

考虑地震动水力的高速铁路跨海斜拉桥碰撞效应研究

雷虎军^{1,2}, 张益禧¹

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 为探究地震动水力对桥梁纵向碰撞效应的影响,以某主跨400 m的跨海斜拉桥为例,通过在节点添加地震动水力附加质量于承台和基础,建立考虑地震动水力的水-结构相互作用模型。通过非线性时程分析法,探究高速铁路跨海斜拉桥主、引桥伸缩缝处碰撞效应对桥梁抗震性能的影响。采用 Midas Civil 建立考虑和不考虑地震动水力有限元模型,并在伸缩缝处添加碰撞单元,沿桥纵向输入地震波对比动水力对主引桥碰撞效应的影响。结果表明:地震动加速度峰值越大,所产生的碰撞效应越大,并且罕遇地震工况下相较于设计地震时碰撞效应至少提高2~3倍。在考虑动水力时,伸缩缝处碰撞力、塔顶位移以及频谱特性都有明显提升,其中在有地震动水力时塔顶位移响应至少增大30%~40%。从频域角度看,群桩的动水力增大了下部结构的惯性力,使塔底的加速度功率谱峰值向低频段偏移,纵向加速度功率谱幅值明显增大。该研究成果可为高速铁路跨海斜拉桥的碰撞研究提供参考。

关键词: 跨海斜拉桥;地震动水力;碰撞效应;纵向碰撞;非线性分析

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)04-0307-09

Study on collision effect of high-speed railway sea-crossing cable-stayed bridge considering ground shaking hydrodynamics

LEI Hujun^{1,2}, ZHANG Yixi¹

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Lab of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to investigate the influence of ground shaking hydrodynamic force on the longitudinal collision effect of the bridge, a cross-sea cable-stayed bridge with a main span of 400 m was taken as an example. The additional mass of the ground shaking hydrodynamic force through the nodes was applied to the bearing platforms and foundations, so as to establish a water-structure interaction model considering the ground shaking hydrodynamic force. The impact of collision effects at the expansion joints of the main and approach bridges of a high-speed railroad cable-stayed bridge on the seismic performance of the bridge was investigated by means of nonlinear time course analysis. Midas Civil was used to establish a finite element model, with and without considering the ground shaking hydrodynamic model, add collision units at the expansion joints, and then input seismic waves along the longitudinal direction of the bridge to compare the dynamic hydrodynamic effect on the collision effect of the main approach bridge. Results show that the larger the peak ground shaking acceleration, the larger the collision effect, and the collision effect is at least 2~3 times higher in rare earthquakes than in design earthquakes. The collision force at the expansion joint, the tower top displacement, and the spectral characteristics are significantly enhanced when considering the hydrodynamic forces, with the tower top displacement response increasing by at least 30%-40% in the presence of ground shaking hydrodynamic forces. From the perspective of frequency domain, the longitudinal acceleration power spectrum amplitude increases significantly because the dynamic hydraulic force of the group piles increases the inertia force of the substructure, which shifts the peak of the acceleration power spectrum at the bottom of the tower to the lower frequency band. The research findings can provide a certain reference for the study of collision in high-speed railway cross-sea cable-stayed bridges.

Keywords: sea-crossing cable-stayed bridge; ground shaking hydraulics; collision effect; longitudinal collision; nonlinear analysis

收稿日期: 2024-10-08

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2024J01152)

第一作者简介: 雷虎军(1986—),男,四川渠县人,教授,博士,研究方向: 车-桥耦合振动及桥梁抗震。

斜拉桥凭借其跨越能力强、造型优美,已成为跨海、跨江的首选桥梁结构。但跨海斜拉桥由于其所在的地理位置,面临着巨浪、急流、深水等恶劣海洋环境,并且主、引桥结构的动力特性相差较大,在地震作用下相邻联发生非同向纵向振动,造成伸缩缝处相邻梁体较大相对位移,导致相邻联在伸缩缝处易发生碰撞。

目前,一些国内外学者对地震作用下大跨度桥梁伸缩缝处相邻梁体的碰撞效应进行了研究^[1]。闫聚考等^[2]利用悬索桥缩尺模型进行振动台实验,发现主桥与引桥相互靠近运动时,之间的碰撞会减小引桥梁位移及固定墩内力的需求;郑国足等^[3]通过对连续刚构桥主梁与过渡墩碰撞效应时程分析,解释了墩梁碰撞过程和破坏机理,分析了桥梁系统易损性、概率地震风险及墩梁碰撞效应的影响;张培等^[4]深入研究了大跨度斜拉桥不同工况下的碰撞效应,发现主、引桥的周期比影响最大,其次是质量比和碰撞间隙。

地震动水力作为地震次生荷载,会改变桥梁结构的自振特性,从而影响其地震响应。国内外学者针对地震动水力的模拟以及对斜拉桥结构动力响应的影响进行了大量研究。Wang 等^[5]提出了水平圆柱体附加质量的水动力压力分析和简化

计算方法。Chen 等^[6]则对深水桥墩在地震和波浪作用下的动态响应和水动力压力进行了研究。吴堃等^[7]研究表明,地震作用下桥墩加速度与动水压力需综合考虑多种影响因素,Morison 方程不适用于计算地震作用下桥墩动水压力,需进行修正。周牧等^[8]通过有限元计算发现矩形桥墩在地震输入方向上的迎水面为平面,相比圆形桥墩与水的相互作用更明显,会产生更大的动水压力。Ti 等^[9]优化了跨海大桥桥墩的地震动水力形状,通过对比不同形状的桥墩探索最佳几何形状,以实现最小的波浪力。

以上研究只针对梁桥和一般斜拉桥的碰撞效应,对跨海斜拉桥主引桥的碰撞效应研究较少。本文以一座高速铁路跨海斜拉桥为例,探究地震作用下考虑地震动水力对碰撞效应的影响规律,为跨海斜拉桥的抗震性能评估和设计提供参考。

1 工程概况及计算模型

1.1 工程概况

某主跨 400 m 的高速铁路跨海斜拉桥,跨度分布为(70+70+130+400+130+70+70)m,全桥长 940 m,采用半漂浮体系。全桥正立面如图 1 所示。1#~3#、6#~8#分别为桥墩,4#和 5#为桥塔。

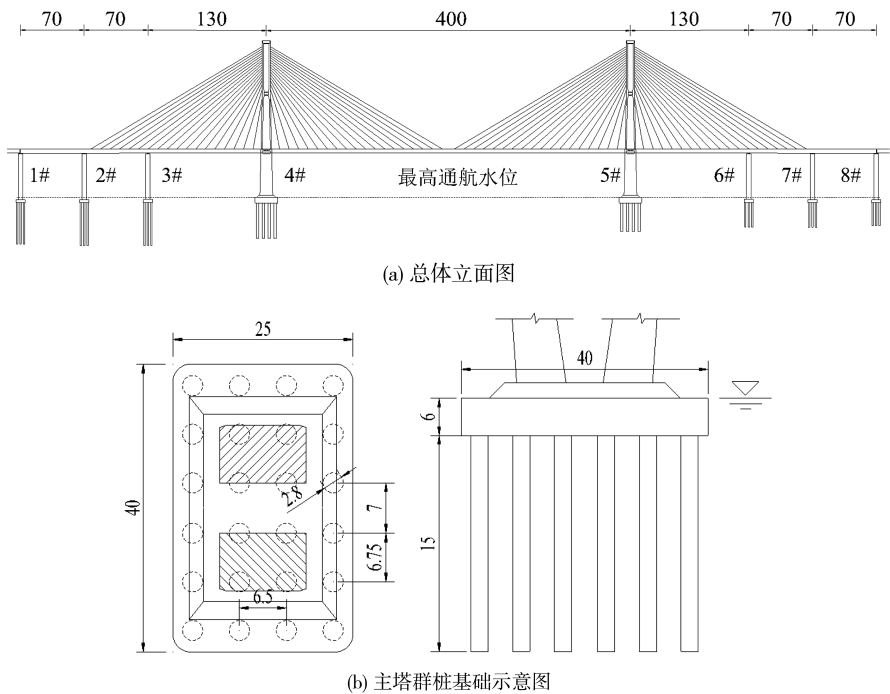


图 1 某主跨 400 m 斜拉桥(单位:m)

Fig.1 A 400m main span cable-stayed bridge(unit: m)

主塔为 C50 混凝土,弹性模量、容重分别为 3.6×10^4 MPa 和 26.3 kN/m^3 ,塔柱间设横系梁,塔柱为箱形截面,辅助墩分布如图 1 所示。斜拉索为抗拉强度 1.7×10^3 MPa 的镀锌平行钢丝拉索,成品索计算弹性模量采用 2×10^5 MPa,共 72 对(144 根)斜拉索,张拉端设置在塔内,斜拉索在主梁上间距 10.5 m 呈扇形布置。桥梁主塔高 169.3 m,塔柱间设有两道横系梁,塔底设置塔座,承台顶面为最高通航水位,承台高 6 m,主塔处桩直径 2.8 m,桩底在冲刷线处固结。

主梁上层为混凝土桥面板,下层为槽形钢箱梁的叠合梁结构。主梁宽 16 m、高 4.5 m,其中桥面板采用 C60 混凝土,中室和边室厚度分别为 0.35 m 和 0.3 m,其中腹板、边板及横隔板顶 3 处均加厚。槽形钢箱梁由底板(平底板和斜底板)、腹板及边板三部分构成。钢箱梁分为 9 个区。为了满足结构的受力和刚度要求,各区段采用不同的底板以及 U 形加劲肋厚度,使得各区段截面特性有所不同,主梁标准横断面如图 2。

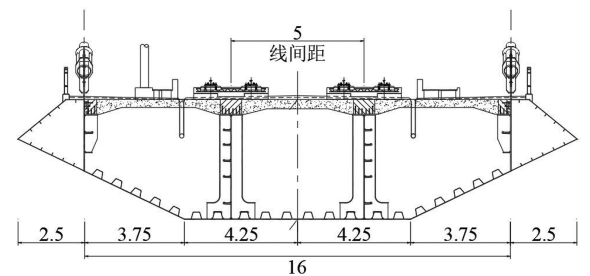


图 2 主梁标准横断面图(单位:m)

Fig.2 Standard cross-section of main beam (unit: m)

1.2 主、引桥梁体间的碰撞效应

为了模拟相邻联非同向振动导致伸缩处的碰撞,采用接触单元法中的线性弹簧碰撞模型^[10]模拟。恢复系数 e 值取 1,即忽略碰撞时的能量消耗。在 Midas Civil 有限元软件中采用其中的间隙单元来模拟,碰撞单元模型及力-位移关系如图 3。

力与位移的关系式为:

$$F = \begin{cases} k(d_0 + x_s) & d_0 + x_s < 0 \\ 0 & d_0 + x_s \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, k 为碰撞单元刚度,kN/m; d_0 为起始间隙,m; x_s 为主引桥间的相对位移,m。

碰撞单元刚度取值大小对碰撞效应的模拟有

重要的影响,根据相关文献研究,碰撞刚度取较短主梁纵向刚度^[11],经计算将本桥碰撞效应模拟中的弹簧刚度取为引桥梁体轴向刚度的 0.5 倍, $k=3.0\times 10^6$ kN/m。

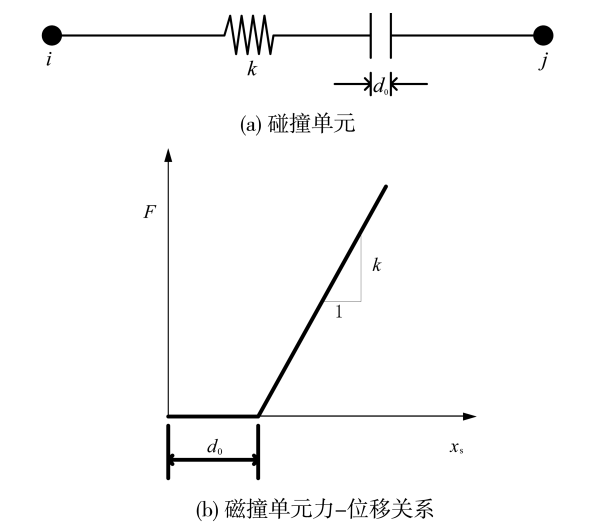


图 3 碰撞单元及其力-位移关系

Fig.3 Collision units and their force-displacement relationships

1.3 有限元分析模型

采用非线性有限元软件 Midas Civil 建立该桥简化梁式分析模型,模型包含节点 4 207 个,梁单元 4 202 个,桁架单元 144 个。主梁和桥墩均为梁单元,而斜拉索为桁架单元,同时不考虑各桥墩的塑性变形,并利用 Ernst 公式对斜拉索的垂度进行修正。斜拉索与主塔和主梁之间采用刚接,在连接墩(1#、8#)、辅助墩(2#、3#、6#、7#)处设竖向约束;桥塔与主梁之间设竖向和横向约束,纵向设带限位功能的黏滞阻尼器。

主引桥间考虑碰撞效应,采用碰撞单元模拟,碰撞单元分别布置在主桥与左右引桥的伸缩缝位置处,碰撞单元刚度 k 为 3.0×10^6 kN/m,伸缩缝起始间隙取为 0.05 m,如图 4 所示。全桥采用瑞利阻尼,阻尼比取 5%。

自振频率和振型是结构动力分析的重要参数,反应了结构的刚度指标。采用子空间迭代法计算不考虑地震动水力时的自振频率 f_1 与考虑地震动水力的自振频率 f ,并求出 2 种情况下自振频率的比值 f_1/f ,仅列出无地震动水力时前 4 阶的频率、周期、振型特征和与其对应振型有地震动水力的情况,见表 1。

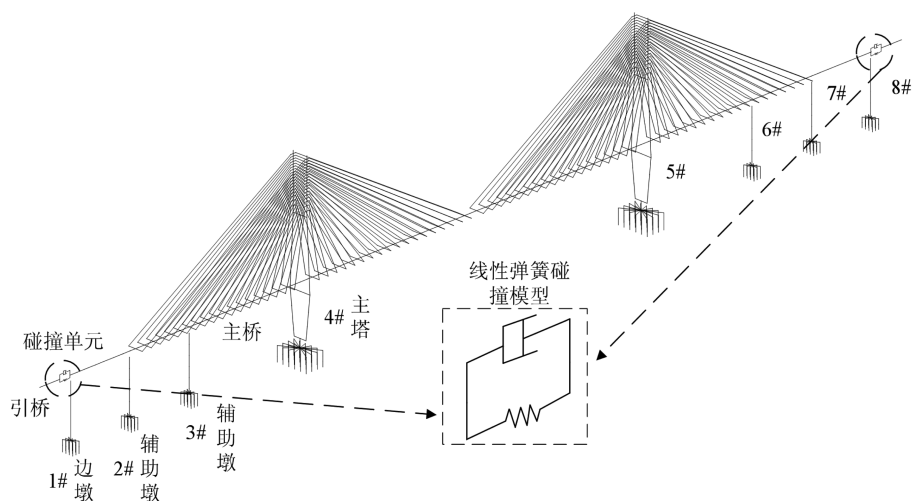


图 4 碰撞单元位置分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of collision unit location distribution

表 1 斜拉桥自振频率及振型特征

Tab.1 Self-oscillation frequency and vibration pattern characteristics of cable-stayed bridges

无地震动水力		有地震动水力		f_1/f	振型描述
阶次	f_1/Hz	阶次	f/Hz		
1	0.153	1	0.154	0.993	主梁纵飘
2	0.248	9	0.276	0.897	主梁正对称横弯
3	0.353	18	0.391	0.902	主塔反向侧弯
4	0.359	19	0.398	0.901	主塔同向侧弯

由表 1 可知,该斜拉桥第 1 阶振型为主梁纵飘,在有无地震动水力下斜拉桥的基本周期均约为 6.5 s,该桥基频较低周期较长符合半漂浮体系的特征。在相同振型下考虑地震动水力时结构自振频率均有所降低,由此可知,地震动水力会对桥梁的自振特性产生一定影响。

2 地震动水力附加质量

高速铁路跨海桥梁的基础在震动的作用下会产生变形,因而带动其附近水体运动并产生地震动水力反作用于基础上。地震动水力作为地震次生荷载,会改变桥梁结构自身的动力特性,从而影响其地震响应。

2.1 承台的地震动水力附加质量模型

文献[12]根据水体控制方程和边界条件,推导出深度 h 处圆柱体精确的地震动水力学解:

$$f_w = M_w(\ddot{u}_s + \ddot{u}_g)$$

(2)

式中, f_w 为地震动水力, kN; $\ddot{u}_s$ 为结构的加速度, m/s^2 ; $\ddot{u}_g$ 为地面加速度, m/s^2 ; M_w 为地震动水力等效质量, kg。

$$M_w = \frac{2\rho\pi R^2}{H} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{-K_1(R_0)}{r_0 K_1'(R_0)} W \cos(h_0) (\cos(h_0)) W$$

(3)

式中, ρ 为水的密度, kg/m^3 ; R 为圆柱体半径, m; H 为水的深度, m; K 为等效质量单位高度矩形截面的动水力附加质量与圆形截面动水力附加质量的等效换算系数; h 为水平辐射波浪力高度, m; $W = \int_0^H N^T N dz$; $r_0 = \alpha r$, $\alpha = [(2j-1)\pi]/(2d)$, $j = 1, 2, \dots$; $h_0 = \alpha h$ 。

对公式(3)拟合,将高度 h 处 1 m 长 ($h \pm 0.5$ m) 圆柱地震动水力附加质量简化为:

$$m_{rw} \approx \rho\pi R^2 d_1 \left\{ 1 - \frac{z}{H} \exp \left[d_2 \left(\frac{z}{H} - 1 \right) \right] \right\}$$

(4)

其中,

$$\begin{cases} d_1 = 0.918e^{-0.468L} + 0.155e^{0.015L} \\ d_2 = 1.248L^{-1.1194} + 2.156 \end{cases}$$

(5)

式中, z 为水深(水底 $z=H$, 自由水面 $z=0$), m; $L = 2r/d$, 为圆柱体直径与水深之比, $0.2 \leq L \leq 2$ 。

2.2 群桩附加质量计算公式

假定不同深度处柱-水的相互作用相同,文献[13]将实际的三维柱-水耦合系统简化为二维模型。由于复杂的地震波可分解为一系列简谐波处理,因此单桩的地震动水力表达式可由一系列简谐波来推导计算。文献[14]研究发现单桩结构上的地震动水力表示为:

$$\begin{cases} F_x = -m\ddot{u} \\ F_y = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $m=\rho\pi r_1^2$ 为海水质量, kg; $\ddot{u}$ 为结构加速度, m/s^2 ; F_x 与 F_y 分别是 x 和 y 方向上的地震动水力分量, kN。

群桩上的附加地震动水力质量计算公式为:

$$\begin{cases} m_x^{C_i} = \rho\pi r^2(1+h_x^i) \\ m_y^{C_i} = \rho\pi r^2 h_y^i \end{cases} \quad (7)$$

表 2 1#~4# 墩、塔地震动水力附加质量计算结果

Tab.2 1#~4# piers' and towers' ground vibration hydraulic additional mass calculation results

单位: 10^5 kg

构件	1#边墩附加质量		2#辅助墩附加质量		3#辅助墩附加质量		4#主塔附加质量	
	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向
群桩	2.621	0.193	2.621	0.193	2.561	0.185	23.808	3.182
承台	5.022	3.262	5.022	3.261	5.022	3.261	25.181	15.819
墩柱	0.749	0.491	0.749	0.491	0.749	0.491	—	—

表 3 5#~8#墩、塔地震动水力附加质量计算结果

Tab.3 5#~8# piers' and towers' ground vibration hydraulic additional mass calculation results

单位: 10^5 kg

构件	5#主塔附加质量		6#辅助墩附加质量		7#辅助墩附加质量		8#边墩附加质量	
	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向
群桩	24.589	3.312	2.379	0.174	2.212	0.161	2.212	0.161
承台	25.177	15.676	5.021	3.263	5.018	3.249	5.018	3.249
墩柱	—	—	0.768	0.486	0.771	0.489	0.771	0.489

注:群桩为该桥墩所有桩柱单元节点地震动水力附加质量之和。

3 地震波的选取及输入

根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)^[15]得到目标桥梁的抗震设防烈度为 7 度,设防地震水平加速度峰值为 $1.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,特征周期一区 T_g 为 0.45 s,位于Ⅲ类场地,参考《铁路工程抗震设计规范》(GB50111-2006)^[16](以下简称《规范》),得到设计反应谱,依照文献[17]对规范中设计反应谱下降段进行修正,基于该反应谱选取符合规范要求的地震波。

按《规范》^[16]反应谱曲线在 PEER 数据库选取了 3 条地震波,如表 4 所示,其加速度反应谱对比曲线如图 5 所示,地震波时程曲线如图 6 所示。根据相关铁路工程抗震细则中 3 水准设防要求,峰值加速度(peak ground acceleration,PGA)分别调整为设计地震和罕遇地震。同时考虑竖向地震

将最高通航水位作为地震动水力计算水面高度。在此高度下,各桥墩均有 3 m 高的墩柱是位于最高通航水位以下,分别采用承台和群桩的附加质量模型计算出各墩、塔的附加质量。1#~8#桥墩以及桥塔底部的附加质量计算结果见表 2 和表 3。由表 2 和表 3 可知,桥墩承台横向的地震动水力附加质量均小于纵向的,因为桥墩承台纵向比横向迎水面积更大。

的作用,取值为水平地震的 65%。地震波均采用一致激励以加速度模式输入,暂不考虑地震动的空间变异性。

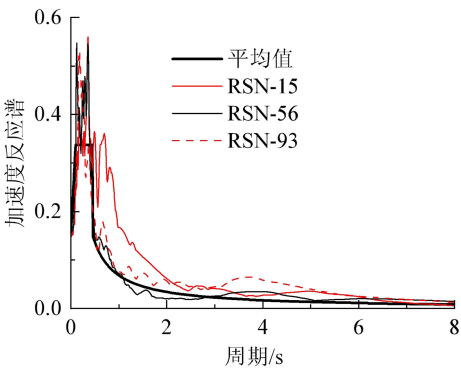


图 5 地震波加速度反应谱对比曲线

Fig.5 Comparison curves of seismic wave acceleration response spectra

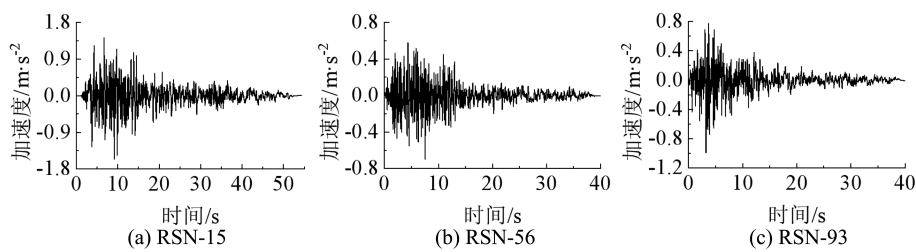


图 6 地震波时程曲线
Fig.6 Seismic wave time course curve

表 4 选取地震波的详细信息

Tab.4 Detailed information of selected seismic waves

地震事件	发生年份	记录台站	震级	PGA/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
Kern County	1952	Taft Lincoln School	7.36	1.421
San Fernando	1971	Carbon Canyon Dam	6.61	0.578
San Fernando	1971	Whittier Narrows Dam	6.61	0.774

位移的规律。伸缩缝的初始间隙取 0.05 m, 分别对有地震动水力在设计地震和罕遇地震的情况下进行分析。

4.1 伸缩缝处碰撞力响应

根据图 7 和图 8 不同峰值加速度下碰撞力时程图,以及表 5 和表 6 伸缩缝处碰撞力峰值及碰撞次数统计表,在设计地震时,有地震动水力明显大于无地震动水力的碰撞力峰值,其中 RSN-15 和 RSN-56 地震波碰撞力几乎增长了一倍。在罕遇地震时,有地震动水力碰撞次数明显增多。在不同地震动作用下碰撞力次数与峰值差异较大,可能与斜拉桥结构动力特性和地震波的频谱特性有关。

4 主、引桥梁端碰撞地震响应分析

分析斜拉桥主、引桥间伸缩缝处碰撞与塔顶

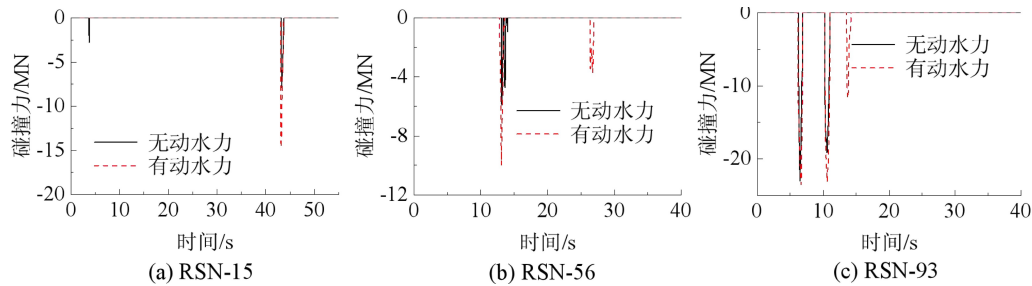


图 7 设计地震下伸缩缝处碰撞力时程
Fig.7 Time course of collision force at expansion joints under design earthquake

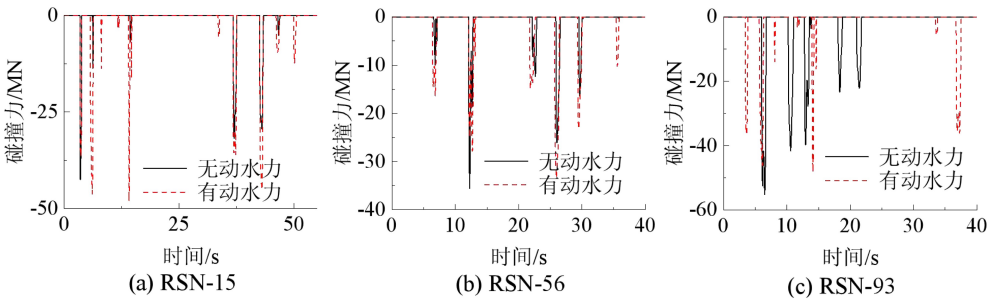


图 8 罕遇地震下伸缩缝处碰撞力时程
Fig.8 Time course of collision forces at expansion joints under rare earthquakes

表 5 设计地震时伸缩缝处碰撞情况统计表

Tab.5 Statistics of collisions at expansion joints during design earthquakes

有无地震 动水力	RSN-15 地震波		RSN-56 地震波		RSN-9 地震波	
	碰撞 力/MN	次 数	碰撞 力/MN	次 数	碰撞 力/MN	次 数
	碰撞 力/MN	次 数	碰撞 力/MN	次 数	碰撞 力/MN	次 数
无地震动水力	7.86	2	5.90	1	23.21	2
有地震动水力	14.70	1	9.95	2	23.14	3

表 6 罕遇地震时伸缩缝处碰撞情况统计表

Tab.6 Statistics of collisions at expansion joints in rare earthquakes

有无地震 动水力	RSN-15 地震波		RSN-56 地震波		RSN-9 地震波	
	碰撞 力/MN	次 数	碰撞 力/MN	次 数	碰撞 力/MN	次 数
	碰撞 力/MN	次 数	碰撞 力/MN	次 数	碰撞 力/MN	次 数
无地震动水力	42.40	6	35.62	5	55.13	5
有地震动水力	48.32	10	33.41	6	48.43	8

4.2 结构位移响应

4.2.1 梁端位移变化

由图 9 与图 10 可见,伸缩缝处的位移在考虑和不考虑地震动水力的工况下,位移时程曲线十分接近,说明地震动水力对伸缩缝处梁端位移的影响很小,但对峰值位移有一定影响,峰值位移都有少许的增大。RSN-93 地震波在罕遇地震作用下,在有无地震动水力工况下,位移时程还是有明显的区别,峰值位移有明显后移,虽然峰值差距不大。

4.2.2 塔顶位移变化

由图 11 和图 12 及表 7 可知,有无地震动水力,塔顶位移时程曲线峰值出现时间基本一致。但有地震动水力时,塔顶位移都有明显的增大,其中 RSN-15 地震波作用下,塔顶位移几乎增大了一倍,且在另外两条地震波作用下,位移至少增长 30%~40%。可见,考虑地震动水力对塔顶位移有显著影响,因此不能忽略地震动水力的影响。

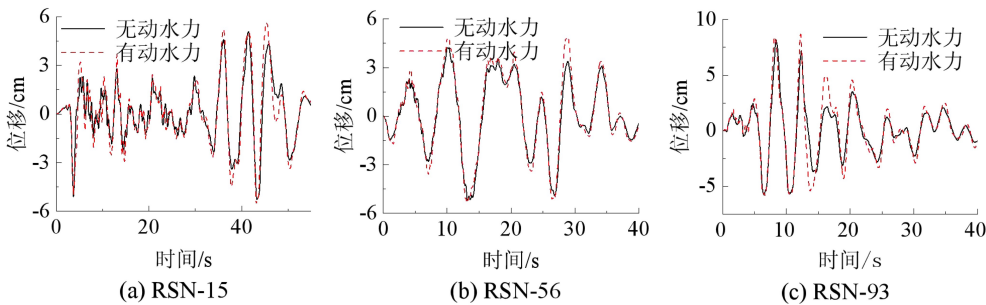


图 9 设计地震下伸缩缝处梁端相对位移时程

Fig.9 Time course of relative displacement of beam ends at expansion joints under design earthquakes

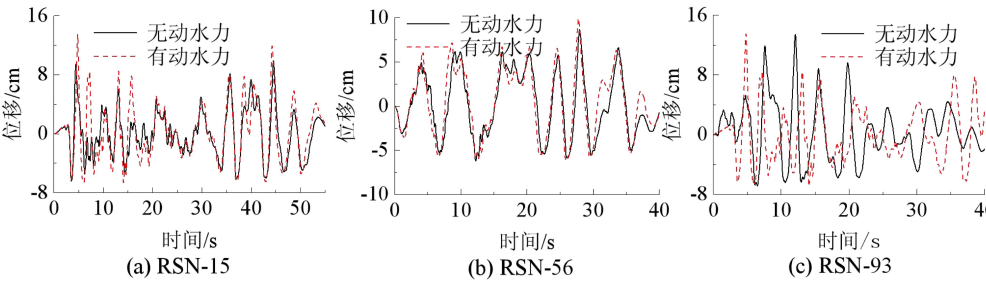


图 10 罕遇地震下伸缩缝处梁端相对位移时程

Fig.10 Time course of relative displacement of beam ends at expansion joints under rare earthquakes

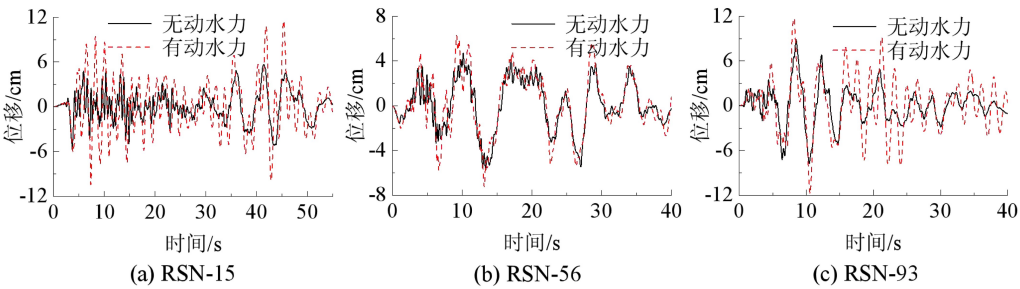


图 11 设计地震下塔顶相对位移时程

Fig.11 Time course of relative displacement of tower top under design earthquakes

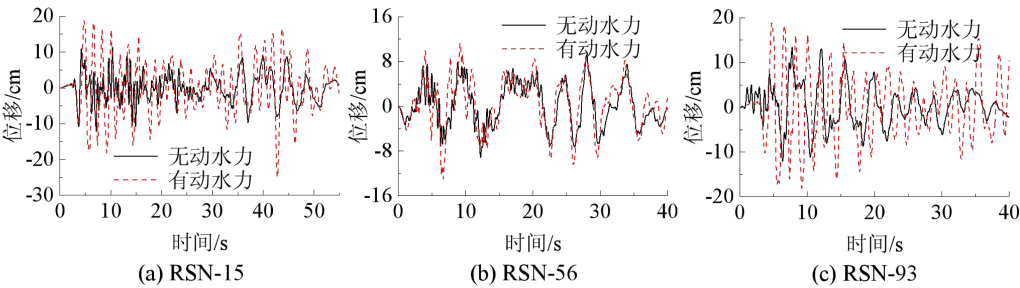


图 12 罕遇地震下塔顶相对位移时程

Fig.12 Time course of relative tower top displacement under rare earthquakes

表 7 塔顶最大位移幅值情况统计表

Tab.7 Statistics on maximum displacement amplitude of tower top						
有/无地震 动水力	设计地震下最大位移			罕遇地震下最大位移		
	RSN-15	RSN-56	RSN-93	RSN-15	RSN-56	RSN-93
	单位:cm					
无地震 动水力	-5.71	-5.74	8.87	12.13	9.21	13.41
有地震 动水力	11.50	-7.23	11.82	-24.94	-13.43	18.80

水力时主梁位移纵向位移功率谱略微增大。

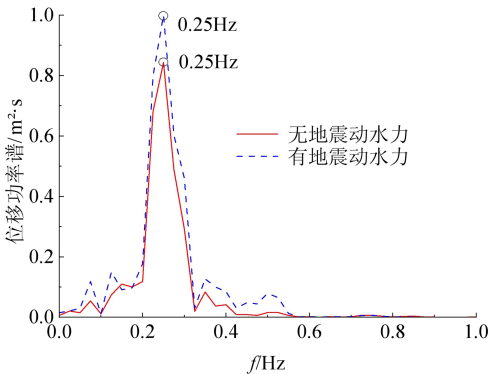


图 13 主梁梁端纵向位移功率谱对比

Fig.13 Comparison of longitudinal displacement power spectra of main girder ends

4.2.3 功率谱分析

将桥梁子系统动力响应在 RSN93 地震波作用的时程分析结果进行傅里叶变换,分析得到桥梁位移、加速度归一化功率谱,研究地震动水力对主梁位移以及加速度频谱特性的影响,如图 13 和图 14 分别为跨海斜拉桥是否考虑地震动水力两种情况下主梁纵向位移、加速度功率谱对比图。

从图 13 可见,地震动水力对纵向位移功率谱的分布影响较小,是否考虑地震动水力这两种工况下,功率谱均在 0.25 Hz 时达到峰值,但考虑地震动

从图 14 可知,地震动水力对纵向加速度功率谱有较大提升。纵向加速度功率谱幅值明显增大,考虑地震动水力时加速度反应谱峰值为不考虑地震动水力时的 1.5 倍。在 0.1~2 Hz 区段(低频段),考虑地震动水力后的加速度功率谱值也显著提高,高频段相差不大。但在有无地震动水力两种工况下,功率谱峰值频率 1.4 Hz 和 2.675 Hz 接近斜拉桥的二阶和三阶振型频率 1.4 Hz 和 2.55 Hz。且在考虑地震动水力的情况下塔顶纵向加速度功率谱峰值往低频区域靠近,综上所述,

地震动水力对塔顶位移以及加速度功率谱影响还是十分显著的。

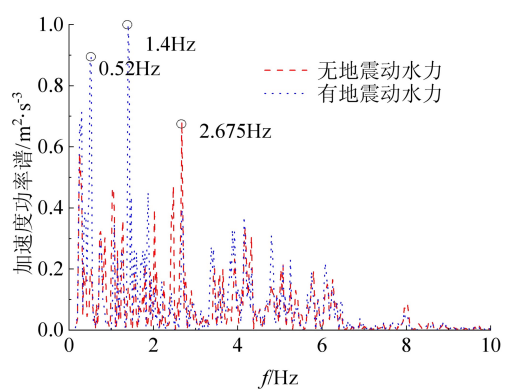


图 14 主梁梁端纵向加速度功率谱对比

Fig.14 Comparison of power spectra of longitudinal acceleration at main girder ends

5 结论

1) 由于高速铁路跨海斜拉桥主、引桥的结构体系不同,动力特性差异较大。地震作用下主、引桥极易发生碰撞,并将产生较大的碰撞力,在设计

地震下碰撞力峰值为 23.5 MN。这类碰撞力不仅会造成主、引桥接触破坏,还会增大跨海斜拉桥在地震作用下的响应,因此在抗震设计时应考虑碰撞效应。

2) 不同地震波作用的工况下,伸缩缝处碰撞效应不尽相同的原因,不仅与所加载的地震动频谱特性有关,还与斜拉桥的振动特性有关,但地震动加速度峰值越大,所产生的碰撞效应越大,罕遇地震下相较于设计地震各种碰撞效应至少提高 2~3 倍。

3) 在考虑地震动水力时,碰撞使得伸缩缝处碰撞力、塔顶位移以及频谱特性都有明显提升,其中最显著的是在有地震动水力时,塔顶位移响应至少增大 30%~40%,在罕遇地震下,碰撞次数增多了将近一倍。

4) 从频域角度来看,地震水动力显著影响了桥梁结构的动力响应。纵向加速度功率谱幅值明显增大,在 0.1~2 Hz 区段,考虑地震动水力后的加速度功率谱值显著提高,峰值增大了 1.5 倍。因为群桩基础的地震动水力增大了桥梁下部结构的惯性力,从而使塔底的加速度功率谱峰值向低频段偏移。

参考文献:

[1] MOAYYEDI S A, REZAEI H, KALANTARI A, et al. Effects of deck-abutment pounding on the seismic fragility curves of box-girder highway bridges[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2024, 28(8): 2188-2217.

[2] 闫聚考, 李建中, 彭天波, 等. 大跨度悬索桥主引桥碰撞效应振动台试验及数值研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 234-240, 261.

[3] 郑国足, 焦应乾, 石岩, 等. 考虑墩-梁碰撞效应的连续刚构桥系统易损性与概率地震风险性分析[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(3): 147-159.

[4] 张培, 赵科, 赵维刚, 等. 地震作用下斜拉桥不同工况碰撞效应研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(5): 64-68.

[5] WANG P G, HUANG Y R, QU Y, et al. The hydrodynamic pressure analysis and simplified calculation method of added mass of oscillating horizontal cylinder in finite water depth[J]. Ocean Engineering, 2024, 310: 118615.

[6] CHEN Y, HUANG X, WU K, et al. Experimental research on dynamic responses and hydrodynamic pressures of deep-water bridge piers under seismic and wave actions[J]. Engineering Structures, 2024, 313: 118276.

[7] 吴堃, 李忠献. 地震作用下桥墩动水压力及 Morison 方程适用性试验研究[J]. 工程力学, 2022, 39(12): 41-49.

[8] 周枚, 江坤, 李久龙. 地震作用下不同形式深水桥墩流固耦合效应研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(21): 7-18.

[9] TIZ L, WANG H. Hydrodynamic shape optimization of sea-crossing bridge pier under wave force[J]. Ocean Engineering, 2024, 299: 117281.

[10] 陈学喜, 朱晞, 高学奎. 地震作用下桥梁梁体间的碰撞响应分析[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(6): 75-79.

[11] 张文学, 鲍艳, 王景景. 伸缩缝间隙及纵向阻尼器对斜拉桥的碰撞影响[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 60-63.

[12] WANG P G, LV S Y, ZHANG C, et al. An analytical method for the solution of earthquake-induced hydrodynamic forces and wave forces on multiple vertical cylinders with arbitrary smooth sections[J]. Ocean Engineering, 2022, 263: 112440.

[13] YANG W L, LI A, DENG L W, et al. Study on characteristics and calculation method of hydrodynamic force on pile group under earthquake[J]. Ocean Engineering, 2020, 207: 107375.

[14] YANG W L, LI A, FENG X Y, et al. Calculation method of hydrodynamic force on one column of the twin columns under earthquake[J]. Ocean Engineering, 2020, 197: 106874.

[15] 中国地震局. 中国地震动参数区划图: GB18306-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

[16] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程抗震设计规范: GB50111-2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

[17] 黎璟, 钱永久, 杨华平, 等. 铁路斜拉桥减隔震方案参数优化研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(5): 45-50.

(责任编辑: 陈雯)