

文章编号: 1007-2993(2025)01-0001-05

卵石地层深基坑降水可回灌性分析

于天飞¹ 刘文彬^{2,3} 李旭光¹ 马健^{2,3} 罗礼涛¹ 胥旻扬¹

(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】 为客观评价卵石地层深基坑降水回灌的可行性, 分析梳理了影响可回灌性的关键因素, 划分了可回灌性等级, 确定了对应的评价指标水平, 基于 Euclid 贴适度-灰色关联度分析, 提出了可回灌性多因素、多水平综合评价模型。通过分析深基坑工程参数与可回灌性评价指标的关联度, 可确定深基坑工程降水的可回灌性等级。以回灌工程实例对可回灌性分析的可靠性进行了验证, 结果表明, 基于 Euclid 贴适度-灰色关联度的可回灌性分析方法可为回灌设计提供参考。

【关键词】 卵石地层; 深基坑降水; 可回灌性; Euclid 贴适度-灰色关联度分析

【中图分类号】 TU46

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2023-0700

Feasibility analysis of dewatering recharge for deep foundation pit in pebble stratum

Yu Tianfei¹ Liu Wenbin^{2,3} Li Xuguang¹ Ma Jian^{2,3} Luo Litao¹ Xu Minyang¹

(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】 To objectively evaluate the feasibility of dewatering recharge in deep foundation pit in pebble stratum, the key factors affecting the feasibility of recharge were analyzed, the classification of the feasibility of recharge and the corresponding evaluation index levels were determined. Based on Euclid approach degree and grey correlation degree analysis, a multi-factor and multi-level comprehensive evaluation model for recharging feasibility was proposed. By analyzing the correlation degree between the parameters of deep foundation pit engineering and the evaluation index of recharge feasibility, the feasibility grade of dewatering recharge of deep foundation pit engineering can be determined. The reliability of the recharge feasibility analysis was verified by a case study of the recharge project, and the results show that the method of the recharge feasibility analysis based on Euclid approach degree and grey correlation degree can provide references for recharge design.

【Key words】 pebble stratum; dewatering of deep foundation pit; feasibility of recharge; Euclid approach degree-grey correlation degree analysis

0 引言

城市建设快速发展, 深基坑工程降水规模越来越大, 抽排水直接排放消耗了大量的地下水资源。在卵石地层开展深基坑降水资源型回灌是城市建设中深基坑工程控制地下水、保障施工安全的一项实用技术, 也是防止过度开采与排放地下水、保护地下水资源的有效手段。为保证回灌工程的顺利实施, 深基坑降水回灌的可行性分析研究得以陆续开展。闫玉玺^[1] 通过现场试验监测管井回灌量、地下水位、水质

等的变化, 验证了在砂卵石层管井回灌地下水的可行性。王国富等^[2] 以回灌水质、建筑物距离基坑远近、风险损失等级、含水层透水性以及基坑降水量与含水层储水量之比为评价指标, 利用矩阵评价法建立了基坑降水回灌适宜性分级标准, 用于评价深基坑降水回灌的适宜性(侧重于防沉降型回灌)。郭枫等^[3] 以北京地铁区间降水工程为背景开展回灌试验, 实现了抽水量的等量回灌, 证明了在厚卵石层潜水层中进行水资源保护型回灌的可行性。李凌宜等^[4] 从场地

作者简介: 于天飞, 男, 1979 年生, 大学本科, 主要从事建筑施工技术研究。E-mail: yutianfei@163.com

通信作者: 刘文彬, 男, 1973 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程施工技术研究。E-mail: 33415488@qq.com

条件、地层条件、周边环境等方面对回灌可行性分析作了初步探讨。欧志亮等^[5]以砂卵石强渗透性地区地铁基坑降水工程为例,利用地下水数值模型评价了回灌设计方案的可行性。

尽管目前针对卵石地层深基坑降水的可回灌性分析已开展了一定的研究,但是尚未形成系统的分析评价方法,不利于深基坑降水回灌的可行性评判与推广应用。本文在已有研究成果的基础上分析了影响深基坑降水可回灌性的关键因素与评价指标,基于Euclid贴近度-灰色关联度多因素、多水平分析模型,提出了一种卵石地层深基坑降水可回灌性分析方法,为降水回灌方案决策及后续研究提供参考。

1 可回灌性影响因素

深基坑降水回灌是利用管井抽排地下水,降低基坑施工范围内的地下水水位,并通过回灌井将排出的地下水回灌至含水层来保护地下水资源。当地下水水位在降水与回灌的共同作用下得到有效控制,同时满足施工安全与环境保护的要求时,即认为回灌是可行的。在卵石层采用管井重力流同层回灌时,可回灌性主要从回灌场地条件、回灌距离、回灌目标层水文地质条件及周边环境要求等方面进行综合评价。

1.1 回灌场地条件

基坑降水区面积与基坑涌水量正相关,回灌区面积与回灌井数量、整体回灌能力正相关,回灌区面积应满足整体回灌能力不小于基坑涌水量的要求。为便于比较分析,可用回灌区与降水区面积之比 a 作为回灌场地面积的评价指标, a 越大,可回灌性越强。根据回灌区面积与降水区面积之比 a ,将可回灌性划分为5个等级(见表1)。

表1 回灌场地条件的影响

回灌场地条件	可回灌性分级				
	强	较强	中	较弱	弱
回灌区与降水区面积比 a	>0.8	0.5~0.8	0.3~0.5	0.1~0.3	<0.1

1.2 回灌距离

受场地条件限制采取短路径回灌时,降水与回灌之间存在着相互影响,在降水区低水位与回灌区高水位的水头差作用下,部分回灌水回流至基坑,导致基坑降水的总涌水量增加,同时增加降水与回灌难度。

张晋勋等^[6]在潜水完整井浸润线方程中引入等流量和等效大井近似条件,推导出降水井点群和回灌井点群系统涌水量和回灌水量等效大井近似解。经

公式变换可得到回灌条件下潜水完整井的基坑涌水量计算公式^[7]:

$$Q = \frac{\pi k(2H_0 - s)s}{\ln\left(\frac{R_1}{r}\right) - \alpha \ln\left(\frac{R_2}{l}\right)} \quad (1)$$

式中: Q 为基坑降水涌水量, m^3/d ; k 为含水层渗透系数, m/d ; H_0 为潜水含水层厚度, m ; s 为基坑地下水设计降深, m ; R_1 为降水影响半径, m ; R_2 为回灌影响半径, m ; r 为降水区等效半径, m ; l 为降水区等效大井中心点至回灌区等效大井中心点的距离, m ; α 为回灌水量与基坑涌水量的比值。

由式(1)可知:降水与回灌相互影响的程度与回灌距离 l 密切相关。 l 取值越小,基坑涌水量越大,降水回灌难度越大; l 取值越大,基坑涌水量越小,降水回灌难度越小。回灌距离对可回灌性的影响等级划分见表2。

表2 回灌距离的影响

回灌区至降水区距离	可回灌性分级				
	强	较强	中	较弱	弱
l/m	>1000	800~1000	500~800	300~500	<300

1.3 卵石层水文地质条件

基坑降水回灌的难易程度与回灌目标层的水文地质条件直接相关。选择卵石层为回灌目标层时,卵石层的透水性越强,地下水潜在的可流动速度就越大,回灌水的侧向流动就会越快,可回灌性也越强;卵石层的可灌厚度越大,储水量越大,可回灌性也越强;卵石层埋深越浅,施工难度和成本越低,可回灌性也越强。参照《城市建设工程地下水控制技术规范》(DB 11/1115-2014),卵石水文地质条件对可回灌性的影响可根据渗透系数、可灌厚度和埋深划分为5个等级(见表3)。

表3 卵石层水文地质条件的影响

卵石层水文地质条件	可回灌性分级				
	强	较强	中	较弱	弱
渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	>350	250~350	150~250	50~150	<50
可灌厚度 h/m	>15	10~15	5~10	3~5	<3
埋深 H/m	<10	10~20	20~30	30~50	>50

1.4 周边建构筑物

降水回灌引起土体内孔隙水压力和有效应力发生改变,进而引起土体的颗粒移动或变形,宏观表现为地表竖向位移,其在降水区附近表现为沉降,最大

沉降点位于降水漏斗中心,在回灌区附近表现为隆起,最大隆起点位于回灌区中心^[8]。为保证周边建构物的安全,回灌区与建构物之间需保持足够的安全距离,可回灌性可从周边建构物边线至回灌区中心的最小距离 s 来分级评价(见表 4)。

表 4 周边建构物的影响

周边建构物最小距离	可回灌性分级				
	强	较强	中	较弱	弱
s/m	>1000	500 ~ 1000	300 ~ 500	100 ~ 300	<100

综上所述,卵石层深基坑降水的可回灌性主要受回灌区与降水区面积比、回灌距离、回灌目标层渗透系数、目标层厚度、目标层埋深和周边建构物距离等 6 个因素的影响,每个因素的不同水平对应着不同的可回灌性等级。根据可回灌性影响因素及评价指标,划分可回灌性等级见表 5。可回灌性分析涉及多因素、多水平评价指标,需采取系统性的综合评价方法。

表 5 可回灌性评价指标

评价指标	可回灌性分级				
	强	较强	中	较弱	弱
回灌区与降水区面积比 a	>0.8	0.5 ~ 0.8	0.3 ~ 0.5	0.1 ~ 0.3	<0.1
回灌区至降水区距离 l/m	>1000	800 ~ 1000	500 ~ 800	300 ~ 500	<300
目标层渗透系数 $k/(m \cdot d^{-1})$	>350	250 ~ 350	150 ~ 250	50 ~ 150	<50
目标层可灌厚度 h/m	>20	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	<5
目标层埋深 H/m	<10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 50	>50
周边建构物距离 s/m	>1000	500 ~ 1000	300 ~ 500	100 ~ 300	<100

2 可回灌性分析模型

灰色关联分析是一种根据数列的可比性和相近性,分析系统内部主要因素之间的相关程度,确定相关程度最大的因素的定量化比较分析方法。近年来在经济效益分析、围岩稳定性评价等众多领域得到了广泛的应用^[9-10]。参照此方法,深基坑降水可回灌性分析可通过分析工程参数参考数列与评价指标比较数列之间的关联度来确定可回灌性等级。传统的灰色关联分析模型中未考虑评价指标的区间形式^[11],也未能体现关联系数相对于关联度的波动情况,为弥补这些不足,结合已有研究成果,提出了适用于可回灌性分析的 Euclid 贴适度-灰色关联复合模型,该模型的主要计算步骤如下。

2.1 建立参考数列和比较数列

设实际工程参数为参考数列 $\{x(k)\}$, $k = 1, 2, \dots, 6$;

可回灌性评价指标为比较数列 $\{y_i(k)\}$, $k = 1, 2, \dots, 6$; $i = 1, 2, \dots, 5$ 。

2.2 数据处理

由于可回灌性影响因素各有不同的计量单位,原始数据存在量纲和数量级上的差异,不同的量纲和数量级不便于比较。因此,在计算关联度之前通常要对参考数列和比较数列进行无量纲化处理,这里采用归一化处理方法将参考数列与对比数列转变为 $[0, 1]$ 之间的数据。在评价指标中,回灌目标层埋深越大可回灌性越弱,此指标为负向指标,还需要进行正向化处理。

2.3 计算绝对差 $\Delta_i(k)$

在传统灰色关联分析模型中, $x(k)$ 与 $y_i(k)$ 在第 k 项指标上的绝对差 $\Delta_i(k) = |x(k) - y_i(k)|$,由于可回灌性评价指标采用区间形式,各参考数列与对比数列的绝对差 $\Delta_i(k)$ 按式(2)计算:

$$\Delta_i(k) = \begin{cases} |x(k) - a_i(k)| & \text{左无限区间} \\ \left| x(k) - \frac{a_i(k) + b_i(k)}{2} \right| & \text{有限区间} \\ |x(k) - b_i(k)| & \text{右无限区间} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a_i(k)$ 为某一可回灌性等级对应评价指标的上限; $b_i(k)$ 为某一可回灌性等级对应评价指标的下限。

2.4 计算关联系数 $\xi_i(k)$

$\{x(k)\}$ 对 $\{y_i(k)\}$ 在第 k 项指标处的关联系数 $\xi_i(k)$ (反映比较数列与参考数列在某项指标上的关联程度) 定义为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (3)$$

式中: $\min_i \min_k \Delta_i(k)$ 为两级最小差; $\max_i \max_k \Delta_i(k)$ 为两级最大差; ρ 为分辨系数,在 $0 \sim 1$ 之间取值,通常取值为 0.5 。

2.5 计算关联度 r_i

设比较数列与参考数列在每一项评价指标处的关联系数 $\xi_i(k)$ 相对于其平均值 \bar{r}_i 的波动值为 $d_i(k)$, 则 $\xi_i(k)$ 可以表示:

$$\xi_i(k) = \bar{r}_i + d_i(k) \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^6 d_i(k) = 0 \quad (5)$$

则 Euclid 贴适度-灰色关联复合模型可表示为:

$$r_i = 1 - \frac{1}{\sqrt{6}} \left[6 \times (\bar{r}_i - 1)^2 + \sum_{k=1}^6 d_i(k)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

2.6 确定可回灌性等级

根据式(6)依次计算关联度 $r_i (i = 1, 2, \dots, 5)$, 关联度最大的一组评价指标对应的等级即为实际工程的可回灌性等级。

3 案例分析

3.1 工程概况

北京市某深基坑竖向投影面积约 20000 m², 开

挖深度 12.57 ~ 14.0 m, 开挖范围内地层自上而下依次为人工填土、粉细砂、砂质粉土、卵石层。基坑工程涉及一层地下水, 施工期间水位埋深 10.19 ~ 14.16 m, 地下水类型属潜水, 含水层为卵石层, 渗透系数 432 m/d。地下水控制采用管井封闭降水方案, 抽排水采用管井重力流同层回灌, 回灌区长度 60 m, 宽度 35 m, 面积约 2100 m², 回灌相关工程参数见表 6。

3.2 确定参考数列和比较数列

取工程参数为参考数列, 可回灌性评价指标为比较数列, 则该工程的可回灌性评价参数见表 7。

表 6 回灌工程参数表

回灌区与降水区面积比 a	回灌区至降水区距离 l/m	目标层渗透系数 $k/(m \cdot d^{-1})$	目标层可灌厚度 h/m	目标层埋深 H/m	周边构筑物距离 s/m
0.105	255	432	6	10	1200

表 7 可回灌性评价参数表

评价指标	比较数列 $y_i(k)$					参考数列 $x(k)$
	$i = 1$ 强	$i = 2$ 较强	$i = 3$ 中	$i = 4$ 较弱	$i = 5$ 弱	
回灌区与降水区面积比 a	>0.8	0.5 ~ 0.8	0.3 ~ 0.5	0.1 ~ 0.3	<0.1	0.105
回灌区至降水区距离 l/m	>1000	800 ~ 1000	500 ~ 800	300 ~ 500	<300	255
目标层渗透系数 $k/(m \cdot d^{-1})$	>350	250 ~ 350	150 ~ 250	50 ~ 150	<50	432
目标层可灌厚度 h/m	>20	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	<5	6
目标层埋深 H/m	<10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 50	>50	10
周边构筑物距离 s/m	>1000	500 ~ 1000	300 ~ 500	100 ~ 300	<100	1200

3.3 数据处理

参考数列与对比数列均利用最优值进行归一化处理, 目标层埋深指标为负向指标, 需作正向化处理

(前面加“-”号), 并按照式(2)对有效区间指标取中值、无限区间指标取有效实数进行简化处理, 数据处理结果见表 8。

表 8 数据处理结果

评价指标	比较数列 $y_i(k)$					参考数列 $x(k)$
	$i = 1$ 强	$i = 2$ 较强	$i = 3$ 中	$i = 4$ 较弱	$i = 5$ 弱	
回灌区与降水区面积比 a	1	0.8125	0.5	0.25	0.125	0.1313
回灌区至降水区距离 l/m	1	0.9	0.65	0.4	0.3	0.2550
目标层渗透系数 $k/(m \cdot d^{-1})$	0.8102	0.6945	0.463	0.2315	0.1157	1.0000
目标层可灌厚度 h/m	1	0.875	0.625	0.375	0.25	0.3000
目标层埋深 H/m	-0.2	-0.3	-0.5	-0.8	-1	-0.2000
周边构筑物距离 s/m	0.8333	0.65	0.3334	0.1667	0.0833	1.0000

3.4 关联度计算与分析

根据式(2)一式(6)计算可得: $\bar{r}_1 = 0.5089$, $\bar{r}_2 = 0.4642$, $\bar{r}_3 = 0.4498$, $\bar{r}_4 = 0.5107$, $\bar{r}_5 = 0.5482$; $r_1 = 0.4556$, $r_2 = 0.4429$, $r_3 = 0.4418$, $r_4 = 0.4669$, $r_5 = 0.4655$ 。从计算结果可知, 传统灰色关联分析模型计算的关联度最大值为 $\bar{r}_5 = 0.5482$, 该工程的可回

灌性等级为弱; Euclid 贴近度-灰色关联度复合模型计算的关联度最大值为 $r_4 = 0.4669$, 该工程的可回灌性等级为较弱。二者相比较而言, Euclid 贴近度-灰色关联度复合模型充分体现了关联系数相对于关联度的波动情况, 评价方法更客观、更合理。

从回灌工程实施过程来看, 设计阶段考虑到回

灌区面积较小且距离基坑降水区较近,存在整体回灌能力偏低和回灌水回流至基坑的风险,为提高可回灌性,采取了加大回灌井直径并优化成井工艺以提高回灌能力,同时加密基坑临近回灌区侧的降水井布置以控制回流水等措施。总体而言,该工程的可回灌性与基于 Euclid 贴近度-灰色关联度的分析结果较为吻合,该评价方法可行、有效,可为降水回灌设计提供参考。建议降水回灌设计针对不利因素采取有效控制措施,以保证回灌效果及周边环境安全。当可回灌性等级为较弱或弱且无有效的控制措施时,不建议采用降水回灌措施。

4 结论

(1)在卵石层采用管井重力流同层回灌时,可主要从回灌场地条件、回灌距离、回灌目标层水文地质条件及周边环境要求等方面对可回灌性进行分析评价。

(2)Euclid 贴近度-灰色关联度复合模型,解决了多因素、多水平分析评价问题,克服了传统的灰色关联分析法的不足,具有客观性和实用性特点,适用于深基坑降水可回灌性分析,可为降水回灌设计及后续研究提供参考。

(3)卵石层深基坑降水回灌设计时,建议针对回灌不利因素采取有效,以保证回灌效果和周边环境安全,当可回灌性等级为较弱或弱且无有效的控制措施时,不建议采用降水回灌措施。

本文仅针对卵石潜水含水层中管井重力流回灌的可行性影响因素及可回灌性分析评价方法进行了探索,对于承压水含水层回灌、加压回灌、防沉降回灌等回灌类型,其可行性分析与评价尚有待开展研究。

参 考 文 献

- [1] 闫玉玺. 北方某市管井回灌地下水可行性试验研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2015. (YAN Y X. The experimental research on feasibility of tubewell groundwater recharge in a northern city[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015. (in Chinese))
- [2] 王国富, 唐卓华, 李 罡, 等. 基坑工程降水回灌适宜性分级研究 [J]. 施工技术, 2016, 45(13): 41-44.49. (WANG G F, TANG Z H, LI G, et al. Suitability classification of groundwater recharge in deep foundation excavation[J]. Construction Technology, 2016, 45(13): 41-44.49. (in Chinese))
- [3] 郭 枫. 北京地铁房山线丰益桥南站~风井基坑回灌试验及数值模拟研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2019. (GUO F. Recharge test and numerical simulation study of Fengyi bridge south station to Fengjing section of Fangshan line of Beijing subway[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019. (in Chinese))
- [4] 李凌宜, 李大宁, 赵 刚, 等. 资源性降水回灌系统设计方法初探 [J]. 中国矿业, 2019, 28(S2): 440-443. (LI L Y, LI D N, ZHAO G, et al. Preliminary study on design method of resource precipitation and recharge system[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(S2): 440-443. (in Chinese))
- [5] 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. (OU Z L, SHEN Y Y, XU L. Study on subway dewatering reinjection scheme in high permeability area[J]. Urban Geology, 2022, 17(1): 50-55. (in Chinese))
- [6] 李旭光, 刘文彬, 于天飞, 等. 深基坑降水与短路径回灌的降水回灌一体化设计方法: 116186869A[P]. 2023-05-30. (LI X G, LIU W B, YU T F, et al. Dewatering and recharging integrated design method for deep foundation pit dewatering and short-path recharging: 116186869A[P]. 2023-05-30. (in Chinese))
- [7] 李大宁, 赵 刚, 韩冬冰. 基于数值分析的降水与回灌相互影响分析 [J]. 山西建筑, 2020, 46(1): 88-89. (LI D N, ZHAO G, HAN D B. Analysis of Interaction between precipitation and recharge based on numerical analysis[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(1): 88-89. (in Chinese))
- [8] 刘思峰, 蔡 华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046. (LIU S F, CAI H, YANG Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modelling[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2013, 33(8): 2041-2046. (in Chinese))
- [9] 马菊红. 新灰色关联分析法在评价经济效益中的应用研究 [J]. 情报杂志, 2005, 24(3): 98-99. (MA J H. Research on the application of new grey relational analysis method in evaluating economic benefits[J]. Journal of Intelligence, 2005, 24(3): 98-99. (in Chinese))
- [10] 伍学雷. 基于改进灰色关联分析模型的围岩稳定性综合评价 [J]. 河南科技, 2014, 33(7): 23-24. (WU X L. Comprehensive evaluation of surrounding rock stability based on improved grey relational analysis model[J]. Henan Science and Technology, 2014, 33(7): 23-24. (in Chinese))
- [11] 王嵩峰, 周培疆. Euclid 贴近度-灰色关联模型在环境影响评价中的应用 [J]. 环境科学与技术, 2004, 27(S1): 25-27. (WANG S F, ZHOU P J. Study on complex model of Euclid approach degree-grey relational analysis: its application in environmental quality assessment[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 27(S1): 25-27. (in Chinese))