

上海文化广场工程承压水控制对周边环境影 响实例研究

张 刚¹, 廖 斌^{1, 2}

(1. 现代建筑设计集团上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 以上海文化广场工程为例, 结合现场抽水试验分析所得参数, 采用显式有限差分法建立了基坑开挖降水的三维流-固耦合模型。首先, 将计算所得基坑施工期间(开挖+降水)的位移与实测位移进行了对比验证; 其次, 对完全由降承压水引起的地表沉降分布进行了模拟, 并与降水沉降两步预估法计算所得结果进行了比较。实例分析结果表明, 该模型能较好地模拟实际开挖过程中基坑的变形规律及周边环境影 响, 其计算所得降承压水引起的地表沉降分布与两步预估法基本吻合, 可为类似降承压水引起的环境影 响研究提供一种新思路。

关键词: 承压水降水; 基坑; 流-固耦合; 地表沉降

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0715-06

作者简介: 张 刚(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事基坑工程承压水控制、土体力学微观模拟和土体流固耦合方面的研究工作。E-mail: itstony@126.com。

Effect of controlling confined water on surrounding environment of Shanghai Cultural Plaza

ZHANG Gang¹, LIAO Bin^{1, 2}

(1. Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai Xiandai Architectural Design Group, Shanghai 200011, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: For the project of Shanghai Cultural Plaza, according to the parameters gained from in-situ tests, a 3-D fluid-solid coupling model for groundwater seepage is established based on 3-D finite difference method. First, the calculated displacement is compared with the measured one during the period of construction. Secondly, the surface subsidence caused by dewatering is simulated and compared with the measured one based on the two-step estimate method. The results of engineering example show that the 3-D fluid-solid coupling model can simulate the deformation rules and environmental effect quite well. The calculated displacement caused by dewatering is consistent with the calculated one by the two-step estimate method. It may provide a new research idea for the relevant researches on confined water.

Key words: dewatering of confined water; foundation pit; fluid-solid coupling; surface settlement

0 引 言

随着基坑开挖深度的增加, 软土地区深基坑工程的承压水问题日益突出^[1-2]。深基坑开挖过程中对承压含水层中的承压水过量抽取, 地下水位降低以后会引起地基土的固结沉降, 将对周边的市政道路、地下管线、构筑物及建筑物等正常使用造成不利影 响^[3]。因此, 为确保基坑工程和周围环境的安全, 有必要对降承压水引起的渗流场变化及环境影 响进行正确的分析。

目前, 已经有许多学者对承压水控制问题进行了研究, 并且取得了一定的成果。周念清等^[4]以上海地铁 11 号线徐家汇站为例, 建立地下水渗流数值模型, 采用三维有限差分法对基坑降水进行模拟; 宋建学等^[5]基于二维稳定渗流理论推导基坑工程并点降水引起的

水位降低空间分布, 根据有效应力原理建立地面沉降计模型, 并简化为分层总和法形式的计算公式。严驰等^[6]选用适合基坑开挖的 **Hardening-Soil** 本构模型, 结合某深基坑工程利用有限元法对承压层的不同处理方案进行对比计算; 俞洪良等^[7]基于二维有限元方法对基坑施工不同阶段地下水渗流特征进行了分析。

目前, 有关降承压水的数值模拟大部分都没有现场实测结果进行对比验证; 此外, 基坑计算大都仅考虑基坑开挖产生的应力场对周边土体和结构的影响, 不能真实反映基坑降水开挖对周边环境的影响, 因此有必要进行基坑降水的流-固耦合分析。本文结合上

基金项目: 2010 年上海市青年科技启明星计划项目 (10QB1402200)

收稿日期: 2012-08-24

海文化广场工程,采用三维显式有限差分法对基坑开挖降水进行流-固耦合分析,并与实际监测数据进行了比较,为分析降承压水引起的地下水渗流场变化、周边环境的影响和围护结构变形等提供了新途径。

1 工程概况

上海文化广场工程位于卢湾区(现为黄浦区)永嘉路 36 号,基地西北角有保护建筑白尔登公寓(天然地基浅基础),基地西侧有一座保留的变电站,基地东、西两侧均为道路,地下管线众多,道路对面尚有低层建筑,均在基坑施工影响范围内(如图 1 所示)。工程用地面积约 47035 m²,其中基坑长 174 m,长约 131 m,大体呈矩形。基坑开挖深度主要有 7.4, 12.5, 16.4, 18.5, 23 m。基坑围护采用地下连续墙结合钢筋混凝土支撑的围护形式(如图 2 所示)。

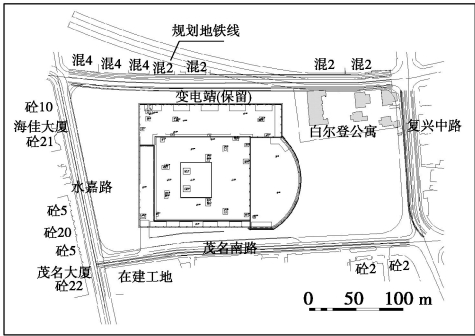


图 1 上海文化广场及周边环境

Fig. 1 Shanghai Cultural Plaza and surrounding environment

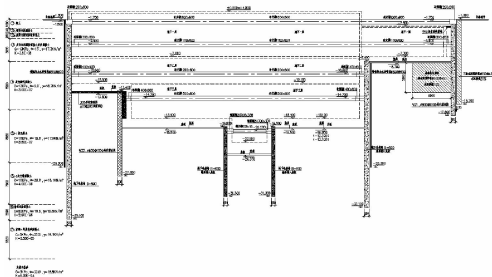


图 2 基坑支护典型断面

Fig. 2 Typical section of supporting structure

2 地质原型

根据工程地质勘察,文化广场第四系松散沉积物在 110 m 内地表及浅部分布的第四系地层为上更新统和全新统,可划分为 10 层及其不同层次的亚层。本工程承压含水层分布^[8-9]如下:

(1) 第一承压含水层(⑦₁层和⑦₂层): ⑦₁层受后期河流切割,其顶板起伏较大,局部缺失,⑦₂层均有分布,含水层一般厚度 22.10~36.50 m。根据抽水试验期间测得该含水层静止水头埋深 8.8 m 左右。

(2) 第二承压含水层(⑨层灰色粉细砂): 场内均有分布,岩性为粉细砂,局部夹砂质粉土。含水层一般厚度 30.5~32.7 m。根据抽水试验期间测得该含水层静止水头埋深 9.0 m 左右。

第一、二承压含水层相互连通,根据现场抽水试验结果,可分析得出承压含水层的水文地质参数平均值^[10]如表 1 所示。

表 1 含水层水文地质参数^[10]

Table 1 Hydrological and geological parameters of aquifers

含水层	水平渗透系数 $K_h/(m \cdot d^{-1})$	贮水率 S_{s1}/m	导压系数 a_{m2}/d
第一承压含水层	2.41	2.02×10^{-3}	145
第二承压含水层	5.35	4.68×10^{-2}	321

3 三维流-固耦合模型建立

3.1 模型尺寸及边界条件

根据实际工程资料,本次模型的计算面积设为 600 m×600 m,计算深度设为 65 m(如图 3 所示)。计算模型的渗流初始条件为定水头边界,潜水位在地表以下 1 m 处,承压水埋深在地表以下 6 m 处。

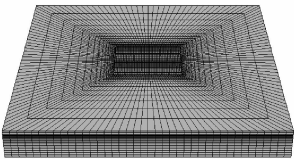


图 3 模型网格

Fig. 3 Layout of model mesh

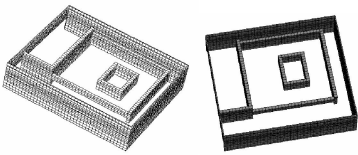


图 4 地下连续墙模型

Fig. 4 Layout of diaphragm wall model

渗流的边界条件为:内边界为已知流量边界(降水井),外边界为定水头边界,底边界为隔水边界。地下连续墙作为隔水边界处理,应力的初始条件为自重应力。位移边界条件为:外边界水平方向固定,竖直方向自由;底边边界水平方向自由,竖直方向固定。

3.2 网格划分

考虑到降水井及连续墙的布置,基坑开挖区的网格划分较密,向外逐渐变疏,剖分为 80×80 个单元,剖分的总原则为基坑内密,向外变疏。垂向上根据土层的渗透性、连续墙的深度、井点工作段的位置分为 20 层,井点作为定流量边界处理,共 128000 个节点

(如图 3, 4 所示)。

4 计算过程

土体的应力应变关系采用弹塑性本构模型，服从莫尔 - 库仑准则。基坑开挖计算过程中将围护结构和土体作为整体进行分析，地下连续墙和周围土体均采用 8 节点实体单元模拟，各道逆作楼板采用壳单元模拟，各道环梁采用梁单元模拟，地下连续墙和土体之间设接触面。模型中的土层参数如下表 2 所示。设置降压井滤管上部的深度为 37.0 m。设计滤管的长度为 10 m，井底设置 1 m 的沉砂管，井深为 48 m。降水井的编号为 YA1~YA8，流量均为 765 m³/d。

表 2 土层物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indexes of soils						
土层	重度 (kN·m ⁻³)	φ (°)	c /kPa	压缩 模量 /MPa	K_0	渗透 系数 cm/s
褐黄色粉质黏土	18.7	17	19	4.58	0.46	2.00 $\times 10^{-6}$
灰黄色淤泥质粉质黏土	17.9	15.5	15	7.73	0.38	5.00 $\times 10^{-6}$
灰色淤泥质粉质黏土夹砂质粉土	17.3	15	13	2.85	0.47	3.50 $\times 10^{-5}$
灰色淤泥质黏土	16.7	9	13	1.99	0.56	3.00 $\times 10^{-7}$
灰色黏土	17.9	15	16	2.89	0.58	3.50 $\times 10^{-7}$
灰色粉质黏土	18.1	20	16	3.93	0.46	4.00 $\times 10^{-6}$
暗绿色色粉质黏土	19.8	19.5	52	7.9	0.38	2.50 $\times 10^{-6}$
灰绿—草黄色砂质粉土	19.1	33.5	5	8.12	0.39	9.00 $\times 10^{-4}$
灰黄色粉砂	18.8	33	3	5.8	0.46	2.50 $\times 10^{-3}$

表 3 实际施工工况

Table 3 Actual construction conditions	
工况	施工内容
第 1 阶段	施工地下连续墙和钻孔灌注桩，坑内土体加固
第 2 阶段	第 1 道混凝土支撑施工结束，第 2 层土体开挖施工期间
第 3 阶段	第 2 层土体开挖施工结束
第 4 阶段	第 2 道支撑施工结束，第 3 层土体开挖施工
第 5 阶段	第 3 层土体开挖施工结束
第 6 阶段	第 3 道支撑施工结束，第 4 层土体开挖施工，降承压水
第 7 阶段	第 4 道支撑施工结束，基坑底标高为-13.8 m 土体开挖施工结束
第 8 阶段	第 5 道支撑施工结束，第 5 层土体开挖施工
第 9 阶段	开挖施工完毕，基坑垫层施工结束

基坑实际施工工况如表 3 所示，根据实际施工工况及基坑支护体系，本次计算开挖荷载分为 4 级，每次开挖加支撑分为一级，具体如表 4 所述。图 5 为基坑开挖至设计深度时的三维流 - 固耦合模型。

表 4 计算开挖工况

Table 4 Computational construction conditions	
荷载级号	开挖荷载情况
1	地下一层开挖至-8.7 m，加两道支撑
2	地下二层开挖至-13.8 m，加一道支撑和底板，降承压水
3	地下三层开挖至-19.8 m，加一道支撑和底板
4	舞台区开挖至-24.3 m，加一道支撑和底板

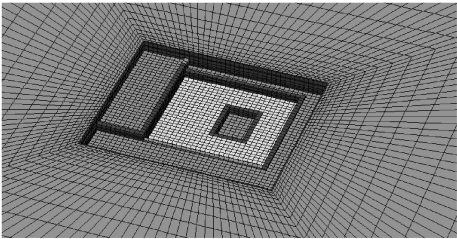


图 5 开挖至设计深度的三维流 - 固耦合模型

Fig. 5 3-D fluid-solid coupling model excavated to design depth

5 基坑降水开挖模拟结果与施工实测对比分析

5.1 侧向位移对比分析

(1) 墙体侧向位移对比分析

围护墙体在不同开挖深度时的计算侧向变形分布如图 6 所示；实际施工过程中，墙体典型位置处的实际监测侧向位移如图 7 所示。

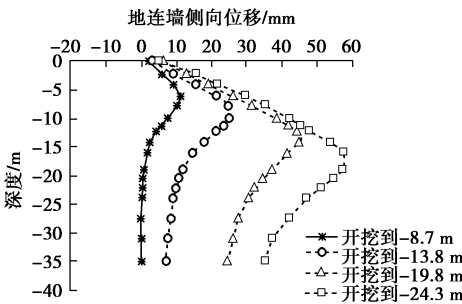


图 6 墙体计算侧向位移曲线

Fig. 6 Calculated horizontal displacements of diaphragm wall

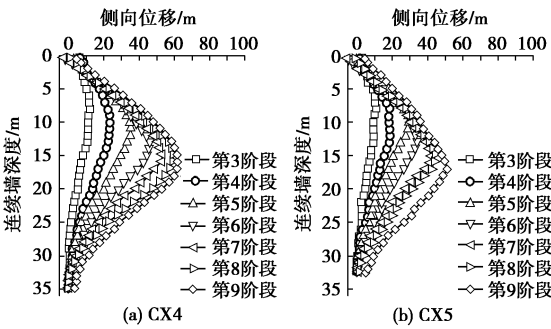


图 7 墙体实测侧向位移

Fig. 7 Measured horizontal displacements of diaphragm wall

由图 6 可见，在不同开挖深度下，墙体侧向变形基本表现为两端小，中间大的分布。最大侧向位移约为 60 mm，最大侧向位移与开挖深度之比为 0.24%。各开挖深度下最大侧向位移基本发生在开挖面偏上的位置，随着开挖深度的加大，最大侧向位移发生位置也在向下移动，开挖至设计深度时，最大侧向位移大约发生在 19.2 m 的位置。

图 7 中,测斜孔 CX4 位于基坑西侧连续墙的中部,而测斜孔 CX5 靠近基坑西侧连续墙的阴角。开挖至设计深度时,测斜点 CX4 的最大侧向位移为 61.85 mm,测斜点 CX5 的最大侧向位移为 51.51 mm,最大侧向位移的位置距离墙顶 16 m,靠近基坑的开挖面稍偏上的位置,最大侧向位移与最终开挖深度的比值约为 0.25%。可见,基坑围护结构的侧向变形具有显著的空间效应,且基坑角部空间效应更加显著。

(2) 坑外土体侧向位移对比分析

开挖至设计深度时,坑外土体的计算侧向变形分布如图 8 所示;实际施工过程中,坑外土体典型位置处的实际监测侧向位移如下图 9 所示。

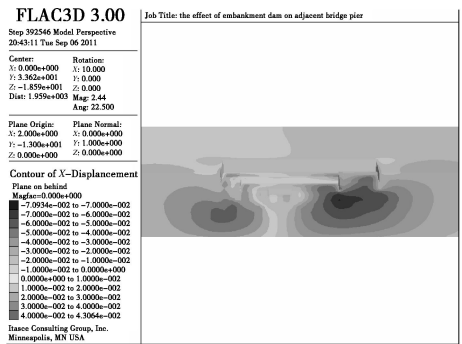


图 8 坑外土体侧向位移云图

Fig. 8 Horizontal displacement contour of soil outside pit

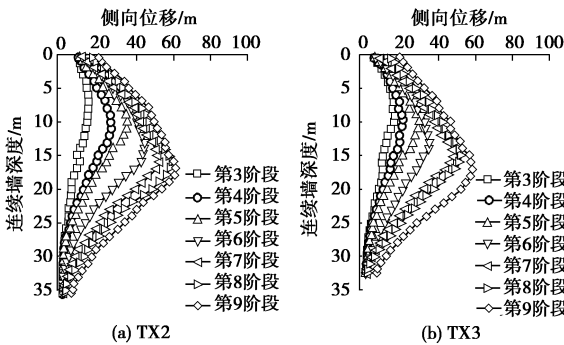


图 9 坑外土体实测侧向位移

Fig. 9 Measured horizontal displacements of soil outside pit

由图 8 可见,基坑开挖过程中,坑外土体发生较大的水平位移,最大水平位移为 70.9 mm,最大位移发生在地面以下 24 m 左右(即开挖面附近),且距离基坑越远水平位移越小。

由图 9 可见,土体实测侧向变形规律与连续墙的侧向变形规律相似。当开挖深度较浅时,最大侧向位移位于开挖面以下;当开挖深度较深时,开挖面穿过淤泥质粉质黏土时,最大侧移位置位于靠近开挖面附近;开挖至设计深度时,土体的最大侧向位移约为 70 mm。

5.2 竖向位移对比分析

开挖至设计深度时,坑外土体的计算竖向位移分

布规律如图 10, 11 所示。

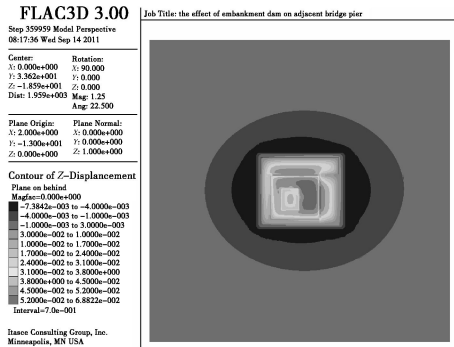


图 10 开挖至设计深度时的地表沉降云图

Fig. 10 Vertical displacement contour excavated to design depth

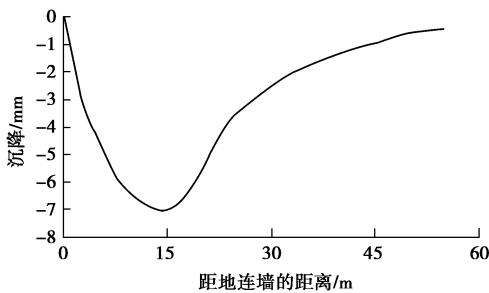


图 11 开挖至设计深度时的坑外地表沉降

Fig. 11 Vertical displacement excavated to design depth

由图 10, 11 可见:开挖至设计深度时,在基坑底部,土体发生隆起,基坑隆起量最大达 63.8 mm,降低承压水头可有效地减小基底隆起量;在坑外周边一定区域,土体发生沉降,沉降最大值发生在离坑边较近的位置;本次计算所得最大地面沉降量发生在离开坑边约 15 m 的位置,最大沉降达到 7 mm,离开坑边 15 m 距离以后,沉降随距离的增加而衰减。

本工程也记录了周边建筑物的在基坑施工期间(开挖+降水)的沉降分布情况(如图 12、表 5、6 所示)。根据实测数据:白尔登公寓在基坑开挖和降水期间的总沉降量在 3.6~7.1 mm 之间,平均值约为 5.5 mm;保留建筑 1 在基坑开挖和降水期间的总沉降量在 4.9~8.8 mm 之间,平均值约为 6.4 mm;保留建筑 2 在基坑开挖和降水期间的总沉降量在 5.2~5.8 mm 之间,平均值约为 5.5 mm;保留建筑 3 在基坑开挖和降水期间的总沉降量在 4.4~5.8 mm 之间,平均值约为 5.1 mm。

由以上分析可见,通过现场抽水试验分析所得各参数建立的三维流-固耦合模型能较好地模拟基坑施工过程中的变形规律。其计算所得侧向位移与实际监测侧向位移发展规律比较相近,位移峰值和峰值深度也大致相同;其计算所得沉降与实际监测沉降分布规律基本吻合,沉降值也相差不大。

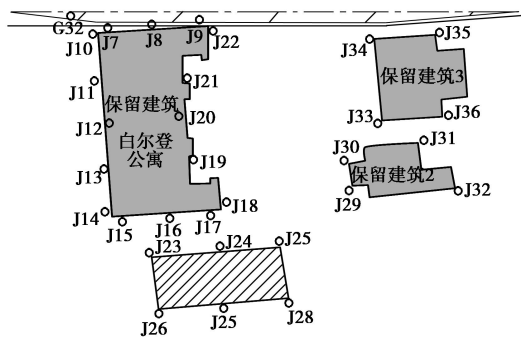


图 12 基坑周边建筑物测点布置图

Fig. 12 Monitoring points of surrounding buildings

表 5 白尔登公寓基坑开挖降水期间最终沉降

Table 5 Final settlements of Baierdeng Apartment during

construction								mm	
J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14		
-5.5	-5.5	-6.0	-7.1	-5.0	-4.6	-5.5	-5.3		
J15	J16	J17	J18	J19	J20	J21	J22		
-6.3	-6.6	-6.4	-3.6	-4.8	-5.6	-5.5	-5.0		

表 6 保留建筑基坑开挖降水期间最终沉降

Table 6 Final settlements of pre-existing buildings during

construction												mm	
J23	J24	J25	J26	J27	J28	J30	J31	J33	J34	J35	J36		
-8.8	-6.6	-7.0	-5.6	-5.5	-4.9	-5.8	-5.5	-5.2	-4.4	-5.1	-5.8		

6 基坑降承压水模拟结果分析

通过与施工期间实测位移的对比验证，开挖和降水两种工况与实测结果拟合的较好，因此，本次建立的三维流 - 固耦合模型可以用来模拟完全由降承压水引起的周边环境影

响。降水稳定后典型降水井截面的孔压界面分布情况如图 13 所示：降水井区域附近孔压呈漏斗形状分布，降水能有效地减小局部水头，降低预开挖区域的水位，保证工程安全。

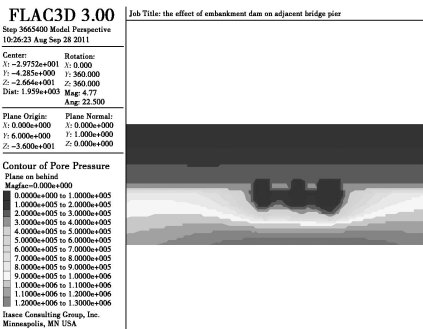


图 13 典型降水井截面孔压分布

Fig. 13 Distribution of pore pressure of a typical dewatering well

地下水流方向如图 14 所示：在基坑降水过程中，水流总是从降水区域外围流向预开挖区的；在预开挖区域附近渗流场速度值达到最大值，基坑壁外围渗流速度矢量大致指向基坑壁，预开挖区底面以下渗流场速度指向基坑底面。这表明地下水在水头差作用下向预开挖区方向流动，且距降水区域较远处速度值大幅

减小。
降承压水引起的周围地表沉降分布如图 15 所示：在井点降水区域内沉降值最大可达 6.6 mm，沉降分布范围很广，在距降水井 200 m 处，沉降仍可达 2 mm。场地东北角的白尔登公寓位置处的沉降约为 2 mm 左右，后面多幢保留建筑位置处的沉降约为 1.5 mm。

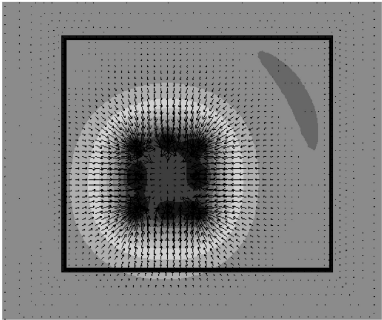


图 14 地下水流动方向矢量图

Fig. 14 Vector diagram of groundwater flow direction

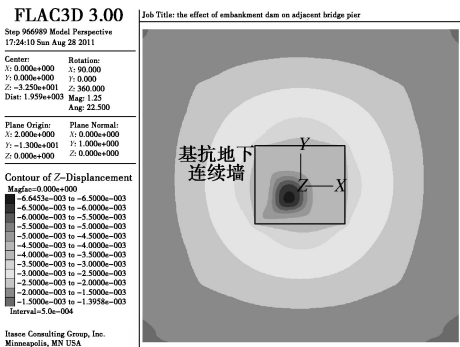


图 15 计算所得降水引起的地表沉降分布云图

Fig. 15 Calculated horizontal displacement contour caused by dewatering

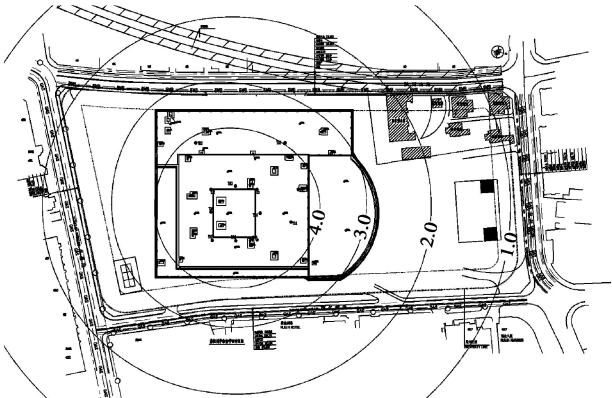


图 16 两步预估法计算沉降等值线图^[9]

Fig. 16 Surface subsidence calculated by two-step estimate method

本工程采用降水沉降两步预估法预测所得降承压水引起的地表沉降^[9]如图 16 所示，白尔登公寓由降承压水引起的沉降在 2 mm 左右；保留建筑由降承压水引起的地面沉降在 1~2 mm 之间。可见，降水沉降两步预估法与三维流 - 固耦合模型计算所得的地表沉降分布比较吻合，沉降值也比较接近。

此外，将流 - 固耦合模型计算所得完全由降承压

水引起的地表沉降(图 15)与基坑施工期间的实测沉降(表 6, 7)相对较: 场地东北角的白尔登公寓由基坑降水引起的沉降在 2 mm 左右, 约占施工期间总沉降量的 35%; 后面多幢保留建筑由降水引起的地面沉降约为 1.5 mm, 约占施工期间总沉降量的 25%。

7 结 论

(1) 采用三维显式有限差分法建立的流-固耦合模型, 能较好地还原基坑降水开挖施工过程中地下水渗流场的分布形式, 并模拟围护结构及周边环境的变形规律, 可为实际基坑开挖提供重要指导。

(2) 三维流-固耦合模型与降水沉降两步预估法计算^[8]所得的地表沉降分布基本吻合, 一定程度上验证了两步预估法的准确性, 同时也为类似降承压水引起的地表沉降预估提供了一种新的思路。

(3) 降承压水过程中, 水流总是从降水区域外围流向预开挖区, 预开挖区底面以下渗流场速度指向基坑底面; 水头降深主要集中在降水区域中心, 随着距降水中心距离的增加, 水头降水逐渐减小, 抽水后降水井区域孔压呈漏斗形状。

(4) 在基坑施工期间引起的地表总沉降中, 降承压水引起的沉降量占的比重比较大, 且距离降水中心越近, 降水引起沉降所占的比重也越大。因此, 实际基坑工程中应尽量避免大范围降水或采取相应措施减小其影响。

参考文献:

- [1] 张具寿. 32 m 深基坑施工中承压水的控制及对环境的影响[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊): 310 - 313. (ZHANG Ju-shou. Control of pressure water during construction of 32 m deep-foundation pit and its effects on surrounding environment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, **30**(S0): 310 - 313. (in Chinese))
- [2] 叶为民, 万 敏, 陈 宝, 等. 深基坑承压含水层降水对地面沉降的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(2): 1799 - 1804. (YE Wei-min, WAN Min, CHEN Bao, et al. Influence of dewatering of confined aquifers on land subsidence during deep excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(2): 1799 - 1804. (in Chinese))
- [3] 翁其平, 王卫东. 深基坑承压水控制的设计方法与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊): 343 - 348. (WENG Qi-ping, WANG Wei-dong. Design and application of control of confined groundwater in deep foundations pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S0): 343 - 348. (in Chinese))
- [4] 周念清, 唐益群, 娄荣祥, 等. 徐家汇地铁站深基坑降水数值模拟与沉降控制[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(12): 1950 - 1956. (ZHOU Nian-qing, TANG Yi-qun, LOU Rong-xiang, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and land subsidence control of Xujiahui Metro Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(12): 1950 - 1956. (in Chinese))
- [5] 宋建学, 周乃军, 邓 攀. 基坑降水引起的环境变形研究[J]. 建筑科学, 2006, **22**(3): 26 - 30. (SONG Jian-xue, ZHOU Nai-jun, DENG Pan. Environmental settlement caused by construction pit dewatering[J]. Building Science, 2006, **22**(3): 26 - 30. (in Chinese))
- [6] 严 驰, 冯海涛, 李亚坡. 深基坑开挖中坑内降承压水的有限元模拟分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, **22**(2): 29 - 33. (YAN Chi, FENG Hai-tao, LI Ya-po. Gray numerical simulation of contaminant transport in low-permeability porous media[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, **22**(2): 29 - 33. (in Chinese))
- [7] 俞洪良, 陆杰峰, 李守德. 深基坑工程渗流场特性分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2002, **29**(5): 595 - 600. (YU Hong-liang, LU Jie-feng, LI Shou-de. Study on seepage field characteristics of foundation pit excavation[J]. Zhejiang University China (Science Edition), 2002, **29**(5): 595 - 600. (in Chinese))
- [8] 张 刚. 承压水降水引起地面沉降的实用预估方法研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2012, **4**(1): 35 - 39. (ZHANG Gang. Study on practical prediction method of surface settlement caused by dewatering of confined water[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2012, **4**(1): 35 - 39. (in Chinese))
- [9] 张 刚. 承压水降水引起地表沉降的预估与实测对比研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 已录用. (ZHANG Gang. Study on the comparison between prediction and field measurement of surface settlement caused by dewatering of confined water[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, accepted. (in Chinese))
- [10] MOENCH A F. Convergent radial dispersion: A Laplace transform solution for aquifer tracer testing[J]. Water Resources Research, 1989, **25**(3): 439 - 447.

(本文责编 孙振远)