

单索面斜拱曲梁组合桥线形影响因素研究

郭太军, 何鹏, 吴家盛

(中恩工程技术有限公司, 广东 广州 510000)

摘要:以广东广州海丝人行景观天桥为工程背景,采用 MIDAS/Civil 建立空间有限元模型,研究单索面斜拱曲梁组合桥的主梁容重、主梁刚度、拱肋刚度、桥墩刚度、吊杆初张力与刚度、温度作用对成桥梁拱线形的影响,按影响大小将各因素划分为忽略不计($\Delta\delta < 5\text{ mm}$)、影响小($5\text{ mm} \leq \Delta\delta \leq 10\text{ mm}$)和影响大($\Delta\delta > 10\text{ mm}$)3 个等级,结果表明,对曲梁竖向与平面线形影响较大的因素为年温差,对斜拱肋面内与面外线形影响较大的因素主要为年温差、索拱温差与吊杆初张力;基于以上研究,对该类桥梁施工过程中梁拱线形控制提出合理化建议。

关键词:桥梁;单索面斜拱曲梁组合桥;梁拱线形;人行景观天桥

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0116-04

世界上第一座单索面斜拱曲梁组合桥——盖茨黑德千禧桥于 2001 年诞生于英国^[1]。目前国内外已建的单索面斜拱曲梁组合桥多是当地地标性建筑^[1-3]。现有针对单索面斜拱曲梁组合桥的研究主要集中在施工方法、结构动力特性与人致振动分析、抗震研究及施工过程控制等方面^[4-13],针对其成桥线形的研究鲜有报道。鉴于此,本文以广东广州海丝人行景观天桥(26+36+55+22) m 为工程背景,研究主梁容重、主梁刚度、拱肋刚度、桥墩刚度、吊杆初张力与刚度、温度作用对单索面斜拱曲梁组合桥成桥梁拱线形的影响,探讨桥梁施工过程中线形控制措施。

1 工程背景与有限元模型

海丝天桥横跨广州市黄埔区九龙大道,连接缤纷广场与海丝知识中心。桥梁融合了单索面、斜拱肋与曲线梁等结构要素,其独特的空间效应与周围错落有致的现代建筑群相得益彰(见图 1)。



图 1 海丝天桥景观效果图

该桥为多跨连续中承式斜拱曲梁桥,跨径布置为(26+36+55+22) m。主梁采用单箱单室等高钢箱梁,位于曲率半径分别为 125 m、58 m 的圆弧

及直线段上,另设 3 个分支与主梁刚接。拱肋采用正五边形变高截面钢箱拱,矢跨比为 1/2.5,拱肋整体外倾 20°。全桥采用梁拱分离、墩梁固结、拱脚与承台固结的有推力支承体系(见图 2、图 3)。

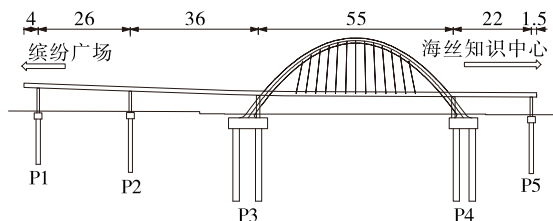


图 2 海丝天桥立面布置图(单位:m)

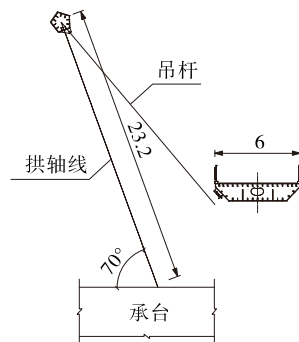


图 3 海丝天桥横断面图(单位:m)

采用 MIDAS/Civil 建立全桥空间杆系有限元模型,吊杆采用桁架单元模拟,其余结构单元均采用梁单元模拟,桩土之间相互作用采用土弹簧模拟。桥墩与主梁及拱脚与承台之间均采用刚性连接。

2 梁拱线形影响因素分析

采用单因素分析方法,选取表 1 所示影响因素

进行分析,以设计值为基准,分别对某一影响因素进行一定幅度的改变,其他影响因素保持不变,进行考虑施工全过程的结构计算分析。以成桥状态的梁拱线形为控制目标,确定各因素对控制目标的影响程度。为准确描述梁拱的线形变化,将其正交分解(见图 4),选取曲梁竖向线形改变量 $\Delta\delta_1$ 、曲梁平面线形改变量 $\Delta\delta_2$ 、斜拱肋面内线形改变量 $\Delta\delta_4$ 、斜拱肋面外形线改变量 $\Delta\delta_5$ 为控制目标进行分析。

表 1 影响因素与计算工况

影响因素	基准值	工况一	工况二
主梁容重	78.5 kN/m ³	+5%	-5%
主梁刚度	206 GPa	+5%	-5%
拱肋刚度	206 GPa	+5%	-5%
桥墩刚度	206 GPa	+5%	-5%
吊杆初张力	设计值	+5%	-5%
吊杆刚度	195 GPa	+5%	-5%
年温差/℃	—	+25	-25
索梁温差/℃	—	+10	-10
索拱温差/℃	—	+10	-10

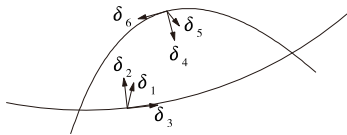


图 4 梁拱位移正交分解示意图

由于梁拱线形影响因素众多,限于篇幅,本文仅给出影响较大因素的计算结果。

2.1 曲梁竖向线形

图 5、图 6 分别为主梁容重和吊杆初张力、温度作用对曲梁竖向线形的影响,其他因素影响较小。

由图 5、图 6 可知:主梁容重($\pm 5\%$)与吊杆初张力($\pm 5\%$)对曲梁竖向线形的影响有限,均不大于 4 mm;年温差($\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)对曲梁竖向线形的影响显

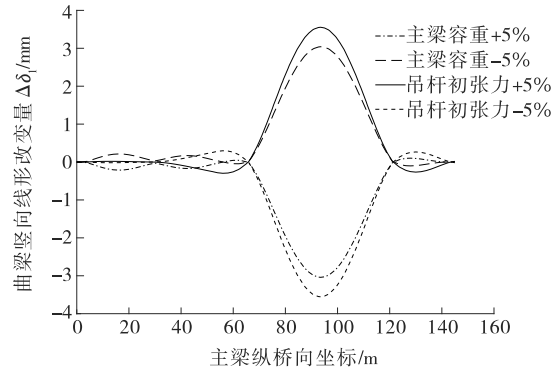


图 5 主梁容重与吊杆初张力对曲梁竖向线形的影响

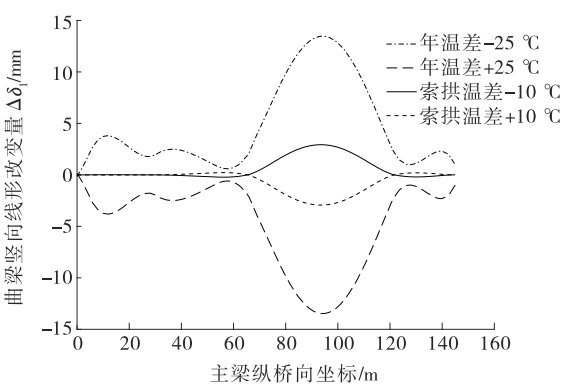


图 6 温度作用对曲梁竖向线形的影响

著,最大平面改变量为 13.47 mm;索拱温差($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)作用下,曲梁竖向线形变化较小,最大值仅为 2.04 mm。总体而言,各因素对曲梁主跨竖向线形的影响远大于边跨。

2.2 曲梁平面线形

经计算分析,结构构件(主梁、拱肋、桥墩与吊杆)刚度变化对曲梁平面线形的影响可忽略不计。图 7、图 8 分别为主梁容重和吊杆初张力、温度作用对曲梁平面线形的影响。

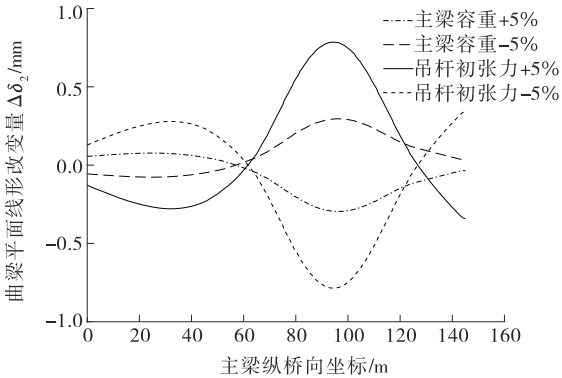


图 7 主梁容重与吊杆初张力对曲梁平面线形的影响

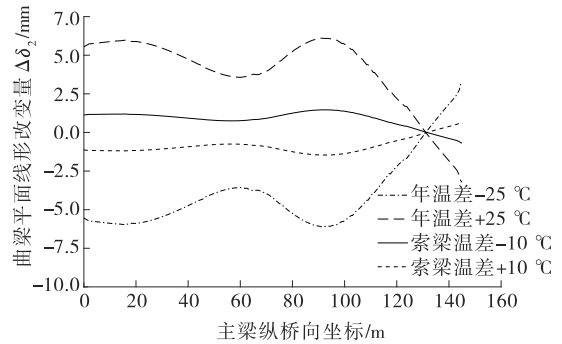


图 8 温度作用对曲梁平面线形的影响

由图 7、图 8 可知:主梁容重($\pm 5\%$)与吊杆初张力($\pm 5\%$)对曲梁平面线形的影响很小,平面线形

改变量均小于 1 mm;年温差($\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)对曲梁平面线形的影响较显著,主跨最大平面线形改变量为 6.11 mm,边跨最大平面线形改变量为 5.98 mm;索梁温差($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)作用下,曲梁平面线形变化较小,仅为 1.47 mm。

2.3 斜拱肋面内线形

图 9、图 10 分别为拱肋刚度和吊杆初张力、温度作用对斜拱肋面内线形的影响,其他因素的影响可忽略不计。

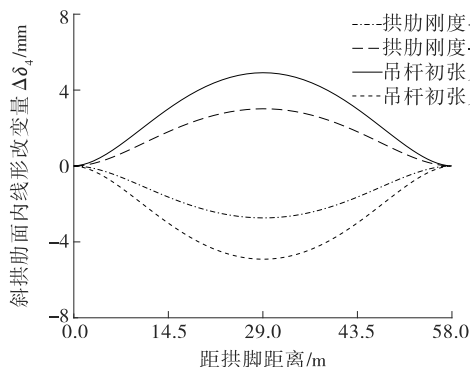


图 9 拱肋刚度与吊杆初张力对斜拱肋面内线形的影响

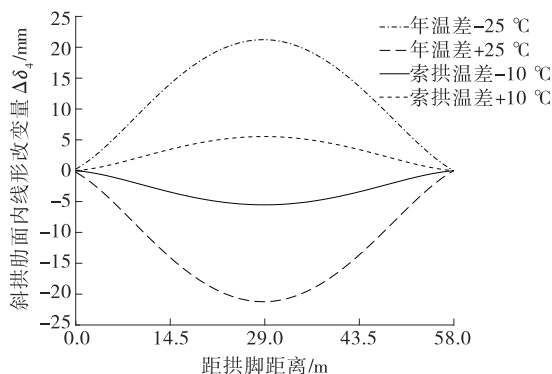


图 10 温度作用对斜拱肋面内线形的影响

由图 9、图 10 可知:拱肋刚度($\pm 5\%$)与吊杆初张力($\pm 5\%$)对斜拱肋面内线形的影响较大,最大面内线形改变量分别为 3.02 mm、4.92 mm;年温差($\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)对斜拱肋面内线形的影响显著,最大面内线形改变量为 21.24 mm;索拱温差($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)作用下,斜拱肋面内线形变化较大,最大面内线形改变量为 5.54 mm。各因素对拱顶面内线形的影响最大,越接近拱脚,拱肋面内线形变化越小且拱肋线形变化基本呈对称分布。

2.4 斜拱肋面外线形

图 11、图 12 分别为拱肋刚度和吊杆初张力、温度作用对斜拱肋面外线形的影响,其他因素的影响

可忽略不计。

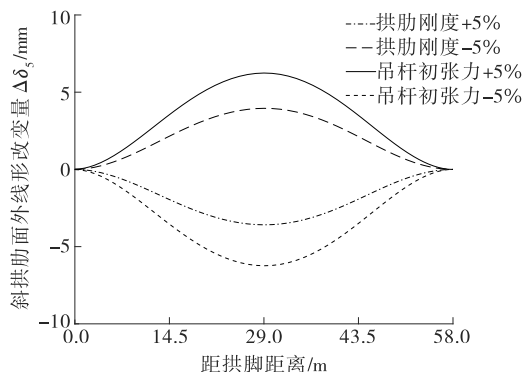


图 11 拱肋刚度与吊杆初张力对斜拱肋面外线形的影响

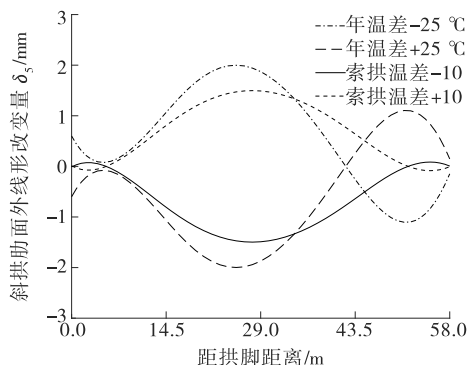


图 12 温度作用对斜拱肋面外线形的影响

由图 11、图 12 可知:拱肋刚度($\pm 5\%$)与吊杆初张力($\pm 5\%$)对斜拱肋面外线形的影响较大且基本呈对称分布,最大面外线形改变量分别为 3.96 mm、6.24 mm;年温差($\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)对斜拱肋面外线形的影响较小且呈非对称分布(主要是由于墩梁刚度分布不对称),最大面外线形改变量为 2.00 mm;索拱温差($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)作用下,斜拱肋面外线形变化较小,最大面外线形改变量为 1.50 mm。

2.5 各影响因素对比分析

各因素对控制目标的影响程度对比见表 2。

根据有限元计算结果,将各因素按影响大小划分为 3 个等级,分别为忽略不计($\Delta\delta < 5\text{ mm}$)、影响小($5\text{ mm} \leq \Delta\delta \leq 10\text{ mm}$)和影响大($\Delta\delta > 10\text{ mm}$)。由表 2 可知:对曲梁竖向与平面线形影响较大的因素为年温差;对斜拱肋面内线形影响较大的因素为年温差与索拱温差;对斜拱肋面外线形影响较大的因素为吊杆初张力。

3 结论

(1) 基于城市人行景观天桥追求轻盈美观的造型需求,海丝天桥主要构件梁、拱、墩均采用钢结构

表 2 海丝天桥成桥线形影响因素识别结果

单位:mm

影响因素	计算工况	控制目标			
		曲梁竖向线形 改变量 $\Delta\delta_1$	曲梁平面线形 改变量 $\Delta\delta_2$	斜拱肋面内线形 改变量 $\Delta\delta_4$	斜拱肋面外线形 改变量 $\Delta\delta_5$
主梁容重	$\pm 5\%$	3.04	0.30	0.04	0.08
主梁刚度	$\pm 5\%$	0.72	0.26	0.19	0.28
拱肋刚度	$\pm 5\%$	0.11	0.02	3.02	3.96
桥墩刚度	$\pm 5\%$	0.09	0.11	0.04	0.03
吊杆初张力	$\pm 5\%$	3.56	0.79	4.92	6.24
吊杆刚度	$\pm 5\%$	0.06	0.01	0.08	0.11
年温差	$\pm 25\text{ }^\circ\text{C}$	13.47	6.11	21.24	2.00
索梁温差	$\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$	1.51	1.47	0.75	1.39
索拱温差	$\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$	2.04	0.48	5.54	1.50

设计,结构刚度大、质量轻,主梁容重变化对梁拱线形的影响很小。施工线形控制中,主梁各节段质量误差不超过 5%即可。

(2) 结构构件刚度变化(梁、拱、墩及吊杆刚度 $\pm 5\%$)对梁拱线形的影响可忽略不计。实际工程施工过程中,确保构件弹性模量满足要求即可。

(3) 吊杆初张力变化对主梁线形的影响很小,对斜拱肋线形的影响较大。实际工程施工中应严格控制吊杆初张拉力,其误差不宜大于 3%。

(4) 年温差对主梁竖向与平面线形及斜拱肋面内线形均影响显著。施工过程中应实时监测环境温度变化,主梁跨中合龙、张拉吊杆等关键施工工况宜在温差变化较小时段进行。

(5) 索梁温差对梁拱线形的影响可忽略不计,索拱温差主要对斜拱肋面内线形影响较大。施工过程中应评估索拱温差对斜拱肋面内线形的影响并进行误差纠偏。

参考文献:

[1] JOHNSON J, CURRAN P. Gateshead Millennium Bridge—an eye-opener for engineering[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 2003, 156(1): 16—24.

[2] BURNTON P, BIRMINGHAM N, BUXTON S. Elizabeth quay pedestrian bridge, Perth—the jewel of the quay[C]//Footbridge 2017 Berlin—Tell A Story: Conference Proceedings 6-8.9.2017 TU-Berlin, Berlin, Germany. Chair of Conceptual and Structural Design, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren-Massivbau, Technische Universität Berlin, 2017: 1.

[3] 汤达洲. 厦门山水步道工程总体设计[J]. 中国市政工程, 2019(2): 8—11+134.

[4] BUTTERWORTH K, CARR D, KASSABIAN P. Gateshead Millennium Bridge, UK: Fabrication, assembly and erection[J]. Civil Engineering Innovation, 2008, 2(2): 63—70.

[5] 宁平华, 王晟, 华旭刚, 等. 大跨度曲梁空间拱人行桥动力特性研究[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 147—150.

[6] 周健华, 黄友钦, 刘爱荣. 斜拱曲梁人行桥步行舒适度研究[C]//中国力学学会. 第 30 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册). 北京: 中国力学学会, 2021: 428—434.

[7] 罗晓群, 张晋, 沈昭, 等. 单斜面索拱支承曲梁人行桥人致振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 83—92.

[8] 张凯伦, 刘爱荣, 饶瑞, 等. 斜拱曲梁桥的优化设计和抗震研究[C]//中国力学学会. 第 30 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册). 北京: 中国力学学会, 2021: 384—392.

[9] 汪一意, 陈建兵, 熊秉贤. 外倾单肋下承式异形钢拱桥静力参数敏感性分析[J]. 中外公路, 2017, 37(4): 180—184.

[10] 刘斌. 大跨度斜拉桥钢混叠合加劲梁制造线形研究[J]. 公路与汽运, 2020(4): 146—147+152.

[11] 李静, 龚贵林. 基于二次抛物线的拱轴线线形施工控制[J]. 公路与汽运, 2021(1): 114—117.

[12] 张丰, 颜东煌, 陈常松. 大跨度组合梁斜拉桥成桥状态参数敏感性分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 91—97.

[13] 张玉平, 刘雪松, 李传习. 基于 MOPSO 算法的双塔斜拉桥合理状态确定[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(2): 22—27+35.

收稿日期: 2022—02—11