

考虑止水帷幕插入比的降水井滤管参数设计优化研究

帅红岩¹, 李光诚^{1*}, 黄俊杰², 邓敏¹, 王建筱¹

(1. 湖北省城市地质工程院, 湖北 武汉 430050; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:以武汉市某基坑工程实例为背景,基于承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降两大观测指标,采用有限元软件ABAQUS建立群井降水三维数值计算模型进行了数值模拟分析,通过设置多组计算工况,对在悬挂式止水帷幕不同插入比 λ 条件下,降水井不同滤管长度 L 及滤管埋深 H 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响规律进行了研究。研究表明:插入比 λ 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响要远大于降水井滤管长度 L 及滤管埋深 H 的影响。在止水帷幕插入比 $\lambda=0.4\sim 0.6$ 时,通过改变滤管长度 L 及滤管埋深 H 来提高承压层坑内水位降深或降低承压层坑外水位降深具有较大的空间。止水帷幕插入比 $\lambda>0.6$ 后起到较好的隔水效果,滤管埋深 H 宜位于承压含水层顶部,滤管长度 L 不宜超过0.4倍的承压含水层厚度 M 。

关键词:悬挂式止水帷幕;插入比;降水井;滤管参数;数值模拟

中图分类号:TU46⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)06-0141-11

Study on parameter design optimization for dewatering well screen considering waterproof curtain insertion ratio

SHUAI Hongyan¹, LI Guangcheng^{1*}, HUANG Junjie², DENG Min¹, WANG Jianxiao¹

(1. Hubei Institute of Urban Geological Engineering, Wuhan Hubei 430050, China;

2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Taking a foundation pit project in Wuhan as the background, based on two observation indicators of water level drop inside and outside the confined layer pit and surface settlement outside the pit, a three-dimensional numerical calculation model for group well precipitation was established using finite element software ABAQUS for numerical simulation analysis. By setting multiple calculation conditions, under the conditions of different insertion ratios of suspended waterproof curtains λ , the influence of different well screen lengths L and filter tube burial depth H on the water level drop inside and outside the confined layer pit and surface settlement outside the pit was studied. The research results indicate that the impact of the insertion ratio λ on the water level drops inside and outside the confined layer pit and the surface settlement outside the pit is much greater than that of the length L and burial depth H of the well screen in the dewatering well. When the λ is between 0.4 and 0.6, there is a large space to increase the water level drop inside the confined layer pit or decrease the water level drop outside the confined layer pit by changing the length L and the burial depth H . When λ exceeds 0.6, it has a good water blocking effect. The buried depth H of the well screen should be located at the top of the confined aquifer, and the length of the well screen L should not exceed 0.4 times the thickness of the confined aquifer M .

Key words: suspended waterproof curtain; insertion ratio; dewatering well; parameters of well screen; numerical simulation

收稿日期:2024-02-27; 修回日期:2024-05-14 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.06.018

第一作者:帅红岩,女,汉族,1982年生,高级工程师,水文地质工程地质专业,硕士,主要从事岩土工程设计施工及地质灾害防治等方面的工作,湖北省武汉市汉阳区298号地勘企业大楼29楼,157222602@qq.com。

通信作者:李光诚,男,汉族,1971年生,正高级工程师,注册岩土工程师,水文地质工程地质专业,硕士,主要从事岩土工程设计施工和地质灾害防治工作,湖北省武汉市汉阳区298号地勘企业大楼29楼,505960243@qq.com。

引用格式:帅红岩,李光诚,黄俊杰,等.考虑止水帷幕插入比的降水井滤管参数设计优化研究[J].钻探工程,2024,51(6):141-151.

SHUAI Hongyan, LI Guangcheng, HUANG Junjie, et al. Study on parameter design optimization for dewatering well screen considering waterproof curtain insertion ratio[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 141-151.

0 引言

随着我国经济的高速发展,城市地下空间开发规模逐年增大,深大基坑工程更是不断涌现。对于承压含水层富水且深厚的地区,为避免承压水在基坑开挖过程中对基坑底板造成隆起或突涌等危害,通常会采取降水措施。由于落底式止水帷幕会极大程度增加工程造价,悬挂式止水帷幕搭配中深降水井降水仍是目前深大基坑工程中较为通行的地下承压水控制方法。然而悬挂式止水帷幕不能完全隔绝基坑内外的水力联系,因此在降水过程中将不可避免地造成坑外地下水位的降低,进而引发土体产生固结变形,最终导致基坑周边一定区域的地表沉降,这将带来不良的社会影响和严重的经济损失。

针对落底式与悬挂式止水帷幕条件下的基坑降水渗流分析以及降水对基坑周边环境的影响研究已较为常见。冯晓腊等^[1]、肖铭钊等^[2]通过建立三维渗流有限元模型、编制三维有限元计算程序对武汉长江隧道武昌盾构井深基坑降水工程实例进行了模拟计算,并将有无悬挂式止水帷幕两种工况下的水头降深计算结果与实际存在悬挂式止水帷幕的实际监测值进行了对比分析,定量说明了悬挂式止水帷幕对基坑降水的影响。李瑛等^[3]建立了悬挂式止水帷幕条件下坑内减压抽水量与坑外承压水头降深的关系式,并利用参数分析研究了承压含水层渗透系数各向异性、基坑平面面积、止水帷幕插入深度等因素对减压降水的影响规律。李光明等^[4]、程芸等^[5]、张哲斐等^[6]以基坑降水工程实例为背景,采用有限元软件对工程实例进行了数值模拟,模拟计算结果与监测数据基本吻合。随后在该模拟计算的基础上对止水帷幕插入承压含水层深度、降水井数量、降水井抽水流量、井点布置、滤管长度及滤管埋深等多种因素在降水控制中所发挥的作用进行了深入研究。冯晓腊等^[7-8]、蔡娇娇等^[9]、张东升等^[10]通过开展基坑现场群井抽水试验与连通试验,分析研究了落底式止水帷幕条件下基坑涌漏量的组成及其渗流规律,总结了落底式止水帷幕建立前后试验井流量及降深变化的规律,定义了落底式止水帷幕综合止水系数,对落底式止水帷幕的止水效果进行了定量评价。丁洲祥等^[11]采用Biot固结理论分析了两种封闭式止水帷幕发生漏水意外时对地下水位和坑外土体位移的影响。分析

结果表明,漏水部位周围土体的渗流等势线较为密集,渗流速度较大,容易诱发扩大破坏;竖向封闭式止水帷幕漏水会引发坑边土体沉降、地表土体侧移相对较大、水位下降迅速。阎波等^[12]针对超大型基坑降水设计中采用的部分悬挂、部分落底式止水帷幕,利用数值模拟对比分析了不同落底率下深基坑降水的地下水控制效果及其对邻近地铁隧道的影响。王建秀等^[13-15]将墙-井作用划分为四种模式,基于墙-井作用改变水流方向、增加渗流路径和减小过水断面,利用地层渗透各向异性实现了对水位和沉降的控制。通过改变降水井滤管与止水帷幕的水平及竖向距离来研究地铁基坑降水对基坑周围环境的影响,而后基于研究结果对降水控制措施进行了优化。李福林^[16]通过现场边施工降水井边开展原位抽水试验,借助三维数值法,科学调整降水方案,在总井数增加不多的情况下,将坑内水位降至基底以下。邵晨晨^[17]在止水帷幕无法隔断承压水层,地质条件复杂情况下采用抽灌一体化降水方案,通过加长止水帷幕深度,增加承压水绕流路径,有效降低坑内降承压水对抗外的影响。

然而,以往的各项研究主要集中在落底式与悬挂式止水帷幕条件下基坑降水过程中的地下水渗流分析与基坑降水开挖对周边环境的影响分析上,鲜有对于在止水帷幕不同插入比 λ 条件下,降水井不同滤管长度 L 及滤管埋深 H 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响规律的研究。本文基于某一基坑工程实例,利用ABAQUS有限元分析软件,在该工程实例数值复现的基础上,对在止水帷幕不同插入比 λ 条件下,降水井不同滤管长度 L 及滤管埋深 H 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响规律进行了研究,得到的研究结论对基坑降水止水帷幕及降水井滤管参数的设计优化具有一定的参考意义。

1 工程概况

1.1 工程简介

湖北福星惠誉三眼桥置业有限公司拟在武汉市江岸区投资建设某项目,该项目位于花桥街道三眼桥路以北、黄孝河路以西,由K14和K15二个地块构成。其中一期K14地块基坑工程已完工,本文所依托的工程实例为二期K15地块基坑工程。该基坑呈“7”字形,东西向最长约130 m,南北向最长约

110 m, 基坑周长约 480 m, 开挖面积约 9200 m², 最大开挖深度为 12.75 m。基坑采用钻孔灌注桩结合 2 层混凝土内支撑的支护形式, 布撑方式采用平行对顶撑加角撑, 2 层混凝土内支撑的布设深度分别为 1 m 和 5 m。基坑侧壁采用 800 mm 厚的 CSM 水泥土搅拌墙作为悬挂式止水帷幕, 止水帷幕深度为 40 m。基坑采用深井降水法降低承压水位, 降水井共 23 口, 其滤管埋深为 15 m, 滤管长度为 15 m; 观测井共 3 口, 其滤管埋深为 15 m, 滤管长度为 5 m。降水总时长为 120 d, 单井抽水流量为 80 m³/h。基坑场地内降水井、观测井及地表沉降监测点的平面布置详见图 1。

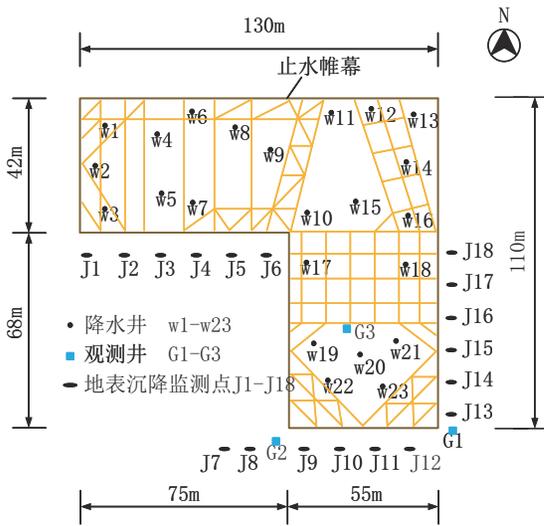


图 1 基坑场地平面布置

Fig.1 Layout plan of the foundation pit site

1.2 场地工程地质条件

本场地地势平坦, 地貌上属于长江 I 级阶地。依据勘察资料, 本场地在勘探深度 71.30 m 的范围内自上而下分布有: 厚度不一的杂填土(Q^{ml}); 第四系全新统(Q₄^{al})冲积成因的粘性土、砂土, 其具有颗粒自上而下逐渐变粗的沉积规律, 即典型的二元结构; 第三系—白垩系(K—E)强风化泥岩和砾岩。各岩土层埋藏分布的具体情况详见图 2。

本场地地下水类型可分为 3 类, 自上而下分别为: 上层滞水、孔隙承压水、基岩裂隙水。上层滞水赋存于①层杂填土, 一般受大气降水及人工排水补给, 水位水量随季节而变化。勘察期间测得上层滞水稳定水位埋深为 0.6~2.5 m。孔隙承压水赋存于下部砂土层⑤₁~⑤₃, 与长江有密切的水力联系, 水

层号	岩性	B1 20.78 埋深(标高)/m		B2 20.47 埋深(标高)/m	
		埋深(标高)/m	埋深(标高)/m	埋深(标高)/m	埋深(标高)/m
①	Q ^{ml} 杂填土	19.28 1.50	19.47 1.00	2.40(18.07)	
②	Q ₄ ^{al} 淤泥质粉质粘土	3.00(17.78)		4.40(16.07)	
③	Q ₄ ^{al} 粉质粘土	6.00(14.78)			
⑤ ₁	Q ₄ ^{al} 粉细砂	7.20(13.58)		7.50(12.97)	
⑤ ₂	Q ₄ ^{al} 粉细砂	12.70(8.08)		12.10(8.37)	
⑤ ₃	Q ₄ ^{al} 细砂	31.10(-10.32)		30.60(-10.13)	
⑥ ₁	K-E 强风化泥岩	43.00(-22.22)		42.10(-21.63)	
⑥ ₂	K-E 较破碎砾岩	45.00(-24.22)		50.60(-30.13)	
⑥ ₃	K-E 较完整砾岩	49.30(-28.52)		60.30(-39.52)	
		60.30(-39.52)		60.60(-40.13)	

图 2 典型地质剖面

Fig.2 Typical geological profile

量丰富, 勘察期间承压水位位于地面以下 7 m 左右, 是基坑降水的主要含水层。基岩裂隙水赋存于场地基岩裂隙中, 水量很小, 勘察期间未能测得其水位。

2 数值模型的建立与验证

2.1 几何模型的建立

依据该工程实例建立群井降水三维有限元数值计算模型, 有限元模型的总体视图及局部视图详见图 3、图 4。根据勘察期间的抽水试验资料, 考虑降水影响半径, 模型的平面计算范围选取 800 m × 800 m 以消除边界的影响, 模型的计算深度取为 55 m。止水帷幕厚度为 800 mm, 深度为 40 m。由于该工程实例中降水井数量较多, 为利于网格的划分和计算的收敛, 模型中仅建立降水井实体, 未建立观测井实体, 降水井的结构及井位布置与工程实例一致。

2.2 材料参数的选取

依据勘察资料, 将计算模型中的土体概化为 7 层, 其中潜水层(杂填土)和弱透水层(粘土)采用剑桥模型, 承压含水层(砂土)采用摩尔-库伦模型, 强风化泥岩采用线弹性本构模型。整个模型的土层

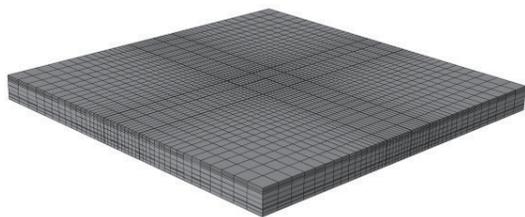


图3 群井降水有限元模型总体视图

Fig.3 Overall view of the finite element model for drawdown in group well

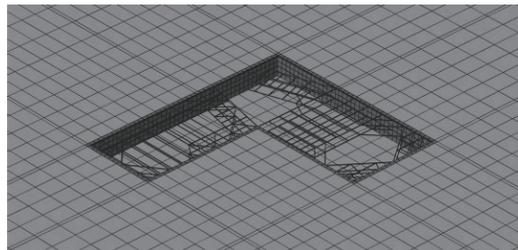


图4 群井降水有限元模型局部视图

Fig.4 Partial view of the finite element model for drawdown in group well

分布及计算参数详见表1。支护桩墙、内支撑及止水帷幕亦采用线弹性本构模型,其中支护桩墙及内支撑密度取为 2.5 g/cm^3 ,弹性模量取为 $3\times 10^7\text{ kPa}$,

泊松比取为0.2;止水帷幕密度取为 1.8 g/cm^3 ,弹性模量取为 $1.5\times 10^4\text{ kPa}$,泊松比取为0.2。

表1 土层分布及计算参数

Table 1 Soil distribution and calculated parameters

编号	土层名称	厚度/ m	饱和重 度 $\gamma_{\text{sat}}/$ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	泊松 比 ν	初始孔 隙比 e_0	渗透系 数 $k/$ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	弹性 模量 E/kPa	有效内 摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	有效粘 聚力 $c/$ kPa	压缩曲 线斜率 λ	回弹曲 线斜率 κ	临界状 态压力 比 M	超固 结比 OCR
1	杂填土	3	17.8	0.25	1.05	6.0×10^{-6}				0.03692	0.004615	0.92	1.01
2	淤泥质粉质粘土	3	17.2	0.3	1.19	3.0×10^{-8}				0.04573	0.005717	0.95	1.08
3	粉质粘土	2.5	18.1	0.3	0.971	5.0×10^{-7}				0.03826	0.004782	0.96	1.07
4	粉质粘土夹粉土	3.5	17.9	0.3	1	9×10^{-7}				0.03754	0.004981	0.96	1.06
5	粉细砂	20	18.1	0.25	0.88	1×10^{-4}	25000	33	5				
6	细砂	10	18.3	0.25	0.89	1×10^{-4}	32000	36	5				
7	强风化泥岩	13	18.9	0.3	0.91	6.0×10^{-6}				0.03692	0.004615	0.92	1.01

2.3 边界条件及网格划分

模型顶部设置零孔压边界,为自由排水边界;模型四周设置水平方向上的位移约束,为定水头边界;模型底部设置水平和竖直方向上的位移约束,为隔水边界。土体与止水帷幕、支护桩墙之间采用摩擦接触,摩擦系数 μ 取为0.2。土体与支护桩墙、止水帷幕的网格类型均采用实体孔压单元C3D8P,内支撑的网格类型采用梁单元。整个模型共划分有23954个六面体单元,32116个节点,2104个梁单元。

2.4 降水开挖模拟

依据该工程实例,降水开挖模拟共分为4个计算步。前2步仅开挖;第3步仅降水;第4步降水开挖同时进行,降水持续至土体开挖到坑底并施做好基坑底板。依据勘察资料,以地表标高为零点(地表 $\pm 0.00\text{ m}$),本模型承压含水层初始水头取为模型顶面(地表 $\pm 0.00\text{ m}$)以下7 m。对于开挖步,每一步均开挖至对应层位的内支撑轴线标高以下0.5

m,以便于支撑的安装。由于支护桩墙及止水帷幕的设置于降水开挖前已经完成,且与降水开挖间隔了足够长的时间,故不考虑其安装施做过程对降水开挖的影响。有限元计算步的具体内容详见表2。

对于基坑土体开挖,将被开挖部分的单元从模型中移除,然后在开挖面上施加应力释放荷载,即完成土体开挖的模拟。对于两层内支撑,由于其在基坑开挖前并没有进行安装,故需要在计算前将已建好的内支撑部件进行移除,待基坑开挖到相应深度后再将对应层位的内支撑进行激活。对于基坑降水,根据地下水类型的不同,计算模拟有所不同。对于潜水,通过设置开挖面水力边界来模拟潜水疏干,即令基坑开挖面上的总水头等于位置水头;对于承压水,通过在降水井滤管段的单元节点上设置流量边界来实现。

2.5 数值模型的对比较证

3口观测井水位降深的计算值与实测值的对比

表 2 有限元计算步
Table 2 Step for finite element calculation

计算部	计算部内容	施 工 内 容
Step 0	地应力平衡	
Step 1	仅开挖	坑内土体开挖至-1.5 m,安装第一层支撑
Step 2	仅开挖	坑内土体开挖至-5.5 m,安装第二层支撑
Step 3	仅降水	通过降水井持续抽水降低承压水位,坑内承压水位稳定降深维持在 11 m 左右
Step 4	降水开挖同时进行	降水井持续抽水,坑内承压水位稳定降深维持在 11 m 左右,坑内土体开挖至-12.75 m

见图 5,各地表沉降监测点沉降量的计算值与实测值的对比见图 6。由图 5 可见,从抽水开始,随着抽水时间的延续,坑内外观测井的水位降深均逐渐增大并最终趋于稳定,且坑内观测井的水位降深比坑外观测井的水位降深大了约 9~10 m,这表明该工程实例中悬挂式止水帷幕起到了明显的隔水作用。G1~G3 观测井水位降深的数值计算值与实际监测值在变化趋势上与量值分布规律上基本吻合,数值计算值与实际监测值的误差约在 3.63%~8.82% 之间。由图 6 可见,坑外各地表沉降监测点沉降量的数值计算值与实际监测值在变化趋势上与量值分布规律上亦较为吻合,数值计算值与实际监测值的误差约在 2.11%~7.54% 之间。以上结果表明所建立的计算模型可以较准确地反映出工程实例中承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的变化趋势与量值分布规律。

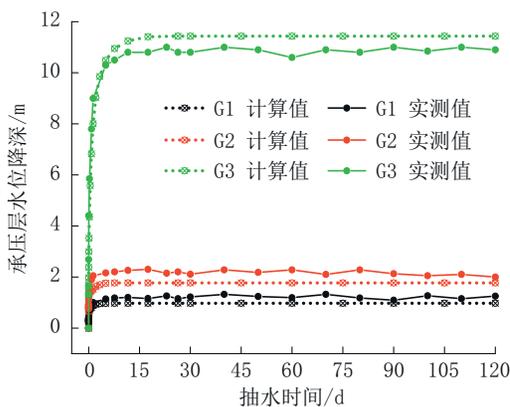


图 5 观测井水位降深对比验证

Fig.5 Comparative validations of the water level drops for the observation wells

3 优化研究与结果分析

3.1 研究方案与工况设计

以建立的数值模型为基础,在考虑止水帷幕不

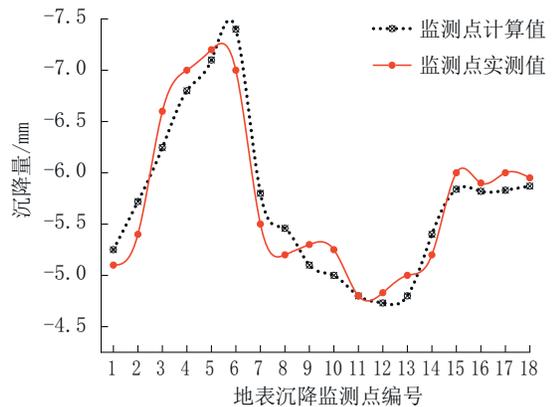


图 6 地表沉降监测点沉降量对比验证

Fig.6 Comparative validations of settlement in surface subsidence monitoring point

同插入比 λ 条件下,就降水井不同滤管长度 L 及滤管埋深 H 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响规律进行研究。止水帷幕插入比 λ (0、0.2、0.4、0.6、0.8) 定义为止水帷幕插入承压含水层深度与承压含水层厚度 M 的比值, L (6、12、18、24、30 m) 为滤管长度, H (12、18、24、30 m) 为滤管埋深。具体计算工况详见表 3 与表 4。此外,为利于各工况计算结果的对比分析,后文若不做特殊说明,各工况计算结果中的承压层坑内外水位降深观测点与坑外地表沉降观测点所处模型中的空间位置各自均一致,其中承压层坑内外水位降深观测点所在平面的深度为 21 m。各观测点位置信息详见图 7。

3.2 不同插入比 λ 条件下滤管长度 L 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响

不同插入比 λ 条件下承压层坑内外观测点水位降深与滤管长度 L 的关系分别如图 8、图 9 所示。由图 8 可见,对于任一确定的滤管长度 L ,当插入比 $\lambda \neq 0.6$ 时,坑内 A2 观测点的水位降深随插入比 λ 的增加缓慢增大;当插入比 $\lambda > 0.6$ 时,该观测点水位降深随插入比 λ 的增加快速增大。插入比 λ 从 0.6 增

表3 变滤管长度 L 及插入比 λ 的计算工况

Table 3 Calculation conditions for variable length of well screen and insertion ratio of the waterproof curtain

工况	滤管长度 L/m	滤管埋深 H/m	止水帷幕插入比 λ
1	6		
2	12		
1	3	12	0
4	24		
5	30		
1	6		
2	12		
2	3	12	0.2
4	24		
5	30		
1	6		
2	12		
3	3	12	0.4
4	24		
5	30		
1	6		
2	12		
4	3	12	0.6
4	24		
5	30		
1	6		
2	12		
5	3	12	0.8
4	24		
5	30		

加到0.8,该观测点水位降深至少增加了2.5 m,水位降深增长幅度至少在35.7%以上。对于任一确定的插入比 λ ,当滤管长度 $L \geq 0.4$ 倍的承压含水层厚度 M 时,坑内A2观测点的水位降深几乎不受滤管长度的影响;当滤管长度 $L > 0.4$ 倍的承压含水层厚度 M 时,该观测点水位降深随滤管长度 L 的增加逐渐减小。由图9可见,对于任一确定的滤管长度 L ,坑外A1观测点的水位降深随插入比 λ 的增加逐渐减小。当插入比 $\lambda \geq 0.6$ 时,对于任一确定的插入比 λ ,坑外A1观测点的水位降深随滤管长度 L 的增加逐渐减小;当插入比 $\lambda > 0.6$ 后,对于任一确定的插入比 λ ,该观测点的水位降深几乎不受滤管长度 L 的影响。

表4 变滤管埋深 H 及插入比 λ 的计算工况

Table 4 Calculation conditions for variable location of well screen and insertion ratio of the waterproof curtain

工况	滤管长度 L/m	滤管埋深 H/m	止水帷幕插入比 λ
1		12	
2		18	
1	12	24	0
3		30	
1		12	
2		18	
2	12	24	0.2
4		30	
1		12	
2		18	
3	12	24	0.4
4		30	
1		12	
2		18	
4	12	24	0.6
3		30	
1		12	
2		18	
5	12	24	0.8
3		30	
4		30	

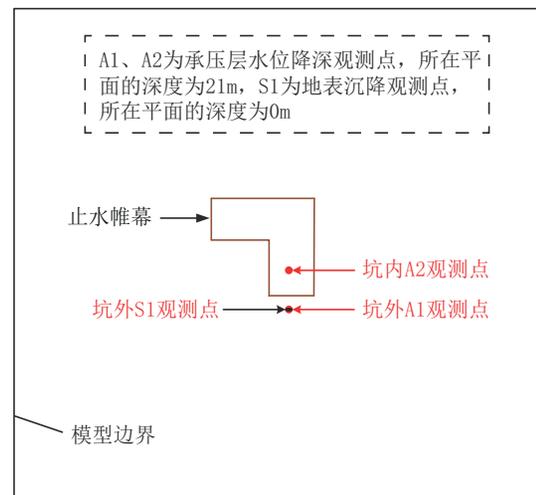


图7 观测位置示意

Fig.7 Schematic diagram of observation location

不同插入比 λ 条件下坑外地表沉降观测点沉降量与滤管长度 L 的关系如图10所示。由图10可见,对于任一确定的滤管长度 L ,S1观测点的沉降量随

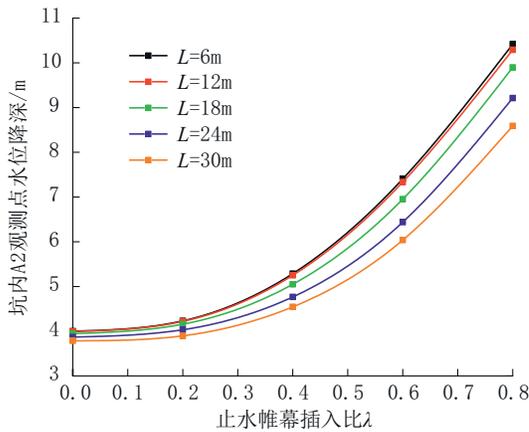


图 8 不同插入比条件下承压层坑内水位降深与滤管长度的关系

Fig.8 Relationships between the drawdown of the confined aquifer inside the foundation pit and the length of well screen with different insertion ratios

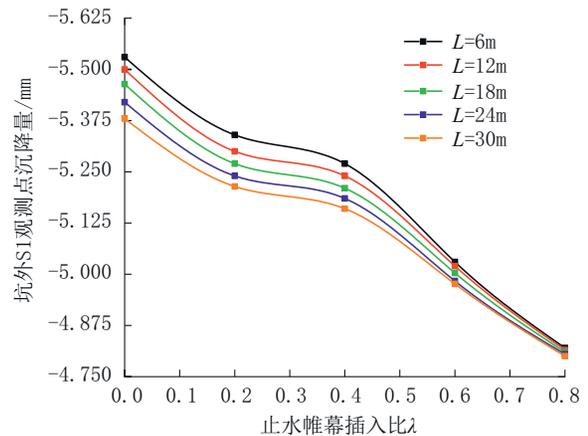


图 10 不同插入比条件下坑外地表沉降与滤管长度的关系

Fig.10 Relationships between the surface settlement outside the foundation pit and length of well screen with different insertion ratios

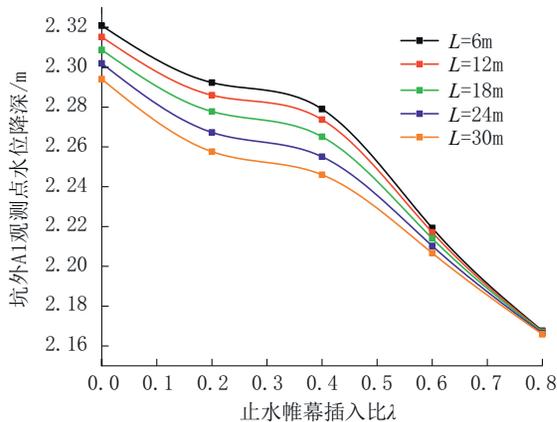


图 9 不同插入比条件下承压层坑外水位降深与滤管长度的关系

Fig.9 Relationships between the drawdown of the confined aquifer outside the foundation pit and the length of well screen with different insertion ratios

插入比 λ 的增加逐渐减小;对于任一确定的插入比 λ , S1 观测点的沉降量随着滤管长度 L 的增加逐渐减小。

对于任一确定的滤管长度 L :当止水帷幕插入比 λ 增加时,客观上会减小坑外地下水向坑内渗流的过水断面的面积,当降水井定流量抽水时,根据达西定律,渗流面积减小了,那么基坑内外水力梯度就会增加,即基坑内外水头差增大。同时由于坑外地下水不能穿越止水帷幕而直接沿水平方向进入坑内,必须三维绕流从过水断面处进入坑内,这将增大

坑外地下水向坑内降水区域补给的渗流路径,更大程度阻隔了承压含水层坑内外的水力联系,坑外地下水因此更难向坑内进行补给,致使降水井抽取的坑外水量减小,坑内水量增大,最终导致承压层坑内水位降深增大、坑外水位降深减小,坑外地表沉降也因此减小。图 11 为在滤管长度 L 及滤管埋深 H 均为 12 m 时,不同插入比 λ 条件下的深度为 21 m 处的承压层孔压分布云图。从图 11 中可以直观地看到,随着插入比 λ 不断增加,承压层坑内外水头差值不断增大。插入比 λ 越大,止水帷幕的隔水效果越好,坑内降水对抗外的影响也就越小。对于任一确定的插入比 λ :随着滤管长度 L 不断增大,滤管进水断面在竖向上不断增长直至充满整个承压含水层,坑外地下水从过水断面处进入坑内后,由必须沿竖向经过滤管底部一定厚度的土层才能渗流至滤管到可直接水平向渗流至滤管,使得坑外地下水向坑内降水区域补给的渗流路径减小,致使坑外水位降深减小,坑外地表沉降也因此减小。

从图 8~10 中均可看到,插入比 λ 要比滤管长度 L 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响更为突出。故在基坑降水设计中,宜首先确定止水帷幕插入比 λ ,而后再确定滤管长度 L 。止水帷幕插入比 λ 只有在大于 0.6 后才会有较好的隔水效果,故止水帷幕插入比 λ 宜大于 0.6。然而在插入比 λ 大于 0.6 的条件下,对于任一确定的插入比 λ ,由滤管长度 L 的改变致使承压层坑内 A2 观测点的水位降深

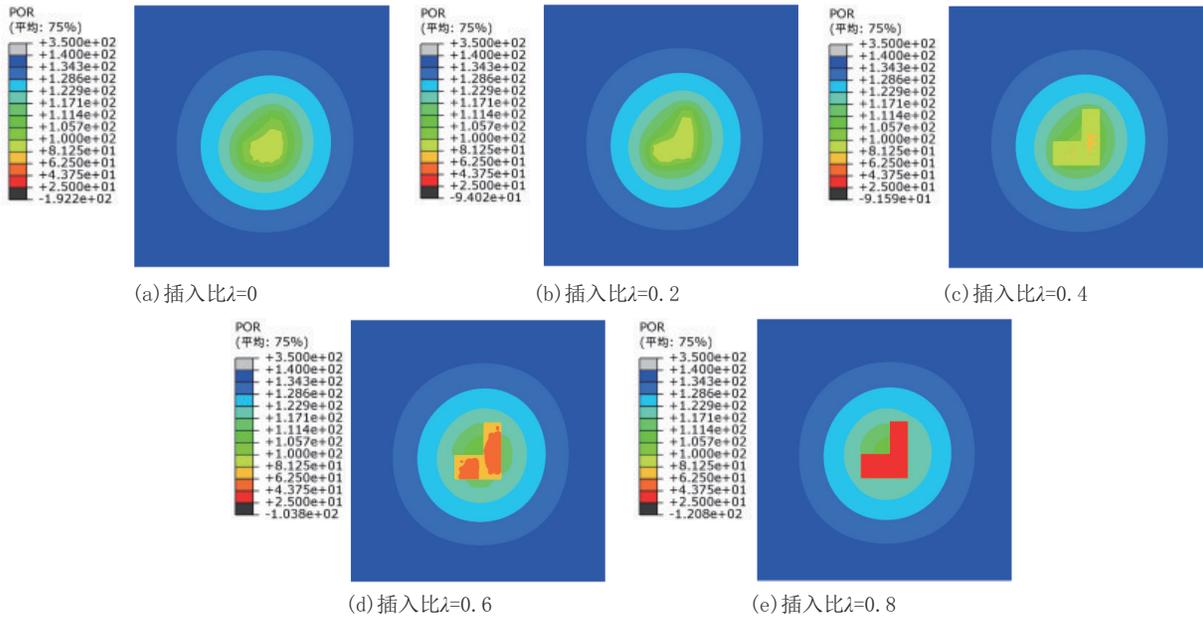


图 11 不同插入比条件下的承压层孔压分布云图

Fig.11 Cloud diagram of pressure distribution in the confined aquifer under different insertion ratio

量值变幅最多达 22.9%、承压层坑外 A1 观测点的水位降深量值变幅最多达 0.9%、坑外 S1 观测点的沉降量值变幅最多达 1.48%。基于这一对比分析,当插入比 $\lambda > 0.6$ 后,应首先考虑坑内降水要求,为提高坑内降水效率,滤管长度 L 不宜超过 0.4 倍的承压含水层厚度 M ,降水井滤管段宜完全内包于止水帷幕,滤管底部至帷幕底部应留有一定厚度的土层。

3.3 不同插入比 λ 条件下滤管埋深 H 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响

不同插入比 λ 条件下承压层坑内外观测点水位降深与滤管埋深 H 的关系分别如图 12、图 13 所示。由图 12 可见,对于任一确定的滤管埋深 H ,当插入比 $\lambda \geq 0.6$ 时,坑内 A2 观测点的水位降深随插入比 λ 的增加缓慢增大;当插入比 $\lambda > 0.6$ 时,该观测点水位降深随插入比 λ 的增加快速增大。插入比 λ 从 0.6 增加到 0.8,该观测点水位降深至少增加了 2.3 m,水位降深增长幅度至少在 46.8% 以上。对于任一确定的插入比 λ ,该观测点水位降深随着滤管埋深 H 的增加逐渐减小。由图 13 可见,对于任一确定的滤管埋深 H ,坑外 A1 观测点的水位降深随插入比 λ 的增加逐渐减小;对于任一确定的插入比 λ ,坑外 A1 观测点的水位降深随滤管埋深 H 的增加逐渐减小,且当插入比 $\lambda > 0.6$ 后,对于任一确定的插入比 λ ,滤管埋深 H 的改变对该观测点水位降深的影响相对

较小。

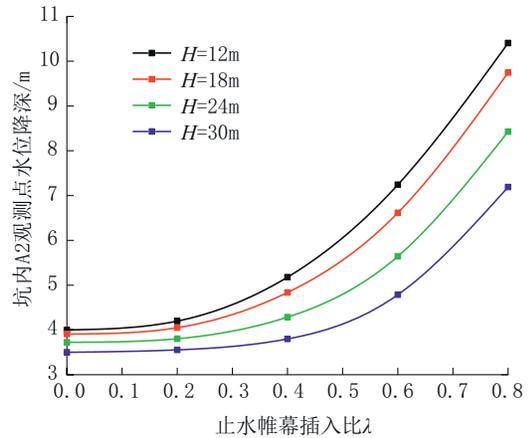


图 12 不同插入比条件下承压层坑内水位降深与滤管埋深的关系

Fig.12 Relationships between the drawdown of the confined aquifer inside the foundation pit and the burial depth of well screen with different insertion ratios

不同插入比 λ 条件下坑外地表沉降观测点沉降量与滤管埋深 H 的关系如图 14 所示。由图 14 可见,对于任一确定的滤管埋深 H ,S1 观测点的沉降量随插入比 λ 的增加逐渐减小;对于任一确定的插入比 λ ,S1 观测点的沉降量随着滤管埋深 H 的增加逐渐减小。

对于任一确定的插入比 λ :随着滤管埋深 H 不

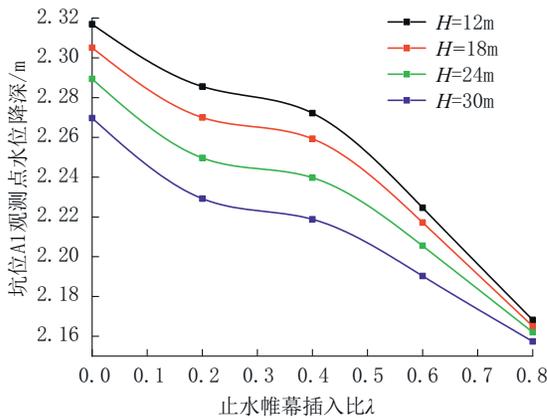


图 13 不同插入比条件下承压层坑外水位降深与滤管埋深的关系

Fig.13 Relationships between the drawdown of the confined aquifer outside the foundation pit and the burial depth of well screen with different insertion ratios

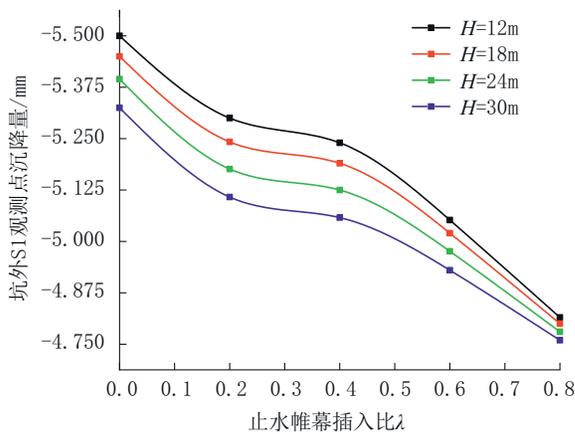


图 14 不同插入比条件下坑外地表沉降与滤管埋深的关系

Fig.14 Relationships between the surface settlement outside the foundation pit and the burial depth of well screen with different insertion ratios

断增大,滤管进水断面整体不断下移,坑外地下水从过水断面处进入坑内后,由必须沿竖向经过滤管底部一定厚度的土层才能渗流至滤管到可直接水平向渗流至滤管,使得坑外地下水向坑内降水区域补给的渗流路径减小,致使坑外水位降深减小,坑外地表沉降也因此减小。

从图 12~14 中均可看到,插入比 λ 要比滤管埋深 H 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响更为突出。故在基坑降水设计中,宜首先确定止水帷幕插入比 λ ,而后再确定滤管埋深 H 。止水帷幕插入比 λ 只有在大于 0.6 后才会有较好的隔水

效果,故止水帷幕插入比 λ 宜大于 0.6。然而在插入比 λ 大于 0.6 的条件下,对于任一确定的插入比 λ ,由滤管埋深 H 的改变致使承压层坑内 A2 观测点的水位降深量值变幅最多达 52.1%、承压层坑外 A1 观测点的水位降深量值变幅最多达 1.8%、坑外 S1 观测点的沉降量值变幅最多达 2.47%。基于这一对比分析,当插入比 $\lambda > 0.6$ 后,应首先考虑坑内降水要求,为提高坑内降水效率,滤管埋深 H 宜位于承压含水层的顶部。

3.4 不同插入比 λ 条件下承压层坑内外水位降深对滤管长度 L 及滤管埋深 H 的敏感性

为量化研究在不同插入比 λ 条件下承压层坑内外水位降深对滤管长度 L 及滤管埋深 H 的敏感性,对于任一确定的插入比 λ ,定义 $\theta_H, \theta_L, \varphi_H, \varphi_L$ 四个指标,四个指标的表达式如下:

$$\theta_H = \frac{S_{\max}^H - S_{\min}^H}{S_{\max}^H}, \quad \theta_L = \frac{S_{\max}^L - S_{\min}^L}{S_{\max}^L},$$

$$\varphi_H = \frac{W_{\max}^H - W_{\min}^H}{W_{\max}^H}, \quad \varphi_L = \frac{W_{\max}^L - W_{\min}^L}{W_{\max}^L}$$

式中: S_{\max}^H, S_{\min}^H ——分别为变滤管埋深 H 条件下坑外观测点 A1 的最大、最小降深; W_{\max}^H, W_{\min}^H ——分别为变滤管埋深 H 条件下坑内观测点 A2 的最大、最小降深; S_{\max}^L, S_{\min}^L ——分别为变滤管长度 L 条件下坑外观测点 A1 的最大、最小降深; W_{\max}^L, W_{\min}^L ——分别为变滤管长度 L 条件下坑内观测点 A2 的最大、最小降深; θ_H, θ_L ——分别为在任一确定的插入比 λ 条件下,承压层坑外水位降深对滤管埋深 H 、滤管长度 L 的敏感度; φ_H, φ_L ——分别为在任一确定的插入比 λ 条件下,承压层坑内水位降深对滤管埋深 H 、滤管长度 L 的敏感度。

$\theta_H, \theta_L, \varphi_H, \varphi_L$ 的量值越大,意味着敏感性越强。 $\theta_H, \theta_L, \varphi_H, \varphi_L$ 与止水帷幕插入比 λ 的关系如图 15 所示。

从图 15 可见,对于任一确定的止水帷幕插入比 λ ,承压层坑内或坑外水位降深对滤管埋深 H 的敏感性都要强于对滤管长度 L 的敏感性。基于这一点,在基坑降水设计中,当确定了止水帷幕插入比 λ 后,宜先确定滤管埋深 H ,而后确定滤管长度 L 。 $\theta_H, \theta_L, \varphi_H, \varphi_L$ 均随着插入比 λ 的增加呈现先增大再减小的趋势。对于承压层坑外水位降深: θ_H 与 θ_L 在插入比 λ 为 0~0.4 时处于较高水平,意味着承压层坑外水位降深对滤管长度 L 及滤管埋深 H 的敏感性较

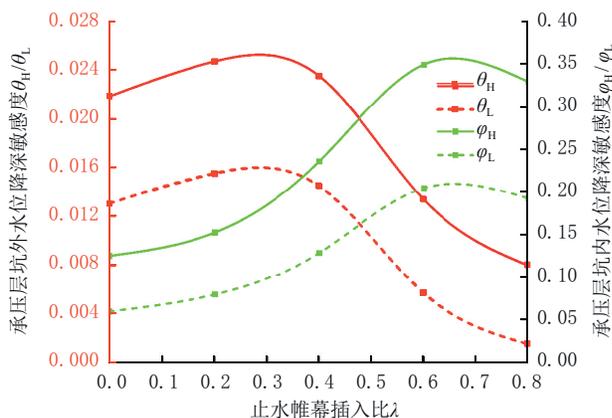


图 15 敏感度 θ_H 、 θ_L 、 ϕ_H 、 ϕ_L 与插入比 λ 的关系

Fig.15 The relationship between the sensitivity θ_H 、 θ_L 、 ϕ_H 、 ϕ_L and the insertion ratio λ

强; θ_H 与 θ_L 在插入比 $\lambda > 0.6$ 后处于较低水平,意味着承压层坑外水位降深对滤管长度 L 及滤管埋深 H 的敏感性较弱。对于承压层坑内水位降深: ϕ_H 与 ϕ_L 在插入比 λ 为 $0 \sim 0.4$ 时处于较低水平,意味着承压层坑内水位降深对滤管长度 L 及滤管埋深 H 的敏感性较弱; ϕ_H 与 ϕ_L 在插入比 $\lambda > 0.6$ 后处于较高水平,意味着承压层坑内水位降深对滤管长度 L 及滤管埋深 H 的敏感性较强。

从基坑降水的角度出发,上述分析表明,当止水帷幕插入比 $\lambda < 0.4$ 时,由于止水帷幕的隔水作用非常差,此时靠改变滤管长度 L 及滤管埋深 H 来有效提高承压层坑内水位降深很难实现;当止水帷幕插入比 $\lambda > 0.6$ 后,由于止水帷幕已经能够起到较好的隔水作用,此时靠改变滤管长度 L 及滤管埋深 H 来进一步大幅度降低承压层坑外水位降深较难实现。 θ_H 、 θ_L 、 ϕ_H 、 ϕ_L 在插入比 λ 为 $0.4 \sim 0.6$ 时均处于中等水平,这也意味着在止水帷幕插入比 λ 为 $0.4 \sim 0.6$ 时,通过改变滤管长度 L 及滤管埋深 H 来提高承压层坑内水位降深或降低承压层坑外水位降深具有较大的空间。

4 结语

本文基于某基坑工程实例,利用ABAQUS有限元分析软件,在该工程实例数值复现的基础上,对在止水帷幕不同插入比 λ 条件下,降水井不同滤管长度 L 及滤管埋深 H 对承压层坑内外水位降深及坑外地表沉降的影响规律进行了研究,得到以下研究结论:

(1)止水帷幕插入比 λ 对承压层坑内外水降深及坑外地表沉降的影响要远大于降水井滤管长度 L 及滤管埋深 H 对承压层坑内外水降深及坑外地表沉降的影响。止水帷幕插入比 λ 只有在大于 0.6 后才会起到较好的隔水效果。

(2)对于任一确定的止水帷幕插入比 λ ,滤管长度 L 与滤管埋深 H 的不断增大,均会导致坑外地下水从过水断面处进入坑内后,由必须沿竖向经过滤管底部一定厚度的土层才能渗流至滤管到可直接水平向渗流至滤管,使得坑外地下水向坑内降水区域补给的渗流路径减小,致使坑外水位降深减小,坑外地表沉降也因此减小。

(3)对于任一确定的止水帷幕插入比 λ ,承压层坑内或坑外水位降深对滤管埋深 H 的敏感性均要强于对滤管长度 L 的敏感性。在止水帷幕插入比 λ 为 $0.4 \sim 0.6$ 时,通过改变滤管长度 L 及滤管埋深 H 来提高承压层坑内水位降深或降低承压层坑外水位降深具有较大的空间。

(4)基坑降水设计时宜首先确定止水帷幕插入比 λ ,而后确定滤管埋深 H ,最后确定滤管长度 L 。止水帷幕插入比 λ 宜大于 0.6 ,滤管埋深 H 宜位于承压含水层顶部,滤管长度 L 不宜超过 0.4 倍的承压含水层厚度 M 。降水井滤管段宜完全内包于止水帷幕,滤管底部至帷幕底部应留有一定厚度的土层。

参考文献 (References):

- [1] 冯晓腊,谢武军,卢智强,等.悬挂式止水帷幕对基坑降水的影响[J].土工基础,2006,20(4):33-36.
FENG Xiaola, XIE Wujun, LU Zhiqiang, et al. The infection of pensile curtain to foundation pit dewatering[J]. Soil Engineering and Foundation, 2006, 20(4):33-36.
- [2] 肖铭钊,冯晓腊,陈新国,等.悬挂式止水帷幕对基坑降水影响的定量研究[C]//2009中国城市地下空间开发高峰论坛.北京:中国市政工程协会,2009:286-289,292.
XIAO Mingzhao, FENG Xiaola, CHEN Xinguo, et al. Quantitative study on the influence of suspended waterproof curtain on foundation pit dewatering[C]//2009 China Urban Underground Space Development Summit Forum. Beijing: China Municipal Engineering Association, 2009:286-289, 292.
- [3] 李瑛,陈东,刘兴旺,等.悬挂式止水帷幕深基坑减压降水的简化计算方法[J].岩土力学,2021,42(3):826-832,862.
LI Ying, CHEN Dong, LIU Xingwang, et al. Simplified calculation method of decompression dewatering for deep excavation with suspended waterproof curtain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3):826-832, 862.
- [4] 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 Guangming, LI Mingsheng. 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.
- [5] 程芸,冯晓腊,万里波. 深基坑降水流固耦合数值模拟及敏感性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1121-1127, 1215. CHENG Yun, FENG Xiaola, WAN Libo. Fluid-solid coupling calculation and sensitivity analysis of dewatering in deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1121-1127, 1215.
- [6] 张哲斐,冯晓腊,蔡兵华,等. 深基坑多层承压含水层中混合井降水技术优化研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(1): 85-94. ZHANG Zhefei, FENG Xiaola, CAI Binghua, et al. Optimization of precipitation technology of mixed wells in multi-layer confined aquifers of deep foundation Pits[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(1): 85-94.
- [7] 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 Xiaola, LI Dongguang. 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.
- [8] 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 Xiaola, CAI Jiaojiao, XIONG Zonghai, et al. Research on well group pumping test for foundation pit with drop waterproof curtains [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(6): 107-112.
- [9] 蔡娇娇,冯晓腊,杨宇,等. 落地式止水帷幕隔渗效果评价研究[J]. 施工技术, 2018, 47(16): 25-28. CAI Jiaojiao, FENG Xiaola, YANG Yu, et al. Research on evaluation of plugging effect of drop waterproof curtain[J]. Construction Technology, 2018, 47(16): 25-28.
- [10] 张东升,冯晓腊,袁光明,等. 基于深基坑群井抽水试验的落底式止水帷幕隔水效果分析[J]. 常州工学院学报, 2020, 33(1): 7-13. ZHANG Dongsheng, FENG Xiaola, YUAN Guangming, et al. An analysis on the effect of drop waterproof curtain based on the pumping test of group wells in deep foundation pit[J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2020, 33(1): 7-13.
- [11] 丁洲祥,龚晓南,俞建霖,等. 止水帷幕对基坑环境效应影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(S1): 146-150. DING Zhouxiang, GONG Xiaonan, YU Jianlin, et al. Finite element analysis of environmental effects of waterproof wall on foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S1): 146-150.
- [12] 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 Bo, TAI Jun, HU Ke, et al. Application of partially-closed impervious curtain to foundation pit dewatering [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(9): 98-105.
- [13] Wang J X, Liu X T, Wu Y B, et al. Field experiment and numerical simulation of coupling non-Darcy flow caused by curtain and pumping well in foundation pit dewatering[J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 277-293.
- [14] Wang J X, Wu Y B, Liu X T, et al. Areal subsidence under pumping well-curtain interaction in subway foundation pit dewatering: conceptual model and numerical simulations[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 198.
- [15] 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. WANG Jianxiu, GUO Taiping, WU Lingao, et al. Mechanism and application of interaction between underground wall and well in dewatering for deep excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 564-570.
- [16] 李福林. 基于抽水试验的深基坑降水方案优化调整与实施[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 103-110. LI Fulin. Optimized adjustment and implementation of deep foundation pit dewatering based on pumping test[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 103-110.
- [17] 邵晨晨. 复杂地质条件和敏感环境中基坑设计实践及关键技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(6): 102-108. SHAO Chenchen. Design practice and key technology for the foundation pit in complex geology and sensitive environments [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6): 102-108.

(编辑 王文)