

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.04.036

心墙防渗土料原位渗透与室内渗透试验对比研究

李朝政, 张永全, 沈蓉

(中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司 科学研究分院, 云南 昆明 650033)

摘要: 土质心墙堆石坝是目前水电站设计的主要坝型之一,其坝高已达到 300 m 级,该坝型解决的首要问题是心墙防渗土料的抗渗性能。为得到贴近实际的渗透系数,对几个水利水电工程心墙防渗土料的原位渗透和室内渗透试验成果进行对比分析。研究发现原位渗透试验所得渗透系数基本上都大于 1×10^{-5} cm/s,超出规范要求,而室内渗透试验成果基本上都小于 1×10^{-5} cm/s。从边界条件和外界影响等因素综合分析,室内渗透试验方法所得渗透系数更贴近实际,该结论对于类似工程设计和施工具有一定的参考意义。

关键词: 原位渗透;室内渗透;心墙防渗土料;对比研究

中图分类号: TU411.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2015)04—0178—05

Research on the Comparison Between In-situ and Indoor Permeability Test of Core Impermeable Soil

LI Chaozheng, ZHANG Yongquan, SHEN Rong

(Hydrochina Kunming Engineering Corporation Limited Scientific Research Branch, Kunming, Yunnan 650033, China)

Abstract: At present, soil core rock-fill dam is one of the main dam types in the design of hydropower stations, with the highest dam of 300 m level. The principal problem of this dam type lies in the permeability resistance of core impermeable soil. In order to get the permeability coefficient which is close to its actual value, the test results of core impermeable soil obtained by in-situ and indoor permeability tests in several water resources and hydroelectric engineering were compared and analyzed. It was found that the permeability coefficients obtained by in-situ permeability tests of impermeable soil were mostly greater than 1×10^{-5} cm/s, which exceeded specification requirements, but permeability coefficients obtained by indoor permeability tests were mostly smaller than 1×10^{-5} cm/s. According to the comprehensive analysis of boundary conditions and external influences, it was concluded that the permeability coefficients obtained by indoor permeability tests were closer to the reality. This study will provide some reference for the design and construction of similar engineering.

Keywords: in-situ permeability; indoor permeability; core impermeable soil; comparison research

土石坝是当今世界建造数量最多、高度最高的坝型。在土质心墙堆石坝的设计中,防渗土料的选择至关重要,合格的心墙防渗料的首要条件是满足防渗要求,在《碾压式土石坝设计规范》^[1] (DL/T5395-2007)中要求,心墙防渗料的渗透系数要求不大于 1×10^{-5} cm/s。渗透系数的测定一般采用原位渗透和室内渗透试验进行,本文将对目前用于大坝防渗土料渗透系数测定的主要方法和步骤进行说明,同时对部分心墙堆石坝防渗土料渗透系数的不

同测试方法进行对比研究,总结不同方法间试验成果的规律。

1 渗透试验

注水试验是渗透特性研究的方法之一,它具有简捷,不破坏土体结构而直接测试出土体渗透系数的优点^[2],也是开展碾压试验和施工期测试土体抗渗指标的主要方法。

室内渗透试验贯穿于水电站和水库等设计和施

工的整个过程中,特别是对预可研和可研阶段起至关重要的作用。

1.1 现场原位渗透试验

现场原位注水渗透试验分为垂直渗透和水平渗透试验,垂直渗透可采用试坑法、单环法和双环法,由于试坑法、单环法都不同程度的存在侧向渗漏影响试验精度,而双环法理论上认为内环水只产生垂直渗流,故本文中列举的工程原位垂直渗透全部采用双环法进行。

原位水平渗透试验具体的操作步骤目前还没有在已有的规范中列明,本文中所述的试验方式在糯扎渡水电站碾压试验中采用过。

(1) 原位垂直渗透试验

现场垂直渗透系数测定的试验装置见图1^[3]。

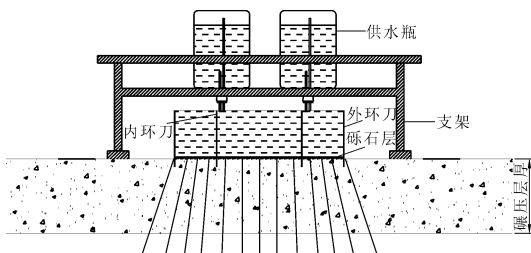


图1 现场垂直渗透系数测定试验装置示意图

(2) 水平渗透试验

水平渗透系数测定的试验装置见图2^[4]。

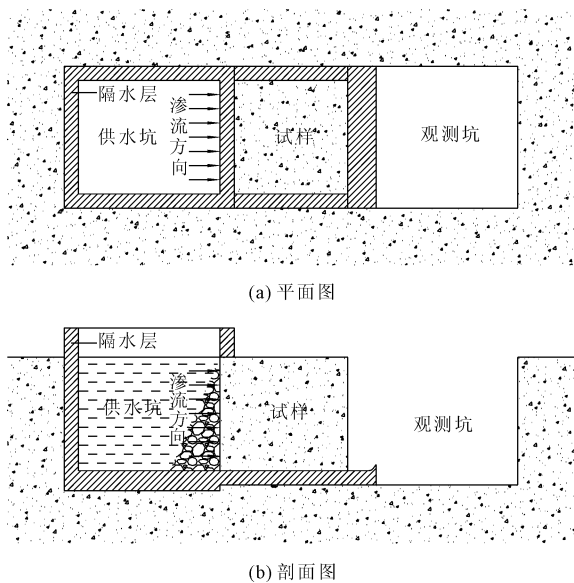


图2 现场水平渗透系数测定试验装置示意图

水平渗透系数的测定应按下列步骤进行:

① 按图2制作原位水平渗透试样,砾石土试样尺寸不小于 $50\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 、黏性土试样尺寸不小于 $40\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 。每个渗透试样至少

应包含1个碾压结合面。

② 在试样上游面挖供水坑,坑的三壁和底面用不透水材料处理,并做好试样与不透水材料界面间的防渗。

③ 为防止试样迎水面长时间泡水塌落,在试样上游用粗砾石保护。

④ 在试样下游挖观测坑,试样下游出水面底板做成有出水口的量水堰。

⑤ 向供水坑内加水,水位要与试件顶面平齐,并保持水位不变,供水坑的供水装置可参照垂直渗透系数测定的试验装置。

⑥ 当下游出水流量稳定后,每隔 $2\text{ h} \sim 3\text{ h}$ 测记流出水量至少4次~5次。取3个~4个数字接近的渗透系数求平均值。同时测记水温。

(3) 试验成果整理^[5]

按下列公式计算土体渗透系数的近似值:

$$k_T = \frac{V_w}{At} \quad (1)$$

式中: k_T 为温度为 T 时的渗透系数, cm/s ; V_w 为在时间 t 内的渗入水量, cm^3 ; A 为渗流面积, cm^2 ; t 为间隔时间, s 。

1.2 室内渗透试验

室内渗透试验采用直径为 30 cm 的垂直渗透仪进行,原状样的垂直渗透试验渗流方向垂直于碾压土体的层面,水平渗透试验渗流方向平行于土体的层间结合面。

试验制样方式和成果整理参考《水电水利工程土工试验规程》^[6](DL/T5355-2006)中16.1节进行。

2 类似工程渗透试验成果

2.1 炳巷水库

炳巷水库位于元谋县老城乡纳悟算村以北 1 km 处,水库拦河大坝为黏土心墙石渣坝,坝高 84.7 m 。炳巷水库地处亚热带干燥季风气候区,平均气温 16°C ,最高气温高达 42°C 。碾压试验对花坟山料场、大水管料场、小河口料场、那悟算I料场进行了现场碾压试验。各料场土料在最优含水率情况下进行了原位垂直渗透试验各2组,原位垂直渗透试验采用双环法,并在复核场原位渗透试验附近取原状样进行了室内大型渗透试验,试验成果见表1。

从试验成果比较来看,四个料场土料原位垂直渗透系数为 $i \times 10^{-5}$,比原状样室内渗透系数大一个量级。其中,花坟山和那悟算I料场原位垂直渗透试验的渗透速率为原状样室内渗透速率的3倍左

右,大水箐及小河口料场原位垂直渗透试验的渗透速率为原状样室内渗透速率的 10 倍左右,总体来讲原位垂直渗透速率是室内渗透速率的 3 倍~10 倍。

表 1 原位垂直渗透与原状样室内渗透试验成果

土料名称	不同组数原位垂直渗透系数 k_{20}			原状样室内渗透系数 k_{20}
	1	2	平均值	
	单位: cm/s			
花坟山土料	1.97×10^{-5}	2.94×10^{-5}	2.46×10^{-5}	3.15×10^{-6}
大水箐土料	1.10×10^{-5}	1.17×10^{-5}	1.14×10^{-5}	3.46×10^{-6}
小河口土料	1.40×10^{-5}	1.17×10^{-5}	1.29×10^{-5}	3.25×10^{-6}
那悟算 I 料场土料	1.46×10^{-5}	2.34×10^{-5}	1.90×10^{-5}	1.25×10^{-6}

表 2 原位垂直渗透与原状样室内渗透试验成果

土料名称	不同组次原位垂直渗透系数 k_{20}			不同组次原状样室内渗透系数 k_{20}		
	1	2	平均值	1	2	平均值
	单位: cm/s					
槽子地 I 采区土料	3.81×10^{-6}	1.35×10^{-6}	2.58×10^{-6}	1.05×10^{-6}	1.28×10^{-6}	1.17×10^{-6}
槽子地 II 采区土料	3.84×10^{-6}	5.04×10^{-6}	4.29×10^{-6}	2.64×10^{-6}	7.01×10^{-7}	1.67×10^{-6}
大干田料场土料	8.73×10^{-7}	1.13×10^{-6}	1.00×10^{-6}	1.08×10^{-6}	5.98×10^{-8}	3.52×10^{-7}
碾压 8 遍后			3.33×10^{-6}			3.66×10^{-7}

从试验成果比较来看,槽子地两个采区土料经碾压 8 遍后在原位进行垂直渗透试验的渗透速率为原状样土料室内试验所得渗透速率的 3 倍左右。大干田料场土料经碾压 8 遍后原位渗透试验与原状样室内渗透试验所得渗透系数相差一个数量级,渗透速率也是 3 倍左右的关系;经碾压 10 遍后,也进行了一组原位渗透和室内渗透的对比试验,原状样室内渗透试验的渗透系数小一个数量级。

2.3 糯扎渡水电站

糯扎渡水电站为砾质土心墙堆石坝,坝高 261.5

2.2 龙虎水库

龙虎水库位于云南省楚雄州彝族自治州中部牟定县西北部 15 km 处龙川河上游老虎箐峡口地段,是一座以灌溉为主,兼顾养殖及综合利用的中型水库,水库拦河大坝为黏土心墙石渣坝,坝高 68.3 m。碾压试验选用槽子地、大干田料场的土料进行,槽子地料场黏土层为泥岩经全风化作用后形成,分为两个采区,土料为黏土质砾(GC);大干田料场也为全强风化泥岩,多为黏性土。两个料场三个采区土料复核试验场上(铺土厚 35 cm,碾压 8 遍后)均进行了原位垂直渗透试验各 2 组,原位垂直渗透试验采用双环法,并在复核场原位渗透试验附近取原状样进行了室内大型渗透试验,试验成果见表 2。

m,同等坝型高度全国第一,世界第三。采用风化料掺硬岩(角砾岩)碎石料做心墙防渗料,国内属首次,国际上也不多见。

糯扎渡水电站碾压试验共进行了二期,第一期和第二期碾压试验均对风化料和平均级配的掺砾料进行了原位垂直和水平渗透试验,并在碾压场地取原状样进行室内大型渗透试验。第一期碾压试验渗透试验成果见表 3 及表 4^[7],第二期碾压试验渗透试验成果见表 5 及表 6^[8]。

表 3 第一期原位垂直渗透及水平渗透试验成果

试验材料	不同组次原位垂直渗透系数 k_{20}				不同组次原位水平渗透系数 k_{20}			总平均值
	1	2	3	平均值	1	2	平均值	
	单位: cm/s							
风化料	9.21×10^{-6}	3.01×10^{-5}	1.98×10^{-5}	1.97×10^{-5}	7.48×10^{-5}	4.47×10^{-5}	5.98×10^{-5}	3.43×10^{-5}
平均级配掺砾料	1.23×10^{-5}	3.43×10^{-5}	2.85×10^{-5}	2.21×10^{-5}	6.08×10^{-5}	2.93×10^{-5}	4.50×10^{-5}	3.15×10^{-5}

表 4 第一期原状样垂直渗透及水平渗透试验成果

试验材料	不同组次原状样垂直渗透系数 k_{20}				不同组次原状样水平渗透系数 k_{20}			总平均值
	1	2	3	平均值	1	2	平均值	
	单位: cm/s							
风化料	2.07×10^{-6}	3.14×10^{-6}	—	2.59×10^{-6}	5.07×10^{-6}	2.61×10^{-5}	1.56×10^{-5}	6.36×10^{-6}
平均级配掺砾料	1.54×10^{-6}	3.77×10^{-6}	6.91×10^{-6}	8.69×10^{-6}	1.51×10^{-5}	—	1.51×10^{-5}	1.15×10^{-5}

从第一期碾压试验土料的渗透试验成果表 3 看

出,风化料与掺砾料的原位垂直和水平渗透系数均

为 $i \times 10^{-5}$,但系数上水平渗透系数要比垂直渗透系数大 3 倍左右。从表 4 看出,原状样室内垂直渗透系数较现场原位渗透系数小一个数量级;水平渗透系数平均为 $i \times 10^{-5}$,比现场原位渗透系数小 3 倍左右。

风化料现场原位渗透试验的渗透系数总平均值(水平、垂直渗透系数之积开平方根)为 3.43×10^{-5}

cm/s,较原状样室内渗透系数的总平均值大一个数量级,渗透速率约是 5 倍的关系。掺砾料现场原位渗透试验的渗透系数总平均值(水平、垂直渗透系数之积开平方根)为 3.15×10^{-5} cm/s,与原状样室内渗透系数的总平均值属同一量级,但渗透速率约是原状样室内渗透速率的 3 倍。

表 5 第二期原位垂直渗透及水平渗透试验成果

单位:cm/s

试验材料	不同组次原位垂直渗透系数 k_{20}				不同组次原位水平渗透系数 k_{20}				总平均值
	1	2	3	平均值	1	2	平均值		
风化料	5.26×10^{-6}	9.93×10^{-6}	9.47×10^{-6}	8.22×10^{-6}	3.07×10^{-5}	4.97×10^{-5}	4.03×10^{-5}	1.82×10^{-5}	
平均级配掺砾料	2.15×10^{-5}	2.03×10^{-5}	9.89×10^{-6}	1.72×10^{-5}	4.02×10^{-5}	5.67×10^{-5}	4.84×10^{-5}	2.88×10^{-5}	

表 6 第二期原状样垂直渗透及水平渗透试验成果

单位:cm/s

试验材料	不同组次原状样垂直渗透系数 k_{20}				不同组次原状样水平渗透系数 k_{20}				总平均值
	1	2	3	平均值	1	2	平均值		
风化料	2.95×10^{-6}	4.39×10^{-6}	—	3.67×10^{-6}	3.28×10^{-6}	2.31×10^{-5}	1.32×10^{-5}	6.96×10^{-6}	
平均级配掺砾料	2.76×10^{-6}	1.42×10^{-6}	—	2.09×10^{-6}	4.34×10^{-6}	4.07×10^{-6}	4.21×10^{-6}	2.97×10^{-6}	

从第二期碾压试验土料的渗透试验成果表 5 看出,风化料与掺砾料的原位垂直和水平渗透系数基本上在 $i \times 10^{-5}$ 左右,但水平渗透速率约为垂直渗透速率的 3 倍左右。从表 6 看出,原状样室内垂直渗透系数基本上在 $i \times 10^{-6}$ 左右,水平渗透速率约为垂直渗透速率的 3 倍左右。

风化料的原位垂直渗透速率约是室内渗透速率的 3 倍左右,原位水平渗透速率同为室内水平渗透速率的 3 倍左右;掺砾料原位垂直渗透速率约是室内渗透速率的 10 倍左右,原位水平渗透速率同为室内水平渗透速率的 10 倍左右。

风化料和掺砾料现场原位渗透试验的渗透系数总平均值(水平、垂直渗透系数之积开平方根)为 $i \times 10^{-5}$ cm/s,较原状样室内渗透系数的总平均值大

一个数量级。

2.4 苗尾水电站

苗尾水电站位于云南省大理州云龙县旧州镇境内的澜沧江河段上,是澜沧江上游河段一库七级开发方案中的最下游一级电站,上接大华桥水电站,下邻澜沧江中下游河段最上游一级电站——功果桥水电站。

大坝为砾质土心墙堆石坝,坝高 139.8 m,碾压试验采用主料场苗尾寨土料场土料,土层以残坡积土为主。在复核场对苗尾寨料场一取料点进行了原位垂直渗透试验,并取用同一取料点土料在室内进行击实试验并参考碾压试验的压实干密度制样进行室内大型渗透试验,试验成果见表 7^[9]。

表 7 苗尾水电站防渗土料原位及室内垂直渗透试验成果

单位:cm/s

场次	不同组次原位垂直渗透系数 k_{20}						不同组次室内渗透系数 k_{20}					
	1	2	3	4	5	6	平均值	1	2	3	平均值	
一小场	1.51×10^{-5}	5.77×10^{-6}	2.37×10^{-5}	1.91×10^{-5}	2.46×10^{-5}	1.26×10^{-5}	1.68×10^{-5}	2.48×10^{-6}	3.01×10^{-6}	2.75×10^{-6}	2.75×10^{-6}	
二小场	8.56×10^{-6}	1.37×10^{-5}	2.42×10^{-5}	1.63×10^{-5}	1.42×10^{-5}	9.94×10^{-6}	1.45×10^{-5}	1.31×10^{-6}	1.48×10^{-6}	2.31×10^{-6}	1.70×10^{-6}	

从试验成果看,苗尾寨土料 12 组原位垂直渗透试验基本都在 $i \times 10^{-5}$ cm/s,平均值为 1.57×10^{-5} cm/s,渗透系数略高于规程上 $\leq 1 \times 10^{-5}$ cm/s 的要求;从室内垂直试验成果看,所有试样的渗透系数均

为 $i \times 10^{-6}$ cm/s,比现场原位渗透系数小于一个量级,原位垂直渗透试验所得渗透系数比室内渗透试验所得渗透系数大 5 倍~10 倍左右。

3 结 论

(1) 从糯扎渡水电站两期碾压试验看,现场原位渗透试验水平方向渗透速率是垂直方向渗透速率的 3 倍左右,原状样室内渗透试验水平方向渗透速率同样是垂直方向渗透速率的 3 倍左右。

(2) 从列举的四个工程的垂直渗透试验的成果看,原位渗透试验的渗透系数基本上在 $i \times 10^{-5}$ cm/s,高于规范^[1]中心墙防渗料的渗透系数不大于 1×10^{-5} cm/s 的要求,而室内试验的渗透系数基本上在 $i \times 10^{-6}$ cm/s;原位垂直渗透试验的渗透速率是室内渗透速率的 3 倍~10 倍。

(3) 从原位和室内渗透试验的对比来看,两种方法的垂直渗透试验的渗透系数差距较两种水平渗透试验的渗透系数差距大,这是由于理论上认为双环法进行原位垂直渗透试验,内环水只产生垂直渗流,但从试验成果看,双环法渗透试验的边界条件与室内渗透试验的边界条件还是有所差别,双环法渗透试验时内环水有可能有部分侧向渗漏,另一个原因是原位渗透试验时,由于试验温度远高于室内试验时温度,水量蒸发,产生试验误差。而两种水平渗透试验方法的边界条件和渗透路径接近,渗透系数的差别主要原因是由于水分的蒸发造成的。

(4) 从所列举的工程看,原位垂直渗透试验的渗透系数基本上都超过了 1×10^{-5} cm/s,而室内渗透系数基本上都满足规范^[1]要求。从试验的边界条

件来分析,心墙防渗土料的渗漏更接近于室内渗透的边界条件,建议渗透系数的选用宜采用室内试验的成果,原位渗透试验成果可作为参考。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T5395 - 2007 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 陈定贤,袁光国,吕 衡,等.瀑布沟电站防渗土料的研究[J].四川水利发电,1996(3):51-56.
- [3] 中华人民共和国水利部. SL237 - 1999 土工试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [4] 国家能源局. NB/T35016 - 2013 土工筑坝材料碾压试验规程[S].北京:中国电力出版社,2013.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T5356 - 2006 水电水利工程粗粒土试验规程[S].北京:中国电力出版社,2006.
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T5355 - 2006 水电水利工程土工试验规程[S].北京:中国电力出版社,2006.
- [7] 张永全,谢正明,李融融,等.糯扎渡水电站可行性研究阶段心墙防渗料碾压试验研究报告[R].昆明:国家电力公司昆明勘测设计研究院科学研究所,2003.
- [8] 谢正明,张永全,李 琦,等.糯扎渡水电站可行性研究阶段心墙防渗料碾压试验研究报告[R].昆明:中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院,2006.
- [9] 李朝政,李 伟,等.苗尾水电站可行性研究阶段大坝心墙防渗土料现场碾压试验报告[R].昆明:云南华昆水电水利科学研究所,2010.

(上接第 154 页)

- [4] 李若冰,张志昌.明渠六圆弧蛋形断面临界水深和收缩断面水深的计算[J].武汉大学学报:工学版,2012,45(4):58-62.
- [5] 滕 凯,李新宇.六圆弧蛋形断面无压隧洞水面线解析计算模型[J].水资源与水工程学报,2013,24(4):177-182.
- [6] 张志昌,贾 斌.明渠六圆弧蛋形断面水面线的近似计算[J].应用力学学报,2014(6):952-958.
- [7] 张志昌,贾 斌,李若冰.六圆弧蛋形断面共轭水深计算方法研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(1):220-228.
- [8] 谢成玉,滕 凯.抛物线形断面渠道均匀流水深的近似计算公式[J].水电能源科学,2012(7):94-95,172.
- [9] 刘 刚,滕 凯.梯形断面均匀流水深的近似计算公式[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):41-44.
- [10] 谢成玉,滕 凯.三次抛物线形渠道断面收缩水深的简化计算[J].南水北调与水利科技,2012,10(2):148-150.
- [11] 滕 凯.消力池深的简化算法[J].人民长江,2012,43(15):77-79,91.
- [12] 滕 凯,周 辉.弧底梯形明渠正常水深的简化算法[J].黑龙江八一农垦大学学报,2012,24(5):85-88.
- [13] 滕 凯.标准门洞形过水断面临界水深的简化算法[J].华北水利水电学院学报,2012,33(5):1-3.
- [14] 张志昌.水力学[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [15] 王慧文.偏最小二乘回归法及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [16] 阎凤文.测量数据处理方法[M].北京:原子能出版社,1988.