

江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数统计特性研究

速宝玉¹, 胡云进¹, 刘俊勇², 詹美礼¹, 张祝添¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 珠江水利委员会科研所, 广东 广州 510611)

摘要 首先对江垭碾压混凝土坝芯样室内渗透试验的渗透系数进行统计分析, 然后对貌似分散的渗透系数数据进行概型分布的严格检验, 从而揭示了现代正常施工的碾压混凝土坝中的二级配、三级配碾压混凝土和变态混凝土包括各自含层(缝)面芯样的渗透系数均符合对数正态分布统计特性。计算分析表明, 求得的各种类型碾压混凝土渗透系数的均值、方差及各自的累积概率曲线, 不但为设计提供了更科学的、概念明确的分析数据, 也为科学地评价碾压混凝土坝的质量提供了一种定量的科学分析方法。

关键词 碾压混凝土 室内渗透试验 渗透系数 统计特性

中图分类号 TV642.3

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2002)02-0001-05

随着碾压混凝土施工技术的不断发展和改进, 对层、缝面的处理技术日益成熟。许多资料表明, 在处理良好的情况下, 碾压混凝土的层、缝面渗透性与碾压混凝土本体渗透性相差无几^[1]。但是碾压混凝土坝的渗透离散性(即不均匀性)却是不可避免的。主要是来自施工中的各种随机因素(如拌和料的离散性、铺筑厚度及碾压的不均一性, 以及在施工过程中难以避免的施工机械对局部层面造成的扰动和污染等)造成的。这种渗透的不均匀性不仅存在于各碾压层面, 而且也存在于碾压混凝土本体。本文针对碾压混凝土坝渗透的不均匀性, 结合江垭碾压混凝土坝室内芯样渗透试验的渗透系数测试结果, 将碾压混凝土坝渗透系数看作一随机变量, 按照统计学原理进行随机统计分析。通过对江垭碾压混凝土坝芯样渗透试验结果分门别类的统计分析, 初步认为江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数满足对数正态分布。这对以后开展碾压混凝土坝随机分析, 建立随机数学计算模型有着重要的基础建设意义, 同时也为科学地评价碾压混凝土坝的质量提供了一种定量的科学分析方法。

1 工程简介和室内芯样渗透试验概况

江垭水利枢纽工程位于湖南省张家界市境内澧水支流 水中游, 距长沙 322 km, 总库容 17.41 亿 m³, 电站装机 30 万 kW, 是‘九五’期间我国水利建设的重点工程之一。工程挡水建筑物采用碾压混凝土重力坝, 最大坝高为 131 m, 是目前在建的最高碾压混凝土重力坝。重力坝基础设置 2.0 m 厚的三级配常态混凝土, 其标号为 C15。挡水坝除预制廊道及坝顶结构外采用全断面碾压混凝土, 以三级配为主。

防渗层是二级配碾压混凝土, 其标号为 C20。其上游为变态混凝土(在二级配碾压混凝土铺料中另加一定量的水泥浆并用插入式振捣器振捣形成厚度为 30 cm 的混凝土, 称变态混凝土), 客观上加强了防渗层。防渗层厚度依次为: 高程 165.0 m 以下为 8 m, 高程 165.0 ~ 215.0 m 之间为 5 m, 高程 215.0 ~ 240.0 m 之间为 3 m。防渗层下游坝体为三级配碾压混凝土, 高程 190 m 以下其标号为 C15, 高程 190 m 以上其标号为 C10。大坝采用分层填筑碾压法施工, 每 30 cm 为一填筑碾压层, 层间结合面称为层面。层面间的间隔时间在初凝时间内, 层面不作任何处理。超过初凝时间, 又在 24 h 之内的, 则需在摊铺上层混凝土之前刮铺 2.0 cm 厚的砂浆。超过 24 h 的按常规施工缝处理。一般最大层间允许间隔时间为 6 h。每填筑碾压 10 层为一升程, 其厚度为 3 m。每个升程结合面称为缝面, 缝面停歇时间较长, 缝面处理按常态混凝土施工缝处理。

室内芯样渗透试验是在笔者所在的实验室首创研制的 KS-50B 多功能高压渗透仪上进行的, 试验用碾压

收稿日期 2001-01-02

基金项目 ‘九五’国家科技攻关子题(96-220-01-02-01(3))

作者简介 速宝玉(1936—), 女, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工渗流和岩土工程渗流研究。

混凝土芯样均取自已浇好的江垭碾压混凝土大坝上. 芯样类型有二级配碾压混凝土、三级配碾压混凝土和变态混凝土 3 种(每种碾压混凝土均包括含层、含缝和本体芯样), 芯样为圆柱体, 尺寸为 $\varnothing 150\text{ mm}$. 试验步骤和试验成果详见有关文献^①. 剔除少数渗透异常(有孔眼、0.1 MPa 下射水)的芯样后, 共获得 107 个有效的渗透系数数据, 其中二级配碾压混凝土的 67 个, 三级配碾压混凝土的 22 个, 变态混凝土的 18 个.

2 江垭碾压混凝土芯样渗透系数的随机统计分析

2.1 碾压混凝土芯样渗透系数的频率统计

对某一随机变量进行统计分析, 首先必须知道其分布规律, 即其抽样样本满足什么分布函数. 为此, 首先对江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数进行频率统计, 以寻求其满足的分布函数. 频率统计分变态混凝土本体、变态混凝土含层、变态混凝土含缝、二级配本体、二级配含层、二级配含缝、三级配本体、三级配含层、三级配含缝等 9 种情况, 统计结果见表 1. 从表 1 和《龙滩 RCC 渗流特性试验研究》^①可以看出, 江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数满足对数正态分布.

表 1 江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数频率统计

Table 1 Frequency statistics of permeability coefficients for Jiangya RCCD core samples									
渗透系数 k $/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	变态混凝土								
	含层面			含缝面			本 体		
	频数	频率/%	累积频率/%	频数	频率/%	累积频率/%	频数	频率/%	累积频率/%
$1\times 10^{-6}\sim 9\times 10^{-6}$	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
$1\times 10^{-7}\sim 9\times 10^{-7}$	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
$1\times 10^{-8}\sim 9\times 10^{-8}$	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
$1\times 10^{-9}\sim 9\times 10^{-9}$	0	0.0	0.0	3	30.0	30.0	1	25.0	25.0
$1\times 10^{-10}\sim 9\times 10^{-10}$	1	25.0	25.0	3	30.0	60.0	1	25.0	50.0
$1\times 10^{-11}\sim 9\times 10^{-11}$	2	50.0	75.0	2	20.0	80.0	2	50.0	100.0
$1\times 10^{-12}\sim 9\times 10^{-12}$	1	25.0	100.0	2	20.0	100.0			

二级配碾压混凝土									
渗透系数 k $/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	含层面			含缝面			本 体		
	频数	频率/%	累积频率/%	频数	频率/%	累积频率/%	频数	频率/%	累积频率/%
$1\times 10^{-6}\sim 9\times 10^{-6}$	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
$1\times 10^{-7}\sim 9\times 10^{-7}$	3	10.7	10.7	9	25.7	25.7	0	0.0	0.0
$1\times 10^{-8}\sim 9\times 10^{-8}$	2	7.2	17.9	2	5.7	31.4	0	0.0	0.0
$1\times 10^{-9}\sim 9\times 10^{-9}$	5	17.9	35.8	11	31.5	62.9	1	25.0	25.0
$1\times 10^{-10}\sim 9\times 10^{-10}$	13	46.3	82.1	7	20.0	82.9	1	25.0	50.0
$1\times 10^{-11}\sim 9\times 10^{-11}$	2	7.2	89.3	6	17.1	100.0	0	0.0	50.0
$1\times 10^{-12}\sim 9\times 10^{-12}$	3	10.7	100.0				2	50.0	100.0

三级配碾压混凝土									
渗透系数 k $/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	含层面			含缝面			本 体		
	频数	频率/%	累积频率/%	频数	频率/%	累积频率/%	频数	频率/%	累积频率/%
$1\times 10^{-6}\sim 9\times 10^{-6}$	0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	1	16.7	16.7
$1\times 10^{-7}\sim 9\times 10^{-7}$	4	33.3	33.3	1	25.0	25.0	1	16.7	33.4
$1\times 10^{-8}\sim 9\times 10^{-8}$	3	25.0	58.3	0	0.0	25.0	1	16.7	50.1
$1\times 10^{-9}\sim 9\times 10^{-9}$	2	16.7	75.0	2	50.0	75.0	2	33.2	83.3
$1\times 10^{-10}\sim 9\times 10^{-10}$	3	25.0	100.0	1	25.0	100.0	1	16.7	100.0
$1\times 10^{-11}\sim 9\times 10^{-11}$				0	0.0	100.0			
$1\times 10^{-12}\sim 9\times 10^{-12}$				0	0.0	100.0			

① 速宝玉,等. 龙滩 RCC 渗流特性试验研究. 南京: 河海大学, 1999.

2.2 碾压混凝土芯样渗透系数统计特征值的计算

根据前面频率统计的结果,初步认为江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数满足对数正态分布,令 $x = \lg k$, k 为渗透系数 (cm/s), 则其分布曲线的函数式为^[2]

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

(1)

累积概率(即保证率)为

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} dx$$

(2)

样本均值、样本均方差和变异系数按下述公式计算：

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

(3)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}}$$

(4)

$$C_v = \frac{\sigma}{|\mu|}$$

(5)

式中： μ ——均值； σ ——均方差； C_v ——变异系数； x_i ——样本值； n ——样本容量。其中 σ 和 C_v 用来表示检测值的离散性。

用式(3),(4),(5)对频率统计分析时所分的 9 种情况进行统计特征值计算,结果见表 2。

表 2 江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数统计特征值
Table 2 Statistical characteristic values of permeability coefficients
for Jiangya RCCD core samples

混凝土 类型	试件状态	样本容量 n	均 值		均方差 σ	变异系数 C_v
			$\lg[k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})]$	$k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$		
变态 混凝土	含层面	4	- 10. 761	$1. 74 \times 10^{-11}$	0. 990	0. 09
	含缝面	10	- 9. 868	$1. 35 \times 10^{-10}$	1. 481	0. 15
	本 体	4	- 10. 073	$8. 44 \times 10^{-11}$	1. 122	0. 11
二级配 混凝土	含层面	28	- 9. 252	$5. 60 \times 10^{-10}$	1. 381	0. 15
	含缝面	35	- 8. 528	$2. 96 \times 10^{-9}$	1. 555	0. 18
	本 体	4	- 10. 434	$3. 68 \times 10^{-11}$	1. 626	0. 16
三级配 混凝土	含层面	12	- 7. 723	$1. 89 \times 10^{-8}$	1. 164	0. 15
	含缝面	4	- 8. 359	$4. 38 \times 10^{-9}$	1. 099	0. 13
	本 体	6	- 7. 848	$1. 42 \times 10^{-8}$	1. 515	0. 19

从表 2 中的均值结果可看出,江垭碾压混凝土坝含层面、含缝面芯样渗透系数与本体芯样的相近,这说明江垭碾压混凝土坝层缝面处理是非常成功的,同时也说明只要处理得当,碾压混凝土的含层面、含缝面渗透性可以接近本体的渗透性。

2.3 碾压混凝土芯样渗透系数统计分布函数的检验

前述江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数满足对数正态分布,按统计学原理还需进行分布函数的拟合检验,判断其正误。对分布函数进行检验的常用方法有以下几种:(a)正态概率纸检验;(b)皮尔逊 χ^2 检验;(c)柯尔莫哥洛夫检验;(d)斯米尔诺夫检验。正态概率纸只局限于正态分布函数的检验,使用受到限制。皮尔逊 χ^2 检验和柯尔莫哥洛夫检验都可以用于检验一个总体的分布函数,不论总体的分布函数是什么类型,但后者比前者更精细更严格。斯米尔诺夫检验法适用于检验两个总体的分布函数是否相同。

这里先采用柯尔莫哥洛夫检验法对变态混凝土(含缝面)芯样、二级配(含层面)碾压混凝土芯样和三级配(含层面)碾压混凝土芯样渗透系数的对数正态分布函数进行检验,再用斯米尔诺夫检验法检验变态混凝土含层、含缝面和本体芯样、二级配层缝面和本体芯样、三级配含层面、含缝面和本体芯样是否分别服从同一分布。上述两种检验的原理和方法详见文献[3~5]。

在概率统计中,一般取显著性水平 $\alpha = 0.01, 0.05^{[3]}$,考虑到取对数后会降低渗透系数的离散度,一般取显著性水平 $\alpha = 0.05, 0.10$. 但由于柯尔莫哥洛夫检验和斯米尔诺夫检验比较严格和精细,故取显著性水平 $\alpha = 0.05$ 进行拟合检验.

柯尔莫哥洛夫检验计算结果^①表明,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,二级配(含层面)碾压混凝土、三级配(含层面)碾压混凝土和变态(含缝面)混凝土芯样渗透系数满足对数正态分布.

斯米尔诺夫检验计算结果^①表明,在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下,含层面、含缝面和本体芯样的渗透系数趋于同一分布,即都服从对数正态分布.

2.4 碾压混凝土芯样渗透系数的统计分析计算

既然已经证明江垭碾压混凝土坝的含层面、含缝面和本体芯样的渗透系数均趋于同一分布,那么就可以不分含层面、含缝面和本体,统一进行统计分析.

根据式(3),(4),(5)分别对变态混凝土、二级配碾压混凝土、三级配碾压混凝土的统计特征值进行了计算,结果见表3.

表3 变态混凝土、二级配混凝土和三级配混凝土芯样渗透系数统计特征值

Table 3 Statistical characteristic values of abnormal, two-graded and three-graded RCC permeability coefficients

混凝土类型	样本容量 <i>n</i>	均值		均方差 σ	变异系数 C_v
		$\lg[k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})]$	$k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$		
变态混凝土	18	-10.112	7.72×10^{-11}	1.300	0.13
二级配混凝土	67	-8.944	1.14×10^{-9}	1.553	0.17
三级配混凝土	22	-7.873	1.34×10^{-8}	1.219	0.15

江垭碾压混凝土坝变态、二级配和三级配芯样渗透系数对数正态分布的概率密度曲线和累积概率曲线如图1、图2所示.

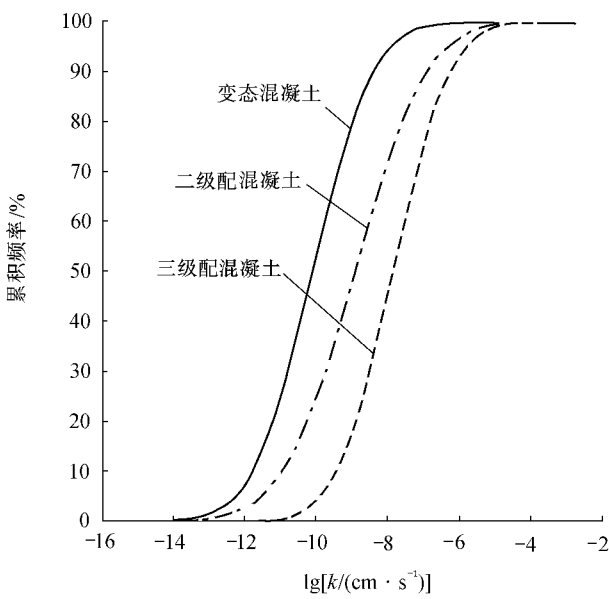
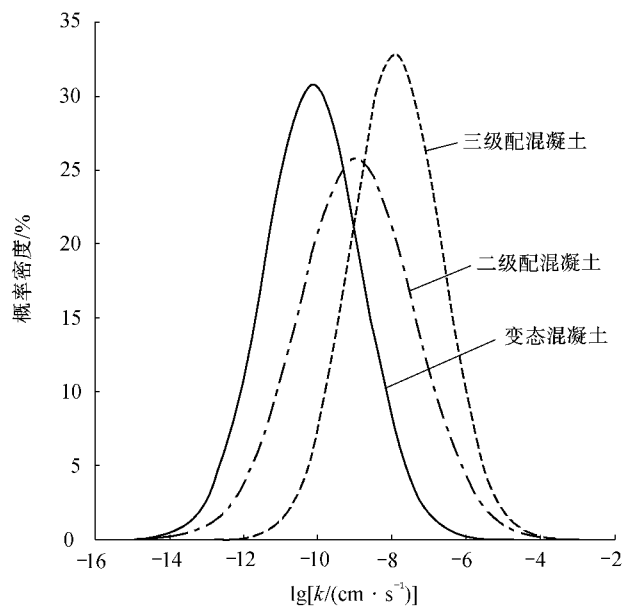


图1 变态混凝土、二级配碾压混凝土和三级配碾压混凝土芯样渗透系数对数正态分布的概率密度曲线比较

Fig.1 Probability density curves of permeability coefficient for abnormal, two-and three-graded RCC

图2 变态混凝土、二级配碾压混凝土和三级配碾压混凝土芯样渗透系数对数正态分布的累积概率曲线比较

Fig.2 Accumulated probability curves of permeability coefficient for abnormal, two-and three-graded RCC

① 速宝玉,等.龙滩 RCC 渗流特性试验研究.南京:河海大学,1999.

3 结 束 语

由江垭碾压混凝土坝大量芯样全面详细的室内渗透试验和试验结果统计分析可知,江垭碾压混凝土坝芯样渗透系数服从对数正态分布,故可以以均值、均方差和变异系数为统计参数,建立起随机数学计算模型. 这为以后开展碾压混凝土坝随机分析打下坚实的基础. 同时,从统计结果可以初步看出,江垭碾压混凝土坝含层面、含缝面芯样渗透系数与本体的渗透系数相近,且都具有很强的抗渗性,说明江垭工程对含层面、含缝面的处理措施是成功的. 这与江垭碾压混凝土力学特性试验的结论是一致的^[6]. 此外,江垭碾压混凝土坝芯样详细的渗透试验结果也说明,在层缝面处理良好的情况下,坝体碾压混凝土仍存在局部缺陷集中的现象. 这些缺陷可能是由于施工碾压不密实,也可能是因为拌料不均匀,粉煤灰与水泥胶结不好所致. 这些随机存在的缺陷如果连通可能会造成坝体局部渗漏. 所以必须注意改进施工工艺和提高施工控制质量,并且大坝建成后运行期需设置渗流观测系统,对局部部位进行事后观测和灌浆处理,以建成一座经久耐用、安全可靠的碾压混凝土坝.

参考文献：

[1] 姜福田. 碾压混凝土[M]. 北京 中国铁道出版社,1979. 94 ~ 107.
[2] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 第 2 版. 北京 高等教育出版社,1989. 148 ~ 153.
[3] 吴翊,李永乐,胡庆军. 应用数理统计[M]. 长沙 国防科技大学出版社,1995. 72 ~ 81.
[4] 徐世朴. 统计检验与质量控制[M]. 第 2 版. 北京 清华大学出版社,1986. 63 ~ 77.
[5] 蔡正咏,王足献. 数理统计在混凝土试验中的应用[M]. 北京 中国铁道出版社,1988. 51 ~ 69.
[6] 余济贤,杨康宁. 江垭 RCC 大坝的监理实践与体会[A]. 见 中国碾压混凝土坝情报网主编. 碾压混凝土筑坝技术交流会论文集[C]. 北京 水利电力出版社,1998. 62 ~ 66.

Statistical Features of Permeability Coefficients of Jiangya RCCD Core Samples

SU Bao-yu¹, HU Yun-jin¹, LIU Jun-yong², ZHAN Mei-li¹, ZHANG Zhu-tian¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Scientific Research Institute of Zhujiang Water Conservancy Council, Guangzhou 510611, China)

Abstract: A statistical analysis is performed on permeability coefficients from laboratory permeability tests on core samples of the Jiangya Roller Compacted Concrete Dam (RCCD). Strict examination of probability distribution reveals that the permeability coefficients for two-graded RCC, three-graded RCC, and abnormal RCC in modern normal construction of RCCD obey normal distribution. Through calculation and analysis, the mean value, variance, and accumulated probability curves of probability coefficients for different kinds of RCC are obtained. Not only can the results provide scientific and clear data for design, but also provide a scientific quantitative method for quality appraisal of RCCD.

Key words: Roller Compacted Concrete(RCC) ;laboratory permeability test ;permeability coefficient ;statistical features