见图6。

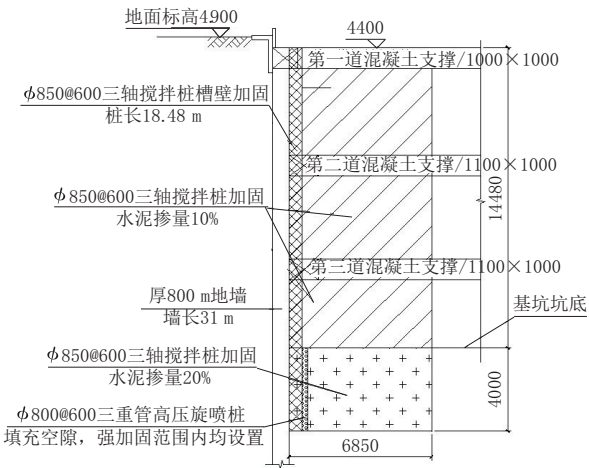


图6 标准段基坑外围裙边加固布置图

裙边加固以上为水泥掺量10%的弱加固体,其作用为适当固化上方土体,降低地下水对软弱土体的不利影响,开挖时改善坑内施工作业环境,为第二、三道支撑等快速作业提供便利。增设弱加固后无需对弱加固区进行疏干降水。

2.4 超长地下连续墙缺陷无损检测

为了解决超长地下连续墙缺陷不易揭示的难题,工程特别引入了跨孔雷达无损检测技术。该技术将发射天线和接收天线放入地下连续墙预埋的测斜管内,通过发射等高和不等高雷达信号来识别两孔之间混凝土浇筑质量情况,可以准确定位地下连续墙混凝土浇筑质量缺陷位置,其识别精度达10 cm级,基本上排除了地下连续墙浇筑断墙以及混入大块土体等严重风险源。跨孔雷达检测设备详见图7。

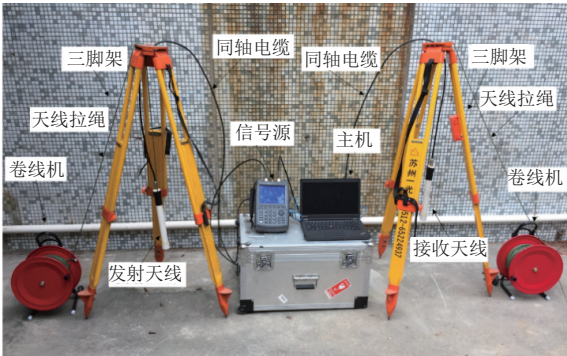


图7 跨孔雷达设备

2.5 落深坑地下水防控

基坑内的落深坑主要分为两类,一类是处于整

体基坑中央的落深坑,另一类为贴近整体基坑外围围护结构的落深坑。

对于内部落深坑一律采用了 20% 水泥掺量的高压旋喷桩重力坝围护结构,同时根据落深坑深度进行的坑底封底加固,完全对落深坑开挖形成加固体全包裹状态,彻底隔断了地下水对落深坑开挖的影响。

对于贴近外围围护结构的落深坑,一方面对邻近围护一侧的外围围护结构进行加深,将墙长 31 m 左右标准地墙深度增加到 40~42 m,确保了落深坑外侧防水;另一方面对落深坑的剩余围护部位采用 $\phi 600$ mm 钻孔灌注桩坑中坑围护,钻孔灌注桩外侧进行厚度不小于 1 m 的高压旋喷桩加固,水泥掺量 20%,坑底实施厚度不小于 4 m 的坑底封底加固,水泥掺量 20%,详细情况见图 8。该类型落深坑因深度较小,剩余三面围护和坑底封底加固采用了前述内部落深坑的围护方法。

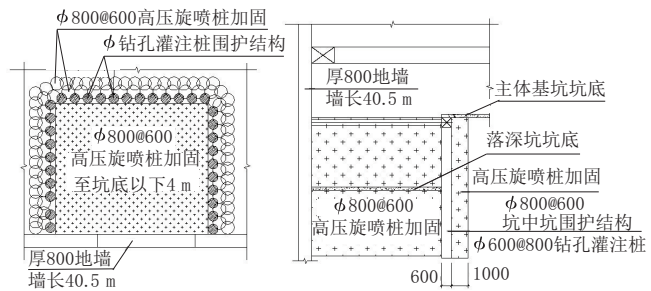


图8 贴近地墙落深坑围护结构布置图(单位:mm)

以上措施保障了落深坑开挖地下水渗漏问题。除此之外,在高压强加上方土体进行高压旋喷弱加固,其作用与前述裙边加固上方弱加固相同,同样该区域不需要布置降水井。

2.6 降水工艺

基坑总体分两阶段施工,首阶段施工 1、3、5、7# 基坑,二阶段施工 2、4、6# 基坑。降水井在首道支撑施工完成后进行施工。疏干降水井井孔直径 $\phi 650$ mm、井管直径 $\phi 273$ mm,井管滤水管采用开圆孔花管,孔布置为 $\phi 10$ mm@50 mm×50 mm 圆孔,外包 60 目尼龙网做滤网,滤水管外采用中粗砂滤料填充。滤管上方段井管采用实管,实管与土层接触段长度不少于 2 m,并且在实管和土体之间采用黏土夯实填充,避免漏气,详图如图 9 所示。

疏干井降水工艺采用真空降水工艺。疏干井内降水的同时对井口进行密封,并且对井管内施加真空负压,真空负压强度大于 65 kPa。基坑开挖前疏干井至少降水疏干 20 d,并且要求疏干降水井的水位降深至少大于目标开挖面 1 m 以下。基坑开挖

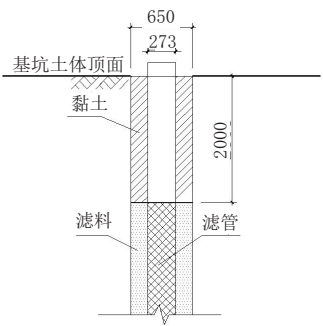


图9 疏干井结构图(单位:mm)

时,卸除真空负压按照正常疏干排水方法进行作业。潜水真空降水设备如图 10 所示。



图10 真空降水设备

承压降水井施工及井结构采用传统井工艺。基坑施工时,无特殊情况不启用承压水降水井,承压水降水井作为基坑安全施工的预备井使用。

基坑施工底板时,保留部分疏干井做泄水孔使用。当结构回筑完成后,将疏干井进行封井。底板施工时,所有承压水降水井均保留,当结构回筑完成后对承压水降水井进行封井。

3 工程应用效果

3.1 基坑开挖期间周边地下水变化情况

以本工程中央的 5 号基坑为例,分析基坑开挖期间地下水变化情况,坑外降水井布置点位如图 11 所示。

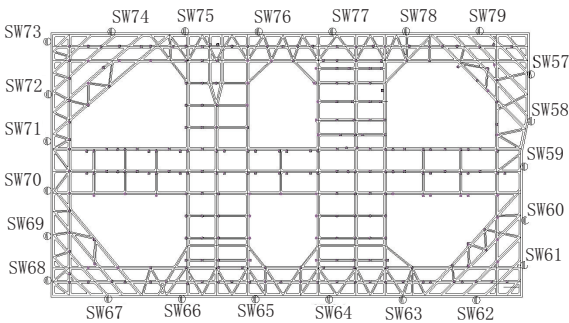


图11 坑外潜水观测井布置图

其中,对 SW57~SW61、SW68~SW73 点位的潜水位进行了基坑工程建设全周期监测,监测结果如下

图12所示。

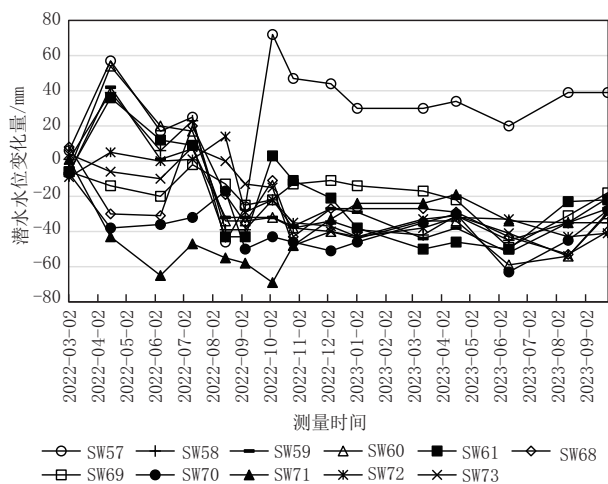


图12 坑外潜水观测井布置图

从图12可以看出工程整个建设周期5号基坑坑外潜水水位变化范围为+72~-69 mm。根据勘察资料,本区域常年潜水地下水最大变化幅度为1.0 m,可见基坑施工全过程中周边潜水变化幅度较为平稳。可以证明,本工程所采用的地下水防治措施较为有效。

3.2 开挖施工期间基坑整体防水表现

本工程开挖面积达到10.9万 m^2 ,分两阶段进行施工。首阶段施工1、3、5、7#基坑,二阶段施工2、4、6#基坑。整体基坑施工中,采用了本文所述的所有地下水防控措施和工艺,施工全过程未发生任何地下水的重大事故,基坑坑底未发生渗漏,仅地下连续墙墙面出现少量渗水。

在施工底板结构,特别是开挖坑中落深坑及其结构时,均未发生和地下水相关的渗水问题。另外,在开挖7#深基坑全过程中,未启用承压水降水井,顺利完成了基坑结构回筑。

工程施工采用了真空负压降水方法,显著提升了软土土层降水效率和效果,极大地改善了基坑坑内的工作环境(见图13)。



图13 基坑坑底土体情况及工作人员行动

综上,通过本文技术完全实现了对软土地层超大型深基坑地下水防控的根本目标,即:同时达到

基坑无渗漏风险的要求和提升坑内工作环境的要求。

4 结论

本文以某超大型轨道交通地下停车库深基坑工程项目为例,重点研究软土地层超大规模深基坑地下水防控的关键技术和设防机理。重点得出以下结论:

(1)基坑渗漏风险事故概率及经济损失与基坑规模呈现线性增长关系。超大深基坑渗漏防控呈现“线长面广”的特点,风险处理又需要土方回填、坑内压重等大规模、长时间的施工作业,因此超大深基坑地下水防控的难度极大。

(2)针对超长围护结构在开挖等扰动影响下渗漏控制难度大的问题,本文提出深浅渗漏风险区别对待和超长围护结构利用变形协同原理降低渗漏的基坑渗漏防控理念,具体实现方法为在超大深基坑坑底以下4 m、临近围护结构6.85 m范围进行裙边地基加固。同时应用了跨孔雷达对地下连续墙的缺陷进行了无损检测。

(3)提出超大深基坑地下水防控的核心目标为提升基坑安全和坑内工作环境。围绕该目标引入软土地层超大深基坑的真空负压降水技术,以及针对不同土层特征的针对性降水井布置方法,如面对⑤_{1a}层和⑤_{1b}层的差异依托工程中分别布置了疏干井1和疏干井2两种降水井型号。

(4)对坑内存在的少量落深坑采用四周围护防水+坑底封底的全隔断防水措施,彻底解决了坑中坑开挖施工地下水控制的难题。

参考文献:

- [1] 梁保真,郑建国,王毓国,等.邻近既有建(构)筑物基坑工程研究现状综述[J].岩土工程技术,2026,40(1):1-17.
- [2] 常利鹏.深厚软土地层深基坑变形特征及局部支护失效对其稳定性影响的研究进展综述[J].江西建材,2025(10):15-17.
- [3] 高如,赵翌博,曹文昱,等.城市更新深基坑工程动态监测及变形预测研究综述[J/OL].水利水电技术(中英文),1-3[2025-05-29].
<https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250529.1111.004>.
- [4] 陈加核.复杂环境软土富水超深地下五层车站基坑的设计、研究与实践[J].岩土工程学报,2025,47(增刊2):187-192.
- [5] 宫培松,沈欣云,韩博雯,等.深基坑工程人员区域入侵行为预警数字孪生系统[J].中国安全科学学报,2025,35(8):33-39.
- [6] 李亮,张太忠,单广灿,等.深厚富水软土地层深基坑水平封底与降水联合优化设计方法[J].铁道科学与工程学报,2025,22(10):4528-4541.

(下转第178页)