

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.005

考虑施工质量影响的碾压混凝土坝地震动力响应

钟登华,刘肖军,佟大威,王 振,宋文帅

(天津大学建筑工程学院,天津 300072)

摘要: 针对现有碾压混凝土坝地震动力响应分析未考虑施工质量影响的问题,提出一种考虑施工质量影响的碾压混凝土坝分析方法。基于碾压混凝土坝施工质量实时监控系统数据,分析施工质量对物理力学参数的影响;建立考虑施工质量影响的有限元分析模型,并结合实际工程,进行地震动力响应计算。结果表明,该方法可以分析施工质量对地震动力响应的影响,为抗震设计提供科学依据。
关键词: 碾压混凝土坝;地震动力响应;施工质量影响;施工质量实时监控系统
中图分类号: TV312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)03-0215-08

Study on seismic responses of RCC dams considering influences of construction quality

ZHONG Denghua, LIU Xiaojun, TONG Dawei, WANG Zhen, SONG Wenshuai
(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The design values of the materials' property parameters were adopted customarily in researches by far, which failed to take the influences of construction quality into account. A method for the seismic response analysis of RCC dam considering the influences of construction quality is proposed in this paper. Firstly, based on the real-time monitoring data of compaction quality of RCC dam, the physical and mechanical parameters under the impact of construction quality were analyzed; then, a finite element model considering the influences of the construction quality was established; finally, combined with a practical project, the seismic responses were calculated. The results show that the influences of the construction quality on the seismic responses can be analyzed with this method, and thus, it can provide more scientific evidences for the anti-seismic design of RCC dam.
Key words: RCC dam; seismic responses; construction quality influences; real-time monitoring system of compaction quality of the RCC dam

碾压混凝土坝的地震动力响应是指结构在地震等动力荷载作用下产生变形、应力等,结构的地震动力响应分析不仅是结构设计的重要依据,而且是进行结构抗震研究的基础^[1-4]。众多学者对混凝土坝在地震作用下的动力响应进行了研究^[5-7];文献[8-12]对结构地震动力响应有限元求解方法及坝体-地基-水库系统的相互影响进行了深入研究;文献[13-15]研究了有限元建模方式对坝体结构地震动力响应的影响。由结构动力学原理可知,结构材料的物理、力学性能参数是影响结构地震动力响应的关键因素^[16]。Wu 等^[17-18]开展了混凝土材料动力特性对结构动力响应影响的相关研究;文献[19-21]研究了材料剪切模量等变化对结构地震动力响应的影响。由上述研究可知,科学合理地确定结构材料的物理、力学性能参数是准确分析结构地震动力响应的基础,而现有的研究中材料物理、力学性能参数的选取多是基于设计参数,未能考虑施工质量的影响,而施工质量是影响材料物理、力学性能参数的决定性因素。

基金项目: 国家自然科学基金(51439005,51339003);国家自然科学基金创新群体基金(51621092)
作者简介: 钟登华(1964—),男,中国工程院院士,教授,博士,主要从水利水电工程施工仿真与实时控制分析技术研究。E-mail: dzhong@tju.edu.cn
引用本文: 钟登华,刘肖军,佟大威,等. 考虑施工质量影响的碾压混凝土坝地震动力响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):215-222.
ZHONG Denghua, LIU Xiaojun, TONG Dawei, et al. Study on seismic responses of RCC dams considering influences of construction quality[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(3):215-222.

2 有限元模型建立

2.1 结构动力学分析

任意结构在外力荷载作用下的状态方程为

$$Ma(t) + cv(t) + \bar{K}L(t) = P(t)$$

式中: M ——结构整体质量矩阵; c ——结构阻尼矩阵; $\bar{K}$ ——结构刚度矩阵; $P(t)$ ——结构所受外力荷载矩阵; $a(t)$ 、 $v(t)$ 、 $L(t)$ ——结构的加速度、速度、位移。

应用有限元法求解结构动力学方程,结构整体质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵均由单元矩阵装配而成。

$$M = \sum M_e \quad c = \sum c_e \quad K = \sum K_e$$

其中
$$M_e = \iiint_{V_e} N^T \rho N dV$$

式中: M_e ——单元刚度矩阵; c ——结构阻尼矩阵; c_e ——单元阻尼矩阵; K_e ——单元刚度矩阵; V ——结构形状函数; V_e ——单元域; N ——单元形状函数矩阵; ρ ——密度。

从而 $M = |m(V, \rho)|$ 即结构质量矩阵由结构形状函数及密度决定, $K = |k(V, e)|$ 即结构刚度矩阵由结构形状函数及结构各部分刚度决定, $c = |c(\alpha, \beta, m, k)|$ 即结构阻尼矩阵由阻尼系数(α, β)及结构质量与刚度决定。

对于碾压混凝土结构,根据碾压混凝土碾压特性 $\rho = Q(q_{\text{设}}, q_{\text{施}})$, 即结构的密度为结构设计参数($q_{\text{设}}$)及施工质量($q_{\text{施}}$)确定; $e = \varepsilon(\varepsilon_{\text{材}}, q_{\text{施}})$ 即结构的刚度由材料特性($\varepsilon_{\text{材}}$)及施工质量确定。因此结构动力响应 $v(t) = v(V, q_{\text{设}}, q_{\text{施}}, \varepsilon_{\text{材}}, \alpha, \beta)$ 由结构形状、设计参数、施工质量等因素决定。

2.2 有限元模型的建立

以国内某碾压混凝土坝典型挡水坝段为例,进行考虑施工质量影响的大坝有限元分析模型的建立及分析。坝段的断面如图 2(a) 所示,坝高 108 m,坝顶宽度 15 m,坝底宽度 81 m。大坝按不同的材料分成 3 个区域,基础垫层常态混凝土(高 4 m),大坝主体碾压混凝土(高 89.5 m),坝顶常态混凝土(高 11.5 m)。大坝碾压混凝土区域分为 30 个仓面进行浇筑,每个仓面高 3 m(最后一个仓面高 2.5 m),其仓面按高程从低到高分别编号 1, 2, ..., 30, 如图 2(b) 所示。

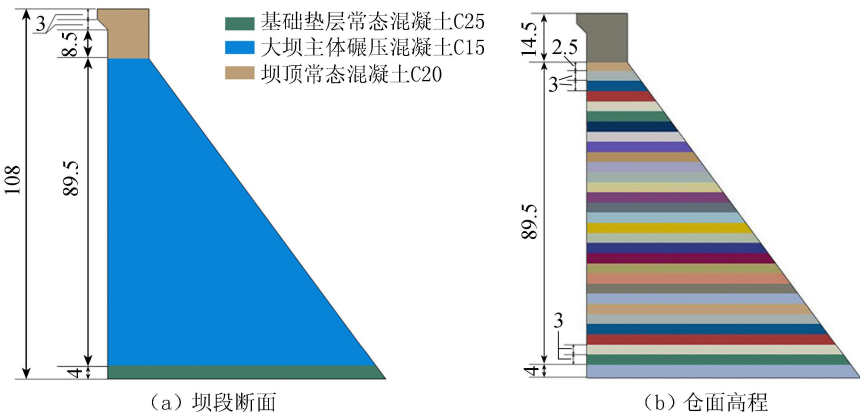


图 2 典型坝段断面和仓面高程(单位:m)

Fig.2 Profile of the typical cross section and storehouse surface elevation (units: m)

大坝采用分仓碾压浇筑的方式进行施工,由于施工质量的影响,大坝施工完成后坝体的物理及力学性能参数和设计参数存在差异。图 2(b) 中不同的颜色即代表不同的材料属性。为了考虑施工质量对大坝动力响应的影响,在进行有限元网格划分时需要考虑不同区域材料参数的赋值问题。通过自定义节点及单元的方法在 Abaqus 软件中^[26]对大坝进行有限元网格划分。大坝整体网格划分如图 3(a) 所示,局部网格的放大图及单元节点的定义方式如图 3(b) 所示。

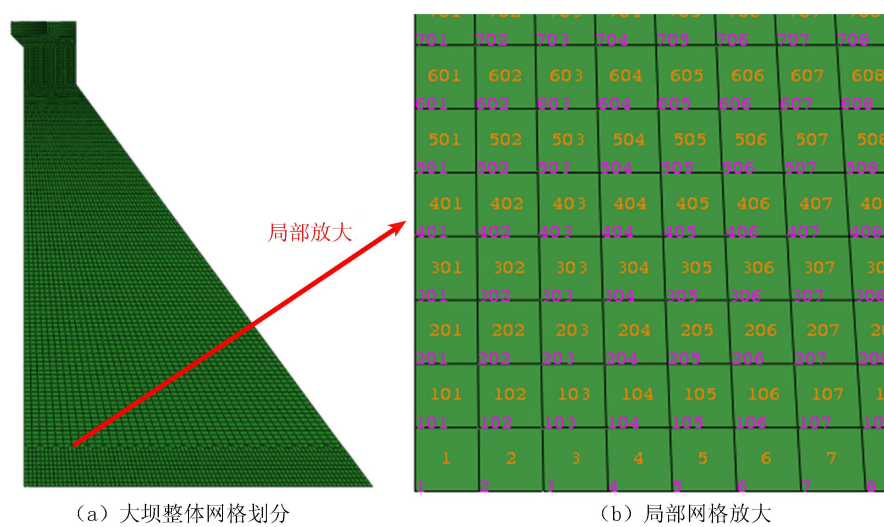


图3 大坝结构网格划分

Fig.3 Mesh generation of the dam

3 物理力学参数计算

3.1 碾压混凝土压实特性分析

碾压混凝土在振动条件下达到液化状态,其中粗细骨料进行重新排列形成紧密排列的骨料骨架,骨架间的缝隙被流动浆液填充从而形成密实的混凝土。碾压混凝土压实机理的研究^[21]表明:碾压混凝土的密度及抗压强度随振动加速度增大、振动时间延长而增加,碾压混凝土必须是在振动力作用下使其液化,达到密实密度,才具有结构设计要求强度^[24]。所以研究碾压混凝土抗压强度的先决条件必须是在振动力作用下使其液化,达到密实表观密度。

碾压混凝土的抗压强度与其密度成正比关系,根据施工现场及实验室测定数据,图4表示碾压混凝土强度比(实际抗压强度与密实混凝土抗压强度比值)与密度比(实际密度与密实混凝土密度比值)的关系。碾压混凝土抗拉强度分为轴心抗拉强度与劈裂抗压强度,其测定均较抗压强度复杂且精度低,工程应用中多取抗拉强度为抗压强度的1/10。同时国内外学者对碾压混凝土特性的研究表明,碾压混凝土的弹性模量与其强度密切相关^[24],碾压混凝土弹性模量与抗压强度的关系可以由式(3)计算得出:

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{43.4}{f_{cu}}}$$

(3)

式中: E_c ——混凝土弹性模量; f_{cu} ——混凝土抗压强度。

3.2 参数计算

工程实际中碾压混凝土的压实度通常作为施工质量检测的控制性指标,即通过控制碾压混凝土的密度来控制施工质量。

$$P = \frac{\rho'}{\rho_d} \times 100\%$$

(3)

式中: P ——碾压混凝土压实度; ρ' ——现场检测碾压混凝土密度; ρ_d ——碾压混凝土设计密度。

工程实际中影响碾压混凝土压实度的施工质量控制参数包括碾压机行驶速度 v 、碾压遍数 n 、压实厚度 h 等,即 $P=f(v,h,n,\omega)$ (ω 表示其他影响因素的综合影响因子)。应用碾压混凝土施工质量实时监控系统(图5)^[23,25,27]可以对上述参数实现全过程实时监控。同时系统可以实时采集施工现场压实度检测数据,通

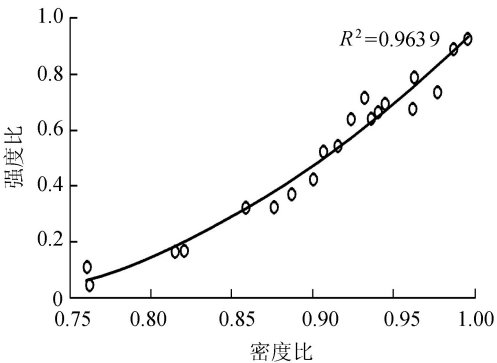


图4 碾压混凝土强度比与密度比关系曲线

Fig.4 Relative curve of the strength ratio and the density ratio of the dam

过 GPS 定位设备确定检测点的坐标,通过核子密度仪测量检测点的压实度。

通过对大坝建设过程中施工全工程监控数据及压实度检测数据进行回归及统计分析,可以得到各个坝段各仓混凝土密度。以国内某碾压混凝土坝某典型挡水坝段为例,如图 6 所示。

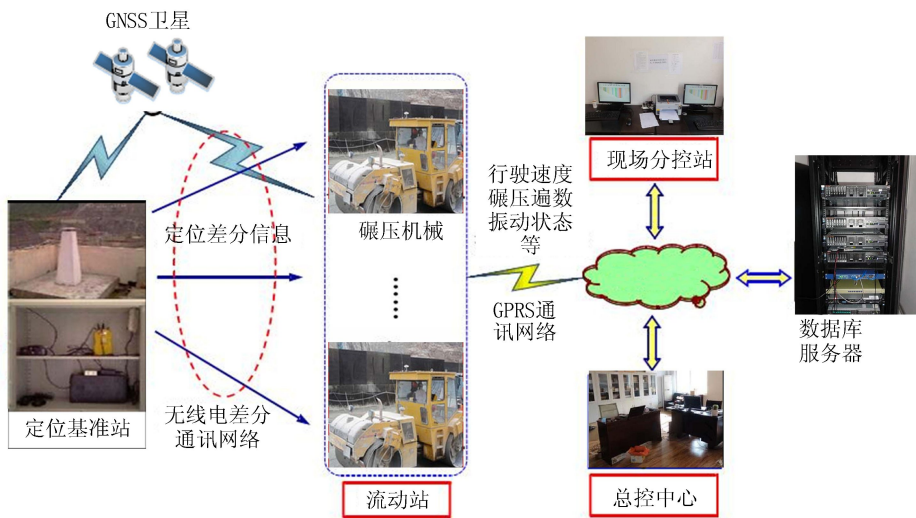


图 5 碾压质量实时监控系统架构

Fig. 5 Scheme of the intelligent monitor system of compaction quality

大坝各个分区材料的设计值如表 1 所示,不考虑施工质量影响时碾压混凝土坝各个分区材料参数均按表 1 取值。考虑施工质量影响时,由图 6 可知各仓碾压混凝土物理、力学参数有较大差异,由 3.1 节碾压混凝土压实特性即可分析得到考虑施工质量的碾压混凝土坝物理、力学性能参数。

表 1 混凝土参数设计值
Table 1 Design parameters of the concrete

混凝土型号	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
C25	2 500	28	22. 4	2. 24
C20	2 500	25	18. 5	1. 85
C15	2 500	24	14. 3	1. 43

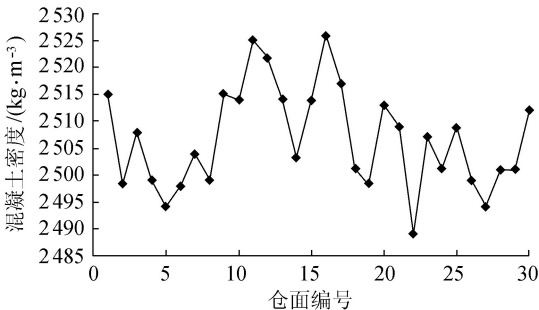


图 6 各仓混凝土密度变化曲线

Fig. 6 Density variation curve of different concrete bins

4 碾压混凝土坝地震动力响应分析

分别对上述所建立的未考虑施工质量影响及考虑施工质量影响的大坝有限元模型进行模态分析来得到结构的动力特性参数(振型、自振频率、振型参与系数)。计算得到的 2 种模型的前 4 阶振型如图 7 所示。由图 7 可以看出,结构各阶振型基本相同即施工质量对于结构的振型基本没有影响。该结论与 Altunisik 等^[3]对拱坝进行的模型试验相关研究的结论相同。

对施工质量对碾压混凝土坝自振频率的影响进行分析,2 种模型前 8 阶振型的自振频率计算结果如图 8 所示。从计算结果可以看出,考虑施工质量影响时大坝各阶振型的自振频率均有所增加且增幅均在 7% 左右。

根据抗震设计要求,水平向加速度峰值取 0. 20g,竖直向加速度峰值取 0. 13g。选取 Koyna 地震记录时程作为地震动输入,并根据设计峰值加速度进行调幅,分别计算是否考虑施工质量影响的碾压混凝土坝的结构动力响应。

2 种模型最大主应力在地震持续过程中各个时刻最大值的分布如图 9 所示。图 9 中黑色区域表示最大主应力为压应力,且其值均小于抗压强度,因此结构不会发生受压破坏。同时由图 9 可知:2 种模型的最大拉应力均出现在坝踵位置,分别为 3. 05 MPa、3. 00 MPa,即施工质量对最大拉应力基本没有影响;未考虑施工质量影响时坝体上游面拉应力最大值出现在坝体中间位置,考虑施工质量影响时出现在坝体折坡上游处;同

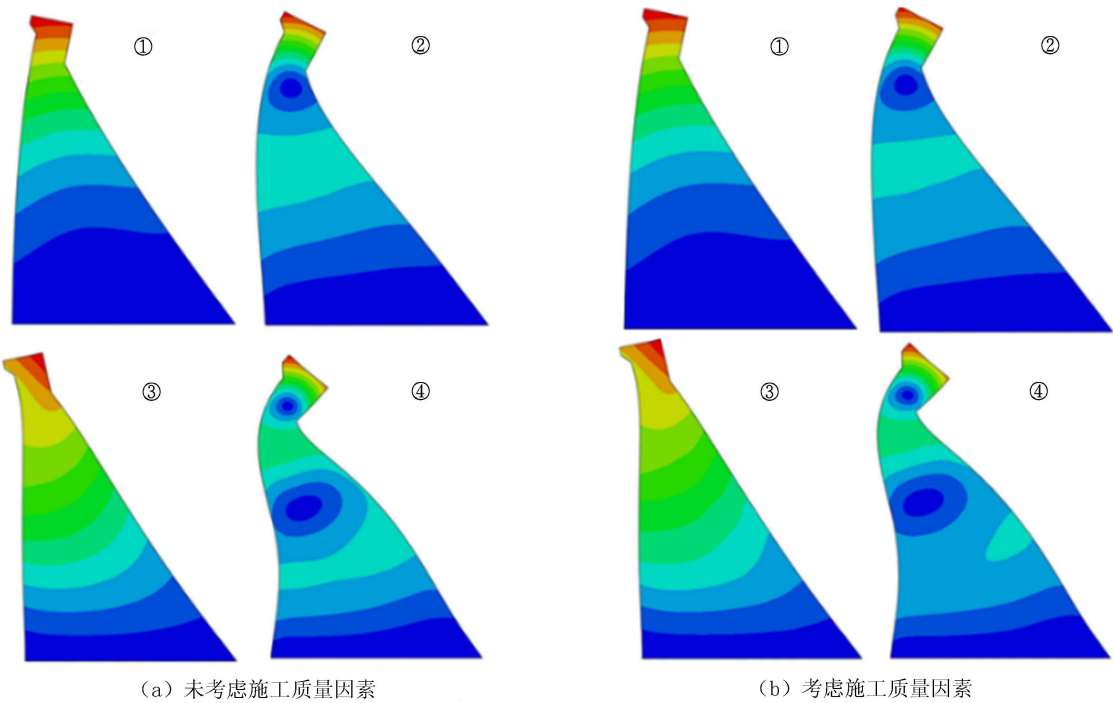


图7 大坝结构前4阶振型
Fig.7 The first 4 order mode of dam structure

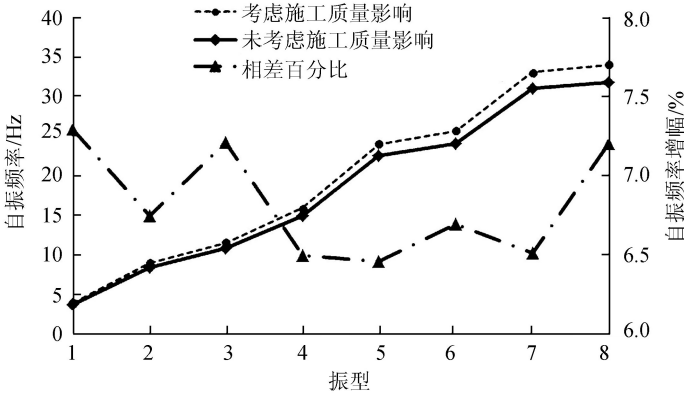


图8 施工质量对各阶振型自振频率的影响
Fig.8 Influences of the construction quality on natural frequencies

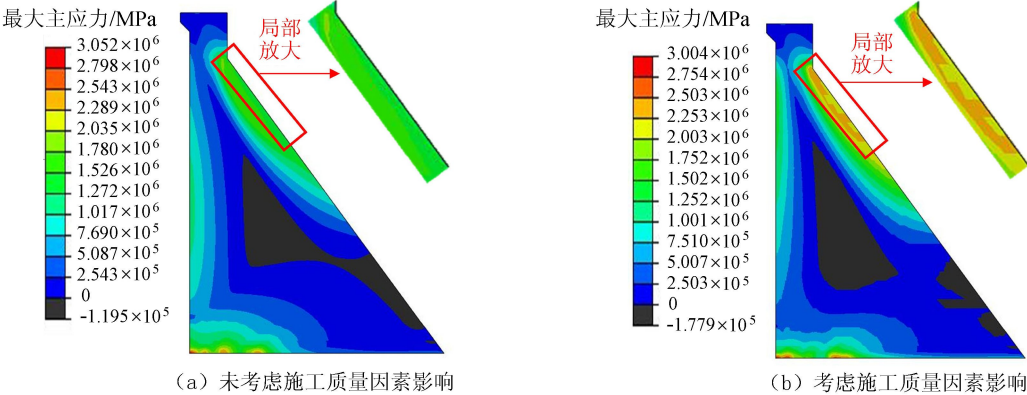


图9 最大主应力分布
Fig.9 Distribution of the maximum principle stress

时考虑施工质量影响时坝体下游面拉应力(图9中红框所示)远大于未考虑施工质量时,且最大值出现在下游折坡处,不利于坝体的安全稳定。综上所述,虽然施工质量对结构最大拉应力基本没有影响,但对结构的安全稳定有不利影响,因此在进行碾压混凝土坝地震动力响应及安全稳定分析时应将施工质量考虑在内。

5 结 语

碾压混凝土坝地震动力响应分析是结构安全稳定设计及分析的基础,而施工质量是大坝安全稳定运行的重要保证。本文针对现有碾压混凝土坝地震动力响应分析未考虑施工质量影响的问题,提出了一种解决方法:首先通过碾压质量实时监控系统获取施工质量全面数据,并根据碾压混凝土材料特性,确定考虑施工质量影响的结构物理力学性能参数;然后根据施工特点及过程,通过对 Abaqus 软件二次开发建立考虑施工质量影响的有限元模型,计算分析施工质量对结构动力响应的影响。分析结果表明:施工质量使大坝各阶振型自振频率增加7%左右,而对振型及各阶振型的振型参与系数没有影响;考虑施工质量影响时结构地震动力响应不利于结构安全稳定。研究表明,在大坝进行结构设计及抗震安全评价时需要考虑施工质量的影响,这样才能保证大坝能够满足安全稳定运行的需要。

参考文献:

- [1] 赵丽娜. 重力坝静动力分析及抗震安全性研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [2] 谭海龙,包腾飞,王少伟. 基于 MARC 振型分解反应谱法重力坝抗震安全评价[J]. 水电能源科学, 2013,31(7): 55-59. (TAN Hailong, BAO Tengfei, WANG Shaowei. Seismic safety evaluation of gravity dam based on mode-decomposition response spectrum method with MARC[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(7): 55-59. (in Chinese))
- [3] ALTUNISIK A C, GUNAYDIN M, SEVIM B, et al. Dynamic characteristics of an arch dam model before and after strengthening with consideration of reservoir water[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30:060160016.
- [4] 李桂青. 抗震结构计算理论和方法[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [5] 邱流潮,刘桦,金峰. 混凝土重力坝地震响应数值分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006,34(1): 65-68. (QIU Liuchao, LIU Hua, JIN Feng. Numerical method for analysis of seismic response of concrete gravity dams [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2006, 34(1): 65-68. (in Chinese))
- [6] YAZDANI Y, ALEMBAGHERI M. Nonlinear seismic response of a gravity dam under near-fault ground motions and equivalent pulses[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 92: 621-632.
- [7] 王群,关宏洁,张倩. 基于数学去噪后模拟地震信号测试混凝土结构抗震性能的研究[J]. 地震工程学报, 2019,41(1): 36-41. (WANG Qun, GUAN Hongjie, ZHANG Qian. Seismic performance test of the concrete structures based on seismic analog signals after denoising[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 36-41. (in Chinese))
- [8] YILMAZTURK S M, ARICI Y, BINICI B. Seismic assessment of a monolithic RCC gravity dam including three dimensional dam-foundation-reservoir interaction[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 137-148.
- [9] ZHONG Hong, LIN Gao, LI Jianbo, et al. An efficient time-domain damping solvent extraction algorithm and its application to arch dam-foundation interaction analysis[J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2008, 24(9): 727-748.
- [10] LIN Gao, WANG Yi, HU Zhiqiang. An efficient approach for frequency-domain and time-domain hydrodynamic analysis of dam-reservoir systems[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(13): 1725-1749.
- [11] 施有志,孙爱琴,林树枝,等. 地下综合管廊土-结构接触面参数对地震动力响应的影响数值分析[J]. 地震工程学报, 2017,39(5): 811-819. (SHI Youzhi, SUN Aiqin, LIN Shuzhi, et al. Numerical analysis of the influence of soil-structure interface parameters on the seismic dynamic response of underground utility tunnels[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 811-819. (in Chinese))
- [12] 周凤玺,庞宾宾,翟睿智. 圆形隧洞对地下地震动的影响: SH 波入射[J]. 地震工程学报, 2018,40(5): 873-878. (ZHOU Fengxi, PANG Binbin, ZHAI Ruizhi. Effect of circular tunnels on earthquake subground motions: incidence of SH Wave[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(5): 873-878. (in Chinese))
- [13] ARICI Y, BINICI B, ALPER A. Comparisons of expected damage patterns from two and three dimensional nonlinear dynamic analyses of an RCC dam[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2012, 3(10): 305-315.
- [14] 蔡新,武颖利,郭兴文. 混凝土坝及坝后式厂房整体地震响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008,36(1): 49-53. (CAI Xin, WU Yingli, GUO Xingwen. Integral seismic response analysis of concrete dam and powerhouse at dam toe [J].

Journal of Hohai Univesity(Natural Science), 2008, 36(1): 49-53. (in Chinese))

- [15] 朱国金,苏怀智,胡灵芝. 碾压混凝土坝结构性态的块体元与有限元耦合分析模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005,33(6): 36-39. (ZHU Guojin, SU Huaizhi, HU Lingzhi. BEM and FEM coupling analysis model for structural behavior of roller compacted concrete dams [J]. Journal of Hohai Univesity(Natural Science),2005, 33(6): 36-39. (in Chinese))
- [16] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of sturctures[M]. New York;Computers & Structures, 2003.
- [17] WU Mingxing, CHEN Zhenfu, ZHANG Chuhan. Determining the impact behavior of concrete beams through experimental testing and meso-scale simulation: I. drop-weight tests[J]. Engineering Fracture Mechanics,2015, 135: 94-112.
- [18] WU Mingxing, ZHANG Chuhan, CHEN Zhenfu. Determining the impact behavior of concrete beams through experimental testing and meso-scale simulation: II. particle element simulation and comparison[J]. Engineering Fracture Mechanics,2015, 135: 113-125.
- [19] MALAEKE H, MOEENFARD H. Analytical modeling of large amplitude free vibration of non-uniform beams carrying a both transversely and axially eccentric tip mass[J]. Journal of Sound and Vibration,2016, 366: 211-229.
- [20] ABDEL-GHAFFAR A M, KOH A. Longitudinal vibration of non-homogeneous earth dams [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,1981, 9(3): 279-305.
- [21] ARIYAN M, HABIBAGAH G, NIKOOEE E. Seismic response of earth dams considering dynamic properties of unsaturated zone [J]. E3S Web of Conferences,2016, 9: 8002.
- [22] 钟登华,张元坤,吴斌平,等. 基于实时监控的碾压混凝土坝仓面施工仿真可视化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5): 377-385. (ZHONG Denghua, ZHANG Yuankun, WU Binping, et al. Simulation and visual analysis for construction of storehouse surface of RCC dam based on real-time monitoring [J]. Journal of Hohai Univesity(Natural Science), 2016, 44(5): 377-385. (in Chinese))
- [23] 钟桂良. 碾压混凝土坝仓面施工质量实时监控理论与应用[D]. 天津:天津大学, 2011.
- [24] 方坤河. 碾压混凝土材料、结构与性能[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2004.
- [25] 刘玉玺. 碾压混凝土坝施工信息模型原理与应用研究[D]. 天津:天津大学, 2015.
- [26] Dassault Systèmes Simulia Corp. Abaqus User's Manual[M]. Providence:Dassault Systèmes Simulia Corp, 2011.
- [27] 林达. 碾压混凝土坝施工压实质量预测模型研究[D]. 天津:天津大学, 2012.

(收稿日期:2018-03-13 编辑:张志琴)