

DOI: 10.11779/CJGE201903014

基于变形控制标准的高土石坝地震可靠度分析

吕小龙^{1, 2}, 迟世春^{*1, 2}

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学工程抗震研究所, 建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于可靠度分析的设计方法是科学定量地研究和保证岩土工程安全性的重要手段之一。通过定量考察土石坝工程中的不确定性因素, 综合评估地震失效概率, 可为高土石坝抗震设计和风险评估提供参考。以坝顶震陷率作为地震安全控制指标, 提出了同时考虑地震和筑坝料参数不确定性的土石坝地震可靠度分析方法。首先, 采用地震烈度作为地震危险性的宏观衡量尺度, 通过引入地震烈度概率模型, 将基于概率烈度的地震动峰值作为地震强度因子, 调整规范谱人工地震波的幅值进行动力有限元计算。然后, 采用适用于处理小样本和非线性问题的高斯过程响应面法, 建立筑坝料参数与坝顶震陷率之间的非线性映射关系, 结合蒙特卡罗法计算高土石坝地震失效概率。最后, 以紫坪铺面板堆石坝为例, 应用该方法考察了设计基准期内的地震失效概率。

关键词: 土石坝; 地震可靠度; 高斯过程响应面; 紫坪铺面板堆石坝

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2019)03 - 0519 - 07

作者简介: 吕小龙(1989 -), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 从事高土石坝抗震研究工作。E-mail: lvxiaolong@mail.dlut.edu.cn.

Seismic reliability analysis of high earth-rockfill dams based on deformation control criteria

LÜ Xiao-long^{1, 2}, CHI Shi-chun^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The reliability-based design (RBD) is one of the most crucial measures to study and guarantee geotechnical engineering safety. Through quantitative analysis of uncertainty in earth-rockfill dam engineering, the failure probability can be evaluated and may provide a reference basis for the seismic performance design and safety risk assessment. By selecting the crest seismic settlement ratio as the seismic safety index, the seismic reliability analysis of high earth-rockfill dams, which incorporates the uncertainty of earthquakes and dam material parameters, is proposed. First, based on the seismic intensity probability model, the seismic acceleration corresponding to the earthquake intensity occurrence probability is used as the earthquake intensity factor. The artificially generated seismic waves are adjusted for finite element calculations. Then, the Gaussian process regression (GPR) model, which is capable of solving the highly nonlinear regression problem with small samples, is used to establish the nonlinear mapping relation between material parameters and crest settlement ratio. The Monte-Carlo simulation method is employed to calculate seismic failure probability. For verification, the proposed method is employed to calculate the seismic failure probability of Zipingpu concrete face rockfill dam.

Key words: earth-rockfill dam; seismic reliability; Gauss process response surface; Zipingpu CFRD

0 引言

随着水资源开发的需要和国家能源战略的推进, 中国水利水电工程建设进入快速发展阶段。土石坝由于工程经济、施工快速以及对地质适应能力强等优点得到了大力发展。目前, 一批 200~300 m 级的高土石坝正在或即将开工建设。这些高坝多位于地震频发的西部地区, 一旦失事, 将造成不可承受的损失。将风险概率理念引入高土石坝地震安全评价中, 考虑地

震动和筑坝料参数不确定性的影响, 用可靠指标度量高土石坝抗震安全性十分必要^[1-4]。

随着现代筑坝技术的进步, 高土石坝的设计施工正从传统的承载力控制理念向变形控制转变^[5-6]。地震

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379029); 国家重点研发计划项目(2016YFB0201001)

收稿日期: 2018 - 01 - 31

*通讯作者 (E-mail: schchi@dlut.edu.cn)

作用下,坝顶震陷是土石坝的主要震害形式之一,且坝顶震陷率 δ (坝顶震陷量与坝高的比值)容易在地震记录中查到。因此,采用坝顶震陷率作为抗震安全控制指标,具有代表性和可操作性。

国内学者对高土石坝抗震安全问题已进行了许多有意义的探索。陈生水等^[7]和赵剑明等^[8]进行了高土石坝极限抗震能力研究,并初步建议了相应的抗震安全控制标准。王笃波等^[9-10]基于坝顶震陷率破损评价指标,分别施加不同地震峰值加速度进行土石坝地震易损性分析。孔宪京等^[11-12]采用增量动力分析法,考虑地震动输入的不确定性,提出了高面板堆石坝抗震性能评价方法。杨鸽等^[13]考虑筑坝料参数的不确定性,将随机场模拟技术与有限元结合,分析了堆石料参数不确定性对大坝地震响应的影响。目前,在高土石坝地震失效风险分析中,同时考虑地震和筑坝料参数不确定性的研究还较少。

受地震机制、传播途径、场地条件的影响,地震发生的时间、地点、强度都存在严重的不确定性。中国采用地震烈度作为地震强度指标,本文利用坝址的地震危险性分析成果,将基于概率烈度对应的地震动峰值作为地震强度因子。根据《水电工程水工建筑物抗震设计规范》^[14]的标准反应谱,人工合成地震动加速度时程,然后将人工模拟地震波调整至相应的地震强度水平作为动力分析的输入。为考虑堆石料参数不确定性的影响,采用蒙特卡罗法计算高土石坝地震失效概率。然而,对于失效概率较小的事件,蒙特卡罗法要求抽样次数很大。由于高土石坝动力有限元分析计算成本较高,本文采用适用于处理小样本和非线性问题的高斯过程响应面法^[15-16]建立堆石料参数与坝顶震陷之间的非线性映射关系,可有效提高计算效率。最后,以紫坪铺面板堆石坝为例,应用上述方法考察了设计基准期内的地震失效概率。

1 基于变形控制标准的高土石坝地震可靠度分析框架

在中国,地震区划采用地震烈度作为地震强度指标。为充分利用现有的地震危险性分析成果,在进行高土石坝地震可靠度分析时,可建立用地震烈度表示的失效概率模型:

$$p_f = \sum_j p_f[\delta(\mathbf{X}) > \delta_{\text{cri}} | I_j] \cdot p(I_j) \quad (1)$$

式中 I_j 为地震烈度, $j=1, 2, \dots, 12$; $p(I_j)$ 是坝址区发生烈度为 I_j 地震的概率,可参考具体工程地震安全性评价报告; $p_f[\delta(\mathbf{X}) > \delta_{\text{cri}} | I_j]$ 是土石坝在地震烈度 I_j 时的失效概率; δ 是坝顶震陷率; δ_{cri} 是抗震安全控制指标,取 0.6%^[7]; \mathbf{X} 是具有不确定性的筑坝料

参数。

1.1 坝址地震烈度概率模型

土石坝工程地震危险性评价一般可根据坝址的基本烈度估算地震发生概率。目前,地震工程学界普遍认为,50年设计基准期内最大地震烈度的概率分布符合极值III型^[17-18],其概率分布函数为

$$F_{\text{III}}(I) = \exp\left[-\left(\frac{\omega - I}{\omega - \varepsilon}\right)^K\right] \quad (2)$$

式中 ω 是地震烈度上限值,取为 12; ε 是众值烈度,比基本烈度低 1.5 度; K 是形状系数,采用分位值法确定, $K=8.577$ 。

已知 50 年内的烈度概率分布函数,则任意 t 年内的烈度概率分布函数为

$$F_t(I) = [F_{\text{III}}(I)]^{t/50} = \exp\left[-\frac{t}{50}\left(\frac{\omega - I}{\omega - \varepsilon}\right)^K\right] \quad (3)$$

《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》^[19]规定,对于 1 级~3 级主要建筑物结构的设计使用年限应采用 100 年。对于设计基准期 $t=100$ a 的高土石坝,地震烈度的概率分布函数为

$$F_t(I) = \exp\left[-2\left(\frac{\omega - I}{\omega - \varepsilon}\right)^K\right] \quad (4)$$

地震烈度 I 的发生概率可用下式计算:

$$p(I) = F_t(I+1) - F_t(I) \quad (5)$$

地震烈度是对地震灾害的综合评定,烈度与峰值加速度之间并没有一一对应的关系。通过对大量地震资料的研究表明^[20],在统计意义上坝址的地面峰值加速度 $a(\text{cm/s}^2)$ 与地震烈度 I 满足如下统计关系:

$$a = 10^{(I \lg 2 - 0.01)} \quad (6)$$

1.2 地震烈度 I_j 时高土石坝失效概率计算

运用蒙特卡罗法,根据筑坝料参数的统计特征进行抽样,结合静、动力有限元计算结果,计算失效概率。假设样本容量为 N ,其中第 k 个样本为 \mathbf{X}_k ,则发生地震烈度 I_j 时,高土石坝的失效概率为

$$p_f[\delta(\mathbf{X}) > \delta_{\text{cri}} | I_j] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N G(\mathbf{X}_k | I_j) \quad (7)$$

式中, $G(\cdot)$ 是土石坝失效与否的指示函数,即

$$G(\mathbf{X}_k | I_j) = \begin{cases} 1 & (\delta(\mathbf{X}_k) > \delta_{\text{cri}}) \\ 0 & (\delta(\mathbf{X}_k) < \delta_{\text{cri}}) \end{cases} \quad (8)$$

对于失效概率较小的事件,蒙特卡罗法要求抽样次数很大。由于高土石坝动力有限元分析的计算成本较高,本文采用泛化能力强,适用于处理小样本、非线性问题的高斯过程响应面法^[15-16]建立堆石料参数与坝顶震陷率之间的非线性映射关系,可以有效提高计算效率。

2 计算流程

图1给出了高土石坝地震失效风险评估流程。主要包括坝址地震风险评估模块和地震作用下高土石坝失效概率评估模块,最后通过式(1)将地震的不确定性和筑坝料参数的不确定性耦合起来,综合评估土石坝的地震失效概率。

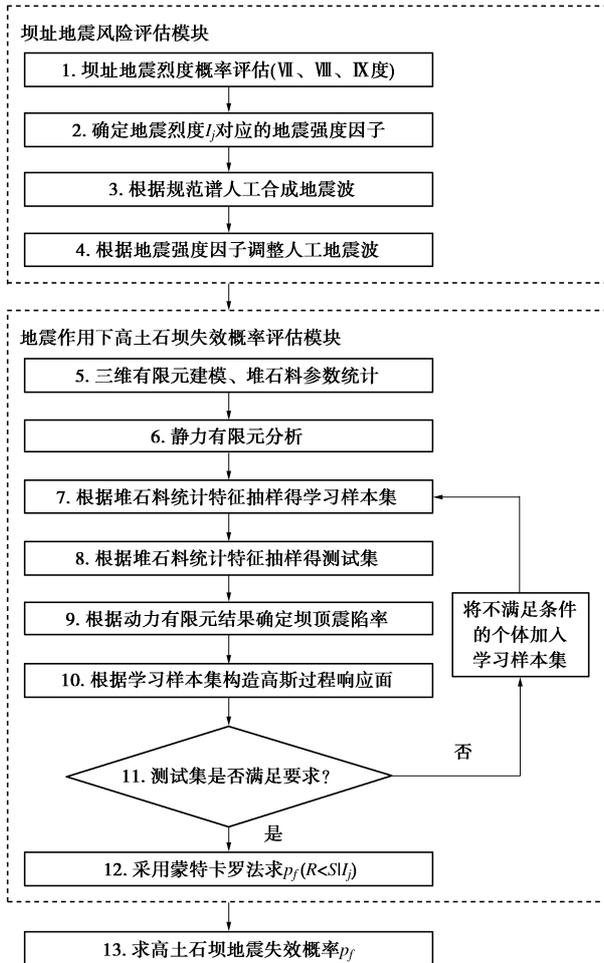


图1 土石坝地震失效风险评估流程

Fig. 1 Implementation procedure of evaluation of seismic failure probability of earth-rockfill dams

具体实现步骤如下:①参考地震安全性评价报告,确定坝址区基本烈度,根据式(5)确定地震烈度 I_j 的发生概率 $p(I_j)$;②根据式(6)确定地震烈度 I_j 对应的地震强度因子;③根据《水电工程水工建筑物抗震设计规范》^[4]的标准反应谱,人工合成地震动加速度时程;④将人工模拟地震波调整到相应的地震强度水平作为动力分析输入;⑤对具体土石坝工程进行三维有限元建模,并收集统计筑坝料参数;⑥进行土石坝静力有限元分析,获取结构的初始应力场;⑦根据堆石料统计特征抽样得学习样本集;⑧根据堆石料统计特征,随机抽取 $N_{\text{test}} = 20$ 个样本组成测试集;⑨对上述学习样本集和测试集进行动力有限元分析,确定坝

顶震陷率;⑩根据学习样本集和确定性有限元分析得到的坝顶震陷率构造高斯过程响应面,建立堆石料参数与坝顶震陷率之间的映射关系;⑪通过测试集的收敛条件判断是否需要更新高斯过程响应面。若不满足收敛条件,则将不满足条件的个体加入学习样本集,返回步骤⑦,更新高斯过程响应面;若满足收敛条件,则转至步骤⑫;⑫根据堆石料参数的统计特征,随机抽取 $N = 10^7$ 个样本,结合构造的高斯过程响应面,采用式(7)计算地震烈度 I_j 时土石坝失效概率;⑬根据式(1)计算土石坝地震失效概率。

第11步的收敛判别条件:高斯过程(GPs)^[15-16]是在高斯随机过程和贝叶斯学习理论上发展起来的一种具有概率预测意义的机器学习方法。与人工神经网络(ANN)、径向基函数(RBF)、支持向量机(SVM)相比,高斯过程模型不仅能给出预测变量的均值 μ_δ ,还能给出预测结果的标准差 σ_δ 。本文以测试样本有限元分析得到的坝顶震陷率 δ 是否能够落在置信水平为95%的置信区间 $[\mu_\delta - 2\sigma_\delta, \mu_\delta + 2\sigma_\delta]$ 作为判别条件。若响应面预测失败,则将该样本加入学习样本集,重新构造高斯过程响应面。通过不断迭代,实现响应面的动态更新,使响应面更有效反映堆石料参数与坝顶震陷率之间的映射关系。

3 工程算例

本节采用提出的高土石坝地震失效风险评估方法,考察紫坪铺面板堆石坝设计基准期内的地震失效概率。

3.1 有限元模型

紫坪铺面板堆石坝最大坝高156 m,坝顶宽度12 m,上游坝坡1:1.4,下游坝坡二级马道以下1:1.4,以上1:1.7。根据设计资料,建立三维有限元模型见图2,共划分7614个单元,总结点数为8278个,坝基结点三向位移全部约束。填筑完成后,蓄水至正常蓄水位EL.877.0 m。

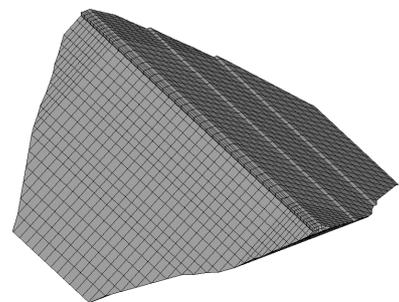


图2 紫坪铺面板堆石坝有限元模型

Fig. 2 FEM meshes of Zipingpu CFRD

3.2 坝址地震风险评估

紫坪铺大坝坝址区地震基本烈度为VII度,按VIII度地震设防。《水电工程水工建筑物抗震设计规范》^[4]

适用于设计烈度为VI、VII、VIII、IX度的碾压式土石坝。鉴于VI度设防的土石坝，地震作用往往不属于工程设计的控制作用，可不进行抗震计算，采取适当抗震措施即可。因此，对于烈度 I ~ VI 的地震， $p_f[\delta(X) > \delta_{crit}] = 0$ 。根据式 (5)，发生烈度 X ~ XII 地震的概率极低， $p(I_j) \approx 0$ ，且规范中的数值分析方法对于烈度 X ~ XII 的地震是否完全适用仍然存疑。因此，本文将工程上重点关注的 VII、VIII、IX 作为潜在地震烈度的划分。根据式 (5) 计算的坝址地震烈度概率见表 1。

表 1 坝址发生烈度 I_j 地震的概率

地震烈度 I_j	VII	VIII	IX
$p(I_j)$	15.94%	2.80%	0.26%

采用《水电工程水工建筑物抗震设计规范》^[14] 规定的标准反应谱，生成人工地震波，时程曲线见图 3。根据式 (6) 确定的地震强度因子，调整每条人工地震波幅值后，作为动力有限元分析的顺河向输入，同时取水平向峰值的 2/3 作为竖向输入。

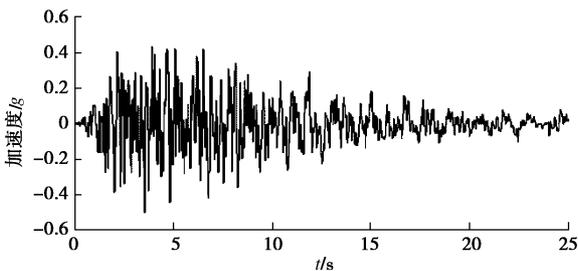


图 3 人工合成地震动加速度时程

Fig. 3 Artificially generated seismic waves

3.3 本构模型与堆石料参数统计

堆石体静力计算采用邓肯 E-B 模型^[21]，公式如下：

$$\left. \begin{aligned} E_t &= K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left(1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right)^2 \\ B_t &= K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \end{aligned} \right\} (9)$$

式中 E_t 为弹性模量； K 为切线模量系数； n 为切线模量指数； p_a 为单位大气压； R_f 为破坏比； c 为凝聚力，对于堆石料， $c = 0$ ； φ 为内摩擦角， $\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3 / p_a)$ ； σ_1 和 σ_3 分别为大、小主应力。 B_t 为体积模量； K_b 为体积模量系数； m 为体积模量系数。本文采用朱晟等^[22] 反演所得模型参数见表 2。

表 2 紫坪铺坝料 E-B 模型参数

坝料	ρ_d	φ_0	$\Delta\varphi$	K	n	R_f	K_b	m
主堆石	2.16	55.39	10.60	1120	0.32	0.75	490	0.120
次堆石	2.15	55.39	10.60	1033	0.38	0.71	338	0.030
垫层料	2.30	57.51	10.65	1274	0.44	0.84	1260	-0.026
过渡料	2.25	57.63	11.44	1153	0.38	0.75	1085	-0.089

动力分析采用等效线性黏弹性模型^[21]，永久变形分析采用等价结点力法和沈珠江模型。沈珠江模型将残余体应变和残余剪应变表示为振次、动剪应变和应力水平的函数：

$$\varepsilon_{vr} = c_{vr} \lg(1 + N) \quad (10)$$

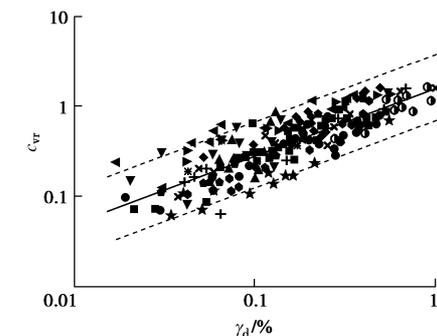
$$\gamma_r = c_{dr} \lg(1 + N) \quad (11)$$

$$c_{vr} = c_1 \gamma_d^{c_2} \exp(-c_3 S_1^2) \quad (12)$$

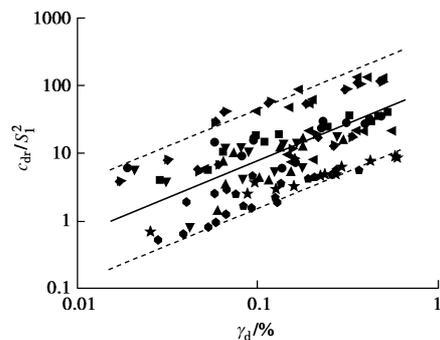
$$c_{dr} = c_4 \gamma_d^{c_5} S_1^2 \quad (13)$$

式中 $\varepsilon_{vr}, \gamma_r$ 为残余体应变和残余剪应变； N 为等效振动次数； c_{vr}, c_{dr} 分别为残余体应变系数和残余剪应变系数； γ_d 为动剪应变幅值； S_1 为震前静应力水平； c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 为模型参数。若不计 S_1 对 c_{vr} 的影响， $c_3 = 0$ 。

堆石料来自不同料场，母岩性质和沉积条件差异较大，模型参数具有不确定性。获取特定工程堆石料模型参数的统计特性需开展大量室内动三轴试验，成本极高。分析类比国内高堆石坝的动三轴试验成果是确定堆石料参数统计特征的有效手段之一。本文选取对坝体永久变形影响较大的动剪模量和沈珠江模型参数作为随机变量。其中，模量衰减和阻尼增长关系采用室内大型动力三轴试验曲线^[21]，最大动剪模量的衰减指数 n 取 0.4。类比设计填筑标准相近工程的现场原位剪切波速试验资料^[22]，假设堆石料动剪模量参数 k_1 近似服从正态分布，变异系数为 10%，其统计特性列于表 3。收集国内多座堆石坝筑坝材料的残余变形试验数据绘于图 4，如图 4 所示，试验点较集中的落在



(a) $c_{vr} - \gamma_d$ 关系曲线



(b) $c_{dr} / S_1^2 - \gamma_d$ 关系曲线

图 4 堆石料残余变形试验数据汇总

Fig. 4 Summary of dynamic triaxial test results

一个狭窄条带内。假设参数 c_1 和 c_4 在双对数坐标系下服从均匀分布, 将其统计特性列于表 3。其中, c_2, c_3 为 0.75 和 1.12, $c_3=0$ 。为提高计算效率, 主、次堆石料采用一套模型参数。

表 3 堆石料参数统计特性

Table 3 Statistic parameters of rockfill materials			
坝料参数	分布类型	均值	标准差/上下界
k_1	正态分布	5300	530
c_1	双对数坐标系下均匀分布	1.57	0.70~3.88
c_4	双对数坐标系下均匀分布	68	21~220

参考二次多项式响应面法的样本构造原则。动剪模量参数 k_1 的统计参数为 μ_{k_1} 和 σ_{k_1} , 在 $[\mu_{k_1} - f\sigma_{k_1}, \mu_{k_1} + f\sigma_{k_1}]$ 范围内等间距抽取 $2f + 1$ 个随机变量。残余变形参数 c_1 和 c_4 在双对数坐标系下服从均匀分布, 在 $[c_{i,\min}, c_{i,\max}]$ 范围内对数等间距的抽取 n 个随机变量。由于各参数的数量级相差较大, 不利于高斯过程响应面的构造。因此, 需对随机变量进行无量纲化处理。然后, 将上述无量纲化的堆石料参数组合成包含 $(2f + 1) \times n \times n$ 个样本的学习样本集, 进而构造能够反映堆石料材料参数与坝顶震陷率之间映射关系的高斯过程响应面。本文取 $f = 2, n = 5$, 则学习样本个数 $N_{\text{sample}} = 125$ 。

3.4 紫坪铺堆石坝地震可靠度分析

根据堆石料参数的统计特征, 随机抽取 10^7 个样本, 结合上述高斯过程响应面, 分析坝顶震陷率的分布特征。将地震烈度为 VII、VIII、IX 度时坝顶震陷率的频率分布绘于图 5。

地震作用下, 坝顶震陷率为正值。图 5 中根据坝顶震陷率的频率分布情况, 按照对数正态分布进行拟合。如图所示, 不同地震烈度下坝顶震陷率频率分布与对数正态分布吻合较好。因此, 在进行简化分析时可假设土石坝坝顶震陷率服从对数正态分布。

图 5 中虚线所示为采用堆石料参数均值进行确定性有限元分析得到的坝顶震陷率。地震烈度为 VII、VIII、IX 度时分别为 0.06%, 0.17% 和 0.47%。若考虑堆石料参数的不确定性, 坝顶震陷率大于该预测结果的概率分别为 82.34%, 82.30% 和 80.70%。因此, 为确保高土石坝抗震安全, 进行动力分析时考虑筑坝料的不确定性十分必要。

将蒙特卡罗抽样分析结果汇总于表 4。地震烈度为 VII 时, 加速度幅值较小, 地震引起的塑性变形累积远达不到破坏程度。因此, 尽管坝址发生烈度为 VII 度地震的可能性较大, 但土石坝联合地震失效概率为 0。紫坪铺面板坝按 VIII 度地震设防, 计算的地震失效概率仅 1.17×10^{-5} , 表明坝体设计合理, 地震变形控制措

施有效。地震烈度为 IX 时, 地震失效概率高达 67.2%, 说明 IX 度地震是该工程地震变形稳定性的控制荷载。然而, 坝址区发生 IX 度地震的可能性极小, 是否需将设防烈度提高至 IX 度, 需结合经济性评价综合考虑。

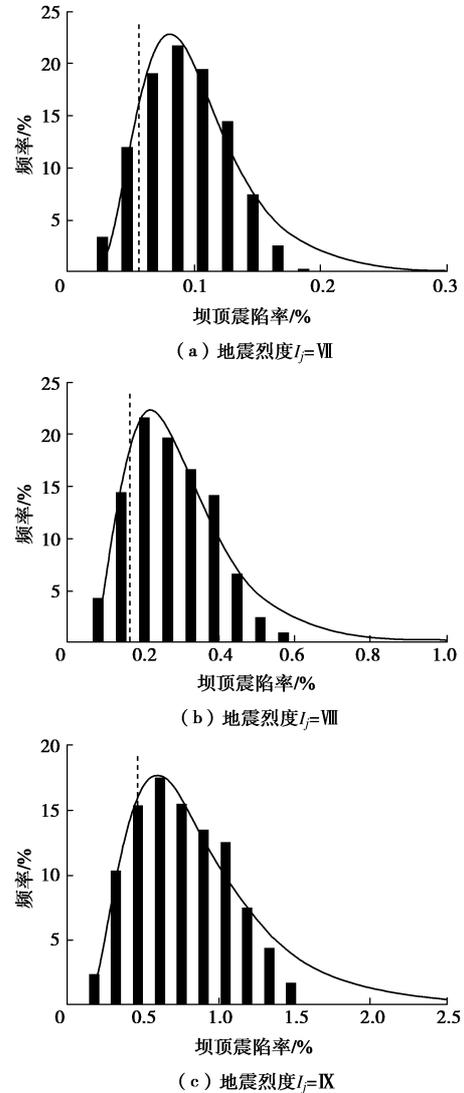


图 5 不同地震烈度下坝顶震陷率频率分布

Fig. 5 Frequency distribution of dam crest ratio subjected to earthquake intensity I_j

表 4 紫坪铺堆石坝的地震失效概率

Table 4 Seismic failure probabilities of Zipingpu CFRD subjected to earthquake intensity I_j

烈度	a_j/g	$p(I_j)/\%$	$p_f(R < S I_j)$	$p_f(R < S I_j) \cdot p(I_j)$
VII	0.125	15.94	0	0
VIII	0.25	2.80	1.17×10^{-5}	3.28×10^{-7}
IX	0.5	0.26	6.72×10^{-1}	1.75×10^{-3}
Σ	—	—	—	1.75×10^{-3}

在岩土工程中, 以年计失效概率作为风险控制标准, 且规范中的可靠指标亦由年计失效概率换算而来。因此, 需建立失效概率与年计失效概率之间的关系。陈祖煜^[23]建议, 将年计失效概率 P_f 和失效概率 p_f 用下

式联系起来:

$$P_f = \frac{P_f}{T} \times \frac{N_d}{T} \quad (14)$$

式中 T 为岩土工程的寿命; N_d 为设计基准年, 水利水电工程中, 高土石坝设计基准期为 100 a。鉴于大部分岩土工程建于近代, 人们对其寿命知之甚少, 但应该比设计基准年大。作为一种保守的处理方案, 假定 $T = N_d$, 则式 (14) 可近似表达为

$$P_f = \frac{P_f}{N_d} \quad (15)$$

则紫坪铺面板堆石坝设计基准期内的年计失效概率为 1.75×10^{-5} 。

根据《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》^[19] 4.3.12 条: 结构的可靠度宜采用可靠指标 β 表达, 可靠指标按 $\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f)$ 计算, 其中, $\Phi^{-1}(\bullet)$ 为标准正态分布函数的反函数, P_f 为年计失效概率。本次计算得到的地震变形稳定性可靠指标为 4.14。规范^[19]规定, 可靠度指标应满足 $\beta \geq \beta_t$, β_t 是目标可靠指标。安全级别为 I 级的水工结构, 持久设计状况对应第一、二类破坏的目标可靠度分别为 3.7 和 4.2。规范同时规定^[19], 偶然设计状况 (地震作用) 的可靠指标可低于持久设计状况的目标可靠指标。基于上述分析结果认为, 从坝顶震陷角度, 工程偏于不安全。若发生地震, 可能造成坝体局部损伤。

4 结 论

本文以坝顶震陷率作为地震安全控制指标, 提出了一种高土石坝地震可靠度分析方法, 该方法可同时考虑地震和筑坝料参数的不确定性。通过对紫坪铺面板堆石坝的分析, 验证了方法的可行性。主要结论如下:

(1) 采用地震烈度作为地震危险性的宏观衡量尺度, 通过引入地震烈度概率模型考虑地震的不确定性, 可使高土石坝地震失效风险分析更加全面。

(2) 采用蒙特卡罗法内嵌高斯过程响应面法的方式考虑筑坝料参数不确定性的影响, 该模式实现容易, 计算效率较高, 便于实际工程应用。

(3) 若忽略筑坝料参数的不确定性, 将有较大概率低估土石坝的地震响应。为确保高土石坝抗震安全, 进行土石坝抗震安全评价时考虑筑坝料的不确定性十分必要。

(4) 高土石坝地震可靠度的研究尚处于起步阶段。本文仅考虑了堆石料参数的不确定性, 未考虑参数空间变异性的影响, 且设计基准期内多次地震发生的概率、准确获取实际工程筑坝料参数统计特性以及探讨高土石坝地震变形、稳定、防渗体安全之间的关联都是需要进一步深入研究的课题。

参考文献:

- [1] LOW B K, PHOON K K. Reliability-based design and its complementary role to Eurocode 7 design approach[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 65: 30 - 44.
- [2] 张楚汉, 金 峰, 王进廷, 等. 高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展[J]. 水利学报, 2016(3): 253 - 264. (ZHANG Chu-han, JIN Feng, WANG Jin-ting, et al. Key issues and developments on seismic safety evaluation of high concrete dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016(3): 253 - 264. (in Chinese))
- [3] 武清玺, 俞晓正. 混凝土面板堆石坝可靠度计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2004(4): 468 - 472. (WU Qing-xi, YU Xiao-zheng. Research on the method of reliability analysis of concrete faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(4): 468 - 472. (in Chinese))
- [4] 武清玺, 俞晓正, 赵魁芝. 响应面法及其在混凝土面板堆石坝可靠度分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(9): 1506 - 1511. (WU Qing-xi, YU Xiao-zheng, ZHAO Kui-zhi. Response surface method and its application in reliability analysis of concrete-faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(9): 1506 - 1511. (in Chinese))
- [5] 杨泽艳, 蒋国澄. 洪家渡 200 m 级高面板堆石坝变形控制技术[J]. 岩土工程学报, 2008(8): 1241 - 1247. (YANG Ze-yan, JIANG Guo-cheng. Deformation control techniques for 200 m-high Hongjiadu Concrete Face Rockfill Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(8): 1241 - 1247. (in Chinese))
- [6] 杨启贵, 常晓林, 周创兵, 等. 水布垭超高面板堆石坝变形控制方法研究[J]. 岩土力学, 2010(增刊 2): 247 - 253. (YANG Qi-gui, CHANG Xiao-lin, ZHOU Chuang-bing, et al. Study of dam deformation control method for Shuibuya high concrete faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(S2): 247 - 253. (in Chinese))
- [7] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013(1): 59 - 65. (CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(1): 59 - 65. (in Chinese))
- [8] 赵剑明, 刘小生, 杨玉生, 等. 高面板堆石坝抗震安全评价标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2015(12): 2254 - 2261. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, YANG Yu-sheng, et al. Criteria for seismic safety evaluation and maximum aseismic capability of high concrete face rockfill

- dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015(12): 2254 - 2261. (in Chinese))
- [9] 王笃波, 刘汉龙, 于陶. 基于变形的土石坝地震风险分析[J]. 岩土力学, 2012(5): 1479 - 1484. (WANG Du-bo, LIU Han-long, YU Tao. Seismic risk analysis of earth-rock dam based on deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012(5): 1479 - 1484. (in Chinese))
- [10] 王笃波, 刘汉龙, 于陶, 等. 基于变形的土石坝地震易损性分析[J]. 岩土工程学报, 2013(5): 814 - 819. (WANG Du-bo, LIU Han-long, YU Tao, et al. Seismic fragility analysis for earth-rockfill dams based on deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(5): 814 - 819. (in Chinese))
- [11] 孔宪京, 庞锐, 邹德高, 等. 基于 IDA 的高面板堆石坝抗震性能评价[J]. 岩土工程学报, 2017, 40(6): 978 - 984. (KONG Xian-jing, PANG Rui, ZOU De-gao, et al. Seismic performance evaluation of high CFRD based on incremental dynamic analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 40(6): 978 - 984. (in Chinese))
- [12] 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(7): 866 - 873. (PANG Rui, KONG Xian-jing, ZOU De-gao, et al. Seismic subsidence fragility analysis of high CRFDs based on MSA[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017(7): 866 - 873. (in Chinese))
- [13] 杨鹤, 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(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(10): 1822 - 1832. (in Chinese))
- [14] NB 35047—2015 水电工程水工建筑物抗震设计规范[S]. 2015. (NB 35047—2015 Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project[S]. 2015. (in Chinese))
- [15] 苏国韶, 宋咏春, 燕柳斌. 高斯过程机器学习在边坡稳定性评价中的应用[J]. 岩土力学, 2009(3): 675 - 679. (SU Guo-shao, SONG Yong-chun, YAN Liu-bin. Application of Gaussian process machine learning to slope stability evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(3): 675 - 679. (in Chinese))
- [16] 苏国韶, 肖义龙. 边坡可靠度分析的高斯过程方法[J]. 岩土工程学报, 2011(6): 916 - 920. (SU Guo-shao, XIAO Yi-long. Gaussian process method for slope reliability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(6): 916 - 920. (in Chinese))
- [17] 高小旺, 鲍霁斌. 地震作用的概率模型及其统计参数[J]. 地震工程与工程振动, 1985, 5(1): 13 - 32. (GAO Xiao-wang, BAO Ai-bin. Probabilistic model and its statistical parameters for seismic load[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1985, 5(1): 13 - 32. (in Chinese))
- [18] 沈华, 戴靠山, 翁大根. 风电塔结构抗震设计的地震作用取值研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016(3): 84 - 91. (SHEN Hua, DAI Kao-shan, WENG Da-gen. Seismic loading for wind turbine tower structural design[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016(3): 84 - 91. (in Chinese))
- [19] GB 50199—2013 水利水电工程结构可靠性设计统一标准[S]. 2013. (GB 50199—2013 Unified standard for reliability design of hydraulic engineering structures[S]. 2013. (in Chinese))
- [20] 刘恢先, 卢荣俭, 陈达生, 等. 修订中国地震烈度表的一个建议方案. 中国科学院工程力学研究所地震工程研究报告集: 第四集[M]. 北京: 科学出版社, 1981. (LIU Hui-xian, LU Rong-jian, CHEN Da-sheng, et al. A proposal to revise Chinese intensity scale. Report of seismic engineering, institute of engineering mechanics, Chinese academy of sciences: the 4th set[M]. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese))
- [21] 刘小生, 王钟宁, 汪小刚, 等. 面板坝大型振动台模型试验与动力分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (LIU Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, WANG Xiao-gang, et al. Large-scale table model tests and dynamic analysis of CFRD[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [22] 朱晟, 杨鹤, 周建平, 等. “5·12”汶川地震紫坪铺面板堆石坝静动力初步反演研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010(5): 113 - 119. (ZHU Sheng, YANG Ge, ZHOU Jian-ping, et al. Back analysis on static and dynamic characteristics of Zipingpu CFRD Under “5·12” Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Sichuan University, 2010(5): 113 - 119. (in Chinese))
- [23] 陈祖煜. 建立在相对安全率准则基础上的岩土工程可靠度分析与安全判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 521 - 544. (CHEN Zu-yu. Reliability analysis and safety criterion in geotechnical engineering based on the index of safety margin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 521 - 544. (in Chinese))