

悬挂式帷幕基坑涌水量计算及插入深度影响效应研究

张钦喜 晁哲 张雪冬

(北京工业大学建筑工程学院,北京 100124)

【摘要】 为确定悬挂式止水帷幕插入深度和基坑内涌水量、基坑外最大水位降深的关系,从而得出在预定基坑外最大水位降深和基坑内涌水量下的较优悬挂式帷幕的插入深度,根据达西定律和大井简化的均质含水层潜水非完整井的基坑涌水量计算公式,推导出帷幕插入深度、基坑涌水量、基坑外最大水位降深的关系式。将推导的公式进行基坑实例计算并与大卫登可夫和弗兰克的方法进行对比,分析两种计算方法结果的异同点。采用室内模型试验和 Midas/GTS/NX 数值模拟对悬挂式帷幕基坑地下水渗流进行模拟,对公式推导的结果进行验证,证明文中提出的计算公式与实际情况更接近,并得出结论:基坑外最大水位降深随着帷幕插入深度的增加略有降低,但变化不大,基坑涌水量随着帷幕插入深度的增加逐渐减小。

【关键词】 插入深度;止水帷幕;水位降深;涌水量

【中图分类号】 TU 46

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2018.03.001

Study on Seepage Volume Calculation of Suspended

Curtain and Effect of Depth into Soil

Zhang Qinxi Chao Zhe Zhang Xuedong

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

【Abstract】 In order to confirm relationship between flow rate of foundation pit and suspended curtain depth into stratum and relationship between maximum water level reduction of outside the foundation pit, so then finding the optimum value of suspended curtain depth into stratum, according to Darcy's law and large-well-method, formula was derived. By comparative analysis of example of derived formula and Davidenkoff's way, the similarities and differences of the results was discovered. Groundwater seepage in foundation pit was simulated by laboratory model experiment and Midas/GTS/NX, verifying derived formula and coming to conclusion, which maximum water level reduction of outside the foundation pit was discussed slightly with increasing of suspended curtain depth into stratum and flow rate of foundation pit was reduced.

【Key words】 depth into stratum; suspended curtain; water level reduction; flow rate

0 引言

在基坑开挖时,为防止地下水对施工造成影响,需要对地下水进行有效控制。通常地下水控制有降水和止水两类,降水一般采用基坑井点降水或集水明排,使基坑范围内的地下水降至设计水位以下,止水是在基坑周围设置止水帷幕^[1],用帷幕来进行隔水,阻断或延长地下水的渗流路径。随着基坑工程的规模和深度不断加大,越来越多的基坑涉及降水的问题,特别在建筑物比较密集的地区,基坑降水会引起周围一定范围内的地表沉降,严重时会造成邻

近建筑物的破坏。近年来,随着水资源的匮乏和节水意识的增强,许多地区出台了一系列的政策,限制基坑开挖时降水,转而采用止水帷幕的方式来阻断地下水的渗流,来保证基坑内的正常施工,同时也减小了周围建筑物的沉降。止水帷幕有落底式止水帷幕和悬挂式止水帷幕两种,落底式止水帷幕即将止水帷幕插入隔水层中,悬挂式止水帷幕未将帷幕插入隔水层中。一方面基坑所处含水层较厚,弱透水层埋藏较深,致使施工机械无法将止水帷幕打入隔水层中,另一方面由于工程造价较高,经济不合理,

基金项目:北京市自然科学基金重点项目(8171001)

作者简介:张钦喜,男,1964年生,教授、研究生导师,主要从事地基处理及基坑工程等方面的教学与研究工作。

E-mail: qinxizhang@126.com

此时不宜采用落底式止水帷幕,而采用悬挂式止水帷幕更为合理。

采用悬挂式止水帷幕,帷幕未能将地下水完全隔断,基坑外水不断向基坑内流动,使得基坑外地下水位降低。基坑外地下水位的降深太大会造成周围建筑物和管线的沉降,如何来确定帷幕的插入深度,即在经济合理的前提下,使基坑外的水位降深和基坑内的涌水量达到最优,国内关于此问题的研究很少,相关文献和规范对基坑外最大水位降深和基坑内涌水量也提出了一些计算公式,但不同方法计算的结果相差较大^[2-6]。

针对上述问题,本文结合前人的研究,提出了一种新的计算方法,采用相关案例,将此方法和大卫登可夫的方法进行了比较,综合两种计算方法来说明基坑外最大水位降深、基坑内涌水量和帷幕插入深度的关系,通过关系曲线来确定帷幕插入深度最优位置,并采用模型试验和数值模拟来验证文中提出的计算方法的可行性和基坑外最大水位降深、基坑内涌水量与帷幕入土深度的关系。

1 大卫登可夫和弗兰克的方法

当流线和等势线很集中,经常采用这种方法来确定帷幕入土深度。该方法以分段法来进行计算,并以平面渗流为出发点,结合试验的修正导得空间渗流的计算结果^[7]。

1.1 平面渗流排水计算

基坑示意图如图1,1-1'为等势线,地基被分为I、II两段。第I段与闸坝地基渗流计算中的进出口段有相同的形式,而第II段相当于长为 $2L_2$ 平面底板渗流阻力的一半。

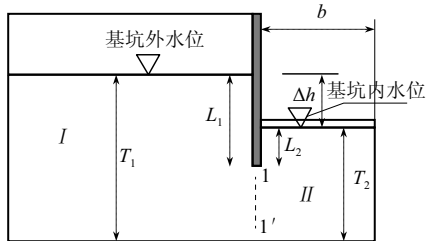


图1 基坑示意图

对这两种情况由流体力学的解可给出阻力系数值(图2所示),其中 ζ_1 表示第I段阻力系数,根据参数 L_1/T_1 和 T_2/b 确定。 ζ_2 为第二段阻力系数,根据 L_2/T_2 和 T_2/b 确定。由此可知由帷幕一侧渗入基坑的流量为

$$q=0.8k\Delta h \frac{1}{\zeta_1+\zeta_2} \quad (1)$$

式中: q 为基坑涌水量, m^3/d ; k 为渗透系数, m/d ; Δh 为水头差, m 。

坑外水位最大降深为

$$S_w=\Delta h-1.3\Delta h \frac{\zeta_2}{\zeta_1+\zeta_2} \quad (2)$$

式中: S_w 为坑外最大水位降深, m 。

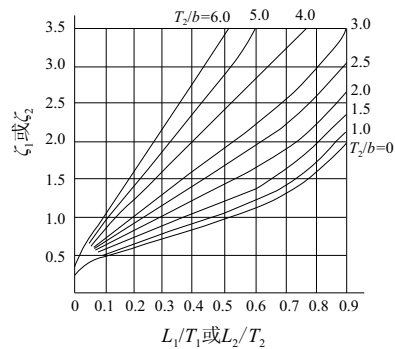


图2 阻力系数曲线图

1.2 三向渗流排水计算

根据大量电拟试验求得流入基坑的流量及帷幕底的水头,再与按平面图形求得的相应计算值比较,可找出三向渗流情况相对平面渗流情况的修正系数,从而得到基坑三向渗流的排水计算式。

对圆形基坑,其计算式为:

$$q=0.8k\Delta h \frac{1}{\zeta_1+\zeta_2} \quad (3)$$

$$S_w=\Delta h-1.3\Delta h \frac{\zeta_2}{\zeta_1+\zeta_2} \quad (4)$$

对于正方形基坑,其计算式为

$$q=0.75k\Delta h \frac{1}{\zeta_1+\zeta_2} \quad (5)$$

$$S_w=\Delta h-1.3\Delta h \frac{\zeta_2}{\zeta_1+\zeta_2} \quad (6)$$

当基坑长宽比接近或大于2时,即可采用平面渗流的计算式确定而不做修正。渗流量在长宽比接近2的情况下,只需将长边按平面渗流计算式求得单宽值 q ,而计算总渗流量可忽略短边得 $Q=2Lq$ (L 为长边一条边的长)。

1.3 案例计算

案例为在潜水含水层设置悬挂式止水帷幕,如图1,基坑顶距离隔水层为30 m,基坑深度13 m,基坑外水位距离隔水层 $T_1=22$ m,基坑内水位距离隔水层 $T_2=16$ m,基坑内外水头差 $\Delta h=6$ m,土层均质为各向同性单一土层,渗透系数5 m/d。分别将基坑假定为周长为200 m的条形基坑、方形基坑、圆形基坑和长宽比为2的基坑,将数据带入上式,计

算的结果见图 3、图 4。

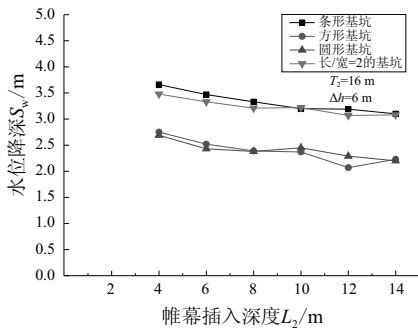


图 3 S_w-L_2 关系曲线图

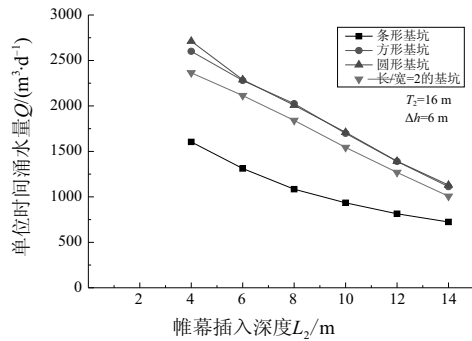


图 4 $Q-L_2$ 关系曲线图

从图 3、图 4 可以看出,用此方法计算的基坑外最大水位降深随着帷幕插入深度的增加略有减小,但变化不大,条形基坑和长宽比为 2 的基坑水位降深相对较大,圆形基坑和方形基坑外水位降深相对较小。基坑的涌水量随着帷幕插入深度的增加而逐渐减小,方形基坑、圆形基坑、长宽比为 2 的基坑涌水量变化较大,而且接近线性变化,条形基坑涌水量变化相对较小。

2 本文提出的公式计算法

将基坑周围渗流场流网分布图看成是沿帷幕结构中心轴线剖开的 2 个流网图(基坑内和基坑外)的组合,分别计算基坑涌水量 $Q_{坑内}$ 和 $Q_{坑外}$,计算示意图如图 5 所示。根据关系 $Q_{坑内} = Q_{坑外}$,求得 S_w-L_2 、 $Q-L_2$ 关系。

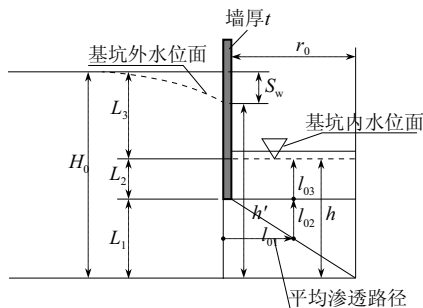


图 5 基坑计算示意图

2.1 基坑外涌水量 $Q_{坑外}$ 计算

按大井简化的均质含水层潜水非完整井的基坑

降水总涌水量可按下列公式计算^[8]:

$$Q_{坑外} = \pi k \frac{H_0^2 - h_m^2}{\ln\left(1 + \frac{R}{r_0}\right) + \frac{h_m - l}{l} \ln\left(1 + 0.2 \frac{h_m}{r_0}\right)} \quad (7)$$

式中: l 取 $h'/3$; $h' = H_0 - S_w$; H_0 为已知数, r_0 也已知。

$$h_m = \frac{H_0 + h'}{2} \quad (8)$$

影响半径 R 宜通过试验确定,缺少试验时,可按下列公式计算并结合当地经验取值:

$$R = 2S_w \sqrt{kH_0} \quad (9)$$

2.2 基坑内涌水量 $Q_{坑内}$ 计算

如图 4 所示,围绕结构中心轴线处和基坑内降水处按等水头边界考虑,其他边界为不透水边界,由于坑内渗流可概化为进口面为圆柱侧面,出口为一圆断面的异型圆管流,并将基坑内渗流区域划分为三部分。

假定渗流在 1、2、3 各区平均作一维达西渗流运动,则按达西渗流定律有:

$$Q_{坑内} = kA \frac{h' - h}{L_0} \quad (10)$$

式中: A 为基坑内平均渗流断面面积, $A = V/L_0$, V 为坑内渗透总体积(含防渗墙以下部分); L_0 为基坑内平均渗透路径总长($L_0 = l_{01} + l_{02} + l_{03}$)。

由于取平均渗透路径,则

$$l_{01} = \frac{r_0 + t}{2}, l_{02} + l_{03} = \frac{2L_2 + L_1}{2}$$

$$\text{带入得: } L_0 = l_{01} + l_{02} + l_{03} = \frac{r_0 + t + L_1 + 2L_2}{2}$$

$$V = \pi r_0^2 (L_1 + L_2) + \pi [(r_0 + t)^2 - r_0^2] L_1 \quad (11)$$

整理得:

$$Q_{坑内} = 4k\pi \frac{\{r_0^2 (L_1 + L_2) + [(r_0 + t)^2 - r_0^2] L_1\} (h' - h)}{(2L_2 + L_1 + r_0 + 2t)^2} \quad (12)$$

由于 r_0 、 L_1 、 L_2 、 t 、 h 均为可知数,仅 $h' = H_0 - S_w$, 含未知数 S_w 。

由关系 $Q_{坑内} = Q_{坑外}$ 得到:

$$\pi k \frac{H_0^2 - h_m^2}{\ln\left(1 + \frac{R}{r_0}\right) + \frac{h_m - l}{l} \ln\left(1 + 0.2 \frac{h_m}{r_0}\right)} = 4k\pi \frac{\{r_0^2 (L_1 + L_2) + [(r_0 + t)^2 - r_0^2] L_1\} (h' - h)}{(2L_2 + L_1 + r_0 + 2t)^2} \quad (13)$$

由于式(13)只有一个未知数 S_w ,故可求解出 S_w-L_2 的关系,结果代入式(7)即可求出 $Q-L_2$ 的关系。将案例数据代入式(13)和式(7)用 Matlab 求出 S_w-L_2 的关系,如图 6 所示, $Q-L_2$ 的关系,如图 7 所示。

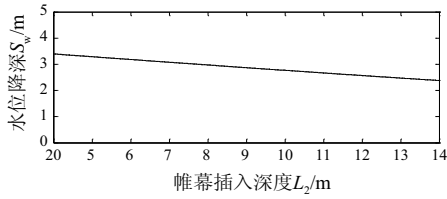


图6 S_w-L_2 关系曲线图

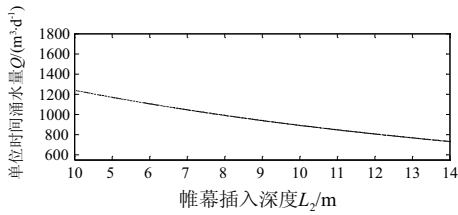


图7 $Q-L_2$ 关系曲线图

从图6、图7可以看出,推导的计算公式计算的关于 S_w-L_2 的关系和 $Q-L_2$ 的关系,随着 L_2 的增加 S_w 、 Q 均呈减小趋势。

3 模型试验

采用模型箱进行悬挂式帷幕基坑地下水渗流模拟,模型箱尺寸为 $2400\text{ mm} \times 1800\text{ mm} \times 1800\text{ mm}$,模型箱中部设置 30 mm 厚有机玻璃来模拟止水帷幕。为实现左右两侧水位恒定,左侧上水箱与模型中坑外侧相连接,右侧排水箱与坑内侧相连接。采用带有刻度的有机玻璃管作为测压管,测压管沿着模型箱一侧均匀布置,通过测压管测量土中各测点地下水压力水头,试验模型如图8所示。采用均质砂土进行试验,为保证模型箱中的砂土比较均匀,采用撒砂进行充填,待砂土固结稳定后开始试验。试验分为八组,前四组 $L_1+L_2=600\text{ mm}$,在基坑内外水头差分别为 $\Delta h=200\text{ mm}$ 、 $\Delta h=400\text{ mm}$ 、 $\Delta h=600\text{ mm}$ 、 $\Delta h=800\text{ mm}$ 条件下,改变帷幕插入深度 L_2 ,测出基坑外最大水位降深和基坑内涌水量。试验结果如图9、图10所示。后四组 $L_1+L_2=700\text{ mm}$,在基坑内外水头差分别为 $\Delta h=200\text{ mm}$ 、 $\Delta h=400\text{ mm}$ 、 $\Delta h=600\text{ mm}$ 、 $\Delta h=800\text{ mm}$ 条件下,改变帷幕插入深度 L_2 ,测出基坑外最大水位降深和基坑内涌水量。试验结果如图11、图12所示。

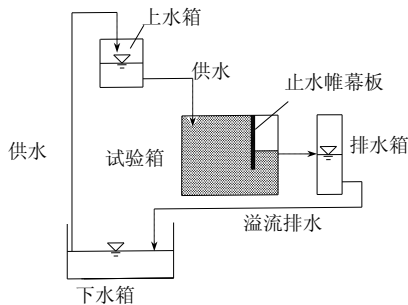


图8 试验模型

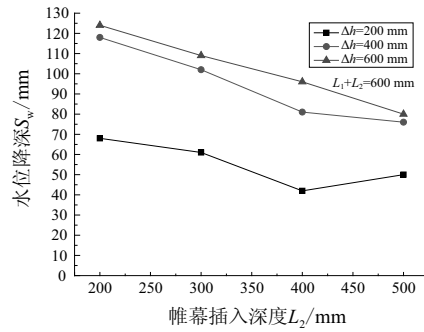


图9 S_w-L_2 关系曲线图

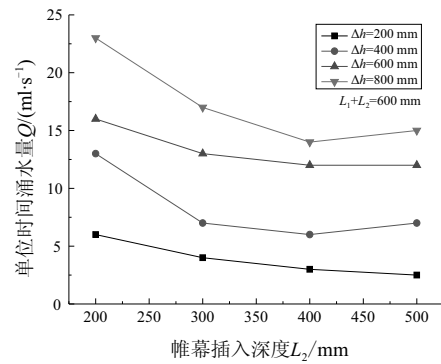


图10 $Q-L_2$ 关系曲线图

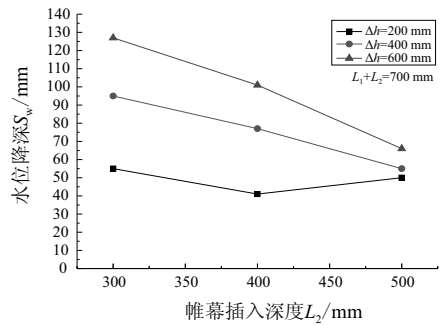


图11 S_w-L_2 关系曲线图

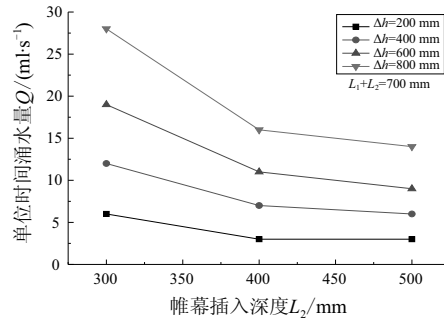


图12 $Q-L_2$ 关系曲线图

从试验结果可以看出,基坑外最大水位降深、基坑涌水量随着帷幕插入深度的增加而减小,与本文提出的方法计算的结果变化趋势基本一致。从试验结果也可以看出,基坑内外水头差越大,基坑外最大水位降深和基坑涌水量变化越大。

4 两种计算方法对比

将大卫登可夫和弗兰克的方法(方法一)计算的圆形基坑与本文提出的方法(方法二)计算的圆形基坑进行了对比,对比结果如图 13、图 14 所示。

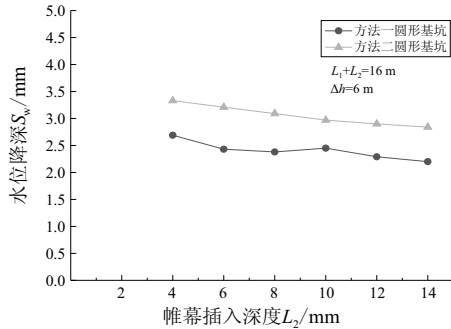


图 13 S_w-L_2 关系曲线图

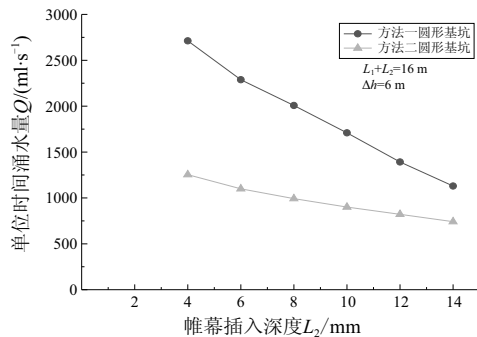


图 14 $Q-L_2$ 关系曲线图

从方法一和方法二计算的结果可以看出,曲线变化趋势基本相同,基坑外最大水位降深和基坑内涌水量随着止水帷幕插入深度的增加而减小,基坑外最大水位降深变化很小,基坑内涌水量变化相对更明显。方法一圆形基坑和方法二圆形基坑计算基坑涌水量相差较大,方法二计算的涌水相对较小。

5 模拟结果分析

采用 Midas/GTS/NX 软件对悬挂式止水帷幕进行渗流过程的数值分析,反映渗流场中水头等势线、基坑涌水量、流速矢量在不同条件下的变化规律,假定降水阶段土体的应力-应变关系符合弹性应力-应变关系,降水前土体在自重作用下已经固结完成^[9-10]。模型为一长条形基坑,基坑宽度为 30 m,长 100 m,帷幕宽度 0.8 m,基坑深度 13 m,隔水层距离基坑顶部 30 m,模型中假定土层均质为各向同性单一土层,渗透系数 5 m/d,在基坑左右水头边界为 22 m,在基底下 1 m 处施加水头边界为 16 m,水从基坑两侧绕过帷幕向坑内渗流。

基坑及周围的水头等势线分布图和基坑涌水量

图如图 15、图 16 所示,从图 15 中可以看出,水头随着离基坑的距离减小而减小,这与悬挂式止水帷幕降水过程中的实际情况一致,过水断面上的水头基本相等,这与本文提出的计算方法的基本假定吻合。从图 16 中可以看出,进水量为正值,出水量为负值,坑底涌水量中间小两边大。从图 17 中可以看出,除帷幕下方小范围内的流速相对较大外,过水断面的其他区域流速趋于稳定并且大小基本相等。

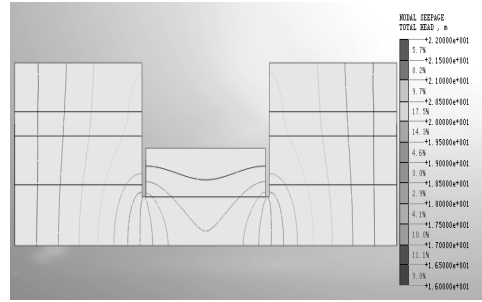


图 15 等势线分布图

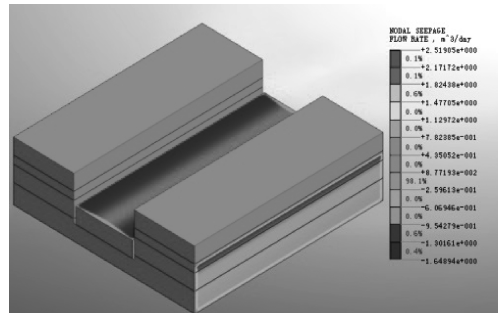


图 16 基坑涌水量云图

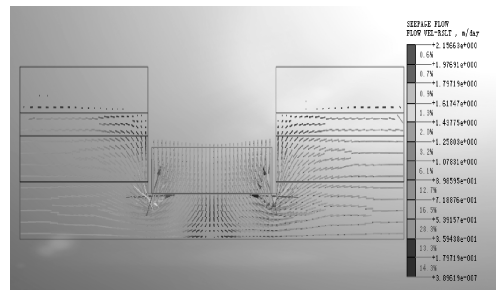


图 17 流速矢量图

在其他条件不变的情况下,设置帷幕插入深度分别为 4 m、6 m、8 m、10 m、12 m、14 m,提取帷幕正下方的水头值,计算出帷幕外的最大水位降深,绘制 S_w-L_2 的关系曲线图,计算基坑内的涌水量,绘制 $Q-L_2$ 的关系曲线图,并将模型分析结果与本文提出的方法的结果进行比较,结果如图 18、图 19 所示。

从图 18、图 19 中可以看出,在帷幕插入深度相同时,数值模拟结果的基坑外最大水位降深和基坑内涌水量与本文提出的计算方法计算结果基本相

同,随着帷幕插入深度增大,坑外水位降深与坑内涌水逐渐减小。

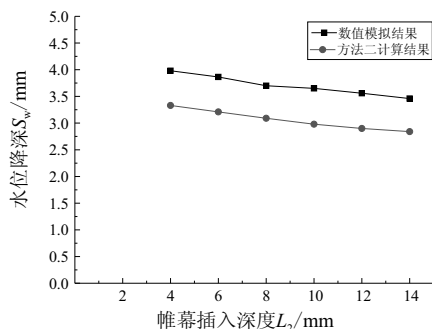


图 18 S_w-L_2 关系曲线图

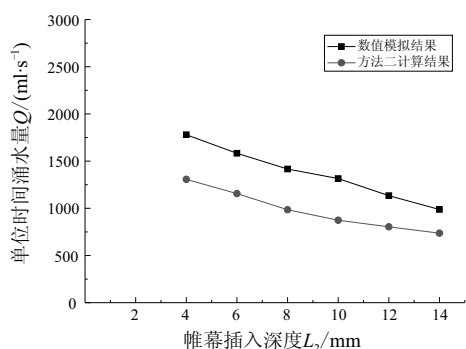


图 19 $Q-L_2$ 关系曲线图

6 结论

帷幕的止水效果比较复杂,与基坑的平面布置形式、基坑内外水头差、透水层的厚度、土的渗透性、止水帷幕的入土深度等都有很大关系。文中采用大卫登可夫和弗兰克的方法对不同形式的基坑进行计算,根据达西定律和大井简化的均质含水层潜水非完整井的基坑涌水量计算公式,推导出来帷幕插入深度与基坑内涌水量、基坑外最大水位降深的关系式。通过以上研究工作,得到以下结论:

1)随着帷幕插入深度增大,坑内涌水量、基坑外最大水位降深呈减小趋势但变化不大。

2)根据大卫登可夫和弗兰克的方法,对于不同形式(其他条件都相同)的基坑,条形基坑的水位降深较大,圆形和方形基坑的水位降深相对较小,圆形和方形基坑的涌水量较条形基坑大。

3)根据达西定律和大井简化的均质含水层潜水非完整井的基坑涌水量计算公式,计算出的坑外最大水位降深比大卫登可夫和弗兰克的计算结果大,但变化趋势基本一致,基坑涌水量与大卫登可夫和

弗兰克的计算结果相差较大。

4)通过室内模型实验,当基坑内外水头差增大,基坑外最大水位降深和基坑内涌水量都增大,与本文提出的计算方法的计算结果变化规律一致。

5)通过系统的数值分析,得出的基坑外最大水位降深、基坑内涌水量和本文提出的计算方法的结果基本相同,变化趋势一致。止水帷幕下方的过水断面水头基本相等,过水断面的流速除帷幕底部小范围流速较大外,过水断面的其他位置流速基本相等,这与公式的基本假定相符。

6)根据帷幕插入深度与基坑内涌水量、基坑外最大水位降深的关系曲线,可以得出在预定坑外最大水位降深和基坑涌水量下的较优悬挂式帷幕的插入深度,使得在兼顾安全、环保和经济的前提下,帷幕插入深度的确定更为科学、合理。

参考文献

- [1] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] 金小荣,俞建霖,祝哨晨,等. 基坑降水引起周围土体沉降性状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1575-1580.
- [3] 郑刚,朱合华,刘新荣,等. 基坑工程与地下安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, 46(6): 5-17.
- [4] 李伟,童立元. 不同地连墙插入深度下降水对周边环境的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊1): 272-277.
- [5] 陆建生. 悬挂式帷幕基坑地下水控制中的尺寸效应[J]. 工程勘察, 2015(1): 51-57.
- [6] Budhu M, Adiyaman I B. Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping [J]. International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, 2010, 34(14): 1459-1478.
- [7] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1995: 164-166.
- [8] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 218-224.
- [9] 姜忻良,宗金辉. 基坑开挖工程中渗流场的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 564-568.
- [10] 王翠英,王家阳. 深基坑降水中不同的地质模型有限元应用研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1259-1264.

收稿日期:2018-03-19