文章编号:1005-0523(2012)04-0040-06

高承压水条件下地铁深基坑减压降水研究

李培妍[1],宋福贵[1],宫全美[1],杨海东[2]

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 200092;2. 中铁十三局集团第三工程有限公司,辽宁 沈阳 110000)

摘要:为降低高承压水深基坑工程的突涌风险,在某地铁深基坑换乘站建设过程中,通过现场抽水试验及沉降监测,借助数值模拟为基坑减压降水进行方案优化。获取了承压含水层的水文地质参数,分析预测了三维渗流场及周边沉降的时空分布规律,提出了合理的降水优化方案,对类似工程具有借鉴意义。

关键词:高承压水;抽水试验;数值模拟;减压降水

中图分类号:TU46 **文献标志码**:A

沿海地区高层建筑及地铁车站深基坑开挖工程普遍涉及高承压含水层,面临多种基坑突涌[1]风险,影响基坑整体稳定性。基坑开挖过程中需进行降水设计,不合理的降水设计为基坑开挖的安全埋下隐患,甚至酿成重大的工程事故[2]。

对影响基坑工程的承压水问题处理通常有“隔水”、“降压”及“封底”3种技术手段[3]。考虑经济因素,通常在承压含水层埋藏较浅时,采取地下连续墙等围护“隔水”措施。对不能采取“隔水”措施,而又达不到基坑抗突涌要求的情况,可采取“降压”措施,降低坑内水头。“封底”措施适用于上覆土重略小于承压水水头压力的情况,通过增加土的重度和提高剪切强度以满足抗突涌条件。通过数学解析、数值模拟以及现场抽水试验等多种途径对深基坑承压水减压降水问题已有不少研究[4]。而在异形基坑等存在不规则水力边界条件下,由于获得解析解存在理论局限,因而只能借助数值手段进行模拟。

基于某地铁深基坑换乘站的现场抽水试验数据,确定了含水层的水文地质参数(如渗透系数、导水系数和贮水系数等)。通过对降压的分析校核及由此引起的沉降的模拟[5],进行了方案的优化,以达到保证降水方案切实可靠的目的。紧密联系抽水试验进行含水层模型识别,进而对降水效果及由此引起的沉降进行预测分析的设计方法,对工程后续降水运行方案的设计具有参考意义,对降水运行具有理论指导意义,可供类似工程参考借鉴。

1 工程概况

1.1 工程背景

某地铁车站为换乘站,其中换乘段为1期工程,主体结构东、西两段为2期工程,附属结构(包括耳朵井1,2以及附属风道)为3期工程。本工程采用明挖顺作法施工,围护结构拟采用1 m厚地下连续墙。标准段基坑开挖深度为23.75 m,端头井为25.14 m,附属结构为16.73 m。基坑平面布置如图1所示。

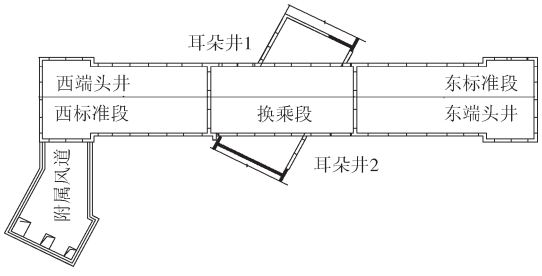

图1 基坑平面示意图

Fig.1 Plane schematic diagram of the foundation pit

本场地承压含水层主要分布于$(12)_1$中砂层和$(14)_1$圆

收稿日期:2012-05-05

作者简介:李培妍(1988—),女,硕士研究生,研究方向为地下水的工程应用。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

砾层,其水位埋深约4 m。承压含水层厚度约29 m,属中等透水~强透水层,富水性好且相互连通。场区各土层由上至下的分布情况及室内渗透系数试验结果如表1所示。

表1　基坑地质概况

Tab.1　Geological survey of the foundation pit

土层编号	平均层厚/m	层顶埋深/m	土层名	室内试验渗透系数/cm·s^{-1}	
				水平K_H	垂直K_V
③$_3$	4.7	1.0~4.4	砂质粉土夹粉砂	3.05×10^{-5}	1.78×10^{-5}
③$_4$	4.1	4.7~9.3	砂质粉土	2.70×10^{-5}	3.00×10^{-5}
③$_5$	3.0	7.0~13.2	粉砂夹砂质粉土	5.10×10^{-4}	6.00×10^{-4}
③$_7$	2.3	11.0~16.0	砂质粉土	4.56×10^{-5}	5.63×10^{-5}
④$_3$	7.3	15.1~17.8	淤泥质粉质粘土	2.67×10^{-7}	2.14×10^{-6}
⑥$_2$	5.8	22.5~26.7	淤泥质粉质粘土	3.70×10^{-7}	1.30×10^{-6}
⑫$_1$	11.4	28.6~33.0	中砂	1.60×10^{-2}	7.30×10^{-3}
⑭$_1$	17.0	40.2~43.1	圆砾	7.00×10^{-2}	6.00×10^{-2}

1.2　问题提出

本工程所处的地质条件不利,水文条件特殊且周边环境复杂,开挖深度大和环境保护要求较高,能否安全解决承压水降水问题,并有效控制对环境的影响是本工程设计及施工的重点。

对基坑在开挖过程中基底面的抗突涌安全性进行验算[6],验算结果如表2所示,表明实际开挖时需采取相应的减压降水措施。当工程开挖大于临界深度需开启深部承压含水层的降压井,以降低基坑突涌风险。本工程在考虑安全系数满足1.1的情况下,基坑稳定的临界开挖深度为16.1 m。

表2　基底面抗突涌验算结果

Tab.2　Checking results of foundation bottom against bursting

工程部位	开挖深度/m	水压力/kPa	土压力/kPa	控制水位埋深/m	水位降低要求/m
端头井	25.14	224.2	82.98	22.20	26.20
标准段	23.75	224.2	108.00	19.90	12.60
附属	16.73	224.2	234.36	8.40	1.10

2　抽水试验研究

为探明⑫$_1$中砂层承压性,进行专项抽水试验,以便进行数值反演分析,预测三维渗流场及周边沉降时空分布规律,为基坑围护设计提供可靠依据,并提出合理的基坑降水方案。

2.1　抽水试验布置

本试验进行2组单井和1组双井抽水的单落程非稳定流抽水试验。试验共布置4口试验井,编号为H1~H4。井深为38 m。滤管位于中砂层顶部,滤管长8 m,滤管底部设置1 m长沉淀管。进行了两组单井(井编号分别为H1,H2)抽水试验,和一组双试验井(井编号为H1和H2)抽水试验;抽水时除抽水井以外的试验井均作为观测井观测水位的降深情况;单试验井抽水时测得H1,H2的稳定时流量分别为38,43 m^3·h^{-1},双试验井抽水时为32,40 m^3·h^{-1};抽水的同时通过观测孔(孔号为G1和G2)观测了潜水层的水位变化情况。试验工作量如表3所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 抽水试验工作量汇总表

Tab.3 Summary table of pumping tests workload

抽水井编号	观测井编号	累计时间/min			流量/$m^3 \cdot h^{-1}$
		抽水	恢复	合计	
H1	H2,H3,H4	660	536	1 204	38
H2	H1,H3,H4	898	300	1 198	43
H1,H2	H3,H4	3 070	1 290	4 360	40

2.2 静止地下水位观测

本场地静止水位具有波动性,抽水前应进行静止水位观测,观测结果如表4所示。

表4 试验井静水位一览表

Tab.4 Static water level list for test wells

参数	H1	H2	H3	H4
孔口标高/m	5.90	5.70	5.99	5.94
井中水位埋深/m	7.63 ~ 7.55	7.17 ~ 7.10	7.42 ~ 7.32	7.66 ~ 7.61
水位埋深/m	7.73 ~ 7.65	7.47 ~ 7.40	7.43 ~ 7.33	7.72 ~ 7.67

2.3 单井抽水试验

1) 试验水位特征。以第1组单井试验的水位特征为例,观测井H2,H3,H4的t–s(时间–降深)曲线如图2所示。

2) 水文地质参数求解。利用抽水试验分析软件AquiferTest,采用单井抽水时的试验数据,进行Hantush–Jacob和泰斯水位恢复曲线法拟合求取水文地质参数[7],拟合结果整理如表5所示。

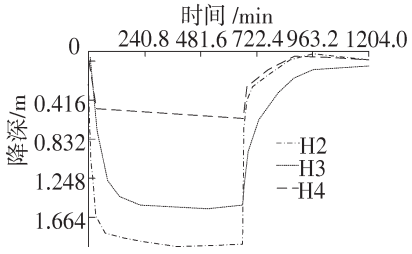

图2 H1抽水时观测井中水位的t–s曲线图

Fig.2 The t–s curve in observation wells when H1 pumping

表5 水文地质参数拟合表

Tab.5 Fitting table of hydrogeology parameters

单井试验	观测井号	渗透系数/$m \cdot d^{-1}$		导水系数/$m^2 \cdot d^{-1}$		Hantush–Jacob曲线法贮水系数/$\times 10^{-4}$
		泰斯水位恢复法	Hantush–Jacob曲线法	泰斯水位恢复法	Hantush–Jacob曲线法	
第1组	H4	10.8	10.1	294	314	5.37
	H2	9.23	10.4	300	268	5.43
第2组	H4	9.06	10.4	302	280	7.94
平均值		10.0		293		6.25

3) 影响半径。引入稳定流影响半径概念,预估抽水影响范围,有两个观测孔时一般采用公式法计算影响半径,如式(1)所示[8]。据此利用H2井抽水试验H3,H4观测孔降深数据进行计算得到影响半径R的值为167.2 m。

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_2 - s_1} \tag{1}$$

式中:R为影响半径,m;s_1,s_2为对应观测孔内水位降深,m;r_1,r_2为对应观测孔距抽水井的距离,m。

2.4 群井抽水试验

在单井试验后,进行一组群井抽水试验。以H1,H2为抽水井,通过H3,H4观测承压水水位降深的时

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

空变化。试验期间，抽水井H2及观测井H3，H4的最大水位降深分别为21.97，3.95 m和1.42 m。

现场抽水试验表明当采用流量大于40 $m^3 \cdot h^{-1}$的水泵进行降水时，会因流量过大，致使水泵吸入空气，影响降水井进水，从而降低降水质量。建议在进行预测模拟及后期有地下连续墙进行降水时，控制单井最大涌水量为25~35 $m^3 \cdot h^{-1}$。

2.5　沉降监测

以试验井区域为中心在60 m范围内布置监测点，共10个，编号为C1~C10。监测点仅在试验区域布置1条监测剖面，监测点间距约5，10，15 m。监测时间从2010年6月8日开始到2010年7月1日结束。

根据沉降监测，影响范围内地表沉降量在±2 mm（“－”值表示回弹量）内变化，在抽水试验期间沉降变化无明显规律。由于抽水时间较短，总抽水量不大，并且承压含水层（中砂层和圆砾层）压缩性相对较小，所造成的周围环境影响较小。

3　三维渗流数值模拟

3.1　模型的建立

采用地下水三维渗流数值模拟软件进行水文模型数值模拟。地下水三维连续渗流方程可用（2）式所示的偏微分方程来表示，结合边界条件和初始条件可进行求解。

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z})-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \tag{2}$$

式中：K_{xx}，K_{yy}，K_{zz}分别为x，y，z坐标轴方向上的渗透系数；h为水头；W为单位体积流量；S_s为孔隙介质贮水率；t为时间。

水位初始条件为抽水试验观测到的平均水位。边界条件为计算区域上下边界取弱含水层边界，四周边界取定水头边界，定水头边界值同初始水位值。因承压含水层渗透性大，确定以基坑中心点为基点，方向各延伸800 m，共计1 600 m×1 600 m，通过试算在平面尺寸上可满足模型计算精度要求。网格剖分时平面网格由基坑外而内逐渐加密共剖分为98×85个网格单元，纵向网格依据实际地质层进行剖分。其它模拟参数如滤管长度、抽水时间、抽水量等根据实际和预测模拟情况进行取值。

3.2　模型校验

根据相应的抽水工况进行模型计算，将计算结果与观测资料对比进行验证。由于篇幅所限仅以第1组单井抽水试验为例，单井涌水量约38 $m^3 \cdot h^{-1}$，数值验证采用相同条件进行验证。其观测井H4实测数据与模型计算曲线能较好拟合，数值模拟中降深随时间的变化过程以及最终稳定降深值与实测的观测井数据基本一致。

通过对两组单井实验和一组双井实验的数值模型识别与验证，表明数值模型与实际相切合。模拟反演了抽水期间承压含水层水流状态，验证了抽水试验得出的水文地质参数的可靠性，表明建立的三维渗流数值模型能够反映实际条件下的地下水渗流情况。并可依此模型进行基坑降水方案比选以及减压期间地下水动态特征状况预测。

3.3　降水预测

根据抽水试验期间地下水位观测资料，按开挖至设计标高时的降压要求，通过预测模拟进行减压降水设计优化。以基坑换乘段的模拟为例演示预测过程，其它各工程部位的模拟结果如表6所示。

当基坑围护结构为40.0 m深（墙底位于⑭1圆砾层顶板处）时，对基坑减压降水的可行性进行数值模拟分析，模拟采用井结构同试验井结构。在基坑开挖至设计深度（23.75 m）时基坑范围内承压水位的最小安全降深12.6 m（埋深为19.9 m）。开启4口减压井进行减压，单井涌水量25 $m^3 \cdot h^{-1}$（此为该有围护结构下群井的预估最大单井出水量），预测坑内承压含水层顶部水位降深等值线图如图3所示。

在持续减压抽水1天后，基坑内最浅降深在14.0 m左右，能够满足基坑安全开挖至23.75 m的减压要求。由于围护结构阻滞作用，持续减压降水时坑外水位降深较小，持续抽水120天（预计降水持续时间）后，坑外水位降深在4.0 m左右，抽水影响范围约200.0 m。

计算含水层的沉降量的沉降模型的方程如式（3）所示[9]。

$$\Delta b=-q_i\Delta tA \tag{3}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其中 $$q_i = S'_{sk}\frac{\partial h}{\partial t}$$

方程中 Δb 表示厚度为 A 的含水层在 Δt 时间内的压缩量。当单元格水头大于前期固结水位(它表示土体在某一时刻之前粘性土中曾达到过的最低孔隙水压力水头)时，S'_{sk} 是含水层骨架部分弹性储水率；当单元格水头小于前期固结水位时，S'_{sk} 是含水层骨架部分非弹性储水率。对于任何模型，若给定的前期固结水头大于初始水头，则指定前期固结水头为初始水头值，构成了求解地下水流和地面沉降之间的耦合模型。

利用该沉降模型进行模拟，在持续减压抽水120天后，地表沉降量分布如图4所示，坑外减压降水影响范围内沉降约为1～6.0 mm，基坑减压降水对坑外环境有一定的影响。

表6 基坑降水运行预测结果

Tab.6 The forecasting results of precipitation operation for pit

工程部位	模拟围护深度/m	最小安全降深/m	井数	单井流量/$m^3\cdot h^{-1}$	抽水1天后的降深/m	沉降量/mm
换乘段	40	12.6	4	25	16.0	1~6
2期西段	40	12.6(14.9)	4	25	14.0(16.0)	1~6
2期东段	40	12.6(14.9)	5	25	14.0(16.0)	1~6
耳朵井1	无	1.34	1	37.5	2.0	0~3
耳朵井2	无	1.34	1	37.5	2.0	0~3
附属风道	无	1.11	1	37.5	1.8	0~3

注：① 表中2期东、西段的降深数据包括括号外表示标准段降深值，括号内表示换乘段的降深值；② 表中的沉降量，对于主体结构系指降水120天后的沉降量，对于附属结构系指降水30天后的沉降量。

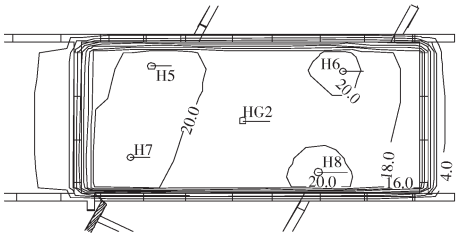

图3 抽水1天坑内降深等值线图

Fig.3 The water level contour map in pit after 1 day pumping

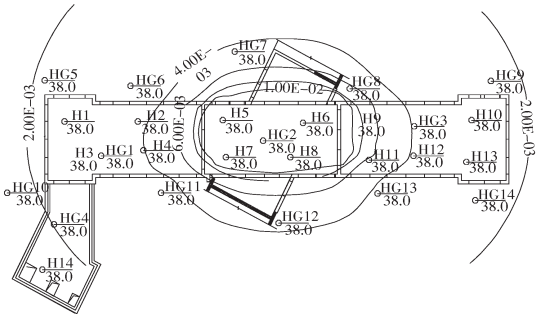

图4 抽水120天后沉降等值线图

Fig.4 The subsidence contour map after 120 days' pumping

3.4 降水方案

根据数值模拟结果，结合实际工程情况，考虑承压降水是本工程重要的施工风险源，拟将基坑主体围护结构作隔断处理，插入土层58.0 m，隔断基坑内外承压水水力联系。基坑降水优化降水设计方案布井如图5所示，其中主体西段和换乘段分别布设4口减压降水井和1口备用兼观测井，主体东段布设4口减压降水井和1口备用兼观测井；附属耳朵井1和耳朵井2分别布设1口备用井，附属风道布设1口减压井和1口备用井。

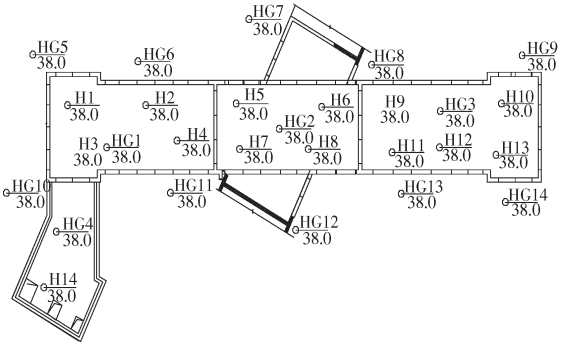

图5 优化降水方案布井平面图

Fig.5 The well plane layout of optimization dewatering scheme

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　结语

1）本次抽水试验测得⑫$_1$中砂层水位埋深为7.33~7.72 m。试验中当水泵流量大于40 $m^3 \cdot h^{-1}$时，会吸入空气影响降水质量，建议进行涌水量计算时单井最大涌水量取25~35 $m^3 \cdot h^{-1}$。

2）对抽水试验进行拟合分析，求取了⑫$_1$中砂层的水文地质参数：渗透系数为10.0 $m \cdot d^{-1}$，导水系数为293 $m \cdot d^{-1}$，贮水系数为6.25×10^{-4}，影响半径为167.2 m。

3）数值模拟模型以现场抽水试验为前提进行反演校核。经校核的模型用于减压降水水位和沉降量的预测，能保障预测结果与工程实际更为贴近。在此基础上提出的基坑降水的优化设计方案可靠度更高，对工程后续的减压运行具有指导意义。

参考文献：

[1] 孙玉永，周顺华. 基于离心模型试验的基坑突涌模式及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2010，29(12)：2551-2557.

[2] 毕湘利. 承压水作用下地铁深坑开挖施工设计技术研究[D]. 上海：同济大学，2004.

[3] 戴斌，王卫东. 受承压水影响深基坑工程的若干技术措施探讨[J]. 岩土工程学报，2006，28(S1)：1659-1663.

[4] 张杰青，陈海兵，施木俊，等. 基坑地下承压水的控制设计及抢险方法[J]. 岩石力学与工程学报，2000，19(S1)：1108-1110.

[5] 邵烈，杨龙才，王炳龙. 软土地区无碴轨道线路桥梁桩基础沉降规律和预测分析[J]. 华东交通大学学报，2011，28(4)：6-13.

[6] 中华人民共和国建设部. GB 50007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.

[7] 蒋辉. 基于AquiferTest的抽水试验参数计算方法分析[J]. 水文地质工程地质，2011，38(2)：35-38.

[8] 刘建行，侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1997：77.

[9] 张冬冬. 承压降水引起周边环境变形的数值模拟分析[J]. 上海地质，2010，31(S1)：24-28.

Pressure Reduction Dewatering in Deep Foundation Pit of Subway under High Confined Water

Li Peiyan[1], Song Fugui[1], Gong Quanmei[1], Yang Haidong[2]

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Railway 13th Bureau Group 3rd Engineering Co. Ltd. , Shenyang 110000, China)

Abstract: To reduce the bursting risk of deep excavation engineering under high confined water during the construction of a subway transfer station, an optimization scheme was provided based on the field pumping tests and subsidence monitoring with the aid of numerical simulation. Through the analysis in the paper, the hydrogeology parameters for the confined aquifer were defined, then the 3D seepage field and the space-time settlement distribution of the surrounding were forecasted, and the reasonable optimization dewatering scheme was put forward. This research provides reference for similar projects.

Key words: high confined water; pumping test; numerical simulation; pressure reduction dewatering

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net