

中央扣对大跨度空间缆索悬索桥静动力特性影响研究

唐茂林¹, 李帅帅¹, 唐清华², 李翠娟^{1*}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司)

摘要:为探讨不同中央扣联结形式对空间缆索悬索桥静、动力特性的影响,以宝塔坪特大桥为研究背景,建立了该桥3种不同联结模式下的三维空间静、动力计算模型,针对3种不同中央扣联结形式下结构静、动力响应做了对比分析。研究表明:静力方面,中央扣对活载下加劲梁的竖向挠度影响较小,但会减小梁端纵向位移,并将增大跨中加劲梁轴力;动力方面,中央扣的设置提高了结构的反对称扭转频率,推迟了纵漂振型的出现,增大了结构的抗扭转刚度和纵向刚度。

关键词:空间缆索;悬索桥;中央扣;活载;静动力响应

1 引言

中央扣又称中央夹具,是在悬索桥跨中设置的连接主缆和加劲梁的装置,可有效提高大跨度悬索桥的结构刚度。中央扣的首次应用是在1950年的Tacoma新桥上,至今已发展出了3种设置形式,分别为:①用刚性三角桁架联结主缆与加劲梁,将梁与缆在跨中处相对固结,即刚性中央扣;②通过在跨中设置1对或多对斜吊索来约束加劲梁的纵向位移,即柔性中央扣;③直接将加劲梁与主缆联结。表1为国内外部分

悬索桥中央扣设置情况。由表1可看出:欧美国家倾向于采用刚性中央扣,而日本倾向于采用柔性中央扣,中国多采用刚性中央扣。

近年来,多座新建悬索桥均采用了中央扣,但相关的文献报道却很少。在结构抗风性能方面,胡腾飞等以矮寨特大桥为背景,利用有限元分析和动力测试的方法,研究了中央扣对结构模态特性的影响;在结构抗震方面,夏支贤等以云南金沙江大桥为工程背景,研究了中央扣对独塔地锚式悬索桥地震响应的影响;在车致振动方面,徐勋以四渡河大桥为背景,通过对比3种中央扣在移动汽车车列激励下的时程反应,探讨了大

三沙大桥采用方法①进行承载能力设计,同时采用方法②进行承载能力复核,确保结构在安全的前提下,不过于浪费。

7 结语

三沙大桥采用钢管混凝土劲性骨架法成拱技术,为该工法在大跨度桥梁中的运用又推进了一步。劲性骨架法修建的拱桥,在设计过程中尤其要注意骨架的线形控制、骨架的安全控制,确保施工过程中的安全。钢筋混凝土箱形拱桥养护简单,后期病害较少、造价较低,特别适合于深切V形峡谷地貌,在山区峡谷桥梁中已成为有竞争力的桥型方案。

参考文献:

- [1] 谢邦珠,李文琪,张传贤,等. 万县长江公路大桥技术总结[M]. 1版. 成都:电子科技出版社,2001.
- [2] 牟廷敏,谢邦珠,庄卫林,等. 钢管混凝土劲性骨架成拱技术的兴起和发展[C]. 第二十一届全国桥梁学术会议论文集(上册),2014.
- [3] JTG/T D65-06-2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
- [4] DB51/T 1992-2015 钢筋混凝土箱形拱桥设计规程[S].
- [5] 中国公路工程咨询集团有限公司. S232恩施市沙地至三岔段改扩建工程两阶段施工图设计[Z],2018.
- [6] 常柱刚,赵翔宇,黄立浦. 考虑拱圈与拱架联合效应的拱架受力性能研究[J]. 中外公路,2018(4).

收稿日期:2020-09-03(修改稿)

作者简介:唐茂林,男,博士,副教授. E-mail:tmlpl@126.com

* 通信作者:李翠娟,女,博士,副教授. E-mail:Lcj@swjtu.edu.cn

表 1 国内外部分悬索桥中央扣设置情况

桥名	跨径/m	用途	加劲梁	中央扣设置方式	建成年份/年
Tacoma 桥(美)	853	公路	桁架	刚性	1950
Mackinac(美)	1 158	公路	桁架	刚性	1957
Little Belt 桥(丹)	600	公路	箱梁	刚性	1970
Creat Belt 桥(丹)	1 624	公路	箱梁	刚性	1998
High Coast 桥(瑞)	1 210	公路	箱梁	刚性	1997
Tancarville 桥(法)	608	公路	桁架	刚性	1959
25 April 桥(葡)	1 013	公铁	桁架	刚性	1966
大鸣门桥(日)	876	公路	桁架	柔性	1985
白岛大桥(日)	720	公路	箱梁	柔性	1996
彩虹桥(日)	570	公路	桁架	柔性	1993
润扬长江大桥(中)	1 490	公路	箱梁	刚性	2005
坝陵河大桥(中)	1 088	公路	桁架	柔性	2008
四渡河大桥(中)	900	公路	桁架	刚性	2009
泰州长江大桥(中)	1 080+1 080	公路	箱梁	刚性	2012
矮寨特大桥(中)	1 176	公路	桁架	刚性	2012
澧水大桥(中)	856	公路	桁架	刚性	2017
洞庭湖大桥(中)	1 933.6	公路	板桁结合加劲梁	刚性	2018
兴康特大桥(中)	1 100	公路	桁架	刚性	2018

跨度悬索桥中央扣在动力激励下的作用;在自振特性研究方面,彭旺虎等通过连续模型研究了设置中央扣悬索桥的扭转自振特性,阐述了中央扣提高结构反对称扭转频率的机理。然而,以上文献多围绕设置中央扣的平面缆索悬索桥的动力特性开展研究,针对中央扣对空间缆索悬索桥静动力特性影响方面的研究较为欠缺。

该文以重庆宝塔坪特大桥为研究对象,利用悬索桥非线性分析软件 BNLAS 建立了该桥设置柔性中央扣、刚性中央扣和不设置中央扣 3 种情况下的静、动力计算模型,对比分析了该桥在这 3 种工况下的静、动力特性及其变化规律。相关研究结果可为该桥前期设计和后期运营提供参考,同时还可推动中央扣在大跨度空间缆索悬索桥中的应用。

2 工程概况

宝塔坪特大桥位于重庆市奉节县,是一座双塔单跨简支地锚式空间缆索悬索桥,主缆的孔跨布置为(240+800+230) m,桥形布置见图 1。全桥采用 2 根空间主缆,主缆竖向矢跨比为 1/10,两主缆左、右岸散索点横向中心距分别为 32、23.5 m,空缆状态下,中跨 2 根主缆相互平行,主缆横桥向相隔 10 m,成桥状态下,两主缆横桥向间距由塔顶主索鞍出口处的 10 m

逐渐过渡到跨中处的 22 m 左右。吊杆采用抗拉强度为 1 770 MPa 的平行钢丝,全桥共计两类吊索,在端部为特殊吊索,吊索间距为 16 m,其余吊索为普通吊索,吊索间距为 12 m。加劲梁为钢混组合梁,由钢梁通过剪力钉与混凝土桥面板结合而成,钢梁由主纵梁、次纵梁、横梁和风嘴组成,加劲梁全宽 27.99 m,中心线处梁高 3 m,钢梁标准节段长度为 12 m,加劲梁标准断面如图 2 所示,主塔结构形式为钢筋混凝土箱形断面门式框架结构。

3 结构静、动力计算模型

为对比研究跨中设置不同类型联结将主缆与加劲梁固结对空间缆索悬索桥静、动力特性的影响,该文利用悬索桥非线性分析专用软件 BNLAS 建立了 3 种不同中央扣模式的计算模型,如图 3 和表 2 所示。

这 3 种结构有限元计算模型有以下特点:

- (1) 加劲梁的主纵梁、次纵梁、横梁均采用空间梁单元(共计 1 536 个)模拟,桥塔结构也离散为空间梁单元(共计 174 个)。
- (2) 主缆和斜向吊索离散为具有初始张力的只受拉杆单元(共计 371 个)。
- (3) 刚性中央扣用空间梁单元模拟,柔性中央扣用斜拉索单元模拟。

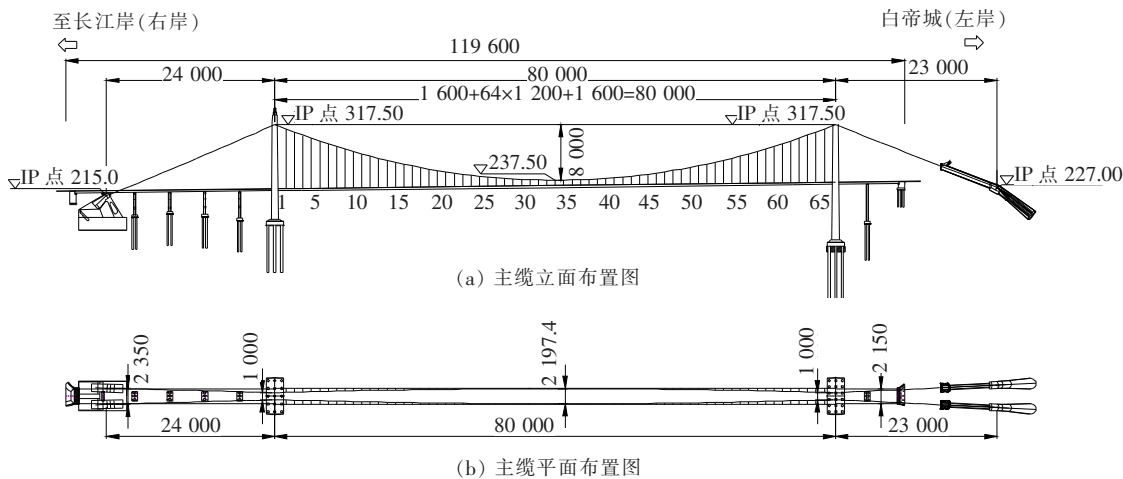


图 1 宝塔坪特大桥桥型布置图(除标高单位为 m 外,其余:cm)

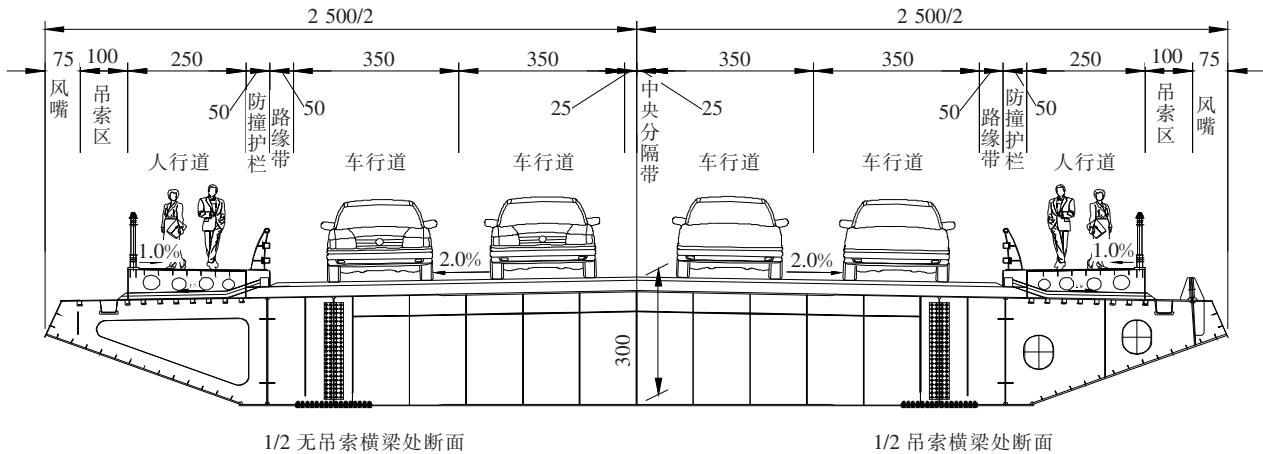


图 2 加劲梁标准断面(单位:cm)

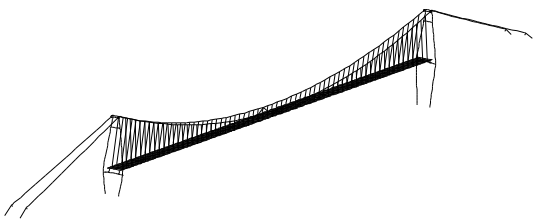


图 3 宝塔坪特大桥结构静、动力计算模型

表 2 3 种跨中不同联结方式结构静、动力计算模型

模型	中央扣类型	中央扣构造
M-A	无中央扣	无
M-B	刚性中央扣	刚性三角桁架
M-C	柔性中央扣	斜吊索

向转动的自由度,主缆与主塔在塔顶处的线位移完全耦合,主缆锚跨、主塔塔底固结。

4 中央扣对结构静力特性的影响

4.1 中央扣对汽车荷载响应的影响

为研究不同中央扣联结形式对空间缆索静力特性的影响,在所述 3 种不同中央扣形式的计算模型中加入四车道汽车荷载,对比 3 种中央扣形式下结构在活载下的静力响应,计算结果见表 3。

由表 3 可看出:① 设置柔性中央扣、刚性中央扣和不设置中央扣 3 种情况下,活载下加劲梁 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 处最大、最小竖向挠度几乎无变化;② 活载下塔顶处主缆水平不平衡力几乎无变化,说明中央扣的设置与否对活载作用下主缆缆力的影响较小;③ 设置中央扣后活载作用下加劲梁梁端部纵向位移明显减小,其中设置刚性中央扣与柔性中央扣的情况,加劲

(4) 在进行动力特性计算时,二期铺装及混凝土桥面板重量均转化成均布质量分配到钢梁上,索夹荷载也转化成节点质量转换到主缆节点上。

(5) 耦合了主梁与主塔在横桥向、竖向及绕纵桥

梁端部位移较不设置中央扣的情况下,最大纵向正位移分别减小 30%与 35%,最大纵向负位移分别减小 28%与 32%。

图 4 为活载作用下不同中央扣联结形式加劲梁竖向位移包络图、纵向位移包络图、加劲梁轴力包络图及加劲梁竖向弯矩包络图。

表 3 不同中央扣形式结构活载响应分析

工况		加劲梁挠度/m			主缆轴力/kN		塔顶不平衡	桥塔处梁端
		$L/4$	$L/2$	$3L/4$	边跨侧	中跨侧	水平力/kN	纵向位移/m
无中央扣	Max	0.65	0.23	0.65	12 692	13 716	107	0.26
	Min	-1.22	-1.01	-1.22				-0.25
柔性中央扣	Max	0.65	0.23	0.65	12 692	13 716	107	0.18
	Min	-1.21	-1.01	-1.21				-0.18
刚性中央扣	Max	0.65	0.23	0.65	12 687	13 713	106	0.17
	Min	-1.21	-0.99	-1.21				-0.17

注:表中加劲梁最大挠度正负值分别为最大向上位移与最大向下位移,加劲梁最大纵向位移正值为沿 x 轴正方向的最大位移,最大纵向位移负值为沿 x 轴负方向的最大位移,其中 x 轴为纵桥向,以小里程指向大里程侧为正反向,反之为负方向。

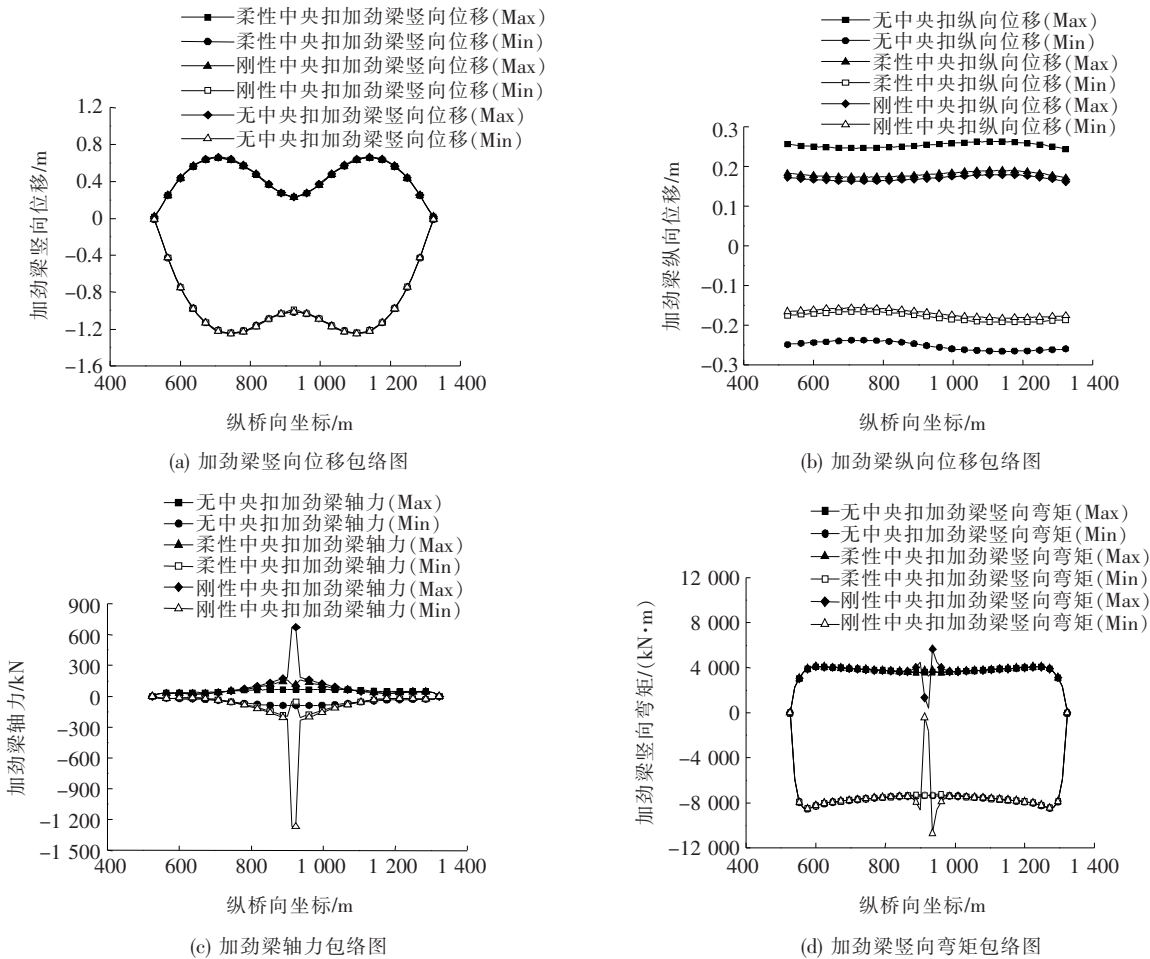


图 4 活载作用下 3 种不同中央扣形式的结构静力响应

由图 4 可知:① 活载作用下,3 种不同联结形式的中央扣模型中加劲梁最大竖向正位移与最大竖向负位

移均出现于 $L/4$ 处与 $3L/4$ 处,最小竖向正位移与最小竖向负位移出现于跨中处,竖向位移包络图呈现 M

形,说明了计算模型的正确性;② 活载作用下,设置中央扣加劲梁纵向位移明显小于未设置中央扣工况下的位移,此外,设置刚性中央扣的纵向位移小于设置柔性中央扣的纵向位移,说明 3 种不同中央扣联结对加劲梁纵向约束的排序情况为:刚性中央扣>柔性中央扣>不设置中央扣;③ 活载作用下,由于中央扣限制了缆、梁运动的不同步性,增大了加劲梁的纵向约束,使得跨中处的加劲梁轴力增大,设置刚性中央扣的加劲梁最不利轴力甚至增大了 10 倍左右,达到-1 260 kN (负值代表拉力);④ 活载作用下,设置柔性中央扣的工况与不设置中央扣的工况相比,加劲梁竖向弯矩几乎无变化,设置刚性中央扣将会使得中央扣区段的加劲梁竖向弯矩减小,且减小幅度较大。

综合表 3 和图 4 可知:设置中央扣对活载作用下加劲梁的竖向挠度并没有太大的影响。设置柔性中央扣时,加劲梁竖向弯矩并没有太大的变化,说明设置柔性中央扣并没有引起结构竖向刚度的改变;设置刚性中央扣时跨中弯矩大幅度减小,但跨中轴力却大幅度增大。

4.2 中央扣对跨中附近吊索活载应力幅的影响

为探究 3 种中央扣联结形式在活载作用下对跨中段短吊索应力幅值的影响,取跨中 33[#] 吊索及其左右吊索为研究对象,对比其在 3 种中央扣联结形式下的活载应力幅,相关结果见图 5。

由图 5 可知:活载作用下,设置刚性中央扣后跨中短吊索应力幅急剧下降,由不设置中央扣情况下的 271.35 MPa,下降到 120 MPa,设置柔性中央扣、刚性

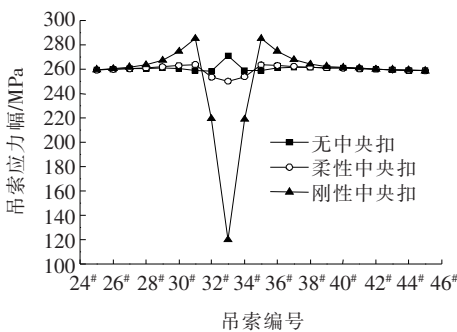


图 5 活载作用下不同中央扣联结形式跨中短吊索应力幅变化

中央扣情况下与不设置中央扣相比,应力幅分别减小 8%、55%,由此可见,设置中央扣可减小跨中短吊索的活载应力幅。究其原因,中央扣的设置减小了缆、梁不同步运动的趋势,增大了主缆对加劲梁的纵向约束作用,有效抑制了活载作用下缆、梁的错动。综上所述,设置中央扣可有效解决跨中短吊索在活载作用下的弯折效应。

5 中央扣对结构动力特性的影响

大跨度悬索桥固有振动特性分析是开展结构抗风、抗震以及车致振动研究的基础,为探讨不同中央扣联结形式对空间缆索悬索桥自振特性的影响,该文对宝塔坪特大桥 3 种中央扣联结形式下结构自振频率与振型特征做了对比分析,结果如表 4 所示。

表 4 3 种不同中央扣联结形式下宝塔坪特大桥自振频率与振型特征的比较

振型特征		f_{M-A}/Hz	f_{M-B}/Hz	f_{M-C}/Hz	f_{M-B}/f_{M-A}	f_{M-C}/f_{M-A}
1 阶侧弯	正对称	0.070 7(1)	0.071 2(1)	0.070 8(1)	1.006 8	1.000 7
	反对称	0.126 6(3)	0.126 8(2)	0.126 7(2)	1.001 0	1.000 5
1 阶竖弯	正对称	0.182 7(5)	0.183 0(4)	0.182 6(4)	1.001 7	0.999 6
	反对称	0.282 2 (10)	0.276 0(8)	0.271 9(9)	0.977 8	0.963 6
1 阶扭转	正对称	0.307 6(11)	0.316 0(10)	0.309 2(10)	1.027 4	1.005 3
	反对称	0.506 7(22)	0.526 8(26)	0.512 3(25)	1.039 5	1.010 9
主跨主缆振动	1 阶	0.335 6(12)	0.381 5(13)	0.341 3(11)	1.136 9	1.017 1
	2 阶	0.388 0(16)	0.390 9(14)	0.388 1(16)	1.007 5	1.000 3
边跨主缆振动	1 阶	0.502 6(21)	0.502 9(21)	0.502 7(21)	1.000 4	1.000 1
	2 阶	0.508 5(23)	0.508 5(22)	0.508 5(22)	1.000 0	1.000 0
纵漂伴随竖弯	1 阶	0.106 8(2)	0.132 9(3)	0.132 3(3)	1.244 9	1.239 1
	2 阶	0.150 7(4)	0.486 7(20)	0.351 1(13)	3.229 7	2.329 6

注:表中括号内数字表示该振型特征在相应模型中出现的模态阶次。

由表 4 可得:① 该桥基频为 0.070 7 Hz,基本周期较长,其对应振型为 1 阶侧弯振型,第 2 阶振型为反对称竖弯伴随纵漂,相应的频率为 0.106 8 Hz,这些特点与文献[4]、[5]、[9]中的变化规律一致,同时也符合大跨度悬索桥柔性结构的一般规律;② 相比设置柔性中央扣的空间缆索模型,设置刚性中央扣的各阶频率略高;③ 设置中央扣的模型侧弯模态频率均高于未设置中央扣的模型,但是频率增大的幅度不大,3 种模型侧弯模态频率排序依次为 $M-B > M-C > M-A$,说明中央扣在一定程度上提高了空间缆索悬索桥的横向刚度,但提高的幅度有限,设置刚性中央扣提高的幅值要大于设置柔性中央扣;④ 对于竖弯模态,中央扣对反对称模态频率的影响明显大于对正对称模态频率的影响,但从数值上看,中央扣对空间缆索竖弯模态频率的影响较小,说明中央扣对结构竖向刚度的影响也较小;⑤ 中央扣明显增大了结构扭转模态的频率,且刚性中央扣较柔性中央扣增大幅值更大。对比正对称扭转频率与反对称扭转频率,发现中央扣对反对称扭转频率的影响更大,反对称扭转模态下, $M-B$ 、 $M-C$ 模型与 $M-A$ 模型相比,频率分别增大 5% 与 4%,究其原因,结构在发生反对称扭转时,倾斜吊索在横桥向增大了缆、梁的联结,在横向对主缆提供了一对方向相反的拉力,使得主缆获得额外的弹性应变能,结构的扭转频率得到提高;⑥ 设置柔性中央扣对主缆的振动频率几乎无影响,设置刚性中央扣提高了主缆的振动频率,最大可提高 14%;⑦ 空间缆索悬索桥中央扣对纵漂高阶振型的影响较为明显,相比无中央扣的模型,有中央扣的模型 1、2 阶纵漂频率分别高出 25%、178%,且纵漂振型明显推迟,中央扣联结形式对纵漂频率的影响排序为:刚性中央扣 > 柔性中央扣 > 无中央扣。究其原因,中央扣的使用,减小了缆梁的不同步运动,增大了缆、梁连接,增强了对加劲梁的纵向约束作用,提高了结构纵向刚度,从而增大了结构纵漂频率。

6 结 论

以宝塔坪空间缆索悬索桥为背景,利用 BNLAS 对比分析了 3 种不同中央扣联结形式对结构静、动力特性的影响。得出以下结论:

(1) 中央扣联结形式对活载作用下加劲梁的挠度并无影响,但是中央扣的使用会使跨中加劲梁的轴力增大,采用不同中央扣联结形式时,对加劲梁跨中弯矩的影响也不同。

(2) 中央扣可降低跨中短吊索活载作用下的应力幅值,刚性中央扣活载应力幅减小趋势更加明显。

(3) 中央扣可增大结构扭转模态的频率,且对反对称扭转频率的影响更大,但对竖弯模态的频率影响较小,同时,中央扣对纵漂高阶振型的影响特别明显,有中央扣时,会使纵漂振型明显推迟。

(4) 以上研究成果对该桥前期设计及后期运营阶段的健康监测提供了一定的参考,此外,也为以后中央扣在大跨度空间缆索悬索桥上的应用推广提供了一定的基础资料。但应注意,在选用中央扣时要从结构受力、动力特性、经济性等方面综合考虑。

参考文献:

- [1] Gimsing N J. Cable Supported Bridges: Concept and Design[M]. England: John Wiley & Sons, 1997.
- [2] 朱本瑾. 多塔悬索桥的结构体系研究[D]. 同济大学硕士学位论文, 2007.
- [3] VIOLA J M, SYED S, CLENANCEI J. The New Tacoma Narrows Suspension Bridge: Construction Support and Engineering[C]. Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium. New York: Structure Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, 2005: 1—12.
- [4] 徐勋, 强士中, 贺拴海. 中央扣对大跨悬索桥动力特性和汽车列车激励响应的影响[J]. 中国公路学报, 2008(6).
- [5] 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(4).
- [6] 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(6).
- [7] 夏支贤, 刘斌, 陈永亮, 等. 中央扣对独塔地锚式悬索桥动力特性及地震响应的影响[J]. 中外公路, 2016(2).
- [8] 彭旺虎, 邵旭东. 设置中央扣悬索桥的扭转自振分析[J]. 中国公路学报, 2013(5).
- [9] Xu Y L, Ko J M, Zhang W S. Vibration Studies of Tsing Ma Suspension Bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 1997, 2(4): 149—156.