

基于 ABAQUS 的面板砂砾石坝三维动力有限元分析

李阳¹, 任亮², 王瑞骏¹, 余莲¹, 牛文龙¹, 荆慧斌¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 建立了新的有限元分析方法, 为准确合理地进行面板砂砾石坝的三维动力有限元分析提供参考。在对砂砾石料的动力本构模型及其分析方法进行分析与选择的基础上, 利用 ABAQUS 软件实现砂砾石的等效线性粘弹性模型, 对一座已建成的高面板砂砾石坝进行了地震响应分析, 重点分析大坝的反应加速度、动位移和残余变形等动力反应情况。结果表明: 坝体在地震作用下的响应不强烈, 但在顺河向地震作用下坝顶出现鞭梢效应, 需采取相应的抗震工程措施。

关键词: ABAQUS; 面板砂砾石坝; 动力响应; 三维有限元分析; 抗震稳定

中图分类号: TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0039-05

Finite element analysis of 3D dynamics for concrete face rock fill dam based on ABAQUS

LI Yang¹, REN Liang², WANG Ruijun¹, YU Lian¹, NIU Wenlong¹, JING Huibin¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China;

2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The paper established a new finite element analysis method so as to provide a reference for the accurate and reasonable 3D dynamic analysis of CFRD. By means of analyzing and selecting the dynamic constitutive model and analysis of the sand-gravel-fill, It realized the dynamic equivalent linear viscoelastic model of grit stone based on ABAQUS software, and carried out the seismic response analysis for a built high concrete face rock-fill dam, and focused on the analysis of dynamic response such as dam response acceleration, dynamic displacement and residual deformation. Results show that the dam response under the action of earthquake is not strong, but under the action of earthquake along with the river direction, the whipping effect appears in the dam crest and it is necessary to take the corresponding measures of seismic engineering.

Key words: ABAQUS; concrete face sand-gravel-fill dam; dynamic response; 3D finite element analysis; seismic stability

随着计算机技术的迅速发展以及有限元法在坝工计算中的广泛应用, 面板堆石坝的动力反应计算理论及方法已有了长足的发展。《水工建筑物抗震设计规范》中规定, 我国碾压式土石坝设计规范中明确规定^[1], 对于 1 级、2 级高坝应用有限元法进行应力和变形分析, 在地震区还要进行动力有限元分析。近年来引入国外的 ABAQUS 软件^[2]属目前国际上最先进的大型通用非线性有限元分析软件之一。本文作者完成了砂砾石的等效线性粘弹性模型在 ABAQUS 软件上的实现^[3], 在此基础上对已

建的面板堆石坝进行了地震反应分析, 分析总结坝体残余变形及坝体动力加速度、动位移分布规律, 对大坝抗震安全性进行评价。

1 面板砂砾石坝的动力有限元计算

1.1 计算本构模型

目前, 用于砂砾石料有限元动力计算中的本构模型主要包括等效线性粘弹性模型和非线性粘弹塑性模型, 其中等效线性模型在工程上使用较为广泛, 而非线性粘弹塑性模型目前还处于理论上的探索阶

收稿日期: 2014-06-30; 修回日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779051)

作者简介: 李阳(1991-), 男, 陕西延安人, 在读硕士研究生, 主要从事水工结构分析及数值仿真研究。

通讯作者: 王瑞骏(1963-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 教授, 主要从事坝工应力研究。

段。本文工程实例采用等效线性粘弹性模型。

等效线性粘弹性模型是一种应用于面板坝地震动力响应分析的主要模型,它认为土是粘弹性体^[4],土体的非线性和滞后性特征主要是通过等效剪切模量和等效阻尼比来反映。它的基本原理是把材料应力应变关系所体现出的滞回环等价地用倾角和面积相等的椭圆来表示,虽然近似的椭圆和实际的滞回环间存在着一定的误差,但对于一般阻尼水平较低的地震反应还是可以使用的,最后在此基础上得到动剪切模量及阻尼比。

动剪切模量的计算式:

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

式中: γ_r 为地震过程中的参考剪应变; γ 为动剪应变。

阻尼比的计算式为:

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

最大动剪模量的计算式为:

$$G_{\max} = K_m P_a \left(\frac{\sigma'_0}{P_a} \right)^m \quad (3)$$

式中: K_m 为系数,由动力特性试验测定; σ'_0 为围压; m 为材料参数,同样由动力特性实验测定。 G 和 λ 迭代是否收敛的判断标准为:

$$\left| \frac{G_i - G_{i-1}}{G_{i-1}} \right| \leq 10\%; \quad \left| \frac{\lambda_i - \lambda_{i-1}}{\lambda_{i-1}} \right| \leq 10\% \quad (4)$$

1.2 计算方法

在面板坝的动力有限元计算中,基于等效线性粘弹性模型的等效线性法比较实用,因此本文拟用这种方法对面板坝进行动力分析^[5]。

采用等效线性法进行坝体动力分析时,砂砾石料的非线性主要是通过剪切模量和阻尼比随应变关系的变化来体现的,此方法近似用一个等效的线性振动体系代替处于非线性振动中的坝体,进而部分坝体的振动特性即可由该等效的线性振动体系来表征^[6-7]。

本方法的具体分析步骤为:

(1) 经过静力计算得到坝体震前的初始有效应力,在此基础上,采用最大动剪模量的计算式(3)计算出 $G_{\max}$,并取各个单元的初始动剪模量为 $G_0 = 0.7G_{\max}$ 及初始阻尼比 $\lambda_0 = 0.05$ 。

(2) 计算出各个单元的质量矩阵和刚度矩阵,再通过组合叠加成整体质量矩阵和刚度矩阵;采用式 Rayleigh 法求出结构体系的整体阻尼矩阵。

(3) 输入地震反应加速度,采用 Wilson- θ 法假设结构的加速度在 $\theta\Delta t$ 时间段内呈现线性关系来近似的求解坝体的动力平衡方程,得到各单元在不同时段内的地震反应,进而获取体系的最大动剪应变 $\bar{\gamma}_{\max}$,以及等价动剪应变 $\gamma_e = 0.65\bar{\gamma}_{\max}$ 。

(4) 将等价的动剪应变 γ_e 代入(1)及(2)式中,得到相应的动剪切模量 G 和阻尼比 λ 。

(5) 将步骤(4)中求得的 G 和 λ 代入(4)式中以判断迭代是否收敛。若满足收敛条件计算停止,即认为步骤(4)中求得的 G 和 λ 符合现实情况,否则需重新计算。

(6) 重新迭代计算是以步骤(4)中求得的 G 和 λ 作为新的初始量,并重复步骤(2)~(5)直至满足条件。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

水电站坝体为面板砂砾石坝,最大高度为123.5 m,总填筑量 544 万 m^3 ,其中砂砾石料约为 421 万 m^3 ,防浪墙高 4.7 m,大坝坝顶高程 2 894.5 m,正常蓄水位为 2 887.5 m,坝顶长 438 m,上游坝坡 1:1.55,下游设有 3 级马道,其上部坝坡 1:1.5,其余 1:1.4。

大坝的标准剖面见图 1 所示。

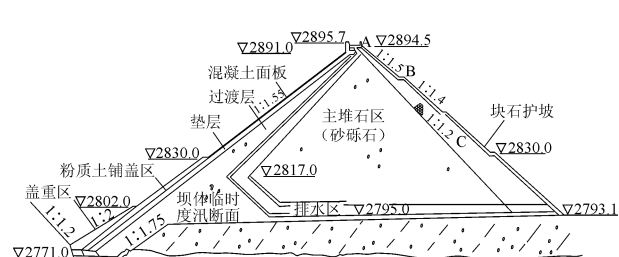


图1 面板堆石坝标准断面图

2.2 材料的计算参数

经过对本算例面板堆石坝垫层料、过渡料、堆石料和覆盖层进行分析,决定材料的本构模型参数参照公伯峡面板堆石坝试验参数^[8]。填筑料的 E-B 模型参数见表 1。在大坝的动力有限元模拟中,根据中国水科院的动力特性试验研究成果^[9]采用式(3)计算确定主堆石料、次堆石料和垫层料的最大动剪模量系数 K_m 和指数 m ,坝基覆盖层参数是通过现场波速试验并参考室内试验结果确定^[10]。对于混凝土面板和趾板的动弹模量取值,按照规范要求:动弹模取值高于静弹模 30%,故模拟中选用 9×10^6 kPa。不同材料的动力计算参数取值见表 2 所示。

表 1 大坝填筑料的 E-B 模型参数

材 料	$\rho_d /$ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c /$ MPa	$\varphi / ^\circ$	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}
垫层料	2.21	0	51.2	1337	0.34	0.91	973	0.23	1500	0.34
过渡料	2.18	0	48.3	887	0.28	0.85	654	0.33	1420	0.28
主堆石料	2.24	0	48.8	1420	0.34	0.89	890	0.31	1600	0.34
次堆石料	2.22	0	46.2	596	0.38	0.76	476	0.27	1020	0.38
坝基覆盖层	2.25	20	44.0	1500	0.30	0.89	1000	0.25	1800	0.30

表 2 面板坝动力分析参数

材 料	K_m	m	μ
主堆石料	3576	0.506	0.350
垫层料	3705	0.496	0.350
次堆石料	2500	0.506	0.300
坝基覆盖层	6760	0.506	0.480
面板和趾板	90000	0	0.167
接触单元	20000 m^{-1}	0.70	

2.3 有限元网格和地震波输入

本次有限元计算采用 ABAQUS 软件来模拟大坝在运行期遭遇地震时的动力反应,其有限元网格见图 2 所示, x 轴为顺河向, y 轴为坝轴向, z 轴为垂向,共计剖分得到 3987 个单元,4617 个节点。关于有限元模拟范围和单元型式的选取同静力部分。

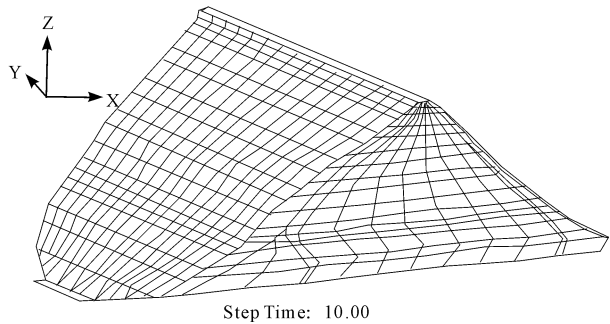


图 2 面板坝三维动力有限元模型

不同地震波的输入对坝体的动力有限元结果有着很大的影响,本文工程实例在结合地震波相关选取原则的基础上^[11],进行人工拟合地震波,并在有限元分析中同时输入水平和竖直向的地震波,其中水平向地震加速度根据该水库的设计要求,按照 100 年的基准期 4%~6% 超越概率,调整其最大加速度为 0.203 g,而竖直向的最大加速度按照规范要求取值为水平向的 2/3,即调整为 0.135 g,地震波作用持时 20 s,时间步长为 0.02 s。其加速度时程曲线如图 3 所示。

2.4 计算工况

取水库正常蓄水+地震作用为计算工况,坝上游

水位取 2887.5 mm,下游无水;地震参数如上所述。

鉴于本工程的具体特点,本文拟选定面板坝的 0+242 断面进行动力分析,并给出此断面上部分节点加速度反应的时程曲线(节点 A 高程 2894.5 m,位于下游坝坡顶部;节点 B 高程 2870.0 m,位于下游坝坡第一级马道处;节点 C 高程 2845.0 m 处,位于上游面板内侧处)。

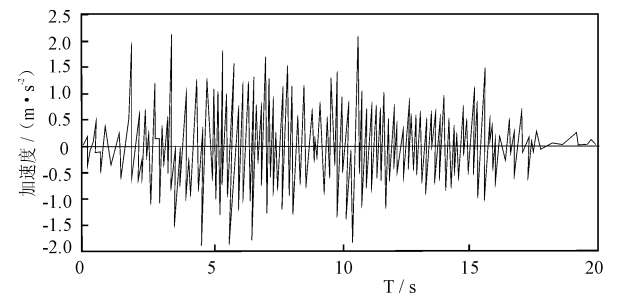


图 3 加速度时程曲线

2.5 有限元计算结果分析

在地震作用下面板砂砾石坝坝体节点 A、B、C 的顺河和垂向加速度时程曲线见图 4~6;坝体 0+242 断面的顺河、垂直向最大反应加速度以及最大动剪应力等值线结果见图 7~9 所示。

对比分析以上等值线结果可以看出:坝体的竖向加速度反应在 0.9 倍坝高处达到 1.92 m/s^2 ,为加速度的峰值,在下游坝坡的顶部到达 1.9 m/s^2 ;相对于竖向最大加速度反应,坝体的顺河向反应更为强烈,其最大反应值为 6.37 m/s^2 ,出现在坝顶偏下游处,因此为了防止坝顶部分块石在惯性力作用下发生滚动或滑移,采取放缓下游靠近坝顶处的坡度并进行相应的锚固是十分有必要的;坝体的动剪应力在横剖面的靠近底部处达到峰值 0.48 MPa。分析以上变形规律,可以看出坝体竖向、顺河向最大反应加速度峰值均位于坝体顶部,而且随着坝高最大反应加速度逐渐增大。顺河向地震作用下大坝的地震反应较为强烈,且加速度随坝高增加而被放大,表现出鞭梢效应。坝体的动剪应力随着坝高的增大而减小,在坝体靠近底部处达到峰值。

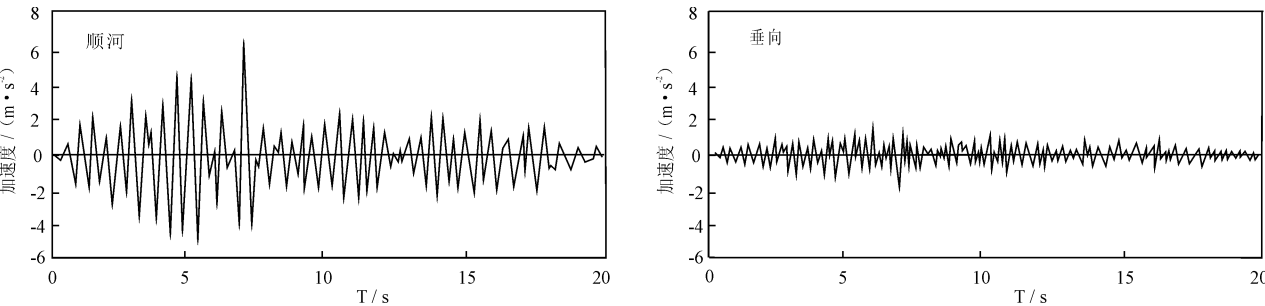


图4 节点 A 的加速度时程曲线

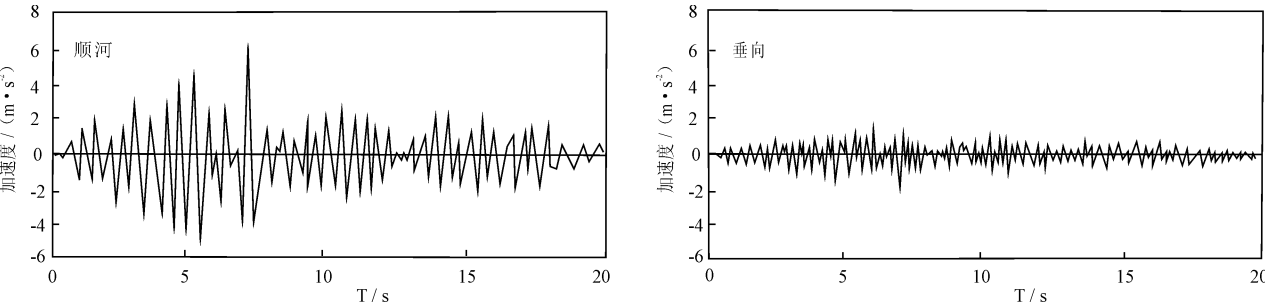


图5 节点 B 的加速度时程曲线

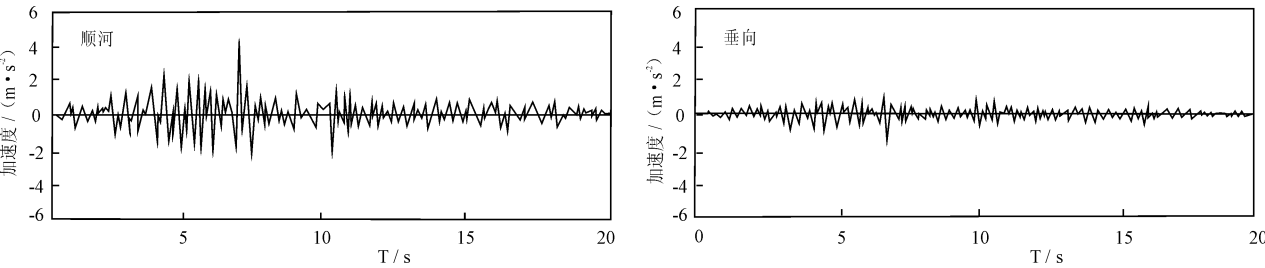


图6 节点 C 的加速度时程曲线

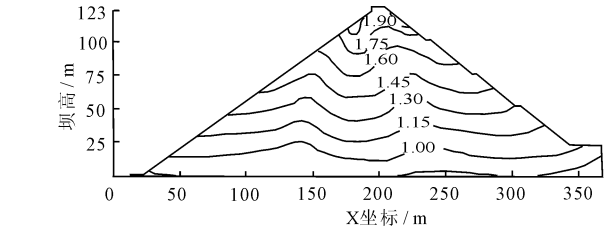


图7 竖向最大反应加速度等值线图(单位: m/s^2)

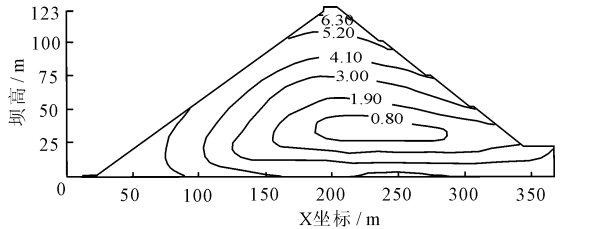


图8 顺河向最大反应加速度等值线图(单位: m/s^2)

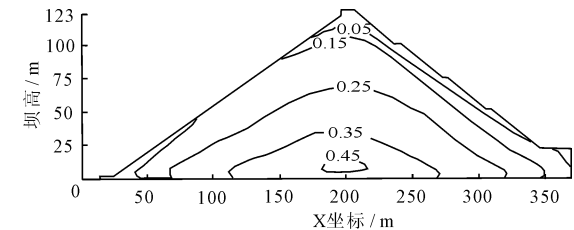


图9 最大动剪应力等值线图(单位: MPa)

在地震作用下面板坝坝体的残余变形有限元分析结果见图 10~11 所示。

对比以上坝体的残余变形结果可以看出:地震作用后,坝体产生的最大沉陷量位于坝顶处,达到

0.192 m,占坝高的 0.15%;坝体的向上游残余变形量为 0.039 m,向下游为 0.122 m,分析其原因:一方面是由于下游次堆石区为爆破堆石和隧洞开挖石渣料,其动剪模量较砂砾石料低,另一方面是由于上游库水压力的作用;分析以上变形量的分布规律,可以看出坝体的两个方向残余变形峰值都是从坝底到坝顶逐渐增大,顺河向残余变形峰值大于竖向残余变形峰值。地震作用引起的变形主要表现为坝体沉陷和向下游位移,因此应采取适当的工程措施。在地震作用下算例坝体面板的应力变形有限元分析结果见图 12~15 所示。

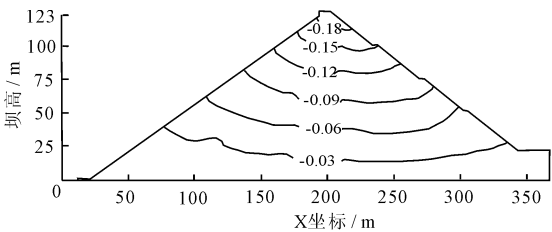


图 10 地震作用下坝体的竖向残余变形等值线图(单位:m)

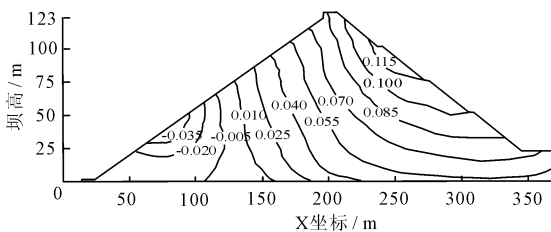


图 11 地震作用下坝体的顺河向残余变形等值线图(单位:m)

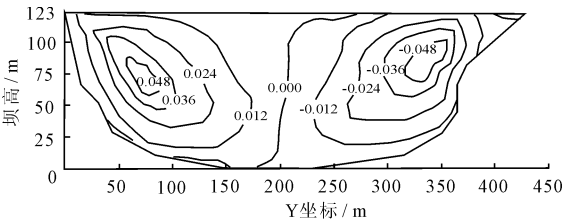


图 12 地震作用下面板的水平向位移等值线图(单位:m)

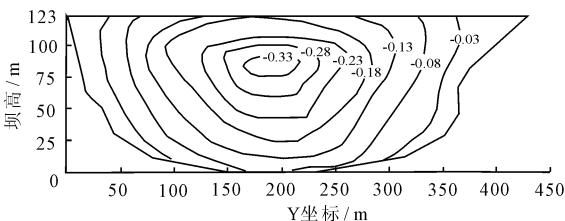


图 13 地震作用下面板的挠度等值线图(单位:m)

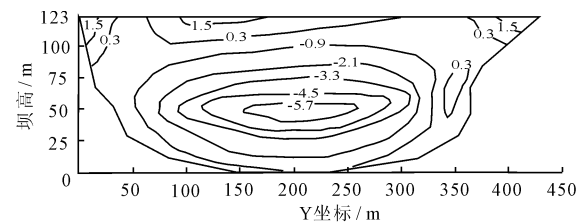


图 14 地震作用下面板的顺坡向应力等值线图(单位:MPa)

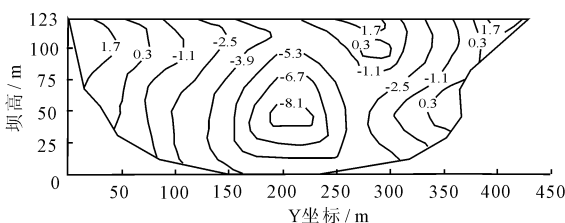


图 15 地震作用下面板的坝轴向应力等值线图(单位:MPa)

从以上有限元结果图可以看出:在地震作用下,混凝土面板的轴向位移仍指向河谷中心,最大轴向位移为 0.052 m,和震前相比,地震所引起的残余变形较小;震后混凝土面板的挠度峰值为 0.353 m,相比于震前增加了 0.022 m,说明本次地震作用所引起的挠度变形量不大,分析原因是由于在经过压实后的砂砾石坝坡上浇筑钢筋混凝土面板,其模量较高,因此地震所引起的残余变形量较小;震后面板的顺坡向压应力峰值从 6.29 MPa 减小到 5.76 MPa,但拉应力区有所增大,且峰值由 1.02 MPa 增加到 1.59 MPa;震后面板的坝轴向应力分布较震前变化较大,最大轴向压应力增加了 0.34 MPa 达到 8.23 MPa,最大轴向拉应力增加了 0.57 MPa 达到 1.87 MPa,并在面板顶部偏右岸处出现局部拉应力区,这点在设计中应予以重视,以防地震产生的瞬间作用致使面板拉裂破坏。

在 8 度设计地震作用下该面板砂砾石坝的有限元动力计算成果汇总见表 3,从此可看出:

(1)坝体顺河向最大反应加速度的放大系数为 3.2,明显大于竖向的 1.4,这说明坝体的顺河向加速度明显比竖向剧烈。同时随着鞭梢效应的存在,在下游坝顶处由于受拉力作用可能会产生坝轴向的

裂缝,并在局部处可能伴随有填筑料松动或滑落现象的发生,因此应针对此薄弱区域强化抗震设计,例如:选择抗震性能和级配良好的填筑料,严控施工碾压质量,并做好不同材料区间的过渡;针对坝顶区域,采取上缓下陡形的坝坡、加宽坝顶并增加浆砌块石压重等措施;为防止动水涌浪,应在设计中预留足够的超高。

表 3 面板坝三维动力有限元计算结果

		名称	幅值
最大反应加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) (放大系数)	竖向	垂向	1.92(1.4)
	顺河向	水平向	6.37(3.2)
	顺河向	向上游	0.039
最大动剪应力/MPa	顺河向	向下游	0.122
	顺河向	向上游	0.039
坝体残余变形/m	竖向	向下	0.192
	顺河向	向上游	0.039
	顺河向	向下游	0.122
	顺河向	向上游	0.039
混凝土面板应力/MPa	顺坡向应力	压	5.76
		拉	1.59
	坝轴向应力	压	8.23
		拉	1.87
混凝土面板位移/m	挠度	向坝内	0.353
	坝轴向位移	向右岸	0.052
	坝轴向位移	向左岸	0.051

紊动强度逐渐减小。

(3)数值模拟计算和物理模拟试验结果的对比分析可知,以多孔介质区域代替柔性沉水植物进行数值模拟是可行的。为了更精确的对柔性植物进行数值模拟,今后的研究可采用更加精细的多孔介质区域,考虑多孔介质的各项异性,并且把多孔介质区域设置为动网格区域。

参考文献:

- [1] Jarvela J. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants [J]. Journal of Hydrology, 2002,1(269):44-54.
- [2] Syunswe Ikeda, Minoru Kanazawa. Three-dimensional organized vortices above flexible water plants [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996,122(11):634-640.
- [3] Fathi - Maghadam M, Kouwen N N. Nonsubmerged vegetative roughness on floodplains [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997,123(1):51-57.
- [4] 韩璐. 柔性植被河道水流特性试验研究[D]. 南京:河海大学,2006.

- [5] 朱红钧,赵振兴,韩璐. 有植被的河道水流紊动特性模型试验研究[J]. 水利水运工程学报,2006(4):57-61.
- [6] Hsieh Ping Cheng, Shiu Yu Sheng. Analytical solutions for water flow passing over a vegetal area [J]. Advances in Water Resources, 2006,29(9):1257-1266.
- [7] 黄本胜,袁梦,邱秀云. 有水葫芦的河道水流数值模拟[J]. 广东水利水电,2008(8):1-3+18.
- [8] 王莹莹. 有双重植被河道水流特性试验研究[D]. 南京:河海大学,2007.
- [9] 高学平. 高等流体力学[M]. 天津:天津大学出版社,2005.
- [10] Fluent Inc. Fluent user's guide [M]. Fluent Inc., 2003.
- [11] Temple D M. Velocity distribution coefficients for grass lined Channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986,112(3):193-205.
- [12] Gourlay M R. Discussion of "Flow retardance in vegetated channels" by N Kouwen, T Eunny, H M Hill [J]. Irrigation Drainage Division, 1970,96(3):351-357.
- [13] 王洪虎. 不同植物对水流结构变化影响规律试验研究[D]. 武汉:长江科学院,2012.

(上接第43页)

(2)从大坝的残余变形可以看出,由于坝体主要材料为砂砾石,其抗剪强度和变形模量较高,因此震后残余变形量处于比较低的水平,这对整个工程的抗震有利。

(3)混凝土面板经过地震作用后,面板的坝轴向应力分布较震前有较大变化,从而导致坝体面板在局部出现或扩大的拉应力区,这应该在面板设计与施工中充分重视。总体上,经过对该面板坝的有限元动力计算,可以看出大坝整体是安全的。

3 结 语

基于 ABAQUS 有限元软件实现了砂砾石料动力分析中常用的等效线性粘弹性模型,在此基础上对已建的面板砂砾石坝进行了三维动力分析,得出了大坝动力反应加速度、坝体残余变形、混凝土面板地震应力和动位移等。计算结果表明,在超越概率4%~6%地震作用下,面板砂砾石坝的绝对加速度、动位移和残余变形等动力反应都不是很强烈,但是顺河向地震作用下坝顶存在明显的鞭梢效应。因此面板坝的抗震设计中应针对此薄弱区域进行强化设计,确保大坝在强震作用下能够安全运行。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. SL274-200 碾压式土石坝设

- 计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [2] 费康,刘汉龙. ABAQUS 的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J]. 岩土力学,2010,31(3):881-890.
- [3] 潘家军,王观琪,江凌,等. 基于 ABAQUS 的高混凝土面板堆石坝地震反应三维非线性分析[J]. 水力发电学报,2011,30(6):80-84.
- [4] 赵剑明,汪闻韶,常亚屏,等. 高面板坝三维真非线性地震反应分析方法及模型试验验证[J]. 水利学报,2003,34(9):12-18.
- [5] 潘家军,饶锡保,张计,等. 超宽河谷上面板堆石坝地震响应特性分析[J]. 世界地震工程,2010,26(S1):301-304.
- [6] 王霄. 面板堆石坝三维动力响应分析[D]. 天津:天津大学,2005.
- [7] 丁陆军. 面板堆石坝三维动力反应分析[D]. 西安:西安理工大学,2005.
- [8] 国家电力公司西北勘测设计研究院. 黄河公伯峡水电站工程初步设计重编报告(第五篇枢纽布置及建筑物)[R]. 西安:国家电力公司西北勘测设计研究院,1995:1-119.
- [9] 中国水利水电科学研究院. 黑泉水库混凝土面板堆石坝坝体及坝基土料动力特性试验研[R]. 中国水利水电科学研究院,2005. 10.
- [10] 刘小生,王钟宁,赵剑明,等. 面板堆石坝振动模型试验及动力分析研究[J]. 水利学报,2002,33(2):29-35.
- [11] 胡文源,邹晋华. 时程分析法中有关地震波选取的几个注意问题[J]. 南方冶金学院学报,2003,24(4):25-28.