

车辆激励下中央扣对悬索桥梁端位移的影响

王连华^{1,2†}, 孙璋鸿¹, 崔剑锋³, 黄国平¹, 胡思聪¹

(1.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2.湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

3.湖南省交通规划勘察设计研究院, 湖南 长沙 410008)

摘要:为研究中央扣对悬索桥梁端位移的影响,以洞庭湖二桥为工程背景,考虑结构几何非线性效应,建立相应的全桥空间有限元动力模型.基于有限元模型,考虑多种行车工况,研究了中央扣对该桥动力特性及在车辆激励下对梁端位移的影响.结果表明:中央扣能显著提高悬索桥的整体纵向刚度,改变悬索桥的纵飘模态特性.在车辆激励下,设置中央扣明显减小了加劲梁的纵向振幅,提高了加劲梁的振动频率,导致梁端累加位移值增大.双向行驶的车辆越多,增设中央扣后梁端位移峰值减小得越明显.不同类型的中央扣造成悬索桥对应的共振车速和主梁的动力响应各不相同.行车工况下,不同类型中央扣对梁端位移的控制效果各有差别.

关键词:悬索桥;中央扣;动力特性;纵向位移;累加位移

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

Effects of Central Buckle on End Displacement of Suspension Bridges under Vehicle Excitation

WANG Lianhua^{1,2†}, SUN Zhanghong¹, CUI Jianfeng³, HUANG Guoping¹, HU Sicong¹

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China;

3.Hunan Province Communications Planning, Survey and Design Institute, Changsha 410008, China)

Abstract: In this study, the Dongting Lake Bridge II was chosen as engineering background to investigate the effects of the central buckle on the end displacement of suspension girder. Considering the geometric nonlinear effect, three finite element models of the suspension bridge were established. Based on the FE model and considering multiple driving conditions, the effect of central buckle on the dynamic characteristic of the suspension bridge and end displacement under vehicle excitation was investigated. It is shown that the central buckle can significantly increase the stiffness of the suspension bridge, and it seems to govern the longitude modal displacement at the end of the girder. Moreover, the transient analysis was performed to investigate the vehicle-induced dynamic response of the suspension bridge. Furthermore, the effects of the central buckle on the longitude modal displacement in the end of girder were evaluated. The results show that the central buckle can be designed to decrease the peak value of the

* 收稿日期:2018-04-06

基金项目:交通运输部建设科技项目(2013318798320), Science and Technology Program of Ministry of Transport (2013318798320); 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2029), Natural Science Foundation of Hunan Province(2018JJ2029)

作者简介:王连华(1975—),男,湖南双峰人,湖南大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: Lhwang@hnu.edu.cn

dynamic response of the girder. However, it increases the cumulative displacement at the end of the girder.

Key words: suspension bridge; central buckle; dynamic behavior; longitude displacement; cumulative displacement

对悬索桥而言,梁端位移与伸缩缝的疲劳寿命、支座的磨损密切相关,因此预测合理的梁端位移值尤为重要。然而,温度随时间的长期变化^[1]与汽车荷载的作用会激励悬索桥主梁反复振动,导致梁端承受大量的累积位移。江阴长江大桥梁端日累加行程达到 93 m,并造成该桥的伸缩装置损坏严重^[2]。显然,除遵循伸缩缝的设计准则外,还需着重考虑梁端累加位移的影响。通过采取合适的减振措施控制主梁的位移响应,同时减小梁端峰值位移与累加位移才能更好地保障结构的持久运营。

为改善悬索桥的受力状态,通常在跨中设置中央扣。如润扬长江大桥通过增设刚性中央扣减小了梁端的日累计位移^[3]。彭旺虎等^[4]研究了中央扣对悬索桥纵向和竖向耦合振动的影响。胡腾飞等^[5]的研究表明中央扣能大幅度提高结构的反对称扭转频率。王浩等^[6]研究了中央扣对大跨悬索桥风致抖振响应的影响。徐勋等^[7]研究了中央扣对悬索桥地震响应的影响。王浩等^[8]研究了中央扣对悬索桥抗风和抗震性能的影响。然而以上研究主要针对的是中央扣对悬

索桥抗风和抗震性能的影响。

本文以岳阳洞庭湖二桥为工程背景,建立全桥空间有限元动力计算模型,基于简化的车辆有限元模型和 ANSYS 软件的瞬态分析功能,对悬索桥的动力特性以及加劲梁的纵向位移响应进行深入研究。

1 工程背景

洞庭湖二桥为主跨 1 480 m,边跨分别为 460 m 和 491 m 的双塔钢桁梁悬索桥,如图 1 所示。上部结构主梁采用板桁结合型加劲梁,桁高 9 m,桁宽 35.4 m。主缆矢跨比为 1/10;中跨及岳阳岸边跨由 175 束索股组成,君山岸边跨由 181 束索股组成;吊索标准纵向间距 16.8 m。索塔采用双柱式门式框架结构,岳阳侧主塔高度 206 m,君山侧主塔高度为 214 m。锚碇采用“葫芦”形地下连续墙基础。两岸主塔及君山侧主梁末端设置横向抗风支座。主跨跨中设置 5 对斜吊索作为中央扣。

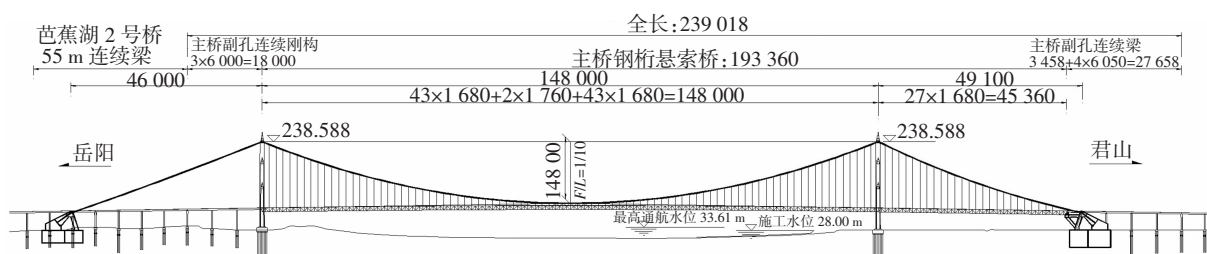


图1 洞庭湖二桥桥型总体布置(单位:cm)

Fig.1 Overview of the Dongting Lake II Bridge(unit:cm)

2 有限元模型

2.1 全桥有限元模型

根据洞庭湖二桥的结构特性,利用 ANSYS 软件建立相应的全桥有限元模型,如图 2 所示。在该有限元模型中,钢桁加劲梁和索塔均采用空间梁单元(Beam188)模拟;桥面行车道板采用板壳单元(Shell63)模拟;主缆、吊索和中央扣均采用空间杆单元(Link10)模拟。

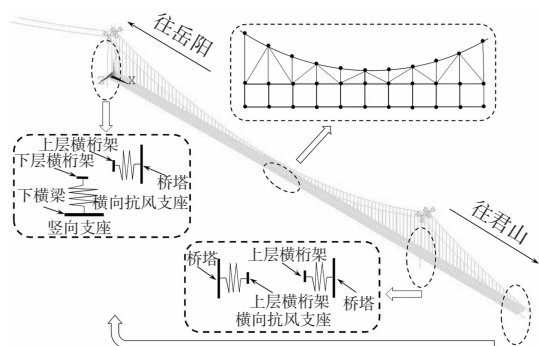


图2 洞庭湖二桥空间有限元模型

Fig.2 Finite element model of the Dongting Lake II Bridge

根据受力特点,耦合塔顶节点与塔顶正上方的主缆节点的平动自由度;同时耦合加劲梁与主塔在横桥向与纵桥向的转动自由度. 本文主要关注局部结构的动力响应,故忽略洞庭湖二桥的桩-土相互作用,将主缆和主塔底部全部固结.另外为了研究中央扣的影响,考虑了3种连接体系的全桥有限元模型,表1给出了相应连接方式的模拟.

表1 3种连接方式的模拟

Tab.1 Modeling of three connecting types

模型	模拟	方式
无中央扣(M-A)	跨中短吊索	无
柔性中央扣(M-B)	5对斜拉索	Link10
刚性中央扣(M-C)	5对刚臂	Beam188

2.2 车辆有限元模型

忽略桥梁振动对车辆的影响,车桥共振的运动方程可以写成^[9]:

$$M_b \ddot{U}_b(t) + C_b \dot{U}_b(t) + K_b U_b(t) = F_b(t) \quad (1)$$

式中: U_b 为桥梁位移向量, \dot{U}_b 为桥梁速度向量, \ddot{U}_b 为桥梁加速度向量, M_b 为桥梁质量矩阵, C_b 为桥梁阻尼矩阵, K_b 为桥梁刚度矩阵, F_b 为车辆荷载列向量.式(1)的求解可利用ANSYS的瞬态求解功能和质量单元的生死功能来实现,具体步骤为:首先在主梁节点处满布质量单元,并将所有质量单元杀死,当车辆行驶至主梁某一位置时激活该位置的质量单元并立刻杀死前位置的质量单元,循环此过程直至车辆驶离桥梁.

3 特征值分析

表2给出了3种连接体系桥梁的前10阶固有

频率及振型特性.比较表2中不同连接体系桥梁的自振频率与振型,可以得到如下结论:

1) 由于吊杆的约束以及主缆和吊杆拉力对竖向刚度的影响,悬索桥面内刚度远大于面外刚度,因此洞庭湖二桥第1阶振型为正对称侧弯,竖弯特性出现在高阶振型中.

2) 不同模型竖弯振型的自振频率差别微小,因此中央扣并不能有效提高悬索桥的竖向刚度.

3) 中央扣的设置明显影响了悬索桥的自振特性,图3分别给出了M-A与M-C第3阶振型图,从图3可看出增设中央扣后主梁振动特性发生了改变,模态位移减小.值得指出的是,在洞庭湖二桥纵桥向上主缆与主梁存在“单摆”现象,因此第2阶振型呈现出“纵飘”的振动特性.在车辆激励下该振型被激振导致主梁可能产生较大的纵向位移.

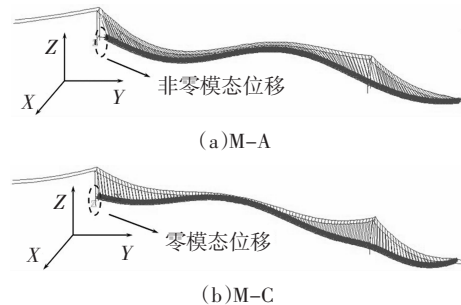


图3 第3阶振型特征对比图

Fig.3 Comparison of the third mode

4 车桥耦合动力响应

根据桥梁动力平衡方程,通过ANSYS软件求解车辆激励下的梁端位移响应,并计算不同时刻的梁端位移值.重点讨论中央扣对梁端位移响应的

表2 3种连接体系桥梁前10阶固有频率和振型特征

Tab.2 The first ten orders of natural frequencies and vibration characteristics

振型阶数	M-A		M-B(洞庭湖二桥)		M-C	
	频率/Hz	振型特征	频率/Hz	振型特征	频率/Hz	振型特征
1	0.056 2	正对称侧弯	0.056 3	正对称侧弯	0.056 4	正对称侧弯
2	0.080 5	纵飘+竖弯	0.092 7	纵飘+竖弯	0.092 8	纵飘+竖弯
3	0.108 8	纵飘+竖弯	0.114 0	正对称竖弯	0.114 2	正对称竖弯
4	0.115 1	正对称竖弯	0.141 8	反对称侧弯	0.142 2	反对称侧弯
5	0.138 9	反对称侧弯	0.150 8	正对称竖弯	0.151 1	正对称竖弯
6	0.151 5	正对称竖弯	0.195 3	正对称竖弯	0.195 5	正对称竖弯
7	0.198 1	正对称竖弯	0.204 8	反对称竖弯	0.205 0	反对称竖弯
8	0.207 8	反对称竖弯	0.225 8	主缆摆振	0.225 8	主缆摆振
9	0.225 8	主缆摆振	0.227 4	正对称扭转	0.227 6	正对称扭转
10	0.227 4	正对称扭转	0.239 6	正对称扭转	0.239 8	正对称扭转

减振.

4.1 车辆激励下中央扣的影响

为研究加劲梁在车辆荷载作用下的动力响应以及中央扣对加劲梁端位移的控制,考虑 4 辆车速为 72 km/h 的 55 t 标准车. 图 4 给出了梁端纵向位移与累加位移时程曲线.从图 4 可以看出,梁端位移峰值出现在车辆行驶至主梁 1/4 跨、3/4 跨位置的时,因此中央扣的设置并未改变主梁的振动特性.然而,中央扣明显减小了梁端纵向位移的峰值.另一方面,对主梁自由振动阶段而言,设置中央扣后主梁自由振动加速衰减.值得注意的是,由于中央扣的设置提高了结构的纵向刚度,主梁振动频率因此提高,此时可以发现设置中央扣后梁端累加位移值明显增大.

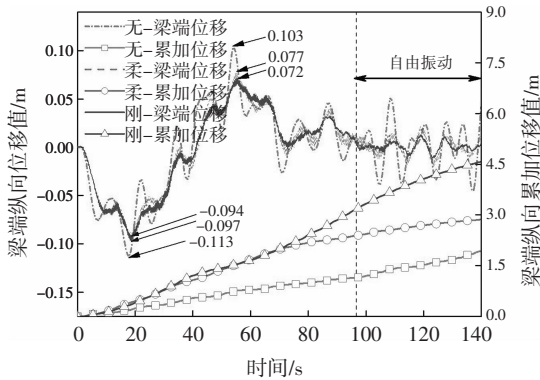


图 4 梁端纵向位移时程图

Fig.4 Time history of longitudinal displacement

图 5 给出了不同模型的梁端竖向角位移和累加竖向角位移的时间历程曲线.可以看出,梁端产生明显的转角变形,最大角位移值达到 0.002 6/rad,因此梁顶、底面纵向变形存在一定的差异.对于实际工程而言,需要区分伸缩缝与梁底支座各自承受的纵向位移值.另外柔性中央扣对累加竖向角位移有更好的控制效果,相反刚性中央扣控制效果并不明显.为了控制角位移,可适当考虑设置柔性中央扣.

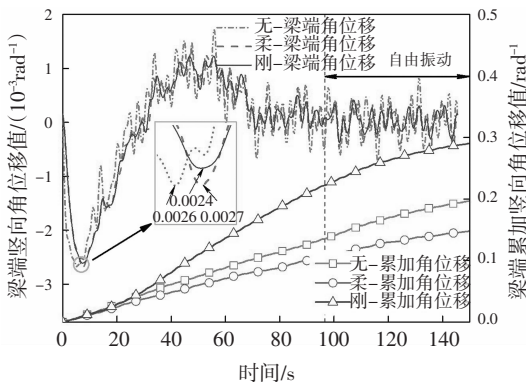


图 5 梁端竖向角位移时程图

Fig.5 Time history of vertical angular displacement

4.2 车速对中央扣控制动力响应的影响

一般而言,车速越大,车辆具有的动能越大,对主梁的冲击作用也越显著.为研究不同车速工况下中央扣对主梁动力响应的影响,考虑 6 种常见车速工况.图 6 和图 7 分别给出了 3 种连接体系的桥梁在不同车速下的梁端纵向位移峰值.可以看出,梁端峰值位移随车速增大呈先增后减的变化趋势,但中央扣对峰值位移的控制效果却随车速增大而减弱.另外受边跨吊杆的影响,增设柔性或刚性中央扣并未有效控制最小值位移.

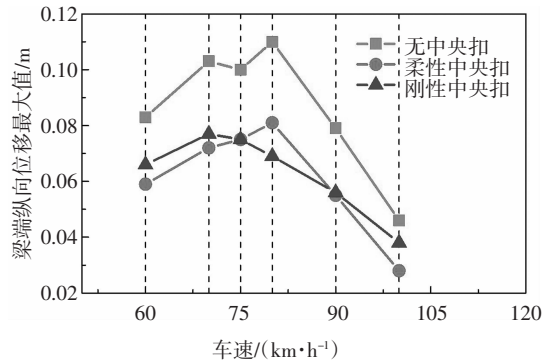


图 6 不同车速工况下梁端最大纵向位移

Fig.6 Maximum longitudinal displacement

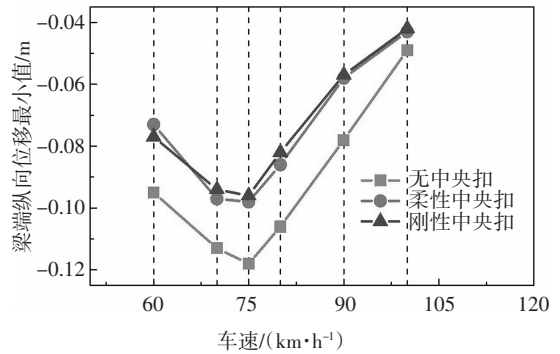


图 7 不同车速工况下梁端纵向位移最小值

Fig.7 Minimum longitudinal displacement

图 8 给出了梁端累加位移随车速增大的变化图.可以看出,累加位移值同样随着车速增大呈先增后减的变化趋势;以 M-C 为例,车速从 60 km/h 增大到 100 km/h,累加位移值从 2.52 m 增大到 4.56 m 再大幅减小至 1.23 m.总体而言,梁端纵向位移似乎在特定车速下发生了共振,此时主梁的振动速度、幅值均显著增大,导致梁端产生较大的累加位移.同时可以看出,设置刚性中央扣的共振车速小于设置柔性中央扣的共振车速,因此可通过整体刚度定性判断相应的共振车速.

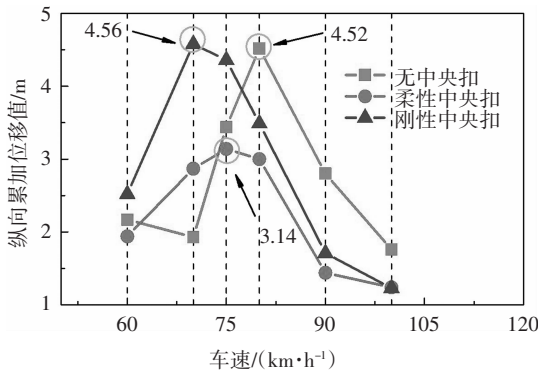


图8 不同车速工况下梁端累加纵向位移值
Fig.8 Cumulative longitudinal displacement

4.3 行驶方向对中央扣控制动力响应的影响

为研究车辆行驶方向对主梁动力响应的影响,分别考虑两车单向(GK1)、两车双向(GK2);四车单向(GK3)、四车双向(GK4)4种工况,如图9所示。

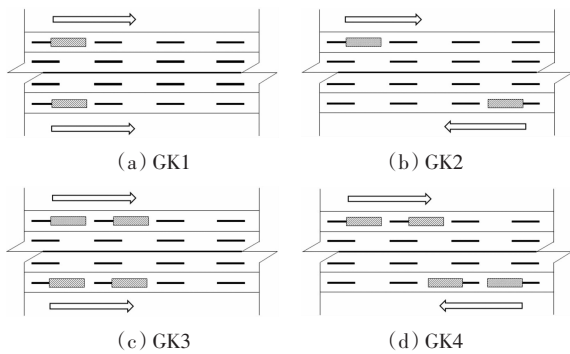


图9 GK1,GK2,GK3,GK4示意图

Fig.9 Schematic diagram of GK1,GK2,GK3,GK4

图10给出GK3和GK4工况下的梁端位移时间历程曲线;表3给出了4种工况下的梁端位移峰值和累加位移值.可以看出,增设中央扣能减小梁端位移峰值,刚性中央扣对位移峰值的控制效果略优于柔性中央扣.另一方面,当车辆相向行驶时,梁端峰值位移小于同向行驶时的位移峰值,注意到设置中央扣仅小幅提升了控制效果.主要原因是在相向行驶车辆激励下,梁端同时受近端与远端车辆的影响,导致位移响应被削弱,纵向位移峰值相应减小.因此设置柔性或刚性中央扣对位移峰值的控制效果不显著。

此外还可以看出增加相向行驶车辆的数量会弱化不设中央扣的悬索桥位移峰值部分抵消的动力效应.但对增设中央扣的悬索桥而言,相向行驶的车辆越多,梁端位移峰值削减的效应越显著.此外,中央扣的设置导致累加位移增大,72 km/h为M-B对应的共振车速,因此累加位移值最大。

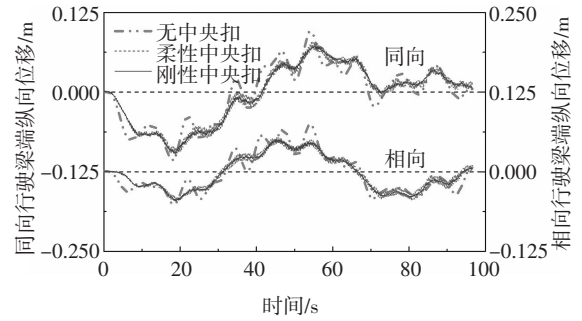


图10 GK3,GK4工况梁端位移响应

Fig.10 Longitudinal displacement for GK3 and GK4

表3 GK1-GK4工况下各模型的位移峰值和累加位移值
Tab.3 Peak longitudinal displacement and cumulative displacement for GK1 to GK4

模型	位移值/m	位移值/m			
		GK1	GK2	GK3	GK4
M-A	峰值	Max 0.047	0.021	0.096	0.074
	Min -0.039	-0.021	-0.101	-0.052	
	累加值	0.850	0.190	1.040	0.760
M-B	峰值	Max 0.021	0.018	0.078	0.054
	Min -0.024	-0.023	-0.096	-0.047	
	累加值	1.430	1.080	4.850	4.200
M-C	峰值	Max 0.019	0.017	0.072	0.051
	Min -0.024	-0.022	-0.097	-0.046	
	累加值	0.370	0.400	1.390	0.910

4.4 车流对中央扣控制动力响应的影响

为研究车流的影响,考虑间距分别为50 m、100 m、150 m的工况.图11给出了间距100 m的车流不

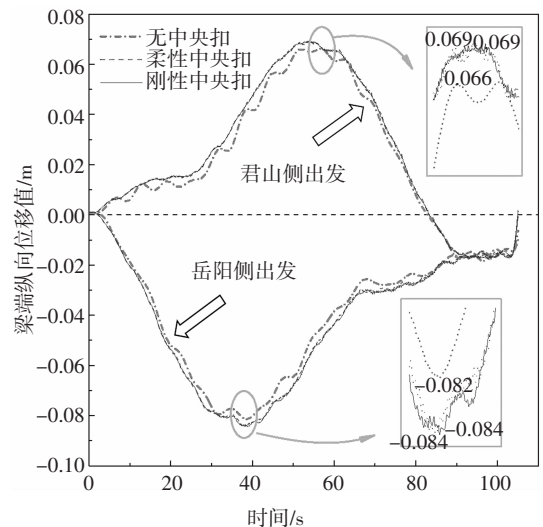


图11 间距100 m车流工况下梁端纵向位移

Fig.11 Time history of longitudinal displacement for separation distance of 100 m

同连接体系桥梁的梁端位移时间历程曲线.可以看出,当第一辆车行驶至主梁 2/5 跨位置处时,梁端位移同连接体系桥梁的梁端位移时间历程曲线.可以看出,当第一辆车行驶至主梁 2/5 跨位置处时,梁端位移出现最大值;此时不同模型对应的位移时程曲线变化基本一致,但梁端位移值反而略大于无中央扣体系(M-A)的位移值.另外值得注意的是,当车流双向行驶时,主梁振动会相互影响导致位移值减小.因此在实际工程中,可以根据车流情况设计伸缩缝位移量,若存在明显的单向车流,则需增大伸缩缝的设计值;相反伸缩缝的设计值可相应减小.

表 4 为不同车距工况下 3 种模型的累加位移值.结合表 4 与图 11 可以看出,车流的累加位移值远小于 4 车同向行驶工况下的累加位移值(见图 4),同时主梁振动频率也明显降低.主要原因是不同车辆同时激发主梁振动,振动相互影响造成梁端位移减小.

表 4 不同间距下梁端累加位移值

Tab.4 Cumulative longitudinal displacement for different separation distance

模型	位移值/m		
	间距 50 m	间距 100 m	间距 150 m
M-A	1.14	0.18	0.22
M-B	0.86	0.33	0.24
M-C	0.85	0.30	0.40

4.5 刹车对中央扣控制主梁动力响应的影响

通常而言,车辆制动力与车辆静荷载线性相关,且在刹车过程中制动力不随制动过程减小^[10].为考察车辆制动的影响,考虑一辆标准车行驶至加劲梁跨中位置制动,制动力大小为车辆静荷载,制动时间 3 s.图 12 为该工况下 3 种模型的梁端位移时间历程曲线.可以看出中央扣对梁端位移响应曲线有明显影响,因此中央扣改变了主梁在制动力作用下的动力响应.同时,设置中央扣后梁端位移峰值均远小于无中央扣模型的位移峰值,并且刚性中央扣对位移峰值的控制效果略优于柔性中央扣.另外可以看出,相比于柔性中央扣,刚性中央扣能更加有效地控制主梁在制动力作用下的振动,既减小了位移峰值,又减小了累加位移值.因此,通过中央扣能有效控制车辆制动对主梁的影响,并且刚度越大,减弱主梁动力响应的效果越显著.

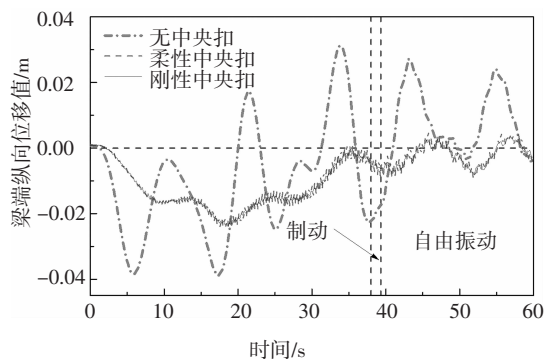


图 12 跨中位置刹车工况下梁端位移

Fig.12 Time history of longitudinal displacement for braking in the mid-span off the bridge

5 结论

本文以洞庭湖二桥为工程背景,分别建立了跨中 3 种连接方式的全桥有限元模型.对比分析了各模型的自振特性,同时研究了中央扣对梁端位移响应的控制,得到以下结论:

- 1) 中央扣能显著提高悬索桥的纵向刚度,但中央扣刚度对结构的模态影响较小.
- 2) 中央扣能减小纵向位移峰值,然而增大主梁纵向振动频率,导致较大的累加位移值.同时,设置刚性中央扣的悬索桥对应的共振车速最小,但引起的梁端累加位移和累加竖向角位移最大;相反柔性中央扣对共振车速的影响较小.另一方面,在车辆间距影响下,不同类型中央扣减振效果基本不受车辆间距的影响.
- 3) 相向行驶的车辆会引起主梁的纵向振动相互影响.桥梁设置中央扣后,相向行驶的车辆数量越多,梁端位移峰值削减得越明显.
- 4) 中央扣能有效减弱车辆制动对主梁动力响应的影响.增大中央扣刚度,可有效控制主梁的动力响应,减小梁端的位移峰值和累加位移值.

值得指出的是,本文的研究并没有考虑阻尼器的影响.实际上,洞庭湖二桥在主梁的两端分别设置了阻尼器进行减振.理论上讲,中央扣与阻尼器对梁端位移响应控制机理有明显不同,前者主要利用结构模态属性的改变,后者主要利用耗能.因此阻尼器的设置应该只在定量的层面影响数值结果,并不会定性影响本文的结论.

参考文献

- [1] 邓扬,李爱群,丁幼亮.大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用[J].公路交通科技,2009,26(5):55—58.
DENG Y,LI A Q,DING Y L. Research application of correlation between beam end displacement and temperature of long-span suspension bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2009,26(5):55—58.(In Chinese)
- [2] 刘扬,李杜宇,邓扬.大跨度悬索桥伸缩缝位移监测数据分析与评估[J].长沙理工大学学报,2015,12(2):21—28.
LIU Y,LI D Y,DENG Y. Analysis and assessment of the monitoring data of expansion joints for long-span suspension bridge [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2015,12(2):21—28. (In Chinese)
- [3] 单宏伟,韩大章,吕立人.润扬长江公路大桥悬索桥中央扣设计[J].公路,2004(8):58—61.
SHAN H W,HAN D Z,LÜ L R. Design of center nodes of runyang suspension bridge over yangtze river [J]. Highway,2004(8):58—61. (In Chinese)
- [4] 彭旺虎,邵旭东.悬索桥纵向和竖向耦合自振研究[J].工程力学,2012,29(2):142—148.
PENG W H,SHAO X D. Study on longitudinal and vertical coupling vibration of suspension bridges [J]. Engineering Mechanics,2012,29(2):142—148. (In Chinese)
- [5] 胡腾飞,华旭刚,温青,等.中央扣对大跨悬索桥模态特性的影响[J].公路交通科技,2015,32(6):89—92.
HU T F,HUA X G,WEN Q,*et al.* Influence of central buckles on modal characteristics of long-span suspension bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015,32(6):89—92. (In Chinese)
- [6] 王浩,李爱群.中央扣对大跨度悬索桥风致抖振响应的影响[J].土木工程学报,2009,42(7):78—84.
WANG H,LI A Q. Influence of central buckle of wind-induced buffeting response of long-span suspension bridge [J]. China Civil Engineering Journal,2009,42(7):78—84. (In Chinese)
- [7] 徐勋,强士中.中央扣对大跨悬索桥动力特性和地震响应的影响研究[J].铁道学报,2010,32(4):84—91.
XU X ,QIANG S Z. Influence of central buckle on dynamic behavior and seismic response of long-span suspension bridge[J]. Journal of China Railway Society,2010,32 (4):84—91. (In Chinese)
- [8] 王浩,李爱群,杨玉冬,等.中央扣对大跨悬索桥动力特性的影响[J].中国公路学报,2006,19(6):49—53.
WANG H,LI A Q,YANG Y D,*et al.* Influence of central buckle on dynamic behavior of long-span suspension bridge [J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19 (6): 49—53. (In Chinese)
- [9] CHATTERJEE P K,DATT T K,SURANA C S. Vibration of suspension bridge under vehicle movement [J]. Journal of Structural Engineering,1994,120(3):681—703.
- [10] GUPTA R K,TRAILLNASH R W. Vehicle braking on highway bridges [J]. Journal of Engineering Mechanics,1980,106 (4): 641—658.
- [11] 朱志辉,张鹏,赵婷婷,等.考虑节点刚域影响的钢-混组合桁架梁桥行车动力响应分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(5):19—28.
ZHU Z H,ZHANG P,ZHAO T T,*et al.* Driving dynamic response analysis of a steel-concrete composite trussed girder bridge considering the effect of nodal rigid zone [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2018,45(5):19—28. (In Chinese)