

文章编号:1671-6833(2015)03-0087-05

覆盖层上高面板堆石坝地震反应特性研究

岑威钧<sup>1,2</sup>, 袁丽娜<sup>1,2</sup>, 张自齐<sup>1,2</sup>, 周 涛<sup>3</sup>, 杨宏昆<sup>3</sup>, 卢培灿<sup>3</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 四川省清源工程咨询有限公司, 四川 成都 610072)

摘 要: 对西南强震区某拟建覆盖层上高面板堆石坝进行不同超越概率地震波作用下的地震反应计算分析, 重点研究大坝在强震作用下动位移、加速度、面板动应力及坝基覆盖层液化等地震反应特性. 研究表明: 随着输入地震波峰值的增大, 大坝动位移和加速度、面板动应力、覆盖层动孔压和液化度等反应均逐渐增大, 但加速度放大倍数逐渐减小. 在 100 年超越概率 2% 的校核地震作用下, 大坝的抗震安全性依然在合理范围之内, 大坝的抗震设计是合理的.

关键词: 高面板堆石坝; 地震反应; 加速度; 面板动应力; 动孔压

中图分类号: TU47 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.03.019

0 引言

混凝土面板堆石坝以其安全性、经济性及对地基条件的广泛适应性得到了坝工界的普遍认同. 随着筑坝技术的迅速发展, 面板坝筑坝高度不断攀升, 筑坝条件也越发复杂. 国内外相继建造了一批坝高大于 100 m 的高面板堆石坝, 其中一些面板坝坐落在强震区和覆盖层上<sup>[1]</sup>. “5.12”汶川大地震后, 高面板坝抗震安全性的研究得到了很大重视, 同时也注重面板坝震害资料的收集及抗

震效果的后评价. 其中, 受汶川大地震影响的高 156 m 的紫坪铺面板堆石坝的抗震安全性和加固措施备受关注<sup>[2-3]</sup>.

我国西南地区某拟建混凝土面板堆石坝, 最大坝高 138 m, 坝顶高程 2 925 m, 坝顶宽 10 m、长 292 m, 上下游坝坡均为 1:1.4, 趾板基础固结灌浆深 10 m, 坝基帷幕灌浆最大深度约 75 m. 坝基仅河床部位约有 20 m 厚的覆盖层. 大坝最大剖面见图 1.

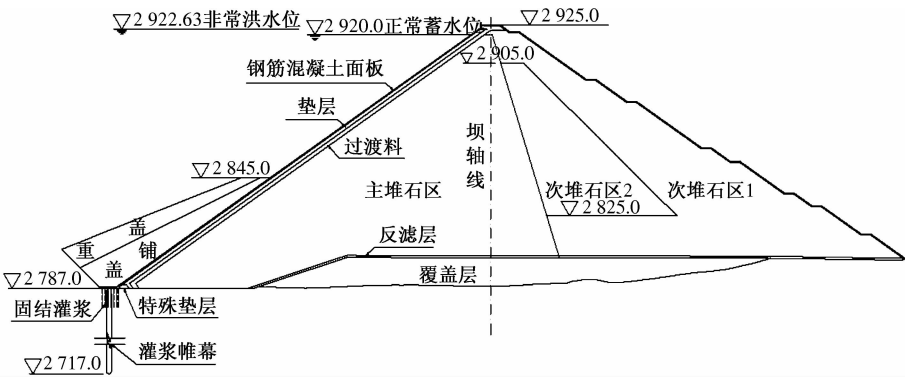


图 1 大坝典型剖面图  
Fig.1 Typical section of the dam

收稿日期:2015-01-10; 修订日期:2015-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009055); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放研究基金(YK914019); 长江科学院开放研究基金项目(CKWV2012307/KY)

作者简介: 岑威钧(1977-), 男, 浙江慈溪人, 河海大学副教授, 博士, 主要从事土石坝工程结构安全分析及水工建筑物渗控研究, E-mail: hhucwj @ 163. com

## 1 面板坝地震反应计算理论

### 1.1 地震反应计算过程

首先对大坝进行静力非线性计算,求出震前每一单元的静应力,作为动力计算的初始应力场.动力计算根据地震加速度时程曲线幅值大小来划分若干计算时段,每一时段假定各单元的动参数剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$  保持不变.根据静力初始应力场和土石料的动力本构模型计算各单元的  $G$  和  $\lambda$ ,供迭代之用.用 Wilson- $\theta$  法求解动力控制方程,计算时间步长  $\Delta t$  取 0.01 ~ 0.02 s,得到各单元的动剪应变  $\gamma$  过程,取该时段最大剪应变  $\gamma_{\max}$  的 0.65 倍作为该单元在该时段的平均剪应变  $\bar{\gamma}$ .从土石料动力本构模型确定  $G$  和  $\lambda$ ,再计算剪应变过程线,迭代几次直到各单元的剪切模量和阻尼比达到精度要求.将此剪切模量和阻尼比作为下一时段的起始模量  $G_{i+1}$  和阻尼比  $\lambda_{i+1}$ ,并更新大坝的基频以作下一时段迭代之用.重复上述步骤,求得所需动力反应量,直至地震结束为止.

### 1.2 堆石料和覆盖层的动力本构模型

地震作用下,筑坝堆石料和覆盖层土石料的动应力应变关系具有明显的非线性和滞后性等动力特性.由于 Hardin-Drnevich 模型<sup>[4]</sup>应用经验较为丰富,计算成果较为合理,因此本文选用该模型进行计算. Hardin-Drnevich 模型采用与动剪应变  $\gamma_d$  相适应的动剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$  两个参数来反映土体动力非线性和滞后性,计算公式为

动模量:

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + \gamma_d/\gamma_r}. \quad (1)$$

阻尼比:

$$\lambda = \lambda_{\max} \frac{\gamma_d/\gamma_r}{1 + \gamma_d/\gamma_r}. \quad (2)$$

最大剪切模量:

$$G_{\max} = K_2 P_a (\sigma'_m/P_a)^n. \quad (3)$$

式中:  $\gamma_d$  为动剪应变;  $\gamma_r$  为参考剪应变;  $\sigma'_m$  为平均有效应力;  $P_a$  为大气压力;  $K_2$  和  $n$  为试验参数.

式(1)~式(3)给出的 Hardin-Drnevich 模型仅在计算最大动剪切模量时考虑了围压的影响,而试验资料表明,动剪切模量  $G$  和阻尼比  $\lambda$  对围压亦有较强的依赖性,原模型不能很好地体现围压的作用.根据动力试验资料,将剪切模量的计算式修正为

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + \alpha (\gamma_d/\gamma_r)^m}. \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  和  $m$  为修正系数,可根据实验数据拟合得到;  $\gamma_r$  也可与围压建立联系.

类似地,等效阻尼比的计算用  $\alpha (\gamma_d/\gamma_r)^m$  代替原式(2)中的  $\gamma_d/\gamma_r$ . 这样在高面板坝的抗震计算中,动本构模型可以较好地体现围压的影响,而不是简单地取某一围压下的参数值.参数  $\gamma_r$  和  $m$  等处理成关于围压的函数,根据动力试验数据进行回归拟合,详细过程可参考文献[5].

### 1.3 坝基覆盖层动孔隙水压力增长特性

坝基覆盖层动孔隙水压力对大坝抗震安全性的影响至关重要,其增长、扩散和耗散是一个非常复杂的过程,影响因素众多.虽然国内外不少学者<sup>[7-10]</sup>提出或改进了各类动孔压计算模型,但是,这些计算型只能考虑部分影响因素,而且,很难采用一个计算式对土体液化过程中的各种因素进行综合考虑.1981年,顾淦臣教授基于动三轴试验得到动孔压增长曲线(图2),提出利用该试验曲线计算动孔压.与传统方法(如孔压应力模型等)相比,该法避开了动力试验时取某轴向应变(如5%)时的动剪应力作为液化剪应力的任意性,计算更为科学合理.限于篇幅,具体计算步骤不再详细给出,参见文献[6].

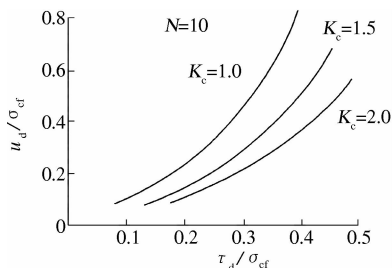


图2 动孔压比与动剪应力比关系

Fig.2 The relationship between dynamic pore pressure ratio and dynamic shear stress ratio

## 2 地震反应计算分析

### 2.1 计算模型及计算条件

对大坝连同河床处覆盖层进行有限元建模,有限元网格见图3.在混凝土面板与垫层之间设置无厚度六面体和五面体动力接触单元,以反映面板与垫层之间的动力相互作用.在面板各板块之间及面板与趾板之间设置连接单元,考虑止水材料的阻尼特性.采用附加质量法考虑库水的动水压力作用效应,大坝主要动力计算参数见表1.

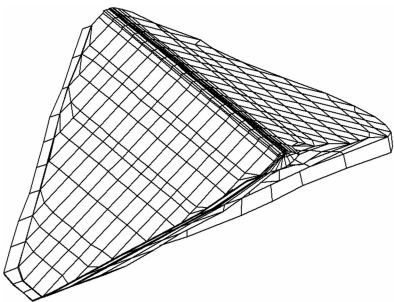


图 3 大坝计算有限元计算模型  
Fig.3 Finite element mesh of rockfill dam

表 1 坝料及覆盖层动力计算参数

Tab.1 Calculation parameters of dam and overburden

坝料	$K_2$	$n$	$\lambda_{\max}$
垫层料	2 450	0.54	0.22
过渡料	2 380	0.52	0.22
主堆石料	2 205	0.48	0.23
次堆石料	2 100	0.50	0.24
覆盖层	1 540	0.51	0.26

根据地震局提供的场地地震安全性评价报告,坝址 50 a 超越概率 10%、50 a 超越概率 5% 和 100 a 超越概率 2% 水平向地震加速度峰值分别为  $100\text{ cm/s}^2$ 、 $126\text{ cm/s}^2$  和  $219\text{ cm/s}^2$ ,输入的地

震加速度时程曲线是以场地反应谱为目标谱进行人工合成的.图 4 为 50 a 超越概率 10% 地震的三向加速度时程曲线.进行动力时程分析时,竖向地震加速度时程曲线峰值取水平向曲线峰值的  $2/3$ ,坝轴向地震加速度峰值同顺河向峰值.

2.2 地震反应分析

2.2.1 大坝动位移及加速度

不同概率水准地震作用下大坝动位移、加速度极值及放大倍数见表 2.图 5 为 50 a 超越概率 5% 地震大坝动位移包络值等值线图.坝体三向动位移由坝基至坝顶逐渐增大,在坝顶附近达到最大值.大坝加速度极值随着输入地震加速度峰值的增加逐渐增大,但加速度放大倍数逐渐减小.不同超越概率地震波作用下,大坝加速度分布规律及放大倍数均在合理范围之内.

2.2.2 面板动应力反应<sup>[7-9]</sup>

图 6 为 50 a 超越概率 10% 的地震时面板动应力包络值(绝对值的最大值)等值线图.混凝土面板顺坡向和坝轴向动应力(动拉应力和动压应力)等值线分布规律合理,动应力极值随着输入地震波峰值的增大而增大.在 50 a 超越概率 10% 的设计地震作用下,顺坡向动压应力和动拉应力

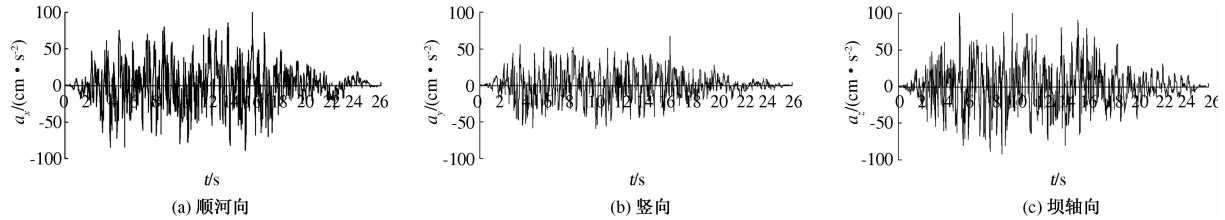


图 4 50 年超越概率 10% 加速度时程曲线  
Fig.4 The time history curve of acceleration surpassing the probability of 10% in 50 years

表 2 大坝动位移、加速度极值及放大倍数

Tab.2 Extreme value of dynamic displacement, acceleration and magnification

地震工况	动位移/cm			加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )及放大倍数		
	$u_{d,x}$	$u_{d,y}$	$u_{d,z}$	$a_x$	$a_y$	$a_z$
50 a 超越概率 10%	4.70	2.08	2.88	3.85(3.85)	2.68(3.99)	3.16(3.16)
50 a 超越概率 5%	6.32	2.40	3.02	4.65(3.69)	3.25(3.87)	3.73(2.96)
100 a 超越概率 2%	11.63	4.56	6.12	5.72(2.61)	4.33(2.97)	6.05(2.76)

注:括号内为加速度放大倍数.

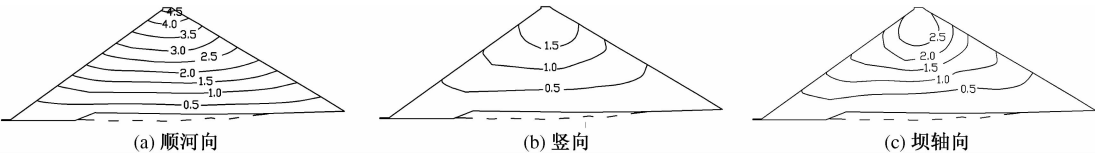


图 5 大坝动位移包络值等值线图(单位:cm)  
Fig.5 The enveloping value contour map of dam displacement (unit: cm)

极值分别为 3.74 MPa 和 -4.11 MPa,均大致位于面板的中部;坝轴向动压应力和拉应力极值分别为 4.61 MPa 和 -4.00 MPa,均大致位于岸坡附近面板.

当动拉应力与顺坡向静应力叠加后,面板中部的动拉应力区与该部位静压应力区有一定抵消作用,使面板总压应力区和极值减小,面板上部的总拉应力区和极值增大.在设计地震作用下静动拉应力叠加极值未超过 2.5 MPa,其中超过面板 C25 混凝土抗拉强度的区域很小.当面板动压应力和顺坡向静应力叠加后,面板顺坡向不出现拉应力区,总压应力极值为 11.4 MPa,未超过面板 C25 混凝土的抗压强度.面板坝轴向动压应力和

拉应力极值均大致位于岸坡附近面板的中上部.当动压应力与坝轴向静应力叠加后,河床部位面板的压应力区域和极值有所增大,总压应力极值约 11.9 MPa,未超过面板 C25 混凝土的抗压强度,两岸面板的拉应力区和极值有较大减小,不是拉应力极值控制值.当动拉应力和坝轴向静应力叠加后,两岸附近面板的拉应力区和极值增大,总拉应力极值约 5.4 MPa.由于地震时混凝土面板动应力是交变的,且各处极值发生在不同时刻,这种静动拉应力的最不利叠加只在某瞬时或短时间内发生,且只局限于两岸面板局部区域,未必对面板整体结构安全有重大影响.为了确保面板安全,建议在岸坡附近面板受拉区适当增加配筋率.

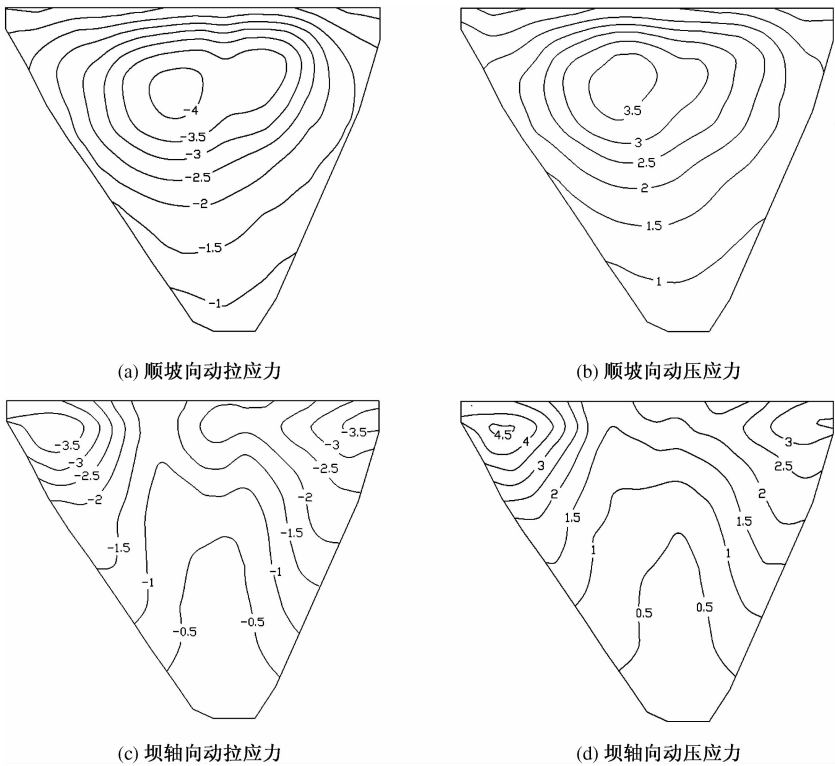


图 6 面板动应力包络值等值线图 (单位:MPa)  
Fig. 6 The enveloping value contour map of panel stress ( unit: MPa)

2.2.3 坝基覆盖层动孔压与液化特性分析<sup>[10]</sup>

在 50 a 超越概率 10% 的设计地震作用下坝基覆盖层动孔压和液化度极值分别为 177.5 kPa 和 31.5%,其中液化度指该单元的动孔压与平均有效应力之比.随着地震加速度峰值的增加,坝基覆盖层的动孔压和液化度均有所增加,但液化度极值均不大.即使遭遇最不利 100 a 超越概率 2% 校核地震时,坝基覆盖层液化度极值仅为 61.9%.因此,强震作用下坝基覆盖层不会出现液化现象,这也是确保大坝抗震安全的重要因素之一.

3 结束语

通过对我国西南强震区某高面板堆石坝进行不同超越概率地震作用下地震反应计算分析可知,随着输入地震波峰值的增大,大坝加速度和动位移、面板动应力、覆盖层动孔压和液化度等动力反应均逐渐增大,但加速度放大倍数逐渐减小.在 100 年超越概率 2% 的地震波作用下,大坝动力反应基本上均在正常范围之内,但面板动应力极值增加较大.尤其当坝轴向动拉应力与静应力叠加时,两岸面板一定区域内会超过面板混凝土的抗

拉强度,需适当增加配筋率.坝基覆盖层的动孔压不大,不会出现液化现象.综合分析大坝的强震反应特性,可以判定大坝在现有设计条件下的抗震安全性总体上是有保障的,整体上能安全经受校核状态下的强震作用.

参考文献:

[1] 徐泽平.超高混凝土面板堆石坝建设中的关键技术问题[J].水力发电,2010,36(1):51-54.  
[2] 陈生水,霍家平,章为民.“5.12”汶川地震对紫平铺混凝土面板堆石坝的影响及原因分析[J].岩土工程学报,2008,30(6):795-801.  
[3] 赵剑明,周国斌,关志诚,等.紫坪铺“5.12”震害对面板堆石坝抗震措施的若干启示[J].水电能源科学,2012,30(1):24-27.  
[4] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects [J]. Journal of soil mechanics and foundation divi-

sion, ASCE, 1972, 98 (SM6): 603-624.  
[5] 曹学兴,何蕴龙,熊堃,等.考虑围压效应的高土石坝动力响应分析[J].天津大学学报,2014,47(2): 116-123.  
[6] 顾淦臣,沈长松,岑威钧.土石坝地震工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2009.  
[7] SEED H B, MARTIN. Pore water pressure changes during soil liquefaction [C]//Proc ASCE, 1976, 102 (GT4).  
[8] FINN W D, MARTIN, BYREN. Seismic response and liquefaction of sand [C]//Proc ASCE, 1976, 102 (GT8).  
[9] 徐志英,沈珠江.高尾矿坝的地震液化和稳定分析[J].岩土工程学报,1981,3(4):22-32.  
[10] 岑威钧,顾淦臣,闵家驹,等.黄土动力特性试验及深厚黄土地基上土石坝抗震分析研究[J].岩土力学,2010,31(1):187-192.

Study on the Seismic Response of a High CFRD on Alluvium Deposit

CEN Wei-jun<sup>1,2</sup>, YUAN Li-na<sup>1,2</sup>, ZHANG Zi-qi<sup>1,2</sup>, ZHOU Tao<sup>3</sup>, YANG Hong-kun<sup>3</sup>, LU Pei-can<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China; 3. Sichuan Qingyuan Engineering Consultant Co., Ltd., Chengdu 610072, China)

**Abstract:** The calculation of dynamic response and seismic safety evaluation of a high CFRD on alluvium deposit subjected to seismic excitation of different transcendental probabilities were carried out, with emphasis on the seismic response characteristics of dynamic displacement, acceleration, dynamic stresses of face slab and liquefaction of alluvium deposit under strong excitation. The results show that dynamic displacement, acceleration, dynamic stresses of face slab and liquefaction degree of alluvium deposit will increase gradually with the increasing of seismic wave peak, but the acceleration magnification will decrease. The seismic safety of dam is still within a normal range even for transcendental probability 2% in 100 years.

**Key words:** high concrete face rockfill dam (CFRD); seismic response; acceleration; dynamic stress of face slab; dynamic pore water pressure