

# 复杂地质深层雨水调蓄工程施工难点与应对

苏 宇

(上海市水务建设工程安全质量监督中心站, 上海市 200232)

**摘 要:** 目前国内软土地基中深度达60 m的城市深层地下空间尚无开发案例, 在项目施工过程中存在较大的不确定性及安全风险, 深层雨水调蓄管道建造理论及技术体系亟须完善。依托苏州河段深层雨水调蓄管道系统工程试验段的建设实施, 从超深围护结构、深层地下水控制、超深竖井结构、深埋盾构隧道四个部分, 系统地介绍了项目实施情况, 详细分析了各施工环节的难点与特点, 并提供了有效的应对措施, 为后续类似复杂地质条件下城市雨水调蓄工程的建设提供参考和借鉴。

**关键词:** 深层雨水调蓄; 超深围护结构; 地下水控制; 超深竖井结构; 深埋盾构隧道

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0279-06

## Construction Difficulties and Countermeasures for Deep Rainwater Storage Project under Complex Geological Conditions

SU Yu

(Shanghai Water Construction Engineering Safety Quality Supervision Center Station, Shanghai 200232, China)

**Abstract:** Currently, there are no cases of developing the urban deep underground spaces in soft soil foundations at depths of up to 60 m in China. There will be large indeterminacy and safety risk in the process of project construction. The theoretical and technical systems for constructing the deep rainwater storage pipelines urgently need to be improved. Relying on the construction implementation of the test section for the deep rainwater storage pipeline system project in the section of Suzhou River, the implementation situation of the project is systematically introduced from four parts of ultra-deep enclosing structures, deep groundwater control, ultra-deep shaft structures and deeply buried shield tunnel. And the difficulties and characteristics of each construction stage are analyzed in detail, and the effective countermeasures are provided, which provides the references and experience for the construction of urban rainwater storage projects under the similar complex geological conditions in the future.

**Keywords:** deep rainwater storage; ultra-deep enclosing structures; groundwater control; ultra-deep shaft structure; deeply buried shield tunnel

## 0 引 言

上海市降雨量大、暴雨频繁, 城市人口密集、地下管线复杂、现有雨水系统的改造难度极大, 从地下空间开发及工程效果来看, 建设深层雨水调蓄管道工程是较为可行的实施方案之一<sup>[1]</sup>。深层雨水调蓄管道设计埋深约60 m<sup>[2]</sup>, 只能采用盾构法施工, 目前国内软土地基中深度达60 m的城市深层地下空间尚无开发案例, 涉及的超深竖井、深埋盾构均需作技术突破, 项目实施过程中存在较大的不确定性及安全风险, 故深层雨水调蓄管道建造理论及其技术体系亟需完善。

本文以苏州河段深层雨水调蓄管道系统工程试验段(苗圃—云岭西)为背景工程, 针对深层雨水调蓄管道工程中的超深围护结构、深层地下水控制、超深竖井结构、深埋盾构隧道四项关键施工内容, 分析其主要技术难特点, 总结归纳工程建设过程中遇到的问题及应对措施, 系统地介绍深层雨水调蓄管道工程建设中的施工关键技术。

## 1 工程概况

苏州河段深层雨水调蓄管道系统工程试验段(苗圃—云岭西)地处上海市中心城区, 调蓄管道采用盾构掘进方式<sup>[3]</sup>, 其中苗圃竖井作为盾构始发井(内径34 m, 开挖深度56.6 m), 云岭西竖井作为盾构接收井(内径30 m, 开挖深度58.65 m), 盾构管道的内径为10 m, 区间总长度约为1.617 km。

收稿日期: 2025-01-24

作者简介: 苏宇(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水务工程质量安全监督管理工作。

根据岩土勘察报告显示,苏州河深隧项目试验段工程深度范围内,主要由黏性土、粉性土和砂土组成,可划分为12个主要土层,地质剖面图如图1所示。地下水主要为赋存于浅部土层中的潜水、第Ⅰ承压含水层(第⑦层)、第Ⅱ承压含水层(第⑨层)及第Ⅲ承压含水层(第⑩夹层、第⑪层)。盾构掘进主要涉及第⑦层、第⑧<sub>2</sub>层中的承压水。

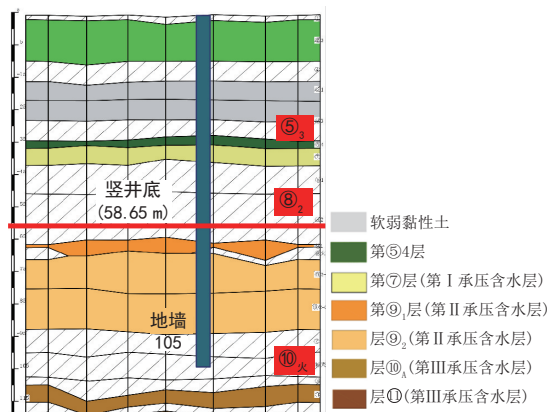


图1 苏州河深隧项目地质剖面图

## 2 超深围护结构施工难特点及应对措施

以苏州河深隧项目云岭西竖井为例,该竖井采用厚度1.5 m、深度达105 m的地下连续墙作为围护结构<sup>[4]</sup>,开挖深度最深达58.65 m,开挖涉及的土层主要为软黏性土,流变特性容易造成较大变形,第Ⅱ、Ⅲ承压水层突涌风险大<sup>[5]</sup>。根据现有文献,在国内软土地基中尚未开展过大规模深度超100 m的地下连续墙的建造实施。

### 2.1 成槽型式

超深地下连续墙成槽型式一般可采用一刀成槽和三刀成槽。

(1)一刀成槽型式:槽段方量少,钢筋笼重量轻,对成槽垂直度和槽壁稳定控制较为有利,但是会导致划分槽段数量较多,接缝数量成倍增加,容易造成竖井结构地下水渗漏风险。

(2)三刀成槽型式:可以最大限度上减少槽段接缝数量,尽可能规避竖井结构渗漏水风险,但应用于圆形竖井结构,会使槽段由三条折线组成“[”形状,如图2所示;该型式对超深地墙槽段成槽精度和钢筋笼制作精度均提出了更高的要求,且槽段方量和钢筋笼重量大大增加,地墙成槽、钢筋笼对接、混凝土浇筑时间都随之增加,因此需要更加严格地控制槽壁稳定性<sup>[6]</sup>。

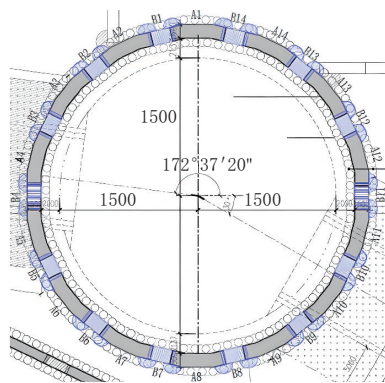


图2 竖井超深地墙围护槽段划分图(单位:mm)

鉴于上述两种成槽型式特点,该项目实施过程中通过开展现场成槽试验性施工,采取了一系列措施,包括:改进施工工艺保证成槽垂直度、调整泥浆指标控制槽壁稳定、优化钢筋笼重量并分节吊装等,优化了三刀成槽的施工技术。该项目圆形竖井超深地墙一期槽段均采用了三刀成槽的型式,在优化施工技术后,大大减少了槽段的接缝数量,降低了竖井结构地下水渗漏安全风险,成功解决了超深维护结构的施工难题。

### 2.2 成槽垂直度控制

超深围护结构垂直度的控制长期以来都是施工难点。在超深隧超深地下连续墙成槽过程中,相邻墙体会向两侧和前后方向偏移,造成相邻墙体套铣有效搭接长度减小,一旦一期槽段向远离二期槽段的方向偏斜过大,则无法保证二期槽段套铣至地墙底部都能铣削到新鲜的混凝土面,导致相邻槽段地墙底部产生开叉夹泥<sup>[7]</sup>。为了保证超深地下连续墙的整体性,确保墙体的隔水、挡土效果满足要求,需要严格控制超深地墙成槽垂直精度,超深地墙两端和前后方向的垂直度偏差均不应大于1/1 000<sup>[8]</sup>,套铣有效搭接长度不得小于100 mm。

为了保证成槽垂直度要求,该工程配备了德国宝峨MC96和MC128铣槽机进行成槽作业。铣槽机可通过各类传感器将机械在槽段内各方向偏位情况、垂直度偏差数据等工作情况实时反映到驾驶室的显示器上,经验丰富的铣槽机司机可以根据施工数据的变化预测未来一段时间内铣槽机的倾斜倾向,并利用铣槽机身四周每个面上分布的液压纠偏板,及时对成槽姿态进行纠偏。

成槽过程中每成槽40 m深度便需进行1次槽段超声波检测,如图3所示,以观测掌握槽段垂直度及稳定性情况,及时进行铣槽纠偏并采取措施加强槽壁稳定。每次提斗再次下放时要先对现状槽段进行

修槽,确保槽壁垂直度后,再向下进行掘进成槽<sup>[9]</sup>。

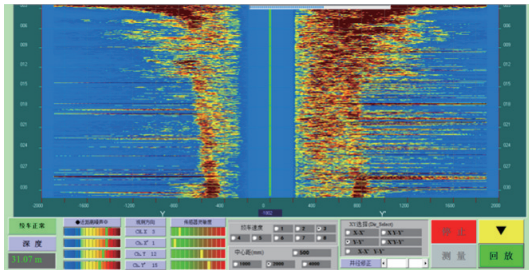


图3 超声波检测结果

2.3 钢筋笼制作和吊装

该工程超深地下连续墙一期槽段三条折线组成“〔”形状,“〔”形钢筋笼对制作精度的要求十分严格,同时一期槽段的钢筋笼整体重量近 180 t,吊装难度高。

鉴于上述特点,现场制作与“〔”形地墙钢筋笼相匹配的钢筋加工平台,保证钢筋笼在加工过程中不扭曲。钢筋笼采用同胎制作,105 m 地墙钢筋笼分成三节成型起吊入槽。钢筋笼对接接头采用 I 级接头机械连接,机械接头对接存活率要求大于 90%。在钢筋笼制作精度得以保证的前提下,还需对钢筋笼的吊放过程进行严格控制,避免在吊放时产生偏差,尤其是在对呈平躺姿态的钢筋笼进行起吊以令其回直的过程中,钢筋笼的内部应力根据其自身刚度及吊点布设情况发生变化,使钢筋笼相应产生一定的扭曲变形。为了保证吊装过程中钢筋笼姿态的平直,通过有限元软件建模仿真模拟验证地墙钢筋笼在吊装过程中的强度及变形情况,合理布置吊点,保证施工安全,如图 4 所示。

3 深层地下水控制施工难特点及应对措施

项目中苗圃竖井开挖深度为 56.6 m,云岭西竖井开挖深度为 58.65 m,基坑底位于第⑧<sub>2</sub>层中,场地内分布第 I 承压含水层、第 II 承压含水层、第 III 承压含水层,各含水层之间具有复杂的水力联系。在复杂水文地质条件下超深竖井开挖实施中,如对承压水处置不当,必然会增加坑底突涌、环境影响等安全风险,甚至造成严重的基坑失稳事故。因此,除在采用内外两道 105 m 深的地下连续墙作为隔水帷幕,并严格超深地下连续墙施工质量管控外,对第 II、第 III 承压含水层降水也是管理的重要环节。

在上海市,对超深基坑第 II 承压含水层降水的工程实践还较少,已有的降水案例中,降深也较小;对第 III 承压含水层降水更是尚属首次<sup>[10]</sup>。根据前期

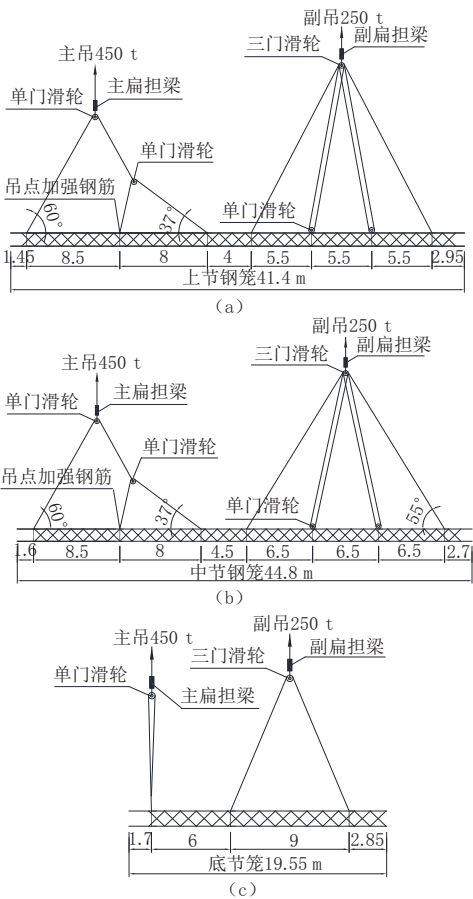


图4 105 m地墙上、中、下三节钢筋笼吊点设置示意图(单位:m)

抽水试验反映出第 II 承压含水层(⑨层)水量很大,降水比较困难,深层降水井不仅设置在竖井内部,在内外两道隔水帷幕之间也同样进行了布设,形成阶梯形的水力梯度,减小竖井内部降水井的抽水压力,如图 5 所示。

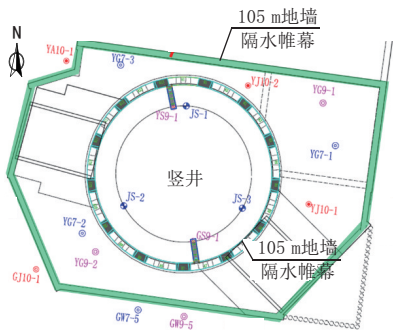


图5 云岭西竖井降水井平面布置图

由于⑨层已被隔断,属于落底式帷幕降水,而⑩<sub>夹</sub>层等都属于敞开式降水。在竖井围护结构全部施工完成后,为了确保竖井开挖过程中深层承压水突涌风险可控,针对不同开挖深度工况的基坑降水要求,现场对竖井内⑨层、坑外⑩<sub>夹</sub>、两墙间⑦层和⑨层进行四组验证试验。根据现场验证的试验结果,竖井内⑨层、坑外⑩<sub>夹</sub>层降水均满足基板抗突涌要求。

## 4 超深竖井结构施工难特点及应对措施

以该项目云岭西竖井为例,其为内径30 m的圆形井,挖深达58.65 m,此深度的超深竖井开挖及结构施工在国内软土地区尚属首次实施,无相关工程案例和经验可以借鉴。

### 4.1 开挖方式

对比顺作法与逆作法的优劣,顺作法为常规工艺,施工技术成熟、施工效率高,但相较于逆作法,在基坑开挖过程中安全风险高;逆作法通过对竖井内衬结构逐层向下施工,虽然工艺较为复杂,分层高度有限,导致内衬结构施工水平缝数量增多,但对围护结构刚度有一定增强、安全性高、对环境的影响小。此外,顺作法后期还需在底板上满堂搭设高排架用来施工竖井内衬结构,高排架搭设拆除风险极高,且从总工期来看,顺作法并不占优。因此该工程云岭西竖井采用逆作法先行实施,分为十六层土进行开挖,其中上部16.45 m设置圈梁采用顺作法施工,挖深16.45 m以下部分设置内衬墙,采用大直径整体式环形钢模板按3 m一段逐层逆作施工,如图6所示。

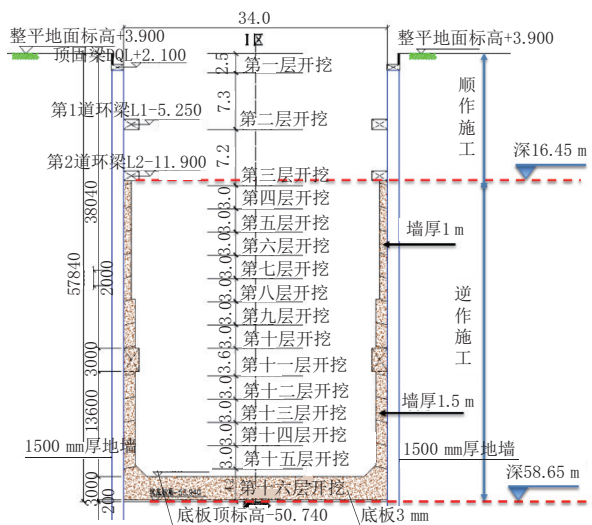


图6 云岭西竖井开挖剖面示意图

### 4.2 底板浇筑

竖井底板厚3 m,最大混凝土浇筑方量约为3 250 m<sup>3</sup>,底板内环钢筋为中心直径20.1 m的横纵向钢筋,外环钢筋由外侧9.5 m环向径向钢筋组成,总重量超过750 t<sup>[11]</sup>。由于钢筋笼体量大,绑扎工艺复杂,采用结构有限元软件对钢筋支架整体进行建模分析,并对结构承载力、水平抗剪能力及稳定性进行复核算,有限元模型如图7所示。

大体积混凝土底板施工存在水化热释放量高、收缩幅度大的特点,容易出现开裂现象;且底板位于

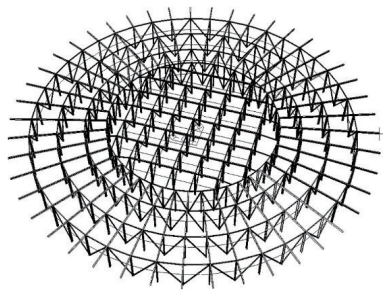


图7 竖井底板钢筋支架有限元模型

深度约60 m的竖井内,施工工艺复杂,因此,混凝土需具备“高流态和高抗渗”等特点。为最大程度降低温度应力带来的不利影响,抑制裂缝的产生与发展,可通过优选原材料、优化配合比、实施温度监控等措施,提高大体积混凝土结构的耐久性能。

在浇筑与养护期间,为精准把控混凝土的温度变化,防止因内外温差超限引发温度裂缝与收缩裂缝,通过在底板内部设42个测点,对混凝土的内表温度实施监测,密切跟踪温差波动;同时对底板混凝土采用蓄热保湿养护工艺,在保持湿度的环境中,加快混凝土强度发展,提高其早期强度,进而确保混凝土内表温差始终处于可控范围内,保障了底板混凝土的施工质量。

此外,由于竖井深度已超出常规汽车泵作业能力范围,底板浇筑施工采用“汽车泵+固定泵接力”的形式,由4台汽车泵自地面向下泵送。通过坑内设置在钢平台处的8个浇捣平台同时进行供料,通过布料平台由外接软管引入溜槽内进行混凝土浇筑。

### 4.3 应急预案

超深竖井施工周期长、综合技术难度大、对环境的影响控制要求高,尤其在竖井开挖和内衬结构施工过程中所涉及的问题具有复杂和安全风险高等特点。为了有效应对竖井可能出现的渗漏与失稳等风险,制定了相应的应急预案,主要内容包括:TZS溶性聚氨酯“针眼法”渗漏修补,渗漏处钢板封堵、坑外引孔旋喷注浆封堵,声测管作为冷冻管进行冷冻法加固与一体化移动式抽水泵车抽水回灌平衡内外水头压力等。

## 5 深埋盾构隧道施工难特点及应对措施

项目的雨水调蓄管道采用盾构法施工,自苗圃工作井始发,至云岭西工作井接收,全长约1.62 km,顶部覆土厚度为40.45~45.21 m,隧道内径为10 m,外径为11.3 m,最小曲线半径为500 m,纵向设置-1‰纵坡。盾构隧道需近距离穿越苏州河防汛墙、

苗圃泵房、祁连山南路桥、真光路桥、海烟配送中心等多个建(构)筑物。

5.1 切削地墙

由于围护设计在竖井围护地墙外还增设了一道地下连续墙,故盾构进出洞在苗圃—云岭西隧道区,需两次切削地墙,同时考虑盾构机在承压水层掘进过程中的磨损,对Φ11 730 mm 盾构机全断面切削刀盘的刀具配置进行了如下优化:

- (1)将刀盒式撕裂刀替换为滚刀,以提高其穿越地下连续墙时的切削能力;
- (2)优化正面刮刀、圆弧刮刀、中心刀的合金形状,以增强刀具的耐磨性、抗冲击性,如表 1 所列;
- (3)刀盘配置刀具和盘体磨损探测装置,以实时掌握刀具的磨损状态,一旦刀具出现磨损,及时进行更换;
- (4)增加刀盘测温系统及应力应变监测系统,以更好地掌握刀盘的工作状况。

表 1 盾构机刀盘参数表

| 项目            | 参数           |
|---------------|--------------|
| 中心刀(数量)       | 1 套          |
| 刮刀(数量/高度)     | 116 件/135 mm |
| 圆弧刮刀(数量/高度)   | 24 件/135 mm  |
| 滚刀(数量/高度)     | 64 件/175 mm  |
| 焊接式撕裂刀(数量/高度) | 40 件/180 mm  |
| 保径刀(数量)       | 24 件         |

5.2 盾构进出洞

进出洞土体加固目的在于在破除竖井围护结构后,土体应具有足够的稳定性,在进出洞施工周期内不发生开挖面坍塌、地下水流失、地表大幅沉降等情况。项目的盾构进出洞段处在承压含水层范围内,进出洞土体加固质量尤为重要。因此,项目的始发井、接收井均采用了“水泥系加固+冻结加固”的方式,均可利用竖井结构施工阶段打设的降水井作为应急降水井。

在盾构进出洞作业时,盾构壳体与洞门的间隙极易出现泥水大量涌入井内的情况,不仅会对开挖面泥水压力的有效建立造成阻碍,破坏开挖面土体的稳定性,还会干扰井内及盾构内的正常施工。为规避此类风险,高性能的密封止水装置至关重要。有鉴于此,盾构始发时在洞圈预埋钢板上按照盾构外形尺寸制造并安装一个箱体结构,且箱体内部安装 2 道帘布橡胶板,垂直于盾构中心线,当盾构尾部钢板刷完全进入箱体套体时,即可进行洞门封堵。除止水箱体外,在洞门内部安装 3 道盾尾刷,并在洞门

圈上预留盾尾油脂管路,辅助进行洞门封堵。止水箱体按照全压推进进行复核,满足 0.6 MPa 泥水压力荷载下的受力要求,如图 8 所示。

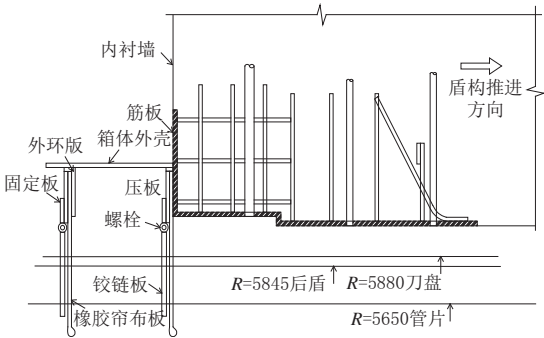


图 8 洞门止水箱体剖面示意图

5.3 超深覆土应对

该工程盾构隧道埋深大,最大覆土厚度约 45 m,盾构掘进范围内穿越的⑦层砂质粉土夹粉质黏土与⑧<sub>2</sub>层粉质黏土夹粉砂均为承压水层,盾构掘进过程中容易发生变形及渗漏等问题。

考虑到该区间施工工况,盾构中心正面水土压力较高,主驱动采用内、外周密封的形式,且内外周均采用齿形密封圈的形式,单道密封圈可承受 1 MPa。在前一道密封圈失效后,下一道密封圈仍可保证 1 MPa 的压力。盾尾设计采用 4 道盾尾钢丝刷及 1 道钢板刷,可以满足盾构机在超深覆土埋深下的盾尾保护;对于盾构机的盾尾油脂及同步注浆的压注系统,保证其压注压力大于外界土压力,确保盾尾油脂和同步注浆顺利压注。

在盾构机超深埋掘进期间,通过将高质量泥水输送至切口,可以有效支护正面土体。通常情况下,泥水密度需控制在 1.15~1.25 g/cm<sup>3</sup> 范围内,黏度需控制在 18 s 以上。同时在盾构推进过程中,控制同步注浆量与推进速度,使二者相匹配,确保均匀且充分地填充盾尾空隙;当实际阶段注浆量小于计算阶段注浆量的 10% 时,应暂停推进,直至注浆量达标后再继续推进,从而实现对地面变形的有效控制。

5.4 小半径曲线掘进

该工程盾构隧道最小曲线半径 500 m,对于大直径盾构而言,推进转弯半径越小,在施工过程中按设计曲线进行拟合的难度就越高。较小的转弯半径会使得掘进单位距离时所需的纠偏量增大,进而增加盾构轴线的精准控制的难度,易导致管片错台较大,角部破损,接缝密封垫渗漏水几率加大,同时可能会带来管片碎裂、盾尾渗漏、对地层的扰动等问题。

在小半径曲线段进行盾构掘进作业时,盾构机

的管片、壳体等部件极易与周边土体发生较大的侧向挤压现象,盾构机壳体设计采用前大后小的锥度,可提高盾构在小转弯半径掘进时的通过性。此外,为缓解盾构转弯时偏转力大的情况,盾构具备单侧超挖能力,刀盘设计有可用于超挖的仿形刀,最大超挖量为105 mm,满足小曲线转弯。

盾构在小半径曲线段内推进时,盾构机的纠偏控制尤为重要。盾构推进装置总推力约163 400 kN,单位面积推力约为1 504 kN/m<sup>2</sup>,推进油缸控制采用分区设计,分成6个区域,在掘进时每组油缸都能够单独控制,可更好地对盾构姿态进行调整和控制。在曲线段推进过程中,为确保盾构机沿着设计曲线精准掘进,需做到勤测勤纠。盾构机每环都要进行纠偏操作,工程人员通过计算,利用盾构机左右千斤顶的行程差精准调控盾构机的纠偏量,从而实现盾构机在曲线推进时的精确控制<sup>[12]</sup>。

### 5.5 建(构)筑物穿越

该工程盾构穿越建(构)筑物时存在较高的风险,一旦出现问题,将引发不良社会影响。因此施工前需要对建筑的基础信息、与隧道位置的相对关系、建筑物自身结构质量情况等进行实地摸排调查,为穿越施工做好准备工作<sup>[13]</sup>。

为确保盾构穿越施工安全进行,该工程采用了泥水平衡盾构机。该类型盾构机对压力波动较为敏感,便于正面压力平衡控制,对区间影响范围内管线沉降的控制精度高。在穿越施工过程中,可根据地面监测情况,对泥水压力进行适当调整,减小泥水压力波动值,按20~25 mm/min速度掘进,尽可能维持推进速度的稳定,使盾构机能够以均衡、匀速的状态安全穿越建(构)筑物。

与此同时,利用车架上的新浆拌制系统,将新型堵漏剂HS-2直接压注到开挖面,以增强泥水自身的堵漏性能,进而提升泥膜质量,为正面土体提供更可靠的稳定性保障。

同步注浆的浆液配比需根据推进数据进行相应的调整,推进过程中应对同步注浆量和浆液质量实施严格把控,每环同步注浆所用的浆液,都需要进行塌落度测试,要求控制在(14±2)cm之间,对于不符合要求的浆液必须进行调整。推进阶段,应均匀地压注浆液,使其尽快填充盾构周围的建筑间隙;当盾尾快要脱离建(构)筑物下方时,应适量增大浆液注浆量。

## 6 结 语

目前国内关于深层软土地基中超深城市地下空间的开发案例仍未见相关报道,项目施工过程中存在较大的不确定性及安全风险。本文依托苏州河段深层雨水调蓄管道系统工程试验段的建设实施,从超深围护结构、深层地下水控制、超深竖井结构、深埋盾构隧道4个方面,对上海市深层地下空间的开发进行了如下有益探索。

(1)超深围护结构的施工应开展现场成槽试验进行工艺优化,主要包括:改进工艺保证成槽垂直度、调整泥浆指标控制槽壁稳定、优化钢筋笼重量分节吊装等。实践表明,优化后的三刀成槽施工技术可大幅减少槽段接缝数量,降低了竖井结构地下水渗漏安全风险。

(2)超深竖井开挖可采用逆作法进行实施,16 m以上部分设置圈梁采用顺作法施工,16 m以下部分设置内衬墙采用大直径整体式环形钢模板逐层逆作施工;同时,底板浇筑时需采用设置分缝、优化配合比、实施温度监控等措施,以避免出现混凝土开裂的现象,并采用蓄热保湿养护工艺,确保底板混凝土的施工质量。

(3)承压水的处置对超深竖井开挖的安全稳定性尤为关键。竖井处于复杂承压水层中,水力联系复杂,将深层降水井同时设置在竖井内部、内外两道隔水帷幕之间,可形成阶梯型的水力梯度,减小竖井内部降水井抽水压力,以确保竖井开挖过程中深层承压水突涌风险可控。

(4)深埋盾构隧道施工时,需结合结构和地质条件对刀盘进行优化,并应设置合理的密封结构,避免盾构进出洞及掘进过程中出现渗漏问题。对于穿越建构筑物区间,可采用压力波动敏感型盾构机,以便于正面压力平衡控制,提高管线沉降控制精度。

### 参考文献:

- [1] 张滕静,朱姝静.城市内涝问题在城市更新过程中的改善研究[J].科技创新与应用,2024,14(22):148-152.
- [2] 王磊,张建频,廖青桃,等.苏州河深层排水调蓄管道系统工程规划研究[J].中国给水排水,2016,32(15):139-142.
- [3] 王卫东,徐中华,宗露丹,等.软土地区56m深圆形基坑的优化设计与实践[J].建筑结构,2022,52(10):1-10.
- [4] 李林.竖向分层浇筑特深地下连续墙施工技术研究[J].现代隧道技术,2018,55(5):238-244.
- [5] 徐进.基于ANSYS的深基坑承压水降压对周边环境的影响分析[J].城市道桥与防洪,2021,38(7):341-345.