

基坑工程管井回灌优化设计探讨

陆建生

(上海广联建设发展有限公司,上海 200438)

摘要:目前基坑管井回灌设计及优化尚无专门成熟的方法,通过不同基坑回灌类型的分析,提出了基坑管井回灌设计原则及设计流程,并对回灌参数进行了探讨,对回灌可施加的最大压力进行了分析,通过 285 组基坑水文地质数值模型的计算,对比分析了不同渗透各向异性系数、回灌井结构、回灌井位置和保护建(构)筑物位置下的渗流特征,提出了回灌设计综合指数,从经济、技术及施工难度角度综合评估回灌对保护建(构)筑物以及对坑内降水的双重作用,指导抽灌一体化设计。

关键词:基坑工程;管井回灌;回灌渗流;悬挂式帷幕;单井回灌设计量;回灌设计综合指数;优化设计

中图分类号:TU443 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)12-0053-09

Study on Optimization Design of Tube Well Recharge for Foundation Pit/LU Jian-sheng (Shanghai Guanglian Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: Currently, there are no mature design and optimization methods of recharge for foundation pit tube well. Through the analysis on different types of deep foundation pit recharge, the design principle and process are presented and the discussion and analysis are made on the well recharge parameters and maximum recharge pressure. Based on the calculation of 285 sets of hydro-geological model of deep foundation pit, different permeability anisotropy parameters, recharge well types, well locations and seepage features under the buildings (structures) being protected are comparatively analyzed to provide the comprehensive index of recharge well design. From the angles of economic, technique and construction difficulty, the comprehensive evaluation are made on double effect of recharge to the buildings (structures) protection and pit dewatering to guide the integration design of pumping and recharging.

Key words: foundation pit engineering; tube well recharge; recharge seepage; hanging curtain; designed recharge flow of single well; comprehensive index of recharge well design; optimization design

0 引言

上海、北京等城市的部分深基坑工程使用回灌管井控制地下水水位,在建(构)筑物的沉降控制方面取得了一定的成效^[1~5]。但各类基坑工程回灌目的的差异性、回灌管井在空间布置上的局限性和回灌运行时间的短期性,决定了基坑工程地下水回灌管井技术有其特殊性^[6,7],如管井运行控制模式及原则的特殊性^[6]、管井设计参数的特殊性^[6]以及管井空间布设的特殊性^[7]等。基坑管井回灌需考虑基坑降水与回灌的同步协调设计及运行控制,文献[5]中介绍了相关的基坑降水回灌一体化设计实践及其在控制沉降中的作用。

尽管如此,目前人工回灌在工程降水领域的应用仍属于探索阶段^[8],多本技术规范^[9,10]将基坑回灌定义为一种控制因降水而引起的沉降的措施,对其概念进行了叙述,但尚无专门的成熟设计方法作为参考。实际工程应用中管井回灌的设计及运行控

制仍以个人主观判断为主;在回灌压力取值、回灌管井结构等方面仍存在较大的误区;对如何评价基坑工程回灌的经济技术性能,如何优化回灌管井设计,尚缺乏相对可靠的综合指标用以评估。

本文将探讨不同基坑回灌类型的差异,基于渗流分析的回灌设计原则、抽灌设计流程以及相关回灌管井设计参数的取值问题;通过 285 组基坑水文地质数值模型,对比分析不同渗透各向异性系数、回灌井结构、回灌井位置和保护建(构)筑物位置下的地下水渗流特征,在此基础上提出回灌设计综合指数,从经济、技术及施工难度角度综合评估回灌对保护建(构)筑物及坑内降水的双重作用,以期利用该指数作为基坑工程回灌优化设计的指导参数。

1 基坑工程回灌类型

据回灌目的含水层的差异可以分为承压水回灌和潜水回灌。在上海等软土地区,由于潜水含水层

收稿日期:2014-07-08;修回日期:2014-11-16

基金项目:上海市科学委员会资助项目(08201201302,13231201004)

作者简介:陆建生(1981-),男(汉族),江苏昆山人,上海广联建设发展有限公司副总工程师、工程师、注册岩土工程师、注册一级建造师(市政),环境科学专业,硕士,从事水文地质勘察、地下水综合治理方面的咨询及科研工作,上海市园康路 255 号,lujest@sina.com。

基本被隔断,本文所述回灌均指承压水回灌,潜水回灌可借鉴执行。

据回灌目的的差异可分为基于环境控制和基于水资源保护这2类不同控制要求的地下水回灌^[6]。

据基坑地下水控制类型差异可分为无帷幕下、悬挂式帷幕下和隔断式帷幕下的基坑回灌。

据止水帷幕功效发挥的差异可分为2类:

(1)绕流补偿性回灌。抽水时因止水帷幕的作用,地下水水流从止水帷幕底部进入基坑内侧,因绕流作用,坑外水位仍有一定下降而进行的回灌补偿。

(2)渗透破坏补救性回灌。因止水帷幕缺陷而引起坑内外地下水的水平渗流补给,进而引起坑外水位下降而进行的回灌。该类型回灌必须严格控制回灌水头及回灌井位置,避免因回灌引起止水帷幕缺陷扩大化,以及二次不利变形的发生。

以上2类回灌在实际工程中往往同时存在,回灌设计时应有针对性的进行回灌管井设计。

2 基坑抽灌一体化设计

2.1 基坑抽灌一体化设计原则

基坑工程抽灌运行控制的指标包括不同开挖阶段基坑内水位控制值和保护建(构)筑区的水位控制值。抽灌一体化设计应遵循以下原则:(1)以控制保护建(构)筑区地下水水位变化最小为原则,地下水水位抬升后水位应不超过保护建(构)筑物处初始水位,同时必须保证基坑内水位满足降水设计要求;(2)当坑内外水位设计存在矛盾时,首要任务是使基坑内水位满足设计要求,在此基础上尽量减弱保护建(构)筑物区的地下水水位变化。

回灌设计控制指标参数包括以下3个(不含坑内控制指标)。

控制设计低限值 S_{dl} :建(构)筑物处最大水位降深允许值。该值的选取应通过水文地质特征、建(构)筑允许变形及变形特征综合确定。

控制设计高限值 S_{dh} :建(构)筑物处最大水位抬升允许值。该值一般按抬高至初始水位考虑,如超过初始水位过多,则对变形控制也可能是不利的,比如建(构)筑物可能出现的上抬,或回灌停止后的建(构)筑物可能出现的变形。

回灌可调节限值 S_{dd} :不同工况条件下回灌可抬高的最高水位值。回灌井的布设在平面上受到多方限制^[10],同时又必须考虑基坑内水位降深要求,因此回灌井在不同工况所能调节的水位值有着严格的限制条件。

回灌设计的目标是在基坑内部满足降水要求时,同时满足以下公式:

$$S_{dd} \geq S_{dh} \quad (1)$$

满足式(1)时,回灌对建(构)筑物处含水层水位控制是完全可靠的,消除了坑内降水对建(构)筑物的影响,其回灌设计安全系数高。

当由于基坑周边环境的复杂性及受限于建筑红线等问题,回灌井并非能按理论设计布设,其结果只能满足式(2)或式(3)。

$$S_{dh} > S_{dl} \geq S_{dl} \quad (2)$$

$$S_{dl} > S_{dd} \quad (3)$$

满足式(2)时,回灌对建(构)筑物处含水层水位控制具有一定的可靠度,其主要作用是减弱水位降深对建(构)筑物的影响,使其影响在建(构)筑物允许的变形范围内,其回灌设计安全系数可接受。

满足式(3)时,回灌只能一部分减弱水位降深对建(构)筑物的影响,需要增补其它措施才能确保建(构)筑物因降水引起的变形在允许范围内,其回灌设计安全系数较低。

在实际工程中,回灌作为一种辅助措施,其受限条件多。在基坑开挖不同阶段,回灌可能分别满足式(1)、(2)和(3),因此在不同阶段需设置不同的配套措施,综合系统性地控制因水位下降引起的建(构)筑物变形。

2.2 主要水文地质参数的获取

抽灌一体化设计的前提是通过掌握现有水文地质条件,分析现有水文条件下抽灌对环境变形的控制,设计中主要水文地质参数包括如下几个。

渗透系数(K_h, K_v):基坑区域面积小,地层起伏相对较大且受止水帷幕阻水等影响,地下水三维渗流特征明显,因此采用 K_h 和 K_v 两个参数值反映地下水渗流在水平向和垂直向上的差异。而目前国内开展的普通抽水试验一般是以解析法为基础,求解单一渗透系数,缺少渗透系数在水平和垂向上的差异分析^[11],难以反映地下水三维流特征。渗透各向异性系数(K_v/K_h)较好地反映了地层在水平和垂向上的渗透差异。

储水系数(μ):单位水平面积承压含水层柱体,当水头下降1个单位时所释放的水量。该值越大,水位降深幅度越小,此系数直接决定水位的升降及升降速率,同时该值与地面沉降间也存在一定的关系^[12]。

管井单位涌水量(q_c):抽水井井内水位下降1m,所对应的管井平均出水量。通过该参数可计算出单井涌水量,对于工程本身具有较大的实际意义。

管井单位涌水量除以对应滤管的长度即为单米单位涌水量,该参数是抽水井滤管长度定量设计的一个重要参数。

管井单位回灌量(q_h):回灌井井内水位上抬 1 m 所对应的平均回灌量。它是回灌设计中的关键参数,一般的水文地质勘察报告不会提供,在实际工程设计中可借鉴管井单位涌水量 q_c 计算,理论上 $q_h \approx q_c$,但抽水与回灌时井壁四周的受力差异性大,且 q_h 受施工的影响变幅相对较大,因此回灌设计时单位回灌量可按下式计算:

$$q_h \approx \eta q_c \quad (4)$$

式中: η ——阻力系数比,为保证设计的安全性,该值可取为 1/2 ~ 1/3,渗透系数大的可取较大值。

在条件允许的情况下,应通过单井三次定流量回灌试验确定管井单位回灌量。管井单位回灌量除以对应滤管的长度即为单米单位回灌量,该参数是回灌井滤管长度定量设计的一个重要参数。

2.3 抽灌设计流程

抽灌一体化设计流程如图 1 所示,首先在掌握基本的水文地质条件、基坑开挖概况、基坑围护和环境条件后,进行基坑降水设计,降水设计方法可参考文献[13~14]。其次,通过计算预测基坑内满足不同降深时,保护建(构)筑物处的水位降深及区域内的水位降深变化趋势,分析坑内降水对坑外环境的影响,判断是否需要设置回灌井。如需进行回灌,则先确定单井回灌设计量,然后依据现场条件分析影响管井平面布置的关键因素^[7],并在此基础上进行回灌井的概念设计。实际工程中,回灌管井的布置受到多方面因素的影响,迫使管井的布置不能按理想状态布置,因此管井的布置应通过地下水三维渗流计算,通过流场的再分布分析回灌管井布置的可靠性。对于需要进行回灌设计的工程,建议针对工程的重要性及回灌的难易程度,开展不同程度等级的回灌试验。

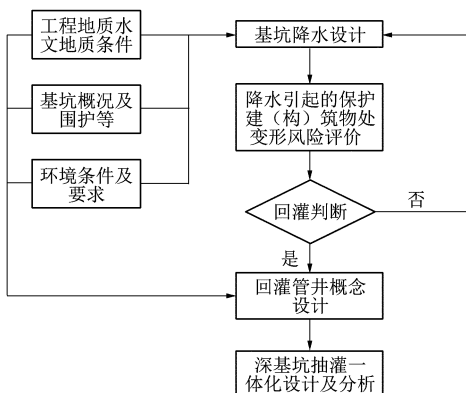


图 1 回灌设计流程图

2.4 单井回灌设计量的确定

单井回灌设计量是影响回灌井后期布置的关键参数,它与回灌前建(构)筑物处含水层水位、回灌施加压力相关,回灌前建(构)筑物处水位可通过降水设计计算获得。回灌压力的取值可参考文献[6]中的最大安全回灌水头 H_{saf} (原文献在推导结果中遗忘了 h_2):

$$H_{saf} = \frac{K_0 \gamma_s - F_1 \gamma_w}{F_1 \gamma_w} h_2 \approx \left(\frac{\gamma_s}{1.35 F_1 \gamma_w} - 1 \right) h_2 \quad (5)$$

式中: F_1 ——回灌安全系数; K_0 ——静止土压力系数; h_2 ——粘土球分隔层底至地面间分隔层的厚度, m; γ_s ——粘土球分隔层底至地面间各分隔层的平均重度, kN/m³; γ_w ——水的重度,一般取 10 kN/m³。

如含水层层顶埋深为 30 m,上部土体平均重度按 18 kN/m³考虑,则

$$H_{saf} \approx \left(\frac{\gamma_s}{1.35 F_1 \gamma_w} - 1 \right) h_2 = 30 \left(\frac{18}{13.5 F_1} - 1 \right)$$

当 $F_1 = 1.0$ 时 $H_{saf} = 10.00$ m,即回灌压力最大值约为 0.1 MPa;

当 $F_1 = 1.1$ 时 $H_{saf} = 6.36$ m,即回灌压力最大值约为 0.063 MPa;

当 $F_1 = 1.2$ 时 $H_{saf} = 3.33$ m,即回灌压力最大值约为 0.033 MPa;

由式(5)可知,在浅层承压水回灌中可施加的回灌压力较小。当 $h_2 = 60$ m, $F_1 = 1.0$ 时, $H_{saf} = 20.00$ m,也即回灌压力最大值约为 0.2 MPa。而目前规范^[11]中提出的加压回灌值偏大,与实际现场所能达到值差别较大。

上海第 I 承压含水层层顶埋深一般约为 30 m,第 II 承压含水层层顶埋深约为 60 m,考虑到施工因素,为避免回灌井井壁冒水的现象,笔者认为上海地区针对第 I 承压水的回灌压力不宜超过 0.1 MPa,建议设计值取 0.06 MPa;针对第 II 承压水的回灌压力不宜超过 0.2 MPa,建议设计值取 0.13 MPa。

在获取回灌压力设计值后可求取相应的管井回灌量。回灌井的最大可回灌量是评估回灌井能力的一个关键参数。

回灌井的可回灌量可由下式计算:

$$Q_p = q_h (H_{saf} - h_0) \quad (6)$$

式中: h_0 ——无回灌状态下的地下水水位埋深值,为负数值, m。

将式(5)代入式(6)得:

$$Q_p = q_h \left[\left(\frac{\gamma_s}{1.35 F_1 \gamma_w} - 1 \right) h_2 - h_0 \right] \quad (7)$$

根据各地区施工条件及地层情况,可选取相应的回灌安全系数,作为对应的单井设计回灌量。

在上海地区建议将当 $F_1 = 1.0$ 时对应的 Q_p 为回灌井的最大单井可回灌量;当 $F_1 = 1.1$ 时对应的 Q_p 为回灌井的最大单井设计可回灌量。

如按 $h_2 = 30 \text{ m}$, $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$, $h_0 = -7 \text{ m}$, $q_h = 0.4 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m})$ 考虑,则

当 $F_1 = 1.0$ 时,最大单井可回灌量 $Q_p \approx 6.8 \text{ m}^3 / \text{h}$;

当 $F_1 = 1.1$ 时,最大单井设计可回灌量 $Q_p \approx 5.4 \text{ m}^3 / \text{h}$;

当需考虑群井回灌效应时,可通过调节 h_0 来计算群井作用下的单井可回灌量。

3 回灌管井结构及位置布设分析

在基坑工程地下水控制的3种类型中^[13],悬挂式帷幕下的地下水抽灌流场、回灌管井结构及位置布设相对复杂,本节将开展针对基坑悬挂式帷幕的抽水-回灌一体化设计的分析,并从经济、技术及施工难度角度提出优化分析。

3.1 基坑悬挂式帷幕抽灌数值模型

计算概念模型如图2和图3所示,抽水井(C_1)位于基坑中间,基坑尺寸 $20 \text{ m} \times 200 \text{ m}$,止水帷幕厚 1.0 m ,深度至 -45.0 m ,离止水帷幕 5.0 、 10.0 、 15.0 、 20.0 、 30.0 、 40.0 、 50.0 和 60.0 m 的位置分别设置回灌井($H_1 \sim H_8$),同时在基坑内设置含水层观测孔 F_1 ,坑外离止水帷幕 2.5 、 7.5 、 12.5 、 17.5 、 25.0 、 35.0 、 45.0 和 55.0 m 的位置分别设置含水层观测孔($F_2 \sim F_9$),各水位观测点在剖面上分别位于埋深 -30.0 、 -35.0 、 -40.0 、 -45.0 、 -50.0 、 -55.0 、 -60.0 m 处。

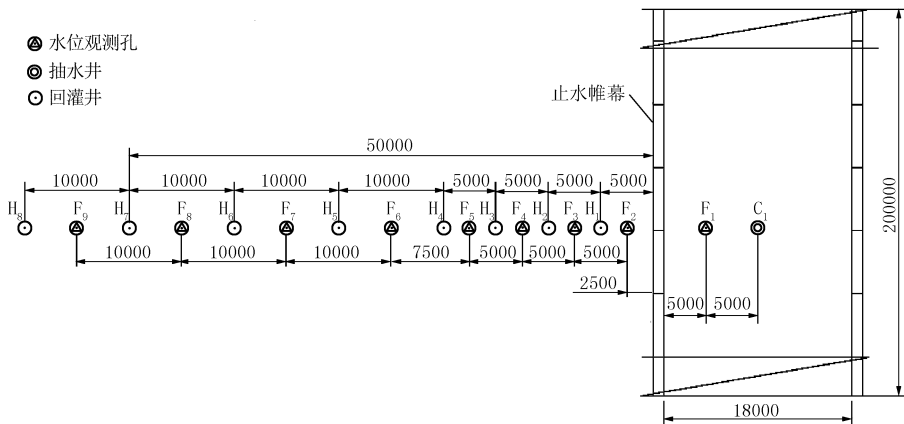


图2 模型概念平面布设示意图

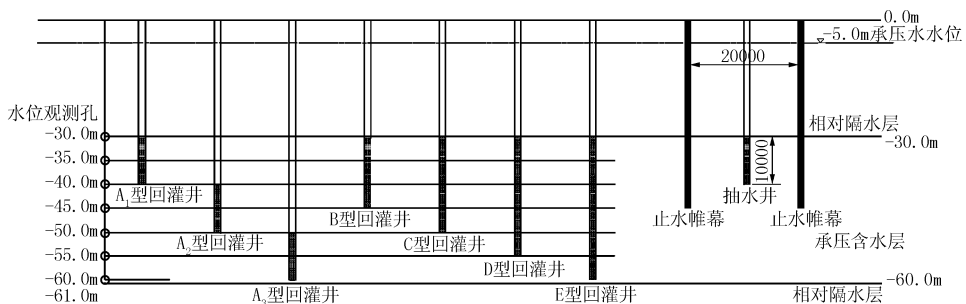


图3 水文地质概念模型剖面示意图

为分析不同渗透各向异性系数对回灌的影响,假设水平渗透系数为 6.0 m/d ,垂向渗透系数分别取 0.5 、 1.0 、 2.0 、 4.0 和 6.0 m/d ,对应的渗透各向异性系数 (K_v/K_h) 分别为 0.083 、 0.167 、 0.333 、 0.667 和 1 (即 $K_1 = 0.083$, $K_2 = 0.167$, $K_3 = 0.333$, $K_4 = 0.667$, $K_5 = 1$)。承压含水层位于 $-30.0 \sim -$

61.0 m 间,初始水位埋深 -5.0 m 。

为分析不同回灌井结构对基坑内及建(构)筑物区的水位变化影响,回灌井滤管采用以下7类作为对比分析的基础。A₁类:滤管位置位于 $-30.0 \sim -40.0 \text{ m}$;A₂类:滤管位置位于 $-40.0 \sim -50.0 \text{ m}$;A₃类:滤管位置位于 $-50.0 \sim -60.0 \text{ m}$;B类:滤管

位置位于 -30.0 ~ -45.0 m; C类: 滤管位置位于 -30.0 ~ -50.0 m; D类: 滤管位置位于 -30.0 ~ -55.0 m; E类: 滤管位置位于 -30.0 ~ -60.0 m。抽水井滤管位置位于 -30.0 ~ -40.0 m。

假设含水层均一, 不同深度处渗透系数相等, 回灌井单米单位回灌量相等, 抽水井单米单位涌水量为 3 倍单米单位回灌量, 回灌井采用加压回灌, 回灌压力为 0.1 MPa ($H_{saf} = 10\text{ m}$), 据式(7)可得到不同回灌井类型下的单井回灌量, 如表 1 所示。

表 1 回灌井类型及相应参数设置

井型	L /m	q_1 /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	q /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	h_0 /m	H_{saf} /m	Q /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
A 型	10	0.04	0.4	-5	10	6
B 型	15	0.04	0.6	-5	10	9
C 型	20	0.04	0.8	-5	10	12
D 型	25	0.04	1.0	-5	10	15
E 型	30	0.04	1.2	-5	10	18
抽水井	10	0.12	1.2	-5	-30	-30

注: L ——过滤器长度, m; q_1 :——每米单位回灌量或每米单位涌水量; q ——单位回灌量或单位涌水量; h_0 ——初始水位; Q ——单井回灌量。

3.2 模拟流程

依据前述的水文地质概念模型进行单井抽水模拟和单井抽水 - 单井回灌模拟(见表 2)。

表 2 模型设置

类型	数量/组	时间/d	抽水井 C_1	回灌井
单井抽水模拟	5	0 ~ 60	开启	关闭
		60 ~ 90	关闭	关闭
		0 ~ 30	开启	关闭
单井抽水 - 单井回灌模拟	280	30 ~ 60	开启	开启
		60 ~ 90	关闭	关闭

3.3 数值模拟计算与分析

为简化计算, 基坑抽水回灌过程中不考虑抽水井和回灌井井周地下水流动的特殊性, 假设抽水 - 回灌过程中地下水在含水层中的运动完全服从达西定律, 回灌井作为一种补给源考虑, 因此以连续性原理和达西定律为基础, 建立了三维地下水非稳定渗流数学模型^[13]。数值计算分析采用 modflow 程序。

3.3.1 悬挂式帷幕下的坑内抽水场特征

图 4 为坑内单井抽水时坑内外监测点 (F_1 和 F_2) 不同埋深处的水位降深值, 坑内含水层 (F_1 点) 上部(滤管段)水位降深最大, 其次为滤管底至止水帷幕段, 止水帷幕下部的含水层水位降深最小。距离基坑较近的观测点 (F_2) 在不同深度处的水位降深存在明显的差异, 止水帷幕底附近的水位降深值最大, 说明坑外地下水场受到止水帷幕影响在一

定区域内呈现明显的三维流特征。

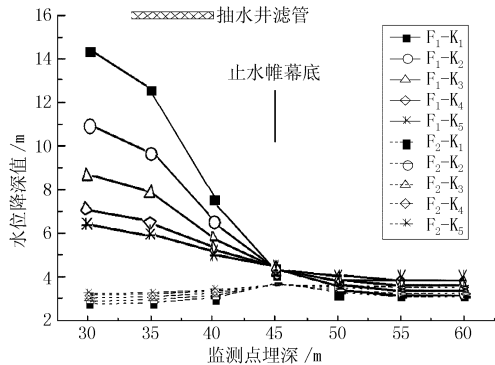


图 4 抽水条件下的坑内外水位降深值

由图 4 可知, 渗透各向异性系数的取值直接影响坑内外的地下水场特征, 各向异性系数越大, 坑内水位降深越小, 坑外水位降深越大; 各向异性系数越小, 坑内水位降深越大, 坑外水位降深越小, 同时坑内不同埋深处的水位降深差异越大(特别是滤管段), 三维流特征越明显。

3.3.2 悬挂式帷幕下的抽灌流场特征

图 5 为单井抽水 - 单井回灌时的坑内外水位降深值, 其中回灌井 H_1 开启, 回灌井结构采用 A_1 型, 此时不同埋深处的地下水场趋势与抽水时基本一致。坑外 F_2 点处受到回灌井的影响, 与抽水时相比三维流特征更加明显, 渗透各向异性系数越小, 对应的变化越大。

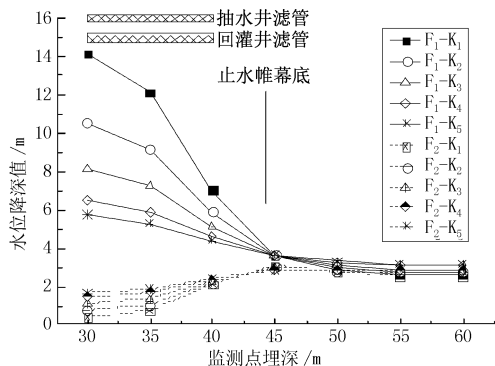


图 5 抽灌条件下的坑内外水位降深值 (H_1 回灌)

图 6 为抽灌条件下回灌井 (H_1) 回灌引起的坑内外水位抬升值, H_1 回灌时坑内水位抬升明显, 也即须考虑回灌对坑内降水的不利影响。回灌时, 坑外 F_2 处引起的水位抬升值受到井结构、止水帷幕位置和渗透各向异性参数影响明显, 滤管段水位抬升值最大, 其次为滤管底至止水帷幕段, 止水帷幕下部的含水层水位抬升最小。渗透各向系数越小, 坑外不同埋深处的水位抬升差异越大, 即其值越小, 越有利于抬升滤管段对应的含水层水位。

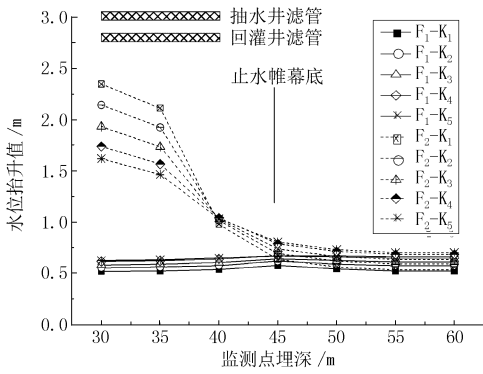


图6 抽灌条件下回灌井回灌引起的坑内外水位抬升值(H₁回灌)

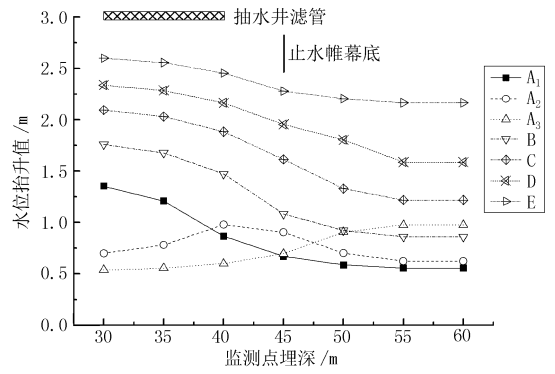


图8 抽灌条件下回灌井 H₁ 分别采用不同滤管类型回灌引起的坑外 F₅ 处水位抬升值

3.3.3 不同回灌井结构对地下水流场的影响

图7为抽灌条件下回灌井 H₁ 分别采用不同井结构回灌时引起的坑内 F₁ 点处的水位抬升值,对坑内含水层顶水位抬升由大到小的回灌井型分别为 E、D、C、B、A₂、A₃、A₁,同时不同埋深处的水位抬升值差异也较大,其值受到止水帷幕深度和回灌井结构的综合影响。

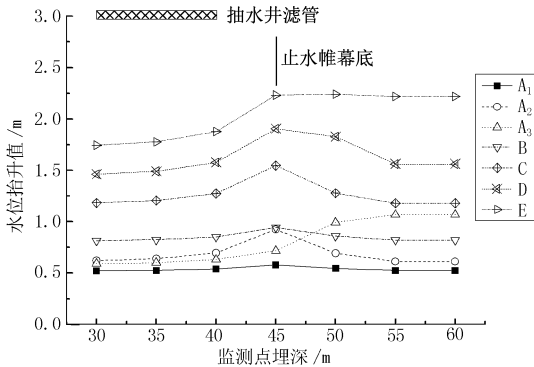


图7 抽灌条件下回灌井 H₁ 分别采用不同滤管类型回灌引起的坑内 F₁ 点水位抬升值

图8为抽灌条件下回灌井 H₁ 分别采用不同井结构回灌时引起的坑外 F₅ 点处水位抬升值,其值在不同埋深处存在一定差异,也即存在三维流特征。各类型结构中,E型管的回灌对各点的水位抬升效果最大,对比 A₁、A₂、A₃ 这三类井管可知,当回灌量相等时,滤管段对应的含水层水位抬升值最大。

3.3.4 回灌井与基坑距离对地下水流场的影响

图9为分别开启回灌井 H₁ 至 H₈ 这8口回灌井时,坑内 F₁ 点处的水位抬升值,由图9可知,离基坑越近,对坑内水位抬升越明显,但受到止水帷幕和各向异性系数的影响,坑内含水层层顶水位抬升值各阶段相差较小。

图10为分别开启回灌井 H₁ 至 H₈ 这8口回灌井时,对坑外 F₅ 点处的水位抬升值,由图10可知,离监测点最近的 H₃ 和 H₄ 回灌时,水位抬升值最

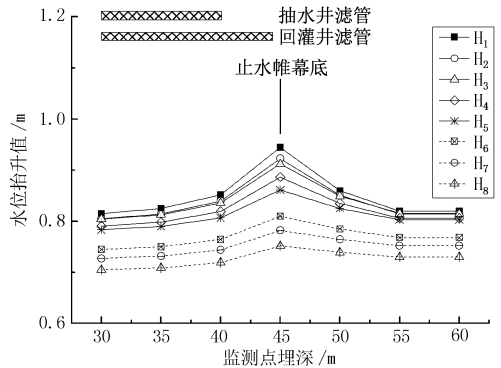


图9 不同回灌井位置回灌时对坑内水位抬升值影响(B型回灌井)

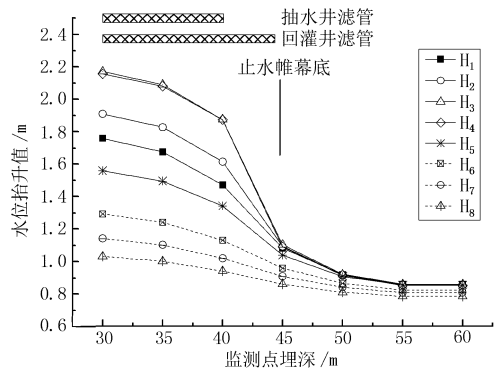


图10 不同回灌井位置回灌时对坑外 F₅ 处的水位抬升值影响(B型回灌井)

大,H₁ 和 H₅ 与 F₅ 的距离相等,但受到止水帷幕的影响,H₁ 对 F₅ 点的水位抬升效果更加明显,但由图9可知,H₁ 回灌对坑内水位降水更不利,因此回灌井位置的设置直接影响保护建(构)筑处的水位和基坑内部的水位,如何评估优化其设置是一个值得探讨的问题。

3.4 讨论

3.4.1 回灌因素讨论

基于环境控制的基坑回灌的主要目的是在保证基坑安全的同时,减少坑外保护建(构)筑物处因地

下水变化引起的地层扰动,减少对周边环境的影响^[6]。因此,回灌过程必须控制好基坑内和保护建(构)筑物区的水位,也就是抽水-回灌应控制好各点位处的地下水流场变化。由前述数值模拟分析可知,对于一个特定工程,影响其地下水流场分布特征的主要因素包括:水文地质条件、基坑形状、悬挂式止水帷幕深度、管井(抽水井和回灌井)结构和回灌管井井位设置。

水文地质条件是影响回灌目的能否完成的前提条件,包括含水层厚度、地下水水位、地下水排补给条件、渗透系数及其各向异性系数、储水系数、含水层的渗透变形关系、含水层上下的土层特性以及含水层补给等因素。

其中渗透各向异性系数是关系悬挂式帷幕基坑抽灌运行设计是否正确关键参数之一,由前述计算可知,渗透各向异性系数越小,坑内抽水对坑外水位下降的影响越小,同时坑外回灌对坑内水位上抬的影响也越小。为准确进行抽灌一体化设计,在水文地质勘察中应准确的提供该参数。

抽灌作用下,基坑附近的地下水流场具有明显的三维流特征,含水层上下相邻的土层中水压力也将产生变化,也即该部分土层特性也将直接影响降水引起的环境变形,抽水回灌期间,需考虑不同土层的特性,避免只单一分析抽水含水层,而未找到降水引起环境变形的多土层因素。

前述计算可得到以下几个结论。

(1)在抽灌运行设计中止水帷幕的深度直接影响地下水流场变化,其设计应建立在可靠的三维渗流分析基础上。

(2)不同管井结构所对应的地下水流场变化差异较大,滤管越长,回灌量越大,回灌效果也越好,但其经济性差,对坑内的影响也越大,因此如何评估何种管井结构更为合理需要一个综合判断指数。

(3)回灌井应尽量布置于保护建(构)筑物处,为提高回灌效果,在距保护建(构)筑相同距离范围内,可将回灌井设置于靠近基坑侧,以有效利用止水帷幕的作用,但此时回灌对坑内的影响也将相应增加,如何平衡两种效果是值得探讨的一个问题。

3.4.2 回灌设计评估参数探讨

为进一步分析讨论抽灌设计的可行性及经济性,本文将对回灌效率值 f 、回灌影响基坑降水的不利因素 f_1 、回灌影响坑外环境的有益因素 f_2 、抽水水位降深比 η 、回灌水位抬升比 μ 和回灌设计综合指标 F 进行相关定义。

回灌效率值 f :通过管井回灌某处水位恢复百分比,其值为:

$$f = (S - S_h) / S \times 100\% \quad (8)$$

式中: S ——抽水时监测点处的水位降深值, m;
 S_h ——抽灌一起作用时监测点处的水位降深值, m。

抽灌一体化水位控制属于双水位控制,其中坑内水位是指基坑内含水层层顶的水位,属于定点水位,回灌期间回灌将对坑内安全造成不利影响;基坑外某点水位是指影响建构筑物变形的含水层厚度范围内的加权平均水位降深值,回灌对其影响是有益的。

对于回灌影响基坑降水的不利因素 f_1 定义为:

$$f_1 = (S_d - S_{dh}) / S_d \times 100\% \quad (9)$$

式中: S_d ——抽水时基坑内监测点含水层层顶处的水位降深值, m; S_{dh} ——抽灌一起作用时监测点含水层层顶处的水位降深值, m。

对于回灌影响坑外环境的有益因素 f_2 可设为:

$$f_2 = (\bar{S} - \bar{S}_h) / \bar{S} \times 100\% \quad (10)$$

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^n \frac{h_i \bar{S}_i}{E_i} / \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{E_i} \quad (11)$$

$$\bar{S}_h = \sum_{i=1}^n \frac{h_i S_{hi}}{E_i} / \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{E_i} \quad (12)$$

式中: \bar{S} ——抽水时监测点位于保护建(构)筑物处影响建(构)筑物变形的含水层厚度范围内的加权平均水位降深值, m; \bar{S}_h ——抽灌一起作用时监测点位于保护建构筑物处影响建(构)筑物变形的含水层厚度范围内的加权平均水位降深值, m; n ——影响建(构)筑物变形的不同变形特征土层层数; h_i ——对应变形土层的厚度, m; E_i ——对应变形土层的变形模量, MPa; \bar{S}_i ——抽水时,对应变形土层垂向上的算数平均水位降深值, m; S_{hi} ——抽灌时,对应变形土层垂向上的算数平均水位降深值, m。

抽水时坑内外水位降深比 η 定义为:

$$\eta = \bar{S} / S_d \quad (13)$$

回灌时坑内外水位抬升比 μ 为:

$$\mu = (S_d - S_{dh}) / (\bar{S} - \bar{S}_h) \quad (14)$$

坑外回灌对坑内地下水水位控制属于不利因素,对坑外水位控制属于有利因素,各种不同回灌井对其影响各有差异,为评价某类井在某一条件下的优越性,本文将定义回灌设计综合指标 F 。

回灌设计综合指标 F :将影响建构筑物变形的土层厚度范围内的加权平均水位降深值减小至特定值,同时坑内含水层层顶水位达到设计水位降深值时所需增设的降水井及回灌井的经济技术综合评估值。

其值越低,对应的抽灌设计经济技术综合优势越高。

抽水回灌是一个循环运行的过程,假设 η 和 μ 为常数,考虑满足坑内水位要求而增加的抽水量,当抬高建(构)筑物处 1 m 水头时回灌井需抬高的实际水位值为:

$$1 + \mu\eta + \mu^2\eta^2 + \mu^3\eta^3 + \dots = 1/(1 - \mu\eta) \quad (15)$$

对应的基坑内实际增加的水位降深值为:

$$\mu + \mu^2\eta + \mu^3\eta^2 + \dots = \mu/(1 - \mu\eta) \quad (16)$$

对应的回灌设计综合指标 F 定义为:

$$F = \frac{a_1 + a_2\mu}{1 - \mu\eta} = \frac{a_1 + a_2\mu}{1 - f_1/f_2} \quad (17)$$

$$a_1 = C_1 l_1 / \bar{S} \quad (18)$$

$$a_2 = C_2 l_2 / S_d \quad (19)$$

式中: a_1 ——采用回灌井抬高 1 m 水头(平均降深)的经济指标,与回灌井数量和井深等有关; a_2 ——采用抽水井下降 1 m 水头(含水层层顶)的经济指标,与抽水井水量和井深有关; l_1 ——回灌井井深, m; l_2 ——抽水井井深, m; C_1 和 C_2 ——分别为回灌井和抽水井的单米造价价格指数,当需要反应抽水井与回灌井的运行风险差异或施工难度等级时,可通过调整 C_1 和 C_2 完成。

3.4.3 F 指标探讨

本节将利用前述计算结果,计算相应的 F 指标,探讨 F 在抽灌设计中的应用。其中 $C_2 = 1, C_1 = 1.5, S_d$ 和 S_{an} 分别为单井抽水和单井抽-单井灌作用时 F_1 点处含水层层顶水位降深值, \bar{S} 和 \bar{S}_b 分别为单井抽水和单井抽-单井灌作用时监测点($F_2 \sim F_9$) 在含水层(-30 ~ -60 m)不同深度上的算数平均水位降深值。井结构参数见模型。

3.4.3.1 不同回灌井结构在 F 值中的反映

图 11 为 H_1 采用不同回灌井结构回灌时,不同观测点处计算得到的 F 值曲线图,由图可见,在 H_1 回灌时,离其最近的 F_2 观测点处的 F 值最小, F_9 处的 F 值最大, E 型井管所对应的 F 值最小。在 H_4 回灌时,具有同样的趋势。

3.4.3.2 回灌井与基坑位置差异在 F 值中的反映

图 12 为 B 型回灌井在不同点位处回灌所对应的 F 值。由图可知,保护建(构)筑物位于不同点位时,所对应的 F 值差异较大。位于 F_2 和 F_3 点时, F 值随距离增加而增加;位于 F_9 点时, F 值随距离增加而减小;其余各点 F 值曲线为凹形曲线,最低值位于一定距离内。可见如要优化回灌井井位的布设必须综合考虑基坑位置及保护建(构)筑物的位置,

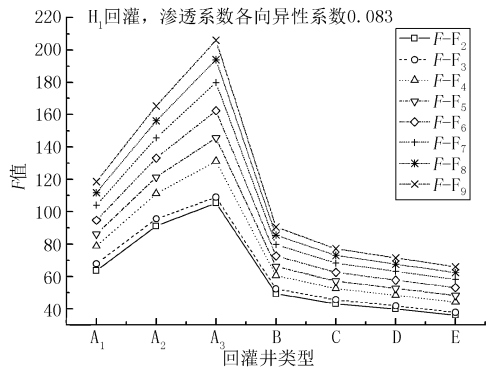


图 11 H_1 采用不同回灌井型时的 F 值

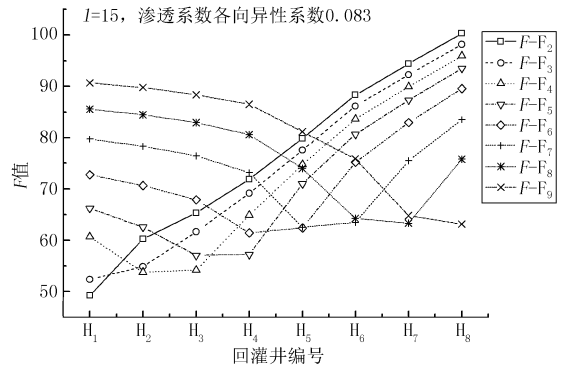


图 12 B 型回灌井在不同点位处回灌所对应的 F 值

而 F 值较好的考虑了该因素对回灌在技术经济方面的影响。

3.4.3.3 渗透各向异性系数对 F 值的影响

图 13 是 H_4 采用 B 型井回灌时不同渗透各向异性系数所对应的 F 值。由图可知,各向异性系数越小, F 值越小,对回灌越有利。

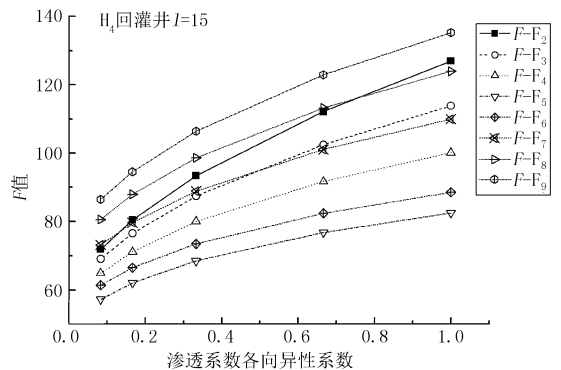


图 13 不同渗透各向异性系数对 F 值的影响

3.4.3.4 影响建(构)筑物变形的含水层厚度范围在 F 中的反映

由图 14 可知, E 型井管所对应的 F 值最小,分析其原因主要是本次计算中 S 取为含水层各监测点的平均值,如影响建(构)筑物变形的含水层厚度范围变成含水层层顶上段 10 m,则对应的 F 值如图 14 所

示,当保护建(构)筑物位于 F_2 和 F_3 点,则采用B型井管最为合理,当位于 $F_4 \sim F_9$ 这6个位置时则采用E型管最为合理。因此规范中要求回灌管井滤管底不低于止水帷幕,这一规定是不合适的。采用何种管型需在合理确定影响建(构)筑物变形的含水层厚度范围基础上计算回灌设计综合指数后确定。

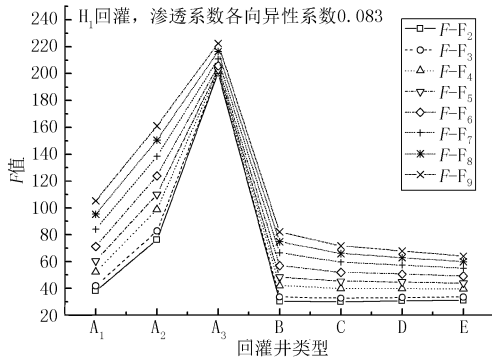


图14 含水层变化后 H_1 采用不同回灌井型时的 F 值

4 结语

探讨了不同基坑回灌类型的差异性,按止水帷幕功效发挥的差异将基坑回灌分为绕流补偿性回灌和渗透破坏补救性回灌。

探讨了回灌设计中的控制指标问题以及抽灌设计流程。

提出了最大回灌压力的计算,并认为现行规范中的回灌压力取值偏大,笔者认为上海地区针对第I承压水(含水层顶板埋深约为30 m)的回灌压力不宜超过0.1 MPa,建议设计值取0.06 MPa;针对第II承压水(含水层顶板埋深约为60 m)的回灌压力不宜超过0.2 MPa,建议设计值取0.13 MPa。

渗透各向异性系数是关系悬挂式帷幕基坑抽灌运行设计是否正确的关键参数之一,渗透各向异性系数越小,坑内抽水对坑外水位下降的影响越小,坑外回灌对坑内水位上抬的影响也越小。为准确地进行抽灌设计,在水文地质勘察中应准确提供该系数。

不同管井结构所对应的地下水流场变化差异较大,滤管越长,回灌量越大,回灌效果越好,但其经济性较差,对坑内的影响也越大。

提出了回灌设计综合指数 F ,从经济、技术及施工难度角度综合评估回灌对保护建(构)筑物以及对坑内降水的双重作用,为后期进行回灌的优化设计奠定了基础。通过综合指数的分析认为在实际设计中必须合理确定影响建(构)筑物变形的含水层厚度范围;规范中要求回灌管井滤管底不低于止水帷幕,这一规定是不合适的。采用何种管型最合理可通过回灌设计综合指数的计算对比选取。

参考文献:

- [1] 石振华,李传尧,等.城市地下水工程与管理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [2] 侯景岩,魏连伟.用降水回灌法改善北京地铁“复八线”工程地质环境和施工条件[J].水文地质工程地质,1997,(3):38-41.
- [3] 宁仁岐,郭莘,徐晓飞.金力大厦深井点降水及回灌技术[J].哈尔滨建筑大学学报,1996,29(6):116-120.
- [4] 黄伟达,张明,蓝永基,等.倾斜式回灌技术在复杂环境深基础施工中的应用[J].岩土工程学报,2010,32(1):332-334.
- [5] 陆建生,潘伟强,沈池,等.深基坑承压水抽灌一体化设计及工程应用[J].施工技术,2014,(1).
- [6] 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.
- [7] 陆建生.基于环境控制的深基坑工程管井回灌设计分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):70-77.
- [8] 冶雪艳,耿冬青,杜新强,等.工程降水中人工回灌综合技术[J].世界地质,2011,30(1):90-97.
- [9] JGJ 120-2012,建筑基坑支护技术规程[S].
- [10] DGTJ 08-61-2010,基坑工程技术规范[S].
- [11] 陆建生,崔永高,缪俊发.基坑工程环境水文地质评价[J].地下空间与工程学报,2011,7(1):1506-1513.
- [12] 冉兴龙,曹海东,夏斌,等. Jacob 假定下含水层的储水率及其地面沉降机理意义[J].水动力学研究与进展 A 辑,2005,20(3):393-399.
- [13] 吴林高,等.工程降水设计施工与基坑渗流理论[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [14] 姚天强,石振华.基坑降水手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

安徽淮北首个地热资源勘探井开钻

国土资源报(2014-12-12) 12月3日,淮北东湖畔岱河边,安徽省地矿局第一水文工程地质勘察院承担的安徽省淮北市矿山集地热资源预可行性勘查勘探井正式开钻。

这是淮北市境内首次开展清洁能源(地热资源)勘查工作,勘查区位于安徽省淮北市杜集区矿山集,面积4.60 km²,项目投资290余万元,初步设计施工地热资源勘探井一口,深约1600 m。

勘查区地热地质条件十分有利,按淮北煤田的平均地热

增温率2.65℃/100 m计算,该项目设计施工1600 m地热勘探井,预计热储温度可达50℃左右,出水量约20 m³/h。

淮北市是安徽省重要的能源基地,境内煤炭资源开采已近尾声,为国家级资源枯竭型城市。为适应城市转型,以及开发清洁能源(地热资源)需要,淮北市人民政府决定进行地热资源勘探工作。

以往资料表明,工作区有较好的成热地质背景。地热资源的开发利用,将成为淮北市新的经济增长点。