

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.032

潜水地区深基坑降水引起地面沉降的抽水 试验及其简化计算

吴意谦^{a,b}, 朱彦鹏^{a,b,c}

(兰州理工大学 a. 土木工程学院; b. 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室;

c. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050)

摘要:以兰州地铁 1 号线马滩站深基坑工程为依托, 根据场地工程地质和水文地质条件, 设计单井抽水试验及完整基坑降水工程, 并完成了现场监测工作。得到各自的地下水位及地表沉降量的变化规律, 对比发现两者水位变化趋势、沉降量基本相同。在裘布依假定的前提下首先求出基坑降水后地下水位的降落曲线方程, 忽略土体的侧向变形及群井效应对降水效果的影响, 采用分层总和法分别计算水位降落曲线上疏干土与饱和土的地面沉降量, 叠加后得到最终坑周地面沉降量。采用大型有限元软件对该基坑降水工程进行数值模拟, 现场监测数据与数值计算及理论计算结果基本吻合, 表明本文提出的计算方法具有较高的工程实用价值。

关键词:基坑降水; 沉降; 抽水试验; 监测; 数值模拟; 工程实例

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0168-10

The simplified calculation and well-pumping test of settlement on the dewatering of foundation pits location in phreatic aquifer

Wu Yiqian^{a,b}, Zhu Yanpeng^{a,b,c}

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of

Gansu Province; c. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry

of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China)

Abstract: Taking the deep foundation pit engineering of Ma-tan Station of Lanzhou Subway 1# project as background, based on the engineering geological and hydrogeological condition, the design of single well-pumping test and dewatering project of deep foundation pit of subway station was given, the in-situ monitoring jobs were completed. The change of the underground water level and the settlement values around the foundation pit are obtained, the change trend and settlement values of dewatering project are similar with the single well-pumping test. Ignoring the lateral displacement and the effect of the group wells, the equation of the water-table depression was solved on the supposition of Dupuit presupposition. Then the settlement of the soil layers above and under the cone of water-table depression was calculated respectively based on the layer-wise summation method, and the actual settlement was the sum of the both. The large finite element analysis software is used for the construction process simulation of the dewatering, the comparison and analysis with numerical simulation, theoretical calculation and monitoring of the engineering examples show that the calculation method has a practical engineering value.

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAK12B07); 国家自然科学基金(50978129)

作者简介: 吴意谦(1986-), 男, 博士生, 主要从事岩土工程支挡结构研究, (E-mail) 371901233@qq.com;

朱彦鹏(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

Key words: dewatering of foundation pit; settlement; well-pumping test; monitoring; numerical simulation; engineering examples

随着中国城市建设的飞速发展,高层建筑及地下空间的开发利用正如火如荼地进行着,诸多深、大基坑工程如雨后春笋出现在我们身边。大多数基坑位于地下水位面以下的潜水层,为保持深基坑在干燥、安全的环境下开挖施工,通常要通过降水使地下水位下降到开挖面以下。地下水的抽取,必然使基坑周围地下水渗流场发生改变,会在基坑周围形成漏斗状的弯曲水面,即所谓的“降水漏斗”。降水漏斗的曲面趋于稳定后,就必然造成基坑周围地面的不均匀固结沉降,严重时会引起周围建筑物、地下管线的倾斜或开裂,会给周围环境带来巨大的风险,国内外相关工程事故屡见报道^[1]。

降水导致含水层骨架压密所产生的地面沉降是一种固结过程,究其原因是由于抽取地下水引起土层孔隙水压力消散,有效应力增加。根据计算模型所能反映的土层的固结特征,地面的沉降理论可以分为经典弹性、准弹性、流变学三种。目前关于降水引起地面沉降的计算方法主要有基于固结理论的弹性及黏弹性和黏弹塑性方法,基于实测沉降资料的经验、半经验法,假定降水前后土体总应力不变或由水文地质概念推导出的沉降估算法、随机介质法及神经网络法等。国内外学者对此也进行了大量的研究,提出了一些计算方法^[2-10]。

文中对兰州地区某地铁车站深基坑工程分别进行单井抽水试验和完整降水工程,监测大降深降水时各自的水位降深和其引起的地面沉降变化规律。在忽略土体的侧向变形及群井效应前提下,首先在裘布依假定条件下求出坑后地下水位降落曲线方程,然后采用分层总和法分别计算稳定地下水位面上下干土、疏干土及饱和土体各自的沉降量,最终叠加得出基坑周围地面的总沉降量。结合数值模拟结果及其工程实例监测数据进行对比分析,结果表明该方法计算结果较为合理准确,可以用于基坑降水引起地层沉降的预测计算。为今后深基坑降水的设计和施工提供了参考。

1 工程概况

1.1 工程概况

兰州市地铁 1 号线 1 期工程全长 26.53 km,布设于主城区内,均为地下线,共 20 个车站。本站位

于七里河区马滩村, T188 号路与规划道路十字路口,沿 T188 号公路铺设,车站设计起点里程为 YDK15+056.513,终点里程为 YDK15+355.713,车站周边建筑物及车流量较少。车站为地下三层单柱双跨箱型框架结构,主体长度 299.20 m,标准段宽 20.3 m,总高 20.84 m,结构底板埋深约 24.867 m,中心里程处顶板覆土约 3.717 m。车站总建筑面积 26 682.40 m²,车站在 T188 道路两侧各设置两个出入口,在车站设置两组风亭,车站采用明挖顺做法施工。



图 1 车站深基坑开挖后现场照片

1.2 水文条件

兰州市气候类型属黄土高原温带半干旱气候,年平均降雨量 293.5 mm,年平均蒸发量 1 446.4 mm。场地地下水属第四系松散岩类孔隙潜水,主要赋存于下部砂卵石层中,接受大气降水及黄河水、上游地下水的侧向径流补给,流向东北,排泄于下游黄河。勘察期间地下水位埋深 8.5~9.1 m,水位高程 1 518.35~1 518.47 m,高出基坑底约 16.0 m。单井涌水量 800~1 200 方/日,地下水位年变幅 1.0~1.5 m。基坑降水深度按 17.0 m 考虑(至底板下约 1 m 处)。

1.3 场地工程地质条件

马滩站地貌单元原为黄河南岸河漫滩,后来经过人工改造活动,现形成 I 级阶地高度。本车站位于七里河断陷盆地中部,现场勘察显示,在工程范围内区域地质条件相对稳定,无断裂等地质构造通过。

本次勘察揭露最大深度约 30 m,根据钻孔揭露,在勘察深度范围内主要由素填土、卵石等组成,据区域地质资料,下部卵石层厚度大于 200 m。场地地层分布自上而下主要划分为 3 层,其力学指标

参考表 1 中对应建议值。

表 1 拟建场地主要地层的力学指标

岩土名称	层厚/ m	质量 密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	压缩 模量/ MPa	粘聚 力/ kPa	内摩 擦角	泊松 比	渗透 系数
素填土	8.0	1.5	8	12	16	0.38	5~10
卵石	7.0	2.2	40	8	38	0.20	60~80
卵石	>200	2.3	45	10	39	0.18	60~80

1.4 基坑支护及降水设计方案

该基坑工程开挖深度约 -25.0 m, 不宜采用复合土钉等支护形式, 地下连续墙及咬合桩的造价又较高。拟采取 $\Phi 1\ 000@1\ 400$ 钻孔灌注桩 + 4 道 $\Phi 609$ 钢管内支撑, 壁厚最大 16 mm。支撑位置分别在地下 2、8、15、22 m 处, 水平间距 3 m。施加预应力值 150、200、250 和 200 kN。桩间采用 100 mm 厚网喷混凝土。

基坑开挖施工中, 因地下水位高于基坑底面, 为保障施工环境及安全, 避免产生流砂、基坑坍塌等事故, 必须进行基坑降水。地下水位高出基坑底面 16.0 m, 含水层较厚, 伴随基坑开挖, 采用管井法坑外不间断降水。

根据兰州地区基坑降水的经验及岩土工程勘察报告, 当基坑开挖时在灌注桩间渗漏点进行堵漏、采用坑外管井井点降水(图 4)与基坑内明排疏干等多种手段相结合的方法进行降水, 确保施工时实现基坑内干作业的目标。降水计算时考虑到井点外漏高度 1.0~1.5 m, 确定降水井井深 30 m, 至基坑底面下 4 m。基坑面积约 26 682.40 m^2 , 方形基坑等效半径 92 m, 渗透系数按表 1 取 60 m/d。按均质含水层潜水非完整井考虑, 最终计算得出管井数量 42 口, 成孔直径 1 000 mm, 管井直径 800 mm, 降水井构造图见图 2。井间距约 10~15 m, 使之形成稳定的降水漏斗, 尽可能切断外围水源对基坑的补给。

基坑开挖后, 根据坑内积水情况, 在基坑坑底四周设置 500 mm(长) \times 500 mm(宽) \times 1 000 mm(深) 大小集水坑, 一般间距 20~30 m, 采用砖砌、M10 水泥砂浆抹面。同时, 顺基坑坡底四周设置 200 mm(宽) \times 300 mm(深) 大小排水明沟, 砖砌、M10 水泥砂浆抹面, 沟底坡度取 0.5%; 沟内充填 30~50 mm 干净卵石形成盲沟, 将基坑渗水引入集水坑内, 由集水坑抽至沉砂池排出。设计排水管主管采用 $\Phi 400$ mm 钢管, 支管采用 $\Phi 100$ mm 钢管。

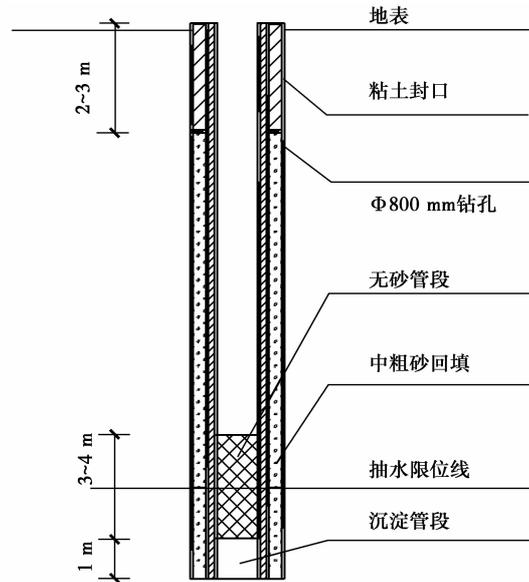


图 2 降水井构造图

2 降水试验及其监测方案

2.1 降水试验方案及试验目的

结合兰州地区特有工程地质、水文地质条件, 拟研究单井、群井降水过程中水位降深和地面的沉降变化规律。基坑平面近似为矩形, 设计试验抽水井 1 口, 观测井 3 口。观测井结构同降水井(图 2), 井深均为 30 m, 井径 800 mm, 滤水管内径 500 mm, 滤水管采用无筋混凝土滤水管, 井管外采用天然圆砾填料。整个降水试验分为基坑降水前单井抽水试验(图 3)和基坑完整降水(图 4)两步。前一组试验完成后, 要求水位恢复接近静止水位, 然后进行下一组试验。试验井和观测井平面布置见图 7。

单井抽水试验时间从 2014 年 9 月 1 日上午 10 点开始, 到 2014 年 9 月 16 日上午 10 点结束, 共历时 15 d; 各项监测为了观测停降水后的变化, 一直延续到 2014 年 9 月 30 日结束。



图 3 试验井抽水过程

完整基坑降水伴随基坑开挖不间断进行, 从 2014 年 10 月 15 日上午 10 点开始, 至 2014 年 11 月

14日上午10点,水位趋于稳定,达到降深要求,共历时30d,各项监测一直延续到2014年12月15日结束。



图4 车站深基坑降水过程

2.2 监测方案

为确保该基坑降水工程及抽水试验的安全顺利

进行和基坑周边环境的安全,准确反映坑周降水效果、水位变化及其地表变形大小,降(抽)水过程中拟对以下2项内容进行现场监测(见表2):(1)地下水位;(2)基坑边一定范围内地表的竖向沉降。支护结构位移、支撑轴力、坑周土压力等一系列其他重要的监测项目将在基坑开挖时进行。主要监测仪器有水准仪和水位计。坑周地下水位的6个监测点布置在降水井附近,垂直于基坑外边线方向布置,井间距10m;坑周地表沉降监测选择基坑东侧(试验井附近)和西侧共6处测点,沿基坑外边线45°方向布置。各监测点具体位置如图7所示。

监测也分为抽、降水两个阶段。稳定抽(降)水试验过程中,对每眼观测井的井内水位和每个沉降监测点的沉降量进行观测。井内水位用电测水位计量测,沉降监测运用水准仪。

表2 监测项目及测点布置

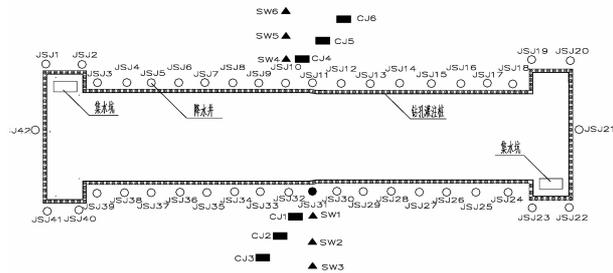
序号	监测项目	监测位置	监测精度	测点布置	仪器名称	监测频率	控制值	报警值
1	地下水位	基坑周边	1.0 m	孔间距 10 m	水位计	1次/1~3 d		
2	地表沉降	基坑周边	1.0 mm	孔间距 10 m	水准仪	1次/1~3 d	-30 mm	-25 mm

表3 潜水含水层单井抽水试验过程表

	静止水位 标高/m	抽水井降 深值/m	抽水开 始时刻	抽水结 束时刻	降深发展 时间/min	降深稳定 时间/min	水位恢复 时间/min	涌水量/ (m ³ ·d)
抽水试验	-9.0 m	-17.0 m	09-01 10:00	09-16 10:00	21 600	900	8 640	约 800
基坑降水	-9.0 m	-17.0 m	10-15 10:00	11-14 10:00	43 200	>30 d	—	约 30 000



图5 电测水位计



注: ○ 降水井 ● 试验井 ▲ 地下水位监测点 ■ 地表沉降监测点

图7 降水井及各监测点平面布置图



图6 沉降监测点布置

3 抽水试验及降水效果分析

3.1 单井抽水后坑外地下水位监测结果分析

SW1、SW2、SW3 非别为试验井 JSJ31 的水位观测井,距试验井距离分别为 10、20 和 30 m。单井抽水试验期间车站基坑尚未开挖降水,抽水试验运行方案及过程如表 3 所示。各井地下水位随时间的变化量如图 8 所示。各观测点的水位处于比较平稳

的下降状态,试验井水位最大降深至-25 m。测点 SW2 和 SW3 的水位降深总体上比测点 SW1 的降深小,这是由于测点 SW2、SW3 距离试验抽水井较远,各处水位降深达到预期效果。15 d 后随着抽水试验的结束,地下水由于各向补给,水位回升至初始水位面。

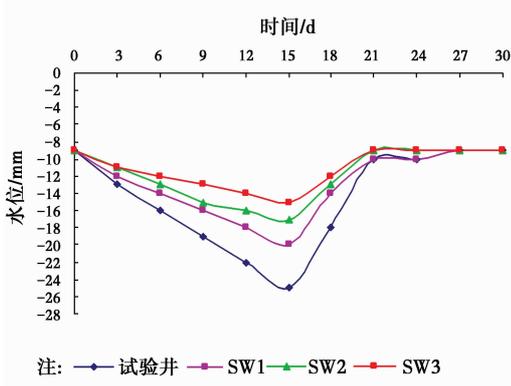


图 8 地下水水位随时间变化图

根据抽水结束后各观测井水位的监测结果,光滑连接各井水位降深,可以得到抽水试验刚结束时井剖面的降水漏斗如图 9 所示。

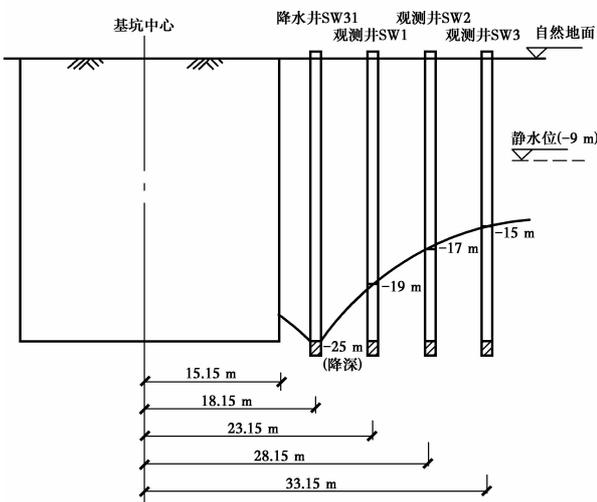


图 9 地下水水位随距离(降水漏斗)变化图

3.2 单井抽水后坑周地表沉降监测结果分析

饱和土体在平衡状态时的总应力由土颗粒相互作用产生的有效应力和孔隙水压力组成,一旦土中孔隙水流失或孔隙水压下降,土体为了平衡,土颗粒的有效应力就要增加,颗粒之间被压密,引起土体沉降。

如图 10 所示,单井抽水完成后,各监测点沉降值在-9~-3 mm,沉降从抽水开始即发生,至抽水结束时基本达到最大并趋于稳定,后期也没有恢复

迹象。该沉降的发生由下覆土体的沉降带动引起,且沉降一旦发生则很难恢复,故在地面沉降控制中需对这一现象引起足够的重视。

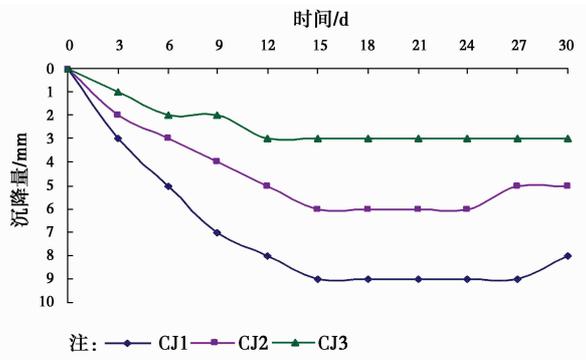


图 10 基坑东侧地表沉降曲线

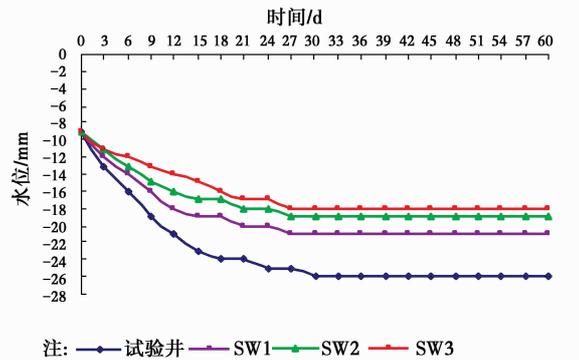


图 11 地下水水位变化图

3.3 基坑降水后坑外地下水位监测结果分析

根据现场条件,选择与试验井对称的降水井 JSJ10 作为重点观测井。坑外水位测点的水位变化在基坑围护结构为地连墙或咬合桩,或设有止水帷幕并采用坑内降水时,可以反映该处止水结构的施工质量、止水效果,是判断该处基坑是否出现漏水的重要指标。本车站深基坑采用灌注桩加内支撑围护体系,基坑降水时间约为 30 d,图 11 为地下水水位随时间变化曲线。各观测点的水位处于比较平稳的下降状态,降水井最大水位降深至-25 m。测点 SW4 的水位降深总体上比测点 SW5、SW6 大,这是由于测点 SW4 距离降水井更近。三处测点的水位降深速率明显比前面单井抽水试验时的各测点降深速率快,这是由于后期完整基坑降水工程的群井效应所致,但最终各测点降深趋于一致,这是由于基坑总涌水量不变,水位降深达到预期效果。30 d 后伴随基坑开挖,降水工程不间断进行,地下水水位面趋于稳定。

根据降水过程中各观测井水位的监测结果,同

理也可得到基坑降水结束时井剖面的降水漏斗如图12所示。

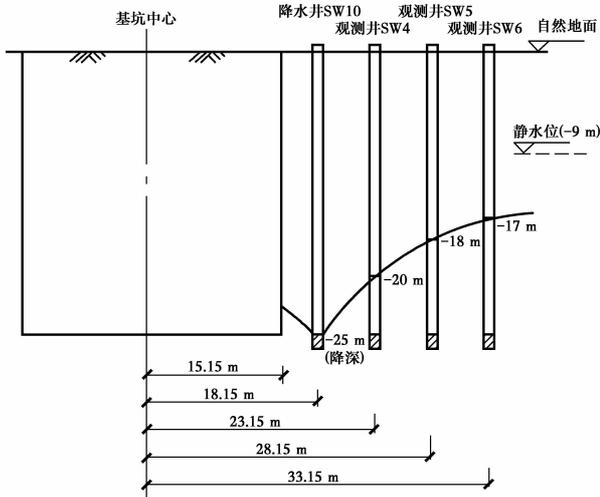


图12 地下水水位随距离(降水漏斗)变化图

3.4 基坑降水后坑周地表沉降监测结果分析

选取基坑西侧与抽水试验井沉降观测点相对称的CJ4、CJ5、CJ6三个测点,其沉降监测曲线见图13。三个测点的总体沉降值均不大,呈现出明显的非线性,沉降值随测点距离降水井距离增大而减小,能够满足基坑降水设计中关于地面最大沉降的控制要求。沉降最大值发生于坑边降水井附近的CJ4点,最大沉降值约为-10mm。监测点的沉降曲线形态类似,大致可分为4个阶段:(1)沉降量线性增长阶段;(2)沉降量和沉降速率随降水深度加深不断增加阶段,呈现出明显的非线性;(3)沉降速率递减阶段,沉降量继续增加;(4)降水最终完成后沉降趋于稳定阶段。

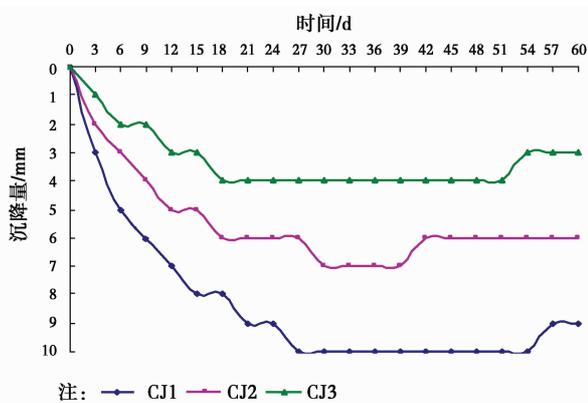


图13 基坑西侧地表沉降曲线

对比基坑两侧六个监测点分别在抽、降水结束后的沉降监测结果,如图14所示。两沉降曲线形态类似,单井抽水后沉降最大值约为-9mm,基坑降

水后约为-10mm;距离试验井30m处的CJ3(抽水)沉降量为-3mm,同样距离降水井JSJ10为30m(降水)的CJ6沉降量也为-3mm,总体上而言基坑降水后的坑周土体沉降量略大于单井抽水后的沉降量,但增量极小,降水沉降量的群井效应并不明显,二者的差值在岩土工程问题中可以忽略。

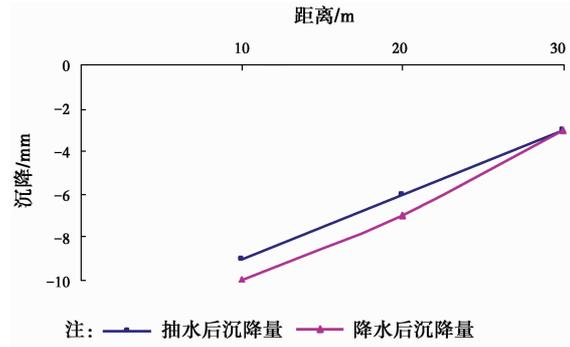


图14 抽、降水后地表沉降曲线对比

表4 距坑边不同距离地面最终沉降量

距坑边距离/m	抽水后沉降量/mm	降水后沉降量/mm
10	-9	-10
20	-6	-7
30	-3	-3

4 降水引起地面沉降的简化计算

4.1 降水引起地面沉降的规范算法

目前国内对于基坑降水引发的地面沉降主要有JGJ 120—2012《建筑基坑支护规程》和JSJ 311—2013《建筑深基坑工程施工安全技术规范》两种算法,它们都是基于分层总和法估算降水引起的沉降^[11-12]:

$$s = \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_i} H_i \quad (1)$$

式中: s/m 为降水引起的地面总沉降量; s_i/m 为第*i*计算土层的沉降量; $\Delta p_i/kPa$ 为第*i*计算土层由降水引起的附加荷载(等于孔隙水压力的负增量, $\Delta p = \Delta \sigma' = \gamma_w (H - y)$, H/m 为降水前土层的水位高度,即潜水层厚度, y/m 为水位下降后的水位高度,二者均以相对不透水层为基准); E_i/kPa 为第*i*计算土层的弹性模量(对黏土和粉土, $E_i = (1 + e_0)/a_v$, e_0 为土层的原始孔隙比; a_v/MPa^{-1} 为土层的体积压缩系数,应取自土的有效自重压力至土的有效自重压

力与附加压力之和的应力段); H_i/m 为第 i 计算土层的厚度。

对于没有越流的潜水含水层,具体参加计算的地层范围为降水目标含水层及其以上地层。上述计算中, $(H - y)$ 即基坑降水的水位降深值,由于其难以确定,规范中没有其具体的计算方法,大大限制了规范中相关公式的应用。

4.2 降落漏斗曲线方程

本文讨论当基坑位于浅部潜水层的情形。除截止水帷幕深达不透水层(坑内外无水力联系)的情

况,在坑内外进行降水时,会在坑周形成明显的降落漏斗。而稳定后的水位高度 y/m 可按照解析法或数值模拟方法计算,后者计算过程繁琐。忽略群井效应、地下水流速的垂向分量,将渗流按恒定流分析,认为流向井的潜水流是近似水平的,等水头面是共轴的圆柱面,在均质、各向同性地层中采用轴对称的假设,除井四周附近地区外,降水曲线曲率较小,符合达西定律,运用裘布依公式来处理井流问题,引入近似概念,可以得到简化的降落漏斗曲线方程,以便计算最终沉降量,降落漏斗如图 15 所示。

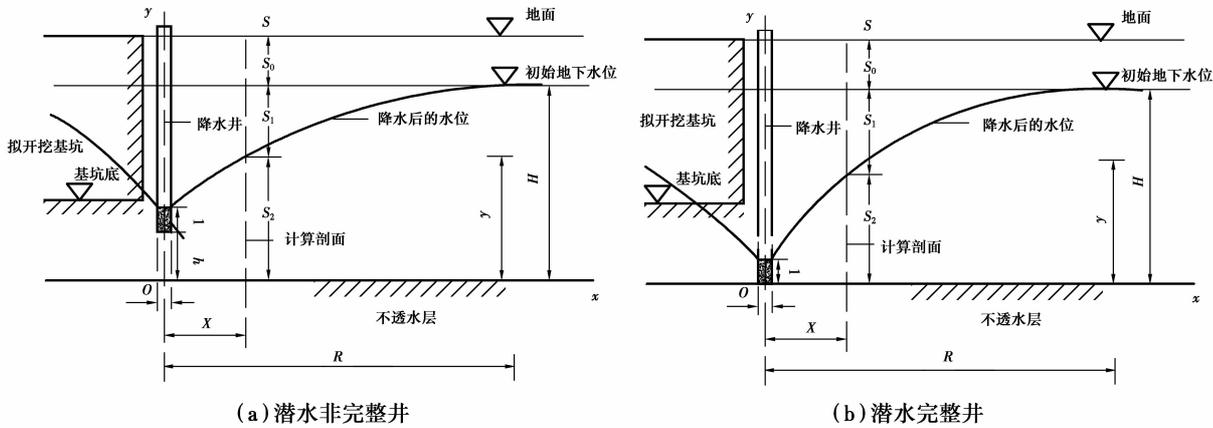


图 15 单井降水示意图

图(a)所示为潜水非完整井,图(b)为潜水完整井。图中 x/m 为水位降深 y 处某点距井轴的水平距离; r/m 为井半径; l/m 为降水井滤水管长度; h/m 为非完整井距离不透水层距离(完整井时 $h=0$); $l+h$ 为降水后井中的水位高度; 设 R/m 为降水影响半径,在其以外的区域,地下水位不受影响,即 $x=R$ 处, $y=H$ 。按照上述假设,可得潜水位分布方程(或称为浸润曲线方程)为^[13]

$$y^2 = (l+h)^2 + [H^2 - (l+h)^2] \frac{\ln \frac{x}{r}}{\ln \frac{R}{r}} \quad (2)$$

由上式计算的浸润曲线,仅在 $x > H$ 区域同实际曲线一致,在 $x < H$ 区域,特别是在井壁处,裘布依浸润曲线总是低于实际浸润曲线,称为“水跃”现象^[13],这是由于采用了裘布依假设而造成的。

4.3 坑边任意点(s)沉降量的简化计算

降水漏斗形成后,在曲线上分为干土部分、疏干部分和饱和部分,降水前后 S_0 区土体均位于水位线以上,可近似认为是干土区,其有效应力不变,不存在附加有效应力,忽略土体的压密,则 $S_0 = 0$; 在

降水过程中, S_1 区土体被疏干; S_2 区土体降水前后均位于水位面以下。本文单独计算三部分土体各自的沉降量,由公式(1)中, S_2 区土体的附加有效应力为

$$\Delta\sigma' = \gamma_w(H - y) \quad (3)$$

S_1 区疏干土的附加有效应力为^[11]

$$\Delta\sigma' = \gamma_w z \quad (4)$$

其中: z 为计算土中点至初始地下水位垂直距离。

则地面沉降量可采用规范公式(1)计算,疏干区内土层的沉降量为

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_w z}{E_i} H_i \quad (5)$$

水位降落线以下饱和土体的沉降量为

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_w(H - y)}{E_i} H_i \quad (6)$$

其中: $y = \sqrt{(l+h)^2 + [H^2 - (l+h)^2] \frac{\ln \frac{x}{r}}{\ln \frac{R}{r}}}$

所以地面总沉降量为三个区域的土体产生的沉降总和,即

$$S = S_0 + S_1 + S_2 = S_1 + S_2 \quad (7)$$

5 工程实例分析

5.1 有限元数值模拟计算模型

采用有限元软件 MIDAS/GTS 模拟计算降水产生的坑周土体沉降。依据圣维南原理, 取基坑尺寸的 2~5 倍范围作为计算区域。模型岩土体分为 3 层, 具体参数见表 1, 建立三维数值计算模型。土体为实体单元, 采用 More-Column 本构模型。模型力学边界条件底面各向位移都为零, 侧面各边界法向位移为零, 上表面(地面)为无约束的自由边界。

5.2 降水过程的实现

本次计算假定各土层的非饱和特性曲线是一样的, 图 16 给出了降水过程里土体中孔压水头的分布情况。在水头由 -9 m 降至 -25 m 的过程中, 土层固结被压密。水头降低可影响到坑边 200 m 以外的范围, 但坑周附近区域水头下降显著。

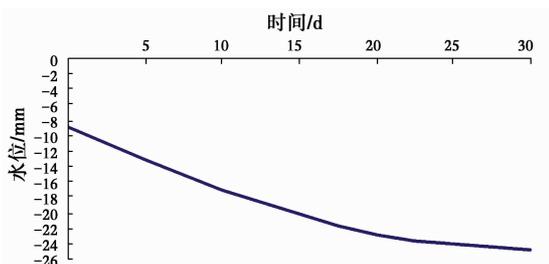


图 16 孔压水头变化

将土体定义为多孔介质, 建立流固耦合模型。为准确模拟降水过程, 采用时间函数和空间函数施加边界水头压力, 通过在坑边一定部位设定孔压的方式实现降水和渗流的目的。物理模型施加初始水头边界(水头值 -9.0 m)。时间函数可以控制降水速度, 空间函数可以控制降水井沿竖向的水头变化分布。井中水头至 30 d 时降深至 -25 m, 其后水头一直保持在井底。

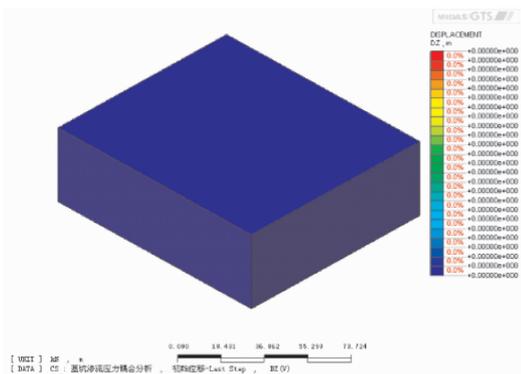


图 17 初始沉降位移云图

5.3 降水位移分析

从图 18 可以看出降水引起的地面最大沉降发生在离降水井较近的位置, 随着离井距的增大, 沉降降低较快。计算得到 10 m 及以外区域最大值为 -8.7 mm, 略小于监测值, 满足相关规范的安全要求。

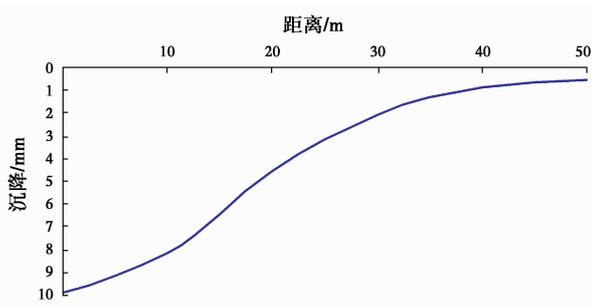


图 18 坑周地表沉降曲线

在距井边 3 倍水位降深(50 m 内)的水平距离内, 地面沉降量较为可观, 称为沉降明显影响带; 而相当于 10 倍水位降深处(50~150 m)的地面沉降量已明显降低, 占最大沉降量的 20% 左右, 故将距降水井 3~10 倍水位降深内的地带称为沉降稍有影响带; 而相当于 15 倍处的地面沉降量已降低为最大沉降的 10% 左右, 故将距离基坑边 10~15 倍水位降深范围的地带称为沉降微小影响带。此范围以外(200 m)的沉降, 则可以忽略。需要提出的一点是通常讲的降水影响范围是指降水影响半径所圈限的区域, 不能等同于降水引起的沉降影响范围。在降水开挖时一定要密切注意基坑周边可能要发生最大沉降的区域, 必要时进行监测预警, 防止工程事故的发生。

基坑周围地层移动主要表现为垂直沉降和水平移动。其中地表沉降主要由坑周土体压密造成, 是控制变形的重要指标。

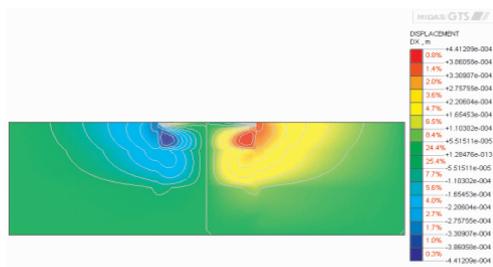


图 19 基坑降水水平位移切片云图

图 21 是井外 10 m 处 30 d 内沉降变化的过程, 由此可以计算任意时刻的沉降速度, 并估计沉降量

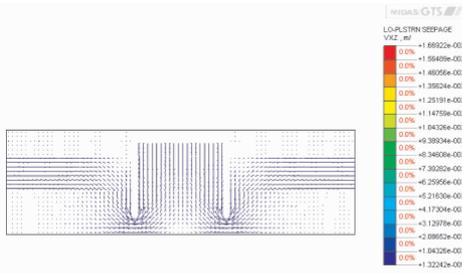


图 20 基坑降水向量

未来的变化趋势。由图可知随着降水的进行, 沉降量逐渐加大, 在 30 d 后趋于稳定。降水引起的附加有效应力与直接作用于地基土上的荷载不同。其在时间上是随着土层的疏干逐渐形成的, 最后才达到最大值。在空间上, 附加有效应力在含水层被疏干的那部分中随深度增大, 而在降水动态水位面以下的饱水含水层中则是不变的。降水过程中产生超孔隙水压力的增量绝对值并不等于有效应力的增量的绝对值, 即总应力是变化的。抽水作用加速了孔隙中水向外渗流的速度, 为排水创造了良好条件, 所以对于同样的土层来说, 若有相同大小的附加有效应力, 降水引起的变形发展过程比一般建筑地基土变形要快许多。

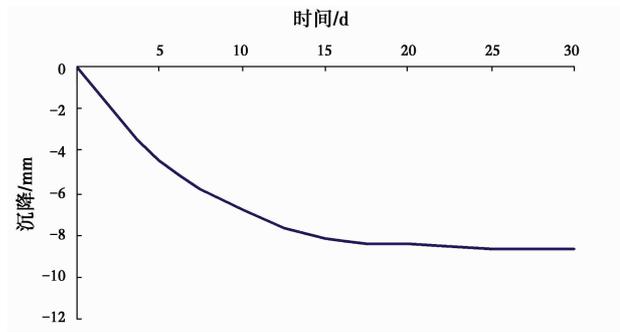


图 21 沉降变化过程

5.4 基坑降水后土体沉降量的简化计算结果

方形基坑等效半径 92 m, 根据相关资料, 影响半径 $R \approx 200$ m。根据以上参数, 将提出的计算方法(7)用 MATLAB 软件进行编程计算, 具体的沉降量计算结果如表 5 所示。

表 5 距坑边不同距离地面最终沉降量计算值

至坑边距离/m	S 点沉降值/mm
10	19.1
20	13.3
30	10.1

5.5 降水后沉降量的对比分析

经过本文提出的计算方法、数值模拟以及现场监测, 得出了在该工程实例水文地质参数背景下的坑边土体沉降值, 各沉降值对比见图 22。可以看出, 各计算值变化趋势与实际监测值较为吻合, 各计算结果合理可信。三种不同方法计算的结果存在一定差异, 数值模拟计算结果略小于监测值, 这是由于在模拟中没有考虑实际工程的时空效应、地面超载等诸多因素; 而理论算法虽然偏于保守, 计算值较大。但本文提出的简化算法能够快速便捷地估算基坑降水引起的地面沉降量, 为今后类似工程提供了参考。

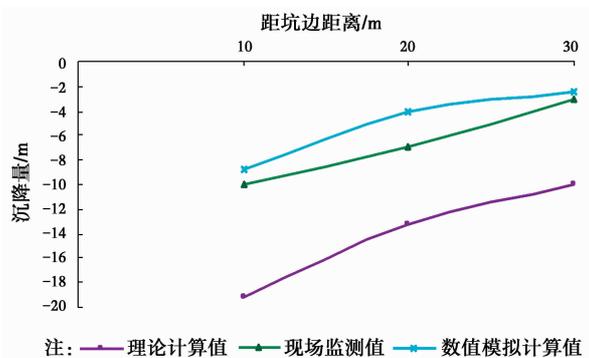


图 22 距坑边不同距离地面沉降计算值与监测值对比

6 结论

1) 在地下水位较高地区开挖基坑时, 由于含水层被切断, 在压差作用下地下水必然会不断地渗流入基坑, 令深基坑的设计及施工面临极大的难题, 处理不当将会造成基坑浸水, 在动水压力作用下还可能引起流砂、管涌和边坡失稳等工程事故。因此深基坑工程必须要具备合理的降排水方案, 本工程采用坑外管井降水结合坑内明排的设计方案合理可行。

2) 在降水工程前设计了单井抽水试验, 并完成了现场监测工作。由于基坑降水使周围土层产生漏斗状的位移场分布, 那么地层的最大沉降与其和降水井的相对位置有关。距降水井越近, 沉降也就越大, 随基坑降水的结束而逐渐趋于稳定。最终坑周地表最大沉降 -10 mm, 监测结果各变形值满足相关规范要求。沉降值和各处水位降深均略大于抽水试验监测值, 但增量很小, 在岩土工程问题中可以忽略。

3) 本文提出一种简化算法, 计算基坑降水引起坑后地面沉降, 先求得降水后地下水位的降落曲线

方程,考虑到曲线上下分为干土、疏干土及饱和土,分别求出各自的沉降值,叠加后得出最终的坑后沉降量。该公式可以较直观地计算不同降水深度、距降水井不同距离时的地面沉降量及其分布。

4)采用有限元数值分析软件对该深基坑降水全过程进行模拟计算,并与监测值及前文提到的计算值进行了对比分析。模拟值略小于监测值,是由于模拟计算中没有考虑时空效应、地面超载等因素。理论计算结果大于监测值,计算结果偏于保守。

5)基坑降水引起的地面附加沉降不仅与降水产生的降落漏斗形状、深浅及水头有关,还与地层的分布、可压缩性、压缩层厚度等因素有关。另外抽水的时间长短、抽水强度、抽水的季节、基坑场地的水文地质边界等因素又会影响到降落漏斗的形态。在实际工程中,地表沉降还受到群井效应、坑边超载、施工开挖、围护结构约束等诸多因素的影响,故而寻求降水引起周围地表沉降的精确解仍很困难,是需要进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] 唐业清. 基坑工程事故分析与处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] Lewis R W, Schrefler B. A fully coupled consolidation model of the subsidence of Venice [J]. Water Resource Research, 1978, 14(2):465-473.
- [3] 叶为民, 赵少阳, 陈永贵, 等. 二元结构土层分布区工程降水诱发地面沉降变形研究[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2012, 43(11): 4446-4450.
- [4] 原华, 张庆贺, 张建伟. 侧摩阻力约束下降水引起的地面沉降估算方法[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(8): 1329-1334.
- [5] 王建秀, 吴林高, 朱雁飞, 等. 地铁车站深基坑降水诱发沉降机制及计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1010-1019.
- [6] 施成华, 彭立敏. 基坑开挖及降水引起的地表沉降预测[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 117-121.
- [7] 李琳, 张建根, 杨敏. 疏干降水引起坑后地面沉降的一种简化计算方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(Sup): 306-309.
- [8] 冯志焱, 刘林. 黄土场地基坑大降深降水试验研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2010, 38(9): 192-199.
- [9] 杨敏, 卢俊义. 上海地区深基坑周围地面沉降特点及其预测[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(2): 194-199.
- [10] 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.
- [11] JSJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] JSJ 311—2013 建筑深基坑工程施工安全技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
- [13] 陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1999.

(编辑 周沫)