

王洋洋,景月岭,黄友保,等.地震波斜入射输入体系下坝后式厂房易损性分析[J].地震工程学报,2021,43(6):1452-1459.DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1452

WANG Yangyang, JING Yueling, HUANG Youbao, et al. Vulnerability analysis of a powerhouse at dam toe under the input of obliquely incident seismic waves[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(6): 1452-1459. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1452

地震波斜入射输入体系下坝后式厂房易损性分析

王洋洋^{1,2}, 景月岭^{1,2}, 黄友保³, 刘丙瑞³, 周召虎^{1,2}, 何李浩^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

3. 安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了考虑地震波斜入射对坝后式厂房易损性的影响,通过斜入射 SV 波和 P 波波场叠加,在地表得到与实测地震动一致的设计地震动分量。同时为了考虑坝后式厂房的动力损伤,在程序中嵌入混凝土动力损伤本构,编写了可以考虑地震波斜入射体系的结构易损性分析程序。最后从太平洋地震工程研究中心(PEER)数据库中选取 26 条近场地震动数据,根据峰值地面加速度(PGA)对每条地震波进行调幅,以我国西南地区某坝后式厂房为工程实例,用增量动力学分析法计算了其上下游墙体在不同强度斜入射体系地震动作用下的易损性曲线。与传统垂直入射模式下的地震易损性曲线对比发现,传统垂直入射下的破坏概率较高,两种入射模式破坏概率最大相差 26%。其中,坝后式厂房下游墙的破坏概率比上游墙大,最大相差可 19%。因此坝后式厂房的抗震设计需考虑地震波斜入射的影响,并重点考虑下游墙部位的抗震安全性。

关键词: 坝后式厂房; 斜入射; 设计地震动; 易损性分析; 地面峰值加速度

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)06-1452-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1452

Vulnerability analysis of a powerhouse at dam toe under the input of obliquely incident seismic waves

WANG Yangyang^{1,2}, JING Yueling^{1,2}, HUANG Youbao³, LIU Bingrui³,
ZHOU Zhaohu^{1,2}, HE Lihao^{1,2}

(1. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering and Materials, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

3. Anhui Shui'an Construction Group Co., Ltd., Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: To study the influence of obliquely incident seismic waves on the vulnerability of powerhouse at dam toe, the design seismic component consistent with measured ground motion was first obtained on the surface through the superposition of obliquely incident SV-wave field and

收稿日期: 2020-06-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(PA2019GDPK0036), 国家自然科学基金青年项目(51409074)

第一作者简介: 王洋洋(1994—), 男, 浙江绍兴人, 硕士, 研究方向为水工结构抗震。E-mail: 846225854@qq.com。

通信作者: 景月岭(1983—), 男, 河南兰考人, 副教授, 博士, 研究方向为水工结构抗震。E-mail: jing@hfut.edu.cn。

P-wave field. Meanwhile, in order to consider the dynamic damage of the powerhouse, a program of structural vulnerability analysis considering the system of obliquely incident waves was compiled, in which a damage constitutive model of concrete was embedded. Finally, 26 near-field ground motions were selected from the PEER database and modulated according to the peak ground acceleration (PGA). Taking a powerhouse at dam toe in southwest China as an example, the vulnerability curves of its upstream and downstream walls under the action of obliquely incident system with different intensities were calculated with the incremental dynamic analysis method. Through comparison, it is found that the failure probability of seismic vulnerability curves under vertically incident waves is relatively higher than that under obliquely incident waves, with the maximum difference of 26%. The failure probability of downstream wall is higher than that of upstream wall, and the maximum difference is up to 19%. Thus, the seismic design of powerhouse at dam toe should consider the effect of obliquely incident seismic wave, and more attention should be paid to the seismic safety of downstream wall.

Keywords: powerhouse at dam toe; oblique incidence; design ground motion; vulnerability analysis; peak ground acceleration

0 引言

地震作用下的结构易损性分析起源于对核电站的研究,引入土木工程领域后得到了充分的发展,取得了一系列的研究成果^[1-6]。目前来看,水利工程领域的地震易损性分析研究较少^[7-9],且多侧重于结构类型的多样化和构件层次的精细化建模等方面,并且简化了外源地震波的输入模式,即通过在结构底部直接输入地震波的方式模拟地震动能量的输入,忽略了地震波的场地效应和土-结构动力相互作用对结构易损性分析结果的影响。最近 Samanta^[10]对比研究了高中低三种不同楼层的房屋在软土基础上的易损性,研究发现考虑土-结构动力相互作用会影响建筑物的动力响应和破损概率。黄博等^[11]研究发现,局部河谷地形和土-结构动力相互作用对多层框架结构的动力响应和易损性曲线影响较大。但其考虑的是剪切波垂直入射的情形,没有考虑近场地震动斜入射和地表非一致性运动。

综上所述,现有的结构易损性研究还未将地震波斜入射影响考虑在内,由于地震波斜入射输入会在地表产生放大效应。为了以地表实测地震动分量为输入目标,本文基于斜入射 SV 波和 P 波波场编制了考虑地表实测地震动水平分量的地震波入射程序。程序可以在斜入射体系下实现到达地表的地震动为实测地震动的目标。接着采用增量动力学分析法(IDA),选取太平洋地震工程研究中心(PEER)数据库中 26 条实测地震动的水平向分量为目标地震动,以我国西南地区某坝后式厂房为实例,计算得到

了该坝后式厂房上下游墙体易损性曲线,并对比分析了与传统垂直入射模式得到的易损性曲线的差异性。

1 基本理论

1.1 基于斜入射波场的地表实测地震动模拟

一般考虑土-结构动力相互作用时会截取结构周围的部分地基,并在其周围施加一定的人工边界以模拟半无限地基的辐射阻尼效应。为了在大型通用有限元软件 ANSYS 中实现地震波的斜入射输入,本文采用黏弹性边界^[12-13]模拟半无限地基的辐射阻尼作用。地震波通过等效节点力的方式施加到黏弹性边界上,由此实现地震波的近场入射模拟。此前人们多认为地震波通过近场基础入射到自由面是垂传播的,近年来国内外学者发现近场地震动也有一定的比例是斜入射传播到地表的。为了建立反映地表非一致性运动的地震动场,考虑斜入射地震波与地表实测地震动之间的联系,苑举卫等^[14-15]通过固体介质中波场叠加技术,将地表地震动分量看作是斜入射 SV 波和 P 波的叠加,构造了基于地表实测地震动的斜入射体系,采用的思想如下:地震波在传至地表时会发生波形转换,生成反射 SV 波和反射 P 波,如图 1 和图 2 所示,并且入射角和反射角满足 Snell 定律。地表地震动水平分量可以看做是由垂直入射的剪切波引起的,竖向分量是由垂直入射的膨胀波引起的。遵循这个思路,将地表地震动水平分量和竖直分量分别看作是由斜入射 SV 波

和 P 波叠加引起的。

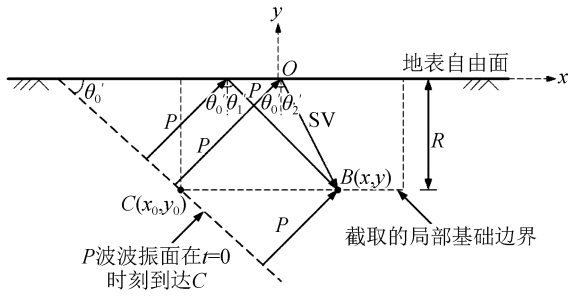


图 1 P 波斜入射自由场

Fig.1 A free-field system under obliquely incident P-wave

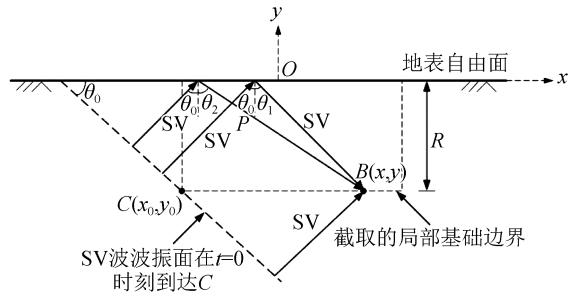


图 2 SV 波斜入射自由场

Fig.2 A free-field system under obliquely incident SV-wave

为了编程实现上述思路,设半无限空间自由面中心点 O 为坐标原点,如图 1、图 2 所示。该处水平向实测地震动为 $u_h(t)$,在截取的部分地基左下角 C 点处 SV 波的入射时程为 $f(t)$,入射角度为 θ_0 ,该处 P 波的入射时程为 $g(t)$,入射角度为 θ'_0 。它们叠加作用得到的地表中心点的地震动水平分量为 $u_h(t - t_i)$,其中 t_i 表示叠加波传播到地表 O 点的时间延迟,故入射的 SV 波和 P 波竖直分量之间存在以下关系。

$$\begin{aligned} & -f\left(t - \frac{x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0}{c_s}\right) \sin \theta_0 - \\ & f_1 f\left(t - \frac{x \sin \theta_1 - y \cos \theta_1}{c_p}\right) \cos \theta_1 - \\ & f_2 f\left(t - \frac{x \sin \theta_2 - y \cos \theta_2}{c_s}\right) \sin \theta_2 + \\ & g\left(t - \frac{x \sin \theta'_0 - y \cos \theta'_0}{c_p}\right) \cos \theta'_0 - \\ & g_1 g\left(t - \frac{x \sin \theta'_1 - y \cos \theta'_1}{c_p}\right) \cos \theta'_1 - \\ & g_2 g\left(t - \frac{x \sin \theta'_2 - y \cos \theta'_2}{c_s}\right) \sin \theta'_2 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x, y 分别代表地表自由面任意点水平向和竖直向坐标,角度上标中带有“'”符号的表示入射 P 波与其对应的两个反射角。 f_1 和 f_2 分别代表入射

SV 波反射生成的 P 波和 SV 波与其的波幅比; g_1 和 g_2 分别代表入射 P 波反射生成的 P 波和 SV 波与入射 P 波的波幅比。根据 Snell 定律,P 波和 SV 波的入射角度确定, f_1, f_2, g_1 和 g_2 是可以计算得到的常数。故式(1)化简为

$$\begin{aligned} & -f\left(t - \frac{x \sin \theta_0}{c_s}\right) (-\sin \theta_0 - f_1 \cos \theta_1 - f_2 \sin \theta_2) + \\ & g\left(t - \frac{x \sin \theta'_0}{c_p}\right) (-\cos \theta'_0 - g_1 \cos \theta'_1 - g_2 \sin \theta'_2) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

为了使上式在地表任意点处均成立,入射 SV 波和 P 波必须同时达到自由面,且其入射角之间必须满足如下等式

$$\frac{\sin \theta_0}{c_s} = \frac{\sin \theta'_0}{c_p} \quad (3)$$

则入射 P 波可以根据入射 SV 波得到

$$g\left(t - \frac{x \sin \theta'_0}{c_p}\right) = f_v f\left(t - \frac{x \sin \theta_0}{c_s}\right) \quad (4)$$

其中

$$f_v = \frac{\sin \theta_0 + f_1 \cos \theta_1 + f_2 \sin \theta_2}{\cos \theta'_0 - g_1 \cos \theta'_1 - g_2 \sin \theta'_2} \quad (5)$$

注意,根据式(4)可知入射 SV 波和 P 波并不是同时从 C 点同时入射的,为使叠加波场在地表产生的水平向地震动与实测地震动水平分量相等,需满足

$$\begin{aligned} u_h(t - t_i) &= f\left(t - \frac{x \sin \theta_0}{c_s}\right) \times \\ & [\cos \theta_0 + f_1 \sin \theta_1 - f_2 \sin \theta_2] + \\ & f_v (\sin \theta'_0 + g_1 \sin \theta'_1 - g_2 \cos \theta'_2) \end{aligned} \quad (6)$$

其中:

$$t_i = \frac{x \sin \theta_0}{c_s}, \quad (7)$$

$$f\left(t - \frac{x \sin \theta_0}{c_s}\right) = f_{sh} u_h\left(t - \frac{x \sin \theta_0}{c_s}\right)$$

其中:

$$f_{sh} = [(\cos \theta_0 + f_1 \sin \theta_1 - f_2 \cos \theta_2) + f_v (\sin \theta'_0 + g_1 \sin \theta'_1 - g_2 \cos \theta'_2)]^{-1} \quad (8)$$

根据上述简单推导^[14-15],入射 P 波可由式(4)计算得到。然后根据波的传播理论,斜入射 SV 波和 P 波在地表共同产生的波场就可以得到,其水平向地震动与地表实测地震动相等且具有非一致特性。

1.2 混凝土损伤模型

为了真实描述坝后式厂房的动力损伤过程,需采用合理的混凝土损伤本构。由于 ANSYS 软件中缺乏合理评价混凝土材料在地震工况下经历反复拉

压荷载后的损伤本构。本文利用 APDL 语言编程,将混凝土单元的损伤通过弹性模量的折减来实现。应力应变关系如图 3 所示,考虑了混凝土的拉伸损

伤和其在地震动期间由于拉伸损伤产生单元受力性能下降而导致的压剪损伤,分别采用最大拉应变准则和摩尔-库伦准则来判断拉伸损伤和压剪损伤。

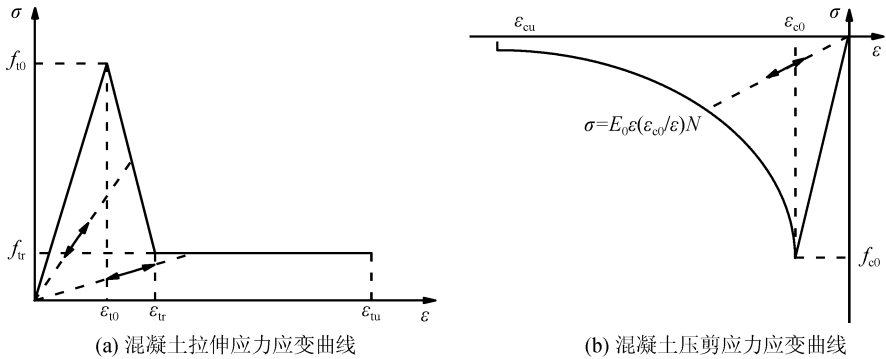


图 3 混凝土应力应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of concrete

2 坝后式厂房易损性分析

2.1 案例背景

我国西南某坝后式水电站地处两个强震发生带之间,其所属坝后式厂房上游墙高 38.1 m,下游厂房墙高 23.6 m。根据已有的研究^[16],坝后式厂房上游的大坝在地震动期间对其动力响应有一定影响,为了更实际的反映坝后式厂房的动力响应,本文基于 ANSYS 软件建立如图 4 所示的厂坝二维模型。

基础长宽分别为 1 000 m 和 500 m,材料参数取值如表 1 所示。

表 1 材料参数表

Table 1 Material parameters			
材料类别	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
C25 混凝土	28	0.167	2 400
C20 混凝土	25.5	0.167	2 400
基岩	8	0.230	2 700

经有限元程序弹性分析可知,图 4 中整个结构的薄弱位置处于坝后式厂房的上下游墙部位,如图 5 所示,在程序中对这部分结构赋予 2.1 节中的混凝土损伤模型,以此来考察坝后式厂房的易损性。

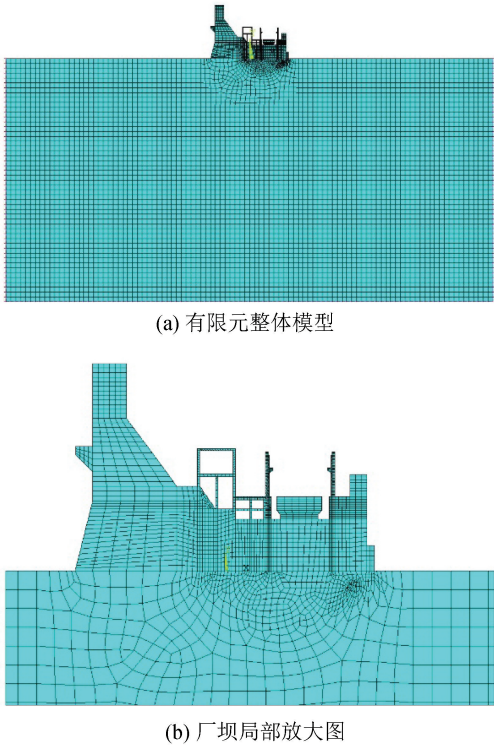


图 4 有限元模型

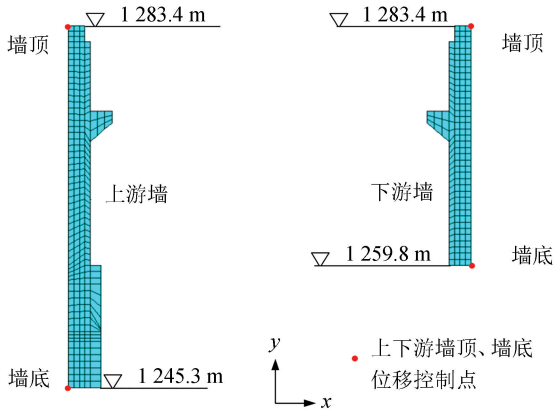


图 5 上下游墙顶、墙底位置

Fig.5 Location of the top and bottom of upstream and downstream walls

2.2 实测地震波选取与处理

太平洋地震工程研究中心(PEER)中的强震数据库(NGA)记录了全球浅层地壳地震中记录的大量地震动,由于地震波的频谱特性对结构响应差别

Fig.4 Finite element model

影响很大,将水电工程水工建筑物抗震设计规范^[17](NB35047—2015)中标准设计反应谱输入 NGA 数据库,再依据震级($6.5 < M_s < 8$)、震中距($R < 50$ km)和场地类别(二类场地)从中选取了 26 条实测地震动数据列于表 2 中。

由于实测地震动长持时会引起结构刚度和强度

表 2 地震动记录

Table 2 List of earthquake records					
地震名称	年份	M_s	R/km	水平加速度分量	编号
San Fernando	1971	6.61	89.72	RSN59_SFERN_CSM095.AT2	0059
San Fernando	1971	6.61	21.5	RSN80_SFERN_PSL180.AT2	0080
Loma Prieta	1989	6.93	73	RSN788_LOMAP_PJH045.AT2	0788
Loma Prieta	1989	6.93	83.45	RSN789_LOMAP_PTB207.AT2	0789
Loma Prieta	1989	6.93	74.14	RSN797_LOMAP_RIN000.AT2	0797
Loma Prieta	1989	6.93	63.15	RSN804_LOMAP_SSF115.AT2	0804
Landers	1992	7.28	2.19	RSN879_LANDERS_LCN260.AT2	0879
Kocaeli_Turkey	1999	7.51	7.21	RSN1165_KOCAELI_IZT180.AT2	1165
Chi-Chi_Taiwan	1999	7.62	122.48	RSN1440_CHICHI_TAP065-E.AT2	1440
Tottori_Japan	2000	6.61	70.52	RSN3920_TOTTORI_OKYH02NS.AT2	3920
Tottori_Japan	2000	6.61	15.23	RSN3925_TOTTORI_OKYH07NS.AT2	3925
Tottori_Japan	2000	6.61	15.59	RSN3954_TOTTORI_SMNH10NS.AT2	3954
Niigata_Japan	2004	6.63	77.5	RSN4248_NIIGATA_TCGH17NS.AT2	4248
Chuetsu-oki_Japan	2007	6.8	126.64	RSN5013_CHUETSU_FKSH15NS.AT2	5013
Chuetsu-oki_Japan	2007	6.8	103.85	RSN5363_CHUETSU_TCGH17NS.AT2	5363
Chuetsu-oki_Japan	2007	6.8	139.52	RSN5444_CHUETSU_YMTH03NS.AT2	5444
Iwate_Japan	2008	6.9	118.68	RSN5641_IWATE_IWTH09NS.AT2	5641
Iwate_Japan	2008	6.9	99.05	RSN5646_IWATE_IWTH14NS.AT2	5646
Iwate_Japan	2008	6.9	72.44	RSN5649_IWATE_IWTH17NS.AT2	5649
Iwate_Japan	2008	6.9	82.93	RSN5670_IWATE_MYG011NS.AT2	5670
Iwate_Japan	2008	6.9	56.72	RSN5679_IWATE_MYGH03NS.AT2	5679
Iwate_Japan	2008	6.9	57.15	RSN5685_IWATE_MYGH11NS.AT2	5685
El Mayor-Cucapah_Mexico	2010	7.2	147.39	RSN6009_SIERRA.MEX_0604A180.AT2	6009
Tottori_Japan	2000	6.61	152.1	RSN6231_TOTTORI.1_HYG027NS.AT2	6231
Niigata_Japan	2004	6.63	110.16	RSN6526_NIIGATA_FKSH15NS.AT2	6526
Niigata_Japan	2004	6.63	127.63	RSN6746_NIIGATA_SITH09NS.AT2	6746

退化,根据文献^[9]中使用的截断方法,使用显著持时将实测地震波截断,只计算地震波能量由 0.5% 累计至 95% 所需的时间段。能量累计的计算公式根据式(9)计算。

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_i} a^2(t) dt \tag{9}$$

式中: AI 表示 Arias^[18]强度, t_i 表示地震波总持时, $a(t)$ 表示地震波加速度时程。这里采用 MATLAB 程序包对 PEER 中选取的 26 条实测地震波进行截断。为了进行 IDA 分析,对选取的 26 条近场地震动进行调幅,每条地震波加速度峰值按 0.1g 的级差调成 0.1g 至 1.0g 共 10 组。各条地震波的反应谱如图 6 所示,图中图例的数字代表的是表 2 中地震波的编号。

2.3 易损性指标选取

结构易损性分析中易损性指标的选取至关重要。由于本文研究的对象是单层坝后式厂房。众多研究者^[1,3,19]对单层厂房的地震易损性研究均采用

最大层间位移角作为厂房破坏等级划分的参数。本文将坝后式厂房破坏等级按层间位移角划分为轻微破坏、中等破坏、严重破坏三个级别。各自对应的层间位移角限值^[3]如表 3 所示。

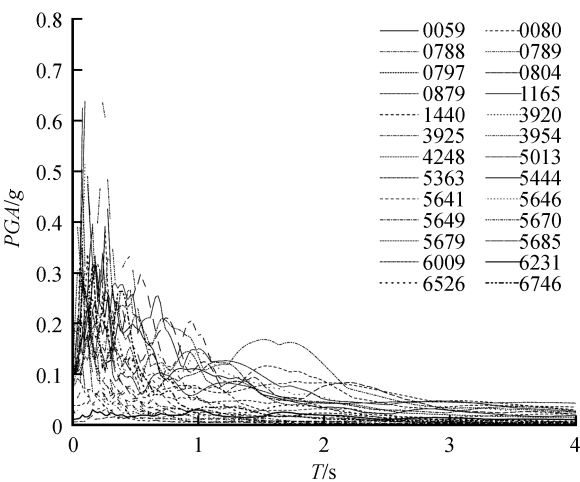


图 6 选取的 26 条地震波反应谱
Fig.6 Response spectra of 26 seismic waves

表 3 坝后式厂房结构破坏等级与层间位移角的关系

破坏等级	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
层间位移角 θ	$0.25\% < \theta < 0.5\%$	$0.5\% < \theta < 0.83\%$	$0.83\% < \theta < 2.0\%$

2.4 易损性曲线分析

已有的易损性曲线通常有两种绘制方法。第一种是直接拟合法,第二种是概率分布法。本文采用应用范围较广的直接拟合法。为了对比传统垂直入射

模式与本文斜入射体系下基于地表实测地震动输入模式对坝后式厂房的易损性曲线的影响,选取同样的地震波对同一个有限元模型进行增量动力学分析。经过有限元程序计算后得到的易损性曲线如图 7 所示。

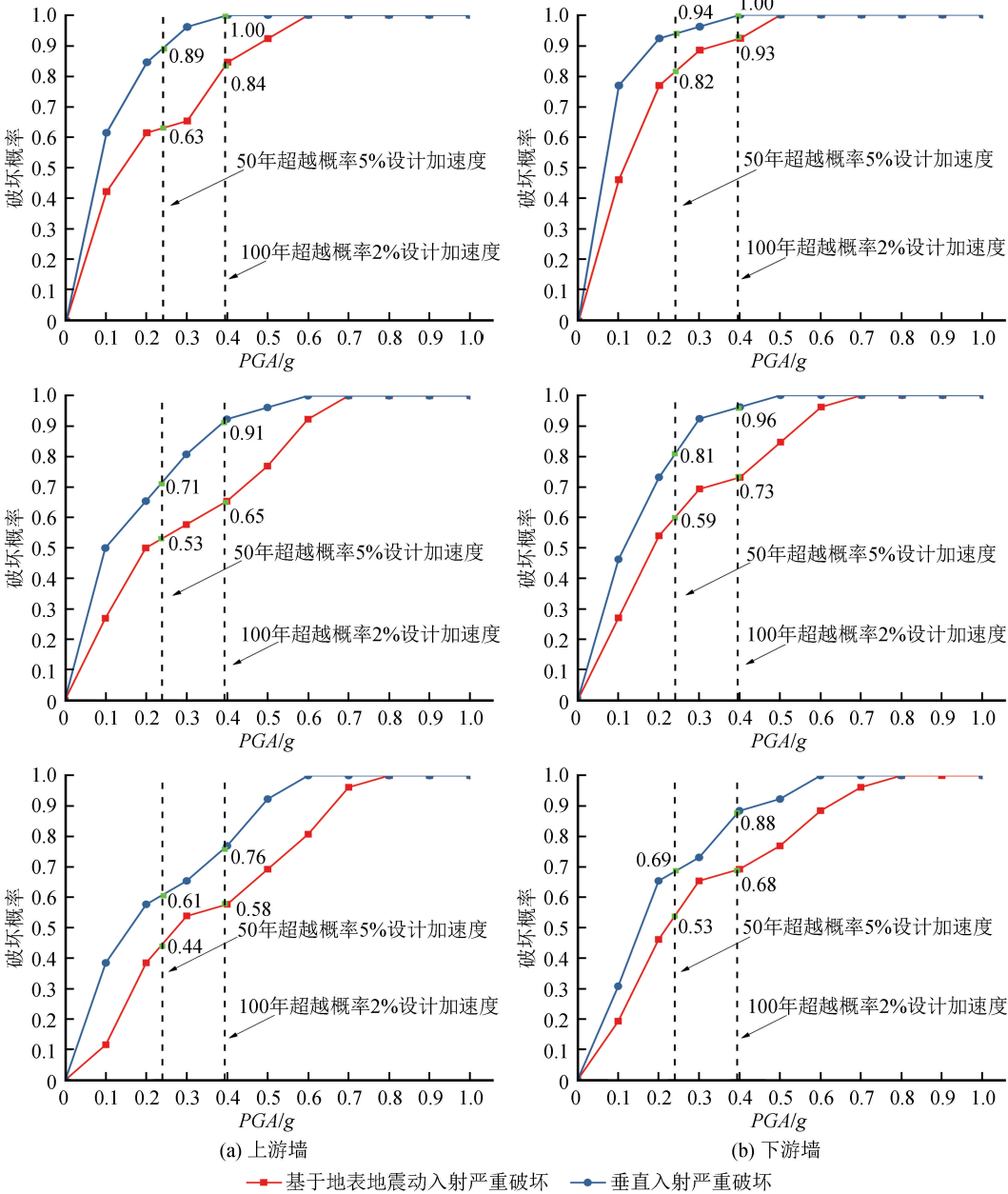


图 7 上下游墙易损性曲线

Fig.7 Vulnerability curves of the upstream and downstream walls

从图 7 可见,斜入射体系下基于地表地震动入射的坝后式厂房上下游墙的易损性曲线和传统的垂直入射得到的易损性曲线有明显不同。总体上来

看,各个破坏等级下的易损性曲线形状类似,均是在 PGA 小于 0.5g 时超越概率增长迅速,PGA 超过 0.5g 时超越概率增长缓慢直至 100%。坝后式厂房

上下游墙体在垂直入射模式下的破坏概率比斜入射体系下高。根据中国地震局地质研究所《金沙江龙开口水电站工程场地地震安全性评价和水库诱发地震评价报告》成果,本文的坝后式厂房所在场地 50 年超越概率 5% 的设计加速度为 $0.24g$, 100 年超越概率 2% 设计加速度为 $0.394g$ 。在三种破坏模式下将这两条加速度直线与相应的易损性曲线相交。在轻微破坏等级下,垂直入射时,50 年超越概率 5% 的设计加速度时坝后式厂房上游墙的超越概率是 0.89,斜入射体系下基于地表实测地震动入射时这一值为 0.63;100 年超越概率 2% 的设计加速度下,两种入射体系的轻微破坏概率分别是 1 和 0.84。下游墙的轻微破坏概率比上游墙大,50 年超越概率 5% 的设计加速度时分别为 0.94 和 0.82;100 年超越概率 2% 的设计加速度下轻微破坏概率分别是 1 和 0.93,这一峰值加速度下两种入射体系计算得到的差别最小,只有 7%。在中等破坏等级时,垂直入射下,50 年超越概率 5% 的设计加速度时坝后式厂房上游墙的超越概率是 0.71,斜入射体系下基于地表实测地震动入射时这一值为 0.53;100 年超越概率 2% 的设计加速度下,两种入射体系的轻微破坏概率分别是 0.91 和 0.65,这一峰值加速度下两种入射体系计算得到的差别最大,达到 26%。下游墙的轻微破坏概率比上游墙大,50 年超越概率 5% 的设计加速度时分别为 0.81 和 0.59;100 年超越概率 2% 的设计加速度下轻微破坏概率分别是 0.96 和 0.73。在严重破坏等级下,垂直入射时,50 年超越概率 5% 的设计加速度时坝后式厂房上游墙的超越概率是 0.61,斜入射体系下基于地表实测地震动入射时这一值为 0.44;100 年超越概率 2% 的设计加速度下,两种入射体系的轻微破坏概率分别是 0.76 和 0.58。下游墙的轻微破坏概率比上游墙大,50 年超越概率 5% 的设计加速度时分别为 0.69 和 0.53;100 年超越概率 2% 的设计加速度下轻微破坏概率分别是 0.88 和 0.68。从地震波斜入射体系下基于地表实测地震动的坝后式厂房上下游墙的易损性曲线和传统的垂直入射得到的结果对比可以看出,斜入射作用对易损性曲线的影响不可忽略,需在同类坝后式厂房的地震安全性评价中考虑地震波斜入射作用的影响。

3 结论

本文编写的程序克服了斜入射地震波输入难以按地表实测地震动参数为目标来调幅进行结构易损性分析的困难,并在程序中嵌入了混凝土损伤模型。

以我国西南地区某坝后式厂房为工程实例进行了结构易损性分析。经过 520 组数值实验,与传统垂直入射模式下的易损性曲线做对比后得到了以下结论:

(1) 根据波的传播理论,推导了合成地表水平向地震动的斜入射 SV 波和 P 波公式表达,使得地表水平向地震动与实测地震动相等且具有非一致性特性。

(2) 传统的垂直入射方式得到的坝后式厂房上下游墙的易损性曲线的各级破坏超越概率比地震波斜入射体系下基于地表实测地震动模式得到的易损性曲线的超越概率大。最大时相差 26%,故进行坝后式厂房的易损性分析时需考虑地震波斜入射的影响。

(3) 坝后式厂房下游墙各个等级的破坏概率比上游墙大。在地震波斜入射体系下,下游墙体各级损坏超越概率中最高比上游墙体超出 19%,对同类坝后式厂房进行抗震设计时应当予以关注。

(4) 该方法仅适用于线弹性均质地基。在实际工程中,地基往往是非均质的,并且非岩质地基在强震作用下具有非线性特性。因此,如何将该方法推广到非均质地基和非线性地基是今后研究的重点。

参考文献(References)

- [1] 文波,牛获涛.大型变电站主厂房地震易损性研究[J].土木工程学报,2013,46(2):19-23.
WEN Bo, NIU Ditao. Seismic vulnerability analysis for the main building of the large substation[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2): 19-23.
- [2] 吕大刚,李晓鹏,王光远.基于可靠度和性能的结构整体地震易损性分析[J].自然灾害学报,2006,15(2):107-114.
LÜ Dagang, LI Xiaopeng, WANG Guangyuan. Global seismic fragility analysis of structures based on reliability and performance[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(2): 107-114.
- [3] 张号浩.单层钢筋混凝土柱厂房地震易损性分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2011.
ZHANG Haohao. Seismic vulnerability analysis of single-story factory buildings with reinforced concrete columns[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2011.
- [4] 刘晶波,刘阳冰,同秋实,等.基于性能的方钢管混凝土框架结构地震易损性分析[J].土木工程学报,2010,43(2):39-47.
LIU Jingbo, LIU Yangbing, YAN Qiushi, et al. Performance-based seismic fragility analysis of CFST frame structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 39-47.
- [5] 吕西林,苏宁粉,周颖.复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析[J].地震工程与工程振动,2012,32(5):19-25.
LÜ Xilin, SU Ningfen, ZHOU Ying. IDA-based seismic fragility analysis of a complex high-rise structure[J]. Journal of

- Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(5):19-25.
- [6] 吴文朋,李立峰,王连华,等.基于 IDA 的高墩大跨桥梁地震易损性分析[J].地震工程与工程振动,2012,32(3):117-123.
WU Wenpeng, LI Lifeng, WANG Lianhua, et al. Evaluation of seismic vulnerability of high-pier long-span bridge using incremental dynamic analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(3):117-123.
- [7] 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(05):814-819.
WANG Dubo, LIU Hanlong, YU Tao, et al. Seismic fragility analysis for earth-rockfill dams based on deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(05):814-819.
- [8] 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.
ZHONG Hong, LI Xiaoyan, LIN Gao. Analyses of failure modes-based seismic fragility of gravity dams[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(1):60-65.
- [9] 姚霄雯.基于性能的高拱坝地震易损性分析与抗震安全评估[D].杭州:浙江大学,2013.
YAO Xiaowen. Performance-based seismic fragility analysis and safety assessment of high arch dams[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [10] SAMANTA A, SWAIN A. Seismic response and vulnerability assessment of representative low, medium and high-rise buildings in Patna, India[J]. Structures, 2019, 19:110-127.
- [11] 黄博,廖凯龙,赵宇,等.考虑河谷地形影响的多层框架结构地震易损性[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(4):692-701,723.
HUANG Bo, LIAO Kailong, ZHAO Yu, et al. Seismic fragility analysis of multi-storey frame structure considering effect of valley terrain[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(4):692-701,723.
- [12] 陈灯红,杜成斌,苑举卫.基于 ABAQUS 的粘弹性边界单元及在重力坝抗震分析中的应用[J].世界地震工程,2010,26(3):127-132.
CHEN Denghong, DU Chengbin, YUAN Juwei. Viscous-spring boundary element based on ABAQUS and application to dynamic analysis of a gravity dam[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(3):127-132.
- [13] 赵建锋,杜修力,韩强,等.外源波动问题数值模拟的一种实现方式[J].工程力学,2007,24(4):52-58.
ZHAO Jianfeng, DU Xiuli, HAN Qiang, et al. An approach to numerical simulation for external source wave motion[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(4):52-58.
- [14] 苑举卫,杜成斌,刘志明.基于设计地震动的地震波斜入射波动输入研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(5):250-255.
YUAN Juwei, DU Chengbin, LIU Zhiming. Study on oblique wave input based on design seismic component[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5):250-255.
- [15] 苑举卫,杜成斌,刘志明.地震波斜入射条件下重力坝动力响应分析[J].振动与冲击,2011,30(7):120-126.
YUAN Juwei, DU Chengbin, LIU Zhiming. Time-domain seismic response for gravity dam to obliquely incident and seismic waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7):120-126.
- [16] 景月岭,王洋洋,梅润雨.地震作用下坝后式水电站厂坝连接形式对比研究[J].水利水电技术,2017,48(5):50-55,119.
JING Yueling, WANG Yangyang, MEI Runyu. A comparative study on powerhouse-dam joint mode for hydropower station after dam under seismic action[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5):50-55,119.
- [17] 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.
- [18] ARIAS A. A measure of earthquake intensity[R]. In Seismic Design for Nuclear Power Plants, MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1970.
- [19] 朱健,谭平,周福霖.基于位移的钢筋混凝土结构单层厂房易损性分析[J].振动与冲击,2010,29(1):207-213,247.
ZHU Jian, TAN Ping, ZHOU Fulin. Seismic fragility analysis for industrial buildings based on displacement and strengthening measures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1):207-213,247.