

## 基坑开挖过程中地下水渗流数值模拟

刘历波,王晓磊,史三元

(河北工程大学 土木工程学院 河北 邯郸 056038)

**摘要:**地下水渗流会对基坑的安全构成威胁。本文基于深基坑工程实例,建立了三维基坑渗流模型。通过对邯郸市某建筑基坑开挖过程中渗流情况的数值模拟,分析了基坑分阶段开挖过程中基坑内外土体中孔隙水压力在时间和空间上的分布规律。分析结果表明基坑开挖过程中地下水由基坑外部向内部渗流,基坑内、外部形成主、被动压力区,对基坑内部稳定性不利。研究结论为深基坑的设计与支护提供理论指导。

**关键词:**基坑开挖;渗流分析;地下水;数值模拟

**中图分类号:** TU46+3

**文献标识码:** A

## Numerical simulation of groundwater seepage in the process of excavation

LIU Li-bo, WANG Xiao-lei, SHI San-yuan

(College of Civil Engineering Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** Groundwater seepage poses a threat to the foundation pit safety. Based on the example of deep foundation pit engineering, the three-dimensional seepage model is established. According to the seepage numerical simulation of a foundation pit at excavation stage in Handan city, the pore water pressure distribution rule in soil of foundation pit in time and space at excavation stages were analyzed. The result showed that the groundwater flow into the internal foundation pit from the external in the process of excavation, and active pressure and passive pressure zone were formed. The conclusion provides theoretical guidance for the design and support of deep foundation pit.

**Key words:** pit excavation; seepage analysis; groundwater; numerical simulation

近些年来,随着我国城市建筑结构体积庞大化和建筑形式复杂化,基坑的深度和规模也在不断增大,而这些也使基坑工程中的渗流问题也愈发凸显。在一些地下水较浅的城市,降水措施不当时基坑发生、流砂、地层隆起和基坑坍塌的可能性更大<sup>[1]</sup>。据统计,其中因地下水处理不当引发的事故约占22%<sup>[2]</sup>。工程实践表明,基坑工程安全很大程度上取决于对基坑进行正确地渗流分析。而渗流对固体的作用体现在孔隙压力载荷上,因而有必要对于基坑开挖过程中的孔隙水压力的情况研究分析<sup>[3-4]</sup>。

刘建军<sup>[5]</sup>采用数值方法分析了基坑降水过程中基坑土体渗透压力、水头变化规律以及对基坑

变形的影响。杨宝珠<sup>[6]</sup>应用FLAC3D软件分析了深基坑开挖过程中围护结构变形、支撑轴力以及工程桩承载参数的时空效应。本文从数值模拟着手,对基坑开挖阶段基坑内和基坑周围土体内的渗流情况进行了数值模拟。研究了基坑开挖过程中坑内外土体的孔隙水压力在空间上的分布变化规律,为基坑工程的设计与支护提供指导。

### 1 渗流控制方程和求解条件

基坑开挖过程中,坑外土体形成压力主动区,坑内形成被动区。基坑分 $n$ 步开挖。每次开挖深度为 $\Delta h_j$ , ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 每步开挖后被动区土层厚度为 $h_2$ ,  $h_{2j} = h_1 - \Delta H_j$ 。基坑分布开挖示意图如图1。

收稿日期:2012-10-20

基金项目:河北省教育厅青年基金项目(2010221);邯郸市科技局项目(1020140119)

作者简介:刘历波(1979-),男,河北乐亭人,讲师,从事岩土工程结构工程方面的研究。

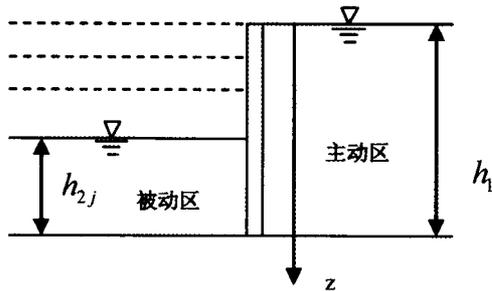


图1 基坑分步开挖示意图

Fig.1 Schematic diagram of foundation pit excavation

主动区和被动区在每步开挖下的超静孔压分别用  $u_{1j}$  和  $u_{2j}$  表示,采用太沙基一维固结理论的假设,并假定土体的渗透系数和回弹模量为常数,可得负孔压消散的控制方程分别为

$$\frac{\partial u_{1j}}{\partial t} = c_{r1} \frac{\partial^2 u_{1j}}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_{2j}}{\partial t} = c_{r2} \frac{\partial^2 u_{2j}}{\partial z^2} \quad (2)$$

假设主动区和被动区在围护结构的底部渗流是连续的则式(1)、(2)边界条件为

$$\begin{cases} u_{1j}(0, t) = 0 \\ u_{2j}(\Delta H_j, t) = 0 \\ u_{1j}(h_1, t) = u_{2j}(h_1, t) \\ k_{v1} \frac{\partial u_{1j}(h_1, t)}{\partial z} = -k_{v2} \frac{\partial u_{2j}(h_1, t)}{\partial z} \end{cases} \quad (3)$$

每步开挖后坑底卸载所产生的初始超静孔压为该步开挖土体对抗底的有效作用力和前一步开挖后尚未完全消散的超静孔压之和;主动区的初始超静孔压可以近似假设为由围护结构底部到坑外地表呈线性分布。得到故方程(1)和(2)的初始条件分别为:

$$\begin{cases} u_{11}(z, 0) = -r'_2 \Delta h_1 z / h_1 = -r'_1 \Delta H_1 z / h_1 \\ \quad (j=1, 0 \leq z \leq h_1) \\ u_{1j}(z, t_{j-1}) = -r'_2 \Delta h_1 z / h_1 + u_{1j-1}(z, t_{j-1}) \\ \quad (j > 1, 0 \leq z \leq h_1) \end{cases} \quad (4)$$

表1 土体物理力学指标

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soils

| 层号  | 土层名称    | 厚度/m | w/%  | $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$ | e         | 快剪指标  |                 |
|-----|---------|------|------|-----------------------------------|-----------|-------|-----------------|
|     |         |      |      |                                   |           | c/kPa | $\Phi / ^\circ$ |
| 1   | 杂填土     |      |      |                                   | 0.6-1.2   | 10    | 8               |
| 2   | 粉质粘土    | 28.4 | 18.6 | 1.011                             | 3.7-4.3   | 16    | 11              |
| 3-1 | 粘质粉土    | 31.3 | 18.7 | 0.865                             | 2.7-3.1   | 14    | 20              |
| 4-1 | 粉质粘土    | 36.5 | 18.9 | 0.622                             | 2.5-3.4   | 31.8  | 10              |
| 4-2 | 淤泥质粉质粘土 | 46.6 | 17.6 | 0.588                             | 13.5-16.4 | 4.5   | 15              |

$$\begin{cases} u_{21}(z, 0) = -r'_2 \Delta h_1 = -r'_1 \Delta H_1 \\ \quad (j=1, \Delta H_1 \leq z \leq h_1) \\ u_{2j}(z, t_{j-1}) = -r'_2 \Delta h_1 + u_{2j-1}(z, t_{j-1}) \\ \quad (j > 1, \Delta H_j \leq z \leq h_1) \end{cases} \quad (5)$$

## 2 基坑开挖渗流模拟

### 2.1 工程概况

采用 MIDAS/GTS 岩土分析软件对邯郸市拟建建筑进行了渗流数值模拟。该建筑地上 12 层,地下 3 层,采用框架结构,柱下独立基础,基坑平面形状为矩形,实际开挖深度为 17 m。基坑分三次依次向下开挖,第一次开挖深度为 8 m,第二次 5 m、第三次 4 m。计算应用土体物理力学参数及渗透系数见表 1、表 2。

### 2.2 模拟工况

建模主要是生成二维网格之后利用生成的网格扩展成三维 Hexa 网格。土体采用摩尔-库伦模型,最终建立计算模型模型。定义开挖前为第一阶段,开挖过程为第二、第三、第四阶段。开挖完成后为第五阶段。本次模拟主要研究在开挖过程中基坑及其周围土体内孔隙压力的分布规律。模拟工况如下:(1)开挖前基坑及其周围土体中孔隙压力的分布情况;

(2)开挖阶段基坑及其周围土体中孔隙压力的分布规律。分析第一、二阶段在开挖 7 d、20 d、30 d 后孔隙压力的分布规律。第三阶段在前两阶段的基础之上继续向下开挖 4 m。开挖完成后,分析 7 d、20 d、30 d、100 d 基坑内及周围孔隙水压力的分布情况;

(3)基坑在开挖结束后基坑及其周围土体中孔隙压力的分布情况。

表2 渗透系数

Tab.1 Permeability coefficients

| 层号 | $k_x/(m/d)$ | $k_y/(m/d)$ | $k_z/(m/d)$ |
|----|-------------|-------------|-------------|
| 1  | $2.62e-4$   | $2.62e-4$   | $2.21e-4$   |
| 2  | $4.81e-4$   | $4.81e-4$   | $4.31e-4$   |
| 3  | $2.11e-4$   | $2.11e-4$   | $1.81e-4$   |
| 4  | $1.14e-4$   | $1.14e-4$   | $0.92e-4$   |

2.3 模拟结果分析

(1) 开挖前基坑内外孔隙水压力分布情况

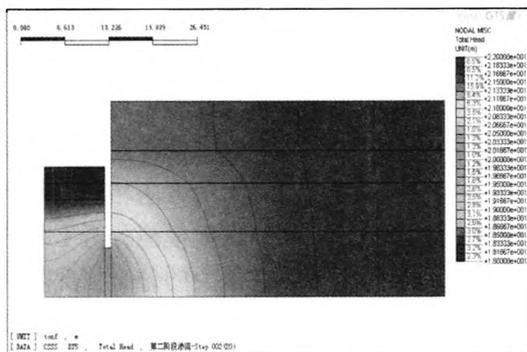
由于不存在内外压差的,开挖前基坑内外土体处于相对静止状态。孔隙水压力水平分层分布,水体没有相对运动趋势。在没有进行开挖产生压力水头的情况下,基坑内水体的渗流压力来自外界水源。

(2) 开挖阶段基坑及其周围土体孔隙水压力的分布规律

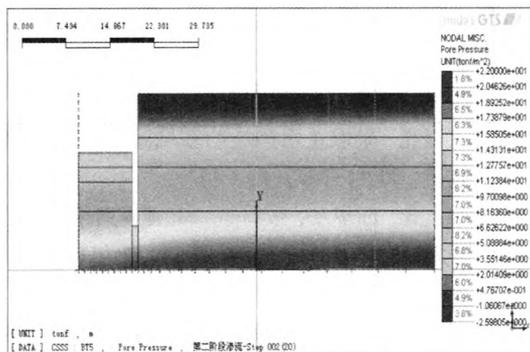
① 空间上基坑孔隙水压力的分布情况

基坑开挖造成坑内外产生水头差,在水头压力作用下,坑外水体向坑内发生渗流。选取第二阶段开挖后基坑渗流情况分析,如图2所示。基坑开挖过程中,导致基坑内外产生压力水头,基坑下部越接近连续墙处,孔隙水压力由基坑内侧向基坑外侧呈现增大趋势,如图2a所示。这说明从基坑外侧向基坑内侧渗流过程中,孔隙水压力逐渐变小。而在坑内,超静孔压包括正的区域和负的区域,在围护结构底部为由最大负的超静孔压(坑外)变化为最大正的超静孔压(坑内)的区域。

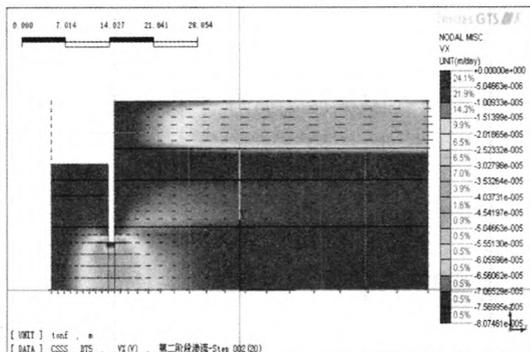
随着基坑的不断开挖,基坑内外水平方向孔隙水压力不平衡,且内外压差不断增大,增加的水力梯度促使坑外水体向坑内渗流,见图2b。图2c为水平方向水流速度矢量图,从图中可以反映出基坑外水体向基坑内水平方向的渗流速度,在本阶段地下连续墙下方渗流矢量线最长,这表示此区域渗流速度最快,渗流产生的渗流力最大。



(a) 开挖水头分布



(b) 孔隙水压力等值线



(c) 开挖渗流速度分布

图2 第二阶段渗流情况

Fig.2 Seepage condition at the second phase

② 基坑孔隙水压力的时间变化

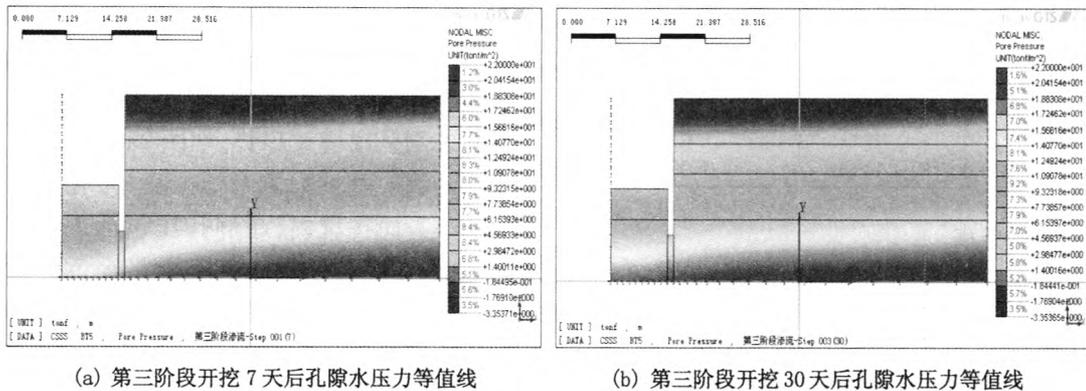
各阶段开挖后,基坑开挖后随着基坑内地下水的渗流,负孔隙水压力会逐步消散。以第三阶段开挖后7 d和30 d为例,基坑内外孔隙水压力

变化云图如图3所示。基坑外土体向远离基坑的一侧负超孔隙水压力逐步消散。靠近地下连续墙的部位孔隙水压力等值线向下逐步发展。

选取地下连续墙底部为监测点,各阶段孔隙

水压力数据绘制成图4曲线。从图中可以清楚反映出各个阶段开挖后压力水头的变化情况。从第

一阶段开挖到第五阶段开挖结束,底部监测点的水头由16 m下降到10 m以下,随后渐趋稳定。



(a) 第三阶段开挖 7 天后孔隙水压力等值线

(b) 第三阶段开挖 30 天后孔隙水压力等值线

图3 第三阶段渗流情况

Fig.3 Seepage condition at the third phase

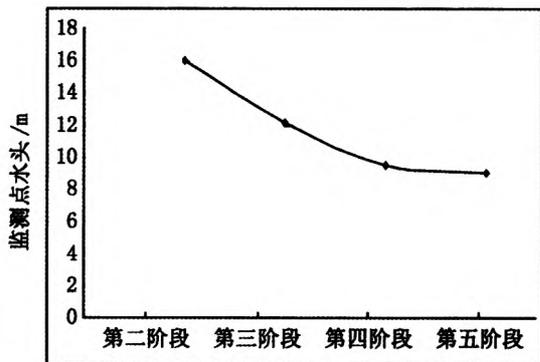


图4 各阶段水头曲线图

Fig.4 Water head curve of each phase

(3) 基坑在开挖结束后基坑及其周围土体中孔隙压力的分布情况

第五阶段开挖完成后,基坑内外土体内孔隙水压力的分布情况如图5所示。由基坑开挖产生的超孔隙水压力逐渐消失,孔隙水压力基本上停止变化,说明此时孔隙水压力处于平稳状态,基坑渗流处于稳定状态,属于稳定流阶段。

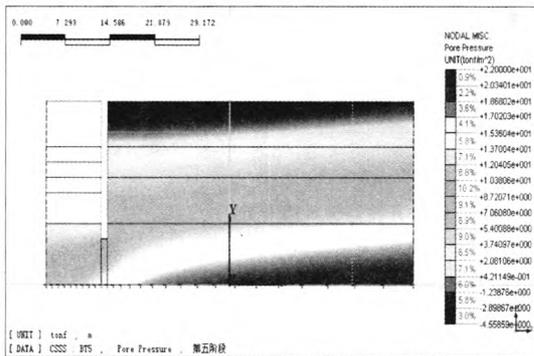


图5 第五阶段孔隙水压力等值线

Fig.5 Pore water pressure contour at The fifth phase

### 3 结论

通过数值计算可以看出,基坑开挖产生的影响如下:①基坑开挖打破了基坑内外水体原来的平衡状态,基坑内部水头降低,在基坑外部水头压力水头作用下基坑外部水体发生向内部的渗流。②卸载作用是基坑外部成为主动土压力区,基坑内部形成被动土压力区,且渗流方向与主动土压力的方向相同对基坑内部稳定性不利。本文通过数值模拟分析了基坑开挖过程中基坑内外孔隙水压力的分布情况随时指导基坑支护和开挖施工的安全进行。

### 参考文献:

- [1] 赵全胜,张春会.改进 Duncan - Chang 模型及其在基坑开挖数值模拟中的应用[J].河北科技大学学报,2009,30(2):112 - 115.
- [2] 王国光.采取止水措施的基坑渗流场研究[J].工业建筑,2001,31(4):43 - 45.
- [3] 徐鑫鑫,苏华友,张春萍. BP 神经网络在基坑周边地表短期沉降预测中的应用[J].四川理工学院学报:自然科学版,2013,26(2):35 - 38.
- [4] 王晓磊,李京涛.邯郸新近沉积饱和粉粘土本构归一性探讨[J].河北工程大学学报:自然科学版,2009,26(3):37 - 40.
- [5] 刘建军,杨前雄,史沛元.基坑降水过程中地下水渗流数值模拟[J].地下水,2005,27(5):342 - 343.
- [6] 杨宝珠,仲晓梅.基于 FLAC - 3D 的深基坑开挖过程数值分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2008,25(3):15 - 18.

(责任编辑 马立)