

文章编号: 1007-2993(2026)03-0423-07

# 某落底式止水帷幕基坑的群井连通试验研究

陈律<sup>1</sup> 危正平<sup>2</sup> 胡磊<sup>3</sup> 程凯<sup>2</sup> 汪紫璇<sup>3</sup>

(1. 中机三勘岩土工程有限公司, 湖北武汉 430000; 2. 正宇科创(武汉)岩土工程有限公司, 湖北武汉 430000; 3. 南京南大岩土工程技术有限公司湖北分公司, 湖北武汉 430000)

**【摘要】** 高承压水地区的深基坑工程通常采用落底式止水帷幕隔渗, 以减小降水对周边环境的影响。然而目前关于落底式帷幕止水效果的评价方法尚不完善。武汉某深基坑工程地下水控制采用 CSM 落底式止水帷幕+坑内疏干方案, 为预判基坑出水量并评价帷幕止水效果, 开展了群井多降深抽水试验, 通过获取坑内外的水位降深数据以及出水量等信息, 在土方开挖前预判了基坑后期的出水量, 经初步判断, CSM 落底式帷幕止水效果良好。该方法可为落底式止水帷幕评价提供借鉴。

**【关键词】** CSM; 落底式止水帷幕; 群井连通试验; 多降深抽水试验; 出水量

**【中图分类号】** TU473

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0118

## Experimental study on well group connectivity test of a foundation pit with aquifer-penetrating cut-off wall

CHEN Lü<sup>1</sup> WEI Zhengping<sup>2</sup> HU Lei<sup>3</sup> CHENG kai<sup>2</sup> WANG Zixuan<sup>3</sup>

(1. China Machinery TIDI Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan 430000, Hubei, China; 2. Zhengyu Kechuang (Wuhan) Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan 430000, Hubei, China; 3. Nanjing Nanda Geotechnical Engineering Technology Co., Ltd. Hubei Branch, Wuhan 430000, Hubei, China)

**【Abstract】** Cut-off walls penetrating the aquifer are commonly adopted for seepage isolation in deep foundation pit projects in high artesian water areas, so as to reduce the impact of dewatering on the surrounding environment. However, the current evaluation methods for the seepage control effect of cut-off walls penetrating the aquifer remain inadequate. For a deep foundation pit project in Wuhan, the groundwater control scheme combines the CSM cut-off wall penetrating the aquifer with internal well dewatering. To predict the water inflow of the foundation pit and evaluate the seepage control effect of the cut-off wall, a multi-level pumping test with a well group was carried out. By obtaining the data of water level drawdown inside and outside the foundation pit as well as the water inflow information, the subsequent water inflow of the foundation pit was predicted prior to earth excavation. Preliminary judgment shows that the CSM cut-off wall penetrating the aquifer achieves a favorable seepage control effect. This method can provide a reference for the evaluation of cut-off walls penetrating the aquifer.

**【Key words】** CSM; aquifer-penetrating cut-off wall; well group connectivity test; multi-level pumping test; water inflow

### 0 引言

在高承压水地区的深基坑工程中, 为避免坑底突涌, 防止地下水位过高影响基坑安全, 确保地下结构施工作业, 通常需采用“降止结合”的方式对地下承压水加以控制<sup>[1-4]</sup>。按照止水帷幕是否深入完整隔水层, 止水帷幕的形式可分为悬挂式止水帷幕与落底式止水帷幕<sup>[5-7]</sup>。

在实际工程中, 悬挂式止水帷幕的应用较为广泛, 有关悬挂式止水帷幕抗渗流稳定等方面的研究也

比较成熟<sup>[8]</sup>。袁斌等<sup>[9]</sup>通过数值模拟研究证明止水帷幕的存在可以很大程度地减少基坑总抽水量及坑外地表沉降。冯晓腊等<sup>[10]</sup>、杨建民等<sup>[11]</sup>通过现场抽水试验给出了基坑降水工程涌水量的计算方法。Luo 等<sup>[12]</sup>采用有限元法求解悬挂式止水帷幕附近水流运动解析解。Vilarrasa 等<sup>[13]</sup>、Pujades 等<sup>[14]</sup>、Yang 等<sup>[15]</sup>运用有限元法得到止水帷幕渗漏程度系数。Wu 等<sup>[16]</sup>运用有限差分法研究基坑抽水时止水帷幕阻隔地下水的效果, 结果显示地下水水位变化与承压含水

基金项目: 武汉市 2023 年度市城建局科技项目(202361); 湖北省建设科技计划项目(2023117)

作者简介: 陈律, 男, 1987 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计、咨询等工作。E-mail: 277679311@qq.com

层埋深相关。

针对落底式止水帷幕的研究大多侧重于止水方式及其应用,对于落底式止水帷幕的质量评价、地下水量预估等方面的研究则较少<sup>[17-19]</sup>。本文以某超深基坑工程全数字化群井连通试验为依托,统计试验过程中的出水量与相应降深,从而分析研究CSM落底式止水帷幕条件下的地下水渗流规律。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

项目位于武汉中央商务区东北角,为大型公共建筑。该项目设有3层地下室,基坑周长约574.8 m,开挖面积约22000 m<sup>2</sup>,最大开挖深度达20.1 m。基坑周边环境较为复杂(见图1)。北侧12.0~16.5 m处为机场河排水走廊与地铁3号线交通走廊;东侧距离2号线及范湖站约22 m,距机场河排水走廊约6.3 m;东南侧距离在建的4层地下室约15 m;南侧距离范湖广场及其停车场约6.4 m;西侧现状为空地,后期将建设武汉市图书馆新馆。

### 1.2 工程地质条件

场地地貌单元为长江I级阶地,整体地势较为平坦,现状高程为20.75~21.59 m。在勘探范围内,综合各土层物理力学性质、地层沉积时代、成因以及静力触探曲线特征,场地被划分为5个单元层16个亚层,各岩土层的岩土名称及岩土工程参数见表1。

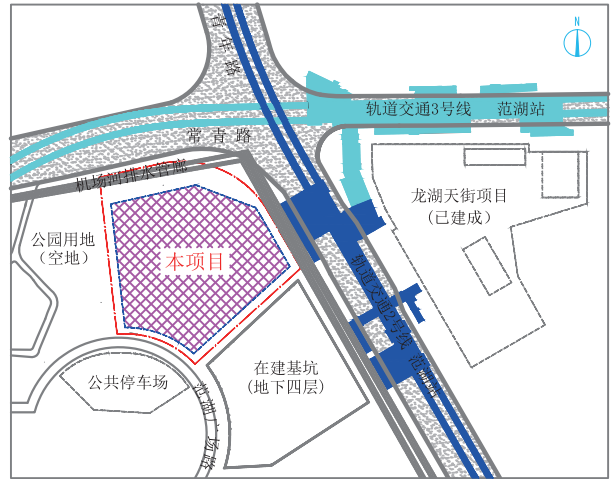


图1 项目周边环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the surrounding environment of the project

### 1.3 水文地质条件

本场地的地下水主要包含上层滞水、孔隙承压水以及基岩裂隙水。上层滞水主要赋存于(1)层填土,其补给来源主要为大气降水和地表雨水。(2)层土处于粉质黏土与砂土之间,属于过渡层,透水性和饱水性较强。孔隙承压水赋存于(3)、(4)单元层中,与长江存在直接的水力联系,水量充沛。根据勘察单位2020年12月在场内抽水试验,稳定承压水位于地面下10.9 m(相当于标高10.7 m),场地承压含水层

表1 岩土层参数表

Tab. 1 Geotechnical parameter

地层编号	岩土名称	层厚/m	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\phi$ /( $^{\circ}$ )
(1-1)	杂填土	0.3~3.1	8	15
(1-2)	素填土	0.6~3.9	8	6
(2-1)	黏土	0.8~3.0	24	13
(2-2)	黏土	0.7~2.7	19	11
(2-3)	淤泥质粉质黏土	2.7~6.9	12	5
(2-4)	淤泥质粉质黏土夹粉土	1.0~6.3	15	6
(3)	粉砂夹粉土、粉质黏土	1.0~4.8	14	8
(4-1)	粉砂	2.0~13.4	0	32
(4-2)	粉细砂	4.6~16.5	0	34
(4-2a)	粉砂夹粉土	0.5~2.0	12	9
(4-3)	细砂	6.6~17.5	0	35
(4-3a)	粉砂夹粉土	0.5~6.0		
(4-4)	中粗砂混卵、砾石	0.3~3.0		
(5-1)	强风化粉砂质泥岩	0.5~5.8	45	18
(5-2)	中等风化粉砂质泥岩	8.0~21.0	67	25
(5-2s)	中等风化软弱夹层粉砂质泥岩	5.0~	35	16

的综合渗透系数  $k=19.62 \text{ m/d}$ , 降水影响半径  $R=300 \text{ m}$ 。场地的基岩为粉砂质泥岩, 基岩面埋深在  $43.4 \sim 46.3 \text{ m}$ 。

### 1.4 基坑支护形式

基坑周边环境复杂且开挖深度较大, 经方案比选, 确定基坑支护采用厚度  $1.0 \text{ m}/1.2 \text{ m}$  地下连续墙(墙长为  $28.0 \sim 30.0 \text{ m}$ )+2 道钢筋混凝土内支撑的方式, 在地连续墙外侧设置厚度为  $700 \text{ mm}$  的连续 CSM 落底式止水帷幕。典型基坑支护剖面如图 2 所示。

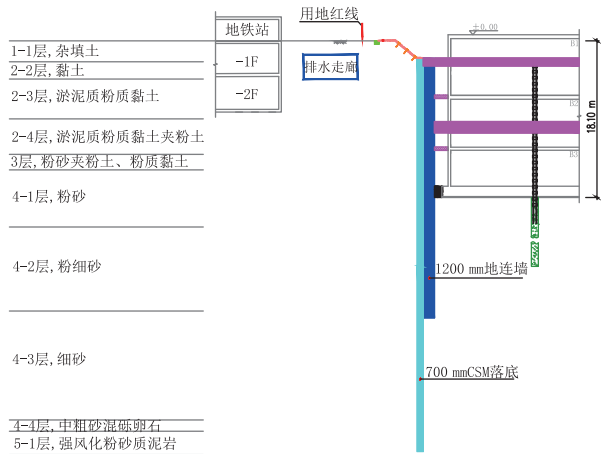


图 2 基坑支护典型剖面图

Fig. 2 Typical section of excavation support

### 1.5 地下水处理方案

本项目涉及的地下水主要为上层滞水和下部砂层中的承压水, 基坑地下水控制总体上采用“降止结合”的方式, 即采用 CSM 落底式止水帷幕阻断基坑内外水力联系后, 对坑内地下水采用明排+管井疏干的处理方案。

对于坑内上层滞水, 采用坑内集水明排方案进行处理。对于下部砂层承压水, 采用中深井进行疏干降水。根据区域经验, 坑内设置降水井 27 口(含观测井兼作备用井 5 口, 井深  $36 \text{ m}$ ), 坑外设置观测井 12 口(兼作备用井和回灌井, 井深  $34 \text{ m}$ )。降水井孔径  $\phi 600 \text{ mm}$ , 下放  $\phi 273 \text{ mm}$  桥式滤水管, 井管与孔壁间充填碎石滤料。降水井单井设计出水量为  $1440 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

为预判基坑土方开挖期间的基坑涌水量, 进而对降水井数量和布置进行优化调整, 拟于基坑开挖前进行全数字化群井连通试验。

## 2 群井连通试验

### 2.1 试验目的与任务

通过现场的数字化群井抽水试验以及水位恢复试验, 观察并掌握抽水引发的深层承压水水位变化特征, 实现如下目的:

(1) 判别止水帷幕的封闭性, 确定降水效果是否满足设计要求。

(2) 定性分析落底式帷幕的止水效果, 评估基坑降水后的周边地面沉降以及对周边环境的影响。

(3) 检验基坑周围排水系统的排水能力。

(4) 借助抽水连通试验, 指导项目降水的二次化设计。

(5) 为获取落底式止水帷幕条件下坑内外的水力联系与渗透规律积累试验数据。

### 2.2 试验仪器与数据采集

#### 2.2.1 数字水位计(水位标高信息)

试验采用全自动一体式无线单点水位计。当被测水压荷载作用于渗压计上时, 会使弹性膜板发生变形, 这种变形传递给振弦后, 振弦应力随之改变, 进而改变振弦的振动频率。自动采集设备能够采集渗压计的振动频率, 然后将频率信号通过无线网传输至云平台, 经物理量换算后得出水荷载的压力值, 进而获取水位标高。其工作示意图如图 3 所示。

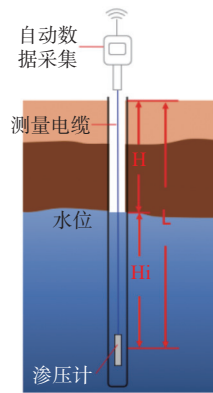


图 3 数字水位计工作原理图

Fig. 3 Working principle of digital water level gauge

#### 2.2.2 流量计(总出水流量信息)

试验采用单声道 V 字形布置方法, 在总出水管处布置壁挂式超声波流量计, 以此测试满管状态下稳定流态的流量数据(见图 4)。

流量计的原理是测量声波在流动介质中传播的时间与流量的关系。在流体中, 声波的实际传播速度

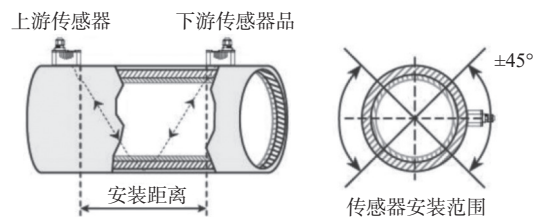


图 4 单声道 V 字形布设流量计示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flowmeter with monoponic V-shaped layout

由介质静止状态下声波的传播速度和流体轴向平均流速在声波传播方向上的分量组成。将测得的流体流速乘以过流面积,就能得到流体流量信息。

### 2.2.3 数据采集

水位信息和总出水量信息是本试验主要获取的目标数据,在试验过程中,可通过外置的自动记录、储存与传输功能实现对这些数据的实时获取。为确保试验数据的可靠性,在试验过程中每隔一定时间要对数据进行人工复核比对。

### 2.3 试验计划

降水井全部施工完毕后开展试验。如图5所示,试验利用其中的12口降水井,按照均匀开启降水井的原则,分三次逐步开启(按照图5中□→○→△的顺序)。此外,将坑内的6口井(图5中云线圈注)和坑外的10口井作为观测井。试验中记录各批降水井开启至水位稳定期时坑内外观测井的水位变化情况。当水位降至设计标高且稳定之后,再分三批次逐步关停降水井,并记录每次水位稳定后坑内外观测井的水位。同时,在试验过程中每隔半小时记录一次基坑总出水量。

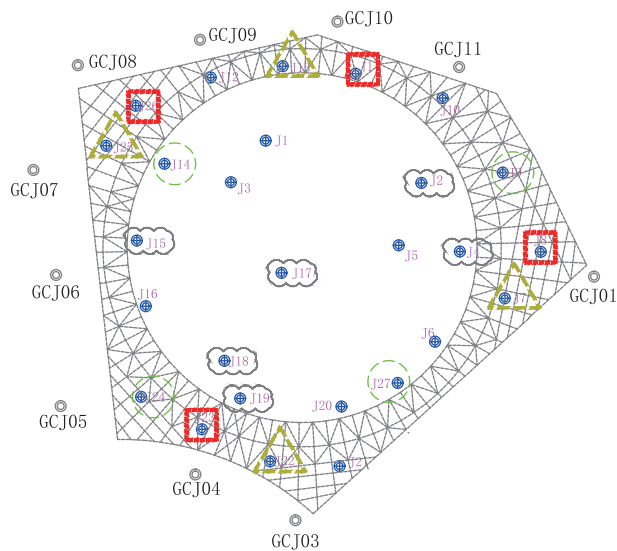


图5 连通试验井位平面布置图

Fig. 5 Layout plan of wells for connectivity test

### 2.4 试验要点

(1)降水井开启后,将观测井水位的数据读取设置为每隔一段时间(如5~10 min)进行一次。

(2)分批次均匀开启试验井,在后续批次井开启时,要求前序降水的水位稳定(水位变化在20 cm以内)达到10 h以上。

(3)实时监测总出水量,对降水井的动水位进行人工测量。在试验过程中,基坑内所有未开启的降水

井均用作人工测量的观测井。

(4)采用数字化超声波流量监测仪定期采集基坑总出水量的数据。

### 2.5 试验过程

依据现场实际状况与整体试验部署,项目在2022年11月16日10:30正式开启数字化群井抽水连通试验,于11月23日16:30逐步关井以开展水位恢复试验,至11月27日15:30全部试验结束,总共历时11天5小时。试验过程与用时情况等相关数据见表2。

表2 抽水连通试验和水位恢复试验过程记录  
Tab. 2 Process record of pumping connectivity test and water level recovery test

阶段	次序	开始时间	开关井顺序	开(关)井时长/h	稳定时长/h	阶段用时/h
群井抽水试验	1	0.0 h	第一批开启4口降水井 J1、J7、J9、J24	17.0	11.5	28.5
	2	28.5 h	第二批开启4口降水井 J11、J8、J21、J15	5.0	38.0	43.0
	3	71.5 h	第三批开启3口降水井 J3、J20、J18	5.0	17.0	22.0
	4	93.5 h	第四批开启2口降水井 J24(重启)、J25	5.0	75.5	80.5
水位恢复试验	5	174.0 h	第一批关停降水井 J3、J25、J18	13.0	11.5	24.5
	6	198.5 h	第二批关停降水井 J11、J8、J20、J15	13.0	11.0	24.0
	7	222.5 h	第三批关停降水井 J1、J7、J9、J24	0	46.5	46.5

注:①在抽水试验55 h时,因周边新建排水沟需要J24井关泵;②在抽水试验75 h时J21降水井损坏,为维持出水量保证水位降深要求,第四批次J24井重新开启,新开启J25井;③312 h后水位稳定不再回升,试验结束时坑内水位距离初始水位约1.0 m,坑外距离初始水位约0.4 m。

试验过程中,利用坑内的J4、J23、J10、J13观测井以及坑外的GCJ1、GCJ8、GCJ10、GCJ11观测井,记录所有工况下的水位变化情况,同步记录基坑的总出水量数据。

## 3 试验数据分析

### 3.1 坑内外观测井水位变化

观测井的点位选取具有一定的代表性,如J4与GCJ1、J23与GCJ8等均为坑内外同区域的点位,可分析落底帷幕阻断工况下坑内降水时坑外的水位降幅和恢复情况。汇总全试验过程的水位-时间曲线,如图6所示。由图6得知,每组试验中抽水井和观测井水位变化的特征大体相同,其变化具备以下特点:在试验开始的短时间内,水位会迅速下降,之后水位

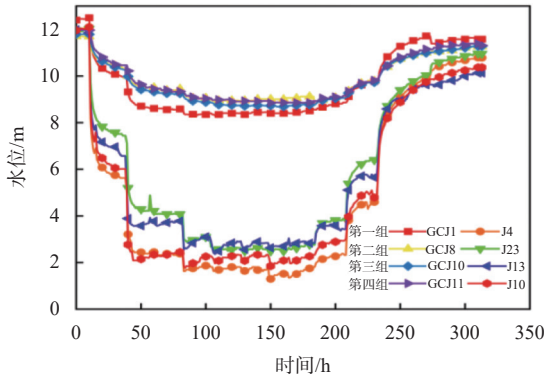


图 6 试验全过程观测井水位-时间曲线图

Fig. 6 Water level-time curve of observation wells during full test process

下降速度渐渐变缓,最终趋于稳定;停止抽水后水位又快速上升,接着趋于稳定,整个变化曲线呈“U”形。

第一批 4 口降水井开启后,坑内观测井水位降深 4.0 ~ 6.0 m,坑外观测井水位降深小于 1.0 m;第二批 4 口降水井开启后,坑内水位总降深 8.0 ~ 10.0 m 时,坑外水位降深约 1.5 ~ 2.0 m;第三批 3 口降水井和第四批 2 口小流量降水井开启后,坑内水位降至基坑底 1.0 m 以下,坑外观测井水位仅有少许降低,坑内坑外水位达到稳定。将这 4 组试验中的最大降深进行汇总,结果如表 3 所示。

表 3 连通试验坑内外试验井最大降深汇总表

Tab. 3 Summary table of maximum drawdown of test wells inside and outside the pit for connectivity test

区 位	坑外观测井最大降深/m	坑内观测井最大降深/m	降深差/m
基坑东侧	4.11	10.82	6.71
基坑西侧	2.96	9.60	6.64
基坑南侧	3.11	9.50	6.39
基坑北侧	3.12	10.25	7.13

注: G CJ1 最大降深为 4.11 m,综合判断为异常数据(可能受南侧在建基坑施工影响所致)。

综合分析图 4、图 5 及表 3 相关数据发现,距离抽水井越近的观测井,其水位降深越大。其中,坑内观测井的水位降深大且变化速率快,坑外观测井的水位降深小且变化较为缓慢,整个基坑的水位降深呈现出明显的“漏斗效应”。

### 3.2 基坑总出水量

通过统计每半小时记录的经总管的基坑抽水量数据,绘制出基坑每半小时总出水量汇总折线图(见图 7)。由图 7 可知:1)在基坑降水试验第四阶段,当满足基坑土方开挖的降水目标要求后,基坑总出水量约为 240 m<sup>3</sup>/h;2)在整个试验(包括抽水试验四个阶段和恢复试验三个阶段)过程中,从开始到后期水位稳定,总体出水量呈逐步减少的趋势。

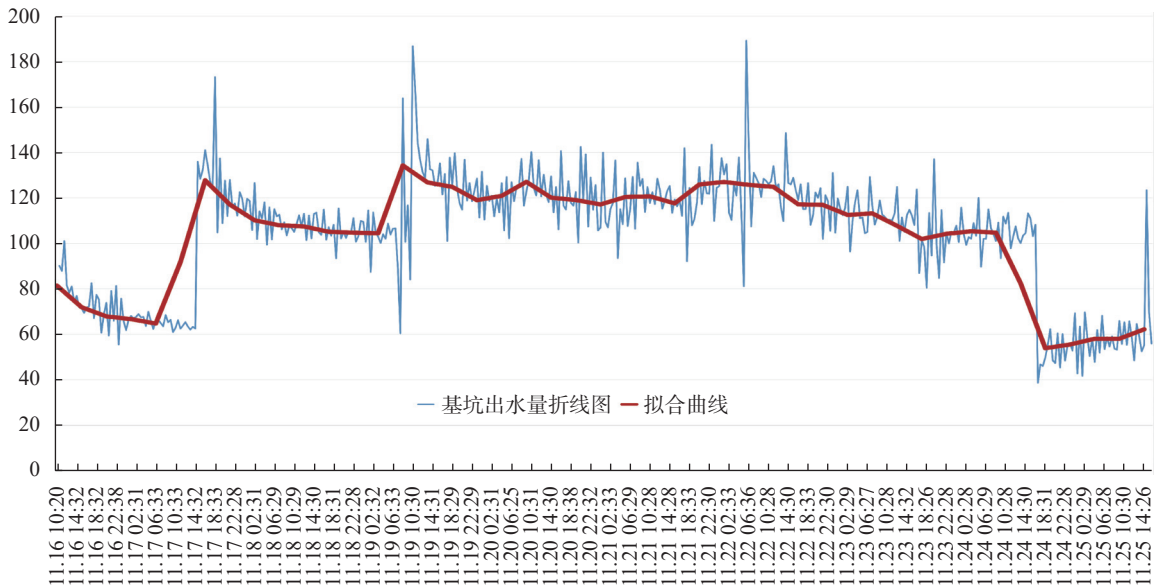


图 7 基坑每半小时总出水量折线图

Fig. 7 Line chart of total water discharge from foundation pit per half hour

### 3.3 基坑实际涌水量与大井法理论涌水量比较

根据地下水类型、补给条件、降水井的完整性以及基坑面积、形状、降水深度、布井方式等因素,敞开降水时基坑涌水量按规范<sup>[20]</sup>中大井法估算,相关

公式见式(1)。

$$Q = 2\pi k \frac{M S_d}{\ln\left(1 + \frac{R}{r_0}\right)} \quad (1)$$

式中： $Q$ 为基坑降水总涌水量， $\text{m}^3/\text{d}$ ； $k$ 为渗透系数， $\text{m}/\text{d}$ ； $M$ 为承压水含水层厚度， $\text{m}$ ； $s_d$ 为基坑地下水位设计降深， $\text{m}$ ； $R$ 为降水影响半径， $\text{m}$ ； $r_0$ 为基坑等效半径， $\text{m}$ ， $r_0 = \sqrt{A/\pi}$ ； $A$ 为基坑面积， $\text{m}^2$ 。本项目基坑理论涌水量计算有关参数见表4。

表4 基坑理论涌水量计算公式取值表  
Tab.4 Value-taking table of calculation formula for theoretical water inflow of foundation pit

参数	取值
基坑面积 $A/\text{m}^2$	22268.8
基坑等效半径 $r_0/\text{m}$	84.21
降水影响半径 $R/\text{m}$	200
基坑地下水位设计降深 $s_d/\text{m}$	10.50
承压含水层厚度 $M/\text{m}$	37.0
渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	17.0

将表4中各参数取值代入式(1)，可以计算出本项目理论涌水量 $Q_{\text{理}}=34097.56 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

根据前述基坑抽水试验，本项目基坑在落底式帷幕隔水工况下，每天的实际出水总量 $Q_{\text{实}}=240\times 24=5760 \text{ m}^3/\text{d}$ ，约为按大井法理论计算涌水量的16.89%。

#### 4 结论

通过开展基坑群井抽水连通试验及数据分析，得出如下主要结论：

(1)本项目基坑采用CSM落底式止水帷幕后，基坑坑内涌水量为基坑敞开涌水量的16.89%，表明CSM落底式帷幕能够阻隔坑外大部分地下水，使基坑整体出水量呈数量级下降，CSM落底式帷幕的隔水效果较好。

(2)帷幕落底但仍有一定量的坑外地下水补给，初步判断系因帷幕底部与基岩接触面存在绕流以及坑底以下帷幕存在局部缺陷所致。

(3)试验过程中坑外观测井水位降幅为1.85~3.12 m，存在一定差异，初步分析与场地地层条件、人工操作等多因素有关，有待于更多项目的验证。对于降深较大区域，后期基坑开挖过程中应加强监测，做好针对性的预防措施。

(4)降水井设计可依据连通试验数据进行优化，建议采用“多井小泵”的原则。

(5)连通试验是在基坑开挖前判断帷幕施工质量的一种重要技术手段。在后期针对落底帷幕项目开展连通试验时，可广泛收集相关的流量和降深数据，从而为落底帷幕的设计和评定提供数据参考。

#### 参考文献

- [1] 冯晓腊,蔡娇娇,熊宗海,等.落底式止水帷幕条件下深基坑群井试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(6):107-112.(FENG X L, CAI J J, XIONG Z H, et al. Research on well group pumping test for foundation pit with drop waterproof curtains[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 107-112. (in Chinese))
- [2] 蔡娇娇.落底式止水帷幕条件下承压含水层基坑降水设计方法研究[D].武汉:中国地质大学,2018.(CAI J J. Study on dewatering design method of foundation pit with drop waterproof curtain in confined aquifer[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese))
- [3] 冯红超.落底式帷幕在地下结构永久主动抗浮工程应用中的渗透性研究[J].工程勘察,2018(8):24-29,36.(FENG H C. Study on the permeability of closed groundwater cut-off curtain in the active anti-uplifting engineering[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018(8): 24-29,36. (in Chinese))
- [4] 余永强,刘微,唐冬雪.止水帷幕作用下基坑渗流场特性分析[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2011,21(3):24-27,32.(YU Y Q, LIU W, TANG D X. Analysis on the seepage field characteristic of excavation with waterproof structure[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 21(3): 24-27,32. (in Chinese))
- [5] XU Y S, SHEN S L, DU Y J, et al. Modelling the cutoff behavior of underground structure in multi-aquifer-aquitard groundwater system[J]. Natural Hazards, 2013, 66(2): 731-748.
- [6] 阎波,太俊,胡科,等.部分落底式止水帷幕在基坑降水中的应用[J].长江科学院院报,2023,40(9):98-105.(YAN B, TAI J, HU K, et al. Application of partially-closed impervious curtain to foundation pit dewatering[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(9): 98-105. (in Chinese))
- [7] 陈青,陈惠敏.深大基坑基底破碎基岩裂隙水施工处治技术[J].湖南交通科技,2019,45(2):157-159.(CHEN Q, CHEN H M. Construction and treatment technology of fractured bedrock fissure water in deep and large foundation pit base[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2019, 45(2): 157-159. (in Chinese))
- [8] 汪勋文,江继.止水帷幕深度对地下水渗流规律的影响分析[J].山西建筑,2022,48(22):74-78.(WANG X W, JIANG J. Analysis of influence of water-stop curtain depth on groundwater seepage law[J]. Shanxi

- Architecture*, 2022, 48(22): 74-78. (in Chinese))
- [9] 袁 斌, 武永霞, 廖少明, 等. 基于数值模拟的富水砂砾地层深基坑降水方案优化 [J]. *工程勘察*, 2017, 45(1): 34-39. (YUAN B, WU Y X, LIAO S M, et al. Optimization of deep excavation pit dewatering in water-rich sand and gravel strata based on numerical model[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2017, 45(1): 34-39. (in Chinese))
- [10] 冯晓腊, 李栋广. 落底式止水帷幕条件下基坑涌漏量计算 [J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(5): 16-21. (FENG X L, LI D G. Chung leakage quantity calculation of foundation pit on the condition of the cut-off wall insert into impermeable layer[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(5): 16-21. (in Chinese))
- [11] 杨建民, 隋颜阳. 一种软土地区深基坑涌水量计算方法 [J]. *铁道建筑*, 2017, 57(11): 94-97. (YANG J M, SUI Y Y. A calculation method on water inf low of deep foundation pit in soft soil area[J]. *Railway Engineering*, 2017, 57(11): 94-97. (in Chinese))
- [12] LUO G Y, HONG C. Using zero-thickness elements to simulate suspended cut-off walls in a regional seepage field[J]. *Computers and Geotechnics*, 2006, 33(6/7): 305-315.
- [13] VILARRASA V, CARRERA J, JURADO A, et al. A methodology for characterizing the hydraulic effectiveness of an annular low-permeability barrier[J]. *Engineering Geology*, 2011, 120(1/4): 68-80.
- [14] PUJADES E, ORBAN P, BODEUX S, et al. Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency?[J]. *Applied Energy*, 2017, 190: 135-146.
- [15] YANG T, TONG L Y, HESHAM EL NAGGAR M, et al. Hydraulic head difference at two sides of suspended waterproof curtain during multi-grade dewatering of excavation[J]. *Underground Space*, 2023, 10: 137-149.
- [16] WU Y X, SHEN S L, YUAN D J. Characteristics of dewatering induced drawdown curve under blocking effect of retaining wall in aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 554-566.
- [17] 吕斌泉, 冯晓腊, 蔡娇娇, 等. 落底式止水帷幕条件下基坑涌水量计算研究 [J]. *岩土工程技术*, 2020, 34(1): 18-23. (LV B Q, FENG X L, CAI J J, et al. Water inflow calculation of foundation pit under the condition of bottom-type waterproof curtain[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2020, 34(1): 18-23. (in Chinese))
- [18] 万 昊, 冯庆高, 蔡兵华, 等. 落底式止水帷幕条件下承压含水层水文地质参数计算方法研究 [J]. *安全与环境工程*, 2024, 31(1): 57-66,74. (WAN H, FENG Q G, CAI B H, et al. Calculation methods for hydrogeological parameters of confined aquifers under the condition of drop waterproof curtain[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(1): 57-66,74. (in Chinese))
- [19] 张雅洁. 不同类型止水帷幕基坑涌水量计算方法探讨 [J]. *海河水利*, 2023(8): 98-100. (ZHANG Y J. Calculation method of water inrush in the foundation pit of different types of water-resisting curtain[J]. *Haihe Water Resources*, 2023(8): 98-100. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: 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))

收稿日期: 2025-03-17