

考虑材料参数空间变异性的沥青混凝土心墙坝-覆盖层系统地震响应研究

王宗凯, 宋志强, 刘云贺, 王 飞

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 覆盖层及坝体材料参数的空间变异性往往显著影响沥青混凝土心墙坝-覆盖层系统的地震响应。提出一种基于数论选点的空间随机场模拟技术, 通过数论选点方法实现随机点集分布优化, 采用正态或对数正态分布函数考虑材料参数空间变异性, 采用高斯型自相关函数考虑材料参数空间相关性, 通过协方差分解生成随机参数库, 实现了基于蒙特卡洛法的考虑坝体-覆盖层材料空间差异性及相关性的随机场模拟和“非侵入式”随机有限元计算。以某实际工程为例, 选取静力邓肯-张 E-B 本构模型和动力等效线性黏弹性本构模型中的敏感参数作为随机参数, 分析了沥青混凝土心墙坝坝顶、心墙顶水平向峰值加速度和坝体竖向永久变形的均值、变异系数及 95% 的置信区间限值等统计规律及概率分布检验; 分析了输入地震动对随机响应离散程度和相对于确定值超越概率的影响。结果表明: 数论选点法可以显著优化随机点集分布和提升计算效率; 考虑材料参数的空间随机性会大概率引起坝体地震响应增大; 坝体和覆盖层材料的空间差异性对坝顶和心墙顶水平峰值加速度的影响大于对永久变形的影响; 坝体的地震响应统计结果不一定符合正态或对数正态分布; 忽略材料参数的空间变异性会造成沥青混凝土心墙坝-覆盖层系统不同工况不同指标地震响应 50%~90% 概率的低估; 覆盖层地震响应结果的离散程度大于坝体及心墙。

关键词: 沥青混凝土心墙坝; 地震响应; 覆盖层; 空间变异性; 随机有限元

中图分类号: TV312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)05-1188-12

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.05.017

引 言

中国西南地区虽然水能资源丰富, 但是河床深厚覆盖层广泛分布、强震频发给水电工程的抗震安全带来严峻考验^[1-2]。沥青混凝土心墙坝由于良好的环境适应能力成为强震区深厚覆盖层场地的优选坝型, 因此开展深厚覆盖层场地沥青混凝土心墙坝的抗震安全研究具有十分重要的意义^[3]。河床覆盖层由于类型复杂且结构松散, 往往在物理力学性质上呈现出较大的空间变异性和随机性。对于坝体来说, 由于国内外规范对堆石料的级配和母岩性质控制较为“粗犷”^[4]以及施工质量控制的不确定性, 使得坝体堆石料的物理力学性质也具有一定的空间变异性和随机性^[5]。在以往深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝地震响应研究中, 往往忽略覆盖层和坝体材料参数的空间随机性, 使得结构的精确分析所能取得的结果被粗略的经验指标所覆盖, 难以得出更加符合实际的坝体抗震安全评价结论。

国内外研究者针对材料参数的空间随机性开展了大量的研究, 但多针对于随机场的生成、模拟方法或者是结构静力分析, 对于材料参数的空间随机性对结构地震动力响应的影响的研究尚不多见。Cho^[6]和蒋水华等^[7]采用 K-L (Karhune-Loeve) 展开法来进行随机场的模拟, 研究了材料的空间随机性对边坡稳定性的影响, 但是当研究区域不规则且协方差函数形式复杂时, K-L 法中的二维 Fredholm 积分方程求解存在一定困难。王建娥等^[8]采用 Cholesky 分解方法生成了面板堆石坝材料参数的空间随机场, 研究了当考虑材料参数随机时的面板堆石坝的沉降规律。Suchomel 等^[9]采用局部平均法模拟了潜在滑动面上的土体参数空间特性, 并分析了土体参数空间特性与边坡失效概率的关系。杨鸽等^[10]采用局部平均细分法模拟面板堆石坝的二维空间随机场, 研究了筑坝堆石料空间不确定性对大坝地震响应的影响。郭晴等^[11]假设坝体材料符合特定分布, 通过抽样完成沥青心墙坝的空间随机场的生成, 并对坝体的应力变形等进行了分析。

以上研究虽然实现了对材料参数的空间变异性

收稿日期: 2021-11-17; **修订日期:** 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52039008); 国家自然科学基金面上项目(51479165, 51779208); 陕西省自然科学基金基础研究计划面上项目(2022JM-276); 陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目(22JQ052)。

及空间随机场的模拟,针对边坡、土石坝等分析了结构可靠度、应力变形响应等,得出了一些有价值的研究成果,但是分析时大都采用蒙特卡洛方法进行随机配点,这种配点方法会给高土石坝工程材料的空间随机有限元计算带来较大计算量。同时,针对深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝的随机地震响应研究较少。故本文提出一种基于数论选点的空间随机场模拟技术,考虑覆盖层和坝体材料参数的空间随机性和相关性,开展了沥青混凝土心墙坝-覆盖层地震响应随机有限元计算,得出了坝顶、心墙顶水平向峰值加速度和坝体竖向永久变形的均值、变异系数及 95% 的置信区间限值等统计规律及概率分布结论;讨论了地震动强度对随机响应离散程度和相对于确定值超越概率的影响,为强震区深厚覆盖层场地沥青混凝土心墙土石坝的抗震安全评价提供参考。

1 基于数论选点法空间随机场模拟

1.1 多维空间变量的数论选点法

在覆盖层以及坝体材料的空间变异特性的模拟中,首先需要进行参数的随机配点,对于空间多维随机变量问题,传统蒙特卡洛选点策略产生的样本点容易出现如图 1 所示的局部集中现象,在不增加样本数量情况下,难以对变量概率分布空间实现全面覆盖,可能对随机响应分析结果产生较大偏差^[12-13]。如果通过大量增加样本数量解决该问题,则计算效率显著下降。

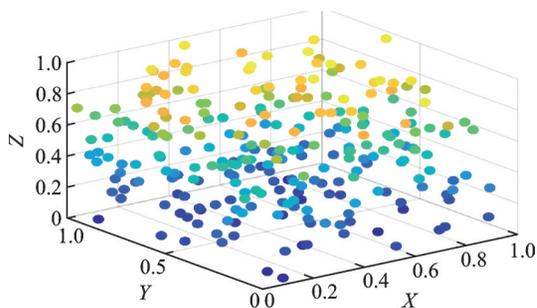


图 1 蒙特卡洛法生成点集概率

Fig. 1 Probability of points generated by Monte Carlo method

本文将数论方法引入材料参数随机配点中,该方法能够实现多维变量概率分布空间的全面均匀覆盖,与传统蒙特卡洛配点法相比大幅提升了计算结果的可靠性和计算效率^[14]。

多维空间数论选点法的数学理论基础是华罗庚提出的 C^s 上数论网格^[15],目前已经被证明 GLP (Good Lattice Point) 点集在所有可能生成的点集中具有最小偏差^[16],故本文选择该点集进行随机配点的生成。下式给出了 GLP 点集的 s 维生成矢量(N, h_1, h_2, \dots, h_s)^[13]:

$$H(z) = \frac{3^s}{n} \left\{ 1 + 2 \sum_{k=1}^{\frac{n-1}{2}} \prod_{j=0}^{s-1} \left[1 - 2 \left(\frac{kz^j}{n} \right) \right]^2 \right\} \quad (1)$$

当 $z=c$ 时,函数 $H(z)$ 在区间 $1 \leq z \leq (n-1)/2$ 取得极小值,此时 $1, c, \dots, c^{s-1}$ 按模 n 取得最优系数 (h_1, h_2, \dots, h_s)。文献[16]中给出了部分最优系数表,可用来产生 GLP 点集。

进一步按照下式可以得到单位超立方体 $(0, 1)^s$ 内点集 $x_{j,k}$:

$$x_{j,k} = \frac{h_j k}{N} - \text{int} \left(\frac{h_j k}{N} \right) \quad (j = 1, 2, \dots, s; k = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

图 2 给出了应用数论选点法生成区间 $(0, 1)$ 内点集概率的三维空间分布,该点集为随机场参数点集的概率值,下文将通过 Nataf 逆变换将概率值转换随机场的参数值。通过与蒙特卡洛配点法得到的随机点概率(图 1)对比可以发现,通过 GLP 集合可以选出“低偏差”的分布点集,将整个概率分布空间覆盖,解决了蒙特卡洛法随机点集生成过程中的概率缺失或者太过集中的问题。此外,在使用数论法生成点集的过程中,只要点的个数以及区间边界确定,生成点将是固定的,因此采用数论选点法可以在精度不受影响的前提下,显著提升多维空间随机计算的效率。

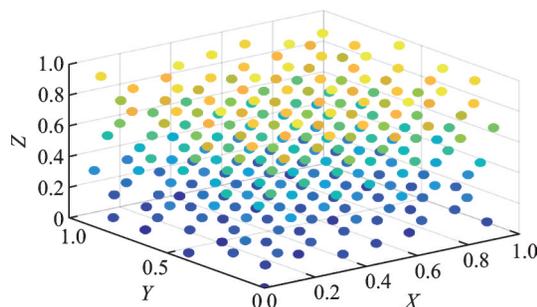


图 2 数论选点法生成点集概率

Fig. 2 Probability of points generated by number theory selection method

1.2 空间随机场模拟

为了同时考虑材料参数的空间变异性和空间相关性,采用合理的随机场理论是十分重要的。本文采用中心点离散法分解离散随机场,通过 Nataf 逆变换将标准独立空间的数论点集转换成符合特定分布的点集,基于 Cholesky 分解法对随机变量进行变换,结合相关高斯随机场及对数正态随机场完成同时考虑差异性和相关性的空间随机场模拟。随机场的单元参数通过均值、变异系数、分布函数、相关函数以及相关距离等来进行控制。

中心点离散法取所研究几何空间域为 V ,通过有限元方法离散为 n 个单元体子空间 V_i ,即 n 个随

机变量。在二维空间下,子域的中心点记为 (X_i, Y_i) 。令 $H(X, Y)$ 为空间 V 在力学模型下的参数随机场,中心点离散法将 $H_i(X_i, Y_i)$ 值赋给子空间 V_i 中心点 (X_i, Y_i) 来体现该单元子域的材料特征。

由于地基覆盖层和坝体材料可能的分布类型有多种:如正态分布、对数正态分布、 χ^2 分布、 t 分布等。在进行空间随机场模拟时需要将生成的数论点集 $x_{j,k}$ 转换成符合特定分布的点集,本文采用Nataf逆变换来实现,即对于随机变量 R 有如下所示的关系:

$$\begin{cases} \theta = F^{-1}(R) \sim F(x) \\ R = F(\theta) = \int_{-\infty}^{\theta} f(x) dx \end{cases} \quad (3)$$

式中 $F^{-1}(\cdot)$ 为分布函数 $F(x)$ 的反函数, $f(x)$ 为分布函数 $F(x)$ 的概率密度函数。

通过下式将产生的数论点集 $x_{j,k}$ 转换成符合 $F(x)$ 分布函数的点集,用来实现对材料参数空间变异性的模拟。

$$A_{j,k} = F^{-1}(x_{j,k}), (k = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, s) \quad (4)$$

各空间随机参数的数字特征通过变异系数 C_v 来描述,变异系数为:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (5)$$

式中 σ 为各随机参数标准差; μ 为各随机参数均值。

在覆盖层及坝体材料参数随机场的模拟中,一般认为只有在相关距离以内的不同空间点之间的材料特性才会有较强的相关性。本文选用高斯自相关函数计算不同空间点处的相关系数,进而实现对覆盖层和坝体材料参数的空间相关性的模拟^[8]:

$$\rho(\tau_x, \tau_y) = \exp\left[-\pi\left(\frac{\tau_x^2}{\delta_h^2} + \frac{\tau_y^2}{\delta_v^2}\right)\right] \quad (6)$$

式中 τ_x 为空间中两点水平方向上的距离, $\tau_x = |x_i - x_j|$; τ_y 为空间中两点在竖直方向上的距离, $\tau_y = |y_i - y_j|$; δ_h 为水平自相关距离, δ_v 为竖直自相关距离,由土体性质进行确定。

$$\rho_{n \times n} = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdots & \rho_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过Cholesky分解法使得 $\rho_{n \times n} = L_{n \times n} L_{n \times n}^T$,将符合特定分布的点集 $A_{j,k}$ 进行 m 次随机抽样生成点数 $A_{m \times n}$, m 为模拟次数, n 为子空间个数。则随机变量的样本矩阵 $H_{m \times n}^D$ 可以通过下式得到:

$$H_{m \times n}^D(x, y) = A_{m \times n} L_{n \times n} \quad (8)$$

在计算过程中自相关系数矩阵由于计算误差或者舍入误差出现行列式值接近于“0”,此时可以对矩阵进行微调补救,使之可以产生与实际情况相接近

的相关系数矩阵^[17]。

通过下式便可生成材料参数的非高斯随机场:

$$H_i(x, y) = \exp\left[\mu_{\ln x_i} + \sigma_{\ln x_i} \cdot H_i^D(x, y)\right] \quad (9)$$

$$\mu_{\ln x_i} = \ln \mu_{x_i} - \frac{\sigma_{\ln x_i}^2}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_{\ln x_i} = \sqrt{\ln\left[1 + \left(\frac{\sigma_{x_i}}{\mu_{x_i}}\right)^2\right]} \quad (11)$$

式中 $\mu_{\ln x_i}, \sigma_{\ln x_i}$ 分别为第 i 个变量取对数后的均值和标准差。

2 计算模型及随机参数

2.1 模型概况

本文选取某实际覆盖层场地上沥青混凝土心墙坝为研究对象。最大坝高102.8 m,坝顶宽度10 m,坝顶高程502.8 m,上游坝坡在447.0 m高程以下为1:2.5,以上为1:1.7,下游坝坡为1:1.7,并在高程467.8 m和432.8 m处设置2 m宽马道。坝体材料分区如图3所示,分为堆石区、围堰石渣区、过渡区、沥青混凝土心墙以及覆盖层。利用ABAQUS有限元软件建立沥青混凝土心墙坝-覆盖层系统有限元网格模型,单元类型采用四节点等参单元,为了满足数值计算的要求,有限元模型在进行网格划分时必须满足单元长度与宽度小于相关距离,有限元模型网格划分如图3所示,共3083个单元,最大网格长度为14.86 m,宽度为4.63 m。覆盖层分别向上、下游及深度方向延伸100 m。静力计算边界条件为覆盖层底部全约束,上、下游两侧的节点在水平方向约束。动力计算将上、下游两侧的节点在水平方向约束,采用一致输入方法,地震动从覆盖层底部输入^[18]。Goodman接触单元是一个无厚度的一维单元,由4节点组成。由于其物理意义较为明确且无厚度,可以较好地反映材料性质差异较大的两种结构接触面上的张裂和相对滑动,因此在岩土力学中得到了广泛应用,故对沥青心墙与过渡料以及防渗墙与覆盖层之间设置Goodman接触^[19]。

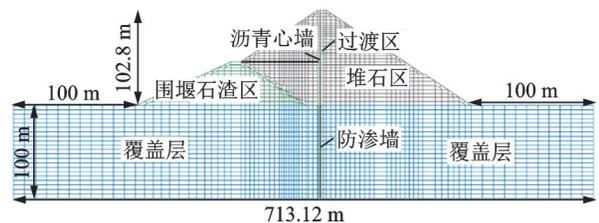


图3 沥青混凝土心墙坝-覆盖层系统材料分区及有限元网格模型图

Fig. 3 Material partition and finite element mesh model of asphalt concrete core dam-overburden system

2.2 覆盖层及坝体材料参数随机场的建立

沥青心墙坝的地震响应分析包括静力计算和动力计算过程,覆盖层土体和坝体堆石料在静力计算中采用邓肯-张 E-B 模型^[20],动力计算采用等效线性黏弹性本构模型^[21],永久变形计算采用等价节点力和残余应变模型^[21]。

等效线性黏弹性模型假定土料为黏弹性体,通过剪切模量 G 和等效阻尼比 λ 来表征土体的动应力-应变关系的非线性和滞后性。本文采用沈珠江等建议的形式^[21]。

剪切模量:

$$G = \frac{k_2}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} P_a \frac{\sigma_3'}{P_a} \quad (12)$$

阻尼比:

$$\lambda = \lambda_{\max} \frac{k_1 \bar{\gamma}_d}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} \quad (13)$$

$$\bar{\gamma}_d = 0.65 \gamma_{d\max} \left(\frac{\sigma_3'}{P_a} \right)^{n-1} \quad (14)$$

式中 σ_3' 为围压; k_1, k_2, n 为模型参数; $\bar{\gamma}_d$ 为归一化的剪应变; P_a 为大气压强; λ_{\max} 为最大阻尼比; $\gamma_{d\max}$ 为最大动剪应变。

对于永久变形计算,采用目前应用较多的残余

应变模型,即沈珠江模型。

动力残余体积应变增量:

$$\Delta \varepsilon_v = c_1 (\gamma_d)^{c_2} \exp(-c_3 S_1^2) \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (15)$$

动力残余剪应变增量:

$$\Delta \gamma = c_4 (\gamma_d)^{c_5} S_1^2 \frac{\Delta N}{1 + N} \quad (16)$$

式中 N 为总振动次数; ΔN 为时段增量; c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 为模型参数; S_1 为应力水平。

从以上静、动力本构模型可以看出,反映材料性质的模型参数多达十几个,如果对每个参数都进行随机场模拟,会使得计算工作量变得十分庞大,而实际研究发现,不同的参数对计算结果的影响程度不同,仅考虑敏感性较大参数的随机性,既可以大幅提升计算效率,又可以得到满足工程精度要求的计算结果。根据以往学者对覆盖层土体和坝体堆石料静、动力本构模型参数的敏感性研究结论^[22-25],本文选取静力参数密度 ρ 、系数 K 以及摩擦角 φ ,动力参数 $k_1, n, \nu, \lambda_{\max}$ 作为随机参数。其他本构模型参数,包括永久变形计算的模型参数取为确定值。表 1 给出了材料静力邓肯-张 E-B 本构模型参数的确定值;表 2 给出了材料动力等效线性黏弹性本构模型及永久变形计算参数的确定值;表 3 给出了本文选取的随机参数的统计分布特性,假设各随机参数均服从正态分布。

表 1 材料静力邓肯-张 E-B 模型参数

Tab. 1 Static material Duncan-Zhang E-B parameters

	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	K	n	R_f	C / kPa	$\varphi / (^\circ)$	P_a	K_b	m
堆石区	2.15	950	0.562	0.89	40	36	100	600	-0.076
围堰石渣料	2.24	650	0.604	0.89	40	35	100	450	0.107
过渡料	2.2	1000	0.6	0.87	30	38	100	700	-0.1
沥青混凝土	2.413	342.7	0.18	0.62	25	27.8	100	2134	0.29
覆盖层	2.06	1031	0.36	0.9	35	53.5	100	810	-0.16

表 2 材料动力等效线性黏弹性模型及永久变形模型参数

Tab. 2 Dynamic equivalent linear viscoelastic model and parameters of permanent deformation model for materials

	k_1	k_2	n	ν	λ_{\max}	$c_1 / \%$	c_2	c_3	c_4	c_5
堆石区	17.1	1657	0.571	0.35	0.21	0.69	0.53	0	9.12	0.35
围堰石渣料	17.1	1450	0.57	0.35	0.21	0.69	0.53	0	9.12	0.35
过渡料	15.7	1450	0.627	0.328	0.22	0.56	0.42	0	8.25	0.4
沥青混凝土	20	1979.4	0.4	0.345	0.2	0	0	0	0	0
覆盖层	16.2	3895	0.46	0.35	0.1	0.74	0.43	0	9.55	0.38

表 3 本文计算选取的静、动随机参数统计特性表

Tab. 3 Selected static and dynamic random parameters

	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		K		$\varphi / (^\circ)$		k_1		n		ν		λ_{\max}		相关距离
	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	均值	变异系数	
覆盖层	2.06	0.25	1031	0.25	53.5	0.25	16.2	0.3	0.16	0.2	0.35	0.1	0.1	0.3	$\delta_h = 50 \text{ m}$ $\delta_v = 5 \text{ m}$
堆石区	2.15	0.2	950	0.25	36	0.25	17.1	0.25	0.571	0.15	0.35	0.1	0.21	0.25	$\delta_h = 30 \text{ m}$ $\delta_v = 3 \text{ m}$
围堰石渣料	2.24	0.2	650	0.2	40	0.2	17.1	0.25	0.57	0.15	0.35	0.1	0.21	0.25	$\delta_h = 40 \text{ m}$ $\delta_v = 5 \text{ m}$

考虑到沥青混凝土心墙与过渡料由于严格的施工控制,其空间特性应该趋于一致,故在随机场的模拟中对这两部分材料的参数取确定值。混凝土防渗墙采用线弹性模型计算,弹性模量为28 GPa,泊松比为0.167,密度为2400 kg/m³。

对于覆盖层、堆石以及围堰石渣等材料的空间相关性,根据以往学者的分析结论^[26],土体的水平相关距离一般为10~80 m,竖向相关距离一般为1~5 m。结合本工程的模型信息,本文计算选取相关距离如表3所示。图4(a)给出了覆盖层区域静力随机参数 K 的随机场实现云图,通过40 m×40 m的网格来进行示意;图4(b)为考虑材料的空间差异和相关特性后,基于数论选点和Cholesky分解方法生成的沥青混凝土心墙坝-覆盖层整体模型的材料动力参数 k_1 非高斯随机场的一次模拟示意图。

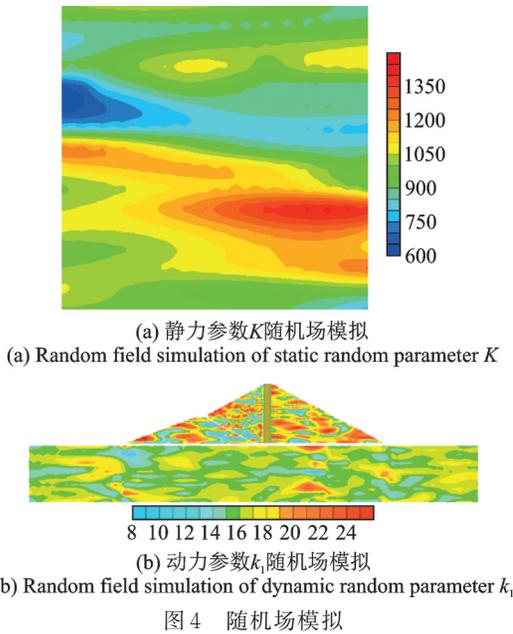


图4 随机场模拟

2.3 计算流程

本文的计算流程如图5所示,主要分为三部分:随机参数库的生成、随机有限元分析、计算结果概率统计分析。第一部分,首先通过数论选点法生成随机变量的多维随机矩阵,再结合均值、变异系数、相关函数、相关距离等生成材料的随机参数库;第二部分,将随机材料参数赋给有限元模型,在蒙特卡罗法的框架下进行 N 次响应计算,直到计算结果趋于稳定;第三部分,对计算结果进行性态分布、最大值、均值、超标概率等统计分析。

2.4 计算工况

根据某实际沥青混凝土心墙堆石坝工程所在的

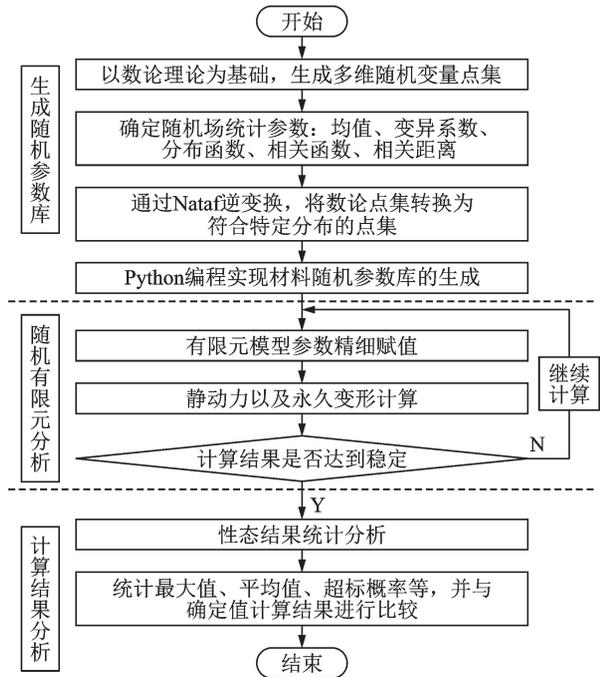


图5 计算分析流程图

Fig. 5 Flow chart of computational analysis

场地信息,场地类别为II类场地,卓越周期为2.5 s,按水工抗震设计规范标准设计反应谱,生成E1~E3三条人工地震波作为输入,地震动水平峰值加速度分别调幅为0.41g,0.32g,0.42g。地震动输入采用双向输入,持续时间皆为20 s,输入间隔为0.01 s,竖向峰值加速度取水平向的2/3。图6给出了三条人工地震波的加速度时程曲线以及反应谱曲线(阻尼比取为5%)。E1~E3每条地震波输入的计算工况

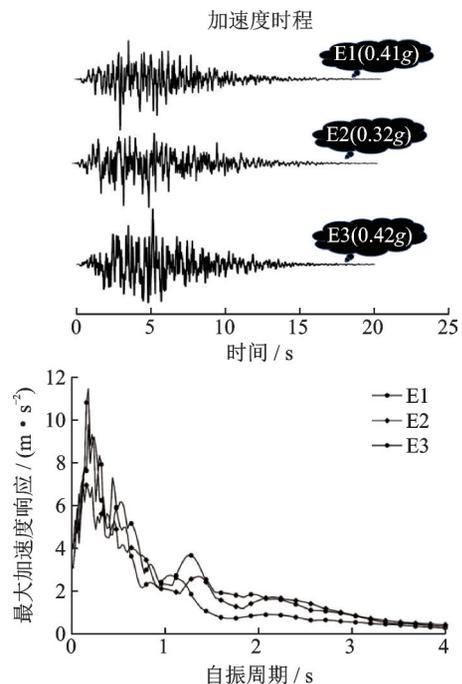


图6 覆盖层-坝体随机有限元分析中的输入地震波时程
Fig. 6 Input seismic wave time history in stochastic finite element analysis of overburden and dam

分别作为工况 1~3,在某一次整体模型静、动力参数随机场建立后,分别输入三条地震波进行三种工况的计算,不同工况进行有限元计算时所对应的模型参数是相同的,这样可以同时分析在相同材料的空间差异性情况下,不同地震动带来的影响。

3 随机有限元计算结果分析

为了确定计算次数 N 是否足够,每次计算结束后,将计算的响应结果如坝顶水平加速度、永久变形求平均值,绘制出该平均值随模拟次数的变化曲线,当所求平均值与上一次误差小于某收敛阈值即满足下式时,则证明模拟结果已经达到稳定。

$$\left| \frac{\mu_i - \mu}{\mu} \right| \leq \epsilon \quad (17)$$

式中 μ_i 为第 i 次计算模拟均值。

图 7 为工况 3 地震响应均值变化曲线,取 $\epsilon = 0.1\%$ 。由图可见,经 73 次模拟可以使得计算响应达到稳定值,与传统蒙特卡罗配点法计算 500 多次的计算次数相比^[27-28],采用数论选点法进行配点优化大大提高了计算效率。下文将对 200 次模拟结果进行统计分析,并用样本去估算总体特性。

3.1 心墙应力与水平加速度分析

表 4 为心墙响应统计表,表中的应力值以拉为正、压为负。从表中可以看到,三种工况下心墙顶处第三主应力确定值的计算结果分别为 -98.47 , -71.05 , -90.91 kPa;当考虑材料空间变异性时,三种工况的均值分别为 -99.48 , -73.82 , -92.61 kPa,均值结果均大于确定值下的计算结果,最大值分别为 -120.35 , -86.01 , -112.24 kPa,

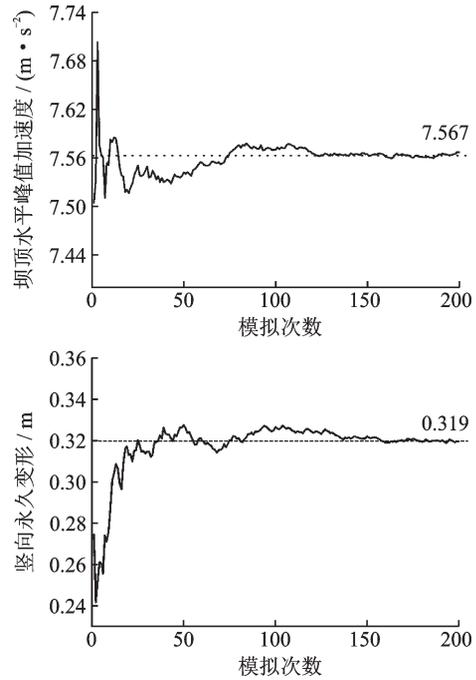


图 7 地震响应均值变化曲线

Fig. 7 Mean variation curve of seismic response

均比确定值计算结果至少增大了 20%。对结果进行 A-D 正态分布检验,结合统计值与相伴概率可以看出三种工况下考虑材料的空间变异性时,坝肩处心墙的第三主应力均服从正态分布。

从表 4 可以得到三种工况下心墙顶水平加速度峰值的确定值计算结果分别为 8.073 , 6.304 , 7.283 m/s²。当考虑材料的空间变异性和相关性后,三种工况下的均值分别为 8.185 , 6.502 , 7.528 m/s²,均大于确定值的计算结果,并且三种工况下的最大值分别为 8.804 , 7.155 , 8.056 m/s²,相较于确定值计算结果分别增大 9.1%,13.5% 和 10.6%。经过 A-D 正态分布检验可以得出心墙顶水平峰值加速度同样符合正态分布。

表 4 心墙响应分析统计表

Tab. 4 Statistical table of core wall response analysis

参数	心墙顶第三主应力/kPa			心墙顶水平加速度峰值/(m·s ⁻²)		
	1	2	3	1	2	3
确定值	-98.47	-71.05	-90.91	8.073	6.304	7.283
均值	-99.48	-73.82	-92.61	8.185	6.502	7.528
变异系数	-0.077	-0.056	-0.068	0.037	0.029	0.026
中位数	-99.05	-73.74	-92.75	8.212	6.478	7.523
最小值	-82.85	-64.52	-75.01	7.037	6.062	7.039
最大值	-120.35	-86.01	-112.24	8.804	7.155	8.056
A-D 统计值	0.321	0.715	0.591	0.372	0.886	0.591
相伴概率 p	0.529	0.061	0.121	0.377	0.073	0.192
95% 均值置信区间	[-100.55, -98.41]	[-74.46, -73.31]	[-93.48, -91.75]	[8.143, 8.227]	[6.475, 6.529]	[7.501, 7.556]

3.2 坝顶水平加速度分析

图8为考虑材料参数的空间变异性的坝顶水平加速度峰值概率分布图。虚线所示为计算参数取确定值的计算结果,三种工况分别为8.118, 6.455, 7.364 m/s²。实线所示为考虑材料参数的空间变异性的均值结果,三种工况分别为8.210, 6.609, 7.567 m/s²,各工况下确定值的计算结果均小于均值

结果。对比三种工况的变异系数,工况1最大为3.5%,比工况2和3呈现出更大的离散性。在图8中可以看到,虽然3种工况下加速度分布的大小不同,但是都呈现出相近的分布规律。图9为坝顶水平加速度峰值正态分布检验图,可以看到大多数数据点是集中于参照线附近且在95%置信带之间。对数据点进行A-D正态分布检验结果如表5所示, p 值均大于0.05,故数据结果皆服从于正态分布。

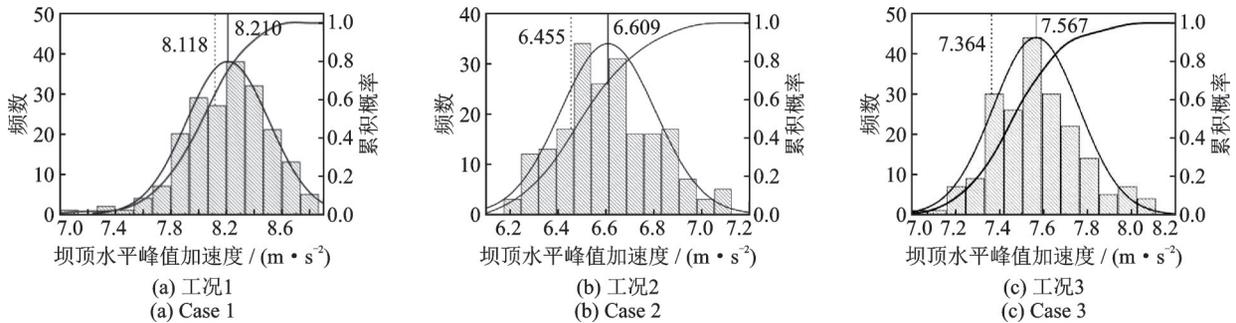


图8 坝顶水平峰值加速度概率分布

Fig. 8 Probability distribution of horizontal peak acceleration on dam crest

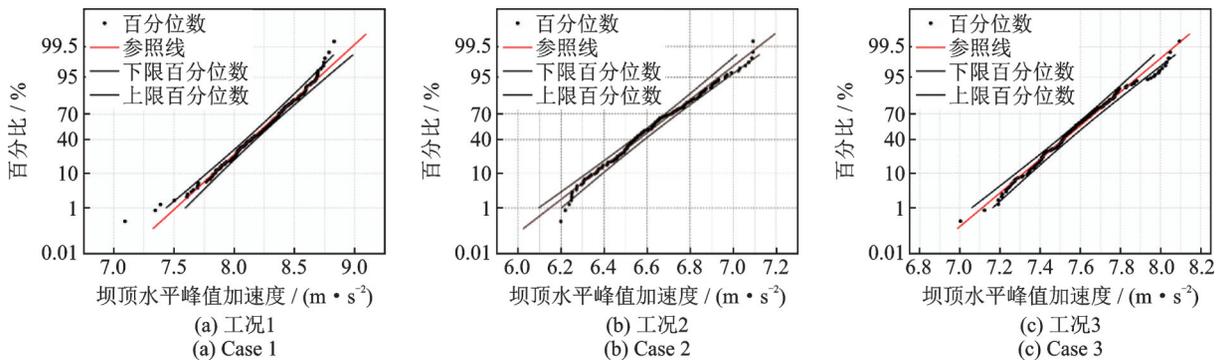


图9 坝顶水平峰值加速度正态分布检验

Fig. 9 Test of normal distribution of horizontal peak acceleration on dam crest

表5 坝顶水平峰值加速度响应统计表

Tab. 5 Statistical table of horizontal peak acceleration response of dam crest

工况	均值	变异系数	中位数	最大值	最小值	A-D统计值	相伴概率 p	95%均值置信区间
1	8.210	0.035	8.225	8.831	7.094	0.372	0.417	[8.168, 8.252]
2	6.609	0.029	6.585	7.192	6.199	0.658	0.085	[6.582, 6.637]
3	7.567	0.026	7.552	8.095	7.003	0.591	0.121	[7.539, 7.594]

注:表中加速度单位为m/s²。

图10为坝顶水平峰值加速度的含量图,可以看到三种工况下的最大值分别为8.831, 7.192, 8.095 m/s²,相较于确定值均增大了9%左右。增大率最大的为工况3,最小为工况2。与确定值相比,三种工况出现了不同的超越概率,最小出现在工况1为62%,最大为工况3达到了87%,即在实际工程地震响应分析中,当不考虑材料参数的空间变异性时,将有60%以上的概率会低估坝顶的水平加速度响应。通过三个工况之间的对比结果可

知,考虑材料参数的空间特性差异会使得坝体地震响应相比材料参数取确定值的结果有较大的超越概率,但在不同的工况即不同的地震波作用下,超越概率有较大不同。因此在实际工程中考虑多条地震波输入情况下研究坝体材料参数的空间变异性响应是很有必要的。

3.3 坝体竖向永久变形分析

图11为坝体竖向永久变形的概率分布图,三种

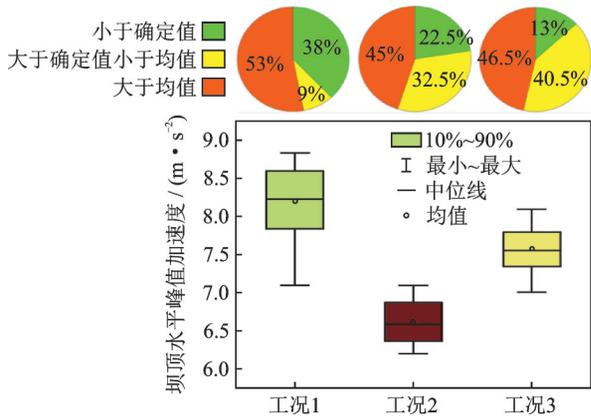


图 10 坝顶水平向峰值加速度含量图

Fig. 10 Horizontal peak acceleration content diagram of dam crest

工况下永久变形的确定值计算结果分别为 0.2908, 0.2593, 0.2985 m, 考虑材料参数的空间特性时计算结果的均值分别为 0.3162, 0.2799, 0.3195 m 皆大于确定值结果, 最大值分别为 0.5254, 0.4600, 0.5303 m, 增幅最大的为工况 1, 为 80.6%, 最小的为工况 2, 为 77.4%, 同时三种工况与确定值相比均有着 50% 以上的超越概率。与心墙顶及坝顶水平向峰值加速度相比, 永久变形的变异系数更大, 离散性更强。图 12 为竖向永久变形正态分布检验图, 可以看到结果数据与 45° 直线有较大的偏离, 有较多点在 95% 置信区间以外, 并且通过 A-D 正态分布检验 (如表 6 所示), 竖向永久变形并不符合正态分布。

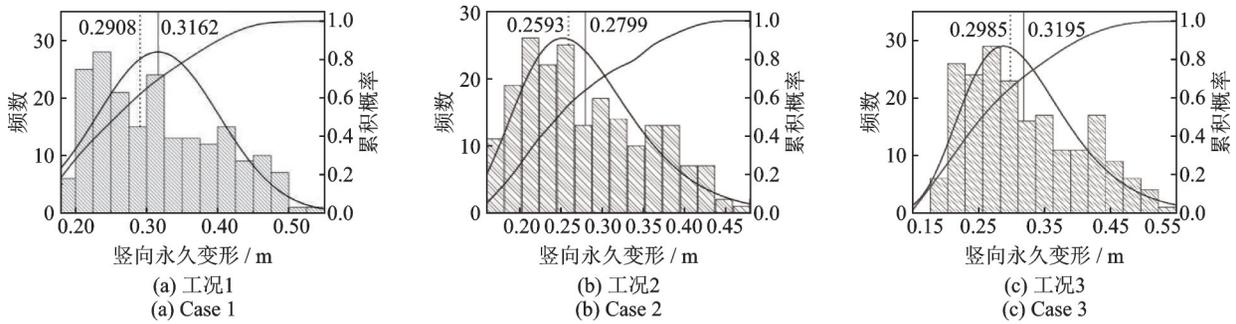


图 11 竖向永久变形概率分布图

Fig. 11 Vertical probability distribution of permanent deformation

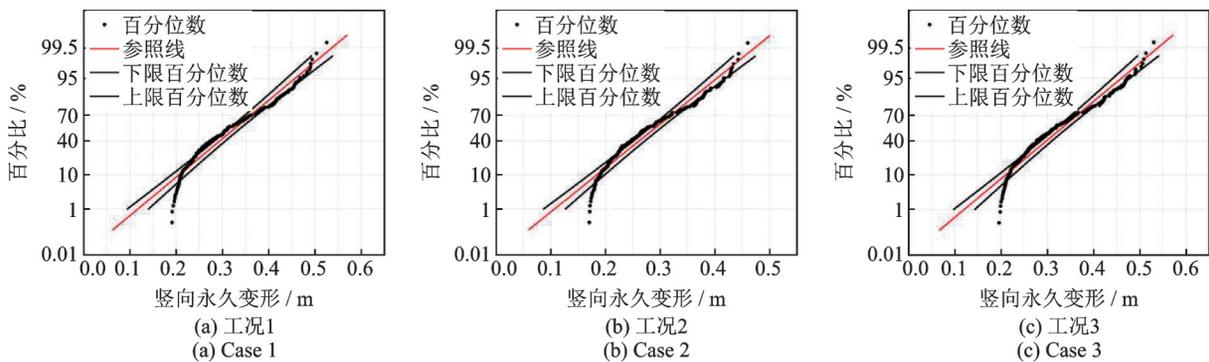


图 12 竖向永久变形正态分布检验

Fig. 12 Test of normal distribution of vertical permanent deformation

表 6 竖向永久变形统计表

Tab. 6 Statistics of vertical permanent deformation

工况	均值	变异系数	中位数	最大值	最小值	A-D 统计值	相伴概率 p	95% 均值置信区间
1	0.3162	0.271	0.3031	0.5254	0.1914	3.224	<0.05	[0.3045, 0.3284]
2	0.2799	0.267	0.2643	0.4600	0.1703	3.206	<0.05	[0.2698, 0.2907]
3	0.3195	0.268	0.3059	0.5303	0.1959	3.388	<0.05	[0.3077, 0.3317]

注:表中竖向永久变形单位为 m。

国内一些学者对于高土石坝基于永久变形的极限抗震能力和地震易损性进行研究时,多用坝顶震陷率作为地震变形的控制标准^[29-30],为了使不同随机有限元计算方法得出的大坝概率安全评价结果之间的比较更有意义,本研究对震陷率进行了等别划

分,如表 7 所示。按照表 7 的等别划分,确定值计算结果均处于第 II 等别,而从图 13 中可以看出 200 次模拟中有 40% 以上概率震陷率等别大于第 II 等别,达到第 III 甚至第 IV 等别,这就使得大坝危险等级显著提升,如果忽略材料参数的空间特性,将会低估大

表7 震陷率等别划分

Tab. 7 Classification of subsidence rate

等别	划分区间
I	震陷率 $\leq 0.2\%$
II	$0.2\% < \text{震陷率} \leq 0.3\%$
III	$0.3\% < \text{震陷率} \leq 3\%$
IV	震陷率 $> 4\%$

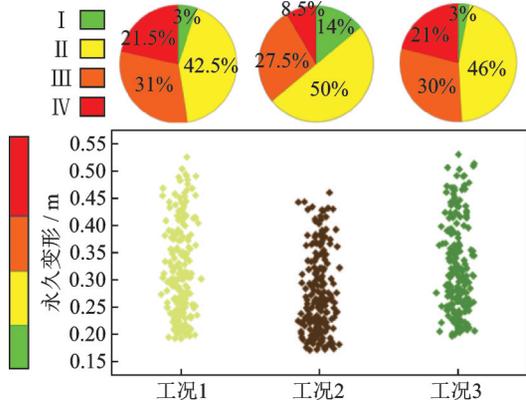


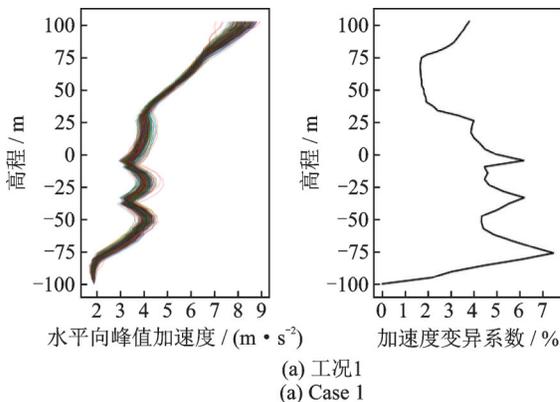
图13 坝顶震陷率含量图

Fig. 13 Content diagram of subsidence rate of dam crest

坝永久变形响应,对大坝的抗震安全评价将会产生较大误差。

3.4 覆盖层-坝体沿高度的水平峰值加速度分析

图14给出了中轴线水平峰值加速度及变异系数图。从图中可以看出,考虑材料参数的空间特性时,沿高度的水平峰值加速度覆盖层处的离散性明显大于坝体部位,并且两者之间的变化趋势呈现出明显不同的规律,坝体部位随着高度增大,加速度也在不断增加,呈近似线性变化,而覆盖层部位加速度随高度有增大也有减小,呈非线性变化。对三种工况进行对比可以发现,不同地震动下虽然变化的整体趋势具有一定的相似性,但是水平向峰值加速度沿高度的变化规律不同;同时通过表8可以看到不同地震动的坝顶峰值加速度放大倍数有着明显差异。故上述提出在考虑材料参数空间变异性的同时考虑多条地震动对响应的影响是很有必要的。



(a) 工况1
(a) Case 1

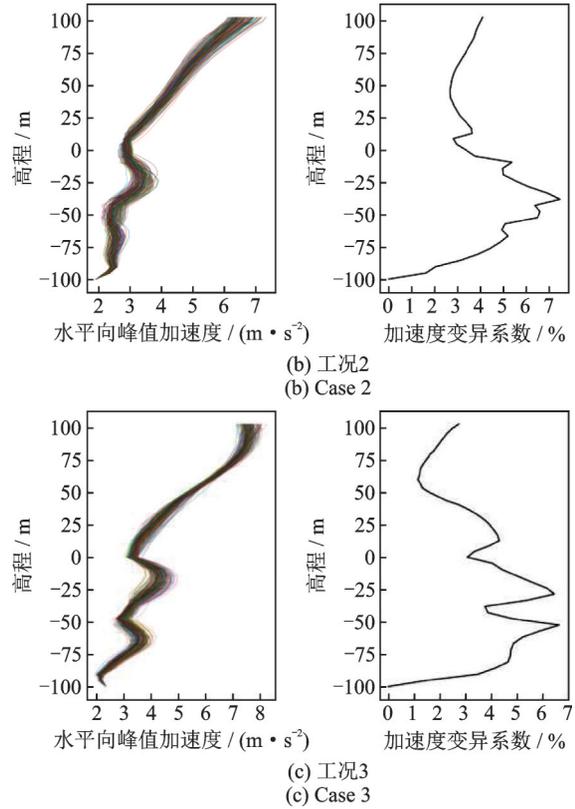


图14 中轴线水平峰值加速度及变异系数图

Fig. 14 Axis horizontal peak acceleration and coefficient of variation

表8 水平向峰值加速度及放大倍数

Tab. 8 Horizontal peak acceleration and magnification

工况	坝高/m	峰值加速度均值/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大倍数
1	0	3.683	0.92
	102.8	8.210	2.04
2	0	2.903	0.93
	102.8	6.609	2.11
3	0	3.312	0.80
	102.8	7.567	1.84

注:0 m表示坝底。

4 结论

本文提出了基于数论选点优化随机点集分布的空间随机场模拟方法,采用正态或对数正态分布函数考虑材料参数的空间变异性,采用高斯型自相关函数考虑材料参数的空间相关性,采用协方差分解生成随机参数库,实现了考虑坝体-覆盖层材料空间差异性及相关性的“非侵入式”随机有限元计算。以某实际工程为例,选取静力邓肯-张E-B本构模型和动力等效线性黏弹性本构模型中的敏感参数作为随机参数,分析沥青混凝土心墙坝坝顶、心墙顶水平向峰值加速度和坝体竖向永久变形的均值、变异系数

及95%的置信区间限值等统计规律及概率分布检验;分析了输入地震动强度对随机响应离散程度和相对于确定值的超越概率的影响。具体结论如下:

(1)与传统蒙特卡洛随机点生成方法相比,数论选点法可以实现对多维变量概率分布空间的全覆盖,在精度不受影响的前提下,大大减少有限元计算次数,显著提升多维随机空间模拟和随机有限元计算效率。

(2)在三种工况下的随机有限元计算结果中,地震响应的统计结果有40%~90%的概率会超出参数确定下的计算结果,这表示忽略材料的空间变异性可能导致低估大坝的地震响应:心墙顶处的第三主应力最大值超出确定性参数结果20%以上,坝顶水平峰值加速度最大值超出确定参数结果的9.9%,各地震工况下结果相比确定参数结果超越概率在62.5%~87%之间;心墙顶部峰值加速度最大值超出确定参数结果13.5%;竖向永久变形最大值超出确定参数结果的80.6%,各地震工况的超越概率均在50%以上。

(3)坝体和覆盖层材料参数的不确定性使得结构动力响应的结果发生离散,随机有限元计算的统计结果中坝顶和心墙顶水平加速度结果符合正态分布,竖向永久变形结果则不符合。对于覆盖层-坝体系统中轴线的水平向峰值加速度,覆盖层中轴线的变异系数最大为7.4%,心墙中轴线的变异系数最大为4.3%,这表明尽管同时考虑了覆盖层和坝体材料的空间随机性,但随机响应结果的离散仍是在覆盖层地基区域更为显著。

(4)不同地震工况下水平峰值加速度沿高度的变化规律有较大的区别,加速度放大倍数也有显著差异,说明地震动差异带来的影响也是不可忽略的,应同时考虑材料参数的空间变异性 and 地震动的随机性进行沥青混凝土心墙坝-覆盖层系统的地震响应分析,以得到更加符合实际情况的坝体响应结果和抗震安全评价结论。

参考文献:

- [1] 邹德高,余翔,余挺,等.深厚覆盖层上高土石坝动力稳定分析[J].水电与抽水蓄能,2020,6(1):22-27.
ZOU Degao, YU Xiang, YU Ting, et al. Study on the dynamic stability analysis method for high earth built on deep overburden [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, 6(1): 22-27.
- [2] 孔宪京,陈健云,邹德高.高坝抗震安全理论发展趋势研究[J].水力发电学报,2020,39(7):1-11.

- KONG Xianjing, CHEN Jianyun, ZOU Degao. Study on development trend of seismic safety theory for high dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(7): 1-11.
- [3] 刘升欢,宋志强,王飞,等.深厚覆盖层液化对场地卓越周期及土石坝地震响应影响研究[J].振动工程学报,2021,34(4):721-729.
LIU Shenghuan, SONG Zhiqiang, WANG Fei, et al. Influence of liquefaction of deep overburden on the site predominant period and seismic response of the earth-rock dam [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(4): 721-729.
- [4] 水工建筑物抗震设计标准:GB 521247—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
Standard for seismic design of hydraulic structures: GB 521247—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [5] 林威伟,钟登华,胡炜,等.基于随机森林算法的土石坝压实质量动态评价研究[J].水利学报,2018,49(8):945-955.
LIN Weiwei, ZHONG Denghua, HU Wei, et al. Study on dynamic evaluation of compaction quality of earth rock dam based on Random Forest [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(8): 945-955.
- [6] Cho S E. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties [J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, 2010, 136(7): 975-984.
- [7] 蒋水华,刘贤,黄劲松,等.考虑水力模型参数空间变异性土石坝边坡可靠度分析[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(4):939-951.
JIANG Shuihua, LIU Xian, HUANG Jinsong, et al. Reliability analysis of slope stability of embankment dams considering spatial variability of hydraulic model parameters [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(4): 939-951.
- [8] 王建娥,杨杰,程琳,等.考虑材料参数空间变异性的堆石坝非侵入式随机有限元研究[J].水资源与水工程学报,2019,30(3):200-207.
WANG Jiane, YANG Jie, CHENG Lin, et al. Study on the noninvasive stochastic finite element method of rockfill dam considering spatial variability of material parameters [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(3): 200-207.
- [9] Suchomel R, Masion D. Comparison of different probability methods for predicting stability of a slope in spatially variable c-soil [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(1): 132-140.
- [10] 杨鸽,朱晟.考虑堆石料空间变异性的土石坝地震反应随机有限元分析[J].岩土工程学报,2016,38(10):1822-1832.

- YANG Ge, ZHU Sheng. Seismic response of rockfill dams considering spatial variability of rockfill materials via random finite element method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (10) : 1822-1832.
- [11] 郭晴, 刘东海, 陈辉. 空间差异性下沥青混凝土心墙坝应力与变形的随机有限元分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(11):140-146.
GUO Qing, LIU Donghai, CHEN Hui. Stress and deformation of asphalt concrete core wall dam in consideration of spatial difference: stochastic finite element analysis[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(11): 140-146.
- [12] 陈建兵, 李杰. 结构随机响应概率密度演化分析的数论选点法[J]. 力学学报, 2006, 38(1):134-140.
CHEN Jianbing, Li Jie. Strategy of selecting points via number theoretical method in probability evolution analysis of stochastic response of structure[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38 (1):134-140.
- [13] Li J, Chen J. Stochastic Dynamics of Structures [M]. John Wiley & Sons, 2009.
- [14] 华罗庚, 王元. 数论在近似分析中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
HUA Luogeng, WANG Yuan. Application of Number Theory in Approximate Analysis[M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [15] 汪新槐. 多维数值积分的数论方法及其在结构可靠度分析中的应用[D]. 南京: 河海大学, 2005.
WANG Xinhuai. Number theoretical Method for numerical multiple integrals and the application in structural reliability analysis[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [16] 方开泰, 王元. 数论方法在统计中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
FANG Kaitai, WANG Yuan. Number-theoretic Methods in Statistics Chapman and Hall [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [17] 文德智, 卓仁鸿, 丁大杰, 等. 蒙特卡罗模拟中相关变量随机数序列的产生方法[J]. 物理学报, 2012, 61 (22): 26-33.
WEN Dezhi, ZHUO Renhong, Ding Dajie, et al. Generation method of random number sequence of related variables in Monte Carlo simulation [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(22): 26-33.
- [18] 杨正权, 赵剑明, 刘小生, 等. 超深厚覆盖层上土石坝动力分析边界处理方法研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(2): 138-143.
YANG Zhengquan, ZHAO Jianming, LIU Xiaosheng, et al. Study on boundary processing method for dynamic analysis of earth-rockfill dam on super-deep overburden layer [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (2): 138-143.
- [19] 董景刚. 土与结构接触面力学特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
Dong Jinggang. Study on mechanical properties of interface between soil and structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [20] 邹德高, 韩慧超, 孔宪京, 等. 近断层脉冲型地震动作用下面板堆石坝的动力响应[J]. 水利学报, 2017, 48 (1): 78-85.
ZOU Degao, HAN Huichao, KONG Xianjing, et al. Seismic response of a concrete-faced rockfill dam to near-fault pulse-like ground motions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(1): 78-85.
- [21] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究, 1996(2): 143-150.
SEHN Zhujiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading [J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(2): 143-150.
- [22] 吴长彬, 燕乔. 堆石料的邓肯 E-B 模型参数敏感性分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(8): 94-96.
WU Changbin, YAN Qiao. Sensitivity analysis of Duncan E-B model parameters for rockfill [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(8): 94-96.
- [23] 李炎隆, 李守义, 丁占峰, 等. 基于正交试验法的邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 873-879.
LI Yanlong, LI Shouyi, DING Zhanfeng, et al. The sensitivity analysis of Duncan-Chang E-B model parameters based on the orthogonal test method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 873-879.
- [24] 杨玉生, 刘小生, 赵剑明, 等. 邓肯 E-B 模型参数敏感性分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, 11 (2): 81-86.
YANG Yusheng, LIU Xiaosheng, ZHAO Jianming, et al. Parameter sensitivity analysis of Duncan E-B model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013, 11(2): 81-86.
- [25] 罗博华. 考虑覆盖层材料空间变异性的土石坝动力响应分析及预测[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
LUO Bohua. Dynamic analysis and prediction of dynamic response of earth-rock dam considering spatial variability of overburden material [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [26] 蒋水华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 508-518.
JIANG Shuihua, LI Dianqing, ZHOU Chuangbing, et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 508-518.

- [27] 杨鹤, Griffiths D V, 朱晟. 考虑堆石料空间变异性的土石坝坝坡地震稳定性随机有限元分析[J]. 地震工程学报, 2019, 41(4): 939-948.
YANG Ge, Griffiths D V, ZHU Sheng. Seismic slope stability analysis of earth-rockfill dams considering spatial variability of rockfill materials via random finite element method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 939-948.
- [28] Chen H, Liu D. Stochastic finite element analysis of rockfill dam considering spatial variability of dam material porosity [J]. Engineering Computations, 2019, 36(9): 2929-2959.
- [29] 靳聪聪, 迟世春, 聂章博. 基于地震变形易损性的高土石坝抗震安全分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 334-343.
JIN Congcong, CHI Shichun, NIE Zhangbo. Seismic safety analysis of high earth-rockfill dams based on seismic deformational fragility [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 334-343.
- [30] 庞锐, 孔宪京, 邹德高, 等. 基于MSA法的高心墙堆石坝地震沉降易损性分析[J]. 水利学报, 2017, 48(7): 866-873.
PANG Rui, KONG Xianjing, ZOU Degao, et al. Seismic subsidence fragility analysis of high CRFDs based on MSA [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(7): 866-873.

Research on seismic response of asphalt concrete core dam-overburden considering the spatial variability of material parameters

WANG Zong-kai, SONG Zhi-qiang, LIU Yun-he, WANG Fei

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The spatial variability of overburden and dam material parameters significantly affects the seismic response of asphalt concrete core dam-overburden system. This paper proposes a space random field simulation technology based on number theory selection, and the random point sets distribution optimization is realized by using number theory selection method. The spatial correlations of material parameters and the spatial variability of material parameters are considered using normal or lognormal distribution and Gaussian autocorrelation relationship, respectively. Random parameter library is generated by covariance decomposition in Python, and secondary script development is carried out for Abaqus finite element software. Based on the Monte Carlo method, the random field simulation and "non-invasive" random finite element calculation considering the spatial difference and correlation of dam-overburden material are realized. Taking an actual project as an example, the sensitive parameters in the static Duncan-Chang E-B constitutive model and the dynamic equivalent linear viscoelastic constitutive model are regarded as random parameters. The statistical law and probability distribution tests of the mean value, variation coefficient and 95% confidence interval limit value of the horizontal peak acceleration of the asphalt concrete core dam and the vertical permanent deformation of the dam are analyzed. The influence of ground motion intensity on discrete degree of random response and transcendence probability relative to determinate value is also analyzed. The result shows that the point selection method through number theory can significantly optimize the random point set distribution and improve computational efficiency. The randomness of material parameters will cause the seismic response of the dam to increase with a high probability, and the spatial difference of dam body and overburden materials has a greater impact on the peak horizontal acceleration of the top of the dam and core wall than on the permanent deformation. The statistical results of the seismic response of the dam do not necessarily conform to the normal or lognormal distribution. Ignoring the spatial variability of material parameters will cause an underestimation of the 50% to 90% probability of the seismic response of the asphalt concrete core dam-overburden system under different conditions and different indexes. The dispersion of the seismic response results of the overburden layer is greater than that of the dam body and core wall.

Key words: asphalt concrete core dam; seismic response; overburden; spatial variability; stochastic finite element

作者简介: 王宗凯(1997—),男,硕士研究生。电话:15353099793;E-mail:2200420084@stu.xaut.edu.cn。

通讯作者: 宋志强(1981—),男,教授,博士生导师。电话:15929975587;E-mail:zqsong@xaut.edu.cn。