

“以缝代并列”——排水孔幕模拟方法探讨*

王恩志 王洪涛 王慧明

(清华大学水利水电工程系 北京 100084)

摘要 在单个排水孔模拟方法即“以管代孔”法的基础上,将岩体中排水并列概化为一条等效窄缝,依据流量和水头等价原则,确定出等效窄缝的各向异性渗透系数与排水孔间距和岩体排水量之间的对应关系,进而提出了“以缝代并列”模拟岩体排水孔幕的新方法。该方法将等效窄缝作为岩体中一级导水结构单元,能模拟不同条件下的排水效果,既能反映实际条件,又便于工程应用,是模拟岩体排水的实用方法。

关键词 渗流,排水并列,岩体,等效裂缝,数值方法

分类号 O357.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2002)01-0098-04

1 引言

“以管代孔”法是利用渗流等效性,根据排水孔本身强导水性能,通过模型求解出孔内各点水头值,避免了人为给定水头所带来的计算误差,这对于单个排水孔的模拟是一种有效的方法。但当排水孔数目众多,且岩体范围较大时,排水孔间距就显得很微小,这时就难以将所有排水孔都一一用管单元来表示,使得渗流计算变得极为复杂和困难,并且也不利于推广应用。为此,在“以管代孔”法的研究基础上^[1],通过对岩体排水特性的进一步研究,为简化计算,本文首次提出“以缝代并列”岩体排水孔幕模拟的新方法。

2 基本原理

排水孔正是由于自身的“空心”结构才成为岩体中具有强渗透性能的导水结构,而排水并列则是由这些“空心”结构体在岩体中按一定间距排列所形成的一道强导水的孔幕,周围的地下水在水力梯度的驱动下流入排水孔幕并沿着孔壁排出,在岩体中形成一道呈条带状分布的渗流降压区,从宏观上看就如同岩体中的一条窄缝或窄沟作用一样^{2~4]}。虽然排水孔幕与窄缝在渗透特性上各有异同,但在

一定条件下两者的渗流场特征又极为相似。

从并列和岩体渗透性分布看,每一个排水孔所在部位的导水性能均表现为脉冲式的突变,这种突变造成了“漏斗状”的水头降压区的出现,在渗流场中形成了一条沿并列方向分布的“波浪状”水头线,其“波谷”位于排水孔处,“波峰”位于两排水孔中部,“波谷”与“波峰”间的水头差随着排水孔的加密而逐渐减小,当排水孔的间距减小到一定程度后,这种波浪起伏的水位线就会接近一条直线,这时渗流场特征就与一条窄缝作用下的渗流场吻合。因此,从渗流场总体特征上看,排水孔幕可以概化为一条窄缝。

从渗透结构上看,导水性能呈脉冲式突变使得沿并列方向岩体渗透性极不均匀,这一点与多孔介质的微观结构极为相似。在多孔介质中,孔隙的渗透性远大于固体颗粒的渗透性,其渗透性也呈脉冲式突变,渗流就在这种不规则的孔隙管道中运动。从研究渗流场特征的角度出发,忽略固体颗粒和孔隙管道的具体个性,在渗流量和水头等价原则的基础上,取一局部区域从相对宏观上作为一个整体并赋予相应的渗透系数,当孔隙管道在各个方向分布不同时,赋予各向异性的渗透系数来表征这一局域的渗透性能,这一局域即是多孔介质渗流理论中的“表征单元体”,这种方法也是多孔介质渗流理论产生和发展所依据的基本方法^[5]。与此相比,虽然岩体中的排水孔从尺度上远大于多孔介质中的孔隙管道,但从结构特

1999年12月14日收到初稿,2000年1月17日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目(59479010,59779014)。

作者 王恩志 简介:男,1958年生,博士,1982年毕业于长春地质学院水工系水文地质工程地质专业,现任副教授,主要从事裂隙渗流与岩基工程方面的教学和科研工作。

征上又有其相似之处,如果从更宏观的角度看,忽略排水孔及其间岩体的个性,在满足渗流量和水头等价条件下,视某一段排水孔幕为一个相对的整体,同样也可以赋予相应的渗透系数。这样,在岩体中就相当于存在一条强渗透性的导水带,其作用完全等同于一条导水窄缝。

按渗流理论的宏观方法,从渗透介质结构和渗流场特征上,可以将排水孔幕作为一条等效的窄缝^[6],即“以缝代并列”,在满足渗流量和水头等价的原则基础上,赋予窄缝相应的等效渗透系数。因此,“以缝代并列”的关键问题是确定导水窄缝的等效渗透系数。

3 计算方法

为确定排水孔幕等效渗透系数值,以一理想的三维各向同性岩体为例,在三维岩体中部设置一道排水孔幕(孔底排水式),探讨排水孔幕等效渗透系数与排水孔间距、水位降、排水量、岩体渗透性之间的关系,并与按解析解和管单元数值计算并列的结果对比,按渗流量和水头等价原则,找出排水孔幕等效渗透系数。

为了进行对比,排水孔幕的计算分别采用解析方法和数值方法。按地下水动力学原理,并列的单井流量解析公式为

无压水:

$$Q = \frac{1.366K_0(2H_0 - s_w)s_w}{\lg\left(\frac{D}{\pi r_w}\right) + \lg\left(\operatorname{sh}\frac{\pi R}{D}\right)} \quad (1)$$

式中: Q 为单井流量(m^3/d), K_0 为岩体渗透系数(m/d), H_0 为无压含水层厚度(m), s_w 为水位降深(m), R 为并列至补给边界的距离(m), r_w 为井半径(m), D 为井间距(m)。

数值计算采用有限元方法,对单个排水孔采用管单元,对整体并列采用等效裂缝单元。裂缝单元在三维空间上为一面状单元,其中的渗流为裂缝所在平面内的二维流,取其两个主渗方向为局部坐标,则裂缝内的二维渗流控制方程为^[6]

$$\frac{\partial}{\partial x_1}\left(K_{x_1} \frac{\partial H}{\partial x_1}\right) + \frac{\partial}{\partial x_2}\left(K_{x_2} \frac{\partial H}{\partial x_2}\right) + w = 0 \quad (2)$$

式中: x_1, x_2 为裂缝面主渗方向的局部坐标; w 为裂缝内的源汇项; H 为水头。

在三维有限元中,等效裂缝划分为面单元,并将其渗透传导矩阵与总体矩阵组合。在本例中,并列垂向布置,则等效裂缝的两个主渗方向与三维

坐标系的 y 和 z 一致。由于沿排水孔轴线方向上(垂向)的渗透性能主要取决于排水孔本身,而沿并列延伸方向上(水平)的渗透性能则主要取决于岩体,且前者远大于后者,因而用各向异性渗透系数来表征等效窄缝的这种渗透特性。取沿并列延伸方向(水平)的渗透系数 K_h 与岩体渗透系数一致,而顺排水孔轴线方向(垂向)的渗透系数 K_v 远大于岩体的渗透系数,该值需按与并列等效原则加以确定。

因此,在数值计算中,排水孔幕采用两种单元类型划分,一是将排水孔用管单元逐个划分;二是将排水孔幕按裂缝面单元划分。取岩体上、下游为定水头边界,两侧面为流面边界,排水孔底作为出水点。为能详细划分管单元和裂缝面单元,将计算区域划分成 14 080 个单元,14 631 个结点(图 1)。

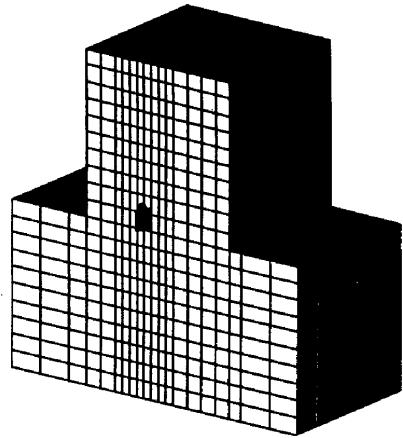


图 1 三维岩体计算单元模型

Fig. 1 Element model of three dimensional rock mass for calculation

4 排水孔幕渗透参数分析

根据单孔计算结果,在并列单个管单元计算中,取排水孔等效渗透系数 K 为岩体渗透系数 K_0 的 500 倍,岩体渗透系数 $K_0 = 1.0 \text{ m}/\text{d}$ 。随着孔间距的缩小,地下水水面逐次下降,水头线的波谷和波峰之间的水头差由大变小,最后趋于一致,并列上的水面近于一条直线。

在并列计算的岩体中,将原并列用裂缝单元代替,通过调整裂缝垂向的等效渗透系数 K_v 值,可得到相应的渗流量和水头线。由计算结果绘制的 K_v-q, K_v-h 关系曲线变化特征与单孔模拟结果相似,即裂缝中水头 h 随 K_v 的增大而减小,而排水量 q 则在增大,但当 K_v 增大到某一值后,水头 h 逐渐趋于稳定,排水量 q 的增幅也在减小。

对比裂缝和单个并列计算的水头 h 随单位长度上的排水量 q 的变化关系曲线,由裂缝计算出的水头 h_f (图2中的4号线)介于单个并列计算的水头峰、谷值之间(图2中的1,2号线)。从两种方法计算的 $q-h$ 曲线看,单位排水量 $q < 39 \text{ m}^3/\text{d}$ 时(相应于孔距大于 6 m , $K_v < 50 \text{ m}/\text{d}$),裂缝水头 h_f 大于单个并列的平均水头(见图2中的3号线)。 q 越小,相当于并列排水孔间距变大、裂缝等效渗透系数变小的情况,裂缝水头 h_f 愈偏离平均水头而靠近并列的峰值水头,直至重合,这恰反映了排水孔间距很大直至达到无排水时,裂缝和单个并列计算中的峰值水头趋于一致。当 $q > 39 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,裂缝水头 h_f 与单个并列计算的平均水头接近,但略低于平均水头。随着 q 增大,即排水孔间距变小,各曲线渐趋于重合,这时并列作用就完全等同于一道裂缝的作用。在实际工程中,排水孔间距大多都在 5 m 以内,因而按等效渗透系数 K_v 计算的水头与并列平均水头接近,从而能满足渗流量和水头等价的要求。

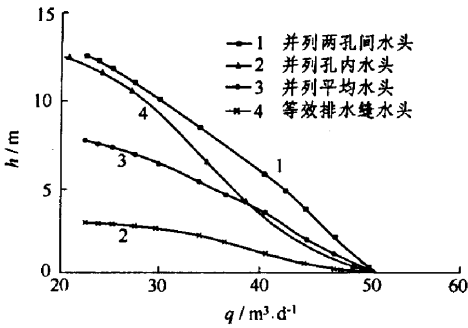


图2 并列和等效裂缝水头 h 与单位排水量 q 关系曲线

Fig. 2 Contrast of relation curves between water level h and unit flow quantity q about drainage hole line and equivalent fissure

将并列数值计算的井孔水位值代入并列流量的解析公式(1)中,得到并列的单位流量(见表1)。显然,并列的解析计算结果与单个并列的数值结果是一致的。因此,裂缝的流量计算结果既可与解析结果对照,也可与单个并列的数值结果对照,它们之间存在着数值上的对应关系,可用来确定流量等价关系。

按上述计算结果,当孔间距小于 6 m 时,裂缝中水头与并列平均水头近于一致,即水头可满足等价要求,这时只要满足渗流量等价,就可确定出裂缝等效渗透系数值与并列排水孔距之间的对应关系。其确定方法如下:在并列排水孔距 $D(\text{m})$ 及窄缝渗透系数 $K(\text{m}/\text{d})$ 与单位排水量 $q(\text{m}^3/\text{d})$ 的关系曲线

上(见图3),先在排水孔间距 D 坐标上取一孔距值(如图3中 a 点),在 $D-q$ 曲线上找出相应的单位排水量 q (如图3中 b 点),根据这个排水量 q 值,再由裂缝计算的 K_v-q 曲线上找出相同的 q 值(如图3中 c 点),再引水平线至 K 坐标找出相应的 K_v 值(如图3中 d 点),此值即为对应某一排水孔距的裂缝等效渗透系数 K_v 值。

表1 并列计算流量对照表

Table 1 Comparison among calculated fluxes of hole-line

孔距 D /m	并列流量计算		裂缝流量计算	
	解析解 Q / $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	数值解 Q / $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	流量 Q / $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	渗透系数 K_v / $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
1. 0	51. 96	52. 40	54. 85	1 000
2. 0	50. 12	50. 85	53. 30	500
3. 0	46. 97	47. 35	51. 45	300
4. 0	44. 22	44. 55	44. 77	100
6. 0	39. 32	40. 58	39. 01	50
8. 0	35. 09	36. 60	34. 65	30

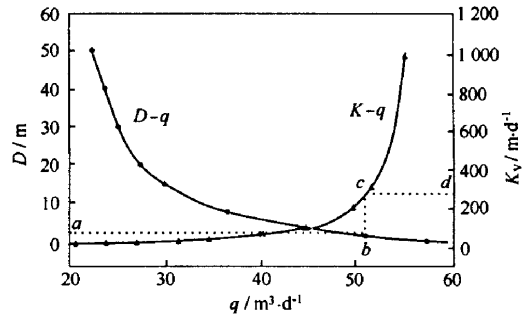


图3 并列孔间距 D 和窄缝等效渗透系数 K_v 与单位排水量 q 关系曲线

Fig. 3 Relation curves among hole space D , permeability coefficient K_v of equivalent fissure and unit flux q of drainage

这种确定等效渗透系数的方法简单明了,便于使用,对任一种岩体可得到相应孔距的等效窄缝的渗透系数。如本例得到的结果见表2。

表2 孔距、排水量、等效渗透系数对应关系表

Table 2 Corresponding relations among hole space, flux and equivalent permeability coefficient

孔距 D /m	单位排水量 q / $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	窄缝等效渗透系数 K_v / $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$
1. 0	52. 40	416. 50
2. 0	50. 85	274. 60
3. 0	47. 35	158. 19
4. 0	44. 55	98. 44
6. 0	40. 58	62. 72

5 结 论

通过理论计算分析表明,在渗流量和水头等价原则的基础上,“以缝代并列”方法能有效模拟岩体排水孔幕的排水情况。通过改变等效渗透系数值,既可以模拟不同排水孔距的排水特征,也可以描述不同工况下的排水效果(如井孔堵塞或部分失效等)。采用“以缝代并列”不仅能有效反映井孔间距和排水孔失效与否对排水的影响,而且该方法便于工程应用。将排水孔幕作为强导水的窄缝结构并赋予等效渗透系数,这不仅符合渗流的物理条件,而且还弥补了以往排水孔模拟中由于人为给定内边界水头所存在的理论缺陷。因此,本方法在理论上和工程上都将有重要参考价值。作者已将“以缝代并列”方法成功地应用于龙羊峡、龙滩、汾河二库、福建溪柄溪、新疆石门子、天生桥一级、陕西娘娘滩、尼泊尔科西等水利水电工程中的三维渗流场研究中。

“以缝代并列”方法是为了简化对并列各个排水孔的模拟而提出的一种宏观处理方法,这种处理方法必须是在一定条件下进行的。当排水孔间距较大或计算的岩体范围较小时,或者是需要详细模拟每

个排水孔的渗流特性时,就必须采用管单元表示的单个排水孔的并列计算方法来描述排水孔幕的作用和渗流场特征。当排水孔间距较小或岩体范围相对较大时,才可以从宏观角度将排水孔幕处理为等效窄缝。在许多工程中,特别是水利水电工程中,排水孔间距一般都在5 m之内,与岩体尺度相比是微小的。上述的计算结果表明,排水孔间距小于6 m的并列均可以运用“以缝代并列”方法进行分析。因此,“以缝代并列”方法将是模拟岩体排水孔幕的有效实用方法。

参 考 文 献

- 1 王恩志,王洪涛,邓旭东.“以管代孔”——排水孔模拟方法探讨[J].岩石力学与工程学报,2001,20(3):346~349
- 2 关锦荷,刘嘉忻,朱玉侠.用排水沟代替排水并列的有限元法分析[J].水利学报,1984,(3):10~18
- 3 王 镭,刘 中,张有天.有排水孔幕的渗流场分析[J].水利学报,1992,(4):15~20
- 4 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].北京:水利水电出版社,1989
- 5 贝尔 J.多孔介质流体动力学[M].李竞生,陈崇希译.北京:中国建筑工业出版社,1986
- 6 王恩志,王洪涛,孙 役.三维裂隙网络渗流数值模型研究[J].工程力学,1997,(增):520~525

“FISSURE TO REPRESENT LINE OF HOLES”——NUMERICAL METHOD FOR SIMULATING THE DRAINAGE HOLE CURTAIN IN ROCK MASSES

Wang Enzhi, Wang Hongtao, Wang Huiming
(Tsinghua University, Beijing 100084 China)

Abstract On the basis of the method for simulating single drainage hole, which is so called “pipe to represent hole”, a line of drainage holes in rock masses is described as an equivalent narrow fissure. The corresponding relationship between the coefficient of anisotropy permeability of the equivalent narrow fissure and the space of drainage holes is determined by the equivalent principle for water head and flow quantity, and further a new method is put forward for simulating a line of drainage holes in the rock masses. This method is named as “fissure to represent a line of holes”. By using the equivalent narrow fissure as strong permeability element, this method can simulate the drainage function of holes in different conditions. Such method not only can describe real circumstances of drainage in rock masses, but also is easy to be used for engineering. So it is a practical method for simulating the drainage system in rock masses.

Key words seepage flow, a line of drainage holes, rock masses, equivalent fissure, numerical method