

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.006

# 漫滩二元地层基坑开挖及降水引起的地表沉降预测\*

王涛<sup>1,2</sup>, 施斌<sup>1</sup>, 王鑫永<sup>3</sup>, 邓永锋<sup>4</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093; 2. 中设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210014;  
3. 南京理工大学土木工程系, 江苏南京 210094; 4. 东南大学交通学院, 江苏南京 210096)

**摘要:** 基坑土方开挖及降水引起的地表沉降预测是基坑工程安全领域关键问题之一。工程中常用的基坑支护结构计算软件未考虑降水固结引起的沉降。为全面计算基坑工程引起的地表沉降, 提出了理论计算模型, 采用 MATLAB 编制差分算法程序, 生成附带基坑围护结构及土体分层单元的场地模型, 实现了自动计算地下水位下降深度与地表沉降。以位于长江和秦淮河漫滩地区二元结构场地的南京地铁螺塘街站为案例进行验证, 该方法计算的地下水位降深和地表沉降与现场监测数据基本吻合, 其中观测孔位地下水位降深偏差为 2.4%~8.6%, 地表沉降计算值偏差大都在 10% 以内, 表明了所提计算方法的可靠性。进行泛化分析, 将原始二元地层与上部淤泥质土层替换为砂层工况进行比较, 分析了围护结构插入比、土层性质对地下水位降深和地表沉降的影响。结果表明: 原始二元地层相对于替换砂层的工况, 水位降深小但沉降峰值大, 对水位下降的反应更加灵敏, 沉降曲线曲率更大, 对周边环境危害也更大, 围护结构插入比的增加对地表沉降削弱效果显著。

**关键词:** 基坑工程; 二元结构地层; 地下水; 地表沉降; 围护结构插入比

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0724-08

## Prediction on Ground Settlement Caused by Foundation Pit Excavation and Dewatering Surrounded by Dual Structural Stratum in Floodplain

WANG Tao<sup>1,2</sup>, SHI Bin<sup>1</sup>, WANG Xinyong<sup>3</sup>, DENG Yongfeng<sup>4</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. China Design Group Corporation Limited, Nanjing 210014, China;

3. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

4. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In the security field of foundation pit engineering, accurate prediction on ground surface settlement caused by excavation and dewatering is one of the key issues. Most softwares used for designing foundation pit retaining structures do not take settlement caused by dewatering into consideration despite its significance. In order to calculate the settlement caused by foundation pit construction comprehensively, a theoretical model, which applies differential algorithm method programmed by MATLAB code, is proposed in this paper. The proposed program can generate enclosure structure and layered soil element, and can calculate automatically the groundwater drop depth and ground settlement. The Luotang Street metro station project is used for validation, which is located in the dual structural

\* 收稿日期: 2019-09-04; 修回日期: 2019-09-30

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(41427801)、国家自然科学基金青年基金项目(41502274)资助

作者简介: 王涛(1982-), 男, 高级工程师, 博士研究生。主要从事岩土工程设计及研究。Email: wangthp@163.com

stratum of Yangtze River and Qinhuai River floodplain. The values calculated by the proposed program are compared with the on-site monitoring data. The deviation of groundwater drop depth between the calculated and monitoring data is only 2.4%~8.6%. The deviation of ground maximum settlement between the calculated and monitoring data is less than 10%. The above results indicate the reliability of the proposed method and the hereinafter developed program. The comparative analysis between the original dual structural stratum and designed layer conditions that replace upper silt soil with sand is carried out. The influence of enclosure structure's insertion ratio and soil properties on the groundwater drop depth and ground settlement was analyzed systematically. The results show that, compared with the case of replacing upper silt soil by sand, the groundwater drop depth of the original dual stratum is less, but the peak value of ground settlement is larger, and the original dual stratum is more sensitive to dewatering, and the curvature of ground settlement curve is greater, and it's more harmful to the surrounding environment. The settlement peak can be more obviously weakened by increase of the insertion ratio.

**Keywords:** foundation pit engineering; dual structural stratum; groundwater; ground settlement; insertion ratio of enclosure structure

## 引言

随着我国一、二线城市轨道交通线网逐渐完善,地下线路纵横交错,车站越挖越深,基坑工程安全问题也越来越突出。以往突发的坑底流砂、突涌、邻近建筑物及周边道路管线的开裂倾斜等工程灾害都对社会造成了不可估量的损失,预测基坑周边的降水及地表沉降仍然是岩土工程防灾减灾领域一大关键问题<sup>[1]</sup>。基坑施工导致周边的沉降主要由降水引起的沉降与基坑开挖卸荷产生的沉降组成。尤其是在江河漫滩二元结构场地,由于上部大多为漫滩沉积物淤泥质黏土和细砂<sup>[2]</sup>,若基坑选用悬挂式止水帷幕,较少的降水便足以产生较大的地表沉降,且往往在总沉降中占据主导地位。理正、启明星等国内主流的基坑支护结构设计软件的沉降计算功能模块只考虑了土体开挖沉降,未考虑降水产生的沉降,导致计算结果往往与现场实测值呈现出较大的数值与分布规律差异,而使用多种软件分别进行两种沉降的分析又给工程设计人员增添了很多麻烦,不利于工程应用。

基坑降水所导致的周边场地沉降的计算难点在于地下水位变化未知,使得边界条件难以确定。目前处理此类渗流问题主要有解析方法、边界转换法以及数值计算方法等<sup>[3]</sup>。解析法无法用来处理复杂几何模型及三维问题。较常用的数值法,主要有有限元法、有限差分法以及边界元法等<sup>[4-6]</sup>。如王兆

清等<sup>[4]</sup>采用多节点单元划分网格来逼近自由面,应用移动网格有限元法进行数值计算,可以有效避免网格畸形,提高计算精度。张顺福<sup>[5]</sup>在初流量法的基础上结合子域积分改进后进行三维无压非稳定渗流场计算,可以克服诸如离散工作量大而困难、自由面积分点结果出现跳跃等影响算法收敛与稳定性的问题。但是上述文献计算过程中有的只针对地下水渗流而未考虑线性结构(如围护结构与土体分层等)的影响,有的则是编程步骤较为繁琐不易实现。

本文基于MATLAB2016编译了二维差分法沉降计算程序,计算模型包含基坑围护结构单元和土体分层单元,并应用二维渗流基本微分方程通过有限差分离散进行域内各节点水头计算,将复杂渗流问题通过规则矩形网格系统进行求解,方法简单快捷。以位于长江和秦淮河漫滩地区二元结构场地的南京地铁7号线螺塘街站基坑工程为案例,利用理论和经验公式,采用编译的计算程序研究地下水位降深和地表沉降的变化规律,与实测数据进行了深入的比较,并探讨影响地表沉降的关键控制参数。

## 1 地表沉降计算方法

目前国内主流的基坑支护结构设计软件均是基于弹性地基梁理论计算围护结构的水平侧向位移,再通过水平位移与地表沉降的几何关系计算沉

降,忽略了基坑内降水引起的坑外水位下降和地表沉降,导致沉降数值和沉降曲线与实际相差较大。因此工程实践中,需要找到一种快速准确预测基坑土体开挖和降水叠合效应引起的地表沉降的计算方法。

基坑降水引起的地表沉降计算的关键在于坑外自由水位及其降深的预测;基坑土体开挖引起的地表沉降计算的关键在于建立与围护结构水平位移曲线包络面域的关系公式。为实现上述叠加效应的一体化计算,可采用MATLAB有限差分法编译程序处理,技术路线如图1所示。

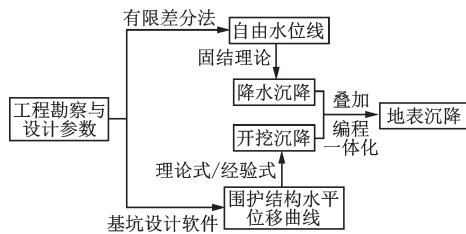


图1 地表沉降计算的技术路线

Fig.1 Technical route of ground settlement calculation

### 1.1 自由水位线迭代计算

地下水自由水位线的数值结果通过二维渗流基本微分方程及达西定律<sup>[7]</sup>,结合有限差分法编程计算得到:

$$k_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中, $u$ 为节点总水头,m; $k_x$ 、 $k_z$ 分别为节点对应土层的水平、竖向渗透系数,cm/s。计算时做如下假设:①水流及固体骨架不可压缩;②饱和渗流条件,服从达西定律;③研究内容可简化为二维平面问题。采用的差分法在迭代过程中,使自由水面始终满足水头边界条件 $u=z$ 和流量边界条件 $q=0$ ,编程计算步骤如下<sup>[4]</sup>:

(1) 假定自由面初始位置为 $\Gamma$ ,暂时剔除自由水面以上的计算节点,在本轮迭代计算中所有边界固定,边界条件参考式(7);

(2) 对当前节点进行一轮迭代差分计算,得到自由面上的所有节点水头值 $u(\Gamma)$ ;

(3) 对 $u(\Gamma)$ 的数值根据 $z=u$ 来调整该自由面节点的纵坐标,同时适应性的微调下方一定范围节点的水头值;

(4) 自由水面边界固定,重复步骤②~③至第

$i+1$ 轮迭代,直到满足所有节点平均差值 $|u_{\text{mean}}^{(i+1)} - u_{\text{mean}}^{(i)}|$ 与最大差值 $|u_{\text{max}}^{(i+1)} - u_{\text{max}}^{(i)}|$ 小于预设的阈值。

编程时需注意以下几点:由于差分法固定网格,因此进行步骤(3)调整时自由面节点应吸附于邻近点,其余节点按插值处理;由于差分网格只有两个方向,一些“阶梯顶点”上的自由面边界法线方向可通过边界节点的对应 $z$ 向和 $x$ 向合并代替。

### 1.2 基坑降水引起的地表沉降计算

将饱和土视为固液两相的随机介质,根据随机介质理论,单元土体下沉在地表产生的单元下沉盆地可表示为 $W_{\text{ew}}$ ,将其在降水曲线上方土体范围内积分,可得到在基坑外一定距离 $x$ 处的地表降水沉降理论值<sup>[8-9]</sup>:

$$W_w = \int_0^R \int_{h_0}^{f(r)} W_{\text{ew}} \text{d}sd\text{r} \quad (2)$$

$$W_{\text{ew}} = \frac{1}{r(\eta)} \exp\left[-\frac{\pi(x-r)^2}{r^2(\eta)}\right] \quad (3)$$

$$d_s = \frac{\alpha_{\text{vn}} \Delta \sigma'}{1 + e_n} d\eta \quad (4)$$

式中, $\eta$ 和 $r$ 分别对应竖直方向和水平方向; $R$ 为降水最大影响范围,m; $h_0$ 为初始地下水水位线,m; $f(r)$ 为降水后自由水位线方程; $r(\eta) = \eta / \tan \beta$ , $\beta$ 为对应土层主要影响范围角; $\Delta \sigma'$ 为深度 $\eta$ 处的土体微小单元 $d\eta dr$ 因降水产生的有效应力增量,kPa; $d_s$ 为土体微小单元在 $\Delta \sigma'$ 作用下产生的微元固结压缩; $\alpha_{\text{vn}}$ 为对应土层压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ ; $e_n$ 为对应土层的初始孔隙比。

### 1.3 基坑土体开挖引起的地表沉降计算

基坑土体开挖引起的地表沉降若通过理论公式计算,可采用下列公式<sup>[8]</sup>:

$$W_e = \iint_{\Omega + \Gamma/2} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x-r)^2\right] \text{d}r\text{d}\eta \quad (5)$$

式中, $\eta$ 、 $\beta$ 、 $x$ 、 $r$ 的含义同式(2)、(3); $\Omega$ 为基坑一边围护结构深度范围内的水平位移曲线包络面域; $\Gamma$ 为基坑底板上拱曲线包络面域。

文献[10-12]建立的偏态分布及其改进模型也是可行的计算方法。该地表沉降模型应用地层损失法的概念,并通过大量深基坑开挖地表沉降实测曲线的拟合分析建立。由于未考虑坑底上拱变形量,该方法计算所得的基坑土体开挖地表沉降与理论公式数值在基坑边缘附近会有一定差别,但其余

区域结果比较接近。该方法计算公式如下：

$$v(x) = \frac{S_w}{\sqrt{2\pi} \omega x} e^{-\frac{\left[\ln \frac{x}{2x_m}\right]^2}{2\omega^2}} \quad (6)$$

式中,  $v$  为墙后任一点地表沉降量, mm;  $\Delta x$  为待求沉降点距坑边距离, m;  $x_m$  为最大沉降点距坑边距离, 对于坑周无超载软土基坑可取  $0.5 \sim 0.7h$ , m;  $S_w$  为沉降曲线包络面积, 可取为  $0.8 \sim 1.2$  倍的围护结构侧移曲线包络面积  $S_p$ , m $\cdot$ mm;  $\omega$  为经验系数, 软土基坑可取  $0.60 \sim 0.70$ 。围护结构水平变形量很大程度上反应了实际的坑外地表沉降<sup>[13-14]</sup>, 而理论公式(5)还对坑底上拱变形量进行了考虑。但由于理论公式(5)的未知变量参数较多, 编程计算不易得到最终解, 因此本文针对基坑土体开挖引起的地表沉降计算编程采用了经验公式(6)。

表1 螺塘街地铁站场地土层主要参数

Table 1 Main parameters of the soil around Luotang street metro station

层号/地层名称	平均厚度/m	渗透系数/ ( $10^{-6} \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$	初始 孔隙比	天然重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	饱和重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
①-1/杂填土	4.7	500	0.459	0.856	19.0	19.7
①-2/素填土	1.4	20	0.475	0.942	18.3	18.6
②-2b4/淤泥质粉质黏土、粉质黏土	3.5	12.5	0.645	1.131	17.6	17.7
②-3b3-4+d3/粉质黏土与粉砂互层	3.6	300	0.469	1.018	18.0	18.5
②-3d3/粉细砂	4.2	2 700	0.170	0.829	18.2	18.7
②-4d2/粉细砂	15.4	3 300	0.151	0.821	18.5	19.0
②-5d1/粉细砂	11.2+10.0	3 600	0.134	0.787	19.0	19.6
②-5b3-4+d2-3/粉质黏土与粉砂互层	2.2	300	0.365	1.011	17.7	18.2
②-6d1/中粗砂	2.3	6 000	0.103	0.639	19.8	20.5
③-4e/含卵砾石中粗砂	7.9	9 000	0.249	1.120	20.5	21.7
K2p-2/泥岩、粉砂质泥岩	4.0	20	—	—	21.5	22.4

注: ②-5d1粉细砂层在厚度11.2 m处插入②-5b3-4+d2-3粉质黏土与粉砂互层

螺塘街站为地下三层岛式车站, 采用明挖顺作法施工, 基坑开挖深度约为23.8 m。围护结构采用厚1 m、深约50.5 m的地下连续墙, 地墙插入比为1.12, 并采用悬挂式止水帷幕, 即围护结构未隔断坑内外地下水。基坑采用坑内重力式管井降水至坑底以下1 m, 管井距基坑边约5 m。

## 2.2 计算模型与参数说明

计算模型中降水影响范围采用Forchheimer公式初步计算<sup>[15]</sup>, 取基坑开挖深度的5倍, 即120 m。计算范围内的各土层等效为水平分层。将该模型以平面问题简化取半边进行分析, 忽略井点半径并

## 2 工程实例计算与验证

### 2.1 工程概况

南京地铁7号线螺塘街站位于建邺区河西南部螺塘路南侧, 秦淮新河北侧, 临近长江, 属于典型的长江和秦淮河漫滩地貌单元。土层由上而下分布及参数见表1。该区域土层是典型的漫滩二元结构<sup>[2]</sup>, 上部为河漫滩沉积物淤泥质黏土和细砂, 下部为组成河床沉积物的粗砂和砾石。在埋深约67 m处为场地下伏基岩, 该岩层主要包括泥岩、泥质粉砂岩, 其裂隙大多呈闭合状, 泥、钙质充填, 透水性差且不均匀, 可视为一不透水层边界。该区域地下承压水头平均埋深约2 m。

取为中心轴, 根据上述参数建立实例分析的计算模型如图2所示。计算模型中, 在土体分层处应满足  $v_{出} = v_{入}^{[7]}$ , 其余边界条件为:

$$\begin{cases} u = h_1 & \text{on } DE \\ u = h_2 & \text{on } BC \\ u = z & \text{on } AB, AG, EF \\ q = 0 & \text{on } CD, AG, EF, HIJK \end{cases} \quad (7)$$

地勘报告将②-3b3-4+d3层至③-4e层定为承压水层, 因此简化处理时  $DE$  边界上承压水层的初始水头值  $h_1$  根据地勘报告确定。

鉴于本工程地质条件较差, 式(6)中,  $x_m$  取为  $0.6h$ ,  $S_w$  取为  $0.9S_p$ ,  $\omega$  取为  $0.60$ ,  $S_p$  的取值可依据基

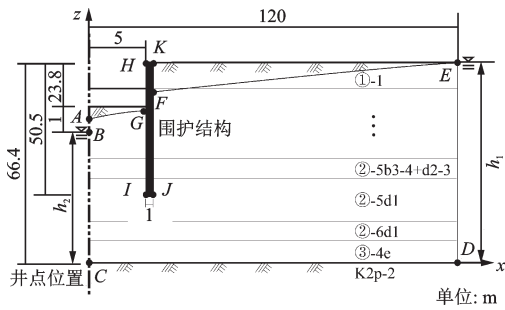


图2 工程实例计算模型

Fig.2 Calculation model of the engineering case

坑支护结构设计软件计算得到的围护结构水平位移曲线求得。

利用MATLAB编译程序时,分别依据式(2)、(3)、(4)、(7)计算降水引起的地面沉降,依据式(5)、(6)计算基坑土体开挖引起的地面沉降,并最终对两个结果进行线性叠加。

螺塘街站主体基坑的监测点布置如图3所示。研究区域内的地连墙深层水平位移监测点CX5~7和CX15~17的监测数据见表2。由理正深基坑软件计算得到的围护结构水平位移曲线如图4所示,围护结构水平位移峰值45.5 mm,将该曲线作为输入参数,再采用公式(6)即可求解基坑土体开挖引起的地面沉降。表2所示监测数据中,6个监测点的水平位移峰值均值为50.3 mm,位置在围护结构顶部以下约20 m。理正深基坑软件计算的围护结构水平位移结果与现场监测数据的偏差约为9.5%。

### 2.3 计算结果验证

基于MATLAB2016编译差分法沉降计算程

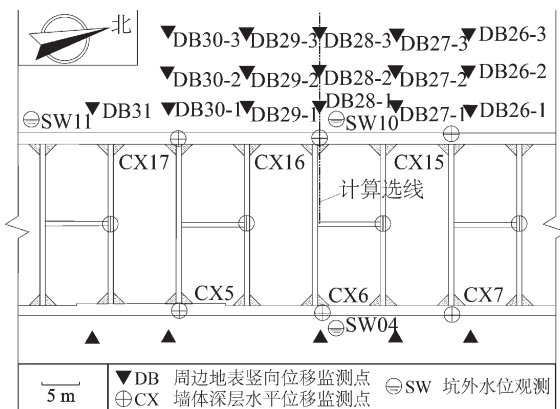


图3 计算区域内基坑监测点布置

Fig.3 Arrangement diagram of monitoring points of the pit  
注:本图示意范围有限,SW12孔位在SW11左侧约40 m处,本图未显示,DB26~30第4~6监测点未标出

表2 围护结构水平位移监测数据

Table 2 Horizontal displacement monitoring data of enclosure structure

监测点	峰值点深度/m	峰值点水平位移/mm	监测点	峰值点深度/m	峰值点水平位移/mm
CX5	19.5	-44.12	CX15	21.5	-56.14
CX6	20	-46.59	CX16	19.5	-53.63
CX7	21	-48.52	CX17	20.5	-53.57

注:地连墙水平位移负号表示向基坑内

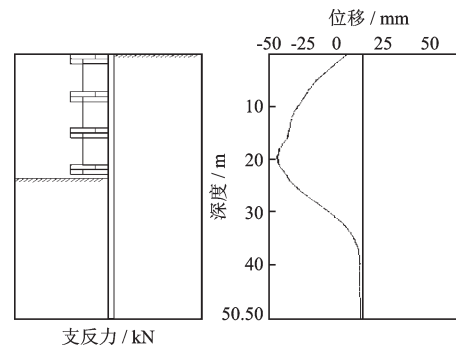


图4 围护结构水平位移曲线(理正基坑软件计算结果)

Fig.4 Horizontal displacement curve of the enclosure structure calculated by LEADING SOFTWARE

序,根据上述计算模型、参数及边界条件进行模拟分析。程序计算时取0.5 m×0.5 m的正方形单元划分网格,迭代计算精度预设为1e-6。

图5为本文所提方法编程计算得到的地下水自由水位线与现场监测地下水位的对比。可见,计算地下水水位线在基坑边60 m以外基本不变,坑外区域在基坑边处降至最低,最低水位埋深为8.8 m(原始地下水埋深2 m,计算水位降深6.8 m),整体略低于SW10~12孔水位埋深实测值8.1~8.6 m,与SW10孔位数值最接近,只有2.4%的偏差。坑内水位基本水平并与坑外水位有近15.8 m的水位落差。

图6为相应的计算节点水头值云图,等势线增量为1 m。在远端的降水影响边界处等势线基本保持竖直,在围护结构附近等势线呈现出密集状态并与地连墙正交,降水流在此处集聚且越靠近地连墙,水流越呈现出竖向的流动趋势。同时注意到深度约44~46 m范围内,由于该段的粉质黏土与粉砂互层渗透性低,等势线均有一定弯折现象。

为了验证本文方法计算结果的准确性,同时利用理正深基坑软件计算了土体开挖引起的地表沉

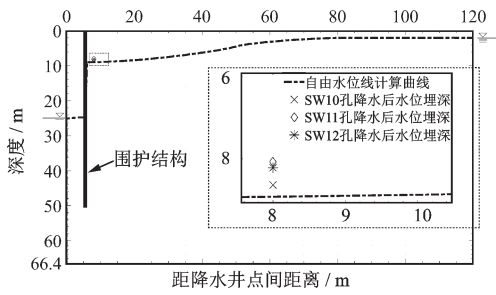


图5 计算自由水位线与实测孔水位

Fig.5 Calculated free surface and measured data of groundwater

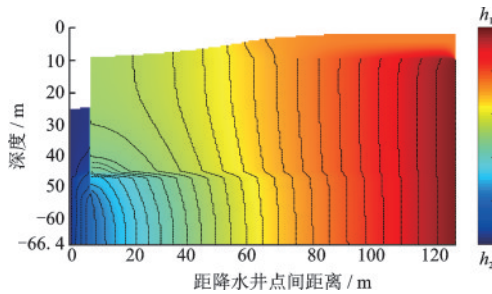


图6 计算节点水头变化云图与等势线

Fig.6 Nodal head contour and corresponding equipotential lines of groundwater

降曲线,如图7所示。利用MODFLOW软件和分层总和法计算了基坑降水引起的地表沉降等值线,如图8所示。将两个软件计算的结果进行叠加可得到地表总沉降量。将本文方法计算得到的地表沉降曲线与理正深基坑和MODFLOW软件叠加的计算结果、现场监测数据进行对比分析,如图9所示。

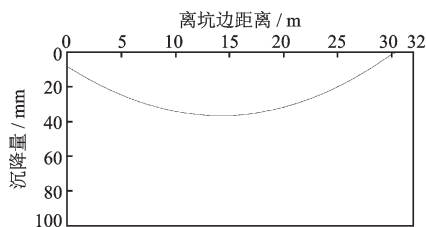


图7 基于理正软件的地表沉降曲线

Fig.7 Ground settlement curve calculated by LEADING SOFTWARE

图9中,本文方法计算得到的地表总沉降曲线与现场监测数据和曲线规律基本吻合,数据偏差基本在10%以内。采用理正深基坑软件计算得到的地表沉降曲线,其峰值与本文方法计算的土体开挖引起的地表沉降基本相符,但与本文方法计算的地表总沉降值以及现场监测数值相差较大,且曲线规

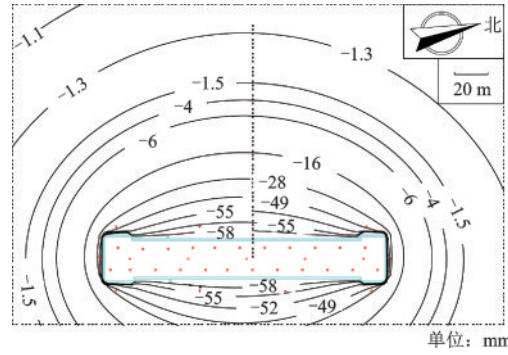


图8 基于MODFLOW软件的降水地表沉降等值线

Fig.8 Equipotential lines of dewatering settlements calculated by MODFLOW

律也不相符,但是当理正深基坑软件计算结果与MODFLOW软件计算的降水沉降进行叠加后,叠加值与本文方法计算的地表总沉降曲线在数值和规律上均比较吻合。

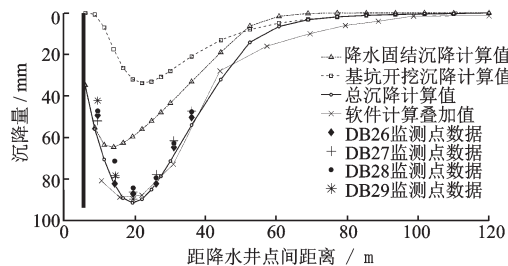


图9 本文方法、理正与MODFLOW软件计算叠加、现场监测地表沉降数值对比

Fig.9 Comparison of ground settlement calculated by the proposed method, combined method with LEADING/MODFLOW software and field monitoring data

### 3 沉降影响因素与规律分析

结合本文所采用的工程案例,进一步分析了围护结构插入比和土层渗透性对地下水位降深和地表沉降的影响。由于漫滩二元结构地层的上部淤泥质土层特性是基坑工程问题的关键,因此还通过将原始上部淤泥质土层替换为粉细砂土层来实现土层渗透性变化的分析。

#### 3.1 原始土层工况规律分析

图10的实线段为地层等参数不变的情况下,通过改变地连墙插入深度(插入比 $k_d$ ),得到基坑边地下水位降深与相应的降水沉降。比较分析可知,随着地连墙插入深度的增加,水位降深逐渐减小,地

表沉降也相应降低。

图 10(a) 中的  $k_7 \sim k_{10}$  为自上而下第 7~10 层土的渗透系数, 各层土的分布详见表 1。从图 10(a) 实线段可以看出, 当插入深度在 ②-5b3-4+d2-3 土层之上 (44 m) 时, 增大围护结构插入比具有很高的效益, 反之围护结构插入比对水位降深的影响降低。这是由于 ②-5b3-4+d2-3 粉质黏土与粉砂互层水平层理发育, 竖向透水性不强, 根据表 1, 其渗透系数  $k_8$  仅为紧邻上下土层 ②-5d1 粉细砂层渗透系数  $k_7$  的 1/12。

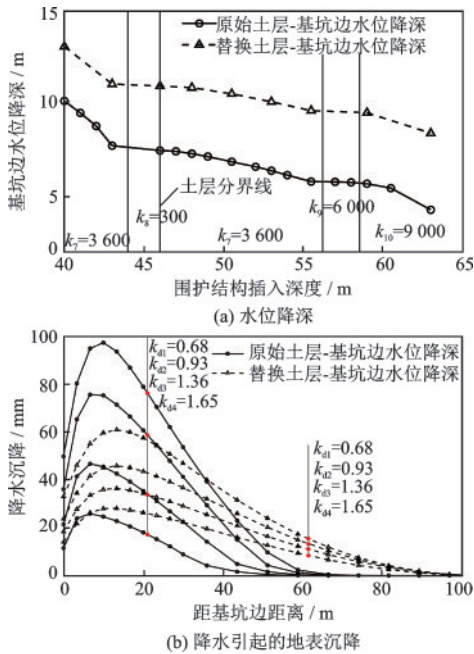


图 10 不同土层围护结构插入比对水位降深和沉降的影响  
Fig.10 Effect of insertion ratio of enclosure structures in different soil layers on groundwater drop and settlement

从图 10(b) 的实线段可以看出, 围护结构插入比  $k_d$  对降水沉降影响甚大。插入比  $k_d$  由 0.68 增大一倍至 1.36 时, 其降水地面沉降峰值由 97.2 mm 减少至 46.6 mm, 且地面沉降大于 30 mm 的范围由距基坑边 40.2 m 减少至 24.2 m, 影响范围大幅降低。

### 3.2 替换土层工况规律分析

将场地上部的 ①-2 素填土层 (松散状态)、②-2b4 淤泥质粉质黏土与粉质黏土层 (软~流塑状态)、②-3b3-4+d3 粉质黏土 (软~流塑状态) 与粉砂 (松散状态) 互层替换为 ②-4d2 粉细砂层 (中密状态), 水位降深和地表沉降曲线如图 10 的虚线段所示。

与原始土层情况相同, 水位降深与地表沉降随着地连墙插入深度的增加而减小。但相对原始土层, 水位降深更大而沉降峰值却变小。进一步分析可知, 漫滩二元地层结构的上部土体颗粒小, 如淤泥质土层渗透性较差而压缩系数很大, 对地下水下降的反应灵敏, 从而形成更大的沉降。分析图 10(b) 还可发现, 相同的  $k_d$  增量, 原始土层 (即上部为淤泥质等细颗粒土) 降水沉降曲线曲率更大, 即相同范围内, 差异沉降更大, 对周边建筑物的危害更大。

## 4 结 论

(1) 基于 MATLAB2016 编译了二维差分法基坑工程地表沉降计算程序, 可考虑围护结构与土体分层进行基坑工程降水及开挖后的自由水位线及地表沉降计算, 并给出了关键部分的代码编译思路。应用有限差分法编译程序计算水位降深具有思路清晰、方法简单可行的优点。相较于国内主流基坑支护结构设计软件, 本方法可用于深基坑工程降水及开挖时两种地表沉降的协同计算以及模型中各位置地下水头值的计算, 对地表最终沉降以及围护结构侧边水压进行预测, 为减少降水引起的基坑工程灾害事故提供计算依据。

(2) 通过对南京地铁 7 号线螺塘街站的模拟分析, 验证本文方法在悬挂式止水帷幕降水模拟方面的适用性良好, 计算精度与工程实测数据和规律吻合较好。

(3) 二元结构中的上部淤泥质等细颗粒土层压缩系数大、渗透性差, 较小的水位降低也会造成不可忽略的地表沉降; 上部淤泥质土层替换为粉细砂层时虽坑外地下水位降深增大, 但地表沉降峰值不升反降。

(4) 深基坑工程围护结构插入比越大, 坑外水位降深越低, 这一现象在渗透性大的土层中更显著; 围护结构相同插入比增值, 上部为淤泥质土时降水沉降峰值减少的幅度更显著。当场地下部高渗透性土层中间存在相对弱透水土层时, 可将围护结构插入该土层以下能更有效地减少基坑外水位降深和沉降。因此二元结构场地基坑工程可通过调整围护结构插入比来控制坑外地下水位和地表沉降以达到最佳经济效益。

## 参考文献:

- [1] 蔡来炳,周红波.城市轨道交通深基坑工程承压水风险与控制研究[J].防灾减灾工程学报,2015,35(5):617-623.  
Cai L B, Zhou H B. Risk of the artesian water and control measurements for the deep excavation of urban rail transit engineering [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(5): 617-623. (in Chinese)
- [2] 李英,何忠泽,严桂华,等.武汉二元结构地层基坑降水及其地面沉降研究[J].岩土工程学报,2012,34(增1):767-772.  
Li Y, He Zh Z, Yan G H, et al. Excavation dewatering and ground subsidence in dual structural stratum of Wuhan [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Sup1): 767-772. (in Chinese)
- [3] Leontiev A, Huacasi W. Mathematical programming approach for unconfined seepage flow problem [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2001, 25(1): 49-56.
- [4] 王兆清,李术才,李树忱.无压渗流问题的多节点有限元方法[J].岩土力学,2008,29(10):2647-2650.  
Wang Zh Q, Li Sh C, Li Sh Ch. Multi-node finite element approaches for unconfined seepage flow problem [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2647-2650. (in Chinese)
- [5] 张顺福.子域积分法及组合网格算法在无压渗流中的应用[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013.  
Zhang Sh F. Application of sub-domain integration method and composite grid method in unconfined seepage analysis [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013. (in Chinese)
- [6] 介玉新,揭冠周,李广信.用适体坐标变换方法求解渗流[J].岩土工程学报,2004,26(1):52-56.  
Jie Y X, Jie G Zh, Li G X. Seepage analysis by boundary-fitted coordinate transformation method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 52-56. (in Chinese)
- [7] 王俊杰.地下水渗流力学[M].北京:中国水利水电出版社,2013.  
Wang J J. Groundwater seepage mechanics [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese)
- [8] 施成华,彭立敏.基坑开挖及降水引起的地表沉降预测[J].土木工程学报,2006,39(5):117-121.  
Shi Ch H, Peng L M. Ground surface settlement caused by foundation pit excavation and dewatering [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 117-121. (in Chinese)
- [9] 谷拴成,李志,李瑶.深基坑工程预降水诱发地表沉降分析[J].科学技术与工程,2018,18(30):233-237.  
Gu Sh Ch, Li Zh, Li Y. Analyses on ground settlement induced by pre-precipitation in deep foundation pit project [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(30): 233-237. (in Chinese)
- [10] 聂宗泉,张尚根,孟少平.软土深基坑开挖地表沉降评估方法研究[J].岩土工程学报,2008,30(8):1218-1223.  
Nie Z Q, Zhang Sh G, Meng Sh P. Surface settlement of deep foundation pits by excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1218-1223. (in Chinese)
- [11] 刘小丽,周贺,张占民.软土深基坑开挖地表沉降估算方法的分析[J].岩土力学,2011,32(增1):90-94.  
Liu X L, Zhou H, Zhang Zh M. Analysis of surface settlement estimation of deep foundation pit excavation in soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup1): 90-94. (in Chinese)
- [12] 成怡冲,张挺钧,郑翔,等.软土地区明挖隧道施工引起周边建筑沉降的预测方法[J].城市轨道交通研究,2018,21(10):68-72.  
Cheng Y Ch, Zhang T J, Zheng X, et al. Prediction method of surrounding building settlement caused by open-excavated tunnel construction in soft soil area [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(10): 68-72. (in Chinese)
- [13] 康志军,谭勇,李想,等.基坑围护结构最大侧移深度对周边环境的影响[J].岩土力学,2016,37(10):2909-2914.  
Kang Zh J, Tan Y, Li X, et al. Influences of depth of maximum lateral deflection of excavation support on adjacent environment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2909-2914. (in Chinese)
- [14] 施有志,柴建峰,赵花丽,等.地铁深基坑开挖对邻近建筑物影响分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(6):35-43.  
Shi Y Zh, Chai J F, Zhao H L, et al. Study on the impact of metro deep foundation excavation on neighboring buildings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 35-43. (in Chinese)
- [15] 田梅青.淤泥地层中深基坑降水影响范围及地层变形稳定性分析[J].科学技术与工程,2013,13(31):9436-9440.  
Tian M Q. Research on dewatering and deformation stability of deep foundation pit in silt stratum [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(31): 9436-9440. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)