

主塔塔型对大跨度钢塔斜拉桥地震反应的影响

陈方有¹ 叶爱君^{1,*} 韩大章² 华 新²

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2 中设设计集团股份有限公司, 南京 210014)

摘 要 为研究钢塔斜拉桥在不同塔型下的地震反应, 以实际桥梁工程为背景, 从斜拉桥抗震设计的角度出发, 利用反应谱方法分析了独柱塔、H 型塔和钻石型塔三种塔型对斜拉桥地震反应的影响。结果表明: 独柱式钢塔斜拉桥的纵飘周期最长, H 型塔最短; 独柱式塔的横向侧弯周期也最长, 钻石型塔最短。纵向+竖向地震作用下, H 型塔及其基础的地震弯矩较大, 但塔顶和塔梁间地震位移较小; 横向+竖向地震作用下, 钻石型塔的塔柱地震轴力较大, 独柱式塔较小, 独柱式塔的基础地震弯矩需求也较小。总体而言, 在 7 度地震区, 对于钢塔及其基础, 地震均不会控制设计。

关键词 钢塔斜拉桥, 塔型, 抗震性能

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2020.01.011

Impact of Tower Types on Seismic Responses of Long-Span Steel-Tower Cable-Stayed Bridges

CHEN Fangyou¹ YE Aijun^{1,*} HAN Dazhang² HUA Xin²

(1.State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai200092, China; 2.China Design Group Company Limited, Nanjing210014, China)

Abstract To investigate seismic response of steel-tower cable-stayed bridges with different types of towers, an actual bridge is taken as the prototype in this paper. Based on the response spectrum analysis method, seismic responses of steel-tower cable-stayed bridge models with three types of towers including single-column, H-type and diamond-shaped towers are obtained. The results show that for the first longitudinal period, the model with the single-column tower shows the longest value while the model with the H-shaped tower presents the shortest period. As for the first transversal period of the tower, the model with the single-column tower is also the longest one while the model with the diamond-shaped tower has the shortest period in this case. Under the combined longitudinal and vertical earthquake excitations, the H-type tower and its foundations have the largest demands of bending moments, whereas the displacement is quite small. Under the excitation of horizontal and vertical earthquakes, the tower column of the diamond-shaped tower shows a relatively larger axial force demand, while the single-column tower is very small. Also, bending moment demands for the single-column tower is quite small. In general, in the region with a Chinese seismic intensity scale of 7, the earthquake will not control design of the steel-towers and foundations for cable-stayed bridges.

Keywords steel-tower cable-stayed bridge, type of tower, seismic response

收稿日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(51778469)

作者简介: 陈方有, 男, 硕士研究生, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: tjdx_cfy@163.com

* 联系作者: 叶爱君, 女, 博士, 教授, 博导, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: yeaijun@tongju.edu.cn

0 引言

我国的斜拉桥经过近 40 年的发展,建设水平已跻身世界前列,大跨度斜拉桥的建设越来越多,并在交通网络中发挥着交通枢纽的重要作用。目前,已有学者进行了大量斜拉桥的抗震性能研究。叶爱君^[2]以苏通长江大桥为例,对三种不同塔型(倒 Y 型、A 型和菱型)混凝土斜拉桥进行了抗震性能研究;ABDEL RAHEEM^[3]以一座典型三跨斜拉桥的钢塔为例,对斜拉桥钢塔的抗震性能进行了研究;王福春^[4]以沈阳富民桥为例,对混凝土直线和折线塔斜拉桥进行了抗震性能研究;Okamoto^[5]对多跨斜拉桥钢塔进行了静力和抗震性能研究,得出了其具有良好的抗震性能;陈旭^[6]以海南铺前大桥为例,对四种不同塔型(H 型、倒 Y 型、A 型和宝石型)混凝土独塔斜拉桥进行了横向抗震性能研究;沈星^[7]以苏通长江大桥为例,对斜拉桥倒 Y 型混凝土主塔进行了横向抗震性能研究,并揭示了主塔横向破坏机理。

综上所述,国内外学者对斜拉桥抗震性能的研究主要是混凝土塔斜拉桥,且研究范围多限于桥墩以上结构,对钢塔斜拉桥及基础抗震性能的研究较少。因此,本文采用 SAP2000 有限元软件,以一座钢塔斜拉桥为背景,针对 H 型塔、钻石型塔和独柱塔三种常见的斜拉桥主塔形式,分别建立了动力分析模型,采用反应谱方法分析了三个模型的地震反应,并将其结果进行了比较分析。

1 工程背景

本文以南京浦仪公路西段跨江大桥为工程背景。主桥为双塔独柱式双索面全飘浮体系钢塔斜拉桥,跨径布置采用 50 m+180 m+500 m+180 m+50 m=960 m(图 1)。主梁采用分离式钢箱梁截面,总宽 54.4 m,梁高 4 m;主塔为中央独柱型钢塔,独柱钢塔从两幅桥面之间穿过,塔高 166 m;主塔基础采用群桩基础,为钻孔摩擦桩,承台下设 18 根桩,桩径为 2.8 m。

2 动力计算模型

为分析不同塔型对钢塔斜拉桥地震反应的影响,本文比较分析了三种常见塔型斜拉桥的地震

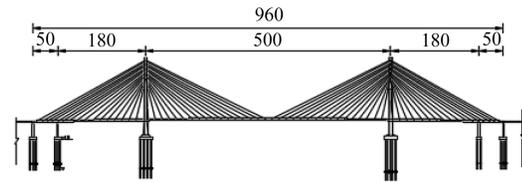


图 1 主桥立面(单位:mm)

Fig.1 Elevation of main bridge (Unit:mm)

反应,即独柱型、H 型和钻石型。三个模型桥塔高度相同,模型 1 为独柱型,模型 2 为 H 型,模型 3 为钻石型,桥塔立面如图 2 所示。

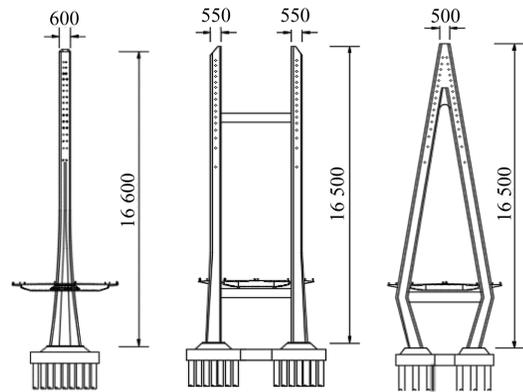


图 2 三种塔型示意图(单位:mm)

Fig.2 Three types of towers (Unit:mm)

本文采用 SAP2000 软件建立了其三维有限元模型。主桥主梁、主塔、桥墩和承台均采用梁单元模拟,斜拉索采用杆单元模拟。其中,主梁节点通过主从约束与斜拉索和横梁相连接;斜拉索、主梁和主塔考虑了恒载几何刚度的影响;墩底与承台中心及桩顶中心节点主从相连。二期恒载以及横隔梁质量以集中质量形式加在梁单元上。各群桩基础采用六弹簧模型模拟(独柱型塔和钻石型塔基础为 18 根桩,H 型塔基础为 20 根桩,桩径均为 2.8 m),土弹簧刚度由“m 法”确定,如表 1 所示(图 3)。

表 1 主塔基础六弹簧平动刚度

Table 1 Spring stiffness of foundation of main tower

位置	平动刚度/(10 ⁶ kN·m ⁻¹)								
	独柱型			H 型			钻石型		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
18#塔	17.2	16.4	29.4	21.6	18.2	32.7	16.6	16.4	29.4
19#塔	9.66	9.26	29.4	11.9	10.3	32.7	9.39	9.26	29.4

注:表中“x”表示纵桥向,“y”表示横桥向,“z”表示竖向;表中桥塔编号见图 3

模型 1 为全飘浮体系,在索塔处设置一对 0 号索;模型 2 和模型 3 为半飘浮体系,在索塔下横梁

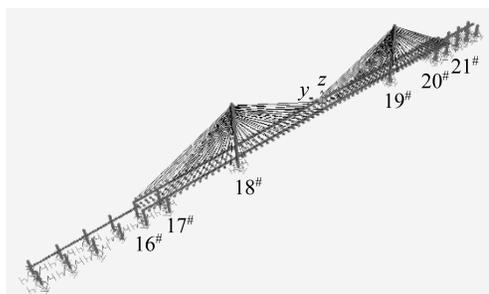


图3 斜拉桥模型示意图

Fig.3 Numerical model of cable-stayed bridge

上设置支座。三个模型主桥桥墩上均设置纵向单向滑动支座,引桥桥墩上均设置 QZ 球钢支座,在塔梁相接处设置横向抗风支座。

3 地震动输入

本桥最大设防地震重现期为 2000 年,阻尼比取 0.02,场地水平加速度反应谱如图 4 所示。

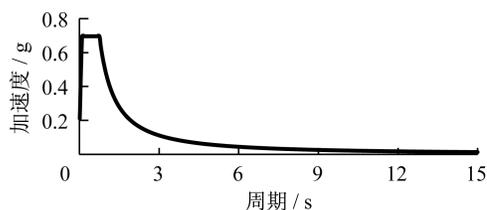


图4 水平向加速度反应谱曲线

Fig.4 Response spectrum curve of horizontal acceleration

表 2

三种塔型斜拉桥动力特性比较

Table 2

Comparisons of dynamic characteristics of three types of towers

振型阶数	独柱型塔		H型塔		钻石型塔	
	周期/s	振型描述	周期/s	振型描述	周期/s	振型描述
1	15.59	主梁纵漂	10.63	主梁纵漂	14.24	主梁纵漂
2	5.07	左引桥固定墩纵弯	5.07	左引桥固定墩纵弯	5.07	左引桥固定墩纵弯
3	4.317	右引桥固定墩纵弯	4.317	右引桥固定墩纵弯	4.317	右引桥固定墩纵弯
4	3.727	主塔横向正对称侧弯	3.192	主梁一阶竖弯	3.055	主梁一阶竖弯
5	3.386	主塔横向反对称侧弯	2.409	主塔横向正对称侧弯	2.32	主梁二阶竖弯
6	3.006	主梁一阶竖弯	2.347	主梁二阶竖弯	2.258	主梁一阶侧弯
7	2.246	主梁二阶竖弯	2.337	主塔横向反对称侧弯	1.648	左引桥桥墩侧弯
8	1.763	主梁一阶侧弯	2.035	主梁一阶侧弯	1.643	主塔横向反对称侧弯

表 3

斜拉桥主塔质量与刚度

Table 3 Mass and stiffness of main tower

工况	独柱型	H型	钻石型
桥塔质量/t	6 435	12 940	9 732
纵向刚度/(kN·m ⁻¹)	1 170	4 040	1 708
横向刚度/(kN·m ⁻¹)	1 655	13 947	71 942

竖向设计反应谱取为水平向的 2/3。地震输入方向分别为纵桥向+竖向和横桥向+竖向。

在有限元模型的反应谱分析中,计算振型数取 700 阶^[8]。

4 三种塔型斜拉桥抗震性能比较

4.1 动力特性比较

分析和认识桥梁结构的动力特性是进行抗震性能分析的基础。因此,对三个模型进行模态分析,并将各模型前八阶振型及对应的周期列于表 2。由于三个模型桥面系质量均相同,故动力特性的差异主要由主塔质量和刚度引起,其中主塔刚度包含其基础刚度(表 3)。但由于三种塔型横向刚度的增量远大于桥塔质量增量,因此,三种模型动力特性的差异主要由主塔刚度引起^[9]。从表中结果可看出:以主塔纵向振动为主的主梁纵漂振型,周期最长的模型为独柱型,钻石型次之,H型最短,其原因是主塔纵向刚度最大的模型为 H 型,钻石型次之,独柱型较小;以主塔横向振动为主的主塔横向侧弯振型,周期最长的模型为独柱型,H型次之,钻石型最短,其原因是主塔横向刚度最大的模型为钻石型,H型次之,独柱型最小。

4.2 地震反应比较

为了能够获取三种塔型工况的地震反应比较情况,在全桥结构动力特性分析的基础上,进一步进行了地震反应谱分析,分别取主塔底截面弯矩、主塔承台底截面弯矩、主塔塔身最大压应力、主塔基础最不利单桩抗弯性能和主桥关键位置位移作

比较。具体比较结果如下。

表 4 和表 5 对纵向和横向地震作用下三种塔型工况的主塔底截面地震弯矩和轴力最大值进行了比较,其中 H 型塔和钻石型塔塔底内力取两肢中较大值的两倍,结果表明:H 型塔的塔柱地震弯矩较大,独柱型较小,但在横向+竖向地震作用时,钻石型塔塔柱的地震轴力较大,H 型塔次之,独柱型塔较小。

表 4 地震作用下主塔底截面弯矩最大值

Table 4 Maximum values of bending moment at bottom section of towers under seismic action

工况	位置	弯矩/(kN·m)		
		独柱型	H 型	钻石型
纵向+竖向	18#塔	5.75×10 ⁵	8.44×10 ⁵	5.40×10 ⁵
	19#塔	5.70×10 ⁵	8.30×10 ⁵	5.64×10 ⁵
横向+竖向	18#塔	9.63×10 ⁵	1.28×10 ⁶	1.01×10 ⁶
	19#塔	1.18×10 ⁶	9.74×10 ⁵	8.88×10 ⁵

表 5 地震作用下主塔底截面轴力最大值

Table 5 Maximum values of axial force at bottom section of towers under seismic action

工况	位置	轴力/kN		
		独柱型	H 型	钻石型
纵向+竖向	18#塔	3.49×10 ⁴	3.86×10 ⁴	3.12×10 ⁴
	19#塔	3.49×10 ⁴	3.96×10 ⁴	3.16×10 ⁴
横向+竖向	18#塔	3.45×10 ⁴	5.62×10 ⁴	7.78×10 ⁴
	19#塔	3.44×10 ⁴	5.52×10 ⁴	7.20×10 ⁴

表 6 对纵向和横向地震作用下三种塔型工况的主塔承台底截面地震弯矩最大值进行了比较,结果表明:在纵向+竖向地震作用下,H 型塔承台底截面弯矩需求较大,独柱型和钻石型较小;在横向+竖向地震作用下,H 型塔塔底弯矩需求最大,其次是钻石型塔,独柱型塔最小。总体而言,独柱

表 8 主塔基础单桩抗弯性能

Table 8 Flexural behavior of single pile of main tower

工况	位置	纵向+竖向				横向+竖向			
		最不利轴力/ kN	地震弯矩/ (kN·m)	弯矩能力/ (kN·m)	能力/ 需求	最不利轴力/ kN	地震弯矩/ (kN·m)	弯矩能力/ (kN·m)	能力/ 需求
独柱塔	18#塔	6.86×10 ³	1.02×10 ⁴	3.41×10 ⁴	3.35	4.46×10 ³	8.75×10 ³	3.19×10 ⁴	3.65
	19#塔	5.46×10 ³	1.62×10 ⁴	3.28×10 ⁴	2.02	1.24×10 ³	1.44×10 ⁴	2.89×10 ⁴	2.01
H 型塔	18#塔	3.96×10 ³	9.01×10 ³	3.14×10 ⁴	3.49	6.76×10 ³	1.63×10 ⁴	3.40×10 ⁴	2.09
	19#塔	2.35×10 ³	1.09×10 ⁴	2.99×10 ⁴	2.74	7.29×10 ³	2.05×10 ⁴	3.45×10 ⁴	1.68
钻石型塔	18#塔	7.48×10 ³	6.85×10 ³	3.46×10 ⁴	5.05	4.29×10 ³	8.93×10 ³	3.17×10 ⁴	3.55
	19#塔	5.27×10 ³	1.33×10 ⁴	3.26×10 ⁴	2.46	5.14×10 ³	1.42×10 ⁴	3.25×10 ⁴	2.29

图 5 对三个塔型工况下的主桥塔梁相对位移、主梁梁端位移和主塔塔顶位移进行了比较,结

果表明:纵向位移均为独柱型塔最大,钻石型塔次之,H 型塔最小,塔顶横向位移最大的是独柱型

表 6 地震作用下主桥各承台底截面弯矩最大值

Table 6 Maximum values of bending moment at bottom section of piles under seismic action

工况	位置	弯矩/(kN·m)		
		独柱型	H 型	钻石型
纵向+竖向	18#塔	7.32×10 ⁵	1.01×10 ⁶	7.21×10 ⁵
	19#塔	7.57×10 ⁵	1.02×10 ⁶	7.60×10 ⁵
横向+竖向	18#塔	1.19×10 ⁶	2.58×10 ⁶	2.35×10 ⁶
	19#塔	1.45×10 ⁶	2.28×10 ⁶	2.06×10 ⁶

表 7 对三个塔型工况的主塔(地震作用+恒载)最不利截面最大压应力进行了比较,结果表明,H 型桥塔截面最大应力较小,为 116 MPa,独柱型桥塔和钻石型桥塔分别为 165 MPa 和 169 MPa,而设计允许应力为 304.4 MPa,各塔能力需求比接近 2,比较富裕。

表 7 主塔截面最大压应力

Table 7 Maximum compressive stress of towers

工况	位置	压应力/MPa		
		独柱型	H 型	钻石型
横向+竖向	18#塔	155	116	169
	19#塔	165	107	157
纵向+竖向	18#塔	160	87	136
	19#塔	162	89	138

表 8 对纵向和横向地震作用下三个塔型工况的主塔基础最不利单桩抗弯性能进行了比较,结果表明:在地震作用下,各基础的单桩抗弯强度都比较富裕,独柱式和钻石型塔基础的能力需求比都在 2 以上,其中,独柱型塔的基础单桩抗弯性能表现最为优异。

果表明:纵向位移均为独柱型塔最大,钻石型塔次之,H 型塔最小,塔顶横向位移最大的是独柱型

塔, H型塔次之, 钻石型塔最小, 与三种塔型的刚度大小排序一致。

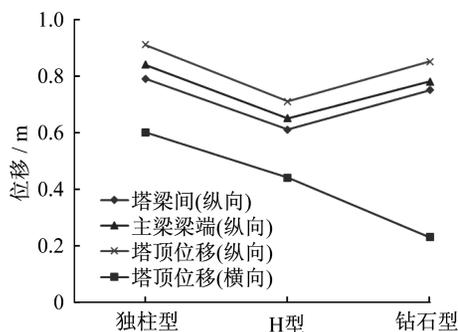


图5 主桥关键点最大位移

Fig.5 Maximum displacements of key points

5 结论

本文以南京浦仪公路西段跨江大桥为背景桥梁, 该桥全线路为一般(中硬)场地, 针对独柱型、H型和钻石型三种桥塔形式分别建立了空间有限元模型, 采用反应谱分析方法研究了不同塔型对钢塔斜拉桥地震反应的影响, 主要结论如下:

(1) 斜拉桥的纵飘周期, 独柱式塔最长, H型塔最短; 主塔横向侧弯周期, 独柱式塔最长, 钻石型塔最短。

(2) 纵向+竖向地震作用下, H型塔及其基础的地震弯矩显著大于另两种塔型, 但塔顶和塔梁间地震位移明显小于另两种塔型。

(3) 横向+竖向地震作用下, 钻石型塔的塔柱地震轴力较大, H型塔次之, 独柱式塔则较小; 同时, 独柱式塔的基础地震弯矩需求也较小, 且显著小于H塔型。

(4) 不管采用哪一种塔型, 在7度地震区, 对于钢塔及其基础, 地震均不会控制设计。

参考文献

[1] 叶爱君. 桥梁抗震[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 1-143.

[2] Ye Aijun, Hu Shide, Fan Lichu. Seismic conceptual design for bridge tower of a long-span cable-stayed bridges [C]. Proceedings of the First PRC-US Workshop on Seismic Analysis and Design of Special Bridges, 2002.10.

[3] Abdel Raheem S E, Hayashikawa T. Parametric study on steel tower seismic response of cable-stayed bridge under great earthquake ground motion [J]. Structural Engineering Earthquake Engineering, 2003, 20: 25-41.

[4] 王福春, 梁力, 李鑫. 混凝土折线塔斜拉桥抗震性能研究[J]. 城市道桥与防洪, 2010(9): 30-34.

[5] Okamoto Y, Nakamura S. Static and seismic studies on steel/concrete hybrid towers for multi-span cable-stayed bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(2): 203-210.

[6] 陈旭, 李建中. 主塔塔形对独塔斜拉桥主塔横向地震反应影响[J]. 世界地震工程, 2015, 31(1): 240-246.

Chen Xu, Li Jianzhong. Influence of tower type on transverse seismic response of single pylon cable-stayed bridge [J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(1): 240-246. (in Chinese)

[7] 沈星, 叶爱君. 大跨度斜拉桥倒Y型混凝土主塔横向抗震性能分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(11): 52-59.

Shen Xing, Ye Aaijun. Analysis on lateral seismic performance of inverted Y-shaped concrete tower for long span cable-stayed bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(11): 52-59. (in Chinese)

[8] 王晓伟, 叶爱君. 大跨度斜拉桥地震反应谱分析中计算振型数研究[J]. 结构工程师, 2011, 27(4): 84-90.

Wang Xiaowei, Ye Aijun. Computational mode number research in seismic response spectrum analysis of long-span cable-stayed bridge [J]. Structural Engineers, 2011, 27(4): 84-90. (in Chinese)

[8] 叶爱君, 胡世德, 范立础. 斜拉桥抗震体系研究[J]. 桥梁建设, 2002, 32(4): 1-4.

Ye Aijun, Hu Shide, Fan Lichu. Research on aseismic structural system of cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2002, 32(4): 1-4. (in Chinese)

[9] 杨玉民, 袁万城, 范立础. 大跨斜拉桥横向地震反应及其分形特征[J]. 同济大学学报, 2001, 29(1): 15-19.

Yang Yumin, Yuan Wancheng, Fan Lichu. Transverse Seismic Response of Long-span Cable-stayed Bridges and Their Fractal Characteristic [J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(1): 15-19. (in Chinese)

[10] 乔小帅. 双塔斜拉桥抗震概念设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013: 1-8.