

# 深厚覆盖层上面板坝加速度响应空间分布特性研究

邹德高<sup>1,2</sup>, 唐川<sup>1,2</sup>, 屈永倩<sup>1,2</sup>, 冉从勇<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学海岸与海洋工程全国重点实验室; 2. 大连理工大学建设工程学院;  
3. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司)

**摘要:**为深入认识强震区深厚覆盖层上面板坝的动力效应,采用考虑大坝-覆盖层-地基之间的动力相互作用的三维波动分析方法,开展了深厚覆盖层上面板坝的地震响应分析,并考虑了河谷宽度、覆盖层特性、地震动特性等关键因素的影响。结果表明,岸坡边缘效应导致两岸附近的坝顶区域出现了较大的加速度响应;深厚软弱覆盖层的高频滤波效应削弱了河谷段的坝顶加速度响应;强震作用时土体模量降低和阻尼增大导致河谷段坝顶的加速度响应进一步降低;两岸附近的坝顶局部区域为坝坡抗滑稳定的薄弱部位,建议重点加固。

**关键词:**面板坝;深厚覆盖层;动力响应;抗震设计

**Study on spatial distribution characteristics of acceleration response of CFRD on deep overburden//Zou Degao<sup>1,2</sup>, Tang Chuan<sup>1,2</sup>, Qu Yongqian<sup>1,2</sup>, Ran Congyong<sup>3</sup> (1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology; 2. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology; 3. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited)**

**Abstract:** To gain a deeper understanding of the dynamic effects of concrete-faced rockfill dam (CFRD) on deep overburden in seismically active regions, seismic response analyses of CFRDs on deep overburden were conducted using a three-dimensional wave propagation analysis method that accounts for the dynamic interaction between the dam, overburden, and foundation, considering key factors such as valley width, overburden characteristics, and ground motion properties. The results show that edge effects near the abutments induce relatively large acceleration responses at dam crest regions in the vicinity of both abutments. The high-frequency filtering effect of the deep and soft overburden attenuates the acceleration at the dam crest in the valley section. Under strong seismic loading, the reduction in soil modulus and increase in damping further reduce the acceleration response at the dam crest in the valley dam segment. The local areas near the dam crest close to the abutments are identified as potential weak areas in terms of slope sliding stability, for which targeted reinforcement measures are recommended.

**Key words:** CFRD; deep overburden; dynamic response; seismic design

随着水电开发的持续推进,地质条件优越的理想坝址大多已被开发,目前有多座在建和拟建的重大水利水电工程选址在强震区覆盖层深厚的地基上。相比于混凝土坝,土石坝对覆盖层地基的适用性更好,是覆盖层地基上的首选坝型<sup>[1-2]</sup>。覆盖层地基通常由低模量的冲积或沉积层构成,其动力特性与基岩显著不同,这种差异使得大坝的地震响应机制更加复杂。因此,深入研究深厚覆盖层上土石坝的地震响应特性,对于提高其抗震能力、保障大坝安全至关重要。

目前对土石坝动力效应的认识主要源于岩性地基上的工程实践。近年来,国内外学者对深厚覆盖

层上土石坝的地震响应进行了研究。例如:党发宁等<sup>[3]</sup>依托下坝地工程,采用等效弹塑性模型探讨了土石坝的动力稳定性;何蕴龙等<sup>[4]</sup>利用汶川地震数据进行了冷勒心墙坝的动力反应分析;岑威钧等<sup>[5]</sup>研究了覆盖层上土石坝的极限抗震能力;方火浪等<sup>[6]</sup>采用二维弹塑性有限元法研究了加速度与变形的动力响应特性;杨正权等<sup>[7]</sup>提出了一种考虑覆盖层结构性变化的二维地震反应分析模型;余翔等<sup>[8]</sup>采用不同的地震动输入方法开展了深厚覆盖层上土石坝二维动力响应分析;刘升欢等<sup>[9]</sup>基于二维模型,分析了液化对场地卓越周期及坝体地震响应的影响;Yu等<sup>[10]</sup>采用二维模型研究了水位对覆

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2024YFF1702002);大连理工大学基本科研业务费项目(DUTZD25101)

**作者简介:**邹德高(1973—),男,教授,博士,主要从事岩土地震工程、高坝和核电工程抗震研究。E-mail:zoudegao@dlut.edu.cn

**通信作者:**屈永倩(1990—),男,副教授,博士,主要从事高土石坝和核电工程抗震研究。E-mail:quyongqian@dlut.edu.cn

盖层上土石坝地震响应的影响;Wang 等<sup>[11-12]</sup>采用二维分析方法研究了覆盖层对地震动放大效应的影响;王飞等<sup>[13]</sup>开展了不同地震动入射方向下覆盖层上土石坝的二维动力分析。目前的研究主要关注分析方法以及某个工程的动力响应,尽管三维分析方法逐渐普及,但对于深厚覆盖层上面板坝地震响应的三维空间分布特性及影响机制尚缺乏系统的深入分析。

针对上述问题,本文采用考虑大坝-覆盖层-地基相互作用的三维波动分析方法,对深厚覆盖层上的面板坝开展了系统的地震响应分析,考虑了河谷宽度、覆盖层厚度与模量、地震动强度及频谱特性等关键因素的影响,阐明了深厚覆盖层上面板坝加速度响应和坝坡稳定的空间分布规律,以期提升深厚覆盖层上面板坝动力效应的认识水平,为抗震设计和加固优化提供支撑。

## 1 模型与参数

### 1.1 研究方案

本文采用面板坝开展分析,坝高 140 m,坝顶宽度 12 m,上游坝坡 1 : 1.65,下游坝坡 1 : 1.75;河谷左岸和右岸坡度分别为 1 : 1.5 和 1 : 1.0。为系统研究河谷宽度及覆盖层特性对大坝地震响应的影响,本文考虑以下关键因素:河谷宽度  $L$  (工况 1~6)、覆盖层厚度  $D$  (工况 6~9)、覆盖层剪切模量系数  $k_2$  (工况 9~11)、地震峰值加速度 PGA (工况 9、12、13) 以及地震动频谱特性 (工况 9、14、15)。各工况的具体设置见表 1。

表 1 计算工况设置

工况	地震动	$L/m$	$D/m$	$k_2$	PGA/(m/s <sup>2</sup> )
1	茨哈峡	63	0		4
2	茨哈峡	125	0		4
3	茨哈峡	250	0		4
4	茨哈峡	500	0		4
5	茨哈峡	1000	0		4
6	茨哈峡	2000	0		4
7	茨哈峡	2000	100	770	4
8	茨哈峡	2000	300	770	4
9	茨哈峡	2000	600	770	4
10	茨哈峡	2000	600	385	4
11	茨哈峡	2000	600	1540	4
12	茨哈峡	2000	600	770	2
13	茨哈峡	2000	600	770	6
14	大石峡	2000	600	770	4
15	古水	2000	600	770	4

### 1.2 有限元模型

图 1 为覆盖层厚度为 600 m 时的三维有限元模型,共有 1719875 个单元和 1751514 个节点。模型上下游方向边界距坡脚均不小于覆盖层厚度的 3 倍,左右岸方向基岩截取宽度为  $1.2H$  ( $H$  为坝

高),竖向截取至覆盖层以下基岩,厚度为  $1.2H$ 。坝体网格高度为  $H/25$ ,覆盖层网格高度不超过最大剪切波速数值的  $1/40$ 。模型的计算域及网格尺寸均满足规范<sup>[14]</sup>要求。在三维有限元数值分析中,大坝的施工与蓄水过程共分为 51 个荷载步,前 26 步模拟分层填筑过程,后 25 步则模拟从建基面开始蓄水至正常蓄水位的过程。

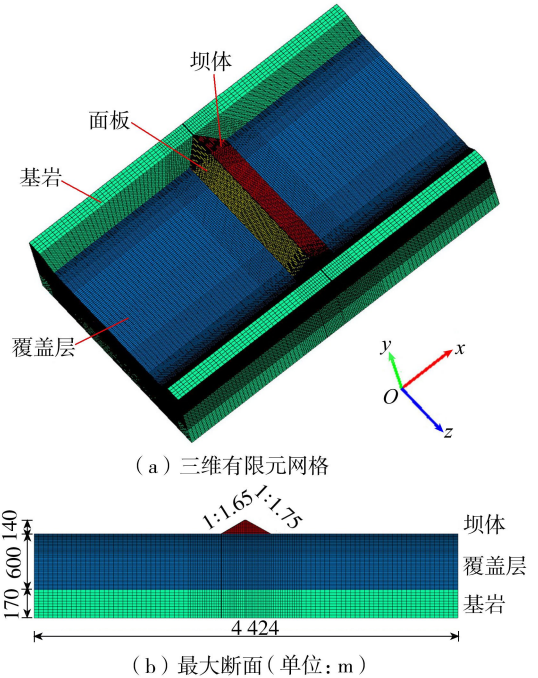


图 1 数值计算有限元网格

### 1.3 本构模型与参数

堆石体和覆盖层的力学参数见表 2,静力计算采用邓肯张  $E-\mu$  和  $E-B$  模型,动力计算采用等价线性模型。基岩和混凝土面板及防渗墙采用线弹性模型,基岩的密度为  $2680 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $15 \text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.3$ ;混凝土的密度为  $2500 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $30 \text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.167$ 。面板与堆石体之间设置 Goodman 接触面单元,采用双曲线接触面模型模拟接触特性,模型参数包括:剪切模量系数为  $4800$ ,剪切模量指数为  $0.56$ ,接触面剪应力破坏比为  $0.74$ ,接触面外摩擦角为  $36.6^\circ$ ,黏聚力为  $0 \text{ kPa}$ 。

### 1.4 地震动参数

地震动输入采用基于人工边界与等效荷载的波动分析方法<sup>[15]</sup>,充分考虑了大坝-覆盖层-地基之间的动力相互作用。所选用的地震波为根据茨哈峡、大石峡和古水 3 个工程的场地谱合成的人工地震波。在地震动输入中,竖向加速度峰值取为顺河向和坝轴向峰值的  $2/3$ 。加速度峰值归一化后加速度时程如图 2 所示,对应的加速度放大倍数谱与傅里叶幅值谱见图 3。从加速度放大倍数谱可见,茨哈峡和大石峡工程的场地谱最大动力放大系数  $\beta_{\max}$  约

表 2 堆石体和覆盖层力学参数

区域	静力计算参数										动力计算参数				
	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$k$	$n$	$\varphi_0/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$	$r_f$	$k_b$	$m$	$G$	$F$	$D$	$k_1$	$k_2$	$n'$	$\lambda_{\text{max}}$
堆石体	2420	1150	0.32	52.0	8.0	0.77	545	0.19				30.0	2190	0.36	0.20
覆盖层	2150	385	0.44	40.5	5.0	0.72			0.43	0.11	1.9	11.5	770	0.64	0.26

注： $\rho$ 为密度； $k$ 、 $n$ 为切线变形模量相关材料常数； $\varphi_0$ 为土体内摩擦角； $\Delta\varphi$ 为内摩擦角随围压的变化量； $r_f$ 为土体偏应力破坏比； $k_b$ 、 $m$ 为体积模量相关材料常数； $G$ 、 $F$ 、 $D$ 为切线泊松比相关材料常数； $k_1$ 为动剪模量系数； $n'$ 为动剪模量指数； $\lambda_{\text{max}}$ 为最大阻尼比。

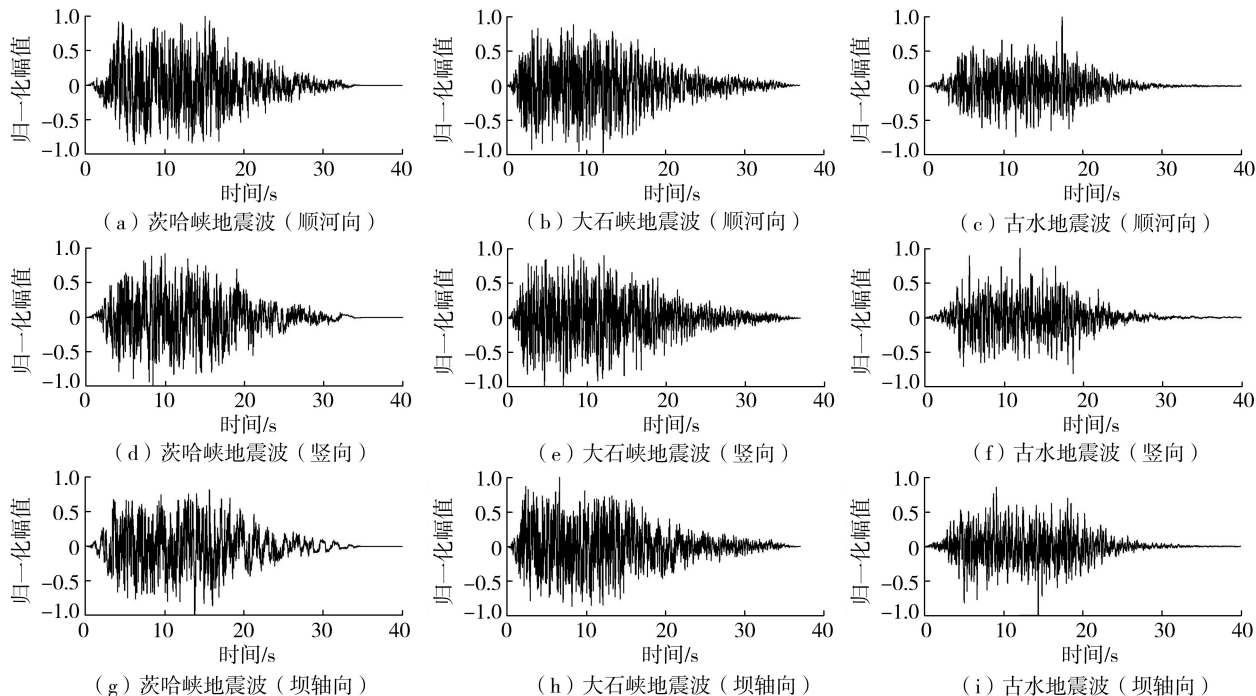


图 2 不同地震波归一化的加速度时程曲线

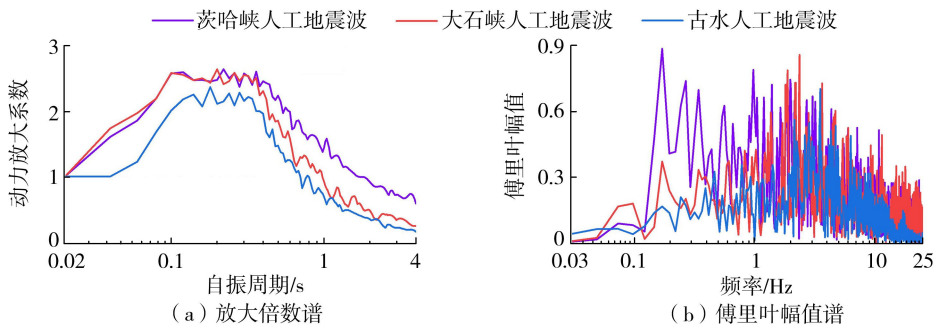


图 3 不同地震波的加速度放大倍数谱和傅里叶幅值谱

为 2.5, 而古水工程约为 2.0; 在特征周期  $T_g$  方面, 茨哈峡地震波为 0.4 s, 大石峡和古水地震波均为 0.35 s。此外, 傅里叶幅值谱显示, 茨哈峡、大石峡、古水地震波的卓越频率分别为 0.17、2.37、3.52 Hz。按低频成分含量由高到低排序, 依次为茨哈峡地震波、大石峡地震波和古水地震波。

## 2 面板坝的动力效应空间分布特性

### 2.1 河谷宽度的影响

图 4 为不同河谷宽度条件下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布, 图中两条虚线之间为河谷段。由图 4 可知, 河谷宽度对加速度峰值的分布形态具

有决定性影响。当河谷较窄 ( $L \leq 250 \text{ m}$ ) 时, 加速度峰值呈显著的单峰分布, 最大值位于河谷中部, 并向两岸递减<sup>[16]</sup>。随着河谷宽度增加, 加速度峰值由河谷的单峰分布逐渐转变为靠近两岸的双峰分布, 同时河谷中部形成一个相对较高的波动平台。这种随着河谷宽度变化而表现出的加速度响应复杂化现象, 源于河谷地形效应, 即边缘效应<sup>[17-19]</sup>。该效应最早由 Kawase<sup>[17]</sup> 在分析 1995 年日本 Hyogo-ken Nambu 地震在 Kobe 市的震害时提出, 并将其定义为“盆地边缘效应”。后续研究也利用这一理论对 1994 年美国 Northridge 地震<sup>[18]</sup> 和 1995 年土耳其 Dinar 地震<sup>[19]</sup> 的震害进行了解释。该理论的物理机

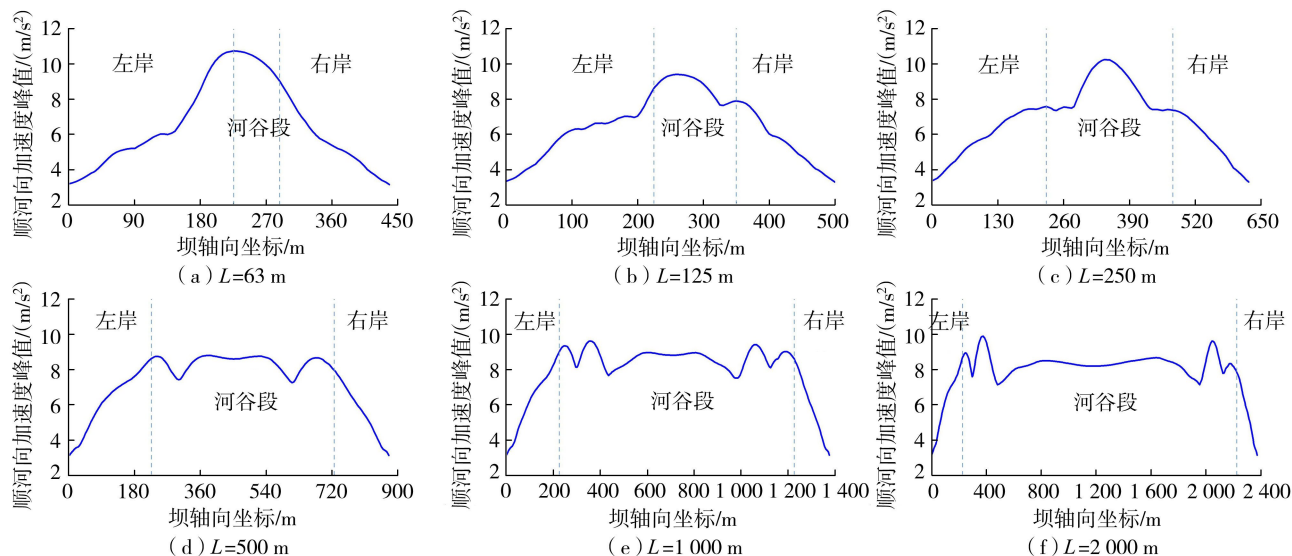


图4 不同河谷宽度条件下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布

制如下:由于两岸基岩波速远高于坝体,地震波率先抵达岸坡,在岸坡-坝顶交界处因振动不连续激发出衍射波;衍射波与经基岩延迟传到坝顶的体波相遇,发生相长干涉,导致靠近河谷边缘的局部地震响应放大。窄河谷中,两侧衍射面波与直达体波几乎同时汇聚于河谷中心,因而中心处放大最为显著,这是边缘效应在河谷尺度较小时的一种集中体现。

## 2.2 覆盖层厚度的影响

图5为覆盖层厚度变化时坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布情况。由图5可见,河谷段坝顶加速度峰值曲线均呈显著起伏,且起伏形态随覆盖层厚度改变。总体上,加速度峰值在岸坡与河谷段交界处附近较大,而在河谷中部较小,这一空间分布特征在不同覆盖层厚度下均保持一致。此外,随着覆盖层厚度增加,坝顶加速度峰值呈下降趋势,表明覆盖层能够有效减弱坝顶地震动响应,具有系统性减震作用。这一规律与Peng等<sup>[20]</sup>基于北京地区地下土层三维剪切波速模型的计算所得结论一致,即深层场地的放大系数普遍小于浅层场地。

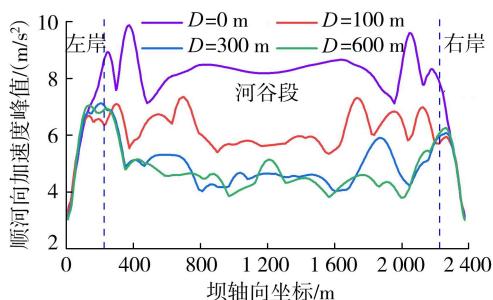


图5 不同覆盖层厚度条件下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布

为进一步量化覆盖层厚度对面板坝动力响应的调控作用,以坝顶河谷段中点及其覆盖层-基岩交界

面投影的傅里叶幅值比(RFRS,即传递函数)为指标,提取系统基频。图6给出了不同覆盖层厚度下该点的顺河向加速度传递函数曲线。结果显示,随着覆盖层厚度增加,面板坝-覆盖层系统的最大RFRS值逐渐向低频方向移动;无覆盖层时,最大RFRS位于0.71 Hz,随着覆盖层增厚,最大RFRS依次移至0.59、0.32、0.24 Hz,即系统基频从0.71 Hz下降至0.24 Hz。这表明若输入地震动以高频为主,则覆盖层的滤波作用越强,有助于抗震;若地震动含长周期成分越高,则可能引发共振,导致坝顶加速度显著放大,甚至诱发液化或失稳。此外,当覆盖层厚度达到300 m和600 m时,两者在频率高于0.4 Hz时的传递函数曲线基本重合。由此可见,当覆盖层厚度超过一定值后,影响面板坝-覆盖层系统的地震响应差异的主要因素为地震动的低频成分。

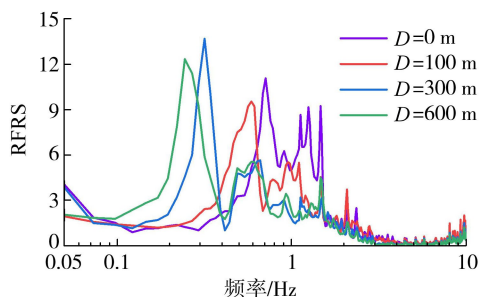


图6 不同覆盖层厚度下河谷段中点顺河向加速度响应的传递函数曲线

## 2.3 覆盖层模量的影响

图7为不同覆盖层剪切模量下的坝顶顺河向加速度峰值响应沿坝轴线的分布,均表现出两岸附近大、河谷段小的宏观规律。当剪切模量系数降低时,坝顶顺河向加速度峰值整体降低,且河谷段与两岸段的加速度峰值差异进一步扩大。图8为不同覆盖

层剪切模量下河谷段中点顺河向加速度传递函数曲线。可见,随着覆盖层剪切模量的减小,面板坝-覆盖层系统的最大 RFRS 的对应的频率依次为 0.34、0.24、0.15 Hz,表明系统的基频随覆盖层剪切模量的减小而降低。这些现象说明,覆盖层剪切模量的降低导致大坝-覆盖层系统的基频降低,覆盖层对地震动的滤波作用增强。这与已有研究结论<sup>[21]</sup>一致,即覆盖层越软,滤波作用越显著,结构的加速度响应越小。

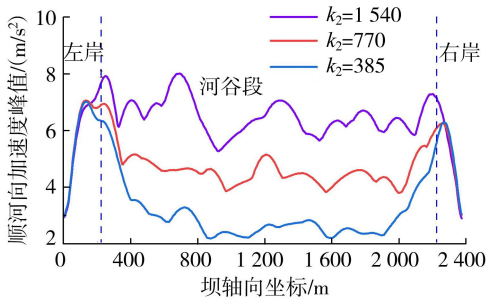


图7 不同覆盖层剪切模量系数下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布

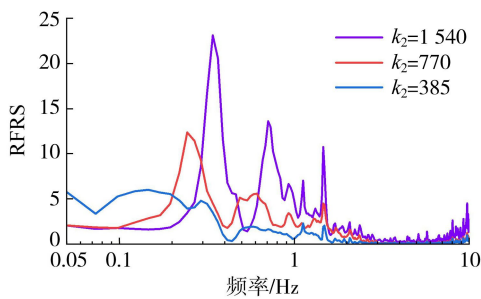


图8 不同覆盖层剪切模量系数下河谷段中点顺河向加速度响应的传递函数曲线

## 2.4 输入地震动强度的影响

图9为不同输入地震动强度下的坝顶顺河向加速度放大系数沿坝轴线的分布,均表现出两岸附近大、河谷段小的宏观规律。同时,随着输入地震动强度增大,坝顶的顺河向加速度放大系数整体呈下降趋势。已有坝体地震观测表明,坝顶PGA放大系数随坝基PGA的增大而减小<sup>[22]</sup>。从土体动力特性变化的角度看,当地震动强度增大时,坝体和覆盖层的

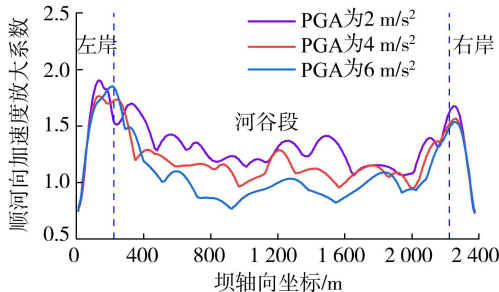


图9 不同输入地震动强度下坝顶顺河向加速度放大系数沿坝轴线的分布

动剪应变随之增大,导致材料剪切模量降低、阻尼增大,从而使面板坝-覆盖层系统整体刚度下降、耗能能力增强,动力效应因此减弱。例如,基于Aratozawa坝的长期地震监测记录显示,在Iwate-Miyagi地震中,坝体上部剪切模量从400 MPa降至50 MPa(对应最大剪应变 $10^{-3}$ ),坝体下部剪切模量则由800 MPa降至100 MPa<sup>[23]</sup>。

## 2.5 地震动频谱特性的影响

图10为不同人工地震波激励下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布,均表现出两岸附近大、河谷段小的宏观规律。随着地震动低频成分含量的增加,坝顶加速度响应增大,表明低频分量的占比是决定深厚覆盖层上面板坝动力响应的关键因素。此外,在低频成分占优的茨哈峡地震波激励下,加速度峰值的最大值更靠近河谷,而大石峡和古水地震波激励下的加速度峰值的最大值则更靠近岸坡。这表明输入地震动频谱的改变,不仅会改变坝顶响应的强度,而且会改变面波与体波的干涉位置。

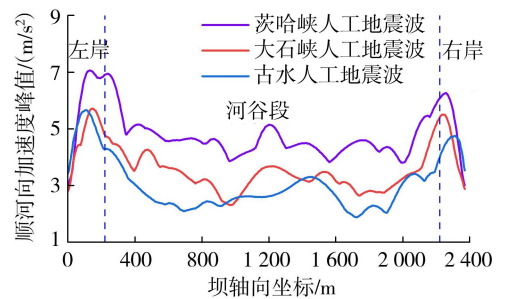


图10 不同人工地震波激励下坝顶顺河向加速度峰值沿坝轴线的分布

## 3 深厚覆盖层上面板坝坝坡稳定及抗震加固

### 3.1 坝坡动力稳定的空间分布特性

采用有限元动力时程稳定分析方法<sup>[24]</sup>对1.2节所示的面板坝开展坝坡稳定分析,分别选取3个典型位置,即河谷中部覆盖层厚600 m的断面、靠近两岸区域的覆盖层厚100 m的断面、两岸的无覆盖层断面。下游坝坡的稳定分析结果见表3。由前述分析可知,深厚覆盖层上面板坝的动力响应表现为两岸附近大、河谷段小的空间分布规律,因此坝坡稳定性表现出同样的规律,即两岸附近无覆盖层位置的安全系数最小(0.62),累积滑移量最大(13.2 cm);河谷段安全系数较大(1.24),覆盖层厚度为100 m的中间位置的坝坡稳定性居中,安全系数为0.93,累积滑移量为0.2 cm。两岸附近无覆盖层位置对应的最小安全系数的滑弧位置、安全系数时程和累积滑移量时程见图11~13。

表 3 下游坝坡稳定分析结果

工况	位置	D/m	最小安全系数	累积滑移量/cm
1	河谷中部	600	1.24	
2	近岸坡区	100	0.93	0.2
3	岸坡段		0.62	13.2



图 11 岸坡段最小安全系数对应的滑弧位置

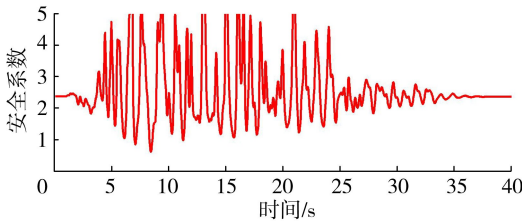


图 12 岸坡段地震过程中的安全系数时程

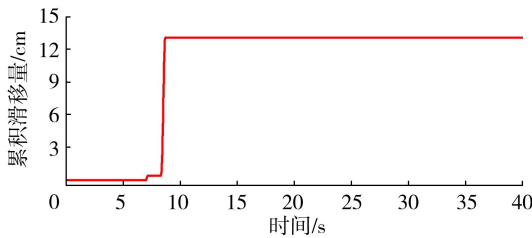


图 13 岸坡段的累积滑移量时程

### 3.2 坝坡的重点抗震加固区

前述研究表明,宽河谷深厚覆盖层上高面板坝的加速度响应受覆盖层厚度、覆盖层模量、地震动强度、地震动频谱特性的影响,但加速度空间分布均表现出两岸附近大、河谷段小的规律,两岸附近的坝顶区域为地震抗滑稳定的不利位置。因此,建议将两岸附近的 4/5 坝高以上区域作为坝坡抗滑稳定的重点加固区,可采用钉结护面板、加筋、放缓坝坡和抬高高压重等措施进行局部加固<sup>[25]</sup>。

## 4 结论

**a.** 河谷的边缘效应导致大坝在靠近两岸的局部区域出现较大的地震响应。当河谷较窄时,左右两岸边缘效应导致的局部响应较大区域重合于河谷中部,表现为河谷中部加速度响应最大;当河谷较宽时,加速度响应呈现两岸附近大、河谷中部小的空间分布规律。

**b.** 随覆盖层厚度的增加或覆盖层模量的降低,大坝覆盖层的基频降低,滤波效应增大,河谷段的坝顶加速度响应减弱。当地震动强度增大,堆石体与覆盖层的模量随之降低且阻尼增大,同样导致河

谷段的加速度响应减弱,因此对于强震区深厚软弱覆盖层上的面板坝工程,两岸附近与河谷中部的坝顶加速度响应的差别更为显著。

**c.** 深厚覆盖层上的面板坝工程的基频较低,地震动的低频能量越丰富,坝顶加速度响应越大。因此,对于深厚软弱覆盖层上的面板坝工程,抗震分析时需重点考虑低频成分丰富的地震动。

**d.** 宽河谷深厚覆盖层上高面板坝的加速度响应表现为两岸附近大、河谷中部小的空间分布规律,两岸附近的坝顶区域为抗滑稳定的不利位置,建议对两岸附近的 4/5 坝高以上区域进行重点加固。

### 参考文献:

[ 1 ] 邹德高,屈永倩,孔宪京,等.深厚覆盖层上土石坝防渗墙损伤开裂精细化分析及防渗功能评价[J].水利学报,2024,55(2):147-157. (Zou Degao, Qu Yongqian, Kong Xianjing, et al. Refined failure analysis and functional evaluation of cutoff walls of rockfill dams on deep overburden [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 ( 2 ): 147-157. ( in Chinese ))

[ 2 ] 马春辉,侯媛媛,杨杰,等.基于RUN-XGBoost算法的土石坝渗流预测模型[J].水利水电科技进展,2024,44(2):72-78. (Ma Chunhui, Hou Yuanyuan, Yang Jie, et al. Seepage prediction model of earth-rockfill dams based on RUN-XGBoost algorithm [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 ( 2 ): 72-78. ( in Chinese ))

[ 3 ] 党发宁,胡再强,谢定义.深厚覆盖层上高土石坝的动力稳定分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2041-2047. (Dang Faning, Hu Zaiqiang, Xie Dingyi. Dynamic stability analysis of high earth-rockfill dam on thick moraine cover foundation [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 ( 12 ): 2041-2047. ( in Chinese ))

[ 4 ] 何蕴龙,刘俊林,熊堃.汶川地震冷勒大坝动力响应规律分析[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):157-164. (He Yunlong, Liu Junlin, Xiong Kun. Seismic response of Yele Dam during Wenchuan Earthquake [ J ]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41 ( 3 ): 157-164. ( in Chinese ))

[ 5 ] 岑威钧,张自齐,周涛,等.覆盖层上高面板堆石坝的极限抗震能力[J].水利水电科技进展,2016,36(2):1-5. (Cen Weijun, Zhang Ziqi, Zhou Tao, et al. Maximum seismic capacity of a high concrete-face rockfill dam on alluvium deposit [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 ( 2 ): 1-5. ( in Chinese ))

[ 6 ] 方火浪,张轶群,郭婧,等.深厚砂质覆盖层土坝的弹塑性地震反应分析[J].岩土力学,2013,34(11):3197-3204. (Fang Huolang, Zhang Yiqun, Guo Jing, et al.

- Elastoplastic seismic response analysis of earth dam on deep sandy alluviums [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(11): 3197-3204. (in Chinese)
- [7] 杨正权, 刘小生, 赵剑明, 等. 考虑深厚覆盖层结构特性的场地地震反应分析研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(1): 175-182. (Yang Zhengquan, Liu Xiaosheng, Zhao Jianming, et al. Study on ground seismic response analysis considering structural characteristics of deep overburden layer[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(1): 175-182. (in Chinese))
- [8] 余翔, 孔宪京, 邹德高, 等. 覆盖层上土石坝非线性动力响应分析的地震波动输入方法[J]. *岩土力学*, 2018, 39(5): 1858-1866. (Yu Xiang, Kong Xianjing, Zou Degao, et al. Seismic wave input method for nonlinear dynamic analysis of earth dam built on overburden[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(5): 1858-1866. (in Chinese))
- [9] 刘升欢, 宋志强, 王飞, 等. 深厚覆盖层液化对场地卓越周期及土石坝地震响应影响研究[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(4): 721-729. (Liu Shenghuan, Song Zhiqiang, Wang Fei, et al. Influence of liquefaction of deep overburden on the site predominant period and seismic response of the earth-rock dam[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(4): 721-729. (in Chinese))
- [10] Yu Xiang, Lai Yuanping, Qu Yongqian, et al. Study on seismic wave propagation regularity and dam-foundation interaction characteristics of earth-rock dam on deep overburden[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 164: 105803.
- [11] Wang Fei, Song Zhiqiang, Liu Yunhe, et al. Seismic wave input method for high earth dams considering the transmission amplification effect of the bedrock-overburden interface[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 130: 103927.
- [12] Wang Fei, Song Zhiqiang, Liu Yunhe, et al. Construction of the spatially varying ground motion field of a bedrock-overburden layer site and its influence on the seismic response of earth-rock dams[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(18): 1914.
- [13] 王飞, 宋志强, 刘云贺, 等. 基于设计地震动的斜入射波时程确定方法对土石坝地震响应的影响[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(19): 80-88. (Wang Fei, Song Zhiqiang, Liu Yunhe, et al. Effects of oblique incident wave time history determination method based on design ground motion on seismic response of earth-rock dam[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(19): 80-88. (in Chinese))
- [14] NB/T 11559. 2—2024 水电工程有限元数值分析导则第2部分:土石坝[S].
- [15] 孔宪京, 周晨光, 邹德高, 等. 高土石坝-地基动力相互作用的影响研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(12): 1417-1432. (Kong Xianjing, Zhou Chenguang, Zou Degao, et al. Influence of the dynamic interaction between high rockfill dam and foundation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(12): 1417-1432. (in Chinese))
- [16] 周晖, 李俊杰, 康飞. 面板堆石坝坝顶加速度沿坝轴线分布规律[J]. *岩土力学*, 2010, 31(5): 1534-1538. (Zhou Hui, Li Junjie, Kang Fei. Research on distribution of horizontal acceleration along axis of concrete-faced rockfill dam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1534-1538. (in Chinese))
- [17] Kawase H. The cause of the damage belt in Kobe: "the basin-edge effect," constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves[J]. *Seismological Research Letters*, 1996, 67(5): 25-34.
- [18] Graves R W, Pitarka A, Somerville P G. Ground-motion amplification in the Santa Monica area: effects of shallow basin-edge structure[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, 88(5): 1224-1242.
- [19] Bakır B S, Özkan M Y, Cılız S. Effects of basin edge on the distribution of damage in 1995 Dinar, Turkey earthquake[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(4): 335-345.
- [20] Peng Yanju, Wang Zhenming, Woolery E W, et al. Ground-motion site effect in the Beijing metropolitan area[J]. *Engineering Geology*, 2020, 266: 105395.
- [21] 李小军, 程晓芳, 荣棉水, 等. 基于强震动记录统计分析的不同场地分类方法比较[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(4): 677-684. (Li Xiaojun, Cheng Xiaofang, Rong Mianshui, et al. Comparison of different site classification methods based on statistical analysis of strong ground motion records[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(4): 677-684. (in Chinese))
- [22] Park D, Kishida T. Seismic response of embankment dams based on recorded strong-motion data in Japan[J]. *Earthquake Spectra*, 2019, 35(2): 955-976.
- [23] Mogi H, Kawakami H. NIOM analysis of earthquake observation records in a rockfill dam[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2022, 112(2): 1080-1100.
- [24] 徐斌, 邹德高, 孔宪京, 等. 高土石坝坝坡地震稳定分析研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(1): 139-144. (Xu Bin, Zou Degao, Kong Xianjing, et al. Seismic stability of slopes of high rockfill dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(1): 139-144. (in Chinese))
- [25] 邹德高, 周扬, 孔宪京, 等. 高土石坝加速度响应的三维有限元研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(增刊1): 656-661. (Zou Degao, Zhou Yang, Kong Xianjing, et al. 3D FEM study of acceleration response of high earth-rock dams[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 656-661. (in Chinese))

(收稿日期: 2026-01-08 编辑: 俞云利)