

近断层主余震考虑斜入射下的重力坝响应分析

李宇辰¹, 李晓娜¹, 杨杰¹, 朱和敏²

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司, 宁夏 银川 750000;)

摘要: 一次大的地震中一般存在主震和余震,当震源距离地面较近时,近断层主余震序列通常以某一角度斜入射至地基,因此只考虑地震波垂直入射的情况是不适合的,有必要考虑地震波在多个角度下斜入射的情况。选取3条近断层实测主余震序列,推导地震动P波斜入射界面等效节点力公式,并验证其可行性;以Koyna大坝为研究对象,研究了单个主震和主余震序列2种工况下入射角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时的大坝地震响应,以位移、损伤指数、损伤耗散能3个指标对震后坝体破坏进行了分析,建立了局部损伤指数量化分析损伤程度。研究表明:近断层单个主震和主余震2种工况入射角在 $15^\circ \sim 75^\circ$ 之间时,大坝地震响应均大于垂直入射情况;在多种性能指标下,主余震序列下的地震响应均大于单个主震。

关键词: 重力坝地震响应; 近断层地震动; P波; 主余震序列; 斜入射

中图分类号:TV312;TV64

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2024)02-0174-09

Seismic response of gravity dams subjected to oblique incidence of near-fault mainshock – aftershock sequences

LI Yuchen¹, LI Xiaona¹, YANG Jie¹, ZHU Hemin²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Ningxia Water Resources and Hydropower Survey Design and Research Institute Co., Ltd., Yinchuan 750000, China)

Abstract: A large earthquake usually consists of mainshock and aftershock. When the epicenter of the earthquake is close to the ground surface, the oblique incidence of mainshock and aftershock often occur near the fault area. Therefore, it is necessary to consider the case of oblique incidence of seismic waves at multiple angles instead of vertical incidence only. Three mainshock – aftershock sequences measured near the fault area were selected to derive the equivalent node-force formula of ground motion P wave oblique incidence interface, and then the feasibility of the formula was verified. Taking Koyna Dam as the research object, the seismic response of the dam at the incidence angle of $0^\circ \sim 90^\circ$ was studied under two working conditions, namely, single mainshock sequence, mainshock – aftershock sequence. Three indices of displacement, damage index and damage dissipation energy were used to analyze the damage of the dam body after the earthquake, and the local damage index was established to quantify the damage to the dam. The results show that when the incidence angle varies in the range of $15^\circ \sim 75^\circ$, the seismic response of the dam is greater than that of the vertical incidence under the two working conditions. Under all three performance indices, the seismic response of the mainshock and aftershock sequence is greater than that of the single mainshock.

Key words: seismic response of gravity dam; near-fault ground shock; P wave; mainshock – aftershock sequence; oblique incidence

收稿日期:2023-12-01; 修回日期:2024-01-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51809212)

作者简介:李宇辰(1998—),男,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为水工结构静动力分析。

通讯作者:杨杰(1971—),男,四川大邑人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水利工程安全监测与管理信息化。

1 研究背景

在我国西部地区建设有大批的水利工程,同时西部地区也是地震频发区域。因此地震对大坝的破坏一直是众多学者重点研究的课题。不同类型的地震对大坝造成的损伤程度有所不同。地震作为一种自然灾害,按照断层距离的远近通常可分为近断层地震动和远场地震动。已有研究表明,相比于远场地震动,近断层地震动会对结构的地震响应造成更大的影响^[1-3]。在水利工程方面,一些学者通过对比两类地震动作用下各类水工建筑物的累积损伤情况,证实了近断层地震动危害性远大于远场地震动^[4-6]。在以往的研究中,地震波被认为是垂直射入地面的,该情况适用于远场地震动,但近断层地震波相比于远场地震动,其接触到地基界面时发生的反射的次数变少。这导致垂直入射并不适用于研究近断层地震动下大坝的地震响应,因此必须考虑地震波的斜入射情况。目前已有许多学者对地震动斜入射时大坝的地震响应进行了研究。崔激等^[7]采用耐震时程分析(endurance time analysis, ETA)法同时考虑空间斜入射对重力坝抗震性能进行了评估。李明超等^[8]分析了地震 P 波和 SV 波斜入射下重力坝的动力响应,对震后坝体损伤进行了评估。刘琳等^[9]研究了地震动的脉冲特性和输入角度对沥青混凝土心墙坝的地震响应影响。

大量的历史地震数据表明,一次大的地震中一般存在主震和余震^[10],许多大坝在主震中能够相对保持完整,但可能在随后的余震中受到严重损坏。近些年已有学者针对水利工程在主余震地震序列下的损伤破坏进行了研究,如王高辉等^[11]从损伤、位移及损伤耗散能方面探讨了强余震对重力坝地震响应的影响。金爱云等^[12]建立了拱坝-库水-地基有限元分析模型,并基于耐震时程法(ETA)构建主震-ETA 余震序列进行高拱坝非线性动力分析。张社荣等^[13]探讨了余震持时因素对渡槽结构受主余震序列累积损伤的影响。张旭^[14]采用易损性分析方法从概率角度评估了余震对高面板堆石坝抗震性能的影响。

综上所述,许多学者对主余震序列作用下水利工程的损伤、结构特性、危害等进行了研究^[15-18],也有多位学者对近断层地震动斜入射时大坝的地震响应进行了探索^[19-20],关于主余震序列和地震波斜入射两方面领域的理论与实践均在不断完善。但对于考虑斜入射的近断层主余震序列作用下重力坝地震

响应的研究较少,研究近断层地震动对大坝的地震破坏,不能只考虑单个主震和垂直入射情况,应该选择近断层主余震序列进行地震波斜入射研究。

基于此,本文选取了 3 条近断层主余震序列地震波,推导并验证了地震动 P 波斜入射方法的可行性,以 Koyna 大坝为研究对象分析了主余震因素、地震波入射角度对重力坝位移、损伤、损伤耗散能 3 种指标的影响规律,且在损伤分析方面建立了以大坝下游折坡处损伤指数为标准的大坝震害评价等级,以此来量化大坝的损伤程度,得到了大坝在 3 种性能指标下的地震响应数据,研究成果可为重力坝的抗震设计提供参考。

2 计算理论与方法

2.1 选取近断层主余震地震动

在美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)地震记录数据库中选取了 3 条近断层主余震序列,地震序列的选择标准如下^[21]:

(1) 近断层主余震记录台站距断层在 0 ~ 20 km 之间;

(2) 主震震级 ≥ 6 且峰值加速度 $\geq 0.06g$, 余震震级 ≥ 5 且峰值加速度 $\geq 0.03g$;

(3) 主震和余震记录取自相同台站的同一方向分量;

(4) 近断层主余震序列的主震和余震的峰值速度值(peak ground velocity, PGV)/峰值加速度值(peak ground acceleration, PGA)均大于 0.2。

按照上述标准挑选出的近断层主余震序列如表 1 所示。在输入地震波时,在主震和余震事件之间加入了 10 s 的时间间隔,该间隔的加速度为零,地面足以在前一次地震事件后停止运动。构造的主余震序列时程曲线见图 1。

2.2 P 波斜入射理论及验证

根据波形转换原理,地震动 P 波斜入射进地基表面时,入射 P 波会产生反射 P 波、反射 SV 波,如图 2 所示。对于上述 3 种波在地基表面上的叠加问题,学者们提出了许多解决方法^[22-24]。实际上,斜入射时模型边界上自由场波动叠加更为完整,最后得到的结构地震响应结果更符合实际情况。本文考虑了地基左、右、底 3 个边界上入射 P 波、反射 P 波、反射 SV 波的叠加。以边界节点位置各种波的延迟时间为参数进行波长叠加计算,最后得到地基上各边界的等效节点力。

表1 选取的3条近断层主余震序列

序号	地震事件	台站名称	地震分类	断层距/ km	PGA/ 9.81(m·s ⁻²)	PGV/ (m·s ⁻¹)	PGV/PGA
No.1	Imperial Valley	El Centro Array #3	M	15.04	0.156	0.436	0.28
			A	16.08	0.189	0.415	0.22
No.2	Imperial Valley	El Centro Array #7	M	8.45	0.161	0.362	0.23
			A	11.23	0.125	0.267	0.21
No.3	Northridge	Moorpark - Fire Sta	M	6.95	0.187	0.654	0.35
			A	6.39	0.148	0.577	0.39

注:表中M代表主震,A代表余震。

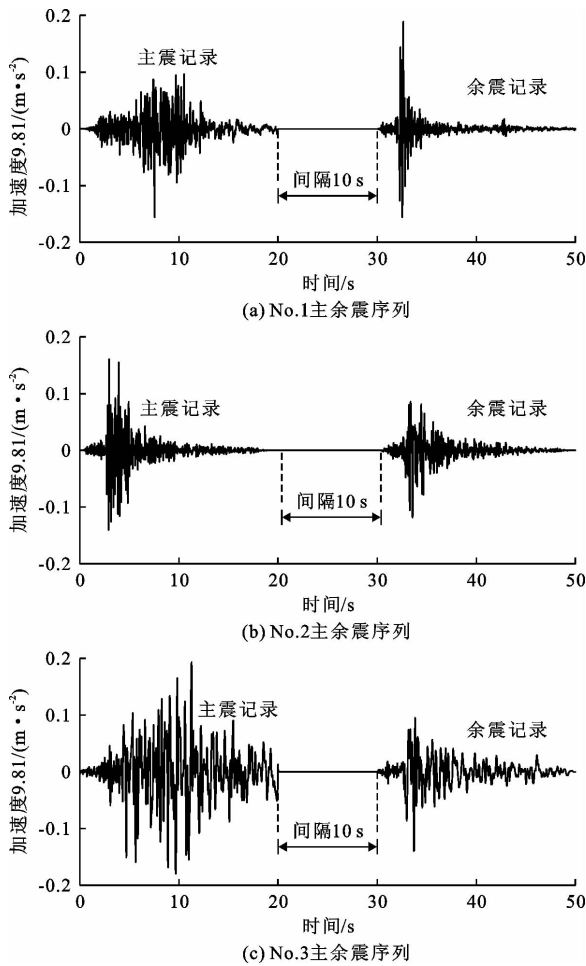


图1 近断层主余震序列加速度时程曲线

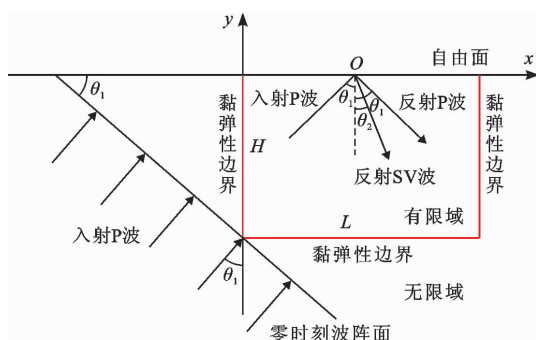


图2 P波斜入射示意图

本文将以左界面为例来推导P波斜入射时左边界面上的等效节点力公式。根据马笙杰等^[25]的二维黏弹性波动输入方法,计算出地基面上的等效节点力 F_b 。

$$F_b = (K_b \mathbf{u}_b^{ff} + C_b \dot{\mathbf{u}}_b^{ff} + \sigma_b^{ff} \mathbf{n}) A_b \quad (1)$$

式中: A_b 为边界节点处的影响面积, m^2 ; \mathbf{u}_b^{ff} 为自由场位移, m ; $\dot{\mathbf{u}}_b^{ff}$ 为速度向量, m/s ; σ_b^{ff} 为应力张量, Pa ; K_b 为刚度系数, N/m ; C_b 为阻尼系数, $N/(m/s)$; \mathbf{n} 为边界法线余弦向量。

图2中 θ_1 、 θ_2 分别为P波的入射角和反射SV波的反射角, $(^\circ)$ 。以 A_1 、 A_2 、 B_1 分别表示入射P波、反射P波、反射SV波的势函数幅值。

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{v_s^2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 - v_p^2 \cos^2 2\theta_2}{v_s^2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 + v_p^2 \cos^2 2\theta_2} \quad (2)$$

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{2v_s v_p \sin 2\theta_1 \cos 2\theta_2}{v_s^2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 + v_p^2 \cos^2 2\theta_2} \quad (3)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{v_s}{v_p} \sin \theta_1\right) \quad (4)$$

式中: v_p 、 v_s 分别为P波波速和SV波波速, m/s 。

P波和SV波的位移、速度、应力场分别用公式(5)~(10)计算^[26]。

$$u_{ix}(t) = u_s(t - \Delta t_1) \sin \theta_1 + \frac{A_2}{A_1} u_s(t - \Delta t_2) \sin \theta_1 - \frac{B_1}{A_1} u_s(t - \Delta t_3) \cos \theta_2 \quad (5)$$

$$u_{iy}(t) = u_s(t - \Delta t_1) \cos \theta_1 - \frac{A_2}{A_1} u_s(t - \Delta t_2) \cos \theta_1 - \frac{B_1}{A_1} u_s(t - \Delta t_3) \sin \theta_2 \quad (6)$$

$$\dot{u}_{ix}(t) = \dot{u}_s(t - \Delta t_1) \cos \theta_1 + \frac{A_2}{A_1} \dot{u}_s(t - \Delta t_2) \cos \theta_1 - \frac{B_1}{A_1} \dot{u}_s(t - \Delta t_3) \sin \theta_2 \quad (7)$$

$$\dot{u}_{iy}(t) = \dot{u}_s(t - \Delta t_1) \sin \theta_1 - \frac{A_2}{A_1} \dot{u}_s(t - \Delta t_2) \sin \theta_1 -$$

$$\frac{B_1}{A_1} \dot{u}_s(t - \Delta t_3) \cos \theta_2 \quad (8)$$

$$\sigma_{lx}(t) = \frac{\lambda + 2G \sin^2 \theta_1}{v_p} (\dot{u}_s(t - \Delta t_1) + \frac{A_2}{A_1} \dot{u}_s(t - \Delta t_2) + \frac{G}{v_s} \sin 2\theta_2 \frac{B_1}{A_1} \dot{u}_s(t - \Delta t_3)) \quad (9)$$

$$\sigma_{ly}(t) = \frac{2G \cos \theta_1 \sin \theta_1}{v_p} (\dot{u}_s(t - \Delta t_1) - \frac{A_2}{A_1} \dot{u}_s(t - \Delta t_2) + \frac{G}{v_s} \cos 2\theta_2 \frac{B_1}{A_1} \dot{u}_s(t - \Delta t_3)) \quad (10)$$

式中: σ_{lx} 、 σ_{ly} 为地震波在 x 、 y 方向上引起的正应力, Pa; Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 分别为入射 P 波、反射 P 波和反射 SV 波的延迟时间, s; λ 为拉梅常数; G 为介质剪切模量, GPa (具体数值见 3.1 节); v_p 、 v_s 分别为 P 波和 SV 波波速, m/s。将公式(2) ~ (10) 带入公式(1) 即可计算出左边界面的等效节点力, 其他界面计算原理与之相似, 不再赘述。

以一个二维有限元模型来验证上述斜入射方式的合理性。选取一个长 × 宽为 100 m × 50 m 的二维有限域模型, 在有限元建模软件 ABAQUS 中用长 × 宽为 2.5 m × 2.5 m 的四节点单元进行有限元划分, 如图 3 所示。介质密度为 2.7 kg/m³, 泊松比为 0.24, P 波波速为 2 425 m/s。选择有限元模型上部中点为参考点 O, 在设计地震动作用下, O 点处的水平位移如公式(11) 所示, 公式(11) 中参数含义与上文一致。在左下角以 30° 入射角射入地震动 P 波, 输入 P 波总时间为 2 s, 时间步长取 0.01 s。

$$u(t) = 2 \sin[4\pi(t - t_0)] - \sin[8\pi(t - t_0)] \quad (11)$$

$(t_0 \leq t \leq t_0 + 0.5s_0, t > 0.5s)$

式中: t_0 为地震波开始时刻, s; s_0 为地震波持续时间, s。

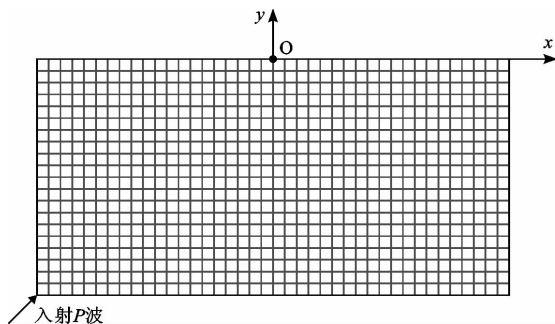


图 3 二维有限元验证模型

图 4 为 O 点的水平位移时程曲线数值解与解析解对比。由图 4 可以看出, 观测点 O 点的水平位移响应与设计地震动基本相同, 这证明了上述地震波斜入射方法的可行性。

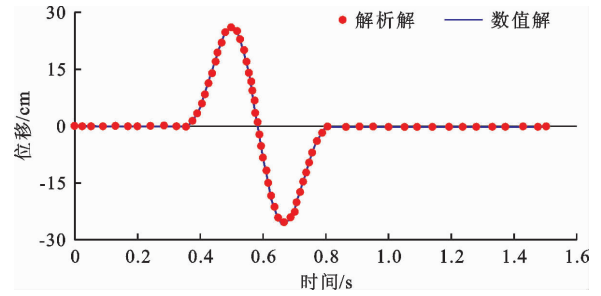


图 4 观测点 O 的水平位移时程曲线

2.3 地震损伤指数

对于混凝土重力坝的塑性损伤研究, 本文采用局部损伤指数指标来定量评估大坝的地震损伤。局部损伤指数通过分析在同一高度下损伤区域内单位损伤因子的权重来评估该区域的损伤程度。局部损伤指数 DI_{Li} 定义为裂纹路径的长度与沿着该路径的总横截面长度的比值^[27]。

$$DI_{Li} = \left(\frac{l_{Di}}{L_i} \right) \quad (12)$$

式中: DI_{Li} 为裂纹路径 i 的局部损伤指数; L_i 为预期裂纹路径 i 增长的总长度, m; l_{Di} 为裂纹路径 i 的实际长度, m。

图 5 为混凝土重力坝预期裂纹路径 L_i 的建立, 图中设置了路径 1 和路径 2 两条裂纹。

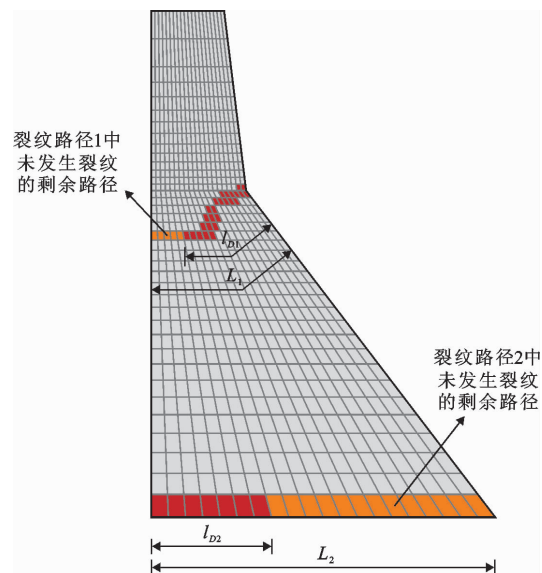


图 5 重力坝坝体裂纹路径的建立

根据 Koyna 重力坝在地震中的实际损伤情况, 选择了大坝下游折坡处的局部损伤指数作为量化损伤程度的指标。为了更直观地用局部损伤指数来描述大坝的损伤破坏, 建立了以 DI_{Li} 为标准的重力坝坝体地震破坏等级, 分级标准参考了马智勇^[28] 提出的坝体震害等级分类。根据 DI_{Li} 的大小将坝体损伤

程度分为4级,如表2所示。

表2 坝体震害等级

坝体下游折坡处 损伤指数 DI_{Li}	震害	等级
(0.0, 0.2)	坝体基本完好	一级
[0.2, 0.4)	坝体轻微损伤	二级
[0.4, 0.6)	坝体中等损伤	三级
[0.6, 0.8]	坝体严重损伤	四级

3 主余震斜入射下重力坝地震响应

3.1 工程概况及有限元模型

为了研究近断层主余震地震动斜入射下的大坝地震响应,选取因为地震破坏而倒塌的典型大坝 Koyna 重力坝为研究对象。Koyna 重力坝坝高 103 m,上部坝宽 14.8 m,底部坝宽 70.2 m,1967 年遭遇 6.5 级地震时上游水位深度为 91.75 m。图 6 为坝体尺寸及库水位示意图,图 7 为有限元模型。整个模型共有 1 560 个单元和 1 849 个节点。

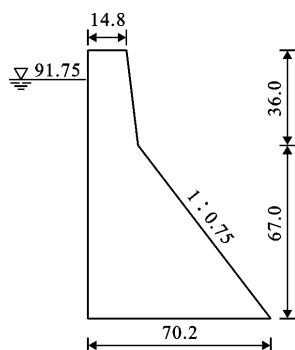


图6 坝体尺寸及库水位示意图(单位:m)

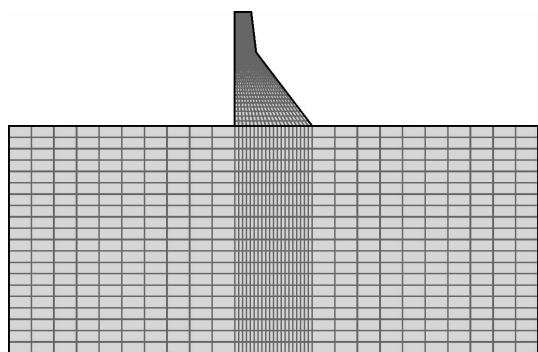


图7 Koyna 重力坝有限元模型

坝体、坝基材料分别设为塑性损伤材料、线弹性材料,材料参数见表3。在地基表面边界节点设置黏弹性边界,施加等效节点荷载。本文采用的黏弹性边界^[29]的弹簧系数用公式(13)、(14)表示,阻尼

系数用公式(15)、(16)表示。

$$K_{BN} = \frac{1}{1 + \alpha} \frac{\lambda + 2G}{2r_b} \quad (13)$$

$$K_{BT} = \frac{1}{1 + \alpha} \frac{G}{2r_b} \quad (14)$$

$$C_{BN} = \beta \rho v_p \quad (15)$$

$$C_{BT} = \beta \rho v_s \quad (16)$$

式中: K_{BN} 、 K_{BT} 分别为法向和切向弹簧系数; C_{BN} 、 C_{BT} 分别为法向和切向阻尼系数; r_b 为散射波源至人工边界的距离,m; λ 为拉梅常数,(坝体取5.77 GPa,地基取5.55 GPa), G 为介质剪切模量,GPa,(坝体取13.47 GPa,地基取8.33 GPa); ρ 为介质质量密度, kg/m^3 ; v_p 、 v_s 分别为P波和SV波波速,m/s; α 、 β 为无量纲参数^[29],分别取0.8、1.1。

表3 坝体、地基材料参数表

坝体材料		地基材料	
参数	取值	参数	取值
弹性模量/GPa	31	弹性模量/GPa	20
泊松比	0.15	泊松比	0.20
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 643	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 700
剪胀角/ $(^\circ)$	36.31	剪胀角/ $(^\circ)$	36.31
断裂能/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	200	黏聚力/MPa	2
动态抗拉强度/MPa	2.9	抗拉强度/MPa	1.28

3.2 荷载条件和计算工况

在进行重力坝静力分析时,一般考虑的荷载为坝体自重和静水压力,两种荷载通过压力施加在重力坝模型上。进行重力坝动力分析时,考虑荷载为动水压力和地震动荷载,动水压力通过附加质量法施加在上游坝体节点处。地震动荷载则转化成等效节点力,施加在地基底面和侧面节点上。

在 ABAQUS 中将重力坝调至正常蓄水位时,将选取出来的 3 条近断层主余震 P 波按照单个主震、主余震序列 2 种工况从大坝上游按 7 个不同的角度倾斜入射。地震动 P 波的入射角度分别取 0° (垂直入射)、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° (水平入射),依据重力坝的抗震设计标准^[30],将 2.1 节选出的 3 条近断层主余震地震动记录的主震加速度峰值 (PGA) 均调幅为 $0.2g$,余震地震动 PGA 按主震调幅比例进行缩放。

3.3 结果分析

3.3.1 位移分析 在对重力坝的位移分析中,本文选择了坝顶水平向和竖向位移作为坝体变形的指标。图 8 为单个主震和主余震序列两类地震事件工

况下 P 波在不同入射角下坝顶水平向和竖直向位移曲线图。

图 8(a)为单个主震和主余震序列在不同角度下入射时坝顶最大水平位移。从图 8(a)可以看出,两类地震事件的水平位移在入射角为 0°~60°之间时随入射角的增大而增加,在入射角为 60°~90°之间时随入射角的增大而减少。水平位移最大值均出现在入射角为 60°时,最小值均为 0,出现在入射角为 90°时,此时地震波水平射入地基,对大坝没有造成影响。在入射角相同时,主余震序列下坝顶产生的水平位移均大于单个主震,如入射角为 60°时,单个主震和主余震序列下坝顶产生的水平位移均值分别为 8.56 和 10.86 cm,主余震序列水平位移比单

个主震增大 26.9%。

图 8(b)为单个主震和主余震序列在不同角度下入射时坝顶最大竖直位移,与水平位移变化规律不同,竖直位移随入射角的增大呈不断减小的趋势,最小值均出现在入射角为 90°时,最大值则在垂直入射时(入射角为 0°)。入射角为 0°时单个主震与主余震序列下的竖直位移均值分别为 7.11 和 9.04 cm,主余震序列相比单个主震的增幅为 27.1%。

3.3.2 损伤分析 以 No.1 近断层脉冲型地震动 P 波入射下的塑性损伤结果为例,分析入射角度和主余震两种因素对大坝损伤结果的影响规律。No.1 地震动在 2 种计算工况不同入射角度下的损伤结果见图 9、10。

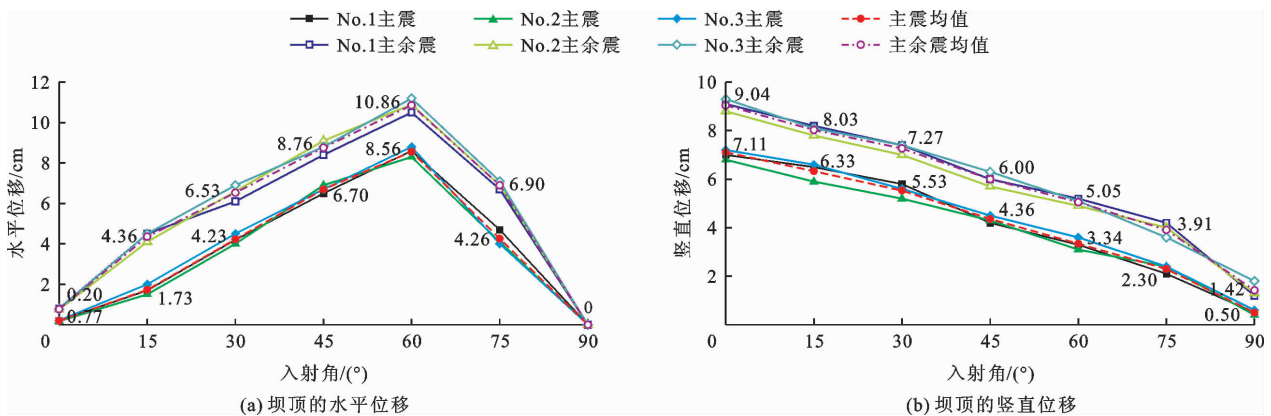


图 8 单个主震和主余震序列地震事件在不同入射角度下坝顶位移曲线

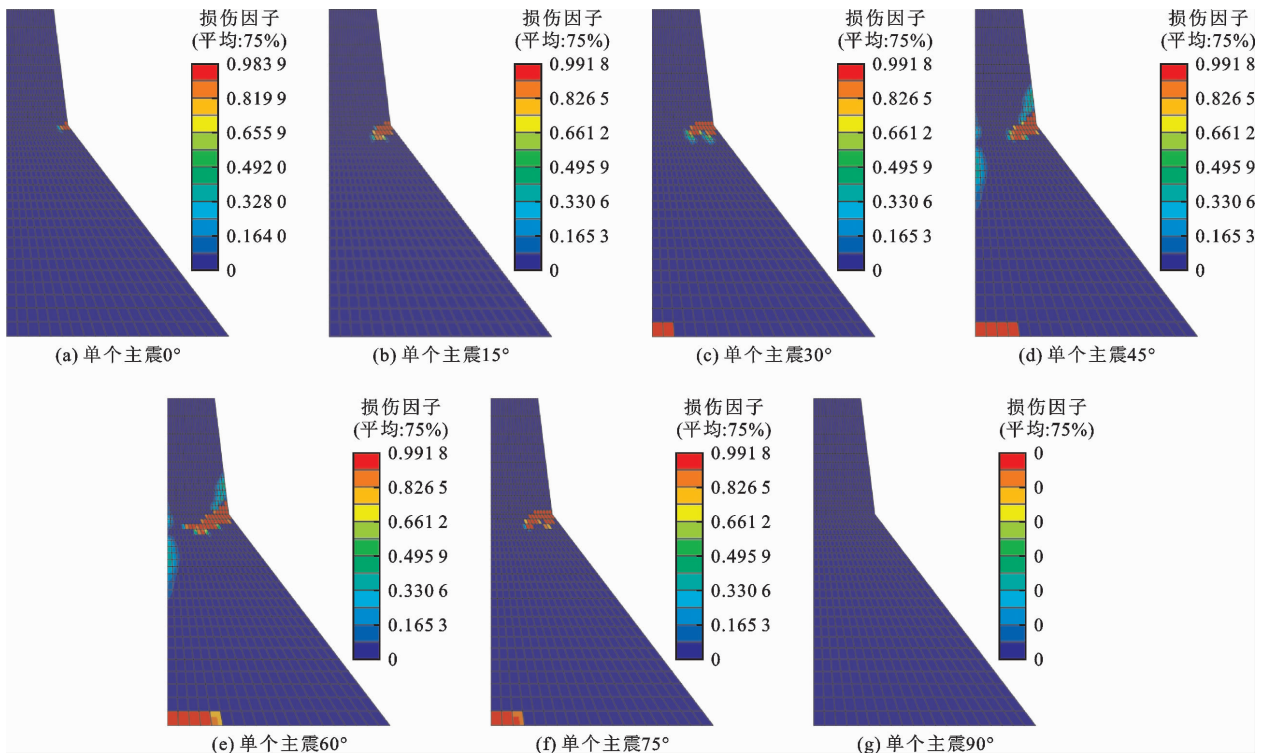


图 9 No.1 地震动单个主震工况在不同入射角度下的坝体损伤结果

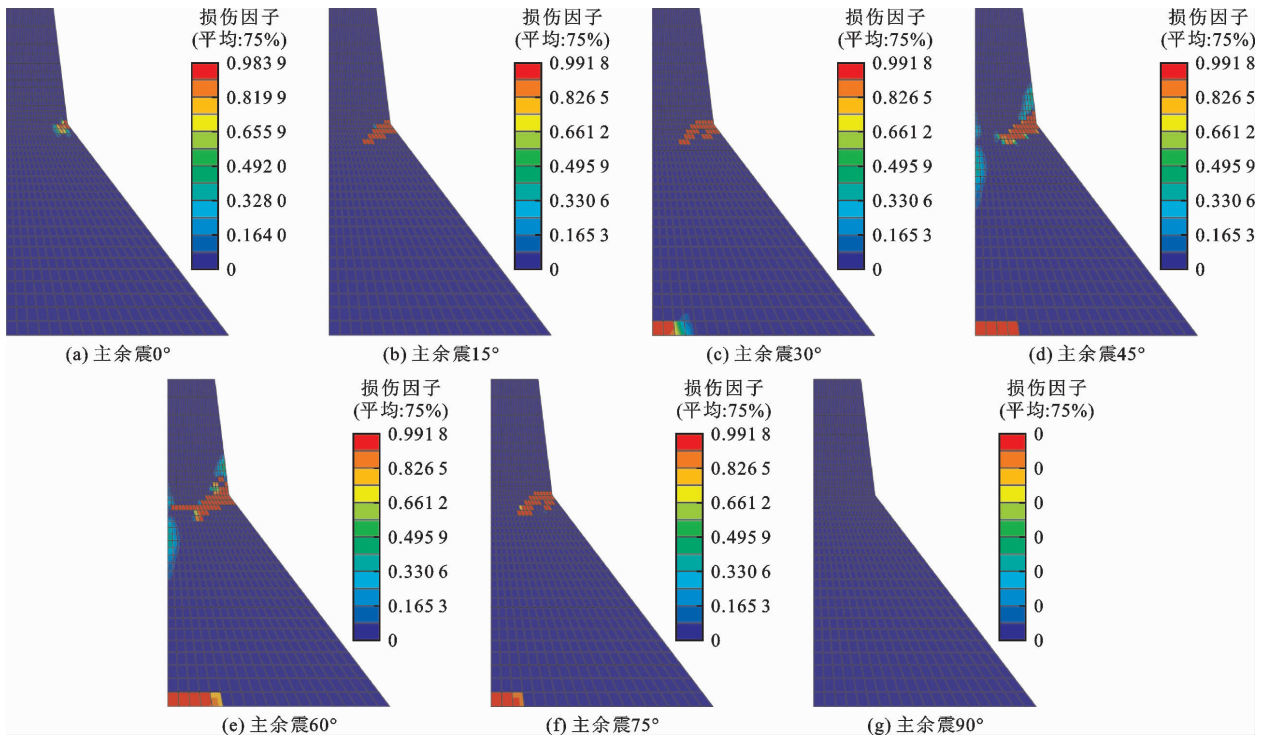


图 10 No. 1 地震动主余震序列工况在不同入射角度下的坝体损伤结果

图 9、10 表明,当入射角为 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时,2 种工况在 P 波入射下的重力坝坝体损伤范围随入射角的增大而增大,折坡处产生的裂缝破坏长度也同时增大,入射角为 60° 时大坝损伤达到了最大;在入射角为 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时,坝体损伤随入射角的增大而减少,在水平入射 (90°) 时,坝体未出现损伤破坏。坝体损伤主要出现在下游折坡处和坝踵两个位置,对比 0° 和 60° 两个角度下的坝体损伤,可以明显看出 60° 下坝体在折坡处和坝踵位置的损伤有了明显的增大。对比图 9、10 可知,在同一入射角度下,主余震序列产生的损伤均大于单个主震;在入射角为 60° 时,主余震序列下的坝体折坡处相比于单个余震已经出现了向上游方向延伸的贯穿性损伤。

由图 9、10 可以看出,Koyna 重力坝的主要损伤区域在下游折坡处位置。本节根据 2.3 节的局部损伤指数理论及公式,计算出两类地震事件工况下重力坝下游折坡处的局部损伤指数,并根据 2.3 节提出的坝体震害等级对各工况下的坝体损伤进行量化区分结果见表 4,表 4 中所有数据为均值。表 4 中折坡处局部损伤指数可直观地体现出坝体随地震波入射角度的损伤变化情况,也是对图 9、10 损伤范围变化规律的进一步量化。可以看出两类地震事件计算工况下折坡处损伤指数均随入射角度的增大呈先增大后减小的趋势,在入射角为 60° 时折坡处损伤指数达到最大值,其中单个主震最大值达到 0.60,

相对垂直入射增加了 6.5 倍;主余震序列折坡处损伤指数最大值达到 0.75,相对垂直入射时增加了 4.0 倍。单个主震和主余震计算工况在入射角为 60° 时对大坝的损伤均达到了四级破坏损伤程度,这些数据表明,在进行近断层地震序列下混凝土重力坝的地震响应分析时,考虑 P 波斜入射角度因素的影响是必不可少的。

表 4 下游折坡处地震损伤指数及震害等级

P 波入射 角度/ $(^\circ)$	单个主震		主余震序列	
	DI_{Li}	等级	DI_{Li}	等级
0	0.08	一级	0.15	一级
15	0.21	二级	0.30	二级
30	0.34	三级	0.41	三级
45	0.50	四级	0.60	四级
60	0.60	四级	0.75	四级
75	0.34	二级	0.42	三级
90	0	一级	0	一级

对比两类地震事件计算工况,主余震序列作用下的折坡处局部损伤指数在大部分角度下都要高于单个主震。例如当入射角度为 60° 时,单个主震下折坡处损伤指数为 0.60,主余震序列下折坡处损伤指数为 0.75,增幅为 25%。值得注意的是,在入射角度为 75° 时,主余震序列造成的破坏损伤等级高

于单个主震的破坏损伤等级,这表明如果不考虑主余震序列的因素,在重力坝的地震安全设计中很有可能会低估地震对大坝的损伤破坏。

3.3.3 损伤耗散能分析 图11为所有工况下的坝体损伤耗散能计算结果,图11中数值均为平均值。由图11可以看出,坝体损伤耗散能随着地震波入射角的增大先呈不断增大的趋势,在60°时达到最大值;60°后随着角度的增大耗散能开始下降,直到90°时下降为0,与损伤规律一致;因入射角为90°时坝体未出现损伤,故损伤耗散能为0。在主余震因素方面,图11中可以明显看出,除90°以外的所有角度(因为90°时,两类地震事件的损伤都为0),主余震序列工况的损伤耗散能均大于单个主震工况,其中增长最大的是入射角为60°时,主余震序列损伤耗散能均值为80.7 kN·m,单个主震均值为60.5 kN·m,增幅为33.4%。

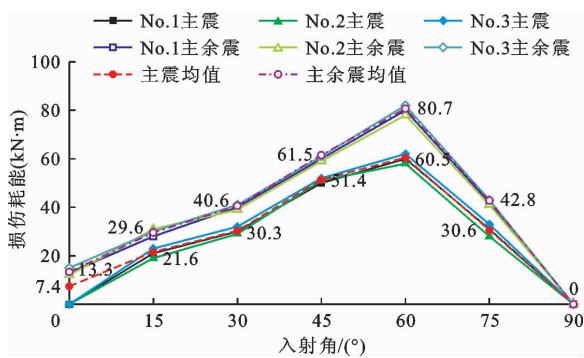


图11 两类地震事件在不同入射角度下的损伤耗散能

4 结论

本文通过模拟重力坝遭受近断层P波斜入射作用过程,分析了近断层P波的入射角度、主余震因素对重力坝的位移、损伤和损伤耗散能的影响。

(1)P波的入射角在0~90°时,重力坝坝顶水平位移随入射角度的增大呈先增大后减小的趋势,水平位移峰值出现在入射角为60°时;竖直位移随入射角度的增大而减小。同一入射角度下,近断层脉冲型主余震序列工况对大坝位移变形的影响均大于单个主震工况。

(2)单个主震和主余震序列工况作用下坝体损伤程度均随入射角度的不断增大呈先增大后减小的趋势。2种工况下,大坝下游折坡处损伤指数均在60°时达到最大值,且主余震序列工况下的损伤指数均大于单个主震工况。坝体耗散能随入射角度的变化规律与损伤程度变化规律一致。

(3)综合多种性能指标结果,入射角在15°~75°之间的大坝地震响应均大于垂直入射(入射角0°),其中60°入射角下坝顶水平位移最大、坝体损伤最严重、损伤耗散能最高;在入射角度为75°时主余震序列造成的破坏损伤等级高于单个主震,这表明如果地震安全设计未考虑近断层地震动中的主余震因素,可能会低估地震对重力坝的损伤破坏。

参考文献:

- [1] 崔丙会,王亮,翟亚飞,等.近断层地震动作用下高耸桥塔地震反应分析[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):181-187.
- [2] 王飞,宋志强,刘云贺,等.SV波斜入射不同自由场构建方法下水电站地面厂房地震响应研究[J].振动与冲击,2021,40(7):9-18.
- [3] 孙奔博.近断层强震作用下高沥青混凝土心墙坝动态响应分析及抗震性能评价[D].天津:天津大学,2021.
- [4] 蒋乐英,廖意辉,王志明,等.河谷差异地震作用下拱式倒虹吸地震响应分析[J].长江科学院院报,2022,39(12):117-121+140.
- [5] GORAI S, MAITY D. Seismic response of concrete gravity dams under near field and far field ground motions[J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109292.
- [6] 张社荣,王宽,王高辉,等.近断层地震动方向性效应对混凝土重力坝累积损伤特性的影响[J].地震工程与工程振动,2014,34(1):44-53.
- [7] 崔激,刘贵锋,张社荣,等.考虑斜入射的重力坝耐震时程法抗震性能评估[J].水力发电学报,2023,42(12):1-14.
- [8] 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.
- [9] 刘琳,宋志强,王飞,等.近断层SV波斜入射下沥青混凝土心墙坝响应分析[J].振动与冲击,2021,40(21):97-105.
- [10] 陈厚群.汶川地震后对大坝抗震安全的思考[J].中国工程科学,2009,11(6):44-53.
- [11] 王高辉,卢文波,严鹏,等.强余震对主震受损重力坝非线性动态响应的影响[J].水利学报,2017,48(6):661-669.
- [12] 金爱云,王进廷,潘坚文.基于主余震序列的高拱坝极限抗震能力损失研究[J].振动与冲击,2022,41(3):82-89.
- [13] 张社荣,刘文杰,杜敏,等.余震持时特性对高烈度区渡槽动力响应的影响研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(8):850-859.
- [14] 张旭.主余震地震动作用下高面板堆石坝抗震性能研

- 究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [15] 郭涛, 桂博, 徐李辉, 等. 基于 P-D- ϵ 特性的重力坝主余震损伤累积分析[J]. 振动. 测试与诊断, 2022, 42(4): 710-717 + 825-826.
- [16] 翟亚飞, 毕仲辉, 唐彧杰, 等. 基于 NGA 模型的主余震序列作用下重力坝损伤破坏研究[J]. 水利学报, 2020, 51(2): 152-157 + 168.
- [17] XU Qiang, ZHANG Tianran, CHEN Jianyun, et al. A new endurance time analysis method for damage evaluation of high arch dams under the oblique incidence of mainshock - aftershock seismic sequences by wavelet decomposition[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 161: 107406.
- [18] PANG Rui, XU Bin, ZHOU Yang, et al. Fragility analysis of high CFRDs subjected to mainshock - aftershock sequences based on plastic failure[J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110152.
- [19] XU Shutong, XU Qiang, CHEN Jianyun, et al. Seismic performance analysis of gravity dam system under arbitrary oblique incidence of near-fault SV ground motions[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(12): 04022240.
- [20] CHEN Denghong, PAN Ziyue, ZHAO Yiyuan. Seismic damage characteristics of high arch dams under oblique incidence of SV waves[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 152: 107445.
- [21] 庞鑫宇. 主余震序列斜输入作用下水电站厂房非线性地震响应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [22] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [23] 章小龙, 李小军, 陈国兴, 等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1126-1135.
- [24] 张梁, 朱海涛, 梁建文, 等. 基于黏弹性边界的 P 波斜入射波场分解方法精度比较[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 177-186.
- [25] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在 ABAQUS 中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1445-1457.
- [26] 宋志强, 刘琳, 王飞, 等. 近断层 P 波斜入射下沥青混凝土心墙坝响应分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7): 245-253.
- [27] WANG Gaohui, WANG Yongxiang, LU Wenbo, et al. Damage demand assessment of mainshock-damaged concrete gravity dams subjected to aftershocks[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 98: 141-154.
- [28] 马智勇. 基于损伤和位移的重力坝地震易损性分析研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [29] 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.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水工建筑物抗震设计标准: GB 51247—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

(上接第 173 页)

- [11] 马睿, 张庆龙, 胡昱, 等. 混凝土拱坝温度应力与横缝性态智能控制方法[J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 100-111.
- [12] 张晓飞, 王晓平, 黄宇, 等. 寒潮条件下碾压混凝土拱坝温度应力仿真研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 192-197.
- [13] ZHANG Yuxiang, PAN Jianwen, SUN Xinjian, et al. Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions[J]. Engineering Structures, 2021, 230: 111721.
- [14] 张媛媛. 堆石混凝土重力坝温度应力仿真分析及温控措施研究[J]. 陕西水利, 2022(4): 32-35.
- [15] 刘强, 赵厚然, 姬广祥, 等. 高海拔高寒地区堆石混凝土坝温度应力仿真分析与温度监测[J]. 混凝土, 2023(6): 26-32 + 39.
- [16] 尤林, 张冲, 庞明亮. 叶巴滩拱坝建基面选择及体形设计[J]. 水电站设计, 2019, 35(2): 7-12.
- [17] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [18] 徐小蓉, 肖安瑞, 梁婷, 等. 考虑分层填充的非均质堆石混凝土温度研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(3): 141-152.
- [19] 赵运天. 堆石混凝土拱坝施工期温度应力研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [20] 程恒, 周秋景, 娄诗建, 等. 石坝河水库堆石混凝土重力坝施工期工作性态仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(9): 1408-1416.
- [21] 国家能源局. 堆石混凝土筑坝技术导则: NB/T 10077—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [22] 中华人民共和国水利部. 混凝土重力坝设计规范: SL 319—2018[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [23] 何涛洪, 徐小蓉, 雷峥琦, 等. 绿塘整体浇筑堆石混凝土拱坝施工期温度仿真研究[J/OL]. 水利水电技术(中英文). <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/10.1746.TV.20230721.1211.006.html>