

文章编号:1671-4814(2009)01-55-07

地下水渗流沉降的三维耦合模型 及程序的研制*

骆祖江¹, 郑飞¹, 童学平²

(1 河海大学土木工程学院, 南京 210098)

(2 南京浦口区建筑安装工程质量监督站, 南京 211800)

摘要:研制可合理模拟预测基坑降水过程中引起地面沉降的计算机程序,并提出最优化解水方案。基于三维全耦合数值模型,笔者开发了GWS软件。GWS软件是以比奥固结理论为基础,将土体的非线性特征及土的渗透性随应力状态的动态变化考虑进去,通过耦合地下水渗流场和土体应力场进行模拟预测基坑降水过程中渗流场及地面沉降的变化。以一个实际基坑降水工程为例,经GWS软件计算得出5口井联合抽水方案,后续工程证明此方案正确、可靠。以三维全耦合数值理论为基础的GWS软件,可以为基坑降水工程引起的地下水渗流场变化及地面沉降量提供可靠的预测。

关键词:GWS软件;基坑降水;地面沉降;耦合模型

中图分类号:P641

文献标识码:A

1 引言

近年来,我国高层建筑和地下工程日益增多,基坑工程显得越来越重要。在基坑开挖过程中,由于工程需要不可避免要遇到基坑降水问题,如若处理不当,就会对周围环境造成不良影响^[1],甚至出现工程事故^[2]。目前,关于基坑降水与地面沉降的大多数模型没有考虑土体的变形参数和渗透性随土体应力场的改变而变化。三维渗流与地面沉降全耦合模型^[3]在这两方面作了进一步完善,经工程实践证明,此模型贴近实际,计算精度较高。

基于三维全耦合模型,笔者开发了GWS软件。GWS软件可在计算机上建立基坑降水的水文地质概念模型,预测基坑降水过程中引起的地下水渗流场与地面沉降场的变化趋势,和基坑降水引起地面沉降的发生及发展程度,实现整个基坑降水过程中地下水三维渗流和地面沉降模拟控制计算的可视化。

2 软件原理

2.1 地下水三维非稳定流数学模型

为克服边界的不确定性对计算结果的影响,根据定水头边界应远离源、汇项的原则,模

* 收稿日期:2008-05-28

第一作者简介:骆祖江(1964~)男,汉族,江苏吴江人,教授,主要从事水文地质、工程地质研究。

型以基坑为中心,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并是唯一的源、汇项。据此,建立与之相适应的地下水三维非稳定流数学模型^[4]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W &= \frac{E}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (x, y, z) \in \Omega \\ h(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} &= h_1(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ h(x, y, z, t) \Big|_{t=t_0} &= h_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Omega \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $E = \begin{cases} S & \text{承压含水层} \\ S_y & \text{潜水含水层} \end{cases}$; $T = \begin{cases} M & \text{承压含水层} \\ B & \text{潜水含水层} \end{cases}$; $S_s = \frac{S}{M}$; S 为储水系数; S_y 为给水度; M 为承压含水层单元体厚度(m); B 为潜水含水层单元体地下水饱和厚度(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(1/d); 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); S_s 为储水率(m^{-1}); t 为时间(d); Ω 为计算域; Γ_1 为第一类边界。

2.2 土水全耦合模型

饱和土体中假定土骨架变形为线弹性、微小变形、渗流符合达西定律、水不可压缩或微压缩的三维比奥固结方程如下^[5,6,7]:

$$\begin{cases} -G \nabla^2 w_x - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ -G \nabla^2 w_y - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ -G \nabla^2 w_z - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{1}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \gamma_w \right) \right) \right] = 0 \quad (3)$$

式中: G 为剪切模量, ν 为泊松比, w_x 、 w_y 、 w_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的位移分量, u 为孔隙水压力, k_x 、 k_y 、 k_z 分别为 x 、 y 、 z 方向上的渗透系数, γ 为土的重度, γ_w 为水的重度。采用伽辽金加权余量法离散方程,考虑土的非线性特性,取 Δt 时间内的位移增量来代替位移,将式(2)、(3)离散成增量形式^[8]:

$$\begin{bmatrix} K & C \\ C^T & \Delta t H + B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta r \\ \Delta u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta f \\ \Delta t \{F\} - \Delta t H u \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: K 、 H 分别是固体刚度矩阵和流体“刚度”矩阵, C 是耦合矩阵, B 是关于自由面的积分矩阵, Δr 为位移增量, Δf 为等效节点力增量。上述方程结合一定的初始条件和边界条件,即可进行求解。

2.3 模型中有关参数与物理量的处理

2.3.1 邓肯-张非线性模型

采用邓肯-张非线性模型^[9],将土体的本构关系推广到非线性,则本构关系 $\{\Delta \sigma\} = [D] \{\Delta \epsilon\}$ 中矩阵 $[D]$ 中的弹性常数 E 、 ν 不再视为常量,而是随应力状态改变,其切线弹性模量和

切线泊松比的表达式如下:

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 k p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (5)$$

$$\nu_t = \frac{G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)}{\left[1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{k p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]} \right]} \quad (6)$$

式中 c, φ 为强度指标, k, n, R_f, G, F, D 为试验参数, 由土体常规三轴压缩试验确定。

2.3.2 渗透率 k 的动态模型

流固耦合实际上是孔隙应力消散引起土体骨架应力重分布, 宏观上表现为土体的固结变形, 土体的孔隙率 n 改变, 影响渗透率, 从而影响渗流。目前许多流固耦合的文献建立的模型大都忽略孔隙率和渗透率之间的相互联系和变化。在比奥固结理论假定前提下, 可以得到孔隙度 n 和渗透率 k 的动态表达式^[10]:

$$n = \frac{n_0 + \varepsilon_v}{1 + \varepsilon_v}, \quad k = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \cdot \left[1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0} \right]^3 \quad (7)$$

式中 n_0 为初始孔隙度, k_0 为初始渗透率, ε_v 为体应变。

2.3.3 荷载列阵

集中力、体力、面力和初应变等效荷载:

$$\{f^e\} = [N]^T \{P\} + \iint_V [N]^T \{\bar{P}\} dV + \iint_S [N]^T \{\bar{P}\} dS + \{P\} \xi_0 \quad (8)$$

式中右端四项分别表示集中力、体力、面力和初应变等效荷载。

附加荷载:

$$P_w = (\gamma_0 - \gamma') \Delta h \quad (9)$$

式中 Δh 为 Δt 时刻内的水位变化, γ_0 为降水后的天然重度(用天然重度代替持水重度), γ' 为降水前土体的有效重度。计算时将 P_w 分成许多小的荷载增量且与时间增量同步, 叠加到方程的右端。

开挖荷载:

$$\{f^e\} = \sum_{i=1}^M \iint_V [B]^T [\sigma_0] dV + \sum_{i=1}^M \iint_V [N]^T \gamma dV \quad (10)$$

式中 $[B]$ 为应变位移矩阵, $[\sigma_0]$ 为初始应力场, M 为被挖材料的单元数。

3 软件简介

本软件借助通用的图形处理软件AutoCAD 和有限元分析软件ANSYS, 采用Fortran 语言编写有限元计算程序, 对基坑降水过程中的渗流和沉降进行分析计算, 并生成水位和沉降等值线图, 为基坑降水工程提供可靠的预测。

本软件有六个主菜单, 分别为打开、前处理模块、计算模块、后处理模块、还原、帮助。每个主菜单包含不同的子菜单(图1)。

3.1 打开

打开下拉菜单包括三个选项, AutoCAD 模型、ANSYS 模型和 dxflwin 模型(图1)。它们

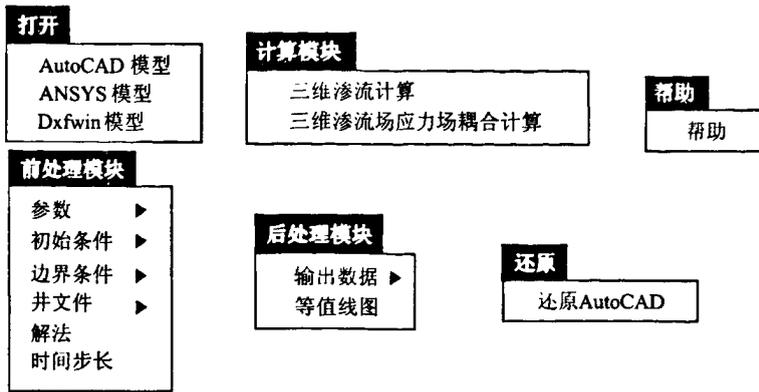


图1 GWS 软件菜单

Fig. 1 Menu of the GWS software

主要是在前后处理图形文件用到的。

3.2 前处理模块

前处理模块包含参数、初始条件、边界条件、井文件、解法、时间步长等选项,见图1。参数包含水文地质参数和土体结构模型参数两类。初始条件包含初始水头。边界条件包含已知水头边界条件、已知流量边界条件、已知位移边界条件。井文件包含节点井和单元井两类文件。解法有PCG解法或Crout直接解法两种。这里的时间步长是指将时间总数根据不同时段抽水量不同、边界条件不同,划分成不同的应力期,为了计算稳定、收敛,每个应力期又分为不同的时间步长。前处理模块准备的数据被保存成不同的数据文件,这些数据文件将在计算模块的计算中用到。

3.3 计算模块

计算模块是本软件的核心模块,是采用Fortran语言编写的。本模块包含三维渗流计算和三维渗流场应力场耦合计算选项。耦合分析程序结构图(图2)。

前处理的数据准备好之后,点击“三维渗流计算”菜单和“三维渗流场应力场耦合计算”菜单,软件开始计算。软件计算生成后的数据,将在后处理模块中运用到。

3.4 后处理模块

后处理模块输出软件计算后的数据和需要生成的图形。输出的数据有水位数据和耦合沉降数据,并可以绘制水位等值线图和地面沉降等值线图。后处理生成的图形是dxf格式的,可在AutoCAD下对线条及字体进行修改。

本软件的流程图可简单描述如下。

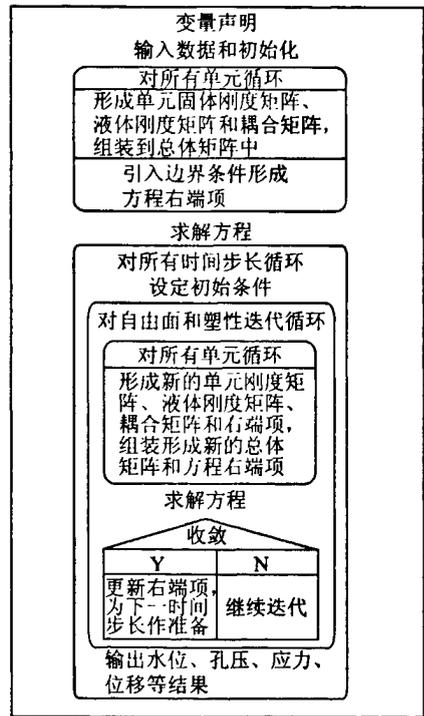


图2 耦合分析程序结构图

Fig. 2 Framework of the coupled program

4 算例

4.1 工程概况

某基坑工程,场地标高-0.5 m,基坑为直径60 m的圆形基坑,最深处标高为-9.2 m。基坑采用厚1 m的地下连续墙作为围护,墙顶标高-0.5 m,墙底标高-17.5 m。

该基坑开挖段为弱潜水含水层,水量不大;但基坑底板以下埋藏有高承压的上更新统第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,含水层顶板标高为-9.53~-10.48 m,底板标高为-49.64~-56.72 m,层厚达39 m左右,静水位标高约为-3.62 m,对基坑底板的稳定性极为不利。为确保基坑工程的开挖顺利进行和开挖后的稳定,必须将下部承压含水层的地下水位降至基坑底板以下,基坑的抽水井点布置如图4所示。

4.2 水文地质概念模型的建立

根据研究区的水文地质特征,建立的模型是以水平方向上基坑中心为原点,向四周各扩展300 m,边界为定水头边界和零位移边界;模型在垂向上取至第Ⅲ承压含水层的隔水层底板,考虑抽水井和基坑围护连续墙的位置及层厚的影响,模型分为9层。模型的三维网格剖分如图5所示。

4.3 模型预测方案

采用上述数学模型,选取2007年4月6日到2007年4月21日的抽水水位下降期作为模型的校正识别的时段,水位初始值由实测值给出,模型初始位移为0。图6和表1是模型的参数分区及各分区的参数值。根据各时段不同的抽水量,将整个过程分为3个应力期。根据基坑降水要求,即降水第15天基坑底板下伏第Ⅰ承压含水层上部降压段(模型第4层)水位降至埋深10.1 m(标高-10.6 m)。设计不同的降水方案输入GWS计算,经GWS计算发现,采用5口井降水,每口井的单井抽水量为 $350 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 最为合

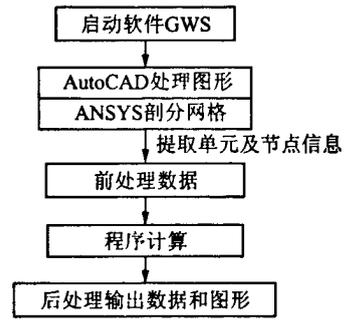


图3 GWS软件流程图
Fig. 3 Flow chart of the GWS software

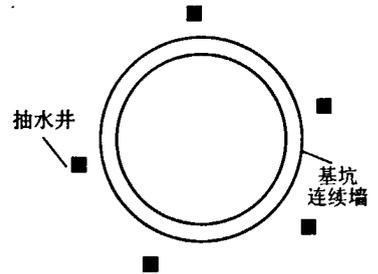


图4 抽水井点布置图
Fig. 4 Location map of dewatering wells

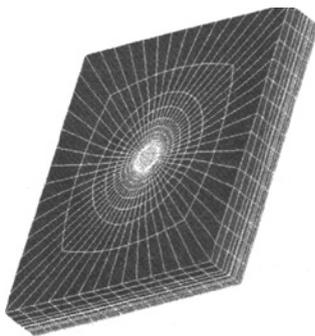


图5 模型网格剖分图

Fig. 5 Three-dimensional gridding of the model

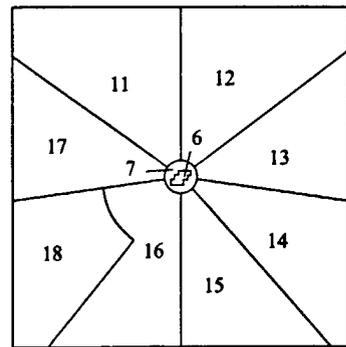


图6 模型第4层参数分区图

Fig. 6 Division of the parameters in layer 4

适,抽水井布置见图4。降水第15天,基坑底板下伏第1承压含水层上部降压段水位最低处标高为-13.2 m时,基坑周围的最大地面沉降量约为1.4 cm。图7是GWS软件输出的最终地下水水位等值线,图8是最终的地面沉降等值线图。经后续工程检验,GWS软件的模型预测较好的符合实际情况。

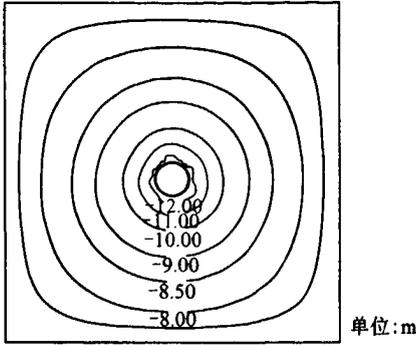


图7 降水第15天模型第4层水位预测等值线图
Fig. 7 Forecasted contour map of groundwater level in layer 4 on the fifteenth day of dewatering

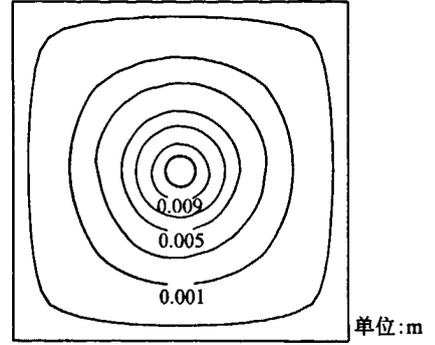


图8 降水第15天基坑周围地面沉降量预测等值线图
Fig. 8 Forecasted contour map of land-subsidence on the fifteenth day of dewatering

表1 模型第4层相关参数表

Table 1 Parameters concerned in layer 4

参数 分区号	K_{ox} /m · d ⁻¹	K_{oy} /m · d ⁻¹	K_{oz} /m · d ⁻¹	μ /L · d ⁻¹	$\varphi/(^{\circ})$	c /kPa	E_0 /MPa	ν_0
6	3.6	3.6	0.36	0.15	20	5	697.4	0.463
7	2.5	2.5	0.25	0.15	18	7	520.0	0.482
11	3.9	3.9	0.39	0.15	20	5	697.4	0.476
12	3.1	3.1	0.31	0.15	18	7	520.0	0.480
13	2.6	2.6	0.26	0.15	20	5	697.4	0.476
14	3.3	3.3	0.33	0.15	20	5	697.4	0.471
15	2.8	2.8	0.28	0.15	18	7	520.0	0.480
16	3.2	3.2	0.32	0.15	20	5	697.4	0.469
17	4.1	4.1	0.41	0.15	18	7	520.0	0.478
18	2.3	2.3	0.23	0.15	18	7	520.0	0.482

4 结论

(1) 三维地下水渗流场与应力场耦合模型可以同时计算出地下水位和地面沉降量,在工程实际应用中具有重要意义。

(2) 三维耦合数值模型可以很好地模拟整个基坑降水过程,为基坑降水过程中可能引发的地面沉降问题提供可靠的预测。

(3) 基于三维全耦合数值模型的GWS软件实现了数值模拟的可视化,能为基坑降水的优化设计提供准确性和便捷性。

参考文献

- [1] 马丽丽. 深基坑开挖中的水文地质问题[J]. 工程勘察, 1996, 1(2): 25-29.
- [2] His J P, Carter J P, Small J C. Surface Subsidence and Drawdown of the Water Table due to Pumping [J]. Geotechnique, 1994, 44(3): 381-396.
- [3] 骆祖江, 李朗, 姚天强. 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[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1947-1951.
- [4] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖貽. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [6] 罗晓辉. 深基坑开挖渗流与应力耦合分析[J]. 工程勘察, 1996, 2(6): 37-41.
- [7] Biot M A. General Theory of Three-dimensional consolidation [J]. J. Appl. Physics, 1941(12): 155-164.
- [8] 谢康和, 周健. 岩土工程有限元分析理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] Duncan J M, Chin-Yung Chang. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. ASCE. SM, 1970(5): 1629-1653.
- [10] Gu Xiaoyun, Ran Qiquan. A 3-D coupled model with consolidation of geological properties [C]// Land subsidence, proceeding of the Sixth International Symposium on Land Subsidence [A]. Italy. Ravenna, 2000(11): 355-365.

Three-dimensional coupled models of groundwater seepage and land-subsidence and development of computer program

LUO Zu-jiang¹, ZHENG Fei¹, TONG Xue-ping²

(1 College of Civil Engineering, Hehai University, Nanjing, 210098, China)

(2 Construction and Installation Engineering Quality Supervision Station of Pukou District, Nanjing City Nanjing, 211800, China)

Abstract

A computer program which can reasonably simulate and forecast the land subsidence caused by foundation pit dewatering was developed in the paper, with an optimal plan of dewatering presented. Based on the three-dimensional coupled numerical model, the writers developed a GWS software. On the basis of Biot's consolidation theory, the GWS software can simulate and forecast the change of seepage and land subsidence in the process of foundation pit dewatering, which considered the non-linear characteristics of soil and the dynamic change of permeability coefficient with the stress state. Taking a practical foundation pit dewatering project for example, a plan of simultaneous operation of five extraction wells was obtained by calculation of the GWS software. The plan was proved to be correct and reliable by follow-up project. The GWS software which is based on the three-dimensional coupled numerical model could provide reliable forecast for the change of seepage and land subsidence caused by foundation pit dewatering.

Key words: GWS software; foundation pit dewatering; land subsidence; coupled model