

# 考虑地震动空间效应的斜拉桥模型 振动台台阵试验

郑庆涛<sup>1,2</sup>, 苏俊省<sup>1,2</sup>, 李忠献<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

**摘要:**针对大跨斜拉桥空间跨度范围广、局部场地条件差异性大,服役期内可能遭受空间地震动影响的问题,开展了空间地震动作用下大跨斜拉桥振动台台阵试验。研究了地震动空间效应对斜拉桥关键截面动力响应(加速度、位移和应变)的影响规律。研究表明:地震动空间效应对斜拉桥的地震动力响应有明显影响,其中行波效应影响较小,考虑行波效应和相干效应时影响次之,同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应时影响最为显著。以主塔为例,与一致激励相比,同时考虑空间地震动的行波效应、相干效应和局部场地效应时,主塔加速度、位移和应变最大增加幅值分别为55.69%、62.37%和67.37%。因此,开展大跨斜拉桥结构抗震设计时,采用一致激励或仅考虑行波效应时可能会低估斜拉桥的实际地震响应,应综合考虑行波效应、相干效应和局部场地效应等地震动空间效应。

**关键词:**大跨斜拉桥;振动台台阵试验;行波效应;相干效应;局部场地效应

中图分类号:U448.27

文献标识码:A

## Shaking table test of a cable-stayed bridge model considering the spatial effects of ground motion

ZHENG Qingtao<sup>1,2</sup>, SU Junsheng<sup>1,2</sup>, LI Zhongxian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** This paper investigates the effects of spatial effects of seismic ground motions on the seismic responses of long-span cable-stayed bridges, considering their large range and notable variations in local site conditions. Shaking table tests were conducted on a cable-stayed bridge, and the dynamic responses (acceleration, displacement, and strain) of critical sections of the cable-stayed bridge were compared and analyzed. The results demonstrate the significant influence of spatial effects of ground motion on the dynamic responses of the cable-stayed bridge. Specifically, the analysis reveals that the wave passage effect has the least impact on the dynamic responses of the cable-stayed bridge, followed by the combined effect of the wave passage and coherence, while the combined effects of the wave passage, coherence, and local site conditions exert the largest influence. Taking the main tower as an example, the maximum acceleration, displacement, and strain responses increased by 55.69%, 62.37%, and 67.37%, respectively, when spatial seismic motions incorporating the wave passage effect, coherence effect, and local site effects were considered, as compared to uniform excitation. Consequently, the seismic responses of cable-stayed bridges may be underestimated if only uniform excitation or the wave passage effect is considered. It is therefore imperative to comprehensively account for the effects of wave passage, coherence, and local site conditions of the spatial ground motion in the dynamic response analysis of long-span cable-stayed bridges.

收稿日期:2023-07-22; 修回日期:2023-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52238012,51427901)

作者简介:郑庆涛(1990—),男,博士研究生,主要从事桥梁抗震研究。E-mail:zhengqingtao@tju.edu.cn

通讯作者:李忠献(1961—),男,教授,博士,主要从事结构工程与防灾减灾研究。E-mail:zxli@tju.edu.cn

**Key words:** long-span cabled-stayed bridge; shaking tables test; wave passage effect; coherence effect; local site effect

## 0 引言

大跨斜拉桥具有空间跨度范围广、局部场地条件差异性大的特点,其服役期内可能遭受地震动空间效应的影响(以下简称为空间地震动)。空间地震动具有行波效应、相干效应和局部场地效应等特征<sup>[1-2]</sup>,可能对大跨度桥梁的动力响应产生一定影响<sup>[3]</sup>。

孙利民等<sup>[4-6]</sup>采用振动台试验和数值模拟,研究了行波效应对斜拉桥地震响应的影响,指出纵向行波增大了塔顶纵向加速度和主跨竖向加速度,而横向行波降低了塔顶和主跨横向加速度;且行波效应降低了辅助墩的耗能作用,导致桥塔的地震损伤增大。李小珍等<sup>[7]</sup>和沈禹等<sup>[8]</sup>研究了行波效应对矮塔斜拉桥地震响应的影响,指出行波效应对桥梁地震响应的影响与剪切波速相关,应在斜拉桥抗震设计时予以考虑。许基厚等<sup>[9]</sup>以一座主跨为820 m的双塔非对称斜拉桥为研究对象,研究了行波效应对塔顶、主梁和塔底等关键位置动力响应的影响,指出与一致激励相比,行波效应作用下塔底剪力减小,主梁轴力增加,行波效应在较小视波速下引起塔顶纵向位移减小,而在较大视波速下则影响不明显。曾勇等<sup>[10]</sup>研究表明,峰值加速度相同,但地震动频谱和持时不同时,行波效应对斜拉桥动力响应的影响不同,应根据不同场地条件开展行波效应作用下斜拉桥抗震分析。

相干效应反映了地震场中任意两点的空间相关性,是决定互功率谱密度函数的重要指标,将影响空间地震动峰值和频谱特性,进而影响桥梁结构地震动力响应<sup>[11]</sup>。SOYLUK等<sup>[12]</sup>建立了主跨200、400、600 m的斜拉桥数值模型,研究了相干效应对斜拉桥地震动力响应的影响,指出相干效应对斜拉桥动力响应的影响与相干函数有关,在抗震分析时应予以考虑。李忠献等<sup>[13-14]</sup>研究了地震动空间效应下城市高架桥梁地震碰撞响应,指出同时考虑行波效应与相干效应时碰撞最为显著。武芳文等<sup>[15-16]</sup>研究表明,地震动相干效应导致桥梁结构的内力和位移响应明显增大,对斜拉桥进行随机地震响应分析时,必须考虑地震动空间相干效应的影响。陈志伟等<sup>[17]</sup>研究了地震动相干效应对高墩大跨铁路桥梁动力响应的影响,指出地震动相干效应对桥墩剪力、弯矩和位移响应均有明显放大。

当基岩地震动通过上覆土传至地表时,由于局部场地效应,地震动将产生不可忽略的放大和过滤作用,进而影响桥梁结构动力响应<sup>[11]</sup>。LI等<sup>[18]</sup>研究了不同场地条件下相邻桥梁的动力响应,指出相较于浅层土和岩石场地,桥梁结构在软土地下的位移响应更大,碰撞更为显著。雷虎军等<sup>[19]</sup>研究表明,场地效应将显著影响大跨高速铁路钢桁梁斜拉桥车桥系统的动力响应。程麦理等<sup>[20-21]</sup>开展了多点激励下非规则高墩曲线桥梁地震台阵试验,指出局部场地效应增大了曲线桥梁结构地震响应。李忠献等<sup>[22-23]</sup>研究表明,局部场地条件对入射波产生过滤和放大效应,导致其频率和振幅成分明显改变,同时考虑行波效应和局部场地效应时,桥墩的动力响应较一致激励以及单独考虑行波效应和局部场地效应时有所增大。

目前国内外学者通过数值模拟或振动台试验,开展了空间地震动下桥梁动力响应研究。然而,综合考虑行波效应、相干效应和局部场地效应的地震动空间效应对斜拉桥动力响应影响的研究较少,尤其缺乏相关的全桥振动台台阵试验研究。针对这一问题,本文开展了空间地震动作用下大跨斜拉桥地震响应振动台台阵试验,研究了地震动空间效应对斜拉桥动力响应的影响,为大跨斜拉桥抗震设计提供依据。

## 1 试验设计

### 1.1 模型设计

选取我国东南沿海地区某大跨斜拉桥为原型,桥梁全长840 m,跨径组合为(60+120+480+120+60) m,主塔采用宝石型塔柱结构,塔高155.1 m,边墩及辅助墩为钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)空心薄壁结构,墩高47.5 m,主梁采用扁平流线型钢箱梁,如图1(a)所示。根据柯西公式<sup>[24]</sup>,分别确定试验模型几何尺寸、加速度、密度和弹性模量相似比分别为 $S_l = 1/52.46$ 、 $S_a = 3$ 、 $S_\rho = 5.83$ 和 $S_E = 1/3$ ,其余物理量相似比由量纲相似推导可得,如表1所示。

$$\frac{S_E}{S_\rho S_l S_a} = 1 \quad (1)$$

式中,  $S_E$ 、 $S_\rho$ 、 $S_l$ 和  $S_a$ 分别为弹性模量、密度、长度和加速度相似比。

基于相似比参数,按照钢筋配筋率与原型一致的原则,分别对斜拉桥主塔、边墩和辅助墩进行缩尺设计;钢箱梁按照横桥向及纵桥向抗弯刚度等效的原则进行缩尺设计;在保证桩轴压比和抗弯刚度等效的前提下对主塔、边墩及辅助墩桩进行并桩处理;桩底与基础现浇为一体,基础预留螺栓孔,将基础与振动台面锚固,实现缩尺模型边界条件的模拟;试验模型分别采用微粒混凝土和镀锌铁丝对原型桥中混凝土及钢筋进行模拟。斜拉桥缩尺模型示意图如图 1(b) 所示。

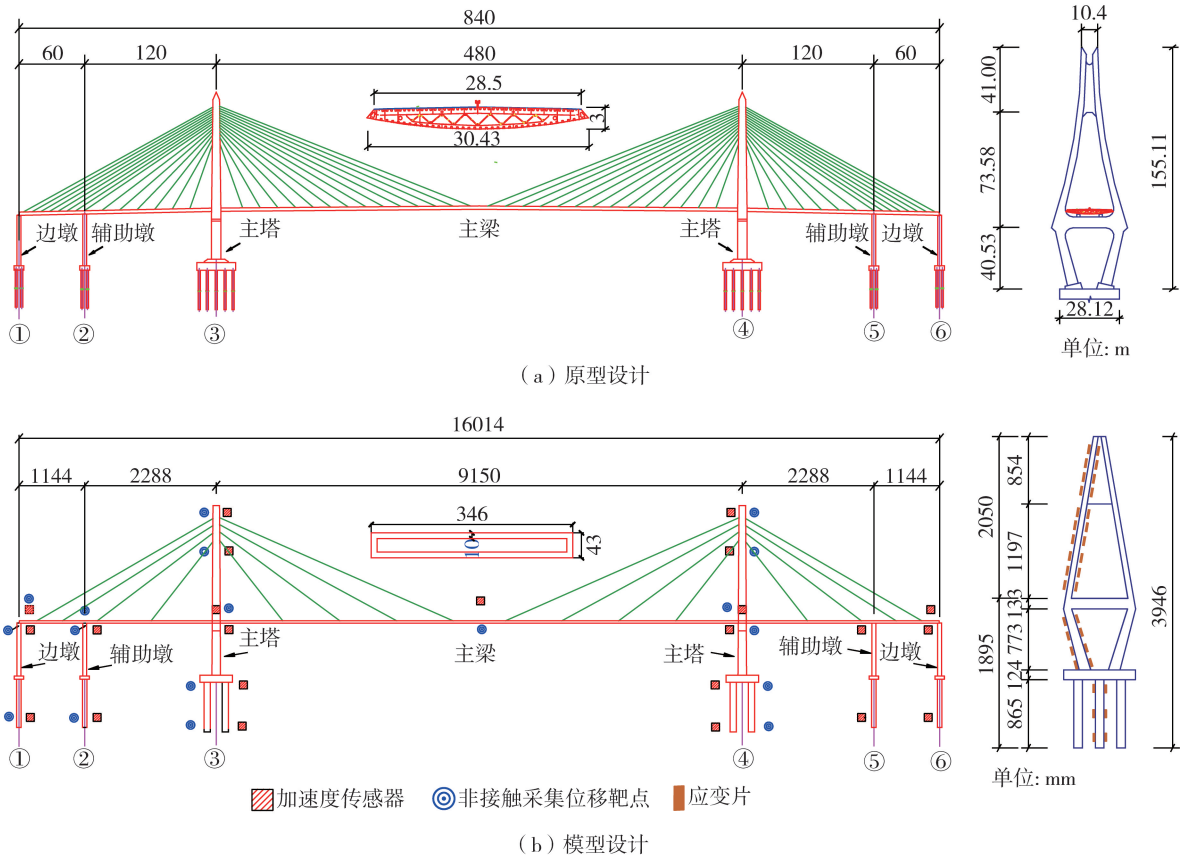


图 1 斜拉桥设计尺寸图

Fig. 1 Diagram of design dimension for long-span cable-stayed bridge

表 1 斜拉桥振动台台阵试验模型设计相似关系

Table 1 Similarity relationship of shaking table array test for cable-stayed bridge model

| 物理量  | 相似关系                       | 相似比     | 物理量 | 相似关系                          | 相似比         |
|------|----------------------------|---------|-----|-------------------------------|-------------|
| 长度   | $S_l$                      | 1/52.46 | 应变  | $S_\epsilon = S_\sigma / S_E$ | 1           |
| 弹性模量 | $S_E$                      | 1/3     | 质量  | $S_m = S_\sigma S_l^2 / S_a$  | 1/24 762.33 |
| 密度   | $S_\rho = S_E / (S_a S_l)$ | 5.83    | 力   | $S_F = S_\sigma S_l^2$        | 1/8 256.15  |
| 加速度  | $S_a$                      | 3       | 时间  | $S_t = S_l^{0.5} S_a^{-0.5}$  | 1/12.55     |
| 应力   | $S_\sigma = S_E$           | 1/3     | 频率  | $S_f = S_l^{-0.5} S_a^{0.5}$  | 12.55       |

## 1.2 测试方案

通过布置不同类型的传感器,获取试验模型关键截面处的动力响应,包括加速度、位移和应变等。表 2 给出了传感器种类及数量,其中加速度传感器 23 只;非接触采集设备(DIC)1 套(共计 19 个测量靶点);应变片 120 片,具体测点位置如图 1(b) 所示。斜拉桥振动台台阵试验现场图如图 2 所示,本文全部试验均在天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室的水下地震模拟振动台系统上完成。

表 2 传感器种类及数量  
Table 2 Types and numbers of sensors

| 传感器种类        | 传感器数量         | 测点位置                             |
|--------------|---------------|----------------------------------|
| 加速度传感器       | 23 支          | 沿主塔、边墩和辅助墩高度及主梁长度方向关键截面处布置加速度传感器 |
| 非接触采集设备(DIC) | 1 套(19 个测量靶点) | 沿主塔、边墩和辅助墩高度及主梁长度方向关键截面处布置位移测点   |
| 应变片          | 120 片         | 沿主塔、边墩和辅助墩高度方向的关键截面处布置应变片        |

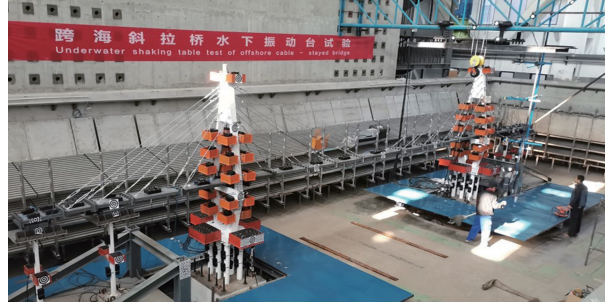


图 2 大跨斜拉桥振动台台阵试验现场图

Fig. 2 Test site overview of shaking table test of long-span cable-stayed bridge

### 1.3 工况设置

#### 1.3.1 空间地震动合成

空间地震动功率谱密度函数为空间各点互功率谱函数和自功率谱函数组成的功率谱密度函数矩阵<sup>[25]</sup>, 本文采用 Clough-Penzien 功率谱密度函数模型<sup>[11,22]</sup>, 可表示为

$$S_g(\omega) = |H_g(\omega)|^2 |H_f(\omega)|^2 S_0$$

$$H_g(\omega) = \frac{\omega_g^2 + 2i\xi_g \omega_g \omega}{\omega_g^2 - \omega^2 + 2i\xi_g \omega_g \omega} \quad (2)$$

$$H_f(\omega) = \frac{\omega^2}{\omega_f^2 - \omega^2 + 2i\xi_f \omega_f \omega}$$

式中:  $H_g(\omega)$  为 Kanai-Tajimi 滤波函数;  $H_f(\omega)$  为高通滤波函数;  $S_0$  为基岩白噪声的不变功率谱函数(谱强度因子);  $\omega_g$  和  $\xi_g$  分别为中心频率和阻尼比;  $\omega_f$  和  $\xi_f$  分别为过滤层的中心频率和相应阻尼比。

选用 Sobczyk 相干函数模型<sup>[11]</sup>表达空间地震动相干效应的影响, 即

$$r_{ij}(\omega, d) = |r_{ij}(\omega, d)| \exp(i\varphi_{ij}(\omega, d)) = e^{-\beta\omega d_{ij}^2/v_{app}} e^{-i\omega d_{ij} \cos \alpha/v_{app}} \quad (3)$$

式中:  $|r_{ij}(\omega, d)|$  为衡量  $i, j$  两点相关度的迟滞函数; 相干函数的相位  $\varphi_{ij}(\omega, d)$  体现了行波效应的影响, 当仅考虑行波效应时, 试验中通常采用不同振动台台面输入地震动时间差模拟行波效应, 研究行波效应对桥梁动力响应的影响<sup>[4-5]</sup>, 如式(4)所示:

$$\Delta t = \frac{d_{ij}}{v_s} \quad (4)$$

式中:  $\Delta t$  为不同振动台输入地震动时间差;  $d_{ij}$  为空间任意两点  $i$  和  $j$  点的距离;  $v_s$  为土层剪切波速。

通过场地传递函数考虑局部场地效应<sup>[11,22]</sup>, 进而确定功率谱密度函数矩阵, 基于原型谱表示法, 得到空间任意一点考虑局部场地效应的平稳地震动为

$$a_i(t) = \sum_{j=1}^i \sum_{l=1}^N A_{ij}(\omega_l) \cos[\omega_l t + \beta_{ij}(\omega_l) + \varphi_{jl}(\omega_l)] \quad (5)$$

式中:  $A_{ij}(\omega)$  和  $\beta_{ij}(\omega)$  分别为地震动时程幅值和相位;  $N$  为频率离散点数;  $\omega_u$  为高频截止频率;  $\Delta\omega = \omega_u/N$  为频率增量且满足  $\omega_l = l\Delta\omega$ ;  $\varphi_{jl}$  为分布于  $[0, 2\pi]$  之间的随机独立相位角。

通过对式(5)乘以强度包络函数, 得到非平稳加速度地震动时程, 生成试验用基岩一致激励 EQ1。根据 EQ1, 针对不同剪切波速, 通过输入地震动时间差, 生成不同剪切波速下考虑行波效应影响的地震动 EQ2~EQ4, 同时考虑行波效应与相干效应生成 EQ5 地震动, 同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应生成 EQ6 地震动。

1.3.2 试验工况

考虑地震动空间效应的振动台试验工况如表3所示,为表述方便,后序文中采用地震波名称代表试验工况。当考虑行波效应、相干效应和局部场地效应共同影响时,空间地震动功率谱密度函数矩阵受相干函数和场地传递函数的影响,导致其生成的空间地震动存在差异,这种差异主要体现在输入地震动频谱特性和峰值加速度两个方面。因此,为综合考虑地震动空间效应,且避免输入地震动过大,导致斜拉桥过早破坏而影响后续试验。本文将EQ1~EQ6地震动中峰值加速度最大的地震动(EQ6工况振动台A)调幅至0.15g,其余地震动(EQ1~EQ5)峰值加速度按照与EQ6地震动峰值加速度的比例调幅,如图3所示。本文主要研究考虑地震动空间效应的斜拉桥横桥向动力响应变化规律,因此,本文所有试验工况均沿横桥向输入地震动。图4为EQ5工况地震动相干系数。由图可知,EQ5工况下2条地震动在低频下相关性较高,本试验中斜拉桥前3阶振型频率均较低,所选地震动的相干性可以较好地反映地震动相干效应对本文中斜拉桥动力响应的影响。图5为输入地震动加速度反应谱,由图可知,考虑局部场地效应时,EQ6地震动加速度反应谱明显大于EQ1~EQ5,因此,局部场地效应不仅对输入地震动时程特性影响显著(图3),还明显影响其频谱特性,进而影响斜拉桥地震作用下动力响应。

表3 考虑地震动空间效应的振动台试验工况

Table 3 Test conditions for the shaking table tests of long-span cable-stayed bridge considering spatial effects of ground motion

| 序号 | 地震动 | 地震动空间效应                            |
|----|-----|------------------------------------|
| 1  | EQ1 | 基岩一致激励                             |
| 2  | EQ2 | 行波效应(剪切波速 100 m/s)                 |
| 3  | EQ3 | 行波效应(剪切波速 300 m/s)                 |
| 4  | EQ4 | 行波效应(剪切波速 500 m/s)                 |
| 5  | EQ5 | 考虑行波效应、相干效应(剪切波速 300 m/s)          |
| 6  | EQ6 | 同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应(剪切波速 300 m/s) |

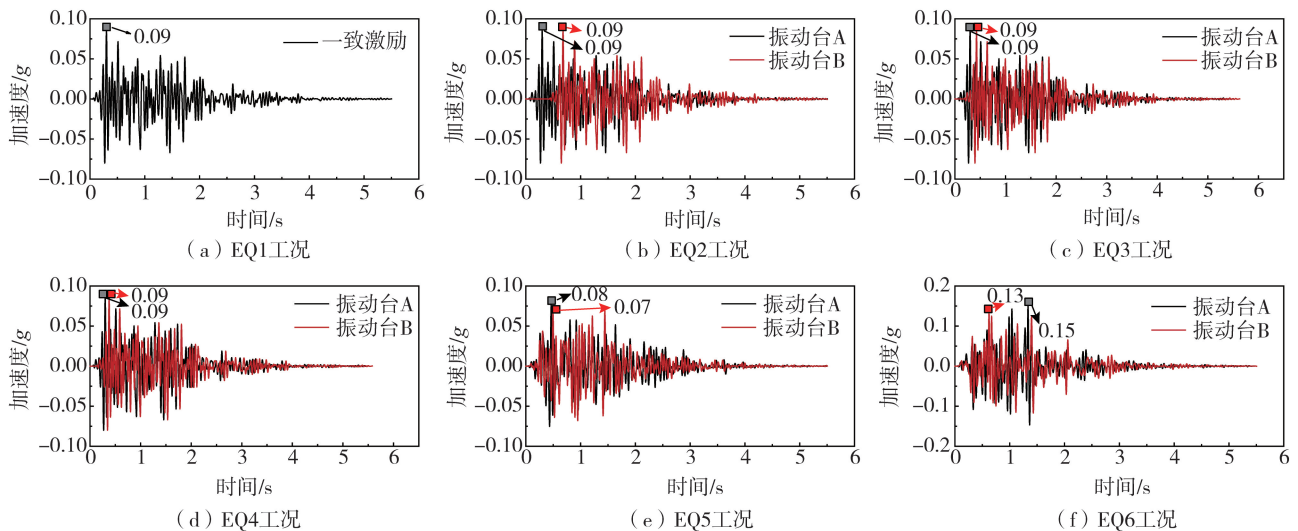


图3 考虑地震动空间效应的大跨斜拉桥振动台阵列试验输入地震动时程

Fig. 3 Time history of input ground motions for shaking table tests of long-span cable-stayed bridge considering spatial effects

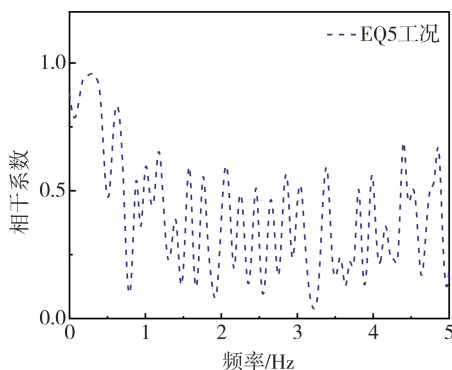


图4 EQ5工况地震动之间的相干函数

Fig. 4 Coherence function of ground motions for EQ5 condition

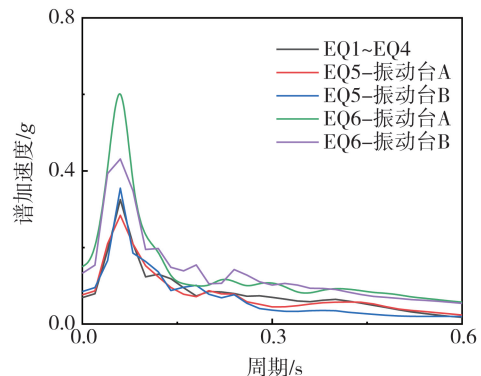


图5 输入地震动加速度反应谱

Fig. 5 Acceleration response spectrum of input ground motions

## 2 试验结果与分析

### 2.1 动力特性分析

原型桥和模型桥前 3 阶自振频率与振型对比如表 4 所示,其中模型桥自振频率根据试验获得的频率,通过频率相似比( $S_f=12.55$ )反算得到。由表可知,原型桥与模型桥前 3 阶振型一致,自振频率接近,因此,模型桥可以较好地反映原型桥动力特性。

表 4 原型桥与模型桥前 3 阶振型与自振频率比较

Table 4 Comparison of the first three modes and natural frequencies between prototype and model bridges

| 工况类型 | 第 1 阶 |          | 第 2 阶 |          | 第 3 阶 |             |
|------|-------|----------|-------|----------|-------|-------------|
|      | 频率/Hz | 阵型       | 频率/Hz | 阵型       | 频率/Hz | 阵型          |
| 原型   | 0.139 |          | 0.401 |          | 0.559 |             |
| 模型   | 0.149 | 主梁 1 阶纵飘 | 0.448 | 主梁 1 阶竖弯 | 0.640 | 主梁和主塔 1 阶横弯 |

### 2.2 加速度响应分析

空间地震动作用下塔顶加速度时程如图 6 所示。由图可知,考虑行波效应时(EQ2~EQ4),塔顶加速度时程变化趋势与一致激励(EQ1)基本一致。相较于一致激励(EQ1)工况,行波效应(EQ2~EQ4)增大了塔顶加速度响应,其中 EQ3 工况下增幅最大,加速度响应增大 4.72%;当考虑受多因素影响的空地震震动时,塔顶加速度增幅更为显著,在 EQ5(行波效应+相干效应)和 EQ6(行波效应+相干效应+局部场地效应)工况下,塔顶加速度分别增大 12.36%和 43.64%。因此,相较于地震一致激励(EQ1)工况,地震动空间效应导致桥塔加速度峰值增大,其中行波效应(EQ2~EQ4)影响较小,同时考虑行波效应和相干效应(EQ5)影响次之,同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应(EQ6)时影响最大。

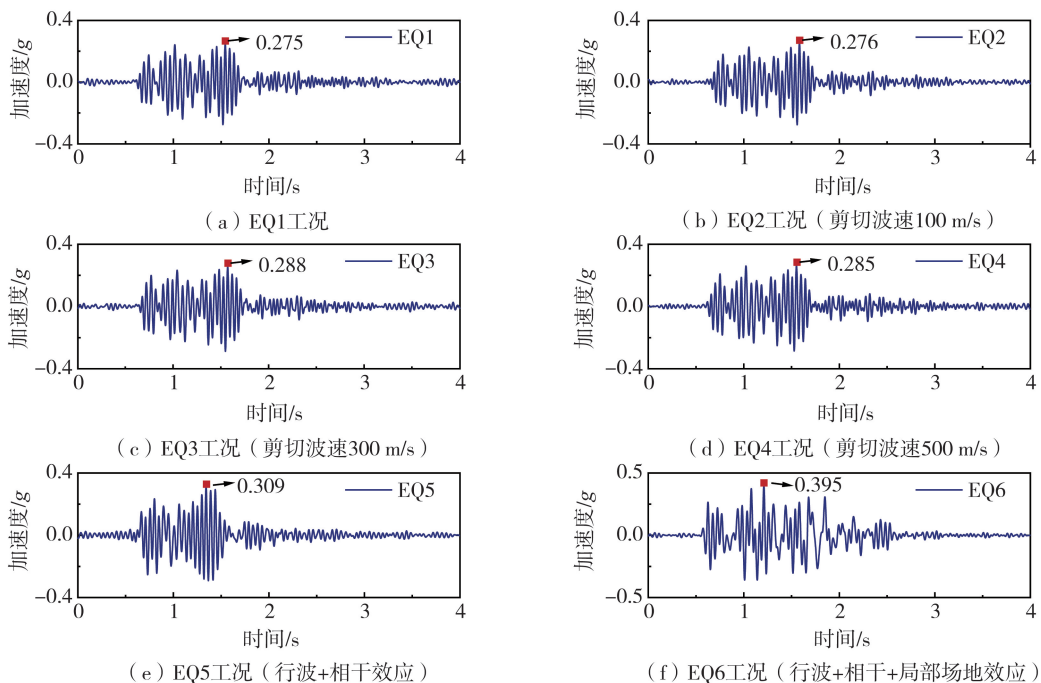


图 6 空间地震动作用下塔顶加速度时程

Fig. 6 Acceleration time history of the tower top under spatial effects of ground motion

为研究地震动空间效应对主塔不同位置处加速度的影响,引入加速度放大系数,其定义为试验模型不同位置处加速度与输入加速度的比值。表 5 给出了空间地震动作用下主塔不同位置处的加速度放大系数及其相对于一致激励的变化幅值。整体而言,行波效应(EQ2~EQ4)对主塔加速度产生不利影响,其影响与剪切波速相关,这是由于不同剪切波速下振动台台面输入地震动时间差不同,进而导致对主塔加速度响应影响不同。行波效应对下塔柱顶加速度影响最为显著,其中剪切波速为 300 m/s 时影响最大,加速度增幅为 26.22%。当考虑受多因素影响的空地震震动时,其对主塔加速度影响更为显著,与基岩一致激励(EQ1)相

比,在 EQ5(行波效应+相干效应)和 EQ6(行波效应+相干效应+局部场地效应)工况下,桩顶和下塔柱顶加速度分别增大 28.73%和 55.69%。

表 5 空间地震作用下主塔加速度放大系数

| 地震波 | 上塔柱顶          | 中塔柱顶          | 下塔柱顶          | 桩顶            |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| EQ1 | 1.928         | 0.670         | 0.334         | 0.602         |
| EQ2 | 1.944(0.82%)  | 0.645(-3.74%) | 0.319(-4.32%) | 0.619(2.89%)  |
| EQ3 | 2.026(5.07%)  | 0.669(-8.61%) | 0.491(26.22%) | 0.723(1.40%)  |
| EQ4 | 1.983(2.87%)  | 0.635(-5.18%) | 0.382(14.53%) | 0.644(6.98%)  |
| EQ5 | 2.284(18.44%) | 0.752(12.33%) | 0.314(-5.88%) | 0.775(28.73%) |
| EQ6 | 2.205(14.37%) | 0.921(37.46%) | 0.520(55.69%) | 0.809(34.39%) |

注:表中括号变化比例均为相对于一致激励(EQ1)工况的加速度放大系数变化。

空间地震动作用下主梁横桥向加速度放大系数图如图 7 所示,其中,加速度放大系数为主梁测点峰值加速度与振动台台面输入地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)的比值。由图 7(a)可知,一致激励作用(EQ1)下加速度沿主梁长度方向对称分布,变化趋势较为规律,加速度最大值出现在跨中位置。行波效应下(EQ2~EQ4),主梁加速度分布呈现不对称性,相较于 EQ4 工况(剪切波速为 500 m/s),剪切波速较低时(EQ2 和 EQ3 工况),主梁加速度非对称性更为显著。这是由于较小的剪切波速下,振动台台面输入地震动时间差更大,不同幅度地激发了主梁不同位置处加速度响应。与一致激励(EQ1)相比,EQ3 工况(剪切波速 300 m/s)下主梁加速度增幅最大,加速度峰值增大 26.32%。由图 7(b)可知,在 EQ5(行波效应+相干效应)和 EQ6(行波效应+相干效应+局部场地效应)工况下,主梁绝大多数位置加速度大于一致激励(EQ1)工况,其中 EQ6 工况下主梁加速度增幅最大,最大增幅为 43.73%。

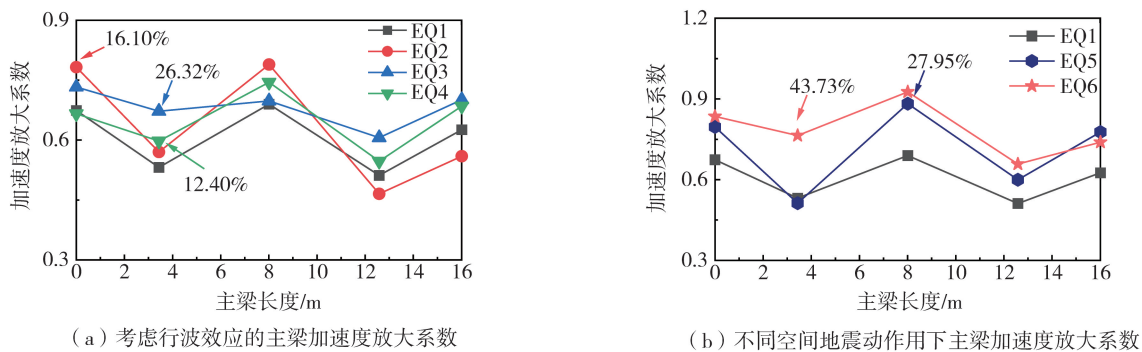


图 7 空间地震作用下主梁加速度放大系数

Fig. 7 Acceleration amplification coefficient of the deck under spatial effects of ground motion

空间地震动作用下边墩和辅助墩墩顶加速度放大系数如图 8 所示。由图可知,地震动空间效应增大了边墩和辅助墩墩顶加速度。相较于一致激励(EQ1)工况,考虑行波效应(EQ2~EQ4)时边墩和辅助墩墩顶加速度增加,且其影响与剪切波速相关,在 EQ2 工况(剪切波速 100 m/s)下加速度增幅最大,边墩和辅助墩墩顶加速度峰值分别增大 39.13%和 22.69%。EQ5 工况(行波效应波速 300 m/s+相干效应)下,地震动空间效应对边墩和辅助墩墩顶加速度的影响与 EQ2 相近,相较于一致激励,边墩和辅助墩墩顶加速度峰值分别增大 31.42%和 23.85%。此外,EQ6(行波效应+相干效应+局部场地效应)工况下,地震动空间效应对边墩和辅助墩墩顶加速度影响最为显著,相较于一致激励,EQ6 工况下边墩和辅助墩墩顶加速度峰值分别增大 51.60%和 30.77%。

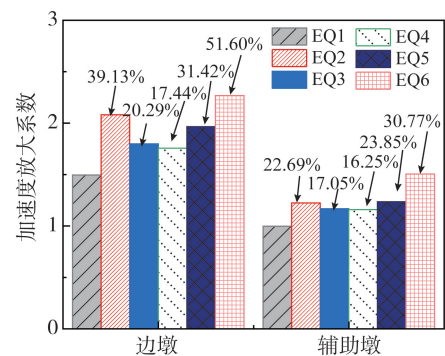


图 8 空间地震动作用下边墩和辅助墩墩顶加速度放大系数

Fig. 8 Acceleration amplification coefficient of the top of side pier and auxiliary pier under spatial effects of ground motion

### 2.3 位移响应分析

空间地震动作用下塔顶相对位移时程曲线如图 9 所示。由图可知,相较于一致激励(EQ1)工况,考虑行波效应(EQ2~EQ4)时塔顶相对位移增大,其增幅与剪切波速相关;当剪切波速为 300 m/s 时(EQ3 工况),塔顶相对位移增幅最大,最大增幅为 10.27%。考虑受多因素影响的 空间地震动时,塔顶相对位移增幅更为显著,在 EQ5(行波效应+相干效应)和 EQ6(行波效应+相干效应+局部场地效应)工况下,塔顶相对位移与基岩一致激励(EQ1)工况相比分别增加 20.25%和 31.14%。因此,相较于地震一致激励(EQ1)工况,地震动空间效应增大了塔顶相对位移,其中行波效应(EQ2~EQ4)影响最小,同时考虑行波效应和相干效应(EQ5)影响次之,同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应(EQ6)时影响最为显著。

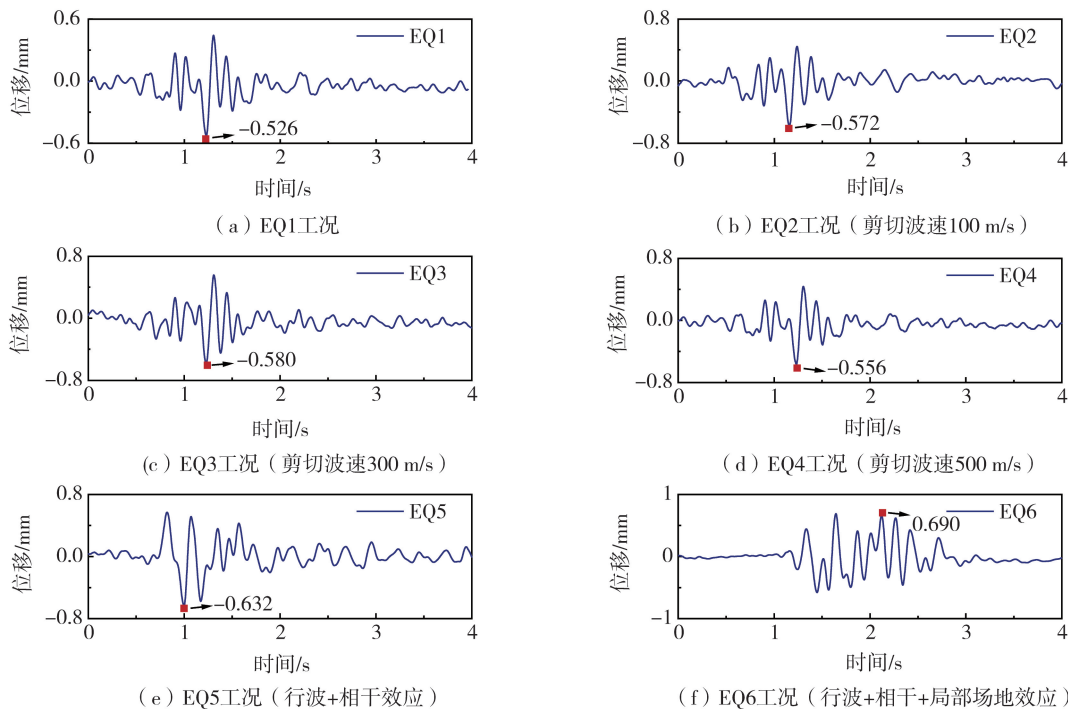


图 9 空间地震动作用下塔顶相对位移时程

Fig. 9 Relative displacement time history of the tower top under spatial effects of ground motion

空间地震动作用下主塔不同位置相对位移如表 6 所示。由表可知,相较于一致激励(EQ1)工况,当仅考虑行波效应时(EQ2~EQ4),主塔不同位置处的相对位移呈现不同幅度的增加或减小。总体而言,行波效应对主塔位移产生不利影响,当剪切波速为 300 m/s 时(EQ3 工况),行波效应对主塔相对位移影响最为显著,下塔柱顶相对位移较一致激励增大 21.26%。相较于一致激励(EQ1)工况,EQ5(行波效应+相干效应)和 EQ6(行波效应+相干效应+局部场地效应)工况下,桩顶和下塔柱顶相对位移分别增大 26.67%和 62.37%,这表明同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应(EQ6)时,空间地震动对主塔相对位移影响最为显著。

表 6 空间地震动作用下主塔相对位移

Table 6 Relative displacement of the tower under spatial effects of ground motion mm

| 地震波 | 上塔柱顶          | 中塔柱顶           | 下塔柱顶          | 桩顶            |
|-----|---------------|----------------|---------------|---------------|
| EQ1 | 0.526         | 0.582          | 0.322         | 0.233         |
| EQ2 | 0.572(8.74%)  | 0.502(-13.65%) | 0.316(-1.62%) | 0.262(12.34%) |
| EQ3 | 0.580(10.35%) | 0.497(-14.56%) | 0.390(21.24%) | 0.254(8.72%)  |
| EQ4 | 0.556(5.65%)  | 0.536(-7.85%)  | 0.375(16.72%) | 0.276(18.17%) |
| EQ5 | 0.632(20.25%) | 0.662(13.82%)  | 0.293(-8.87%) | 0.296(26.67%) |
| EQ6 | 0.690(31.14%) | 0.945(62.37%)  | 0.422(31.13%) | 0.330(41.27%) |

注:括号中的变化比例均为相对于一致激励(EQ1)工况的相对位移变化。

空间地震作用下边墩和辅助墩墩顶相对位移如图 10 所示。整体而言,考虑地震动空间效应(EQ2~EQ6)时,边墩和辅助墩墩顶相对位移大于一致激励(EQ1)工况。当仅考虑行波效应(EQ2~EQ4)时,剪切波速为 100 m/s (EQ2)时,边墩和辅助墩墩顶相对位移增加最为显著,相较于一致激励(EQ1)工况分别增大

28.59%和21.74%。这一现象与主塔存在不同,主塔在剪切波速 300 m/s(EQ3)时,相对位移增幅最大。因此,剪切波速的变化对于主塔、边墩和辅助墩位移影响存在不同。相较于其他空间地震动(EQ2~EQ5)工况,同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应的空间地震动(EQ6)对边墩和辅助墩墩顶相对位移影响最为显著,相较于一致激励,边墩和辅助墩墩顶相对位移在EQ6工况下分别增大38.07%和31.44%。

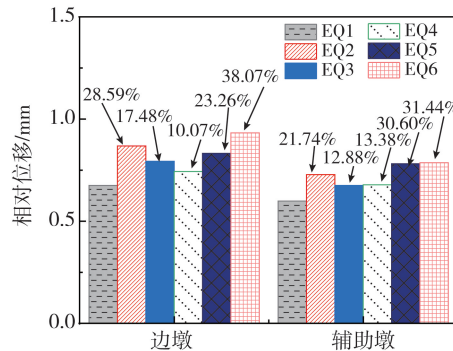


图10 空间地震动作用下边墩和辅助墩墩顶相对位移

Fig. 10 Relative displacement of the top of side pier and auxiliary pier under spatial effects of ground motion

## 2.4 应变响应分析

空间地震动作用下塔底、边墩及辅助墩墩底纵向钢筋应变如表7所示。由表可知,考虑地震动空间效应(EQ2~EQ6)时,塔底、边墩及辅助墩墩底钢筋应变均大于一致地震激励(EQ1)工况。EQ6(行波效应+相干效应+局部场地效应)工况下,空间地震动作用对塔底、边墩和辅助墩墩底钢筋应变的影响最为显著,相较于一致激励(EQ1)工况,塔底、边墩和辅助墩墩底钢筋应变峰值分别增大67.37%、43.24%和27.70%。此外,地震动空间效应对主塔应变影响最大,对边墩墩底影响次之,对辅助墩墩底影响最小。

表7 空间地震动作用下塔底、边墩及辅助墩墩底应变

Table 7 Strains of the bottom of tower, side pier and auxiliary pier under spatial effects of ground motion

| 地震波 | 主塔             | 边墩            | 辅助墩           |
|-----|----------------|---------------|---------------|
| EQ1 | 73.29          | 53.42         | 42.28         |
| EQ2 | 94.50(28.93%)  | 70.42(31.83%) | 51.95(22.86%) |
| EQ3 | 99.45(35.69%)  | 68.11(27.50%) | 48.65(15.06%) |
| EQ4 | 88.64(20.94%)  | 65.81(23.19%) | 47.29(11.85%) |
| EQ5 | 103.47(41.18%) | 71.07(33.04%) | 51.22(21.16%) |
| EQ6 | 122.67(67.37%) | 76.52(43.24%) | 53.99(27.70%) |

注:括号中的变化比例均为相对于一致激励(EQ1)工况的应变变化。

## 3 结论

针对大跨斜拉桥空间跨度范围广、局部场地条件差异性大,服役期内可能遭受空间地震动影响的问题,本文设计并开展了空间地震动作用下大跨斜拉桥地震响应振动台台面阵试验,研究了地震动空间效应对斜拉桥地震动力响应的影响,主要研究结论如下:

1)考虑行波效应时,受非一致激励的影响,主塔加速度和位移不同幅度的增加或减小,其影响程度与剪切波速相关,当剪切波速为300 m/s(EQ3)时,行波效应对主塔加速度和位移的影响最为显著,相较于一致激励,下塔柱顶加速度和位移峰值分别增大26.22%和21.26%。同时考虑行波效应和相干效应(EQ5)时,地震动空间效应对主塔的影响大于仅考虑行波效应,其桩顶加速度较一致激励(EQ1)分别增大28.73%和26.67%;同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应(EQ6)时,桥塔加速度和位移响应最大,相较于一致激励(EQ1),下塔柱顶加速度和位移峰值分别增大55.69%和62.37%。

2)行波效应导致主梁加速度产生非对称性,其中较小剪切波速下非对称性更为显著,这是由于与较大的剪切波速相比,较小的剪切波速导致振动台台面输入地震动产生更大的时间差,进而引起主梁加速度响应非对称性更为显著;相较于其它空间地震动(EQ2~EQ5)工况,同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应(EQ6)时,主梁加速度响应最大,其加速度峰值较一致激励(EQ1)工况最大增幅达43.73%。

3)相较于地震一致激励(EQ1)工况,考虑地震动空间效应(EQ2~EQ6)时,边墩和辅助墩墩顶加速度、位移和墩底应变均增大;不同剪切波速对边墩和辅助墩动力响应的影响不同,剪切波速为100 m/s(EQ2)时边墩和辅助墩动力响应增大最为显著。同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应(EQ6)时,边墩和辅助墩动力响应最大。

4)总体而言,与一致激励相比,地震动空间效应增大了斜拉桥的地震动响应,其中行波效应(EQ2~EQ4)影响最小,考虑行波效应和相干效应(EQ5)时影响次之,同时考虑行波效应、相干效应和局部场地效应(EQ6)时影响最大。因此,开展大跨斜拉桥结构抗震设计时,采用一致激励或仅考虑行波效应时可能会低估斜拉桥实际地震响应,应综合考虑行波效应、相干效应和局部场地效应等地震动空间效应。

## 参考文献:

- [1] DER KIUREGHIAN A. A coherency model for spatially varying ground motions[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1996, 25(1): 99-111.
- [2] BOGDANOFF J L, GOLDBERG J E, SCHIFF A J. The effect of ground transmission time on the response of long structures[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1965, 55(3): 627-640.
- [3] 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.
- [4] 孙利民, 谢文, 楼梦麟, 等. 行波激励下桩-土-斜拉桥多点振动台试验[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(12): 221-233.  
SUN Limin, XIE Wen, LOU Menglin, et al. Multiple shaking table tests on pile-soil-cable-stayed bridge under travelling wave excitations[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(12): 221-233. (in Chinese)
- [5] XIE W, SUN L M, LOU M L. Wave-passage effects on seismic responses of pile-soil-cable-stayed bridge model under longitudinal non-uniform excitation: Shaking table tests and numerical simulations[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020, 18(11): 5221-5246.
- [6] 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 traveling wave excitation for super long-span cable-stayed bridges[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(10): 1471-1481. (in Chinese)
- [7] 李小珍, 刘栢杰, 雷虎军, 等. 行波效应对矮塔斜拉桥弹性地震响应的影响[J]. *铁道工程学报*, 2015, 32(11): 49-54.  
LI Xiaozhen, LIU Zhenjie, LEI Hujun, et al. Effect of traveling wave on elastic-plastic seismic response of low-pylon cable-stayed bridge[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2015, 32(11): 49-54. (in Chinese)
- [8] 沈禹, 谈华顺, 王献攀, 等. 考虑行波效应的大跨度矮塔斜拉桥耐震时程分析[J]. *工程力学*, 2020, 37(3): 131-141, 148.  
SHEN Yu, TAN Huashun, WANG Xianzhi, et al. Application of the endurance time method to seismic-induced pounding analysis for long-span extradosed cable-stayed bridges considering wave passage effects[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(3): 131-141, 148. (in Chinese)
- [9] 许基厚, 王学伟, 祝兵, 等. 非对称单侧混合梁斜拉桥多点激励地震响应分析[J]. *地震工程学报*, 2019, 41(5): 1207-1214.  
XU Jihou, WANG Xuewei, ZHU Bing, et al. Seismic performance of a cable-stayed bridge with asymmetric single-side mixed girders under multi-support excitation[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2019, 41(5): 1207-1214. (in Chinese)
- [10] 曾勇, 曾渝荷, 谭宇杰, 等. 行波效应对轻轨两用独塔单索面钢桁梁斜拉桥地震反应影响分析[J]. *结构工程师*, 2021, 37(6): 92-98.  
ZENG Yong, ZENG Yutong, TAN Yujie, et al. Influence of traveling wave effect on seismic response of single pylon cable-stayed bridge with single cable plane steel truss for road and rail[J]. *Structural Engineers*, 2021, 37(6): 92-98. (in Chinese)
- [11] LI X Q, LI Z X, CREWE A J. Nonlinear seismic analysis of a high-pier, long-span, continuous RC frame bridge under spatially variable ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 114: 298-312.
- [12] SOYLUK K, DUMANOGLU A A. Spatial variability effects of ground motions on cable-stayed bridges[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(3): 241-250.
- [13] 李忠献, 岳福青, 周莉, 等. 考虑地震动空间效应的城市高架桥梁地震碰撞响应分析[J]. *天津大学学报*, 2006, 39(8): 938-943.  
LI Zhongxian, YUE Fuqing, ZHOU Li, et al. Seismic pounding responses of urban elevated bridges considering spatial variation of ground motion[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2006, 39(8): 938-943. (in Chinese)
- [14] 李忠献, 周莉, 岳福青. 地震动空间效应与土-基础相互作用效应对隔震桥梁临界碰撞间隙的影响[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(7): 85-90.  
LI Zhongxian, ZHOU Li, YUE Fuqing. Effects of spatial variation of ground motion and soil-foundation interaction on critical pounding gap length of seismic isolated bridges[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(7): 85-90. (in Chinese)
- [15] 武芳文, 薛成凤, 赵雷. 地震动空间相干效应对大跨度斜拉桥随机地震反应的影响[J]. *世界地震工程*, 2010, 26(2): 107-113.  
WU Fangwen, XUE Chengfeng, ZHAO Lei. Influence of spatial coherence of seismic motions on stochastic seismic response of long-span cable-stayed bridges[J]. *World Earthquake Engineering*, 2010, 26(2): 107-113. (in Chinese)
- [16] 武芳文, 赵雷. 地震动空间变异性对千米级斜拉桥结构随机地震反应的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(5): 118-127.  
WU Fangwen, ZHAO Lei. Influence of spatial variation of seismic ground motion on thousand-meter scale cable-stayed bridge[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2009, 29(5): 118-127. (in Chinese)

- [17] 陈志伟, 蒲黔辉, 贾宏宇, 等. 地震动相干效应对高墩大跨铁路桥梁的动力响应影响[J]. 世界地震工程, 2016, 32(1): 104-111.  
CHEN Zhiwei, PU Qianhui, JIA Hongyu, et al. Influence of coherence effect on dynamical response of a high pier and a long-span railway bridge subjected to earthquake excitations[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1): 104-111. (in Chinese)
- [18] LI B, BI K M, CHOUW N, et al. Experimental investigation of spatially varying effect of ground motions on bridge pounding[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(14): 1959-1976.
- [19] 雷虎军, 李书斌, 黄炳坤. 非一致地震激励下大跨铁路斜拉桥车桥耦合振动研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 213-221.  
LEI Hujun, LI Shubin, HUANG Bingkun. Train-bridge coupling vibration of long-span railway cable-stayed bridge under non-uniform seismic excitation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 213-221. (in Chinese)
- [20] 程麦理, 李青宁, 尹俊红, 等. 非规则高墩曲线桥梁振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 24-30.  
CHENG Maili, LI Qingning, YIN Junhong, et al. Shaking tables tests of irregular curved bridge with high piers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 24-30. (in Chinese)
- [21] 程麦理, 李青宁, 闫磊, 等. 多点激励下非规则高墩曲线桥梁地震响应试验研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(5): 874-880.  
CHENG Maili, LI Qingning, YAN Lei, et al. Experimental study on seismic of irregular high piers curved bridge under multi-point excitation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(5): 874-880. (in Chinese)
- [22] 李忠献, 李笑穹, 李宁. 空间相关多点多维地震动的模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 64-72.  
LI Zhongxian, LI Xiaorong, LI Ning. Simulation of multi-point and multi-dimension spatially correlated earthquake ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(4): 64-72. (in Chinese)
- [23] 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. Shaking tables test study on seismic responses of a long-span rigid-framed bridge under multi-support excitations[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 81-89. (in Chinese)
- [24] DING Y, MA R, SHI Y D, et al. Underwater shaking table tests on bridge pier under combined earthquake and wave-current action[J]. Marine Structures, 2018, 58: 301-320.
- [25] ZERVA A, ZERVAS V. Spatial variation of seismic ground motions: An overview[J]. Applied Mechanics Reviews, 2002, 55(3): 271-297.