DOI:10.14188/j.1671-8844.2026.0007
文章编号:1671-8844(2026)09-1409-12

长周期地震动作用下高土石坝动力响应及易损性评估研究

王凯飞,吴志彬,付智勇,杜文琪

(武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:为研究长周期地震动对高土石坝动力响应与抗震性能的影响,以某深厚覆盖层上的黏土心墙坝为对象,从NGA-West2数据库中筛选出典型脉冲型长周期地震动和远场类谐和长周期地震动各30条,基于有限元动力响应分析,研究了土石坝-覆盖层体系在长周期地震动作用下的动力响应特征。随后,采用增量动力分析方法,开展了长周期地震动作用下土石坝易损性研究,并与普通地震动下的易损性结果进行了对比。结果表明:1)脉冲型长周期地震动作用下的坝体动力响应强于普通地震动作用下的响应,但弱于远场类谐和长周期地震动;2)远场类谐和长周期地震动引起的坝顶平均最大竖向永久变形值为1.80 m,分别为脉冲型长周期地震动的1.29倍与普通地震动的1.80倍;3)在峰值地面加速度(peak ground acceleration, PGA)相同的水平地震动作用下,土石坝在远场类谐和长周期地震动作用下发生各等级破坏的概率P_f最高,脉冲型地震动次之,普通地震动最低。研究成果可为深厚覆盖层上高土石坝的抗震设计与安全评价提供参考。

关键词:长周期地震动;土石坝;动力响应;地震易损性

中图分类号:TV 642　**文献标志码:**A

Dynamic response and seismic fragility assessment of high earth-rockfill dams under long-period ground motions

WANG Kaifei, WU Zhibin, FU Zhiyong, DU Wenqi

(State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To investigate the impact of long-period ground motions on the dynamic response and seismic performance of high earth-rockfill dams, a high clay-core earth-rockfill dam on a deep overburden layer is taken as a case study. Thirty typical pulse-like long-period ground motions and thirty far-field harmonic-like long-period ground motions are selected from the NGA-West2 database. Using finite-element dynamic response analysis, the dynamic response characteristics of the dam-overburden system under long-period ground motions are investigated. Subsequently, the incremental dynamic analysis method is employed to evaluate the seismic fragility of the dam under long-period ground motions, with results compared to those under ordinary ground motions. The findings indicate that: 1) the dynamic response of the dam under pulse-like long-period ground motions is stronger than that under ordinary ground motions but weaker than that under far-field harmonic-like long-period ground motions; 2) the average maximum vertical permanent deformation at the dam crest induced

收稿日期:2026-01-05

作者简介:王凯飞(2000-),男,硕士研究生,主要从事高土石坝抗震评价研究,E-mail: 2022202060055@whu.edu.cn。

通信作者:杜文琪(1985-),男,教授,博士生导师,主要从事水工程抗震评估与防灾减灾研究,E-mail: wqdu309@whu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:U24A20182);湖北省自然科学基金项目(编号:2024AFD355)。

本文引用格式:王凯飞,吴志彬,付智勇,等.长周期地震动作用下高土石坝动力响应及易损性评估研究[J].武汉大学学报(工学版),2026,59(9):1409-1420.

Citation: WANG Kaifei, WU Zhibin, FU Zhiyong, et al. Dynamic response and seismic fragility assessment of high earth-rockfill dams under long-period ground motions[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(9): 1409-1420.

by far-field harmonic-like long-period ground motions is 1.80 m, which is 1.29 times that caused by pulse-like long-period ground motions and 1.80 times that caused by ordinary ground motions; 3) under horizontal ground motions with the same peak ground acceleration (PGA) level, the probability of the dam experiencing various damage levels P_f is highest under far-field harmonic-like long-period ground motions, followed by pulse-like long-period ground motions, and lowest under ordinary ground motions. The results provide a reference for the seismic design and safety assessment of high earth-rockfill dams on deep overburden layers.

Key words: long-period ground motions; earth-rock dams; dynamic response; seismic fragility

土石坝因其结构简单、经济性好、施工周期短，已成为应用最广泛的坝型之一。随着我国水利水电建设的快速发展，特别是在“西部大开发”和“西电东送”国家战略的推动下，我国在中西部地区相继建成了一大批坝高超过200 m的高土石坝，如糯扎渡心墙堆石坝、两河口心墙堆石坝等。然而，西部地区地震活动频发、地震烈度高，多数高土石坝位于高地震烈度区，地震对其安全构成了严重威胁[1]。此外，我国西部地区河床下普遍分布有厚度数十米至上百米的覆盖层。在高烈度地震动作用下，深厚覆盖层场地易产生显著的长周期地震动效应，因此，如何保障建于深厚覆盖层上的土石坝在长周期地震动作用下的安全稳定运行，是一项亟待解决的关键问题[2]。

长周期地震动包括近断层速度脉冲型地震动与远场类谐和地震动两类。全球多个强震实例表明，长周期地震动对长自振周期结构具有显著破坏作用，并且由不同类别长周期地震动引起的结构动力响应也存在明显差异。例如，1994年美国北岭地震、1995年日本神户地震和1999年中国台湾集集地震等均对工程结构造成了严重的破坏[3]，其主要原因是近断层地震动的速度脉冲效应显著。2008年汶川地震中，靠近龙门山断裂带的都江堰市多处桥梁受近断层脉冲型地震动冲击而发生破坏，而距震源约100 km的成都市部分高层建筑则因远场类谐和地震动的共振效应出现大量非结构构件损伤[4]。2011年日本东北大地震中，远场的东京地区记录到持时超过60 s的远场类谐和地震动，导致多栋超高层建筑产生明显层间位移，近断层区域则因脉冲型地震动导致桥梁与港口设施严重损毁[5]。这些震例充分表明长周期地震动对工程结构的威胁具有普遍性，且其破坏机制与地震动类型密切相关，需在工程抗震研究中予以重视[6]。

近年来，国内外学者针对长周期地震动，尤其是近断层脉冲型地震动作用下各类工程结构的抗震性能开展了大量研究：WU等[7]对比分析了脉冲型与非脉冲型地震动对土石坝动力响应及土层液化的影响差异；邹德高等[8]探讨了脉冲型与非脉冲型地震动作用下面板堆石坝的加速度、顺河向水平位移以及面板顺坡向应力的变化；李慧敏等[9]对比了长周期地震动作用下等厚度覆盖层上不同高度面板堆石坝动力响应特征的差异；李思瀚等[10]采用直接概率积分法，分别计算了高土石坝在脉冲型与非脉冲型地震动激励下的坝顶沉降与坝坡滑移量等随机动力响应，并评估了其动力可靠度；DAVOODI等[11]比较了近断层脉冲型地震动和远场类谐和地震动的效应，探究了它们对土石坝非线性动力响应的影响。然而，现有研究多聚焦于近断层脉冲型地震动，针对远场类谐和地震动作用下高土石坝的动力响应及易损性研究仍不够深入。此外，近断层脉冲型与远场类谐和两类长周期地震动作用下土石坝动力响应差异也鲜有研究涉及。

1 长周期地震动选择

脉冲型地震动指速度时程中具有显著速度脉冲的近断层地震动，是长周期地震动的典型代表之一。SHAHI等[12]提出了基于小波分解技术的近断层脉冲型地震动判别方法，并将太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)数据库中的近断层地震动记录分为速度脉冲型和非脉冲型两类。基于该判别方法，WU等[7]针对近断层脉冲型长周期地震动提出了以下选取准则：

1)震级$M_w \geqslant 6$；

2)断层距$R_{rup} \leqslant 20$ km；

3)峰值地面速度(peak ground velocity, PGV)$\geqslant$80 cm/s。

由于该准则能够有效反映脉冲型地震动的特征，本文采用WU等[7]提出的脉冲型地震动选取准则。

远场类谐和长周期地震动具有低频成分丰富、持时较长、振动后期呈现多个循环脉冲等特征[13-14]。李雪红等[15]基于β谱提出了长周期地震动的量化指

标，用β谱曲线2～10 s周期段谱值与周期平方的加权平均值β_t作为界定参数。然而，该方法不能有效地过滤高频分量的影响。李英民等[16]提出了基于希尔伯特-黄变换（Hilbert-Huang transform，HHT）的地震动分量分离的界定方法，可有效识别地震动中的长周期分量。该方法利用HHT计算长周期分量与原地震动Hilbert累积能量的比值r_E：

$$r_E = \frac{E_{LPC}}{E_{ORC}} \tag{1}$$

式中：E_{LPC}为长周期分量累积能量；E_{ORC}为原始地震动总累积能量。

基于r_E，李英民等[16]进一步提出了长周期地震动界定指标（long-period ground motion index，LPGI），并将LPGI≥0.6的地震动定义为长周期地震动，反之为普通地震动。LPGI的表达式为

$$\mathrm{LPGI} = \frac{1}{1 + e^{22.1 - 37.3r_E - 16.9\mathrm{PGV/PGA}}} \tag{2}$$

式中：PGA（peak ground acceleration）为峰值地面加速度。

本文基于SHOJI等[17]提出的90%能量持时概念表征长周期地震动能量分布特性，其中$t_{90\%}$为地震动累积能量从总能量的5%达到95%对应的时间间隔。当$t_{90\%}$≥45 s时，地震动表现出类谐和特性。基于上述方法，本文从NGA-West2数据库中选取了3组地震动记录：近断层脉冲型长周期地震动、远场类谐和长周期地震动，以及震级与前2组相近、但不具有长周期特征的普通地震动。每组地震动包含30条记录。

图1为典型的脉冲型和远场类谐和长周期地震动时程曲线。图1中：RSN（record sequence number）为记录序列号。由图1可知，脉冲型长周期地震动含有强烈的速度脉冲，而远场类谐和长周期地震动则以长周期、低频剪切波和面波为主。

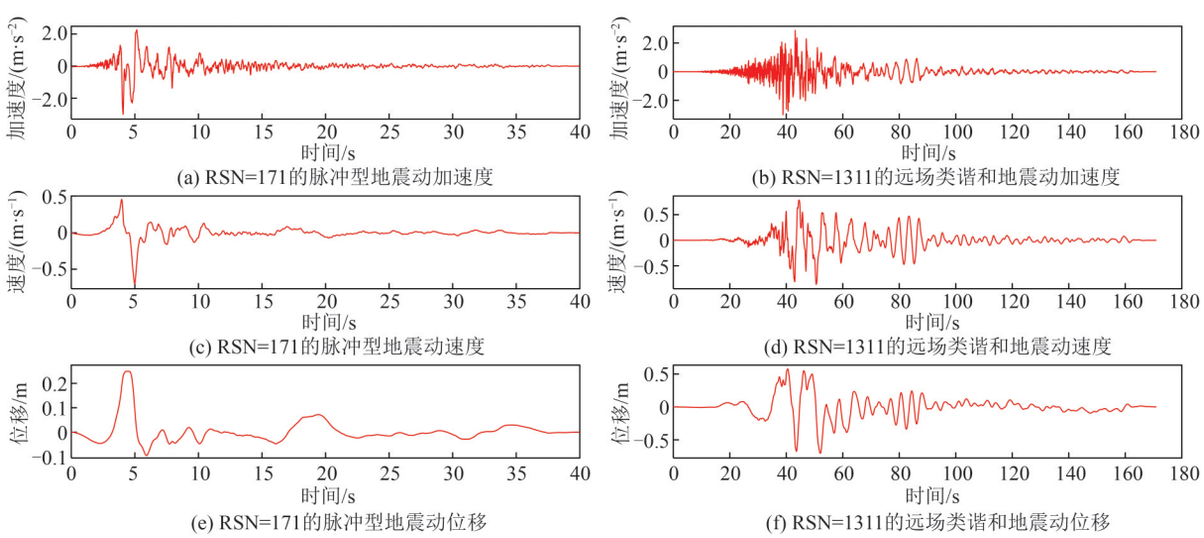


图1　典型的长周期地震动时程曲线

Fig.1　Time-history curves of typical long-period ground motions

图2(a)～(c)分别展示了普通地震动、脉冲型地震动和远场类谐和地震动的加速度反应谱，图2(d)对比了3组地震动的反应谱。为排除地震动峰值加速度的影响，所有记录的加速度峰值均调整至0.3g（g为重力加速度）。由图2可知，长周期地震动的加速度反应谱值在中长周期段均高于普通地震动，这与长周期地震动低频分量集中的特性相符。远场类谐和长周期地震动的反应谱在中长周期段高于近断层脉冲型地震动，且衰减更为缓慢。在4～6 s的长周期段，远场类谐和长周期地震动的反应谱具有典型的“双峰特征”，与普通地震动和脉冲型地震动差异明显。

图3(a)～(c)分别展示了PGV、阿里亚斯强度I_a和显著持时$D_{s,5\text{-}75}$的累积分布函数（cumulative distribution function，CDF）曲线。由图3可知：脉冲型地震动的PGV远大于普通地震动，这是因为近断层脉冲型地震动的速度时程前期包含强速度脉冲，具有短时、高能量的特性。远场类谐和地震动的$D_{s,5\text{-}75}$和I_a远大于普通地震动，这是因为远场类谐和地震动通常具有更高的总能量与更多的振动循环次数，并且随着R_{rup}的增大，地震波经历的反射、折射和散射作用更多，导致持时更长。此外，3类地震动的平均周期T_m也存在显著差异：远场类谐和地震动的平均周期最长（1.36 s），脉冲型地震动次之

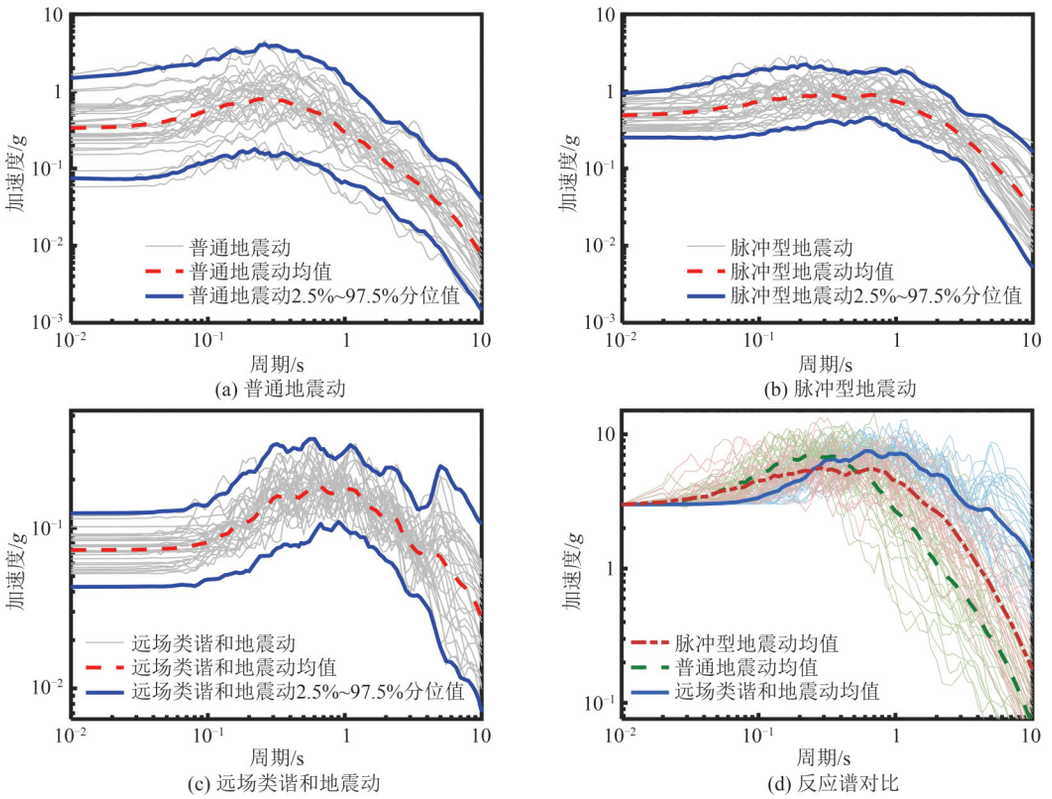


图 2 长周期地震动和普通地震动反应谱及对比

Fig.2 Response spectra and comparison of long-period and ordinary ground motions

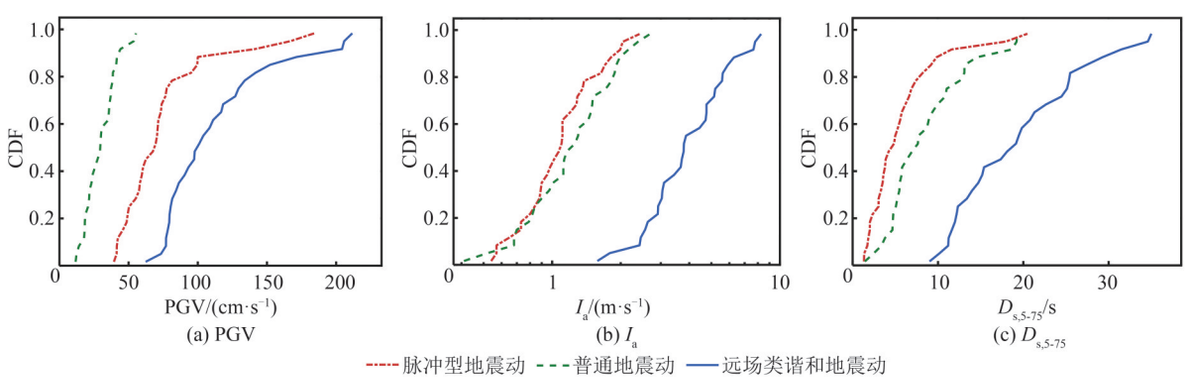


图 3 脉冲型、远场类谐和与普通地震动的 PGV、I_a 及 $D_{s,5\text{-}75}$ 的累积分布函数

Fig.3 Cumulative distribution functions of PGV, I_a and $D_{s,5\text{-}75}$ for pulse-like, far-field harmonic-like, and ordinary ground motions

(0.95 s),普通地震动最短(0.57 s)。因此,所选 3 组地震动的 PGV、I_a 和 $D_{s,5\text{-}75}$ 的分布特征与各自的地震动产生机理相符,能够分别反映近断层脉冲效应、远场类谐和效应及普通地震动的基本特性。

2 土石坝动力响应

2.1 数值模型

本文以某黏土心墙坝为对象开展长周期地震动作用下高土石坝动力响应研究。该黏土心墙坝坝高 200 m、坝顶宽 16 m。上下游坡度分别为 1∶2.0 与 1∶1.8,坝体分区包括堆石区、过渡层、反滤层与黏土心墙。根据地质勘探资料,坝址处基岩埋深较大,河床覆盖层最大厚度达 80 m。大坝分 22 层进行填筑,竣工后分 3 级蓄水,最终上游蓄水位至 180 m。本文利用 ABAQUS 商业软件建立了黏土心墙坝-覆盖层体系的有限元模型,如图 4 所示。模型采用平面应变四节点单元,共计 18 668 个单元和 19 042 个节点。该模型的动力特性分析结果表明,坝-覆盖层体系的基频约为 0.58 Hz,1 阶自振周期约为 1.72 s,属于典型的中长周期结构体系。

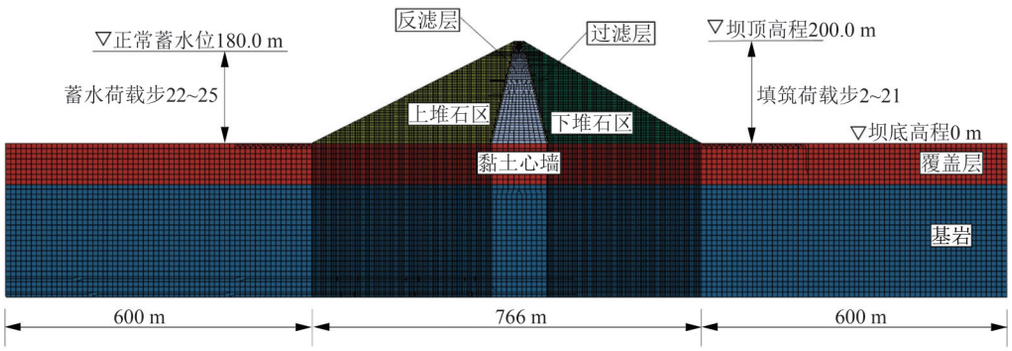


图 4　深厚覆盖层上黏土心墙土石坝坝体分区

Fig.4　Zoning of the clay-core earth-rock dam on a deep overburden layer

2.2　本构模型及参数

在静力计算中，筑体各分区材料与覆盖层采用邓肯-张 *E-B*（其中 *E* 为切线弹性模量，*B* 为切线体积模量）模型进行模拟，其参数取自瀑布沟大坝的实际工程数据[18]，见表 1。表 1 中：ρ 为密度；K 为切线模量系数；n 为模量指数；R_f 为破坏比；c 为黏聚力；φ 为内摩擦角；φ_0 为初始内摩擦角；K_{ur} 为卸载-再加载模量系数；K_b 为体积模量系数；m 为体积模量指数。

表 1　邓肯-张 *E-B* 模型参数

Table 1　Parameters of the Duncan-Chang *E-B* model

分区	ρ/(g•cm^{-3})	K	n	R_f	c/kPa	φ/(°)	φ_0/(°)	K_{ur}	K_b	m
上坝壳	2.10	1 000	0.52	0.68	0	54.0	10	2 000	420	0.34
下坝壳	2.10	800	0.50	0.70	0	51.0	10	1 600	318	0.30
反滤层	2.03	790	0.59	0.81	14.1	35.5	0	1 580	400	0.30
过渡层	2.15	986	0.36	0.74	11.5	38.8	0	1 972	550	0.32
心墙	2.36	550	0.42	0.76	0.12	35.0	0	1 100	240	0.29
覆盖层	2.05	1 200	0.42	0.62	0	50.0	0	1 680	800	0.30

静力计算结果为动力计算提供初始应力状态。动力计算采用基于等效黏弹性模型的等效线性化分析方法[19]，永久变形计算采用基于等效节点力法的沈珠江残余变形模型[20]。2 个模型的计算参数均取自费康等[19]的算例，见表 2。表 2 中：k_1、k_2 为动剪切模量参数；n_d 为动剪切模量衰减指数；λ_{max} 为最大阻尼比；c_1～c_5 为阻尼比拟合参数。

表 2　等效黏弹性模型及残余变形模型参数

Table 2　Parameters for the equivalent viscoelastic and residual deformation models

分区	k_1	k_2	n_d	λ_{max}	c_1/%	c_2	c_3	c_4/%	c_5
堆石料	17.4	3 000	0.444	0.22	0.74	0.43	0	9.55	0.38
反滤层	11.2	1 000	0.596	0.20	0.24	0.57	0	8.25	0.73
过渡层	23.5	2 950	0.438	0.21	0.56	0.42	0	8.25	0.40
心墙	15.9	1 700	0.522	0.30	0.04	0.17	0	18.9	1.02
覆盖层	20.0	3 895	0.460	0.20	0.30	0.31	0	5.86	1.13

模型中基岩的密度为 2 700 kg/m^3，弹性模量为 10 GPa，泊松比为 0.24。

2.3　静力计算结果及分析

坝体在竣工期与蓄水期的整体应力、位移分布如图 5 所示。需要指出的是，ABAQUS 软件中以拉应力为正、压应力为负，故其代数值最小的主应力对应于岩土工程中的最大主压应力。由图 5 可知，在心墙与坝壳交界面处应力均呈现不连续现象。这是由于心墙的变形模量较低，在相同荷载下变形较大，其承担的部分竖向荷载通过应力重分布转移至两侧坝壳，导致心墙竖向应力低于其自重应力、坝壳竖向应力高于其自重应力，形成典型的“拱效应”。

竣工期坝体最大、最小主应力均随深度增加而增大；受上下游坝壳变形模量差异影响，即使无水压作用，应力分布也非完全对称。蓄水前后坝体未出现明显的应力集中区域，这对坝体的稳定性有利，蓄水前后坝体最大主压应力分别为 5.01、4.78 MPa，低于一般土石坝填筑料的破坏强度。蓄水前坝体基本无拉应力，蓄水后受水压力作用，上游坝体出现一定范围的拉应力区，但最大拉应力仅为 0.38 MPa。

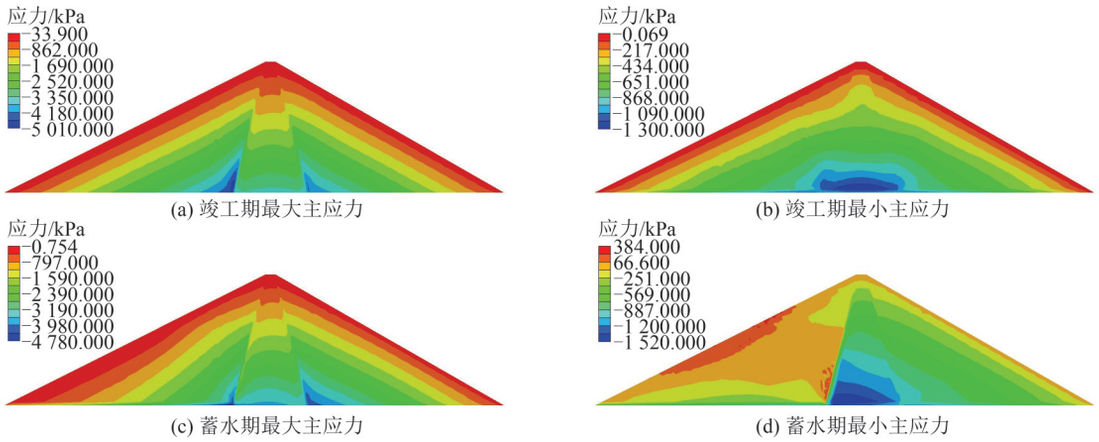


图 5 竣工期和蓄水期最大主应力和最小主应力云图

Fig.5 Contour maps of maximum and minimum principal stresses during the completion and impoundment periods

竣工期和蓄水期顺河向位移及竖向沉降云图如图 6 所示,图中沉降以负值表示,顺河向位移以指向下游为正,单位均为 m。由图 6 可知,无论竣工期还是蓄水期,最大沉降均出现在坝体中轴线附近,蓄水前、后坝体最大竖向沉降分别为 2.72、2.53 m,最大沉降量发生在 1/2 坝高处,沉降量约占坝体与覆盖层总高度的 0.90%,符合工程规律[21]。竣工期顺河向上、下游位移极值分别为 0.45、0.57 m,均指向坝外且发生于堆石区;蓄水期顺河向上、下游位移极值分别为 1.19、1.08 m,分别位于坝体上游堆石区上部和下游堆石区下部,反映出水压力对位移分布的显著影响。

综上,2 种工况下坝体应力与位移分布符合一般规律,并且与现有土石坝静力分析的研究结果基本一致[22],表明本文所建立的黏土心墙土石坝数值模型具有良好的可靠性。

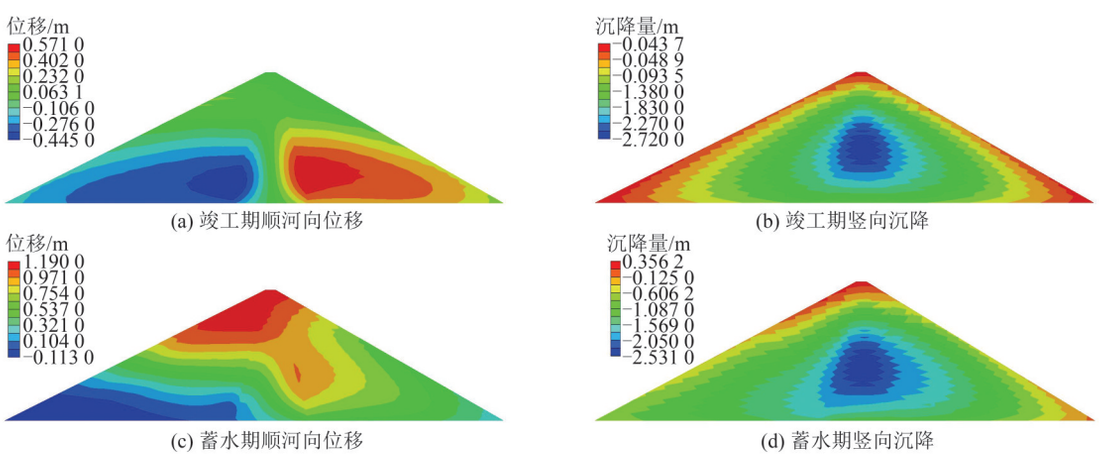


图 6 竣工期和蓄水期顺河向位移及竖向沉降云图

Fig.6 Contour maps of along-river displacement and vertical settlement during the completion and impoundment periods

2.4 动力计算结果及分析

2.4.1 水平峰值加速度

基于选定的远场类谐和地震动、脉冲型地震动和普通地震动记录各 30 条,本文开展坝体动力计算,提取坝体中轴线上各节点的水平峰值加速度,结果如图 7(a)~(c)所示。水平峰值加速度沿坝高逐渐增大,靠近坝顶处增速较快,呈现典型的鞭梢效应,与已有研究中土石坝的动力响应规律基本一致[23]。进一步分析表明,远场类谐和、脉冲型、普通地震动作用下,坝顶水平峰值加速度平均值分别为 9.64、6.54、4.11 m/s^2,即长周期地震动作用下的坝顶水平峰值加速度明显大于普通地震动作用下的数值。长周期地震动中,远场类谐和地震动引发的坝顶水平峰值加速度大于脉冲型地震动作用下的数值。远场类谐和地震动的平均周期(1.36 s)与坝体 1 阶自振周期(1.72 s)接近,易引发显著共振效应,使得远场类谐和地震动作用下土石坝动力响应显著强于其他类型地震动。此外,远场类谐和地震

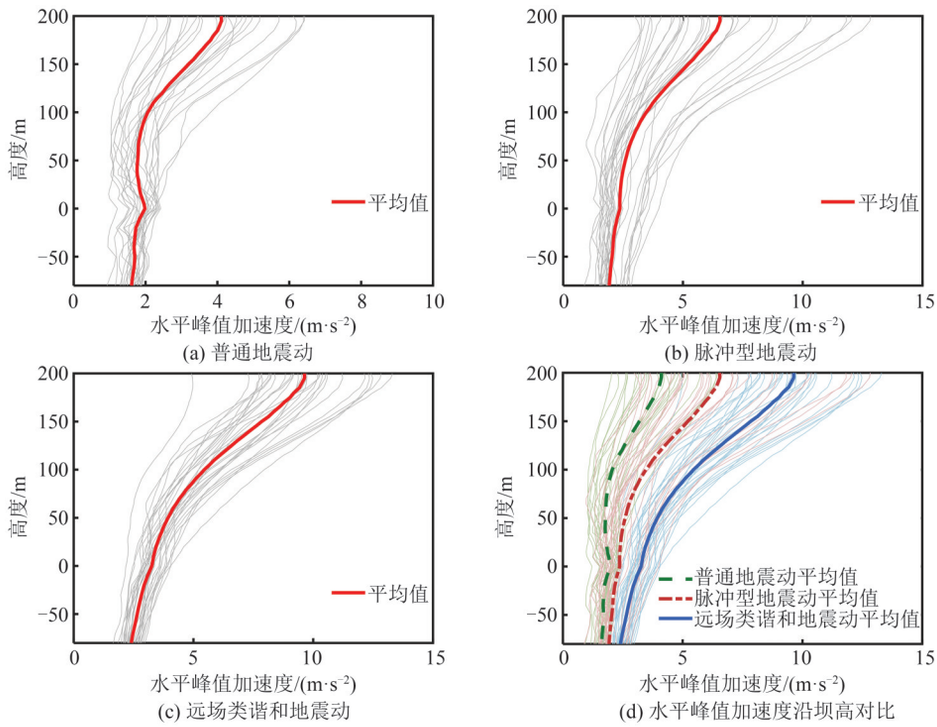


图 7　普通、脉冲型和远场类谐和地震动作用下坝体水平峰值加速度沿坝高的对比

Fig.7　Comparison of peak horizontal acceleration along the dam height for ordinary, pulse-like, and far-field harmonic-like ground motions

动持时较长，多次循环加载的累积效应使动力响应有充分时间发展与放大，因此其引起的坝顶峰值加速度较脉冲型地震动更大。

2.4.2　竖向永久变形

通过对土石坝在3种地震动作用下的永久变形进行数值计算，本文获取了90组变形数据，并从中提取了坝体中轴线上沿坝高分布的竖向永久变形数据用于后续分析。

图8为3种地震动作用下土石坝竖向永久变形云图，该云图基于每组30条地震动记录计算得到的坝体响应平均值绘制而成，用以反映不同类型地震动引发的整体变形趋势与分布规律。如图8所示，土石坝的最大竖向永久变形发生在坝顶，沿坝高自下而上逐渐增大。通过云图对比分析可知，远场类谐和地震动引起的永久变形最大，脉冲型地震动次之，普通地震动最小。

图9展示了坝体中轴线上竖向永久变形沿坝高的分布，可以看出，脉冲型地震动作用下的平均最大竖向永久变形值为1.4 m，远大于普通地震动作用下的1.0 m，这是由于脉冲型地震动短时间内释放大量能量，土体所受剪应力瞬间超过其抗剪强度，塑性变形快速累积。远场类谐和地震动的平均最大竖向永久变形值为1.8 m，除了共振效应导致

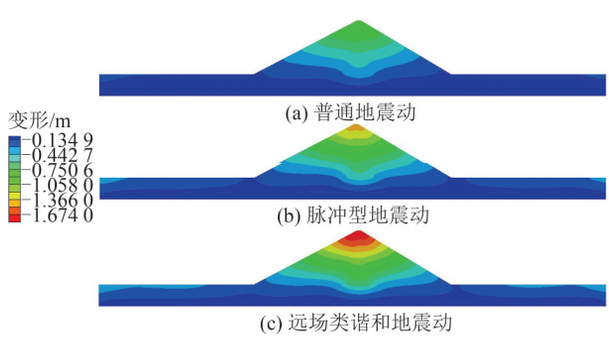


图 8　坝体竖向永久变形云图

Fig.8　Contour maps of vertical permanent deformation of the dam body

动力响应增大的影响外，长持时多循环剪切作用使土体有效应力降低、强度持续衰减，因此竖向永久变形值最大。

3　长周期地震动作用下土石坝易损性分析

3.1　增量动力分析法基本原理

地震易损性定义为结构在给定地震动强度下达到或超越某一性能水平的概率，其数学表达式为

$$F(\mathrm{im})=P\left(\mathrm{LS}\middle|\mathrm{IM}=\mathrm{im}\right) \tag{3}$$

式中：IM(intensity measure)为地震动强度参数，是地震易损性分析的核心输入参数；im为IM的具体

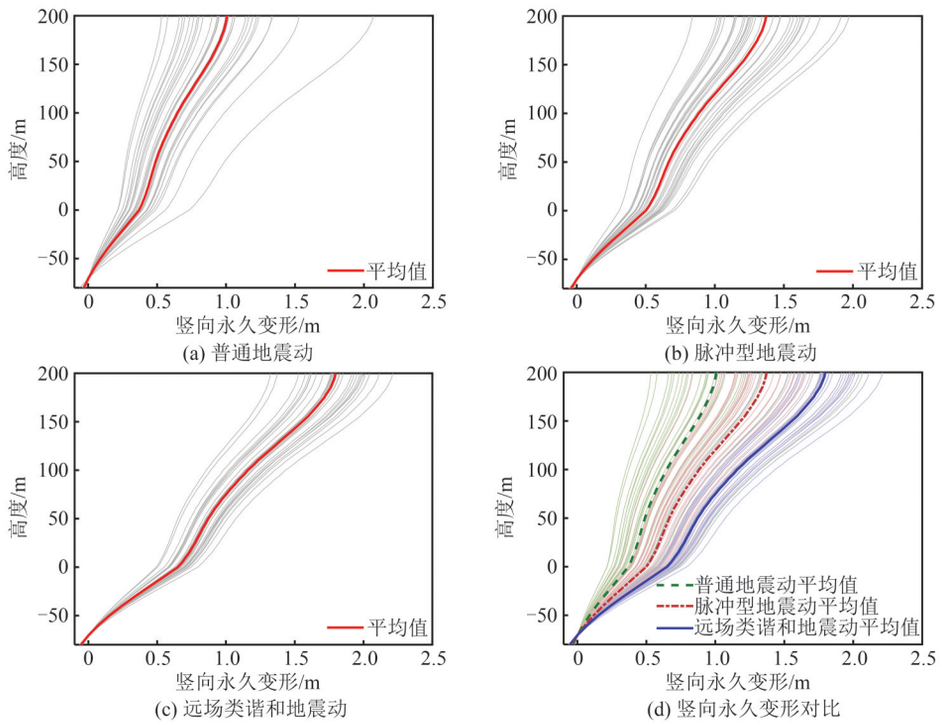


图 9 普通、脉冲型和远场类谐和地震动竖向永久变形沿坝高的对比

Fig.9 Comparison of vertical permanent deformation along the dam height for ordinary, pulse-like, and far-field harmonic-like ground motions

取值;$F(\mathrm{im})$为结构在给定地震动强度下达到或超越某一性能水平的超越概率;LS(limit state)为结构极限状态;$P(\cdot)$为条件概率函数。

本文选择PGA作为地震动强度参数,并采用对数正态分布模型作为易损性函数,其形式如下:

$$P_{\mathrm{f}}\left(C\left|\mathrm{IM}=x\right.\right)=\Phi\left(\frac{\ln x-\ln\theta}{\sigma}\right) \tag{4}$$

式中:P_{f}为在给定IM条件下坝体达到某一性能水平的超越概率;C为置信水平对应的标准正态分布分位数;$\Phi(\cdot)$为标准正态分布的CDF;x为IM的具体取值;θ、σ分别为坝体达到该破坏状态时IM的对数均值、对数标准差。

增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)法的具体步骤如下:对z条地震动记录按比例逐级调幅,分别对坝体进行动力计算,得到z条表征IM与坝体性能水平对应关系的曲线,即IDA曲线。随后通过矩估计法求解式(4)中的参数,计算式如下:

$$\ln\theta=\frac{1}{z}\sum_{i=1}^{z}\ln(\mathrm{IM}_i) \tag{5}$$

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{z-1}\sum_{i=1}^{z}\ln\left(\frac{\mathrm{IM}_i}{\theta}\right)} \tag{6}$$

式中:IM_i为第i条地震动作用下坝体达到某一性能水平时对应的地震动强度。

由于采用了逐级调幅计算,IDA法可更全面地反映不同IM水平下坝体的动力响应规律,能更准确地评估大坝的抗震性能。

3.2 破坏等级划分与性能参数

在土石坝抗震研究中,合理选定量化震害等级的评估指标至关重要。坝体在地震作用下的变形是其主要的破坏形式,变形大小既能反映滑坡、开裂等损伤的严重程度,也可直接反映大坝的整体安全状况与震损程度。因此,将坝体永久变形作为抗震性能的评价指标,具有较强的代表性

在求解地震易损性函数之前,须明确定义工程结构的损伤状态。目前土石坝损伤状态及相应性能水平的划分多依据震害统计资料与高土石坝的极限抗震能力确定。庞锐等[25]综合国内学者基于永久变形的高土石坝极限抗震能力及易损性研究成果,提出坝顶相对震陷率的0.5%、0.8%、1.2%作为200 m级高心墙堆石坝的破坏等级划分标准;王笃波等[26]选取坝顶相对震陷率的0.1%、0.4%、1.0%作为坝高100 m的云鹏心墙堆石坝的破坏等级标准。本文针对200 m级黏土心墙堆石坝,选取坝顶相对震陷率0.4%、0.8%和1.2%作为3个破坏等级的界限,分别对应轻度、中度和重度3种破坏等级。

3.3　地震易损性分析

PGA作为应用最广泛的地震动强度参数，与工程需求参数具有较强的相关性，且易于与现行抗震设计规范衔接。此外，PGA在地震动调幅过程中具有良好的可操作性，便于开展工程结构在不同地震动强度水平下的对比分析，已被多数学者采用[27-29]。综上考虑，本文选取PGA作为IM，并按0.1g步长对所选地震动记录进行逐级调幅。通过静力计算、动力计算与残余变形计算，共获取900组数据，建立了PGA与坝顶相对震陷率关系的IDA曲线簇，如图10所示。采用上文提到的矩估计法，得到各破坏等级对应的θ、σ。表3列出了3种地震动作用下高土石坝达到不同破坏状态对应的θ、σ。对比结果可知：远场类谐和地震动作用下，大坝地震易损性参数的θ最小，表明其达到不同极限破坏状态所需的PGA更低，更易引发坝体破坏。

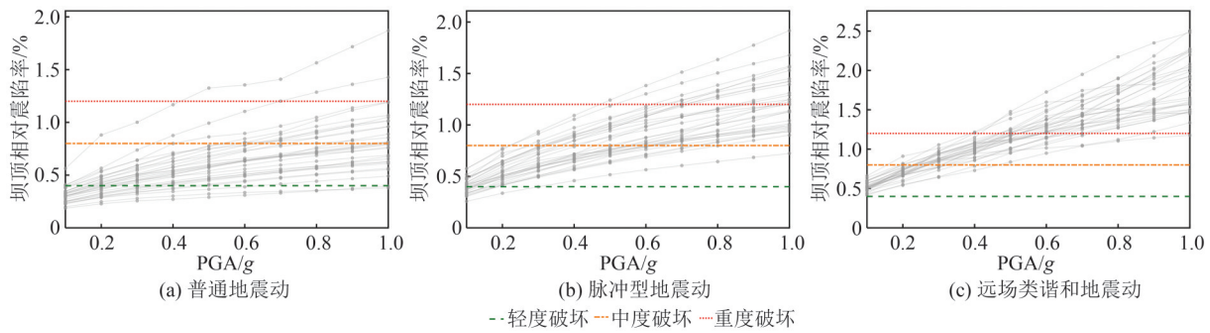


图10　3种地震动作用下大坝的IDA曲线

Fig.10　IDA curves of the dam under three types of ground motions

表3　3种地震动类型下的地震易损性参数

Table 3　Seismic fragility parameters under three types of ground motions

地震动类型	θ			σ		
	轻度破坏	中度破坏	重度破坏	轻度破坏	中度破坏	重度破坏
远场类谐和	0.80	2.70	5.60	0.40	0.25	0.26
脉冲型	0.91	4.70	9.90	0.56	0.39	0.36
普通	2.20	11.30	15.00	0.83	0.80	0.40

将表3中的θ、σ代入式(4)，得到以PGA为自变量、以坝顶相对震陷率为破坏指标的易损性曲线，如图11所示。对比3种地震动作用下的易损性曲线可知，P_f随PGA增大而上升的趋势基本一致，曲线均呈S形。随着破坏等级提高，曲线上升速率逐渐减缓，即P_f达到100%的变化过程更为平缓。从地震易损性概率曲线可得到以下具体结论：

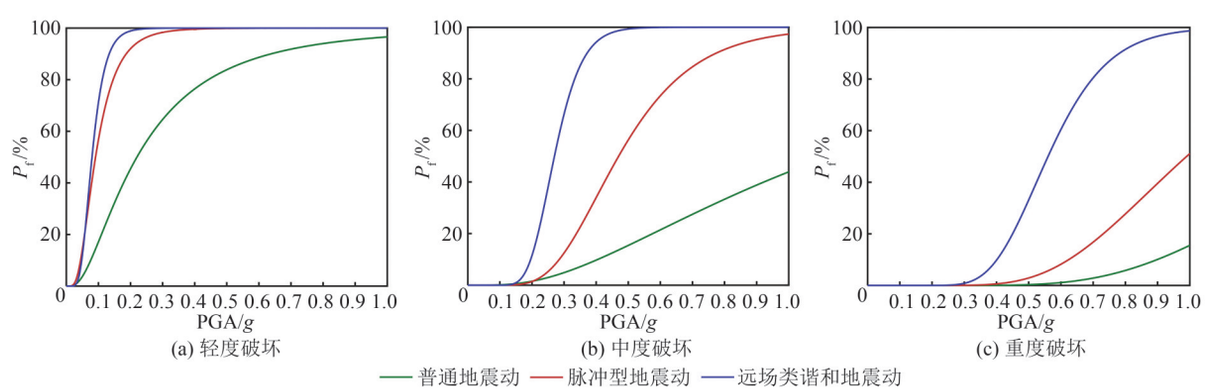


图11　3种类型地震动作用下大坝的地震易损性曲线

Fig.11　Seismic fragility curves of the dam under three types of ground motions

1）当PGA=0.2g时，普通地震动导致轻度破坏的P_f仅为43%，脉冲型地震动为95%，远场类谐和地震动达100%；

2）当PGA=0.4g时，普通地震动不易引发中度破坏，脉冲型地震动作用下引发中度破坏的P_f为33%，远场类谐和地震动引发中度破坏的P_f则高达97%；

3）当PGA=0.6g时，普通与脉冲型地震动下坝体仍不易发生重度破坏，而远场类谐和地震动引发重度破坏的P_f已达61%。

上述结果表明,在相同PGA水平下,长周期地震动(尤其是远场类谐和地震动)对坝体的破坏概率显著高于普通地震动。因此,在土石坝的抗震设计与安全评估中,有必要系统考虑长周期地震动的影响。

4 结论

本文以深厚覆盖层上的200 m级黏土心墙坝为研究对象,从NGA-West2数据库中选取脉冲型长周期地震动、远场类谐和长周期地震动及普通地震动各30条开展非线性动力时程分析,系统研究了坝体在长周期地震动作用下的坝顶水平峰值加速度、竖向永久变形等动力响应特征;结合IDA法,以坝顶相对震陷率为损伤指标开展地震易损性评估,对比了长周期地震动与普通地震动对坝体抗震性能的影响差异,得出以下主要结论:

1)在长周期地震动作用下,坝体动力响应更加剧烈,坝体中轴线上的水平峰值加速度沿坝高逐渐增大,鞭梢效应更为显著。在相同PGA作用下,远场类谐和长周期地震动引发的坝顶峰值加速度平均值达9.64 m/s^2,分别为脉冲型长周期地震动(6.54 m/s^2)的1.47倍与普通地震动(4.11 m/s^2)的2.35倍。

2)长周期地震动引起的坝体竖向永久变形也明显大于普通地震动作用下的数值。其中远场类谐和长周期地震动导致的坝顶平均最大竖向永久变形值达1.8 m,分别为脉冲型长周期地震动(1.4 m)的1.29倍与普通地震动(1.0 m)的1.80倍。

3)在相同PGA作用下,长周期地震动导致坝体失效的P_f更大,其中远场类谐和地震动引起各等级破坏的P_f最高。当PGA=0.4g时,远场类谐和地震动导致坝体发生中度破坏的P_f超过50%,而脉冲型地震动与普通地震动分别约为33%与不足10%;当PGA=0.6g时,远场类谐和地震动下重度破坏的P_f为61%,脉冲型地震动与普通地震动发生重度破坏的P_f均小于10%。

本文分析了长周期地震动对高土石坝动力响应与抗震性能的影响,研究成果可为同类工程的抗震安全评价提供参考。然而,受数据库与筛选条件限制,后续仍需结合更多实测强震记录,扩充涵盖不同震级、断层距与场地条件的长周期地震动样本,以提升研究的普适性。此外,本文采用的坝顶相对震陷率破坏指标虽具有代表性,未来还可结合坝坡位移、心墙水力劈裂等多指标构建综合评价体系,进一步提升震害评估的全面性与准确性。

参考文献:

[1] 战吉艳, 陈国兴, 刘建达, 等. 远场大地震作用下大尺度深软场地的非线性地震效应分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3229-3238.
ZHAN Jiyan, CHEN Guoxing, LIU Jianda, et al. Analysis of nonlinear seismic effects of large-scale deep soft site under far-field large earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3229-3238.

[2] 杨迪雄, 李刚, 程耿东. 近断层脉冲型地震动作用下隔震结构地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(2): 119-124.
YANG Dixiong, LI Gang, CHENG Gengdong. Seismic analysis of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(2): 119-124.

[3] 景铭, 韩庆华, 芦燕, 等. 长周期地震动下大跨空间结构空气弹簧-摩擦摆三维隔震体系振动控制分析[J]. 工程力学, 2023, 40(11): 31-45.
JING Ming, HAN Qinghua, LU Yan, et al. Vibration control analysis of the air spring-FPS three-dimensional isolated structure of large-span spatial structure subjected to long-period ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(11): 31-45.

[4] 张继文. 基于性能的公路梁桥抗震评估中的地震波选择研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
ZHANG Jiwen. Research of real earthquake ground motions selection for performance-based highway girder bridge seismic evaluation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.

[5] 刘琼祥, 唐熙, 周斌, 等. 长周期地震动作用下超高层建筑结构响应研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(21): 29-33.
LIU Qiongxiang, TANG Xi, ZHOU Bin, et al. Research on structural response of super high-rise buildings under long-period ground motion[J]. Building Structure, 2019, 49(21): 29-33.

[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.
ZHANG Sherong, WANG Kuan, WANG Gaohui, et al. Effects of the directivity of near fault ground motions on accumulated damage of concrete gravity dams[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(1): 44-53.

[7] WU Q, LI D Q, LIU Y, et al. Seismic performance of earth dams founded on liquefiable soil layer subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 143: 106623.

[8] 邹德高, 韩慧超, 孔宪京, 等. 近断层脉冲型地震动作用下面板堆石坝的动力响应[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 78-85.
ZOU Degao, HAN Huichao, KONG Xianjing, et al. Seismic response of a concrete-faced rockfill dam to near-fault pulse-like ground motions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(1): 78-85.

[9] 李慧敏, 翟宁欢, 赵梦蝶, 等. 深厚覆盖层高面板堆石坝长周期地震动动力响应[J]. 水电能源科学, 2023, 41(8): 109-112.
LI Huimin, ZHAI Ninghuan, ZHAO Mengdie, et al. Long-period seismic dynamic response of high face rockfill dam with deep overburden[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(8): 109-112.

[10] 李思瀚, 庞锐, 周扬, 等. 近断层地震动作用下高土石坝随机动力分析研究[J]. 振动工程学报, 2025, 38(5): 919-930.
LI Sihan, PANG Rui, ZHOU Yang, et al. Stochastic dynamic analysis of high earth-rock dam under near-fault ground motion[J]. Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(5): 919-930.

[11] DAVOODI M, JAFARI M K, HADIANI N. Seismic response of embankment dams under near-fault and far-field ground motion excitation[J]. Engineering Geology, 2013, 158: 66-76.

[12] SHAHI S K, BAKER J W. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2456-2466.

[13] 梅伟, 顾世祥, 雷宏, 等. 近断层脉冲地震动作用下土石坝动力响应分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(10): 853-860.
MEI Wei, GU Shixiang, LEI Hong, et al. Dynamic response analysis of earth-rock dam subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(10): 853-860.

[14] 颜桂云, 方艺文, 吴应雄, 等. 远场类谐和地震动下大底盘单塔楼隔震结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(18): 86-94.
YAN Guiyun, FANG Yiwen, WU Yingxiong, et al. Shaking table tests on single-tower isolated structures with a large chassis under far-field harmonic-like ground motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(18): 86-94.

[15] 李雪红, 王文科, 吴迪, 等. 长周期地震动的特性分析及界定方法研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(5): 685-692.
LI Xuehong, WANG Wenke, WU Di, et al. The bounded method and characteristics analysis for long-period ground motions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(5): 685-692.

[16] 李英民, 赵晨晓, 谭潜. 基于HHT地震动分量分离的长周期地震动界定方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7): 164-171.
LI Yingmin, ZHAO Chenxiao, TAN Qian. Classification method for long period ground motions based on component decomposition with HHT[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7): 164-171.

[17] SHOJI Y, TANII K, KAMIYAMA M. A study on the duration and amplitude characteristics of earthquake ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7/8/9/10): 505-512.

[18] 周雄雄. 高心墙堆石坝湿化变形与数值模拟方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
ZHOU Xiongxiong. Study on the wetting deformation and the numerical simulation method of HCRFD[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[19] 费康, 刘汉龙. ABAQUS的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 881-890.
FEI Kang, LIU Hanlong. Secondary development of ABAQUS and its application to static and dynamic analyses of earth-rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 881-890.

[20] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究, 1996(2): 143-150.
SHEN Zhujiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(2): 143-150.

[21] 邹德高, 孟凡伟, 孔宪京, 等. 堆石料残余变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 807-812.
ZOU Degao, MENG Fanwei, KONG Xianjing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 807-812.

[22] 王彭煦, 宋文晶. 水布垭面板坝实测沉降分析与土石坝沉降统计预报模型[J]. 水力发电学报, 2009, 28(4): 81-85.
WANG Pengxu, SONG Wenjing. Analysis on the measured settlement and prediction modeling of statistic settlement of Shuibuya CFRD[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(4): 81-85.

[23] 罗博华. 考虑覆盖层材料空间变异性的土石坝动力响应分析及预测[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
LUO Bohua. Dynamic analysis and prediction of dynamic response of earth-rock dam considering spatial variability of overburden material[D]. Xi′an: Xi′an University of Technology, 2021.

[24] 徐斌, 李思瀚, 庞锐. 近断层地震动作用下土石坝加速度分布研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(14): 66-72.
XU Bin, LI Sihan, PANG Rui. Acceleration distribution in earth-rock dams under near-fault ground motion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(14): 66-72.

[25] 庞锐, 孔宪京, 邹德高, 等. 基于MSA法的高心墙堆石坝地震沉降易损性分析[J]. 水利学报, 2017, 48(7): 866-873.
PANG Rui, KONG Xianjing, ZOU Degao, et al. Seismic subsidence fragility analysis of high CRFDs based on MSA[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(7): 866-873.

[26] 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(5): 814-819.
WANG Dubo, LIU Hanlong, YU Tao, et al. Seismic fragility analysis of earth-rockfill dams based on deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 814-819.

[27] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 59-65.
CHEN Shengshui, LI Guoying, FU Zhongzhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 59-65.

[28] 赵剑明, 刘小生, 陈宁, 等. 高心墙堆石坝的极限抗震能力研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 97-102.
ZHAO Jianming, LIU Xiaosheng, CHEN Ning, et al. Research on the maximum anti-seismic capability of high earth core rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 97-102.

[29] 邵磊, 迟世春, 李红军, 等. 高心墙堆石坝极限抗震能力初探[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3827-3832.
SHAO Lei, CHI Shichun, LI Hongjun, et al. Preliminary studies of ultimate aseismic capacity of high core rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3827-3832.

(编辑:陶佳音)