

不同场地地下大跨斜拉桥多维多点随机地震响应分析

石焱¹, 陆路^{1*}, 范书立², 沈檬¹, 左春愿¹, 孙新国¹, 曹飞飞¹

(1.淮阴工学院 管理工程学院, 江苏 淮安 223003; 2.大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116023)

摘要:为了研究不同场地地下大跨斜拉桥随机地震响应,该文采用场地传递函数评估不同场地条件对地震动传播的影响,综合考虑行波效应及相干效应,生成了不同场地条件的多点功率谱,运用绝对位移求解的虚拟激励法对斜拉桥在不同场地地下的一致激励及多点多维的地震响应进行对比分析。选取一大跨斜拉桥作为工程实例,采用Ansys有限元软件进行随机地震响应分析;考虑场地条件对地震功率谱的影响,计算桥梁结构在不同激励方式下的随机响应,提取桥梁各单元响应的功率谱,并计算功率谱响应的均方根极值。研究结果表明:软土地表对桥梁随机响应的放大效应约为硬土地表的3倍;多点激励对桥梁随机响应的放大影响约为一致激励的1.5倍。因此,场地效应对大跨斜拉桥的随机地震响应影响极大,在抗震设计时不能忽略其影响。

关键词:大跨斜拉桥;随机响应;场地传递函数;功率谱密度函数;虚拟激励法

中图分类号:U443

文献标志码:A

Multi-Dimensional and Multi-Point Random Seismic Response Analysis of Long-Span Cable-Stayed Bridges at Different Sites

SHI Yi¹, LU Lu^{1*}, FAN Shuli², SHEN Meng¹, ZUO Chunyuan¹, SUN Xinguo¹, CAO Feifei¹

(1.College of Management and Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223003, China; 2.School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: To study the random seismic response of long-span cable-stayed bridges at different sites, the site transfer function was used to evaluate the influence of different site conditions on ground motion propagation. By considering the traveling wave effect and the coherence effect, the multi-point power spectrum under different site conditions was generated. By using the pseudo excitation method for solving the absolute displacement, the seismic responses of cable-stayed bridges under uniform excitation and multi-dimensional and multi-point excitation at different sites were compared. A long-span cable-stayed bridge was selected as an example, and Ansys finite element software was used to analyze the random seismic response of the bridge. By considering the influence of site conditions on the seismic power spectrum, the random responses of the bridge under different excitation modes were calculated, and the power spectrum of each element of the bridge was extracted. The extreme root mean square of the power spectrum response was calculated. The results show that the amplification effect of soft soil on the random response of the bridge is about three times that of hard soil, and the amplification effect of multi-point excitation on the random response of the bridge is about 1.5 times that of uniform excitation. Therefore, the site effect has a great influence on the random seismic response of long-span cable-stayed bridges, and its influence cannot be ignored in bridge design.

Keywords: long-span cable-stayed bridge; random response; site transfer function; power spectrum density function; pseudo excitation method

收稿日期:2023-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51678107);江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK20191050);江苏省高校自然科学基金研究项目(编号:18KJD560001,22KJD180001);江苏省高校哲学社会科学项目(编号:2019SJA1659)

作者简介:石焱,男,博士,讲师.E-mail:dagongshi@163.com

*通信作者:陆路,男,博士,教授.E-mail:llzhxy@aliyun.com

0 引言

中国面积广阔、地形复杂,建造了大量大跨桥梁。例如:狮子洋大桥的主跨为2 180 m双层钢桁悬索桥;张靖皋长江大桥的南航道桥为主跨2 300 m的超大跨径悬索桥,是世界最大跨度的桥梁;苏通长江公路大桥跨径为1 088 m,是当时世界跨径最大的斜拉桥;还有杭州湾大桥、港珠澳大桥等。这些大桥跨度都很长,这就可能使桥墩处在不同的场地条件下,对桥梁结构产生不同的影响^[1-3]。大量数据表明场地条件对地震动的传播影响很大,很多学者也对其做过研究^[4-7],但根据一维波动理论,用场地传递函数计算场地效应对随机地震响应的影响,这方面的研究较少,而且很多研究并不系统,没有系统地考虑行波效应、相干效应和多维多点激励的影响^[8-9]。

目前,国内外对桥梁的随机地震响应的研究较多。Karmakar等^[10]讨论了改型后的 Vincent Thomas 桥在产生的频谱兼容的空间地震动下的地震响应,然后研究了地震动的空间变异性对桥梁地震位移响应的影响;Soyluk等^[11]通过模拟地震动的初始波道和场地反应等时间历程,研究了空间变化的地震动和土与结构的相互作用对斜拉桥的响应;黄艳^[12]构建了结构与地基整体分析模型,利用多源加权集中的黏弹性人工边界,实现了基于黏弹性人工边界的地震动输入,分析了地基与结构动力相互作用对全漂浮结构体系的动力响应影响。但大跨斜拉桥的随机地震响应分析还存在一些问题。有些研究只分析了桥梁的部分结构,没有对整个桥梁结构进行宏观的分析研究。例如:Jia等^[13]研究了高墩桥的三维随机地震响应,只分析了桥梁某一点的受力情况,并没有对整桥进行分析。还有些研究进行随机响应分析时,未能全面考虑各种参数对随机响应的影响,得到的分析结果不够准确。例如:郑史雄等^[14]对大跨度斜拉桥进行了多维多点随机地震激励响应分析,其在考虑局部场地效应时只是变化了功率谱参数,并不能完全体现场地条件对空间地震动的影响;陈彦江等^[15]虽在分析钢管混凝土拱桥的空间地震响应时运用了场地传递函数,却并没有考虑功率谱在不同场地下的参数变化,而分析随机地震响应,功率谱的参数选取很重要。

本文运用场地传递函数、相干函数和功率谱模

型合成考虑行波效应、相干效应和局部场地效应的空间多点多维功率谱矩阵;选取某大跨斜拉桥作为分析实例,采用 Ansys 有限元软件建立其三维模型;采用基于绝对位移直接求解的虚拟激励法,再把功率谱矩阵分解,求得虚拟激励;最后运用 Ansys 谐响应分析功能研究斜拉桥在多维多点地震下的随机响应。

1 多维多点地震随机响应原理

考虑空间变化效应的地震动在本质上是随机的,通常用功率谱矩阵表示。地震动在复杂场地的多维多点性主要是通过行波效应、相干效应和局部场地效应体现。

$$\gamma_{ij}(\omega) = \frac{S_{ij}(\omega)}{\sqrt{S_i(\omega)S_j(\omega)}} \quad (1)$$

式中: $\gamma_{ij}(\omega) = |\gamma_{ij}(\omega)| \exp\left(-\frac{\omega d_{ij}}{v_{app}}\right)$ 为两点间相干函数; $|\gamma_{ij}(\omega)|$ 为部分相干效应; $\exp\left(-\frac{\omega d_{ij}}{v_{app}}\right)$ 为行波效应; d_{ij} 为两点间的距离; v_{app} 为视波速; $S_i(\omega)$ 和 $S_j(\omega)$ 为*i*、*j*两点的自功率谱函数; $S_{ij}(\omega)$ 为互功率谱函数。

$$S_{ii}(\omega) = |H_i(i\omega)|^2 S_R(i\omega) \quad (2)$$

式中: $S_R(i\omega)$ 为基岩的功率谱矩阵; $S_{ii}(\omega)$ 为*i*点地面的功率谱矩阵; $H_i(i\omega)$ 为场地传递函数。其中,出平面波(SH波)的场地传递函数可以表示为:

$$H(\omega) = \left| \frac{v_t}{v_0} \right| = \frac{1}{\cos kt^L d + \sin kt^L d \times i/p} \quad (3)$$

式中: k 为波数; t 为入射角相关系数; $p = t^R G^R / t^L G^L$ 是阻尼比,上标R是基岩,L是土层。平面内波(P-SV波)水平分量和垂直分量的函数表达式如下:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} + R_{11} & L_{34} + R_{12} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} + R_{21} & L_{44} + R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_t \\ iW_t \\ U_b \\ U_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_b \\ iR_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:矩阵 L 为土层的刚度阵,矩阵 R 为基岩的刚度阵; U_t 和 W_t 分别为土层顶部的水平向和垂直向位移, U_b 为土层底部位移; U_r 为基岩顶部位移。 P_b 为地震荷载。

由上式可得P-SV波水平分量 H_u 和垂直分量 H_w

的表达式:

$$\begin{aligned} H_u(\omega) &= |U_t(\omega)/U_b(\omega)| \\ H_w(\omega) &= |W_t(\omega)/U_b(\omega)| \end{aligned} \quad (5)$$

根据上述公式可得到空间多点互功率谱矩阵如下:

$$S_{ij}(\omega) = H_i(i\omega) H_j^T(i\omega) S_R(i\omega) \gamma_{ij}(\omega) \quad (6)$$

本文运用绝对位移直接求解的虚拟激励法计算斜拉桥的随机响应^[16-18]。对于 m 个地面支撑和 n 个自由度的线性结构,该结构的运动方程如下:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_{ss} & M_{sb} \\ M_{bs} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_b \end{Bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;下标 s 表示非支撑点,下标 b 表示支撑点; P 为地震力。

将公式(7)展开,通过大质量法,可将动力方程优化为:

$$\begin{aligned} M_{ss} \ddot{X}_s + C_{ss} \dot{X}_s + K_{ss} X_s = \\ - \left(M_{sb} + C_{sb} \frac{1}{i\omega} - K_{sb} \frac{1}{\omega^2} \right) P e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: P 由地震的功率谱密度矩阵分解得到, $S_{ij}(\omega) = P^* P^T$ 。

2 虚拟激励法在 Ansys 中的实现

Ansys 实现绝对位移求解的虚拟激励法的流程如下:

(1) 在 Ansys 建立斜拉桥的有限元模型,运用 MASS 21 质量单元在桥墩的墩底各添加一个质量为 $m=10^{12}$ 的大质量点;放开支点各方向的位移约束,只约束各支点的转动自由度。

(2) 选取合适的功率谱模型,根据不同的场地条件选取相应的模型参数;选取合适的相干函数模型;再根据不同场地条件选取场地传递函数参数;最后就可得到不同场地下方的空间多维多点功率谱函数矩阵。功率谱矩阵分解就可求得虚拟激励荷载。

(3) 运用 Ansys 谐响应分析功能进行求解,得到结构随频率变化的谐响应曲线。

(4) 计算谐响应值实部和虚部的均方根,即可得到结构单元随频率变化的虚拟响应曲线。选取结构单元虚拟响应的极值,就可得到结构随机地震响应最不利变化。

3 实例分析

3.1 有限元模型

本文对某大跨斜拉桥进行有限元分析,斜拉桥的主跨长 436 m,两侧边跨长分别为 162 m 和 60 m;左桥塔高 167.19 m,右桥塔高 172.69 m。有限元模型的桥梁和桥塔都是用 Beam 4 单元建模,桥索用 Link 8 单元模拟,Mass 21 单元模拟附加质量^[19-21]。有限元模型如图 1 所示。对斜拉桥的有限元模型进行模态分析,模态数量为 10 阶。考虑到篇幅大小,本文只给出了前 5 阶模态如表 1 所示,第 1 阶模态特征为主梁顺桥向纵向漂移;第 2 阶模态特征为主梁横桥向横向漂移;第 3 阶模态特征为主梁横桥向弯曲漂移;第 4 阶模态特征为主梁对称竖向弯曲;第 5 阶模态特征为桥塔横桥向漂移。由于大跨斜拉桥的自振周期很长,自振频率在低频区很密集^[22-26]。

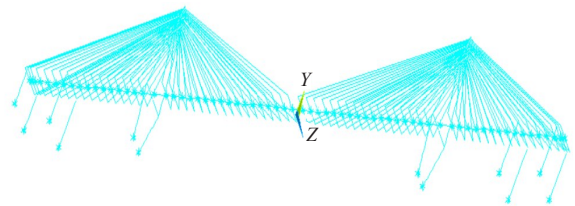


图 1 大跨斜拉桥有限元模型

Figure 1 Finite element model of long-span cable-stayed bridge

表 1 大跨斜拉桥前 5 阶模态的频率和峰值因子

Table 1 Frequencies and peak factors of top five modes of long-span cable-stayed bridges

阶次	频率/Hz	峰值因子
1 阶	0.093 8	0.156×10^{-3}
2 阶	0.193 6	0.340×10^{-3}
3 阶	0.311 6	0.397×10^{-3}
4 阶	0.344 9	0.369×10^{-3}
5 阶	0.400 8	0.201×10^{-3}

3.2 场地参数和函数模型

该实例中相干函数采用的是 Harichandran-Vanmarcke 模型;并选取了软土和硬土两种场地条件,场地条件参数^[27]如表 2 所示。实例中采用的功率谱模型为 Clough-Penzien 模型,公式如式(9)所示。功率谱密度参数^[28]在不同场地条件下的取值如表 3 所示,不同场地条件下的功率谱密度函数如图 2 所示。

$$S(\omega)=\frac{\omega_g^4+4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega_g^2-\omega^2)^2+4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}\cdot\frac{(\omega/\omega_f)^4}{[1-(\omega/\omega_f)^2]^2+4\xi_f^2(\omega/\omega_f)^2}\cdot S_0$$

(9)

式中: ω_g 和 ξ_g 为地基的卓越频率和阻尼比; ω_f 和 ξ_f 为土层的卓越频率和阻尼比; S_0 为地震强度因子。

表2 场地条件参数

Table 2 Site condition parameter

场地条件	土层高度/m	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	阻尼比
软土	25	2×10 ⁷	1 600	0.45	0.05
硬土	25	3×10 ⁷	1 900	0.40	0.05
基岩	—	180×10 ⁷	2 300	0.30	0.05

表3 功率谱密度参数在不同场地条件下的取值

Table 3 Values of power spectrum density parameters under different site conditions

场地条件	ω_g	ξ_g	ω_f	ξ_f	S_0
软土	5	0.20	0.50	0.60	0.003 69
硬土	10	0.40	1.00	0.60	0.002 63

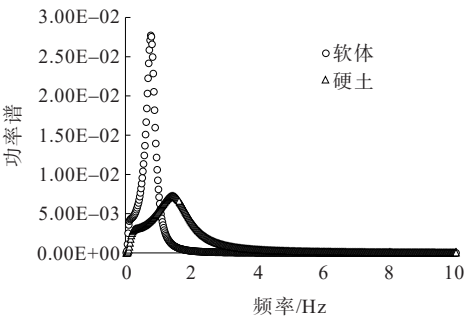


图2 不同场地条件下的功率谱密度函数

Figure 2 Power spectrum density function under different site conditions

4 结果分析

为了研究多点多维激励、行波效应、相干效应和场地条件对地震动传播的影响,该实例用4种不同的工况进行分析研究。4种工况分别是:①一致激励下硬土地场条件;② 多点多维激励下硬土地场条件;③一致激励下软土地场条件;④ 多点多维激励下软土地场条件。

对4种工况的随机地震响应进行分析,提取桥梁和桥塔上每个单元响应的极值点,并选取极值点最大的单元,描绘其频率变化曲线,结果如图3~16所

示。分析结果可知:软土条件对结构随机地震响应的影响远远大于硬土,多点激励对结构随机地震响应的影响要大于一致激励。产生这样的结果是因为大跨斜拉桥是半悬浮结构,自振周期较长,易与低频能量发生共振,而功率谱密度函数在软土条件下低频能量显著。所以软土场地对大跨斜拉桥随机地震响应的影响更大。

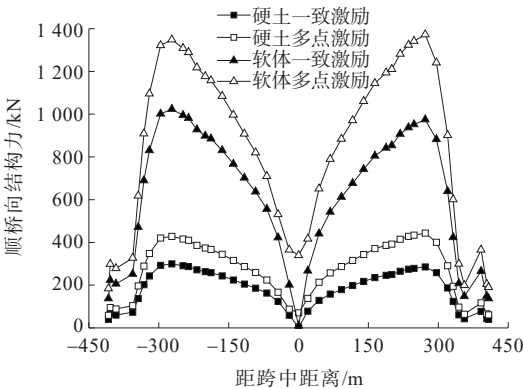


图3 桥梁轴力均方根极值

Figure 3 Extreme root mean square of bridge axial forces

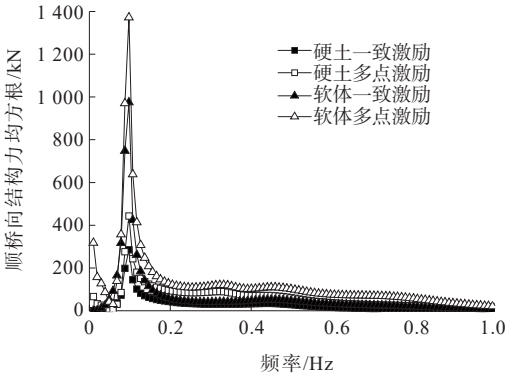


图4 峰值点轴力均方根频率变化曲线

Figure 4 Frequency variation curve of root mean square of axial force at peak point

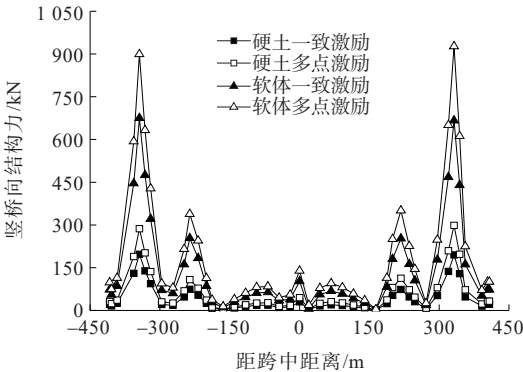


图5 桥梁剪力均方根极值

Figure 5 Extreme root mean square of bridge shear force

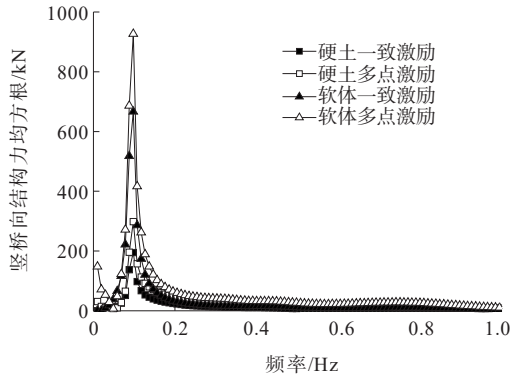


图6 峰值点剪力均方根频率变化曲线

Figure 6 Frequency variation curve of root mean square of shear force at peak point

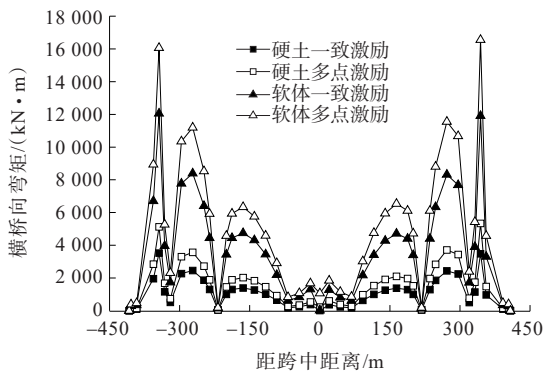


图7 桥梁横桥向弯矩均方根极值

Figure 7 Extreme root mean square of transverse bridge bending moment

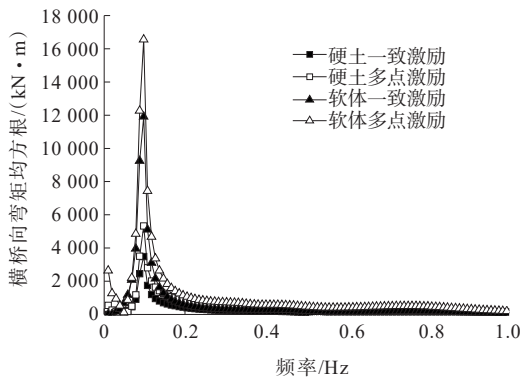


图8 峰值点弯矩均方根频率变化曲线

Figure 8 Frequency variation curve of root mean square of bending moment at peak point

由图3可知:软土地地,多点激励下的桥梁轴力峰值是一致激励的1.4倍;硬土地地,多点激励下的桥梁轴力峰值是一致激励的1.6倍;多点激励情况下,桥梁在软土上的轴力峰值是硬土条件下的3.0倍;一致激励情况下,桥梁在软土上的轴力峰值是硬土条件下的3.4倍。从图4中可以发现随机响应均方

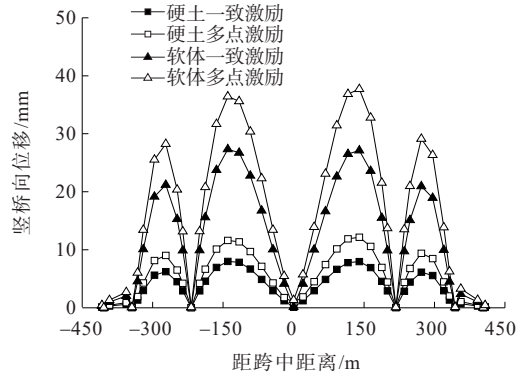


图9 桥梁竖桥向位移均方根极值

Figure 9 Extreme root mean square of vertical displacement of bridge

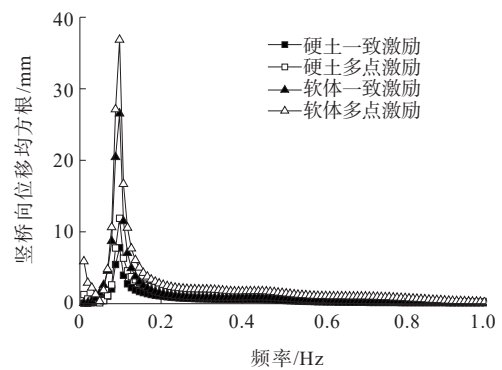


图10 峰值点竖桥向位移均方根频率变化曲线

Figure 10 Frequency variation curve of root mean square of vertical displacement of bridge at peak point

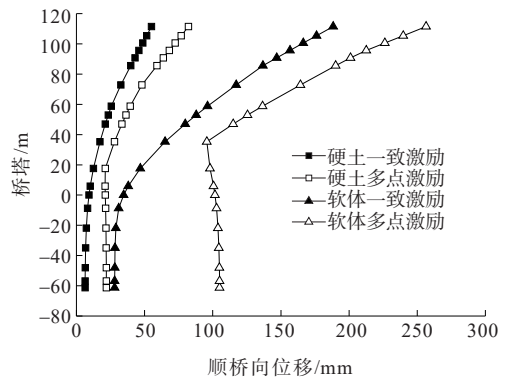


图11 桥塔顺桥向位移均方根极值

Figure 11 Extreme root mean square of bridge tower displacement along the bridge

根随着频率的增加先快速变大,达到峰值后又急速降低,然后进入平稳段。对比图4中的峰值频率变化曲线,可以发现4种工况的峰值点都在1阶频率处。

对比图5、7、9、11的结构响应,其变化曲线与图3曲线变化规律基本相符,将各组数据的峰值平均计算可得:软土地地,多点激励下的结构响应均方根峰

值是一致激励的1.4倍;硬土地地,多点激励下的结构响应均方根峰值是一致激励的1.5倍;多点激励,软土地地上的结构响应均方根峰值是硬土地地的3.1倍;一致激励,软土地地上结构响应均方根峰值是硬土地地的3.4倍。由此可见,场地条件对桥梁结构响应的影响大约是行波效应和相干效应的2倍。根据图6、8、10、12的峰值频率曲线,可知其最大响应也都在1阶频率处。

图13为右桥塔各单元顺桥向弯矩均方根的极值曲线,图15为桥梁竖桥向弯矩均方根极值。两图曲线变化规律基本一致,将其峰值平均计算可得:硬土条件下,多点激励对弯矩的影响是一致激励的2.5倍;软土条件下,多点激励对弯矩的影响是一致激励的2.5倍;一致激励下,软土对弯矩的影响是硬土的1.6倍;多点激励下,软土对弯矩的影响是硬土的1.6倍;由此可知对于桥塔顺桥向和桥梁竖桥向弯矩,激励方式对其影响较场地条件更大。

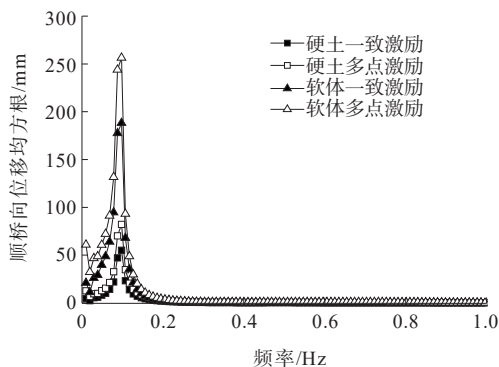


图12 峰值点顺桥向位移均方根频率变化曲线

Figure 12 Frequency variation curve of root mean square of displacement along the bridge at peak point

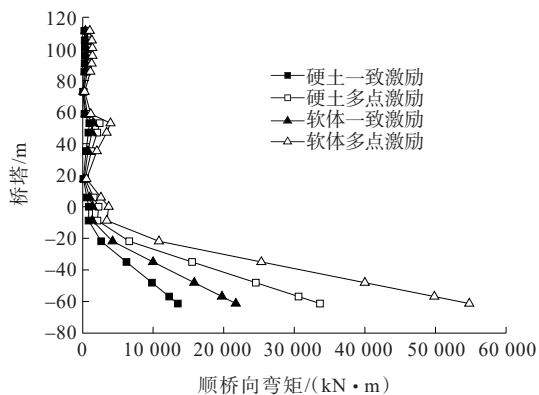


图13 桥塔顺桥向弯矩均方根极值

Figure 13 Extreme root mean square of bridge tower bending moment along the bridge

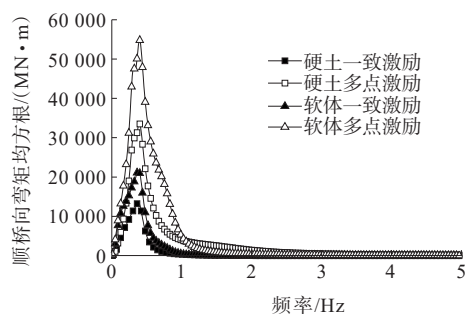


图14 峰值点桥塔弯矩均方根频率变化曲线

Figure 14 Frequency variation curve of root mean square of bridge tower bending moment along the bridge at peak point

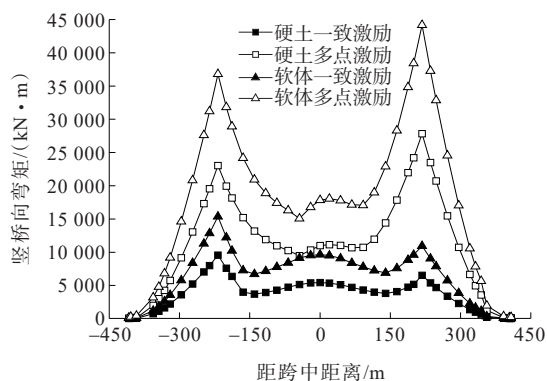


图15 桥梁竖桥向弯矩均方根极值

Figure 15 Extreme root mean square of vertical bridge bending moment

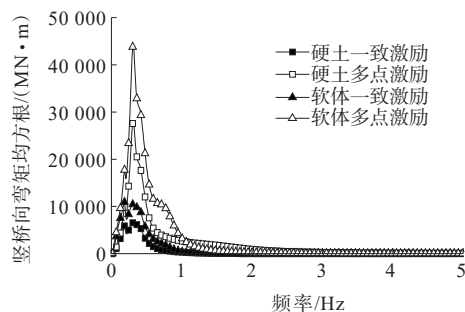


图16 峰值点桥梁弯矩均方根频率变化曲线

Figure 16 Frequency variation curve of root mean square of bridge bending moment at peak point

图14为桥塔弯矩频率变化曲线,其最大响应在5阶频率附近。图16为桥梁弯矩频率变化曲线,其多点激励最大响应在3阶频率处,而一致激励在2阶、3阶和5阶处都是响应极值。另外,对比图5、7、9、11,硬土多点激励工况的均方根都在0.14 Hz之后超过了软土一致激励工况,也就是说,场地条件对1阶频率处的响应影响很大,而2阶频率以上,激励方式的影响更重要。由图14和16可以发现,硬土工况的均

方根在 1.05 Hz 附近超过了软土工况。从图 2 也可以发现,软土工况对低频响应影响更大,硬土对高频响应影响较大。

5 结论

本文考虑了行波效应、相干效应和场地效应,运用相干函数、场地传递函数和 Clough-Penzien 功率谱模型,得到了具有多点多维属性的随机地震动互功率谱密度函数。运用绝对位移求解的虚拟激励法,将合成的互功率谱矩阵分解后即可得到虚拟荷载。然后利用 Ansys 软件的谐响应模块获得斜拉桥的随机地震响应,提取结构单元响应的极值,得到斜拉桥桥梁、桥塔随机响应的均方根极值。最后将得到的斜拉桥随机地震响应结果进行归纳,得出以下结论:

(1) 场地条件对大跨斜拉桥随机地震响应影响很大。随着频率的增加,软土场地下随机响应的均方根与硬土场地下响应均方根比值越来越大,在峰值点达到最大,然后慢慢变小;在响应的平稳段,硬土场地下响应均方根慢慢超过软土场地的响应均方根。因此,在随机响应的低频段,软土场地的影响较硬土地大;而在随机响应的高频段,硬土地的影响较软土地大。

(2) 激励方式对大跨斜拉桥随机地震响应影响较小。在随机响应的低频段,激励方式影响较场地条件小;但在响应的高频段,激励方式的影响较场地条件大。多点激励对随机响应的影响始终比一致激励的影响大。

参考文献:

References:

- [1] VLACHOS C, PAPAKONSTANTINOU K G, DEODATIS G. A multi-modal analytical non-stationary spectral model for characterization and stochastic simulation of earthquake ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 80: 177-191.
- [2] APAYDIN N M, BAS S, HARMANDAR E. Response of the fatih sultan mehmet suspension bridge under spatially varying multi-point earthquake excitations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 84: 44-54.
- [3] BI K M, HAO H. Numerical simulation of pounding damage to bridge structures under spatially varying ground motions[J]. Engineering Structures, 2013, 46: 62-76.
- [4] BI K M, HAO H. Influence of irregular topography and random soil properties on coherency loss of spatial seismic ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(9): 1045-1061.
- [5] KONAKLI K, DER KIUREGHIAN A. Simulation of spatially varying ground motions including incoherence, wave-passage and differential site-response effects[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(3): 495-513.
- [6] 高忠虎, 吴忠铁, 狄生奎, 等. 考虑行波效应下钢管混凝土系杆拱桥隔震研究[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 84-90.
GAO Zhonghu, WU Zhongtie, DI Shengkui, et al. Study on seismic isolation of concrete filled steel tubular tied arch bridge considering traveling wave effect[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 84-90.
- [7] ZHANG D Y, XIE W C, PANDEY M D. Synthesis of spatially correlated ground motions at varying sites based on Vector-valued Seismic Hazard Deaggregation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 41: 1-13.
- [8] 丁阳, 林伟, 李忠献. 大跨度空间结构多维多点非平稳随机地震反应分析[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 97-103.
DING Yang, LIN Wei, LI Zhongxian. Non-stationary random seismic analysis of long-span spatial structures under multi-support and multi-dimensional earthquake excitations[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 97-103.
- [9] 丁阳, 张笈玮, 李忠献. 部分相干效应对大跨度空间结构随机地震响应的影响[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 86-92.
DING Yang, ZHANG Jiwei, LI Zhongxian. Influence of partial coherence effect on random seismic responses of long-span spatial structures[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 86-92.
- [10] KARMAKAR D, RAY-CHAUDHURI S, SHINOZUKA M. Seismic response evaluation of retrofitted Vincent Thomas Bridge under spatially variable ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 42: 119-127.
- [11] SOYLUK K, SICACIK E A. Soil-structure interaction analysis of cable-stayed bridges for spatially varying ground motion components[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 35: 80-90.
- [12] 黄艳. 大跨度斜拉桥复杂条件下地震反应分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
HUANG Yan. Seismic response analysis of long-span cable-stayed bridge under complex conditions[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012.

- [13] JIA H Y,ZHANG D Y,ZHENG S X,et al. Local site effects on a high-pier railway bridge under tridirectional spatial excitations: Nonstationary stochastic analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2013,52:55-69.
- [14] 郑史雄,张金,贾宏宇,等. 大跨度斜拉桥多维多点随机地震激励响应分析[J]. 西南交通大学学报. 2014,49(5):747-53. ZHENG Shixiong, ZHANG Jin, JIA Hongyu, et al. Stochastic seismic response analysis of large-span cable-stayed bridge subjected to multi-dimensional and multi-support excitations [J]. Journal of Southwest Jiaotong University. 2014,49(5):747-53.
- [15] 陈彦江,张德义,李晰,等. 空间变化地震作用下钢管混凝土拱桥的抗震分析[J]. 工程力学,2013,30(12):99-106. CHEN Yanjiang, ZHANG Deyi, LI Xi, et al. Stochastic seismic analysis of a CFST arch bridge under spatially varying ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12):99-106.
- [16] 贾少敏,王子琦,赵雷,等. 多点激励下隔震桥梁非线性随机振动的时域显式迭代模拟法[J]. 工程力学,2018,35(12):116-123. JIA Shaomin, WANG Ziqi, ZHAO Lei, et al. A simulation method based on explicit time-domain iteration scheme for nonlinear random vibration analysis of isolated bridges under multi-support excitation[J]. Engineering Mechanics, 2018,35(12):116-123.
- [17] 王志华,陈国兴,胡庆兴. 特大型桥梁桩基完全非平稳随机地震反应分析[J]. 工程力学,2010,27(2):172-177. WANG Zhihua, CHEN Guoxing, HU Qingxing. Fully non-stationary stochastic seismic analysis of supergiant bridge pile foundation[J]. Engineering Mechanics, 2010,27(2):172-177.
- [18] 张志超,张亚辉,林家浩. 水平地震下列车过桥的非平稳随机响应及其极值估计[J]. 工程力学,2011,28(1):178-185. ZHANG Zhichao, ZHANG Yahui, LIN Jiahao. Non-stationary random vibration and peak value estimation of trains passing over bridge during horizontal earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(1):178-185.
- [19] 贾宏宇,郑史雄. 基于场地效应的山区高墩桥梁随机地震响应分析[J]. 公路交通科技,2012,29(6):93-97,121. JIA Hongyu, ZHENG Shixiong. Analysis of random seismic response of high-rise pier bridge in mountain area based on site effect[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012,29(6):93-97,121.
- [20] 孙才志,赵雷,贾少敏. 考虑场地效应的大跨度多塔斜拉桥随机地震响应分析[J]. 公路交通科技,2014,31(8):71-76. SUN Caizhi, ZHAO Lei, JIA Shaomin. Analysis on random seismic response of long-span multi-pylon cable-stayed bridge considering site effect[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014,31(8):71-76.
- [21] 武芳文,赵雷. 考虑地震动局部场地效应的大跨度斜拉桥随机地震响应分析[J]. 地震研究,2010,33(1):93-98. WU Fangwen, ZHAO Lei. Stochastic seismic response of long-span, cable-stayed bridges under local site effect[J]. Journal of Seismological Research, 2010,33(1):93-98.
- [22] 甄玉杰,连云杰. 西安正阳大道机场东跨线桥抗震弹塑性分析与评价[J]. 中外公路,2021,41(2):168-171. ZHEN Yujie, LIAN Yunjie. Seismic elastoplastic analysis and evaluation of east airport overpass bridge of Zhengyang Avenue in Xi'an[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(2):168-171.
- [23] 汪泉清. 高烈度区装配式公路桥梁抗震性能研究[J]. 中外公路,2020,40(6):132-135. WANG Quanqing. Study on seismic performance of assembled highway bridge in high intensity area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020,40(6):132-135.
- [24] 王贵春,张世蒙,NIKOLAOS Simos,等. 柯尼萨石拱桥近场和远场地震损伤研究[J]. 中外公路,2022,42(1):79-85. WANG Guichun, ZHANG Shimeng, SIMOS N, et al. Near-and far-field earthquake damage study of the Konitsa Stone Arch Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(1):79-85.
- [25] 闵锐,王志民. 基于均匀设计响应面法的桥梁地震易损性分析[J]. 中外公路,2021,41(增刊2):123-126. MIN Rui, WANG Zhimin. Seismic vulnerability analysis of bridges based on uniform design response surface method [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(sup 2): 123-126.
- [26] 陈皞,周牧,安风明,等. 地震作用下群桩体系桥梁连续倒塌模拟研究[J]. 中外公路,2019,39(2):113-120. CHEN Hao, ZHOU Mi, AN Fengming, et al. Simulation study on continuous collapse of bridge supported on pile groups under earthquake loads[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019,39(2):113-120.
- [27] BI K M, HAO H. Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2012, 29:92-104.
- [28] MARANO G C, TRENTADUE F, MORRONE E, et al. Sensitivity analysis of optimum stochastic nonstationary response spectra under uncertain soil parameters[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008,28(12):1078-1093.