



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.023

徐力群, 江沅, 王丽艳, 等. 黏土地基深井排水效果试验与渗流场分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 149-155. XU Liqun, JIANG H ang, WANG Li yan, et al. Drainage effect of deep well on clay foundation and seepage field analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 149-155. (in Chinese)

黏土地基深井排水效果试验与渗流场分析

徐力群¹, 江沅², 王丽艳², 沈振中¹, 李强¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 无锡市水利设计研究院有限公司, 江苏 无锡 214023)

摘要: 深井降水效果将影响水利工程的排水方案设计。为了分析黏土地基工程深井井点降水措施的有效性, 结合无锡市生态休闲岛工程, 根据地质勘测资料, 通过建立渗流分析有限元模型, 采用固定网格有限元非饱和和渗流计算分析方法, 分析了深井降水的非稳定渗流场, 对比分析了试验井的排水量实测数据, 研究结果表明深井降水具有较好的排水效果, 提出了地基土层渗透性对渗流场有较大的影响, 建议了采取合适的井深和井间距以保证深井降水效果, 结果可为类似黏土地基排水措施提供设计参考。

关键词: 非稳定渗流分析; 黏土地基; 深井排水效果; 现场试验; 井点流量

中图分类号: TV 223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0149-07

Drainage effect of deep well on clay foundation and seepage field analysis

XU Liqun¹, JIANG H ang², WANG Li yan², SHEN Zhen zhong¹, LI Qiang¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Wuxi Water Resource and Design Institute Co., Ltd., Wuxi 214023, China)

Abstract: The drainage effect of deep wells influences engineering design. According to the surveyed geological data, the finite element model for seepage analysis was established. Based on the fixed finite element method for unsaturated seepage analysis, the unsteady seepage field of deep well drainage was calculated. Then comparison was conducted between the numerical calculation and the test data. The results showed that the deep well drainage method was effective, and the permeability of foundation soil had a great influence on the seepage field. We suggest that appropriate well depth and well spacing should be adopted so as to ensure the effect of deep well drainage. The results can provide reference for drainage measures on similar clay foundations.

Key words: unsteady seepage analysis; clay foundation; deep well drainage effect; field test; discharge of well points

某生态休闲岛景观工程为开挖湖面取土堆起, 为加速人工岛基础沉降、缩短施工工期、加快工程进度以及保证工程的正常进行以及施工和运行安全性, 拟建场地拟采用深井井点降水措施, 但考虑到工程基础渗透系数较小, 地层复杂, 常规的计算方法和经验难以判断其效果, 因此拟进行深井点降水试验, 进而分析井点降水的实际效果, 通过现场试验以及

有限元理论分析, 提出合理的井点降水措施。

国外关于深井排水及非稳定渗流的研究起步较早。有记录的第一个采用深井降水方法的工程是1896年英国柏林的地铁工程; 1931年, 德国 Bremerhaven^[1]建造二座水闸时采用了58口深井进行减压; 日本1953年在名古屋铁道大厦建设中首次采用井点降水法^[2]。1931年, Richards将Darcy定律推

收稿日期: 2016-01-18 修回日期: 2016-07-28 网络出版时间: 2017-06-00

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179062); 江苏省自然科学基金青年基金(BK2012410)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51179062); Natural Science Foundation of Jiangsu Province Youth Foundation(BK2012410)

作者简介: 徐力群(1983), 男, 浙江人, 讲师, 硕士生导师, 主要从事水工建筑物渗流分析控制与优化方面研究。E-mail: xuliqun6.2@163.com

广应用到非饱和渗流中以后,人们才开始了非饱和渗流的研究。基于 Richards 控制方程的饱和-非饱和渗流后来得到了深入的研究,并成功地应用到许多实际工程中。Neuman 最早将有限元方法应用到解饱和-非饱和问题。国内关于降水技术的应用及非稳定渗流的研究相对较晚。首先是在 1950 年,东北某工业基地的建设中首先使用了轻型井点降水的方法^[3];随后 1955 年上海在武宁路泵站的基坑工程施工中,成功研制出了真空泵式抽水装置。井点降水法在国内越来越成熟,也更多的应用在各种工程中。最近几年,国内学者也开展了不少非稳定渗流的研究。理论研究方面,王文科^[4]提出用有限分析法求解地下水非稳定井流问题并对该方法作了改进;速宝玉等^[5]提出了采用截止负压法进行三维非稳定渗流分析;戚蓝等^[6]提出了基于逐步积分法研究得到非稳定渗流场分布、渗流损失水量。工程应用方面,毛昶熙等^[7]指出了江河堤防必须考虑河水涨落的非稳定渗流来设计最经济可靠的渗控措施;师颖^[8]应用 Seep3D 对基坑降水三维非稳定渗流进行模拟,量化分析了基坑降水;高丹盈^[9]分析了排水管间距对南水北调工程大沙河段渠道排水非稳定渗流场的影响。本工程拟针对黏土地基深井降水方案,采用非稳定饱和-非饱和和非稳定渗流有限元法,计算分析深井降水的效果,确定合适的井深和井间距,为设计提供理论参考依据。

1 深井降水试验

某生态休闲岛景观工程位于无锡市惠山区职教园区的洋溪河畔,拟建生态休闲岛由景观人工岛、景观人工湖、配套建筑、直驳岸、天桥、龙桥、栈桥、拱桥、西桥等几部分组成。生态休闲岛共有 4 座人工岛,均为开挖湖面取土推起,其中 1 号岛工程量最大,其占地面积约 5.2 万 m^2 ,基础地面高程为 3.5 m (黄海下同),顶高程为 14.5 m,最大高度为 11 m,显山路贯穿将 1 号岛,路面高程为 5.5~6.5 m,将其分为左右两侧。显山路两侧边坡为 1:1,其余部分坡度在 1:2~1:5。1 号岛堆土方量约为 23 万 m^3 。根据野外钻孔土层资料及各土层的物理力学性能指标,本工程基础主要为黏土、粉质黏土夹粉土和粉质黏土,土层分层较为明显,含水层间隔分布。地下水位较高,初见水位标高为 1.16~4.20 m,稳定水位标高为 0.76~4.10 m。

1.1 试验方案设计、试验过程

根据地质资料,(1)层为表土,(2)层为黏土,(5-1)、(5-3)、(6)、(8)层为粉质黏土,(3)、(5-2)层

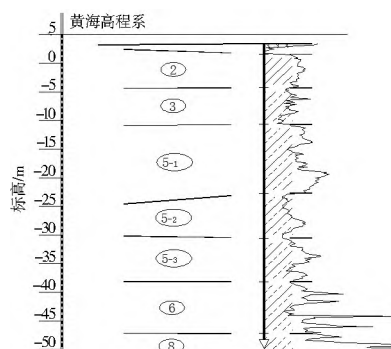


图 1 试验深井区地质剖面

Fig. 1 Geological section of test deep wells

为粉质黏土夹粉土,此含水层土性以砂性土为主,富水性较好。根据生态岛沉降计算分析得出基础沉降影响深度约为 50 m。根据本地区多年来成功的降水经验,常规管井深度约在 30~40 m,结合沉降计算分析,初步拟定管井井深到(5-2)层,降水深度约为 30 m。

根据以上分析,本次管井排水试验,管井深度为 30~40 m。采用管井直径为 200 mm。试验井选取 1 号岛西侧,现场施工条件较好的地段,试验井点可作为后期施工井使用,本次管井排水试验共布置井点 6 眼,编号为 1 号-6 号,管井井点间距为 15~20 m,试验深井布置见图 1。

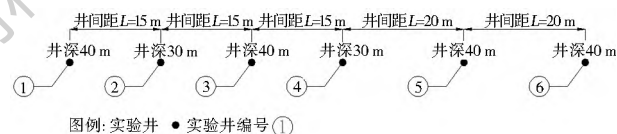


图 2 试验深井布置示意图

Fig. 2 Layout of test deep wells

本次深井排水实验按图钻取 6 口深井,安装好水表进行计量后采用抽水泵对试验深井内渗水进行抽排,保证井内水及时全部排空。安排 2 人 24 小时观察并做好水量记录,安排专人每天至施工现场收集水量记录表,核对记录表每天抽水时间的准确性。整个试验过程抽水出水均正常,未发生异常情况。

1.2 试验结果

每个试验井点排水量采用水表计量,每隔 24 h 记录一次排水量,观测期为 1 个月。各试验井排水过程线见图 2。图中点实线为实测值,实线为计算拟合值。

各试验井初始排水量和稳定排水量如图 3 所示,比较各试验井初始排水量、结束时排水量可知,试验井深度及相对位置对排水量影响较大。1 号、6 号井井深为 40 m,初始排水量为 53 m^3 、56 m^3 ,基本稳定时流量为 29.3 m^3 、44 m^3 。3 号、5 号井井深同为 40 m,其初始阶段、稳定阶段排水量均小于 1 号

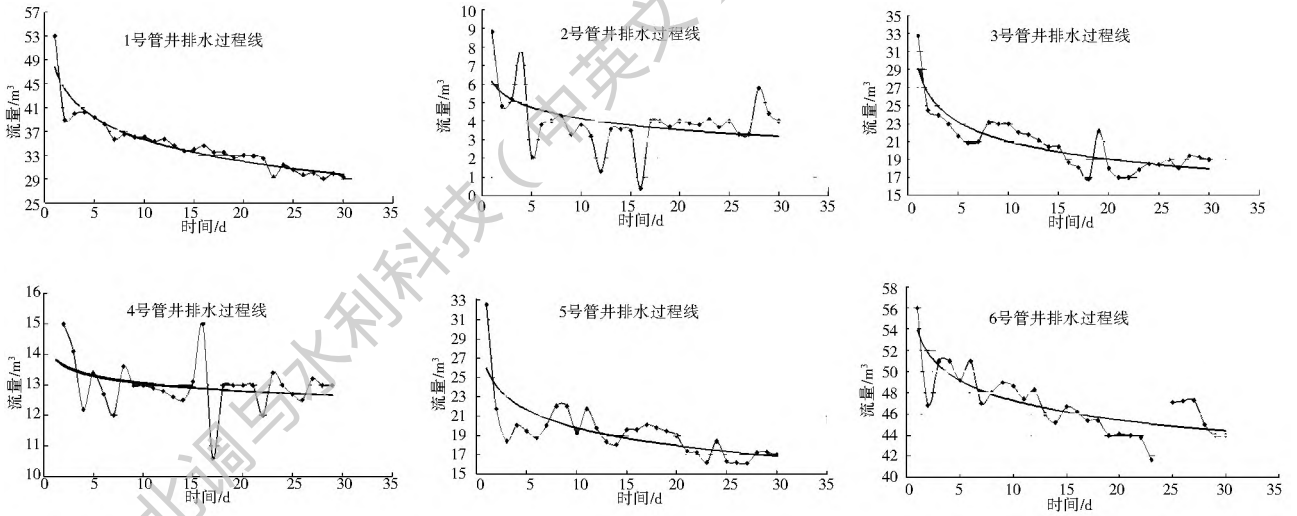


图2 各试验井排水过程线

Fig. 2 Discharge hydrographs of each test well

井、6号井,主要原因是其在1号、6号井之间,受其影响较大。2号井初始排、稳定时排水流量分别为 8.8 m^3 、 4.0 m^3 ,主要是其井深仅为 30 m ,比相邻井深度少 10 m 。

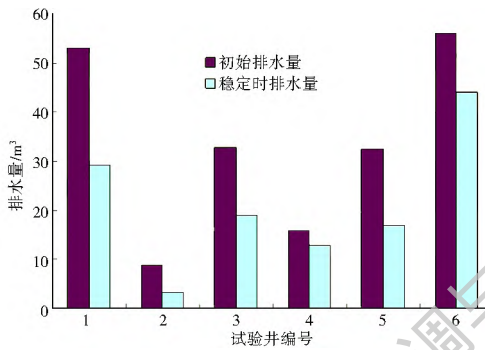


图3 各井初始与稳定时排水量

Fig. 3 Initial and stable discharges of each test well

从影响半径来看,1号、6号距相邻井距离为 15 m 、 20 m ,6号井排水量略高于1号井。从时间上来看,1号、6号井试验结束时,即排水 $25\sim 30\text{ d}$ 后,排水量基本达到稳定;3号、4号、5号井排水 20 d 后,排水量基本达到稳定;2号井排水 20 d 后,排水量基本达到稳定。

由试验数据分析可以看出,各试验井的数据与渗流基本规律一致,1号-6号井平均排水量,初始阶段排水量平均值为 33.2 m^3 ,稳定阶段排水量为平均值为 20.9 m^3 。

2 有限元结果分析

2.1 有限元计算理论

根据饱和-非饱和土的渗流基本微分方程^[10],应用 Galerkin 加权余量法及格林第一公式,对时间采用隐式有限差分格式^[11],导出非稳定饱和-非饱

和渗流有限元法的基本方程

$$\left[[A] + \frac{1}{\Delta t} [B] \right] \{h_c\}_{t+\Delta t} = \{P\} + \frac{1}{\Delta t} [B] \{h_c\}_t \quad (1)$$

式中: $[A] = \sum_{e=1}^{NE} \left[\iiint_{\Omega^e} \sum_{i,j=1}^3 k_r(h_c) k_{ij}^s \frac{\partial N_n}{\partial x_i} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} d\Omega \right]$;

$[B] = \sum_{e=1}^{NE} \left[\iiint_{\Omega^e} N_n N_m [C(h_c) + \beta S_s] d\Omega \right]$; $\{P\} = - \sum_{e=1}^{NE} \left[\iiint_{\Omega^e} \sum_{i=1}^3 k_r(h_c) k_{i3}^3 \frac{\partial N_n}{\partial x_i} d\Omega \right] - \sum_{e=1}^{NE} \left[\iiint_{\Omega^e} N_n Q d\Omega + \iint_{\Gamma} q_n N_n ds \right]$; NE 为单元总数; N_n 和 N_m 为单元结点 n 和 m 的形函数; t 为时间变量, Δt 为时间增量; $(h_c)_t$ 和 $(h_c)_{t+\Delta t}$ 分别为时间 t 和 $t+\Delta t$ 时的节点压力水头; Ω 为计算空间域, s 为计算域边界。

2.2 有限元分析模型

根据渗流计算分析的一般原则和特点^[12],结合深井排水实验及工程拟采用的深井排水布置情况,考虑到如以完整的实验方案建立模型,工作量较大,因此考虑以外最外侧两孔深井建立数值模型。以试验井邻近地质勘测孔土层分布建立数值模型的竖向分布,取以1号岛基础外侧两排深井作为模型的边界,计算模型的截取范围如下: X 方向以最外侧排水井为基准,向外截取 150 m ,向内截取岛第二口井; Z 方向为高程方向,底部截至相对不透水层,底高程 -76 m ; Y 方向取井孔直径 0.20 m ,数值模型计算范围见图4。计算模型保留土层的详细结构,准确模拟基础分层。

模型左侧截取边界地面高程以下部分、右侧深井井底以下部分以及模型底部,取为不透水边界;初始地下水位为已知水头边界,深井井壁边界部分为出渗边界,深井内渗水及时抽排,井内水位设置固定水深 0.1 m 。沿坝轴线截取的两侧面均为不透水边



图 4 数值计算模型剖面

Fig. 4 Profile of numerical model

界。三维有限元网格模型节点总数为 33 300 个,单元总数为 16 325 个,有限元网格模型图见图 5。

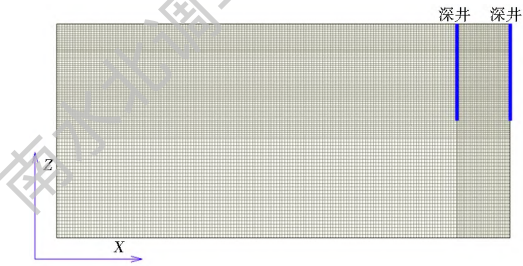


图 5 有限元网格模型

Fig. 5 Finite element model

2.3 非稳定渗流分析参数

根据地质勘测资料和现场试验以及类比其它类

似工程,本工程采用的渗透系数见表 1。初始时刻地下水位 20 m。

表 1 地基材料渗透系数

Tab. 1 Permeability coefficients of foundation materials

材料名称	垂直向渗透系数 $k_v / (m \cdot s^{-1})$	水平向渗透系数 $k_h / (m \cdot s^{-1})$
(1) 表土	2.32E-06	3.48E-06
(2) 黏土	3.44E-09	8.51E-09
(3) 粉质黏土夹粉土	1.55E-07	2.12E-07
(5-1) 粉质黏土	6.53E-08	9.29E-08
(5-2) 粉质黏土夹粉土	8.68E-08	1.28E-07
(5-3) 粉质黏土	5.28E-08	8.73E-08
(6) 粉质黏土	6.36E-08	8.43E-08
(8) 粉质黏土	4.35E-08	8.33E-08

对于所缺的黏土、粉质黏土夹粉土的土水特性关系曲线,计算采用渗透系数类似工程的砂掺合料的土水特性关系来进行计算分析。体积含水率 θ 与毛细压力 h 的关系,以及体积含水率 θ 与相对透水率 k_r 的关系分别见表 2、表 3。本次计算分析粉质黏土的土水特性参照粉质黏土夹粉土的土水特性关系曲线。

表 2 黏土土水特性关系

Tab. 2 Soil water relationship of clay

h / m	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	100.0	150.0
k_r	1.0000	0.9375	0.2550	0.0375	0.0125	0.0063	0.0000	0.0000
θ	0.600	0.548	0.432	0.266	0.170	0.134	0.058	0.045

表 3 粉质黏土夹粉土土水特性关系

Tab. 3 Soil water relationship of silty clay mixed with silt

h / m	0.0	-13.0	-15.0	-25.0	-30.0	-35.0	-40.0	-50.0
k_r	1.0000	0.963	0.886	0.55	0.225	0.082	0.03	0.01
θ	0.35	0.3	0.288	0.255	0.225	0.201	0.175	0.15

2.4 深井降水效果分析

本次分析考虑以深井降水控制深度 32 m、井间距 30 m,建立基本模型。饱和-非饱和非稳定渗流下模型剖面的浸润线位置、等水头线及其数值见图 6。由图可知,深井连续排水条件下,两井点之间的地下水位能有效降低,粉质黏土夹粉土相对透水层排水效果明显,黏土层处于暂态饱和状态,其面积随

时间的增加逐渐减小,由于黏土的渗透系数较小,其暂态饱和状态消散速度较为缓慢。降水至第 7 d,两井间饱和和区面积为初始状态下的 27.84%,至第 30 d,两井间饱和和区面积为初始状态下的 25.56%。从外侧井降水效果来看,其较为明显的影响半径约为 80 m,在前 150 d 时间段内变化不大,随着时间的增加而逐渐扩大,至稳定时刻见图 6。

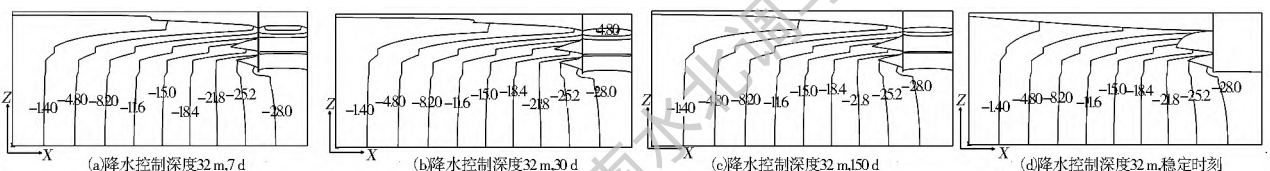


图 6 各时刻地下水位等势线

Fig. 6 Groundwater contours at different moments

暂态饱和区平均厚度变化见图7,从图中可以看出,从时间上看,从第7 d至150 d,暂态饱和区平均厚度由8.72 m降为6.24 m,其占原初始状态饱和区厚31 m的28.2%降为20.1%。同时由于第三层黏土较厚,暂态饱和区占主要部分,其厚度约占总厚度的80%。从图的变化趋势看,其暂态饱和区完全消散的时间约为550~600 d。

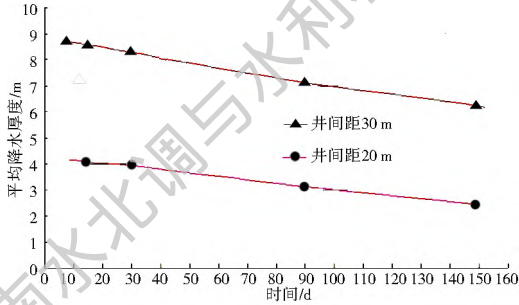


图7 暂态饱和区平均厚度变化

Fig. 7 Average depth of transient saturated zone at different moments

当井间距由30 m减少为20 m时,暂态饱和区厚度能明显减少,以降水至第15 d为例,深井间距20 m与30 m时暂态饱和区对比见图8,其暂态饱和区厚度由8.56 m减少为4.06 m,此刻占原初始状态饱和区厚31 m的27.6%降为13.1%。

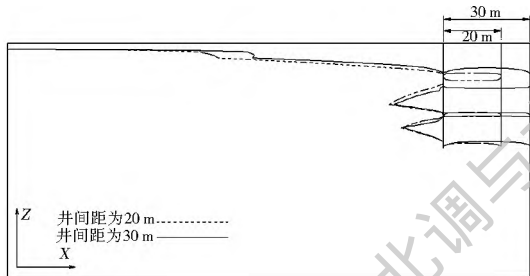


图8 深井间距20 m与30 m时暂态饱和区对比(15 d)

Fig. 8 Comparison of transient saturated zones at well depth of 20m and 30m after 15 days

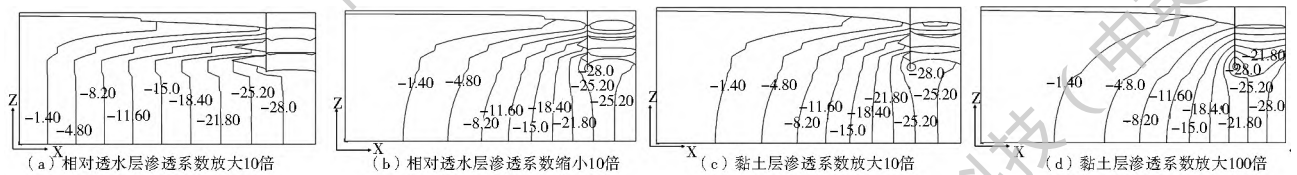


图10 透水层渗透系数变化等势线(30 d)

Fig. 10 Groundwater contours at different permeability coefficients in permeable layer after 30 days

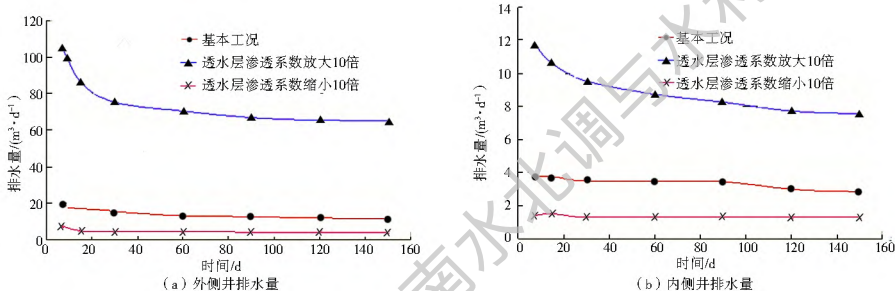


图11 透水层渗透系数变化相对应的井排水量

Fig. 11 Discharge changes with the change of permeability coefficient in permeable layer

试验井排水量与数值计算排水量对比见图9,从深井排水量来看,与一号试验井相比,外侧井理论计算第7 d、15 d、30 d排水量分别为19.30 m³/d、17.10 m³/d、15.50 m³/d,小于试验井的35.7 m³/d、34 m³/d、29.3 m³/d,与试验井平均排水量基本相当。出现这种原因主要有:(1)试验1号井比模型要深8 m,其排水量必然较大;(2)为减少计算量,本次采用的数学模型与实际试验井存在一定的区别。从两者排水量级及变化趋势看及考虑上述原因,本次数值计算结果基本与试验数据保持一致。对比外围井与内部井排水量来看,外部排水量大于内部井,主要原因是外部井的集水面积大于内部井,这与井群渗流规律保持一致。

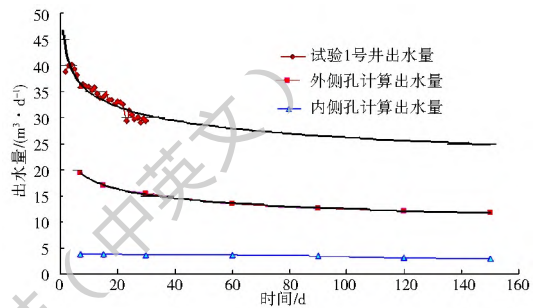


图9 试验井排水量与数值计算排水量对比

Fig. 9 Comparison between measured and calculated discharges

考虑到地层的不均匀性,挡土层渗透系数在一图10、图11。定范围内变化时,深井排水30 d时其地下水水位线见当相对透水层渗透系数放大10倍时,暂态饱和区厚度略有减少,暂态饱和区面积与基本工况相比,占原初始状态饱和区厚31 m的28%降为24%。当相对透水层渗透系数缩小10倍时,相对透水层排水效果急剧减少,暂态饱和区面积大幅度上升,占初始状态饱和区的62%。

当黏土层渗透系数放大 10 倍时,相对透水层排水效果减若,暂态饱和区面积大幅度上升,占初始状态饱和区的 47%。当黏土层渗透系数放大 100 倍时,基础渗透系数均处于同一数量级,深井排水效果不明显,其地下水位下降约 8.6 m,非饱和区仅为初始状态饱和区的 26%,连续排水 150 d 后,地下水位下降 18.5 m,非饱和区约为初始状态饱和区的 58%。这种现象的主要原因是土层的渗透系数较大,深井间距相对大,深井水补给量较大,这从井的影响半径及排水量上能明显反映。上述分析表明,相对透水层与黏土渗透系数差距越大,降水效果越明显,两者相差一个数量级时,非饱和区面积约占

50% 左右。

黏土层渗透系数变化相对应的井排水量见图 12,由图可知,土层的渗透系数变化对井的排水量影响较大。以降水第 15 d 为例,相对透水层渗透系数放大 10 倍后,外侧井排水量为 75.20 m^3 ,排水量增加 4.85 倍,内侧井排水量为 9.5 m^3 ,排水量增加 2.73 倍;相对透水层渗透系数减小 10 倍后,外侧井排水量为 4.62 m^3 ,排水量为原来的 30%,内侧井排水量为 1.29 m^3 ,排水量增加 0.37 倍。当黏土的渗透系数放大 10 倍、100 倍时,外侧井排水量分别为原来的 1.95 倍、6.6 倍,内侧井排水量分别为原来的 3.65 倍、12.2 倍。

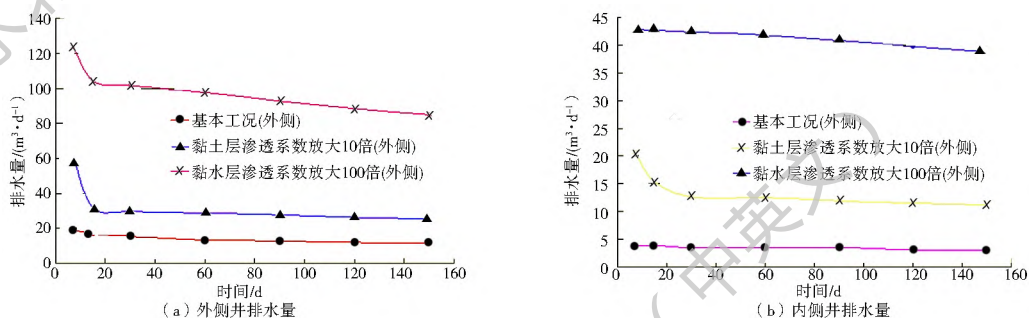


图 12 黏土层渗透系数变化相对应的井排水量

Fig. 12 Discharge changes with the change of permeability coefficient in clay layer

3 结论

针对黏土地基深井降水效果,基于现场试验成果分析,以及非稳定饱和-非饱和有限元法的非稳定渗流分析,分析了深井降水的非稳定渗流场,对比分析了试验深井的排水效果实测数据,开展了粘土地基渗透性对降水效果的敏感性分析,可得到以下结论。

(1) 拟建场地地层含水量较为丰富,通过深井降水试验和有限元分析可知,在井深 35~40 m、井间距 20~30 m 条件下,深井能够有效降低地下水位,四周外围井间距应适当减少,采取管井降水加速地基沉降是可行的。

(2) 通过三维非稳定渗流有限元计算分析可知,针对黏土地基,采用深井降水,深井降水前 15~20 d 时,深井降水效果明显,但后期较弱,建议拟建场地清基前 15~20 d 前开始管井降水。

(3) 因本工程相对透水层渗透系数较小,相对透水层与黏土渗透系数相差越大,降水效果越明显,本案例中两者相差一个数量级时,非饱和区面积约占 50% 左右,相差二个数量级时,非饱和区面积约占 70% 左右。

(4) 本工程深井降水水位较低,降水效果明显,

当水位较高时,采用此类方法进行排水,效果有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 刘宝探,廖国华.北京地铁王府井站至东单站地面钻孔降水对地面环境影响的分析[R].中国岩石力学与工程学会,1995. (LIU Bao tan, LIAO Guo hua. Analysis on the influence of ground drilling and drainage on the ground environment in Beijing Metro Wangfujing station to Dongdan station[R]. Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, 1995. (in Chinese))
- [2] 任红林,杨敏.基坑工程井点降水分析计算[J].水文地质工程地质,2000(1): 31-35. (REN Hong lin, YANG Min. Analysis and calculation of well point dewatering in foundation pit engineering[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000(1): 31-35. (in Chinese))
- [3] 何世秀.渗流对基坑周边沉降的影响[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9): 151-155. (HE Shi xiu. Influence of seepage on ground settlement of deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 151-155. (in Chinese))
- [4] 王文科.用改进的时间差分有限分析法模拟地下水非稳定井流方程[J].水科学进展,1996,7(2): 112-118. (WANG Wen ke. Numerical solutions of groundwater unsteady well flow equation by the improved time difference finite analytic method[J]. Advances in Water Science, 1996, 7(2): 112-118. (in Chinese))

- nese))
- [5] 速宝玉, 郭洪兴, 詹美礼. 非稳定渗流用截止负压法求解的研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 711-714. (SU Baoyu, GUO Hongxing, ZHAN Meili. Research on the calculation of unsteady seepage by cut off negative pressure method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 711-714. (in Chinese))
- [6] 戚蓝, 老西飞, 王志浩, 等. 基于逐步积分法的人工岛三维非稳定渗流数值模拟[J]. 水利水电技术, 2013, 44(11): 128-130, 134. (QI Lan, LAO Xi fei, WANG Zhi hao et al. Step by step integration method based 3-D numerical simulation of unsteady seepage of artificial island[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(11): 128-130, 134. (in Chinese))
- [7] 毛昶熙, 冯玉宝, 段祥宝. 堤防设计中的非稳定渗流计算[J]. 水利学报, 2002(12): 56-62, 67. (MAO Chang xi, FENG Yubao, DUAN Xiang bao. Calculation of unsteady seepage in levee design[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(12): 56-62, 67. (in Chinese))
- [8] 师颖. 基坑工程非稳定渗流场的三维有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2004. (SHI Ying. The 3-D finite element analysis for unsteady seepage in excavation engineering[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese))
- [9] 高丹盈, 杨素娟, 李占松, 等. 南水北调大沙河渠道排水非稳定渗流计算分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2010, 31(5): 27-31. (GAO Danying, YANG Sujuan, LI Zhansong, et al. Calculation and analysis of the unsteady seepage drainage in the Dashahe Part Channel of the South to North Water Transfer Project[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2010, 30(5): 27-31. (in Chinese))
- [10] 张蔚榛. 地下水非稳定流计算和地下水资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (ZHANG Weizhen. Unsteady groundwater flow calculation and evaluation of groundwater resources[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [11] 王勰成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. (WANG Xiecheng, SHAO Min. The basic principle of finite element method and numerical methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese))
- [12] 罗焕炎, 陈雨孙. 地下水运动的数值模拟[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986. (LUO Huanyan, CHEN Yusun. Numerical Simulation of Groundwater Movement[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1986. (in Chinese))