

随机主余震作用下坝坡动力稳定性分析

姚浩宇^{1,2}, 李康宏³, 周扬^{1,2}, 庞锐^{1,2}, 刘俊¹

(1. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 海岸与海洋工程全国重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 中国电建集团 北京勘察设计院有限公司, 北京 100024)

摘要:【目的】针对现有土石坝抗震稳定分析中余震影响考虑不足的问题, 研究随机主余震序列作用下土石坝的抗震稳定性, 量化余震对土石坝动力稳定性及可靠度的影响。【方法】本研究基于“震源-传播-场地”的思想建立了序列型地震动模型, 基于直接概率积分法(DPIM)和吸收条件法构建了坝坡稳定分析及可靠度评估的框架, 并将所构建的分析框架应用于实际工程庄里抽水蓄能电站上水库大坝的抗震稳定分析及可靠度评估, 以滑动位移作为评价指标, 系统探究了余震对坝坡动力响应及可靠度的影响。【结果】①当 $PGA=0.3g$ 时, 仅主震作用和主余震作用后坝坡最大滑动位移的均值分别为 0.0375 m 和 0.0434 m , 余震后坝坡最大滑动位移的提高比例为 15.73% , 对应阈值为 15 cm 的坝坡动力可靠度降低 1.37% 。②当 PGA 分别为 $0.4g$ 、 $0.5g$ 和 $0.6g$ 时余震使得坝坡最大滑动位移的提高比例分别为 16.06% 、 19.10% 以及 21.11% 。③ PGA 为 $0.6g$ 时余震使得对应阈值为 15 cm 的坝坡动力可靠度降低 4.20% 。【结论】相较于单次主震, 考虑余震后坝坡的滑动位移总体上有一定程度的提高, 可靠度有所降低, 余震对坝坡抗震稳定性的影响不容忽视。本研究可为土石坝抗震稳定评估提供实践指导。

关键词:坝坡; 主余震; 滑动位移; 随机分析; 可靠度

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

在能源需求持续扩大的现实背景下, 水力水电资源的开发利用已经上升到国家的战略高度。抽水蓄能凭借其成熟的技术、巨大的开发潜力以及经济上的优势已经成为储能领域的重要力量, 在中国多地兴建了一大批抽水蓄能电站, 其中有相当一部分位于地震易发区^[1-3]。土石坝作为抽水蓄能电站的主要坝型, 一旦发生破坏, 在造成重大经济损失的同时也给下游居民的生命安全带来严重威胁。诸多的工程案例、数值模拟以及土石坝模型试验表明坝坡失稳是土石坝地震破坏的主要形式^[4-5]。因此, 对土石坝开展抗震稳定分析及安全评估是一项尤为重要而迫切的课题。

安全系数作为坝坡稳定性评估中最常用的指标, 因其概念简单易于计算得到了广泛应用^[6-7]。然而, 在进行坝坡动力稳定分析中, 仅凭借安全系数进行评价较为片面, 无法有效表征整个地震过程中的坝坡稳定性的发展^[8]。相比之下, Newmark 块体滑动位移法具有更清晰的物理意义, 可以考虑地震事件对坝坡的累积破坏效应, 在对

坝坡进行抗震稳定分析时更为合理, 逐渐被研究人员所采用^[9-10]。此外, 大量的研究表明诸如坝体材料参数以及荷载激励等影响坝坡稳定性的因素都具有很强的不确定性, 且相较于材料参数的不确定性, 荷载激励的不确定性在坝坡的随机响应中占主导地位^[5]。因此, 在进行坝坡动力稳定分析时, 考虑地震激励的随机性是必要的。

事实上, 地震活动具有序列性的特征, 始于一次主震并伴随多次余震^[11]。2008 年汶川地震中一次主震发生后伴随发生了数万次余震, 其中余震震级最大达到了 6.4 级, 给建筑物带来了严重破坏^[12]。近年来, 诸多学者针对余震对结构动力响应的影响进行了研究。徐世界等^[13]采用增量动力分析方法定量研究了余震对面板堆石坝抗震性能的影响。Pang Rui 等^[14]以 15 组实测主余震地震序列作为荷载输入, 对 200 m 级面板堆石坝在不同强度组合的主震-余震序列作用下进行了一系列非线性动力时程分析, 探究了余震对面板的变形、剪应变及损伤指数的影响。上述研究均表明

收稿日期/Received:2025-08-20

修回日期/Revised:2025-12-18

基金项目:国家自然科学基金(52479094,52379117,52279096,52279125);辽宁省科技计划联合计划(2023JH2/101700339)。

第一作者:姚浩宇(2001—),男,硕士研究生,从事土石坝防灾减灾方面的研究。E-mail:yaohaoyu@mail.dlut.edu.cn。

通信作者:周扬(1984—),男,副研究员,博士,从事土石坝等土工构筑物抗震方面的研究。E-mail:zhouy@dlut.edu.cn。

余震对结构响应具有显著影响，在进行结构地震响应分析时，考虑余震是必要的。然而，鲜有研究探讨余震对土石坝坝坡动力稳定及可靠性的影响。作为土石坝破坏的主要形式，对土石坝坝坡开展主余震作用下的动力响应及可靠度评估显得尤为关键。

鉴于以上文献综述所提到的研究不足，本研究基于“震源-传播-场地”的思想建立了序列型地震动模型，设置四组不同的峰值加速度，每组 200 个样本，共生成 800 条随机主余震作为荷载激励输入。以实际工程庄里抽水蓄能电站上水库大坝为计算模型，以滑动位移作为评价指标，基于直接概率积分法 (Direct Probability Integral Method, DPIM) 构建了坝坡稳定分析及可靠度评估的框架。系统探究了余震对坝坡动力响应及可靠度的影响，研究结果对坝坡的地震响应和可靠度评估具有实践指导意义。

1 主余震序列型随机地震动模拟

地震荷载的随机性常通过一组由随机地震动模型生成的随机加速度时程来体现，这类模型能够以少量的随机变量高效地简化地震激励过程^[15]。然而，这些模型无法从根本上捕捉地震动的随机性。事实上，地震动的随机性受到震源、地震波的传播模式以及局部场地的影响^[16,17]，基于这一理念，可构建一个表征地震动关键物理控制因素的随机函数^[16-17]：

$$a_R(t) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A_R(\xi, \omega) \cdot \cos[\omega t + \Phi_R(\xi, \omega)] d\omega \quad (1)$$

其中 $a_R(t)$ 为加速度时程， ω 表示圆频率， R 代表震中距。 $A_R(\xi, \omega)$ 和 $\Phi_R(\xi, \omega)$ 为地震动加速度时程的 Fourier 幅值谱和相位谱，写作：

$$A(\xi, \omega) = \frac{A_0 \cdot \omega \cdot e^{-KR\omega}}{\sqrt{\omega^2 + (1/\tau)^2}} \times \sqrt{\frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}} \quad (2)$$

$$\Phi(\xi, \omega) = \arctan\left(\frac{1}{\tau\omega}\right) - R \cdot \ln[a\omega + 1000b + 0.1323\sin(3.78\omega) + c \cos(d\omega)] \quad (3)$$

其中， K 表示地震动传播过程的衰减系数，取为 10^{-8} s/m。 $\xi = [A_0, \tau, \xi_g, \omega_g, a, b, c, d]$ 为表征主震-余震序列不确定性的基本物理向量。 A_0 和 τ 是表征震源不确定性的随机变量， a 、 b 、 c 、 d 为描述波数和频率关系的经验系数，其分布特征如表 1 所示。（当参数服从 Log-Normal 分布时， μ 和 σ 分别表示 Log-Normal 分布的均值和标准差；当参数服从 Weibull 分布时， μ 和 σ 分别表示 Weibull 分布的形参和尺参。） ξ_g 和 ω_g 分别为场地等效阻尼比和等效卓越圆频率，均服从 Weibull 分布， ξ_g 的形参和尺参分别为 0.49 和 4.67， ω_g 的形参和尺参分别为 12.63 和 1.26。需要指出的是，上述参数的拟定过程较为复杂，并非本文的重点。详细的获取过程可参见文献^[16,18]。

表 1 地震动参数分布特征
Tab.1 Distribution characteristics of the seismic parameters

变量	主震			余震		
	分布类型	μ	σ	分布类型	μ	σ
A_0	Log-normal	-2.85	1.26	Log-normal	-4.54	1.32
τ	Log-normal	-1.75	1.24	Log-normal	-2.15	1.71
a	Log-normal	1.32	0.56	Log-normal	1.83	0.49
b	Log-normal	1.89	0.55	Log-normal	1.95	0.50
c	Weibull	1.33	1.22	Weibull	1.76	1.66
d	Weibull	1.23	1.20	Weibull	1.44	1.35

将窄带谐波叠加法^[18]与上述随机主余震模型相结合，用于合成随机地震动。对 ω 进行离散化处理，每个离散的窄带频率区间视为窄带谐波叠加分量。通过叠加各频率分量对应的窄带谐波，得到地震加速度时程 $a_R(t)$ 的表达式如下：

$$a_R(t) = -\sum_j A_j \cdot \Gamma_j(t) \cdot \cos(\omega_j t + \varphi_j) \quad (4)$$

$$A_j = \frac{2}{\pi} \frac{A_0 \cdot \omega_j \cdot e^{-KR\omega_j}}{\sqrt{\omega_j^2 + (1/\tau)^2}} \times \sqrt{\frac{1 + 4\xi_g^2(\omega_j/\omega_g)^2}{[1 - (\omega_j/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega_j/\omega_g)^2}} \quad (5)$$

$$\Gamma_j(t) = \frac{\sin\left[\left(t - \frac{x}{c_j}\right)\Delta\omega_j\right]}{t - \frac{x}{c_j}} \quad (6)$$

$$\varphi_j = \arctan\left(\frac{1}{\tau\omega_j}\right) - R \cdot \ln[a\omega_j + 1000b + 0.1323\sin(3.78\omega_j) + c\cos(d\omega_j)] \quad (7)$$

$$c_j = \frac{d\omega}{dk}\bigg|_{\omega=\omega_j} = \frac{a\omega_j + 1000b + 0.1323\sin(3.78\omega_j) + c\cos(d\omega_j)}{d(a + \cos^2(d\omega_j))} \quad (8)$$

其中, A_j , $\Gamma_j(t)$, c_j 和 φ_j 分别表示波群振幅、

时-能包络函数、等效群速度-频率关系和波群相位。本文针对每一组加速度峰值(Peak Ground Acceleration, PGA)生成了 200 个加速度时程, 均由 30 s 的主震和 20 s 的余震组成, 主余震之间间隔 10 s。图 1 展示了 PGA=0.3g 对应的三个典型的加速度时程。生成的随机主余震具有非平稳特性, 且余震的加速度幅值可能也较大。图 2 给出 200 条地震动加速度时程的前两阶统计量。图 3 给出了归一化的单条反应谱和 200 条地震动加速度的平均反应谱曲线。此外, 需要指出的是本文的主要目的是从概率角度探究余震对坝坡动力响应及可靠度的影响而非进行规范演算, 因此所生成的随机主余震没有与标准设计反应谱进行拟合。

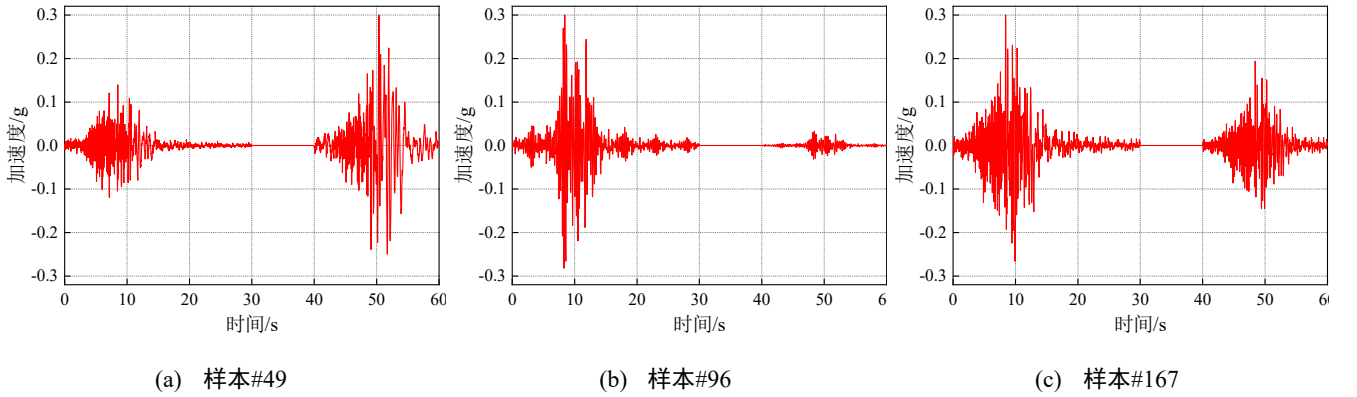


图 1 代表性地震动加速度时程

Fig.1 Representative seismic acceleration time histories

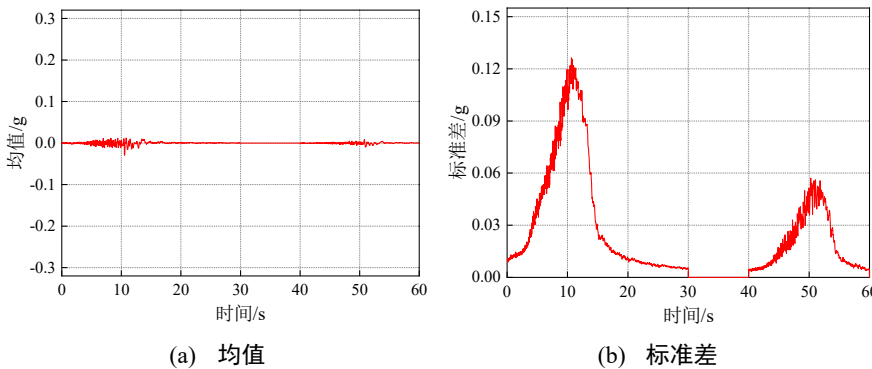


图 2 地震动加速度均值和标准差时程

Fig.2 Time histories of mean and standard deviation of seismic acceleration

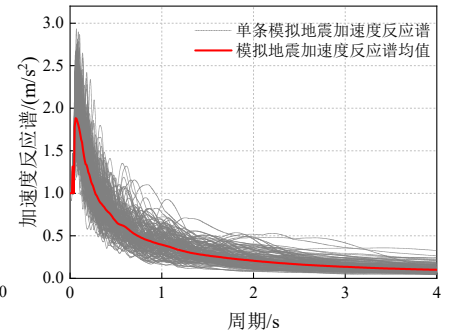


图 3 地震动加速度反应谱

Fig.3 Seismic acceleration response spectrum

2 计算模型与参数

庄里抽水蓄能电站上水库库盆西南侧布置大坝, 采用沥青混凝土面板堆石坝, 坝顶高程 373 m, 坝轴线处最大坝高 115 m, 坝轴线长 588 m, 坝顶宽度 10 m, 上游坡比 1:1.75, 下游坡比 1:1.5。根据工程地质勘查的结果, 庄里上水库大坝坐落在

弱风化基岩上, 其剪切波速已大于 800 m/s, 属于硬岩场地, 计算时采用刚性地基假定^[19]。有限元动力计算过程中地震动输入采用一致性均匀输入法^[20], 即选取基岩以上的坝体作为计算对象, 在坝体内部各节点上施加同一个地震加速度时程产生惯性力。选取典型的二维断面进行有限元静、动力计算和稳定计算, 计算模型的二维有限元整

体网格如图 4 所示，共划分 3350 个单元，3490 个节点。

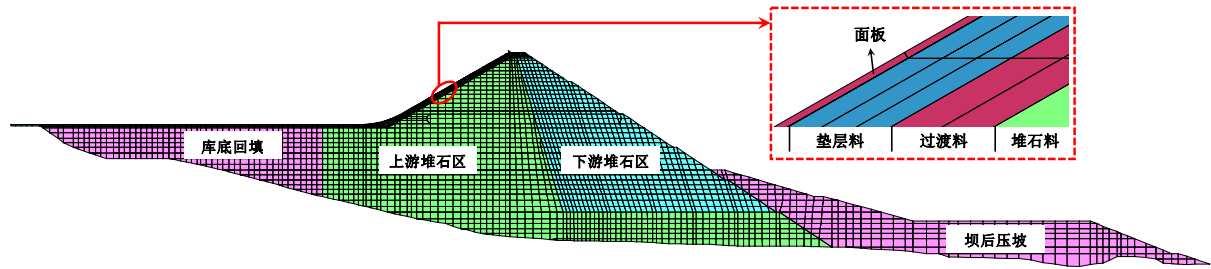


图 4 典型二维断面有限元网格

Fig.4 Typical two-dimensional cross-section finite element mesh

采用大连理工大学自主开发的 GEODYNA 和 FEMSTABLE 软件进行有限元静动力和稳定计算^[21]。静力分析采用邓肯张 $E-\mu$ 本构模型，堆石料动力计算采用沈珠江模型，沥青混凝土面板采用等效线性粘-弹性模型，面板和垫层料之间设置无厚度的四节点 Goodman 单元^[22]。静动力分析材料参数均通过试验得出，具体见表 2—表 4。沥青混凝土最大动剪切模量系数 k_2 和动剪切模量指数 n 分别为 5062 和 0.32。稳定分析通过叠加静力和动力计算得到的应力场进行下游坝坡有限元动力稳定计算，计算整个地震过程中每一时刻的最小安全系数并搜索最危险滑裂面，当安全系数小于 1.0 时，采用 Newmark 块体滑动位移法计算坝坡的滑动位移^[21]。

表 2 堆石料动力计算参数

Tab.2 Rockfill material parameters for dynamic calculation

坝体分区	k_1	k_2	$\lambda_{\max}/\%$	n
垫层料	39.7	2792	18	0.363
过渡料	37.0	2492	19	0.335
上游堆石料	33.9	2281	21	0.335
下游堆石料	24.4	1576	23	0.353
坝后压坡体	13.8	840	27	0.450
库底回填	13.8	840	27	0.450

注： k_1 为动剪切模量衰减参数； k_2 为最大动剪切模量系数， $\lambda_{\max}$ 为最大动阻尼比， n 为动剪切模量指数。

表 3 静力计算参数

Tab.3 Material parameters for static calculation

坝体分区	$\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	c/kPa	$\varphi_0/^\circ$	$\Delta\varphi/^\circ$	K	n	R_f	K_b	m
垫层料	2.25		55.2	9.5	1337.2	0.28	0.68	708.6	0.14
过渡料	2.21		54.7	10.7	1145.1	0.26	0.68	621.2	0.10
上游堆石料	2.18		52.0	9.7	933.8	0.24	0.70	447.3	0.08
下游堆石料	2.15		48.3	7.4	712.5	0.27	0.74	247.1	0.15
沥青混凝土面板	2.42	240	28.5		210.8	0.42	0.64	2156.2	0.57
坝后压坡体	1.75		38.3	5.3	350	0.37	0.75	120	0.30
库底回填	1.75		38.3	5.3	350	0.37	0.75	120	0.30

注： ρ_d 表示堆石密度； c 代表粘聚力； φ_0 为一个大气压下的内摩擦角； $\Delta\varphi$ 为小主应力增加一个对数周期下摩擦角的减小值； K 为切线模量系数； n 为切线模量指数； R_f 为材料的破坏比； K_b 为体积模量系数； m 为体积模量指数。

表 4 沥青混凝土动力非线性特性参数

Tab.4 Dynamic nonlinear parameters of asphalt concrete

剪应变($1\text{e-}4$)	0.01	3.87	4.64	5.43	7.51	9.06	10.91	100
剪切模量比	1.0000	1.0000	0.9857	0.9733	0.9476	0.9328	0.9181	0.8500
阻尼比(%)	23	23	23	23	23	23	23	23

3 结果分析

为评估地震作用下土石坝坝坡的动力可靠性，

需要定义滑动位移的阈值。然而，目前关于坝坡滑动位移阈值的选择并不统一。例如，Wieczorek

G F 等^[23]以及 Jibson R W 和 Michael J A^[24]针对区域性天然滑坡分别提出了 0.05 m 以及 0.15 m（严重风险）的判别标准。然而，这主要基于由松散沉积物或风化岩土构成天然边坡结构，不适用于本研究的人工碾压填筑的土石坝工程。就土石坝工程而言，瑞士大坝抗震指南规定^[25]坝坡深层滑动的容许变形量为 0.5 m。美国相关规范规定滑动位移的容许值为 0.61-1.0 m^[26]。田景元等^[27]指出坝坡滑动位移大于滑动体的 1%或滑动位移大于 1.0 m 时，坝坡存在失稳风险。本文主要关注主余震序列型地震动作用下土石坝坝坡的滑动位移，基于上述相关研究结合第 2 节中所提供的数值模型，在保证安全储备的前提下提出了 15 cm、30 cm 和 50 cm 三个滑动位移风险控制标准，分别对应于低风险、中度风险和高风险水平。此外，需要强调的是，本研究的核心是采用随机分析方法量化余震对系统可靠度的相对影响，此处滑动位移的选取是参考相关研究及规范而拟定的，更

为精准的阈值确定应根据工程实际的地质条件结合模型试验等来确定，这也是今后研究的方向。

基于第 1 节介绍的随机主余震模型，将所生成的序列型随机地震动作为荷载激励对土石坝进行输入，共设置四组不同的地震动加速度峰值（0.3g、0.4g、0.5g、0.6g），每组进行 200 次确定性计算。并将确定性计算结果与 DPIM 和吸收条件法相结合^[28]，得到了滑动位移的概率信息，从概率角度分析了土石坝坝坡的动力响应。

3.1 随机分析

图 5 展示了四组不同 PGA 对应的土石坝坝坡滑动位移的均值和标准差时程曲线。随着地震动的作用，坝坡的滑动位移呈现出阶梯型单调增长的趋势，在主震和余震阶段滑移量均有较为显著的增长，在主余震间隔阶段滑动位移呈现出平台阶段。滑动位移的标准差和均值随时间的变化呈现出相似的趋势。同一时刻下，随着地震强度的增加滑动位移的均值和标准差均增大。

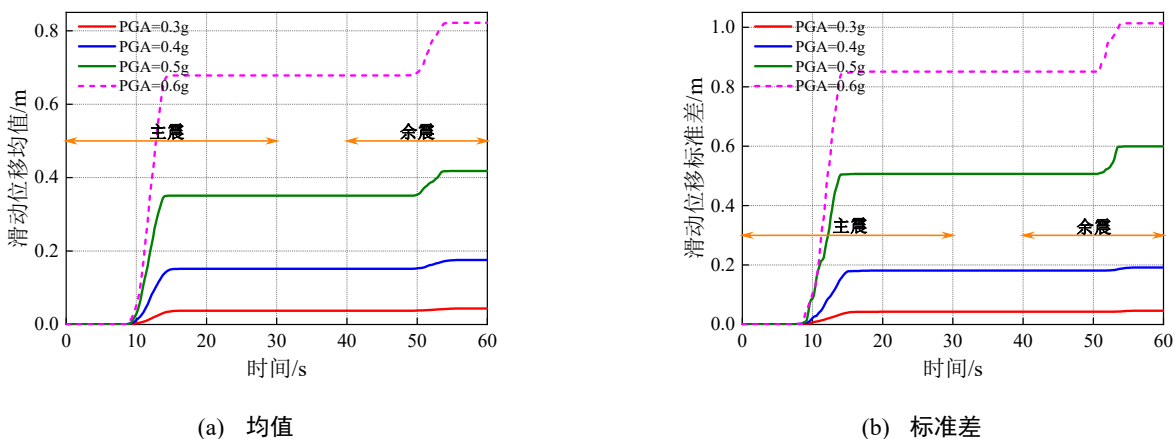
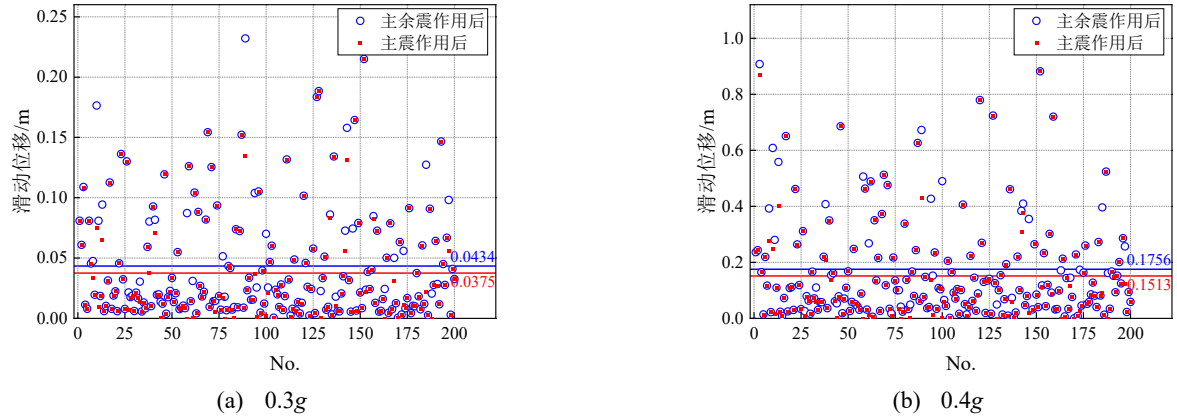


图 5 滑动位移均值和标准差时程

Fig.5 Time histories of mean and standard deviation of sliding displacements

图 6 给出了坝坡在主震-余震序列和仅主震作用下不同地震强度对应样本的最大滑动位移的分布数据。由图 6 可以看出，即使是相同的地震强

度作用下，不同随机样本对应的滑动位移也存在显著差异，突显出从随机角度对坝坡进行动力分析的必要性。



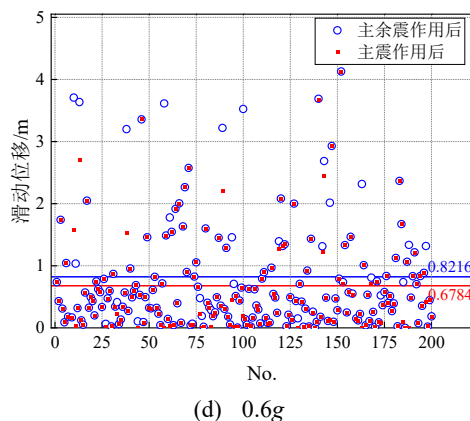
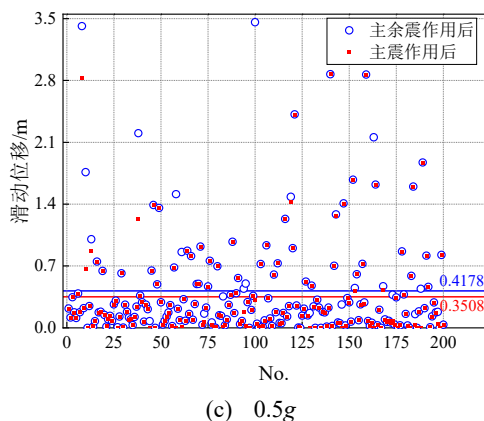


图 6 坝坡最大滑动位移分布数据

Fig.6 Distribution data of maximum sliding displacement of the dam slope

表 5 列出了四组不同 PGA 对应的坝坡最大滑动位移的均值和余震后的滑动位移的提高比例。当 $PGA=0.3g$ 时，仅主震作用和主余震作用后坝坡最大滑动位移的均值分别为 0.0375 m 和 0.0434 m ，余震后坝坡最大滑动位移的提高比例为 15.73% 。而当 PGA 分别为 $0.4g$ 、 $0.5g$ 和 $0.6g$ 时余震使得坝坡最大滑动位移的提高比例分别为 16.06% 、 19.10% 以及 21.11% ，这表明余震对坝坡动力响应的影响不容忽视，且余震的影响随着 PGA 的增加而进一步加剧。因此，考虑余震以及地震动的随机性对坝坡动力稳定的影响是必要的。

图 7 展示了在 PGA 为 $0.3g$ 情况下基于 DPIM 得到的坝坡滑动位移在三个典型时刻对应的概率密度函数(Probability density function, PDF)和累

积概率分布函数 (Cumulative probability distribution function, CDF) 曲线。在不同的时刻，坝坡滑动位移的概率信息展现出显著的差异，随着地震动的发展，坝坡滑动位移的 PDF 曲线的峰值逐步降低，CDF 曲线逐渐下移，对应的坝坡可靠性逐渐降低。

表 5 坝坡最大滑动位移均值

Tab.5 Average value of maximum sliding displacement of the dam slope

地震类型	PGA			
	0.3g	0.4g	0.5g	0.6g
主震	0.0375 m	0.1513 m	0.3508 m	0.6784 m
主余震	0.0434 m	0.1756 m	0.4178 m	0.8216 m
提高比例	15.73%	16.06%	19.10%	21.11%

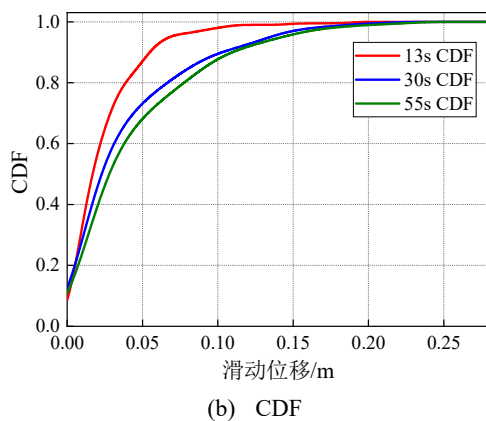
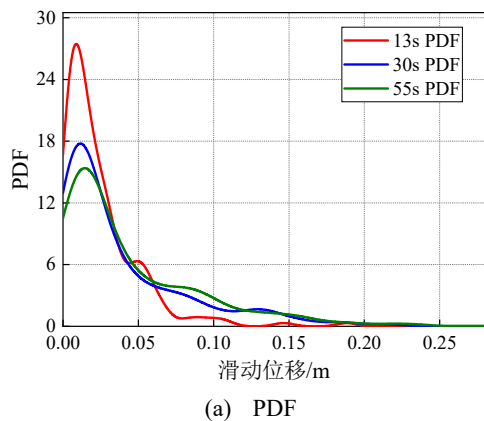


图 7 典型时刻滑动位移的概率信息

Fig.7 Probability information of sliding displacement at typical moments

3.2 可靠度分析

图 8 给出了基于吸收条件法得到的坝坡在四组不同 PGA 作用下的滑动位移的 PDF 和 CDF 曲线。不同 PGA 对应的滑动位移的 PDF 和 CDF 图像在形状上类似，然而在数值上有较大差别。四组工况对应的 PDF 曲线均呈现明显的峰值左偏，

且在滑动位移为 0 m 时对应的 PDF 值较高，这是因为在 200 个随机地震动样本作用下坝坡的滑动位移有一部分为 0 的情况，这在图 6 坝坡滑动位移的分布数据中有具体的体现。随着 PGA 的增加，坝坡滑动位移的 PDF 和 CDF 图像越宽，PDF 对应的峰值显著降低，对应的可靠性水平逐渐降低。

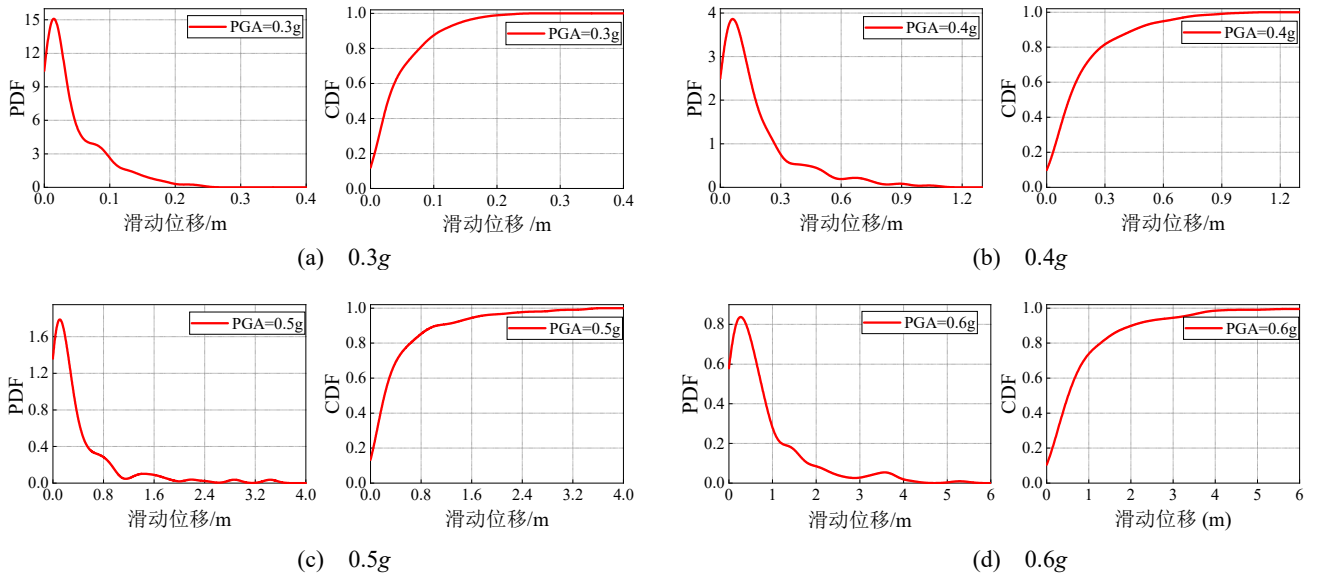


图 8 基于吸收条件法的滑动位移的 PDF 和

Fig.8 PDF and CDF of sliding displacement based on the absorption condition method

图 9 给出了四组不同 PGA 在三个设定的滑动位移阈值对应下的坝坡可靠度随时间的变化曲线，从四组曲线均可以看出余震会在一定程度上降低坝坡的动力可靠度。当 PGA 为 0.3g 时，滑动位移阈值设定为 30 cm 和 50 cm 坝坡可靠度随时间没有变化，滑动位移阈值设定为 15 cm 时，余震使得坝坡动力可靠度从主震结束后的 97.03%降

低为 95.66%。表 6 列出了四组不同 PGA 和不同阈值对应的坝坡地震可靠性。随着地震强度的增大，余震使得坝坡动力可靠度下降的效应更为显著。PGA=0.3g 时，余震使对应 15 cm 阈值的可靠性降低 1.37%，而当 PGA=0.6g 时，这一降低幅度增至 4.20%，进一步表明，余震对坝坡抗震可靠性的影响不容忽视。

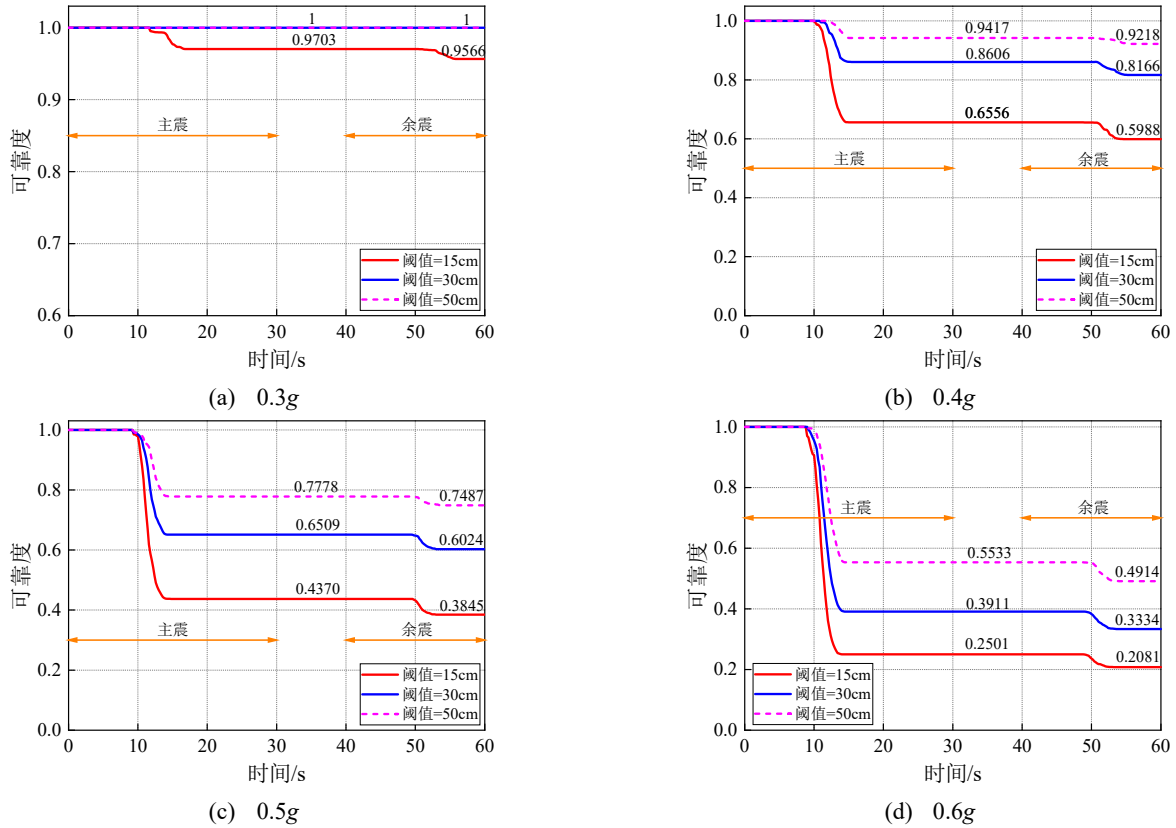


图 9 不同阈值对应的坝坡时变可靠度

Fig.9 Dynamic reliability of dam slopes corresponding to different thresholds

表 6 不同阈值对应的坝坡动力可靠度
Tab.6 Dynamic reliability of dam slopes corresponding to different thresholds

地震类型	阈值	PGA			
		0.3g	0.4g	0.5g	0.6g
仅主震	15 cm	0.9703	0.6556	0.4370	0.2501
	30 cm	1	0.8606	0.6509	0.3911
	50 cm	1	0.9417	0.7778	0.5533
主余震	15 cm	0.9566	0.5988	0.3845	0.2081
	30 cm	1	0.8166	0.6024	0.3334
	50 cm	1	0.9218	0.7487	0.4914

4 结论

本文以实际工程庄里水电站上水库大坝为计算模型，以滑动位移作为评价指标，基于 DPIM 开展了随机主余震作用下的坝坡稳定分析及可靠度评估。系统探究了地震动的随机性以及余震对坝坡动力响应及可靠度的影响。主要得出以下几点结论：

- 1) 基于“震源-传播-场地”的思想建立了序列型随机地震动模型，采用窄带波群叠加法生成了大量的随机主余震加速度时程，为坝坡动力稳定分析提供了激励输入，结合 DPIM 和吸收条件法可以高效地获取坝坡在整个地震持时的时变可靠度；
- 2) 即使在同一地震强度作用下，不同随机主余震对应的坝坡滑移量之间也展现出了较大的差异，且随着坝体材料非线性特性在地震作用下的持续发展，坝坡滑动位移的 PDF 曲线展现出不同于正态或对数正态分布的形式，从随机动力角度进行坝坡稳定分析是必要的；
- 3) 余震会在一定程度上降低坝坡的动力可靠度，不同阈值下余震对坝坡动力可靠度降低的程度不同。随着地震强度增大，余震使得坝坡动力可靠度下降的效应更为显著，余震对坝坡抗震可靠性的影响不容忽视。

参 考 文 献

[1] 莫巨华,王浩,王超,等.基于卧式抽蓄的风光水储蓄联合运行优化调度研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):1-9.[Mo Juhua,Wang Hao,Wang Chao,et al.Optimized scheduling of wind-solar-hydro energy storage joint operation based on horizontal pumped storage[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power,2025,46(1):1-9.]

[2] 任岩,侯尚辰,韩宇平,等.基于平抑风光波动的矿坑抽水蓄能电站出力与机组特性研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):20-31.[Ren Yan,Hou Shangchen,Han Yuping,et al.Study on the output and unit

characteristics of pumped storage power station utilizing abandoned mine pits for smoothing the fluctuation of wind and photovoltaic outputs[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power,2025, 46(1):20-31.]

[3] 刘汉东,王甲亮,于怀昌.抽水蓄能电站压力管道钢衬失稳机理研究现状[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(6):1-7.[Liu Handong,Wang Jialiang,Yu Huaichang.Research status of instability mechanism of penstock steel lining in pumped storage power station[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power,2021,42(6):1-7.]

[4] 聂相田,庄濮瑞,焦延涛,等.考虑渗流-应力耦合的均质土坝边坡稳定分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(6):54-58.[Nie Xiangtian,Zhuang Purui,Jiao Yantao,et al.Slope stability analysis of homogeneous earth dam considering seepage stress coupling[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power,2020,41(6):54-58.]

[5] Pang Rui,Yao Haoyu,Xu Bin.Dynamic reliability and seismic fragility analysis for high concrete-faced rockfill dam slopes subjected to stochastic earthquake and parameter excitation via PDEM[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2024,186:108915.

[6] 介玉新,王杨强,周婷,等.稳定分析中滑动面构造方法分析[J].水力发电学报,2024,43(7):73-84.[Jie Yuxin,Wang Yangqiang,Zhou Ting,et al.Analysis of generating slip surfaces in stability analysis[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2024,43(7):73-84.]

[7] 陈文胜,刘成,徐彬,等.边坡稳定性分析的力矩和方法研究[J].岩土工程学报,2025,47(03):645-651.[Chen Wensheng,Liu Cheng,Xu Bin,et al.Torque sum method for slope stability analysis[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2025,47(03):645-651.]

[8] Pang Rui,Yao Haoyu,Xu Mingyang,et al.Slope displacement reliability analysis considering rock

- parameters spatial variability subjected to stochastic mainshock-aftershock earthquake[J].Reliability Engineering & System Safety,2024,251:110337.
- [9] Newmark N M.Effects of earthquakes on dams and embankments[J].Geotechnique,1965,15(2):139-160.
- [10] 王家鑫,夏元友,王智德.考虑滑面应变软化效应的边坡震后位移计算方法[J].计算力学学报,2024,41(6):1029-1036. [Wang Jiaxin,Xia Yuanyou, Wang Zhide.Seismic displacement calculation method of slope with considering strain-softening effect of slip surface[J].Chinese Journal of Computational Mechanics,2024,41(6):1029-1036.]
- [11] 白治朋,文勇波,贺秀儒,等.基于条件谱匹配的主余震序列型地震动选择方法研究[J].世界地震工程,2025,41(2):21-31.[Bai Zhipeng,Wen Yongbo,He Xiuru, et al.Ground motion selection method for main- aftershock sequences based on conditional spectrum matching[J]. World Earthquake Engineering,2025,41(2):21- 31.]
- [12] Xu Chong,Xu Xiwei,Yao Xin,et al.Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12,2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis[J].Landslides,2014,11(3): 441-461.
- [13] 徐世界,郑晓东,钟金盛,等.主余震序列作用下面板堆石坝应变能及易损性分析[J].水电能源科学,2024,42(9):120-124.[Xu Shijie,Zheng Xiaodong,Zhong Jinsheng,et al.Strain energy and vulnerability analysis of faced rockfill dam under main aftershock sequence[J]. Water Resources and Power,2024,42(9):120- 124.]
- [14] 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.
- [15] Vandanapu L,Shields M D.3rd-order spectral representation method: Simulation of multi-dimensional random fields and ergodic multi-variate random processes with fast Fourier transform implementation[J].Probabilistic Engineering Mechanics,2021,64:103128.
- [16] 申家旭,陈隽,丁国.基于 Copula 理论的序列型地震动随机模型[J].工程力学,2021,38(1):27-39.[Shen Jiaxu,Chen Jun,Ding Guo.A stochastic model for sequential ground motions based on the copula theory[J].Engineering Mechanics,2021,38(1):27-39.]
- [17] Zhou Yang,Jing Mingyuan,Pang Rui,et al.Reliability evaluation for cantilevered retaining walls considering uncertainty of mainshock-aftershock sequences[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2022,163:107548.
- [18] Pang Rui,Zhou Yang,Chen Guohai,et al.Stochastic mainshock-aftershock simulation and its applications in dynamic reliability of structural systems via DPIM[J]. Journal of Engineering Mechanics,2023,149(1): 04022096.
- [19] 王辉,岑威钧,王栋良,等.强震区某沥青混凝土面板堆石高坝抗震安全性分析[J].水资源与水工程学报,2023,34(5):165-171.[Wang Hui,Cen Weijun,Wang Dongliang,et al.Seismic safety of a high asphalt concrete-faced rockfill dam in strong earthquake area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2023,34(5): 165-171.]
- [20] 周晨光,孔宪京,邹德高,等.地震波动输入方法对高土石坝地震反应影响研究[J].大连理工大学学报,2016,56(4):382-389.[Zhou Chenguang,Kong Xianjing, Zou Degao,et al.Study of influence of earthquake wave motion input method on seismic response of high earth-rock dam[J].Journal of Dalian University of Technology,2016,56(4):382-389.]
- [21] 邹德高,余翔,余挺,等.深厚覆盖层上高土石坝动力稳定分析[J].水电与抽水蓄能,2020,6(1):22-27,2.[Zou Degao,Yu Xiang,Yu Ting,et al.Dynamic stability analysis of high earth-rockfill dam on deep overburden layer[J]. Hydropower and Pumped Storage,2020,6(1):22-27, 2.]
- [22] Goodman R E,Taylor R L,Brekke T L.A model for the mechanics of jointed rock[J].ASCE Soil Mechanics and Foundation Division Journal,1968,94(3):637-659.
- [23] Wiczorek G F,Wilson R C,Harp E L.Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County, California[R].1985.
- [24] Jibson R W,Michael J A.Maps showing seismic landslide hazards in Anchorage,Alaska[M].US Geological Survey Reston,VA,USA,2009.
- [25] Darbre G R.Swiss guidelines for the earthquake safety of dams[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering,Vancouver,Canada:13 WCEE Secretariat,2004:Paper No.1794.
- [26] Federal Emergency Management Agency.Federal guidelines for dam safety:Earthquake analyses and design of dams:FEMA 65[R].Washington,DC:U.S.Department of Homeland Security,Federal Emergency Management Agency,2005.
- [27] 田景元,刘汉龙,伍小玉.高土石坝极限抗震能力的评判角度及标准述评[J].防灾减灾工程学报,2013,33(增刊 1): 128-131.[Tian Jingyuan,Liu Hanlong,Wu Xiaoyu. Evaluation perspectives and criteria of maximum aseismic capability for high earth-rock dam[J].Journal of Disaster

Prevention and Mitigation Engineering,2013,33(S1):
128-131.]
[28] Chen Guohai,Yang Dixiong.A unified analysis framework

of static and dynamic structural reliabilities based on direct
probability integral method[J].Mechanical Systems and
Signal Processing,2021,158:107783.

Dynamic stability analysis of dam slope subjected to stochastic main and aftershock sequence

YAO Haoyu^{1,2}, LI Kanghong³, ZHOU Yang^{1,2}, PANG Rui^{1,2}, LIU Jun¹

(1. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;3. POWERCHINA Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

Abstract:【Objective】 To address the insufficient consideration of aftershock effects in current seismic stability analyses of earth-rock dams, the seismic stability of earth-rock dams subjected to stochastic mainshock-aftershock sequences was investigated, and the effects of aftershocks on the dynamic stability and reliability of earth-rock dams were quantified.

【Methods】 A sequential ground motion model was established based on the "source-path-site" concept. A framework for slope stability analysis and reliability assessment was constructed using the Direct Probability Integral Method (DPIM) and the absorbing condition method. The proposed framework was applied to evaluate the seismic stability and reliability of the upstream dam of the Zhuangli Pumped Storage Power Station. The sliding displacement was employed as the evaluation metric, and the influence of aftershocks on the dynamic response and reliability of the dam slope was systematically investigated. **【Results】** (1) When $PGA=0.3g$, the mean maximum sliding displacements of the dam slope under mainshock only and main-aftershock sequences are 0.0375 m and 0.0434 m, respectively, representing a 15.73% increase due to aftershocks, which corresponds to a 1.37% reduction in dynamic reliability with a threshold of 15 cm. (2) For higher PGAs of 0.4g, 0.5g and 0.6g, the aftershock-induced displacement increases reach 16.06%, 19.10% and 21.11% respectively. (3) The aftershocks cause a 4.20% decrease in the dam slope dynamic reliability with a threshold of 15 cm and $PGA=0.6g$. **【Conclusion】** Compared to a single mainshock, the inclusion of aftershocks generally leads to an increase in sliding displacement and a reduction in reliability. The impact of aftershocks on the seismic stability of dam slopes cannot be ignored. This study provides practical guidance for the seismic stability assessment of earth-rock dams.

Keywords: dam slope; main and aftershock sequence; sliding displacement; stochastic analysis; reliability