

DOI: 10.11779/CJGE201804002

天津第二粉土粉砂微承压含水层回灌试验研究

郑刚^{1,2}, 曹剑然^{1,2}, 程雪松^{1,2}, 哈达^{1,2}, 刘菊³

(1. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
3. 上海广联建设发展有限公司, 上海 200438)

摘要: 天津、上海等地已尝试采用回灌措施控制基坑降水引起的承压含水层水头下降及引起的沉降, 然而目前回灌理论尚缺乏研究, 在粉土粉砂微承压含水层中进行回灌的可行性也急需研究。因此本文在邻近天津某地铁基坑工程的场地外开展了一系列单井回灌、群抽群灌试验以及单抽单灌现场试验。试验结果表明, 在粉土、粉砂为主的土层进行回灌是可行的。采用抽水试验得到的水文地质参数可以用于预测回灌的水位抬升, 但是相同流量下, 在距中心井较近距离内(约5~7m内), 回灌产生的水位上升值显著大于抽水导致的水位降落值。加压回灌可以显著提高回灌效率。回灌量与抽水量维持在相近水平可以有效控制周边地表及建筑物沉降。当回灌停止后, 周边地表沉降有快速发展的趋势, 因此在实际工程中, 抽水停止后应当适当延长回灌时间, 逐步减小回灌量, 使地下水位逐步回稳, 避免抽灌活动结束后沉降的快速发展。采用双井组合回灌技术可有效的控制回灌井回扬时引起的含水层水位的下降。

关键词: 微承压含水层; 回灌; 加压回灌; 抽降水; 沉降控制; 双井组合回灌

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)04-0592-10

作者简介: 郑刚(1967-), 男, 贵州人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程的教学与科研工作。

E-mail: zhenggang1967@163.com。

Experimental study on artificial recharge of second Tianjin silt and silty sand micro-confined aquifer

ZHENG Gang^{1,2}, CAO Jian-ran^{1,2}, CHENG Xue-song^{1,2}, HA Da^{1,2}, LIU Ju³

(1. MOE Key Laboratory of Coast Civil Structures and Safety, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Shanghai Guanglian Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: The recharge measures are used to try to control the settlement and head down of the confined aquifers caused by the pumping of the foundation pits in Tianjin, Shanghai and other regions. However, the researches on the theory of recharge are still deficient, and the feasibility of recharging in the micro-confined aquifer of silt and sandy silt is also urgently needed. Therefore, a series of single-well recharge tests, group-pumped and group-recharge tests and double-combined recharge tests near a subway foundation pit project in Tianjin are carried out. The test results show that it is feasible to recharge in silt and fine sand as the main component of the soil layer, and the pumping theory can be used to predict the change of the water level in confined aquifers caused by recharge in practical engineering within a certain range. The hydrogeological parameters obtained by the pumping tests can be used to predict the rise of the water level of the recharge, but at the same flow rate, the uplift of the water level generated by recharge is significantly greater than the drawdown of the water level caused by pumping within the distance from the center well (about 5 ~ 7 m). The pressurized recharge can improve the efficiency remarkably. The amounts of recharge and pumping at a similar level can effectively control the settlements of the surrounding surface and buildings. The surrounding surface subsidence has a rapid development trend when the recharge is stopped. In practical engineering, in order to avoid such a settlement trend with rapid growth, the recharge time is properly extended after pumping is stopped, the amount of recharge is gradually reduced, and the groundwater level is gradually stabilized so as to avoid the rapid development of settlements at the end of pumping and recharge. The twin-well combined recharge technique can be used to control the decline of the water level of aquifers caused by the discharge of the recharge well.

Key words: micro-confined aquifer; recharge; pressurized recharge; pumping; settlement control; twin-well combined recharge

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目(15ZCZDSF00770); 国家自然科学基金项目(41630641, 51508382)

收稿日期: 2017-01-04

0 引言

随着基坑工程越来越向着深、大、长的方向发展,由施工所引发的安全性、稳定性和对周边邻近建筑物的影响日益受到人们的重视。当基坑开挖深度较大且坑底以下的承压含水层的厚度较大时,有时会出现地下连续墙或止水帷幕不能截断承压含水层的情况,此时称其为悬挂式止水帷幕。由于悬挂式止水帷幕并不能够完全截断含水层,这将导致坑内外的水力连通,在对承压含水层进行抽降水时会引起紧邻基坑的建筑物及地下构筑物发生不均匀沉降^[1-3]。

采用人工补给地下水(即回灌),促使含水层水位迅速回升,增加水压,则可使含水层回弹及含水层向上的水头压力增大,进而使上部黏土层孔隙水压力增大,发生回弹。承压含水层和黏性土层回弹的叠加作用可以使地面不沉或轻微抬升。由此可见,地下水人工回灌是控制地面沉降的有效途径之一^[4]。

对于回灌,目前已有学者进行了现场试验^[5-10],数值模拟^[11-12]及模型试验^[13]等相关研究。瞿成松等^[5]在上海某工程中通过在降水同时结合回灌技术控制降水的影响半径,有效的控制了坑外相邻地面因基坑减压降水引起的地面沉降。郑刚等^[6]通过在天津某基坑工程中开展基于建筑物沉降控制的承压含水层回灌,证明了在粉土、粉细砂层中进行回灌是可行的,承压含水层因基坑抽灌水引起的水位升降与被保护建筑物隆沉之间呈现出很强相关性和同步性。俞建霖等^[7]通过对杭州某基坑工程进行回灌证明了采用回灌法对基坑周围集中的对象进行保护更加经济有效。

上述国内外的研究只针对实际基坑工程采取了回灌措施,对回灌控制地表沉降的可行性进行了研究。然而目前尚无通过现场抽水回灌试验,研究不同回灌量下水位上升锥形状、水位上升锥随回灌发展的特征及回灌措施对被保护建筑物一侧的水位抬升效果的相关内容。本文在天津某地铁基坑工程场地开展了单井抽灌试验和群抽群灌试验对这些内容进行了研究,并且对回灌的设计和 implement 提出了相关建议。同时开展了双井的单抽单灌试验,对实际工程中回灌井定期回扬、备用回灌井回灌的效果进行了研究。

1 试验方案

1.1 工程概况

本回灌试验在天津地铁某地铁站基坑工程场地进行。本场地 75 m 深度内地下水可划分为:潜水、第一层承压水、第二层承压水及第三层承压水,典型地质剖面及含水层分布如图 1 所示。第二承压含水层与

第三承压含水层存在一定的水力连通。

1.2 试验目的

对于此场地地铁站基坑,经抗突涌稳定性验算发现,在基坑开挖过程中需降低第二承压含水层承压水位才能防止基坑发生突涌破坏。而由于该基坑地连墙截断第一、二承压含水层,未截断第三承压含水层,属于悬挂式止水帷幕,基坑减压降水会诱发一定的环境沉降。采用回灌措施控制环境沉降是一种最直接的方式,同时由于回灌也可以在一定程度上降低环境保护对象对于基坑止水帷幕深度的要求,减少工程造价,因此也是一种相对经济的方式。因此为了制定基坑施工过程中的承压水降压及回灌方案,开展了本文所述的针对第二承压含水层的现场抽灌试验。

本文试验场地位于地铁站基坑以外,与基坑相距有一定的距离。试验进行期间,基坑地连墙施工还未封闭完成,并且距离试验场地最近的东侧地连墙还未开始施工。因此对试验无明显影响。

本次研究依托此工程开展专项抽水回灌试验,通过“抽水—回灌”试验期间的抽水量、回灌量、观测井水位、孔隙水压力等试验参数的分析,结合试验期间由于减压降水和回灌引起的深层土体和地表隆沉实测值,初步研究在天津地区类似地质条件下的回灌效果。同时为本基坑工程制定实际施工期间能够满足环境控制要求的减压降水和回灌方案提供参考依据。本试验具体目的如下:

(1) 在试验期间实测承压水水头;通过单井抽灌试验,观测降水漏斗形状及其随抽水发展的特征曲线、水位上升锥形状及其随回灌发展的特征曲线。

(2) 通过群抽群灌试验,模拟研究实际工程条件下回灌对被保护建筑物一侧的水位抬升效果。

(3) 通过单抽单灌试验,模拟实际基坑开挖过程中回灌井定期回扬,备用回灌井开启的回灌控沉情况。

(4) 通过对地表沉降及孔隙水压力进行观测,得到试验期间各项观测指标的实测参数及变化特征曲线,并结合相关工程经验进行分析,为后续基坑施工提供参考和依据,以保证该地铁站的正常建设和安全施工。

1.3 抽水井、回灌井及监测点布置

回灌井及观测井的平面布置如图 2 所示,图 2 中每个同心圆半径相差 5 m。各试验井结构如图 1 所示。表 1 所示为各试验井的初始水位埋深。各试验井及监测点的参数信息如表 2 所示。按照试验目的及现场实际情况,试验场区以 H1 为中心布置两个主要沉降监测点断面, H2~H3 断面和 H1~G7 断面,如图 2 所示。

试验过程中,地下水的抽灌过程会导致土体孔隙

水压力的变化,因此,本次试验在 G5、G7 旁各设了一组孔隙水压力监测点,如图 1 所示。

表 1 各试验井初始水位埋深

Table 1 Depths of initial water level of observation wells

井号	初始水位埋深/m	井号	初始水位埋深/m	井号	初始水位埋深/m
H1	7.20	C1	6.34	G4	8.21
H2	7.10	G1	7.20	G5	7.15
H3	7.35	G2	7.25	G6	7.05
—	—	G3	6.31	G7	8.03

1.4 试验工况

本次抽水—回灌试验共分为 3 个部分进行:

(1) 单井试验: H1 单井抽水及 H1、H3 单井回灌试验。

(2) 群井试验: G5、G6 抽水, H1、H2、H3 回灌,通过 G1、G3 的水位变化来观测实际工程条件下采取回灌措施对被保护建筑物一侧的水位抬升效果。

(3) 单抽单灌试验: H1、C1 组合试验。

以上三部分试验内容的具体工况信息如表 3 所示。试验过程中均按规范要求监测抽水井或回灌井周围观测井水位变化,每 10 min 监测一次。地面沉降测点一天监测两次,时间分别为上午 9 点和下午 6 点。

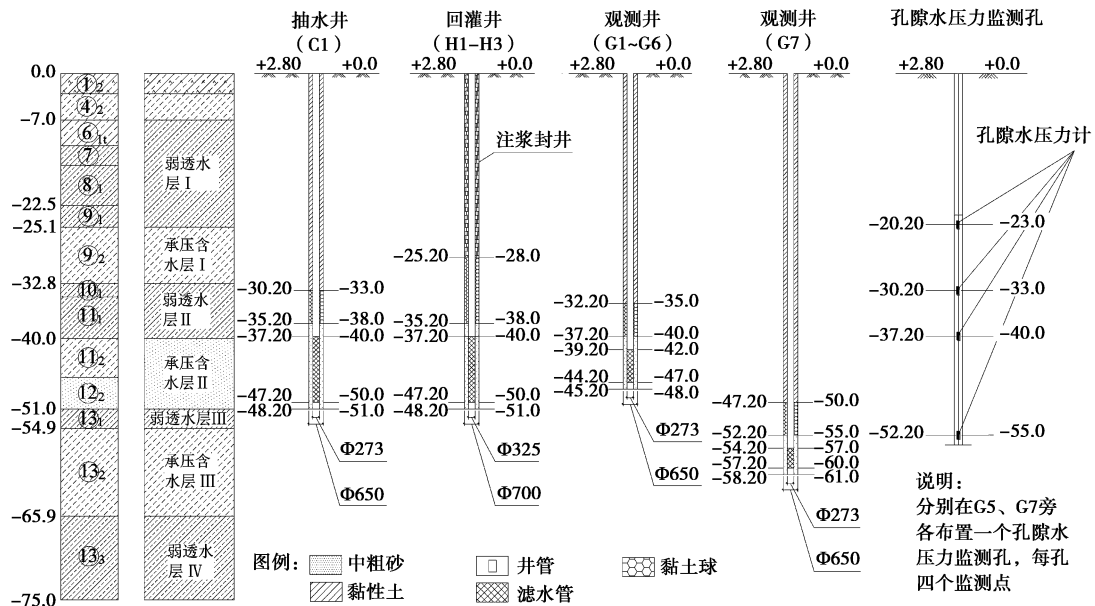


图 1 典型地质剖面图

Fig. 1 Typical geological profile

表 2 各试验井及监测信息表

Table 2 Test wells and monitoring information

项目名称	井号或监测点号	单位	过滤管或监测点层位	井深/m	数量	孔径/mm	井径/mm
回灌井兼抽水井	H1、H2、H3	口	第二承压含水层	51	3	700	325
抽水井兼观测井	C1、G1、G2、G4-G6	口	第二承压含水层	48	6	650	273
	G3	口	第二承压含水层	51	1	650	273
深层观测井	G7	口	第三承压含水层	61	1	650	273
地面沉降	D1-D20	个	进入原状土		20	—	—
孔隙水压计	K2-1、K2-2	组	23 m、33 m、40 m、55 m	55	2	130	—

表 3 抽水—回灌试验工况表

Table 3 Conditions of pumping and recharge

抽水工况	序号	抽水井	回灌井	观测井	持续时间	含水土层	
H3 单井回灌	1	—	H3	其他各井	1d	第二承压含水层	
单井试验	H1 单井抽水	2	H1	—	其他各井	1d	第二承压含水层
	回灌量 2m ³ /h	3	—	H1	其他各井	1d	第二承压含水层
	H1 单井回灌	4	—	H1	其他各井	2d	第二承压含水层
	回灌量 1m ³ /h	4	—	H1	其他各井	2d	第二承压含水层
	回灌量 0.5m ³ /h	5	—	H1	其他各井	1d	第二承压含水层
群井试验	群抽群灌	6	G5、G6	H1、H2、H3	其他各井	6d	第二承压含水层
	G5、G6 群井抽水	7	G5、G6	—	各试验井	1d	第二承压含水层
单抽单灌试验	C1 抽水、H1 回灌	8	C1	—	其他各井	1d	第二承压含水层

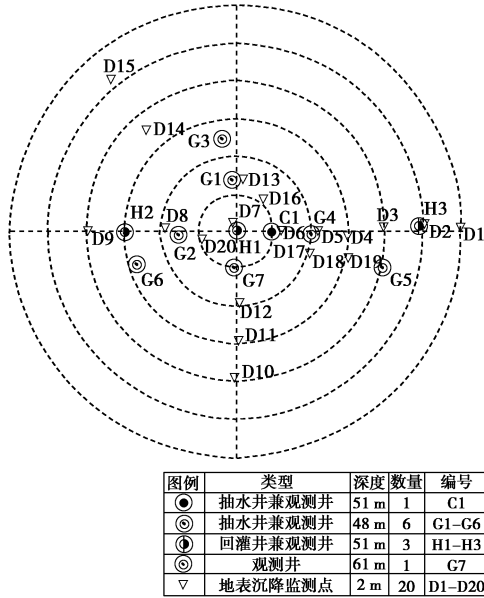


图 2 回灌井及观测井平面布置图

Fig. 2 Layout of recharge wells and observation wells

2 单井试验结果与分析

2.1 抽降水及回灌引起的水位变化

如表 3 所示, 针对第二承压含水层, 先后进行了 H3 单井回灌试验、H1 单井抽水和回灌试验。

(1) H3 回灌试验

H3 回灌试验主要用以研究在以粉土、粉砂为主的承压含水层中进行自然回灌(回灌压力为 0)的最大回灌量以及加压回灌的最大回灌量和最大回灌压力。

H3 单井回灌试验由 0.5 m³/h 回灌量开始, 试验初期每隔半小时增加约 0.5 m³ 回灌量。试验期间回灌量 Q 及回灌压力 p 随时间变化曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出, H3 自然回灌下的最大回灌量为 2.8 m³/h, 在此稳定回灌量(回灌速率)下 H3 的井中水位已达到井口位置并保持稳定平衡状态。

在确定 H3 井在自然回灌下的最大回灌量之后, 继续对 H3 井采取加压回灌, 同时继续逐渐增加回灌量。不同回灌压力对应的回灌量如图 3 所示, 回灌压力后期稳定在 0.05~0.06 MPa, 此时井口周边开始冒水, 单位时间内回灌量不再增加, 回灌量稳定在约 5.5 m³/h。由此可见, 加压回灌可显著增加单位时间回灌量, 大幅提高回灌效率。

H3 单井回灌期间各观测井的水位抬升 h 随时间的变化曲线如图 4 所示。可以看出, 各观测井在前 6.7 h 时间段内水位抬升较快, 到 6.7 h 后变化趋于平稳。

(2) H1 单井抽水试验

H1 单井抽水持续时间为 1 d, 水位降深约为 22.13 m, H1 动水位从 6.27 m 下降到 28.4 m。图 5 所示为

H1 抽水试验各观测井的水位降深 s 的时程曲线及抽水量时程曲线, 可以看出, 抽水量随时间有一定波动, 但平均约为 1 m³/h, 后期稳定出水量约为 0.9 m³/h。

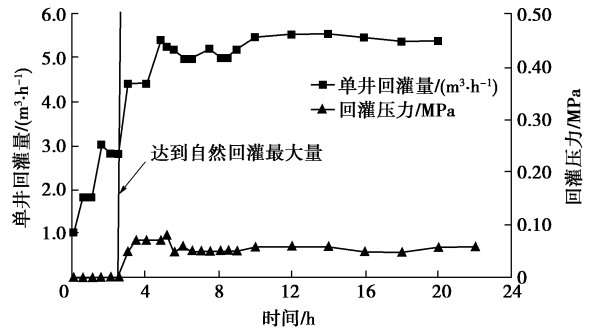


图 3 H3 单井回灌 $Q-t$ 曲线及 $p-t$ 曲线

Fig. 3 Curves of $Q-t$ and $p-t$ during recharge of H3 single well

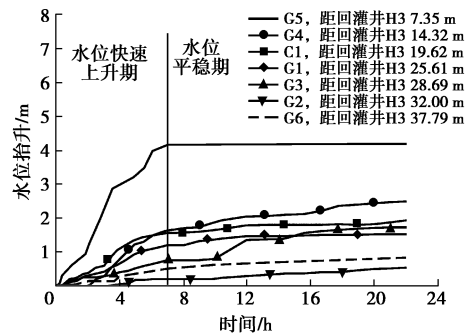


图 4 H3 单井回灌 $h-t$ 曲线图

Fig. 4 Curves of $h-t$ during recharge of H3 single well

总体来讲, 抽水初期 1.6 h 内出水量较大, 随后出水量下降明显, 至 8.3 h 后趋于稳定。第二承压含水层水位在前 3.3 h 内变化较快, 之后变化趋于缓慢, 且该含水层水位达到稳定时间较长。各观测井的水位降落持续时间与抽水持续时间几乎同步, 并且距离抽水井越近的观测井水位降深越大。H1 停抽 3.3 h 后水位恢复约 70%, 至停抽 8.3 h 后水位恢复基本稳定, 稳定水位比初始水位平均深约 0.4 m。

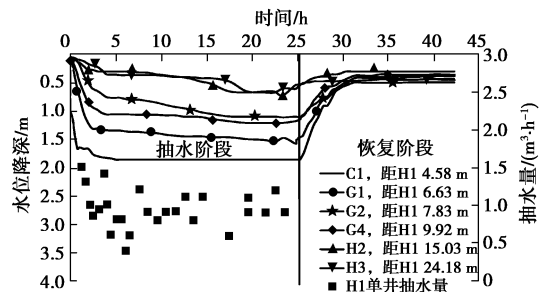


图 5 H1 抽水各观测井 $s-t$ 曲线图

Fig. 5 $s-t$ curves during pumping of H1 single well

(3) H1 单井回灌试验

在 H1 井第一次抽水试验结束并且恢复稳定水位后, 利用 H1 井进行回灌试验。H1 单井回灌试验分 3

个阶段,按时间先后分别为:回灌 2 m³/h、回灌 1 m³/h、回灌 0.5 m³/h。回灌 2 m³/h、1 m³/h 连续进行,回灌 0.5 m³/h 随后单独进行试验。图 6 为先后进行的回灌量为 2 m³/h 和 1 m³/h 试验的各观测井水位抬升时程曲线及回灌量时程曲线。

从图 6 中可以看出,在每个阶段中,单井回灌量随时间都有一定波动,但基本能保持相应的回灌量。各观测井水位变化与回灌量的变化基本保持同步,回灌量越大水位抬升越大,并且距离回灌井越近的观测井水位抬升幅度越大。H1 进行 2 m³/h 回灌期间,可以看出前 6.7 h 水位上升比较剧烈,6.7 h 后各观测井水位趋于平稳。1 m³/h 回灌结束后进行水位恢复,在水位恢复稳定后,回灌 0.5 m³/h 在之后单独进行。

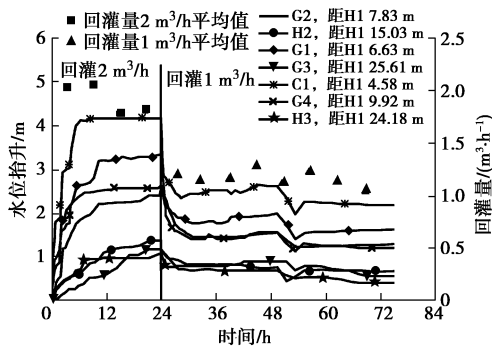


图 6 H1 回灌 2 m³/h 及 1 m³/h 时 $h-t$ 曲线图

Fig. 6 $h-t$ curves during recharge of 2 and 1 m³/h of H1

图 7 所示为回灌 0.5 m³/h 各主要观测井的水位抬升时程曲线及回灌量时程曲线。可以看出,0.5 m³/h 回灌期间同样是前 6.7 h 水位上升比较剧烈,6.7 h 后各观测井水位趋于平稳。对比 H1 单井抽水试验发现,回灌水位的剧烈上升至平稳的时间大于抽水水位剧烈下降至平稳的时间。

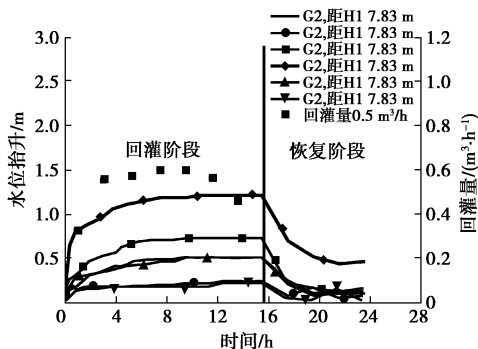


图 7 H1 回灌 0.5 m³/h 时 $h-t$ 曲线图

Fig. 7 $h-t$ curves during recharge of 0.5 m³/h of H1

2.2 水文地质参数分析

(1) 线性回归求水文地质参数

采用 Cooper 等^[14]方法分别分析 H1 单井抽水 1

m³/h 试验以及回灌 0.5 m³/h 和 2 m³/h 试验的结果。图 8 显示了 H1 在恒定流量下回灌 0.5 m³/h 的 $h-lgt$ 曲线作为示例,使用回归分析可以得出图中的直线,进而根据直线的斜率 Δi 求得导水系数 T ,并且由在时间轴上的截距 t_0 求得贮水系数 u^* 。

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta i} \quad (1)$$

$$u^* = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad (2)$$

式中, r 是观测井与抽水井(回灌井)的距离。

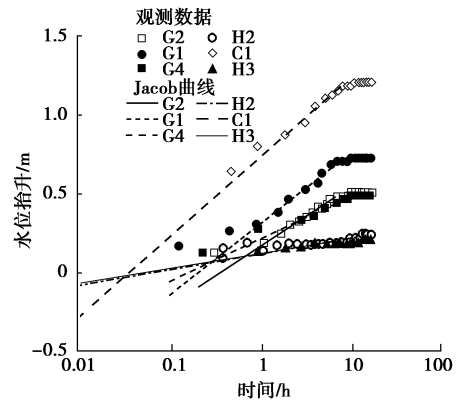


图 8 H1 单井 0.5 m³/h 回灌 $h-lgt$ 曲线

Fig. 8 $h-lgt$ curves during recharge of 0.5 m³/h of H1

T 和 u^* 确定后,即可根据含水层厚度 M 确定渗透系数 k 和储水系数 S_s 。由此方法,根据 H1 单井抽水 1 m³/h 试验以及回灌 0.5 m³/h 和 2 m³/h 试验确定的渗透系数 k 分别为 0.593, 0.524 及 0.495 m/d, 储水系数 S_s 分别为 1.675×10^{-4} , 1.587×10^{-4} 及 4.843×10^{-4} 。可以看出,依据单井抽水试验降深数据线性归化所得的水文地质参数与单井回灌试验抬升数据线性归化所得的水文地质参数较为接近。由此可以初步说明,采用抽水试验降深数据得到的水文地质参数可以用于预测单井回灌的水位抬升情况。

(2) 数值模拟

为了进一步研究是否可以采用抽水试验降深数据得到的水文地质参数可以用于预测单井回灌的水位抬升情况以及研究抽水降落曲线与回灌锥曲线的关系,本文根据 H1 单井抽水试验计算得到的水文地质参数(渗透系数 k 及储水系数 S_s 分别为 0.593 m/d 及 1.675×10^{-4})对 H1 单井抽水 1 m³/h 以及回灌 0.5, 1 和 2 m³/h 试验进行数值模拟。数值模拟采用 MODFLOW 进行,模型如图 9 所示。

数值模拟得到的 H1 单井抽水试验中水位稳定后的降落漏斗曲线($s-r$ 曲线)与现场实测各井降深结果的对比如图 10 所示。由图 10 可见,数值模拟得到的结果与实测数据较为接近,说明采用 Cooper 和

Jacob 方法求得的水文地质参数较为合理。

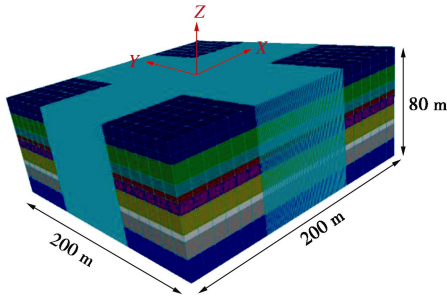


图 9 模型示意图

Fig. 9 Model

进一步利用 H1 单井抽水试验得到的水文地质参数对 H1 回灌试验进行数值模拟。数值模拟得到的 H1 单井回灌试验中不同回灌量下水位稳定后的回灌锥曲线 ($h-r$ 曲线) 与现场实测各井降深结果的对比如图 11 所示。从图 11 中可以看出, 在各个回灌量下, 数值模拟得到的回灌 $h-r$ 曲线与实测值在距离回灌井 7 m 以外均较为接近, 在距回灌井 7 m 以内, 实测值均大于数值模拟结果。图 12 所示为笔者在天津另一场地进行的抽灌试验的水位对比结果, 可以看出, 对于相同的流量 (1, 2, 3, 4 m^3/h), 实测的抽水水位降落曲线和回灌水位抬升曲线同样在距离中心井 5 m 以外较为接近, 在距中心井 5 m 以内, 回灌抬升值大于抽水降深值。此试验结果与本文得到的结果较为接近。

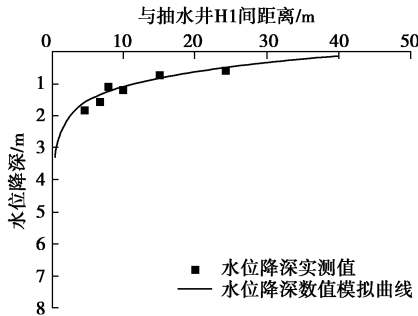


图 10 H1 抽水 $s-r$ 曲线图

Fig. 10 $s-r$ curves of H1 pumping

相同流量下, 抽水降落曲线及回灌锥曲线在距离中心井较近距离内有所差异的原因可能有以下几个原因。一是回灌井附近可能存在紊流^[15]; 二是回灌会引起井周围的承压含水层出现一定范围的堵塞, 进而导致井周围一定范围的含水层渗透系数降低^[16-18]; 三是由于回灌井过滤器的结构为桥式过滤器, 水流的方向不同会导致抽水与回灌的井损值不同^[19]。上述原因的初步探讨均是基于已有文献, 但确凿的原因还需深入研究。

由此上述分析可以初步说明, 采用抽水试验所得

的降深数据经过参数反演, 所得的水文地质参数可以用于回灌试验的水位抬升预测, 但是在距回灌井较远处 (5~7 m 以内), 预测结果会一定程度上低估实际工程中的水位抬升。该结果说明, 在实际工程中, 当仅有抽水试验得到的水文地质参数时, 可以利用这些参数进行回灌方案设计。

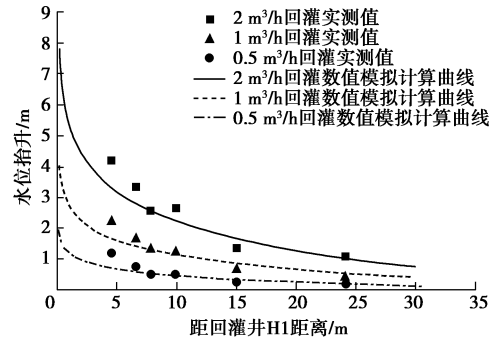


图 11 H1 单井各级回灌 $h-r$ 曲线图

Fig. 11 $h-r$ curves during multi-stage recharge of H1 single well

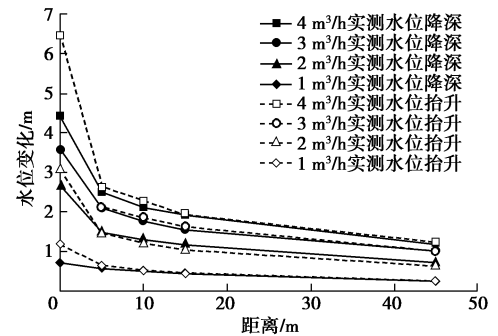


图 12 天津某场地试验抽灌水位对比

Fig. 12 Comparison of water levels of pumping water and recharge water

2.3 抽降水及回灌引起的地表隆沉分析

图 13 为 H1 单井抽水及回灌试验过程中主要监测断面 H2~H3 上典型测点 D4、D5、D6 的沉降时程曲线及 C1 观测井的水位变化时程曲线。D4、D5、D6 距 H1 的水平距离分别为 14.76, 10.55, 5.46 m。

从图 13 中可以看出, H1 从 5 月 20 日开始至 5 月 21 日抽水结束的单井抽水试验期间, 于 5 月 21 日 D6 测点发生最大约 1.8 mm 的地表沉降, 抽水结束后水位恢复期间, 沉降值有所减小。

H1 进行 2 m^3/h 的单井回灌试验期间, D5 测点发生最大约 3.3 mm 的地面隆起。H1 进行 2 m^3/h 回灌开始后约 6.7 h 邻近观测井水位即达到最大值并保持稳定, 但是在开始回灌约 0.5 d 时地面才开始显著隆起, 在 1 d 时隆起才达到最大值。

当 H1 回灌量由 2 m^3/h 降为 1 m^3/h 时, 地表隆起

量下降明显, 在 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 回灌开始 1 d 后, 隆起量才略有增加, 并且在回灌停止后约 0.4 d 时隆起量达到最大值, 此时 D5 测点隆起约 2 mm。H1 井回灌暂时结束后, 地表开始急剧下沉, 由隆起变为沉降, D5 测点下沉约 2.3 mm。

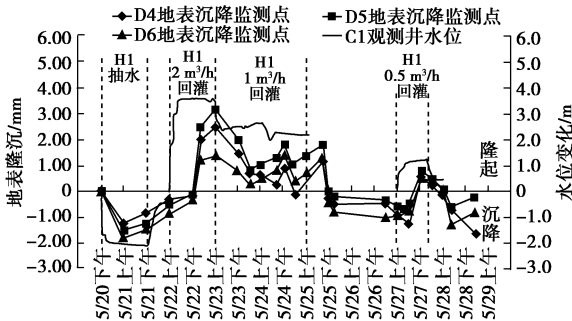


图 13 场区典型测点沉降及 C1 井水位回升时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of subsidence at typical measuring points and change of well level at C1

H1 进行 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 回灌重启后, 同样, 邻近观测井水位在回灌开始后约 6.7 h 即达到最大值并保持稳定, 而地面在回灌开始后 0.5 d 才开始显著隆起, 并在接近 1 d 时达到最大隆起值, D5 测点隆起约 0.8 mm。回灌结束后, 地面快速下沉, 最大下沉量在 2 mm 左右。

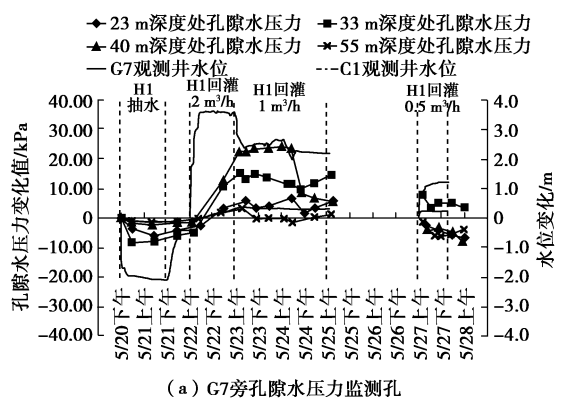
从上述变化曲线的分析可以看出, 地表隆起量随回灌量的增加而增加, 随回灌量的减小而减小; 回灌过程中, 相比地下水位的变化, 地表隆沉的变化有一定的滞后性, 约滞后 0.5 d; 尤其值得注意的是, 在回灌量减小或者回灌停止时, 地表会发生快速下沉的现象, 甚至可能由地表隆起变为沉降。

2.4 抽降水及回灌引起的孔隙水压力变化分析

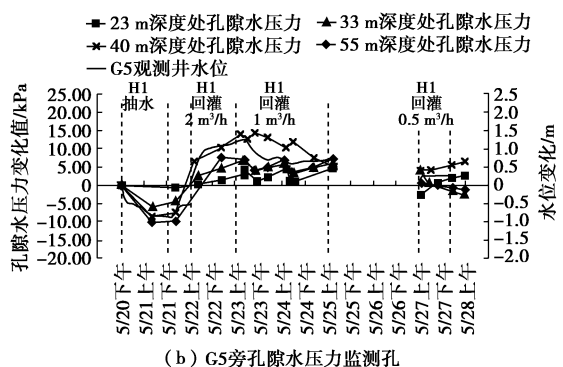
H1 单井抽降水及回灌试验期间, G7 及 G5 观测井旁的孔隙水压力监测数据变化曲线如图 14 所示。G7 和 G5 距 H1 的水平距离分别为 5 m 和 18 m。图 14 中, G7 井和 G5 井的水位变化曲线同样绘于图中和其旁边孔隙水压力变化作为对比。由于 G7 观测井不是 H1 回灌井的同层观测井, 而 C1 观测井距离 H1 的水平距离与 G7 观测井接近, 因此以 C1 观测井的水位变化代表 G7 位置上与 H1 回灌井同层的水位变化, 如图 14 (a) 中所示。

G7 旁 40 m 深处孔隙水压力变化略小于 C1 井水位变化, G5 旁 40 m 深处孔隙水压力变化与 G5 水位变化接近, 由此可见, 此次孔隙水压力监测相对较为可靠。同时, 通过图 14 可以发现, 孔隙水压力的变化同样滞后于观测井的水位变化, 这一点与地表竖向变形一致。这主要是由于 23, 33 及 40 m 深度处的孔隙水压力计均位于回灌及抽水滤管所在的第二承压含水

层上部渗透系数较低的粉质黏性土层中。第二承压含水层水位变化后, 受限于渗透系数, 上部粉质黏土层中孔压变化需要较长的时间才能完成。



(a) G7 旁孔隙水压力监测孔



(b) G5 旁孔隙水压力监测孔

图 14 H1 单井抽水及回灌试验中 $p_w - t$ 曲线

Fig. 14 Curves of $p_w - t$ during discharge and recharge tests on H1

由上述分析可以发现, 地表沉降或者是隆起主要由两部分组成, 第一部分是抽水或回灌的承压层竖向变形, 第二部分为上部黏性土层的竖向变形。由于承压层孔隙水压力变化较快, 因此其竖向变形可以迅速完成; 但是上部粉质黏土层孔隙水压力消散较慢, 因此其竖向变形完成较慢。这也是地表隆沉相比地下水位的变化有一定滞后性的原因。

3 群抽群灌试验结果与分析

3.1 群抽群灌试验中水位变化

G5、G6 抽水, H1、H2、H3 回灌, 抽水井与回灌井同时运行 6 d。

图 15 所示为群抽群灌期间的水量变化, 回灌量为正值, 抽水量为负值。图 16 所示为群抽群灌试验期间各观测井的水位变化时程曲线, 水位抬升为正值, 水位下降为负值。从图 15 中可以看出, 在试验初期 6 月 4 日至 6 月 5 日期间, 回灌量与抽水量有较大波动, 这是由于水泵初期工作不稳定导致的, 此时相应的水位变化也波动较大。这段时间内, 由于回灌量总和显著大于抽水量, 周边观测井水位有显著上升。

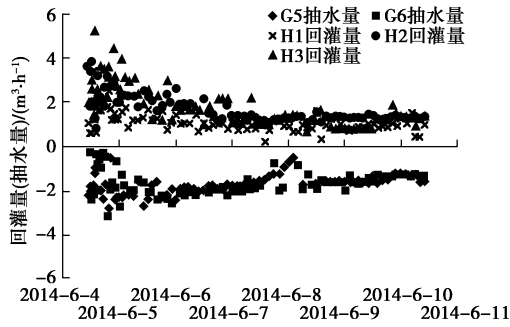


图 15 群抽群灌期间水量变化

Fig. 15 Variation of flow rate during group wells tests

6月5日以后回灌量与抽水量开始趋于稳定并维持在相近水平, G5与G6井的抽水量分别稳定在1.6 m³/h和1.35 m³/h, 总抽水量约2.95 m³/h; H1、H2及H3回灌量分别稳定在0.95, 1.35及1.3 m³/h, 总回灌量约为3.6 m³/h。此时图16中各观测井的水位变化也趋于稳定。总体来讲, 回灌量略大于抽水量。

由于C1、G1~G4观测井位于回灌井一侧, 距抽水井G5、G6距离较远, 在回灌量与抽水量达到稳定并维持在相近水平时, 各观测井的水位略有抬升。其中G1、G3观测井位于两个回灌井连线的无抽水井侧, 可以认为是位于被保护建筑物一侧, 这两个观测井水位均保持抬升的状态, 水位抬升值小于1 m。这说明在抽水井和被保护建筑物之间设置相应数量的回灌井并进行同步回灌, 能够维持被保护建筑物一侧水位的稳定, 使周边建筑物处地下水基本能维持原始水位, 水位的变化仅随回灌量和抽水量的变化有小幅波动, 不会对被保护建筑物产生较大影响。

从图16中还可以看出, 在6月10日抽水与回灌同时停止后, 各观测井的水位有迅速下降的趋势。

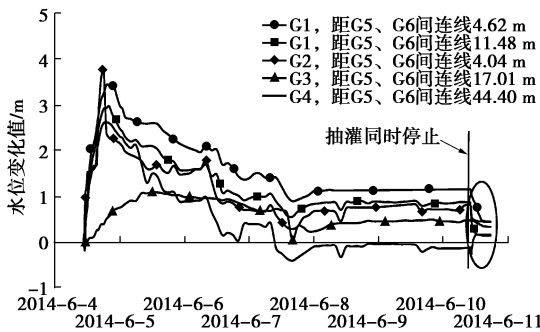


图 16 群抽群灌各观测井 s-t 曲线图

Fig. 16 s-t curves during group well tests

3.2 群抽群灌试验引起的地表隆沉分析

图17为群抽群灌试验过程中若干典型测点的沉降时程曲线。D3、D4、D5、D7点位于回灌井H1、H2、H3间连线上, 因此总体呈隆起状态; D11测点靠近抽水一侧, 因此呈沉降状态; D16测点位于代表被保护建筑物一侧, 同样产生一定的隆起。由此可见,

回灌对地表沉降产生了显著的抑制作用。

4 单抽单灌试验结果与分析

群抽群灌试验结果说明了回灌对抑制地表沉降是有效的。然而, 工程实践表明, 回灌井工作一段时间后, 因井管壁会出现不同程度堵塞导致回灌效率下降, 因此需定期将回灌井进行抽水回扬以解决堵塞问题, 但回灌井抽水回扬会引起水位下降和地层沉降。因此, 本文提出双井组合回灌的方法, 并进一步开展了单抽单灌试验。

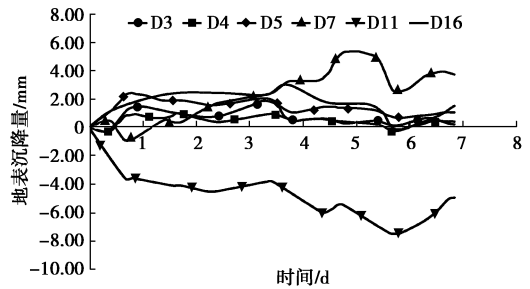


图 17 群抽群灌试验地表沉降监测曲线

Fig. 17 Ground settlement curves during group well tests

试验过程中C1进行抽水模拟回灌井回扬过程, H1同时进行回灌以模拟备用井开启进行回灌。试验时C1、H1同时开启, C1抽水井流量及H1回灌井回灌量均稳定在0.8~1 m³/h, 运行1 d至观测井水位稳定。各观测井的水位随时间的变化趋势如图18所示。

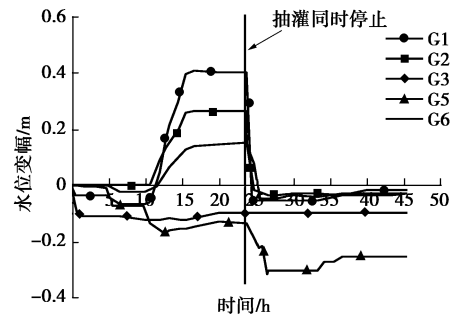


图 18 单抽单灌试验各观测孔 s-t 曲线图

Fig. 18 s-t curves of observation wells with pumping and recharge at the same time

从图18中可以看出, C1、H1同时开启后的前10 h, C1抽水与H1回灌均未达到稳定状态, G2观测井水位基本没有变化, G1、G3、G5、G6观测井的水位呈下降趋势。C1、H1运行10 h后至观测井水位稳定期间, G1、G2、G6水位均呈抬升趋势。G1、G2、G6位于H1一侧, 受H1回灌的影响大于C1抽水的影响, G5位于C1一侧, 受C1抽水的影响较大。

单抽单灌试验期间, 单抽单灌稳定状态下各观测井的实测水位变幅与数值模拟计算的抽水井与回灌井的水位叠加曲线的对比如图19所示。

C1、H1 单抽单灌试验表明, 当实际工程中的在 一口回灌井准备进行抽水回扬时, 为了避免回扬引起 地下水水位下降并引起邻近建筑物沉降, 可在回灌井附 近适当距离设置备用回灌井进行回灌, 有效控制回扬 引起的含水层水位的下降, 形成双井组合回灌技术, 即每两口回灌井近距离成对布置, 可轮流进行回扬和 回灌, 从而解决只有一口回灌井时(相当于其它回灌 井距离较远)回扬引起附加沉降的问题。

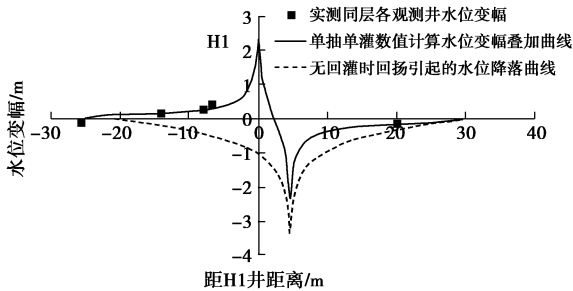


图 19 单抽单灌试验稳定状态下各观测孔 $s-t$ 曲线对比

Fig. 19 Comparison of $s-t$ curves of observation wells in steady state with pumping and recharge at the same time

5 结论和建议

本文通过在天津地铁某地铁基坑工程所在场地开展单井回灌试验、群抽群灌试验以及单抽单灌试验, 对不同回灌量下的水位上升锥形状、水位上升锥随回灌发展的特征曲线、加压回灌效果以及回灌对水位抬升的效果进行研究。得出的结论如下:

(1) 在试验场地条件下, 粉土、粉砂微承压含水层中单井最大稳定自然回灌量最大可达 $2.8 \text{ m}^3/\text{h}$, 加压回灌最大稳定回灌量可达 $5.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 回灌压力后期稳定在 $0.05 \sim 0.06 \text{ MPa}$ 。说明在以粉土、粉砂等相对较细颗粒构成的承压含水层中进行回灌是可行的, 加压回灌可以显著提高回灌效率。

(2) 采用抽水试验降深数据得到的水文地质参数可以用于预测单井回灌的水位抬升情况。但是相同流量下, 在距中心井较近距离内(约 $5 \sim 7 \text{ m}$ 内), 回灌产生的水位上升值显著大于抽水导致的水位降落值, 而在距中心井较远距离, 两者较为接近。在实际工程中, 当仅有抽水试验得到的水文地质参数时, 可以利用这些参数及降水理论进行回灌方案设计, 但需对距离中心井较近位置处的回灌上升锥曲线进行修正。

(3) 地表隆起量随回灌量的增加而呈上升趋势。回灌过程中, 相比地下水位的变化, 地表隆沉的变化有一定的滞后性, 约滞后 0.5 d 。这主要是由于承压层水位变化后, 上部黏土或粉质黏土层孔隙水压力消散及竖向变形完成较慢。另外, 在回灌量减小或者回灌

停止时, 地表会发生快速下沉的现象, 甚至可能由地表隆起变为沉降。因此在实际工程中, 抽水停止后应当适当延长回灌时间, 并逐步减小回灌量, 使地下水水位逐步回稳, 避免抽灌活动结束后沉降的快速发展。

(4) 通过群抽群灌试验可知, 当回灌量与抽水量维持在相近水平时, 相对于抽水井来说, 在回灌井另一侧的承压含水层的地下水水位基本上能保持稳定, 地表也不会发生显著沉降, 说明回灌可有效控制沉降。

(5) 通过单抽单灌试验可知, 在回灌井回扬的过程中, 为了避免地下水位的下降, 可采用双井组合回灌技术, 即回灌井可近距离成对布置, 当一口回灌井准备进行回扬时, 可同时开启另一口回灌井来有效控制回灌引起的含水层水位下降。

(6) 实际工程中, 如采用现场水质处理装置, 把基坑内抽出的地下水回灌至原地层, 维持地下水平衡, 可避免地下水的浪费, 同时实现对周边建筑物的保护。

参考文献:

- [1] 张莲花, 孔德坊. 沉降变形控制的基坑降水最优化方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1171 - 1174. (ZHANG Lian-hua, KONG De-fang. Optimization method and application of pit dewatering for controlling settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1171 - 1174. (in Chinese))
- [2] 金小荣, 俞建霖, 祝哨晨, 等. 基坑降水引起周围土体沉降性状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1575 - 1581. (JIN Xiao-rong, YU Jian-lin, ZHU Xiao-chen, et al. Analysis of behavior of settlement of pit's surrounding soils by dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1575 - 1581. (in Chinese))
- [3] 骆祖江, 李朗, 姚天强, 等. 松散承压含水层地区深基坑降水三维渗流与地面沉降耦合模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1947 - 1951. (LUO Zu-jiang, LI Lang, YAO Tian-qiang, et al. Coupling model of three dimensional seepage and land-subsidence for dewatering of deep foundation pit in loose confined aquifers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1947 - 1951. (in Chinese))
- [4] 吴建中, 王寒梅, 杨天亮. 浅层地下水人工回灌应用于上海市工程性地面沉降防治的试验研究[J]. 现代地质, 2009, 23(6): 1194 - 1200. (WU Jian-zhong, WANG Han-mei, YANG Tian-liang. Experimental research on artificial recharge to shallow aquifer to control land subsidence due to construction in Shanghai City[J]. Geoscience, 2009, 23(6): 1194 - 1200. (in Chinese))

- [5] 瞿成松, 徐丹. 地下水回灌在地铁边基坑降水中的应用[J]. 岩土工程技术, 2012, **26**(5): 238 - 241. (QU Cheng-song, XU Dan. Groundwater recharge of pit dewatering close to the metro[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2012, **26**(5): 238 - 241. (in Chinese))
- [6] 郑刚, 曾超峰, 刘畅, 等. 天津首例基坑工程承压含水层回灌实测研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 491 - 495. (ZHENG Gang, ZENG Chao-feng, LIU Chang, et al. Field observation of artificial recharge of confined water in first excavation case in Tianjin[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 491 - 495. (in Chinese))
- [7] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程地下水回灌系统的设计与应用技术研究[J]. 建筑结构学报, 2001, **22**(5): 70 - 74. (YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Study on the design and the application of the groundwater recharge system in excavation[J]. Journal of Building Structures, 2001, **22**(5): 70 - 74. (in Chinese))
- [8] BUTLER J J, HEALEY J M. Relationship Between pumping - test and slug - test parameters: scale effect or artifact?[J]. Ground Water, 1998, **36**(2): 305 - 312.
- [9] COES A L, SPRUILL T B, THOMASSON M J. Multiple-method estimation of recharge rates at diverse locations in the North Carolina Coastal Plain, USA[J]. Hydrogeology Journal, 2007, **15**(4): 773 - 788.
- [10] VOUDOURIS K, DIAMANTOPOULOU P, GIANNATOS G, et al. Groundwater recharge via deep boreholes in the Patras Industrial Area aquifer system (NW Peloponnesus, Greece)[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, **65**(3): 297 - 308.
- [11] SHEN S L, XU Y S. Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(9): 1378 - 1392.
- [12] TUGEL F, HOUBEN G J, GRAF T. How appropriate is the Thiem equation for describing groundwater flow to actual wells?[J]. Hydrogeology Journal, 2016, **24**(8): 2093 - 2101.
- [13] JAZAEI F, SIMPSON M J, CLEMENT T P. Spatial analysis of aquifer response times for radial flow processes: nondimensional analysis and laboratory-scale tests[J]. Journal of Hydrology, 2016(532): 1 - 8.
- [14] COOPER H H, JACOB C E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well - field history[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1946, **27**(4): 526 - 534.
- [15] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997. (XUE Yu-qun. Groundwater dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. (in Chinese))
- [16] 张扬清, 冉岸绿, 武朝军, 等. 降压回灌作用下黏土的渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 21 - 25. (ZHANG Yang-qing, RAN An-lv, WU Chao-jun, et al. Experimental study on permeability properties of soft clay in process of pumping and recharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 21 - 25. (in Chinese))
- [17] 吴昌瑜, 张伟, 李思慎, 等. 减压井机械淤堵机制与防治方法试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(10): 3181 - 3187. (WU Chang-yu, ZHANG Wei, LI Si-shen, et al. Research on mechanical clogging mechanism of relief well and its control method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(10): 3181 - 3187. (in Chinese))
- [18] 李识博, 王常明, 王钢城, 等. 松散堆积物坝基渗透淤堵试验及颗粒流模拟[J]. 水利学报, 2012, **43**(10): 1163 - 1170. (LI Shi-bo, WANG Chang-ming, WANG Gang-cheng, et al. Infiltration clogging test and simulation by PFC3D for loose dam foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **43**(10): 1163 - 1170. (in Chinese))
- [19] 李旺林, 束龙仓, 李砚阁, 等. 承压-潜水含水层完整反滤回灌井的稳定流计算[J]. 工程勘察, 2006(5): 27 - 30. (LI Wang-lin, SHU Long-cang, LI Yan-ge, et al. Calculation of steady flow in complete recharge well with filter layer with submerged aquifer[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006(5): 27 - 30. (in Chinese))