

刘金芳,尹晓霞,高凤.SV波斜入射下混凝土重力坝易损性分析[J].地震工程学报,2024,46(2):318-324.DOI:10.20000/j.1000-0844.20221024001

LIU Jinfang, YIN Xiaoxia, GAO Feng. Fragility analysis of the concrete gravity dam under the oblique incidence of SV waves [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(2): 318-324. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221024001

## SV波斜入射下混凝土重力坝易损性分析

刘金芳<sup>1</sup>, 尹晓霞<sup>2</sup>, 高凤<sup>3</sup>

(1. 青海省水利水电勘测规划设计研究院有限公司, 青海 西宁 810012;

2. 青海省农田建设和土地整治中心, 青海 西宁 810012;

3. 陕西省建筑职工大学, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 易损性分析是评估不同强度地震作用下混凝土重力坝各级破坏概率的有效方法。目前重力坝易损性分析通常假定地震波为垂直入射,然而在近断层区域,地震波往往是倾斜入射的,地震波斜入射对重力坝地震响应有显著影响。从太平洋地震工程研究中心数据库选取16条地震动记录,采用黏弹性人工边界结合等效节点荷载实现SV波斜入射波动输入。采用增量动力分析方法对地震动峰值加速度进行调幅,以印度Koyna混凝土重力坝为研究对象,以坝顶相对位移为抗震性能指标,建立SV波斜入射下重力坝不同震损等级的易损性曲线。结果表明,与垂直入射相比,相同震损等级和相同地震动强度下,斜入射时重力坝破坏概率减小;当PGA接近重力坝实际遭受的地震动强度时,入射角为15°和30°时破坏概率与垂直入射相比最大减小率分别为27.3%和68.2%;各地震动强度下,15°和30°斜入射相对于垂直入射的破坏概率差异值最大分别达36.6%、83.9%。因此,混凝土重力坝抗震性能分析应考虑地震波斜入射的影响。研究结果也可为近断层区域混凝土重力坝安全风险评估提供参考。

**关键词:** 混凝土重力坝; 地震波入射角度; 增量动力分析; 黏弹性边界; 相对位移

中图分类号: TV312

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)02-0318-08

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20221024001

## Fragility analysis of the concrete gravity dam under the oblique incidence of SV waves

LIU Jinfang<sup>1</sup>, YIN Xiaoxia<sup>2</sup>, GAO Feng<sup>3</sup>

(1. Qinghai Water Resources and Hydropower Survey, Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Xining 810012, Qinghai, China;

2. Qinghai Bureau of Animal Husbandry and Agriculture Accounting Assignment Center, Xining 810012, Qinghai, China;

3. Architecture Zabor University of Shaanxi Province, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**Abstract:** An effective method for evaluating the damage probability of concrete gravity dams under ground motions with different intensities is fragility analysis. The fragility analysis of gravity dams generally assumes that seismic waves are vertically incident, but those in the near-fault area are obliquely incident. The oblique incidence of seismic waves has a considerable influence on the

收稿日期: 2022-10-24

基金项目: 西安市碑林区应用技术研发项目(GX2150)

第一作者简介: 刘金芳(1989-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工结构设计方面的工作。E-mail: cl25254@126.com。

seismic response of gravity dams. Based on the database of the Pacific Earthquake Engineering Research Center, 16 ground motion records were selected, and the oblique incidence input of SV waves was realized using the viscoelastic artificial boundary and equivalent nodal load. The PGA of ground motion was modulated using the incremental dynamic analysis method. The Koyna concrete gravity dam in India was taken as the research object in this paper. The fragility curves for different earthquake damage levels of the gravity dam under the oblique incidence of SV waves were established by taking the relative displacement of the dam crest as the seismic performance index. Results show that under the same earthquake damage level and ground motion intensity, the damage probability of gravity dams under the oblique incidence of SV waves decreases compared to that under the vertical incidence. When the PGA is close to the actual earthquake intensity of gravity dams, the maximum reduction rates of failure probability are 27.3% and 68.2%, respectively, when the incident angles are  $15^\circ$  and  $30^\circ$ , compared with that under vertical incidence. Meanwhile, the maximum difference values of failure probability are 36.6% and 83.9% compared with those under vertical incidence. Therefore, the influence of the oblique incidence of seismic waves should be considered in the seismic performance analysis of concrete gravity dams. The results can also provide a reference for the safety risk assessment of concrete gravity dams in near-fault areas.

**Keywords:** concrete gravity dam; incidence angle of seismic wave; incremental dynamic analysis; viscoelastic boundary; relative displacement

## 0 引言

混凝土重力坝作为应用广泛的大型水工建筑物,其安全稳定运行至关重要。然而,我国处于地震高发区,强震对重力坝的危害不容忽视。对混凝土重力坝进行抗震性能评价是其可行性研究、建设、运行过程中不可缺少的一部分。

在坝址附近的近断层区域产生的地震波传播到坝址附近时并非垂直入射,而是以一定角度斜入射传播。以往研究表明,地震波入射角度对混凝土重力坝动力响应具有显著影响。如李明超等<sup>[1]</sup>通过塑性损伤模型分别对 P 波、SV 波斜入射对于混凝土重力坝动力响应的影响进行了分析,结果表明:SV 波角度增大会造成应力、位移及损伤的减小;P 波角度增大会使响应先增大后减小,在  $60^\circ$  时达到最大。苑举卫等<sup>[2]</sup>确保地震动在水平地表的响应与设计地震动分量一致,通过波场分解将水平地表的震动分解为 P、SV 波,研究了不同入射角度下混凝土重力坝的动力响应特征。

上述研究仅针对地震波入射角度对结构响应进行分析,并未研究地震波斜入射角对混凝土重力坝抗震安全性能的影响。在重力坝抗震性能分析中,易损性分析方法是较为常见的分析方法。黎曼<sup>[3]</sup>、王超等<sup>[4]</sup>通过对比分析不同坝型在地震动作用下的损伤,以整体损伤为指标对重力坝坝体抗震破损指

标进行了分级。石强等<sup>[5]</sup>提出以地震波单峰面积与损伤相关性作为评价指标。陈灯红等<sup>[6]</sup>以坝顶相对位移为指标对重力坝的抗震性能进行了分析。姚倩茹等<sup>[7]</sup>、刘肖军等<sup>[8]</sup>将不同的评价指标按照一定的加权系数联合,作为综合评价指标对重力坝的抗震能力进行分析。

上述关于混凝土重力坝抗震安全评价的研究,在地震动输入上多为一致输入或假定地震波为垂直入射的波动输入,并未考虑到地震波斜入射对混凝土重力坝抗震安全性能的影响。

本文采用黏弹性人工边界结合等效节点荷载的波动输入方法,实现 SV 波不同入射角度的地震动输入。从太平洋地震工程研究中心(PEER)强震数据库选取 16 条地震动记录,对印度 Koyna 重力坝进行非线性动力时程分析;坝体混凝土采用塑性损伤模型,采用增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)法得到不同入射角度下混凝土重力坝的易损性曲线,评估相同地震强度条件、不同入射角度下重力坝的破坏概率,分析地震波斜入射相对垂直入射对破坏概率的影响程度。

## 1 SV 波斜入射波动输入

### 1.1 二维黏弹性边界

当地震波入射结构-地基系统时,从结构内向外

传播的地震波称为外行波,这一部分地震波入射至无限远地基时将被耗散吸收,这种耗能能力称为辐射阻尼效应。当采用有限元方法进行结构-地基动力时程分析时,由于计算能力的限制,导致在进行分析时很难选取过大的地基范围以模拟这一能力,因此通常只截取有限范围的地基进行分析。而模拟无限域地基的耗能能力时,通常在截取的边界上建立全局或局部人工边界来保证外行波穿过边界时不发生反射。在众多的全局或局部人工边界当中,刘晶波等<sup>[9-10]</sup>提出并改进的黏弹性人工边界,由于能够模拟弹性恢复能力,克服了黏性边界的低频失稳问题,具有良好的稳定性且易实现,因此被广泛使用。黏弹性人工边界通过在边界节点上施加弹簧-阻尼器系统以模拟地基的耗能能力和弹性恢复能力。弹簧-阻尼器系统中的弹簧器及阻尼器系数计算公式为:<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} K_N = \frac{\alpha_N G}{R}, & C_N = \rho c_P \\ K_T = \frac{\alpha_T G}{R}, & C_T = \rho c_S \end{cases} \quad (1)$$

式中: $K$ 、 $C$ 分别是弹簧器系数和阻尼系数,下标 $N$ 、 $T$ 分别表示法向和切向; $\alpha_N$ 和 $\alpha_T$ 为人工边界参数,分别取1.33和0.67; $G$ 为剪切模量; $R$ 为散射波源到边界节点的距离,散射波源一般取地基地表的中心; $\rho$ 为密度; $c_S$ 为剪切波速; $c_P$ 为压缩波速。

## 1.2 SV波斜入射波动输入方法

刘晶波等<sup>[9]</sup>提出的将地震波动转换为作用于边界节点上的等效荷载的方法,是目前普遍使用的黏弹性人工边界地震动输入方法。等效节点力 $F$ 的计算公式如下:

$$F = (Ku + C\dot{u} + \sigma)A \quad (2)$$

式中: $A$ 为节点影响面积; $u$ 为位移; $\dot{u}$ 为速度; $\sigma$ 为应力。

地震波入射时所产生的波场包含自由波场和散射波场。其中,自由波场包含入射波场和反射波场。散射波场由结构内部产生并向外传播,因此当采用黏弹性人工边界时,传播至边界的散射场可被人工边界吸收。因此,在输入时等效节点荷载的计算仅考虑自由波场。

SV波以一定角度倾斜入射,在到达地表时,由于地表的剪切以及挤压作用,在其反射波中不仅会有同波型的反射SV波,还会有不同波型的反

射P波。图1为SV波以 $\alpha$ 角斜入射时的有限域示意图。

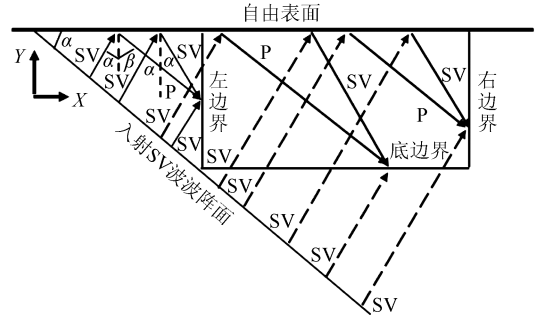


图1 有限域内SV波斜入射示意图

Fig.1 Schematic diagram of the oblique incidence of SV waves in the finite domain

当SV波以 $\alpha$ 角斜入射时,其在自由地表产生的反射SV波、反射P波与入射SV波的波幅比 $B_1$ 、 $B_2$ ,以及P波反射角 $\beta$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} B_1 = \frac{c_P^2 \cos^2 2\alpha - c_S^2 \sin 2\alpha \sin 2\beta}{c_S^2 \sin 2\alpha \sin 2\beta + c_P^2 \cos^2 2\alpha} \\ B_2 = \frac{2c_S c_P \sin 2\alpha \cos 2\alpha}{c_S^2 \sin 2\alpha \sin 2\beta + c_P^2 \cos^2 2\alpha} \\ \beta = \arcsin\left(\frac{c_P \sin \alpha}{c_S}\right) \end{cases} \quad (3)$$

由波动理论可得,当SV波以 $\alpha$ 角斜入射时,从零时刻波阵面到有限域内任一点 $A(x_0, y_0)$ 的时间间隔为:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \frac{y_0 \cos \alpha + x_0 \sin \alpha}{c_S} \\ \Delta t_2 = \frac{2H \cos \alpha - y_0 \cos \alpha + x_0 \sin \alpha}{c_S} \\ \Delta t_3 = \frac{H \cos \alpha - (H - y_0) \tan \beta \sin \alpha + x_0 \sin \alpha}{c_S} + \frac{H - y_0}{c_P \cos \beta} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t_3$ 分别为入射SV波、反射SV波、反射P波从零时刻波阵面到达A点的时间延迟; $H$ 为地基高度。

由式(3)、(4)可得有限域任一点的自由场位移、速度分别如式(5)和(6)所示:

$$\begin{cases} u_x(t) = u_0(t - \Delta t_1) \cos \alpha + B_1 u_0(t - \Delta t_2) \cos \alpha + \\ \quad B_2 u_0(t - \Delta t_3) \sin \beta \\ u_y(t) = 0 \\ u_z(t) = -u_0(t - \Delta t_1) \sin \alpha + B_1 u_0(t - \Delta t_2) \sin \alpha - \\ \quad B_2 u_0(t - \Delta t_3) \cos \beta \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{u}_x(t) = \dot{u}_0(t - \Delta t_1)\cos\alpha + B_1\dot{u}_0(t - \Delta t_2)\cos\alpha + \\ B_2\dot{u}_0(t - \Delta t_3)\sin\beta \\ \dot{u}_y(t) = 0 \\ \dot{u}_z(t) = -\dot{u}_0(t - \Delta t_1)\sin\alpha + B_1\dot{u}_0(t - \Delta t_2)\sin\alpha - \\ B_2\dot{u}_0(t - \Delta t_3)\cos\beta \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $u_0(t)$  为入射 SV 波在零时刻波阵面处的位移时程;  $\lambda$  为拉梅常数。

由平面应变理论以及式(5),可得三个边界上节点的应力计算公式如式(7)~(9)所示。

(1) 底边界:

$$\begin{cases} \sigma_x(t) = \frac{G\cos 2\alpha}{c_s}[\dot{u}_0(t - \Delta t_1) + B_1\dot{u}_0(t - \Delta t_2)] + \\ \frac{G\sin 2\beta}{c_p}B_2\dot{u}_0(t - \Delta t_3) \\ \sigma_y(t) = 0 \\ \sigma_z(t) = \frac{G\sin 2\alpha}{c_s}[\dot{u}_0(t - \Delta t_1) - B_1\dot{u}_0(t - \Delta t_2)] - \\ \frac{\lambda + 2G\cos^2\beta}{c_p}B_2\dot{u}_0(t - \Delta t_3) \end{cases} \quad (7)$$

(2) 左边界:

$$\begin{cases} \sigma_x(t) = \frac{G\sin 2\alpha}{c_s}[\dot{u}_0(t - \Delta t_1)] + B_1\dot{u}_0(t - \Delta t_2) + \\ \frac{\lambda + 2G\sin^2\beta}{c_p}B_2\dot{u}_0(t - \Delta t_3) \\ \sigma_y(t) = 0 \\ \sigma_z(t) = \frac{G\cos 2\alpha}{c_s}[\dot{u}_0(t - \Delta t_1) - B_1\dot{u}_0(t - \Delta t_2)] - \\ \frac{G\sin 2\beta}{c_p}B_2\dot{u}_0(t - \Delta t_3) \end{cases} \quad (8)$$

(3) 右边界:

$$\begin{cases} \sigma_x(t) = -\frac{G\sin 2\alpha}{c_s}[\dot{u}_0(t - \Delta t_1)] + B_1\dot{u}_0(t - \\ \Delta t_2) - \frac{\lambda + 2G\sin^2\beta}{c_p}B_2\dot{u}_0(t - \Delta t_3) \\ \sigma_y(t) = 0 \\ \sigma_z(t) = -\frac{G\cos 2\alpha}{c_s}[\dot{u}_0(t - \Delta t_1) - B_1\dot{u}_0(t - \\ \Delta t_2)] + \frac{G\sin 2\beta}{c_p}B_2\dot{u}_0(t - \Delta t_3) \end{cases} \quad (9)$$

将式(5)~(9)代入式(2),可得有限域边界上任

一点的等效节点力,实现 SV 波斜入射波动输入。

## 2 混凝土重力坝易损性分析理论

### 2.1 基于 IDA 的地震易损性

结构地震易损性分析的目的是预测结构在不同地震动强度下发生破坏的超越概率<sup>[12]</sup>。结构的响应与地震动强度之间服从以下关系:

$$S = a(IM)^b \quad (10)$$

式中:  $S$  为结构的响应;  $IM$  为地震动指标,本文取地震动峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA);  $a$ 、 $b$  均为拟合参数。

对上式两边求对数可得结构的概率需求模型,如式(11)所示:

$$\ln S = b \ln IM + \ln a \quad (11)$$

采用对数正态分布描述易损性,有:

$$P(S \geq LS | PGA) = 1 - \Phi\left[\frac{\ln(LS) - \ln(R)}{\delta}\right] \quad (12)$$

式中:  $\Phi[\cdot]$  为标准正态分布;  $LS$  为结构性能水准;  $\delta$  为结构响应的对数标准差,由下式计算:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum [\ln S_i - \ln(a \cdot IM^b)]^2}{n - 2}} \quad (13)$$

将式(11)、(13)代入式(12),可得易损性曲线为:

$$P(S \geq LS | PGA) = \Phi\left(\frac{\ln IM - \frac{\ln LS - \ln a}{b}}{\frac{\delta}{b}}\right) \quad (14)$$

### 2.2 易损性指标选取

在易损性分析中,采用结构的相对位移作为标准时,可根据实测数据为其可信性提供保证。本文以上游迎水面坝顶相对坝底的相对位移作为抗震性能评价指标<sup>[13]</sup>,破坏标准与等级划分如表 1 所列。

### 2.3 实测地震动的选取

由于地震动频谱对结构响应具有不可忽视的影响,需选取多条地震波消除频谱的影响。从 PEER 地震数据库中选取 16 条地震动(表 2),阻尼比为 5% 的地震动反应谱如图 2 所示。以 PGA 为地震动强度参数,对所选地震动调幅进行 IDA 分析,调幅范围为 0.1g~1.0g,每次调幅间隔为 0.1g,共 10 组。由于

SV 波存在临界角度  $\alpha = \arcsin\left[\sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}\right] = 35.26^\circ$ ,

表 1 震害等级划分

Table 1 Classification of earthquake damage levels

震害等级	基本完好	轻微损伤	中等损伤	严重损伤	溃坝
坝顶相对位移	[0%~0.014%)	[0.014%~0.035%)	[0.035%~0.105%)	[0.105%~0.154%)	≥0.154%

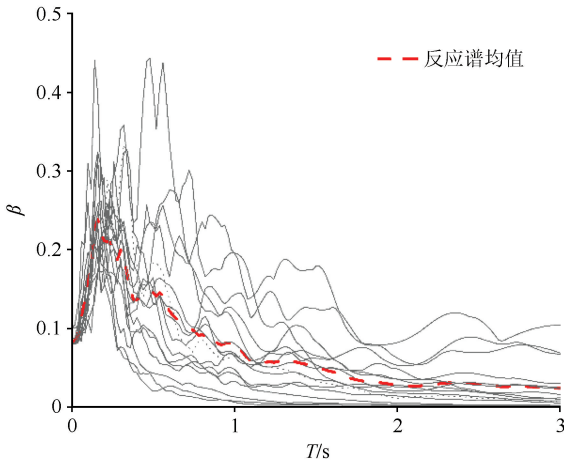


图2 地震动加速度反应谱

Fig.2 Acceleration response spectra of the selected ground motions

为分析斜入射角度的影响,选取  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  共 3 个角度作为地震动入射角度,其中入射角度为  $0^\circ$  时为垂直入射,其余为斜入射。

### 3 计算模型

选取印度 Koyna 重力坝一个典型非溢流坝段进行有限元分析,坝高 103 m,宽 70.2 m,震前水深 91.75 m。地基范围自坝址向下游,坝踵向上游,自建基面向下各延伸 1.5 倍坝高。采用四面体平面应变单元离散模型,共划分 2 692 个单元,共 2 838 个节点。Koyna 大坝体型及有限元模型见图 3。

坝体混凝土材料本构模型采用混凝土塑性损伤模型,初始弹性模量  $E_0 = 31.027$  GPa,泊松比  $\nu_c = 0.15$ ,密度  $\rho_c = 2\ 643$  kg/m<sup>3</sup>,抗拉强度  $f_{t0} = 2.90$  MPa,初

表 2 所选 16 条地震动记录的基本信息

Table 2 Basic information of the selected 16 ground motion records

编号	地震名称	震级	台站	年份	震中距/km	震源深度/km
1	Humbolt Bay	5.80	Ferndale City Hall	1937	71.28	71.57
2	Northwest Calif-01	5.50	Ferndale City Hall	1938	52.73	53.58
3	Northern Calif-07	5.20	Cape Mendocino	1975	28.73	34.73
4	Parkfield	6.19	Cholame-Shandon Array #12	1966	17.64	17.64
5	Hollister-02	5.50	Hollister City Hall	1961	17.20	18.08
6	Kern County	7.36	Santa Barbara Courthouse	1952	81.30	82.19
7	Lytle Creek	5.33	Devil's Canyon	1970	18.38	20.24
8	Borrego	6.50	El-Centro Array #9	1942	56.88	56.88
9	San Francisco	5.28	Golden Gate Park	1957	9.74	11.02
10	Lytle Creek	5.33	LA-Hollywood Stor FF	1970	73.46	73.67
11	Southern Calif	6.00	San Luis Obispo	1952	73.35	73.41
12	San Fernando	6.61	Fairmont Dam	1971	25.58	30.19
13	Imperial Valley-06	6.53	El-Centro Array #3	1979	10.79	12.85
14	Imperial Valley-06	6.53	Cerro Prieto	1979	15.19	15.19
15	Chi-Chi	7.62	TCU107	1999	15.99	15.99
16	Yountville	5.0	Napa-Napa College	2000	15.45	17.29

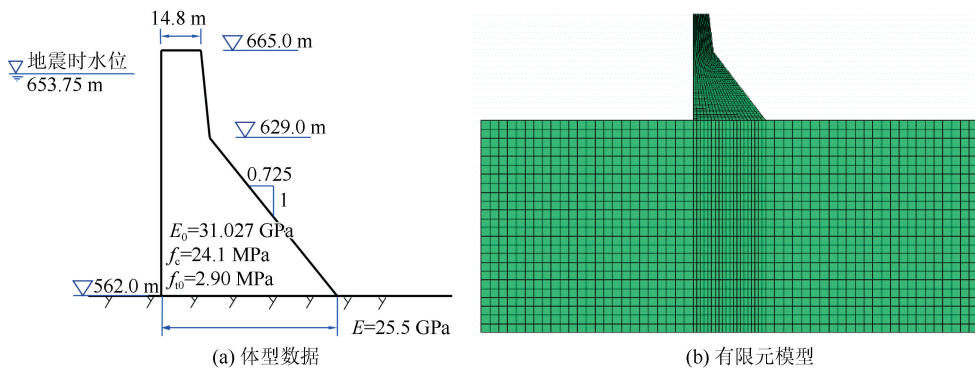


图3 Koyna 大坝体型及有限元模型

Fig.3 Shape and finite element model of the Koyna dam

始压缩屈服强度  $f_{c0} = 13.0$  MPa,抗压强度  $f_c = 24.1$  MPa。地基采用线弹性模型,密度  $\rho_b = 2\ 700$  kg/m<sup>3</sup>,弹性模量  $E = 25.5$  GPa,泊松比  $\nu_b = 0.25$ 。

动水压力采用不考虑库水可压缩性的 Westergaard 方法模拟;采用前两阶自振频率计算 Rayleigh 阻尼,坝体阻尼比取 10%,地基阻尼比取 5%。



## 4 易损性曲线分析

根据表 1 给出的划分标准,图 4 给出了不同震害等级、不同入射角度下坝体的易损性曲线。如图

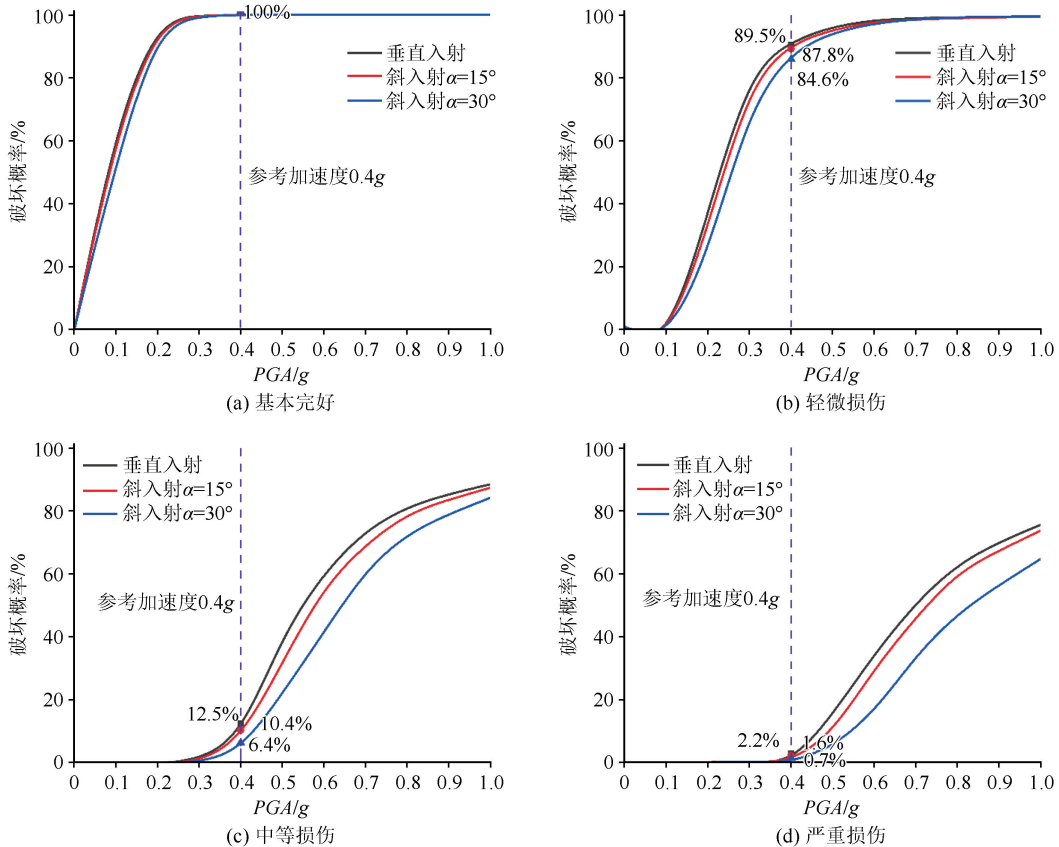


图 4 不同震害等级下混凝土重力坝易损性曲线

Fig.4 Fragility curves of the concrete gravity dam under different seismic damage levels

1967 年, Koyna 大坝在遭受水平向 PGA 为 0.474g、竖直向 PGA 为 0.312g 的地震动作用下, 发生开裂、渗漏, 故本文选取 0.4g 为参考 PGA。可以看出, 在基本完好等级下, 参考加速度作用下垂直入射、入射角度为 15° 和 30° 时, 坝体的超越概率均为 100%; 在轻微损伤等级下, 垂直入射时坝体的超越概率为 89.5%, 入射角度为 15° 和 30° 时分别为 87.8% 和 84.6%, 与垂直入射相比, 减小率分别为 1.9% 和 5.5%; 在中等损伤等级下, 垂直入射时坝体的超越概率为 12.5%, 入射角度为 15° 和 30° 时分别为 10.4% 和 6.4%, 与垂直入射相比, 减小率分别为 16.8% 和 48.8%; 在严重损伤等级下, 垂直入射时坝体的超越概率为 2.2%, 入射角度为 15° 和 30° 时分别为 1.6% 和 0.7%, 与垂直入射相比, 减小率分别为 27.3% 和 68.2%。震害等级越严重, 入射角度对易损性曲线的影响越大, 混凝土发生相应破坏程度的概率越小。

4 所示, 除基本完好等级外, 其余震损等级下, 随着 SV 波角度的增大超越概率逐渐减小。这说明随着 SV 波角度的增大, 输入地震动的水平向分量减小, 坝体动力响应也减小, 这与之前的研究结果一致<sup>[1]</sup>。

为进一步分析斜入射对地震动易损性的影响, 图 5 给出了斜入射与垂直入射超越概率的差异曲线, 可以看出, 曲线整体呈现增-减-增-减的趋势。这是由于当 PGA 较小时, 坝体整体损伤程度小, 斜入射角度越大, 输入水平向地震动峰值加速度越小, 因此随着 PGA 增大, 入射角度小的工况更容易先发生破坏, 破坏概率更大; 当 PGA 增大, 坝体出现轻微破坏的概率增大, 而此时强度较低, 难以发生更强的破坏, 入射角度对易损性曲线的影响减小; 随着 PGA 继续增大, 损伤持续增大, 此时损伤尚未贯通坝体, 坝体由于中部损伤开裂, 导致顶部相对位移增大, 地震动输入越大, 相对位移越大, 入射角度对易损性曲线的影响增大; 当 PGA 增大到损伤贯通坝体, 此时地震动角度的变化更难以影响易损性曲线。从数值上看, 与垂直入射相比, 在 0.1g 时斜入射超越概率减小最多, 入射角度为 15° 和 30° 时分别减小 36.6% 和 83.9%。

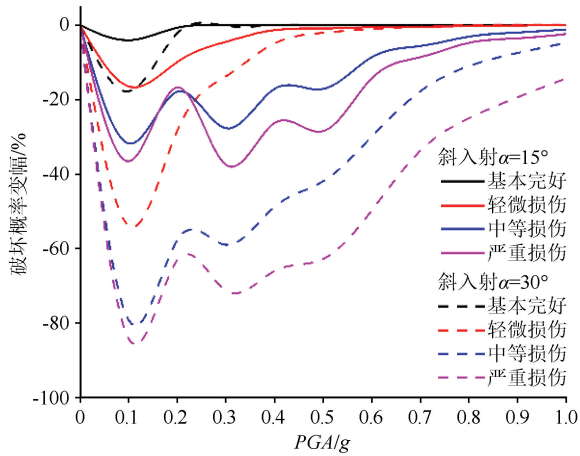


图5 不同震害等级下斜入射与垂直入射超越概率差异曲线

Fig.5 Difference curves of exceedance probability between oblique incidence and vertical incidence under different earthquake damage levels

综上,地震波斜入射会对混凝土重力坝不同破坏等级的概率造成较大影响,在今后分析同类混凝土重力坝时,进行抗震安全评价时需考虑地震波斜入射对于结果的影响。

## 5 结论

本文通过黏弹性人工边界实现 SV 波斜入射,并利用 IDA 法分析了 SV 波斜入射相对于垂直入射对混凝土重力坝超越概率的影响。研究结果表明:

(1) 混凝土重力坝破坏等级为轻微、中等和严重损伤时,斜入射方式得到的混凝土重力坝易损性曲线相对于垂直入射有较大差异。震害等级越高,斜入射对易损性曲线的影响越大。

(2) 斜入射相对于垂直入射的超越概率差异值随着 PGA 的增大,呈现增-减-增-减的规律,在 0.1g 时超越概率差异值最大,入射角为 15° 和 30° 时超越概率分别最大可减小 36.6% 和 83.9%。因此,近断层区域混凝土重力坝抗震性能评估需要考虑地震波斜入射的影响。本文结果也为近断层区域混凝土重力坝安全风险评估提供了参考。

(3) 本文只考虑了 SV 波单波斜入射对混凝土重力坝的影响,实际上地震动输入是由多个不同类型波共同入射产生的,下一步将开展多波组合斜入射对易损性曲线影响的研究。

## 参考文献 (References)

[1] 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.

LI Mingchao, ZHANG Jiawen, ZHANG Mengxi, et al. Plastic damage response analysis of concrete gravity dam due to obliquely incident seismic waves[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11): 1326-1338, 1349.

[2] 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.

[3] 黎曼.基于性能的混凝土重力坝地震易损性分析及风险评估[D].天津:天津大学,2013.

LI Man. Performance-based seismic fragility analysis and risk evaluation of concrete gravity dam[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.

[4] 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.

WANG Chao, ZHANG Sherong, LI Man, et al. Classification of earthquake damage to gravity dams based on a damage index model[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(6): 218-226.

[5] 石强,李艳玲,吴震宇,等.考虑震损指标相关性的重力坝地震易损性分析[J].人民黄河,2017,39(12):109-112,116.

SHI Qiang, LI Yanling, WU Zhenyu, et al. Seismic fragility analysis of gravity dam based on correlation between single peak area and damage index[J]. Yellow River, 2017, 39(12): 109-112, 116.

[6] 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 Denghong, XIE Jinghui, YANG Naixin. A study of seismic performance of concrete gravity dam based on incremental dynamic analysis[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 48-55.

[7] 姚倩茹,宋志强,王飞,等.基于综合破坏指数的混凝土重力坝易损性分析[J].应用力学学报,2022,39(1):104-112.

YAO Qianru, SONG Zhiqiang, WANG Fei, et al. Vulnerability of concrete gravity dams based on a comprehensive destruction index[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(1): 104-112.

[8] 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.

LIU Xiaojun, CHEN Wenlong, SONG Wenshuai, et al. Study on seismic vulnerability of concrete dams based on improved IDA[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, 48(10): 1103-1112.

[9] 刘晶波,吕彦东.结构-地基动力相互作用问题的一种直接方法[J].土木工程学报,1998,31(3):55-64.

LIU Jingbo, LÜ Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 55-64.

(下转第 334 页)

- tional Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, 40(6):962-984.
- [27] SAMIMI S, PAK A. A three-dimensional mesh-free model for analyzing multi-phase flow in deforming porous media[J]. Meccanica, 2016, 51(3):517-536.
- [28] SAMIMI S, PAK A. A fully coupled element-free Galerkin model for hydro-mechanical analysis of advancement of fluid-driven fractures in porous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016, 40(16):2178-2206.
- [29] GHAFARIPOUR O, ESGANDANI G A, KHOSHGHALB A, et al. Fully coupled elastoplastic hydro-mechanical analysis of unsaturated porous media using a meshfree method[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, 43(11):1919-1955.
- [30] SMITH I M, GRIFFITHS D V, MARGETTS L. Programming the finite element method[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Inc, 2015.
- [31] JU S H, WANG Y M. Time-dependent absorbing boundary conditions for elastic wave propagation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 50(9):2159-2174.

(本文编辑:任 栋)

\*\*\*\*\*  
(上接第 324 页)

- [10] 刘晶波,王振宇,杜修力,等.波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J].工程力学, 2005, 22(6):46-51.  
LIU Jingbo, WANG Zhenyu, DU Xiuli, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6):46-51.
- [11] SUN B B, DENG M J, ZHANG S R, et al. Inelastic dynamic analysis and damage assessment of a hydraulic arched tunnel under near-fault SV waves with arbitrary incoming angles[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104:103523.
- [12] HARIRI-ARDEBILI M A, SAOUMA V E. Seismic fragility analysis of concrete dams: a state-of-the-art review[J]. Engineering Structures, 2016, 128:374-399.
- [13] 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.  
MA Zhiyong, ZHANG Wei, ZHOU Qiang, et al. A deformation-based method for seismic fragility analysis of gravity dam [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(22):51-58.

(本文编辑:赵乘程)