

文章编号:1006-2106(2014)12-0023-05

水井抽水引起地基沉降影响范围探讨^{*}

李国和^{1**} 张建民² 张 嘎² 黄大中¹

(1. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142; 2. 清华大学, 北京 100084)

摘要:研究目的:地下水开采是引发地面沉降的主要原因,且集中抽水引起的不均匀沉降会对高速铁路工程造成严重危害。因此,研究水井抽水引起地基变形过程,合理估算地基沉降范围,用以指导地面沉降区内的高速铁路选线及采取可靠的防治措施。

研究结论:(1)基于离心模型试验结果,采用数值模拟方法模拟分析了不同深度条件下水井抽水引起地基沉降的规律和影响范围,模拟结果表明靠近抽水位置区域的地基变形大于远离水抽水位置区域,排水引起地基沉降量与其不均匀程度随着排水次数和沉降的增大有逐渐减小的趋势;(2)不同深度抽水时引起地面沉降过程及影响范围有所不同,浅层抽水时不均匀沉降较为严重,影响范围较小,深层抽水时地基沉降较平缓,但影响范围较大;(3)承压水单井稳定流抽水引起地基变形影响范围与含水层渗透系数负相关,与开采量正相关,若控制地下水开采量,其变形影响范围是可以控制的,一般不超过 1 000 m;(4)当高速铁路经过地面沉降易发区时,需采取绕避集中抽水区域、封井、禁采、限采及控制地下水开采量等多重措施;(5)该研究成果可指导高速铁路选线和铁路沿线地面沉降防治等领域。

关键词:抽水;地基变形;离心模型试验;数值模拟;影响范围

中图分类号:P642.5 文献标识码:A

Exploration on the Influence Scope of Ground Settlement due to Pumping Groundwater

LI Guo - he¹, ZHANG Jian - min², ZHANG Ga², HUANG Da - zhong¹

(1. The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Research purposes: Groundwater exploitation is the main cause of land subsidence, and the uneven settlement caused by centralized pumping is serious harm to high-speed railway projects. In this paper, the process of foundation deformation caused by the wells pumping is studied, and the extent of ground settlement is estimated reasonably, aiming to guide the railway line selection and take reliable preventive measures.

Research conclusions: (1) Based on the results of centrifuge model tests, numerical simulation method was established accordingly to simulate the behavior and extension of ground settlement due to exploiting groundwater at different depth. The results show that the deformation of soils decreases with increasing distance from the well. The settlements and their difference due to pumping groundwater decrease with increasing number of exploiting cycles. (2) At the center district of land subsidence and vicinity of the well, the asymmetry subsidence is more serious with exploiting groundwater at a shallow depth, and its extent is narrower than that exploiting groundwater more deeply. (3) The influence extent of foundation deformation caused by steady flow pumping of the single well in confined water is negatively related to the permeability coefficient and positively related to the production, then its deformation influence range can be controlled if

^{*} 收稿日期:2014-07-29

^{**} 作者简介:李国和,1967 年出生,男,教授级高级工程师。

the pumping rate has been effectively controlled, and it is generally not more than 1000m. (4) When the high-speed railway through the region of land subsidence prone to take around, the multiple measures should be taken to avoid uneven settlement, such as bypassing centralized pumping region, closing well, limiting the production and controlling the amount of groundwater exploitation. (5) The research results can provide references for line selection of high-speed railway and subsidence control in land subsidence region.

Key words: pumping groundwater; ground settlement; centrifuge model test; numerical simulation; influence scope

区域地面沉降是一种缓变型地质灾害,其一般表现为大范围平缓下沉,但在新增井点及超量开采的水井附近,由集中抽水引起的地表不均匀变形明显加剧,对处于变形影响范围内的高速铁路工程造成严重危害^[1]。目前,抽水作用引起地基变形的研究主要采用现场监测、室内试验和理论计算等手段,对于水井抽水引起地基变形量计算研究较多,而对水井抽水引起的地基变形过程及变形范围则缺乏研究。因此,研究水井抽水引起地基变形过程,合理估算地基变形范围,对指导铁路选线及采取可靠的防范措施具有重要的指导意义。

1 水井抽水导致地基变形的机理分析

水井抽水引起地基变形主要存在含水层压密和弱透水层固结两种不同的效应和过程,其机理也有很大的区别。

抽水引起土体有效应力的增加,主要归结为两种作用过程:一是,地下水位的下降改变了土粒间的浮托力,导致土体有效应力由浮容重变为湿容重而增加;二是,当水头压力改变,在土层中产生水头梯度,由此产生的渗透压力导致土的有效应力的增加。对于黏性土来说,在抽水过程中,黏土边介水头压力的降低,破坏了土体内孔隙水压力的平衡状态,这时土中产生了水力梯度,黏土层各点水分便向外排出,土体即固结压缩^[2]。由于黏土的弱透水性,固结变形将随时间的延续缓慢进行。

抽水固结的排水边介条件视抽水条件而定,若在下方砂层抽水则下方为透水面,顶面砂层可看作不透水,固结即由下方先开始,其孔隙水压力沿深度分布的规律与地表加同等荷载是截然不同的。此外,抽水过程中,土中流出水量除包括按渗透固结规律由孔隙排出的水分外,还包括由于水头差引起的定常流动。定常流动不引起孔隙水压力变化,但可能引起土骨架位置的调整,而成为压密土体的附加因素。

在抽水引起水位下降过程中,在砂类土比例相对较大的地区,压缩层变形与地下水位线性相关明显,并反映出一定的弹性特征。此时,沉降随水位变化随时发生,下降沉降量可采用式(1)计算:

$$S_{\infty} = \frac{\Delta P \cdot H}{E} \quad (1)$$

式中 S_{∞} ——土层最终沉降量(mm);

ΔP ——由于地下水位变化施加于土层上的平均荷载(MPa);

H ——计算土层的厚度(m);

E ——土层的压缩模量(MPa)。

上式中地面沉降量与地下水位下降引起的附加应力变化线形相关。

根据近年来的研究结果,地面沉降主要由弱透水层的变形引起^[3-5],而对弱透水层固结压缩效应的研究就变得更加重要。土层固结原理可解释为随着黏土边界水头压力的降低,破坏了土体内孔隙水压力的平衡状态,这时土中产生了水力梯度,黏土层各点水分便向下排出,土体即固结压缩。由于黏土的弱透水性,固结变形将随时间的延续缓慢进行。对于黏性土固结计算则相对复杂,沉降计算一般采用 $e \sim \log p$ 曲线计算。

在排水固结过程中,黏性土固结程度和时间效应可用固结度来表示,其定义为 $U = S_t/S$,其中 S_t 为某一时刻地基的沉降量, S 为地基的最终沉降量。在实际应用中固结度可简化为 $U_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-N}$,其中 $N = \frac{\pi^2}{4} T_v = \frac{\pi^2 C_v t}{4H^2}$,可进一步改写为如下形式:

$$U_t = 1 - Ae^{-B \cdot t} \quad (2)$$

相应时间 t 的沉降量:

$$S_t = (1 - Ae^{-B \cdot t})S \quad (3)$$

式中 S ——基础的最终沉降量;

U_t ——任意时间 t 时的固结度;

A 、 B ——指数方程的两个参数。

在单向渗流固结理论中, A 是常数, B 值与固结系数、排水距离及土层厚度等因素有关。表明弱透水层的压缩不仅与孔压变化及本身土性有关,还与固结时间有关。

对于一个含水层与弱透水层相间的多层地基来说,地下水的开采过程实际上是在抽水井的某个特定深度段给含水砂层施加一个负压,使含水层的该井段与周围出现压力差,周围土层中的水在这种压力差的

驱使下向井运移。这样抽水首先在含水砂层中形成一个测压水头降落漏斗,随着抽水过程的持续,漏斗区的测压水头持续下降,影响范围持续扩大,相邻各弱透水层中的孔隙水将不断向含水砂层中释放,孔隙水压力也随之降低。孔隙水压力的降低转化为有效应力的增加,因此含水层发生压密及临近弱透水层的固结,由此导致地面沉降^[6]。在抽水引起地基变形过程中,含水层变形随水位变化瞬时发生,而弱透水层存在一定的滞后效应。

为了研究分析水井抽水引起地基变形过程及特征,课题组进行了离心模型试验及数值计算。

2 抽水深度对地基变形过程及范围的影响

根据离心模型试验中的相似准则,进行将地基沉降还原到离心模型试验条件,基于商业有限元计算软件 Abaqus 对离心模型试验进行了数值模拟计算。运用有限单元和有限差分方法离散二维 Biot 静力固结方程,将地基抽水固结沉降问题简化为平面应变问题,模型采用四节点实体单元剖分。土的本构模型采用修正剑桥模型来模拟,剑桥模型的试验参数通过三轴不排水试验以及土的侧限试验获得,土的渗透系数由渗透试验获得。结果表明该数值模拟方法能较好地再现基于离心模型试验得出的水井抽水引起地基中孔压与沉降发展的规律^[1]。

将验证后的数值计算方法用于实际工程中的计算。选取北京朝阳区大鲁店 204 号钻孔勘探资料,将该地区地层简化为弱透水层与含水层相间深 270 m 的地层型式。计算参数主要依据现场勘探资料,对于部分没有的土层参数,参考资料和工程类比确定。参数值如表 1 所示。

表 1 朝阳区各土层土体计算参考参数

土层编号	土层性质	层厚/m	弹性模量/MPa	初始孔隙比	含水量/%
L1	黏质粉土	20	10~20	0.9	31
L2	粉细砂	50	20~26	0.812	28
L3	粉质黏土	40	21~33	0.7	25
L4	粉质砂土	50	30~35	0.7	25
L5	粉质黏土	45	30~35	0.7	25
L6	粉细砂	50	35~40	0.7	25
L7	粉质黏土	15	35~50	0.7	25

数值模拟中将地基简化为水平成层的多层地基,将地基引起的不均匀沉降简化为平面应变问题。根据其对称性,采用一半地基进行计算。计算将主要对比

分析从不同深度含水层(L6、L4、L2)底部采用相同抽水速率抽水 1 d 引起地基沉降规律。

在计算中,当抽水时,会在抽水点设置一个固定的孔压边界条件用来模拟抽水,这个固定的孔压大小会影响抽水的速率,考虑到三个不同抽水点的高程不同,为了使得三个抽水点的抽水速率相同以方便对比,因此将 L6 的抽水点孔压设置为 0, L4 抽水点的孔压设置为 -0.95 MPa, L2 抽水点孔压设置为 -1.85 MPa,如表 2 所示。

表 2 计算方案

抽水点	孔压边界条件/MPa	抽水时间/d
L6 底部	0	3
L4 底部	0.95	3
L2 底部	1.85	3

图 1~图 4 给出了各计算方案不同时间段下地基竖向位移等值线与孔压等值线示意。可以看出,当抽水井开始从含水层抽水时,抽水点的孔压开始下降,地面也开始沉降,第 1 天内孔压降低与地面沉降发展的最为迅速,而第 2 天与第 3 天地基孔压基本稳定,地基沉降缓慢发展。从图 1 可以看出,当从 L6 含水层抽水时,刚开始地基中沉降最大的地方并不是地基表面,而是地基内抽水点上方的某一位置。随着沉降的逐渐发展,地基中沉降最大的点逐渐靠近地面,这是由于地基的整体性,地面沉降相对于地基沉降有个延迟响应。对比三种方案下地基沉降的特点,可以看出,当以相同速率抽水时,抽水点越靠近地面地基沉降量越大,而靠近抽水井的区域不均匀沉降程度也越大,但是地面沉降影响的区域要减小很多。

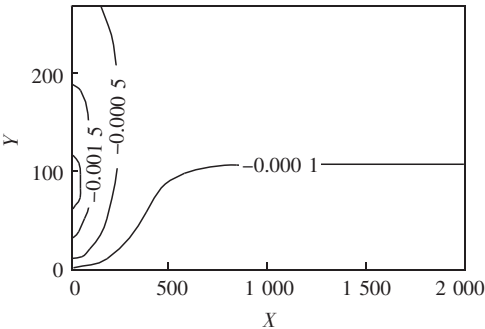


图 1 L6 抽水 1 h 后地基竖向位移等值线(单位:m)

表 3 给出了抽水过程中各方案的主要计算结果特征值。可以看出,抽水的第 1 天地基中沉降发展最大,后两天沉降缓慢发展。当从较深的 L6 含水层抽水时,地基中最大的沉降量并不是发生在抽水井处的地面,而是在地基的某一深度,而当从较浅的 L2 含水层抽水时,地基中的最大沉降发生在抽水井所在的地面处。

表 3 抽水过程中方案主要计算结果统计表 (单位:mm)

沉降量 抽水时间	地基最大沉降量				抽水井处地面沉降量			
	1 h 后	1 d 后	2 d 后	3 d 后	1 h 后	1 d 后	2 d 后	3 d 后
L6	3	8.9	11.7	13.3	0.68	6	9.46	12.6
L4	4.19	13.3	15.6	18.8	1.97	10.7	15.3	18.8
L2	3.12	16	18.5	19.9	3.12	16	18.5	19.9

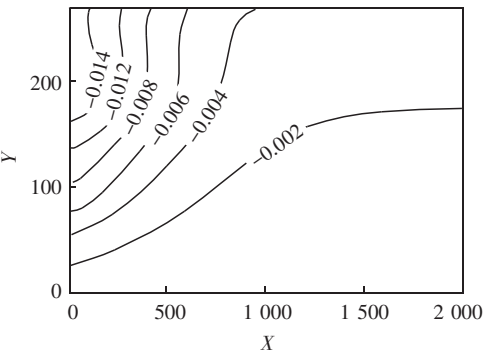


图 2 L6 抽水 3 d 后地基竖向等值线(单位:m)

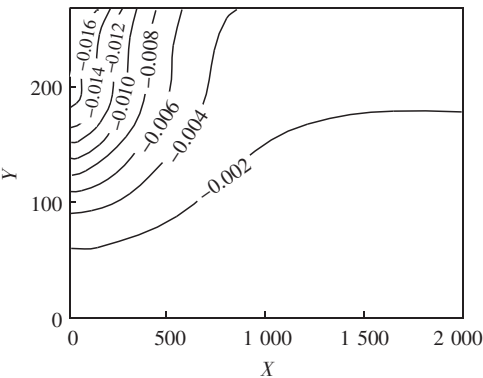


图 3 L4 抽水 3 d 后地基竖向位移等值线(单位:m)

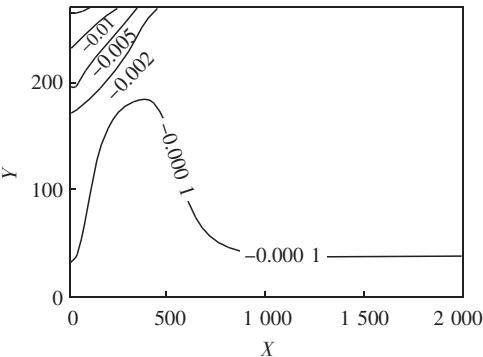


图 4 L2 抽水 3 d 后地基竖向位移等值线(单位:m)

表 4 给出了抽水 3 d 后三个计算方案中各土层厚度变化值,厚度变化取各土层地基最左侧上下两点的竖向位移差值。可以看出,当从不同的含水层抽水时,各土层对沉降的贡献有所不同。进行抽水的含水层以及与该含水层相邻的两个弱透水层对沉降贡献较大。

需要指出,当从 L6 含水层抽水时,由于抽水点上部地基的整体性,上部土层 L2 发生了膨胀,这说明这时抽水点上的较远的土层发生了跟随变形。

表 4 各计算方案抽水 3 d 后各土层厚度变化 (压缩为正,膨胀为负) (单位:mm)

抽水层	从 L6 抽水	从 L4 抽水	从 L2 抽水
L1	0.1	1.8	6.5
L2	-0.8	0.1	7.36
L3	1.4	3.4	4.43
L4	3.49	7.27	0.922
L5	3.61	4.03	0.476
L6	3.52	1.632	0.157 7
L7	1.28	0.568	0.054 3

上述分析表明:对于靠近抽水井附近区域,从较浅含水层抽水导致的地表变形相对敏感,不均匀沉降程度较大,但变形范围较小;从较深含水层抽水时,地表变形有一定滞后,随着抽水时间增长,首先在井点附近显现,并逐步向外围扩展,变形范围相对较大。

3 抽水引起地基变形的影响范围

以上模拟结果表明,在相同的抽水速率条件下,水井深度越大,抽水时间越长,其影响范围越大,最终稳定在一定范围之内。水井不同深度抽水条件下的影响范围如表 5 所示。

表 5 不同深度抽水时地基变形影响范围

抽水点	抽水深度/m	抽水时间/d	影响范围/m
L6 底部	255	3	950
L4 底部	160	3	850
L2 底部	70	3	400

从表 5 可见,随着抽水深度的加深,抽水引起的基础变形范围相应扩大,但抽水深度与地基变形范围并非线性关系,至深层时扩展减缓,基本限定在 1 000 m 范围以内。根据地震部门在天津蓟县地震台进行的地下水位对定点形变观测干扰的抽水实验结果^[7-8],抽水所带来的干扰在时间过程上与井孔水位变化同步,井孔距形变观测点越远,抽水对形变观测的干扰和影响就越小,在 900 m 之外影响已经十分微弱。这与我们上述所确定深井抽水引起地基变形的影响半径基本吻合。

目前,对于水井抽水引起的地基变形范围尚无专门的计算公式,鉴于水井抽水引起的地基变形主要由水位变化引起,所以在实际计算中可以采用影响半径来初步估算地基变形影响范围。由于水井主要抽取较深层地下水,一般属于微承压水和承压水,可采用承压水井稳定流裘布依公式计算影响半径:

$$\lg R = \frac{2.73KM_s}{Q} + \lg r \quad (4)$$

式中 R ——影响半径(m);

K ——含水层渗透系数(m/d);

s ——水位降深(m);

Q ——流量(m^3/d);

r ——水井半径(m)。

当缺乏监测资料时,影响半径也可由下式计算:

$$R = 10s \sqrt{K} \quad (5)$$

式中符号同上。

以华北平原为例,中东部地区浅层地下水开采主要为农业灌溉,采深多在 30 ~ 50 m,少数达到 80 m。地下水含水层多以粉砂为主,局部有细砂层,该类含水层的渗透系数 K 约为 1.0 ~ 5.0 m/d。根据地下水实际开采情况,在水位降深 10 m 的条件下,单井开采的影响范围大约为 100 ~ 200 m。若取综合渗透系数为 3.0 m/d,当水位降深要接近 23 m 才可能使影响范围扩大到 400 m。深层地下水开采的开采深度多在 200 ~ 400 m,少数达 500 m,地下水含水层多以粉、细砂层为主,局部夹有中砂,渗透系数 K 约为 2.0 ~ 5.0 m/d。根据地下水实际开采情况,不考虑群井效应,在水位下降 30 ~ 40 m 的条件下,单井开采的影响范围大约为 400 ~ 900 m,与模拟结果近似。

对于多数开采井,已知抽水层位水文地质条件和单井开采量,而很难获得水位降深数据。此时,可通过联立计算公式(4)和(5),消去水位降深项 s ,来对影响半径进行计算。以华北平原一区域内地热水源井为例,计算参数分别为 $r = 0.3$ m, $M = 300$ m, Q 取 3 000 m^3/d 、4 000 m^3/d 、5 000 m^3/d , k 取 0.1 m/d、0.5 m/d、1 m/d、5 m/d、10 m/d,可以求得影响半径的取值范围如表 6 所示。

表 6 不同渗透系数和抽水量下的影响半径 R

R/m $k/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$ $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	0.1	0.5	1	5	10
3 000	356.1	137.9	90.9	33.6	21.5
4 000	497.2	194.2	128.5	48.2	31.1
5 000	643.1	252.6	167.7	63.5	41.3

从表 6 可看出,对于承压水井稳定流抽水,若单日

抽水量不变,随着渗透系数的增大,影响半径减小;而对于同一渗透系数含水层,随着抽水量的增加,影响半径逐渐增大。根据大量的调查资料,在容易引发地面沉降的区域内,含水层多以粉细砂为主,渗透系数为 1.0 ~ 8.0 m/d,若单井抽水水量控制在 5 000 m^3/d 以内,其影响半径不超过 200 m。可见,在地面沉降区内,对于单个水井,若不超量开采,其影响范围是可以得到有效控制的。

4 结论

(1) 试验及模拟结果表明,在地下水开采过程中,在井点周围的地基出现明显的孔隙水压力和变形的不均匀分布,靠近抽水位置区域的地基变形大于远离抽水位置区域。在抽水初期的地面沉降发展迅速,随着排水次数增加有逐渐减弱的趋势。在井点附近,不均匀沉降最为严重。

(2) 浅层抽水引起的地基沉降影响的范围虽小,但造成的不均匀沉降较强烈,而深层抽水引起的地基沉降相对较平缓,但影响范围相对较大。因此,在一些集中开采区域及抽水井附近,由于开采地下水造成局部的水位快速下降会引起局部的地面下沉,特别是浅层地下水的开采引起的局部不均匀沉降比深层地下水开采更严重一些。

(3) 根据计算及数值模拟结果,对于承压水井稳定流,在相同的抽水速率条件下,水井深度越大,抽水时间越长,其影响范围越大,最终稳定在一定范围之内,一般不会大于 1 000 m;若单日抽水量不变,随着渗透系数的增大,影响半径减小,而对于同一渗透系数含水层,随着抽水量的增加,影响半径逐渐增大。对于群井抽水,其影响范围会有所增加,需采用地下水渗流计算软件(如 MODFLOU 等)进行专门计算。

(4) 对于经过地面沉降易发区的高速铁路而言,在铁路选线中应绕避集中抽水点及群井集中抽水区域,绕避距离根据水文地质条件及渗透系数、开采量等参数计算确定;在铁路两侧变形影响范围内不允许有新增井点,对铁路有影响的既有井点采取封井及禁采措施;对变形影响范围以外的深井井点及水源地要限采及合理控制地下水开采量。合理采用上述多重措施才能达到科学有效地控制由于水井集中抽水而造成的不均匀沉降问题。

参考文献:

- [1] 李国和,张建民,张嘎,等. 浅层地下水开采对高速铁路工程的影响及对策[J]. 铁道工程学报,2007(12):23-27.

(下转第 32 页 To P. 32)