

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.018

岑威钧,袁丽娜,王帅. 非一致地震动输入下高面板坝地震反应特性[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 126-132. (CEN Weijun, YUAN Li-na, WANG Shuai. Dynamic response of high CFRDs under non-uniform seismic waves input[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 126-132.)

非一致地震动输入下高面板坝地震反应特性

岑威钧¹, 袁丽娜¹, 王 帅²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635)

摘要:为研究地震波非一致输入对三维高面板坝动力反应的影响,采用波场分离的思路将人工动力边界处的总波场分解为无局部场地效应影响的自由场和局部场地效应引起的散射场,借助黏弹性边界建立地震波在自由场作用下地震动非一致输入,实现考虑地基辐射阻尼和地震波行波效应地震动输入。对我国西南地区某高面板坝进行非一致地震动反应分析,研究P波和SV波作用下坝体结构的动力反应规律。结果表明:当P波非一致输入时,随着入射角度的增加,竖向加速度和动位移极值逐渐减小,水平向加速度和动位移极值逐渐增大;SV波非一致输入时,地震动反应规律与P波入射时相反。入射角度对地震波的行波效应以及坝顶加速度反应谱幅值等都有较显著的影响。

关 键 词:非一致输入;黏弹性边界;入射角;行波效应;高面板坝;地震反应

中图分类号:TV641.1;TV698.1⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-640X(2016)04-0126-07

我国西部地区水资源丰富,拟建(规划)和在建一系列高坝进行水能开发利用。面板坝因抗震性能优越而被采用,筑坝数量和高度明显呈上升趋势^[1-2]。强震作用下高面板坝的动力反应倍受学术界和工程界的关注,而合理的地震动输入是正确认识大坝地震反应的关键之一。传统的无质量地基模型不能考虑地基的辐射阻尼作用,也不能反映地震行波效应对高面板坝动力反应的影响。当高面板坝遭遇浅源地震时,地震波并不是垂直入射至坝体,而是以一定的角度进行斜入射传播^[3]。由于地震波到达建基面不同处的传播路径的差异、坝址附近地形条件的变化以及入射角度的不同,入射地震波经过反射和折射后对大坝各处的地震作用存在明显差异^[4],如地震波到达地面各点的时间延迟。因此,对于浅源地震作用下的高面板坝,采用按同相位等振幅假定的地震波均匀输入不甚合理,应考虑地震动输入的非一致性,其中入射角度和相位差是体现地震动输入非一致特性的主要因素之一。程嵩^[5]对面板坝的非均匀地震动输入的震动反应与变形规律展开研究,认为相较于均匀一致输入方法可能更符合实际地震波的传播规律。田景元^[4]对面板坝进行多点输入的动力反应分析表明,与单点输入相比,多点输入坝基部位的最大动剪应力和损伤值偏大。周晨光^[6]基于对黏弹性人工边界参数的修订,建立体现行波效应和地基辐射阻尼的面板坝地震反应分析方法,研究地震波斜入射时行波效应对坝体加速度分布的影响。王帅^[7]研究地震波P波、SV波和SH波斜入射时面板坝的地震反应,指出斜入射与垂直入射时大坝的地震反应有明显不同。目前对非一致地震动输入下高面板坝三维动力特性的研究成果还较少,为此,本文通过数值模拟方法对此进行研究,以期对高面板坝的抗震设计提供借鉴参考。

收稿日期:2015-07-31

基金项目:长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016376/KY);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资助项目(YK914019);江苏高校优势学科建设工程资助项目(YS11001)

作者简介:岑威钧(1977—),男,浙江慈溪人,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 地震波非一致输入方法

地震波在传播过程中,其幅值、频谱及振动方向都在发生变化,因此地震波并非一直保持一定的波形沿着某个方向传播^[8]。图1为高山峡谷地带高面板坝受浅源地震波非一致入射示意图。大坝先在坝基处受到入射角为 α 的倾斜非一致地震动的作用,然后地震波传入坝体。设地震波最先入射处的输入波场为 $u(t)$ 。根据波在弹性半空间的传播规律,当波阵面传播距离为 r 时,半空间内任一点P波(图2)的入射波场和反射波场^[9-10]分别为:

$$u_x^{(0)}(x,y,t) = u(t-r/v_p) \sin \alpha_1, u_y^{(0)}(x,y,t) = -u(t-r/v_p) \cos \alpha_1 \quad (1)$$

$$u_x^{(1)}(x,y,t) = A_1 u(t-r/v_p) \sin \alpha_1', u_y^{(1)}(x,y,t) = A_1 u(t-r/v_p) \cos \alpha_1' \quad (2)$$

$$u_x^{(2)}(x,y,t) = A_2 u(t-r/v_s) \cos \beta_1, u_y^{(2)}(x,y,t) = -A_2 u(t-r/v_s) \sin \beta_1 \quad (3)$$

式中: A_1 和 A_2 分别为P波入射时,反射P波和反射SV波与入射P波幅值的比例系数; $u_x^{(0)}(x,y,t)$ 和 $u_y^{(0)}(x,y,t)$ 为P波入射场, $u_x^{(1)}(x,y,t)$ 和 $u_y^{(1)}(x,y,t)$ 为P波反射场, $u_x^{(2)}(x,y,t)$ 和 $u_y^{(2)}(x,y,t)$ 为反射SV波的反射场。

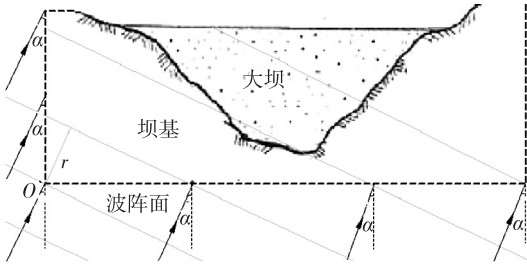


图1 地震波倾斜入射示意

Fig. 1 Oblique incidence of seismic wave

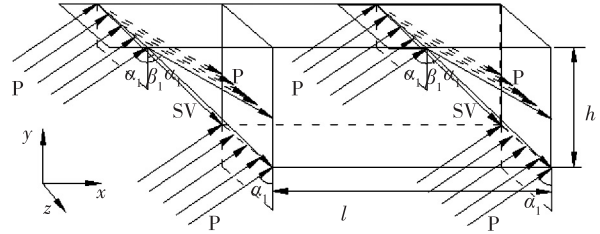


图2 三维半空间P波斜入射示意

Fig. 2 Oblique incidence of P wave

类似地,当斜入射波场 $u(t)$ 确定的条件下,半空间内任一点SV波的入射波场和反射波场与式(1)~(3)相类似,具体见文献[9]。

通常假定动力人工边界自动满足局部场地效应引起的散射场在截断边界的辐射条件,因此可以把人工边界的总波场分解为无局部场地效应影响的自由场和局部场地效应引起的散射场^[11]。弹簧-阻尼元件组成的黏弹性人工边界可以很好地吸收射向人工边界的波动能量^[12],因而只需在人工边界输入自由场即可,并且自由场可以转化为人工边界处的应力边界条件,则施加在黏弹性边界节点的切向和法向荷载可表示为:

$$\begin{cases} F_{Br}(t) = K_{Br} u_B(t) + C_{Br} \dot{u}_B(t) + \tau(t)A \\ F_{Bn}(t) = K_{Bn} u_B(t) + C_{Bn} \dot{u}_B(t) + \sigma(t)A \end{cases} \quad (4)$$

式中: A 为节点控制有效长度或面积; $\tau(t)$ 和 $\sigma(t)$ 分别为 $u_B(t)$ 和 $\dot{u}_B(t)$ 作用下的切向应力和法向应力。

P波和SV波作用下坝基三维应力边界条件的具体表达式见文献[7,13],此处不再一一推导列举。

2 工程概况及模型简介

2.1 工程概况

某水利工程位于四川省成都市西北60余千米的岷江上游麻溪乡,距都江堰市9 km。工程主要建筑物包括混凝土面板堆石坝、岸边溢洪道、引水发电系统,冲沙放空洞、1号和2号泄洪排沙洞。大坝坝高156 m,坝顶全长663.77 m,坝顶宽12 m,上游坝面坡度为1:1.4,下游坝面坡度在840.0 m马道以上为1:1.5,840.0 m马道以下为1:1.4。

2.2 计算模型与计算条件

考虑坝体与地基之间的动力相互作用,有限元网格采用如图 3 所示的带地基模型,同时也为了便于施加集中黏弹性边界。大坝有限元网格节点总数27 570个,单元总数 25 246 个。动力计算过程中,坝料按动力黏弹性模型考虑,计算参数见文献[14]。面板和趾板采用线弹性材料。地基密度为 $\rho = 2\,300\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $E = 2.5 \times 10^{10}\text{ Pa}$,泊松比 $\mu = 0.2$ 。

2008 年“5.12”汶川大地震时,由于该坝因仪器损坏未监测到实际地震波,因此本文按规范反应谱人工拟合地震波(见图 4)。

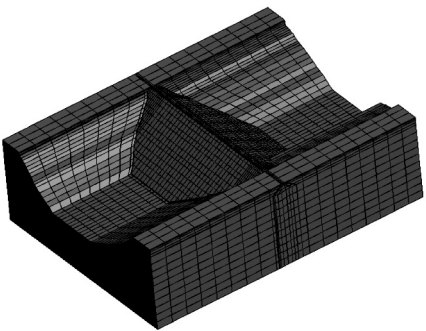


图 3 大坝三维有限元网格
Fig. 3 3D finite element meshes of dam

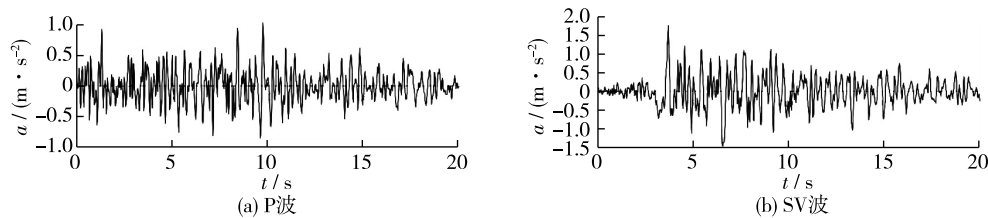


图 4 入射波曲线
Fig. 4 Input time-history curves of P wave and SV wave

3 计算结果分析

为了研究大坝-地基整个体系的地震反应特性,分别进行地震动一致输入和非一致输入,计算分析大坝在自由场 P 波和 SV 波作用下大坝的地震反应。

3.1 P 波入射时的大坝地震反应

当 P 波以不同角度入射时,坝体加速度和动位移极值见表 1。

P 波从一致输入到非一致输入,随着入射角度的增加,大坝水平向地震反应逐渐增大,而竖向向地震反应逐渐减小,这是因为当地震波以小角度入射时,P 波对水平向地震动的贡献随入射角度的增加而增大,对竖向地震动的贡献随入射角度的增加而减小。坝体动位移与加速度极值的变化规律一致。

表 1 P 波入射时坝体加速度和动位移极值

Tab. 1 Acceleration and dynamic displacement of dam under P wave input

地震动输入方式		加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		动位移/cm	
		水平向	竖向	水平向	竖向
一致输入		1.944	5.463	0.232	3.970
非一致输入	30°入射	2.419	2.282	2.246	2.886
	60°入射	3.815	1.976	3.418	1.613

在大坝最大剖面坝顶上下游处分别取特征点 A 和 B,同时在上下游坝脚分别取特征点 C 和 D,对特征点地震反应进行行波效应对比分析。图 5 和 6 给出了坝顶和坝脚特征点的竖向加速度和竖向动位移时程曲线。当地震波一致输入时,坝顶加速度和动位移时程相同,地震波同时到达坝顶。当地震波以不同入射角度非一致输入时,随着入射角度增加地震波的行波效应逐渐体现。地震波以 60°非一致入射时,由于坝顶处 A 和 B 点的距离比较短,行波效应并不明显,但上下游坝脚 C 和 D 点却出现了明显的相位差和峰值差。这点较真实地反映实际高面板坝遭遇浅源地震时的大坝地震反应特性,因此此时考虑采用地震波的非一致输入是必要的。

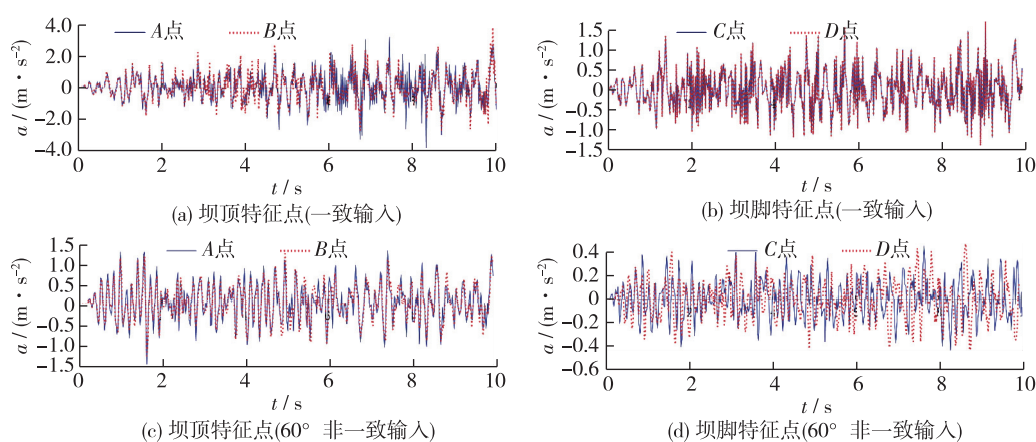


图5 P波入射时特征点竖向加速度时程曲线

Fig. 5 Time-history curves of vertical acceleration of typical points under P wave input

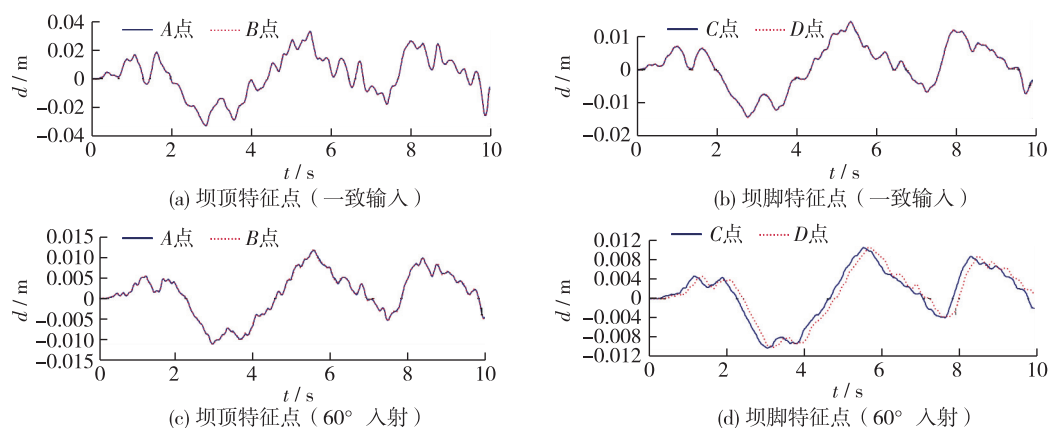


图6 P波入射时特征点竖向动位移时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of vertical dynamic displacement of typical points under P wave input

大坝水平向加速度反应谱幅值的卓越周期随入射角度的增加而逐渐增大,并且反应谱幅值随入射角度的增加而逐渐增大,地震波以 30° 入射时水平向加速度反应谱比垂直入射时放大了 2.18 倍,而地震波以 60° 入射时加速度反应谱比垂直入射时放大了 3.27 倍。竖向加速度反应谱幅值的最大值在周期为 $0.2 \sim 0.6$ s 处,1 s 以后的入射角度对坝顶加速度反应谱幅值影响较小。随入射角度的增加,竖向加速度反应谱幅值逐渐减小,地震波以 30° 入射时水平向加速度反应谱幅值是垂直入射时的 $2/3$,而地震波以 60° 入射时加速度反应谱幅值是垂直入射时的 $1/3$ 。因此地震波非一致输入时,入射角度对坝体顶部的水平向和竖向加速度反应谱幅值都有一定影响。

3.2 SV 波入射时的大坝地震反应

根据坝基材料参数计算可得 SV 波斜入射时的临界角度约为 38° ,因此 SV 波非一致输入时的角度选择应小于此值。表 2 为 SV 波一致输入和非一致输入时坝体加速度和动位移极值。

当 SV 波入射时,随着入射角度的增加,地震波从一致输入变为非一致输入,水平向加速度和动位移极值逐渐减小,竖向向加速度和动位移极值逐

表2 SV波入射坝体加速度和动位移极值

Tab. 2 Acceleration and dynamic displacement of dam under SV wave input

地震动输入方式	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		动位移/cm	
	水平向	竖向	水平向	竖向
一致输入	7.516	2.804	4.648	0.539
非一致输入	30°入射	5.342	2.816	4.923
	60°入射	4.743	3.395	4.137

渐增大,这是因为 SV 波对水平向地震动的贡献随入射角度的增加逐渐减小,而对竖向地震动的贡献随入射角度的增加而增大。图 7 和 8 给出了坝顶和坝脚特征点的水平向加速度和动位移时程曲线。

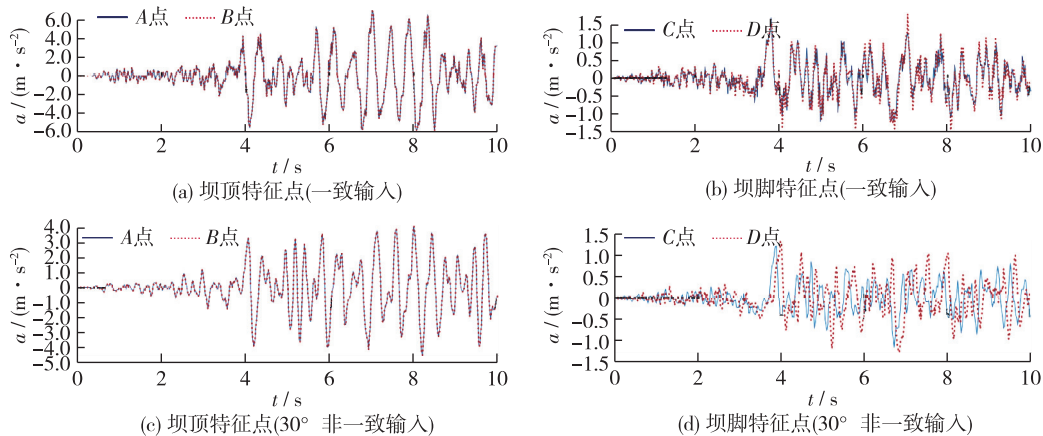


图 7 SV 波入射时特征点水平向加速度时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of horizontal acceleration of typical points under SV wave input

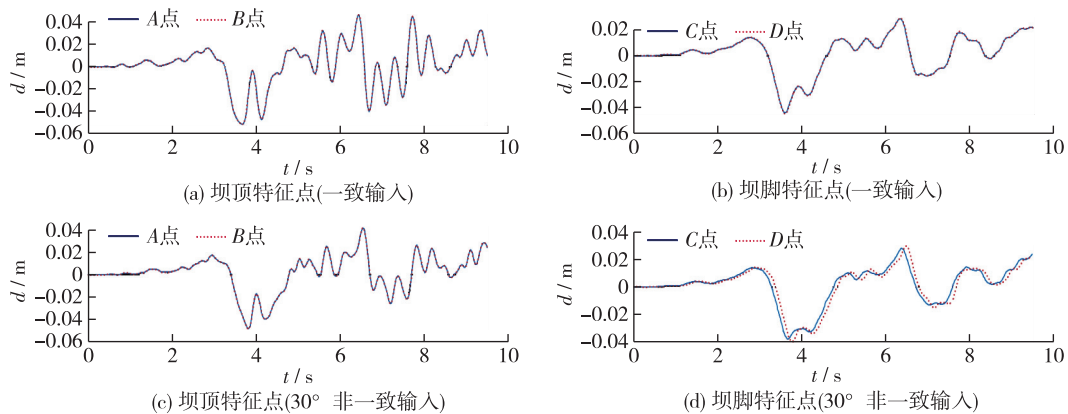


图 8 SV 波入射时特征点水平向动位移时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of horizontal dynamic displacement of typical points under SV wave input

对 SV 波垂直入射、15°入射以及 30°入射时坝顶中心加速度反应谱进行研究,可以发现:当 SV 波入射时,水平向加速度反应谱随着入射角度的增加幅值逐渐减小。其中,地震波 15°角入射时水平向加速度是垂直入射时的 3/4,30°入射时水平向加速度是垂直入射时的 1/2。而竖向加速度反应谱幅值随入射角度的增大逐渐增大,地震波 15°角入射时的竖向加速度反应谱幅值比垂直入射时放大 2.39 倍,30°入射时比垂直入射放大了约 4 倍。因此,入射角度的变化对坝体顶部加速度反应有很大影响。

4 结 语

地震波非一致输入与一致输入时大坝地震反应有明显不同。随着 P 波入射角度的增加,其水平向分量逐渐增大,竖向分量逐渐减小;SV 波入射时的规律与之相反。地震波一致输入时地震波到达坝体同一波阵面上点的时间相同,同一水平面上的点地震动时程曲线重合。而随着入射角度的增加,行波效应变得更显著。因此,对于遭遇浅源地震的高面板坝,其地震反应分析时考虑采用地震波的非一致输入是必要的,同时应进一步研究合理入射角度的选择。

参 考 文 献:

- [1] 马洪琪. 300 m 级面板堆石坝适应性及对策研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(12): 4-8. (MA Hong-qi. 300 m grade concrete face rockfill dam adaptability and countermeasures [J]. Chinese Engineering Science, 2011, 13(12): 4-8. (in Chinese))
- [2] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高面板坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 59-65. (CHEN Shen-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 59-65. (in Chinese))
- [3] TAKAHIRO S. Estimation of earthquake motion incident angle at rock site [C] // Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand, 2000: 956.
- [4] 田景元. 面板坝多点输入地震反应分析及相关方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2003. (TIAN Jing-yuan. Earth dam's response to multi-point input seismic incitation and relative researching method [D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [5] 程嵩. 面板坝地震动输入机制与变形规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2012. (CHENG Song. Research on seismic input mechanism and deformation law of embankment dams [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese))
- [6] 周晨光. 高面板坝地震波动输入机制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. (ZHOU Chen-guang. Research on the mechanism of seismic wave input about high rock fill dam [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [7] 王帅. 考虑地基远域能量逸散及地震波斜入射时面板坝地震反应分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2012. (WANG Shuai. Study on seismic response of earth-rock dams considering effect of far field energy dissipation of foundation and oblique incidence of seismic waves [D]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese))
- [8] 陈厚群. 坝址地震动输入机制探讨[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1417-1423. (CHEN Hou-qun. Discussion on seismic input mechanism at dam site [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1417-1423. (in Chinese))
- [9] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (DU Xiu-li. Theories and methods of wave motion for engineering [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [10] 吴兆营. 倾斜入射条件下面板坝最不利地震动输入研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2007. (WU Zhao-yin. A study of the worst seismic motion input for earth-dam seismic stability under oblique incidence conditions [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics China Earthquake Administration, 2007. (in Chinese))
- [11] 赵建锋, 杜修力, 韩强, 等. 外源波动问题数值模拟的一种实现方式[J]. 工程力学, 2007, 24(4): 52-58. (ZHAO Jian-feng, DU Xiu-li, HAN Qiang, et al. An approach to numerical simulation for external source wave motion [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(4): 52-58. (in Chinese))
- [12] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 46-51. (LIU Jing-bo, WANG Zhen-yu, DU Xiu-li, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 46-51. (in Chinese))
- [13] 袁丽娜. 高面板坝地震动输入方法比较及应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2015. (YUAN Li-na. Study on seismic input method comparison and application of high earth-rock dam [D]. Nanjing: Hohai University, 2015. (in Chinese))
- [14] 刘小生, 王钟宁, 汪小刚, 等. 面板坝大型振动台模型试验与动力分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (LIU Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, WANG Xiao-gang, et al. Large-scale shaking table model test and dynamic analysis of CFRD [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese))

Dynamic response of high CFRDs under non-uniform seismic waves input

CEN Wei-jun¹, YUAN Li-na¹, WANG Shuai²

(1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

2. *Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou 510635, China*)

Abstract: In order to study the influences of the oblique incidence seismic waves on the seismic response of the high concrete face rockfill dam, a total wave field of the artificial boundary is separated into free field without local topography effects and scattering field caused by local topography effects according to the thought of wave field decomposition. The seismic input method considering the non-uniform ground motion under the free field is established based on the viscoelastic artificial boundary. Furthermore, the influences of radiation damping of the infinite foundation and traveling wave effects are also realized by the method. The dynamic response analysis of a high concrete face rockfill dam under the actions of different incident waves and the incident angle is made, and studies of a dynamic response rule of the dam under the action of plane P wave and SV wave are carried out. It is found from the results of the dynamic response that the oblique incidence seismic wave is significantly different from the vertical incidence. With the increase of the incident angle of incident P wave, the peak acceleration and the peak displacement in the horizontal component is gradually increased, while the peak acceleration and the peak displacement in the vertical component is gradually decreased, which is opposite to the case of incident SV wave. The safety of the high concrete face rockfill dam cannot be ensured if only considering the influences of the vertical incidence. At the same time, the traveling wave effects and the amplitude of the acceleration response spectrum on crest of the dam are also influenced by the incident angle.

Key words: non-uniform input of seismic wave; viscoelastic boundary; angle of input; traveling wave effect; high concrete face rockfill dam; seismic response