

# 考虑地震动空间效应的深水桥梁减震性能

袁万城, 林 曾, 党新志, 贾丽君

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 以大跨深水连续梁桥为研究对象, 提出了拉索减震体系. 对考虑地震动空间效应的不同激励地震动输入的实现方法做了阐述, 对比常规体系和弱固定体系, 研究考虑地震动空间效应时深水桥梁拉索减震体系的减震效果, 并进一步探讨了考虑地震动空间效应时, 动水压力对深水桥梁地震响应的影响. 研究表明, 拉索减震支座具有良好的减震性能, 且其对地震动空间效应非常敏感; 考虑地震动空间效应时, 动水压力对拉索减震体系、常规体系动力响应的影响较一致激励有所差异, 且该差异随视波速、失相干系数及局部场地条件的不同而变化.

**关键词:** 深水桥梁; 地震动; 空间效应; 水压力; 拉索减震支座

**中图分类号:** TU318

**文献标志码:** A

## Seismic Isolation Performance of Bridges in Deep-water Considering the Spatial Variability of Ground Motions

YUAN Wancheng, LIN Zeng, DANG Xinshi, JIA Lijun

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A cable seismic isolation system was proposed for long span continuous girder bridges in deep water. A method was presented for obtaining the ground motion acceleration of different excitation points which based on the recorded ground motion arrays itself considering the spatial variability at the same time. Compared with the conventional system and the feeble fixed system, the seismic isolation effectivity of cable seismic isolation system was studied when the spatial variability of ground motions was considered, and the effect of earthquake induced hydrodynamic pressure on the seismic response of deep-water bridges was discussed. The results indicate that the deep-water continuous girder bridges with cable-sliding friction aseismic bearing have remarkable

isolation performance, and this bearing is sensitive to the spatially varying earthquake ground motions including wave-passage, incoherence and site-response effect. The effect of hydrodynamic pressure on the seismic response of bridges in deep water is different, considering the spatial variability of ground motions relative to a uniform excitation, which is also changed with apparent wave velocity, incoherence coefficient, local site condition when wave-passage, incoherence and site-response effect are considered.

**Key words:** bridges in deep water; earthquake; the spatial variability of ground motions; hydrodynamic pressure; the cable-sliding friction aseismic bearing

大跨度桥梁结构由于受地震动空间效应的影响, 各支撑处地震动输入的振幅和频率成分各不相同, 此时如果仅采用一致激励进行地震反应分析, 往往造成与实际地震作用下结构的动力响应差异较大, 使结果不精确. 近年来, 国内外许多学者对非一致地震动激励的大跨度桥梁动力响应问题进行过研究, 如 Lou 等<sup>[1]</sup>对三跨预应力混凝土高架桥梁分别进行了一致地震动激励和考虑地震动空间效应的非一致地震动激励分析; Soyluk 等<sup>[2]</sup>考虑地震动空间效应对斜拉桥进行了随机地震响应分析, Ates 等<sup>[3]</sup>采用随机振动分析方法研究了地震动空间效应对一座采用摩擦摆隔震系统的桥梁动力响应的影响; 国内范立础等<sup>[4]</sup>、潘旦光等<sup>[5]</sup>、江宜城等<sup>[6]</sup>学者采用不同分析方法对斜拉桥、梁桥等多种结构体系也进行了非一致激励研究. 已有的研究均表明, 地震动的空间变化对大跨度桥梁结构地震响应影响较大, 对于大跨度桥梁抗震分析应该考虑地震动空间效应.

跨江、海的深水桥梁在地震作用下会受到动水压力的作用. 近年来, 许多学者研究了动水压力对桥

收稿日期: 2016-06-01

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE14-B-14); 国家自然科学基金(51478339, 51278376, 91315301); 江西省科技计划(20151BBG70064)

第一作者: 袁万城(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震与振动. E-mail: yuan@tongji.edu.cn

通讯作者: 贾丽君(1967—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为大跨度桥梁结构理论. E-mail: jialj@tongji.edu.cn

墩地震响应的影响,如高学奎等<sup>[7]</sup>在 Morison 方程的基础上,采用附加质量考虑周围水体的影响,研究了地震动水压力对深水桥墩的影响;魏凯<sup>[8]</sup>采用流固耦合方法,即用势流体单元模拟桥墩周围的水体,用实体单元模拟桥墩,对地震作用下深水桥梁动力响应进行了详细分析研究;李忠献等<sup>[9]</sup>采用辐射波理论考虑地震动水压力,再将该压力施加到桥墩上并进行结构动力响应分析;李磊等<sup>[10]</sup>、冯俊迎<sup>[11]</sup>采用附加质量方法或辐射波理论考虑动水压力来研究其对深水梁桥的不同减隔震体系地震响应的影响.以上研究结果表明,地震动水压力增大桥梁的动力响应,常规结构体系较减隔震体系对动水压力更敏感.

经过国内外学者多年的努力,深水桥梁的地震响应研究已有明显的进展,但必须注意的是,深水桥梁地震反应分析均采用一致地震动激励方法,而对于大跨度深水桥梁地震响应分析还应考虑地震动空间效应,否则导致计算结果不精确,但至今为止,该方面研究很少,仅有李忠献等<sup>[9]</sup>研究了行波效应对某四跨预应力混凝土深水连续刚构桥地震响应的影响,并且针对考虑地震动空间的深水桥梁减隔震研究更少,因此,有必要做进一步研究.本文在阐述基于场地条件和参考点加速度时程生成了考虑地震动空间效应的不同激励地震动输入方法的基础上,建立考虑地震动空间效应的深水桥梁地震响应分析方法,考虑地震动空间效应,对深水连续梁桥常规体系、弱固定体系和拉索减震体系进行地震响应分析.

## 1 考虑地震动空间效应的地震动输入模拟

已知参考点  $m$  的加速度为  $a_m(t_i)$ ,  $t_i$  为时刻,  $i=1,2,\dots,N$ ,  $N$  为等间距观测的数据总数量,且为偶数,则该加速度时程的自功率谱  $G_{mm}(\omega)$  ( $\omega$  为频率)为

$$G_{mm}(\omega_p) = N\Delta t(A_{pm}^2 + B_{pm}^2)/(4\pi) = \Delta t \left| \sum_{i=1}^N a_m(t_i) \exp(it_i\omega_p) \right|^2 / (\pi N) \quad (1)$$

式中:  $p$  为频率阶数;  $A_{pm}$ ,  $B_{pm}$  为不同频率  $\omega_p$  对应的傅里叶系数.

目标点  $n$  的自功率谱密度  $G_n(\omega)$  为

$$G_n(\omega) = G_{mm}(\omega) |H_n(\omega)|^2 / |H_m(\omega)|^2 \quad (2)$$

其中局部场地土的频率响应函数  $H_e(\omega)$  为

$$H_e(\omega) = (\omega_e^2 + 2i\zeta_e\omega_e\omega) / (\omega_e^2 - \omega^2 + 2i\zeta_e\omega_e\omega), \quad e = m, n \quad (3)$$

式中:  $e$  表示参考点  $m$  或目标点  $n$ ;  $\omega_e$  和  $\zeta_e$  分别是  $e$  处的滤波频率和阻尼比.  $\omega_e$  可以通过第一共振频率得到,  $\omega_e = \pi v_{s,e} / (2z_e)$ , 其中  $v_{s,e}$  和  $z_e$  分别代表剪切波速和距离岩石层的厚度. 本文中, 支撑点处分别考虑采用软土、中硬土和硬土 3 种场地土层类型, Kiureghian 和 Neuenhofer<sup>[12]</sup> 给出了不同土层各自的对应参数, 见表 1 所示.

表 1 不同场地的滤波频率和阻尼比

Tab.1 The filter frequency and damping ratio of different sites

土层类型	$\omega_e / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\zeta_e$
硬土	15	0.6
中硬土	10	0.4
软土	5	0.2

参考点  $m$  和目标点  $n$  的互功率谱  $G_{mn}(\omega)$  为

$$G_{mn}(\omega) = \gamma_{mn}(\omega) \sqrt{G_{mm}(\omega)G_{nn}(\omega)} \quad (4)$$

式中:  $\gamma_{mn}(\omega)$  为凝聚函数, 可计入行波效应、失相干效应和局部场地效应<sup>[10-11]</sup>, 可表示为

$$\gamma_{mn}(\omega) = |\gamma_{mn}(\omega)| \exp\{i[\theta_{nm,wp}(\omega) + \theta_{nm,sr}(\omega)]\} \quad (5)$$

式中:  $|\gamma_{mn}(\omega)|$  表示失相干效应函数;  $\theta_{nm,wp}(\omega)$  表示行波效应函数;  $\theta_{nm,sr}(\omega)$  表示局部场地效应函数.

失相干效应模型取为

$$|\gamma_{mn}(\omega)| = \exp\left[-\left[\frac{\alpha d_{mn}\omega}{v_s}\right]^2\right] \quad (6)$$

式中:  $d_{mn}$  为  $m$  点和  $n$  点之间的距离;  $v_s$  为波速;  $\alpha$  为失相干系数, 并且  $\beta = \alpha / v_s$ , 一般建议取值合理范围为  $2 \times 10^{-4} \sim 10 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ <sup>[13-14]</sup>.

行波效应模型取为

$$\theta_{nm,wp}(\omega) = -\alpha d_{nm,L} \sin(\psi) / v_s = -\alpha d_{nm,L} / v_{app} \quad (7)$$

式中:  $d_{nm,L}$  为参考点  $m$  和目标点  $n$  沿着波在地表传播方向的投影距离;  $v_{app}$  为视波速;  $\psi$  为波到达地面的人射角.

局部场地效应模型取为

$$\theta_{nm,sr}(\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[H_m(\omega)H_n(-\omega)]}{\text{Re}[H_m(\omega)H_n(-\omega)]} \quad (8)$$

通过上述参考点  $m$  与目标点  $n$  的自功率谱、两点的互功率谱、参考点  $m$  的傅里叶系数的均值与协方差矩阵计算得到目标点  $n$  的傅里叶系数的均值和协方差矩阵, 再由两点位置地震波傅里叶系数的联合正态分布抽样得到目标点  $n$  加速度时程的一组傅里叶系数, 最后乘以调制函数并进行基线校正可得目标点  $n$  的加速度时程<sup>[15]</sup>. 借助 MATLAB 平台编程实现了该方法<sup>[16]</sup>.

根据上述方法, 以如图 1 所示的某跨径布置为

(60+60+60)m 的连续梁桥为例,1 号墩支撑处为参考点,其地震动输入为 Kobe 波,该波峰值加速度为  $0.251\text{ g}$ ,峰值对应时刻为  $7.33\text{ s}$ ,分别考虑视波速为  $120\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $1\,200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的 3 种行波效应工况,考虑  $\beta$  取  $2.0\times 10^{-4}\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $5.0\times 10^{-4}\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$  和  $10.0\times 10^{-4}\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$  的 3 种失相干效应工况,考虑 FMMF(1 号、4 号支撑处为硬土,2 号、3 号支撑处为中硬土)、FMSF(1 号、4 号支撑处为硬土,2 号支撑处为中硬土,3 号支撑处为软土)、FSSF(1 号、4 号支撑处为硬土,2 号、3 号支撑处为软土)的 3 种局部场地效应工况,借助 MATLAB 平台生

成得到 2 号、3 号和 4 号支撑处等目标点的加速度时程,由于篇幅有限,不一一列出,仅列出时程的峰值(PGA)及峰值对应的时刻,见表 2 所示。

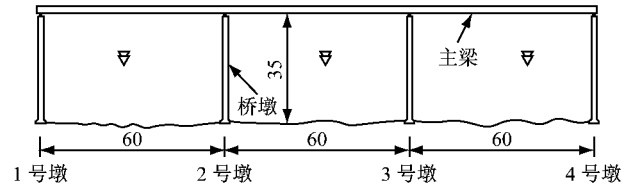


图1 连续梁桥示意(单位:m)

Fig.1 The diagram of a continuous girder bridge (unit: m)

表2 目标点的加速度时程峰值及其对应时刻

Tab.2 The peak value and peak time of target points time history

效应	工况	2号墩		3号墩		4号墩	
		PGA/g	峰值时刻/s	PGA/g	峰值时刻/s	PGA/g	峰值时刻/s
行波效应	$120\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.251	7.83	0.251	8.33	0.251	8.83
	$600\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.251	7.43	0.251	7.53	0.251	7.63
	$1\,200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.251	7.38	0.251	7.43	0.251	7.48
失相干效应	$2\times 10^{-4}\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$	0.310	7.33	0.361	7.34	0.454	8.42
	$5\times 10^{-4}\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$	0.362	9.58	0.425	6.65	0.559	10.06
	$10\times 10^{-4}\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$	0.430	8.57	0.507	8.29	0.441	9.59
局部场地效应	FMMF	0.141	7.33	0.141	7.33	0.251	7.33
	FMSF	0.141	7.33	0.122	7.32	0.251	7.33
	FSSF	0.122	7.32	0.122	7.32	0.251	7.33

## 2 深水桥梁非一致地震动激励分析方法

将整个深水桥梁结构自由度分为非约束自由度和约束自由度,故考虑动水压力影响的多支撑桥梁结构地震反应的动力平衡方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sb} \\ \mathbf{M}_{sb}^T & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_s \\ \ddot{\mathbf{x}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{sb}^T & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_s \\ \dot{\mathbf{x}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{sb}^T & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{x}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_s(t) \\ \mathbf{P}_b(t) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$  为桥梁结构自由度的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;下标 s 表示非约束自由度,下标 b 表示约束自由度; $\ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}$  为桥梁结构自由度的绝对加速度、绝对速度和绝对位移列阵; $\mathbf{P}_b(t)$  为桥梁结构约束自由度反力列阵; $\mathbf{F}_s(t)$  为地震作用下水中桥墩所受到的地震动水压力矩阵,当不考虑动水压力的影响时  $\mathbf{F}_s(t)=\mathbf{0}$ 。

对于小尺度的圆柱墩,可根据 Morison 方程<sup>[17]</sup>得到水中桥墩所受到的地震动水压力  $F_s(t)$ 。

$$F_s(t) = \rho V \ddot{u} + (C_M - 1) \rho V (\ddot{u} - \ddot{x}_r - \ddot{x}_g) + 0.5 C_D \rho A [|\dot{u} - \dot{x}_r - \dot{x}_g| (\dot{u} - \dot{x}_r - \dot{x}_g)] \quad (10)$$

式中: $\rho$  为水的密度; $V$  为单位长度柱体的体积; $A$  为单位长度柱体垂直于水流方向的投影面积; $\ddot{u}, \dot{u}$  分别为水的绝对加速度和绝对速度大小; $\ddot{x}_r, \dot{x}_r$  分别为桥墩的相对加速度和相对速度大小; $\ddot{x}_g, \dot{x}_g$  分别为地震动加速度和速度大小; $C_M, C_D$  分别为动水惯性力系数和动水黏性阻尼系数。采用大型通用有限元软件 ANSYS 中的 PIPE59 单元来考虑地震作用下深水桥墩所受到的动水压力作用<sup>[18-19]</sup>。

大跨度桥梁结构非一致激励分析方法常有大质量法、位移法和大刚度法等<sup>[20]</sup>。本文采用大质量法,该方法的基本思想是,首先解除支撑处沿着地震作用方向的约束,并在支撑处赋予一个节点大质量(一般为整体质量的  $10^6$  倍),再根据牛顿第二定律施加力时程荷载。

## 3 工程概况

以某跨径布置为 (60+60+60)m、墩高为 35 m 的三跨连续梁桥为例,如图 1 所示,其桥墩采用直径为 4.1 m 的实心圆截面,墩底固结,不考虑桩土相互作用,主梁采用斜腹板式箱梁截面,截面高 3.6 m,截面宽 16.05 m。

为了进行比较分析,设置了 3 种体系进行分析

计算:体系 1 为常规体系,即 2 号墩处设置固定支座,其余墩处设置活动支座,支座摩擦系数为 0.02;体系 2 为弱固定体系,即 2 号墩处设置弱固定支座(在强震作用下,抗剪销被剪断,固定支座变为活动支座),其余墩处设置活动支座,摩擦系数为 0.02;体系 3 为拉索减震体系,即 2 号墩处设置固定型拉索减震支座(在强震作用下,抗剪销被剪断,变为活动拉索减震支座),其余墩处设置活动型拉索减震支座,拉索减震支座自由程取为 5.5 cm,摩擦系数为 0.02,边墩拉索刚度为  $3 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,中间墩拉索刚度为  $4 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ . 为了更好分析地震动水压力对深水桥梁地震响应的影响,上述 3 种体系均考虑无水和水深 20 m 两种情况.

拉索减震支座<sup>[21-22]</sup>是由普通盆式支座(或球形钢支座)和拉索组合而成,其力学模型由普通摩擦支座和拉索构件 2 个独立单元本构组成,如图 2 所示,图中  $F$  为水平力,  $u$  为水平位移,  $K_1$  为摩擦支座的初始刚度,  $F_{\max}$  为摩擦支座的摩擦力,  $x_y$  为屈服位移,  $u_0$  为拉索的自由程,  $K_H$  为拉索的水平向拉伸刚度. 拉索减震支座中的普通摩擦支座本构采用 ANSYS 软件中的 COMBIN40 单元<sup>[19]</sup>模拟,拉索本构采用 COMBIN39 非线性弹簧单元<sup>[19]</sup>模拟.

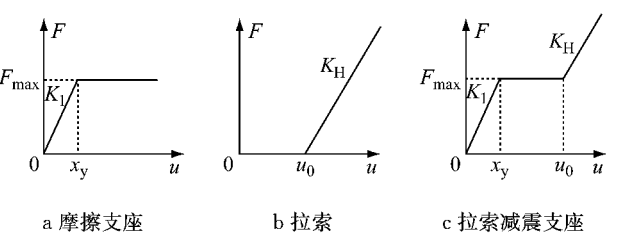


图 2 拉索减震支座力学本构  
Fig.2 Restoring force model of cable-sliding friction aseismic bearing

4 考虑地震动空间效应的地震响应分析

4.1 行波效应

假设 1 号墩支撑处为参考点,其地震动输入为 Kobe 波,考虑行波效应分别对深水连续梁桥 3 种体系进行地震响应分析,其中视波速分别取  $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $1\,200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

为了更好衡量动水压力对深水桥墩地震响应的影响,采用动水效应系数来表示地震动水压力引起桥墩动力响应的增幅,即有水和无水情况下结构动力响应的差值与无水情况下结构动力响应的比值.

取典型 2 号墩的结果作为关注重点,表 3 给出

了不同视波速下 3 种体系中 2 号墩墩底弯矩、墩顶位移和支座位移,图 3 给出了不同视波速下常规体系、拉索减震体系中 2 号墩墩底弯矩和墩顶位移的动水效应系数.

表 3 行波效应下桥墩地震响应幅值  
Tab.3 Seismic responses amplitude of bridge pier under travelling wave effect

体系	工况	墩底弯矩/ (MN · m)	墩顶位移/ cm	支座位移/ cm
常规体系	V=120 m · s <sup>-1</sup>	无水 98.65 有水 99.21	8.85 8.95	
	V=600 m · s <sup>-1</sup>	无水 116.40 有水 118.20	10.18 10.41	
	V=1 200 m · s <sup>-1</sup>	无水 115.00 有水 117.10	10.00 10.23	
	一致激励	无水 110.80 有水 113.20	9.62 9.85	
	V=120 m · s <sup>-1</sup>	无水 28.10 有水 30.14	2.30 2.20	9.07 9.62
	V=600 m · s <sup>-1</sup>	无水 36.18 有水 37.54	2.75 2.75	8.60 9.42
弱固定体系	V=1 200 m · s <sup>-1</sup>	无水 37.24 有水 37.98	2.86 2.88	8.71 9.62
	一致激励	无水 38.75 有水 38.84	2.97 2.99	7.51 8.81
	V=120 m · s <sup>-1</sup>	无水 31.36 有水 33.58	2.43 2.57	5.70 5.75
	V=600 m · s <sup>-1</sup>	无水 51.84 有水 57.07	4.16 4.29	6.19 6.05
拉索减震体系	V=1 200 m · s <sup>-1</sup>	无水 50.32 有水 57.49	4.13 4.36	6.20 6.33
	一致激励	无水 52.92 有水 58.00	4.08 4.17	6.04 6.01

由表 3 可以得到,对于常规体系,2 号固定墩的墩底内力非常大,墩顶位移也非常大. 无论有水还是无水情况,与常规体系相比,拉索减震体系的 2 号墩墩底内力呈明显减小趋势,减小幅度达 50%,并且拉索减震体系在不同视波速下的地震响应值相差较大;与弱固定体系相比,采用拉索减震体系后,各墩的墩梁相对位移基本控制在 6 cm 左右,能够有效防止落梁及相邻联间碰撞的发生. 因此,采用拉索减震体系后,释放了墩梁间的相对位移,但一旦该位移超过拉索自由程时,拉索即发生限位作用,调节一联桥中各桥墩的地震力分配,实现力和位移两者之间的平衡,发挥较好的减震性能,且对行波效应非常敏感.

另外,当视波速较小时,会导致各支撑处的地震动相位差较大,故此时地震响应值与一致激励时相差较大,但随着视波速的增加,行波效应产生的影响减弱,逐渐趋近于一致激励的结果.

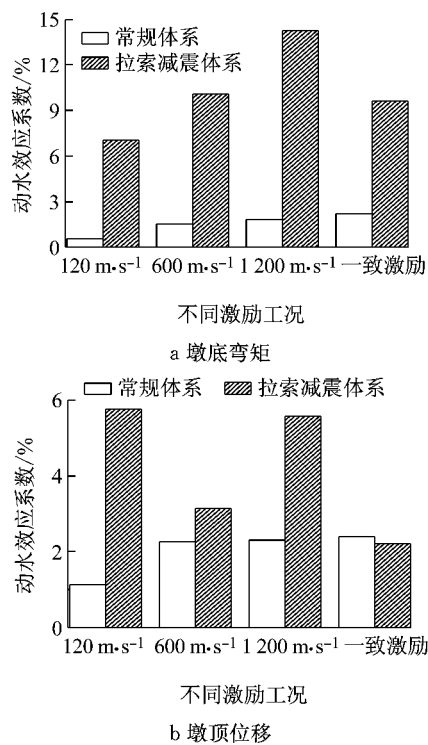


图 3 行波效应下桥墩动水效应系数

Fig. 3 The hydrodynamic coefficient of bridge pier under travelling wave effect

由图 3 可以发现,常规体系固定墩的动水效应系数较小,仅为 1.0% 左右,且其随视波速的不同而变化较小,而拉索减震体系中桥墩的动水效应系数较大,最大可达 14.25%,此时动水压力对墩底内力的影响大于其对墩顶响应的影响,当考虑行波效应时动水效应系数随着视波速的不同而发生差异.因此,对于大跨度深水桥梁的抗震设计,为了更加精确分析动水压力对桥梁地震响应的影响考虑行波效应是十分有必要的.

#### 4.2 失相干效应

假设 1 号墩支撑处为参考点,其地震动输入为 Kobe 波,考虑失相干效应分别对深水连续梁桥 3 种体系进行地震响应分析,其中  $\beta$  分别取  $2.0 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $5.0 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $10.0 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ .

表 4 给出了不同失相干系数下 3 种体系中 2 号墩墩底弯矩、墩顶位移和支座位移,图 4 给出了不同失相干系数下常规体系、拉索减震体系中 2 号墩墩底弯矩和墩顶位移的动水效应系数.

由表 4 可以得到,对于同一种体系而言,考虑失相干效应时桥墩地震响应与一致激励时的差值较大,且该差值基本随失相干系数的增大而增大.这主

表 4 失相干效应下桥墩地震响应幅值

Tab. 4 Seismic responses amplitude of bridge pier under incoherence effect

体系	工况		墩底弯矩/ (MN·m)	墩顶位移/ cm	支座位移/ cm
常规体系	$2 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	无水	110.40	9.45	
		有水	117.00	9.64	
	$5 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	无水	139.10	11.82	
		有水	148.80	11.86	
	$10 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	无水	114.40	9.13	
		有水	121.40	9.18	
	一致激励	无水	110.80	9.62	
		有水	113.20	9.85	
弱固定体系	$2 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	无水	35.53	2.94	7.51
		有水	32.68	2.71	6.90
	$5 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	无水	49.89	3.96	10.18
		有水	53.52	3.97	9.34
	$10 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	无水	50.08	3.64	7.44
		有水	55.98	4.15	7.25
	一致激励	无水	38.75	2.97	7.51
		有水	38.84	2.99	8.81
拉索减震体系	$2 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	无水	39.26	2.84	5.65
		有水	42.59	2.90	5.67
	$5 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	无水	52.82	4.12	5.87
		有水	60.65	4.37	5.93
	$10 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	无水	50.32	4.11	6.31
		有水	66.63	4.43	6.43
	一致激励	无水	52.92	4.08	6.04
		有水	58.00	4.17	6.01

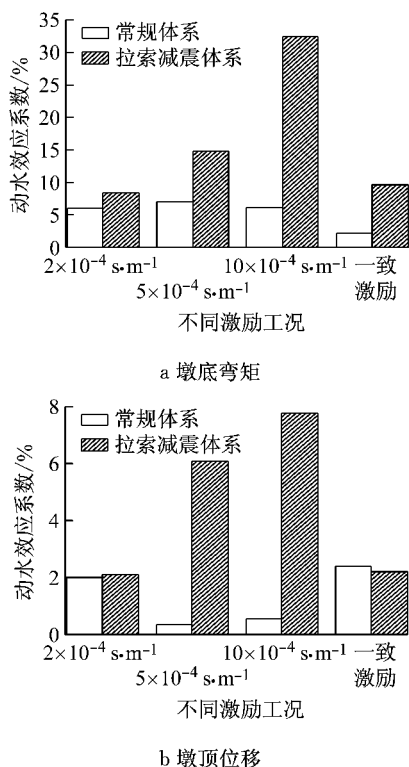


图 4 失相干效应下各桥墩动水效应系数

Fig. 4 The hydrodynamic coefficient of bridge pier under incoherence effect

要是由于当两桥墩距离一定时,随着失相干系数逐渐增加,两点的地震空间相关性越来越弱,从而出现加速度时程抖动厉害的趋势。

另外,对于有水情况,常规体系中 2 号固定墩最大弯矩可达  $148.80 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ,而采用拉索减震体系后,2 号墩的最大弯矩仅为  $60.65 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ,减小幅度达  $59.2\%$ ,并且拉索减震体系在不同失相干系数下的地震响应值相差较大;与弱固定体系相比,拉索减震体系中各墩的墩梁相对位移得到有效控制,基本控制在  $6 \text{ cm}$  左右,这突出显示了拉索减震支座的限位优势.对于无水情况,也具有同样的规律.这表明拉索减震支座能在不同失相干系数的地震动输入下发挥良好的减隔震性能,且对失相干效应非常敏感。

由图 4 可以发现,对于常规体系而言,2 号固定墩的动水效应系数是较小的,且各墩的动水效应系数随失相干系数的变化呈现一定差异;与常规体系相比,拉索减震体系中桥墩的动水系数基本稍微偏大,且考虑失相干效应时动水压力也随失相干系数的不同对各桥墩地震响应的影响有所差异。

#### 4.3 局部场地效应

假设 1 号墩支撑处为参考点,其地震动输入为 Kobe 波,考虑局部场地效应分别对深水连续梁桥 3

种体系进行地震响应分析,其中考虑了 3 种局部场地条件:1 号、4 号支撑处为硬土,2 号、3 号支撑处为中硬土(记为 FMMF);1 号、4 号支撑处为硬土,2 号支撑处为中硬土、3 号支撑处为软土(记为 FMSF);1 号、4 号支撑处为硬土,2 号、3 号支撑处为软土(记为 FSSF)。

表 5 给出了不同局部场地条件下 3 种体系中 2 号墩的墩底弯矩、墩顶位移和支座变形,图 5 给出了不同局部场地条件下常规体系、拉索减震体系中 2 号墩的墩底弯矩和墩顶位移的动水效应系数。

表 5 局部场地效应下桥墩地震响应幅值  
Tab. 5 Seismic responses amplitude of bridge pier under site-response effect

体系	工况	墩底弯矩/ ( $\text{MN} \cdot \text{m}$ )	墩顶位移/ cm	支座位移/ cm
常规体系	FMMF	无水	105.80	9.44
		有水	107.20	9.58
	FMSF	无水	108.70	9.68
		有水	108.90	9.73
	FSSF	无水	174.00	15.58
		有水	174.70	15.64
弱固定体系	一致激励	无水	110.80	9.62
		有水	113.20	9.85
	FMMF	无水	38.35	3.05
		有水	43.93	3.22
	FMSF	无水	37.94	3.02
		有水	42.62	3.12
拉索减震体系	FSSF	无水	46.38	3.61
		有水	47.70	3.62
	一致激励	无水	38.75	2.97
		有水	38.84	2.99
	FMMF	无水	57.40	4.50
		有水	57.87	4.52
拉索减震体系	FMSF	无水	43.64	3.73
		有水	45.00	3.85
	FSSF	无水	47.69	3.72
		有水	48.03	3.74
	一致激励	无水	52.92	4.08
		有水	58.00	4.17

由表 5 可以得到,考虑局部场地效应时桥墩地震响应较一致激励有较大差异,尤其对于常规体系而言,而 FSSF 局部场地条件下的计算结果与其他 3 种场地条件下的结果相差较大,这主要是由于硬土-软土之间的相位角要远远大于硬土-中硬土之间的相位角。

另外,对于无水情况,常规体系的 2 号固定墩在 FSSF 局部场地条件下的墩底弯矩最大,达  $174 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ,而拉索减震体系的墩底弯矩最大仅为  $48 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ,减小幅度达  $70\%$ ,并且拉索减震体系在不同局部场地条件下的地震响应值相差较大;与弱固

定体系相比,拉索减震体系中的墩梁相对位移得到了有效控制,防止落梁及联间碰撞的发生.对于有水情况,也具有相同规律.这表明拉索减震支座对于连续梁桥而言具有较好的减隔震性能,且对局部场地条件非常敏感.

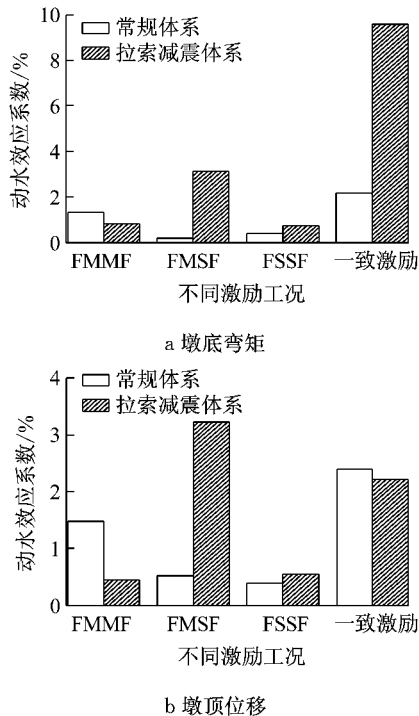


图5 局部场地效应下各桥墩动水效应系数

Fig.5 The hydrodynamic coefficient of bridge pier under site-response effect

由图5可以发现,无论是常规体系还是拉索减震体系,动水效应随局部场地条件的不同而呈现一定的差异.常规体系中的2号固定墩动水效应是最小的,局部场地效应对其的影响也较小;而对于拉索减震体系,局部场地效应对其各桥墩的动水效应影响较大;动水压力对墩底响应的影响大于其对墩顶响应的影响.因此,对于大跨度深水桥梁的抗震计算分析,研究地震作用下动水压力对深水桥梁的动力响应影响时考虑局部场地效应是有必要的.

## 5 结论

首先阐述了基于场地条件和参考点加速度时程生成了考虑地震动空间效应的不同激励地震动输入的方法,建立了考虑地震动空间效应的深水桥梁地震响应分析方法,并分析了地震动空间效应对深水连续梁桥常规体系、弱固定体系和拉索减震体系地震响应的影响,得出以下结论:

(1) 动水压力作用增大了桥梁结构的动力响

应,动水压力对墩底响应的影响大于其对墩顶响应的影响.

(2) 对于大跨深水连续梁桥而言,拉索减震支座能够实现力和位移两者之间的平衡,具有良好的减震性能,且其对行波效应、失相干效应和局部场地效应等地震动空间效应非常敏感.

(3) 考虑行波效应、失相干效应和局部场地效应等地震动空间效应时动水压力对深水桥梁常规体系、拉索减震体系动力响应的影响较一致激励有所差异,且该影响随视波速、失相干系数以及局部场地条件的不同而变化.

(4) 对于大跨度深水桥梁抗震设计,考虑地震动空间效应、动水压力的影响是非常有必要的.

## 参考文献:

- [1] LOU L, ZERVA A. Effects of spatially variable ground motions on the seismic response of a skewed, multi-span, RC highway bridge[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7/8/9/10):729.
- [2] SOYLUK K, DUMANOGU A A. Spatial variability effects of ground motions on cable-stayed bridges[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2004, 24(3): 241.
- [3] ATES Sevet, BAYRAKTAR Alemdar, DUMANOGU A Aydin. The effect of spatially varying earthquake ground motions on the stochastic response of bridges isolated with friction pendulum systems[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2006, 26(1): 31.
- [4] 范立础,王君杰,陈玮. 非一致地震激励下大跨度斜拉桥的响应特征[J]. 计算力学学报, 2001, 18(3):358.  
FAN Lichu, WANG Junjie, CHEN Wei. Response characteristic of long-span cable-stayed Bridges under non-uniform seismic action[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(3):358.
- [5] 潘旦光,楼梦麟,范立础. 多点输入下大跨度结构反应分析研究现状[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(10):1213.  
PAN Danguang, LOU Menglin, FAN Lichu. Status of seismic response analysis of long-span structures under multiple support excitons[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(10):1213.
- [6] 江宜城,杨德喜,李黎,等. LRB隔震桥梁空间变异性地震随机响应分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(1):104.  
JIANG Yicheng, YANG Dexi, LI Li, et al. Stochastic response analysis of seismically isolated bridges with LRB to spatially varying earthquake ground motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1):104.
- [7] 高学奎,朱晞. 地震动水压力对深水桥墩的影响[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(1): 55.  
GAO Xuekui, ZHU Xi. Hydrodynamic effect on seismic response of bridge pier in deep water[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006, 30(1):55.
- [8] 魏凯. 地震作用下桥梁深水基础流固耦合效应及抗震方法研

- 究[D]. 上海:同济大学, 2013.
- WEI Kai. Earthquake induced fluid-structure effects and seismic response analyses of deepwater foundations for bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [9] 李忠献, 黄信. 行波效应对深水连续刚构桥地震响应的影响[J]. 工程力学, 2013, 30(3):120.
- LI Zhongxian, HUANG Xin. Influence of traveling wave effect on seismic responses of continuous rigid-framed bridge in deep water[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 120.
- [10] 李磊, 张永亮, 陈敦. 基于摩擦摆支座的深水高桩承台连续梁桥减隔震研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(2):108.
- LI Lei, ZHANG Yongliang, CHEN Dun. Study on seismic isolation of friction pendulum bearing of continuous girder bridge with deepwater elevated pile caps [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 108.
- [11] 冯俊迎. 深水隔震桥梁的地震反应分析及抗震性能研究[D]. 广州:广州大学, 2014.
- FENG Junying. Seismic response analysis and performance study of isolated bridge in deep-water [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014.
- [12] KIUREGHIAN A D, NEUENHOFER A. Response spectrum method for multi-support seismic excitation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1992, 21(8):1.
- [13] LUCO J E, WONG H L. Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1986, 14(6):891.
- [14] KONAKLI K, KIUREGHIAN A D. Simulation of spatially varying ground motions including incoherence, wave-passage and differential site-response effects [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(3):495.
- [15] PRIESTLY M J N, SEIBLE F, CALVI G M. Seismic design and retrofit of bridges[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [16] 钟剑. 考虑地震动空间效应的斜拉桥易损性分析[D]. 上海: 同济大学, 2015.
- ZHONG Jian. Seismic fragility analysis for cable-stayed bridges considering spatial variability of ground motion[D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [17] MORISON J R, O'BRIEN M P, JOHNSON J W, *et al.* The force exerted by surface waves on piles [J]. Petroleum Transactions, AIME, 1950, 189: 149.
- [18] 林曾. 考虑多种因素的深水桥梁地震响应分析[D]. 上海: 同济大学, 2016.
- LIN Zeng. Seismic performance analysis of deep-water bridges considering multi-factors [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [19] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- WANG Xinmin, LI Yiqiang, XU Hongwei. ANSYS software structural analysis element and its application [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [20] 罗超, 楼梦麟, 桂国庆. 大跨度结构多点地震反应计算方法的比较[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 8.
- LUO Chao, LOU Menglin, GUI Guoqing. Comparison for calculation methods of long-span structure under multi-support seismic excitation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(1): 8.
- [21] YUAN W, WANG B, PAKCHIU C, *et al.* Seismic performance of cable-sliding friction bearing system for isolated bridges[J]. Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 2012, 11(2): 173.
- [22] 袁万城, 王斌斌. 拉索减震支座的抗震性能分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(8):1126.
- YUAN Wancheng, WANG Binbin. Numerical model and seismic performance of cable-sliding friction aseismic bearing [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(8): 1126.

#### (上接第 624 页)

- [18] CHEN W F. Plasticity in reinforced concrete[M]. New York: McGraw-Hill, 1981.
- [19] MAZARS J. A description of micro-and macro-scale damage of concrete structures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25: 729.
- [20] 李杰, 吴建营, 陈建兵. 混凝土随机损伤力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LI Jie, WU Jianying, CHEN Jianbing. Stochastic damage mechanics for concrete[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [21] ZIENKIEWICZ R L, TALOR R L, ZHU J Z. Finite element method: Its basics and fundamentals[M]. London: Elsevier, 2000.
- [22] BELYTSCHKO T, LIU W K, MORAN B, *et al.* Nonlinear finite elements for continua and structures[M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [23] 郝柏林. 从抛物线谈起——混沌动力学引论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1993.
- HAO Bailin. Starting from the parabola: Chaotic dynamics introduction[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 1993.
- [24] LIN Y K. Probabilistic theory of structural dynamics[M]. New York: McGraw-Hill, 1976.
- [25] 李杰, 陈建兵. 随机动力系统里的概率密度演化方程及其研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(2):170.
- LI Jie, CHEN Jianbing. Advances in the research on probability density evolution equations of stochastic dynamical systems[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(2):170.
- [26] LI Jie, CHEN Jianbing. Stochastic dynamics of structures[M]. New York: Wiley & Sons, 2009.
- [27] LI J, CHEN J B, FAN W L. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability[J]. Structural Safety, 2007, 29(2): 112.
- [28] 钱令希. 工程结构优化[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- QIAN Lingxi. The optimization of engineering structure[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1983.