

# 潜水层基坑降水引起地表沉降试验与理论研究

杨清源<sup>1, 2</sup>, 赵伯明<sup>1, 2</sup>

(1. 北京交通大学 城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 为研究基坑内外含水层未完全隔离条件下基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降变化机制, 以深圳地铁综合枢纽基坑工程为研究实例, 选取深圳典型潜水地层, 采用模型试验方法, 结合理论分析, 揭示潜水地层不完整井降水有效影响深度和坑外土层孔隙水压变化规律, 分别提出不完整井降水有效影响深度、坑外水位变化曲线和绕渗区划分计算公式。基于提出的理论公式, 研究提出基坑外地表沉降简化计算方法, 理论计算地表沉降曲线变化趋势与试验结果基本吻合, 但理论结果偏于保守, 因此进一步利用绕渗区渗流作用原理对简化方法进行修正, 有效提高了理论计算精度, 分析对比现场监测数据, 结果表明该方法具有较高的工程实用价值。上述研究成果可为类似潜水地层基坑工程降水设计、施工提供参考。

**关键词:** 基坑工程; 潜水; 基坑降水; 模型试验; 有效影响深度; 降水曲线; 地表沉降

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)06 - 1506 - 14

## Experimental and theoretical study on the surface subsidence by dewatering of foundation pit in phreatic aquifer

YANG Qingyuan<sup>1, 2</sup>, ZHAO Boming<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The ground surface subsidence outside the foundation pit caused by the incomplete well dewatering in the foundation pit under the condition that the aquifer inside and outside the foundation pit is not separated completely is studied in the foundation pit in Shenzhen Metro hub by means of the model tests and theoretical analysis. The effective depth due to incomplete well dewatering in the phreatic water stratum and the variation of the soil pore water pressure outside the foundation pit are revealed. The calculation formulas for the effective depth due to the incomplete well dewatering, the varying curve of water level outside the foundation pit and the percolation zone partition are put forward respectively. A simplified calculation method for the surface subsidence outside the foundation pit is proposed. The theoretically calculated trend of the surface subsidence curve is basically consistent with the measured results. However, the theoretical results tend to be conservative. Therefore, the simplified method is revised further by using the seepage principle of a by-pass seepage zone,

**收稿日期:** 2017 - 12 - 18; **修回日期:** 2018 - 02 - 26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51778046); 国家自然科学基金高铁联合基金重点资助项目(U1434210); 深圳地铁集团科研项目(SZ-CGM-KY001/2014)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51778046), High-speed Rail Joint Fund of National Natural Science Foundation of China(Grant No. U1434210) and Scientific Research Projects of Shenzhen Metro Group(Grant No. SZ-CGM-KY001/2014)

**作者简介:** 杨清源(1988 -), 男, 2013 年于大连大学建筑工程学院结构工程专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。E-mail: yqingyuan123@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1611

which improves effectively the precision of theoretical calculation. Finally, the comparison between the in-situ monitoring data and theoretical calculated results shows that the proposed method is applicable in practical engineering.

**Key words:** foundation pit engineering; phreatic water; dewatering of foundation pit; model test; effective influencing depth; precipitation curve; surface subsidence

## 1 引言

近年来,随着基坑工程深度和数量增加,基坑降水程度也将增大,基坑降水过程对周围土体变形影响也愈加突出。目前,国内外学者在基坑降水引起地表变形研究领域取得了一定成果,李琳等<sup>[1]</sup>提出了计算基坑内疏干降水引起地表沉降的简化算法,黄雅虹等<sup>[2]</sup>提出了特定区域基坑降水引起地表沉降的评估方法,原华等<sup>[3]</sup>提出了侧摩阻力约束下降水引起地面沉降的估算方法,王建秀等<sup>[4]</sup>提出了地铁车站深基坑降水诱发沉降的计算方法,吴意谦和朱彦鹏<sup>[5]</sup>提出了考虑疏干带非饱和土影响下基坑降水引起地面沉降的计算方法,R. Debasis 和 E. R. Keith<sup>[6]</sup>进行了基岩排水引起软土地表沉降研究,这些学者在开展研究过程中基坑内外降水引起基坑外土层疏干区划分均以 Dupuit 理论降水曲线<sup>[7-8]</sup>为基础。实际上当含水层厚度较大且基坑内降水时,常因经济技术条件限制地连墙无法将基坑内外含水层完全隔离,基坑内降水井也主要为不完整井,降水会对井底部一定深度地下水产生影响,同时基坑外地连墙附近地下水发生水平和竖直 2 个方向上的运动<sup>[9-10]</sup>,导致坑外实际降水曲线与 Dupuit 理论降水曲线形式存在差异,进而影响基于 Dupuit 理论降水曲线计算地表沉降方法的准确性,可见通过分析基坑降水引起水位变化机制,较准确地计算地连墙底部出现地下水绕渗引起坑外地表沉降变化具有重要实际意义。

本文以深圳地铁综合枢纽基坑工程为背景,选取深圳典型潜水地层,通过设计模型试验,结合理论分析,首先对不完整井降水有效影响深度变化规律以及基坑外的水位变化机制进行研究,提出有效影响深度、坑外降水曲线和绕渗区划分计算方法,然后基于上述计算理论公式,对基坑外地表沉降简化计算方法进行了推导,并在考虑绕渗区渗流作用影响基础上对简化方法进行修正,从而得到更准确

的坑外地表沉降计算结果。

## 2 室内模型试验设计

### 2.1 工程背景

模型试验以深圳综合枢纽基坑工程为背景,基坑范围地层为典型潜水地层,即从上至下依次分布为粉质黏土层、砾质黏性土层、全风化花岗岩层和强风化花岗岩层。实际地层与降水和地表沉降相关的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 实际地层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of the actual strata

实际地层	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	黏聚力/ kPa	渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	孔隙 比	压缩模 量/MPa
粉质黏土	1.95	19	24	0.1	0.90	8.03
砾质黏性土	1.76	18	27	0.5	0.99	8.87
全风化花岗岩	1.85	21	28	1.0	0.91	16.05
强风化花岗岩	1.88	24	26	3.0	0.80	14.77

### 2.2 地层材料设计

确定几何相似常数  $C_l = 1/50$ , 密度相似常数  $C_\rho = 1$ , 重力加速度相似常数  $C_g = 1$ 。基于 3 种物理量,通过传统量纲分析法<sup>[11]</sup>可得到与本试验相关相似常数。模型试验选取 40 目、150 目和 300 目石英砂粉<sup>[12-13]</sup>,按照不同质量配比得到满足相似比例配比结果,如表 2 所示。

表 2 相似地层物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of the similar strata

相似地层	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	黏聚力/ kPa	渗透系数/ ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	孔隙 比	压缩模 量/MPa
粉质黏土	1.93	19	0.46	0.015	0.92	2.13
砾质黏性土	1.78	18	0.62	0.070	0.98	2.16
全风化花岗岩	1.83	22	0.56	0.150	0.91	2.62
强风化花岗岩	1.88	25	0.49	0.430	0.83	3.24

需要注意模型试验相似材料配比时，压缩模量并不严格满足相似比，但由于其他参数均已满足，且地下水位变化与压缩模量无关，因而并不影响不完整井有效影响深度变化规律和坑外水位变化机制的研究，也不影响后续降水引起坑外地表沉降机制研究和验证。

### 2.3 地下连续墙结构相似材料设计

实际工程中地下连续墙采用的钢筋混凝土弹性模量为 35 GPa，泊松比为 0.167，由分离相似设计理论<sup>[14]</sup>，试验中基坑地下连续墙结构相似材料选用有机玻璃材料，其弹性模量为 3.1 GPa，泊松比为 0.25，根据抗弯刚度相似等效原则，实际地下连续墙厚度为 1 000 mm，则模型有机玻璃板厚度为 11 mm。

考虑试验研究重点是基坑内不完整井降水引起基坑外地表沉降变化，在满足降水井与基坑地连墙间距以及降水井相互间距与实际工程几何相似比为 1 : 50 基础上，选取部分车站基坑结构开展试验研究。图 1 为基坑内降水井布置。

### 2.4 试验模型箱设计

试验模型箱主体部分尺寸长 2 m，宽 1.8 m，高

1.2 m，四周均有补水箱，补水箱与主体部分由带微小孔洞隔板相隔。隔板厚度为 5 cm，隔板开孔面积占总面积的 48%，试验土层最大孔隙率为 44%，可通过调节隔板开孔数量，达到与土层孔隙率一致，满足对试验土层稳定渗流供水，形成定水头边界条件，同时在补水箱中加入中空圆柱状支撑，以保证在整个试验过程中隔板不发生变形。

### 2.5 试验降水系统设计

降水井管与观测井管均采用外径为 20 mm 的 PVC 线管制成，整个抽水系统分为抽水泵、抽水管、抽水量控制阀门和抽水过滤网组成，如图 2 所示。

### 2.6 试验监测仪器

模型试验中采用地孔隙水压计型号为 WTBKXSY - 10，厚度为 12.95 mm，外径为 13.18 mm，最大量程为 10 kPa，精度为 0.001 kPa。地表位移计型号为 WTBWYJ - 5，最大量程为 5 mm，精度为 0.001 mm，位移计主要由粘贴在方形中空钢管下表面的磁力盒固定于地表，位移计探头与地表处垫片接触，当地表位移发生变化时，位移计测得数据通过型号为 GM3813 数据采集仪反馈于电脑直接读取数据。

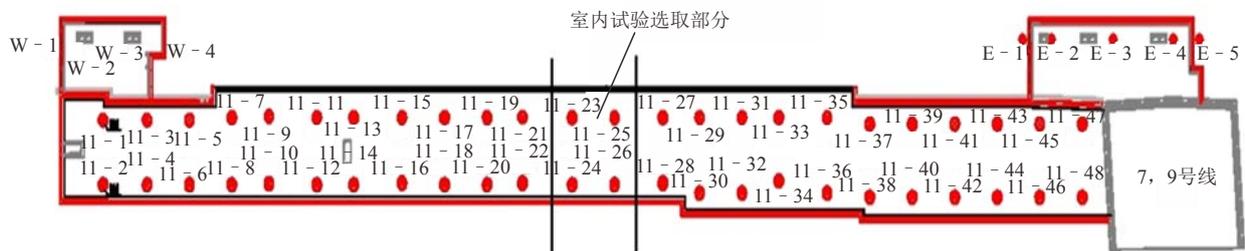


图 1 基坑内降水井平面布置

Fig.1 Arrangement of the dewatering wells in the foundation pit

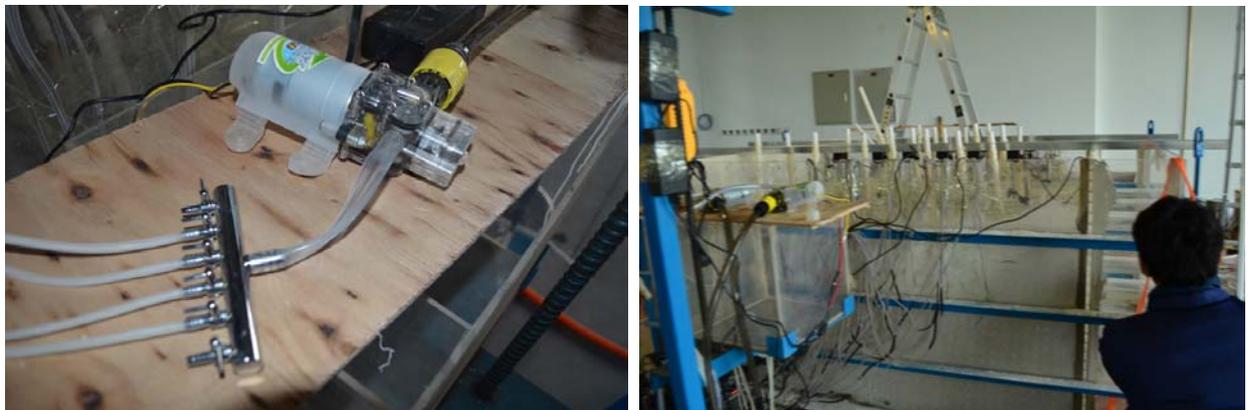


图 2 抽水系统设计

Fig.2 Pumping system design

### 3 不完整井有效影响深度研究

#### 3.1 试验过程及结果分析

基坑内不完整井降水模型试验平面布置图和剖面图如图 3~5 所示,在整个降水过程中始终保持补水箱内水位位于地表初始水位。

选择砾质黏性土相似地层开展试验,为忽略基坑开挖对水位影响,试验均模拟基坑开挖前降水过程。试验过程如下:

将预先配比完成地砾质黏性土相似土样缓缓铺入箱体中。装填时每铺设 10 cm 地层材料,即刻进行地层夯实,每平方米的夯实的次数和夯击力与

节 2.2 相似材料试验一致,以保证土层的物理参数稳定。每当填筑到试验仪器、基坑围护结构和降水管理置深度时,将箱底排水管均连接到高处水箱,通过高处水箱向试验箱内注水,注水速度可通过箱底排水管口阀进行调节,保证流速平稳,不易过快,使土层自下而上饱和,土层内饱和后会产生一定的沉降变形,需要继续填入,经过 1~2 次饱和与补填后方可进行监测仪器和土样的继续装填和安装,其中测点 1 和 2 处孔隙水压计为相互交错排列(共 3 列),直至装填土样至要求高度 1.1 m。土层固结时四周水箱和主体箱均保持 1.1 m 高水位,地层在自重作用下固结,待土层地表沉降观测点位移计读数变化小于 0.001 mm/d 表明土层固结基本完成。

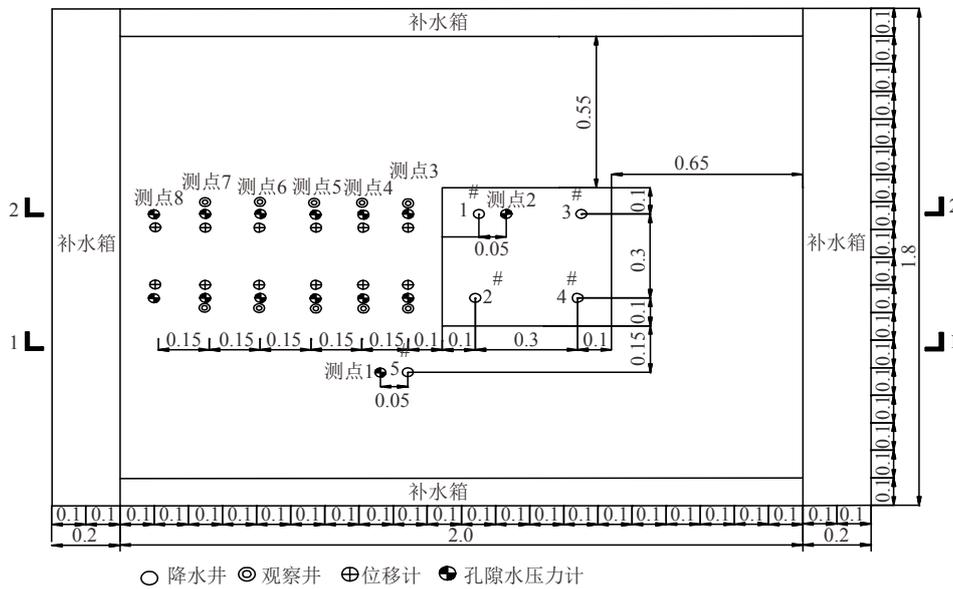


图 3 试验平面布置图(单位: m)

Fig.3 Test arrangement(unit: m)

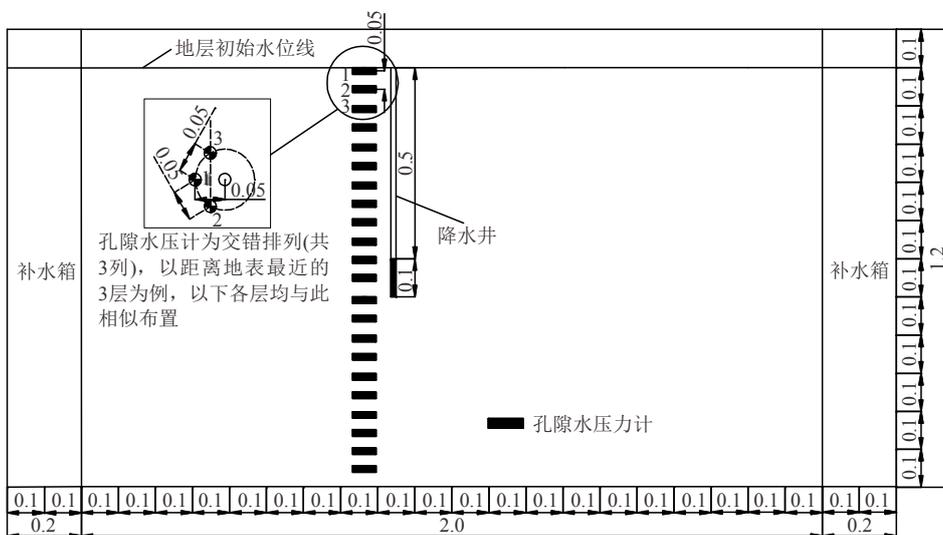


图 4 1-1 剖面示意图(单位: m)

Fig.4 1-1 section view(unit: m)

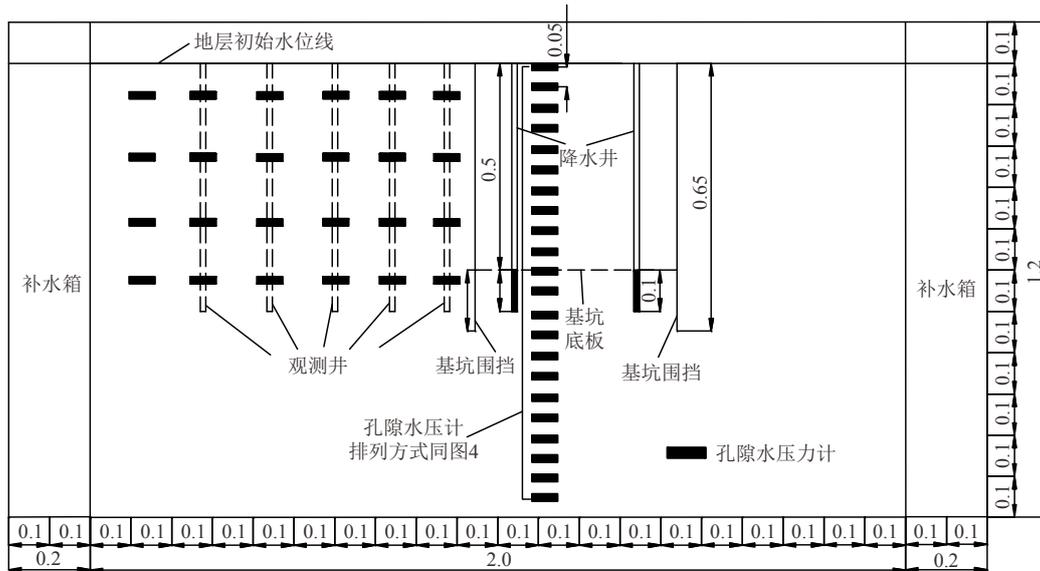


图5 2-2剖面示意图(单位: m)

Fig.5 2-2 section view(unit: m)

本试验主要为定降深抽水, 为保证降水过程中降水井内水位始终为试验所需降深, 每次降水试验前均要将抽水管水头固定于5#降水井内指定降水深度(0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m), 由巴布什金潜水不完整井涌水量计算公式<sup>[7-8]</sup>如下:

试验过滤器埋深相对较浅时, 即  $l/2 < 0.3m_0$  ( $l$  为降水井过滤器长度,  $m_0$  为降水井过滤器中点到隔水底板的距离)时, 有

$$Q_{\text{不完整}} = \pi k s_{w(\text{不完整})} \left( \frac{l + s_{w(\text{不完整})}}{\ln \frac{R}{r_w}} + \frac{l}{\ln \frac{0.66l}{r_w}} \right) \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{不完整}}$  为不完整单井涌水量,  $k$  为地层渗透系数,  $s_{w(\text{不完整})}$  为不完整井水位降深,  $R$  为降水井影响半径,  $r_w$  为降水井半径。

计算得砾质黏性土地层达到所需降深地理论涌水量分别为  $Q_{0.1} = 0.004 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $Q_{0.2} = 0.008 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $Q_{0.3} = 0.013 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $Q_{0.4} = 0.019 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $Q_{0.5} = 0.026 \text{ m}^3/\text{d}$ , 试验选取地抽水泵最大抽水量可达  $Q_{\text{抽水}} = 5.76 \text{ m}^3/\text{d}$ , 通过调节抽水管与水泵之间地连接阀门, 使抽水量大于或等于涌水量, 保证降水井内水头高度始终于所需高度。抽水开始后, 始终保持四周水箱水位 1.1 m, 观测和采集不同埋深孔隙水压传感器读数变化, 当孔隙水压传感器读数变化均小于 0.001 kPa 时认为降水达到稳定, 可再继续抽水 60 min 后关闭抽水泵, 整个抽水试验结束。整理分析测点 1 不同埋深孔隙水压计监测数据得到 5#降水井不同降深降水前与降水稳定后孔隙水压力变化曲线如图 6 所示。

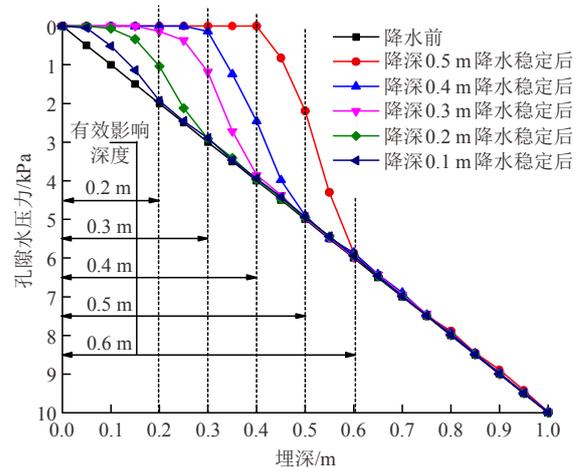


图6 5#不同降深孔隙水压力变化曲线

Fig.6 Curves of variation in pore water pressure at different drawdowns of #5

与5#降水井试验过程相同, 分别对仅1#降水井以及1#和3#降水井同时开展指定深度降水试验, 整理分析测点2不同埋深孔隙水压监测数据, 得到1#以及1#和3#不同降深降水前与降水稳定后不同埋深孔隙水压力变化曲线如图7, 8所示。

图6和7中有效影响深度对比, 不完整井基坑内降水有效影响深度大于基坑外, 这是由于基坑内降水地连墙底部出现地下水绕渗现象, 绕渗作用增大了不完整井有效影响深度, 图7和8中有效影响深度对比, 双井降水有效影响深度大于单井降水, 这是由于群井效应导致绕渗作用增大, 进而对有效影响深度影响增大。

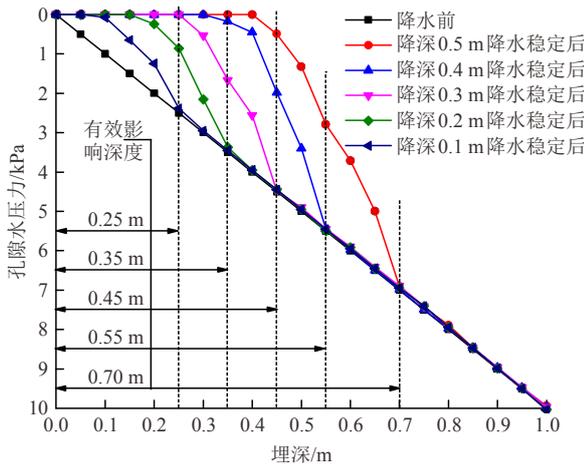


图 7 1#降水井不同降深孔隙水压力变化曲线

Fig.7 Curves of variation in pore water pressure at different drawdowns of dewatering wells #1

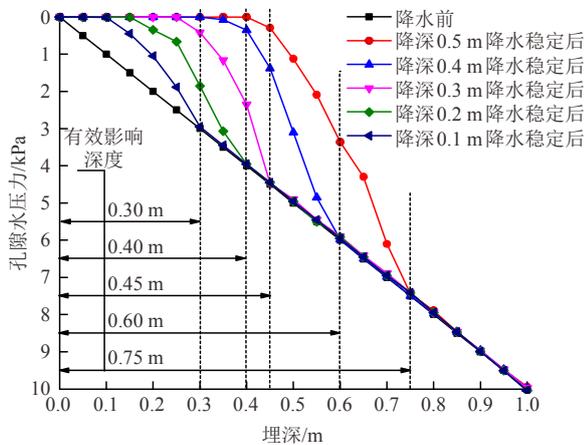


图 8 1#和 3#降水井不同降深孔隙水压力变化曲线

Fig.8 Curves of variation in pore water pressure at different drawdowns of dewatering wells #1 and #3

### 3.2 有效影响深度理论计算

以巴布什金潜水层完整井和不完整流量计算方法<sup>[7-8]</sup>为基础,结合刘俊龙<sup>[15]</sup>将潜水不完整井等效为潜水完整井思路,开展不完整井有效影响深度理论计算。深圳典型潜水地层从上到下渗透系数逐渐增大,底部为强风化花岗岩地层,渗透系数最大,地层下部不存在弱透水层,故理论计算可忽略弱透水层本身释水情况。潜水完整井单井涌水量计算公式<sup>[7-8]</sup>如下:

$$Q_{完整} = \frac{\pi k(2H_a - s_{w(完整)})s_{w(完整)}}{\ln \frac{R + r_w}{r_w}} \quad (2)$$

式中:  $Q_{完整}$  为完整井单井涌水量,  $s_{w(完整)}$  为完整井水位降深,  $H_a$  为完整井含水层厚度。

潜水不完整井涌水量计算公式同式(1)。

将不完整井等效为与其流量及水位降深相同完整井可得

$$\left. \begin{aligned} Q_{完整} &= Q_{不完整} \\ s_{w(完整)} &= s_{w(不完整)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据式(3)计算得到  $H_a$ , 即为等效后完整井的含水层厚度, 也就是不完整井有效影响深度。基于砾质黏性土相似地层不完整井降水有效影响深度计算结果如表 3 所示。

表 3 有效影响深度理论计算结果

Table 3 Theoretical calculated results of effective depth

降深/m	砾质黏性土/m
0.1	0.220
0.2	0.314
0.3	0.422
0.4	0.530
0.5	0.637

将理论计算结果和与节 3.1 试验结果对比, 与试验结果的误差= $(\text{试验结果} - \text{理论计算结果}) / \text{试验结果} \times 100\%$ , 如表 4 所示。

表 4 理论计算结果与试验结果对比

Table 4 Comparison of theoretical calculation results and test results

降深/m	理论计算结果与 5# 试验结果误差/%	理论计算结果与 1# 试验结果误差/%	理论计算结果与 1# 和 3# 试验结果误差/%
0.1	-10.00	12.00	26.67
0.2	-4.67	10.29	21.50
0.3	-5.50	6.22	6.22
0.4	-6.00	3.64	11.67
0.5	-6.17	9.00	15.07

从表 4 可知, 理论计算结果与基坑外 5# 降水井试验结果误差相对较小, 与基坑内 1#, 3# 降水井试验结果误差相对较大, 且均小于基坑内试验结果, 理论方法更适用于基坑外不完整井有效影响深度计算, 而运用于基坑内时需乘以放大系数。节 3.1 试验结果可知, 当其他条件相同时, 基坑内不完整井有效影响深度是基坑外平均 1.18 倍, 基坑内不完整井有效影响深度理论值可由理论公式计算值乘放大系数 1.18 得到。当其他条件相同时, 基坑内双井同时降水测点 2 试验结果是单井降水平均 1.12 倍, 基坑内双井降水, 不完整井有效影响深度理论值可由理论公式计算值乘基坑内影响放大系数 1.18, 再乘双井降水影响放大系数 1.12 得到。地铁车站基坑大多均为狭长形, 降水井距离长边地连墙多在 5 m 范围内, 即模型试验的 0.1 m 范围, 且沿宽度方向基坑内多为单井或双井降水, 故放大系数满足实际需要。

### 3.3 理论方法在成层地层的应用

将节 3.1 试验地层换成成层相似地层, 各地层自上而下分布和厚度如图 9 所示。



图9 成层地层分布(单位: m)

Fig.9 Stratified formation distribution(unit: m)

试验过程与砾质黏性土相似地层完全相同, 得到 5#, 1#, 1#和 3#降水井不同降深降水前与降水稳定后孔隙水压力变化曲线如图 10~12 所示。

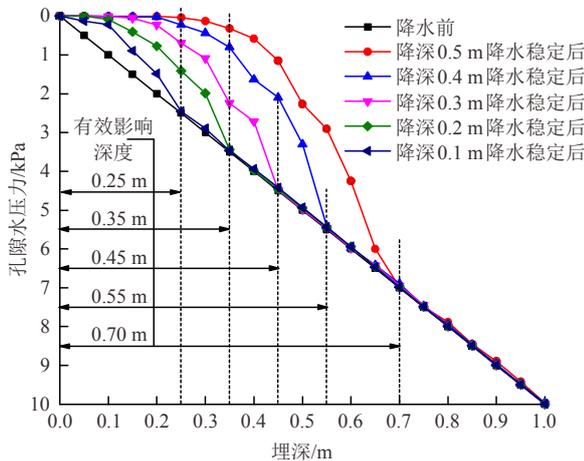


图 10 5#降水井不同降深孔隙水压力变化曲线

Fig.10 Curves of variation in pore water pressure at different drawdowns of dewatering wells #5

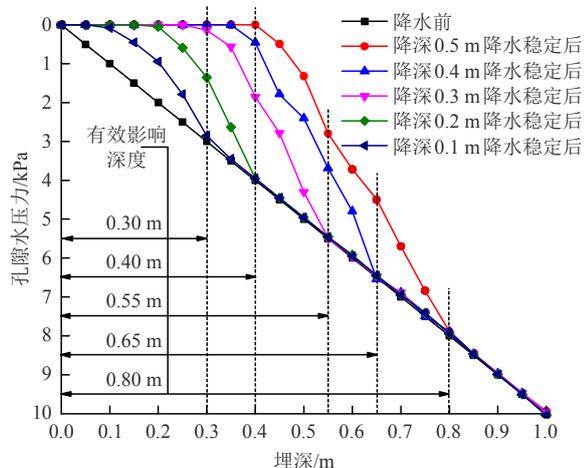


图 11 1#降水井不同降深孔隙水压力变化曲线

Fig.11 Curves of variation in pore water pressure at different drawdowns of dewatering wells #1

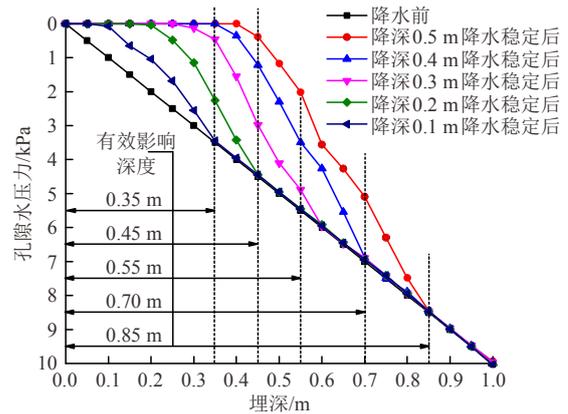


图 12 1#和 3#降水井不同降深孔隙水压力变化曲线

Fig.12 Curves of variation in pore water pressure at different drawdowns of dewatering wells #1 and #3

运用节 3.2 理论方法, 其中成层地层渗透系数可取等效渗透系数  $K_{等效}^{[7-8]}$ , 计算如下:

$$K_{等效} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (4)$$

式中:  $K_i$  为第  $i$  层土渗透系数,  $M_i$  为第  $i$  层土厚度。计算得成层地层等效渗透系数为 0.27 m/d, 进而由式(1)~(3)得不同降深的有效影响深度计算值, 如表 5 所示, 并与试验值进行对比, 如表 6 所示。

表 5 有效影响深度理论计算结果

Table 5 Theoretical calculated results of effective depth

降深/m	基坑外/m	基坑内单井/m	基坑内双井/m
0.1	0.220	0.260	0.291
0.2	0.322	0.380	0.426
0.3	0.434	0.512	0.574
0.4	0.544	0.642	0.719
0.5	0.652	0.769	0.862

表 6 理论计算结果与试验结果对比

Table 6 Comparison of theoretical calculation results and test results

降深/m	理论计算结果与 5#试验结果误差/%	理论计算结果与 1#试验结果误差/%	理论计算结果与 1#和 3#试验结果误差/%
0.1	12.00	13.33	16.86
0.2	8.00	5.00	5.33
0.3	3.56	6.91	-4.36
0.4	1.09	1.23	-2.71
0.5	6.86	3.88	-1.41

从表 6 可以看出, 理论值与试验结果最大误差为 16.86%, 其随着降深增大误差逐渐变小, 与试验结果较为接近, 验证了理论方法应于成层地层具有良好的适用性和准确性。

## 4 基坑外降水曲线公式提出

### 4.1 试验结果分析

分别整理分析节 3.1 中砾质黏性土相似地层 1# 降水井定降深 0.5 m 试验中测点 3#~8# 孔隙水压监测数据，得到降水稳定后砾质黏性土相似地层不同埋深水位变化曲线，如图 13 所示。

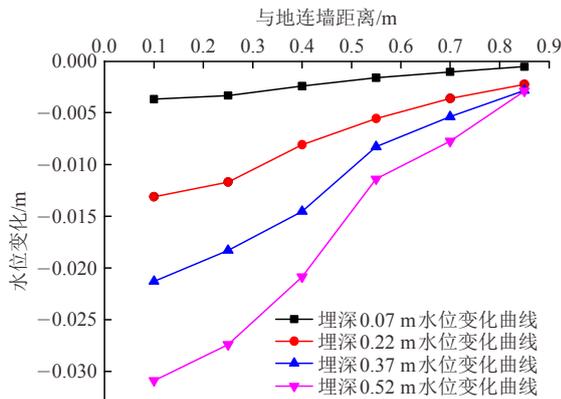


图 13 砾质黏性土地层不同埋深水位变化曲线

Fig.13 Curves of variation in water level of gravelly clay stratum at different depths

从图 13 可看出，在地连墙深度范围内，基坑外土层中孔隙水压变化值随埋深增加而增大，基坑外降水曲线形式为“先下凹再上凸”型与潜水层稳定流 Dupuit 降水曲线“类抛物线”型<sup>[7-8]</sup>有较大不同。下面采用曲线拟合方法对抗外降水曲线进行研究。

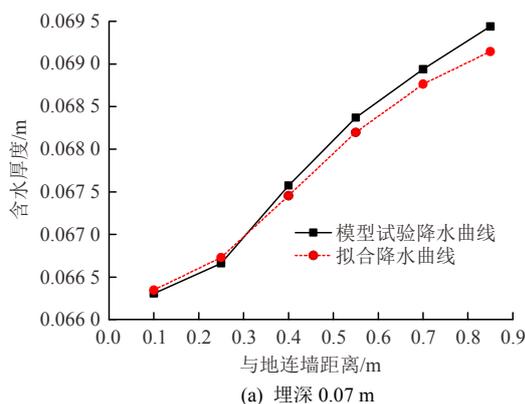
### 4.2 理论公式的提出

根据图 13 中水位变化曲线形状和趋势，选取拟合函数形式如下：

$$y = A_2 + (A_1 - A_2) / [1 + (x / x_0)^p] \quad (5)$$

式中： $x$  为基坑外与地连墙距离； $y$  为地连墙外距离为  $x$  处的土层的含水厚度； $A_1$ 、 $A_2$ 、 $x_0$  和  $p$  为参数。

将图 13 中  $x$  和  $y$  的试验值代入式(5)，可得砾质黏性土相似地层拟合函数参数值如表 7 所示，表中



(a) 埋深 0.07 m

表 7 砾质黏性土地层拟合函数参数值  
Table 7 Fitting values of parameters of gravelly clay stratum

埋深/m	$A_1$	$A_2$	$x_0$	$p$	$R$
0.07	0.066	0.069	0.53	2.7	0.998
0.22	0.207	0.215	0.61	2.6	0.998
0.37	0.348	0.364	0.51	2.8	0.998
0.52	0.489	0.510	0.51	3.0	0.998

$R$  为相关系数。

参考潜水层稳定流 Dupuit 降水曲线公式<sup>[7-8]</sup>可知，影响降水曲线变化的物理量主要为降水前土层含水厚度  $H$ ，降水稳定后基坑外距离地连墙最近处土层含水厚度  $h_w$  ( $h_w$  可由该土层降水前含水厚度  $H$  减去该土层水位降深  $s_w$  得到)，土层渗透系数  $k$  和基坑内不完整井有效影响深度  $H_a$ 。各物理量在试验中的取值如表 8 所示。

表 8 砾质黏性土地层主要物理量值

Table 8 Main physical values of gravelly clay stratum

埋深/m	$s_w/m$	$H/m$	$k/(m \cdot d^{-1})$	$H_a/m$
0.07	0.066	0.07	0.07	0.75
0.22	0.207	0.22	0.07	0.75
0.37	0.349	0.37	0.07	0.75
0.52	0.490	0.52	0.07	0.75

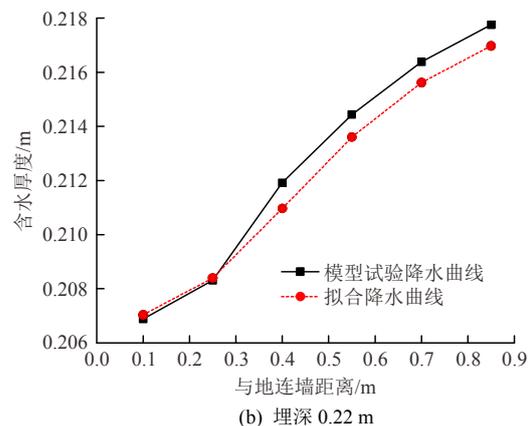
对比表 7 和 8 可知，函数参数与试验物理量存在一定关系，不同埋深土层参数  $A_1$  与  $h_w$  值均基本相等，参数  $A_2$  与  $H$  值均基本相等，可由  $h_w$  替换参数  $A_1$ ，由  $H$  替换参数  $A_2$ 。同时发现不同埋深参数  $x_0$  均值与  $2.45\sqrt{kH_a}$  值基本相等，故用  $2.45\sqrt{kH_a}$  替换参数  $x_0$ ，参数  $p$  在不同地层中数值变化较小，可将  $p$  作为常数，取各层均值 2.8。

拟合函数形式可以改写为

$$h = H + (h_w - H) / [1 + (x / 2.45\sqrt{kH_a})^{2.8}] \quad (6)$$

式中： $h$  为地连墙外距离为  $x$  处的土层的含水厚度。

砾质黏性土地层中，将不同埋深拟合降水曲线与模型试验降水曲线进行对比，如图 14 所示。



(b) 埋深 0.22 m

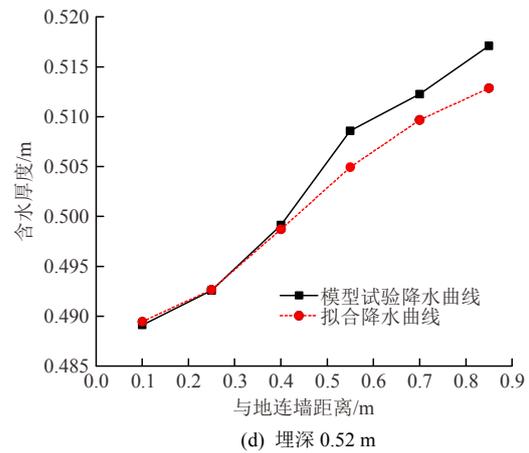
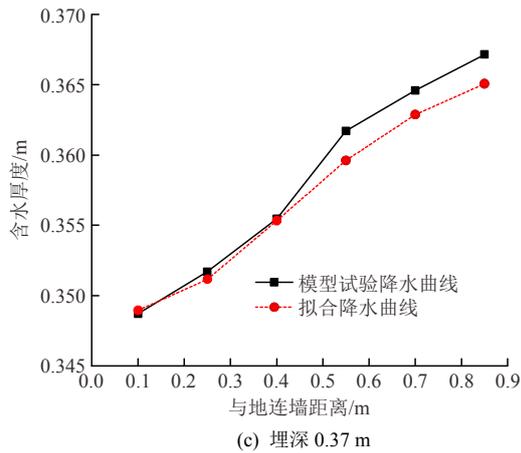


图 14 不同埋深降水曲线对比

Fig.14 Comparison of curves of water level falling at different depths

从图 14 可看出, 拟合降水曲线与试验降水曲线基本吻合, 说明由式(6)计算得到的降水曲线能较准确描述基坑外降水趋势。

### 4.3 理论公式在成层地层的应用

成层地层降深 0.5 m 降水稳定后坑外不同埋深水位变化曲线, 如图 15 所示。

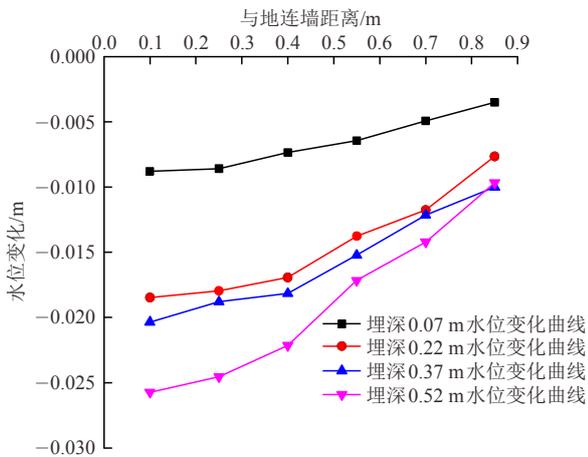


图 15 成层地层不同埋深水位变化曲线

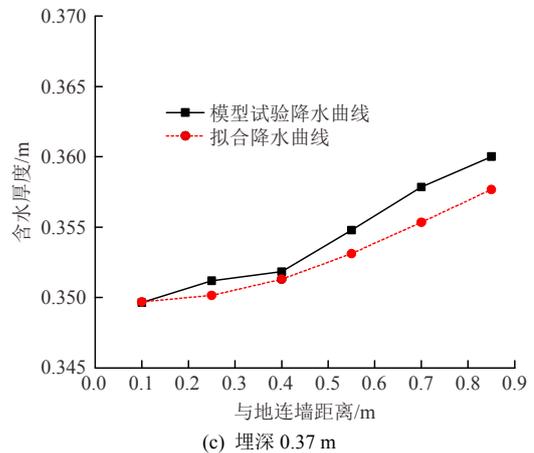
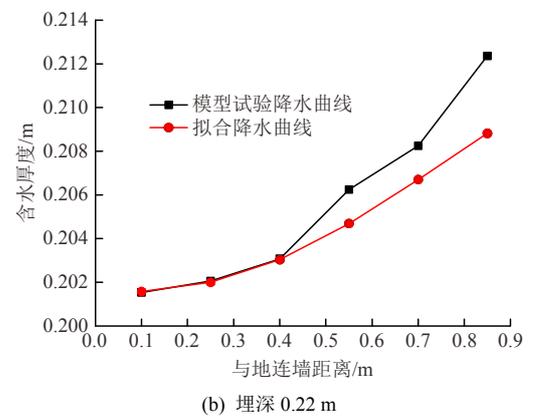
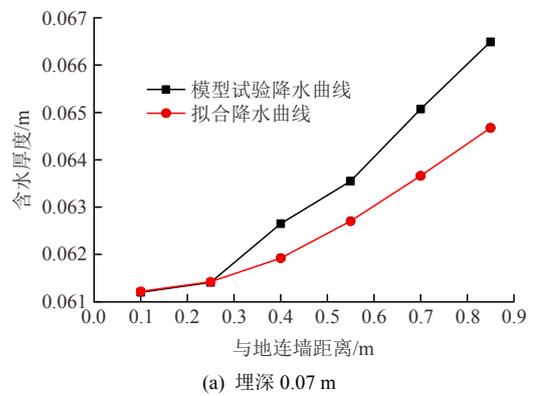
Fig.15 Curves of variation in water level of stratified formation at different depths

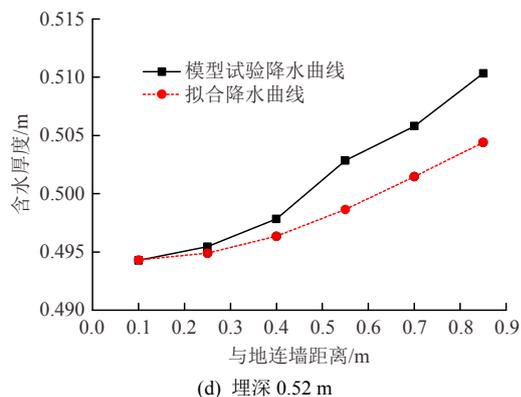
由式(6), 计算得到成层地层不同埋深拟合降水曲线, 并与试验结果进行对比, 如图 16 所示。

由图 16 可知, 拟合降水曲线与试验降水曲线基本吻合, 验证了拟合降水曲线公式能较准确描述成层地层基坑外降水趋势。

### 4.4 绕渗区的划分

根据地下水动力原理<sup>[7-8]</sup>及王军辉等<sup>[9-10]</sup>研究成果, 由于地连墙的影响, 在地连墙一侧降水, 另一侧会出现 2 个区域, 即绕渗区和非绕渗区。如图 17 所示。





(d) 埋深 0.52 m

图 16 不同埋深降水曲线对比

Fig.16 Comparison of curves of water level falling at different depths

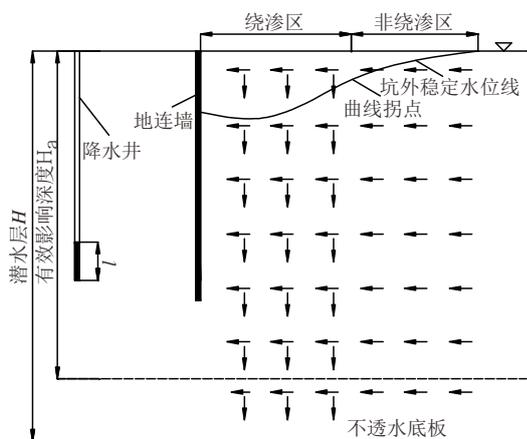


图 17 绕渗区分计算模型

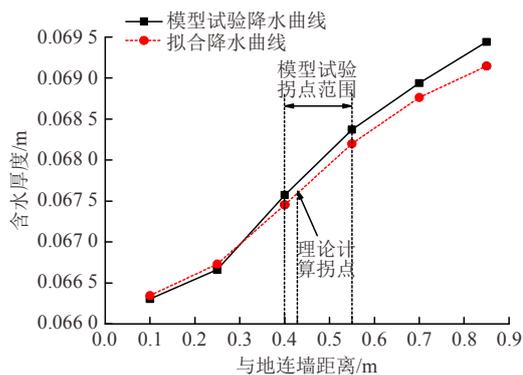
Fig.17 Calculation model of by-pass seepage zone partition

图 13 和 15 中降水曲线均为“先下凹再上凸”形式，下凹部分为绕渗主要影响区域，上凸部分受绕渗影响较小，故认为降水曲线下凹部分区域为绕渗区，上凸部分区域为非绕渗区，曲线由下凹变为上凸的拐点位置即为绕渗区和非绕渗区的划分界限。

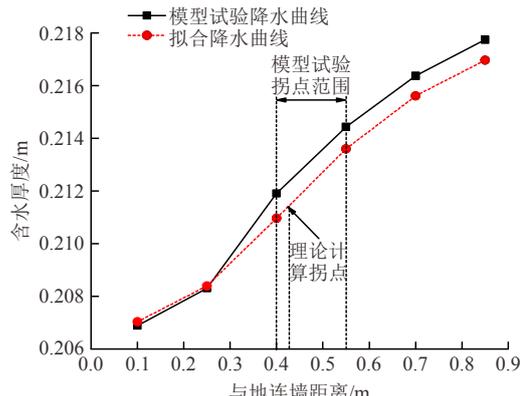
对降水曲线拟合式(6)求二阶导数，并令二阶导数为 0，求得的  $x$  值就是降水曲线拐点与地连墙的距离。对  $h$  求二阶导得

$$h''(x) = - \left\{ \frac{2.8(h_w - H) \left( \frac{x}{2.45\sqrt{kH_a}} \right)^{0.8}}{6k^2 H_a^2} \right. \\ \left. \left[ 3.8 \left( \frac{x}{2.45\sqrt{kH_a}} \right)^{2.8} - 1.8 \right] \right\} / \left[ 1 + \left( \frac{x}{2.45\sqrt{kH_a}} \right)^{2.8} \right]^3 \quad (7)$$

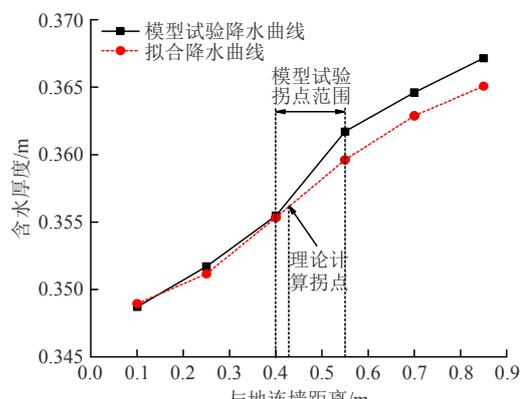
令  $h'' = 0$  求对应  $x$  值，得到拐点与地连墙距离  $x = 1.876 \sqrt{kH_a}$ ，进而求得不同地层降水曲线拐点，并与试验降水曲线拐点范围对比，如图 18 所示。



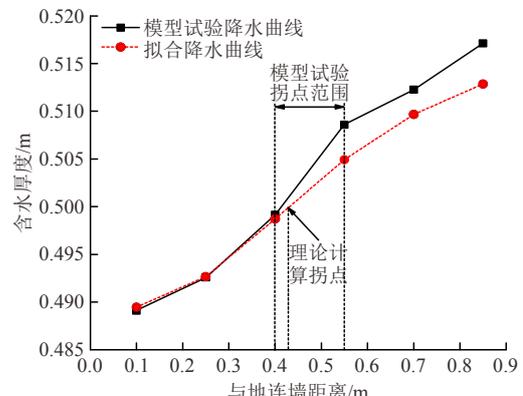
(a) 埋深 0.07 m



(b) 埋深 0.22 m



(c) 埋深 0.37 m



(d) 埋深 0.52 m

图 18 砾质黏性土地层降水曲线拐点位置

Fig.18 Inflection point locations of curves of water level falling in gravelly clay stratum

从图 18 和 19 可看出, 不同地层理论计算地降水曲线拐点位置均处于试验拐点范围内, 说明理论方法能够较准确划分坑外绕渗区和非绕渗区。

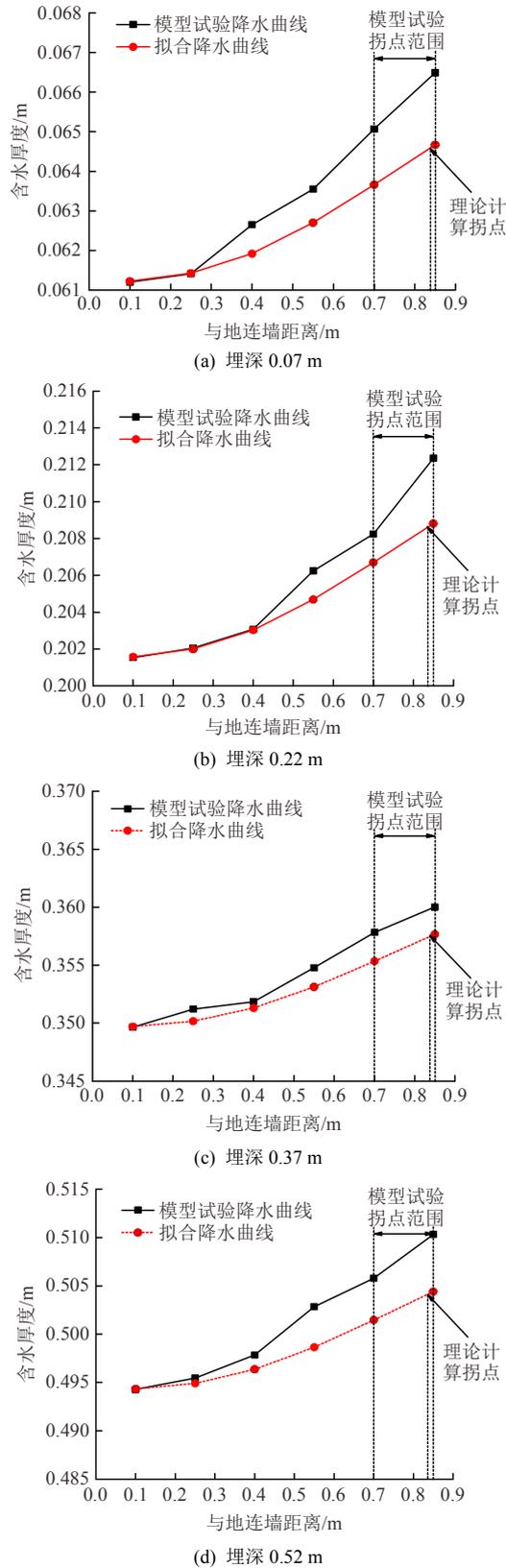


图 19 成层地层降水曲线拐点位置

Fig.19 Inflection point locations of curves of water level falling in stratified formation

## 5 基坑外地表沉降计算

### 5.1 简化计算方法

结合吴意谦和朱彦鹏<sup>[5]</sup>研究思路, 根据基坑内降水引起基坑外距离地连墙任意位置的水位降深, 建立地表沉降简化计算模型如图 20 所示。

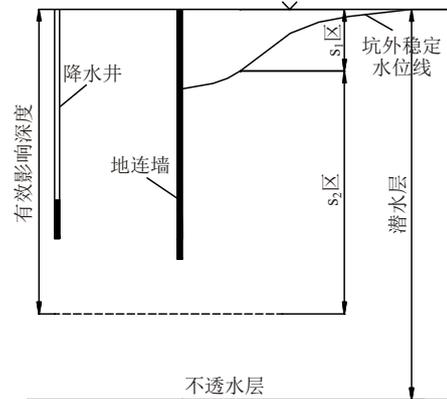


图 20 坑外地表沉降简化计算模型

Fig.20 Simplified calculation model of surface settlement outside the foundation pit

从图 20 可以看出, 降水曲线形成后, 可以在曲线上分为疏干部分和饱和部分(认为初始水位以上干土层不存在降水引起的附加荷载, 干土层沉降量可以忽略) $s_1$  区疏干土附加荷载  $\Delta\sigma_1$  为

$$\Delta\sigma_1 = \gamma_w z \tag{8}$$

式中:  $\gamma_w$  为水的重度,  $z$  为计算土层中点至初始地下水位的垂直距离。

$s_2$  区饱和土附加荷载  $\Delta\sigma_2$  为

$$\Delta\sigma_2 = \gamma_w (H - h) \tag{9}$$

式中  $h$  可由式(6)计算得到。

$s_2$  区土层降水完成后还处于饱和, 降水后的水位高度取上部的稳定降水曲面高度  $h$ , 即水位变化应为  $H-h$ ; 而  $s_1$  区在降水过程中水位是动态下降的, 该区域内任意计算上层均是由层顶疏干至层底, 最终下降至稳定降水曲面。故该区域内计算土层降水后水位高度应取有效影响深度底部至土层中点作为疏干过程中水位平均高度  $z$ , 水位变化应为潜水层厚度  $H$  与该高度之差  $z$ 。则地面沉降量可采用规范公式计算, 疏干区  $s_1$  区沉降量  $s_1$  为

$$s_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_1}{E_i} H_i \tag{10}$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  层土的压缩模量,  $H_i$  为第  $i$  计算土

层的厚度。

饱和区  $s_2$  区的沉降量  $s_2$  为

$$s_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_2}{E_i} H_i \quad (11)$$

坑外地表最终沉降量为

$$s_{\text{总}} = s_1 + s_2 \quad (12)$$

以节 4 中砾质黏性土和成层相似地层基坑内不完整井降深 0.5 m 试验工况为算例，0.07 m 埋深距离地表较近，故可由降水曲线拟合公式计算得到降深 0.5 m 埋深 0.07 m 地下水位变化曲线作为地表附近疏干区和饱和区的划分界限，进而计算得到砾质黏性土地层和成层地层地表沉降曲线，并与地表沉降试验监测结果对比，如图 21 和 22 所示。

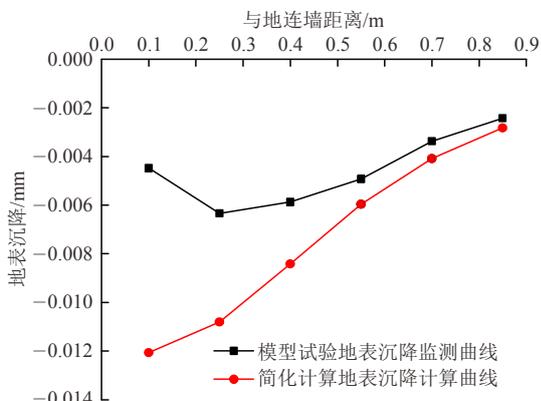


图 21 砾质黏性土地层地表沉降曲线对比

Fig.21 Comparison of the ground settlement curves of gravelly clay stratum

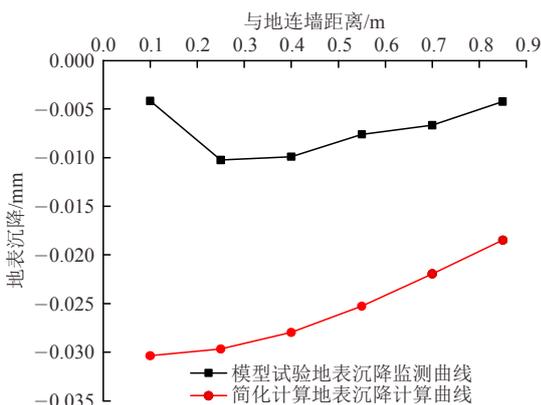


图 22 成层地层地表沉降曲线对比

Fig.22 Comparison of the ground settlement curves of stratified formation

从图 21 和 22 可以看出，地表沉降计算曲线变化趋势与试验监测曲线基本吻合。但同时也发现距离地连墙附近一定范围内地表沉降计算值远大于试验监测值。

### 5.2 考虑渗流力作用基坑降水引起坑外地表沉降计算

与节 5.1 研究思路相同，在整个降水历程中， $s_1$  区土体被疏干， $s_2$  区土体在降水前后均位于稳定地下水水面以下始终饱和。本文单独计算两部分土体各自沉降量，其中在绕渗区范围内疏干部分和饱和部分考虑渗流力在水平方向存在分量，如图 23 所示。

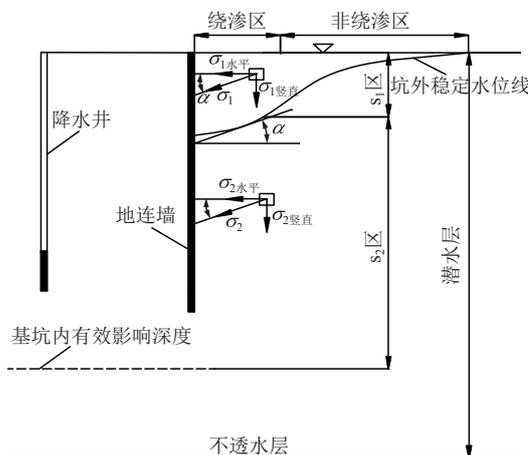


图 23 考虑渗流力土体变形计算简化模型

Fig.23 Simplified model of soil deformation calculation considered seepage force

设坑外地表任意点与地连墙距离记为横坐标为  $x$ ，首先求出  $x$  处与所求直线平行的曲线切线斜率(平行直线斜率相等)：

$$h'(x) = - \frac{2.8(h_w - H) \left( \frac{x}{2.45\sqrt{kH_a}} \right)^{1.8}}{2.45\sqrt{kH_a} \left[ 1 + \left( \frac{x}{2.45\sqrt{kH_a}} \right)^{2.8} \right]^2} \quad (13)$$

由图 23 有

$$\tan \alpha = h'(x) = - \frac{2.8(h_w - H) \left( \frac{x}{2.45\sqrt{kH_a}} \right)^{1.8}}{2.45\sqrt{kH_a} \left[ 1 + \left( \frac{x}{2.45\sqrt{kH_a}} \right)^{2.8} \right]^2} \quad (14)$$

根据三角几何关系可得

$$\sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} \quad (15)$$

绕渗区  $s_1$  区由降水引起附加应力在竖直方向分量为

$$\Delta\sigma_{1\text{竖直}} = \Delta\sigma_1 \sin \alpha = \gamma_w z \sin \alpha \quad (16)$$

绕渗区  $s_2$  区由降水引起附加应力在竖直方向分

量为

$$\Delta\sigma_{2\text{垂直}} = \Delta\sigma_2 \sin\alpha = \gamma_w(H-h)\sin\alpha \quad (17)$$

疏干部分和饱和部分在绕渗区范围内考虑渗流地面沉降量计算如下:

疏干区  $s_1$  区沉降量为

$$s_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_{1\text{垂直}}}{E_i} H_i \quad (18)$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  层土压缩模量,  $H_i$  为第  $i$  计算土层厚度。

饱和区  $s_2$  沉降量为

$$s_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_{2\text{垂直}}}{E_i} H_i \quad (19)$$

坑外地表最终沉降量  $s_{\text{总}}$  为

$$s_{\text{总}} = s_1 + s_2 \quad (20)$$

以节 4 中砾质黏性土和成层相似地层基坑内不完整井降深 0.5 m 试验工况为算例, 利用上述计算方法, 计算得到砾质黏性土地层和成层地层地表沉降变化曲线, 并与试验结果对比, 如图 24 和 25 所示。

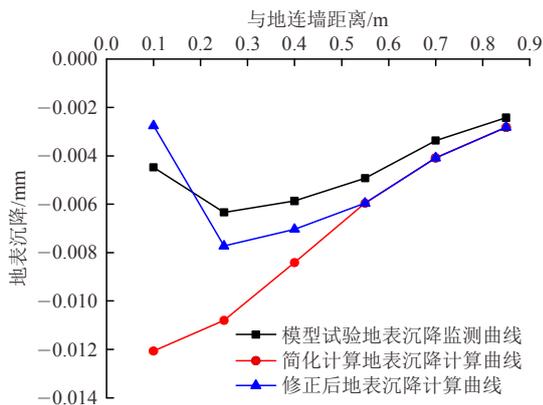


图 24 砾质黏性土地层地表沉降曲线对比

Fig.24 Comparison of the ground settlement curves of gravelly clay stratum

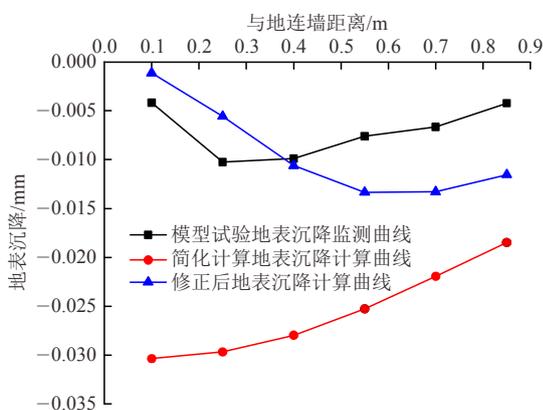


图 25 成层地层地表沉降曲线对比

Fig.25 Comparison of the ground settlement curves of stratified formation

通过图 24 和 25 可以看出, 修正后的理论计算地表沉降曲线与试验结果吻合度更高, 可较准确快捷地估算基坑降水引起坑外地表沉降量。

### 5.3 工程实例分析

由于场地条件限制和施工进度要求, 在实际基坑工程中, 基坑降水后, 基坑开挖施工即开始进行, 因而很难在基坑内外布置大量孔隙水压测点并且实际基坑工程往往重视工期, 也不允许在基坑开挖前于基坑内外做大量研究性试验, 故仅能以基坑周边地表沉降监测点与理论计算值进行对比。

深圳地铁综合枢纽实际工程指定降深为 21 m, 采取分区分层降水方案, 即先对降水二区进行分层降水, 降至指定深度, 再对降水一区分层降水降至指定深度, 为忽略基坑开挖对水位变化影响, 选取基坑开挖前降水二区第一层(降深为 5 m)降水引起基坑中部地表沉降监测断面, 如图 26 所示。

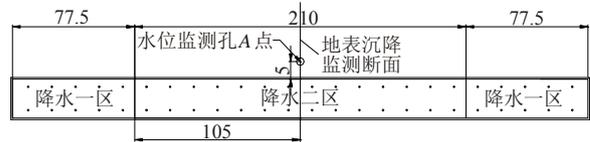


图 26 基坑降水分区及测点布置(单位: m)

Fig.26 Layout of water level falling in partitioned foundation pit and measuring points(unit: m)

由降水稳定后水位监测孔 A 点的水位降深值以及上述理论方法计算得到地表沉降结果, 与降水稳定后现场监测结果对比, 如图 27 所示。

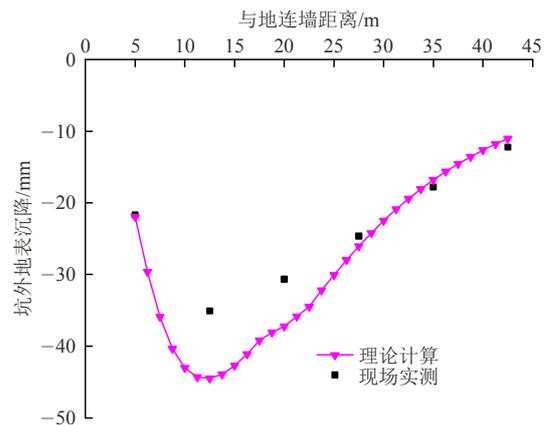


图 27 坑外地表沉降曲线对比

Fig.27 Comparison of curves of the surface subsidence outside the foundation pit

从图 27 可以看出, 地表沉降理论计算曲线与现场监测结果基本吻合, 仅在最大沉降值附近存在一定偏差, 理论计算最大沉降值与现场监测结果误差约为 30%, 说明理论计算曲线能够相对较准确描述实际工程中基坑外地表沉降变化趋势。

## 6 结 论

通过设计基坑降水模型试验, 并结合理论分析, 对基坑内不完整井降水引起基坑外地表沉降变化进行研究, 得到如下结论:

(1) 揭示了基坑内外降水有效影响深度变化规律: 降水条件相同情况下, 由于绕渗作用影响, 基坑内降水有效影响深度大于基坑外, 由于群井效应影响, 基坑内双井降水有效影响深度大于基坑内单井降水有效影响深度。

(2) 提出了不完整井降水有效影响深度确定方法, 并应用于成层地层中, 理论计算结果与试验结果基本吻合, 验证了理论方法具有良好的适用性和准确性。

(3) 提出了基坑内不完整井降水引起坑外水位变化曲线拟合公式及绕渗区划分方法。通过在成层地层中地运用, 并与试验结果对比, 验证了拟合降水曲线公式能较准确描述成层地层基坑外降水趋势, 绕渗区划分方法能够较准确划分坑外绕渗区和非绕渗区。

(4) 建立基坑外地表沉降简化计算模型, 结合不完整井降水有效影响深度及基坑外降水曲线理论公式, 提出了基坑内不完整井降水引起坑外地表沉降简化计算方法, 由该方法计算得到地表沉降曲线与模型试验地表沉降监测曲线基本吻合。但同时也发现距离地连墙附近一定范围内地表沉降计算值远大于试验监测值。为得到更加精确的地表沉降计算结果, 在绕渗区范围内, 考虑渗流力作用影响, 对简化计算方法进行修正, 结合简化方法计算结果、试验监测数据和现场监测数据进行对比分析, 表明修正后地表沉降计算曲线可更加准确地描述基坑外地表沉降趋势, 为类似潜水地层基坑工程降水施工和设计提供更加有效地指导。

### 参考文献(References):

[1] 李琳, 张建根, 杨敏. 疏干降水引起坑后地面沉降的一种简化计算方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 306 - 309.(LI Lin, ZHANG Jiagen, YANG Min. Simplified analysis of settlement due to dewatering of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 306 - 309.(in Chinese))

[2] 黄雅虹, 吕悦军, 周毅, 等. 北京亦庄轻轨工程场地水位下降引起地面沉降量的评估方法探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2 457 - 2 462.(HUANG Yahong, LU Yuejun, ZHOU Yi, et al. A method for estimating land extraction and subsidence induced by groundwater its application to site evaluation of Yizhuang light railway in Beijing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2 457 - 2 462.(in Chinese))

[3] 原华, 张庆贺, 张建伟. 侧摩阻力约束下降降水引起的地面沉降估

算方法[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(8): 1 329 - 1 334.(YUAN Hua, ZHANG Qinghe, ZHANG Jianwei. Estimation method for surface subsidence induced by dewatering under the constraint of lateral friction[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(8): 1 329 - 1 334.(in Chinese))

[4] 王建秀, 吴林高, 朱雁飞, 等. 地铁车站深基坑降水诱发沉降机制及计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1 010 - 1 019.(WANG Jianxiu, WU Lingao, ZHU Yanfei, et al. Mechanism of dewatering-induced ground subsidence in deep subway station pit and calculation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1 010 - 1 019.(in Chinese))

[5] 吴意谦, 朱彦鹏. 考虑疏干带非饱和土影响下基坑降水引起地面沉降的计算[J]. 工程力学, 2016, 33(3): 179 - 187.(WU Yiqian, ZHU Yanpeng. Calculation of settlement considering unsaturated soil influence of the dewatering of foundation pits[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(3): 179 - 187.(in Chinese))

[6] DEBASIS R, KEITH E R. Surface settlements at a soft soil site due to bedrock dewatering[J]. Engineering Geology, 2009, 107: 109 - 117.

[7] 陈崇希, 林敏. 地下水水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 59 - 69.(CHEN Chongxi, LIN Min. Groundwater dynamics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 59 - 69.(in Chinese))

[8] 薛禹群, 吴吉春. 地下水水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 20 - 96.(XUE Yuqun, WU Jichun. Groundwater dynamics[M]. Beijing: Geological Publish House, 2010: 20 - 96.(in Chinese))

[9] 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): 1 390 - 1 398.(WANG Junhui, TAO Lianjin, 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): 1 390 - 1 398.(in Chinese))

[10] 王军辉, 韩焯, 周宏磊. 城市地铁建设对地下水环境研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(3): 408 - 415.(WANG Junhui, HAN Xuan, ZHOU Honglei. Effect of urban metro operation on groundwater environment[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(3): 408 - 415.(in Chinese))

[11] 顾大钊. 相似材料和相似模型[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995: 6 - 51.(GU Dazha. Similar materials and similar models[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1995: 6 - 51.(in Chinese))

[12] 张邦芾. 基坑工程地下水渗流场特性研究[硕士学位论文][D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2014.(ZHANG Bangfu. Study on the characteristics of groundwater seepage field in engineering[M. S. Thesis][D]. Beijing: China Academy Foundation Pit of Building Research, 2014.(in Chinese))

[13] 刘丰敏. 考虑初始水力坡度和层间补给的降水引起地面沉降研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2016.(LIU Fengmin. research on ground settlement caused by dewatering considering the initial hydraulic gradient and interlayer recharge[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2016.(in Chinese))

[14] 王志佳, 张建经, 付晓, 等. 模型试验的分离相似设计方法——以锚索格构加固边坡模型试验为例田[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2 617 - 2 623.(WANG Zhijia, ZHANG Jianjing, FU Xiao, et al. Isolated similar design method for a scaled model test and its application to slope-anchor cable-lattice beam system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2 617 - 2 623.(in Chinese))

[15] 刘俊龙. 潜水含水层中的非完整井降水设计计算探讨[J]. 岩土工程技术, 2002, (5): 297 - 301.(LIU Junlong. Research on the simplified method of design for dewatering by annular partially penetrated wells in phreatic aquifer[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2002, (5): 297 - 301.(in Chinese))