

悬挂式止水帷幕室内模型试验研究

张钦喜, 闫金波, 王成名, 张志红
(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为了准确揭示设置悬挂式止水帷幕条件下基坑的控水规律,采用自行设计研制的模型试验箱开展了室内地下水渗流模型试验,研究帷幕插入深度对基坑内涌水量、降水影响半径、基坑外水位降深和地表沉降的影响. 试验结果表明:以基坑内涌水量、基坑外水位降深和地面沉降为评价指标,帷幕插入深度在 90 ~ 100 cm 之间,悬挂式止水帷幕的控水效果较好;以降水影响半径为评价指标,帷幕插入深度在 80 ~ 90 cm 之间,悬挂式止水帷幕的控水效果较好;坑内与坑外水头损失占总水头损失的比值接近 1:1,帷幕底部小范围内的水头损失占比很小,受帷幕插入深度的影响也比较小. 试验结果可为悬挂式止水帷幕的基坑降水设计提供参考依据.

关 键 词: 悬挂式止水帷幕;涌水量;水位降深;影响半径;地面沉降

中图分类号: TU 740 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)11-1640-06

Study on Indoor Model Test of Suspended Water Curtain

ZHANG Qin-xi, YAN Jin-bo, WANG Cheng-ming, ZHANG Zhi-hong
(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China. Corresponding author: ZHANG Qin-xi, E-mail: Qinxizhang@126.com)

Abstract: In order to accurately reveal the water control law of the foundation pit under the condition of suspended water-stopping curtain, the indoor groundwater seepage model test was carried out to study the influence of the curtain insertion depth on the water inflow in the foundation pit, the influence radius of precipitation, the water level drop outside the foundation pit and the ground settlement. The test results show that taking the water inflow in the foundation pit, the water level drop outside the foundation pit and the ground settlement as evaluation indexes, the curtain insertion depth is between 90 ~ 100 cm, and the hanging water-stop curtain has a good water control effect; taking the influence radius of precipitation as the evaluation index, the curtain insertion depth is between 80 ~ 90 cm, and the hanging water-stopping curtain has a good water control effect; the ratio of water head loss in the pit and outside the pit to total water head loss is close to 1:1. The water head loss in the small range at the bottom of the curtain accounts for a very small proportion and is also less affected by the depth of curtain insertion. The test results can provide reference for foundation pit dewatering design of suspended water curtain.

Key words: suspended water-stopping curtain; water inflow; water level drawdown; radius of influence; land subsidence

在基坑施工过程中,基坑深度在天然地下水位以下时,需要对地下水进行处理,从而保持基坑干燥状态,创造有利于主体结构施工的环境. 目前,地下水的处理方式主要分为止水与降水两种. 止水法即在隔水层相对较浅的情况下,将止水帷幕插入隔水层中,从而完全隔断坑内外的水力联系. 但是,当地下含水层较厚时,止水帷幕止水将大大增加工程的造价与工期,同时随着止水帷幕深度的增加,施工难度也逐渐加大,止水帷幕的质量难以得到保证. 降水法即在基坑周围设置若干

降水井,通过抽水使基坑及其周围区域的自然水位降至坑底以下,以达到地下水处理的目的.但是大量地抽排地下水不仅会造成水资源的严重浪费,同时还将导致基坑周围地面的差异沉降.因此,在一些工况下,采用“止降结合”不失为一种有效的方式.通过悬挂式止水帷幕隔水与坑内降水井疏干相结合,既可以降低工程造价,还可以减少水资源的浪费以及基坑周边的沉降.

悬挂式止水帷幕作为一种绿色经济的控水方案,近年来在工程建设中逐步得到推广和应用,基础研究工作也逐渐加强.在室内试验方面,文献[1-6]通过室内模型试验分析不同埋深和不同挡水截面宽度的地下构筑物对地下水渗流的影响,探讨了各工况下地下水位随时间变化的规律和稳定状态时的水位分布规律;在数值模拟方面,文献[7-9]使用地下水渗流软件,模拟了西安地铁 1 号线通化门车站深基坑降水工程,对有无悬挂式止水帷幕两种工况下的水位降深进行对比,定量地分析悬挂式止水帷幕对基坑降水的影响;在理论分析方面:文献[9-11]根据地下水动力

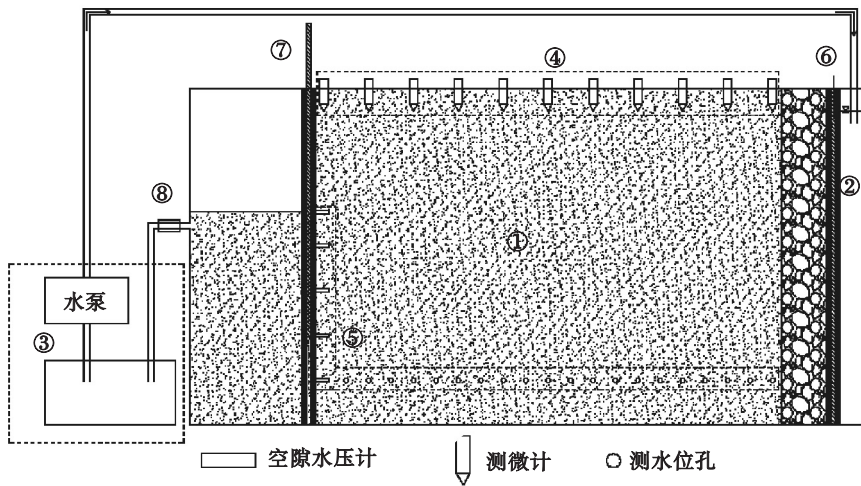
学原理,提出了悬挂式止水帷幕条件下的涌水量计算公式,分析地下水在悬挂式止水帷幕影响下的渗流特征,同时用系统的数值试验对公式进行了精度验证.

限于实际工程中采用悬挂式止水帷幕的工程案例较少,且相关理论研究不足,缺乏帷幕插入深度合理设计的科学依据.本文通过开展室内地下水渗流模型试验,研究了不同帷幕插入深度对基坑内涌水量、基坑外水位降深、降水影响半径、地面沉降量及水头损失的影响,探讨了在不同评价指标下,帷幕插入深度的合理选取方法.

1 室内模型试验

1.1 试验装置

自行设计研制了室内地下水渗流模型箱,试验系统主要由土箱、上水箱、水循环系统、水压监测系统、沉降监测系统、进水过渡板、帷幕挡板、流量计量系统组成.如图 1 所示.



①—土箱; ②—上水箱; ③—水循环系统; ④—沉降监测系统; ⑤—水位监测系统; ⑥—进水过渡板; ⑦—帷幕挡板; ⑧—流量监测系统.

图 1 室内地下水渗流模型试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of indoor groundwater seepage model test system

试验模型箱体由 19 mm 厚钢化玻璃制成,其尺寸(长、宽、高)为 3 m×0.7 m×1.5 m.对土箱四周进行整体加固,共设有三道抱箍、四座钢柱、两条拉梁以及底部一圈钢支撑,以防钢化玻璃在水土合力作用下发生位移变形,进而导致土箱漏水,影响试验结果.左侧上水箱模拟基坑降水影响半径外的定水头边界,右侧开挖部分土体模拟基坑内侧,基坑尺寸(长、宽、高)为 0.7 m×0.5 m×0.5 m.如图 2 所示.



图 2 模型箱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the model box

水压监测系统由 19 个液位计和 10 个孔隙水压力计组成. 液位计排布在土箱外侧,间隔10 cm,通过水箱宝塔接头穿过预留在钢化玻璃上的孔洞与土箱内的观测孔相连. 孔隙水压力计埋置在砂土中,位于基坑外帷幕旁,布设间隔 20 cm. 如图 3 所示.



图 3 水压监测系统
Fig. 3 Water pressure monitoring system

沉降监测系统由 11 根位移测微计组成,位移测微计放置于砂土表面,沿着纵向布置,间隔 20 cm. 如图 4 所示.



图 4 沉降监测系统
Fig. 4 Settlement monitoring system

1.2 试验土样

采用砂土作为本试验土样. 选择适宜的试验土样应当满足以下条件:①保证渗流遵循达西定律;②能够在较短时间内达到渗流稳定. 鉴于此,试验土样选用粒径范围在 0.21 ~ 0.85 mm 之间

的砂粒. 通过筛分法测定的土样颗粒级配曲线如图 5 所示.

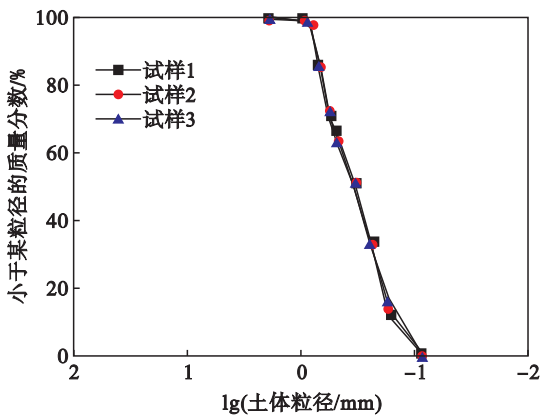


图 5 土体颗粒级配曲线
Fig. 5 Soil particle grading curve

根据土工试验规程,对砂土的物理力学指标天然密度、最大干密度、最小干密度、含水量、渗透系数、压缩模量进行测算. 各项参数结果如表 1 所示.

表 1 砂土各项参数 Table 1 Sand parameters			
土体参数	数值	土体参数	数值
密度/(g·cm ⁻³)	1.77	最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.82
最小干密度/(g·cm ⁻³)	1.67	含水量/%	19
渗透系数/(m·d ⁻¹)	29.8	压缩模量/MPa	36
不均匀系数	5.0	曲率系数	1.08

1.3 试验方案

基坑地下水渗流过程如图 6 所示,右侧上水箱为土箱提供水源,左侧在基坑开挖面以下有溢水口排水,观测井在土箱中均匀排布,与箱外的液位计连接,试验过程中维持上下水头稳定,上水头固定在 1.3 m,下水头固定在 1 m(水头为相对于土箱底部的水位). 持续向上水箱中注水,多余的水从上水箱的溢水口溢出,使上水箱的水位维持在初始水位,打开下游溢水口的阀门,使下游基坑处保持有水流出. 渗流过程中,每隔 10 min 读取一次下游溢水口出水流量,当相邻两次读数不再变化时,即可认为渗流达到稳定状态,读取此时水位监测系统中各点的水位值. 改变帷幕插入深度,可进行下一组试验. 设置帷幕的插入深度分别为 70,80,90,100,110 cm,开展地下水渗流试验,同时考虑无帷幕设计的基坑地下水渗流情况,试验共设计 6 种工况.

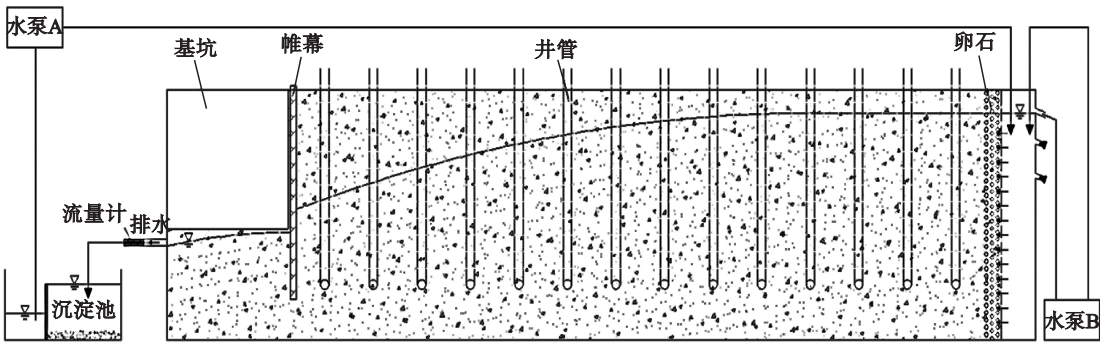


图 6 基坑渗流简图
Fig. 6 Seepage diagram of foundation pit

2 试验结果与分析

2.1 帷幕插入深度对坑外水位降深的影响

根据试验中水位监测系统监测到的数据,得到不同帷幕插入深度下坑外水位的变化规律,如图 7 所示。

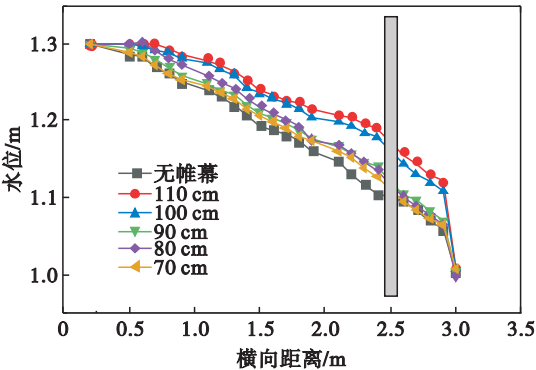


图 7 帷幕插入深度对水位降深的影响
Fig. 7 Effect of curtain insertion depth on water level

从图 7 可以看出,坑外的水位随着帷幕插入深度的增加而呈现减小的趋势.帷幕插入深度每增加 10 cm (70 ~ 110 cm),坑外水位的减小量分别为 0.8, 0.4, 3.9, 1.2 cm.当插入深度在 70 ~ 90 cm 之间 (即 $1.4 D \sim 1.8 D$, D 为基坑开挖深度) 时,对坑外水位降深的减少效果较小;当插入深度在 90 ~ 100 cm 之间 ($1.8 D \sim 2 D$) 时,对坑外水位降深的减少效果显著;当插入深度在 100 ~ 110 cm 之间 ($2 D \sim 2.2 D$) 时,对坑外水位降深的减少效果再次减弱.因此从控制坑水位降深这一因素考虑,合理的帷幕插入深度宜在 90 ~ 100 cm 之间 ($1.8 D \sim 2 D$).

2.2 帷幕插入深度对基坑涌水量的影响

根据试验中流量计量系统测得的数据,得到不同帷幕插入深度下坑内涌水量的变化规律,如

图 8 所示。

从图 8 可以看出,坑内涌水量随着帷幕插入深度的增加而呈现减小的趋势.帷幕插入深度每增加 10 cm (70 ~ 110 cm),坑内涌水量的减少量分别为 0.13, 0.18, 0.57, 0.09 m^3/d .当插入深度在 70 ~ 90 cm 之间 ($1.4 D \sim 1.8 D$) 时,对坑内涌水量的减少效果较小;当插入深度在 90 ~ 100 cm 之间 ($1.8 D \sim 2 D$) 时,对坑内涌水量的减少效果显著;当插入深度在 100 ~ 110 cm 之间 ($2 D \sim 2.2 D$) 时,对坑内涌水量的减少效果再次减弱.因此从控制坑内涌水量这一因素考虑,合理的帷幕插入深度宜在 90 ~ 100 cm 之间 ($1.8 D \sim 2 D$).

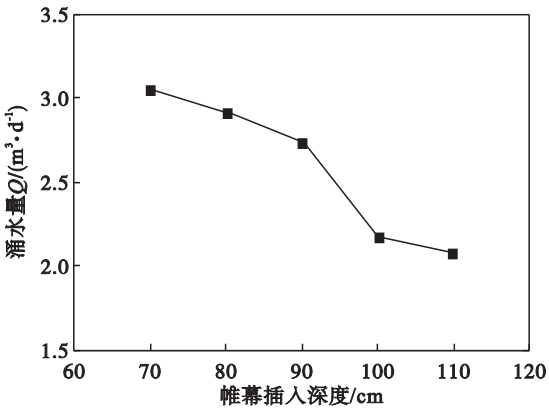


图 8 帷幕插入深度对涌水量的影响
Fig. 8 Effect of depth of curtain insertion on water inflow

2.3 帷幕插入深度对降水影响半径的影响

根据图 7 可以看出,降水所造成的影响随着帷幕插入深度的增加而呈现减小的趋势.但是由于地下水运动具有连续性,而且受室内模型尺寸的限制,所以较难观测到明显的降水漏斗曲线的边界,故设定当坑外水位降深与含水层厚度的比值小于 99% 时,水位降深可忽略不计,由此可得出在室内模型试验中各工况的影响半径结果,如图 9 所示。

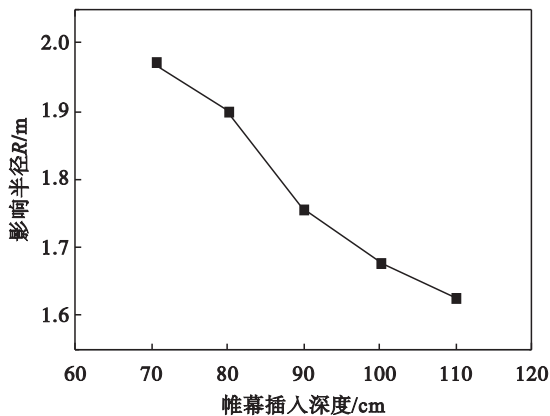


图 9 帷幕插入深度对降水影响半径的影响
Fig. 9 Effect of curtain insertion depth on precipitation radius

从图 9 可以看出,降水影响半径随着帷幕插

入深度的增加而呈现减小的趋势.帷幕插入深度每增加 10 cm (70 ~ 110 cm),降水影响半径的减少量分别为 7.0,14.4,7.9,5.0 cm.当插入深度在 70 ~ 80 cm 之间 ($1.4 D \sim 1.6 D$) 时,对降水影响半径的减小效果较小;当插入深度在 80 ~ 90 cm 之间 ($1.6 D \sim 1.8 D$) 时,对降水影响半径的减小效果显著;当插入深度在 90 ~ 110 cm 之间 ($1.8 D \sim 2.2 D$) 时,对降水影响半径的减小效果逐渐减弱.因此从控制降水影响半径这一因素判断,合理的帷幕插入深度宜在 80 ~ 90 cm 之间 ($1.6 D \sim 1.8 D$).

2.4 帷幕插入深度对坑内外水头损失的影响
根据试验中水位监测系统监测到的数据,得到不同帷幕插入深度下坑内外水头损失的变化规律,如表 2 所示.

表 2 试验各工况坑内外水头损失

Table 2 Water head loss in and out of the pit under different conditions

帷幕插入深度	坑外损失	水头损失比例	帷幕下损失	水头损失比例	坑内损失	水头损失比例
cm	mm	%	mm	%	mm	%
110	70.28	46.06	1.60	1.05	80.71	52.89
100	69.47	43.96	1.59	1.01	86.98	55.04
90	70.51	44.93	0.99	0.63	85.43	54.44
80	71.41	45.79	0.05	0.32	84.04	53.89
70	71.84	46.22	0.41	0.26	83.17	53.51

从表 2 可以看出,在帷幕插入深度 70 ~ 110 cm 范围内,坑外水头损失占总水头损失的 44% ~ 47%,比值随着帷幕插入深度的增加先减小后增大,坑内水头损失占总水头损失的 52% ~ 55%,比值随着帷幕插入深度的增加先增大后减小,帷幕底部小范围内的水头损失占总水头损失的 0.2% ~ 1.1%,比值随着帷幕插入深度的增加逐渐增大.坑内外水头损失比值接近 1:1,且坑内水头损失略大于坑外水头损失.当坑外水头损失达到最小时,即帷幕插入深度在 90 ~ 100 cm ($1.8 D \sim 2 D$) 时,基坑降水对坑外造成的水头影响最小,因此从坑内外水头损失占比这一因素考虑,合理的帷幕插入深度宜在 90 ~ 100 cm 之间 ($1.8 D \sim 2 D$).

2.5 帷幕插入深度对坑外地表沉降的影响

根据沉降监测系统监测到的数据,得到不同帷幕插入深度下坑外地表沉降的变化规律,如图 10 所示.

从图 10 可以看出,坑外地表沉降量随着帷幕插入深度的增加而呈现减小的趋势,且距离帷幕越远,沉降越小.帷幕插入深度每增加 10 cm

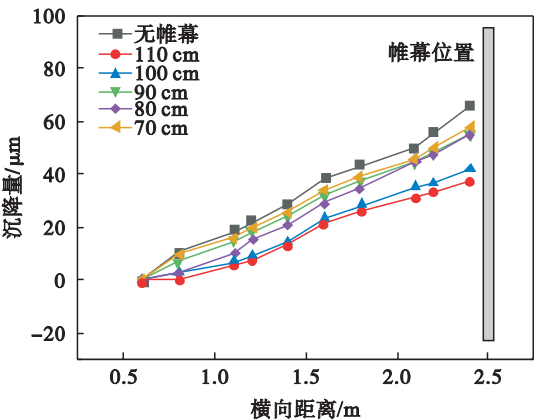


图 10 帷幕插入深度对坑外沉降的影响
Fig. 10 Effect of curtain insertion depth on settlement outside the pit

(70 ~ 110 cm),坑外最大沉降减小量分别为 2.9,0.4,13.33,4.3 μm ,当插入深度在 70 ~ 90 cm 之间 ($1.4 D \sim 1.8 D$) 时,对坑外最大沉降的减少效果较小;当插入深度在 90 ~ 100 cm 之间 ($1.8 D \sim 2 D$) 时,对坑外最大沉降的减少效果显著;当插入深度在 100 ~ 110 cm 之间 ($2 D \sim 2.2 D$) 时,对坑外最大沉降的减少效果再次减弱.因此从控制

坑外最大沉降这一因素考虑,合理的帷幕插入深度宜在 90 ~ 100 cm 之间(1.8 D ~ 2 D).

综合考虑基坑涌水量、降水影响半径、坑外水位降深及地表沉降几个重要参数,建议最适宜的帷幕插入深度为 90 cm(1.8 D).

3 结 论

1) 基坑涌水量、坑外水位降深及地表沉降随着帷幕插入深度的增加而减小,且在帷幕插入深度增加的过程中,涌水量和坑外水位降深的变化量先增大后减小.

2) 降水影响半径随着帷幕插入深度的增加而减小,且在帷幕插入深度增加的过程中,降水影响半径的变化量先增大后减小.

3) 基于试验结果,对于深厚潜水含水层,建议悬挂式止水帷幕插入深度可设计为基坑开挖深度的 1.8 倍.

4) 坑外水头损失占比随着帷幕插入深度的增加先减小后增大,坑内水头损失占比随着帷幕插入深度的增加先增大后减小,坑内与坑外水头损失的比值接近 1:1.

参考文献:

[1] 许烨霜. 考虑地下构筑物对地下水渗流阻挡效应的地面沉降性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
(Xu Ye-shuang. Evaluation of the behavior of groundwater seepage and land subsidence via considering infrastructures penetrated into aquifers [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.)

[2] 郑品, 许烨霜, 沈水龙. 地下结构对含水层挡水作用的室内试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7 (2): 253 - 256, 268.
(Zheng Pin, Xu Ye-shuang, Shen Shui-long. Laboratory investigation on cutoff effect of underground structure to groundwater seepage of aquifer [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7 (2): 253 - 256, 268.)

[3] 张邦带. 基坑工程地下水渗流场特性研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2014.
(Zhang Bang-pei. Study on characteristics of groundwater seepage field in foundation pit engineering [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2014.)

[4] 薛丽影, 杨斌, 刘丰敏, 等. 基坑工程地下水渗流模型试验系统研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (sup1): 126 - 130.
(Xue Li-ying, Yang Bin, Liu Feng-min, et al. Model test system for groundwater seepage in foundation pit engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (sup1): 126 - 130.)

[5] 陈西安. 悬挂式防渗墙防渗效果的模拟试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
(Chen Xi-an. Experimental study on the effect of suspended seepage controlling wall to control seepage failure [D]. Nanjing: Hehai University, 2007.)

[6] 胡静. 软土地区二元结构地层深基坑降低承压水水位室内模型实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2001.
(Hu Jing. Study on decreasing water level of confined water in soft soil two-layer deep excavation through interior model experiment [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2001.)

[7] 汤光明, 王建平, 张紫艳, 等. 悬挂式止水帷幕止水作用的数值分析[J]. 建筑技术开发, 2011, 38 (7): 20 - 22, 32.
(Tang Guang-ming, Wang Jian-ping, Zhang Zi-yan, et al. Numerical analysis of suspended impervious curtain sealing effect [J]. Building Technology Development, 2011, 38 (7): 20 - 22, 32.)

[8] 刘胜利, 蒋盛钢, 曹成勇. 强透水砂卵地层深基坑地下水控制方案比选与优化设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15 (12): 3189 - 3197.
(Liu Sheng-li, Jiang Sheng-gang, Cao Cheng-yong. Comparison and optimization of alternatives to groundwater control for a deep excavation in highly permeable sand and gravel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15 (12): 3189 - 3197.)

[9] 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.)

[10] 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 in depth into stratum on discharge rate and its optimum design [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41 (9): 1390 - 1398.)

[11] 刘庆方, 刘继强, 谭佩莲, 等. 考虑围护结构隔水作用的基坑涌水量计算[J]. 隧道建设, 2013, 33 (2): 142 - 146.
(Liu Qing-fang, Liu Ji-qiang, Tan Pei-lian, et al. Calculation of water inflow of foundation pits considering water insulation effect of retaining structures [J]. Tunnel Construction, 2013, 33 (2): 142 - 146.)