

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.362>



强震作用下土石坝易损性快速精准分析的 CIHA 方法

张伟丽, 邓黎, 庞于涛*, 于森, 田建林

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 强震作用下土石坝极易出现失稳破坏, 从而造成人员伤亡和较大的社会经济损失. 由于地震的不确定性, 强震作用下土石坝失稳分析通常采用失稳概率表示, 目前常用方法是地震易损性分析方法, 主要有云图法和增量动力分析 (incremental dynamic analysis, IDA) 两种方法. IDA 方法计算结果准确, 但计算效率低, 云图法计算效率虽高, 但计算精度无法得到有效保证. 基于上述问题, 提出了一种基于云图法和 IDA 方法的地震易损性快速精准分析方法 (CIHA, cloud-IDA hybrid approach). CIHA 方法可兼顾计算效率和计算精度, 该方法基于云图法的对数线性回归假设, 通过非线性时程分析, 并对地震波进行一次放缩来计算相应损伤指标下的地震动强度值, 利用地震动强度值得到的均值和方差生成土石坝在各个损伤等级下的易损性曲线. 通过对 Lower San Fernando 土石坝的地震易损性分析, 将所提 CIHA 方法与 IDA 方法的计算结果进行了对比. 结果表明, 在计算精度方面, CIHA 方法可以获得与 IDA 方法相近的结果, 在计算效率方面, CIHA 方法相比 IDA 方法计算效率有显著提高.

关键词: 土石坝; 强震作用; 地震易损性分析; IDA 方法; 云图法; CIHA 方法; 岩土工程.

中图分类号: X43

文章编号: 1000-2383(2022)12-4390-11

收稿日期: 2022-04-20

CIHA Method for Rapid and Accurate Vulnerability Analysis of Embankment Dams under Strong Earthquakes

Zhang Weili, Deng Li, Pang Yutao*, Yu Miao, Tian Jianlin

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Earth dams are prone to be instability and failure, resulting in casualties and great social and economic impact under strong earthquakes. Due to the uncertainty of earthquake, the instability analysis of earth dams under strong earthquake is usually expressed by the instability probability. At present, the commonly used method is the seismic vulnerability analysis method, mainly including cloud chart method and incremental dynamic analysis (IDA). The incremental dynamic analysis leads to accurate results but has low computational efficiency, while cloud analysis has high computational efficiency but cannot guarantee the computational accuracy effectively. Therefore, CIHA, a fast and accurate seismic vulnerability analysis method based on cloud analysis and IDA is proposed in this paper. CIHA can give consideration to both calculation efficiency and accuracy. This method is based on the logarithmic linear regression hypothesis of cloud analysis and adopts nonlinear time history analysis. The seismic intensity value under the corresponding damage index is calculated by scaling the seismic wave once, and the fragility curves of earth dam under each damage level is generated based on the mean and variance of these seismic intensity values. The calculation results of the method proposed in this paper are compared with those of IDA through the seismic fragility analysis of Lower San

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51708527).

作者简介: 张伟丽 (1974—), 女, 副教授, 博士, 从事岩土边坡加固研究. ORCID: 0000-0001-8751-9945. E-mail: zwl@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 庞于涛, 副教授, 博士, 从事结构地震风险分析. E-mail: pangyutao@cug.edu.cn

引用格式: 张伟丽, 邓黎, 庞于涛, 于森, 田建林, 2022. 强震作用下土石坝易损性快速精准分析的 CIHA 方法. 地球科学, 47(12): 4390—4400.

Citation: Zhang Weili, Deng Li, Pang Yutao, Yu Miao, Tian Jianlin, 2022. CIHA Method for Rapid and Accurate Vulnerability Analysis of Embankment Dams under Strong Earthquakes. *Earth Science*, 47(12): 4390—4400.

Fernando earth dam. The results show that the practical seismic fragility analysis method can obtain similar results with IDA in terms of accuracy, and the calculation efficiency is significantly improved compared with IDA in terms of calculation efficiency.

Key words: embankment dam; seismic loadings; seismic fragility analysis; incremental dynamic analysis (IDA); cloud analysis; cloud-IDA hybrid approach (CIHA); geotechnical engineering.

0 引言

土石坝因其建筑材料易获取,且对地形适应性强,在世界各地得到了广泛应用(Tani, 2000; Chen *et al.*, 2014).截至 2007 年,我国现有土石坝占大坝总数的 93%(Chen *et al.*, 2014).然而,地震高烈度区的许多土石坝并没有达到抗震设防要求,在地震期间极易遭到破坏(陈厚群等, 2008; Hariri-Ardebili and Saouma, 2016; Sawada *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019).根据地震震害的历史记录,滑坡是地震期间土石坝的主要破坏模式之一,可对坝体造成相当大的破坏甚至危及人类生命(Chen *et al.*, 2014; Huang and Xiong, 2017a; 黄武彪等, 2022; 李永威等, 2022).例如, 2008 年汶川地震期间(Chen *et al.*, 2014), 47 座土石坝因边坡滑坡而受损. 2001 年 Bhuj 地震期间(Singh *et al.*, 2005), 一些土石坝在地震中边坡失稳,从而导致坝体受损.因此,强震期间土石坝的边坡稳定性受到了学界的高度重视.

在岩土工程设计中,常常采用确定性的拟静力方法(Tsompanakis *et al.*, 2010)对地震作用下土石坝动力响应和边坡稳定性进行评估.然而,由于地震作用及地质条件的不确定性,基于概率理论的评估理论与方法越来越流行(Lagaros *et al.*, 2009; 吕大刚等, 2010; Huang *et al.*, 2018).地震易损性分析是基于性能的地震工程框架(performance-based earthquake engineering, PBEE)评估的关键步骤之一,能够评估土石坝在多个地震级别下的稳定性.与传统可靠度指标相比(Schultz *et al.*, 2010),地震易损性曲线能够提供更为丰富且全面的性能评估.

目前,地震易损性分析已广泛应用于土木工程领域(Nielson and DesRoches, 2007; Pang *et al.*, 2014; Buratti *et al.*, 2017; Phan *et al.*, 2017),但近年来只有少数研究涉及土石坝的地震易损性分析.王笃波等(2012, 2013)和马智勇等(2017)以大坝的位移作为性能指标对大坝进行了地震易损性分析. Lagaros *et al.*(2009)将人工神经网络引入边坡的地震易损性分析,以提高蒙特卡罗模拟的计算效率.于京池等(2022)提出了一种基于遗传算法的人工

神经网络的地震易损性分析方法. Maruyama *et al.*(2010) and Kwak *et al.*(2016)利用日本地震后的现场观测数据研究了高速公路路堤和堤坝的地震易损性.靳聪聪等(2019)在对土石坝易损性分析时考虑了水位的影响,得到了不同水位时土石坝的易损曲线. Tsompanakis *et al.*(2010)发现与精细数值方法相比,边坡经验易损性曲线的准确性较低. Kim and Sitar(2013)使用 Newmark 位移方法和蒙特卡罗模拟评估了强震产生边坡永久变形的概率.田硕等(2020)用增量法对土石坝进行了动力分析,分别得到了基于拱冠位移、横缝开度和损伤体积的概率地震需求模型. Argyroudis and Kaynia(2015)根据 IDA (incremental dynamic analysis)方法估算公路和铁路路堤及路堑的地震易损性,国内不少学者通过 IDA 方法分析了大坝在不同地震强度作用下的破坏概率(陈灯红等, 2018; 孔宪京等, 2018; 贺路翔等, 2019; 杨紫辉等, 2019; 庞锐等, 2022).刘肖军等(2018)提出了基于改进 IDA 的混凝土坝易损性分析方法. Huang and Xiong(2017b)经过研究发现以往大多数边坡地震稳定性研究没有考虑地震激励下土体的动力非线性行为,从而导致评估的结果并不准确.

一般来说,地震易损性曲线可以通过经验或数值分析方法得到(Buratti *et al.*, 2017; Ghosh *et al.*, 2017),但经验方法依赖专家主观意见,数值分析方法基于精细化有限元模拟,能够提供更可靠的评估结果,因此数值分析方法被认为是目前最为有效的方法(Wu, 2015).地震易损性分析的数值方法主要有两种,云图法和增量动力分析方法(IDA)(Baker and Cornell, 2005).云图法是目前计算效率最高的方法,其基于未缩放的地震记录来进行非线性时程分析,通过假定的对数线性回归模型来构建工程结构地震易损性需求参数 EDP 与地震动强度 IM 的关系.相比之下,IDA 方法则采用重复缩放地震波的方式来进行非线性时程分析,从而构建 EDP 和 IM 之间的关系(Phan *et al.*, 2017).与云图法相比,IDA 方法虽然相对精确,没有任何假设,但分析中涉及地震波的缩放,计算非常耗时,计算效率较低(De

Risi *et al.*, 2017). 为了提高 IDA 方法的计算效率, 有学者尝试将机器学习方法引入地震易损性分析中, 如将人工神经网络(于京池等, 2022)引入拱坝的地震易损性分析, 但人工神经网络方法仍需要大量计算时间来获得大规模训练样本, 才能够保证其分析精度, 因此 IDA 方法的计算效率很难得到提升.

综上所述, 在土石坝地震易损性分析中, 目前尚未有一种方法可以兼顾计算效率与计算精度. 本文旨在提出一种具有较高计算效率和精度的 CIHA (cloud-IDA hybrid approach) 方法, 该方法基于云图法的对数线性回归假设, 通过一次放缩得到对应损伤指标值下的地震动强度值, 从而进行地震易损性分析. 由于 CIHA 方法仅需进行一次放缩, 大大减少了放缩所需要的计算量, 提高了计算效率. 本文研究成果可为土石坝边坡地震动力稳定性的地震易损性分析与地震性能评估提供一定依据.

1 传统地震易损性分析方法

21 世纪初, 为了更为有效地体现地震动的不确定性, 地震工程防灾从最初的确定性动力分析评估方法转向了基于性能的地震工程评估框架(PBEE). 由于地震易损性方法能够更好地体现地震动强度与受灾体破坏之间的关系(Schultz *et al.*, 2010), 并为后续的社会经济性损失打下基础, 地震易损性方法成为 PBEE 框架的核心步骤. 目前土石坝地震易损性分析常用的方法有两种, 即云图法与增量动力方法(IDA), 这两种方法都是通过构建地震易损性需求参数 EDP 与地震动强度 IM 之间的关系, 进行边坡易损性分析.

土石坝的地震易损性可表示为某一地震动强度下土石坝的条件失效概率曲线. 在边坡的地震分析中, 常选取边坡的地震失稳安全系数 D 作为 EDP, 假设地震需求 D 与抗震能力 C 均为对数正态分布, 则基于经典可靠度方法——一次二阶矩法(Pang *et al.*, 2014), 该条件失效概率可表示为:

$$P_f(C \geq D | IM = im) = \Phi \left(\frac{\ln(\mu_C / \mu_D)}{\sqrt{\sigma_{\ln C}^2 + \sigma_{\ln D | IM}^2}} \right), \quad (1)$$

式(1)中, D 为边坡地震失稳安全系数; C 为破坏极限状态值; $\Phi[\cdot]$ 为标准正态分布函数; μ_D 为边坡地震失稳安全系数均值; μ_C 为极限状态均值; $\sigma_{\ln D | IM}$ 为给定 IM 强度下的边坡地震失稳安全系数方差; $\sigma_{\ln C}$ 为地震响应方差.

1.1 云图法

云图法用未经缩放的地震波进行非线性时程分析, 并利用假定的对数线性回归模型来构建需求参数 EDP 与地震动强度 IM 的关系. 若选取边坡的地震失稳安全系数 D 作为 EDP, 在云图法中, 土石坝地震易损性需求参数 EDP 与地震动参数 IM 之间应满足关系式(2)(Pang *et al.*, 2014):

$$\ln(D) = \ln(a) + b \ln(IM), \quad (2)$$

式(2)中, a 与 b 为回归系数. 该式为对数空间的线性拟合, 即 EDP- IM 曲线. 式(2)可表示为式(3):

$$\ln(\mu_D) = \ln(a) + b \ln(IM), \quad (3)$$

假设土石坝地震响应方差为一固定值, 其值可由式(4)计算:

$$\sigma_{\ln D | IM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(D_i) - (\ln a + b \ln IM_i)]^2}{n-2}}, \quad (4)$$

式(4)中, i 为第 i 条地震波; D_i 为第 i 条波的地震响应值; IM_i 为第 i 条波的地震动水平; n 为选取的地震动数量.

从以上各式可以看出, 在云图法中假设了地震响应均值与地震动强度满足对数线性关系, 其所需计算量较小.

1.2 IDA 方法

IDA 方法采用增量动力分析手段, 将地震波从一个较小的地震动水平放缩到较大的地震动水平, 可分析土石坝从弹性行为到塑性行为的全过程, 从而建立 EDP- IM 曲线(Baker and Cornell, 2005). 通过 IDA 分析, 得到边坡在不同地震动下的失稳安全系数, 即为边坡的 IDA 曲线. 根据每个 IDA 曲线, 可得到对应损伤指标值下的 IM_s 值. 采用这些 IM_s 值的均值 γ_{IM} 与方差 ζ_{IM} , 可由式(5)计算易损性曲线:

$$P_f(C \geq D | IM = im) = \int_0^{im} \frac{1}{x \zeta_{IM} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(x) - \gamma_{IM}]^2}{2\zeta_{IM}^2} \right\} dx. \quad (5)$$

2 快速精准分析的 CIHA 方法

基于上述讨论, 本文提出可兼顾计算效率与计算精度的 CIHA 方法, 其具体流程如图 1 所示.

(1) 采用云图法拟合的 EDP- IM 曲线确定边坡安全系数为 1 时的基准地震动参数(IM_b). 当边坡达到某一极限状态时边坡的安全系数定义为 LS , LS 取值不同即为不同的损伤指标值. 可依据区间 $[0,$

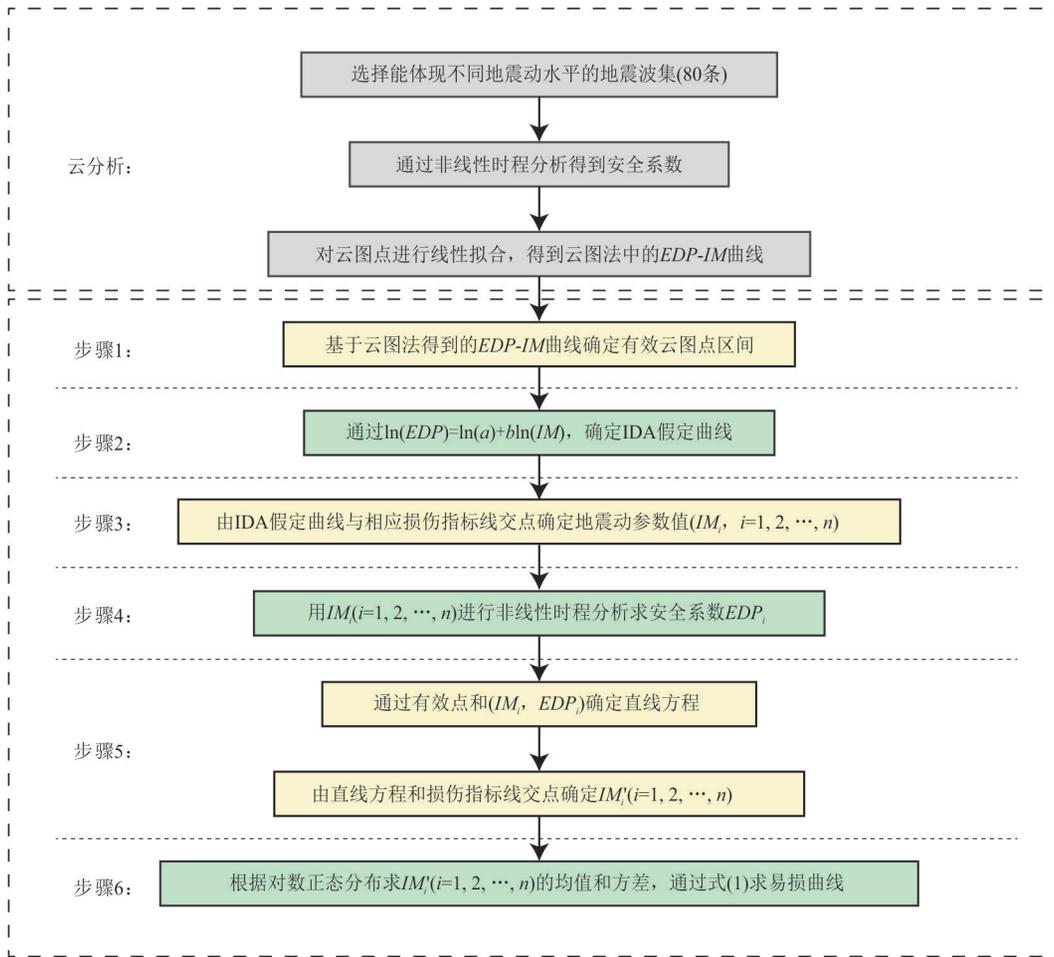


图 1 CIHA 方法流程图

Fig.1 Flow chart of CIHA method

IM_b]和 $[0.8LS, 1.2LS]$ 来确定取点范围,该范围内的所有点即为用来生成 IDA 易损性曲线的有效点,如图 2 所示.

(2)根据云图法,假设通过每个有效点的 IDA 曲线具有公式(2)的形式,并假定该式 b 值与云图法中的 EDP-IM 曲线相同,由此可通过公式(2)计算得到每个有效点相应的回归系数 a_i 值,其中 $i=1, 2, \dots, n$,其中 n 为有效点个数.

(3)以 a_i 和 b 为回归系数,通过公式(2)求出每个有效点对应的 IDA 假定曲线.利用这些 IDA 假定曲线与损伤指标横线(取值为 LS)的交点来确定相应损伤指标值对应下的地震动参数值 $IM_i(i=1, 2, \dots, n)$.

(4)确定 IM_i 后,基于边坡的非线性有限元模型,输入地震波,进行非线性时程分析,得到边坡的安全系数 EDP_i .

(5)使用步骤(4)得到的点 (IM_i, EDP_i) 和第一步确定的与点 (IM_i, EDP_i) 对应的有效点,给出直线方

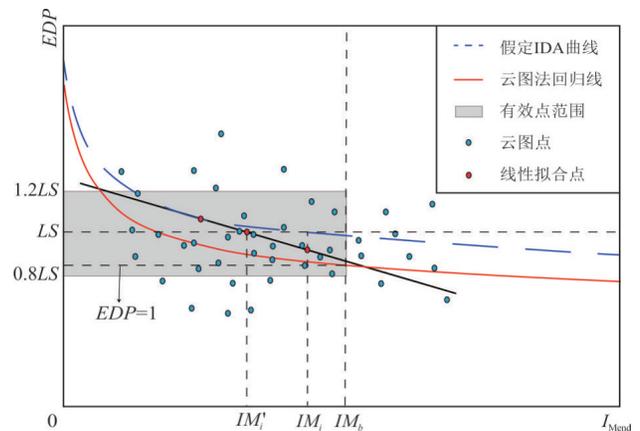


图 2 CIHA 方法示意

Fig.2 Schematic diagram of CIHA method

程,根据该直线与损伤指标横线(取值为 LS)的交点来确定不同损伤指标时每条直线对应的地震动参数 $IM'_i(i=1, 2, \dots, n)$.

(6)根据对数正态分布,求出这些地震动参数 IM'_i 值的均值和方差,采用公式(1),可得到不同损

伤指标对应的土石坝地震易损性曲线。

3 土石坝有限元模型

本文以 Lower San Fernando 土石坝为研究对象,对土石坝的地震易损性进行分析。Lower San Fernando 土石坝位于美国的加利福尼亚州,该土石坝在建造时,采用水力冲填的方法直接建造在天然冲积层上。上游边坡破坏发生在 1971 年 San Fernando 地震期间,该地震震级为 6.5 级。大坝坝高 44 m,上游侧边坡坡度为 2.5:1,下游侧边坡坡度为 4:1。土石坝被设计成由 3 个垂直区域组成的核心区,核心区包括一个中央不透水区域和两侧两个透水区域 (Krinitsky and Hynes, 2002),其横截面的数值模型如图 3 所示。

根据 Gu *et al.* (1993) 的研究,本文建立的 Lower San Fernando 土石坝非线性弹塑性模型中采用莫尔-库仑破坏准则。按照土地分类,土石坝有限元网格可以划分为 3 个区域,位于坝顶的碾压填料土层、两个水力冲填土层、冲积层地基和地基下的天然冲积土,它们的初始孔隙比分别为 0.500、0.660 和 0.567。材料参数取值如表 1 所示。首先对该模型进行静力分析获得地震前土石坝的静力特性,然后利用 San Fernando 地震中最大峰值加速度 PGA 为 0.6 g 的地震波进行非线性时程分析。图 4 显示了坝顶 30 s 内相对水平和垂直变形的变化。在 18.71 s 的动态荷载作用下,坝顶最大水平位移为 9.3 cm。垂直沉降发生在 2.06 s,幅度为 0.8 cm。碾压填料和水力填料振动期间土体的典型应力应变路径如图 5 所示。它代表土层发生非线性弹塑性变形。在地震荷载结束时,在两个方向上都存在较小的永久变形。为了更客观地描述计算效率,需要说明的是本文计算是在 PC 机上实现的,PC 机采用英特尔处理器 (i9-10900X CPU @ 3.70 GHz), 16 G 内存, 512 G, 2060Ti。采用该数值模型的计算结果与 Chen *et al.*

表 1 土石坝非线性弹塑性模型中的材料参数取值

Table 1 Values of material parameters in nonlinear elastoplastic model of earth rock dam

材料	土体参数			泊松比 ν
	密度 ρ (g/cm ³)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	
碾压填料	1.8	5.0	34	0.35
水力填料	1.9	5.0	34	0.38
冲积层地基	2.0	5.0	36	0.48

(2014) 的研究结果相近,因此验证了本文所建立数值模型的准确性。后续的土石坝易损性分析基于该非线性有限元模型,通过选择一定地震波集的非线性时程分析,得到边坡在不同地震动水平下的安全系数,并用不同方法进行易损性分析。

4 易损性分析与讨论

为了提高云图法的准确性,所选择的地震波集需要体现不同地震动水平,以增加云图法拟合的准确性。本文选择的地震波集包括以下 3 个部分:(1) 35 条实测基岩地震波;(2) 35 条地震波乘以放缩系数 2.0 来生成具有更大地震动水平的地震波;(3) 10 条人工生成的地震波来代表具有重现期 2475 年的强震记录。地震波选取自 Ground Motions for PEER Transportation Research Program 中的 set2 部分。地震波数据从 https://www.jackwbaker.com/PEER_gms.html 网站下载。图 6 给出了所选择地震波集的伪加速度谱。

基于边坡非线性有限元模型,通过上述地震波集的非线性时程分析,可得到边坡在不同地震动水平下的安全系数,由式(6)计算:

$$F(t) = \frac{\int \tau_f(t) dA}{\int \tau(t) dA}, \quad (6)$$

式(6)中, $\tau_f(t)$ 以及 $\tau(t)$ 分别为滑体的抗滑力与推

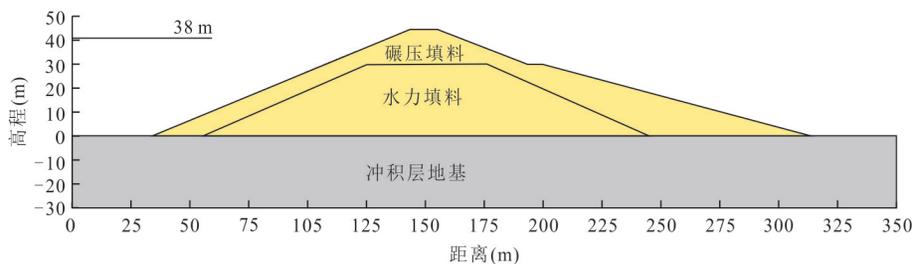


图 3 Lower San Fernando 土石坝横截面

Fig.3 Cross section of Lower San Fernando earth rock dam

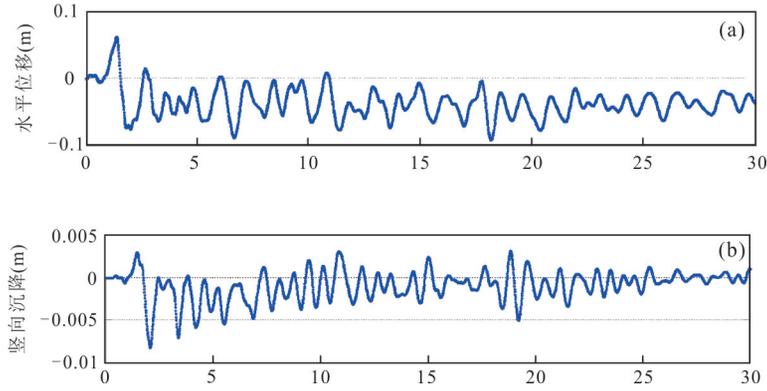


图 4 坝顶 30 s 内相对水平和垂直变形变化曲线

Fig.4 Change curves of relative horizontal and vertical deformation of dam crest within 30 s
a. 水平位移;b. 竖向沉降

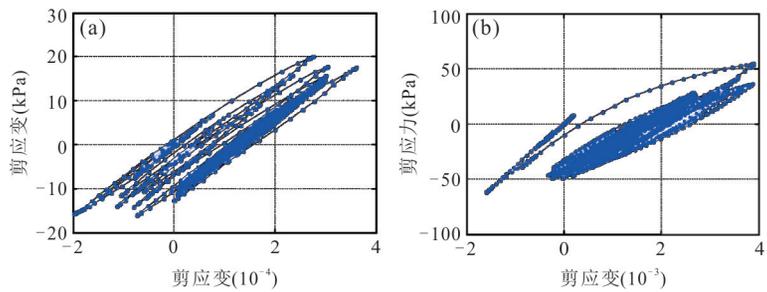


图 5 振动期间土体的典型应力应变路径

Fig.5 Typical stress-strain paths of soil during vibration
a. 碾压填料;b. 水力填料

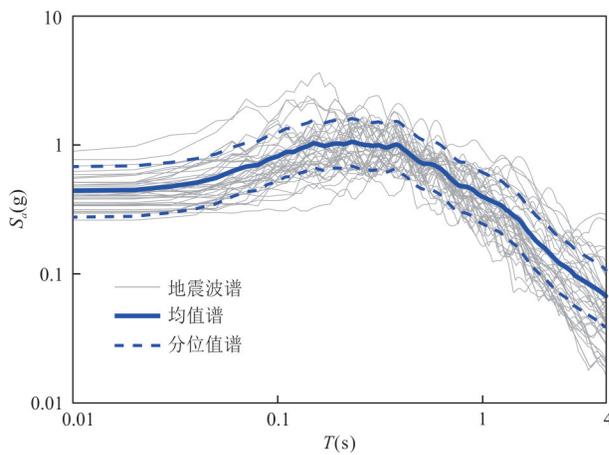


图 6 所选地震波集的伪加速度谱

Fig.6 Pseudo acceleration spectrum of the selected seismic wave set

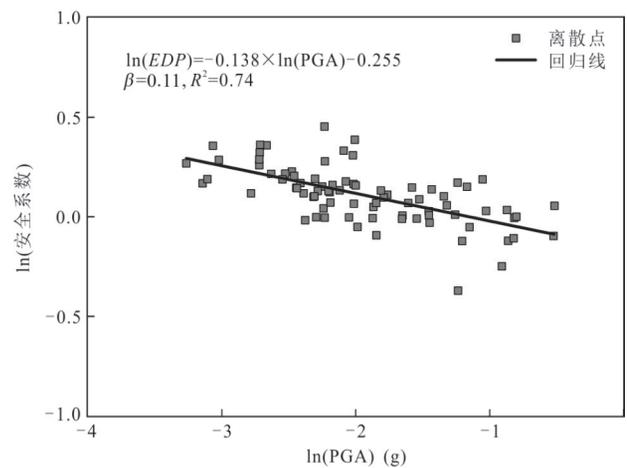


图 7 云图法所得到的 EDP 与 IM 之间的关系

Fig.7 Relationship between EDP and IM obtained by cloud diagram method

力时程,选择每条地震波的峰值加速度 PGA 作为衡量地震波强度大小的指标.通过对 80 条波进行非线性时程分析,分别得到 80 条地震波作用下边坡的安全系数,进而可进行对数空间的线性拟合,得到云图法中的 EDP-IM 曲线,如图 7 所示.

为了验证本文所用 CIHA 方法的准确性,同时

采用 IDA 方法以及云图法进行计算,并对计算结果进行对比分析.如图 8 所示,IDA 法将每条波放缩 8 次来进行非线性时程分析,得到 IDA 曲线,进而得到 IDA 方法下的易损性曲线.为了生成边坡失稳的易损性曲线,本文参考国内外规范《岩土工程设计

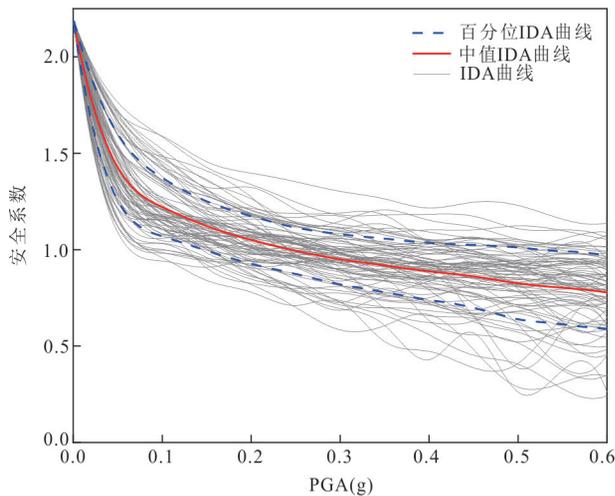


图 8 不同地震波下的 IDA 曲线

Fig.8 IDA curve under different seismic waves

规范欧洲规范 7》(EC7, 2004)、《水电水利工程边坡设计规范》(中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2006.《水电水利工程边坡设计规范》(DLT 5353-2006), 北京)等给出了边坡失稳损伤等级以及相应的损伤指标值, 如表 2 所示。

云图法用未缩放的地震波来进行非线性时程分析, 通过假定的对数线性回归模型来构建需求参数 EDP 与地震动强度 IM 的关系. 图 9 给出了不同 PGA 分布下基于云图法的土石坝易损性曲线. 由于输入地震振动荷载的不确定性, 以及地质条件的不确定性, 云图法得到的拟合曲线相关系数一般在 0.6~0.8 之间, 本文拟合的相关系数为 0.74, 在此范围内. 从图 9 中可以看出, 所选地震波集的 IM 分布不同, 云图法所得到的对数回归线差别较大. 当 PGA 均匀分布于空间时, 拟合曲线可以很好地拟合 IDA 曲线的均值线, 但由于不同强度的地震波记录很稀少, 在地震波的选择中很难做到 PGA 均匀分布, 且地震波强度在不同区间均匀分布, 对云图法的拟合效果会产生影响. 因此相对 IDA 方法, 云图法虽然不存在放缩, 计算效率相对较高, 但是计算结果对拟合数据较敏感, 所以该方法的稳定性不好.

基于上述情况, 本文提出采用云图法的对数回归结果, 使用一次放缩的方法提高云图法的稳定性, 减少 IDA 法放缩所需要的计算量, 节省计算时间, 提高计算效率, 以实现土石坝易损性的精准快速分析. 下面以损伤指标值 LS 为 1.25 时的地震易损性分析为例, 详细说明 CIHA 方法的实施过程.

(1) 通过云图法拟合得到对数回归线, 对数回归线的相应参数见图 7 所示, 进而由对数回归线得

表 2 边坡失稳损伤等级以及损伤指标值

Table 2 Damage grade and damage index value of slope instability

损伤等级	安全等级	LS 值
轻微	高	1.25
中等	中	1.15
严重	低	1.00

到 $EDP-IM$ 曲线. 为了得到有效点区间, 首先需要得到边坡安全系数为 1.0 时的基准地震动参数 IM_b , 该值可从云图法的 $EDP-IM$ 上得到, 此处为 0.3, 则 CIHA 方法的取点区间为 $IM \in [0, 0.3]$, $D \in [1, 1.5]$, 该区间内的云图点即为后续生成易损性曲线的有效点.

(2) 根据云图法, 假设通过每个有效点的 IDA 曲线都具有公式 (2) 的形式, 且该 IDA 假定曲线与云图法中的对数回归曲线在对数空间中具有相同的斜率, 即 b 值相同. 由图 7 可知, 云图法所得到的 b 值为 -0.1388 , 可通过有效点 $(0.1343, 1.4720)$ 求出与之对应的回归系数 $a_1 = 1.1159$.

(3) 以 a_1 和 b 为回归系数, 通过公式 (3) 求出各个有效点对应的 IDA 假定曲线. 以某个有效点为例, 其满足如下方程:

$$\ln(EDP) = \ln(1.1159) - 0.1388 \ln(IM). \quad (7)$$

通过式 (7) 确定该 IDA 假定曲线与损伤指标横线 $LS = 1.25$ 的交点, 并利用此交点确定损伤指标为 $LS = 1.25$ 时的地震动参数 $IM_1 = 0.4394$.

(4) 当地震动参数 $IM_1 = 0.4394$ 时, 对边坡有限元模型进行非线性时程分析, 可得到边坡的安全系数 $EDP_1 = 1.1180$. 通过非线性时程分析确定另外一个点 $(0.4394, 1.1180)$.

(5) 由步骤 (2) 对数线性回归直线确定有效点 $(0.1343, 1.4720)$ 和步骤 (4) 非线性时程分析得到的点 $(0.4394, 1.1180)$ 可确定直线方程:

$$y = -1.1602x + 1.6278. \quad (8)$$

根据直线方程与损伤指标横线 LS 的交点确定地震动参数 IM_i' 的值为 0.3671. 按此方法可依次计算出每个有效点对应的地震动参数 IM_i' 值.

(6) 根据对数正态分布, 求出这些地震动参数 IM_i' 值的均值和方差, 代入公式 (1), 得到损伤指标为 LS 时的边坡地震易损性曲线.

经过上述步骤, 参照表 2 边坡失稳损伤等级对应的损伤指标, 边坡安全系数为 1.25、1.15 和 1.00 时损伤等级分别为轻微、中等和严重, 可生成图 10 所

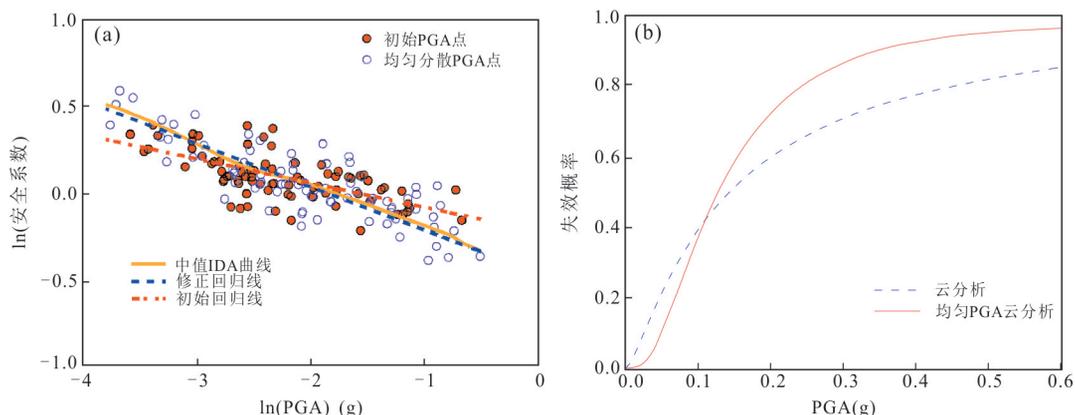


图 9 不同 IM 强度分布下基于云图法的地震易损性曲线

Fig.9 Seismic vulnerability curve based on cloud diagram method under different IM intensity distributions

a. 云图法;b.易损性曲线

示边坡易损性曲线.为了便于对比,IDA 方法生成的易损性曲线也在图 10 中一并给出.从图 10 中可以看出,CIHA 方法和 IDA 方法的结果较为接近,吻合度好,说明了 CIHA 方法具有较高的准确性.

此外,为了验证选取有效点范围的合理性,调整有效点范围的大小,分别取 D 在 $0.7LS \sim 1.3LS$ 、 $0.8LS \sim 1.2LS$ 、 $0.9LS \sim 1.1LS$ 三个不同区间,即纵轴区间大小分别为 $0.6LS$ 、 $0.4LS$ 、 $0.2LS$,用本文的 CIHA 方法进行易损性分析.由图 11 可以看出,当选取区间为 $0.7LS \sim 1.3LS$ 时,失效概率偏大;区间为 $0.9LS \sim 1.1LS$ 时,失效概率偏小;区间为 $0.8LS \sim 1.2LS$ 时结果和 IDA 方法得到的结果最接近,效果最好.

IDA 方法通过对 80 条输入地震波进行缩放分别进行了 8 次缩放,然后以缩放后的地震波作为输入源通过有限元软件进行非线性时程分析,非线性时程分析计算时间为 $80 \times 8 = 640$ h,耗费时间较大,

表 3 给出了云图法、IDA 法和 CIHA 方法所需的计算时间.从表 3 中可以看出,相比 IDA 方法,云图法和 CIHA 方法计算时间分别减少了 87.5% 和 80.3%.云图法不需要对地震波缩放,CIHA 方法缩放次数少,因此这两种高效快速的计算方法主要是减少地震波的缩放次数实现的.CIHA 方法不仅计算速度快,所得到的易损性曲线与 IDA 方法吻合度高,保证了计算精度,可以实现土石坝易损性的精准快速分析.

本文分析的 Lower San Fernando 土石坝工况比较简单,对于比较复杂的工况,也可以通过建立精细化数值模型来进行地震易损性分析,因而本文的 CIHA 方法可以用来进行复杂工程的地震易损性分析.在上述分析计算过程中,由于地质条件的复杂性,本文在建立非线性有限元时并没有考虑土层力学特性的随机性,在后续的工作中有待进一步深入研究.

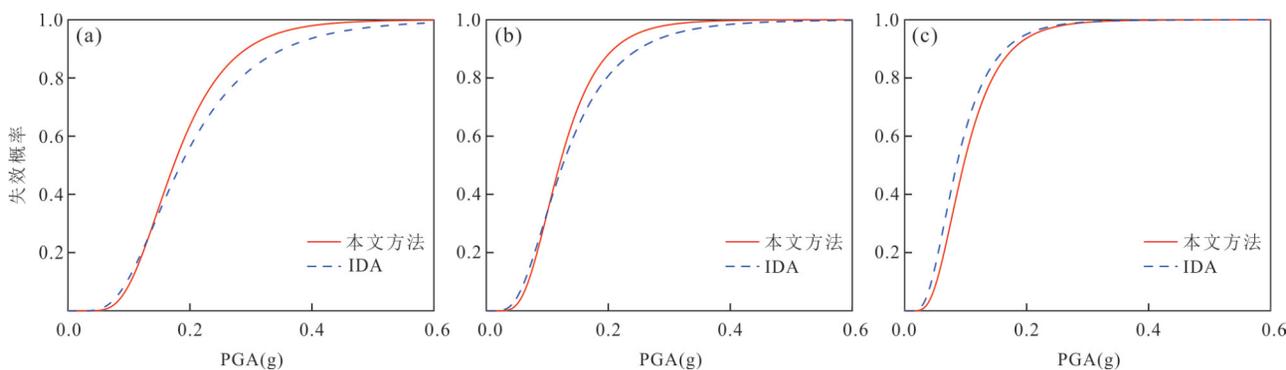


图 10 不同损伤等级下 IDA 方法与 CIHA 方法所生成的地震易损性曲线

Fig.10 Seismic vulnerability curves generated by IDA method and CIHA method under different damage levels

a. 轻微;b.中等;c.严重

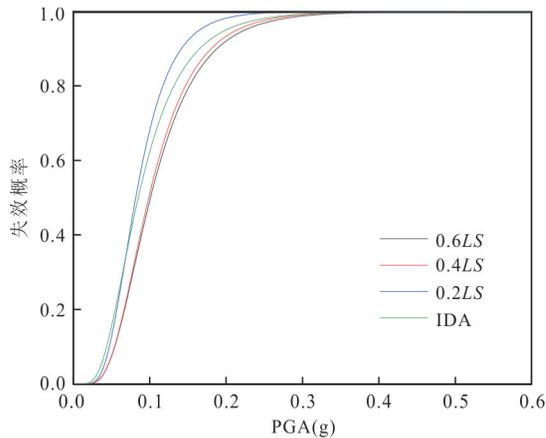


图 11 不同有效点范围对应的地震易损性曲线

Fig.11 Seismic vulnerability curves corresponding to different effective point ranges

表 3 不同方法所需要的计算时间

Table 3 Calculation time required by different methods

计算方法	计算时间(h)	百分比(%)
IDA 方法	$80 \times 8 = 640$	100
云图法	80	12.5
CIHA 方法	$80 + 56 = 126$	19.7

5 结论

本文用 CIHA 方法、IDA 方法以及云图法分别对 Lower San Fernando 土石坝进行了地震易损性分析中,详细对比分析了 CIHA 方法在精度与效率上的优势,以及 CIHA 方法有待改进的地方,主要结论总结如下.

(1)分别采用云图法和 IDA 方法得到了地震作用下土石坝的易损性曲线.在云图法中,研究了不同 PGA 分布下的土石坝易损性曲线.结果表明,云图法计算效率虽高,但得到的易损性曲线会随着所选地震波集的 IM 分布变化而不同,云图法不具有稳定性.而 IDA 方法的结果具有较高的准确性和较好的稳定性,但 IDA 方法计算耗时较长,效率低.

(2)提出了基于云图法对数回归的土石坝地震易损性快速精准的 CIHA 方法.通过对 Lower San Fernando 土石坝进行的地震易损性分析表明,本文所提出的 CIHA 方法得到的易损性曲线与 IDA 方法吻合度较高,验证了 CIHA 方法的有效性.

(3)该方法仅对地震波进行一次放缩,从计算效率方面来看,本文所提出的 CIHA 方法相比 IDA 方法计算时间减少了 80.3%,因而 CIHA 方法可用于地震作用下土石坝边坡稳定性的快速评估.

(4)土石坝边坡失稳评估基于边坡非线性有限元模型,可以考虑地震激励下土体的动力非线性行为,更为准确地反映边坡不同的损伤等级以及地震动之间的对应关系.

综上所述,相比传统云图法,CIHA 方法可以提高地震作用下边坡易损性分析的精度与稳定性,与传统 IDA 方法相比,CIHA 方法可以在保证计算精度的同时,提高计算效率.但本文在建立非线性有限元模型时,没有考虑地质条件的复杂性,对土层进行了简化.土层力学特性的随机性问题,有待在后续工作中进行深入研究.CIHA 方法在本文中用于土石坝的地震易损性分析,所用算法也适用于大型边坡在地震中的失稳安全评估.

References

- Argyroudis, S., Kaynia, A., 2015. Analytical Seismic Fragility Functions for Highway and Railway Embankments and Cuts. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44:1863–1879. <https://doi.org/10.1002/eqe.2563>
- Baker, J., Cornell, C., 2005. Vector-Valued Ground Motion Intensity Measures for Probabilistic Seismic Demand Analysis. Stanford University, Stanford.
- Buratti, N., Minghini, F., Ongaretto, E., et al., 2017. Empirical Seismic Fragility for the Precast RC Industrial Buildings Damaged by the 2012 Emilia (Italy) Earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(14): 2317–2335. <https://doi.org/10.1002/eqe.2906>
- Chen, D.H., Xie, J.H., Yang, N.X., 2018. A Study of Seismic Performance of Concrete Gravity Dam Based on Incremental Dynamic Analysis. *Hydro-Science and Engineering*, (5):48–55 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G.X., Jin, D.D., Mao, J., et al., 2014. Seismic Damage and Behavior Analysis of Earth Dams during the 2008 Wenchuan Earthquake, China. *Engineering Geology*, 180:99–129.
- Chen, H.Q., Xu, Z.P., Li, M., 2008. Wenchuan Earthquake and Seismic Safety of Large Dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 39(10):1158–1167 (in Chinese with English abstract).
- De Risi, R., Di Sarno, L., Paolacci, F., 2017. Probabilistic Seismic Performance Assessment of an Existing RC Bridge with Portal-Frame Piers Designed for Gravity Loads only. *Engineering Structures*, 145: 348–367. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.053>
- EC7, 2004. Eurocode 7: Geotechnical Design. CEN - ENV, Brussels, Belgium.

- Ghosh, S., Ghosh, S., Chakraborty, S., 2017. Seismic Fragility Analysis in the Probabilistic Performance-Based Earthquake Engineering Framework: An Overview. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 13(1): 122–135. <https://doi.org/10.1007/s12572-017-0200-y>
- Gu, W. H., Morgenstern, N. R., Robertson, P. K., 1993. Progressive Failure of Lower San Fernando Dam. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2):333–349.
- Hariri-Ardebili, M. A., Saouma, V. E., 2016. Seismic Fragility Analysis of Concrete Dams: A State-of-the-Art Review. *Engineering Structures*, 128: 374–399. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.034>
- He, L. X., Chen, D. H., Yang, Z. H., et al., 2019. Study on Seismic Performance of Three Dimensional Concrete Gravity Dam System Based on IDA. *Journal of Natural Disasters*, 28(4):159–168(in Chinese with English abstract).
- Huang, W. B., Ding, M. T., Wang, D., et al. Evaluation of Landslide Susceptibility Based on Layer Adaptive Weighted Convolutional Neural Network Model along Sichuan - Tibet Traffic Corridor. *Earth Science*, 47(6): 2015–2030 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.243>
- Huang, Y., Hu, H. Q., Xiong, M., 2018. Probability Density Evolution Method for Seismic Displacement-Based Assessment of Earth Retaining Structures. *Engineering Geology*, 234: 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.01.019>
- Huang, Y., Xiong, M., 2017a. Probability Density Evolution Method for Seismic Liquefaction Performance Analysis of Earth Dam. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(6): 925–943. <https://doi.org/10.1002/eqe.2837>
- Huang, Y., Xiong, M., 2017b. Dynamic Reliability Analysis of Slopes Based on the Probability Density Evolution Method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.011>
- Jin, C. C., Chi, S. C., Nie, Z. B., 2019. Seismic Fragility Assessment of High Earth-Rockfill Dams Considering the Seismic Wave Randomness and Water Level. *Journal of Vibration and Shock*, 38(6): 67–74, 107(in Chinese with English abstract).
- Kim, J. M., Sitar, N., 2013. Probabilistic Evaluation of Seismically Induced Permanent Deformation of Slopes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44:67–77.
- Kong, X. J., Pang, R., Zou, D. G., et al., 2018. Seismic Performance Evaluation of High CFRDS Based on Incremental Dynamic Analysis. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(6):978–984(in Chinese with English abstract).
- Krinitzsky, E. L., Hynes, M. E., 2002. The Bhuj, India, Earthquake: Lessons Learned for Earthquake Safety of Dams on Alluvium. *Engineering Geology*, 66(3–4): 163–196. [https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(02\)00049-2](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(02)00049-2)
- Kwak, D. Y., Stewart, J. P., Brandenberg, S. J., et al., 2016. Characterization of Seismic Levee Fragility Using Field Performance Data. *Earthquake Spectra*, 32(1):193–215.
- Lagaros, N. D., Tsompanakis, Y., Psarropoulos, P. N., et al., 2009. Computationally Efficient Seismic Fragility Analysis of Geostructures. *Computers and Structures*, 87(19–20):1195–1203.
- Li, Y. W., Xu, L. R., Zhang, L. L., et al., 2022. Evaluation of Landslide Susceptibility Based on Layer Adaptive Weighted Convolutional Neural Network Model along Sichuan-Tibet Railway. *Earth Science*(in press)(in Chinese with English abstract).
- Liu, X. J., Chen, W. L., Song, W. S., et al., 2018. Study on Seismic Vulnerability of Concrete Dams Based on Improved IDA. *Scientia Sinica (Technologica)*, 48(10):1103–1112 (in Chinese with English abstract).
- Lü, D. G., Yu, X. H., Pan, F., et al., 2010. Probabilistic Seismic Demand Analysis of Structures Based on an Improved Cloud Method. *World Earthquake Engineering*, 26(1): 7–15(in Chinese with English abstract)
- Ma, Z. Y., Zhang, W., Zhou, Q., et al., 2017. A Deformation-Based Method for Seismic Fragility Analysis of Gravity Dam. *Journal of Vibration and Shock*, 36(22):51–58(in Chinese with English abstract).
- Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., et al., 2010. Fragility Curves for Expressway Embankments Based on Damage Datasets after Recent Earthquakes in Japan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11): 1158–1167.
- Nielson, B. G., DesRoches, R., 2007. Seismic Fragility Methodology for Highway Bridges Using a Component Level Approach. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(6):823–839.
- Pang, R., Zhou, Y., Zhang, Y., 2022. Seismic Fragility Analysis of High Faced Rockfill Dam Based on the Method of IDA-SVM. *Water Resources and Power*, 40(1):94–97 (in Chinese with English abstract)
- Pang, Y. T., Dang, X. Z., Yuan, W. C., 2014. An Artificial Neural Network Based Method for Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges. *Advances in Structural Engineering*, 17(3):413–428. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.3.413>

- Phan, H.N., Paolacci, F., Bursi, O.S., et al., 2017. Seismic Fragility Analysis of Elevated Steel Storage Tanks Supported by Reinforced Concrete Columns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 47:57–65. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.02.017>
- Sawada, Y., Nakazawa, H., Oda, T., et al., 2018. Seismic Performance of Small Earth Dams with Sloping Core Zones and Geosynthetic Clay Liners Using Full-Scale Shaking Table Tests. *Soils and Foundations*, 58(3):519–533.
- Schultz, M. T., Gouldby, B. P., Simm, J. D., et al., 2010. Beyond the Factor of Safety: Developing Fragility Curves to Characterize System Reliability. ERDC - SR - 10 - 1, USACE.
- Singh, R., Roy, D., Jain, S.K., 2005. Analysis of Earth Dams Affected by the 2001 Bhuj Earthquake. *Engineering Geology*, 80(3–4): 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.002>
- Tani, S., 2000. Behavior of Large Fill Dams during Earthquake and Earthquake Damage. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20(1–4): 223–229. [https://doi.org/10.1016/s0267-7261\(00\)00055-5](https://doi.org/10.1016/s0267-7261(00)00055-5)
- Tian, S., Fan, S.L., Chen, J.Y., 2020. Seismic Fragility Analysis for Arch Dam Based on Multiple Responses. *Journal of Vibration and Shock*, 39(1):253–259, 288(in Chinese with English abstract).
- Tsompanakis, Y., Lagaros, N.D., Psarropoulos, P.N., et al., 2010. Probabilistic Seismic Slope Stability Assessment of Geostructures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1–2): 179–191. <https://doi.org/10.1080/15732470802664001>
- Wang, D.B., Liu, H.L., Yu, T., 2012. Seismic Risk Analysis of Earth-Rock Dam Based on Deformation. *Rock and Soil Mechanics*, 33(5):1479–1484(in Chinese with English abstract).
- Wang, D.B., Liu, H.L., Yu, T., et al., 2013. Seismic Fragility Analysis for Earth-Rock Fill Dams Based on Deformation. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(5): 814–819(in Chinese with English abstract).
- Wu, X.Z., 2015. Development of Fragility Functions for Slope Instability Analysis. *Landslides*, 12(1):165–175. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0536-3>
- Yang, Z.H., Chen, D.H., He, L.X., et al., 2019. Study on Potential Failure Modes of Jin'anqiao Concrete Gravity Dam Based on Incremental Dynamic Analysis. *World Earthquake Engineering*, 35(2): 78–89(in Chinese with English abstract).
- Yu, J.C., Jin, A. Y., Pan, J. W., et al., 2022. GA-BP Artificial Neural Networks for Predicting the Seismic Response of Arch Dams. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 62(8):1321–1329(in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.J., Zheng, H., Jiang, F., et al., 2019. Stability Analysis of Soil Slope Based on a Water-Soil-Coupled and Parallelized Smoothed Particle Hydrodynamics Model. *Computers and Geotechnics*, 108:212–225

附中文参考文献

- 陈灯红, 谢京辉, 杨乃鑫, 2018. 基于增量动力分析的混凝土重力坝抗震性能分析. *水利水运工程学报*, (5):48–55.
- 陈厚群, 徐泽平, 李敏, 2008. 汶川大地震和大坝抗震安全. *水利学报*, 39(10):1158–1167.
- 贺路翔, 陈灯红, 杨紫辉, 等, 2019. 基于 IDA 的重力坝三维系统抗震性能研究. *自然灾害学报*, 28(4):159–168.
- 黄武彪, 丁明涛, 王栋, 等, 2022. 基于层数自适应加权卷积神经网络的川藏交通廊道沿线滑坡易发性评价. *地球科学*, 47(6):2015–2030.
- 靳聪聪, 迟世春, 聂章博, 2019. 考虑地震波随机性及水位影响的高土石坝易损性研究. *振动与冲击*, 38(6):67–74, 107.
- 孔宪京, 庞锐, 邹德高, 等, 2018. 基于 IDA 的高面板堆石坝抗震性能评价. *岩土工程学报*, 40(6):978–984.
- 李永威, 徐林荣, 张亮亮, 等, 2022. 强震山区地震诱发滑坡发育规律与易发性评估. *地球科学(待刊)*.
- 刘肖军, 陈文龙, 宋文帅, 等, 2018. 基于改进 IDA 的混凝土坝地震易损性研究. *中国科学:技术科学*, 48(10):1103–1112.
- 吕大刚, 于晓辉, 潘峰, 等, 2010. 基于改进云图法的结构概率地震需求分析. *世界地震工程*, 26(1):7–15.
- 马智勇, 张伟, 周强, 等, 2017. 基于位移的重力坝地震易损性分析方法. *振动与冲击*, 36(22):51–58.
- 庞锐, 周扬, 张艺, 2022. 基于 IDA-SVM 的高面板堆石坝地震易损性分析. *水电能源科学*, 40(1):94–97.
- 田硕, 范书立, 陈健云, 2020. 基于多个响应量的拱坝地震易损性分析. *振动与冲击*, 39(1):253–259, 288.
- 王笃波, 刘汉龙, 于陶, 2012. 基于变形的土石坝地震风险分析. *岩土力学*, 33(5):1479–1484.
- 王笃波, 刘汉龙, 于陶, 等, 2013. 基于变形的土石坝地震易损性分析. *岩土工程学报*, 35(5):814–819.
- 杨紫辉, 陈灯红, 贺路翔, 等, 2019. 基于 IDA 的金安桥混凝土重力坝潜在失效模式研究. *世界地震工程*, 35(2): 78–89.
- 于京池, 金爱云, 潘坚文, 等, 2022. 基于 GA-BP 神经网络的拱坝地震易损性分析. *清华大学学报(自然科学版)*, 62(8):1321–1329.