张彬,张宏民,宫照伟.基于场地效应的悬索桥随机地震响应分析[J].地震工程学报,2018,40(4):631-636.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2018.04.631

ZHANG Bin,ZHANG Hongmin,GONG Zhaowei.Random Seismic Response of a Suspension Bridge Considering Site Effect[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(4):631-636.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2018.04.631

基于场地效应的悬索桥随机地震响应分析

张 彬，张宏民，宫照伟

（辽宁工程技术大学土木工程学院，辽宁 阜新 123000）

摘要：因大跨径悬索桥梁具有较大的跨越尺度，同时墩柱基础所处场地条件也存在差异，所以对其进行地震响应分析时需考虑局部场地效应。为了正确分析场地效应对大跨度桥梁的地震响应，以某悬索桥为研究背景，采用 MIDAS/CIVIL 有限元软件，建立该悬索桥的有限元模型，在考虑地震动的局部场地效应情况下列举 9 种不同的计算工况，对大跨度悬索桥进行时程分析，通过控制一个塔墩处场地类别，改变另一个塔墩处的场地类别来分析场地效应对桥梁跨中位移和弯矩的影响。研究结果显示：场地效应对悬索桥的跨中位移和弯矩存在一定影响，不同的场地条件对桥梁同一位置的破坏程度不同。

关键词：大跨度桥梁；地震动；有限元模型；时程分析；场地效应

中图分类号：U442.5^{+}5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－0844(2018)04－0631－06

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2018.04.631

Random Seismic Response of a Suspension Bridge Considering Site Effect

ZHANG Bin, ZHANG Hongmin, GONG Zhaowei

(*College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China*)

Abstract: The local site effect should be considered when analyzing the seismic response of long-span suspension bridges because of the large span scale and different site conditions of pier column foundation. For such analysis, the finite element model of a certain long-span suspension bridge is established in this paper using the MIDAS/Civil finite element software. Considering the local site effect of ground motions, nine different calculation conditions are listed to carry out the time-history analysis of the long-span suspension bridge. By controlling the site classification of one tower pier and changing the site classification of another tower pier, the influence of site effect on the midspan displacement and bending moment of the bridge is analyzed. The results show that site effect has some impacts on the midspan displacement and bending moment of sus-

收稿日期:2017-07-08

基金项目:国家安监总局项目(05 05 079);辽宁省教育厅项目(1.2011048)

第一作者简介:张 彬(1960－),男,教授,博士生导师,主要从事桥梁与隧道工程学科等方面的研究。E-mail:2529461042@qq.com。

通信作者:张宏民,男,硕士研究生。E-mail:2529461042@qq.com。

pension bridges, and different site conditions have different levels of destruction on the same position of the bridge.

Keywords: long-span bridge; ground motion; finite element model; time-history analysis; site effect

0 引言

悬索桥是大跨度桥梁中的典型代表,因其具有跨越能力大、造型优美、宏伟壮观等优点受到众多设计专家们的青睐,得到了广泛应用。同时由于其跨度大、空间性强等原因导致桥梁结构支撑各点受到的地震波激励经历不同的地质条件和路径,因此地震对桥梁不同位置产生的影响必然存在差异。这种差异包括行波效应、部分相干效应、波的衰减效应和局部场地效应[1-2]。在地震作用下,以上四种差异可能会导致桥梁一部分坍塌而另一部分完好无损。为了消除这些差异带来的损失,在大跨度桥梁抗震设计中,必须考虑其对桥梁结构的影响。衰减效应由于其影响效果较小,可以忽略,但其他三种效应带来的影响很大,在进行地震响应分析时应予以考虑。其中局部场地效应是因为桥梁底部基础各支点处土的性质存在不同,对地震波的各个要素形成影响[3]。国内外震害经验表明:结构设施必须考虑局部场地效应对其的影响。Bi 等[4]基于不同场地条件下的人工地震波,深入研究了场地效应对结构的影响;孙才志等[5]研究发现局部场地效应对大跨度多塔斜拉桥随机地震响应的影响不可忽略。要想全面、准确地研究场地效应对大跨度桥梁抗震的影响,需建立大跨桥梁的实际模型,本文利用 MIDAS/CIVIL 有限元分析软件,建立某悬索桥的模型,进行场地效应下的地震响应分析。

1 工程实例

1.1 工程概况

本文以位于西部高烈度山区某悬索桥为研究背景。该悬索桥桥梁宽度 B 为 11.0 m,总长 L 为 1 950 m,其跨径布置为(375+1 200+375) m,桥梁类型为 A 类。桥梁所处位置为Ⅶ度抗震区,设防烈度为Ⅷ度,结构的阻尼比为 0.05。

1.2 计算模型

为使分析结果准确、可靠,依据桥梁实际尺寸,采用 MIDAS/CIVIL 有限元软件对该悬索桥进行建模。全桥建模模型如图 1 所示。该模型包含 795 个节点,798 个单元,其中悬索桥的加劲梁和索塔生成为梁单元,主缆和吊杆生成为索单元,加劲梁与吊杆之间为刚性连接;为了使加劲梁和主缆沿桥梁方向能作为一个整体工作,在中间跨跨中位置的加劲梁和主缆之间连接中央支撑模型。

图 1 MIDAS 有限元模型

Fig.1 MIDAS finite element model

1.3 随机地震动输入

根据相关规定[6],大跨度桥梁应该按照 50 年超越概率 2%的地震动参数进行抗震设计,参考地震部门给出的地震动参数进行抗震分析。地震波在传播过程中具有很强的的随机性,表现在同一次地震在同一片场地上测得的数据都不尽相同,同时不同的地震波对结构产生的响应也可能会有明显的区别。因此为了获得地震时程分析的准确性,选择合适的地震动输入显得尤为重要[7-8]。由于该悬索桥两个塔墩间隔较大,故在分析地震响应时不可忽略地震动的空间变化特性。地震波传播过程中的不确定性[9],使得地震波在悬索桥的两塔墩处具有差异性。地震动输入采用改进的 Kanai 自功率谱模型,其表达式为:

$$S_w=\frac{\omega^6}{\omega^6+\omega_c^6}\frac{1+4\xi_g^2\frac{\omega^2}{\omega_g^2}}{\left[1-\frac{\omega^2}{\omega_g^2}\right]^2+4\xi_g^2\frac{\omega^2}{\omega_g^2}}S_0 \tag{1}$$

式中：ω 为地震地面运动频率；ξ_g 为场地特征阻尼比；ω_g 为场地卓越频率；S_0 为白噪声谱强度；ω_c 为控制地震地面运动低频含量的参数。

由于场地效应的作用，两个塔墩处的自功率谱不同，因此要分析两支撑处的自功率谱之间的关系；屈等[10] 在对地震记录分析的基础上，进行回归拟合，得到如下公式：

$$\Delta S_0 = 2.571 \times 10^{-5} \Delta h - 1.24 \times 10^{-6} \Delta x \quad (2)$$

式中：ΔS_0 为任意两测点的自功率谱强度差值；Δh 为两点的土层厚度差；Δx 为两点的震中距差。

因只研究波传播方向这一直线上地震动的空间变化问题，由式(2) 就可根据其中一个塔墩处的自功率谱求得另一个塔墩处的自功率谱。本文中 $\Delta h = 0$，$\Delta x = 1\ 200$，以此来考虑梁塔墩处的场地差异。在计算分析过程中，在两塔墩处输入有差异的自功率谱以考虑场地效应[11]。

场地类型分为坚硬、中硬、中软、软弱四种类型。在本文中，为了获得场地效应对桥梁结构响应的影响规律，需要分别分析不同场地条件下场地效应的随机地震响应对桥梁结构的影响，即通过场地类型的变化来考虑不同场地效应对结构随机地震响应的影响[12]。假设桥梁两个塔墩处的地基土分别为坚硬、中硬、软弱三种场地类型之一，则两个塔墩处的场地类别可以有 9 种不同的组合。为了考虑局部场地效应，本文列举了 9 种不同的计算工况(表 1)。

表 1　考虑局部场地效应的计算工况

Table 1　Calculation conditions considering local site effect

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8	工况 9
场地条件	坚-坚	中-坚	软-坚	坚-中	中-中	软-中	坚-软	中-软	软-软

注：坚为坚硬场地，中为中硬场地，软为软弱场地；坚-坚表示 1 号塔墩处的场地类别为坚硬场地，而 2 号塔墩的场地类别为坚硬场地。

根据《公路桥梁抗震设计细则》规定：抗震设防烈度为Ⅷ度和Ⅸ度的拱式结构、长悬臂桥梁结构和大跨度结构以及竖向作用引起的地震效应很重要时，应同时考虑顺桥向 X、横桥向 Y 和竖向 Z 的地震作用[13]。对于大跨度悬索桥，我国通常做法是竖直地震系数取为水平地震系数的 1/2(或 2/3)，表达如下：

$$\text{顺桥向：} E_X + 0.5E_Z \quad (3)$$

$$\text{横桥向：} E_Y + 0.5E_Z \quad (4)$$

式中：E_X、E_Y、E_Z 分别代表作用于顺桥向、横桥向、竖直向的地震激振作用。

2　时程分析过程与结果

2.1　时程分析过程

悬索桥的有限元模型建立之后，需对悬索桥的时程进行分析。首先应将包含恒载和地震荷载在内的荷载添加到桥梁结构上，添加恒载时应以时变静力荷载的形式加载到结构上，分析类型为非线性，时间函数类型选择无量纲形式，采用静力法作为分析方法；而地震荷载应以加速度的形式加载，分析类型为非线性，分析方法采用直接积分法，过程类型为瞬态，分析时间取 80 s，分析时间步长取 0.02 s[14-15]。

2.2　时程分析结果

为正确分析场地效应下的悬索桥地震响应，在上述 9 种工况下分别对跨中位移和弯矩的影响进行了分析。其中图 2 为工况 1、工况 2、工况 3 地震动输入下地震波对跨中位移的影响曲线图。这三种工况在 2 号塔墩处均为坚硬场地，通过改变 1 号塔墩处的场地类别来分析场地效应对跨中处位移的影响。通过对比可以得出：位移值随着地震波的传播不断变化，同时不同的地震动对该悬索桥跨中位移的影响也不同，跨中横桥向相对位移的最大值不尽相同，最大位移发生时刻也有明显的区别。工况 1 下的时程分析中跨中横桥向位移的最大值为 13.05 mm，发生在 28.7 s 时刻；工况 2 下的时程分析中跨中横桥向位移的最大值为 13.11 mm，发生在2.74 s 时刻；工况 3 下的时程分析中跨中横桥向位移的最大值为 13.28 mm，发生在 45.82 s 时刻。

图 3 给出了工况 4、工况 5、工况 6 地震动输入下地震波对跨中弯矩的影响曲线。这三种工况在 2 号塔墩处均为中硬场地，通过改变 1 号塔墩处的场地类别来分析场地效应对跨中处弯矩的影响。从时程分析结果中可以看出悬索桥的跨中弯矩值随着地震波的传播可增可减，且对应不同地震波的弯矩变化函数曲线区别较大，其变化趋势截然不同。其中在工况 4 作用下，跨中弯矩的最大值为 206.8，发生在 3.30 s；在工况 5 作用下，当地震波传播到7.34 s时，跨中弯矩的峰值为 214.7；在工况 6 的响应分析中跨中弯矩的最大值为 214.6，发生在 5.42 s 时刻。

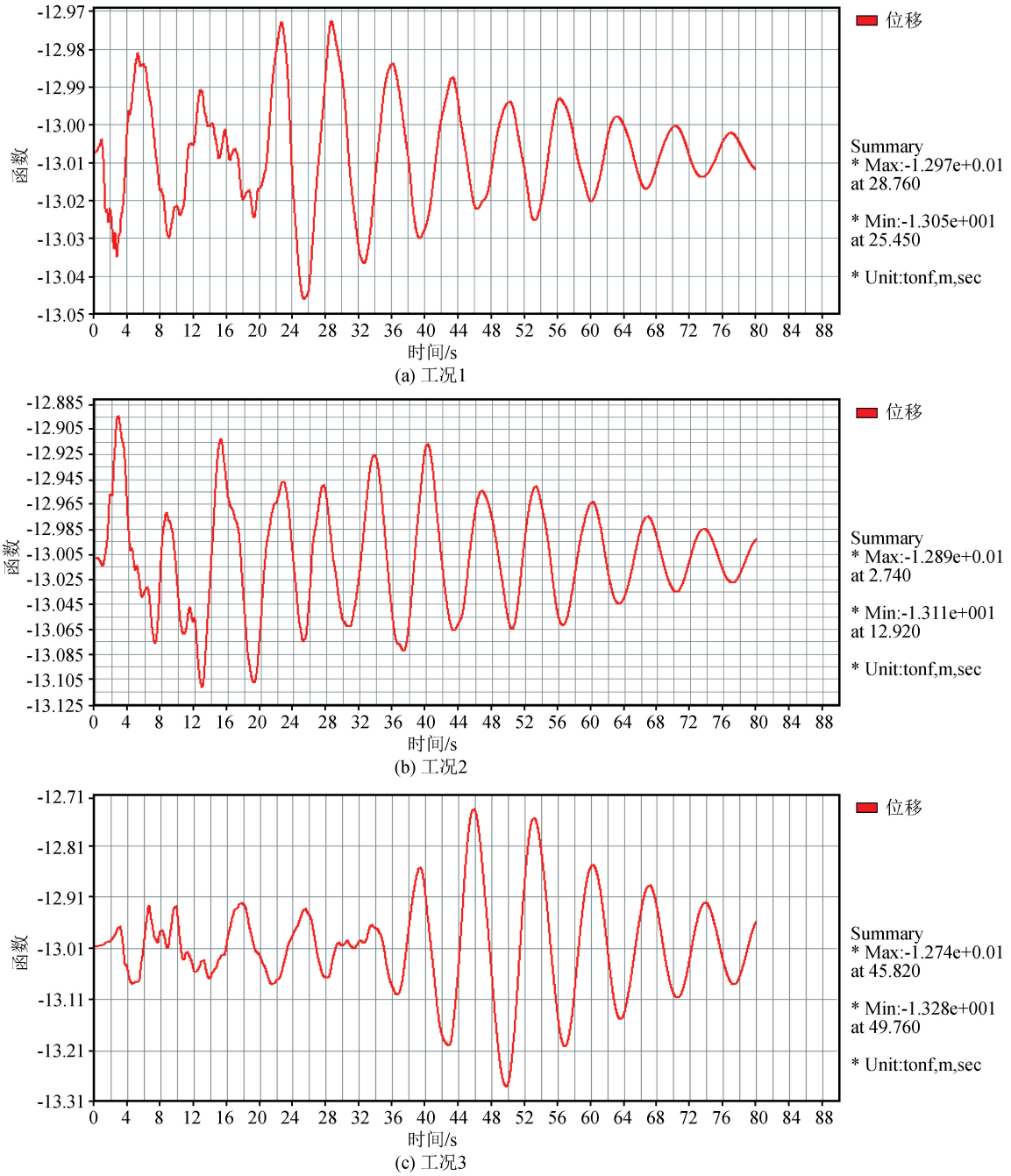

图 2 不同工况下的场地效应对跨中位移影响曲线

Fig.2 Influence curve of the site effect on midspan displacement under different conditions

3 结论

通过本文的时程分析和数值模拟计算，得出如下结论：

（1）通过对大跨度悬索桥的随机地震响应分析，得出大跨度悬索桥的跨中位移、跨中弯矩伴随地震波的传播不断变化，随着时间的推移总体变化趋势在减少，但曲线并没有明显的规律，体现了地震波传播的随机性。

（2）场地效应对大跨度悬索桥的地震响应影响很大，不同场地效应下的地震波对桥梁的影响时间和强度都会有差异，工况 1 场地效应下，即两塔墩场地条件一样时，地震对位移的影响在短时间内强度较小，而工况 3 场地效应下，即两场地条件相差较大时，对桥梁位移影响的强度会很快达到最大值，此时对桥梁的破坏力大。因此在修建大跨结构

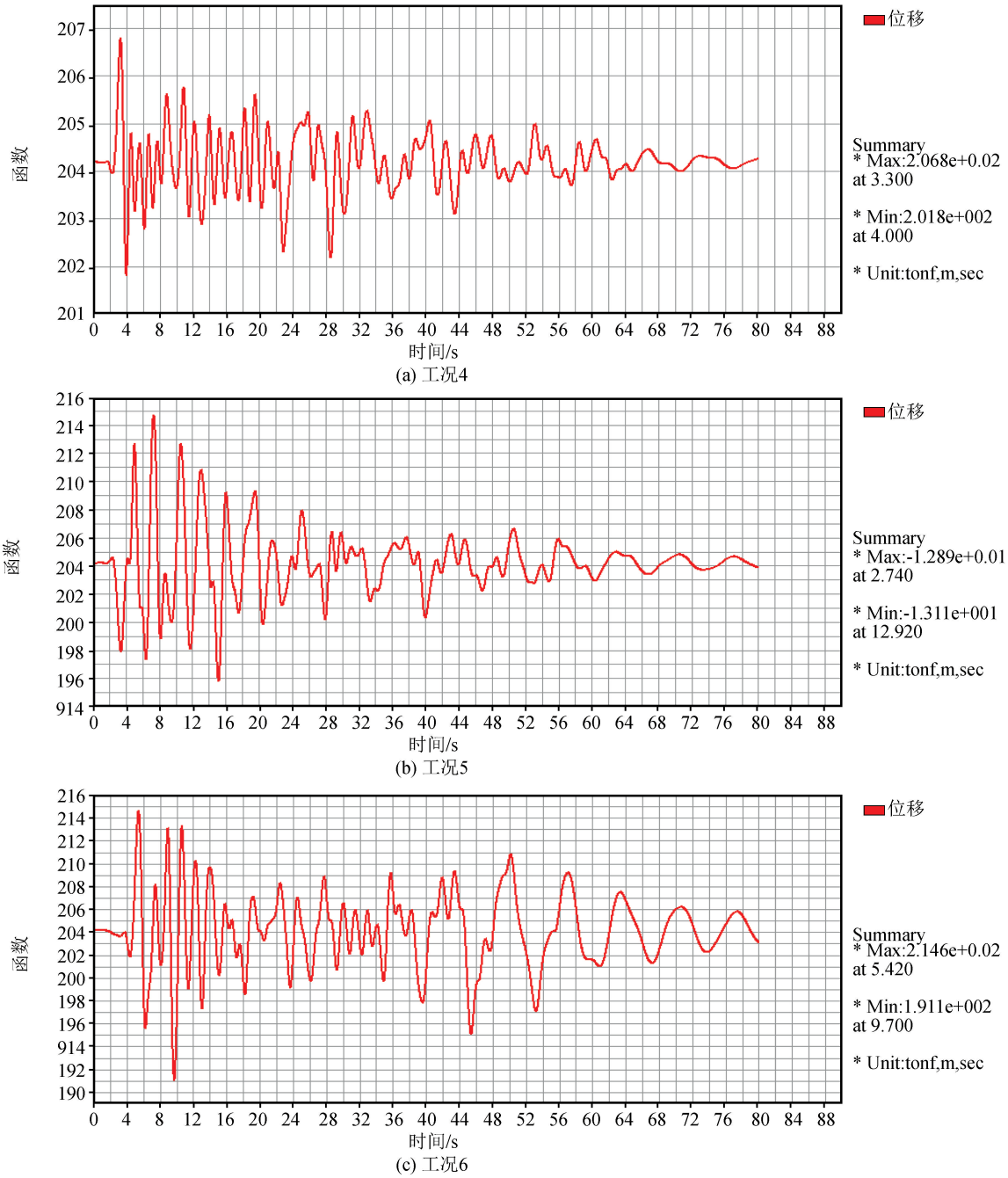

图 3　不同工况下的场地效应对跨中弯矩影响曲线

Fig.3　Influence curve of the site effect on midspan bending moment under different conditions

时，应选择场地类别较接近的环境，而非场地相差悬殊之地。

（3）对于大跨度空间结构，其不同位置的地质条件会有差异，因此地震波的传播路径会有所不同，对结构的破坏程度也会不同。因此在进行大跨度空间结构修建时，应严格考察周围的地质条件，合理考虑场地效应带来的影响，减轻地震对结构的损坏。

参考文献(References)

[1] KIUREGHIAN A D, NEUENHOFER A. Response Spectrum Method for Multi-support Seismic Excitations[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21: 713-740.

[2] 李青. 多点地震动模拟及工程应用[D]. 重庆：重庆大学，2015.
LI Qing. Simulation and Application of Multi-point Ground Motions for Engineering Structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

[3] BOUCKOVALAS G D, PAPADIMITRIOU A G. Numerical

Evaluation of Slope Topography Effects on Seismic Ground Motion[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2005, 27(7-10): 547-558.

[4] BI K, HAO H. Modeling and Simulation of Spatially Varying Earthquake Ground Motions at Sites with Varying Conditions [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2012, 29: 92-104.

[5] 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.

[6] 公路桥梁抗震设计细则：JTG/T B02-01-2008[S].北京：人民交通出版社，2008.
Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges: JTG/T B02-01-2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.

[7] 孟凡超，王仁贵，徐国平，等.悬索桥[M].北京：人民交通出版社，2011.
MENG Fanchao, WANG Rengui, XU Guoping, et al. Suspension Bridges[M]. Beijing: China Communication Press, 2011.

[8] 张长浩，封建湖，王勋涛，等.地震动的小波分析技术在高层结构抗震设计中的应用研究[J].地震工程学报，2016，38(5)：728-737，744.
ZHANG Changhao, FENG Jianhu, WANG Xuntao, et al. Application of Wavelet Analysis in Seismic Design of a High-rise Structure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5): 728-737, 744.

[9] 卓卫东，杨宁，曾武华.公路桥梁基于概率的实用抗震性能设计框架[J].中南大学学报(自然科学版)，2015，46(9)：3468-3474.
ZHUO Weidong, YANG Ning, ZENG Wuhua. A Practical Framework for Probability and Performance-based Seismic Design of Highway Bridges[J]. Journal of Central South University (Scieence and Technology), 2015, 46(9): 3468-3474.

[10] 屈铁军，王君杰，王前信.空间变化的地震动功率谱的实用模型[J].地震学报，1996，18(1)：55-62.
QU Tiejun, WANG Junjie, WANG Qianxin. Practical Model of Power Spectrum of Ground Motion Based on Spatial Variation[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(1): 55-62.

[11] 夏明强，欧文东.非一致场地大跨度斜拉桥的地震响应分析[J].世界地震工程，2014，36(3)：196-201.
XIA Mingqiang, OU Wendong. Seismic Response Analysis of Long-span Cable-stayed Bridge on Non-uniform Site [J]. World Earthquake Engineering, 2014, 36(3): 196-201.

[12] 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.

[13] 刘章军，雷耀龙，方兴.大跨桥梁结构随机地震反应的概率密度演化分析[J].土木工程学报，2013，46(增刊 1)：226-232.
LIU Zhangjun, LEI Yaolong, FANG Xing. Probability Density Evolution Method-based Random Seismic Response Analysis of Cable-stayed Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Suppl): 226-232.

[14] 李世增.钢筋混凝土连续梁桥墩柱地震易损性分析[D].合肥：安徽建筑大学，2014.
LI Shizeng. Analysis of Seismic Vulnerability of Reinforced Concrete Continuous Beam Bridge Pier Columns[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2014.

[15] 林丽霞，丁南宏，张元海，等.考虑阻尼值修正的双链式悬索桥地震响应分析[J].铁道科学与工程学报，2012，9(5)：25-30.
LIN Lixia, DING Nanchong, ZHANG Yuanhai, et al. Seismic Response Analysis of Double Chains Suspension Bridge Considering Modified Damping Value[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(5): 25-30.