

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202307172024081986

文章编号:1674-599X(2024)04-0076-09

引用格式:赖珍康,薛小强,吕龙,等.行波效应对近断层高低塔斜拉桥地震响应的影响[J].交通科学与工程,2024,40(4):76-84.

Citation: LAI Zhenkang, XUE Xiaoqiang, LYU Long, et al. Influence of traveling wave effect on seismic response of near-fault cable-stayed bridge with high-low towers[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 76-84.

行波效应对近断层高低塔斜拉桥地震响应的影响

赖珍康,薛小强,吕龙,袁宇航

(成都理工大学 环境与土木工程学院,四川 成都 610059)

摘要:以一座高低塔斜拉桥为研究对象,采用大质量法模拟非一致激励进行地震响应分析。研究不同纵向约束体系下考虑行波效应的脉冲型近断层高低塔斜拉桥的地震响应;探讨不同地震动类型与地震动传播方向下高低塔斜拉桥地震响应受行波效应的影响规律;分析不同脉冲周期地震动作用下斜拉桥地震响应随脉冲周期的变化规律。研究表明:相比于纵向阻尼体系与半漂浮体系斜拉桥,固结体系斜拉桥地震响应对视波速的变化更敏感;不同地震动输入方向下行波效应对斜拉桥地震响应影响规律有所不同;当视波速较小时,视波速对高塔和低塔内力差异影响较大;纵向阻尼体系斜拉桥地震响应随着脉冲周期的增大整体上呈先增大后减小的趋势。塔底内力随视波速的变化规律受脉冲周期的影响显著,当视波速较大,且脉冲周期与斜拉桥纵向一阶周期接近时,斜拉桥地震响应达到最大值。

关键词:近断层;行波效应;约束体系;大质量法

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

Influence of traveling wave effect on seismic response of near-fault cable-stayed bridge with high-low towers

LAI Zhenkang, XUE Xiaoqiang, LYU Long, YUAN Yuhang

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Taking a cable-stayed bridge with high-low towers as the research object, the large mass method is employed to simulate non-uniform excitation for seismic response analysis. The seismic response of cable-stayed bridge with high-low towers under pulse-type near-fault earthquake considering traveling wave effect under different longitudinal constraint systems was studied. The effect of traveling wave on seismic response of cable-stayed bridge with high-low towers under different ground motion types and ground motion propagation directions was discussed. The variation of seismic response of cable-stayed bridge with pulse period under different pulse period ground motion was analyzed. Results show that the seismic response of cable-stayed bridge with consolidation system is more sensitive to the change of apparent wave velocity than that of cable-stayed bridge with longitudinal damping system and semi-floating system. The influence of traveling wave effect in different seismic input directions on the seismic response of cable-stayed bridges differs. When the apparent wave velocity is low, the difference of internal force between high tower and low tower is greatly influenced by the apparent wave velocity. The seismic response of cable-stayed bridge with

收稿日期:2023-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108113)

通信作者:吕龙(1986—),男,副教授,主要从事桥梁抗震和结构动力学方面的研究工作。E-mail:lvlongs@126.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

longitudinal damping system increases first and then decreases with the increase of pulse period. The variation of the internal force at the bottom of the tower with the apparent wave velocity is significantly affected by the pulse period. When the apparent wave velocity is high and the pulse period is close to the longitudinal first-order period of the cable-stayed bridge, the seismic response of cable-stayed bridge reaches the maximum.

Key words: near-fault; traveling wave effect; restraint system; large mass method

近年来,我国斜拉桥建设数量不断增多,而我国又是一个地震频发的国家,桥梁建设场地接近断层地区难以避免。地震动在介质中的传播速度有限,结构下部各支撑点受到的地震激励的先后顺序不同,受到的地震动存在相位差,故行波效应对斜拉桥地震响应的影响不可忽视^[1-4]。范立础等^[5]基于平稳随机地震动场理论,研究了行波效应对大跨斜拉桥的影响,发现在低视波速时大跨度结构地震响应呈振荡变化。曾玉华^[6]采用相对运动法分析了行波效应对斜拉桥关键构件地震响应的影响,发现在低视波速时斜拉桥索力峰值增加较大。王再荣等^[7]对多点激励的振动方程进行了简化,用拟静力法对一座主跨为1 400 m的斜拉桥进行了分析,发现当视波速为1 000~3 000 m/s时,长周期地震动的行波效应十分显著。许智强等^[8]研究了行波效应对一结合梁斜拉桥地震响应的影响,发现行波效应总体上减小了主梁与塔顶的纵向位移。一些学者^[9-10]以非对称斜拉桥为研究对象进行了研究,结果表明非对称桥梁结构的地震响应随视波速的变化规律受地震动输入方向的影响显著。许莉等^[11]以一斜拉桥为研究对象,研究了在不同视波速下桥梁结构的地震响应,结果表明,左右塔地震响应受非一致激励的影响并不相同。方圆等^[12]以一多塔斜拉桥为对象,研究了不同纵向约束体系下行波效应对桥梁地震响应的影响,发现塔梁纵向固定会显著增大中塔地震响应。GUO等^[13]以一典型斜拉桥为研究对象,建立缩尺模型进行地震响应分析,结果表明,

在一定视波速的近场地震动作用下,黏滞阻尼器的减震效果比远场地震动作用下的更差。

以上文献主要侧重于研究不同视波速下斜拉桥地震响应的特点,而对近断层非对称斜拉桥的地震响应影响研究较少。本文以一非对称斜拉桥为对象,利用大质量法^[14]模拟非一致激励,分析在不同纵向约束体系、地震动传播方向、地震动类型和脉冲周期下行波效应对斜拉桥地震响应的影响。

1 工程概况及动力计算模型

1.1 工程概况

以一非对称斜拉桥为工程背景,其跨径布置为(65+123+318+138) m。主梁为混凝土截面,梁高2.6 m,宽27.5 m。主塔均为“H”形,采用高低塔布置。高塔和低塔塔高分别为115.0 m和92.0 m,高塔塔侧设22对索,低塔塔侧设16对索,斜拉索标准间距为8.0 m,桥址场地类别为Ⅱ类。桥面为双向四车道,拉索区宽1.2 m。主梁断面示意图如图1所示,斜拉桥立面图如图2所示。

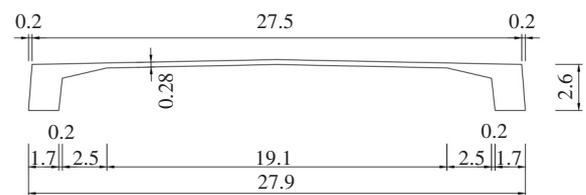


图1 主梁断面示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of main girder section (unit: m)

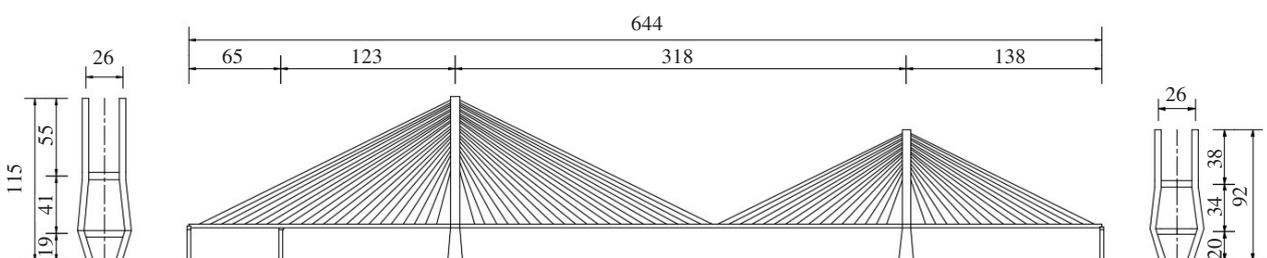


图2 斜拉桥立面图(单位:m)

Fig. 2 Elevation view of the cable-stayed bridge (unit: m)

1.2 动力计算模型

本文采用 Midas Civil 软件建立斜拉桥模型,斜拉索使用桁架单元模拟,主梁、桥塔、辅助墩均采用空间梁单元模拟,斜拉索与主梁刚接,不考虑桩土效应,承台底固结。分别建立半漂浮体系、纵向阻尼体系和固结体系斜拉桥的结构动力模型。其中,半漂浮体系斜拉桥支座顺桥向约束全部放开;阻尼体系于半漂浮体系的基础上在各塔梁连接处分别加装2个黏滞阻尼器(共4个),阻尼器采用 Maxwell 模型模拟。固结体系斜拉桥将塔梁连接处固结。桥梁动力有限元模型如图3所示(图中只给出了纵向阻尼体系模型)。

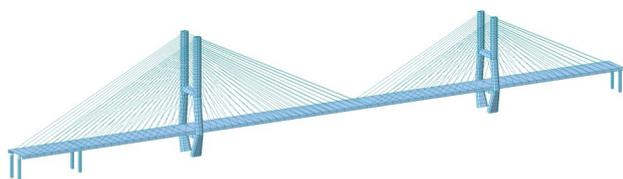


图3 桥梁动力有限元模型

Fig. 3 Finite element model of bridge dynamics

1.3 动力特性分析

采用多重 Ritz 向量法计算半漂浮体系与固结体系斜拉桥的动力特性,结果见表1。由表1可知,半漂浮体系斜拉桥的纵向自振周期明显比固结体系斜拉桥的大。半漂浮体系斜拉桥一阶振型为主梁纵漂,二阶振型为主梁对称竖弯,三阶振型为主梁及桥塔横向反对称振动。由一阶振型可知半漂浮体系斜拉桥纵向刚度低,结构较柔^[15]。

表1 结构自振特性

Table 1 Structural natural vibration characteristics

纵向模式 阶数	周期/s	
	半漂浮体系	固结体系
一	6.991	2.633
二	2.783	1.807
三	1.896	1.493

2 地震动输入

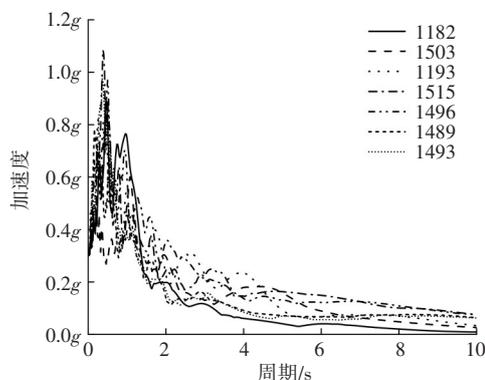
近场脉冲型地震动的选择原则为断层距小于15 km,且场地类别为 II 类;远场地震动的选择原则为断层距大于 50 km,且场地类别为 II 类。根据上述原则,从 PEER 地震动数据库中选取 CHI-CHI 地震的近断层脉冲地震动和远场地震动各7条。将所选地震动的峰值加速度都调整为 0.3g(g 为重力加速度)。地震动基本信息见表2。

表2 地震动基本信息

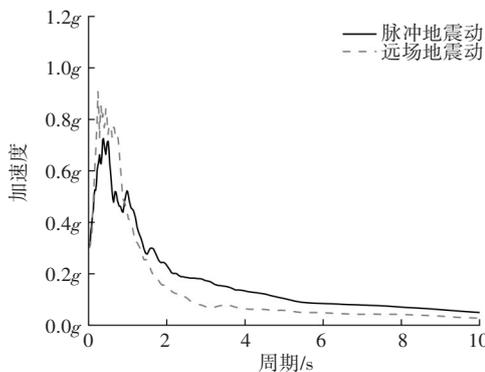
Table 2 Basic information of ground motions

地震动类别	编号	脉冲周期/s	断层距/km	峰值加速度	调幅系数
脉冲地震动	1182	2.570	9.76	0.359g	0.836
	1503	5.740	0.57	0.790g	0.380
	1193	6.650	9.62	0.282g	1.065
	1515	8.099	5.16	0.225g	1.332
	1496	8.939	10.48	0.156g	1.919
	1489	10.220	3.76	0.279g	1.076
	1493	13.118	5.95	0.229g	1.308
远场地震动	1190		50.53	0.066g	4.569
	1274		53.79	0.064g	4.678
	1276		51.62	0.123g	2.444
	1346		73.22	0.073g	4.089
	1348		72.32	0.073g	4.109
	1349		70.35	0.076g	3.956
	1427		89.91	0.067g	4.448

所选脉冲地震动和远场地震动的加速度反应谱如图4所示。由图4(a)可知,当周期较大时,加速度随脉冲周期的增大整体上呈减小趋势。由图4(b)可知,当周期小于1 s时,远场地震动加速度平均反应谱值大于脉冲地震动加速度平均反应谱值,当周期大于1 s时,刚好相反。



(a) 脉冲地震动加速度反应谱



(b) 地震动加速度平均反应谱

图4 地震动加速度反应谱

Fig. 4 Ground motion acceleration response spectrum

3 行波效应对桥梁地震响应的影响

本文视波速分别取 400、600、800、1 000、2 000、4 000、6 000、8 000 m/s,并沿纵桥向输入地震动。输入方法采用大质量法,即在地基节点上附加大质量块,并去掉地震动激励方向上的约束,将加速度时程转化为力时程后再进行输入。分析不同视波速下塔底内力的变化与梁端位移的变化,研究行波效应对斜拉桥地震响应的影响。

3.1 结构纵向约束体系

为研究斜拉桥纵向约束体系对斜拉桥行波效应的影响,本文分析了在近断层脉冲地震动作用下固结体系、半漂浮体系与纵向阻尼体系斜拉桥地震响应随视波速的变化规律,计算结果用不同视波速下结构地震响应与一致激励下地震响应的比值表示,结果如图 5~6 所示。其中,阻尼指数 α 取 0.3,阻尼系数取 $7\,000\text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 。

由图 5 可知,在脉冲地震动作用下,半漂浮体系斜拉桥梁端位移随着视波速的增大变化不显著;纵向阻尼体系斜拉桥梁端位移开始随着视波速的增大而大幅减小,但在视波速达到 6 000 m/s 后逐渐平稳;固结体系斜拉桥梁端位移随着视波速的增大先减小后增大。这表明纵向阻尼体系与固结体系斜拉桥梁端位移对视波速的变化较敏感,而半漂浮体系斜拉桥梁端位移受视波速的影响不显著。

由图 6(a)可知,在脉冲地震动作用下,随着视波速的增大,纵向阻尼体系斜拉桥高塔塔底的弯矩逐渐减小,当视波速达到 2 000 m/s 后趋近于一致激

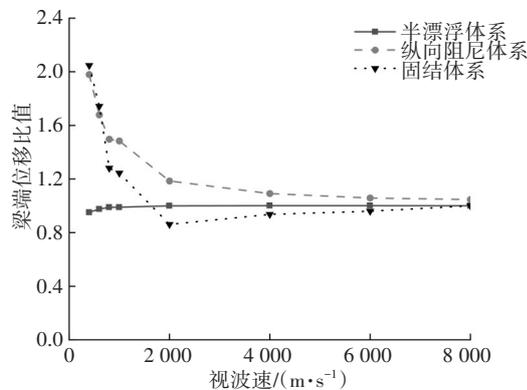
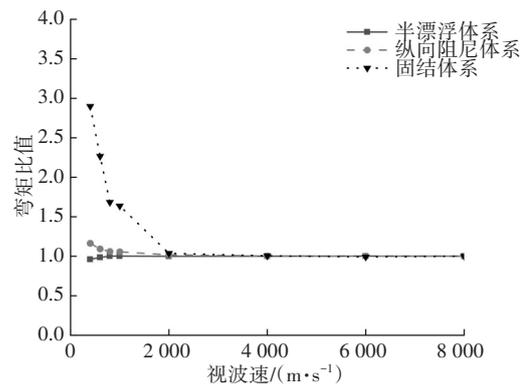
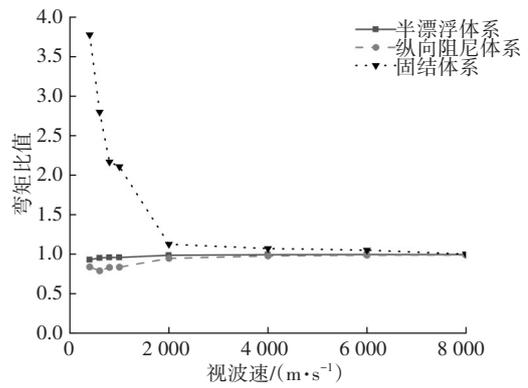


图 5 不同纵向约束体系下斜拉桥梁端位移比值随视波速的变化

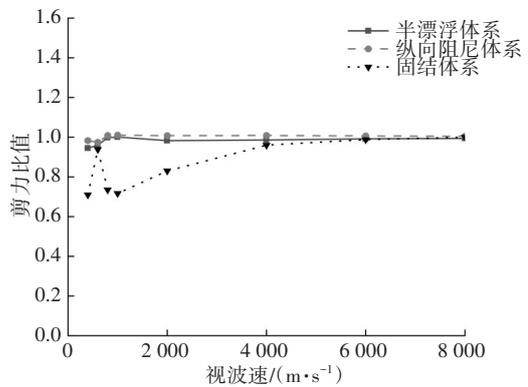
Fig. 5 Variation of girder-end displacement ratio of cable-stayed bridge with apparent wave velocity for different longitudinal restraint systems



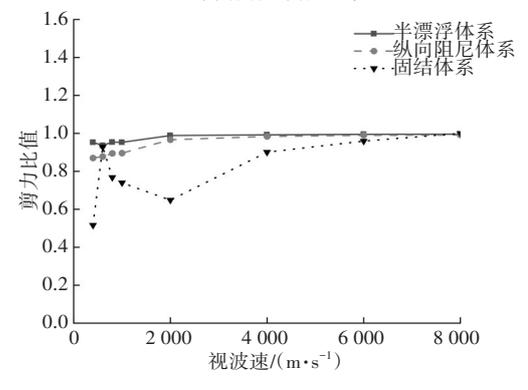
(a) 高塔塔底弯矩比值



(b) 低塔塔底弯矩比值



(c) 高塔塔底剪力比值



(d) 低塔塔底剪力比值

图 6 不同纵向约束体系下斜拉桥塔底内力比值随视波速的变化

Fig. 6 Variation of internal force ratio at tower bottom of cable-stayed bridge with apparent wave velocity for different longitudinal restraint systems

励下的结果;半漂浮体系斜拉桥高塔塔底弯矩对视波速的变化不敏感;固结体系斜拉桥高塔塔底弯矩随着视波速的增大而减小,当视波速大于 2 000 m/s 后达到稳定。由图 6(b)可知,在脉冲地震动作用下,纵向阻尼体系与半漂浮体系斜拉桥低塔塔底的弯矩受视波速变化的影响较小;固结体系斜拉桥低塔塔底的弯矩随着视波速的增大而逐渐减小,在低视波速时下降较快。由图 6(c)~6(d)可知,在脉冲地震动作用下,纵向阻尼体系与半漂浮体系斜拉桥高塔塔底的剪力随着视波速的增大先减小后增大;固结体系斜拉桥高塔塔底的剪力随着视波速的增大先增大后减小再增大,在视波速达到 4 000 m/s 后塔底的剪力趋近于一致激励下的结果。纵向阻尼体系与半漂浮体系斜拉桥低塔塔底的剪力随着视波速的增大而增大,在视波速大于 4 000 m/s 后塔底剪力达到稳定;固结体系斜拉桥低塔塔底的剪力随着视波速的增大先增大后减小再增大,且都小于一致激励下的剪力。以上分析表明,纵向阻尼体系与固结体系斜拉桥梁端位移对视波速的变化较敏感。与纵向阻尼体系与半漂浮体系斜拉桥相比,固结体系斜拉桥塔底内力受视波速的影响更大。

为研究行波效应对斜拉桥减震率的影响,本文分析了不同视波速下纵向阻尼体系斜拉桥与半漂浮体系斜拉桥的地震响应。定义减震率=(半漂浮体系斜拉桥地震响应最大值-纵向阻尼体系斜拉桥地震响应最大值)/半漂浮体系斜拉桥地震响应最大值,结果如图 7 所示。

由图 7(a)可知,随着视波速的增大,斜拉桥梁端位移减震率也在增大。由图 7(b)可知,随着视波速的增大,高塔塔底的弯矩减震率有所增大,在视波速达到 4 000 m/s 后减震率趋于稳定,低塔塔底的弯矩减震率先增大后减小最后趋于稳定;当视波速小于 2 000 m/s 时,低塔塔底的弯矩减震率比高塔塔底的大;当视波速大于 2 000 m/s 后,低塔塔底的弯矩减震率比高塔塔底的略小。由图 7(c)可知,高塔塔底和低塔塔底的剪力减震率随着视波速的增大整体上呈先增大后减小的趋势,当视波速大于 1 200 m/s 后,低塔塔底的剪力减震率比高塔塔底的大。以上分析表明,不同视波速下阻尼器对斜拉桥梁端位移和塔底弯矩的减小效果较好,而对塔底剪力的减小效果稍差;当视波速较大时,在设置阻尼器后斜拉桥梁端位移和塔底弯矩的减震效果整体上较好,而塔底剪力的减震效果略有降低,且高塔

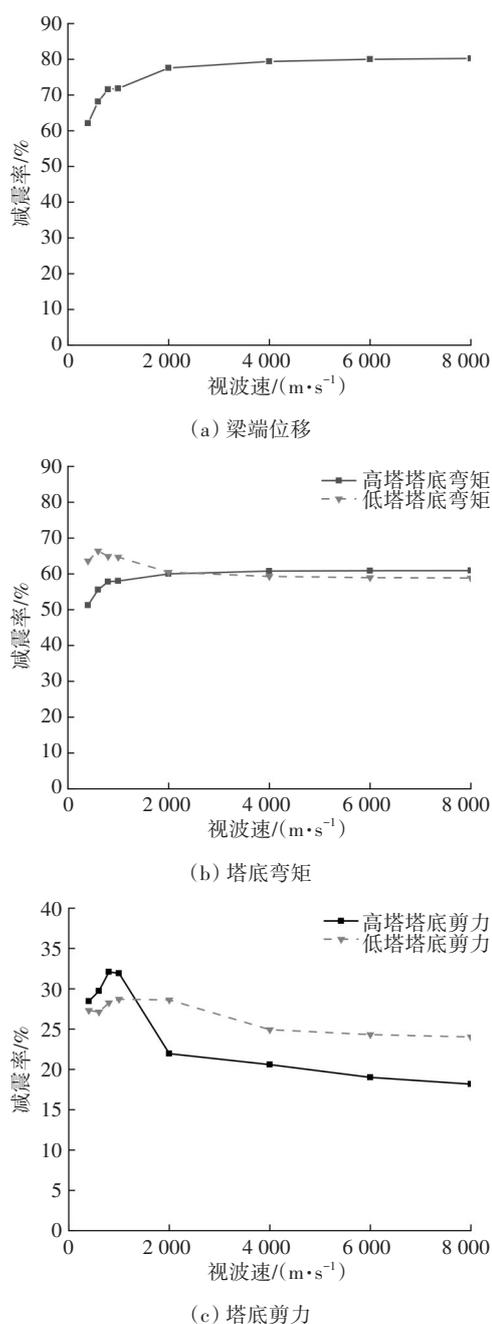


图 7 阻尼器对斜拉桥减震效果的影响

Fig. 7 Influence of dampers on seismic reduction effect of cable-stayed bridges

和低塔减震效果的差异程度随着视波速的变化,出现了较明显的波动。

综上所述,相比于半漂浮体系斜拉桥和纵向阻尼体系斜拉桥,固结体系斜拉桥地震响应受行波效应的影响更明显。设置阻尼器能有效减小考虑行波效应的斜拉桥的地震响应,且对梁端位移和塔底弯矩的改善效果较好,但阻尼器对考虑行波效应的斜拉桥高塔和低塔的减震效果不一致,且减震效果受视波速大小的影响较明显。

3.2 地震动输入方向

为研究脉冲地震动作用下,地震动输入方向对考虑行波效应的斜拉桥地震响应的影响,本文分析了地震动沿不同方向输入时斜拉桥的地震响应。在不同地震动输入方向下斜拉桥地震响应随视波速的变化如图8~9所示。

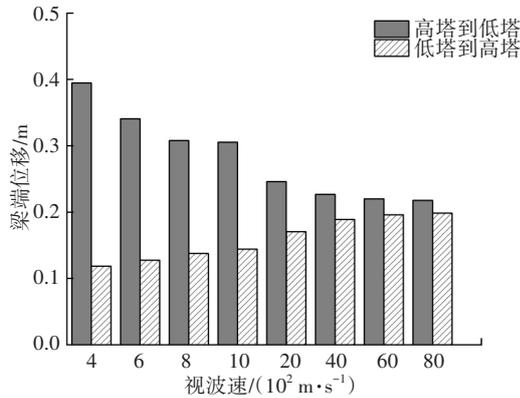
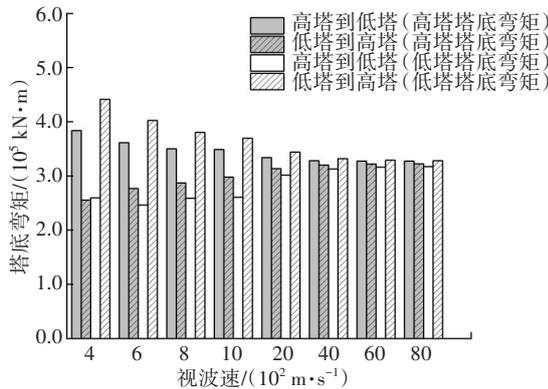
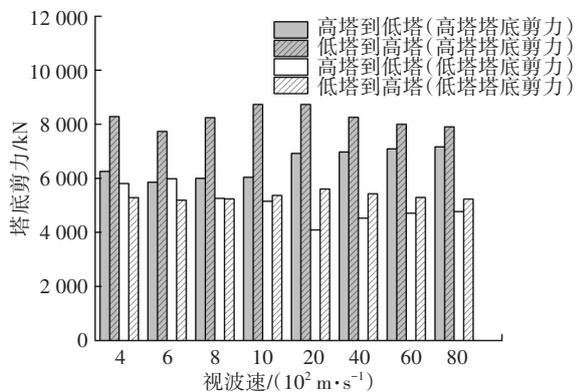


图8 不同地震动输入方向下梁端位移随视波速的变化
Fig. 8 Variation of girder-end displacement with apparent wave velocity for different seismic input directions



(a) 塔底弯矩



(b) 塔底剪力

图9 不同地震动输入方向下塔底内力随视波速的变化
Fig. 9 Variation of internal force at tower bottom with apparent wave velocity for different input directions of ground motion

由图8可知,当地震动沿高塔向低塔方向传播时,梁端位移随着视波速的增大而不断减小,在视波速达到6 000 m/s后趋近于一致激励下的结果;当地震动沿低塔向高塔方向传播时,随着视波速的增大梁端位移呈增大趋势。当视波速为400~2 000 m/s时,不同传播方向下梁端位移存在较大差异;在视波速大于4 000 m/s后,地震动传播方向不同带来的梁端位移差异逐渐减小。

由图9(a)可知,对于高塔而言,当地震动从高塔向低塔方向输入时,高塔塔底弯矩随着视波速的增大先减小后趋于稳定;当地震动从低塔向高塔方向输入时,高塔塔底弯矩随着视波速的增大而增大,然后趋于稳定。对于低塔而言,当地震动从高塔向低塔方向输入时,低塔塔底弯矩随着视波速的增大先减小后略有增大再趋于稳定;当地震动从低塔向高塔方向输入时,低塔塔底弯矩随着视波速的增大逐渐减小然后趋于稳定。当地震动沿不同方向输入时,高塔和低塔塔底弯矩之间的差异均随着视波速的增大而逐渐减小。由图9(b)可知,对于高塔而言,当地震动沿不同方向输入时,随着视波速的增大塔底剪力的变化规律有所不同,当地震动由高塔向低塔方向输入时,塔底剪力小于地震动由低塔向高塔方向输入时的塔底剪力;对于低塔而言,当地震动由高塔向低塔方向输入时,塔底剪力随着视波速的增大先振荡变化,在视波速达到4 000 m/s后趋于稳定;当地震动由低塔向高塔输入时,塔底剪力对视波速的变化不敏感。

综上所述,梁端位移随视波速的变化规律受地震动输入方向的影响较大。地震动输入方向对塔底弯矩随视波速的变化规律有一定的影响。在不同的地震动输入方向下,高塔和低塔塔底弯矩的差异随视波速的变化规律基本一致。在不同的地震动输入方向下,塔底剪力随视波速的变化规律有所不同。在视波速较小时,地震动由低塔向高塔传播对高塔受力有利,反之对低塔受力有利。

3.3 地震动类型

为研究不同类型地震动对斜拉桥行波效应的影响,本文分析了近断层脉冲地震动和远场地震动作用下纵向阻尼体系斜拉桥的地震响应,结果如图10~11所示。

由图10可知,在两种不同类型地震动作用下,随着视波速的增大,纵向阻尼体系斜拉桥梁端位移先减小然后趋于稳定,且脉冲地震动作用下的梁端

位移大于远场地震动作用下的梁端位移。在视波速达到4 000 m/s后,二者的梁端位移均基本保持稳定。

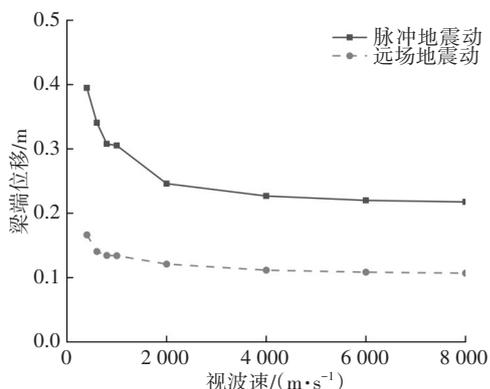
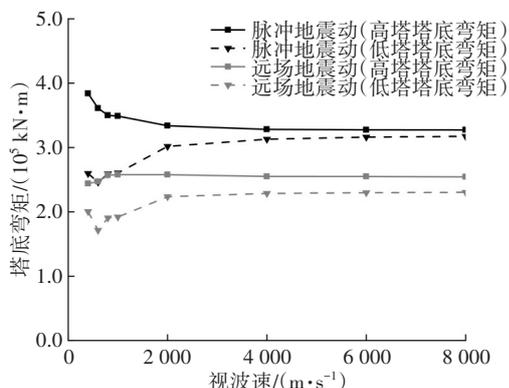
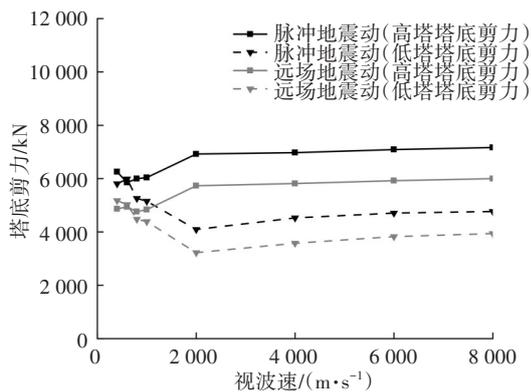


图10 不同地震动类型下梁端位移随视波速的变化

Fig. 10 Variation of girder-end displacement with apparent wave velocity for different ground motion types



(a) 塔底弯矩



(b) 塔底剪力

图11 不同地震动类型下塔底内力随视波速的变化

Fig. 11 Variation of internal force of tower bottom with apparent wave velocity for different ground motion types

由图11(a)可知,在脉冲地震动作用下,高塔塔底弯矩随视波速的增大而逐渐减小,低塔塔底弯矩随视波速的增大先略微减小后增大。在远场地震动作用下,高塔塔底弯矩对视波速的变化不敏感,低塔塔底弯矩随视波速的增大先减小后增大。在

相同地震动类型下,高、低塔塔底弯矩之间的差异均呈现逐渐减小的趋势。由图11(b)可知,在近断层脉冲地震动和远场地震动作用下,高塔塔底剪力随视波速的增大,先减小后增大再趋于稳定,低塔塔底剪力随视波速的增大呈先减小后增大的趋势。且在相同地震动类型下,高、低塔塔底剪力的差异均呈先增大后减小的趋势。

由以上分析可知,近断层脉冲地震动和远场地震动作用下塔底内力随视波速的变化规律基本一致,且当视波速较小时,高塔与低塔内力差异受视波速变化的影响显著。

3.4 地震动脉冲周期

为研究地震动脉冲周期对考虑行波效应的斜拉桥地震响应的影响,本文计算了不同脉冲周期地震动作用下纵向阻尼体系斜拉桥的地震响应,结果如图12~13所示。

由图12可知,随着脉冲周期的增大,梁端位移呈先增大后减小的趋势。随着视波速的增大,梁端位移峰值所对应的脉冲周期随着视波速的增大呈减小趋势。当视波速大于600 m/s时,梁端位移随脉冲周期的变化规律受视波速的影响不显著,当脉冲周期为6.65 s,即接近桥梁纵向一阶周期时,斜拉桥梁端位移取得最大值。在同一脉冲周期下,当脉冲周期较小时,随着视波速的增大梁端位移变化较小;当脉冲周期较大时,梁端位移随着视波速的增大而逐渐减小。

由图13(a)~13(b)可知,高塔和低塔塔底弯矩随着脉冲周期的增大均呈先增大后减小的趋势。在同一脉冲周期下,当脉冲周期较小时,随着视波速的增大高塔塔底弯矩变化较小;当脉冲周期较大时,高塔塔底弯矩随着视波速的增大而逐渐减小,

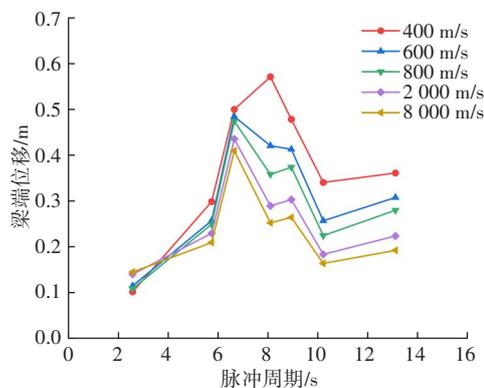


图12 不同脉冲地震动作用下梁端位移随脉冲周期的变化

Fig. 12 Variation of girder-end displacement with pulse periods for different pulse ground motions

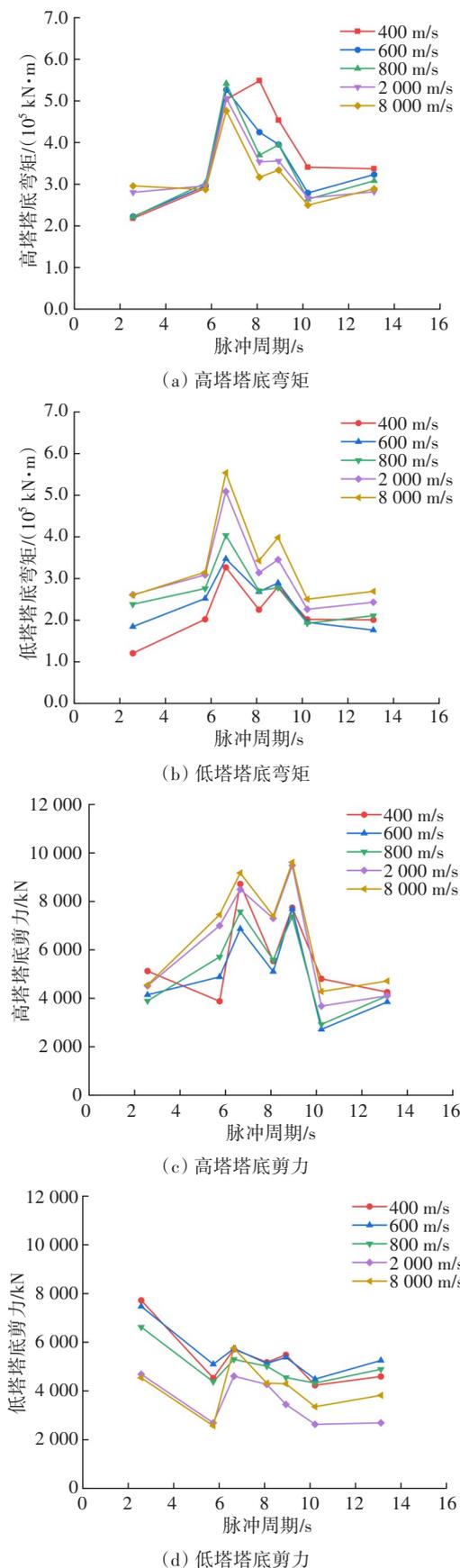


图13 不同脉冲地震动作用下塔底内力随脉冲周期的变化
 Fig. 13 Variation of internal force at tower bottom with pulse periods for different pulse ground motions

在不同的脉冲周期下,塔底弯矩随视波速的变化规律不一致。由图13(c)~13(d)可知,高塔和低塔塔底剪力随脉冲周期的变化规律不一致,随着脉冲周期的增大,高塔塔底剪力整体上呈先增大后减小的趋势;低塔塔底剪力整体上呈减小趋势,在脉冲周期为6.55 s时有一定的突变,且在不同脉冲周期下塔底剪力随视波速的变化规律有所不同。

以上分析表明,斜拉桥梁端位移和塔底弯矩随着脉冲周期的增大总体上呈先增大后减小的趋势,而高塔和低塔塔底剪力随着脉冲周期的变化呈现出不同的变化规律。说明塔底内力随视波速的变化规律受脉冲周期的影响显著。当视波速较大,脉冲周期接近斜拉桥纵向一阶周期时,斜拉桥地震响应达到最大值。

4 结论

本文研究了行波效应对不同纵向约束体系斜拉桥地震响应的影响,分析了在不同地震动传播方向、地震动类型与脉冲周期下,纵向阻尼体系斜拉桥地震响应随视波速的变化规律,所得结论如下:

- 1) 不同约束体系下行波效应对斜拉桥地震响应的规律有所不同。与半漂浮体系和纵向阻尼体系斜拉桥相比,固结体系斜拉桥地震响应对视波速的变化更加敏感。
- 2) 斜拉桥地震响应随视波速的变化规律受地震动输入方向的影响显著。当视波速小于4 000 m/s时,地震动由低塔向高塔传播对高塔受力有利,反之对低塔受力有利。地震动传播方向对斜拉桥地震响应的影响不可忽视。
- 3) 不同地震动类型下塔底内力随视波速的变化规律基本一致。当视波速较小时,视波速对纵向阻尼体系斜拉桥高、低塔内力差异的影响明显。
- 4) 除低塔塔底剪力外,纵向阻尼体系斜拉桥地震响应随着脉冲周期的增大整体上呈先增大后减小的趋势,且脉冲周期对塔底内力随视波速的变化规律影响明显。当视波速较大,即脉冲周期接近斜拉桥纵向一阶周期时,斜拉桥地震响应达到最大值。

参考文献(References):

[1] ZHAO J J. Large-span cable-stayed bridge seismic response analysis considering traveling wave effect [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 477-478: 1034-1037. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.477-478.

- 1034.
- [2] 马凯, 钟剑, 袁万城, 等. 非一致地震激励下飘浮体系斜拉桥易损性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(12): 1744-1754. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2017.12.003.
MA Kai, ZHONG Jian, YUAN Wancheng, et al. Fragility analysis of floating cable-stayed bridge under non-uniform seismic excitation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(12): 1744-1754. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2017.12.003.
- [3] XIONG M, HUANG Y, ZHAO Q. Effect of travelling waves on stochastic seismic response and dynamic reliability of a long-span bridge on soft soil [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(9): 3721-3738. DOI: 10.1007/s10518-018-0316-x.
- [4] RAMADAN O M O, MEHANNY S S F, KOTB A A M. Assessment of seismic vulnerability of continuous bridges considering soil-structure interaction and wave passage effects [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110161. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110161.
- [5] 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): 358-363. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4708.2001.03.021.
FAN Lichu, WANG Junjie, CHEN Wei. Response characteristics of long-span cable-stayed bridges under non-uniform seismic action [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(3): 358-363. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4708.2001.03.021.
- [6] 曾玉华. 考虑行波效应的大跨度双塔斜拉桥地震响应分析[J]. 公路与汽运, 2022(3): 94-97. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.03.023.
ZENG Yuhua. Seismic response analysis of long-span twin-tower cable-stayed bridge considering traveling wave effect [J]. Highways & Automotive Applications, 2022(3): 94-97. DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2022.03.023.
- [7] 王再荣, 孙利民, 程纬. 超大跨斜拉桥地震行波效应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1471-1481. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.10.001.
WANG Zairong, SUN Limin, CHENG Wei. Effects of traveling wave excitation for super longspan cable-stayed bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(10): 1471-1481. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2016.10.001.
- [8] 许智强, 赵人达. 考虑行波效应的大跨度结合梁斜拉桥地震响应分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(7): 22-25. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.07.06.
XU Zhiqiang, ZHAO Renda. Seismic response analysis of long span composite girder cable-stayed bridge considering traveling wave effect [J]. Railway Engineering, 2018, 58(7): 22-25. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2018.07.06.
- [9] 潘思璇, 唐冕, 宋旭明. 行波激励对非对称矮塔斜拉桥抗震性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 1862-1872. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.07.012.
PAN Sixuan, TANG Mian, SONG Xuming. Seismic behavior of asymmetric extradosed bridge with action of traveling wave effect [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(7): 1862-1872. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2020.07.012.
- [10] 许基厚, 王学伟, 祝兵, 等. 非对称单侧混合梁斜拉桥多点激励地震响应分析[J]. 地震工程学报, 2019, 41(5): 1207-1214. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1207.
XU Jihou, WANG Xuewei, ZHU Bing, et al. Seismic performance of a cable-stayed bridge with asymmetric single-side mixed girders under multi-support excitation [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1207-1214. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1207.
- [11] 许莉, 郑旭霞. 非一致地震激励下大跨斜拉桥的地震反应[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 528-533.
XU Li, ZHENG Xuxia. Seismic response of long-span cable stayed bridge under asynchronous excitations [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 528-533.
- [12] 方圆, 李建中, 彭天波, 等. 行波效应对大跨度多塔斜拉桥地震反应影响[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 148-152, 235, 256. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2010.10.031.
FANG Yuan, LI Jianzhong, PENG Tianbo, et al. Influence of travelling-wave effect on seismic response of a long-span multi-tower cable stayed bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 148-152, 235, 256. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2010.10.031.
- [13] GUO W, LI J Z, GUAN Z G. Shake table test on a long-span cable-stayed bridge with viscous dampers considering wave passage effects [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(2): 4020118. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001665.
- [14] 雷虎军, 黄炳坤, 刘伟, 等. 大质量法在桥梁非一致弹性地震响应分析中的误差与改进[J]. 振动与冲击, 2020, 39(22): 28-34. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.22.005.
LEI Hujun, HUANG Bingkun, LIU Wei, et al. Error analysis and improvement of the large mass method used in elastic-plastic response analysis of bridges subjected to non-uniform seismic [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 28-34. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.22.005.
- [15] 王晓佳, 张瀚钊, 张祖军. 地锚式独斜塔混凝土斜拉桥抗震性能[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 101-107. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.010.
WANG Xiaojia, ZHANG Hanzhao, ZHANG Zujun. Seismic behavior of concrete ground-anchored cable-stayed bridge with inclined tower [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 101-107. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.010.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:杜明瑞)