

## 采用止水挡墙的基坑渗流场模拟

刘红岩<sup>1</sup>, 戎涛<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 2. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 在分析土体饱和渗流的有限元求解方法的基础上,对采用不同止水挡墙的基坑渗流场进行了模拟分析. 计算结果表明,随着止水挡墙长度的增加及渗透系数的减小,基坑内部降排水对外侧地下水位变化的影响逐渐减小,基坑底部的渗流量、垂直流速和水力梯度等都随着距支护墙体距离的增加而减小,减小到一定程度后逐渐趋于稳定. 计算结果还表明,计算模型尺寸对计算结果也有影响,但随着模型尺寸的增大,其影响越来越小.

**关键词:** 止水挡墙; 基坑工程; 渗流场; 模拟

中图分类号: U46.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)02-0084-05

### Simulation of seepage field in the foundation pit adopting cut-off wall

LIU Hong-yan<sup>1</sup>, RONG Tao<sup>2</sup>

(1. *College of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*  
2. *School of Civil Engineering, Henan Polytechnical University, Jiaozuo 454000, China*)

**Abstract:** On basis of analyzing the solution method of saturated seepage in soil by finite element method, the seepage field in the foundation pit with different cut-off walls is simulated. The calculation results show that the influence of the draining in the foundation pit on the change of the underground water table outside the pit gradually decreases with the increase of the height of the cut-off wall and the decrease of the permeability coefficient. And the seepage discharge, vertical velocity and hydraulic gradient at the bottom of the foundation pit all decrease along with the increase of the distance from the cut-off wall, but when decreasing to some extent, they all gradually tend to be stable. Meanwhile, the dimension of the calculation model will influence the calculation result, but with the increase of the dimension, its influence will become less and less.

**Key words:** cut-off wall; foundation pit engineering; seepage field; simulation

据统计,所有基坑工程事故中直接因为地下水处理不当而引发的事故约占 21.4%<sup>[1]</sup>,而直接或间接由水害引起的基坑工程事故总计达 70% 以上<sup>[2]</sup>,这充分说明地下水是导致深基坑工程事故的重要因素之一. 地下水不仅直接影响土的物理性质和强度指标,还会引起土中应力状态的变化. 当采取一定的降排水措施

收稿日期: 2007-07-05

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20060400498)

作者简介: 刘红岩(1975-),男,河南扶沟人,副教授,博士,主要从事土木工程方面教学与科研工作.

E-mail: lhyan1204@126.com.

时,地下水在基坑内部的流动还将产生渗透动水压力,进而引起基坑边坡失稳、流土、管涌和地面沉降等危害.因此,只有充分了解降排水引起的基坑内部渗流场,才能更好地预防和控制由地下水渗流对基坑造成的危害,进而采用合理的防治措施,预防工程事故的发生.止水挡墙在基坑止、降水施工中有广泛的应用,尽管已有不少文献研究了不同水力条件下边坡或基坑内部的渗流场特征,但很少有详细讨论渗流场内部的流速及水力梯度等重要渗透特征参数的定量变化规律<sup>[3-5]</sup>.本文在前人研究的基础上,重点研究基坑内部的渗流场特征.

## 1 土体饱和渗流的有限元求解

当不考虑土和水的可压缩性,且符合达西定律及内部的源和汇时,其水头函数应满足如下方程<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz} \frac{\partial H}{\partial z}\right) = 0 \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (1)$$

式中: $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$ 分别为各向异性主方向渗透系数; $H$ 为点 $(x, y, z)$ 在 $t$ 时刻的水位值; $\Omega$ 为计算区域.

在利用有限元求解问题时,首先对求解区域进行单元剖分,利用有限个单元的集合体代替连续的渗流场.对于稳定渗流场而言,其有限元求解方程组为 $\mathbf{KH}=\mathbf{Q}$ ,其中, $\mathbf{K}$ 为总体渗透矩阵,由单元渗透矩阵集合而成; $\mathbf{Q}$ 为自由项,为域内源和已知边界流量对节点的贡献; $\mathbf{H}$ 为待求节点水头.结合相应的初始条件和边界条件即可进行求解.

## 2 计算模型及材料参数

### 2.1 计算模型及边界条件

所采用的计算模型如图1所示.根据对称性,以基坑底部中心线为对称轴,并考虑基坑降水所能影响到的范围,取计算模型的长度为61 m,深度30 m,其中,止水挡墙外侧50 m,基坑开挖深度10 m,基坑底部宽度20 m,根据模型的对称性,计算模型中取其一半宽度,即10 m.支护防水结构的宽度为1 m,长度为 $h$ ,为考虑不同挡墙高度及其渗透系数对基坑渗流的影响,分别对 $h$ 赋予不同的值,以观察基坑渗流场的变化.以 $A$ 为原点, $AB$ 方向为 $X$ 轴, $AG$ 方向为 $Y$ 轴建立直角坐标系.

计算边界条件:假定初始地下水位在地表处,即 $GE$ 边.当采用降水措施后,地下水水位逐渐下降,但由于 $AG$ 边距基坑较远,受基坑降水的影响不大.因此,取 $AG$ 边的水力边界条件为定水头水位边界.施工要求基坑底部不允许有积水,所以基坑底部 $CD$ 边的水头为定水头. $CB$ 边为对称边,取为不透水边界,底部边界 $AB$ 也取为不透水边界.当不考虑止水挡墙渗透系数的变化时,认为 $EF$ 不透水.

### 2.2 材料参数

假设所分析范围内的土体渗透性为各向同性,取其饱和渗透系数为 $10^{-5}$  m/s.由于本文中同时还考虑了止水挡墙的可渗透性,所以假设止水挡墙的渗透性也为各向同性.

## 3 计算结果及分析

### 3.1 不透水止水墙对渗流场的影响

根据上述计算模型、计算参数及边界条件,分别取止水挡墙高度 $h=0, 10, 12, 14$ 和 $16$  m,计算基坑内渗

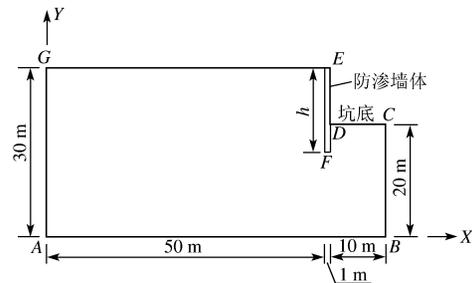


图1 基坑渗流计算模型示意图

Fig. 1 Seepage calculation model of foundation pit

流场的变化. 本算例所对应的实际工况为在基坑底部进行降排水的工况, 即基坑底部的水位不变, 始终保持在基坑底部.

**3.1.1 止水墙高度对基坑外侧地下水的影响** 基坑外侧地下水位线在基坑侧壁上的出露点距地表的距离( $L$ )随止水挡墙高度( $h$ )的变化见图2. 可见, 出露点距地表的距离 $L$ 随止水挡墙高度的增加而减小. 这表明随着止水挡墙高度的增加, 基坑降水对外侧地下水的影响逐渐减小; 也说明利用止水挡墙对基坑降水进行支护, 可有效减小地下水位的下降程度, 进而减小地表沉降. 从图2还可以看出, 随着止水挡墙高度的逐渐增加, 该曲线的斜率逐渐变缓. 这说明止水挡墙在一定高度范围内能很有效地减小基坑外侧地下水位的下降, 但达到一定高度后, 这种作用就不明显了. 所以在实际工程中应选择一个合理的止水挡墙高度.

**3.1.2 止水墙高度对渗流量的影响** 基坑底部的流量随止水挡墙高度的变化见图3. 可见, 没有设置止水挡墙时, 基坑底部靠近开挖边缘处, 即坑角处的渗流量最大; 随着止水挡墙高度的增加, 渗流路径加长, 从而导致水头损失的增加, 渗流量减小. 当止水挡墙高度为10 m时, 坑角处的渗流量减小不明显, 仅减小到原来的70%左右; 当止水挡墙高度增加到12 m时, 坑角处的渗流量明显减小, 仅为原来的17%左右; 但随着止水挡墙高度的进一步增加, 坑角处的渗流量减幅变缓.

从渗流量沿基坑底部水平面的分布规律来看, 当止水挡墙高度没有超过基坑开挖深度时, 即高度为0 m和10 m时, 坑底的最大渗流量均出现在坑角; 当止水挡墙高度超过基坑开挖深度时, 坑角处的渗流量明显减小, 在距坑角约1 m处的渗流量达到最大, 然后又逐渐减小. 这表明止水挡墙对坑角附近的渗流场影响最为显著.

**3.1.3 止水墙高度对渗流流速的影响** 止水墙高度与基坑底部垂直渗流流速的关系见图4. 可见, 没有止水挡墙时, 基坑坑角处的流速较大, 但小于止水挡墙高度为10 m时的流速, 这是由于当止水挡墙的高度正好等于基坑深度时, 水流无法从基坑侧壁渗出而集中在坑角处. 当止水挡墙的高度进一步增加时, 就会出现地下水绕过止水挡墙的流动现象, 因而垂直流速降低, 且降低幅度较大, 之后随着止水挡墙高度的增加, 垂直流速的变幅逐渐减小, 并最终趋于稳定.

**3.1.4 止水墙高度对水力梯度的影响** 止水墙高度与基坑底部水力梯度的关系见图5. 可见, 无止水挡墙时, 坑角处的垂直水力梯度最小; 而止水挡墙高度为10 m时, 此处的垂直水力梯度最大. 这主要是由于无止水挡墙时, 水会沿着基坑侧壁渗出, 而当止水挡墙高度为10 m时, 水就只能从基坑底部渗出, 从而导致其水力梯度增加. 当止水挡墙高度进一步增加时, 渗流路径增加, 进而增大能量损失, 减小水力梯度. 由于水力梯度是与渗流力成正比, 所以较高的水力梯度就意味着较大的渗透力. 因此, 当止水挡墙的高度与基坑开挖深度相同时, 坑角处所受的渗流力最大, 对基坑底部最为不利, 故应使止水挡墙的高度超过基坑开挖深度.

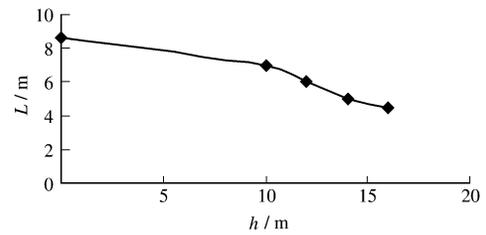


图2 基坑侧壁地下水位线下降高度随止水挡墙长度的变化

Fig.2 Variation of underground water table at foundation pit's side with height of the cut-off wall

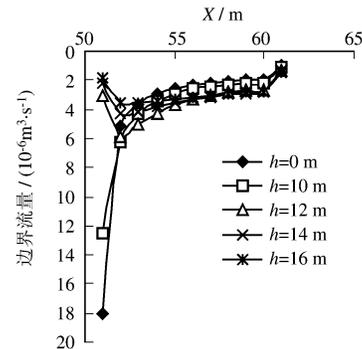


图3 基坑底部流量随X坐标变化曲线

Fig.3 Variation of seepage discharge at the bottom of foundation pit with x-coordinate

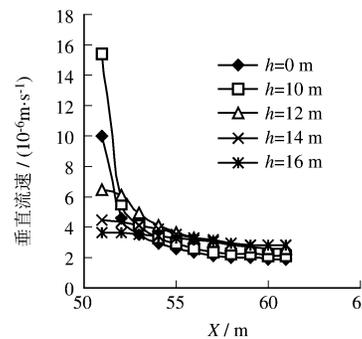


图4 基坑底部垂直接流速随X坐标变化曲线

Fig.4 Variation of vertical velocity at the bottom of foundation pit with x-coordinate

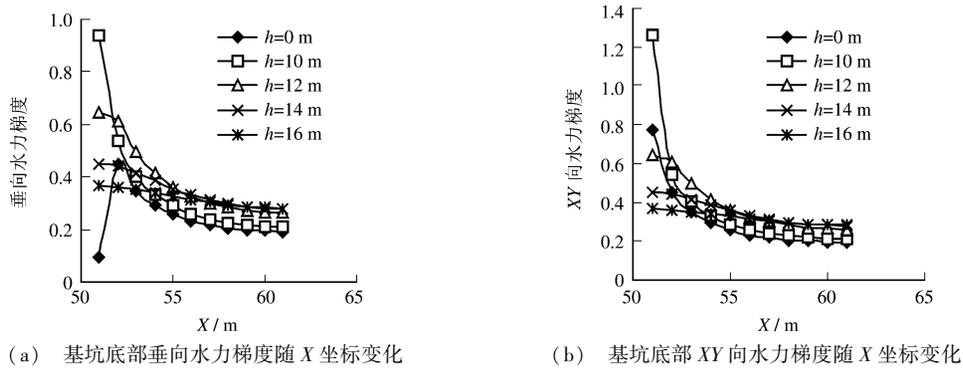


图 5 渗流场内不同变量随 h 值的变化

Fig. 5 Variation of different variables in seepage field with h

### 3.2 透水止水墙对渗流场的影响

由于止水挡墙并非完全不透水,因此有必要研究止水墙体渗透性对基坑渗流场的影响.取止水挡墙的高度为 14 m,分别取其饱和渗透系数为  $10^{-6}, 10^{-7}, 10^{-8}$  及  $10^{-9}$  m/s 时,计算基坑内渗流场的变化.

**3.2.1 止水墙渗透系数与地下水位下降高度的关系** 计算结果表明,随着止水挡墙渗透系数的减小,基坑外侧水位下降高度先下降较大,然后逐渐趋于平稳(见图 6).这说明止水挡墙的渗透系数对水位下降的高度有影响,但当渗透系数下降到一定程度后,止水挡墙渗透系数的变化对地下水位变化的影响就不明显了.因此,没必要过份提高止水挡墙的防渗性能.

**3.2.2 止水墙渗透系数与渗流量的关系** 计算结果表明,当止水挡墙的渗透系数为  $10^{-6}$  m/s 时,基坑坑角处的渗流量最大,然而随着距坑角距离的增加,渗流量逐渐减小;其他 3 种情况的规律基本一致,即渗流量最大值发生在距坑角一定距离处,而非坑角处(见图 7).当墙体渗透系数减小到一定值后,坑底流量基本不再变化.

**3.2.3 止水墙渗透系数与渗流流速的关系** 当止水挡墙的渗透系数为  $10^{-6}$  m/s 时,基坑底部的垂直流速远大于其他 3 种情况,但最大流速均不在坑角处,而在距坑角一定距离处(见图 8).达到最大值后,随着距坑角距离的增加,垂直流速逐渐减小.说明当止水挡墙渗透系数减小到一定值后,垂直流速基本不变.

### 3.3 计算范围的影响

在前面的计算中,计算模型所模拟的深度一定,这可能会对计算结果有一定的影响.因此,为了更好地了解下部模型边界的范围对计算结果的影响,就取止水挡墙高度为 16 m,计算深度分别为 30,40 和 50 m 三种情况进行分析.计算结果见图 9.

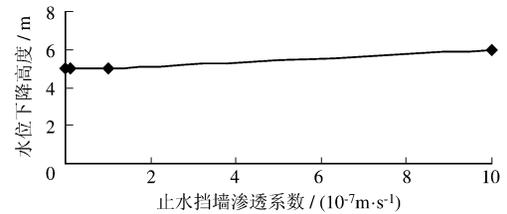


图 6 基坑侧壁地下水位线下降高度随止水挡墙渗透系数的变化规律

Fig. 6 Variation of underground watertable at foundation pit's side with permeability coefficient of the cut-off wall

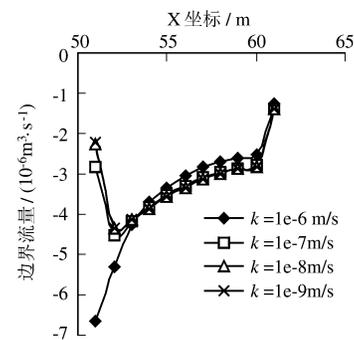


图 7 基坑底部流量随 X 坐标变化

Fig. 7 Change of seepage discharge at the bottom of foundation pit with x-coordinate

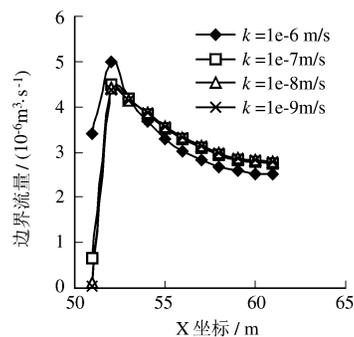
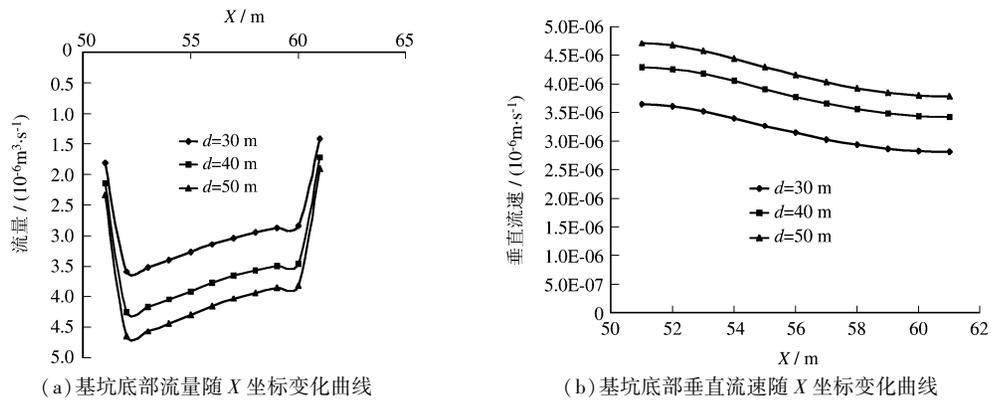


图 8 基坑底部垂直流速随 X 坐标变化

Fig. 8 Change of vertical velocity at the bottom of foundation pit with x-coordinate



(a) 基坑底部流量随 X 坐标变化曲线

(b) 基坑底部垂流速随 X 坐标变化曲线

图9 渗流变量及流速随计算模型深度的变化

Fig. 9 Change of seepage discharge and vertical velocity at the bottom of foundation pit with depth of calculation model

由图9可见,随着基坑开挖深度的增加,基坑底部的流量和垂流速均发生变化.这是因为计算中人为假定模型底部边界不透水,当模拟范围较小时,计算范围中的含水量就小,因而计算得出的含水量就小.因此,计算模拟的范围对计算结果有较大影响;当计算深度从30 m增加到40 m时,渗流流量和流速的变幅都较大,而从40 m增加到50 m时,流量和流速的变幅明显减小.这说明模型计算范围增大到一定值后,计算结果基本趋于稳定.

## 4 结 语

(1)不同止水挡墙条件下的基坑渗流场计算表明,随着止水挡墙高度的增加及渗透系数的减小,基坑内部降排水对外侧地下水位变化的影响逐渐减小,且基坑底部的渗流量、垂流速和水力梯度等都随着距支护墙体距离的增加而减小,减小到一定值后,趋于稳定.

(2)对本文中所给工况而言,支护墙体的高度为12 m,其渗透系数为 $10^{-7} \text{ m/s}$ 时,基坑内部的降水对坑外地下水位及坑内渗流的影响已很小,此时已达到经济效益与安全效应的最佳结合.

(3)计算模型模拟的范围大小对计算结果也有影响,不过,当模拟范围达到一定值后,计算结果渐趋稳定.

## 参 考 文 献:

- [1] 王国光,王成华,严平,等.采取止水措施的基坑渗流场研究[J].工业建筑,2001,31(4):43-45.
- [2] 纪佑军,刘建军,薛强.基坑地下水渗流数值模拟[J].武汉工业学院学报,2006,25(1):72-77.
- [3] 唐晓松,郑颖人.水位下降过程中超孔隙水压力对边坡稳定性的影响[J].水利水运工程学报,2007,(1):1-6.
- [4] 姜忻良,宗金辉.不同土质条件下基坑渗流场渗透特性分析[J].天津大学学报,2006,39(11):1299-1304.
- [5] 俞洪良,陆杰峰.深基坑工程渗流场特性分析[J].浙江大学学报(理学版),2002,29(5):595-600.
- [6] 吴林高,缪俊发,张瑞,等.渗流力学[M].上海:上海科学技术文献出版社,1996:18-21.