

张敬宜, 李明超, 张佳文, 等. 基于增量动力分析与多层感知机的混凝土坝地震易损性评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 1030-1039. ZHANG J Y, LI M C, ZHANG J W, et al. Seismic vulnerability assessment of concrete dam based on incremental dynamic analysis and multilayer perceptron[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 1030-1039. (in Chinese)

基于增量动力分析与多层感知机的 混凝土坝地震易损性评估

张敬宜, 李明超, 张佳文, 张梦溪, 闫文钰

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350)

摘要:传统坝体地震易损性评估所采用的非线性数值模拟手段的计算量很大,为兼顾大坝地震易损性评估的高效性与准确性,提出基于增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)与多层感知机(multilayer perceptron, MLP)的混凝土坝地震易损性评估方法。以我国西北地区某混凝土重力坝为例,建立三维坝体-库水-地基有限元模型并开展多组地震响应计算。利用等步长调幅处理所选地震动记录,并采用三向地震进行幅值输入;选取峰值[地面]加速度(peak ground acceleration, PGA)为地震动强度指标,坝顶顺河向位移为大坝损伤指标,初步进行混凝土坝易损性分析。提取各地震动特性参数作为输入,坝顶顺河向位移为输出,训练并测试 MLP 模型;扩充地震动以获取各地震动特性参数,利用 MLP 模型进行坝顶顺河向位移的快速预测,实现有限元结果的扩充,进行混凝土坝易损性分析,并绘制易损性曲线。结果表明,将 MLP 模型引入分析可有效扩充数据量,利用 IDA-MLP 耦合方法建立的大坝地震易损性曲线符合实际规律,验证了采用 MLP 模型预测混凝土坝损伤指标进而扩充数据的可行性,在保证精度的情况下大幅提高计算效率,为同类型水工建筑物的抗震安全评价和防震减灾提供科学依据。

关键词:混凝土重力坝;地震易损性;增量动力分析;坝顶顺河向位移;多层感知机

中图分类号: TV642.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbqk.2023.0099

我国西部和南部地区水能资源丰富^[1],但这些地区的水利工程往往面临着高海拔、高边坡、高地震烈度等复杂情况^[2]。混凝土坝作为复杂的大型水工建筑物,在强震作用下会出现不可逆转的损害,其震害会对人民生命安全和国家经济造成巨大损失^[3-4]。因此,研究坝体结构地震易损性对保证混凝土坝在地震作用下安全运行具有重要意义。

20 世纪 70 年代, Cornell^[5] 提出地震易损性分析是一种预测结构在不同地震强度作用下发生各级破坏概率的方法,开始运用于工程领域; Ellingwood 等^[6] 在 2001 年对蓝石混凝土重力坝进行不同洪水水平下的易损性研究。随后,许多学者针对不同极限状态^[7-8]、划分方法^[9-12]、地震波场输入^[13-15] 下的重力坝易损性以及高坝抗震分析进行深入研究。

在不同强度的地震作用下,混凝土坝的动力响

应分析方法是研究结构易损性的关键。1977 年, Bertero^[16] 最先提出增量时程分析的概念; 2002 年, Vamvatsikos^[17] 对此概念进行完善,形成了增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)法。IDA 法是一种以非线性动力时程分析为基础的方法,概念简单且能全面精确地评估结构物在地震作用下全时段的破坏过程^[18],在基于性能的结构易损性分析方面较传统方法有很大优势,广泛应用于建筑^[19]、桥梁^[20]、水工结构^[9] 等领域。贺路翔等^[21] 基于 IDA 方法研究在地震作用下光照混凝土重力坝的整体抗震性能; 杨紫辉等^[22] 基于 IDA 方法分析了金安桥碾压混凝土重力坝的非溢流坝段在不同峰值[地面]加速度(peak ground acceleration, PGA)下的损坏过程以及在极端荷载下的潜在失效模式; Amirpour 等^[23] 基于 IDA 法,发现坝顶位移比上下游超应力区峰值

收稿日期: 2023-08-01 修回日期: 2023-09-26 网络出版时间: 2023-10-11

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231009.0856.003>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179139; 51879185); 天津大学自主创新基金项目(2023XJD-0065)

作者简介: 张敬宜(2001—),女,河南息县人,主要从事水工结构工程安全分析研究。E-mail: zzzjyy_1223@tju.edu.cn

通信作者: 李明超(1979—),男,湖北仙桃人,教授,博士生导师,主要从事水利工程仿真与安全研究。E-mail: LMC@tju.edu.cn

应力更适合作为损伤指标。在 IDA 方法的基础上,一些新的性能指标、影响因素及改进方法^[24-26] 也被提出。

IDA 方法扩展到三维有限元模型时其耗时明显增大,这与现阶段对于非线性动力参数的选取、多种指标的确定以及大量组数地震动的输入等要求是矛盾的。近年来,随着算法模型的发展,将机器学习算法引入有限元计算以进行结构的行为分析预测^[27-28] 被广泛采用,极大节省了计算成本。部分学者^[29-36] 在基于机器学习的结构地震易损性分析方面不断研究。Zhou 等^[37] 基于有限元的结果,引入支持向量机,建立了混凝土堆石坝的易损性曲线;于京池等^[38] 提出基于遗传算法的多层前馈神经网络代替部分非线性有限元计算,以大岗山拱坝为例进行地震易损性分析;靳聪聪等^[39] 分析糯扎渡高心墙堆石坝的地震易损性,采用人工神经网络与多条带分析相结合的方法,提出 PGA 与相对震陷率的关系模型,并得到大坝三维地震易损性曲线。但目前混凝土坝地震易损性分析中震害等级划分、破坏指数计算多采用单一参数,而不同的结构对特定的地震动强度参数有不同的适应性,分析结果随之不同。因此,有必要采用多个地震动强度参数进行输入以获得更为准确的结构地震易损性分析结论,为基于性能的抗震设计提供更有力的数据支持和更可靠的地震损失评估。

为解决 IDA 分析过程中计算时间过长、计算数据庞大、输入多等问题,以某典型的混凝土重力坝为研究对象,建立三维库水-坝体-地基有限元模型,将多层感知机(multilayer perceptron, MLP)与 IDA 方有机融合,分析混凝土重力坝的地震易损性并绘制其易损性曲线,在保证精度的情况下有效减少有限元计算时间,提高大坝地震易损性分析效率。

1 研究方法

1.1 基于 IDA 的易损性分析方法

1.1.1 方法步骤

IDA 方法的实质是对结构施加地震动记录,并将其按照一定的比例系数调整为强度不同的多组地震动,进行动力时程分析,得到结构在不同强度的地震动作用下的损伤全过程,分析性能参数与地震动强度之间的关系,绘制 IDA 曲线,评价结构的抗震性能。

IDA 法的主要流程:合理建立结构的数值模拟模型;选取与场地条件相匹配的地震波,并选择恰

当地震动强度指标(intensity measure, IM)和损伤指标(damage measure, DM);对选取的地震波进行调幅;采取 IDA 法对已建立模型进行非线性动力响应计算,并绘制以 DM 为横坐标、IM 为纵坐标的 IDA 曲线。

1.1.2 IDA 法的参数指标及易损性分析

地震易损性^[40] 指在可能遭遇的不同强度地震动的作用下结构发生某种破坏程度的可能性。地震易损性曲线是指在一定强度(IM)的地震动作用下结构达到或者超越某一性能水准的概率^[41],可用公式(1)进行表达:

$$P_f = P(R \geq L_s | IM = x) \quad (1)$$

式中: P_f 和 P 分别为结构的易损性函数和其达到不同震害等级的失效概率; R 为结构在特定地震动作用下的损伤; L_s 为结构在不同破坏状态下对应的性能水准限值; x 为地震动强度。

选取 PGA 作为地震动强度指标变量,选取坝顶顺河向位移为损伤指标,基于 IDA 法研究大坝的易损性。在通常情况下,结构在地震作用下的反应参数(位移、应力和损伤指数等)满足对数正态分布^[42],表达式为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{\ln x}^2}(\ln x - \mu_{\ln x})^2\right] \quad (2)$$

则其易损性曲线表示为

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln x - m_x}{\beta_x}\right) \quad (3)$$

其中:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x \quad (4)$$

$$\beta_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln x - m_x)^2} \quad (5)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布; m_x 和 β_x 为达到一定性能水平所需的 IM 的对数平均数、对数标准差。利用式(3)~(5)即可获得结构的地震易损性曲线,进一步预测结构在遭遇地震动作用时达到某一破坏状态的超越概率。

1.2 基于 IDA-MLP 的易损性分析方法

采用多地震动输入可以获取更为准确的结构地震易损性分析结论,但同时会增加计算时间,故将 MLP 引入 IDA 法实现大坝地震易损性的高效率分析。

1.2.1 多层感知机网络

在早期,感知机模型是一种线性模型,只能用于处理简单的二元分类问题。因此,需要增加隐藏层并使用激活函数,有效提高感知机模型的非线性表

达能力。多层感知机训练方式灵活,在数据复杂庞大时具有较高的准确率和泛化能力,可以更好地解决非线性问题,故选取 MLP 作为预测大坝损伤指标的机器学习算法。

MLP 模型又称为多层神经网络,为具有较多隐含层的神经网络^[43]。它与浅层神经网络相比,具有更多的网络参数,可以更好解决局部的最优问题^[44],因而被广泛应用于机器学习、数据挖掘等领域。多层感知机内部主要分为 3 类神经网络层:输入层(用于输入数据集)、隐藏层(用于数据计算)和输出层(用于输出神经网络处理后的数据),基本结构见图 1。MLP 模型具有 1 个线性关系 $z = \sum w_i x_i + b$ 和 1 个激活函数 $f(z)$ 。本文中 MLP 模型共分为 5 层,分别为 1 个输入层、3 个隐藏层和 1 个输出层。

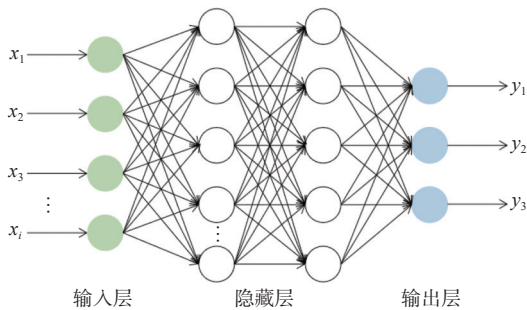


图 1 多层感知机模型的基本结构

Fig. 1 The basic structure of the multilayer perceptron model

1.2.2 模型评估函数

将平均绝对误差(E_{MA})、均方误差(E_{MS})、决定系数(R^2)作为 MLP 模型的评估指标。计算公式为

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{i,exp} - y_{i,pred}| \quad (6)$$

$$E_{MS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{i,exp} - y_{i,pred})^2} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,pred} - \bar{y}_{i,exp})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{i,exp} - \bar{y}_{i,exp})^2} \quad (8)$$

式中: n 为预测值数量; $y_{i,exp}$ 为实际值; $\bar{y}_{i,exp}$ 为实际值 $y_{i,exp}$ 的平均值; $y_{i,pred}$ 为预测值。

1.2.3 预测方案

基于 IDA 的地震易损性分析需要得到坝顶特征点的水平向位移,进而绘制地震易损性曲线,故 MLP 的输入可选取表征地震动的强度指标 IM_s ,用于预测不同破坏状态下的坝顶水平向位移。其中,与幅值相关的 IM_s 为 PGA 、 I_A ,与频谱相关的 IM_s

为 V_{max}/A_{max} 、 I_C 、 T_p ,与持时相关的 IM_s 为 CAV 。考虑地震动的三要素包括了幅值、频谱和持时,故提取 PGA 、 I_A 、 V_{max}/A_{max} 、 I_C 、 CAV 这 5 个地震强度指标。

2 基于 IDA 的大坝地震易损性分析

2.1 有限元模型

混凝土重力坝有限元分析模型由坝体、库水和地基 3 部分构成,选取大坝溢流坝段作为研究对象,并进行合理简化。采用有限元软件建立与坝段实际尺寸相同的三维有限元模型。同时为了降低基岩及边界条件对与有限元计算结果的影响,从大坝坝踵、坝趾处分别向上游、下游取大坝坝高的 2.5 倍,坝基深度取大坝坝高的 2.5 倍。坝体和地基部分的网格采用了八节点一次线性六面体单元。整个模型划分实体单元 5 526 个,节点数 7 952 个,见图 2。库水力学参数:密度为 $1\ 000\ \text{kg/m}^3$,屈曲模量为 $2.07\ \text{GPa}$;坝基岩体与坝体混凝土的力学参数见表 1,其中,岩体采用线弹性模型,坝体混凝土采用混凝土塑性损伤(concrete damaged plasticity, CDP)模型,其塑性损伤参数见表 2。采用无质量地基法考虑坝体-地基相互作用,采用声学单元法考虑坝体-库水相互作用。坝体三维模型施加的边界条件如下:基岩底部约束全部位移,坝基的上游和下游边界分别进行顺河流向位移的约束,坝体的左右岸边界分别进行横河流向位移的约束。

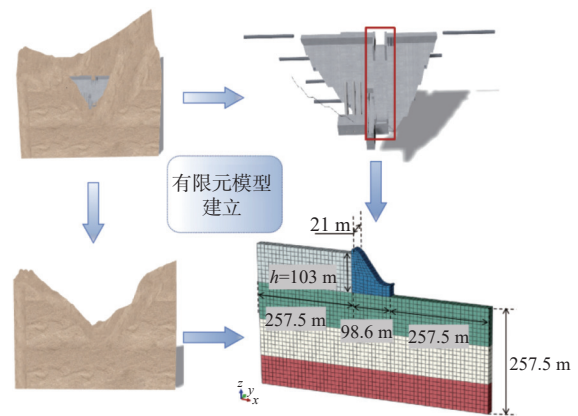


图 2 坝体有限元网格划分过程

Fig. 2 Dam finite element meshing process diagram

表 1 坝体及地基力学性能参数

Tab. 1 Mechanical performance parameters of dam and foundation

名称	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	杨氏模量 E / GPa	泊松比 μ
坝体	2 643	31.0	0.20
地基	层1	2 500	0.23
	层2	2 600	0.21
	层3	2 700	0.20

表2 混凝土塑性损伤参数

Tab. 2 Concrete plastic damage parameters

膨胀角	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性参数
30	0.1	1.16	0.667	0.000 5

2.2 地震动选取与输入

坝址区场地 50 年超越概率为 10%, 设计地震动峰值加速度 A_{max} 为 0.19g, 地震动反应谱特征周期 T_g 为 0.45 s, 地震影响系数最大值 α_{max} 为 0.475。结合工程场地参数以及《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)^[45], 从美国太平洋地震研究中心 PEER 地震波数据库选取 20 条地震动, 其反应谱见图 3, 相关信息见表 3。

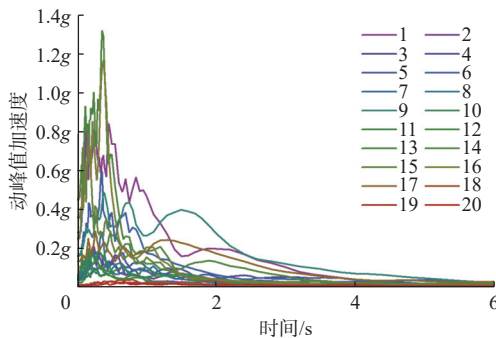


图3 20条地震动的反应谱

Fig. 3 20 ground motion response spectra

表3 PEER 选取的地震动记录

Tab. 3 Ground motion records selected by PEER

地震	年份	地震台	震级
Helena_Montana-01	1935	Carroll College	6
Helena_Montana-02	1935	Helena Fed Bldg	6
Humboldt Bay	1937	Ferndale City Hall	5.8
Imperial Valley-01	1938	El Centro Array #9	5
Northwest Calif-01	1938	Ferndale City Hall	5.5
Northern Calif-01	1941	Ferndale City Hall	6.4
Imperial Valley-03	1951	El Centro Array #9	5.6
Northwest Calif-03	1951	Ferndale City Hall	5.8
Imperial Valley-04	1953	El Centro Array #9	5.5
Central Calif-01	1954	Hollister City Hall	5.3
Imperial Valley-05	1955	El Centro Array #9	5.4
San Francisco	1957	Golden Gate Park	5.28
Northern Calif-04	1960	Ferndale City Hall	5.7
Hollister-02	1961	Hollister City Hall	5.5
Parkfield	1966	San Luis Obispo	6.19
Northern Calif-05	1967	Ferndale City Hall	5.6
Northern Calif-06	1967	Hollister City Hall	5.2
Lytle Creek	1970	Wrightwood - 6074 Park Dr	5.33
Hollister-03	1974	Hollister City Hall	5.14
Northern Calif-07	1975	Cape Mendocino	5.2

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[46]中 5.1.2 条文说明, 沿结构基础的底部同时进行三向输入, 其地震动参数 PGA 的比例取水平主向: 水平次向: 竖向=1.00: 0.85: 0.65^[47]。采用上述组合, 利用 IDA 法分别输入选取的 20 条地震动进行三维地震作用。

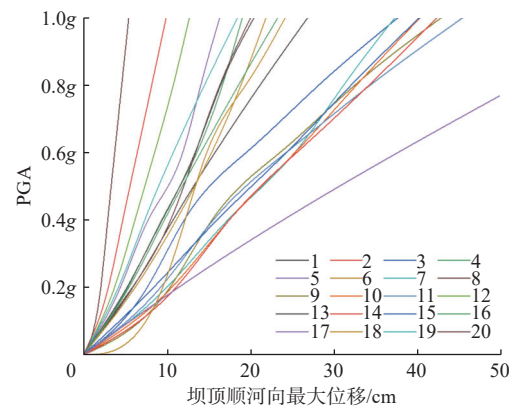
根据式(9)对选取的地震动调幅:

$$a(t) = \lambda \frac{A(t)}{|A_{max}|} \quad (9)$$

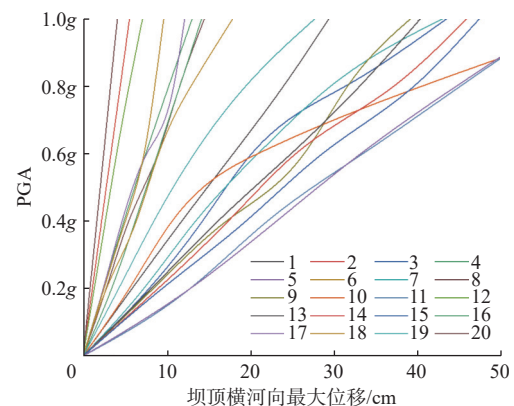
式中: $A(t)$ 为选取原始地震动的加速度; $a(t)$ 为调幅处理后的地震动加速度; $|A_{max}|$ 为原始地震动记录的峰值加速度; λ 为地震动调幅比例系数。

2.3 IDA 分析结果

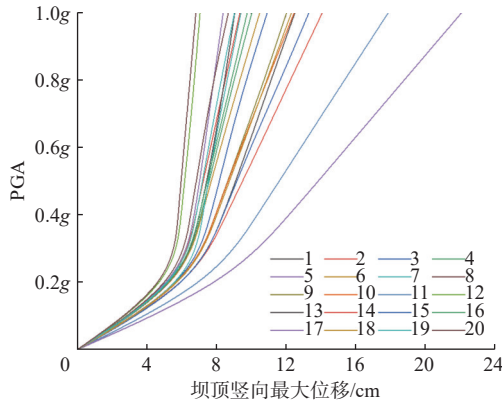
对表 3 中所列的 20 条地震动记录进行等步长法调幅, 地震动的水平主向(顺河流向)分量按 PGA 分别调整为 0.2g、0.4g、0.6g、0.8g 和 1.0g, 水平次向(横河流向)和竖向的调整系数分别为水平主向的 0.85 和 0.65, 生成 100 个地震动记录。利用 100 个地震动记录样本, 对三维模型坝顶一特征点的顺河流向、横河流向和竖向最大位移进行 IDA 分析。选取有限元计算结果作为 DM(x 轴), 并将计算结果所对应的 PGA 作为 IM(y 轴), 得到 IDA 曲线簇, 见图 4。



(a) 坝顶顺流向最大位移 IDA 曲线簇



(b) 坝顶横流向最大位移 IDA 曲线簇



(c) 坝顶竖向最大位移 IDA 曲线簇

图 4 模型 IDA 曲线簇

Fig. 4 IDA curve clusters for the model

2.4 震害等级划分

重力坝在不同地震作用下出现的损伤不同,在进行地震易损性分析时,需要确定地震作用下震害

等级划分标准的定义^[48],见表 4,并选取位移性能水准的阈值。

结合关于地震作用下坝体位移性能的划分标准^[42, 48-49],统计 IDA 分析的重力坝动力响应结果。基于表 4 中的重力坝五级震害定义和坝顶位移这一损伤指标进行重力坝震害等级的确定,其中 H 为选取重力坝段的最大坝高,为 103 m。

2.5 坝体易损性分析

基于生成的 100 条地震动记录对模型进行有限元动力计算,统计 IDA 分析结果得到重力坝在不同性能水准下的 m_x 和 β_x 值,其结果见表 5。

由此可以得到以坝顶特征点顺河向位移为损伤指标的混凝土重力坝在不同 PGA 下超越各个性能水准的超越概率,见表 6。根据表中数据,绘制混凝土重力坝的地震易损性曲线,见图 5。

表 4 重力坝震害等级划分标准

Tab. 4 Classification standard of gravity dam earthquake damage grade

等级	性能水准	具体描述	坝顶位移 DM/cm
一级	基本完好	重力坝处于基本完好的状态,仅在局部出现轻微损伤,可以正常使用,整体处于弹性状态	0~0.095H% (0 < DM ≤ 9.785)
二级	轻微损伤	重力坝的整体结构出现轻微损伤,经过略微修复后即可恢复到正常使用状态	0.095H%~0.159H% (9.785 < DM ≤ 16.377)
三级	中等损伤	重力坝出现大多数的明显裂缝,但未贯穿,局部出现轻微渗漏,需要进行整体修复才可以正常使用	0.159H%~0.249H% (16.377 < DM ≤ 25.647)
四级	严重损伤	重力坝大部分部位出现贯穿性裂缝,渗漏现象严重,其附属结构严重损坏,难以修复	0.249H%~0.367% (25.647 < DM ≤ 37.801)
五级	溃坝	重力坝出现不可修复的损伤破坏,丧失大坝设计时的预定功能,出现溃坝现象	大于 0.367% (DM > 37.801)

表 5 重力坝地震易损性函数参数

Tab. 5 Seismic vulnerability function parameter of gravity dam

性能水准	对数均值 m_x	对数标准差 β_x
基本完好	1.149 114 11	0.530 131 929
轻微损伤	1.583 015 43	0.507 099 055
中等损伤	1.945 093 276	0.324 137 869
严重损伤	2.146 384 607	0.107 788 576
溃坝	2.158 048 538	0.194 822 863

表 6 混凝土重力坝各个性能水准的超越概率

Tab. 6 Probability of exceeding each performance level

PGA	性能水准					%
	基本完好	轻微损伤	中等损伤	严重损伤	溃坝	
0.2g	19.49	3.96	0	0	0	
0.4g	67.27	34.90	2.93	0.29	0	
0.6g	88.73	65.97	28.22	17.58	2.95	
0.8g	96.04	83.62	63.95	50.34	34.12	
1.0g	98.52	92.20	86.01	81.53	76.97	

采用工程场地基准期 50 年内超越概率 10% 时的基岩动峰值加速度 0.19g 作为设计地震动峰值加速度。该重力坝受到设计地震动作用时,重力坝坝顶顺河向位移大于 9.785 cm,即超越基本完好的概率为 19.49%,有约 80% 的概率属于基本完好状态,而超越严重损伤与溃坝的概率为零,大概率出现轻微损伤,若遭遇地震,震后进行稍微修复即可恢复重力坝的正常功能,继续使用。

3 耦合 IDA 与 MLP 的大坝地震易损性分析

3.1 基于 MLP 的大坝地震损伤预测

基于有限元计算以及 IDA 方法分析得到在不同 PGA 下坝顶顺河向位移的结果,将其引入 MLP 模型中,训练可以表示坝顶位移与 IM_s (PGA、 I_A 、 V_{max}/A_{max} 、 I_C 、CAV) 之间关系的 MLP 模型,其中这 5 个 IM_s 均可利用 SeismoSignal 软件直接获得。

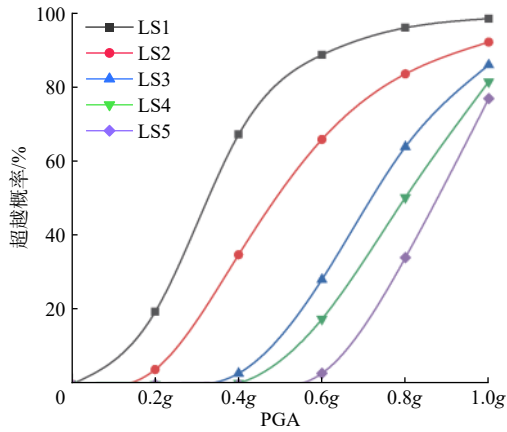


图 5 基于 IDA 的大坝地震易损性曲线
Fig. 5 Dam seismic vulnerability curves based on IDA

基于 IDA-MLP 的大坝地震易损性分析流程见图 6, 具体步骤如下: (1) 将通过有限元计算得到的各极限状态的 20 组数据(即 100 条地震动的 5 个振动响应指标和坝体位移)划分为两部分, 其中, 15 组即 75 条地震动数据作为 MLP 模型的训练集, 剩余 5 组即 25 条地震动数据作为 MLP 模型的测试集。(2) 通过训练得到不同 IM_s 下对应的坝顶顺河向位移的 MLP 模型。(3) 扩充选取地震动记录 300 个, 并提取其振动响应指标。(4) 利用 MLP 模型对不同极限破坏状态下的坝顶位移进行预测, 实现坝顶顺河向位移这一损伤指标数据的扩充, 并绘制易损性曲线。

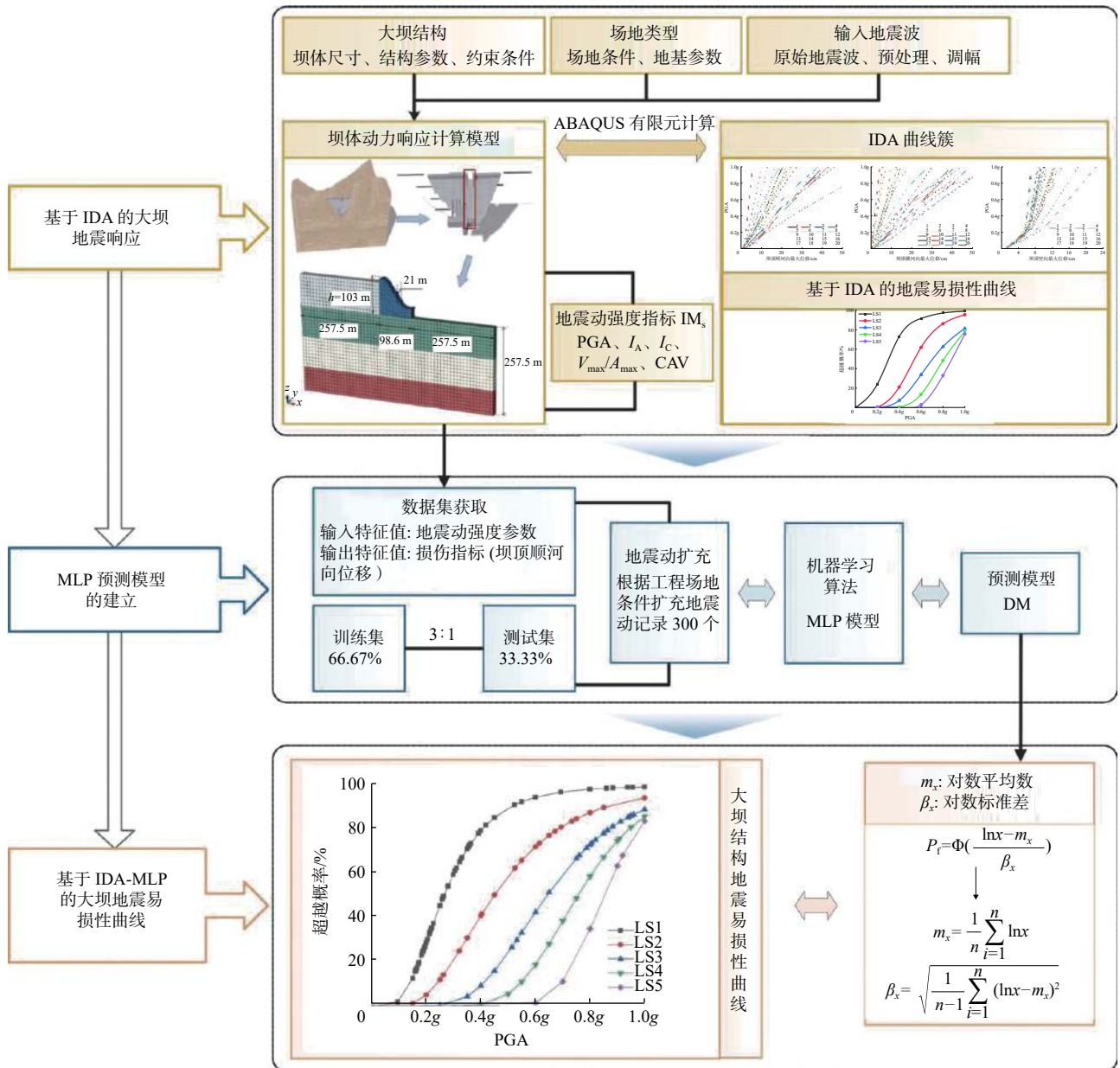


图 6 基于 IDA-MLP 的大坝地震易损性分析流程
Fig. 6 Flow chart of seismic vulnerability analysis of dams based on IDA-MLP

3.2 基于 IDA-MLP 的大坝地震损伤预测效果评估

采用 MLP 算法预测损伤指标即坝顶顺河向位移与理论计算的损伤指标对比结果, 见图 7, 图中圆点所代表的预测值越接近预测值和理论值相同的等值线, 代表预测精度越高。从图 7 可以看出, 经过训练后 MLP 模型的预测值集中在等值线周围, 决定系数(R^2)为 0.960 2, 均方误差(E_{MS})为 0.005 6, 平均绝对误差(E_{MA})为 0.056 1, 这些评价指标的数值表明, MLP 模型具有较高的预测准确率, 可以很好地解决非线性问题。采用该模型预测坝体损伤指标具有可行性, 可有效扩充损伤指标进而分析大坝地震易损性。

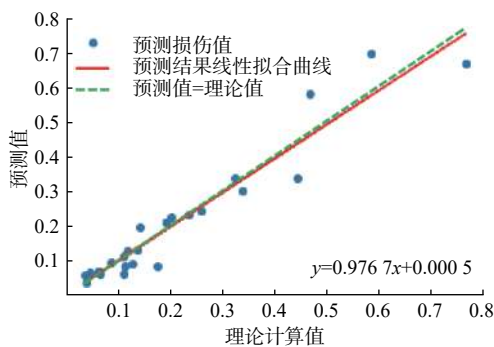


图 7 预测损伤值与理论计算损伤值的对比
Fig. 7 Comparison of predicted damage values with calculated damage values

3.3 基于 IDA-MLP 的大坝易损性曲线

利用已经训练好的 MLP 模型预测大坝在扩充地震动作用下不同极限状态时的损伤指标, 得到对应的损伤指标数据集, 使用此模型开展单次损伤指标预测的计算时间为 10 s。基于式(3)~(5)对扩充后的数据进行计算, 可得到重力坝在不同性能水准下的 m_x 、 β_x 值, 统计分析得到混凝土重力坝在不同 PGA 下超越各位移性能水准的超越概率, 绘制得到基于 IDA-MLP 算法模型扩充预测的易损性曲线, 见图 8, 可以看出, MLP 模型扩充预测出的损伤指标(坝顶顺河向位移)符合有限元计算数据的基本规律, 基于 IDA-MLP 算法模型扩充预测的易损性曲线和基于有限元计算的理论易损性曲线总体一致, 利用 MLP 模型扩充数据进行坝体易损性分析具有较好的预测性能。

基于 100 个地震动记录进行非线性数值模拟分析, 其中对大坝施加一个地震动记录进行动力时程分析的时间为 10 min, 共需 1 000 min。MLP 模型基于 300 个地震动记录开展损伤指标预测所需时间

为 10 s, 利用算法模型可节约计算工作量达 75%。在保证一定的预测精度的情况下, MLP 模型可以增补有限元非线性动力计算结果, 构造出更多的损伤指标数据, 保证坝体易损性曲线的绘制结果更接近真实情况, 提高大坝地震易损性分析效率。

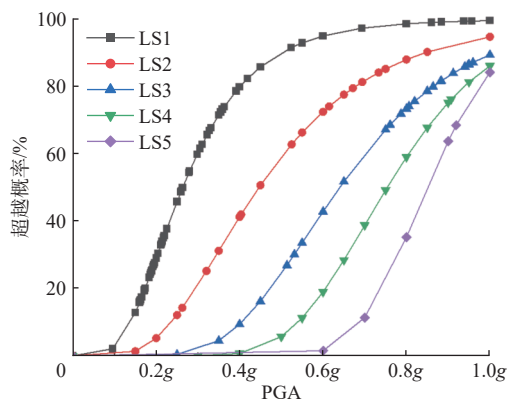


图 8 基于 IDA 和 MLP 的坝体地震易损性曲线
Fig. 8 Seismic vulnerability curve of dam body based on IDA and MLP

4 结论

本文依托实际工程, 选取某西北地区重力坝的溢流坝段, 建立三维坝体-库水-地基有限元模型, 采用多组输入进行基于 IDA 法重力坝地震易损性分析以获得更为准确的结论, 同时结合 MLP 机器学习算法, 对有限的损伤指标进行扩充, 实现了准确高效的混凝土重力坝地震易损性分析。

基于 IDA 法对混凝土重力坝进行地震易损性分析, 并绘制了坝顶顺河向位移、横河向位移和竖向位移的 IDA 曲线簇以及地震易损性曲线。结果表明, 选取的重力坝在设计地震动作用下发生的震害等级较低, 有约 80% 的概率属于基本完好状态。

将 MLP 模型引入 IDA 法, 提出了基于 IDA-MLP 的混凝土重力坝地震易损性分析方法, 结果表明, MLP 模型经过训练后, 其预测损伤指标的精度较高, 决定系数(R^2)为 0.960 2, 均方误差(E_{MS})为 0.005 6, 平均绝对误差(E_{MA})为 0.056 1, 基于该方法可以构造更多的分析数据以扩充有限元动力计算结果, 节约计算工作量达 75%, 减少了非线性动力计算时间, 尽可能接近真实地进行快速准确预测大坝地震易损性并绘制易损性曲线, 提高大坝地震易损性分析效率。

由于问题的复杂性, 本文选取位移指标作为大坝损伤指标, 后续研究还应考虑其他损伤指标因子, 更为全面地分析重力坝地震易损性。目前所采用

的样本数据是混凝土重力坝在设计地震动下的有限元计算结果,因此今后仍需要结合数值模拟计算和实测结果更深入地进行探索。

参考文献:

- [1] 梁辉. 混凝土坝-地基体系整体稳定地震易损性分析和抗震安全评价[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [2] 谭界雄, 任翔, 李麒, 等. 论新时代水库大坝安全[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 149-153. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.05.023.
- [3] 章明旭, 王进廷. 高混凝土坝抗震安全风险评评估框架[J]. 水力发电学报, 2020, 39(11): 13-20. DOI: 10.11660/slfdbx.20201102.
- [4] 孔宪京, 陈健云, 邹德高. 高坝抗震安全理论发展趋势研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(7): 1-11. DOI: 10.11660/slfdbx.20200701.
- [5] CORNELL C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of The Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583. DOI: 10.1785/BSSA0580051583.
- [6] ELLINGWOOD B, TEKIE P B. Fragility analysis of concrete gravity dams[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2001, 7(7): 41-48. DOI: 10.1061/(asce)1076-0342(2001)7:2(41).
- [7] LUPOI A, CALLARI C. The role of probabilistic methods in evaluating the seismic risk of concrete dams[M]. Dordrecht: Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-94-007-1448-9_15.
- [8] LUPOI A, CALLARI C. A probabilistic method for the seismic assessment of existing concrete gravity dams[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2012, 8(10): 985-998. DOI: 10.1080/15732479.2011.574819.
- [9] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2020.0041.
- [10] ABDELHAMID H, MAHMOUD B, HUSSEIN M. Seismic risk analysis of concrete gravity dams under near-fault ground motions[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 256-259: 2240-2243. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.2240.
- [11] 王超, 张社荣, 黎曼, 等. 基于损伤指数模型的重力坝地震破坏等级划分[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(6): 218-226. DOI: 10.13197/j.eeev.2014.06.218.wangc.027.
- [12] 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. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2007.12.011.
- [13] 李明超, 张佳文, 张梦溪, 等. 地震波斜入射下混凝土重力坝的塑性损伤响应分析[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1326-1338, 1349. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190538.
- [14] ZHANG J W, LI M C, HAN S. Seismic analysis of gravity dam-layered foundation system subjected to earthquakes with arbitrary incident angles[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(2): 4021279. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002268.
- [15] 张佳文, 李明超, 韩帅, 等. 非一致地震作用下高坝-复杂地基体系动力响应分析[J/OL]. 水利学报: 1-13. <https://hfffg1b13095ec5284139sbbcf6fxxqbbvv6vbcfgfy.ed.s.tju.edu.cn/10.13243/j.cnki.slxb.20230019>, 2023-09-21.
- [16] BERTERO V V. Strength and deformation capacities of buildings under extreme environments[J]. Structural Engineering and Structural Mechanics, 1977, 53(1): 95-102.
- [17] VAMVATSIKOS D. Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis[D]. Palo Alto: Stanford University, 2002.
- [18] 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. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.007.
- [19] 陈强, 申允, 杨龙, 等. 基于IDA的基础隔震站房结构地震易损性分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 1088-1093. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1513.
- [20] 张健, 师新虎, 刘志强. 大跨度整体式高墩桥梁地震易损性分析[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(3): 212-219. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1355.2023.03.033.
- [21] 贺路翔, 陈灯红, 杨紫辉, 等. 基于IDA的重力坝三维系统抗震性能研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 159-168. DOI: 10.13577/j.jnd.2019.0417.
- [22] 杨紫辉, 陈灯红, 贺路翔, 等. 基于IDA的金安桥混凝土重力坝潜在失效模式研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(2): 78-89.
- [23] AMIRPOUR A, MIRZABOZORG H. Quantifying the qualitative limit-states using IDA approach in concrete arch dams[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(11): 7729-7740. DOI: 10.1007/s13369-014-1393-z.
- [24] 刘肖军, 陈文龙, 宋文帅, 等. 基于改进IDA的混凝土坝地震易损性研究[J]. 中国科学:技术科学, 2018, 48(10): 1103-1112. DOI: 10.1360/N092018-00280.
- [25] 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. DOI: 10.11779/CJGE201806002.

- [26] PAN J W, XU Y J, JIN F. Seismic performance assessment of arch dams using incremental nonlinear dynamic analysis[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, 19(3): 305-326. DOI: 10.1080/19648189.2014.960950.
- [27] SONG L F, XU B, KONG X J, et al. Reliability analysis of 3D rockfill dam slope stability based on the Copula function[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(3): 04021001. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001932.
- [28] 苏怀智, 吴中如, 温志萍, 等. 遗传算法在大坝安全监控神经网络预报模型建立中的应用[J]. *水利学报*, 2001(8): 44-48. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2001.08.00.
- [29] WANG Z Y, PEDRONI N, ZENTNER I, et al. Seismic fragility analysis with artificial neural networks: application to nuclear power plant equipment[J]. *Engineering Structures*, 2018, 162: 213-225. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.02.024.
- [30] SUN B Y, ZHANG Y T, HUANG C G. Machine learning-based seismic fragility analysis of large-scale steel buckling restrained brace frames[J]. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 2020, 125(2): 755-776. DOI: 10.32604/cmes.2020.09632.
- [31] 韩小雷, 蔡燕飞, 杨明灿, 等. 钢筋混凝土框架结构震损预测模型参数敏感性[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(4): 563-571. DOI: 10.11990/jheu.202105031.
- [32] KAZEMI F, ASGARKHANI N, JANKOWSKI R. Machine learning-based seismic fragility and seismic vulnerability assessment of reinforced concrete structures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 166: 107761. DOI: 10.1016/j.soildyn.2023.107761.
- [33] 闫业祥, 孙利民. 基于高斯过程回归的桥梁多变量地震易损性分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(23): 27-35. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.23.004.
- [34] HUANG G, QIU W G, ZHANG J R. Modelling seismic fragility of a rock mountain tunnel based on support vector machine[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 102: 160-171. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.09.002.
- [35] REZAEI H, ZARFAM P, GOLAFSHANI E M, et al. Seismic fragility analysis of RC box-girder bridges based on symbolic regression method[J]. *Structures*, 2022, 38: 306-322. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.12.058.
- [36] HUANG Z K, ARGYROUDIS S A, PITILAKIS K, et al. Fragility assessment of tunnels in soft soils using artificial neural networks[J]. *Underground Space*, 2022, 7(2): 242-253. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.07.007.
- [37] ZHOU Y, ZHANG Y, PANG R, et al. Seismic fragility analysis of high concrete faced rockfill dams based on plastic failure with support vector machine[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 144: 106587. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106587.
- [38] 于京池, 金爱云, 潘坚文, 等. 基于GA-BP神经网络的拱坝地震易损性分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(8): 1321-1329. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.25.028.
- [39] 靳聪聪, 迟世春. 高心墙堆石坝弹塑性动力反应分析及地震易损性研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(7): 1390-1400. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2020.07.018.
- [40] 张海, 孟亚翠, 田丽媛. 基于IDA砌体结构地震易损性影响因素研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(1): 49-53. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2017.01.007.
- [41] 范书立, 田硕, 陈健云. 基于响应面法的拱坝地震易损性分析[J]. *人民长江*, 2019, 50(7): 160-164. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.07.027.
- [42] 李嘉豪. 基于黏弹性人工边界的重力坝损伤分析及易损性研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022. DOI: 10.27144/d.cnki.ghbsc.2022.000030.
- [43] 曹景祥, 刘其成. 基于深度强化学习的路径规划算法研究[J]. *计算机应用与软件*, 2022, 39(11): 231-237. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2022.11.036.
- [44] NASSIF A B, HO D, CAPRETZ L F. Towards an early software estimation using log-linear regression and a multilayer perceptron model[J]. *Journal of Systems and Software*, 2013, 86(1): 144-160. DOI: 10.1016/j.jss.2012.07.050.
- [45] 国家能源局. 水电工程水工建筑物抗震设计规范, NB 35047—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [46] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范, GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [47] GOODMAN J. Structural fragility and principle of maximum entropy[J]. *Structural Safety*, 1985, 3(1): 37-46. DOI: 10.1016/0167-4730(85)90006-2.
- [48] 马智勇, 张伟, 周强, 等. 基于位移的重力坝地震易损性分析方法[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(22): 51-58. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.22.009.
- [49] 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. DOI: 10.7511/dllgxb201201011.

Seismic vulnerability assessment of concrete dam based on incremental dynamic analysis and multilayer perceptron

ZHANG Jingyi, LI Mingchao, ZHANG Jiawen, ZHANG Mengxi, YAN Wenyu

(*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China*)

Abstract: The western region of China is rich in hydropower resources, but strong earthquakes occur frequently. Hydraulic structures may withstand strong earthquakes during their life cycle. The damage caused by earthquakes will affect the normal operation of water conservancy projects, which seriously threatens people's lives and social stability. The seismic vulnerability analysis provides the seismic basis for seismic design of hydraulic structure and earthquake prevention and disaster reduction, which is very important to ensure the expected performance of concrete gravity dam and safe operation under earthquake.

The seismic vulnerability assessment of dams often requires the use of nonlinear numerical simulation methods and a huge amount of calculation work. Considering the efficiency and accuracy of seismic vulnerability assessment of dams, a way based on incremental dynamic analysis and multilayer perceptron for seismic vulnerability assessment of concrete dams is proposed. Taking a concrete gravity dam in northwest China as an example, a three-dimensional finite element model of dam body-reservoir water-foundation is established and multiple seismic response calculations are carried out. The selected ground motion records are processed by equal step amplitude modulation, and the amplitude input is carried out by three-way seismic. The peak ground acceleration is selected as the index of ground motion intensity, and the displacement of dam top along river is selected as the index of dam damage. The multilayer perceptron model was trained and tested by extracting the vibration characteristic parameters as input and the displacement of dam top along river as output. The ground motion is extended to obtain the vibration characteristic parameters. The MLP model is used to quickly predict the displacement of the dam top along the river, and the finite element results are extended. The vulnerability analysis of the concrete dam is carried out, and the vulnerability curve is drawn.

The results are as follows: (1) The seismic vulnerability of concrete gravity dam is analyzed based on incremental dynamic analysis method. Incremental dynamic analysis's curve clusters of river-side displacement, transverse river flow displacement and vertical displacement of the dam crest are plotted, and seismic vulnerability curves are plotted. In summary, the earthquake damage grade of the selected gravity dam under the designed ground motion is low, and about 80% probability belongs to the basically intact state. (2) The multi-layer perceptron model is introduced into the incremental dynamic analysis method, and the seismic vulnerability analysis method of concrete gravity dam based on incremental dynamic analysis-multi-layer perceptron is proposed. After the training of the multi-layer perceptron model, the accuracy of the damage prediction index is higher. The coefficient of determination is 0.960 2, the mean square error is 0.005 6, and the mean absolute error is 0.056 1. Based on this method, more analytical data can be constructed to expand the finite element dynamic calculation results. It saves the calculation work up to 75% and reduces the nonlinear dynamic calculation time. The seismic vulnerability of dams can be predicted quickly and accurately as close as possible to the reality, and the vulnerability curve can be drawn to improve the efficiency of seismic vulnerability analysis of dams.

Key words: concrete gravity dam; seismic vulnerability; incremental dynamic analysis; dam crest displacement along the river; multi-layer perceptron