

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.01.013

已有裂缝重力坝加高后的工作性态

颜天佑¹ 钮新强^{1,2} 李同春¹ 赵兰浩¹ 吴德绪² 吕国梁²

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.长江水利委员会长江勘测规划设计研究院,湖北 武汉 430010)

摘要 基于瞬态温度场和徐变应力有限元法,对某重力坝加高工程的温度场与应力场进行有限元仿真计算。对老坝体纵向裂缝和新老混凝土接合面的接触问题采用有限元混合法进行模拟,重点分析老坝体纵向裂缝产生的原因,研究坝体加高后对老坝体纵向裂缝以及坝体关键部位的影响,对大坝的加高工程具有一定的参考价值。

关键词 大坝加高 纵向裂缝 新老混凝土接合面 重力坝

中图分类号:TV313 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2009)01-0047-05

Working behavior analysis for a heightened gravity dam with longitudinal cracks//YAN Tian-you¹, NIU Xin-qiang^{1,2}, LI Tong-chun¹, ZHAO Lan-hao¹, WU De-xu², LV Guo-liang² (1. College of Water of Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Changjiang Water Resources Commission Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract : Based on the finite element method of transient temperature fields and creep stress, finite element simulation analysis of the temperature field and stress field of the heightening process of a gravity dam is carried out. Contacting problems of the longitudinal cracks in the original dam and the adjoining face between old and new concrete are simulated with the mixed finite element method. The causes of longitudinal cracks are analyzed. The effects on the longitudinal cracks in the original dam and the key parts of the dam after heightening are also studied, and provide a certain reference value for other gravity dam heightening projects.

Key words : dam heightening; longitudinal crack; joint face between old and new concrete; gravity dam

随着社会和经济的发展,水资源短缺将成为制约我国可持续发展的一个重要因素。水资源开发利用的程度越来越大,但适合建坝的新坝址却越来越少,由于需水量的增长和水库淤积的发展,已建的以供水、灌溉等为目的的水库越来越不能满足人们的需求。因此,对已建大坝的加高将成为未来大坝建设的一个重要方向。大坝加高在国外已有许多工程实例,如日本、委内瑞拉、美国、澳大利亚等国已有工程实例^[1],但国内类似工程相对较少。

重力坝加高一般会带来 3 个主要问题,即老坝应力恶化、新老混凝土接合面开裂及新混凝土表面裂缝。文献[2]对大坝加高带来的 3 个主要问题的产生原因进行了详细的分析并提出了一些解决方法。但对于一些特殊情况,如对已有纵向裂缝重力坝加高后工作性态的研究还比较少,本文结合某重力坝加高工程,重点分析老坝体纵向裂缝产生的原因,研究坝体加高后对其纵向裂缝以及关键部位的

影响,对大坝的加高工程具有一定的参考价值。

1 有限元分析条件

在某重力坝加高之前对坝体的检查中发现,老坝体的 3~7 坝段 150 m 和 159 m 高程处均有从门库起裂的纵向裂缝出现。纵向裂缝不仅降低了坝体的整体性,而且在坝体加高后裂缝由于受坝体下游坡伸缩变形的影响,有继续向下发展的可能性。所以有必要对老坝体纵向裂缝产生的原因,以及加高后纵向裂缝对新老坝体的影响进行分析。

1.1 计算方法

对新老坝体进行非稳定温度场和应力场仿真计算主要基于瞬态温度场和徐变应力有限元法^[3-4]。应考虑施工浇筑顺序、入仓温度、间歇期、通水冷却、养护条件、表面散热、外界气温变化等条件,以及新浇筑混凝土徐变等效应,在此基础上计算新浇筑混凝土的徐变温度应力场。

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAB04A01)

作者简介:颜天佑(1982—),男,江苏建湖人,博士研究生,从事水工结构研究。E-mail: jty001_1999@163.com

对于老坝体纵向裂缝以及新老混凝土接合面之间的摩擦接触问题,有限元求解方法主要有拉氏乘法^[5-6]、罚函数法^[7]、间隙元法^[8-9]、数学规划法^[10]等。接触面条件的单边不等式约束性决定了接触问题需要采用试探-校核的增量迭代方法进行求解,在以往的求解方法中,一般采用全自由度作为迭代求解变量,这样就降低了求解效率。本文采用有限元混合法^[11-12]对摩擦接触问题进行模拟分析。该方法将作用在接触体上的力系分解为外力和接触界面上的接触力,以接触体的位移为基本未知量,以接触区域局部坐标系下的结点接触力为迭代变量,将非线性接触迭代收缩在可能接触面上进行,求解过程中总体刚度矩阵只需在迭代之前形成和分解1次,大幅度提高了计算效率。坝体混凝土以拉应力超过抗拉强度作为开裂判据,跟踪模拟纵向裂缝和新老混凝土接合面的开裂扩展情况及对坝体应力等指标的影响。

1.2 计算参数

1.2.1 气温曲线

大坝坝址处的多年平均气温为 15.8℃,气温年变幅为 13.5℃。根据坝址情况,分别将年均气温和气温年变幅增加 0.5℃,温度场计算中采用式(1):

$$T_c(t_0) = 16.3 + 14.0 \sin \frac{2\pi}{365}(t_0 - 105) \quad (1)$$

式中: $T_c(t_0)$ 为气温; t_0 为计算时刻至1月1日的天数。

1.2.2 混凝土弹性模量

温度应力计算中新混凝土弹性模量计算式为

$$E(t) = 37.5(1 - e^{-0.1632t^{0.6848}}) \quad (2)$$

式中: $E(t)$ 为混凝土弹性模量, GPa; t 为混凝土龄期, d。

1.2.3 放热系数

混凝土表面与大气接触后的放热系数 $\beta = 15 \text{ W/(m} \cdot \text{℃)}$,混凝土表面与水接触后的 $\beta = 2326 \text{ W/(m} \cdot \text{℃)}$ 。

1.2.4 混凝土徐变

基岩与坝体老混凝土不考虑徐变,新混凝土徐变表达式为

$$\alpha(t, \tau) = \left(C_1 + \frac{D_1}{\tau^n} \right) [1 - e^{-k_2(t-\tau)}] +$$

$$\left(C_2 + \frac{D_2}{\tau^n} \right) [1 - e^{-k_2(t-\tau)}] \quad (3)$$

式中: $\alpha(t, \tau)$ 为混凝土徐变, $10^{-6}/\text{MPa}$; τ 为混凝土加荷龄期; $C_1 = 2.5, D_1 = 200, m = 1.0, k_1 = 0.3, C_2 = 7.0, D_2 = 50, n = 1.0, k_2 = 0.005$ 。

1.2.5 混凝土与基岩力学特性

计算参数见表1,新老混凝土接合面摩擦系数为1.0,黏聚力取1.5 MPa,抗拉强度为1.0 MPa,老混凝土的抗拉强度为2.5 MPa。

2 老坝体纵向裂缝成因分析

为分析老坝体纵向裂缝产生的原因,考察各荷载(坝体自重、水荷载、温度荷载)对坝体的影响,将整个有限元计算过程分3部分进行。首先计算地基沉降,然后计算坝体在自重、水压力及渗透压力作用下的应力、应变状况,最后施加温度荷载。为了得到老坝体运行期坝体随外界温度变化的准稳定温度场,上游水下部分采用第一类边界条件(等于水温处理),暴露在空气中的部位按放热边界处理,地基周边边界按绝热边界处理。为了有效消除假定的初始温度场对坝体准稳定温度场的影响,以5 d为计算步长进行20 a计算,以最后1 a的温度场作为老坝体计算的准稳定温度场。根据现场钻探得到的存在纵向裂缝的位置预先设置裂缝开展路径,以坝体混凝土拉应力超过抗拉强度作为开裂判据。温度应力场的计算时间为2005年4月1日至2006年4月1日,坝前水位达到145 m高程(吴淞高程,下同)。

根据老坝体的有限元计算结果可知,坝体在自重、水压力及渗透压力作用下位移分布连续,纵向裂缝不会形成,坝体作为一个整体在外荷载作用下发生变形。当考虑温度荷载后,坝体出现了开裂现象,裂缝最先从坝顶开始,逐渐向下发展,直至144.57 m高程趋于稳定。从图1所示的缝面上 $O_1 \sim O_3$ 点(位置见图2)张开度~时间曲线中可以看出,坝体纵向裂缝在高温季节闭合,在低温季节张开。在1月中下旬缝面张开度达到最大值。

分析纵向裂缝产生的原因主要是由于温度作用,当坝体温度降低时,坝体上、下游表面由于温降而收缩,上游坝面向上游变形,下游坝面向下游变形,在坝体中形成垂直于纵缝方向的拉应力,当拉应

表1 混凝土计算参数

材 料	弹性模量/ GPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$)	导温系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	线膨胀系数/ ($10^{-5} \cdot \text{℃}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{℃}^{-1}$)
基 岩	21.0	2700	0.220	2.73	0.1	1	971
老混凝土	35.0	2450	0.167	2.73	0.1	1	963
28 d 老混凝土	29.5	2450	0.167	2.73	0.1	1	963
90 d 新混凝土	36.5	2450	0.167	2.73	0.1	1	963

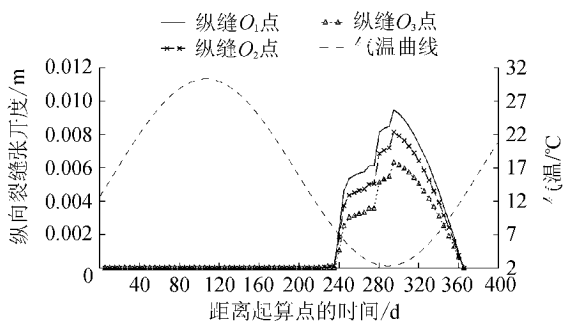


图1 坝体典型点纵向裂缝张开度~时间曲线

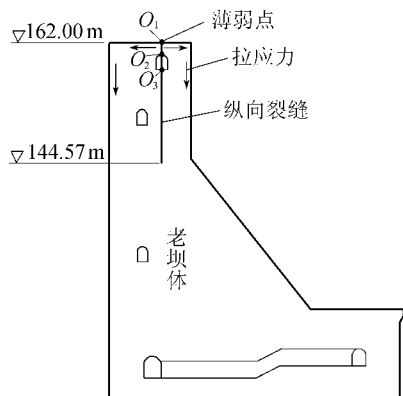


图2 老坝体产生纵向裂缝受力示意图

力超过混凝土的抗拉强度时,缝面被拉开,受力情况如图2所示。并且由于缝尖端应力集中效应的存在,使得纵缝的开裂向深处延伸,同时温度应力得到释放和转移,一直到达一个稳定的状态。从老坝体的历史监测资料来看,纵缝顶部的门库是一个薄壁结构,加上刚浇筑不久就承受门机重量等作用,再加上温度荷载的作用容易先起裂一小部分,而这先起裂的纵缝就成为后来在温度荷载作用下纵缝向深处发展的一个诱因。

图3给出了考虑或不考虑坝体纵缝张开情况下坝踵处第一、第二主应力~时间曲线。从图3中可以看出,在计算时间内2种情况下坝踵始终处于受压状态。相对于不考虑坝体纵缝开裂的弹性计算情况,坝体纵缝开裂后坝踵压应力有所增大,裂缝的出现使得坝体的整体性有所降低。

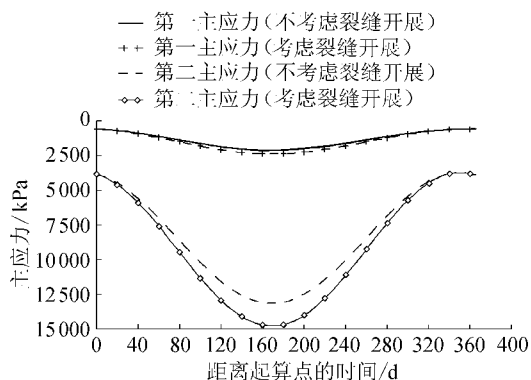


图3 坝踵第一、第二主应力~时间曲线

3 大坝加高后工作性态分析

大坝加高仿真计算从4号坝段新混凝土浇筑即2006年4月20日开始,一直到2012年11月25日,其中施工期即2010年7月之前坝前水位为145m高程,加高完成以后运行期水位达到170m高程。其加高示意图如图4所示。为考察已有裂缝对新增混凝土的影响,在顶部加高部分以及新老混凝土接合面之间预设了裂缝的开展路径。在坝体加高之前,老坝体的纵向裂缝初始状态取开裂到144.57m高程,比现在探测到的状态148m高程略深。根据有限元的计算成果,主要对以下3个关键部位进行了分析研究。

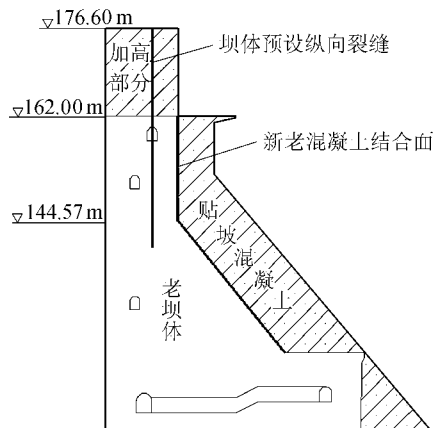


图4 4号坝段加高示意图

3.1 纵向裂缝

缝面特征点位置见图5。图6给出了纵向裂缝各特征点处张开度随时间变化曲线。从图6中可以看出,坝体的预设纵向裂缝张开度随气温发生周期性变化,冬天有张开的趋势,夏天有闭合的趋势。纵向裂缝的开度随着高程的降低而减小,呈撕裂状态。坝体的纵缝在第300天(2006年1月26日)和第646天(2007年1月7日)时,纵缝的开度达到最大值。

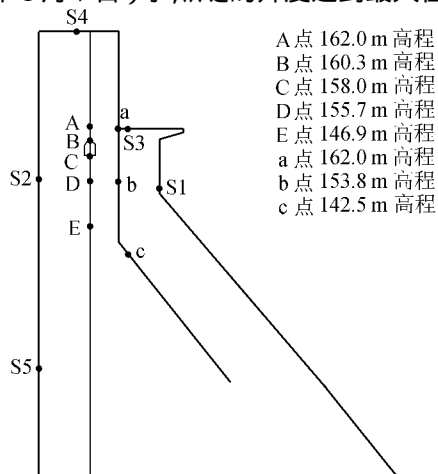


图5 坝体特征点位置示意图

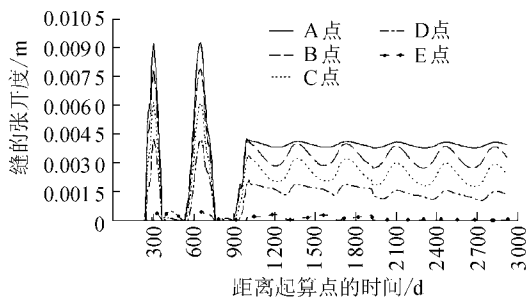


图6 纵向裂缝特征点处张开度随时间变化曲线

当坝体贴坡和加高部分完成后,纵向裂缝的张开度明显减小,并随气温发生周期性变化。顶部加高部分未出现开裂现象,老坝体已有的纵向裂缝基本处于张开状态,但没有向下开展的趋势,处于稳定的状态。出现这种情况主要有3个方面的因素:①水位。当第1917天(2010年7月1日)坝前水位抬高到170m高程时,对缝的张开度起到了一定的限制作用,E点处的纵向裂缝基本处于闭合状态。②新浇筑混凝土的温度保护作用。贴坡混凝土完成以后,原暴露在空气中的老坝体下游面成为内部边界,温度变化幅度明显减小,导致坝体出现纵向裂缝的温降荷载也相应减少。③新浇贴坡混凝土对老坝体的压紧作用。

3.2 坝踵应力分析

从整个计算过程来看(图7),坝踵处应力指标均随四季变化而发生周期性变化,夏季压应力水平增大,冬季减小。大坝加高完成后,坝踵应力没有明显的恶化现象。在坝前水位抬升前,由于新增混凝土的自重作用,坝踵处竖直向压应力水平有所提高,数值上提高了约1.7MPa。当坝前水位抬高至170m高程后,由于水压力和温度荷载的共同作用,坝踵处竖直向压应力水平随时间变化的幅值明显减小,变化范围由原来的 $-5.2 \sim -15.98$ MPa减小到了 $-2.0 \sim -9.27$ MPa。

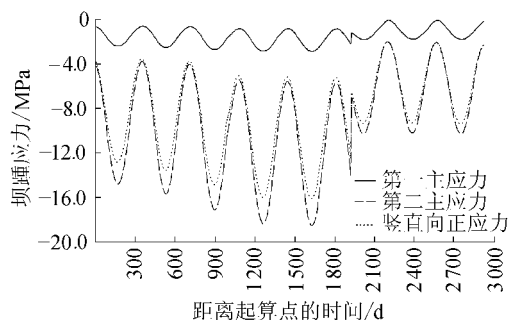


图7 4号坝段坝踵处应力曲线

通过以上分析可知,大坝加高完成后,在高水位运行时,坝踵处的压应力水平有所减小,但坝踵一直处于受压状态,没有出现较大的拉应力。

3.3 新老混凝土接合面

新老混凝土接合面在冬季会出现部分张开现象

(图8)结合面开裂到142.5m高程附近停止延伸,受到下游新坝面温降作用,坝体的新老混凝土接合面在浇筑完成的第1次温降过程中发生开裂,随着混凝土龄期的增长,混凝土的弹性模量增大,在经历第2次温降过程时,结合面最大开度有所增大,最后趋于稳定。缝的开度随气温发生周期性变化,冬季张开,夏季闭合。计算结果所反映出的规律与现场试验得到的监测结果^[13]基本一致。

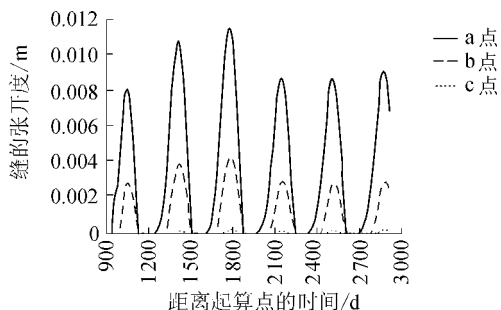


图8 新老混凝土接合面特征点处张开度随时间变化曲线

图9给出了考虑新老混凝土张开时坝面各特征点应力时程曲线,从图9中可以看出,坝体表面的应力随外界温度作周期性变化。当坝前水位抬高到170m高程时,坝体表面的应力水平有所减小,增加的水荷载对结合面的张开度起到了一定的限制作用。当坝前水位抬升后,水荷载作用在S2点横截面处的弯矩值增大,但是第一主应力却减小了(图9),这主要是由于此处应力受水位和温度的双重影响,水位抬升以后,S2点处温度变化变小,第一主应力的减小说明温度荷载对S2点处的应力影响更大。

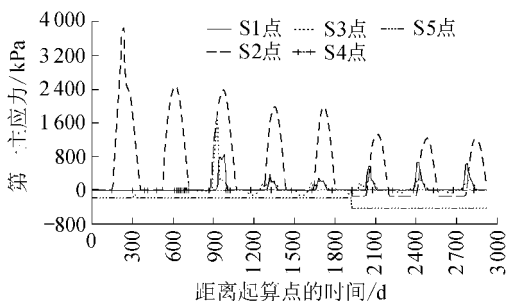


图9 考虑新老混凝土张开时坝面各特征点应力时程曲线

图10给出了考虑新老混凝土完全黏结时坝面各特征点应力时程曲线。从图9和图10的比较中

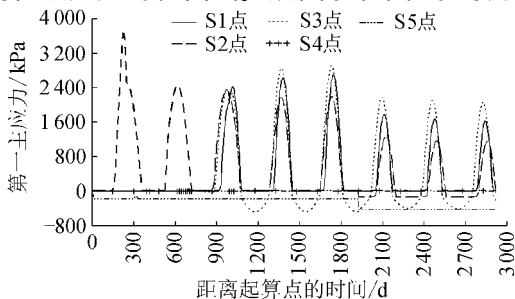


图10 考虑新老混凝土完全黏结时坝面各特征点应力时程曲线

可以看出,新老混凝土接合面张开后,对温降产生的拉应力起到了释放作用,在张开部位附近的应力明显减小,但对坝踵处的应力影响比较小。冬季上游坝面有向上游变形的趋势,结合面张开对上游面的应力有一定的释放作用。夏季结合面闭合,贴坡混凝土和老坝体紧贴在一起,共同抵抗外力。所以建议对新老混凝土接合面采取允许其开裂、控制其开裂深度和张开度的处理方式。

4 结论与建议

a. 重力坝老坝体出现的纵向裂缝主要是由于温度变化产生的温度应力引起的。在温降的过程中,容易造成大坝顶部混凝土开裂,缝尖端应力集中效应的存在使得纵向裂缝向深处开展,一直到达一个稳定的状态。老坝体纵向裂缝在高温季节闭合,在低温季节张开。

b. 大坝加高工程完成后,顶部加高部分未出现开裂现象,老坝体已有的纵向裂缝基本处于张开状态,但没有向下扩展的趋势。主要因为,抬高后的坝前水位对缝的张开度起到了一定的限制作用,贴坡混凝土完成以后,原暴露在空气中的老坝体下游面成为内部边界,温度变化幅度明显减小,导致坝体出现纵向裂缝的温降荷载也相应减少,新浇贴坡混凝土对老坝体的压紧作用。

c. 大坝加高完成、水位抬升以后,坝踵压应力水平有所减小,但是始终处于受压状态。

d. 新老混凝土的接合会在大坝加高完成后第一个温降过程中开裂,开裂后对其周围的应力起到了释放作用,但对坝踵处影响较小。建议采取允许新老混凝土接合面开裂、控制其开裂深度和张开度的处理方式。

(上接第 22 页)

5 结 语

算例表明,ASMIWPSO 算法比 PSO 算法的优化结果更好。

适应度排序计算的 a_i^j 和 b_i^j 数值控制在稳定的范围内,似可用于修正学习因子,使得适应度差的粒子增强学习能力,适应度好的粒子减弱学习能力。

坝坡稳定风险分析,要计算多个不同水位下的最小安全系数,ASMIWPSO 算法更准确地求出最小安全系数,提高了计算坝体边坡失稳、失效概率以及大坝允许风险标准和进行风险评价的可靠性^[7]。

参考文献:

[1] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization
水利水电科技进展 2009 29(1) Tel 025-83786335

参考文献:

[1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
[2] 张国新, 朱伯芳, 吴志朋. 重力坝加高的温度应力问题[J]. 水利学报, 2003(5): 11-15.
[3] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
[4] 杨庆生, 李春江, 弓俊清. 大体积混凝土凝固过程的温度和应力仿真与控制[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(9): 948-953.
[5] 王水林, 邓建辉, 葛修润. 改进的拉氏乘子法在接触摩擦问题中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 64-67.
[6] SIMO J C, WRIGGER P, TAYOR R L. A perturbed lagrangian formulation for the finite element solution of contact problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1985, 50: 163-180.
[7] KIKUCHI N. A smoothing technique for reduced integration penalty methods in contact problems[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1982, 18: 343-350.
[8] 雷晓燕, SWOBODE G, 杜庆华. 接触摩擦单元的理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 23-32.
[9] 邵伟, 金锋, 王光伦. 用于接触面模拟的非线性薄层单元[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39(2): 34-38.
[10] HAUG D, SAXCE G. Frictionless contact of elastic bodies by finite element method and mathematical programming technique[J]. Computers Structures, 1980(11): 55-67.
[11] 赵兰浩. 考虑坝体-库水-地基相互作用的有横缝拱坝地震响应分析[D]. 南京: 河海大学, 2006.
[12] 赵兰浩, 李同春, 牛志伟. 坝体-库水动力相互作用的数值求解格式[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 491-495.
[13] 肖汉江, 李祖民. 大坝加高试验温度应力仿真计算与原型监测对比分析[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(S1): 54-56.

(收稿日期 2008-07-08 编辑: 方宇彤)

[C]//Proc IEEE Int Conf on Neural Networks. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995: 1942-1948.

[2] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
[3] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
[4] 冯骏, 薛云灿, 江金龙. 一种新的改进粒子群算法研究[J]. 河海大学常州分校学报, 2005, 20(1): 10-13.
[5] 赵明阶, 何光春, 王多垠. 边坡工程处治技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
[6] 陶俊波. 系统分析的研究和在水利工程的应用[D]. 南宁: 广西大学, 2008.
[7] 麻荣永. 土石坝风险分析方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

(收稿日期 2007-10-22 编辑: 高建群)