

DOI: 10.11779/CJGE201806002

基于 IDA 的高面板堆石坝抗震性能评价

孔宪京^{1, 2}, 庞锐^{*2}, 邹德高^{1, 2}, 徐斌^{1, 2}, 周扬^{1, 2}

(1. 海岸和近海工程国家重点实验室(大连理工大学), 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 抗震性能分析能够有效估计结构在地震作用下的危险性, 逐渐成为抗震安全性评价的重要方法, 但由于结构的复杂性, 该方法在面板堆石坝方面的应用还处于起步阶段。随着强震区大量高面板堆石坝的建设, 这些高坝的安全性是必须要考虑的重大问题, 因此对大坝进行抗震性能分析至关重要。增量动力分析(IDA)法作为一种抗震性能分析方法, 能够全面、深入地分析在不同强度地震作用下结构性能的变化。将 IDA 法引入到高面板堆石坝安全评价领域, 建立了高面板堆石坝地震破坏性能评价方法。根据场地条件选取了 15 条不同的强震动记录, 以地震峰值加速度 PGA 为地震动参数, 采用坝体地震震后变形、坝坡稳定性、面板防渗体安全为抗震性能评价指标, 选取合适的性能参数, 建议了高面板堆石坝各评价指标的破坏等级划分标准, 通过大量非线性有限元计算, 得到各性能参数的地震易损性曲线, 分析了大坝在不同强度地震作用下发生破坏的概率, 成果可为高面板堆石坝抗震性能设计和安全风险评估提供参考和依据。

关键词: 高面板堆石坝; 抗震性能; 增量动力分析; 地震易损性

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)06-0978-07

作者简介: 孔宪京(1952-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程和高土石坝抗震研究。E-mail: kongxj@dlut.edu.cn。

Seismic performance evaluation of high CFRDs based on incremental dynamic analysis

KONG Xian-jing^{1, 2}, PANG Rui², ZOU De-gao^{1, 2}, XU Bin^{1, 2}, ZHOU Yang^{1, 2}

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

Abstract: The seismic performance analysis can effectively estimate the risk of structures under earthquake action, so it gradually becomes the important method of seismic safety evaluation. However, this method is still in the beginning stage of application because of the complexity of CFRDs. The safety of these high dams must be seriously considered as a large number of high CFRDs are constructed, so it is very important to perform the seismic performance analysis of dams. As the seismic performance analysis method, the incremental dynamic analysis (IDA) can analyze the change of structural performance under different intensity earthquakes comprehensively and deeply. IDA is introduced into the field of safety evaluation of high CFRDs, and a seismic damage performance evaluation method is established. Fifteen different strong motion records are chosen according to the site conditions. The peak ground acceleration of earthquake is selected as the earthquake intensity factor. The dam seismic deformation, slope stability and anti-seepage of face safety are selected as the indexes of seismic performance evaluation. First, the damage grade standards of high CFRDs of each evaluation index are suggested after selecting the appropriate performance parameters. Afterwards, the seismic fragility curves of each performance parameter are acquired through a large number of nonlinear finite element calculations. Finally, the failure probability of dams under different earthquake intensities is analyzed, and the results may provide the reference and basis for the seismic performance design and safety risk assessment of high CFRDs.

Key words: high CFRD; seismic performance; incremental dynamic analysis; seismic fragility

0 引 言

混凝土面板堆石坝具有工期短、投资省、施工简便、安全可靠、适应性广等优点, 已成为许多工程的

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404900); 国家自然科学基金项目(51379028, 51679029, 51508071)

收稿日期: 2017-02-07

***通讯作者** (E-mail: pangruipangpan@163.com)

首选坝型。随着社会经济对水利水电需求的不断增长,混凝土面板堆石坝技术的不断进步与发展,混凝土面板堆石坝的建设高度也不断攀升。中国西部地区海拔高,水能资源丰富,适宜建设大型水利枢纽工程,因此,在本地区,一批200 m以上的高面板堆石坝已建或在建,如水布垭(233 m,已建),江坪河(219 m,在建),猴子岩(219.5 m,在建);还有部分高面板堆石坝如茨哈峡、大石峡等也在规划或可研中。由于中国西部大部分地区活断层多、规模大、强度高,这些高面板坝在强震作用下的安全性,是工程建设之中必须要考虑的关键问题。但迄今为止,还没有200 m以上的高面板坝遭遇严重震害的案例,因此,需要对大坝在强地震作用下安全性进行抗震性能分析。

基于性能的地震工程(PBEE)理论在国内外部分土木及建筑结构抗震设计规范中被采用^[1-3],但由于面板坝结构的复杂性,目前世界各国的面板坝抗震安全设计均未采用性能设计,但部分国家和地区的学者正在尝试大坝结构向性能设计过渡的研究工作^[4-6],不过还未涉及到面板坝。PBEE理论的基本内容是考虑地震动随机性(如强度和持时等)以及结构本身随机性,对不同风险水平的地震作用,使结构满足不同的目标性能,目标性能可以被定义为结构的地震响应参数(如应力、位移、损伤、滑移量)等的极限状态^[1]。增量动力分析(IDA)法是新近发展并应用的一种PBEE分析方法^[7],可以全面地、深入地分析在不同强度地震动作用下结构性能的变化情况。

本文采用增量动力分析法,考虑地震动输入的不确定性,以坝体地震震后变形、坝坡稳定性、面板防渗体安全为高面板堆石坝主要抗震性能评价指标,选取地震峰值加速度PGA为地震强度因子,坝顶相对震陷率、坝坡稳定累积滑移量、面板破坏指标(需求应力比和超应力累积持时)为性能参数,建议大坝破坏等级划分标准,对250 m标准面板坝进行地震反应分析和易损性分析,得出基于不同性能指标的各破坏等级易损性曲线和概率。

1 IDA方法

1.1 IDA方法简述

IDA方法是一种基于非线性动力时程分析建立的参数化分析方法,1977年被提出,Vamvatsikos^[7]进行了系统性研究和拓展,现已广泛用于估算结构在遭遇不同强度地震作用的响应和分析结构的整体稳定能力。用不同的地震强度因子将地震动参数(如峰值加速度PGA,峰值速度PGV等)加以调整,使之成为一组不同强度的地震动,在这组不同强度的地震作用

下,分别对结构进行非线性动力时程分析,在此基础上绘制表示工程体灾变程度的性能参数(damage measure, DM)与相应的地震动参数(intensity measure, IM)的曲线,即IDA曲线,在曲线上可以定义结构的性能状态。通过对IDA曲线的趋势、离散状态进行统计分析,可以了解结构在地震作用下灾变失效的全过程。中国水利水电科学研究院在小湾拱坝与溪洛渡拱坝的抗震性能分析中采用了IDA方法^[8],取得了大坝安全度的初步评价,表明了IDA方法在大型水利水电工程中的适应性。

1.2 IDA易损性分析方法

易损性分析是IDA法的一种分析方法。地震易损性分析中,对每条IDA曲线分别进行拟合或通过插值的方法,求得每条IDA曲线上各性能水平对应的IM值,最后建立以地震动强度指标为横坐标,结构反应超过一定破坏界限水平的概率为纵坐标的一种曲线。

根据相关研究^[9-10],一般假设地震易损性服从双参数对数正态分布模型,可定义如下:

$$P_r(C|IM=X) = \Phi\left[\frac{\ln X - \theta}{\sigma}\right], \quad (1)$$

式中, $P_r(C|IM=X)$ 为地震强度 $IM=X$ 作用下达到某性能水平的概率, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数, $IM=X$ 为地震强度因子(如地震峰值加速度PGA或反应谱加速度 S_a 等),双参数 θ , σ 分别为达到某性能水平所需地震强度因子的对数平均值和对数标准差。最后得到以地震强度因子IM为自变量的正态分布函数,绘制出易损性曲线。双参数 θ , σ 可通过以下公式求得:

$$\ln \hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln IM_i, \quad (2)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(IM_i/\hat{\theta}))^2}. \quad (3)$$

2 地震记录与性能参数的选取

2.1 地震记录的选取

根据Vamvatsikos等^[7]的建议,进行IDA分析,10~20条地震完全满足要求。地震动输入采用实际地震记录和人工模拟的加速度记录。选取中国某高土石坝工程设计地震动反应谱为目标反应谱,最后根据本场场地条件及目标反应谱,在PEER数据库里选取了13条吻合良好的实测地震记录,目标反应谱对应的地震波加速度时程如图1。另外两条地震波人工生成,15条地震地震波的加速度反应谱如图2,其中目标反应谱为粗实线,平均反应谱为粗点线,可见平均反应谱与目标反应谱吻合良好,表明选取的地震波能够较好地

反映本场地震特性。13条地震动选取大致过程：①将目标反应谱导入PEER数据库；②设置搜索和选取地震动记录限制条件：地震等级6.0~8.5级，震中距大于10 km，场地为硬岩或岩石场地，PGA大于0.2g，PGV大于15 cm/s。

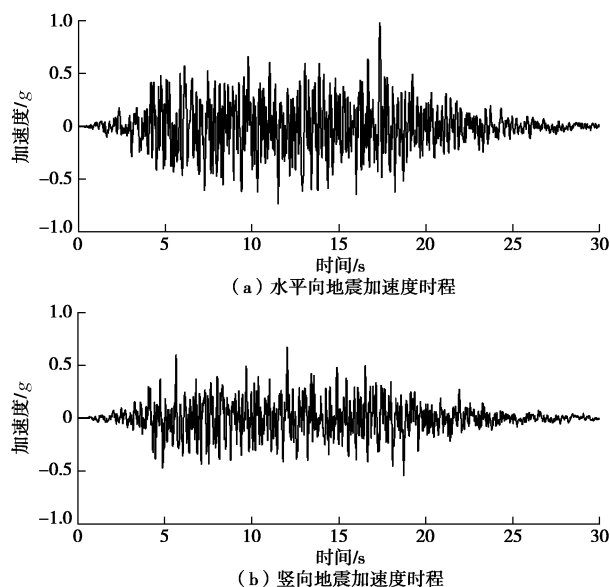


图1 地震动加速度时程

Fig. 1 Time histories of input ground motions

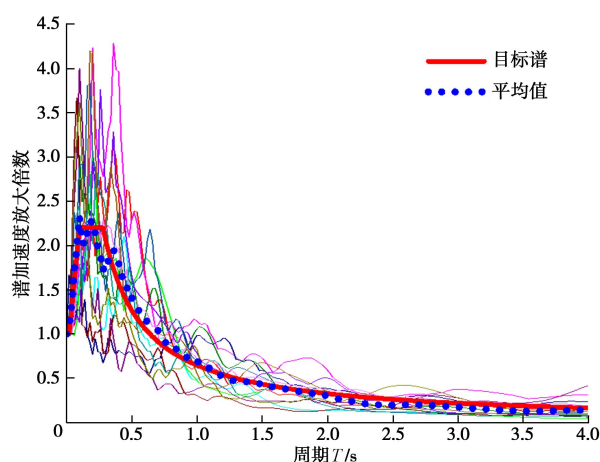


图2 地震加速度反应谱曲线

Fig. 2 Curves of earthquake acceleration response spectra

2.2 性能参数选取

根据相关学者^[11-13]建议，高面板堆石坝抗震安全性主要从变形、稳定、防渗体安全3个方面考虑，本文根据这些研究的评价方法，分别选取坝顶相对震陷率、坝坡累积滑移量、面板需求应力比和超应力累积持时3个性能参数，进行基于不同破坏等级的地震易损性分析。各性能参数的描述如下：

(1) 坝顶相对震陷率：大坝地震最大永久变形与坝高比值。

(2) 坝坡累积滑移量：对大坝进行动力时程有限元稳定分析，计算坝坡稳定最危险滑弧对应的滑移量。

(3) 面板破坏指标（需求应力比DCR和超应力累积持时）：面板需求应力比DCR，地震作用过程中，面板最大拉应力与混凝土动抗拉强度比值；面板超应力累积持时，面板拉应力超过混凝土动抗拉强度的累积时间；详见文献[14]。

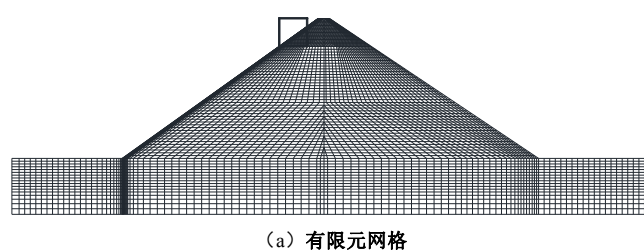
3 计算模型与参数

本文采用的计算程序为笔者团队自主开发的岩土工程系列软件GEODYNA (Geotechnical Dynamic Nonlinear Analysis)，对坝高250 m的标准面板堆石坝进行二维非线性有限元数值计算，详细分析了不同地震波在不同地震强度下的各性能参数分布特性和变化规律，进而研究了遭遇不同强度地震的大坝易损性。所采用的有限元模型、本构模型和计算参数如下。

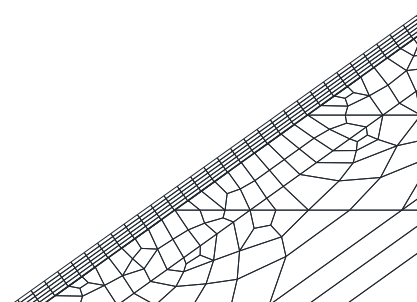
3.1 有限元模型

采用规则面板堆石坝的坝顶宽度20 m，上游坝坡为1:1.4，下游坝坡为1:1.5，面板下游设水平宽2 m的垫层区和两层水平宽4 m的过渡区。坝壳堆石料采用同一筑坝材料。大坝分61层填筑，面板分3期浇筑（分期面板顶部高程分别为100, 200, 250 m），面板浇筑完成开始蓄水，水位蓄至225 m。

混凝土面板堆石坝有限元网格如图3(a)所示，对面板及以下的垫层区和过渡区的网格适当加密（图3(b)）。单元采用四边形4结点等参单元，趾板与垫层接触面、面板与垫层接触面和面板周边缝均采用四边形4结点Goodman界面单元模拟。



(a) 有限元网格



(b) 面板和垫层局部加密网格图

图3 混凝土面板坝有限元网格模型

Fig. 3 FEM mesh model of CFRDs

3.2 计算本构模型和参数

堆石体静力计算采用邓肯E-B非线性弹性本构模型^[15]，动力计算采用等效黏弹性本构模型^[15]，永久变

表 1 静力模型计算参数

Table 1 Parameters of static model

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	K	n	R_t	K_b	m	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$
堆石料	2180	1150	0.25	0.75	465	0.16	50.2	7.8
过渡料	2250	1190	0.26	0.82	500	0.16	51.2	8.5
垫层料	2250	1220	0.26	0.82	510	0.15	51.0	8.2

表 2 动力模型计算参数

Table 2 Parameters of dynamic model

材料	K	n
堆石料	2026.8	0.577
过渡料	2092.7	0.565
垫层料	2092.7	0.565

表 3 永久变形模型计算参数

Table 3 Parameters of residual deformation model

材料	$c_1/\%$	c_2	c_3	$c_4/\%$	c_5
堆石料	12.85	1.37	0.00	68.4	1.33
过渡料	10.02	1.26	0.00	48.3	1.23
垫层料	10.02	1.26	0.00	48.3	1.23

形计算采用笔者等^[16]改进的沈珠江残余变形经验模型, 接触面采用双曲线接触面模型模拟^[16]。各模型堆石料参数见表 1~3。面板混凝土标号为 C30, 弹性模量为 30 GPa, 抗压强度为 27.6 MPa, 泊松比为 0.167, 静力和地震动力荷载下抗拉强度采用 Raphael^[17]建议公式计算, 静力抗拉强度为 3 MPa。双曲线接触面模型参数采用河海大学试验成果^[15], 面板缝参数采用文献^[15]建议值。动力计算时采用波动输入方法^[16]。

3.3 大坝破坏等级划分建议

在高面板坝变形安全评价方面, 陈生水等^[12]建议以坝顶相对震陷率小于 0.6%作为控制标准, 赵剑明等^[13]建议把坝顶相对震陷率 0.6%~0.8%作为控制标准; 王笃波等^[10]以坝顶相对沉陷率 0.1%、0.4%、1%为评价界限, 考虑材料参数的不确定性, 分析了 100 m 高的南盘江云鹏水电站心墙坝达到轻微破坏、中等破坏和严重破坏的易损性; Swaisgood^[11]调查了国内外 69 座土石坝 (包括面板堆石坝、心墙堆石坝、水力冲填坝和土坝), 以坝顶相对沉陷率为指标, 将震害情况分为完好 (0.1%以下)、轻微破坏 (0.012%~0.5%)、中等破坏 (0.1%~1.0%) 和严重破坏 (0.5%以上) 4 个破坏等级。本文参考相关安全评价和等级划分标准, 以坝顶相对震陷率 1.0%为大坝极限抗震能力状态, 建立坝顶相对震陷率 0.4%, 0.7%, 1.0%三个界限破坏状态, 并建议分别对应轻度破坏、中度破坏和重度破坏 3 种破坏等级。

在坝坡稳定安全评价方面, 国内外一些研究和规范从累积滑移量角度进行分析, 瑞士采用两级地震设

计水准^[18], 对浅层滑动容许变形 20 cm, 对深层滑动容许变形 50 cm; Ozkan^[19]建议的地震滑移变形控制标准为 1 m; 田景元等^[20]认为累积滑移量超过 1 m 或超过滑动体长度的 1%, 坝坡失稳。本文参考相关研究和规范, 以累积滑移量 1 m 为大坝极限抗震能力控制标准, 建立累积滑移量 5, 50, 100 cm 三个界限破坏状态, 其分别对应轻度破坏、中度破坏和重度破坏 3 种破坏等级。

在面板防渗体抗震安全性评价方面, 在线弹性框架内, 目前相关研究^[12-13]主要集中于以面板应力、接缝变形等为控制标准; Ghanaat^[14]利用弹性时程分析结果, 根据计算获得的最大拉应力与混凝土抗拉强度比值即需求应力比 DCR 及地震过程中坝体最大拉应力大于混凝土抗拉强度的累积时间即超应力累积持时, 提出了混凝土坝破坏等级划分标准, DCR=1 时, 超应力累积持时 0.4 s, DCR=2 时, 超应力累积持时 0 s, 确定了轻微和中度破坏界限; 沈怀至等^[21]在混凝土重力坝抗震性能评价中引入这一理念, 并发展到弹塑性损伤分析框架内。本文在线弹性框架内, 尝试引入这一评价方法, 根据面板应力动态变化情况, 对面板安全性初步评价和破坏等级划分。建议破坏等级如下: 未出现破坏或轻度破坏, 面板未超过抗拉强度, DCR 不大于 1; 轻度~中度破坏, 面板出现开裂, DCR 和超应力累积持时处于图 4 阴影部分以内。重度破坏 DCR 大于 2 或超应力累积持时处于图 4 阴影部分以外, 应采用非线性弹塑性计算, 后续研究中将进一步分析。

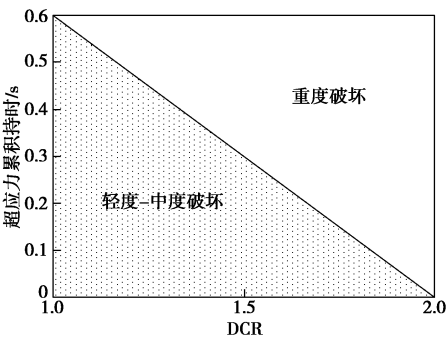


图 4 大坝面板抗震性能和破坏评价标准

Fig. 4 Seismic performance and damage evaluation standard of face slab

3.4 有限元计算

本文选取地震峰值加速度 PGA 为地震强度因子, 进行等间隔调幅, 调幅间隔为 0.1g, 直到使性能参数达到重度破坏程度。地震动输入同时考虑顺河水平向、竖向两个方向输入, 竖向加速度峰值取水平向的 2/3。经过大量的有限元非线性计算, 得到的地震波峰值加速度 PGA 与坝顶相对震陷率、累积滑移量性能参数的 IDA 曲线, 如图 5 所示。

4 地震易损性分析

4.1 易损性曲线的形成

分别对以上每条 IDA 曲线分别进行 Spline 三维样条插值或者对数据进行最小二乘法拟合 (对面板破坏指标处理采用此方法, 见文献[9]), 得到易损性曲线

所需的参数, 见表 4; 并根据 1.2 节的易损性分析原理, 得到 3 个性能参数对应各破坏等级的易损性曲线, 如图 6 所示。

4.2 大坝易损性概率分析

根据 4.1 节的大坝易损性分析结果, 可以得到各性能指标对应的不同破坏等级易损性概率, 如表 5 所示。可以看出, 坝体变形方面, 在较小地震作用下, 0.2g 和 0.3g 地震峰值加速度, 会发生一定概率的轻度破坏, 在较大地震作用下, 0.6g 峰值加速度, 已经完全发生轻度破坏, 中度破坏概率也已经非常大, 重度破坏的概率也有一定数值, 达到 50%; 坝坡稳定方面, 在较小地震作用下, 几乎不会发生破坏, 但在较大地震作用下, 会发生非常大概率轻度破坏和一定概率的中度破坏以及较小概率的重度破坏; 面板防渗体安

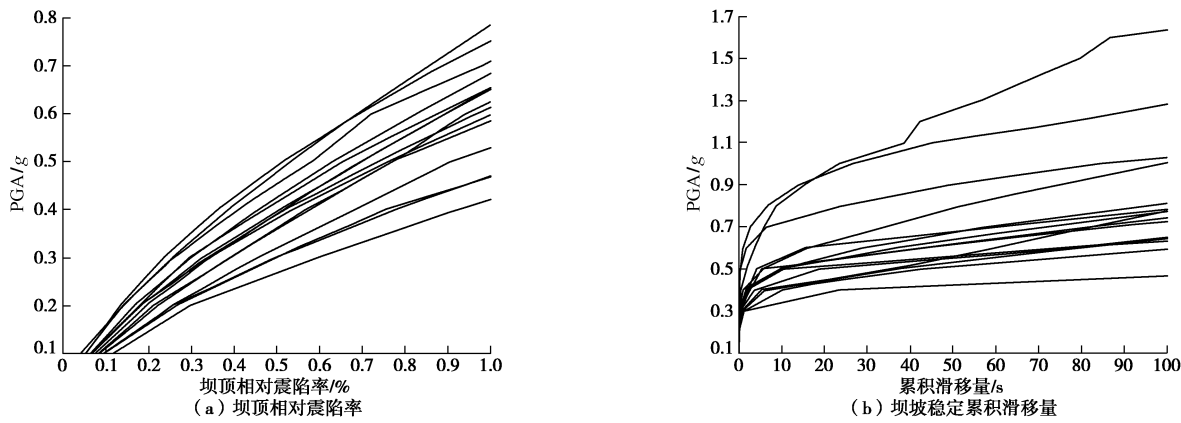


图 5 地震作用下各性能参数的 IDA 曲线

Fig. 5 IDA curves of various performance parameters under seismic action

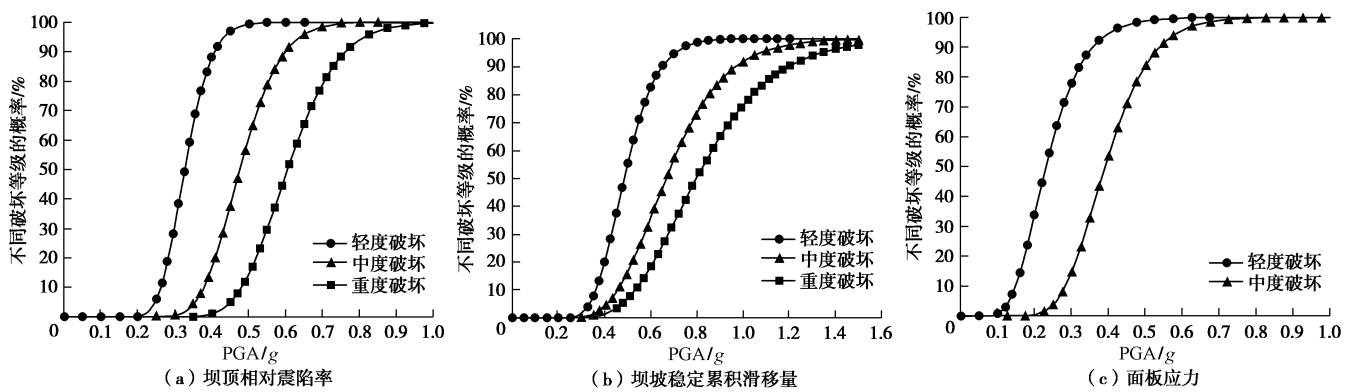


图 6 不同性能参数的易损性曲线

Fig. 6 Seismic fragility curves of various performance parameters

表 4 大坝破坏加速度峰值地震易损性参数值

Table 4 Parameters of seismic fragility for dam failure with respect to PGA

性能指标	破坏等级					
	轻度破坏		中度破坏		重度破坏	
	$\theta/(m \cdot s^{-2})$	$\sigma/(m \cdot s^{-2})$	$\theta/(m \cdot s^{-2})$	$\sigma/(m \cdot s^{-2})$	$\theta/(m \cdot s^{-2})$	$\sigma/(m \cdot s^{-2})$
坝体震后变形	4.85	0.23	6.69	0.29	7.97	0.31
坝坡稳定	3.26	0.17	4.77	0.18	6.05	0.18
面板防渗体安全	2.31	0.34	3.92	0.25	—	—

表 5 不同地震强度下大坝各性能指标破坏概率
Table 5 Failure probabilities of various dam performance indexes under different intensity earthquakes (%)

破坏等级	坝体震后变形			坝坡稳定			面板防渗体安全		
	轻度破坏	中度破坏	重度破坏	轻度破坏	中度破坏	重度破坏	轻度破坏	中度破坏	重度破坏
0.2g	23.3	0	0	0	0	0	33.7	0	
0.3g	31.3	0	0	1.8	0	0	77.8	14.3	
0.4g	88.0	16.4	1.1	20.0	3.9	1.4	94.6	53.3	后续研究中
0.5g	100	60.5	14.4	55.4	16.0	6.9	100	83.5	非线性计算
0.6g	100	90.0	48.1	82.5	35.6	18.3	100	95.6	进一步分析
0.7g	100	100	79.1	100	56.2	34.0	100	99.0	

全方面, 在较小地震作用下, 已经产生较大概率轻度破坏和一定概率的中度破坏, 在较大地震作用下, 几乎完全发生轻度破坏和中度破坏。

5 结 论

(1) 本文将 IDA 方法引入到高面板堆石坝抗震安全性评估领域, 形成了基于变形、稳定、面板防渗体安全的大坝抗震性能评价方法, 较为合理和全面。该方法可以较好地考虑地震动输入的随机性, 全面评估大坝的抗震性能, 得到不同强震作用下各性能指标的概率, 为大坝的强震抗震性能提供准则和参考。

(2) 建议了坝顶相对震陷率、坝坡稳定累积滑移量、面板需求应力比和超应力累积持时的性能参数, 地震峰值加速度的地震强度因子, 并分析了选取依据, 为开展 IDA 研究提供了合适的破坏性能参数和地震强度表征指标。

(3) 建议了适用于高面板堆石坝不同性能指标安全评估的界限状态和破坏等级划分标准, 确定了轻度破坏、中度破坏和重度破坏的三等级破坏抗震性能水平, 并探讨了划分依据。

(4) 通过基于 IDA 的大坝易损性分析, 得到各性能指标对应不同破坏等级的易损性曲线和破坏概率, 为高面板堆石坝的抗震设计、加固和维修决策提供一定的参考。

(5) 采用规则高面板堆石坝, 根据本文建立的基于 IDA 方法分析流程, 进行了抗震性能易损性分析。分析结果表明, 在地震作用下面板较易发生破坏, 很小地震就会产生极大的破坏概率, 需要采取一定的抗震加固措施; 轻度地震作用下, 坝坡稳定性较大, 但强震对坝坡稳定影响较大。

(6) IDA 方法目前在土石坝中的应用目前仍处于起步阶段, 尚需更多研究。同时考虑地震动输入和土石坝材料参数的随机性, 是十分必要的; 考虑多种失效模式之间的相关性, 对大坝抗震性能进行全面、详细、深入的分析也是今后需要进一步进行的工作。

参考文献:

[1] Euro code 8-2004. Design of structures for earthquake resistances[S]. 2004.

[2] NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings[S]. 1996.

[3] CECS160—2004 建筑工程抗震性态设计通则(试用)[S]. 2004. (CECS160—2004 General rule for performance based seismic design of buildings[S]. 2004. (in Chinese))

[4] Federal Emergency Management Agency.FEMA-65: federal guidelines for dam safety—earthquake analysis and design of dams[R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2005.

[5] 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, 47(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, 47(3): 253 - 264. (in Chinese))

[6] 陈厚群. 大坝的抗震设防水准及相应性能目标[C]// 第二届全国防震减灾工程学术研讨会论文集. 广州, 2005. (CHEN Hou-qun. Seismic fortification levels and performance objectives for large dams[C]// Proceedings of the 2nd national conference on Engineering Mitigation of Earthquake Disasters. Guangzhou, 2005. (in Chinese))

[7] VAMVATSIKOS D. Incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491 - 514.

[8] 王海波. 水工抗震学科国际科学技术发展动态跟踪[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(2): 286 - 293. (WANG Hai-bo. A state-of-art report on aseismic design of hydraulic structure[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009, 7(2): 286 - 293. (in Chinese))

- [9] 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 foundation system[J]. Engineering Mechanics, 2008, **25**(12): 86 - 91. (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, **35**(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, **35**(5): 814 - 819. (in Chinese))
- [11] SWAISGOOD J R. Embankment dam deformations caused by earthquakes[C]// Pacific Conference on Earthquake Engineering[CD-ROM]. Christchurch, 2003.
- [12] 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, **35**(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, **35**(1): 59 - 65. (in Chinese))
- [13] 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, **37**(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, **37**(12): 2254 - 2261. (in Chinese))
- [14] GHANAAT Y. Failure modes approach to safety evaluation of dams[C]// 13th World Conf on Earthquake Eng. Vancouver, 2004: 1115.
- [15] 孔宪京, 邹德高. 紫坪铺面板堆石坝震害分析与数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao. The seismic damage analysis and numerical simulation of Zi Pingpu CFRD[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [16] 孔宪京. 混凝土面板堆石坝抗震性能[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (KONG Xian-jing. Seismic performance of concrete-faced rockfill dam[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [17] JM Raphael. The tensile strength of concrete[J]. ACI J Proc, 1984, **81**(17): 158 - 165.
- [18] GR Darbre. Swiss Guidelines for the Earthquake Safety of Dams[C]// Proc 13th WCEE, Vancouver B C. 2004: 1794.
- [19] OZKAN M Y. A review of considerations on seismic safety of embankments and earth and rock-fill dams[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998, **17**: 439 - 458.
- [20] 田景元, 刘汉龙, 伍小玉. 高土石坝极限抗震能力的评判角度及标准述评[J]. 防灾减灾工程学报, 2013(增刊 1): 128 - 131. (TIAN Jing-yuan, LIU Han-long, WU Xiao-yu. Evaluation perspectives and criteria of maximum aseismic capability for high earth-rock dam[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013(S1): 128 - 131. (in Chinese))
- [21] 沈怀至, 张楚汉, 寇立夯. 基于功能的混凝土重力坝地震破坏评价模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, **47**(12): 2114 - 2118. (SHEN Huai-zhi, ZHANG Chu-han, KOU Li-hang. Performance-based seismic damage assessment model for concrete gravity dams[J]. J Tsinghua Univ (Sci& Tech), 2007, **47**(12): 2114 - 2118. (in Chinese))