

紧水滩拱坝动力特性及地震响应研究

林义兴

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘要 通过在大型模拟地震振动台上的结构试验,探讨了紧水滩拱坝空、满库时坝体的动力特性和在7度水平地震作用下坝体的动力响应;同时,进行了有限元计算分析,以便相互验证。另外,对顺河水平与垂直双向地震耦合作用下坝体的动应力变化也进行了探讨。结果表明:该坝的最大动应力是拱向应力,发生在顶拱中间部位;在拱冠坝踵处和下游面2/3~3/4坝高范围内产生较大的梁应力;考虑垂直地震影响后,坝体的动应力与相应水平单向地震时相比,增大率为10%左右。

关键词 拱坝 动力特性 动力响应 应力 地震试验

紧水滩水电站是一座综合利用的水利枢纽工程。拦河大坝为混凝土三心圆双曲拱坝,坝顶弦长310m,最大坝高102m,最大底宽24.6m,顶拱厚5m,宽高比为0.24。

经地震部门鉴定,认为紧水滩库区基本烈度为6度,按水工建筑物抗震设计规范规定,本工程水工建筑物可不考虑设防。但与其近邻的乌溪江湖南镇水库,自1979年蓄水后,库区曾多次发生有感地震,该水库蓄水后是否也会发生水库地震尚是一个难以回答的问题;若一旦诱发水库地震,能否确保大坝的安全更是令人疑虑。为此,设计部门确定按7度地震对大坝进行整体结构模型动力试验,探明坝体空、满库时的动力特性及在7度地震作用下的动力响应,为鉴定大坝的抗震性能提供依据。

1 研究手段及方法

对结构动态性能的探讨,通常是通过模型试验或计算分析来获得,有时从两方面共同探讨,以便互相验证,保证所得的成果更合理。在无大型振动台之前,结构动态模型试验大多采用共振法或瞬态脉冲法测定动力特性,然后根据标准反应谱按振型叠加法求得

动力响应。该方法简便易行,但无法模拟地震波进行试验。自从引进大型振动台后,使动态模型试验的手段得到更新,它能模拟某一特定的地震运动,可直接测定结构物的动力响应,所得试验成果更符合实际情况。因此,本试验是在从美国MTS公司引进的大型模拟地震振动台上进行的。测试坝体的动力特性时,采用正弦波扫描(30~120 Hz, $a_{\max} = 0.2g$),通过采集通道由计算机将坝体各测点的加速度响应自动记录,然后进行FFT变换和频谱分析得到频响函数(或称传递函数)^[1,2],即可给出模型坝体各阶自振频率及相应振型,再根据下式换算得原型坝体的频率

$$f_p = \frac{1}{C_L} \sqrt{C_E/C_p} f_m \quad (1)$$

测试坝体的动力响应时,基岩水平输入波为根据标准反应谱由计算生成的人造地震波(30~120 Hz, $a_{\max} = 0.1g$),垂直向输入波为水平波乘以2/3后所得到的波形。模型坝体动应力是在7度人造地震波作用下由计算机采集坝体上各测点最大应变来计算,并根据相似条件换算为原型坝体应力,即

$$\sigma_p = C_L C_p C_\sigma \sigma_m \quad (2)$$

有限元计算分析中,假定混凝土和基岩都是各向同性、均质的弹性体,在考虑坝、水相互作用时,忽略了水的可压缩性,动水压力对坝体的影响采用加于坝体的附加质量来代替,并忽略了阻尼的影响。计算中坝体采用空间 20 节点等参单元和 15 节点三棱柱体单元,用无限元来模拟坝体的基础和库水,但不考虑基岩的质量。当求出坝体的自振频率后,根据标准反应谱计算各阶振型最大地震反应,然后用“平方和开方”法将各振型反应组合,即得到坝体的最大动应力。

2 试验模型

模型的几何比尺 $C_L = 250$, 模型材料选用加重橡胶(两岸坝基面沿深度 0.5 倍坝高范围以外部位用与其弹性模量相同的石膏块代替),其容重为 2.44 t/m^3 ,与坝体混凝土相近,故模型的密度相似比尺 $C_r = 1$ (忽略两岸用石膏代替部位),因此,模型中库水可用自来水模拟。加重橡胶动弹性模量按等截面悬臂梁弯曲振动试验确定,其值为 0.3 GPa ,则模型的弹模相似比尺 $C_E = 100$ 。模型模拟范围:河床基础深 0.5 倍坝高;两岸基础不小于 1 倍坝高;水库长 1.5 m (大于 3 倍坝高),其中 40 cm 长的水库模拟自然地形见图 1,剩余部分用矩型水槽代替。水槽壁用纤维板并贴防雨布代替,以便消除槽壁振动对库水的影响^[3]。

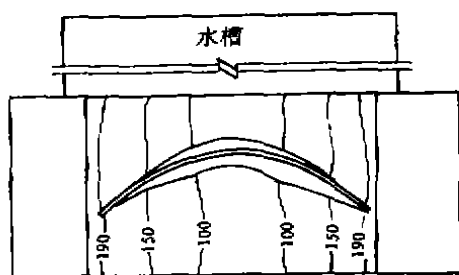


图 1 模型平面简图

3 坝体动力特性

由试验得到的坝体空、满库时自振频率

和相应模态振型见附表及图 2。分析计算所得坝体前五阶频率与试验结果相近(见附表),其相应各阶振型形态与试验基本吻合。可见,一、四阶振型为反对称;二、三、五阶振型为正对称。五阶振型梁向(坝高)均未出现拐点,这是由于该双曲拱坝坝身较薄,拱的作用较大。满库时,坝体的各阶振动频率明显下降,试验结果前五阶频率相对空库时降低了 $11\% \sim 17\%$,计算值降低率为 $15\% \sim 25\%$,这说明水库的动水压力对坝体的动力特性影响明显。

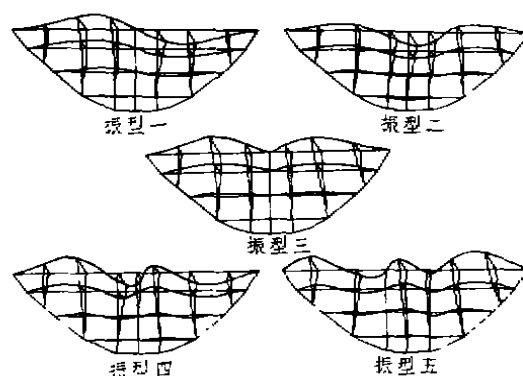


图 2 模态振型(满库)

附表 坝体自振频率(Hz)

振型 序号	空库		满库		振型 模态	库水影响频率 降低率(%)	
	试验	计算	试验	计算		试验	计算
一	2.08	2.29	1.72	1.74	反对称	17	24
二	2.52	2.83	2.14	2.12	对 称	15	25
三	2.96	3.18	2.53	2.42	对 称	15	24
四	3.60	4.00	3.19	3.40	反对称	11	15
五	4.50	5.06	4.00	4.25	对 称	11	16

从附表中的试验与计算结果看,虽然它们反映的规律相互吻合,但量值上仍存在一些差异,模型的两岸基础模拟范围偏小和计算中单元划分过大,可能是导致两者频率不一致的主要原因;模型中库水用水直接模拟,而计算中动水压力是根据韦斯特伽德公式计算的,两者之间可能存在差异,从而导致库水影响坝体频率降低率稍有不同。

4 地震时坝体动力响应

a. 在 7 度顺河水平地震作用下,空库时

坝体动应力分布是以拱冠梁为中心轴,左、右两边基本对称,最大拱向应力发生在拱冠梁顶部,其值约为 1.2 MPa;最大梁向应力出现在拱冠梁附近 2/3~3/4 坝高部位,其值为 0.5 MPa 左右。满库时,坝体的动应力分布规律(见图 3 中实线所示)与空库时相同,其应力值比空库时增大 30%~60%,这说明薄拱坝受库水影响较显著。拱冠梁空、满库时应力见图 4。计算分析所得满库时坝体的应

力分布(见图 3 中虚线所示),其最大值和分布规律与试验结果基本一致。

b. 在 7 度横河水平地震作用下,坝体的动应力分布规律与顺河水平地震时不一样,不论是空库或满库情况,坝体最大应力区均发生在拱冠两侧 1/4 拱附近,而在拱冠梁部位应力较小,但仍然是拱向应力比梁向应力大,最大拱应力发生在上述部位顶拱处,最大梁应力还是出现在 2/3~3/4 坝高处。满库时,坝体的动应力分布规律基本与空库时相似,应力的增大率比顺河向工况小些。最大应力处拱梁空、满库时的应力见图 5。

c. 在 7 度顺河水平与垂直双向耦合地震作用下,坝体的动应力分布规律与相应的水平单向振动情况相似,其应力值与水平单向振动时相比,总的变化趋势是两岸 1/4 拱范围内的坝段,应力有所减小,而拱中间坝段应力有所增大,就平均而言,它们的变化比率不超过 10%。该变化趋势及变化率似乎与坝型厚实的拱坝有所不同,这可能是与坝型有关。该工况坝体的动力响应变化情况,不仅表明双向地震耦合作用下,在同一时刻两个方向的振动都达到最大的可能性不大,也反映出对于薄型且上游坝面倒悬的坝型,考虑垂直地震作用后,对动力响应的影响似乎比厚实的坝大些。因此,在大坝抗震设计中,对于坝区地震烈度为 7 度而上游坝面倒悬多的薄型拱坝,是否考虑垂向地震的影响,应进行论证。

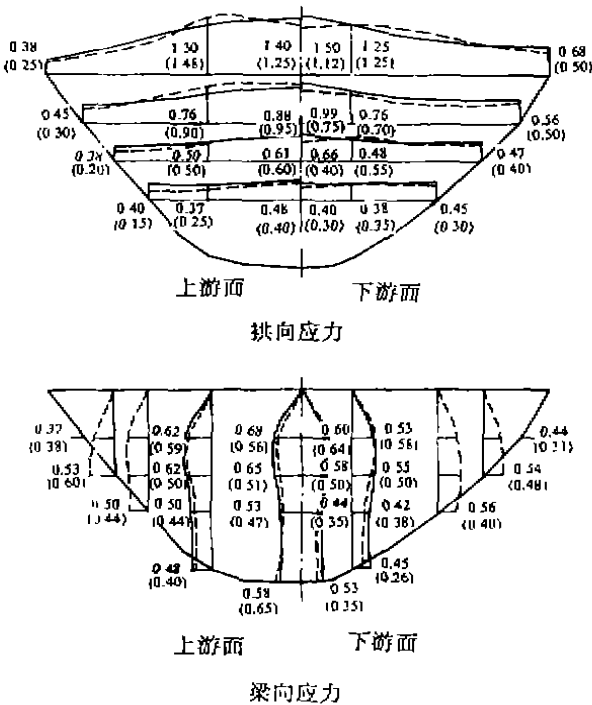


图 3 顺河水平 7 度地震满库时坝体应力分布(MPa)

——实验成果; ----, (·) 计算成果

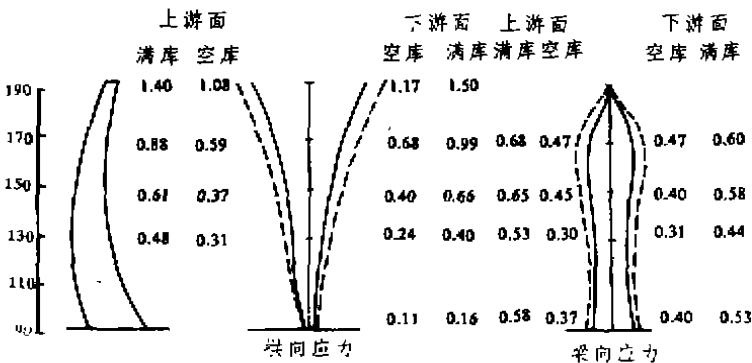


图 4 顺河水平 7 度地震空、满库时拱冠梁应力分布(MPa)

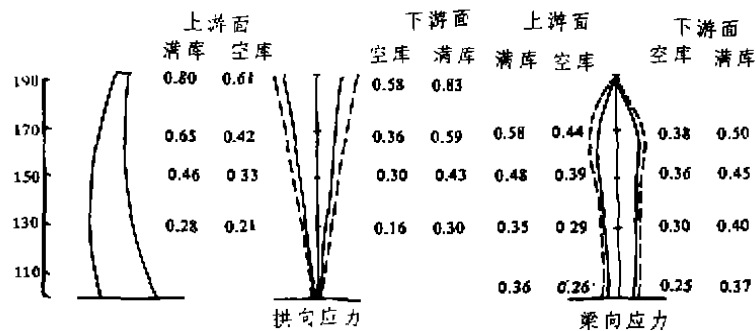


图5 横河水平7度地震空、满库时最大应力部位的拱、梁应力分布(MPa)

从上述各工况坝体应力分布来看,在7度地震作用下,坝体拱向应力较大的区域位于拱冠两侧1/4拱之间的范围内,其中最大值为1.5 MPa(满库时),但该区域在静水压力(正常高水位)作用下,拱向应力均为压应力,上、下游面最大值分别为3.7 MPa(拱冠170 m高程处)和2.2 MPa(拱冠170 m高程处),它们最大值产生的部位不同,在这两种荷载组合作用下,该区域拱向不会产生拉应力。而在1/3~2/3坝高的上游面两拱端处,虽然拱向动应力约为0.4 MPa,但静水压力作用下,该处拱向已有0.8 MPa的拉应力,动应力为静应力的一半,故在特殊荷载组合下,该部位的拉应力会超过1 MPa,是值得注意的部位之一。梁向应力比拱向应力小,在拱冠坝踵处和下游面2/3~3/4坝高处,动应力仅为0.6 MPa左右,而在静水压力作用下,这两个部位梁向拉应力分别约为4.7 MPa和2.7 MPa。因此,考虑地震荷载后,这两个部位应力会有不同程度的提高,虽然它们增大的比率不大,但仍是值得注意的部位。

5 结 论

a. 坝体空、满库时的基本频率,试验值分别约为2.1 Hz和1.7 Hz,计算值分别为2.3 Hz和1.7 Hz,两者相近,且振型形态呈反对称,这不仅体现双曲薄型拱坝应有的动力特性,也说明了坝体拱向起的作用较大,梁向较柔。因此,薄型拱坝的坝肩稳定对大坝的安全运行非常重要。

b. 坝体的动力响应是顺河向振动时比

横河向振动时大,拱向应力比梁向应力大,虽然它们所发生的部位不同,但对坝体而言,仍然以顺河向地震时较为不利。因此,大坝抗震设计中可考虑以顺河向地震为主。

c. 在7度地震标准反应谱作用下,坝体最大动应力(1.5 MPa)发生在下游顶拱中部,由于其发生部位与最大静应力部位(正常高水位)不重合,故考虑正常高水位与地震组合作用时,顶拱处的应力不会超过材料所允许的强度,而在上游面河床坝段的坝踵和1/3~2/3坝高的两拱端处及下游面2/3~3/4坝高的拱中部,虽然动应力不是最大(只有0.4~1.0 MPa),但静水压力作用下,这些部位已产生较大的拉应力。所以,它们仍是值得引起重视的部位。

d. 库水影响使坝体自振频率降低明显(试验值为11%~17%,计算值为15%~25%),动应力增大了30%~60%,表明水库动水压力对薄型坝体动应力有显著的影响。

e. 在7度顺河双向地震耦合作用下,坝体的动力响应与水平向地震作用下的结果相比,应力值变化不明显(增大或减小不超过10%),说明双向耦合地震时,两个方向的振动在同一时刻都达到最大的可能性极小。因此,对于坝区地震烈度为7度的薄双曲拱坝,垂直地震的影响能否忽略,是个值得进一步探讨的问题。

f. 地震时坝体上游面动水压力的分布规律和较高地震烈度作用下考虑垂直地震后对薄型坝体的动应力影响等问题,有待今后进一步探讨。

参加本课题模型试验的还有何衡和陶艳芝,在试验过程中得到了振动台试验室全体同志的大力支持,谨致谢意。

参考文献

- 1 汪风泉等.试验振动分析.南京:江苏科技出版

社,1988.169~212

- 2 戴诗亮.随机振动实验技术.北京:清华大学出版社,1984.196~218
- 3 左东启等.模型试验的理论和方法.北京:水利水电出版社,1984.294~300

(收稿日期:1996-01-23)

水费与水资源费的区别

水费和水资源费是水利工作中常常碰到的两个名词,是两个完全不同的概念,在使用的时候应该严格区别。

《水法》第34条规定:“使用供水工程供应的水,应当按照规定向供水单位缴纳水费。对城市中直接从地下取水单位,征收水资源费;其他直接从地下或者江河、湖泊取水的,可以由省、自治区、直辖市人民政府决定征收水资源费”。水资源是一种自然资源,不是劳动创造的,没有劳动价值,也没有劳动价值转化而成的价格。它是国家和人民的宝贵财富,但不是商品,水资源的时空分布与社会用水的时空要求差异很大。水利供水工程就是按照工农业发展和人民生活的需要,通过蓄、泄、引、提等工程手段,为社会提供水源。水利工程所供的水,从经济意义上讲,已经不是天然状态的水资源,而是经过投入劳动和物化劳动加工后的水,具有价值,具有商品属性。因此,水利供水工程单位对用水户收取水费是客观合理的。

征收水资源费的主要宗旨,是利用经济杠杆厉行节约用水,遏制用水浪费现象,加强水资源的管理与保护。同时,水资源费也是用水单位对水资源主管部门提供服务的补偿。在水资源开发利用之前,必须对自然资源进行调查、勘测、评价和研究等,在开发利用后还有许多附加劳动支出,如对地下水的补源、回灌和保护等。这些劳动消耗的补偿,构成了水资源费的基础。它既不同于水费,也不同于税收,而是水资源开发利用特性决定的附加费用支出,属于间接成本性质。

概括而言,水资源费是体现对自然资源实行有偿使用的行政性收费;水费是供水单位的经营性收费。水资源费在收取的时候称为“征收”,而水费在收取的时候称为“计收”。水资源费在支付的时候称“交纳”,而水费在支付的时候称“缴纳”。

(杨文磊 供稿)

美国水力发电简况

水力发电在世界上依然是最为重要的再生能源,占世界发电量的18.5%。全世界水电资源理论蕴藏量为40000 TW·h/a,其中,技术可开发量为13000 TW·h/a,经济可开发量为8800 TW·h/a。全世界发电站的装机容量为3000 GW,其中,水电站的装机容量占23%,热能占65%,核能占11.6%,其它能源占0.4%。

据联合国统计,利用水力发电的国家现有139个,其中,美国是水力发电最大的生产国家,占世界装机容量的25%,1993年水力发电量为267326 GW·h。

在美国据1979年美国陆军工程师团从事的一项题为“水电资源预计总量”的研究,倘若美国所有潜在的水电站址加以开发,其水电装机容量可高达512 GW。目前可开发量为150 GW,经济可开发量为376000 GW·h/a。目前的水电装机容量为74400 MW,发电量为288 GW·h/a,约占全美国电力的13%。

目前美国的水电产量在国内各生产部门所占比例分别为:私营与商业部门52%;美国陆军工程师团24%;美国内政部开垦局16%;田纳西河流域管理局6%;其它部门3%。其中,美国陆军工程师团是美国水电生产量最大的生产单位,拥有13个部门,分管39个地区和几个专业部门,对坝、库、闸、堤进行维护与建设。目前,在各种规模的74053座坝中。由美国陆军工程师团营运管理的坝有562座,水电站有70座,总装机容量为20719 MW。

(元国江 供稿)

更正:本刊1996年第1期第55页第4行:“……质量体系系列标准(ISO/T1900-ISO9000),……”应改为“……质量体系系列标准(GB/T19000-ISO9000),……”;1996年第2期第62页倒数第14行“……在一幢40mm高的大楼里……”应改为“……在一幢40m高的大楼里……”。特此更正。