

多点激励下桩-土-斜拉桥全模型振动台试验研究

谢 文¹ 孙利民² 楼梦麟²

(1. 宁波大学, 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: 大跨斜拉桥的自振频率和阻尼低以及空间尺度大, 其地震响应受桩基础、场地土特性和地震动空间效应的影响较大。然而, 由于试验条件和技术所限, 目前尚缺乏相关的全模型振动台试验研究。以一座设计主跨 1400m 超大跨斜拉桥为原型, 设计和制作了一座几何相似比为 1/70 且包括上部结构、桩基础和场地土等在内的试验模型, 通过振动台试验研究了多点激励对桩-土-斜拉桥全模型地震响应的影响及其规律。试验结果表明: 纵向多点激励使一侧主塔的纵向位移、一侧主塔和桥墩的纵向桩-土-结构相互作用效果以及主跨一侧竖向位移增大, 而另一侧减小; 横向多点激励使一侧主塔的横向位移和一侧桥墩的横向桩-土-结构相互作用效果增大, 另一侧减小, 但使两侧主塔的横向桩-土-结构相互作用效果和主跨两侧横向位移响应均增大; 桩-土-结构相互作用对斜拉桥的加速度响应产生不利影响。基于上述结果, 大跨斜拉桥的抗震设计或性能评估应考虑多点激励和桩-土-结构相互作用的影响。

关键词: 大跨斜拉桥; 振动台试验; 多点激励; 全模型; 桩-土-结构相互作用; 地震响应

中图分类号: U442.5⁺5 U448.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)05-0079-11

Shaking table test on a pile-soil-cable-stayed bridge full model under multi-support excitations

Xie Wen¹ Sun Limin² Lou Menglin²

(1. Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Seismic responses of long-span cable-stayed bridges may be significantly affected by the properties of the pile foundation and site soil as well as the spatial effect of ground motion because the long-span cable-stayed bridge has low natural frequencies, structural damping and large spatial scale. However, there are few experimental studies on the full model of a long-span cable-stayed bridge composed of the superstructure, pile foundation and site soil due to the limitations of shaking table testing facilities and technology. A complete model of 1/70-scaled cable-stayed bridge, composed of superstructure, pile foundations and site soil, was designed and fabricated according to a preliminary design of long-span cable-stayed bridge with main span of 1400 m. The full model was tested on the shaking table to study the mechanism associated with the seismic responses of the long-span cable-stayed bridge under uniform and multi-support excitations. Experimental results show that the longitudinal displacement response of the main tower, the longitudinal pile-soil-structure interaction effects of the main tower and piers, and the vertical displacement response of the main span in one side of the full model increase when being subjected to longitudinal multi-support excitations, while the corresponding seismic responses in other side decrease. The transverse displacement response of the main tower and the transverse pile-soil-structure interaction effects of the piers in one side increase when being subjected to transverse multi-support excitations, whereas the corresponding seismic responses in other side reduce. However, the transverse pile-soil-structure interaction effects of the towers and the transverse displacement of the main span in

基金项目: 国家自然科学基金(91515101-05、51608282)

作者简介: 谢文, 博士, 副教授

通讯作者: 孙利民, 博士, 教授

收稿日期: 2018-04-16

both sides increase for transverse multi-support excitations. Moreover, it is found that the pile-soil-structure interaction has adverse influences on the acceleration response of the cable-stayed bridge. Therefore, it is suggested that the multi-support excitations and pile-soil-structure interaction should be considered when conducting performance evaluation and seismic analyses on long-span cable-stayed bridges.

Keywords: long-span cable-stayed bridge; shaking table test; multi-support excitations; full model; pile-soil-structure interaction; seismic response

E-mail: lmsun@tongji.edu.cn

引 言

作为越江跨海的大跨桥梁,斜拉桥是一种很有竞争力的桥型。研究表明^[1-2],采用现有材料和结构形式,斜拉桥的跨径可达 1400m。大跨斜拉桥结构自振周期较长且阻尼较低,地震时虽不易发生整体破坏,但强震下可发生较大的位移响应,导致主塔、桥墩和支座等构件损伤甚至局部破坏。如 1995 年神户地震中 Higashi-Kobe 斜拉桥的支座出现损坏^[3]、1999 年台湾集集地震中集鹿斜拉桥的桥塔混凝土剥落以及桥墩发生明显裂缝等^[4]。大跨斜拉桥空间尺度大,地面运动的空间变化将是显著的,此空间变化引起的地震动空间效应对地震响应的影响可能是重要的^[5]。

目前,关于地震动空间效应对大跨斜拉桥地震响应的影响已开展了大量的数值模拟分析^[6-15]。结果表明:地震动空间效应对大跨斜拉桥地震响应的影响明显,但影响程度取决于桥梁结构体系及其动力特性以及地震动的输入特性^[16]。在试验研究方面,由于受设备能力的限制,地震动空间效应对大跨度斜拉桥地震响应影响的振动台试验相对滞后。但随着试验技术的快速发展,振动台试验已成为桥梁地震响应和抗震性能研究最有效方法之一,使得探讨地震动空间效应对桥梁模型地震响应的影响成为现实^[17-23],如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^[17];行波效应对大跨斜拉桥地震响应既有有利的一面^[18],也有不利的一面^[19,20];局部场地效应使大跨刚构桥的桥墩变形和墩底应变增大^[21];但既有试验研究几乎忽略了桩-土-结构相互作用的影响,即假设下部结构为刚性基础。而桩-土-结构相互作用对大跨度桥梁等柔性结构地震响应的影响可能更为突出,尤其当其建于软土地基之中。

关于桩-土-结构相互作用的振动台试验研究主要侧重于桥梁下部基础,即桥梁上部结构简化成集

中质量^[24-31],如韦晓等^[25]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^[28]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^[30]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^[31]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。

综上,目前尚缺乏针对超大跨斜拉桥多点激励的振动台试验研究,尤其是包含桩基础和场地土等在内的全模型试验,因此有必要开展多点激励下桩-土-斜拉桥全模型地震响应特性的振动台试验研究,其一,可揭示多点激励对桩-土-斜拉桥全模型地震响应的影响规律及其机理;其二,可验证多点激励下桩-土-斜拉桥全模型地震响应的动力分析模型和方法;其三,可验证多点激励的理论分析结果以及弥补仅通过理论分析无法发现新现象的不足。

本文以一座试设计的主跨 1400m 超大跨斜拉桥为原型,综合考虑振动台承载能力、几何尺寸和试验经费等限制条件,按几何相似比 1/70 设计和制作一座包括模型土、桩基础和上部结构等在内的斜拉桥试验模型;以笔者提出的具有良好抗震性能的辅助墩耗能体系为例^[32],基于多点振动台试验技术分别开展纵向多点激励、横向多点激励下桩-土-斜拉桥全模型试验研究,揭示多点激励对桩-土-斜拉桥全模型地震响应的影响规律及其机理。

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，其余相似比由上述三个基本相似比导出。试验模型的相似比见表 1。

表 1 试验模型相似比

Table 1 Similarity ratios of test model

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 ²	1/70 ²
	惯性矩 I	S_I	1/70 ⁴	1/70 ⁴
材料性能	弹性模量 E	S_E	0.3	1
	应力 σ	S_σ	0.3	1
	应变 ε	S_ε	1	1
动力性能	密度 ρ	$S_E / (S_a \cdot S_l)$	10.5	35
	水平加速度 a	S_a	2	2
动力性能	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

以一座试设计的主跨 1400m 超大跨斜拉桥为原型，按几何相似比严格缩尺后，试验模型总长 38200mm(见图 1)，主塔和桥墩高度分别为 5100mm 和 860mm，主塔和桥墩处分别设有 4×6 和 3×3 群桩基础，其桩长和桩径分别为 1000mm 和 105mm，群桩基础在层状剪切土箱中的相对位置如图 1 所示。主塔和桥墩采用 M15 微粒混凝土和 1.2~3.2mm 镀锌铁丝，纵筋与箍筋焊接成网状；桩基和承台采用 C40 混凝土和 6mm 螺纹钢。

采用层状剪切土箱盛放和模拟模型土^[33]。层状剪切土箱由 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 12mm，除底层框架外，其余层间放置凹槽，凹槽内放钢滚珠，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 2mm 的钢板防止横向滑动和扭转，1 号、4 号层状剪切土箱的长宽高分别为 6700mm、1700mm 和 1006mm，2 号、3 号层状剪切土箱的长宽高分别为 2300mm、2800mm 和 1006mm；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，斜拉索等效成 8×7 根直径为 8mm 的钢丝。

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相似比较小，附加全配重质量难以实现，因此模型采用欠配重。由于加速度相似比设计为 2，因此模型实际配重只需附加理论配重的 1/2；然后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见后图。

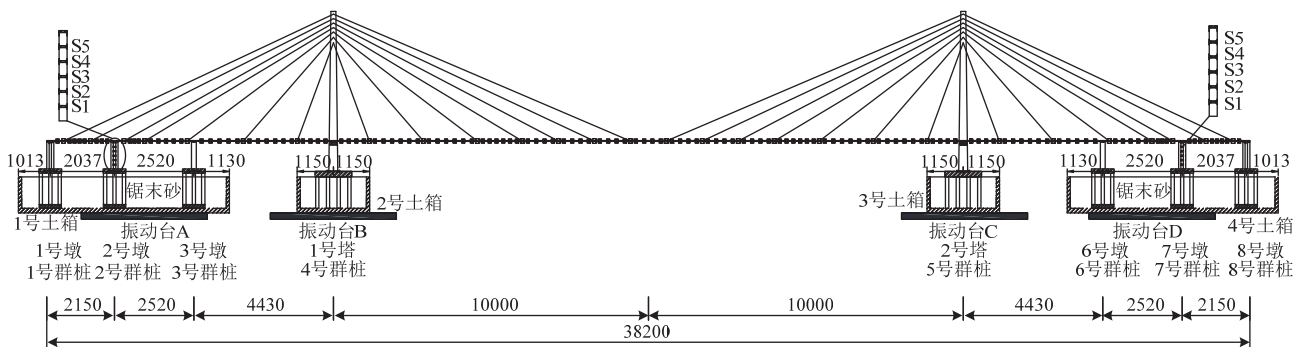


图 1 桩-土-斜拉桥全模型 (单位: mm)

Fig.1 Full model of pile-soil-cable-stayed bridge (unit: mm)

模型土由砂子和木屑均匀混合而成以降低剪切模量^[34]。由于试验原型为一座试设计斜拉桥，缺乏实际的地质场地，无法以原型土的动力特性作为模型土的设计依据。因此从土对结构地震响应的最

不利影响出发，设计模型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，然后通过共振柱试验确定模型土的剪切模量和密度，最终模型土由质量比为 3 : 1 的砂子和木屑组成，其密度

为 840kg/m^3 ，初始剪切模量为 5.65MPa ，剪切模量 G 和阻尼比 D 如图 2 所示。砂子和木屑经过晒干、过筛、均匀拌合以及入箱等程序；装入层状剪切土箱时分层压实，每层压实的厚度不超过 100mm ，装土过程中通过实际称重和压实体积来控制模型土的密度。

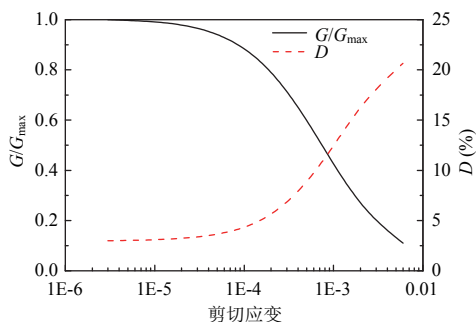


图 2 模型土剪切模量、阻尼比与剪切应变曲线

Fig.2 Relationship between shear modulus/damping ratio and shear strain

安装后的桩-土-斜拉桥全模型如图 3 所示，主塔下横梁与主梁、墩顶与主梁之间均安装四氟板滑动支座，1 号~3 号群桩、4 号群桩、5 号群桩和 6 号~8 号群桩分别与 1 号、2 号、3 号和 4 号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。关于试验模型的几何尺寸、模型配重、层状剪切土箱和模型土等详细设计和试验模型安装请参阅文献[32,35]。

1.3 结构体系

笔者研究了一致激励下考虑桩-土-结构相互作用的超大跨斜拉桥三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^[35]。鉴于辅助墩耗能体系具有更优良的抗震性能，因此本文仅以此结构体系为例，分别开展纵向和横向多点激励振动台试验研究，探讨多点激励对桩-土-斜拉桥全模型地震响应的影响及其规律。

辅助墩耗能体系的边界条件或连接条件为：边墩（1 号和 8 号墩）-主梁以及主塔-主梁之间安装四氟板滑动支座，辅助墩（2 号、3 号、6 号和 7 号墩）-主梁之间通过钢板焊接形成固结，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-主梁之间安装了刚度为 4080kN/m 的纵向弹性拉索，其刚度根据原型桥梁的最优参数缩尺而得。辅助墩耗能体系的力学简图如图 4 所示。



图 3 安装后桩-土-斜拉桥全模型

Fig.3 Full model of pile-soil-cable-stayed bridge after being assembled

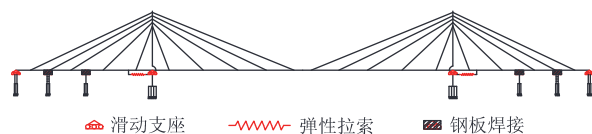


图 4 辅助墩耗能体系的力学简图

Fig.4 Sketch of energy dissipation structural system with auxiliary pier

2 试验方案

2.1 传感器布置

试验主要测量加速度、位移和应变等地震响应，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，试验模型总共有 383 个传感器，其中包括 68 个位移计、103 个加速度计和 212 个应变片，位移计和加速度计的布置如图 5 所示。

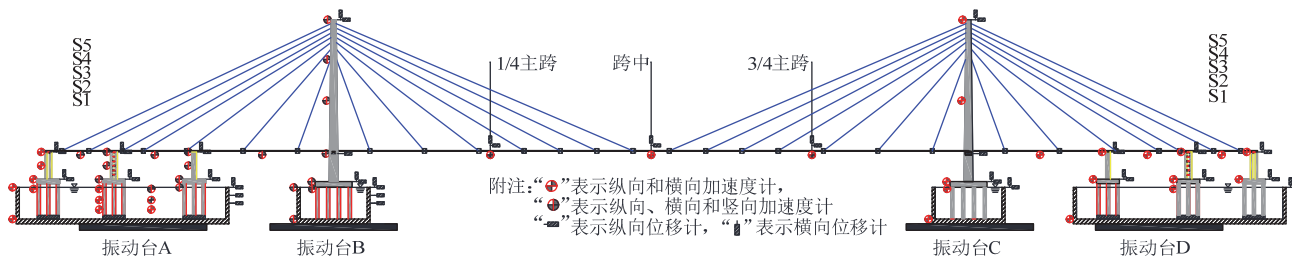


图 5 桩-土斜拉桥全模型测点布置

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

2.2 试验加载

由于试设计的超大跨斜拉桥缺乏实际的工程地质场地，因此选取了能反映我国沿海地区工程地质场地特征的 1 条基岩人工波以及由此生成的 4 条考虑了局部场地效应的地震波，分别记为 EQ 波、EQ1 波、EQ2 波、EQ3 波和 EQ4 波，然后在不同支承处输入不同地震波实现局部场地效应对斜拉桥地震响应的影响。当进行振动台试验时，为了考虑试验模型的缩尺效应，各地震波的时间间隔以及持时需按时间缩尺比进行压缩，压缩后的地震波加速度时程以及相应的频谱特性分别如图 6~图 7 所示。

将 EQ 波、EQ1 波、EQ2 波、EQ3 波和 EQ4 波的峰值地面加速度 (Peak Ground Acceleration,

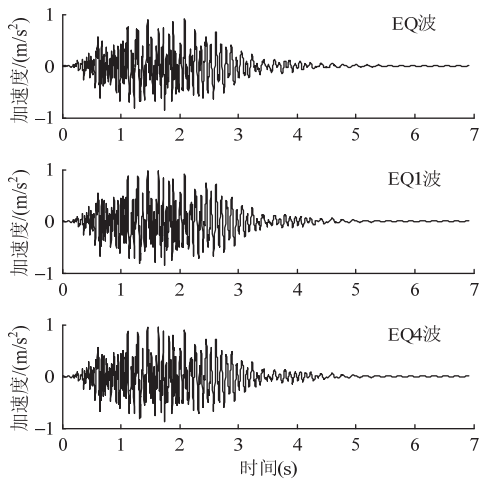


图 6 地震波加速度时程

Fig.6 Acceleration time history of earthquake waves

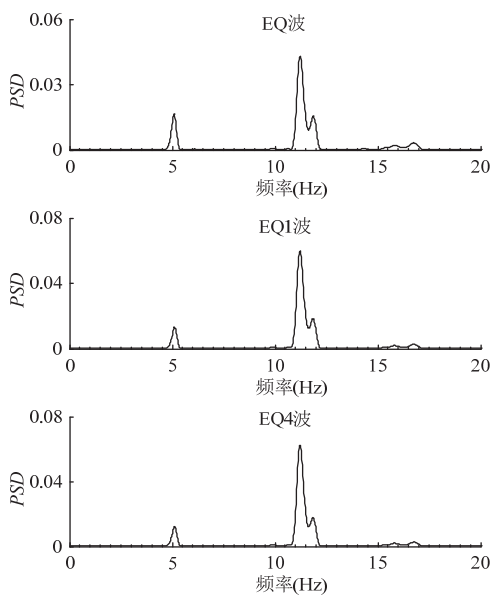


图 7 地震波加速度频谱

Fig.7 Acceleration frequency spectra of earthquake waves

PGA) 调至 0.1g, 分别从纵向和横向进行多点激励的振动台试验, 限于振动台的功能限制, 本试验未考虑竖向地震动输入的影响。试验工况列于表 2 中, 其中四点激励为振动台 A、B、C 和 D 同时分别输入 EQ1 波、EQ2 波、EQ3 波和 EQ4 波, 两点激励为振动台 A 和 B 一起联动以及振动台 C 和 D 一起联动, 且同时分别输入 EQ1 波和 EQ4 波, 一致激励为振动台 A、B、C 和 D 同时输入 EQ 波。

表 2 试验工况 (PGA=0.1g)

Table 2 Testing cases with PGA of 0.1g

方向	激励方式	振动台 A	振动台 B	振动台 C	振动台 D
纵向	一致激励	白噪声	白噪声	白噪声	白噪声
	四点激励	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4
	两点激励	EQ1	EQ1	EQ4	EQ4
	一致激励	EQ	EQ	EQ	EQ
横向	一致激励	白噪声	白噪声	白噪声	白噪声
	四点激励	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4
	两点激励	EQ1	EQ1	EQ4	EQ4
	一致激励	EQ	EQ	EQ	EQ

3 试验结果与分析

3.1 动力特性

在试验模型分别进行纵向和横向地震激励前, 采用白噪声先后进行纵向和横向扫频以追踪其相应方向的动力特性, 基于随机子空间方法识别了前 10 阶振型以及相应频率, 并利用修正后的有限元模型得到了相应振型及频率 (见表 3)。值得说明的是, 试验模型未出现扭转振型, 可能与试验模型设计时主梁的扭转刚度增大有关。

表 3 试验模型的前 10 阶频率及振型

Table 3 First 10-order frequencies and vibration modes 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, 其余频率均与数值结果吻合较好, 如主塔对称侧弯及主梁对称竖弯与数值结果的误差在 4% 以内, 且两种方法得到的振型完全一致, 但在此仅显示数值模型的部分振型, 如图 8 所示。表明随机子空间方法和有限元模型均可有效评估试验模型的动力特性。

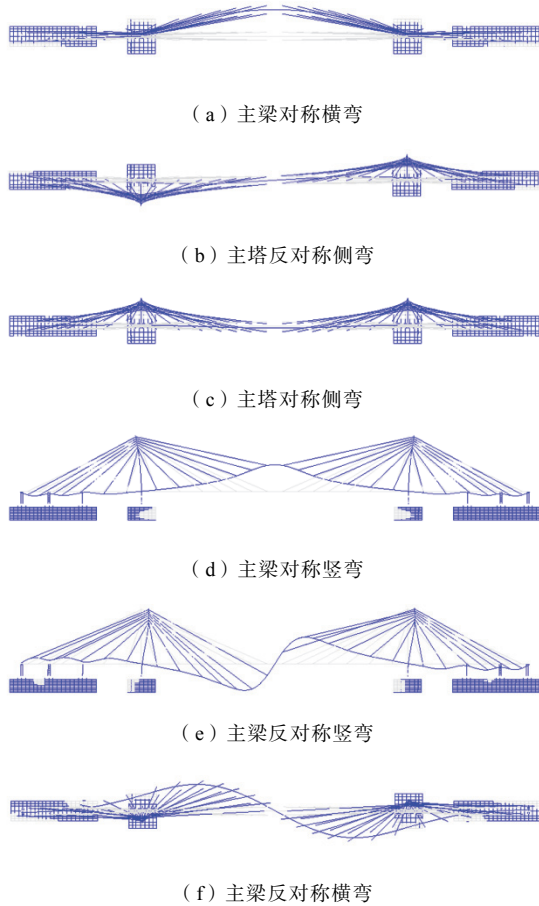


图 8 试验模型的前 6 阶振型

Fig.8 First 6-order vibration modes of test model

3.2 多点激励对桩-土-结构相互作用的影响

为了尽量消除振动台输出加速度在不同工况之间差异的影响, 引入加速度放大系数来讨论多点激励对桩-土-结构相互作用的影响, 其中加速度放大系数为构件加速度与相应振动台输出加速度之比。图 9 为试验模型分别在纵向、横向多点激励下塔底、墩底相应方向的最大加速度放大系数。

由图 9 可发现, 不管是多点激励还是一致激励, 塔底的最大加速度放大系数在 2.0~3.3 之间, 墩底的最大加速度放大系数在 1.0~3.3 之间, 大于相应振动台的加速度放大系数 1, 表明桩-土-结构相互作用对主塔、桥墩加速度响应均有放大作用, 产生不

利影响。这种现象表明: 如果斜拉桥在抗震设计或性能评估中忽略了该因素的影响, 其在地震作用下的动力响应或损伤程度有可能被低估。

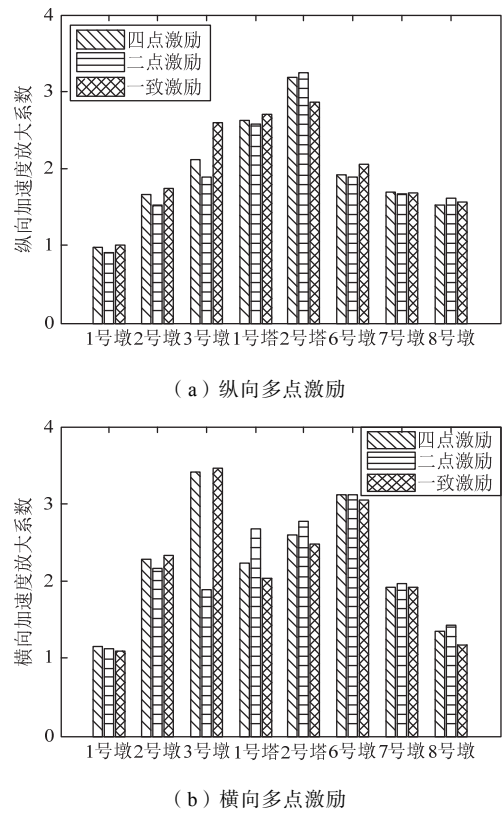


图 9 多点激励下塔底和墩底最大加速度放大系数

Fig.9 Maximum acceleration amplification factor at tower and pier bottoms under multi-support excitations

分析图 9(a) 可知, 与纵向一致激励结果相比, 纵向多点激励降低了模型左侧桩-土-结构相互作用效果, 而增大了右侧桩-土-结构相互作用效果。如在两点激励下, 1 号塔底、1 号墩底纵向加速度放大系数比相应的一致激励结果分别减小 5% 和 10%, 而 2 号塔底、8 号墩底纵向加速度放大系数比相应的一致激励结果分别增大 13% 和 3%。其可能原因是: 当模型遭受纵向一致激励 (反对称地震荷载) 时, 其加速度响应主要以反对称振型的贡献为主; 而当模型遭受纵向多点激励 (非对称地震荷载) 时, 除了反对称振型外, 其对称振型也会被激发, 对加速度响应产生影响, 因而导致其一侧加速度响应减小, 另一侧加速度响应增大。

考虑横向多点激励后, 模型左侧桥墩的桩-土-结构相互作用效果减弱, 而右侧桥墩的桩-土-结构相互作用效果加强 (图 9(b))。如在两点激励下, 3 号墩底横向加速度放大系数比相应的一致激励结果减小 9%, 而 6 号墩底横向加速度放大系数比相

应的一致激励结果增大 3%。其原因是：当模型遭受横向一致激励（对称地震荷载）时，其加速度响应主要以对称振型的贡献为主；而当模型遭受横向多点激励（非对称地震荷载）时，除了对称振型外，其反对称振型也会被激发，对加速度响应产生影响，导致一侧加速度响应降低，另一侧加速度响应增大。但值得注意的是，考虑横向多点激励后，桩-土-结构相互作用对主塔的影响效果更明显。如在两点激励下，1号塔底、2号塔底横向加速度放大系数比相应的一致激励结果分别增大 30%和 11%。其可能原因是：尽管横向多点激励会激发模型的主塔反对称侧弯，但同时也会激发其主塔对称侧弯，因为主塔反对称侧弯与其对称侧弯频率很接近（见表 3），因此不管激发以主塔为主的何种振型，均有可能导致其加速度响应增大。

3.3 多点激励对加速度响应的影响

图 10 为试验模型在多点激励下主跨的最大加速度放大系数。

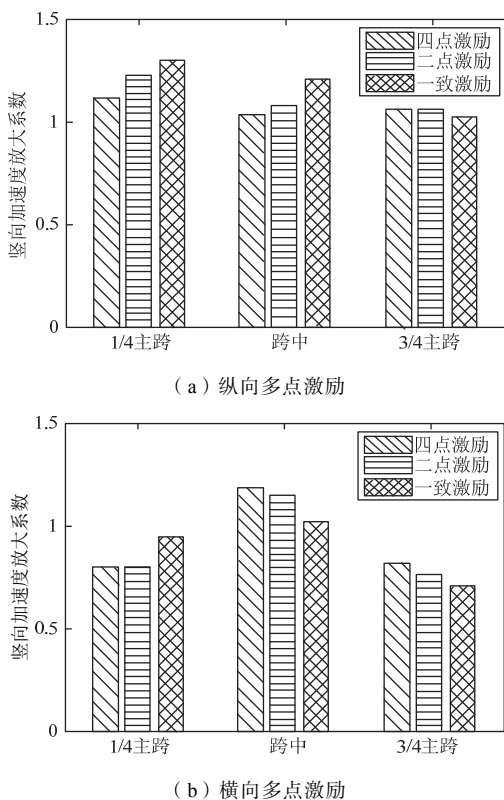


图 10 多点激励下主跨最大加速度放大系数

Fig.10 Maximum acceleration amplification factor of main span under multi-support excitations

由图 10 (a) 可知，考虑纵向多点激励后，1/4 主跨和跨中的竖向加速度放大系数减小，而 3/4 主跨竖向加速度放大系数增大。与一致激励结果相比，

四点激励使 1/4 主跨和跨中竖向加速度放大系数减小约 15%、而 3/4 主跨则增大 3%。由图 10 (b) 得知，考虑横向多点激励后，1/4 主跨最大横向加速度放大系数减小，而跨中和 3/4 主跨则增大。与一致激励结果相比，四点激励使 1/4 主跨最大横向加速度放大系数减小约 15%，而跨中和 3/4 主跨则增大约 15%。

3.4 多点激励对位移响应的影响

分别在纵向、横向多点激励下，试验模型的塔顶、塔底和塔-梁、墩顶和土箱顶以及主跨等关键部位的最大相对位移响应如图 11 及后图所示，其中相对位移为构件相对地面的绝对位移减去相应振动台的输出位移，如 1 号塔顶的相对位移等于塔顶的绝对位移减去振动台 B 的输出位移；2 号墩顶的相对位移等于 2 号墩顶的绝对位移减去振动台 A 的输出位移。

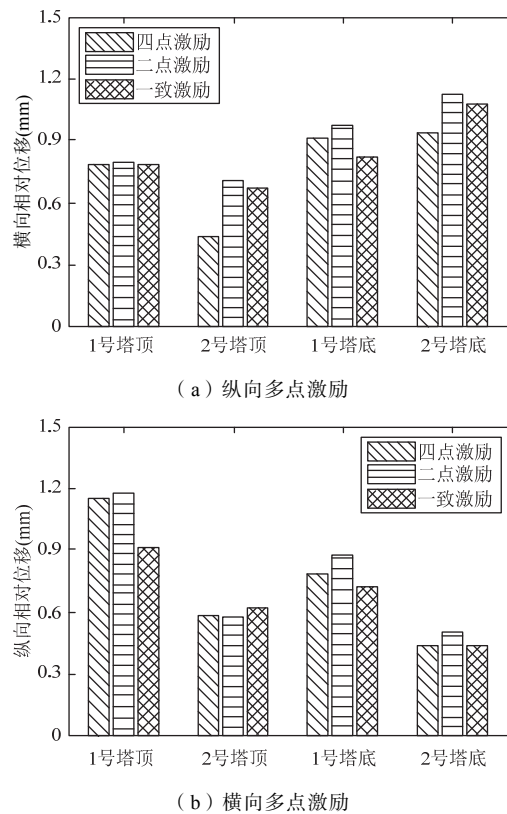


图 11 多点激励下主塔、塔-梁最大相对位移响应

Fig.11 Maximum relative displacement of main tower and tower-girder under multi-support excitations

由图 11 (a) 知，与纵向一致激励相比，纵向多点激励使一侧塔顶、塔-梁最大纵向相对位移增大，另一侧最大纵向相对位移减小。如在纵向四点激励下，1 号塔顶和塔-梁的最大纵向相对位移比纵向一致激励结果分别增大 0.2%和 10%，而 2 号塔顶

和塔-梁的最大纵向相对位移分别减小 35%和 13%。其主要原因是：在纵向一致激励下，试验模型的各主塔以相同方式运动（图 12（a）），而在纵向多点激励下，试验模型的不同主塔出现不同的运动模式（图 12（b）），两种模式叠加后导致主塔一侧位移响应增大，另一侧位移响应减小。

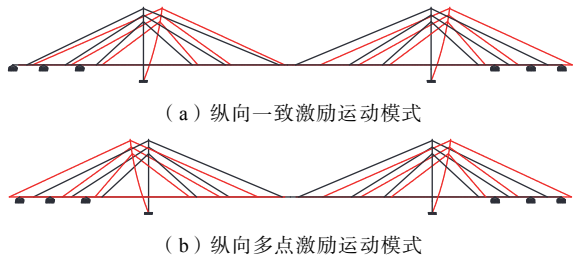


图 12 不同纵向激励下斜拉桥的不同运动模式

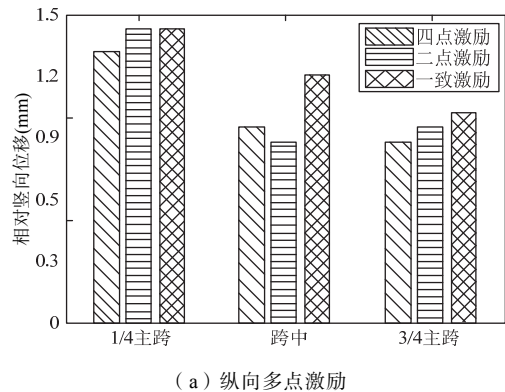
Fig.12 Different motion modes of cable-stayed bridge under longitudinal earthquake excitations

考虑横向多点激励后，模型一侧主塔最大横向相对位移响应增大，另一侧主塔的变化相对较小，如图 11（b）所示。如在横向四点激励下，1号塔顶和塔底最大横向相对位移比横向一致激励结果分别增大 28%和 11%，2号塔顶和塔底最大横向相对位移分别减小 6%和 4%。其主要原因是：在横向一致激励下，试验模型各部位也以相同方式移动，而在横向多点激励下，试验模型的不同部位出现不同的移动模式，导致一侧主塔横向相对位移增大，另一侧横向相对位移减小。

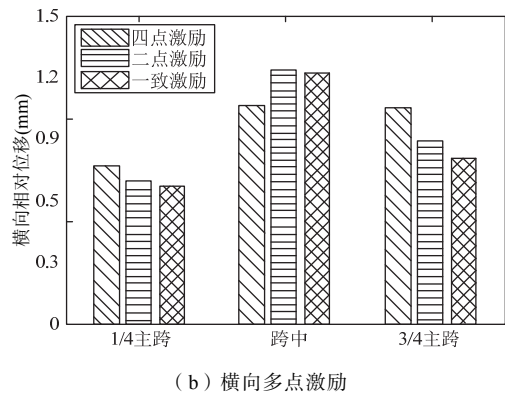
相同观察同样适用于多点激励对主梁位移响应的影响。即考虑纵向多点激励后，主跨一侧最大竖向相对位移增大，而另一侧及跨中减小；如与纵向一致激励结果相比，纵向两点激励使 1/4 主跨的最大竖向相对位移略增 1%，而跨中和 3/4 主跨分别减小 28%和 6%，如图 13（a）所示。考虑横向多点激励后，主跨两侧最大横向相对位移增大，而跨中减小；如与横向一致激励结果相比，横向四点激励使跨中最大横向相对位移减小 12%，而 1/4 主跨和 3/4 主跨分别增大 16%和 30%，见图 13（b）。

总体来说，考虑纵向多点激励后墩顶最大纵向相对位移有所减小，如图 14（a）所示。与纵向一致激励结果相比，纵向两点激励下 1 号、2 号和 3 号墩顶的最大纵向相对位移分别减小 19%、21%和 12%。尽管在纵向多点激励下模型的对称竖弯振型更容易被激发，但其对称竖弯振型在桥墩处的振型幅值相对较小，因而对墩顶纵向相对位移的影响较小。但墩顶最大纵向相对位移仍有变化，其可能原

因是：在不同激励方式下，即使相同振型被激起，其振动能量可能不同，进而对其位移响应的贡献也不同。



(a) 纵向多点激励



(b) 横向多点激励

图 13 纵向多点激励下主跨最大相对位移响应

Fig.13 Maximum relative displacement of main span under multi-support excitations

由图 14（b）可知，考虑横向多点激励后，远离主塔处的墩顶最大横向相对位移减小，而靠近主塔处的墩顶增大。如在横向四点激励下，2 号和 7 号墩顶最大横向相对位移与横向一致激励结果相比减小约 20%，而 3 号和 6 号墩顶最大横向相对位移比横向一致激励结果分别增大 25%和 16%。其可能原因是：横向多点激励仍会更易激发主跨反对称横弯振型，但由于塔-梁处横向设置滑动支座（基本可自由滑动），其主跨反对称横弯振型对近主塔处桥墩的影响相对较大，因而会增大 3 号和 6 号墩顶的横向相对位移。此外，远离主塔处桥墩的位移变化可能与不同激励方式激发振型的不同能量有关。

分析图 15 可知，考虑多点激励后，2 号和 3 号土箱顶的最大纵向相对位移增大，而 1 号和 4 号土箱顶有所减小。如在纵向四点激励下，2 号和 3 号土箱顶最大纵向相对位移比纵向一致激励结果分别增大 21%和 7%。在横向两点激励下，2 号和 3 号土箱顶最大横向相对位移与横向一致激励结果相比分

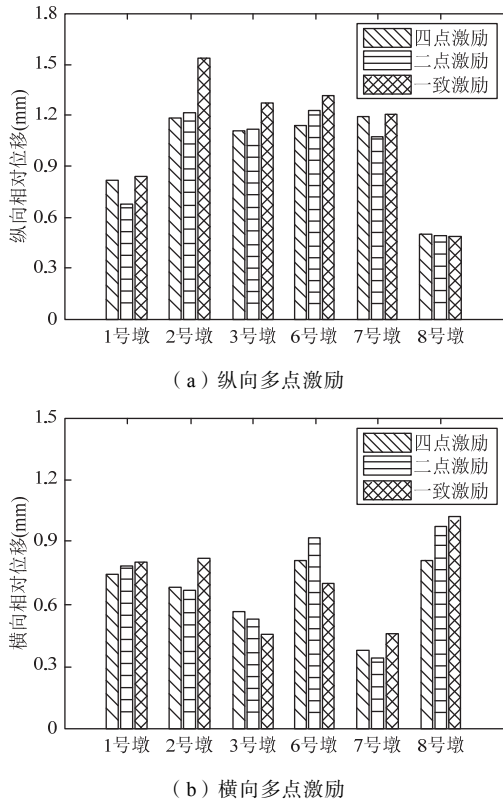


图 14 多点激励下墩顶最大相对位移响应

Fig.14 Maximum relative displacement at pier tops under multi-support excitations

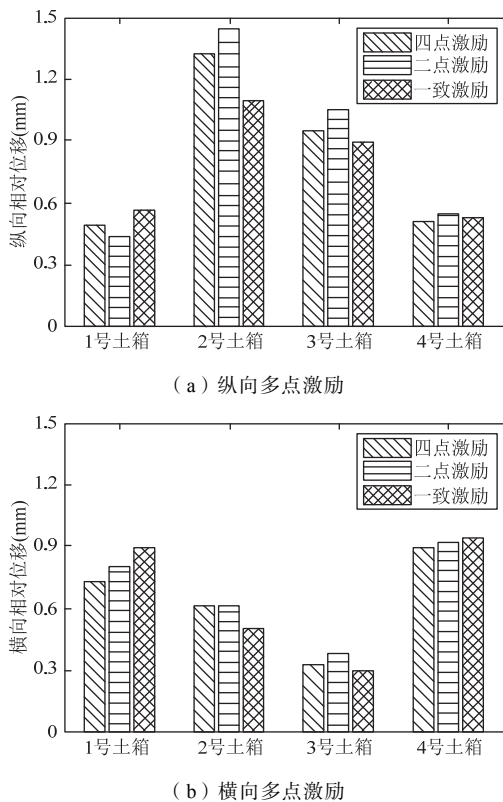


图 15 多点激励下土箱顶最大相对位移响应

Fig.15 Maximum relative displacement at shear box tops under multi-support excitations

别增大 24%和 29%。这是因为：不同激励方式激发土体及土箱的振型能量可能不同，致使其位移响应也不同。

4 结论

以一座试设计的主跨 1400m 超大跨斜拉桥为原型,设计和制作了一座几何相似比为 1/70 且包括桩基础、场地土和上部结构等在内的试验模型,通过振动台试验研究了多点激励对斜拉桥地震响应的规律,得到以下结论:

(1) 多点激励对桩-土-斜拉桥的位移响应产生复杂且不利影响。多点激励使一侧主塔的位移响应增大,另一侧减小;纵向多点激励使主跨一侧竖向位移响应增大,另一侧减小,横向多点激励使主跨两侧横向位移响应均增大。从最不利角度出发,斜拉桥的抗震性能分析需考虑多点激励的影响。

(2) 考虑多点激励后,桩-土-斜拉桥一侧的纵向桩-土-结构相互作用效果增大,另一侧减小;一侧桥墩的横向桩-土-结构相互作用效果加强,另一侧减弱;但主塔的横向桩-土-结构相互作用效果均增强。

(3) 桩-土-结构相互作用对斜拉桥的加速度响应产生不利影响,如塔底、墩底加速度与其相应振动台输出加速度相比,最大的放大程度约 3.3 倍。因此,斜拉桥的抗震性能分析需考虑该因素的影响。

(4) 本文探讨了多点激励对桩-土-斜拉桥全模型地震响应的规律,为动力响应分析方法和模型验证提供试验基础,为相关重大工程的抗震设计提供参考价值。

致谢

振动台试验得到同济大学土木工程学院梁发云教授、陈清军教授和袁万城教授等专家的指导和帮助,得到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、罗超和杨耀华等学生的帮助,在此表示感谢!

参考文献

[1] Nagai M, Fujino Y, Yamaguchi H, et al. Feasibility of a 1,400m span steel cable-stayed bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 444-452

[2] Sun B, Cheng J, Xiao R C. Preliminary design and parametric study of 1400 m partially earth-anchored cable-stayed bridge [J]. Science China Technological

- Sciences, 2010, 53(2): 502-511
- [3] Wilson J C. Repair of new long-span bridges damaged by the 1995 Kobe Earthquake [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2003, 17(4): 196-205
- [4] 周智杰. 集鹿大桥震害评估与修复之研究[D]. 台湾: 台湾大学, 2004 (Zhou Zhijie. Evaluation and repaired on seismic damage of Chi-Lu bridge [D]. Taiwan: Taiwan University, 2004 (in Chinese))
- [5] 陈幼平, 周宏业. 斜拉桥地震反应的行波效应[J]. 土木工程学报, 1996, 29(6): 61-68 (Chen Youping, Zhou Hongye. Seismic behavior of cable-stayed bridges under travelling wave excitation [J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(6): 61-68 (in Chinese))
- [6] 项海帆. 斜张桥在行波作用下的地震反应分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1983(2): 4-12 (Xiang Haifan, Earthquake response analysis of cable-stayed bridges under the action of travelling waves [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1983(2): 4-12 (in Chinese))
- [7] Nazmy A S, Abdel-Ghaffar A M. Effects of ground motion spatial variability on the response of cable-stayed bridges [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1992, 21(1): 1-20
- [8] Soyuluk K, Dumanoglu A A. Spatial variability effects of ground motions on cable-stayed bridges [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2004, 24(3): 241-250
- [9] 李忠献, 黄健, 丁阳, 等. 不同地震激励下大跨度斜拉桥的地震反应分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 48-53 (Li Zhongxian, Huang Jian, Ding yang, et al. Seismic responses of long span cable stayed bridges under different patterns of earthquake excitations [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 48-53 (in Chinese))
- [10] 全伟, 李宏男. 大跨斜拉桥多维多点地震激励减震控制方法分析[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(4): 540-546 (Quan Wei, Li Hongnan. Analysis of earthquake mitigation control method for large-span cable-stayed bridge under multi-component multi-support earthquake [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(4): 540-546 (in Chinese))
- [11] Raheem S E A, Hayashikawa T, Dork U. Ground motion spatial variability effects on seismic response control of cable-stayed bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 10(1): 37-49
- [12] 王再荣, 孙利民, 程纬. 超大跨斜拉桥地震行波效应分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(10): 1471-1481 (Wang Zairong, Sun Limin, Cheng Wei. Effects of travelling wave excitation for super long-span cable-stayed bridges [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(10): 1471-1481 (in Chinese))
- [13] 李帅, 王景全, 颜晓伟, 等. 近断层地震动空间分布特征对斜拉桥地震响应影响[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 94-104 (Li Shuai, Wang Jingquan, Yan Xiaowei, 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, 2016, 49(6): 94-104 (in Chinese))
- [14] Zhong J, Jeon J S, Yuan W, et al. Impact of spatial variability parameters on seismic fragilities of a cable-stayed bridge subjected to differential support motions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6): 04017013
- [15] Li C, Li H N, Hao H, et al. Seismic fragility analyses of sea-crossing cable-stayed bridges subjected to multi-support ground motions on offshore sites [J]. Engineering Structures, 2018, 165: 441-456
- [16] 何庆祥, 沈祖炎. 结构地震行波效应分析综述[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 50-57 (He Qingxiang, Shen Zuyan. Review of structural seismic analysis of travelling wave effects [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 50-57 (in Chinese))
- [17] Johnson N, Ranf R, Saiidi M, et al. Seismic testing of a two-span reinforced concrete bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(2): 173-182.
- [18] 高文军, 唐光武, 黄福伟, 等. 厦漳跨海大桥北汉主桥振动台试验研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(4): 7-13 (Gao Wenjun, Tang Guangwu, Huang Fuwei, et al. Shaking table test study of north main bridge of Xiazhang sea-crossing bridge [J]. Bridge Construction, 2013, 43(4): 7-13 (in Chinese))
- [19] 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 1): 25-29 (Fang Zhenzheng, Zhang Chao, Chen Yongjian, 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))
- [20] 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
- [21] 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 Xiaoyu, Li Zhongxian, 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))
- [22] 闫聚考, 李建中, 彭天波, 等. 三塔两跨悬索桥行波效应振动台试验及数值研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 44-48 (Yan Jukao, Li Jianzhong, Peng Tianbo, et al. Shake table tests and numerical analysis for travelling wave effect of a three-tower two-span suspension bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7): 44-48 (in Chinese))
- [23] 李晰, 贾宏宇, 李倩. 近断层地震动作用下大跨度曲线刚构桥台阵试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(5): 199-208 (Li Xi, Jia Hongyu, Li Qian. Shaking table tests for a long-span curved rigid bridge under near-fault ground motions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(5): 199-208 (in Chinese))

- [24] Makris 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
- [25] 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 Lichu, Wang Junjie. Shake table test on soil-pile-structure interaction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 35(4): 91-97 (in Chinese))
- [26] 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
- [27] 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 Xianzhang, Xu Pengju, et al. Shaking table test on seismic response of pile groups of bridges in liquefiable ground [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(5): 672-680 (in Chinese))
- [28] 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
- [29] 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(3): 196-204
- [30] 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
- [31] 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 Aijun, Wang Xiaowei. Shake table test of pile supported bridge under scour condition [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(12): 280-289 (in Chinese))
- [32] 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 Limin. 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))
- [33] 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 Xiaoping, Sun Limin, Hu Shide, et al. Development of laminar shear box used in shaking table test [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2002, 30(7): 781-785 (in Chinese))
- [34] 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 Menglin, Zong Gang, Niu Weixing, 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))
- [35] 孙利民, 谢文. 超大跨斜拉桥多点振动台试验研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(11): 38-48 (Sun Limin, Xie Wen. Experimental studies on super long-span cable-stayed bridge by using multiple shake table testing [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(11): 38-48 (in Chinese))

谢文(1981—),男,博士,副教授。主要从事桥梁抗震与振动控制研究。

孙利民(1963—),男,博士,教授。主要从事健康监测、桥梁抗震与振动控制等研究。

楼梦麟(1947—),男,博士,教授。主要从事工程结构抗震与振动控制、土-结构动力相互作用等研究。