

深基坑工程回灌管井设计若干问题探讨

陆建生

(上海广联建设发展有限公司,上海 200438)

摘要:针对深基坑工程回灌管井设计中的一些问题进行了探讨,根据不同回灌目的,将基坑工程地下水回灌分为基于环境控制和基于水资源保护这两类不同控制要求的地下水回灌,同时阐述了这两种不同回灌模式下的控制原则、定水头回灌与定流量回灌模式的选取原则、极限回灌压力及设计最大回灌压力的计算、最大安全回灌水头和最大可回灌量的确定方法以及回灌井开启时间的设定等回灌管井设计问题。

关键词:回灌管井;回灌控制;地下水;最大回灌压力;最大可回灌量;深基坑工程

中图分类号:TU46⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)08-0042-05

Discussion on the Design of Recharge Well for Deep Foundation Pit Engineering/LU Jian-sheng (Shanghai Guanglian Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: Discussion is made on some problems in the design of recharge well for deep foundation pit engineering, according to different recharge purposes, groundwater recharge for foundation pit engineering is based on environmental control and water resource protection; the control principle, selection principles of constant recharge and constant flow recharge modes, calculation of limit pressure and designed maximum recharge pressure, maximum safe recharge water head and determination method of maximum recharge amount as well as recharge well opening time setting are elaborated.

Key words: recharge well; recharge control; groundwater; maximum recharge pressure; maximum recharge amount; deep foundation pit

0 引言

在城市深基坑工程建设中,采用降水的方法降低开挖土层中可能引起基坑底板承压水突涌的含水层的地下水位是十分必要的^[1,2]。但随着地下水位的降低,地基中原水位以下土体的有效自重应力增加,导致地基土体固结,进而造成降水影响范围内的地面和建(构)筑物产生不均匀沉降、倾斜、开裂等现象,危及其安全和正常使用^[1~6]。因此在深基坑建设中必须采取有效措施消除或降低基坑降水对周围环境的影响。控制因基坑降水而引起的工程性地面沉降,最直接有效的办法是控制地下水水位,而在控制地下水水位的措施中地下水人工回灌是一种相对经济可靠的措施。早在18世纪末19世纪初,欧洲的一些国家已经有了人工补给地下水^[7],我国许多大中城市在20世纪50年代末期就开始了地下水回灌的实施与研究^[7],但其主要目的是:调蓄地下水资源和控制区域地面沉降。为控制区域地面沉降,上海等地长期开展地下水人工回灌工作,取得了较好的地面沉降防治效果^[8]。

随着城市深基坑工程建设的复杂化,上海、北京等城市的部分基坑采用了工程性的回灌^[9~11]。这些工程回灌多属于应急措施一部分,备用为主,其回灌目的含水层主要集中于浅层承压水,同时深基坑工程回灌井在空间布置上的局限性与回灌时间的短期性,都决定了基坑工程承压水回灌技术方法的特殊性。受限于密集的建筑群和复杂的地下设施的影响,深基坑回灌运行过程中必须分析水土应力变化,避免因回灌形成土层的二次不利变形。

目前回灌作为一项预防性工程措施,受到多方的关注,在多本技术规范^[12,13]上均有提及,但是对于其设计指导性不强,困惑较多。鉴于此,本文针对回灌设计中不同回灌模式下的控制原则、定水头回灌与定流量回灌的选取原则、极限回灌压力及设计最大回灌压力的计算、回灌井回灌量的确定方法及回灌井开启时间的设定等回灌管井设计问题进行探讨。

1 深基坑工程回灌控制原则

深基坑工程地下水回灌根据回灌目的的差异可

收稿日期:2013-03-22

基金项目:上海市科学委员会资助项目(08201201302)

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,上海市国伟路135号10号楼216室,lujest@sina.com。

分为基于环境控制和基于水资源保护这两类不同控制要求的地下水回灌。

基于环境控制的深基坑工程地下水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,其主要分析指标是地下水水位。该类型回灌遵循以下原则:在保证基坑内水位满足基坑安全要求的同时,控制保护建(构)筑物区地下水水位变化最小。超灌与少灌均不利于环境的控制。

基于水资源控制的基坑工程地下水回灌主要目的是在保证基坑安全的同时减少水资源浪费,保护水资源平衡,以及解决基坑降水过程中外排水量大而导致的市政排水问题。基于水资源控制的基坑工程地下水回灌与常规水资源型回灌的差异主要是基坑工程地下水回灌还需分析回灌对基坑内水位及建(构)筑物区水位的影响。因此该类型回灌遵循以下原则:最大量将原外排地下水回灌至原地层中,同时确保基坑内水位控制在安全水位内。

因水文地质条件、环境要求及基坑特点的差异,回灌控制将以某一种方式为主。如上海地区深基坑工程中的回灌目前主要考虑控制环境变形,但与此同时部分工程通过原水回灌也在一定程度上减少了水资源的排放,达到水资源控制的目的。对于那些在含水层渗透性大的地区,因基坑外排水量远大于市政允许排水量,其回灌主要是基于水资源控制的目的。

为防止原地层中的地下水受到污染,回灌水水质应不劣于含水层水质,在深基坑建设过程中应鼓励原水回灌。为避免不同含水层间的水质污染,回灌井必须设置可靠的分隔层。

2 定流量与定水头回灌的选择

管井回灌的控制模式可分为定水头回灌与定流量回灌。

定水头回灌也叫定压力回灌,是指回灌过程中回灌井内的水头高度(或回灌压力)维持不变,在运行过程中回灌井井损将不断增大,进而使得流量减小,在该类型回灌过程中不会出现井壁突涌现象。

定流量回灌是指回灌过程中流入回灌井内的流量维持不变,在运行过程中回灌井井损将不断增大,进而使得回灌井内压力不断增加,后期运行控制极易出现井壁突涌现象。

两种控制模式均需采用回扬措施确保回灌井内压力小于极限回灌压力及确保回灌流量的稳定性。

基于变形控制的管井回灌其目的是确保保护建(构)筑物区的水位变幅控制在允许范围内。以完整井在承压含水层中回灌为例,回灌过程可近似为抽水的逆过程,则单井回灌水位抬升值可由公式(1)计算获得:

$$s(r,t) = H_0 - H(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1)$$

$W(u)$ 为泰斯井函数, $u = \frac{r^2}{4at}$, $W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx$ 式中: Q ——回灌流量, m^3/d ; T ——含水层导水系数, m^2/d ; s ——任一点任意时刻的水位抬升值, m ; a ——导压系数, m^2/d ; H_0 ——初始水位, m ; R ——计算点到回灌井的距离, m ; $H(r,t)$ —— t 时刻距离回灌井 r 处的含水层水位, m 。

$W(u)$ 与时间 t 之间的关系如图1所示,随着时间的推移, $W(u)$ 值趋于稳定,而由公式(1)可知,在 t 达到一定值后, $Q-s$ 可近似为成正比关系,即如果回灌流量固定,保护建(构)筑物区的最终水位抬升值随时间的变化非常小,可近似为定值;在定压回灌中,因受井损逐渐变大的影响,在回灌压力不变的条件下,回灌流量减小,进而使得在实际控制中难以确保 s 为定值,因此基于变形控制为目的的管井回灌应以选择定流量回灌为主,对于以水资源控制为主的管井回灌应以定水头为主。

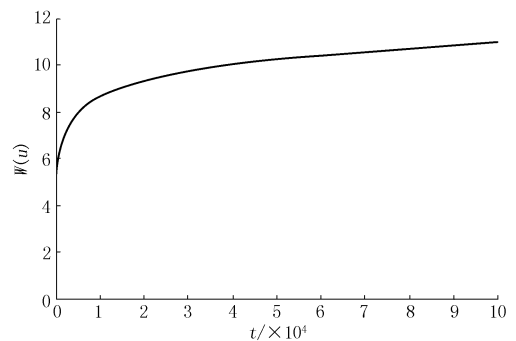


图1 $W(u)$ 与时间 t 关系曲线示意图

3 极限回灌压力及设计最大回灌压力

在回灌过程中会出现回灌井井壁冒水的现象,其主要原因为:

(1)井壁回填不密实,含水层至地面有管道存在,该种情况下,回灌水头超过地面即开始冒水;

(2)回灌井井壁水压力超过上覆土压力后出现突涌现象;

(3)粘土球底部因回灌水头的增加发生剪切破坏和拉伸破坏,逐渐形成垂向裂隙,最终发展至地面,冒水。

原因(1)属于施工不达标,本文不做讨论。

原因(2)中的回灌井井壁抗突涌稳定性条件为:粘土球底板至地表的土压力应大于安全系数下承压水的顶托力,如图2所示。

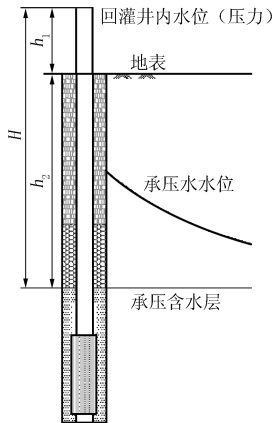


图2 回灌井示意图

即:

$$\gamma_s h_2 \geq F_s \gamma_w (h_1 + h_2) = F_s \gamma_w H \quad (2)$$

式中: h_1 ——回灌井内承压水位与地面的距离,m,当高出地面时,该值为正数,当低于地面时,该值为负数; h_2 ——粘土球分隔层底至地面间分隔层的厚度,m; H ——回灌井内承压水位高于粘土球分隔层底部的高度,m; γ_s ——粘土球分隔层底至地面间各分隔层的平均重度, kN/m^3 ; γ_w ——水的重度,一般取 10 kN/m^3 ; F_s ——井壁抗突涌安全系数。

当 $F_s = 1$ 时, h_1 为极限回灌水头,

$$H_{\text{lim}} = (\gamma_s - \gamma_w) / \gamma_w \cdot h_2 = (\gamma_s / \gamma_w - 1) h_2 \quad (3)$$

对应的水压为极限回灌压力,考虑到回灌井壁回填材料与原状土、井壁管之间接触的不确定性, F_s 的取值应大于1,在不同填土材料及施工质量条件下其值的选取还需要做进一步的试验研究。

原因(3)中为避免粘土球底部发生剪切破坏和拉伸破坏,进而在垂向逐渐发展裂隙,土体竖向和水平向主应力分别为:

$$\sigma_z = \gamma_s h_2 - \gamma_w H \quad (4)$$

$$\sigma_x = K \gamma_s h_2 - \gamma_w H \quad (5)$$

拉伸破坏时小主应力为零:

$$\sigma_x = K \gamma_s h_2 - \gamma_w (h_1 + h_2) = 0 \quad (6)$$

$$H_{1s} = (K \gamma_s - \gamma_w) / \gamma_w \cdot h_2 = (K \gamma_s / \gamma_w - 1) h_2 \quad (7)$$

对于拉伸破坏时, K 取静止土压力系数,按经验公式可得 $K = K_0 = 1 - \sin \varphi$,对于粘土球考虑 $\varphi = 15^\circ$,则可得 $K_0 = 0.74$,则:

$$H_{1s} = (K \gamma_s - \gamma_w) / \gamma_w \cdot h_2 = (0.74 \gamma_s / \gamma_w - 1) h_2 \quad (8)$$

$$\sigma_x = \sigma_z \tan^2(45^\circ - \varphi/2) - 2c \tan(45^\circ - \varphi/2) \quad (9)$$

由(4)、(5)、(9)可得:

$$h_1 = \frac{\gamma_s h_2 [K - \tan^2(45^\circ - \varphi/2)] + 2c \tan(45^\circ - \varphi/2)}{\gamma_w [1 - \tan^2(45^\circ - \varphi/2)]} \quad (10)$$

剪切破坏时两主应力应满足摩尔-库仑强度准则:

$$K_0 \gamma_s h_2 \geq \gamma_w (h_1 + h_2) \quad (11)$$

$$H_{\text{lim}} = (K_0 \gamma_s - \gamma_w) / \gamma_w \cdot h_2 \quad (12)$$

对比式(2)和(11)可知, $F_s = 1/K_0 \approx 1.35$,即当安全系数 $F_s \geq 1.35$ 时即满足抗突涌要求,又能避免出现裂缝的进一步发展。因此克服粘土球底部发生剪切破坏和拉伸破坏是浅层回灌设计的主控因素。

案例:上海某基坑降水回灌工程中,回灌井结构如图2所示,为避免井壁冒水,在回填滤料上方回填了10 m长粘土球,粘土球顶至地面添瓜子片,瓜子片密实后,通过预埋注浆管注浆封填。在回灌试验中,1号回灌井因回灌流量大,在回灌不到3 min井内回灌水头 h_1 已达35 m,井壁出现大量冒水,2号回灌井内水头 h_1 超过22 m时,井壁出现冒水,3号回灌井内水头 h_1 位于20 m时,未出现井壁冒水现象。

试验中可假设 $\gamma_s = 18.0 \text{ kN/m}^3$, $h_2 = 58.0 \text{ m}$ 。

对于1号井有:

$$F_s = \frac{\gamma_s h_2}{\gamma_w (h_1 + h_2)} = \frac{18.0 \times 58.0}{10 \times (35 + 58)} = 1.12$$

对于2号井有:

$$F_s = \frac{\gamma_s h_2}{\gamma_w (h_1 + h_2)} = \frac{18.0 \times 58.0}{10 \times (22 + 58)} = 1.30$$

对于3号井有:

$$F_s = \frac{\gamma_s h_2}{\gamma_w (h_1 + h_2)} = \frac{18.0 \times 58.0}{10 \times (20 + 58)} = 1.34$$

1号井因压力聚集过快及监测频率等原因,实际井壁冒水临界点应小于35 m,也即 F_s 应远大于1.12,对于2号井,其井壁冒水时的 $F_s = 1.30$ 与1.35比较一致,但考虑由含水层顶至地面管路的形成需要一段时间,也即实际的安全系数应大于

1.30。

通过案例比较可知,利用裂缝公式计算极限回灌压力是相对符合实际的,同时考虑到下填滤料过程的复杂性,工程实践中确立最大安全回灌水头,必须考虑适当的安全系数。

$$H_{saf} \leq (K_0 \gamma_s - F_1 \gamma_w) / (F_1 \gamma_w) \quad (13)$$

式中: F_1 ——回灌安全系数。

对应抗突涌安全系数 $F_s = F_1 / K_0 \approx 1.35 F_1$ 。

在回灌流量不变的情况下,回灌压力将逐渐增加,后期虽然可利用回扬措施降低回灌压力,但回灌压力在一定时间内还是存在一定增加空间,为此应在充分考虑回灌压力增长速率及回扬时间间隔的基础上确定回灌安全系数。

目前基坑工程回灌井多布置于浅层承压水中,其回灌有较多的特殊性,对于深层回灌井因其含水层顶板埋深深,回灌可在较高压力条件下进行,而浅层承压水因其水头高且其含水层顶板埋深浅,其回灌压力的设置受到严格的限制。

4 回灌流量的确定

回灌井设计时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。

回灌井的最大可回灌量可由下式计算:

$$Q_p = q_h (H_{saf} - h_0) \quad (14)$$

式中: q_h ——单位设计回灌量, $L/(h \cdot m)$,回灌井内水位抬升 1 m 时的回灌流量值; H_{saf} ——最大安全回灌水头; h_0 ——无回灌状态下的地下水水位埋深值, m。

H_{saf} 可通过(13)式确定, h_0 可通过地下水渗流计算获取降水期间的水位埋深值。单位设计回灌量 q_h 是回灌设计中的关键参数,在一般的水文地质勘察中不会给出,在实际工程设计中可通过井单位出水量 q_c 计算获得,理论上 $q_h \approx q_c$,但回灌时阻力远大于抽水,且 q_h 的变幅相对较大,因此回灌设计时单位设计回灌量可按下式计算:

$$q_h = \eta q_c \quad (15)$$

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。

对应回灌井的最大可回灌量:

$$Q_p = \eta q_c (H_{saf} - h_0) \quad (16)$$

基于环境控制下的水位抬升值可通过式(17)求得:

$$S = \sum_{i=1}^n s(r_i, t) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i Q_{pi} W(u_i)}{4\pi T} \quad (17)$$

式中: λ ——群井回灌效应系数。

当 S 接近至水位抬升目标值时所对应的回灌管井数量 n 为回灌井开启数量。在工程设计中为解决回灌井的措施回扬及回灌井的备用井,设计回灌井数量为:

$$N = K_\alpha n \quad (18)$$

式中: K_α ——回灌井设计安全系数,其值的选取根据土层特征及施工工况确定; n ——回灌井理论计算量; N ——回灌井设计数量。

在地层复杂及含水层受到止水帷幕等影响时,应通过三维地下水渗流分析,确定回灌井理论计算量。

回灌井开启状态下,整个区域的地下水水位均要抬升,即在抬高了保护区地下水水位的同时,也抬高了抽水区的地下水水位。在此条件下需要合理的考虑回灌井的空间布置,即保证基坑的安全也在一定程度上抬升保护建筑区的地下水水位。

基于水资源控制下的回灌井理论计算量为:

$$n = Q / Q_p \quad (19)$$

式中: Q ——场区单日最大回灌量, m^3/d 。

基于水资源控制的回灌井应尽量远离基坑区,同时必须分析回灌对基坑施工的影响。

5 回灌井启动时间的设置

基于环境控制的回灌井其主要目的是控制建(构)筑物的沉降,相同地层的弹性模量远大于压缩模量,则在相同水位幅度内波动时,回弹量要远小于沉降量。鉴于此应尽量避免或降低建(构)筑物区的水位波动,也即抽水应同步进行,但其抽水流量及回灌流量的确定应通过计算分析后确定。

基于水资源控制的回灌井应在回灌水水质满足回灌要求时即可启动回灌井回灌,期间抽水流量及回灌流量的确定应通过计算合理获取。

对于两种目的均有的回灌井应选取严格的一方进行设置。

6 结语

(1) 基坑工程地下水回灌根据不同回灌目的可分为基于环境控制和基于水资源保护这两类不同控制要求的地下水回灌。

(2) 基于环境控制的基坑工程地下水回灌控制原则:在保证基坑内水位满足基坑安全要求的同时,控制保护建(构)筑物区地下水水位变化最小。超灌与少灌均不利于环境的控制。

(3) 基于水资源控制的基坑工程地下水回灌控制原则:最大量将原外排地下水回灌至原地层中,同时确保基坑内水位控制在安全水位内。

(4) 基于变形控制为目的的管井回灌应以选择定流量回灌为主,对于以水资源控制为主的管井回灌应以定水头回灌为主。

(5) 目前基坑工程回灌井多布置于浅层承压水中,其回灌有较多的特殊性,对于深层回灌井因其含水层顶板埋深深,回灌可在较高压力条件下进行,而浅层承压水因其水头高且其含水层顶板埋深浅,其回灌压力的设置受到严格的限制。

(6) 克服粘土球底部发生剪切破坏和拉伸破坏是浅层回灌设计的主控因素。通过案例比较可知,利用裂缝公式计算极限回灌压力是相对符合实际的,同时考虑到下填滤料过程的复杂性,必须考虑适当的安全系数,进而确立最大安全回灌水头。

(7) 建立了最大安全回灌水头和最大可回灌量的计算公式。

(8) 基于环境控制的回灌井其抽灌应同步进

行;基于水资源控制的回灌井应在回灌水水质满足回灌要求时即可启动回灌井回灌。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 卢礼顺,刘建航,刘庆华,等. 上海某地铁站深基坑周围土体沉降研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(S1):1764-1768.
- [4] 闫双. 基坑降水诱发的建筑物特殊事故及其分析[J]. 四川建筑科学研究,2012,(3):133-135.
- [5] 康介莲,程林林. 施工降水引起房屋墙体开裂的事故处理[J]. 山东建筑大学学报,2009,(5):488-493.
- [6] 刘国彬,王洪新. 上海浅层粉砂地层承压水对基坑的危害及治理[J]. 岩土工程学报,2002,24(6):790-792.
- [7] 李恒太,石萍,武海霞. 地下水人工回灌技术综述[J]. 中国国土资源经济,2008,21(3):41-42,45.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 宁仁岐,郭莘,徐晓飞. 金力大厦深井井点降水及回灌技术[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1996,(6):116-120.
- [11] JGJ 120-2012,建筑基坑支护技术规程[S].
- [12] DGTJ 08-61-2010,基坑工程技术规范[S].

柴达木盆地页岩气勘查开发打开“一扇窗”

《中国矿业报》消息(2013-08-01) 首次系统获得柴达木盆地中侏罗统大煤沟组泥页岩层段 20 余项参数,首次获得侏罗系富含有机质泥页岩的含气性,在中侏罗统大煤沟组泥页岩层段发现 3 套含气层……“青海柴达木盆地重要页岩气远景区调查评价”项目柴页 1 井工程近日顺利完成施工,交上了一份漂亮的“答卷”。

据项目承担单位中国地质调查局油气资源调查中心副主任翟刚毅介绍,这 3 个含气泥页岩的发现,标志着柴达木盆地页岩气勘查开发打开了“一扇窗”,这为高原盆地非常规油气勘查开发突破奠定了基础。

据了解,柴页 1 井采用密闭取心的方式,首次在柴达木盆地中侏罗统大煤沟组获得完整的长达 136.28 m 泥页岩层段岩心。根据现场气测、含气量分析、岩屑岩心、元素扫描、伽马能谱扫描、常规测井、特殊测井等资料的分析,在大煤沟组 7 段优选出 2 层页岩气显示的有利层段。层段 1 从 1921.18~1979.3 m,厚度 57.50 m,岩性为大套的黑色~灰黑色碳质泥岩,夹薄层油页岩。层段 2 从 1992.41~2037.71 m,厚度 45.30 m,岩性为灰黑色碳质泥岩,夹灰白色中砂岩。

在大煤沟组 5 段优选出 1 层有利层段,从 2082~2120 m,厚度 38 m,岩性为灰黑色碳质泥岩,夹多套煤层及深灰色砂质泥岩。

翟刚毅介绍,下一步将在前期岩心、测井资料等综合研究的基础上,研究制定压裂试气方案,组织实施压裂施工、试气、试油,力争获得油气突破。此外,针对柴达木盆地石炭系泥页岩油气勘查的德页 1 井近期也将实施钻探。

柴页 1 井位于青海省海西州大柴旦镇,构造上属于柴达木盆地北缘鱼卡坳陷,目的层为中侏罗统大煤沟组泥页岩层段。该井是中国地质调查局部署的“青海柴达木盆地重要页岩气远景区调查评价”项目工作任务之一,也是中国地质调查局在柴达木盆地针对陆相侏罗系实施的第一口页岩气参数井。柴页 1 井和德页 1 井井位是项目承担单位中国地质调查局油气资源调查中心和实施单位青海油田公司在前期优选的 10 个页岩气远景区中,结合地质、地震、邻井资料,利用斯派迪克变频技术重新处理地震资料的研究成果。其中,柴页 1 井实际施工周期为 2013 年 5 月 21 日~7 月 24 日,工期 65 天,完钻井深 2250 m,钻遇基岩 65 m。