# 基坑降水一回灌共同作用下地下水浸润曲线求解研究

高扬,代方园,雷炳霄,曾纯品,孙虹洁

山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队,济南,250014

内容提要:基坑工程中,通常采用地下水回灌措施降低降水对周边地质环境产生的不良影响,然而目前基坑降 水一回灌的相关设计理论仍处于探索阶段。本文通过引入平面二维流势函数理论和叠加原理,分别求解得到了无 止水帷幕工况下潜水完整井和承压完整井在降水一回灌共同作用下的地下水浸润曲线方程;此外,本文通过空间 汇点原理和镜像原理分别求得基坑内降水和基坑外回灌对基坑外地下水位的影响,并运用叠加原理得到了有止水 帷幕工况下,深基坑降水一回灌作用下的地下水浸润曲线解析式。本文利用得到的解析式探讨了在具有止水帷幕 条件下回灌井距基坑围护结构的距离、渗透系数等主要因素对浸润曲线的影响,为基坑降水一回灌设计提供了参 考依据。

关键词:回灌;浸润曲线;解析式;基坑;地下水

近年来,随着城市轨道交通的发展以及高层建 筑的不断增多,基坑工程开挖深度不断增大,复杂程 度也日益增加(龚晓南等,1998),地下水问题是基坑 工程不可忽视的一道难题,也是保证基坑工程安全 施工的关键问题之一(吴林高,2003)。目前,常采用 基坑内降水+基坑外止水的方法来控制地下水,保 证基坑工程的安全(Feng Xiaola et al., 2013)。基 坑降水过程中,由于孔隙水的消散,使得土的有效自 重应力增加,同时,产生了作用在土体上的渗流力, 二者的共同作用,引发了基坑附近土体及建筑物的 沉降等危害(Jin Xiaorong et al., 2005; Zhang Yong et al., 2008)。Jin Xiaorong et al. (2005)通过二维 有限元模拟发现,在基坑周边设置回灌井可以有效 的减小回灌点以外的不均匀沉降量和总沉降量。 Yao Jihua et al. (2013)通过建立水-土耦合模型发 现,设置回灌井后,相对远离基坑处比相对靠近基坑 处的地面沉降减小显著。

目前国内已经有许多通过回灌技术控制降水对 周边环境影响的成功案例(Ma Ronghua et al., 1997; Zheng Gang et al., 2013; Qu Chengsong et al., 2014; Lu Jiansheng et al., 2014), 相关的设计理 论和方法也有了一定的参考。例如, Zeng Qingjun et al. (2001)从地下水系统理论出发,得到了基坑 工程降水—回灌系统的抽(注)水量的数学建模及求 解方法,但该方法仅适用于基坑周边地下水补给不 强烈的情况。一些学者(Yu Jianlin et al., 2001; Yuan Hua et al., 2013) 对回灌设计方法进行了探 索,并成功应用于工程实践,但其设计理论未考虑止 水帷幕的影响。目前,已有学者注意到基坑围护结 构对地下水渗流路径的影响,如Liu Qingfang et al. (2013)考虑围护结构对地下水渗流场的影响,提出 了改进的基坑涌水量公式,但未提及围护结构对地 下水回灌渗流的影响。本文利用叠加原理和镜像原 理分别推导了无止水帷幕和有止水帷幕两种工况下 的基坑降水一回灌共同作用下地下水的浸润曲线公 式,并利用该解析式探讨了回灌井距基坑围护结构 的距离、渗透系数等因素对回灌浸润曲线的影响,为 基坑降水一回灌设计提供了参考依据。

## 1 无止水帷幕工况浸润曲线求解

### 1.1 潜水完整井降水一回灌共同作用

假设含水层均质、隔水底板水平,则潜水含水层 平面二维流中,可引入吉林斯基势函数 φ(陈崇希 等,1999),则:

作者简介:高扬,男,1989年生。工程师,主要从事岩土体稳定性研究。Email. gaoyang89@qq. com。

通讯作者:曾纯品,男,1976年生。研究员,主要从事环境岩土学研究。Email:596677856@qq.com。

引用本文:高扬,代方园,雷炳霄,曾纯品,孙虹洁. 2019. 基坑降水—回灌共同作用下地下水浸润曲线求解研究. 地质学报, 93(s1):127 ~132, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019219.
 Gao Yang, Dai Fangyuan, Lei Bingxiao, Zeng Chunpin, Sun Hongjie. 2019. Calculation of saturation curve under the action of dewatering and recharge in foundation pit. Acta Geologica Sinica, 93(s1): 127~132.

收稿日期:2019-07-23;改回日期:2019-09-08;责任编辑:周健。

(1)

 $d\varphi = khdh$ 

由达西定律,可得潜水完整井的流量用势函数 表示的形式:

$$\varphi = \frac{Q}{2\pi} \ln r + c \tag{2}$$

式中:Q为涌水量(m<sup>3</sup>);r为过水断面半径(m);c为 常数,其值由边界条件确定。

至此,我们可以通过势函数叠加原理,求得基坑 降水一回灌耦合状态下浸润曲线方程。

假设设计降水井 m 口,设计回灌井 n 口,则降 水井与回灌井会产生相互干扰,若降水井与回灌井 是任意布置的,可令各降水井至某点的距离分别,  $r_1, r_2, \dots, r_n$ 干扰涌水量为 $Q_1$ ;各注水井至某点的 距离分别 $r_1', r_2', \dots, r_n'$ ,干扰涌水量为 $Q_2$ 。则由 叠加原理,可以得到 m 口抽水井与 n 口回灌井共同 工作时的该点的势函数  $\varphi = \frac{Q}{2\pi kM} \ln r + c$ (Mao Genhai et al.,2005);

一般在布置基坑降水一回灌井时,回灌井与抽水井不会相隔太远,故可以假设抽水井的影响半径 R远大于各井间距,则有  $\varphi = \frac{Q}{2\pi kM} \ln r + c$ ,对于回 灌井的影响半径 R,有同样的关系。则在影响半径 R 处的势函数为:

$$\varphi_{dR} = \frac{1}{2}kH^{2} = \sum_{i=1}^{m+n} \varphi_{ik} = \left(\sum_{i=1}^{m} \frac{Q_{i}}{2\pi} \ln R_{i}\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{i}}{2\pi} \ln R_{i}^{'}\right) + C \quad (4)$$

由式(4)减式(3),便可得到基坑降水一回灌共 同作用下的浸润曲线方程,即:

$$H^{2} - h_{c}^{2} = \sum_{i=1}^{m} \frac{Q_{i}}{\pi k} \ln \frac{R_{i}}{r_{i}} - \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{i}^{'}}{\pi k} \ln \frac{R_{i}^{'}}{r_{i}^{'}} \quad (5)$$

同样,由叠加原理,我们可以得到降水井群与回 灌井群分别单独作用时的浸润曲线方程,即:

降水井群单独作用时:

$$H^{2} - h_{cj}^{2} = \sum_{i=1}^{m} \frac{Q_{i}}{\pi k} \ln \frac{R_{i}}{r_{i}}$$
(6)

回灌井群单独作用时:

$$H^{2} - h_{ch}^{2} = -\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{i}^{'}}{\pi k} \ln \frac{R_{i}^{'}}{r_{i}^{'}}$$
(7)

把式(6)、(7)带入公式(5),可得:

$$h_c^2 = h_{cj}^2 + h_{di}^2 - H^2 \tag{8}$$

公式(8)便为潜水完整井降水一回灌共同作用下的 浸润曲线方程。式中 h<sub>c</sub>为降水一回灌共同作用下 的水头(m);h<sub>d</sub>为降水井群单独作用时的水头(m); h<sub>d</sub>为回灌井群单独作用时的水头(m);H 为潜水含 水层厚度(m)。

## 1.2 承压完整井降水一回灌共同作用

假设承压含水层均质、等厚,则承压含水层平面 二维流中的势函数为:

$$\mathrm{d}\varphi = kM\mathrm{d}h \tag{9}$$

式中:M为承压含水层的厚度(m)。

同样结合达西定律可得: $\varphi = \frac{Q}{2\pi kM} \ln r + c$ 。

仿照潜水完整井求得的承压完整井降水一回灌 共同作用下的浸润曲线方程,即:

$$M - h_{c} = \sum_{i=1}^{m} \frac{Q_{i}}{2\pi kM} \ln \frac{R_{i}}{r_{i}} - \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{i}'}{2\pi kM} \ln \frac{R_{i}'}{r_{i}'} \quad (10)$$

承压完整井降水井群单独作用时:

$$M - h_{cj} = \sum_{i=1}^{m} \frac{Q_i}{2\pi k M} \ln \frac{R_i}{r_i}$$
(11)

承压完整井回灌井群单独作用时:

$$M - h_{ch} = -\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{i}'}{2\pi kM} \ln \frac{R_{i}'}{r_{i}'}$$
(12)

把式(6)、(7)带入公式(5),可得:

 $h_c = h_{cj} + h_{ch} - M$  (13)

公式(13)便为承压完整井降水一回灌共同作用 下的浸润曲线方程,式中参数物理意义参照公式 (8)。对比潜水完整井与承压完整井的求解过程,承 压完整井可直接应用叠加原理对各井的水头 h 进行 叠加,潜水完整井是通过将微分方程线性化后对 h<sup>2</sup> 进行叠加。

## 2 有止水帷幕工况浸润曲线求解

由于帷幕(或隔水结构)深入到降水含水层内, 将基坑含水层大部分隔断,仅基坑底部进水。由 于帷幕的阻隔作用,渗透路径增加,边界条件确定 困难,地下水的渗流特征变得复杂,吴林高(2003) 曾针对这种情况进行过讨论,但未给出明确的解 析解。

对于有帷幕(或围护结构)的基坑,可以将基坑 看作一个"大井",帷幕可以看作该井的井壁,则该基 坑可以简化成仅井底进水的降水井。那么有止水帷 幕时的基坑降水—回灌浸润曲线求解模型就可以看 作承压降水井与承压回灌井群共同作用的模型。

由于降水井群可以看作若干个汇点的总和,基 坑内降水井群形成的水位降深,可通过空间汇点原 理求得。设某点距汇点的距离为 r,该点处的降深 为 s,若基坑为圆形,则过水断面积为 2πr<sup>2</sup>。根据达 西定律,可得汇点处的流量为:

$$Q = -K \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}r} 2\pi r^2$$

分离变量后可得基坑外某点 r 至影响半径 R 区间内的积分,即该点处的水位降深:

$$s_j = M - h_{cj} = \frac{Q_1}{4\pi K} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right)$$
 (14)

其中:M为承压含水层的厚度(m); $h_a$ 降水井群 单独作用时的水头(m); $Q_1$ 为基坑总涌水量(m<sup>3</sup>);r为距汇点的距离(m),本文取研究点至基坑边界的 距离与基坑的等效半径 $r_0$ 之和。若基坑为圆形时,  $r_0$ 为圆半径;若基坑为矩形, $r_0 = 0.29(a+b)$ ,其中 a、b分别为基坑的长边和短边;若基坑为不规则形 状,则 $r_0 = \sqrt{A/\pi}$ ,其中 A 为基坑的面积(Liu Qingfang et al.,2013)。

对于单个回灌井,可将帷幕看做隔水边界,根据 镜像原理,可以设基坑内部也有一个回灌量相同(为 Q<sub>2</sub>)的回灌虚井。若回灌过程加压,则回灌井的降 深为该回灌井和基坑内虚井的叠加,即:

$$s_{h} = -\left(\frac{Q_{2}}{2\pi kM}\ln\frac{R}{r_{1}} + \frac{Q_{2}}{2\pi kM}\ln\frac{R}{r_{2}}\right) = -\frac{Q_{2}}{2\pi kM}\ln\frac{R^{2}}{r_{1}r_{2}}$$
(15)

由叠加原理可得加压回灌井群的水位降深:

$$s_h = M - h_{ch} = -\sum_{i=1}^n \frac{Q_2}{2\pi kM} \ln \frac{R^2}{r_1 r_2}$$
 (16)

将公式(14)与(16)代入公式(13),便可得存在 帷幕时加压回灌的水位线方程:

$$h_{c} = M - \frac{Q_{1}}{4\pi K} \left(\frac{1}{r_{0}} - \frac{1}{R}\right) + \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{2}}{2\pi k M} \ln \frac{R^{2}}{r_{1}r_{2}}$$
(17)

 $h_c = M - s_j - s_h \tag{18}$ 

公式(18)便是有止水帷幕工况时的基坑降水回 灌作用下地下水的浸润曲线公式。式中:h。为降 水一回灌共同作用下的水头(m);M为含水层厚度 (m);Q<sub>1</sub>为基坑总涌水量(m<sup>3</sup>);Q<sub>2</sub>为总回灌量 (m<sup>3</sup>);R为影响半径(m);K为含水层渗透系数(m/ s);s<sub>5</sub>为基坑降水在研究点处引起的水位变幅(m); s<sub>h</sub>为回灌在研究点处引起的水位变幅(m);r<sub>0</sub>为基坑 的等效半径(m);r<sub>1</sub>为研究点距基坑外回灌井的距 离(m);r<sub>2</sub>为研究点距基坑内虚井的距离(m)。

## 3 实例分析

济南轨道交通 R1 线大杨庄站位于齐鲁大道与 经十西路交叉口处,场地揭示地下水类型为第四系 松散岩类孔隙水。第四系孔隙水混合水位埋深 6.8 ~7.0 m。该场地内⑧<sub>1</sub>、⑧<sub>2</sub>层为工程影响范围内的 主要含水层,其埋深为 10.8~21.50m,属强透水层, 其顶板、底板均为透水性相对较弱的厚层粘性土组 成。现场抽水及回灌试验确定的综合渗透系数 K=9.13m/d,影响半径 R=200m。

大杨庄站车站主体采用明挖法施工,支护结构 采用套管咬合钻孔灌注桩+地下连续墙,根据其支 护方式可视作有止水帷幕工况。车站总长 514.09m,标准段宽22.7m,标准段底板埋深约 19.0m。坑内布置68口降水井,水位降至基坑底板 以下。帷幕外侧布置39口回灌井,回灌井距基坑 30m,回灌井间距为18m,采用加压回灌方式,目标 回灌量达到100%。

场地各土层根据室内确定的渗透指标见表1。

表 1 济南轨道交通大杨庄站各土层渗透系数

 Table 1 Permeability coefficient of each soil layer in

 Dayangzhuang station of Jinan

层号	岩土层	天然重度	渗透系数(cm/s)		
			$K_{h}$	K <sub>v</sub>	
$\bigcirc$	黄土	19.0	$1.0 \times 10^{-4}$	3.5×10 <sup>-4</sup>	
8	粉质粘土	19.2	6.5×10 <sup>-5</sup>	$1.2 \times 10^{-4}$	
$(\$)_1$	卵石	20.5	$3.0 \times 10^{-1}$	3.0×10 <sup>-1</sup>	
<b>8</b> <sub>2</sub>	细砂	19.6	6.0×10 <sup>-3</sup>	6.0×10 <sup>-3</sup>	
83	粉土	19.6	8.0×10 <sup>-4</sup>	$1.0 \times 10^{-3}$	
$(8)_4$	粘土	19.4	9.0×10 <sup>-6</sup>	1.6×10 <sup>-5</sup>	
10	粉质粘土	19.0	7.5×10 <sup>-5</sup>	$1.0 \times 10^{-4}$	

为模拟无止水帷幕工况降水一回灌共同作用, 本文在上述场地内沿直线布设了2口抽水井、2口 监测井和1个回灌井,相关参数见表2。无止水帷 幕工况降水一回灌共同作用水位变幅现场实测值与 根据公式(8)得到的的理论计算值的对比关系见 图1。

#### 表 2 济南轨道交通大杨庄站无止水帷幕工况 试验井参数一览表

 Table 2
 List of parameters of test wells without water-stop curtain in Dayangzhuang station of Jinan

井编号	抽1	抽 2	观 1	回灌井	观 2
单井抽灌水量(m <sup>3</sup> /h)	50	20	\	70	\
与回灌井距离(m)	97.59	55.96	17.89	0	-13.94
实测水位变幅(m)	-6.61	-0.22	+1.1	+5	+0.74
理论计算水位变幅(m)	-4.07	-2.55	+1.77	+4.69	+2.18



### 图 1 济南轨道交通大杨庄站无止水帷幕工况 降水一回灌共同作用下的浸润曲线

Fig. 1 The saturation curve under the coupling of dewatering-recharge without waterproof curtain in Dayangzhuang station of Jinan

由图 1 可知,无止水帷幕工况时根据公式(8)得 到的水位变幅的理论计算值与现场实测值基本吻 合。局部数据理论值与实测值误差较大,可能是由 于现场地层渗透系数不均匀导致。

此外,本文根据公式(18)计算得到了该工程基 坑有止水帷幕工况降水一回灌共同作用下的浸润曲 线的理论值,该理论值与现场实测结果的关系对比 详见图 2。





Fig. 2 The saturation curve under the coupling of dewatering-recharge with waterproof curtain in Dayangzhuang station of Jinan

由图 2 可知,基坑帷幕外地下水位浸润曲线实 测值与理论值趋势基本相同,总体呈现如下规律:基 坑降水一回灌共同作用下,回灌井附近受回灌的影 响,地下水位较高;靠近基坑一侧,由于受到基坑内 降水的影响,回灌井与基坑之间的浸润曲线逐渐降 低,近似呈线性变化;在远离基坑一侧,共同作用下 的浸润曲线呈逐渐降低的趋势,但降低幅度小于靠 近基坑一侧。

## 4 影响降水一回灌共同作用浸润曲线 主要因素分析

基坑外降水一回灌共同作用下的浸润曲线受到 诸多因素的影响,如回灌井与基坑围护结构的距离、 渗透系数等。本文以上述工程为基本算例,在具有 止水帷幕工况条件下,考虑某一因素影响时,假定其 他条件不变,试利用公式(18)分析其规律。

## 4.1 回灌井距基坑围护结构的距离对浸润曲线的 影响

一般来说回灌井距离基坑围护结构越近,回灌 地下水对基坑围护结构的压力越大,从而对基坑围 护结构产生不利影响,甚至产生帷幕渗漏或基坑坍 塌等危害。根据公式(18)得出的回灌井距基坑帷幕 不同距离时对浸润曲线的影响(详见图 3)。



### 图 3 济南轨道交通大杨庄站回灌井与基坑围护结构 的距离对浸润曲线的影响



由图 3 可知,回灌井距基坑围护结构越近,则邻 近围护结构处的地下水升幅越大,水位越高,回灌对 基坑围护结构的不利影响越大;回灌井距基坑围护 结构越远,水位越低,回灌对围护结构的不利影响越 小。因此,在回灌设计时,应考虑回灌对围护结构的 影响,并应在场地允许范围内,回灌井布设尽可能远 离基坑。

#### 4.2 帷幕条件下渗透系数对浸润曲线的影响

渗透系数是关系基坑降水回灌设计成败的重要



图 4 济南轨道交通大杨庄站渗透系数对浸润曲线的影响 Fig. 4 Influence of permeability coefficient on saturation curve in Dayangzhuang station of Jinan

由图 4 可知,渗透系数越大,基坑降水回灌共同 作用下基坑外水位升幅越小,浸润曲线越低。原因 在于,渗透系数越大,基坑外回灌水可以迅速向周围 消散,不至于使得基坑外地下水位上升过大,从而使 得基坑外回灌井的单井回灌量越大。因此,回灌井 设计时,应优先将回灌井滤水管设置在渗透系数较 大的土层中。

## 5 结论

(1)本文利用叠加原理和镜像原理分别推导得 到了无止水帷幕和有止水帷幕两种工况下的基坑降 水一回灌共同作用下地下水的浸润曲线解析式。

(2)通过实例分析,实际观测数据与理论计算值 基本吻合。局部数据理论值与实测值误差较大,可 能是由于现场地层渗透系数不均匀导致。

(3)利用得到的解析式探讨了回灌井距基坑围 护结构的距离、渗透系数等因素对回灌浸润曲线的 影响,结果表明:回灌井距基坑围护结构越近,则邻 近围护结构处的地下水升幅越大,水位越高,回灌对 基坑围护结构的不利影响越大;渗透系数越大,基坑 降水回灌共同作用下基坑外水位升幅越小,浸润曲 线越低。回灌布设时应尽量远离基坑且设置在渗透 系数较大的土层中。

(4)本文基本假设为含水层为均质,但工程实践 中水文地质条件复杂多变,含水层为非均质时的回 灌渗流还需进一步研究。

#### References

- Feng Xiaola, Li Dongguang. 2013. Chung leakage quantity calculation of foundation pit on the condition of the cut-off wall insert into impermeable layer. Hydrogeology & Engineering Geology, 40(5):16~21 (in Chinese with English abstract).
- Jin Xiaorong, Yu Jianlin, Zhu Shaochen, Gong Xiaonan. 2005. Analysis of behaviors of settlement of pit's surrounding soils by dewatering. Rock and Soil Mechanics, 26(10):1575~1581 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qingfan, Liu Jiqian, Tan Peilian, Li Yuanhai, Lin Zhibin. 2013. Calculation of water inflow of foundation pits considering water insulation effect of retaining structures. Tunnel Construction, 33(2):  $142 \sim 146$  (in Chinese with English abstract).
- Lu Jiansheng, Pan Weiqiang. 2014. Test and analysis of artificial recharge to the shallow confined aquifer of deep foundation pit in Shanghai. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 10 (2): 295 ~ 298 (in Chinese with English abstract).
- Ma Ronghua. 1997. Recharging construction technology of two level light well point for Suzhou Yisha center building. Construction Technology, (1):  $70 \sim 74$  (in Chinese with English abstract).
- Mao Genhai, Song Jianfeng, Yao Yilun, Chen Guansheng. 2005. Research on application of recharging techniquein excavation engineering. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 39 (1): 582  $\sim$  586 (in Chinese with English abstract).
- Qu Chengsong. 2014. Analysis on recharge test at Lujiazui area in Shanghai. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 10(2): 295  $\sim$  298 (in Chinese with English abstract).
- Wu Lingao. 2003. Design and Execution of Dewatering & Theory of Seepage in Deep Excavation. Beijing: China Communications Press (in Chinese with English abstract).
- Yao Jihua, Song Hanzhou, Wu Zhiwei, Liu Zhen. 2013. Numerical simulation for controlling ground settlement caused by dewatering in deep foundation pit basedon recharge method. Geotechnical Investigation & Surveying, (4): 30 ~ 34 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jianlin, Gong Xiaonan. 2001. Study on design and application of groundwater recharge system inexcavation. Journal of Building Structures, (5): 70 ~ 74 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Hua, Zhang Qinghe. 2013. Optimization design and application of dewatering-recharge system in deep excavation. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 47(9):1424~1429 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingjun, Gong Xiaonan. 2001. Optimum design theory of dewatering-recharged system of deep excavation. China Civil Engineering Journal, 34(2):74~78 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Zhao Yunyun. 2008. Real time prediction of land subsidence caused by foundation pit dewatering. Rock and Soil Mechanics, 29 (6): 1593 ~ 1596 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Gang, Zeng Chaofeng, Liu Chang, Shi Xiaorui, Zong Chao, Xue Xiuli. 2013. Field observation of artificial recharge of confined water in first excavation casein Tianjin. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 35(Supp. 2):30~34 (in Chinese with English abstract).

#### 参考文献

陈崇希.1999.地下水动力学.武汉:中国地质大学出版社,52~55. 冯晓腊,李栋广.2013.落底式止水帷幕条件下基坑涌漏量计算.水 文地质工程地质,40(5):16~21.

- 龚晓南,高有潮. 1998. 深基坑工程设计施工手册. 北京:中国建筑工 业出版社.
- 金小荣,俞建霖,祝哨晨,龚晓南. 2005.基坑降水引起周围土体沉降 性状分析.岩土力学,26(10):1575~1581.
- 刘庆方,刘继强,谭佩莲,李元海,林志斌. 2013.考虑围护结构隔水 作用的基坑涌水量计算.隧道建设,33(2):142~146.
- 陆建生,潘伟强.2014.上海某枢纽基坑工程浅层承压水回灌试验分 析.地下空间与工程学报,10(2):295~298.
- 马荣华. 1997. 苏州伊莎中心大厦二级轻型井点回灌施工技术. 施工 技术,(1):70~74.
- 毛根海,宋建锋,姚懿伦,陈观胜. 2005.回灌技术在基坑工程中的应 用研究.浙江大学学报(工学版),39(1):582~586.
- 瞿成松. 2014.上海陆家嘴地区回灌试验分析.地下空间与工程学报,10(2):295~298.

- 吴林高. 2003.工程降水设计施工与基坑渗流理论.北京:人民交通 出版社.
- 姚纪华,宋汉周,吴志伟,刘震.2013.基于回灌法控制深基坑降水引 发地面沉降数值模拟.工程勘察,(4):30~34.
- 俞建霖,龚晓南. 2001. 基坑工程地下水回灌系统的设计与应用技术 研究. 建筑结构学报, 22(5):70~74.
- 原华,张庆贺. 2013. 深基坑降水-回灌系统的最优化设计与应用. 上 海交通大学学报,47(9):1424~1429.
- 曾庆军,龚晓南. 2001.深基坑降排水一注水系统优化设计理论.土 木工程学报,34(2):74~78.
- 张勇,赵云云. 2008. 基坑降水引起地面沉降的实时预测. 岩土力学, 29(6):1593~1596.
- 郑刚,曾超峰,刘畅,史小锐,宗超,薛秀丽. 2013. 天津首例基坑工程 承压含水层回灌实测研究. 岩土工程学报,35(Supp. 2):30 ~34.

## Calculation of saturation curve under the action of dewatering and recharge in foundation pit

GAO Yang, DAI Fangyuan, LEI Bingxiao, ZENG Chunpin\*, SUN Hongjie

801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan, 250014

 $*\ Corresponding\ author: 596677856 @qq.\ com$ 

#### Abstract

Groundwater recharge is often employed to reduce the adverse effects of dewatering on geological environment surrounding during the construction of deep foundation pit. However, the design theory of dewatering-recharge is still in exploratory stage. In this paper, two-dimensional potential function theory and superposition principle are introduced to solve the equation of saturation curve under the combined action of dewatering and recharge of diving well and confined well without waterproof curtain. In addition, the influence of dewatering in foundation pit and groundwater recharge outside foundation pit on groundwater level outside foundation pit is obtained by space confluence point principle and mirror image principle, and the analytical expression of groundwater saturation curve under dewatering-recharge in foundation pit with waterproof curtain is obtained by superposition principle. In this paper, the influence of the main factors is discussed, such as the distance between the recharge well and the waterproof curtain of foundation pit and the permeability coefficient on the saturation curve under the condition of the waterproof curtain, which provides a reference for the dewatering-recharge design of foundation pit.

Key words: recharge; saturation curve; analytic expression; foundation pit; groundwater