

DOI: 10.11779/CJGE201702017

多维反滤回灌井室内稳定流试验研究

李旺林¹, 尹志远², 刘占磊³, 魏鹏昆¹, 何家鹏¹

(1. 济南大学, 山东 济南 250002; 2. 济南市热力工程公司, 山东 济南 250100; 3. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘 要: 反滤回灌井是山东胶东半岛地下水回灌中常用的回灌设施, 它由普通回灌井和回灌池组成。在分析现有反滤回灌井存在问题的基础上, 设计了一组回灌量大, 又能防淤积、防低水位污水回灌、抗水流冲刷的多维反滤回灌井, 给出了单井回灌量的理论计算公式和计算参数; 同时, 研制了室内稳定流回灌试验装置, 进行了普通回灌井、现有反滤回灌井和多维反滤回灌井的室内稳定流试验研究, 得出结论: ①同现有反滤回灌井相比, 多维反滤回灌井的单井回灌量增加了 370%~420%; ②多维回灌井口的形状影响单井回灌量, 在过水断面面积相同的情况下, 圆形多维回灌井口的单井回灌量最大; ③初次回灌试验中, 单井回灌量最大, 随回灌试验次数增加, 单井回灌量逐渐减小, 并趋向于稳定; ④单井回灌量与多维回灌井口过水断面开孔率是一个非线性的关系, 20%的过水断面开孔率是适宜的。研究成果对于提高反滤回灌井的回灌能力和定量计算单井回灌量具有重要的现实意义。

关键词: 反滤回灌井; 多维; 回灌试验; 单井回灌量; 稳定流

中图分类号: TU411.93

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)02-0327-07

作者简介: 李旺林(1964-), 山东成武人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程、水工结构工作。E-mail: cswlw@163.com。

Laboratory steady state flow tests on multidimensional recharge well with filter layer

LI Wang-lin¹, YIN Zhi-yuan², LIU Zhan-lei³, WEI Peng-kun¹, HE Jia-peng¹

(1. University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Jinan Thermal Power Engineering Company, Jinan 250100, China; 3. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The recharge well with filter layer is a common device using for recharging groundwater on the Jiaodong Peninsula in Shandong Province of China, and composed of recharge well and pool. By analyzing the problems of the existing recharge wells with filter layer, a group of multidimensional recharge wells with filter layer are designed, which are of a large single-well recharge volume and the advantages of siltation prevention, prevention of waste water recharge and scour resistance. The theoretical formulas and parameters of the single-well recharge volume for multidimensional recharge wells with filter layer are also given. Meanwhile, the laboratory steady state flow recharge test device is developed. The laboratory steady state flow tests on ordinary recharge well, existing recharge well with filter layer and multidimensional recharge wells with filter layer are carried out. The following conclusions are drawn: (1) Under the same conditions, compared with that of the existing recharge well with filter layer, the single-well recharge volume of multidimensional recharge wells with filter layer increases by 370%~420%; (2) The shape of multidimensional recharge wellhead affects single-well recharge volume, and single-well recharge volume of the round multidimensional recharge wellhead is the largest in the same flow section area; (3) The single-well recharge volume is the largest in the first test, and gradually decreases and tends to be stable with the increasing number of tests; (4) There is a nonlinear relationship between the single-well recharge volume and the inflow section porosity of multidimensional recharge wellhead, and the inflow section porosity is suitable for 20%. The study is of significance for improving the recharge capacity and calculating the single-well recharge volume quantitatively.

Key words: recharge well with filter layer; multidimension; recharge test; single-well recharge volume; steady state flow

1 概 述

山东胶东半岛属低山丘陵区, 人均水资源占有量 291.2 m³, 属较严重缺水地区。该区年降雨量的70%~80%集中在7月—8月份, 枯水季节, 河流经常出现断

流和枯涸现象; 汛期丰水季节, 大量雨洪水无法利用,

基金项目: 山东省科技计划项目(2013GSF11606); 水利部公益性科研专项项目(201401024)

收稿日期: 2015-11-27

流入大海。为此,胶东半岛兴建了一批汛期雨洪水利用工程,其中反滤回灌井是最常用的一种雨洪水回灌设施^[1]。反滤回灌井是一种自身具有一定净水能力的特殊回灌井,常布置在河道或回灌渠道内,由回灌池和位于回灌池底中心的普通回灌井组成,其中回灌池是一个倒四方台形土坑,坑内设砂、砾石两层反滤料,可以过滤河水中颗粒和杂质,适用于上部为壤黏土、下部为砂的地层,以及砂与壤黏土互层的地层。

如何提高回灌设备的回灌能力是回灌工程设计的一个重要问题。目前常从两个方向研究这个问题,一是减少回灌设备的堵塞,一是提高回灌设备的单位回灌量。

在回灌设备堵塞研究方面,黄修东等^[2]采用砂柱模拟井灌过程中注水井周围砂层的堵塞过程,分析井灌过程中可能发生的物理、生物堵塞。郑西来等^[3]分析了悬浮固体颗粒对含水介质堵塞的机理。Ma等^[4]在回灌池中用干、湿循环和保持低水头的办法减少生物堵塞。Phien-wej等^[5]分析了回灌水中携带空气、悬浮颗粒引起的物理堵塞,以及回灌水与自然地下水的化学堵塞等。

在提高回灌设施的回灌量方面,Rastogi等^[6]研究了回灌池形状对回灌量的影响,采用有限元法分析了矩形、圆形、正三角形等不同形状回灌池的回灌效果,得出等面积、等回灌率情况下,矩形回灌池回灌量最大的结论。李旺林等^[7-9]研究了反滤回灌井单井回灌量的定量计算方法,分析了现有反滤回灌井存在的主要问题,如回灌池结构不合理等。

本文以提高现有反滤回灌井单井回灌量为前提,设计了三种多维反滤回灌井,推导了多维反滤回灌井单井回灌量计算公式,研制了室内稳定流回灌试验装置,进行了普通回灌井、现有反滤回灌井和多维反滤回灌井的室内稳定流回灌试验研究。这对于提高反滤回灌井的回灌能力和定量计算反滤回灌井的单井回灌量,具有重要的现实意义。

2 多维反滤回灌井

2.1 多维反滤回灌井设计

在现有反滤回灌井的基础上,保留回灌井,将回灌池从地面以下抬高至地面以上,由土坑变为具有硬质材料护壁的回灌井口,并从原来回灌池表面一维入渗进水,改为从回灌井口顶面、外侧面、内侧面、内侧面底面等多维入渗进水的方式。

设计了3种新型回灌井口:①圆形多维回灌井口,其外形为空芯圆柱体,见图1(a)~(d);②方形多维回灌井口,其外形为空芯正方体,见图1(a)、(e)~

(g);③台形多维回灌井口,其外形为空芯四方台体,见图1(a)、(h)~(j)。3种新型回灌井口的顶面、外侧面、内侧面、内底面均带有能够进水的圆孔。

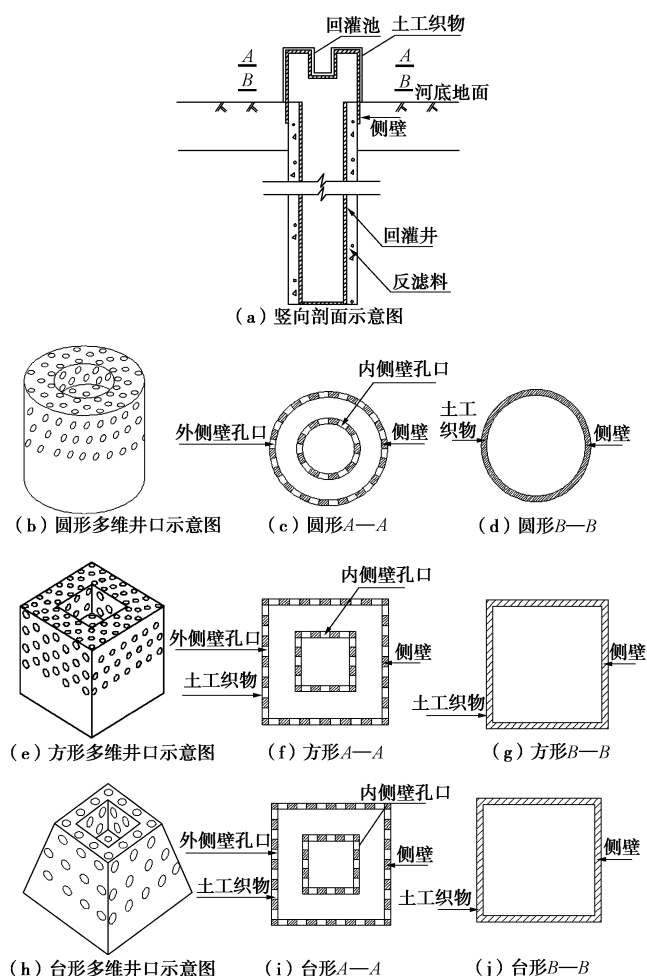


图1 多维回灌井口示意图

Fig. 1 Structural diagram of multidimensional recharge wellhead

与普通反滤回灌井相比,多维反滤回灌井具有以下特点:

(1)回灌池置于地面之上,称之为多维回灌井口,其顶面、外侧面、内侧面及内底面均可进水,增加了进水断面面积,提高了抗淤能力。

(2)多维回灌井口采用钢筋混凝土等硬质材料,增强了抗冲能力。

(3)多维回灌井口外表覆盖一层土工织物,既能有效过滤回灌水中的杂质,又能节省砂砾石材料,还方便维修和更换。

(4)在多维回灌井口墙壁底部一定高度范围内,采用不透水墙壁,可防止雨洪初期劣质河水回灌至含水层。

(5)如果河水污染,在多维回灌井口土工织物反滤层的外层再加套一层不透水的土工膜,可防止污染河水回灌至含水层。

2.2 多维反滤回灌井单井回灌量计算公式

以承压一潜水含水层完整多维反滤回灌井为例, 推导承压一潜水含水层完整多维反滤回灌井的单井回灌量的计算公式。

假设半径 R_0 圆形岛屿中心, 打一眼承压一潜水含水层完整多维反滤回灌井, 岛屿周围地下水位固定不变, 回灌前初始地下水位水平。承压一潜水含水层完整多维反滤回灌井稳定流详见图2。

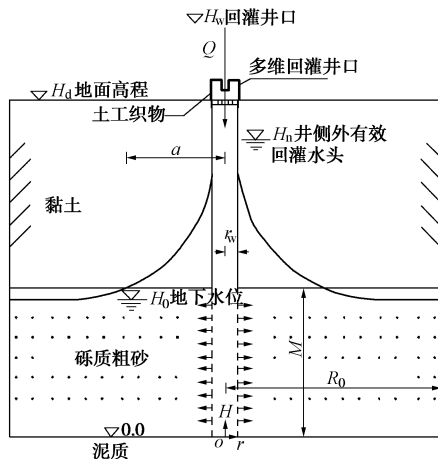


图2 多维反滤回灌井稳定流模型示意图

Fig. 2 Steady flow model for multidimensional recharge well with filter

稳定流运动特征: 回灌水渗入多维回灌井口, 垂直落入井内, 再转化为水平井流, 进入含水层; 多维回灌井口渗流和回灌井水平井流组成连续的承压一潜水含水层完整多维反滤回灌井的稳定流。

基本假定: ①在连续注水的条件下, 多维回灌井口中渗水全部渗入回灌井中, 即井口渗流和水平流是连续的, 无蒸发和侧向渗漏损失; ②水流通过多维回灌井口的渗流服从达西定律; ③回灌井中的水平井流服从达西定律; ④含水层是均质、各向同性, 水平向无限延伸; ⑤灌水前地下水面是水平的; ⑥忽略弱透水层的贮水性。

多维反滤回灌井稳定流模型由方程(1)~(3)组成, 其中方程(1)为多维回灌井口的渗流方程, 方程(2)为承压一潜水含水层完整普通回灌井的水平井流方程(参见文献[7]), 方程(3)为水流通过多维回灌井口后水头 H_f 和回灌井内有效回灌水头 H_n 之间假定关系式。

$$Q = K_f A_f \frac{H_w - H_f}{m_f}, \quad (1)$$

$$Q_j = \frac{\pi k_0 (2MH_n - M^2 - H_0^2)}{\ln \frac{R_0}{r_w}}, \quad (2)$$

$$H_n = \beta_{fcx} H_f, \quad (3)$$

$$H_f = \frac{H_w}{1 + \alpha_{fcx} \beta_{fcx}} + \frac{\alpha_{fcx} (M_2 + H_0^2)}{2M(1 + \alpha_{fcx} \beta_{fcx})}, \quad (4)$$

$$\alpha_{fcx} = \frac{2\pi k_0 M m_f}{K_f A_f \ln \frac{R_0}{r_w}}. \quad (5)$$

式中 Q 为反滤回灌单井回灌量 (m^3/s); H_w 为多维回灌井口外水头, 即河道或渠道回灌设计水位 (m); H_f 为水流通过多维回灌井口后的水头 (m); K_f 为土工织物+多维回灌井口壁的综合渗透系数 (m/s); A_f 为多维回灌井口渗水断面总面积 (m^2); m_f 为土工织物+多维回灌井口壁的厚度 (m); H_n 为回灌井内有效回灌水头, 指回灌井井壁外的实际回灌水头 (m); H_0 为回灌前地下水位 (m); M 为含水层厚度 (m); R_0 为影响半径 (m); r_w 为滤水管半径 (m); K_0 为含水砂层的渗透系数 (m/s); β_{fcx} 为承压一潜水完整多维反滤回灌井综合系数, 实质上反映多维回灌井口的水头损失、回灌井井损等, 需要通过试验确定, 无量纲; α_{fcx} 为系数, 与多维回灌井口和含水层有关的常数, 无量纲。

在基本假定(1)条件下, 多维回灌井口渗流量和普通回灌井回灌量相等, 联立方程(1)~(3), 可得出 H_f , 见方程(4)和(5), 由方程(1), 或方程(3)、方程(2)均可求得多维反滤回灌井的单井回灌量。

承压一潜水含水层完整多维反滤回灌井地下水丘曲线分为承压段和潜水位段(图2), 承压段、潜水位段地下水位方程分别见式(6)、(7), 分界位置 a 的计算式见式(8)、(9)。

$$H = H_n - \frac{Q_{cu}}{2\pi K_0 M} \ln \frac{r}{r_w} \quad (r \leq a), \quad (6)$$

$$H^2 = H_0^2 + \frac{Q_{cu} \ln \frac{R_0}{r}}{\pi K_0} \quad (r > a), \quad (7)$$

$$a = e^y, \quad (8)$$

$$y = \frac{2M(H_n - M) \ln R_0 + (M^2 - H_0^2) \ln r_w}{2MH_n - H_0^2 - M^2}, \quad (9)$$

式中, H 为距井中心 r 处的地下水位 (m), r 为距井中心的位置, a 为承压段、潜水位分界线距离井中心的位置。

3 多维反滤回灌井稳定流试验

3.1 试验设计

(1) 试验装置

室内回灌试验装置为有机玻璃材质的长方体, 长1.8 m, 宽0.8 m, 高1.3 m, 由供水、排水、回灌和测量系统组成, 能模拟半个完整或非完整反滤回灌井的稳定流回灌试验, 见图3。

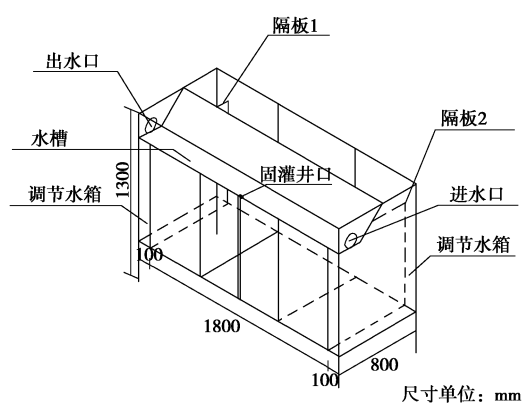


图3 回灌试验装置示意图

Fig. 3 Design diagram of laboratory recharge test device

试验装置供水系统包括水源、稳压水箱、水表、进水管和进水口。排水系统包括出水口、调节水箱排水孔和底排水孔。

试验装置回灌系统有回灌水槽、回灌井、回灌井口、长方体容器和地下水位调节水箱，其中水槽模拟河道或渠道，长方体容器模拟含水层，地下水位调节水箱用于调控环境地下水位。回灌井模型半径10 mm，有机玻璃管材，取一半，黏于长方体容器一侧壁正中间。考虑回灌井口与普通回灌井的实际比例关系，各回灌井口模型比例1：25，取一半，其中圆形多维回灌井口高60 mm，外径为40 mm，内径为20 mm；方形多维回灌井口高60 mm，边长为40 mm；台形多维回灌井口高60 mm，上口边长为35 mm，下口边长为40 mm。多维回灌井口模型过水断面面积的开孔率约为20%，模型照片见图4（a）～（c）。

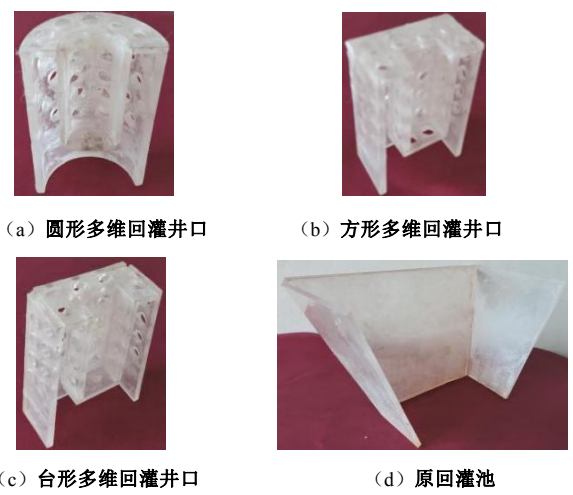


图4 多维回灌井口模型

Fig. 4 Multidimensional recharge wellheads

还制作了1：25的现有反滤回灌井回灌池的模型，取一半，其底部尺寸为40 mm×20 mm长方形，顶部尺寸为80 mm×40 mm长方形，模型照片详见图4（d）。为分析过水断面开孔率对单井回灌量的影响，以方形

多维回灌井口为例，又制作了两个过水断面开孔率分别为30%和10%的方形多维回灌井口。

试验装置测量系统有水位和流量测量，包括水槽水位标尺、调节水箱水位标尺、测压管，以及进水、出水流量测量等。测压管布置于长方体容器底部，按水平线、垂直线和对角线布置，共计20只，主要用于测量含水层不同位置处的水位，见图5。

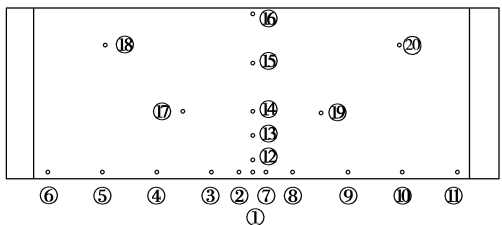


图5 测压管布置图

Fig. 5 Arrangement plan of piezometric tubes

（2）试验方案

模拟承压一潜水含水层完整井稳定流，拟进行的稳定流回灌试验有：①普通回灌井，仅有回灌井，而没有回灌池或回灌井口；②现有反滤回灌井，指带有回灌池的反滤回灌井，其回灌池为四方台体土坑，内设置砂、碎石两级反滤料；③圆形多维反滤回灌井；④台形多维反滤回灌井；⑤方形多维反滤回灌井；⑥方形多维反滤回灌井（过水断面开孔率约为30%）；⑦方形多维反滤回灌井（过水断面开孔率约为10%）。

（3）试样制备

试验装置表层为黏土，下层为砂。砂样采用天然河沙，平均粒径0.84 mm，不均匀系数3.20，曲率系数1.18，为不良级配粗砂，其控制干密度1.44~1.50 g/cm³，渗透系数为3.07~3.55×10⁻⁴ m/s。砂样颗粒大小分布曲线见图6。

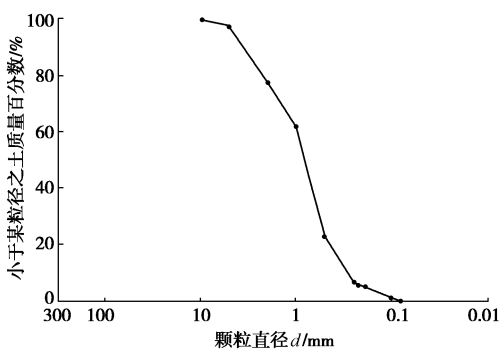


图6 砂样颗粒分布曲线

Fig. 6 Particle size distribution curve of sand

多维回灌井口反滤材料采用土工织物，其单位面积重量为200 g/m²，厚度为3 mm，土工织物+有机玻璃井口壁（约20%的开孔率）的综合渗透系数为6.2×10⁻⁴ m/s。

3.2 试验方法

试验模拟承压一潜水含水层完整井稳定流。试验装置底层铺设天然河砂，表层为黏土。试验时，水槽内回灌水位稳定在 92 cm（容器底部基准水位为 0），周围环境地下水位（指地下水位调节水箱）稳定在 20 cm。为保持周围地下水位稳定，在回灌井模型对面的一侧侧壁下部，设置一砾石排水带，排水带出口与两侧调节水箱相连，使该侧地下水位与两侧调节水箱的水位保持一致。

试验时，水由稳压水箱流出，经水槽一侧端部进入水槽，流经回灌井口时，一部分水渗入回灌井口或回灌池，以垂向流落入回灌井内，再以水平流渗入砂层，最后进入两侧地下水位调节水箱；水槽中其余水经另一侧端部排水管排出。打开地下水位调节水箱排水阀，使两侧调节水箱内水位稳定在周围环境地下水位（20 cm）。当水槽内回灌水位和调节水箱水位保持稳定时，单位时间内从调节水箱排水阀排出的水量即等于反滤回灌井的单井回灌量。

每一种稳定流回灌试验均进行平行试验。

3.3 试验成果

水槽内水头为 92 cm，周围环境地下水位为 20 cm 时，各承压一潜水含水层完整井稳定流试验的单井回灌量见表 1，实测的沿水平线布置测压管地下水位线见图 7。

表 1 单井回灌量及 β_{fcx} 汇总表

Table 1 Summary of single-well recharge volumes and β_{fcx}		
回灌井名称	回灌量 $/(L \cdot \text{min}^{-1})$	β_{fcx}
普通回灌井	19.82	
现有反滤回灌井	3.05	0.635
圆形多维反滤回灌井	15.33	0.952
台形多维反滤回灌井	14.05	0.862
方形多维反滤回灌井（开孔率20%）	14.54	0.874
方形多维反滤回灌井（开孔率30%）	16.19	
方形多维反滤回灌井（开孔率10%）	9.30	

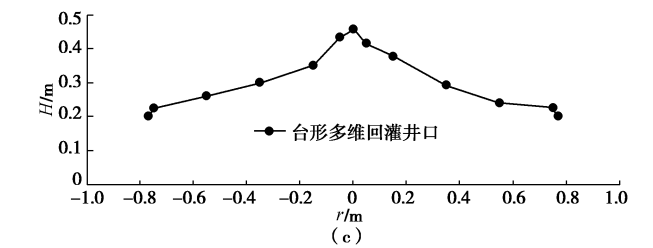
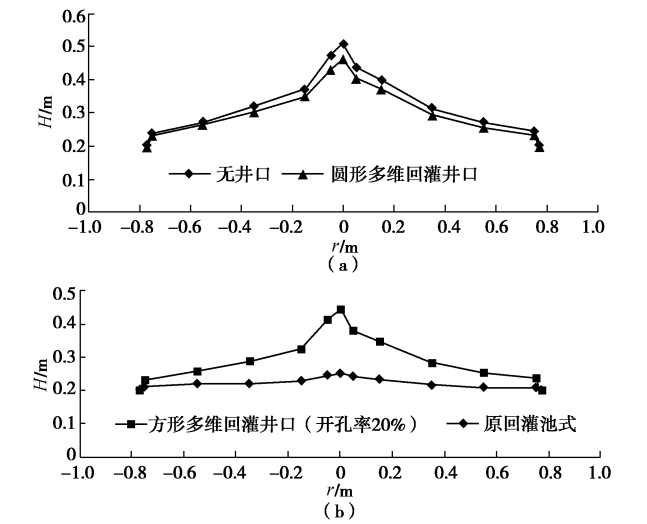


图 7 实测地下水位线

Fig. 7 Measured groundwater levels

从表 1 和图 7 中可以看出：

(1) 在相同的试验条件下，普通回灌井地下水位线最高，多维反滤回灌井次之，现有反滤回灌井最低，说明现有反滤回灌井回灌池的综合水头损失最大，而多维回灌井口的综合水头损失相对较小。

(2) 在相同的试验条件下，现有反滤回灌井的单井回灌量仅为普通回灌井的 15.39%；圆形、方形和台形多维反滤回灌井（进水断面开孔率均为 20%）的单井回灌量分别为普通回灌井的 77.35%，73.36% 和 70.89%。

(3) 在相同的试验条件下，同现有反滤回灌井相比，多维反滤回灌井的单井回灌量增加了 360.65%~402.62%，大大提高了单井回灌量。

4 分析与讨论

4.1 多维反滤回灌井单井回灌量计算系数

利用表 1 的试验成果，将实测的多维反滤回灌井的单井回灌量代入式（1）~（3），通过反算可推求承压-潜水完整多维反滤回灌井的综合系数 β_{fcx} ，见表 1。

在地下水库工程设计中，有了综合系数 β_{fcx} ，即可利用式（1）~（3）计算多维反滤回灌井的单井回灌量，实现多维反滤回灌井回灌量的定量计算。

结合图 7 和表 1，可以说明综合系数 β_{fcx} 实质上代表反滤回灌井的井损，现有反滤回灌井的 β_{fcx} 约 0.6351，而多维反滤回灌井的 β_{fcx} 约为 0.8622~0.9520。可见，多维反滤回灌井的 β_{fcx} 比现有反滤回灌井提高了 35.7%~49.9%。

4.2 单井回灌量理论计算公式的试验验证

由于采用实测的单井回灌量反向推求了计算参数 β_{fcx} ，再利用 β_{fcx} 计算单井回灌量理论值进行验证，就失去了意义。通过实测地下水位和理论公式计算地下水位的对比分析，同样可以验证单井回灌量理论计算公式的合理性。

以圆形多维反滤回灌井为例，采用理论计算公式（式（6）、（7））计算的沿试验装置长边（测压管 1~11）方向的地下水位见图 8，回灌试验实测的地下水位线也见图 8。

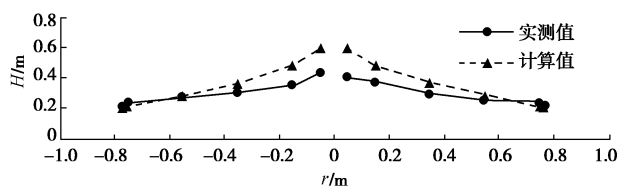


图8 地下水位实测与计算值对比图

Fig. 8 Comparison between measured and calculated values of groundwater level

从图8中可以看出:

(1) 实测地下水位线与理论公式计算的地下水位线表现出相似的规律性。

(2) 低水位部分的地下水位线拟合的相对较好, 而高水位部分存在一定差距。其原因在于: ①理论公式计算值代表地下水位线, 而地下水位实测值为相应底板位置处的水头值。②对于井口附近, 在形成稳定流的过程中, 不仅有水平流, 还存在自上而下的斜向流、竖向流, 使得上部砂层中细小泥粒被带到底部, 并产生水头损失; 离井口越近, 水位越高, 细小泥粒沉淀的越多, 引起的水头损失越大, 使得地下水位与底部水头值之差越大; 反之, 离井口越远, 地下水位与底部水头值之差越小。③由于环境地下水位为 0.2 m, 在接近两侧端部的砂层主要为水平流, 细小泥粒下沉的很少, 同时还有部分细小泥粒被地下水流带出砂层, 底部的水头损失很小, 与地下水位基本一致。因此, 低水位侧地下水位线计算值与实测值吻合的较好, 而高水位侧地下水位线计算值与实测值有一定差距。

上述分析表明描述多维反滤回灌井稳定流单井回灌量的理论计算公式是合理的。

4.3 回灌试验次数对单井回灌量的影响

图9为圆形多维反滤回灌井单井回灌量 Q 与回灌试验次数 N 关系曲线。由图9中可知: 初次回灌试验, 其单井回灌量最大, 随回灌试验次数增加, 单井回灌量逐渐减小, 并趋向稳定, 其稳定单井回灌量约为初次试验单井回灌量的 60.2%。

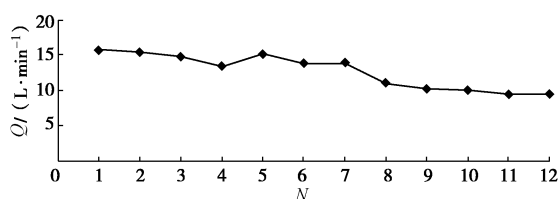


图9 单井回灌量与回灌次数关系曲线

Fig. 9 Relation curve between single-well recharge volume and recharge test time

原因分析: 水流在由多维回灌井口渗入回灌井, 进入含水砂层, 以及在含水砂层渗流的过程中, 水流

中夹杂着一些空气和一些细小颗粒, 此外含水层中还存在一些封闭气泡和细小的泥沙颗粒, 这些都会产生堵塞作用, 并影响单井回灌量的大小。

4.4 多维回灌井口类型对单井回灌量的影响

在回灌试验中, 采用了 3 种多维回灌井口, 其中圆形多维回灌井口的过水断面面积为 46.52 cm², 方形多维回灌井口为 61.36 cm², 台形多维回灌井口为 57.20 cm²。

一般而言, 渗水量与过水断面面积成正比, 可以推论: 在相同条件下, 方形多维反滤回灌井的单井回灌量最大, 台形次之, 圆形最小。然而, 实验结果却表明: 圆形多维反滤回灌井的单井回灌量最大, 方形次之, 台形最小。由此可知: 多维回灌井口类型影响单井回灌量的大小。

原因在于: ①圆形多维反滤回灌井中回灌井口和回灌井的断面形状均为圆形, 当水流从圆形多维回灌井口进入回灌井时, 水流流态比较流畅, 水头损失较小, 单井回灌量相对较大; 而方形、台形多维回灌井口形状与回灌井形状不同, 水流流态不流畅, 水头损失较大, 单井回灌量相对较小。②方形和台形多维回灌井口断面形状相似, 水流流态相近, 水头损失接近, 方形多维回灌井口因过水断面面积较大而具有较大的单井回灌量。

文献[6]中的研究对象为单纯的大型回灌池, 其回灌池下没有回灌井, 因而其“矩形回灌池的回灌量最大”的结论与本次试验成果不具有可比性。

4.5 过水断面开孔率对单井回灌量的影响

以方形多维反滤回灌井为例, 做了 3 种外形尺寸相同、过水断面开孔率分别为 30%, 20% 和 10% 的方形多维回灌井口的模型, 分别进行稳定流回灌试验。3 种不同开孔率的方形多维反滤回灌井的单井回灌量分别为 16.19, 14.54, 9.30 L/min, 其中开孔率 20% 的方形多维回灌井口的单井回灌量为开孔率 30% 的 89.81%, 而开孔率 10% 方形多维回灌井口的单井回灌量为开孔率 20% 的 63.96%。这表明单井回灌量与过水断面开孔率是一个非线性的关系, 当过水断面开孔率低于 20% 时, 其单井回灌量降低幅度较大。另外, 过大的过水断面开孔率还会影响多维回灌井口的结构强度和安全性。因此 20% 的过水断面开孔率是适宜的。

以此类推, 对于其他形状的多维反滤回灌井, 20% 的过水断面开孔率也是适宜的。

5 结 论

(1) 多维回灌井口下部不透水墙壁可防止雨洪初期劣质河水回灌至含水层, 在多维回灌井口外侧加套

不透水的土工膜, 可防止污染河水回灌至含水层, 这增强了多维反滤回灌井的抗污性。

(2) 在试验条件下, 普通回灌井、现有反滤回灌井、圆形多维反滤回灌井、方形多维反滤回灌井和台形多维反滤回灌井的单井回灌量分别为 19.82, 3.05, 15.33, 14.54, 14.04 L/min。同现有反滤回灌井相比, 多维反滤回灌井的单井回灌量大约增加了 360.65%~402.62%, 且抗淤、抗冲能力强, 还节约砂砾石建筑材料。

(3) 多维反滤回灌井稳定流单井回灌量的理论计算公式是合理的, 其单井回灌量的综合系数 β_{fcx} 约为 0.862~0.952, 比现有反滤回灌井高 36.7%~50.7%, 可用于多维反滤回灌井单井回灌量的定量计算。

(4) 多维反滤回灌井初次回灌的单井回灌量最大, 随回灌试验次数的增加, 其单井回灌量逐渐减小, 并趋向稳定。

(5) 多维回灌井口形状影响单井回灌量, 圆形多维回灌井口的进水水流流态最佳, 其单井回灌量也最大。

(6) 单井回灌量与多维回灌井口过水断面开孔率是一个非线性的关系, 20%的过水断面开孔率是适宜的。

参考文献:

- [1] 李旺林, 束龙仓, 殷宗泽. 地下水库的概念和设计理论[J]. 水利学报, 2006, **37**(5): 613 - 618. (LI Wang-lin, SHU Long-cang, YIN Zong-ze. Concept and design theory of groundwater reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(5): 613 - 618. (in Chinese))
- [2] 黄修东, 束龙仓, 刘佩贵, 等. 注水井回灌过程中堵塞问题的试验研究[J]. 水利学报, 2009, **40**(4): 430 - 434. (HUANG Xiu-dong, SHU Long-cang, LIU Pei-gui, et al. Experimental study on clogging of recharge well[J]. Journal of the Hydraulics Division, 2009, **40**(4): 430 - 434. (in Chinese))
- [3] 郑西来, 单蓓蓓, 崔恒, 等. 含水层人工回灌物理堵塞的实验与数值模拟[J]. 地球科学, 2013, **38**(6): 1321 - 1326. (ZHENG Xi-lai, SHAN Bei-bei, CUI Heng, et al. Test and numerical stimulation on physical clogging during aquifer artificial recharge[J]. Journal of Earth Science, 2013, **38**(6): 1321 - 1326. (in Chinese))
- [4] MA L, SPALDING R F. Effects of artificial recharge on ground water quality and aquifer storage recovery[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1997, **33**(3): 561 - 572.
- [5] PHIEN-WEJ N, GIAO P H, NUTALAYA P. Field experiment of artificial recharge through a well with reference to land subsidence control[J]. Engineering Geology, 1998(50): 187 - 201.
- [6] RASTOGI A K, PANDEY S N. Modeling of artificial recharge basins of different shapes and effect on underlying aquifer system[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1998, **3**(1): 62 - 68.
- [7] 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 - 29. (LI Wang-lin, SHU Long-cang, LI Yan-ge, et al. The calculation of steady state flow of confined-unconfined aquifer recharge well with filter layer[J]. Engineering Survey, 2006(5): 27 - 29. (in Chinese))
- [8] 李旺林, 李英特. 反滤回灌井的改进技术[J]. 水利水电技术, 2013, **44**(2): 48 - 50. (LI Wang-lin, LI Ying-te. Present situation and improvement of recharge well with filter layer[J]. Water resources and Hydropower Engineering, 2013, **44**(2): 48 - 50. (in Chinese))
- [9] 李旺林. 反滤回灌井的结构设计理论和方法[J]. 地下水, 2009, **31**(1): 126 - 129. (LI Wang-lin. Structure design theory and method of recharge well with filter layer[J]. Groundwater, 2009, **31**(1): 126 - 129. (in Chinese))