

文章编号:1000-582X(2010)04-080-08

水平排水孔在岸坡治理工程中的应用

唐晓松^{1,2}, 郑颖人^{1,2}, 刘亮³, 梁宇³

(1. 后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 400041; 2. 重庆市地质灾害防治工程技术研究中心, 重庆 400041;
3. 重庆高速公路集团有限公司, 重庆 401121)

摘要: 由于含水平排水孔的渗流场分析的复杂性, 以及水库岸坡本身稳定性分析的复杂性, 严重地限制了水平排水孔在水库岸坡治理工程中的应用。增设水平排水孔是提高水库岸坡稳定性的重要方法, 因此围绕水平排水孔的布设模式以及排水效果展开研究具有十分重要的理论和现实意义。考虑到分析的复杂性以及是初次尝试, 仅在二维条件下, 通过一个工程算例, 完整地介绍了从水平排水孔模型的建立、含水平排水孔的渗流场分析到治理后岸坡的稳定性分析的整套方法。通过数值分析的结果可以直观地看出, 增设水平排水孔能有效地提高水库岸坡的稳定性。同时, 相对于增大水平排水孔孔径而言, 增长孔长对其排水效果的影响更为明显。

关键词: 水库岸坡; 水平排水孔; 渗流场; 稳定性; 孔径; 孔长

中图分类号: TU432

文献标志码: A

Application of horizontal drain holes in the engineering control of bank slope

TAND Xian-song^{1,2}, ZHENG Ying-ren^{1,2}, Liu Liang³, Liang Yu³

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, P. R. China;
2. Chongqing Engineering and Technology Research Center of Geological Hazard Prevention and Treatment, Chongqing 400041; 3. Chongqing expressway group Co., LT, Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: Since the analysis of seepage field with horizontal drain holes and the stability analysis of reservoir banks are very complicated, the application of horizontal drain holes in the engineering control of bank slope is restricted seriously. It is economical and reasonable to add horizontal drain holes to improve the slope stability, so it is of both practical and theoretical significance to research horizontal drain holes. Considering the complication of analysis, the paper introduces a complete set of methods of establishing the model of horizontal drain holes, analyzing the seepage field with horizontal drain holes and analyzing the slope stability after engineering control with horizontal drain holes only in two-dimensional condition with a calculation example. The results of numerical analysis show that the slope stability can be improved by adding horizontal drain holes. and the length of the hole has obvious effects on draining compared with the aperture.

Key words: reservoir bank; horizontal drain hole; seepage field; stability; aperture; length

收稿日期: 2009-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40318002)

作者简介: 唐晓松(1979-), 男, 后勤工程学院博士, 主要从事岩土工程稳定性分析及其数值模拟研究。

郑颖人(联系人), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, (E-mail) cqdzxx@263.net。

大量的工程实践和现场研究表明^[1-4],水是影响水库岸坡稳定性的主要因素之一,其危害作用十分明显。因此,尽量减少地表水向坡体内入渗并有效排出坡体内的地下水,对于岸坡的治理至关重要。常见的地下水排水措施有:渗沟、盲沟、渗井、排水涵洞、水平排水孔、集水井以及盲洞等。由于水平排水孔这种排水措施具有施工简便、工期短、节约材料和劳动力,且不需要经常维护的特点,是一种比较经济有效的排水措施,因此水平排水孔法在水库岸坡的治理工程中得到了广泛应用和推广。

通过设置水平排水孔排出地下水来提高水库岸坡的稳定性,是经工程实践检验的有效方法之一^[5-7]。水平排水孔的排水效果直接取决于其布设模式。目前实际工程中,水平排水孔的布设方案一般是照搬规范,或者根据经验、井流计算公式进行简单设计^[8],因此常常出现水平排水孔布设位置不对、水平排水孔失效、不能发挥排水作用,或者排水孔幕排水效果不能满足要求,或者为保证排水效果而盲目加密、增多排水孔数量等情况,造成不必要的工程浪费。因此,进行水平排水孔布设模式的研究有很高的实用价值。

目前关于水库岸坡治理工程中水平排水孔的研究还很少,大部分的研究工作都是针对大坝等水利工程中的垂直排水孔进行的。在水利工程中经常采用各种近似方法对排水孔进行简化处理^[9-10],如有的把排水孔作为计算域内给定水头的边界条件;有的把排水孔作为有限元网格中的一个定水头的节点。但事实上排水孔的排水效果与其孔径、孔深和孔间距的大小密切相关,采用简化方法忽略排水孔的尺寸效应是不可靠的,为此很多学者通过研究提出了新的改进方法^[11-17]。如:朱岳明等提出的排水孔结构的研究方法;詹美礼等提出的解析法和有限元法相结合的模拟方法;王恩志等提出的“以管代孔”的方法,进而提出了“以缝代并列”的方法来模拟排水孔幕。借鉴上述关于水利工程中垂直排水孔的研究可以看出,含水平排水孔的渗流场分析是一个复杂的三维问题,且模型的建立十分困难。由于是对该问题的初次尝试,在分析中把三维问题简化为二维问题进行分析。结合一个工程算例,完整地介绍了从水平排水孔模型的建立、含水平排水孔的渗流场分析到水平排水孔治理后岸坡的稳定性分析的整套方法,并就水平排水孔孔径以及孔长对其排水效果的影响展开研究。

1 水平排水孔在水库岸坡治理工程中的工程算例

某水库岸坡的计算剖面,如图1所示。计算工况:自重+坡体前部水位从175 m以2 m/d的速度匀速下降至145 m。

计算参数的选取,滑床土:土体重度 $\gamma = 25.0 \text{ kN/m}^3$,粘聚力 $c = 270 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 27.2^\circ$,土体渗透系数 $k_x = k_y = 1 \times 10^{-19} \text{ m/d}$;滑体土:设置为不排水条件, $\gamma_{\text{天然}} = 18.2 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{饱和}} = 18.6 \text{ kN/m}^3$, $c = 22.2 \text{ kPa}$, $\varphi = 15.1^\circ$, $k_x = k_y = 0.1 \text{ m/d}$;滑带土:也设置为不排水条件, $\gamma_{\text{天然}} = 18.2 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{饱和}} = 18.6 \text{ kN/m}^3$, $c = 19.8 \text{ kPa}$, $\varphi = 11.6^\circ$, $k_x = k_y = 0.1 \text{ m/d}$ 。

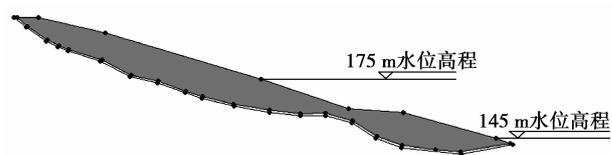


图1 计算剖面示意图

采用正版的 PLAXIS 程序结合 PLAXFLOW^[18]地下水渗流模块对算例进行稳定性分析,计算结果见表1。

表1 计算工况条件下稳定性的分析结果

计算天数 t/d	0	1	2→15
水位高程 d/m	175	173	171→145
安全系数	1.077	1.001	失稳破坏

从分析结果可以看出,该滑坡的稳定性随坡体前部库水水位的下降而降低,当水位下降1 d后,水位继续下降,该滑坡将失稳破坏。因此,需要对该滑坡进行治理,并使其在计算工况条件下始终保持稳定,于是采用增设水平排水孔的治理方法。

2 水平排水孔模型的建立

正常作用下的水平排水孔实际是一个水平的、充满空气的、中空的柱状体,因此可以把它看作是比一般渗流介质渗透性大得多的特殊介质。这样,就可以用一定的渗透系数来表征水平排水孔特殊的导水性能,并在模型中按照实体单元进行渗流计算。由于该方法是将水平排水孔中的空气看作是一种渗

流介质,故此方法称为“空气单元法”。

“空气单元法”通过给水平排水孔单元赋予一定的渗透系数,并将其加入到整体模型中,从而使计算结果更接近于实际情况,但是什么样的渗透系数才能正确反映水平排水孔的导水能力却成为一个新的问题。由渗流理论可知,水流在通过渗透性突变的界面时会发生水流折射现象。如图 2 所示,水流在通过介质 I 和介质 II 之间的界面时发生了折射。

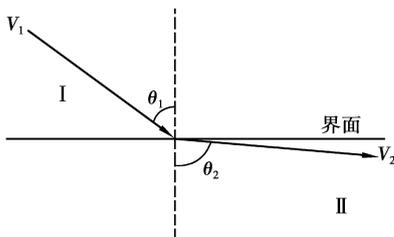


图 2 水流折射示意图

设介质 I 的渗透系数为 k_1 , 介质 II 的渗透系数为 k_2 , 界面上某一点附近的渗透速度在两介质中的值分别为 V_1 和 V_2 , V_1 、 V_2 和界面法向的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 。按界面上任一点都应满足水头相等和法向速度相等的原则,其渗流折射定律为

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{k_1}{k_2} \quad (1)$$

从式(1)可以明显看出,折射角 θ_2 随渗透系数 k_2 增大而增大,当 $k_2 \gg k_1$ 时, $\theta_2 \rightarrow 90^\circ$, 这表明强渗透性的介质可以改变水流的方向从而达到导水作用,但是到底表征水平排水孔导水性能的渗透系数取多少呢? 是否渗透系数取的越大越好呢? 从文献[19-21]采用“空气单元法”模拟排水孔得到的分析结果可以看出,排水孔的导水性能不仅仅取决于排水孔自身渗透系数的大小,而是由排水孔的渗透系数 $k_{\text{排水孔}}$ 与周边介质的渗透系数 $k_{\text{周边介质}}$ 的比值 R ($R = k_{\text{排水孔}} / k_{\text{周边介质}}$), 即相对渗透系数的大小决定的。通过文献中的算例可以发现, R 的取值并不是越大越好,只要 R 不低于一定大小,就足以表征排水孔的导水性能;对于不同的工程和排水孔不同的排水方式, R 的取值各不相同,如孔口出流式的排水孔, R 取 1 000 就可以模拟排水孔的作用;而对于孔壁逸出式排水孔, R 取 500 即可。因此,文中在模拟水平排水孔时,也是通过分析计算来确定排水孔渗透系数的大小,以水平排水孔内某一节点处的流速作为控制条件。如果水平排水孔的渗透系数增大后,通过渗流计算得到的节点流速和渗透系数增大

前通过渗流计算得到的节点流速相比,两者相差在 2% 以内,则说明增大前的排水孔渗透系数已足以表征水平排水孔的导水性能。由于工程中采用的水平排水孔一般只有上部透水,下部和端部均不透水,因此在建立水平排水孔模型时,需要在底部和端部分别设置不透水的界面,以保证水平排水孔的下半段和端部不透水,水平排水孔的单孔模型如图 3 所示。



图 3 水平排水孔单孔模型

3 水平排水孔治理效果的分析

从前面的工程算例可以看出,该滑坡在坡体前部库水水位从 175 m 下降至 145 m 的过程中,极易发生失稳破坏,因此采用增设水平排水孔的措施进行治理,希望通过工程治理使其在库水水位下降的过程中保持稳定。为了保证水平排水孔的正常工作,及其长期有效性,还根据潜在滑面的位置在其剪出口处设置了挡墙,通过墙面把水平排水孔打入滑坡体内。由于挡墙不考虑其透水,因此设置为非孔隙材料。建立的有限元计算模型如图 4 所示,水平排水孔孔径为 100 mm,孔长为 30 m。

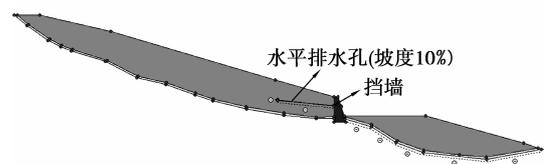


图 4 有限元计算模型示意图

要进行治理后该滑坡的稳定性分析,首先要确定合理的水平排水孔的渗透系数。取坡体前部库水水位为 175 m 时的情况进行分析,按前述的方法,以水平排水孔孔内某节点处的流速作为控制条件,计算结果见表 2,分别选取水平排水孔内的 4 个节点作为数据读取点(如图 5 所示)。图 5 绘制的是当水平排水孔渗透系数等于 500 m/d,即相对渗透系数等于 5 000 时,通过渗流计算得到的浸润面位置。

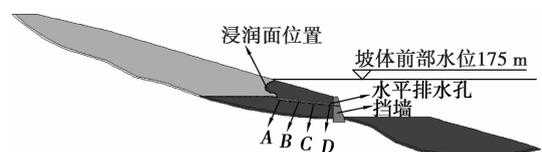


图 5 水平排水孔渗透系数取 500 m/d, 即相对渗透系数等于 5 000 时的浸润面位置

表 2 不同水平排水孔渗透系数的计算结果

排水孔渗透系数/(m·d ⁻¹)	10				20				100			
相对渗透系数(R)	100				200				1 000			
数据点	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
节点流速/(m·d ⁻¹)	9.74	9.74	9.78	9.81	17.70	17.96	18.51	19.65	83.66	85.34	89.57	97.41
排水孔渗透系数/(m·d ⁻¹)	500				1000							
相对渗透系数(R)	5 000				10 000							
数据点	A	B	C	D	A	B	C	D				
节点流速/(m·d ⁻¹)	257.43	263.36	281.80	310.13	258.69	264.92	284.48	313.55				

从表 2 中的计算结果可以看出,水平排水孔渗透系数取值的大小,即相对渗透系数的大小直接决定水平排水孔导水性能的强弱,当水平排水孔的渗透系数分别取 10 m/d、20 m/d 和 100 m/d 时,通过渗流计算得到节点流速与水平排水孔渗透系数取 500 m/d 时对应的节点流速相比,其间存在着较大的差异;但当水平排水孔的渗透系数继续增大至 1 000 m/d 时,其对应的节点流速和水平排水孔渗透系数取 500 m/d 时对应的节点流速相比,在 4 个数据点分别相差 0.49%、0.59%、0.95% 和 1.10%,均小于 2%。这说明对于该算例而言,水平排水孔的渗透系数取 500 m/d,即相对渗透系数等于 5 000 时,就能充分反映水平排水孔的导水性能,而较小的

渗透系数(如 10 m/d、20 m/d 和 100 m/d),显然不足以表征水平排水孔的导水性能。

同时,通过分析可以发现,水平排水孔内各个节点的流速并不是一个沿水平排水孔方向上的定值,其节点流速沿排水方向逐渐增大,越接近水平排水孔的出水口,节点流速越大。这说明越接近于水平排水孔的出水口,坡体内的地下水越易进入排水孔。

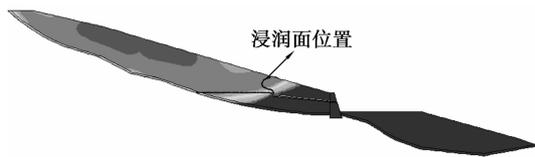
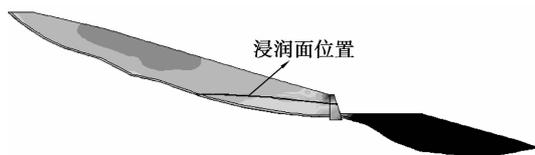
在确定了水平排水孔的渗透系数取 500 m/d 后,就可以采用有限元强度折减法对治理后的滑坡在库水水位下降过程中的稳定性进行了分析。假设库水水位下降速率计算工况相同,仍然是以 2 m/d 的速度匀速下降的,计算结果见表 3。

表 3 治理后的滑坡在水位下降条件下稳定性分析的结果

计算天数 t/d	0	1	2	3	4	5	6	7
水位高程 d/m	175	173	171	169	167	165	163	161
安全系数	1.211	1.197	1.192	1.191	1.190	1.188	1.186	1.185
计算天数 t/d	8	9	10	11	12	13	14	15
水位高程 d/m	159	157	155	153	151	149	147	145
安全系数	1.181	1.175	1.167	1.165	1.163	1.160	1.131	1.114

从表 3 中的计算结果可以看出,水位下降过程中各个时刻对应的安全系数均大于 1.000,这说明该滑坡经过治理后,在坡体前部水位从 175 m 下降至 145 m 的过程中能够始终保持稳定。安全系数的变化随坡体前部库水水位的降低虽然没有什么明显的规律,但是总体上看安全系数随坡体前部库水水位的降低逐渐减小。图 6~10 分别绘制了 t=0 d、

4 d、8 d、12 d 和 15 d 时,坡体内的浸润面和滑面位置。从图 6~10 可以看出,该滑坡在水位下降过程中存在多个潜在滑面。由于水平排水孔的排水疏干作用,坡体内浸润面的位置明显降低。为了更清楚地说明水平排水孔的工作机理,表 4 列出了水位下降过程中不同时刻水平排水孔内 4 个数据点处的节点流速。

图6 $t=0$ d时浸润面和滑面位置示意图图7 $t=4$ d时浸润面和滑面位置示意图图8 $t=8$ d时浸润面和滑面位置示意图

由于前面在对该滑坡进行治理时,为了保证水平排水孔的正常工作及其长期有效性,增设了挡墙,

因此为了进一步说明水平排水孔的导水疏干作用对该滑坡稳定性的提高,在计算中设置水平排水孔未工作,对该滑坡仅设置挡墙时的情况进行了稳定性分析,计算结果见表5。从表中的数据可以看出,虽然设置挡墙后滑坡的稳定性略有提高,但是随着水位的下降还是会发生失稳破坏。因此,可以认为水平排水孔的导水疏干作用对该滑坡稳定性的提高起到了主导作用。

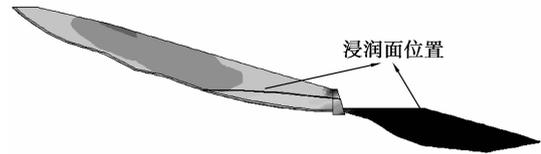
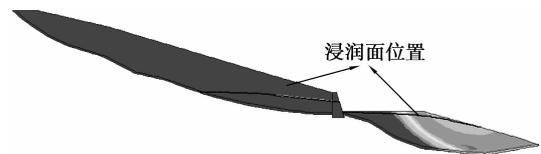
图9 $t=12$ d时浸润面和滑面位置示意图图10 $t=15$ d时浸润面和滑面位置示意图

表4 水位下降过程中各个时刻水平排水孔内节点的流速

计算天数 t/d	0	1	2	3	4	5	6	7
节点A	257.43	222.84	149.34	79.40	49.94	23.03	5.11	0.93
节点B	263.36	228.50	155.55	86.49	51.63	23.23	5.26	0.94
节点C	281.80	229.48	158.18	103.17	53.16	24.64	5.61	0.97
节点D	310.13	263.29	175.69	105.06	55.42	25.39	6.05	1.01
计算天数 t/d	8	9	10	11	12	13	14	15
节点A	0.24	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
节点B	0.25	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
节点C	0.25	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
节点D	0.26	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

表5 仅设置挡墙时稳定性分析的结果

计算天数 t/d	0	1	2	3→15
水位高程 d/m	175	173	171	169→145
安全系数	1.116	1.038	0.997(<1)	失稳破坏

4 水平排水孔孔长、孔直径对排水效果的影响

从前面的分析可以看出,由于水平排水孔的排水疏干作用,有效地减少了滑坡体内地下水的含量,

使浸润面的位置明显降低,从而使滑坡体的稳定性得到了提高。实际工程中,水平排水孔的导水性能受孔长以及孔直径等因素的影响,而其排水作用是否有效和明显可以直观地通过水平排水孔内节点处的流速来衡量,这里将结合该算例就水平排水孔孔长(L)和孔直径(d)对排水效果的影响展开研究。分析过程中仅使计算条件中的一个发生改变,而其余的计算条件均保持不变。由于孔长以及孔径的变化将使几何模型发生变化,因此很难就水平排水孔内同一节点在不同计算条件下对应的节点流速进行

对比,故以水平排水孔内节点的最大流速(V_{max})来衡量水平排水孔的排水效果。

1)水平排水孔孔长的影响

为了研究水平排水孔孔长对排水效果的影响,

取排水孔孔径为 100 mm,排水孔的渗透系数为 500 m/d,并在分析过程保持不变,排水孔孔长分别取 20 m,30 m(治理工程中采用孔长)和 40 m 进行分析,计算结果见表 6。

表 6 取不同水平排水孔孔长的计算结果

(a)L=20 m								
计算天数 t/d	0	1	2	3	4	5	6	7
节点最大流速 $V_{max}/(m \cdot d^{-1})$	316.66	241.25	166.11	100.09	54.26	25.39	6.13	1.72
计算天数 t/d	8	9	10	11	12	13	14	15
节点最大流速 $V_{max}/(m \cdot d^{-1})$	0.54	0.11	0.03	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
(b)L=30 m								
计算天数 t/d	0	1	2	3	4	5	6	7
节点最大流速 $V_{max}/(m \cdot d^{-1})$	344.18	270.13	179.90	107.47	56.63	25.91	6.10	1.03
计算天数 t/d	8	9	10	11	12	13	14	15
节点最大流速 $V_{max}/(m \cdot d^{-1})$	0.26	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
(c)L=40 m								
计算天数 t/d	0	1	2	3	4	5	6	7
节点最大流速 $V_{max}/(m \cdot d^{-1})$	375.86	284.32	195.00	110.52	64.31	22.26	2.27	0.14
计算天数 t/d	8	9	10	11	12	13	14	15
节点最大流速 $V_{max}/(m \cdot d^{-1})$	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

从表 6 可以看出,水平排水孔的长短对其导水性能的强弱有明显地影响,相对于孔长 $L=30\text{ m}$ 的情况而言, $L=20\text{ m}$ 时孔内节点的最大流速在计算天数 $t=12\text{ d}$ 时才趋于零($<0.01\text{ m/d}$),明显长于 $L=30\text{ m}$ 时孔内节点的最大流速趋于零($<0.01\text{ m/d}$)的时间(计算天数 $t=10\text{ d}$)。当水平排水孔孔长继续增长到 $L=40\text{ m}$ 时,这一时间也继续缩短至 $t=9\text{ d}$,这说明对于 $L=20\text{ m}$ 的水平排水孔而言,需要 11 d 的时间才能基本疏干滑坡体内的地下水,如果采用 $L=30\text{ m}$ 和 $L=40\text{ m}$ 的排水孔,

则可以把基本疏干滑坡体内地下水的时间分别缩短为 9 d 和 8 d 。因此,在实际工程中为了提高水平排水孔的导水性能,可以适当地加长水平排水孔的长度。

2)水平排水孔孔径的影响

分别取排水孔孔径 $d=50\text{ mm}$ 、 100 mm 和 200 mm 进行分析,排水孔孔长为 30 m ,排水孔的渗透系数为 500 m/d ,并在分析过程中保持不变,计算结果见表 7,排水孔孔径 $d=100\text{ mm}$ 的计算结果见表 6(b)。

表 7 取不同水平排水孔孔径的计算结果

(a)d=50 mm								
计算天数 t/d	0	1	2	3	4	5	6	7
节点最大流速 $V_{max}/(m \cdot d^{-1})$	342.11	268.50	178.82	106.82	56.29	26.02	6.13	1.04
计算天数 t/d	8	9	10	11	12	13	14	15
节点最大流速 $V_{max}/(m \cdot d^{-1})$	0.26	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

(b) $d=200\text{ mm}$

计算天数 t/d	0	1	2	3	4	5	6	7
节点最大流速 $V_{\max}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	353.70	271.48	180.01	108.03	56.81	25.94	6.02	1.03
计算天数 t/d	8	9	10	11	12	13	14	15
节点最大流速 $V_{\max}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	0.25	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

从表7中的数据可以看出,相对于水平排水孔孔长对其导水性能的影响,水平排水孔孔径的影响要小得多,孔径 $d=50\text{ mm}$ 、 100 mm 和 200 mm 时对应的孔内节点的最大流速基本没有什么变化。因此,如果想通过增大水平排水孔孔径的方法来增强其导水性能,不但达不到预期效果,反而会由于孔径的增大使施工的难度增大。

5 结 论

结合一个工程算例,完整地介绍了从水平排水孔模型的建立、含水平排水孔的渗流场分析到水平排水孔治理后岸坡的稳定性分析的整套方法,并就水平排水孔孔径以及孔长对其排水效果的影响展开研究。可以看出,由于水平排水孔的排水疏干作用,使坡体内的地下水能够顺利排出,有效地提高了坡体的稳定性。文中的算例在经过增设水平排水孔的治理后,能在坡体前部库水水位从 175 m 下降至 145 m 的过程中始终保持稳定。

同时,由于水平排水孔孔长相对于孔径对其排水效果的影响更为明显,因此在实际工程中为了提高水平排水孔的导水性能,优先考虑适当加长水平排水孔的孔长。

参考文献:

- [1] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. *Geo-technique*, 1999, 49(3): 387-403.
- [2] DESAI C S. Drawdown analysis of slopes by numerical method[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering*, 1977, 103(GT7), 667-676.
- [3] SCHNITZER G, ZELLER J. The seepage caused by the fluctuation of reservoir water level in the fill dam[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1988(5): 332-336.
- [4] GUREGHIAN A B, YOUNGS E C. The calculation of steady state water table heights in drained soils by means of the finite element method[J]. *J. Hydrol*, 1975 (27): 15-32.
- [5] 尚岳全. 管网渗流系统对含碎石粘性土边坡的稳定作用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(8): 1371-1372. SHANG YUE-QUAN. Study on the stability of pebbly clay slopes with pipe drainage system [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(8): 1371-1372.
- [6] 章普标, 唐晓武. 超长距离水平排水滤管在高速公路边坡滑坡处治中的应用[J]. *公路*, 2006(1): 80-85. ZHANG PU-BIAO, TANG XIAO-WU. The application of horizontal drainage filter tube of super-long distance in the control of slope landslide of expressway [J]. *Highway*, 2006(1): 80-85.
- [7] 林建东, 董夫钱. 水平降排水技术在滑坡治理中的应用[J]. *探矿工程*, 2006(4): 38-40. LIN JIAN-DONG, DONG FU-QIAN. The application of the technology of horizontal dewatering and drainage in the landslide control [J]. *Exploration Engineering*, 2006(4): 38-40.
- [8] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [9] 张有天. 用边界元法求解有排水孔的渗流场[J]. *水利学报*, 1982(7): 13-18. ZHANG YOU-TIAN. Solving the seepage field with drainage holes through boundary element method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1982(7): 13-18.
- [10] FIPPS G. Drains as a boundary condition in finite elements[J]. *Water Resources Research*, 1986(22): 11-18.
- [11] 余成学, 刘先珊, 叶查贵. 改进的排水孔解析解和有限元耦合计算方法[J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 601-603. SHE CHENG-XUE, LIU XIAN-SAN, YE CHA-GUI. Improved coupling method of analytical solution for drainage hole and FEM [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 601-603.
- [12] 许桂生, 陈胜宏. 模拟排水孔的复合单元法研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2005, 2(20): 214-220. XU GUI-SHENG, CHEN SHENG-HONG. Study on the composite element method for modeling drainage holes [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2005, 2(20): 214-220.
- [13] ZHAN MEILI, SU BAOYU. New method of simulating concentrated drain hole in seepage control analysis [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 1999 (3): 27-35.
- [14] NONVELLER E. Efficiency of horizontal drains on slope stability [C] // IN: Pasamehmetoglu E D ED, *Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Rotterdam: Balkma, 1994, 112-117.

- [15] 王恩志,王洪涛,邓旭东.“以管代孔”一排水孔模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(3):346-349.
WANG EN-ZHI, WANG HONG-TAO, DENG XU-DONG. Pipe to represent hole-numerical method for simulating single drainage hloe in rock-masses [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(3): 346-349.
- [16] 王恩志,王洪涛,王慧明.“以缝代井列”一排水孔幕模拟方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(1):98-101.
WANG EN-ZHI, WZNG HONG-TAO, WANG HUI-MING. Fissure to represent ling of hholes-numerical method for simulating the drainage hole cuatain in roch masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(1): 98-101.
- [17] 朱岳明,张燎军. 排水孔穿过自由面时渗流场的改进排水子结构法求解[J]. 岩土工程学报,1997(2):69-76.
ZHU YUE-MING, ZHANG LIAO-JUN. Solution to seepage field problem with the technique of improved drainage substructure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 19(2):69-76.
- [18] 郑颖人,唐晓松. 库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2007,27(8):1115-1121.
ZHENG YING-REN, TANG XIAO-SONG. The stability analysis of slope under reservoir drawdown condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,27(8): 1115-1121.
- [19] 胡静. 空气单元法模拟渗流场分析中的排水孔[J]. 水力发电,2005,31(12):34-36.
HU JING. The drainage hole in the analysis of using air element method to simulate seepage field[J]. Water Power, 2005,31(12): 34-36.
- [20] 胡静,陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J]. 岩土力学,2003,4(2):281-283.
HU JING, CHEN SHENG-HONG. Air element method for modeling drainage holes in seepage analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,4(2): 281-283.
- [21] CHEN S H, XU Q, HU J. Composite elements method for seepage analysis of geotechnical structures with drainage hole array[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 16(3): 260-266.

(编辑 陈移峰)

(上接第74页)

- [5] FRANK C C WENG, WANG H S. Proceedings of the fourth international conference on advances in steel structures: Seismic behavior of steel beam to steel reinforced concrete (SRC) column connections, Shanghai, June 13-15, 2005 [C]. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2005.
- [6] JGJ 138-2001, 型钢混凝土组合结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [7] BEUTEL J, THAMBIRATNAM D, PERERA N. Cyclic behavior concrete filled steel tubular column to steel beam connection [J]. Engineering Structures, 2002, 24: 29-38.
- [8] 周学军,曲慧. 方钢管混凝土框架梁柱节点在低周期往复荷载作用下的抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2006,39(1):38-42.
ZHOU XUE-JUN, QU HUI. Seismic resistance of bole-weld joint and all-weld joint of concrete filled square steel tube and steel beam under cyclic load[J]. China Civil Engineering Journal,2006, 39(1): 38-42.
- [9] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [10] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [11] 杨成武. 钢管混凝土桁架转换层施工监控研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [12] DVORKIN E N, BATHE K J A. Continuum mechanics based four-node shell element for general nonlinear analysis[J]. Engineering Computations, 1984, 1(1): 77-88.
- [13] 陆新征,江见鲸. 利用 ANSYS Solid 65 单元分析复杂应力条件下的混凝土结构[J]. 建筑结构, 2003,33(6): 22-24.
LU XIN-ZHENG, JIANG JIAN-JING. Analysis for concrete structure under complex stress condition with solid 65 FEA element of ANSYS [J]. Building Structure, 2003, 33(6): 22-24.
- [14] GB 50010-2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [15] LU X Z, TENG J G, YE L P, et al. Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model [J]. Journal of Composite for Construction, ASCE, 2007, 11(2): 161-174.
- [16] 查晓熊,唐家祥. 钢管混凝土结构非线性有限元分析中混凝土界面模型的研究及应用[J]. 工程力学, 1999, 16(6):29-35.
ZHA XIAO-XIONG, TANG JIA-XIANG. The study and application of concrete bounding surface constitutive relationships to the nonlinear finite element analysis of concrete filled steel tubular structures [J]. Engineering Mechanics, 1999,16(6):29-35.
- [17] YUNUS S M, PAWLAK T P, COOK R D. Solid elements with rotational degrees of freedom[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1991,31:573-592.

(编辑 陈移峰)