

DOI: 10.11779/CJGE20220564

悬挂式止水帷幕下基坑内外抽灌承压水的计算方法

武永霞¹, 沈水龙²

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 汕头大学工学院, 广东 汕头 515063)

摘要: 悬挂式止水帷幕下抽取坑内承压水时会对周边环境产生影响, 地下水回灌能够有效控制坑外水位降深从而达到保护环境的目的。由于止水帷幕的存在, 坑内外抽灌水使得基坑内外形成水位差。帷幕两侧水位差一方面是渗流方向和渗流路径的改变引起的, 一方面是渗流面积减少引起的。通过数值模拟回归分析方法获得了基坑外回灌时帷幕两侧水位差的计算公式。将回灌时获得的水位差与笔者以往获得的基坑内抽水时止水帷幕两侧水位差的计算公式进行叠加, 获得了基坑内外抽灌承压水时止水帷幕两侧水位差的计算公式。所提出的公式表明, 帷幕两侧水位差与止水帷幕宽度及其进入承压含水层的深度、含水层各向异性、含水层的厚度以及无止水帷幕下抽灌承压水在帷幕处产生的水力梯度有关。最后通过工程实例对所提出的算法进行了验证。

关键词: 止水帷幕; 承压含水层; 基坑; 抽灌作用; 水位差

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)09-1971-08

作者简介: 武永霞(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: wuyongxia@sues.edu.cn。

Method for calculating pumping and recharging confined water inside and outside excavations under suspended waterproof curtain

WU Yongxia¹, SHEN Shuilong²

(1. College of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. College of Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China)

Abstract: The surrounding environment will be affected when the confined water in an excavation is pumped under a suspended waterproof curtain. The groundwater recharge can effectively control the groundwater drawdown outside the excavation so as to protect the environment. The existence of the waterproof curtain makes the head difference at two sides of the curtain during pumping and recharging of the confined water. The head difference is caused by the variation of seepage direction and path and the reduction of the seepage area. A series of equations to calculate the head difference during recharging outside the excavation are obtained by the numerical simulation regression method. The groundwater head difference during pumping-recharging action is the sum of the head difference during pumping and recharging, respectively. The proposed equations indicate that the head difference is related to the width of the waterproof curtain, the inserted depth of the waterproof curtain into the confined aquifer, the anisotropy of the aquifer, the thickness of the aquifer, and the hydraulic gradient under normal conditions. Finally, the proposed method is applied to a field case to verify its validity.

Key words: waterproof curtain; confined aquifer; excavation; pumping-recharge action; head difference

0 引言

城市化进程的快速发展导致地下空间的开发和利用不断增加, 由此出现了许多深大基坑。城市大多建于第四纪松散沉积物之上, 其下分布有水位高、厚度大的承压含水层。为防止承压水突涌给基坑带来的风险, 常采用降水的方式来降低承压水水位。基坑降水使得土体固结, 从而可能导致地面沉降、地面塌陷、建筑物开裂等环境问题的产生。因此, 一般采用止水帷幕以减少降水对环境的影响。由于承压含水层厚度大, 止水帷幕造价高, 大多数工程采用悬挂式止水帷

幕。

在环境保护要求较高的地区基坑降水时, 悬挂式止水帷幕不足以有效控制地面沉降, 地下水回灌作为一种比较经济的措施在工程中得到了广泛应用^[1-3]。如上海汉中路枢纽站开挖降水过程中, 在需保护建筑物周边布设了6口回灌井进行回灌后, 坑内降水并未引起建筑物沉降^[4]。当抽水井和回灌井共同工作时, 坑

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41807235)

收稿日期: 2022-05-06

内抽水使得坑内承压水位降至安全水位以下, 以确保基坑的安全; 坑外回灌使得其周边构筑物下承压水位下降较少, 从而达到保护环境的目的。而抽水和回灌的效果最直观的表现在于基坑内外的水位变化上。一般情况下, 开挖降水过程中基坑内观测井能够实时观测承压水的水位。然而, 在实际工程中, 因施工场地限制, 布设的坑外观测井较少, 而且在施工过程中坑外观测井经常遭受破坏、掩埋等, 无法正常工作。在这些因素下, 能够用于监测坑外水位的观测井很少, 甚至没有。

目前常用数值分析法模拟计算抽灌水过程中基坑内外地下水的分布情况^[5-6]。但是, 建立数学模型比较复杂, 现场工程师不能直接应用。工程现场的工程师更愿意使用简单实用的公式快速计算现场的水位差。Pujades 等^[7]提出了承压含水层中长条形构筑物(水平方向或垂直方向完全隔断含水层)两侧水位差的计算方法, 该方法不考虑源汇项。Shen 等^[8]提出了悬挂式止水帷幕下基坑内降水时止水帷幕两侧的水位差的计算方法, 在已知坑内水位的前提下可获得坑外的最大水位降深; 该方法仅考虑了基坑内抽水的情况, 并未考虑坑外回灌。因此本文的目的为探明回灌作用下止水帷幕两侧水位差与止水帷幕插入承压含水层深度、含水层各向异性、含水层厚度及天然水力梯度间的关系, 进而提出一种能直接计算基坑内外抽灌承压含水层止水帷幕两侧水位差的计算方法。

1 帷幕-井作用机理

基坑内外抽灌水可看作是抽水和回灌的叠加。关于悬挂式止水帷幕下基坑内抽水时帷幕-井作用机理, 已有很多文献进行过详细的论述, 此处不再赘述。

图 1 为基坑外回灌时止水帷幕对渗流场阻挡示意图。回灌时, 若无止水帷幕, 则承压含水层水位线为具有轴对称性质的连续曲线, 如图 1 曲线 h_m (由于对称性, 此处仅显示止水帷幕一侧水位); 当存在止水帷幕时, 承压含水层水位线变为不连续曲线(曲线 h_r)。与无止水帷幕作用下相比, 由于止水帷幕的阻挡作用, 基坑外靠近回灌井一侧水位较高, 基坑内水位降低, 基坑外远离回灌井一侧水位降低。

图 2 为抽灌作用下止水帷幕对承压含水层阻隔剖面图。图 2 中所示基坑中心有一口抽水井抽取承压水, 止水帷幕的存在使得基坑内外承压水位出现水位差, 且以抽水井为对称轴对称分布(曲线 h_p)。当在基坑外某一侧承压含水层中布设回灌井进行回灌时, 水位的分布发生了变化, 不再对称分布(曲线 h_{rp})。且在非完

整井和止水帷幕的附近均出现了三维流。由于止水帷幕的阻挡作用, 回灌水主要进入了坑外承压含水层中, 另有部分回灌水通过止水帷幕下方进入基坑, 进入基坑的回灌水有小部分通过远离回灌井的止水帷幕下方流出基坑。而水位的抬升量与灌入的水量密切相关, 整体来看, 基坑内外水位均有所抬升。靠近回灌井一侧, 水位抬升比较大; 远离回灌井一侧, 水位抬升比较小。

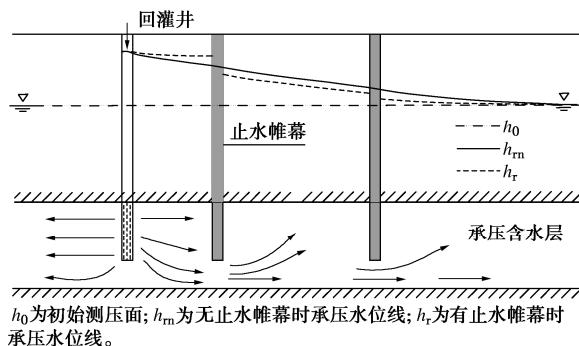


图 1 回灌时止水帷幕对承压含水层阻隔剖面图

Fig. 1 Barrier effects of waterproof curtain during recharging

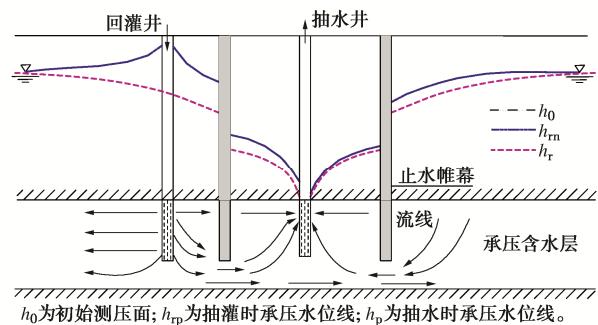


图 2 抽灌时止水帷幕对承压含水层阻隔剖面图

Fig. 2 Barrier effects of waterproof curtain during pumping and recharging

2 基于数值模拟的帷幕两侧水位差的计算方法

2.1 基坑内抽水

关于悬挂式止水帷幕下基坑内降水, Wu 等^[9]研究中已详细分析了承压水位沿含水层竖直方向的分布特征。图 3 为不同止水帷幕深度下, 抽水稳定后帷幕两侧承压含水层水位降深沿含水层深度的分布。在含水层顶部, 基坑内水位降深最大, 基坑外水位降深最小; 在含水层底部, 坑内外水位降深与含水层顶部相反。即沿含水层纵向深度, 止水帷幕两侧的水位差逐渐减小。造成这种差异的主要原因是: 离止水帷幕底板越远, 承压水通过止水帷幕下方进入基坑时其渗流路径越长。根据 Darcy 定律, 渗流路径越长, 水位的变化越小, 即含水层顶部坑外水位降深最小。

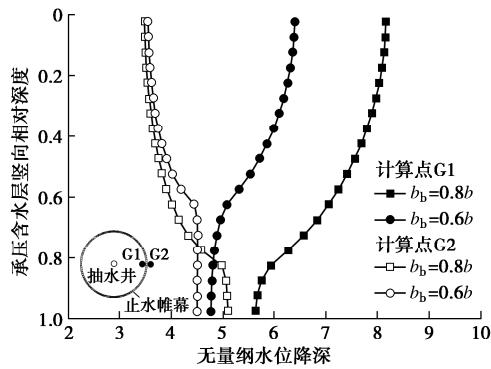


图 3 抽水作用下含水层竖向深度与水位降深关系图

Fig. 3 Relationship between longitudinal depth and drawdown in confined aquifer under pumping

基于上述承压水位的分布特性, Shen 等^[8]通过 Darcy 定律和对大量数值模拟的结果分析获得了基坑内抽水时止水帷幕两侧最大水位降深差的计算公式。公式表明, 水位差 Δh_p 与止水帷幕插入承压含水层的深度、承压含水层的水平及垂向渗透系数、止水帷幕的宽度和承压含水层的厚度有关。具体如下:

$$\Delta h_p = \begin{cases} i_n L_b \left(1.32 b_{bd} \left(\frac{k_x}{k_z} \right)^{\frac{5}{8}} \left(\frac{10}{b} \right)^{0.3668 \ln b - 0.852} \frac{b}{L_b} + \frac{b_{bd}}{1 - b_{bd}} + 1 \right) & (b_{bd} < 0.25) \\ i_n L_b \left(\sqrt{\frac{1}{8} \ln \left(\frac{6b_{bd}^{1.1}}{(1 - b_{bd})^{2.23}} \right)} \left(\frac{k_x}{k_z} \right)^{\frac{5}{8}} \left(\frac{10}{b} \right)^{0.3668 \ln b - 0.852} \frac{b}{L_b} + \frac{b_{bd}}{1 - b_{bd}} + 1 \right) & (b_{bd} \geq 0.25) \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_n 为止水帷幕未进入承压含水层时其两侧的水力梯度; L_b 为止水帷幕的宽度; b 为承压含水层的厚度; b_{bd} 为止水帷幕插入承压含水层的相对厚度; k_x , k_z 分别为承压含水层的水平向和垂向渗透系数。

2.2 基坑外回灌

(1) 止水帷幕两侧水位差的形成

地下水的回灌可以看作是抽水的逆过程, 区别在于, 坑内抽水时坑外承压水通过止水帷幕下方进入基坑; 而回灌时回灌水经靠近回灌井的止水帷幕(第一道)进入基坑, 之后部分回灌水经远离回灌井的止水帷幕(第二道)流出基坑。由于渗流路径不同, 故两道止水帷幕两侧的水位差明显不同(图 1 所示)。止水帷幕产生的水位差, 一方面是渗流面积减少引起的, 用 s_{rbi} 表示; 一方面是渗流方向和渗流路径的改变引起的, 用 s_{rbo} 表示。 s_{rbi} 和 s_{rbo} 如下所示:

$$s_{rbi} = \Delta h_{rb} - \Delta h_m, \quad (2)$$

$$s_{rbo} = \Delta h_{rt} - \Delta h_{rb}, \quad (3)$$

$$\Delta h_m = i_m L_b. \quad (4)$$

式中: Δh_b 为止水帷幕两侧含水层底部的水位差; Δh_{rt}

为止水帷幕两侧含水层顶板水头差; Δh_m 为止水帷幕未进入承压含水层时, 止水帷幕两侧的水头差; i_m 为止水帷幕未进入承压含水层回灌时止水帷幕两侧水力梯度。

当回灌井为完整井时, 可根据 Thiem^[10]公式(式 5)计算 i_m 。当回灌井为非完整井时, 如果 $r_b \geq 1.5b$, 则用式(5)计算 i_m ; 若 $r_b < 1.5b$, 则 i_m 根据 Kozeny^[11]经验公式(式 6)进行计算:

$$i_m = \frac{Q_{rw}}{2\pi TL_B} \ln \left(1 + \frac{L_B}{r_b} \right), \quad (5)$$

$$i_m = \frac{1}{D} \frac{Q_w}{2\pi TL_b} \ln \left(\frac{r_{b0}}{r_b} \right), \quad (6)$$

$$D = \frac{b_s}{b} \left(1 + 7 \sqrt{\frac{r_w}{2b_s}} \cdot \cos \frac{\pi b_s}{2b} \right). \quad (7)$$

当 s_{rbi} , s_{rbo} 和 Δh_m 确定后, 则可以采用下式计算出回灌作用下止水帷幕两侧的水位差:

$$\Delta h_r = s_{rbo} + s_{rbi} + i_m L_b. \quad (8)$$

由于止水帷幕的存在, s_{rbi} 和 s_{rbo} 难以直接用解析计算公式进行计算。因此借助数值模拟法, 不同止水帷幕下水位的分布规律, 将数值计算结果进行回归分析, 进而得出 s_{rbi} 和 s_{rbo} 的值。为使计算结果具有一般性, 将 s_{rbi} 和 s_{rbo} 无量纲化, 其无量纲形式分别为

$$s_{rbid} = s_{rbi} / (i_m L_b), \quad (9)$$

$$s_{rbod} = s_{rbo} / (i_m L_b). \quad (10)$$

无量纲形式表明 s_{rbid} 和 s_{rbod} 与回灌井过滤器的长度无关。第一道、第二道止水帷幕两侧无量纲形式水位差分别用 s_{1rbid} 和 s_{1rbod} , s_{2rbid} 和 s_{2rbod} 表示。

(2) 数值计算模型

a) 分析范围及网格划分

为获得基坑外回灌时止水帷幕两侧的水位差的计算公式, 采用三维有限差分软件 Visual Modflow 建立数学模型, 分析采用圆形基坑(见图 5)。基坑半径为 18 m, 止水帷幕宽度为 1 m。假设在基坑外距离止水帷幕 15 m 处有一口回灌井, 回灌量为 300 m³/d。土层的分布以上海典型地层为依据, 水文地质情况自上而下分别为: 潜水层; 第 I 相对隔水层; 承压含水层及第 II 相对隔水层。止水帷幕在承压含水层的相对位置如图 4 所示。

模型在水平方向以基坑中心点为中心向外扩展, 以消除边界条件对计算结果的影响, 分析范围为 830 m × 820 m。水平方向网格从基坑向外由密到疏, 垂直方向地面以下 44 m。要分析 s_{rbid} 和 s_{rbod} 与止水帷幕插入承压含水层深度间的关系, 将承压含水层在垂直方向细化, 划分为 20 层, 其它土层各划分为 1 层, 故网

格在竖直方向共分为 29 层。图 5 为网格剖分图, 图中不同颜色代表不同的土层。

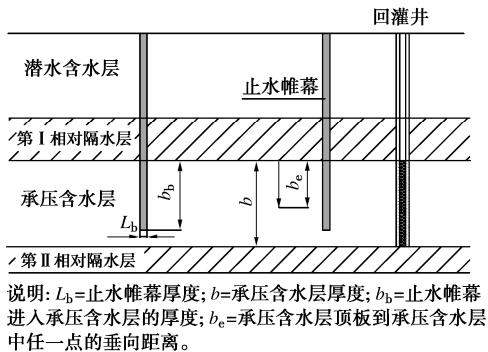


图 4 止水帷幕在承压含水层中的位置

Fig. 4 Position of waterproof curtain

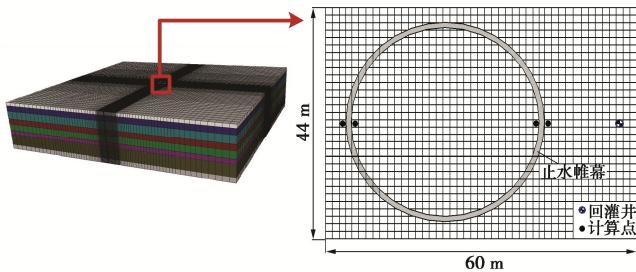


图 5 网格剖分图

Fig. 5 Finite difference mesh

b) 模型参数

模型中计算参数见表 1。土层厚度基于上海 500 kV 世博变电工程, 承压含水层渗透系数及储水率来源于该工程抽水试验报告^[12], 其它土层参数取值基于室内试验。止水帷幕起隔水作用, 其渗透系数取值为 10^{-9} m/s。

表 1 模型计算参数

Table 1 Model parameters

土层名称 地质	水文 厚度/ m	$k_x/$ ($m \cdot d^{-1}$)	$K_z/$ ($m \cdot d^{-1}$)	$S_s/$ m^{-1}
②粉质黏土 Aq0	3	8×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-6}
③淤泥质粉质黏 土	5	5.1×10^{-4}	2.7×10^{-4}	1×10^{-6}
④淤泥质黏土	7	2.4×10^{-4}	1.4×10^{-4}	1×10^{-6}
⑤I-1 黏土	5	3.03×10^{-3}	1.74×10^{-3}	1×10^{-6}
⑤I-2 粉质黏土 AdI	6	2.5×10^{-4}	1.17×10^{-3}	1×10^{-6}
⑥粉质黏土	4	2.8×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1×10^{-6}
⑦粉砂 AqI	10	3.6	3.6	6×10^{-5}
⑧粉质黏土 AdII	4	8×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-6}

注: k_x , k_z 分别为水平渗透系数和垂向渗透系数, S_s 为储水率。

c) 边界和初始条件

模型中初始潜水含水层和第 I 相对隔水层水位取为地面下 -1 m, 承压含水层和第 II 相对隔水层水位取

为地面下 -7 m。边界远离回灌井, 故四周采用定水头边界条件, 其水位同初始条件; 底部为隔水边界。回灌井为模型的唯一源汇项; 过滤器位于承压含水层中, 长度为 10 m。此外, 基坑内外各有 2 个计算点, 计算点在止水帷幕的两侧。

(3) 帷幕两侧承压含水层水位竖向分布规律

通过建立的三维模型计算回灌作用下承压含水层竖向深度水位的抬升。为和抽水下的水位降深作比较, 计算中⑦粉砂层垂向渗透系数取为 0.6 m/d。为使计算结果具有一般性, 采用无量纲形式。无量纲水位抬升 s_d 为模型计算出的水位变化量 s 与特征水位抬升量 s_c 的比值, 其中 s_c 计算公式如下:

$$s_c = Q_{rw} / (2\pi T) \quad (11)$$

变换后的无量纲形式不再受承压含水层厚度、土层导水系数及回灌量的影响。

图 6 为回灌作用下含水层竖向深度与水位抬升的关系图。由图 6 可知, 止水帷幕插入承压含水层的深度越大, 基坑外水位抬升量越大, 基坑内越小。在承压含水层的上部和下部, 止水帷幕深度对水位抬升量的影响较小; 止水帷幕上方 20% 含水层厚度的范围内, 水位变化较大。比较图 3, 6 发现, 基坑内抽水时止水帷幕对基坑内外水位差影响程度远大于基坑外回灌。

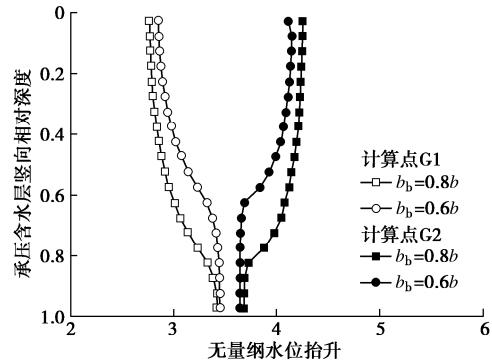


图 6 回灌作用下含水层竖向深度与水位抬升关系图

Fig. 6 Relationship between longitudinal depth and drawdown in confined aquifer under recharging

(4) 帷幕两侧水位差与止水帷幕深度关系

改变止水帷幕插入承压含水层的深度, 共计 20 个工况, 计算每种工况下止水帷幕两侧的水位差, 即 C1 与 C2、C3 与 C4 之间的水位差, 并根据式 (9), (10) 转化为无量纲形式。

图 7 为止水帷幕插入承压含水层的相对深度 b_{bd} 与帷幕两侧无量纲水位差间的关系。图 7 中 s_{1rbid0} , s_{2rbid0} 分别为回灌水经过第一道和第二道止水帷幕因渗流面积减少引起的水位差; s_{1rbod0} , s_{2rbod0} 分别为第一道和第二道止水帷幕因渗流方向和渗流路径的改变引起的水位差。由图 7 可知, 止水帷幕插入承压含水

层的相对深度 b_{bd} 越大, s_{1rbid0} 和 s_{2rbid0} 越大。当 $b_{bd} \leq 0.85$ 时, b_{bd} 越大, s_{1rbod0} 和 s_{2rbod0} 越大; 当 $b_{bd} > 0.85$ 时, b_{bd} 越大, s_{1rbod0} 和 s_{2rbod0} 越小。图中的点可用指数函数进行拟合, 拟合曲线的相关系数 R^2 分别为 0.997 和 0.998, 拟合公式如下所示:

$$s_{1rbid0} = 0.5b_{bd}^{1.4} e^{\frac{b_{bd}^2}{(1-b_{bd})^{0.28}}}, \quad (12)$$

$$s_{1rbod0} = 2.5b_{bd}^{1.3} e^{\frac{b_{bd}^{1.6}}{(1-b_{bd})^{0.05}}}, \quad (13)$$

$$s_{2rbid0} = 0.5b_{bd}^{1.1} e^{\frac{b_{bd}^{0.8}}{(1-b_{bd})^{0.31}}}, \quad (14)$$

$$s_{2rbod0} = 2.8b_{bd}^{1.85} e^{\frac{b_{bd}^{1.6}}{(1-b_{bd})^{0.08}}}. \quad (15)$$

上述公式表明, 无量纲水位差仅与止水帷幕插入承压含水层的相对深度有关。

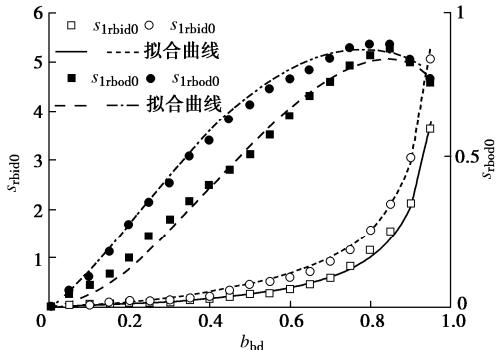


图 7 帷幕两侧无量纲水位差与 b_{bd} 关系图

Fig. 7 Relationship between dimensionless water level difference and b_{bd}

(5) 影响因素分析

式 (12) ~ (15) 是基于各向同性含水层且以含水层厚度为 10 m 的圆形基坑为前提。因此需讨论含水层的各向异性、含水层厚度及止水帷幕形状对计算结果的影响。

a) 含水层各向异性

将含水层各向同性时分析所得曲线 (图 7) 作为标准曲线, 分别计算承压含水层水平向渗透系数 k_x 分别是 3 倍、6 倍和 10 倍垂向渗透系数 k_z 的情况下, 止水帷幕两侧水位差与止水帷幕插入承压含水层深度之间的关系。计算过程中, 更改垂向渗透系数, 其它参数保持不变。图 8 给出了含水层各向异性对第一道止水帷幕两侧水位差的影响。从图 8 可以看出, 不同垂向渗透系数下, 所得曲线与标准曲线不重合; 且相同止水帷幕深度下, k_z 越小, s_{1rbid1} 越小, s_{1rbod1} 越大。

b) 含水层厚度

更改含水层的厚度, 其它参数保持不变。分别计算 $b=8$ m, $b=16$ m, $b=20$ m 和 $b=30$ m 时, 止水帷幕两侧水位差与止水帷幕插入承压含水层深度之间的关

系。 $b=8$ m 时, 回灌井过滤器长度为 8 m, 其它条件下均为 10 m。图 9 给出了含水层厚度对第一道止水帷幕两侧水位差的影响。从图 9 中可以看出, 当含水层厚度 b 大于 10 m 时, 相同止水帷幕深度下, s_{1rbid} 及 s_{1rbod} 均随含水层厚度增加而减小; 当 b 小于 10 m 时, 含水层厚度对计算结果几乎无影响。此外, 当 $b_{bd} \leq 0.5$ 时, 含水层厚度对 s_{1rbid} 影响较小; 当 $b_{bd} \leq 0.25$ 时, 含水层厚度对 s_{1rbod} 影响较小。

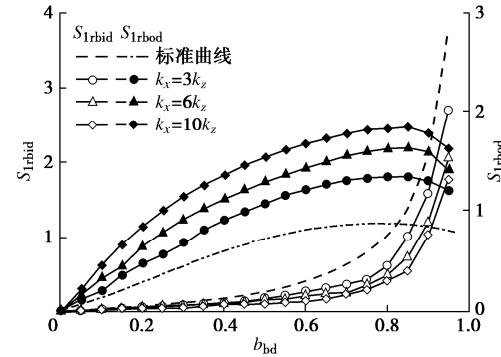


图 8 含水层各向异性对 S_{1rbid} 和 S_{1rbod} 的影响

Fig. 8 Effects of aquifer anisotropy on S_{1rbid} and S_{1rbod}

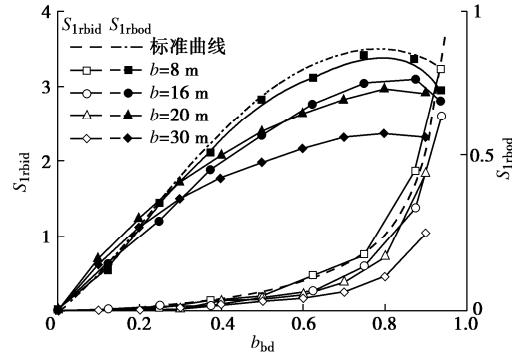


图 9 含水层厚度对 S_{1rbid} 和 S_{1rbod} 的影响

Fig. 9 Effects of aquifer thickness on S_{1rbid} and S_{1rbod}

c) 止水帷幕形状

以上计算结果是基于圆形基坑获得的, 改变基坑的形状, 即改变止水帷幕的形状。假设基坑为矩形, 长度为 50 m, 宽度为 36 m; 其它参数保持不变。计算矩形基坑在不同止水帷幕深度下帷幕两侧的水位差。图 10 分别给出了矩形基坑和圆形基坑下第一道止水帷幕两侧水位差与止水帷幕插入承压含水层深度之间的关系。由图 10 可知, 当 $b_{bd} \leq 0.85$ 时, 止水帷幕形状对 s_{1rbid} 无影响; 当 $b_{bd} > 0.85$ 时, 止水帷幕形状对 s_{1rbid} 影响较小。当 $b_{bd} \leq 0.6$ 时, 止水帷幕形状对 s_{1rbod} 无影响; 当 $b_{bd} > 0.6$ 时, 止水帷幕形状对 s_{1rbod} 影响较小。总体来说, 止水帷幕形状对止水帷幕两侧水位差的影响很小。

含水层各向异性、含水层厚度及止水帷幕形状对第二道止水帷幕两侧水位差的影响具有相似的规律。

(6) 止水帷幕两侧水位差的计算

如果要利用式(12)~(15)计算无量纲水位差, 则需要对含水层各向异性和含水层厚度进行修正, 修正后图8和图9中的所有计算点应落在标准曲线附近。

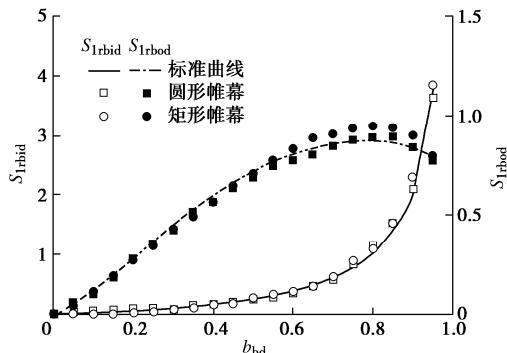


图 10 止水帷幕形状对 S_{1rbid} 和 S_{1rbod} 的影响

Fig. 10 Effects of aquifer thickness on S_{1rbid} and S_{1rbod}

修正无量纲水位差并代入式(8)~(10)后, 可得到回灌作用下止水帷幕两侧水位差的计算公式, 具体如下:

第一道止水帷幕两侧水位差:

$$\Delta h_{1r} = i_{1rn} L_B \left[\frac{5}{2} b_{bd}^{1.3} e^{-\frac{b_{bd}^{1.6}}{(1-b_{bd})^{0.05}}} \left(\frac{k_x}{k_z} \right)^{\frac{7}{20}} \left(\frac{10}{b} \right)^{0.032 \ln b - 0.78} \frac{b}{L_B} + \frac{1}{2} b_{bd}^{1.4} e^{\frac{b_{bd}^2}{(1-b_{bd})^{0.28}}} \left(\frac{k_x}{k_z} \right)^{\frac{5}{14}} \left(\frac{10}{b} \right)^{0.3 \ln b - 0.3} + 1 \right]。 \quad (16)$$

第二道止水帷幕两侧水位差:

$$\Delta h_{2r} = i_{2rn} L_B \left[2.8 b_{bd}^{1.85} e^{-\frac{b_{bd}^{1.6}}{(1-b_{bd})^{0.08}}} \left(\frac{k_x}{k_z} \right)^{\frac{47}{100}} i_{2rn} b + \frac{1}{2} b_{bd}^{1.1} e^{\frac{b_{bd}^{0.8}}{(1-b_{bd})^{0.31}}} \left(\frac{k_x}{k_z} \right)^{\frac{3}{10}} \left(\frac{10}{b} \right)^{0.23 \ln b - 0.1} + 1 \right]。 \quad (17)$$

式中: i_{1rn} 和 i_{2rn} 分别为止水帷幕未进入承压含水层时两道止水帷幕两侧的水力梯度。

2.3 坑内外抽灌共同作用

止水帷幕作用下基坑内抽水基坑外回灌时, 止水帷幕两侧的水位差可以看作是抽水引起的水位差和回灌引起的水位差的叠加。第一道止水帷幕对回灌水的作用表现为止水帷幕两侧坑外水位的雍高大于坑内, 即增加了止水帷幕两侧的水位差; 第二道止水帷幕对回灌水的作用与第一道止水帷幕相反, 减少了止水帷幕两侧的水位差。因此第一道及第二道止水帷幕两侧水位差的解析计算公式分别为

$$\Delta h_1 = \Delta h_p + \Delta h_{1r}, \quad (18)$$

$$\Delta h_2 = \Delta h_p - \Delta h_{2r}。 \quad (19)$$

如果抽水井和回灌井是完整井, 则式(1), (16)和(17)中 i_n , i_{1rn} 和 i_{2rn} 可以通过式(5)进行计算;

如果抽灌井为非完整井, 则可采用式(6)进行计算。此外, 如果有多口井抽水或回灌水, 只需将每口井在止水帷幕两侧产生的 i_n , i_{1rn} 和 i_{2rn} 进行叠加, 即所提出的计算公式可以用于多口井抽水及回灌。

3 工程应用

相关文献中没有发现止水帷幕作用下基坑内外抽灌地下水的工程实例, 故选择现场抽水试验工程。通过数值模拟方法对工程实测数据进行反演, 确定含水层的水文地质参数。在同一数值模型下, 假设基坑内有抽水井抽水基坑外有回灌井进行回灌, 将数值模拟计算结果与上述提出的回归公式法所得结果进行比较, 对所提出的计算方法进行验证。

3.1 工程概况

上海市某轨道交通地下区间风井基坑工程(Wu等^[13]), 基坑长 49 m, 宽 22.5 m, 开挖深度 28.15 m; 采用地下连续墙作为围护结构, 地下连续墙宽 1.2 m, 深 48.6 m。基坑平面布置图如图 11 所示。该工程位于上海正常土层分布区, 在 65 m 深度范围内, 分布有潜水含水层和承压含水层, 厚度分别为 21.1, 37.7 m。土层地质剖面图如图 12 所示。

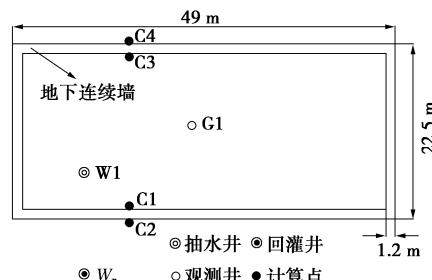
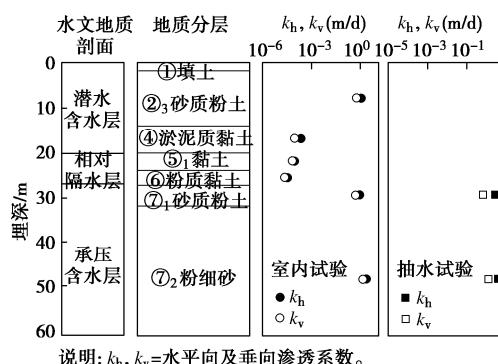


图 11 基坑平面布置图

Fig. 11 Plan view of excavation



说明: k_h, k_v =水平向及垂向渗透系数。

图 12 地质剖面图及土层渗透系数

Fig. 12 Geotechnical profile and soil permeability

3.2 抽水试验

为获得承压含水层的渗透系数, 在基坑开挖前进行了抽水试验。试验井平面如图 11 所示。其中 W1

为抽水井, 井深 50 m, 过滤器长 17 m, 井径为 273 mm; G1 为观测井, 井深 43 m, 过滤器长 10 m。试验期间, 抽水井抽水量为 $744 \text{ m}^3/\text{d}$ 。Wu 等^[13]通过数值模拟分析法获得了承压含水层的水文地质参数 (图 12)。

3.3 结果分析

假设基坑外有一口回灌井 (图 11), 回灌井井结构同抽水井。基坑内抽水井以 $744 \text{ m}^3/\text{d}$ 的抽水量抽水 2 d 后, 开启基坑外回灌井, 回灌井回灌量为 $360 \text{ m}^3/\text{d}$ 。抽灌共同作用时间为 3 d。分别应用本文提出的回归公式法和数值法分析计算 C1 和 C2 及 C3 和 C4 两侧的水位差。

(1) 回归公式法

根据图 12, ⑦₁砂质粉土及⑦₂粉细砂水平向渗透系数分别为 2.6, 3.6 m/d, 垂向渗透系数分别为 0.6, 1.1 m/d; 故承压含水层水平向与垂向加权平均渗透系数比为 3.4 m/d, 导水系数 T 为 $131 \text{ m}^2/\text{d}$ 。本工程承压含水层的顶板埋深为 27.6 m, 地下连续墙进入承压含水层的相对深度 b_{bd} 为 0.55。由图 11 可知, 抽水井和回灌井与各计算点的距离小于 1.5 倍承压含水层厚度, 因此在计算抽水井或回灌井引起的水位降深时, 需要考虑井的非完整性, 采用 Kozeny 经验公式计算。将相关数值代入式 (6), (7) 后, 可计算出单独抽水和单独回灌时地下连续墙两侧计算点间的天然水力梯度, 如表 2 所示。

表 2 解析计算相关数值

Table 2 Relevant values of proposed method

$Q_w/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	r_1/m	r_2/m	r_3/m	r_4/m	$i_{1n}/$	$i_{2n}/$
744	7.21	8.06	15.20	16.55	0.139	0.106
-360	9.53	8.49	27.65	28.90	0.070	0.027

说明: Q_w 为抽灌水量, r_1 , r_2 , r_3 和 r_4 分别为抽水井或回灌井距离计算点 C1、C2、C3 和 C4 的距离, i_{1n} , i_{2n} , i_{1m} 和 i_{2m} 分别为计算点 C1 和 C2、C3 和 C4 间在无止水帷幕下抽水和回灌时的天然水力梯度。

根据式 (1), (16) 和 (17) 分别计算出基坑内单独抽水及单独回灌作用下引起的 C1 与 C2、C3 与 C4 间的水位差。将计算结果带入式 (18), (19) 中, 可获得由抽灌共同作用引起的 C1 与 C2、C3 与 C4 间的水位差。表 3 列出了相关计算结果。

(2) 数值分析法

采用三维非稳定流数值模拟方法计算抽灌作用下地下连续墙两侧的水位差。模型分析范围及计算参数基于文献 Wu 等^[13]。图 13 为抽灌水 5 d 后承压含水层的水位等值线图。由图 13 可知, 计算点 C1 与 C2 间的水位差为 14.09 m, C3 与 C4 间的水位差为

11.39 m。

表 3 回归公式法计算结果

Table 3 Calculated results by proposed method

条件	位置	符号	数值/m
抽水引起的水位差	C1、C2 间	Δh_{1p}	13.77
回灌引起的水位差	C3、C4 间	Δh_{2p}	10.51
抽灌共同引起的水位差	C1、C2 间	Δh_{1r}	2.02
抽灌共同引起的水位差	C3、C4 间	Δh_{2r}	1.02
抽灌共同引起的水位差	C1、C2 间	Δh_1	15.79
抽灌共同引起的水位差	C3、C4 间	Δh_2	9.49

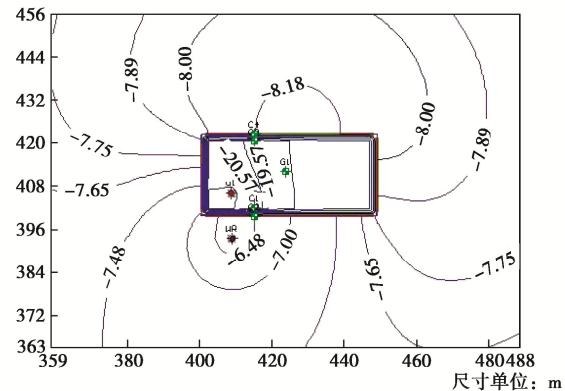


图 13 承压含水层水位等值线图

Fig. 13 Water contours of confined aquifer

将回归公式法计算结果与数值计算结果进行比较发现, 回归公式法计算的 C1 与 C2 间的水位差略大于数值法, C3 与 C4 间的水位差略小于数值法。这是由于计算天然水力梯度时, 不同计算点的水位降深使用相同的非完整井不完整系数。总体来说, 两种方法计算结果比较接近, 表明本文提出的计算公式是合理的。

4 结论

(1) 基坑内外抽灌水时止水帷幕对渗流场的影响机制在于渗流方向和渗流路径改变引起的止水帷幕一侧水位壅高, 一侧水位降低; 以及渗流面积减少引起的帷幕两侧水位差的增大。

(2) 基坑外回灌井进行回灌时, 止水帷幕两侧水位抬升量在承压含水层不同深度处有所不同, 在含水层顶部水位变化最大, 在含水层底部水位变化最小; 止水帷幕深度对帷幕两侧水位差的影响小于坑内抽水。

(3) 通过数值模拟分析法对不同止水帷幕下帷幕两侧的水位差进行了回归分析, 获得了基坑外回灌承压含水层时, 回灌水流经第一道和第二道止水帷幕时, 两道帷幕两侧水位差的计算公式。

(4) 获得了基坑内外抽灌地下水时止水帷幕两侧水位差的计算公式, 该公式考虑止水帷幕插入深度、

含水层各向异性、含水层厚度及抽水井和回灌井参数。

(5) 将提出的计算方法应用到了一个的工程实例中，并将其计算结果与数值计算结果进行了对比，结果验证了计算公式的合理性。

参考文献：

- [1] 郑 刚, 曹剑然, 程雪松, 等. 天津第二粉土粉砂微承压含水层回灌试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 592-601. (ZHENG Gang, CAO Jianran, CHENG Xuesong, et al. Experimental study on artificial recharge of second Tianjin silt and silty sand micro-confined aquifer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 592-601. (in Chinese))
- [2] 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, 2019, **41**(9): 1609-1618. (ZHENG Gang, CAO Jianran, CHENG Xuesong, et al. Field tests on groundwater recharge considering leakage between semiconfined aquifers[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1609-1618. (in Chinese))
- [3] 刘祥勇, 宋享桦, 谭 勇, 等. 南通富水砂性地层地铁深基坑抽水回灌现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(7): 1331-1340. (LIU Xiangyong, SONG Xianghua, TAN Yong, et al. Field tests on groundwater recharge of deep excavations in Nantong water-rich sandy stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(7): 1331-1340. (in Chinese))
- [4] 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, **43**(1): 48-52. (LU Jiansheng, PAN Weiqiang, SHEN Chi, et al. Design and application on pumping-recharge integration system of deep foundation excavation[J]. Construction Technology, 2014, **43**(1): 48-52. (in Chinese))
- [5] ZHENG G, HA D, ZENG C, et al. Influence of the opening timing of recharge wells on settlement caused by dewatering in excavations[J]. Journal of Hydrology, 2019, **573**: 534-545.
- [6] 李又云, 王 欢, 苏世强, 等. 软土深基坑单井回灌参数优化与现场测试分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, **17**(2): 520-528. (LI Youyun, WANG Huan, SU Shiqiang, et al. Parameters optimization and field test analysis on recharge well in deep foundation pit of soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, **17**(2): 520-528. (in Chinese))
- [7] PUJADES E, LÓPEZ A, CARRERA J, et al. Barrier effect of underground structures on aquifers[J]. Engineering Geology, 2012, **145/146**: 41-49.
- [8] SHEN S L, WU Y X, MISRA A. Calculation of head difference at two sides of a cut-off barrier during excavation dewatering[J]. Computer and Geotechnics, 2017, **91**: 192-202.
- [9] WU Y X, SHEN S L, YUAN D J. Characteristics of dewatering induced drawdown curve under blocking effect of retaining wall in aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2016, **(539)**: 554-566.
- [10] THIEM G. Hydrologische Methoden[M]. Gebhardt: Leipzig, 1906.
- [11] KOZENY J. Theorie und berechnung der brunnen[J]. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1933, **28**: 88-92, 101-105, 113-116.
- [12] 上海长凯岩土有限公司. 500 kV 上海世博变电站工程群井抽水试验报告[R]. 上海: 上海长凯岩土有限公司, 2007. (Shanghai Changkai Geotechnical Co, LTD. Report of group wells pumping test of 500KV Shanghai Expo Substation Project[R]. Shanghai: Shanghai Changkai Geotechnical Co, LTD, 2007. (in Chinese))
- [13] WU Y X, SHEN J S, CHENG WC, et al. Semi-analytical solution to pumping test data with barrier, wellbore storage, and partial penetration effects[J]. Engineering Geology, 2017, **226**: 44-51.