无限深透水地基上土石坝渗流控制边界元法初探

白俊文,侍克斌

(新疆农业大学水利与土木建筑工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:简述渗流控制理论的发展现状,指出建在无限深或较深厚覆盖层透水地基上的土石坝,其渗流控制措施的设计尚不够完善.在分析几种渗流控制的计算方法后认为,用边界元法研究无穷远处的边界条件是适合的,据此用边界元法对无限深透水地基上修筑土石坝的渗流计算问题进行了分析和讨论,提出了建模思路,给出了边界元法的数学模型.

关键词:土石坝;渗流控制;无限深透水地基;边界元法

中图分类号:TV641/TV139.14 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2005)S1-0043-03

土石坝是一种挡水建筑物,为有计划的利用水资源壅高水位或拦蓄河水.被挡的水壅高后由于位势的升高,水流会沿着坝身土料、坝基土体和坝端两岸地基的孔隙向下游渗透,造成坝身、坝基或绕坝的渗漏.土石坝的渗流对水库的经济效益和大坝安全运行起着决定性的作用,因此渗流控制始终是土石坝研究的课题之一.

1 渗流控制研究现状

从 1856 年达西解决了土的基本渗流理论后,土石坝渗流控制理论得到了很大发展.纵观国内外对渗流原理的研究,可分为 3 个发展阶段:由单纯的防渗发展到防渗和排水相结合,进而发展到目前防排结合的反滤层保护渗流出口.另外,评价渗流控制效果的标准也由有无渗漏发展为渗漏量是否在允许范围内,渗流出口有无适合的反滤保护[1,2].渗流控制措施包括防渗和排渗,防渗控制措施一般分为两大类:水平防渗措施和垂直防渗措施,所有这些防渗措施,其实质都是延长坝基渗径,使坝基内的渗透坡降不超过允许渗透坡降,从而保证坝基的渗透稳定.只凭防渗措施企图完全截断渗流,往往是不经济的,也是不可能的[3].因此,必须结合适当的排渗措施以确保地基的渗流安全.

20 世纪 30 年代以后从渗流破坏事例中提出了渗透破坏的两种假说,即渗流出口破坏和内部集中渗透破坏[4].

a. 渗流出口破坏假说.实践证明,均质砂砾石地基或有弱透水层的双层地基,若出现危险性渗水,多表现为坝脚后的地基表面翻水带砂,或下游地基表层被渗流穿洞,涌水翻砂,渗流量不断增大.当渗流出口的水力比降接近临界水力比降时,下游出口地基土体变松,并会发展为沙沸现象,水头增加时引起某一块土体冲出浑水破坏为流土,或由于管涌带走细粒,连锁反应形成下游至上游的集中渗流通道,很快导致工程失事.这种假说认为首先是渗流出口破坏因而导致工程失事,如果在渗流出口做了重点保护,就能有效地控制渗流破坏.

b. 内部集中破坏假说.国内外研究指出,地基土体内部因薄弱地带细粒被冲走,孔隙增加,渗透性也随之变大,局部的管涌会在地基中形成集中渗流通道,朝着渗流方向发展,因而,渗流通道长度增加.由于渗流通道出口未加反滤保护,渗流量逐渐增大,最终土骨架被冲刷,酿成工程事故.这类集中渗流取决于局部的地质条件,地基土层的成层性和地基土本身的特性等一些偶然因素.因坝基接触冲刷而形成集中渗流内部管涌,最后导致工程失事.这种假说认为单纯靠保护出口不能解决问题,还要对地基土体集中渗流进行控制.

由以上叙述可知,这两种破坏假说都认为渗透破坏是由于渗透力的原因,只是破坏条件不同.前一种破坏重点在渗流出口段,一般是突发性的;后一种破坏重点在土体内部薄弱地带,是随时间发展的.但坝后渗流出口保护对这两类假说显得更为重要.为防止渗透破坏,目前的发展趋势是必须一方面从校核地基整体渗

基金项目:新疆水利水电工程重点学科基金资助项目(xjzdxk-2002-10-05)

作者简介:白俊文(1977—),男,内蒙古包头人,硕士研究生,从事当地材料坝设计理论与施工技术研究.

透稳定出发,控制地下轮廓的平均水力比降小于地基的允许水力比降,另一方面在任何情况下都必须重视渗流逸出段,做好反滤压重层.

通过国内外对渗流控制原理的不断研究,渗流控制原理日趋完善.采取渗流控制措施的两个主要目标很明确,一是出逸坡降要小于土的允许坡降,二是控制渗流量在允许范围内.

2 渗流控制存在的问题

从现有的研究情况来看,国内外在透水坝基渗流控制方面的研究多限于有限深的情况,使得建在有限深透水地基上的土石坝渗流控制原理和渗流控制措施的优化设计日趋完善,无论是对水平防渗铺盖还是各种垂直防渗措施,在理论上都有比较精确的计算方法.但对于建在无限深透水地基或较深厚覆盖层上的土石坝,以前的计算公式已不再适用,现阶段对于建在这种地基上的坝型,只是按'有效深度'的概念转化为有限深地基进行计算.因此如何采取一种符合实际情况的防渗措施,到目前为止还没有提出一种切合实际的渗流控制的设计方法和计算理论,这使坝工界在无限深的透水地基上修筑土石坝时面临挑战.例如,巴基斯坦的塔贝拉大坝上设计出了世界上最高水头的黏土铺盖,坝基为砂砾石覆盖层,厚度为 230 m 左右,水平铺盖的长度起初按 10 倍水头设计,在蓄水运行后,铺盖发生渗漏塌坑,危及大坝的安全运行,后经多次水下抛土处理,直至铺盖长度达到 17 ~ 20 倍水头才达到稳定要求[5].又如新疆的恰拉水库,库区出露地层主要为第四系冲积物和风积物,坝基地层主要为粉细砂强透水层.在设计中按无限深透水地基考虑,坝前最大水深 6.5 m,防渗方案采用水平铺盖防渗,设计铺盖长度 140 m,采用水平铺盖防渗后,渗透比降、渗流量都达到了设计要求,但同时也看出,水平铺盖长度是最大水头的 21 倍之多.

按有限深透水地基设计的铺盖长度只需 6 ~ 8 或 8 ~ 10 倍的水头,但从上述两个工程实例可以看出铺盖长度远远超出这个经验设计范围,由此可见在无限深或较深厚覆盖层的透水地基上防渗措施的设计不能简单地套用现有的有限深透水地基的防渗设计经验和方法.因此,有必要研究无限深透水地基或较深厚覆盖层上修筑土石坝的渗流控制措施的计算.

关于无限深透水地基,SL 274—2001《碾压式土石坝设计规范》指出当透水地基深度大于建筑物不透水底部长度的 1.5 倍以上时,可以按无限深透水地基估算.但对于透水的土石坝,如何选取则很模糊.当然,实际问题中并不存在无限域,它只是一个数学概念.在什么条件下才能将实际问题按无限域计算,这是渗流控制理论上是很值得研究的课题.

3 渗流控制计算方法

渗流问题的计算方法分为 4 类:①解析法,包括流体力学法和水力学法;②数值法;③图解法;④实验法.渗流分析的基本假定之一是材料均匀、等向,而实际情况却难以如此,所以说无论采用哪种方法,其结果都带有一定程度的近似性.

渗流计算是在已知定解条件下求解渗流基本方程,以求得渗流场水头分布和渗流量等渗流要素,它是工程设计的重要内容.由于土石坝属于无压渗流,有渗流自由面(浸润面)且非稳定渗流自由面随库水位升降而变动,加之一般渗流场有不同程度的非均质和各向异性,几何形状和边界条件复杂,解析求解在数学上有不少困难,有时甚至无法求解.它仅能对一些简单流动情况获得解析解.流体力学法较为严谨,但只适用几种比较简单的边界情况,当遇到复杂的边界条件时,流体力学法将无法求解.遇到复杂地基或复杂边界条件时,采用水力学法或流网图解法也会遇到一定的困难,有时无法求解.电比拟实验法能解决平面问题也能解决三维问题,目前更多的是解决三维问题,但需要一定的设备,而且所需费用较高、时间较长.因此前人提出的许多近似计算公式在使用上仍受一定条件的制约,实际工程往往借助于模拟试验求解.20 世纪 60 年代,电子计算机的普及和数值方法的发展推进了数学模型的发展,为渗流计算提供了有效的方法.

数值计算实际上是一种近似的计算方法,但对边界条件较复杂的问题进行分析和计算时,计算机作为计算工具既能保证计算速度,又可达到相当高的令人满意的精确度,所以数值法在渗流计算中愈来愈显示出其重要性.渗流计算中常用的数值方法为有限差分法和有限元法,以及在 20 世纪 70 年代发展起来的边界元法.目前有限差分法已经很少应用,有限元法在计算渗流问题上应用最多,而边界元法在求解渗流问题上应用还不十分成熟[6].

以上提到的有限差分法和有限元法均采取把求解区域离散为若干单元或网格,从而使问题的控制方程在区域上全部满足或部分满足边界的函数近似的形式,这种区域法在求解有限深地基的渗流问题时取得了很好的效果,也广泛地应用于工程实际当中.但水利水电工程经常遇到无限深介质或半无限深介质问题,区域法就暴露了它的局限性,在处理此类问题时,区域法通常的办法是在离研究范围足够远处人为地划定边界并主观的给出边界条件,而这显然是不适用的[7].边界元法对于研究无穷远处的

边界问题是非常适合的，这种方法通常根据变分法或加权余量法建立流体力学的积分方程，再由格林公式或其他方法将求解域的积分方程转化为求解边界的积分方程，引进微分方程的基本解，然后把控制边界边剖分成若干小单元，将求函数解简化为求解单元节点上的函数值，求解积分方程就化为求解一组线性代数方程，从而得到边界上的未知物理量. 必要时利用边界上全部物理量再求解域内的未知函数及其导数. 因此，面对这类问题，边界元法无疑将会显示它的优越性[8].

4 边界元法数学模型

边界元法适用于一个渗透系数为 K，各向同性的二维均质区域 D，D 的一部分边界上给定势函数 φ，而在其余边界上则给定法向速度 u，需求出 D 区域内或边界 S 上的任意指定点处的流速和势函数值[9]. 根据边界元法的原理，第一类边界条件为给定水头边界条件；第二类边界条件为给定流量边界条件. 在应用该方法时，对任一边界要求知道其中的一类边界条件，即已知水头或流量. 而对于建在无限深透水地基或较深厚透水地基上的土石坝，采用不透水铺盖斜墙式防渗时，坝基的流量和水头都是未知的，直接应用此法是不可能实现的.

笔者的思想是根据边界元基本原理，在坝基上作一个直线假设，即坝基上的水头损失是线性损失. 举例叙述如下，当采用常单元法计算时(见图 1)，假定 6 点的水头为 u_6，则 7 ~ 12 点的水头损失按线性分布. 这样虽然 u_6 是未知的，但坝基上各点水头相对 u_6 是已知的.

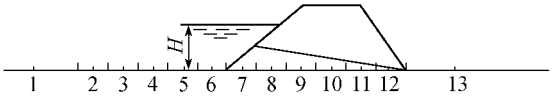

图 1 边界元法建模计算简图

按照以上的思路那么 1，7，8，9，10，11，12，13 点代表第一类边界条件(已知水头边界条件)，而 2，3，4，5，6 点代表第二类边界条件(已知流量边界条件). 根据公式

$$c_i u_i + \int_{S_1} \bar{u} \frac{\partial u^*}{\partial n} \mathrm{d}S + \int_{S_2} u_i \frac{\partial u^*}{\partial n} \mathrm{d}S = \int_{S_1} \frac{\partial u}{\partial n} u^* \mathrm{d}S + \int_{S_2} \bar{q} u^* \mathrm{d}S$$

式中：$\bar{u}$，$\bar{q}$ 为已知边界条件；u^* 是基本解，对于拉普拉斯方程基本解 $u^* = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r_{ij}}$，其中 r_{ij} 是域内任一点 i 到 j 点的距离；c_i 取为 $\frac{1}{2}$；u_i 是点源在 i 点时的水头；S_1 为第一类边界条件；S_2 为第二类边界条件；n 为单元数. 这样，13 个未知量，建立 13 个方程. 推广而言 n 个未知数，就能建立 n 个方程. 求解可得沿铺盖的水头损失，进而进行设计计算.

5 结 语

鉴于我国地质条件良好的坝址日趋减少，许多可开发的大坝都将建在无限深或较深厚覆盖层地基上，因此，研究这种情况下的渗流控制具有重要的现实意义. 本文对于建在无限深透水地基或深厚覆盖层透水地基上的土石坝的渗流计算提出了边界元法的应用，以是探讨.

参考文献：

[1] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京：水利电力出版社，1992：98-99.
[2] 刘杰. 土石坝破坏原因及控制措施[J]. 水利水电技术，1979，(3)：25-27.
[3] 牛运光. 土坝安全与加固[M]. 北京：中国水利电力出版社，1998：35-38.
[4] 屈智炯. 砂砾石地基上闸坝渗流稳定的研究[J]. 成都水利，1995(1)：22-25.
[5] 徐尚壁. 黏土铺盖[M]. 北京：水利电力出版社，1988：230-232.
[6] 毛昶熙. 编渗流计算分析与控制[M]. 北京：水利电力出版社，1990：300-310.
[7] 张有天. 边界元方法及其工程中的应用[M]. 北京：水利电力出版社，1989：125-128.
[8] 饶寿期. 有限元和边界元法基础[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，1990：67-68.
[9] 布莱比亚 C A. 工程师用的边界元法[M]. 武际可，傅子智，译. 北京：科学出版社，1986：89-92.

(收稿日期：2004-12-17 编辑：骆 超)