

文章编号:1672-3031(2017)04-0272-06

深厚覆盖层中地震动传播规律离心模拟试验研究

张雪东, 魏迎奇, 张紫涛, 梁建辉

(中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 深厚覆盖层上高土石坝抗震问题一直是土石坝抗震研究领域的热点之一, 而地震动在覆盖层中传播规律研究是其重要组成部分, 为揭示地震在覆盖层中的传播机理, 本文开展了离心机振动台试验, 分别研究了输入加速度峰值、土层特性对于地震动在其中传播规律的影响。研究发现, 地震动经覆盖层传播后, 低频成分被放大, 高频被抑制, 且随着输入地震动峰值增加, 地震动加速度峰值放大倍数逐渐减小, 而对于相同的地震动输入, 加速度峰值放大倍数随着土体剪切刚度的增加而逐渐变大。

关键词: 深厚覆盖层; 地震动; 动力离心模型试验; 传播规律

中图分类号: TU4

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2017.04.005

1 研究背景

高土石坝在强震作用下的抗震安全性, 一直是业界十分关注的问题, 特别是“5.12”汶川大地震以来, 对修建在高地震烈度区的新建工程与已建工程的大坝抗震安全性受到了越来越多的重视^[1]。我国在深厚覆盖层上已经建设了大量的土石坝, 坝型包括土质心墙堆石坝、混凝土面板堆石坝和沥青混凝土心墙堆石坝等, 如小浪底、瀑布沟、长河坝等^[2-5]。目前我国水工建筑物抗震设计规范以拟静力法进行土石坝动力抗滑稳定验算为主, 其中如何准确合理地确定地震惯性荷载沿坝体高程的分布是关键。目前规范规定的地震惯性力分布系数仅适合百米级坐落在基岩上的土石坝, 对坐落在超深厚覆盖层上的百米级土石坝是否适合值得商榷。深厚覆盖层地基的存在改变了坝体振动特性, 也会影响作用于坝体和坝基的加速度响应分布, 进而增加了坝体和坝基的抗滑稳定性验算的不确定性。由于缺乏类似工程实例和有关地震实测资料, 现有理论分析手段存在局限性和缺乏验证, 因此采用物理模型和数值模拟相结合是研究上述关键问题的有效手段。振动台试验是土石坝抗震研究中常用的物理模拟手段, 由于岩土材料物理力学特性与其应力状态相关, 常规振动台试验在揭示土石坝真实的动力反应特征和振动破坏机理方面有其局限性。20世纪80年代以来, 国际岩土工程界对采用离心机研究岩土结构动力特性问题产生了极大的兴趣, 并陆续开展了相关研究工作^[6], 在此背景下, 为揭示地震动传播机理, 本文开展了动力离心模型试验, 分别研究了输入加速度峰值、土层特性对于地震动在其中传播规律的影响。

2 试验方案

2.1 传感器布置方案 以覆盖层中具有代表性的粗粒、细粒土层为原型进行缩尺制作水平均质土层模型(模型A、B), 模型传感器布置见图1, 每个模型由下至上布置加速度传感器A0—A6, 测量模型中不同位置处的振动加速度, 模型表面中心部位布置激光位移传感器, 用于测量每一次振动过程中

收稿日期: 2016-06-15

基金项目: 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(GE0145B102017)

作者简介: 张雪东(1980-), 男, 河北人, 博士, 高级工程师, 主要从事非饱和土力学、动力离心模型试验研究。

E-mail: zxerdo@126.com

模型的沉降量；模型制作完成后，试验拟采用场地波，分别在 $30g$ 、 $50g$ 的离心力条件下，采用 3 种振动幅值 ($0.18g$ 、 $0.36g$ 、 $0.53g$) 进行振动试验，研究在不同土层厚度 (不同 g 值)、不同地震动幅值条件下的地震动传播规律。

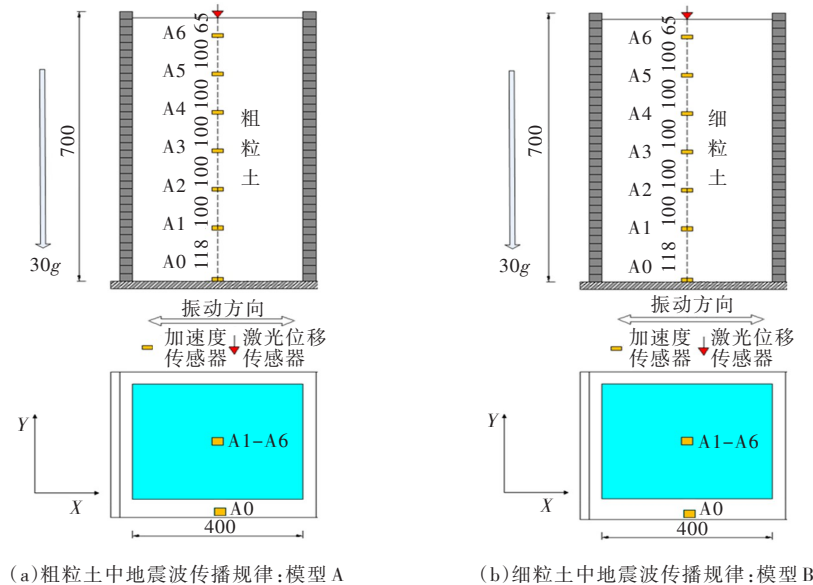


图1 覆盖层中地震波传播规律模型布置

2.2 模型制备 试验中粗粒土模型 (模型 A) 拟采用 M 工程覆盖层第④层中取得的土料缩尺后进行模拟，由于除第④层外其它各层取得的土料数量都十分有限，因此细粒土模型 (模型 B) 拟以③-3 层中的土料为原型进行缩尺，使用其它工程中材料性质相近的土料配置完成，粗、细两种土料的缩尺计算结果见图 2 (因为两种土中的细颗粒，即 $<5\text{ mm}$ 的土粒含量都大于 20%，为保障土的工程性质不发生改变，缩尺计算采用了等量替代法)。

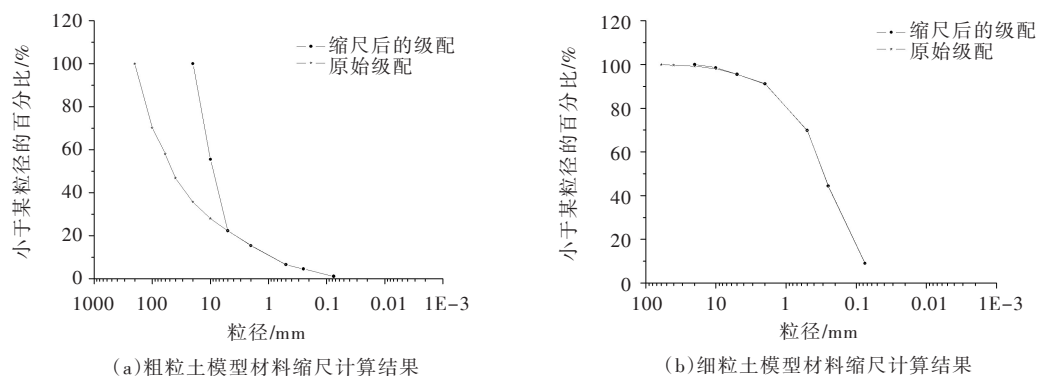


图2 土层材料缩尺结果

模型 A、B 都是饱和地基，饱和流体选用甲基纤维素溶液。模型制样时每 5 cm 为一填筑层，填筑同时在预定位置埋入各种传感器。通过控制干密度来制备模型，粗粒土模型的控制干密度为 2.21 g/cm^3 ，细粒土模型的控制干密度为 1.75 g/cm^3 。

2.3 输入地震动 试验中场地为均匀饱和场地，初步拟定选择场地波作为自由场地动力试验的激励。场地波以三种峰值加速度 ($0.18g$ 、 $0.36g$ 、 $0.53g$) 在同一个模型上连续加载，米林场地波波形 (截取 81.91s) 见图 3。

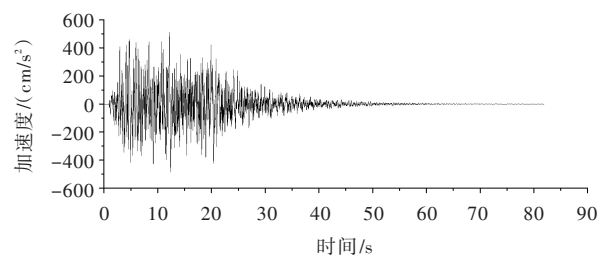


图3 地震波时程

2.4 试验工况 本次试验研究包含粗粒土和吸力土两个模型,其试验过程如下:①开动离心机,运转至 30 g 离心加速度;②监控模型表面的沉降变形,当其稳定后,启动离心机振动台施加地震动荷载;③施加的地震动荷载峰值逐级增加,目标峰值分别为 0.18 g 、 0.36 g 和 0.53 g ;④在施加每一级地震动荷载后,监控模型内部的孔隙水压力,在地震引起的超静孔压力完全消散后继续施加下一级地震动荷载,表1给出了本次研究的所有实验工况。

表1 试验工况总结

模型名称	试验编号	离心加速度 $\times g$	输入地震动振幅 $\times g$	备注
粗粒土模型	Test 1	30	0.131	1 所有试验结果已 换算至原型尺度; 2 表中振幅为各试 验中实测 A1 振幅
	Test 2	30	0.334	
	Test 3	30	0.527	
细粒土模型	Test 4	30	0.136	
	Test 5	30	0.288	
	Test 6	30	0.478	

3 试验结果与分析

3.1 加速度结果初步分析 A0—A6是沿模型高度方向自下而上布设的加速度传感器,其中A0安装于模型箱外侧底板的上表面,A1—A6埋置于模型内部。在试验过程中,地震动首先传至模型箱底板,而后通过模型箱侧壁的水平推动力、底板上表面与模型之间的摩擦力传至模型之中,这说明A0与A1测得的地震动差异不仅包括两者之间土层的影响,还包括底板的摩擦以及模型箱侧壁水平推动的影响,导致A0与A1测量结果的差异不能真实反映地震动在两者之间土层的传播规律,因此在下文的分析过程中,地震动在土层中的传播规律仅通过分析A1—A6的传感器测量结果得出。本次试验的采样频率为 $5\,000\text{ Hz}$,所有试验曲线为换算为原型尺度结果的曲线。

3.2 典型试验结果 图4给出了粗粒土模型在 30 g 条件下,输入地震动峰值为 0.18 g 的试验测量结果,从图中曲线可以看出,不同传感器给出的测量结果有较好的一致性,且此工况下地震动随着土层升高逐渐放大。由于篇幅所限,其他工况条件下试验结果在此处就不一一给出。

3.3 输入地震波振幅对于动力放大系数的影响 图5分别给出了粗粒土模型和细粒土模型中,地震动由A1所在土层传播至A6所在土层的加速度放大倍数;从图中可以看出,随着输入地震动幅值逐渐变大,粗粒土模型加速度放大倍数由小振时候1.30,变为强震条件下的0.78,细粒土模型加速度放大倍数由小振时的0.65,变为强震条件下的0.46,这说明随着输入地震动峰值加速度的增加,地震动加速度放大倍数都会逐渐减小。从能量角度看,出现上述现象的原因如下:在输入振幅小的条件下,土体处于弹性范围,能量损失较小,因此对于输入地震波能够起到一定的放大作用,而随着地震动输入增大,土体出现塑性变形,出现能量耗散,因此地震动经土层传播后会出现衰减的情况。

3.4 地震动传播过程中反应谱的变化规律 从图中6可以看出,在所有试验中,输入地震动的反应谱在经过土层传播后,地震动反应谱的长周期成分增加,特征周期变大,反应谱平台值对应的周期范围增加。说明地震动在土层中传播过程中,低频(长周期)的成分被放大,而高频成分被抑制。

3.5 地震动在粗、细粒土中传播规律对比 从图7中可以看出,当输入的地震动峰值接近时,地震波在粗粒土层中传播后的加速度放大倍数大于相同条件下的细粒土模型。在本次试验中,粗、细粒土的区别本质上是剪切模量的区别,即粗粒土的剪切模量明显大于细粒土,说明对于相同的地震动输入,地震动的放大幅度与其自身的剪切模量正相关。

4 结论

通过开展模拟覆盖层中地震动传播规律的离心模型试验,得出以下结论:(1)随着输入地震动幅

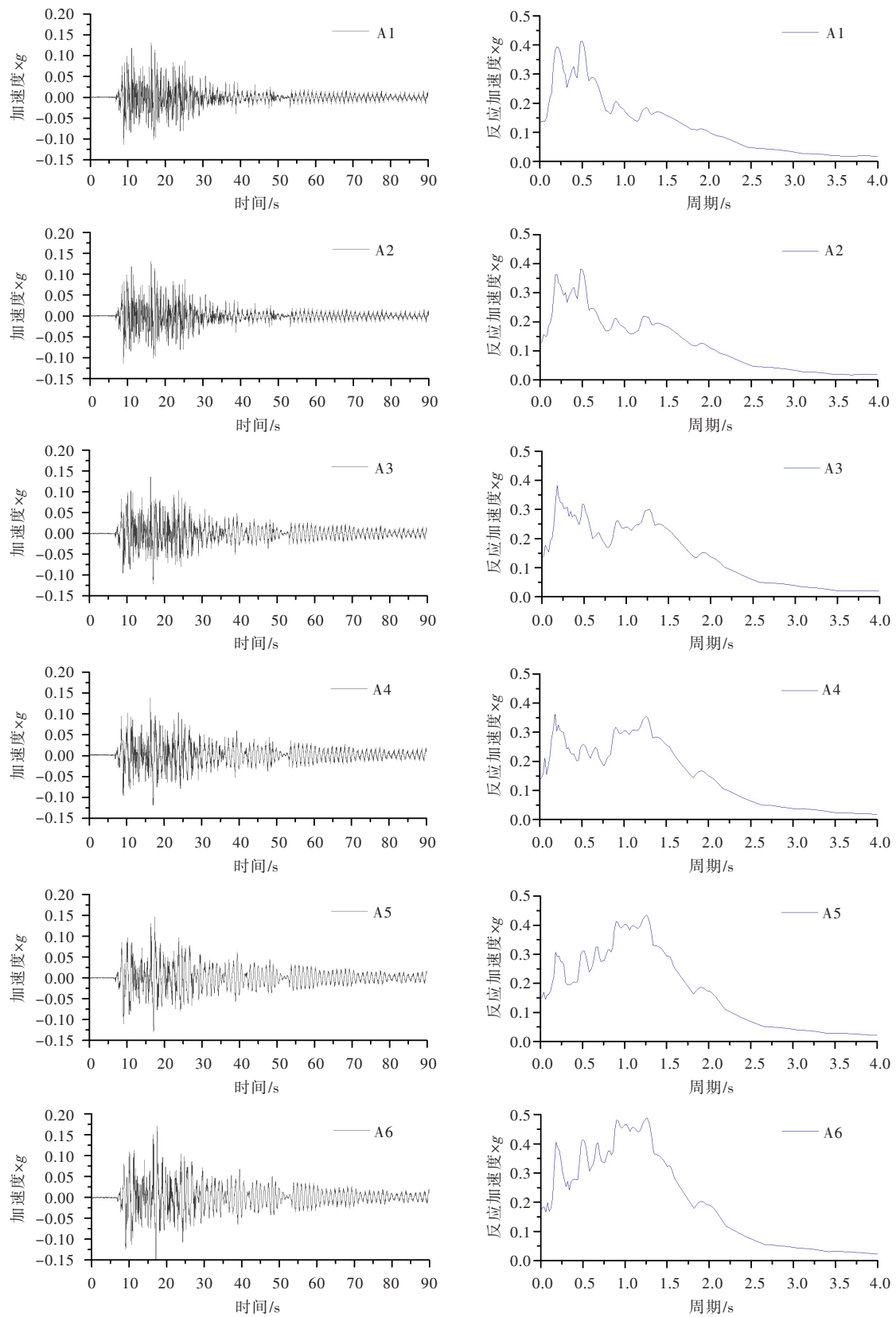


图4 粗粒土模型-30g-目标峰值0.18g测试结果(左图:时程;右图:反应谱)

值逐渐变大,粗粒土和细粒土模型的加速度放大倍数都逐渐减小,这是由于输入振幅小的条件下,土体处于弹性范围,能量损失较小,因此对于输入地震波能够起到一定的放大作用,而随着地震动

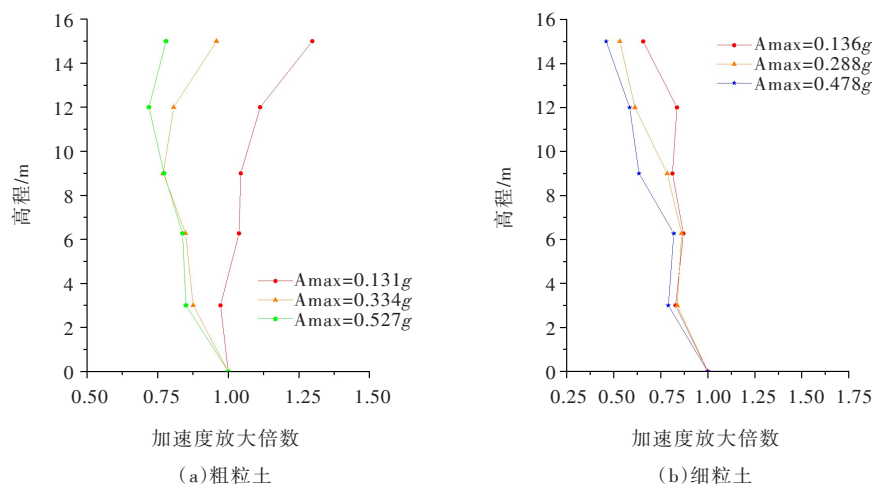


图5 加速度放大倍数随输入地震动幅值的变化规律

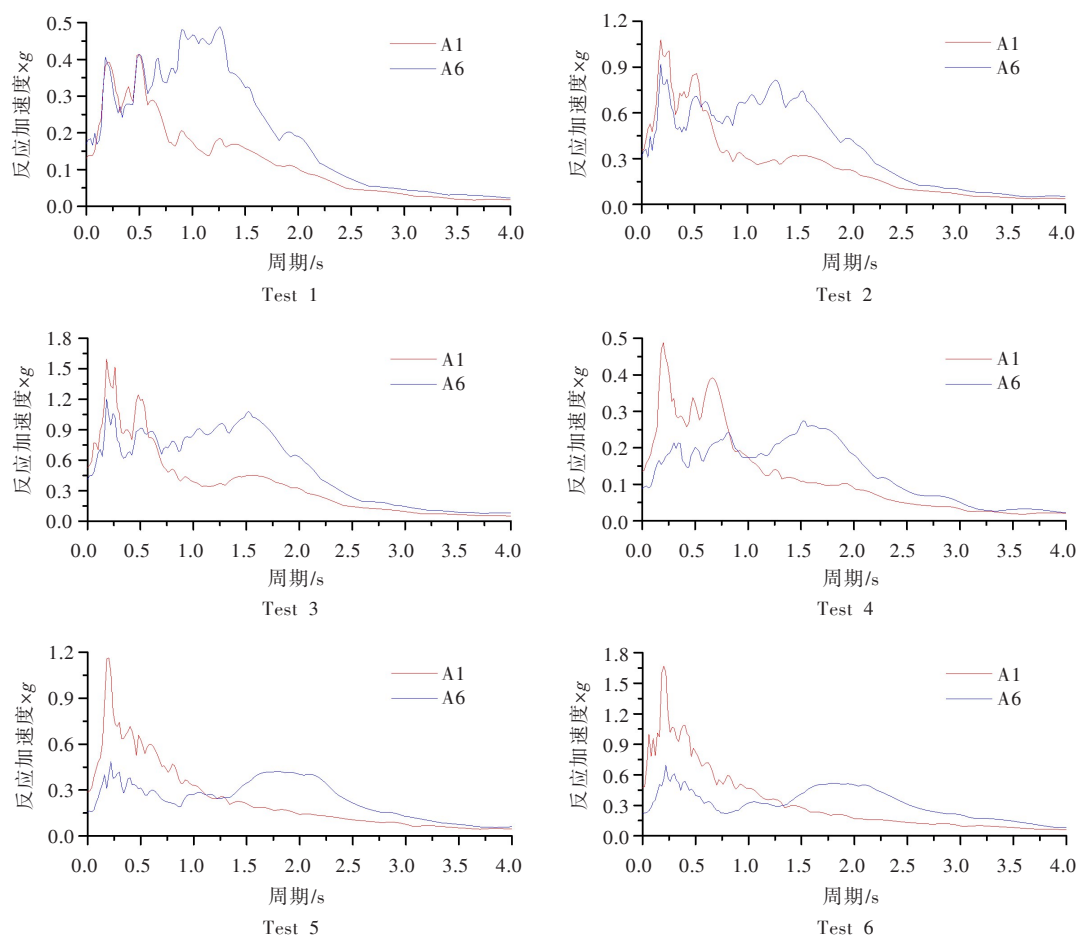


图6 输入地震动和地表地震动反应谱对比

输入增大,土体出现塑性变形,出现能量耗散,因此地震动经土层传播后会出现衰减的情况。(2)输入地震动的反应谱在经过土层传播后,地震动反应谱的长周期成分增加,特征周期变大,反应谱平台值对应的周期范围增加,这说明经过土层的传播,地震波低频部分被放大,高频部分被抑制。(3)当输入的地震动峰值接近时,由于粗粒土模型的剪切刚度大于细粒土模型,因此地震波在粗粒土层中传播后的加速度放大倍数大于相同条件下的细粒土模型。

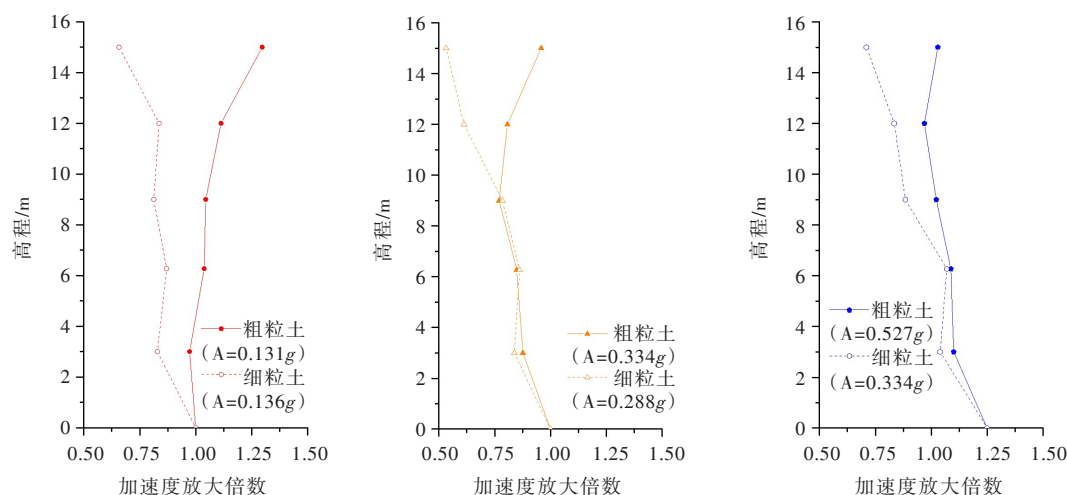


图7 输入地震动振幅相近时粗、细粒土加速度放大倍数对比

参 考 文 献:

- [1] 赵剑明, 刘小生, 温彦锋, 等. 紫坪铺大坝汶川地震震害分析及高土石坝抗震减灾研究设想[J]. 水力发电, 2009(5): 11-14.
- [2] 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(6): 2041-2047.
- [3] 赵剑明, 温彦锋, 刘小生, 等. 深厚覆盖层上高土石坝极限抗震能力分析[J]. 岩土力学, 2010(s1): 41-47.
- [4] 王翔南, 张向韬, 董威信, 等. 深厚覆盖层上心墙对是强震动力响应分析[J]. 地震工程学报, 2015(2): 349-354.
- [5] 潘家军, 饶锡保, 周欣华, 等. 深厚覆盖层上面板堆石坝新型结构应力变形性状影响因素研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 163-167.
- [6] 侯瑜京. 土工离心机振动台及其试验技术[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006(1): 15-22.

Dynamic centrifuge modeling research on the propagation law of earthquake motion

ZHANG Xuedong, WEI Yingqi, ZHANG Zitao, LIANG Jianhui

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The seismic behavior of high earth rockfill dams built on a deep overburden layer is one of the research hotspots in the field of anti-seismic engineering of those dams. The propagation behavior of seismic waves through the overburden layer is the important part of the aforementioned research. In order to examine such a propagation behavior of seismic waves through the overburden layer, a series of dynamic centrifuge tests were carried out in this study. The influence of the peak acceleration of the input motion and the soil properties on the propagation behavior of seismic waves was explored. This study indicates that the components of seismic waves with low-frequencies become strengthened while those with high-frequencies become weakened after propagation through the soil. In addition, the amplification factor of the peak acceleration decreases with increasing the peak acceleration of the input motion. Meanwhile, amplification factor increases with increasing the shear modulus of the soil for the same input motion.

Keywords: deep overburden layer; seismic wave; dynamic centrifuge tests; propagation behavior

(责任编辑: 祁 伟)