DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2023.03.24

基坑坑底隔渗体局部缺陷下渗流量计算及敏感性分析

邓伟,师文豪,王源,吴静红 (苏州科技大学土木工程学院,江苏苏州 215011)

摘 要:基坑开挖过程中采用坑底旋喷隔渗体加固是降低地下水渗流对基坑影响的重要手段。一旦隔渗体出现局 部缺陷,地下水将涌入基坑,影响施工,甚至会诱发突涌事故,威胁施工安全。针对矩形基坑坑底隔渗体出现局部 缺陷的情况,建立了简化的坑底隔渗体缺陷渗水量计算模型,导出了渗流量计算公式;应用 GeoStudio 有限元软件 对坑底隔渗体局部缺陷下的基坑渗流场进行了数值模拟,并与理论计算结果进行了对比分析,探讨了公式的适用 条件。结果表明:隔渗体缺陷抗渗系数δ(原状土与缺陷处的渗透系数之比)是影响公式准确性的主要因素,随着δ 的增大,公式计算值与模拟值之间的相对误差呈减小趋势,当δ≥20时,计算值与模拟值基本吻合,隔渗体底部水 头差异对渗流量影响较小;δ<20时公式计算值误差偏大,通过经验方法对理论公式进行修正后得到半理论半经验 公式,能够较好地降低因隔渗体底部水头差异引起的渗流量计算误差。研究结果对于基坑坑底涌水量计算以及隔 渗体质量分析等有一定的参考价值。

关键词:基坑渗流;封底隔渗体;局部缺陷;计算方法;数值模拟;渗流场 中图分类号:TU46 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2023)03-0193-08

Calculation of inflow at the bottom of excavation pit with defected sealing barrier and its sensitivity analysis

DENG Wei, SHI Wenhao, WANG Yuan, WU Jinghong

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: The use of the jet-grouted bottom sealing barrier reinforcement at the bottom of the pit during excavation is an efficient measure to reduce the impact of groundwater seepage on the pit. Once a local defect appears in the barrier, groundwater will pour into the pit, which will obstruct construction and even induce inrush accidents, threatening construction safety. Regarding to this problem, a simplified numerical model was established for the calculation of seepage inflow at the bottom of a rectangular pit with a defected sealing barrier, by which the formula for calculating the seepage inflow was derived. Then, GeoStudio was adopted to simulate the seepage field of the barrier with a local defect, and the results were compared with those of the previous derived formula, so as to discuss the applicable conditions of the formula. The results show that the defect impermeability coefficient δ (the ratio of the permeability coefficient of the undisturbed soil to that of the defect in the barrier) is the main factor affecting the accuracy of the formula, and the relative error between the calculated and simulated values tends to decrease with the increase of δ , when $\delta \ge 20$, the calculated value is consistent with the simulated value, the difference in waterhead at the bottom of the seepage barrier has a small effect on the amount of seepage; when $\delta < 20$, the relative error between the calculated and simulated values is large, a half-theoretical, half-empirical equation obtained by correcting the theoretical equation empirically can better reduce the error in the calculation of seepage volume caused by the difference in waterhead at the bottom of the sealing barrier. The results of the study have a certain referential value for the calculation of the inflow at the bottom of the pit and the analysis of barrier quality.

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20200993);国家自然科学基金项目(42202306)

通讯作者:师文豪(1988一),男,河南洛阳人,博士,讲师,主要从事地下工程突涌水与防治方面的研究工作。

收稿日期:2022-04-07; 修回日期:2022-07-27

作者简介:邓伟(1998一),男,四川广安人,硕士研究生,主要从事岩土地下工程方面的研究。

Key words: foundation pit seepage; bottom sealing barrier; local defect; calculation method; numerical simulation; seepage field

1 研究背景

地下水渗流是引发基坑破坏的最主要因素之 一^[1-5],为了减轻地下水渗流对基坑工程带来的不 利影响,往往通过设置竖向止水帷幕来阻隔地下 水^[6-11],然而,当含水层厚度较大时,竖向止水帷幕 不能深入至不透水层,这时一般对基底进行加固形 成水平封底隔渗帷幕,并与竖向止水帷幕共同阻隔 坑内与坑外的水力联系。

在水平封底隔渗体施工方面,周铮^[12]提供了一 种通过 RJP(Rodin jet pile) 工法封底加固替代抽降 承压水的新思路及工艺方法, RJP 工法是以超高压 喷射流体的功能,将土层的组织结构破坏,被其破坏 了的土粒与浆液混合搅拌,凝固后便在地层中形成 大口径的固结体,该方法可以减少止水帷幕的插入 深度,并避免抽降承压水对环境设施的扰动。刘 伟[13]提出在深厚富水地层的深基坑工程设置带有 抗浮锚杆的全封闭止水帷幕技术方案,应用静力平 衡和渗流稳定条件对封底止水帷幕的力学特性进行 了分析,提出了该基坑封底结构的设计方法。蒋盛 钢等^[14]为解决基坑地下水渗流问题,采用水平封底 帷幕方案,保证了基坑施工的安全。Luo^[15]针对深 基坑封底的抗浮问题,选择了较合理的抗浮方案,从 而解决了地铁深基坑的封底问题。在数值模拟方 面,晏莉等^[16]、曹树辉等^[17]借助三维数值计算软件 对基坑工程坑底加固进行模拟,结果表明基底水平 封底能够有效阻止坑外地下水向坑内渗流。

隔渗体的质量直接关系到基坑地下水渗流量的 控制效果。在理想状态下,坑底旋喷加固隔渗体被 认为是不透水的,但是可能由于施工工艺、注浆填充 率、施工扰动等原因,使得旋喷隔渗体产生局部缺陷 而存在一定的透水性。Liu等^[18]建立了注浆加固体 在渗流作用下的损伤力学模型,研究了渗透水压对 注浆加固体渗透性的作用机理,得到了注浆加固体 损伤变量随渗透水压的变化规律。曹成勇等^[19]考 虑了基底旋喷隔渗体的渗流作用,提出了基坑旋喷 封底隔渗体的设计方法。Shi等^[20]基于达西渗流原 理,推导了基坑在水平帷幕条件下的涌水量,并通过 室内试验验证了理论计算方法的可靠性。在旋喷隔 渗体局部存在缺陷的情况下,当坑内与坑外水头差 很大时,地下水可能会从缺陷处喷涌而入,造成基坑 突涌;当坑内与坑外水头差较小时,地下水则会渗入 至基坑内。

本文针对潜水条件下坑底隔渗体出现局部缺陷 的情况建立了地下水渗入基坑内渗流量的计算公 式,借助有限元数值软件对隔渗体缺陷渗流场进行 了分析,并与公式计算结果进行了对比分析,在此基 础上探讨了公式的准确性和适用条件。

2 隔渗体缺陷渗流量简化计算方法

假设一矩形基坑坑底采用隔渗体加固,当坑底 隔渗体出现缺陷时,地下水会渗入至基坑内,建立有 局部缺陷的矩形基坑坑底隔渗体简化模型,如图 1 所示。图 1 中 h_w 为初始水位线至地连墙底距离; h_g 为坑底隔渗体厚度; h_s 为隔渗体底部至地连墙底距 离; h_d 为初始水位线至基底距离; $H_a、H_b$ 分别为隔 渗体底部和顶部水头;L、D分别为基坑的长度和深 度。隔渗体缺陷取竖直长条形,其厚度与隔渗体厚度 一致,长度为 l_s ; x为缺陷至基坑左侧壁距离。S,R分 别为计算模型的总长度和总深度。





假设土体为各向同性,即 $k_x = k_y$,成层土的等效渗透系数k可表示为:

$$k = M / \sum_{i=1}^{n} (M_i / k_i)$$
 (1)

式中:*M* 为土层总厚度,m; *M*_i 为各土层平均厚度, m; *k*_i 为各土层渗透系数,m/d; *n* 为土层数。

假设地下水渗流服从达西定律(Darcy's law), 那么任意过水断面的流量是处处相等的;且地下水 渗流方向垂直于土层,地下水水位基本水平,并始终 保持稳定。由达西定律可知,任一过水断面的单宽渗 流量为:

$$q = kL\frac{\Delta h}{l} \tag{2}$$

式中: q 为单宽渗流量, m^2/d ; k 为土体渗透系数, m/d; L为基坑长度,m; Δh 为水头差,m; l 为渗流路 径长度,m。

根据公式(2)可得出经有缺陷的隔渗体渗出的 单宽渗流量为:

$$q_1 = k_g L \frac{H_a - H_b}{h_g} \tag{3}$$

式中: $H_a \ H_b$ 分别为隔渗体底部和顶部水头,m; k_g 为含缺陷隔渗体的等效渗透系数,m/d。

假设坑底的位置水头为0(以坑底为水头基准面),隔渗体顶部位于坑底,则*H_b*=0。由于隔渗体 缺陷的存在,隔渗体在竖直方向上可分为两层渗透 系数不同的隔渗体,地下水在隔渗体中的渗流与层 面平行,则隔渗体等效渗透系数*k_a*为:

 $k_{g} = [k_{A}l_{A} + k_{B}(L - l_{A})]/L$ (4) 式中: $k_{A} = k_{B}$ 分别为隔渗体缺陷处和完好处的渗透 系数,m/d; l_{A} 为隔渗体缺陷处的长度,m; L 为基坑 长度,m,即隔渗体总长度。

因此,公式(3) 变为:

$$q_1 = \left[k_A l_A + k_B (L - l_A) \right] \frac{H_a}{h_g}$$
(5)

同理,在基坑降水过程中,基坑外地下水需绕过 止水帷幕进入隔渗体。由于基坑外初始总水头近似 认为不变,由公式(1)可计算流入隔渗体的单宽渗 流量为:

$$q_2 = k_s L \frac{h_d - H_a}{h_w + h_s} \tag{6}$$

流入隔渗体的流量应等于经隔渗体流出的流量,即 $q = q_1 = q_2$,联立公式(5)与(6)得出隔渗体 底部水头 H_a 和渗入基坑的单宽渗流量q为:

$$H_{a} = \frac{k_{s}h_{g}h_{d}L}{\left[k_{A}l_{A} + k_{B}(l - l_{A})\right](h_{w} + h_{s}) + k_{s}h_{g}L}$$
(7)
$$q = \frac{\left[k_{A}l_{A} + k_{B}(L - l_{A})\right]k_{s}h_{d}L}{\left[k_{A}l_{A} + k_{B}(L - l_{A})\right](h_{w} + h_{s}) + k_{s}h_{g}L}$$
(8)

式中:k_s为原状土体的渗透系数,m/d。

3 坑底隔渗体局部缺陷下渗流场数值 模拟

为进一步确定上述推导公式的准确性和适用条

件,采用 GeoStudio 软件中 SEEP/W 模块对隔渗体存在局部缺陷的渗流场进行数值模拟分析。

3.1 计算模型及边界条件

假设基坑深度D为10 m,开挖长度为L,止水帷 幕深度为15 m,宽度为1 m,隔渗体厚度为2 m,缺陷 取为竖直长条形,厚度为2 m(同隔渗体厚度),长度 为 $l_{a,o}$

为了使模型边界的水头不受基坑降水的影响, 模型总长度 S 取 5L,总深度 R 取 3D,假设地下水水 位在地表,模型两侧假设为定水头边界,基坑降水降 至基坑底部,模型底部定为不透水边界,因此,图 1 中模型左、右边界 AO 边和 EF 边总水头应定为 30 m,基坑底部 GN 边总水头应定为 20 m。止水帷幕默 认为不透水,因而不考虑其渗透性。假设土体为均匀 且各向同性,则设定 $k_s = k_s^x = k_s^y = 8 \text{ m/d}; 一般来$ 说,隔渗体的渗透系数低于土体渗透系数的 10⁻³ ~10⁻⁴ 时,可认为不透水,因此,赋予隔渗体完好处的 $渗透系数为 <math>k_B = 8 \times 10^{-5} \text{ m/d}$ 。

3.2 隔渗体缺陷参数定义

为综合分析含缺陷隔渗体的防水质量,定义缺陷抗渗系数 δ 为原状土体的渗透系数与隔渗体缺陷处渗透系数的比值,即 $\delta = k_s/k_A$,其范围为 $1 \le \delta \le 10^5$,当 $\delta = 1$ 时,表示隔渗体缺陷处无任何加固,其渗透系数大小与原状土相同, δ 越大,表明缺陷处的渗透系数越小、加固效果越好;定义缺陷质量系数 ξ 为隔渗体缺陷渗透系数与隔渗体完好部分渗透系数的比值,即 $\xi = k_A/k_B$,其范围为 $1 \le \xi \le 10^5$,当 $\xi = 1$ 时,表示隔渗体缺陷处渗透系数与完好处渗透系数相同,即隔渗体无缺陷, ξ 越大,表明缺陷处的加固效果越差。

3.3 隔渗体局部缺陷对基坑渗流场的影响

3.3.1 缺陷位置对渗流场的影响 选取隔渗体缺陷的抗渗系数 $\delta = 10$,即 $k_A = 0.8$ m/d,设基坑长度 L为15 m、缺陷长度占隔渗体长度(基坑长度)的20%,进而对缺陷处于不同位置时的渗流场进行数值模拟。

图 2 描述了缺陷在不同位置时基坑流场等势线 与流线分布,其中 x 表示隔渗体缺陷至基坑左侧壁 的距离,当x = 0时,缺陷位于坑底左边角处;当x = 6 m时,缺陷位于坑底中央。

由图2可知,当隔渗体缺陷的位置发生改变时, 对流线的分布影响较大,而对等势线的影响较小。 因此可知,不同位置的隔渗体缺陷主要影响地下水 的渗流路径,而对于坑底渗流量影响较小。



图 2 隔渗体缺陷在不同位置时基坑流场等势线及流线分布

图 3 为隔渗体缺陷不同位置与坑底渗流量的关 系曲线模拟结果。



3.3.2 缺陷占比对渗流场的影响 缺陷占比即隔 渗体缺陷长度占隔渗体总长度的百分比。选取缺陷

由图3可知,随着隔渗体缺陷逐渐由坑底边角 移向坑底中央位置,坑底单宽渗流量逐渐略微变大 并趋于稳定。表明当隔渗体缺陷由坑底边角移至坑 底中央时,坑底渗流量不断小幅增大,但其增长率逐 渐减小,因此,隔渗体缺陷出现在坑底不同位置时, 对坑底渗流量的影响较小。

图4描述了隔渗体缺陷在不同位置时,坑底水力 梯度随隔渗体缺陷距基坑左侧壁距离的变化关系曲 线。由图4可知,当缺陷在坑底边角处即x = 0时,坑 底水力梯度由小变大,随着缺陷逐渐移向坑底中央, 坑底左侧水力梯度逐渐增大,右侧逐渐降低,缺陷处 水力梯度始终较小;当缺陷在坑底中央即x = 6 m 时,坑底左侧水力梯度与右侧一致,整体上呈现对称 形式。由此可见,由于隔渗体缺陷的存在,地下水更 倾向从缺陷处渗出,因此隔渗体缺陷处的水力梯度始 终比完好处的要小,并且越靠近缺陷处,坑底的水力 梯度越小,离缺陷越远,水力梯度也越大。



的地下水水位线高程变化曲线。由图5可知,当缺陷 位于坑底边角即x = 0时,由于地表左侧更靠近隔渗 体缺陷,因此左侧地下水水位较其他情况略低,随着 缺陷逐渐移向坑底中央, 左侧水位逐渐上升, 而右

抗渗系数 δ = 5,即 k_{λ} = 1.6 m/d,设基坑长度 L 为 15 m、缺陷位于坑底中央的基坑模型,对不同缺陷占 比下的渗流场进行数值模拟。

图 6 为坑底渗流量与缺陷占比的关系曲线。由 图 6 可知,随着缺陷占比的增大,坑底渗流量不断增 大但其增长率逐渐减小。

在不同缺陷占比下,坑底水力梯度和地下水水 位线高程随着距基坑左侧壁距离的变化关系如图 7 所示。由图 7(a)可知,在缺陷占比一定时,水力梯 度从隔渗体左侧完好处至缺陷处逐渐减小,再从缺 陷处至右侧完好处逐渐增大。这是由于隔渗体缺陷 的存在,地下水能够从隔渗体缺陷处渗出,因此隔渗 体缺陷处的水力梯度要比完好处的小。当缺陷占比 由大变小时,坑底的水力梯度不断增大,而由渗透力 *J* = γ_w · *i* 与流速 *v* = *k* · *i* 可知,渗透力*J*和流速*v* 均 与水力梯度*i* 成正比,由此可见,尽管缺陷占比较小 时坑底渗流量也较小,但同时地下水水位线升高导 致其水力梯度增大,更容易发生渗透破坏。由图 7 (b)可知,缺陷占比越小时,地下水水位线越高,随 着缺陷占比的增加,有更多的水渗入基坑,地下水水 位线逐渐降低,但在缺陷占比同比例增大过程中,地 下水水位下降的幅度在逐渐减小。



图 6 隔渗体缺陷占比与坑底渗流量的关系曲线



图7 不同缺陷占比下坑底水力梯度和地下水水位线高程变化曲线

4 公式计算与数值模拟结果对比分析

4.1 不同缺陷位置下计算值与模拟值对比分析

选取隔渗体缺陷的抗渗系数 $\delta = 40$,即 $k_A = 0.2 \text{ m/d}$,基坑长度 L 为 15 m,缺陷占比为 20%,建 立基坑模型进行渗流量的数值模拟,并将模拟结果 与公式计算值进行对比分析。

图 8 为隔渗体缺陷不同位置下坑底渗流量公式 计算值与模拟值对比。由于建立的计算公式是将隔 渗体缺陷处与完好处的渗透系数等效为统一值,因 此缺陷在坑底不同位置时,公式计算的坑底渗流量 是相同的,单宽渗流量均为 2.88 m²/d,在图 8 中呈 一直线。从图 8 中的模拟值曲线来看,当缺陷位于 坑底边角时,地下水渗流受到基坑侧壁的阻碍作用, 坑底渗流量略小,单宽渗流量为 2.80 m²/d,与模拟 值的相对误差为 2.8%;随着缺陷逐渐向坑底中央 移动,两者相对误差逐渐减小,当缺陷位于坑底中央 即 *x* = 6 m 时,模拟单宽渗流量为 2.82 m²/d,计算 值与模拟值的相对误差为 2.1%。由此可见,不同 位置的隔渗体缺陷对公式计算值与模拟值之间的误 差影响较小。





4.2 不同缺陷抗渗系数下计算值与模拟值对比分析

(1)选取缺陷位于坑底中央且占比为20%,基 坑长度 L 分别为5、10和20m,建立基坑模型对不 同缺陷抗渗系数δ下的渗流量进行数值模拟,并将 模拟值与公式计算值进行对比分析。

在相同缺陷占比(20%)、不同基坑长度的情况 下,坑底渗流量公式计算值与模拟值随缺陷抗渗系 数δ的变化曲线以及两者相对误差曲线如图9所 示。由图9可知,在相同缺陷占比、不同基坑长度情况下,随着 δ 值的增大,公式计算与模拟的渗流量均 情况逐渐减小。在L = 5 m情况下,当 $\delta = 1 时, 即 k_{A} = 渗系 k_{s} = 8 m/d 时,相当于缺陷处无任何加固的极限状 所示$

态,此时模拟值与计算值相差最大,随着缺陷抗渗系数 δ 的增大,两者之间的相对误差逐渐减小;同样在 $L = 10 \ 20 \ m$ 情况下,渗流量的计算值与模拟值之间的相对误差均随 δ 的增大而减小。由此可见, δ 对坑底渗流量公式计算值与模拟值之间的误差影响较大, δ 越大则两者之间的误差越小,而基坑长度对两者的误差影响相对较小。

(2)设基坑长度 L 为 15 m,建立缺陷位于坑底 中央且占比分别为 10%、30% 和 50% 的基坑模型, 对不同缺陷抗渗系数δ下的渗流场进行数值模拟。 在相同基坑长度(L = 15 m)、不同缺陷占比的 情况下,坑底渗流量公式计算值与模拟值随缺陷抗 渗系数 δ 的变化曲线以及两者相对误差曲线如图10 所示。由图10可知,在相同基坑长度、不同缺陷占比 情况下,公式计算与模拟的渗流量变化趋势与图9 一致。在缺陷占比为10%情况下,当 $\delta = 1$ 时,公式 计算值与模拟值相差最大,随着缺陷抗渗系数 δ 的 增大,两者之间的相对误差逐渐减小;同样在缺陷占 比为30%、50%情况下,渗流量的计算值与模拟值 之间的相对误差均随 δ 的增大而减小。由此可见, δ 值是影响坑底渗流量公式计算值与模拟值之间相对 误差的主要因素, δ 越大则两者之间的相对误差越 小,而缺陷占比对公式计算值与模拟值之间的相对





4.3 不同缺陷质量系数下计算值与模拟值对比分析

选取基坑长度 L 为 20 m、缺陷位于坑底中央且 占比为 50%, δ 分别为 20($k_A = 0.4 \text{ m/d}$)、40、50、 60、70 和 80($k_A = 0.1 \text{ m/d}$),建立基坑模型对不同 缺陷质量系数 ξ 下的渗流量进行数值模拟,并与公 式计算值进行对比分析。

在相同基坑长度(L = 20 m)和缺陷特征的情况下,坑底渗流量公式计算值与有限元软件模拟值随缺陷质量系数 ϵ 的变化曲线以及两者相对误差曲线如图 11 所示。由图 11 可知,当 δ 值一定时,随着 ϵ 的不断变化,坑底渗流量公式计算值与模拟值的相对误差变化不大,即 ϵ 对两者之间的相对误差影响较小;而当 ϵ 一定时,不同的 δ 对两者的相对误差影

响较大,由此可见, δ 是影响两者之间相对误差的主要因素。

5 讨 论

通过将公式计算的渗流量与有限元软件模拟的 渗流量进行对比分析可知,隔渗体缺陷位置、缺陷占 比、基坑长度以及隔渗体缺陷质量系数 ξ 对公式计 算值与模拟值之间的误差影响较小,缺陷抗渗系数 δ 是影响两者相对误差的主要因素,随着 δ 的增大, 计算值与模拟值之间的误差不断减小,当 $\delta \ge 20$ 时, 计算值与模拟值基本吻合。

数值模拟的渗流量与理论计算的渗流量之间存 在误差的主要原因是隔渗体底部水头有所不同,缺 陷处的水头小于完好处水头,但计算公式并未考虑 到两者的差异性。随着δ的增大,隔渗体缺陷处与完 好处的底部水头差异逐渐减小,计算值与模拟值逐 渐接近。



图 11 坑底渗流量计算值与模拟值随 ξ 的变化及两者相对误差(L = 20 m,缺陷占比 50% 位于中央)

考虑到隔渗体缺陷处与完好处水头的差异性 是造成渗流量计算公式误差的主要原因,建立基坑 长度 L为15 m、缺陷位于坑底中央的基坑模型,对隔 渗体底部水头差异性进行分析。图 12 为不同缺陷占 比情况下隔渗体缺陷处水头 H_{a1} 与完好处水头 H_{a2} 之比与缺陷抗渗系数 δ 的关系。由图 12 可知,当 δ < 20 时,隔渗体底部水头具有差异性,随着 δ 的增大, H_{a1}/H_{a2} 与 δ 基本呈线性关系;当 $\delta \ge 20$ 时, H_{a1} 与 H_{a2} 基本一致。



图 12 不同缺陷占比下 H_{a1}/H_{a2} 与 δ 的关系

当 δ < 20 时,通过经验拟合方法可以得到 H_{a1}/H_{a2} 与 δ 的经验关系为:

$$H_{a1}/H_{a2} = 0.011\delta + 0.75 \tag{9}$$

一般情况下,缺陷在隔渗体中占比较小,可认为 $H_{a2} = H_a$,则缺陷处水头可近似为:

$$H_{a1} = (0.011\delta + 0.75)H_a \tag{10}$$

通过拟合得到的经验关系可以对公式(8)进行 修正,得到渗流量计算的半理论半经验公式为:

$$\begin{cases} q = \frac{k_A l_A H_a (0.011\delta + 0.75) + k_B l_B H_a}{h_g} & (0 < \delta < 20) \\ q = \frac{[k_A l_A + k_B (L - l_A)] k_s h_d L}{[k_A l_A + k_B (L - l_A)] (h_w + h_s) + k_s h_g L} & (\delta \ge 20) \end{cases}$$
(11)

分别应用公式(8)、(11)计算得到修正前、后的

渗流量与 δ 的关系曲线并分析渗流量计算值与模拟 值的相对误差(以绝对值表示),如图 13 所示。由图 13 可知,当 δ = 1 时,修正前、后计算公式的相对误 差由 17.6%减小至8.0%,由此可见,修正后的半理 论半经验公式能够较好地降低因隔渗体底部水头差 异而引起的渗流量计算误差。



误差分析(L = 15 m,缺陷占比 20%)

当隔渗体无缺陷即缺陷质量系数 $\xi = 1$ 时,缺 陷处渗透系数与完好处渗透系数相同,公式(8)可 简化为:

$$q = \frac{k_g k_s h_d L}{k_g (h_w + h_s) + k_s h_g}$$
(12)

公式(12)即为文献[20]、[21]中隔渗体位于坑 底时的基坑涌水量计算公式,即假定坑底隔渗体无 缺陷时的渗流量计算公式,是本文计算公式的一个 特殊情况。

6 结 论

应用 GeoStudio 有限元软件对基坑底部隔渗体 出现局部缺陷时的渗流场进行了模拟,并将理论计 算的渗流量与模拟值进行了对比分析,得出以下主 要结论:

(1) 针对基坑坑底隔渗体出现局部缺陷情况下

隔渗体竖直方向渗透性的差异性特征,基于等效渗透 系数原理,建立了坑底隔渗体局部缺陷下的渗流量计 算模型,并引入了缺陷抗渗系数δ和缺陷质量系数ξ 两个指标共同描述坑底缺陷隔渗体的防水质量。

(2)隔渗体缺陷的抗渗系数δ是影响基坑坑底 渗流量公式计算值与模拟值之间相对误差的主要因 素,当δ≥20时,渗流量的理论计算值与模拟结果基 本吻合,随着δ的继续增大,计算值与模拟值的相对 误差不断减小。隔渗体缺陷位置、缺陷占比、基坑长 度以及缺陷质量系数ξ对公式计算值与模拟值之间 的相对误差影响较小。

(3)针对δ < 20时基坑坑底渗流量的理论计算 值与模拟结果相对误差较大的问题,考虑隔渗体缺 陷处与完好处底部水头存在差异性,将拟合得到的 隔渗体底部水头经验关系对理论公式进行了修正, 得到了分段式的半理论半经验基坑坑底渗流量计算 公式,有效减小了计算误差。

参考文献:

- WU Yongxia, SHEN Shuilong, YUAN Dajun. Characteristics of dewatering induced drawdown curve under blocking effect of retaining wall in aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2016, 539: 554 - 566.
- [2] 李瑛,胡德军,叶向前,等.基于事故分析的深基坑承压 水突涌机理研究[J].地下空间与工程学报,2019,15
 (3):943-948.
- [3] 邱明明,杨果林,段君义,等.砂土场地排桩围护挡墙渗 漏水对基坑变形规律的影响[J].水资源与水工程学报, 2020,31(6):194-200.
- [4] 章丽莎,应宏伟,王迪,等.动态地下水位变化引起的基 坑底抗渗流稳定性计算新方法[J].中南大学学报(自 然科学版),2019,50(3):634-640.
- [5] XU Xiaobing, HU Qi, HUANG Tianming, et al. Seepage failure of a foundation pit with confined aquifer layers and its reconstruction[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 138: 106366.
- [6] ZHANG Haochen, WANG Maoyuan, LIU Yang. Design of ground water control in super large deep foundation pit[J]. Advanced Materials Research, 2013, 838-841: 701-704.
- [7] 李方明,陈国兴,刘雪珠.悬挂式帷幕地铁深基坑变形特 性研究[J].岩土工程学报,2018,40(12):2182-2190.
- [8] SHI Chenghua, CAO Chengyong, LEI Mingfeng, et al. Optimal design and dynamic control of construction dewatering with the consideration of dewatering process [J].

KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21: 1161 – 1169.

- [9] 葛晓永,张妹伊,陈征,等. 悬挂式止水帷幕圆形基坑承 压含水层地下水非稳定流计算[J].水资源与水工程学 报,2022,33(1):178-183.
- [10] LIU Linghui, LEI Mingfeng, CAO Chengyong, et al. Dewatering characteristics and inflow prediction of deep foundation pits with partial penetrating curtains in sand and gravel strata[J]. Water, 2019, 11(10): 2182.
- [11] WANG Jianxiu, LIU Xiaotian, LIU Shaoli, et al. Physical model test of transparent soil on coupling effect of cutoff wall and pumping wells during foundation pit dewatering[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14: 141 – 162.
- [12] 周 铮. 深基坑工程采用 RJP 工法封底加固以取代抽降 承压水的方法及工程应用[J]. 建筑结构, 2016, 46 (S1):742-745.
- [13] 刘伟. 深厚富水地层深基坑新型止水封底帷幕的设计 与施工[J]. 矿业安全与环保,2018,45(5):83-86.
- [14] 蒋盛钢,刘胜利.深厚潜水地铁基坑地下水控制方案分析与评估[J].地下空间与工程学报,2019,15(S1):
 333-340.
- [15] LUO Sheng. Research and application of anti-floating schemes of deep foundation pit of subway for underwater excavation and underwater concrete sealing [C]// E3S Web of Conferences, 2020.
- [16] 晏 莉,杨海涛,崔云龙,等.富水粉砂地层深基坑底部 注浆加固数值模拟分析[J].水利水电科技进展,2022, 42(4):80-86+102.
- [17] 曹树辉,车灿辉,吉泳安. 深层水平封底在巨厚砂卵石 层基坑地下水控制中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2019,39(10):1657-1665.
- [18] LIU Linsheng, WANG Hongbo, ZHENG Shijie, et al. Damage model and experimental study of a sand groutingreinforced body under seepage[J]. Processes, 2022, 10 (2): 256.
- [19] 曹成勇,施成华,刘建文,等.考虑渗流作用的基坑旋喷 封底隔渗体设计方法[J].华中科技大学学报(自然科 学版),2021,49(7):49-54.
- [20] SHI Chenghua, SUN Xiaohe, LIU Shengli, et al. Analysis of seepage characteristics of a foundation pit with horizontal waterproof curtain in highly permeable strata [J]. Water, 2021, 13(9): 1303.
- [21] 孙晓贺,施成华,曹成勇,等.强透水地层水平帷幕作用 下基坑渗流特性[J].东南大学学报(自然科学版), 2021,51(6):1002-1008.