

基于变形的土石坝地震易损性分析

王笃波^{1, 2}, 刘汉龙¹, 于陶¹, 杨贵¹

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 华北水利水电学院管理与经济学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 地震易损性分析是地震风险分析的重要组成部分, 可以预测结构在遭受不同等级地震荷载作用下发生各级破坏的概率。土石坝在地震作用下易发生不同程度的破坏, 对其进行易损性分析可以为土石坝地震风险分析及评价提供有效途径。考虑土石坝材料参数及地震动输入不确定性因素的影响, 提出了基于变形的土石坝地震易损性分析方法。采用正交设计法选取材料参数样本组合, 分别施加不同地震峰值加速度进行地震反应分析, 基于坝顶相对沉降破坏评价指标, 给出了大坝的易损性曲线。以云鹏心墙土石坝为例进行了地震易损性分析, 得到大坝不同震损等级的风险概率, 对土石坝地震风险评估和抗震设计优化、维修加固决策等具有重要意义和应用价值。

关键词: 土石坝; 风险分析; 变形; 易损性分析

中图分类号: TU435, TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)05-0814-06

作者简介: 王笃波(1979-), 男, 江苏连云港人, 博士研究生, 副教授, 主要从事土石坝地震风险分析等方面的研究工作。E-mail: wdb7033@sina.com。

Seismic fragility analysis for earth-rockfill dams based on deformation

WANG Du-bo^{1, 2}, LIU Han-long¹, YU Tao¹, YANG Gui¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, School of Management and Economics, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: Seismic fragility is an important part of seismic risk analysis, which can be adopted to predict the probabilities of structural damage induced by different levels of earthquakes. The fragility analysis provides an effective way for the seismic risk analysis and evaluation of earth-rockfill dams due to the dam performance with different degrees of damage under earthquakes. Considering the uncertainties of earth-rockfill dam material parameters and ground motion effect, a seismic fragility analysis method for earth-rockfill dams is proposed. Seismic response analysis is undertaken by using different peak accelerations of earthquakes. The combinations of material parameter samples are obtained by means of the method of orthogonal design. A fragility curve of the dam is proposed based on the relative settlement of the dam crest which serves as a seismic damage evaluation index. The seismic fragility analysis is applied in the Yunpeng Core Earth-rockfill Dam, and the risk probabilities with different seismic damages are obtained. This research is of great significance and applicable value for seismic risk assessment, seismic design, reinforcement and maintenance measures of earth-rockfill dams.

Key words: earth-rockfill dam; risk analysis; deformation; fragility analysis

0 引言

地震是自然灾害中危害最大的灾种之一, 具有突发性、随机性、续发性、毁灭性等特点, 对社会生活和地区经济发展等造成极其严重的后果。土石坝作为世界坝工建设工程中应用最为广泛和发展最快的一种坝型, 数量多, 分布广泛, 且很多的土石坝直接建造在高烈度地震区, 因此, 土石坝的地震灾害风险分析近年来在抗震安全评价领域得到了广泛关注与研究。2008年, “5·12”汶川大地震对震区内紫坪铺面板堆石坝等众多土石坝都产生了较为严重的破坏, 其震害风险得到了社会各界和学术界的广泛关注。土石坝地

震风险分析是对坝址区在运行期内遭受地震作用及发生某种程度地震灾害和社会后果概率的研究论证, 主要由地震危险性分析、地震易损性分析和地震灾害损失评估三部分组成。其中, 地震易损性分析可以预测结构在遭受不同等级地震荷载作用下发生各级破坏的概率, 对于土石坝的抗震设计、加固和维修决策具有重要的应用价值, 是科学合理地分析土石坝的抗震性

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50825901); 国家自然科学基金项目(51109068); 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010A570004)

收稿日期: 2012-06-15

能、提高土石坝的抗震能力、减少损失的有效途径。

结构的地震易损性分析最早是从 20 世纪 70 年代末的美国核电站分析开始的, Kennedy 等^[1-2]提出了两种易损性分析方法 (Zion 法和 SSMRP 法), 分析了核电站整体结构和局部构件的易损性; 此后, 地震易损性分析受到了地震工程界和土木工程界的广泛关注, 在建筑结构、桥梁结构、生命线系统等重大工程中开展了大量系统性的研究工作, 取得了许多有价值的成果。在水利工程中, 地震易损性分析也开展了一些研究。Tekie 等^[3]以 Bluestone 重力坝为例, 考虑大坝、水与基础的相互作用, 对大坝的 4 种极限状态分别进行了地震易损性分析, 给出了坝体开裂、坝基滑移以及坝趾的易损性曲线, 并研究了静动力荷载作用下的坝体易损性曲线; Papadrakakis 等^[4]采用连续介质界面单元和蒙特卡罗法对静力荷载作用下 Scalere 大坝的易损性进行了分析; 沈怀至等^[5]给出了以地震峰值加速度为自变量的坝体及坝基交界面的易损性曲线, 提出了坝体-地基系统整体易损性的评价概念。但是, 目前国内外对于土石坝的地震易损性研究还很少, 常宝琦等^[6]根据大量的震害资料, 利用确定性的方法对土坝的地震易损性进行了分析, 但还尚未有完善的理论和分析方法。

本文提出了基于性能的土石坝地震易损性概念和分析方法及步骤, 根据部分典型不确定性材料参数的统计特性进行抽样组合并进行地震反应分析, 得出大坝不同破损等级的地震易损性曲线。

1 土石坝地震易损性分析方法

土石坝地震易损性是指土石坝在不同地震峰值加速度作用下发生各级破损状态的条件概率, 通常可采用易损性曲线表示。易损性曲线是以地震动强度指标为横坐标, 结构反应超过规定破坏极限状态或地震损失的概率为纵坐标的一种曲线, 是评估结构损伤水平的一种行之有效的工具, 它可以由经验方法和理论分析两类方法得到。经验方法需要收集大量的震害资料, 建立起结构的地震损害与地表运动之间的关系, 可信度较高, 但实现比较困难。理论分析方法一般通过对大坝的地震响应分析采用数值模拟来研究上述关系, 该方法可以弥补实际地震破坏资料的匮乏, 不受具体条件的限制, 操作简单可行, 便于推广应用。

在易损性概念的数学描述中, 一般假设地震易损性服从双参数对数正态分布模型, 可定义为^[7]

$$F_R = \phi\left(\frac{\ln \text{PGA} - m_{\text{PGA}}}{\sigma_{\text{PGA}}}\right), \quad (1)$$

式中, $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数, PGA 为地震峰值加

速度, 双参数 m_{PGA} , σ_{PGA} 分别为达到某一破损等级所需加速度峰值的对数平均值和对数标准差, 可采用拟合的方法求得。由此可得到以 PGA 为自变量的正态分布函数, 从而可绘制易损性曲线。

本文提出的土石坝地震易损性分析方法首先根据土石坝主要筑坝材料参数的概率分布特征, 利用随机抽样方法获得多组材料参数样本, 然后选择若干条地震波, 针对不同地震作用水平进行非线性有限元分析, 通过将大坝的破损状态与大坝破损评价指标相比较, 可确定达到各级破损状态的 PGA, 据此拟合出易损性曲线参数, 最后代入易损性公式中得到大坝的易损性曲线。土石坝的地震易损性分析基本流程如图 1 所示。

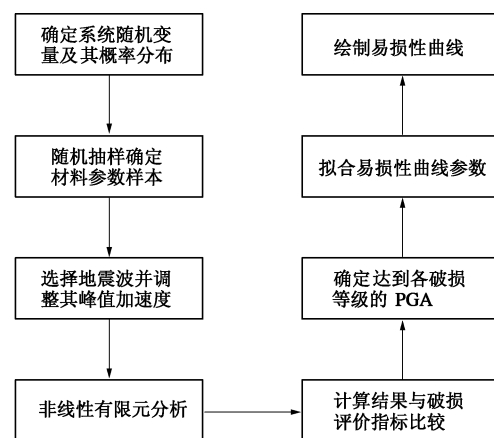


图 1 地震易损性分析步骤

Fig. 1 Flow chart of seismic fragility analysis

2 土石坝材料参数的不确定性

一切不确定性的因素是事物存在风险的根源, 对不确定量的研究是风险分析理论产生和发展的基础。岩土工程的不确定性一般包括参数、模型不确定性和人们认识的不确定性。在土石坝的抗震分析过程中, 由于试验、量测及施工等客观条件或人为因素的影响, 土石坝结构设计中的材料参数均成为不确定性量, 这些不确定性参数将对大坝地震响应产生重要的影响。

土石坝材料参数一般都具有很大的随机性和不确定性, 很难逐个定量分析, 本文只选取主要典型参数进行分析。在计算土石坝地震反应中, 目前广泛应用的本构关系是静力 Duncan-Chang 非线性弹性模型和动力 Hardin-Drnevich 等效线性化模型。

在 Duncan-Chang 模型中, 土体的切线模量为

$$E_t = \left[1 - R_f \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n. \quad (2)$$

式中 σ_1 , σ_3 分别为大、小主应力, p_a 为大气压力; 另有 5 个参数, c , φ , K , n , R_f 须经试验确定, 其中, 强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 是体现材料静

力特性的重要参数,对变形有很大影响;初始模量 E_i 与固结压力 σ_3 曲线的斜率 n , σ_3 为 100 kPa 时对应的 E_i 值, K 以及破坏比 R_f 。

在 Hardin-Drnevich 模型中,土体的初始模量为材料的最大动剪切模量,对地震动力分析结果有重要影响,表示为

$$G_{\max}=K_2p_a\left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right)^n。$$

(3)

式中, p_a 为大气压力; K_2 为动剪切模量系数, n 为动剪切模量,均为试验常数,与土的种类及重度有关,可由室内小应变试验或平均波速法测定。

由于坝料试验的影响因素很多,试验数据具有一定的离散性,得到的参数并不完全反映实际,需对其进行概率分析。因此,本文选择黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和剪切模量系数 K_2 、模量指数 n 共 4 个对土石坝地震反应有较大影响的参数作为随机变量进行概率分析。用概率方法进行风险分析时应在具备充分数据的基础上进行,计算时通常先假设不确定因素服从某种概率分布。研究表明^[8-9],岩土体材料参数一般符合正态分布、对数正态分布和均匀分布,强度参数 c 、 φ 值的概率分布多为正态分布,也有少数为对数正态分布,而对动力参数 K_2 、 n 的概率特征现在很少有研究。据此,本文假设 c 、 φ 和 K_2 、 n 四个参数在一定区间内分别符合正态、对数正态分布和正态、均匀分布。

3 土石坝地震破损评价

土石坝在遭受地震荷载作用时会出现不同的破损状态,一般可分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏 5 个等级,其详细描述如表 1 所示^[10]。

表 1 土石坝震害等级划分

Table 1 Classification of earthquake damage of earth-rockfill dams

震害等级	震损状态描述
基本完好	宏观上无震害
轻微破坏	有宽度小于 5 mm 的纵向裂缝,宏观上无沉降,需要简单处理
中等破坏	有多条宽度大于 5 mm 的纵向裂缝,宏观上可看出沉降,有横向裂缝,需要进行整修和加固
严重破坏	坝体产生了滑裂,坝坡局部隆起、凹陷或滑坡,需要进行大修和加固
毁坏	坝体大面积滑坡,坝基失稳,坝体陷落,甚至垮坝,需要重建

表 1 从结构构件的破坏程度、功能丧失程度并考虑修复的难易程度等宏观描述的角度对土石坝的震害进行了分级,但如何选择合适的评价指标来定量评价土石坝震害等级,是土石坝抗震研究的一个难点和关

键所在,目前尚未有成熟的方法和标准,虽做法不尽相同,但一般均包含稳定和变形两个方面。在各类工程结构中,由于结构的损伤一般都与位移直接有关,因此,基于位移的设计思想就具有其可行性和合理性,并成为基于性能设计方法的一种主要形式。对于土石坝结构,单一的稳定安全系数只能定性地反映土石坝在地震中的安全程度,难以预测土石坝可能出现的各种震害。而选择地震永久变形作为衡量土石坝抗震安全性能的设计标准,代表着未来土石坝抗震安全评价的发展方向,以此为基础的新的抗震设计方法得到迅速发展,但新的方法在如何定量确定土石坝地震永久变形与大坝整体安全的关系及评价标准方面还有很多困难,许多国家的学者对此进行了研究,但目前仍未达成共识^[11]。

坝顶沉陷是土石坝最为普遍的震害之一,其大小不仅能直接反映大坝的安全和震损情况,还能反映坝体的滑坡及开裂程度,且其实际数据容易在地震记录中查到,具有代表性和可操作性。Swaigood^[12]曾对全球土石坝震害情况进行了调查统计,分析了地震能量和坝顶相对沉陷及震害程度的相关性,见图 2。王笃波等^[13]根据上述研究成果也进行了一些研究和探索。鉴于土石坝震损的复杂性,本文仅从地震永久变形角度分析土石坝的震损情况,并选取坝顶相对沉陷(坝顶沉陷值与大坝坝高和坝基覆盖层厚度之和的比值)为评价指标,对土石坝进行易损性分析,验证本文方法的可行性。

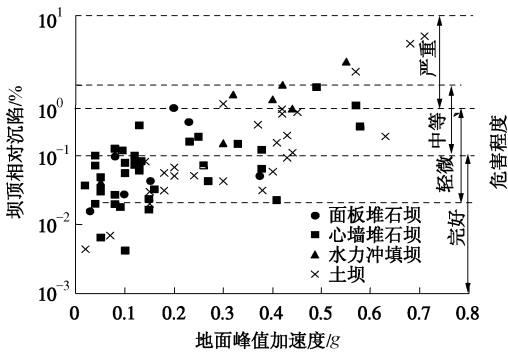


图 2 土石坝地震坝顶沉陷^[12]

Fig. 2 Settlement of earth-rock dams during earthquake

4 工程实例分析

4.1 计算模型及地震动输入

以南盘江云鹏水电站为例,心墙堆石坝最大坝高 100 m,坝顶长度 480 m,坝顶宽度 10 m,上游坝坡为 1:2.0,下游平均坝坡为 1:1.8。坝体采用平面四结点等参单元模拟,单元网格剖分如图 3 所示。计算采用分级加荷进行,静力计算分 6 级加载,1~5 级依次为坝体施工,6 级为施工完后蓄水到正常蓄水位,

然后进行动力计算。

根据地震危险性分析, 工程区地震基本烈度按Ⅶ度进行工程抗震设防, 50 a 超越概率 10% 的地层峰值加速度为 0.1g。输入地震波加速度时程参照昆明勘测设计研究院提供的糯扎渡水电站的地震波加速度时程, 取其中的 3 条并分别把每条地震波计算峰值加速度按比例调整为 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g。图 4 为所选地震波的反应谱加速度曲线, 反应谱的离散性反映了地面地震运动的偶然不确定性。地震波考虑同时从顺河水平向与竖向双向输入, 竖向加速度分量取水平向加速度分量的 2/3, 并考虑遇合系数 0.5。计算用地震持续时间为 20 s, 时间间隔为 0.02 s。动力分析中, 地震波从基岩顶部输入。

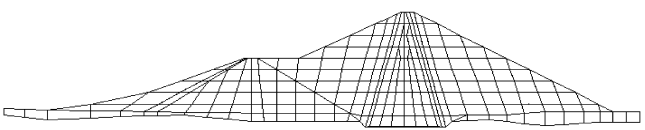


图 3 坝体有限元网格剖分图

Fig. 3 Finite element mesh of dam

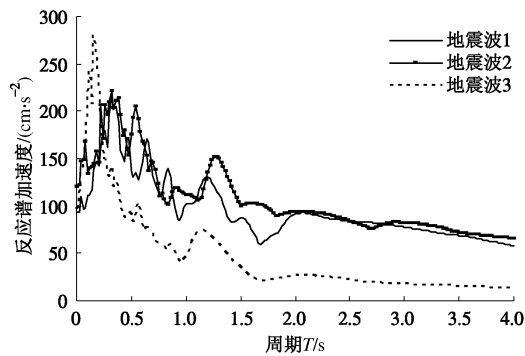


图 4 地震反应谱曲线

Fig. 4 Spectral curves of earthquake response

4.2 材料参数及样本生成

假定分析采用的部分不确定参数及统计特性分别如表 2, 3 所示。

表 2 静力参数统计特性

Table 2 Statistical properties of static parameters

坝料名称	C (正态分布) /kPa			φ (对数正态分布) /(°)		
	取值范围	均值	标准差	取值范围	均值	标准差
上下游堆石料	0	0	0	45~53	48.7	1.86
黏土心墙	14~26	20	3.77	25~35	29.6	1.82

表 3 动力参数统计特性

Table 3 Statistical properties of dynamic parameters

坝料名称	K (正态分布)			n (均匀分布)		
	取值范围	均值	标准差	取值范围	均值	标准差
上下游堆石料	1600~3000	2216	402	0.54~0.65	0.60	0.031
黏土心墙	800~1800	1320	355	0.6~0.76	0.68	0.053

根据表 2 及表 3 的参数统计特性, 运用正交设计

方法^[14], 选取 8 个工况 (即 8 组材料参数随机样本) 进行计算, 如表 4。其他参数参照文献云鹏水电站心墙土石坝有限元动力分析报告^[15]。

表 4 材料参数抽样样本

Table 4 Sampling samples of material parameters

工况	上下游堆石料				黏土心墙			
	C /kPa	φ /(°)	K	n	C /kPa	φ /(°)	K	n
1	0	47.8	1780	0.58	21.9	31.1	876	0.65
2	0	51.3	2141	0.62	24.9	32.7	1204	0.68
3	0	49.0	1767	0.61	16.8	30.7	1222	0.76
4	0	46.8	1997	0.63	19.5	29.7	1537	0.74
5	0	49.5	2230	0.57	20.8	28.7	1403	0.61
6	0	48.3	2350	0.59	12.9	29.1	1453	0.70
7	0	50.8	2991	0.56	18.7	27.3	2000	0.71
8	0	45.9	2475	0.65	22.9	27.7	961	0.63

4.3 结构地震反应分析

永久变形的计算采用刘汉龙提出的等价结点力法^[16], 即认为土体的永久变形是由于等效结点力的作用而产生的附加变形, 模型参数如表 5。其中, K_c 为固结应力比, A , B 为由试验确定的系数。

表 5 地震永久变形参数

Table 5 Permanent deformation parameters of earthquakes

土料	K_c	A			B		
		5 周	10 周	20 周	5 周	10 周	20 周
上下游堆石料	1.5	0.007	0.012	0.023	2.044	2.208	2.311
	2.0	0.014	0.018	0.020	2.032	2.134	2.289
	2.5	0.013	0.017	0.019	2.011	2.123	2.175
黏土心墙	1.5	0.473	0.490	0.523	1.427	1.435	1.453
	2.0	0.393	0.413	0.452	2.423	2.431	1.198
	2.5	0.313	0.336	0.282	3.420	3.427	1.386

将表 3 中的 8 个工况与 3 条地震波及其分别对应的 7 个加速度峰值的地震动输入分别组合, 共进行了 168 个样本的非线性有限元计算, 得到了 168 组大坝的响应。计算结果表明, 竖向最大永久变形基本都发生在上游坝坡坝顶附近, 不同地震波、不同工况对大坝的竖向最大永久变形有着比较明显的影响, 但规律基本保持一致。图 5 为在地震波 1 作用下不同工况的竖向最大永久变形变化, 反映了材料参数的随机性对结果的影响, 且随着峰值加速度的增大变形的离散性逐步增大。图 6, 7 分别为在不同地震波作用下工况 1 和工况 6 的竖向最大永久变形变化, 反映了地震动输入的随机性对结果的影响。

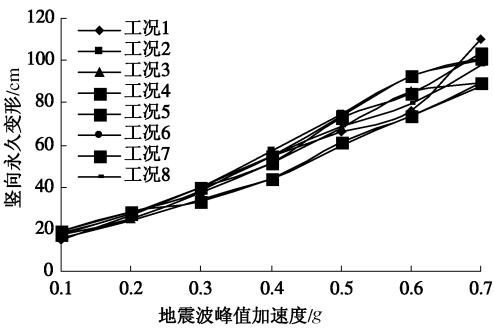


图 5 地震波 1 作用下不同工况竖向最大永久变形变化曲线

Fig. 5 Largest vertical permanent deformation curves under seismic waves 1 and different conditions

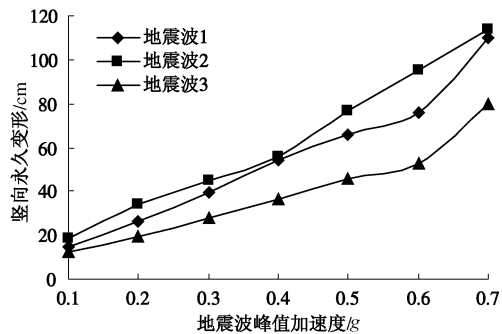


图 6 不同地震波作用下工况 1 竖向最大永久变形变化曲线

Fig. 6 Largest vertical permanent deformation curves of 1st condition under different seismic waves

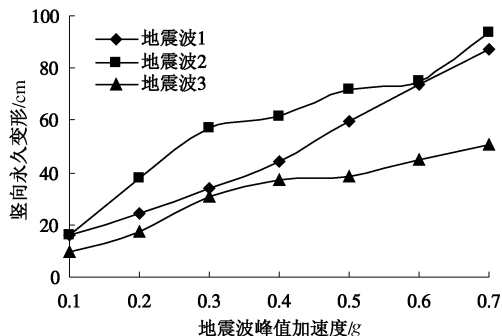


图 7 不同地震波作用下工况 6 竖向最大永久变形变化曲线

Fig. 7 Largest vertical permanent deformation curves of 6th condition under different seismic waves

4.4 易损性曲线的形成

根据对 168 个样本的计算结果, 可拟合插值求出各样本坝顶沉陷值 (在本例中, 坝顶沉陷值近似按竖向最大永久变形计算) 分别达到各震损等级值时的地震波峰值加速度。参照文献[13]的研究成果, 设本例中坝顶相对沉陷达到 0.1%, 0.4%, 1% 时坝体分别达到轻微破坏、中等破坏和严重破坏的临界状态 (暂不考虑溃坝极限状态)。根据易损性分析原理, 分别对各震损等级对应的地震波峰值加速度进行拟合, 即可得到易损性曲线所需的参数 m_{PGA} , σ_{PGA} , 计算结果如表 6 所示。

表 6 大坝地震易损性曲线拟合参数值

Table 6 Fitting values of fragility curves of dam

坝顶相对沉陷/%	m_{PGA}	σ_{PGA}
0.1	3.960	0.658
0.4	5.660	0.356
1.0	6.672	0.270

将表 6 的 m_{PGA} 和 σ_{PGA} 的值代入式 (1) 中, 得到以峰值加速度为变量的易损性概率曲线, 如图 8 所示。

从坝顶相对沉陷评价指标的角度, 由图 8 可看出: 在峰值加速度为 0.1g 时, 坝体发生轻微破坏的概率为 83%, 发生中等破坏的概率为 1%; 峰值加速度为 0.3g 时, 坝体发生中等破坏的概率为 53%, 发生严重破坏

的概率为 1%; 峰值加速度为 0.5g 时, 坝体发生中等破坏的概率为 93%, 而发生严重破坏的概率为 4%; 峰值加速度达 0.7g 时, 坝体发生严重破坏的概率达 30%。

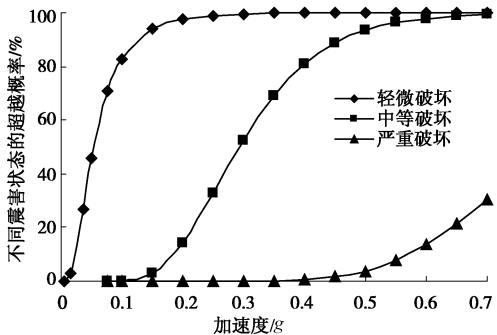


图 8 大坝地震易损性曲线

Fig. 8 Seismic fragility curves of dam

5 结 论

本文考虑土石坝材料参数及地震动输入不确定性因素的影响, 提出了基于变形的土石坝地震易损性分析方法, 并进行了实例分析, 得出以下 3 点结论。

(1) 基于性能的结构易损性分析方法可以应用在土石坝抗震风险分析中, 为土石坝地震风险评价提供有效途径。

(2) 土石坝材料参数和地震动输入均具有一定的随机性, 对土石坝地震反应有明显的影响, 且随着地震荷载水平的加大影响也逐步增大。

(3) 以云鹏心墙土石坝为例进行了分析, 得出的易损性曲线较好地反映了不同地震输入水平下达到各破损等级的概率, 从而使工程设计人员能够根据大坝的重要性, 从安全和经济的角度, 选择不同的破坏概率或不同的永久变形作为控制标准, 进行优化设计。

参考文献:

[1] KENNEDY R P. Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies[J]. Nuclear Engineering and Design, 1980, **59**(2): 315 - 338.

[2] KENNEDY R P, RAVINDRA M K. Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984, **79**(1): 47 - 68.

[3] TEKIE P B, ELLINGOOD B R. Seismic fragility assessment of concrete gravity dams[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, **32**(14): 221 - 224.

[4] PAPADRAKAKIS Manolis, PAPADOPOULOS Vissarion. Vulnerability analysis of large concrete dams using the continuum strong discontinuity approach and neural networks[J]. Structural Safety, 2008, **30**(3): 217 - 235.

- [5] 沈怀至, 金 峰, 张楚汉. 基于性能的重力坝-地基系统地震易损性分析[J]. 工程力学, 2008, **25**(12): 86 - 91. (SHEN Huai-zhi, JIN Feng, ZHANG Chu-han. Performance-based seismic fragility analysis of concrete gravity-foudation system[J]. Engineering Mechanics, 2008, **25**(12): 86 - 91. (in Chinese))
- [6] 常宝琦, 梁纪彬. 土坝的地震易损性和震害速评[J]. 华南地震, 1994, **14**(3): 46 - 56. (CHANG Bao-qi, LIANG Ji-bin. Vulnerbility and evaluation of seismic damage for earth dams[J]. South China Journal of Seismology, 1994, **14**(3): 46 - 56. (in Chinese))
- [7] KARIM K R, YAMAZAKI Fumio. Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, **30**(12): 1839 - 1856.
- [8] 张继周, 缪林昌. 岩土参数概率分布类型及其选择标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 2): 3526 - 3532. (ZHANG Ji-zhou, MIAO Lin-chang. Types and selection criteria of probability distribution of rock and soil parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3526 - 3532. (in Chinese))
- [9] 陈立宏, 陈祖煜, 刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(1): 37 - 40, 45. (CHEN Li-hong, CHEN Zu-yu, LIU Jin-mei. Probability distribution of soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(1): 37 - 40, 45. (in Chinese))
- [10] GB/T 24336—2009. 生命线工程地震破坏等级划分[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. (GB/T 24336—2009. Classification of earthquake damage to lifeline engineering[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese))
- [11] 李红军, 迟世春, 林 皋, 等. 高土石坝地震永久变形研究评述[J]. 水利学报, 2007(增刊): 178 - 183. (LI Hong-jun, CHI Shi-chun, LIN Gao. et al. Review on the seismically permanent deformation of high earth rock-fill dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S0): 178 - 183. (in Chinese))
- [12] SWAISGOOD J R. Embankment dam deformations caused by earthquakes[C]// 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering[CD-ROM]. Christchurch, 2003.
- [13] 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, **33**(5): 1479 - 1484. (WANG Du-bo, LIU Han-long, YU Tao. Seismic risk analysis for earth-rockfill dam based on deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(5): 1479 - 1484. (in Chinese))
- [14] 陈 魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. (CHEN Kui. Experimental design and analyses[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 刘汉龙, 丁选明, 杨 贵, 等. 云鹏水电站心墙土石坝有限元动力分析报告[R]. 南京: 河海大学, 2010. (LIU Han-long, DING Xuan-ming, YANG Gui, et al. The 3D finite element stress and strain research report of the Yunpeng hydropower station rockfill dam[R]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese))
- [16] 刘汉龙, 陆兆溱, 钱家欢. 土石坝地震永久变形分析[J]. 河海大学学报, 1996, **24**(1): 91 - 96. (LIU Han-long, LU Zhao-zhen, QIAN Jia-huan, Earthquake-induced permanent deformation of earth-rock dams[J]. Journal of Hohai University, 1996, **24**(1): 91 - 96. (in Chinese))