

# 大跨度拱桥随机地震响应分析\*

禹奇才, 刘爱荣, 唐 潘, 程方杰  
(广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 基于随机振动理论, 研究了大跨度拱桥在不同的地震动空间条件下的平稳随机地震响应特征, 分析了局部场地效应、部分相干效应和行波效应对大跨度拱桥地震响应的影响, 揭示了地震动空间变化对大跨度拱桥随机地震响应的影响规律。阐明了局部场地效应对大跨度拱桥地震响应的影响与其构造特性、位置、边界条件等因素有关; 考虑空间相干效应可减小大跨度拱桥的地震反应; 地震内力响应随地震视波速的增大而减少。

**关键词:** 大跨度拱桥; 随机地震响应; 局部场地效应; 部分相干效应; 行波效应

**中图分类号:** U445.7; TU 375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 04-0032-05

## Random Seismic Response Analysis of Long-span Arch Bridge

YU Qicai, LIU Airong, TANG Pan, CHENG Fangjie

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Based on the theory of random vibration, the stationary random seismic response characteristics on long-span arch bridge under different condition of the spatical variable ground motions was investigated, and the influence of seismic response on long-span arch bridge under the local site effect, part of coherent effect and traveling wave effect was analysed, then the influence of the spatical variable ground motions on the long-span arch bridge random seismic response was demonstrated. It is showed that the influence of seismic response on long-span arch bridge is relative with its structure characteristics, position, boundary conditions; Considering the part of coherent effect, the seismic response increases insignificantly, while the seismic response of long-span arch bridge show an increasing trend with the seismic shear wave velocities increasing.

**Key words:** long-span arch bridge; random seismic response; local site effect; part of coherent effect; traveling wave effect.

大跨度拱桥以其跨越能力强、造型美观、经济适用得到了广泛应用, 在交通运输和国民经济发展中占有重要地位, 研究大跨度拱桥地震响应特征是很有必要的<sup>[1]</sup>。常见地震响应分析方法有反应谱法、时程分析法和随机振动法。反应谱法由于难以考虑地震动空间不一致性而使大跨度桥梁的地震响应分析具有严重不足; 时程分析法虽可以考虑地震动的不一致性, 但也存在计算工作量大, 计算结果

过于依赖所选取的地面加速度时间历程曲线的缺点。随机振动法由于较充分地考虑了地震发生的统计概率特性而被日益广泛采用。随机振动法基于以往大量强震记录, 考虑未来可能发生的地震动, 掌握地震动的集合特性, 对于结构的反应可作为集合的特性从统计概率上评价, 所以能较为合理、准确地反应大跨结构的地震响应特征<sup>[2-3]</sup>。

大多数学者对地震响应研究方法主要集中于反

\* 收稿日期: 2011-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978062); 广东省自然科学基金资助项目(9151065004000002); 广东省科技计划资助项目(2010A030200014); 广州市科技计划资助项目(2010Y1-C751); 广州市属高校科研资助项目(10A005)

作者简介: 禹奇才(1955年生), 男, 教授; E-mail: zhydxs@ihw.com.cn

应谱法以及时程分析法，对随机振动法涉及并不多。Zhihao Lu 和 Hanbin Ge 等<sup>[4-5]</sup>利用 Pushover 法研究了钢拱桥的地震响应特征；刘爱荣和张俊平等<sup>[6-8]</sup>人以广州新光大桥为研究背景，利用时程分析法研究了多点激励和行波效应对大跨度连续刚架拱桥地震响应的影响；李正英和李正良<sup>[9]</sup>采用时程分析法研究了大跨度拱桥在行波激励下的地震响应特征。

本文综合考虑了局部场地效应、部分相干效应和行波效应等地震动空间变化的影响，对某大跨径上承式箱型拱桥进行了随机地震响应分析，旨在探索大跨度拱桥在不同空间变化条件下的地震响应规律。

### 1 随机地震动空间模型

常见地震动地面加速度功率谱密度函数模型有白噪声模型、Kanai-Tajimi（金井清 - 田治见宏）模型、胡聿贤、周锡元模型、欧进萍 - 牛荻涛模型、杜修力 - 陈厚群模型、Ruiz-Penzien 模型。本文采用 Ruiz-Penzien 模型进行随机震动分析，该模型提出通过地震动低频过滤器修正的办法，改进了金井清模型的不足之处，可用于多点地震动激励下的结构响应分析，其具体形式如下<sup>[10]</sup>：

$$S_{\omega} = \frac{1 + 4\zeta_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\zeta_g^2(\omega/\omega_g)^2} \cdot \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_f^2)^2 + 4\omega^2\omega_f^2\zeta_f^2} S_0 \quad (1)$$

上式中， $\zeta_f, \omega_f$  为高通滤波器的阻尼比和振动频率。不同场地条件下该模型参数取值如下<sup>[11]</sup>： $\omega_g = 15.0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $\zeta_g = 0.6$ ； $\omega_f = 1.5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ； $\zeta_f = 0.6$ ； $S_0 = 17.26 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ 。

### 2 地震动空间变化效应

#### 2.1 局部场地效应

由于地震场中不同点处局部场地条件，即地形条件、土层分布等的差异，导致各点处地震动相关性的降低。局部场地效应对结构地震响应空间分布的具体影响取决于具体场地的地质地形特征，需要根据地震波动理论和具体场地情况确定。

文献 [12] 对实测地震记录进行回归拟合，得到下式：

$$\Delta S_0 = 0.257 1 \times \Delta h - 0.012 4 \Delta x \quad (2)$$

式中  $\Delta S_0$  是任意测点间自功率谱参数的差值， $\Delta h$  为土层厚度差值，单位为 m。 $\Delta x$  为两测点的震中距差，单位为 m。

#### 2.2 空间相干效应

地震波穿过不同土层时经历不同程度的反射和折射，从而导致各地面点之间地震动相关性的降低。对于两不同的激励点，其相关程度与两点间的距离和地震动的频率有关。间距越大，相干值越小；频率越高，相干性越弱。

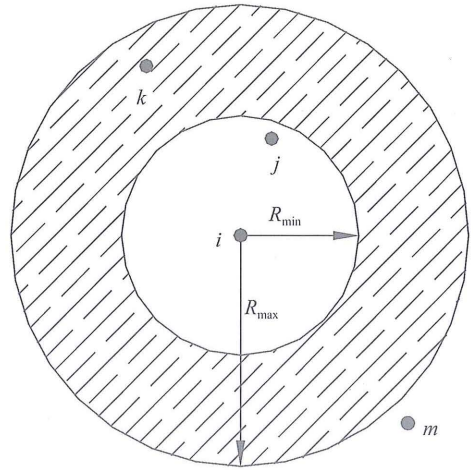


图 1 激励点间空间相干关系示意图

Fig. 1 Space coherent relation among incentive points

图 1 给出了空间  $j, k, m$  三点和  $i$  之间的关系，节点  $i$  和节点  $j$  激励完全相干，节点  $i$  和节点  $k$  激励部分相干，节点  $i$  和节点  $m$  激励是完全不相干。对于两个激励点 1 和 2，其 PSD 的表达式为：

$$S(\omega) = S_0(\omega) \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{12} \\ \alpha_{12} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{其中, } \alpha_{12} = \begin{cases} 0 & D_{12} \geq R_{\max} \\ 1 & D_{12} \leq R_{\min} \\ \frac{R_{\max} - D_{12}}{R_{\max} - R_{\min}} & R_{\min} < D_{12} < R_{\max} \end{cases}$$

#### 2.3 行波效应

地震波从震源向四周传播，可以近似地认为场地上某一点与震中的连线为地震波的传播方向。沿波传播方向的一条直线上  $k, l$  两点间的互功率谱密度中的行波效应因子可以表示为：

$$\exp[i\theta_{kl}(\omega)] = \exp[-i\omega d_{kl}^L/v_{app}] \quad (4)$$

式中  $d_{kl}$  是两点间的水平距离， $d_{kl}^L$  是两点间连线  $d_{kl}$  沿波传播方向的投影， $v_{app}$  是地震地面波视波速。

### 3 算例分析

某大跨径上承式箱型拱桥，主跨为 420 m、净矢高为 87.5 m，矢跨比为 1/4.8；拱轴线为悬链

线, 拱轴系数  $m = 1.6$ , 主拱圈高  $7.0 \sim 16.0$  m。采用 ANSYS 软件的 APDL 语言, 编制了接口程序, 对该桥的地震响应特征进行了计算分析, 有限元模型如图 2 所示。

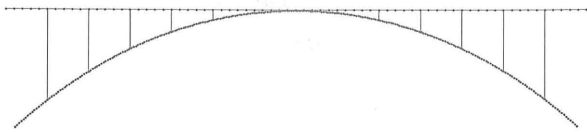


图 2 大跨度拱桥有限元计算模型  
Fig. 2 The FEM of long-span arch bridge

### 3.1 局部场地效应影响分析

由公式 (2) 取  $\Delta h = 0$  和  $\Delta x = 420$  m 考虑两支承处的场地差异, 在计算分析过程中, 在两个支承处输入有差异的自功率谱考虑场地效应。

计算结果表明 (见图 3, 图 4), 与一致激励相比, 考虑局部场地效应后, 跨中弯矩从零增到  $1.96 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 其效应非常明显, 而其他截面的弯矩变化均不大; 但考虑局部效应后的轴力普遍大于一致激励地震作用下的轴力, 其中拱脚附近轴力从  $1.94 \times 10^8 \text{ N}$  增加到  $2.43 \times 10^8 \text{ N}$ , 增大 25.3%, 然而较大差异主要集中在主拱圈跨中附近处, 差值为  $1.21 \times 10^8 \text{ N}$  左右。

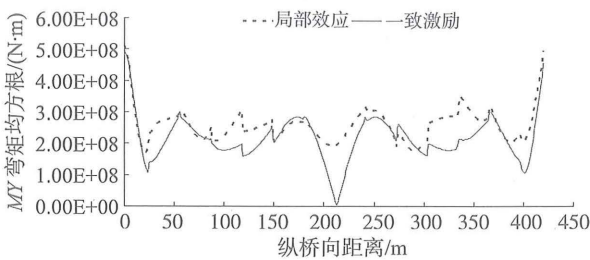


图 3 主拱圈弯矩 MY 均方根 (N · m)  
Fig. 3 Root mean square of main arch ring bending moments MY

可以看出, 与一致激励相比较, 在考虑地震动的局部场地效应时, 结构的地震响应总体上明显增大。

### 3.2 空间相干效应影响分析

假定地震波沿纵桥向传播, 区域最小半径  $R_{\min}$  和最大半径  $R_{\max}$  由公式 (3) 按  $[R_{\min}, R_{\max}]$  划分为如下 3 种工况:

- 工况 1:  $[0, 10]$ , 完全不相干;
- 工况 2:  $[0, 300]$ , 部分相干;

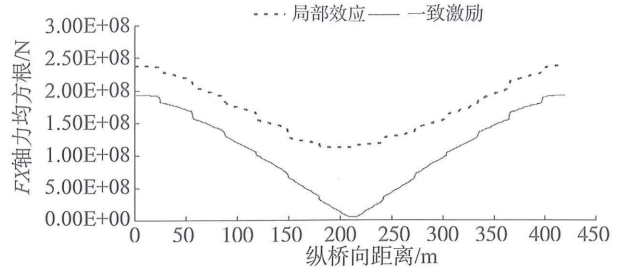


图 4 主拱圈轴力 FX 均方根 (N)  
Fig. 4 Root mean square of Main arch ring axial forces FX

工况 3:  $[0, 420]$ , 完全相干。

计算结果表明 (见图 5, 图 6), 当为完全相干时, 主拱圈内力有一定程度的减小, 与完全不相干效应比较, 主拱圈弯矩减小 20%、轴力减小 12.5%。随着支承点之间相干程度增大, 主拱圈的地震反应呈现递减的趋势。

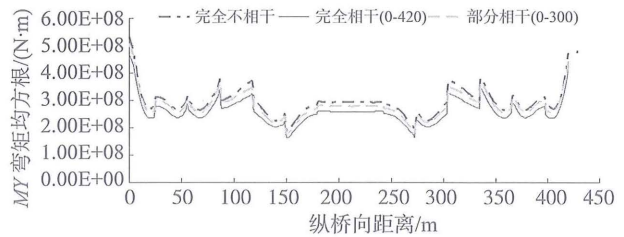


图 5 主拱圈弯矩 MY 均方根 (N · m)  
Fig. 5 Root mean square of main arch ring bending moments MY

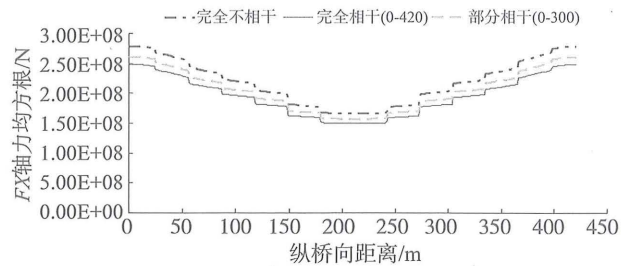


图 6 主拱圈轴力 FX 均方根 (N)  
Fig. 6 Root mean square of main arch ring axial forces FX

总体而言, 考虑空间相干效应减小了结构的地震反应, 即结构截面内力响应峰值发生了一些变化, 但变化不大。主要是因为地震相干性随结构跨度的损失较慢, 对于一般跨度的空间结构, 地震动相干性损失不大。

### 3.3 行波效应影响分析

假定地震波沿纵桥向方向传播, 计算过程中均采用常量视波速, 根据文献 [11] 取值方法, 本

文计算时分别取值为 50 m/s, 150 m/s, 250 m/s, 400 m/s, 800 m/s, 1 500 m/s, 2 500 m/s 及无穷大 (即一致激励)。

从图 7 和图 8 中可以看出, 一致纵向激励与行波激励作用下拱顶附近的内力增大并不明显, 随着视波速的增大主拱圈拱脚弯矩和轴力呈现出减小的趋势, 并最终接近于一致激励, 在低视波速 50 m/s 时拱脚弯矩和轴力分别为  $9.10 \times 10^8$  和  $3.81 \times 10^8$ , 而在一致激励下拱脚弯矩和轴力分别为  $4.93 \times 10^8$  和  $1.94 \times 10^8$ , 较视波速为 50 m/s 分别减小了 84% 和 97%。

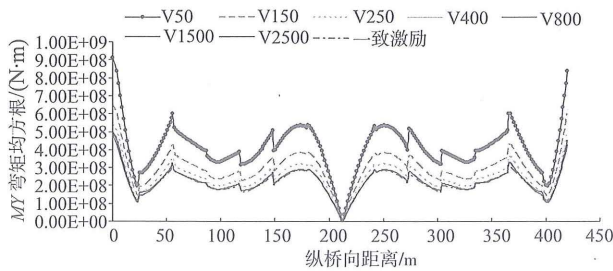


图 7 主拱圈弯矩 MY 均方根 (N·m)

Fig. 7 Root mean square of main arch ring bending moments

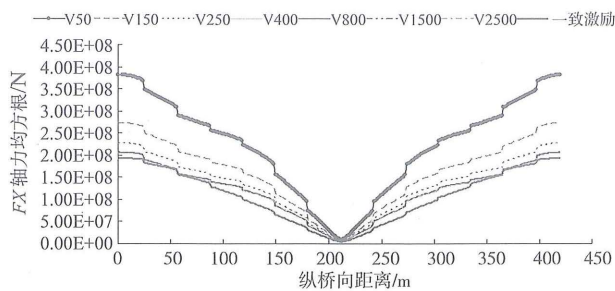


图 8 主拱圈轴力 FX 均方根 (N)

Fig. 8 Root mean square of main arch ring axial forces

考虑行波效应后, 当视波速小于 250 m/s 时, 主拱圈拱脚的内力地震响应远大于一致激励作用; 当视波速大于 250 m/s 时, 主拱圈拱脚的内力地震响应趋于一致激励, 并随着视波速的递增, 最终趋于恒定值。由此可见, 一致激励较低视波速时结构内力偏于保守, 对结构抗震分析偏于保守。

#### 4 空间变化因素对比分析

考虑局部场地效应、部分相干效应及行波效应对主拱圈内力影响如图 9 和图 10 示。其中, 部分相干效应  $[R_{min}, R_{max}]$  为  $[0, 300]$ ; 在行波效应中视波速为 150 m/s。

由图 9 和图 10 可知, 行波效应对主拱圈内

弯矩影响较大, 尤其是拱脚部位; 相干效应对跨中弯矩影响最为明显; 而局部场地效应影响相对较小。相干效应对主拱圈的轴力影响最为显著, 考虑相干效应后, 主拱圈轴力的最大增大约 36.8%; 行波效应影响与相干效应相似, 但影响程度较小; 而局部场地效应影响较小。

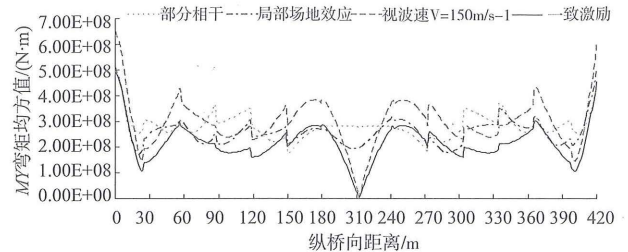


图 9 主拱圈弯矩 MY 均方根 (N·m)

Fig. 9 Root mean square of main arch ring bending moment

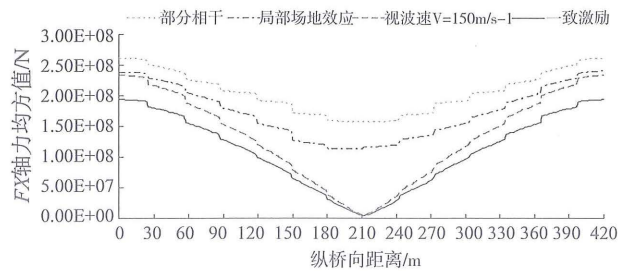


图 10 主拱圈轴力 FX 均方根 (N)

Fig. 10 Root mean square of main arch ring axial forces

以上分析表明, 地震动空间变化效应对主拱圈地震响应有着较为显著的影响, 尤其是对拱脚和跨中截面的影响不容忽视。而不同的空间效应对大跨度拱桥地震响应也存在极大差别。

#### 5 结 论

根据以上计算分析可得出以下主要结论:

- 1) 地震动空间变化对大跨度拱桥地震响应影响很大, 尤其是拱顶和拱脚截面。
- 2) 对于不同的内力响应, 地震动空间变化特性的影响程度和规律不尽相同, 必须区别对待, 具体问题具体分析。
- 3) 考虑空间相干效应可减小结构的地震反应。
- 4) 与一致激励相比较, 考虑地震动的局部场地效应后, 结构的地震响应总体上明显增大。
- 5) 考虑行波效应后, 当视波速小于 250 m/s 时, 主拱圈拱脚的内力地震响应远大于一致激励作用; 当视波速大于 250 m/s 时, 主拱圈拱脚的内力

地震响应趋于一致激励,并随着视波速的递增,最终趋于恒定值。

#### 参考文献:

- [1] 邹和平,刘玉亮,郑单,等. 5.12汶川大地震极震区灾害成因初析[J]. 中山大学学报:自然科学版,2009,48(2):131-135.
- [2] 徐兆. 多自由度线性阻尼系统的随机振动分析[J]. 中山大学学报:自然科学版,1984(1):77-82.
- [3] 苏敏邦,戎海武. Vander Pol-Duffing 单边约束系统的随机响应[J]. 中山大学学报:自然科学版,2009,48(2):20-26.
- [4] LU Z H, GE H B, Tsutomu Usami. Applicability of pushover analysis - based seismic performance evaluation procedure for steel arch bridges[J]. Engineering Structures, 2004, 26:1957-1977.
- [5] LU Z H, GE H, USAMI T. Applicability of pushover analysis-based seismic performance evaluation procedure for steel arch bridges[J]. Engineering Structures, 2004, 26:1957-1977.
- [6] 刘爱荣,张俊平,禹奇才,等. 多点激励下大跨度连续刚架拱组合桥的空间地震响应分析[J]. 暨南大学学报,2007,28(3):246-250.
- [7] LIU Airong, ZHANG Junping, YU Qicai. Study of seismic response of long span continuous rigid-frame arch bridge [J]. Journal of Shenzhen University, 2007, 24(4):228-233.
- [8] LIU Airong, ZHANG Junging, YU Qicai, et al. Study on dynamic properties and traveling wave effect of Xinguang Bridge [J]. Journal of Guangzhou University, 2007, 6(4):74-80.
- [9] 李正英,李正良. 空间地震动作用下大跨度拱桥地震响应分析[J]. 重庆大学学报,2009,32(8):920-924.
- [10] 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):6-14.
- [11] RUIZ P, PENZIEN J. Probabilistic study of the behavior of structures during earthquakes [C] // Report No. EE-RC 69-03. California: Earthquake Engineering Center University of California, 1969.
- [12] 屈铁军,王君杰,王前信. 空间变化的地震功率谱的实用模型[J]. 地震学报,1996,18(1):55-62.

(上接第31页)

- [3] 王定江. 非线性种群发展方程解的性质[J]. 高校应用数学学报, 1998, 13(1):25-30.
- [4] 李留瑜,付秀山,郑治刚. 论森林的数量分布结构[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 16(4):82-89.
- [5] 郑治刚. 同龄纯林的林龄分布结构变化方程[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 16(4):90-98.
- [6] 张启敏,聂赞坎. 森林发展系统强解的存在唯一性及稳定性分析[J]. 生物数学学报, 2004, 19(4):51-56.
- [7] WANG D J, ZHANG Y F. The property of solution of a nonstationary forest evolution system[J]. Systems Science and Systems Engineering, 1993, 2:281-288.
- [8] XU L F, WU H B. A free-boundary problem to dynamic system for pure forest [J]. Ann of Diff Eqs, 2010, 20(2):227-233.
- [9] ANGEL C, JOAN S. Global dynamics and optimal life history of a structured population model[J]. SIAM J Appl Math, 1999, 59(5):1667-1685.
- [10] BALLINGER G, LIU X. Permanence of population growth models with impulsive effects [J]. Math Comp Modeling, 1997, 26:59-72.
- [11] LADYZENSKAYA O A. Linear and quasilinear equations of parabolic type[M]. Translations of Mathematical Monographs, AMS Providence, Providence Rhode Island Translated from the Russian by S Smith, 1968.
- [12] 沈以淡. 积分方程[M]. 2版,北京:北京理工大学出版社, 2002:18-22.