

DOI: 10.11779/CJGE2014S2045

考虑围护结构影响的深基坑降压井布置方案优化

王康达¹, 童立元¹, 王占生², 刘松玉¹

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 苏州轨道交通有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 为研究深基坑围护结构对降压井降水效果的影响, 以苏州地铁4号线某车站深基坑降水工程为例, 通过对未考虑围护结构的初步设计方案与考虑围护结构的优化方案的对比, 运用Modflow数值分析软件模拟计算初步设计方案和优化方案的地下水位变化, 并对方案的合理性进行评价。结果表明, 未考虑围护结构影响的初步设计方案在基坑内不同位置的水位变化不均匀, 坑内最大水位差达到了3.5 m, 而考虑围护结构影响的优化方案通过非均匀布井, 可以有效地使水位变化均匀, 坑内最大水位差仅有0.5 m, 符合工程实际要求。

关键词: 基坑; 围护结构; 减压降水; 非均匀布井

中图分类号: TU46

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0259-06

作者简介: 王康达(1992-), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程、地下工程方面的研究。E-mail: 729527503@qq.com。

Optimization of dewatering wells in deep foundation pit considering effect of retaining structure

WANG Kang-da¹, TONG Li-yuan¹, WANG Zhan-sheng², LIU Song-yu¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Suzhou Railway Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: To analyze the effect of retaining structure on dewatering wells in deep foundation pit, a dewatering project of deep foundation pit in Suzhou Metro Line 4 is taken as an example. First, the initial design project and the optimized design project which considers the effect of building envelope are compared. Second, Modflow is used to simulate changes of water level and to evaluate the rationality of the design. The results show that the initial design project which does not consider the effect of retaining structure causes the water level no uniform, and the maximum water level difference reaches 3.5 m. While the optimized design project can make water level uniform, and the maximum water level difference is only 0.5 m, which satisfies the dewatering requirements.

Key words: foundation pit; retaining structure; dewatering; nonuniform well

0 引言

地下水是基坑工程施工的主要风险源之一, 越来越多的深基坑涉及到承压水的降水问题, 特别是在基坑尺寸较大的工程中, 承压水降水不均匀会非常容易耽误工期从而增加工程造价。因此如何有效、均匀地降低承压水位以配合施工进度已成为研究的热点。目前关于地下水问题的研究, 在上海地区的研究程度比较高。吴林高等^[1]结合工程实践, 总结分析了不同降水模式下的地下水渗流计算, 为基坑降水工程提供了宝贵的经验; 基坑围护结构周围的地下水渗流特征与场地水文地质条件、围护结构插入目的降水层的相对深度、降水井与围护结构的相对位置等因素密切相关。孙文娟等^[2]结合上海市彭越浦泵站的基坑降水工程, 研究了软土地基中基坑围护结构的挡水作用机理, 将

基坑降水模式分为了5类, 并分析了各类降水模式的技术特点, 为基坑降水工程提供了宝贵的经验; 翁其平等^[3]在基坑已有止水帷幕的情况下, 提出了根据止水帷幕插入承压含水层的相对深度而设置降水井及过滤器的位置, 使得抽水量最小, 从而减小对周围环境的影响。在基坑渗流方面, 数值模拟仍然是一种行之有效的手段。周志芳等^[4]采用前苏联双层结构数学模型, 建立三维有限元模型, 计算了润扬长江大桥南锚基坑降水对周围环境的影响, 计算结果与实测值较吻合; 王建秀等^[5]针对上海地铁9号线宜山路站基坑止水帷幕入土深度及不同“墙-井”组合关系, 结合降水数值

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ01B02); 苏州轨道交通有限公司科学基金项目(SZGDKY201303)

收稿日期: 2014-07-28

模拟结果,优化了基坑降水方案;严驰等^[6]通过三维有限元模拟,计算了微承压水作用下基坑的稳定性,结果表明,承压水的存在会明显降低有效应力和整体安全系数,在实际工程设计和施工方案的确 定中需高度重视,以避免工程事故的发生。

基坑围护结构对降水效果的影响已得到国内多数同行的认同,国内对于“墙-井”关系的研究多在于单井与墙的作用关系,偏于微观,对于宏观上围护结构对降水效果的影响研究甚少。本文以苏州地铁 4 号线某车站深基坑降水工程为例,通过对未考虑围护结构的降水初步设计方案与考虑围护结构影响的优化降水方案进行对比,定量的分析了围护结构对降水效果的影响,并讨论了不均匀布井方案的可行性,以期为今后的降水设计提供帮助。

1 工程背景及场地地质条件

1.1 工程背景

该地铁车站呈南北方向,车站主体外包总长286.2 m,轨面标高-12.980 m,标准段基坑开挖深度18 m,端头井开挖深度20 m,结构底板标高在14.60 m 左右,换乘节点开挖深度25 m,框架结构,为地下两层岛式(换乘部位三层),拟采用明挖法施工。车站被分为3个区域,其中换乘段以北为 A 区,换乘段为 B 区,换乘段以南为 C 区。由于该地铁站处于闹市区,周围建筑物众多,所以对沉降控制的要求很高。车站周围环境如图1所示,各区域开挖深及地连墙深度如表1所示。



图 1 车站基坑及其周围环境

Fig. 1 Metro station and surrounding environment

表 1 基坑开挖深度及地墙深度

Table 1 Depths of excavation and diaphragm wall

工程部位	基坑开挖深度/m	地连墙深度/m
标准段	18	40
换乘段	25	57

1.2 工程地质条件

场地地表以下 80.00 m 深度范围内所揭露的土层均为第四纪松散沉积物,按其成因类型、岩性和工程性能可划分 8 个工程地质层(见表 2)。

表 2 场地工程地质条件

Table 2 Geological conditions of excavation site

层号	地层名称	地层厚度 /m	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	
				垂直	水平
① ₃	素填土	1.00~4.20	19.4	7.5×10^{-7}	8.9×10^{-7}
③ ₁	黏土	0.70~4.00	19.7	5.8×10^{-7}	6.2×10^{-7}
③ ₂	粉质黏土	1.00~4.10	19.2	2.5×10^{-5}	3.3×10^{-5}
③ ₃	粉土夹粉砂	1.70~3.60	19.8	3.27×10^{-3}	—
④ ₂	粉砂夹粉土	5.00~10.00	19.8	3.27×10^{-3}	—
④ ₃	粉砂夹粉黏	1.90~10.10	19.6	3.27×10^{-3}	—
⑤ ₁	粉质黏土	2.40~10.20	18.8	5.0×10^{-5}	5.9×10^{-5}
⑤ ₂	粉土夹粉砂	19.4~27.7	19.4	3.27×10^{-3}	—
⑦ ₃	粉黏夹粉土	6.30~12.50	19.2	—	—
⑧ ₂	粉质黏土	3.00~4.80	19.4	—	—
⑨	粉砂	2.70~3.10	18.9	—	—
⑩ ₂	粉质黏土	未揭露	19.5	—	—

1.3 水文地质条件

根据地下水埋藏条件可分为潜水和承压含水层。潜水由填土及浅层黏土层组成,主要接受大气降水入渗补给,水位随季节变化,据区域水文资料,苏州市潜水位标高在 0.21~2.63 m,勘察期间实测潜水稳定水位约在 1.23~1.41 m 之间。场地下部⑤₂层为承压含水层,埋深在 27.00~28.50 m 之间,厚度大于 10 m,水位标高约为-0.9 m,对工程影响较大;⑨粉砂层为深层承压水,埋深大于 60 m,对工程影响不大。

2 降压井布置初步设计

2.1 降压井的布置原则

(1) 降压井间距、深度、孔径依据拟建工程场区水文地质条件、基坑总涌水量、单井降水能力并结合工程经验确定。

(2) 降压井尽可能布置在不影响基坑开挖施工的位置。

(3) 降压井的布置尽可能减少降水对周围环境的影响。

2.2 基坑突涌验算

当前,基坑突涌可能性计算多采用安全系数法:当基坑底板至承压含水层顶板间的土压力应大于或等于安全系数下承压水的顶托力,则基坑是稳定的,否则便有突涌的可能。

计算公式为

$$P_{\text{ce}}/P_{\text{wy}}=(H\cdot\gamma_s)/(\gamma_w\cdot h)\geq F_s \quad (1)$$

式中 P_{ce} 为基坑底至承压含水层顶板间土压力(kPa); P_{wy} 为承压水头高度至承压含水层顶板间的水压力(KPa); H 为基坑底至承压含水层顶板间距离(m), h 为承压水水头高度至承压含水层顶板距离(m), γ_s 为基坑底板至承压含水层顶板间土的平均重度(kN/m^3), γ_w 为水的重度(kN/m^3), 偏安全的取 $10\text{ kN}/\text{m}^3$; F_s 为安全系数 1.10;

按上覆土层平均重度为 19.3 kN/m^3 对⑨粉土含水承压层进行突涌计算得 $P_{cz} = (64.4 - 22.5) \times 19.3 = 808.67 \text{ kPa}$; $P_{wy} = (64.4 - 2.7) \times 10 = 617 \text{ kPa}$; $P_{cz} / P_{wy} = 760.42 / 635 = 1.31 > 1.10$ 不突涌。

因此,在基坑开挖过程中⑤₂粉砂或粉土承压含水层与上部微承压含水层连通,具有突涌可能性,需要进行减压降水。而⑨粉土层在基坑开挖过程中对工程没有影响,不会突涌。

2.3 降压井布置方案

根据设计和勘察资料,地下连续墙插入承压含水层,换乘段隔断基坑内外水力联系,而其他区域均未隔断基坑内外承压水的水力联系。

根据地质资料及工程特点,采用井点降水以降低承压含水层的水头高度,防止基坑突涌,保证基坑稳定性。考虑到降压性降水对周边环境的影响,承压水降压井宜布置在基坑内侧。

如图2所示,将基坑分为A区、B区、C区三部分,分别计算其所需的降水井数。

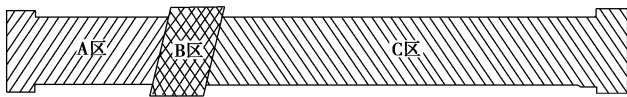


图2 车站基坑分区图

Fig. 2 Subarea of metro station

在A、C区域,地下连续墙未隔断基坑内外承压含水层的水力联系,基坑的总涌水量按均质含水层承压水非完整井涌水量公式计算:

$$Q = 2.73k \frac{M's_w}{\lg\left(1 + \frac{R_0}{r_0}\right) + \frac{M-l}{l} \lg\left(1 + 0.2 \frac{M}{r_0}\right)} \quad (2)$$

式中 Q 为基坑总涌水量 (m^3/d); k 为含水层渗透系数 (m/d); s_w 为基坑水位最小安全降深 (m); M 为承压含水层厚度 (m); M' 为承压含水层坑内有效补给厚度 (m); l 为过滤器有效工作长度 (m); R_0 为抽水影响半径 (m); r_0 为基坑等效半径。

根据勘察资料结合本工程的基坑围护设计,⑤₂粉砂或粉土承压含水层对坑内减压降水补给厚度约为 20 m 。根据勘察成果及抽水试验成果,渗透系数为 1.65 m/d 。为保证基坑安全,最小安全降深为 $s_w = 20.0 \text{ m}$ 。

抽水影响半径取 $R_0 = 250 \text{ m}$, A区域基坑等效半径为 $r_0 = 0.29 \times (a+b) = 27 \text{ m}$, C区域基坑等效半径为 $r_0 = 0.29 \times (a+b) = 60.0 \text{ m}$ 。

由式(2)可得A区域, $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{d}$, C区 $Q = 2224 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

勘察资料提供的渗透系数及该区域工程经验,该承压含水层单井涌水量在 $q = 150.0 \sim 300.0 \text{ m}^3/\text{d}$, 故本

次计算取单井涌水量 $q = 200 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

按式 $n = 1.1/Q/q$ 计算所需要的降压井数量,对于A区域: $n = 8$; 对于B区域,由于B区域地连墙隔断了基坑内外的水力联系,按完整井涌水量公式计算得需布置3井。对于C区域, $n = 12$ 。

根据以上计算,共需要布置23口降压井。编号为Y1~Y23。

根据承压含水层埋藏深度、厚度以及围护结构插入深度,设计减压井深度为 35.0 m ,过滤器位置设置为 $5.0 \sim 34.0 \text{ m}$ 。降压井平面布置见图3。

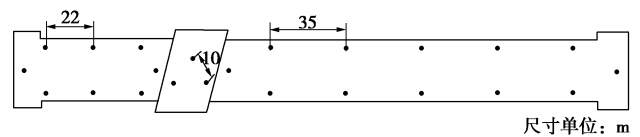


图3 降压井平面布置图

Fig. 3 Layout of dewatering wells

A、B、C三个区域均采用均匀布井方式。在A区域中,井与井之间的间距为 22 m , B区域为等边三角形布置,井与井之间的距离为 10 m , C区域井与井之间的距离为 35 m 。

3 基坑降水运行三维数值模拟分析

3.1 地下水渗流模型建立

本文运用 Modflow4.2 建立基坑降水的三维数值模型,分析基坑内水位的降深。为了保证计算结果的精确性,必须合理的设置计算模型的计算区域范围,有效地消除地下水渗流计算的边界效应。设计计算模型尺寸为 $1600 \text{ m} \times 1600 \text{ m}$ 范围。由于基坑降水涉及到的地层到⑨粉砂层,在垂直方向,选 80 m 计算深度。水文地质计算模型采用有限单元法建模,层位剖分参照场地典型钻孔资料进行,按照《岩土工程勘察报告》提供的信息,对地层进行概化。初始条件按照现场的数据给出,四周边界条件取为定水位边界,初始水头按 0 m 计算。

计算模型如图4所示,降压井在模型中的布置如图5所示,降压井参数见表3。

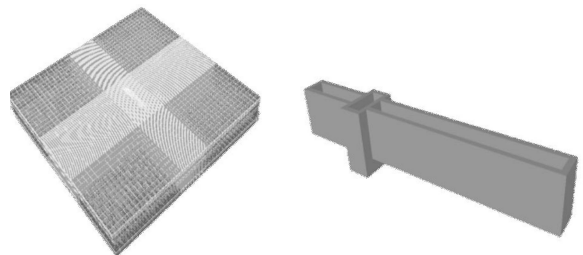


图4 基坑及地连墙三维有限元模型

Fig. 4 Three-dimensional finite element model of pit and diaphragm wall

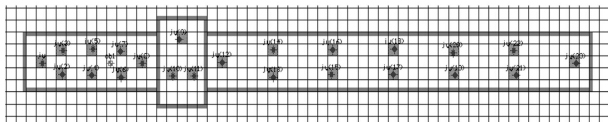


图 5 降压井在模型中的布置

Fig. 5 Layout of dewatering wells in simulating model

表 3 降压井参数表

Table 3 Parameters of dewatering wells

井编号	井深/m	滤管长/m	抽水量/m ³
JY1~JY8	35	10	200
JY9~JY11	35	10	100
JY12~JY23	35	10	200

3.2 模型运行结果

本文模拟以多孔介质承压含水层非稳定流三维数学模型为理论基础，计算单元采用 3 d 实体单元，模拟抽水 60 d 的降水效果。同时，将 60 d 散化为 12 个应力周期，每个周期为 5 d，以观察水位降深随时间的变化。模型的求解器采用 MODFLOW2000，时间步长取 10。因车站基坑纵向由地连墙隔断为 A、B、C 三个独立区域，每个区域可独立进行止水、降水施工，所以模拟时在 3 个区域分别设置了观察井以观察每个区域的水位降深情况。

A 区域区域降水 5 d 和降水 60 d 的水位降深云图如图 6 所示，以基坑中线为轴线，基坑左边缘为原点的降深距基坑边缘的变化图见图 7。

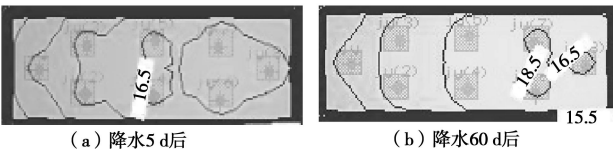


图 6 A 区域降水云图

Fig. 6 Cloud picture of dewatering in region A

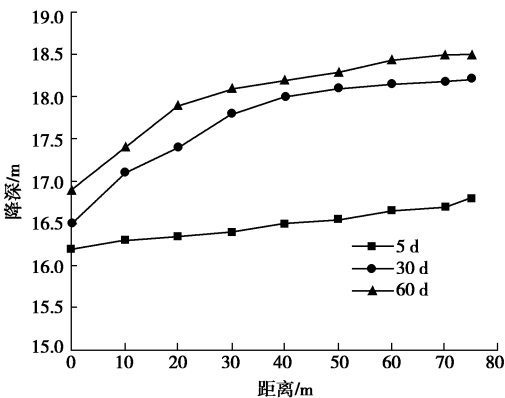


图 7 A 区域降深 - 距离变化图

Fig. 7 Change of water level in region A with different distances

B 区域区域降水 5 d 和降水 60 d 的水位降深云图如图 8 所示，以基坑中线为轴线，基坑左边缘为原点的降深距基坑边缘的变化图见图 9。B 区域地连墙深

度较深，插入了相对隔水层⑤₂，隔断了基坑内外的水力联系。

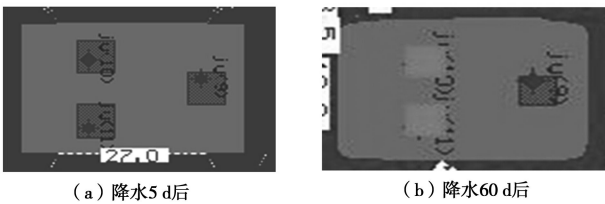


图 8 B 区域降水云图

Fig. 8 Cloud picture of dewatering in region B

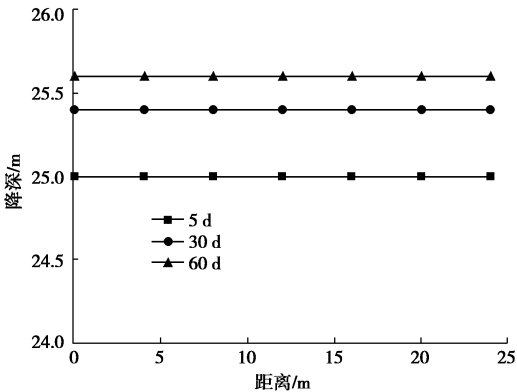


图 9 B 区域降深 - 距离变化图

Fig. 9 Change of water level in region B with different distances

C 区域区域降水 5 d 和降水 60 d 的水位降深云图如图 10 所示，以基坑中线为轴线，基坑左边缘为原点的降深距基坑边缘的变化图见图 11。

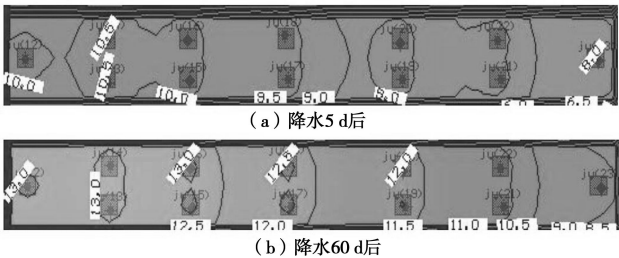


图 10 C 区域降水云图

Fig. 10 Cloud picture of dewatering in region C

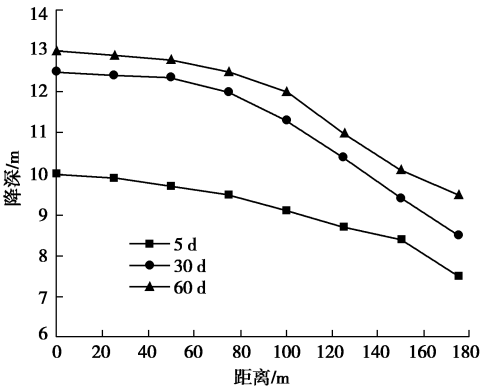


图 11 C 区域降深 - 距离变化图

Fig. 11 Change of water level in region C with different distances

3.3 结果分析

首先, A、B、C 三个区域的水位降深有着明显的不同。由于 B 区域的地下连续墙隔断了墙内外的水力联系, 抽水后没有补给, 所以水位下降的最多; A 区域由于降水井布置较密所以水位下降的次多; C 区域由于降水井布置相对稀疏且由于相对隔水层⑤_1 的缺失使上部微承压含水层与下部承压含水层联接为一个整体承压含水层, 所以稳定时水位下降的最少。

其次, 每个区域内部的降水也不均匀, 越靠近换乘段 B 的水位降深越大, 在端头井部分水位降深最小。其原因为换乘段 B 的地下连续墙隔断了水力联系后, 靠近 B 区域的部分只有两面是与外界有水力联系的, 而在端头井部分, 地连墙三面都不隔断水力联系, 使得其水力补给更加充分从而降深较小。

4 降水方案优化

初步降水方案的问题主要表现在: ①3 块区域的水位下降幅度不一致; ②每个区域内的水位降深不均匀; ③没有考虑围护结构的影响。根据以上问题提出相对应的解决方案:

A 区域由于面积较小, 水位下降过快, 且因为内侧地连墙完全隔断了水力联系, 均匀布井会导致水位下降幅度不一。针对此问题, 将原先的 8 口井减少为 5 口, 以 3+2 的形式布置, 内侧疏外侧密。

B 区域由于四周地连墙均完全隔断内外水力联系, 布置三口井显然是多余的。因此将 B 区域的井数调整为两口同时适当减少抽水量, 以使水位以较为平缓的速度下降。

C 区域面积大而狭长, 初步设计时没有考虑围护结构的影响从而导致水位降深较浅且两头水位差达到了 3.5 m。针对此情况, 将原先的 12 口井增加为 13 口, 靠近换乘段的井间距适当调大, 而在端头部分的井间距调小。

具体的井位布置和井参数详见图 12 与表 4。

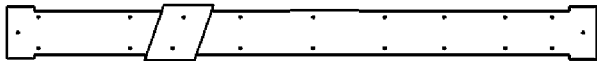


图 12 优化后降水井平面布置图

Fig. 12 Layout of dewatering wells after optimization

表 4 优化后降水井参数表

Table 4 Parameter of dewatering wells			
井编号	井深/ m	滤管长/ m	抽水量/ m^3
JY1~JY5	35	10	250
JY6~JY7	35	10	50
JY8~JY20	35	10	250

将优化方案用 Modflow 进行数值模拟, 模拟结果见图 13, 14。

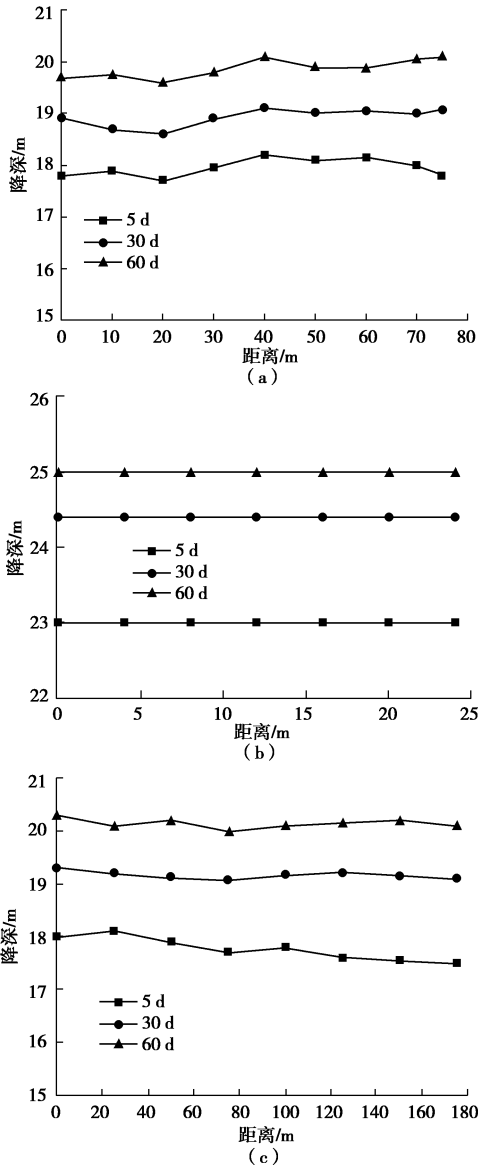


图 13 优化后各区域降深 - 距离变化图

Fig. 13 Change of water level in each region with different distances after optimization

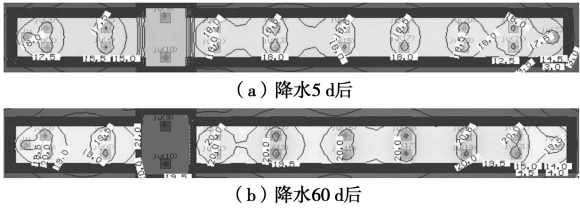


图 14 优化后降水云图

Fig. 14 Cloud picture of dewatering after optimization

5 结 论

本文以苏州地铁 4 号线某基坑降水工程为例, 通过对比优化前和优化后的降水方案, 定量的分析了围护结构对降水效果的影响, 得出以下 4 点结论。

(1) 如果基坑四周围护结构插入土层深度相同,

则采用均匀布井的方案是合理的,如区域 B。

(2) 如果基坑四周围护结构插入土层深度不相同,若如初步设计采用均匀布井方案,基坑内的水位降深是不均匀的,越靠近插入土层深的围护结构,水位降深越大。在本例中,A 区域与 C 区域的水位降深差分别达到了 2.5 m 和 3.5 m。

(3) 不均匀布井方案可以有效地解决围护结构影响下水位下降不均匀的问题,同时优化后的方案考虑了地连墙的隔水效果,适当减少了降压井的数目,从而减少了整体的工程造价。数值模拟结果显示,各区域内水位差在 0.5 m 左右,满足设计要求。

(4) 通过对比 A 区域和 C 区域可以得出,围护结构对降水效果的影响大小与基坑的具体尺寸有关。A 区域由于长宽比较小,围护结构的影响就较小,其水位差为 2.5 m;而 C 区域由于长宽比较大,其内部水位差达到了 3.5 m。定性来说,长宽比越大,围护结构对降水效果的影响就越大。

参考文献:

- [1] 吴林高. 工程降水设计施工与基坑渗流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (WU Lin-gao. Design and execution of dewatering & theory of seepage in deep excavation[M]. Beijing: China Communication Press, 2003, (in Chinese))
- [2] 孙文娟, 沈水龙, 李耀良, 等. 基坑开挖前降水引起的地面沉降的工程案例分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊): 314 - 318. (SUN Wen-juan, SHEN Shui-long, LI Yao-liang, et al. Case study on settlement around unexcavated foundation pit due to groundwater pumping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S0): 314 - 318. (in Chinese))
- [3] 王卫东. 深基坑承压水控制的设计方法与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 30(增刊): 343 - 348. (WANG Wei-dong. Design and application of control of confined ground water in deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 30(S0): 343 - 348. (in Chinese))
- [4] 周志芳, 朱宏高, 陈 静, 等. 深基坑降水与沉降的非线性耦合计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1984 - 1988. (ZHOU Zhi-fang, ZHU Hong-gao, CHEN Jing, et al. Nonlinear coupling calculation between dewatering and settlement of deep foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1984 - 1988. (in Chinese))
- [5] 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 Jian-xiu, GUO Tai-ping, WU Lin-gao, 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. (in Chinese))
- [6] 严 驰, 李学山, 杨毅秋. 微承压水作用下深基坑稳定的有限元分析[J]. 勘察科学技术, 2006(2): 3 - 7. (YAN Chi, LI Xue-shan, YANG Yi-qiu. The FEM analysis of deep foundation pit's stability under influence of micro-artesian[J]. Site Investigation Science and Technology, 2006(2): 3 - 7. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)