

土坝坝体注水试验的影响因素

王文双,江晓益

(浙江省水利河口研究院,浙江 杭州 310020)

摘要:针对目前病险土坝地质勘察中选取坝体土渗透系数较难的问题,采用适合土坝坝体注水试验的渗透系数计算公式,分析了注水试验参数对渗透系数的影响,并对常水头与降水头室内渗透试验与现场注水试验成果进行对比分析。结果表明:土坝坝体注水试验水头和初始水位对试验结果影响最大,注水试验水头过高易产生坝体水力劈裂,造成坝体土渗透系数偏大的假象;大坝坝体填土均适合进行常水头及降水头注水试验;土坝坝体土渗透系数的确定应综合注水试验及室内渗透试验的成果。

关键词:病险土坝;注水试验;渗透系数;临界水头;水力劈裂

中图分类号:TV221.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)01-0053-05

Influencing factor analysis of water injection test in earthfill dam//WANG Wenshuang, JIANG Xiaoyi (Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Considering the difficulty of determining the hydraulic conductivity of a dangerous earthfill dam during geological investigations, the influence of a water injection test on hydraulic conductivity was analyzed using the hydraulic conductivity calculation formula which is suitable for a water injection test in an earthfill dam. The results of stable-water-flow and flexible-water-flow laboratory permeability tests were analyzed and compared with those of field water injection tests. The results show that the water head and initial water level of the water injection test have the largest influence on the test results. Hydraulic fracturing in the dam occurs easily under high-head water in water injection tests, leading to a larger permeability than the real one. The filled soil of the dam is suitable for stable-water-flow and flexible-water-flow water injection tests. The hydraulic conductivity can be determined through water injection tests and laboratory permeability tests.

Key words: dangerous earthfill dam; water injection test; hydraulic conductivity; critical water head; hydraulic fracturing

病险土坝工程地质勘察是大坝安全鉴定及除险加固设计的主要工作之一,其中坝体土的渗透系数大小将直接关系到病险土坝的安全性评价及除险加固方案的确定。勘察实践表明,坝体注水试验测定的渗透系数一般均大于取样室内渗透试验测定的渗透系数,如果坝体土填筑质量差,甚至会相差一两个数量级。如何客观评价坝体土的渗透系数,对地质工程师来说相当困惑。水库大坝安全鉴定或除险加固设计审查时,不同专家对使用坝体注水试验成果存在不同的认识,甚至部分专家不赞成坝体注水试验,注水试验是否对土坝坝体造成破坏以及其成果与室内渗透试验成果的偏差太大往往成为争议的焦点。笔者认为,SL 345—2007《水利水电工程注水试验规程》^[1]比较适合于天然沉积地层,对于土坝这种应力分布特殊的“地质体”,注水试验的适用性尚需要研究。应该说,钻孔注水试验是野外测定岩土层渗透性的一种比较实用且有效的方法,其原理与

抽水试验相似,但其与室内的渗透试验及抽水试验还是有较大差别的,适用条件及边界条件均有所不同,特别是对于土坝这种特殊“地质体”,分析研究坝体注水试验的相关影响因素,对于解决目前病险水库地质勘察中坝体土渗透性评价的难题有着极为重要的理论及现实意义。

1 土坝坝体注水试验渗透系数计算公式

1.1 注水试验边界条件

钻孔注水试验的原理与抽水试验类似,但注水试验理论研究相对滞后,不同学者根据不同假定边界条件和流态推导出不同的渗透系数计算公式,且现行规程规范及部分参考手册中对注水试验的分析也仅适用于天然沉积地层,其边界条件是半无限空间地质体和水平的地下水位,对于土坝这种特殊的、孤立的人工填筑“地质体”,其浸润线是倾斜的,同时其分层填筑特征、特殊的应力分布及累积效应

(如心墙拱效应等)对常规注水试验均存在一定影响^[2]。

首先应对土坝坝体钻孔注水试验的边界条件进行简化分析。根据常规注水试验实践,试验的影响边界宽度一般认为是试验段长度的1~2倍^[3],若按试验段长5 m考虑,试验影响范围也就5~10 m,相对于土坝的防渗体(心墙)宽度,其渗流比降不大,因此局部浸润线(坝内水位)可视为水平,近似符合常规注水试验边界条件。土坝注水试验渗透系数计算公式目前可采用YS 5214—2000《注水试验规程》^[4]、SL 345—2007《水利水电注水试验规程》及工程地质手册提供的公式。

1.2 渗透系数计算公式

当采用常水头注水试验时,规程及手册提供的注水试验渗透系数计算公式对于饱和土渗流时(试验段位于地下水位以下)差别主要体现在传导比的取值,而非饱和土渗流时(试验段位于地下水位以上)公式差别较大。

1.2.1 地下水位以下试验段

a. 常水头注水试验。渗透系数计算公式为

$$K = \frac{0.366Q}{lH} \lg \frac{ml}{r} \quad (1)$$

其中 $l > 8r$ $m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}$

式中: K 为渗透系数,cm/s; Q 为稳定注水量,cm³/s; H 为试验水头,cm; l 为试验段长度,cm; r 为试验段内半径,cm; m 为传导比; K_h 、 K_v 分别为水平、垂直渗透系数,cm/s。

在实际应用中,传导比 m 并非定值,要求试验前进行估算,工程地质手册针对巨厚且水平分布宽的含水层建议取 $m=2$ ^[5],抽水试验中一般取 $m=0.66 \sim 1.6$ ^[6]。土坝坝体填筑采用分层碾压,坝体土一般多表现为各相异性特征,其水平渗透系数大多比垂直渗透系数大。对浙江省千库保安工程中部分水库大坝防渗体室内水平及垂直渗透系数进行统计,心墙坝 $m=1.2 \sim 1.8$,均质坝 $m=1.1 \sim 1.2$,因此笔者计算渗透系数时,一般心墙坝取 $m=1.4$,均质坝取 $m=1.1$ 。

b. 降水头注水试验。渗透系数计算公式可采用SL 345—2007《水利水电注水试验规程》推荐公式:

$$K = \frac{0.0523r^2}{2\pi l / \ln \frac{ml}{r}} \frac{\ln H_1/H_2}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中: t_1 、 t_2 为注水试验的持续时间,min; H_1 、 H_2 为 t_1 、 t_2 对应的试验水头,cm。

另外还可根据 $\ln(H_t/H_0)$ 与 t 的关系求得注水

试验特征时间 T_0 ,其中 H_t 为试验某时刻 t 的试验水头, H_0 为试验初始水头, T_0 为 $H_t/H_0=0.37$ 时所对应的 t 值,可在 $\ln(H_t/H_0)$ 与 t 的关系曲线上确定,则渗透系数计算公式为

$$K = \frac{0.0523r^2}{(2\pi l / \ln \frac{ml}{r}) T_0} \quad (3)$$

1.2.2 地下水位以上试验段

a. 常水头注水试验。当试验段位于地下水位以上时,理论上属非饱和土渗流问题,应考虑土层毛细力影响,渗流不符合达西定律^[1],一般推荐采用纳斯别尔格公式:

$$K = \frac{0.423Q}{H^2} \lg \frac{2H}{r} \quad (4)$$

该公式要同时满足 $50 < H/r < 200$ 和 $H \leq l$,由于条件苛刻,试验时水头控制难度极大。

b. 降水头注水试验。现行规程建议采用美国双栓塞注水试验公式计算渗透系数,由于该公式极其复杂,需要提供土层的最终饱和度及试验土层孔隙度,误差也相当大,且试验装置条件苛刻,不具现场操作性。

精确确定非饱和土的渗透系数十分困难,应尽量确保在误差不大的情况下选择简便可行的试验方法。图1为某水库坝体心墙填土的天然含水率、饱和度与填土深度的关系,填土天然含水率一般在20%~30%之间,饱和度在75%~100%之间,它们与浸润线及填土深度并无相关关系,并且填土饱和度平均约为86%,大多并未达到95%以上的饱和标准。可见坝体填土的非饱和问题是存在的,但由于目前对非饱和土的渗流问题研究并不深入,在当前技术条件下,用饱和渗流理论进行坝体注水试验分析尽管有一定偏差,但至少是可以理解的。

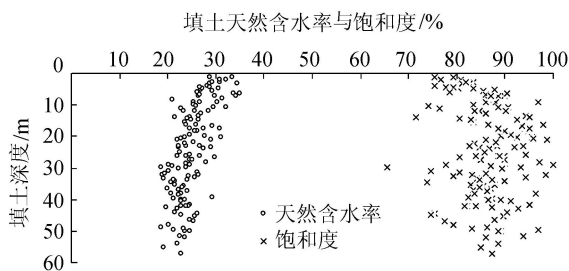


图1 某水库坝体心墙填土天然含水率、饱和度与填土深度的关系

2 土坝坝体注水试验成果分析

2.1 注水试验参数选择

土坝坝体注水试验参数主要包括试验段长度、水头、初始水位、稳定注水量、试验段孔径、注水试验持续时间、特征时间及传导比等。

对于试验段长度 l 的选取,SL 345—2007《水利水电工程注水试验规程》规定同一试验不宜跨越透水性相差悬殊的两种岩土层,对于均一岩土层, l 不宜大于 5 m,且 $l > 8r$;YS 5214—2000《注水试验规程》要求 $ml > 8r$;工程地质手册要求 $l > 4r$ 。抽水试验规定当含水层厚度不大于 15 m 时,宜采用完整孔抽水,当含水层厚度大于 15 m 时,可采用非完整孔抽水,此时 $l < 0.3H$ ^[6]。在压水试验中国外有关规程规定 l 为 3~6 m,多数为 5 m,因此现行压水试验规程规定 l 宜为 5 m,过长则影响成果精度,过短又会增加试验次数和费用^[7]。综上所述,土坝坝体注水试验的试验段长度可取 3~5 m,若遇特殊情况(如坝体裂缝、夹层等),应根据具体情况确定试验的位置和长度。

注水试验水头 H 的计算与坝体内浸润线即初始水位有关,传统方法是利用钻孔揭露初始水位,由于钻孔孔径较大,孔内充水将耗费相当长时间,同时由于持续钻进孔深的变化以及钢管护壁影响,孔内初始水位的判定相当困难。合理确定初始水位对试验结果影响较大,同时初始水位将直接影响到临界水头的确定,而临界水头是影响坝体水力劈裂与否的关键^[8]。一般大中型水库坝体内均埋设测压管,可根据勘探期间坝体浸润线拟合确定钻孔初始水位,而大多数小型水库无观测设施,可以结合钻探采取的坝体填土柱状样的目测湿度判定,但坝体土防渗性能较好时难以判断,此时可以根据大坝结构推测坝体浸润线,并在推测浸润线上下段坝体附近要求尽量控制钻探进度,延长坝体土钻探时间,隔天进行孔内水位观测,若坝体土较软易缩径应提前下花管护壁,若土体强度较高应预留 3~5 m 进水段,以此判断孔内初始水位。试验段压力零线计算可参考压水试验压力零线计算方法^[7]。

注水试验的稳定注水量与注水试验水头成正比,注水量太大会抬高注水试验水头,易造成坝体局部水力劈裂,所以应尽量选择较为适中的注水量。连续 2 次量测的注入流量之差不大于最后一次注入流量的 10% 时流量稳定,试验即可结束,取最后一次流量作为计算值。

试验段孔径的选取一般为标准的钻具口径,坝体土层钻进一般采用直径为 110 mm、130 mm 及 150 mm 的 3 种钻具。由于孔径相差不大,因此它不是注水试验成果的主要影响因素。

对于常水头注水试验的持续时间应从两方面考虑:对于地下水位以下试验段,试验持续时间可相对较短,对于地下水位以上试验段,为提高土层饱和度,试验持续时间应相对长一些,但总的注水试验持续时间也不宜过长。考虑到土坝特殊的应力特征及

局部可能存在的裂缝等缺陷,注水持续时间不宜遵照现行规程主要针对天然沉积地层要求的 1~2 h,笔者认为应尽量在半小时内完成,以免造成坝体不必要的损伤。对于降水头注水试验,注水试验持续时间应根据水位下降幅度而定,开始观测时间间隔应尽量短,后期观测时间间隔可适当延长,当试验水头下降到初始水头的 0.3 倍或连续观测值达到 10 个以上时,可结束试验,其特征时间 T_0 可由 $\ln(H_i/H_0)-t$ 曲线确定。

传导比 m 的选取可利用室内水平及垂直渗透系数进行计算复核。根据统计,传导比 $m = 1.1 \sim 1.8$,说明大坝防渗体水平渗透系数一般是垂直渗透系数的 1.2~3.2 倍。如果以段长为 5 m、孔径为 110 mm 试验段进行分析,其他条件相同,仅由于传导比的不同导致两者渗透系数计算值相差 10% 左右,影响不大。

2.2 水力劈裂现象分析

水力劈裂通常是指岩土体在高水压作用下产生裂缝并发展的过程。SL 345—2007《水利水电注水试验规程》建议注水试验水头选择控制水位至孔口,主要考虑观测水位方便,但并未考虑到高水头对土体易产生水力劈裂的可能,特别是对于土坝这种应力分布特殊的“地质体”,注水试验造成坝体水力劈裂的风险大大增加^[8]。

笔者在病险土坝坝体钻孔注水试验过程中发现当注水水头过高或水位接近孔口时,漏水量有突然增大的现象。如图 2 所示,某水库在心墙深度 30.2~35.0 m 试验段进行注水试验时坝体土在高水头作用下存在明显水力劈裂现象。第 1 次以 15 L/min 的稳定流量注水时,水位上升后缓慢下降,水力劈裂强度较低;第 2 次调整流量至 90 L/min 时,孔内水位快速上升,当水位升至距孔口 1 m 左右时,水位快速下降,水力劈裂强度大。经计算,心墙深度 30.2~35.0 m 试验段发生第 1 次水力劈裂的临界水头约为 22.4 m。心墙深度 34.8~39.8 m 试验段在两种不同的注水量下未发生明显水力劈裂现象。

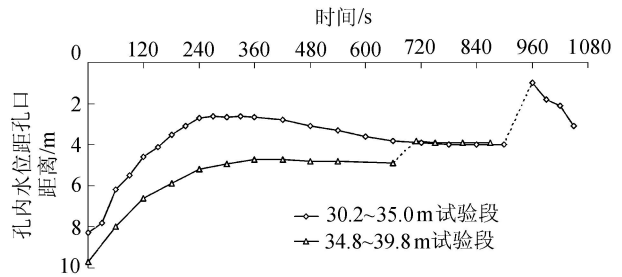


图 2 某水库心墙深度 30.2~39.8 m 分段注水试验水位变化曲线

土石坝心墙的水力劈裂问题是一个非常重要且极其复杂的问题,目前尚无很好的方法对劈裂的发

生进行预测和计算模拟,其发生条件并不十分清楚。

因为坝体不是无限体,理论计算和实践都证明土坝坝体的小主应力 σ_3 垂直坝轴线方向, σ_3 方向的坝体横断面为有限断面,坝坡可以自由位移,故在坝体中,尤其是在坝轴线附近 σ_3 比地基中的侧压力小得多。所以在沿坝轴线进行坝体钻孔注水试验时,水压力首先最容易劈开的是小主应力面,即 σ_3 的作用面,形成沿坝轴线方向的纵向缝^[9]。

理论计算表明,坝体横向侧压力系数 K_3 沿坝高方向呈曲线分布,即当坝体深度与坝高之比为0.3~0.7时, K_3 值较小,为0.2~0.3,其中坝体深度与坝高之比为0.5时 K_3 最小,约为0.2^[9]。说明现场坝体钻孔注水试验时当试验段在1/3~2/3倍坝高处,如果注水水头过大,则易造成坝体局部水力劈裂。

在病险土石坝工程地质勘察实践中,应尽量避免坝体钻孔注水试验引起水力劈裂,临界水头值的选择至关重要。在当前注水试验引起水力劈裂的机理及过程未完全清楚的情况下,应尽量选择较低的水头进行试验,试验方法可参照抽水试验,采用分级注水,即选择3个不同水头,取3次试验结果的平均值作为最终试验值,其中1/3~2/3倍坝高处应特别注意不能采用高水头。试验时估算临界水头,在临界水头值以内采用3个不同的试验水头进行注水试验。如果3次试验结果出现较大差别,应分析原因进行甄别,从试验段套管脚止水、坝体结构、原生裂缝或水力劈裂等方面进行综合分析。

3 常水头与降水头注水试验结果对比分析

采用常水头分级注水试验,每级试验结果均有一定差别,当某级渗透系数计算值与最小值之比($K/K_{\min}$)大于5时应考虑有可能试验段局部已产生水力劈裂,造成试验段渗透系数偏大。当发生水力劈裂后,计算的坝体土渗透系数一般都大于 $1.0\times 10^{-4}\text{cm/s}$,呈中等透水性。

降水头注水试验一般采用连续水头比(公式(2))及特征时间(公式(3))两种方法计算,宜利用水头比与时间关系曲线对试验结果进行初检,当该关系不呈直线状态时,应查找原因。一般来说,开始时间段由于水头下降速率较快而引起读数误差,水头比与时间关系稍具曲线状,随着时间延长,基本都呈直线。利用特征时间计算渗透系数时,宜将初始水头与不同时间段水头计算的渗透系数进行算术平均,作为最终推荐的渗透系数,以消除部分读数误差。同时两种计算方法之间的对比综合分析也能够判定数据的准确度。

表1所示的对比结果表明:当试验段的渗透系数 $K<1.0\times 10^{-4}\text{cm/s}$ 时为弱透水性,常水头注水试

验获取的渗透系数一般比降水头注水试验的结果小, $K_{\text{常}}/K_{\text{降}}$ 在0.23~0.79之间,平均值为0.45。当试验段的 $K>1.0\times 10^{-4}\text{cm/s}$ 时为中等透水性,一般常水头注水试验获取的渗透系数比降水头注水试验的结果大, $K_{\text{常}}/K_{\text{降}}$ 在1.94~13.58之间。从偏安全角度考虑,当试验段为弱透水性时,宜采用降水头注水试验,当试验段为中等及以上透水性时,宜采用常水头注水试验,且同时辅以降水头注水试验进行结果对比,根据两种试验结果并结合室内试验进行综合分析。

表1 坝体常水头与降水头注水试验结果对比

水库	孔号	试验段深度/m	$K/(10^{-5}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$		$K_{\text{常}}/K_{\text{降}}$
			常水头	降水头	
芝 堰	ZK4	15.0~21.2	4.91	8.12	0.60
		29.7~34.2	2.62	6.54	0.40
		41.0~45.4	0.43	1.87	0.23
	ZK12	30.2~35.0	19.90	2.01	9.90
		34.8~39.8	71.00	5.23	13.58
山横桥	ZK3	3.0~8.0	30.60	15.80	1.94
		12.4~18.0	1.49	6.13	0.24
		22.7~28.0	3.12	3.93	0.79

SL 345—2007《水利水电工程注水试验规程》规定常水头注水试验适用于地下水位以上或以下渗透性比较大的砂性土或砂卵石层,降水头注水试验适用于地下水位以下的粉土、黏性土等渗透性比较小的土层。YS 5214—2000《注水试验规程》规定常水头注水试验适用于地下水位以下渗透性较强的地层,降水头注水试验适用于地下水位以上或以下的粉土、砂土及渗透性不大的碎石土层。由于大坝防渗体一般由黏性土分层填筑而成,尽管压实土质为低渗透性,但其填筑质量、层面或裂缝等缺陷不可避免,因此防渗体局部多表现为弱至中等透水性,应该说这种渗透性特征均适合进行常水头及降水头注水试验,而实践也证明两种方法计算出的渗透系数结果相近。由于降水头注水试验工艺简单、省时,故工程实践中多推荐采用降水头注水试验。不过降水头注水试验也有其局限性,国内病险水库大部分建于20世纪五六十年代,多数为边勘测、边设计、边施工的“三边”工程,某些大坝防渗体填筑料及填筑质量差,大坝坝体局部有空洞、裂隙、砂及碎块石等,这种坝体土的渗透性一般较强,降水头注水试验成果误差较大。常水头注水试验时采用分级注水有利于发现水力劈裂现象,而降水头注水试验一般水头到孔口,极易瞬间发生水力劈裂现象。因此建议注水试验时一定要控制水头上升速度,并实时监测水头与流量的变化,并尽量采用低水头,尤其是对降水头注水试验。当然,如果工期许可,建议两种注水方法都采用,对试验段原位渗透成果进行综合分析。

4 现场注水试验与室内渗透试验成果对比分析

注水试验可视为以水平向为主的渗透试验。根据表 2 所示对比成果,土坝钻孔注水试验与室内渗透试验测定的渗透系数确实存在一定的偏差,一般中型水库由于施工质量相对有所保证,前者与后者的比值一般为 5~10;而小型水库施工质量一般相对较差,成果偏差基本都在 100 倍以上。至于两种试验方法存在的差异,笔者认为原因是多方面的,抛开设备误差及一些人为因素影响而言,两者产生差别的最主要原因是由于土坝坝体的非均质性 & 坝体填筑时的层面和不可避免的裂缝等缺陷造成的渗透系数的尺度效应^[10]。

表 2 现场注水试验与室内渗透试验结果对比

水库名称	类型	现场试验 $K_{\text{注}}$ /($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	室内试验 $K_{\text{h室}}$ /($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$K_{\text{注}}/K_{\text{h室}}$
芝 堰	中型	8.85	1.240	7.1
周公畈	中型	66.40	12.300	5.4
大河口	中型	11.90	1.040	11.4
巧 英	中型	4.55	1.150	4.0
朝 阳	小型	60.80	0.162	375.3
湫水寺	小型	227.00	0.185	1227.0

碾压式土石坝设计规范规定心墙填筑土的渗透系数小于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,均质坝的渗透系数小于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ^[11]。若勘察结果不能满足以上要求,大坝防渗体的防渗性能是不合格的。结合已有研究成果及工程实践,坝体渗透系数的选取可以从以下几方面考虑^[12]:

- a. 对于大坝黏性土防渗体,应对现场钻孔注水试验及室内渗透试验成果进行统计分析整理,将现场钻孔注水试验得到的渗透系数小值平均值与室内渗透试验得到的渗透系数大值平均值进行算术平均,作为防渗体渗透系数的建议值。
- b. 大坝防渗体外侧的过渡段或砂性坝壳,由于室内无法进行试验,应直接采用现场注水试验成果,将试验得到的渗透系数大值平均值作为该分区渗透系数的建议值。
- c. 当现场钻孔注水试验与室内渗透试验分别统计后的渗透系数平均值基本接近时,可直接采用两者的算术平均值。

5 结 论

- a. 钻孔注水试验中的初始水位(压力零点)及注水试验水头对注水试验结果影响最大。注水试验水头过高易产生坝体水力劈裂,造成坝体土渗透系数偏大的假象,注水试验时应尽量选择较低的水头

进行试验,并采取分级注水,取合理结果的平均值作为最终试验值。

- b. 大坝坝体填土均适合进行常水头及降水头注水试验,从偏安全角度考虑,当试验段为弱透水性时,宜采用降水头注水试验,当试验段为中等及以上透水性时,宜采用常水头注水试验,且同时辅以降水头注水试验进行对比。
- c. 土坝坝体渗透系数具有明显的尺度效应,目前大坝的渗流稳定评价仍然属于相对大尺度的模拟,土坝防渗体渗透系数的确定应综合注水试验及室内渗透试验结果。

参考文献:

[1] SL 345—2007 水利水电工程注水试验规程[S].

[2] 韦港,闫宇. 关于注水试验不适合均质土坝坝体渗透性测试的讨论[J]. 水利水电科技进步,2009,29(4):18-20. (WEI Gang, YAN Yu. Discussion on water injection test in applicability to the permeability test for homogeneous earth dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(4):18-20. (in Chinese))

[3] 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.

[4] YS 5214—2000 注水试验规程[S].

[5] 常士骠,张苏民. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

[6] SL 320—2005 水利水电工程钻孔抽水试验规程[S].

[7] SL 31—2003 水利水电工程钻孔压水试验规程[S].

[8] 江晓益,孙伯永,陈星. 病险土石坝水力劈裂现象的注水试验研究[J]. 中国农村水利水电,2010(6):143-146. (JIANG Xiaoyi, SUN Boyong, CHEN Xing. Research on hydraulic fracturing caused by water injection tests in dangerous earth-rockfill dams[J]. China Rural Water and Hydropower,2010(6):143-146. (in Chinese))

[9] 白永年,吴士宁,王洪恩,等. 土石坝加固[M]. 北京:水力电力出版社,1992.

[10] LURDES M, JESUS C. An analysis of hydraulic conductivity scale effects in granite (full-scale engineered barrier experiment (FEBEX), grimsel, Switzerland) [J]. Water Resources Research,2005,41(3):1-13.

[11] SL 271—2001 碾压式土石坝设计规范[S].

[12] 徐峰,梁章清. 水库大坝质检钻孔野外注水试验及参数选取的探讨[J]. 江西水利科技,2005,31(增刊2):73-74. (XU Feng, LIANG Zhangqing. Discussion of field water injection test of drilling holes and its parameter selection of the dams of reservoirs[J]. Jiangxi Hydraulic Science and Technology, 2005, 31 (Sup2): 73-74. (in Chinese))

(收稿日期:2012-05-03 编辑:周红梅)