

文章编号: 1007-2993(2024)06-0750-04

# 资源型回灌群井效应动态试验研究

李旭光<sup>1</sup> 刘文彬<sup>2,3</sup> 于天飞<sup>1</sup> 马健<sup>2,3</sup> 赵刚<sup>2,3</sup> 王远川<sup>1</sup>

(1. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100088; 2. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101;

3. 北京市轨道交通深基坑岩土工程重点实验室, 北京 100101)

**【摘要】** 资源型回灌是城市建设工程保护地下水的有效措施之一。为在回灌设计中合理考虑群井效应的影响, 采用在选定的回灌区内动态调整回灌井数量和间距的现场试验方法, 研究了群井效应对单井回灌量的影响, 总结了单井回灌量随井数、井间距的变化规律。结果表明, 群井效应对单井回灌量影响显著, 回灌区面积一定时, 单井回灌量随回灌井数量的增加呈明显下降趋势, 单井回灌量与回灌井间距呈近似对数关系。

**【关键词】** 资源型回灌; 群井效应; 施工降水; 试验研究

**【中图分类号】** TU46+3

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.017

## Dynamic Experimental Study on Group Well Effect of Resource Recharge

Li Xuguang<sup>1</sup> Liu Wenbin<sup>2,3</sup> Yu Tianfei<sup>1</sup> Ma Jian<sup>2,3</sup> Zhao Gang<sup>2,3</sup> Wang Yuanchuan<sup>1</sup>

(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 2. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China; 3. Beijing Key Laboratory of Deep Foundation Pit Geotechnical Engineering for Urban Rail Transit, Beijing 100101, China)

**【Abstract】** Recharge is one of the effective measures to protect groundwater resources in urban construction. To reasonably consider the influence of group well effect in the design of a recharge project, the influence of group well effect on the recharge capacity of a single well was experimentally studied by adjusting the number and spacing of recharge wells dynamically in the selected recharge area, and the change law of the recharge capacity of a single well with the number and spacing of recharge wells was summarized. The results show that the group well effect has a significant effect on the recharge capacity of a single well. Once the recharge area is selected, the recharge capacity of a single well decreases with the increase of the number of recharge wells, and the relationship between the recharge capacity of a single well and the spacing of recharge wells is roughly logarithmic.

**【Key words】** resource recharge; group well effect; engineering dewatering; experimental study

### 0 引言

地下工程施工时, 将施工降水的抽排水进行资源型回灌是保护地下水资源的有效措施。近年来, 已开展了砂卵石强透水地层资源型回灌可行性、降水与回灌的相互影响分析、回灌施工与控制等方面的理论和试验研究<sup>[1-6]</sup>。在基坑降水回灌方案设计方面, 张晋勋等<sup>[7]</sup>基于潜水完整降水-回灌井群的浸润线方程, 建立了一体化降水回灌井点群系统等流量近似理论解和等效大井近似理论解公式; 夏鹏<sup>[8]</sup>利用回灌模型试验分析修正了适用于回灌井稳定流影响半径的经验公式; 钱学溥等<sup>[9]</sup>理论推导了引用影响半径计

算公式, 提高了回灌条件下基坑涌水量计算的可信度。降水回灌设计中除涌水量、影响半径以外, 单井回灌量是确定回灌井数量、保证回灌实施效果的关键参数。由于回灌设计理论尚不完善, 工程中常将回灌看作降水的逆过程。借鉴 Dupuit 管井降水涌水量经验公式计算单井回灌量时, 计算值往往远大于回灌现场实测值<sup>[10]</sup>。究其原因, 除工程实际条件与经验公式假定条件之间存在一定偏差外, 群井回灌引起的群井效应也不容忽视。目前, 回灌群井效应的研究成果较少, 崔永高<sup>[11]</sup>研究了深厚强透水层超大基坑降水的群井效应, 结果表明强透水性含水层基坑降水的群井效应

**作者简介:** 李旭光, 男, 1978 年生, 汉族, 河北保定人, 大学本科, 工程师, 主要从事建筑施工技术质量管理工作。E-mail: lixuguang@163.com

**通讯作者:** 刘文彬, 男, 1973 年生, 汉族, 山东泰安人, 工学博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程技术相关研究工作。E-mail: 33415488@qq.com

极为明显。欧志亮等<sup>[12]</sup>定量评价了井间距对回灌水位的影响,增大井间距可使回灌区水位上升幅度减小,但回灌群井效应对单井回灌量的影响有待进一步研究。

本文通过现场回灌试验研究回灌群井效应,分析选定回灌区内不同回灌井数量、不同回灌井间距对单井回灌量的影响,总结不同回灌设计下单井回灌量的变化规律,为类似工程回灌设计提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 回灌场地选择

依托北京市某职工住宅工程基坑降水项目开展回灌试验研究,基坑开挖深度 14.05 m,南北长 245 m,东西宽 135 m,桩锚支护结构,场地地下水类型为潜水,采用管井降水措施控制地下水,水位降深约 5.2 m,基坑涌水量计算值  $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。矩形回灌试验场地位于基坑东侧,距离基坑约 550 m,长度 80 m,宽度 40 m。场地勘察深度 40.0 m 范围内,地层划分为人工堆积层( $Q_4^{\text{al}}$ )、新近沉积层( $N_4^{\text{al+pl}}$ )、第四纪沉积层( $Q_4^{\text{al+pl}}$ )和古近纪沉积岩层(E)四大类(见图 1)。

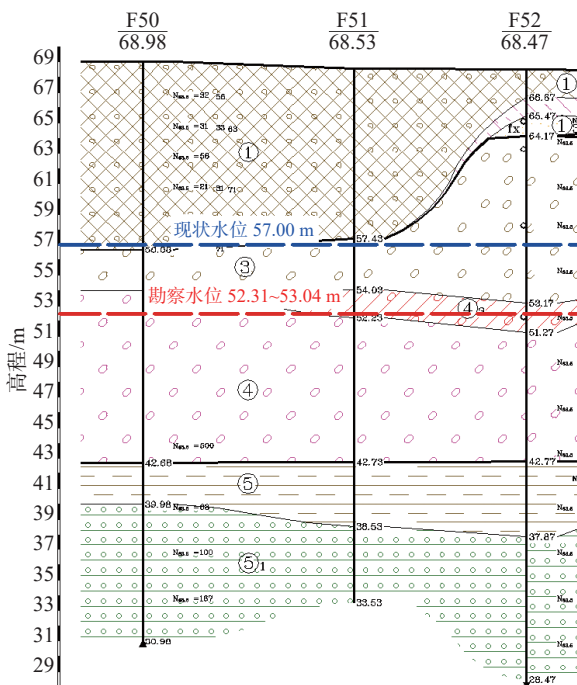


图 1 典型地质剖面图

勘察期间(2020年10月)揭露到1层地下水,水位标高为 52.31 ~ 53.04 m,含水层为卵石③层和卵石④层,含水层底板为黏土岩⑤层,地下水类型属潜水,主要接受大气降水入渗及永定河渗漏等方式补给,以地下水侧向径流、人工开采为主要排泄方式,水位年变化幅度一般为 3 ~ 6 m。受永定河生态补水的影响,基坑护坡桩施工期间(2021年10月)地下水位上升至 57.00 m。

据勘察报告,各地层物理力学性质参数见表 1。

表 1 地层物理力学性质参数

序号	地层	天然重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角 /( $^\circ$ )	黏聚力 /kPa	渗透系数 /( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )
①	杂填土	18	10	0	
① <sub>2</sub>	粉土素填土	18	10	8	
②	粉细砂	19.5	28	0	4.32
③	卵石	21	40	0	432
④ <sub>3</sub>	卵石混黏性土	20	34	5	
⑤	卵石	22	42	0	432

### 1.2 回灌试验装置

试验采用重力流管井同层回灌方法,回灌目标层为④卵石层,回灌试验装置布置见图 2、图 3。回灌井 20 眼,矩形布置,纵横向间距均为 10 m,井径 800 mm,井深 26.5 m,井管滤水段采用  $\phi 529 \text{ mm}$  桥式滤水管,滤料粒径 3 ~ 6 mm,采用大功率反循环成孔工艺。回灌主管 DN600 螺旋钢管,回灌支管 DN200 螺旋钢管。通过 DN200 闸阀控制回灌井的开启或关闭,实现回灌井数量、间距的动态控制。输水管上游使用 2 台明渠流量计监测计量总水量,输水管下游使用 2 台电磁流量计监测计量溢流水量。

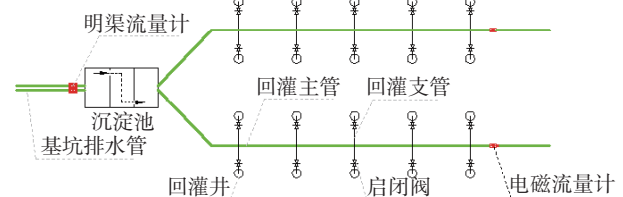


图 2 回灌试验装置布置平面图

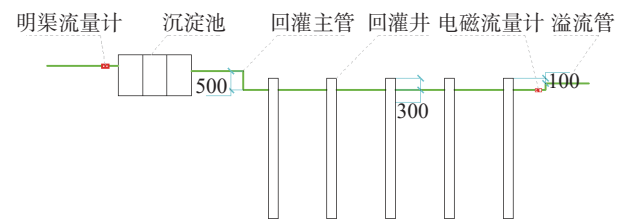


图 3 回灌试验装置布置剖面图(单位:mm)

如图 3 所示,回灌主管末端设置溢流管,回灌主管、回灌支管、回灌井口与溢流管之间设计一定的高差,竖向整体呈“U”型布置。当回灌水量大于总回灌能力时,超过回灌量的水通过溢流管排放,此时回灌井内的水位保持在溢流管底高程位置,保持稳定后即可认为达到最大回灌能力。

## 2 试验方案

通过启闭阀动态控制回灌井是否参与试验,在回灌区内设计 6 组不同回灌井数量的回灌试验,回

灌井数量  $n$  分别为 1, 3, 6, 10, 14, 20。在 20 眼回灌井之内按近似均匀布置原则选择相应数量、不同布置方式的回灌井,并计算得到每次回灌试验对应的回灌井间距  $s$ 。以  $n=3$  为例,在回灌试验区 20 眼回灌井中按照均匀、满布原则选择 3 眼回灌井,回灌井间距按算术平均值取近似值。 $n=3$  的回灌试验方案见图 4(填充部分为参与试验的回灌井)。

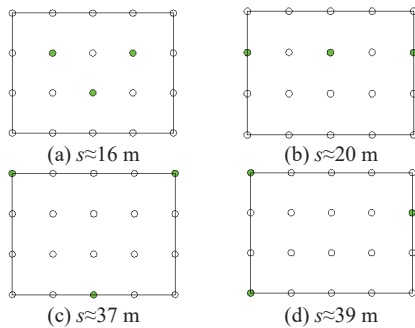


图 4 回灌井选择示意图( $n=3$ )

同样,可以得到  $n$  分别为 6, 10, 14 时的试验方案和对应的井间距,6 组回灌试验设计对应的回灌井间距见表 2。

表 2 试验方案设计

井数	井间距/m
$n=1$	
$n=3$	$s \approx 16, 20, 37, 39$
$n=6$	$s \approx 10, 17, 20, 23$
$n=10$	$s \approx 12, 14, 16, 18$
$n=14$	$s \approx 10, 13, 14$
$n=20$	$s=10$

### 3 影响因素及措施

通过动态调整回灌井数量及位置进行 6 组回灌试验时,影响试验结果的主要因素包括回灌引起的地下水位变化、长时间回灌造成的悬浮物或气泡阻塞以及回灌井达到最大回灌能力状态的判定等。为尽可能降低上述因素的不利影响,试验中主要采取了以下控制措施:①回灌试验按照回灌井数量从小到大的顺序依次实施;②监测回灌区地下水位,待回灌区水位恢复到初始值后再开始下次试验;③每组试验结束后回扬清洗使用过的回灌井;④溢流水保持稳定 1 h 后判定回灌井达到最大回灌能力状态;⑤每组试验先后两次采集水量数据的时间间隔不少于 8 h。

由于回灌试验区距离基坑较近,基坑降水对回灌试验区地下水位和回灌水的渗流扩散势必存在一定的影响。受试验条件的限制,暂未考虑基坑降水对回灌试验结果的影响。

## 4 试验结果分析

### 4.1 试验数据处理

回灌井达到最大回灌能力状态后,采集 2 台明渠流量计的读数并求和得到  $Q_1$ 、2 台电磁流量计的读数求和得到  $q_1$ ,持续回灌时间  $t$  后,再次采集 2 台明渠流量计的读数求和得到  $Q_2$ 、2 台电磁流量计的读数求和得到  $q_2$ ,进而可根据式(1)计算得到单井回灌量  $Q_{\text{单}}$ 。

$$Q_{\text{单}} = \frac{(Q_2 - Q_1) - (q_2 - q_1)}{t \cdot n} \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{单}}$  为单井回灌量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_1$  为稳定溢流后的回灌水量,  $\text{m}^3$ ;  $Q_2$  为持续回灌  $t$  后的回灌水量,  $\text{m}^3$ ;  $q_1$  为稳定溢流后的溢流量,  $\text{m}^3$ ;  $q_2$  为持续回灌  $t$  后的溢流量,  $\text{m}^3$ ;  $t$  为稳定溢流后持续回灌时间,  $\text{d}$ ;  $n$  为回灌井数量。

### 4.2 单井回灌量分析

根据式(1)计算每组试验条件下的单井回灌量,  $n=1$  时,单井回灌量为  $3600 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $n=20$  时,回灌井间距为 10 m,单井回灌量值为  $1820 \text{ m}^3/\text{d}$ 。 $n$  分别等于 3, 6, 10, 14 的四组回灌试验计算的单井回灌量值随回灌井间距的变化曲线见图 5。

试验结果显示,回灌井数  $n$  从 1 变化至 20 时,最大单井回灌量从  $3600 \text{ m}^3/\text{d}$  降低至  $1820 \text{ m}^3/\text{d}$ ,整体呈下降趋势。井数  $n$  分别为 1, 3, 6 时,对应的最大单井回灌量分别为  $3600, 3450, 3323 \text{ m}^3/\text{d}$ ,单井回灌量下降幅度不大,群井效应的影响不明显;井数  $n$  分别为 10, 14, 20 时,对应的最大单井回灌量分别为  $3034, 2645, 1820 \text{ m}^3/\text{d}$ ,单井回灌量下降幅度较大,群井效应的影响较为显著。当井数  $n$  一定时,群井效应随着井间距的增大逐步减弱,表现为单井回灌量逐渐增大。通过回归分析可知,单井回灌量与井间距之间存在近似对数关系。对于类似工程条件的回灌设计,单井回灌量计算取值时可参考二者关系式适当考虑群井效应的影响。

### 4.3 总回灌量分析

回灌场地的总回灌量取决于含水层的贮水能力及渗流扩散能力,在回灌场地面积、含水层厚度、渗透系数、地下水位等条件确定后,该场地的总回灌量理论上存在一个最大值,回灌设计即是通过计算确定合理的回灌井数量及间距,使总回灌量的设计值尽可能接近最大值,实现降耗增效的工程目标。6 组试验的最大总回灌量随井数增加的变化曲线见图 6。

从变化曲线来看,当井数  $n=1, 3, 6$  时,总回灌量随回灌井数量的增加线性上升,回灌场地的回灌能力



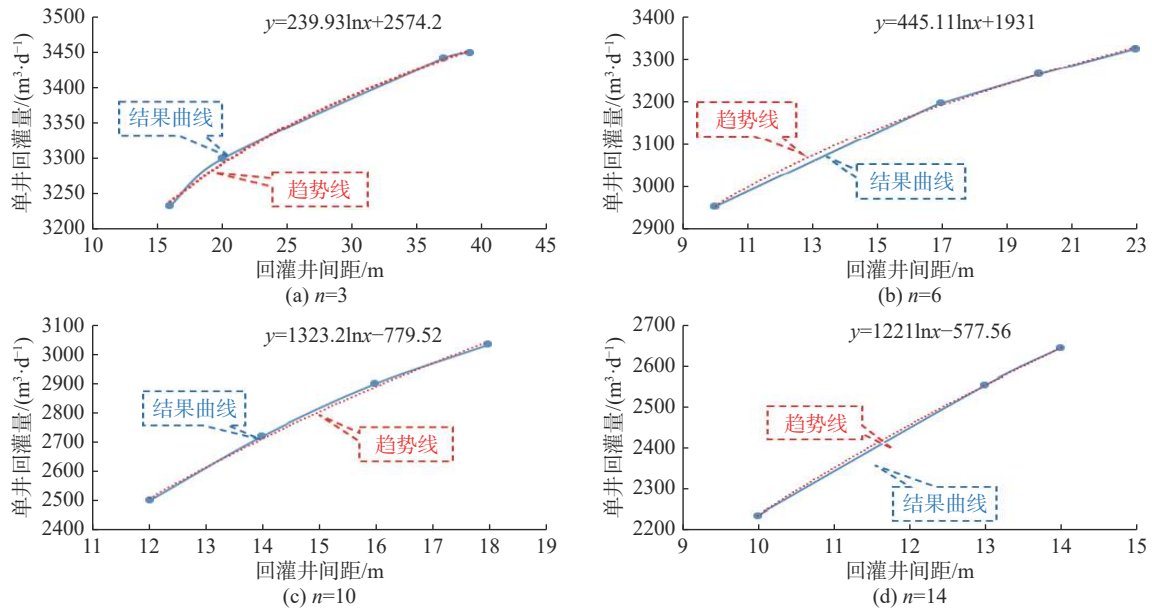


图5 单井回灌量变化曲线

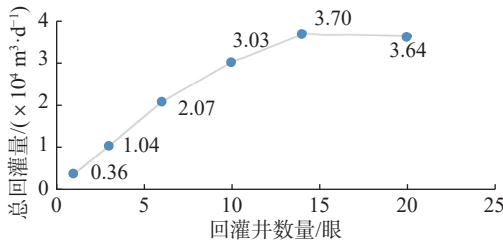


图6 总回灌量变化曲线

尚未充分发挥,可考虑增加回灌井数量;当  $n=10$ , 14 时,总回灌量随回灌井数量的增加缓慢提升,回灌场地的回灌能力逐渐接近最大值,可考虑优化回灌井布置进一步提高回灌能力;当  $n=20$  时,总回灌量随回灌井数量的增加反而有所降低,说明回灌井数量已超过最优值。由此可见,回灌场地的总回灌量与回灌井数量并非简单的正比关系,设计时应结合单井回灌试验、群井效应分析、类似工程经验综合确定经济合理的回灌井数量及布置形式。

## 5 结论

(1)在选定的回灌区内,随回灌井数量增加单井回灌量整体呈下降趋势,证明回灌群井效应对单井回灌量存在一定的影响,且井数越多影响越显著。

(2)回灌井数量相同时,随回灌井间距增大,单井回灌量呈上升趋势,二者近似呈对数关系。

(3)回灌场地的总回灌量与回灌井数量并非简单的正比关系,设计时应结合单井回灌试验、群井效应分析、类似工程经验综合确定经济合理的回灌井数量及布置形式。

(4)受试验条件的限制,仅针对 6 种试验工况下的群井效应进行了初步定量化分析,地层渗透性、含

水层厚度、基坑降水等因素对回灌群井效应的影响有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 毛根海, 宋建锋, 姚懿伦, 等. 回灌技术在基坑工程中的应用研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2005(1): 166-169.
- [2] 肖双全, 赵刚, 李凌宜, 等. 砂卵石潜水位回灌对临近同层降水工程影响研究 [J]. 都市轨道交通, 2021, 34(2): 111-116.
- [3] 胡冰冰, 路林海, 李罡, 等. 富水砂卵石层基坑封闭降水与回灌工程关键技术 [J]. 都市轨道交通, 2021, 34(3): 92-97, 103.
- [4] 郑刚, 曹剑然, 程雪松, 等. 考虑承压含水层间越流的地下水回灌现场试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 41(9): 1-10.
- [5] 陆建生. 深基坑工程回灌管井设计若干问题探讨 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(8): 42-46.
- [6] 刘金. 济南市富水地层基坑降水与回灌理论计算及试验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [7] 张晋勋, 赵刚, 韩玉珍, 等. 潜水位一体化降水回灌设计方法研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3107-3116.
- [8] 夏鹏. 厚砂卵石地层回灌模型试验与回灌井流问题研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [9] 钱学溥, 于义强. 引用影响半径理论公式及其应用 [J]. 工程勘察, 2019, 47(6): 43-49.
- [10] 郭枫, 王贵和, 阚生雷, 等. 北京地区厚卵石潜水位现场回灌试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(32): 13379-13385.
- [11] 崔永高. 深厚强透水含水层超大基坑降水群井效应研究 [J]. 工程地质学报, 2015, 23(3): 574-579.
- [12] 欧志亮, 沈媛媛, 许亮. 强渗透地区地铁降水回灌方案研究 [J]. 城市地质, 2022, 17(1): 50-55.