

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0741-05

# 基坑工程降水渗流场特性分析

李春忠<sup>1,2</sup>, 陈国兴<sup>1</sup>, 樊有维<sup>2</sup>

(1. 南京工业大学 岩土工程研究所, 南京 210009; 2. 南京市测绘勘察研究院有限公司, 南京 210005)

**摘 要:** 基于 Biot 固结理论和 Terzaghi 有效应力原理, 采用有限元法对深基坑工程降水渗流场进行应力场与渗流场耦合的数值模拟。结合南京九华山隧道基坑工程降水实例, 分析了基坑降水水位线的形状、流速分布及地表沉降规律; 比较了降水井不同布置、井深对基坑渗流场及周围地表沉降的影响, 其结果有助于进一步了解地下水与土体相互作用机理, 并为基坑工程降水井的设计提供可靠的指导。

**关 键 词:** 基坑工程; 降水; 渗流; 流固耦合; 渗流场特性

**中图分类号:** O 257.3

**文献标识码:** A

## Study on seepage field characteristics of foundation pits

LI Chun-zhong<sup>1,2</sup>, CHEN Guo-xing<sup>1</sup>, FAN You-wei<sup>2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China;

2. Co. Ltd. of Nanjing Institute of Surveying, Mapping & Geotechnical Investigation, Nanjing 210005, China)

**Abstract:** Based on Biot consolidation theory and Terzaghi effective stress principle, a coupling numerical simulation was done to analyze the seepage field characteristics of foundation pit during the dewatering by FEM. Taking the dewatering practice of Jiuhuashan Tunnel foundation pit engineering for example, the shape of phreatic surface, the distribution of seepage velocity and the settlement of ground are analyzed; and the influences of different distribution and depth of draining wells on the seepage field characteristics and ground settlement are compared. This research redounds to understanding mutual action mechanism between groundwater and soils. It provides credible directions to the draining well design for foundation pit engineering.

**Key words:** foundation pit; dewatering; seepage; fluid-solid coupling; seepage field characteristics

## 1 引 言

在含水率丰富的软土地区进行基坑工程开挖, 不可避免地要遇到地下水问题<sup>[1]</sup>。通常情况下要采取降水措施, 而降水引起的地下水位的变化将引发土体中渗流场和应力场的改变, 加之不同形式的防渗帷幕、不同类型的支护结构的设置, 使得地下水与土体的相互作用显得极为复杂, 这些不确定因素阻碍了对基坑降水渗流场特性的认识以及降水对周围环境影响的评价<sup>[1, 2]</sup>。因而, 研究基坑工程降水过程中应力场与渗流场的相互作用机理, 掌握降水渗流场的特性及降水对周围环境的影响是有重要的工程应用价值的。

基坑工程降水引起的渗流场和应力场耦合问题是一个涉及到非均质、非线性的土体材料、复杂

的荷载作用以及多种变化的边界条件的非线性组合问题, 目前广泛应用有限元法进行模拟分析<sup>[3~5]</sup>。

本文在前人研究基础上, 将采用 ABAQUS 软件对基坑降水过程进行流固耦合分析。

## 2 流固耦合问题的有限元法分析

在 ABAQUS 软件模拟计算中, 通过把渗流场分析的结果作为应力场分析的荷载来实现两种场的耦合, 利用包含所有必须自由度(位移和孔压)的耦合单元类型通过一次求解得出耦合场分析结果。对流固耦合问题的求解采用有效应力分析法, 以滑动土体的土骨架为研究对象, 水作为存在于土骨架中的连续介质, 孔隙水压力采用总孔压即包括静水压力和渗流孔压, 其基本原理如下<sup>[4, 6]</sup>:

流固耦合问题的应力平衡方程可用有效应力

收稿日期: 2006-06-25

作者简介: 李春忠, 男, 1980 年生, 硕士, 主要从事基坑工程稳定性研究及地下水渗流数值模拟。

表示为

$$\bar{\sigma} = \sigma + \chi u_w I \quad (1)$$

式中  $\bar{\sigma}$  为有效应力;  $\sigma$  为总应力;  $u_w$  为平均孔隙水压力;  $\chi$  为试验确定的系数, 一般取  $\chi = S_r$  (土的饱和度);  $I$  为方向矢量。

采用小变形假设, 几何方程可表示为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

应变可以分解为

$$d\varepsilon = (d\varepsilon_g^{\text{vol}} + d\varepsilon_w^{\text{vol}})I + d\varepsilon^{\text{el}} + d\varepsilon^{\text{pl}} \quad (3)$$

式中  $d\varepsilon_g^{\text{vol}}$ ,  $d\varepsilon_w^{\text{vol}}$  分别为土颗粒和水的体积应变;  $d\varepsilon^{\text{el}}$ ,  $d\varepsilon^{\text{pl}}$  分别为土的弹性应变和塑性应变。

水的连续性微分方程可表示为

$$\frac{\partial(\rho_w n)}{\partial t} + \nabla(\rho_w n v_w) + Q = 0 \quad (4)$$

式中  $\rho_w$  为水的密度;  $n$  为土体的孔隙率;  $v_w$  为孔隙水的流速;  $Q$  为地下水的补给源。

结合 Darcy 定律, 得到孔隙水的流速方程:

$$v_w = -\frac{k}{S_r n \rho_w g} \left( \frac{\partial u_w}{\partial x} - \rho_w g \right) \quad (5)$$

式中  $k$  为水力传导系数;  $g$  为重力加速度。

将式 (2) ~ 式 (5) 代入式 (1), 由虚功原理可得流固耦合问题应力平衡方程的变分形式:

$$\int_V (\bar{\sigma} - \chi u_w I) : \delta \varepsilon dV = \int_S t \delta v ds + \int_V f \delta v dV + \int_V S_r n \rho_w g \delta v dV \quad (6)$$

式中  $f$  为单位体积土体的体力;  $\delta \varepsilon = \text{sym}(\partial \delta v / \partial x)$  为虚变形率;  $\delta v$  为虚渗流速度;  $t$  为单位面积的表面作用力。

### 3 工程实例分析

九华山隧道全长 2 780 m, 是南京市快速内环东线的重要组成部分, 它包括山体隧道和湖底隧道两段, 从九华山山体下穿, 穿越玄武湖, 连接玄武湖东西向隧道, 并与新庄立交相接。该工程被认为是施工难度最大、地质条件最复杂的南京城建项目之一。选取湖底隧道 k6+400~k6+720 标段, 进行基坑降水流固耦合数值模拟。

#### 3.1 有限元计算的简化模型

为了分析问题的方便, 揭示出基本的规律, 本文作了如下基本假定:

- ①降水阶段土体的应力-应变关系符合弹性应力-应变关系, 土骨架不可压缩;
- ②按平面应变问题考虑;
- ③降水前, 土体在自重作用下固结已完成;
- ④不考虑深井埋设、支护桩施工引起的土体应力和

变形; ⑤渗透系数为定值, 且土体渗透性为各向同性。

#### 3.2 土体的计算参数

为了突出描绘降水过程对基坑工程的影响, 在有限元模型建立时对土层进行了简化, 主要参数如表 1 所示。土体采用减缩积分的四节点平面应变孔压实体单元, 共划分了 9 196 个单元。支护桩和止水桩采用减缩积分的四节点平面应变实体单元, 支护桩划分了 20 个单元, 止水桩划分了 16 个单元。土钉和降水井采用梁单元。土体计算模型尺寸为 406.3 m×40.0 m (宽度×深度)。模型左右两侧边界设置为水平向约束, 竖向自由, 底部边界设置为水平向, 竖向约束。模型左右边界 50 m 范围内假定孔隙水压力不发生变化, 为定水头边界, 模型底部为不透水边界, 降水井为排水边界。网格分布情况如图 1 所示。

#### 3.3 区性计算结果分析

结合工程实际施工情况, 在基坑开挖之前, 先进行场地内降水, 本次模拟中给定降水时间为 15 d, 采用流固耦合分析方法对降水过程中水位及水头压力的变化及降水对周围环境的影响进行了数值模拟, 结果分析如下。

##### 3.3.1 降水水位线分布

基坑降水特征值是尽可能全面地反映基坑降水效果的变量, 应当具有一定的代表性。在实际工程中, 基坑降水的最终目的是要把地下水自由面降到基底以下, 以保证施工的顺利进行, 因而地下水自由面的高程对基坑降水效果具有决定性的意义。同时, 由于在一般情况下基坑中心处的自由面最高, 故基坑中心处的地下水自由面高程应予以考虑。从图 2, 图 3 可看出, 在降水第一天仅在井的周围水头有所减小, 基坑内外的自由面下降不明显; 随着抽水时间的增长, 基坑内部自由面不断下降, 但下降速度逐渐减小, 近似呈直线关系; 而基坑外部孔隙水压力下降幅度较小, 自由面几乎没有变化, 可见止水帷幕及咬合桩起到很好的止水效果。此外, 从图 2 可以看出, 降水过程中井群间孔隙水压力呈连续的漏斗形分布, 随着降水时间的增加, 降水漏斗的范围不断扩大, 水位线变平缓。

##### 3.3.2 降水过程中流速分布规律

从图 4 可以看出, 在降水初期较高的流速仅出现在井的周围, 而帷幕下的流速较低, 此时并抽取的地下水主要由基坑内部供给。在井周围的高流速区面积不断增大, 降水进行到 3 d 时帷幕下开始出现一定流速, 且速度值不断增大, 但增大速度不断

表 1 有限元模型输入参数一览表  
Table 1 Input parameters of finite element model

| 土层编号          | 厚度<br>/ m | 重度<br>/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ | 弹性模量<br>/ MPa | 泊松比  | 渗透系数<br>/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 强度指标         |                         |                         |
|---------------|-----------|-----------------------------------------|---------------|------|------------------------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
|               |           |                                         |               |      |                                          | 黏聚力<br>/ kPa | 摩擦角<br>/ ( $^{\circ}$ ) | 膨胀角<br>/ ( $^{\circ}$ ) |
| ②-1 粉土        | 1.7       | 17.7                                    | 15            | 0.35 | $1.9 \times 10^{-8}$                     | 12           | 15                      | 15                      |
| ②-2 粉土夹粉砂     | 4.8       | 18.7                                    | 15            | 0.35 | $8.0 \times 10^{-6}$                     | 12           | 24                      | 24                      |
| ②-3 淤泥质粉质黏土   | 21.4      | 17.7                                    | 12            | 0.40 | $4.4 \times 10^{-7}$                     | 9            | 16                      | 16                      |
| ③-5 粉质黏土混碎、砾石 | 3.1       | 19.6                                    | 18            | 0.33 | $7.7 \times 10^{-8}$                     | 32           | 15                      | 15                      |
| ⑤基岩           | 9.0       | 20.0                                    | 100           | 0.3  | $1.0 \times 10^{-9}$                     | /            | /                       | /                       |

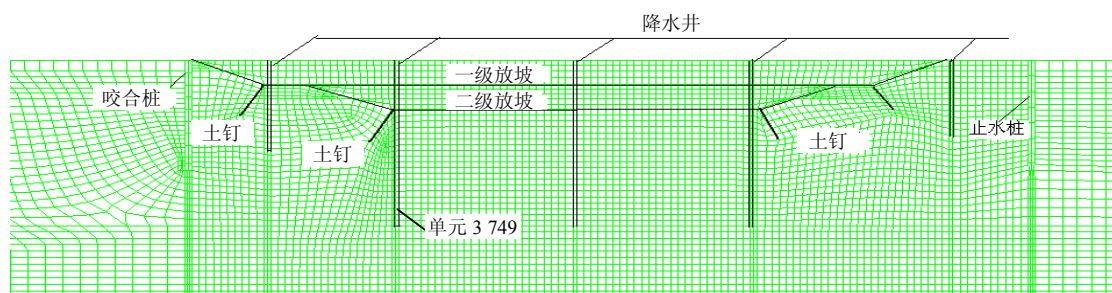


图 1 有限元模型网格划分示意图  
Fig.1 Meshes of finite element model

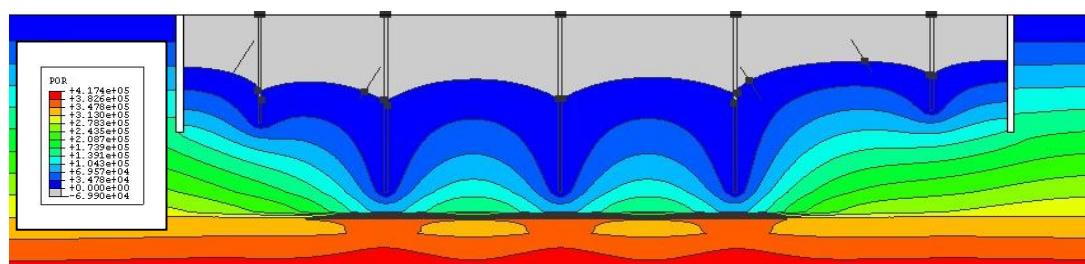


图 2 自由面水位线示意图(单位: Pa)  
Fig.2 The contours of phreatic surface(unit:Pa)

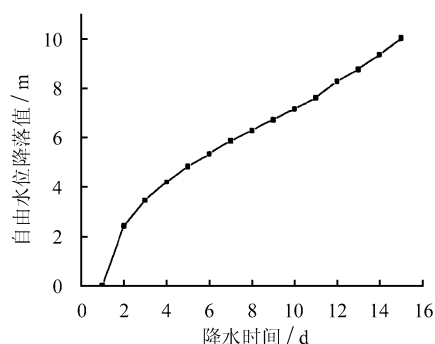


图 3 水位降深随时间变化曲线  
Fig.3 The curve of groundwater descent depth with time

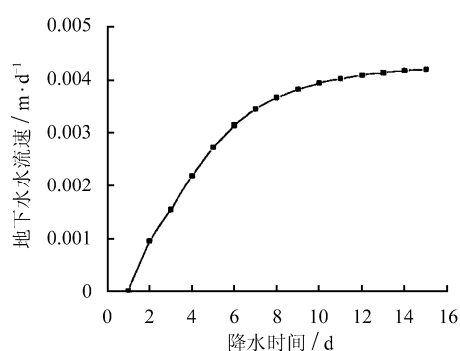


图 4 帷幕底单元 3749 处流速随时间变化图  
Fig.4 The curve of seepage velocity with time on element 3749 of water-seal pile

减小, 近似呈双曲线函数关系; 在降水进行到 15 d 时高速区仍在井周围, 帷幕下的流速趋于稳定。此时, 井抽取的地下水少量由基坑外部供给, 大部分还是基坑内部的, 这与该工程降水设计采用的基坑内地下水疏干方案是相符的。

### 3.3.3 降水引起的地面沉降分析

选取九华山隧道基坑工程中右线地面为分析

对象, 得到图 5 所示的降水引起的地面沉降曲线。从图中可以看出, 随着降水时间的增长, 地面沉降逐步增加, 但增加幅度逐渐变小; 沉降值随距坑边距离的增加不断减小, 且在距坑边 30 m 范围内沉降值变化幅度比较大, 120 m 以外沉降值几乎保持不变, 可见降水对地表沉降的影响范围基本在 120 m 以内。此外, 基坑内沉降曲线呈抛物线形式, 基坑

中心沉降最大,向两边递减;由于止水帷幕的影响,沉降主要集中在基坑内部,坑外影响较小,在坑边处最大沉降为 85.9 mm,在距坑边 120 m 处沉降只有 1.4 mm。

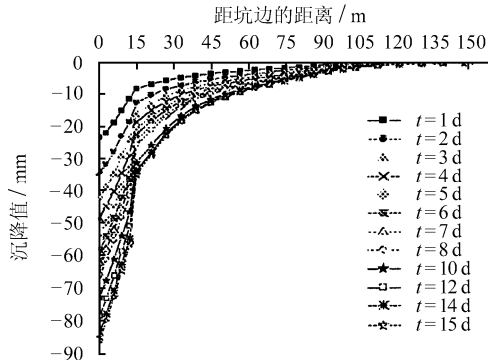


图 5 降水引起的基坑外地表沉降曲线

Fig.5 The settlement curve of soils outside the pit caused by dewatering

### 3.3.4 降水井数量及布置间距对基坑降水效果影响

为研究降水井数量及间距对基坑降水的影响,针对本节所用的九华山隧道基坑工程情况,选定以下 5 种布置方法进行比较分析:

- 工况 a. 井间距  $D = 10$  m, 井数  $N = 10$ ;
- 工况 b. 井间距  $D = 15$  m, 井数  $N = 7$ ;
- 工况 c. 井间距  $D = 20$  m, 井数  $N = 5$ ;
- 工况 d. 井间距  $D = 25$  m, 井数  $N = 5$ ;
- 工况 e. 井间距  $D = 40$  m, 井数  $N = 3$ 。

由图 6 可知,随着抽水井间距的增加,相同抽水时间内基坑中心水位降深不断减小,即降水井降水能力不断下降,可知井间距对基坑中心水头降落有较大影响。结合图 7 可知,在井间距  $D$  为 10, 15, 25 m 时流速基本一致,要比井间距  $D$  为 20 m 和 40 m 时的流速大,一个主要原因是因为后者的降水井与止水帷幕间距比其他 3 种情况要大,降水时有少量水绕过止水帷幕进入降水井,从而使帷幕底流速较小,渗流作用相对较小。从图 8 可以看出,井间距为 15 m 时,坑外地表沉降值最大,其余 4 种情况下沉降值差别不大。这主要是由于按 15 m 间距布置时,降水井距坑边距离较其他 4 种情况要近,因而在降水的渗流作用下土体位移变化较大。根据隧道结构布局特点,从保证工程安全施工和尽可能降低对环境的影响的角度出发,通过以上分析,建议在基坑中部降水井采用 15 m 的井间距,而东西两侧采用 20 m 的间距,使水位降深满足施工要求,并对周围地表沉降的影响范围降到最低,同时止水帷幕受到的渗流作用力也相对较小。

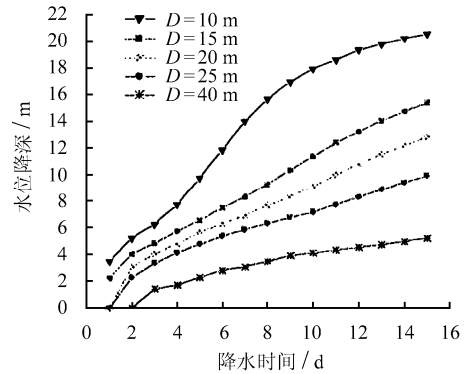


图 6 井间距  $D$  对水位降深的影响

Fig.6 The influence of distance between draining wells on the descent of groundwater

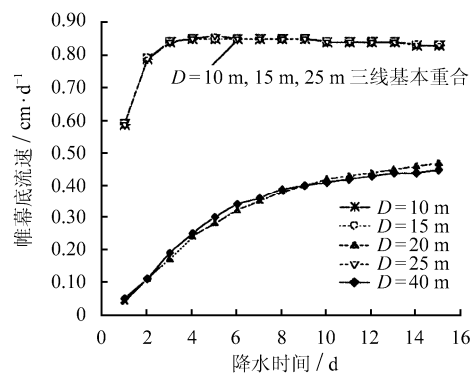


图 7 不同井间距时止水帷幕下流速分布曲线

Fig.7 The curve of seepage velocity on element 3749 of water-seal pile under different distances of draining wells

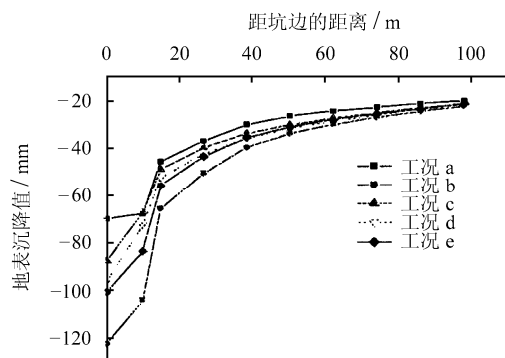


图 8 不同井间距下坑外地表沉降分布曲线

Fig.8 The settlement curve of of ground soil outside the pit under different distances of draining wells

### 3.3.5 降水井的井深对降水效果的影响

以井间距  $D = 25$  m, 井数  $N = 5$  的降水井布局为例,通过以下 5 种方式调整井的深度:

- 工况 a. 5 口井深都为 28 m;
  - 工况 b. 5 口井深都为 15 m;
  - 工况 c. 5 口井深都为 20 m;
  - 工况 d. 中间 3 口井深 15 m, 两侧 2 口井深 28 m;
  - 工况 e. 中间 3 口井深 28 m, 两侧 2 口井深 15 m;
- 得到不同井深下基坑降水结果如图 9~11 所示。

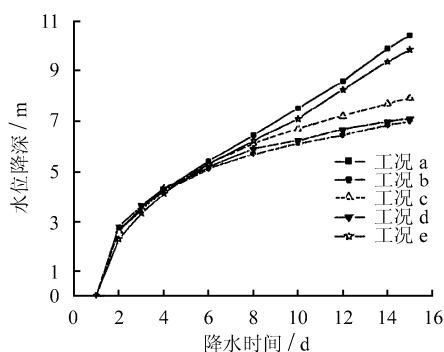


图9 降水井井深对水位降深的影响

Fig.9 The influence of draining well depth on the descent of groundwater

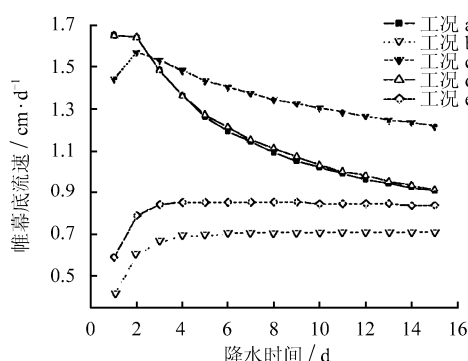


图10 井深对帷幕底流速的影响

Fig.10 The influence of draining well depth on seepage velocity on the bottom of water-seal pile

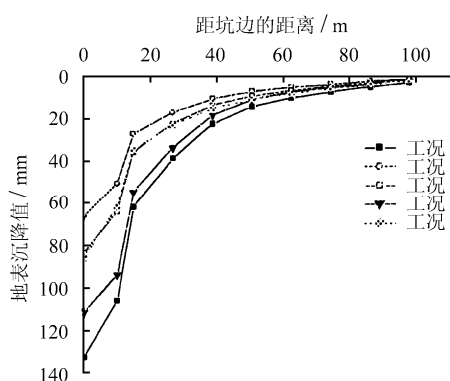


图11 不同井深时坑外地表沉降分布曲线

Fig.11 The settlement curves of ground soil outside the pit under different depths of draining wells

从图9~11中不难看出,降水井井深对水位降深有较大影响,井深越大,相同时间内水位降深也越大,而采用中间井深较大两侧井深相对减小的布设会取得更好的效果。结合图10,11可以看出,降水引起的地表沉降与渗流作用发挥大小有较大关系,井深大沉降也相应增大;在工况c与e下沉降值基本一致,而工况d要比e引起的沉降大,这与止水帷幕与降水井相对深度有关,本工程止水帷幕桩长为18.5 m,所以在降水井底超过止水帷幕时流

速将相对较大,渗流作用更显著些。综合分析可知,降水井井深对基坑工程降水、地表沉降及止水帷幕设置都有较大影响,在进行井深设计时要综合考虑场地水文地质条件、周围环境要求、水位降深要求及止水帷幕桩长等因素。

## 4 结 论

通过对九华山隧道基坑工程降水过程的流固耦合模拟分析,可以得到以下结论:

(1) 群井降水自由面呈连续的漏斗形,在降水稳定时漏斗坡度变缓;

(2) 降水过程中较高的流速出现在井的周围,而帷幕下的流速较低,随着降水时间的增加,帷幕下流速有所增加,其受临近降水井埋深的影响较大,当井深较大时地下水将绕过止水桩底流入井中此时桩底将出现较大的流速;

(3) 降水井井深对自由面、最大流速和地表沉降均影响较大,适中的插入深度对降低自由面、减小最大流速和地表沉降都有明显效果;

(4) 井间距对降水效果有较大影响,适中的井间距可以很好地达到满足施工要求的水位降深,同时对周围环境的影响也较小;

(5) 帷幕插入深度对自由面、最大流速和地面沉降均影响较大,适中的插入深度对于降低自由面、减小最大流速和流量,降低工程造价均有明显效果;

(6) 可以适当增加中间井数量以达到显著降低自由面和减小最大流速的目的,但增加的中间井会给施工带来不便,故应当根据具体的情况确定。

## 参 考 文 献

- [1] 唐业清,李启民,崔江余. 基坑工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [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] 罗晓辉. 基坑开挖渗流数值分析[J]. 土工基础, 1997, 11(3): 18-21.
- [4] 罗晓辉. 深基坑开挖渗流与应力耦合分析[J]. 工程勘察, 1996, 25(6): 37-41.
- [5] Ronaldo I. Borja. Free Boundary, Fluid Flow, and Seepage Forces in Excavations[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(1):
- [6] HKS inc., Analysis of geotechnical problems with ABAQUS, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, USA.