

文章编号:1005-0523(2019)01-0049-10

多塔矮塔斜拉桥结构体系的适用性研究

罗浩¹,丁延书¹,刘榕²,伍英²,赖明苑³

(1.中交第一公路工程局有限公司,北京 100024;2.湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南长沙 410008;
3.中南大学土木工程学院,湖南长沙 4100075)

摘要:为研究多塔矮塔斜拉桥结构体系的适用性,以常德沅水四桥为工程背景,分别建立半漂浮、塔梁固结和刚构体系空间有限元模型,对结构在静动力工况下的作用效应进行分析比较。计算结果表明:刚构体系结构刚度大,静力及地震作用下荷载效应分布比较均匀,但在整体升温时桥墩和桥塔将出现很大的内力。半漂浮体系和塔梁固结体系在荷载作用下变形大,温度内力相对较小,制动力和地震作用下各墩响应差别明显。沅水四桥采用刚构和塔梁固结组合的结构体系,解决了温度作用下边墩受力过大的问题;固结墩分成紧靠的双肢可减小桥墩的抗推刚度,不增加基础工程量,又达到良好的美学效果,可为今后同类型桥梁设计提供参考。

关键词:多塔矮塔斜拉桥;结构体系;静动力特性;适用性

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

矮塔斜拉桥是一种介于连续(刚构)梁桥与斜拉桥之间的桥型,与连续梁相比具有结构新颖、跨越能力大、造型美观等优点;与斜拉桥相比具有施工方便、节省材料、主梁刚度大等优点。由于矮塔斜拉桥桥塔矮、梁的刚度较大,对控制塔顶水平位移及梁的变位较为有利,在150~350 m跨径的桥梁中极具竞争性,受到国内外工程技术人员的广泛关注^[1]。我国相继修建了芜湖长江大桥(2000年)、福建漳州战备大桥(2001年)、厦门同安银湖大桥(2002年)、惠青黄河公路大桥(2007年)、大连长山大桥(2014年)等矮塔斜拉桥^[2-4]。韩国(Kack-Hwa一桥,2006年;Keong-An桥,2009年)、法国(圣雷米-德莫里耶纳桥,1996年)^[5]、西班牙(德巴河大桥,2003年;考容桥,2004年)、克罗地亚(家园桥,2006年)、巴西(巴西秘鲁联通桥,2007年)、印度(维韦卡南达二桥,2007年)、加拿大(金耳大桥,2009年)以及美国(新珍珠港纪念桥,2015年)等国家也都修建了不少矮塔斜拉桥^[6-7]。

随着矮塔斜拉桥应用的日益广泛,国内外学者对其结构体系、静动力受力性能、构造方式、局部受力等方面都进行了一些研究。日本学者山崎淳和山縣敬二等(1995)通过统计分析提出采用拉索数值荷载分担比例 β 和缆索竖向刚度与主梁刚度的比值 γ 来对矮塔斜拉桥拉索承担荷载贡献进行特征描述;刘凤奎、蔺鹏臻、刘志鑫等(2004)通过引入矮塔斜拉桥的特征参数,对独塔及双塔矮塔斜拉桥的动静力性能做了描述;高翔(2007)探讨了矮塔斜拉桥的结构体系、跨径布置、主梁截面形式和梁高的参数选择、拉索和索塔的构造特点等,探究矮塔斜拉桥的力学特征,分析其特点及适用性;杨国静(2007)讨论了墩梁刚结和铰结两种体系桥梁在各工况和荷载组合作用下的受力行为和变形情况,比较分析了成桥后期混凝土时间依存特性对两种体系桥梁受力行为的影响;史海涛^[8](2010)通过调整不同的结构参数,对矮塔斜拉桥的结构内力及变形的影响进行了分析,进而得出了该类桥型在不同支承条件、塔高、无索区长度及边主跨比的合理取值范围;董亮(2012)研究矮塔斜拉桥局部到整体的空间应力、受力特征,同时对相关的敏感参数展开讨论;李晓龙(2013)

收稿日期:2018-07-01

基金项目:湖南省交通厅科技进步与创新项目(201426)

作者简介:罗浩(1986—),男,工程师,研究方向为土木工程。

研究了预应力混凝土矮塔斜拉桥结构的受力性能,用比拟梁法推导索梁活载比的计算方法;王维康(2014)采用了层次分析法和模糊理论两大数学模型作为理论支撑,对实际工程模型体系中存在的不足之处用灰色关联度等方法进行了相关完善与改进。

目前,对矮塔斜拉桥的研究大多集中于独塔或双塔斜拉桥的结构体系和静动力特征,对多塔矮塔斜拉桥的结构体系研究很少。常规斜拉桥按照塔、梁、墩相互结合方式,可分为漂浮体系、半漂浮体系、塔梁固结体系和刚构体系。漂浮体系的主梁截面无负弯矩峰值,温度、收缩和徐变次内力均较小,但是在悬臂施工时塔柱处主梁需要临时固结。由于矮塔斜拉桥主梁刚度大,存在较长的无索区,如果采用漂浮体系则桥塔位置竖向拉索受力过大;因此矮塔斜拉桥没有采用漂浮体系的先例。半漂浮体系的主梁在塔墩上设置竖向支承,整体刚度相对漂浮体系大,满载时塔柱处主梁有负弯矩峰值。塔梁固结体系将塔梁固结并支承在墩上,可有效地减小主梁中央段的轴向拉力和结构的温度内力,缺点是结构刚度小、变形大。刚构体系的塔梁墩均固结,结构刚度大,容易满足悬臂施工的稳定要求,但是主梁固结处弯矩大,索塔需要承受较大的温度应力以及水平地震作用^[8-10]。本文以多塔矮塔斜拉桥的结构体系为研究对象,通过对比不同体系下结构的静动力性能,对各结构体系的适用性进行分析,为多塔矮塔斜拉桥的设计提供参考。

1 工程背景及计算模型

本文的依托工程为常德沅水四桥。沅水四桥主桥为跨径组合(106+4×175+106) m的五塔四跨矮塔斜拉桥,该桥采用刚构和塔梁固结混合体系,全长 912 m。主梁为预应力混凝土变截面箱梁,全幅采用斜腹板单箱三室断面。箱梁顶板宽 29.50 m,底板宽 16.25~14.75 m,悬臂长 5.50 m。箱梁跨中梁高 3.2 m,根部梁高 6 m;边腹板厚 0.60 m,中腹厚 0.45 m。全桥共 5 个索塔,塔高 32.5 m。塔底与主梁 0 号梁段固结,塔身横向宽 2.50 m,塔身上段纵桥向等宽 3.8 m,塔底 12.5 m 范围内按曲线渐变至 6 m。斜拉索为单索面双排索,采用 $\varphi 15.2$ mm 型环氧涂层钢绞线拉索体系。梁上索距 4.0 m,塔上索距 0.8 m,斜拉索在塔上采用分丝管式索鞍通过。

主墩采用钢筋混凝土实体花瓶式桥墩,桥墩横桥向由墩顶 15.70 m 宽向下 16 m 收腰至 11.00 m 宽,再至墩底为等宽段,形似“花瓶”,表面设竖向景观凹槽;桥墩纵桥向厚度为 3.52 m,墩顶 6.5 高度线性渐变至 5.52 m,墩底 6.5 m 高度线性渐变至 4.52 m。主墩下接 5.0 m 厚承台,承台平面尺寸为 23.8 m(横)×13.8 m(纵),下设 15- $\varphi 2.2$ m 群桩基础,纵向布置 3 排,每排 5 根。大桥的桥型布置如图 1 所示。

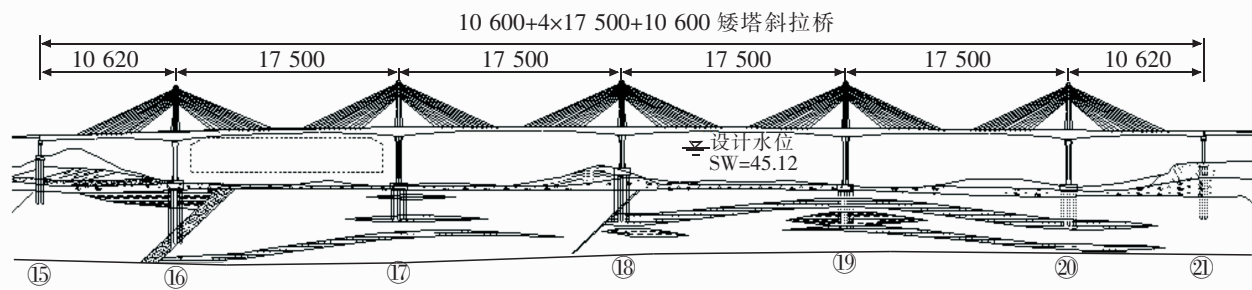


图 1 常德沅水四桥主桥桥型图(单位:cm)

Fig.1 Bridge layout of the fourth Yuanshui bridge in Changde (unit:cm)

采用有限元程序 Midas Civil 建立沅水四桥主桥有限元模型,全桥共离散为 789 个节点,770 个单元。主梁、桥墩和桥塔均用空间梁单元模拟,斜拉索用桁架单元模拟。主梁和桥塔为 C55 混凝土,桥墩为 C50 混凝土,弹性模量分别取 $3.55e4$ MPa 和 $3.45e4$ MPa。主梁预应力筋和拉索均采用标准强度 1 860 MPa 的钢绞线,弹性模量为 $1.95e5$ MPa。通过修改塔、梁、墩之间的约束方式,得到不同结构体系(半漂浮体系、塔梁固结体系、刚构体系)的空间计算模型。其中,半漂浮体系和塔梁固结体系的纵向固定支座设置于正中间的桥墩,其余桥墩为纵向活动支座,计算模型如图 2 所示。

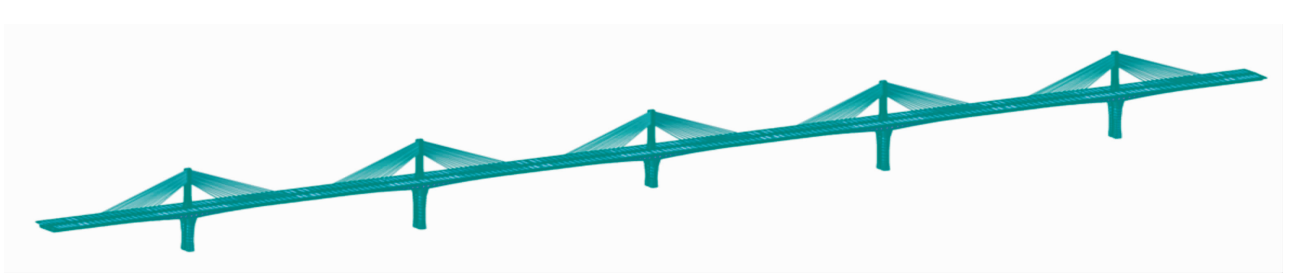


图 2 沅水四桥计算模型

Fig.2 The calculation model of the fourth Yuanshui bridge in Changde

2 多塔矮塔斜拉桥的静力特性

对于多塔矮塔斜拉桥静力特性研究,主要研究半漂浮体系、塔梁固结体系、刚构体系矮塔斜拉桥的主梁、主塔、拉索、主墩的作用效应。通过对比汽车荷载、温度作用、制动力作用等作用效应,分析不同结构体系的适用性。

2.1 主梁作用效应

为方便描述各位置的受力及挠度情况,各跨中及墩编号如图 3 所示。由于结构具有对称性,下文中均只列出 1/2 结构在较大荷载效应的部分工况下的计算结果。

在不同荷载工况下,各结构体系主梁跨中及支点处的弯矩如表 1 所示。

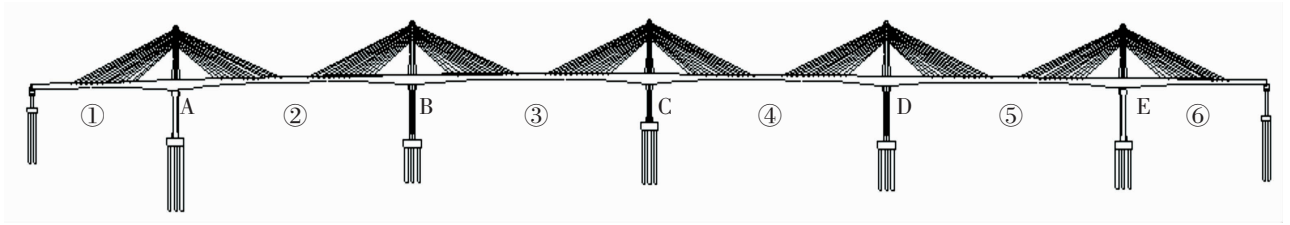


图 3 分跨及桥墩编号示意

Fig.3 Spans and piers number

表 1 不同结构体系主梁跨中及支点弯矩

Tab.1 The support points and mid-span moment of different structural systems

荷载工况	结构体系	位置					
		①	②	③	A 支点	B 支点	C 支点
汽车	半漂浮体系	83 535.9	79 094.4	87 346.1	-122 062.7	-134 639.7	-137 376.4
	塔梁固结	93 088.7	87 525.6	100 531.5	-128 188.8	-139 274.2	-139 204.2
	刚构体系	46 126.7	48 963.4	49 532.4	-122 205.1	-126 007.9	-125 121.2
温度梯度	半漂浮体系	19 464.8	31 343.9	27 851.8	53 235.9	43 535.6	47 948.2
	塔梁固结	20 054.8	31 470.7	27 819.6	52 370.6	43 568.3	48 028.8
	刚构体系	32 552.0	28 320.2	28 021.9	33 552.1	44 890.9	51 999.0
整体升温	半漂浮体系	-7 982.0	3 787.7	2 234.5	-9 236.9	-11 975.6	-9 957.4
	塔梁固结	468.9	2 602.8	2 828.8	-10 911.1	-11 900.6	-11 088.7
	刚构体系	65 564.0	-8 534.3	-703.4	-123 548.8	-31 893.8	31 746.9
二恒	半漂浮体系	12 492.6	48 578.9	40 884.8	-138 501.4	-155 839.4	-146 166.2
	塔梁固结	11 798.7	49 153.6	40 667.8	-139 353.9	-155 832.5	-145 722.1
	刚构体系	24 904.9	44 669.7	41 906.7	-155 793.2	-148 415.1	-146 462.1

从表 1 可见,由于桥墩的约束作用,汽车荷载下刚构体系的跨中弯矩明显较半漂浮和塔梁固结体系小,支点弯矩则相差不大;温度梯度作用下,刚构体系边跨跨中和 A 支点弯矩与半漂浮体系及塔梁固结体系也有明显差异;整体升温时,刚构体系的跨中和支点弯矩,尤其是边跨跨中和 A 支点处弯矩明显较半漂浮和塔梁固结体系大;二期恒载作用下,刚构体系边跨跨中和 A 支点弯矩均较大,其余跨中和支点位置不同结构体系的弯矩相差不大。

不同荷载作用下各结构体系的主梁竖向挠度与半漂浮体系的主梁竖向挠度如表 2 所示。

表 2 不同结构体系下主梁跨中挠度
Tab.2 Mid-span deflection of main beam in different structural systems

荷载工况	结构体系	跨中位置		
		①	②	③
汽车	半漂浮体系	-63.0	-167.0	-190.7
	塔梁固结	-69.6	-185.5	-219.5
	刚构体系	-30.4	-62.4	-63.4
二恒	半漂浮体系	-10.6	-65.7	-44.8
	塔梁固结	-10.1	-66.7	-44.3
	刚构体系	-20.0	-53.2	-47.6

汽车荷载作用下刚构体系跨中挠度最小,半漂浮体系次之,塔梁固结体系挠度最大,表明刚构体系具有较大的结构刚度。二期恒载作用下刚构体系边跨跨中挠度相对较大,主要是半漂浮体系和塔梁固结体系中跨荷载的作用使得边跨上挠,而刚构体系由于桥墩的约束作用使得该效应减小。

2.2 主塔作用效应

不同荷载作用下各结构体系桥面位置处塔柱弯矩如表 3 所示。

表 3 不同结构体系桥面位置处塔柱弯矩
Tab.3 The bending moment of tower column at the bridge deck in different structural systems

荷载工况	结构体系	墩号		
		A	B	C
汽车	半漂浮体系	22 453.2	16 221.2	62 427.1
	塔梁固结	12 903.3	15 597.5	16 310.6
	刚构体系	11 765.8	14 782.4	15 037.4
整体升温	半漂浮体系	-27 533.7	-10 252.3	-745.0
	塔梁固结	-103.3	-10.3	-6.7
	刚构体系	43 601.2	21 333.1	-2 622.4

汽车荷载作用下,塔梁固结体系和刚构体系的主塔弯矩基本接近,半漂浮体系的主塔弯矩相对较大。整体升温时,塔梁固结体系为外部静定结构,且主塔两侧拉索变形基本一致;因此其主塔弯矩很小,而刚构体系的作用效应最大。

荷载作用下各结构体系的主塔塔顶顺桥向的水平位移如表 4 所示。

刚构体系水平刚度大,在移动荷载和制动力作用下其塔顶水平位移均较小,半漂浮体系水平刚度相对塔梁固结体系大,在制动力作用下其位移明显较小;整体升温时,刚构体系的塔顶出现较大的水平位移。

表 4 不同结构体系塔顶水平位移
Tab.4 Horizontal displacement at the top of the tower in different structural systems

荷载工况	结构体系	主塔塔顶位置		
		A	B	C
汽车	半漂浮体系	59.7	58.7	89.4
	塔梁固结	53.1	90.1	92.4
	刚构体系	24.1	18.5	26.1
整体升温	半漂浮体系	-72.8	-37.8	0.7
	塔梁固结	-70.6	-35.0	0.1
	刚构体系	-92.4	-31.1	3.8
制动力	半漂浮体系	4.4	3.3	5.4
	塔梁固结	7.5	7.9	6.9
	刚构体系	1.9	1.4	2.0

2.3 桥墩作用效应

在不同荷载作用下,各结构体系的桥墩墩顶弯矩如表 5 所示。

表 5 不同荷载作用下各结构体系桥墩墩顶弯矩
Tab.5 The bending moment at the top of the piers in different structural systems

荷载工况	结构体系	主墩墩顶位置		
		A	B	C
汽车	半漂浮体系	29 415.5	21 031.9	79 413.8
	塔梁固结	0.0	0.0	0.0
	刚构体系	120 435.8	146 911.7	140 738.4
温度梯度	半漂浮体系	-1 735.8	-2 258.9	-41.0
	塔梁固结	0.0	0.0	0.0
	刚构体系	41 956.0	12 027.6	-1 906.9
整体升温	半漂浮体系	-35 783.1	-13 474.4	-926.9
	塔梁固结	0.0	0.0	0.0
	刚构体系	231 214.0	130 790.9	-13 890.9
制动力	半漂浮体系	2 170.5	1 182.5	-13 890.0
	塔梁固结	0.0	0.0	0.0
	刚构体系	-5 203.7	-6 044.1	-6 042.4

由计算结果可知,塔梁固结体系无墩顶弯矩。在移动荷载、温度梯度、整体升温作用下,刚构体系的墩顶弯矩均比半漂浮体系大;制动力作用时,由于半漂浮体系的水平力均集中在固定支座所在的 C 墩,其弯矩值较大,而刚构体系各墩弯矩值比较均匀。

各结构体系的桥墩墩底弯矩如表 6 所示。

表6 各结构体系桥墩墩底弯矩
 Tab.6 The bending moment at the bottom of the piers in different structural systems kN·m

荷载工况	结构体系	主墩墩底位置		
		A	B	C
汽车	半漂浮体系	60 780.1	47 097.9	72 405.3
	塔梁固结	0.0	0.0	0.0
	刚构体系	60 115.4	102 620.8	91 831.4
温度梯度	半漂浮体系	-3 388.7	-5 042.8	132.3
	塔梁固结	0.0	0.0	0.0
	刚构体系	-50 010.3	-15 085.3	3 036.4
整体升温	半漂浮体系	-72 946.2	-30 931.7	3 067.2
	塔梁固结	0.0	0.0	0.0
	刚构体系	-367 934.0	-150 773.0	22 129.9
制动力	半漂浮体系	4 414.7	2 778.9	35 026.4
	塔梁固结	0.0	0.0	54 659.7
	刚构体系	7 928.9	6 882.5	10 490.8

与墩顶的作用效应类似,汽车、温度梯度、整体升温作用下刚构体系的墩底弯矩值均较半漂浮体系大。制动力作用下塔梁固结体系均通过C墩固定支座传力,其墩底弯矩最大;半漂浮体系部分水平力通过拉索传递到其余各墩,墩底弯矩相对较小;刚构体系各墩水平力和弯矩均较均匀。

2.4 拉索作用效应

斜拉索采用单索面双排索,1个索塔两侧各设13对拉索,从桥塔往跨中分别编号S1~S13。各拉索成桥索力如表7所示。

表7 拉索成桥索力
 Tab.7 The cable forces in completion state kN

拉索号	半漂浮体系		塔梁固结		刚构体系	
	A,E塔成桥索力	B,C,D塔成桥索力	A,E塔成桥索力	B,C,D塔成桥索力	A,E塔成桥索力	B,C,D塔成桥索力
S1	3 332	3 394	3 388	3 438	3 236	3 436
S2	3 405	3 487	3 412	3 525	3 375	3 467
S3	3 363	3 449	3 413	3 419	3 330	3 399
S4	3 301	3 489	3 276	3 424	3 353	3 494
S5	4 006	3 992	3 958	3 979	3 974	3 952
S6	4 095	4 067	4 066	4 038	4 129	4 009
S7	4 118	3 988	4 161	4 057	4 074	4 022
S8	4 092	3 966	4 020	3 969	4 150	3 945
S9	4 847	4 654	4 792	4 628	4 863	4 652
S10	4 911	4 825	4 912	4 830	4 862	4 773
S11	5 075	5 075	4 997	5 044	5 130	5 012
S12	5 145	5 130	5 052	5 029	5 050	5 122
S13	4 599	4 715	4 623	4 798	4 553	4 751

值得注意的是,不同结构体系合理的成桥索力相差在 4%以内,表明结构体系对成桥索力影响很小。表 8 给出了不同荷载工况下各结构体系部分拉索的索力值。

由计算结果可知,各结构体系拉索索力在二恒作用下的差异相对较小;汽车荷载作用下刚构体系拉索的索力较小,半漂浮体系和塔梁固结体系的索力较大,且两者之间也存在一定差异;整体升温 and 温度梯度作用下各拉索索力差异大,刚构体系索力受整体升温影响相对较大。

表 8 不同荷载作用时各结构体系的索力
Tab.8 The cable forces of the structural system under different loads

拉索位置	结构体系	kN			
		整体升温	温度梯度	二恒	汽车荷载
塔 A 边跨短索	半漂浮体系	230.1	43.5	228.4	200.0
	塔梁固结	-46.3	13.2	218.3	196.7
	刚构体系	116.4	40.4	242.1	186.8
塔 A 边跨长索	半漂浮体系	-142.0	52.6	354.6	662.0
	塔梁固结	-49.7	72.2	378.3	788.0
	刚构体系	-417.9	-3.3	293.3	285.1
塔 C 中跨短索	半漂浮体系	-45.7	34.1	245.1	398.3
	塔梁固结	-45.1	33.9	244.5	268.3
	刚构体系	-132.3	25.7	245.8	197.0
塔 C 中跨长索	半漂浮体系	-58.2	47.5	402.2	641.2
	塔梁固结	-56.8	46.2	398.8	687.1
	刚构体系	-218.5	40.1	421.3	397.0

3 多塔矮塔斜拉桥的动力特性

斜拉桥的动力特性分析是斜拉桥结构体系研究的重要组成部分,结构的动力特性取决于结构体系、刚度、质量和支承条件等^[11-13]。本节通过计算各结构体系的自振特性和地震响应,分析各结构体系的动力特性。

3.1 自振特性

风、地震和行驶车辆荷载等对结构的作用均是动力问题,而结构的自振特性决定其动力特性反应的特点。对于矮塔斜拉桥结构,其各阶周期和振型对结构的抗风、抗震性能评估具有重要的意义。

通过对 Midas Civil 模型的特征值分析,各结构体系前五阶自振频率和振型如表 9 所示。

表 9 各结构体系自振频率及振型
Tab.9 The natural vibration frequency and vibration mode of each structural system

阶数	半漂浮体系		塔梁固结		刚构体系	
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型
1	0.288	主梁反对称竖弯	0.272	主梁反对称竖弯	0.541	主梁反对称竖弯
2	0.398	主梁对称竖弯	0.322	纵飘	0.622	主梁对称竖弯
3	0.453	纵飘	0.392	主梁对称竖弯	0.681	纵飘
4	0.560	主梁反对称竖弯	0.538	主梁反对称竖弯	0.757	主梁反对称竖弯
5	0.696	主梁对称竖弯	0.700	主梁对称竖弯	0.853	主梁对称竖弯

从表 9 可以看到,3 种结构体系一阶和二阶竖弯振型分别为主梁反对称竖弯和主梁对称竖弯,其中半漂浮体系和塔梁固结体系频率相近,而刚构体系的频率明显较大,表明其具有较大的竖向刚度。3 种结构体系的一阶纵漂频率分别为 0.322,0.453,0.681 Hz,表明塔梁固结体系的纵向刚度最小,刚构体系的纵向刚度相对较大。

3.2 抗震性能

根据设计文件,桥位处场地抗震设防烈度为 7 度,地震动反应谱特征周期为 0.43 s,抗震设防类别为 A 类。分别对各结构体系进行反应谱分析,半漂浮体系、塔梁固结体系和刚构体系的纵向塔顶位移分别为 56.5,74.0 mm 和 35.7 mm;横向塔顶位移分别为 117.7,117.5 mm 和 118.3 mm。地震作用下各结构体系桥墩墩底顺桥向、横桥向的轴力、剪力及弯矩如表 10 所示。

表 10 反应谱分析结果
Tab.10 Results of reaction spectrum analysis

桥墩编号	结构体系	顺桥向			横桥向		
		轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
A	半漂浮体系	1 151.4	2 539.5	53 503.1	0.0	10 907.7	356 283.9
	塔梁固结	583.4	3 644.4	79 191.5	0.0	10 880.8	357 817.1
	刚构体系	5 252.3	9 025.9	133 276.4	0.0	10 782.7	354 837.3
B	半漂浮体系	2 681.5	2 914.1	65 896.3	0.0	12 517.4	487 109.3
	塔梁固结	359.6	3 164.0	76 412.2	0.0	12 506.5	486 741.6
	刚构体系	2 694.5	6 664.5	99 244.5	0.0	12 524.2	489 772.5
C	半漂浮体系	282.2	24 728.4	396 378.7	0.0	10 660.0	309 090.1
	塔梁固结	12.7	21 623.7	498 268.0	0.0	10 669.9	309 270.4
	刚构体系	558.5	17 155.4	203 765.1	0.0	10 809.6	314 857.0

从计算结果可以看到,在纵向固定支座所在的 C 墩,半漂浮体系和塔梁固结体系的顺桥向地震响应均大于刚构体系,而活动支座处的 A,B 墩顺桥向地震响应较小。由于塔梁固结体系墩顶处反力大,其地震响应较半漂浮体系更大。各结构体系横桥向约束刚度差别不大,地震响应的差别也很小。

4 实桥结构体系的选择

从以上的计算和分析可知,刚构体系多塔矮塔斜拉桥刚度较大,而且各跨刚度分布比较均匀,在汽车、地震等直接荷载作用下力学性能表现良好,但在温度等间接荷载作用下出现过大的内力响应;因此,沅水四桥设计时采用了组合结构体系,即将图 3 中的 B,C,D 墩设置为刚构,将 A,E 墩设置为塔梁固结。在保证桥梁美学效果的同时,为了进一步减小桥墩的温度效应,设计时将 B,C,D 墩分为双肢,以减小桥墩的抗推刚度。两肢之间的间距仅为 2 cm,中间采用橡胶板进行填充,保持外形与 A,E 墩一致。

实桥组合结构体系在各荷载工况下的主梁的弯矩如表 11 所示。

对比表 11 和表 1 可知,组合结构体系主梁在汽车、二恒、温度梯度下的作用效应在刚构体系和塔梁固结体系之间;整体温度作用下的荷载效应大大降低,A 支点处弯矩仅为刚构体系的 13.1%。此外,整体温度作用下,实桥 A 桥塔和 A 桥墩的弯矩与塔梁固结体系基本一致,B 桥塔和 B 桥墩的弯矩在刚构体系的 40% 以下,有效地减小桥墩和桥塔温度效应。实桥组合体系的自振特性和地震响应也兼具塔梁固结体系和刚构体系的特点。

表 11 实桥主梁跨中及支点弯矩
Tab.11 The mid-span and support point bending moment of the bridge

kN·m

荷载工况	位置					
	①	②	③	A 支点	B 支点	C 支点
汽车	72 344.3	64 008.5	59 411.6	-102 685.1	-124 514.6	-132 089.1
温度梯度	19 631.8	31701.9	27 676.1	51 998.8	42 651.1	48 680.0
整体升温	-5 116.1	8 367.5	-750.3	-16 159.8	-35 652.9	2 170.8
二恒	17 415.7	49 380.6	40 409.5	-134 829.0	-153 313.0	-145 676.2

5 结论

通过对比多塔矮塔斜拉桥 3 种结构体系的静动力特性,得到以下结论:

1) 刚构体系结构刚度大,在汽车、二恒、制动力等直接荷载作用下的荷载效应分布比较均匀,而在整体升温时桥墩和桥塔都出现很大的内力。值得注意的是,二期恒载作用下刚构体系主梁边跨跨中和边墩支点弯矩均较大,边跨跨中挠度也相对较大,主要是半漂浮体系和塔梁固结体系中跨二恒的作用使得边跨上挠,而刚构体系由于桥墩的约束作用使得该效应减小。

2) 半漂浮体系和塔梁固结体系在各工况下的作用效应相差不大,但是塔梁固结体系刚度更小;因此荷载作用下变形大,温度内力相对较小。制动力作用下,塔梁固结体系均通过中墩固定支座传力,其墩底弯矩大;半漂浮体系部分水平力通过拉索传递到其余各墩,墩底弯矩相对较小。

3) 3 种结构体系一阶和二阶竖弯振型分别为主梁反对称竖弯和对称竖弯,刚构体系具有较大的竖向刚度,其竖弯频率明显较半漂浮体系和塔梁固结体系大。塔梁固结体系只有一个纵向约束墩,其纵漂频率较早出现。各结构体系横桥向约束刚度差别不大,地震响应的差别也很小;半漂浮体系和塔梁固结体系各桥墩的地震相应差别大,纵向固定支座所在桥墩的顺桥向地震响应大于相应的刚构体系桥墩,而活动支座处的桥墩顺桥向地震响应较小。

4) 实桥采用刚构和塔梁固结组合的结构体系,很好地解决了整体温度作用下边墩的受力问题。将固结墩分成紧靠的双肢既减小了桥墩的抗推刚度,不增加基础工程量,又保证了各墩在桥梁纵向的一致性,达到良好的美学效果,可为今后类似桥梁设计提供参考。

参考文献:

- [1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2007:376-428.
- [2] 施文杰. 矮塔斜拉桥在国内外的发展与实践[J]. 现代交通技术,2012,9(3):22-25.
- [3] 喻梅. 多塔矮塔斜拉桥结构特性分析[D]. 成都:西南交通大学,2003:24-68.
- [4] 史海涛. 矮塔斜拉桥结构体系及参数研究[D]. 西安:长安大学,2010:40-56.
- [5] MICHEL VIRLOGEUX. Bridges with multiple cable-stayed spans[J]. Structural Engineering International,2001,22(1):120-123.
- [6] 李忠三,雷俊卿,林道锦. 多塔斜拉桥力学特性分析[J]. 世界桥梁,2014,42(1):40-44.
- [7] 林云,张磊,郭华东. 矮塔斜拉桥活载作用下的静力特性分析[J]. 西南交通科技,2013(6):112-115.
- [8] 王立峰,刘龙,肖子旺. 大跨度矮塔斜拉桥结构静动力特性分析[J]. 中外公路,2013,33(3):118-121.

- [9] 吴强. 大跨度铁路矮塔斜拉桥力学特性研究[D]. 南昌. 南昌大学, 2016:15-31.
- [10] 吴中, 李婧, 李垣君. 桥闸间耦合水流分析与桥位选择[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(6):45-52.
- [11] 覃丹, 梁才, 廖宸锋. 某三塔矮塔斜拉桥抗震性能分析[J]. 西南交通科技, 2016(5):66-70.
- [12] 陈维, 胡珊, 刘义河, 等. 多塔矮塔斜拉桥抗震结构体系研究[J]. 公路, 2013, 3(3):107-109.
- [13] 贾永峰, 邱婷, 宋庆辉, 等. 基于光纤传感技术的大跨连续刚构桥施工阶段张拉预应力监测[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(2):24-31.

Study on Structural System for Multi-Span Extra-Dosed Cable-Stayed Bridge

Luo Hao¹, Ding Yanshu¹, Liu Rong², Wu Ying², Lai Mingyuan³

(1.CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China; 2.Hunan Provincial Communications Planning Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410008, China; 3.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Taking the fourth Yuanshui Bridge in Changde as the construction background, the space finite element models of semi-floating system, pylon and girder rigid fixity system and rigid frame system were established respectively to investigate the serviceability of structural systems for multi-span-short tower cable-stayed bridges. The action effects under static and dynamic conditions were analyzed and compared. The results indicated that the distributions of load effects were fairly even under the static force and seismic action due to the structural stiffness of rigid frame system. But the internal forces in piers and towers of rigid frame system were strong with global temperature rising. There were relatively large deformations and small temperature internal forces of semi-floating system and pylon and girder rigid fixity system. And the response of each pier under braking force or seismic action was obviously different from the semi-floating system and pylon and girder rigid fixity system. The structural system of the Fourth Yuanshui Bridge is a combination of rigid frame system and pylon and girder rigid fixity system, which solves the excessive stress of the abutment pier under thermal action. Moreover, the fixed piers are divided into two adjacent legs to reduce the thrust rigidity of pier, which do not increase the foundation quantity and also achieve fine aesthetic effect.

Key words: multi-span-short tower cable-stayed bridges; structural systems; static and dynamic characteristics; serviceability