

文章编号: 1007-2993(2026)03-0317-11

# 悬挂式 TRD 帷幕深基坑地下水 控制优化设计与实践

刘雪珠<sup>1,2</sup> 方庆<sup>1,2</sup> 张军<sup>3</sup> 王迎丰<sup>1,2</sup> 庄晓杰<sup>3</sup> 徐灿林<sup>2</sup>(1. 江苏省岩土工程公司, 江苏南京 210019; 2. 江苏省地质局第一地质大队, 江苏南京 210042;  
3. 中国建筑一局(集团)有限公司, 北京 100080)

**【摘要】** 长江漫滩区地下水丰富、承压水头高、第四纪沉积层深厚, 对于周边存在重大敏感构筑物的深大基坑工程, 常规采用落底式地下连续墙全截断止水, 施工难度大、工程造价高。依托南京扬子江智慧中心临江深大基坑工程, 基于现场抽水试验数据, 分别利用公式法计算和数值法拟合获得了场地详细的水文地质参数; 通过建立三维渗流数值模型, 优化并确定了合理的悬挂式止水帷幕地下水控制方案, 通过数值分析预测了悬挂式止水帷幕基坑降水对周边地铁和隧道的影响, 数值模拟预测结果与监测数据基本吻合。基坑工程实施效果与监测数据表明, 所采取的地下水控制方案有效地保护了地铁、隧道等周边环境, 相比于地下连续墙全截断方案, 降低了工程造价, 较好地平衡了周边环境影响和社会经济效益, 可为类似复杂环境下深大基坑地下水控制提供参考。

**【关键词】** 深基坑; TRD; 悬挂式止水帷幕; 长江漫滩; 现场抽水试验; 地铁隧道

**【中图分类号】** TU473

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0004

## Optimization design and practice of suspended TRD waterproof curtain for groundwater control in deep foundation pit

LIU Xuezhū<sup>1,2</sup> FANG Qing<sup>1,2</sup> ZHANG Jun<sup>3</sup> WANG Yingfeng<sup>1,2</sup>  
ZHUANG Xiaojie<sup>3</sup> XU Canlin<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Geotechnical Engineering Company, Nanjing 210019, Jiangsu, China; 2. The First Geological Brigade of Jiangsu Geological Bureau, Nanjing 210042, Jiangsu, China; 3. China Construction First (Group) Co., Ltd., Beijing 100080, China)

**【Abstract】** The Yangtze River floodplain area is rich in groundwater, has high confined water head, and thick Quaternary sedimentary strata. For deep and large foundation pits surrounding significant sensitive structures, the conventional method is to use bottom-sealing continuous walls for complete water cutoff, which is very difficulty and costly. Based on the deep foundation pit project of Nanjing Yangtze River Smart Center along the river, detailed hydrogeological parameters of the site were obtained through on-site pumping tests by using formula method calculation and numerical method fitting respectively. By establishing a three-dimensional seepage numerical model, a reasonable groundwater control scheme for the suspended water-stop curtain was optimized and determined. The impact of suspended water-stop curtain foundation pit dewatering on subways and tunnels under different foundation pit conditions was predicted. The numerical simulation prediction results were basically consistent with the monitoring data. The implementation effect and monitoring data of foundation pit engineering show that the adopted groundwater control scheme effectively protects the surrounding environment of subways, tunnels, etc. Compared with the full cut-off scheme of underground continuous walls, it reduces the project cost and better balances the impact of the surrounding environment and social and economic benefits. It can provide a reference for groundwater control in deep and large foundation pits in similar complex environments.

**【Key words】** deep foundation pit; TRD; suspended waterproof curtain; the Yangtze River floodplain; field pumping test; subway tunnel

基金项目: 江苏省地质局基金项目(2020KY15)

作者简介: 刘雪珠, 男, 1970年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程、地质灾害治理设计施工技术研究工作。E-mail: 1792960738@qq.com

通信作者: 方庆, 男, 1987年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程、地质灾害治理设计与研究工作。E-mail: 283868166@qq.com

## 0 引言

长江中下游沿岸漫滩区地层呈典型的二元结构,上部为软弱淤泥质土,下部为砂砾、砂卵石层,地下水丰富且承压水头高,第四纪沉积地层厚度约45~65 m<sup>[1-2]</sup>。深基坑开挖过程中,为避免坑底发生突涌破坏且减少降水对周边环境的影响,减压井配合止水帷幕组成的“墙-井”止降水体系被广泛采用<sup>[3-5]</sup>。对于周边存在重大敏感建构筑物(如地铁、隧道等)的深大基坑,常规采用落底式地下连续墙全截断止水。然而落底式止水帷幕由于深度大,存在工程造价昂贵、工期长、施工难度大等问题。悬挂式止水帷幕结合坑内减压井的止降水体系具有明显优势,悬挂式止水帷幕能够延长地下水的渗流路径,因此插入深度越大,地下水渗流路径越长,水力梯度越小,止水的效果越好,发生突涌破坏的风险越小,对周边环境的影响也越弱,但与此同时工程造价和施工难度也随之增加<sup>[6-13]</sup>。因此在满足抗突涌、基坑周边环境要求的前提下,综合协调周边环境影响和社会经济效益,保护地下水资源,合理设计地下水控制方案至关重要,已成为长江漫滩高承压水地层地下工程设计与施工的关键问题。

何绍衡等<sup>[14]</sup>研究降水对于基坑变形发展的影响规律和不利因素,认为存在最优止水帷幕深度。李伟等<sup>[15]</sup>以苏州地铁4号线车站降水工程为例,用数值模拟的方法研究了在承压含水层中,不同的地连墙插入深度下,基坑外地下水位和地表沉降的变化规律。骆祖江等<sup>[16]</sup>通过建立的基坑降水三维渗流模型对南通地铁1、2号线换乘站青年路站深基坑降水工程悬挂式止水帷幕深基坑降水方案模拟优化,提出一般滤管底部宜浅于止水帷幕底部3~4 m。上述研究成果多以地铁线路或车站基坑为对象,而对于长江漫滩高承压水复杂地层紧临地铁、隧道等敏感环境深基坑悬挂式止水帷幕地下水控制却鲜有研究。

本文以南京江北新区扬子江智慧中心临江深大基坑为背景,通过现场抽水试验获得了场地详细的水文地质参数。建立了三维渗流模型优化并确定了合理的地下水控制方案,基坑工程的实践效果和监测数据表明,本项目采用悬挂式止水帷幕结合减压井降水的方案保证了在建地铁、已建隧道等周边环境的安全,有效地平衡了周边环境影响和社会经济效益,可为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 项目概况

扬子江智慧中心项目位于南京市江北新区核心

区,浦镇大街以北、浦滨路以东,地块东侧邻近在建轨道交通11号线。项目用地面积约3.8万m<sup>2</sup>,总建筑面积约27.55万m<sup>2</sup>,项目主体由4栋塔楼及裙房组成,设置2~3层地下室。项目基坑周长约710 m,基坑开挖总面积3.15万m<sup>2</sup>,其中地下三层区域面积1.8万m<sup>2</sup>,地下三层区域大面开挖深度15.85~16.85 m, A、B塔楼区域开挖深度20.35~22.15 m;地下二层区域大面开挖深度11.65~12.55 m, C、D塔楼区域开挖深度16.35 m(见图1)。

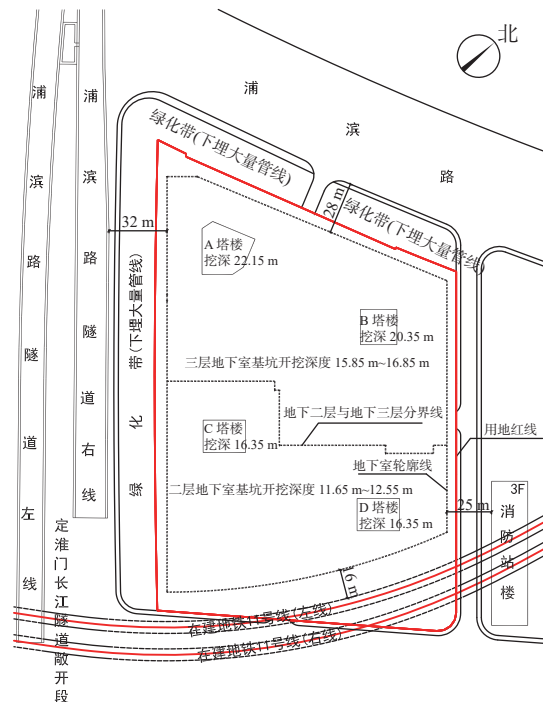


图1 基坑平面与周边环境关系图

Fig. 1 Foundation pit plan and surrounding environment relationship diagram

### 1.2 周边环境

基坑平面与周边环境关系见图1。基坑东侧地下结构边线距在建地铁11号线盾构隧道结构边线(左线)16 m,地铁隧道底埋深约26~27 m,隧道结构直径6.6 m,根据相关规程,地铁隧道结构累计沉降需控制在10 mm以内。与本基坑存在交叉施工工况,为尽量减小对其影响,本项目基坑需尽量减少承压水抽水量并尽快完成地下结构底板,项目工期极为紧张;基坑南侧地下结构边线距离南京定淮门长江隧道敞开段为123 m,暗埋段为236 m,地下结构边线距浦滨路隧道右线约32 m,隧道采用箱体结构,隧道基础桩桩长12 m,该隧道连接南京定淮门隧道往江北新区方向出口,日均车流量超过10万辆,若因基坑施工造成隧道封闭,社会影响极大,隧道累计沉降需控制20 mm以内;基坑西侧距离浦滨路约28 m,浦

滨路绿化带下埋设大量的燃气、供水等市政管线; 基坑东北角地下结构边线距离有已建的消防站楼(3F) 约 25 m, 消防站楼基础类型为桩基础。综上所述, 本基坑周边环境复杂、敏感, 变形要求极其严格。

1.3 工程地质及水文地质条件

拟建场地属长江漫滩, 地面标高为 5.0~5.5 m, 地层自上而下为: ①<sub>2</sub> 素填土; ②<sub>1</sub> 粉质黏土; ②<sub>2</sub> 淤泥质粉质黏土; ②<sub>3</sub> 粉质黏土夹粉砂; ②<sub>4</sub> 粉砂; ②<sub>4A</sub>

粉质黏土; ②<sub>5</sub> 粉细砂; ④<sub>1</sub> 含砾中粗砂(卵砾石含量一般为 10~15%, 局部可达 30% 左右, 粒径一般为 1~4 cm, 局部大于 8 cm); ④<sub>2</sub> 中粗砂混卵砾石(卵砾石直径 2~6 cm, 最大直径超 10 cm, 卵砾石含量 25%~40%); ⑤<sub>1</sub> 强风化泥岩; ⑤<sub>2A</sub> 中等风化泥岩; ⑤<sub>2</sub> 中等风化泥质粉砂岩。各层物理力学参数见表 1, 场地典型的地质剖面见图 2。

表 1 土层物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层编号	地层名称	土的状态	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c_{\text{eq}}/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi_{\text{eq}}/(\text{°})$	土层渗透系数 $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	
						$K_v(\text{垂直})$	$K_h(\text{水平})$
① <sub>2</sub>	素填土	软塑—可塑	18.8	(10)	(10)	$1.87\times 10^{-4}$	$2.55\times 10^{-4}$
② <sub>2</sub>	淤泥质粉质黏土	流塑	17.9	10.8	13.0	$7.12\times 10^{-6}$	$8.85\times 10^{-6}$
② <sub>3</sub>	粉质黏土夹粉砂	流塑—软塑	17.9	9.0	13.5	$1.62\times 10^{-4}$	$2.19\times 10^{-4}$
② <sub>4</sub>	粉砂	中密, 局部稍密	18.3	1.0	29.5	$4.00\times 10^{-3}$	$4.20\times 10^{-3}$
② <sub>4A</sub>	粉质黏土	流塑—软塑	17.9	10.2	13.8	$4.27\times 10^{-5}$	$6.34\times 10^{-5}$
② <sub>5</sub>	粉细砂	密实, 局部中密	18.4	1.2	31.1	$7.50\times 10^{-3}$	$8.50\times 10^{-3}$
④ <sub>1</sub>	含砾中粗砂	密实	19.0	2.0	32.0	$5.00\times 10^{-3}$	$5.00\times 10^{-3}$

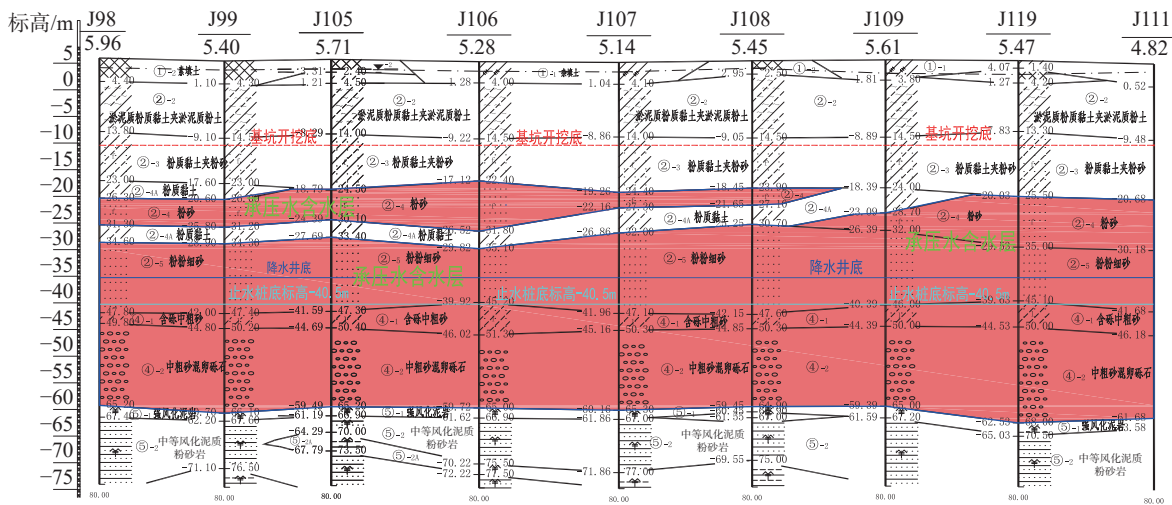


图 2 典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological section drawing

影响本基坑的地下水主要为第四系孔隙潜水和承压水。孔隙潜水主要赋存于①<sub>2</sub> 层素填土及②<sub>2</sub> 层淤泥质粉质黏土中。①<sub>2</sub> 层人工填土层成为地下水的主要赋存空间, 有利于地下水的渗透及汇集, 雨季时含水量较丰富; 漫滩相沉积的饱和软弱黏性土②<sub>2</sub> 淤泥质粉质黏土饱含地下水, 但透水性弱、给水性差, 潜水水位埋深约为地面下 1 m。承压水主要赋存于②<sub>4</sub> 层粉砂、②<sub>5</sub> 层粉细砂、④<sub>1</sub> 层含砾中粗砂、④<sub>2</sub> 层中粗砂混卵砾石中, 含水性较好, 以上部潜水垂向

越流补给、长江等地表水系的侧向径流补给为主要来源, 承压水水位标高 1.6 m, 水头埋深为地面下 3.4~3.9 m。

1.4 基坑抗突涌稳定性分析

抗突涌验算承压水头取 1.60 m, 突涌稳定性应符合式(1)规定<sup>[17]</sup>, 抗突涌计算结果见表 2。

$$\frac{D\gamma}{h_w\gamma_w} \geq K_h \tag{1}$$

式中:  $K_h$  为突涌安全系数, 不应小于 1.1;  $D$  为承压含

表2 抗突涌稳定性分析结果

Tab. 2 Analysis results of surge resistance stability

序号	基坑位置	抗突涌系数	安全水位标高/m	水位降深/m	备注
1	塔楼A	0.18	-14.4	16.0	减压
2	塔楼B	0.56	-10.2	11.8	减压
3	地下三层底	0.68	-5.5	7.00	减压
4	塔楼C/D	0.62	-6.05	7.60	减压
5	地下二层底	1.21	安全	0	不减压

土层顶面至坑底的土层厚度, m;  $\gamma$ 为承压含水层顶面至坑底土层的天然重度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $h_w$ 为承压含水层顶面的压力水头高度, m;  $\gamma_w$ 为水的重度,  $\text{kN/m}^3$ 。

## 2 基坑地下水控制主要技术难点

经综合分析,本项目基坑地下水控制主要技术难点如下:

(1)项目地处长江漫滩区,距离长江直线距离约1.5 km,下部承压水与长江存在水力联系,工程地质条件差,上部软土层厚度达30 m,项目周边环境极其复杂,紧邻在建地铁11号线、南京定淮门过江隧道、浦滨路隧道,浦滨路绿化带下埋设供水、燃气等市政管线。

(2)承压含水层深厚且水头高,如采用落底式止水帷幕,帷幕的长度将超过65 m,施工难度极大,同时④<sub>1</sub>层、④<sub>2</sub>层含卵砾石,TRD工法在卵砾石层中的穿透能力差、效率低,需采取引槽、引孔等辅助措施,帷幕质量难以保证。

(3)基坑东侧在建地铁11号线与本基坑存在施工交叉的工况,需最大程度减少交叉施工时间,定淮门过江隧道日均车流量超过10万辆,一旦出现基坑渗漏、涌水、沉降过大等事故,将会造成严重的经济损失及社会影响。

(4)受地下结构外轮廓线控制,临地铁侧基坑轮廓线呈弧形,且弧度较大,增加了TRD帷幕施工难度。

(5)原扬子江隧道管理中心拆除后,场地遗留有大量预应力管桩,管桩底部已进入承压含水层,由于后期工程桩、支护结构施工,一部分管桩需要拔除,处理过程中会形成竖向通道,加剧基坑突涌、管涌等风险。

## 3 现场水文地质抽水试验

### 3.1 现场抽水试验方案及实施

为评价承压含水层的富水性,实测试验井的单井出水量及影响半径,获取详细的承压含水层的水文地质参数,修正地勘报告中的水文地质参数,从而为地下水控制优化设计提供重要依据,开展了现场抽水试验。现场抽水试验采用单井非稳定流抽水试验,本次试验区域设置在场东南角基坑外侧,抽水试验井

及观测井沿两个方向呈直角布置,中心点处设置1口试验抽水井(CS1),每边各布置3口试验观测井(GC1—GC6),平面布置如图3所示。试验抽水井、试验观测井井长均为45 m,滤管长度21 m,井底位于②<sub>5</sub>粉细砂层。

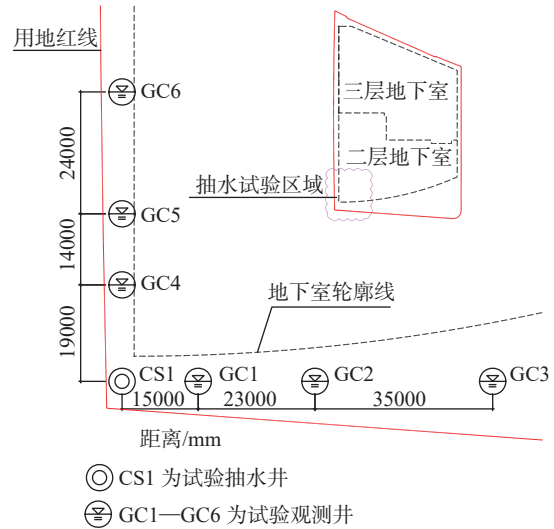


图3 现场抽水试验布井图(单位:mm)

Fig. 3 Site pumping test well layout diagram (Unit: mm)

抽水试验开始前,抽水井及观测井承压水初始水位埋深约11.5 m,水位绝对标高-5.5~-5.0 m,与勘察报告提供的承压水水位绝对标高1.6 m相差较大(与季节性水量补给和排泄有关)。抽水试验开始于2022年9月27日9时30分,结束于2022年9月28日8时45分,期间抽水井CS1的单井稳定出水量约66.8  $\text{m}^3/\text{h}$ ,总抽水量1604  $\text{m}^3$ ,水位最大降深19.3 m。现场抽水后观测井水位立即下降,抽水开始后对各个观测井水位进行动态观测,观测井水位降深0.55~1.03 m,抽水24 h后,各观测井水位均达到稳定状态。抽水井停止抽水后,抽水井内水位恢复较快,5 min基本能恢复原始水位,各观测井6~8 h可恢复至原始水位。单井抽水期间水位降深与抽水时间关系见图4。

### 3.2 公式法计算水文地质参数

采用规程<sup>[18]</sup>中承压非完整井流纳斯别尔格公式(式2)计算渗透系数,得到承压含水层平均加权渗透系数,计算结果见表3。

$$k = \frac{0.16Q}{l(S_1 - S_2)} \times \left\{ \begin{array}{l} \arsh \frac{l}{r_1} - \arsh \frac{l}{r_2} - \frac{L}{M} \times \\ \left[ \arsh \frac{M}{r_1} - \arsh \frac{M}{r_2} - \ln \frac{r_2}{r_1} \right] \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中: $k$ 为渗透系数; $Q$ 为试验抽水井抽水量; $S$ 为水

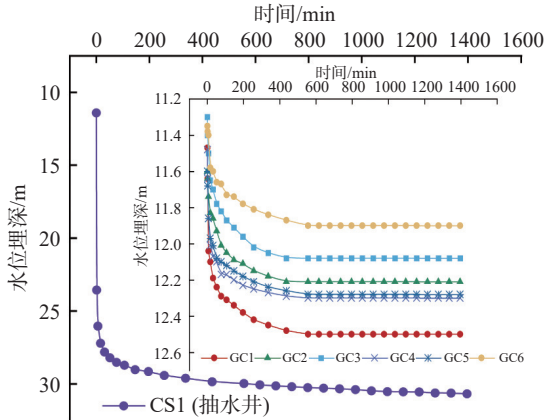


图 4 单井抽水试验水位降深与时间关系曲线  
Fig. 4 The relationship curve between water level drop depth and time in the pumping test

表 3 公式法计算渗透系数结果

Tab. 3 The result of calculating the permeability coefficient by the formula method

渗透系数 $k$ /( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )				渗透系数
GC1,GC2	GC1,GC3	GC4,GC5	GC4,GC6	平均值/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$3.9\times 10^{-2}$	$3.6\times 10^{-2}$	$3.9\times 10^{-2}$	$3.8\times 10^{-2}$	$3.8\times 10^{-2}$

位降深;  $l$ 为过滤器长度;  $r$ 为试验观测井至试验抽水井之间的距离;  $M$ 为承压含水层的厚度。

### 3.3 数值法拟合水文地质参数

利用 Visual Modflow 建立本工程的三维非稳定渗流模型,数值模拟的原理是通过地层的水文地质参数来模拟预测承压水水位变化,根据地层水文地质参数相接近原则,可对类似地层进行概化归一,高度概化模型便于通过实际抽水数据来修正模型参数,使得模型更具实际意义。将浅部软土层①<sub>2</sub>层素填土、②<sub>1</sub>层粉质黏土、②<sub>2</sub>层淤泥质粉质黏土、②<sub>3</sub>层粉质黏土夹粉砂、②<sub>4A</sub>层粉质黏土统一概化为弱透水黏土层;将渗透性及粒径相接近的承压含水层②<sub>4</sub>粉砂层、②<sub>5</sub>粉细砂层概化为一层;④<sub>1</sub>层含砾中粗砂、④<sub>2</sub>层中粗砂混卵砾石概化为一层;将⑤<sub>1</sub>层强风化泥岩、⑤<sub>2A</sub>中等风化泥岩、⑤<sub>2</sub>中等风化泥质粉砂岩概化为基岩隔水层。按照计算的平面范围、地层概化以及初始边界条件,建立三维数值模型,模型平面尺寸为 1164 m×1272 m,深度为 80 m,剖分 405 行、204 列,共 82620 个网格单元,模型底部为基岩不透水,模型四周设置承压水定水头边界,水头取值为现场实测地下水位埋深 11.5 m,在网格剖分中,对计算区域进行了局部加密,三维模型及模型俯视图分别见图 5、图 6。

选取 GC1、GC5、GC6 试验观测井数据绘制降深曲线,将其与数值计算预测的降深曲线进行拟合,

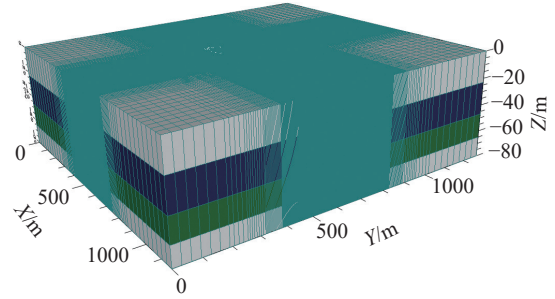


图 5 三维模型图

Fig. 5 Three-dimensional model diagram

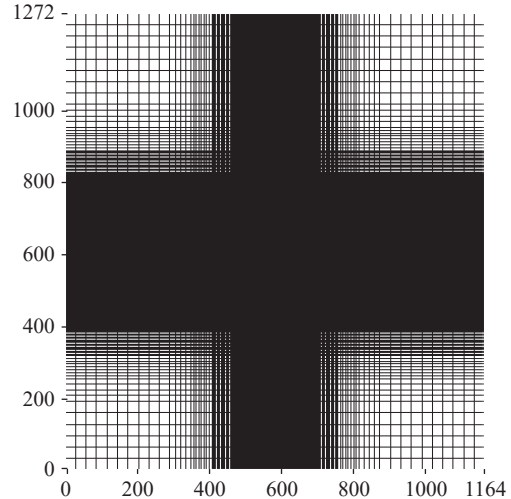


图 6 模型俯视图

Fig. 6 Top view of the model

拟合结果见图 7。该参数组合下试验观测井内水位模拟预测值与实测值相关系数为 0.992,拟合情况较好。从拟合结果看,水平渗透系数约为垂直渗透系数的 2~6 倍,与水平渗透系数大于垂直渗透系数的地区经验相符。公式法及数值模拟计算水文地质参数结果见表 4。

由计算结果可以看出,公式法和数值模拟计算得到的水平渗透系数虽存在一定的差异,但较为接近,

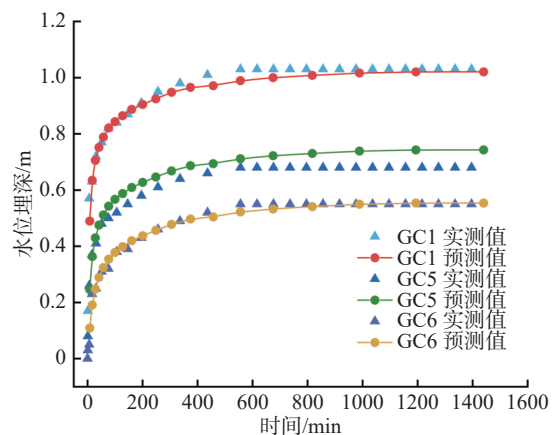


图 7 实测观测井水位与数值计算拟合图

Fig. 7 Measured observation well water level and numerical calculation fitting diagram

表4 不同方法计算水文地质参数结果  
Tab. 4 The results of hydrogeological parameter calculations by different methods

计算方法	层位	水平渗透系数/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	垂直渗透系数/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	贮水率/ $\text{m}^{-1}$
公式法	② <sub>4</sub> 、② <sub>5</sub>	$3.8\times 10^{-2}$	$5.0\times 10^{-3}$	$5\times 10^{-5}$
	④ <sub>1</sub> 、④ <sub>2</sub>			
数值模拟	② <sub>4</sub> 、② <sub>5</sub>	$3.0\times 10^{-2}$	$5.0\times 10^{-3}$	$5\times 10^{-5}$
	④ <sub>1</sub> 、④ <sub>2</sub>	$3.3\times 10^{-2}$	$1.65\times 10^{-2}$	$5\times 10^{-5}$

其差异主要来自现场试验观测误差及拟合过程中的误差。现场抽水试验基本反映了承压含水层的水力特性,所获得的含水层渗透系数远大于勘察报告提供的渗透系数值,为基坑地下水控制设计提供了精准且可靠的依据。

#### 4 地下水控制优化设计方案

##### 4.1 止水帷幕设计

本项目周边环境复杂敏感,变形控制要求严苛,需做好地下水控制方案。根据场地地质条件,承压含水层④<sub>2</sub>中粗砂混卵砾石层底埋深约65 m,其卵砾石含量局部高达40%,若穿透该层采用落底式止水帷幕,施工难度大,采用TRD工艺止水帷幕质量无法保证,需采用地下连续墙,经测算,采用地下连续墙造价约增加9000万元,成本投入巨大。经多轮沟通论证后,拟采用700 mm厚渠式切割水泥土连续墙(TRD)悬挂式止水帷幕+坑内减压井+坑内疏干井+坑外回灌井组合的地下水控制设计方案。

##### 4.2 地下水控制模拟优化

为合理确定悬挂式TRD止水帷幕方案,采用有限差分法Visual Modflow建立三维渗流模型,对不

同TRD止水帷幕方案下坑内降水对周边环境的影响进行分析。

根据场地工程地质、水文地质条件、基坑几何尺寸,建立本工程的三维水文地质概念模型,模型尺寸及地层概化与现场抽水试验模型相同,TRD止水帷幕设置为防渗墙模块,渗透性设置为 $1.0\times 10^{-5}$  m/d,根据勘察报告,承压水初始水位取最不利水位标高1.60 m。

根据抗突涌稳定性计算结果,承压水减压主要在地下三层区域,基坑内土方开挖至地下室二层底后开始抽取承压水至主体结构满足抗浮要求。为有效地减小抽降承压水对地铁及过江隧道影响,在地下二层与地下三层交界处增加一道TRD止水帷幕进行方案优化比选。根据地质剖面分析,由于②<sub>4</sub>粉砂层与②<sub>5</sub>粉细砂层之间存在透镜体地层②<sub>4A</sub>粉质黏土层,为确保减压效果,减压井底需进入②<sub>5</sub>粉细砂,减压井长需超过35 m,为保证出水量和出水效率,考虑地层划分误差,减压井长度不宜小于40 m。帷幕比选方案如下:

方案一:基坑四周帷幕深40 m,减压井深40 m;

方案二:基坑四周帷幕深45 m,减压井深40 m;

方案三:基坑四周帷幕深50 m,减压井深45 m;

方案四:基坑四周帷幕深55 m,减压井深45 m;

方案五:基坑四周帷幕深45 m+地下二层与地下三层交界处增设45 m深帷幕,减压井深40 m;

方案六:基坑四周帷幕深55 m+地下二层与地下三层交界处增设55 m深帷幕,减压井深45 m。

上述方案数值模拟结果对比分析情况见表5。

表5 不同TRD止水帷幕方案对比分析

Tab. 5 Comparative analysis of different TRD waterstop curtain schemes

序号	总抽水量/( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )	坑内最大稳定水位降深/m	浦滨路隧道最大水位降深/m	地铁区间最大水位降深/m	工程造价	施工难度	风险程度
方案一	35200	16.0	10.6	9.6	低	简单	大
方案二	26800	16.0	8.6	7.1	低	简单	一般
方案三	24800	16.0	7.9	6.4	较低	难度较大	一般
方案四	23300	16.0	7.5	6.0	较高	难度大	较小
方案五	25600	16.0	8.1	6.6	高	简单	一般
方案六	21800	16.0	7.1	5.6	高	难度大	较小

由表5对比分析可以得出:

(1)在坑内最大稳定水位降深一定的情况下,随着止水帷幕深度的增加,总抽水量及坑外水位最大降深均呈减小趋势,止水帷幕深度超过45 m后,总抽水量及坑外水位降深变化幅度明显减小。

(2)基坑四周设置止水帷幕的同时在地下二层与地下三层之间增设一道同深的止水帷幕,总抽水量及坑外水位降深变化较小,表明增设止水帷幕的止水效果并不显著。

(3)止水帷幕与减压井深度同为40 m时,总的

抽水量大,地下水基本无绕流,坑外水位降深大,风险程度较高。

为节约工期和造价,减少本项目地下工程与地铁交叉施工时间,同时考虑 TRD 工艺在卵砾石层中的施工难度,经综合比选,最终选定方案二为本项目基坑地下水控制方案。具体设计方案如下:

#### (1) 止水帷幕设计

整体采用 700 mm 厚 TRD 作为止水帷幕,帷幕的有效深度 45 m,帷幕底标高为 -40.5 m,位于②<sub>5</sub> 粉细砂与④<sub>1</sub> 含砾中粗砂交界处,以利于 TRD 效率的提高,充分发挥其性能优势。

#### (2) 承压含水层减压设计

减压井钻孔直径 700 mm,井深 40 m,滤管长度 19 m,井管为  $\phi 325 \times 6$  mm 钢管,桥式过滤器。坑内布设 106 口减压井,其中三层地下室区域布置 58 口降水井,备用减压井 15 口兼做坑内观测井;负二层地下室区域 C、D 塔楼及附近布置 8 口,为预防遗留管桩拔桩及勘察孔封堵带来的突涌风险,负二层地下室区域应具备将水位降至开挖面以下的抽水能力,故布置 25 口备用减压井。减压降水井和坑外承压水观测井平面布置见图 8。

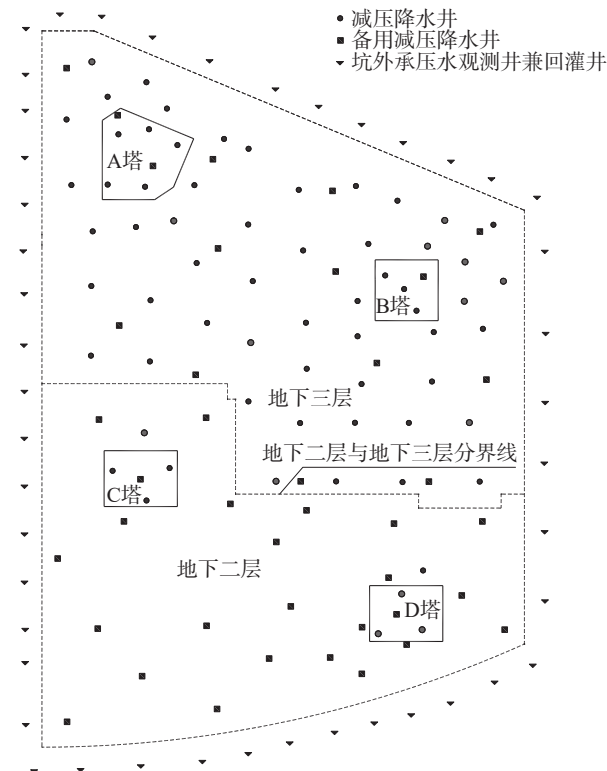


图 8 基坑降水井平面布置图  
Fig. 8 Layout plan of dewatering wells for foundation pits

#### (3) 潜水含水层降水设计

针对上部软土潜水层含水量高、强度低、渗透性

差的特点,采用坑内真空疏干降水,共布置 102 口真空井(约 300 m<sup>2</sup>一口疏干井),疏干井钻孔直径 650 mm,井管采用  $\phi 273 \times 4$  mm 钢管,桥式过滤器,地下二层区域井长 18 m,地下三层区域井长 22 m。

#### (4) 回灌井设计

在基坑 TRD 止水帷幕外侧分别设置承压水回灌井与潜水回灌井,回灌井兼水位观测井,承压水观测井间距为 30 m,浦滨路隧道、地铁侧、消防站楼等重点部位加密至 15 m,井结构同减压井;潜水观测井间距统一为 30 m,井深 20 m。

#### 4.3 基坑降水对环境影响分析及预测

##### (1) 基坑开挖至三层地下室坑底工况

本基坑最不利工况为开挖至三层地下室及 A、B 塔楼基底,A 塔楼基底承压水水位降深 16 m,基坑总涌水量约为 26800 m<sup>3</sup>/d,坑外浦滨路隧道、地铁位置水位降至标高约 -5 ~ -7 m,降深约为 6.6 ~ 8.6 m,预测的承压水水位标高等值线图见图 9。

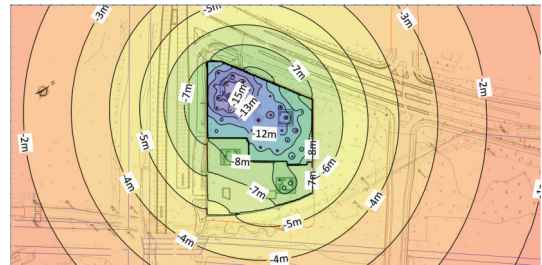


图 9 开挖至坑底承压水安全水位标高等值线图(单位:m)  
Fig. 9 Contour map of the safe water level elevation of confined water up to the bottom of the pit (Unit: m)

根据规程<sup>[17]</sup>中降水引起的地层沉降公式(见式(3))计算沉降值,绘制沉降等值线,见图 10。此工况下,地铁结构沉降 8 mm,底板未浇筑前,如地铁施工至此,风险较大,需加快基坑施工进度,尽早封闭底板。

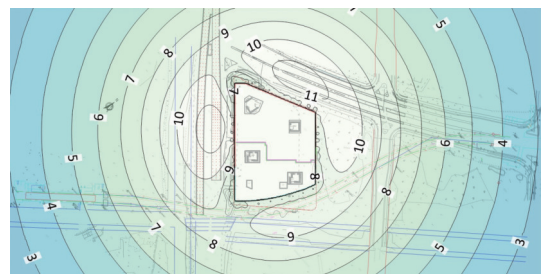


图 10 开挖至坑底沉降等值线图(单位:mm)  
Fig. 10 Contour map of settlement from excavation to the bottom of the pit (Unit: mm)

$$s = \psi_w \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \sigma'_{zi} \Delta h_i}{E_{si}} \quad (3)$$

式中:  $s$  为沉降量;  $\psi_w$  为沉降计算经验系数,根据南京

长江漫滩地区经验取 0.3;  $\Delta\sigma'_{zi}$  为附加有效应力;  $\Delta h_i$  为土层厚度;  $E_{si}$  为压缩模量。

(2) 底板施工完成后工况

底板施工完成后,后浇采用超前止水带,水位恢复至满足大底板抗突涌要求的位置,同时考虑底板具有一定的压重及强度。经计算,底板完成后三层地下室区域水位降深约为 4.6~6.6 m,相应的安全水位标高约为 -5.0~-3.0 m,基坑总涌水量约为 10560 m<sup>3</sup>/d,此时坑外水位降至标高约 -2.0~-1.0 m,降深约为 2.6~3.6 m,该工况下二层地下室满足抗突涌稳定性要求,无需抽取承压水。预测的承压水水位标高等值线见图 11,沉降等值线见图 12。此工况下,地铁结构沉降量 3.5 mm,满足地铁变形控制要求。

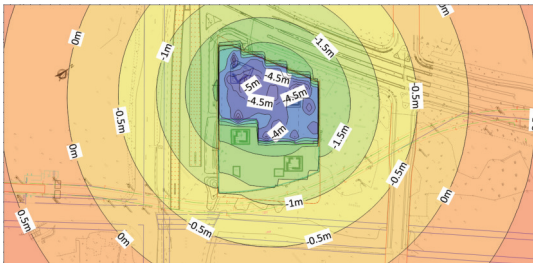


图 11 底板完成后承压水安全水位标高等值线图  
Fig. 11 Contour map of safe water level elevation of pressurized water excavated to the bottom of the pit

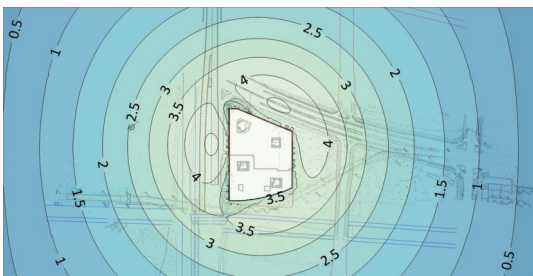


图 12 底板完成后沉降等值线图(单位:mm)  
Fig. 12 Contour map of settlement after the completion of the base plate (Unit: mm)

5 地下水控制效果评价

2023 年 11 月 5 日开始向下开挖三层地下室土方并抽取承压水,2024 年 2 月 10 日地下室底板全部施工完成,2024 年 9 月 2 日地下结构施工完成,停止抽取承压水。从开始抽取承压水至地下室底板施工完成,坑外承压水观测井水位呈下降趋势,观测井水位普遍下降 1~2 m,单井出水量约 80~100 m<sup>3</sup>/d,此时正值枯水期,坑外初始承压水水位较低,约为 -6 m,随着底板施工完成和地下结构施工,坑内承压水降深减小,坑外承压水位有所恢复,6—8 月汛期长江水位及承压水位迅速抬升后趋于稳定,承压水水位变化曲线见图 13。

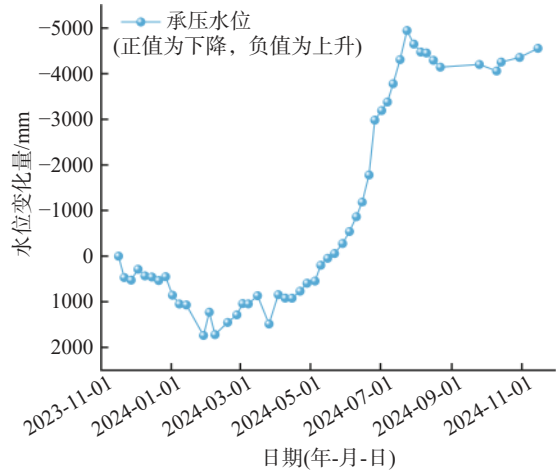


图 13 承压水水位变化

Fig. 13 The variation of confined water level over time

本项目基坑地下水控制效果具体如下:

(1) 从基坑开挖到整个地下室施工期间,基坑侧壁整体无明显的渗水现象,开挖到底后坑内土体较为干燥,止降水效果良好,基坑实景如图 14 所示。



图 14 基坑开挖到底实景图

Fig. 14 Realistic picture of excavation of foundation pit to the end

(2) TRD 止水帷幕外侧共设置 22 口潜水观测井,45 口承压水观测井,潜水观测井水位均正常,基坑开挖至塔楼基底时,承压观测井 34 最大水位降深达到 2.5 m,承压观测井 39 最大水位降深达到 3.2 m,及时启动自动化回灌后两观测井恢复正常水位,其余坑外承压水观测井水位降深均在 2 m 内,变化幅度较小,表明超深悬挂式 TRD 有效地阻隔了基坑内、外承压水水力联系,实现了预定止水、减压目标。

(3) TRD 成墙养护 28 天后取芯,钻探水泥石芯样进尺 368.7 m,累计采取水泥石芯样试件 240 组,TRD 取芯率达 92% 以上,芯样呈灰色,芯样连续完整,水泥石搅拌均匀,水泥石芯样单轴抗压强度平均值为 0.96 MPa,大于设计强度 0.8 MPa,满足设计要求。现场取芯照片见图 15。



图 15 TRD 现场取芯试样  
Fig. 15 TRD on-site core sampling sample

(4)浦滨路隧道沉降监测曲线如图 16 所示,浦滨路隧道结构最大沉降 17 mm,6—8 月汛期承压水位随长江水位抬升,沉降有所减小,稳定至 13 mm,现场巡视正常,无开裂现象。地铁 11 号线拱底沉降监测曲线如图 17 所示,左线于 2024 年 7 月 13 日盾构穿过监测点,右线于 2024 年 8 月 10 日盾构穿过监测点,右线隧道结构拱底沉降累计值稳定在 2 mm 左右,左线拱底沉降在右线未盾构前约 2 mm,后突增至 8 mm 并趋于稳定,拱底沉降突增是由于右线盾构过程中对已建左线隧道结构的扰动所致。2024 年 9 月 2 日停止抽取承压水后隧道结构沉降趋于稳定,抽取承压水引起的地铁结构沉降实测值与数值模拟预测结果基本吻合,满足变形控制要求。

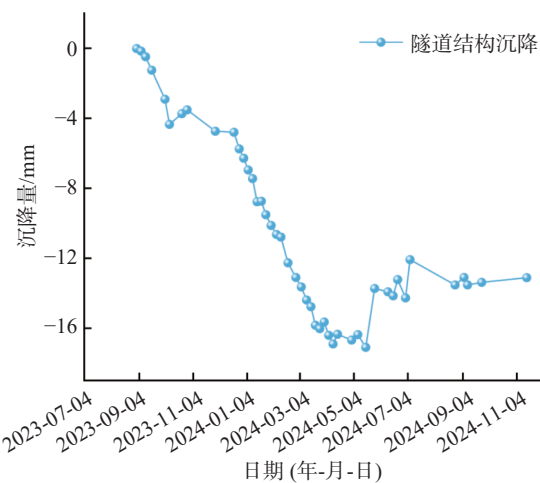


图 16 浦滨路隧道沉降  
Fig. 16 The relationship between settlement of Pubin Road Tunnel and time

综合上述分析,悬挂式 TRD 止水帷幕结合减压井减压的地下水控制方案有效且可靠,实现了预期的止降水目的,基坑降水对周边环境影响较小,有效地保护了周边环境。

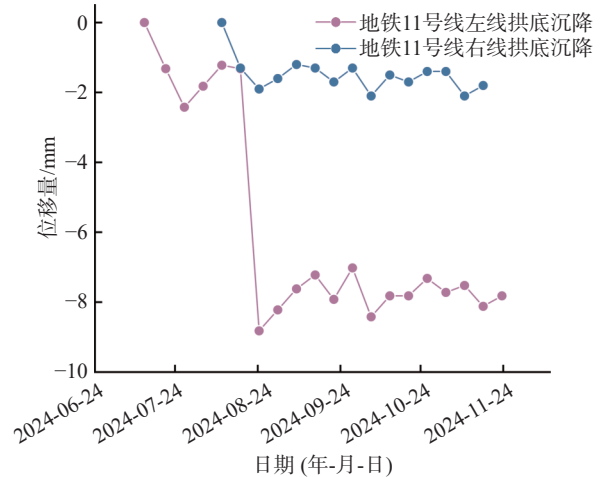


图 17 地铁结构拱底沉降  
Fig. 17 The relationship between the settlement of the bottom of the subway structure arch and time

## 6 结论

本工程属于长江漫滩区临江深大基坑工程,周边环境复杂且变形控制要求严苛,场地水文地质条件复杂,承压含水层深厚且水头较高,基坑存在突涌风险。通过现场抽水试验获取场地水文地质参数,建立三维渗流模型,通过数值分析优化了基坑地下水控制方案。基坑实施效果及监测数据表明,所采取的地下水控制方案满足地铁、隧道等周边环境的保护要求,较好地协调了周边环境影响和社会经济效益的均衡性。主要结论如下:

(1)基于现场抽水试验数据,分别利用公式法计算和数值法拟合分析,获得了场地实际的水文地质参数,修正地勘报告中水文地质参数,为基坑承压水控制设计提供了精准且可靠的依据。同时表明复杂水文地质条件下开展现场水文地质试验的必要性。

(2)考虑到场地承压水含水层深厚且卵砾石含量高,采用落底式止水帷幕施工难度大、工程造价高,通过技术经济综合分析,提出悬挂式 TRD 止水帷幕+坑内疏干/减压+坑外回灌的综合地下水控制方案。

(3)地下水控制方案比选的数值模拟结果显示,在坑内最大稳定水位降深一定的情况下,随着止水帷幕深度的增加,总抽水量及坑外水位降深均呈减小趋势,但止水帷幕深度超过一定深度后(本工程为 45 m),这种减小趋势明显变缓;悬挂式止水帷幕底部应超深于减压井底部不小于 5 m,以增加地下水渗流路径,降低承压水减压抽降风险。据此,综合考虑技术经济效果,确定了基坑地下水控制方案的具体设计参数。

(4)数值模拟和工程实施效果均表明,本工程所

采取的地下水控制设计方案可以实现预期目的,有效地保护了周边环境。基坑监测数据与数值模拟预测结果基本吻合,验证了本文所采取的数值分析方法的可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] 肖裕生,施春华.南京地区第四系主要地层类型及分层探讨[J].南通大学学报(自然科学版),2008,7(2):60-65. (XIAO Y S, SHI C H. On the division of the Quaternary in the Nanjing region, Eastern China[J]. *Journal of Nantong University (Natural Science Edition)*, 2008, 7(2): 60-65. (in Chinese))
- [2] 李方明,陈国兴,刘雪珠.悬挂式帷幕地铁深基坑变形特性研究[J].岩土工程学报,2018,40(12):2182-2190. (LI F M, CHEN G X, LIU X Z. Deformation characteristics of suspended curtain deep foundation pit of metro lines[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(12): 2182-2190. (in Chinese))
- [3] 曹洪,潘泓,骆冠勇.地下结构截排减压抗浮概念及应用[J].岩石力学与工程学报,2016,35(12):2542-2548. (CAO H, PAN H, LUO G Y. A new anti-floatation method by drainage: concept and application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2542-2548. (in Chinese))
- [4] ZENG C F, SONG W W, XUE X L, et al. Construction dewatering in a metro station incorporating buttress retaining wall to limit ground settlement: insights from experimental modelling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 116: 104124.
- [5] 哈达,朱敢平,李竹,等.天津市承压含水层条件下地下连续墙深度优化[J].地下空间与工程学报,2018,14(2):490-499. (HA D, ZHU G P, LI Z, et al. Underground diaphragm wall depth optimization considering the confined aquifer in Tianjin[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(2): 490-499. (in Chinese))
- [6] 郑刚,赵悦镔,程雪松,等.复杂地层中基坑降水引发的水位及沉降分析与控制对策[J].土木工程学报,2019,52(S1):135-142. (ZHENG G, ZHAO Y B, CHENG X S, et al. Strategy and analysis of the settlement and deformation caused by dewatering under complicated geological condition[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(S1): 135-142. (in Chinese))
- [7] 杨清源,王子珺.承压含水层深基坑降水引起地表沉降试验研究[J].地下空间与工程学报,2024,20(3):917-928. (YANG Q Y, WANG Z J. Experimental study on the surface subsidence by dewatering of deep foundation pit in confined aquifer[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, 20(3): 917-928. (in Chinese))
- [8] 詹胜文,丁苏南,任文明,等.长江漫滩高承压水地层悬挂式帷幕深基坑变形规律研究[J].工程地质学报,2025,33(2):645-655. (ZHAN S W, DING S N, REN W M, et al. Deformation characteristics of deep excavation with suspended curtain in Yangtze River floodplain area with highly confined water[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, 33(2): 645-655. (in Chinese))
- [9] 向朱锋,徐金明.悬挂式止水帷幕条件下深基坑开挖变形特性研究[J].水文地质工程地质,2023,50(5):96-106. (XIANG Z F, XU J M. Deformation characteristics of deep foundation pit with suspended waterproof curtain during excavation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(5): 96-106. (in Chinese))
- [10] 李光明,李明生.悬挂式止水帷幕基坑降水控制措施研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(3):921-932. (LI G M, LI M S. Research on control measures unclosed curtain for cutting off drains on dewatering of foundation pit[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(3): 921-932. (in Chinese))
- [11] 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. (LIU S L, JIANG S G, CAO C Y. Comparison and optimization of alternatives to groundwater control for a deep excavation in highly permeable sand and gravel[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(12): 3189-3197. (in Chinese))
- [12] 张志红,郭晏辰,凡琪辉,等.悬挂式止水帷幕基坑降水引起坑外地面沉降计算方法[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(9):1329-1334. (ZHANG Z H, GUO Y C, FAN Q H, et al. Calculation method for land subsidence induced by dewatering of foundation pit with suspended waterproof curtains[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(9): 1329-1334. (in Chinese))
- [13] 王卫东,常林越,谭轲.超深TRD工法控制承压水的邻近地铁深基坑工程设计与实践[J].建筑结构,2014,44(17):56-62. (WANG W D, CHANG L Y, TAN K. Design and practice of a deep foundation pit project adjacent to subway tunnel using super deep TRD construction method to control confined water[J]. *Building Structure*, 2014, 44(17): 56-62. (in Chinese))
- [14] 何绍衡,夏唐代,李连祥,等.地下水渗流对悬挂式止水帷幕基坑变形影响[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(4):713-723. (HE S H, XIA T D, LI L X, et al. Influence of groundwater seepage on deformation of

- foundation pits with suspended impervious curtains[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(4): 713-723. (in Chinese))
- [15] 李 伟, 童立元, 王占生, 等. 不同地连墙插入深度下水对周边环境的影响分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 272-277. (LI W, TONG L Y, WANG Z S, et al. Analysis of impact of dewatering on the environment under different inserted depth of diaphragm wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 272-277. (in Chinese))
- [16] 骆祖江, 成 磊, 张兴旺, 等. 悬挂式止水帷幕深基坑降水方案模拟优化 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2022, 52(6): 1946-1956. (LUO Z J, CHENG L, ZHANG X W, et al. Simulation and optimization of dewatering scheme for suspended impervious curtain in deep foundation pit[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1946-1956. (in Chinese))
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规范: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [18] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钻孔抽水试验规程: SL 320—2005[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of pumping test in borehole for water resources and hydropower engineering: SL 320—2005[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese))

收稿日期: 2025-01-06