

DOI: 10.11779/CJGE2017S1025

基坑工程地下水渗流模型试验系统研究

薛丽影^{1,2}, 杨斌^{1,2}, 刘丰敏^{1,2}, 张邦蒂^{1,2}, 王昆泰^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院地基所, 北京 100013; 2. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013)

摘要: 设计了符合基坑工程条件的模型试验系统, 可以模拟基坑地下水渗流。模型试验系统由土箱、排水箱、进水箱、上水箱、下水箱、测压装置等组成。通过给定进水箱与排水箱的水位可以实现基坑内外水头恒定, 从而形成稳定的渗流。利用模型试验系统已经完成的试验为悬挂式截水帷幕基坑地下水渗流以及完整井条件下的层状含水层渗流, 获得与实际工程相符的渗流流网形态, 用来研究地下水渗流场的特征和规律。试验结果可指导实际工程设计, 同时可以用来修正基坑规程中地下水涌水量、坑外水位降深以及降水引起的沉降计算等。

关键词: 地下水渗流; 模型试验; 悬挂式截水帷幕; 弱透水夹层

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)S1 - 0126 - 06

作者简介: 薛丽影(1978 -), 女, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: xlydjs@163.com。

Model test system for groundwater seepage in foundation pit engineering

XUE Li-ying^{1,2}, YANG bin^{1,2}, LIU Feng-min^{1,2}, ZHANG Bang-fu^{1,2}, WANG Kun-tai^{1,2}

(1. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China)

Abstract: The model test system designed is in accordance with the conditions of foundation pit engineering, which can simulate the groundwater seepage. It is composed of a soil box, a drainage box, a feed-water tank, an upper water tank, a lower water tank and a pressure measuring device. It can get the constant water head inside and outside the foundation pit by changing the water level in the feed-water tank and the drainage box, and thus forming stable seepage. The model test system is used to complete the tests on groundwater seepage of foundation pit with unclosed curtain of cutting-off drains and the groundwater seepage of completely penetrating well in stratified aquifers. The seepage shape gained is consistent with the actual situation, and it is used to study the characteristics and laws of groundwater seepage fields. The test results can guide the actual engineering design, and can be used to modify the calculation of water inflow, the water level drawdown outside the foundation pit and the settlement caused by precipitation in foundation pit specifications.

Key words: groundwater seepage; model test; unclosed curtain of cutting-off drain; aquitard

0 引言

地下水渗流控制是基坑工程中的一重要安全控制技术。目前, 常用的基坑渗流问题分析方法主要包括理论分析法和试验分析法。试验分析法可用于渗流基本理论研究或验证数值计算结果。

许焯霜^[1]应用室内试验研究了地下构筑物对多层含水层的渗流阻挡效应及其对城市地面沉降的影响机理。曹杰^[2]通过砂槽模型试验研究了悬挂式防渗墙防渗效果。但用于研究基坑渗流的模型试验并不多见, 为研究适应基坑条件下的地下水渗流问题, 本文研制了地下水渗流试验系统。该系统可模拟不同地质条件下基坑的分步开挖, 以及模拟截水或者降水条件下的基坑地下水渗流。

1 试验装置的研制思路

1.1 渗流模型试验的原理

试验装置主要由土箱、进水箱、排水箱、测压管、上水箱、下水箱、水力固结系统等组成。图1为渗流模型试验的原理图, 土箱右侧为基坑外侧, 左侧为基坑内侧, 右侧进水箱作为基坑补给水源, 左侧排水箱作为基坑开挖侧溢流槽。上水箱向进水箱进行补给, 进水箱保持恒定水头, 向土中侧向补给水, 水渗流通过土体后流入土箱左侧排水箱, 排水箱中水位与基坑内开挖面土体保持一致, 从土箱中渗流出的水流回下水箱。由于将基坑地下水渗流简化为二维渗流场, 故可以通过土箱上的测压管来测读基坑中水头, 从而得

到基坑中渗流场分布。

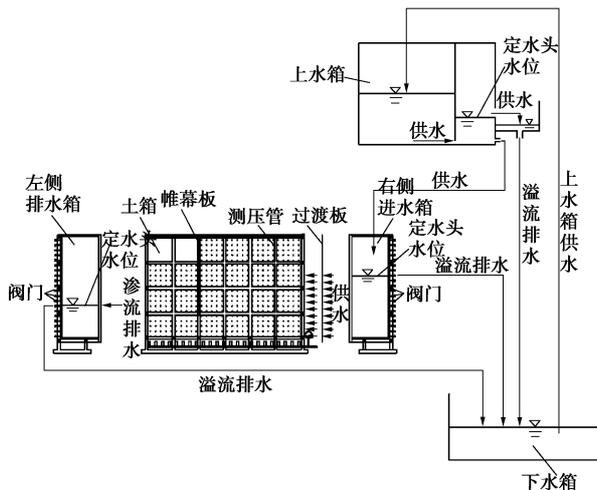


图 1 渗流模型试验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of seepage model tests

1.2 试验装置需满足的要求

该渗流试验系统需要满足以下基本要求:

(1) 为得到坑内外不同的水头差对基坑渗流场的影响, 需满足基坑内外的水头分别可调, 从而基坑内外的水头差能够人为控制, 并且基坑内外的水头设定后能够保持恒定, 在基坑内土体中形成稳定的渗流。

(2) 进水箱及排水箱能向土箱供水和排水, 但土颗粒不能向进水箱及排水箱渗漏。

(3) 渗流过程中, 能够方便、准确测得土中压力水头, 从而得到试验条件下的基坑渗流场。

(4) 试验系统密封性好, 不会引起不必要的水头损失; 由于试验用水量较大, 试验水路能自动循环, 以节约用水。

(5) 对于砂性土的试验, 能够采用水力固结, 使填料均匀密实。

(6) 能够在土箱内设置截水帷幕, 模拟有悬挂式帷幕基坑的地下水渗流; 通过调节截水帷幕的插入深度, 得到截水帷幕插入深度对渗流场的影响。

2 渗流模型试验装置

2.1 基坑内外水头的控制

(1) 定水头的控制

如图 2 所示, 土箱尺寸为 2.4 m×0.8 m×1.8 m (高), 左右两侧分别设置水箱与土箱连接, 水箱尺寸为 0.8 m×0.8 m×1.8 m (高), 右侧进水箱模拟基坑外侧, 左侧排水箱模拟基坑内侧。如图 3 所示, 水箱连接土箱一侧开设间隔 10 mm 的圆孔, 圆孔中设置螺栓, 其内径为 5 mm, 作为地下水渗流通道, 两侧水箱通过调节各排阀门确定水箱中水位, 用来模拟基坑

渗流坑内外水头。如图 4 所示, 阀门的间距为 10 cm, 通过开关阀门可设定水位, 并保持水位恒定。土箱及水箱箱壁选用有机玻璃, 外侧设置方形钢筋加固, 经计算, 有机玻璃板的最大变形小于 1 mm。

(2) 渗流损失分析

渗流过程中, 右侧进水箱通过螺栓向土箱中补给水, 因总渗流量较少, 螺栓中的水流速度较慢, 根据海曾-威廉公式^[3], 螺栓孔中满流时, 沿程损失为

$$h_f = 10.67 \frac{Q^{1.852} L}{C_w^{1.852} D^{4.87}} \quad (1)$$

式中, h_f 为沿程水头损失 (m³/s), Q 为流量 (m³/s), L 为管道长度 (m), D 为管道内径 (m), C_w 为海曾-威廉粗糙系数, 新铸铁管取 130。

试验时, 基坑渗流量最大不超过 30 mL/s, 设其全部从一排螺栓孔流过, 螺栓孔长为 5 cm, 螺栓孔内径 5 mm, 通过螺栓孔的沿程损失最大为 0.93 mm。通过螺栓孔后, 过渡板内水头与右侧进水箱内水头近似相等, 试验时基坑内外水头差最小为 20 cm, 定水头误差最大为 0.465%, 在本试验中可以忽略不计。



图 2 土箱、进水箱与排水箱

Fig. 2 Soil box, feed-water box and drainage box



图 3 水箱连接土箱侧面

Fig. 3 Side of soil box connected to water tank



图4 水箱外侧设置阀门

Fig. 4 Valve outside water tank

2.2 水头测量装置

如图5所示,土箱观测面的有机玻璃上开设圆孔,并在圆孔中安装内径5 mm的中空螺栓,螺栓上装有排气用的三通和球阀,测压管通过软流体管与球阀连接。如图6所示,测压管间隔10 cm,均匀分布在箱体侧面,可测得箱体剖面各点水头。渗流过程中每隔一小时读取测压管水头,渗流达到稳定状态后,可进行下一组试验。



图5 测压管与箱体连接

Fig. 5 Connection of pressure tube and box

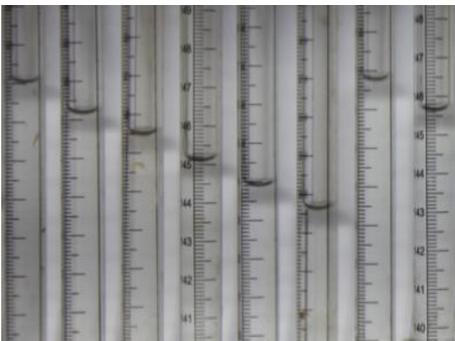


图6 测压管

Fig. 6 Pressure tube

2.3 循环至渗流稳定的实现

水力固结或者渗流试验时,为防止由于供水不及时而影响试验结果,同时也为了节约用水,试验水路

实现了自动循环。如图1所示。

2.4 水力固结

水力固结的目的是避免分层填料时导致土体分层,提高填土的密实性与均匀性。如图7所示,土箱中填好土后,由上水箱向土箱顶盖供水,水从顶盖底侧的孔均匀流入土箱中,水渗流通过填土,由土箱底流出,汇入下水箱,再通过潜水泵将下水箱水输送到上水箱,形成回路,最终使得试验填土固结。水力冲填过程中,封闭两侧水箱,防止水溢出。为保持渗透固结压力恒定,即土中水力梯度恒定,要求上水箱中水头保持恒定,由上水箱中设置的溢流排水通道实现。

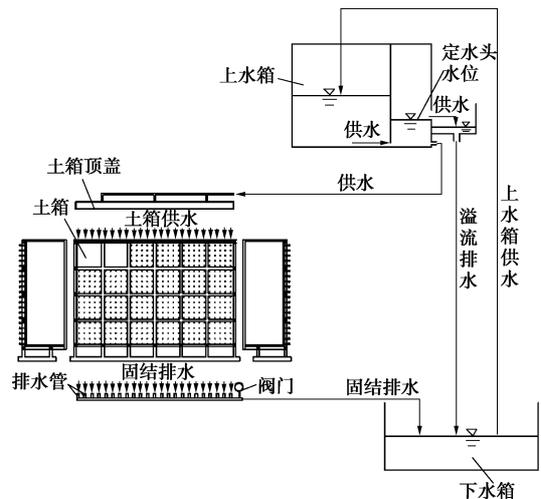


图7 水力固结原理

Fig. 7 Principle of hydraulic consolidation

2.5 悬挂式帷幕的模拟

如需模拟有悬挂式帷幕的基坑渗流,可在模型箱中设置有机玻璃以模拟截水帷幕,通过调节有机玻璃下端净高度,用来模拟截水帷幕的过水断面距离。

3 试验装置完成的试验

3.1 悬挂式帷幕基坑地下水渗流试验^[4]

(1) 试验方案

基坑开挖如遇隔水层埋藏相对较深,选用悬挂式截水帷幕时,坑内外地下水未能隔断。若基坑周围有建筑物,需考虑地下水位降低造成地层沉降对周围环境的影响。目前基坑规程中地下水涌水量及坑外水位降深计算方法并未考虑悬挂式截水帷幕的影响^[5],为研究设置悬挂式截水帷幕的情况下,基坑地下水水位下降量及影响地下水位下降的因素,本文利用该试验系统完成了悬挂式帷幕基坑地下水渗流试验。

基坑渗流简图如图8所示,模型箱右侧进水箱作为补给水源,左侧排水箱根据基坑开挖深度确定出水口的位置,截水帷幕左侧可分步开挖。如图9所示,帷幕板下端与箱底的距离 M ,模拟帷幕下端过水断面,

通过调节帷幕板的固定高度, 研究过水断面厚度 M 对地下水渗流的影响; 坑内帷幕板插入土中的深度 D , 模拟帷幕插入深度, 通过改变坑内土的深度 D_0 , 研究其对地下水渗流的影响; 左右两侧水箱的水头差 Δh , 模拟基坑内外水头差, 通过调节两侧水箱的水头差 Δh , 研究基坑内外水头差对地下水渗流场的影响。试验共分 4 组 64 个工况。

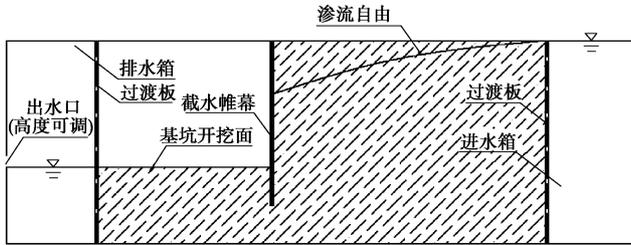


图 8 基坑渗流简图

Fig. 8 Diagram of seepage in foundation pit

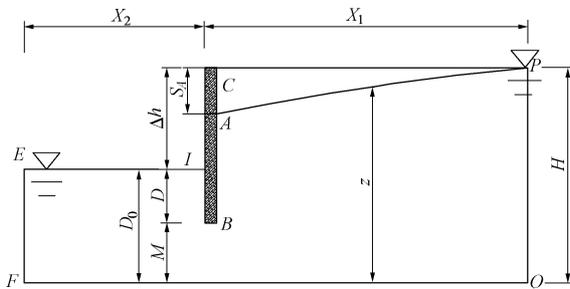
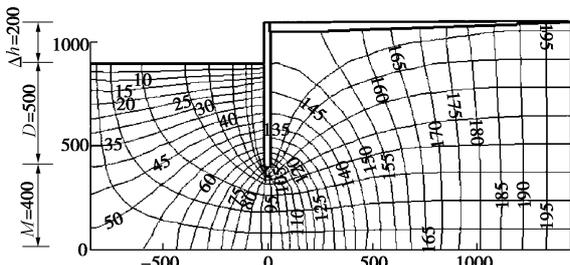


图 9 参数示意图

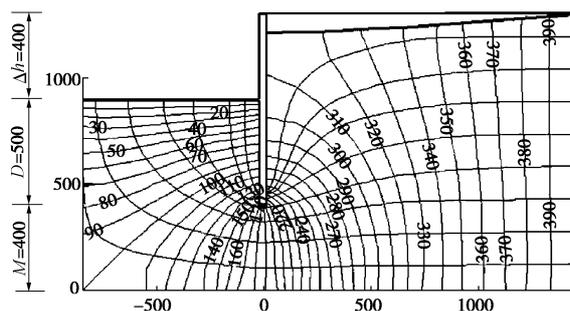
Fig. 9 Sketch map of parameters

(2) 试验结果

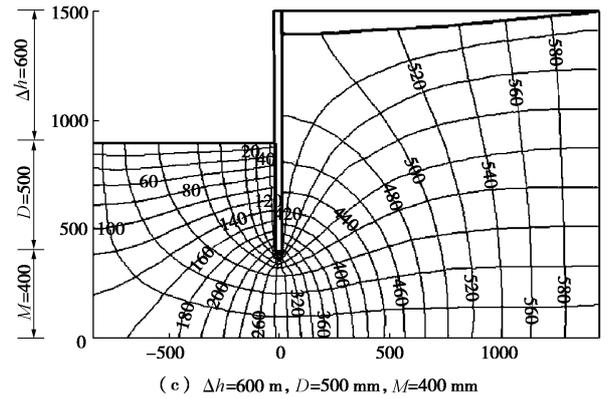
根据试验系统的水头测量装置, 实测出各点水头高度, 汇出流网。图 10 为部分工况下实测的流网变化规律, 根据流网可进一步分析帷幕插入深度、水头差等对水位降深及基坑渗流量的影响。



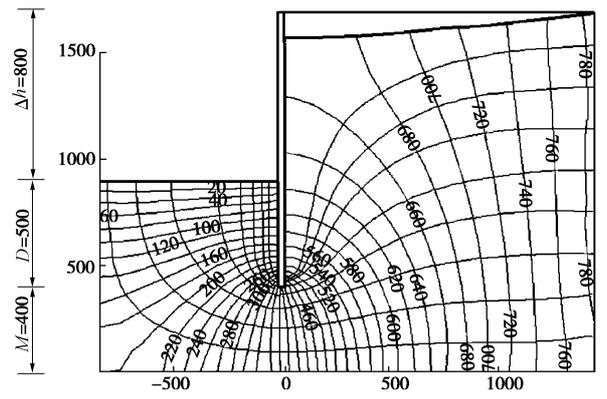
(a) $\Delta h=200$ m, $D=500$ mm, $M=400$ mm



(b) $\Delta h=400$ m, $D=500$ mm, $M=400$ mm



(c) $\Delta h=600$ m, $D=500$ mm, $M=400$ mm



(d) $\Delta h=800$ m, $D=500$ mm, $M=400$ mm 单位: mm

图 10 部分工况下实测流网分布

Fig. 10 Seepage shapes of part tests

3.2 层状含水层基坑渗流试验^[6]

(1) 试验方案

目前, 基坑工程设计中对层状含水层的处理方法通常将渗透系数加权平均, 简化为均质土或者分层单独计算^[7], 不考虑层间渗流补给, 这样将导致水位降深计算的不准确, 不能得到层状土的实际水位降深。本文利用该模型试验系统完成了基坑层状含水层地下水渗流试验, 得到基坑层状含水层在层间渗流补给下的渗流规律。

土箱中土层共分 3 层, 由下到上依次为: 细砂含水层 (厚 800 mm)、弱透层 (厚 200 mm) 和细砂含水层 (厚 600 mm), 如图 11 所示。为了获得不同渗透系数的弱透层对层状含水层渗流场的影响, 分别采用了黏土、粉土、粉砂模拟弱透层, 同时为了对比分析, 设计一箱均质砂土试验, 试验共分 4 组, 如表 1 所示。

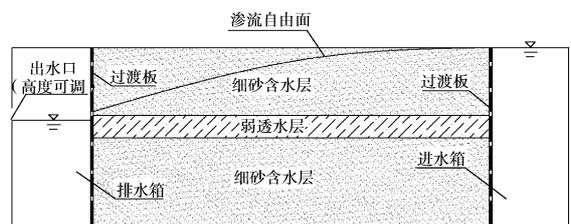


图 11 基坑渗流简图

Fig. 11 Diagram of seepage in foundation pit

表 1 弱透水层土性

Table 1 Soil properties of aquitard

试验编号	第一组	第二组	第三组	第四组
弱透水层土性	黏土	粉土	粉砂	细砂

试验时进水箱水位保持 H_1 恒定,通过逐步降低排水箱内水位 H_2 形成水头差 Δh ,模拟完整井基坑降水,测试不同水头差时层状含水层的渗流场。试验共分 64 个工况。

(2) 试验结果

图 12 为不同弱透水层条件下水头差 $\Delta h = 1200$ mm 时完整井的流网。由图可以看出对于层状含水层的渗流流网与均质含水层区别较大。随着弱透水层渗透系数的减小,弱透水层内的等水头线发生转折越明显。弱透水层渗透系数越小上层含水层对下层的补给越弱,故相同坐标处的上层含水层水位越高,而下层含水层水位越低。

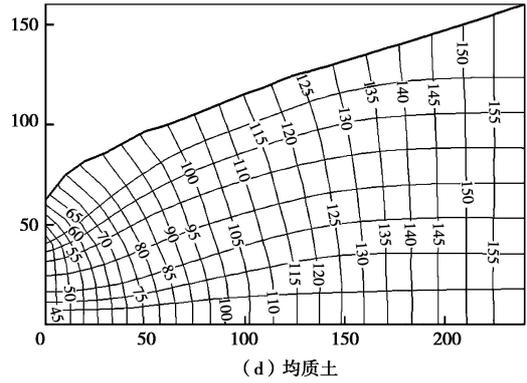


图 12 不同弱透水层的流网 ($\Delta h = 1200$ mm)

Fig. 12 Seepage shapes of different aquitards ($\Delta h = 1200$ mm)

4 结 论

(1) 本文设计了符合基坑工程条件的模型试验系统,通过给定进水箱与排水箱的水位可以实现基坑内外水头恒定,从而形成稳定的渗流,可以模拟基坑地下水渗流。

(2) 利用该模型试验系统已经完成的试验之一为悬挂式帷幕基坑地下水渗流,通过实测的流网变化规律,可分析得到帷幕插入深度、水头差等对水位降深及基坑渗流量的影响。

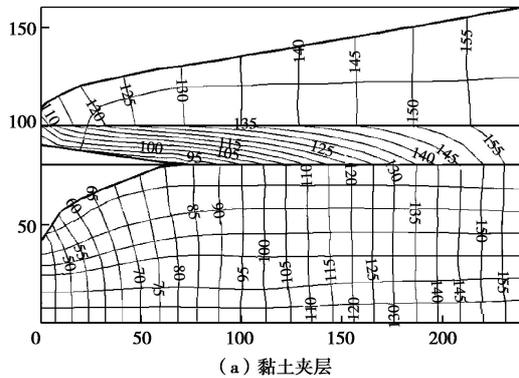
(3) 利用该模型试验系统已经完成的试验之二为完整井条件下的层状含水层渗流,获得与实际工程相符的渗流流网形态,得到基坑层状含水层在层间渗流补给下的渗流规律。

(4) 试验结果可指导实际工程设计,同时可用来修正基坑规程中地下水涌水量、坑外水位降深以及降水引起的沉降计算等。

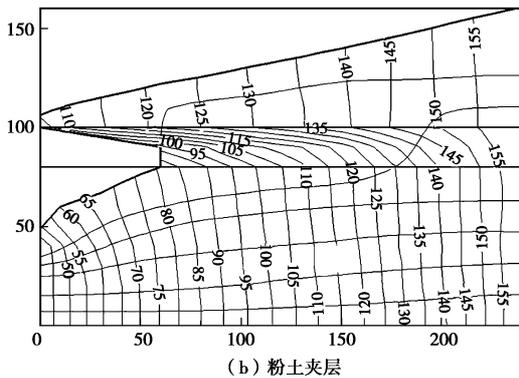
参考文献:

[1] 许焯霜. 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 behaviour of groundwater seepage and land subsience via considering infrastructures penetrated into aquifers[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. (in Chinese))

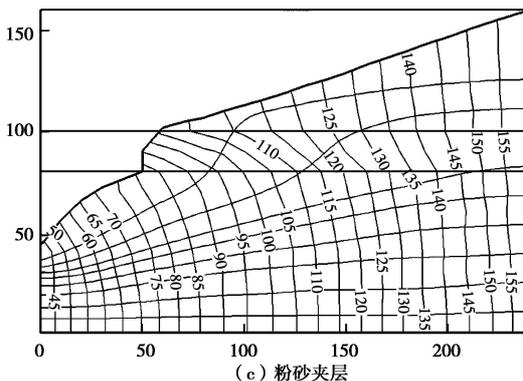
[2] 曹 杰. 悬挂式防渗墙防渗效果的模拟试验研究[J]. 山西建筑, 2011(25): 223 - 224. (CAO Jie. Research on simulation test of seepage resistance effect for suspended diaphragm wall[J]. Shanxi Architecture, 2011(25): 223 - 224. (in Chinese))



(a) 黏土夹层



(b) 粉土夹层



(c) 粉砂夹层