

基于加卸载响应比理论的大坝台风作用效应计算方法

褚凯敏¹, 马福恒², 沈振中¹, 魏金帅¹

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 南京水利科学研究所, 南京 210029)

摘要: 台风对大坝的作用包括台风引起的强降雨对大坝的影响、台风引起的库水位波动(波浪)对大坝的影响以及台风风荷载对大坝的影响等。基于加卸载响应比理论,通过对台风作用下的大坝效应增强和维持判据进行深入研究,提出了库水位加卸载响应比和波浪加卸载响应比的计算方法,给出了台风作用下大坝效应增强与维持判据的评判准则。利用上述方法和评价准则,对受2010年10号台风“莫兰蒂”影响的东坞水库进行分析,结果表明,东坞水库大坝受台风影响不大,大坝处于稳定状态。将加卸载响应比理论引入到水利工程领域,是对加卸载响应比理论的应用范围的拓展,也是研究台风作用下大坝稳定性的新思路。

关键词: 台风作用; 大坝效应; 加卸载响应比; 维持判据

中图分类号: TV51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0180-05

Calculation Method of the Effects of Dam under Action of Typhoon Based on the Loading and Unloading Response Ratio Theory

CHU Kai min¹, MA Fu heng², SHEN Zhen zhong¹, WEI Jin shuai¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The effects of typhoon on the dam include the effects of heavy rainfall and reservoir water level fluctuation caused by typhoon, and the typhoon wind load on the dam. According to the loading and unloading response ratio theory, the criteria of enhanced and sustaining dam effects under the action of typhoon were investigated. The calculation methods of water level loading and unloading response ratio (LURR) and wave LURR were proposed, which provided the evaluation criteria of enhanced and sustaining dam effects under the action of typhoon. The presented method and evaluation criteria were used to analyze the Number 10 typhoon "Moranti" on the Dongwu reservoir dam in 2010. The results showed that the typhoon has insignificant effects on the Dongwu reservoir dam and the dam is in stable. The introduction of LURR into the hydraulic engineering field can expand the application scope of the LURR theory and is also the new idea to study the dam stability under the action of typhoon.

Key words: typhoon effect; dam effect; loading and unloading response ratio (LURR); maintenance criterion

我国是世界上登陆台风最多、受台风影响最为严重的国家之一,平均每年有8~9个台风登陆我国东南沿海地区。台风引起的暴雨及其引发的次生灾害严重威胁人类的生命财产安全。如2012年8月受台风“海葵”影响,舟山岱山水库溃坝,造成10人死亡27人受伤。因此,研究台风作用下大坝效应增强与维持判据,对于预测和监控大坝稳定性具有重要的理论意义和实用价值。

加卸载响应比理论是研究非线性系统失稳前兆和进行失稳预报的新理论,目前主要应用于地震预报和滑坡预报方面^[1],而针对台风效应方面的应用鲜有研究。考虑到台风环

境量对大坝作用表现为突变荷载和冲击荷载,极易造成大坝局部瞬间破坏的问题,本文将加卸载响应比理论引入到水利工程领域,探究台风作用下大坝效应的增强,并预测大坝是否会发生失稳,为大坝管理部门实时动态监控大坝的稳定状态提供理论依据^[2]。

1 加卸载响应比理论

20世纪90年代,尹祥础等^[3]提出了加卸载响应比的概念,并在地震预测中进行了推广应用。不仅如此,加卸载响应比还可以预测水库地震^[4]、矿山地震^[5-6]、滑坡^[7-8]等临界

收稿日期: 2012-11-30 修回日期: 2013-04-26 网络出版时间: 2013-05-18
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1016.013.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(51079086)
作者简介: 褚凯敏(1991-),男,江苏人,主要从事水工结构工程方面的研究。E-mail: 1160144463@qq.com
通讯作者: 马福恒(1969-),男,河南项城人,教授级高工,博士,主要从事大坝安全评价、监测与管理方面的研究工作。E-mail: fhma@nhri.cn

现象和损伤演化,以及大型工程结构的健康诊断^[3,9]。

为了直观起见,以混凝土应力应变曲线(见图1)来介绍加卸载响应比理论的宏观机理。一般情况下,图1中用纵坐标表示载荷 P (代替应力 σ),横坐标表示对应于载荷 P 的广义响应 R (代替应变 ϵ)。

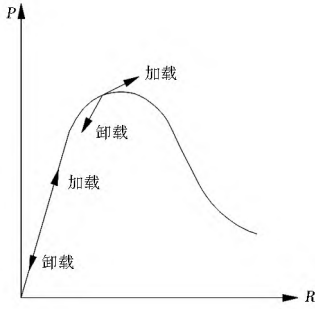


图1 混凝土本构曲线

Fig. 1 The constitutive curve of concrete

为了定量地刻画加载响应与卸载响应的差别,定义响应率 X 和加卸载响应比 Y 两个基本量。

响应率 X 定义为:

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta R} \quad (1)$$

式中: ΔP 和 ΔR 分别为载荷 P 和响应 R 的增量。

加卸载响应比 Y 定义为:

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (2)$$

式中: X_+ 和 X_- 分别为加载响应量与卸载响应量。

当介质处于弹性阶段时^[3], $X_+ = X_-$,因此加卸载响应比值 $Y = 1$;在损伤阶段,由于 $X_+ > X_-$,因此 $Y > 1$,而且随着损伤的增加, Y 值也会增加;当介质临近破坏时, Y 值会越来越来大,达到峰值。因此加卸载响应比 Y 是一个能够定量地反映非线性系统趋于失稳程度的参数,可以刻画坝体和坝基介质的损伤程度,即加卸载响应比理论可以感知(预测)台风作用下大坝性态特征的演变规律。

大坝筑坝材料(土体、混凝土等)的损伤过程极其复杂,是一个远离平衡态的非线性不可逆过程,而利用加卸载响应比理论预测大坝的失稳有其独特的优势。因此本文基于加卸载响应比理论来预测台风作用下大坝的稳定性。

2 台风对大坝作用的效应计算方法

台风对大坝的作用主要是台风引起的强降雨、台风引起库水位波动(波浪)以及台风风荷载对大坝的影响。强降雨引起的库水位上升对于大坝而言相当于一次加载,水库泄水对大坝而言相当于一次卸载;波浪以及风荷载对大坝的循环冲击作用对于大坝而言亦相当于加卸载的过程,由于台风风荷载对大坝的冲击作用较小,这里不再考虑其对坝体的影响。台风施予大坝的物理化学作用对加卸载响应比突变产生干扰的可能性非常小。综上所述,本文主要研究台风引起的强降雨和库水位波动对加卸载响应比突变产生的干扰,并将其表达成加卸载响应比动力学参数,进而对台风作用下大坝作用效用增强和维持判据进行研究。

2.1 台风作用下库水位加卸载响应比

(1) 库水位加卸载响应比计算公式。将一段时间内水

库水位监测序列平均分为若干加卸载区间^[10],每一个区间内平均水位 H 为初始水位,加载区间内最高水位 H_{\max} 与平均水位 H 的差值为加载增量 ΔH_+ ,水位变化期间引起的大坝内某监测点位移变化值作为加载响应量 $\Delta \delta_+$,加载区间内最低水位 H_{\min} 与平均水位 H 的差值作为卸载增量 ΔH_- ,水位变化期间引起的大坝内某监测点的位移变化值作为卸载响应量 $\Delta \delta_-$ 。据此可建立库水位加卸载响应比模型,即台风作用下大坝库水位加卸载响应比 Y_1 为:

$$Y_1 = \frac{\Delta \delta_+ / \Delta H_+}{\Delta \delta_- / \Delta H_-} \quad (3)$$

其中:

$$\Delta H_+ = H_{\max} - H \quad (4)$$

$$\Delta H_- = H - H_{\min} \quad (5)$$

(2) $\Delta \delta$ 的确定。响应量 $\Delta \delta$ 的确定首先要设定监测点,确定好监测点的位置、数量。然后用这些监测点的监测数据来确定 $\Delta \delta$ 。以混凝土重力坝为例,这里选取河床最大典型剖面坝轴线附近的监测点为标准监测点,见图2。如果坝轴线处有多个监测点,取这些监测点位移的加权平均值作为位移响应量 $\Delta \delta$ 。

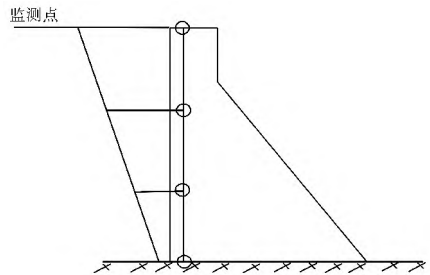


图2 混凝土坝位移监测点位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the displacement monitoring positions of concrete dam

(3) 失稳判据。加卸载响应比理论是为了研究非线性系统的稳定性而建立的,因此可根据数理统计基本原理,对库水位加卸载响应比的异常判别可采用均方差。即先统计库水位加卸载响应比时序的平均值 Y_1 ,之后求解序列均方差 σ 。以序列均值加均方差作为库水位加卸载响应比异常判据,即当

$$Y_1 > [Y] = Y_1 + \sigma \quad (6)$$

坝体视为失稳。

当台风引起的降雨对坝体影响不大时,库水位加卸载响应比一般以序列均值 Y_1 为基点上下波动,表现为线性变形阶段;如果库水位加卸载响应比异常偏离,库水位加卸载响应比表现为非线性变形阶段,台风对大坝的作用明显增强;如果库水位加卸载响应比明显大于 $[Y]$,库水位加卸载响应比表现为突变,认为坝体受台风影响强烈。

2.2 台风作用下水库波浪加卸载响应比

2.2.1 浪压力的确定方法

台风引起的波浪对大坝的影响表现为直接施加坝体。

台风引起的水库波浪与台风风速密切相关。徐安、傅继阳等^[11]采用三维超声风速仪现场观测了台风“珍珠”和“派比安”的登录过程,分析了两次台风过程的平均风速和风速变化历程,研究结果表明,台风平均风速有一个明显的先增

大后减小的过程,当观测站逐渐进入眼壁和螺旋雨带部分时,风速急剧增大;随着台风中心逐渐远离观测站,风速渐渐变小;台风中心经过观测站时,风向会发生 180° 变化,因此台风引起的库水波浪对大坝形成循环的冲击作用。台风风速越大波浪强度越大,反之波浪强度小,波浪要素与最大风速和风区长度有关。台风最大风速是指水面上空 10 m 高度处的 10 min 平均风速的最大值。风区长度 D 可按下列可能情况分别确定。

(1) 当沿风向两侧水域较宽广时,风区长度 D 可采用计算点至对岸的直线距离,如图 3(a) 所示。

(2) 当沿风向有局部缩窄且缩窄处宽度 B 小于 12 倍计算波长时,风区长度 D 可采用 $5B$,同时大于等于计算点至缩窄处的直线距离,如图 3(b) 所示。

(3) 当沿风向两侧水域较窄,或水域形状不规则,或有岛屿等障碍物时,首先自计算点逆风向作主射线与水域边界相交,如图 3(c) 所示;然后在主射线两侧每隔 7.5° 作一射线,分别与水域边界相交。记 D_0 为计算点沿主射线方向至对岸的距离, D_i 为计算点沿第 i 条射线至对岸的距离, α_i 为第 i 条射线与主射线的夹角,则 $\alpha_i = i \times 7.5^\circ$ (一般取 $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6$),同时令 $\alpha_0 = 0$ 。于是,等效风区长度 D 即为:

$$D = \frac{\sum D_i \cos^2 \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i} \quad (i = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6) \quad (7)$$

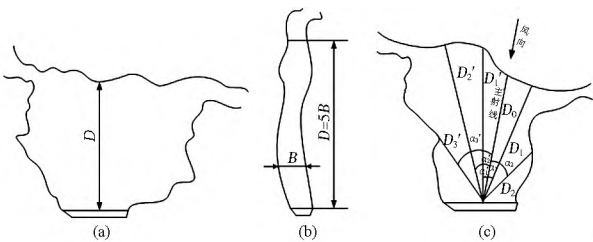


图 3 水域风区长度计算图

Fig. 3 Calculation chart of fetch length

平均波周期及平均波长采用莆田试验站公式(式 8),该公式是南京水利科学研究院在福建试验站 6 年观测分析的结果。

$$\frac{gh_m}{V_0^2} = 0.13 \text{th} \left[0.7 \left(\frac{gH_m}{V_0^2} \right)^{0.7} \right] \cdot \text{th} \left\{ \frac{0.0018 \left(\frac{gD}{V_0^2} \right)^{0.45}}{0.13 \text{th} \left[0.7 \left(\frac{gH_m}{V_0^2} \right)^{0.7} \right]} \right\} \quad (8)$$

其中,

$$\frac{gT_m}{V_0} = 13.9 \left(\frac{gh_m}{V_0^2} \right)^{0.5} \quad (9)$$

式中: h_m 为平均波高(m); V_0 为计算风速(m/s); D 为风区长度(m); g 为重力加速度(m/s²); H_m 为水域平均水深(m); T_m 为平均周期(s)。

由 H_m 和 T_m 可用理论公式算出平均波长 L_m :

$$L_m = \frac{gT_m^2}{2\pi} \text{th} \frac{2\pi H_m}{L_m} \quad (10)$$

对于 $H_m \geq 0.5 L_m$ 的深水波,式(10)还可简写为:

$$L_m = \frac{gT_m^2}{2\pi} \quad (11)$$

坝上游挡水面有直墙式和斜坡式两种样式。不管是哪

种形式的挡水面,只要知道 L_m 都可以根据坝前水深与 L_m 之间的大小关系计算出单位长度浪压力标准值 q_{wk} (kN/m)。 q_{wk} 的详细求解过程可参见相关文献[12],这里不再赘述。

2.2.2 波浪加卸载响应比的确定方法

(1) 浪压力加卸载响应比的计算公式。根据台风风荷载的监测值计算出相应的浪压力,形成浪压力序列。将一段时间内浪压力序列平均分为若干加卸载区间,每一个区间内静水压力 p 为初始压力,加载区间内浪压力最大值 q_{max} 为加载增量 Δq_+ ,浪压力变化期间引起的大坝内某监测点垂直正应力 σ_t 的变化值作为加载响应量 $\Delta \sigma_+$,加载区间内静水压力的折减值作为卸载增量 Δq_- ,折减的百分比由最大波高和坝前水深确定,浪压力变化期间引起 σ_t 的变化值作为卸载响应量 $\Delta \sigma_-$,即可建立大坝波浪加卸载响应比模型。

台风作用下水库波浪加卸载响应比 Y_2 为:

$$Y_2 = \frac{\Delta \sigma_+ / \Delta q_+}{\Delta \sigma_- / \Delta q_-} \quad (12)$$

其中:

$$\Delta q_+ = q_{max} \quad (13)$$

$$\Delta q_- = p \times \frac{h_{波}}{H_{水}} \quad (14)$$

式中: q_{max} 为浪压力最大值; p 为静水压力; $h_{波}$ 为最大波高; $H_{水}$ 为坝前水深。

(2) $\Delta \sigma$ 的确定。以混凝土坝为例,选取河床典型剖面坝踵处垂直正应力的变化值作为响应量 $\Delta \sigma$,监测位置如图 4 所示。

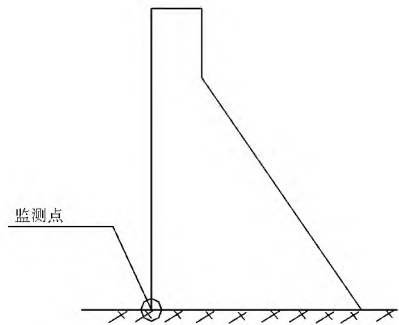


图 4 混凝土坝垂直正应力监测位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the vertical normal stress monitoring positions of concrete dam

(3) 失稳判据。同库水位加卸载响应比失稳判据的分析过程,波浪加卸载响应比的失稳判据如下式:

$$Y_2 > [Y] = Y_2 + \sigma \quad (15)$$

式中: Y_2 为浪压力加卸载响应比时序的平均值; σ 为浪压力加卸载响应比时序均方差。

如果波浪加卸载响应比以其序列均值 Y_2 为基点上下波动,波浪加卸载响应比表现为线性变形阶段,台风对坝体基本没有影响;如果波浪加卸载响应比异常偏离 Y_2 ,波浪加卸载响应比表现为非线性变形阶段,台风对大坝的作用明显增强;如果波浪加卸载响应比明显大于 $[Y]$,波浪加卸载响应比表现为突变,认为坝体受台风影响强烈。

3 台风作用下大坝效应增强与维持判据评判准则

为了清楚地了解台风作用下大坝所处的效应状态,依

据台风作用下水库水位加卸载响应比和波浪加卸载响应比,建立了如下台风作用下大坝效应增强与维持判据的评判准则:

(1) 库水位加卸载响应比和波浪加卸载响应比均以序列均值为基点上下波动,则认为大坝处于稳定状态,台风对大坝稳定和安全没有影响;

(2) 库水位加卸载响应比和波浪加卸载响应比中,一个以序列均值为基点上下波动,另一个异常偏离序列均值,但不明显大于 $[Y]$,则认为大坝处于基本稳定状态,台风对大坝稳定和安全影响不大;

(3) 库水位加卸载响应比和波浪加卸载响应比均异常偏离相应地序列均值,则认为大坝处于极限平衡状态,台风对大坝稳定和安全造成重大影响,是大坝破坏的主要因素;

(4) 库水位加卸载响应比和波浪加卸载响应比中,一个异常偏离序列均值,另一个明显大于 $[Y]$,则认为大坝趋于失稳状态;

(5) 库水位加卸载响应比和波浪加卸载响应比均大于相应的 $[Y]$,则认为大坝失稳。

4 工程实例

2010年10号强热带风暴“莫兰蒂”于9月8日5时在台湾南部海面生成,9日14时加强为强热带风暴,10日02时加强为台风,3时30分在福建石狮登陆。登陆时中心附近最大风力12级(35 m/s),中心气压975 hPa,过程极大风速为18.9 m/s。“莫兰蒂”自9月10日20时开始影响浙江松阳县,到11日2时结束。短短的6个小时,全县降雨量超过100 mm的有8个站,其中西源、膳垄、杨岭脚三个站3 h雨量分别达到106 mm、105 mm、102 mm,对该县的水利工程造成严重影响。

东坞水库位于松阳县叶村乡源口村附近,所在河流为东坞源,系瓯江水系松阴溪的一条支流。水库是一座以灌溉为主、结合发电、防洪和供水等综合利用的中型水库。水库大坝为重力墙式堆石坝,坝顶高程208.2 m,最大坝高54.2 m。坝址以上集雨面积29.0 km²,主河道长9.0 km,正常蓄水位206.0 m,相应库容1470万m³;设计洪水位207.46 m($P=1%$),校核洪水位207.98 m($P=0.05%$),相应库容为1610万m³。

2008年东坞水库进行过除险加固扩建,在原坝的基础上增设了混凝土重力墙。除险加固后东坞水库大坝典型剖面见图5。

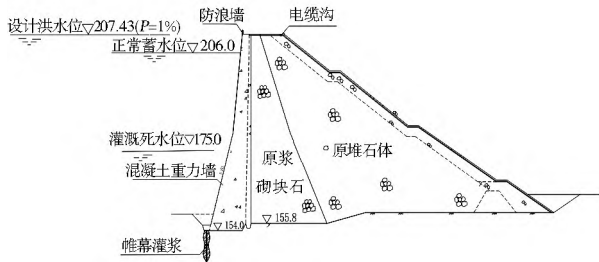


图5 东坞水库大坝典型剖面图

Fig. 5 Typical layout of Dongwu reservoir dam

下面根据前文所提出的方法,分析台风对东坞水库大坝的作用效应。

(1) 东坞水库大坝库水位加卸载响应比计算。

利用东坞水库大坝2010年的监测资料,对除险加固后台风作用下东坞水库大坝的库水位加卸载响应比进行计算,结果见表1。

表1 库水位加卸载响应比计算表

Table 1 The calculated results of reservoir water level LU RR

加卸载区间 (水文年)	H /m	H_{max} /m	H_{min} /m	ΔH_+ /m	ΔH_- /m	$\Delta \delta_+$ /mm	$\Delta \delta_-$ /mm	Y_1
00.03- 01.02	198.1	207.1	186.7	9.0	11.4	9	14	0.82
01.03- 02.02	199.3	207.5	185.9	8.2	13.4	8	9	1.46
02.03- 03.02	197.5	207.3	187.2	9.8	10.3	16	12	1.40
03.03- 04.02	201.3	207.4	186.8	6.1	14.5	9	6	3.57
04.03- 05.02	198.7	206.9	185.1	8.2	13.6	6	12	0.84
05.03- 06.02	197.3	206.8	186.3	9.5	11.0	8	12	0.77
06.03- 07.02	195.4	207.3	185.9	11.9	9.5	9	6	1.20
07.03- 08.02	193.2	206.9	185.5	13.7	7.7	18	14	0.72
08.03- 09.02	196.7	207.5	185.8	10.8	10.9	12	9	1.35
09.03- 10.02	195.5	207.4	186.1	11.9	9.4	10	8	0.99

注: $Y_1 = 1.31, \alpha = 0.80$

由表1中的数据可知,台风作用下东坞水库大坝的允许库水位加卸载响应比 $[Y]$ 为2.11。

2010年3月开始到9月11日这段时间,东坞水库水位平均值 $H = 198.30$ m, $H_{max} = 207.7$ m, $H_{min} = 186.9$ m, $\Delta \delta_+ = 11$ mm, $\Delta \delta_- = 8$ mm。因此,2010年台风作用下东坞水库大坝库水位加卸载响应比 $Y = 1.67 < 2.11$ 。

(2) 东坞水库大坝波浪加卸载响应比计算。由于东坞水库大坝缺乏坝踵处的应力监测资料,本文利采用三维有限单元法建立三维有限元模型,计算台风所引起的波浪对东坞水库大坝的作用,计算成果如图5-图7及表2所示。其中,应力符号规定为拉应力为正,压应力为负。

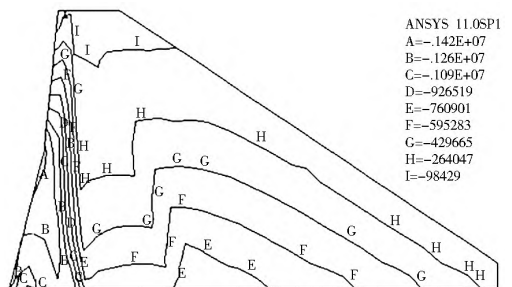


图6 东坞水库正常蓄水位时大坝垂直正应力分布

Fig. 6 Distribution of vertical normal stress of Dongwu reservoir dam under the normal storage level

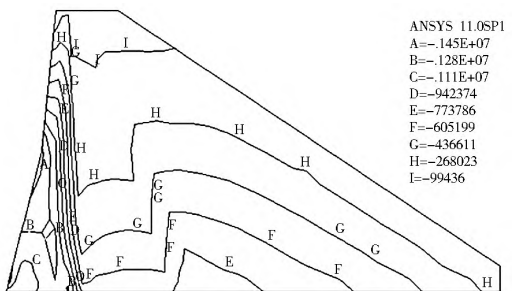


图7 加载时大坝垂直正应力分布(最大波高5 m)

Fig. 7 Distribution of vertical normal stress of Dongwu reservoir dam under the loading condition (maximum wave height: 5 m)

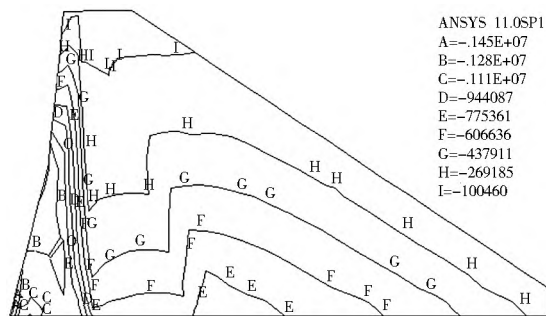


图 8 卸载时大坝垂直正应力分布(最大波高 5 m)

Fig. 8 Distribution of vertical normal stress of Dongwu reservoir dam under the unloading condition (maximum wave height: 5 m)

表 2 波浪加卸载响应比计算

Table 2 The calculated results of wave LURR

加卸载区间 q_{max}	MPa						
	Δq_+	Δq_-	σ_{y1}	σ_{y2}	σ_y	$\Delta \sigma_+$	σ_c
设计波高 5 m	1.92	0.049	-1.11	-1.45	-1.26	0.15	0.19
设计波高 4 m	1.53	0.039	-1.15	-1.40	-1.26	0.11	0.14
设计波高 3 m	1.15	0.029	-1.19	-1.36	-1.26	0.07	0.10
设计波高 2 m	0.77	0.020	-1.23	-1.32	-1.26	0.03	0.06
设计波高 1 m	0.38	0.010	-1.25	-1.28	-1.26	0.01	0.02

根据三维有限元模型计算结果发现,2010 年 9 月 10 日至 11 日东坞水库在 10 号台风“莫兰蒂”影响下,大坝坝踵处并没有出现拉应力,该次台风引起的库水位波浪对东坞水库大坝影响极小,可以忽略,因此可不进行波浪加卸载响应比计算。

综上所述,利用本文提出的台风作用下大坝效应增强和维持评判准则,分析结论为:2010 年 10 号台风“莫兰蒂”作用下东坞水库大坝处于安全稳定状态,该台风对东坞水库大坝影响不大。

5 结语

(1) 通过分析台风引起的强降雨、台风引起的库水位波动以及台风风荷载对大坝的影响,确定了将台风引起的强降雨和台风引起的库水位波动作为大坝效应增强的根源。

(2) 引入加卸载响应比理论,并将库水位作为加卸载响应的动力学参数,将大坝某监测点的位移作为响应量,提出了台风作用下大坝库水位加卸载响应比的计算方法;将波浪压力作为加卸载响应的动力学参数,将大坝坝踵处的垂直正应力作为响应量,提出了台风作用下大坝波浪加卸载响应比的计算方法。

(3) 依据台风作用下水库水位加卸载响应比和波浪加卸载相应比,提出了台风作用下大坝效应增强和维持判据的评判准则。

(4) 根据设计的方法和建立的模型,计算了东坞水库大坝对受 2010 年 10 号台风“莫兰蒂”影响的加卸载响应比,结果认为该工程在此次台风作用下的是安全的。

虽然基于非线性系统理论的台风作用下大坝加卸载响应比理论在预报大坝失稳方面具有一定的应用前景,是该领域研究探索的一个方向,但仍的尚需要大量工程实例进行验证,并加以完善。

证,并加以完善。

参考文献(References):

[1] 唐春龙. 加卸载响应比理论用于滑坡预测的机理[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 645-651. (TANG Chun long. Mechanism Analysis about Load/unload Response Ratio Theory in Prediction of Landslide[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3):645-651. (in Chinese))

[2] 桑国庆. 南水北调受水区干旱灾害风险评估方法探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 14-17. (SANG Guoqing. Drought Risk Assessment in the South to North Water Transferred Areas[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 14-17. (in Chinese))

[3] 尹祥础, 张浪平, 张晖辉, 等. 加卸载响应比 20 年及其展望[J]. 国际地震动态, 2008, (4): 1-17. (YIN Xiang-chu, ZHANG Lang ping, ZHANG Hui hui, et al. LURR Than 20 Years, and Its Outlook[J]. Recent Developments in World Seismology, 2008. (4): 1-17. (in Chinese))

[4] Zhuang J C and Y in X C. Random Distribution of the Load/Unload Response Ratio (LURR) Under Assumptions of Poisson Mode. I[J]. Earthquake Research in China, 1999, 15: 128-138.

[5] Chen X Z and Y in X C. Application of LURR Theory to the Earthquake Prediction for Reservoir Induced Earthquakes[J]. Earthquake Research in China, 1995, 11: 361-367.

[6] Yin X C, Yu H Z, Kukshenko V, et al. Load/Unload Response ratio(LURR), Accelerating Energy release (AER) and State Vector revolution as precursors to failure of rock specimens [J]. Pure Appl Geophys, 2004, 161: No. 11-12, 2405-2416.

[7] Xu Q and Huang R Q. Investigation on precursor of slope instability in term of LURR. [J]. Chinese Journal of Geological Disasters, 1995, 6(2).

[8] Jiang T. The Analysis of landslide in terms of Load /Unload Response Ratio. PhD Thesis, Institute of Geology [J]. Chinese Seismological Bureau, 2004.

[9] 张浪平, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比与损伤变量关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1874-1881. (ZHANG Lang pin, YIN Xiang-chu, LIANG Nai-gang. Study On Relation Between Load/Unload Response Ratio Aand Damage Variable, 2008, 27(9): 1874-1881. (in Chinese))

[10] 胡先明, 朱航. 大桥水库 4.6 级地震前后的库水加卸载响应比变化特征 [J]. 地震地质, 2009, 31(4): 715-723. (HU Xian ming, ZHU Hang. The Characteristics of Load/Unload Response Ratio Before and After the Ms 4.6 Daqiao Reservoir Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2009, 31(4): 715-723. (in Chinese))

[11] 徐安, 傅继阳, 赵若红. 土木工程相关的台风近地风场实测研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(1): 23-31. (XU An, FU Ji yang, ZHAO Ruohong. Field Measurements of Typhoons According to Civil Engineering Research[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(1): 23-31. (in Chinese))

[12] 沈长松, 王世夏, 林益才. 水工建筑物 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (SHEN Chang song, WANG Shi xia, LIN Yi cai. Hydraulic Structure [M]. Beijing: China Water Power Press, 2008. (in Chinese))