

富水砂层潜水非完整井抽水试验及数值模拟研究

李威¹, 杨学义², 孙大钧²

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 中国核工业华兴建设有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 针对典型富水砂层基坑降水工程, 采用不同规范公式及数值模拟方法依据抽水试验计算所得的含水层渗透系数结果进行对比, 并基于规范及数值模拟方法结合现场实际降水情况对降水施工方案及渗透系数结果进行验证。结果表明: 针对深厚富水砂层非完整井抽水试验, 采用规范中无观测孔公式及1个观测孔公式以及有限元方法计算所得含水层渗透系数结果较为一致, 与2个观测孔公式计算结果偏差较大; 降水施工方案与现场降水情况分析结果验证了采用无观测孔公式、1个观测孔公式及有限元方法计算所得含水层渗透系数值的合理性。

关键词: 富水砂层; 基坑降水; 观测孔; 渗透系数; 抽水试验; 潜水非完整井

中图分类号: U652.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-7874(2025)05-0021-06

doi: 10.7640/zggwjs202505003

Pumping test and numerical analysis of incomplete well in the phreatic aquifer of water-rich sand layer

LI Wei¹, YANG Xue-yi², SUN Da-jun²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

2. China Nuclear Industry Huaxing Construction Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: In response to the dewatering projects of typical water-rich sand layer foundation excavations, a comparison was conducted on the permeability coefficient results of the aquifer calculated using different standard formula and numerical simulation methods based on the pumping test. Furthermore, the dewatering construction scheme and permeability coefficient results were verified by integrating the standards, numerical simulation methods, and the actual dewatering conditions on-site. The results show that for the incomplete well pumping tests in deep water-rich sand layers, the permeability coefficient results of the aquifer calculated using the formula without observation wells, the formula with one observation well, and the finite element method are relatively consistent, while there is a significant deviation from the results calculated by the formulas with two observation wells. The analysis of the dewatering scheme and the on-site dewatering conditions validates the rationality of the aquifer permeability coefficient values calculated using the formula without observation wells, the formula with one observation well, and the finite element method.

Key words: water-rich sand layer; excavation dewatering; observation well; permeability coefficient; pumping test; incomplete well in phreatic aquifer

0 引言

在城市基础设施建设过程中, 不同区域水文地质差异对深基坑施工构成挑战, 特别是在富水砂层, 地下水处理更是基坑工程施工的重点和难点^[1]。降水是减小地下水对基坑开挖影响的最常

见、最有效的方法之一, 降水方案设计前通常要查明建设场地的水文地质特征, 如采用室内试验、抽水试验等方法获取含水层渗透系数等参数, 再结合水文地质参数及基坑条件制定降水方案^[2-4]。现阶段的降水施工方案在编制过程中含水层渗透

收稿日期: 2024-07-15 修回日期: 2024-08-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项项目 (Y321002; Y324001)

作者简介: 李威 (1994—), 男, 安徽宿州人, 硕士, 工程师, 研究方向为岩土工程数值计算。E-mail: liwei@nhri.cn

系数多依据规范公式结合抽水试验数据来确定,基坑涌水量多依据规范提供的大井法公式计算。针对抽水试验,不同规范依据观测孔的数量不同给出不同的渗透系数计算公式,而不同公式渗透系数计算结果存在一定差别^[5-8]。依据不同含水层渗透系数计算得到的基坑涌水量不同,若含水层渗透系数与工程实际不符,会导致降水施工方案的抽水井配置过盈或不足,造成人力物力的浪费或基坑水位降深达不到目标值,故基于合适的方法确定准确的含水层渗透系数至关重要。

本文基于实际工程项目,采用不同规范公式及数值模拟方法^[9-10]依据抽水试验结果计算、反演渗透系数,并基于降水施工方案结合现场实际降水情况,采用规范及数值模拟方法对渗透系数结果进行验证,确定合适的渗透系数及计算方法,为降水方案设计提供参考。

1 工程概况

某项目三期工程拟进行基坑降水,三期工程基坑降水施工方案编制时拟采用一、二期方案中

的渗透系数,但结合项目工程资料发现该渗透系数取值偏大。考虑二期工程已完工,相关资料较为完整,故拟通过对二期工程抽水试验及降水施工进行分析,确定含水层渗透系数。

项目二期工程所处位置场地基本平整,天然地面平均海拔高程为 200.0 m,场地含水层厚度约为 143 m,地下水位标高为 192.0 m,地表以下 2~4 m 是略带黏性的黄色细砂土,原状土密实;向下是纯净的灰色砂土,颗粒均匀。二期工程基坑面积为 12 964 m²,目标降水深度为 8.5 m,即水位降至 183.5 m 时方满足现场施工要求。

2 抽水试验分析

2.1 抽水试验

工程可研阶段及详勘阶段均进行室内试验测定含水层渗透系数,试验结果最大值分别为 5.2 m/d 及 19.4 m/d,相差较大,而项目一期工程基坑降水施工方案采用的含水层渗透系数为 87.9 m/d。二期工程基坑降水施工方案制定前开展了现场抽水试验,抽水试验的平面布置如图 1 所示。

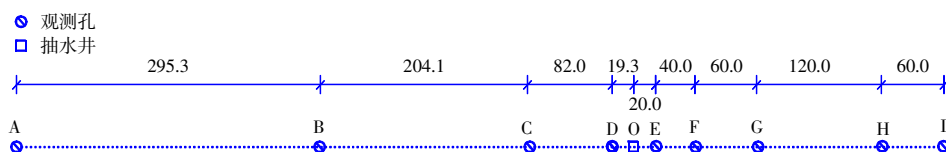


图 1 抽水试验平面布置图(m)

Fig. 1 Layout plan of pumping test(m)

抽水试验采用 1 台流量可调节的长轴深井泵,以 400 m³/h 流量、340 m³/h 流量及 280 m³/h 流量开展 3 个降程的抽水试验。抽水井所处位置自然地面高程 200.20 m,井内动水位高程 179.50 m,水泵进水口位于井内动水位以下 2~3 m,滤管长度 15.2 m,半径为 0.125 m,抽水由大流量开始。具体抽水试验流程如下:第一降程以 400 m³/h 流量抽水,直至井中水位稳定为止。开始抽水至抽

水结束期间内,依据规范要求每隔一定时间对抽水井和观测孔的水位进行观测记录,而后分别进行 340 m³/h 及 280 m³/h 流量的抽水试验。

由于抽水试验数据量较大,仅以部分数据进行展示。图 2 为第一降程过程中观测孔 D 及抽水井内水位降深变化曲线图,图中纵坐标为水位降深值,正值代表水位下降,负值代表水位上升,横坐标为按监测时序排列的测值编号。

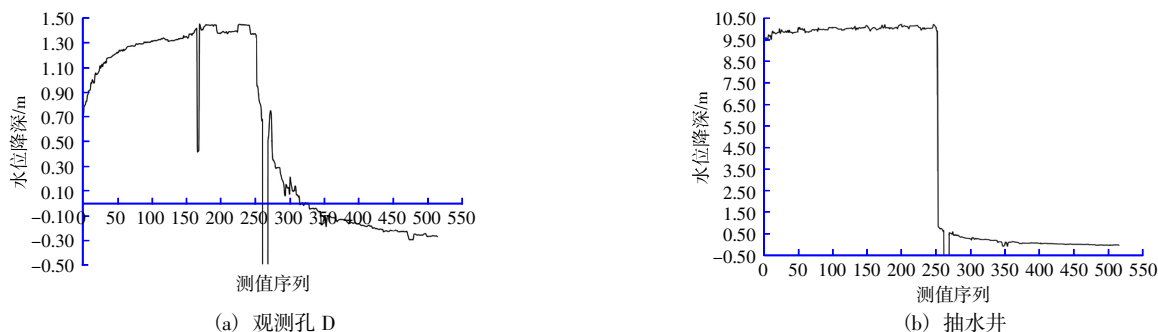


图 2 典型孔内水位变化曲线

Fig. 2 Typical variation curve of water level in the borehole

2.2 基于规范的含水层渗透系数计算

针对潜水稳定流非完整井单孔抽水试验, 常采用文献[5]和文献[6]中推荐的公式进行渗透系数计算, 计算公式主要包括单井抽水无观测孔公式、单井抽水 1 个观测孔公式及单井抽水 2 个观测孔计算公式, 分别见式(1)一式(3)。

$$k=\frac{0.366Q}{LS}\lg\frac{0.66L}{r}$$
(1)

$$k=\frac{0.366Q(\lg r_1-\lg r)}{(S-S_1)(S-S_1+L)}$$
(2)

$$k=\frac{0.366Q(\lg r_2-\lg r_1)}{(S_1-S_2)(2S-S_1-S_2+L)}$$
(3)

式中: k 为含水层渗透系数, m/d; Q 为单井稳定抽水流量, m³/d; S 、 S_1 、 S_2 分别为抽水井、观测孔 1 及观测孔 2 的水位降深, m; L 为滤管长度, m; r 、 r_1 、 r_2 分别为抽水井半径、观测孔 1 到抽水井距离及观测孔 2 到抽水井距离, m。

3 种抽水试验示意图如图 3 所示, 图中, R_i 为降水影响半径; H 为潜水含水层厚度。

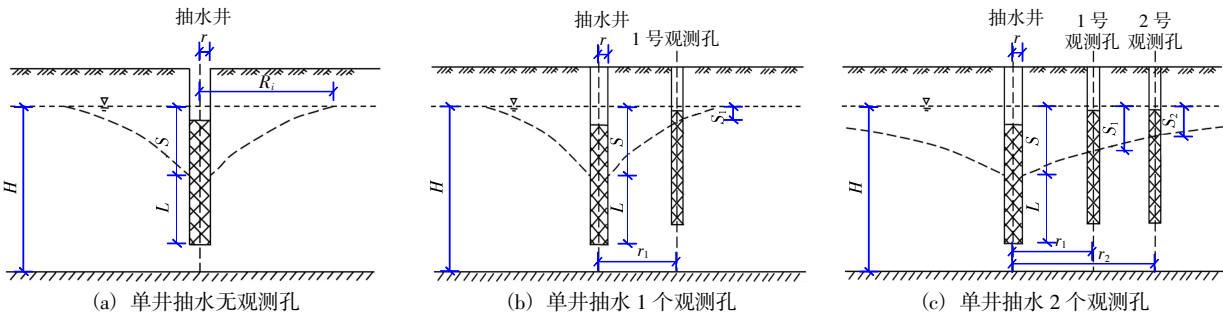


图 3 潜水非完整井抽水试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of incomplete well pumping test in phreatic aquifer

根据抽水试验结果可知, 第一降程、第二降程和第三降程抽水稳定时抽水井水位降深分别为 10.00 m、8.57 m 和 6.30 m, 根据式(1)计算可得对应含水层渗透系数分别为 44.0 m/d、43.7 m/d 和 48.9 m/d。

分别采用式(2)、式(3)对抽水试验数据进行处理, 依据不同观测孔组合计算所得含水层渗透系数分别如表 1 和表 2 所示, 因抽水试验过程中部分观测孔数据有误, 故表中仅统计 3 个降程均存在有效数据的观测孔。

表 1 基于 1 个观测孔公式含水层渗透系数计算结果

Table 1 Calculation results of permeability coefficient of aquifer based on an observation well

观测孔编号	观测孔与抽水井距离/m	不同抽水流量的观测孔水位降深/m			不同抽水流量的渗透系数/(m·d ⁻¹)		
		400 m³/h	340 m³/h	280 m³/h	400 m³/h	340 m³/h	280 m³/h
C	101.3	0.290	0.400	0.240	42.3	45.5	55.5
D	19.3	1.430	1.290	0.900	37.8	39.9	48.4
E	20.0	1.380	1.300	0.900	37.7	40.3	48.7
F	60.0	0.630	0.640	0.400	40.9	43.7	53.0
G	120.0	0.260	0.300	0.160	43.1	45.9	56.0
H	240.0	0.070	0.120	0.040	46.2	49.1	60.1
I	300.0	0.080	0.080	0.003	47.7	50.2	61.4

表 2 基于 2 个观测孔公式含水层渗透系数计算结果

Table 2 Calculation results of permeability coefficient of aquifer based on two observation wells

抽水井计算路径		不同抽水流量渗透系数/(m·d ⁻¹)			平均值/(m·d ⁻¹)	标准差
		400 m³/h	340 m³/h	280 m³/h		
观测孔 D	观测孔 C	65.8	78.8	101.1	81.9	17.9
观测孔 E	观测孔 F	67.0	71.4	88.0	75.5	11.1
观测孔 E	观测孔 G	72.2	75.7	96.6	81.5	13.2
观测孔 E	观测孔 H	85.6	88.5	114.9	96.3	16.2
观测孔 E	观测孔 I	93.7	92.9	119.9	102.2	15.4
观测孔 F	观测孔 G	82.4	83.8	114.2	93.5	18.0
观测孔 F	观测孔 H	109.7	109.3	151.6	123.5	24.3
观测孔 F	观测孔 I	128.8	117.1	159.3	135.0	21.8
观测孔 G	观测孔 H	164.0	157.4	225.5	182.3	37.5
观测孔 G	观测孔 I	224.0	167.5	227.0	206.2	33.5
观测孔 H	观测孔 I	-1 619.0	209.5	232.1	-392.5	1 062.3

由表 1 可知, 观测孔距离越远, 计算结果偏差相对越大, 仅考虑 120.0 m 范围内观测孔时, 采用单井抽水 1 个观测孔计算公式得到的含水层渗透系数为 37.7~56.0 m/d, 平均值为 45.2 m/d。

由表 2 可知, 第一降程抽水试验的含水层渗透系数计算结果存在-1 619.0 m/d 的明显异常值, 不考虑该异常值, 其含水层渗透系数分布在 65.8~

224.0 m/d 之间；第二降程抽水试验的含水层渗透系数分布在 71.4~209.5 m/d 之间；第三降程抽水试验的含水层渗透系数分布在 88.0~232.1 m/d 之间，3 降程相同路径含水层渗透系数平均值分布在 75.5~206.2 m/d。

对比 3 个计算公式求得的含水层渗透系数可知，单井抽水无观测孔公式与单井抽水 1 个观测孔公式计算结果较为接近，与单井抽水 2 个观测孔公式计算结果相比则存在较大偏差，而二期项目现场针对抽水试验数据采用单井抽水 2 个观测孔公式进行渗透系数计算，且现场降水施工方案采用的渗透系数为 87.9 m/d。

2.3 基于数值模拟的含水层渗透系数计算

根据抽水试验方案建立单井抽水试验有限元模型如图 4 所示，模型半径为 2 000 m，高度方向 200 m，初始地下水位标高 192.00 m，抽水井位于模型中间位置，模型共有节点 75 689 个，单元 65 144 个。依据抽水试验方案，抽水流量分别取 280 m³/h、340 m³/h 及 400 m³/h，假定含水层为均质砂层，研究不同含水层渗透系数条件下地下水位响应，含水层渗透系数分别取 87.90 m/d、

58.60 m/d、29.3 m/d、14.65 m/d。

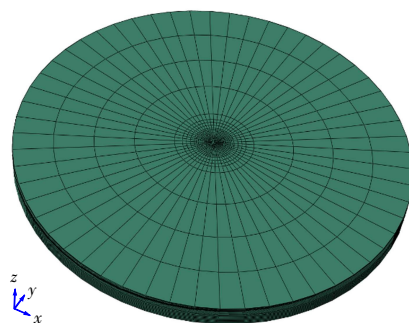


图 4 单井抽水试验有限元模型

Fig. 4 Finite element model of single well pumping test

图 5 为在 4 种地层渗透系数下不同抽水流量的地下水位降深随抽水井距离变化的曲线。由图可知，抽水流量与井距相同时，渗透系数越大水位降深越小；抽水流量及渗透系数相同时，水位降深随井距增大而减小；渗透系数及井距相同时，抽水流量越大水位降深越大。

对抽水井不同位置的水位降深与渗透系数关系进行分析，如图 6 所示。在固定抽水流量及井距条件下，水位降深与渗透系数间关系可用幂函数进行拟合，且拟合相关系数 R^2 为 0.99。

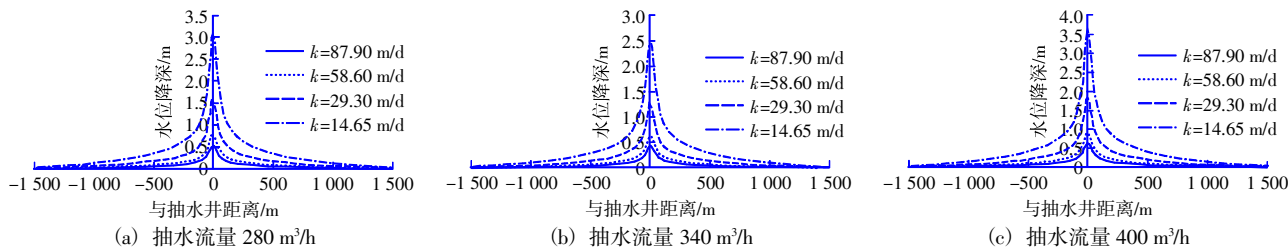


图 5 水位降深随距抽水井距离变化曲线

Fig. 5 Curve of water drop with distance from pumping well

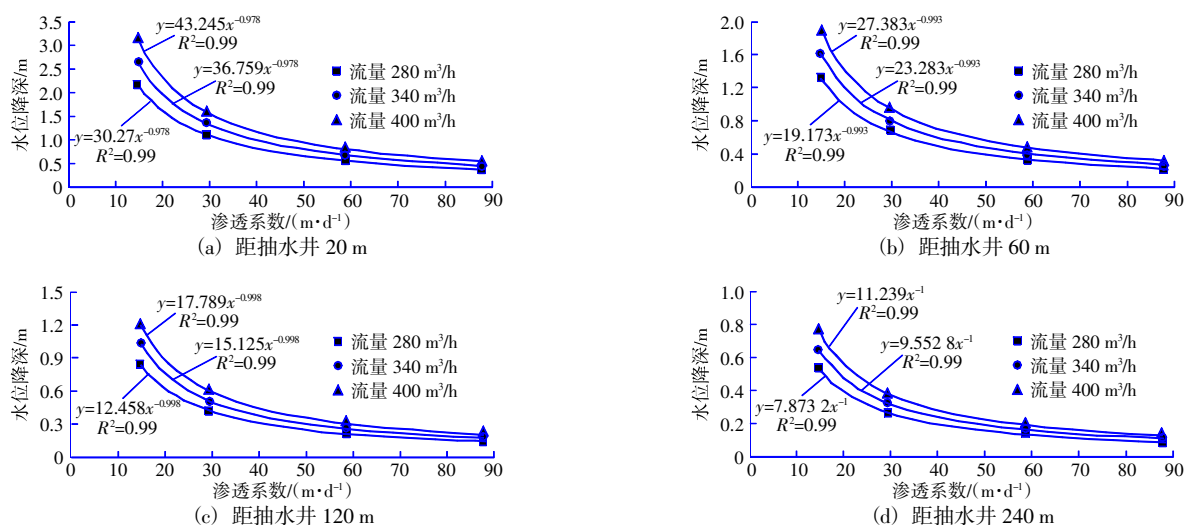


图 6 不同位置水位降深与渗透系数关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between water level drop and permeability coefficient at different positions

不同流量与井距的拟合函数不同, 根据拟合函数, 代入抽水试验数据得到不同井距处的水位降深即可得到地层渗透系数反演值, 渗透系数反演结果统计如表 3 所示。

表 3 基于抽水试验模拟的渗透系数反演值
Table 3 Inversion of permeability coefficient based on pumping test simulation

井距/ m	抽水流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	试验 降深/m	拟合 系数	拟合 指数	反演渗透系 数/(m·d ⁻¹)	标准 差	平均值/ (m·d ⁻¹)
19.3	280	0.90	30.270	-0.978	36.4	2.4	33.2
	340	1.29	36.759	-0.978	30.8		
	400	1.43	43.245	-0.978	32.6		
20.0	280	0.90	30.270	-0.978	36.4	2.4	33.6
	340	1.30	36.759	-0.978	30.5		
	400	1.38	43.245	-0.978	33.8		
60.0	280	0.40	19.173	-0.993	49.6	5.1	43.8
	340	0.64	23.283	-0.993	37.1		
	400	0.63	27.383	-0.993	44.6		
120.0	280	0.16	12.458	-0.998	79.0	11.9	66.6
	340	0.30	15.125	-0.998	50.7		
	400	0.26	17.789	-0.998	70.1		

由表3可知, 随着抽水井距离的增加, 不同抽水流量采用的水位降深试验值通过拟合函数获取地层渗透系数的离散性增加, 主要因为抽水井距离越远, 水位降深越小, 试验值敏感性越大。井距为 19.3 m 的观测孔 D、井距为 20.0 m 的观测孔 E、井距为 60.0 m 的观测孔 F 以及井距为 120.0 m 的观测孔 G, 其不同抽水流量下渗透系数拟合值偏差相对较小, 井距取 60.0 m 以内时, 渗透系数平均值约为 33.2~43.8 m/d。

对比采用不同规范公式得到的含水层渗透系数与基于抽水试验模拟反演得到的含水层渗透系数可知, 采用单井抽水 2 个观测孔公式计算结果与其他结果相差较大。综合各计算结果, 建议该项目所处位置含水层渗透系数取值为 45.0 m/d, 而非 87.9 m/d。

3 降水方案分析

3.1 基于规范的基坑涌水量计算

二期项目降水施工方案采用的含水层渗透系数为 87.9 m/d, 涌水量计算采用文献[7]给定的计算公式:

$$Q_0=\frac{1.366k(H^2-h^2)}{\lg(1+\frac{R_i}{r_0})+\frac{(H+h)/2-L}{L}\lg(1+0.2\frac{(H+h)/2}{r_0})}$$

(4)

式中: Q_0 为基坑涌水量, m³/d; k 为渗透系数, m/d, 取 87.9 m/d; H 为潜水含水层厚度, m, 取 143 m; h 为井内动水位到潜水含水层底面的距离, m, 取 130 m; R_i 为降水影响半径, $R_i=10S_w\sqrt{k}=796.9$ m, S_w 为降水深度; L 为滤管长度, m, 取 15.2 m; r_0 为基坑等效半径, $r_0=\sqrt{A/\pi}=64.24$ m, A 为基坑等效面积。将以上数据代入式(4)可得到基坑涌水量为 180 973.2 m³/d。

渗透系数采用 45.0 m/d 时, 对应基坑涌水量为 92 648.4 m³/d。

3.2 基于数值模拟的基坑降水方案分析

二期项目基坑现场降水共布置 25 口抽水井, 抽水井分布如图 7(a)所示, 降水时潜水泵流量取 210 m³/h。依据降水施工方案建立基坑降水三维有限差分模型如图 7(b)所示, 抽水井出水流量为 5 040 m³/d, 持续抽水时间为 150 d, 模型四周设置固定水头边界, 水头值为 192 m, 为分析不同含水层渗透系数对降水效果的影响, 含水层渗透系数考虑 87.9 m/d、61.3 m/d、50.0 m/d、40.9 m/d 及 30.0 m/d 共 5 种工况。

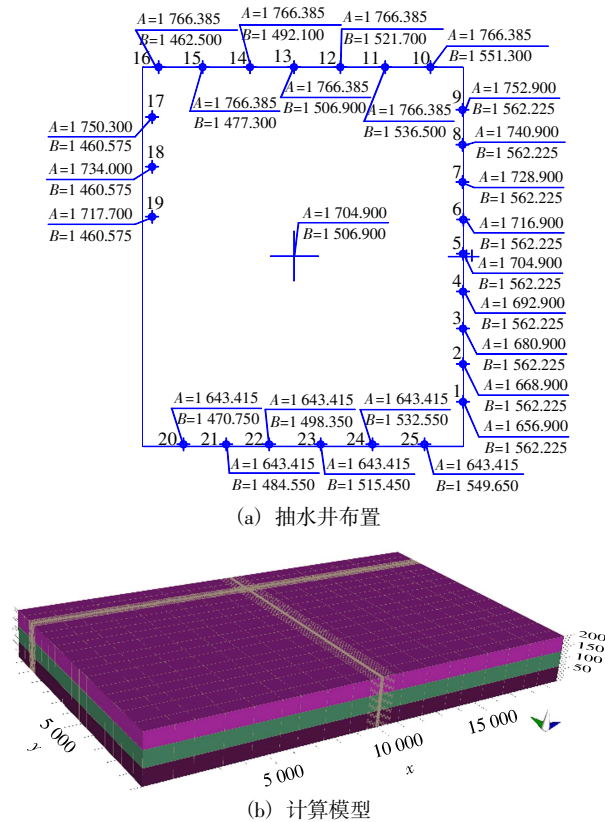


图 7 现场降水施工布置及计算模型
Fig. 7 Layout and model of on-site dewatering construction

根据计算模型内观测孔统计数据,对基坑内水位变化过程进行分析,绘制在不同含水层渗透系数下观测孔水位变化曲线及渗透系数与最终降深关系曲线,如图8及图9所示。

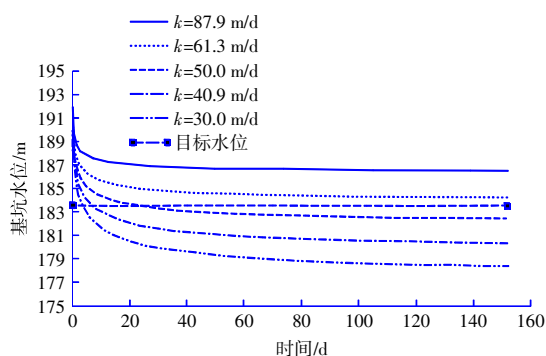


图8 基坑水位与降水时间关系曲线

Fig. 8 Curve of foundation excavation water level with dewatering time

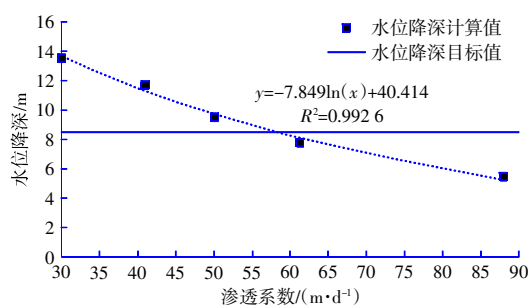


图9 水位降深与渗透系数关系曲线

Fig. 9 Curve of water drop with permeability coefficient

由图8可知,随着渗透系数的增加,相同抽水流量条件下,达到稳定状态时基坑内水位降深减小,含水层渗透系数为87.9 m/d时,按二期项目基坑降水施工方案,基坑降水目标无法达到;由图9可知,稳定状态水位降深与渗透系数关系可用对数函数拟合,且拟合相关系数为0.9926,根据拟合函数,在此降水施工方案条件下含水层渗透系数为58.3 m/d时,基坑水位降深方能达到目标值8.5 m。

二期项目基坑降水工程现场采用的降水方案即为图7(a)所示布设25口抽水井,且单井抽水量为210 m³/h即5 040 m³/d,根据现场施工记录,25口抽水井同时工作时,基坑水位可降至目标高度,而且在关停1/3抽水井即仅采用17口抽水井,单井抽水量5 040 m³/d的条件下,基坑水位仍可在目标水位保持稳定,此时基坑涌水量为85 680 m³/d,结合式(4)可知渗透系数与基坑

涌水量近似呈线性关系,则根据基坑涌水量可反推此时含水层渗透系数为38.8 m/d;根据58.3 m/d的渗透系数减小1/3可反推含水层渗透系数为38.9 m/d。

结合抽水试验分析结果及降水方案分析结果可知,含水层渗透系数取87.9 m/d过于保守,推荐采用45.0 m/d更为合适。

4 结语

针对典型富水砂层深基坑降水工程,采用规范及有限元方法对抽水试验及降水施工方案进行分析,得出如下结论:

1) 采用规范中单井抽水无观测孔公式及单井抽水1个观测孔公式对潜水非完整井抽水试验数据进行处理得到的含水层渗透系数较为一致且接近实际情况,采用单井抽水2个观测孔公式计算结果偏差较大。

2) 采用有限元模拟单井抽水试验,固定抽水流量及井距条件下,水位降深与渗透系数间关系可用幂函数进行拟合,在合适的井距范围内通过拟合函数结合抽水试验数据可求得含水层渗透系数,且结果接近实际情况。

3) 对于后续三期工程基坑降水方案的编制,建议含水层渗透系数取45.0 m/d。

参考文献:

- [1] 樊东东,刘天任,谭勇,等.富水砂层水文地质参数反演及基坑降水围护优化[J].建筑技术,2023,54(13):1587-1591.
FAN Dong-dong, LIU Tian-ren, TAN Yong, et al. Inversion of hydrogeological parameters in water-rich sand layer and optimization of excavation dewatering and support syetem[J]. Architecture Technology, 2023, 54(13): 1587-1591.
- [2] 孙彦晓,刘松玉,童立元,等.长江漫滩区明挖隧道基坑降承压水优化分析[J].岩土力学,2023,44(6):1800-1810.
SUN Yan-xiao, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Optimization of confined aquifer dewatering for cut and cover tunnel in Yangtze River floodplain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(6): 1800-1810.
- [3] 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 Communications Press, 2003.
- [4] 冯波,陈猛,钱巍,等.集水明排与深井井点联合降水工程应用[J].中国港湾建设,2017,37(11):53-56.
FENG Bo, CHEN Meng, QIAN Wei, et al. Application of combined dewatering method of water catchment and deep well in pit excava-

(下转第96页)