

基于概率密度演化的渡槽结构抗震分析^①

曾波, 邢彦富, 刘章军

(三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:应用随机过程的正交展开方法, 将地震动加速度过程展开为标准正交基函数与标准正交随机变量的线性组合形式。在此基础上采用随机函数的思想, 将正交展开式中的标准正交随机变量表达为基本随机变量的函数形式, 从而实现用一个基本随机变量来表达原地震动过程的目的。结合地震动过程的正交展开-随机函数模型与概率密度演化方法, 对某大型渡槽结构进行随机地震反应分析与抗震可靠度计算; 重点研究空槽和三槽有水等四种工况下渡槽结构控制点位移以及控制截面内力的随机地震反应与可靠度, 进而获得渡槽结构控制点和控制截面的地震反应概率信息。

关键词: 地震动; 渡槽结构; 正交展开-随机函数; 概率密度演化方法; 抗震分析

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0991-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0991

Seismic Analysis of Large-scale Aqueduct Structures Based on the Probability Density Evolution Method

ZENG Bo, XING Yan-fu, LIU Zhang-jun

(College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Using the orthogonal expansion method of random processes, the non-stationary seismic acceleration process is represented as a linear combination of the standard orthogonal basis functions and the standard orthogonal random variables. Then, using the random function, these standard orthogonal random variables in the orthogonal expansion are expressed as an orthogonal function form of the basic random variable. Therefore, this method can use a basic random variable to express the original earthquake ground processes. The orthogonal expansion-random function approach was used to generate 126 representative earthquake samples, and each representative sample was assigned a given probability. The 126 representative earthquake samples were combined with the probability density evolution method of stochastic dynamical systems and random seismic responses of large-scale aqueduct structures was investigated. In this study, four cases were considered; aqueduct without water, aqueduct with water in the central trough, aqueduct with water in a two-side trough, and aqueduct with water in three troughs, and probability information of seismic responses for these cases were obtained. Moreover, using the proposed method, the seismic reliability of the aqueduct structures was efficiently calculated. This method provides a new and effective means for precise seismic analysis of large-scale aqueduct structures.

Key words: ground motion; aqueduct structure; orthogonal expansion-random; probability density evolution method; seismic analysis

① 收稿日期: 2014-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278282, 50808113); 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心

作者简介: 曾波(1989—), 男, 硕士, 主要从事工程结构抗震研究。

通讯作者: 刘章军(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构随机动力学与抗震可靠度研究。

E-mail: liuzhangjun73@aliyun.com

0 引言

渡槽是输送渠道水流跨越河渠、道路、山冲、谷口等的架空输水建筑物,是渠系建筑物中应用最广的交叉建筑物之一,具有排洪和导流的作用^[1]。文献[2-4]对渡槽结构进行了确定性地震反应分析。由于地震作用的随机性,较为合理的研究方法是应用随机振动理论进行地震动的描述和结构随机地震反应分析^[5-6]。然而,经典的随机振动分析方法对于复杂结构的非线性分析难以求得解析解或数值解,同时,由于经典随机振动分析理论的主体是基于数值特征的分析体系,使得根据响应的分析结果很难获取精确的结构动力可靠度。近年来李杰和陈建兵从概率密度演化的基本思想出发发展了概率密度演化理论,在线性结构与非线性结构随机反应分析和结构可靠度方面取得了很大的研究进展^[7-8]。在地震动随机过程的研究中,文献[9]提出了一类基于标准正交基的随机过程展开法,文献[10]利用能量等效原则进行了地震动随机过程的正交展开研究,可以用10~15个基本随机变量来描述地震动随机特性的目的,但总体而言,所需基本随机变量的数量还是偏多。为此,文献[11]在正交展开方法的基础上采用随机函数的思想,建议了一类随机过程的正交展开-随机函数方法,实现了用一个基本随机变量来描述平稳地震动加速度过程的目的。本文在非平稳地震动加速度过程的正交展开-随机函数模型基础上结合概率密度演化理论,进行大型渡槽结构控制点位移以及控制截面内力的随机地震动力反应与抗震可靠性分析,以期为大型渡槽结构的精细化抗震可靠度计算提供新的途径。

1 地震动过程的正交展开-随机函数模型

文献[9]给出了地震动随机过程的正交展开式

$$\ddot{X}(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{\lambda_j} \xi_j f_j(t) \\ f_j(t) = \sum_{k=1}^N \phi_{jk} \varphi_k(t) \quad (1)$$

式中, $\ddot{X}(t)$ 为地震动加速度随机过程; λ_j 与 ϕ_{jk} 分别为地震动加速度相关矩阵的第 j 个特征值与标准特征向量 $\Phi_j = [\phi_{j1}, \phi_{j2}, \dots, \phi_{jN}]^T$ 的第 k 行元素; N 为展开项数,本文取 $N = 600$; $\{\varphi_k(t), k=1, 2, \dots\}$ 为区间 $(0, T]$ 上的标准三角函数基,其中 T 为地震动持时(本文取 $T=20$ s); ξ_j ($j=1, 2, \dots, N$)为一组标准的正交随机变量。

为了达到用少量基本随机变量来描述地震动随

机过程的目的,文献[11]采用随机函数的思想,将式(1)中的标准正交随机变量 x_j ($j=1, 2, \dots, N$)表达为基本随机变量的Hartley正交函数形式:

$$\xi_j = \text{cas}(j\Theta), j=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中,Hartley正交基函数 $\text{cas}(x) = \sin(x) + \cos(x)$;基本随机变量 Θ 在区间 $[-\pi, \pi]$ 上均匀分布。容易验证, ξ_j ($j=1, 2, \dots, N$)是一组标准的正交随机变量。

在上述地震动加速度过程的正交展开-随机函数模型中,非平稳地震动加速度过程的演变功率谱密度函数(单边谱)可表示为^[12]

$$S_{\ddot{X}}(\omega, t) = A^2(t) S_a(\omega) \quad (3)$$

式中, $S_{\ddot{X}}(\omega, t)$ 为非平稳地震动加速度过程的演变功率谱(单边谱); $S_a(\omega)$ 为对应的平稳地震动加速度过程的功率谱密度函数(单边谱),本文采用了Clough-Penzien模型^[13]

$$S_a(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_f^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \omega^2} S_0 \quad (4)$$

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)中Ⅱ类场地的第二组,场地特征周期 $T_g=0.4$ s,可知场地卓越频率 $\omega_g=2\pi/T_g=15.71$ rad/s,并取参数 $\zeta_g=0.6$, $\omega_f=0.1\omega_g=1.571$ rad/s, $\zeta_f=0.6$ 。同时,抗震设防烈度为Ⅷ度,设计基本地震加速度为0.2 g,根据文献[11]可得式(4)中谱强度因子 $S_0=81.15$ cm²/s³。

在式(3)中,确定性调制函数 $A(t)$ 取为^[12]

$$A(t) = \left[\frac{t}{c} \exp\left(1 - \frac{t}{c}\right) \right]^d \quad (5)$$

其中, c 是地震动峰值加速度出现的时间(本文取 $c=4$ s); d 是控制 $A(t)$ 形状的指数(本文取 $d=1$)。

在非平稳地震动加速度过程的演变功率谱密度函数基础上,可直接获得其自相关函数,并按文献[12]中相应的公式来计算地震动加速度相关矩阵,从而即可得到相关矩阵的特征值 λ_j 与标准特征向量 Φ_j 的第 k 个元素 ϕ_{jk} 。

为了进行渡槽结构的随机地震反应和抗震可靠性分析,需要将基本随机变量 Θ 进行离散化处理。首先,在区间 $[-\pi, \pi]$ 上将基本随机变量 Θ 按均匀化离散,从而得到基本随机变量 Θ 的126个离散点 ϑ_i ($i=1, 2, \dots, 126$),同时计算各离散点 ϑ_i 的赋得概率 P_i ($i=1, 2, \dots, 126$);其次,由式(2)计算标准正交随机变量 ξ_j ($j=1, 2, \dots, 600$)的126组确定性

离散值;最后,由式(1)即可生成 126 条非平稳地震动加速度过程的代表性时程曲线。图 1 给出了其中两条。

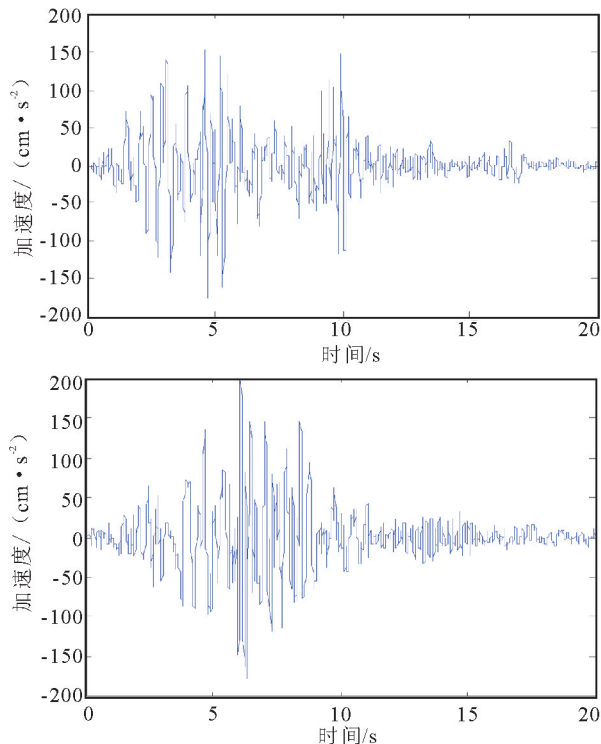


图 1 生成地震动加速度过程的代表性时程

Fig.1 Generated sample functions for ground motion acceleration

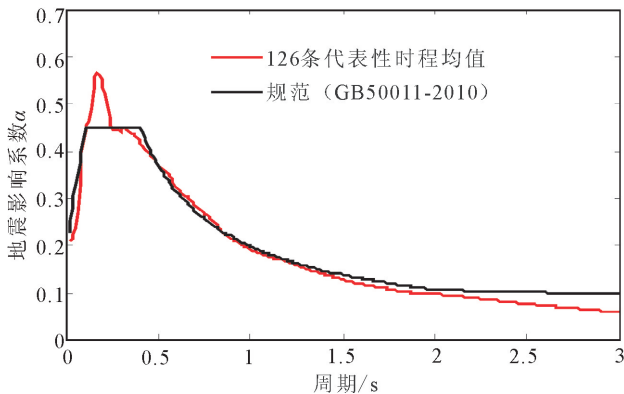


图 2 126 条代表性时程的均值反应谱与规范反应谱的比较

Fig.2 Comparison between the mean response spectrum from 126 samples and the code spectrum

图 2 为本文方法生成的 126 条非平稳地震动加速度过程的代表性时程曲线的均值反应谱曲线与规范给定反应谱曲线的比较。从图 2 中可知,在结构的 0~3 s 周期内,除局部有一定的偏差外,两者总体拟合程度较好。

2 结构随机地震反应分析的的概率密度演化方程

在随机地震作用下,一般多自由度系统的控制方程可写为^[14]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{G}(\mathbf{Y}(t)) = \mathbf{I}\mathbf{F}(t) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{M}, \mathbf{C}$ 分别为 $n \times n$ 阶的质量矩阵和阻尼矩阵; $\ddot{\mathbf{Y}}, \dot{\mathbf{Y}}, \mathbf{Y}$ 分别为 n 维的加速度、速度和位移反应向量; $\mathbf{G}(\cdot)$ 为线性或非线性恢复力向量,对于线性系统,有 $\mathbf{G} = \mathbf{K}\mathbf{Y}$, 其中 $\mathbf{K}$ 为 $n \times n$ 阶的刚度矩阵; $\mathbf{I}$ 为 $n \times r$ 阶激励影响矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 为 r 维地震激励向量。当考虑一致地震激励时,则 $\mathbf{I}\mathbf{F}(t) = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t)$, 其中 $\mathbf{I}$ 为 n 维单位向量, $\ddot{\mathbf{X}}(t)$ 为非平稳地震动加速度过程,如式(1)所示。

在式(6)中,假定质量矩阵 $\mathbf{M}$ 、阻尼矩阵 $\mathbf{C}$ 以及 $\mathbf{G}(\cdot)$ 的基本参数为确定性量,则结构反应的任意物理量,例如位移、速度、加速度等均是存在、唯一且连续地依赖于基本随机变量 Θ 。因此,将感兴趣的某一物理量记为 $Z = H(\Theta, t)$, 则其速度过程可表示为

$$\dot{Z} = h(\Theta, t) \quad (7)$$

其中, $h = \partial H / \partial t$ 。

显然, $Z = H(\Theta, t)$ 本身可视为一个随机动力系统,其中的源随机因素完全由基本随机变量 Θ 来刻画。考察 (Z, Θ) 构成的增广系统,由于所有的随机因素都已包含在内,因此这是一个概率保守系统。

为方便计,记 (Z, Θ) 的联合概率密度函数为 $P_{Z\Theta}(z, \theta, t)$ 。根据概率守恒原理的随机事件描述^[7],可得:

$$\frac{D}{Dt} \int_{\Omega_t \times \Omega_\Theta} p_{Z\Theta}(z, \theta, t) dz d\theta = 0 \quad (8)$$

根据文献[7]的推导,同时考虑到 $\Omega_t \times \Omega_\Theta$ 的任意性,可得^[8]

$$\frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, t)}{\partial t} + h(\theta, t) \frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, t)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

于是, $Z(t)$ 的概率密度函数 $p_z(z, t)$ 为

$$p_z(z, t) = \int_{\Omega_\Theta} p_{Z\Theta}(z, \theta, t) d\theta \quad (10)$$

式中, Ω_Θ 为基本随机变量 Θ 的分布空间。概率密度演化方法分析的流程图如图 3 所示。

3 工程实例分析

3.1 工程概况^[15]

以南水北调某大型渡槽结构为例。该渡槽结构

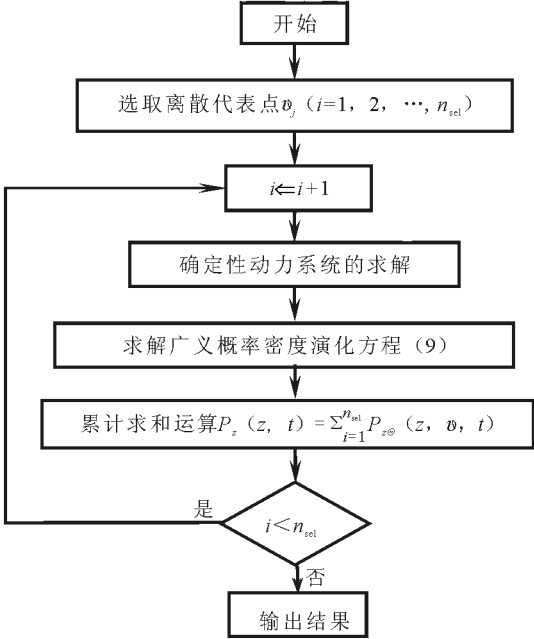


图 3 概率密度演化方法分析的流程图

Fig.3 Flow chart of the probability density evolution method

形式为简支结构,共 17 跨,单跨长为 40 m,全长为 885 m,槽身段长为 680 m,槽体总宽度为 27 m,设计流量为 400 m³/s,采用三槽并联的型式。槽墩为加肋空心薄壳墩体,槽墩上部宽度为 28.20 m,槽墩底部宽度为 35.00 m,槽墩基础的高程为 60.25 m。在正常使用时槽体内水深为 5.74 m,可单槽、双槽或三槽输水。

3.2 有限元模型的建立

本文采用大型有限元通用分析软件 ANSYS 建立了大型渡槽结构的有限元模型,如图 4 所示。针对渡槽结构形式特点及各部件的受力特征,对不同的部件分别采用不同的单元进行模拟。槽体的横梁、纵梁、顶梁和顶部拉杆采用 BEAM189 单元进行模拟,中墙板、边墙板、底板和槽墩采用 SHELL63 单元进行模拟,盆式橡胶支座采用 COMBIN14 单元和 COMBIN40 单元进行模拟,邻跨渡槽结构的质量和槽体内水体的质量采用 MASS21 单元进行模拟。

(1) 材料参数^[15]:渡槽槽体的材料为 C₅₀ 混凝土,密度 2 500 kg/m³,弹性模量 32.5 GPa,泊松比 0.167;渡槽槽墩的材料为 C₂₅ 混凝土,密度 2 500 kg/m³,弹性模量 28.0 GPa,泊松比 0.167;渡槽槽墩墩帽的材料为 C₄₀ 混凝土,密度 2 500 kg/m³,弹性模量 32.5 GPa,泊松比 0.167;支座部分密度为

2 500 kg/m³,弹性模量 3.86 GPa,泊松比 0.35。

(2) 计算范围的选取:由于该渡槽各跨跨度相等,槽墩高度及地基情况差异不大,故采用渡槽结构的一跨代替整体结构进行计算分析。

(3) 槽内水体的模拟:把渡槽内的水体按照附加质量的方式分别加在槽体墙体和底板相应的结点上^[16]。

(4) 计算工况的选取:考虑了三槽无水、中槽正常使用水位、边槽正常使用水位、三槽正常使用水位共四种工况。

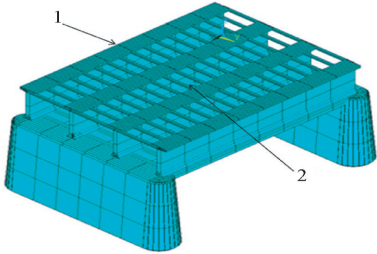


图 4 渡槽结构有限元模型

Fig.4 Finite element model of the aqueduct structures

3.3 随机地震反应与抗震可靠度

应用地震动加速度随机过程的正交展开—随机函数模型,通过对基本随机变量 Q 的均匀化离散,可得 126 个确定性的离散点值,从而获得 126 条非平稳地震动加速度的代表性时程曲线以及相应代表性时程的赋得概率,结合概率密度演化理论,研究了上述四种工况下渡槽结构的随机地震反应与抗震可靠度。限于篇幅,文中仅给出三槽无水时渡槽边墙顶部跨中(即图 4 中 1 点位置)位移,以及三槽有水时渡槽底部中主梁跨中(即图 4 中 2 处位置的正下方)弯矩的随机地震反应概率信息,包括均值和标准差以及概率密度演化曲面,分别如图 5 和图 6 所示。

从图 5(b)和图 6(b)可知,位移和弯矩反应的概率密度函数是非规则曲线,其演化则像绵延不断的山脉,而其等概率密度线则像河流中的水流。事实上,这是概率在状态空间中流动的结果。在上述随机地震反应的概率密度演化基础上,根据等价极值事件的思想^[17],容易获得工况一(三槽无水)和工况四(三槽正常使用水位)时的抗震可靠度,如图 7 所示。其中(a)为工况一下位移等价极值的概率分布函数,(b)为工况四下弯矩等价极值的概率分布函数。事实上,等价极值事件的分布函数(纵坐标)即为抗震可靠度。根据给定的界限值即可获得抗震可靠度,反之亦然,如图 7(a)可靠度达到 95%的限值为 0.025 m,图 7(b)可靠度达 95%时的限值为 6.8

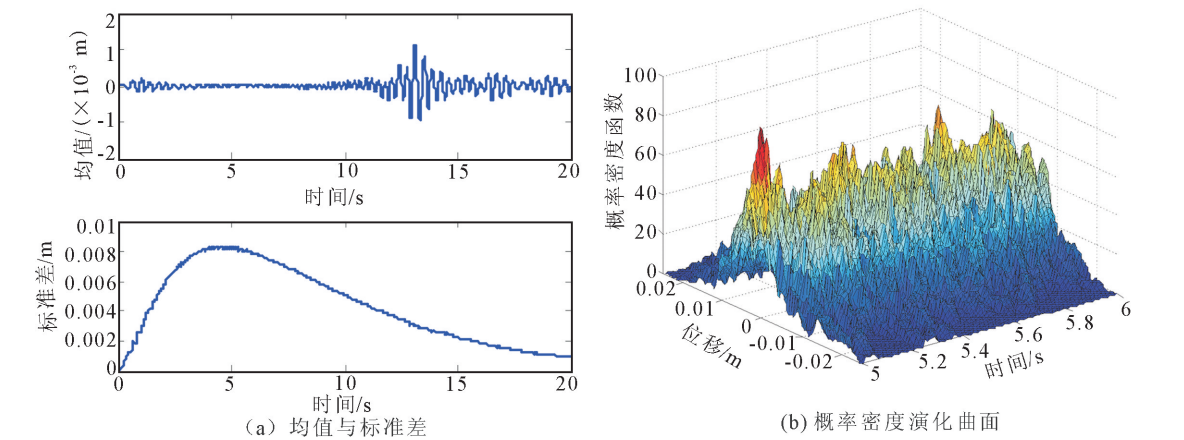


图 5 渡槽边墙顶部跨中横向位移的概率信息(工况一)

Fig.5 Probability information for transverse displacement of aqueduct side-wall top (case 1)

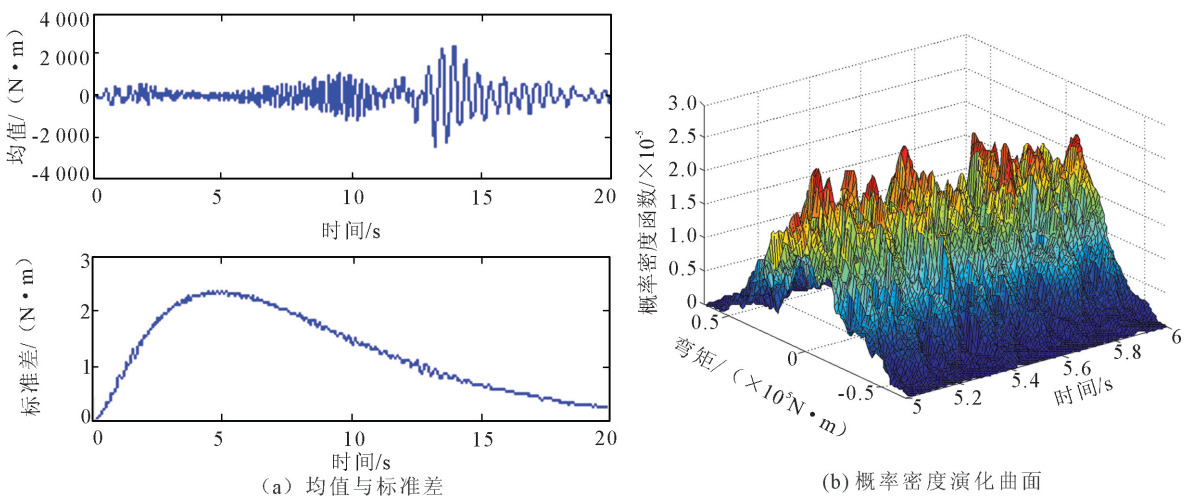


图 6 渡槽底部中主梁跨中弯矩的概率信息(工况四)

Fig.6 Probability information for the girder span moment of aqueduct of the bottom (case 4)

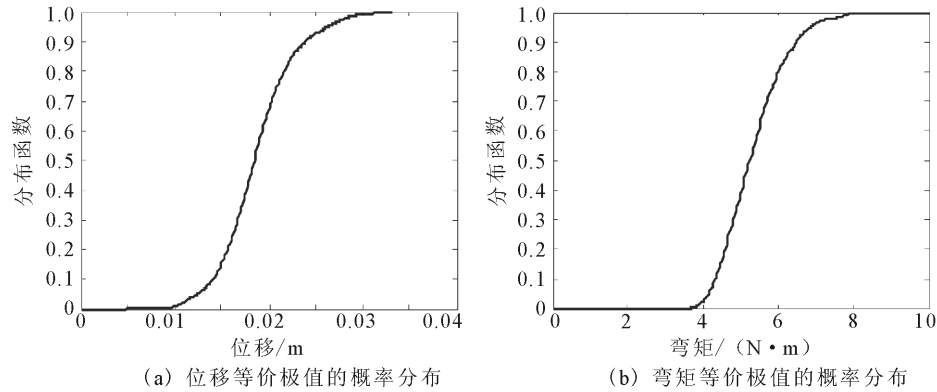


图 7 抗震可靠度

Fig.7 Seismic Reliability

$\times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

4 结论

采用地震动加速度过程的正交展开-随机函数

模型,结合概率密度演化方法,对空槽状况、中槽有水、边槽有水和三槽有水等四种工况下渡槽结构的随机地震反应与抗震可靠性进行了分析。结果表明:(1)通过对渡槽结构的动力特性分析,第一阶振

型为横槽向,表明该方向的刚度偏小。

(2) 在相同地震动输入情况下,渡槽在四种工况下随着水体质量的增加横向地震反应将不断加大。

(3) 在同一工况下边墙上部结构地震反应均要大于边墙中部的地震反应。可见,随着墙体高度的增加墙体的地震反应不断增大,因而在渡槽结构墙体的上部需要设置拉杆来减小这种地震反应,增加结构的整体性与安全性。

(4) 应用概率密度演化理论,可以获得渡槽结构在随机地震作用下的概率密度随时间的演化过程,进而可计算基于概率密度函数的、精细化的渡槽结构抗震可靠度。

参考文献(References)

- [1] 竺慧珠,陈德亮,管枫年.渡槽[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
ZHU Hui-zhu, CHEN De-liang, GUAN Feng-nian. Aqueducts [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 吴红华,李正农,袁文阳,等.渡槽结构地震反应的时程分析[J].中国农村水利水电,2002(5):43-45.
WU Hong-hua, LI Zheng-nong, YUAN Wen-yang, et al. Analysis of Time-process of Earthquake Reaction of Aqueduct Structure[J]. China Rural Water and Hydropower, 2002(5): 43-45. (in Chinese)
- [3] 杜晓伟,陈淮,孙国钧,等.大型双槽渡槽地震反应分析[J].世界地震工程,2003,19(2):23-26.
DU Xiao-wei, CHEN Huai, SUN Guo-jun, et al. Seismic Response Analysis of Large-scale Aqueduct with Double Troughs [J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 23-26. (in Chinese)
- [4] 李林.罕遇地震下空心薄壁高墩大跨T形刚构桥弹塑性地震反应分析[J].地震工程学报,2013,35(2):56-61.
LI Lin. Elastic-plastic Seismic Response Analysis of Hollow Thin-walled High-pier Large-span T-shaped Rigid Frame Bridge Under High-level Earthquake Conditions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 56-61. (in Chinese)
- [5] 林家浩,张亚辉.随机振动的虚拟激励法[M].北京:科学出版社,2004.
LIN Jia-hao, ZHANG Ya-hui. Pseudo-excitation Method for Random Vibration[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [6] 王志华,陈国兴,胡庆兴.特大型桥梁桩基完全非平稳随机地震反应分析[J].工程力学,2010,27(2):172-177.
WANG Zhi-hua, CHEN Guo-xing, HU Qing-xing. Fully Non-stationary Stochastic Seismic Analysis of Supergiant Bridge Pile Foundation[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2): 172-177. (in Chinese)
- [7] LI Jie, CHEN Jianbing. Stochastic Dynamics of Structures[M]. Singapore: John Wiley & Sons Pte Ltd, 2009.
- [8] 李杰,陈建兵.随机动力系统下的概率密度演化方程及其研究进展[J].力学进展,2010,40(2):170-188.
LI Jie, CHEN Jian-bing. Advances in the Research on Probability Density Evolution Equations of Stochastic Dynamical Systems[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(2): 170-188. (in Chinese)
- [9] 李杰,刘章军.基于标准正交基的随机过程展开法[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(10):1279-1283.
LI Jie, LIU Zhang-jun. Expansion Method of Stochastic Processes Based on Normalized Orthogonal Bases [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(10): 1279-1283. (in Chinese)
- [10] 刘章军,李杰.地震动随机过程的正交展开[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(9):1153-1159.
LIU Zhang-jun, LI Jie. Orthogonal Expansion of Stochastic Processes for Earthquake Ground Motion [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(9): 1153-1159. (in Chinese)
- [11] 刘章军,万勇,镇斌.平稳地震动过程的正交展开-随机函数模型[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(2):199-208.
LIU Zhang-jun, WAN Yong, ZHEN Bin. Simulation of Stationary Ground Motion Processes: Hybrid Orthogonal Expansion and Random Function Approach [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 199-208. (in Chinese)
- [12] 刘章军,曾波,周宜红,等.地震动过程的概率模型及在重力坝抗震可靠度分析中的应用[J].水利学报,2014,45(9).
LIU Zhang-jun, ZENG Bo, ZHOU Yi-hong, et al. Probabilistic Model of Ground Motion Processes and Seismic Dynamic Reliability Analysis of the Gravity Dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(9). (in Chinese)
- [13] Ray W, Clough, Joseph Penzien. Dynamics of Structures Second Edition (Revised) [M]. [S.l.], Computers and Structures, Inc., 2003.
- [14] 刘章军,陈建兵.结构动力学[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
LIU Zhang-jun, CHEN Jian-bing. Dynamics of Structures [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese)
- [15] 彭利华.大型渡槽结构抗震及隔震研究[D].保定:河北农业大学,2002.
PENG Li-hua. Study on Seismic-resistance and Isolation of Large-scale Aqueduct [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2002. (in Chinese)
- [16] 张伯艳,邓迎,李德玉.渡槽抗震计算中几个关键问题的简化处理方法[J].南水北调与水利科技,2005,3(2):46-48.
ZHANG Bo-yan, DENG Ying, LI De-yu. Simplification Treatment of Some Key Problems in Aqueduct Aseismic Calculation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(2): 46-48. (in Chinese)
- [17] LI Jie, CHEN Jian-bing, FAN Wen-liang. The Equivalent Extreme-value Event and Evaluation of the Structural System Reliability [J]. Structural Safety, 2007, 29(2): 112-131.