

DOI: 10.11779/CJGE201907017

# 桩-土-斜拉桥动力相互作用体系振动反应特性试验研究

谢文<sup>1</sup>, 孙利民<sup>\*2</sup>

(1. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 大跨斜拉桥结构自振频率和阻尼较低, 其地震响应可能受桩基础和场地土特性的影响较大, 然而目前为止, 由于试验条件和技术所限, 尚缺乏相关的包括桩基础、场地土和上部结构在内的全模型振动台试验研究。以一座试设计的主跨 1400 m 超大跨斜拉桥为原型, 设计并完成了一座几何相似比为 1/70, 且包括群桩、人工土和上部结构在内的试验模型, 采用多点振动台试验技术, 研究了不同加速度峰值和不同频率成分地震作用下桩-土-斜拉桥动力相互作用体系的振动反应特性。试验结果表明: 桩-土-结构相互作用对斜拉桥地震响应产生影响, 其影响程度与地震输入频谱特性密切相关; 在纵向一致激励下, 桩-土-结构相互作用受地震动加速度峰值的影响不明显, 在横向一致激励下, 桩-土-结构相互作用随地震动加速度峰值的增大而减小; 主塔高阶振型对其地震响应的贡献明显; 地震输入频谱特性影响桩-土-斜拉桥动力相互作用体系的地震响应, 特别是在具有丰富长周期成分的 Mexico City 波作用下主梁竖向地震响应显著增大。

**关键词:** 大跨斜拉桥; 振动台试验; 桩-土-结构相互作用; 高阶振型; 频谱特性

**中图分类号:** TU435; U442.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2019)07-1319-10

**作者简介:** 谢文(1981—), 男, 湖南娄底人, 博士, 副教授, 主要从事桥梁抗震和振动控制以及桩-土-结构相互作用等方面的研究工作。E-mail: xiewen@nbu.edu.cn。

## Experimental studies on seismic response characteristics of dynamic interaction system of pile-soil-cable-stayed bridges

XIE Wen<sup>1</sup>, SUN Li-min<sup>2</sup>

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The seismic response of long-span cable-stayed bridges with lower structural frequencies and damping may be significantly affected by the properties of the pile foundation and site soil. However, few experimental studies on the full model for long-span cable-stayed bridges including the pile foundation, site soil and superstructure are available because of the limitations of shaking table testing facilities and technology. A 1/70-scaled full model for a cable-stayed bridge, which includes the pile groups, artificial site soil and superstructure, is designed and constructed according to the trial designed long-span cable-stayed bridge with the main span of 1400 m. The shaking table tests on the full model are conducted to study the seismic response characteristics of the dynamic interaction system of the pile-soil-cable-stayed bridge under uniform earthquake excitations with various frequency components and shaking intensities in the separately longitudinal and transverse directions. The experimental results show that: (1) The pile-soil-structure interaction effects significantly affect the seismic response of the full model for the cable-stayed bridge, but the degree of the influence is closely related to the spectral characteristics of various earthquake waves. (2) The influences of the peak acceleration of the ground motions on the pile-soil-structure interaction effects are not significant when the full model is subjected to the uniform earthquake excitations in the longitudinal direction. However, the pile-soil-structure interaction effects gradually decrease as the peak acceleration of the ground motion increases under transverse uniform earthquake excitations. (3) The higher order mode shapes of the tower make a significant contribution to its seismic response. (4) The seismic response of the dynamic interaction system of the pile-soil-cable-stayed bridge is obviously affected by the spectral characteristics of various earthquake waves. Especially, the vertical seismic response of the girder notably increases when it is subjected to the Mexico City waves with long period components.

**Key words:** long-span cable-stayed bridge; shaking table test; pile-soil-structure interaction; high-order mode shape; spectral characteristic

**基金项目:** 国家自然科学基金重大研究计划集成项目 (91515101-05); 国家自然科学基金青年基金项目 (51608282)

**收稿日期:** 2018-04-11

**\*通讯作者 (E-mail: lmsun@tongji.edu.cn)**

## 0 引言

斜拉桥是一种很有竞争力的桥型。目前,采用现有结构形式和材料,斜拉桥的主跨跨径可达 1400 m<sup>[1]</sup>。然而,大跨斜拉桥由于其自振周期较长且阻尼较低,强震作用下其主塔、桥墩和支座等构件可能发生损伤甚至局部破坏。如 1995 年神户地震损坏了东神户斜拉桥的所有支座<sup>[2]</sup>,1999 年集集地震损伤了集鹿斜拉桥的主塔和桥墩等<sup>[3]</sup>。此外,高阶振型对大跨斜拉桥等密频结构地震响应的影响可能更敏感;桩-土-结构相互作用对大跨度斜拉桥等柔性结构地震响应的影响可能更突出,尤其当大跨度斜拉桥建于软土地基之中。

振动台试验技术可重现桥梁结构所遭受的真实地面运动,是研究桥梁结构抗震最直接有效的方法之一。目前,关于桥梁结构抗震的振动台试验主要集中在以下两方面:侧重于桥梁下部基础和侧重于桥梁上部结构。其中,侧重于桥梁下部基础的振动台试验研究均将桥梁上部结构简化成集中质量<sup>[4-11]</sup>,如韦晓等<sup>[5]</sup>开展了桩-土-结构相互作用试验研究,表明桩-土-结构动力相互作用效应随输入激励水平的增加而增强;Wang 等<sup>[8]</sup>研究了不同冲刷下桩-土-桥墩的抗震行为,发现桩的弯矩需求随冲刷深度的增加而增大,而桥墩的弯矩需求随之减小;Durante 等<sup>[10]</sup>试验研究了单桩集中质量体系、群桩集中质量体系的地震响应,发现桩的弯矩需求取决于地震频谱特性与桩-土-结构体系频率之间的关系;商宇等<sup>[11]</sup>研究了河床冲刷深度对桩基桥梁地震反应的影响,发现土层会显著放大基岩地震动,但放大效应受基岩地震动加速度峰值的影响较大。研究表明:桩-土-结构相互作用的影响不容忽视。

另一方面,不少学者开展了侧重于桥梁上部结构的振动台试验研究<sup>[12-17]</sup>,但往往忽略了桩-土-结构相互作用的影响,即假设桥梁下部基础为刚性基础。如 Johnson 等<sup>[12]</sup>研究了两跨 RC 连续梁的抗震性能,表明非一致激励对非对称桥梁地震响应的影响明显,而对对称桥梁的影响几乎可忽略;李建中等<sup>[17]</sup>研究了大跨悬索桥不同结构体系的抗震性能,发现纵向阻尼器可有效控制其主塔-主梁的纵向相对位移;Shoji 等<sup>[18]</sup>和王瑞龙等<sup>[19]</sup>研究了长周期地震激励对斜拉桥地震响应的影响,结果表明长周期丰富的地震波将激起长周期桥梁更大的地震响应。此外,有学者采用地震工程模拟网络和实时耦联动力子结构试验技术开展了考虑桩-土-结构相互作用的振动台试验<sup>[20-21]</sup>,结果表明桩-土-结构相互作用对桥梁地震响应的影响不可忽视,但这些研究并非具有实际物理场意义的桩-土-结构相互作用的全模型试验。

综上,尚缺乏考虑桩-土-结构相互作用的大跨斜拉桥振动台试验研究,且桩-土-结构相互作用对这种柔性结构的影响可能更为突出。因此,本项试验以一座试设计的主跨 1400 m 超大跨斜拉桥为原型,设计并完成了一座包含群桩、人工场地土和上部结构在内的试验模型,采用振动台试验技术研究斜拉桥不同结构体系的抗震性能以及验证附加耗能构件的控制效果,揭示多点激励对桩-土-斜拉桥地震响应的影响机理,探索桩-土-结构相互作用对上部结构地震响应的影响规律,研究地震输入特性对桩-土-斜拉桥地震响应的影响及其规律,研究强地震作用下桩-土-斜拉桥的灾变演化及其破坏模式,为大跨深水基础缆索承重桥梁的抗震设计理论提供试验基础,为相关重大工程的实施建设提供科学支撑。

限于篇幅,本文仅以笔者所提出的具有良好抗震性能的辅助墩耗能体系为例<sup>[22]</sup>,研究一致激励下地震输入特性(加速度峰值和频谱特性)对桩-土-斜拉桥动力相互作用体系振动反应特性的影响及其规律。

## 1 试验模型

### 1.1 模型相似比

综合考虑振动台承载能力和几何尺寸以及试验场地和项目经费等限制条件,模型几何相似比取 1/70;考虑模型重力加速度效应、初始刚度以及振动台加速度输出能力和人工配重的实现,模型加速度相似比为 2;此外,模型混凝土和钢材的弹性模量相似比分别取 0.3 和 1.0,其余相似比由上述 3 个基本相似比导出。试验模型的相似比见表 1。

表 1 试验模型相似比

性能	物理量	相似关系	混凝土	钢材
几何性能	长度 $l$	$S_l$	1/70	1/70
	面积 $A$	$S_A$	1/70 <sup>2</sup>	1/70 <sup>2</sup>
	惯性矩 $I$	$S_I$	1/70 <sup>4</sup>	1/70 <sup>4</sup>
材料性能	弹性模量 $E$	$S_E$	0.3	1
	应力 $\sigma$	$S_\sigma$	0.3	1
	应变 $\varepsilon$	$S_\varepsilon$	1	1
	密度 $\rho$	$S_\rho / (S_A \cdot S_l)$	10.5	35
动力性能	水平加速度 $a$	$S_a$	2	2
	时间 $T$	$S_l^{0.5} S_a^{-0.5}$	0.0845	0.0845
	频率 $f$	$S_l^{-0.5} S_a^{0.5}$	11.8322	11.8322

### 1.2 模型设计

按几何相似比严格缩尺后,试验模型总长 38200 mm,主塔、桥墩的高度分别为 5100, 860 mm,如图 1 所示。由于原型桥梁桩基数量较多,先根据刚度等效原则进行并桩,同时受振动台承载能力限制,因此

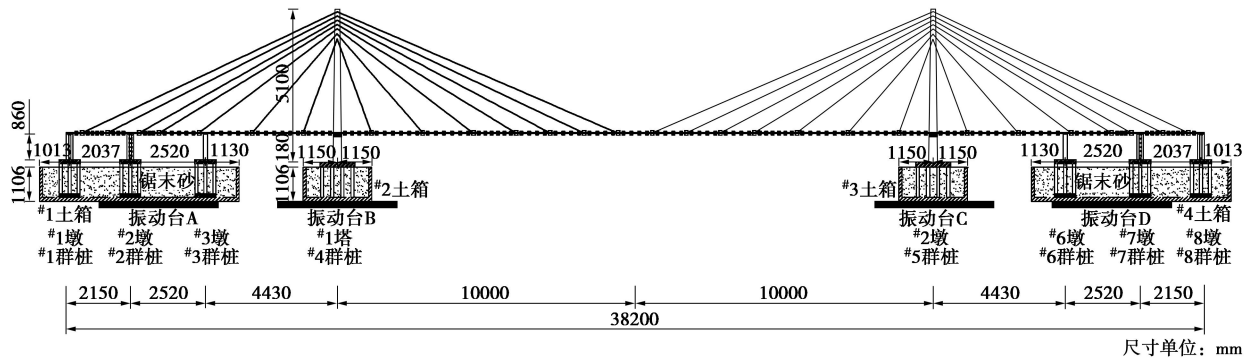


图1 桩-土-斜拉桥模型

Fig. 1 Full model for pile-soil-cable-stayed bridge

只截取一段桩长(70 m)进行缩尺设计,模型桩高和桩径分别为1000, 105 mm,其中桥墩和主塔处分别设置3×3和4×6的群桩基础,群桩基础在层状剪切土箱中的相对坐标如图1所示。主塔、桥墩采用M15微粒混凝土和1.2~3.2 mm镀锌铁丝模拟原型构件的混凝土和钢筋,纵筋与箍筋焊接成网状,桩基采用C40混凝土和6 mm螺纹钢;上述3种构件的配筋率与原型构件相同,即主塔、桥墩和桩基的配筋率分别为2.67%, 1.7%, 3.26%。

根据竖向抗弯刚度等效原则以及横向抗弯刚度近似等效,模型主梁设计成箱型截面,但忽略了轴向和扭转刚度的影响。根据轴向刚度等效原则,原型拉索等效成8×7根双索面拉索,由直径为8 mm的钢丝绳制作而成。

为了减少土箱边界反射和再现人工土的自由场反应,通常采用层状剪切土箱模拟土体边界,且其边界条件已得到验证<sup>[23]</sup>。因此,本试验采用与文献<sup>[23]</sup>相同的层状剪切土箱,但其中几何尺寸不同。即它由9层(不含底层框架)独立的长方形框架叠合而成,框架层间间隙为12 mm,除底层框架外,其余两层之间放置凹槽,凹槽内放数颗钢滚珠以形成自由滑动的支承点,在与纵向方向垂直的侧面各贴一块厚2 mm的钢板以防止横向滑动和扭转, #1和#4层状剪切土箱的长宽高分别为6700, 1700, 1006 mm, #2和#3层状剪切土箱的长宽高分别为2300, 2800, 1006 mm。

为了满足模型与原型桥梁的惯性力和动力相似,需通过附加质量以弥补材料重度不足的影响,即根据相似理论计算所得的理论质量与模型质量的差值即为附加质量。由于试验模型的几何缩尺比较小,附加全配重质量难以实现,因此采用欠配重模型。主塔从塔底至上横梁区段均匀对称安装配重以及在塔顶安装2个配重箱;桥墩沿墩柱两侧均匀对称安装配重;主梁配重以成对半圆钢块为主,再辅以配重箱;由于人工土质量的影响和振动台承载能力限制,桩基未附加质量,导致桩基频率偏高;由于拉索附加质量相对全桥

模型质量很小,且不考虑拉索本身动力特性的影响,因此忽略其附加质量。主塔、桥墩和主梁附加质量安装部位如图3所示。

实际场地土通常难以满足振动台试验动力相似率要求,需采用降低剪切模量或提高质量密度的人工土来模拟,本项试验采用砂子和木屑的混合物<sup>[24]</sup>。此外,由于原型桥梁为一座试设计斜拉桥,缺乏实际的地质场地,无法以原型场地土的动力特性作为人工土的设计依据。因此从土层对上部结构地震响应的最不利影响出发,设计人工土的频率以桥墩和主塔的一阶频率为依据确定其剪切模量和密度,并通过GDS共振柱试验确定其剪切模量和密度。最终,砂子和木屑的质量比为3:1,人工土的密度为840 kg/m<sup>3</sup>,其初始剪切模量为5.65 MPa(有效围压为7.5 kPa)。其剪切模量 $G$ 、阻尼比 $D$ 与剪切应变关系如图2所示。

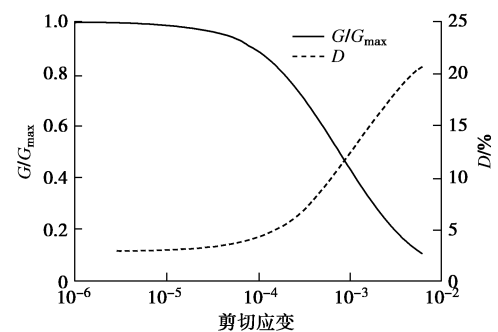


图2 人工土的剪切模量、阻尼比与剪切应变曲线

Fig. 2 Relationship among shear modulus, damping ratio and shear strain for artificial soil

砂子和木屑晒干、过筛和均匀拌合组合成人工土,然后分层装入层状剪切土箱,每层人工土厚度不超过100 mm,通过实际称重和压实体积来控制人工土密度,以达到期望的土体密度。

安装后的桩-土-斜拉桥模型如图3所示。主塔下横梁-主梁、墩顶-主梁之间安装滑动支座, #1~#3群桩、#4群桩、#5群桩和#6~#8群桩分别与#1、#2、#3和#4层状剪切土箱底部固结,然后层状剪切土箱分别与振动台A、B、C和D通过螺栓连接。关于试验

模型安装可参阅文献[22]。



图3 安装后桩-土-斜拉桥模型

Fig. 3 Full model for assembled pile-soil-cable-stayed bridge

### 1.3 结构体系

笔者研究了地震作用下桩-土-斜拉桥3种纵向结构体系的抗震性能：①半漂浮体系；②弹性约束体系；③辅助墩耗能体系<sup>[22]</sup>，其中辅助墩耗能体系具有更优良的抗震性能。本文仅以辅助墩耗能体系为例，分别在单一的纵向一致激励和横向一致激励作用下，采用振动台试验技术探讨地震输入特性（加速度峰值和频谱特性）对桩-土-斜拉桥振动反应特性的影响及其规律。

辅助墩耗能体系的边界条件或连接条件为：#1和#8墩-主梁以及主塔-主梁之间安装滑动支座，而#2、#3、#6和#7墩-主梁之间通过钢板焊接形成固结，目的是使辅助墩分担更多主梁惯性力和耗散更多地震输入能，主塔-主梁之间安装纵向弹性拉索，其刚度为4080 kN/m。辅助墩耗能体系的力学简图如图4所示。

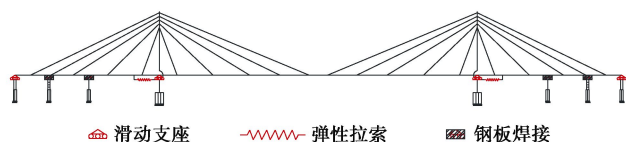


图4 辅助墩耗能体系的力学简图

Fig. 4 Structural system of energy dissipation supporting pier

## 2 试验方案

### 2.1 传感器布置

本项试验主要测量加速度、位移和应变等地震响

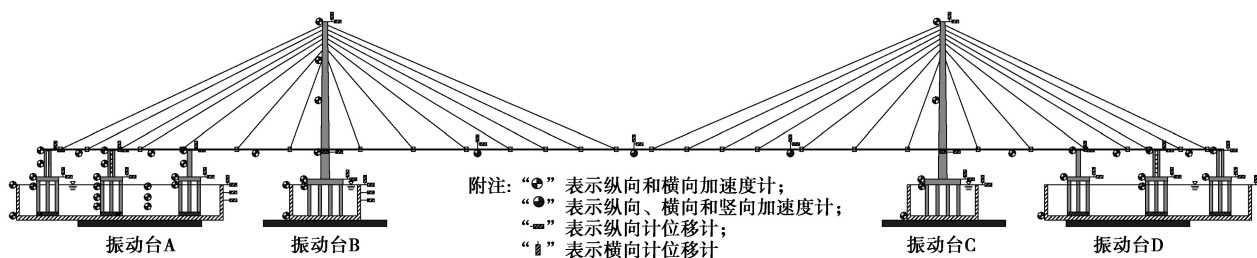


图5 桩-土-斜拉桥模型测点布置

Fig. 5 Layout of measuring points for full model for pile-soil-cable-stayed bridge

应，相应传感器为压电式加速度计、拉线式位移计和电阻式应变片。试验模型共有383个传感器实时采集数据，其中包括68个位移计、103个加速度计和212个应变片。图5为位移计和加速度计的安装部位。

### 2.2 试验加载

试验选取了某超大跨斜拉桥的人工地震波（记为Acce100波）作为地震输入，其卓越周期和频率成分能反映中国沿海地区工程地质场地特征；还选取了经典的实际地震记录El-Centro波和Mexico-City波作为地震输入，以期研究地震输入频谱特性对试验模型地震响应的影响及其规律；3条地震波分别简称为A波、E波和M波。当试验进行地震输入时，3条波的持时和时间间隔均按时间相似常数进行压缩，为了符合振动台的性能要求，也过滤了地震波的高频成分（如100 Hz以上频率），A波、E波和M波的加速度时程以及相应的频谱特性如图6、7所示。

分析图7可知，A波和E波的频带相对较宽，其主要能量分别分布在频率4~40、5~50 Hz，其中能量较大区域集中在频率7.5~21、19~48 Hz；M波的频带相对较窄，其主要能量集中在频率4~7 Hz。

首先，将3条地震波的峰值加速度（peak ground acceleration, PGA）均调至0.1g，然后对试验模型分别进行单一的纵向一致激励输入和横向一致激励输入，本文暂未考虑空间相关性和行波效应等多点激励输入。试验模型的纵向一致激励工况如表2所示，需要说明的是，由于M波的长周期成分相对较丰富，若进行其较大PGA加载有可能损伤模型，进而影响后续试验，因此仅进行了M波的较小PGA（0.2g以下）加载试验。另外，试验模型的横向一致激励工况与纵向工况相同，但地震输入方向为横向。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 动力特性

在试验模型进行振动加载前，先后进行单一的纵向或横向白噪声扫频以识别其相应方向的动力特性，然后采用随机子空间方法识别了前10阶振型以及相应频率，并采用修正后的有限元模型得到了相应振型及频率（见表3）。



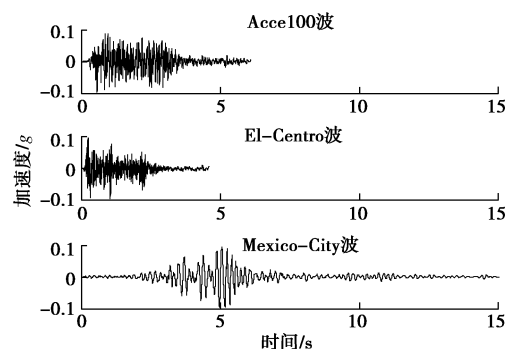


图 6 地震波加速度时程

Fig. 6 Acceleration history time of earthquake waves

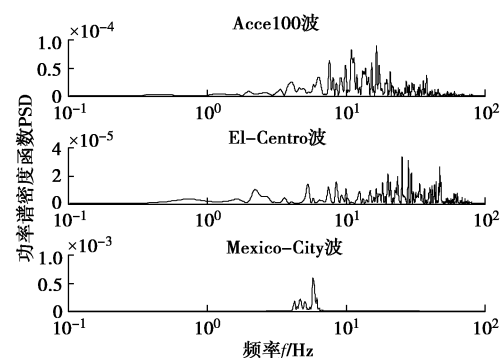


图 7 地震波加速度频谱特性

Fig. 7 Spectral characteristics of acceleration of earthquake waves

表 2 纵向一致激励工况

Table 2 Cases of uniform earthquake excitations in longitudinal direction			
输入波	输入方向	激励模式	PGA/g
白噪声			0.08
A 波			0.10, 0.20, 0.30, 0.40
白噪声			0.08
E 波	纵向	一致激励	0.10, 0.20, 0.30, 0.40
白噪声			0.08
M 波			0.10, 0.20
白噪声			0.08

Table 3 First 10 mode shapes and modal frequencies of test model				
振型	频率/Hz		误差/%	振型描述
	数值模型	试验模型		
1	1.208	1.341	11.01	主梁对称横弯
2	2.337	2.125	-9.27	主塔反对称侧弯
3	2.363	2.276	-3.84	主塔对称侧弯
4	2.459	2.557	3.99	主梁对称竖弯
5	2.948	2.986	1.29	主梁反对称竖弯
6	3.006	未识别	—	主梁反对称横弯
7	3.680	3.613	-1.82	纵漂
8	3.852	3.953	2.62	主梁对称竖弯
9	4.483	4.612	2.88	主梁反对称竖弯
10	5.344	5.240	-1.93	主梁对称竖弯

由表 3 可知, 除第 6 阶主梁反对称横弯振型未被识别外, 其余频率均与有限元模型结果比较吻合, 如主塔对称侧弯及主梁对称竖弯与试验模型的误差在 4% 以内, 且两种方法之间得到的振型相同, 表明随机子空间方法和有限元模型均可有效描述试验模型的动

力特性。

3.2 不同峰值加速度作用下体系振动特性分析

限于篇幅, 仅以经典 E 波为例分析不同峰值加速度 (PGA) 作用下桩 - 土 - 斜拉桥体系的振动特性。图 8 和图 10 分别给出了 #1 塔 (含桩)、#2 墩 (含桩) 以及 #1 土箱自由土沿各自高度分布的最大加速度放大系数, 其中加速度放大系数等于构件最大加速度响应与相应振动台最大输出加速度之比 (下同)。

由图 8 (a) 可知, 在 E 波纵向一致激励下, 主塔 (含桩) 最大纵向加速度放大系数的变化规律: ①最大纵向加速度放大系数沿塔高呈非线性分布, 其原因是主塔高阶振型对加速度响应的贡献明显, 如图 9 (a) 所示。②在 PGA 为 0.4g 以内的 E 波作用下, 归一化的最大纵向加速度放大系数受加速度峰值的影响不明显 (15% 以内), 如在 PGA 为 0.1g, 0.2g, 0.3g 和 0.4g 作用下, 塔顶最大纵向加速度放大系数分别为 1.387, 1.388, 1.239, 1.521, 塔中最大纵向加速度放大系数分别为 1.167, 1.103, 1.171, 1.331。③在不同 PGA 作用下, 桩顶 (塔底) 的最大纵向加速度放大系数变化较小 (10% 以内), 表明在桥梁纵向的桩 - 土 - 结构相互作用受基岩地震动加速度峰值的影响较小。

分析图 8 (b) 可知, 在 E 波横向一致激励下, 主塔 (含桩) 最大横向加速度放大系数的变化规律有: ①最大横向加速度放大系数沿塔高呈非线性分布, 其原因是主塔高阶振型被激发 (见图 9 (b)), 表明高阶振型对主塔横向加速度的影响明显。②在 PGA 为 0.4g 以内的 E 波作用下, 最大横向加速度放大系数受加速度峰值的影响不明显 (平均影响在 15% 以内)。③桩顶 (塔底) 的最大横向加速度放大系数随 PGA 的增大而减小 (最大减小约 20%), 如在 PGA 为 0.10g, 0.20g, 0.30g 和 0.40g 作用下, 塔底的最大横向加速度放大系数分别为 2.628, 2.354, 2.216 和 2.063, 表明在桥梁横向的桩 - 土 - 结构相互作用随基岩地震动加速度峰值增大而减小, 其原因是: 随横向地震 PGA 的增大, 主梁与支座之间更容易滑动甚至脱离, 降低了桥梁整体刚度。

由图 10 (a) 可发现, 在 E 波纵向一致激励下, 2 号墩 (含桩) 最大纵向加速度放大系数有如下变化规律: ①墩底和桩顶最大纵向加速度放大系数大于 1, 表明桩 - 土 - 结构相互作用对桥墩纵向加速度有放大作用, 但放大效应受基岩地震动加速度峰值的影响不明显 (15% 以内)。②最大纵向加速度放大系数沿墩高逐渐变化, 即最大纵向加速度放大系数从桩底至桥墩中部 (0~1670 mm) 逐渐增大, 然后至墩顶减小, 主要原因是主梁对墩顶纵向运动有约束作用, 限制了墩顶振动。③桥墩最大纵向加速度放大系数随 PGA 的逐级增大而变化不明显 (15% 以内), 如在 PGA 为 0.10g,

0.20g, 0.30g, 0.40g 作用下, 墩顶最大纵向加速度放大系数分别为 0.988, 0.931, 0.931, 0.807。

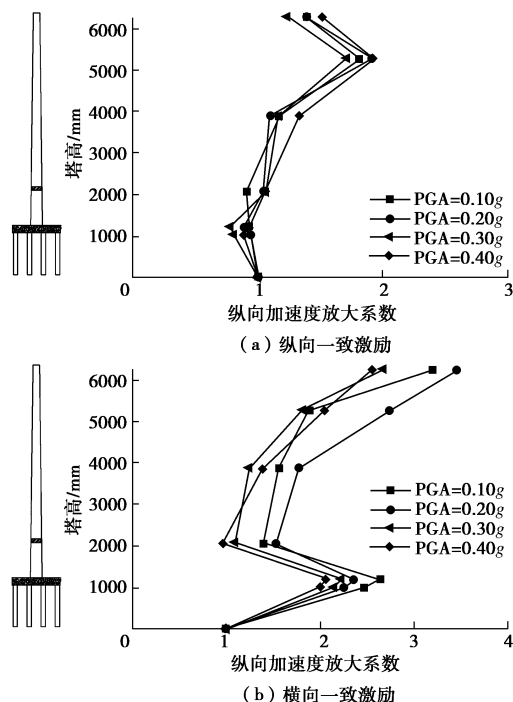


图 8 E 波作用下#1 塔最大加速度放大系数

Fig. 8 Maximum amplification coefficients of acceleration of No.1 tower under E waves

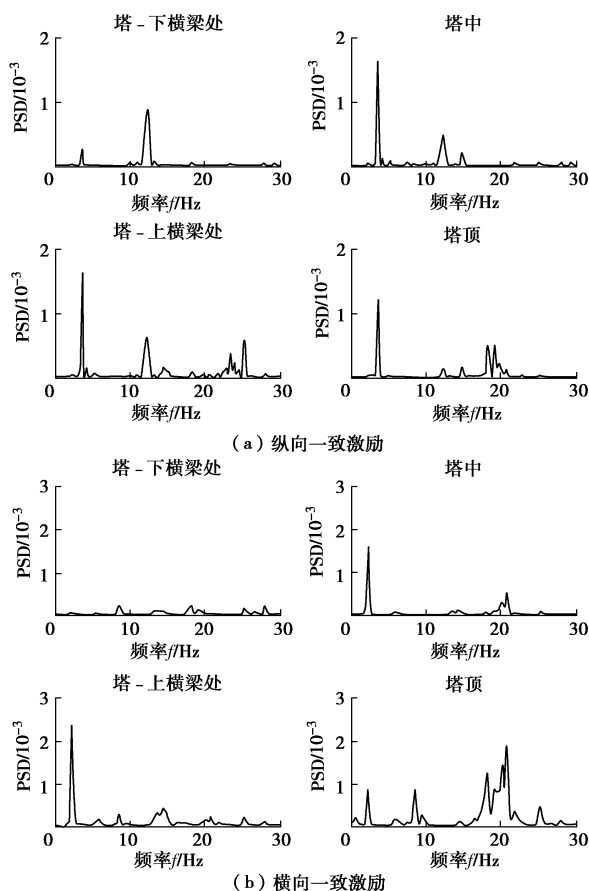


图 9 E 波作用下#1 塔加速度频谱

Fig. 9 Spectral characteristics acceleration of No.1 tower under E waves

分析图 10 (b) 可得, 在 E 波横向一致激励下, #2 墩 (含桩) 在横向的地震响应规律有: ①墩底和桩顶最大横向加速度放大系数大于 1, 表明桩-土-结构相互作用对桥墩横向加速度产生有放大效应, 但放大效应随基岩地震动加速度峰值的增大而减小。②最大横向加速度放大系数沿墩高逐渐变化, 即从桩底至墩底 (0~1240 mm) 最大横向加速度放大系数逐渐增大, 然后至墩顶逐渐减小, 与主梁对桥墩的横向约束作用有关, 限制了墩顶振动。③最大横向加速度放大系数随 PGA 的逐级增大而逐渐减小, 如在 PGA 为 0.10g, 0.20g, 0.30g, 0.4g 作用下, 墩顶最大纵向加速度放大系数分别为 0.871, 0.719, 0.691, 0.617, 桩顶分别为 1.605, 1.405, 1.316, 1.103。

自由土最大纵向加速度放大系数沿其高度呈非线性分布 (图 10 (a))。其可能原因是土体高阶振型被激发, 导致桩-土-结构相互作用更明显, 使桩基和土体的地震响应更复杂, 表明桩-土的运动相互作用随其高度逐渐变化。分析图 10 (b) 可知, 自由土最大横向加速度放大系数沿其高度被逐渐放大, 表明桩-土的运动相互作用随其高度逐渐增强; 土层的放大效应显著, 土体表面加速度峰值相对于剪切土箱底部的输入加速度显著增大。

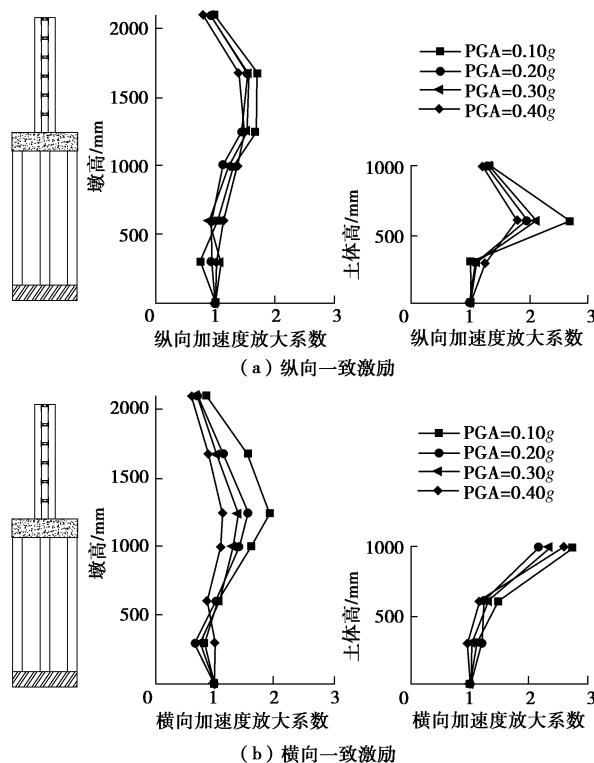


图 10 E 波作用下#2 墩、自由土最大加速度放大系数

Fig. 10 Maximum amplification coefficients of acceleration of No. 2 pier and free soil under E waves

### 3.3 不同频谱特性地震对体系振动特性的影响

限于篇幅, 仅以 PGA 为 0.10g 的地震响应为例,

分析不同频谱特性地震对桩-土-斜拉桥体系振动特性的影响,图 11, 12 给出了不同地震一致激励下#1 塔(含桩)、#2 墩(含桩)和#1 土箱自由土沿各自高度分布的最大加速度放大系数。

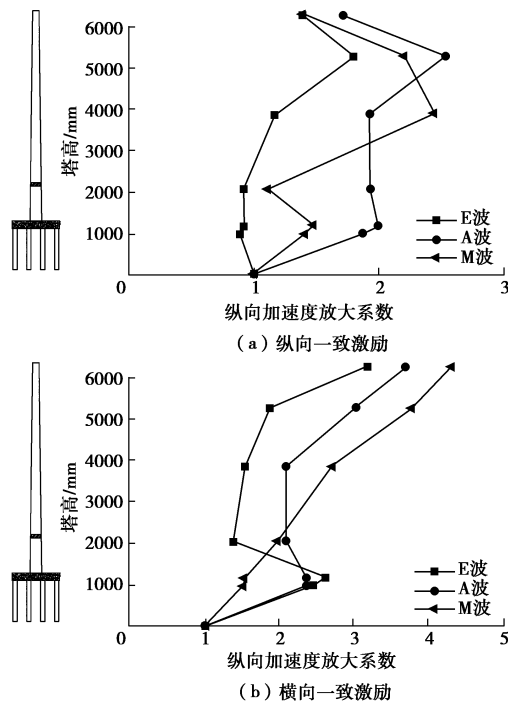


图 11 不同地震作用下#1 塔最大加速度放大系数

Fig. 11 Maximum amplification coefficients of acceleration of No.1 tower under different earthquake waves

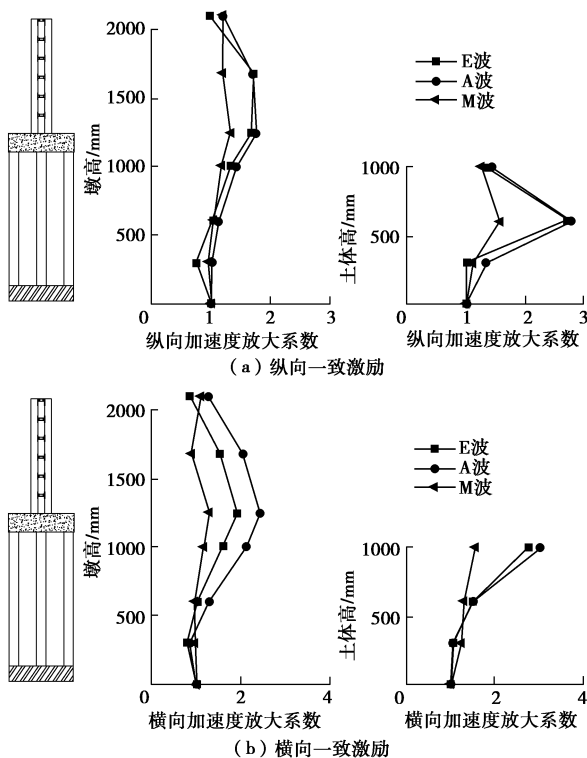


图 12 不同地震作用下#2 墩、自由土最大加速度放大系数  
Fig. 12 Maximum amplification coefficients of acceleration of No. 2 pier and free soil under different earthquake waves

分析图 11 (a) 可知, 与 E 波纵向一致激励结果相比, A 波和 M 波纵向作用下主塔(含桩)最大纵向加速度放大系数明显增大, 其原因是与 E 波的卓越能量频带 19~48 Hz 相比, A 波和 M 波的卓越能量频带分别集中于 7.5~21 Hz 和 4~7 Hz (图 7), 更接近主梁竖弯和纵漂振型频率(2.4~5.5 Hz, 见表 3)。如在 A 波纵向一致激励下, 桩顶、塔中和塔顶的最大纵向加速度放大系数分别增大 110%, 65%, 24%, 在 M 波纵向一致激励下, 相同部位的最大纵向加速度放大系数分别增大 57%, 109%, 1%。这些结果表明: 在相同 PGA 作用下, 不同频谱特性地震输入明显影响主塔(含桩)的纵向加速度响应。

在 E 波、A 波和 M 波纵向一致激励下, 塔底最大纵向加速度放大系数分别为 0.923, 1.998, 1.472 (图 11 (a)), 表明桩-土-结构相互作用对主塔纵向加速度响应产生影响, 且其影响程度不仅与地震输入的频谱特性相关, 也与结构或构件的动力特性相关。即当地震波的主要频率成分(图 7)越接近结构或构件的卓越频率(图 13), 结构或构件的加速度响应越大。需要说明的是, 在 El Centro 波作用下塔底纵向加速度放大系数略小于 1, 其原因是 El Centro 波的主要能量集中于 19~48 Hz 远离塔底和土体的纵向卓越频率(11.7 Hz, 见图 13)。

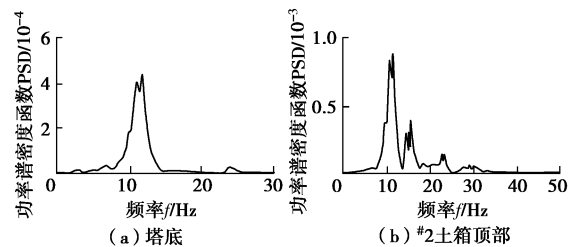


图 13 白噪声激励下塔底和#2 土箱顶部的纵向加速度频谱

Fig. 13 Spectral characteristics of longitudinal acceleration at tower bottom and No. 2 shear box top under white noise excitations

由图 11 (b) 可知, 与 E 波横向一致激励结果相比, A 波和 M 波横向作用下除塔底外的主塔最大横向加速度放大系数增大, 其主要原因是 A 波和 M 波的卓越能量所在频带(图 7)比 E 波更接近主塔侧弯频率(约 2.3 Hz, 见表 3)。如在 A 波和 M 波横向一致激励下, 塔顶最大横向加速度放大系数分别增大 16%, 35%, 塔中分别增大 34%, 74%。这表明: 在相同 PGA 作用下, 不同频谱特性地震输入对主塔(含桩)横向加速度响应产生明显影响。

在 E 波、A 波和 M 波横向一致激励下, 塔底最大横向加速度放大系数分别为 2.374, 2.628, 1.538 (图

11 (b)), 表明桩-土-结构相互作用对主塔横向加速度响应产生明显不利影响。比较不同地震波作用下横向加速度放大系数可知: 桩-土-结构相互作用不仅与地震输入的频谱特性相关, 也与结构或构件的动力特性相关, 即当地震波的主要频率成分(图7)越接近结构或构件的卓越频率(图14), 结构或构件的加速度响应越大。

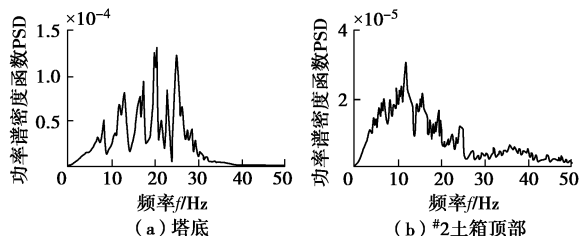


图14 白噪声激励下塔底和#2土箱顶部的横向加速度频谱  
Fig. 14 Spectral characteristics of transverse acceleration at tower bottom and No. 2 shear box top under white noise excitations

分析图12(a)可知, 与E波纵向一致激励结果相比, A波纵向作用下#2墩(含桩)和自由土的最大纵向加速度放大系数变化较小, 如桩顶、墩中和自由土表面增大在7%以内; M波纵向作用下桩底至墩中区段和自由土的横向加速度放大系数减小, 如桩顶和墩中分别减小11%, 30%, 距土箱底600 mm处自由土减小42%, 其原因是: M波的频带相对较窄, 且主要集中在低频(图7), 远离#2墩底(桩顶)和土体的主要频率成分(图15)。此外, M波纵向作用下墩顶最大纵向加速度放大系数反而比E波作用的结果增大21%, 其原因是: 由于约束作用, #2墩顶的加速度反应由主梁纵漂振型控制, 而M波的卓越能量频带(图7)更接近主梁纵漂频率(表3), 易激发主梁纵向振动, 导致#2墩顶纵向加速度增大。

在E波、A波和M波纵向一致激励下, 墩底最大纵向加速度放大系数分别为1.688, 1.746, 1.331(图12(a)), 表明不能忽视桩-土相互作用对桥墩纵向加速度响应的放大作用, 且其放大效应受地震输入频谱特性的影响。

由图12(b)得知, 与E波横向一致激励结果相比, A波横向作用下#2墩(含桩)的最大横向加速度放大系数增大, 而自由土的变化很小, 如桩顶、墩底和墩顶分别增大33%, 27%, 45%; M波横向作用下桩底至墩中区段和自由土的横向加速度放大系数减小, 如桩顶和墩底分别减小25%, 32%, 自由土表面减小43%, 其原因仍与地震输入的卓越能量所在频带与2号墩频率、土体频率密切相关。进一步比较可知, M波横向作用下墩顶最大横向加速度放大系数反而比E波作用的结果增大28%, 其原因是: 主梁约束

了#2墩顶的横向振动, 导致#2墩顶在横向与主梁一起振动, 而M波的卓越峰值(图7)更接近主梁横向频率(表3), 易激起主梁横向振动, 导致#2墩顶横向加速度增大。

在E波、A波和M波横向一致激励下, 墩底最大横向加速度放大系数分别为1.921, 2.437, 1.307(图12(b)), 表明桩-土-结构相互作用对桥墩横向加速度响应的影响不能忽视, 且其影响程度与地震输入的频谱特性相关。在E波、A波和M波横向作用下, 桩顶最大横向加速度放大系数分别为1.605, 2.134, 1.207, 自由土表面最大横向加速度放大系数分别为2.754, 3.004, 1.561, 比较两者相同高度的加速度响应可发现桩-土相互作用比较明显。

分析图16(a)可知, 与E波纵向一致激励结果相比, A波纵向作用下主跨最大竖向加速度放大系数增大, 尤其M波作用下显著增大, 其原因是A波和M波的卓越能量所在频带(图7)比E波更接近主梁竖弯频率(表3)。如M波纵向作用下, 1/4主跨、跨中和3/4主跨的最大竖向加速度放大系数分别为E波作用结果的5.2倍、3.7倍和5.9倍。这些结果表明: 在相同PGA作用下, 主梁竖向加速度响应明显受不同频谱特性地震输入的影响, 且具有丰富长周期特性的M波对超大跨斜拉桥主梁竖向地震响应的影响特别显著。

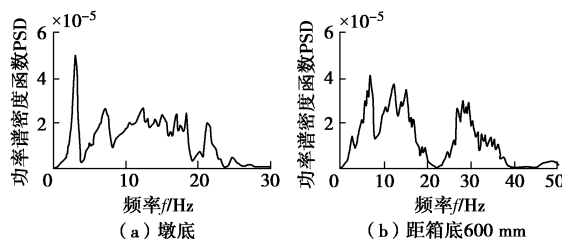


图15 白噪声激励下#2墩底和#1土箱自由土600 mm处的纵向加速度频谱  
Fig. 15 Spectral characteristics of longitudinal acceleration at No. 2 pier bottom and 600 mm-height of free soil in No. 1 shear box under white noise excitations

由图16(b)可知, 与E波横向一致激励结果相比, A波横向作用下主跨最大横向加速度放大系数增大, 如1/4主跨、跨中和3/4主跨分别增大33%, 19%和42%; M波横向作用下主跨最大横向加速度放大系数减小, 如跨中和3/4主跨分别减小12%和8%; 其原因仍与地震输入的卓越能量所在频带与主梁的横弯频率密切相关。这些结果表明: 在相同PGA作用下, 不同频谱特性地震输入对主跨横向加速度响应产生明显影响。



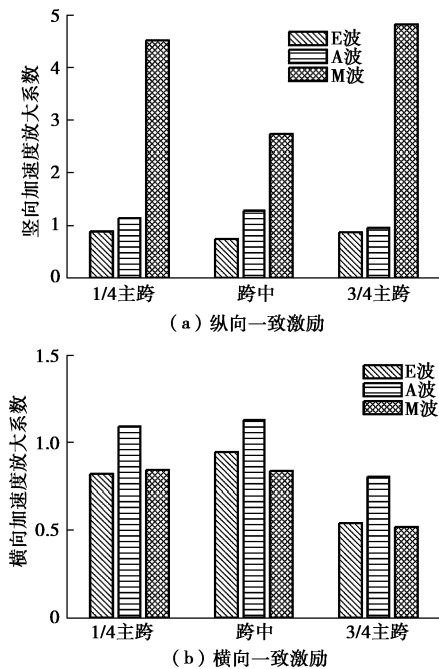


图16 不同地震作用下主跨最大加速度放大系数

Fig. 16 Maximum amplification coefficients of acceleration of main span under different earthquake waves

## 4 结 论

本文以一座试设计的主跨 1400 m 超大跨斜拉桥为原型, 设计和制作了几何相似比为 1/70 且包括桩基础、场地土和上部结构等在内的试验模型, 研究了地震波的峰值加速度和频谱特性对桩-土-斜拉桥动力相互作用体系振动特性的影响及其规律。主要得出以下 4 点结论。

(1) 桩-土-结构相互作用对超大跨斜拉桥加速度响应产生明显影响, 且其影响程度与地震输入的频谱特性相关, 也与构件自身的动力特性相关。当地震波的卓越频率越接近构件或土体的主要振型频率, 桩-土-结构相互作用效果越明显。因此, 在斜拉桥抗震设计或性能评估中应综合考虑上述各因素的影响。

(2) 在纵向一致激励下, 桩-土-结构相互作用受基岩地震动加速度峰值的影响不明显; 在横向一致激励下, 桩-土-结构相互作用随基岩地震动加速度峰值的增大而减小, 其原因是: 随横向地震 PGA 的增大, 主梁与支座之间更容易滑动甚至脱离, 降低了桥梁整体刚度。

(3) 在不同地震输入特性(峰值加速度和频谱特性)作用下, 超大跨斜拉桥主塔的最大纵向或横向加速度沿塔高呈非线性分布, 显示主塔高阶振型对其地震加速度响应的贡献明显。

(4) 不同频谱特性地震输入明显影响超大跨斜拉桥的地震响应。与相同 PGA 的人工波和 El Centro 波

激励结果相比, 具有长周期成分的 Mexico City 波导致主梁竖向地震响应显著增大。

致 谢: 感谢同济大学土木工程学院楼梦麟教授、梁发云教授、陈清军教授和袁万城教授对本试验方案所提出的宝贵意见, 也感谢同济大学土木工程学院研究生聂丹、王建国、贾亚杰、陈海兵、焦胜、杨耀华和罗超对本试验的帮助。

## 参考文献:

- [1] NAGAI M, FUJINO Y, YAMAGUCHI H, et al. Feasibility of a 1,400 m span steel cable-stayed bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 444 - 52.
- [2] NAGASAWA M, SUMI K, TASAKI K, et al. Seismic retrofit of the all-free type cable-stayed Higashi-Kobe bridge with new energy dissipation devices[C]// 5th World Conference on Structural Control and Monitoring. Tokyo, 2010.
- [3] 周智杰. 集鹿大桥震害评估与修复之研究[D]. 台北: 台湾大学, 2004. (ZHOU Zhi-jie. Evaluation and repaired on seismic damage of Chi-Lu bridge[D]. Taipei: Taiwan University, 2004. (in Chinese))
- [4] MAKRI S N, TAZOH T, YUN X, et al. Prediction of the measured response of a scaled soil-pile-superstructure system [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 1997, 16(2): 113 - 124.
- [5] 韦 晓, 范立础, 王君杰. 考虑桩-土-桥梁结构相互作用振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 91 - 97. (WEI Xiao, FAN Li-chu, WANG Jun-jie. Shake table test on soil-pile-structure interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 91 - 97. (in Chinese))
- [6] CUBRINOVSKI M, KOKUSHO T, ISHIHARA K. Interpretation from large-scale shake table tests on piles undergoing lateral spreading in liquefied soils[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2006, 26(2): 275 - 286.
- [7] 唐 亮, 凌贤长, 徐鹏举, 等. 可液化场地桥梁群桩基础地震响应振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 672 - 680. (TANG Liang, LING Xian-zhang, XU Peng-ju, et al. Shaking table test on seismic response of pile groups of bridges in liquefiable groud[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 672 - 680. (in Chinese))
- [8] WANG S C, LIU K Y, CHEN C H, et al. Experimental investigation on seismic behavior of scoured bridge pier with pile foundation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(6): 849 - 864.

- [9] SU L, TANG L, LING X, et al. Pile response to liquefaction-induced lateral spreading: a shake-table investigation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, **82**: 196 – 204.
- [10] DURANTE M G, SARNO L D, MYLONAKIS G, et al. Soil-pile-structure interaction: experimental outcomes from shaking table tests[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2016, **45**(7): 1041 – 1061.
- [11] 商宇, 叶爱君, 王晓伟, 冲刷条件下的桩基桥梁振动台试验[J]. *中国公路学报*, 2017, **30**(12): 280 – 289. (SHANG Yu, YE Ai-jun, WANG Xiao-wei, Shake table test of pile supported bridge under scour condition[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, **30**(12): 280 – 289. (in Chinese)))
- [12] JOHNSON N, RANF R, SAIID I, et al. Seismic testing of a two-span reinforced concrete bridge[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2008, **13**(2): 173 – 182.
- [13] 房贞政, 张超, 陈永健, 等. 基于三台阵振动台的多塔斜拉桥试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, **45**(增刊 1): 25 – 29. (FANG Zhen-zheng, ZHANG Chao, CHEN Yong-jian, et al. Research on the shaking table test of three towers cable-stayed bridge based on three shaking table system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, **45**(S1): 25 – 29. (in Chinese))
- [14] 闫晓宇, 李忠献, 韩强, 等. 多点激励下大跨度连续刚构桥地震响应振动台阵试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, **46**(7): 81 – 89. (YAN Xiao-yu, LI Zhong-xian, HAN Qiang, et al. Shake tables test study on seismic response of a long-span rigid-framed bridge under multi-support excitations[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, **46**(7): 81 – 89. (in Chinese))
- [15] ZONG Z H, ZHOU R, HUANG X Y, et al. Seismic response study on a multi-span cable-stayed bridge scale model under multi-support excitations part I: shaking table tests[J]. *Journal of Zhejiang University (Science A)*, 2014, **15**(5): 351 – 363.
- [16] 王曙光, 刘伟庆, 徐秀丽, 等. 大跨连续梁桥纵向消能减震振动台模型试验[J]. *中国公路学报*, 2009, **22**(5): 54 – 59. (WANG Shu-guang, LIU Wei-qing, XU Xiu-li, et al. Shaking table model test of long-span continuous girder bridge with longitudinal seismic energy dissipating[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, **22**(5): 54 – 59. (in Chinese))
- [17] LI J, YAN J, PENG T, et al. Shake table studies of seismic structural systems of a Taizhou Changjiang Highway Bridge Model[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, **20**(3): 04014065.
- [18] SHOJI G, KOGI T, UMESAKA Y. Seismic response of a PC cable-stayed bridge subjected to a long-period ground motion[C]// *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, 2008.
- [19] 王瑞龙, 徐艳, 李建中. 一致激励下的混凝土斜拉桥振动台试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, **43**(3): 357 – 363. (WANG Rui-long, XU Yan, LI Jian-zhong. Shake table test of a concrete cable-stayed bridge subjected to uniform seismic excitation[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, **43**(3): 357 – 363. (in Chinese))
- [20] WOOD S, ANAGNOS T, ARDUINO P, et al. Using NEES to investigate soil-foundation-structure interaction[C]// *13th Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver BC, 2004.
- [21] 闫晓宇, 李忠献, 李勇, 等. 考虑土-结构相互作用的多跨连续梁桥振动台阵试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, **46**(11): 98 – 104. (YAN Xiao-yu, LI Zhong-xian, LI Yong, et al. Shake tables test on a long-span continuous girder bridge considering soil-structure interaction[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, **46**(11): 98 – 104. (in Chinese))
- [22] 谢文, 孙利民. 采用振动台阵的超大跨斜拉桥大比例全模型试验研究[J]. *土木工程学报*, 2018, **51**(8): 47 – 59, 80. (XIE Wen, SUN Li-min. Experimental studies on a large-scaled full model of a super long-span cable-stayed bridge by using shaking table array system[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, **51**(8): 47 – 59, 80. (in Chinese))
- [23] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2002, **30**(7): 781 – 785. (WU Xiao-ping, SUN Li-min, HU Shi-de, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test[J]. *Journal of Tongji University*, 2002, **30**(7): 781 – 785. (in Chinese))
- [24] 楼梦麟, 宗刚, 牛伟星, 等. 土-桩-钢结构相互作用体系的振动台模型试验[J]. *地震工程与工程振动*, 2006, **26**(5): 226 – 230. (LOU Meng-lin, ZONG Gang, NIU Wei-xing, et al. Shaking table model test of soil-steel structure interaction system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, **26**(5): 226 – 230. (in Chinese))