DOI：10.16285/j.rsm.2016.0599

三维区域地面沉降数值模拟

罗 跃[1, 2]，叶淑君[2]，吴吉春[2]

（1. 东华理工大学 江西省数字国土重点实验室，江西 南昌 330013；2. 南京大学 地球科学与工程学院，江苏 南京 210046）

摘 要：由于地裂缝研究及地表变形监测技术（例如 GPS，InSAR 等）的快速发展，抽取地下水引起的地层水平位移受到关注。传统区域地面沉降模型虽然求解快速但不能模拟水平位移；比奥模型虽然能够模拟土体的三维变形，但模型求解的计算量较大，较少应用于大尺度的区域地面沉降数值模拟。为解决以上问题，推导了解耦三维地面沉降数学模型，模型推导过程显示：比奥模型假设法向总应力和不变，则可简化为解耦三维地面沉降模型；解耦三维地面沉降模型假设土体仅有垂向一维变形，则可简化为传统区域地面沉降模型。同时通过数值试验验证了解耦三维地面沉降模型可以作为比奥模型的替代模型和传统区域地面沉降模型的改进模型，用来模拟抽取地下水引起的三维区域地面沉降。

关 键 词：地面沉降；地裂缝；解耦三维地面沉降模型；贮水率

中图分类号：P 641.6 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2018) 03－1063－08

Numerical model for simulating 3D regional land subsidence

LUO Yue[1, 2], YE Shu-jun[2], WU Ji-chun[2]

(1. Key Laboratory for Digital Land Resources of Jiangxi Province, East China Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China;
2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract: Horizontal deformation resulted from excessive groundwater exploitation has received attention in recent years because of earth fissures and technological development of deformation monitoring, such as GPS and InSAR. However, traditional uncoupling 1D model of land subsidence cannot simulate horizontal deformation. Though Biot model is able to simulate horizontal deformation, using this model is not appropriate for numerically solving the problem of regional land subsidence because the size of discrete model and time step is limited due to long computation time and ill-conditioned linear system matrix. To overcome inherent weaknesses above, uncoupling 3D mathematical model of land subsidence is developed by combining the benefits of uncoupling 1D model and Biot model. Uncoupling 3D mathematical model consists of groundwater flow and deformation equation. Both equations are coupled with parameters (i.e., Young modulus, Poisson ratio and specific water storage). Groundwater flow equation initially computes 3D flow field (equivalent fluid pore pressures) and then the deformation equation calculates 3D deformation based on the known flow field. The derivation of uncoupling 3D mathematical model shows that Biot model can be simplified to uncoupling 3D model based on the assumption that the total normal stress does not change in the process of groundwater flow; uncoupling 3D model can be simplified to uncoupling 1D model based on the assumption that the radial displacements vanish. Meanwhile, numerical experiment shows that uncoupling 3D model can provide deformation results similar to Biot model with much less running time compared with Biot model. Therefore, uncoupling 3D model can be considered as an alternative model to Biot model and an improved model for uncoupling 1D land subsidence model to simulate 3D regional land subsidence.

Keywords: land subsidence; earth fissure; uncoupling 3D model of land subsidence; specific water storage

1 引 言

目前，传统区域地面沉降数值模型只能模拟土层的垂向变形，是解耦一维地面沉降模型（简称为解耦一维模型）[1−3]，这种模型先利用地下水运动方程计算含水层的水位变化，然后利用水位模拟结果

收稿日期：2016-03-28
基金项目：东华理工大学江西省数字国土重点实验室开放研究基金资助项目（No.DLLJ201608）；国家自然科学基金资助项目（No.41602258）；江苏省自然科学基金资助项目（No.BK2012730）；国土资源部地面沉降监测与防治重点实验室开放基金资助项目（No.20140012）。
This work was supported by the Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province (DLLJ201608), the National Natural Science Foundation of China (41602258), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2012730) and the Open Research Program of Key Laboratory of Land Subsidence Monitoring and Prevention (20140012).
第一作者简介：罗跃，男，1985 年生，博士，讲师，主要从事区域地面沉降的数值模拟研究工作。E-mail: kuaikuaikaikai@126.com
通讯作者：叶淑君，女，1974 年生，博士，教授，主要从事区域地面沉降的数值模拟研究工作。E-mail: sjye@nju.edu.cn

计算土层垂向变形量[4]。地下水数值模拟软件MODFLOW 中内置的地面沉降模拟模块 SUB 和SUB-WT 都是基于解耦一维模型[5−7]。

但过量开采地下水或大规模回灌地下水时，土层不仅仅会发生明显的垂向变形，也可能发生较大的侧向水平变形[8]。Burbey[9]认为在含水层中抽水会引起明显的水平位移，且水平位移是引起地裂缝的重要因素。同时较大的水平变形可能导致大型线状工程（例如地铁隧道）发生挠曲变形，也会危害高层建筑物的稳定性[10]。因此，研究三维区域地面沉降具有重要价值。另一方面，随着地面沉降监测技术的快速发展，如 GPS 和 InSAR 已经能够获取地表的三维形变场[11]，为三维区域地面沉降研究提供了数据基础。

目前，通常认为比奥模型是理论较严谨的，能够模拟土层三维变形的模型。但比奥模型（本文称为耦合三维地面沉降模型）使用数值法（例如有限单元法）求解时计算量大，易产生病态矩阵，使得模型的网格剖分尺寸和时间步长会有较多限制[12−13]。因此，耦合三维模型并不适用于区域地面沉降问题，需要有替代模型来模拟三维区域地面沉降问题。Burbey[14]通过引入“体积流量”概念推导了一种基于 MODFLOW 软件的三维地面沉降模型，但“体积流量”概念并没有得到广泛认可。Teatini 等[15]从数值计算方法上简化耦合三维模型，先计算三维地下水流场，然后使用模拟水位计算地层的三维变形。但这种方法的物理意义并没有得到清楚解释。因此，本文将从解耦一维模型和耦合三维模型出发，推导解耦三维地面沉降模型（简称为解耦三维模型），并比较这 3 种模型在理论上的联系与区别。同时利用数值试验证明，解耦三维模型能够应用于三维地面沉降数值模拟。

2 数学模型

传统区域地面沉降模型是解耦一维模型，解耦一维模型由地下水运动方程和一维变形方程两个方程组成，其中“解耦”指孔隙水压力和土的变形分步计算。本文建立的解耦三维模型也是先利用地下水运动方程计算地下水位，然后将计算出的地下水位作为已知条件代入三维变形模型计算土体的三维变形。地下水运动方程的一般形式为[4]

$$\frac{\partial \varepsilon_{\mathrm{v}}}{\partial t}=\frac{\partial h}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial h}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial h}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right) \quad (1)$$

式中：K_x，K_y，K_z 分别为 3 个主方向的渗透系数；h 为水位。根据贮水率 S_{s} 定义，水位改变一个单位时单位体积土体释放或储存的水量[16]，则体积应变 ε_{v} 可用贮水率表示为

$$\mathrm{d}\varepsilon_{\mathrm{v}}=S_{\mathrm{s}}\mathrm{d}h \quad (2)$$

把式（2）代入式（1）可得到地下水运动方程：

$$\frac{\partial \mathrm{h}}{\partial t}S_{\mathrm{s}}=\frac{\partial h}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial h}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial h}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right) \quad (3)$$

此方程即为承压含水层中地下水运动的基本微分方程。值得注意的是本文在推导式（3）时，没有涉及力学平衡及应力−应变之间的复杂关系，这是因为式（2）已经蕴含了这些复杂的关系[16]。

当利用式（3）计算得到地下水位后，再利用三维变形方程计算土体的三维变形。若不考虑体积力，则用位移表示的变形方程[17]为

$$\left.\begin{aligned}&\frac{E}{2(1+v)}\left(\frac{1}{1-2v}\frac{\partial \varepsilon_{\mathrm{v}}}{\partial x}+\nabla^2 w_x\right)+\frac{\partial u}{\partial x}=0\\&\frac{E}{2(1+v)}\left(\frac{1}{1-2v}\frac{\partial \varepsilon_{\mathrm{v}}}{\partial y}+\nabla^2 w_y\right)+\frac{\partial u}{\partial y}=0\\&\frac{E}{2(1+v)}\left(\frac{1}{1-2v}\frac{\partial \varepsilon_{\mathrm{v}}}{\partial z}+\nabla^2 w_z\right)+\frac{\partial u}{\partial z}=0\end{aligned}\right\} \quad (4)$$

式中：u 为孔隙水压力，与水位 h 的关系为 $u=(h-z_{\mathrm{d}})\gamma_{\mathrm{w}}$，其中，$z_{\mathrm{d}}$ 为标高，γ_{w} 为水的重度；E 为弹性模量；v 为泊松比；w_x、w_y、w_z 分别为 x、y、z 方向位移；∇^2 为拉普拉斯算子。土体体积应变 ε_{v} 为

$$\varepsilon_{\mathrm{v}}=-\left(\frac{\partial w_x}{\partial x}+\frac{\partial w_y}{\partial y}+\frac{\partial w_z}{\partial z}\right) \quad (5)$$

结合式（3）和式（4），得到完整的解耦三维模型方程组：

$$\left.\begin{aligned}&\frac{E}{2(1+v)}\left(\frac{1}{1-2v}\frac{\partial \varepsilon_{\mathrm{v}}}{\partial x}+\nabla^2 w_x\right)+\frac{\partial \hat{u}}{\partial x}=0\\&\frac{E}{2(1+v)}\left(\frac{1}{1-2v}\frac{\partial \varepsilon_{\mathrm{v}}}{\partial y}+\nabla^2 w_y\right)+\frac{\partial \hat{u}}{\partial y}=0\\&\frac{E}{2(1+v)}\left(\frac{1}{1-2v}\frac{\partial \varepsilon_{\mathrm{v}}}{\partial z}+\nabla^2 w_z\right)+\frac{\partial \hat{u}}{\partial z}=0\\&\frac{\partial h}{\partial t}S_{\mathrm{s}}=\frac{\partial h}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial h}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial h}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)\end{aligned}\right\} \quad (6)$$

式中：$\hat{u}$ 为由 h 计算得到孔隙压力。求解式（6）分两步：第 1 步计算水位，求解地下水运动方程；第 2 步计算变形，求解变形方程，其中水压力的变化作为附加荷载加到变形方程中。

解耦三维模型与解耦一维模型的区别在于变形

计算方程。解耦一维模型的变形计算方程假设土体仅发生垂向一维变形，垂向位移的变化量 Δw_z 可用一维变形方程计算：

$$\Delta w_z = \int_0^M s_s \Delta h(m) \mathrm{d}m \tag{7}$$

式中：M 为土层厚度；Δh 为水位变幅。因此，解耦一维模型可视为解耦三维模型的简化形式。

另外，解耦三维模型（式（6））与耦合三维模型（即式（4）和式（1）的综合）在形式上类似，区别在于土体体积应变 ε_v 的处理。解耦三维模型中的地下水运动方程使用贮水率表示水位与土体体积应变之间的关系；耦合三维模型用土颗粒位移表示土体体积应变（即式（5）），使用弹性模量和泊松比表示有效应力与土体体积应变之间的关系。根据弹性模量和泊松比的定义，体积应变与弹性模量和泊松比的关系式为

$$\varepsilon_v = \frac{(1-2v)(1+v)}{1+(n-2)v}\frac{\sigma'_{sum}}{E} \tag{8}$$

式中：σ'_{sum} 为法向有效应力之和；n 为模型的空间维数。根据有效应力原理，有

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} u \tag{9}$$

式中：$i, j = 1, 2, 3$；δ_{ij} 称为克罗内克符号，$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}$。式（9）写成法向有效应力和形式为

$$\sigma'_{sum} = \sigma_{sum} - nu \tag{10}$$

假定法向总应力和 σ_{sum} 不变（即太沙基假设之一），结合式（8）和式（2）可得

$$S_s = \frac{(1-2v)(1+v)}{1+(n-2)v}\frac{n}{E}\gamma_w \tag{11}$$

此式即为贮水率与弹性模量、泊松比之间的关系式。式（11）显示贮水率与弹性模量、泊松比的关系与空间维数有关。水文地质研究者 Teatini 等[15]和 Burbey[18]根据贮水率的定义，认为式（11）中的维数值是 1。从推导式（11）的过程可看出耦合三维模型与解耦三维模型的本质区别在于解耦三维模型多一个假设：在地下水流动过程中法向总应力和 σ_{sum} 保持不变。因此，解耦三维模型是耦合三维模型的简化形式。

3　数值试验

本部分将采用有限元法求解上文提到的 3 种地面沉降模型，并应用于理想算例，说明解耦三维模型在三维区域地面沉降模拟中的适应性和优越性。理想算例根据上海市各地层的特征和抽灌水方式概化而来，模型参数根据上海市分层标数据的反演结果得到[19]。算例假设有 3 个含水层（见图 1），厚度为 30 m，含水层之间夹有弱透水层，厚度同样为 30 m，平面上是边长为 4×10^4 m 的正方形。含水层的渗透系数为 10 m/d，弹性模量为 10^9 Pa，泊松比为 0.25，用弹性模量和泊松比可换算式（11）得到贮水率为 8.33×10^{-6} m^{-1}。弱透水层的渗透系数为 10^{-4} m/d，弹性模量为 10^6 Pa，泊松比为 0.45，换算得到贮水率为 2.6×10^{-3} m^{-1}。模型采用非规则化的 6 节点三棱柱网格剖分，在平面上以等边三角形为主（见图 1），在井附近边长约 5 m，在边界附近边长约为 8 000 m，平面每一层上有 346 个节点，674 个单元。为模拟弱透水层滞后排水现象，每个弱透水层垂向上剖分成 9 层单元（见图 1）。抽水井在中部含水层的中央位置（即位置坐标为 0，0），抽水量随时间变化，第 0～10 年间（假设每年只有 365 d）抽水量为 1 000 m^3/d；第 11～14 年间，不抽水也不灌水，在第 15～20 年间，灌水量为 500 m^3/d。模型的四周为给定水位边界，水位为 0 m，上、下面为零流量边界。

三维模型与解耦一维模型的区别之一是：解耦一维模型不需要输入位移边界条件。但解耦一维模型并不是没有位移边界条件，模型需要有垂向位移边界条件才是定解问题。解耦一维模型通常默认底部为固定边界，顶部为自由边界，因此，不需要建模人员自己输入边界条件。三维模型需要根据实际情况，设定侧向和垂向 3 个方向的位移边界条件。因此，三维模型能够适应更加复杂的地质情况，例如断层、基岩剧烈起伏等地质条件。本算例的位移边界条件是：限制四周 x、y、z 3 个方向的位移；限制底部垂向位移；顶部为自由位移边界；限制抽水井处的水平位移。

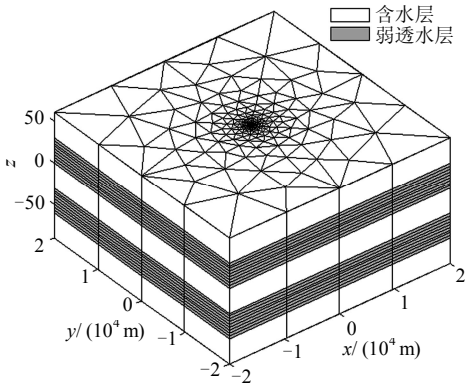
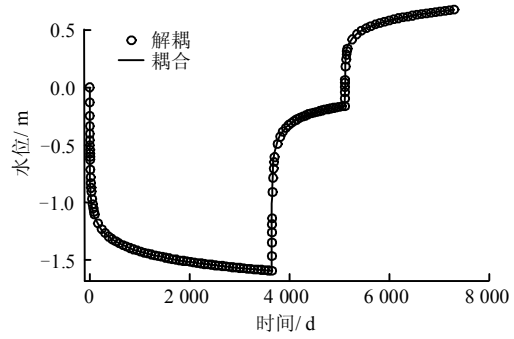


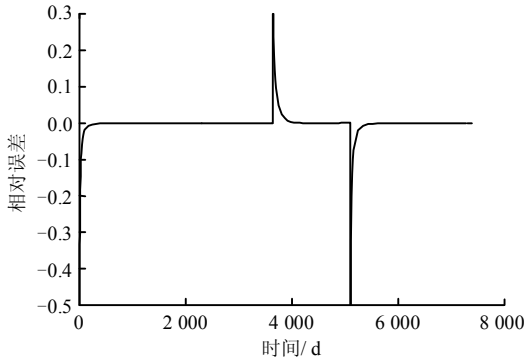
图 1　网格剖分示意图

Fig.1　FE meshes

在中部含水层中，解耦模型与耦合模型的水位模拟结果相似，结果相差最大的时段在开始抽水、停止抽水及开始回灌的初期（见图 2）。图中显示了在中部含水层中离抽水井 247 m 处的模拟水位。以抽水阶段为例，抽水 20 d 后解耦模型水位误差小于 10%（以耦合三维模型的结果为标准值），100 d 后小于 1%。因此，该算例中解耦模型与耦合模型的水位模拟结果十分相近，这与以往研究结论相同[20]。



(a)模拟水位

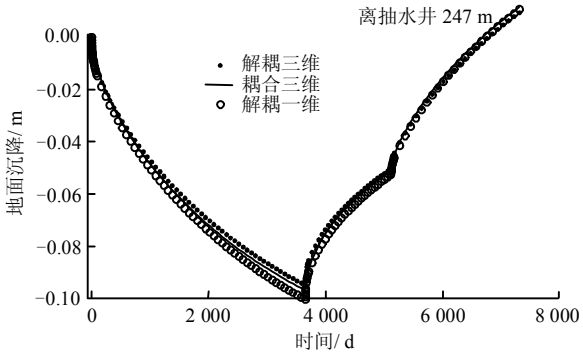


(b) 模拟值相对误差

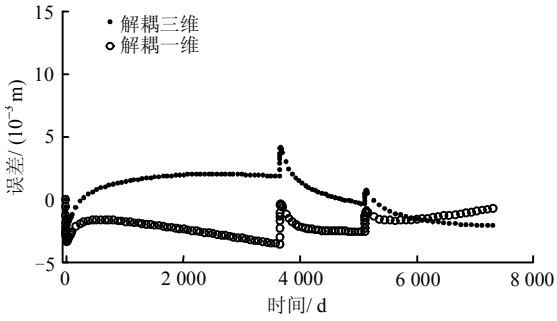
图 2 水位模拟值

Fig.2 Simulation results of groundwater level

垂向位移的模拟结果（见图 3）比水位结果更加复杂。在抽水 242 d 内，解耦三维模型模拟的垂向位移比耦合三维模型更大，之后结果偏小，相对误差小于 3%。而解耦一维模型的结果在抽水阶段一直偏大，242 d 后相对误差小于 10%。但解耦一维模型在抽水 242 d 后绝对误差一直增加，而解耦三维模型的绝对误差没有进一步发展。另外，各个模型的垂向位移模拟值的大小还与空间位置有关。从图 4 可看到，解耦一维模型与三维模型的明显区别是在井附近垂向位移量更大，而解耦三维模型与耦合三维模型的模拟值相似。因此，在模拟地面沉降时，解耦三维模型比解耦一维模型更加逼近耦合三维模型。3 个模型的垂向位移模拟值都显示地面沉降的主要贡献来源于弱透水层，且离抽水井越近压缩量越大（见图 5）。但图 5 显示，解耦一维模型的模拟值普遍偏大，而解耦三维模型的结果通常偏小，因此，解耦一维模型模拟的地面沉降会较保守[20]。但在实际应用时模型通常需要用观测数据校正，校正后 3 种模型的模拟结果除抽水井附近有较大区别，其他地区可能不会有明显区别，但校正后的参数会有差别。



(a) 地面沉降



(b) 模拟值误差

图 3 模拟地面沉降（垂向位移）随时间变化

Fig.3 Change of simulated land subsidence as a function of time

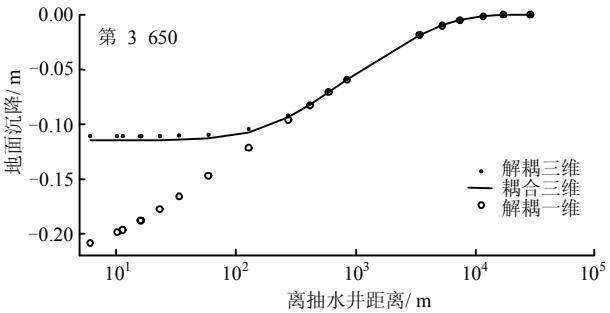


图 4 模拟地面沉降（垂向位移）随空间变化

Fig.4 Variations of land subsidence in space

解耦三维模型与解耦一维模型的根本区别在于，解耦三维模型能够计算土层水平位移。图 6 显示了解耦三维和耦合三维模型模拟水平位移矢量图，两个模型的模拟结果基本一致，土体都是朝抽

水井移动。图 7 显示了水平方向上地表径向位移随抽水的持续而增加，然后，随着停止抽水和回灌地下水的持续而逐渐减小又增加的过程。在抽水阶段，解耦三维模型的水平位移在模拟初期误差较大，之后误差迅速减小（见图 7），2 443 d 后误差才小于 10%，误差比垂向位移模拟结果大，这是由于水平位移在水平面上存在累积效应。使用解耦三维与耦合三维模型模拟的水平位移模拟值画等值线时，两个模型的模拟结果看上去十分接近（见图 8）。在空间上，解耦三维模型能够模拟出径向位移在抽水井及边界附近较小，一定距离后达到最大的特征（见图 9）。因此，解耦三维模型依然能够得到与耦合三维模型相似的水平位移模拟结果。

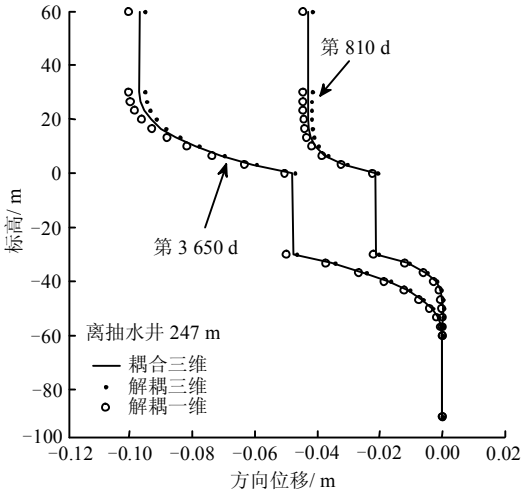


图 5　土层随标高变化的垂向位移

Fig.5　Variations of vertical displacement in the vertical section

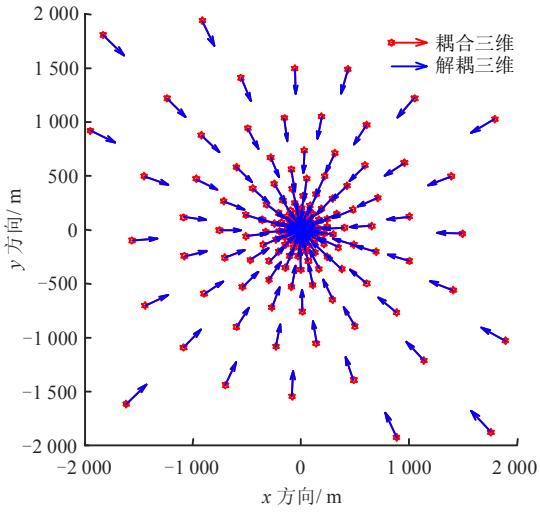
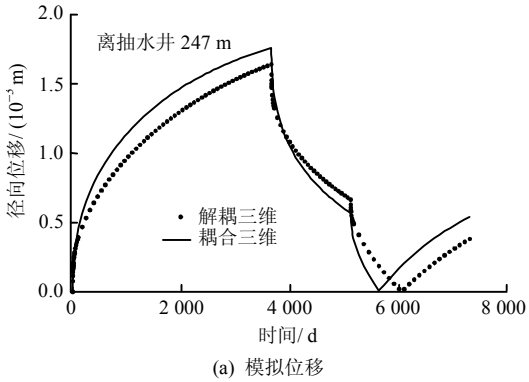
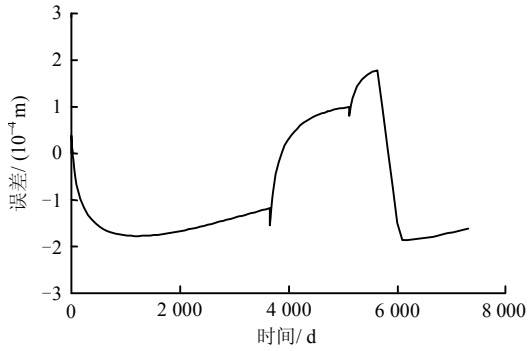


图 6　抽水 3 650 d 地表水平位移矢量图

Fig.6　Displacement vectors at the surface after pumping for 3 650 days



(a) 模拟位移



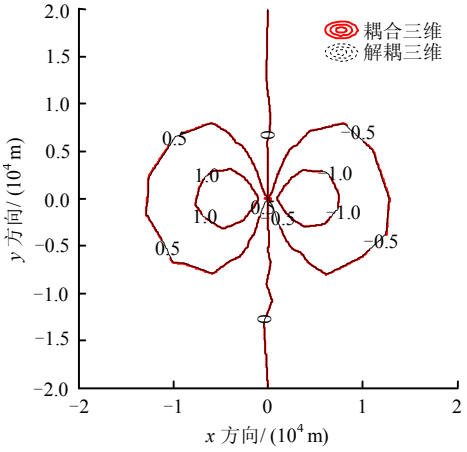
(b) 模拟值误差

图 7　水平位移模拟结果

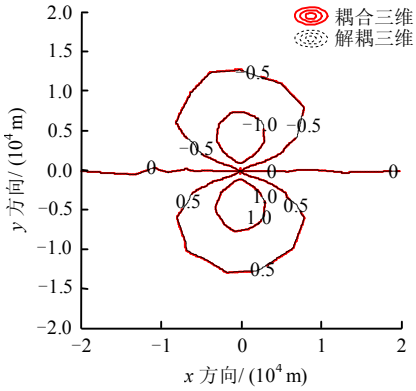
Fig.7　Variations of horizontal displacement

在区域地面沉降模拟中，各含水层的水位观测数据通常比位移观测数据多。如果使用地下水运动理论，预先得到较准确的水流场，解耦三维模型与耦合三维模型的位移模拟结果差别会非常小。算例中的解耦模型如果使用耦合模型计算的水流场，两个模型能够得到几乎相同的水平位移模拟值（见图 10）。笔者利用解耦三维模型模拟上海市三维地面沉降[21]，然后将模拟值与观测值（分层标监测数据）进行对比，结果显示解耦三维模型能够较好地拟合观测数据，这说明解耦三维模型的计算结果是可靠的，能够满足实际应用的精度要求。

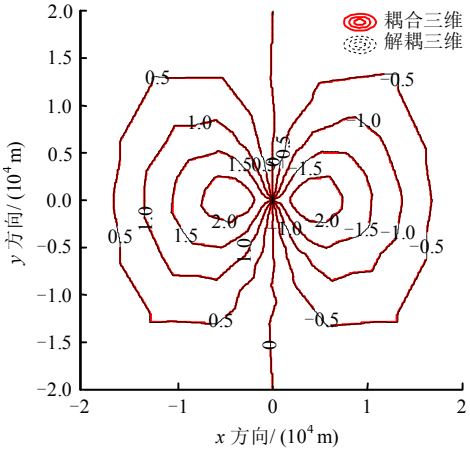
对于三维区域地面沉降数值模拟问题，由于计算规模较大，模型求解的速度是需要考虑的重要因素。解耦一维模型能够得到广泛应用的一个重要原因就是因为解耦一维模型求解快速，而耦合三维模型求解耗时长且复杂。使用有限单元法求解耦合三维模型时，计算量较大，更重要的是离散后的线性方程组常常是病态的[12]，许多大型稀疏线性方程组的快速求解方法并不适用于此种方程。虽然 Reed[22] 通过对位移或水位添加缩放因子试图避免线性方程组的病态，但对于目前收敛速度较快的预处理共轭梯度法（PCG）[12]，这种改进方法并不适用。因此，耦合三维模型不仅仅由于模型本身导致计算量大，还由于模型可供选择的求解方法的限制导致计算量



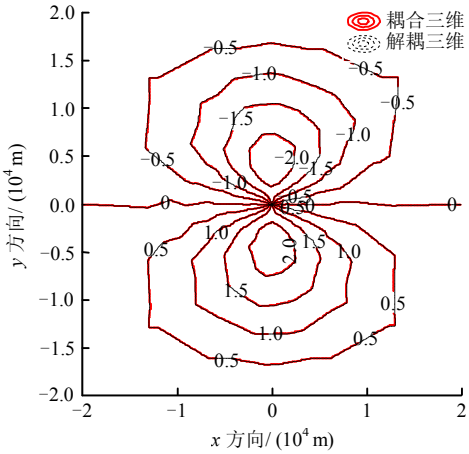
(a) 抽水 810 d x 方向位移值



(b) 抽水 810 d y 方向位移值



(c) 抽水 3 650 d x 方向位移值



(d) 抽水 3 650 d y 方向位移值

图 8 地表水平位移等值线图（红色与黑色线几乎重合）（单位：mm）

Fig.8 Contours of horizontal displacement at different times (unit: mm)

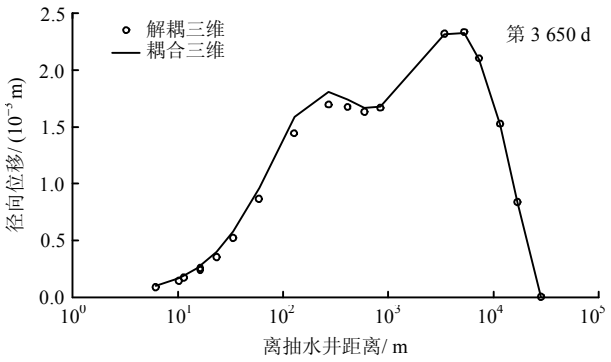


图 9 径向位移随空间位置变化示意图

Fig.9 Radial displacement as a function of distance to pumping well

大。本文算例的耦合三维地面沉降模型由于使用 PCG 迭代法不收敛，因此，本文使用直接求解法。应用直接求解法，耦合模型需要 64.13 h，解耦三维模型需 25.66 h（CPU 型号为 i7−2600，主频 3.4 GH）。但解耦三维模型使用“双阈值不完全乔列斯基分解”作为预处理矩阵时，则耗时仅需 0.04 h（即 140 s），比耦合三维模型快了 1 600 倍，可见解耦三维模型能大幅缩减计算耗时。由于大尺度的区域地面沉降问题通常计算量较大，因此，解耦三维模型在大尺度问题中具有绝对优势。

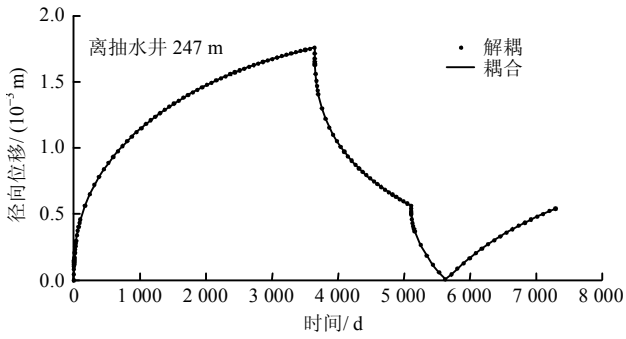


图 10 耦合和解耦三维模型的水平位移模拟值对比

Fig.10 Comparison between simulated horizontal displacements based on coupling and uncoupling 3D model of land subsidence at different times

有时为了减小计算量，使弱透水层在垂向上仅

剖分成一层单元，这时模型在垂向上仅 5 层单元（本文称为粗剖分模型，前述垂向上有 21 层单元的模型称为细剖分模型）。图 11 显示了在中部含水层中离抽水井 247 m 位置处的解耦三维模型模拟的水位，模拟结果显示细剖分模型模拟出的水位变化滞后于粗剖分模型结果，而且水位变化幅度更小。这是因为粗剖分模型不能反映弱透水层真实的缓慢释水过程，将整个弱透水层的释水过程处理为瞬时释水，这显然是与实际不符的。图 12 显示细剖分模型模拟出的垂向位移速率比粗剖分模型更慢，细剖分模型模拟出了弱透水层变形滞后现象。因此，如果需要准确模拟地面沉降的变形滞后现象，则需要对弱透水层进行精细的剖分，但模型的计算量会大幅增加，这时能大幅缩减计算量的解耦三维模型就显得尤为重要。

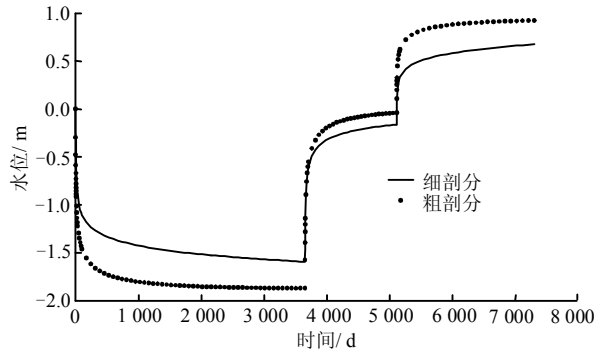


图 11　弱透水层细剖分与粗剖分模型的水位模拟值对比

Fig.11　Comparison between simulated groundwater levels based on different meshes at different times

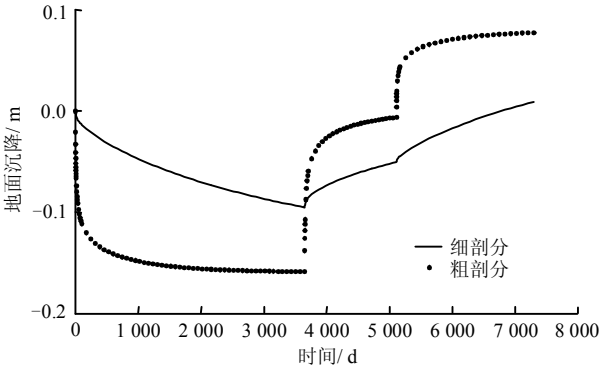


图 12　弱透水层细剖分与粗剖分模型的地面沉降模拟结果对比

Fig.12　Comparison between simulated land subsidence levels based on different meshes at different times

4　结　论

（1）解耦三维地面沉降模型可以弥补解耦一维模型不能模拟土体的三维变形，不能反映土层位移边界条件影响的缺点，且能够更好地逼近耦合三维地面沉降模型，得到与耦合三维模型相近的模拟效果。因此，解耦三维模型是解耦一维模型的改进模型。

（2）大尺度的区域地面沉降数值模拟的网格剖分数量较多，不宜使用计算量较大的耦合三维模型。解耦三维模型的数值求解比耦合三维模型更加稳定且快速，本文算例显示解耦三维模型的求解比耦合三维模型快了 1 600 倍。因此解耦三维地面沉降模型可作为耦合三维地面沉降模型的替代模型，用来模拟抽取地下水引起的三维区域地面沉降。

参 考 文 献

[1] WU J, SHI X, YE S, et al. Modeling of regional land subsidence in Shanghai City, China[J]. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 2008, 72(12): A1038.

[2] SHI X, WU J, YE S, et al. Regional land subsidence simulation in Su-Xi-Chang area and Shanghai City, China[J]. **Engineering Geology**, 2008, 100(1−2): 27－42.

[3] GALLOWAY D L, BURBEY T J. Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction[J]. **Hydrogeology Journal**, 2011, 19(8): 1459－1486.

[4] GAMBOLATI G, FREEZE R A. Mathematical simulation of subsidence of Venice 1. theory[J]. **Water Resources Research**, 1973, 9(3): 721－733.

[5] HOFFMANN J, LEAKE S A, GALLOWAY D L, et al. MODFLOW-2000 ground-water model——user guide to the subsidence and aquifer-system compaction (SUB) package[R]. [S. l.]: [s. n.], 2003.

[6] LEAKE S A, GALLOWAY D L. MODFLOW Ground-water model: user guide to the subsidence and aquifer-system compaction package (SUB-WT) for water-table aquifers[M]. US: US Geological Survey, 2007.

[7] LEAKE S A, GALLOWAY D L. Use of the SUB-WT package for MODFLOW to simulate aquifer-system compaction in Antelope Valley, California, USA[J]. **IAHS-AISH Publication**, 2010: 61－67.

[8] BURBEY T J, WARNER S M, BLEWITT G, et al. Three-dimensional deformation and strain induced by municipal pumping, part 1: analysis of field data[J]. **Journal of Hydrology**, 2006, 319(1−4): 123－142.

[9] BURBEY T J. Mechanisms for earth fissure formation in heavily pumped basins[M]. [S. l.]: [s. n.], 2010.

[10] 余阳. 长春地铁十字换乘站开挖对临近高层建筑物影响的数值分析研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.
YU Yang. Numerical analysis study on influence of Changchun mertro cross interchange transition station excavation to adjacent tall buildings[D]. Jilin: Jilin

University, 2014.

[11] FUHRMANN T, CUENCA M C, KNOPFLER A, et al. Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben area from a combined analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data[J]. **Geophysical Journal International**, 2015, 203(1): 614－631.

[12] FERRONATO M, GAMBOLATI G, TEATINI P. Ill-conditioning of finite element poro elasticity equations[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2001, 38(34−35): 5995－6014.

[13] FERRONATO M, CASTELLETTO N, GAMBOLATI G. A fully coupled 3-D mixed finite element model of Biot consolidation[J]. **Journal of Computational Physics**, 2010, 229(12): 4813－4830.

[14] BURBEY T J. A finite-difference model of three-dimensional granular displacement[D]. US: Morgan State University, 1994.

[15] TEATINI P, FERRONATO M, GAMBOLATI G, et al. Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend[J]. **Water Resources Research**, 2006, 42(1): 209－216.

[16] 吴吉春. 地下水动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
WU Ji-chun. Groundwater hydraulics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009

[17] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983, 345.
HUANG Wen-xi. Engineering properties of soil[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1983.

[18] BURBEY T J. Storage coefficient revisited: is purely vertical strain a good assumption?[J]. **Ground Water**, 2001, 39(3): 458－464.

[19] LUO Y, YE S, WU J, et al. A modified inverse procedure for calibrating parameters in a land subsidence model and its field application in Shanghai, China[J]. **Hydrogeology Journal**, 2016, 24(3): 711－725

[20] GAMBOLATI G, TEATINI P, BAU D, et al. Importance of poroelastic coupling in dynamically active aquifers of the Poriver basin, Italy[J]. **Water Resources Research**, 2000, 36(9): 2443－2459.

[21] YE S, LUO Y, WU J, et al. Three-dimensional numerical modeling of land subsidence in Shanghai, China[J]. **Hydrogeology Journal**, 2016, 24(3): 695－709.

[22] REED M B. An investigation of numerical errors in the analysis of consolidation by finite elements[J]. **International Journal of Numerical & Analytical Methods in Geomechanics**, 1984, 8: 243－257.

上接第 1019 页

[19] 吴钟腾, 叶龙珍, 郑之望. 基于运动学原理的滑坡运动距离预测方法研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(增刊 l): 673－680.
WU Zhong-teng, YE Long-zhen, ZHENG Zhi-wang. Study on the prediction method of landslides movement distance based on kinematic[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2016, 24(Supp.l): 673－680.

[20] 李秀珍, 孔纪名. “5.12”汶川地震诱发滑坡的滑动距离预测[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 243－249.
LI Xiu-zhen, KONG Ji-ming. Runout distance estimation of landslides triggered by “5·12” Wenchuan earthquake[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2010, 42(5): 243－249.

[21] 王念秦, 张倬元, 王家鼎. 一种典型黄土滑坡的滑距预测方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 111－114.
WANG Nian-qin, ZHANG Zhuo-yuan, WANG Jia-ding. A forecasting method of sliding distance on typical loess landslides[J]. **Journal of Northwest University (Natural Science Edition)**, 2003, 33(1): 111－114.

[22] 李保雄, 王得楷. 黄土滑坡空间预报的一种新理论[J]. 甘肃科学学报, 1998, 10(3): 57－58.
LI Bao-xiong, WANG De-kai. A new theory of space forecast for loess landslides[J]. **Journal of Gansu Science**, 1998, 10(3): 57－58.

[23] HEIM A. Bergsturz und Menschenleben[M]. Zürich: Naturforschenden Gesellschaft, 1932.

[24] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslide[J]. **Rock Mechanics**, 1973, 5: 231－236.

[25] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
PAN Jia-zheng. Analysis of building’s stability against sliding and landslide[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1980.

[26] 地矿眉山工程勘察院. 成都市新津县梨花溪风景区狮子山滑坡勘查报告[R]. 眉山: 地矿眉山工程勘察院, 2014.
Meishan Institute of Geological Engineering. The investigation report on Shizishan landslide, Xinjin town, Chengdu city[R]. Meishan: Meishan Institute of Geological Engineering, 2014.