

老鹰岩电站面板堆石坝应力应变及稳定计算分析

李胜东

(四川省内江水利电力建筑勘察设计研究院,四川内江 641000)

摘要:混凝土防渗墙与面板结合部位的是覆盖层上建造面板坝的关键技术,必须做好结合部位的止水,以防止产生集中渗漏。应合理选择面板施工时间,在坝体填筑半年后进行,以改善面板和止水设施工作条件。

关键词:老鹰岩电站;堆石坝;地质条件;分析方法;计算成果

中图分类号:TV7;TV641.4;G613.4

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2014)02-0140-04

1 工程概述

老鹰岩电站工程位于凉山州会理县六华河下游,属六华河规划的第4级,为混合式开发电站,电站装机24 MW,具有不完全年调节性能,电站工程任务为发电和生态保护。电站由首部枢纽、引水系统和电站厂区三部分组成。其中大坝采用钢筋砼面板堆石坝,坝顶高程为1 789.00 m,最大坝高66 m,坝顶长173 m,大坝上游坡采用30~50 cm厚C30钢筋砼面板防渗,面板底部与钢筋砼趾板连接,趾板再同砂卵石基础中的砼防渗墙连接。

2 地形地质条件

坝轴线方向为N41°E,地形坡度较陡,岩层走向与坝轴线夹角为2°。

坝基两岸表层局部出露厚约0~0.5 m的残坡积层(Q_4^{el+dl})、由全风化白云岩碎屑及碎块石组成;坝基河床为第四系冲积层(Q_4^{al})含砂漂卵石或砂卵石层,厚约40.0 m,透水性强。据钻探及物探资料显示河床冲积层共分四层:第一层厚6.0~10.0 m,结构松散~稍密状,承载力标准值200~300 kPa,分布高程1 718.65 m以上,以漂石、卵石及中粗砂粒组成,漂卵石含量占70~80%,其中漂石含量达15%以上;第二层厚约5.0 m,结构中密~密实状,承载力标准值550~650 kPa,分布高程1 713.80~1 718.65 m之间,以卵、砾石及中粗砂粒组成,其中砂粒含量达30%,漂石含量极少,级配良好,强度较高;第三层厚约7.0 m,结构稍密~中密状,承载力标准值为300~400 kPa,分布高程1 707.99~1 713.80 m

之间,以砂夹卵、砾石组成,其中砂粒含量达40%,漂、卵石含量较少,骨架颗粒偏少,强度偏低;第四层厚约18.0 m,结构中密~密实状,承载力标准值为650~800 kPa,分布高程1 689.38~1 707.99 m,砂粒含量占20~25%,漂、卵石含量偏多,其中漂石含量明显增多,据钻探揭露漂石粒径可达700 mm以上。下伏震旦系灯影组下段(Zbd^1)白云岩。河床段强风化层厚0.50~1.80 m,岩芯脆硬,呈碎块状,弱风化~微风化岩体较完整,透水性弱~微;岸坡段强风化卸荷带厚12.0~17.0 m,水平宽8.0~10.0 m,裂隙极其发育,岩芯破碎;弱风化卸荷带厚30.0~33.00 m,裂隙较发育,岩芯呈短柱状,局部呈长柱状;坝基微风化~新鲜基岩,岩体完整。

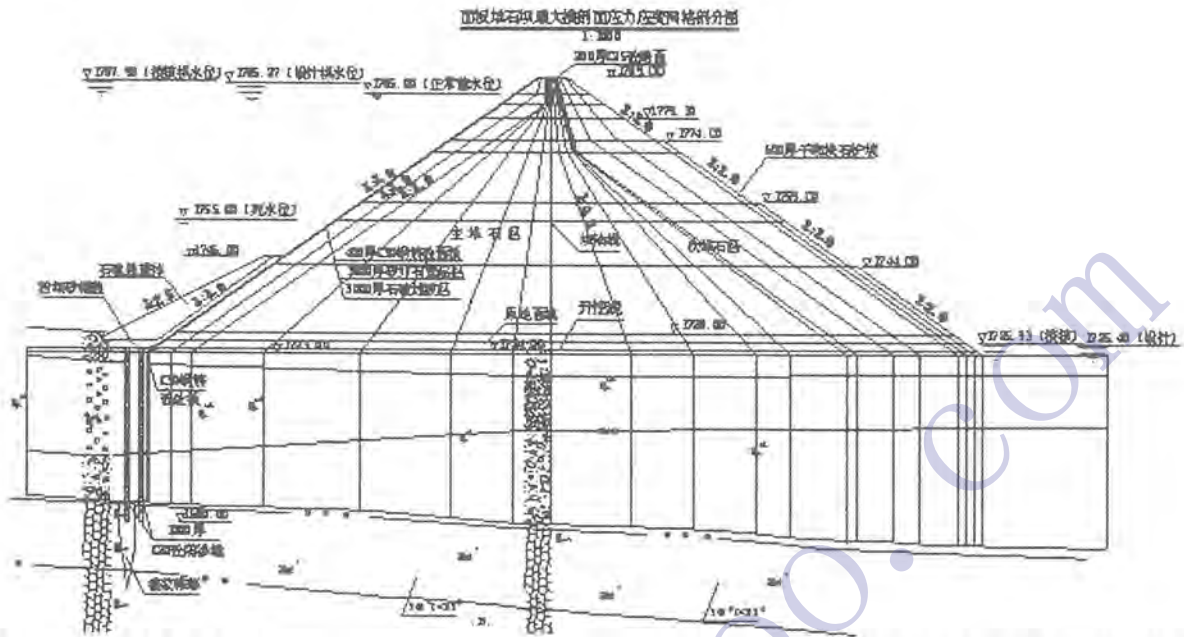
两坝肩平缓台地零星分布第四系残坡积层(Q_4^{el+dl})灰黄色粉土、砂土夹灰岩块碎石,厚0.0~0.60 m。大部分裸露震旦系灯影组下段(Zbd^1)白云岩,产状为:走向N43°E,倾向S47°E,倾角85°,左坝肩强风化卸荷带厚约13.0 m,弱风化卸荷带厚约30.0 m,强风化卸荷带水平宽度为8.0~10.0 m;右坝肩强风化卸荷带厚约18.0 m,水平宽度为13.0~20.0 m,弱风化卸荷带厚约36.0 m。同时左坝肩在高程1 732.55 m~1 749.30 m存在约17 m厚的破碎带,右坝肩在高程1 760.45 m~1 765.41 m存在约5 m厚的破碎带。

3 计算分析方法

由于该工程面板堆石坝基础为深厚覆盖层,且趾板也置于砂卵石层上,为给面板堆石坝周边缝、坝体应力应变及坝坡稳定提供设计依据,确保大坝安全可靠,设计进行了二维应力应变及坝坡

收稿日期:2013-03-18

稳定计算分析工作。计算分析确定的大坝剖面见 下图。



3.1 非线性有限元计算

3.1.1 计算模型

邓肯的 E-B 模式按下列公式计算切线杨氏模量和体积模量:

$$E_t = K(\sigma_3)^n(1 - S_1)^2 \quad (1)$$

$$K_v = K_b(\sigma_3)^m \quad (2)$$

$$\text{其中 } S_1 = R_f(\sigma_1 - \sigma_3)/2\tau_f \quad (3)$$

$$R_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (4)$$

τ_f 为抗剪强度, K 、 K_b 、 m 、 n 、 R_f 是五个计算参数。模式规定抗剪强度用下式计算:

$$\tau_f = \text{SIN}\varphi \times \sigma_3 \quad (5)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg\sigma_3 \quad (6)$$

φ_0 是 $\sigma_3 = 0.1 \text{ MPa}$ 时的内摩擦角。通过常规三轴剪切试验可测定 K 、 K_b 、 m 、 n 、 R_f 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 7 个参数。

程序规定卸荷时切线杨氏模量按下式计算:

$$E_{ur} = K_{ur}(\sigma_3)^{n_{ur}} \quad (7)$$

其中 K_{ur} 为卸荷模量参数。卸荷准则为当前应力水平小于历史上最大值的 95%, E_t 按 (7) 式计算, 否则, E_t 按 (1) 式计算。程序规定施工期一律按加荷模量计算, 蓄水期按上述准则判别加荷或卸荷, 卸荷单元按式 (7) 计算杨氏模量。根据有关文献资料, $K_{ur} = 2K$, $n_{ur} = n$ 。钢筋混凝土采用线弹性材料模型。

3.1.2 计算方法与边界条件

为了模拟坝体填筑过程中荷载随着填筑高度增长的特性, 计算采用中点增量法来解非线性方程组, 将非线性问题转化为分段线性问题来求解。

坝体填筑及建成蓄水会引起较大的坝基变形, 所以, 以向上下游各切取 0.5 倍坝高、覆盖层以下基岩与坝体共同构成计算剖面。基岩底面为应力及位移固定边界, 坝基上下游约束边线为固定位移边界垂直向允许自由变形, 整个坝体表面作为自由边界。计算程序采用经水规总院鉴定的 TOSS 应力应变计算程序。

有限单元网格以四边形等参单元作为基本单元, 面板坝计算剖面单元剖分见上图, 面板坝划分单元 305 个, 节点 379 个, 加荷级数为 16 级。

3.1.3 计算参数选取

由于筑坝料的母岩岩性、原型级配及填筑密度等条件的不同, 因而它们的力学性质及应力应变参数存在差异。根据现有的试验成果用于应力应变有限元计算分析的各种材料参数列于表 1。

3.1.4 施工过程模拟

为使计算结果更接近坝体、坝基应力应变的真实情况, 计算模拟施工分期填筑、分期蓄水的加载方式, 针对面板坝断面计算一期蓄水(度汛)、竣工期、正常水位情况下的应力、应变。

3.2 稳定计算

采用经水规总院鉴定的 SCSA 当地材料坝边

表1 坝料E~B模型参数及非线性强度参数计算取值

试样编号	天然密度 (g/m ³)	饱和密度 (g/m ³)	Rf	K (0.1 MPa)	n	Kb (0.1 MPa)	m	φ° (度)	-Δφ (度)
主堆石料	2.15	2.30	0.75	650	0.4	450	0.30	41.0	7.6
次堆石料	2.14	2.27	0.66	500	0.35	280	0.35	39.0	7.2
垫层料	2.22	2.35	0.8	800	0.3	560	0.2	50	6.0
过渡料	2.20	2.32	0.8	800	0.3	560	0.2	50	6.0
河床覆盖层砂卵石层	2.35	2.35	0.8	800	0.3	560	0.2	50	6.0

注:混凝土模量 K=20 GPa,泊松比 0.2,容重 2.40。

坡稳定计算程序。在上游坝坡计算中不考虑面板对稳定的有利影响,只计其防渗作用。设防地震烈度为7度。计算参数见表2。

4 计算成果及分析

表2 计算参数指标表

坝料	天然密度 (g/m ³)	饱和密度 (g/m ³)	C _{uu} (MPa)	Φ _{uu} (度)	C _{cu} (MPa)	Φ _{cu} (度)	C _{cd} (MPa)	Φ _{cd} (度)
垫层料	2.22	2.35	0.022	35.0	0.020	34.0	0.020	36.0
过渡料	2.20	2.32	0.022	35.0	0.020	34.0	0.020	36.0
主堆石料	2.15	2.30	0.017	35.0	0.0155	34.0	0.019	36.0
次堆石料	2.14	2.27	0.017	33.5	0.016	33.0	0.018	35.0
河床覆盖层砂卵石1层	2.35	2.35			0.00	34.0		
河床覆盖层砂卵石2层	2.40	2.40			0.00	36.0		
河床覆盖层砂卵石3层	2.38	2.38			0.00	34.0		
河床覆盖层砂卵石4层	2.40	2.40			0.00	38.0		

注:1.主堆石料因其c值不稳定,采用1/5倍均值,三轴试验的Φ值,采用0.9倍均值。
2.混凝土防渗墙、趾坝仅计其防渗作用,对稳定的有利影响作为安全储备考虑。

表3 面板坝二维有限元计算特征值

工况	垂直沉降(cm)	水平位移 cm		σ ₁ 0.01 MPa	对应σ ₃ 0.01 MPa	
		向上	向下			
坝基	一期蓄水	30	21	22	168.4	72.0
	竣工期	31	21	23	174.2	72.4
	正常水位	31.8	21.5	24.0	176.1	73.1
坝体	一期蓄水	50.0(坝体+坝基)	7.0	37.4	107.3	45.7
	竣工期	52.0(坝体+坝基)	7.1	38.4	109.7	46.1
	正常水位	58.0(坝体+坝基)	7.2	39.0	125.9	48.5

4.1 应力应变有限元计算分析

面板坝坝体在一期蓄水、竣工期、正常蓄水期垂直沉降最大值 58.0 cm,发生在正常蓄水期坝轴线附近 1/3~1/2 坝高处,因水荷载作用于面板且度汛断面已经蓄水,坝体经进一步固结变形,后

期蓄水引起附加垂直沉降较小,蓄水荷载对垂直沉降等值线分布改变小。坝体在一期蓄水、竣工期、正常蓄水期水平位移向上游最大值为 7.2 cm,水平位移向下游最大值为 39.0 cm。计算成果见表3。

表4 钢筋混凝土面板、防渗墙计算成果特征值

工况	面板最大挠度 /cm	面板最大应力 (N/m ²)		周边缝 (cm)		防渗墙最大应力 (N/m ²)
		压	剪切位移	剪切位移	垂直沉降	
一期蓄水	25.6	1954.9	2.1	7.0	1346	
竣工期	26.2	1961	2.4	7.2	1375	
正常水位	27.0	2036	2.7	7.8	1413	

面板坝坝体在一期蓄水、竣工期、正常蓄水期大主应力、相应小主应力最大值分别为 1.259 MPa、0.485 MPa,发生在正常蓄水期,正常蓄水期大小主应力最大值出现在坝底中部,因钢筋混凝土面板模量高,面板出现应力集中现象,但面板未

出现拉应力。坝体局部出现塑性破坏单元,但并未连成片。在上述各工况下,坝基最大沉降量为 31.8 cm,仅为覆盖层厚度的 0.7% 左右,因此,砂卵石作为坝基不会引起坝体过大沉降变形。坝基最大大主应力 1.761 MPa,防渗墙最大大主应力

14.13 MPa,均未出现拉应力。面板坝一期蓄水、竣工期、正常蓄水期最大扰度为27.0 cm,出现在2/3坝高附近,周边缝最大剪切位移2.7 cm,最大垂直沉降7.8 cm,面板最大压应力为20.36 MPa。由于坝基为深厚覆盖层,加之坝料模量偏小,周边缝最大剪切位移、最大垂直沉降量偏大。成果见表4。

表4。

3.2 稳定计算成果

度汛断面、主坝全断面在各种工况下均满足规范对三级建筑物稳定安全系数要求。计算成果见表5、表6。

5 结论和建议

表5 度汛断面稳定计算安全系数

计算断面	计算工况	位置	计算值		规范值
			瑞典法	毕肖普法	毕肖普法
度汛断面	施工到1782.5 m	上游	1.31	1.35	1.20
		下游	1.37	1.41	1.20
	蓄水到1745.0 m上游不利水位	上游	1.37	1.42	1.30
		蓄水到1745.0 m上游不利水位+7度地震	上游	1.22	1.25
	蓄水到1782.0 m		上游	1.43	1.47
		下游	1.34	1.39	1.30
	蓄水到1782.0 m+7度地震	上游	1.24	1.28	1.15
		下游	1.21	1.24	1.15

表6 主坝全断面稳定计算安全系数

计算断面	计算工况	位置	计算值		规范值
			瑞典法	毕肖普法	毕肖普法
全断面	竣工期	上游	1.29	1.32	1.20
		下游	1.32	1.36	1.20
	校核洪水	上游	1.43	1.49	1.20
		下游	1.32	1.36	1.20
	设计洪水	上游	1.43	1.48	1.30
		下游	1.32	1.36	1.30
	设计洪水+7度地震	上游	1.24	1.31	1.15
		下游	1.21	1.25	1.15
	正常蓄水	上游	1.42	1.47	1.30
		下游	1.32	1.36	1.30
	正常蓄水+7度地震	上游	1.23	1.28	1.15
		下游	1.21	1.25	1.15
	上游最不利水位1747.0	上游	1.30	1.36	1.30
	上游最不利水位1747.0 m+7度地震	上游	1.16	1.21	1.15
	正常水位降至死水位	上游	1.31	1.37	1.30
	正常水位降至死水位+7度地震	上游	1.17	1.23	1.15

通过对老鹰岩面板堆石坝的应力应变和稳定计算分析,可以得出以下几点结论及建议:

(1)面板坝坝基、坝体应力应变计算模拟施工分期填筑、分期蓄水,计算成果符合一般规律,成果的规律性及趋势可信。

(2)面板坝因分期填筑、分期蓄水,出现较大的向下游的水平位移,坝体水平位移等值线沿下游坝坡呈“扁平”状分布,面板未出现拉应力、防渗墙亦未出现拉应力。

(3)由于坝基为深厚覆盖层,加之坝料模量偏小,周边缝最大剪切位移、最大垂直沉降量偏大。面板坝的主要工程问题是坝体变形以及随之

而来的接缝张开和面板断裂而导致大量渗漏,变形问题,特别是对周边缝变形的控制已成为面板坝设计的核心问题。本面板坝须选用能适用大变形的止水材料、止水结构,并做好分缝止水设计和施工。

(4)通过稳定计算分析,度汛断面、主坝全断面在各种工况下均满足规范对三级建筑物稳定安全系数要求。

(5)通过试验资料分析可以发现,试验控制密度较低,坝料孔隙率均在《混凝土面板堆石坝设计规范》(SL228-98)规定的下限,致使压缩

(下转第153页)

对地质因素引起的风险,在项目管理中需高度重视,切实按相关规范及规定做好地质勘探工作,为设计、估算编制提供完备的技术支撑。

为减少设计成果对投资估算的影响,一方面,建议业主给予设计方充足的设计时间,使之做更加具体的论证研究工作,透彻研究各种重要参数,比如装机容量、正常蓄水位、道路选线布置等,为作出相对准确的投资估算做好基础性工作;另一方面,建议规范中加深环保专项设计深度,减少因为环保政策要求带来的工程量变化。

4 结 语

根据在设计单位从事水电工程造价工作的实践,笔者深知水电工程投资估算对水电工程造价管理的重大意义。在水电工程各阶段造价文件中,投资估算是预可行性研究报告的重要篇章,是工程投资的最高限额,是项目决策的重要经济指标和依据。如何对水电工程投资估算进行科学、有效、规范管理显得尤为重要。

.....

(上接第 135 页)

- [4] 段生孝.我国水轮机空蚀磨损破坏状况与对策,北京:中国学术期刊电子出版社,2001
- [5] 韦强.浅谈龙羊峡电厂水轮机的空蚀问题,陕西:陕西水力发电,1993

作者简介:

史宝平(1985-),男,陕西杨凌人,重庆大学电气工程及其自动化专业毕业,工程师,现于雅砻江流域水电开发有限公司从事电

(上接第 143 页)

站运行管理工作;程文(1987-),男,陕西咸阳人,西安理工大学水电站动力设备与管理专业毕业,助理工程师,现于雅砻江流域水电开发有限公司从事电站运行管理工作;檀晓龙(1989-),男,湖北襄阳人,武汉电力职业技术学院机电专业毕业,助理工程师,现于雅砻江流域水电开发有限公司从事电站运行管理工作。

模量偏低,邓肯模型参数中 K_1, K_2 偏低,面板坝对变形极为敏感,为保证大坝的安全,建议提高其压实度,通过试验提高 K_1, K_2 等模量参数。
(6)混凝土防渗墙与面板结合部位的是覆盖层上建造面板坝的关键技术,必须做好结合部位的止水,以防止产生集中渗漏。应合理选择面板施工时间,在坝体填筑半年后进行,以改善面板和止水设施工作条件。

(7)因大坝所处地形为“V”形河谷,两坝肩

水电工程涉及面广,影响因素多,工程特性复杂,个案千差万别,与其他行业投资估算有着明显差别,无疑给造价管理工作带来的难度相对较大。做好水电工程投资估算是一项系统工程,需要不断发现、分析和总结影响投资估算的各种因素,尽可能削弱这些因素对投资估算的不利影响,明确投资估算计算思路,提高造价工作人员对估算总投资的把控能力等等,这些都尤为重要。

参考文献:

- [1] 周尚洁.水电站造价管理的回顾与思路[J].第四届全国工程造价优秀论文集.
- [2] 康健民.水电工程建设征地移民安置费用控制的几点思考[J].中国水利,2010(16):55-56.
- [3] 牟文,徐玖平.项目成本管理[M].北京:经济管理出版社,2008.

作者简介:

孙晨希(1983-),女,湖北孝感人,三峡大学工程管理专业(本科)毕业,四川大学项目管理领域工程(硕士),工程师,从事水电工程造价工作。(责任编辑:卓政昌)

站运行管理工作;

程文(1987-),男,陕西咸阳人,西安理工大学水电站动力设备与管理专业毕业,助理工程师,现于雅砻江流域水电开发有限公司从事电站运行管理工作;

檀晓龙(1989-),男,湖北襄阳人,武汉电力职业技术学院机电专业毕业,助理工程师,现于雅砻江流域水电开发有限公司从事电站运行管理工作。

(责任编辑:卓政昌)

对坝体有一定拱效应,须做好垂直缝设计,尤其是两岸的张性缝设计。

(8)通过计算分析,说明在深厚覆盖层,尤其是砂卵石层上建面板堆石坝是可行的,但应着重处理好坝体、坝基、趾板及面板的稳定、应力及变形问题,以及采取相应的基础处理设计和细部结构设计。

作者简介:

李胜东(1978-),男,四川达县人,工程师,水工专业本科毕业,从事水利水电工程设计工作。(责任编辑:卓政昌)

四川毛滩水电站4台机组同时并网发电

3月21日11时27分,国电四川毛滩水电开发有限公司毛滩水电站四台机组同时并网发电,机组有功105MW,达到最高额定设计出力,电站建成投产后首次实现满负荷运行。据悉,毛滩水电站四台机组于今年1月6日全部建成投产以来,由于枯水期来水量小,发电负荷一直较低,部分机组停机备用。进入三月后,随着天气转暖和上游降雨、来水量逐渐增加,该电站根据来水情况,于21日及时申请调度四台机组并网发电,实现满负荷运行,机组设备运行平稳。