

文章编号: 1009-3087(2011)05-0071-06

复杂岩基上高拱坝坝基坝肩浅层卸荷影响与稳定性研究

杨宝全 张林* 胡成秋 陈建叶

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 采用3维地质力学模型综合法试验以及非线性有限元计算,对考虑浅层卸荷影响的小湾拱坝与地基整体稳定问题进行研究。试验中,用不同尺寸、不同力学参数的微小菱形块体对开挖出现的浅层松弛卸荷岩体进行重点模拟,同时还模拟了坝基坝肩主要的地质构造和加固方案,对主要的断层采用变温相似材料模拟,以便进行降强试验;有限元计算采用与模型试验一致的力学参数以及降强、超载步骤,对坝基浅层卸荷带用加密单元进行模拟。通过模型试验及计算分析得出,受坝基浅层卸荷的影响,在超载过程中坝踵和坝趾附近岩体首先出现开裂(对应模型试验)或产生塑性区(对应计算),最终上游坝踵附近裂缝或塑性区贯通,说明坝基浅层卸荷对坝与地基稳定性有一定影响,为保证运行后工程安全,建议对中下部高程坝基采取固结灌浆等加固措施。

关键词: 坝基浅层; 开挖卸荷; 地质力学模型试验; 有限元计算; 整体稳定性

中图分类号: TV321

文献标志码: A

Study on Influence of Dam Foundation Shallow Unloading and Stability of High Arch Dam with Complicated Rock Foundation

YANG Bao-quan, ZHANG Lin*, HU Cheng-qiu, CHEN Jian-ye

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., School of Hydraulic and Hydroelectric Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Considering the influences of shallow unloading and relaxation rocks, a 3D geo-mechanical model test and 3D nonlinear FEM calculation were carried out to study the global stability of high arch dam and foundation of Xiaowan Project, using different sizes and mechanical parameters of rhombus small blocks. At the same time, the main geological structures and the reinforcing schemes at the dam abutment and dam foundation were simulated. In order to carry out strength-decreasing test, the major weak structural planes were simulated using temperature analogous material. The shallow unloading zone of dam foundation was simulated using dense element. The model tests and calculations showed that the rocks nearby the dam heel and dam toe cracked firstly (corresponding to model test) or appeared plastic zone firstly (corresponding to calculation) affected by the shallow unloading rocks in the process of overloading test and finally the crack or the plastic zone transfixed nearby the upstream dam heel, which showed the shallow unloading rocks have a certain influence on the stability of dam and foundation.

Key words: shallow foundation; excavation unloading; geo-mechanical model test; finite element calculation; global stability

中国西南地区目前在建和即将建设的许多高拱坝,如小湾、锦屏一级、构皮滩、白鹤滩、马吉、松塔等都位于高海拔、高地应力、高地震烈度的深山峡谷中,由于特殊的地理环境,这些高坝往往坝基坝肩地质构造复杂,且建设过程中会涉及大规模的开挖,如

小湾拱坝左岸坝基最大垂直开挖深度为90 m,最大水平开挖深度达130 m^[1]。在开挖过程中,原有的应力平衡状态被打破,开挖面岩体的应力将释放,向临空面回弹,岩体发生松弛、卸荷,变形及强度参数降低等现象。李维树等^[2]对构皮滩水电站高拱坝建基面卸荷岩体变形参数进行研究,结果表明,其建基面卸荷深度为6 m,卸荷带岩体平均变形模量降低43.6%;文献[3]中也指出,小湾高拱坝的建基面开挖卸荷严重,特别是低高程部位,松弛深度达20 m,松弛岩体沿已有裂隙错动、张开和扩展等,其变形及强度参数明显降低,最大降幅约50%。坝基坝肩开挖形成的卸荷带不仅破坏了基础岩体完整性,

收稿日期: 2011-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879050); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB226802); 博士学科点专项科研基金资助项目(20100181110077)

作者简介: 杨宝全(1985-),男,博士生,研究方向: 水工结构工程. E-mail: yangbqscu1019@163.com

* 通讯联系人 zhanglin_scdx@163.com

卸荷带内的陡倾卸荷裂隙还可能构成拱坝失稳的边界条件^[4],甚至会成为拱坝破坏失稳的开裂起点,如玛尔巴赛拱坝就是因为坝基岩体过分破碎和软弱,继而坝踵基岩开裂,地下渗压发生恶化,最终使坝体连同坝基发生深层滑动而溃坝^[5],文献[6]中也指出,拱坝受载后,在建基面上各点都产生了剪应力,如果荷载不断增加或岩体强度不断降低,有一些点就会进入屈服状态,产生应力重分布。这些屈服区逐渐扩展,连成片,坝体应力分布及工作状态不断恶化,最终导致失稳。因此,建基面是拱坝结构系统中的一个薄弱面,特别对于300 m级的高拱坝来说,沿建基面进行稳定校核是非常重要的,若认识不足、支护处理措施不当将导致建基面岩体无法满足工程要求,延误工期、增加资金投入,甚至可能导致重大工程事故^[7]。

采用3维地质力学模型综合法试验和非线性有限元计算相结合的方法,对考虑浅层松弛卸荷影响的小湾拱坝与地基整体稳定性进行研究。试验中,首次用不同尺寸、不同力学参数的微小菱形块体对开挖出现的浅层松弛卸荷岩体进行重点模拟,同时还模拟了坝基坝肩主要的地质构造和加固方案,对主要的断层采用变温相似材料模拟,以便进行升温降强,实现综合法试验。有限元计算采用与模型试验一致的力学参数以及降强、超载步骤,对坝基层层

卸荷带同样采用两层进行概化并用加密单元进行模拟。通过模型试验和计算分析,探讨在浅层卸荷影响下的小湾拱坝及坝基坝肩的变形特性,失稳的破坏过程、破坏形态,确定工程的综合稳定安全度,评价工程的安全性,提出加固处理建议。

1 小湾拱坝坝基坝肩岩体浅层卸荷特性

小湾水电站位于云南省大理州南涧县及临沧地区凤庆县境内,电站总装机4 200 MW,为澜沧江干流第二个梯级电站。拦河大坝为混凝土抛物线变厚度双曲拱坝,最大坝高2 94.5 m。枢纽处河谷总体呈“V”字型,两岸山体雄厚,但与同类型拱坝相比,其河谷较为开阔,河谷谷坡相对较缓,平均坡度40~42°,弧高比达3.1:1,坝体曲率半径较大。坝址岩体以黑云花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩为主。

小湾拱坝坝址区地质构造复杂,主要体现在:1)坝肩断层和蚀变带发育纵横交错。Ⅱ级结构面有坝上游的 F_7 断层,Ⅲ级断层有20条,如横穿左右岸的 F_{11} 、 F_5 、 F_{19} 、 F_{23} 断层,以及仅在右岸的 F_{10} 、 F_{22} 、 F_{27} 断层,蚀变岩体 E_1 、 E_4 、 E_5 、 E_8 等,以及倾向河床的缓倾角裂隙;2)岩体力学参数差异大,非均匀性问题突出;3)坝肩坝基不连续节理裂隙发育并相互切割。平缓开阔的谷坡和复杂的地质构造情况如图1所示。

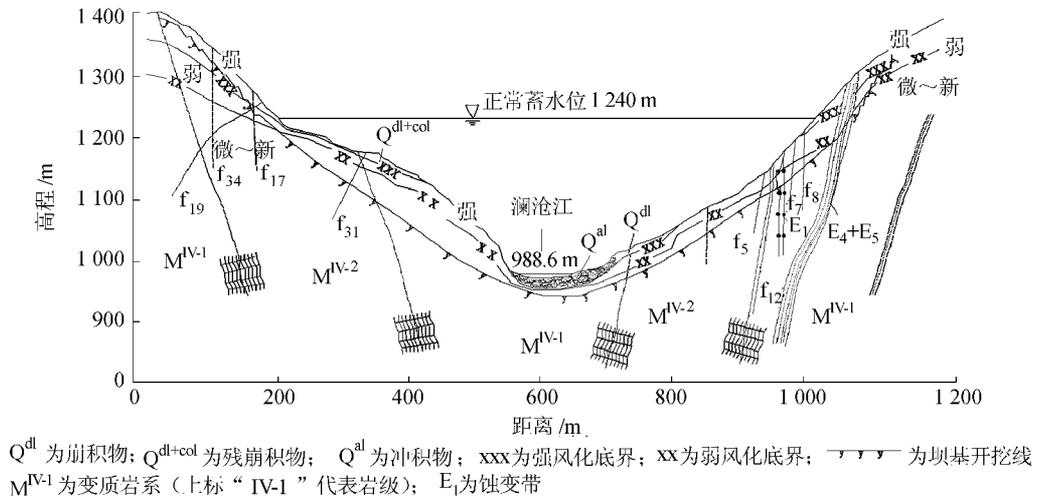


图1 小湾水电站拱坝中心线工程地质剖面图^[8]

Fig. 1 Cross-section of engineering geology along centralline of arch dam in Xiaowan Hydropower Station^[8]

除了复杂的地质构造外,小湾拱坝坝基在开挖后岩体浅表部位(尤其是河谷低高程部位)存在较为明显的应力释放现象,并形成松弛卸荷岩体,其主要表现形式有:形成新裂隙或沿已有裂隙张开的现象、卸荷松弛“回弹”现象、“葱皮”现象、板裂现象、岩爆现象等^[9]。卸荷松弛岩体主要是沿中缓倾角

节理张开,深度达20 m。经过概化后的卸荷带力学参数如表1所示。由表中参数可知,卸荷岩体强度较低,仅相当于Ⅲ类岩体,同时由于卸荷裂隙的产生,使得坝基坝肩岩体完整性差,是影响坝与地基整体稳定的重要因素。而且坝体承受的最大总水推力高达 1.98×10^8 kN(齐顶压力)^[10],在同类坝型中为

最大, 因此对小湾拱坝沿建基面失稳问题进行深入的研究是非常必要的。

表 1 坝基卸荷岩体简化后参数

Tab. 1 Physico-mechanical parameters for simplified unloading rocks of dam foundation

高程	代号	原型参数				模型参数			
		μ_p	$E_p / (10^3 \text{ MPa})$	f_p	c_p / MPa	μ_m	E_m / MPa	f_m	c_m / MPa
975 m 以上	A	0.29	8	1.0	0.5	0.29	26.67	1.0	0.001 7
	B	0.29	8	1.2	1.0	0.29	26.67	1.2	0.003 3
	C	0.28	13	1	0.5	0.28	43.33	1	0.001 7
	D	0.28	13	1.2	1.0	0.28	43.33	1.2	0.003 3
	E	0.28	13	1.3	1.5	0.28	43.33	1.3	0.005 0
	F	0.28	18	1.2	1.0	0.28	60	1.2	0.003 3
	G	0.28	18	1.2	1.5	0.28	60	1.2	0.005 0
	H	0.28	18	1.3	1.5	0.28	60	1.3	0.005 0
975 m 以下	0 ~ 5 m	0.28	14	0.8	0.3	0.28	46.67	0.8	0.001 0
	5 ~ 20 m	0.28	16	1.2	1.3	0.28	53.33	1.2	0.004 3

注: 下标 m 表示相似模型, p 表示原型; 原型力学参数取自昆勘院提供的《云南澜沧江小湾水电站坝基(肩)岩体参数(200711 版)》, 模型参数通过相似关系换算得到; A ~ H 代表 975 m 高程以上按水平深度划分的拱端以里 0 ~ 5 m、5 ~ 20 m 范围内的卸荷岩体, 具体的分区见昆勘院提供的《云南澜沧江小湾水电站坝基(肩)岩体参数(200711 版)》^[11]

2 3 维地质力学模型试验与非线性有限元计算

2.1 3 维地质力学模型试验

地质力学模型试验是目前研究高拱坝与地基整体稳定安全问题的重要手段之一, 因其能模拟坝基坝肩岩体中的断层、破碎带、软弱带以及一些主要的节理裂隙组, 能体现出岩体的各向异性、非线性、非连续等特点而被广泛应用。在地质力学模型试验中, 需要满足相似关系^[12]: $C_\gamma = 1, C_\epsilon = 1, C_f = 1, C_\mu = 1, C_\sigma = C_\epsilon C_E, C_\sigma = C_E = C_L, C_F = C_\sigma C_L^2 = C_\gamma C_L^3$ 。其中 $C_E, C_\gamma, C_L, C_\sigma$ 及 C_F 分别为变形模量比、容重比、几何比、应力比及集中力比; C_μ, C_ϵ 及 C_f 分别为泊松比、应变及摩擦系数比。本文结合小湾水电站工程实际, 选择几何比 C_L 为 300, 容重比 C_γ 为 1.0, 位移比 C_ϵ 为 300, 变形模量比 C_E 为 300; 选择模拟范围为 3.61 m × 4.80 m × 2.23 m (顺河向 × 横向 × 高度), 相当于原型工程尺寸 1 083 m × 1 440 m × 669.5 m。试验采用的荷载组合为正常蓄水位的水压力 + 淤沙压力 + 自重。

模型中对坝基坝肩断层 $F_7, F_{11}, F_{10}, F_5, F_{19}, F_{22}, F_{20}, f_{12}, f_{11}, f_{10}, f_{19}, f_{34}, f_{30}, f_{17}$ 及蚀变带 E_1, E_4, E_5, E_8 等复杂的地质构造进行模拟, 为了实现综合法, 对主要的断层 $F_{11}, F_{10}, F_5, f_{12}, f_{19}, F_{20}$ 采用变温相似材料进行模拟。变温相似材料^[13]是在传统的模型材料中加入高分子材料, 试验时通过电升温法降低材料的力

学参数, 模拟断夹层受渗流、高水压作用等因素影响后力学参数降低的力学行为。各断层的变温相似材料首先依据常温状态下各断层的强度和变形参数(模型值)进行配制, 然后在选定材料的基础上再做变温材料试验, 得出不同温度条件下的抗剪断强度曲线, 典型断层的变温曲线如图 2 所示, 从曲线可知, 断夹层的变温相似模拟材料的抗剪断强度 τ_m 随着温度 T 的升高而不断降低, 试验时通过控制温度来控制降强的幅度。

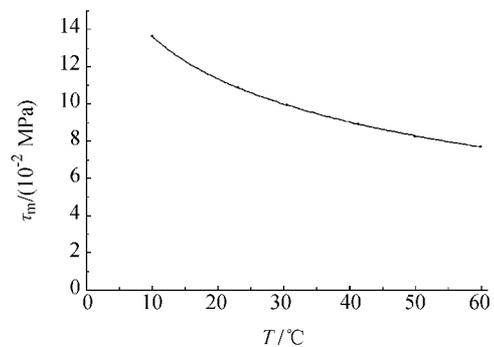


图 2 变温相似材料的 $\tau_m - T$ 关系典型曲线

Fig. 2 $\tau_m - T$ typical curve of temperature analogous material
除了复杂的地质构造外, 坝基坝肩开挖形成的卸荷裂隙也是本次试验模拟的重点, 由于卸荷岩体具有裂隙发育, 强度参数和变形参数比同类岩体低等特点, 因此试验中除了相似模拟卸荷松弛岩体的力学特征外, 还对其多裂隙的结构特征进行模拟。根据坝基开挖揭露的地质情况, 坝基两岸 1 050 m 高

程以上中缓倾角剪切裂隙倾角一般为 $32^\circ \sim 45^\circ$ (取 40° 进行模拟), 975 ~ 1 050 m 高程, 倾角渐变为 $15^\circ \sim 30^\circ$ (取 25° 进行模拟), 975 m 高程以下河床部位坝基的缓倾角节理裂隙倾角一般 $< 10^\circ$ ~ 近水平 (取 7° 进行模拟)。模型上根据近 SN 向、近 EW 向陡倾角结构面与不同倾角中缓倾角剪切裂隙组合进行模拟, 具体如下: 高程 1 050 m 以上的开挖卸荷岩体用倾角为 40° 的菱形块体模拟; 高程 975 m ~ 1 050 m 之间的开挖卸荷岩体用倾角为 25° 的菱形块体模拟; 高程 975 m ~ 950.5 m 之间的开挖卸荷岩体用倾角为 7° 的菱形块体模拟。以上 3 种模型块体尺寸为 $7 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ (II 类岩体) 和 $5 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ (III、IV 类岩体)。对于高程 950.5 m 以下的坝基开挖松弛卸荷岩体, 模拟至建基面以下 20 m 范围, 按 $0 \sim 5 \text{ m}$ 、 $5 \sim 20 \text{ m}$ 两层进行综合模拟, 块体尺寸分别为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 1.7 \text{ cm}$, $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 两种, 倾角都为 0° 。模型材料参数见表 1 所示。模型根据坝肩坝基各类卸荷岩体的范围以及结构面走向按以上几种情况进行砌筑, 从而对开挖浅层卸荷现象进行了精细的模拟, 菱形块体的砌筑情况如图 3 所示。

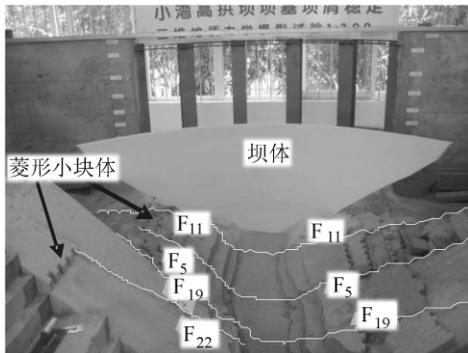


图 3 菱形小块体模拟坝基坝肩开挖卸荷情况

Fig. 3 Condition of simulation dam abutment excavation unloading rocks use rhombus small blocks

模型中还对加固处理方案进行模拟, 主要是各断层、蚀变带的混凝土加固塞, 左岸垫座以及下游贴角, 上游贴角由于千斤顶加荷的限制而未模拟。混凝土材料以及其它的岩类按设计单位提供的力学参数进行相似模拟。

2.2 非线性有限元计算

对于高拱坝的整体稳定分析, 除了物理模拟, 数值计算也是非常有效的方法。为了能和模型试验的结果进行比较, 全面分析建基面开挖卸荷裂隙的影响, 作者还采用了 3 维非线性有限元进行计算, 计算采用与模型试验一致的模拟范围、荷载组合、力学参数。采用有限元通用软件 ANSYS 进行材料非线性

分析, 强度准则采用 Drucker-Prager (D-P) 屈服准则, 离散中坝体采用 solid65 单元, 岩体采用 solid45 单元。计算模型共计离散为 5 733 个节点和 10 137 个单元。为了提高对浅层岩体的模拟精度, 对浅层松弛卸荷岩体按 2 ~ 3 层加密单元划分, 浅层建基面 3 维网格图如图 4 所示。

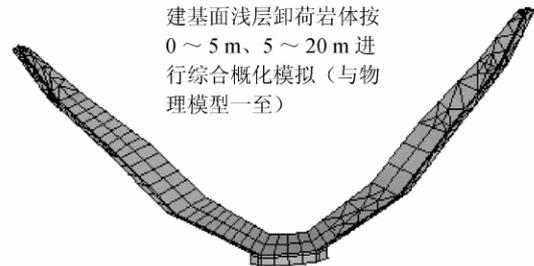


图 4 建基面浅层岩体 3 维网格图

Fig. 4 3D mesh diagram of shallow rock on foundation plane

3 坝基坝肩开挖浅层卸荷对拱坝整体稳定影响分析

小湾拱坝地质力学模型采用超载与降强相结合的综合法进行破坏试验, 即首先加载至一倍荷载, 然后对主要断层强降 20%, 再超载至坝与地基出现整体失稳趋势为止。模型的破坏过程为: 当超载倍数 $K_p = 1.2 \sim 1.4$ 时, 大坝及坝肩变位曲线出现微小波动, 表明拱坝上游侧坝踵附近有初裂; 当超载系数 K_p 大于 2.0 时, 变位增长加快, 左右岸坝肩下游贴角与浅层卸荷岩体接触面出现了裂缝, 并且随着超载倍数的增加不断扩展; 当超载系数 $K_p = 3.3 \sim 3.5$ 时, 大坝及坝肩岩体出现了大变形, 拱坝建基面下游贴角与卸荷岩体接触面出现多条裂缝, 基本贯通整个拱肩槽附近岩体 (如图 5 所示), 拱坝建基面上游侧坝踵附近的岩体从左岸至右岸出现贯通性裂缝 (如图 6 所示), 坝体的左右半拱各出现了一条裂缝, 坝体被撕成三部分而失去承载能力。典型的变位测试曲线如图 7 所示, 曲线上方数字为位移测点编号。图 7(a) 为 1 240 m 拱圈坝顶竖向测点的变位值随超载系数增加而不断变化的情况; 图 7(b) 中的测点 43#、51#、57#、69#、85#、91# 是右坝肩断层 F_{11} 、 F_{10} 、 F_5 、 F_{19} 、 F_{22} 在 1 050 m 高程出露点处的横向向位移测点。综合分析得出小湾拱坝综合安全度为 $K_c = K_1 \times K_p = 1.2 \times (3.3 \sim 3.5) = 3.96 \sim 4.2$ 。其中 $K_1 = 1.2$ 为强度储备系数, $K_p = 3.3 \sim 3.5$ 为超载系数。

有限元计算采用与模型试验一致降强、超载步骤, 即首先加载至一倍荷载, 然后对主要断层强降 20%, 再超载, 直至计算不收敛。计算观测每级荷载

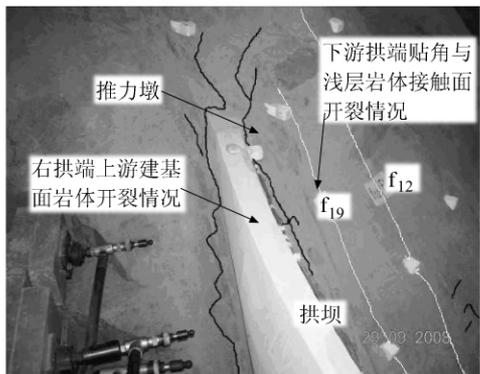


图 5 左岸建基面岩体 $K_p = 3.5$ 时的破坏形态

Fig. 5 Failure patterns of left abutment foundation plane when $K_p = 3.5$

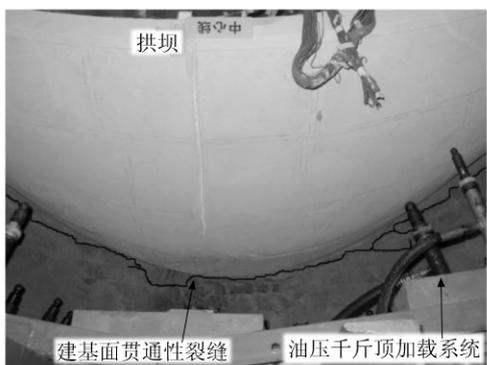
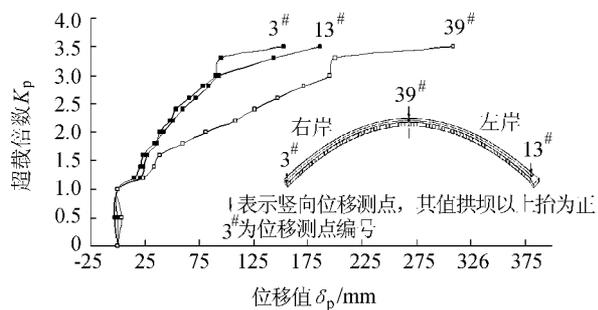
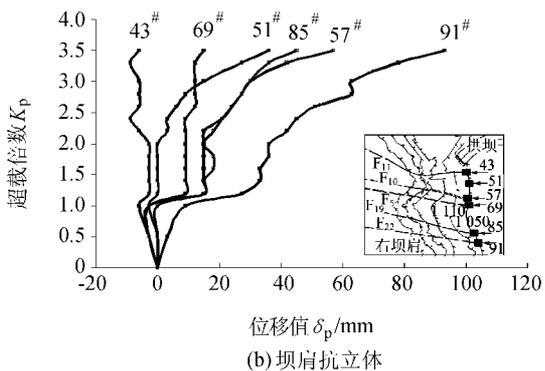


图 6 $K_p = 3.5$ 时上游坝踵破坏形态

Fig. 6 Failure patterns of upstream dam heel when $K_p = 3.5$



(a) 坝体



(b) 坝肩抗立体

图 7 典型测点位移 δ_p 与超载系数 K_p 关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between displacement δ_p and overloading multiples K_p at typical measuring points

下的坝体和坝肩岩体(特别是卸荷岩体)的塑性破坏情况,同时还绘制与模型试验一致的典型测点的超载系数与位移关系曲线,限于篇幅本文仅对塑性破坏情况进行分析。当超载系数 $K_p = 1.0$ 时,建基面低高程部位 950.5 ~ 970 m 高程坝踵附近产生了小范围塑性区(如图 8 所示),位置与模型试验基本一致,970 m 高程以上拱肩槽仅有很少的塑性区,随着超载倍数的增加,塑性区不断扩展和贯通,当超载系数 $K_p = 3.5$ 时,河谷建基面上下游塑性区全部贯通(如图 9 所示),此时坝体由于坝踵处产生较大拉应力、坝趾处出现较大压应力而处于屈服状态,拱坝失去承载能力。综合分析计算成果得到有限元计算小湾拱坝综合安全度 $K_c = 3.6 \sim 4.2$ 。

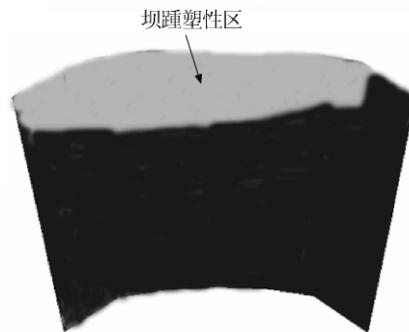


图 8 950.5 m 高程超载系数为 1.0 时的塑性区

Fig. 8 Plastic zone at the height of 950.5 m when overloading coefficient is 1.0

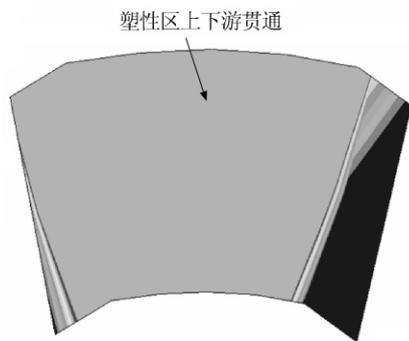


图 9 950.5 m 高程超载系数为 3.5 时的塑性区

Fig. 9 Plastic zone at the height of 950.5 m when overloading coefficient is 3.5

分析模型试验和计算结果可以得出,拱坝及建基面破坏主要原因是:小湾拱坝的建基面岩体由于开挖卸荷影响,其结构完整性较差、强度较低,此薄弱位置将首先开裂,超载后期特别是超载系数 $K_p > 3.0$ 以后,拱坝承受的荷载大,同时两坝肩地质条件不对称,两坝肩抗力体产生了不均匀大变形,由于小湾拱坝坝址区河谷宽高比较大,拱坝梁向作用较大,使得建基面裂缝扩展至坝体,最后坝体开裂失去承

载能力。由此可见,坝基浅层卸荷对坝与地基稳定性有一定影响。

4 结论和建议

1) 建基面是拱坝结构系统中的一个薄弱面,特别对于300 m级的高拱坝来说,沿建基面进行稳定校核是非常重要的,小湾拱坝枢纽所处河谷总体呈“V”字型,但其河谷谷坡相对较缓,弧高比达3.1:1,坝体曲率半径较大,建基面由于开挖后松弛卸荷严重,其抗剪强度低,而且坝体承受总水推力大,因此对小湾拱坝沿建基面失稳问题进行深入的研究是非常必要的。

2) 运用地质力学综合法试验与非线性有限元计算相结合的方法,深入研究坝基坝肩开挖后浅层卸荷对小湾拱坝整体稳定的影响。试验中,首次采用微小菱形块体对浅层松弛卸荷现象进行重点模拟;有限元计算采用与模型试验一致的力学参数,对坝基浅层卸荷带采用两层进行概化并用加密单元进行模拟。通过试验和计算成果分析确定拱坝与坝肩坝基整体稳定综合法试验安全度为3.96~4.20,计算得到的安全度为3.6~4.2。

3) 虽然拱坝与地基的整体稳定安全度满足稳定的要求,但是受坝基浅层卸荷的影响,在超载过程中坝踵和坝趾附近岩体首先出现开裂(对应模型试验)或产生塑性区(对应计算),最终上游坝踵附近裂缝或塑性区贯通,说明坝基浅层卸荷对坝与地基稳定性有一定影响,为保证运行后工程安全,建议对中下部高程坝基采取固结灌浆等加固措施。

参考文献:

- [1] Wu Faquan, Liu Tong, Tang Xianliang, et al. Research on unloading and zonation of rock mass dam foundation excavation—a case study of Xiaowan Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1091–1098. [伍法权, 刘彤, 汤献良, 等. 坝基岩体开挖卸荷与分带研究——以小湾水电站坝基岩体开挖为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1091–1098.]
- [2] Li Weishu, Zhou Huoming, Chen Hua, et al. Study of unloading rock mass deformation parameters for high arch dam foundation base of Goupitan Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1333–1338. [李维树, 周火明, 陈华, 等. 构皮滩水电站高拱坝建基面卸荷岩体变形参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1333–1338.]
- [3] Zhou Hua, Wang Guojin, Fu Shaojun, et al. Finite element analysis of foundation unloading and relaxation effects of Xiaowan Arch Dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1175–1180. [周华, 王国进, 傅少君, 等. 小湾拱坝坝基开挖卸荷松弛效应的有限元分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1175–1180.]
- [4] Huang Runqiu, Lin Feng, Chen Deji, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slopes and its engineering behaviors [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 227–232. [黄润秋, 林峰, 陈德基, 等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 227–232.]
- [5] Li Zan. Malpasset dam collapse and stability of sliding upwards of arch dam [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2002, 18(2): 12–17. [李赞. 玛尔巴塞拱坝的破坏与拱坝上滑稳定分析[J]. 水电站设计, 2002, 18(2): 12–17.]
- [6] Pan Jiazheng, Chen Shihui. Some problems on the construction of high arch dams [J]. Science and Technology Review, 1997(2): 17–19. [潘家铮, 陈式慧. 关于高拱坝建设中若干问题的探讨[J]. 科技导报, 1997(2): 17–19.]
- [7] Feng Xuemin. Analysis of high dam foundation excavation relaxation and revelation [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2010, 26(1): 1–7. [冯学敏. 高坝建基面开挖卸荷松弛分析及启示[J]. 水电站设计, 2010, 26(1): 1–7.]
- [8] Qi Shengwen, Wu Faquan, Zhuang Huaze, et al. Characteristics of unloading fissures in dam's base of Xiaowan Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2907–2912. [祁生文, 伍法权, 庄华泽, 等. 小湾水电站坝基开挖岩体卸荷裂隙发育特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2907–2912.]
- [9] Lin Peng, Wang Renkun, Zhou Yaneng, et al. Study of shallow unloading mechanism and stability of foundation interface of super high arch dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 8–14. [林鹏, 王仁坤, 周雅能, 等. 特高拱坝建基面浅层卸荷机制与稳定分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 8–14.]
- [10] Ma Hongqi. A summary of key engineering technologies for Xiaowan Hydropower Project [J]. Water Power, 2004, 30(10): 13–15. [马洪琪. 小湾水电站枢纽工程关键技术综述[J]. 水力发电, 2004, 30(10): 13–15.]
- [11] Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, CHEECC. Rock mass parameters of dam foundation (shoulder) in Xiaowan Hydroelectric Project in Yunnan Lancangjiang river (200711 version) [R]. Kunming: Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, CHEECC, 2007. [中国水电工程顾问集团昆明勘测设计研究院. 云南澜沧江小湾水电站坝基(肩)岩体参数(200711版)[R]. 昆明: 中国水电工程顾问集团昆明勘测设计研究院, 2007.]
- [12] 张林, 陈建叶. 水工大坝与地基模型试验及工程应用 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2009.
- [13] He Xiansong, Ma Hongqi, Zhang Lin, et al. Study of test method of geomechanical model and temperature analogous model material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 980–986. [何显松, 马洪琪, 张林, 等. 地质力学模型试验方法与变温相似模型材料研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 980–986.]

(编辑 张琼)