

深基坑水平止水帷幕无压性地下水控制设计及实践

陆建生

(上海广联环境岩土工程股份有限公司, 上海 200444)

摘要:沉降微扰动控制区域进行深基坑建设中,采用水平止水帷幕进行地下水控制的技术变得越来越重要。本文探讨了水平止水帷幕无压性地下水控制设计的原理,并应用到某车站的地下水控制设计中,抽水试验及最终的工程实践表明,水平止水帷幕的设计和施工达到了预期的效果。在此基础上针对水平止水帷幕施工工艺及渗漏检测方法、施工开挖期间的水位实时观测和预警提出了建议。

关键词:水平止水帷幕;无压性地下水控制;渗漏检测;土性改良;深基坑

中图分类号:TU473.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)06-0057-06

Design and Practice of Horizontal Waterproof Curtain for Non-pressure Groundwater Control by in Deep Foundation Pit Construction/LU Jian-sheng (Shanghai Guanglian Geotechnical & Environmental Co., Ltd., Shanghai 200444, China)

Abstract: For the deep foundation pit construction in settlement micro-disturbance control area, the horizontal waterproof curtain technique is more and more important in the groundwater control. The design principle of non-pressure groundwater control technology by the horizontal waterproof curtain is discussed and this technology is applied in the groundwater control design of a subway station. The pumping test and the final engineering practice result show that the design and construction of horizontal waterproof curtain have achieved the expected effects. On this basis, the suggestions are put forward for the construction technology & leakage detection methods of horizontal waterproof curtain and the real-time observation & early warning during excavation.

Key words: horizontal waterproof curtain; non-pressure groundwater control; leakage detection; soil improvement; deep foundation pit

0 引言

软土地区城市密集中心区的深基坑施工安全,特别是既有建筑地下空间的开发建设,不仅仅关乎稳定和强度问题,更是关乎周围环境保护问题,如何将施工过程对周围环境的影响控制在更加严格的容许范围内,以确保基坑周围原有建(构)筑物、地下管线及道路等的安全,已成为该类地区基坑工程施工过程中周边环境保护的首要工作^[1-2]。

对于软弱地层区域,地下水水位下降与地面及建(构)筑物的变形关系灵敏,唐业清^[3]及蒋红星^[4]对深基坑事故的调查资料显示,有 20%~70%的基坑事故与地下水控制有关。

沉降微扰动控制区域进行深基坑建设过程中,如何有效进行地下水控制设计是目前基坑建设中的一个重大关键点。控制因基坑降水而引起的工程性地面沉降,最直接有效的办法是控制地下水水位,包

括直接减少或消除坑外特定区域水位降深幅度和减少或消除基坑内水位降深幅度。直接减少或消除坑外特定区域水位降深幅度可采用基于围护-降水一体化设计^[5-8]之上的抽灌一体化技术^[9-11],目前抽灌一体化技术在基坑建设中已有一定的应用,其设计理论也有了一定的研究,在沉降控制方面取得了一定的成效^[12-15],但回灌技术在实际应用过程中受到综合设计不合理、施工场地限制、施工队伍精细化管理水平不足等问题影响,在沉降控制中未能达到预期管理目的。

减少或消除基坑内水位降深幅度是一种更为可靠的地下水控制技术,通过土性的改良形成水平止水帷幕达到降低含水层层顶标高,进而达到不降或少降的目的。水平止水帷幕封底技术目前应用相对较少,部分基坑利用加固形成了水平止水帷幕,但因设计考虑不全,只是减少了帷幕底部含水层的降

收稿日期:2018-03-18;修回日期:2018-05-18

基金项目:上海市科委科研项目“典型区域既有建筑地下空间开发关键技术”(编号:15DZ1204000)

作者简介:陆建生,男,汉族,1981年生,高级工程师,注册岩土工程师,注册一级建造师(市政),硕士,主要从事水文地质勘察、地下水综合治理及回灌方面的咨询及科研工作,上海市汶水东路 510 弄 24 号 601 室,lujest@sina.com。

水幅度,未充分发挥水平止水帷幕的作用。本文简述了水平止水帷幕无压性地下水控制设计的原理,并在某地铁车站的地下水控制设计中的应用。实践表明水平止水帷幕在地下水控制实践中可起到有效的控水作用,并针对实际过程中的控制环节提出了一些建议。

1 水平止水帷幕无压性地下水控制设计原理与计算

1.1 设计原理

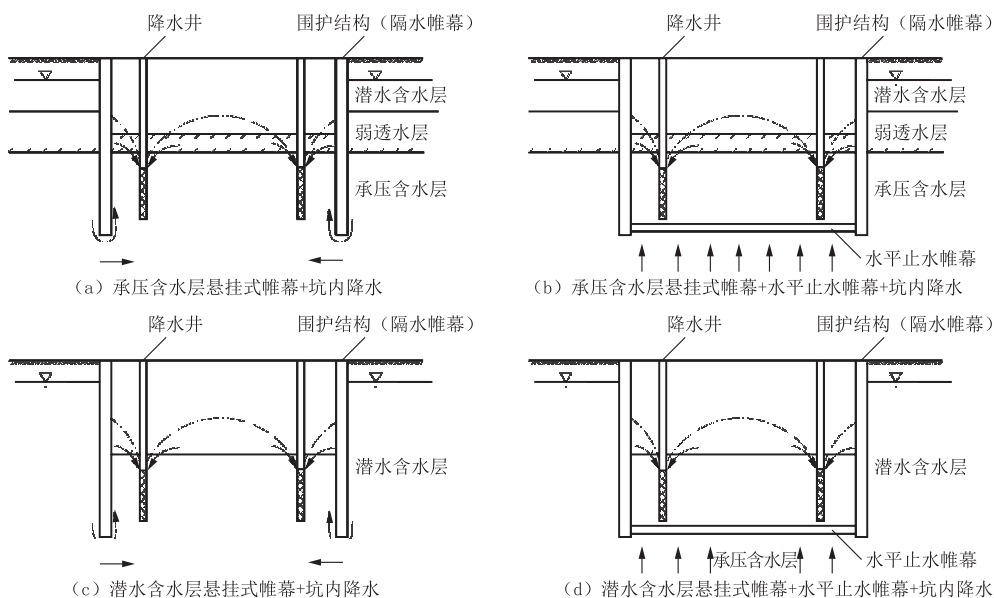


图1 深厚含水层悬挂式帷幕模式

图1(a)和1(b)为针对含水层为承压含水层。图1(c)和1(d)为针对含水层为潜水含水层,在水平止水帷幕底部原潜水含水层变成了局部性的承压水,水平止水帷幕底部的地下水顶托力应不大于帷幕底以上的土压力,如止水帷幕底部部的承压水顶托力大于帷幕底以上的土压力,则仍须考虑帷幕底部地下水的降水,则不符合水平止水帷幕无压性地下水控制设计。

水平止水帷幕无压性地下水控制设计可达到以下目的:

- (1) 沉降敏感区域,在有效保障基坑安全的同时有效控制坑外水位降深;
- (2) 在涌水大的区域,减少基坑涌水量,减少市政排水能力,减少电耗;
- (3) 从水资源保护角度出发,减少水资源浪费。

1.2 设计计算

水平止水帷幕无压性地下水控制设计指通过土性的改良形成水平止水帷幕达到降低含水层层标高,近而达到下部含水层不降水的目的。即水平止水帷幕底部部的承压水顶托力应不大于帷幕底以上的土压力,如图1所示。如止水帷幕底部部的承压水顶托力大于帷幕底以上的土压力,则仍须考虑帷幕底部承压水的降水。水平止水帷幕的作用是在原含水层中间形成一层人工弱透水层,减少基坑的竖向补给。

水平止水帷幕无压性地下水控制计算主要包括水平止水帷幕底埋深的确定、基坑涌水量的确定和水平止水帷幕厚度的确定。计算模型如图2所示。

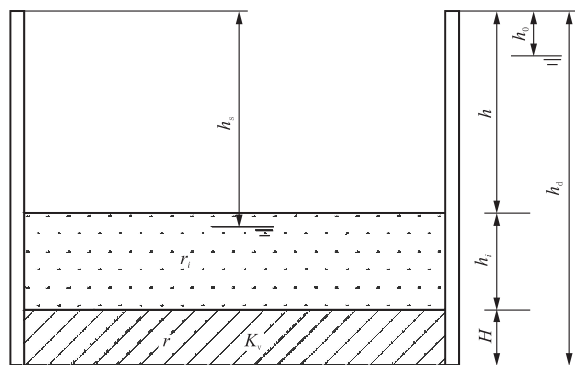


图2 计算模型

1.2.1 水平止水帷幕底埋深的确定

水平止水帷幕底埋深确定原则:水平帷幕形成后,帷幕底部承压水在基坑开挖至底过程中无需

降压。水平止水帷幕底埋深可按公式(1)和(2)计算。

$$F_s = \frac{P_s}{P_w} = \frac{\gamma_i(h_d - H - h) + \gamma H}{\gamma_w(h_d - h_0)} \quad (1)$$

$$h_d = \frac{\gamma_i(H + h) - \gamma H - F_s \gamma_w h_0}{\gamma_i - F_s \gamma_w} \quad (2)$$

式中: P_s ——水平止水帷幕底面至基底面之间的上覆土压力, kPa; P_w ——初始状态下(未减压降水时)水平止水帷幕底面的承压水顶托力, kPa; h ——基坑开挖深度, m; H ——水平止水帷幕厚度, m; h_0 ——初始水位埋深, m; h_d ——水平止水帷幕底埋深, m; γ_i ——水平止水帷幕顶面至基底面间各土层的平均重度, kN/m³; γ_w ——水的重度, kN/m³; γ ——止水帷幕体的重度, kN/m³; F_s ——安全系数, 一般取 1.00~1.10。

1.2.2 基坑涌水量的确定

在不考虑竖向地连墙的水平渗漏及降雨补给量, 只考虑水平帷幕底的垂向补给的条件下, 基坑涌水量可按公式(4)计算。

$$v = k_v(h_s - h_0)/H \quad (3)$$

$$Q = vS = k_v S(h_s - h_0)/H \quad (4)$$

式中: Q ——基坑涌水量 m³/d; v ——地下水渗流速率, m/d; S ——基坑面积, m²; k_v ——改良后的垂向渗透系数, m/d; h_0 ——水平止水帷幕底部含水层水位埋深, m; h_s ——水平止水帷幕上部含水层水位埋深, m。

1.2.3 水平止水帷幕厚度的确定

水平止水帷幕厚度因涉及施工工艺差异、不同土层改良差异等因素的影响, 目前尚无较好的计算方法, 一般以常规经验值考虑, 如 3~8 m, 厚度的取值直接影响基坑涌水量的大小, 因此也可通过预设基坑涌水量大小的方法, 确定止水帷幕的厚度, 如式(5)计算。

$$H = k_v S(h_s - h_0)/Q \quad (5)$$

2 工程实践

2.1 工程概况

福州某站为地下 2 层岛式车站, 框架结构。车站总长 200 m, 标准段宽 19.7 m, 车站标准段基坑深度约为 16.2 m。车站主体结构基坑采用明挖顺筑法施工, 主体围护结构采用厚度为 800 mm 的地下连续墙+4 道内支撑的方案, 第一道为钢筋混凝

土支撑, 其余均采用钢管支撑。为进一步控制施工风险, 车站基坑根据地质差异及施工条件分为 3 个基坑施工, 基坑工程性质如表 1 所示。

表 1 基坑工程性质

工程部位	地面标高/m	基坑底标高/m	围护(800 m 厚地连墙)底标高/m
轴 1~3	西仓	-11.60	-30.85
轴 3~6		-9.89	-28.50~-28.30
轴 6~11		-9.34	-28.30~-28.09
轴 11~19		-9.19	-31.09~-31.58
轴 19~23	东仓	-9.08	-31.58
轴 23~25		-10.65	-31.58

2.2 环境条件

车站周边环境复杂, 车站南侧分布的建筑物主要有省粮油进出口公司宿舍(砖 7.5F)和渠城新村(砖 7.5F); 北侧有孝辉旅社(砖 3F)、后浦安置房(砼 6F)、金洲小区(砖 8F)、肿瘤医院(砼 11F)以及省粮食储备仓库(砼 2F)等, 其中孝辉旅社距离基坑 10 m, 条石基础位于 1 号出入口处, 主体施工期间不拆迁; 靠近车站东侧端头井有一约 6 m 宽内河。车站西侧端头距离五里亭立交桥匝道 60 m, 五里亭立交桥车流量较大, 且车站基坑开挖影响范围内管线较多, 通讯管线、电力管、雨污水管、给水管、煤气管等工程管线密集。根据《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307-2012), 结合本段工程特点和环境特点, 本车站环境风险为 1 级。

2.3 水文地质条件

本站位置的岩土层包括: ①₂ 杂填土, ②₄₋₁ 淤泥、②₄₋₄ 淤泥夹砂、②₄₋₅ 淤泥质中细砂, ③₁ 粉质粘土、③₃ 中粗砂、③₄ 淤泥质土、③₅ 淤泥夹砂、③₈ 卵石(砂质填充)和⑦₁ 强风化花岗岩(砂土状)。车站区域典型地质剖面如图 3 和图 4 所示, 车站区地层起伏大, 地质条件复杂, 车站左右线地质剖面极不对称, 含水层参数如表 2 所示。

专项抽水试验期间, 浅部淤泥层水位标高 4.54~4.76 m, ②₄₋₄ 层水位标高 3.10 m, ②₄₋₅ 层水位标高 3.11~3.62 m, ③₃ 层承压水水位标高为 2.87~3.15 m, ②₄₋₅ 层水位标高略高于③₃ 层水位标高, 且东区观测井水位标高略高于西侧, 本站地下水总的流向是从东北往西南方向排泄。

本场区水文地质条件复杂, 车站西侧②₄₋₅ 和③₃ 层水力联系密切, 车站东侧两者间因③₁ 粘土土的存在上下直接水力联系较弱, 但随着时间的延长,

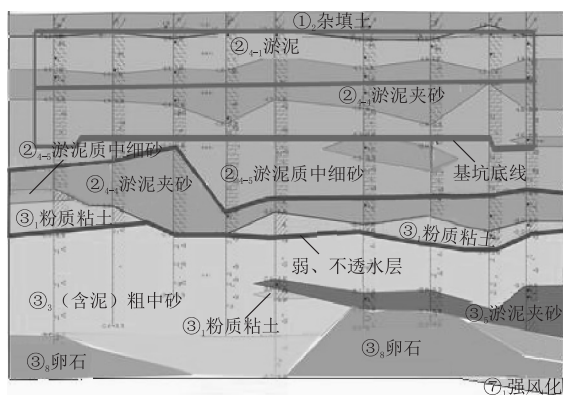


图3 典型地质剖面(左线)

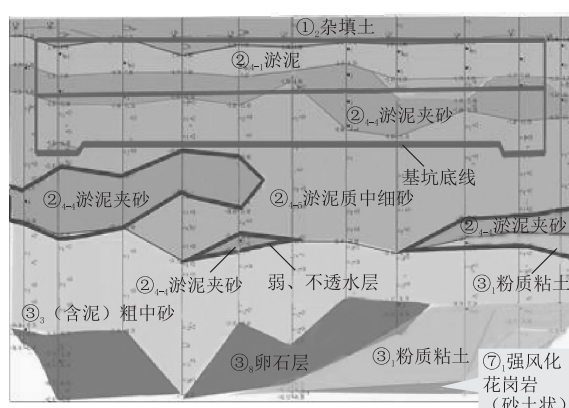


图4 典型地质剖面(右线)

表2 含水层参数汇总

含水层	含水层土性	静止水位标高/m		$K_V/(m \cdot d^{-1})$	$K_H/(m \cdot d^{-1})$	$S_s/(L \cdot m^{-1})$
		场区一	场区二			
② ₄₋₄	淤泥夹砂	3.10		1.00×10^{-3}	9.00×10^{-2}	1.00×10^{-5}
② ₄₋₅	(含泥)细中砂	3.11~3.45	3.62	0.50	6.00	9.00×10^{-5}
③ ₃	粗中砂	2.87~2.91	3.15~3.17	2.00	12.80	1.50×10^{-4}

因水文天窗的原因两者的水力相关性大。

②₄₋₄层、②₄₋₅层与③₃层因降水引起的变形差异大,同时本地区地层起伏大,各土层厚度变化大,致使除总沉降量较大外,后期不均匀沉降也将明显,对建(构)筑物的破坏大。

鉴于本地区水文地质条件复杂及环境复杂,经过专项水文地质试验分析后,确认采用水平止水帷幕进行封底,以减少坑内降水对周边环境的影响。

2.4 水平止水帷幕无压性地下水控制设计

根据公式(2)计算可得到表3中不同安全系数下的临界止水帷幕底埋深,在此基础上依据实际地层起伏、工程风险、止水帷幕施工搭接等问题确定最终设计水平止水帷幕底埋深。为有效控制水平止水帷幕的施工效果,止水帷幕厚度定为5m,采用 $\phi 1100@850$ mm三重管高压旋喷桩。

表3 基坑底抗突涌稳定性验算

区段	工程部位	初始水位埋深/m	坑底埋深/m	临界止水帷幕底 h_d/m			设计水平止水帷幕底埋深/m	备注
				$F_s=1.00$	$F_s=1.05$	$F_s=1.10$		
西基坑	1~3轴(端头)	3.55	18.30	37.64	40.34	43.52	37.55	
	3~6轴	3.55	16.59	33.41	35.78	38.56	35.20	
	6~11轴	3.55	16.04	32.05	34.32	36.97	35.00	与端头搭接3m过渡
中基坑	11~19轴	3.55	15.89	31.68	33.92	36.53	37.79	风险最大段加大安全系数
东基坑	19~23轴	3.55	15.78	31.41	33.62	36.22	38.28	
	23~25轴(端头)	3.55	17.35	35.29	37.81	40.76	38.28	基本隔断含水层

水平止水帷幕所处地层的垂向渗透系数原为2m/d,设计时考虑地层渗透性得到有效改善,按0.1m/d考虑(渗透性改良按95%考虑),依据公式(4),基坑各分坑的基坑涌水量设计指标如表4所示。西坑、中坑设计基坑涌水量为500m³/d考虑,东坑设计基坑涌水量为250m³/d考虑,当实际基坑涌水量小于设计基坑涌水量时,认为止水帷幕施工效果达到预期。

2.5 降水设计

表4 基坑涌水量计算

区段	S/m^2	h_0/m	h_s/m	H/m	$k_v/(m \cdot d^{-1})$	$v/(m \cdot d^{-1})$	$Q/(m^3 \cdot d^{-1})$	基坑涌水量设计指标/(m ³ ·d ⁻¹)
西基坑	1522.00	3.55	18.80	5.00	0.10	0.31	464.21	500
中基坑	1686.00	3.55	16.50	5.00	0.10	0.26	436.67	500
东基坑	855.00	3.55	17.85	5.00	0.10	0.29	244.53	250

本工程主要软弱土层为第②₄₋₁层深灰色淤泥层和第②₄₋₄层深灰色淤泥夹砂层,该两层土含水量高、孔隙比大,土质软弱,高压缩性,具有高灵敏度、

低强度的特点。若不采取措施降低土层含水量,将造成开挖面软弱、积水等不良现象,影响开挖面上的施工,较大的含水量也使得土体自立性差,影响开挖效率。

对于本工程,对基坑开挖造成主要影响的承压含水层为②₄₋₅层和③₃层。在基坑开挖过程中,随着开挖深度的增加,承压水上覆土压力变小,当承压水顶托力大于上覆土压力时,承压水突涌便成为基坑开挖过程中最大的风险之一。

主体基坑内部,针对②₄₋₅层,由于基坑开挖已

经揭露②₄₋₅层,对②₄₋₅层进行直接疏干,针对③₃层,加固底部下不需考虑承压水降水。由于水平止水帷幕施工过程中对上部土层扰动,②₄₋₅层和③₃层不存在稳定的隔水层,因此考虑不单独布设③₃层深井。

基坑周边环境复杂,布置②₄₋₅层和③₃层坑外观测井,用于监测坑外承压水位变化,检验基坑围护止水效果,并实时分析基坑开挖期间的水位变化,进行风险预警。降水井平剖面如图 5 和图 6 所示。

2.6 水平止水帷幕功效分析及小结

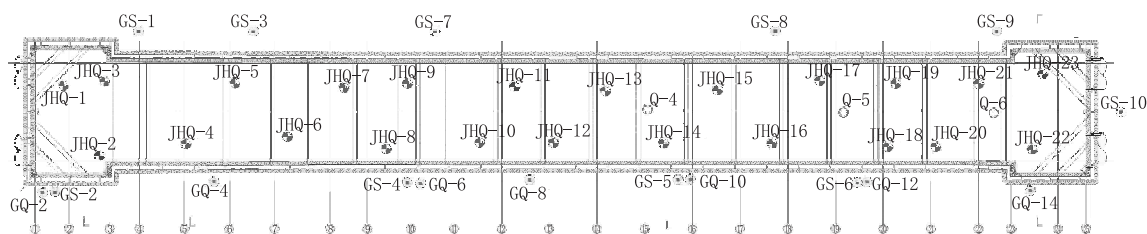


图 5 降水井平面布置

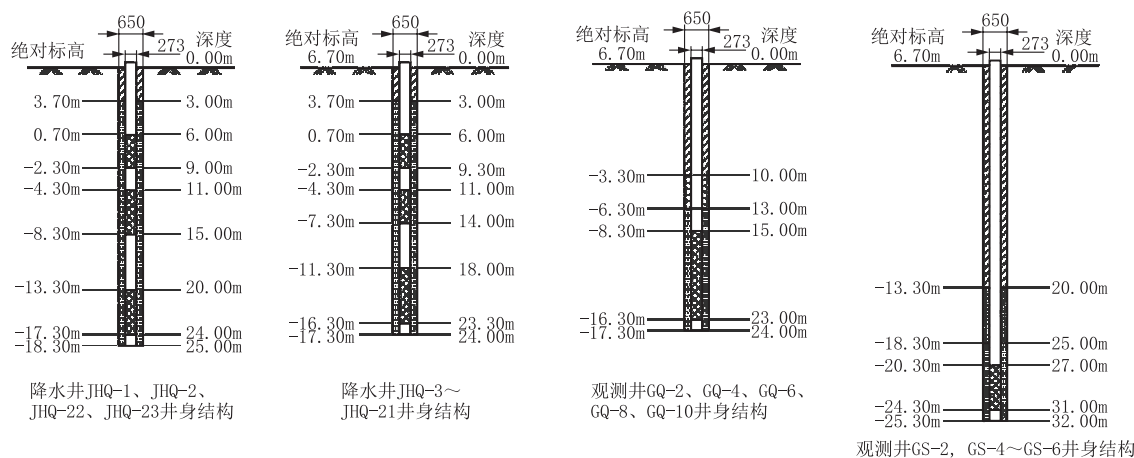


图 6 降水井结构示意图

为检验地连墙和水平止水帷幕的防渗效果,分别对西、中、东基坑进行了封闭性试验。实际基坑涌水量如图 7 和表 5 所示。

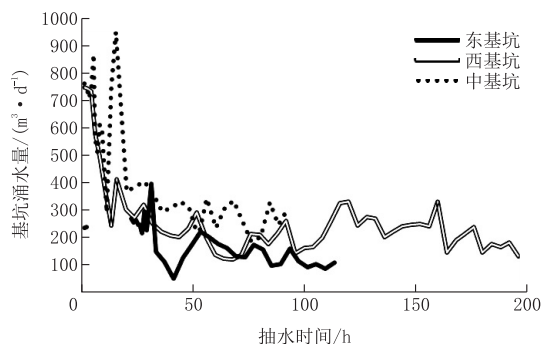


图 7 各基坑涌水量时间变化趋势

西基坑坑内水位降深达到 13 m 时,基坑实际抽水量为 179.55 m³/d,降水按需降水时,基坑涌水量为 277.00 m³/d,小于设计指标 500 m³/d,达到预期设计指标,同时反算垂向渗透系数可得经过水平止水帷幕的施工,该处渗透性改良效果达到 97.20%。

中基坑坑内水位降深达到 17 m 时,基坑实际抽水量为 207.70 m³/d,降水按需降水时,基坑涌水量为 202.27 m³/d,小于设计指标 500 m³/d,达到预期设计指标,同时反算垂向渗透系数可得经过水平止水帷幕的施工,该处渗透性改良效果达到 97.85%。

表5 水平止水帷幕功效分析

部位	初始水位 埋深/m	降水后坑内稳 定水位埋深/m	降水后坑外 水位降深/m	实际抽水量/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	k_v 反算值/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	原状地层 k_v 值/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	改良效 果/%	基坑涌水量设计 指标/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	修正后的基坑涌 水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
西基坑	3.55	13.00	0.16	179.55	0.056	2	97.20	500	277.00
中基坑	3.55	17.00	0.18	207.70	0.043	2	97.85	500	202.27
东基坑	3.55	17.07	0.05	100.29	0.041	2	97.95	250	107.27

东基坑坑内水位降深达到 17.07 m 时,基坑实际抽水量为 $100.29 \text{ m}^3/\text{d}$,降水按需降水时,基坑涌水量为 $107.27 \text{ m}^3/\text{d}$,小于设计指标 $250 \text{ m}^3/\text{d}$,达到预期设计指标,同时反算垂向渗透系数可得经过水平止水帷幕的施工,该处渗透性改良效果达到 97.95%。

同时坑内抽水时,坑外水位降深 0.05~0.18 m,坑外水位降深小,地连墙及水平止水帷幕的止水性好。

3 结论与建议

本文简述了水平止水帷幕无压性地下水控制设计的原理,并在某地铁车站的地下水控制设计中进行了应用,通过抽水试验及工程实践,表明水平止水帷幕作为地下水控制设计的措施之一是有效的,主要结论及建议如下。

(1)本工程在粗中砂地层中(埋深最深 38 m 左右)采用超高压旋喷桩工艺进行土性改良,效果良好,垂向渗透性改良效果达到 97.2%~97.95%。随着基坑开挖深度的增加,水平止水帷幕底深度越来越深,如基坑开挖深度为 30 m 初始水位埋深 5 m 的基坑,其水平止水帷幕底埋深一般会达到 61 m,其施工工艺的要求将越来越高,可尝试采用 RJP 工法或 MJS 工法,另对于不同的地层不同工艺下的改良效果应进行专项试验,特别如卵石地层。

(2)常规采用钻孔取心检测水平止水帷幕渗漏的方法,属于为检测而检测,如取心孔封闭不良,大大降低水平止水帷幕的功效,甚至可能给基坑开挖带来巨大的风险,对于类似工程的检测建议采用坑内抽水试验坑外观测的方法进行封闭性渗漏检测试验,在通过抽水试验不能满足预期目的的情况下,建

议再采用钻孔取心分析土性改良问题。

(3)与竖向止水帷幕类似,随着基坑的开挖,围护的变形,止水帷幕局部可能出现渗透加大或直接出现渗漏的风险,因此在实际施工期间,建议针对坑内外水位进行实时监测,随时预警可能出现的风险。

参考文献:

- [1] 卢礼顺,刘建航,刘庆华,等.上海某地铁车站深基坑周围土体沉降研究[J].岩土工程学报,2006,28(S1):1764—1768.
- [2] 陆建生,崔永高,缪俊发.基坑工程环境水文地质评价[J].地下空间与工程学报,2011,7(1):1506—1513.
- [3] 唐业清.基坑工程事故分析与处理[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [4] 蒋红星,李龙,冯芳.深基坑支护工程中的地下水防治问题研究[J].中国煤田地质,2003,(1):41—43.
- [5] 吴林高,姚迎.连续墙周边的地下水渗流特征及数值模拟[J].上海地质,1995,(3):8—14.
- [6] 朱雁飞.深基坑工程中承压水危害的综合治理方法(上)[J].上海建设科技,2008,(4):16—19.
- [7] 王建秀,郭太平,吴林高,等.深基坑降水中墙-井作用机理及工程应用[J].地下空间与工程学报,2010,6(3):564—570.
- [8] 陆建生.悬挂式帷幕基坑地下水控制中的尺度效应[J].工程勘察,2015,(1):54—61.
- [9] 陆建生.深基坑工程回灌管井设计若干问题探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):72—76.
- [10] 陆建生.基坑工程管井回灌优化设计探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):59—67.
- [11] 陆建生.基于环境控制的深基坑工程管井回灌设计分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):82—89.
- [12] 侯景岩,魏连伟.用降水回灌法改善北京地铁“复八线”工程地质环境和施工条件[J].水文地质工程地质,1997,(3):38—41.
- [13] 龙莉波.悬挂式围护深基坑外地下水回灌技术的研究[J].地基基础,2014,(4):327—329.
- [14] 陆建生,付军,许旭.紧邻地铁深基坑地下水抽灌一体化设计实践[J].地下空间与工程学报,2015,(1):251—258.
- [15] 陆建生,潘伟强,林长荣,等.深基坑承压水抽灌一体化设计及工程应用[J].施工技术,2014,(1):48—52.