

基于降水优化方案的基坑地面沉降数值模拟

黄新¹ 宋汉周²

(1. 河南省交通规划勘察设计院有限责任公司 郑州市 450052 2. 河海大学地球科学与工程学院 南京市 210098)

提 要 针对深基坑降水引起地面沉降给周边环境带来的问题,基于最优化法的降水设计方案,以地下水动力学原理和耦合固结理论为基础,建立地下水渗流场和应变场耦合数学模型。以某地长江大桥锚碇基坑为例,采用有限差分数值分析法求解,模拟得到最优化降水的渗流场和地面沉降量,以及地面沉降主要影响因素的影响程度。模拟结果表明,基于最优化法降水设计能够达到设计要求,产生的长江大堤沉降量较小,其中渗透系数的变化对地面沉降影响较大,长江定水头边界和基坑防渗墙一定程度上减小了地面沉降量。

关键词 降水 耦合模型 有限差分 数值模拟 渗流场 地面沉降

Numerical Simulation of Land Subsidence of Deep Foundation Pit based on Dewatering Optimization Schemes

Huang Xin¹ Song Hanzhou²

(1. Henan Provincial Communications Planning Survey & Design Institute Co., Ltd.

2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University)

Abstract Aiming at the problems by land subsidence owing to deep foundation pit dewatering, using the optimization dewatering design schemes, on the basis of groundwater dynamics theory and coupling consolidation theory, the coupled mathematical model of groundwater seepage field and strain field is established. As the anchor foundation pit of Yangtze River Bridge for example, the seepage field and land subsidence amount of optimization dewatering are simulated and the influencing degree of land subsidence is also analyzed using finite difference numerical method. The results show that it can meet the design requirements, the subsidence amount of Yangtze River bank is reduced, the change of permeability coefficient is the first factor that causes land subsidence, and the boundary of constant head and the seepage wall are set up as to decrease the pumpage, the land subsidence would further reduce.

Keywords dewatering; coupling model; finite difference; numerical simulation; seepage field; land subsidence

1 序言

深基坑降水的目的是人工降低施工区域范围内的地下水位,以便基坑开挖和工程基础施工能够在干燥和安全的条件下进行。当基坑降水时,水位的下降使得各地层中水头产生一定波动,土层中孔隙水压力减小,土颗粒承受的有效应力增大,从而产生地面沉降现象。为了降低深基坑降水对环境的影响

和减少施工费用,需在对基坑降水满足施工要求的条件下,进行最优化降排水设计,如通过有限元^[1]或有限差分法^[2]三维数值模拟地下水渗流和地面沉降,提出减小地面沉降量的抽水方案; Matlab^[3]降水井群布置优化;提高水文地质参数求解精确度,减小水文地质参数偏差对地面沉降解析解的影响^[4]等。但归结起来可以得出是对施工区域的水文地质参数合理性取值以及边界条件的正确反映等问题。本文通过一个工程实例应用有限差分数值模拟软件,进行基坑降水引起地面沉降的数值模拟分析,并分析边界条件和水文地质参数对地面沉降的影响。

作者简介:黄新(1980-),男,硕士,主要从事工程地质和水文地质研究。

收稿日期:2012-05-09

2 场地地质概况及基坑降水方案的设计

工程场地地层主要以粉质粘土、砂砾石、粉砂岩为主,基岩埋深 60m 左右,粉质粘土底板埋深约 12m 左右,由上至下岩性分布如图 2 所示。锚碇区水文地质条件根据地下水分布可划分为潜水含水层和承压含水层两层,两层之间为淤泥质粉质粘土层。上部潜水层透水性和富水性较差,粉质粘土透水性更弱,淤泥质粉质粘土视为隔水层,承压含水层透水

性较好,且与长江有较好的水力联系。对该承压含水层进行抽水试验,按照地下水动力学非完整井求参公式,在初始设计中得到渗透系数为 13.5~36m/d,单井影响半径为 1013m,通过目标函数最优化方法进行降水方案设计^[5],在满足基坑设计降深的约束条件下,得到直径为 325mm 的 28 口非完整井来进行基坑降水,比大井法设计减少了 4 口井(井号为 1、6、10、15),其余各井抽水量,见表 1 所示,其布置,如图 1 所示。

表 1 基坑各井点抽水量一览表 m³/d

井号	02	03	04	05	07	08	09	11	12	13	14	16	17	18
水量	1479	1432	1391	548	1560	1560	1560	920	1433	1391	1526	1560	1560	950
井号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
水量	837	1560	1560	1560	992	1560	1560	614	1560	1560	1560	428	1560	1560

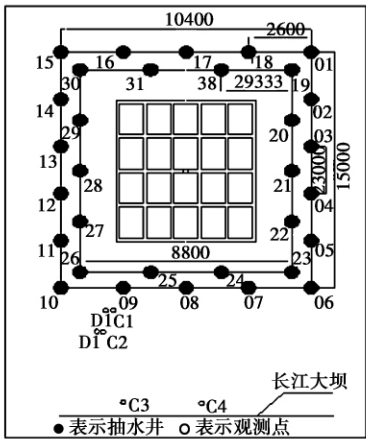


图 1 基坑降水井与沉降观测点分布

3 地面沉降数值模拟

3.1 数学模型

按照设计,降水主要是对下部承压含水层进行。为防止拟合时分层过多而产生无效层现象,将地层岩性剖面概化为三层,如图 2 所示。

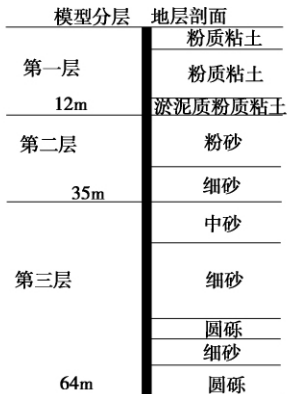


图 2 模型垂向分层与基坑地层剖面关系

基于上述概念模型,可建立场地由降水引起地面沉降的数学模型。该模型由如下两个模块构成。

模块 1: 地下水渗流数学模型。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z}) + W = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t_1) \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H(x, y, z, 0) \\ T \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_w} = -\frac{Q}{2\pi r w} \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{xx} 为水平渗透系数,其值等于 y 轴渗透系数 K_{yy} ; K_{zz} 为垂向渗透系数; S_s 为贮水率; W 为汇源项; Γ_1 为第一类边界条件; Γ_w 为抽水井第二类边界条件。

模块 2: 变形模型。就机理而言,基坑周边地面沉降就是基坑降排水引起的弹性和非弹性释水引起的相应的应变的总和^[6],因此有:

$$\Delta b = \Delta h \cdot S_{ske} \cdot b_0 + \Delta h \cdot S_{skv} \cdot b_0 \quad (2)$$

式中: Δb 为含水层压缩变形量 m ; Δh 为水头变化值, m ; b_0 为可压缩含水层的厚度 m ; S_{ske} 为骨架介质的弹性储水率 m ; S_{skv} 为骨架介质的非弹性储水率 m^{-1} 。

在沉降模型中,假设整个含水层的骨架都可发生压缩并产生沉降变形,参数 S_{ske} 、 S_{skv} 是在每个含水层规模上的等效参数。式(1)和式(2)通过水头项耦合起来形成了耦合模型。

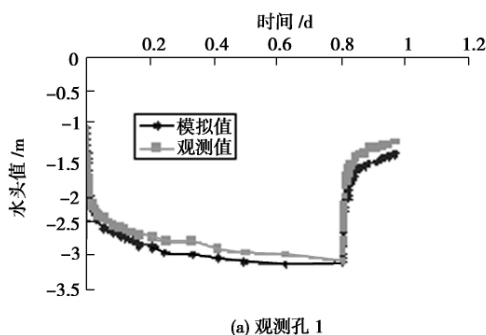
3.2 模型求解方法

作者采用国际通用的地下水渗流模拟软件 Processing Modflow(简称 PMWIN)建立模型。根据常规降排水设计所得的基坑降水影响半径大约 1000m,故计算模型的大小取半径为 1500m,因为基坑距离长江大约 400 多米,所以南部方向半径设置为

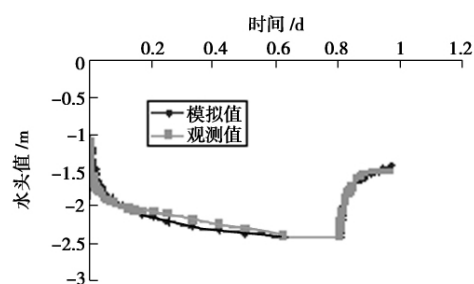
500m,模拟总面积为 $3000\text{m} \times 2000\text{m}$ 。承压水顶底面按照隔水边界设定,潜水面按照已知初始水头边界设置,水头值 -1.1m ;四周按照第一类边界处理,其中,东西及北侧初始水头值为 -1.1m ;南侧为长江,按照给定的定水头边界设置,根据水文观测,长江水头值高于降水区域 1.1m ,所以水头值设为 0 。基坑降水方式为非完整井坑外降水,在建立模型时用WEL井流子程序包模拟抽水井并设置在承压水层上层。根据具体的坐标确定抽水井和观测井的位置,并将模拟区域进行剖分,建立单元数为4968个。

根据抽水试验观测资料,抽水井出水量分别为 $114.9\text{m}^3/\text{h}$ 、 $195.6\text{m}^3/\text{h}$ 进行两次抽水试验。设置降水观测井为2个,标号为D1、D2,并在观测井D1右

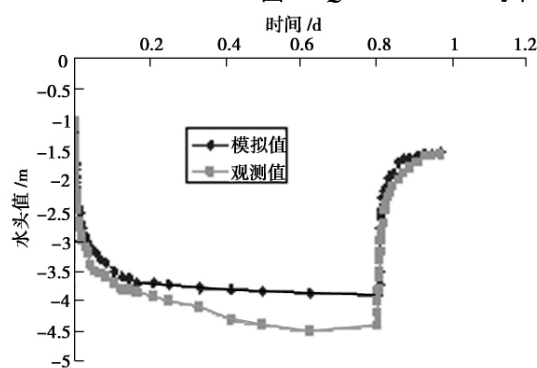
侧 1m 处设置沉降观测点C1;观测井D2右侧 1m 处设置沉降观测点C2;在大堤靠基坑方向一侧设置降水观测点C3、C4,这6个观测点的位置,见图1。根据抽水观测井位置,将两个观测井连线的中点所在的水平线作为分界线,将每个含水层分为两个区。抽水观测分为抽水期($0-0.8\text{d}$)和水位恢复期($0.8-1\text{d}$)两个时段,拟合结果,如图3、4所示。由图3、4可以看出,水头值的计算曲线与实测值的曲线拟合度较高,反演出参数校核是合适的。根据实验所得参数计算承压层抽水时段沉降量,进行C1、C2观测点的沉降量观测值与数值解之间曲线拟合来校核参数,拟合结果,如图5所示。可见,在两者之间存在一定差异,但总的趋势还是吻合的。由此反演确定的有关含水层参数,见表2所示。



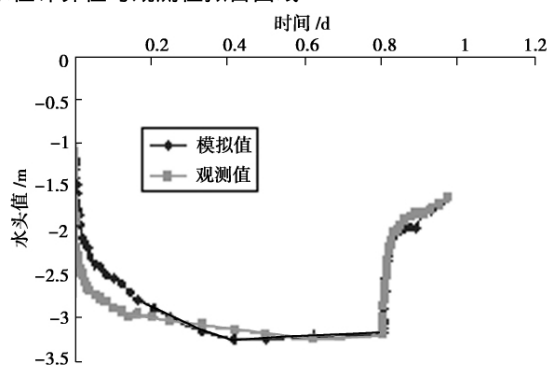
(a) 观测孔 1



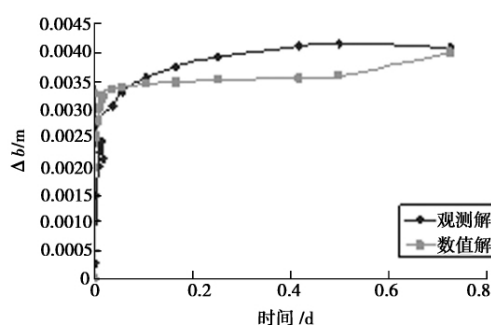
(b) 观测孔 2

图3 $Q = 114.9\text{m}^3/\text{h}$ 时不同观测孔水位计算值与观测值拟合曲线

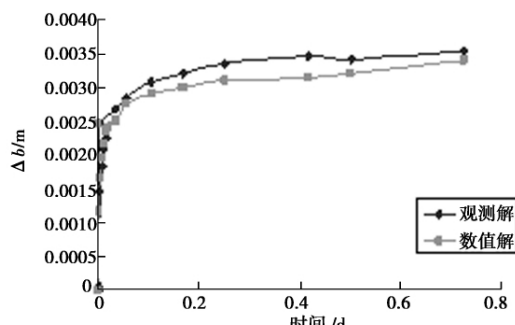
(a) 观测孔 1



(b) 观测孔 2

图4 $Q = 195.6\text{m}^3/\text{h}$ 时不同观测孔水位模拟值与观测值拟合曲线

(a) 沉降观测点 C1



(b) 沉降观测点 C2

图5 $Q = 195.6\text{m}^3/\text{h}$ 时不同测点沉降量数值解与观测值拟合曲线

表 2 地层参数校核表

层号	参数分区	$K_{xx}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$K_{zz}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	S_s/m^{-1}	S_{skv}/m^{-1}	S_{ske}/m^{-1}
1	1	0.002	0.002	$9.00\text{E}-08$	$1.00\text{E}-07$	$1.00\text{E}-08$
2	2	17	9	$5.79\text{E}-04$	$8.00\text{E}-04$	$8.00\text{E}-05$
	3	16	8	$6.10\text{E}-04$	$9.00\text{E}-04$	$9.00\text{E}-05$
3	4	21	11	$9.00\text{E}-04$	$1.10\text{E}-03$	$1.10\text{E}-04$
	5	19.5	10	$9.50\text{E}-04$	$1.20\text{E}-03$	$1.20\text{E}-04$

3.3 计算结果分析与讨论

根据上述模型参数校正和识别以及基坑降水设计,参照施工要求,即该工程沉井基坑在降水后承压水位应降至埋深 21.4m。在降水一个月后,最优化方法降水设计的模型降深等值线图,如图 6 所示。由此反映,影响半径大于 1000m,沿长江方向等值线较密,表示长江对基坑区域补充水量,水力梯度较大。

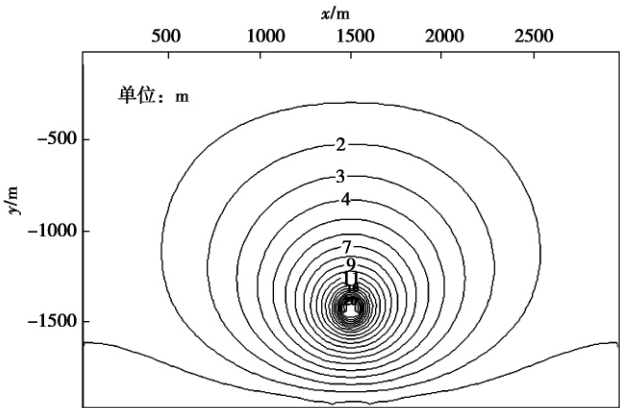


图 6 基于优化法降水 30d 后降深等值线

上述为历时 30d 降水后场地流场的降深,必然对基坑周围引起地面沉降。图 7 为对应时段地面沉降等值线图,大堤旁的观测点 C3 处的沉降量 0.0156m,其值是比较小的,但是为了确保长江大堤的安全,建议随时观测大堤沉降量,必要时打桩护堤。

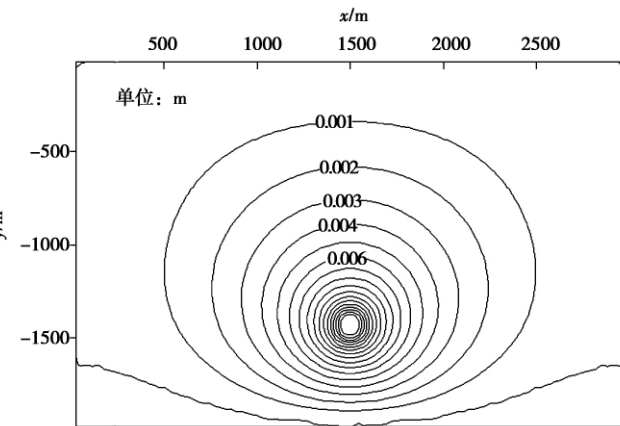


图 7 基于优化法降水 30d 后沉降量等值线
由图 6 和图 7 所知,基坑降深值为 21.5m,满足

基坑降水需要,且地面沉降量较小,对长江大堤的影响较弱。所以,最优化方法在基坑降水设计中优点是突出的,减少了基坑涌水量并减小了对周围环境的影响,从而达到地面沉降预测效果。

根据计算结果,还可进行如下分析。

3.3.1 渗透系数对地面沉降影响分析

按照地下水动力学公式求得的渗透系数为 13.25~36.99m/d,范围比较大,其差值为 23.74 m/d。在设计时取加权平均值为 22.39 m/d,而模型校核第 2 和第 3 层参数为 18、21 m/d,设计取值虽然接近两个参数值,但取值对数值模拟的影响却值得讨论。分别对渗透系数取值 13、22、37 m/d 进行讨论分析,并假设介质为各向同性。得到不同渗透系数时 C3 点地面沉降曲线,如图 8 所示。

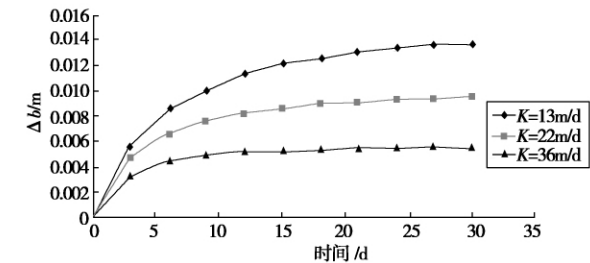


图 8 不同 K 值条件下 C3 点沉降对比曲线

可见,渗透系数的不同取值对地面沉降影响是明显的,并可作如下讨论:

- 1) 随着渗透系数的增大,降深和地面沉降值都是减小的。其机理为 K 增大,抽水量却不变化,使得周围定水头补给量增大,而释水量减小,从而降排水引起的地面沉降量减小。
- 2) 渗透系数取值较小,要把基坑降深到设计值,抽水量相同的条件下,需要引起更大的降深,从而可能引起较大沉降,并可引起基坑较大变形。
- 3) 当 K 取值为 22m/d 时,基坑降深 20m,不能满足基坑降水要求,这说明地层岩性不是各向同性的,而是均质、各向异性介质。

3.3.2 长江水头对地面沉降影响分析

进行基坑降水时随着降深增大,影响半径已经超过了长江位置。在基坑降水设计求参时,长江作为补

给边界处理其影响程度没有反映出来,这里分析没有长江和有长江影响的两种情况。在没有长江的情况下,将模型扩大为 $3000\text{m} \times 3000\text{m}$,其范围超过了基坑降排水影响半径。将四周边界设置为定水头边界,利用所得到的反演参数进行模拟,模拟后与有长江补给的时候地面沉降曲线进行对比,其结果如图9所示。

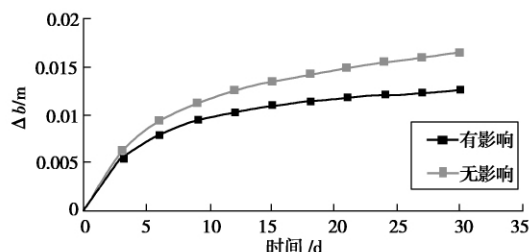


图9 不同边界条件下C3点沉降对比曲线

由图9可知,在降水时,由于基坑抽水量大,在同样的水文地质参数条件下,没有长江影响的地面沉降量高于有长江影响时的沉降量。说明有长江影响时,长江对于基坑降水进行补给,非弹性释水可以得到长江的大量补给从而地面沉降量相对较小,所以总的沉降量比没有长江影响时较小。但是由于基坑至长江大堤段产生较大水力差,可能随水带走粒径较小的土颗粒,产生流土或潜蚀现象。所以建议,在长江内侧设立回灌井,并在江堤内打一排水泥桩,以降低强降水而对大堤的影响。

3.3.3 设置防渗墙对地面沉降影响分析

在PMWIN模拟设计中,可以利用软件的HFB子程序包进行防渗墙设计并输入模型中。由于防渗墙嵌入地层深度影响基坑降水效果,理想的防渗墙嵌入深度应该比降水井较深,可以将降水井取值为防渗墙的 $4/5 \sim 9/10$ 为宜^[8]。设置防渗墙后进行模拟,得到C3点地面沉降对比曲线,如图10。

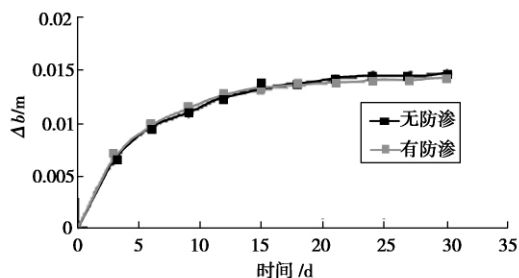


图10 有无防渗墙条件下C3点沉降对比曲线

由图10可知,基坑在设置防渗墙时地面沉降量略小于无防渗墙降水时的沉降值,这是由于防渗墙的存在减小了降水量,同时能够达到基坑内降水要求,体现了防渗墙挡水的效果。当设置防渗墙时,对于基坑的边坡安全和基坑坑底抗隆起都是有益的。

4 结论

通过以上分析,可以得到如下结论:

- 1) 根据数值模拟结果可知,基于最优化法的降水设计能满足基坑降水要求,有利于减小地面沉降量。
- 2) 通过地面沉降影响因素分析可知,在抽水量一定的情况下,降水设计的渗透系数取值精确性对设计结果影响较大。长江定水头边界对基坑降水补给量较大,减小了基坑区域的地面沉降量,但产生的较大水头差可能会冲走粒径较小的土颗粒。此外,防渗墙的存在减少了基坑降水量,也起到了减小基坑区域地面沉降的效果。

参考文献

- [1] 杜延龄,许国安. 渗流分析的有限元法和电网络法. 北京: 水利电力出版社, 1992
- [2] 骆祖江,李郎,姚天强,等. 松散承压含水层地区深基坑降水三维渗流与地面沉降耦合模型. 岩土工程学报. 2006, (11): 1947 ~ 1951
- [3] 孙忠良. 基于目标函数 MATLAB 优化基坑降水的井群设计. 山西建筑. 2008, (3): 361 ~ 362
- [4] 姜忻良,宗金辉. 不同土质条件下基坑渗流场渗透特性分析. 天津大学学报. 2006, 11(39): 12 ~ 16
- [5] 陈杰,朱国荣,王彩会. Excel 软件优化基坑降水的井群设计. 水文地质工程地质. 2003, (1): 88 ~ 90
- [6] Leake S A and Prudic D E. Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference groundwater flow model. U. S. Geological Survey, 1991. 425 ~ 430
- [7] 许锡金,李东霞. 基坑降水引起地面沉降计算方法研究. 岩土工程技术. 2004, 8(4): 194 ~ 199
- [8] 姚天强,石振华. 基坑降水手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006