

基于二维相干性自锚式悬索桥的地震响应研究

李杰, 李娜

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:一般在非一致地震激励的模拟中采用一维相干模型, 即模型中只含有沿地震波传播方向的变量, 但垂直于地震波传播方向两点距离较远(如横桥向)时, 会存在相干性。本文基于二维相干模型, 应用三角级数法, 考虑频率对波速的影响、地震波传播滞后对非平稳调制函数的影响, 生成某自锚式悬索桥桥址处各支点的人工地震波。利用该地震波研究不同激励方式对自锚式悬索桥结构的地震响应, 并与基于一维相干的地震响应结果进行了对比, 从中得到一些有意义的结论。

关键词: 自锚式悬索桥; 二维相干性; 人工地震波; 地震响应

中图分类号: U441 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2008)02-0150-05

Study on Seismic Response of Self-anchored Suspension Bridge Based on 2D-coherence Model

LI Jie, LI Na

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001 China)

Abstract: Usually the 1D-coherence model is used to simulate seismic excitation, that means only a variation which travels along the direction of seismic wave is considered. However, when the distance between two points, which are at vertical direction to the wave way, is some long (e. g. at both side of a bridge), the coherence appears. In this paper, based on 2D-coherence model, using the triangular series method, considering the effect of frequency to wave velocity and the effect of seismic wave lag to non-uniformly modulation function, the artificial seismic wave is formed to every support of a self-anchored suspension bridge. The wave is used to research the seismic responses of the bridge structure in different excitation way. The result is compared with the result of 1D-coherence, and from comparing some valued conclusions are gained.

Key words: Self-anchored suspension bridge; 2D-coherence model; Artificial seismic wave; Seismic response

0 概述

相对于斜拉桥、地锚悬索桥等桥型, 国内外对自锚式悬索桥抗震分析的研究较少^[1-2], 这主要是由于以前很少建造自锚式悬索桥。自锚式悬索桥的大缆直接锚固于加劲梁端, 大缆可以纵向变形以及较大的矢跨比等特点, 使其动力特性和地震作用下的响应与其它类型桥梁有一定区别。刘春城、张哲等^[3-5]对混凝土自锚式悬索桥的动力特性和地震响应做了详细研究。杨孟刚、陈政清等^[6-7]以佛山平胜桥为研

究对象, 采用空间非线性有限元法研究了独塔自锚式悬索桥的地震响应特性, 考虑了一致输入, 行波输入, 多点输入这3种地震动模式以及多种地震波组合, 并就塔梁不同连接方式对结构响应的影响进行探讨研究。在这些分析中的非一致地震激励模型均采用一维相干模型, 即模型中只含有沿地震波传播方向的空间变量, 垂直于地震波传播方向上各支点所受到的激励完全相同。但实际上如果垂直于地震波传播方向支点间距离较远, 如横桥向, 其地震波时

收稿日期: 2007-10-12

作者简介: 李杰(1974-), 男(汉族), 陕西宝鸡人, 工学博士; 主要从事桥梁结构理论研究。

程可能不尽相同。

本文采用 Hao 根据 SMART-1 台阵提出的二维相干模型^[8],考虑频率对视波速的影响和各支点地震波传播滞后对非平稳调制函数的影响,应用三角级数法合成某自锚式悬索桥各支点的地震波,分别考虑地震波激励方向为纵+竖和横+竖时的结构地震响应,并与基于一维相干模型的响应结果进行对比以说明两种分析方法的差异。

1 人工地震波合成

重要工程的抗震设计通常要求输入地面运动加速度波进行时程反应分析。由于未来可能发生的地震动特性不可预测,因此地面运动过程为一随机过程,一般根据已经发生的实际地震动记录的统计分析来建立地震动随机过程模型^[9-12]。

根据非一致激励功率谱矩阵的一般形式^[13],考虑二维空间相干的非一致激励功率谱矩阵表示为

$$S(\omega, d_{kl}^l, d_{kl}^l) = S(\omega) \gamma(\omega, d_{kl}^l, d_{kl}^l) \exp\left(-\frac{id_{kl}^l}{v_{app}} \omega\right) \quad (1)$$

式中 $S(\omega)$ 为各支点的自功率谱密度函数; ω 为地震波的主要圆频率; d_{kl}^l 和 d_{kl}^l 为场地内任意两点 k, l 连线沿地震波传播方向和垂直地震波传播方向的投影; v_{app} 为地震地面波的视波速。本文中 $S(\omega)$ 采用杜修力和陈厚群所提出的功率谱模型^[14-15]:

$$S(\omega) = \frac{1}{1 + (D\omega)^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega_0^2 + \omega^2)^2} \cdot \frac{1 + 4\zeta_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\zeta_g^2(\omega/\omega_g)^2} S_0 \quad (2)$$

式(2)中参数 $D, \omega_0, \omega_g, \zeta_g$ 和 S_0 需要确定,文献[14]、[15]给出了参数 D 和 ω_0 与地震震级的关系。相干函数采用 1989 年 Hao 根据 SMART-1 台震记录所提出的二维相干函数模型^[8]:

$$\gamma_{kl}(\omega, d_{kl}^l, d_{kl}^l) = \exp\left[-(\beta_1 |d_{kl}^l| + \beta_2 |d_{kl}^l|)\right] \exp\left\{-[\alpha_1(\omega) \sqrt{|d_{kl}^l|} + \alpha_2(\omega) \sqrt{|d_{kl}^l|}]\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^2\right\} \quad (3)$$

其中 $\alpha_1(\omega) = \frac{2\pi a}{\omega} + \frac{b\omega}{2\pi} + c, \alpha_2(\omega) = \frac{2\pi d}{\omega} + \frac{e\omega}{2\pi} + g,$ 各常量参数如表 1 所示。

表 1 Hao 相干模型参数 ($\times 0.000 1$)

β_1	β_2	a	b	c	d	e	g
2.250	5.100	106.6	0.265	-1.0	66.55	-0.59	-11.2

根据三角级数和的形式合成第一点地震动时

程。在生成第二点地震动时程时,考虑该点与第一点的相关性;依此类推生成第 n 点地震动时程时,考虑其与前 $n-1$ 个点的相干性,且各点相关性通过互功率谱密度函数表示。利用 MATLAB 编制人工地震波合成程序。下面对某自锚式悬索桥(77.8 + 188 + 77.8 m 钢箱自锚式悬索桥)桥址处各支承位置加速度时程曲线进行合成,图 1 给出桥梁支点位置示意,取 1 点到 6 点为地震波传播方向。

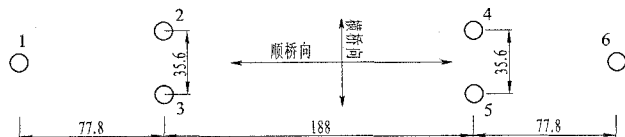


图 1 某自锚式悬索桥各支承点位置示意 (单位:m)

Fig. 1 Locations of every supported point of a self-anchored suspension bridge.

根据该桥地震安全性评价报告所给出 100 年超越概率 10% 验算结构强度时的地震动参数为:场地土类别为 III 类,反应谱特征周期为 0.4 s、PGA = 108.4 gal。依据文献[14]、[15],本文自功率谱密度模型的参数取值如表 2 所示。

表 2 本文自功率谱密度函数的参数取值

D	ω_0	ω_g	ζ_g	$S_0/[m^2 \cdot s^{-1}]$
0.011 37	1.83	13.16	0.97	$2.797 7 \times 10^{-3}$

其中功率谱强度 S_0 依据文献[16]中功率谱强度与最大地面加速度之间关系得到

$$2S_0 = \frac{0.141 \times \alpha_{max}^2 \times \xi_g}{\omega_g \times (1 + 4\xi_g^2)^{0.5}} \quad (4)$$

相干函数模型的参数取值见表 1 所示。视波速采用文献[17]中所给出的计算公式:

$$v_{app}(\omega) = c_1 + c_2 \ln(\omega/2\pi) \quad (5)$$

其中,参数 c_1, c_2 分别取 3 344 和 1 095。

由于支点 2 和 3 垂直于地震波传播方向,近似假定非平稳调制函数^[18]中参数不变,同理支点 4 和 5 的非平稳调制函数中的参数不变。考虑桥址处震中距较大,可根据文献[19]取值:对于 1 点取 $t_a = 1.2$ s、 $T = t_b - t_a = 90$ s、 $a = 0.5$,对于 2(3)、4(5)和 6 点参数按下式计算^[20]

$$\left. \begin{aligned} t_{ai} &= t_a + 0.000 34 d_{i1}^l \\ T_i &= T + 0.002 d_{i1}^l \\ a_i &= a \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 $i = 2, 3, 4, 5, 6; d_{i1}^l$ 为第 i 点震中距与第 1 点震中距的差值。将六个支承点空间位置写成矩阵形式

$$[(d_{jp}^t, d_{jp}^r)]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} (0,0) & (77.8, 17.8) & (77.8, -17.8) & (265.8, 17.8) & (265.8, -17.8) & (343.6, 0) \\ (-77.8, -17.8) & (0,0) & (0, -35.6) & (188,0) & (188, -35.6) & (265.8, -17.8) \\ (-77.8, 17.8) & (0,356) & (0,0) & (188,35.6) & (188,0) & (265.8, 17.8) \\ (-265.8, -17.8) & (-188,0) & (-188, -35.6) & (0,0) & (0, -35.6) & (77.8, -17.8) \\ (-265.8, 17.8) & (-188,35.6) & (-188,0) & (0,35.6) & (0,0) & (77.8, 17.8) \\ (-343.6, 0) & (-265.8, 17.8) & (-265.8, -17.8) & (-77.8, 17.8) & (-77.8, -17.8) & (0,0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

计算中截断频率为 25 Hz; 频率离散点 1 000 个; 持续时间 20 s; 时间步长约 0.02 s; 按加速度 0.108 4 g 调幅。图 2(a) ~ (f) 给出了六个支承点处加速度时程, 可以看出考虑垂直地震波传播方向的影响使得支点 2、3 的加速度时程不相同, 支点 4、5 亦然。

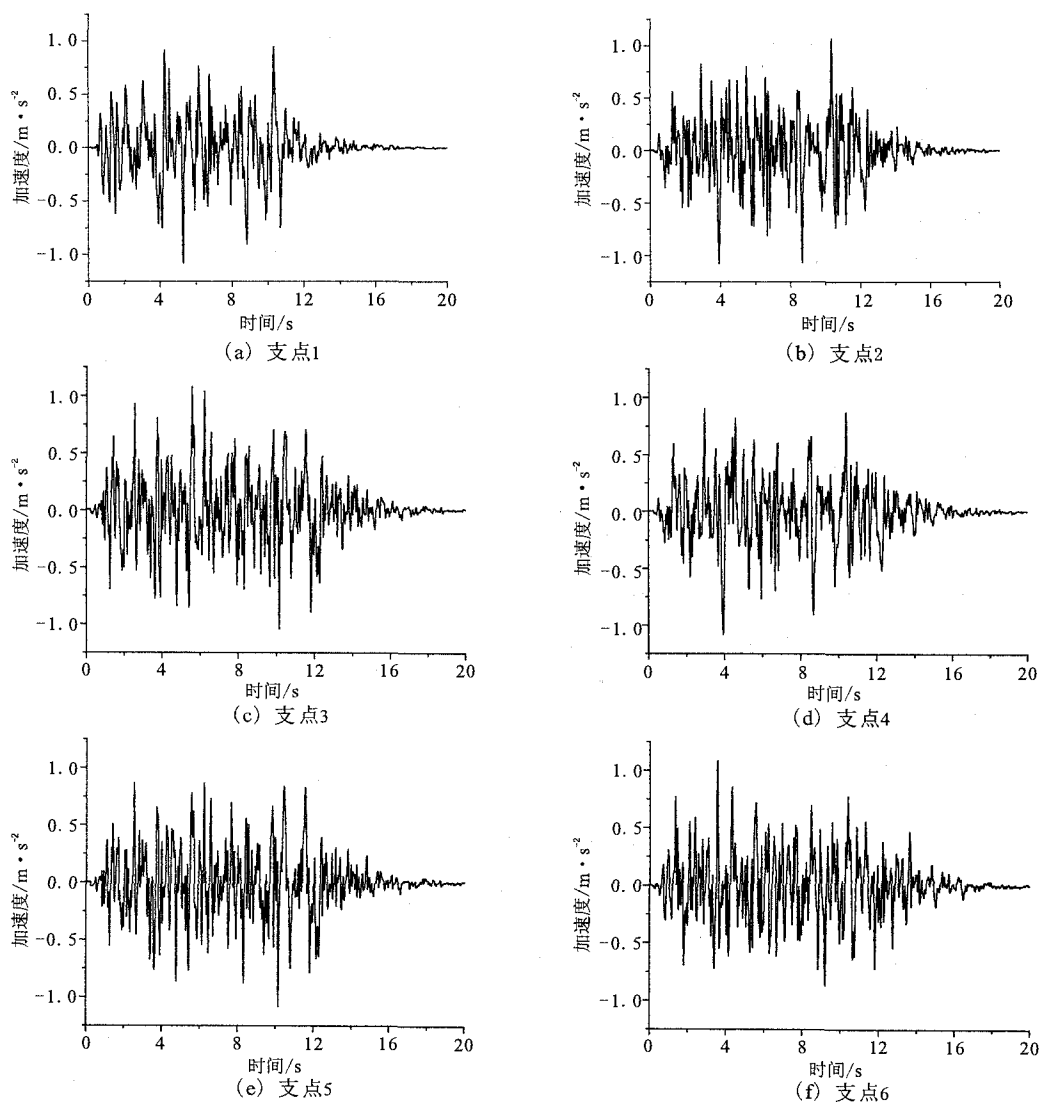


图 2 桥梁各支承点位加速度时程曲线

Fig. 2 Acceleration time-history curves for every supported point of the brige.

2 自锚式悬索桥地震响应分析

地震地面运动三项效应(行波、部分相干、局部场地效应)对大跨度桥梁结构地震响应有两方面的影响^[21]:不同步的动荷载(一致激励仅产生同步动

荷载)、基础相对位移对超静定桥梁结构的伪静力效应。前者往往降低桥梁的动力反应,而后者则是一致地震激励所没有,是非一致地震地面运动另外加给结构的。实际上桥梁结构的非一致地震反应是这两部分的组合,但很难说最终的非一致地震反应

比一致地震反应一定大或者一定小,这既依赖于桥梁超静定程度和刚度,也依赖于各塔墩基础非一致地震波的具体情况。本文利用 ANSYS 中的质量单元 MASS21,采用大质量法模拟加速度时程^[22]。主缆和吊杆采用三维桁架单元 Link8 来模拟,桥塔、边墩和加劲梁采用空间梁单元 Beam188 模拟,吊杆与加劲梁之间通过刚臂单元 Beam4 模拟。分析工况见表3所示,其中线性分析考虑柔性大缆和吊杆的初始刚度。竖向输入的幅值取为纵向输入的0.67倍,横向输入幅值与纵向相同。此外为了对比二维相干性对地震响应影响,工况2和6分析一维相干的地震响应,即将垂直于地震波传播方向的各支点输入相同的地震加速度时程。加劲梁位移和塔、梁交界处以及塔底弯矩时程见图3(a)~(f)所示。图中:L为线性;NL为几何非线性;2D-CO为二维相干多点激励;1D-CO为一维相干多点激励。

表3 分析工况

工况	激励方式	说明
1	纵向+竖向	线性—一致激励
2	纵向+竖向	几何非线性非一致激励(基于一维相干多点激励)
3	纵向+竖向	线性非一致激励(基于二维相干多点激励)
4	纵向+竖向	几何非线性非一致激励(基于二维相干多点激励)
5	横向+竖向	线性—一致激励
6	横向+竖向	几何非线性非一致激励(基于一维相干多点激励)
7	横向+竖向	线性非一致激励(基于二维相干多点激励)
8	横向+竖向	几何非线性非一致激励(基于二维相干多点激励)

由图3可以看出,在给定地震时程波作用下,非一致多点输入与一致激励输入的塔、梁弯矩相比较,部分相干效应对结构地震响应有一定影响,且基于一维相干函数的地震响应小于基于二维相干函数的地震响应,但二维相干效应不很显著。相对于内力,加劲梁位移不会超出一致激励位移响应。多点激励地震响应峰值见表4,可以看出考虑垂直地震波传播

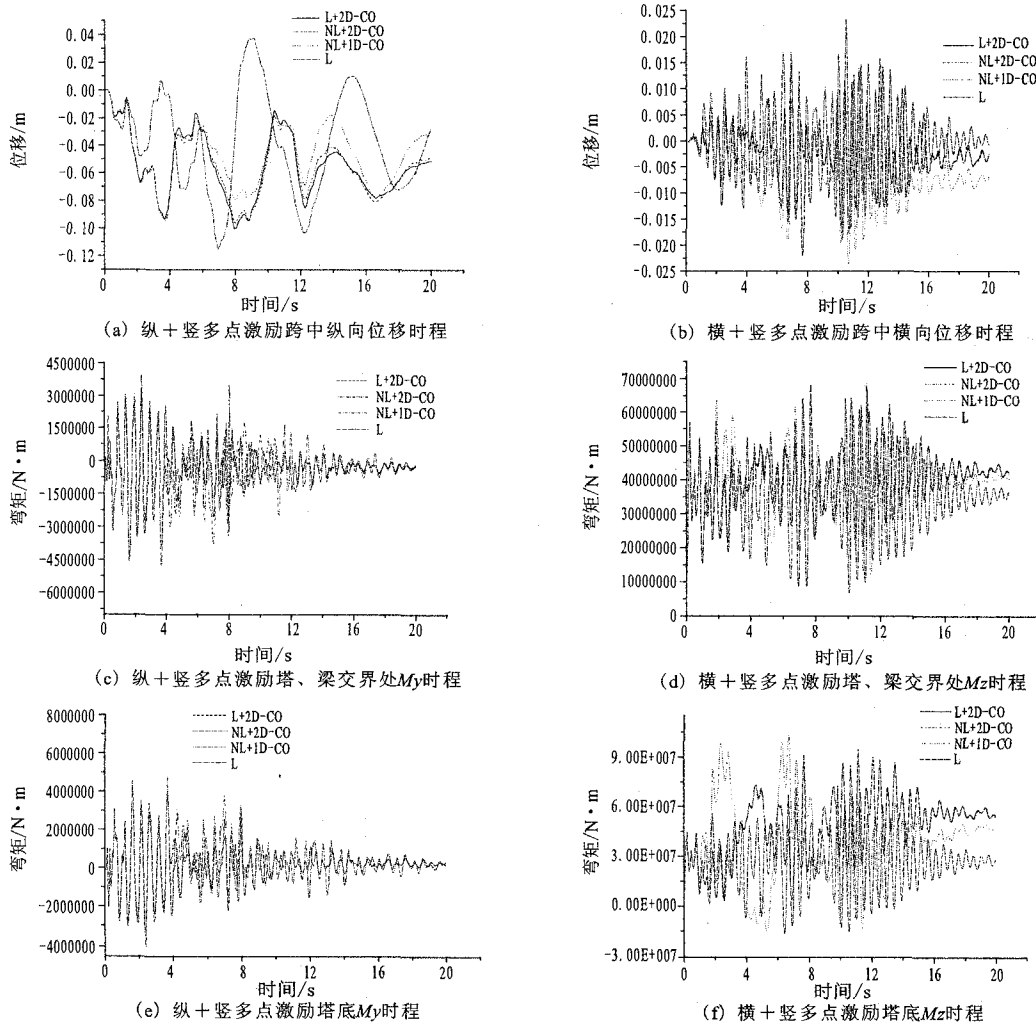


图3 桥梁不同位置在不同激励方式的位移时程或弯矩时程

Fig. 3 The displacement response or M_y/M_z response at different points of the bridge in different excitation ways.

表4 非一致多点激励地震响应峰值对比

响应	跨中位移/m		塔梁交界处弯矩/N·m		塔底弯矩/N·m	
	纵+竖	横+竖	纵+竖	横+竖	纵+竖	横+竖
二维相干线性	-0.1005	-0.0221	-4.642 × 10 ⁶	6.871 × 10 ⁷	4.672E × 10 ⁶	9.489 × 10 ⁷
二维相干几何非线性	-0.0962	-0.0213	-4.816 × 10 ⁶	6.854 × 10 ⁷	4.770E × 10 ⁶	9.453 × 10 ⁷
一维相干几何非线性	-0.0957	-0.0237	-4.652 × 10 ⁶	6.393 × 10 ⁷	4.661E × 10 ⁶	1.035 × 10 ⁸
一致性	-0.1147	0.0233	-4.359 × 10 ⁶	6.397 × 10 ⁷	4.383E × 10 ⁶	7.247 × 10 ⁷
相干性差异	0.52%	-11.27%	3.41%	6.73%	2.29%	-9.49%

注:相干性差异=(二维相干非线性-一维相干非线性)/二维相干非线性×100%

方向各支点的影响,即所谓的二维相干性时,对于纵+竖激励,会使塔、梁交界处和塔底的 M_y 增大,最大达到 3.41%,但对加劲梁跨中位移影响很小;对于横+竖,二维相干性多点激励会使加劲梁跨中位移减小 11.27%,使塔底弯矩 M_z 减小 9.49%,但会使塔梁交界处 M_z 增大 6.73%。

由图3和表4可以看出,不同激励方式下自锚式悬索桥的地震响应时程比较接近,一致激励、一维相干激励和二维相干激励之间差异不是很大,这主要是由于桥梁横向宽度相比于大型房屋、水利等土木建筑不是很大(一般桥梁宽度不超过 50 m),垂直于地震波传播方向的相干效应影响较小,所以二维相干响应并不显著。

3 小结

本文针对自锚式悬索桥地震响应的几何非线性时程分析,研究了垂直于地震波传播方向各支点的相干性对地震响应的影响,通过分析可以看出:

(1) 相干效应对自锚式悬索桥地震效应有一定的影响;

(2) 与一维相干性相比,考虑垂直地震波传播方向各支点间相互影响的二维相干性多点激励对结构有一定影响,但对于桥宽一般最多几十米的自锚式悬索桥结构的地震响应,二维相干效应不显著;

(3) 几何非线性对自锚式悬索桥地震响应影响较小,这主要是因为地震响应分析的初始状态选择为静力平衡状态,即考虑了大缆和吊杆的初张力影响。

特别感谢西南交通大学郑凯锋教授对本文的指导。

[参考文献]

[1] 秋仁东,石玉成,徐瞬华,等. 预应力锚索加固石窟岩体的地震动力响应研究[J]. 西北地震学报,2007,29(1):49-53.
 [2] 李兴田,朱东生. 连续梁桥中设置粘弹性阻尼器的减震效果分析[J]. 西北地震学报,2006,28(1):26-30.
 [3] 刘春城,张哲,石磊. 虚拟激励法在自锚式悬索桥竖向地震反

应分析中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版),2003,33(4):522-525.

- [4] 刘春城. 混凝土自锚式悬索桥三维地震反应研究[D]. 大连:大连理工大学,2003:773-118.
 [5] 张哲. 混凝土自锚式悬索桥[M]. 北京:人民交通出版社,2005:64-108.
 [6] 杨孟刚,胡建华,陈政清. 独塔自锚式悬索桥地震响应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2005,36(1):133-137.
 [7] 杨孟刚. 磁流变阻尼器在大跨度桥梁上的减震理论研究[D]. 长沙:中南大学,2004:38-50.
 [8] Hong Hao. Arch response to correlate multiple excitations[J]. EESD, 1993, 22: 389-404.
 [9] 欧进萍,王光远. 结构随机振动[M]. 北京:高等教育出版社,1998:121-130.
 [10] 董娣,刘锐,桑向国. 随机方法模拟地震动的研究[J]. 西北地震学报,2006,28(4):298-302.
 [11] 梁建文. 非平稳地震动过程模拟方法(II)[J]. 地震学报,2005,27(3):346-351.
 [12] 郭子雄,王妙芳. 人造地震动合成的研究现状和展望[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2006,27(1):7-11.
 [13] Shinozuka M, Deodatis G. Stochastic Process Methods for Earthquake Ground Motion[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1988, 13(3):114-123.
 [14] 杜修力,陈厚群. 地震动随机模拟及其参数确定方法[J]. 地震工程与工程振动,1994,14(4):1-5.
 [15] 杜修力,胡晓,陈厚群. 强震地运动随机过程模拟[J]. 地震学报,1995,17(1):103-109.
 [16] 陈仁福. 大跨悬索桥理论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1994:103-135.
 [17] 屈铁军,王前信. 空间多点地震动合成(I)基本公式[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(1):8-15.
 [18] 钟菊芳,胡晓,屈铁军,等. 竖向地震动强度包络函数的空间变化规律[J]. 西北地震学报,2005,27(1):42-46.
 [19] 屈铁军,王前信. 空间多点地震动合成(II)合成实例[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(2):25-32.
 [20] M Amin, A H - S Ang. Nonstationary Stochastic Model of Earthquake Motions[J]. ASCE, 1968, 94(2):343-360.
 [21] 秦权,孙晓燕,贺瑞,等. 特大跨钢桥对非一致地震地面运动的反应和人工波质量[A]//2006 钢桥科技论坛全国学术会议交流论文集[C]. 大连:[s. n.], 2006:46-59.
 [22] 李杰. 自锚式悬索桥非线性时程响应分析和简化方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2007:55-98.