

doi:10.3799/dqkx.2014.058

地下水渗流与地面沉降耦合模拟

金玮泽¹, 骆祖江^{1*}, 陈兴贤^{1,2}, 谈金忠³

1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210098

2. 江苏省地质矿产勘查局, 江苏南京 210018

3. 江苏南京地质工程勘察院, 江苏南京 210041

摘要: 为了准确模拟由地下水开采导致渗流场和应力场发生变化而引起的地面沉降问题, 根据 Terzaghi 有效应力原理, 建立了地下水三维渗流与一维垂向固结的地下水渗流与地面沉降耦合数值模拟模型和以比奥固结理论为基础, 并结合土体非线性流变理论, 将土体本构关系推广到粘弹塑性, 同时考虑土体力学参数及水力参数的动态变化关系的地下水渗流与地面沉降三维全耦合数值模拟模型。通过对比分析, 结果表明: 基于 Terzaghi 有效应力原理建立的地下水三维渗流与一维垂向固结地下水渗流与地面沉降耦合数值模拟模型模拟所得地面沉降与地下水位呈现出同步变化的趋势, 并且当地下水位逐步回升至初始水位时, 地面沉降也逐步回升到初始的零沉降状态, 而以比奥固结为基础建立的地下水渗流与地面沉降三维全耦合数值模拟模型模拟所得的地面沉降变化趋势滞后于地下水位的变化趋势, 并且当地下水位逐步回升至初始水位时, 地面沉降虽也逐步得到回升, 但回不到初始的零沉降状态, 存在一个永久的残余沉降量。在土体参数变化方面, 土体的孔隙度、渗透系数及泊松比均呈现先减小后增大的变化趋势, 而弹性模量则呈现先增大后减小的变化趋势, 与地面沉降的变化相对应。

关键词: Terzaghi 有效应力原理; 比奥固结理论; 地下水; 沉降; 耦合; 参数变化。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2014)05-0611-09

收稿日期: 2013-10-10

Coupling Simulation of Groundwater Seepage and Land Subsidence

Jin Weize¹, Luo Zujiang^{1*}, Chen Xingxian^{1,2}, Tan Jinzhong³

1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Jiangsu Geology & Mineral, Exploration Bureau, Nanjing 210018, China

3. Jiangsu Nanjing Institute of Geo-Engineering Investigation, Nanjing 21004, China

Abstract: In order to accurately simulate land subsidence caused by seepage field as a result of groundwater exploitation and stress field, two models are established in this study: one is groundwater seepage and land subsidence coupling numerical simulation model of the three-dimensional seepage of groundwater and one-dimensional vertical consolidation in light of Terzaghi effective stress principle; and the other is three-dimensional coupling model of groundwater seepage and land subsidence based on the Biot's consolidation theory combined with the nonlinear rheological theory of soil, extending the constitutive relation in Biot's consolidation theory to viscoelastic plasticity, taking into consideration of the dynamic change relationship of mechanical parameters and hydraulic parameters. The comparison and analysis show that the changing tendency of land subsidence calculated by groundwater seepage and land subsidence coupling numerical simulation model of the three-dimensional seepage of groundwater and one-dimensional vertical consolidation is the same as that of water level variation. When the water level falls back to the initial water level, total subsidence is 0. Land subsidence calculated by Biot's three-dimensional full coupling model falls behind of water level change. When the water level falls back to the initial water level, soil does not rebound to initial 0 subsidence state. There exists permanent remain of subsidence. In aspect of parameter change, porosity, hydraulic conductivity and Poisson's ratio have the tendency of decreasing first and then increasing. Modulus of elasticity has the tendency of decreasing first and then increasing. But these parameter values tend to be stable, corresponding to land subsidence variation.

Key words: Terzaghi effective stress principle; Biot's consolidation theory; groundwater; subsidence; coupling; parameter variation.

基金项目: 江苏省专项基金(No. dk2012ky01).

作者简介: 金玮泽(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事水文地质与工程地质等方面的研究. E-mail: jinweizehh@163.com

* 通讯作者: 骆祖江, E-mail: luozujiang@sina.com

0 引言

准确预测地下水开采引发的地面沉降问题是确定地面沉降防治规划的关键.地下水开采引发地面沉降问题实际是一个渗流场和应力场相互影响、相互作用的问题.目前,国内外关于地下水渗流与地面沉降的常用计算模型,主要有基于 Terzaghi 有效应力原理建立的地下水三维渗流与一维垂向固结沉降的耦合模型,以美国地质调查局开发的 Processing MODFLOW 商业软件为代表(阚京梁和罗立红, 2010;周念清等, 2011;李英等, 2012).骆祖江等(2006, 2008, 2009)近期提出了以比奥固结理论为基础,结合土体非线性流变理论,将土体本构关系推广到粘弹塑性,同时考虑土体水力学参数及土力学参数随渗流场和应力场的动态变化关系,建立了地下水渗流与地面沉降三维全耦合模型.本文应用上述二模型对地下水渗流与地面沉降进行了模拟对比分析,结果表明,无论从模型计算结果还是从模型刻画的地面沉降机理来看,后者更加符合实际,具有更高的计算精度.

1 理论基础与方法

1.1 地下水三维渗流与 Terzaghi 一维沉降模型

对于非均质、空间三维非稳定流系统,如把坐标轴取得与各向异性的主方向一致,可用以下地下水流动连续性方程及其定解条件方程式(1)来描述(骆祖江等, 2007;阚京梁和罗立红, 2010):

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = \mu_s \frac{\partial h}{\partial t}, \\ (x, y, z) \in \Omega; \\ h(x, y, z, t) |_{t=0} = h_0(x, y, z, t_0), (x, y, z) \in \Omega; \\ h(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t), (x, y, z) \in \Gamma_1; \\ k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) + k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \cos(n, z) = q(x, y, z, t), \\ (x, y, z) \in \Gamma_2; \\ h(x, y, z, t) = z(x, y, t), (x, y, z) \in \Gamma_3; \\ k \frac{\partial h}{\partial n} = -\mu \frac{\partial h}{\partial t} \cos\theta. \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 为各向异性主方向渗透系数(m/d); k 为自由面边界渗透系数(m/d); t 为模型计算时间(d); h 为点 (x, y, z) 在 t 时刻的水头值(m); W 为源汇项(1/d); μ_s 为含水层储水率(1/m); q 为流量(m^3/d); μ 为饱和差(自由面上升)或给水度(自由面下降),无量纲,它表示在自由面改变单位高度下,从含水层单位截面积吸收或排出的水量; θ 为自由面外法线方向与垂线的交角; Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 分别

为第 1 类边界、第 2 类边界和自由面边界; Ω 为计算区域.

计算含水层沉降量的沉降模型方程为:

潜水含水层的弹性变形量:

$$\Delta b = -\Delta H(1 - n + n_w)\mu_{ske}b_0 = -\Delta H\mu_{fe}. \quad (2)$$

潜水含水层的非弹性变形量:

$$\Delta b^* = -\Delta H(1 - n + n_w)\mu_{skv}b_0 = -\Delta H\mu_{fv}. \quad (3)$$

承压含水层的弹性变形量:

$$\Delta b = -\Delta H\mu_{ske}b_0 = -\Delta H\mu_{fe}. \quad (4)$$

承压含水层的非弹性变形量:

$$\Delta b^* = -\Delta H\mu_{skv}b_0 = -\Delta H\mu_{fv}, \quad (5)$$

式中: Δb 为含水层弹性压缩量(m), 正为压缩, 负为回弹; Δb^* 为含水层非弹性压缩量(m); ΔH 为水头变化值(m); μ_{fe} 为含水层骨架成分的弹性储水因子, 无量纲; μ_{ske} 为含水层骨架成分的弹性储水率(1/m); μ_{fv} 为含水层骨架成分的非弹性储水因子, 无量纲; μ_{skv} 为含水层骨架成分的非弹性储水率(1/m); b_0 为可压缩含水层的厚度(m); n 为孔隙率, 无量纲; 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, 无量纲.

$$\begin{cases} \mu_{ske} = \rho_w g \left[\frac{3(1 - 2\nu)}{2G(1 + \nu)} \right], \\ \mu_{skv} = \frac{0.434C_c \rho_w}{\sigma'_0(1 + e_0)}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: G 为剪切模量(kPa); ν 为泊松比, 无量纲; g 为重力常数(m/s^2); C_c 为土体的压缩系数, 无量纲; σ'_0 为初始有效应力(kN/m^2); e_0 为初始孔隙比, 无量纲; ρ_w 为水的密度(kg/m^3).

将上述二模型通过水头项耦合起来, 即可形成地下水三维渗流与一维垂向固结的地下水渗流与地面沉降耦合数值模拟模型. 将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(彭国伦, 2005), 编制成三维地下水渗流与一维垂向固结沉降耦合有限元计算机程序.

1.2 比奥固结理论

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(钱家欢和殷宗泽, 1996):

$$\begin{cases} -G \nabla^2 w_x - \frac{G}{1 - 2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ -G \nabla^2 w_y - \frac{G}{1 - 2\nu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ -G \nabla^2 w_z - \frac{G}{1 - 2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{1}{\gamma_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial u}{\partial z} + \gamma_w \right) \right] = 0, \quad (8)$$

式中: G 为剪切模量 (kPa); ν 为泊松比, 无量纲; w_x, w_y, w_z 分别为 x, y, z 方向上的位移分量 (m); u 为孔隙水压力 (kPa); k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 方向上的渗透系数 (m/d); γ 为土的重度 (kN/m³); γ_w 为水的重度 (kN/m³).

1.3 土体本构模型

土的本构关系是土的力学特性即应力—应变—强度—时间等关系的数学表达式. 对于考虑流变特性的土体来说, 其变形特征主要表现为变形的时间与应力水平有关, 所显示的是具有弹性、塑性和粘滞性的粘弹塑性体, 若将此类土体的总应变增量 $d\epsilon$ 分为弹塑性应变增量 $d\epsilon^{ep}$, 粘弹性应变增量 $d\epsilon^{ve}$, 粘塑性应变增量 $d\epsilon^{vp}$, 则具有流变特性的土体中任意点在任意时刻的应变增量为 (Luo and Zeng, 2011):

$$d\epsilon = d\epsilon^{ep} + d\epsilon^{ve} + d\epsilon^{vp}. \quad (9)$$

1.4 比奥固结有限元方程

利用伽辽金加权余量法离散方程, 考虑到土体的非线性特性, 取 Δt 时间内的位移增量来代替位移, 将式 (7)、(8) 离散成增量形式 (李医民和周凤燕, 2004):

$$\begin{bmatrix} \bar{K} & K' \\ K^T & \Delta T + B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R - R_t \\ \Delta t \Delta Q \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: $\Delta \delta$ 为结点位移增量; Δu 为结点孔隙压力增量; \bar{K} 为固体刚度矩阵; K 为渗透流量矩阵; K' 为应力—渗流耦合项矩阵; ΔQ 为流量增量矩阵; B 为自由面的积分矩阵; R 为等效节点荷载, 当存在高层建筑荷载时, R 包括高层建筑荷载引起的附加应力值; R_t 为 t 时刻已经发生的位移所平衡了的那部分荷载.

因为渗流取决于孔隙压力全量的分布, 而不是取决于时间内孔隙压力增量. 所以孔压要用全量的形式表示, 记时刻 t_n 和 t_{n+1} 时单元节点 i 的孔压全量分别为 $u_{i(n)}$ 和 $u_{i(n+1)}$, 且 $\Delta u_i = u_{i(n+1)} - u_{i(n)}$, 则式 (19) 可变换为:

$$\begin{bmatrix} \bar{K} & K' \\ K^T & \Delta t K + B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ u_{i(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R - R_t \\ \Delta t \Delta Q - (\Delta t K + B) u_{i(n)} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

上式即为三维比奥固结有限元方程.

1.5 参数的动态变化模型

1.5.1 孔隙度与渗透系数的非线性

流固耦合问题实际上是孔隙应力的消散引起土体骨架的变形, 渗透系数会发生相应的变化, 从而影响土体的渗透性, 宏观上表现为土体的固结变形. 在比奥固结的假定条件下, 根据孔隙度的相关定义和渗流力学 Kozeny-Carman 方程推得孔隙度 n 和渗透系数 k 的动态表达式 (冉启全和李士伦, 1997; 田杰等, 2005):

$$\begin{cases} n = \frac{n_0 + \epsilon_v}{1 + \epsilon_v}, \\ k = \frac{k_0}{1 + \epsilon_v} \left[1 + \frac{\epsilon_v}{n_0} \right]^3, \end{cases} \quad (12)$$

式中: n_0 为初始孔隙度, 无量纲; k_0 为初始渗透系数 (m/d); ϵ_v 为体应变, 无量纲;

$$\epsilon_v = - \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right).$$

1.5.2 土体参数的非线性

采用邓肯—张非线性模型, 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, 而是随着应力状态改变而改变, 其切线弹性模量和切线泊松比的表达式如下 (罗刚和张建民, 2004):

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 k p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n. \quad (13)$$

$$\nu_t =$$

$$\frac{G - F \lg \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)}{\left(1 - \frac{D (\sigma_1 - \sigma_3)}{\alpha p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (1 - \sin \varphi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]} \right)}, \quad (14)$$

式中: R_f 为破坏比, 无量纲; c 为粘滞力 (kPa); φ 为内摩擦角 ($^\circ$); σ_1 为第 1 主应力 (kPa); σ_3 为第 3 主应力 (kPa); n 为弹性模量与固结压力曲线的斜率; $\log \alpha, G$ 为土体常规三轴压缩实验结果所绘曲线截距, $F = 0.04, D = 3$ 为土体实验参数; p_a 为大气压强 (kPa).

1.6 定解条件

1.6.1 初始条件

(1) 地应力初始条件:

采用土体的自重应力估算土体的初始应力:

$$\begin{cases} \sigma_z = \gamma z, \\ \sigma_x = K_0 \gamma z. \end{cases} \quad (15)$$

式中: σ_x, σ_z 为土体的初始水平向和垂向应力

(kPa); z 为计算点深度(m); K_0 为静止侧压力系数,无量纲,

$$K_0 = \begin{cases} 1 - \sin\varphi' & \text{砂土} \\ 0.95 - \sin\varphi' & \text{粘土} \end{cases}, \varphi' \text{ 为有效内摩擦角.}$$

(2) 位移初始条件:

$$w(x, y, z, t) |_{t=0} = 0, \quad (16)$$

(3) 孔隙水压力初始条件:

$$u(x, y, z, t) |_{t=0} = u_0(x, y, z), \quad (17)$$

式中: $u_0(x, y, z)$ 为研究区域内已知初始孔隙水压力(kPa).

1.6.2 边界条件 (1) 孔隙水压力边界条件 Γ_1 :

$$u(x, y, z) |_{\Gamma_1} = u_s, \quad (18)$$

式中: u_s 为水头边界 Γ_1 上的已知孔隙水压力(kPa).

(2) 流量边界条件 Γ_2 :

$$K \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q_L, \quad (19)$$

式中: q_L 为边界 Γ_2 上的已知单位面积流量(m/d).

(3) 自由面边界条件 Γ_3 :

$$u = Z; q = -\mu \frac{\partial u}{\partial t} \cos\theta, \quad (20)$$

式中: μ 为土体给水度,无量纲; θ 为自由面外法线方向与垂线的交角($^\circ$); q 为通过自由面边界 Γ_3 的单位面积流量(m/d); Z 为自由面所在的高程.

(4) 位移边界条件 Γ_4 :

$$\begin{aligned} w_x |_{\Gamma_4} &= \bar{w}_x, \\ w_y |_{\Gamma_4} &= \bar{w}_y, \\ w_z |_{\Gamma_4} &= \bar{w}_z. \end{aligned} \quad (21)$$

式中: w_x, w_y, w_z 为位移边界 Γ_4 上 3 个方向的已知位移(m).

比奥固结有限元方程结合定解条件和土体力学和水力学参数的动态变化模型即可运用 Fortran 语言编制相应的有限元程序进行求解 (Smith and Griffiths, 2003; 彭国伦, 2005).

2 应用算例

2.1 研究区概况

本文以南通兴益大厦深基坑场地为研究区,含水层以第四系松散层孔隙水为主,按照水文地质条件对含水层进行划分,将场地含水层细分为 7 层,垂向从上往下分别为潜水含水层、第 1 承压含水层、第 2 承压含水层、第 3 承压含水层以及各含水层间的

粘性土弱含水层.其中,潜水含水层:岩性以粉砂、亚砂土为主,底板埋深一般为 20~30 m,静水位埋深 0.9~1.2 m;第 1 承压含水层:粉砂为主,底板埋深 50~52 m,静水位埋深 3.2~3.8 m;第 2 承压含水层:亚砂土、细中砂为主,底板埋深 79~83 m,静水位埋深 7.6~8.1 m;第 3 承压含水层:细中砂、中粗砂为主,底板埋深 96~100 m,静水位埋深 11.5~13.4 m.

2.2 概念模型

为了对地下水渗流与地面沉降进行模拟研究,选取研究区场地平面范围为 $500 \times 500 \text{ m}^2$,垂向深度为 100 m,建立含水层模型.用八节点六面体单元离散化模型,在平面上剖分为 2 500 个矩形网格单元,垂向上剖分为:潜水含水层、第 1 承压含水层、第 2 承压含水层、第 3 承压含水层及各含水层之间的粘性土弱含水层,共 7 层.取第 1 至第 7 层含水层底板标高分别为 -25 m, -37 m, -52 m, -64 m, -79 m, -89 m, -100 m.每层土体划分为 1 个参数分区,垂向从上往下共划分为 7 个参数分区.模型四周均概化为第 1 类已知水头边界,底部概化为隔水边界.抽水井及模型分层如图 1 所示.

2.3 地下水位下降、回升条件下的地面沉降特征

抽水井工作一段时间,使得地下水位下降后,停止抽水,随着时间的推移地下水位会恢复至初始水位.为了探讨此情况下的地面沉降特征,模型设定为 2 个应力期,分别为抽水水位下降期与停止抽水水位回升期.抽水水位下降期又划分为 3 个时间步长,停止抽水水位回升期划分为 9 个时间步长,划分一个月为一个时间步长,共 12 个月.抽水井抽取第 3 承压含水层地下水,对第 1 个应力期进行定流量抽水,抽水量为 $70 \text{ m}^3/\text{d}$,从第 2 个应力期开始停止抽水.地下水位观测井及沉降观测井位置与抽水井位置相同,地下水位观测井对第 3 承压含水层水位进

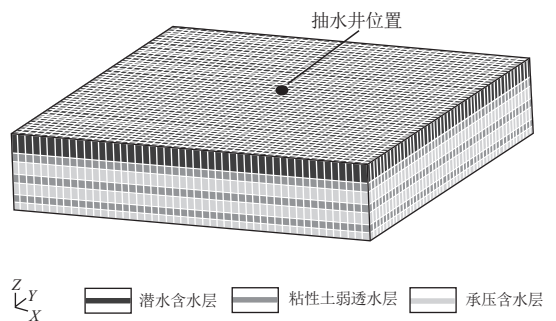


图 1 模型示意

Fig.1 Model sketch

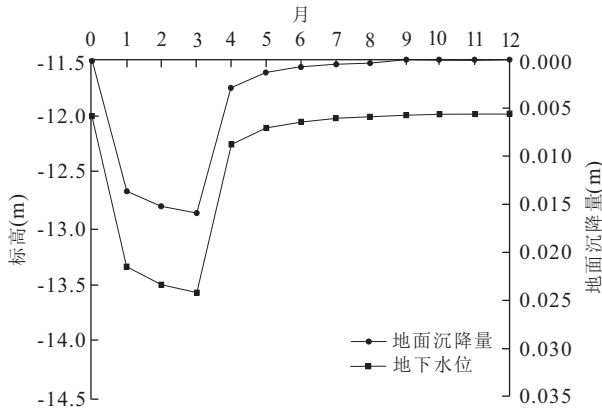


图 2 地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合有限元计算机程序计算结果

Fig.2 Schematic of groundwater three-dimensional seepage and one-dimensional vertically consolidated finite element computer program calculation results

行观测,分别采用地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合有限元计算机程序以及比奥固结三维全耦合有限元计算机程序对同一抽水过程地下水位下降、回升条件下的地面沉降进行计算,并对计算结果进行分析对比。

2.2.1 地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合模型计算结果 采用地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合有限元计算机程序对地下水位及地面沉降进行计算,模型地层各参数(水平向渗透系数 K_x 、 K_y ,垂向渗透系数 K_z ,给水度 S_s ,储水率 S_y ,含水层单位厚度骨架成分的弹性储水因子与非弹性储水因子 μ_{ske} 、 μ_{skv})如表 1 所示。取模型地面沉降计算值及第 3 承压含水层计算水位,如图 2 所示。可以看出,从第 4 个月停止抽水开始,地下水位回升较为明显,在第 8 个月时,地下水位已基本恢复至初始水位。整个应力期时间段的地下水位变化趋势与地面沉降变化趋势相同,在地下水位回升至初始水位

时,地面沉降与地下水位呈现出同步变化的趋势,并且当地下水位逐步回升至初始水位时,地面沉降也逐步回升到初始的零沉降状态。此过程也反映了地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合模型计算出的土体变形为线弹性变形,沉降随着地下水位的变化而变化,与地下水位变化趋势完全相同。

2.2.2 比奥固结地下水渗流与地面沉降三维全耦合模型计算结果 运用比奥固结三维全耦合有限元计算机程序对此过程进行模拟计算,模型地层各参数(初始水平向渗透系数 K_x 、 K_y ,初始垂向渗透系数 K_z ,给水度 S_s ,储水率 S_y ,土体重度 r ,内摩擦角 φ ,粘聚力 c ,初始泊松比 ν_0 ,初始弹性模量 E_0)如表 2 所示。同样取地面沉降值及第 3 承压含水层计算水位如图 3 所示。地下水位在第 9 个月恢复至初始水位,整个地下水位下降趋势也和地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合有限元计算机程序计算结果不同。地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合有限元计算机程序所计算地下水位在第 4 个应力期停止抽水后迅速下降,而比奥固结三维全耦合有限元计算机程序则变化较为平缓。出现这种现象的原因是,地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合有限元计算机程序在整个计算过程中,土体力学及水力学参数均未随土体的固结变形而发生变化,而比奥固结有限元程序考虑了土体力学及水力学参数随土体的固结变化而变化。抽水使得土体固结变形,此时土体压密,其孔隙度减小,渗透系数减小,而在停止抽水后,地下水位回升会使土体孔隙度增大,此时土体的渗透系数又会有所增大,所以第 4 个月到第 6 个月,地下水位回升速度相对较慢,而第 7 个月到第 9 个月地下水位回升相对较快,随着应力期的增加,地下水位必然恢复至初始状态。由于比奥固结三维全耦合有限元计算机程序在土体的本构模型中考虑了土体的粘弹塑性,因此,土体在地下水位下降

表 1 地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合模型地层参数

Table 1 Stratum parameters of the three-dimensional seepage of groundwater and one-dimensional vertical consolidation subsidence coupling model

参数分区	$K_x(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$K_y(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$K_z(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	S_s	$S_y(\text{m}^{-1})$	μ_{ske}	μ_{skv}
1	6×10^{-3}	6×10^{-3}	6×10^{-3}	6×10^{-3}	—	3.2×10^{-5}	2.8×10^{-4}
2	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-3}	—	6×10^{-6}	3.8×10^{-5}	3.1×10^{-4}
3	1.9	1.9	0.19	—	8×10^{-3}	1.3×10^{-5}	1.0×10^{-4}
4	6×10^{-6}	6×10^{-6}	6×10^{-7}	—	6×10^{-6}	4.0×10^{-5}	3.5×10^{-4}
5	2.0	2.0	0.2	—	6×10^{-4}	1.3×10^{-5}	1.1×10^{-4}
6	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-5}	—	6×10^{-5}	4.4×10^{-5}	4.0×10^{-4}
7	2.8	2.8	0.32	—	9×10^{-4}	1.3×10^{-6}	1.4×10^{-4}

表 2 比奥固结地下水渗流与地面沉降三维全耦合模型地层参数

Table 2 Stratum parameters of the three-dimensional coupling model of groundwater seepage and land subsidence based on Biot consolidation

参数分区	K_{0x} ($m \cdot d^{-1}$)	K_{0y} ($m \cdot d^{-1}$)	K_{0z} ($m \cdot d^{-1}$)	S_s	S_y (m^{-1})	r ($kN \cdot m^{-3}$)	φ ($^\circ$)	C (kPa)	ν_0	E_0 (MPa)
1	6×10^{-3}	6×10^{-3}	0.006	6×10^{-3}	—	19.7	18	21	4.8×10^{-1}	38
2	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-3}	—	6×10^{-6}	18.9	20	23	4.8×10^{-1}	32
3	1.9	1.9	0.19	—	8×10^{-3}	20.1	18	21	4.9×10^{-1}	45
4	6×10^{-6}	6×10^{-6}	6×10^{-7}	—	6×10^{-6}	17.8	22	23	4.8×10^{-1}	30
5	2.0	2.0	0.2	—	6×10^{-4}	20.0	20	21	4.9×10^{-1}	46
6	5×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-5}	—	6×10^{-5}	18.1	20	20	4.8×10^{-1}	27
7	2.8	2.8	0.32	—	9×10^{-4}	20.2	20	22	4.9×10^{-1}	46

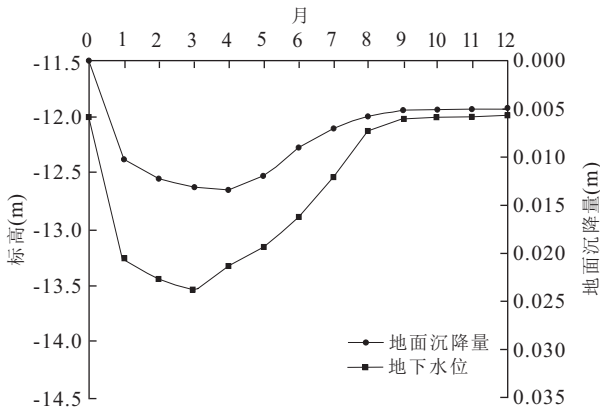


图 3 比奥固结三维全耦合有限元计算机程序计算结果
Fig.3 Schematic of Biot consolidation three-dimensional coupling finite element computer program calculation results

发生固结变形后,将产生部分永久的残余沉降量,即土体在地下水位恢复至初始状态时,仍存在地面沉降.并且地面沉降及回弹伴随着地下水位的存在滞后性,由图 3 可以看出,当第 4 个月停止抽水时,其地面沉降仍在继续,在第 5 个月地面沉降值才有所减小,地面沉降滞后于地下水位变化约 1 个月左右.

2.2.3 模型计算结果对比分析 抽水导致土体中的孔隙水大量排出,地下水渗流场发生变化,孔隙水压力消散,土体的有效应力增加,导致土体的固结,宏观上反映为地面沉降.反之,随着地面沉降的发生,土体固结,其微观上表现为土体的压密,土体孔隙减小,土体的渗透性相应降低,从而影响地下水渗流.地下水三维渗流与一维垂向固结的地下水渗流与地面沉降耦合数值模拟模型将渗流与变形单独考虑,只通过计算地下水位将地下水渗流模型与地面沉降模型耦合起来,是部分耦合模型,并未将土体变形与孔隙压力消散同时考虑,没有从机理上实现地

下水渗流与地面沉降的耦合.而且随着土体固结压缩,不考虑土体力学参数及水力参数随土体中应力场改变的动态变化问题,与实际情况不符,这些不足对地下水渗流引起的地面沉降计算的准确性存在较大的影响,比奥固结地下水渗流与地面沉降三维全耦合数值模拟模型考虑土体变形与孔隙压力消散的耦合作用,从机理上实现了渗流场与应力场的耦合,并且考虑土体力学及水力学参数的动态变化问题,引入土体的粘弹塑性本构模型,大大提高了地面沉降模拟的准确性,使得计算结果更加符合实际情况.

2.3 地下水位下降、回升条件下的土体参数变化特征

参数的准确性深刻地影响着模型计算的准确性.地下水开采引发地面沉降问题实际是一个渗流场和应力场相互影响、相互作用的问题.随着地面沉降的发生,土体水力学参数和土力学参数均会发生相应变化.因此,如何正确模拟参数的变化过程至关重要.由于模型计算结果为孔隙水压力,为了更好的反应计算过程中土体力学参数和水力学参数随地下水位的变化的关系,将孔隙压力进行换算,得出相应的地下水位值.相应的地下水位 $h = u / \gamma_w$, 其中 u 为孔隙水压力, γ_w 为水的重度.

选取模型第 15559 号单元进行孔隙度和渗透系数变化分析.该单元位于模型第 7 层,单元中心点与抽水井位置相同.由于抽水影响,导致土体孔隙水压力变化,从而引起有效应力变化,土体发生固结变形,引起孔隙度的变化.由图 4 可以看出在整个应力期时间段内,孔隙度的变化趋势与地面沉降变化趋势相同.孔隙度在前 4 个月均呈现减小趋势,从第 5 个月开始,孔隙度缓慢增大,第 9 个月到第 12 个月孔隙度变化较小,基本趋于稳定.渗透系数随着孔隙度的变化而发生变化.孔隙度减小,使土体出水能力变弱,从而导致渗透系数减小;反之,孔隙度增大,土体出水能力增强,渗透系数减小.由图 5 和图 6 可以

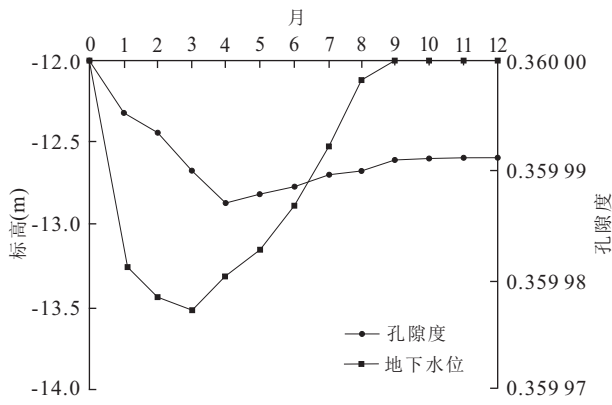


图 4 孔隙度及地下水位随应力期变化

Fig.4 Variation between porosity, groundwater level and stress periods

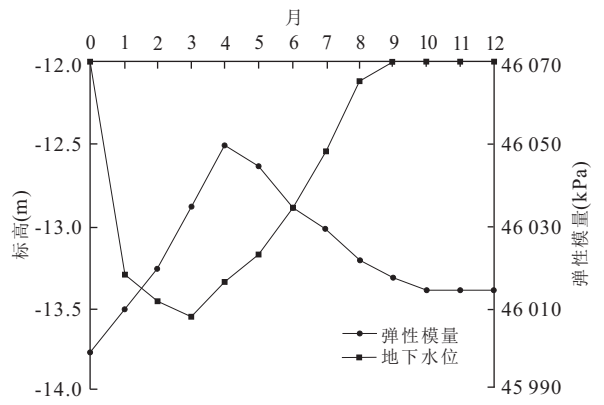


图 7 弹性模量及地下水位随应力期变化

Fig.7 Variation between elastic modulus, groundwater level and stress periods

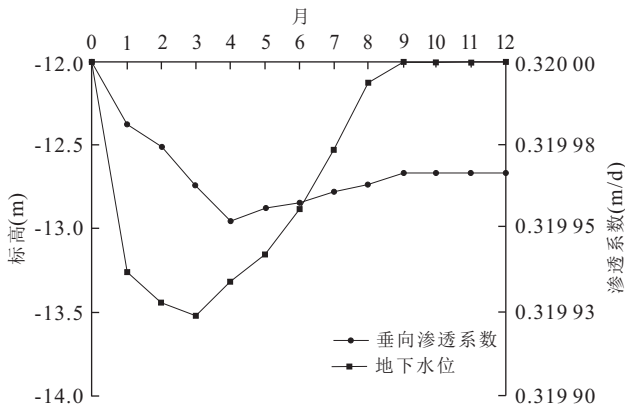


图 5 垂直渗透系数及地下水位随应力期变化

Fig.5 Variation between vertical hydraulic conductivity, groundwater level and stress periods

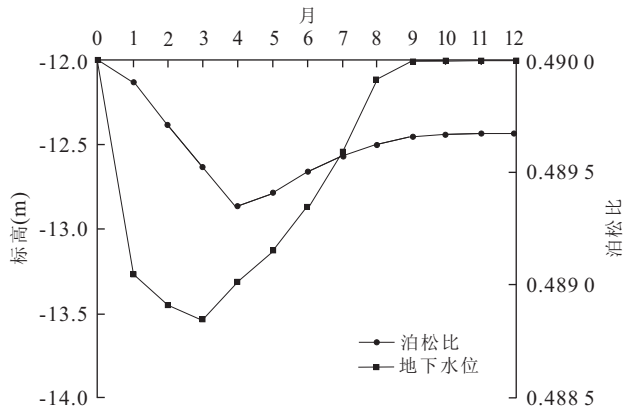


图 8 泊松比及地下水位随应力期变化

Fig.8 Variation between Poisson's ratio, groundwater level and stress periods

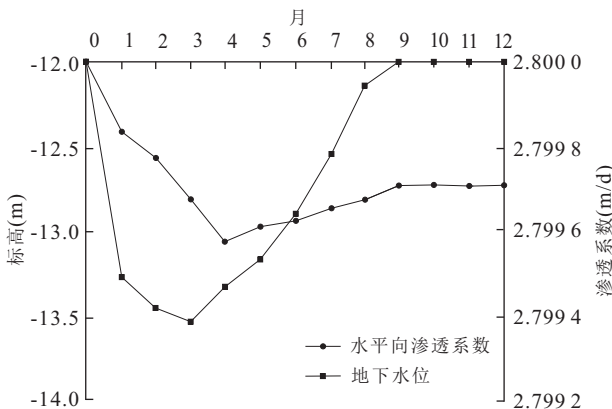


图 6 水平向渗透系数及地下水位随应力期变化

Fig.6 Variation between horizontal hydraulic conductivity, groundwater level and stress periods

看出所选单元的渗透系数变化趋势与孔隙度变化趋势相同,呈现出先减小后增大,而后趋于稳定的

趋势。

同样,选取模型第 15559 号单元的弹性模量及泊松比进行分析.弹性模量及泊松比随应力期变化如图 7 和图 8 所示.由于地下水开采对土体的固结变形压缩的影响,在前 4 个应力期弹性模量增大,而泊松比呈现减小趋势.随着水位的回升,土体发生部分回弹变形,在第 5 个月到第 9 个月,弹性模量减小,泊松比增大,但是在第 9 个月以后,弹性模量及泊松比均趋向于稳定.

3 结论

(1)以比奥固结理论为基础的地下水渗流场与应力场三维全耦合模型,并考虑了土体的非线性流变以及土体固结变形过程中孔隙度、渗透系数、弹性模量及泊松比的变化,使得模型更加符合实际,计算

结果更加科学、合理。

(2)地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合模型所计算的地面沉降呈现出与地下水位同步变化趋势。而以比奥固结理论为基础的地下水渗流与地面沉降三维全耦合模型所计算的地面沉降变化滞后于地下水位变化,与实际情况相吻合。

(3)地下水三维渗流与一维垂向固结沉降耦合模型表明当地下水位回升至初始水位时,地面沉降恢复至零沉降状态。而以比奥固结理论为基础的地下水渗流与地面沉降三维全耦合模型表明当地下水位回升至初始水位时,只发生部分回弹,存在残余沉降量,更加符合实际。

(4)孔隙度、渗透系数、弹性模量及泊松比与地面沉降变化趋势相对应。其中,孔隙度、渗透系数及泊松比随地下水位的下降与回升呈现先减小后增大的变化趋势,而弹性模量随地下水位的下降与回升则呈现先增大后减小的变化趋势,但均滞后于地下水位的变化。

References

- Kan, J. L., Luo, L. H., 2010. Application of Processing Modflow in Prediction of Ground Subsidence. *Journal of Railway Engineering Society*, (2): 27–31 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., He, Z. Z., Yan, G. H., et al., 2012. Excavation Dewatering and Ground Subsidence in Dual Structural Stratum of Wuhan. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 34(Suppl.): 767–772 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. M., Zhou, F. Y., 2004. Solution to a Class of Boundary-Value Problem of Three-Dimensional Partial Differential Equations. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 25(4): 328–331 (in Chinese with English abstract).
- Luo, G., Zhang, J. M., 2004. Improvement of Duncan-Chang Nonlinear Model and Shen Zhujiang's Elastoplastic Model for Granular Soils. *Rock and Soil Mechanics*, 25(6): 887–890 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. J., Liu, J. B., Li, L., 2008. Three-Dimensional Full Coupling Numerical Simulation of Groundwater Dewatering and Land-Subsidence in Quaternary Loose Sediments. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30(2): 193–198 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. J., Liu, J. B., Li, L., et al., 2006. Three Dimensional Coupled Numerical Model between Deep Foundation Pit Dewatering and Land-Subsidence. *Chinese Journal of*

Hydrodynamics (Series A), 21(4): 479–485 (in Chinese with English abstract).

- Luo, Z. J., Zhang, Y. P., Liu, J. B., 2007. Study of Deep Foundation Pit Dewatering and Land-Subsidence Control. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 23(1): 47–51 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. J., Zeng, F., 2011. Finite Element Numerical Simulation of Land Subsidence and Groundwater Exploitation Based on Visco-Elastic-Plastic Biot's Consolidation Theory. *Journal of Hydrodynamics*, 23(5): 615–624.
- Luo, Z. J., Zeng, F., Li, Y., 2009. Study on Three-Dimensional Full Coupling Model of Groundwater Exploitation and Land-Subsidence Control. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(6): 1080–1086 (in Chinese with English abstract).
- Peng, G. L., 2005. Fortran 95 Programming. China Electric Power Press, Beijing (in Chinese).
- Qian, J. H., Yin, Z. Z., 1996. Principle and Calculation of Geotechnics. China Waterpower Press, Beijing (in Chinese).
- Ran, Q. Q., Li, S. L., 1997. Study on Dynamic Models of Reservoir Parameters in the Coupled Simulation of Multiphase Flow and Reservoir Deformation. *Petroleum Exploration and Development*, 24(3): 61–65 (in Chinese with English abstract).
- Smith, I. M., Griffiths, D. V., 2003. Programming the Finite Element Method. Third Edition. Translated by Wang, S., Zhou, J. X., Wang, L., eds., Electronic Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Tian, J., Liu, X. G., Shang, G. H., 2005. Casing Damage Mechanism Based on Theory of Fluid-Solid Coupling Flow through Underground Rock. *Journal of Hydrodynamics (Series A)*, 20(2): 221–225 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, N. Q., Tang, Y. Q., Lou, R. X., et al., 2011. Numerical Simulation of Deep Foundation Pit Dewatering and Land Subsidence Control of Xujiahui Metro Station. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 33(12): 1950–1956 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 阚京梁, 罗立红, 2010. Processing Modflow 模型在预测地面沉降中的应用. 铁道工程学报, (2): 27–31.
- 李英, 何钟泽, 严桂华, 等, 2012. 武汉二元结构地层基坑降水及其地面沉降研究. 岩土工程学报, 34(增刊): 767–772.
- 李医民, 周凤燕, 2004. 一类三维偏微分方程边值问题的解法.

江苏大学学报(自然科学版),25(4):328-331.

罗刚,张建民,2004.邓肯-张模型和沈珠江双屈服面模型的改进.岩土力学学报,25(6):887-890.

骆祖江,刘金宝,李朗,2008.第四纪松散沉积层地下水疏降与地面沉降三维全耦合数值模拟.岩土工程学报,30(2):193-198.

骆祖江,刘金宝,李朗,等,2006.深基坑降水与地面沉降变形三维全耦合模型及其数值模拟.水动力学研究与进展(A辑),21(4):479-485.

骆祖江,张月萍,刘金宝,2007.深基坑降水与地面沉降控制研究.沈阳建筑大学学报(自然科学版),23(1):47-51.

骆祖江,曾峰,李颖,2009.地下水开采与地面沉降控制三维全耦合模型研究.吉林大学学报(地球科学版),39(6):1080-1086.

彭国伦,2005.Fortran 95 程序设计.北京:中国电力出版社.

钱家欢,殷宗泽,1996.土工原理与计算.北京:水力水电出版社.

冉启全,李士伦,1997.流固耦合油藏数值模拟中物性参数动态模型研究.石油勘探与开发,24(3):61-65.

Smith, I.M.,Griffiths,D.V.,2003.有限元方法编程,王蕊,周坚鑫,王来,等,译.北京:电子工业出版社.

田杰,刘先贵,尚根华,2005.基于流固耦合理论的套损力学机理分析.水动力学研究与进展(A辑),20(2):221-225.

周念清,唐益群,姜荣祥,等,2011.徐家汇地铁站深基坑降水数值模拟与沉降控制.岩土工程学报,33(12):1950-1956.

《地球科学——中国地质大学学报》 2014 年 6 月 第 39 卷 第 6 期 要目预告

印尼苏拉威西岛 Kolonodale 与中国云南元江不同气候背景超基性岩红土风化壳的

REE 地球化学对比研究	付 伟等
铀同位素分析技术及其在地学中的应用	邱啸飞等
华南晚奥陶世次火山岩的发现:早古生代与俯冲有关的英安岩	易立文等
岩石颗粒胶结方式对储层岩石弹性及渗流性质的影响	赵建鹏等
包气带增厚区土壤水力参数及其对入渗补给的影响	林 丹等
微咸水膜下滴灌对土壤和棉花元素组成及产量的影响	黄金瓯等
琼州海峡及周边海域沉积环境及近万年以来沉积演化	陈 亮等
西藏知不拉砂卡岩型铜矿床矿物学特征及地质意义	徐 净等
内蒙古维拉斯托-拜仁达坝矿床矿石特征及成矿机理	唐然坤等
伊通盆地岔路河断陷油气二次运移模拟	唐文旭等