

# 基于离心模型试验的中硬自由场放大效应研究\*

兰景岩<sup>1</sup>, 王延伟<sup>1</sup>, 刘娟<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室 桂林, 541004) (2. 中国地震局工程力学研究所 哈尔滨, 150080)

**摘要** 利用叠环式剪切模型箱设计并构造了中硬自由场的离心模型, 在 75g 离心场环境下开展了 8 组工况的动态离心模型试验, 并以此来模拟人工地震动观测台站, 获取中硬自由场不同深度监测点的加速度峰值、时程及反应谱等结果, 系统研究中硬自由场条件下地表及地下不同深度的地震动放大效应。结果表明: 中硬自由场滤波作用较小, 从底部至地表, 地震波的幅值和能量有逐渐增大的趋势, 地震波形损失较小; 中硬自由场地表处的峰值加速度放大作用显著, 地表地震动放大系数在 1.86~2.49 之间, 且放大系数从底部至地表呈逐渐增大的趋势; 地震动加速度反应谱从底部至地表逐渐向高频方向移动, 反应谱值随自由场深度的增加而降低; 地表及地下各层位与基底输入的反应谱比值在一定范围内波动, 且存在极值点, 优势分布于 1.65~1.85 之间。

**关键词** 动态离心模型试验; 中硬自由场; 地震动响应; 放大效应

**中图分类号** TU411; TH113.1

## 引言

近场强地面运动是导致建(构)筑物损伤和倒塌的重要原因<sup>[1-2]</sup>。震害经验和理论研究表明, 场地条件是影响地表震害和地震动响应变化的重要因素<sup>[3-4]</sup>。近百年来, 随着地震工程领域研究的不断深入以及地震动观测手段的日益提升, 科研人员取得了丰硕的以经验方法<sup>[5-8]</sup>、数值模拟法<sup>[9-12]</sup>和间接估计法<sup>[13]</sup>为代表的地震动场地效应的定性和定量研究成果, 有些已被纳入各国的抗震设计规范而被工程界广泛应用<sup>[14-15]</sup>。

我国相当一部分地区处于中硬场地(一般场地)<sup>[16]</sup>, 尽管工程界和地震学界普遍认为中硬场地属抗震有利地段, 但其具有较高的地震动放大作用。有研究表明, 自振周期短的刚性结构在硬场地上的震害严重<sup>[17]</sup>, 因此中硬场地条件对地震动的影响不容忽视。相关研究限于地质条件的特殊性以及地震事件的偶发性, 利用实际地震观测记录进行场地效应研究缺乏足够的代表性和普适性, 因此关于中硬场地条件的地震动放大作用的研究结论存在着巨大的差别和较大的争议<sup>[18-26]</sup>。在这一背景条件下, 科研人员尝试着利用试验手段来揭示场地地震动放大效应机制。章为民等<sup>[27]</sup>运用离心模型试验技术模拟了地震作用下砂土层的孔压增长和消散过程, 并

进行了土层地震动加速度反应研究, 初步分析了加速度反应沿高程上的分布特征。Lai 等<sup>[28]</sup>采用层状剪切箱, 以内华达州密实砂为试验材料进行了一系列的离心机试验, 模拟一维地震响应下土体从线性到非线性的响应过程。刘晶波等<sup>[29]</sup>采用叠环式模型箱, 利用离心机振动台试验研究了砂土地基的地震反应情况, 分析了叠环式模型箱的边界效应, 而后又探讨了砂土、黏土及成层土不同试验工况在天然波的输入下, 其加速度峰值放大系数、频谱和时程反应, 试验结果表明, 砂土层地表低频放大最显著, 峰值加速度放大系数在 1.4 左右<sup>[30]</sup>。Lee 等<sup>[31]</sup>对饱和砂和干砂分别进行了离心模型试验, 给出了地震动均方根值加速度放大系数与土层深度的关系。Afacan<sup>[32]</sup>利用离心模型试验模拟强度不同的地震动输入, 描述了软黏土的峰值加速度和反应谱的放大效应, 得到了软弱土地表加速度放大系数随输入峰值的增大而减小<sup>[33]</sup>。在此基础上, Hashash 等<sup>[34]</sup>则以中密砂为研究对象, 将离心模型试验结果与等效线性化方法、非线性反应分析数值计算结果进行了对比, 给出了一维场地的地震动放大效应, 总结了地表及以下不同深度的加速度放大效应。

笔者拟利用动态离心模型试验, 设计并模拟中硬自由场的岩土台阵, 在不同强度地震动作用下, 获

\* 国家自然科学基金资助项目(51408559); 广西自然科学基金资助项目(2018GXNSFAA281183); 广西岩土力学与工程重点实验室开放基金资助项目(桂科能 19-Y-21-4)

收稿日期: 2020-04-09; 修回日期: 2020-06-29

取完整的地表及地下不同深度处的地震加速度时程记录,围绕关键地震动参数进行数据分析,系统研究中硬自由场条件下地表及地下不同深度的地震动放大效应。

### 1 动态离心模型试验方案的设计

试验用土采自天津滨海某处工地,埋深地表以下10 m左右,合计约1 m<sup>3</sup>。经晾晒→烘干→研磨→过筛→搅拌后,配制成密度为2.0 g/m<sup>3</sup>、含水量为15%、孔隙比为0.48的试验土料,并分层制作离心振动台模型箱。

#### 1.1 试验方案

试验使用某型土工离心试验机,在75g离心状态下提供高精度单向水平振动。试验所用的模型箱为叠环式层状剪切模型箱,有研究表明<sup>[31]</sup>,叠环式剪切模型箱可有效降低侧边界效应。模型箱尺寸为1 000 mm×600 mm×740 mm(长×宽×高),实际质量约为380 kg,为目前国内尺寸体量最大的剪切模型箱,由12层中空铝环组成,相邻两环最大相对位移可达6 mm,箱内布置1 mm厚度强度橡胶膜,以保证模型箱的密封性,同时可用于高含水率土样试验。

本次试验设计并制作了均质硬黏土自由场的离心模型,如图1所示。为降低侧边界影响,获取较准确的加速度记录,在模型箱中部从上至下布设5个微型加速度传感器,其具有频响宽、线性好、性能稳定、体积小、质量轻及安装方便等特点,所有的传感器在出厂和使用前均经过仪器标定和校准。

本次试验为模拟中硬自由场深度为30 m的原型场地,为避免因模型箱高度过高而导致试验误差增大,模型箱高度设计为400 mm,因此试验所采用的离心加速度取75g,所涉及到的主要相似常数(模型/原型)如下:加速度相似常数 $C_a=75$ ;时间相似常数为 $C_t=1/75$ ;频率相似常数为 $C_f=75$ 。

#### 1.2 基底输入地震动

为充分考虑地震作用下中硬自由场的非线性放大特征,笔者对地震动输入采用了2种形式,即人工波和天然波。人工波为《建筑抗震设计规范GB50011—2010》<sup>[15]</sup>给出的天津地区远震、IV类场地条件下的人工合成波,天然波为El Centro地震波,通过调整峰值加速度来控制输入地震波的强度大小。每一次振动试验在加载地震波时,首先要对输

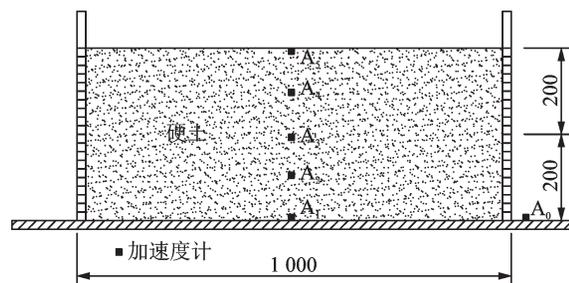
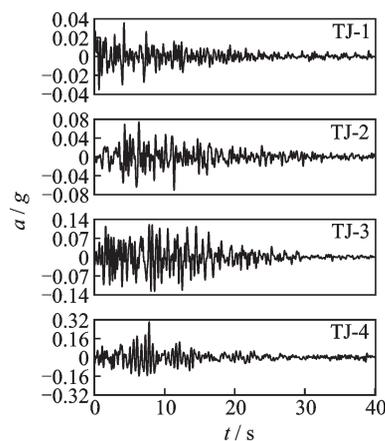


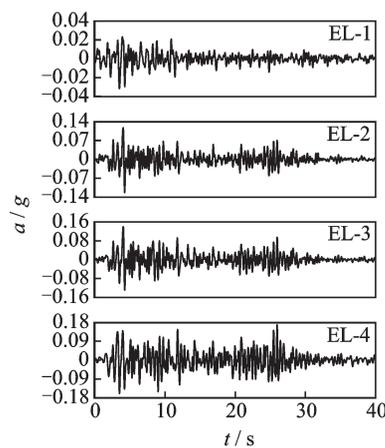
图1 中硬自由场动态离心模型设计图(单位:mm)  
Fig.1 Dynamic centrifugal model of medium-stiff free field (unit:mm)

入的原始地震波按照相似率( $N=75$ )进行幅值和持时的缩放,整理成目标时程,进而对目标时程再进行滤波处理,按照原始波的预期峰值再进行一次缩放,成为滤波后时程,该时程为实际最终离心模型试验的基底地震动输入,即图1中A<sub>0</sub>加速度传感器的量测结果。实际加载的地震波形见图2,合计8条地震波,输入地震动参数如表1所示。



(a) 人工波

(a) Artificial time history



(b) 天然波

(b) Natural time history

图2 实际加载基底地震波时程曲线

Fig.2 Actual time-loaded seismic wave time history

表1 中硬自由场离心模型试验实际输入地震动参数

Tab.1 Actual input ground motion parameters of medium-stiff free-field centrifugal model test

地震波类型	工况	幅值/g	持时/s
天津人工波	TJ-1, TJ-2, TJ-3, TJ-4	0.036, 0.074, 0.127, 0.300	45
El Centro波	EL-1, EL-2, EL-3, EL-4	0.032, 0.124, 0.140, 0.169	60

利用加速度传感器和电荷放大器,获取中硬自由场不同深度、不同层位监测点的加速度峰值、时程及反应谱等量测结果,达到了利用离心模型试验模拟强震台站并获取完整记录的试验目标和效果。

## 2 离心模型试验结果与分析

### 2.1 地表及地下各观测点的仿真加速度记录

本次离心模型试验在原理上能够较好地还原强震观测台站,在模型箱中布设加速度传感器来替代观测台阵中的强震仪,进而可以获取地表及地下各层位的仿真模拟加速度记录。结合上面的离心模型试验设计方案及地震动加载形式,对中硬自由场离心模型进行振动试验,给出了模型箱内传感器 $A_1 \sim A_5$ 的加速度记录,分别对应的深度为 $-30.0, -22.5, -15.0, -7.5$ 和 $0$  m,离心模型的加速度记录如图3、图4所示,即峰值加速度(peak ground acceleration, 简称PGA)。从中硬自由场离心模型试验工况所得到的时程曲线波形上看,所获取的不同深度的地震动记录在波形上一致性较高,基本保留了输入地震波的初始波形。由于滤波作用小,地震波从底部传播过程中,地震波的幅值和能量有逐渐

增大的趋势,地震波形损失较小。

### 2.2 地震动峰值及放大系数沿深度的变化趋势

地表峰值加速度和地震动放大效应是地震工程界长期以来一直关注的重要内容,也是工程抗震设计的重要指标和参数。对于中硬场地的地震动放大系数,前人已有较多的经验成果和建议值,如表2所示。

总的来说,当前对于地表地震动放大效应研究较多,但由于地下实际地震观测记录的匮乏,地表以下地震动放大效应的研究成果较少。为分析地震波在典型场地的传播特征及衰减规律,对上述离心模型试验所获取的地震记录的幅值进行整理,并给出了中硬自由场离心模型试验的PGA随土层埋深的关系曲线,如图5所示。从中硬自由场模型的结果来看,整体上中硬自由场对地震波有一定的放大作用,特别是输入地震波的幅值较高的情况(工况TJ-4和工况EL-4),地表处的峰值加速度放大效果显著。

为了更加清晰地展示场地土对地震动的影响及放大作用,将地震动峰值加速度随深度变化的曲线进行归一化处理,即将各层位所记录的峰值除以基底输入的峰值,得到了峰值加速度的放大系数随深度的变化趋势。同时,将本次动态离心模型试验的结果与国内外已有的离心模型试验结果进行了对比,特别是吸收了文献[31,33-34]的最新研究成果。为进一步探讨本次中硬自由场离心模型试验结果的可靠性,笔者选取了同为中硬场地条件的强震动观测台的实际地震记录,与本次试验结果进行对比和验证。实际观测记录分别选用美国GVDA台站获取的2005年La Quinta 5.2级地震记录(地表PGA

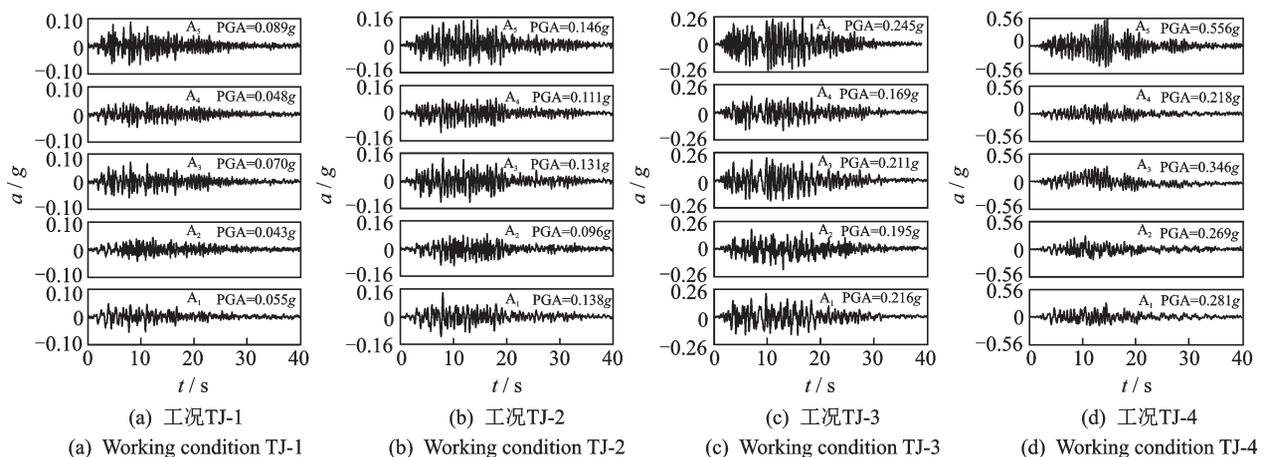


图3 中硬自由场加速度时程响应(输入人工波)

Fig.3 Acceleration time history response of medium-stiff free field (artificial time history)

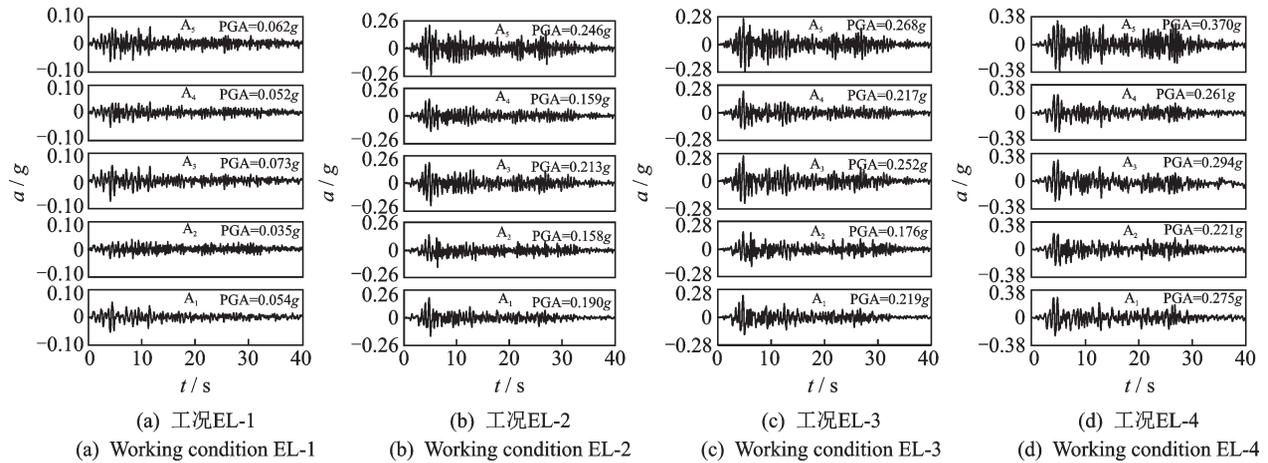


图4 中硬自由场加速度时程响应(输入天然波)

Fig.4 Acceleration time history response of medium-stiff free field (natural time history)

表2 中硬场地(Ⅱ类)的地震动放大系数建议值

Tab.2 Recommended value of ground motion amplification factor for medium-stiff site conditions (site classification Ⅱ)

参考文献	Ⅰ类场地峰值加速度/g					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
文献[18]	1.02	1.08	1.08	1.00	1.11	1.11
文献[19]	1.50	1.45	1.40	1.33	1.25	1.18
文献[20]	1.89	1.20	1.49	1.49	0.74	—
文献[21]	1.40	1.40	—	1.30	1.20	1.10
文献[22]	1.27	1.25	1.23	1.20	1.16	1.11
文献[23]	1.02	1.33	1.23	1.04	0.86	1.49
文献[24]	1.80	1.65	1.60	1.50	1.40	1.30
文献[25]	2.00	1.56	1.45	2.00	—	1.96
文献[26]	1.25	1.22	1.20	1.18	1.05	1.00
最小值	1.02	1.08	1.08	1.00	0.74	1.10
最大值	2.00	1.65	1.60	2.00	1.25	1.96
极差	0.98	0.57	0.52	1.00	0.51	0.86

为0.17g),以及美国WLA台站获取的2012年Brawley 5.4级地震记录(地表PGA为0.18g)。峰值加速度放大系数 $F_a$ 随深度变化的对比如图6所示。

图6中本次试验结果表明,从底部至地表处地震动放大系数总体上呈现先缩小后增大的趋势,地表处的峰值加速度放大系数 $F_a$ 处于1.86~2.49之间,均值为2.03,中硬自由场地表峰值放大系数 $F_a$ 随基底输入峰值的增大而减小,如图7所示。由图6还能够看出,本次试验结果得到的峰值放大系数同已获取的强震动观测记录较为吻合,放大系数随深度的变化规律与实际观测结果也较为一致,说明相似的场地条件或场地类型对地震动放大效应和响应

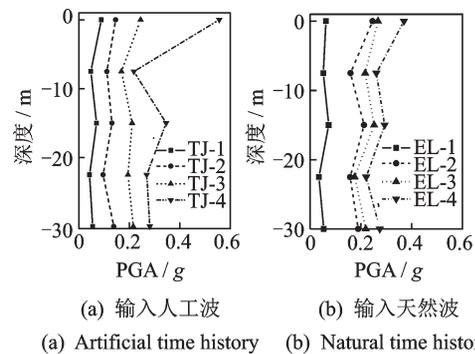


图5 峰值加速度随深度的变化

Fig.5 Relationships between peak acceleration and depth of site

程度在定性定量中的结论比较接近。

本次试验结果同已有的类似离心模型试验结果还是存在着一定的区别和差异,主要原因在于离心模型土的不同以及地震动加载方式的差别。其中:Lee等<sup>[31]</sup>离心模型试验的基底地震动输入峰值为0.20g,研究对象为饱和砂土;曹杰等<sup>[33]</sup>离心模型试验的基底地震动输入峰值分别为0.10g,0.15g和0.40g,研究对象为软黏土;Hashash等<sup>[34]</sup>离心模型试验的基底地震动输入峰值分别为0.33g和0.76g,研究对象为中密砂。

### 2.3 加速度反应谱放大效应

频谱特性也是表征和描述地震动的重要指标,根据离心模型试验结果,绘制了8组工况条件下地表及地下各层位的加速度反应谱,如图8、图9所示。由图可知,从底部至地表加速度反应谱呈现向高频方向移动的趋势,同时加速度反应谱值的大小随自由场深度的增加而降低。

为探讨加速度反应谱在各频率或周期点上的地

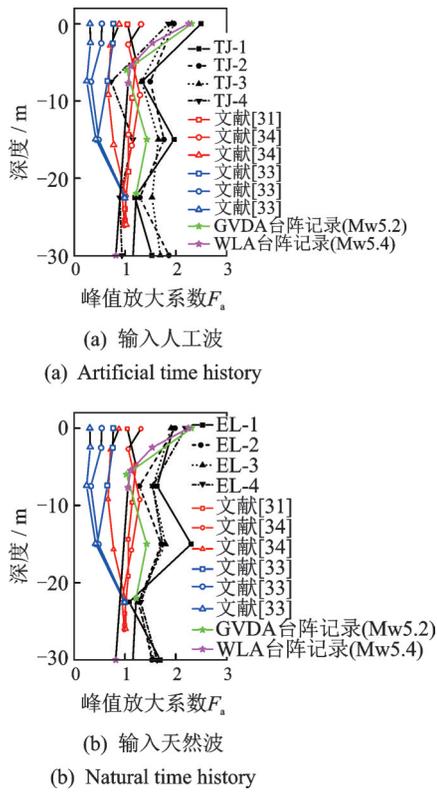


图6 峰值加速度放大系数随深度的变化

Fig.6 Relationships between peak acceleration amplification factor and depth of site

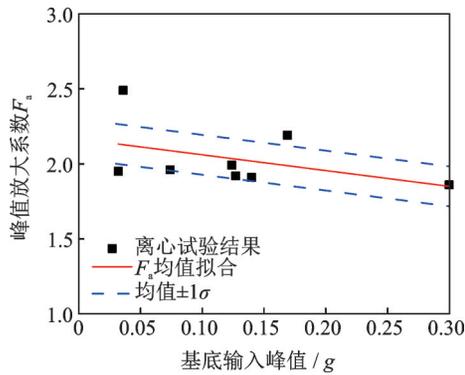


图7 地表地震动放大系数  $F_a$  与基底输入的关系

Fig.7 Relationship between surface ground motion amplification factor ( $F_a$ ) and base seismic wave input

震动场地响应,将每个工况条件下各层位的加速度反应谱除以其周期点对应的输入地震动反应谱,便得到了8组工况的中硬自由场加速度反应谱比曲线,如图10、图11所示。

由图10、图11可知,8组工况下的加速度反应谱比曲线随深度的变化规律并不明显,但存在较明显的极值点。一般来说,在反应谱周期为0.4~0.6s时谱比最低,谱比最低值出现在反应谱的最大值对应的周期点,在长周期6.0s处谱比最高,谱比最高值则出现在反应谱的最低值。

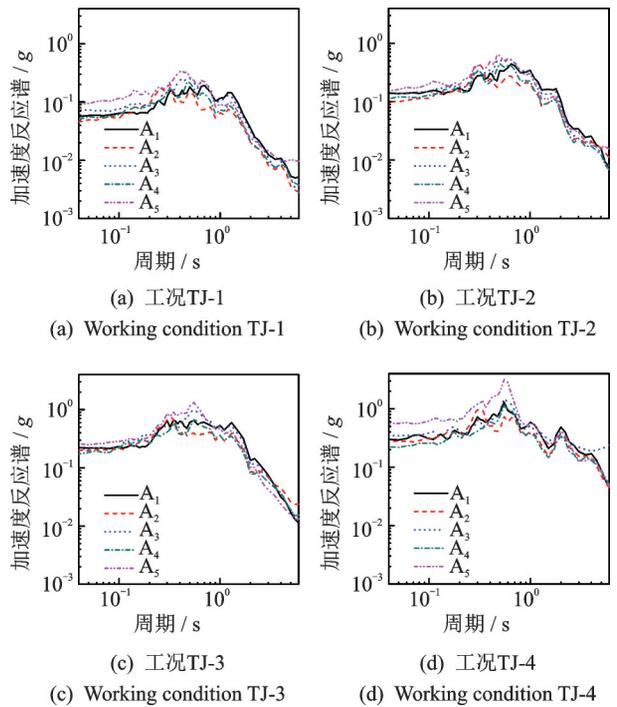


图8 中硬自由场加速度反应谱(输入人工波)

Fig.8 Acceleration response spectrum (artificial time history)

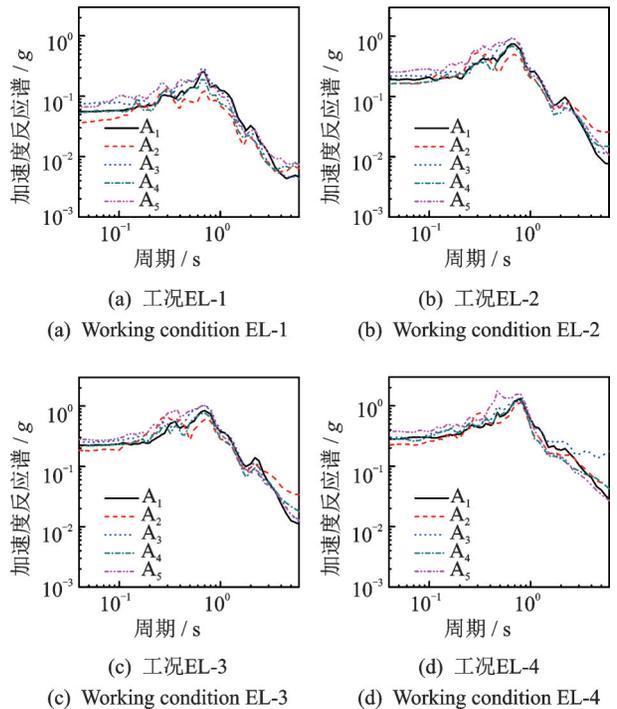


图9 中硬自由场加速度反应谱(输入天然波)

Fig.9 Acceleration response spectrum (natural time history)

从反应谱比值分布上看(图10、图11的阴影部分),在人工波输入条件下,中硬自由场反应谱比范围在0.5~5之间,优势分布于1.65;在天然波输入条件下,中硬自由场反应谱比范围在0.7~10之间,优势分布于1.85。

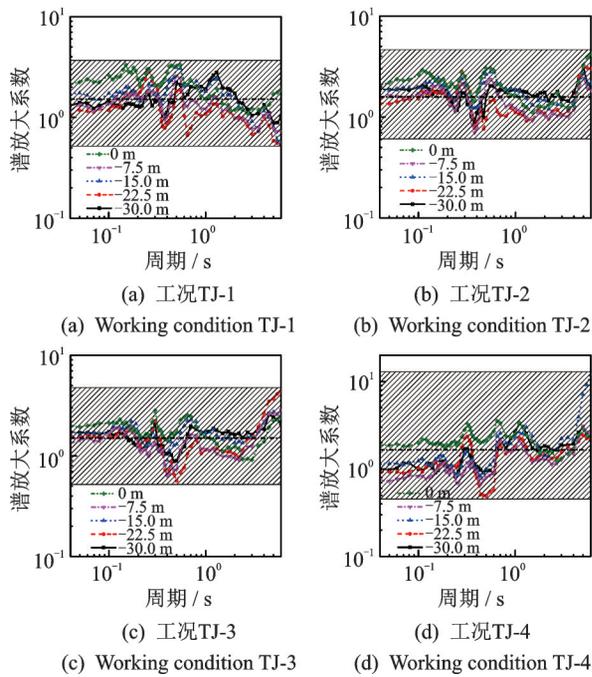


图10 中硬自由场加速度反应谱比(输入人工波)

Fig.10 Acceleration response spectrum ratio (artificial time history)

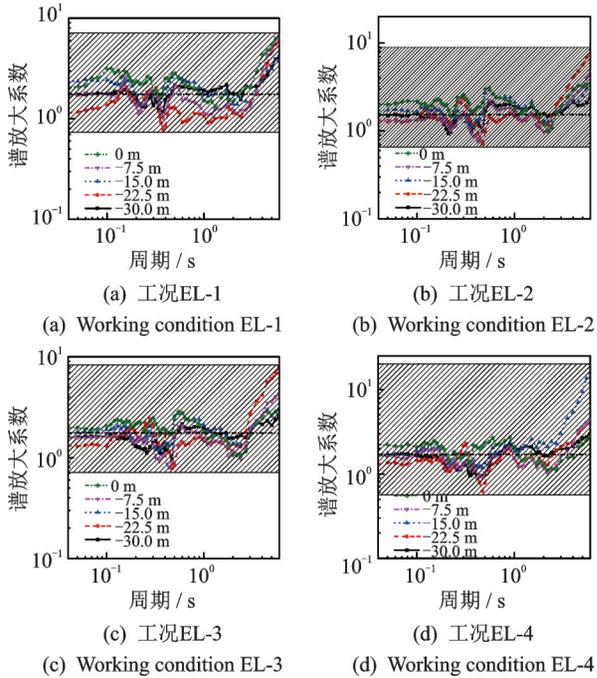


图11 中硬自由场加速度反应谱比(输入天然波)

Fig.11 Acceleration response spectrum ratio (natural time history)

### 3 结论

1) 从离心模型试验结果上看,中硬自由场对地震波有一定程度的放大,特别是输入地震波的幅值较高的情况下,地表处的峰值加速度放大效果显著。

2) 离心模型试验得到的地表地震动放大系数处于1.86~2.49之间。表明中硬自由场地震动放大效应非常明显,特别是地表处的地震动高达基岩处地震动的2倍左右,与实际地震动观测记录结果较为一致。同时,根据离心模型试验结果可知,中硬自由场峰值加速度放大系数从底部至地表呈逐渐增大的趋势。

3) 随着中硬自由场离心模型深度的增加,从底部至地表加速度反应谱呈现向高频方向移动的趋势,同时加速度反应谱结果随自由场深度的增加而降低。

4) 关于地表及地下各层位与基底输入的反应谱比值,根据试验结果可知,在人工波输入条件下,反应谱比值处在0.5~5范围之内,优势分布于1.65;在天然波输入条件下,反应谱比值处在0.7~10之间,优势分布于1.85。此外,反应谱比值存在极值点,在反应谱周期为0.4~0.6 s时谱比最低,与反应谱的最大值对应的周期点基本重合;而在反应谱6.0 s处谱比最高,出现在反应谱长周期的最低点。

### 参 考 文 献

[1] 黎雅乐,宗周红,黄学漾,等.基于倒塌分析的连续梁桥地震损伤评估方法[J].振动、测试与诊断,2019,39(4):867-874.  
LI Yale, ZONG Zhouhong, HUANG Xueyang, et al. Seismic damage assessment method of continuous girder Bridge based on collapse analysis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(4): 867-874. (in Chinese)

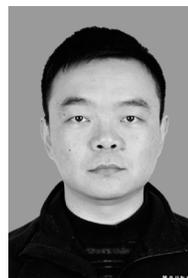
[2] 卢俊龙,韩鑫,李传利,等.多维地震作用下砖石古塔动力反应耦联分析[J].振动、测试与诊断,2020,40(1):163-168.  
LU Junlong, HAN Xin, LI Chuanli, et al. Coupling of dynamic response of masonry pagoda affected by multi-dimension earthquake [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1):163-168. (in Chinese)

[3] 薄景山,李秀领,李山有.场地条件对地震动影响研究的若干进展[J].世界地震工程,2003,19(2):11-15.  
BO Jingshan, LI Xiuling, LI Shanyou. Some progress of study on the effect of site conditions on ground motion [J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(2): 11-15. (in Chinese)

[4] 冯细霞,姜清辉,张慧超,等.岩质边坡地震响应振动

- 台试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(3): 575-582.
- FENG Xixia, JIANG Qinghui, ZHANG Huichao, et al. Shaking table experimental study on seismic response of rock slope [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(3):575-582. (in Chinese)
- [5] BORCHERDT R D. Effect of local geology on ground motion near San Francisco Bay [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1970, 60(1): 29-61.
- [6] ANDREWS D J. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size [J]. Geophysical Monographs, 1986, 37(6): 259-267.
- [7] BONILLA L F, STEIDL J H, LINDLEY G T, et al. Site amplification in the San Fernando Valley, California; variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87 (3) : 710-730.
- [8] NAKAMURA Y. A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface [J]. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute of Japanese National Railways, 1989, 30(1):25-33.
- [9] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analysis [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108 (7):935-952.
- [10] IDRIS I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 95 (4) : 693-698.
- [11] HASHASH Y M A, PARK D. Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment [J]. Engineering Geology, 2001, 62(13): 185-206.
- [12] 袁晓铭, 李瑞山, 孙锐. 新一代土层地震反应分析方法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 95-103.
- YUAN Xiaoming, LI Ruishan, SUN Rui. A new generation method for earthquake response analysis of soil layers [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 95-103. (in Chinese)
- [13] 李小军. 地震动参数区划图场地条件影响调整[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 21-29.
- LI Xiaojun. Adjustment of seismic ground motion parameters considering site effects in seismic zonation map [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 21-29. (in Chinese)
- [14] 黄雅虹, 吕悦军, 彭艳菊. 国内外不同抗震设计规范中场地分类方法的内在关系研究[J]. 震灾防御技术, 2009, 4(1): 80-90.
- HUANG Yahong, LYU Yuejun, PENG Yanju. Study on the relations of site classification methods in seismic design standards between China and abroad [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2009, 4(1): 80-90. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国建设部国家质量监督检验检疫总局. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] 胡聿贤. GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001:84.
- [17] 王海云. 渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用[J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 137-150.
- WANG Haiyun. Amplification effects of soil sites on ground motion in the Weihe basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(1): 137-150. (in Chinese)
- [18] 薄景山. 场地分类和设计反应谱调整方法研究[R]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1998.
- [19] 李小军, 彭青, 刘文忠. 设计地震动参数确定中的场地影响考虑[J]. 世界地震工程, 2001, 17(4): 34-41.
- LI Xiaojun, PENG Qing, LIU Wenzhong. Consideration of site effects for determination of design earthquake ground motion parameters [J]. World Earthquake Engineering, 2001, 17(4):34-41. (in Chinese)
- [20] 耿淑伟. 抗震设计规范中地震作用的规定[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2005.
- [21] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 67-76.
- LYU Hongshan, ZHAO Fengxin. Site coefficients suitable to China site category [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 67-76. (in Chinese)
- [22] 吕悦军, 彭艳菊, 兰景岩, 等. 场地条件对地震动参数影响的关键问题[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(2): 126-135.
- LYU Yuejun, PENG Yanju, LAN Jingyan, et al. Some key problems about site effects on seismic ground motion parameters [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(2): 126-135. (in Chinese)
- [23] 赵艳, 郭明珠, 李化明, 等. 对比分析中国有关场地条件对设计反应谱最大值的影响[J]. 地震地质, 2009, 31(1): 186-196.
- ZHAO Yan, GUO Mingzhu, LI Huaming, et al. Contrast analysis of effect of site condition on the maximum of design response spectra [J]. Seismology and Geology, 2009, 31(1): 186-196. (in Chinese)

- [24] 郭峰, 吴东明, 许国富, 等. 场地条件对抗震设计反应谱最大值的影响[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(1): 69-72.  
GUO Feng, WU Dongming, XU Guofu, et al. Effect of site condition on the maximum value of seismic design response spectrum[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(1): 69-72. (in Chinese)
- [25] 郭晓云, 薄景山, 巴文辉. 汶川地震不同场地反应谱平台值统计分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(4): 54-62.  
GUO Xiaoyun, BO Jingshan, BA Wenhui. Statistical analysis of peak flat values of response spectra in different site conditions based on Wenchuan strong ground motions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(4): 54-62. (in Chinese)
- [26] 中国地震局. GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [27] 章为民, 日下部治. 砂性土层地震反应离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 28-31.  
ZHANG Weimin, KUSAKABE O. Dynamic centrifuge model test of sandy layer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 28-31. (in Chinese)
- [28] LAI T, ELGAMAL A, YANG Z, et al. Numerical modeling of dynamic centrifuge experiments on a saturated dense sand stratum[C]//Proceedings of 11th International Conference on Soil Dynamic & Earthquake Engineering and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Berkeley, USA: University of California, 2004: 558-565.
- [29] 刘晶波, 刘祥庆, 王宗刚, 等. 砂土地基自由场离心机振动台模型试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(9): 1463-1466.  
LIU Jingbo, LIU Xiangqing, WANG Zonggang, et al. Dynamic centrifuge model test of an unconfined sandy foundation [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(9): 1463-1466. (in Chinese)
- [30] 刘晶波, 赵冬冬, 张小波, 等. 地基自由场离心机振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 980-987.  
LIU Jingbo, ZHAO Dongdong, ZHANG Xiaobo, et al. Dynamic centrifuge model tests on an unconfined soil foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 980-987. (in Chinese)
- [31] LEE C J, WEI Y C, KUO Y C. Boundary effects of a laminar container in centrifuge shaking table tests [J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2012, 34(1): 37-51.
- [32] AFACAN K B, BRANDENBERG S J, STEWART J P. Centrifuge modeling studies of site response in soft clay over wide strain range [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(2): 1-13.
- [33] 曹杰, 韩黎明, 冯昌明, 等. 软弱土层自由场动力离心模型试验[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 78-82.  
CAO Jie, HAN Liming, FENG Changming, et al. Dynamic centrifuge tests on free-field response of soft soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 78-82. (in Chinese)
- [34] HASHASH Y M A, DASHTI S, ROMERO M I, et al. Evaluation of 1-D seismic site response modeling of sand using centrifuge experiments [J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2015, 78: 19-31.



**第一作者简介:** 兰景岩,男,1981年11月生,博士后、副研究员。主要研究方向为土动力学和岩土地震工程。曾发表《海底软弱场地非线性地震反应及其应用研究》(《土木工程学报》2013年第46卷增刊(1))等论文。  
E-mail: lanjy1999@163.com