

抽水地面沉降试验初探

吕伟华, 王 非

(东南大学交通学院, 南京 210096)

摘 要: 本文通过室内模型箱试验研究抽水引起的地面沉降。由观测数据的处理和分析得到以下一些结论: 过量抽取地下水是引起地面沉降的主要原因, 回灌只能作为一种阻滞由于过量抽水导致地面沉降的手段; 含水层的压密与弱透水层的压缩都是地面沉降产生的原因, 其中含水层的压缩变形在总沉降中占有重要的比重, 不能只注重弱透水层的变形而忽略含水层压缩变形对地面总沉降的贡献; 研究证实了水位降深与地面沉降之间存在双线性关系并推导了其关系表达式; 试验中含水层厚度是弱透水层厚度的 6~9 倍, 对第一含水层抽水量为该层含水量的 8% 时, 得到了各压缩层占总沉降的比重。

关键词: 抽水; 地面沉降; 含水层; 弱透水层

作者简介: 吕伟华(1983—), 男, 江苏溧阳人, 东南大学岩土工程专业硕士在读。E-mail: whL062273 @yahoo.com.cn。

0 引 言

据有关部门估计, 上海地面每沉降 1 mm 就会造成 1 000 万元的经济损失。40 年来, 上海因地面沉降造成的经济损失达 2 900 亿元。苏锡常地区近 30 年来强烈开采地下水引发的地面沉降灾害极为严重, 地面沉降也造成了数百亿元的损失。由于地面沉降, 天津塘沽沉降中心的高程已不足 1 m, 现有防潮堤不足以抵挡海水, 1992 年 9 月 1 日潮位达 5.93 m^[1]。其他国家和地区的地面沉降问题也是十分严重。世界上发生地面沉降最多的是日本; 最著名的沉降史例是墨西哥城和长滩市, 其最大沉降量达 9 m 多; 意大利的威尼斯和拉文纳也是地面沉降的受害地区; 美国的地面沉降大部分位于西部和南部沿海城市^[2]。

因此, 一方面要严格控制地下水资源的开发利用, 同时怎样有效合理地预测抽水引起地面沉降的沉降量的研究显得尤为重要, 因为它可以为城市建设和城市建筑的保护提供依据, 特别是在经济发达地区能够减少不必要的损失。

1 抽水沉降机理

由于抽水井从承压含水层中抽水时含水层弹性释水, 其压力水头降低, 在总应力不变的情况下, 粒间应力(即有效应力)增加^[3~5]。可以用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} p &= p' + u_w \\ p &= (p' + \Delta u_w) + (u_w - \Delta u_w) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, p 为总应力; p' 为有效应力; u_w 为孔隙水压力。根据 Terzaghi 固结理论, 有效应力的增加伴随着孔隙水的逸出, 压力由孔隙水转移至土颗粒骨架, 骨架发生错动被挤密, 孔隙体积不断缩小, 导致弱透水层和含水层的压缩变形。

抽水时承压含水层中的水不断释去, 其压力值减小, 因此水头降低, 沿抽水井向周围产生水力坡降并且逐渐连续递减至弱透水层与含水层界面, 由于弱透水层的渗透性(渗透系数含水层为 10^{-3} cm/s, 弱透水层为 10^{-7} cm/s)非常小, 所以在含水层与弱透水层界面产生水力梯度力, 弱透水层中的孔隙水在水力梯度力的作用下向含水层补给。如图 1 所示(Δh_1 为水头差, t 为时间, H 为

弱透水层厚度, Z 为深度, p' 为有效应力) 由于渗透系数的差异, 弱透水层的水不能很快排出, 而含水层的静水头压力不断降低, 所以在弱透水层中产生相对含水层的超静孔隙水压力, 弱透水层随渗透释水(向含水层补给)过程超静空隙水压力不断消散而发生固结变形。由于弱透水层的黏性土颗粒粒径极小而孔隙细密导致渗透性非常小, 如果土层很厚, 排水路径将会很长, 那么它的变形发展需要长达几年甚至几十年时间, 这就是为什么很多地面沉降区域虽然采取了控制抽取地下水或者是回灌等措施后, 沉降仍然一直持续发生的原因。而且弱透水层的这一变形过程并不是随着水位降深的发生立刻完成, 一般有一个很长的时间效应, 也就是说弱透水层的变形总是滞后于抽水水位降。

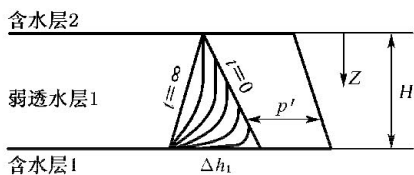


图1 弱透水层超静孔压消散示意图

含水层的压密是含水层中砂粒的位置调整, 也有砂颗粒骨架的压密变形, 因为含水层的渗透性很好, 所以一般认为^[6]其压密变形在抽水结束后会很快完成, 且抽水引起的地面沉降主要为弱透水层中细粒土产生的不可恢复的塑性变形, 含水层粗粒土产生的弹性压密变形所占的比例很小。然而有学者^[7]提出含水层的压缩变形与弱透水层的黏土、粉质黏土相似, 均表现出明显的变形滞后现象, 即次固结(蠕变)特性, 而且承压含水砂层的压缩变形量不容忽视。

注水膨胀变化过程类似于抽水后压密的应力变化规律^[8], 在此不赘述。对整个含水层系统而言, 实际上水位的下降和上升变化等效于对土层的加载和卸载, 导致土层发生了压缩和回弹^[9, 10]。

2 试验设计

2.1 试验目的

目前很多抽水地面沉降的研究都是基于原位抽水井的大量统计数据, 试验场的很多因素又无法人为控制, 不确定性太多。室内模型试验研究抽水地面沉降问题比较鲜见。根据多年原位抽水

井的统计资料分析, 国外已经有很多学者指出抽水水位降深与地面沉降之间存在双线性关系^[11], 目前国内的很多城市抽水地面沉降研究成果也有体现^[12]。

如图2所示, 如果知道抽水量, 得到水位降深, 只要确定这种线性关系的斜率就可以预测地面沉降。但是影响这种线性关系的因素比较多, 如抽水量(Q), 压缩层的厚度(H), 渗透性(K), 抽水时间(T), 季节性水位波动(Ψ), 土层的应力历史(Σ)等等。如果能得到下列关系式:

$$S = F(Q, H, K, T, \Psi, \Sigma) \cdot \Delta W + B \quad (2)$$

式中, S 为沉降值, F 为影响因素的函数, ΔW 为水位降深, B 为沉降修正值, 那么预测沉降就很容易了。确定这么多影响的因素非常困难, 不过所有这些影响因素中抽水量(抽水时间)是可以人为改变设定的。

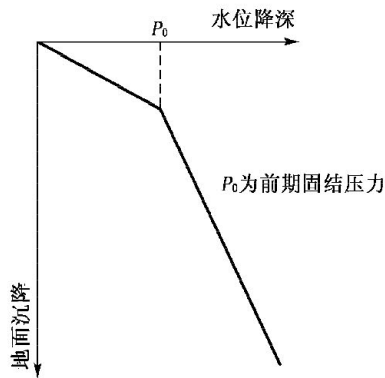


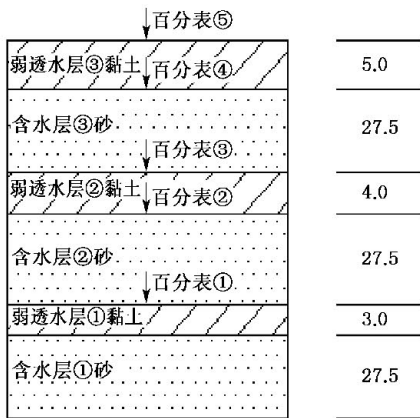
图2 水位降深与地面沉降关系曲线

本文基于以上思想试用室内模型箱试验研究某含水层系统在特定抽水量条件下的地面沉降问题, 定量分析在抽水量及抽水速率一定情况下沉降变化特性, 验证抽水水位降与地面沉降的线性关系及比较含水层弱透水层的变形比例关系。

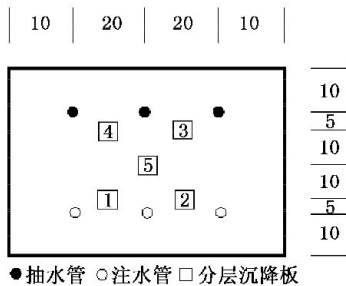
2.2 试验内容

如图3所示按照一定比例尺寸设计试验模型箱(60 cm×50 cm×100 cm)。在模型箱内内壁均匀地涂一层凡士林做隔水边界, 选择均匀含水层砂料、弱透水层土料, 按照含水层弱透水层交替(摊铺干砂密度约为 1.6 g/cm³, 土层摊铺压实后密度约为 1.9 g/cm³, 其中含水量 30%) 设置整个含水层系统, 含水层与弱透水层间用滤纸隔开。参照非完整井^[13]埋设抽水管、注水管(PVC管、有机玻璃管)以及分层沉降板。水管和沉降杆与土

层之间用 PVC 套管包扎塑料薄膜隔开,防止在抽水或注水的时候在水力作用下发生泥沙运移及杆与土层间被粘死或漏水。抽水注水管底距含水层底 5 cm,整个含水层系统最上面用土工布覆盖保湿。



(a) 平面图



(b) 剖面图

图 3 模型示意图(单位:cm)

含水层组铺设完成后实际注水总量为 98 150 mL,至每层水位管水位到达顶层弱透水层并与之齐平为止。全部注水完成且沉降稳定后(百分表变化小于 0.02/24 h),对第一含水层抽水,其抽水量为 4 327 mL,约为该层含水量的 8%。

如图 4 所示为分 5 次抽水注水的时程曲线。前 4 次抽水每次抽水量约为 900 mL,在抽水的同时观测水位降深并同步记录各沉降板沉降,前 4 次抽水频率为 1 次/24 h,每次抽水时间约为 7 h,

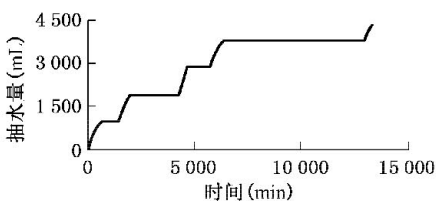


图 4 抽水时程曲线

抽水速率约为 1.6 mL/min。第 5 次抽水距离第 4 次抽水间隔约为 4 d,抽水量为 537 mL。

2.3 试验结果与讨论分析

(1) 水位降地面沉降

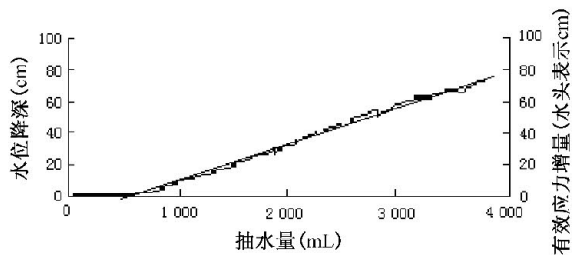


图 5 抽水量、水位降深与有效应力增量

如图 5 所示,在抽水(倒虹吸)初始阶段,水位降深不明显,随着抽水量的增加,水位以一定的坡度下降,最后直至抽水管不能连续抽水,水位降深达到临界值 76 cm 左右。得到抽水速率约为 1.6 mL/min 条件下的抽水量水位降深表达式:

$$\Delta W_{1.6} = 0.0214 \cdot Q - 8.8489 \quad (3)$$

式中, ΔW 为水位降深(cm); Q 为抽水量(mL)。

图 6 所示在水位降深约为 26 cm 时水位降深地面沉降曲线出现转折,如果把单位水位降深之地面沉降定义为 K ,即直线的斜率。其在水位降深 26 cm 之前是一常数,在水位降深 26 cm 之后为另一常数。根据 Thomas L. Holzerd 的观点,水位降深与地面沉降之间存在线性关系,在土中有效应力未超过前期固结压力时和超过前期压力后,两者的关系分别为两条直线,可以用“双直线”来刻画^[14]。在本试验中第一含水层的前期固结压力最大应该是 2.6 kPa 左右。试验含水层系统填筑好注水沉降稳定后,计算上覆荷载最大约为 3.1 kPa,如果考虑模型箱边壁摩擦等因素影响,

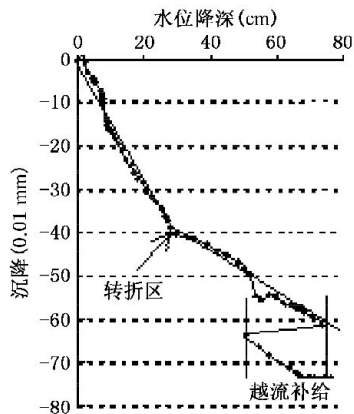


图 6 水位降深沉降曲线

这一结果与抽水试验所得到的前期固结压力值已经相当接近,所以本试验不但证明线性关系的存在,同时也可以得到转折处所对应的水位降深即为该层的前期固结压力,但是抽水沉降曲线所得到的值比实际的要小,原因是抽水沉降存在时间滞后效应。同时由图 6 可得到本试验水位降深地面沉降关系的线性表达式:

$$\left. \begin{aligned} S &= -1.545 \cdot \Delta W + 1.8773 & \Delta W \leq 26 \text{ cm} \\ S &= -0.4878 \cdot \Delta W + 25.731 & \Delta W > 26 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, S 为地面沉降量(0.01 mm); ΔW 为水位降深(cm)。

将式(3)带入式(4)最后得到抽水量沉降关系表达式:

$$\left. \begin{aligned} S &= -0.0331 \cdot Q + 3.2445 & Q \leq 1628 \text{ mL} \\ S &= -0.0104 \cdot Q + 30.0475 & Q > 1628 \text{ mL} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于最后一次抽水与之前一次抽水间隔了 4 d,可以明显地看到地下水位由于越流补给发生了回升,但是地面沉降没有出现相应的回弹或者缓和,而是一直持续的增加,说明抽水地面沉降具有时间效应。

(2) 压缩变形比例关系

如图 7、图 8 所示,对第一含水层抽水时,第一含水层与第一弱透水层的压缩变形占整个地面沉降的 60%,为主沉降层(由于观测原因第一含水层与弱透水层未能分别观测到其压缩变形),第二含水层所占总沉降的比例就已经达到 15%,第三含水层的比重为 7%,这两层含水层的压缩量已经占到总沉降的 22%,如果再考虑第一含水层的压缩(超过第一弱透水层),那么在本试验中,含水层所占总沉降的比例将至少达到 50%,从定量的角度验证地面沉降并不是通常所认为的绝大部分由弱

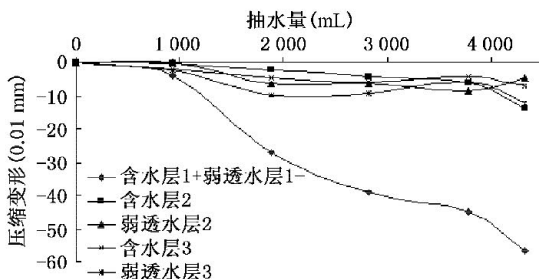


图 7 抽水量分层压缩曲线

透水层固结变形所产生,含水层的压缩变形量也占有相当的比例。

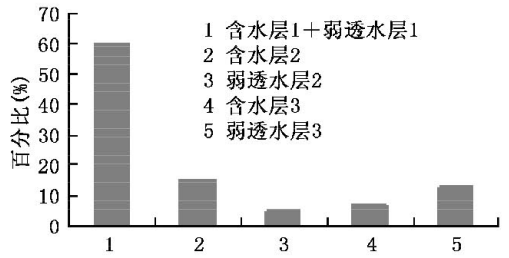


图 8 含水层系统各层压缩量比例关系

(3) 渗透性变化

有效应力的增加导致含水层颗粒之间错动挤密,孔隙逐渐被压缩变小,渗透性逐渐降低,同样的现象也会发生在弱透水层当中。按下列公式计算渗透系数:

$$K_T = \frac{QL}{FHt} \quad (6)$$

式中, K_T 为水温为 T 时土的渗透系数(cm/s); Q 为时间 t 内的透水量(mL); L 为两测压孔间的试样长度(cm); F 为试样断面积(cm^2); H 为平均水头差(cm); t 为时间(s)。

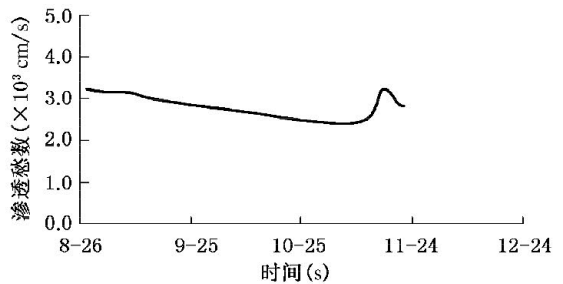


图 9 含水层渗透系数变化

图 9 为连通管测算的第一含水层渗透系数在抽水注水阶段的变化趋势。从变化曲线可以看出,在抽水的初始阶段渗透系数变化不明显,随着时间的推移,渗透系数逐渐减小,当抽水停止一段时间后渗透系数稳定,但是在注水的短时间内由于孔隙水压力的升高,孔隙被水压撑挤并且扩大,所以渗透系数会突然变大,但是随着注水的结束,水压平稳,孔隙又会部分收缩,渗透系数又会减小到某一值附近,但是比初始值要小,说明虽然经过回灌但是土层实际已经被压缩,沉降不可恢复。

3 结 语

(1) 本室内模型试验的探讨说明可以通过室内模型试验研究抽水地面沉降,而且证明区域抽水试验的现象在室内也可以模拟实现,但是水位降与抽水沉降漏斗不易观测。

(2) 水位降深与地面沉降之间存在双线性关系。在土中有效应力未超过前期固结压力和超过前期压力后,水位降深之沉降速率呈现不同速率,两者的关系分别为两条直线,可以用“双直线”来刻画。影响线性关系的因素很多,从实际的角度出发,可以通过控制抽水量来控制沉降,采取一定的回灌来减少抽水沉降带来的危害,但是到底回灌的效果如何,有待更进一步研究。

(3) 含水层的压密与弱透水层的压缩都是产生地面沉降的原因。在区域性的含水层系统中,含水层的厚度可能达到几十米甚至几百米,其压缩变形量在地面沉降当中有可能占有相当大的部分,如果是硬弱透水层的情况下,含水层的压缩变形可能占总沉降比例会更大。

(4) 本文通过数据分析推导得到抽水量与地面沉降的定量关系式以及各含水层系统分层压缩变形比例,但本文只是室内尝试性试验,须结合现场原位抽水井试验观测数据来研究地面沉降问题。

参 考 文 献

- [1] 薛禹群,张云,叶淑君,李勤奋. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 585~593.
- [2] Poland J F. Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal [M]. Unesco, 1984.
- [3] Helm Donald C. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near pixley, California. 1. constant parameters[J]. Water Resources Research, 1975, 11(3):465~478.
- [4] Helm Donald C. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near pixley, California. 2. stress-dependent parameters [J]. Water Resources Research, 1976, 12(3):375~391.
- [5] Lofgren Ben E. Analysis of stresses causing land subsidence[J]. Geological Survey Research, 1968, 600.-B:219~225
- [6] 张云. 一维地面沉降模型及其求解[J]. 工程地质学报, 2002, 10(04):434~407.
- [7] 施小清,薛禹群,吴吉春,张云,于军,朱锦旗. 常州地区含水层系统土层压缩变形特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 3:1~6.
- [8] 缪俊发,吴林高,段光贤[J]. 上海地质, 1996, 1: 10~15.
- [9] 王秀艳,刘长礼. 深层黏性土渗透释水规律的探讨[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3):308~312.
- [10] Poland J F. Land subsidence stopped by artesian-head recovery[C]. santa clara valley, California International Association of Hydrological Sciences, 1977, 121:124~132.
- [11] Holzer Thomas L. Preconsolidation stress of aquifer systems in area of induced land subsidence[J]. Water Resource Research, 1981, 17(3):693~704.
- [12] 王秀艳,刘长礼,张云. 超固结黏性土变形特征及可持续开采水位将的室内试验及确定方法[J]. 岩土力学, 2006, 27(6):875~879.
- [13] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京:地质出版社, 1997. 152~160.
- [14] Burbey T J. Use of time—subsidence data during pumping to characterize specific storage and hydraulic conductivity of semi-confing units[J]. Journal of Hydrology, 2003(281):3~22.