

混凝土拱坝坝肩的安全评价问题综述

周秋景 李同春

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 指出可能影响混凝土拱坝安全的关键点为拱坝坝肩的稳定。阐述坝肩稳定评价中主要包括的 4 个方面内容: 坝肩岩体的模拟方式、坝体和坝肩的联合作用、失稳机理和失稳判据。从这 4 个方面详细阐述了岩体的模拟方法、坝肩安全稳定分析方法和判断准则, 以及失稳机理, 并对各个方面加以简要评价, 指出了目前较为适用的方法和准则, 给出了一些建议。

关键词 拱坝坝肩; 岩体模拟; 失稳机理; 失稳判据; 综述

中图分类号 : TU311.2 ; TV331

文献标识码 : A

文章编号 : 1006-7647(2007)03-0081-05

A review of safety evaluation of concrete arch dam abutments // ZHOU Qiu-jing, LI Tong-chun(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : It is pointed out that the stability of the dam abutment is a key factor affecting the safety of concrete arch dams. Its stability evaluation should be performed from the following aspects, i. e. the method of rock simulation, the co-action of the dam and abutment, the mechanism of abutment instability, and the criterion of instability. Based on a detailed analysis and brief evaluation, some effective methods and criteria are given, and some suggestions are made.

Key words : arch dam abutment; rock simulation; mechanism of instability; criterion of instability; review

拱坝是一种适合于山区峡谷地带的具有较高超载能力的坝型。目前国家在实施西部大开发中充分考虑了西部地区尤其是西南地区的丰富水力资源, 规划修建很多电站, 其中大部分都采用拱坝这种坝型, 原因在于拱坝超载能力强且较经济, 但很大的一个问题即我国西南地区处于环喜马拉雅地震带内, 地震发生较多而且强度较大, 给拱坝的安全稳定造成很大的隐患。目前从已建拱坝来看, 温变、地基沉降、荷载以及地震等引起的坝体开裂对坝体安全影响不大, 最主要的影响因素为坝体自身或者支撑坝体的岩体的滑动^[1], 即拱坝坝肩稳定性。

近 10 年来, 国内很多学者和设计人员都对拱坝坝肩稳定问题充分关注, 并从不同方面加以分析和检验, 主要方法包括模型试验方法和数值分析等。在模型试验方面, 许多学者利用超载或降低材料强度的方法来得到坝体结构的安全系数, 如李朝国等^[2]、李天斌^[3]、姜小兰等^[4]。数值分析方法较多, 包括刚体极限平衡法^[5]、有限元法^[6]、弹簧元法^[7]、离散元法^[8]、块体理论^[9]、非连续接触单元等。如傅坚毅^[5]采用刚体极限平衡法、顾冲时^[6]采用有限元

方法、张伯艳等^[10]结合有限元和刚体极限平衡法来分析, 这些分析计算方法在文献 [11-13] 中都有较完整的叙述。目前规范采用刚体极限平衡法用安全度的概念评价坝肩的稳定程度, 作为补充和改进, 武清玺等^[14]结合可靠度来评价坝体稳定性; 崔玉柱等^[15]考虑地震荷载作用下的坝肩稳定, 提出了动力稳定安全度的概念; 邵国建等^[16]则提出了判断坝肩稳定的干扰能量法。

从上述研究成果来看, 目前在坝肩安全稳定研究的多个方面包括模型试验、数值模拟计算、安全度评价等都有较大的进步, 但是有几个关键的问题仍然没有得到很好的解决。这些问题包括: ①坝肩岩体的正确模拟, 这是计算结果是否准确的前提条件; ②坝肩失稳判据的确切定义及其合理解释, 这是合理判断坝肩安全稳定的基本依据; ③坝肩与坝体如何在分析中联合考虑, 这对于分析计算的精度和准确程度有很重要的影响, 而且是不容忽视的重要因素之一; ④拱坝坝肩破坏的真实机理, 这是研究拱坝和坝肩安全稳定的最关键问题, 也是上述几个方面能够正确进行的保证。这 4 个问题在坝肩稳定和拱

坝安全的分析评价中起到至关重要的作用。

1 岩体模拟

早期拱坝坝肩稳定分析中,基本上都采用刚体极限平衡法,包括条分法、等 K 法等。在这种方法中,岩体被认为是完全刚性的,岩体根据大的软弱夹层被划分成几个部分,这些岩块只有刚体移动而没有自身的形变。这种形式虽然与实际情况有很大差异,但是由于计算简单、经验数据多,到现在仍然是人们计算所采用的主要方法。但是这种方法由于对岩体和间隙自身特性的过分简化,往往造成设计安全程度过高而浪费大量的物力财力,随着结构优化程度要求的不断提高,这种模拟形式最终将难以适应形式的发展。

在有限元法中,由于采用的是连续介质力学的方法,所以认为坝肩岩体是连续介质,分析中充分考虑岩石材料和岩体结构面的本构关系,通过划分很多单元来求得岩体内部各处的应力和应变,由应力和位移的大小评价坝肩岩体的安全和稳定。为了更准确地判定结构的安全程度,有限元法和刚体极限平衡法相结合考虑时,岩体被视为连续介质,只是将单元节点尽可能布置在岩体裂隙周围,一旦求出各个节点上的应力和应变,则据此可得宏观的坝肩推力和稳定系数。该方法中岩体和裂隙等都被视为连续介质。这种将有限元法同极限平衡法相结合的形式虽然比刚体极限平衡法要有优势,但与实际情况仍有较大差异,这种差异是显然的,岩体中存在大量的裂隙和节理,而它们不是被忽略就是被很大程度地简化了,至于其他一些因素比如裂隙渗流的影响等考虑起来比较复杂,并且对于连续岩体实际性质的掌握尚有大量缺漏,如对其破坏机理和应力应变关系都没有清楚的认识,尤其是在动力情况下,这方面的知识就显得更加薄弱。SL203—97《水工建筑物抗震设计规范》中规定岩体动力强度和混凝土动力强度较静力强度可以提高30%,但事实上对动力强度的影响因素很多,包括岩石自身特性、试验设备、加载方式、加载率等,一般认为岩体强度在冲击荷载作用下随着加载率的增加会有所增加,但增加的幅度各有不同,如戴俊^[17]指出加载率对静载强度高的岩石没有对静载强度低的岩石作用明显,同时加载率对拉伸强度的影响没有对压缩强度的影响明显;文献[18]中材料强度随频率增加而有所降低。因此,岩体动力强度和混凝土动力强度较静力强度均提高30%的做法显然过于笼统,不能真实反映材料的动力特性。其他方面如动态情况下的弹性模量、泊松比等一些关键参数随应变率或者地震频率的变

化将作何种变化均没有确定的结论。

对于非连续介质理论如块体理论^[9]、弹簧元^[7]、离散元^[8]、不连续变形分析等,则是将坝肩岩体视作有连接的松散体,可以考虑结构不连续位移,如开裂、滑移和大变形情况。这种理论有一定的合理性,因为事实上坝肩岩体的强度是受岩体软弱带或软弱夹层控制的,在完整块体岩石内部发生破坏是不太可能的,一般都是沿软弱夹层破坏,而非连续介质理论能够充分考虑岩石间软弱夹层、裂隙的变形和位移。但目前看来这些理论发展还很不完善,存在较多缺陷,如在用弹簧元、离散元分析时,很多情况下假设块体是刚性的和只考虑结构面的强度及变形,这与事实有较大差异。而且离散元、不连续变形分析方法等目前多数用在二维分析中,三维分析技术尚不太成熟。

由以上几种主要计算方法的研究来看,目前岩体模拟主要为整体刚体、连续介质体和有连接的小块刚体,尽管现在前者应用较广,但随着计算技术和细观与宏观相结合分析物体性质这两个方面的迅速发展,后两种将具有很大的发展潜力,尤其是最后一种。目前陈胜宏^[19]提出将块体单元法进行改进,不仅仅考虑结构面的强度和变形,而且考虑各个块体的变形特性。未来的发展趋势是将后两者联合起来,充分考虑岩石连续性和岩体裂隙的不连续性,使得结果越来越精确。在考虑岩石性质时,岩石的应力应变关系和裂隙体的应力应变关系是非常关键的因素。目前静力情况下的这种关系尚未能够较精确地掌握,如岩石性质受到各个方面的影响,包括温度、水和时间等,使得坝肩岩石材料在水库蓄水以后如弹性模量和强度等性质均产生较大的改变,这种岩石材料在多种因素作用下性质的变化规律需要加以研究。至于动力情形,现有的多数动力荷载研究的是冲击荷载,在地震这种复杂荷载作用下,岩石性质会产生怎样的改变,对这种关系的掌握还相当薄弱。这些对数值计算的精度有很大影响,是现阶段需要重点解决的问题。

2 失稳判据

对于拱坝安全而言,最关键的影响因素之一就在于坝肩的稳定。但对于如何判断坝肩失稳和如何评价坝肩的稳定程度,一直以来都没有确切的定义,只是用经验的安全系数来说明。事实上,坝肩岩体的破坏有多种形式。如Goodman将岩体破坏分为平面体滑动、楔形体滑动和崩塌3种基本破坏形式,如图1所示。而陈胜宏^[19]认为块体也有3种滑动破坏方式:无滑动面的自由脱离、单面滑动和双面滑

动。显然上述二者是统一的。目前刚体极限平衡法只能考虑单面和双面滑动,对于崩塌或者自由脱离是无法考虑的。

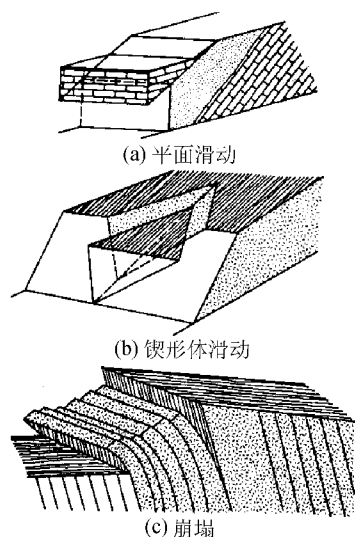


图1 岩体破坏形式示意图

一般采用的刚体极限平衡法将坝肩根据软弱面划分为刚性体,找出其滑动力和抗滑力,以抗滑力和滑动力的比值作为安全系数。此安全系数经过数十年大量实际工程的检验,现在已经比较成熟可靠,但方法中采用多种假设,如已知滑动面、块体为刚体、滑动面各点的抗力方向一致、滑动面上垂直于滑动方向的剪应力为零、仅考虑力矢平衡而忽略转动平衡等,这些与实际情况明显不符。尽管对刚体极限平衡法有很多改进,但仍旧有很大的偏差并可能导致不合理的结果。在静力荷载作用时刚体极限平衡法及其改进方法都可以应用,但如果在地震等动力荷载作用时,坝肩的裂隙变形、坝肩结构面抗剪参数的变动等对坝肩的稳定影响会变得非常显著,使得采用这种方法来判断坝肩在动力情形下的稳定将是十分欠考虑和不适当的。而且即使在静态情形下,由于其前提与事实有很大差异,随着社会对安全程度要求的不断提高和对工程要求的经济性,这种方法也变得越来越不合时宜。

文献[20]提出了点安全系数的边坡稳定判断方法,但点安全系数实质上是经典力学的强度条件,反映的是 Mohr-Coulomb 强度准则。因为在非线性有限元分析中,材料屈服区必须在屈服面内,故点安全系数原则上不会小于1,且各点给出的点安全系数与各点抗滑力的方向是相同的,各点之间并不相同,因此最小等值线并不代表破坏路径,主要反映的是岩体材料的强度储备情况,不能完整反映坝基岩体在各种荷载和自身性质等因素综合作用下的失稳条件。

陈胜宏等^[9]提出了弹黏塑性块体的方法,这种方法假定岩石块体为刚体,只考虑结构面的变形和

强度特性,在此基础上建立块体系统的整体平衡方程、结构面的变形与块体位移的几何相容方程,以及结构面的弹黏塑性本构方程,即可推导出求解块体系统的位移与稳定的基本方程。这种方法考虑块体安全系数的思路是降低结构面材料强度,一旦低到某个程度,计算则发散而无法继续,由此可由强度的储备情况得到块体或者块体组合的安全系数。总体来说,这种方法能够考虑块体的单面滑动、双面滑动和脱离3种失稳模式,且能考虑块体组合的情况和搜索危险组合,而且还能够与其提出的网络渗流方法相结合来分析坝肩的稳定情况,比刚体极限平衡法要合理,但这种利用强度储备来评价安全程度的方法依然存在不足之处,即在运算过程中降低结构面材料强度时,坝肩岩体变位增大,拱坝应力和拱端推力相应会进行调整,从而得出的结果会与事实不符,至于误差的大小则与具体情况有关。

宋战平等^[21]在安全系数强度储备概念基础上提出了动抗滑变形安全系数法,该方法以坝体拉应力作为坝肩岩体抗滑稳定性评价标准,综合考虑非线性坝体和坝基节理、裂隙岩体的动静耦合作用,试图以坝体应力作为坝肩裂隙岩体潜在滑动块体失稳的控制标准。这种方法对于某些特定情况是适用的,但由于拱坝破坏的机理并非一定是由于坝体应力过大造成的,因此这种方法具有较大的片面性和局限性。

邵国建等^[16]基于能量原理提出了判断失稳的方法——干扰能量法。这种方法从摩擦理论和矢量几何出发,基于非线性有限元计算成果,导出了三维可能滑体的抗滑稳定安全系数的计算公式,并根据工程稳定问题的力学机理,建立了稳定评判的干扰能量法来确定岩体的可能滑体、危险滑向和相应的稳定安全系数,给出了利用静力法和干扰能量法联合应用的评判体系。这种方法从力学上稳定的基本概念出发,以能量为判断依据,应有较大的发展空间,而且目前已经取得一些成果,但由于结果同一般的安全系数之间的关系不好比较,具体效果还有待检验。

从以上各个方面的研究来看,目前失稳的判据主要集中在广义力或者强度的研究上,这其中包括总的推力和局部应力,通过推力或者应力同阻力或者强度的比较,得出安全性的评价,而且这种评价基本以强度储备为依据。显然这仅仅是某个时刻结构安全性的评价,难以考虑或者少考虑运行多年后的安全性以及是否经济等因素,而且目前位移或者应变因素很少加以考虑。至于从能量方面加以考虑,是一个相当好的思路,但目前方法还远远不够成熟。

3 坝肩与坝体的联合考虑

在分析拱坝坝肩的安全稳定时必须与拱坝坝体一同考虑,这是因为拱坝坝体和坝肩在建成后运行过程中是一联合体并且相互作用、相互影响,仅考虑坝肩是没有任何意义的。目前规范中分析拱坝的安全时,坝肩部分的稳定分析采用刚体极限平衡法,而坝体部分主要以强度来衡量,并且强度校核采用弹性力学的分析方法,显然两者不相协调,且将坝体与坝肩视为两个独立的分析系统,各自分析其稳定性,不考虑二者的耦联,势必无法正确合理地进行分析。因此如何合理地将坝体和坝肩联合起来考虑也是稳定分析中十分重要的一个方面。

在一般的有限元分析中,坝体和坝肩都采用连续单元模拟,将二者作为一个整体考虑,这样得到的结果会与实际情况有较大差异,因为坝体中存在各种结构缝,坝体同坝肩结合处存在软弱面,坝肩岩体内部存在软弱夹层,它们对坝肩稳定和坝体应力有较大影响。因此目前在有限元计算时,一般用连续单元模拟拱坝坝体,用考虑岩体构造面变形的非连续接触单元模拟拱坝坝肩^[21];或者坝体和坝肩采用连续单元模拟,但二者结合部位采用接触单元或夹层单元,将二者联合起来考虑,可采用的接触单元现在包括 Goodman 单元、Fenves 采用的三维接触单元、动接触模型^[22]以及宋战平等^[23]提出的动接触单元。如张伯艳等^[22]将坝体、库水和基础采用有限元模拟,对于坝体横缝和坝肩潜在滑动体的各个接触面采用接触非线性理论求解,通过这种方式将坝体和坝肩联合起来考虑,能够比较合理地考虑坝体横缝、坝肩节理、结合面对坝体坝肩应力应变以及稳定性的影响。

对于块体理论、离散元、刚体弹簧元等,由于它们本身就是考虑离散体的,因此适宜模拟有很多裂缝和软弱夹层的坝肩岩体,但对坝身则较难考虑,因此一般首先用拱梁分载法分析坝身应力或者坝肩推力,然后将推力作为荷载加到坝肩岩体上面,再利用上述方法进行坝肩稳定计算,如陈胜宏^[19]提出的拱梁系统同坝肩块体系统计算方法。事实上,这种情况下是将坝体和坝肩分别考虑,即使静力条件下也很难考虑坝体和坝肩的联合作用,动力情况下同实际情况差别就更大了。因此对于这类方法来说,解决坝体、坝肩和库水等体系的耦合作用是难点也是重点。

4 拱坝坝肩的破坏机理

对于坝肩的安全稳定分析研究而言,无论采用

何种分析方法和破坏判断准则,都要建立在这样一个基础之上,即坝肩的确切破坏机理。由于分析拱坝坝肩安全稳定的意义在于研究拱坝的安全稳定,因此研究坝肩的破坏机理必须同拱坝坝体同时考虑,一旦坝体本身已经破坏或者不存在,再研究坝肩的破坏就失去了意义。在坝肩的破坏机理研究上,现在主要的研究方法是根据相似原理采用与原型坝体和地基等相似的模型所做的试验。

在文献[1]中作者采用强度储备与超载相结合的方法对四川铜头双曲拱坝的安全稳定性及破坏形式进行试验研究,结果表明模型坝体本身没有发生破坏,主要是坝肩及其抗力体部位出现破坏,破坏原因在于水压力和温度荷载作用下坝肩上游岩体发生开裂并出现裂缝,随着荷载的进一步加大,裂缝条数增多,开裂程度加大并且影响到坝体,最终使坝体失去承载能力。在张林等^[24]对金沙江溪洛渡高拱坝进行的模型试验研究中,采用超载试验方法,得到坝体和坝肩破坏的原因,坝肩岩体材料发生脆性破坏,岩体中节理裂隙的端部应力集中,造成岩桥拉撕破坏,随着荷载的进一步加大,使得上下节理贯通,形成阶梯状复合破坏面。同样在黄国军等^[25]对牛头山拱坝的试验研究中也得出坝肩岩体及基础破坏严重而坝体本身无太大破坏的结论。而在姜小兰等^[4]对构皮滩拱坝、江口双曲拱坝所做的模型试验以及李天斌^[3]对小湾水电站所做的模型试验中,认为坝肩岩体即使在较大的超载情况下也不会发生破坏,破坏的原因在于坝体自身材料强度不够,首先在坝体一些部位产生裂缝并导致坝肩受力情况发生变化从而产生较大变形,继而裂缝进一步加大,坝体变形增大,最终丧失承载能力。由以上多个模型试验结果可以看出拱坝破坏形式并不相同,主要在于坝体本身和坝肩部位相比较哪个部位比较薄弱或者受外界影响更大,因此拱坝的破坏机理不尽相同:一种可能是由于坝肩岩体开裂或者坝肩变形过大最终导致坝体丧失承载能力;另外一种可能是坝体材料强度不够导致坝体本身出现裂缝并不断扩张,最终影响到坝肩并导致结构的整体破坏。

5 结 论

在对拱坝进行安全判定和分析中,有很多因素如库水、淤沙、坝体裂缝、温度荷载、地震荷载、材料性质改变等需要考虑,其中坝肩稳定问题是非常关键的环节。从以上分析可以得出结论如下:

a. 在坝肩的稳定分析中,岩体得以正确模拟是数值分析正确合理的先决条件。为了合理模拟岩石材料,不仅要考虑施工期和运行初期的情况,还必须

考虑在水库蓄水以后的长期强度和弹性模量的变化规律等,对于动力情况,要考虑不同的岩石材料性质随频率和应变率改变时的变化情况,这方面目前考虑较少,是需要重点解决的问题。

b. 由于坝体和坝肩在运行过程中是一体的,必须考虑二者的耦联作用。在一般的有限元分析中,目前在两者结合部位和裂隙等处主要采用夹层单元或者接触单元,可以比较合理地解决两者的耦联作用,但在不连续方法如离散元等方法中还没有得到较好的解决,多数首先采用拱梁分载法计算出坝基推力,然后再单独对坝肩进行分析。显然如何将连续体(坝体、块体岩石)和非连续体(软弱夹层、裂缝)等综合起来考虑是未来努力的方向之一。

c. 至于坝体坝肩如何发生破坏,目前主要根据相似原理采用模型试验的方法来确定,一般认为最主要的影响因素在于坝肩比较薄弱,变形过大最终导致坝体丧失承载能力;另外一种可能是坝体本身强度不够导致裂缝生成和扩展直至整体破坏。当然,模型毕竟是模型,不太可能完全相似于原型。而且到目前为止,真正的拱坝失事很少,因此具体原因还有待考查,这样使得目前拱坝和坝肩安全稳定的判断标准和评价指标缺乏足够的依据,不够准确或者有失全面。现在国内很多建于20世纪五六十年代的坝体处于生命周期的后半期,对于它们的各种运行情况和变化值得密切注意,以积累宝贵资料。

d. 在坝肩的安全稳定分析中,目前主要考虑强度或者应力方面的安全,而且主要是施工期和运行初期阶段,对于结构的位移或者应变以及长期表现关注不够。考虑结构优化和经济指标时,主要是考虑施工期基岩和坝肩开挖填充方量,关于坝肩开挖深度和处理方式对坝体运行后期可能产生的维护费用如基岩重新灌注、裂缝修补等均未考虑,但事实上这些都应该包含在内。

参考文献:

[1] 汝乃华. 拱坝开裂的历史经验[J]. 水利学报, 1990(9): 17-25.

[2] 李朝国, 张林. 拱坝坝肩稳定的三维地质力学模型试验研究[J]. 成都科技大学学报, 1994(3): 73-83.

[3] 李天斌. 拱坝坝肩稳定性的地质力学模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1670-1676.

[4] 姜小兰, 赖跃强, 岳登明, 等. 构皮滩双曲拱坝三维地质力学模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 27-30.

[5] 傅坚毅. 板贝拱坝坝肩稳定分析研究[J]. 湖南水利水电, 2002(2): 8-9.

[6] 顾冲时. 有限元法在分析拱坝坝肩稳定中的应用[J]. 大坝观测与土工测试, 1996, 20(3): 36-39.

[7] 张建海, 范景伟, 何江达. 用刚体弹簧元法求解边坡、坝肩动力安全系数[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 387-391.

[8] HARRISON H B. Some recent applications of the discrete element method[J]. Computers & Structures, 1991, 41(6): 1249-1254.

[9] CHEN Sheng-hong, SHAHROUR I, EGGER P, et al. Elastoviscoplastic block element method and its application to arch dam abutment slopes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(3): 171-193.

[10] 张伯艳, 陈厚群. 用有限元和刚体极限平衡方法分析坝肩抗震稳定[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 665-670.

[11] 陈厚群, 张伯艳, 涂劲. 浅论拱坝坝肩抗震稳定[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 40-44.

[12] 陈厚群. 高拱坝抗震分析和坝肩动力稳定性研究[J]. 水力发电, 2000(8): 51-53.

[13] 柴军瑞. 高拱坝坝肩岩体动力稳定性分析综述[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2001, 20(4): 502-504.

[14] 武清玺, 王德信. 拱坝坝肩三维稳定可靠度分析[J]. 岩土力学, 1998, 19(1): 45-49.

[15] 崔玉柱, 周元德, 张楚汉, 等. 坝肩岩体地震残余变形对小湾拱坝安全度影响[J]. 水利水运工程学报, 2001, 9(3): 13-17.

[16] 邵国建, 卓家寿, 章青. 岩体稳定性分析与评判准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 691-696.

[17] 戴俊. 岩石动力学特性与爆炸理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

[18] 席道瑛, 刘小燕, 张程远. 应力控制疲劳载荷作用下循环硬化的应变响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1807-1810.

[19] 陈胜宏. 高坝复杂岩石地基及岩石高边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

[20] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.

[21] 宋战平, 李宁, 陈飞熊. 高拱坝坝肩裂隙岩体的三维非线性抗震稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 361-366.

[22] 张伯艳, 陈厚群, 涂劲. 基于动接触力法的拱坝坝肩抗震稳定有限元分析[J]. 水利学报, 2004(10): 7-12.

[23] 宋战平, 李宁, 陈飞熊, 等. 拱坝有缝坝体-坝基系统的非线性抗震分析[J]. 水利学报, 2004(6): 33-40.

[24] 张林, 范景伟, 何江达. 拱坝坝肩含断层节理岩体破坏机理研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2000, 32(1): 7-11.

[25] 黄国军, 周澄, 赵海涛. 牛头山双曲拱坝整体稳定三维地质力学模型试验研究[J]. 西北水电, 2004(2): 49-52.

(收稿日期 2006-10-16 编辑 高建群)