

文章编号: 1000-4750(2013)03-0120-06

# 行波效应对深水连续刚构桥地震响应的影响

李忠献<sup>1,2</sup>, 黄 信<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘 要:** 跨海或库区的大跨度桥梁在地震作用下不仅需要考虑水体与桥墩的动力相互作用, 同时由于各桥墩间跨度较大应考虑地震输入的行波效应。该文采用辐射波浪理论求解桥墩地震动水压力, 建立了考虑地震动输入空间效应的深水桥梁地震响应分析方法, 并考虑行波效应对深水连续刚构桥进行地震响应分析。研究表明: 动水压力增大了桥梁结构的地震响应, 其影响程度随着输入地震波和墩梁约束条件的不同而有所差异; 考虑行波效应时地震动水压力对桥梁结构动力响应的影响较一致激励而言有所差别, 同时地震动水压力对桥梁地震响应的影响随着视波速的不同而变化。由此得出结论, 为合理评价地震动水压力对深水长大桥梁动力响应的影响应考虑地震动输入的行波效应。

**关键词:** 深水桥梁; 地震作用; 地震动水压力; 辐射波浪理论; 行波效应

中图分类号: U442.5 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.11.0735

## INFLUENCE OF TRAVELING WAVE EFFECT ON SEISMIC RESPONSES OF CONTINUOUS RIGID-FRAMED BRIDGE IN DEEP WATER

LI Zhong-xian<sup>1,2</sup>, HUANG Xin<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Water-bridge-pier dynamic interactions should be considered in the earthquake response analysis of bridges located in the sea or reservoir area, and the traveling wave effect also cannot be ignored for long-span bridge structures. The hydrodynamic pressure formulary of bridge piers is solved using radiation wave theory, and a seismic response analysis method of bridges in deep water is established, which can consider the spatial effect of a ground motion input. The earthquake response analysis about a continuous rigid-framed bridge is made, considering the traveling wave effect. The results indicate that: dynamic responses of a bridge in deep water is augmented because of hydrodynamic pressure action, and the influence of hydrodynamic pressure on seismic responses of a bridge in deep water is changed with different earthquake wave excitations and constraint conditions about a pier-box girder. The effect of hydrodynamic pressure on the earthquake response of a bridge in deep water is different, considering traveling waves relative to a uniform excitation, which is also changed with apparent wave velocity when the traveling wave effect is considered. In conclusion, the traveling wave effect should be considered in seismic response analyses of long and huge bridges in deep water under hydrodynamic pressure actions.

**Key words:** bridges in deep water; earthquake action; earthquake induced hydrodynamic pressure; radiation wave theory; traveling wave effect

收稿日期: 2011-11-03; 修改日期: 2012-06-26

基金项目: 国家重点基础研究发展“973”计划项目(2011CB013603); 国家自然科学基金项目(90715032, 51021140003)

通讯作者: 李忠献(1961—), 男, 安徽枞阳人, 长江学者特聘教授, 博士, 从事工程结构抗震抗爆、减灾控制与健康监测研究

(E-mail: zxli@tju.edu.cn).

作者简介: 黄 信(1983—), 男, 安徽六安人, 博士生, 从事结构抗震研究(E-mail: xhuang@tju.edu.cn).

大跨度桥梁结构由于地震动输入的各支撑点距离较大,地震波到达各支撑点时间不同从而产生了时间滞后,同时地震波在介质传播中发生反射和折射从而产生频散损失,以及各支撑点的局部土层存在差异使不同支撑点地震波的频谱成分不同,所以大跨度桥梁结构地震响应分析应考虑地震输入的空间效应<sup>[1-4]</sup>。李忠献等<sup>[1]</sup>考虑行波效应对某四跨连续刚构桥进行地震响应分析,并和一致地震激励计算结果进行比较;Dumanoglu等<sup>[2]</sup>考虑地震动的空间效应对悬索桥进行随机地震响应分析,研究表明对于大跨桥梁结构而言行波效应、相干效应等不容忽视;Lou等<sup>[3]</sup>对某三跨预应力混凝土高架桥梁分别进行一致地震输入和考虑地震动空间效应地震输入下的动力响应分析,分析得出相对考虑地震动空间效应而言一致激励并不能给出保守的抗力设计;所以对于大跨度桥梁抗震分析应考虑地震动输入的空间效应。

对于跨海、跨江以及位于库区的大跨度桥梁,为确保桥梁结构安全有必要分析水-桥墩动力相互作用对桥梁地震响应的影响;水-桥墩相互作用问题主要分析方法有解析法、数值法和混合法,混合法是较为常用的方法,其主要是先计算出动水压力解答,然后对桥墩结构施加动水压力并进行动力分析。动水压力主要基于辐射波浪理论进行求解<sup>[5-11]</sup>。Sun等<sup>[5]</sup>基于 Trefftz 函数推导了圆柱体动水压力计算公式,Aviles等<sup>[6]</sup>分析了海底柔性介质对海洋结构物地震动水压力的影响,黄信等<sup>[9]</sup>基于辐射波浪理论建立动水压力解答,分析了自由表面波和水体压缩性对地震动水压力的影响。许多研究者进一步分析了地震动水压力对桥墩地震响应的影响,黄信等<sup>[10]</sup>考虑土-结构相互作用等因素分析动水压力对桥墩动力响应的影响;刘振宇等<sup>[11]</sup>采用一致激励分析了动水压力对深水桥梁地震响应的影响;张国明等<sup>[12]</sup>研究表明地震动水压力作用增大了桥梁结构的动力响应。上述研究主要采用一致激励对深水桥梁进行地震响应分析,而对于大跨度桥梁地震响应分析尚应考虑地震动输入的行波效应。

为分析行波效应对大跨度深水桥梁地震响应的影响,本文建立了考虑地震动输入空间效应的深水桥梁地震响应分析方法,考虑行波效应对深水连续刚构桥进行地震响应分析。

## 1 多点输入下深水桥梁地震响应分析方法

对于大跨度桥梁结构,在多点不同步地震作用下桥梁结构运动方程与一致地震激励下的运动方程不同,此时桥梁结构的动力方程采用分块矩阵形式表示<sup>[1-4]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sb} \\ \mathbf{M}_{bs} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_s \\ \ddot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_s \\ \dot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_s \\ \mathbf{X}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_b \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$  和  $\mathbf{C}$  分别为质量矩阵和阻尼矩阵;  $\mathbf{X}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$  和  $\ddot{\mathbf{X}}$  分别表示地震作用下桥梁结构节点的绝对位移、速度和加速度向量; 下标  $s$  表示桥梁结构非支座节点,下标  $b$  表示桥梁结构支承节点;  $\mathbf{F}_b$  表示作用于各支座的地震力。

考虑行波效应时支座处的地震地面运动加速度向量按具有一定时间差的同一条地震波加速度记录进行取值。

考虑深水桥梁在地震作用下会受到动水压力作用时,此时桥梁结构动力方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{sb} \\ \mathbf{M}_{bs} & \mathbf{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_s \\ \ddot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ss} & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{bs} & \mathbf{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_s \\ \dot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{bs} & \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_s \\ \mathbf{X}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{F}_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{P}$  表示地震作用下水中桥墩所受到的地震动水压力,与桥墩的动力响应相关联。

采用辐射波浪理论计算地震作用下深水桥墩所受的动水压力作用。假定水体无旋不可压缩,根据线性辐射波浪理论,当地面做频率为  $\omega$  的简谐运动时,在柱坐标系下水体的速度势可表示为复数形式  $\Phi(r, \theta, z) = \phi(r, \theta, z)e^{i\omega t}$ , 其中  $\Phi(r, \theta, z)$  为水体速度势;  $\phi(r, \theta, z)$  为速度势空间因子。将  $\phi(r, \theta, z)$  代入 Laplace 方程得到水体控制方程:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

根据 Trefftz 完备函数,  $\phi(r, \theta, z)$  可表示为:

$$\phi(r, \theta, z) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \phi_{mn}(r, \theta, z) \quad (4)$$

其中,  $\phi_{mn}(r, \theta, z)$  可分离变量为:

$$\phi_{mn}(r, \theta, z) = R_{mn}(r)\Theta_n(\theta)Z_m(z) \quad (5)$$

对于整个水体的底面和表面以及水体与桥墩交界面处还要满足相应的边界条件,其中水与桥墩交界面的边界条件为:

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{\partial X}{\partial t} \cos \theta \right) \Big|_{r=R, 0 < z < h} \quad (6)$$

式中:  $R$  为桥墩半径,对于外域水体取桥墩截面外半径,内域水体取桥墩截面内半径;  $h$  为水深;  $X$  为桥墩的位移,包括刚体位移和弹性位移,产生的速度势分别为刚体速度势和弹性速度势;柱坐标系中  $z$  轴沿桥墩轴线向上,坐标原点位于墩底。

将式(5)代入式(3),并结合边界条件,可求得流场中的速度势。对于线性波浪,将速度势代入 Bernoulli 方程可以得到桥墩地震动水压力:

$$P = -\rho \int_0^{2\pi} \frac{\partial \Phi}{\partial t} R \cos \theta d\theta \quad (7)$$

式中:  $P$  为动水压力;  $\rho$  为水体密度。

求得动水压力后代入结构动力方程式(2),便可对桥墩结构进行动水压力作用下的地震响应分析。

## 2 一致激励下深水连续刚构桥地震响应分析

为分析行波效应对深水桥梁地震响应的影响,首先考虑一致激励对深水桥梁进行地震响应分析。

### 2.1 分析模型

深水桥梁为 4 跨连续刚构桥,如图 1 所示(单位为 m),跨度分别为 60m+100m+100m+60m,1 号墩、2 号墩和 3 号墩的墩高分别为 50m、70m 和 90m。上部箱梁为变截面混凝土箱梁,箱梁高为 4.4m~8.8m,桥面宽 8m,箱梁宽 6m;桥墩采用空心截面矩形桥墩,纵桥向宽为 8m,横桥向墩顶宽 7m,墩顶以下 70m 按 25:1 放坡,70m 以下按 5:1 放坡,底部设置 5m 高的实体墩。上部箱梁结构采用 C60 混凝土,桥墩结构采用 C40 混凝土,混凝土材料采用损伤塑性本构模型,利用 ABAQUS 软件的建立了桥梁分析模型,钢筋利用 rebar 单元考虑,边墩和上部箱梁利用约束方程建立连接,仅约束横桥向和竖向,中墩与箱梁采用固接。

为分析地震动水压力对桥梁地震响应的影响,对桥梁结构分别进行无水和有水作用下的动力响应分析,其中有水时 1 号墩、2 号墩和 3 号墩的水深分别为 30m、50m 和 70m;采用天津波(1976 年,EW 方向)和 El-Centro 波(1940 年,EW 方向)的加速

度时程分别沿桥梁纵桥向和横桥向进行地震激励,加速度幅值均调整为 0.2g,地震输入采用一致激励,动水压力采用辐射波浪理论求解并按附加质量形式施加。

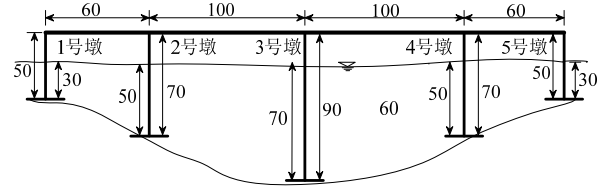


图 1 深水连续刚构桥尺寸图

Fig.1 Dimension of continuous rigid-framed bridge in deep water

### 2.2 桥梁的动力响应

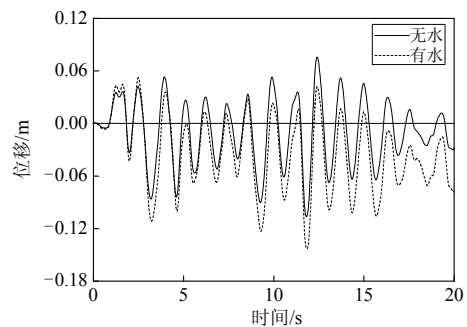
由于桥梁震害主要发生在桥墩部位,以下主要针对桥墩结构动力响应进行分析。表 1 列出了地震作用下桥墩的墩底应力和墩顶相对位移的幅值。

图 2 和图 3 仅给出了 El-Centro 波和天津波沿纵桥向作用时 3 号桥墩的墩顶相对位移的时程和墩底应力时程,所取应力为 Mises 应力。

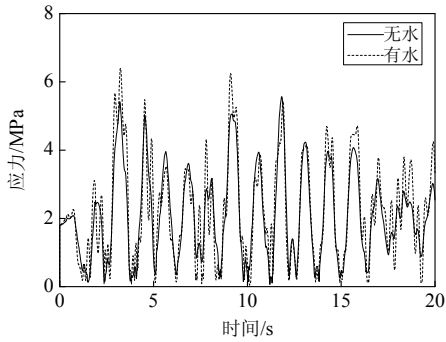
表 1 一致地震激励下桥墩结构地震响应幅值

Table 1 Seismic responses amplitude of bridge pier under uniform earthquake wave excitation

工况	动力响应							
	1 号墩		2 号墩		3 号墩			
	墩底应力/MPa	相对位移/mm	墩底应力/MPa	相对位移/mm	墩底应力/MPa	相对位移/mm		
纵向作用	El-Centro 波	无水	4.02	26.1	7.05	106.7	5.56	106.4
		有水	6.34	39.2	8.24	144.7	6.40	143.2
	天津波	无水	2.57	14.1	8.79	179.0	6.96	186.7
		有水	3.0	17.4	10.04	215.0	7.72	223.2
横向作用	El-Centro 波	无水	3.19	20.0	5.40	50.3	5.72	115.2
		有水	3.76	24.0	6.20	62.2	6.37	101.6
	天津波	无水	2.53	17.1	4.63	65.3	6.78	219.8
		有水	2.69	18.4	5.69	78.3	7.23	249.3



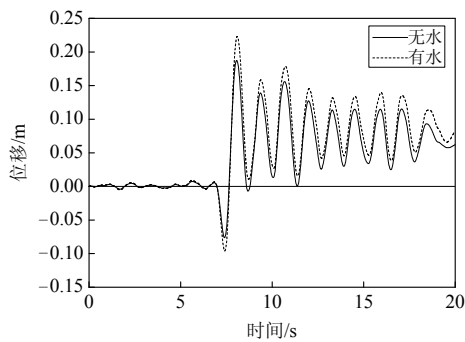
(a) 墩顶位移时程



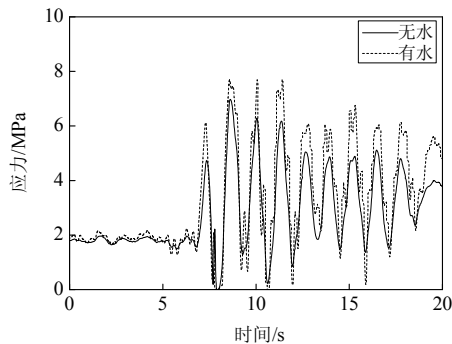
(b) 墩底应力时程

图2 El-Centro 波沿纵桥向作用时3号桥墩动力响应时程曲线

Fig.2 Seismic responses of 3th bridge pier under El-Centro wave excitation



(a) 墩顶位移时程



(b) 墩底应力时程

图3 天津波沿纵桥向作用时3号桥墩动力响应时程曲线  
Fig.3 Seismic responses of 3th bridge pier under Tianjin wave excitation

从表1、图2和图3可以看出,无论是桥墩结构的相对位移还是墩底应力,地震作用下动水压力增大了桥墩结构的动力响应。

为了衡量动水压力对桥墩地震响应的影响程度,采用无量纲参数表示动水压力引起桥墩动力响应的增幅,动力响应增幅为有水和无水作用下结构动力响应的差值同无水作用下结构动力响应的比值,地震作用下动水压力引起桥墩墩顶相对位移响应和墩底应力响应的增幅如表2所示。

表2 一致地震激励下桥墩结构地震响应增幅  
Table 2 Seismic responses increase of bridge pier under uniform earthquake wave excitation

工况	响应增幅					
	1号墩		2号墩		3号墩	
	墩底应力/MPa	墩顶相对位移/mm	墩底应力/MPa	墩顶相对位移/mm	墩底应力/MPa	墩顶相对位移/mm
纵向 El-Centro 波作用	57.7%	50.2%	16.9%	35.6%	15.1%	34.9%
天津波	16.7%	23.4%	14.2%	20.1%	10.9%	19.6%
横向 El-Centro 波作用	17.9%	20.0%	14.8%	23.7%	11.4%	-11.8%
天津波	6.3%	7.6%	22.9%	19.9%	6.6%	13.4%

从表2可以看出,El-Centro波沿纵桥向作用时,1号墩的墩底应力增幅为57.7%,位移增幅为50.2%,而2号墩的墩底应力增幅为16.9%,位移增幅为35.6%,说明El-Centro波沿纵桥向作用时地震动水压力作用增大了桥墩结构的动力响应;同时可以得出地震动水压力对桥墩动力响应的影响随桥墩和上部箱梁约束条件不同而有所差异,如1号墩在纵桥向和上部箱梁结构无约束,而2号墩在纵桥向和上部箱梁结构是约束的,从而上部箱梁结构对2号墩存在较强的约束作用,此时地震动水压力对2号墩动力响应的影响较1号墩而言小。

同样可以看出,El-Centro波沿纵桥向作用时,1号墩的墩底应力增幅为57.7%,天津波沿纵桥向作用时,1号墩的墩底应力增幅为16.7%,可以得出地震动水压力对桥墩动力响应的影响随输入地震波不同而有所差异,这主要是由于不同地震波的频谱特性不同,从而导致考虑地震动水压力时其对桥梁地震响应的影响会产生差异。同时可以看出,El-Centro波沿横桥向作用时1号墩的墩底应力增幅为17.9%,而El-Centro波沿纵桥向作用时1号墩的墩底应力增幅为57.7%,可以得出地震波沿纵向桥作用时地震动水压力对桥墩动力响应的影响较地震波沿横桥向作用时大,这主要是由于纵桥向迎水面大,所受的动水压力大。

### 3 考虑行波效应的深水连续刚构桥地震响应分析

#### 3.1 分析工况

由于大跨度桥梁各个桥墩之间距离较大,其地震响应分析应考虑行波效应。考虑行波效应对上述连续刚构桥进行动水压力作用下的地震响应分析,其中视波速分别取  $V_s=100\text{m/s}$ 、 $200\text{m/s}$ 、 $500\text{m/s}$  和  $1000\text{m/s}$ ; 分别采用天津波(1976年,EW方向)和El-Centro波(1940年,EW方向)的加速度时程沿纵

桥向进行地震激励, 加速度幅值均调整为  $0.2g$ 。

### 3.2 桥梁的动力响应

表 3 列出了不同视波速下桥墩地震响应(包括墩底应力和墩顶相对位移)的幅值。

表 3 行波激励下桥墩结构地震响应幅值

Table 3 Seismic responses amplitude of bridge pier under traveling wave excitation

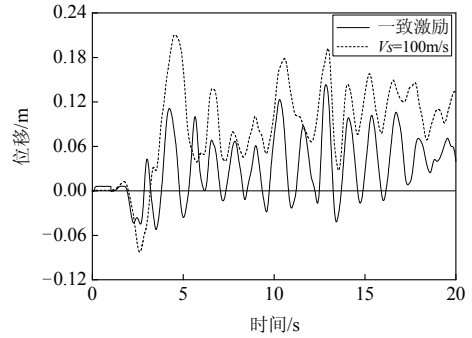
工况		动力响应							
		1号墩		2号墩		3号墩			
		墩底应力/ MPa	相对位移/ mm	墩底应力/ MPa	相对位移/ mm	墩底应力/ MPa	相对位移/ mm		
El-Centro 波	$V_s=100\text{m/s}$	无水	4.0	25.9	8.85	377.9	4.94	213.0	
		有水	6.26	39.8	9.83	380.0	6.68	210.4	
	$V_s=200\text{m/s}$	无水	4.01	25.9	8.23	239.4	2.82	74.5	
		有水	6.31	40.8	9.02	255.4	4.0	78.6	
	$V_s=500\text{m/s}$	无水	3.99	25.9	6.72	107.1	4.23	79.6	
		有水	6.27	40.1	8.73	103.1	5.55	83.8	
	$V_s=1000\text{m/s}$	无水	3.98	26.0	7.68	109.7	5.24	100.9	
		有水	5.77	39.5	8.61	121.4	7.35	131.9	
	天津波	$V_s=100\text{m/s}$	无水	2.58	13.8	5.28	68.1	5.92	166.2
			有水	3.04	17.1	7.49	71.2	6.48	169.3
$V_s=200\text{m/s}$		无水	2.61	14.0	5.81	89.6	4.08	67.7	
		有水	3.08	17.3	5.68	92.5	4.57	63.5	
$V_s=500\text{m/s}$		无水	2.54	14.1	9.26	150.1	5.75	113.3	
		有水	2.99	17.5	9.90	189.3	6.54	154.7	
$V_s=1000\text{m/s}$		无水	2.54	14.2	9.31	177.3	7.05	160.7	
		有水	2.98	17.5	10.50	228.7	6.97	213.0	

图 4~图 5 所示为 El-Centro 波和天津波沿纵桥向作用时, 3 号桥墩在一致激励和视波速  $V_s=100\text{m/s}$  时考虑动水压力作用下桥墩结构应力时程和位移时程的对比。

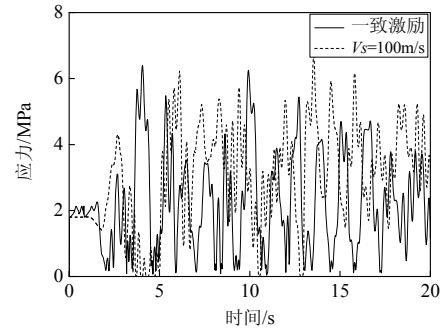
同样, 为衡量地震动水压力对深水桥梁动力响应的影 响, 仍采用无量纲参数计算动水压力增幅, 不同视波速下桥墩动力响应增幅如表 4 所示。

从表 4 可以得到, El-Centro 波作用下, 视波速  $100\text{m/s}$  时 2 号墩的墩底应力增幅为  $11.1\%$ , 墩顶位移增幅为  $1.0\%$ ; 视波速  $500\text{m/s}$  时 2 号墩的墩底应力增幅为  $29.9\%$ , 墩顶位移增幅为  $4.6\%$ , 表明当考虑行波效应时随着视波速的不同动水压力对桥墩动力响应的影 响有所差异。

对比表 2 和表 3 可知, El-Centro 波一致激励下 2 号墩墩底应力增幅为  $16.9\%$ , 而视波速  $100\text{m/s}$  时 2 号墩的墩底应力增幅为  $11.1\%$ , 可以得出一致激励和考虑行波效应时动水压力对桥梁结构动力响 应影响不同, 所以为合理评价地震动水压力对深水桥梁动力响 应影响应根据桥梁实际情况考虑地震动输入的行波效应。



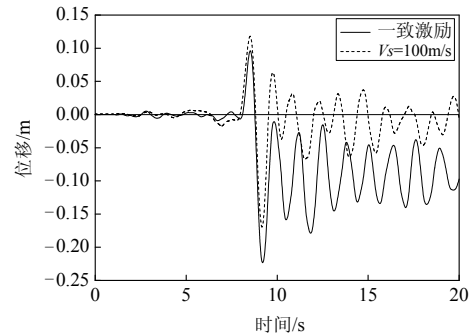
(a) 墩顶位移时程



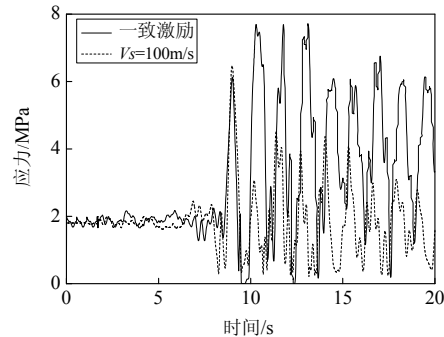
(b) 墩底应力时程

图 4 考虑行波效应时 El-Centro 波沿纵桥向作用下 3 号桥墩动力响应时程曲线

Fig.4 Seismic responses of 3th bridge pier under El-Centro wave excitation considering traveling wave



(a) 墩顶位移时程



(b) 墩底应力时程

图 5 考虑行波效应时天津波沿纵桥向作用下 3 号桥墩动力响应时程曲线

Fig.5 Seismic responses of 3th bridge pier under Tianjin wave excitation considering traveling wave

表4 行波激励下桥墩结构地震响应增幅  
Table 4 Seismic responses increase of bridge pier under traveling wave excitation

工况		响应增幅					
		1号墩		2号墩		3号墩	
		墩底 应力/ MPa	墩顶相 对位移/ mm	墩底 应力/ MPa	墩顶相 对位移/ mm	墩底 应力/ MPa	墩顶相 对位移/ mm
El-Centro 波	$V_s=100\text{m/s}$	56.5%	53.7%	11.1%	1.0%	35.2%	-1.0%
	$V_s=200\text{m/s}$	57.4%	57.5%	9.6%	6.7%	41.8%	5.5%
	$V_s=500\text{m/s}$	57.1%	54.8%	29.9%	-3.7%	31.2%	5.3%
天津波	$V_s=1000\text{m/s}$	45.0%	51.9%	12.1%	10.7%	40.3%	30.7%
	$V_s=100\text{m/s}$	17.8%	23.9%	41.9%	4.6%	9.5%	1.9%
	$V_s=200\text{m/s}$	18.0%	23.6%	2.2%	3.2%	12.0%	-6.2%
	$V_s=500\text{m/s}$	17.7%	24.1%	6.9%	26.1%	13.7%	36.9%
	$V_s=1000\text{m/s}$	17.3%	23.2%	12.8%	29.0%	-1.0%	32.5%

## 4 结论

本文考虑地震动输入的空间效应建立了深水桥梁地震响应分析方法,并分析了行波效应对深水连续刚构桥地震响应的影响,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,动力水压力对桥梁动力响应的影响随输入地震波不同以及桥墩和上部箱梁约束条件不同而有所差异。

(2) 考虑行波效应时动水压力对桥梁动力响应的影响较一致激励有所差别。如 El-Centro 波作用时,一致激励时 2 号墩应力增幅为 16.9%;而当视波速为 100m/s 时,2 号墩应力增幅为 11.1%。

(3) 考虑行波效应时动水压力对桥梁动力响应的影响随着视波速的不同而变化。如 El-Centro 波作用时,视波速为 100m/s 时 2 号墩应力增幅为 11.1%,而当视波速为 500m/s 时 2 号墩的应力增幅为 29.9%。

### 参考文献:

- [1] 李忠献,史志利.行波激励下大跨度连续刚构桥的地震反应分析[J].地震工程与工程振动,2003,23(2):68-76.  
Li Zhongxian, Shi Zhili. Seismic response analysis for long-span continuous rigid-framed bridges under excitation of traveling waves [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(2): 68-76. (in Chinese)
- [2] Dumanoglu A A, Soyuluk K. A stochastic analysis of long span structures subjected to spatially varying ground

- motions including the site-response effect [J]. Engineering Structures, 2003, 25(10): 1301-1310.
- [3] 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): 729-740.
- [4] Dameron R A, Sobash V P, Lam I P. Nonlinear seismic analysis of bridge structures foundation-soil representation and ground motion input [J]. Computers and Structures, 1997, 64(5/6): 1251-1269.
- [5] Sun K, Nogami T. Earthquake induced hydrodynamic pressure on axisymmetric offshore structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991, 20(5): 429-440.
- [6] Aviles J, Li X Y. Hydrodynamic pressures on axisymmetric offshore structures considering seabed flexibility [J]. Computers and Structures, 2001, 79(29/30): 2595-2606.
- [7] Bhatta D D, Rahman M. On scattering and radiation problem for a cylinder in water of finite depth [J]. International Journal of Engineering Science, 2003, 41(9): 931-967.
- [8] Han R P S, Xu H Z. A simple and accurate added mass model for hydrodynamic fluid-structure interaction analysis [J]. International Journal of Engineering Science, 1996, 33(6): 929-945.
- [9] 黄信,李忠献.自由表面波和水体压缩性对深水桥墩地震动水压力的影响[J].天津大学学报,2011,44(4):319-323.  
Huang Xin, Li Zhongxian. Influence of free surface wave and water compressibility on earthquake induced hydrodynamic pressure [J]. Journal of Tianjin University 2011, 44(4): 319-323. (in Chinese)
- [10] 黄信,李忠献.动水压力作用对深水桥墩地震响应的影响[J].土木工程学报,2011,44(1):65-73.  
Huang Xin, Li Zhongxian. Influence of hydrodynamic pressure on seismic responses of bridge piers in deep water [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 65-73. (in Chinese)
- [11] 刘振宇,李乔,赵灿晖,等.深水连续刚构桥地震响应分析[J].地震工程与工程振动,2009,29(4):119-124.  
Liu Zhengyu, Li Qiao, Zhao Canhui, et al. Analysis of seismic responses of continuous rigid-frame bridge in deep water [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 119-124. (in Chinese)
- [12] 张国明,宋波.动水压力对深水桥梁性能设计的影响[J].北京科技大学学报,2009,31(9):1086-1094.  
Zhang Guoming, Song Bo. Effect of hydrodynamic pressure on performance-based design of a deepwater bridge [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(9): 1086-1094. (in Chinese)