

文章编号: 1000-7598-(2008) 增-069-05

白鹤滩水电站拱坝推力对坝肩的影响分析

王瑞红¹, 李建林¹, 蒋昱州², 刘 杰¹, 周济芳³

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098;
3. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072)

摘 要: 对于地质条件复杂的高拱坝, 坝肩的变形及稳定性对拱坝的受力状态有很大的影响, 在研究过程中必须考虑拱坝与坝肩之间的相互作用。为降低三维有限元建模的难度和更好地模拟坝肩复杂的地质构造, 分别建立坝肩和拱坝的有限元模型, 采用试算迭代的方法考虑二者之间的相互作用; 并运用卸荷岩体力学理论的方法分析坝肩岩体开挖卸荷后, 在拱坝推力作用下的应力应变情况。结果表明, 考虑拱坝推力后坝肩槽上、下游边坡位移变化不大, 变幅在 1 cm 左右; 拱坝推力对拱坝端坡有比较明显的影响, 在推力作用下, 边坡向坡内有一定的变形。

关 键 词: 高拱坝; 坝肩; 相互作用; 卸荷岩体; 试算迭代

中图分类号: TV 642

文献标识码: A

Analysis of influence of Baihetan arch dam thrust on dam abutment

WANG Rui-hong¹, LI Jian-lin¹, JIANG Yu-zhou², LIU Jie¹, ZHOU Ji-fang³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The deformation and stability of dam abutment have great influence on stress states of arch dam under complicated geological conditions. It is necessary to consider the interaction between arch dam and dam abutment. In order to built three-dimensional finite element model easier and describe complicated geological conditions better, arch dam finite element model and dam abutment finite element model are built respectively and the iterative calculation method is adopted to simulate the interaction between them. Based on the theory of unloading rock mass mechanics, the stress-strain state of dam abutment rock mass is studied under thrust force of arch dam after excavation unloading. The results show that the displacements of abutment slot both upstream and downstream are not remarkable. The effect of the dam thrust against the slope displacement can not be neglected.

Key words: high arch dam; dam abutment; interaction; unloading rock mass; iterative calculation

1 引 言

我国西南地区目前兴建的一批高拱坝工程都具有坝高、库大、地质条件复杂、地震烈度高等诸多特点, 因此坝肩与拱坝之间的相互影响是一个值得研究的课题。

常用的拱坝坝肩分析方法主要有刚体极限平衡法、有限元法、非连续数值力学方法 (DDA) 和数值流形 (NMM) 等等^[1-4]。刚体极限平衡法将拱坝与坝肩岩体分开考虑, 无法实现拱坝与坝肩之间力

的相互传递, 也无法准确地模拟在拱坝推力作用下坝肩岩体的应力应变情况。有限元法等数值方法虽然可以克服上述缺点, 建立坝肩与拱坝的整体模型进行分析, 但由于网格划分质量的限制, 不能模拟坝肩比较复杂的地质结构, 对于坝肩与拱坝相接的地方, 也难以很好的处理, 建模的难度比较大。

本文以金沙江白鹤滩双曲拱坝坝肩开挖高边坡稳定性分析为工程背景, 分别建立坝肩和拱坝的有限元模型, 采用试算迭代的方法且考虑二者之间的相互作用, 即降低了建模的难度, 又可以较为准确

收稿日期: 2008-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.90610029)。

作者简介: 王瑞红, 女, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事边坡岩体开挖卸荷力学特性方面的研究。E-mail: wrh@ctgu.edu.cn

地反映蓄水后拱坝与坝肩的实际应力应变状态。

2 工程概况

白鹤滩水电站位于金沙江下游的四川宁南县和云南巧家县境内，是一座以发电为主，兼有防洪、拦沙、改善下游航运条件等综合利用效益的大型水电站，属国家西电东送骨干电源点之一，大坝采用抛物线混凝土双曲拱坝，初拟正常蓄水位 820 m，最大坝高 277 m。相应库容为 $179.24 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，装机容量为 12 000 MW，是我国继三峡、溪洛渡之后开展前期工作的又一座千万 kW 级的水电站。

坝址所在河谷呈相对对称的“V”型，左岸坡缓，右岸坡陡；地层倾向上游偏右岸，主要出露 $P_2\beta_2 \sim P_2\beta_{11}$ 玄武岩。坝址区断裂构造较发育，无区域性大断裂带通过，也无大规模的顺河断层，仅发育数条 NW 或 NE 走向的陡倾断层斜切河谷，多属压扭性。岩体卸荷总体上较弱，从高高程往低高程风化程度和深度逐渐减小，且左岸风化和卸荷程度较右岸强烈。总体来说两岸岩体质量较好，右岸岩体质量好于左岸。左岸坝肩开挖边坡高约 300 m；右岸坝肩开挖边坡高约 480 m。

3 岩体力学参数的选取

在边坡工程中，由于开挖对岩体的扰动作用，使得开挖面附近的岩体应力重新分布，其力学特征表现为大面积的卸荷。卸荷会引起岩体质量的迅速劣化，因此卸荷岩体边坡的稳定分析中需考虑卸荷的作用^[5-8]，相应力学参数的选取也应考虑卸荷对岩体质量的损伤劣化作用。

3.1 卸荷岩体力学分析的基本方法

边坡开挖后岩体卸荷损伤，节理连通率增加，岩体质量劣化。不同区域的岩体卸荷程度不同，并且随着开挖的进行，岩体卸荷区域和卸荷程度也在不断地发生变化，因此卸荷分析的模拟过程应该是一个不断调整的动态过程，应根据开挖进程确定相应的卸荷区域，对不同卸荷区按其卸荷程度的大小采用相应的岩体力学参数^[9]。

具体计算时，首先根据地质资料建立相应的模型，代入初始岩体力学参数进行有限元分析，计算初始应力场和应变场。然后对模型进行卸荷来模拟开挖卸荷的过程。第 1 次卸荷后，对比分析初始应力场和开挖应力场，运用卸荷准则对其进行分析，判定岩体的卸荷程度，并按卸荷程度大小划分不同的卸荷区，同时调整各区内的岩体力学参数，以模拟岩体开挖后的损伤，以便对卸荷后的岩体质量进

行评价。第 2 次卸荷时，采用第 1 次卸荷后已调整的参数。直到边坡岩体开挖完成为止^[10-12]。

3.2 坝肩岩体力学参数的选取

本文采用工程岩体分级标准及岩体地质力学 RMR 分类方法，对比国家电力公司华东勘测设计院现场分类成果，对白鹤滩水电站坝肩边坡岩体质量进行综合评价。并在此基础上，通过水电工程规范推荐的方法及 Hoek-Brown 方法，结合分级计算岩体宏观力学参数法综合确定坝肩岩体的初始力学参数，见表 1。

表 1 拱坝坝肩岩体初始宏观力学参数
Table 1 Rock mass initial macromechanical parameters of arch dam abutment

(MPa)				
岩层	区块	E/GPa	c/MPa	$\phi/(\circ)$
$P_2\beta_1^1$	1	18	1.6	54.5
		18	1.6	54.5
		5	0.8	45
		6	0.8	45
$P_2\beta_2^2$	左岸	5	1.6	52.4
		6	1.6	52.4
		15	1.6	52.4
		15	1.6	52.4
$P_2\beta_3^3$	右岸	8	1.5	52.4
		9	1.5	52.4
		15	1.5	52.4
		15	1.5	52.4
$P_2\beta_4^4$	左岸	10	1.6	52.4
		11	1.6	52.4
		8	1	50.2
		10	1.1	50.2
$P_2\beta_5^5$	右岸	14	1.6	52.4
		15	1.6	52.4
		13	1.3	50.2
		12	1.2	50.2
$P_2\beta_6^6$	18	8	1	47.7
		18	1.6	54.5
$P_2\beta_7^7$	20	6	0.8	45
		17	1.6	52.4
$P_2\beta_8^8$	21	7	1	47.7
		7	1	47.7

4 坝体与边坡相互作用的分析方法

白鹤滩水电站大坝建成蓄水后，坝肩边坡岩体将承受上游水位压力及大坝传递过来的推力作用。这些作用是影响边坡稳定的重要因素，必须考虑水库蓄水后拱坝推力对边坡带来的影响。

在分析大坝与坝肩的相互影响时，由于该计算的主要目的是对坝肩边坡进行稳定性分析，为缩短建模时间，分别建立边坡和坝体三维有限元模型，其相互作用采用试算迭代的方法完成。该方法的具体步骤为：①首先对坝体模型的边界采用全约束，求出其在计算工况下的支反力；②将该支反力作为坝体对坡体的作用力作用在坡体上的坝肩开挖处，

求出此时坡体在坝肩处的位移值；③将该位移值作为强制位移施加于坝体，再次计算此时的坝体支反力；④不断重复步②，③的操作，直到求得的坝体支反力变化小于 5% 为止。

将坝肩与坝体分开建模，采用试算迭代法考虑二者之间位移和应力的传递，不但可以较为准确地模拟坝肩与拱坝之间的相互影响，而且还极大的降低了建模的难度，缩短了建模的时间，可以更好的模拟坝肩复杂的地质构造。

5 大坝推力的计算

5.1 大坝基本计算参数

根据金沙江白鹤滩水电站预可行性研究报告中提供的数据，白鹤滩拱坝（为混凝土抛物线型双曲拱坝）设计的基本参数见表 2，选取大坝计算参数见表 3。

表 2 白鹤滩拱坝设计基本参数
Table 2 Design basic parameters of Baihetan Arh Dam

参数	量值
坝顶高程 /m	827.00
坝底高程 /m	550.00
最大坝高 /m	277.00
坝顶厚度 /m	13.00
坝底厚度 /m	70.00
最大拱端厚度 /m	73.238

表 3 白鹤滩拱坝计算参数表
Table 3 Calculation parameters of Baihetan Arh Dam

序号	参数	量值
1	坝体弹性模量 E /GPa	19.6
2	坝体热胀系数 L /(1/°C)	1.0×10^{-5}
3	坝体泊桑比 μ	0.167
4	坝体重度 γ /(t/m ³)	2.45
5	坝体比热 c /(kJ/kg°C)	0.96
6	导热系数 k /(kJ/m·h·°C)	10.6

5.2 计算荷载及荷载组合

影响拱坝坝体应力的主要荷载有：自重、温度、水压力、地基扬压力、淤沙压力、风浪压力、地震荷载等。参照《混凝土拱坝设计规范》^[13]，结合白鹤滩工程情况，本项目仅考虑了起主导作用的几种荷载。考虑特殊荷载组合情况，即上游校核洪水位及相应下游水位+淤沙压力+自重+设计温升。由于温度应力是由温差引起的，这里考虑了温升的情况（经初略计算分析，温升比温降危险）。

各种荷载表述如下：

①水、沙荷载：上游正常蓄水位 820.0 m 及相应下游水位 600.00 m（2 道坝坝顶高程）；上游校核

洪水位 825.63 m 及相应下游水位 636.2 m。

②淤沙压力：上游淤沙高程为 710.0 m，淤沙浮重度为 5 kN/m³、内摩擦角为 0°。

③坝体自重：坝体混凝土重度为 24 kN/m³。

④温度荷载：见表 4。

表 4 设计温度荷载
Table 4 Design temperature load

T_m /°C	8.73	7.90	6.45	2.62	3.10	3.03	1.76	1.25
T_d /°C	0.00	0.00	5.49	12.93	13.71	13.72	8.85	7.50

注： T_m 为平均温度； T_d 为等效线性温差。

5.3 边坡三维模型的建立

5.3.1 三维有限元计算模型

计算所用数值方法为有限元法，其基本力学模型是弹塑性本构关系。有限元分析采用专业计算软件 ADINA 作为计算平台。所建模型顺河流方向长 850 m，垂直河流方向长 1 640 m，左岸高 864 m，右岸高 1 090 m，如图 1 所示。建模时，左岸考虑了对坝肩稳定影响较大的层间错动带 C_3 ，层内错动带 sh_5 ，断层 F_{14} 及 F_{17} ；右岸考虑了层间错动带 C_3 、 C_4 、 C_5 及断层 F_{18} ，层内错动带 sh_{18} 。其他对破碎带、断层等在计算岩体宏观力学参数时有所反映。

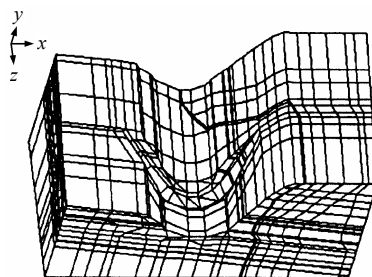


图 1 开挖后三维模型顺河流向视图
Fig.1 3-D model along the river after excavation

5.3.2 计算工况

本研究主要考虑 3 种工况：（1）开挖工况：考虑岩体开挖，按常规岩体力学方法分析。（2）卸荷工况：考虑岩体开挖，按卸荷岩体力学理论与方法分析。（3）拱坝推力工况：考虑大坝建成后对边坡的推力作用。

5.4 坝体模型的建立

采用 ADINA 软件建立拱坝三维有限元模型，如图 2 所示。建模时采用的有限元计算坐标与边坡模型一致。

5.5 大坝对两岸边坡推力的计算

根据上节中所选定的大坝计算参数及计算荷载

(荷载施加见图 3 所示), 可首先求得大坝在边界全约束的情况下的支座反力, 如图 4 所示。

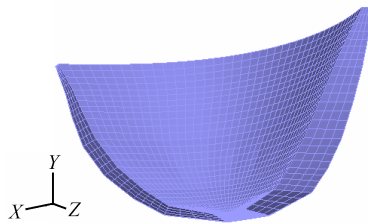


图 2 白鹤滩拱坝模型网格划分图
Fig.2 3-D model grid of arch dam

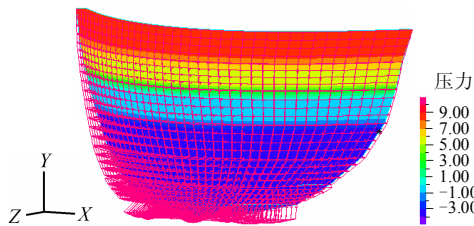


图 3 大坝三维模型上游荷载施加图 (单位: Pa)
Fig.3 Loads of arch dam (unit: Pa)

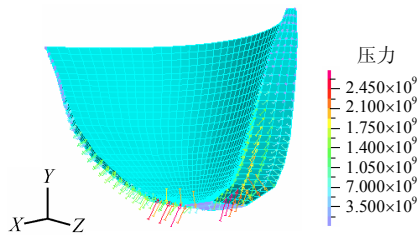


图 4 大坝三维模型支反力图 (单位: Pa)
Fig.4 Support reaction of arch dam (unit: Pa)

分段求出坝体支反力的合力后, 作为坝体对边坡的推力分别施加在左、右岸坝肩槽边坡上, 再按上节所述的计算方法反复迭代, 最后求得坝体支反力 (亦即大坝对边坡推力) 见表 5。

表 5 蓄水后坝体对边坡的平均推力

Table 5 Thrust force of arch dam after water filling

高程 /m	827~780	780~740	740~690	690~640	640~600	600~570	570~550	550
左岸推力 /MPa	1.4	1.3	1.4	2.2	2.8	3.0	2.9	3.5
右岸推力 /MPa	1.3	1.23	1.9	2.3	2.67	2.8	3.1	3.5

5.6 计算结果分析

5.6.1 考虑大坝推力后边坡的应力分布情况

为便于观察计算结果, 在三维模型上剖取了 1[#]~12[#]平切面。限于篇幅, 以下只选取开挖深度比较大的 8[#]平切面 (高程为 680 m) 的计算结果进行分析。

从应力等值线图中可以看出, 由于大坝推力的作用, 坝肩边坡开挖槽附近压应力增大, 应力十分集中。断层 F₁₈ 及错动带 C₂、C₃、C₄、C₅ 部位应力集中更为明显, 如图 5 所示。

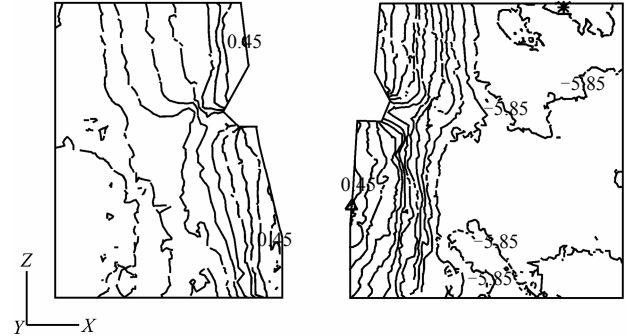


图 5 8[#]剖面第一主应力等值线图 (高程 680 m, 单位: MPa)
Fig.5 Maximum principal stress contours of section 8 under initial condition (unit: MPa)

5.6.2 考虑大坝推力后边坡的变形情况

考虑拱坝推力后平切面垂直河流向位移变化情况见图 6, 顺河流向位移变化情况见图 7, 竖直向位移变化情况见图 8。

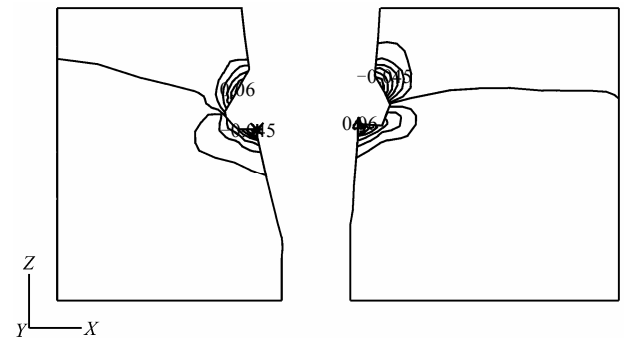


图 6 8[#]剖面垂直河流向相对位移等值线图 (高程 680 m, 单位: m)

Fig.6 The strain contours of section 8 along the x axis (unit: m)

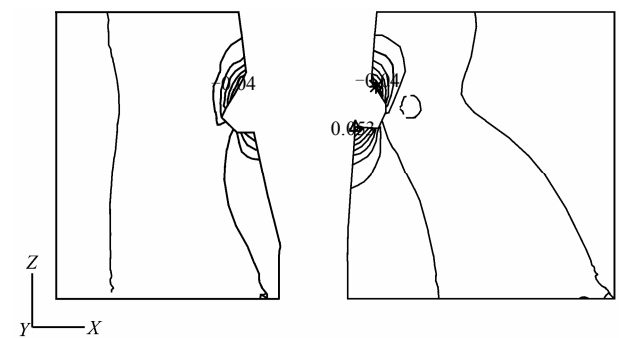


图 7 8[#]剖面顺河流向相对位移等值线图 (高程 680 m, 单位: m)

Fig.7 The strain contours of section 8 along the z axis (unit: m)

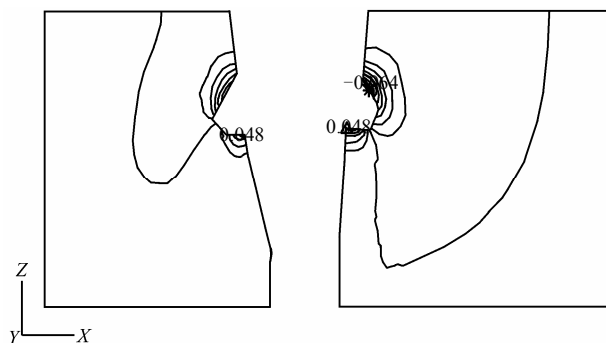


图 8 8#剖面竖直向相对位移等值线图

(高程 680 m, 单位: m)

Fig.8 The strain contours of section 8 along the y axis (unit: m)

由位移图可以看出,考虑拱坝推力后坝肩槽上、下游边坡位移变化不大,变幅在 1 cm 左右;拱坝推力对拱端边坡有比较明显的影响,在推力作用下,边坡向坡内有一定的变形。相同节点在开挖、卸荷、推力 3 种工况下位移变化见表 6。

表 6 3 种工况下拱端边坡相对位移
Table 6 The key points displacements of dam
abutment under three conditions

高程 /m	工况	左岸拱端边坡位移			右岸拱端边坡位移		
		垂直河流 向位移	竖直向 位移	顺河流 向位移	垂直河流 向位移	竖直向 位移	顺河流 向位移
865	开挖	0.831	0.405	-0.019	-0.614	-0.772	0.012
	卸荷	0.889	0.472	0.008	-1.218	-2.087	0.351
	推力	0.635	0.196	-0.030	-1.032	-2.374	0.294
829	开挖	0.629	0.651	-0.072	-0.511	-0.546	0.186
	卸荷	0.551	0.879	-0.095	-1.075	-1.494	0.810
	推力	0.102	0.303	-0.298	0.233	-2.325	0.381
800	开挖	0.655	0.731	-0.021	-0.615	-0.565	0.134
	卸荷	0.563	1.076	-0.020	-1.184	-1.373	0.777
	推力	-0.075	0.242	-0.391	1.021	-2.515	0.043
760	开挖	0.852	0.770	0.166	-0.510	-0.237	-0.035
	卸荷	0.980	1.248	0.235	-0.964	-0.736	0.474
	推力	-0.083	-0.048	-0.397	1.215	-1.974	-0.243
720	开挖	0.007	1.107	0.154	-0.456	-0.203	-0.152
	卸荷	-0.218	1.822	0.267	-0.928	-0.780	0.271
	推力	-0.996	0.585	-0.337	1.247	-2.492	-0.635
680	开挖	-0.649	1.630	0.357	-0.447	-0.117	0.048
	卸荷	-1.114	2.787	0.535	-0.592	-0.067	0.867
	推力	-2.442	0.438	-0.500	1.941	-2.181	-0.260
640	开挖	-0.892	2.057	0.547	0.891	0.984	0.438
	卸荷	-1.723	3.520	0.771	1.308	1.880	1.157
	推力	-3.303	0.688	-0.583	3.594	-0.499	-0.028
624	开挖	-0.653	1.976	0.549	0.546	1.260	0.534
	卸荷	-1.492	3.331	0.840	0.660	2.532	1.170
	推力	-3.067	0.518	-0.683	2.983	-0.115	0.157
610	开挖	-0.350	1.972	0.617	0.014	1.715	0.628
	卸荷	-1.025	3.186	0.977	-0.635	3.805	1.275
	推力	-2.598	0.466	-0.525	1.861	0.468	0.155
580	开挖	0.404	1.906	0.766	1.236	2.352	0.529
	卸荷	0.387	3.012	1.214	2.314	5.063	1.164
	推力	-1.047	0.393	-0.275	4.054	1.494	0.160

6 结 论

本文主要研究了白鹤滩拱坝与坝肩边坡之间的相互作用,并运用卸荷理论分析了蓄水后坝肩岩体的应力应变情况,分析结果表明,(1)分别建立坝肩和拱坝的有限元模型,并采用试算迭代的方法考虑二者之间的相互作用,可以较为准确的模拟坝肩边坡和拱坝的实际应力应变状态,并在很大程度上降低三维有限元建模的难度,有利于更准确地模拟坝肩复杂的地质构造条件。(2)考虑拱坝推力后,坝肩槽上、下游边坡位移变化不大,变幅在 1 cm 左右;拱坝推力对拱端边坡有比较明显的影响,在推力作用下边坡向坡内有一定的变形。(3)蓄水后拱坝推力对坝肩边坡受力状态有很大影响,考虑拱坝与坝肩之间的相互影响十分必要。

参 考 文 献

- [1] SL/T191-96 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1996.
- [2] 张冲,侯艳丽,金峰,等. 拱坝-坝肩三维可变形离散元整体稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 226-1 232.
- [3] 张冲,金峰,徐艳杰. 拱坝-坝肩整体动力稳定分析方法研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(2): 27-36.
- [4] 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.
- [5] 李建林,王乐华,刘杰,等. 岩石边坡工程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
- [6] 哈秋龄. 岩体工程与岩体力学仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 664-668.
- [7] 沈军辉,王兰生,王青海,等. 卸荷岩体的变形破裂特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2 028-2 031.
- [8] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [9] 哈秋龄,李建林. 岩石边坡卸荷岩体宏观力学参数研究[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1996.
- [10] 李建林,哈秋龄. 三峡卸荷岩体宏观力学参数三维数值模拟[J]. 武汉水利电力大学(宜昌)学报, 1997, 19(3): 2-6.
- [11] 李建林,王乐华,杨学堂,等. 锦屏电站坝厂卸荷岩体力学参数研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 17-20.
- [12] 王瑞红,李建林,刘杰,等. 考虑岩体开挖卸荷动态变化水电站坝肩高边坡三维稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 515-3 521.
- [13] 上海勘测设计研究院、长江水利委员会长江勘测现代设计院. SL282-2003 混凝土拱坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.