

基于 FLAC^{2D} 的西安地面沉降数值模拟分析^{*}

李 宁¹, 李 明², 赵法锁³, 王启耀^{3,4}

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国中铁二院西安勘察设计研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 4. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 针对西安地区抽取地下深层承压水所引发的地面沉降进行了分析, 以 Biot 三维固结理论为基础, 采用 FLAC^{2D} 软件对西安地区地质技工学校处的地面沉降进行了二维数值模拟与土体-渗流耦合计算。通过分析模拟的计算结果, 对抽水引起的深层承压含水层垂直沉降和水平变形作了详细的分析, 并阐明了沉降漏斗形成的机理; 发现模拟结果与实际监测的结果是基本吻合的, 表明了地面垂直沉降和水平位移的特征和机理分析的正确性。

关键词: 西安; 地面沉降; 数值模拟; 抽水; 流-固耦合

中图分类号: TU4; P628+3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)03-0210-05

地面沉降因其致灾性触犯了人们的利益而受到关注。在城市, 大量开采地下水资源引起的地面沉降问题相当严重, 如因基础断裂而致使地表建筑物受损, 地下管道在运作使用中被折断, 大量井管出现的“上升”现象、道路路面产生的高低不等的差异变形等, 尤其在地面沉降与地裂缝二者相互作用和相互影响下带来的许多地质或潜在的危害问题更是严重^[1]。

牛修俊等提出最低与临界水位的概念, 黄旭林则认为只要开采地下水, 就会有地面沉降, 武强等通过研究总结出弱透水层在不同深度处的释水变形机理^[2-5]。

对于西安等许多城市来说, 地面沉降的形成主要是由于过量抽取承压水导致承压水位下降, 进而使得孔隙水压力减小、土体有效应力的增加、含水层组物质的压密。因此, 研究一种地下土体-渗流耦合模型, 预测地下水流场、地面沉降的变化趋势, 提出适宜的措施达到防治的原则和目的, 可为社会、经济和环境的可持续发展提供重要的参考^[6-7]。

地面沉降的产生是一个复杂的三维问题, 但在某一剖面上, 可以近似看成平面问题。地面沉降的产生与土体的数值位移和水平位移都有关系, 因此计算中对土体固结沉降的计算不能简单地采用太沙基一维固结理论, 而应该采用 Biot 三维固

结理论。美国 ITASCA 公司开发的 FLAC 软件是在岩土工程领域应用极为广泛的大型计算软件, 可以比奥固结理论为基础进行土体-渗流耦合(流-固耦合)计算。因此本次计算采用 FLAC^{2D} 软件进行二维数值模拟^[8-9]。

1 研究区概况

西安位于渭河断陷盆地的中段南部, 地质环境与渭河断陷盆地的形成与演化有关。从地理位置来讲, 渭河断陷盆地西边与宝鸡相连, 东边与运城、三门峡和灵宝相接, 东西向全长 400 km。该盆地带总体近 EW 向分布, 向东逐渐转变为 NEE 向。整个断陷盆地带在时间和空间上呈现出盆-岭构造^[10]。西安地区地层包括第四系、新近系和古近系, 西安地区地下水的类型主要包括潜水和承压水两大类, 根据其具体的性质、条件及用途, 可将研究区内 300 m 以内的含水层, 划分为潜水及第一、二承压含水岩组。据大量观测资料显示, 西安地区地面沉降的主要区域发生在抽水严重的城区和近郊区, 在长期抽水的影响下, 西安地区形成了西工大、小寨、沙坡村等 7 个大沉降中心, 累计沉降量最大已到 2 100 mm^[11]。根据观测资料成果, 可将西安地区地面沉降过程按照其沉降速率的变化分为 6 个阶段(表 1)。无论速率

^{*} 收稿日期: 2012-11-12 修回日期: 2013-01-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项(41202188); 地震行业科研专项(201208009); 中国地震局第二监测中心科技之光(20120101)

作者简介: 李宁(1985-), 女, 陕西大荔人, 工学硕士, 助理工程师, 主要从事断层形变机理分析研究。

E-mail: liningdeweb@163.com

表 1 西安地面沉降活动分期

沉降历史	微弱沉降期	缓慢沉降期	加速沉降期	加速异常沉降期	持续沉降期	减速沉降期
沉降时间	1959 年以前	1959 – 1971 年	1972 – 1978 年	1979 – 1983 年	1984 – 2001 年	2002 年至今
沉降速率/(mm/a)	0.5	3.5 ~ 9.4	13.86 ~ 46.7	36.0 ~ 110.2	60.0 ~ 130.0	18.0 ~ 40.0

如何变化,地面沉降的轮廓是基本不变的,只是在原初始轮廓上继续发展扩大的过程。

2 模型的建立及求解

2.1 地层的概化

地层模型概化的目的是为了建立地面沉降计算的数学模型,为地面沉降的治理提供科学的预测分析。建立地层模型首先要研究沉积盆地的形成和岩相变化,地层的岩性结构,特别是含水层、弱透水层和隔水层的划分;其次还要依据计划采用的数学模型对地层模型的要求集中参数模型,要求统一和输入输出关系明确^[8,12]。

本文模拟主要是针对抽水引起的地面沉降机理,故概化模型时采用有限差分计算模型,即对研究区地层进行水平层状的概化。

西安地质技工学校处地表沉降和地下水位观测资料比较齐全,约 400 m 深的钻孔揭示了该处 400 m 深度以内底层的组成及各层的岩性,故本文选择该处进行模拟,将研究区垂直方向的土层自上而下剖分成 19 层,具体情况如表 2 所示。其中 A 代表第一承压水含水层系中的粘土层, B 代表第二承压含水层系中的粘土层, C 代表砂层。

2.2 建立模型及网格划分

根据研究区地质条件,将研究区的计算范围确定为:考虑到水平方向与抽水井及含水层的影响半径有关,根据工程经验及土的物理力学性质,对于该研究区土层,在水平方向,以抽水井为中心向外取 300 m,即 $\pi \times 600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 为模拟范围,竖直方向计算深度为整个承压含水组厚度。按照地层概化模型,将模型进行两个方向剖分,水平方向按照 $\Delta x = 12 \text{ m}$ 进行网格剖分,竖直方向按照地层厚度进行不等剖分,据此,模拟区共生成 1 200 个网格单元。所建模型及网格剖分见图 1 及图 2。

2.3 边界条件

本次模拟的计算模型为平面应变模型,位移及渗流边界条件为:顶面为自由位移,自由排水边界;底部为固定位移,不排水边界;两侧边为水平固定,竖向自由,渗流边界根据计算工况按照水头边界处理确定。上述边界状态在降排水过程中保持恒定。土体满足 Mohr-coulomb 本构模型,

流体模型为 fl_ iso 各向同性模型和 fl_ null 流体零模型。

表 2 地层概化模型

承压含水组	层号	地层	层厚/m
第一承压含水组	A ₁	粘土层 1	38.7
	C ₁	砂层 1	2
	A ₂	粘土层 2	25.8
	C ₂	砂层 2	1.6
	B ₁	粘土层 3	20.74
第二承压含水组	C ₃	砂层 3	4.86
	B ₂	粘土层 4	11.1
	C ₄	砂层 4	7
	B ₃	粘土层 5	8
	C ₅	砂层 5	2.9
	B ₄	粘土层 6	13.4
	C ₆	砂层 6	1.3
	B ₅	粘土层 7	8.6
	C ₇	砂层 7	5.5
	B ₆	粘土层 8	9.2
	C ₈	砂层 8	12.98
	B ₇	粘土层 9	9.52
	C ₉	砂层 9	13
	B ₈	粘土层 10	4.3

2.4 参数的选取

在本次模拟中,采用综合方法选取参数,主要是根据室内试验结果及查阅相关文献所得的经验参数,最终确定的模型中各土层具体参数如表 3 所示:

2.5 计算程序

本文中数值模拟计算程序流程如下:

- (1) 建模、划分网格并分组定义;
- (2) 分别定义地层和水的本构模型及性质本构模型及性质;
- (3) 施加位移和孔隙水压力等边界条件,并初始孔隙水压力;
- (4) 使所建模型达到初始平衡状态;
- (5) 利用 fish 函数实现逐步性抽水,即实现不同降深时的结果;
- (6) 流体计算;
- (7) 绘图设置,输出结果。

表 3 各土层计算参数表

土层	重度 $\gamma/$ (kN/m^3)	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	内摩擦角 Φ	粘聚力 c/MPa	垂向渗透系数 $K_z/$ (10^{-7} cm/s)	水平渗透系数 $K_x/(10^{-7} \text{ cm/s})$	孔隙比 n
A	19	12	8.2	23	0.6	15	30	0.5
B	19.5	12	8.2	23	0.8	15	30	0.5
C	20	98	66	32	0	200	400	0.3

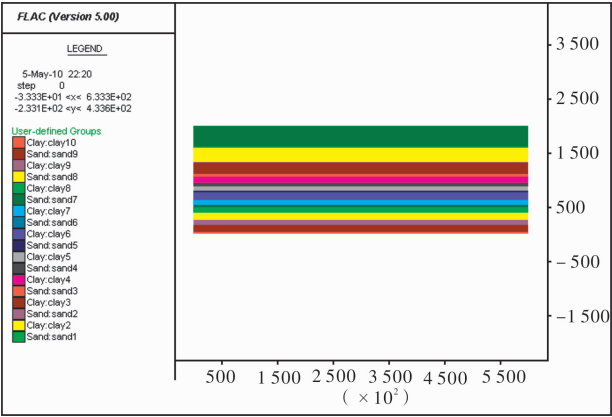


图 1 二维模型图

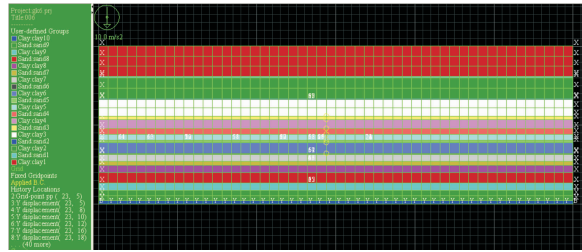


图 2 模型网格剖分图

3 计算结果分析

模拟分为 6 种情况，即令初始水位分别在 200.5 m、190 m、160 m、130 m、100 m、80 m 处分别进行抽水引起的地面沉降计算。通过模拟，发现不论地层中的初始水位在什么位置，在地层的同一水平线上的各点都具有相同的变化趋势，现选取初始水位为 80 m 时的模拟结果图来分析说明。

3.1 垂直沉降分析

(1) 同一水平线上各点沉降速率的差异

在本次模拟中，模拟的渗流时间与迭代的 steps 是成正比的(图 3)。结合图 3，可以迭代步数来代替渗流时间来分析地层的沉降情况。为了在证明抽水过程中地层的不均匀沉降所产生的沉降漏斗的存在，在模拟时，特地选取了模型中位于同一水平线上，并且距水分别为 12 m、24 m、

60 m、120 m、180 m、228 m 和 264 m 的 (24, 12)、(23, 12)、(20, 12)、(15, 12)、(10, 12)、(6, 12)、(3, 12) 7 个点作为特征点，来研究在相同渗流时间的情况下这些特征点之间的垂直沉降差异(图 4)。模拟结果表明：

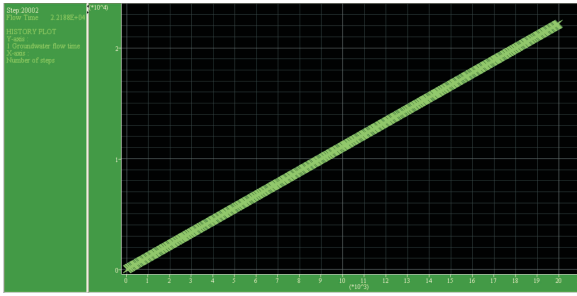


图 3 渗流时间与迭代步数的关系图

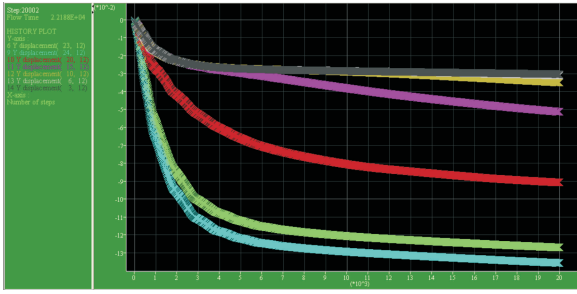


图 4 同一水平线上各点的垂直沉降变化

①在抽水初期，沉降曲线均较陡，说明地面沉降速率很大，随着抽水时间的增长，曲线越来越缓，变形量增加但速度在不断减小，沉降速率的变化反映出最初砂性土瞬间变形大的特征，随后主要是粘性土的较缓慢的压缩过程。

②距离抽水井越近的点，随着渗流时间的增长沉降越快，反之，距离抽水井越远的点，随着渗流时间的增长沉降速率会越慢。

(2) 同一水平线上各点沉降量的差异

模拟时继续选取模型中位于同一水平线上同样的 7 个特征点作为研究点，将这些点连接起来形成特征直线，通过观察地层中选取的这些特征直线的变形情况来描述不同水位降深时地层的竖向位移情况，特征直线的变形曲线绘于图 5 中。在图

5 中, 横轴表示对应于模型中 $j = 12$ 平面处地层中各点与抽水井中心的距离, 纵轴表示特征直线上各节点的沉降量值。图中曲线呈现出明显的沉降半凹槽状, 这很好地反映了地面沉降中心与承压水降落漏斗一致的特征和地面沉降机理。沉降槽的形状主要是由孔隙水压力的消散和地层的失水情况所决定的, 地层由于抽水的作用, 水井边缘处为失水量最大的地方, 所以其孔隙水压力消散得也最快, 故而此沉降也最大。图 6 为模拟区域的垂直沉降位移图, 图中也很好地显示出沉降漏斗的存在。

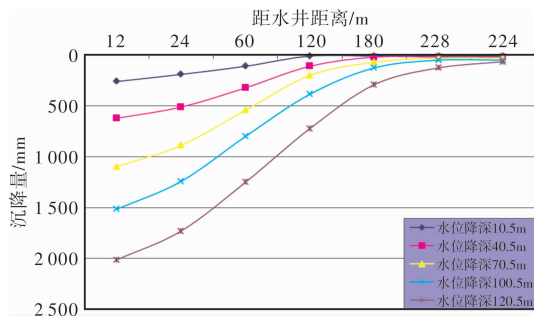


图5 特征直线在不同水位降深处的变形曲线

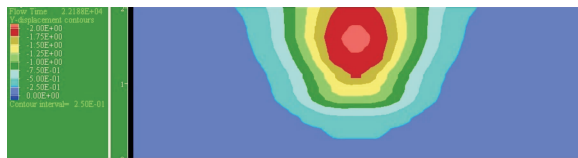


图6 垂直沉降位移

(3) 模拟沉降量与实际监测情况的对比

在同期进行的地面水准观测所测得的地面沉降量和本次模拟的地层沉降量对比见表 4。

表 4 模拟值与实际值的对比

水位降深/m	10.5	40.5	70.5	100.5
a - 模拟地层压密度/mm	260	621	1 096	1 516
b - 地面沉降量/mm	305	818	1 360	1 756
(a/b)/%	85	76	80	86

同时, 根据分层沉降观测结果, 第一层承压含水层系和第二层承压含水层系地层的压密度占总的地层压密度(地面沉降量)的比例为 82%, 通过比较发现, 本次模拟的结果与现实观测结果基本吻合。这验证了沉降机理的分析正确性, 同时也证实了数值模拟模型和编制的程序的合理性和适用性。

3.2 水平位移分析

模拟时同样选取模型中位于同一水平线上的(24, 12)、(23, 12)、(20, 12)和(15, 12)4 个点作为特征点, 它们距水井距离分别为 12 m、

24 m、60 m 和 180 m。通过模拟结果图发现各特征点的水平位移有相似之处, 图 7 所示为各特征点水平位移随抽水时间的增长变化情况, 图 8 所示为所选四个特征点水平位移分布情况。

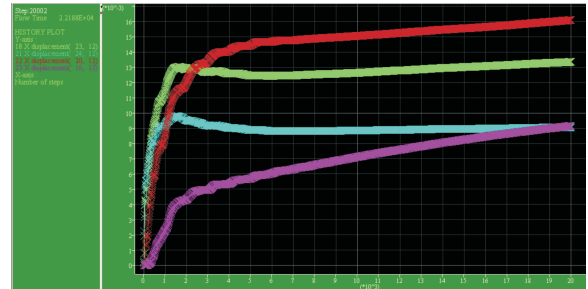


图7 同一水平线上各点的水平位移变化



图8 水平位移图

通过分析, 可以得出以下结论:

抽水引起的含水层水平变形量为抽水时间、径向距离的复杂函数(还有别因素的影响), 可以看出在抽水初期, 地层的水平运动和变形最为剧烈, 而后逐渐稳定。

(1) 水平径向位移随时间的变化: 主要表现为在近抽水井处, 即点(23, 12)和(24, 12), 在抽水初期, 其水平位移显示出地层的径向拉张状态, 而后随着抽水时间的增长, 则变为径向挤压状态;

(2) 水平径向位移随距水井距离的变化: 表现为在近抽水井处, 水平径向位移为先拉张后挤压, 见点(23, 12)和点(24, 12)的位移曲线; 而在远抽水井处, 水平径向位移为拉张状态, 见点(20, 12)和点(15, 12)的位移曲线。

(3) 从图 7 的几条曲线还可以看出, 愈接近水井, 水平位移表现得愈明显, 挤压区和拉张区应该存在一个分界点, 随着距水井距离的增大, 径向挤压区逐渐消失。而径向应变随着距水井的距离先增大, 在达到最大后又开始减小[见图 7 中(24, 12)曲线→(23, 12)曲线→(20, 12)曲线→(15, 12)曲线的变化]。

以上分析比较好地证实了含水层水平变形的客观存在性, 尤其是近井处的挤压很有可能是产生各种管道“错断”的原因。

3.3 垂直位移与水平位移的比较

在本次模拟中, 作者对模型中(24, 12)、

(23, 12)、(20, 12)和(15, 12)四个特征点的垂直位移和水平位移进行了比较。如图4和图7反映出相同的渗流时间内各特征点的垂直位移曲线和水平位移曲线, 比较两图可以得出表5所示的结论。

表5 各特征点垂直位移和水平位移的比较

特征点	(24, 12)	(23, 12)	(20, 12)	(15, 12)
垂直位移/ 10^{-2} m	13.5	12.7	9.1	5.2
水平位移/ 10^{-3} m	9.0	12.9	15.0	8.9

通过表5, 可以得出在相同的渗流时间内这些特征点垂直位移远远大于水平位移。这与实际中人们所观察到的现象是一致的。

4 结论与讨论

以西安地质技工学校处的地面沉降为工程背景, 以Biot固结理论为基础, 应用二维快速拉格朗日有限差分数值模拟软件FLAC^{2D}对抽水引起的地面沉降进行流-固耦合计算。通过分析数值模拟计算结果, 并与实际监测结果进行对比, 发现模拟的结果与实际监测的结果是基本相吻合的。这一方面验证了沉降机理的分析正确性, 另一方面也证明了数值模拟模型和编制的程序的合理性和适用性。通过论文的写作, 获得并进一步认知了西安地面沉降的发育过程、形成条件及发育机理。

参考文献:

- [1] 殷跃平, 张作辰, 张建军. 我国地面沉降现状及防治对策研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 1-7.
- [2] 牛修俊. 地层的固结特征与地面沉降临界水位控沉[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 68-73.
- [3] Zhao Hui, Ran Xinglong, Li Yuan. To determine critical water level by correlation between land subsidence and groundwater drawdown [J]. Site Investigation Science and Technology, 2005 (2): 19-23.
- [4] 黄旭林, 倪菊水. 地下水开采与地面沉降因果关系的剖析和探讨[C]//2002年全国地面沉降学术会议论文集. 北京: 中国地质调查局, 2002: 100-105.
- [5] 武强, 谢海澜, 赵增敏, 等. 弱透土层变形机理的研究[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(3): 207-210.
- [6] 刘玉海, 陈志新, 倪万魁. 西安地裂缝与地面沉降致灾机理及防治对策研讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5 (S1): 67-74.
- [7] 李新生. 西安地面沉裂环境问题研究[D]. 西安: 西安地质学院, 1994.
- [8] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [9] Helm T L. Ground failure induced by groundwater withdrawal from unconsolidated sediments [C] // Maninduced Land Subsidence, Reviews in Engineering Geology, The Geo-logical Society of America, 1984, 6: 67-101.
- [10] 邓起东, 尤惠川. 鄂尔多斯周缘断陷盆地的构造活动特征及其形成机制[M] //现代地壳运动(1). 北京: 地震出版社, 1985: 58-78.
- [11] 陕西省地质环境监测总站. 西安地区地裂缝与地面沉降调查报告[R]. 西安: 陕西省地质环境监测总站 2007.
- [12] Leaker SA. Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference ground-water flow model[R]. U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book6, 1991.

Numerical Simulation Analysis of Xi'an Land Subsidence by FLAC^{2D}

Li Ning¹, Li Ming², Zhao Fasuo³, Wang Qiyao^{3, 4}

(1. Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Xi'an 710054, China;

3. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

4. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Land subsidence caused by pumping underground confined water in Xi'an area is analyzed. Based on Biot three-dimensional consolidation theory, a two-dimensional numerical simulation and soil-seepage coupling calculation are done with FLAC^{2D} software to the land subsidence around Xi'an Geological Technician School. By analyzing the simulation results, vertical settlement and horizontal deformation of the confined aquifer caused by pumping are studied in detail, and the settlement mechanism of funnel form is expounded. The simulation results are generally consistent with the monitoring results, which indicate that the analysis of the characteristics and mechanism of ground vertical settlement and horizontal displacement is correct.

Key words: Xi'an; land subsidence; numerical simulation; pump; fluid-structure coupling