

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.007

高混凝土坝变形性态的库盘影响分析

许焱鑫^{1,2,3}, 郑东健^{1,2,3}, 赵二峰^{1,2,3}, 刘何稚^{1,2,3}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 在研究有限元模型边界确定方法的基础上, 通过建立库盘大范围 and 近坝区小范围 2 种尺度有限元模型, 并由库盘模型变形计算结果提取近坝区模型的边界条件, 提出高混凝土坝变形性态的库盘影响分析方法, 分析库盘变形对大坝变形性态的影响。典型实际工程计算结果表明, 高坝大库工程, 库盘作用对大坝变形影响明显, 尤其坝前大库容工程在应用实测资料分析混凝土坝运行性态、反分析结构力学参数和变形监控指标时, 应该考虑库盘变形的影响, 以确保充分掌握大坝运行性态, 有效监控大坝的安全运行。

关键词: 高混凝土坝; 大型水库工程; 库盘变形; 坝体变形; 变形性态; 有限元模型; 建模方法

中图分类号: TV314; TV642.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2015)04-0319-005

Effect of reservoir basin on deformation behavior of high concrete dam

XU Yanxin^{1,2,3}, ZHENG Dongjian^{1,2,3}, ZHAO Erfeng^{1,2,3}, LIU Hezhi^{1,2,3}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: FEM models of two different scales, including the reservoir basin and near-dam area, were established based on study of the method for determining the model boundaries. By extracting the boundary condition of the near-dam area model from deformation results of the reservoir basin model, a reservoir basin effect analysis method is proposed to study the effect of reservoir basin deformation on the deformation behavior of high concrete dams. Calculated results of a typical project show that reservoir basin deformation has a significant effect on the deformation of a high concrete dam with a large reservoir capacity. In the study of the operational performance and back analysis of mechanical parameters and deformation monitoring indices of high concrete dams with measured data, especially for the project with a wide area of water surface in front of it and a large reservoir capacity, the effect of reservoir basin deformation should be taken into consideration so as to fully understand the operational performance of dams, and effectively monitor the dam operation in safe conditions.

Key words: high concrete dam; large reservoir project; reservoir basin deformation; dam deformation; deformation behavior; FEM model; modeling method

近年来,我国出现了一批已建或在建的超高混凝土坝,如 178 m 高的龙羊峡水电站大坝、240 m 高的二滩水电站大坝、285.5 m 高的溪洛渡水电站大坝、289 m 高的白鹤滩水电站大坝、295 m 高的小湾水电站大坝以

收稿日期: 2014-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(51279052, 51139001, 2014513311); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室研究项目(20145028312); 江苏省“333 高层次人才培养工程”科研项目(2016-B1307101)

作者简介: 许焱鑫(1989—),男,江苏南京人,博士研究生,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail: hhu.yxy@163.com

及305 m高的锦屏一级水电站大坝。此类工程坝高库大,上游水库巨大的水压力不可避免地会造成库盘变形。龙羊峡水电站工程的监测资料^[1]表明,在蓄水过程中,坝体有向上游倾倒的变形现象,监测到的向上游最大水平位移达16 mm;小湾水电站工程蓄水阶段的库区沉陷观测资料^[2]也反映出坝址上游最大沉降35 mm、下游最大抬升2.7 mm的变形现象。库盘变形是由上游巨大水体的自重引起的,它造成坝基往上游的转动,使坝体产生向上游的倾倒变形。在实际工程中,常缺乏对库盘变形的监测和分析;在利用有限元方法分析结构性态时,也只是考虑坝体应力在基础内的影响区域,经验上取2~3倍坝高作为坝体上游侧的计算范围,对库盘变形的影响考虑不足,坝体变形的计算结果往往明显大于实际的测量值,这对低坝小库工程影响较小,可以满足要求。对高坝大库,应用变形实测资料进行坝体、坝基参数反分析,其结果常不符合客观实际,拟定出来的变形监控指标会偏大,这对监控大坝的安全运行不利。因此,对高坝大库工程,分析库水对库盘的作用及其对大坝变形的影响,对准确把握大坝变形性态、有效监控大坝安全有十分重要的意义^[3-4]。

目前国内外对库盘变形的影响监测和分析较少,国内仅有极少数工程开展了库盘变形的监测工作^[1-2],对库盘变形的一般性规律做出了总结。吴中如等^[3]、顾冲时等^[5-8]提出了考虑库盘作用下坝体、坝基和库盘参数反演的确定性模型方法,探讨了混凝土坝空间位移场的正反分析模型,并对有限元分析精度的影响因素进行了研究;熬麟^[9]探讨了重力坝有限元分析中应力边界条件和位移边界条件的考虑方法;黄耀英等^[10-11]将水库地基简化为半无限体,推导了地基的位移和应力,研究模型合理的建模范围与边界约束方式;Zhao等^[12-13]通过建立各种形式的库盘模型,对库盘变形的影响因素进行了初步研究。国外对库盘变形问题研究尚未见相关的研究成果发表。本文在研究模型范围确定方法的基础上,通过建立大范围库盘和小范围近坝区2种尺度有限元模型,提出高混凝土坝库盘变形影响的分析方法,分析库盘作用对混凝土坝变形性态的影响。

1 高混凝土坝库盘变形影响的有限元模型建立

对于高坝大库工程,水库淹没的范围向上游常达到几十千米甚至上百千米,相比而言,坝体是其中的一个细微结构。本文通过建立库盘的大尺度模型和近坝区的小尺度模型,采用线弹性有限元方法,联合分析库盘变形对高混凝土坝变形性态的影响,其过程大致可分为2个步骤:首先,对大范围的库盘有限元模型施加库水压力,得到库盘变形的位移场;然后,对近坝区的有限元模型施加库盘变形的边界条件,计算库盘变形对坝体变形的影响。

1.1 库盘有限元分析模型的构建

1.1.1 建模范围的确定

为计算得到准确的库盘变形,首先需要确定库盘合理的建模范围,包括模型的上游范围、下游范围、基础深度范围、左岸和右岸范围5个部分。对这些范围的合理取值需要通过多次试算来确定:在建模过程中,逐步扩大其中某一项边界的范围,同时将其余边界的范围取得足够大,通过多次试算得到坝体特征点位移随该项边界范围的变化关系,当位移值出现收敛或不受边界条件类型的影响时,即认为模型边界已达到了合理的范围。

1.1.2 地质条件的简化

库区范围广阔,其中的地质条件和地质构造往往十分复杂,难以对地质条件进行真实、详尽的模拟。对地质条件进行简化时,考虑在水平范围内将库盘按照主要的地质分区划分,在深度方向将基岩按照主要的地质分层划分,同时考虑库区范围内重要的地质构造、大的断层和破碎带,以模拟其对库盘整体变形的截断作用。各地质分区材料参数可参考库区的勘测资料;库区深层基岩的地勘工作不足时,可利用库区沉降的实测结果进行反演,或者参照其他地质条件相近工程的成果,利用岩石参数随地基深度变化的关系曲线外延得到。

1.1.3 单元尺寸的选择

在建立大尺度的库盘模型时,因受计算规模限制,坝体和基础不可能剖分得很密;同时,模型中与坝体和河床不同距离处的地形条件也应满足不同的模拟精度。河床部分因直接受水荷载作用,其模拟精度对计算结果的准确性影响较大,所以在距离河床一定范围内采用尺寸相对较小的单元,边长可取100~200 m;在远离河床时,逐渐扩大单元的尺寸,以减少模型的单元数量,提高有限元计算的效率。

1.1.4 边界及荷载的施加

在库盘模型的底边界施加固定约束,其余边界施加法向约束,荷载考虑库盘中水体的自重,将其以面力^[9,14]的形式施加于河床部分的单元,计算得到水体自重产生的库盘变形。

1.2 近坝区有限元分析模型的构建

为准确分析库盘作用对坝体变形的影响,需要对近坝范围的地形、地质条件和坝体结构进行细致的模拟,

此时近坝区模型的边界范围根据工程经验选定,最小范围为上游取2倍坝高、左右岸取1倍坝高、下游取1倍坝高、基础深度取2倍坝高。按照获取近坝区模型边界条件的不同方式,单元划分的方法可分为2种,如图1所示(其中粗实线表示近坝区模型的边界,实线网格为近坝区模型单元,虚线网格为库盘模型单元)。可见近坝区模型边界节点与库盘模型节点的衔接可采用2种方法实现:一是通过不断细分网格达到细致地模拟近坝区结构的目的,此时近坝区模型边界条件即为库盘模型相应节点的变形;二是近坝区模型的边界条件可以利用库盘变形的计算结果在边界节点上插值得到。为提高建模效率和模拟精度,本文采用第2种方法建立近坝区有限元模型,将库盘变形的边界条件施加于近坝区模型的边界节点上,计算得到坝体在库盘作用下产生的变形。

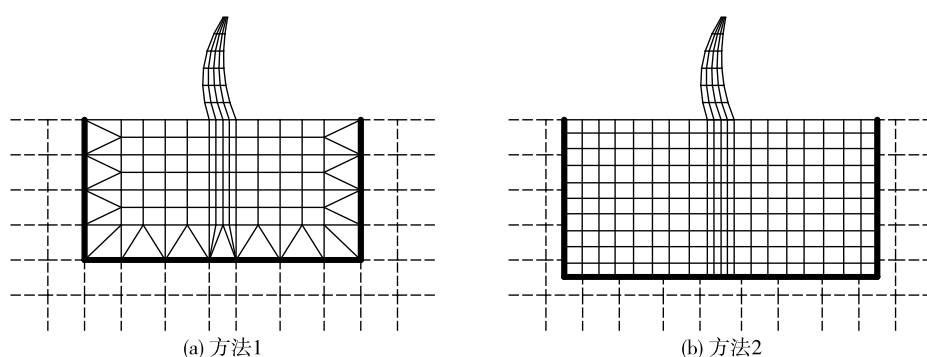


图1 有限元模型网格示意图

Fig. 1 Meshes for FEM model

2 工程实例

为对比不同水库库型下库盘变形的影响,以2座典型的高混凝土坝工程为例进行计算分析。

工程1位于我国西南部地区,为一双曲拱坝,最大坝高295 m,坝体布设有垂线测点和温度计,正常蓄水位1240 m时水库总库容150亿 m^3 。水库在坝前2 km左右分为东、西2支,东支库长123 km,西支库长178 km。水库两岸山势陡峻,河谷深切,自然山坡坡度一般为 $30^\circ\sim 45^\circ$,呈V形河谷。工程2位于我国西北部地区,为一重力拱坝,最大坝高178 m,坝体内布设了垂线测点。正常蓄水位2600 m时水库总库容247亿 m^3 ,水库运行期间尚未达到该正常蓄水位。水库库长101 km,水面面积383 km^2 。坝前峡谷呈V形,水库向上游迅速拓宽,最大水面宽度9 km。

2.1 有限元模型

利用库区和近坝范围的地形、地质资料,根据建模的方法和原则,分别建立了2个工程的大范围库盘和近坝区的有限元模型,如图2和图3所示。工程1的库盘模型:在靠近坝体和河床的一定范围内,单元剖分较密,单元尺寸为100~200 m,其他区域的单元尺寸逐渐过渡至800 m;库区分为4个地质分区,沿基础深度方向分为4个地质分层;模型的建模范围,上游取44 km,下游取21 km,左岸取40 km,右岸取50 km,深度取11 km,以地基深度为例,正常蓄水位下坝顶最大顺河向变形随地基深度的变化如图4所示,深度取11 km时对应的变形增幅为4%,可认为变形达到收敛,故将模型的深度范围取为11 km。工程2的库盘模型:单元尺寸从近坝一定范围内的50~100 m逐渐过渡至远坝范围的800 m;库区分为3个地质分区,沿基础深度方向分为3~4个地质分层;模型的建模范围,上游取70 km,下游取17 km,左岸取16 km,右岸取20 km,深度取10 km。

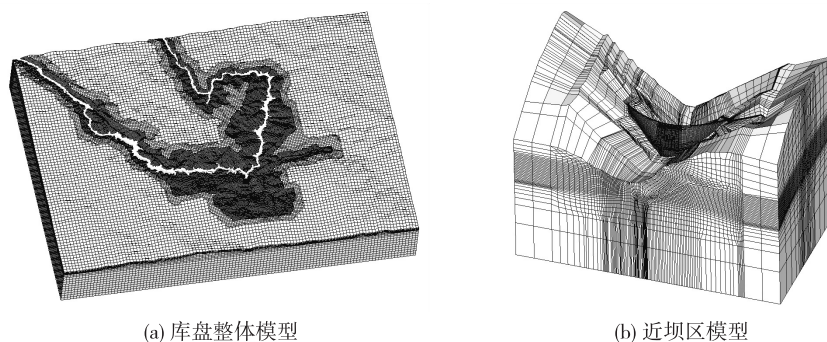


图2 工程1有限元模型

Fig. 2 FEM models of project 1

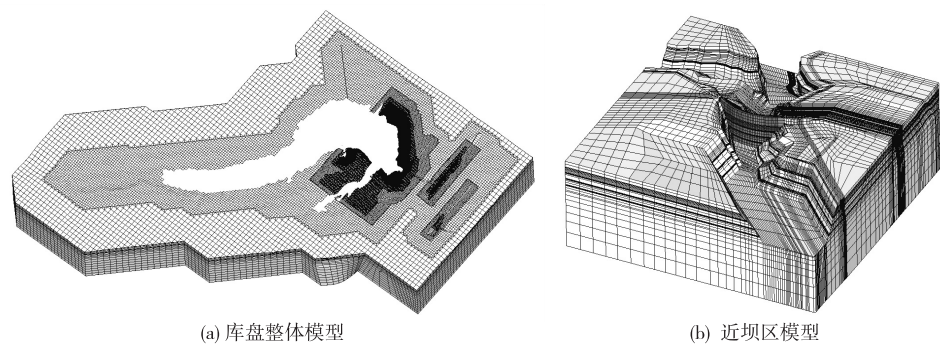


图 3 工程 2 有限元模型
Fig. 3 FEM models of project 2

2.2 库盘作用的影响分析

除水压荷载外,温度荷载也是影响拱坝变形的重要因素,因此对正常蓄水位+温升荷载工况下的坝体变形进行分析,其中工程 1 温度荷载根据正常蓄水位下相应的实测温度场获得,工程 2 的温度荷载取原设计时的温升荷载。首先对库盘模型施加最高水位下的水压荷载,进行库盘变形计算;然后应用近坝区模型进行坝体位移计算,近坝区模型边界节点位移值由库盘模型计算结果插值得到。分别计算了考虑与不考虑库盘作用时的坝体变形,获得拱冠梁坝段垂线测点的径向位移,并与实测值进行对比,见表 1。因工程 2 未达到正常蓄水位,且缺少实际温度场的监测资料,故分析库盘变形影响程度时,以考虑库盘作用时的计算值代表变形的真实值。

表 1 工程 1 和工程 2 坝体径向位移
Table 1 Radial displacement of dams in projects 1 and 2

工程	测点	高程/m	实测值 δ /mm	考虑库盘 δ_1 /mm	不考虑库盘 δ_2 /mm	Δ /mm	σ /%
工程 1	1(坝顶)	1 245	131.00	131.46	138.31	-6.85	5.23
	2	1 174	111.00	112.34	117.66	-5.32	4.79
	3	1 100	81.81	83.49	87.35	-3.86	4.72
	4	1 050	35.52	36.93	39.03	-2.10	5.91
	5(坝基)	963	8.84	10.79	12.05	-1.26	14.25
工程 2	1(坝顶)	2 600	22.73	22.73	33.46	-10.73	47.21
	2	2 560	20.59	20.59	28.81	-8.22	39.92
	3	2 497	10.74	10.74	15.33	-4.59	42.74
	4(坝基)	2 463	5.72	5.72	8.51	-2.79	48.78

注:径向位移值以向下游侧为正; δ 为坝体位移实测值, δ_1 、 δ_2 分别为考虑库盘变形和未考虑库盘变形的坝体位移计算值; $\Delta=\delta_1-\delta_2$, $\sigma=|\Delta/\delta_1|\times 100\%$ 。

由表 1 可以看出,库盘作用使坝体产生向上游的倾倒变形,对两座拱坝的拱冠梁坝段位移影响分别为 1.26~6.85 mm、2.79~10.73 mm。考虑库盘变形的影响后,工程 1 坝体测点位移的计算值更接近实测值。库盘变形对大坝位移的影响,工程 1 坝基以上部位在 5% 左右,坝基部位超过 10%;工程 2 均在 40% 左右。可见,对于坝前水面开阔、水体自重集中于坝前的工程,库盘变形的影响明显。在利用实测资料反演坝体、坝基力学参数,拟定相应变形监控指标时,考虑库盘变形影响的分析结果将更符合实际情况。

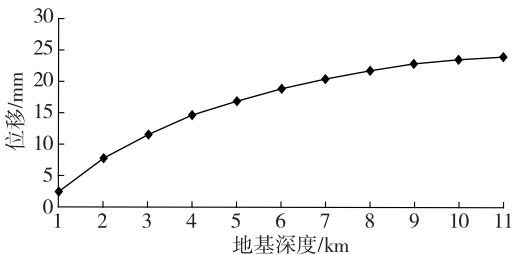


图 4 工程 1 库盘模型坝顶最大顺河
向变形随地基深度变化关系曲线
Fig. 4 Maximum deformation at dam crest along
streamwise direction varying with foundation
depth obtained by reservoir basin model in project 1

3 结 论

a. 库盘作用使坝体产生向上游的倾倒变形,对于库容较小、河道细长的工程,因坝前水量有限,库盘的影响较小;而对于坝前库容较大、河道宽阔的工程,因大量的水荷载集中于坝前,库盘对混凝土坝变形的影响明显。在利用实测资料进行参数反分析和拟定变形安全监控指标时,应考虑库盘变形的影响。

b. 通过建立大范围库盘和小范围近坝区2种尺度的有限元模型,可以分析混凝土坝变形受库盘变形的影响程度。实例分析表明,考虑库盘变形的分析成果与实测资料更加吻合。

c. 对于高坝大库工程,库盘的作用影响较大,但大范围库盘有限元模型的力学参数不易得到,布置一定数量的库盘变形监测点将有利于反演库盘综合力学参数,分析库盘对大坝变形的影响。

参考文献:

- [1] 西北勘测设计研究院. 龙羊峡水电站工程变形监测资料综合分析报告[R]. 西安:西北勘测设计研究院,2014.
- [2] 昆明勘测设计研究院. 小湾水电站工程库盘水准沉降分析报告[R]. 昆明:昆明勘测设计研究院,2013.
- [3] 吴中如,顾冲时. 大坝原型反分析及其应用[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1999:7-21,99-106.
- [4] 郑东健,刘广胜,顾冲时. 大坝水平位移监控指标拟定的混合法[J]. 水电自动化与大坝监测,2002,26(2):42-44. (ZHENG Dongjian, LIU Guangsheng, GU Chongshi. A combination formulation of monitoring index of dam horizontal displacement[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2002, 26(2): 42-44. (in Chinese))
- [5] 顾冲时,吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,2006:182-187.
- [6] 顾冲时,吴中如. 坝体、坝基和库盘变模的整体反演分析[J]. 水力发电学报,1996(3):43-48. (GU Chongshi, WU Zhongru. The inversive analysis on deformation parameters of dam body and its foundation with whole reservoir bed[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1996(3): 43-48. (in Chinese))
- [7] 顾冲时,吴中如,蔡新. 探讨混凝土坝空间位移场的正反分析模型[J]. 工程力学,1997(1):138-144. (GU Chongshi, WU Zhongru, CAI Xin. Analysis and back analysis model of 3-d displacement field of concrete dams[J]. Engineering Mechanics, 1997(1): 138-144. (in Chinese))
- [8] 顾冲时,郑东健,吴中如. 大坝及岩基的仿真有限元模型的精度分析[J]. 水电能源科学,2002,20(2):13-16. (GU Chongshi, ZHENG Dongjian, WU Zhongru. Precision analysis on simulational finite element model of dam and batholith[J]. Water Resources and Power, 2002, 20(2): 13-16. (in Chinese))
- [9] 熬麟. 用有限单元法计算重力坝时关于地基边界条件的探讨[J]. 水利学报,1981,22(4):18-29. (AO Lin. Discussion on boundary conditions of the foundation in applying finite element method to compute stresses in gravity dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1981, 22(4): 18-29. (in Chinese))
- [10] 黄耀英,王润富,吴中如. 无限均布压力作用下弹性地基的应力和位移[J]. 河海大学学报:自然科学版,2007,35(5):518-523. (HUANG Yaoying, WANG Runfu, WU Zhongru. Study on elastic foundation under infinite uniform pressure[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(5): 518-523. (in Chinese))
- [11] 黄耀英,沈振中,吴中如,等. 混凝土坝及坝基分析中截取边界的影响[J]. 水利水运工程学报,2007(4):9-13. (HUANG Yaoying, SHEN Zhenzhong, WU Zhongru, et al. Intercepting boundary influence in analysing concrete dam and its rock foundation size[J]. Hydro-science and Engineering, 2007(4): 9-13. (in Chinese))
- [12] ZHAO Erfeng, ZHANG Libing. Weight analysis on influencing factors of reservoir basin deformation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405: 617-620.
- [13] ZHAO Erfeng, ZHANG Libing, WU Bangbing, et al. Influencing factors of high arch dam operating status with the action effect of reservoir basin[J]. Disaster Advances, 2013, 6(3): 107-111.
- [14] 潘家铮. 坝体有限元分析中的水荷载问题[J]. 水力发电,1984(3):21-26. (PAN Jiazheng. Water pressure problem in dam FEM analysis[J]. Water Power, 1984(3): 21-26. (in Chinese))