

赵立财.行波激励下多跨单索面矮塔斜拉桥主墩索塔地震响应研究[J].地震工程学报,2025,47(2):263-269.DOI:10.20000/j.1000-0844.20230711001

ZHAO Licai, Seismic response of the main pier pylon of a multispan extradosed cable-stayed bridge with a single cable plane under traveling wave excitation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(2): 263-269. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230711001

## 行波激励下多跨单索面矮塔斜拉桥 主墩索塔地震响应研究

赵立财<sup>1,2</sup>

(1. 台湾科技大学 营建工程系, 台湾 台北 10607; 2. 中铁十九局集团 第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 为探究行波激励对多跨矮塔斜拉桥地震响应的影响, 选取某六跨单索面-矮塔斜拉桥为工程背景, 采用 MIDAS/Civil 有限元软件建立全桥有限元模型, 并根据相对运动法理论模拟多点激励行为。分析桥墩墩底、桥塔塔底以及桥塔塔顶这 3 个关键位置处在多点地震动激励作用下的内力或位移响应, 并探究不同视波速下结构内力与位移的变化规律。研究表明: 行波激励对多跨矮塔斜拉桥的地震响应产生显著影响。当视波速为 500 m/s 时, 最不利关键位置处的内力或位移均约为一致激励时的 1.2 倍; 行波激励对中墩底部的弯矩与剪力、边塔塔底的弯矩与剪力和塔顶位移均产生不利影响; 随着视波速的提升, 行波激励的影响逐渐减弱, 当视波速大于 7 000 m/s 时, 关键结构处的内力与位移与一致激励时对应的内力与位移基本保持一致, 此时行波激励效应对结构关键位置处内力的影响可忽略不计。

**关键词:** 单索面; 矮塔斜拉桥; 行波激励; 主墩; 索塔; 地震响应

中图分类号: U441.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2025)02-0263-07

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20230711001

## Seismic response of the main pier pylon of a multispan extradosed cable-stayed bridge with a single cable plane under traveling wave excitation

ZHAO Licai<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei 10607, Taiwan, China;

2. The Third Engineering Co., Ltd., China Railway 19th Bureau Group Corporation Limited, Shenyang 110136, Liaoning, China)

**Abstract:** A six-span extradosed cable-stayed bridge with a single cable plane was investigated in this study to assess the influence of wave traveling effect on the earthquake response of multispan extradosed cable-stayed bridges. A finite element model of the full bridge was established using the software MIDAS/Civil, and the multi-point excitation behavior was simulated based on the theory of relative motion. The internal force or displacement response of three key positions,

收稿日期: 2023-07-11

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(XLYC2007146); 中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(2020-C20)

第一作者简介: 赵立财(1985-), 男(满族), 辽宁盖州人, 博士, 正高级工程师, 从事岩土与结构相互作用、桥梁与隧道智能建造、桥梁与隧道结构动力灾变学理论研究。E-mail: zhaolicai1314@foxmail.com.

namely pier bottom, tower bottom, and tower top, under multipoint ground motion excitation were analyzed. Furthermore, the variation law of structural internal force and displacement under different apparent wave velocities was also explored. The research results reveal that the traveling wave excitation has a significant effect on the earthquake response of the multispan extradosed cable-stayed bridge. At an apparent wave velocity of 500 m/s, the internal forces or displacements at the most unfavorable key position are approximately 1.2 times those under uniform excitation. Furthermore, traveling wave excitation has adverse effects on the bending moment and shear force at the bottom of the middle pier and side tower, as well as on the displacement at the top of the side tower. As the apparent wave velocity increases, the influence of traveling wave excitation gradually weakens. When the apparent wave velocity exceeds 7 000 m/s, the internal forces and displacements at key positions are basically the same as those under uniform excitation. This finding indicates that the influence of traveling wave excitation on the internal force at key positions of the structure can thus be ignored.

**Keywords:** single cable plane; extradosed cable-stayed bridge; traveling wave excitation; main bridge pier; bridge pylon; seismic response

## 0 引言

矮塔斜拉桥是介于连续梁桥和斜拉桥之间的一种新型桥梁,矮塔斜拉桥跨径布置非常灵活,可设计成单塔双跨、双塔三跨和多塔多跨等不同的结构形式。常规斜拉桥一般沿纵桥向全桥布索,而矮塔斜拉桥存在明显的3处无索区段:中跨跨中、塔根部和边跨端部。多跨矮塔斜拉桥具有结构刚度大、施工方便、造型美观等优点,故被视为跨越峡谷、沟壑的优选桥型<sup>[1]</sup>。然而,中国地处地震多发区,一旦发生地震灾害,桥梁结构损坏往往导致巨大的人员伤亡和财产损失<sup>[2]</sup>,该类多跨矮塔斜拉桥的抗震设计问题已引起桥梁界广泛的关注。目前,在桥梁结构的地震响应分析中多采用一致激励法<sup>[3]</sup>,该方法假设各支承点受到的地面运动是相同的,只考虑其随时间的变化。这种假设对于中小跨度桥梁可以接受,但对于大跨度的多跨矮塔斜拉桥而言,该假设与实际情况可能会存在较大的偏差<sup>[4-5]</sup>。当地震发生时,由于多跨矮塔斜拉桥的各桥墩可能位于不同的场地上,会产生多点激励情况。此外,即使场地效应变化不明显,但由于地震波沿桥梁纵向传播的时间差异,也可能存在行波激励效应,因此有必要考虑行波激励效应对多跨矮塔斜拉桥的地震响应的影响,为该类桥型的抗震设计提供参考。

对于行波激励在大跨度缆索支撑体系桥梁地震响应的影响研究方面,国内外许多学者进行了深入的研究。宋光松等<sup>[6]</sup>研究了行波激励下高烈度区特大铁路悬索桥的减震技术,通过布置阻尼器等减震装置来减小地震引起的结构响应。阳威等<sup>[7]</sup>分析了

行波激励效应对大跨度悬索桥地震响应的影响,研究了大跨度悬索桥在地震响应中关键部位的结构变形与内力响应。王浩等<sup>[8]</sup>以大跨悬索桥为工程背景,分析了考虑行波激励效应下大跨度三塔悬索桥的减震控制方案。曾勇等<sup>[9]</sup>通过有限元模拟方法,分析了行波激励效应对轻轨两用独塔单索面钢桁梁斜拉桥地震响应的影响。孙利民等<sup>[10]</sup>通过桩-土-斜拉桥的多点振动台试验,对行波激励下大跨度斜拉桥抗震性能进行评估。开永旺<sup>[11]</sup>考虑土-结构相互作用、非线性材料行为和地震波传播效应等因素,分析了矮塔斜拉桥在地震作用下的动力响应和结构变形。潘思璇等<sup>[12]</sup>使用有限元方法,通过考虑行波激励效应的影响,对大跨度矮塔斜拉桥进行抗震性能分析。沈禹等<sup>[13]</sup>考虑行波激励效应对矮塔斜拉桥抗震性能的影响,探究了不同场地条件、不同视波速等因素对矮塔斜拉桥地震响应的影响。

目前,针对大跨度斜拉桥、悬索桥的行波激励效应研究已较为深入,而针对多跨矮塔斜拉桥的行波激励效应的影响研究则较为不足。因此,本文以某多跨矮塔斜拉桥为工程背景,基于MIDAS/Civil有限元软件建立全桥有限元模型,探究多点激励情况下的多跨矮塔斜拉桥的地震响应规律,为同类桥型的抗震设计提供参考。

## 1 行波激励方法

分析行波效应的地震动激励方法主要有:相对运动法,大质量法和位移输入法。其中,相对运动法基于叠加原理,原则上只适用于线弹性体系,对地震

响应并不适用。本文基于 MIDAS/Civil 软件的位移输入法,来模拟地震中的行波效应<sup>[14]</sup>,通过分离结构的拟静力分量与动力分量,研究结构的地震响应规律。

对于具有多点支撑的桥梁结构,考虑行波激励效应的动力平衡方程为:

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

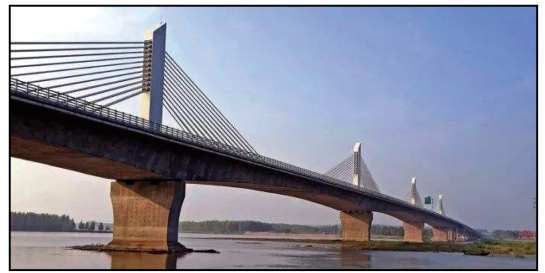
式中: $\ddot{\mathbf{U}}_b$ 、 $\dot{\mathbf{U}}_b$ 、 $\mathbf{U}_b$  分别为结构支撑处的绝对加速度、绝对速度和绝对位移; $\ddot{\mathbf{U}}_s$ 、 $\dot{\mathbf{U}}_s$ 、 $\mathbf{U}_s$  分别表示结构非支撑处(自由节点)的绝对加速度、绝对速度和绝对位移; $\mathbf{M}_{ss}$ 、 $\mathbf{M}_{bb}$  分别为结构支撑处和非支撑处(自由节点)的质量矩阵; $\mathbf{M}_{sb}$ 、 $\mathbf{M}_{bs}$  分别为支撑处与非支撑处(自由节点)接触界面的质量矩阵; $\mathbf{C}_{ss}$ 、 $\mathbf{C}_{bb}$  分别为结构支撑处和非支撑处(自由节点)的阻尼矩阵; $\mathbf{C}_{sb}$ 、 $\mathbf{C}_{bs}$  分别为支撑处与非支撑处(自由节点)接触界面的阻尼矩阵; $\mathbf{K}_{bb}$ 、 $\mathbf{K}_{ss}$  分别为结构支撑处(自由节点)和非支撑处的刚度矩阵; $\mathbf{K}_{sb}$ 、 $\mathbf{K}_{bs}$  用来表征支撑处和非支撑处(自由节点)接触界面的刚度矩阵; $\mathbf{P}_b$  为支撑处所受到的外力。

对式(1)展开运动方程并忽略较小的阻尼项,得到简化运动方程为:

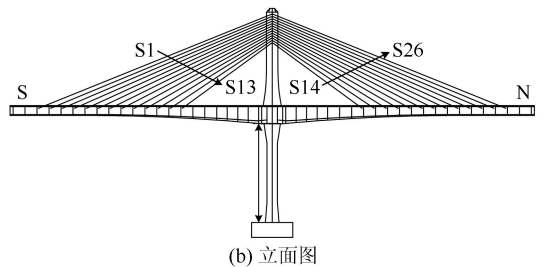
$$\mathbf{M}_{ss}\mathbf{U}_s + \mathbf{C}_{ss}\mathbf{U}_s + \mathbf{K}_{ss}\mathbf{U}_s = -\mathbf{K}_{sb}\mathbf{U}_b \quad (2)$$

## 2 工程背景与有限元模型

选取某六跨混凝土矮塔斜拉桥为工程背景。该桥跨径布置为 105 m+178 m×4+105 m,单索面矮塔斜拉桥立面如图 1 所示。主梁宽度 29.5 m,主梁高度范围 2.95~5.75 m,采用变高度截面预应力混凝土箱梁结构,主梁高度沿二次抛物线变化,主墩采用矩形空心墩,采用单箱两室横截面,其箱梁截面如图 2 所示。斜拉索位于主梁与索塔中心位置,采用独塔单索面布置方案,全桥共 80 根斜拉索,塔柱截面纵向长 2.5 m,横向宽 2.2 m,塔高 16.5 m,为实心矩形混凝土截面。主梁上纵向拉索索距为 5 m,主塔上纵向拉索索距 0.8 m。下部墩身和上部索塔通过刚性联结形成固结体系,主塔高度在 40~75 m 范围内变化。主梁与主塔采用 C55 混凝土,桥墩采用 C50 混凝土,斜拉索采用低松弛高强度钢绞线成品索(1 860 MPa 钢绞线)。设计荷载按 1.3 倍的公路-I 级取值。



(a) 全桥全景照片



(b) 立面图

图 1 单索面-矮塔斜拉桥立面示意图

Fig.1 Schematic diagram of the elevation of a extradosed cable-stayed bridge with a single cable plane

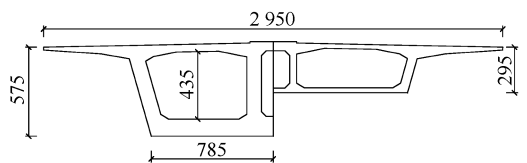


图 2 混凝土箱梁截面(单位:cm)

Fig.2 Cross section of concrete box girder (Unit:cm)

采用 MIDAS/Civil 有限元分析软件建立全桥模型进行空间分析,如图 3 所示。全桥模型共计 880 个节点与 746 个单元。采用梁单元模拟主梁、主塔与桥墩;同时因桥梁跨径较小,故采用采用桁架单元模拟斜拉索。整体坐标系定义如下:纵桥向为 X 向、横桥向为 Y 向、竖桥向为 Z 向。有限元模型中斜拉索与主梁与主塔之间采用刚性连接,主梁与桥墩之间为固结方式,采用共节点方式模拟。

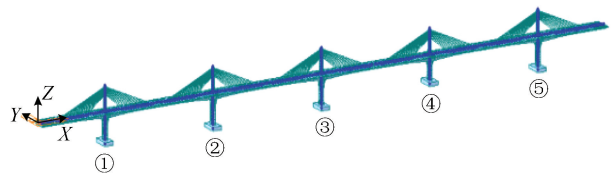


图 3 单索面-混凝土矮塔斜拉桥有限元模型

Fig.3 Finite element model of the extradosed cable-stayed bridge with a single cable plane

## 3 桥梁动力特性

为了进一步了解桥梁的动力特性,采用子空间迭代法计算得到桥梁的前 10 阶自振频率与周期,结果如表 1 所列。有限元计算结果表明,该桥的第一阶

振型为主梁竖弯,自振频率 0.445 Hz,周期 2.248 s。桥梁前 10 阶自振频率的变化范围从 0.445 Hz 至 1.135 Hz,桥梁整体自振频率较大,说明结构具有较大的刚度。以上分析结果与同类桥型的自振特性相符,说明了有限元模型的准确性。

表 1 桥梁自振频率与周期

Table 1 Natural frequency and period of bridge

阶数	频率/Hz	周期/s	振型
1	0.445	2.248	主梁 1 阶对称竖弯
2	0.536	1.864	主梁 1 阶反对称横弯
3	0.627	1.594	主梁 1 阶对称横弯
4	0.694	1.440	主梁 1 阶反对称竖弯
5	0.773	1.294	桥塔 1 节对称横弯
6	0.820	1.220	主梁 1 阶转
7	0.884	1.131	桥塔 1 阶反对称横弯
8	0.890	1.124	主梁 2 阶对称竖弯
9	1.020	0.980	主梁 2 阶反对称竖弯
10	1.135	0.881	桥塔 1 阶扭转

## 4 地震波选取

多跨桥梁结构在不同地震波输入下的动力响应可能会存在较大差异。为了考虑行波激励效应对多塔矮塔斜拉桥地震响应的影响,采用 MIDAS/Civil 软件中的节点动力荷载和多支座激振的功能来模拟多塔斜拉桥受到行波激励效应的影响规律。

考虑地震动具有极强的随机性,本文从太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research, PEER)网站选取具有代表性的 El-Centro 波、Taft 波及 Landers 波进行桥梁的地震响应分析<sup>[15]</sup>,对多跨矮塔斜拉桥的行波效应进行初步探究。El-Centro 波持续时间为 32.5 s,峰值加速度 0.357g,其加速度时程曲线如图 4 所示。Taft 波持续时间为 54.5 s,峰值加速度 0.15g,其加速度时程曲线如图 5 所示。Landers 波持续时间为 60 s,峰值加速度 0.85g,其加速度时程曲线如图 6 所示。

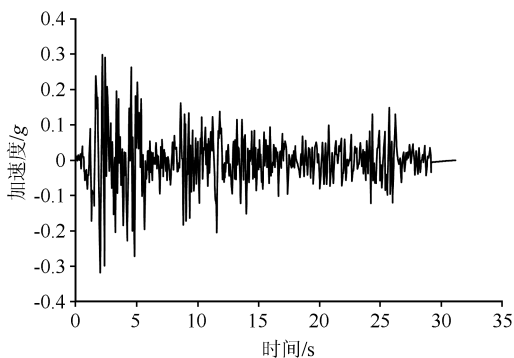


图 4 El-Centro 地震波时程曲线

Fig.4 Time history curve of El-Centro seismic wave

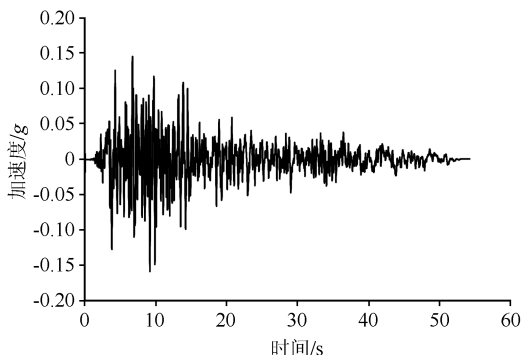


图 5 Taft 地震波时程曲线

Fig.5 Time history curve of Taft seismic wave

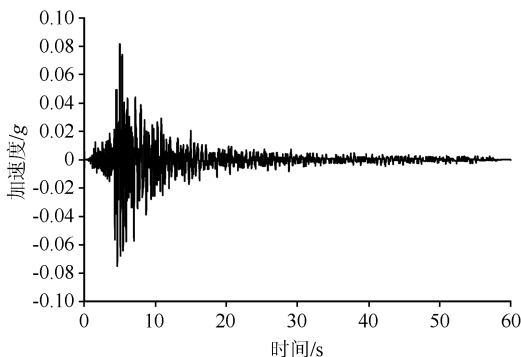


图 6 Landers 地震波时程曲线

Fig.6 Time history curve of Landers seismic wave

对于多跨结构桥梁,地震波到达各个桥墩基础的时间差主要取决于两个参数:视波速、地震波传播方向与震源所在平面夹角<sup>[16]</sup>。考虑到地震动的空间不确定性,地震波在地表传播的方向与震源所在平面夹角也存在不确定性,故在实际计算分析中,通常采用预先设定夹角值和视波速的方法来考虑行波激励效应。本文假定地震波传播方向与震源所在平面夹角为 0,即地震波传播方向与纵桥向(X 向)平行,并假定从 1 号墩向 5 号墩方向传播。考虑到地震波在不同地质条件下,具有不同的波速,为较全面分析地震行波激励效应的影响,视波速取 500 m/s 为初始,最高波速取为 10 000 m/s,不同视波速分别为:500、1 000、2 000、4 000、7 000、10 000 m/s。不同视波速下到达不同桥墩的时间如表 2 所列。

## 5 行波激励下的结构地震响应分析

为了探究地震行波激励效应对多跨矮塔斜拉桥的影响,分别选取桥墩墩底、桥塔塔底以及桥塔塔顶这些关键位置进行分析。分别计算得到一致激励与多点激励作用下关键位置的内力或位移,并进一步计算得到多点激励与一致激励下内力或位移的比值<sup>[17-18]</sup>。



表 2 地震波到达各桥墩所需时间(单位:s)

Table 2 Time required for seismic wave to reach each pier (Unit: s)

墩号	视波速/(m/s)					
	500	1 000	2 000	4 000	7 000	10 000
1号墩	0	0	0	0	0	0
2号墩	0.21	0.105	0.053	0.026	0.015	0.011
3号墩	0.566	0.283	0.142	0.071	0.040	0.028
4号墩	0.922	0.461	0.231	0.115	0.066	0.046
5号墩	1.132	0.566	0.283	0.141	0.081	0.057

5.1 内力分析

不同的视波速下桥墩墩底弯矩的变化趋势如图 7 所示。

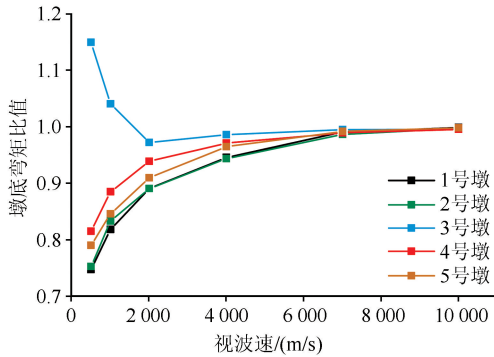


图 7 墩底弯矩随视波速的变化规律

Fig.7 Variation law of bending moment at pier bottom with apparent wave velocity

从图 7 可以看出,考虑行波激励效应时,桥墩墩底弯矩较一致激励情况产生了明显差别。除了 3 号墩以外,其余各墩墩底弯矩的变化趋势基本一致,桥墩墩底弯矩随着视波速的增加而逐渐增大,而 3 号墩墩底弯矩随着视波速的增加而逐渐减小。当视波速为 500 m/s 时,1 号墩的墩底弯矩最小,为一致激励时的 0.73 倍;3 号墩的墩底弯矩最大,为一致激励时的 1.17 倍。随着视波速的增加,各桥墩在墩底处因多点激励产生的弯矩逐渐接近于一致激励下产生的弯矩。对于 3 号桥墩,当视波速大于 4 000 m/s 时,其桥墩墩底弯矩与一致激励时相差不大。相对于其他位置桥墩,当视波速大于 7 000 m/s 时,桥墩墩底弯矩与一致激励时的基本保持一致。从以上分析可以看出,考虑行波激励效应,对除了 3 号桥墩以外的其余桥墩底部的抗弯均有利,但对中墩(3 号墩)抗弯不利。

不同的视波速下桥墩墩底剪力的变化趋势如图 8 所示。从图 8 可以看出,考虑行波激励效应时,桥墩墩底剪力的变化规律与弯矩变化规律基本一致,且墩底剪力较一致激励情况产生了明显差别。除了 3 号墩以外,其余桥墩的墩底剪力随着视波速的增

大呈增大趋势,3 号墩墩底剪力则呈减小趋势。当视波速为 500 m/s 时,5 号墩的墩底剪力最小,为一致激励时的 0.77 倍;3 号墩的墩底剪力最大,为一致激励时的 1.15 倍。随着视波速的增加,各桥墩在墩底处因多点激励产生的剪力逐渐接近于一致激励下产生的剪力。对于 3 号墩,当视波速大于 2 000 m/s 时,其墩底剪力与一致激励时基本保持一致;对于其他桥墩,当视波速大于 7 000 m/s 时,出现了墩底剪力与一致激励时保持一致的现象。以上分析表明,除了 3 号桥墩以外,行波激励效应对桥墩墩底抗剪有利,但对墩中抗剪不利。

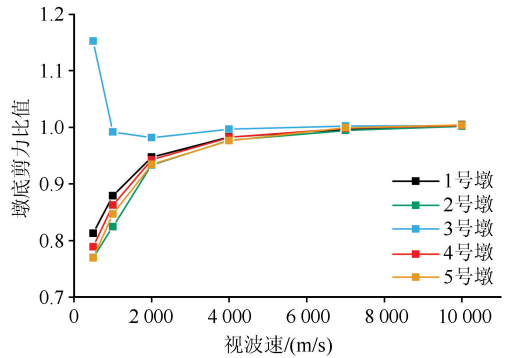


图 8 墩底剪力随视波速的变化规律

Fig.8 Variation law of shear force at pier bottom with apparent wave velocity

在不同的视波速下,桥塔塔底弯矩的变化趋势如图 9 所示。由图 9 可知,行波激励效应对桥塔塔底弯矩产生了较大的影响。对于 1、2 号桥塔,随着视波速的增加,桥塔底弯矩逐渐减小,并逐渐与一致激励时保持一致;对于 3~5 号桥塔,塔底弯矩随着视波速的增加而逐渐增大,并逐级与一致激励时保持一致。当视波速为 500 m/s 时,3 号桥塔处的塔底弯矩最小,为一致激励时的 0.87 倍;1 号桥塔处的塔底弯矩最大,为一致激励时的 1.13 倍。当视波速大于 7 000 m/s 时,桥塔弯矩与一致激励相对应的桥塔弯矩基本保持相同。考虑行波激励效应后,1、2 号塔的塔底弯矩较一致激励时偏不利,3~5 号桥塔的塔底弯矩较一致激励时偏有利。

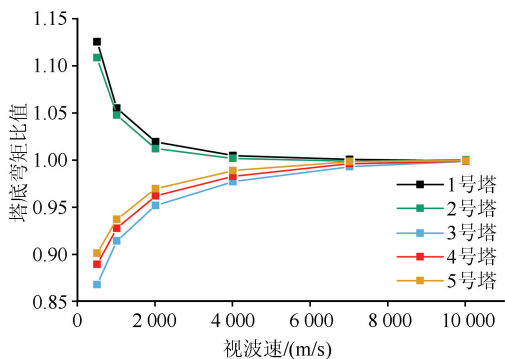


图9 桥塔塔底弯矩随视波速的变化规律

Fig.9 Variation law of bending moment at the bottom of bridge tower with apparent wave velocity

在不同的视波速下,桥塔塔底剪力的变化趋势如图10所示。从图10可以看出,桥塔塔底剪力变化规律与塔底弯矩变化规律相近。考虑行波激励效应时,1、2号桥塔的塔底剪力随着视波速的增加而不断减小,并逐渐接近一致激励时的塔底剪力;3~5号桥塔的塔底剪力随着视波速的增加而不断增加,并逐渐接近一致激励时的塔底剪力。当视波速为500 m/s时,3号桥塔具有最小的塔底剪力,为一致激励时的0.87倍;1号桥塔具有最大的塔底剪力,为一致激励时的1.12倍。当视波速大于7 000 m/s时,桥塔塔底处的剪力与一致激励时对应的剪力基本一致。考虑行波激励效应后,1、2号桥塔的塔底剪力较一致激励时偏不利,3~5号桥塔的塔底剪力较一致激励时偏有利。

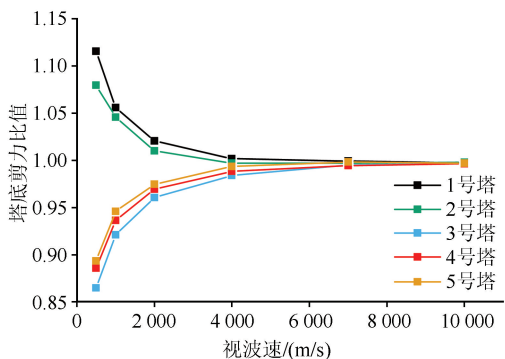


图10 桥塔塔底剪力随视波速的变化规律

Fig.10 Variation law of shear force at the bottom of bridge tower with apparent wave velocity

## 5.2 位移分析

在不同的视波速下,桥塔塔顶部位移的变化趋势如图11所示。从图11可以看出,考虑行波激励效应时,桥塔顶部位移较一致激励情况产生了显著差别。1、2号桥塔塔顶位移随着视波速的增加呈减小趋势;3~5号桥塔的塔顶位移随视波速的增加呈

增大趋势。当视波速为500 m/s时,3号桥塔具有最小的塔顶位移,为一致激励时的0.81倍;1号桥塔具有最大的塔顶位移,为一致激励时的1.26倍。当视波速大于4 000 m/s时,各桥塔的塔顶位移基本与一致激励时保持一致。从以上分析可以看出,考虑行波激励效应后,1、2号桥塔的塔顶位移较一致激励时有较大的增加,3~5号桥塔的塔顶位移则较一致激励时有所减小。

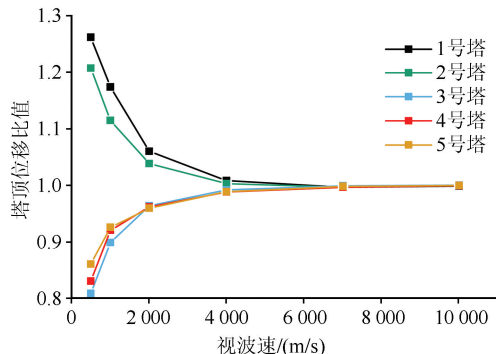


图11 桥塔塔顶位移随视波速的变化规律

Fig.11 Variation law of displacement at the top of bridge tower with apparent wave velocity

## 6 结论

本文以某六跨单索面-混凝土矮塔斜拉桥为工程背景,采用MIDAS/Civil有限元软件建立全桥模型进行空间分析,在PEER数据库中分别选取El-Centro波、Taft波及Landers波进行分析。在桥梁顺桥向通过多点激励地震输入,分析行波激励对多跨矮塔斜拉桥地震响应的影响,并探究不同视波速下的桥梁地震响应规律。本文主要结论如下:

(1) 多跨矮塔斜拉桥在考虑行波激励效应后,其桥墩墩底与桥塔塔底处的内力较一致激励时产生显著差别。当视波速为500 m/s时,最不利桥墩处的桥墩墩底弯矩与剪力分别为一致激励时的1.17与1.15倍;当视波速为500 m/s时,最不利桥塔处的塔底弯矩与剪力分别为1.13与1.12倍。随着视波速的增加,结构关键位置处的内力逐渐与一致激励时接近。当视波速大于7 000 m/s时,行波激励效应对结构关键位置处内力的影响可忽略不计。

(2) 多跨矮塔斜拉桥在考虑行波激励效应后,其桥塔塔顶位移较一致激励时产生显著差别。当视波速为500 m/s时,最不利桥塔处的塔顶位移为一致激励时的1.26倍。随着视波速的增加,塔顶位移逐渐与一致激励时保持相近。当视波速大于4 000 m/s时,行波激励效应对桥塔塔顶位移的影响可忽

略不计。

(3) 对于多塔矮塔斜拉桥的抗震设计,在视波速小于 4 000 m/s 时,行波激励效应会对该类桥型的内力和位移产生显著影响。针对该类桥梁结构,应充分考虑多点输入的行波激励效应影响,而不是仅考虑一致地震动输入。

## 参考文献(References)

- [1] 陈星焯,黄俊杰,颜东煌.多跨矮塔斜拉桥合龙方案比选优化[J].中外公路,2011,31(4):98-103.  
CHEN Xingye, HUANG Junjie, YAN Donghuang. Comparison and optimization of closure schemes for multi-span low-pylon cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(4): 98-103.
- [2] 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): 04020118.
- [3] 李茜,王克海,韦韩.高墩梁桥地震响应分析[J].地震工程与工程振动,2006,26(3):74-76.  
LI Qian, WANG Kehai, WEI Han. Seismic response analysis for girder bridges with tall piers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 74-76.
- [4] ADANUR S, ALTUNK C. Wave-passage effect on the seismic response of suspension bridges considering local soil conditions[J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17(2): 501-513.
- [5] WU Y X, GAO Y F. A modified spectral representation method to simulate non-Gaussian random vector process considering wave-passage effect [J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109587.
- [6] 宋光松,江辉,郭辉,等.行波激励下高烈度区特大铁路悬索桥减震技术研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(11):3303-3315.  
SONG Guangsong, JIANG Hui, GUO Hui, et al. Seismic reduction technology of long-span railway suspension bridge in high-intensity area with the action of traveling wave effect[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(11): 3303-3315.
- [7] 阳威,郝宪武,张鑫敏.行波效应对大跨度悬索桥地震响应的影响分析[J].工程抗震与加固改造,2020,42(2):100-106.  
YANG Wei, HAO Xianwu, ZHANG Xinmin. Analysis of influence of traveling wave on seismic response of long-span suspension bridge[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(2): 100-106.
- [8] 王浩,陶天友,张玉平,等.行波输入下大跨度三塔悬索桥减震控制[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(2):343-349.  
WANG Hao, TAO Tianyou, ZHANG Yuping, et al. Seismic control of long-span triple-tower suspension bridge under travelling wave action[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(2): 343-349.
- [9] 曾勇,曾渝南,谭宇杰,等.行波效应对公轨两用独塔单索面桁架梁斜拉桥地震反应影响分析[J].结构工程师,2021,37(6):92-98.  
ZENG Yong, ZENG Yutong, TAN Yujie, et al. Influence of traveling wave effect on seismic response of single pylon cable-stayed bridge with single cable plane steel truss for road and rail[J]. Structural Engineers, 2021, 37(6): 92-98.
- [10] 孙利民,谢文,楼梦麟,等.行波激励下桩-土-斜拉桥多点振动台试验[J].中国公路学报,2017,30(12):221-233.  
SUN Limin, XIE Wen, LOU Menglin, et al. Multiple shaking table tests on pile-soil-cable-stayed bridge under travelling wave excitations[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 221-233.
- [11] 开永旺.考虑实际场地的矮塔斜拉桥非线性地震响应分析[J].铁道科学与工程学报,2021,18(2):417-424.  
KAI Yongwang. Nonlinear seismic response analysis of extradosed cable-stayed bridge considering actual site condition[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 417-424.
- [12] 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.  
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.
- [13] 沈禹,谈华顺,王献攀,等.考虑行波效应的大跨度矮塔斜拉桥耐震时程分析[J].工程力学,2020,37(3):131-141,148.  
SHEN Yu, TAN Huashun, WANG Xianzhi, et al. Application of the endurance time method to seismic-induced pounding analysis for long-span extradosed cable-stayed bridges considering wave passage effects[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(3): 131-141, 148.
- [14] 陈志伟,蒲黔辉,李晰,等.行波效应对大跨连续刚构桥易损性影响分析[J].西南交通大学学报,2017,52(1):23-29,37.  
CHEN Zhiwei, PU Qianhui, LI Xi, et al. Fragility analysis of large-span continuous rigid bridge considering wave passage effect[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1): 23-29, 37.
- [15] PARK K S, JUNG H J, LEE I W. Hybrid control strategy for seismic protection of a benchmark cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 2003, 25(4): 405-417.
- [16] XU B, WU Z S, YOKOYAMA K. Neural networks for decentralized control of cable-stayed bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(4): 229-236.
- [17] 李小珍,刘栢杰,雷虎军,等.行波效应对矮塔斜拉桥弹塑性地震响应的影响[J].铁道工程学报,2015,32(11):49-54.  
LI Xiaozhen, LIU Zhenjie, LEI Hujun, et al. Effect of traveling wave on elastic-plastic seismic response of low-pylon cable-stayed bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(11): 49-54.
- [18] VINAYAGAMOORTHY M, GANESH G M, SANTHI A S. Structural robustness of a single span extra dosed bridge over cable stayed bridge[J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2019, 22(3): 413-420.