

文章编号: 1671-1637(2011)04-0029-07

三塔悬索桥静动力特性与中塔选型

梁 鹏¹, 吴向男¹, 李万恒², 徐 岳¹

(1 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064; 2 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要:为探讨三塔悬索桥与两塔悬索桥静动力特性差异与中塔选型,以泰州长江大桥为原型,基于有限位移理论建立相应的两塔、三塔(混凝土中塔与钢中塔)悬索桥的空间有限元模型,分析了各种结构参数下的静力和地震效应。研究表明:与两塔悬索桥相比,由于中塔顶缺乏边缆的有效纵向约束,三塔悬索桥整体刚度较小,变形较大,自振频率低;汽车作用下主缆抗滑、桥塔受力、主梁挠跨比等在常规两塔悬索桥中很容易满足要求的指标,但对三塔悬索桥却成为控制指标。三塔悬索桥的3个指标都与中塔抗推刚度密切相关,但其对中塔抗推刚度的需求是矛盾的。“人”字形钢中塔三塔悬索桥的主缆抗滑安全系数为2.17,汽车作用下桥塔最大应力为182 MPa,最大挠跨比为1/210,全部满足要求。可见,“人”字形钢中塔较好地兼顾了3个控制指标的需要,做到了构件刚度和缆索体系刚度的优化,是合理的中塔形式。

关键词:桥梁工程;三塔悬索桥;静动力特性;中塔选型;有限元分析;主缆抗滑安全系数;主梁挠跨比

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

Static and dynamic properties of three-tower suspension bridge and structural type selection of mid-tower

LIANG Peng¹, WU Xiang-nan¹, LI Wan-heng², XU Yue¹

(1. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Research Institute of Highway of Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to discuss the static and dynamic properties differences between three-tower and two-tower suspension bridges, and select the rational structure type of mid-tower, based on the Taizhou Yangtze River Bridge, the 3D space finite element models of two-tower suspension bridge and three-tower suspension bridges with concrete mid-tower and steel mid-tower were set up by finite displacement theory and the static and seismic effects were analyzed under various structural parameters. Analysis result shows that compared with two-tower suspension bridge, because the mid-tower is lack of effective restraints from side cables, three-tower suspension bridge has lower total stiffness, lower natural frequency and larger deflection-to-span ratio of main girder. Under vehicle loads, the anti-slipping safety factor between main cable and saddle, the forces of mid-tower and the deflection-to-span ratio of main girder are not important for two-tower suspension bridge, but become controlling indices for three-tower suspension bridge. The indices are related to the anti-pushing rigidity of mid-tower, but have incompatible demands for the rigidity. Under vehicle loads, when the steel mid-tower with upside-down Y shape is selected, the anti-slipping safety factor between main cable and saddle of mid-tower is 2.17, the

收稿日期: 2011-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808019);“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BA G15B01);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CH D2009JC 024)

作者简介: 梁 鹏(1977-),男,江西高安人,长安大学副教授,工学博士,从事桥梁结构理论研究。

maximum stress of mid-tower is 182 MPa, the deflection-to-span ratio of main girder is 1/210, and they meet correlative demands. Obviously, due to the application of steel mid-tower, the indices are rationally considered, the stiffness optimization of components and cable system is achieved, so, it is an appropriate structure for mid-tower. 9 tabs, 7 figs, 13 refs.

Key words: bridge engineering; three-tower suspension bridge; static and dynamic properties; structural type selection of mid-tower; finite element analysis; anti-slipping safety factor between main cable and saddle of mid-tower; deflection-to-span ratio of main girder

Author resume: LIANG Peng(1977-), male, associate professor, PhD, +86-29-62001585, bridge-doctor@126.com.

0 引言

三塔悬索桥可实现连续长大跨越,突破单一跨径的限制,是跨越宽广水域的可行方案。国际方案竞赛中多次提出大跨三塔或多塔悬索桥方案^[1],但至今没有建成的实例,说明对这种体系的静动力行为把握还不够。中国在建的泰州长江大桥和马鞍山长江大桥(主跨径都是 $2 \times 1\,080\text{ m}$)即将实现超千米级三塔悬索桥连续跨越。

由于中塔缺乏边缆的有效约束,三塔悬索桥结构静动力行为与两塔悬索桥有显著不同^[2]。对这一全新的结构形式,首先要对其静动力特性有深刻的认识,分析其在各种作用下的受力与变形特性,找出与传统两塔悬索桥的力学行为差异,然后才能提出与三塔悬索桥相适宜的结构形式。

Forsberg 等分析了多塔悬索桥的活载挠度和自振特性^[3-4];邹科官等分析了中央扣对三塔悬索桥自振特性的影响^[5];王萍等分析了多塔悬索桥的静力和自振特性^[6];张新军等分析了三塔悬索桥的抗风、抗震问题^[7-8];杨进等从概念设计方面研究了三塔悬索桥总体设计与结构选型^[9];万田保等研究了三塔悬索桥的主缆抗滑安全系数及主梁挠跨比和中塔疲劳验算加载模式^[10];阮静等研究了三塔悬索桥中塔结构选型问题^[11];朱本瑾研究了多塔悬索桥结构体系^[12]。

以上学者仅对多塔悬索桥进行结构分析或参数分析,研究在单一的静力或动力作用下三塔悬索桥的结构体系或中塔选型。然而,结构在静力与动力荷载下,抗风与抗震分析中,对结构的刚度与体系上的要求可能存在某些冲突。针对单因素的优化加上多因素的验算,并不能保证全局较优。本文综合分析静力和地震作用效应,研究三塔悬索桥静动力行为特点,并考虑主缆抗滑、中塔受力、主梁挠跨比等关键指标,确定中塔合理结构形式。

1 工程背景与研究对象

1.1 工程背景

在建的泰州长江大桥为三塔两主跨悬索桥,桥跨布置为 $(390+1\,080+1\,080+390)\text{ m}$,设计成桥状态矢跨比为 1/9。主缆采用预制平行钢丝索股,每根主缆由 169 根索股组成。加劲梁采用封闭式流线型扁平钢箱梁,中心线处梁高 3.5 m。桥塔采用门式框架结构,两边塔为混凝土塔,中间塔为钢塔,两个边塔在顺桥向为单柱形结构,中间桥塔在顺桥向则采用“人”字形结构,以增强结构纵向刚度。

中塔横梁与主梁间设置横向抗风支座,不设竖向刚性约束,仅设置竖向限位挡块,通过上下游挡块的联合作用,以限制主梁扭转振动。中塔与主梁间设置纵向弹性索。边塔处设置横向抗风支座和竖向拉压支座。

1.2 研究对象

以泰州长江大桥为原型,拟定 3 种研究对象,见图 1:模型一简称为两塔,为 $(390+1\,080+390)\text{ m}$ 的两塔单跨悬索桥,两桥塔均为混凝土塔,其材料、截面、边界与背景工程边塔一致;模型二简称为三塔(混凝土中塔),桥跨布置与背景工程一致,中塔与边

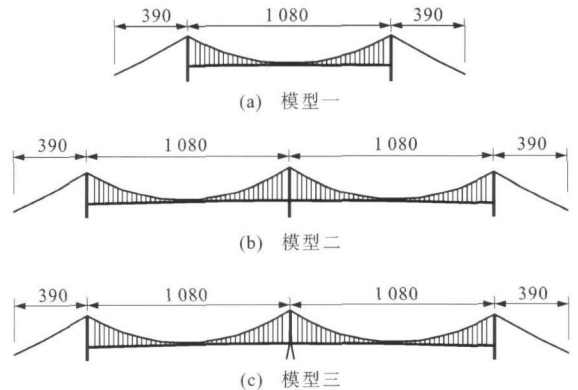


图 1 研究对象

Fig. 1 Research objects

塔相同, 材料、截面、边界与背景工程实桥边塔一致, 三塔(混凝土中塔)为两塔的简单外推, 模型三简称为三塔(钢中塔), 为泰州长江大桥三塔两主跨实桥。为便于对比分析, 3 种模型均不考虑塔梁间的纵向约束装置。

2 分析理论与模型

2.1 分析理论

2.1.1 成桥状态

成桥状态计算是悬索桥分析的基础, 用来计算满足由设计确定的已知条件时的主缆线形、索力、无应力长度等, 为以后的各种计算提供基本数据。悬索单元计算式为

$$l = \frac{HL_0}{EA} + \frac{HL_0}{W} \left[\text{sh}^{-1} \left(\frac{V}{H} \right) - \text{sh}^{-1} \left(\frac{V-W}{H} \right) \right] \quad (1)$$

$$h = \frac{WL_0}{EA} \left(\frac{V}{W} - \frac{1}{2} \right) + \frac{HL_0}{W} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{V}{H} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{V-W}{H} \right)^2} \right] \quad (2)$$

当弹性模量 E 、截面积 A 和自重 W 已知时, 式(1)、(2)中尚有 5 个未知量, 即水平距离差 l 、高差 h 、无应力长度 L_0 、水平力 H 、左端竖向力 V , 对成桥状态计算而言, 通过假定跨径左端的 H 、 V , 根据确定的水平距离 l 可求出各索段的 L_0 和 h , 即确定了悬索桥的成桥状态^[13]。

2.1.2 使用阶段

根据悬索柔性迭代得到成桥状态下悬索桥的几何状态和内力状态, 以此为初始状态, 对使用阶段的各种作用(如汽车、静风等)进行静力分析。在计算使用阶段作用效应时, 采用线性挠度理论, 即仅计入恒载状态轴力产生的几何刚度矩阵, 运用线性叠加原理计算。本文宗旨是进行方案优化分析, 因此, 运用线性挠度理论具有足够的精度。

2.1.3 地震作用

n 个质点体系地震振动时, 动力平衡方程为

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = -MI \ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为结构的质量、阻尼、刚度矩阵; x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别为相对位移、速度、加速度向量; $\ddot{x}_g(t)$ 为地面加速度向量; I 为单位矩阵。

同时输入 3 个方向地震动分量, 采用时程分析的逐步积分法求解运动方程。

2.2 分析模型

基于有限位移理论, 采用脊骨梁模式建立悬索桥空间有限元分析模型; 主梁与主塔用梁单元模拟,

主缆与吊索采用悬链线索单元模拟; 采用数值积分法计算截面抗弯刚度与抗扭刚度; 在主梁质量中计入旋转质量惯性矩; 单元划分不能太粗糙, 因为单元的划分密度决定堆聚质量的分布, 进而决定振型形状和地震惯性力的分布; 根据悬索桥成桥状态分析得到主缆恒载线形和内力。三塔悬索桥有限元模型见图 2, 共 981 个节点、956 个单元。



图 2 三塔悬索桥有限元模型

Fig. 2 Finite element model for three-tower suspension bridge

选择桥址附近具有类似场地地质、相近震级、相近频谱特性条件下的工程场地地震安全性评价报告提供的人工波作为输入地震波(图 3 为其中一条加速度时程), 其 100 年超越概率 4% 地表水平加速度峰值为 0.207g。地震时程分析同时考虑 3 个方向地震动分量与不同地震波的方向组合。

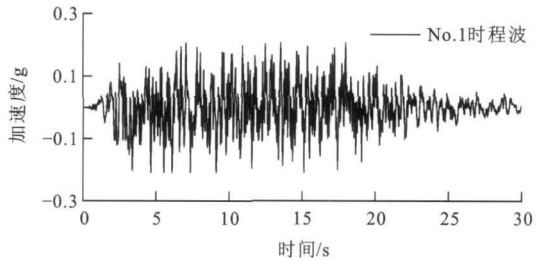


图 3 地震动加速度时程

Fig. 3 Earthquake acceleration time-history

3 静力特性

3.1 汽车作用

按公路 I 级加载, 分中载、偏载情况, 取其包络作为汽车效应, 见图 4 和表 1。从表 1 和图 4 可以看出, 与两塔悬索桥相比, 三塔悬索桥在汽车作用下的位移

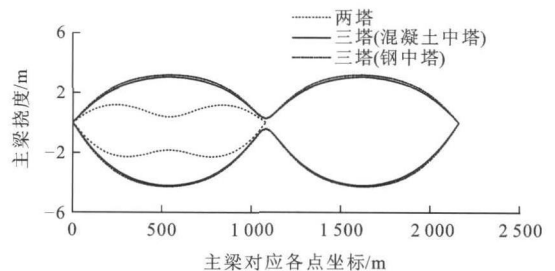


图 4 汽车荷载作用下主梁竖向挠度包络

Fig. 4 Vertical deflection envelopments of main girders under vehicle loads

表 1 汽车荷载作用下主梁位移

Tab. 1 Displacements of main girders under vehicle loads

计算模型		两塔		三塔(砼中塔)		三塔(钢中塔)	
		上挠	下挠	上挠	下挠	上挠	下挠
绝对数值	最大竖向位移/m	1.449	2.756	3.712	5.099	3.877	5.183
	梁端水平位移/m	0.562		1.071		1.228	
相对比值	最大竖向位移	1.00	1.00	2.56	1.85	2.68	1.88
	梁端水平位移	1.00		1.91		2.19	

注:表中的相对比值均为三塔(混凝土中塔)、三塔(钢中塔)计算值与两塔计算值的比值,下同。

显著增大。三塔(钢中塔)上挠、下挠和水平位移分别是两塔相应值的 2.68、1.88 和 2.19 倍;相对于三塔(钢中塔),三塔(混凝土中塔)的刚度增加并不明显。对于两塔悬索桥,在非对称活载作用下,由于边缆的有效约束使得 2 个桥塔顶部产生的水平位移非常小,主梁产生竖向变形主要是由于主缆的形状发生了改变;而对于三塔悬索桥来说,在非对称活载作用下,边塔顶的纵向位移仍然很小,但是中塔顶的纵向位移很大,这就使得加载跨的主缆矢高变大,而非加载跨的主缆矢高变小,见图 5,这种现象加剧了主梁的竖向挠度。

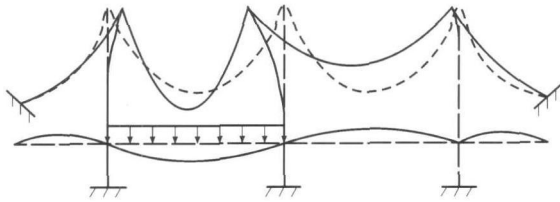


图 5 单跨活载作用下主缆与主梁的变形

Fig. 5 Deformations of main girder and main cable under live load on single span

三塔(钢中塔)最大挠跨比为 $5.183/1.080 = 1/210$ (设置塔梁连接装置后,挠跨比可减小至 $1/230$),超过了《公路悬索桥设计规范》(报批稿) 5.2.1 条“不宜大于跨径的 $1/250 \sim 1/300$ ”的规定。然而,规范限制挠跨比实质是限制汽车作用下梁端转角和最大纵坡,以保障行车的平顺程度。在相同挠跨比条件下,三塔两跨悬索桥主梁最大转角小于两塔单跨的主梁转角,见图 6。在图 6 中: L 为跨度; θ_1 为两塔悬索桥的梁端转角; f 为梁的挠度; θ_2 为三塔两跨悬索桥的梁端转角。

三塔两跨悬索桥发生挠跨比极值的加载为一个主跨相当长范围的加载,另一个是主跨空载,出现这种加载工况应当是发生重大交通事故(各车道全部拥堵),较长时间无人管理与交通监控失效三者组合结果,出现的概率是极低的,因此,适当放宽三塔悬索桥挠跨比限值,例如放宽至 $1/220$,相应的主梁转

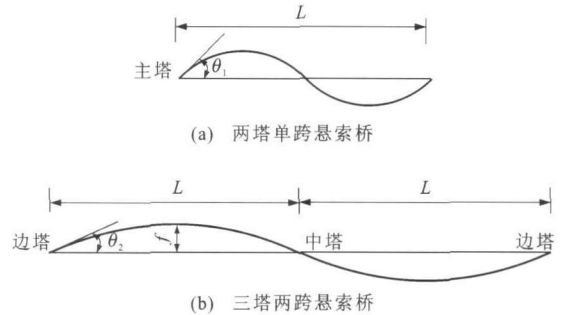


图 6 挠跨比与主梁转角的关系

Fig. 6 Relationships between deflection-to-span ratios and vertical angles of main girders

角仍不超过 0.02 rad ,行车平顺有充足保障。试算结果表明:如采用 I 型钢中塔,满足刚度要求,则塔柱结构尺寸庞大,钢板厚度太大,没有比较意义。

从表 1 可以看出,在汽车作用下,三塔(钢中塔)梁端位移为 1.228 m ,是两塔的 2.19 倍。可通过设置合适的塔梁连接装置,使梁端位移显著减小,从而便于伸缩缝设置。表 2 是汽车作用下主塔内力位移的对比。

表 2 汽车荷载作用下主塔内力与位移

Tab. 2 Forces and displacements of towers under vehicle loads

计算模型		两塔	三塔(砼中塔)		三塔(钢中塔)	
		桥塔	边塔	中塔	边塔	中塔
绝对数值	塔顶位移/m	0.196	0.188	2.105	0.186	2.356
	塔底纵向弯矩/ (MN·m)	237	231	2460	229	2848
相对比值	塔顶位移	1.00	0.96	10.74	0.95	12.02
	塔底纵向弯矩	1.00	0.97	10.38	0.97	12.02

从表 2 中可以看出,在汽车作用下,三塔悬索桥的边塔顶水平位移、塔底弯矩与两塔悬索桥基本相当,但中塔顶水平位移、塔底弯矩是两塔的 $10 \sim 12$ 倍左右,原因在于三塔悬索桥的中塔顶缺乏边缆的有效纵向约束。三塔(混凝土中塔)塔底弯矩已超过了常规混凝土桥塔截面的强度范围;通过试算还表明,如大量加大 I 形混凝土中塔截面或采用 A 形混

土中塔或钢中塔, 则无法满足主缆抗滑移安全度要求。只有三塔(钢中塔)采用“人”字形钢中塔, 才能较好地适应使用要求。

表 3 给出在汽车作用下, 当摩擦因数 μ 为 0.2 时的塔顶主缆抗滑安全系数。从表 3 中可以看出, 三塔悬索桥边塔顶主缆抗滑安全系数满足设计要求, 且富余很大; 但中塔顶主缆抗滑安全系数成为设计控制因素之一, 三塔(钢中塔)抗滑安全系数仅为 2.17。

表 3 汽车荷载作用下主缆抗滑安全系数

Tab. 3 Anti-slipping safety factors between main cables and saddles

计算模型	两塔		三塔(砼中塔)		三塔(钢中塔)	
	桥塔	边塔	中塔	边塔	中塔	
抗滑安全系数	34.47	11.80	2.15	11.85	2.17	

增加中塔刚度, 则主缆抗滑不能满足要求; 减小中塔截面和刚度, 则主梁挠跨比和塔柱强度不能满足要求。通过大量试算表明, 在 2 种材料(混凝土或钢)、3 种顺桥向结构形式(I、A、人形)共 6 种桥塔方案中, 只有“人”字形钢中塔较好地兼顾了主缆抗滑、中塔受力、主梁挠跨比三者需要, 是可行的方案。

3.2 静风作用

泰州长江大桥成桥状态的桥面设计基准风速为 $40.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 以此风速为参照, 按照《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004)进行计算, 主梁的阻力系数取用该桥节段模型风洞试验数据^[3]。

从表 4 可以看出, 在纵风作用下, 与两塔相比, 三塔(钢中塔)主梁的梁端水平位移、边塔顶位移稍大, 分别是两塔的 1.26、1.30 倍; 而中塔顶位移显著增大, 达到两塔的 14.63 倍。

表 4 纵风作用下梁塔水平位移

Tab. 4 Displacements of girders and towers under longitudinal wind

计算模型	两塔	三塔(砼中塔)		三塔(钢中塔)	
		边塔	中塔	边塔	中塔
绝对数值	梁端水平位移/m	0.247	0.362		0.312
	塔顶位移/m	0.016	0.021	0.244	0.020
相对比值	梁端水平位移	1.00	1.47		1.26
	塔顶位移	1.00	1.30	15.25	1.30

从表 5 可以看出, 在横桥向风作用下, 两塔悬索桥的主梁在横向相当于单跨简支梁, 而三塔悬索桥的主梁由于在中塔处有横向支承, 所以它在横向相当于一个两跨连续梁。在相同的均布荷载作用下, 连续梁的跨中位移和弯矩一般都比相同主跨跨径的简支梁小, 所以三塔(钢中塔)主梁的跨中横向位移

和横向弯矩都较两塔小, 分别是两塔的 66%、81%。但是在相同的均布荷载作用下, 连续梁由于在支座处有支承存在, 该处的支点弯矩很大, 所以与两塔主梁的跨中横向弯矩相比, 三塔(钢中塔)中塔处的主梁横向弯矩较大, 是两塔的 1.58 倍。

表 5 横风作用下主梁内力与位移

Tab. 5 Forces and displacements of main girders under lateral wind

计算模型	两塔	三塔(砼中塔)	三塔(钢中塔)
	绝对数值		
跨中主梁横向位移/m	1.208	0.677	0.792
跨中主梁横向弯矩/(MN·m)	376	285	305
中塔处主梁横向弯矩/(MN·m)		541	593
相对比值			
跨中主梁横向位移	1.00	0.56	0.66
跨中主梁横向弯矩	1.00	0.76	0.81
中塔处主梁横向弯矩		1.44	1.58

从表 6 可以看出, 在横风作用下, 三塔(钢中塔)边塔顶的横向位移比两塔略小, 是其 94%, 但是中塔顶的横向位移是两塔的 1.95 倍。与两塔悬索桥相比, 三塔悬索桥边塔塔底的横向弯矩稍有减小, 但是三塔(钢中塔)中塔塔底的横向弯矩却较大, 是两塔塔底弯矩的 1.76 倍。

表 6 横风作用下主塔内力与位移

Tab. 6 Forces and displacements of towers under lateral wind

计算模型	两塔	三塔(砼中塔)		三塔(钢中塔)	
	桥塔	边塔	中塔	边塔	中塔
绝对数值					
塔顶横向位移/m	0.116	0.109	0.139	0.109	0.227
塔底横向弯矩/(MN·m)	131	126	205	126	231
相对比值					
塔顶横向位移	1.00	0.94	1.20	0.94	1.95
塔底横向弯矩	1.00	0.96	1.56	0.96	1.76

4 自振特性

认识结构的自振特性是进行抗震分析的基础, 本文基于子空间迭代法计算桥梁的动力特性, 表 7 给出主要振型, 图 7 给出两塔和三塔悬索桥各主要 1 阶振型。从表 7 和图 7 可以看出, 两塔、三塔悬索桥的动力特性具有以下特点。

(1) 两塔悬索桥首先出现的振型是 1 阶正对称侧弯, 频率为 0.071 Hz; 三塔悬索桥首先出现的振型是 1 阶反对称竖弯, 频率为 0.067 Hz。

(2) 与两塔悬索桥相比, 三塔悬索桥除 1 阶正对称侧弯外, 其余各阶振型的频率都较低, 这是因为三塔悬索桥的桥塔没有边跨主缆的有效约束作用, 结构整体刚度较两塔悬索桥低。三塔(钢中塔)与两塔的 1 阶反对称竖弯、侧弯、扭转频率之比分别为 0.85、

表 7 结构自振特性

Tab. 7 Natural vibration characteristics of structures

振型阶次	两塔		三塔(砼中塔)		三塔(钢中塔)	
	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述
1	0.071	1 阶正对称侧弯	0.063	1 阶反对称竖弯	0.067	1 阶反对称竖弯
2	0.079	1 阶反对称侧弯	0.071	1 阶反对称侧弯	0.070	1 阶反对称侧弯
3	0.118	2 阶反对称竖弯	0.087	2 阶反对称竖弯	0.092	1 阶正对称侧弯
4	0.148	1 阶正对称竖弯	0.095	1 阶正对称侧弯	0.095	2 阶反对称竖弯
5	0.200	2 阶正对称竖弯	0.116	1 阶正对称竖弯	0.117	1 阶正对称竖弯
6	0.226	1 阶反对称侧弯	0.118	3 阶反对称竖弯	0.136	3 阶反对称竖弯
	0.382	1 阶反对称扭转	0.319	1 阶反对称扭转	0.286	1 阶反对称扭转
	0.327	1 阶正对称扭转	0.329	1 阶正对称扭转	0.330	1 阶正对称扭转

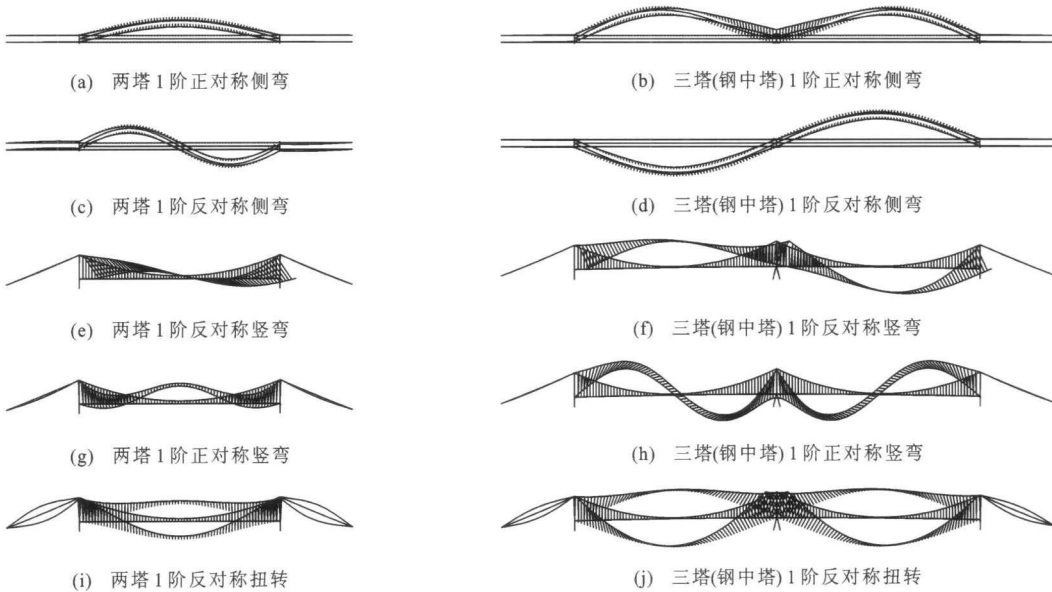


图 7 两塔与三塔(钢中塔)主要 1 阶振型

Fig. 7 Main first order vibration modes of two-tower suspension bridge and three-tower suspension bridge with steel mid-tower

0.31、0.75。

表 8 地震水平位移

Tab. 8 Horizontal displacements under earthquake

计算模型		两塔	三塔(砼中塔)	三塔(钢中塔)
绝对数值	梁端/m	1.181	1.237	0.865
	边塔顶/m	0.074	0.091	0.135
	中塔顶/m		0.831	0.713
相对比值	梁端	1.00	1.05	0.73
	边塔顶	1.00	1.23	1.82
	中塔顶		11.23	9.64

度较小的钢塔时,对结构的抗震有利。

以上分析结果表明,三塔(钢中塔)的主缆抗滑安全系数为 2.17,汽车作用下桥塔最大应力为 182 MPa,最大挠跨比为 1/210,全部满足要求。可见,“人”字形钢中塔较好地兼顾了 3 个控制指标的需要,做到了构件刚度和缆索体系刚度的优化。

(3)三塔悬索桥的反对称扭转振型频率小于主跨相同的两塔单跨悬索桥。与三塔(混凝土中塔)相比,三塔(钢中塔)反对称扭转频率降低更多,这是由于钢中塔扭转刚度小于混凝土中塔的缘故。

5 地震效应

表 8、9 给出 3 种模型的地震效应。从表 8、9 可以看出,在地震作用下,三塔(钢中塔)的边、中塔顶位移分别是两塔顶位移的 1.82、9.64 倍;三塔(钢中塔)的边、中塔底弯矩分别是两塔底弯矩的 1.23、2.23 倍。

在地震作用下,三塔(钢中塔)的主要变形及内力均小于三塔(混凝土中塔),梁端位移、中塔塔底弯矩分别是其 70%和 85%,这说明中塔采用质量与刚

表9 地震内力

Tab. 9 Forces under earthquake

计算模型		两塔		三塔(砼中塔)		三塔(钢中塔)	
		桥塔	边塔	中塔	边塔	中塔	
绝对数值	轴力/MN	50.8	52.0	46.1	65.3	25.1	
	剪力/MN	10.5	10.2	13.0	14.5	8.6	
	弯矩/(MN·m)	472	435	1 240	580	1 052	
相对比值	轴力	1.00	1.02	0.91	1.29	0.49	
	剪力	1.00	0.97	1.24	1.38	0.82	
	弯矩	1.00	0.92	2.63	1.23	2.23	

6 结 语

(1) 在各种静动力作用下,三塔悬索桥的边塔塔顶位移、塔底弯矩与两塔悬索桥基本相当,但中塔塔顶水平位移、塔底弯矩是两塔的10~12倍左右。

(2) 在汽车作用下,主缆抗滑、中塔受力、主梁挠跨比等在常规两塔悬索桥中不会引起很多关注,但在三塔悬索桥中却成为控制指标,且都与中塔抗推刚度密切相关,但其对中塔抗推刚度的需求是矛盾的。

(3) “人”字形钢中塔较好地兼顾主缆抗滑、中塔受力、主梁挠跨比三者的需要,是合理的中塔形式。经塔柱截面精细设计和塔梁连接优化后,可满足三塔悬索桥的各项要求。

(4) 为使结果便于对比,本文只针对两塔与三塔的漂浮体系,通过加劲梁与中主塔间设置适当的纵向约束,可以适当提高主缆抗滑安全系数,减小主梁挠跨比,改善中主塔受力,减小了加劲梁纵向活载位移。

参 考 文 献 :

References :

- [1] FORSBERG T, PETERSEN A. The challenge of constructing a bridge over the Chacao Channel[C] // IABSE: IABSE Conference on Cable-Supported Bridges-Challenging Technical Limits. Zurich: IABSE, 2001: 1-8.
- [2] GIMSING N J. Cable Supported Bridges: Concept and Design[M]. Second Edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 1997.
- [3] FORSBERG T. Multi-span suspension bridges[J]. Steel Structures, 2001, 11(1): 63-73.
- [4] YOSHIDA O, OKUDA M, MORIYA T. Structural characteristics and applicability of four-span suspension bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 453-463.

- [5] 邹科官,王浩,梁书亭.中央扣对三塔悬索桥动力特性的影响[J].建筑科学与工程学报,2009,26(4):49-53.
ZOU Ke-guan, WANG Hao, LIANG Shu-ting. Influences of central buckles on dynamic behaviors of triple-tower suspension bridge[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 49-53. (in Chinese)
- [6] 王萍.多塔连续体系悬索桥静动力特性的研究[D].成都:西南交通大学,2007.
WANG Ping. The study on the static and dynamic performance of multi-tower continuous suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [7] 张新军,赵孝平.三塔悬索桥的抗风稳定性研究[J].公路,2008(11):67-71.
ZHANG Xin-jun, ZHAO Xiao-ping. A study on wind stability of three-tower suspension bridges[J]. Highway, 2008(11): 67-71. (in Chinese)
- [8] 邓育林,彭天波,李建中,等.大跨度三塔悬索桥动力特性及抗震性能研究[J].振动与冲击,2008,27(9):105-110.
DENG Yu-lin, PENG Tian-bo, LI Jian-zhong, et al. Study on dynamic characteristic and aseismic performance of a long-span triple-tower suspension bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 105-110. (in Chinese)
- [9] 杨进,徐恭义,韩大章.泰州长江公路大桥三塔两跨悬索桥总体设计与结构选型[J].桥梁建设,2008(1):37-40.
YANG Jin, XU Gong-yi, HAN Da-zhang, et al. Overall design and structural type selection of three-tower and two-span suspension bridge of Taizhou Changjiang River Highway Bridge[J]. Bridge Construction, 2008(1): 37-40. (in Chinese)
- [10] 万田保,杨进.三塔两跨悬索桥2个重要的技术指标和中塔疲劳验算加载模式[J].世界桥梁,2008(1):8-10,27.
WAN Tian-bao, YANG Jin. Two important technical indices and loading mode for fatigue check calculation of intermediate tower of three-tower and two-span suspension bridge[J]. World Bridges, 2008(1): 8-10, 27. (in Chinese)
- [11] 阮静,吉林,祝金鹏.三塔悬索桥中塔结构选型分析[J].山东大学学报:工学版,2008,38(2):106-111.
RUAN Jing, Ji Lin, ZHU Jin-peng. Structure style selection of the mid-tower of a three-tower suspension bridge[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38(2): 106-111. (in Chinese)
- [12] 朱本瑾.多塔悬索桥的结构体系研究[D].上海:同济大学,2007.
ZHU Ben-jin. Structural system research of multi-tower suspension bridge[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [13] 罗喜恒.复杂悬索桥施工过程精细化分析研究[D].上海:同济大学,2004.
LUO Xi-heng. Refined analysis on complicated suspension bridge in construction[D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)