

四寨水库高重力墩-拱坝整体非线性分析和安全评价

杨海英¹, 周元德², 金 峰², 王进廷²

(1. 贵州省黔南州水利局, 贵州 都匀 558000; 2. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:为评价高重力墩对四寨拱坝的应力变形和抗滑安全的影响,建立了拱坝-重力墩-地基系统的有限元数值模型,其中考虑重力墩-基础、右岸夹层和拱坝-重力墩等交界面的非线性相互作用,以及基岩材料的弹塑性变形行为。分别采用水压超载法和折减强度参数法对重力墩-拱坝系统进行数值模拟,并基于建议的重力墩安全评价指标对系统整体稳定性进行判定。分析表明,采用水压超载法计算的整体安全超载系数为 2.5~3.0,折减强度参数法计算的整体稳定强度储备系数为 2.0~3.0。参考已有的拱坝整体稳定分析统计数据,该工程的整体稳定安全系数相对较低。

关键词:重力墩;拱坝;四寨水库;弹塑性变形;整体稳定分析;水压超载法;折减强度参数法

中图分类号: TU45

文献标识码: B

文章编号: 1006-764X(2007)03-0053-04

Integral non-linear stability analysis and safety evaluation for high gravity pier-arch dam at Sizhai Reservoir//YANG Hai-ying¹, ZHOU Yuan-de², JIN Feng², WANG Jin-ting²(1. Qiannan Prefecture Water Resources Bureau of Guizhou Province, Duyun, 558000, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A finite element numerical model for arch dam-gravity pier-foundation system was established to evaluate the effect of high gravity piers on the stress, deformation and anti-sliding stability of Sizhai arch dam, taking the following factors into account, such as the possible elastoplastic deformation of foundation rocks and the nonlinear interaction between the interfaces of gravity pier-dam foundation, the joint surfaces beneath the right bank, and the interfaces of arch dam-gravity pier. The hydro-pressure over-loading method and the strength reduction method were applied to numerical simulation of gravity pier-arch dam system, and the integral stability of the system was evaluated based on the suggested index for safety evaluation of the gravity pier. The result shows that the integral safety factor of the dam-pier-foundation system calculated by the over-loading method is 2.5-3.0, and the safety storage factor of the system by the strength reduction factor is about 2.0-3.0. The comparison of the calculated results with the statistical data of integral stability analysis obtained before shows that the integral safety factor of Sizhai arch dam is relatively low.

Key words: gravity pier; arch dam; Sizhai Reservoir; elastoplastic deformation; integral stability analysis; hydro-pressure over-loading method; strength reduction method

拱坝的稳定性主要依靠坝端两岸岩体维持,如果坝肩岩体发生滑移、拱座失稳,则拱坝整体安全将无法得到保证。法国的马尔帕塞拱坝由于左岸坝肩内存在容易滑动的断层,建坝蓄水后在拱端推力作用下左岸重力墩和部分岩体发生滑移,造成拱坝最终的严重失稳破坏。坝肩挡力体,包括基岩、重力墩等的稳定性对于评价大坝整体安全具有重要意义^[1-2]。

四寨水库工程受地形地质条件制约,枢纽布置采用拱坝-重力墩-堆石坝的布置方案。其中主坝为抛物线拱坝,坝高 41 m,坝顶厚 3.5 m,坝底厚 9.0 m;右岸重力墩高 33 m,沿坝轴线方向长 41 m,沿河流上下游方向宽 20 m,拱坝与重力墩的连接采用嵌入式,在 1313 m 高程以上坝体上、下游面与重力墩之间以

油毡分隔,间隔宽度为 3~4 mm;右岸的堆石坝坝高 20 m,尚未建成。坝区岩层多为相对隔水层,但由于节理裂隙较为发育,导致构造两侧岩体风化破碎,对大坝稳定带来不利影响。

四寨水库重力墩的高度达到了拱坝高度的 80%,且在重力墩下游侧仅有 6 m 高度的可利用岩体,对于这样主要依靠重力墩承担拱端推力的拱坝而言,重力墩的稳定是整个工程安全的关键。国内外已有一些大坝采用重力墩及推力墩布置方案,如清江隔河岩工程^[3],但对于重力墩-拱坝系统的整体稳定安全评价目前仍缺乏较系统的分析资料。笔者拟结合四寨水库工程实际,采用非线性有限单元法进行分析评价。

基金项目: 国家自然科学基金(50539020)

作者简介: 杨海英(1969—),女(侗族),贵州天柱人,工程师,硕士,从事水利水电工程建设管理工作。E-mail: yanghaiyin@gmail.com

1 计算模型

设计中如采用规范推荐的刚体极限平衡法,只能对重力墩失稳状态从极限平衡观点出发作出一个笼统的安全度估计,并不能确定各部位的应力、变位、失稳机理以及发展过程。而有限单元法作为工程领域应用最广泛的数值分析方法,在对拱坝进行稳定分析时,可以考虑重力墩-基岩、断层弱面等交界面的力学行为,并能模拟不同材料的复杂变形特性,在分析过程中,将大坝变形过程分为大坝的弹性阶段、弹塑性阶段以及最后破坏阶段,从而将结构的强度判据准则与稳定判据统一起来。因此,采用非线性有限元数值方法对四寨拱坝-重力墩-基岩系统进行模拟分析。

1.1 有限元模型

由于右坝段的堆石坝尚未建成,因此主要针对拱坝及重力墩进行整体稳定计算分析。笔者基于弹塑性有限元理论^[4]及非线性接触边界定义,建立了四寨拱坝-重力墩-地基系统有限元计算模型,其中模拟了对系统整体稳定安全可能起控制性影响的重力墩-基础、右岸夹层交界面的非线性作用以及裂隙发育岩层的弹塑性变形行为。

计算模型中拱坝体型基于设计者提供的参数确定,地基截断范围为向上游方向0.5倍坝高,向下游1.5倍坝高,沿顶拱坝肩向两岸各延伸1倍坝高。坝体沿厚度方向划分3层单元,沿高度方向离散为13层网格。如图1所示,模型采用八节点实体单元,共包含15483个单元,19083个节点(图中编号为材料分区,见表1)。

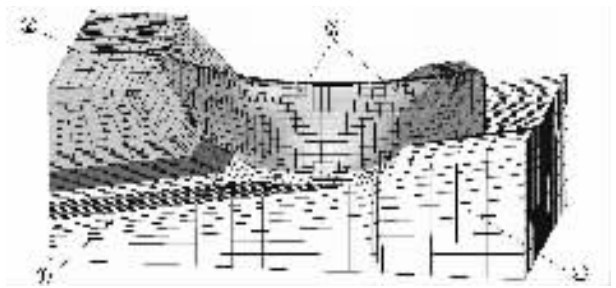


图1 有限元网格模型及材料分区示意图

1.2 材料模型及分区参数

由于重力墩的稳定是整个工程安全的关键,分析中重点关注坝体-重力墩系统的整体稳定安全问题,因此在数值模拟中将重点研究基岩中夹层、重力墩-基础交界面的可能滑移失稳,以及基岩本身塑性变形的发展和连通过程,而对于坝体与重力墩在加载过程可能的局部非线性损伤断裂行为则予以简化,计算中假定坝体及重力墩材料均处于弹性工作状态。

考虑到设计资料中给出了基岩中各岩体分区的

名义抗剪强度参数,数值模型中各分区采用岩石材料常用的 Mohr-Coulomb 塑性屈服准则,其一般形式为

|τ| = c - σtanφ (1)

式中:τ为最大剪应力;σ为作用在同一平面上的正应力(以拉为正);c为材料的黏聚力;φ为材料的内摩擦角。

计算中坝体、重力墩与地基各材料分区的主要力学参数如表1所示。

表1 计算材料参数

编号	材料分区	弹性模量或 变形模量/ GPa	泊松 比	ρ/ (kg·m ⁻³)	f	c/ MPa
①	坝体、重力墩	5	0.22	2300		
②	左坝肩上部基岩	6	0.27		1.2	0.45
③	左坝肩下部基岩	6	0.27		1.06	0.32
④	河床及重力墩基岩	6	0.27		1.0	0.35

注:对于坝体、重力墩采用弹性模量,对于基岩采用变形模量。

1.3 重力墩-基岩及下覆夹层界面模型

由于设计资料对重力墩与基岩交界面的力学参数仅提供了f值(f=0.53),右岸下覆夹层的c值很小(f=0.3,c=0.02MPa),在模型中采用分离的接触边界模拟两者的非线性力学行为,忽略交界面上c值的贡献。计算中按库仑摩擦定律进行模拟。

1.4 计算方法

计算基于通用非线性有限元分析软件 ABAQUS,采用大坝结构工程渐进破坏过程模拟通常采用的水压超载和折减强度参数两种方法进行模拟,并给予综合比较分析。与常规拱坝-基岩稳定安全分析不同,分析对象中重力墩在荷载作用下的变形力学行为值得重点关注,因此,本文通过综合重力墩与基岩接触面的最大张开度和分离范围分布、重力墩的位移、重力墩下覆夹层的接触挤压、基岩塑性区的分布、坝体应力位移分布等的发展变化过程,对整体结构的破坏极限状态进行分析评价。

计算中荷载组合为“自重+水压+温度”荷载,其中拱坝及重力墩温变荷载计算根据规范推荐采用的多年平均最低月平均温度与多年平均气温的差值计算。考虑到坝体及重力墩的施工为整体上升方式,坝体自重一次加载,岩体中初始地应力在建坝前已形成,因此在计算荷载中没有包含岩体自重。

2 计算结果分析

2.1 超载法计算结果分析

2.1.1 重力墩-基础界面最大张开度

分析结果表明,重力墩与基础界面在正常库水位压力作用下处于完全挤压闭合状态,当超载到1.5倍时局部发生张开分离,图2给出了重力墩与基础界面最大张开度的发展过程,可以看出,当超

载系数由 2.5 增大到 3.5 之间,重力墩与基础界面的最大张开度发生一定程度的突变。

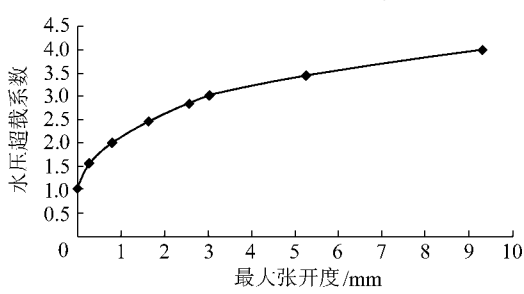


图2 重力墩与基础界面最大张开度发展过程

2.1.2 重力墩特征位移变化

重力墩特征位移随着水压超载系数增加的变化过程如图3所示。可以看出,在超载系数小于4时,墩顶最大位移和超载系数基本成直线关系;当超载系数达到4以后,墩顶位移变化曲线出现斜率突变,对比图2与图3可以看出,墩顶位移-超载系数变化曲线的斜率突变滞后于重力墩-基础界面最大张开度曲线的突变。

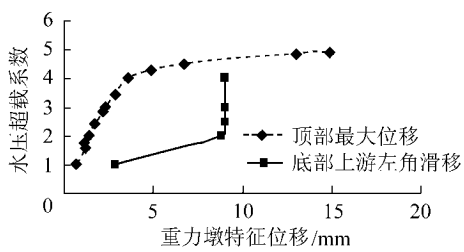


图3 不同水压超载系数下重力墩特征位移变化过程

重力墩底部发生滑移变形以上游侧靠左角点为代点(图3),水压超载2倍以内该点滑移量呈线性变化,超载2.5倍以后,滑移量不再增加,但交界面的最大张开度已经出现突变,分析其中原因,主要是受重力墩下游及左侧的基岩约束影响。

2.1.3 重力墩下覆夹层张开及滑移

重力墩底部的下覆夹层在水压超载系数增加到4.0以前,未发生张开分离。比较分析发现,下覆夹层的最大张开度及滑移量随水压超载系数的变化滞后于重力墩与基础界面相关指标的变化过程。

2.1.4 基岩塑性区发展

对于拱坝-地基系统而言,拱坝作为一超静定结构,自身形体具有较强的应力调整能力,而拱壳作用使得基础的主要受力部位,即可能的破坏部分一般深度较大,而当基岩发生大面积屈服连通破坏时,整个系统将难以维持稳定安全,可能发生整体失稳破坏。

计算结果表明,在正常库水位压力作用下,坝踵附近岩体已出现部分屈服;当超载系数增加至2.5~3.0时,从左岸坝肩顶部至右岸计算边界范围内的基岩表面塑性区已经扩展连通。图4给出了超载

系数为3.0时基岩表面以及内部沿坝轴线剖面塑性扩展连通分布情况。从计算得出的基岩塑性区的分布和发展情况还可以看出,由于重力墩的体形与左坝肩岩体比较相对单薄,水压超载使右岸基岩塑性区的发展快于左岸岩体。

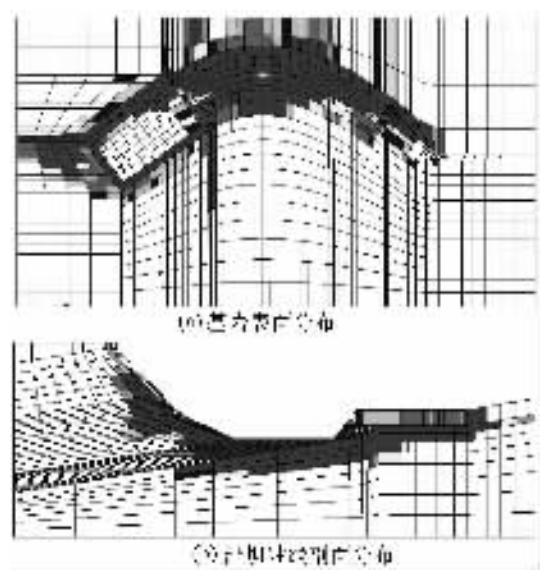


图4 水压超载系数3.0时基岩塑性区分布

从以上4个指标的计算分析结果来看,采用水压超载分析方法计算的四寨拱坝-重力墩整体稳定评价主要取决于重力墩与基础接触面的最大张开度、重力墩底部上游左角滑移变化以及地基岩体塑性区的发展,其整体超载安全系数均在2.5~3.0之间。

2.2 折减参数法计算结果分析

类似超载分析,将基岩各分区的强度参数指标分别折减至设计参数值的3/4,1/2和1/3,模拟分析拱坝-重力墩-基岩系统的应力变形分布,并选取有代表性的重力墩特征位移变化过程、重力墩下覆夹层张开及滑移、基岩塑性区发展连通等指标进行分析研究。

2.2.1 重力墩特征位移变化

折减基岩中相关强度参数的计算结果表明,降低抗剪强度指标对于重力墩-基础界面力学行为的影响主要表现为两侧相互挤压作用力的减小。图5表明了计算强度参数的降低对于重力墩特征位移变化的影响,其中强度储备系数等于折减系数的倒数。当计算参数降低至设计强度指标的1/3时,墩顶最大位移由设计指标时的6.5mm增加到10.2mm,重力墩底部上游侧靠左角点的滑移量增大至6.5mm。综合分析表明,折减地基强度参数为设计参数的1/3~1/2时重力墩特征位移发生突变。由此分析重力墩与基础交界面的强度储备安全系数在2.0~3.0之间。

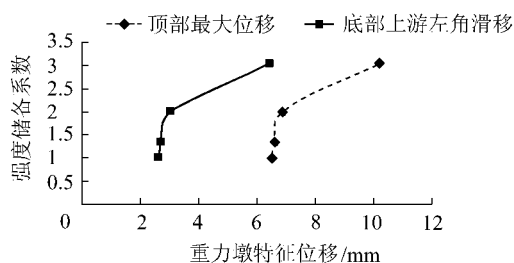


图5 折减地基强度参数重力墩特征位移变化过程

2.2.2 重力墩下覆夹层张开及滑移

计算结果表明,折减基岩抗剪强度指标对于重力墩底部下覆夹层的张开分离行为以及接触挤压应力的分布没有显著影响。

2.2.3 基岩塑性区发展

折减强度参数计算结果表明,当计算参数折减至设计参数的 $1/3$ 时,坝基、重力墩基础岩体表面全部进入塑性状态,并从上游计算边界扩展至下游计算边界。图6给出了基于 $1/3$ 设计强度参数计算得到的基岩表面和沿坝轴线基岩剖面塑性区的分布,当地基发生大面积的塑性屈服区连通时,系统可能发生整体失稳破坏,地基中屈服区的扩展连通与系统极限破坏状态是相关联的,由此判断基岩的强度安全储备系数在 $2.0 \sim 3.0$ 之间。

分析上述折减参数法计算结果,地基抗剪强度指标的降低对拱坝-重力墩-地基系统的影响主要表现为重力墩特征位移曲线发生突变以及岩体中塑性屈服区的扩展连通,其系统整体安全的材料强度储备安全系数在 $2.0 \sim 3.0$ 之间。

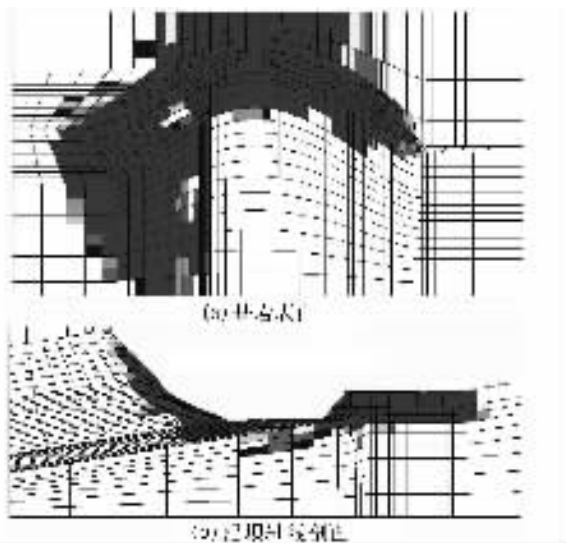


图6 基于 $1/3$ 设计强度参数计算得到的基岩塑性区分布

3 结论与建议

与常规拱坝的安全分析不同,对于采用高重力墩替代坝肩岩体承担拱端推力的拱坝,有必要进行针对性研究以评价系统整体稳定安全。本文选择四

寨水库拱坝-重力墩系统为例进行分析研究,分别采用水压超载法和折减强度参数法计算拱坝-重力墩的整体稳定安全系数,综合分析计算结果表明:

a. 对于重力墩-拱坝复合系统,建议综合分析重力墩与基岩接触面的最大张开度和分离范围分布、重力墩的特征位移变化、基岩塑性区的分布等的发展变化过程,从而实现对结构整体的极限破坏状态进行较为完整和客观的分析评价。

b. 采用水压超载分析方法计算时主要取决于重力墩与基础接触面的最大张开度、张开范围的面积以及地基岩体塑性区的发展,系统整体稳定水压超载安全系数为 $2.5 \sim 3.0$ 。

c. 地基抗剪强度指标的降低对拱坝-重力墩-地基系统的影响主要表现在重力墩特征位移变化曲线以及岩体中塑性屈服区的发展连通过程。四寨水库拱坝-重力墩系统的材料强度安全储备系数在 $2.0 \sim 3.0$ 之间。

综合这2种方法的计算结果,四寨拱坝-重力墩的整体稳定安全系数约在 $2.0 \sim 3.0$ 之间。文献[5]中对25个国内外拱坝进行了整体稳定分析,除已失事的马尔帕赛坝整体稳定安全系数小于 0.8 外,其余工程的整体稳定安全系数均大于 3.5 。与之相比,四寨水库拱坝-重力墩的整体稳定安全系数相对较低。此外,刚体极限平衡法计算结果表明^[6-8],右岸重力墩需要增加墩体工程量以满足抗滑稳定要求,两者结论基本一致。据此笔者建议对重力墩采取适当的加固措施,在后续计算分析中将对对其改善整体稳定安全度的作用进行分析评价。由于计算中假定在各工况下坝体及重力墩材料均处于弹性阶段,而实际可能发生的混凝土损伤断裂对坝体安全的影响仍有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 李瓚,陈兴华,郑建波,等.混凝土拱坝设计[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 周维垣,杨若琼,剡公瑞.大坝整体稳定分析系统[J].岩石力学与工程学报,1997,16(5):424-430.
- [3] 刘宁.清江隔河岩大坝重(推)力墩设计[J].人民长江,2000,31(3):12-15.
- [4] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2000:304-399.
- [5] 林鹏.高拱坝整体稳定及开裂分析[R].北京:清华大学博士后研究报告,2004:49-50.
- [6] 贵州省贵定县四寨水库设计调整报告[R].贵州:黔南州水利水电勘测设计院,2005.
- [7] 贵定县四寨水库坝基稳定安全评价[R].北京:清华大学水利水电工程系,2004:49-51.
- [8] 杨海英.四寨水库拱坝-重力墩整体稳定分析[D].北京:清华大学,2006.

(收稿日期:2006-11-28 编辑:马敏峰)