

曾波,王昆,邓良胜,等.基于非平稳随机地震动模型的重力坝抗震可靠度分析[J].地震工程学报,2017,39(3):0467-0474.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0467
ZENG Bo, WANG Kun, DENG Liang-sheng, et al. Seismic Reliability Analysis of Gravity Dams Based on Non-stationary Random Ground Motion Models[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(3): 0469-0476. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0467

基于非平稳随机地震动模型的重力坝 抗震可靠度分析^①

曾 波¹, 王 昆¹, 邓良胜¹, 刘章军²

(1.四川省紫坪铺开发有限责任公司,四川 成都 610091; 2.三峡大学土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:基于正交展开的非平稳随机地震动模型,并考虑混凝土材料的非线性与坝体与库水之间的流固耦合,对印度 Koyna 重力坝进行有限元分析,得到坝顶水平位移和坝颈拉应力,结合概率密度演化方法和等价极值事件的思想,获得丰富的概率信息。这为坝体结构的随机地震反应分析和可靠度研究提供新的途径。

关键词:重力坝;地震动;流固耦合;概率密度演化方法;可靠度

中图分类号:TV312

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2017)03-0467-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.03.0467

Seismic Reliability Analysis of Gravity Dams Based on Non-stationary Random Ground Motion Models

ZENG Bo¹, WANG Kun¹, DENG Liang-sheng¹, LIU Zhang-jun²

(1. Sichuan Zipingpu Development Co., Ltd., Chengdu 610091, Sichuan, China;

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

Abstract: Based on the method of orthogonal expansion and the idea of random variables, the evolutionary power spectrum model of the non-stationary ground motion acceleration process is proposed, and parameter values of the model are determined according to the code. The non-stationary ground motion acceleration process can be represented as a function with a basic random variable, and the set of representative time histories of the non-stationary ground motion acceleration process with complete probability is obtained. To prove the effectiveness of the method, the Koyna gravity dam in India is used as an example to analyze its response and reliability. Considering the nonlinearity of concrete materials and fluid-solid coupling between dams and reservoir water, the finite element analysis is conducted and horizontal displacement of the dam crest and tensile stress of the dam abutment are obtained. It is shown that rich probability information can be obtained by using the probability density evolution method and the thought of equivalent extreme events. This study provides a new approach of random ground motion response analysis and a reliability study of dam structures.

Key words: gravity dam; non-stationary ground motion; fluid-solid coupling; probability density evolution method; reliability

① 收稿日期:2016-03-29

作者简介:曾波(1988-),男,硕士,主要从事水工结构随机抗震研究、水工建筑物维修维护研究。E-mail:819473499@qq.com。

0 引言

混凝土大坝因其具有诸多良好的性能而被广泛应用。到目前为止,我国已建混凝土坝的数量和高度均居世界首位^[1],而且在今后还会继续兴建大量的混凝土大坝。然而我国处于环太平洋和欧亚两大地震带,是一个地震多发国家,这些大坝在遭遇强地震动作用时,若高坝结构被破坏,除去结构物自身经济损失外,其产生的次生灾害也是相当严重的,因而对于高混凝土坝的抗震设防就显得尤为重要^[2]。

在抗震设计中,地震动作用无法事先确知,造成结构抗震设计的误差很大。地震在时间和空间上均具有很强的随机性,如何合理有效地描述地震动随机过程,一直是抗震工程中一个悬而未决的问题。与此同时,采用确定性地震反应分析很难较为全面地反映结构体系丰富的概率信息。2000 年何蕴龙等^[3]根据经典随机振动理论,得到了重力坝特征部位的均方根响应和最大值的均值和方差。2002 年陈健云等^[4]利用虚拟激励法进行了高拱坝的非平稳随机地震响应分析,得到了拱坝拱冠梁顶部位移及应力的方差。2008 年王爱勤等^[5]得到了变截面坝在平稳和非平稳两种输入模式下最大反应的期望。2013 年贾超等^[6]基于 Kanai-Tajimi 模型,进行了重力坝随机地震分析,得到了关键部位响应功率谱密度与自振频率的关系。2014 年曾波等^[7]结合概率密度演化方法分析了渡槽结构的随机地震反应,获得渡槽结构控制点和控制截面的地震反应概率信息。

本文根据正交展开的随机地震动模型,结合概率密度演化方法和等价极值事件的思想^[8]分析了 Koyna 大坝的随机地震反应和抗震可靠度。

1 基于正交展开的非平稳随机地震动模型

1.1 随机过程的正交展开方法

设连续的实随机过程 $\{X(\omega, t), 0 < t < T\}$ 是一个零均值的二阶矩过程,将其在标准正交基 $\{\varphi_k(t), k=1, 2, \dots\}$ 上展开为^[9]:

$$X(\omega, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} X_N(\omega, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N c_k(\omega) \varphi_k(t) \quad (1)$$

由式(1)可知:

$$\begin{aligned} E[c_i(\omega) c_j(\omega)] &= E\left\{\int_0^T X(\omega, t_1) \varphi_i(t_1) dt_1 \cdot \int_0^T X(\omega, t_2) \varphi_j(t_2) dt_2\right\} = \\ &= \int_0^T \int_0^T R_X(t, t_2) \varphi_i(t_1) \varphi_j(t_2) dt_1 dt_2 = \rho_{ij} \\ &(i, j = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $R_X(t_1, t_2) = E[X(\omega, t_1) X(\omega, t_2)]$ 为随机过程 $X(\omega, t)$ 的自相关函数。记相关矩阵 $\mathbf{R}$ 为:

$$\mathbf{R} = (\rho_{ij})_{N \times N} \quad (3)$$

显然,矩阵 $\mathbf{R}$ 为实对称矩阵。

记随机向量 $\mathbf{C}(\omega) = [c_1(\omega), c_2(\omega), \dots, c_N(\omega)]^T$,注意到随机变量 $c_j(\omega)$ 是一组相关的随机变量,采用随机向量相关结构的分解方法^[10]可将随机向量 $\mathbf{C}(\omega)$ 用一组标准正交的随机变量 $\xi_j(\omega) (j=1, 2, \dots, N)$ 来表示:

$$\mathbf{C}(\omega) = \sum_{j=1}^N \boldsymbol{\Phi}_j \sqrt{\lambda_j} \xi_j(\omega) \quad (4)$$

其中: λ_j 与 $\boldsymbol{\Phi}_j$ 分别为相关矩阵 $\mathbf{R}$ 的特征值与标准特征向量,即:

$$\mathbf{R} \boldsymbol{\Phi}_j = \lambda_j \boldsymbol{\Phi}_j \quad (5)$$

由式(4)可知:

$$c_k(\omega) = \sum_{j=1}^N \sqrt{\lambda_j} \xi_j(\omega) \phi_{jk} (k=1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

式中: φ_{ji} 是标准特征向量 $\boldsymbol{\Phi}_j$ 的第 i 个元素。

于是,随机过程 $X(\omega, t)$ 的近似展开式为:

$$X_N(\omega, t) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \sqrt{\lambda_j} \xi_j(\omega) \phi_{jk} \varphi_k(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{\lambda_j} \xi_j(\omega) f_j(t) \quad (7a)$$

$$f_j(t) = \sum_{k=1}^N \phi_{jk} \varphi_k(t) \quad (7b)$$

取有限项 N 引起的均方相对误差 ϵ 为:

$$\epsilon = \frac{\mu}{\int_0^T E[X^2(\omega, t)] dt} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N \lambda_j}{\int_0^T R_X(t, t) dt} \quad (8)$$

1.2 标准正交随机变量的随机函数表达

在上述随机过程的正交展开式(7)中,随机变量 $\xi_j(\omega) (j=1, 2, \dots, N)$ 是一组标准的正交随机变量:

$$E[\xi_j(\omega)] = 0, E[\xi_i(\omega) \xi_j(\omega)] = \delta_{ij} \quad (9)$$

现采用随机函数的思想^[10],假设随机变量 $\xi_j(\omega) (j=1, 2, \dots, N)$ 是基本随机变量 Θ 的函数,即随机函数 $g_j(\Theta)$ 。于是式(9)变为:

$$E[\xi_j(\omega)] = E[g_j(\Theta)] = \int_{-\infty}^{\infty} g_j(\theta) p_{\Theta}(\theta) d\theta = 0, \quad j=1, 2, \dots, N \quad (10a)$$

$$E[\xi_i(\omega) \xi_j(\omega)] = E[g_i(\Theta) g_j(\Theta)] = \int_{-\infty}^{\infty} g_i(\theta) g_j(\theta) p_{\Theta}(\theta) d\theta = \delta_{ij}, \quad j=1, 2, \dots, N \quad (10b)$$

若假定基本随机变量 Θ 服从均匀分布,则可构

造如下常用的标准正交随机变量 $\xi_k(\omega)(k=1,2,\dots,N)$ 。

选取定义在区间 $[-\pi,\pi]$ 上的 Hartley 正交基函数^[11]:

$\xi_k(\omega)=g_k(\Theta)=\text{cas}(k\Theta),k=1,2,\dots,N$ (11)
其中: $\text{cas}(x)=\cos(x)+\sin(x)$ 。容易验证, $\xi_k(\omega)(k=1,2,\dots,N)$ 是一组标准的正交随机变量。

1.3 非平稳地震动过程的正交展开 - 随机函数模型

在 地 震 工 程 中,非 平 稳 地 震 动 随 机 模 型 一 般 分 为 均 匀 调 制 非 平 稳 随 机 模 型 和 调 制 非 平 稳 随 机 模 型。这里仅考虑常用的均匀调制非平稳随机模型,它可以表示为确定性调制函数与平稳随机过程的乘积:

$$X_g(t)=f(t)X(t)$$
 (12)

式中: $f(t)$ 是反映地震动强度非平稳特性的确定性调制函数; $X(t)$ 是零均值的平稳随机过程,具有单边功率谱密度函数 $S_X(\omega)$, 本文采用 Clough-Penzien 功率谱,即:

$$S_X(\omega)=\frac{\omega_g^4+4\zeta_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega^2-\omega_g^2)^2+4\zeta_g^2\omega_g^2\omega^2}\cdot\frac{\omega^4}{(\omega^2-\omega_f^2)^2+4\zeta_f^2\omega_f^2\omega^2}S_0$$
 (13)

式中: ω_g 和 ζ_g 分别为场地土的卓越圆频率和阻尼比; ω_f 和 ζ_f 分别为过滤的圆频率和阻尼比。

谱强因子 S_0 的计算如下:

$$S_0=\frac{\bar{a}_{\max}^2}{f^2\omega_e}$$
 (14)

$$\omega_e=\int_0^\infty \bar{S}_X(\omega)\mathrm{d}\omega$$
 (15)

$$\bar{S}_X(\omega)=\frac{\omega_g^4+4\zeta_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega^2-\omega_g^2)^2+4\zeta_g^2\omega_g^2\omega^2}\cdot\frac{\omega^4}{(\omega^2-\omega_f^2)^2+4\zeta_f^2\omega_f^2\omega^2}$$
 (16)

式中: f 为峰值因子; ω_e 为谱强度因子等于 1 时的谱面积; $\bar{a}_{\max}$ 为地震动峰值加速度(PGA)的均值。

于是非平稳随机过程的自相关函数为:

$$R_{X_g}(t_1,t_2)=f(t_1)f(t_2)R_g(t_2-t_1)$$
 (17)

其中: $R_X(t_2-t_1)=R_X(\tau)$ 为平稳随机过程 $X(t)$ 的自相关函数,可根据文献[11]求得。

从而演变功率谱密度函数(单边谱)为:

$$S_{X_g}(\omega,t)=f^2(t)S_X(\omega)$$
 (18)

这里,确定性调制函数 $f(t)$ 取为:

$$f(t)=\left[\frac{t}{c}\exp\left(1-\frac{t}{c}\right)\right]^d$$
 (19)

其中: c 是最大加速度峰值对应的时间; d 是控制 $f(t)$ 形状的指数。

根据上述的分析,非平稳地震动随机过程的均值函数和方差函数分别为:

$$E[X_g(t)]=f(t)E[X(t)]=0$$
 (20)

$$E[X_g^2(t)]=R_{X_g}(t,t)=f^2(t)R_X(0)=f^2(t)\int_0^\infty S_X(\omega)\mathrm{d}\omega=\int_0^\infty S_{X_g}(\omega,t)\mathrm{d}\omega$$
 (21)

1.4 非平稳地震动过程的模拟

为检验正交展开 - 随机函数方法的有效性,以上述非平稳地震动加速度过程为例来加以分析和验证,其中地震动持时选择 $T=20\text{ s}$,展开项数为 $N=600$ 。首先,采用标准三角函数基和非平稳地震动加速度过程的自相关函数[式(17)]来计算式(2),从而得到相关矩阵 $\mathbf{R}$,并求出特征值 λ_j 与相应的特征向量 $\Phi_j(j=1,2,\dots,N)$ 。其次,对基本随机变量 $\Theta\in[-\pi,\pi]$ 进行离散化处理,离散公式为: $\vartheta_{n+315}=0.01n+0.005(-314\leq n\leq 313)$ 。同时计算各离散点 ϑ_i 的赋得概率 $P_i(i=1,2,\dots,s)$,选点总数 $s=628$,显然 $\sum_{i=1}^s P_i=1$ 。并由式(11)得到标准正交随机变量 $\xi_j(j=1,2,\dots,N)$ 的确定性离散点集^[12]。演变功率谱模型的参数值参数见表 1。

表 1 演变功率谱模型的参数值

Table 1 Parameter values of evolutionary power spectrum model			
谱参数	计算值	谱参数	计算值
$\omega_g/(\text{rad/s})$	5π	$\bar{a}_{\max}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$	196
ζ_g	0.6	f	3.1
$\omega_f/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	0.5π	$\omega_e/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	49.26
ζ_f	0.6	c/s	4
T/s	20	d	1

最后,由式(7)即可生成非平稳地震动加速度过程的样本时程曲线。图 1 给出了典型的样本时程曲线,图 2 为非平稳非高斯地震动过程的样本总体特性与目标特性比较。

2 混凝土重力坝随机地震反应

2.1 工程实例

印度 Koyna 大坝是一座混凝土重力坝,位于 Koyna 河上,坝体有关尺寸如图 3 所示。Koyna 混凝土重力坝的坝高 103.0 m,坝底宽 70.24 m,坝顶宽 14.8 m,在坝高 66.5 m 处,下游坝面的坡面发生改变,最高水位为 91.8 m。

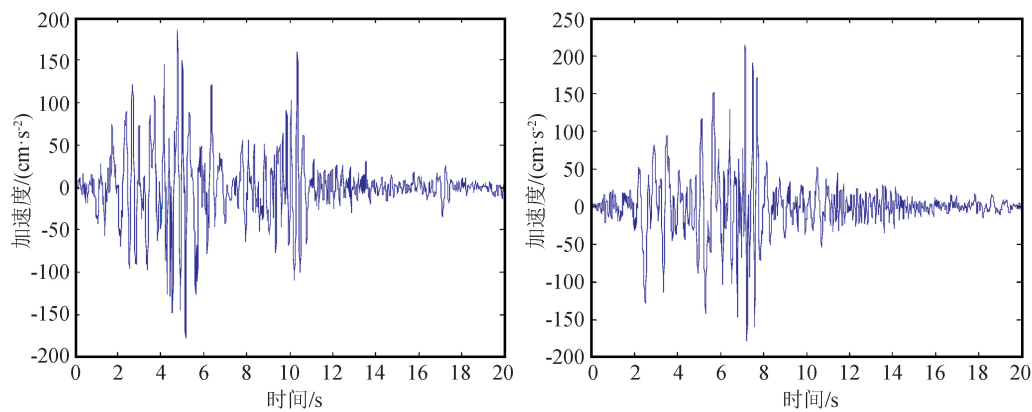


图 1 非平稳非高斯地震加速度过程的典型样本函数

Fig.1 Representative samples of non-Gaussian non-stationary ground motion acceleration process

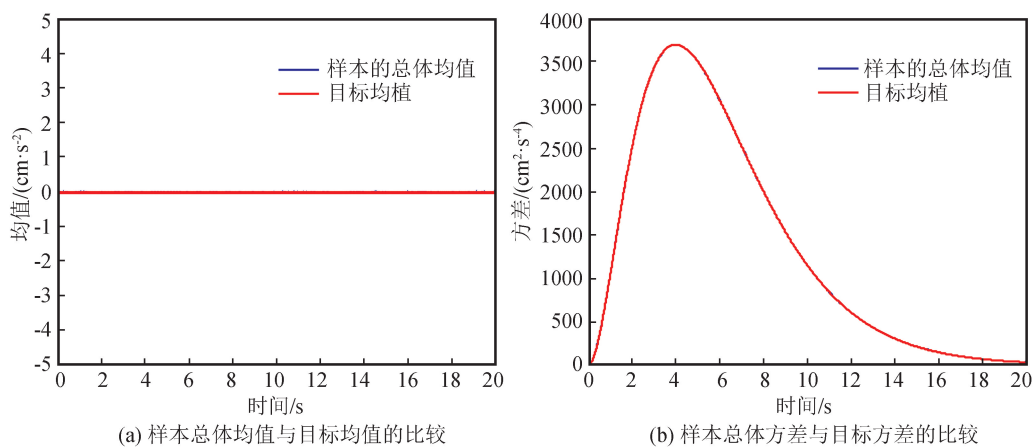


图 2 非平稳非高斯地震动过程的样本总体特性与目标特性比较

Fig.2 Statistics comparison between samples and target of non-Gaussian non-stationary ground motion process

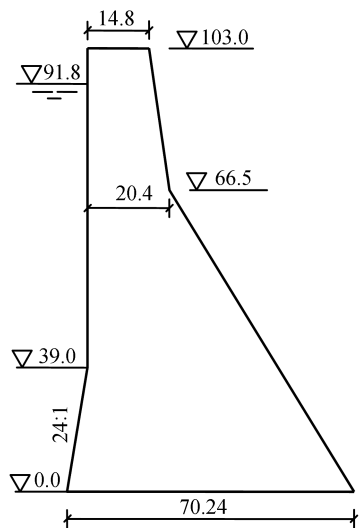


图 3 坝体尺寸图(单位:m)

Fig.3 Dam size (Unit:m)

2.2 材料特性

考虑动力计算时流体的质量和黏度,库水流体为非牛顿流体。对于坝体混凝土材料,采用如图 4

所示的本构模型。其中混凝土弹性模量 $E = 26 \text{ GPa}$,密度 $\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu = 0.2$ 。抗拉强度 $\sigma_{cr} = 2 \text{ MPa}$,抗压强度 $\sigma_c = 26.8 \text{ MPa}$ 。阻尼选用 Rayleigh 阻尼

$$C = \alpha M + \beta K \tag{22}$$

则此类体系第 n 阶振型的阻尼比为

$$\xi_n = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{\beta}{2} \omega_n \tag{23}$$

其中系数 α 和 β 可以根据第 i 阶振型阻尼比 ξ_i 和第 j 振型 ξ_j 计算。若假设这两个振型具有相同的阻尼比 $\xi = 5\%$,则

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \beta = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \tag{24}$$

2.3 拉格朗日-欧拉方法描述的动力方程

在本文中,计算荷载包括静水压力、坝体与库水相互作用的动水压力和地震作用,动水压力的计算考虑流体和坝体结构的流固耦合。求解方法采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)有限元方法^[13-14]。水体长度

取为 3 倍的坝高,其中流固耦合面为水体和坝体的接触面,其高度为整个坝高。如图 5 所示建立了有限元模型,其中坝体采用二维平面应变单元(plain-strain)模拟,流体采用二维流体单元(2D-fluid)。

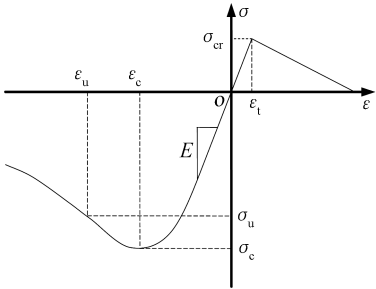


图 4 混凝土本构关系

Fig.4 Constitutive relation of concrete

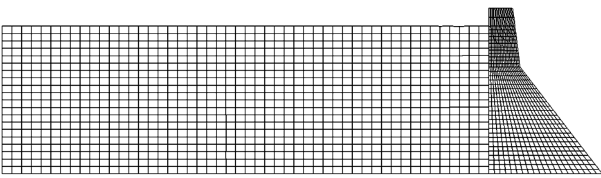


图 5 有限元计算模型

Fig.5 Finite element model

对于图 5 所示的库水、坝体结构流固耦合体系,有如下边界条件:

(1)库水的上自由液面

库水的自由液面是一个可以移动的边界。此边界需满足两个条件:运动学和动力学条件^[15-16]。

自由液面的运动学条件是指流体微粒不能流出液面,或者说自由液面的法向速度要和流体的法向速度相同,即:

$$(v - \dot{d}) \cdot n = 0 \tag{25}$$

式中: v 为自由面的法向速度; $\dot{d}$ 为自由面的位移; n 为自由面单位法向量。

假定切向位移用 Eulerian 坐标系处理,而法向位移用 Lagrangian 坐标系处理。在初始固定的坐标系(Eulerian)中,运动学条件变为:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v \cdot \nabla S = 0 \tag{26}$$

其中, $S(x_i, t)$ 为自由液面上的网格点,运动学条件表明,自由液面表面流体微粒的法向速度等于自由液面本身在这一点上的法向速度。

动力学条件可以用周围压力和表面张力来表示,即

$$\tau_n = -\bar{p}_a n + \sigma H \tag{27}$$

式中: $\bar{p}_a$ 为周围压力; σ 为表面张力; H 为自由液面的曲率向量。

(2)流固耦合边界

流固耦合边界也分为运动学和动力学条件

$$d_f = d_s, n \cdot \tau_f = n \cdot \tau_s \tag{28}$$

其中: d_f 、 d_s 分别为流体和结构的位移; τ_f 、 τ_s 分别为流体和结构的应力。

(3)流固耦合系统中坝体结构的动力方程

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F_s(t) \tag{29}$$

式中: $F_s(t)$ 为坝体结构受到的瞬态激励,包括库水作用在坝体上的动水压力。

2.4 混凝土重力坝随机地震反应和可靠度

在对混凝土重力坝的随机地震反应分析中,本文仅考虑地震动输入的随机性。输出点的位置分别选取坝顶和坝颈,与其对应的输出目标量为坝顶水平位移和坝颈部位的应力。图 6 为坝顶水平位移最大值 0.07 m 第 31 条地震反应;图 7 为坝颈拉应力最大值 2.68 MPa 第 9 条地震反应。图 6、图 7 中地震反应初始值不为零是因为在静力反应的基础之上加载的随机地震动过程;在坝顶水平位移中可以看

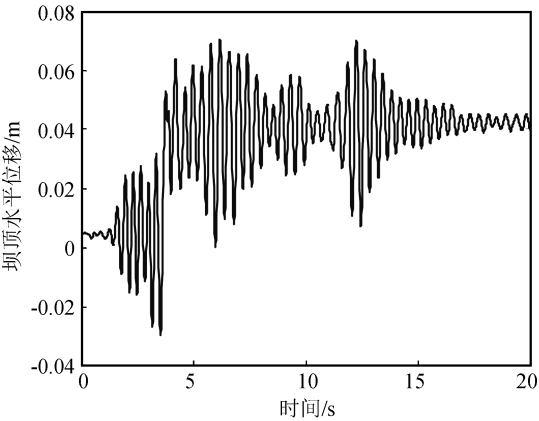


图 6 坝顶水平位移

Fig.6 Horizontal displacement of dam crest

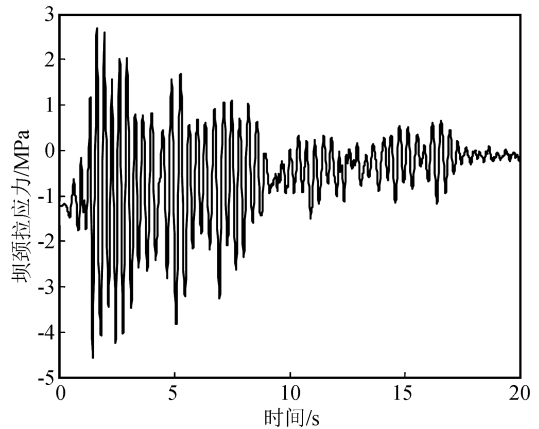


图 7 坝颈拉应力

Fig.7 Tensile stress of dam abutment

出位移出现了较大的飘逸现象,可能是坝体出现裂缝造成的,这一点也可以在图 7 坝颈拉应力反应曲线中得到证明。

在随机地震动输入条件下,利用概率密度演化方法(PDEM)可得混凝土重力坝不同失效准则下随机地震反应的丰富概率特性(图 8)。图 8(a)为坝顶处水平位移的均值和标准差;图 8(b)给出了 3 s、9 s、12 s 时坝顶水平位移的概率密度信息,这表明

坝顶水平位移的幅值在随时间发生演化的同时,位移的变化范围也在随着加载过程而演化;图 8(c)为 6~8 s 时坝顶水平位移的等概率密度线;图 8(d)给出了坝顶位移概率密度演化曲面,它更为清晰地描述了概率密度函数随时间和位移幅值的演化特性。

根据构造等价极值事件的思想,即可以得到按坝顶位移为失效控制准则下的等价极值分布概率面密度曲线和概率分布曲线(图 9)。

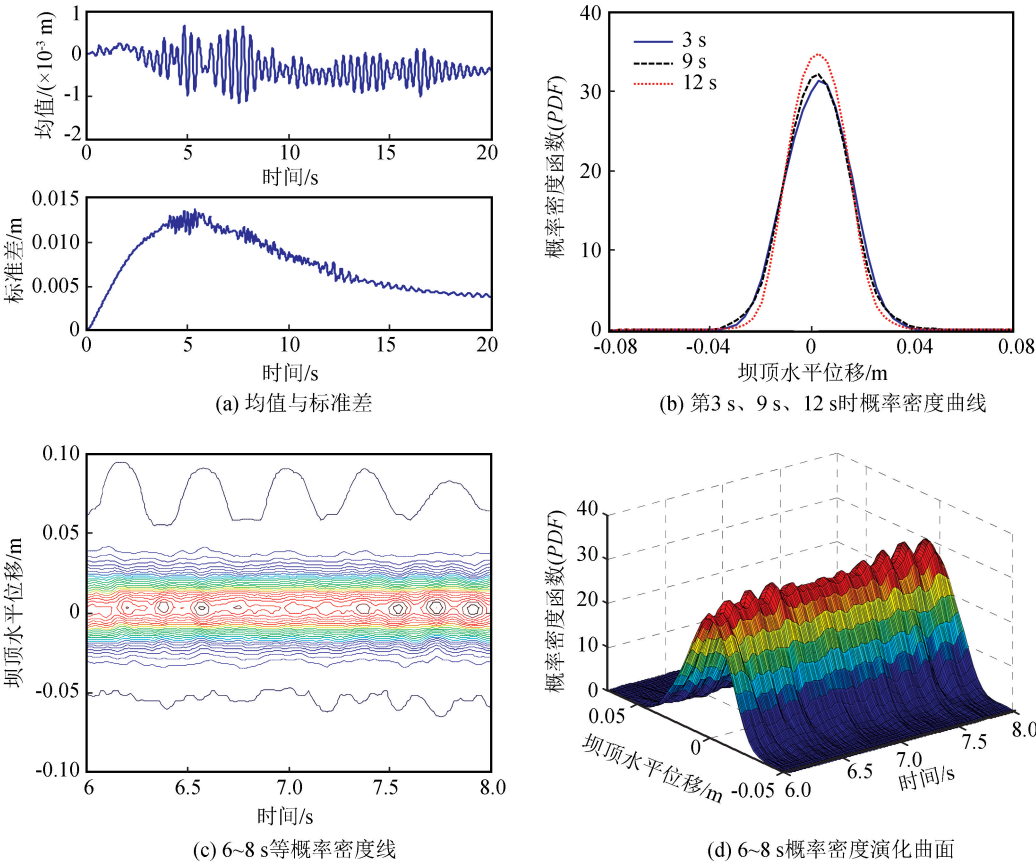


图 8 地震激励下的相对位移概率信息

Fig.8 Relative displacement probability information under seismic excitation

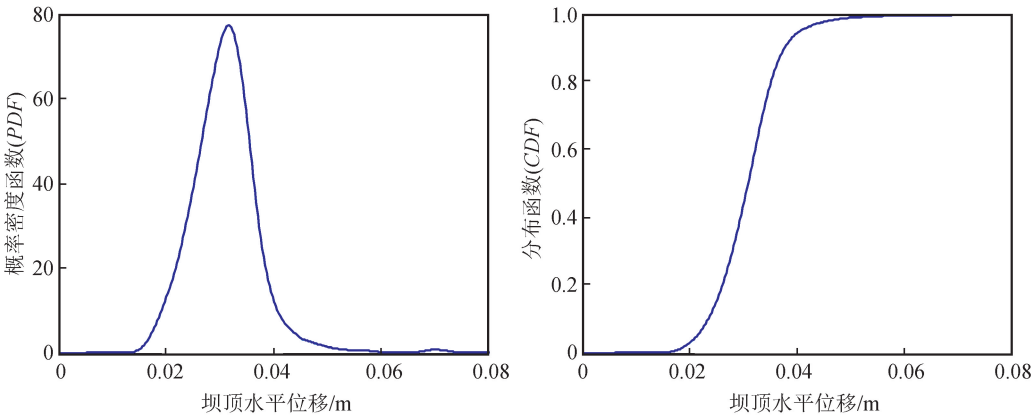


图 9 坝顶水平位移的概率密度信息

Fig.9 Probability density information of horizontal displacement of dam crest

按坝顶位移控制的失效准则下分别取不同坝顶水平位移界限值,可以得到 Koyna 大坝的抗震可靠度(表 2)。

表 2 按位移控制的失效准则下坝体结构抗震可靠度

Table 2 Reliability of dam structure using fail criterion of displacement control

失效准则	动力可靠度		
	位移界限值 0.03 m	位移界限值 0.04 m	位移界限值 0.05 m
坝顶水平向位移	0.439 6	0.943 8	0.989 0

同时根据概率密度演化方法和等价极值事件的思想,亦可给出坝颈部应力的丰富概率信息。限于篇幅,在这里仅给出坝颈部应力的等价极值分布概率密度曲线和概率分布曲线(图 10)。若对于坝颈处的应力,假设混凝土材料的最大拉应力为 2 MPa,则可得按坝颈部混凝土拉应力为失效控制准则下的抗震可靠度为 0.624 7。从可靠度的角度定量说明 Koyna 大坝在坝颈部产生水平裂缝的可能性非常大,这与实际情况符合较好^[17]。

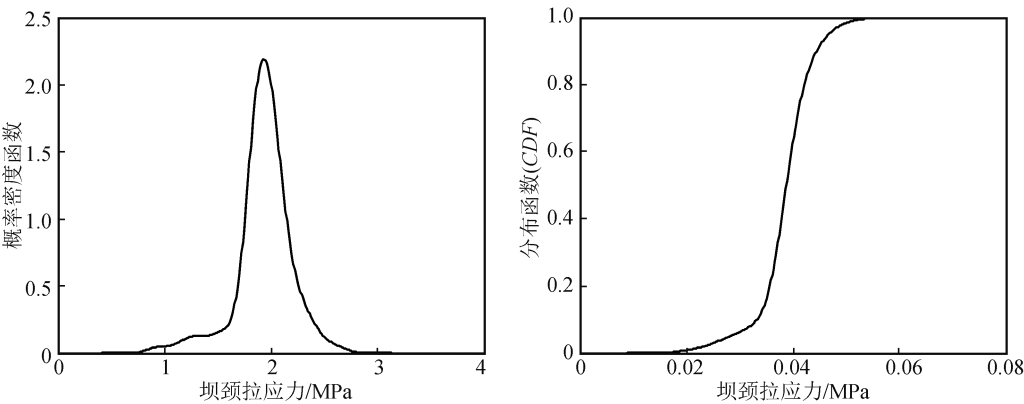


图 10 坝颈部应力的概率信息

Fig.10 Probability information oftensile stress of dam abutment

3 结论

本文根据随机正交展开理论生成非平稳激励的随机地震动,并结合概率密度演化方法和等价极值事件的思想,分析得到混凝土重力坝的随机地震反应和抗震可靠度。

在考虑混凝土材料本构的非线性和坝体结构、库水之间的流固耦合,进行随机地震反应分析研究,计算得到坝顶位移以及坝颈部位的概率密度曲线;再根据等价极值事件的思想,对混凝土坝在流固耦合作用下的抗震可靠度进行分析。这一研究表明,概率密度演化方法和等价极值事件的思想在大坝结构抗震可靠度方面的可行性以及适用性,为大坝结构基于抗震可靠度的精细化设计提供了参考。

参考文献(References)

[1] 潘家铮.水电与中国[M]//中国大坝技术发展水平与工程实例.北京:中国水利水电出版社,2007.
PAN Jia-zheng, Hydropower and China [M]//Chinese Dam Level of Technological Development and Project Examples.Bei-

jing:China Water & Power Press,2007.(in Chinese)

[2] 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 of High Concrete Dams [M].Beijing: Higher Education Press,2011.(in Chinese)

[3] 何蕴龙,陆述远.重力坝随机地震动力分析方法研究[J].水利学报,2000,31(1):35-41.
HE Yun-long, LU Shu-yuan, Study on Random Seismic Analysis Method for Gravity Dam[J].Journal of Hydraulic Engineering,2000,31(1):35-41.(in Chinese)

[4] 陈健云,李静,周晶.高拱坝的非平稳随机地震响应分析[J].工程力学,2002,23(增刊):418-422.
CHEN Jian-yun, LI Jing, ZHOU Jing, Non-stationary Random Seismic Response of High Arch Dam [J].Engineering Mechanics,2002,23(Supp.):418-422.(in Chinese)

[5] 王爱勤,王春玲.指数函数模量成层地基上变截面坝的随机地震反应分析[J].西北地震学报,2008,30(1):31-35.
WANG Ai-qin, WANG Chun-ling, Random Earthquake Response of the Varied Section Dam on the Layered Foundation with Exponential Function Shear Modulus [J].Northwestern Seismological Journal,2008,30(1):31-35.(in Chinese)

[6] 贾超,刘凯,高凤.基于 Kanai-Tajimi 模型的重力坝随机地震分析[J].水力发电,2013,39(1):41-43.
JIA Chao, LIU Kai, GAO Feng, Random Seismic Analysis of

- Gravity Dam Based on Kanai-Tajimi Model[J]. Water Power, 2013, 39(1): 41-43. (in Chinese)
- [7] 曾波, 邢彦富, 刘章军. 基于概率密度演化的渡槽结构抗震分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 991-996.
- ZENG Bo, XING Yan-fu, LIU Zhang-jun. Seismic Analysis of Large-scale Aqueduct Structures Based on the Probability Density Evolution Method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 991-996. (in Chinese)
- [8] 陈建兵, 李杰. 基于概率密度演化方法的随机结构可靠度分析[J]. 计算力学学报, 2004, 21(3): 285-290.
- CHEN Jian-bing, Li Jie. Reliability Analysis of Stochastic Structures Based on Probability Density Evolution Method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, 21(3): 285-290. (in Chinese)
- [9] 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: Science and Technology, 2008, 36(9): 1153-1159. (in Chinese)
- [10] 李杰. 随机结构系统——分析与建模[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- LI Jie. Stochastic Structural Systems-analysis and Modeling [M]. Beijing: Science Press Ltd., 1996. (in Chinese)
- [11] 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): 1066-1074.
- 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): 1066-1074. (in Chinese)
- [12] 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 Bing. Simulation of Stationary Ground Motion Processes Hybrid Orthogonal Expansion-random Function Approach [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 199-208. (in Chinese)
- [13] Ramaswamy B, Kawahara M. Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method for Unsteady, Convective, Incompressible Viscous Free Surface Fluid Flow [J]. Int J Numer Methods Fluids, 1987, 7: 1053-1075.
- [14] Liu Z, Huang Y. A New Method for Large Amplitude Sloshing Problems [J]. J Sound & Vib, 1994, 175(2): 185-195.
- [15] 吴轶, 莫海鸿, 杨春. 排架—渡槽—水三维耦合体系地震响应分析[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 280-285.
- WU Yi, MO Hai-hong, YANG Chun. Seismic Response of Frame-supported Large Rectangular Aqueduct-water 3-D Coupling System [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(3): 280-285. (in Chinese)
- [16] 岳戈. ADINA 流体与流固耦合功能的高级应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- YUE Ge. Advanced Application of ADINA Fluid and Fluid Solid Coupling Function [M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese)
- [17] 杨会臣, 王海波. 混凝土重力坝极限抗震能力初探[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 134-139.
- YANG Hui-chen, WANG Hai-bo. Preliminary Study on the Ultimate Seismic Capacity of Concrete Gravity Dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 134-139. (in Chinese)