

文章编号: 2095—0411 (2012) 01—0055—04

考虑气相堵塞的土样渗透试验分析^{*}

夏 雄¹, 董亮亮¹, 张爱琴², 钱 莉², 黄 凯²

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学, 怀德学院)

摘要: 地面沉降是一种严重的地质灾害现象, 对区域经济和社会生产都会造成严重影响。目前很多地区采取了回灌地下水等措施, 以达到抑制区域地面沉降的目的。但是, 由于回灌水水质与原有地下水存在差异, 回灌水的含气量往往比原有地下水高许多, 不可避免的会在土体孔隙中发生更明显的气相堵塞现象, 从而削弱回灌效果。结合了常州代表性土样, 通过曝气装置, 采用含氧量作为分析指标, 进行了渗透系数试验研究, 分析气相堵塞现象对不同土体渗透系数的影响规律。研究表明气相堵塞随土粒粒径减小更加显著, 细粒土样渗透系数均呈一阶负指数衰减规律变化, 经历一定时间其渗透将趋于稳定。研究结果对于选择回灌水参数、深化理解地面沉降机理具有明显的现实性意义。

关键词: 气相堵塞; 渗透系数; 常州; 地面沉降; 地下水回灌

中图分类号: X 141

文献标识码: A

Study of Soil Permeability Considering the Gas Blocking

XIA Xiong¹, DONG Liang—liang¹, ZHANG Ai—qin², QIAN Li², HUANG Kai²

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213614, China;
2. Held College, Changzhou University)

Abstract: Land subsidence is the sinking of land surface. The occurrence and continuation of land subsidence have a serious impact on the regional economic and social development. Land subsidence in some regions is caused by exploiting groundwater. Changzhou City, underlain by a multi-layered aquifer system in Quaternary sediments in the Great Yangtze River Delta region, experienced a maximum land subsidence rate of 147mm/a in the early 1980s due to excessive groundwater extraction. Land subsidence is caused by the withdrawal of groundwater. When large amounts of groundwater is pumped from the aquifers beneath, water is pulled out of the many layers of clay, which allows the clay to compact under the weight of everything above them. Because of the regional scale of the groundwater exploitation, cone of depression and land subsidence occur. In the process of groundwater recharge, there is more gas in water, and gas blocking inevitably occurs, which has great impact on groundwater recharge and the natural flow of groundwater, especially in the soil layers filled with clay or silt sand. The penetration tests of gravelly sand, fine sand and clay show gas blocking is obvious, particularly evident in clay. The test results show that the attenuation of permeability coefficient gets stable after a certain time, which shows a first-order exponential decay. The results have obvious practical significance for selecting injection water parameters and controlling land subsidence in the future.

^{*} 收稿日期: 2011—11—14

基金资助: 江苏省教育厅 2011 年大学生实践创新计划项目 (HDJ1102042)

作者简介: 夏雄 (1972—), 男, 四川成都人, 博士, 副教授, 主要从事教学和环境岩土、岩土支护与稳定性研究。

Key words: gas blocking; permeability coefficient; Changzhou; land subsidence; groundwater recharge

地面沉降是一种地表标高性损失，作为一种缓变、不易被及时发现的地质灾害，在世界范围内普遍存在，尤其是沿海地区，危害极为严重。中国沿海地区及内陆各省市均有发生地面沉降，较为严重的如天津、西安及长三角等地区^[1]。开采地下水导致的地面沉降是普遍存在的缓变地质灾害现象，世界各处常有发生^[2-6]。为防止地面沉降进一步发展，许多发生区域实行了严格的地下水开采制度，制定了科学的开采规划，并有计划的进行地下水回灌，以加速地下水补给，达到缓解地面沉降的效果^[7]。地下水回灌能在一定程度上缓解地面沉降的趋势，但是回灌水中往往比地下水含有更多肉眼看不到的微粒成分及微小气泡，造成回灌过程中水流通道的发生气相阻塞。

目前，对于地下水回灌过程中的气相堵塞问题研究尚少，也缺少有针对性的研究结果。本文结合常州水文地质情况，利用渗透试验研究，探讨气相堵塞机理，分析气相堵塞现象对常州代表性土体渗透系数的影响规律。

1 常州水文地质特征

土是由固液气 3 相组成的组合体系^[8]。土中各相组成的质和量，以及它们之间的相互作用是控制土的工程性质，影响土体渗透性。

常州地处长江三角洲经济区，除焦溪一带有基岩出露外，其余广大地区均为厚的第 4 系松散覆盖，厚度约 120—240m。根据地质勘查资料，该区域土层大致可分为 4 层^[9]：第 1 层为潜水层、第 I 承压含水层及其底板，深度区间为 0—39.19m，含水层岩性为粉砂，其上下弱透水层岩性为粉土和粉质粘土；第 2 层为第 II 承压含水层顶板，39.19—92.66m 之间，岩性主要为灰黄—青灰色粉质粘土，其中 39.19—71.84m 分层为可塑或硬塑状态，71.84—92.66m 分层为可塑或软塑状态；第 3 层为第 II 承压含水层，深度 92.66—109.09m。岩性为粉砂、细砂；第 4 层为第 II 承压含水层底板，埋深 109.09—144.78m。岩性为以粉质粘土为主的粘性土层。

2 气相堵塞机理

气相堵塞现象无处不在，只是由于含水层岩性不同，其抗堵能力不同而已。地下水回灌缩短了地

下水循环周期，使地下水得到更有效的利用，同时可以抑制地面沉降的进一步发展。一般情况下，地下水含气量很低，地下渗流如图 1（a）所示，几乎不会发生气相堵塞现象。在地下水回灌过程中，如图 1（b）所示，会导致大量的气泡及溶解气体进入地下渗流，微小气泡在渗流过程中不断碰撞，形成较大气泡，一部分排出，而一部分则在土层孔隙中被截留下来，并堵塞渗流孔隙，使得有效渗流孔隙减少，从而降低土层的渗透性。在地下水渗流过程中，造成气相堵塞的气相成分是封闭在固液相及溶解于液相中的气相成分。不易被察觉的大量透明微小气泡对以细粒土为主的含水层回灌及弱透水层自然渗流造成严重影响。

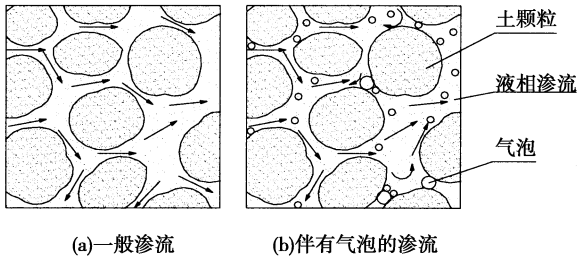


图 1 地下水渗流示意图

Fig. 1 Sketch of groundwater seepage

从其发生机理上看，在地下水回灌过程中，由于水传递运输中的搅动等，会带入部分气体，从而增加水中含气量；同时，地下水回灌过程中，气压的变化也会导致水的汽化，从而增添了水中气相成分的含量。上述多种原因造成了回灌水中气相成分的增加，经测试，回灌水中小气泡的含量可高达 0.47%—0.95%（体积比）^[10]。从而使回灌后土层中固液气 3 相中气相成分提高，容易形成气相堵塞，影响地下水渗流。

3 考虑气相堵塞渗流试验研究

常州区域地下水开采和回灌主要集中在第 II 承压含水层，地下水回灌影响较大的区域也为该土层及相邻隔水层。针对第 II 承压含水层中粉细砂及其上顶板隔水层粘性土开展渗透试验研究，研究回灌水气相成分对土体渗透性的影响。

3.1 试样制备和测试

3.1.1 试验仪器

雷磁 JPBJ—608 型便携式溶解氧测定仪；

TST-55 型渗透仪；GYS-22 型液塑限测定仪；LP-40 型曝气机。

3.1.2 试验材料和方法

试验中渗透试验用水为沸腾后冷却的自来水，水中含气量以含氧量为参考指标；试验土样取自常州地区钻孔土样（部分参数如表 1）。

表 1 试验土样部分物理及力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of the soils			
土样	砾砂	粉细砂	粘土
深度/m	44.35	95.20	75.20
$\rho_d/(\text{g}/\text{cm})$	1.71	1.41	1.58
初始孔隙比	0.617	0.912	0.736
E_{s1-2}/MPa	17.32	10.62	9.64
水温/ $^{\circ}\text{C}$	21.2	19.8	23.5
水含氧量/ (mg/L)	0.5	5.2	5.8

试验中涉及密度测定、固结试验、固剪试验及 3 轴试验方法均采用常规岩土试验方法；渗透试验中，渗透系数较大的砾砂采用常水头渗透试验，渗透系数较小的粉细砂和粘性土采用变水头渗透试验。

3.2 试验结果分析

3.2.1 砾砂

由于砾石类土的最小颗粒相对较大， d_{10} 一般为 0.2-1.0mm 或更大，回灌水中的气泡很容易从它的孔隙中穿过去而进入含水层。当水的浊度较小时，在含气量基本相同的情况下，透水性很大的砾石类含水层，单位回灌量接近单位出水量，气相堵塞很轻微。因此，气相堵塞现象对砾石层渗透性影响微小。

3.2.2 砂类土

砂类土与砾砂不同，粗砂的单位回灌量只相当于单位出水量的一半左右。原因是砂类土中的细颗粒相对较小， d_{10} 一般为 0.02-0.10mm，地下水回灌时，水中的气泡很难从屏障层的孔隙中全部穿过去而进入含水层，故气堵较严重。粉细砂含水层的屏障层就更细了，可以把大小只有几微米的粘土颗粒阻挡住。回灌时几微米的微小气泡理所当然也就进入不了地层，只能停留在天然反滤层及填砾中，回灌也就会更困难。而随液相进入土层中的气相，随着不断的汇集并被土颗粒吸附，堵塞渗流孔隙，进而降低含水层渗透性。

砂性土的渗透系数一般在 1.0×10^{-4} 左右，试验以常州地区潜水层粉细砂为研究对象，土样物理指标如表 1，以水含氧量作为渗流体含气量的参考

指标。试验过程中所用渗流体为冷却后的沸水，经曝气，含氧量保持在约 5.2mg/L 范围内，温度控制在 19.8 $^{\circ}\text{C}$ 左右。通过渗透试验，得到其渗透系数随时间变化情况如图 2 所示。

试验中通过两个平行样对比，由于土样具有一定离散性，两个平行样渗透系数变化略有差异，但是仍然处于一个数量级范围。由图 2 可以看出，粉细砂的渗透系数随时间的延长降低，渗流初期降低较快，3h 左右后，变化趋于平缓，说明随着试样中含气量达到动态平衡，渗透系数趋于某一稳定数值。

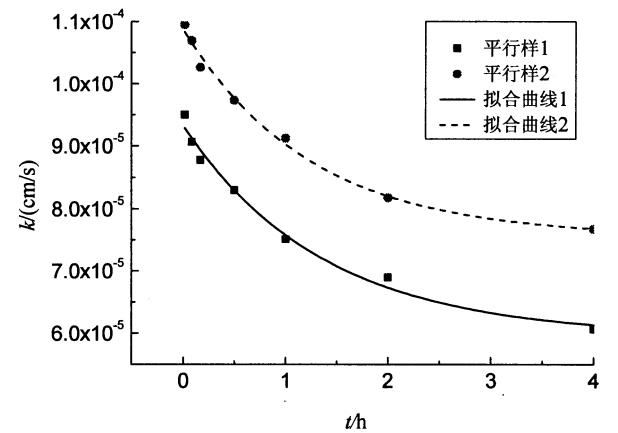


图 2 粉细砂渗透系数衰减曲线

Fig. 2 Variation curves of the sand permeability

通过数据拟合，可近似采用一阶指数衰减函数表示，得到如下方程：

$$k = A \cdot e^{-\frac{t}{t_1}} + B \tag{1}$$

式中： k —渗透系数，cm/s； t —渗透时间，h。

平行样 1 ($R^2 = 0.982\ 32$)： B —常数，为 $5.953\ 07 \times 10^{-5}$ ，cm/s； A —常数，为 $3.374\ 13 \times 10^{-5}$ ，cm/s； t_1 —常数，为 1.362 39，h。

平行样 2 ($R^2 = 0.989\ 88$)： B —常数， $7.552\ 76 \times 10^{-5}$ ，cm/s； A —常数， $3.324\ 75 \times 10^{-5}$ ，cm/s； t_1 —常数，1.224 30，h。

通过数据曲线拟合可以看出，两个样本的渗透系数数值虽然不同，但在试验中的变化趋势及数据拟合函数相似，体现出粉细砂发生气相堵塞现象的一般规律。

3.2.3 粘性土

粘性土以粒径小于 0.074mm 的土粒为主，具有塑性，颗粒细小，渗透系数相对较低，对地下渗流有较大的阻碍作用。试验以常州地区粘性土为研究对象，土样物理指标如表 1，以水含氧量作为渗流体含气量的参考指标。试验过程中所用渗流体为

冷却后沸水，经曝气，含氧量保持在约 5.8mg/L 范围内，温度 23.5℃ 左右。其渗透性变化如图 3 所示。

试验过程中发现随着渗透时间的延长，粘性土样渗透系数在较短的时间内迅速减小，之后趋于某一定值。通过试验现象分析其原因，由于试验所用水曝气后含气量较高，在渗流过程中，溶液中大量微小气泡被阻挡停留于土样中，并不断增多和汇集增大，导致土样中渗流的有效孔隙减少，阻碍土样中水的渗流，从而在宏观上表现为渗透系数的降低；土样的气泡，一部分停留于土样中，影响土样渗透性，一部分随渗流排出，一定时间后必会形成一个动态平衡，从而渗透系数逐渐趋于某一值。对试验数据进行整理，拟合曲线方程形式仍然为公式 (1)。式中： B 为 $3.045\ 01\times10^{-9}$ ，cm/s； A 为 $1.278\ 01\times10^{-7}$ ，cm/s； t_1 为 12.493 48h；其余符号同公式 (1)。 $R^2=0.957\ 02$ 。

由此可知粘性土渗透系数与渗透时间也呈指数衰减关系，与砂性土的气相堵塞相似。而稳定需要更长时间，约 40h 才趋于稳定，其稳定渗透系数约 2.0×10^{-9} cm/s。

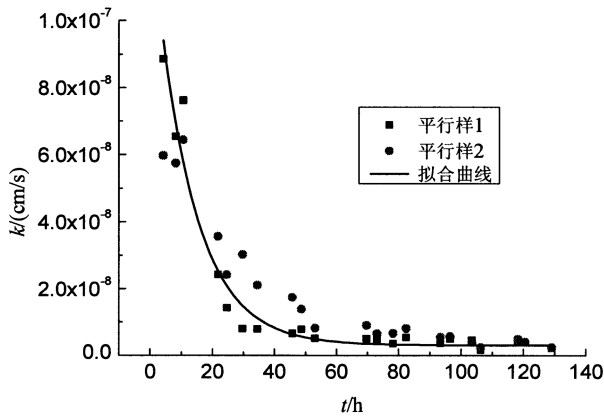


图 3 粘性土渗透系数衰减曲线

Fig. 3 Variation curve of the clay permeability

4 结 论

气相堵塞现象普遍存在于地下水回灌过程中，对土层渗透性产生严重影响。研究表明：①气相堵塞随土样粒径减小影响趋于显著，粘性土受到影响

相对较大，粉细砂次之，砾砂几乎没有影响。②试验数据结果拟合给出渗透系数 k (cm/s) 与时间 t (h) 呈一阶负指数衰减规律变化。③回灌水相对于天然地下水具有较多气相介质，其存在会堵塞土层渗透路径，造成渗透系数下降，使得地下水回灌困难增大，不利于对地面沉降的控制。④针对气相堵塞现象，可以在回灌时选用软管代替硬管，使过水断面实现自行调节，减少管道真空区，从而使产气量减少。另外还可以增加回灌水的透气性和排气性，以获得较好的工艺效果。⑤气相堵塞机理的研究有着明显的工程指导意义，如何更加科学合理地建立理论模型并获得正确的求解仍然值得进一步探索。

参考文献：

[1] 谢海澜, 郑锦娜. 区域性地面沉降研究现状 [J]. 地质调查与研究, 2009, 33 (3): 236—240.

[2] 维然, 段正良, 曾正强, 等. 1921—2000 年上海市地面沉降灾害经济损失评估 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2003, 31 (6): 743—748.

[3] Teatini P, Ferronato M, Gambolati G, et al. A century of land subsidence in Ravenna, Italy [J]. Environ Geol, 2005, 47 (6): 831—846.

[4] Chai J C, Shen S L, Zhu H H, et al. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai [J]. Geo-technique, 2004, 54 (2): 1 432 147.

[5] Chen C X, Pei S P, Jiao J J. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China [J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11: 275—287.

[6] 张阿根, 杨天亮. 国际地面沉降研究最新进展综述 [J]. 上海地质, 2010, 31 (4): 57—63.

[7] 龚士良. 上海地下水流场变化及对地面沉降发展的影响 [J]. 上海水资源研究, 2009, 30 (3): 1—5.

[8] 李镜培. 土力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[9] 王光亚, 于军, 吴曙亮, 等. 常州地区地面沉降及地层压缩性研究 [J]. 地质与勘探, 2009, 45 (5): 612—620.

[10] Joerg E, Drewes P Fox. Behavior and characterization of persistent organic compounds during soil-aquifer treatment [J]. Advanced Water Treatment, Reclying and Reuse, Milano, 1998 (9): 583—590.