

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.03.004

软土深基坑高压水头承压水突涌治理与研究

陈文昭, 朱 锋, 王 文

(南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:在软土深大基坑开挖过程中,高水头承压水对基坑的威胁不容忽视。依托于长江北岸某软土深基坑高压水头承压水突涌事故,从降低承压水水头方向入手,通过理论计算和数值模拟对比分析现场监测数据,研究通过减压降水降低坑内外承压水水头的工程措施,实现对高压水头承压水导致的基坑突涌事故的治理。结果表明:坑外施工降水井进行减压降水对于基坑突涌的治理效果显著。

关键词:软土深基坑;高压水头;基坑突涌;坑外降水设计

中图分类号:TU753 **文献标志码:**A

文章编号:1673-0062(2022)03-0022-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Control and Research on High Pressure Head Confined Water Surge in Deep Foundation Pit in Soft Soil

CHEN Wenzhao, ZHU Feng, WANG Wen

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract:In the process of deep and large foundation pit excavation in soft soil, the threat of high head confined water to foundation pit should not be underestimated. Starting from the direction of reducing confined water head, relying on the high pressure confined water head inrush accident of a deep foundation pit in soft soil of the north bank of the Yangtze River, the paper studies the engineering measures of reducing confined water head inside and outside the pit by decompression precipitation through numerical simulation calculation and comparative analysis of site monitoring data, so as to realize the treatment of pit inrush accident. The results show that decompression dewatering is an efficient and cost saving measure for the treatment of foundation pit water gushing.

key words:soft soil deep foundation pit;high pressure head;foundation pit inrush;design of precipitation outside the pit

收稿日期:2022-01-12

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51708273);2018年湖南省教育厅科研项目(重点)(18A252);湖南省自然科学基金青年项目(2017JJ3263)

作者简介:陈文昭(1969—),男,副教授,博士,主要从事岩土工程高边坡、岩土工程勘察等方面的研究。E-mail: cwzusc@126.com

0 引言

随着轨道交通及地下空间工程的迅猛发展,地下水控制成为不可避免的问题,也是对施工组织设计和工程质量的严峻考验。影响基坑的地下水主要分为上部潜水和下部承压水,二者由隔水层分割,各具特点,应区别对待分别治理。上部潜水对基坑危害多为渗流破坏,一般采用隔水帷幕截水防治。深大基坑工程已经揭穿上层潜水,故围护结构已阻隔上层潜水,采用集水坑抽排或者疏干井疏干通常就能够实现对潜水的控制^[1]。下部承压水的控制一直是基坑工程地下水处理的重点与难点,A. Jurado 等^[2]利用概率分析进行量化地下水对地下工程施工的影响,认为场地湿润、地下水排出不完全状态会给施工带来严重影响。周红波等^[3]通过分析多个典型案例,总结出基坑失稳主要体现为:基坑突涌和围护结构隔水帷幕渗漏,并指出承压水风险控制重点在于隔水、降压和封底。朱雁飞^[4]依据大量工程实例,总结了承压水对深基坑工程的危害模式,强调了承压水对基坑工程施工的影响,并提出了围护-降水一体化设计思路,即明确施工场地水文地质情况,在施工设计时充分考虑承压水的影响。Y. S. XU 等^[5]通过模型试验结合数值模拟的方法,研究地墙插入深度对深层地下水渗流的影响,结果表明上海含水沙地区某挡土墙的有效插入深度比约为70%。X. W. WANG 等^[6]采用数值模拟的方法研究了止水帷幕与降水井之间的相互关系,研究结果给出了止水帷幕深度与降水井滤管长度比值的有效取值与建议取值。曹正龙等^[7]使用地连墙下加深素墙作为止水帷幕,隔断水平方向水源补给,配合坑内减压疏干联合的降水方案,成功解决了济南地铁3号线基坑开挖突涌的风险。徐长节等^[8]采用基底灌浆加固法,成功解决杭州某基坑项目涌水事故。但是对于高承压水条件下的深基坑工程,基底注浆作用有限^[9]。王世君^[10]通过现场实例论证了减压降水、地墙隔断及旋喷桩加固三种方案在软土深基坑工程中处理承压水的可行性,指出对于基坑周边环境较简单的工程,采用减压降水效果且成本低^[11]。

1 工程概况

1.1 基坑概况

该项目基坑起自靖江市城西大道与沿江公路

交叉口,向南逐步挖深,基坑全长约690 m,分为工作井、明挖始发段、明挖暗埋段及敞开段4个区段。基坑北侧是城西大道,中间横穿S356省道,基坑南侧及东西两侧多为农田,有少量村民房屋。地面标高参考地质勘察报告取+3.5 m。

由前期勘察报告及基坑突涌验算可知,工作井区域在开挖过程中有第Ⅲ层承压水突涌的风险。而本次基坑涌水事故就发生在工作井,工作井平面布置如图1所示。工作井全长25 m,采用明挖顺作法施工,基坑开挖深度29.4 m,宽度为53.56 m,采用60 m深1200 mm地下连续墙作为围护结构,地墙外选用全方位高压旋喷注浆(metro jet system, MJS)工法进行基底加固,基坑内部设计4道钢筋混凝土土内支撑加1道钢支撑。

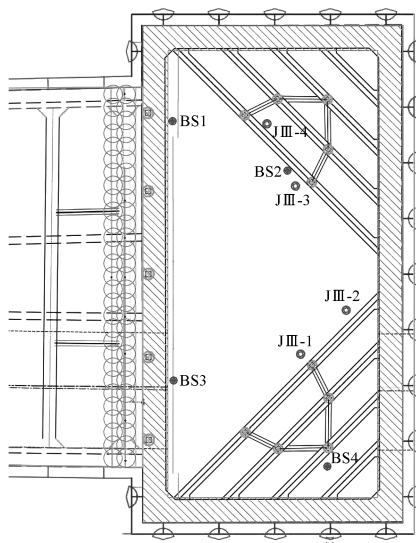


图1 工作井平面图

Fig. 1 Working well plan

1.2 工程地质

据前期地质勘查资料,本场地第四系覆盖层主要为全新统人工填土和冲洪积层等,其中典型土层如下:①1层杂填土;②2层淤泥质粉质黏土,②3层粉砂,②4层粉细砂;③1层粉质黏土,③3层粉砂,③4层粉细砂;④2层粉质黏土,④4层粉细砂,④5层中粗砂,④5-2层粉细砂。①1层总厚度0.6~5.6 m,层顶深度0 m,层底深度0.6~5.6 m;②2层总厚度17.9~24.6 m,层顶深度~5.6 m,层底深度20~26.6 m;③3层总厚度4.3~29.3 m,层顶深度:20~26.6 m,层底深度:27~53.2 m;④4层总厚度1~49.1 m,层顶深度:48.8~53.2 m,层底深度:50~98.9 m。各土层物理力学指标如表1所示。

表 1 各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

岩土 编号	土层厚度/ m	质量密度 ρ / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	重力密度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数 k / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	压缩模量 E_s / MPa	黏聚力 C / kPa	内摩擦角 Φ / rad
①1	0.6 ~ 3.5			5×10^{-3}			
②2	0.8 ~ 12.7	1.81	18.1	5×10^{-5}	3.59	13.6	11.9
②3	1.2 ~ 9.4	1.93	19.3	1.5×10^{-3}	10.55	3	31.2
②4	1.4m ~ 9.6	1.94	19.4	4×10^{-3}	11.03	3.4	32.3
③1	1.1 ~ 4.8	1.99	19.9	5×10^{-6}	6.6	38.3	16.8
③3	1.1 ~ 9.8	1.97	19.7	5×10^{-3}	10.77	3.2	32.7
③4	1.3 ~ 20.9	2.01	20.1	1×10^{-2}	11.64	3.2	33.1
④2	1 ~ 5.4	1.94	19.4	2×10^{-5}	5.67	28.1	16.9
④4	2.4 ~ 14.8	2.04	20.4	1×10^{-2}	12.85	3.4	33.2
④5	1.2 ~ 8.1	2.07	20.7	4×10^{-2}	12.4	1.8	33.3
④5-2	3.9 ~ 15.8	2.03	20.3	1×10^{-2}	12.1	3.5	33.1

1.3 水文地质

通过对工程沿线地下水赋存条件、含水介质及水力特征分析,水文地质主要包括地表水和地下水。

1.3.1 地表水

沿线地表水主要为人工改建后的道路、民房及农田等,地表水主要为河塘。

1.3.2 地下水

潜水主要赋存于浅部填土层、漫滩区及冲积平原区上部土层中,其渗透性和富水性差,径流途径短,径流量小。

承压含水层大致可以分为三个。

第Ⅰ层承压水层主要由②3、②4 组成,含水层总厚度 2.8 ~ 12.8 m,初见水位标高在 -10 m,稳定水位标高在 0.92 m。

第Ⅱ层承压水层主要由③3、③4 组成,含水层总厚度 17.7 ~ 23.5 m,初见水位标高在 -23.6 m,稳定水位标高在 0.40 m。

第Ⅲ承压水主要由④4、④5 及④5-2 组成,含水层总厚度 23.1 ~ 36.6 m,初见水位标高在 -38.9 m,稳定水位标高在 0.57 m。

2 基坑突涌事故概况

2021 年 4 月 25 日凌晨 4 点,在工作井位置基坑开挖至地面以下 14 m 的时候,坑内一处废弃桩头突发涌水现事故,涌水量在 80 m³/h 左右,周边土体向内坍塌且有涌砂迹象。现场立即采取土方、沙袋反压及引流等措施,开启坑内 4 口第Ⅲ层

承压水降压井后,涌水量仍未明显减小。现场涌水情况如图 2 所示。

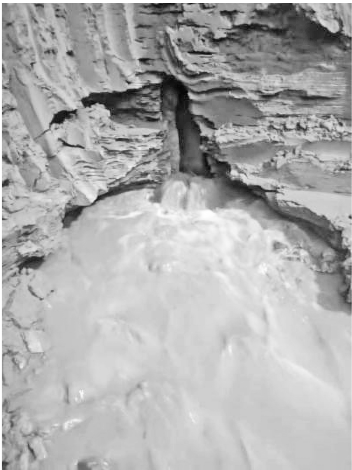


图 2 基坑突涌现场

Fig. 2 Emergence field of foundation pit protrusion

该事故发生时工作井基坑内有 4 口混合疏干井全部运行,合计出水量在 70 m³/h;4 口第Ⅲ层承压水降压井在事故发生后开启,合计出水量在 150 m³/h。为保证后续基坑内土方顺利开挖及开挖完成后主体结构顺利施工,需要将地下水位降至基坑底下 0.5 m ~ 1 m^[12],依照按需降水的原则,开挖过程中需保证基坑内水位控制在开挖面以下 1 m。

3 事故原因及分析处理

土体的强度、刚度及土体与围护结构的摩擦

力是基坑稳定主要影响因素,当其中某一项不能达到平衡或者有较大变形,就会造成基坑突涌的事故^[13]。经调查分析得知:涌水位置是基坑开挖之前进行钻孔灌注桩成孔施工时,遇到障碍物成孔困难最终塌孔,后采用黏土回填,但是回填不够密实,因而留下隐患。工作井位置第Ⅲ层承压水初见水位在标高-38.9 m,废弃桩头施工深度在 60 m 左右,已涉及第Ⅲ层承压水。随着基坑开挖

不断卸荷,开挖至 14 m 时,在第Ⅲ层承压水压力作用下,桩孔被击穿造成涌水事故。经专家论证结合降水单位专家意见,拟采用坑外成井降水方式处理。

3.1 地下水参数选取及基坑抗突涌验算

1) 水文地质参数选取

本次水文地质参数的选取参考地质勘察报告及初期降水试验提供的数据,见表 2。

表 2 承压含水层水文地质参数
Table 2 Hydrogeological parameters of confined aquifer

层号	土层名称	水平渗透系数/(cm·s ⁻¹)	导水系数 T/(m ² ·d ⁻¹)	贮水系数(经验取值)
I 层	②3 粉砂、②4 粉细砂层	2.34×10 ⁻³	14.8	9.94×10 ⁻³
II 层	③3 粉砂、③4 粉细砂	1.22×10 ⁻³	174	1.16×10 ⁻²
III 层	④ ₄ 粉细砂	/	261	1.17×10 ⁻²
	④ ₅ 中粗砂	4.05×10 ⁻² (建议值)	/	/

2) 抗突涌验算

随着基坑开挖,上层覆土压力减小,当上层覆土压力小于或等于承压水层顶托力的时候基坑将有突涌风险。一般通过以下公式进行判断基坑开挖后是否处于抗底部承压含水层突涌稳定的状态。

$$\frac{P_s}{P_w} = \frac{\sum h_i \times \gamma_{si}}{H \times \gamma_w} \geq F_s \quad (1)$$

式中, P_s —承压含水层顶面至基底面之间的上覆土压力,kPa; P_w —初始状态下(未减压降水时)承

压水的顶托力,kPa; h_i —承压含水层顶面至基底面间各分层土层的厚度,m; γ_{si} —承压含水层顶面至基底面间各分层土层的重度,kN/m³; H —高于承压含水层顶面的承压水头高度,m; γ_w —水的重度,工程上一般取 10,kN/m³; F_s —安全系数,工程上一般取 1.05~1.20,本工程取 1.1。

工作井开挖 14 m 已揭穿第 I、II 层承压水,采用疏干降水的方式将其降至开挖面以下 1 m;本次针对第Ⅲ承压含水层,上覆土层重度 γ_s 取 19.5 kN/m³。计算结果如表 3 所示。

表 3 第Ⅲ层承压水抗突涌验算结果
Table 3 The result of checking the resistance to inrush of confined water in the third layer

开挖区域	工况	含水层	开挖状态	最浅层顶 标高/m	坑底标高/m	安全水位 标高/m	水位降深/m	安全系数
工作井	一般工况	第三 承压水	临界状态	-47.28	-21.34	0.57	不需降压	1.10
			底板挖深		-25.90	-7.52	8.09	0.92
	临界状态		-19.69		3.50	不需降压	1.10	
	最不利工况		底板挖深		-25.90	-7.52	11.02	0.87

由表 3 可知,工作井开挖至底板时第三层承压水的安全水位标高为-7.52 m,对于一般工况,基坑开挖至标高为-21.34 m 时才需进行第三层承压水减压降水,开挖至坑底时水位降深为 8.09 m;若是按照最不利的工况考虑,基坑开挖至标高-19.69 m 时就需进行第三层承压水减压降水,开挖至坑底时水位降深为 11.02 m。

3.2 基坑涌水量计算

根据规范^[14],结合本工程性质,由附录 B.03-2 可知,用大井法可计算得出基坑涌水量,利用承压水非完整井公式进行分析计算基坑涌水量。

$$Q = \frac{2.73 \times KMS}{\lg \frac{R + r_0}{r_0} + \frac{M - l}{l} \lg \left(1 + 0.2 \frac{M}{r_0} \right)} \quad (2)$$

式中: Q 为基坑涌水量, m^3/d ; K 为渗透系数, 35 m/d ; S_0 为基坑水位降深, 15 m ; R 为影响半径, 888 m ; r_0 为基坑等效半径, 23 m ; M 为承压含水层厚度, 36.6 m ; l 为滤水器有效工作部分长度, 15 m 。

通过计算,深层承压水位降低至开挖面以下(埋深 15 m)时,预估总涌水量为 $29\,631 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.3 单井涌水量计算及成井数量确定

单井涌水量可按照下公式计算:

$$q_0 = 120\pi \times r_s \times l \sqrt{K} \quad (3)$$

式中: r_s 为滤水管半径, 0.1625 m ; l 为滤水器有效工作部分长度, 15 m 。

由计算结果知,理论单井涌水量约为 $3\,006 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

降水井数量确定根据下式计算:

$$n = 1.2Q/q \quad (4)$$

计算得出 $n=12$,由此可知,理论上在坑外补打12口降压井可满足当前降水要求。

4 降水设计方案及监测数据分析

4.1 降水方案

此次事故处理采取:坑外成井降水、坑内明水

抽排沙袋填堵的思路。在坑外成井过程中严格把控成井质量,满足抽水条件后立刻安排安装水泵启动抽水。待坑外井运行一段时间,基坑内部不再涌水之后,对基坑内存在突涌风险的地方(桩头、损坏的承压井及勘探孔等)全部进行注浆加固与封堵。

根据现场降水效果与施工工况,暂定成井方案如下:坑外补打12口 68 m 减压降水井即可解决当下基坑涌水事故,由于缺乏保护导致基坑外水位观测井损坏严重,在基坑两侧补打2口 50 m 第Ⅱ层承压水观测井及2口 68 m 第Ⅲ层承压水观测井,共计施工16口井。考虑到工程地质勘察不能完全揭示地层局部差异,后期基坑开挖地墙或存在渗漏风险,以及地质勘察报告提出Ⅱ、Ⅲ层承压水之间的隔水层相对薄弱,在施工扰动下有风险形成水力通道,前期抽水试验也证明Ⅱ、Ⅲ层承压水存在一定水力联系,有文献^[15]验证过对于地质结构复杂,承压水量较大地质采用混合深井结构降水成效显著,故坑外补打降水井均采用混合井结构。井位平面布置见图3所示。

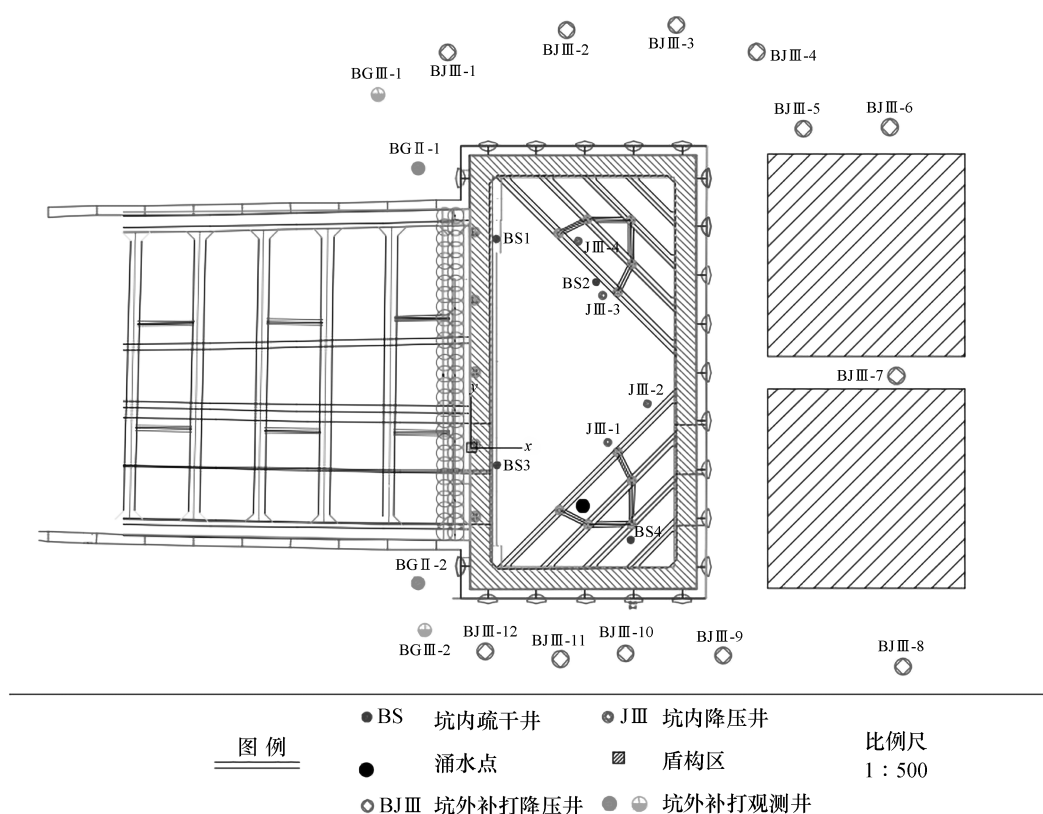


图3 坑外补打降压井平面布置图

Fig.3 Layout of the relief well outside the pit

4.2 处理结果

最终仅用7 d时间完成坑外12口应急减压井的成井工作,并逐步安装水泵抽水运行。坑外应急减压井运行之后,基坑内部已不再涌水,坑外降水效果显著。

4.3 数据分析

由水位监测结果(图4、图5)可知,工作井基坑内外降水井运行1周后,坑内第Ⅲ层承压水水位埋深维持在15.5 m,第Ⅱ层承压水水位埋深维持在31 m;坑外第Ⅱ层承压水水位埋深维持在21.5 m,第Ⅲ层承压水水位埋深维持在20~23 m。已经完全满足目前基坑开挖条件,后续施工依据按需降水原则,控制坑外降水井运行数量,保证水位在开挖面以下1 m。

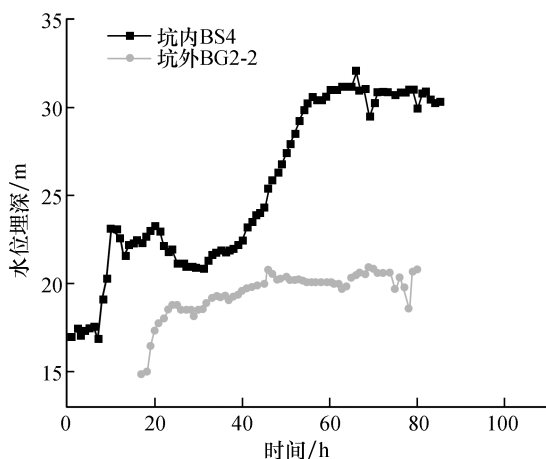


图4 坑外降水后第Ⅱ层承压水水位曲线

Fig.4 The confined water level curve of the second layer after precipitation outside the pit

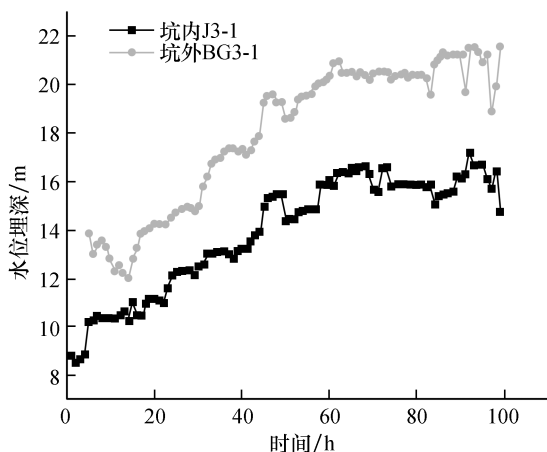


图5 坑外降水后第Ⅲ层承压水水位曲线

Fig.5 The confined water level curve of the third layer after precipitation outside the pit

5 数值模拟计算与分析

5.1 渗流数值模型建立

通过拟建场地的工程水文地质条件、基坑围护结构特点及基坑开挖深度等因素,使用 Visual Mod Flow 进行模拟分析计算,通过现场监测数据与模拟数据对比分析,验证降水施工方案的正确性与合理性。

1) 水文地质模型建立

降水过程中,上覆潜水含水层会与下覆承压含水层组之间将发生一定的水力联系,故将上覆潜水含水层、弱透水层以及上覆深层承压含水层组一并加入模型中计算,并概化成三维空间上的非均质各向异性水文地质概念模型。边界的不确定性会给结果带来随意性,所以对定水头边界做远离源、汇项处理。此次计算将整个基坑的最远边界点为起点,以工作井作为中心向四周扩展500 m,所以实际的计算平面尺寸大概为1 000 m×1 000 m,按定水头边界处理。

根据现有的勘察报告、水文地质条件和钻孔资料,模拟区平面范围按以下原则来确定:以基坑为中心,边界布置在降水井影响半径以外。

2) 模型参数研究

根据本工程的勘察资料、相关工程资料,对模型进行赋值。

3) 本次减压降水三维渗流模型建立的假设条件

(1) 止水帷幕采用墙边界 WALL 进行模拟,厚度及深度由实际施工而定此次为1.2 m×60 m,渗透系数设置 1×10^{-9} cm/s,设置12口井,水泵功率125 m³/h,单井出水量3 000 m³/d。

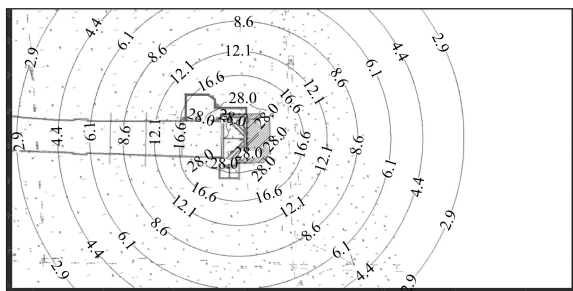
(2) 减压降水井运行时,考虑围护结构隔水效果以及群井抽水效应的因素,假设运行时间较长之后稳定的单井出水量将出现衰减。

5.2 模拟结果分析

模拟计算结果如下所示。由图7可知,工作井区域开启坑内4口减压井及坑外12口承压水降水井,坑外第Ⅲ层承压水降深达18 m~20 m;从图7中不难看出坑外井运行之后,坑外第Ⅱ层承压水降深在20 m左右。由此可以得知目前第Ⅲ层承压水水位已经降至当前开挖面以下,可以达到控制基坑突涌的效果。

图8为坑外井逐步开启降水期间,工作井两侧观测井水位变化实测值与计算值对比曲线,从图中易知,观测井水位变化的实际监测值与计算

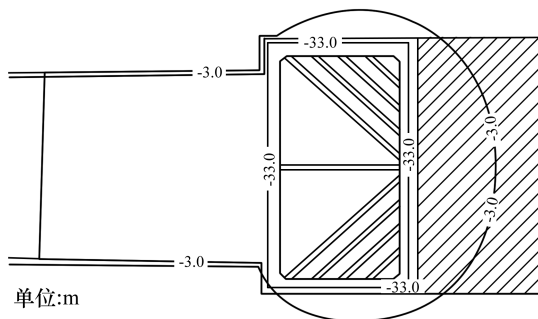
值变化规律基本一致,数值结果也比较接近,总的趋势都是随降水时间的延长水位不断下降,然后慢慢趋于平稳,说明了数值模拟的正确性,也是对降水设计方案的合理性的有力佐证。



单位:m

图6 模拟降水后第Ⅲ层承压水位降深等值线

Fig. 6 Isoline of the descending depth of confined water level of the third layer after simulated precipitation



单位:m

图7 模拟降水后第Ⅱ层承压水位埋深等值线

Fig. 7 Isoline of the descending depth of confined water level of the second layer after simulated precipitation

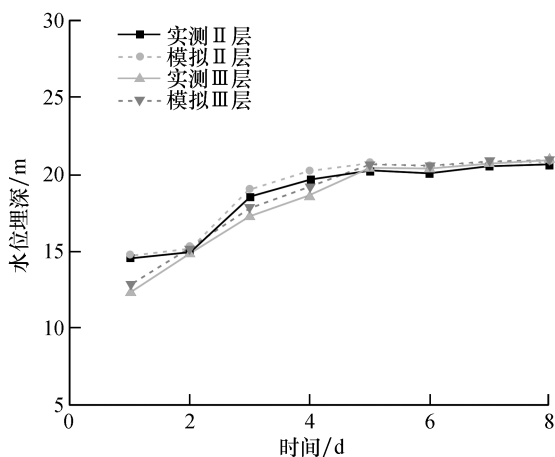


图8 监测数据与模拟数据对比曲线

Fig. 8 Comparison curve between monitoring data and simulation data

6 结论

基于高压水头承压水引发的软土深基坑涌水事故的处理,开展数值模拟与监测数值对比分析,结果表明:

1)采取坑外降水的工程措施对基坑内承压水突涌事故的处理效果显著,而且经济成本相对较低。但要注意的是,坑外成井需避开基坑周边加固区,否则成井施工进度及成井质量不能得到保障,反而耽误抢险的宝贵时间。

2) Visual ModFlow 作为前沿的数值模拟软件,通过预分析地下水渗流场变化,对于优化降水设计,分析降水效益提供重要依据。

3)勘察报告不能完全揭示地层局部差异,在施工组织设计中应充分考虑承压水对基坑开挖的影响,完善承压水突涌风险应对措施。

4)基坑开挖之前一定要彻查基坑内外风险点,特别是勘测孔、桩头及降水井,及时发现及时采取注浆封堵等措施处理。基坑开挖期间,要加强基坑内外水位监测与围护结构位移监测,发生异常情况时能及时做出应对措施。

参考文献:

- [1] 陈刚,吴波,孙旭霞,等. 某深基坑工程地下水防治方案分析[J]. 浙江建筑,2016,33(8):27-30.
- [2] JURADO A, DE GASPARI F, VILARRASA V, et al. Probabilistic analysis of groundwater-related risks at subsurface excavations sites[J]. Engineering geology, 2012, 125:35-44.
- [3] 周红波,蔡来炳. 软土地区深基坑工程承压水风险与控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 27-32.
- [4] 朱雁飞. 深基坑工程中承压水危害的综合治理方法(上)[J]. 上海建设科技, 2008(4): 16-19.
- [5] XU Y S, SHEN S L, MA L, et al. Evaluation of the blocking effect of retaining walls on groundwater seepage in aquifers with different insertion depths[J]. Engineering geology, 2014, 183:254-264.
- [6] WANG X W, Yang T L, XU Y S, et al. Evaluation of optimized depth of waterproof curtain to mitigate negative impacts during dewatering[J]. Journal of hydrology, 2019, 577:123969.
- [7] 曹正龙,孙红松,张睿,等. 济南地铁深基坑承压水控制技术研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(7): 14-18.
- [8] 徐长节,徐礼阁,孙凤明,等. 深基坑承压水的风险控制及处理实例[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊1): 353-358.

(下转第76页)

- lease III-assisted amplification[J]. *Analyst*, 2019, 144(12):3800-3806.
- [48] LI J J, XI H Y, KONG C Y, et al. "Aggregation-to-deaggregation" colorimetric signal amplification strategy for Ag^+ detection at the femtomolar level with dark-field microscope observation[J]. *Analytical chemistry*, 2018, 90(19):11723-11727.
- [49] CUI L, LI Y Y, LU M F, et al. An ultrasensitive electrochemical biosensor for polynucleotide kinase assay based on gold nanoparticle-mediated lambda exonuclease cleavage-induced signal amplification[J]. *Biosensors and bioelectronics*, 2018, 99:1-7.
- [50] LI Z, ZHENG M X, LIU L F, et al. 5'-phosphorylation strengthens sticky-end cohesions[J]. *Journal of the American chemical society*, 2021, 143(37):14987-14991.
- [51] TIAN J J, ZHANG Y, ZHU L J, et al. dsDNA/ssDNA-switchable isothermal colorimetric biosensor based on a universal primer and λ exonuclease[J]. *Sensors and actuators B: Chemical*, 2020, 323:128674.
- [52] YUN W, XIONG W, WU H, et al. Graphene oxide-based fluorescent "turn-on" strategy for Hg^{2+} detection by using catalytic hairpin assembly for amplification[J]. *Sensors and actuators B: Chemical*, 2017, 249:493-498.
- [53] WU Y, FU C C, XIANG J, et al. "Signal-on" SERS sensing platform for highly sensitive and selective Pb^{2+} detection based on catalytic hairpin assembly[J]. *Analytica chimica acta*, 2020, 1127:106-113.
- [54] XIONG Y, DAI J Y, ZHANG Y J, et al. A label-free fluorescent biosensor based on a catalyzed hairpin assembly for HIV DNA and lead detection[J]. *Analytical methods*, 2021, 13(21):2391-2395.
- [55] ZHAN S, XU H, ZHANG W, et al. Sensitive fluorescent assay for copper(II) determination in aqueous solution using copper-specific ssDNA and Sybr Green I[J]. *Talanta*, 2015, 142:176-182.
-
- (上接第28页)
- [9] 宋建禹. 临江高承压水超深基坑支护方案研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2018, 38(9):1529-1537.
- [10] 王世君, 姚燕明, 汪健. 软土地区基坑深层承压水处理方案对比研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(2):503-510.
- [11] 郑剑升, 张克平, 章立峰. 承压水地层基坑底部突涌及解决措施[J]. *隧道建设(中英文)*, 2003, 23(5):25-27.
- [12] 冯晓腊, 崔德山, 熊宗海, 等. 武汉软土地层特点及深基坑降水研究新进展[J]. *四川建筑科学研究*, 2020, 46(增刊1):9-17.
- [13] 庄全贵. 地铁车站富水砂层基坑涌水事故分析与处置[J]. *城市轨道交通研究*, 2020, 23(8):105-107.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 管井技术规范: GB 50296—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014:44.
- [15] 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.