

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

骆祖江¹, 李 朗¹, 姚天强², 罗建军²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘 要: 以上海环球金融中心基坑降水为例, 根据基坑降水过程中有效应力和孔隙水压力的转化关系, 建立了基坑降水与地面沉降的耦合模型, 并采用有限差分数值模拟方法, 模拟了在多层含水层复合存在、含水层最深底板埋深达 145 m、基坑周围挡水连续墙埋深达 34 m、抽水井埋深达 55 m、抽水井过滤器埋深为 34~55 m, 单井抽水量为 1420 m³/d 的 8 口抽水井联合降水情况下, 基坑中心下伏第 I 承压含水层上部降压段水位降至埋深 26 m 时的地下水复杂流动状态及其地面沉降特征。经后续工程验证, 该结果正确、可靠, 该理论用于模拟预测此类地区深基坑降水引起的地下水场变化及其地面沉降具有较高的可信度。

关键词: 基坑降水; 三维渗流; 地面沉降; 耦合模型

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)11-1947-05

作者简介: 骆祖江(1964-), 男, 江苏吴江人, 博士, 教授, 主要从事水文地质、工程地质等方面的教学和研究。

Coupling model of three dimensional seepage and land-subsidence for dewatering of deep foundation pit in loose confined aquifers

LUO Zu-jiang¹, LI Lang¹, YAO Tian-qiang², LUO Jian-jun²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute,

Shanghai 200002, China)

Abstract: Based on the translation relation between effective stress and pore water pressure, a coupling model between deep dewatering of deep foundation pit and land-subsidence was established. Three dimensional finite difference numerical simulation method was applied to dewatering of foundation pit in Shanghai Huanqiu Finance Center, and the complicated flow state of groundwater and character of land-subsidence were simulated under these conditions where the aquifers deposited layer by layer, the bottom of the aquifers embedded up to 145 m in depth, the horizontal flow barrier embedded up to 34 m in depth, the extraction wells were penetrated up to 55 m in depth, the filters of the extraction wells were located between 34 ~ 55 m in depth, eight extraction wells with the quantity of pumping water for each being 1420 m³/d were operated at the same time, and the water level of the upper part of confined aquifer I under the center of foundation pit was decreased to 26 m under land surface. The result was proved to be correct and reliable by follow-up project. It was concluded that it was very reliable to use the theories to simulate and predict the variation of groundwater flow and land-subsidence caused by dewatering of deep foundation pit in such areas.

Key words: foundation pit dewatering; three dimensional seepage; land subsidence; coupling model

0 前 言

长江三角洲是我国经济最为发达的地区, 也是城市化程度最高的地区之一。近年来, 随着国民经济的飞速发展、人口的不断增加、城市建设规模的不断扩大, 地下空间的开发正日益得到重视, 且不断向着大和深的方向发展。长江三角洲分布有巨厚的第四纪松散沉积层^[1-2], 其间发育有多层厚度较大的孔隙承压含

水层, 各含水层之间又以弱含水的粘性土层相分隔, 并发生强烈的水力联系, 构成了一个复合含水层系统, 具有较高的承压水位。深基坑的开挖一方面必须靠大降深的降水来保证, 另一方面大降深的降水又将引发

基金项目: 上海市重大科研项目基金资助 (04dz12003)

收稿日期: 2005-12-21

地面沉降等人为地质灾害,不仅给国民经济的发展带来了不可估量的损失,且给人民的生命财产安全带来了严重威胁^[3-4]。如何正确地模拟预测重大工程深基坑降水引起的地面沉降的发生与发展程度,为有关部门的科学决策提供依据已成为当务之急。

本文以上海市环球金融中心深基坑降水为例,论述了深基坑降水三维渗流与地面沉降耦合模型建立的理论与方法,在概化上海环球金融中心深基坑降水与地面沉降地质概念模型的基础上,建立了上海环球金融中心深基坑降水三维渗流与地面沉降的耦合数学模型,同时模拟预测了基坑降水引起的地下水渗流场与地面沉降场的变化趋势,通过不同方案的对比分析,确定了该基坑的最优化降水方案。实践证明,该理论与方法正确、可靠,是模拟预测重大工程深基坑降水引起地下水渗流场与地面沉降变化特征的良好手段。

1 工程概况

上海环球金融中心位于陆家嘴金融贸易区,北侧为世纪大道,西侧为东泰路,东侧和南侧为规划绿化带,场地标高为+4.00 m。其塔楼地面以上高度为 492 m,共 101 层,地下 3 层。塔楼基坑为直径 100 m 的圆形基坑,面积约 7855 m²。基坑围护采用厚 1 m 的地下连续墙,墙顶标高+1.65 m,墙底标高-30.00 m。基坑大部分底面标高约为-14.35 m,电梯井、集水坑等最深处标高为-21.89 m。

该楼基的浅部为弱潜水含水层,其地下水位埋深为 0.5~1.2 m,水量不大,极易疏干。但基坑底部埋藏有高水头的承压含水层,分别为上更新统第 I、第 II 承压含水层,中更新统第 III 承压含水层,该三层承压含水层相互连通,构成了一个复合承压含水层。含水层顶标高为-23.88~-25.37 m,底板标高为-138.83~-145.07 m,层厚度约 117 m,静水位标高约为-5.7 m,对基坑底板的稳定性极为不利。为确保基坑开挖施工顺利进行,必须对下部承压含水层进行降水减压,将地下水位降至基坑底板以下。

2 基坑降水与地面沉降地质概念模型

本次研究,降水的目的层为上更新统第 I、第 II 承压含水层、中更新统第 III 承压含水层。考虑到降水过程中,上覆弱潜水含水层将与下伏承压含水层发生水力联系,因此将上覆潜水弱含水层和下伏承压含水层一起进入模型参与计算,并将其概化为三维空间上的非均质各向异性。为了克服由于边界的不确定性给计算结果带来的随意性,本着定水头边界应远离源、汇项的原则,通过试算,取以基坑为中心,东西、南

北各扩展 650 m 的范围作为本次模拟计算的区域,共计 1400 m×1400 m,四周均按定水头边界处理。地下水在疏降过程中,基坑外的地下水将通过基坑周围的围护连续墙绕流进入基坑;坑内地下水位大幅度下降,地下水流态为三维非稳定流。基坑内地下水的疏干降压井是唯一的源、汇项(见图 1)。

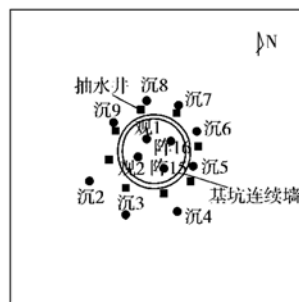


图 1 降水井与观测点布置示意图

Fig. 1 Location of dewatering wells and observation points

基坑降水引起周围含水层中地下水位下降,孔隙水压力逐渐减小,有效应力逐渐增加,使原来由水体承担的一部分荷载转向由含水层骨架承担,含水层骨架由于附加荷载而受到压缩变形,进而使土体产生固结,引起基坑周围地面沉降的发生。

3 基坑降水与地面沉降耦合数学模型

3.1 地下水运动数学模型

根据上述水文地质概念模型,建立与之相适应的地下水运动三维非稳定流数学模型^[5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = \frac{E}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad ((x, y, z) \in \Omega), \quad (1)$$

$$h(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0(x, y, z) \quad ((x, y, z) \in \Omega), \quad (2)$$

$$h(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t) \quad ((x, y, z) \in \Gamma_1). \quad (3)$$

式中 $E = \begin{cases} S(\text{承压含水层}), \\ S_y(\text{潜水含水层}); \end{cases} T = \begin{cases} M(\text{承压含水层}), \\ B(\text{潜水含水层}); \end{cases}$

S 为储水系数; S_y 为给水度; S_s 为储水率 (m⁻¹),

$S_s = \frac{S}{M}$; M 为承压含水层单元体厚度 (m); B 为潜水含水层单元体饱和地下水厚度 (m); k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz}

分别为各向异性主方向渗透系数 (m/d); h 为点 (x, y, z) 在 t 时刻的水头值 (m); W 为源汇项 (d⁻¹); h_0 为计算域初始水头值 (m); h_1 为第一类边界的水头值 (m); t 为时间 (d); Ω 为计算域; Γ_1 为第一类边界。

3.2 地面沉降数学模型

由地下水位下降引起的含水层压缩量的计算模型为^[6]: 承压含水层的弹性变形量

$$\Delta b = -\Delta h S_{ske} b_0 = -\Delta h S_{fe} \quad (4)$$
承压含水层的非弹性变形量

$$\Delta b' = -\Delta h S_{skv} b_0 = -\Delta h S_{fv} \quad (5)$$
潜水含水层的弹性变形量

$$\Delta b = -\Delta h (1 - n + n_w) S_{ske} b_0 = -\Delta h S_{fe} \quad (6)$$
潜水含水层的非弹性变形量

$$\Delta b' = -\Delta h (1 - n + n_w) S_{skv} b_0 = -\Delta h S_{fv} \quad (7)$$

式中 Δb 为含水层弹性压缩量 (m), 正为压缩, 负为膨胀; $\Delta b'$ 为含水层非弹性压缩量 (m); Δh 为水头变化值 (m); S_{fe} 为含水层骨架成分的弹性储水因子; S_{ske} 为含水层单位厚度骨架成分的弹性储水因子 (m^{-1}); S_{fv} 为含水层骨架成分的非弹性储水因子; S_{skv} 为含水层单位厚度骨架成分的非弹性储水因子 (m^{-1}); b_0 为可压缩含水层的厚度 (m); n 为孔隙率; n_w 为水位以上作为多孔介质总体积的一部分的湿气容量。

其中含水层单位厚度骨架成分的弹性储水因子 (m^{-1}) [7-8]

$$S_{ske} = \rho_w g \left[\frac{3(1 - 2\nu)}{2G(1 + \nu)} \right] \quad (8)$$

含水层单位厚度骨架成分的非弹性储水因子 (m^{-1})

$$S_{skv} = \frac{0.434 C_c \rho_w}{p' (1 + e_0)} \quad (9)$$

式中 G 为剪切模量 (MPa); ν 为泊松比; C_c 为压缩系数; p' 为初始有效应力 (MPa); e_0 为初始孔隙比; ρ_w 为水的密度 ($kg \cdot m^{-3}$)。

在沉降模型中, 含水层及包含于其中的弱透水层被视为一个整体, 假设整个含水层的骨架都可发生压缩并产生沉降作用, 参数 S_{fe} 、 S_{fv} 视为在整个含水层规模上的等效参数。

由各含水层的压缩量可求出总地面沉降量。

将上述二模型通过水头项耦合起来, 即可形成地下降水与地面沉降耦合模拟模型。

该模型采用有限差分法进行求解, 并采用强隐式 (SIP) 联立迭代求解法求解线性方程组。将整个求解过程采用 FORTRAN 语言, 编制成计算机程序, 在 P IV3.0 微机上进行计算。

4 模型的校正、识别

根据基坑围护结构及计算目的层在三维空间的变化规律, 将计算区在三维空间上进行离散, 平面上剖分为 67×78 个网格单元, 剖面上剖分为 14 层 (图 2)。各含水层的初始水位和边界水位由实测给出。选取 2004 年 6 月 30 日到 2004 年 7 月 30 日的抽水水位下降期作为模型校正识别的时段。根据各时段不同的抽水量, 将整个过程分为 10 个应力期。通过对观 1、观

2、降 15、降 16 观测点 (见图 1) 进行水位拟合, 对沉 2、沉 4、沉 5、沉 6、沉 7、沉 8、沉 9 地面沉降观测点 (见图 1) 进行地面沉降拟合, 反演计算出了各含水层的水文地质及地面沉降参数 (包括 X 、 Y 、 Z 三个方向的渗透系数 k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} , 重力给水度 S_y , 弹性储水率 S_s , 含水层骨架成分的弹性储水因子 S_{fe} 、非弹性储水因子 S_{fv}), 整个校正、识别过程见图 3。

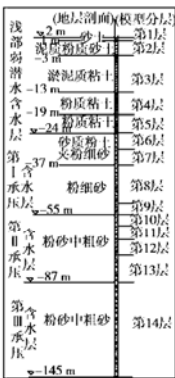


图 2 基坑地层剖面与模型垂向分层关系图
Fig. 2 Stratigraphic sections of the foundation pit vs. vertical layers of the model

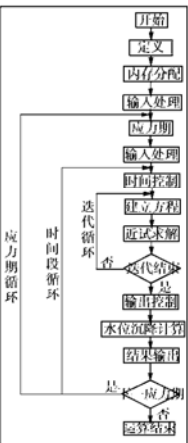


图 3 计算程序流程图
Fig. 3 Flow chart of the calculation program

图 4、5 说明了地下水位与地面沉降的拟合精度, 图 6、7 和表 1、2 说明了模型第 6 层的水文地质与地面沉降参数分区及各分区的参数值。从图 4、5 看出, 地下水位拟合精度较高, 地面沉降拟合出了沉降的主趋势。地面沉降的实测曲线锯齿形波动较大, 是由于基坑场地地处闹市区交通主干道旁, 地面沉降的观测受动荷载影响较大, 这是本模型无法反映的。

5 模型预测及最佳降水方案的确定

根据基坑降水要求, 即降水第 30 天基坑中心下伏第 I 承压含水层上部降压段 (模型第 6 层) 水位降至埋深 26 m (标高 -22 m), 设计不同的降水方案并输入

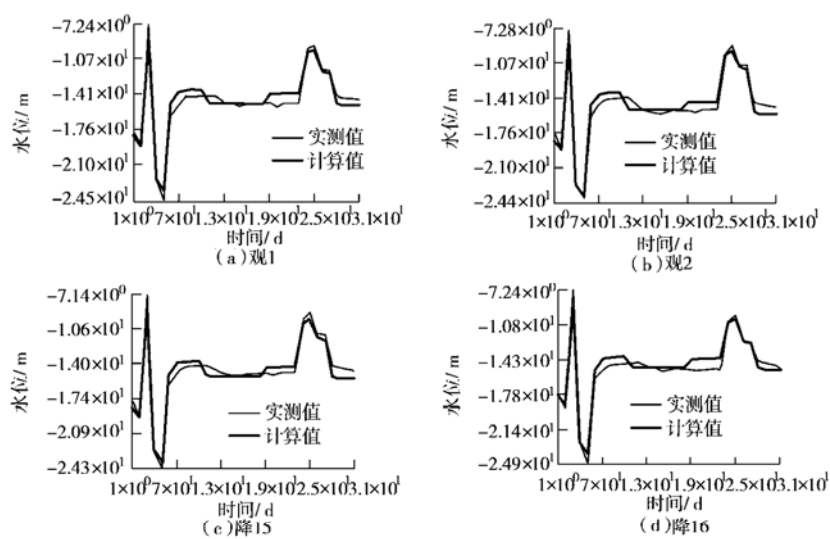


图 4 地下水位拟合图

Fig. 4 Fitting map of groundwater level

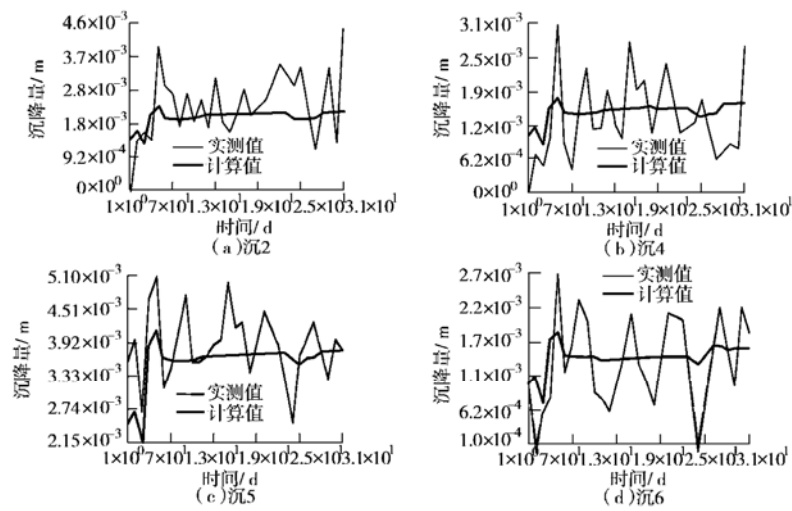


图 5 地面沉降拟合图

Fig. 5 Fitting map of land-subsidence

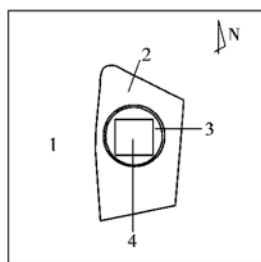


图 6 模型第六层水文地质参数分区示意图

Fig. 6 Division of hydro-geologic parameters in layer 6

模型, 经模型运行发现, 采用 8 口井降水, 每口井的单井抽水量为 $1420 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 最为合适, 抽水井布置见图 1。降水第 30 天, 基坑中心下伏第 I 承压含水层上部降压段水位最低处标高为 -23.4 m 时, 基坑周围的最大地面沉降量约为 2.4 cm 。图 8 给出了降水第 30 天模型第 6 层基坑周围的地下水流场分布特征, 图 9 给出了降水第 30 天基坑周围的地面沉降分布特征。计算结

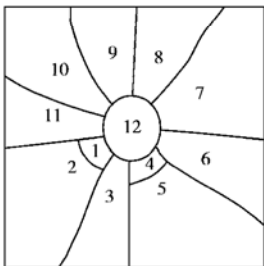


图 7 模型第六层沉降参数分区示意图

Fig. 7 Division of subsidence parameters in layer 6

表 1 模型第 6 层水文地质参数表

Table 1 Hydro-geologic parameters in layer 6 of the model				
参数 分区	k_{xx} $/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	k_{yy} $/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	k_{zz} $/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	S_s $/\text{m}^{-1}$
1	4.00	4.00	4.00×10^{-1}	3.00×10^{-5}
2	5.00	5.00	5.00×10^{-1}	3.00×10^{-5}
3	5.00	5.00	5.00×10^{-1}	3.00×10^{-5}
4	3.00	3.00	3.00×10^{-1}	4.00×10^{-5}

果经后续工程验证正确、可靠。

表 2 模型第 6 层地面沉降参数表

Table 2 Subsidence parameters in layer 6 of the model		
参数分区	S_{fe}/m^{-1}	S_{fv}/m^{-1}
1	1.20×10^{-5}	6.00×10^{-5}
2	1.50×10^{-5}	8.00×10^{-5}
3	1.50×10^{-5}	8.00×10^{-5}
4	1.40×10^{-5}	7.00×10^{-5}
5	1.10×10^{-5}	3.80×10^{-5}
6	1.10×10^{-5}	3.80×10^{-5}
7	1.50×10^{-5}	9.00×10^{-5}
8	1.10×10^{-5}	2.00×10^{-5}
9	1.00×10^{-5}	1.50×10^{-5}
10	1.10×10^{-5}	2.00×10^{-5}
11	1.10×10^{-5}	1.50×10^{-5}
12	1.20×10^{-5}	5.00×10^{-5}

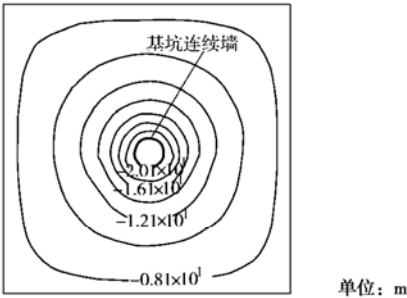


图 8 降水第 30 天模型第 6 层地下水位预测等值线图

Fig. 8 Forecasted contour map of groundwater level in layer 6 of the model at the thirtieth day of dewatering

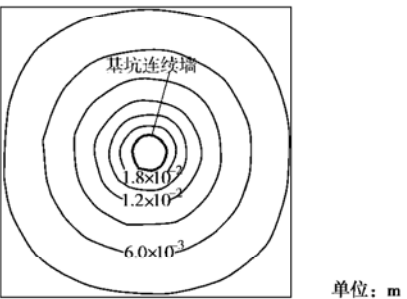


图 9 降水第 30 天地面沉降预测等值线图

Fig. 9 Forecasted contour map of land-subsidence at the thirtieth day of dewatering

6 结 论

(1) 深基坑降水三维地下水渗流与地面沉降耦合模型可同时计算出地下水位和地面沉降量，具有重要的工程实用价值。

(2) 深基坑降水三维地下水渗流与地面沉降耦合模型能够很好地模拟三维地质体及其整个基坑降水工程的结构与过程，是模拟和预测长江三角洲第四纪松散承压含水层地区深基坑降水与地面沉降问题强有力

的工具。

参考文献:

[1] 张惠忠, 刘明建. 上海软土中的“微承压水”与基坑工程[J]. 岩土工程学报, 2002, 27(8): 944 - 947.(ZHANG Hui-zhong, LIU Ming-jian. “Feeble confined water” in Shanghai area and related geotechnical engineering problems in foundation excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,27(8):944 - 947.)

[2] 叶淑君, 薛禹群, 等. 上海区域地面沉降模型中土层变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 140 - 147.(YE Shu-jun, XUE Yu-qun, et al. Study on the deformation characteristics of soil layers in regional land subsidence model of Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,27(2):140 - 147.)

[3] HILL M C. Solving groundwater flow problems by conjugate-gradient methods and the strongly implicit procedure [J]. Water Resources Research, 1990,26(9):1961 - 1969.

[4] 陈崇希, 裴顺平. 地下水开采 - 地面沉降数值模拟及防治对策研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001: 10 - 15.(CHEN Chong-xi, PEI Shun-ping. Numerical simulation of land subsidence due to groundwater withdrawal and its prevention countermeasure [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001:10 - 15.)

[5] 骆祖江, 李 朗, 等. 复合含水层地区深基坑降水三维渗流场数值模拟[J]. 工程地质学报, 2006, 14(1)72:77.(LUO Zu-jiang, LI Lang, et al. Numerical simulation of three-dimensional seepage field of a deep foundation pit during dewatering in a complex composite aquifer system-case study of dewatering of a pit at the Shanghai Finance Center[J].Journal of Engineering Geology, 2006,14(1)72:77.)

[6] WEN Hsing Chiang, WOLFGANG Kinzelbach. 3D groundwater modeling with PMWIN—A simulation system for modeling groundwater flow and pollution [M]. USA: Springer, 2001:120 - 132.

[7] BURBEY T J, HELM D C. Modeling three-dimensional deformation in response to pumping of unconsolidated aquifers[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 1999(2):199 - 212

[8] BURBEY T J. Stress-strain analyses for aquifer-system characterization [J]. Ground Water, 2001,39(1):128 - 136.