

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.014

王志坤, 杨璐. 基于附加质量的混凝土重力坝地震仿真分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 98-103. (WANG Zhi-kun, YANG Lu. Seismic simulation analysis of concrete gravity dam based on added mass method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 98-103.)

基于附加质量的混凝土重力坝地震仿真分析

王志坤, 杨璐

(沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 为了研究混凝土重力坝在地震过程中的动态响应规律, 采用 ABAQUS 三维附加质量法模拟桃林口大坝在迁安波作用下的动态响应, 并研究了 3 个方向地震加速度在地震过程中的影响程度。计算发现: 坝体虽未发生震损, 但下游断面突变处最大拉应力达到 2.56 MPa, 临界于混凝土的动态抗拉强度值 2.6 MPa, 应引起注意, 在设计中折坡处宜做成圆弧形, 以减少应力集中; 在地震过程中, 坝体横河方向位移量达到了 17.87 mm, 极易造成相邻坝段发生碰撞破坏, 工程中可进行横缝灌浆用以加固; 同时计入 3 个方向的地震作用是对坝体最不利的计算方案, 横河向地震加速度和垂直地震加速度在整个抗震分析中都有着重要影响, 单纯考虑其中某一方地震作用的做法严重失真。

关键词: 水工结构抗震; 附加质量法; 重力坝; 动水压力; 仿真分析

中图分类号: TV312

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)04-0098-06

附加质量法是 1933 年 Westergaard 在对水体-结构相互作用研究的基础上提出的一种不考虑水体可压缩性的等效计算方法, 也是目前工程界处理地震作用下水坝动水压力问题通常采用的方法^[1-2]。由于该方法简单实用、易于计算、偏于安全, 欧美等发达国家现在仍采用附加质量法解决工程中的相关问题^[3-5], 我国抗震规范^[6]中规定对于水体-结构相互作用问题应采用 Westergaard 的附加质量公式。

近年来, 我国建设了一批大型水利工程, 但作为一个地震多发国家, 不少已建、在建、拟建的高坝大库都位于强震区, 所以抗震研究是我国水利工程建设中不可避免的严峻挑战。重力坝因为具有较高安全性, 在国内外均被广泛采用^[7-8]。因此混凝土重力坝抗震性能研究对于水利工程建设具有重大现实意义。

1 计算原理

H. M. Westergaard 假设坝前水位对坝体的动水压力作用类似于呈抛物线形分布, 并通过试验推导出了 Westergaard 公式^[9]:

$$m = (7/8)\rho_w \sqrt{h_w z} \quad (1)$$

式中: ρ_w 为水密度; h_w 为设计水深; z 为到水面的距离。

20 世纪 80 年代, Clough 教授在 Westergaard 研究的基础上对其进行了扩展, 扩大了附加质量法的应用范围^[10]:

$$M_p = (7/8)\rho A_i \sqrt{hy} \mathbf{l}_i \quad (2)$$

式中: ρ 为水密度; A_i 为该点在坝面上的隶属面积; h 为设计水深; y 为到水面的距离; \mathbf{l}_i 为某点的法线矢量。

收稿日期: 2015-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11102118); 辽宁省“百千万”人才基金资助项目(2011921048)

作者简介: 王志坤(1990—), 男, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 主要从事水工结构抗震及 ABAQUS 数值模拟的研究。

E-mail: xxzhikun@163.com 通信作者: 杨璐(E-mail: yanglu515@163.com)

拉普拉斯方程导出了应用于有限元动力方程的附加质量矩阵,计入了水体对结构的作用^[11]:

$$\mathbf{K}u + \mathbf{C}u + (\mathbf{M} + \mathbf{M}_p)u = \mathbf{Q} \quad (3)$$

式中: \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{M}_p 为附加质量矩阵; \mathbf{Q} 为不考虑动水压力荷载的结构结点荷载列阵。

2 附加质量单元的开发

应用大型有限元软件对混凝土重力坝的地震响应进行模拟分析是工程界通常采用的有效计算方法,但目前的有限元计算软件中均没有相应的附加质量单元类型,需要用户手动计算并施加^[12]。ABAQUS中仅提供了二维问题的附加质量单元快速施加程序,但二维模型应用范围有限。因此,本文基于ABAQUS软件用户子程序接口,编写三维附加质量单元子程序,实现了三维模型中节点附加质量的快速施加。

3 桃林口重力坝抗震分析

3.1 工程概况及计算模型

桃林口水库位于滦河支流青龙河上,是一座供水、灌溉、发电、养殖等综合利用的大型控制枢纽工程,控制流域面积5 060 km²,占全流域的80%。水库正常蓄水位158.8 m,死水位104 m,坝顶高程163.3 m,最大坝高98.3 m,总库容17.8亿m³,属大I型水库工程。

桃林口水库处于燕山沉降的中部,地质构造复杂,全区地震频繁,特别是坝址区南段尤为突出。《桃林口水库工程地震基本烈度鉴定书》中确定坝址区基本烈度为6°,考虑到枢纽重要性和水库诱发地震等因素的影响,大坝设计烈度提高1°按7°设防,设计地震加速度0.125g。

选取南段区挡水坝段建立三维有限元模型,其中坝段宽20 m,高89.24 m,底宽72.5 m,顶宽8 m,坝前水位84.74 m(见图1)。分别自上、下游坝踵、坝趾位置延伸2倍坝高,同时向下延伸1.5倍坝高作为坝基建立如图2所示的有限元模型,采用C3D8R单元,即8节点实体减缩单元,上游坝体与水体接触表面采用附加质量单元。

计算中,固定坝基底部边界,坝基四周施加法向约束,地震波由坝基底部施加,经由坝基传至坝体。上游与库水接触坝面施加静水压力的同时附加库水质量。

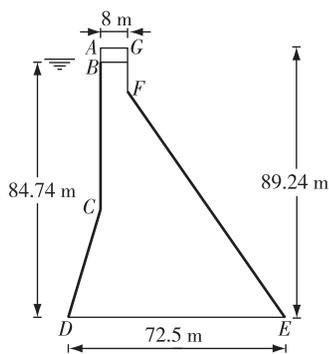


图1 坝体剖面

Fig. 1 Dam body profile

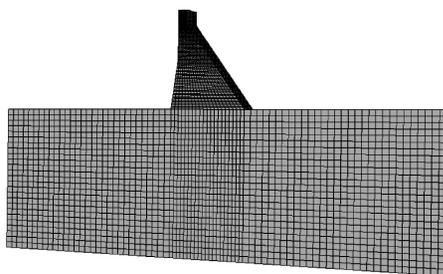


图2 计算模型

Fig. 2 Computation model

3.2 本构关系

根据《水工建筑物抗震设计规范》(SL 203—1997)^[6]规定,在抗震强度计算中,混凝土动态强度和动态弹性模量的标准值可较其静态标准值提高30%,混凝土动态抗拉强度的标准值可取为动态抗压强度标准值的10%^[6]。模型中坝体材料采用混凝土损伤塑性本构模型,密度为2 450 kg/m³,弹性模量 $E=33.15$ GPa,泊

松比为 0.167,坝基部分采用弹性模型。表 1 为混凝土压缩和拉伸下的塑性参数。

表 1 混凝土压缩拉伸硬化系数

Tab. 1 Concrete compression hardening and tension stiffening coefficients

| 压应力/MPa | 压缩非弹性应变值 | 拉应力/MPa | 拉伸非弹性应变值 | 压应力/MPa | 压缩非弹性应变值 | 拉应力/MPa | 拉伸非弹性应变值 |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 18.291 000 | 0 | 2.612 920 | 0 | 6.356 818 | 0.008 668 | 0.512 839 | 0.000 556 |
| 26.130 000 | 0.000 802 | 2.177 433 | 0.000 028 | 5.399 537 | 0.010 165 | 0.454 289 | 0.000 653 |
| 19.027 580 | 0.002 456 | 1.334 831 | 0.000 149 | 4.689 100 | 0.011 655 | 0.409 810 | 0.000 749 |
| 13.095 290 | 0.004 080 | 0.919 801 | 0.000 257 | 4.141 917 | 0.013 141 | 0.374 705 | 0.000 846 |
| 9.751 105 | 0.005 638 | 0.715 546 | 0.000 359 | | | 0.128 123 | 0.003 806 |
| 7.710 469 | 0.007 162 | 0.594 050 | 0.000 458 | | | | |

3.3 地震波

地震波在空间传播方向十分复杂,不同方向地震波对重力坝影响差异较大,计算中考虑 3 个方向地震波同时作用,能比较真实地模拟出实际工程遭受地震破坏时的动态响应。所用地震波取自 1976 年 8 月 9 日 06:41 唐山大地震中的一次 5.7 级余震记录,由于记录地点在迁安地震台,因此通常被称为“迁安波”。迁安波 3 个方向上地震波加速度时程曲线见图 3,地震持时 22 s,加速度峰值 0.125g,时间间隔 0.01 s。

坝址区未发生过强震破坏,没有现成的强震记录,但秦皇岛地区在唐山大地震的破坏范围内,选取坝址区周边区域的地震记录作为加载波形也是工程界通常采用的做法之一。

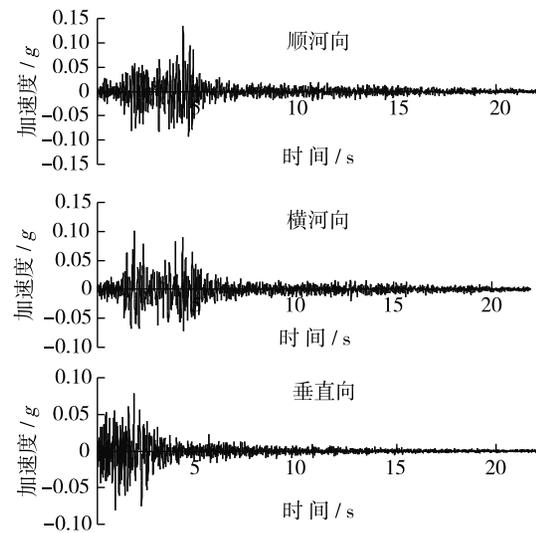


图 3 地震加速度时程曲线

Fig. 3 Seismic acceleration time history curves

4 结果分析

4.1 应力时程分析

相关震损记录及研究资料表明,重力坝上部尤其是断面突变处即下游折坡点位置是抗震薄弱部位。图 4 为震后坝体的拉伸损伤云纹图。由图 4 可知,震后坝体的损伤部位主要集中在坝踵处,坝颈处并未出现拉伸破坏,这是因为按线弹性有限元动力分析的结果,坝踵处都会因角缘效应而呈现拉应力集中^[8],实际震损工程中鲜有坝踵破坏的案例,故对坝踵处的拉伸破坏不加考虑。同时也说明桃林口大坝能抵御迁安波的破坏作用,该工程满足抗震设计要求。

根据工程经验,震后坝体虽未出现不可逆转的变形破坏,但下游断面突变处由于容易出现应力集中拉应力值依然较大,该处应力变化趋势仍不可轻视。图 5 为下游折坡点处 3 个方向的应力时程曲线图,其中 S_{11} , S_{22} , S_{23} 分别为顺河向、横河向和垂直方向的应力值。由图 5 可以看出,地震过程中 3 个方向的应力均主要表现为拉应力。在变化趋势方面,3 个方向的应力变化趋势基本相同,在地震作用前期,随着地震作用的加强应力值逐渐增大,在 2 s 附近达到峰值,之后应力值略有回落但依然较大,一直持续到 6 s 左右,6 s 之后地震强度减小,对坝体的破坏力也随之减弱,各方向的应力值较小。前 6 s 地震加速度大,坝体各部位的应力也大,但各方向应力峰值出现时刻与该方向地震加速度峰值时刻并不吻合,这说明地震的破坏作用是 3 个方向地震波共同作用的结果。在应力峰值方面,顺河向和横河向应力值较小,远远低于混凝土的动态抗拉强度值,但垂直方向最大拉应力值达 2.56 MPa,临界于混凝土的动态抗拉强度值,在工程中应引起足够重视。垂直方向的拉应力一旦超过混凝土的动态承受能力极易造成上部坝体在坝颈位置发生撕裂,产生水平向裂缝,

造成类似于 Koyna 大坝的坝体漏水等严重后果,在工程设计中应尽量避免该处出现应力集中,采用弧线等连接形式或在该处配置抗震钢筋等。

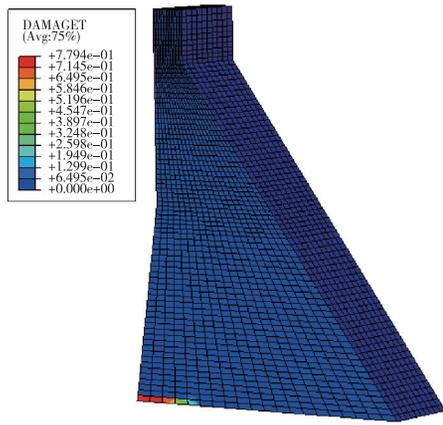


图4 拉伸损伤云图

Fig. 4 Tensile damage image

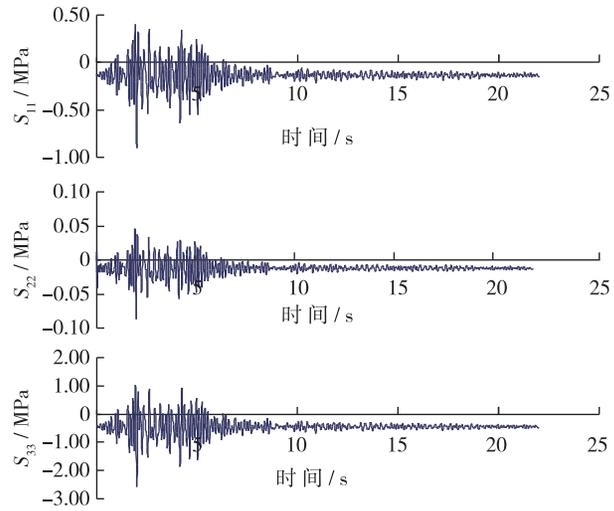


图5 折坡点应力时程曲线

Fig. 5 Stress time history curves of slope points

4.2 位移时程分析

地震过程中上部坝体晃动最为剧烈,图6为坝顶处3个方向的位移时程曲线, U_1 为顺河方向, U_2 为横河方向, U_3 为垂直方向。坝顶在顺河方向最大位移为9.02 mm,出现在2 s时刻。横河方向约在4.3 s时达到,最大位移17.87 mm,这极易导致相邻坝段间发生碰撞,从而造成坝体破坏,在工程中应该引起足够重视。垂直方向由于地震波动较小,最大位移仅为2.76 mm,峰值位移约出现在4.5 s时。

坝顶3个方向的位移变化趋势基本是随地震作用的持续位移量逐步增大,之后由于地震作用减弱坝体逐渐恢复到震前位置。横河向与垂直方向位移均在5 s附近达到最大,顺河向位移不同,经历了两次局部位移峰值分别是2和4 s,分析发现,3个方向的最大位移出现时刻与该方向上地震波动最剧烈的时刻、应力峰值时刻均不同,这也说明了地震作用的复杂性。在抗震计算中单纯计入顺河向地震波或同时计入顺河向和垂直向地震波进行计算,与实际情况存在较大误差,今后处理此类问题时应综合考虑各方向上地震作用的影响。

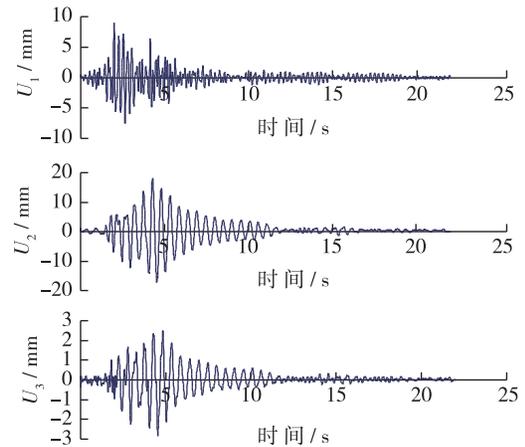


图6 坝顶位移时程曲线

Fig. 6 Displacement time curves of dam crest

5 地震波输入方式对比

根据《水工建筑物抗震设计规范》^[6]要求,在考虑顺河向地震作用的同时,为了研究垂直向地震波与横河向地震波在重力坝抗震计算中的影响程度,特选取了3个典型的地震波输入方式作为3种方案进行模拟计算:方案1,加载顺河向地震波;方案2,加载顺河向地震波+垂直向地震波;方案3,加载顺河向地震波+垂直向地震波+横河向地震波。对地震过程中下游折坡点处应力值的变化范围和坝顶处位移的变化范围进行汇总,计算结果见表2。

表 2 下游折坡点应力和坝顶位移

Tab. 2 Stress summary of slope points and displacement summary of dam crest

| 方案 | 应力/MPa | | | 位移/mm | | |
|----|------------|------------|------------|------------|--------------|------------|
| | 顺河向 | 横河向 | 垂直向 | 顺河向 | 横河向 | 垂直向 |
| 1 | -0.40~0.21 | -0.04~0.02 | -1.05~0.43 | -5.64~4.61 | -0.02~0.02 | -1.39~1.29 |
| 2 | -0.78~0.41 | -0.08~0.04 | -1.97~0.89 | -7.80~8.70 | -0.02~0.02 | -1.31~1.19 |
| 3 | -0.81~0.46 | -0.08~0.05 | -2.56~1.06 | -7.98~9.02 | -17.40~17.80 | -2.76~2.50 |

由表 2 可知,在应力方面,方案 3 较方案 2 略有提高,后两个方案大约是方案 1 的 2 倍;在位移方面,方案 2 的顺河向位移较方案 1 大,另 2 个方向的位移与方案 1 相当,与前两个方案相比,方案 3 在各个方向的位移均有较大增幅,特别是横河向。

在重力坝抗震分析中,同时考虑 3 个方向的地震作用是对坝体最不利的计算方案,此时无论是坝体的动态应力还是动态位移都是 3 个方案中最大的。横河向地震加速度和垂直地震加速度在整个抗震分析中都有着重要影响,只是在应力分析与位移分析中的影响程度不同。

6 结 语

基于 Westergaard 提出的附加质量法,利用 ABAQUS 软件用户子程序接口 UEL,开发编写三维附加质量单元子程序。以秦皇岛桃林口大坝为例,研究在迁安地震波作用下的动力时程响应,研究发现:

(1) 坝体虽未出现塑性破坏,但下游断面突变处由于发生应力集中,垂直方向应力较大,临界于混凝土的抗拉破坏强度,在工程设计中折坡处宜做成圆弧形,避免坝坡面突变,以减少应力集中。

(2) 坝体在震动中横河向的位移较大,极易造成相邻坝段间的碰撞,应采取相应措施加以避免。

(3) 在重力坝抗震分析中,同时计入 3 个方向的地震作用是对坝体最不利的一种计算方案,此时无论是坝体的动态应力还是动态位移都是最大的。横河向地震加速度和垂直地震加速度在整个抗震分析中都有着重要影响,在应力分析中,垂直地震作用影响较大,横河向地震波的影响较小;在位移分析中,横河向地震波的影响更加明显,由横河向地震加速度可能引起的坝段间碰撞问题应引起格外重视。

(4) 坝体在地震过程中的震动是 3 个方向地震波共同作用的结果,目前工程中仅考虑顺河向或同时计入水平和垂直两个方向地震波作用的做法误差较大,不能准确模拟出坝体在地震作用下的动态响应。

参 考 文 献:

- [1] 徐金英,李德玉,郭胜山. 基于 ABAQUS 的两种库水附加质量模型下重力坝动力分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(1): 98-103. (XU Jin-ying, LI De-yu, GUO Sheng-shan. Dynamic analysis of gravity dam under two kinds of reservoir water quality model based on ABAQUS[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(1): 98-103. (in Chinese))
- [2] 宋波,刘浩鹏,张国明. 基于附加质量法的桥墩地震水压力分析与实例研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增 1): 102-107. (SONG Bo, LIU Hao-peng, ZHANG Guo-ming. Analysis and case study of earthquake-induced hydrodynamic pressure on deep water bridge based on added masses approach[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Suppl1): 102-107. (in Chinese))
- [3] 黄耀英,孙大伟,田斌. 两种库水附加质量模型的重力坝动力响应研究[J]. 人民长江, 2009, 40(7): 64-66. (HUANG Yao-ying, SUN Da-wei, TIAN Bin. Study on dynamic response of gravity dam with two kinds of reservoir water quality model[J]. Yangtze River, 2009, 40(7): 64-66. (in Chinese))
- [4] 潘家铮. 水电与中国[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (PAN Jia-zheng. Hydropower and China[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))

- [5] OMIDI O, VALLIAPPAN S, LOTFI V. Seismic cracking of concrete gravity dams by plastic-damage model using different damping mechanisms[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, 63(6): 80-97.
- [6] SL 203—1997 水工建筑物抗震设计规范[S]. (SL 203—1997 Code for seismic design of hydraulic structures[S]. (in Chinese))
- [7] 方修君, 金峰, 王进廷. 基于扩展有限元法的 Koyna 重力坝地震开裂过程模拟[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, 48(12): 2065-2069. (FANG Xiu-jun, JIN Feng, WANG Jin-ting. Simulation of seismic cracking of Koyna gravity dam based on extended finite element method[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2008, 48(12): 2065-2069. (in Chinese))
- [8] 陈厚群. 混凝土高坝抗震研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (CHEN Hou-qun. Study on seismic behavior of concrete dam[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese))
- [9] WESTERGAARD H M. Water pressures on dams during earthquakes [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1933, 98(3): 418-433.
- [10] PAILOPLEE S. Earthquake hazard of dams along the Mekong mainstream[J]. *Natural Hazards*, 2014, 74(3): 1813-1827.
- [11] 杨璐, 金峰. 水工混凝土结构中的数值计算与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (YANG Lu, JIN Feng. Numerical calculation and examples of hydraulic concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [12] 徐磊. 基于 ABAQUS 的四节点三维附加质量单元开发[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(6): 100-102. (XU Lei. Development of four nodes 3-D added mass element in ABAQUS[J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(6): 100-102. (in Chinese))

Seismic simulation analysis of concrete gravity dam based on added mass method

WANG Zhi-kun, YANG Lu

(School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to study the dynamic response of the concrete gravity dam during earthquake, the correctness of the ABAQUS 3D added mass subroutine was proved through the simulation of Koyna earthquake, and the dynamic responses of Taolinkou dam under the action of the Qian'an seismic waves were simulated. And studies of the influences of three directions of the earthquake acceleration during earthquake have been carried out. It is found from analysis results that the damage did not occur, but the maximum tensile stress of the downstream mutation reached 2.56 MPa, less than the critical value of the dynamic tensile strength of concrete 2.6 MPa slightly, to which more attention should be paid in the design. In the design, the slope is advised to make a circular arc shape in order to reduce the stress concentration. During the earthquake, the displacement in the vertical flow direction reached 17.87 mm, which is extremely easy to cause the adjacent dam to collide. So during the construction of works, it can be avoided by transverse joint grouting. Counting the earthquake actions of three directions at the same time is the most unfavorable for the dam body, and the acceleration of the vertical direction and the acceleration of vertical rivers direction all have important influences on the seismic analysis. And the practice of only considering the seismic action of a certain direction is seriously distorted. This seismic simulation analysis is expected to provide more insights into the seismic performance of the gravity dam and to optimize the seismic measures.

Key words: hydraulic aseismic structure; added mass method; gravity dam; hydrodynamic pressure; simulation analysis