

某地铁车站抽水试验及降水方案数值模拟*

李雄威¹ 史贵才¹ 朱建群¹ 王 勇²

(1. 常州工学院土木建筑工程学院, 213002, 常州; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 430071, 武汉 // 第一作者, 副教授)

摘要 以常州某地铁车站项目为对象, 针对地铁车站降水施工, 先进行抽水试验, 然后针对抽水试验开展数值仿真分析; 并在获得有效结果的基础上, 展开整个降水施工的数值仿真模拟, 依据可靠的仿真分析结果, 优化了降水设计。地铁车站的施工过程中, 地下水位和水头均在设计控制范围内, 降水方案确保了施工安全, 使后续施工按期完成。

关键词 地铁车站; 抽水试验; 降水压力; 数值模拟

中图分类号 TU 46⁺³

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2016.09.022

Numerical Modeling of A Subway Station Pumping Test and the Precipitation Pressure

LI Xiongwei, SHI Guicai, ZHU Jianqun, WANG Yong

Abstract subway station in Changzhou City is taken as the research object, the whole dewatering construction process is simulated, first is the precipitation for pumping test, then the numerical modeling of the pumping test and the effective access to the results. According to reliable numerical simulation analysis, the precipitation design is optimized. In the construction process of subway station, the underground water level and water head are within the designed control scope, the precipitation scheme has ensured the construction safety and the follow-up construction.

Key words subway station; pumping test; precipitation pressure; numerical simulation

Author's address School of Civil Engineering & Architecture, Changzhou Institute of Technology, 213002, Changzhou, China

降水是确保地铁车站、重大基坑项目和其它地下工程施工安全的重要一环^[1-3]。而降水方案又要依据不同地区的工程地质和水文地质条件进行针对性的设计^[4-6]。在缺乏相关降水经验的时候, 往往会进行抽水试验, 对单井或群井的出水能力及相应地质环境补水状态进行评价, 为降水方案设计提供

依据。但抽水试验仅能对局部地质环境的降水状态进行评估, 缺乏对整个工程项目降水效率和降水影响的客观分析, 所以, 有时会结合数值仿真模拟, 对降水方案进行深入和全面分析。

本文针对某地铁车站降水施工, 先进行抽水试验, 然后针对抽水试验开展数值模拟计算分析, 在获得有效成果基础上, 展开整个降水施工的数值模拟, 模拟分析结果, 优化降水设计方案。

1 工程概况

本地铁车站为沪宁城际铁路常州站北广场工程中的预留项目。该北广场项目集火车站、长途客运站、地铁车站、公交枢纽站、社会停车场及出租车停靠站等多种交通设施于一体, 还包含商业和商务办公等功能设施。工程项目于2009年3月开工, 于2010年4月竣工。地下工程中预留的地铁车站长度为181.6 m, 标准段宽度为22.9 m, 埋深为19.77 m; 南北端头井宽27.2 m, 埋深分别为21.5 m和21.15 m。基坑围护结构采用桩径为800 mm的钻孔灌注桩。基坑围护结构外侧的止水帷幕采用三轴深层水泥土搅拌桩(桩径为850 mm)。

本工程周边环境复杂, 承压水抽水对环境影响较大, 施工时对减压降水工程提出了很高的要求。为充分观测和掌握承压水抽水引起含水层地下水位变化的特征, 并为降压井的运行制定详细准确的方案, 进行了必要的抽水试验。

2 场地地质及水文地质条件

2.1 场地地质条件

根据勘察报告, 由地层成因、土性不同和物理学差异, 拟建场地在一定深度范围内可划分成不同的层次, 各土层的土性特征见表1。

* 国家自然科学基金项目(41302226; 51579237); 江苏省科学技术基础研究计划(自然科学基金)面上研究项目(BK20131141); 住房和城乡建设部科学技术项目(2012-K3-23); 江苏省地质矿产局科研项目(2015-ky-3)

表1 土层分布

土层名称	分布深度/m	重度/ (kN/m ³)	塑性 指数	液性 指数	地基承 载力/kPa
⑥粉土夹粉砂	-4.40 ~ -6.43	18.9	7.3	1.23	200
⑦粉砂	-6.43 ~ -11.33	19.0	—	—	350
⑨黏土	-11.33 ~ -14.33	20.1	18.2	0.11	380
⑩粉质黏土	-14.33 ~ -17.73	20.1	15.4	0.30	230
⑪粉质黏土	-17.73 ~ -22.03	19.0	8.8	1.06	250
⑬粉质黏土	-22.03 ~ -24.63	19.8	14.2	0.41	270
⑭粉质黏土	-24.63 ~ -31.03	19.2	7.1	1.09	340

2.2 水文地质条件

场地浅部土层中的地下水属于潜水类型,其动水位变化主要受控于大气降水和地面蒸发,地下水位丰水期较高,枯水期较低。水位埋深一般为0.5~2.0 m。

根据地质勘察资料。第I a层承压水主要埋藏于⑥~⑦层粉土、粉砂中;第I b层承压水主要埋藏于⑪层粉土夹粉质黏土及⑭层粉砂中,与长江水、运河水呈补、迳、排关系。

对于⑥~⑦层粉土、粉砂层已经由围护全部隔断,且在土方开挖时也将全部挖除。对本场地有影响的承压水主要赋存于第⑭层承压含水层,水量较大,含水层的补给以侧向径流补给为主,补给速度相对较快,排泄主要是人工开采和侧向径流流出。故而本次抽水试验主要针对⑭层粉砂层。据本区域水文地质资料,第⑭层承压含水层顶板最浅埋深约27.7 m,承压水头埋深为黄海高程-2.85 m。即承压水位埋深为地面以下6.78 m。

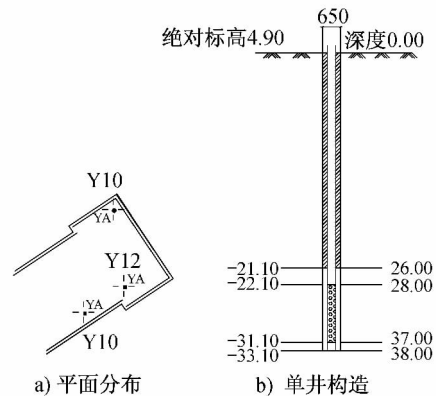
3 抽水试验

2009年7月在基坑内进行群井试验。根据该地区水文地质条件以及现场条件,进行了非稳定流的群井抽水试验,共选择了北端头井的3口降压井为本次抽水试验井。其中包括2口抽水井和1口观测井。

一般根据基坑面积按单井有效抽水面积A(井的经验值为一般为20~300 m²)来确定,而经验值是根据场地潜水含水层的特性及基坑的平面形状来确定。根据以往的布井经验,结合基坑的形状,按每

300 m²布一口井来计算;采用多级滤水管,加真空的措施,以确保每口井的出水量^[7-10]。抽水井分布和构造如图1。

抽水试验主要目的包括3方面:①提供本场地不需要降承压水的临界开挖深度;②获得水位降深与抽水时间、水位恢复与停抽时间之间的规律,为确定合理的降压井抽水时间提供依据;③为建立基坑降水数值模拟模型提供依据。



注: Y10、Y12为抽水井; Y11为观测井; 数值单位为m

图1 抽水井布置

群井抽水试验从2009年07月09日开始。05月09日05:00启动Y10、Y12抽水,并对Y11进行观测。2口试验抽水井启动后出水正常,到2009年7月11日01:00停止抽水,7月11日至7月12日进行水位恢复观测。

3.1 群孔抽水试验井流动态特征

Y10井出水量平均为7.8 m³/h, Y12井出水量平均为8.2 m³/h,群孔抽水试验抽水近2 d,井的出水能力并无衰减。2口井的平均日出水量约为384 m³。具体出水量如图2所示:

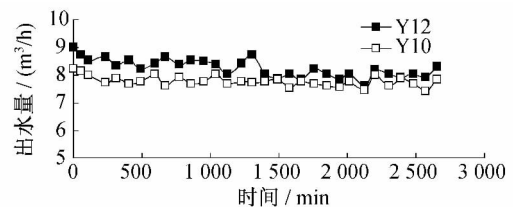


图2 Y12、Y10井出水量曲线

3.2 群孔抽水试验观测井水位动态特征

观测井Y11位于2口抽水井的中间区域,基本能够反映群井抽水过程中,群井降深最大区域的水位特征。根据观测井的水位动态变化曲线可以得到水位变化规律(如图3所示)。在抽水24 h后,水位

基本稳定,观测井水位可降至 22 m。在停抽后 15 h 时,水位可以恢复 77%,即水位上升至 16m。由此看来,基坑内的降压井都能够在抽水后及时发生水位变化(见表 2),而且变化趋势明显(抽水后 24 h 水位基本稳定,停抽后 15 h 基本恢复)。说明含水层的导水能力较好,对于水位变化的响应较快。

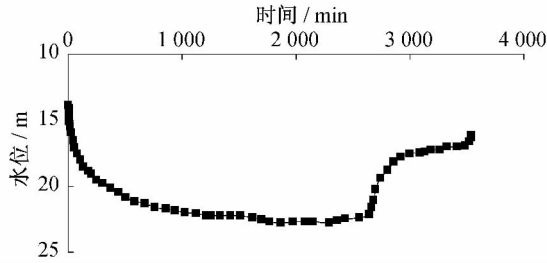


图3 群井抽水试验观测井水位变化曲线

4 群井抽水试验数值模拟

布设观测井的目的是为了了解抽水井在抽水

表2 群孔抽水试验观测孔地下水水位变化值

项目	Y10 抽水孔 (动水位)	Y12 抽水孔 (动水位)	Y11 观测孔 (静水位)
初始水位/m	13.8	14.2	14.0
稳定水位埋深/m	29.8	31.5	22.8

时,承压水头变化的过程。针对试验场地,在抽水试验中布设观测井的原则是“既具有代表性,又能有效反映出场地内外水位变化特征”。本节通过含水层水文地质参数和群井试验取得的井流和水位观测数据,通过数值模拟的方法反演分析,取得整个场地以及周围区域的承压水头变化规律。

4.1 地下水数学模型的原理

地下水流和土体是由固体、液体、气体三相体组成的空间三维系统,土体可模型化为多孔介质,因此求解地下水问题就可以简化为求解地下水在多孔介质中流动的问题。这可用地下水流连续性方程及其定解条件式来描述。

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x H \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y H \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W \quad x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0 \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0 \quad x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ H(x, y, z, t) |_{s_1} = \Psi_1(x, y, z, t) \quad x, y, z \in S_1, t \geq 0 \\ K_n \frac{\partial H}{\partial n} |_{s_2} = Q_2(x, y, z, t) \quad x, y, z \in S_2, t \geq 0 \\ \frac{\partial H}{\partial n} + AH |_{s_3} = B \quad A, B \in S_3, t \geq 0 \\ h(x, y, z, t) |_{t=0} = h_0 \quad x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0 \\ h(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = \phi_1(x, y, t) \quad x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ K_a \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q_2(x, y, z, t) \quad x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \\ \frac{\partial h}{\partial n} + ah |_{\Gamma_3} = \beta \quad a, \beta \in \Gamma_3, t \geq 0 \end{array} \right.$$

式中:

- Q——第二类边界条件下,承压含水层边界 S_2 上单位面积的流量;
- $H(x, y, z, t)$ ——承压含水层承压水头函数;
- $h(x, y, z, t)$ ——潜水含水层的水头函数;
- K_x, K_y, K_z ——分别为 x, y, z 方向的渗透系数;
- Ω ——渗流区域;
- A, B ——第三类边界条件下,承压含水层边界

S_3 上 H 和 $\frac{\partial H}{\partial n}$ 线性组合式中的已知函数;

- K_n ——边界法向方向的渗透系数;
- n ——边界的法线方向向量;
- μ_s ——承压含水层的释水系数;
- μ ——潜水含水层的重力给水度;
- W ——大气降水入渗补给或由潜水蒸发构成的垂向水量交换;
- $\Psi(x, y, z, t)$ ——第一类边界条件下,承压含水

层在边界 S_1 上各点在每一时刻的已知水头函数表达式:

$\phi_1(x, y, t)$ —— 第一类边界条件下, 潜水含水层在边界 Γ_1 上各点在每一时刻的已知水头函数表达式:

h_0 —— 潜水含水层的初始水位分布;

H_0 —— 承压含水层的初始水位分布;

Γ_i —— 第 i 类边界单位宽度的侧向补给量。 Γ_0 对应边界为渗流区域的上边界, 即地下水的自由表面。 Γ_1 对应边界为第一类边界, 即水头边界;

S_i —— 第 i 类边界单位面积的补给量。

4.2 抽水试验数值模型

4.2.1 计算模型

本次数值模拟区域承压水上部不透水层合为第一层, 厚度起伏不大。三维地层从上到下依次为: 弱透水层、第⑦层含水层、弱透水层。根据土层特点, 土体参数设定成非均质水平方向各向同性。采用三维结构、非稳定地下水系统建立地下水系统的数值模拟模型。

本次计算的模拟期定为 2 d, 整个模拟期划分为 2 个计算周期, 每个计算周期计算的时间步长为 1 d。在每个计算周期中, 所有外部源汇项的强度保持不变。根据研究区的含水层结构、边界条件和地下水流场特征, 将模拟区每层剖分为 500 行、400 列规则网格。其中, 活动网格共 200 000 个。

4.2.2 源汇项处理方式

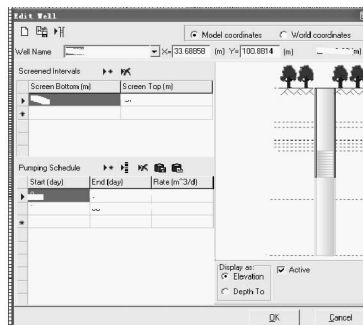
在 Visual modflow 中, 降压井可以设置埋深过滤器长度、出水量等参数, 与实际数据具有很强对比性。根据已有抽水试验观测成果, 抽水井出水量不变。主要参数设置如图 4。

在本次基坑降水模拟中, 模型边界在降水井影响边界以外。故可将模型边界定义为定水头边界, 水位不变。

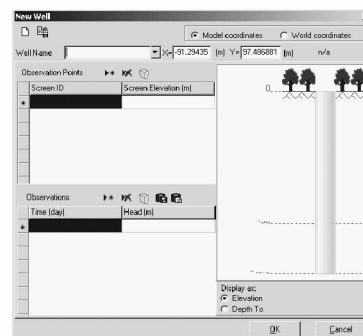
4.3 场地及周围环境承压水头分布模拟分析

将水文地质参数代入到建立的抽水试验数值模型中, 并对观测井的实测数据与数值模拟取得的数据进行对比分析, 通过水头随时间的动态变化可以看出, 模拟的曲线与实测的曲线拟合的很好。这说明水文地质参数真实的反映了含水层的水文地质特性。

将实测与数值模拟的最终稳定降深进行对比见表 3。可以看到两者的误差很小, 在工程允许的误差之内。通过对数值模型的识别与验证, 数值模拟



a) 抽水井



b) 观测井

图 4 井模型示意

的结果与实测的观测井数据基本一致, 因此, 通过该模型计算得到的群井抽水稳定后场地及周围环境的承压水头埋深的模拟结果见图 5。

表 3 数值模拟数据与实测数据的 Y11 观测井稳定水头对比

项目	数值
初始水位/m	14.0
实测稳定水位/m	22.8
数值模拟稳定水位/m	22.1
误差/%	3.1

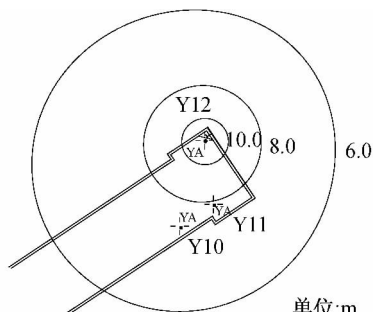


图 5 抽水稳定后的水头等值线

4.4 基坑降水数值模拟预测

验算第⑭层承压含水层的稳定性。

根据《基坑工程设计规程》(DGJ 08 - 61 - 1997), 基坑底板的稳定条件为基坑底板至承压含水层顶板间的土压力应大于承压水的顶托力, 即:

$$\sum \gamma_{s,i} \cdot h_i \geq \gamma_w \cdot H_1 \cdot F_s$$

式中:

h_i ——坑底以下隔水层的覆土厚度;

$\gamma_{s,i}$ ——基坑底至承压含水层顶板间的各层土的重度,取平均重度 19.4 kN/m^3 ;

H_1 ——承压水头高度至承压含水层顶板的距离;

γ_w ——水的重度,取 10 kN/m^3 ;

F_s ——抗承压水头稳定性安全系数,取 1.05 。

据本区域水文地质资料,第⑭层承压含水层顶板最浅埋深约 27.7 m ,承压水头埋深为黄海高程 -2.85 m 。即承压水位埋深为地面以下 6.78 m 。

根据 $\gamma_w \times H_1 \times F_s = \sum \gamma_{s,i} \times h_i$,计算出临界开挖深度 $h_1 = 15.9 \text{ m}$ 。

即当基坑开挖到大于 15.9 m 时,需降低承压水水位;反之,不需要降低承压水水位。

因此,对基坑开挖深度大于 15.9 m 区域具体需降水头,如表4所示:

表4 基坑开挖需降水头对比

区域	基坑开挖深度/m	需降水头/m
东端头井	21.15	10.2
标准段	19.77	7.5
西端头井	21.5	10.9

通过初步模拟估算,在端头井和标准段部分布设12口降压井。根据模拟结果,布设的降压井能够满足基坑开挖的要求。降压井的分布见图6。

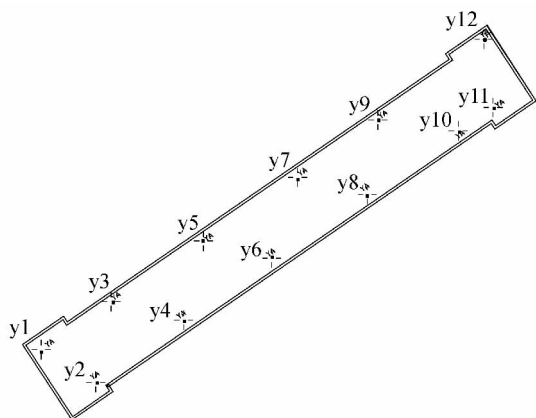


图6 降压井布置

通过数值模拟预测,降水20 d后水位已经稳定。水位稳定后的承压水降深预测等值线图见图7。基坑各区域承压水完全实现预期降水目标,可保证工期的顺利进行。

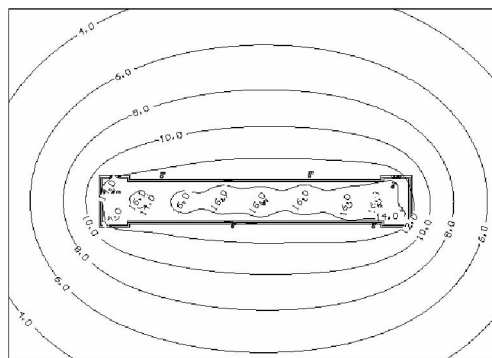


图7 基坑承压水降深预测等值线图

5 结语

某地铁车站降水施工中,先进行抽水试验,然后在获得有效降水成果基础上针对抽水试验展开整个降水施工的数值仿真模拟,并依据可靠的仿真分析结果,优化了降水设计方案。在优化后降水方案的指导下,完成了地铁车站施工的降水任务。车站施工过程中,其地下水位和水头均在设计控制范围内。确保了地铁车站施工的安全,使后续施工按期完成。

参考文献

- [1] 温继伟,陈宝义.管井降水在北京地铁施工中的应用[J].施工技术,2011(19):50.
- [2] 丁智,程围峰,胡增燕,等.杭州地铁人民广场站深基坑降水研究[J].铁道工程学报,2014(1):89.
- [3] 白恒恒.地铁某车站工程施工降水研究[J].铁道工程学报,2012(8):89.
- [4] 徐岩,赵文,李慎刚.基于目标函数法的地铁隧道井群降水优化[J].水文地质工程地质,2009(5):98.
- [5] 覃亚伟,杨新,王帆,等.武汉地铁岳家嘴车站深基坑降水技术应用[J].土木工程与管理学报,2012(1):80.
- [6] 方光秀,马祥,罗江波.地铁车站超深基坑工程大口径管井降水的设计与施工[J].施工技术,2012(13):13.
- [7] 国家质量技术监督局和建设部.供水管井技术规范:GB 50296—1999[S].北京:中国计划出版社,2010.
- [8] 建设部综合勘察研究设计院.建筑与市政降水工程技术规范:JCJ/T 111—1998[S].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [9] 工程地质手册编委会.工程地质手册:第4版[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [10] 中国土木工程学会.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.

(收稿日期:2014-11-28)