

拱坝-坝肩三维可视化建模和稳定性分析

周先齐¹, 徐卫亚¹, 钮新强², 郑文棠¹, 任佳丽³

(1. 河海大学 南京 210098; 2. 长江水利委员会 长江勘测规划设计研究院 武汉 430010; 3. 长江科学研究院 武汉 430010)

摘 要: 拱坝是一种很重要的坝型, 具有体型优美、投资省等优点, 但是其对坝肩岩体要求很高, 因此, 为了了解拱坝-坝肩整体安全性状, 采用 FLAC 大变形软件对拱坝-坝肩稳定性进行了三维研究分析。由于 FLAC 软件前处理有所欠缺, 因此采用 AUTOCAD 和 ANSYS 联合进行三维地质可视化建模, AUTOCAD 用于基本数据信息的处理, ANSYS 对基本数据信息进行再加工得到单元模型, 然后把单元模型转入到 FLAC 做数值计算。通过计算分析, 得出了有益的结论。

关 键 词: 可视化; 拱坝-坝肩; 拱梁分载; 地质力学建模; 稳定性分析

中图分类号: TV 652.4

文献标识码: A

Three-dimensional visualization model and stability analysis of arch dam-dam abutment

ZHOU Xian-qi¹, XU Wei-ya¹, NIU Xin-qing², ZHENG Wen-tang¹, REN Jia-li²

(1. Hohai University Nanjing, 210098, China; 2. Institute of Survey Planning Design and Research, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 3. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Arch dam is an important type of dams due to its beautiful body and lower cost and so on. But it has a high requirement to the rock mass of dam abutment. The three-dimensional stability analysis of arch dam-dam abutment is done by using FLAC large deformation software in order to know the safe property. The three-dimensional geological visualization model is done by combined using Auto CAD and ANSYS due to the preprocessing shortage of FLAC software. The basic data information is processed by using Auto CAD, the element model is obtained by reprocessing the basic data information by using ANSYS software. The element model is turned into FLAC to do numerical calculation. Some useful conclusions are obtained by numeration analysis.

Key words: visualization; arch dam-dam abutment; arched girder load sharing; geomechanical modelling; stability analysis

1 引 言

拱坝是一种很重要的坝型, 通过拱梁分载, 在水平方向将受力通过拱的作用传递到坝肩岩体; 在竖直方向, 通过梁的作用将受力传递到坝基, 很大程度上减轻了自身的负担, 因此, 拱坝具有以下几个特点: (a) 体型优美。拱坝在水平位置是由拱组成的, 竖直方向或者是直线 (称为单曲拱坝), 或者也是曲线 (称为双曲拱坝), 整体上看, 其就是由曲面组成, 造型美观; (b) 相比其他坝型而言, 工程投资小。由于拱坝可以通过拱梁的作用, 将受力进行传递, 减轻本身的负担, 因此, 拱坝本身可以修建的薄一些, 其投资也相对减小; (c) 可以充分发挥材料的强度。拱坝强调拱梁分载来传递受力, 这

就使得拱坝的受力主要为压应力, 而工程材料如水泥等主要是抗压, 因此, 可以充分利用这些材料的强度。但是, 其也有致命的缺点, 就是对两岸山体的稳定性要求很高。因为拱坝的受力大部分都传递到了两岸山体, 如果山体的岩块强度不够, 不能长期承受巨大的压力, 那么就很容易造成溃坝, 这对于现代工程来说, 将是一个毁灭性的灾难。正因为如此, 拱坝-坝肩的稳定性及内在规律成为研究的一个热点。对于拱坝-坝肩的稳定性研究, 目前有两种方法: a 地质力学模型试验。地质力学模型试验按照相似条件建立模型, 尽可能真实的反应工程地质条件, 利用该模型进行相关的试验研究。周维垣等^[1]比较详细的说明了模型试验应该遵循的原则、

起到的作用以及可模拟的力学状态,列举了多个地质力学模型试验实例,并对试验方法和安全系数进行了分析。文献[2-5]也运用地质力学模型试验研究了拱坝-坝肩的稳定性。模型试验耗费高、时间长,应用不方便,因此不能大规模使用。b 数值模拟分析。数值模拟分析就是根据工程地质条件,建立相应的地质力学模型,对各种工况进行计算分析,得出相应的结论,指导设计施工以及运行管理。数值模拟方法具有使用方便、时间短、花费省,容易普遍应用,因此,其得到了较大的应用。文献[6-10]运用数值模拟方法对拱坝-坝肩的稳定性进行了研究,得出了有益的成果。因此,本文采用数值模拟方法对某拱坝进行了拱坝-坝肩稳定性分析,选用的软件为岩土专业计算软件 FLAC。这个软件采用显式差分进行求解,可以比较快速的计算。其自带有各种线性、非线性本构模型,用户也可以利用接口进行二次开发自定义本构模型,可以很方便的对各种静动力岩土问题进行分析处理。但是这个软件对于前处理有所欠缺,不能快速有效的建立三维地质模型,因此对于前处理,应用 Autocad 和 ANSYS 联合进行地质建模,文献[11]就介绍了两者联合应用的一些技巧。

目前,工程设计单位都是采用 Autocad 来制图,工程所有的信息都是记录在 Autocad 图形中,因此,地质建模的第一步就应该从这里开始,而且 Autocad 绘图功能强大,可以很方便的对图形进行处理。除此之外,基于 Autocad 良好的开放性,用户可以利用其提供的二次开发手段实现图形数据的输出。

ANSYS 是一种大型通用有限元软件,具有良好的界面操作,可以比较方便的进行前处理操作,这一点对于复杂模型的建立非常重要。同时,它也有较好的接口,可以导入写好的数据,这也为模型的建立提供了方便。

2 三维地质建模

首先对地质资料进行分析,得出研究区域地质特征,然后以此为基础进行物理模型构建。应用 Autocad 和 ANSYS 进行三维地质可视化建模主要分四步,下面分别介绍。

(1) 先从 Autocad 里面把地面等高线、开挖线、拱坝、地层分界线、挤压卸荷带、断层等信息提取出来,进行归类、简化处理,然后利用 Autocad 里面的二次开发工具编写命令,提取这些信息数据输出。这些信息如图 1~3 所示。

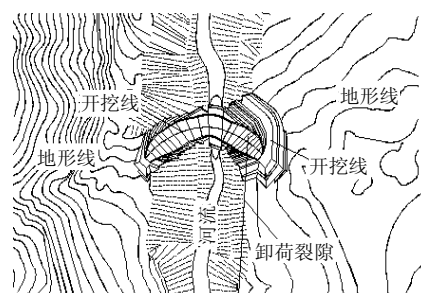


图 1 地形线、开挖线及卸荷裂隙
Fig.1 Monitoring position map

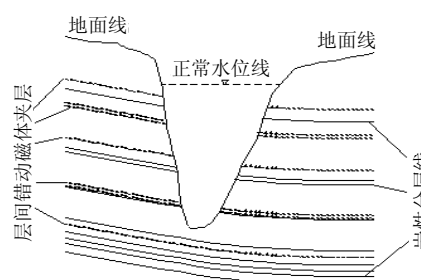


图 2 岩性分界线及层间错动带
Fig.2 Lithologic dividing line and inter-laminar dislocation band

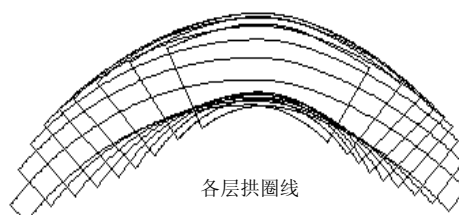


图 3 各层拱圈线
Fig.3 Each arch ring line

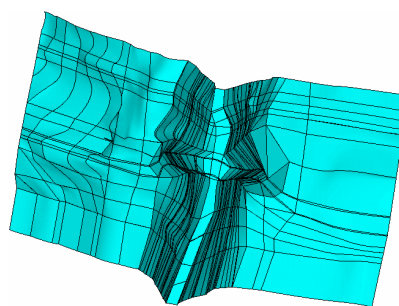


图 4 地面及开挖示意图
Fig.4 Ground and excavation map

(2) 利用 ANSYS 里面自带的 APDL 语言编写命令流,将第一步里面导出的数据信息分别读入到 ANSYS。导入后图形如下图 4~6 所示。

(3) 在第二步导入信息的基础上,开始建立模型,这一步包括建立块体,赋予这些块体相关材料属性、单元属性,最后进行单元划分。建立的模型如图 7~8 所示:

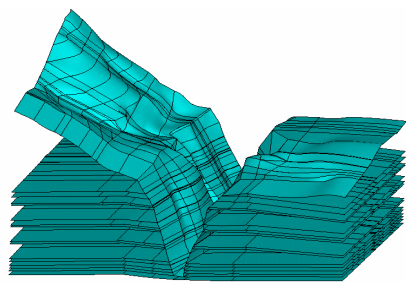


图 5 岩性分界及层间错动带
Fig.5 lithologic dividing line and Inter-laminar dislocation band

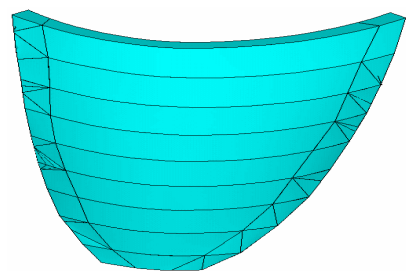


图 6 拱坝示意图
Fig.6 Sketch of arch dam

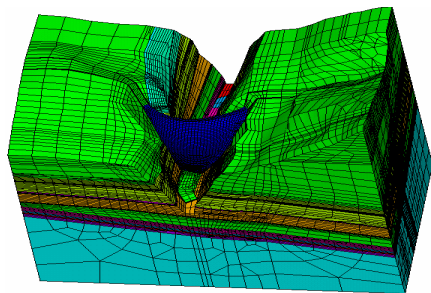


图 7 三维拱坝单元示意图
Fig.7 Sketch of elements of three-dimension arch dam

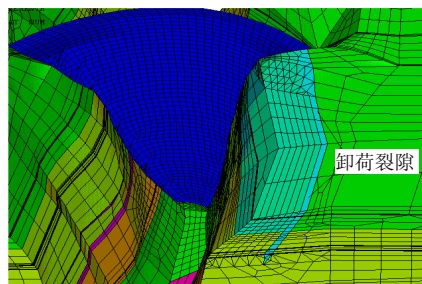


图 8 卸荷裂隙放大示意图
Fig.8 Sketch of amplification of unloading cracking

(4) 利用 FLAC 里面的 fish 语言编写命令流, 将在 ANSYS 里面建好的三维地质模型单元节点信息导出, 转换成 FLAC 规定的格式。FLAC3D 数据格式如表 1 所示, 转换后的图形如图 9~10 所示。

表 1 FLAC3D 数值模型中数据结构
Table 1 Data structure of FLAC3D

编号	命令流格式	数据结构					
		GRIDPOINTS					
1	节点表头						
	节点 1 坐标	G	1	0.0000	0.0000	0.0000	
	节点 2 坐标	G	2	5.0000	0.0000	0.0000	
	⋮				⋮		
	节点 32 坐标	G	23	32.5000	2.5000	7.0000	
2	单元表头	ZONES					
	brick	Z	1	1	2	4	5 3 8 6 7
	wedge	Z	2	9	11	12	10 14 13
	pyramid	Z	3	15	16	18	19 17
	tetrahedral	Z	4	20	21	22	23
3	组表头	GROUPS					
	组 1 标志	ZGROUP	1				
	单元号		1				
	列表						
	⋮		⋮		⋮		
	组 4 标志	ZGROUP	4				
	单元号		4				
	列表						

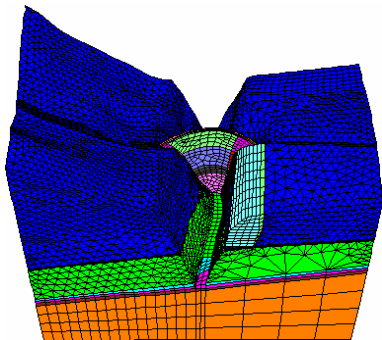


图 9 三维模型示意图
Fig.9 Sketch of three-dimension model

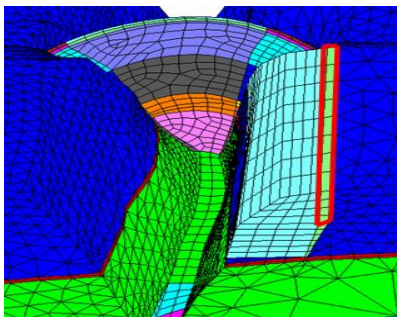


图 10 卸荷裂隙局部放大图
Fig.10 Sketch of local amplification of unloading cracking

3 稳定性分析

3.1 计算荷载与工况

采用正常水位即上游水位 970.00 m, 下游水位

857.00 m, 考虑岩体和坝体自重, 分为坝肩岩体没有加固和坝肩岩体加固两种情况计算。

3.2 物理力学参数

各分区岩体、坝体混凝土物理力学参数如表 2 所示。

3.3 安全系数定义

O.C.Zienkiewicz 等首次提出抗剪强度折减系数的概念, 其提出的强度储备安全系数与 Bishop 在极限平衡法中的稳定安全系数是等效的^[12]。强度折减法的基本原理是将材料的强度参数 c 、 $\tan \varphi$ 值同时除以一个折减系数 F , 这时就会得到一个新的 c' 、 φ' , 然后再用这个强度参数进行试算, 然后调整系数 F , 反复计算, 直到所研究的对象达到临界破坏, 这个时候的系数 F 就是该研究对象的安全系数。分析方程如下:

$$c' = c / F \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan(\tan \varphi / F) \quad (2)$$

因此, 采用强度折减方法来定义该模型之左坝肩下游侧边坡的安全系数。

3.4 计算分析

加固处理前, 坝体顺河向位移分布为拱冠梁中部最大, 向坝体四周递减, 最大位移为 10.35 mm。横河向位移左拱最大位于坝体中部, 右拱位于坝体 2/3 坝高处, 最大值分别为 2.50 mm、3.45 mm。坝体应力分布基本上都是以拱冠梁为线对称分布。拱坝下游侧边坡在上游水压及拱坝作用下, 主要向下游运动, 最大顺河向位移为 20.45 mm, 发生于边坡表面。横河向位移比较小, 只有 3.24 mm。在对边坡进行加固处理后, 坝体顺河向位移分布没有变化, 最大值有所减小, 达到 9.89 mm。横河向左拱最大位移有所上移, 位于 2/3 坝高处, 右拱最大位移位于 2/3 坝高处, 最大值分别为 2.35 mm、2.76 mm。坝体位移分布基本上还是以拱冠梁为线对称分布。下游侧边坡位移减小, 最大顺河向位移为 14.35 mm, 最大横河向位移为 2.38 mm。

没有加固时, 在相关荷载作用下, 坝体主拉应力出现于坝体上游面拱肩槽处、下游面顶拱附近, 最大拉应力出现在上游面右拱肩槽底部, 达到 0.5 MPa, 压应力主要出现于上游面大部、下游面两拱肩槽一带, 最大压应力位于卸荷裂隙附近, 达到 5 MPa; 经过加固处理后, 坝体应力有所调整。主拉应力分布没有太大的变化, 其大小有所降低, 达到 0.3 MPa。主压应力分布也没有变化, 最大压应力向下移动, 出现于下游面拱肩槽中下部, 达到 3 MPa。

表 2 物理力学参数
Table 2 Physico-mechanical parameters

符号	容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	变形模量 / GPa	泊松比	抗剪强度		抗拉强度 / MPa
				f'	c' / MPa	
坝体	24.0	18	0.167	1.1	1.5	1.5
混凝土						
p1m ²	26.6	2.5	0.20	1.5	1.8	1.2
p1m ¹						
p1q ⁹	26.3	20	0.25	0.8	0.8	0.9
p1q ⁸						
p1q ⁷	26.4	20	0.25	1.1	1.4	1.0
p1q ⁶						
p1q ⁵	26.3	17	0.25	1.0	1.1	0.9
p1q ⁴	26.6	25	0.20	0.8	0.9	0.9
p1q ³	26.3	10	0.30	0.8	0.9	0.9
p1q ²	26.3	17	0.30	1.0	1.1	0.9
f ₆ f ₇	26.3	10	0.3	0.65	0.25	0
f ₅	26.3	10	0.3	0.65	0.25	0
f ₃ f ₄	26.3	10	0.3	0.62	0.22	0
卸荷带	26.3	10	0.3	0.5	0.2	0

在下游侧边坡取一个横剖面, 在表面取一个观测点进行安全系数分析。如图 11 所示, 在没有加固处理前, 分别把抗剪强度值进行 1.11、1.20、1.23、1.30 折减, 由图 12 可以看出, 当折减到 1.30 的时候, 观测点的位移不收敛, 因此, 这个时候边坡的安全系数为 1.23; 经过加固处理后, 分别把抗剪强度值进行 1.11、1.43、2.0、2.5 折减, 由图 13 可以看出, 当折减到 2.5 的时候, 观测点的位移不收敛, 因此, 这个时候边坡的安全系数为 2.0。

3.5 小 结

由以上分析可以看出, 蓄水以后, 由于坝肩下游卸荷裂隙的影响, 边坡安全系数不满足《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386-2007) 要求, 经过加固以后, 边坡安全系数达到规范要求。边坡加固前后, 无论是坝体位移、应力, 还是边坡本身的变形, 都有明显的改善。加固后拱坝的位移有所减小, 分布也均匀。应力同样如此。边坡本身的变化比较明显, 顺河向位移明显减小, 安全系数也明显提高。因此, 对边坡进行加固还是有必要的, 可以保证大坝-坝肩的稳定性要求。

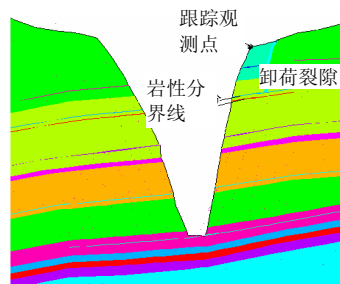


图 11 监测点位置示意图

Fig.11 Sketch of monitoring point positions

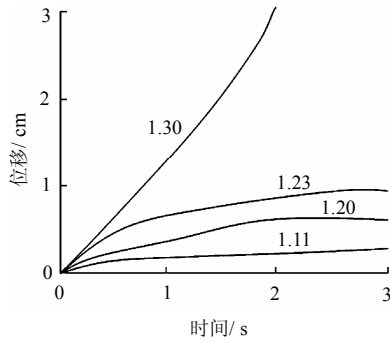


图12 没有加固时结构面强度降低后跟踪点水平向位移历程

Fig.12 Horizontal displacement process of tracking points when the strength of structural plane has been decreased without reinforcement

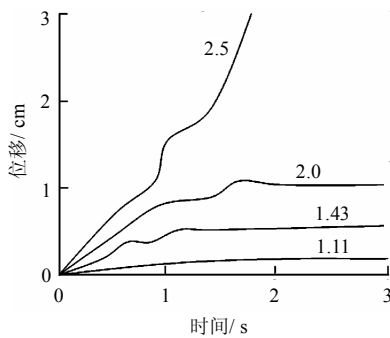


图13 加固后结构面强度降低后跟踪点水平向位移历程

Fig.13 Horizontal displacement process of tracking points when the strength of structural plane has been decreased under reinforcement

4 结 论

三维整体稳定性分析是一个复杂的过程,对其进行研究的时候应该尽可能的采取比较简单的方式。进行数值分析,三维地质可视化建模是一个复杂的工程,因此,应该尽量采用常用的软件进行联合开发,这样就可以使得我们的工作相对容易,工作量也会大大减小。本文在这方面进行了初步的开发研究,实践证明是可行的,最后分析的结果对设计施工有一定的辅助作用,为工程的顺利实施提供了有益的参考。

参 考 文 献

- [1] 周维垣, 杨若琼, 刘耀儒. 高拱坝整体稳定地质力学模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(1): 53—64.
- [2] 张立勇, 张林, 李朝国, 等. 沙牌RCC拱坝坝肩稳定三维地质模型试验研究[J]. 水电站设计, 2003, 19(4): 20—23.
- [3] 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.
- [4] 邓仕涛, 赵海涛, 罗业辉, 等. 牛头山拱坝三维有限元计算和结构模型试验结果比较[J]. 西北水电, 2004, 4: 60—62.
- [5] 张林, 刘小强, 陈建叶, 等. 复杂地质条件下拱坝坝肩稳定地质力学模型试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 1—5.
- [6] 梅明荣, 徐建强, 任青文. 白鹤滩拱坝整体安全度的非线性分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(5): 41—58.
- [7] 宋战平, 李宁, 陈飞熊. 高拱坝一坝基系统的三维静力非线性数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2003, 35(4): 334—342.
- [8] 何江达, 林正伟, 王启智. 锦屏一级高拱坝结构特性及坝肩稳定性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(2): 12—16.
- [9] 张燎军, 苏超, 翟利军, 等. 乌江构皮滩双曲拱坝整体稳定性分析[J]. 水力发电, 2003, 29(3): 16—19.
- [10] 徐明毅, 陈胜宏, 张勇传. 小湾拱坝坝基开挖及加固的三维弹粘塑性有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(1): 1—5.
- [11] 梁声闻, 杨新华, 杨文兵, 等. ANSYS前处理与AutoCAD的系统集成[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004, 21(1): 81—83.
- [12] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1—8.