

库盘大面积土工膜防渗体的渗漏估算

姜海波, 侍克斌, 李玉建

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 对于大面积或全库盘使用土工膜防渗的水库, 土工膜防渗体渗透特性的分析是工程设计和施工的一项重要工作, 对利用和管理库区水资源具有重要意义. 从水量平衡角度, 采用达西定律对库盘大面积土工膜防渗体的渗透特性进行研究, 分析库盘大面积土工膜防渗体产生的破损孔洞对土工膜渗透特性的影响, 计算大面积土工膜防渗体的渗透量和渗透系数, 从整体上得出大面积土工膜防渗体渗透特性的分析方法. 结合工程实例, 计算其土工膜防渗体的渗透量和渗透系数, 得出土工膜防渗体的渗透规律.

关键词: 渗透分析; 土工膜; 达西定律; 统计分析

中图分类号: TV697.32:TV441 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)04-0058-04

近年来, 已有许多水库大坝采用了土工膜进行防渗, 尤其是库区坡度较缓的平原水库或丘陵水库, 甚至采用了全库盘或部分库盘土工膜防渗^[1]. 对于大面积或全库盘使用土工膜防渗的水库, 库盘土工膜防渗体的渗透分析对工程的运行管理有很重要的现实意义. 关于土工膜防渗体的渗透分析, 大量学者都对其进行了研究. 陶同康^[2]从铺盖和透水地基界面的接触冲刷概念出发, 研究复合土工薄膜用作斜墙铺盖防渗, 导出了极限铺盖长度和渗流量的计算公式. 顾淦臣和陶同康^[3-4]对上述问题又进行了讨论, 对复合土工薄膜极限铺盖长度和复合土工薄膜受力变形对其渗流的影响进行了商榷. 吴景海等^[5]通过试验确定土工膜的渗透特性, 计算了土工膜防渗层的渗漏量, 分析了各相关因素对渗漏量的影响, 同时利用达西定律、水流连续条件和 Bessel 函数推导了土工膜复合防渗层渗漏量的计算公式, 得出了土工膜复合防渗层渗漏量的解析解. 程鲲鹏^[6]结合复合土工膜的防渗特性和机理, 用有限元法对复合土工膜防渗土石坝进行了渗流分析.

对于大面积土工膜防渗体渗透特性的分析, 无法采用传统的分析地层渗透特性的方法, 而传统的试验方法也无法模拟大面积土工膜防渗体的渗透特性. 国内外在这一方面的研究均很少. 土工膜有极强的防渗性能, 渗透系数很小, 是较好的防渗材料^[7]; 但土工膜是柔性的, 在施工及运行中容易产生破损孔洞^[8], 这些破损孔洞会成为库区渗漏的主要通道. 因此, 分析库盘土工膜防渗体的渗透特性时, 考虑施工及运行中所造成的破损孔洞对其渗透性的影响显得尤为重要. 从水量平衡角度, 采用达西定律对库盘大面积土工膜防渗体的渗透特性进行研究, 分析库盘大面积土工膜防渗体产生的破损孔洞对土工膜渗透特性的影响, 计算大面积土工膜防渗体的渗透量和渗透系数, 从整体上得出大面积土工膜防渗体渗透特性的分析方法.

1 土工膜防渗体的渗透分析

水库库盘土工膜防渗结构通常由 5 个部分构成: 防护层、上垫层、土工膜、下垫层和支持层^[9], 其中土工膜是防渗结构的主体. 因此, 土工膜的完整性关系到整个库盘的防渗效果. 土工膜属于非孔隙介质^[10], 目前对土工膜在水力梯度作用下的渗透机理尚未完全认识清楚. 为了便于与孔隙介质比较, 仍采用达西定律来描述在水力梯度作用下液体通过土工膜的渗透规律, 并从水量平衡分析的角度研究土工膜防渗体的渗透特性.

收稿日期: 2010-03-12

基金项目: 国家高等学校博士点专项科研基金资助课题(200807580007); 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: 姜海波(1982-), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 主要从事水利水电工程设计、施工理论及方案优选研究.

E-mail: klaud_123@sina.com

土工膜防渗体渗透特性的分析,主要是确定其渗透量和渗透系数.对于渗透量 Q_s 的确定,采用水量平衡的原理进行计算,即

$$Q_s = Q_L - Q_f - W - Q_c \quad (1)$$

式中: Q_s 为土工膜防渗体的渗透量(m^3); Q_L 为水库来水量(m^3); Q_f 为水库泄水量(m^3); W 为水库库面蒸发水量(m^3); Q_c 为水库剩余水量(m^3).水库来水量减去剩余水量为水库出库水量,出库水量由泄水量、蒸发水量和渗透量等3部分构成.这样式(1)可以表示为:

$$Q_s = Q_z - Q_f - W \quad (2)$$

对于各种水量,水库出库水量和泄水量比较容易确定,而水库库面蒸发水量的确定比较困难.水库库面蒸发水量通常有2种确定方法:①1972年9月,世界气象组织蒸发组在日内瓦会议上提出用 $20 m^2$ 蒸发池观测的蒸发量来代替水库水面蒸发量,再换算成水库蒸发水量,其计算公式为 $W = E_0 F$,其中, W 为月(年)水面蒸发水量(m^3); E_0 为水库库区月(年)水面蒸发量(mm); F 为水库库区月(年)平均水面面积(m^2).②采用蒸发器(皿)观测资料计算水库水面蒸发量,再换算成水库蒸发水量,其计算公式为 $W = B(\alpha E_s - E_1)$,其中: B 为月(年)平均水位相应的库水面面积(m^2); α 为蒸发器(皿)水面蒸发量折算系数; E_s 为陆上蒸发站蒸发器(皿)月(年)水面蒸发量(mm); E_1 为库区建库前月(年)陆面蒸发量(mm).在没有陆面蒸发试验资料时,可采用流域年降水量与年径流量之差($P-R$)近似代替,故又可表示为 $W = B(\alpha E_s - P + R)$.

本文采用第1种方法计算水库库面蒸发水量.将计算得出的水库库面蒸发水量代入到式(1),就可以算得水库库区的渗透量.对于全库盘采用土工膜防渗的水库,计算得到的渗透量也即土工膜防渗体的渗透量.然后,再利用达西定律计算土工膜防渗体的渗透系数^[12],即

$$k = Q_s \delta / \Delta h A \quad (3)$$

式中: k 为土工膜防渗体的渗透系数(cm/s); Q_s 为土工膜防渗体的单位时间渗透量(m^3/s); δ 为土工膜防渗体的厚度(cm); Δh 为土工膜防渗体上下的平均水头差(m); A 为土工膜防渗体的渗透面积(m^2).

2 实例分析

2.1 工程概况

新疆胜利水库是一座坝体、坝基及全库盘土工膜防渗的注入式丘陵水库,最大坝高 $18.1 m$,主坝长 $198.1 m$,副坝长 $1 875 m$,坝顶宽度为 $5 m$,库区最大水深为 $21 m$,库容为 $2.0 \times 10^7 m^3$.工程位于新疆和田策勒县恰哈乡境内,地处策勒河与恰哈河中游之间的丘陵区.该地区属于温带干旱性荒漠气候,日照时间长,干旱少雨,年均降水量只有 $35 mm$,年均蒸发量在 $2 400 mm$ 以上.

由于库盘中部低凹处部分覆有厚约 $2 m$ 的冲洪积粉质壤土,渗透系数为 $2.17 \times 10^{-5} cm/s$;其余均由含砾粗砂和砂砾石构成,渗透系数为 $5.41 \times 10^{-3} \sim 1.16 \times 10^{-2} cm/s$.下部为半胶结的砂砾石层,但胶结性差且不连续.库区渗漏是该水库的主要地质问题.但自采用坝体、坝基及全库盘土工膜防渗以来,库区渗漏问题得到了基本解决.

2.2 土工膜渗透特性的分析

胜利水库库盘采用 $0.5 mm$ 的聚乙烯光面土工膜及 $200 g/0.5 mm/200 g$ 规格的复合土工膜进行全库盘防渗,库盘防渗膜铺设面积达 $3.853 \times 10^6 m^2$,聚乙烯光面土工膜铺设面积为 $3.589 \times 10^6 m^2$,复合土工膜铺设面积为 $2.64 \times 10^5 m^2$.胜利水库全库盘土工膜铺设面积居国内外同类型工程之首.经详细调查,胜利水库自第1次蓄水以来土工膜的运行情况为:聚乙烯光面土工膜出现孔洞 $1 155$ 处,复合土工膜出现孔洞 84 处.这些孔洞的出现,一部分是在施工中产生的,未及时发现修补,从而形成了渗漏的通道;还有一部分是由于上垫层中存在棱角尖锐的土体,在水压作用下,刺穿土工膜形成孔洞,从而形成了渗漏的通道.为比较库盘土工膜防渗体渗透特性随不同时期水库运行工况的变化规律,在考虑土工膜防渗体施工和使用中产生的破损孔洞对其渗透性影响的基础上,计算不同时期库盘土工膜防渗体的渗透量和渗透系数,进而从整体上比较土工膜防渗体的渗透规律.从第1种计算水库库面蒸发量的计算式可知,库区蒸发水量的大小与水面蒸发量和平均水面面积的大小有关.库区各年逐月平均水面面积的计算方法是:用实测的同一来水量各断面的水面宽和断面

间距,采用梯形面积公式求出各断面的水面面积,累加得出该水量级实测的库区水面面积,并建立水量与水面面积的关系曲线,再根据历年逐月平均流量插补求得历年逐月和全年的水面面积.计算出库区逐年平均水面面积后,即可计算水库库面蒸发水量(见表1),然后可采用式(1)计算库盘的渗透量.

表 1 水库水位资料统计

Tab. 1 The hydrological data of reservoir

年 份	水库来水量/ 10^4 m^3	泄水量/ 10^4 m^3	蒸发量/ mm	平均水面面积/ m^2	平均水深/ m	蒸发水量/ 10^4 m^3
2003	387.957 1	273.814 8	1 310.1	787 344.206 5	6.00	103.149 9
2004	1 619.987 7	793.191 7	3 024.2	1 535 638.000 0	11.94	464.165 6
2005	2 140.154 0	1 362.439 2	3 050.1	1 635 704.119 4	13.66	498.906 1
2006	2 529.679 6	1 689.418 9	3 188.9	1 804 020.027 8	14.83	575.283 9
2007	2 006.957 2	1 396.086 7	3 023.1	1 591 747.686 2	13.23	481.201 2
2008	2 224.561 8	1 680.321 1	2 944.8	1 699 758.066 9	13.94	500.544 7

注:水库蒸发量为 20 m^2 蒸发池观测资料;水库 2003 年 7 月第 1 次蓄水.

胜利水库是一座坝体、坝基及全库盘土工膜防渗的丘陵水库,这里计算出的渗透量,也即土工膜防渗体的渗透量;由于胜利水库采用了光面土工膜和复合土工膜进行防渗,所以计算出的渗透量是 2 种土工膜的总渗透量.文中根据土工膜铺设面积和出现破碎孔洞的百分比,将总渗透量乘以该百分比,即可分别得出光面土工膜和复合土工膜的渗透量,进而利用式(3)计算土工膜防渗体逐年的平均渗透系数,具体见表 2.

在铺设土工膜之前,库区的渗透系数为 $2.17 \times 10^{-5} \sim 1.16 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$.而从表 2 可见:在蓄水的第 1 年(2003 年),土工膜防渗体的渗透系数在 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 之间,说明土工膜防渗体在水压力梯度作用下具有较好的渗透性;经过 1 年的运行,在 2004 年其渗透量和渗透系数都有所增大,这是由于土工膜防渗体在水压力作用下产生了漏水的孔洞,增大了土工膜防渗体的渗透量;2004 年以后,在对土工膜防渗体进行检查以及修补以后,土工膜防渗体的渗透量和渗透系数有所减小.因而,相对未铺设土工膜防渗体,库区渗漏问题得到了明显改善.

需要说明的是,土工膜渗透量和渗透系数是在宏观考虑了施工中和水库运行时产生的破损孔洞影响而得出的计算结果,采用的是逐年平均水深,因此,该方法只能从宏观整体方面评价土工膜防渗体的渗透性.

表 2 土工膜渗透量及渗透系数计算

Tab. 2 The average leakage capacity and coefficient of geomembrance

年 份	光面土工膜渗透	光面土工膜渗透	光面土工膜渗透	复合土工膜渗透	复合土工膜渗透	复合土工膜渗透
	水量/ 10^4 m^3	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	水量/ 10^4 m^3	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
2003	10.239 222	0.003 247	$1.375 84 \times 10^{-8}$	0.753 178	0.000 239	$4.898 00 \times 10^{-8}$
2004	337.783 676	0.107 111	$1.249 75 \times 10^{-7}$	24.846 724	0.007 879	$4.449 12 \times 10^{-7}$
2005	259.705 275	0.082 352	$8.398 85 \times 10^{-8}$	19.103 425	0.006 058	$2.989 99 \times 10^{-7}$
2006	246.821 110	0.078 266	$7.352 43 \times 10^{-8}$	18.155 690	0.005 757	$2.617 47 \times 10^{-7}$
2007	120.784 614	0.038 301	$4.033 13 \times 10^{-8}$	8.884 686	0.002 817	$1.435 79 \times 10^{-7}$
2008	40.702 036	0.012 907	$1.289 86 \times 10^{-8}$	2.993 964	0.000 949	$4.591 91 \times 10^{-8}$

3 结 语

(1)库盘大面积土工膜防渗体的渗透特性分析,无法用传统的分析土层渗透特性的方法来解决,本文从水量平衡角度对大面积土工膜防渗体的渗透特性进行了分析.

(2)通过对胜利水库库盘土工膜防渗体渗透特性的分析,得出蓄水初期(2003 年)土工膜防渗体的渗透系数是比较小的,一般量级在 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ cm/s}$.经过一段时间的运行后,土工膜防渗体的渗透系数有所增大,而后逐渐稳定.相比未铺设土工膜防渗体,库区渗透特性得到了明显的改善.

(3)完整无损土工膜的渗透系数量级在 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ cm/s}$,考虑了土工膜破损孔洞对其渗透性的影响后,其渗透系数量级增大至 $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$,这是由于土工膜在施工和使用中所产生的破损孔洞加大了土工膜的渗漏量.因此,在施工中要注意对土工膜的保护,在水库维修期间,要对土工膜防渗体进行检修.

参 考 文 献:

- [1] 《土工合成材料工程应用手册》编委会. 土工合成材料工程应用手册[M]. (2版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (*Handbook of Engineering of Geosynthetic Material Compile Committee. Handbook of engineering of geosynthetic material[M]. (2nd edition). Beijing: China Building Industry Press, 2000. (in Chinese)*)
- [2] 陶同康. 复合土工薄膜及其防渗设计[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 31-39. (TAO Tong-kang. Design of impervious layer for embankment dam with geotextile-geomembrane composites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 31-39. (in Chinese))
- [3] 顾淦臣. 关于“复合土工薄膜及其防渗设计”一文的讨论[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(5): 97-100. (GU Gan-chen. Discussed about “composite geomembrane and anti-seepage design”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(5): 97-100. (in Chinese))
- [4] 陶同康. 对“复合土工薄膜及其防渗设计”讨论的答复[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(5): 101-102. (TAO Tong-kang. Replied about “composite geomembrane and anti-seepage design”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(5): 101-102. (in Chinese))
- [5] 吴景海, 陈环. 土工膜防渗层渗漏流量的计算[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 93-99. (WU Jing-hai, CHEN Huan. Calculate impervious layer leakage of geomembranes liners[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 93-99. (in Chinese)).
- [6] 程鲲, 王党在. 复合土工膜土石坝渗流分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2005, 3(1): 41-44. (CHENG Kun, WANG Dang-zai. Seepage analysis on composite geomembrane in seepage control of embankment dam[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2005, 3(1): 41-44. (in Chinese)).
- [7] 鄢俊, 陶同康, 李定方. 土工膜防渗层结构优化设计[J]. 水利水运工程学报, 2001(4): 45-48. (YAN Jun, TAO Tong-kang, LI Ding-fang. Optimum design of a geomembrane anti-seepage layer[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(4): 45-48. (in Chinese))
- [8] 沈振中, 江沆, 沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和—非饱和渗流有限元模拟[J]. 水力学报, 2009, 40(9): 1091-1095. (SHEN Zhen-zhong, JIANG Hang, SHEN Chang-song. Numerical simulation of composite geomembrane defect leakage experiment based on saturated-unsaturated seepage theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1091-1095. (in Chinese))
- [9] JAYAWICKRAMA P. Leakage rate through flaws in geomembrane liners[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1998, 114(6): 1401-1420.
- [10] 吴景海. 含土工膜防渗层渗漏量的研究[D]. 天津: 天津大学, 1992. (WU Jing-hai. Study of impervious layer leakage in geomembranes liners[D]. Tianjin: Tianjin University, 1992. (in Chinese)).
- [11] 洪嘉琰. 水面蒸发试验研究[M]. 北京: 气象出版社, 1991. (HONG Jia-lian. Experimental studies of water evaporation [M]. Beijing: Meteorology Press, 1991. (in Chinese))
- [12] 刘凤茹. 复合土工膜选型及缺陷渗漏量试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (LIU Feng-ru. Observation of leakage due to defects in composite geomembranes[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))

Leakage analysis of leakproof geomembrane for large area of reservoir basin

JIANG Hai-bo, SHI Ke-bin, LI Yu-jian

(*Hydraulic and Civil Engineering Institute, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China*)

Abstract: For large area geomembrane seepage prevention of reservoir, leakage analysis of leakproof geomembrane is an important work in engineering design and construction, and it is meaningful to the utilization and management of water resources of the reservoir area. From water balance view and on the basis of Darcy's law, we analyze the characteristics of prevention of large area geomembrane, calculate the leakage capacity and coefficient of large area geomembrane, and then find the method of analysing the large area geomembrane leakage on the whole. With practical work, we study the leakage capacity and coefficient of leakproof geomembrane, and obtain seepage regulation of geomembrane as impervious body.

Key words: leakage analysis; geomembrance; Darcy's law; statistical analysis