

文章编号: 2095-2163(2022)08-0093-04

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

考虑温度影响的系杆拱桥施工控制研究

徐江顺, 宋郁民

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 本文以福厦铁路新建 72 m 钢管混凝土系杆拱桥施工为背景, 通过数值模拟研究温度对系杆拱桥施工控制的影响。建立全桥有限元分析模型, 根据实际施工温度分别设定桥梁不同构件的温度参数, 并在此基础上分析了施工温度对成桥系梁线形、拱肋线形、系梁应力、拱脚应力的影响。结果表明, 随着施工温度增加, 系梁竖向变形增大; 拱脚处上弦杆内核心混凝土应力增加, 下弦杆内核心混凝土应力减小。因此组合体系桥梁施工控制应考虑实际施工温度的影响, 建议将桥梁不同结构的温度参数按照实际施工温度进行设定。

关键词: 钢管混凝土; 拱桥; 温度; 有限元模型

Research on construction control of tied arch bridge considering the influence of the temperature

XU Jiangshun, SONG Yumin

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

【Abstract】 In order to study the influence of the temperature on the construction control of tied arch bridge, and taking the 72 m concrete-filled steel tube tied arch bridge of Fuxia Railway as the background, the finite element model of the whole bridge is established. According to the actual construction temperature, the temperature parameters of different bridge components are set respectively, and the influence of the actual construction temperature on the alignment of the bridge, the tied beam stress and the arch foot stress are analyzed. The results show that the actual construction temperature has a great influence on the alignment of bridge system beams. When the construction temperature is high, the vertical deformation value of the tied beam shows a significant increase, and the core concrete stress in the upper chord at the arch foot increases, while the core concrete stress in the lower chord decreases. The influence of actual construction temperature should be considered in the construction control of composite system bridges, so it is recommended that the temperature parameters of the different structures of the bridge could be set according to the actual construction temperature.

【Key words】 concrete-filled steel tubes; arch bridge; temperature; finite element model

0 引言

随着国内桥梁建设的飞速发展, 钢管混凝土拱桥因其较强的跨越能力、优美的外观、较低的建设成本等优点得到了广泛应用^[1]。在自然环境中, 钢管混凝土拱桥受到收缩徐变、温度变化等因素的影响, 应力和线形产生改变^[2]。对于钢管混凝土拱桥的收缩徐变效应, 已经有学者从预测模型、计算方法、温度影响、终止时间等角度做出深入研究^[3]。对于大跨度桥梁的温度效应, 已经有学者从混凝土凝固特性、外加剂的使用、施工技术等方面进行研究^[4]。然而, 关于桥梁施工过程中的实际温度对成桥应力和线形的影响研究较少。

在桥梁设计阶段, 通常考虑桥梁建设地址年平

均温度、均匀升降温和梯度升降温^[5]。而在实际施工过程中, 组合体系桥梁不同构件施工温度具有较大差别, 通常钢管混凝土拱桥系梁和拱肋建设于不同季节, 建设时温度差异较大^[6]。由于组合体系桥梁, 成桥过程发生多次体系转换, 因此有必要研究施工过程中已施工构件的变形和位移对成桥线形和应力的影响。本文结合福厦铁路新建钢管混凝土系杆拱桥项目, 建立有限元模型模拟计算施工过程, 研究实际施工温度对钢管混凝土系杆拱桥的影响。

1 工程概况

新建铁路福州至厦门客运专线 72 m 钢管混凝土系杆拱桥, 体系结构为刚性系杆刚性拱。主桥立面布置见图 1。图 1 中, 各尺寸单位均为 cm。

作者简介: 徐江顺(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 桥梁结构分析理论; 宋郁民(1975-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 桥梁结构分析理论、结构动力学。

通讯作者: 宋郁民 Email: song-yumin@163.com

收稿日期: 2021-11-29

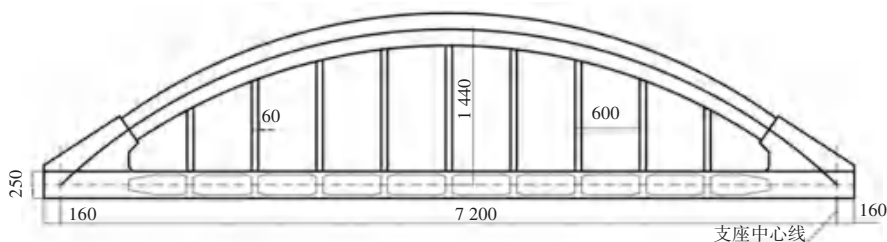


图1 主桥立面布置图

Fig. 1 Elevation layout of main bridge

系梁采用单箱三室预应力混凝土箱型截面,桥面箱宽 17.1 m,梁高 2.5 m,底板厚度为 0.3 m,顶板厚度为 0.3 m,边腹板厚度为 1.3 m,中腹板厚度为 0.3 m。吊点处设置横梁,每个箱室均设检查孔,系梁两端设置进入孔,拱脚处 6 m 范围内设置实体截面梁端。

拱肋采用悬链线线型,矢跨比为 1/5,矢高为 14.4 m,研究推得的悬链线方程(1)可表示为:

$$y = f(Chk\xi - 1) / (m - 1) \quad (1)$$

$$k = \ln(m + \sqrt{m^2 - 1}) \quad (2)$$

$$\xi = 2x/l = x/36 \quad (3)$$

其中, f 为计算矢高,取值 14.4; m 为拱轴系数,取值 1.127; l 为计算跨径,取值 72; x 为拱顶至计算点处的距离。

拱肋采用哑铃型钢管混凝土截面,钢管直径为 1 m,截面高度为 3 m,由厚 16 mm 钢板卷制而成,钢管内填充 C55 混凝土。每根拱肋的两钢管之间用厚为 16 mm 腹板连接,腹腔内不填充混凝土,仅在拱脚范围 1 m 填充 C55 无收缩混凝土。钢管和腹板均采用 Q345qD 钢材。两拱肋之间共设 3 道横撑,拱顶处设 X 型横撑,拱顶至两拱脚间设 2 道 K 型横撑,横撑内部不填充混凝土。拱肋截面如图 2 所示。图 2 中,各尺寸单位均为 mm。

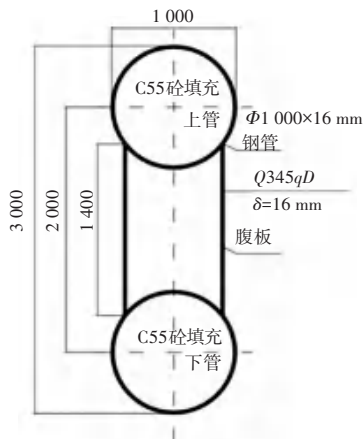


图2 拱肋截面图

Fig. 2 Section diagram of arch rib

吊杆布置采用纵向双吊杆体系,共设 18 对吊杆,吊杆中心纵向间距为 6 m,双吊杆中心距为 0.6 m。吊杆均采用 73 根 $\varphi 7$ 高强低松弛镀锌平行钢丝束,冷铸墩头锚,索体采用 PES 低应力防腐索体,并外包不锈钢防护层。各阶段单根吊杆索力值见表 1。

表1 单根吊杆索力值

Tab. 1 Single derrick cable force value

吊杆编号	初张拉力/kN	二期恒载/kN	支架拆除/kN
D01	525	745	655
D02	600	863	710
D03	425	844	650
D04	275	818	602
D05	200	809	588

2 计算模型

使用有限元软件进行全桥建模,根据实际工程图纸,共建立 401 个节点,454 个单元,包括 36 个桁架单元、418 个梁单元。系梁和拱脚采用梁单元模拟,拱肋采用施工联合截面模拟,吊杆采用桁架单元模拟。拱肋截面的联合程序与实际施工程序一致,首先吊装拼接钢管,其次泵送下弦杆管内混凝土,最后泵送上弦杆管内混凝土。模型中施加的静力荷载包括自重、二期恒载、预应力荷载、温度荷载;列车荷载采用 ZK 活载;混凝土材料(C50、C55)的材龄为 3 d。本文通过该模型模拟施工温度对成桥的影响,为方便分析处理数据,每组 2 根吊杆取其吊杆力的平均值。根据混凝土材料的特殊性质,混凝土浇筑凝固即开始产生收缩变形,并在桥梁自重等荷载作用下产生徐变变形。收缩徐变使节点位置发生改变,将边界条件激活方式定义为“变形后”,此时节点保留前期施工阶段发生的位移,节点不产生强制位移和反力。有限元模型如图 3 所示。

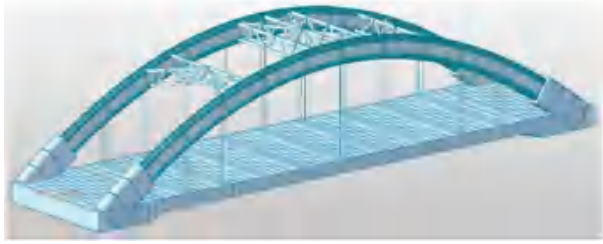


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

3 计算分析

厦门市属于亚热带海洋性季风气候,气候温暖湿润。根据公开的气象资料,厦门市年平均温度在 20 ℃左右,1~12 月的平均温度、平均最高温度、平均最低温度见表 2。

表 2 厦门市气象资料

Tab. 2 Meteorological data of Xiamen

月份/月	平均温度/℃	平均最高温度/℃	平均最低温度/℃
1	12.5	17.0	9.8
2	12.4	16.8	10.0
3	14.6	18.8	11.9
4	18.7	23.1	16.1
5	22.6	26.5	20.1
6	25.8	29.7	23.5
7	27.8	32.3	25.2
8	27.6	32.0	25.0
9	26.0	30.4	23.6
10	23.0	27.4	20.5
11	19.2	23.4	16.2
12	14.6	19.3	11.9

由表 2 可知,厦门市一年中 2 月平均温度最低,为 12.4 ℃;7 月平均温度最高,为 27.8 ℃。月度平均最高温度为 32.3 ℃,月度平均最低温度为 9.8 ℃。为研究实际施工温度对钢管混凝土系杆拱桥的影响,本文共探讨 3 种情况:

(1) 工况 1: 根据设计资料,系梁和拱肋同时安装,安装时温度为 20 ℃,拱肋和系梁采用相同的最高温度和最低温度。

(2) 工况 2: 夏季成桥,系梁初始温度为 2 月份 12.4 ℃,拱肋初始温度为 7 月份 27.8 ℃,拱肋和系梁采用相同的最高温度和最低温度。

(3) 工况 3: 冬季成桥,系梁初始温度为 7 月 27.8 ℃,拱肋初始温度为 2 月份 12.4 ℃,拱肋和系梁采用相同的最高温度和最低温度。

3 种工况下,有限元模型中单元均匀升降温参数设定见表 3。

表 3 单元均匀升降温参数

Tab. 3 Unit uniform temperature rise and fall parameters ℃

工况	系梁			拱肋		
	初始	升温	降温	初始	升温	降温
工况 1	20.0	12.3	10.2	20.0	12.3	10.2
工况 2	12.4	19.9	2.6	27.8	4.5	17.6
工况 3	27.8	4.5	17.6	12.4	19.9	2.6

3.1 系梁和拱肋线形

成桥系梁和拱肋在自重、二期荷载、活载和收缩徐变等因素的共同作用下发生竖向变形。考虑实际施工温度的影响,成桥系梁和拱肋的竖向变形值如图 4 和图 5 所示。

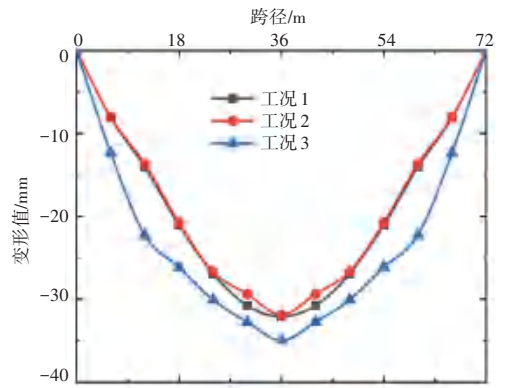


图 4 系梁竖向变形值

Fig. 4 Vertical deformation value of the beam

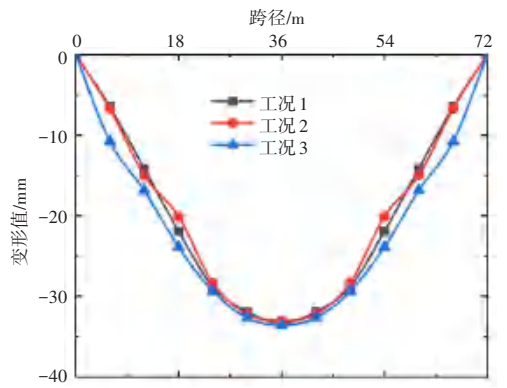


图 5 拱肋竖向变形值

Fig. 5 Vertical deformation value of arch rib

由图 4 可知,工况 1 全桥采用相同的初始温度 20 ℃,系梁跨中挠度最大为 32.09 mm;工况 2 夏季成桥,系梁初始温度为 12.4 ℃,拱肋初始温度为 27.8 ℃,系梁跨中挠度最大为 31.90 mm;工况 3 冬季成桥,系梁初始温度为 27.8 ℃,拱肋初始温度为 12.4 ℃,系梁跨中挠度最大为 34.99 mm。工况 1 和工况 2 系梁变形曲线基本相同,工况 3 系梁竖向变

形值有明显增长。对比工况 1, 工况 3 在 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $L/2$ 处系梁竖向变形值分别增加 32.77%、24.16%、9.04%, 呈现明显的增长趋势。

由图 5 可知, 工况 1 钢管拱肋拱顶挠度最大为 33.28 mm; 工况 2 拱肋拱顶挠度最大为 33.02 mm; 工况 3 拱肋拱顶挠度最大为 33.58 mm, 3 种施工工况下拱肋变形曲线较为接近。工况 3 靠近拱脚两端拱肋竖向位移值偏大, 对比工况 1, 工况 3 在 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $L/2$ 处拱肋竖向变形值分别增加 15.44%、8.90%、0.90%。

对比图 4 和图 5 可知, 施工温度对于成桥系梁的线形影响较大, 在较高的施工温度下, 系梁竖向变形值呈现明显的增长。钢管混凝土系杆拱桥作为一种组合体系的桥梁, 系梁线形的变化将导致拱肋线形随之变化。

3.2 系梁和拱脚应力

3 种工况下系梁和拱脚(钢管、上弦杆核心混凝土、下弦杆核心混凝土)应力见表 4、表 5。表 4、表 5 中, 压应力表示为负值。

表 4 成桥系梁应力

Tab. 4 The stress of the beam MPa

工况	$L/8$	$L/4$	$L/2$
工况 1	-6.0	-7.0	-8.3
工况 2	-6.0	-6.8	-8.3
工况 3	-6.0	-7.0	-8.3

表 5 成桥拱脚应力

Tab. 5 The stress of arch foot MPa

工况	钢管拱肋	上杆混凝土	下杆混凝土
工况 1	-149.0	-4.5	-2.2
工况 2	-149.0	-4.5	-2.2
工况 3	-149.0	-4.8	-2.0

由表 4 和表 5 可知, 3 种工况下成桥系梁应力基本相同, 工况 2 系梁 $L/4$ 跨径截面应力减小 0.2 MPa。工况 1 和工况 2 拱脚应力无变化, 钢管拱肋应力为 149.0 MPa, 上弦杆内核心混凝土应力为

4.5 MPa, 下弦杆内核心混凝土应力为 2.2 MPa。对比工况 1 和工况 2, 工况 3 拱脚上弦杆内核心混凝土应力增加 0.3 MPa, 增长幅值为 6.67%; 下弦杆内核心混凝土应力减小 0.2 MPa, 增长幅值为 -9.10%。工况 3 系梁和拱肋线形的变化较为明显, 拱脚应力随之发生改变。

4 结束语

通过对福厦铁路新建钢管混凝土系杆拱桥进行有限元建模, 对比分析有关数据, 得出以下结论:

(1) 实际施工温度对成桥系梁线形影响较大, 对钢管混凝土拱肋线形影响不显著; 施工温度较高时, 成桥系梁竖向变形值增大, 但跨中截面的变形值增幅较小。

(2) 实际施工温度对成桥系梁应力影响较小; 系梁施工温度较高时, 随着系梁和拱肋变形值的增加, 拱脚上弦杆核心混凝土应力有所增大、下弦杆核心混凝土应力有所减小。

组合体系桥梁施工控制应考虑实际施工温度的影响, 建议将桥梁不同结构的温度参数按照实际施工温度进行设定。

参考文献

- [1] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017, 50(06): 50-61.
- [2] 李立峰, 陈明宪, 胡建华, 等. 茅草街大桥主拱圈节段模型试验研究[C]//第十六届全国桥梁学术会议. 长沙: 中国土木工程学会, 2004: 450-455.
- [3] 王军文, 姚彦强, 苏木标. 大跨度箱梁桥温度与混凝土收缩徐变耦合效应分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(01): 1-7.
- [4] 王永宝, 廖平, 贾毅, 等. 循环温度对大跨混凝土拱桥长期变形行为的影响[J]. 桥梁建设, 2019, 49(03): 57-62.
- [5] 魏亚辉. 大跨度拱桥温度效应对行车影响的试验研究[J]. 铁道建筑, 2017(04): 1-4.
- [6] 李博, 吴腾宇. 钢箱梁系杆拱桥施工监控受温度变化影响及修正分析[J]. 工程与建设, 2020, 34(06): 1155-1157.