

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220720003

波浪-地震联合作用下跨海斜拉桥横向减振控制研究*

雷虎军¹, 朱广平¹, 孙昱坤¹, 林上顺¹, 陈希茂²

(1. 福建理工大学土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 中铁二十四局集团福建铁路建设有限公司, 福建 福州 350013)

摘要: 为研究波浪-地震联合作用下跨海斜拉桥的横向减振控制方法, 以某主跨400 m的跨海斜拉桥为工程背景, 考虑桥梁下部结构高桩承台群桩基础的波浪荷载, 并基于辐射波浪理论求解地震动水力附加质量, 建立了波浪-地震联合作用下考虑水-结构相互作用的全桥有限元模型。在此基础上, 采用黏滞阻尼器构建横向减振体系, 分别探讨了波浪单独作用和波浪-地震联合作用下黏滞阻尼器的减振控制效果。结果表明: 在波浪单独作用下, 仅在辅助墩墩顶设置黏滞阻尼器的横向阻尼体系减振效果较好, 能有效抑制波浪荷载引起的主梁横向位移; 在波浪-地震联合作用下, 比选出的横向阻尼体系依旧表现出很好的减振效果, 且阻尼器参数变化对减振性能的影响规律基本一致; 为兼具减振与减震功能, 推荐阻尼指数 α 取0.8, 阻尼常数 C 宜控制在4 000~6 000 kN·(m/s)⁻²内。研究成果可为跨海斜拉桥的横向减振设计提供参考。

关键词: 跨海斜拉桥; 波浪荷载; 地震动水力; 横向减振控制; 黏滞阻尼器

中图分类号: U448.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0650-08

Lateral Vibration Control of Offshore Cable-stayed Bridge under Combined Earthquake and Wave Loads

LEI Hujun¹, ZHU Guangping¹, SUN Yukun¹, LIN Shangshun¹, CHEN Ximao²

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

2. China Railway 24th Bureau Group Fujian Railway Construction Co., Ltd, Fuzhou 350013, China)

Abstract: To study the lateral damping control of a cross-sea cable-stayed bridge under the combined action of wave and earthquake, taking a cross-sea cable-stayed bridge with a main span of 400 m as the engineering background, a finite element model of the entire bridge considering the water-structure interaction under the joint wave-earthquake action was established. The wave load on the high-piled deck pile group of the bridge substructure was also considered, and the earthquake hydraulic additional mass was solved based on the radiation wave theory. On this basis, the lateral vibration reduction system was constructed by using viscous dampers, and the control effects of viscous dampers under wave action and wave-earthquake combined action were discussed respectively. The results show that the lateral damping system with a viscous damper at the top of the auxiliary pier has a better damping ef-

* 收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878173)、福建省自然科学基金项目(2020J01883)资助

作者简介: 雷虎军(1986—), 男, 教授, 博士。主要从事车-桥耦合振动及桥梁抗震研究。E-mail: leihujun@yeah.net

通讯作者: 孙昱坤(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事桥梁抗震与减隔震方面的研究。E-mail: aaronsyk@foxmail.com

fect under the action of waves alone, which can effectively restrain the lateral displacement of the main beam caused by wave load. Under the combined action of wave and earthquake, the selected lateral damping system still shows a good damping effect, and the influence of damper parameters on damping performance is basically the same. In order to have the function of both vibration damping and earthquake damping, it is recommended that the damping index α should be 0.8 and the damping constant C should be controlled within $4\ 000 - 6\ 000\ \text{kN}\cdot(\text{m/s})^{\circ}$. The research results can provide a reference for the lateral damping design of cross-sea cable-stayed bridges.

Keywords: offshore cable-stayed bridge; wave load; hydrodynamic force; lateral vibration control; viscous damper

0 引言

随着我国东部沿海地区经济的高速发展,大宗货物和人员的高效往来需求十分迫切,交通路网被持续加密,越来越多的跨海桥梁正在建设或规划中。斜拉桥凭借其跨越能力强、造型优美且横向刚度大,已成为跨海桥梁的首选。跨海桥梁面临强风、巨浪、急流、深水等恶劣海洋环境。对于跨海斜拉桥,在纵向可依靠体系优势(半漂浮体系或全漂浮体系)以及众多墩柱的串联削弱波浪荷载的影响。然而,对于跨海斜拉桥的横向,由于需考虑结构的静力和抗风设计,工程中一般采用全限位体系(墩-梁间设横向固定支座)来提高横向刚度,可能导致跨海斜拉桥在地震等极端荷载作用下,主梁遭遇的地震力大幅增加,影响桥上交通的安全性和舒适性^[1-2]。

目前众多学者主要针对地震作用下斜拉桥的横向动力响应控制开展了研究,例如在墩顶设置横向限位挡块^[3-4]、剪力卡榫^[5]、钢阻尼器^[6]等具有较大初始刚度的减震装置。然而,波浪荷载的频谱分布与地震完全不同,在波浪荷载单独作用下,上述横向减震体系与全限位体系无异,无法减小波浪荷载所导致的斜拉桥横向振动。此外,东南沿海地处环太平洋地震带,强震发生时,跨海斜拉桥的下部结构会同时受到波浪力和地震力的作用。X.Y.Zheng等^[7]的实验结果表明,波浪荷载对结构的动力响应有影响,在结构动力时程分析中需重视。因此,针对地震作用下跨海斜拉桥的横向振动控制,需考虑波浪-地震的联合作用。波浪-地震联合作用下的动力时程响应分析通常简化为静水中结构振动引发的地震动水力与水流中静止结构受到的波浪力二者叠加。对于大型结构的动力响应时程分析,地震

动水力和波浪力的计算方法宜采用半解析法^[8-9]。C.G.Liu等^[10]通过对斜拉桥桥塔在复杂海况下的缩尺模型试验,对地震动水力和波浪力的半解析计算方法进行了验证。基于此方法,学者们对处于水环境中的结构进行了动力时程响应分析^[11-12]。遗憾的是,目前针对波浪-地震联合作用下跨海斜拉桥横向减振控制的研究成果还较少,很难用于复杂的跨海斜拉桥设计。

以某跨海斜拉桥为工程背景,考虑高桩承台群桩基础遭遇的波浪力与地震动水力,比选出波浪荷载单独作用下合理的黏滞阻尼器布置方式并进行参数敏感性分析。探究了波浪-地震联合作用下黏滞阻尼约束体系的减振性能和阻尼器参数对减振性能的影响,并给出了既能减小波浪荷载所致结构振动又能满足波浪-地震联合作用时减振需求的阻尼器参数范围。研究成果可为多灾害(强震、波浪)作用下跨海斜拉桥的横向减振控制提供参考。

1 工程概况及模型建立

某主跨为400 m的双塔双索面组合梁斜拉桥,总体布置如图1(a)所示。其中,1#、8#为边墩,2#、3#、6#、7#为辅助墩,4#、5#为主塔;所有桥墩及主塔均采用高桩承台群桩基础,边墩及辅助墩采用12根直径为1.5 m的钻孔桩,主塔采用24根直径为2.8 m的钻孔桩,主塔群桩基础如图1(b)所示。主梁采用钢-混组合梁,主塔高169.3 m,塔下承台高为6 m,承台顶面为最高通航水位,也为本文计算水位,在冲刷线下3倍桩径处对桩固结处理。

采用OpenSees建立该桥的脊梁式动力分析模型,如图2所示。采用弹性梁单元模拟主梁和各墩/塔及高桩承台群桩基础,采用桁架单元模拟斜拉索。通过在墩-梁、塔-梁节点处建立约束(Equal-

DOF), 简化模拟桥梁支座。模型中, 主梁 2、3 方向的平动和绕 1 方向的转动被约束, 构成纵向半漂浮体系, 横向为全限位体系。特征值分析表明, 该全限位体系的 1 阶振型为主梁纵飘, 自振频率为 0.141 Hz。

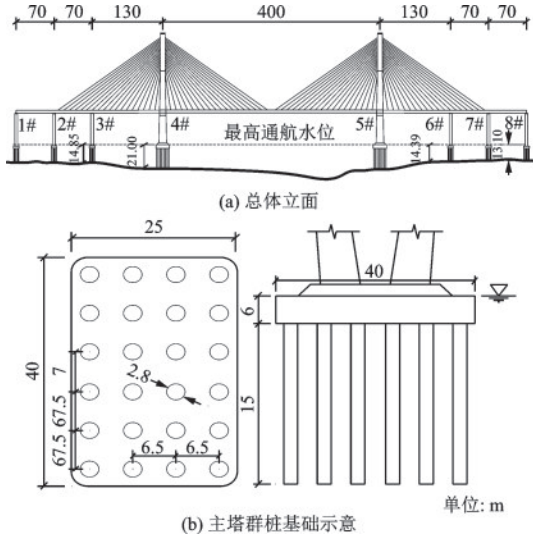


图 1 某主跨 400 m 斜拉桥

Fig.1 A 400 m long main span cable-stayed bridge

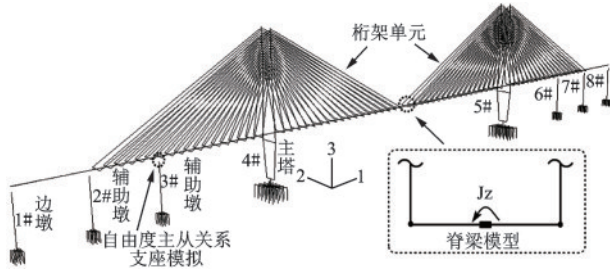


图 2 斜拉桥 OpenSees 模型

Fig.2 OpenSees model of cable-stayed bridge

2 波浪-地震联合作用分析方法

2.1 波浪力

波浪荷载分别作用于承台与桩基两部分。根据我国《港口与航道水文规范》^[13](JTS 145-2015)(以下简称《水文规范》), 对于大尺度的矩形承台, 其截面垂直于波向的宽度与海浪波长之比大于 0.2, 可通过式(1)计算后以集中力的形式施加于承台面处节点来模拟:

$$P_{cap} = 0.355\gamma bHL \left(\frac{\pi}{8} th \frac{2\pi d}{L} \right) \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

对于小尺度圆截面桩基, 依照《水文规范》, 波

浪对单位长度桩基的作用力可按计算公式(2)~(6)计算:

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{ch \frac{2\pi z}{L}}{sh \frac{2\pi d}{L}} \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

$$P_D = 0.5 \frac{\gamma}{g} C_D Du |u| \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{ch \frac{2\pi z}{L}}{sh \frac{2\pi d}{L}} \sin(kx - \omega t) \quad (4)$$

$$P_I = \frac{\gamma}{g} C_M A \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

$$P_{pile} = (P_D + P_I) \times K \quad (6)$$

式中, P_{cap} 为承台水平波浪力; γ 为水的重度, 取 9.8 kN/m³; P_D 为波浪力的速度分量; P_I 为波浪力的惯性分量; P_{pile} 为群桩单位长度的波浪力, 群桩系数 K 见表 1; u 为波浪中水质点运动的水平速度; C_D 为速度力系数, 取 1.2; C_M 为惯性力系数, 取 2.0, 其余符号含义详见《水文规范》。

表 1 群桩系数 K

Table 1 Pile group effect coefficients K

l/D	2	3	4
K	1.5	1.2	1.1

根据《水文规范》中桥址海域的重现期波浪要素参考值, 各重现期设计波浪要素见表 2。

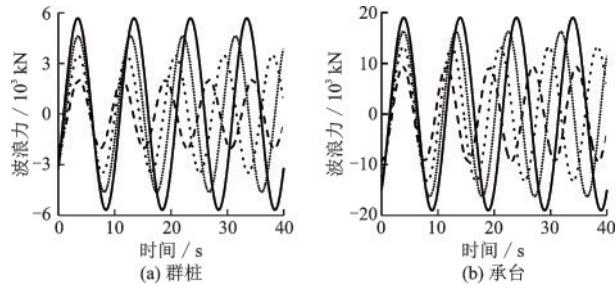
表 2 不同重现期波浪要素

Table 2 Wave characteristic of different return periods

重现期/a	波高 H/m	周期 T/s	波长 L/m
10	4.292	7.705	70.059
100	6.557	10.005	118.127

群桩与承台波浪荷载在计算时均考虑波剖面效应。根据各重现期波浪要素即可计算边墩、辅助墩及主塔群桩基础的波浪荷载, 主塔基础的波浪力时程示意如图 3 所示。

各桩在不同水深处的波浪力时程同样以集中力形式施加于各对应高度节点处。桥梁下部结构波浪荷载的加载方式如图 4 所示, 波浪入射方向为横桥向, 波浪力作为周期性集中荷载施加在桥梁下部。



注: 重现期: ---10 a ·····25 a ———50 a ——100 a

图3 主塔基础波浪力时程曲线

Fig.3 Time-history curve of wave force on main tower foundation

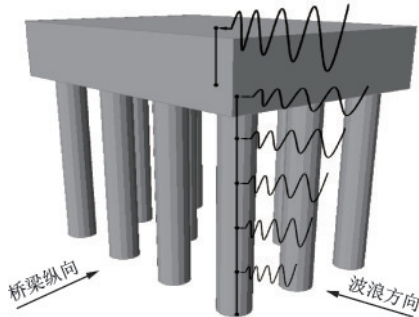


图4 波浪力加载示意图

Fig.4 Presentation drawing of wave force loading

2.2 地震动水力

先不考虑波浪作用,假设底部柱体固定于理想不可压缩水体中,在柱底输入水平地震波,则其运动方程为:

$$M_s \ddot{u}_s + C_s \dot{u}_s + K_s u_s = -M_s \ddot{u}_g - f_w \quad (7)$$

式中, M_s 为结构的质量矩阵、 C_s 为阻尼矩阵、 K_s 为刚度矩阵; \ddot{u}_s 表示结构的加速度列向量、 \dot{u}_s 表示速度、 u_s 表示位移; \ddot{u}_g 表示地面加速度; f_w 表示地震动水力。

圆柱体在深度 z 处的精确动水力解为^[14]:

$$f_w = M_w (\ddot{u}_s + \ddot{u}_g) \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} M_w = \frac{2\rho\pi R^2}{H} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{-K_1(R_0)}{R_0 K_1'(R_0)} W \cos(z_0) (\cos(z_0)) \\ W = \int_0^H N^T N dz \end{cases} \quad (9)$$

式中, M_w 为动水力等效质量矩阵; R 为柱体半径, $R_0 = \alpha R$; z 为计算点相对桩底高度, $z_0 = \alpha z$; $\alpha = \pi j/d - \pi/2d$, $j = 1, 2, 3, \dots$; d 为液面高度; N 为单元

的形函数; T 表示转置计算。

公式(9)中, M_w 为水体附加质量的精确解, P.G.Wang等^[15]利用刚性柱法简化精确解 M_w , 简化拟合方程为:

$$m_w \approx \rho\pi R^2 d_1 \left\{ 1 - \frac{z}{H} \exp \left[d_2 \left(\frac{z}{H} - 1 \right) \right] \right\} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} d_1 = 0.918e^{-0.468L} + 0.155e^{0.015L} \\ d_2 = 1.248L^{-1.1194} + 2.156 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $L = 2R/H$, $0.2 \leq L \leq 2$ 。

赖伟^[16]通过拟合试验数据得到不同截面的等效换算系数 K :

$$K = 0.94732 + \frac{2.59648}{1 + \left(\frac{D/B}{0.09516} \right)^{0.54638}} \quad (12)$$

式中, D 为矩形截面正面迎击水体的宽度; B 为 D 邻边的宽度, $0.1 \leq D/B \leq 10$ 。

根据公式(10)~(12)即可计算矩形承台上的动水力附加质量。

通过假定不同水深处, 柱-水相互作用相同, W.L.Yang等^[17]计算了单根桩上的地震动水力, 并进一步探究了群桩结构中半径为 r 的单桩上动水力附加质量系数为^[18]:

$$\begin{cases} h_x^i = \sum_{j=1}^n h_x^j (j \neq i) \\ h_y^i = \sum_{j=1}^n h_y^j (j \neq i) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $h_x = -2\cos(2\theta_0)/c^2$; $h_y = -2\sin(2\theta_0)/c^2$; $c = L/r$ 为两桩中心距离; θ_0 为两桩中心线与纵桥向的夹角。

通过式(13)、(14)即可推导群桩中任意单桩上的动水力计算公式:

$$\begin{cases} F_x^C = -m\dot{u}(1 + h_x^i) \\ F_y^C = -m\dot{u}h_y^i \end{cases} \quad (14)$$

2.3 波浪-地震联合作用

根据公式(7)、公式(8)及公式(9)~(14)即可得到考虑地震动水力作用的结构运动方程:

$$(M_s + M_w) \ddot{u}_s + C_s \dot{u}_s + K_s u_s = -(M_s + M_w) \ddot{u}_g \quad (15)$$

在此基础上, 将2.1节求得的波浪力 P 带入桥梁结构动力方程(15), 可得:

$$(M_s + M_w)\ddot{u}_s + C_s\dot{u}_s + K_s u_s = -(M_s + M_w)\ddot{u}_g + P \quad (16)$$

由此便可对桥梁在波浪-地震联合作用下的动力响应进行分析。

3 波浪单独作用结果分析

3.1 横向滑动体系与全限位体系

首先考虑重现期为100a的波浪荷载单独作用,对墩梁横向滑动体系(墩、梁间设横向滑动支座)和全限位体系进行动力时程响应分析。表3对比了不同体系下具有代表性的边墩(1#墩)和辅助墩(3#墩)的内力响应幅值、各支座滑动位移幅值以及梁端、跨中位移幅值。

表3 不同约束体系波浪荷载响应幅值
Table 3 Wave load response amplitude of different restraint systems

位置	响应指标	横向滑动	全限位
1#墩	墩底弯矩/(kN·m)	8.71×10^4	7.15×10^4
	墩底剪力/kN	9.95×10^3	1.00×10^4
	支座滑动位移/mm	27.5	0.00
3#墩	墩底弯矩/(kN·m)	8.64×10^4	6.52×10^4
	墩底剪力/kN	1.01×10^4	1.07×10^4
	支座滑动位移/mm	19.6	0.00
梁端	横向位移/mm	11.3	17.8
跨中	横向位移/mm	13.2	13.3

由表3可知,采用墩梁横向滑动体系后,1#墩和3#墩的墩底弯矩和支座滑动位移会显著增大,其中1#墩和3#墩的墩底弯矩分别增大了21.8%和32.5%;而对于全限位体系,支座滑动位移均为0,但波浪荷载传递给桥墩的剪力会增大,1#墩和3#墩墩底剪力分别增大了0.5%和5.9%。对于墩梁横向滑动体系,桥梁的横向刚度相比全限位体系低,可能无法满足正常使用荷载及风荷载对桥梁横向刚度的需求,而对于墩梁全限位体系,又会导致主梁的横向位移增加,可能影响桥上交通的运行平稳性。由此说明,横向滑动体系与全限位体系都有其各自的问题,有必要探究一种既能减振又能减震的墩-梁横向约束体系。

3.2 黏滞阻尼器约束体系

比较两种黏滞阻尼器布置方式:方式一:在两个边墩墩-梁处设置2个阻尼器,共4个;方式二:在

全桥四个辅助墩墩-梁处设置2个阻尼器,共8个。黏滞阻尼器采用OpenSees中的零长度单元(Zero-length element)及ViscousDamper材料模拟。

通过参数敏感性分析选择阻尼器的合理参数。通过引入响应比例指标,即以黏滞阻尼器约束体系与全限位体系二者在波浪荷载下的响应幅值之比,量化减振效果。其比值越小表明减振效果越好,比值大于1.0则表示产生不利影响。图5~7分别为阻尼器的布置方式和阻尼器参数对主梁梁端位移、主梁跨中位移和1#墩墩底弯矩在重现期为100a波浪荷载作用下的响应比例。

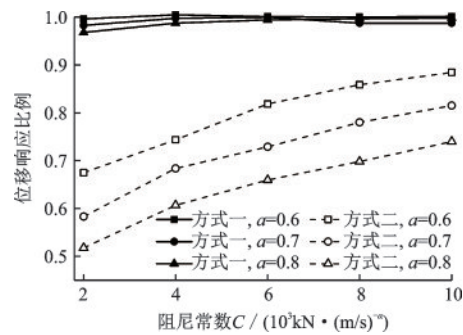


图5 跨中横向位移响应比例

Fig.5 Response ratio of mid-span lateral displacement

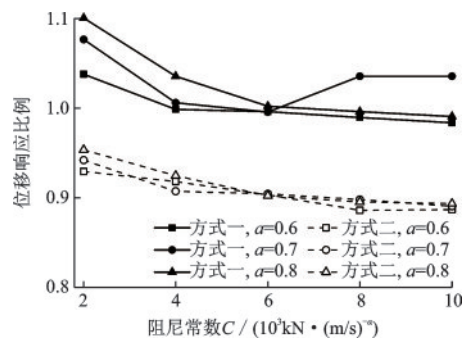


图6 梁端横向位移响应比例

Fig.6 Response ratio of girder end lateral displacement

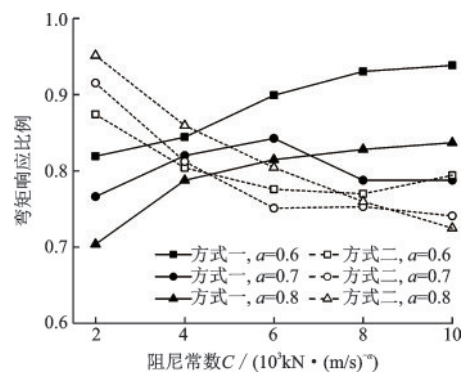


图7 1#墩墩底横向弯矩响应比例

Fig.7 Response ratio of lateral bending moment of pier 1# bottom

从图5~6中可以看出,两种不同的黏滞阻尼器布置方式对桥梁横向位移的控制效果差异显著。仅在边墩墩柱上设置阻尼器(方式一)对跨中横向位移的控制效果十分有限,且阻尼器上方主梁的横向位移幅值略微提高;仅在辅助墩墩柱上设置阻尼器(方式二)时,随着阻尼常数 C 的增大,阻尼器对跨中、梁端二者的横向位移控制效果趋势也产生差异化。跨中位移响应比例随着 C 值的增大而增大,梁端位移响应比例反之减小。图5中,阻尼器布置方式二对跨中横向位移控制表现最佳,其减振效果对阻尼指数 α 也较为敏感,随 α 值的增大,效果越显著。通过合理选择阻尼器参数能将跨中位移幅值控制为全限位体系跨中横向位移的50%左右。

在墩底横向弯矩控制方面,如图7所示。两种布置阻尼器方式随阻尼常数 C 变化二者变化趋势亦存在明显差异,但响应比例幅值都在0.7~0.95内,可以看出两种布置方式对墩底横向弯矩的平均减振率为20%。总的来说,采取黏滞阻尼器的横向减振体系,可将阻尼器布置在辅助墩墩柱上,阻尼指数 α 宜取0.8,阻尼常数 C 范围宜控制在4 000~6 000 $\text{kN}\cdot(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ 内。值得说明的是,当阻尼常数取2000 $\text{kN}\cdot(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ 时,墩底弯矩和跨中横向位移的减振效果更好,但墩底剪力会显著增大。为兼顾墩底弯矩、跨中横向位移以及墩底剪力的减震效果,估推荐阻尼常数应在4 000~6 000 $\text{kN}\cdot(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ 范围内。

4 波浪-地震联合作用结果分析

4.1 地震动参数

根据《铁路工程抗震设计规范》^[19](GB 50111—2006)与文献[20]对设计反应谱进行修正后选取地震波,桥址处场地特征周期 T_g 为0.45 s,设计地震加速度放大系数 β 的周期范围扩大到10 s, β 与结构自振周期 T 的关系如下式所示:

$$\beta(T) = \begin{cases} 1 + \frac{T}{0.1} \times 1.25 & 0 < T < 0.1 \text{ s} \\ 2.25 & 0.1 \text{ s} \leq T < T_g \\ 2.25 \left(\frac{T_g}{T}\right) T_g & T_g \leq T < 10 \text{ s} \end{cases} \quad (17)$$

依据修正后的反应谱,在PEER数据库中筛选了4条天然地震波并人工模拟了1条地震波,其加速度反应谱如图8所示。将上述5条地震波加速度

时程曲线规格化处理,其PGA分别调整为0.05g、0.15g和0.32g并沿桥横向输入,以满足规范中多遇地震、设计地震及罕遇地震三级设防的要求。

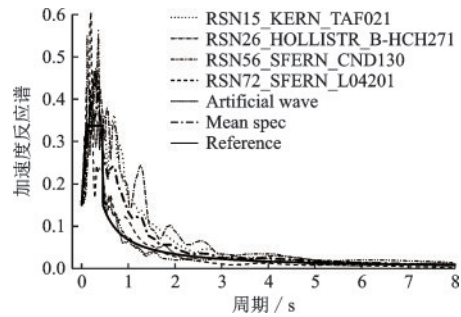


图8 反应谱对比

Fig.8 Comparison of response spectrum

4.2 结果分析

为探究前文比选出的横向减振方式在波浪-地震联合作用下的减振效果,即仅在桥梁辅助墩墩顶布置黏滞阻尼器,对该桥进行非线性动力时程分析。考虑到重现期100 a的波浪荷载与地震同时发生的概率较低,仅将重现期为10 a的波浪荷载与5条地震波组合成5组联合荷载并沿横桥向输入,计算PGA分别为0.05g、0.15g和0.32g时不同阻尼器参数桥梁的梁端与跨中横向位移及3#辅助墩墩底内力,并求取它们在5组联合荷载激励下响应幅值的平均值。仍采用上文的响应比例指标评价减振效果。上述5组联合荷载作用下,黏滞阻尼器参数对该跨海斜拉桥主要动力响应的影响如图9和图10所示。

三种地震设防水准下,黏滞阻尼器参数对主梁横向位移响应的影响如图9所示。在波浪-地震联合作用下,相较于全限位体系,通过设置合适的黏滞阻尼器参数,主梁跨中横向位移响应减少将近50%,说明黏滞阻尼器对斜拉桥跨中位移响应控制十分有效。总体来说,黏滞阻尼器对跨中横向位移的减振效果均随阻尼指数 α 的增大而提高,随阻尼常数 C 的增加而下降,呈现单调变化的趋势。值得注意的是,随着地震设防水准的提高,阻尼指数 α 对减振效率影响渐渐减弱,此时宜调整阻尼常数 C 的大小来接近目标主梁跨中横向位移减振率。但反观其对梁端位移的控制效果,与其对跨中位移的控制产生明显差异。从图中可以看出,在三种设防水准下,不同的阻尼器参数组合对梁端位移的控制贡

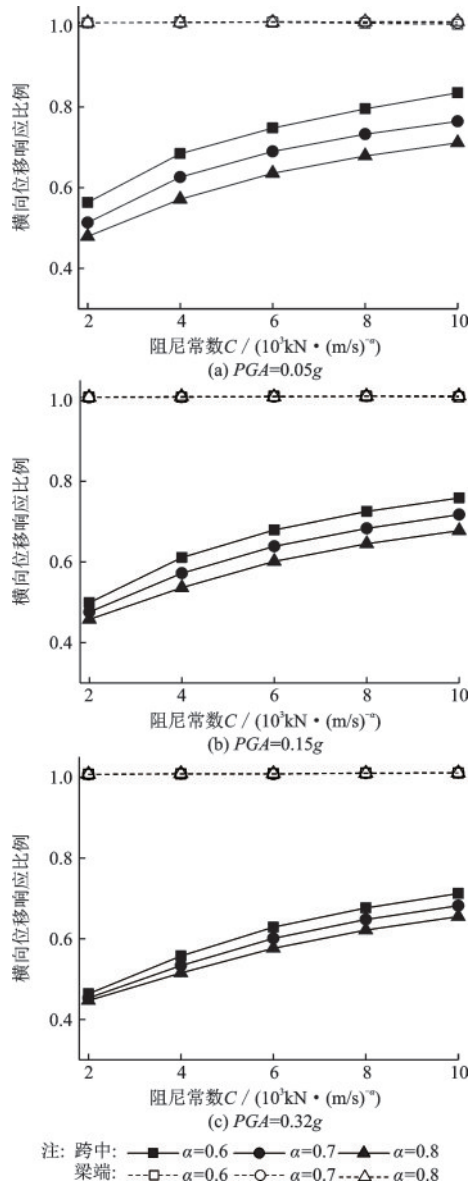


图9 主梁横向位移响应比例

献不大,这与波浪荷载单独作用时其对梁端位移的控制表现较为接近,可见该布置方式对波浪荷载单独作用下与波浪-地震联合作用下梁端横向位移的控制能力都十分有限。

在墩底横向内力响应控制方面,如图10所示。黏滞阻尼器对3#辅助墩墩底内力控制能力存在明显差异:三种地震设防水准下,均可将墩底横向弯矩响应减至近原结构体系的一半,但对墩底横向剪力,可以看出其响应比例随着阻尼常数C的增加略微呈下降趋势,总体在各种阻尼器参数组合中均稍大于1,这表明设置阻尼器并不能减小墩底剪力,但好在只是使其有略微提高。值得关注的是,黏滞阻尼器对横向弯矩的控制能力随阻尼器参数的变化

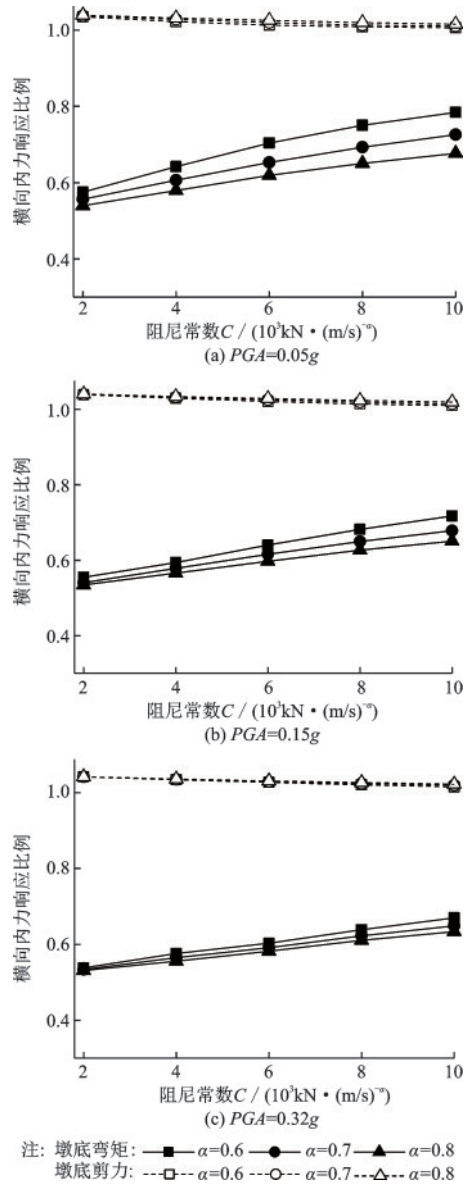


图10 3#墩墩底横向内力响应比例

规律与其对横向位移控制能力随阻尼器参数的变化规律基本一致,即二者在不同设防水准下结构内力减振效率与阻尼器参数的关系呈现单调趋势。这表明对于跨海斜拉桥的横向减振控制设计,当考虑波浪-地震联合作用时可调节黏滞阻尼器参数达到主梁位移的目标减振率,不必担心阻尼器对墩底内力产生过大的不利影响。

5 结论

分析了波浪-地震联合作用下黏滞阻尼器的不同设计参数对跨海斜拉桥横向减振效果的影响,主

要结论如下:

(1)采用横向滑动体系与全限位体系的跨海斜拉桥在波浪荷载作用下,主梁各部产生一定幅度横向位移,而仅在辅助墩墩顶设置黏滞阻尼器的横向阻尼体系能有效的抑制波浪荷载带来的振动;

(2)在波浪-地震联合作用下,横向阻尼体系依旧能表现出很好的减振效果,做到了既可减小波浪荷载导致的振动,又能减小波浪-地震联合荷载导致的振动,且阻尼器参数变化对其减振性能的影响规律基本一致;

(3)在对跨海斜拉桥进行横向约束体系设计时,推荐使用仅在辅助墩墩顶处设置黏滞阻尼器的横向阻尼约束体系。为兼具减振与减震功能,阻尼指数 α 宜取0.8,阻尼常数 C 的范围宜控制在 $4\ 000\sim 6\ 000\ \text{kN}\cdot(\text{m}/\text{s})^{-\alpha}$ 范围内。

参考文献:

- [1] 房忱,李永乐,向活跃.波浪作用下跨海大桥列车走行性能研究[J].西南交通大学学报,2017,52(6):1068-1074.
Fang C, Li Y L, Xiang H Y. Study of train running performance under wave load for cross-sea bridge [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1068-1074. (in Chinese)
- [2] 崔圣爱,郭晨,张猛,等.风-浪作用下跨海大桥列车-桥梁系统耦合振动仿真研究[J].铁道学报,2021,43(7):138-143.
Cui S A, Guo C, Zhang M, et al. Coupled vibration of train-bridge system of cross-sea bridge subject to wind and wave [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(7): 138-143. (in Chinese)
- [3] 燕斌,龚纬.斜拉桥过渡墩处合理横向约束体系研究[J].铁道工程学报,2010,27(4):44-48.
Yan B, Gong W. Study on the reasonable transverse constraint system for transitional pier of cable-stayed bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(4): 44-48. (in Chinese)
- [4] 何雄君,张晶,范诚,等.兰州西固黄河大桥横向抗震体系研究[J].桥梁建设,2018,48(1):65-70.
He X J, Zhang J, Fan C, et al. Study of transverse seismic system for Xigu Huanghe River Bridge in Lanzhou [J]. Bridge Construction, 2018, 48(1): 65-70. (in Chinese)
- [5] 阮怀圣,徐恭义,张燕飞,等.武汉青山长江公路大桥主桥结构横向约束体系设计[J].桥梁建设,2020,50(增1):75-81.
Ruan H S, Xu G Y, Zhang Y F, et al. Transverse restraint system design for main bridge structure of Qingshan Changjiang River Highway Bridge in Wuhan [J]. Bridge Construction, 2020, 50(Sup1): 75-81. (in Chinese)
- [6] 周连绪,叶爱君.千米级斜拉桥横向减震体系振动台试验[J].中国公路学报,2019,32(9):71-79.
Zhou L X, Ye A J. Experiment on transverse isolation system for kilometer-span cable-stayed bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(9): 71-79. (in Chinese)
- [7] Zheng X Y, Li H B, Rong W D, et al. Joint earthquake and wave action on the monopile wind turbine foundation: An experimental study [J]. Marine Structures, 2015, 44(4): 125-141.
- [8] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1974, 3(1): 33-49.
- [9] Ozdemir Z, Souli M, Fahjan Y M. Application of nonlinear fluid-structure interaction methods to seismic analysis of anchored and unanchored tanks [J]. Engineering Structures, 2010, 32(2): 409-423.
- [10] Liu C G, Zhang S B, Hao E T. Joint earthquake, wave and current action on the pile group cable-stayed bridge tower foundation: An experimental study [J]. Applied Ocean Research, 2017, 63(1): 157-169.
- [11] 李悦,宋波.动水对斜拉桥结构动力响应影响研究[J].土木工程学报,2010,43(12):94-99.
Li Y, Song B. Study of the effect of hydrodynamic force on cable-stayed bridges under earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(12): 94-99. (in Chinese)
- [12] 李忠献,黄信.地震和波浪联合作用下深水桥梁的动力响应[J].土木工程学报,2012,45(11):134-140.
Li Z X, Huang X. Dynamic responses of bridges in deep water under combined earthquake and wave actions [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 134-140. (in Chinese)
- [13] 港口与航道水文规范:JTS 145—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [14] Maheri M R, Severn R T. Experimental added-mass in modal vibration of cylindrical structures [J]. Engineering Structures, 1992, 14(3): 163-175.

(本文编辑:周小潭)

(下转第673页)