

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.0041

郑晓东,郝建国,李丹丹. 基于增量动力分析的重力坝抗震性能评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 184-190.  
ZHENG X D, HAO J G, LI D D. Evaluation of seismic performance of gravity dam based on incremental dynamic analysis[J].  
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 184-190. (in Chinese)

## 基于增量动力分析的重力坝抗震性能评估

郑晓东<sup>1</sup>, 郝建国<sup>1</sup>, 李丹丹<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056000; 2. 天津大学, 天津 300350)

**摘要:** 基于增量动力分析法(IDA), 采用塑性耗能占总变形能的比值作为结构性能指标, 提出了重力坝抗震性能评价的三级震害划分和两个极限状态下的失效性划分的建议, 做出 IDA 曲线, 并结合分位数分析和易损性分析对重力坝抗震性能进行评估。以邯郸京娘湖重力坝为例, 进行一系列的非线性分析, 结果表明: 分位数分析的 IDA 曲线中每个极限状态的峰值地面加速度 PGA 均大于设计地震的峰值地面加速度, 满足该重力坝的功能保障性水平和安全保证性水平。易损性分析下, 1.5 倍设计地震作用时 65.92% 的概率处于正常使用阶段, 100% 可以保证安全。结果表明该重力坝具有良好的抗震性能。该项研究结果为重力坝抗震性能设计和安全风险评估提供了新思路。

**关键词:** 增量动力分析; 分位数分析; 易损性分析; 塑性耗能; 抗震性能

中图分类号: TV642.3 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Evaluation of seismic performance of gravity dam based on incremental dynamic analysis

ZHENG Xiaodong<sup>1</sup>, HAO Jianguo<sup>1</sup>, LI Dandan<sup>2</sup>

(1. College of water conservancy and hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China;  
2. Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** The ratio of plastic energy consumption to total deformation energy based on the incremental dynamic analysis method (IDA) was used as the structural performance index. The three-level seismic damage classification of gravity dam seismic performance evaluation and the failure degree division under two limit states were proposed. The IDA curve was made and combined with the quantile analysis and fragility analysis to evaluate the seismic performance of the gravity dam. Taking the Jingniang Lake gravity dam as an example, a series of nonlinear analyses were carried out. The results showed that the peak ground acceleration (PGA) of each limit state in the IDA curve of the quantile analysis was larger than the peak ground acceleration of the designed earthquake, which satisfied the gravity and the level of functional support and safety assurance of the dam. Under the fragility analysis, 65.92% probability of the 1.5 times design earthquake was in the normal use stage and could a 100% safety guarantee. The results showed that the gravity dam had a good seismic performance. The results of this study may provide a new idea for the seismic performance design and safety risk assessment of gravity dams.

**Key words:** incremental dynamic analysis; quantile analysis; fragility analysis; plastic energy consumption; seismic performance

收稿日期: 2019-07-11 修回日期: 2019-09-03 网络出版时间: 2019-09-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190911.1608.006.html>

基金项目: 河北省自然科学基金(E2018402131); 河北省教育厅人才拔尖项目(BJ2018049)

作者简介: 郑晓东(1984—), 男, 河北邯郸人, 讲师, 主要从事水工结构工程方面研究。E-mail: zhengxiaodonghd@163.com

通信作者: 郝建国(1996—), 男, 山西临汾人, 主要从事水工结构抗震方面研究。E-mail: 2432868501@qq.com

我国是一个地震多发国家,2008年汶川地震后,我国大坝的抗震安全问题引起了国内外学者的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。长时间内我国水工建筑物抗震设计规范采用基于承载力的设计理念,仅满足了人员生命安全的基础设计需求,对其他指标的要求程度较低。然而在结构抗震设计需求不断提高的背景下,水工建筑物的抗震设计在保证人员安全的基础上还要考虑到经济损失、灾后功能使用等重要因素。近些年来,国内外学者将基于性能的抗震思想运用于高坝抗震分析中:张楚汉,沈怀至,寇立夯等<sup>[4-6]</sup>对重力坝基于性能的抗震设计方法进行了初步的探索;Alembagheri M<sup>[7-9]</sup>考虑了材料和输入荷载的不确定性,利用增量动力分析方法确定了重力坝和拱坝的抗震性能和不同的极限状态。将基于性能的抗震设计理念应用于坝体抗震领域,通过划分合理的抗震性能水平及性能目标进行量化,研究坝体破坏机理,对于混凝土坝的抗震风险评估和抗震设计优化有着重要的理论意义。

随着基于性能的抗震设计方法研究的不断深化,各国学者提出了不同的性能参数指标以反映建筑物的抗震承载能力和破坏程度。Kowalsky M J<sup>[10]</sup>首次提出了将位移作为结构性能参数的抗震设计方法。Chanaat Y J<sup>[11]</sup>最早通过需求能力比、超应力持时及超应力范围等抗震性能参数量化混凝土坝的损伤程度,建立了大坝抗震安全评价模型;Zhang<sup>[12]</sup>通过最大相对位移进行分位数分析和易损性分析,对进水塔进行了抗震性能评价并研究了结构在地震作用下的破坏机理;陈灯红<sup>[13]</sup>基于坝顶相对位移的指标,对比了流固耦合模型与传统附加质量模型;孔宪京<sup>[14]</sup>选取坝顶相对震陷率、坝坡稳定滑移量、面板破坏指标等为结构性能参数对高面板堆石坝进行了分析;李静<sup>[15]</sup>认为以拱坝损伤体积比和损伤面积比作为评价大坝抗震性能的指标相对于传统的拱坝抗震性能评价指标可以更加清晰地反映出拱坝的损伤变化趋势和抗震承载能力。

通过分析发现,在以往的研究中最大相对位移、最大层间位移角、应变、滑移量等参数被较多地作为结构性能指标进行分析。但若当坝体遭遇了持续时间较长,地震动强度较大的地震波时,上述传统的结构性能参数则不能很好地反映坝体的损伤状态,因此选取一个合理的结构性能指标来定量地反映坝体在地震过程中的损伤是至关重要的。本文以河北省邯郸市京娘湖重力坝为例,基于增量动力分析方法,提出了基于耗能的重力坝抗震性能评价方法,以塑性耗能与总变形能的比值  $D_E$  作为结构性能指标,

确定了重力坝的震害等级和抗震性能水平,结合分位数分析和易损性分析对重力坝的抗震性能进行了有效的评估。

## 1 增量动力分析(IDA)

### 1.1 IDA方法的基本原理

IDA方法是对结构施加多条地震动荷载,将每条地震动荷载按比例调整为多重强度水平,然后利用该组地震动对模型进行一系列非线性时程分析,迫使结构经历从弹性响应到最终的整体破坏的整个过程,同时绘制结构性能参数(DM)和地震动强度参数(IM)之间的关系曲线,即IDA曲线。IDA方法需要考虑地震的随机性,一般情况下需要选取足够多的地震记录,弥补传统动力时程分析的单一性、离散型等缺点,可以真实地反映结构的抗震性能。

### 1.2 结构性能参数的选取

结构性能参数DM是用来描述结构损伤破坏状态的指标,常采用的结构性能参数有相对位移、应变、损伤指数等。

坝体在地震作用下产生的破坏可分为首次超越破坏和累计损伤破坏,这说明混凝土重力坝在地震荷载作用下的损伤破坏是在地震荷载的最大幅值和地震波循环加卸载作用的联合作用下产生的。在以往的抗震性能评价中一般采用以坝顶与坝基之间的相对位移为指标的抗震设计理念,它虽然在一定程度上可以反映出坝体的破坏状态,但是在地震强度较大的情况下,对于坝体的极限状态并不能做出定量的判断,因此控制最大相对位移并不能在精度上保证坝体的安全,但若从耗能的角度分析坝体的抗震性能则可以反映出整个地震过程中整个坝体损伤的变化,更好地对重力坝进行抗震性能分析和安全评估。

地震过程中的动力平衡方程为

$$M\ddot{u}_i + C\dot{u} + Ku = P \quad (1)$$

将式(1)对相对位移  $u$  进行积分

$$\frac{1}{2} M\dot{u}_i^2 + \int \dot{u} C dt + \int \dot{u} K u du = \int \dot{u}_i M du_g + \int P du \quad (2)$$

$$E_k + E_c + E_i = E_{WQ} + E_{WP} \quad (3)$$

式中:  $E_k$  为动能;  $E_c$  为阻尼耗散能;  $E_i$  为体系总变形能;  $E_{WQ}$  为地震输入能量;  $E_{WP}$  为地震荷载作用之前的静力做功。

$$E_i = \int_0^T \int_V \sigma^r \epsilon^d dV dt =$$

$$\int_0^T \int_V \sigma^r \epsilon^d dV dt + \int_0^T \int_V \sigma^r \epsilon^{pl} dV dt =$$

$$\int_0^T \int_V \frac{1-d_r}{1-d} \sigma^r \epsilon^d dV dt + \int_0^T \int_V \frac{d_r-d}{1-d} \sigma^r \epsilon^d dV dt +$$

$$\int_0^T \int_V \sigma^r \epsilon^{pl} dV dt = E_E + E_D + E_P \quad (4)$$

式中:  $d_T$  为  $T$  时刻的损伤;  $\sigma$  为恢复应力;  $E_E$  为弹性应变能;  $E_D$  为损伤耗能;  $E_P$  为坝体塑性耗能。

在本文中选取地震过程中坝体塑性耗能与总变形能比值的最大值  $D_E$  作为 DM。

$$D_E = \left( \frac{E_P}{E_i} \right)_m \quad (5)$$

式中:  $D_E$  为地震发生过程中坝体塑性变形耗能与总变形耗能的比值;  $E_P$  为坝体塑性变形耗能;  $E_i$  为总变形能。

### 1.3 抗震性能水平与破坏等级

结构的抗震性能水平是一种极限破坏状态, 确定坝体的抗震性能水平是基于性能的抗震设计方法的重要组成部分。我国现行使用的水工建筑物抗震

设计规范规定了结构的两种极限状态——正常使用极限状态和承载力极限状态。

基于 ABAQUS 有限元软件对混凝土重力坝进行非线性时程分析, 对比分析以最大相对位移和塑性耗能与总变形能的比值 ( $D_E$ ) 作为结构性能参数生成的 IDA 曲线, 见图 1。

如图 1(a) 所示, 在以  $D_E$  为结构性能参数的分析中, IDA 曲线随着地震动强度的逐渐增大先后通过了  $D_E$  值为 0.2 和 0.7 两个拐点, 因此, 可以根据这两个拐点将 IDA 曲线分为 3 个阶段, 第一个阶段  $D_E$  值缓慢上升, 坝体产生破坏; 第二个阶段  $D_E$  值上升的趋势明显加快, 坝体破坏速率加快; 第三个阶段  $D_E$  值上升的速率随之减缓, 此时坝体近乎完全破坏。

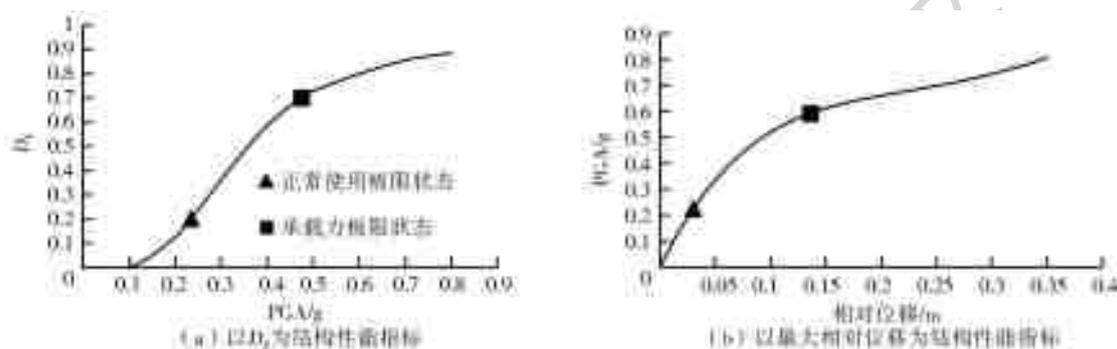


图 1 IDA 曲线示意图

Fig. 1 IDA curve diagram

根据以上所描述的情况, 建议将 0.2 和 0.7 两个  $D_E$  值分别作为正常使用极限状态和承载力极限状态的限值, 从而使结构的破坏程度与结构预期的地震极限状态相对应。沈怀至等<sup>[16]</sup>在金安桥重力坝分析中, 将破坏等级分为未损伤、轻微-中等损伤、严重损伤 3 种。与之类似, 本文也将重力坝的震害划分为 3 个阶段: 正常使用阶段、损伤控制阶段和防止倒塌阶段。

如图 1(b), 在以坝顶相对位移为结构性能参数的分析中, 根据 Vamvatsikos 等<sup>[17-19]</sup>对地震极限状态定义的研究定义斜率为 80% 弹性斜率时的点为正常使用极限状态, 定义斜率为 20% 弹性斜率时的点为承载力极限状态。

对比不同结构性能参数下所得到两个极限状态所对应的 PGA 结果见表 1, 可以看出, 在峰值加速度较小时, 结构性能参数  $D_E$  和最大相对位移所对应的正常使用极限状态相接近, 而在峰值加速度较大时, 以最大相对位移作为结构性能指标所对应的峰值地面加速度远大于以  $D_E$  作为结构性能指标的情况, 若控制最大相对位移作为性能指标, 并不一定能保证坝体安全。因此采用  $D_E$  作为结构性能指

标, 重力坝的抗震性能安全系数更高。

表 1 不同 DM 下的极限状态点

Tab. 1 Limit state points under different DM

结构性能参数	正常使用极限状态	承载力极限状态
$D_E$	0.235 g	0.475 g
最大相对位移	0.224 g	0.589 g

### 1.4 分位数分析

在分位数分析中, 假定 IDA 曲线上每个 IM-DM 点服从对数正态分布<sup>[20-21]</sup>, 对于每个 IM 值, 可得到不同 DM 值的均值和对数标准差, 继而可以得到 16%, 50%, 84% 分位线和均值分位线, 最后根据各分位线的限值确定正常使用极限状态和承载力极限状态。

### 1.5 易损性分析

易损性是指结构在给定的地震荷载下达到或者超过结构的某一极限状态的条件概率。易损性分析是对每条 IDA 曲线分别进行拟合, 通过插值的方法, 求得每条 IDA 曲线上各性能水平对应的峰值地面加速度 PGA 的值, 最后建立以  $I_{PGA}$  为横坐标、 $F(x)$  为纵坐标的易损性曲线。

$$F(x) = P[L_S | IM=x] \quad (6)$$

式中: $F(x)$ 为易损性函数; $P$ 为失效概率; $L_S$ 为结构性能水平; $I_{PGA}$ 为峰值地面加速度 PGA。

具体的分析步骤参见图 2。

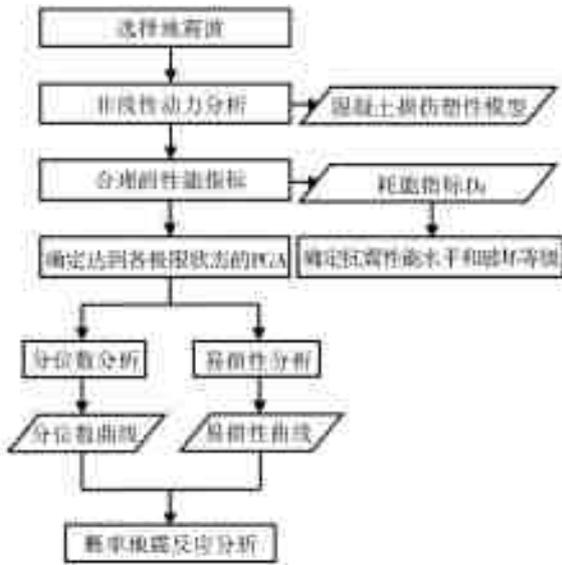


图 2 基于性能的抗震设计方法分析步骤

Fig. 2 Analysis steps of performance-based seismic design method

表 2 重力坝模型的各项参数

Tab. 2 Parameters of the gravity dam model

名称	静态弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	拉伸屈服强度/MPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	无损弹性模量/GPa	阻尼比
坝体 C25	28.0	16.7	1.78	0.20	2 380	20.0	0.05
石英砂岩	59.8	—	—	0.13	2 650	—	—

在分析中主要考虑了静水压力、地震动水压力、扬压力、坝体自重以及地震荷载等主要荷载。动水压力根据规范采用 Westergaard 附加质量进行分析计算,地基分别向上游,下游和垂直方向延伸一倍的坝体宽度和深度,建立该坝体的二维有限元模型,共剖分为 2 610 个单元和 2 735 个结点,地震动输入采用黏弹性人工边界,有限元模型见图 3。

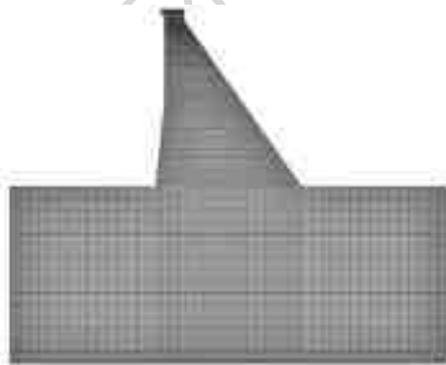


图 3 重力坝二维有限元模型

Fig. 3 2-dimensional finite element model of gravity dam

根据有限元分析可得到该重力坝的前四阶自振频率分别为:4.596 5,9.829 1,10.426,14.877 Hz。可以计算出 Rayleigh 阻尼系数  $\alpha=1.967$  8/s, $\beta=$

## 2 实例分析

### 2.1 计算模型及参数

本文选取的重力坝位于河北省武安市西北部的京娘湖水库,距邯郸市约 60 km。该重力坝属于混凝土重力坝,坝高 81 m,坝顶宽 10.5 m,坝长 185 m,正常蓄水位为 77.5 m。坝基为石英砂岩,硬度达 10 至 12 级。此工程场地抗震设防烈度为 7 度,根据水工建筑物抗震设计标准(GB 51247—2018)查得此工程场地为  $I_1$  级场地。

在计算过程中坝体混凝土采用损伤塑性模型(CDP 模型),以刚度退化为损伤变量,考虑到了在循环加卸载情况下的刚度恢复。在动力分析过程中线弹性阶段的无损弹性模量  $E_0=20.0$  GPa,根据文献[22]在混凝土产生损伤后的弹性模量  $E$  可用无损弹性模量  $E_0$  与损伤因子  $d$  的关系式求出,如下式

$$E=(1-d)E_0 \quad (7)$$

重力坝模型的各项材料参数见表 2。

0.001 1 s。

### 2.2 地震动的选取

在进行 IDA 分析时,一般选取不少于 7 条地震动记录即可满足计算精度的要求。本文根据京娘湖重力坝的场地资料和水工建筑物抗震设计标准(GB 51247—2018),在 Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER)数据库中选取了 6 条与人工设计反应谱相匹配的实测地震动记录以及一条人工合成的地震波。基本信息见表 3,由 SeismoSignal 计算得到其反应谱见图 4。

表 3 选取的地震动记录

Tab. 3 Selected ground motion records

序号	地震名称	年份	震级	峰值地面加速度/g	持续时间/s
1	NorthRidge	1989	7.1	0.568	24.58
2	Imperial valley	1979	6.9	0.313	39.99
3	Friulli	—	—	0.479	20
4	Kobe	1995	7.2	0.345	24.79
5	Sakaria	—	—	0.628	19.98
6	Koyna	1967	6.3	0.474	11
7	人工波	—	—	0.150	20

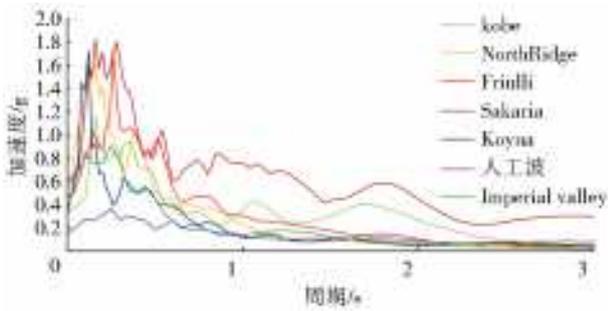


图 4 地震波加速度反应谱  
Fig. 4 Seismic wave acceleration response spectrum

### 2.3 结果分析

将每条地震波的峰值加速度按照一定系数分别调至 0.1~0.8 g,并按水平向和竖向分别导入模型中,通过一系列的非线性分析,输出塑性耗能与总变形能的比值  $D_E$  作为 DM,拟合出一组 IDA 曲线,见图 5。

由图 5 可以看出曲线在  $D_E$  为 0.2 和 0.7 左右的位置有明显拐点,坝体分别达到正常使用极限状态和承载力极限状态,此时对应的 PGA 分别在 0.2 和 0.45 g 左右。当  $0 < PGA \leq 0.1$  g 时,  $D_E$  为 0,说明坝体没有被破坏;当  $0.1$  g  $< PGA \leq 0.45$  g 时,  $D_E$  大致呈指数型增长,说明在中等强度地震作用下,坝体在这一阶段的破坏程度发展迅速;当  $PGA > 0.45$  g 时,  $D_E$  的增长趋势逐渐放缓,坝体接近完全破坏。

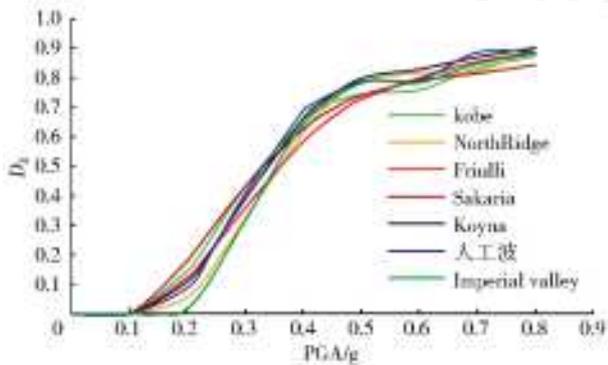


图 5 IDA 曲线簇  
Fig. 5 IDA curve cluster

#### 2.3.1 分位数分析

对 IDA 曲线进行分位数分析时,16%、50%、84%、均值分位曲线以及各分位曲线上对应的正常使用极限状态点和承载力极限状态点见图 6,表 4。

以 84% 的分位数为例(此时具有 84% 的保证率),坝体在峰值地面加速度为 0.219 g 时处于正常使用阶段,满足功能保障性水平;坝体在峰值地面加速度为 0.421 g 时处于损伤控制阶段,满足安全保证性水平。在两种极限状态下的峰值地面加速度均

大于其设计地震的峰值地面加速度 0.15 g,表明坝体的适用性和安全性都可以满足。

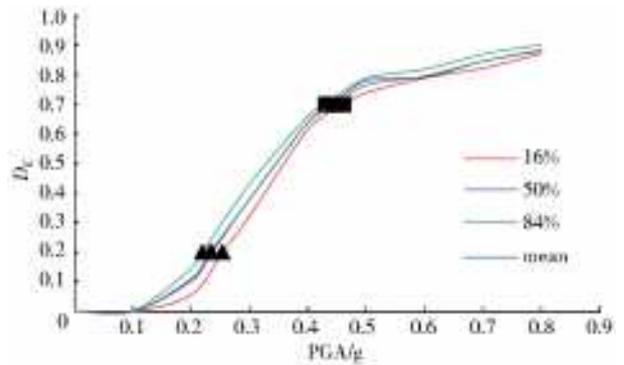


图 6 不同分位的 IDA 曲线  
Fig. 6 IDA curves for different quantiles

表 4 不同分位概率下每个极限状态对应的峰值地面加速度  
Tab. 4 Peak ground acceleration corresponding to each limit state under different fractile probabilities 单位:g

分位概率	正常使用极限状态	承载力极限状态
84%	0.219	0.421
50%	0.235	0.442
均值	0.230	0.431
16%	0.253	0.461

#### 2.3.2 易损性分析

根据重力坝的 IDA 分析结果,分别计算出在不同地震强度下重力坝超越极限状态的概率,由直接拟合法可画出重力坝的地震易损性曲线,见图 7。

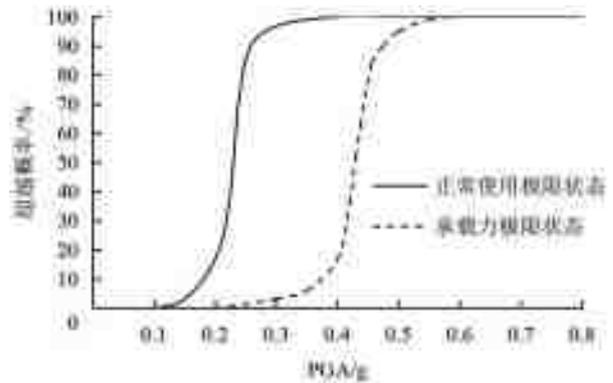


图 7 易损性曲线  
Fig. 7 vulnerability curve

由表 5 可知,在设计地震的作用下,重力坝超越正常使用极限状态的概率为 3%;在 1.5 倍设计地震的情况下,重力坝超越正常使用极限状态的概率达到 65.92%;在 2 倍设计地震的作用下,重力坝超越正常使用极限状态的概率达到 96.83%,超越承载力极限状态的概率为 3.14%。

根据表 5 可计算出在不同地震强度等级下重力坝处于各破坏等级状态的概率,见表 6。在设计地震作用下,重力坝基本无破坏,97% 的概率处于正常

使用阶段,3%处于损伤控制阶段;在1.5倍设计地震的作用下,坝体65.92%的概率处于正常使用阶段,34.08%的概率处于损伤控制阶段;在2倍设计地震作用的情况下,处于正常使用阶段的概率为3.17%,处于防止倒塌阶段的概率为3.14%,而93.69%的概率处于损伤控制阶段。

表5 不同设防水准的超越概率

Tab.5 Surpass probability of different waterproofing standards

设防水准/g	超越概率/%	
	功能保障点	安全保证点
0.1	0	0
0.15	3	0
0.2	16.70	0
0.225	34.08	0
0.3	96.83	3.14
0.4	100	16.70
0.5	100	95
0.6	100	0
0.7	100	0

表6 不同设防水准的破坏概率

Tab.6 Failure probability of different waterproofing standards

设防水准/g	破坏概率/%		
	正常使用阶段	损伤控制阶段	防止倒塌阶段
0.1	100	0	0
0.15	97	3	0
0.2	83.30	16.70	0
0.225	65.92	34.08	0
0.3	3.17	93.69	3.14
0.4	0	83.30	16.70
0.5	0	5	95
0.6	0	0	100
0.7	0	0	100

注:该重力坝设计地震的峰值地面加速度为0.15g,1.5倍设计地震的峰值地面加速度为0.225g,2倍设计地震的峰值地面加速度为0.3g。

综上所述,通过分位数分析得出:IDA曲线中每个极限状态的峰值地面加速度PGA均大于设计地震的峰值地面加速度,从而满足该重力坝的功能保障性水平和安全保证性水平。通过易损性分析得出:在设计地震作用下,处于正常使用阶段的概率接近100%;而在1.5倍设计地震的作用下,65.92%的概率处于正常使用阶段,100%可以保证安全。在2倍设计地震的情况下,93.69%的概率处于损伤控制阶段,满足安全要求。结果表明,该重力坝具有良好的抗震性能,发生全局失效的可能性很小。

### 3 结论

(1)采用IDA方法对混凝土重力坝的抗震性能进行评估,建立了以塑性耗能与总变形能的比值( $D_E$ )作为DM的重力坝抗震性能的评估方法,对基于重力坝抗震性能的3级破坏状态(正常使用阶段、损伤控制阶段和防止倒塌阶段)以及2个极限状态点(正常使用极限状态和承载力极限状态)给出了建议,为评价重力坝的抗震性能提供了一种新的思路。

(2)以京娘湖重力坝为例,应用IDA方法对重力坝进行了抗震性能水平的评价,结果表明:在分位数分析中两个极限状态下的峰值地面加速度均大于该重力坝的设计动荷载的峰值地面加速度,坝体的适用性、安全性都可以得到保障。在易损性分析中,在设计地震作用下,坝体处于正常使用阶段;在1.5倍设计地震作用下坝体处于正常使用状态的概率较大;在2倍设计地震作用下坝体处于损伤控制阶段的概率较大。综上可知,京娘湖重力坝具有良好的抗震性能。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈厚群,徐泽平,李敏.汶川大地震和大坝抗震安全[J].水利学报,2008(10):1158-1167.(CHEN H Q, XU Z P, LI M. Wenchuan earthquake and dam seismic safety[J]. Journal of water conservancy, 2008(10): 1158-1167. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.10.002.
- [2] CHEN G D, JIN D D, MAO J, et al. Seismic damage and behavior analysis of earth dams during the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. Engineering Geology, 2014,180(10):99-129. DOI:10.1016/j.enggeo.2014.06.001.
- [3] LI X N, SHI R. The dynamic stability analysis of Shapai Arch Dam affected by Wenchuan Earthquake[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018,189(5):052020 DOI: 10.1088/1755-1315/189/5/052020.
- [4] 张楚汉,金峰,沈怀至,等.基于功能的高坝抗震安全与风险评价[A].新世纪水利工程科技前沿(院士)论坛[C].天津,2005.(ZHANG C H, JIN F, SHEN H Z, et al. Function-based seismic safety and risk assessment of high DAMS[A]. New century water conservancy technology frontier (academician) BBS[C]. Tianjin, 2005. (in Chinese))
- [5] 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(12):2114-2118.(SHEN H Z, ZHANG C H,

- KOU L H. An evaluation model for earthquake damage of concrete gravity dam based on function[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007(12):2114-2118. (in Chinese) DOI:10.3321/j.issn:1000-0054.2007.12.007.
- [6] 寇立夯,金峰,王进廷. 基于概率的混凝土重力坝地震反应分析[J]. 水利发电学报, 2009, 28(5): 23-28. (KOU L H, JIN F, WANG J T. Probability-based seismic response analysis of concrete gravity DAMS [J]. Journal of hydraulic and power engineering, 2009, 28(05):23-28(in Chinese))
- [7] ALEMBAGHERI M, GHAEMIAN M. Seismic assessment of concrete gravity dams using capacity estimation and damage indexes[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(1): 123-144. DOI: 10.1002/eqe.2196.
- [8] ALEMBAGHERI M, GHAEMIAN M. Damage assessment a concrete arch dam through nonlinear incremental dynamic analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2013 (44): 127-137. DOI: 10.1016/j.soildyn.2012.09.010.
- [9] ALEMBAGHERI M, SEVEDKAZEMI M. Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(1): 41-58. DOI:10.1002/eqe.2457.
- [10] KOWALSKY M J, PRIESTLEY M J N, MACRAE G A. Displacement-based design of RC bridge column in seismic regions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24(12): 1623-1643. DOI: 10.1002/eqe.4290241206.
- [11] CHANAAT Y J. Failure modes approach to safety evaluation of dams[A]. 13th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Vancouver, Canda; 2004.
- [12] ZHANG H Y, ZHANG L J. Seismic performance assessment and potential failure modes of intake towers[J]. Natural Hazards, 2016, 83(3): 1321-1340. DOI:10.1007/s11069-016-2395-9.
- [13] 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, 2018, 40(6): 978-984. (KONG X J, PANG R, ZOU D G, et al. Seismic performance evaluation of high face rockfill dam based on IDA[J]. Journal of geotechnical engineering, 2018, 40(6): 978-984. (in Chinese)) DOI: 10.11779/CJGE201806002.
- [14] 陈灯红, 谢京辉, 杨乃鑫. 基于增量动力分析的混凝土重力坝抗震性能分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 48-55. (CHEN D H, XIE J H, YANG N X. Seismic performance analysis of concrete gravity dam based on incremental dynamic analysis[J]. Journal of water conservancy and transportation engineering, 2018(5): 48-55. (in Chinese)) DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.007.
- [15] 李静, 陈健云, 徐强等. 高拱坝抗震性能评价指标研究[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 118-124. (LI J, CHEN J Y, XU Q, et al. Research on seismic performance evaluation index of high arch dam[J]. Journal of water conservancy, 2015, 46(1): 118-124. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2015.01.016.
- [16] 沈怀至, 金峰, 张楚汉. 基于功能的混凝土重力坝抗震风险模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3323-3328. (SHEN H Z, JIN F, ZHANG C H. A function-based seismic risk model for concrete gravity DAMS [J]. Geotechnical mechanics, 2008, 29(12): 3323-3328. (in Chinese)) DOI:CNKI:SUN:YTLX.0.2008-12-034.
- [17] VAMVASTSIKOS D. Seismic performance uncertainty estimation via IDA with progress accelerogramwise Latin hypercube sampling [J]. Journal of Structure and Engineering, 2014, 140(8): 657-670. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001030.
- [18] VAMVASTSIKOS D. Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis[D]. Dissertation, Stanford University, 2002.
- [19] VAMVASTSIKOS D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514. DOI:10.1002/eqe.141.
- [20] HARIRI-ARDEBILI M A, SAOUMA V E, et al. Quantification of seismic potential failure modes in concrete dams [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2016, 45(6): 979-997. DOI: 10.1002/eqe.2697.
- [21] ARDEBILI M H, SAOUMA V. Collapse fragility curves for concrete dams: comprehensive study [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(10): 101-115. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001541.
- [22] 刘巍, 徐明, 陈忠范. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定及验证 [J]. 工业建筑, 2014(S1): 167-171. (LIU W, XU M, CHEN Z F. Parameter calibration and verification of ABAQUS concrete damage plastic model [J]. Industrial Construction, 2014(S1): 167-171. (in Chinese))