

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201800952

抗拉强度空间变异性对重力坝地震开裂的影响分析

李泽发, 吴震宇*, 卢 祥, 裴 亮, 杨 哲

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘 要:由于施工质量不均匀和混凝土自身的非均质性,重力坝坝体混凝土强度具有空间变异性,这一特性会对大坝的抗震性能造成影响,而当前的重力坝地震动力分析中很少考虑混凝土强度参数的空间变异性。应用随机场理论构建大坝抗拉强度的空间变异随机场,采用中心点法离散随机场并构建自相关函数得到相关系数矩阵,对相关系数矩阵进行Cholesky分解和线性变换,结合独立标准正态分布样本矩阵生成相关对数正态分布样本矩阵,实现抗拉强度空间变异性的抽样模拟。考虑混凝土抗拉强度的空间变异性,采用混凝土塑性损伤模型对Koyna重力坝进行地震非线性动力分析,基于统计意义研究了坝体裂缝条数、裂缝深度、上游面裂缝分布范围和坝顶位移等动力响应特征。成果分析表明:考虑抗拉强度的空间变异性后,Koyna重力坝动力响应具有明显的离散性,且上游面裂缝条数增加后导致坝顶水平位移整体偏向下游,垂直位移整体上抬,残余位移增大;同时裂缝深度均值较均质材料情况增大,坝体震损程度总体加剧;Koyna重力坝实际观察到的裂缝位于计算得到的裂缝分布范围之内。对抗拉强度变异系数和水平向自相关距离的参数敏感性分析表明,坝体动力响应的均值和变异性随变异系数的增大而增大,但对抗拉强度的水平自相关距离变化不敏感。

关键词:重力坝;空间变异性;地震开裂;动力分析

中图分类号:TV312

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)04-0116-09

Influence of Spatial Variability of Tensile Strength on Seismic Cracking of Gravity Dam

LI Zefa, WU Zhenyu*, LU Xiang, PEI Liang, YANG Zhe

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., College of Water Resources & Hydropower, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Since the uneven construction quality and the inherent heterogeneity of concrete, the material properties of the gravity dam have spatial variability. The spatial variability of the concrete strength parameters will affect the seismic performance of dams, while it is rarely considered in the current seismic dynamic analysis of gravity dams. The random field theory was employed to generate the spatial variation random field of concrete tensile strength. The Midpoint method was used to discretize the random field and then Cholesky decomposition and linear transformation were performed on the generated correlation coefficient matrix. A series of independent standard normal distribution sample matrices were utilized to generate corresponding correlation lognormal distribution sample matrices to simulate the spatial variability of tensile strength. Considering the spatial variability of concrete tensile strength, the seismic nonlinear dynamic analysis of Koyna gravity dam was carried out by using Concrete Damaged Plasticity model. Based on the statistical significance, the dynamic response characteristics of the dam, such as the number of cracks, the depth of cracks, the distribution range of cracks on the upstream surface and the displacement of the dam crest were studied. The results showed that, after considering the spatial variability of tensile strength, the dynamic response of the Koyna gravity dam has obvious dispersion, and the additional cracks on the upstream causes the horizontal displacement of the dam crest to be downstream, the vertical displacement to be uplifted, and the residual displacement to be increased. Meanwhile, the mean depth of crack is larger than that of homogeneous assumption, and the extent of dam damage is generally aggravated. The actual observed cracks in the Koyna gravity dam are within the calculated crack distribution. The parameter sensitivity analysis showed that the mean value and variability of the dynamic response of the dam increases with the increase of the coefficient of variation of tensile strength, while they are not sensitive to the horizontal autocorrelation distance of tensile strength.

Key words: gravity dam; spatial variability; seismic cracking; dynamic analysis

收稿日期:2018-08-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401907)

作者简介:李泽发(1994—),男,硕士生。研究方向:水工结构工程及基础工程。E-mail: lzfvij@qq.com

*通信联系人 E-mail: scuwzy@qq.com

网络出版时间:2019-06-17 17:34:34

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190615.2120.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

中国西部地区水能资源丰富,西部地区又是中国的主要地震区,地震烈度和频度都很高。在西部地区修建大坝,坝址选择难以规避地震影响,抗震问题是大坝安全的控制因素。全球进入了新的地震活跃期,中国西部近年来也发生了多次强震,因此,水库大坝抗震安全问题的社会关注度越来越高,高坝抗震设计和安全评价研究的迫切性和重要性越来越突出。混凝土重力坝(以下简称重力坝)是中国西部水电工程常用的拦河大坝坝型。重力坝遭遇地震时发生整体破坏失稳的可能性相对较小,比较常见的震害是坝体开裂(如印度的Koyna重力坝^[1])。裂缝(特别是贯穿性裂缝)的存在对大坝结构安全及运行功能会产生不同程度的损害和影响,因此,有必要对地震动作用下的坝体裂缝开展情况进行分析。

混凝土是一种由砂石骨料和水泥浆搅拌混合而成的非均质材料。在修建重力坝的过程中,一般采用分段、分块方式浇筑混凝土。由于浇筑仓面大、浇筑施工质量不均匀,以及混凝土自身的非均质性,因此,混凝土材料的物理力学性质具有明显的空间变异性,即对于同类混凝土,其在坝体不同位置处的物理力学参数是不一样的。混凝土材料参数的空间变异性对重力坝的动力特性和裂缝开展会产生显著影响。钟红等^[2]在金安桥重力坝地震开裂分析中模拟了混凝土材料参数的空间随机分布,但没有考虑材料参数的空间相关性,即相邻位置的材料参数具有某种程度的相关性,如果不考虑材料参数的空间相关性,会导致相邻位置的材料参数出现较大差异的不合理情况。随机场理论^[3-4]可以很好地描述材料参数的空间变异性,并在岩土工程领域得到广泛应用,如Qi^[5]、Cho^[6]、陈朝晖^[7]和Liu^[8]等研究工作。

作者引入随机场理论用于描述重力坝坝体混凝土材料参数的空间变异性,以遭受过强震的印度Koyna重力坝为例,通过大量计算结果的统计分析研究了混凝土抗拉强度的空间变异性对重力坝地震损伤开裂的影响,并与坝体实际开裂情况进行了对比,最后对描述抗拉强度空间变异性的相关参数进行了敏感性分析。

1 考虑材料参数空间变异性的重力坝地震动力损伤分析方法

1.1 重力坝地震动力损伤分析方法

采用有限元时程分析法计算重力坝结构的动力响应。在地面运动加速度 $\ddot{u}_g$ 的作用下,坝-地基系统的基本运动方程(水库动水压力对结构动力响应的影响通过上游坝面的附加质量考虑,附加质量采用Westergaard公式^[9]计算)为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -MJ\ddot{u}_g \quad (1)$$

式中, M 为含上游坝面附加质量的总体质量矩阵, C 为总体阻尼矩阵, K 为总体刚度矩阵, J 为各项地震动分量的指示矩阵, $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 和 u 分别为节点的加速度列阵、速度列阵、位移列阵。对于结构阻尼,采用Rayleigh阻尼,其表达式如下:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

式中, α 和 β 为Rayleigh阻尼系数,可根据下式计算:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2\omega_1\omega_2\xi}{\omega_1 + \omega_2}, \\ \beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, ξ 为结构阻尼比, ω_1 和 ω_2 分别为结构的第1阶和第2阶自振频率。

混凝土塑性损伤模型(concrete damaged plasticity model, CDP)^[10-11]采用损伤因子和刚度折减因子对结构损伤程度进行量化,可以较好地模拟单向加载、循环加载和动态加载条件下混凝土结构的力学响应,以及静动力荷载作用下混凝土损伤开裂的发生和发展过程,在重力坝地震动力损伤分析中得到广泛应用^[12-13]。

CDP模型将结构总应变 ε 分解为弹性应变和塑性应变两部分,即:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (4)$$

则结构的应力应变关系和损伤演化过程可表示为:

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} = E_0(\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (5)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为有效应力; E_0 为无损伤情况下的材料弹性模量; D 为损伤因子,可表示如下:

$$D = 1 - (1 - s_t d_t)(1 - s_c d_c) \quad (6)$$

式中: d_t 和 d_c 分别为单轴拉、压刚度折减因子; s_t 和 s_c 分别为与应力方向有关的刚度恢复应力状态的函数,定义为:

$$\begin{cases} s_t = 1 - w_t r(\bar{\sigma}), 0 \leq w_t \leq 1; \\ s_c = 1 - w_c r(\bar{\sigma}), 0 \leq w_c \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$r(\bar{\sigma}) = \begin{cases} 0, \bar{\sigma} = 0; \\ \frac{\left(\sum_{i=1}^3 \bar{\sigma}_i\right)}{\left(\sum_{i=1}^3 |\bar{\sigma}_i|\right)}, \bar{\sigma} \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: w_t 和 w_c 为刚度恢复权重因子,本文取 $w_t = 0$ 和 $w_c = 1$; $r(\bar{\sigma})$ 为多轴应力权重因子,为主应力的函数。

1.2 材料参数空间变异性的模拟技术

根据随机场理论^[3-4], 利用混凝土材料参数的概率密度函数(或概率分布函数)和自相关函数即可构造各向异性材料参数随机场。当前随机场离散的主要方法有中心点法^[4, 14-15]、积分点法^[4]、形函数法^[4]等。中心点法以单元中心点处的材料参数代表整个单元的材料参数, 该方法使用简便, 便于构建坝体材料参数的空间相关系数矩阵, 因而得到广泛应用。中心点法的主要缺点是当单元尺寸较大时, 会夸大坝体材料参数的空间变异性, 为减轻该不利影响, 单元尺寸应小于自相关距离^[5, 16]。由于混凝土材料参数不能为负值, 因此, 假定材料参数为服从对数正态分布的随机变量, 其概率密度函数为:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2}, & x > 0; \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, λ 和 ζ 分别为随机变量 X 的对数 $\ln X$ 的均值和标准差。

已知随机变量 X 的均值 μ 和标准差 σ , 可按式(10)确定 λ 和 ζ :

$$\begin{cases} \lambda = \ln \frac{\mu}{\sqrt{1 + \sigma^2/\mu^2}}, \\ \zeta = \sqrt{\ln(1 + \sigma^2/\mu^2)} \end{cases} \quad (10)$$

采用指数型自相关函数^[17]描述各单元中心点处材料参数之间的空间相关性, 即:

$$\rho_{ij} = \exp \left[- \left(\frac{|x_i - x_j|}{L_h} + \frac{|y_i - y_j|}{L_v} \right) \right] \quad (11)$$

式中: ρ_{ij} 为单元 i 和单元 j 中心点处材料参数的相关系数; (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 分别为单元 i 和单元 j 中心点的坐标; L_h 和 L_v 分别为材料参数的水平和垂直自相关距离, 自相关距离越大, 两点间材料参数的相关性越强, 当 $L_h \rightarrow +\infty$ 和 $L_v \rightarrow +\infty$ 时, 随机场内任意两点间的材料参数完全相关, 即对应于均质材料的情况。

由上述随机场的离散方法可知, 离散后的随机场实际上是1组相关随机变量, 因此, 对这组相关随机变量进行抽样模拟, 也就实现了对材料参数随机场(即材料参数空间变异性)的模拟。采用如下方法对材料参数随机场进行抽样模拟。

首先根据各单元中心点坐标和自相关函数确定随机场离散后得到的1组相关随机变量的相关系数矩阵如下:

$$\rho_{n \times n} = [\rho_{11}, \rho_{12}, \dots, \rho_{1i}, \dots, \rho_{1n}] \quad (12)$$

然后利用Cholesky分解^[18]将相关系数矩阵 $\rho_{n \times n}$ 分

解为一个上三角矩阵和一个下三角矩阵:

$$\rho_{n \times n} = B_{n \times n}^T B_{n \times n} \quad (13)$$

式中, 矩阵 $B_{n \times n}$ 为上三角矩阵。

设 $A_{m \times n}$ 为 n 维独立标准正态分布随机变量的 m 个抽样序列组成的样本矩阵, 则 n 维相关标准正态分布随机变量的样本矩阵 $D_{m \times n}$ 可以通过如下的线性变换得到:

$$D_{m \times n} = A_{m \times n} B_{n \times n} \quad (14)$$

而 n 维相关正态分布随机变量的样本矩阵 $Y_{m \times n}$ 为:

$$Y_{m \times n} = \sigma D_{m \times n} + \mu I_{m \times n} \quad (15)$$

式中, $I_{m \times n}$ 为元素全部等于1的 $m \times n$ 矩阵。

则 n 维相关对数正态分布随机变量的样本矩阵 $X_{m \times n}$ 为:

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, $X_{m \times n}$ 的元素 $X_{ij} = e^{Y_{ij}}$ 。

2 算例分析

2.1 有限元模型

Koyna重力坝作为重力坝抗震研究的典型算例, 是少数几座遭受强震作用并发生开裂破坏的重力坝之一, 该重力坝在1967年遭遇6.5级强震作用, 地震造成坝体上下游面出现多处裂缝, 其中下游坝面折坡点附近高程处为贯穿性裂缝。以该重力坝作为算例, 对坝体混凝土抗拉强度的空间变异性进行模拟, 对地震动作用下坝体的动力损伤过程和裂缝分布进行计算并统计分析, 与坝体实际裂缝分布情况进行了对比。

选取Koyna重力坝典型坝体断面建立坝与地基系统2维有限元模型。坝体断面尺寸与地基模拟范围见图1(a), 坝体和地基采用四节点平面应力减缩积分单元进行离散, 水库动水压力对坝体动力反应的影响采用位于上游坝面的自定义附加质量单元模拟。为满足坝体混凝土材料参数的空间变异性和裂缝模拟的精度, 坝体共离散为8 623个单元, 坝体单元尺寸为0.5~0.7 m, 远小于材料参数的自相关距离(≥ 3 m), 坝体有限元模型见图1(b)。为模拟地震动作用下重力坝的损伤开裂情况, 坝体混凝土采用CDP模型, 而地基采用线弹性模型, 动力计算时不计入地基质量的影响, 坝与地基材料参数见表1。模拟过程中考虑了重力、静水压力和动水压力作用, 并施加了图2所示的Koyna地震波。

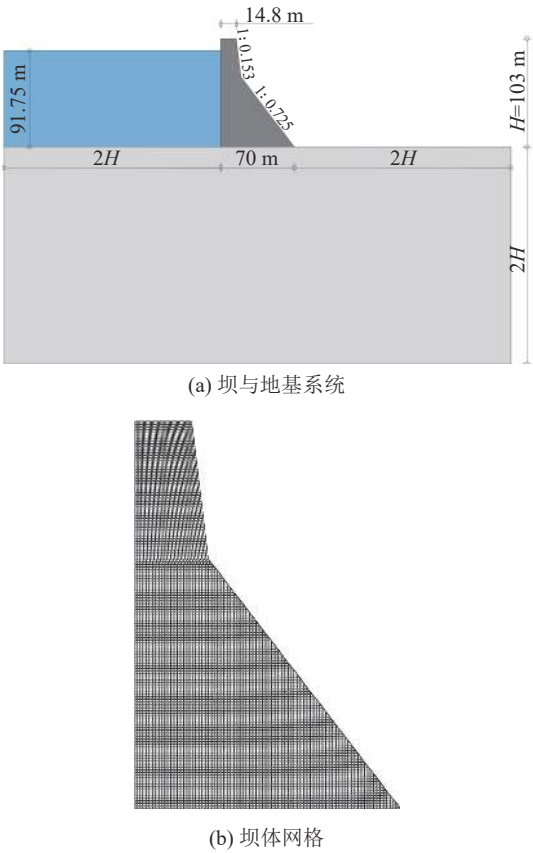


图 1 Koyna重力坝与地基模拟范围与坝体有限元网格
Fig. 1 Modeled zone for Koyna dam–foundation system and finite element mesh for dam

表 1 Koyna重力坝与地基材料参数

Tab. 1 Material parameters for Koyna dam and foundation

材料	物理参数	取值
坝体混凝土	弹性模量/Pa	$3.102\ 7\times10^{10}$
	泊松比	0.2
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 643
	抗拉强度均值/Pa	2.9×10^6
	抗拉强度变异系数	0.2
	抗压强度/Pa	2.41×10^7
	膨胀角/(°)	36.31
	水平向自相关距离 L_h/m	10
	垂直向自相关距离 L_v/m	3
基岩	弹性模量/Pa	1.6×10^{10}
	泊松比	0.25
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0

2.2 坝体混凝土抗拉强度空间变异性的模拟

强震作用下重力坝的开裂行为主要为拉裂, 考虑了对坝体力学行为影响较大的混凝土抗拉强度的空间变异性。采用第1.2节所述的方法对混凝土抗拉强度的空间变异性进行模拟。由于缺少统计资料, 假定抗拉强度的均值等于其设计值; 不同强度等级混

凝土强度的变异系数(coefficient of variance, CV)介于0.14~0.23之间^[19], 本文取0.2; 水平向自相关距离取 $L_h=10\text{ m}$ ^[15]; 对于同一浇筑层, 可以认为混凝土材料特性具有高度相关性, 由于混凝土坝浇筑层厚一般为2~3 m, 因此, 取垂直自相关距离 $L_v=3\text{ m}$ 。采用表1中的材料参数通过100组独立标准正态分布随机抽样序列模拟了100个坝体混凝土抗拉强度随机场。图3显示了3个典型的抗拉强度随机场。

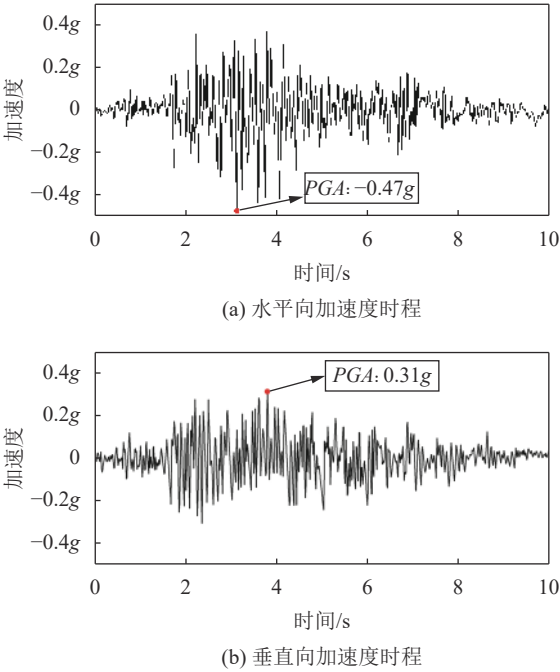


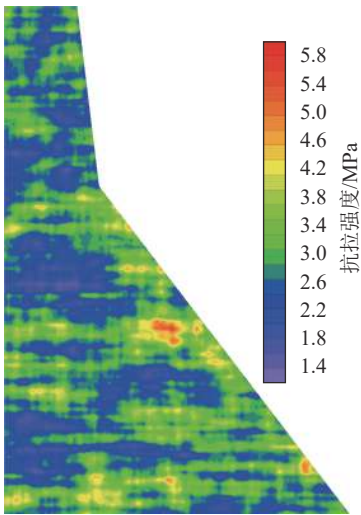
图 2 Koyna地震加速度时程

Fig. 2 Acceleration time histories of Koyna earthquake

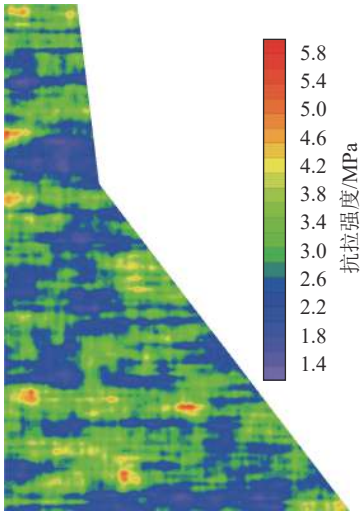
如图3所示, 坝体剖面中不同位置处的混凝土抗拉强度是各不相同的, 具有明显的空间变异性。但是相邻位置处混凝土抗拉强度的量值差异较小, 随着两点之间距离的增大, 抗拉强度量值的差异相应增大, 这体现了材料参数的空间相关性。受材料参数的空间变异性和相关性影响, 坝体剖面中一些区域的混凝土抗拉强度的量值较高, 而另一些区域的量值较低, 从图3(a)~(c)3组材料场的差异可见这些高于均值和低于均值的区域是随机分布的。这与实际工程中观察到的因环境因素和施工因素影响导致的坝体不同部位混凝土质量差异相符。图3所示的模拟结果表明基于随机场理论的材料参数空间变异性模拟方法是可行的。

2.3 混凝土抗拉强度空间变异性对坝体非线性动力响应的影响

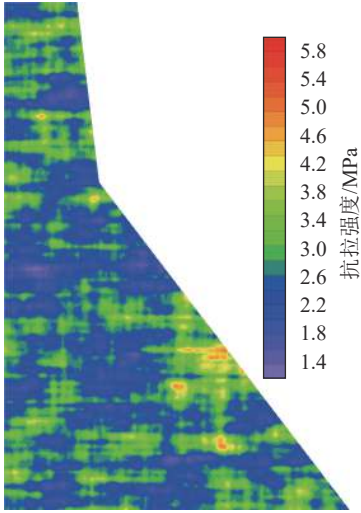
为研究抗拉强度空间变异性对坝体损伤开裂的影响, 对均质材料和考虑材料参数空间变异性(100个抗拉强度随机场)情况下的坝体动力损伤开



(a) 抗拉强度随机场1



(b) 抗拉强度随机场2



(c) 抗拉强度随机场3

图 3 混凝土抗拉强度空间变异性的典型模拟结果
Fig. 3 Typical simulation results of spatial variability of concrete tensile strength

裂过程进行了模拟,并对坝体上下游面及坝踵裂缝的深度和分布范围,以及坝顶位移进行了统计分析。
图4为均质材料情况下坝体损伤开裂过程,图5为与图3中3个抗拉强度随机场对应的坝体损伤开裂过程(坝体裂缝的发生和扩展主要集中在地震动时程的4~7 s段,因此,选取4.0、4.3、4.5和7.0 s这4个时刻展示坝体损伤开裂过程)。

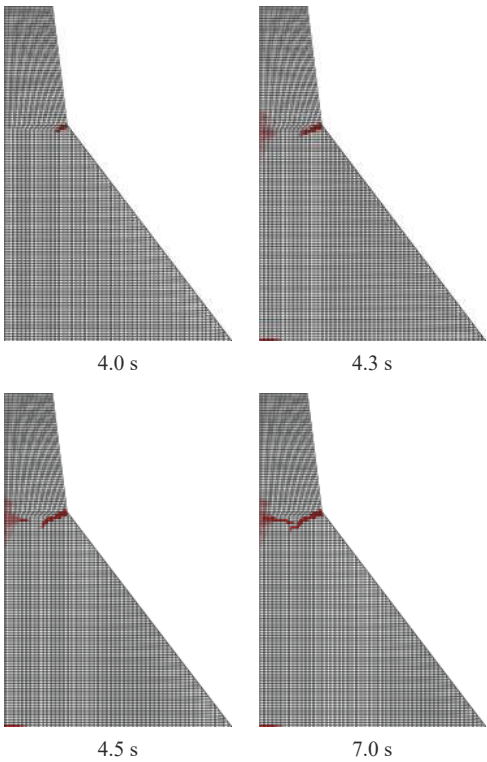


图 4 均质情况下Koyna坝的损伤开裂过程
Fig. 4 Cracking process of Koyna dam under homogeneous hypothesis

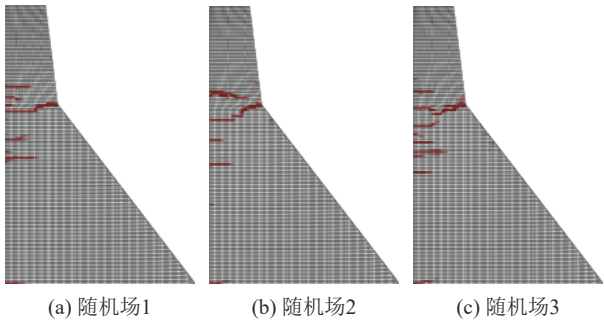


图 5 抗拉强度的空间变异性下Koyna坝的损伤开裂过程
Fig. 5 Cracking process of Koyna dam considering spatial variability of tensile strength

由图4可见,对于均质材料情况,坝体首先在下
游坝面折坡点处出现裂缝,然后分别在坝踵处和与
下游坝面折坡点相对的上游坝面出现裂缝。之后,坝
踵处裂缝沿坝基面向下游扩展,最终深度约4.37 m,
约为坝底宽度的6%;上游坝面裂缝和下游坝面折坡

点处裂缝同时向坝体内部扩展,最终交汇贯穿坝颈。如图5所示,考虑抗拉强度空间变异性的坝体损伤开裂过程与均质材料情况基本一致,但坝体损伤开裂程度加重,主要表现为上游坝面裂缝条数增加。

图6为均质材料和考虑抗拉强度空间变异性的坝顶位移计算结果(为了确定坝顶残余位移,动力计算在地震动作用结束后延续了5 s)。由于地震动作用的前4 s坝体动力响应基本在弹性范围之内,均质材料和考虑抗拉强度空间变异性的坝顶位移时程曲线基本重合。之后,均质材料和考虑抗拉强度空间变异性的坝顶位移时程曲线出现明显差异。相对于均质材料情况,考虑抗拉强度的空间变异性后,坝顶水平位移整体偏向下游,垂直位移整体上抬。均质材料的坝顶水平残余位移为-4.85 mm(负号表示偏向上游)、垂直残余位移为1.61 mm(正号表示上抬);考虑抗拉强度空间变异性的坝顶水平残余位移为-2.15~10.05 mm,垂直残余位移为2.33~6.97 mm。两种情况坝顶位移响应差异较大的原因是考虑抗拉强度空间变异性的坝体损伤开裂比均质材料情况严重。

由图5和6可见,考虑抗拉强度的空间变异性后坝体地震动力响应(裂缝条数、深度、分布范围及坝顶位移)的离散性较大。表2为100个抗拉强度随机场对应的坝体裂缝深度、裂缝条数、裂缝分布范围及坝顶残余位移的统计特征。从计算结果的均值来看,考虑抗拉强度空间变异性的坝体裂缝条数、裂缝深度和坝顶垂直残余位移均明显大于均质材料情况;除上游面裂缝高度上限的变异性较小外,其余计算结果的变异性较大,其中坝踵裂缝深度、上游面裂缝最小深度和坝顶水平残余位移的变异系数分别为0.62、0.51和0.71,其他计算结果的变异系数在0.20左右。

此外,震后观察表明,Koyna重力坝的下游面仅在折坡处存在一条裂缝,而在上游坝面中部存在多条裂缝,这与图5中考虑抗拉强度空间变异性的计算

结果较为一致;从裂缝分布范围来看,Koyna坝实际观察到的裂缝主要分布于建基面以上约51~67 m范围内,见图7(a)^[20];而计算得到的坝体裂缝分布范围为30.11 m(裂缝高度下限的5%分位值)~76.60 m(裂缝高度上限的95%分位值),如图7所示,实际观察到的裂缝位于计算得到的裂缝分布范围之内。

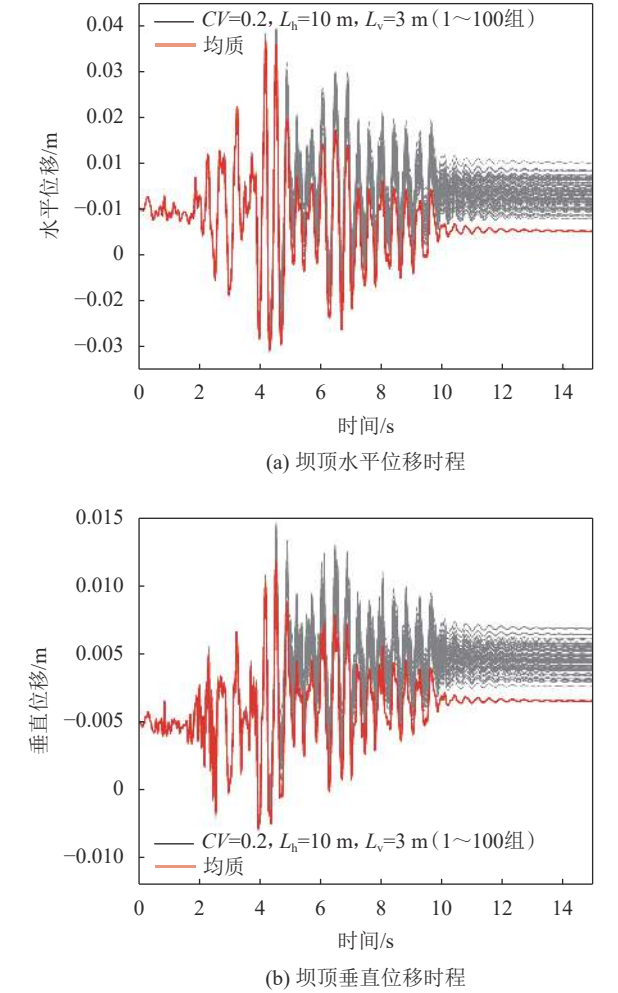


图6 抗拉强度空间变异性对坝顶位移时程的影响
Fig. 6 Influence of spatial variability of tensile strength on time history of dam crest displacement

表2 坝体裂缝分布及坝顶残余位移的统计特征

Tab. 2 Statistical characteristics of cracks and residual displacement of dam crest										
材料分布假设	统计特征	坝踵深度/m	下游折坡深度/m	上游面裂缝分布情况					残余位移/mm	
				裂缝条数	高度上限/m	高度下限/m	最大深度/m	最小深度/m	水平	垂直
均质	—	4.37	9.64	1	64.25	—	10.20	—	-4.85	1.61
	均值	4.09	10.61	6.14	72.18	42.11	12.05	2.48	3.57	4.71
	标准差	2.52	2.22	1.17	3.11	7.56	2.23	1.28	2.76	0.88
	变异系数	0.62	0.21	0.19	0.04	0.18	0.19	0.51	0.71	0.19
	5%分位值	0.70	6.95	4.32	67.49	30.11	8.59	1.33	-0.90	3.31
	95%分位值	7.77	13.56	7.99	76.60	54.57	16.12	4.97	7.63	6.15

注: 5%分位值和95%分位值通过拟合相应的经验概率分布函数得到。

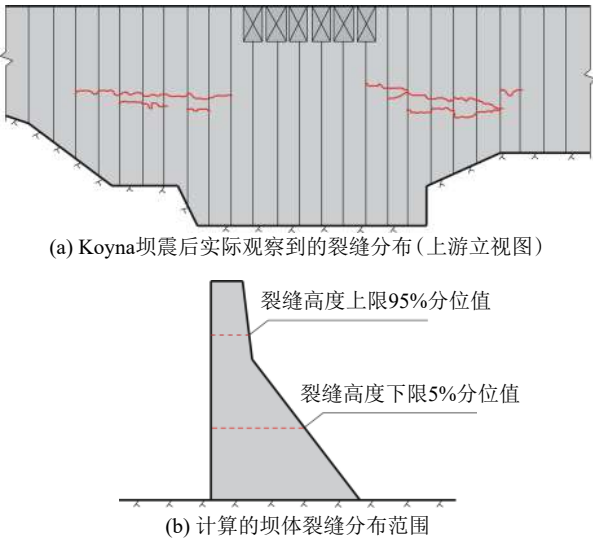


图 7 Koyna坝震后实际观测裂缝分布与考虑抗拉强度空间变异性模拟裂缝分布

Fig. 7 Observed cracks and simulated distribution range of cracks considering spatial variability of tensile strength for Koyna dam

2.4 抗拉强度空间变异性参数敏感性分析

1) 变异系数敏感性分析

变异系数是参数离散程度的量化指标(变异系数越大说明参数越离散)。为研究混凝土抗拉强度的变异系数对重力坝抗震性能的影响,在第2.3节模拟结果基础上,针对抗拉强度变异系数为0.1、0.2和0.3(其余材料参数见表1)的情况,分别生成100个抗拉强度随机场,进行坝体地震动力分析,相应计算结果的统计特征见表3。

表 3 不同抗拉强度变异系数对应的坝体裂缝分布及坝顶残余位移统计特征

Tab. 3 Statistical characteristics of cracks and residual displacement of dam crest corresponding to variation coefficients of tensile strength

变异系数 CV	统计特征	坝踵深度/m	下游折坡深度/m	上游面裂缝分布情况					残余位移/mm	
				裂缝条数	高度上限/m	高度下限/m	最大深度/m	最小深度/m	水平	垂直
0.1	均值	4.27	10.84	5.53	71.29	47.03	11.42	2.39	2.09	4.18
	标准差	1.54	2.16	0.99	2.35	5.48	1.71	1.10	1.99	0.56
	变异系数	0.36	0.20	0.18	0.03	0.12	0.15	0.46	0.95	0.13
	5%分位值	1.05	8.05	4.31	67.56	38.57	8.81	1.37	-0.70	3.52
	95%分位值	7.04	13.53	7.39	75.18	55.07	14.00	4.53	5.44	5.30
0.2	均值	4.09	10.61	6.14	72.18	42.11	12.05	2.48	3.57	4.71
	标准差	2.52	2.22	1.17	3.11	7.56	2.23	1.28	2.76	0.88
	变异系数	0.62	0.21	0.19	0.04	0.18	0.19	0.51	0.71	0.19
	5%分位值	0.70	6.95	4.32	67.49	30.11	8.59	1.33	-0.90	3.31
	95%分位值	7.77	13.56	7.99	76.60	54.57	16.12	4.97	7.63	6.15
0.3	均值	4.51	10.60	6.62	73.11	39.06	12.32	2.61	4.83	5.25
	标准差	3.17	2.37	1.35	3.88	8.77	2.55	1.38	4.02	1.28
	变异系数	0.70	0.22	0.20	0.05	0.22	0.21	0.53	0.83	0.24
	5%分位值	0.43	6.86	4.54	67.36	24.18	8.58	1.30	-1.55	3.37
	95%分位值	10.18	14.11	8.86	78.83	53.90	17.42	5.79	23.74	7.16

由表3结果表明,当坝体混凝土抗拉强度变异系数由低到高变化时,坝体裂缝和残余位移等非线性动力响应的离散性总体增大,表现为裂缝深度、裂缝条数、裂缝分布范围和残余位移变异系数增大,95%分位值增大,5%分位值减小,同时坝体动力响应的均值增大,坝体震损程度相比均质材料情况加剧。由表3可见:坝踵裂缝深度、上游面裂缝条数和坝顶残余位移对抗拉强度变异系数的变化较为敏感,抗拉强度变异系数由0.1变化为0.3时,坝踵裂缝深度变异系数由0.36增加至0.7,裂缝深度由7.04 m增加至10.18 m(95%分位值);上游面裂缝条数由平均5.53条增加至6.62条,其95%分位值由7.39条增加至8.86条;坝顶水平残余位移由5.44 mm增加至23.74 mm(95%分位值)。上游面裂缝分布范围和上游面裂缝深度对抗拉强度变异系数敏感程度其次,当抗拉强度变异系数由0.1增加至0.3时,上游面裂缝分布范围由38.57 m(5%分位值)~75.18 m(95%分位值)扩大为24.18 m(5%分位值)~78.83 m(95%分位值)。此外,下游折坡裂缝深度对抗拉强度变异系数变化不敏感。

2) 水平自相关距离敏感性分析

自相关距离是混凝土材料空间相关性的重要参数。由于混凝土坝浇筑层厚一般为2~3 m,同一浇筑层,可以认为混凝土材料特性具有高度相关性,本文研究了坝体动力响应受水平自相关距离变化的敏感程度。取水平自相关距离为3(水平向与垂直向相等)、10和70 m(水平自相关距离等于可能最大浇筑仓面),分别生成100个抗拉强度随机场,进行地震动

表 4 不同水平自相关距离对应的坝体裂缝分布及坝顶残余位移统计特征

Tab. 4 Statistical characteristics of cracks and residual displacement of dam crest corresponding to different horizontal autocorrelation distances

水平相关距离/m	统计特征	坝踵深度/m	下游折坡深度/m	上游面裂缝分布情况					残余位移/mm	
				裂缝条数	高度上限/m	高度下限/m	最大深度/m	最小深度/m	水平	垂直
3	均值	4.10	10.44	5.96	71.96	43.44	11.84	2.15	2.88	4.37
	标准差	2.42	2.17	1.15	2.77	6.97	2.29	0.85	2.83	0.83
	变异系数	0.59	0.21	0.19	0.04	0.16	0.19	0.40	0.98	0.19
	5%分位值	0.70	7.17	4.32	66.87	32.06	8.61	1.33	-2.21	3.00
	95%分位值	7.84	13.78	8.02	76.03	55.03	15.65	5.16	7.04	6.03
10	均值	4.09	10.61	6.14	72.18	42.11	12.05	2.48	3.57	4.71
	标准差	2.52	2.22	1.17	3.11	7.56	2.23	1.28	2.76	0.88
	变异系数	0.62	0.21	0.19	0.04	0.18	0.19	0.51	0.71	0.19
	5%分位值	0.70	6.95	4.32	67.49	30.11	8.59	1.33	-0.90	3.31
	95%分位值	7.77	13.56	7.99	76.60	54.57	16.12	4.97	7.63	6.15
70	均值	4.33	10.51	5.90	72.09	40.95	12.49	2.68	3.74	4.86
	标准差	2.59	1.94	1.18	3.13	8.36	2.69	1.29	2.33	0.71
	变异系数	0.60	0.19	0.20	0.04	0.20	0.21	0.48	0.62	0.15
	5%分位值	0.68	7.41	4.25	67.06	26.41	9.31	1.35	-0.22	3.79
	95%分位值	7.98	13.34	7.80	76.86	53.10	16.06	5.24	7.80	6.22

力分析得到了不同水平自相关距离下坝体的裂缝发展情况,统计结果如表4所示。

由表4结果表明,在抗拉强度水平自相关距离由3 m到70 m逐渐变大过程中,坝体动力响应对抗拉强度相关距离变化不敏感。其中,坝顶水平残余位移变异系数由0.98降为0.62,垂直残余位移变异系数由0.19降为0.15,离散性有所减弱,这是由于水平自相关距离增大后混凝土不同位置抗拉强度的相关性有所提高。但坝体裂缝发展总体上不敏感,主要表现为:水平自相关距离增大时上下游面及坝踵裂缝深度、裂缝条数和裂缝范围统计特征变幅小,大部分仅为3%~10%;其次是水平相关距离在3 m增大至70 m过程中,坝体裂缝发展没有呈现一致的规律性,裂缝深度、裂缝条数和裂缝范围有小幅波动,如上游面裂缝条数均值由5.96条($L_h=3\text{ m}$)增加至6.14条($L_h=10\text{ m}$)再减少为5.90条($L_h=70\text{ m}$)。

3 结 论

将随机场理论用于模拟重力坝坝体混凝土材料参数的空间变异性,采用混凝土塑性损伤本构模型和有限元动力时程分析,通过大量计算结果的统计分析研究了混凝土抗拉强度的空间变异性对Koyna重力坝地震损伤开裂的影响,并对抗拉强度空间变异性相关参数进行了敏感性分析,得到以下主要结论:

1)考虑混凝土抗拉强度空间变异性后,Koyna重

力坝坝体动力响应具有明显的离散性,同时从计算结果的均值来看,坝体裂缝深度、裂缝条数、裂缝分布范围及坝顶残余位移均明显大于均质材料情况,坝体震损程度加剧。此外,Koyna重力坝实际观察到的裂缝位于本文计算得到的裂缝分布范围之内。

2)考虑抗拉强度空间变异性后,由于上游面裂缝条数增多和裂缝深度增大,坝顶水平位移整体偏向下游,垂直位移整体上抬,残余位移增大,坝顶水平残余位移的均值为3.57 mm(偏向下游),垂直残余位移的均值为4.71 mm(上抬)。

3)坝体地震动力响应对抗拉强度变异系数的变化较为敏感。当抗拉强度的变异系数增大后,坝体裂缝深度、裂缝条数、上游面裂缝分布范围和坝顶残余位移的均值和变异性都相应增大。坝体动力响应对抗拉强度的水平自相关距离不敏感。

4)以Koyna重力坝为例的研究表明,混凝土抗拉强度的空间变异性会增大重力坝坝体的震损程度和裂缝分布的离散性,对结构抗震不利。因此,在重力坝抗震设计中需要考虑材料参数空间变异性的影响,同时在大坝施工时须严格控制施工质量,保证混凝土质量均匀。

参考文献:

[1] Mridha S, Maity D. Experimental investigation on nonlinear dynamic response of concrete gravity dam-reservoir system[J]. *Engineering Structures*, 2014, 80: 289–297.
[2] Zhong Hong, Li Xiaoyan, Lin Gao. Analyses of failure modes-based seismic fragility of gravity dams[J]. *Journal of*

- Dalian University of Technology, 2012, 52(1): 60–65. [钟红, 李晓燕, 林皋. 基于破坏形态的重力坝地震易损性研究[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(1): 60–65.]
- [3] Vanmarcke E. Random Fields: *Analysis and synthesis*[M]. Singapore: World Scientific, 2010.
- [4] Van der Have R. Random fields for non-linear finite element analysis of reinforced concrete[D]. Delft: Delft University of Technology, 2015.
- [5] Qi X H, Li D Q. Effect of spatial variability of shear strength parameters on critical slip surfaces of slopes[J]. *Engineering Geology*, 2018, 239: 41–49.
- [6] Cho S E. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(7): 975–984.
- [7] Chen Zhaohui, Lei Jian, Huang Jinghua, et al. Finite element limit analysis of slope stability considering spatial variability of soil strengths[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(6): 985–993. [陈朝晖, 雷坚, 黄景华, 等. 考虑参数空间变异性的边坡稳定可靠性有限元极限分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 985–993.]
- [8] Liu Y, Shields M D. A direct simulation method and lower-bound estimation for a class of gamma random fields with applications in modelling material properties[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2017, 47: 16–25.
- [9] Altunisik A C, Sesli H. Dynamic response of concrete gravity dams using different water modelling approaches: Westergaard, lagrange and euler[J]. *Computers and Concrete*, 2015, 16(3): 429–448.
- [10] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1989, 25(3): 299–329.
- [11] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892–900.
- [12] Zhang S, Wang G, Yu X. Seismic cracking analysis of concrete gravity dams with initial cracks using the extended finite element method[J]. *Engineering Structures*, 2013, 56(6): 528–543.
- [13] Long Yuchuan, Zhang Chuhan, Xu Yanjie. Nonlinear seismic analyses of a high gravity dam with and without the presence of reinforcement[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(10): 2486–2494.
- [14] Hariri-Ardebili M A, Seyed-Kolbadi S M, Saouma V E, et al. Random finite element method for the seismic analysis of gravity dams[J]. *Engineering Structures*, 2018, 171: 405–420.
- [15] Tang Xinwei, Zhou Yuande, Zhang Chuhan, et al. Study on the heterogeneity of concrete and its failure behavior using the equivalent probabilistic model[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(4): 402–413.
- [16] Hicks M A, Spencer W A. Influence of heterogeneity on the reliability and failure of a long 3D slope[J]. *Computers & Geotechnics*, 2010, 37(7): 948–955.
- [17] Wu Zhenjun, Wang Shuilin, Ge Xiurun. Slope reliability analysis by random FEM under constraint random field[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 3086–3092. [吴振君, 王水林, 葛修润. 约束随机场下的边坡可靠度随机有限元分析方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 3086–3092.]
- [18] Wen Dezhi, Zhuo Renhong, Ding Dajie, et al. Generation of correlated pseudorandom variables in Monte Carlo simulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(22): 514–518. [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): 514–518.]
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [20] Guo Shenshan, Chen Houqun, Li Deyu, et al. Seismic damage and failure analysis of gravity dam and foundation system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(11): 1352–1358. [郭胜山, 陈厚群, 李德玉, 等. 重力坝与坝基体系地震损伤破坏分析[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1352–1358.]

(编辑 张 琼)

引用格式: Li Zefa, Wu Zhenyu, Lu Xiang, et al. Influence of spatial variability of tensile strength on seismic cracking of gravity dam[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(4): 116–124. [李泽发, 吴震宇, 卢祥, 等. 抗拉强度空间变异性对重力坝地震开裂的影响分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 116–124.]