

# 考虑止水帷幕的承压含水层基坑涌水量计算

穆亦龙<sup>1</sup>, 康林<sup>1</sup>, 杨雪菲<sup>2\*</sup>, 唐佳润<sup>2</sup>, 陈东霞<sup>2</sup>

(1. 中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518054; 2. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 止水帷幕结合减压降水井的“墙-井”体系是深大基坑常用的降水措施之一, 而实际工程中采用“墙-井”体系的基坑涌水量比按照规范公式计算的结果小。为了得到止水帷幕下的承压含水层基坑涌水量计算公式, 考虑悬挂式止水帷幕阻断形成的绕流区对基坑地下水水力梯度和渗流断面的影响, 本文建立计算分析模型, 引入绕流区渗径影响系数, 采用数值模拟确定该影响系数, 得到基坑涌水量计算公式。结合工程实例验证了公式的准确性, 分析了止水帷幕插入深度比和基坑尺寸比对基坑涌水量的影响, 得到以下结论: 基坑涌水量与止水帷幕插入深度成反比、与基坑面积成正比; 当帷幕插入深度比大于 0.6 或基坑尺寸比小于 0.4 时, 对基坑涌水量和降深影响较大, 其他范围内影响幅度逐步减缓。本研究可为类似工程基坑涌水量计算和止水降水设施的布置提供理论依据。

**关键词:** 承压水; 止水帷幕; 涌水量; 非完整井; 绕流区; 基坑

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)03-0235-07

## Calculation of water inflow for foundation pit with waterproof curtain in confined aquifers

MU Yi-long<sup>1</sup>, KANG Lin<sup>1</sup>, YANG Xue-fei<sup>2\*</sup>, TANG Jia-run<sup>2</sup>, CHEN Dong-xia<sup>2</sup>

(1. China Railway South Investment Group Co., Ltd., Shenzhen 518054, Guangdong, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

**Abstract:** The ‘wall-well’ system consisting of waterproof curtain combined with decompression well is one of the commonly used dewatering measures for deep foundation pits. However, the actual water inflow into the foundation pit employing this system is smaller than the calculations based on standard engineering formulas. To derive a calculation formula for the water inflow of confined aquifers in foundation pits with suspended waterproof curtains, this work considers the influence of the bypass area created by the suspended waterproof curtain on the hydraulic gradient and seepage cross-section of groundwater within the foundation pit. Introducing the impact factor on seepage path in the bypass area, its determination is accomplished by numerical simulation. Subsequently, a comprehensive calculation formula for foundation pit water inflow in confined aquifers is developed. Through analysis of engineering case studies and numerical simulations investigating the effects of waterproof curtain insertion depth ratios and pit size ratios on foundation pit water inflow, the accuracy of the formula is validated. The results show that the foundation pit water inflow is inversely proportional to the insertion depth of the waterproof curtain and directly proportional to the area of the foundation pit. Notably, when the waterproof curtain insertion depth ratio exceeds 0.6 and the foundation pit size ratio below 0.4, the impact on foundation pit water inflow and water level drawdown outside the foundation pit is more pronounced, with diminishing impact beyond these thresholds. These findings serve as a basis for similar projects in determining foundation pit water inflow and the arrangement of dewatering equipment.

**Key words:** confined water; waterproof curtain; water inflow; partially penetrating well; bypassing area; foundation pit

收稿日期: 2023-02-18

基金项目: 福建省自然科学基金(2021J01010); 福建省自然科学基金(2021J02003); 中铁南方2022年科技创新计划(202208)。

作者简介: 穆亦龙(1968—), 男, 四川西昌人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下工程和工程管理方面的工作。E-mail: 740553100@qq.com。

\*通信作者: 杨雪菲(1999—), 女, 湖北天水人, 硕士, 主要从事残积土基坑或边坡稳定性研究。E-mail: 25320201152230@stu.xmu.edu.cn。

## 0 引言

近年来,随着城市地下空间的利用率不断增长,深大基坑的数量急剧增加,不少基坑的设计深度可达 30 m 以上。此类深基坑底部常存在承压含水层,施工过程中极易出现坑底承压水突涌、结构上浮、周边地表沉降等问题,因此深基坑的止水降水设计要求越来越严格<sup>[1-2]</sup>。止水帷幕结合减压降水井的“墙-井”体系是目前最常使用的降水措施。帷幕可以延长地下水的渗流路径,起到隔水的作用,同时通过设计合理的减压井群总抽水量,可以在施工安全简便的情况下达到良好的降水效果<sup>[3]</sup>。现行的《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)<sup>[4]</sup>给出了一般情况下潜水和承压水下完整井与非完整井的涌水量计算公式,即“大井法”,但该推荐公式并未考虑止水帷幕对于基坑渗流场的影响。在实际工程中,采用“墙-井”体系的基坑涌水量会比按照规范公式计算的结果小,若以规范进行设计计算,最终得到的基坑降水施工方案并不合理。

目前已有许多学者对考虑止水帷幕情况下深基坑内的涌水量进行了研究,主要有以下两种方向:基于“大井法”的修正计算方法和改进阻力系数算法。王军辉等<sup>[5]</sup>将悬挂式止水帷幕影响下的渗流场分为绕流和非绕流两个区域,对常规大井法公式进行了修正,推导出考虑止水帷幕条件下潜水和承压水的涌水量计算公式。王浩等<sup>[6]</sup>提出考虑止水帷幕对基坑进水影响的理论计算公式,通过分析理论计算公式的参数影响时发现:当  $r_0/M \leq 0.4$  时,基坑外水位下降深度  $s$  受基坑面积影响较大;当  $L/M \geq 0.6$  时,可以通过增加止水帷幕深度来减小基坑涌水量( $r_0$  为圆形基坑半径; $L$  为止水帷幕插入深度; $M$  为承压含水层厚度)。李瑛等<sup>[7]</sup>将基坑按面积相等等效为井壁进水的大直径承压水非完整井,令流入井内的水量等于止水帷幕内坑底承压含水层内的竖直向渗流量,以此建立基坑内减压抽水量与基坑外承压水头降深的关系式。张钦喜等<sup>[8]</sup>通过室内模型试验深入研究了帷幕插入深度对基坑内涌水量的影响,根据试验结果分析提出了止水帷幕插入深度的合理取值范围,为类似工程提供参考。彭祎等<sup>[9]</sup>对传统计算公式采用的闸坝改进阻力系数法进行了修正,提出了承压水条件下悬挂式帷幕基坑渗流段的分段方式,将其拓展至含水层各向异性条件下,得到了定量计算悬挂式帷幕基坑

涌水量和坑外水位降深的公式。此外,武永霞<sup>[10]</sup>推导了止水帷幕作用下承压含水层定水位和定流量两种抽水问题的解析解,并对其修正得到止水帷幕作用下承压含水层单井抽水的简易分析模型。

除理论推导外,不少学者对深基坑抽水进行了数值模拟分析<sup>[11-12]</sup>,如 SHEN 等<sup>[13]</sup>基于数值模拟结果进行拟合,得到了深基坑抽水引起的基坑内外水头差,但现有针对悬挂帷幕基坑的数值计算及数值模拟方法存在精确度不高、计算式过于复杂、实用性不强等问题。在先前已有的研究基础上,本文基于裘布依稳定承压井流理论,通过考虑悬挂式止水帷幕阻断形成的绕流区对基坑地下水水力梯度和渗流断面的影响,引入绕流区渗径影响系数,采用数值模拟确定影响系数,得到承压含水层中考虑悬挂式止水帷幕条件下基坑涌水量的完整计算公式。通过实例验证公式精确性,并对基坑涌水量的影响因素展开进一步分析,研究结论可供基坑降水设计和施工参考。

## 1 基坑涌水量计算解析解

前苏联学者鲍切威尔提出大井法来估算群井干扰下涌水量<sup>[14]</sup>,已被广泛引用于国内外许多手册和标准中,现行的《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)<sup>[4]</sup>即是将群井按照大井法进行简化,得到了含水层承压完整井的基坑总涌水量计算公式:

$$Q = 2\pi kMs_0 / \ln\left(1 + \frac{R}{r_0}\right) \quad (1)$$

式中: $Q$  为基坑涌水量; $k$  为承压含水层渗透系数; $s_0$  为基坑设计地下水水位降深; $r_0$  为基坑等效半径; $R$  为基坑降水影响半径; $M$  为承压含水层厚度。该公式适用于均质含水层完整井及含水层厚度不大的均质含水层承压水非完整井,可用于绝大部分仅采用抽水井降水的工程,但该公式并未考虑基坑降水设计中止水帷幕的存在。在基坑降水过程中,止水帷幕对基坑的渗流场有较大的影响,这些影响主要体现在以下两个方面:(1) 基坑外的地下水绕过止水帷幕底端进入基坑内,会延长地下水渗流路径,减小基坑内外的水力梯度差;(2) 止水帷幕插入含水层,会减小渗流断面面积。由 Darcy 定律可知,水力梯度差和渗流断面面积减小,会使得基坑涌水量减小。因此,考虑止水帷幕的基坑降水不宜

采用规范推荐的公式计算。

### 1.1 计算模型及基本假设

基于大井法对悬挂式止水帷幕影响下基坑降水渗流场进行研究,加入悬挂式止水帷幕边界条件,推导存在止水帷幕情况下的承压水地层基坑涌水量计算公式。具体的计算模型如图1所示。其中, $H$ 为基坑外承压水头高度; $R$ 为基坑降水的影响半径; $r_0$ 为圆形基坑的半径; $h_1$ 为抽水后止水帷幕外侧承压含水层最大降深处水头值; $h_2$ 为基坑内承压含水层水头设计值; $L$ 为悬挂式止水帷幕插入承压含水层中的深度; $D$ 为止水帷幕厚度; $M$ 为承压含水层厚度; $M_r$ 为止水帷幕底端到隔水底板的距离。

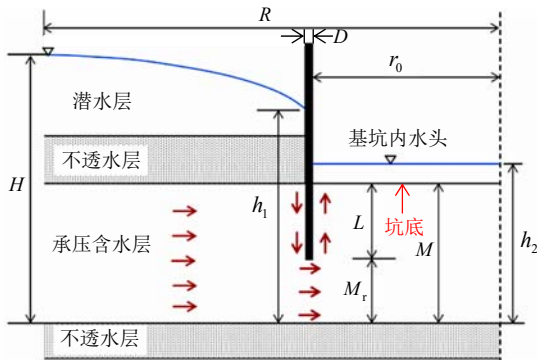


图1 悬挂式止水帷幕的承压含水层计算模型

Fig. 1 Calculation model of confined aquifer with suspended waterproof curtain

由于止水帷幕的存在,止水帷幕周围存在竖向和水平两个方向的渗流,可以称该区域为绕流区。随着靠近底部的不透水层,止水帷幕的阻挡作用逐渐减小,直至小到可以忽略不计。不受止水帷幕影响的区域只存在水平方向的渗流,称该区域为非绕流区。

水流在贴近止水帷幕的绕流区渗流路径最长,即:

$$L_{\max} = 2L + D \quad (2)$$

贴近底部不透水层的非绕流区渗流路径最短,即:

$$L_{\min} = D \quad (3)$$

### 1.2 悬挂式止水帷幕下基坑涌水量解析解

大多理论解析解<sup>[5-6]</sup>计算绕流区域渗流路径时通常直接采用 $(L_{\max} + L_{\min})/2$ ,但该区域流线并非线性分布,直接用 $(L_{\max} + L_{\min})/2$ 计算与实际情况相差较大。为了使得基坑内涌水量的计算更加精确,引入绕流区渗径长度影响系数 $\alpha$ ,该系数随止水帷幕插入深度比 $L/M$ 变化,可以体现绕流区流线分布不

均匀的特点。因此,该区域等效渗径的长度可以表示为:

$$L_m = \alpha \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} = \alpha(L + D) \quad (4)$$

式中: $\alpha$ 与 $L/M$ 相关,即可表示为:

$$\alpha = f\{L/M\} \quad (5)$$

则止水帷幕下基坑外地下水进入基坑内的平均水力梯度为:

$$i_m = (h_1 - h_2)/\alpha(L + D) \quad (6)$$

根据Darcy定律,可得到止水帷幕底端的地下水径流量,即基坑的总涌水量为:

$$Q = 2\pi k r_0 M_r i \quad (7)$$

结合式(6)~(7)可得:

$$h_1 - h_2 = \alpha Q(L + D)/2\pi k s_0 M_r \quad (8)$$

假设基坑外只有无限接近止水帷幕处才发生竖向的绕流,其他区域仍是沿水平方向流动,故基坑外的水流量可采用不考虑止水帷幕的承压含水层非完整井进行计算,即采用式(1),可以得到基坑外地下水水位降深 $s$ :

$$s = \frac{Q}{2\pi k M} \ln\left(1 + \frac{R}{r_0}\right) = H - h_1 \quad (9)$$

假设基坑设计地下水水位降深为 $s_0$ ,则:

$$s_0 = H - h_2 = H - h_1 + h_1 - h_2 = s + h_1 - h_2 \quad (10)$$

结合式(8)~(10)可得:

$$Q = \frac{2\pi k s_0 r_0 M M_r}{r_0 M_r \ln\left(1 + \frac{R}{r_0}\right) + \alpha M(L + D)} \quad (11)$$

该公式即为考虑止水帷幕的承压水层基坑涌水量计算公式。

## 2 绕流区渗径影响系数

建立圆形基坑渗流计算数值模型,如图2所示。承压含水层顶、底板为隔水边界,帷幕内外侧为隔水边界,模型外边界为初始水头的定水头边界,基坑中心设置单口完整抽水井进行降水。计算选取渗透系数 $k_h = k_v = 10 \text{ m/d}$ ,含水层厚度 $M = 30 \text{ m}$ ,基坑设计的地下水水位降深 $s_0 = 15 \text{ m}$ 。

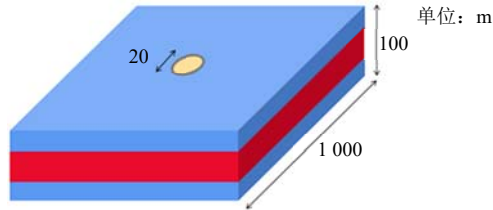


图2 三维有限元模型  
Fig. 2 3D finite element model

由于绕流区渗径影响系数  $\alpha$  与止水帷幕插入深度比  $L/M$  相关, 通过数值模型模拟计算基坑涌水量  $Q$  随  $L/M$  的变化, 结果如图3所示。由图3可知,  $L/M$  对基坑涌水量有较大影响。随着  $L/M$  增大, 基坑涌水量不断减小。若需要控制基坑涌水量, 可以选择增大止水帷幕插入深度的方法。

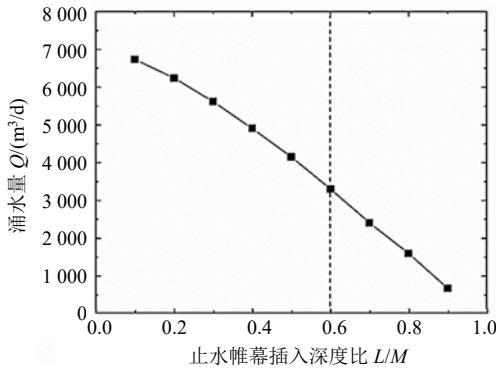


图3 基坑涌水量  $Q$  与止水帷幕插入深度比  $L/M$  关系  
Fig. 3 Relationship between water inflow  $Q$  of foundation pit and waterproof curtain insertion ratio  $L/M$

通过式(11)可以计算得到渗径影响系数  $\alpha$  的值, 渗径影响系数  $\alpha$  与止水帷幕插入深度比  $L/M$  的关系如图4所示。由图4可知,  $\alpha$  随  $L/M$  的增大逐渐增大。当  $0.1 \leq L/M \leq 0.6$  时, 随着  $L/M$  的增大,  $\alpha$  近似线性增大; 当  $0.6 < L/M \leq 0.9$  时,  $\alpha$  近似指数增大。根据图中  $\alpha$  的变化规律, 可以模拟得到  $\alpha$  与  $L/M$  的函数关系。

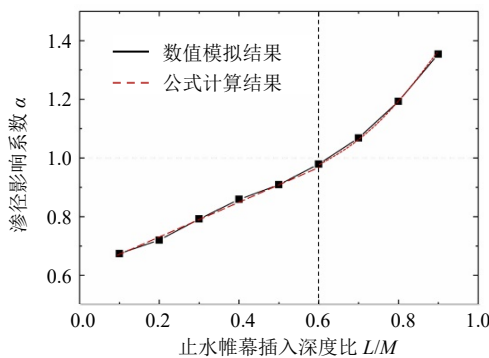


图4 渗径影响系数  $\alpha$  与止水帷幕插入深度比  $L/M$  的关系  
Fig. 4 Relationship between impact factor  $\alpha$  of seepage path and waterproof curtain insertion ratio  $L/M$

当  $0.1 \leq L/M \leq 0.6$  时:

$$\alpha = 2.02L/M + 5.35 \quad (12)$$

当  $0.6 < L/M \leq 0.9$  时:

$$\alpha = 1.8(L/M)^2 - 1.45L/M + 1.2 \quad (13)$$

### 3 验证与分析

#### 3.1 基坑涌水量计算的实例验证

为验证前文提出的止水帷幕影响下基坑涌水量理论公式计算结果的准确性和可行性, 通过对3个基坑工程实例计算验证, 比较分析了理论公式计算值与现场实测值的差异。表1为各工程实例情况<sup>[10]</sup>, 其中甲为上海轨道交通11号线临港新站基坑工程, 乙为上海轨道交通4号线董家渡隧道基坑工程, 丙为杭州轨道交通1号线站基坑工程。

表1 各工程实例情况  
Table 1 Information of foundation pits

工程	土层分布	含水层	止水帷幕
甲	砂质粉土 20 m	潜水层	地下连续墙 深 48 m
	黏土 8 m	隔水层	
	细砂 33 m	承压含水层	
乙	粉质黏土 28 m	弱潜水层	地下连续墙 深 65 m
	粉砂 118.2 m	承压含水层	
丙	砂质粉土 18 m	潜水层	地下连续墙 深 43 m
	黏土 22 m	隔水层	
	圆砾 7 m	承压含水层	

表2为各工程解析解与工程实测值对比, 其中工程现场实测涌水量数据来自文献[10]。  $Q_1$  为理论公式计算的基坑涌水量,  $Q_2$  为现场实际抽水量,  $\Delta$  为计算量  $Q_1$  与实际量  $Q_2$  之间的偏差,  $\Delta = |Q_1 - Q_2| / Q_2 \times 100\%$ 。由表2可知, 理论公式计算的基坑涌水量与现场实测数据基本一致, 误差在13.5%以内, 说明基坑涌水量理论公式(11)具有一定的准确性和可行性, 可应用于类似工程。当承压含水层较薄时, 如工程案例丙, 理论公式的计算偏差相对较大。这可能是因为理论公式的计算模型比较理想化, 当  $r_0/M$  的值很大时, 基坑内外渗流场规律与假设的情况存在一定差异, 因此需要进一步进行数值模拟分析。

#### 3.2 止水帷幕插入深度比 $L/M$ 的影响

为了进一步对模型进行分析验证, 基于 Midas GTS 有限元数值模拟软件, 建立圆型基坑稳定流三维地下水模型, 计算参数与图2所采用的参数相同。图5为不同  $r_0/M$  下, 基坑涌水量  $Q$  随止水帷幕插

入深度比  $L/M$  变化的情况。可以看出,公式计算的解析解与数值模拟的结果基本一致。随着止水帷幕插入越深,基坑涌水量逐渐减小,但基坑涌水量减小的速率显著增大。当  $L/M \leq 0.4$  时,基坑涌水量减

小相对缓慢;当  $L/M > 0.4$  时,基坑涌水量快速减少。因此,在基坑开挖降水过程中,若想减少基坑涌水量,减少所需布置的降水井,则止水帷幕插入深度比至少需要大于 0.4。

表2 工程实例降水量的实测值与计算值对比

Table 2 Comparison between measured and calculated values of precipitation in typical foundation pits

编号	承压含水层特性			基坑特性		止水帷幕特性		$Q_1 / (\text{m}^3/\text{d})$	$Q_2 / (\text{m}^3/\text{d})$	$\Delta/\%$
	$M/\text{m}$	$k/(\text{m}/\text{d})$	$R/\text{m}$	$r_0/\text{m}$	$s_0/\text{m}$	$L/\text{m}$	$D/\text{m}$			
甲	33.0	5	492	18.7	22.0	16.6	1.2	4 536	4 500	0.8
乙	118.2	5	1 044	27.0	33.0	33.2	1.2	23 872	23 000	3.8
丙	7.0	5	130	21.6	5.8	4.0	1.0	519	600	13.5

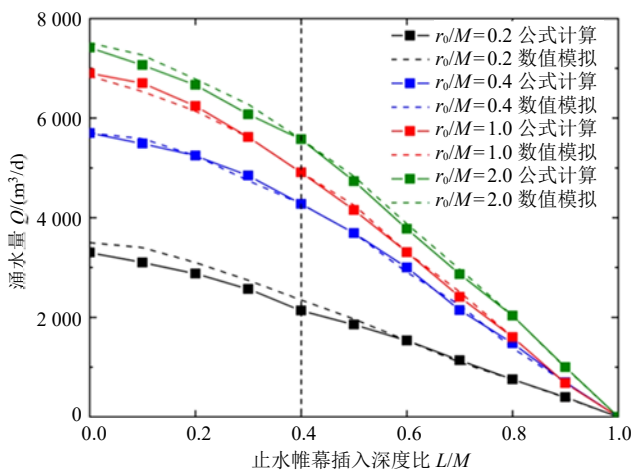


图5 基坑涌水量  $Q$  随止水帷幕插入深度比  $L/M$  的变化关系  
Fig. 5 Relationship between water inflow  $Q$  and curtain insertion ratio  $L/M$

图6为不同  $r_0/M$  下,基坑外水位降深  $s$  随止水帷幕插入深度比  $L/M$  的变化关系。由图6可见,公式计算的解析解与数值模拟的结果基本一致。随着止水帷幕插入越深,基坑外水位降深逐渐减小,当  $L/M < 0.6$  时,止水帷幕插入深度的增加对基坑外水位降深  $s$  的影响较小;当  $L/M \geq 0.6$  时,止水帷幕插入深度的增加对基坑外水位降深  $s$  的减小效果明显。此时止水帷幕插入含水层的深度较深,显著减小了渗流断面面积,由基坑外流向基坑内的水流变少,因此坑外水位降深显著变小。

3.3 基坑尺寸比  $r_0/M$  的影响

图7和图8分别为涌水量  $Q$  和基坑外水位降深  $s$  随基坑尺寸比  $r_0/M$  的变化关系。基坑尺寸比  $r_0/M$  对基坑降水有显著的影响。涌水量  $Q$  与基坑外水位降深  $s$  均随着  $r_0/M$  的增大先迅速增加,然后逐渐趋于缓和;当  $r_0/M \leq 0.4$  时,基坑尺寸比对  $Q$  和  $s$  的影响较大;但随着基坑面积的增大,增长的幅度逐渐减缓;当  $r_0/M > 1$  时,  $Q$  和  $s$  的增速逐渐趋于稳定。当  $r_0/M$  较大时,止水帷幕插入越深,基坑涌水

量减少得越多,止水效果显著提高。因此,对于半径过大的基坑,最宜采用落地式止水帷幕。

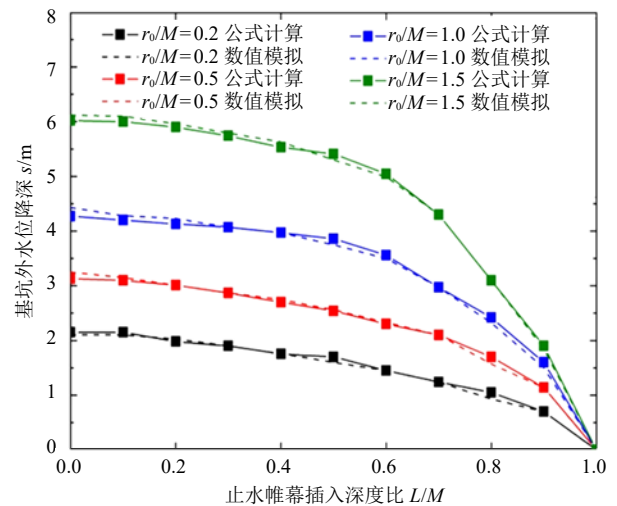


图6 基坑外水位降深  $s$  随止水帷幕插入深度比  $L/M$  的变化关系  
Fig. 6 Relationship between the water level drawdown depth  $s$  and curtain insertion ratio  $L/M$

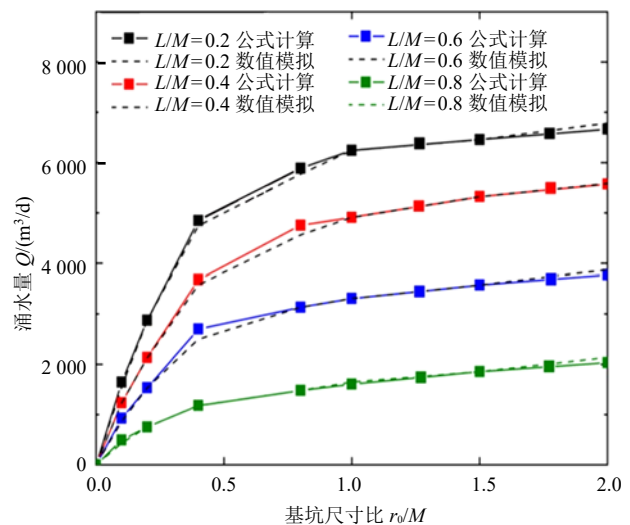


图7 涌水量  $Q$  随基坑尺寸比  $r_0/M$  的变化关系  
Fig. 7 Relationship between water inflow  $Q$  and pit size ratio  $r_0/M$



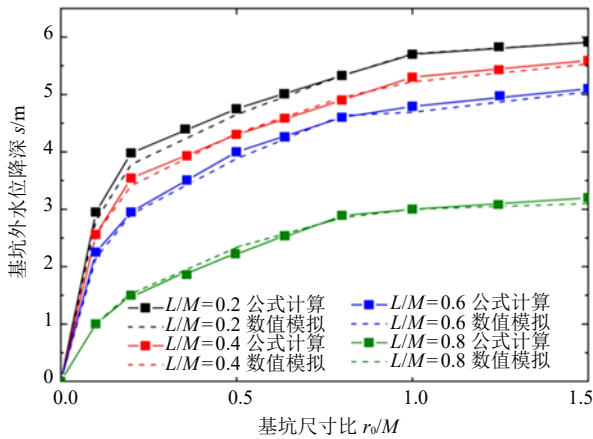


图8 基坑外水位降深  $s$  随基坑尺寸比  $r_0/M$  的变化关系  
Fig. 8 Relationship between the water level drawdown depth  $s$  and pit size ratio  $r_0/M$

综合以上计算结果,理论计算式(11)满足基坑涌水量与止水帷幕深度成反比、与基坑面积成正比的规律。工程实例、数值模拟与理论公式的结果近似,说明了该公式的精确性,也可为类似工程计算基坑涌水量、布置止水降水设备提供依据。

## 4 结论

(1) 基坑工程降水采用悬挂式止水帷幕时会形成绕流和非绕流两个区域。基于绕流和非绕流区的修正大井法,在计算绕流区域渗流路径时引入绕流区渗径长度影响系数后,计算结果具有一定的准确性,可为类似工程提供理论依据。

(2) 悬挂式止水帷幕插入承压含水层深度比  $L/M$  对绕流区渗径影响系数  $\alpha$  影响显著。 $\alpha$  随着  $L/M$  的增大而增大,且在  $L/M=0.6$  处出现影响分界点,通过数值模拟计算及数据拟合,得到了  $\alpha$  与  $L/M$  的函数关系。当  $0.1 \leq L/M \leq 0.6$  时,  $\alpha$  随  $L/M$  的增大呈线性增加;当  $0.6 < L/M \leq 0.9$  时,  $\alpha$  随  $L/M$  的增大呈近似指数增加。

(3) 基坑涌水量  $Q$  和基坑外水位降深  $s$  随止水帷幕插入深度比  $L/M$  增大而减小,随基坑尺寸比  $r_0/M$  增大而增大,且  $L/M$  和  $r_0/M$  对  $Q$  和  $s$  的影响均存在分界点:当  $L/M \leq 0.4$  时,  $Q$  减小相对缓慢;当  $L/M > 0.4$  时,  $Q$  快速减少。当  $L/M < 0.6$  时,  $L/M$  对  $s$  影响较小;当  $L/M \geq 0.6$  时,对  $s$  的影响显著。当  $r_0/M \leq 0.4$  时,  $r_0/M$  对  $Q$  和  $s$  的影响较大;当  $r_0/M > 1$  时,  $Q$  和  $s$  的增速逐渐趋于稳定。

## 参考文献

[1] 刘杨,刘维,史培新,等.超深地连墙成槽富水软弱层

局部失稳理论研究[J].岩土力学,2020,41(增刊1):10-18.

LIU Yang, LIU Wei, SHI Pei-xin, et al. Local instability analysis of the ultra-deep wall-to-slotted in water rich soft layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 10-18.

[2] 郑刚,赵悦斌,程雪松,等.复杂地层中基坑降水引起的水位及沉降分析与控制对策[J].土木工程学报,2019,52(增刊1):135-142.

ZHENG Gang, ZHAO Yue-bin, CHENG Xue-song, et al. Strategy and analysis of the settlement and deformation caused by dewatering under complicated geological condition[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 135-142.

[3] 张在明.地下水与建筑基础工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.

ZHANG Zai-ming. Groundwater and Building Foundation Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120 — 2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[5] 王军辉,陶连金,韩焯,等.悬挂式帷幕入土深度对涌水量影响及优化设计[J].北京工业大学学报,2015,41(9):1390-1398.

WANG Jun-hui, TAO Lian-jin, HAN Xuan, et al. Effect of suspended curtain depth into stratum on discharge rate and its optimum design[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(9): 1390-1398.

[6] 王浩,刘艳敏,赵渊,等.悬挂式止水帷幕条件下基坑涌水量计算研究[J].安全与环境工程,2022,29(3):94-101.

WANG Hao, LIU Yan-min, ZHAO Yuan, et al. Water inflow calculation of foundation pit under the condition of suspended waterproof curtain[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(3): 94-101.

[7] 李瑛,陈东,刘兴旺,等.悬挂式止水帷幕深基坑减压降水的简化计算方法[J].岩土力学,2021,42(3):826-832,862.

LI Ying, CHEN Dong, LIU Xing-wang, et al. Simplified

- calculation method of decompression dewatering for deep excavation with suspended waterproof curtain[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 826-832, 862.
- [8] 张钦喜, 晁哲, 张雪冬. 悬挂式帷幕基坑涌水量计算及插入深度影响效应研究[J]. *岩土工程技术*, 2018, 32(3): 109-114.  
ZHANG Qin-xi, CHAO Zhe, ZHANG Xue-dong. Study on seepage volume calculation of suspended curtain and effect of depth into soil[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2018, 32(3): 109-114.
- [9] 彭祎, 成建梅, 马郛, 等. 基于改进阻力系数法的悬挂式帷幕基坑渗流计算[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(4): 179-186.  
PENG Yi, CHENG Jian-mei, MA Yun, et al. Seepage calculation of foundation with suspended curtain based on improved resistance coefficient method[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(4): 179-186.
- [10] 武永霞. 基坑止水帷幕对含水层渗流作用的计算方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.  
WU Yong-xia. Method of barrier effect of waterproof curtain on groundwater seepage during dewatering in aquifers[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [11] 薛秀丽, 廖欢, 曾超峰, 等. 既有地下结构水-土阻隔效应对基坑抽水引发地层变形影响机制[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(1): 103-111.  
XUE Xiu-li, LIAO Huan, ZENG Chao-feng, et al. Barrier effects of existing underground structures on deformation of strata induced by dewatering of foundation pits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(1): 103-111.
- [12] 王硕, 曾超峰, 薛秀丽, 等. 复杂越流含水层基坑抽水引发围挡变形发展规律[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(增刊2): 125-128.  
WANG Shuo, ZENG Chao-feng, XUE Xiu-li, et al. Development of deformation of enclosure wall during dewatering in a leaky aquifer[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(S2): 125-128.
- [13] SHEN S L, WU Y X, MISRA A. Calculation of head difference at two sides of a cut-off barrier during excavation dewatering[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 91: 192-202.
- [14] 陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.  
CHEN Chong-xi, LIN Min. *Groundwater Hydraulics*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999.
- [15] 吴杰, 李鹏飞, 贾嘉陵, 等. 承压水层圆形基坑悬挂式止水帷幕涌水量解析[J]. *北京交通大学学报*, 2022, 46(4): 113-120.  
WU Jie, LI Peng-fei, JIA Jia-ling, et al. Analysis of water inflow in circular foundation pit with suspended waterproof curtain in confined aquifer[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2022, 46(4): 113-120.