

无限深透水地基上土石坝微透水水平 防渗体对渗流的影响

徐毅¹, 侍克斌¹, 徐千军², 欧阳君³

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830000; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程重点实验室, 北京 100084; 3. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 长沙 410007)

摘 要: 对无限深透水地基上土石坝微透水水平铺盖防渗体长度的选取进行了相关的模型实验, 再利用有限元法建立数学模型进行理论计算, 并将理论数据和实验数据进行对比分析, 最后通过微渗透防渗体和不透水防渗体的渗流数据进行对比, 进而确定了微透水水平铺盖的长度。

关键词: 微透水防渗体; 非均质无限深透水地基; 有限单元法

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)01-0089-04

Influence of micro permeable horizontal impervious body on seepage in embankment dam above infinite pervious foundation

XU Yi¹, SHI Kebin¹, XU Qianjun², OUYANG Jun³

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China;

2. Key Laboratory for River Dynamics and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute of Hunan Province, Changsha 410007, China)

Abstract: Through model experiment, the paper selected the length of micro pervious horizontal impervious body of embankment dam on Infinite deep pervious foundation, used finite element method to establish the mathematical model and carry out theoretical calculation, then analyzed theoretical and experimental data, and finally compared seepage data between micro pervious anti-permeable and impervious anti-permeable body, determined the length of micro permeable horizontal blanket.

Key words: micro porous anti-permeable body; non-homogeneous infinite deep pervious foundation; finite element method

0 引 言

目前, 由于较好的水库坝址逐渐减少, 有相当一部分水库大坝是建在或将要建在无限深透水地基^[1]或深厚覆盖层地基上的, 此类地基基本都是不同岩土间杂分布, 认为其是均质的情况固然容易讨论和计算, 但是对实际工程的指导意义却存在一定的局限性。国内外已有专家和学者, 在假定水平铺盖和坝体斜墙防渗体完全不透水的情况下, 进行无限深透水地基上土石坝的渗流控制方面的研究。这种研究方法拥有取材方便和理论计算简化的特点, 并且已经得到初步的成果: 在增加水平铺盖长度到一定的尺寸之后, 再增加长度已经不能有效的减少

渗流量、降低渗透坡降^[2]。然而, 在实际工程中, 无论是利用粘土还是土工膜做防渗体, 都会因为人为焊接不当, 或不可抗力等原因而存在渗漏的问题。因此, 假定防渗体完全不透水这样的限定条件尚有明显的局限性, 在实际工程中会造成较大的偏差。那么, 对无限深透水地基上土石坝微透水水平铺盖和坝体斜墙防渗体的研究, 将会更加真实而全面地对实际工程进行模拟和计算, 推动非均质无限深透水地基上土石坝渗流控制方面成果的发展。

本文正是对无限深透水地基微透水水平铺盖防渗体长度的选取进行了相关的模型实验, 再利用有限元法建立数学模型进行理论计算, 并将理论数据和实验数据进行对比分析, 最后通过微渗透防渗体

收稿日期: 2012-11-13; 修回日期: 2012-11-20

基金项目: 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放研究基金课题 (sklhse-2011-c-01); 国家自然科学基金项目 (50969010); 新疆水利水电工程重点学科基金项目 (xjzdxk-2002-10-05)

作者简介: 徐毅 (1988-), 男, 山东莱西人, 硕士研究生, 研究方向: 当地材料坝设计理论与施工技术。

通讯作者: 侍克斌 (1957-), 男, 新疆石河子人, 教授, 博士生导师, 从事水利水电工程方面的教学和研究工作。

和不透水防渗体的渗流数据进行对比,确定了微透水水平铺盖的长度选取。

1 非均质无限深透水地基上土石坝微透水铺盖有效长度的确定

某水库为灌注式平原水库,坝基为渗透系数不同的深厚粉细砂覆盖层,渗流设计按照无限深透水地基考虑。坝前最大水深为 8 m,坝基 70 m 之上和 100 m 之下为较强透水层,渗透系数 k_1 为 6.26×10^{-3} cm/s; 70 ~ 100 m 为较弱透水层,渗透系数 k_2 为 2.50×10^{-4} cm/s,允许渗透坡降为 0.1。水库的坝体为土石坝,采用复合土工膜作为水平防渗体和斜墙防渗体。本文根据此水库的基本参数用模型实验和有限元法进行分析计算。

1.1 微透水水平防渗体的选取

在透水地基上修建土石坝,水平铺盖是常用的防渗措施之一^[3]。其作用是增加水平渗径,减小坝基的渗透坡降和渗流量。复合土工膜作为防渗材料是近几十年来在堤坝工程中广泛应用的新技术之一,其渗透系数可以达到 $10^{-10} \sim 10^{-13}$ cm/s。但在实际工程中,由于大批量的生产和施工过程中的损伤等各种因素的制约,复合土工膜的渗透系数往往只能达到 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ cm/s^[4]。长江科学院试验成果证明,一般粘土、壤土抛土料的自然含水量对水下抛土体的防渗能力有很大影响^[5]。于是对红粘土进行了液塑限实验,测得当红粘土达到 65% 的含水率时达到液限状态。并通过变水头法进行渗透实验,利用公式(1)进行多次平行实验,得到液限红粘土的渗透系数可以达到 $1.41 \times 10^{-7} \sim 5.31 \times 10^{-8}$ cm/s。所以用液限红粘土作为实验材料,既可以模拟实际工程中水平防渗体的渗透系数,也方便实验的操作。

$$k = c \frac{aL}{At} \quad (1)$$

式中: c 为常数,取值为 2.3; a 为变压管面积, cm^2 ; L 为试样高度, cm ; A 为试样断面积, cm^2 ; t 为时间, s ; h_1 为初始高度, cm ; h_2 为变化后高度, cm 。

1.2 实验的设计

(1) 根据上述数值模拟实验的条件,设计沙槽渗流模型实验,砂槽渗流模型试验和水工模型一样,必须使模型与实际原型保持几何相似,有一定的长度比尺关系,并应保持彼此之间的动力相似,研究中以摩阻力为主控力^[6]。渗流场的相似,以带脚码 m 表示模型量,不带脚码表示天然原型量,并以 λ 表示

长度比尺,带脚码表示其它量的比尺,则各渗流要素的比尺关系如下:

$$\lambda = \frac{L}{L_m}, \lambda_v = \frac{v}{v_m}, \lambda_Q = \frac{Q}{Q_m}, \lambda_k = \frac{k}{k_m}, \lambda_h = \frac{h}{h_m}$$

由达西定律可得模型比尺关系:流速比尺 $\lambda_v = \lambda_k$,单宽流量比尺 $\lambda_q = \lambda \lambda_k$,流量比尺 $\lambda_Q = \lambda^2 \lambda_k$, λ 为长度比尺, λ_k 为渗透系数比尺。沙槽模型 $\lambda = 200$ 。式中: Q 为流量, cm^3/s 。 v 为流速, cm/s 。 k 为渗透系数, cm/s 。 q 为单宽流量, $\text{cm}^3/(\text{cm} \cdot \text{s})$ 。

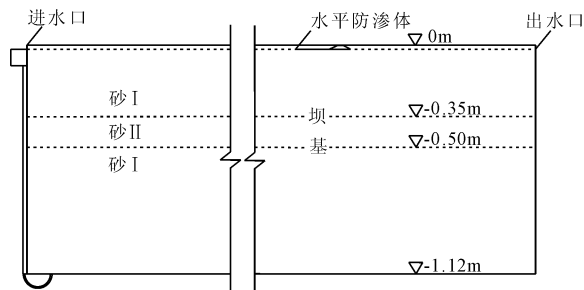


图1 渗流槽内砂子的填充方式

沙槽为立方体,长 $L = 4.0$ m,宽 $D = 0.5$ m,高 $H = 1.2$ m。砂 I 为中砂,其干密度为 1.93 g/cm^3 ,渗透系数为 $8.67 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$;砂 II 为细砂,其干密度为 1.78 g/cm^3 ,渗透系数为 $3.48 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。沙层上修筑土坝模型,由砂 I 砌筑,其干密度为 1.93 g/cm^3 ,渗透系数为 $8.67 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,坝高 0.07 m,上下游边坡均取 1:2。水平防渗体及上游斜墙防渗体均采用液限红粘土,其渗透系数为 $1.41 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。坝前水深 H 为 0.04 m。铺盖长度取 (2 ~ 50) 的坝前水深 H ,逐渐增长。沙槽侧壁上装测压管,用以观察沙槽内水压的变化情况。沙槽中的下游地面水深为 0,在下游与地面齐平的位置开凿一排圆孔,圆孔接渗流收集装置,用以观测渗流量。根据以上长度比尺 $\lambda = 200$ 可得: $\lambda_v = \lambda_k = k/k_m = 6.26/8.67 = 0.722$, $\lambda_q = \lambda \lambda_k = 144.41$, $\lambda_Q = \lambda^2 \lambda_k = 29080$ 。

(2) 本实验的主要目的是观察坝后渗流量随着粘土铺盖长度变化而变化的趋势。试验先从 0.08 m (取 2 倍上游水深) 铺盖开始,液限红粘土的干密度为 1.58 g/cm^3 ,每次称取 320 g 的干粘土进行配合,均匀的铺盖在地基表面约 0.5 cm 厚。利用平水装置,将上游水深始终维持在 4 cm,直到渗流稳定,记录测压管水头和 1 min 内坝基下游的渗流量,并将其换算成流量和单宽流量;0.08 m 长铺盖全部观测完毕后,增加 0.08 m 铺盖长度,此时铺盖变为 0.16 m (取 4 倍上游水深),直到渗流稳定后,重复

上面的过程;依此类推,铺盖长度每次增加 0.08 m,观测渗流量和水压的变化。为了保证是在相应的铺盖长度达到渗流稳定时的数据,每次增加铺盖长度 1 h 后进行数据采集,见表 1。

表 1 铺盖长度与坝基单宽流量关系 $m, m^3/(d \cdot m)$			
防渗体长度与 坝前水头倍数	铺盖 长度	单宽 流量 q	坝后渗透 坡降比
2	16	27.43	0.176
4	32	25.81	0.138
6	48	23.99	0.115
8	64	22.44	0.097
10	80	21.11	0.083
12	96	19.95	0.076
14	112	18.91	0.063
16	128	18.01	0.050
18	144	17.12	0.038
20	160	16.82	0.027
22	176	16.71	0.023
24	192	16.16	0.020
26	208	15.86	0.012
28	224	15.56	0.010
30	240	15.54	0.007
32	256	15.51	0.006

1.3 数值模型的建立

有限元分析方法是一种先进有效的数值模拟法,用于渗流分析计算时可部分替代模型试验、结构物和地基形状不太复杂时精度相对较高,具有成本低、时间短、可方便得模拟多种外部条件的特点^[7]。由水流的连续条件和达西定律可以得到土石坝的二维渗流方程

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \tag{2}$$

式中: k_x 、 k_z 分别为水平向与竖向的渗透系数; h 为总水头。当 $k_x = k_z = k$ 时,上式就简化为 Laplace 方程。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \tag{3}$$

以上文提到的某水库的基本参数进行数值计算。坝前最大水深 8 m,坝高 14 m,上下游边坡均为 1: 2。坝基 70 m 之上为第 I 层,100 m 之下为第 III 层,渗透系数 k_1 为 6.26×10^{-3} cm/s; 70 ~ 100 m 为第 II 层,渗透系数 k_2 为 2.50×10^{-4} cm/s; 水平防渗体和斜墙防渗体的渗透系数 k_3 为 1×10^{-7} cm/s。渗流分析中渗流面的确定一直是个难题,在土石坝的渗流有限元计算中,先划分网格,假设一个下游逸出点,计算出此时的零孔压线,然后再根据零孔压线

与下游坝坡交点位置对逸出点进行修正。多次修正之后,直到修正的逸出点和计算出的逸出点位置相同,计算结束。此时,零孔压线就是浸润线^[8]。由于坝体为粘土斜墙土石坝,对非均质坝,如有褥垫排水、棱体排水或有心墙的情况,可不需要迭代,直接给出满意的结果^[9]。因此上游水位以下的上游坝坡和下游水位以下的下游坝坡为给定水头边界条件。上游水头边界条件为 8 m,下游水头边界条件为 0 m。地基 I 层和地基 III 层的渗透系数为 k_1 ; 地基 II 层的渗透系数为 k_2 ; 水平防渗体和斜墙防渗体的渗透系数为 k_3 。对全局每 5 m 进行一个单元的划分。坝体和坝基共有 7448 个节点,7250 个三面体和四面体单元。有限元网格见图 2(以水平防渗体长度为 10 倍水头为例)。

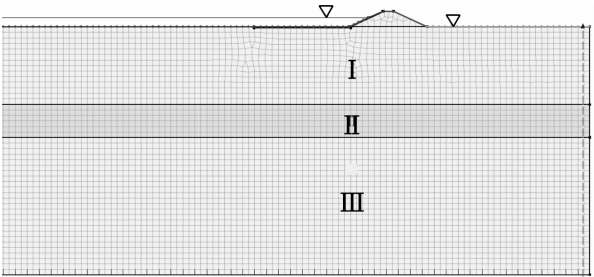


图 2 土石坝的有限元及网格剖分

计算可以得到截面流量的流速和速度矢量图像,见图 3。

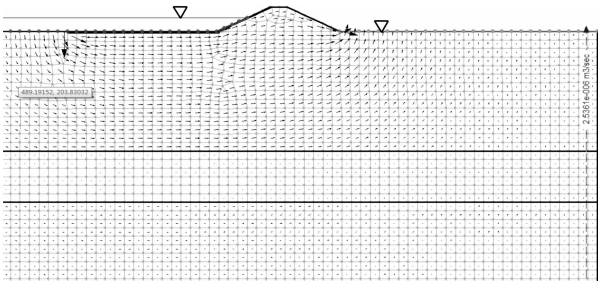


图 3 速度矢量

防渗体部分可以看到水平铺盖和斜墙防渗体有明显的渗流现象,见图 4。

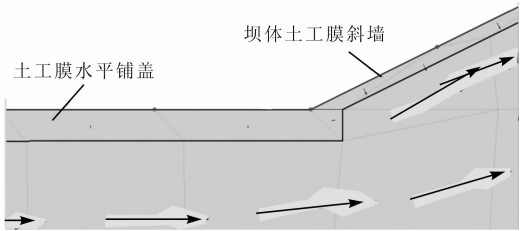


图 4 防渗体部分

通过截面流量的流速和逸出点的渗透坡降得到的理论计算值如下表:

表 2 铺盖长度与坝基单宽流量关系 $m, m^3/(d \cdot m)$			
防渗体长度与坝前水头倍数	铺盖长度	单宽流量 q	坝后渗透坡降比
2	16	24.99	0.155
4	32	22.77	0.128
6	48	20.95	0.108
8	64	19.40	0.093
10	80	18.07	0.087
12	96	16.90	0.064
14	112	15.86	0.053
16	128	14.92	0.042
18	144	14.07	0.035
20	160	13.72	0.022
22	176	13.41	0.018
24	192	13.17	0.013
26	208	12.86	0.011
28	224	12.75	0.008
30	240	12.68	0.007
32	256	12.59	0.006

2 数据分析

将表 1 和表 2 的数据中渗流量与铺盖长度的关系与非均质无限深透水坝基不透水铺盖防渗体长度选取的实验数据绘制曲线^[10],见图 5。

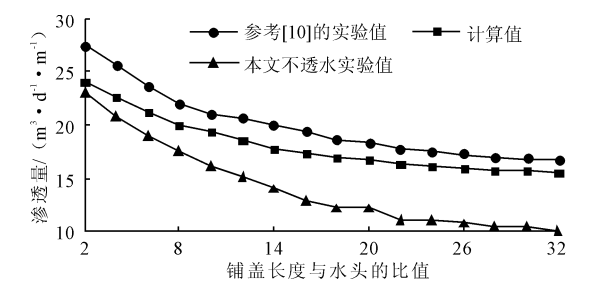


图 5 铺盖长度和坝基渗流量的实验与理论值曲线

通过表 1 和表 2 中的坝后渗透坡降比及图 5 分析可知:①当铺盖长度达到 8 倍上游水深后,坝基的渗透坡降小于允许渗透坡降,再增加铺盖长度,坝基渗透破坏的可能性越低。②实验测定数据和理论计算数据基本吻合,随着铺盖长度的增加渗流量明显在减少。但当铺盖长度达到一定的尺寸之后,再增加铺盖长度对渗流量的减少的影响已经不甚明显。具体来说当水平铺盖的尺寸达到坝前水头的 18 ~ 24 倍的时候,再增加水平铺盖的尺寸已经不能有效

的减少坝基的渗流量。③实验数据比理论数据偏大的原因:在实验过程中,虽然最大程度的减少实验装置内的密切问题,但是无法避免由于地基砂层与粘土接触缝隙产生的孔隙水压力。但是总体趋势是一致的,进而还是验证了计算结果。

3 结 语

非均质无限深透水地基上土石坝的渗流控制是水工地基渗流的重要组成部分,而由于客观原因导致的防渗体破坏,从而引起集中渗漏的情况更应该考虑进我们的理论计算当中,这样才能对实际工程更具指导意义。本文通过理论计算和模拟实验对该问题进行了初步的分析和研究,不仅确定了微透水水平铺盖防渗体有效长度,还证实了理论计算方法的可行性,这对今后类似工程中防渗体渗流分析也有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 袁莹. 无限深透水地基上土石坝坝基渗流控制计算模型及有关问题研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2007.

[2] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[3] 毛海涛. 无限深透水地基上土石坝铺盖长度对坝基渗流的影响[J]. 水力发电,2007, 33(1): 33-36.

[4] 姜海波,侍克斌,李玉建. 库盘大面积土工膜防渗体的渗漏估算[J]. 水利水运工程学报,2010(4):58-61.

[5] 陈昌禄,周小兴. 粘土铺盖在土石围堰防渗中的应用[J]. 水利水电工程设计,2005,24(4):13-15.

[6] 胡家延,彭旭麟. 复变函数[M]. 北京:高等教育出版社,1986.

[7] 侯俊平,郭炜. 有限元的计算方法在大坝渗流分析中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(5):63-66.

[8] 欧阳君,林飞,刘秋英,等. 基于 ABAQUS 的土石坝稳定渗流期应力应变分析[J]. 水资源与水工程学报,2012, 23(2):104-108.

[9] 徐千军,张建红. 确定稳定渗流自由面位置的一种简便方法[J]. 水动力学研究与进展,1999,17(12):418-423.

[10] 尹海华,侍克斌,毛海涛. 非均质无限深透水坝基不透水铺盖防渗体长度选取[J]. 水资源与水工程学报, 2011,22(2)62-65.