

土石坝心墙水力劈裂影响因素分析

王俊杰^{1,2}, 朱俊高³

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学水工建筑物健康诊断技术与设备工程研究中心, 重庆 400074; 3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 基于水力劈裂的断裂力学判定准则和有限元判定模拟方法, 以假想的直心墙土石坝为例, 在考虑心墙内存在裂缝的条件下, 计算分析了库水位、裂缝长度、裂缝位置和心墙材料特性(包括弹性模量、泊松比和密度)等因素对土石坝心墙水力劈裂的影响。计算中假定心墙料、坝壳料和裂缝材料的本构关系均具有线弹性特性。结果表明, 发生水力劈裂的可能性随库水位的抬高、裂缝长度的增大而增大, 随裂缝位置的不同而异。提高心墙材料的弹性模量、泊松比和密度, 均有利于提高心墙的抗水力劈裂能力。

关键词 水力劈裂 库水位 裂缝 弹性模量 泊松比 材料密度

中图分类号 :TV641.2+5 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)05-0042-05

Influence factors on hydraulic fracturing in central core of earth-rock dam//WANG Jun-jie^{1,2}, ZHU Jun-gao³ (1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Engineering Research Center of Diagnosis Technology and Instruments of Hydro-Construction, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : A supposed vertical central core earth-rock dam with horizontal cracks occurring inside was taken an example. The judgment criterion of fracture mechanics and FEM based on hydraulic fracturing were employed for calculation and analysis of the influences of the reservoir water level, the length and position of cracks, and the characteristics of core materials, such as Young's modulus, Poisson's ratio and the density, on hydraulic fracturing of the central core. In the calculation, the linear elastic model was used for simulation of the stress-strain relationships of core material, dam shell material, and the material with cracks occurring. The result shows that the possibility of hydraulic fracturing increases with the rise of reservoir water level and the development of crack length, and that the position of cracks is also an important influence factor. Moreover, the ability of the central core against hydraulic fracturing could be improved by enhancement of Young's modulus, Poisson's ratio and the density of core material.

Key words : hydraulic fracturing; reservoir water level; crack; Young's modulus; Poisson's ratio; material density

土石坝具有适用条件广、可就地取材、经济效益好、施工速度快、抗震性能强等许多优点^[1], 因而在大坝选型中常被首先考虑。随着我国经济的发展和西部大开发战略的实施, 许多大中型水库正在或将要建设, 其中有相当部分为土石坝, 且多为高土石坝。目前已有多座 200 m 级以上高土石坝正在建设或设计、论证中, 其中有些甚至是 300 m 级高坝。尽管如此, 土石坝设计建设中仍有许多关键的岩土工程技术问题亟待解决^[2], 其中土质心墙的水力劈裂问题就属其一。由于心墙水力劈裂问题的重要性和复杂性, 工程和学术界已对此开展过大量的研究工作^[3-7]。时至今日, 土石坝心墙的水力劈裂问题已成

为土石坝工程中人们最为关注, 同时也是最有争议的问题^[2]。

由于水力劈裂所致后果的严重性, 任何可能影响水力劈裂发生的因素都被工程界和学术界所关注。前人^[8-10]已从心墙应力拱效应的角度, 用有限元方法分析了影响水力劈裂的诸因素, 如心墙及坝壳土石料的材料特性和坝体结构等。从发生条件分析, 水力劈裂的发生需要心墙上游面存在能够允许库水快速进入心墙内部的裂缝^[11], 水力劈裂的离心模型试验^[12]也验证了裂缝是水力劈裂发生的必需条件之一。但在前人对土石坝心墙水力劈裂问题的研究中, 绝大多数并没有考虑发生水力劈裂所需的

基金项目 国家自然科学基金(50579014)
作者简介 王俊杰(1973—), 男, 甘肃陇西人, 副教授, 博士, 从事地质工程和岩土工程研究。E-mail :wangjunjiehhu@163.com

裂缝条件。在笔者所能搜集的文献中,仅文献[13]考虑了裂缝对水力劈裂的贡献,作者用有限元方法分析了心墙的水力劈裂问题,用具有一定透水能力的节理单元模拟裂缝,该方法与传统的不考虑裂缝的有限元方法相比,无疑是一大进步。因此,在考虑裂缝的情况下研究该问题是必要的,况且目前尚未见有关裂缝及其特征对水力劈裂影响的研究报道。

图1显示的是直心墙堆石坝心墙的受力简图。假定心墙上游面部位存在一条水平裂缝,水库蓄水后,有利于裂缝闭合或者防止水力劈裂发生的力包括:心墙自重 C 、作用于心墙上游面的竖向静水压力 W 、作用于心墙上下游两侧面的坝壳自重 S ,以及坝壳对心墙下游面的剪力 F ;有利于裂缝张开或者诱导水力劈裂发生的力包括:水平向静水压力 H 、坝壳对心墙上游面的剪力 F (主要是裂缝位置以上部分),以及裂缝内的梯度水压力 G 。

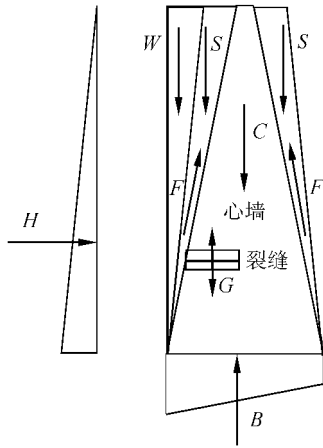


图1 含裂缝心墙受力简图

分析水力劈裂的影响因素,实际上就是分析影响上述各力的因素。由于篇幅所限,本文仅讨论裂缝长度、裂缝位置、库水位、坝料特性(包括心墙土体的弹性模量、泊松比和密度)等对水力劈裂的影响。

1 研究方法

存在于心墙上游面的裂缝通常是局部分布的(图2(a)),这种局部裂缝的扩展问题应属于断裂力学中的三维裂缝问题。考虑到有关三维裂缝的理论尚不够成熟,且计算也比二维问题复杂很多[14],本

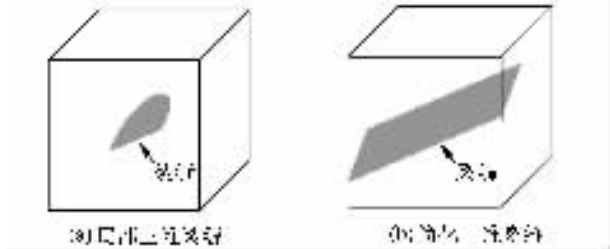


图2 心墙上游面裂缝的简化

文将三维局部裂缝简化为二维问题分析(图2(b))。这种简化显然是降低了裂缝的抗扩展能力,也就是增大了水力劈裂发生的可能性,但从工程安全的角度讲,这种简化是容易被接受的。

1.1 水力劈裂判定准则

心墙裂缝在水压力作用下的扩展,应该是由垂直于裂缝面的拉应力和平行于裂缝面的剪应力共同引起的[6],因此应建立 I - II 复合型的水力劈裂判定准则。文献[15]分析了水力劈裂的发生条件、发生机理,对在建糯扎渡心墙堆石坝的砾质黏土心墙料进行了室内击实试样的断裂特性研究[16],论证了线弹性断裂力学用于研究该心墙土体断裂性状的可行性[17]。基于试验成果和线弹性断裂力学理论,提出了如式(1)的水力劈裂断裂力学判定准则[15]:

$$\sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} = K_{IC} \tag{1}$$

式中: K_{IC} 为心墙土料的断裂韧度,可由断裂试验得到; K_I 和 K_{II} 分别为 I 和 II 型裂缝尖端的应力强度因子。

式(1)中,当左端小于右端时,可判定为不发生水力劈裂;否则,可判定为发生水力劈裂。式(1)的左端可由式(2)得到:

$$J = \frac{1 - \nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) \tag{2}$$

式中: J 积分[18]可用平面应变有限元方法计算得到[19]; E 和 ν 分别为心墙的弹性模量和泊松比(根据 J 积分的定义,式(2)对线弹性和非线性弹性材料均是成立的,对于非线性弹性问题, E 和 ν 分别取为切线弹性模量和切线泊松比)。

综合式(1)和式(2),可知 J 积分值越大,发生水力劈裂的可能性也就越大,因此,在下文的分析中,仅根据计算得的 J 积分值的大小判别发生水力劈裂的可能性大小,以分析影响水力劈裂的诸因素。

1.2 计算方案

图3为一假想直心墙土石坝,坝料分区仅为心墙和坝壳两种弹性材料。这里假定坝壳堆石料和土质心墙料为线弹性材料,仅是为了计算分析的方便,与实际相比是比较粗糙的假定。在我国目前常用的土石坝有限元应力变形计算中,通常假定坝料为非线性弹性材料,并多以邓肯-张模型[20]模拟其应力

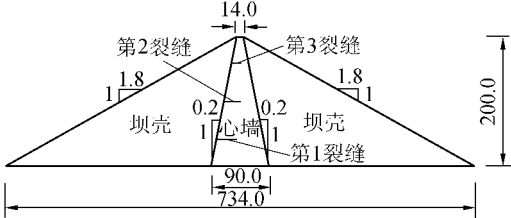


图3 假想土石坝结构示意图(单位: m)

应变关系。

假定心墙上游面分布 3 条水平裂缝,分别位于距离坝底 40.0 m(即 1/5 坝高)、100.0 m(即 1/2 坝高)和 160.0 m(即 4/5 坝高)处。这里忽略了裂缝的产生条件和形成过程,直接假定裂缝已经存在,其目的仅是为了方便地计算分析裂缝位置及裂缝长度对水力劈裂的影响,实际上裂缝可因施工、气候、蓄水等多种原因引起^[3],但是否能够引起本文所假定规模的裂缝尚需进一步研究。

假定水库正常蓄水位为 180.0 m,库水位最高可能达到坝顶高程,即 200.0 m。依据计算目的,共设计了如表 1 所列的 9 个计算方案。

表 1 水力劈裂影响因素分析计算方案

序号	裂缝到坝底距离/m	裂缝位置心墙厚度/m	裂缝长度/m	心墙弹性模量/MPa	心墙泊松比	心墙密度/(g·cm ⁻³)
1	40.0	74.0	2.0~23.0	30.0	0.36	1.99
2	100.0	50.0	2.0~21.0	30.0	0.36	1.99
3	160.0	26.0	2.0~11.0	30.0	0.36	1.99
4	160.0	26.0	2.0~11.0	10.0	0.36	1.99
5	160.0	26.0	2.0~11.0	50.0	0.36	1.99
6	160.0	26.0	2.0~11.0	30.0	0.20	1.99
7	160.0	26.0	2.0~11.0	30.0	0.45	1.99
8	160.0	26.0	2.0~11.0	30.0	0.36	1.79
9	160.0	26.0	2.0~11.0	30.0	0.36	1.89

注 库水位为 180.0~200.0 m 坝壳弹性模量为 150.0 MPa,坝壳泊松比为 0.14,坝壳密度为 2.00 g/cm³。

有限元模型建立时,坝体及裂缝均尽量用 4 结点四边形等参单元,局部用 3 结点三角形单元过渡。裂缝及其影响区域的有限元模型满足文献^[19]中讨论的获得收敛 J 积分值的所有要求。

计算中,用分级加荷模拟大坝施工过程,大坝竣工后的蓄水过程没有模拟,即假定库水位是瞬时到达计算水位的。事实上,对 200 m 级土石坝而言,实际工程的蓄水过程可能长达数年。在此过程中,随着库水向心墙的渗流,心墙土体将由非饱和状态逐渐向饱和状态过渡,其应力状态、孔压等都将发生变化,对此,目前的分析方法尚不够成熟。对水力劈裂而言,诸如裂缝的透水性、心墙土体的饱和状态、孔压等许多因素对其均有影响,而这些因素均随水库蓄水速率、水位等的不同而异^[15],对其进行比较全面的分析,目前尚有不少困难。

在大坝施工中,如果不蓄水,水力劈裂是不可能发生的,因此计算中不考虑裂缝,即裂缝单元的材料参数同其他心墙单元。蓄水时,假定裂缝已经存在,且裂缝长度为计算假定长度,裂缝材料的弹性模量取心墙弹性模量的 0.01%,泊松比取 0.30。在心墙上游面施加库水压力的同时,在裂缝内也施加梯度水压力。

2 影响因素分析

2.1 库水位

对表 1 中的方案 1,假定不同的裂缝长度,计算分析不同裂缝长度时 J 积分值随库水位的变化。图 4 给出的计算结果显示,不同长度裂缝的 J 积分值随库水位的抬高均呈增大变化,但增大速率随裂缝长度的不同而异。也就是说,对于确定长度的裂缝,尤其是裂缝较长时,库水位越高,发生水力劈裂的可能性也就越大。

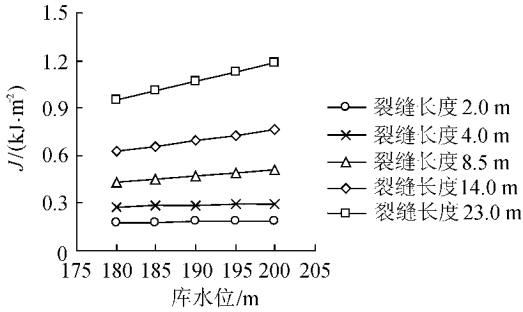


图 4 J 积分与库水位的关系

图 4 中还显示,当裂缝长度仅为 2.0 m 时,计算的 J 积分值随库水位抬高的变化很小。这是由于心墙上游面是倾斜面,当库水位抬高时,作用于裂缝内的水压力增大,将促使裂缝扩展,导致 J 积分值增大,同时,作用于心墙上游面的竖向水压力也增大,有利于裂缝闭合,将导致 J 积分值减小,计算得到的 J 积分值是这 2 种效果的综合反映。由此可见,对于长度较小或很小的裂缝,若在低水位下不发生水力劈裂,在高水位时也很可能不发生水力劈裂。这种不发生水力劈裂的裂缝长度的临界值,应与诸如心墙上游面的倾斜程度、心墙材料特性等许多因素有关,对于实际的坝体应进行专门研究。

2.2 裂缝长度

对表 1 中的方案 1,图 5 给出的 J 积分随裂缝长度的变化显示,随裂缝长度的增加, J 积分值迅速增大。这表明,对于确定的水头,裂缝越长,发生水力劈裂的可能性也就越大。

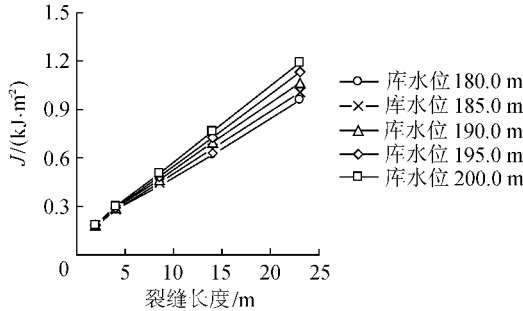


图 5 J 积分与裂缝长度的关系

图 5 中还显示,虽然在裂缝长度为 2.0 m 时,各

水头对应的 J 积分值基本相等,但随裂缝长度的增加,高水头对应的 J 积分值将明显大于低水头对应的值。也就是说,如果水力劈裂发生所需要的 J 积分值为一恒定值的话,则高水位时发生水力劈裂所需的最小裂缝长度要小于低水位时的最小裂缝长度要求。

2.3 裂缝位置

确定心墙中易发生水力劈裂的区域一直是人们所关心的问题,对此目前尚未形成统一的认识。有研究^[3]认为坝体顶部因受过往车辆、气候等因素的影响容易产生裂缝,其为水力劈裂的发生提供了裂缝条件,因而发生水力劈裂的可能性较大,而且,心墙土体的含水量也容易受外界气候的影响发生变化,这也可能加大发生水力劈裂的可能性。文献^[21]认为,可能发生水力劈裂的位置应在坝体的中上部,而不是水压力很大的坝体底部。文献^[10]指出,对于高陡岸坡的心墙坝,防止心墙下部的水力劈裂是至关重要的。因此,目前还不能简单地讲水力劈裂的易发区是心墙的上部还是下部,现有的分析方法尚不能很好地回答该问题。

对表 1 中的方案 1~3,假定图 3 中的 3 条裂缝具有相同的长度,计算其 J 积分值随库水位抬高的变化。图 6 给出的计算结果表明,对于相同长度的裂缝,在同一库水位下,裂缝的位置越是接近坝底, J 积分值越大,发生水力劈裂的可能性也就越大。

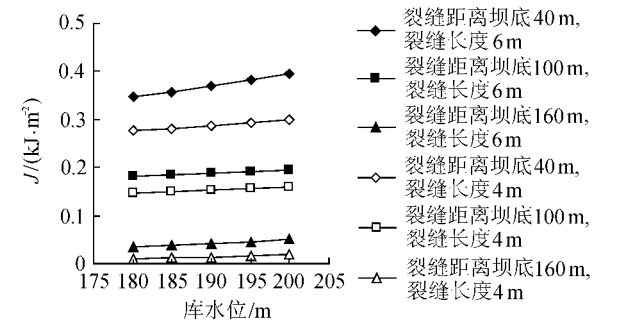


图 6 不同位置裂缝的 J 积分与库水位的关系

2.4 心墙特性

本文仅分析心墙的弹性模量、泊松比和密度三者对水力劈裂的影响。为了便于分析,将三者割裂为相互独立的变量。实际上,对于确定的心墙料而言,三者间是相互联系的,任意一个的变化必然引起其他两个的变化。若将三者综合考虑,并与实际心墙料的特性进行比较分析,结果将更具有实用性,但由于实际心墙料的特性千差万别,且影响因素众多,很难找出有关这三者间的规律性的东西,因而不便于研究分析。

2.4.1 心墙弹性模量

对表 1 中方案 3~5,即图 3 中的“第 3 裂缝”,计

算分析心墙材料的弹性模量对 J 积分的影响。图 7 显示,随心墙弹性模量的提高, J 积分值呈非线性减小,表明提高心墙土料的弹性模量,有利于提高心墙的抗水力劈裂能力,这一结论和以前研究成果^[9-10]是一致的。图 7 中尚显示,提高心墙的弹性模量,更有利于提高在高水位下,或存在较长裂缝时心墙的抗水力劈裂能力。

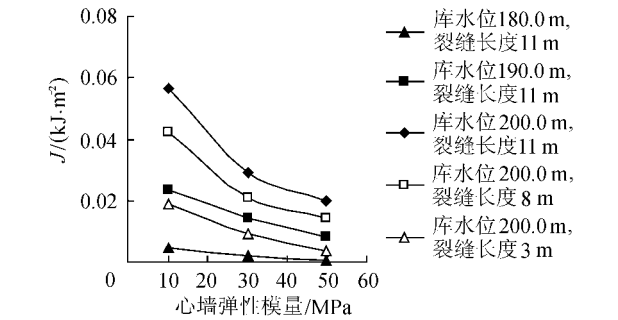


图 7 J 积分与心墙弹性模量的关系

2.4.2 心墙泊松比

对表 1 中的方案 3,6 和 7,即图 3 中的“第 3 裂缝”,计算分析心墙材料泊松比对 J 积分值的影响。图 8 给出的计算结果显示,提高心墙材料的泊松比有利于提高心墙的抗水力劈裂能力,这一结论和以前研究成果^[9-10]也是一致的。

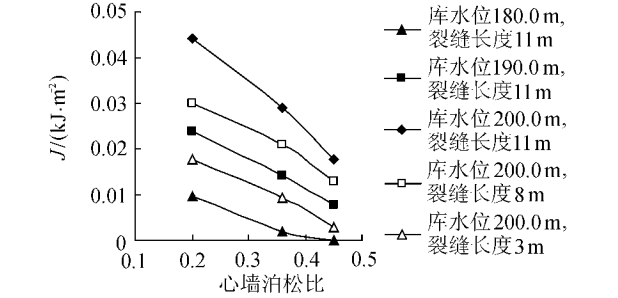


图 8 J 积分与心墙泊松比的关系

2.4.3 心墙密度

对表 1 中方案 3,8 和 9,即图 3 中的“第 3 裂缝”,计算分析心墙土体的密度对 J 积分值的影响。图 9 显示, J 积分值均随心墙密度的提高呈减小变化。也就是说,提高心墙密度有利于提高心墙的抗水力劈裂能力。

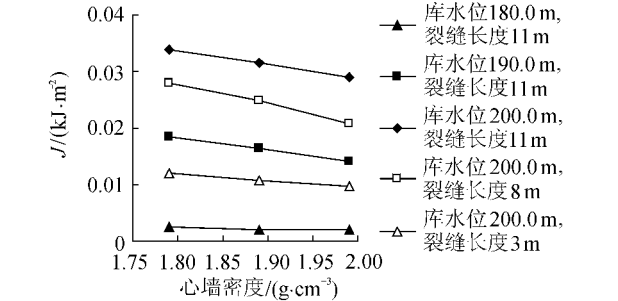


图 9 J 积分与心墙密度的关系

3 结 论

在考虑心墙裂缝存在的前提下,计算分析了库水位、裂缝长度、裂缝位置和心墙特性(包括弹性模量、泊松比和密度)等对水力劈裂的影响。主要结论包括 ①对于确定长度的裂缝,库水位越高,发生水力劈裂的可能性越大 ②对于确定的库水位,裂缝的长度越大,发生水力劈裂的可能性越大 ③水力劈裂的易发区仍是一个没有定论的问题,就本文的假想坝体而言,越是接近坝底的裂缝,发生水力劈裂的可能性越大 ④提高心墙材料的弹性模量、泊松比和密度,均有利于提高心墙的抗水力劈裂能力。

参考文献：

[1] 汝乃华,牛运光.大坝事故与安全:土石坝[M].北京:中国水利水电出版社,2001.

[2] 张丙印,于玉贞,张建民.高土石坝的若干关键技术问题[C]//本集编委会.中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集:上册.北京:清华大学出版社,2003:163-186.

[3] SHERARD J L. Hydraulic fracturing in embankment dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, 112 (10): 905-927.

[4] 孙亚平.水力劈裂机理研究[D].北京:清华大学,1985.

[5] LO K Y, KANIARU K. Hydraulic fracture in earth and rock-fill dams[J]. Canada Geotechnical Journal, 1990, 27: 496-506.

[6] VALLEJO L E. Shear stresses and the hydraulic fracturing of earth dam[J]. Soils and Foundations, 1993, 33 (3): 14-27.

[7] 张辉.堆石坝心墙水力劈裂试验与数值模拟研究[D].南京:河海大学,2005.

[8] KULHAWY F H, GURTOWSKI T M. Load transfer and hydraulic fracturing in zoned dams [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, 102: 963-974.

[9] 曾开华.土质心墙坝水力劈裂机理及影响因素的研究[D].南京:河海大学,2001.

[10] ZHU Jun-gao, WANG Jun-jie. Investigation to arcing action and hydraulic fracturing of core rockfill dam[C]//WIELAND M, REN QING-wen, TAN John S Y. New Developments in Dam Engineering. London: A. A. Balkema Publishers, 2004: 1171-1180.

[11] 王俊杰,朱俊高,张辉.关于土石坝心墙水力劈裂研究的一些思考[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S2): 5664-5668.

[12] 沈珠江,易进栋,左元明.土坝水力劈裂的离心模型试验及其分析[J].水利学报,1994(9): 67-78.

[13] NG A K L, SMALL J C. A case study of hydraulic fracturing using finite element methods [J]. Canada Geotechnical Journal, 1999, 36: 861-875.

[14] ANDERSON T L. Fracture mechanics[M]. 2nd ed. Orlando: CRC Press, 1991.

[15] 王俊杰.基于断裂力学的土石坝心墙水力劈裂研究[D].南京:河海大学,2005.

[16] WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao, CHIU C F, et al. Experimental study on fracture behavior of a silty clay [J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, 30(4): 303-311.

[17] 王俊杰,朱俊高.击实粘性土断裂韧度 K_{IC} 的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21): 3972-3977.

[18] RICE J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks [J]. Trans ASME J Appl Mech, 1968, 35(2): 379-386.

[19] WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao. Numerical study on hydraulic fracturing in core of earth-rock fill dam[J]. Dam Engineering, 2007, XVII(4): 271-293.

[20] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996.

[21] 张坤勇,殷宗泽,朱俊高.各向异性对土质心墙坝水力劈裂的影响[J].岩土力学,2005,26(2): 243-246.

(收稿日期:2006-10-16 编辑:熊水斌)

《水电自动化与大坝监测》征订启事

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

《水电自动化与大坝监测》(双月刊)是水电自动化与大坝监测领域国内外公开发行的专业性技术期刊,目前已入选《中国科技核心期刊》和“中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊”,同时被《中国学术期刊(光盘版)》、“中国期刊网”、“万方数据资源系统数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”全文收录,每双月20日出版。

本刊主要栏目有:理论与算法研究,发电控制技术及设备,状态检修,辅机控制及自动化元件,设备保护,水情测报与水调自动化,大坝监测仪器及自动化,大坝安全监控技术,运行与管理自动化,泵站自动化,闸门控制,水电与电力市场等,以及相关的专家论坛、专题报告和综述等。本刊读者对象为:水电自动化,大坝监测及相关专业从事科研、设计、运行、管理、试验,制造和营销的专业人员,产品用户和大专院校师生等。

本刊2008年每期定价8元,全年6期共计48元。邮发代号:28-39,全国各地邮局(所)均可订阅,亦可向本刊直接订阅。编辑部电话:(025)83092055,广告部电话:(025)83092057,发行部电话:(025)83092051,传真:(025)83421949, E-mail: hadm@nari-china.com, http://www.aeps-info.com(除最近3年网刊每期需收费5元外,其余过刊文章均可免费查阅、下载)。