

独塔混合梁斜拉桥施工及运营阶段温度影响分析

李伟

(中铁十五局集团第一工程有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 为了研究独塔混合梁斜拉桥施工及运营阶段的温度影响,以跨径为 $(32+50+93+260+38)$ m的岳口汉江特大桥为工程背景,利用Midas/Civil软件建立有限元模型,分别研究了体系温差、斜拉索上下游温差、日照温差荷载作用下斜拉桥主梁挠度变形及扭转影响。研究表明:体系温差作用下,悬臂阶段中跨主梁竖向位移随着跨度逐渐增大,在最大悬臂端达到最大值,成桥阶段的位移则呈现出抛物线形,最大位移在 $2L/3$ 跨度处;斜拉索上下游产生温差情况下,边跨侧有一定的扭转,中跨侧悬臂阶段主梁的最大扭转发生在端部,成桥阶段最大扭转则产生在中跨约 $L/2$ 处;日照温差作用下,边跨主梁挠度变化不大,中跨侧日照温差产生的位移趋势与整体升降温基本相同,但最大位移小于体系温差作用下主梁产生的挠度。

关键词: 混合梁斜拉桥; 有限元; 温度荷载; 主梁标高; 挠度变化; 施工控制

在太阳辐射、气温变化等环境因素的作用下,斜拉桥会产生温度梯度分布,继而产生不可忽略的温度应力和变形。对大跨度斜拉桥,温度荷载将会影响其合理线形、结构整体受力,从而对结构产生不利影响,因此研究温度影响规律,修正温度荷载的作用,对施工控制以及运营监控尤为重要。

杨永清等以清溪口渠江特大桥为工程背景,通过有限元模型,研究了在温度荷载作用下斜拉桥的静力特性,并对比分析了不同温度荷载影响下,斜拉桥主梁应力、位移以及斜拉索索力的变化规律;刘国坤等采用基于实测温度场的数值分析方法,研究了施工过程中不同天气条件下索、塔、梁温度轴向应变和曲率对主梁标高的敏感性;颜东煌等通过分段多项式函数拟合温度场分布,对斜拉桥温度影响的计算方法进行了研究;张永健等以某双肢人字形独塔斜拉桥为例,研究了当主塔、副塔、主梁采用不同的连接方式时,整体温度荷载作用下,斜拉桥的应力分布情况;代传广等结合柴埠大桥实际监控数据,研究了混凝土斜拉桥日照温度效应影响,并修正了主梁膨胀系数;李克银等以云阳长江大桥为工程研究背景,分析研究了温度作用下斜拉桥的线形变化特征。综上所述,目前关于温度的影响分析研究较多,但对独塔混合梁斜拉桥在施工及运营阶段的分析较为欠缺,尤其是当桥跨布置不对称时,边跨和中跨在温度影响下产生不均匀变化导致的全桥线形

影响。

该文以湖北岳口汉江特大桥为工程背景,运用Midas/Civil有限元软件建立仿真分析模型,对最大悬臂阶段和成桥阶段下的体系温差、斜拉索上下游温差及日照温差作用下的主梁挠度变形,以及发生的扭转效应进行研究,并分析得到不同温度荷载作用下的主梁竖向位移的变化规律。

1 工程概况

岳口汉江特大桥为混合梁独塔斜拉桥,主桥跨径为 $(32+50+93+260+38)$ m,全长474.2 m,半漂浮结构体系。其中边跨主梁为预应力混凝土箱梁,中跨主梁由混凝土箱梁和钢箱梁组成,钢混结合点位于距主塔23 m处的中跨侧,具体桥型布置如图1所示。

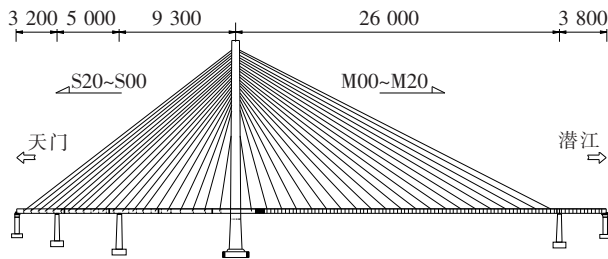


图1 桥型布置图(单位:cm)

混凝土箱梁截面如图 2 所示,标准截面宽 13 m,中心梁高 3.5 m,为单箱三室等高截面,顺桥向每隔 5.5~9.5 m 设置一道宽度为 50 cm 的横梁,具体位置与斜拉索锚固点对应,全桥共布置 22 道斜拉索横梁。边跨混凝土采用 C55 高性能混凝土,标准节段长 9 m。

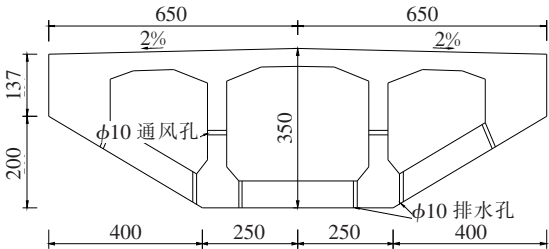


图 2 混凝土主梁截面(单位:cm)

中跨钢箱梁截面外轮廓尺寸与混凝土箱梁相同,为带风嘴的单箱三室截面,其中中间三室与混凝土箱梁相对应。中跨共有 24 个钢箱梁节段,标准节段长 12 m,标准节段每 3 m 布置一道实腹横隔板。

2 有限元模型

将岳口汉江特大桥主桥简化成空间杆系结构模式,用桥梁结构计算分析软件 Midas/Civil 建立施工控制仿真分析模型。模型共有 2 062 个节点,1 346 个单元,斜拉索采用索单元,主梁和主塔采用空间梁单元进行模拟。模型如图 3 所示。

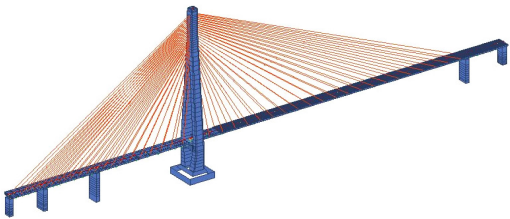


图 3 有限元模型

岳口汉江特大桥边跨采用支架现浇,中跨钢箱梁施工采用悬拼施工工艺,在主桥施工至 19[#] 钢箱梁时,为了保证全桥的顺利合龙同时为了验证模型理论计算的准确性,选取合龙前 2 d(此时现场无任何施工),对大气温度进行间隔多次测量,并相对应地测出 18[#] 钢箱梁端部中间标高,通过对比现场实测温度对梁面标高的影响和理论模型计算结果,最大差值在可接受范围内,这既为岳口汉江特大桥顺利合龙提供了必要的依据,也验证了模型的准确性。具体结果如表 1 所示。

由表 1 可知:实测标高变化与理论标高的最大差值发生在 14:00 时刻,为 13.2 mm,由于测量时,中午

桥面会有轻微的风致震动,测量值会有些许误差,其他各个时刻的相对误差均在±10 mm 以内,证明了模型计算的准确性。以 07:00 的温度为基准,白天温度上升高于基准温度 15 ℃ 时,主梁的标高会呈降低趋势,在次日 01:00 时刻温度低于基准温度,主梁标高则会变高。对比整个测量过程的数据,主梁标高变化最大负值发生在 14:00 时刻,最大负值达 48.3 mm,主梁标高最大正值发生在次日 01:00,最大正值达 4.9 mm,一天中标高变化绝对值达 53.2 mm,所以进行关键工况控制时,若忽略温度影响,必然会造成施工误差,影响控制精度。

表 1 最大悬臂阶段整体升降温对梁面标高的影响

时刻	大气温度/ ℃	实测标高 变化/mm	理论与实测 差值/mm
07:00	15		
09:00	18	-25.1	1.1
12:00	21	-36.6	8.9
14:00	23	-48.3	13.2
17:00	17	-20.7	4.7
20:00	16	-5.8	-2.0
次日 01:00	14	4.9	3.6

3 计算工况

在有限元模型上,根据规范分别对最大悬臂阶段和成桥阶段设置体系温差、斜拉索上下游温差、主梁日照温差 3 个不同的工况,分别计算在温度荷载作用下主梁标高的变化值(即挠度)。从而对桥梁施工以及成桥运营阶段起到温度影响控制作用。

斜拉桥体系温差是季节性气候变化造成的,岳口汉江特大桥的设计合龙温度为 15 ℃,根据当地气象部门历年统计的日平均最高温度和日平均最低温度,整体升降温度的取值为±20 ℃。

斜拉索上下游温差是单侧阳光照射下,斜拉索上下游受热不同产生的,根据现场实测数据反馈,上下游斜拉索温差取为 2、4 ℃。

日照温差荷载是主梁竖向温度分布不均匀造成的,参照 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》第 4.3.12 条规定,主梁日照正温差 T_1 取 14 ℃, T_2 取 5.5 ℃;主梁日照负温差 T_1 、 T_2 取正温差的 -0.5 倍,即 T_1 取 -7 ℃, T_2 取 -2.75 ℃。

4 最大悬臂阶段温度荷载效应

4.1 体系温差对主梁挠度的影响

最大悬臂阶段体系温差引起的主梁挠度见图 4。

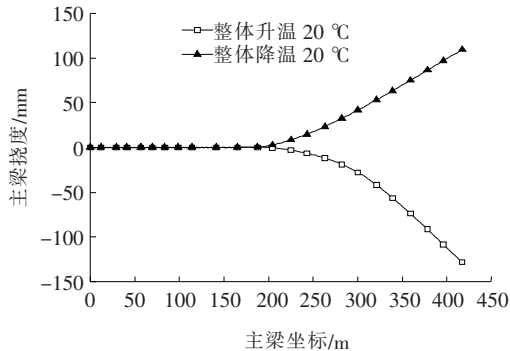


图 4 最大悬臂阶段体系温差下的主梁挠度

由图 4 可知：体系温差作用下边跨混凝土主梁挠度变化不大，引起的最大竖向位移为 4.1 mm。这是由于边跨混凝土主梁采用现浇支架的施工工艺，在施工到最大悬臂阶段时，临时支架尚未完全拆除，从而导致边跨整体刚度很大，对温度荷载的敏感性很小。在中跨侧，整体升温 20℃ 时，主梁挠度随着主梁坐标的变大呈现出非线性的下降趋势，在最大悬臂端达到最大竖向向下位移 129.9 mm。由于斜拉索的线形膨胀系数大于主梁，在温度荷载以及结构本身的自重作用下，斜拉索伸长，从而导致主梁产生向下的竖向位移，同时施工到最大悬臂阶段，索力只进行了初张拉，整体的索力与成桥索力相比较小，中跨钢箱梁侧的整体柔度很大，从而导致在整体升温情况下端部的竖向位移很大。在整体降温作用下，主梁挠度的变化与整体升温相反，悬臂端部产生的最大向上位移为 110.6 mm。

4.2 斜拉索上下游温差对主梁扭转的影响

最大悬臂阶段上下游斜拉索温差导致的主梁上下游挠度差值如图 5 所示。

由图 5 可知，斜拉索上下游温差对边跨混凝土主梁的扭转影响不大，最大扭转发生在主塔附近。当斜拉索上下游温差为 4℃ 时，引起的主梁上下游最大挠度差值为 3.2 mm。这是由于边跨混凝土主梁重度较大，并且在边跨设有辅助墩，所以在斜拉索上下游温差荷载作用下的扭转很小；在中跨侧，随着跨度的增加，主梁上下游挠度差值呈现出非线性的增长趋势，差值越大扭转效应越明显，并且在最大悬臂端达到最大值。斜拉索上下游温差为 2、4℃ 时最大扭转均发生在悬臂端部，最大值分别为 9.6、19.2 mm，所以在施工张拉

阶段应严格控制张拉时的温度，避免主梁产生一定的扭转。

4.3 日照温差对主梁挠度的影响

最大悬臂阶段竖向日照温差下的主梁挠度如图 6 所示。

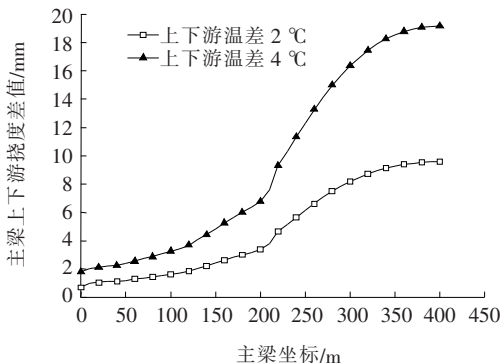


图 5 最大悬臂阶段斜拉索上下游温差下的主梁挠度差值

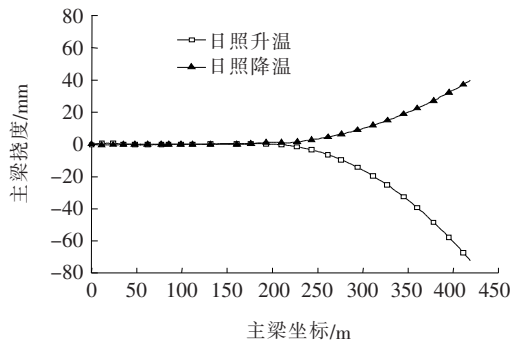


图 6 最大悬臂阶段日照温差下的主梁挠度

由图 6 可知：在日照温差作用下，边跨混凝土主梁产生的挠度基本为零。中跨主梁产生较大的竖向位移。日照升温时，在最大悬臂端主梁产生最大竖向向下位移 71 mm。当日照温度上升时，钢箱梁受热膨胀伸长，导致主梁产生纵向变形，由于斜拉索的长度是固定的，所以斜拉索倾斜角度将变小。当索力一定时，倾角变小，索力的竖向分力也将减小，于是中跨钢箱梁产生向下的位移。日照温差作用下主梁的挠度变化趋势与体系温差作用下的变化趋势基本相同，但在数值上明显较小，表明由于斜拉索的线性膨胀导致的主梁挠度变化在悬臂阶段的影响最大。日照降温作用下主梁的挠度变化与日照升温相反，最大向上位移产生在端部，最大值为 37 mm。

5 成桥阶段的温度荷载效应

5.1 体系温差对主梁挠度的影响

成桥阶段体系温差作用下的主梁挠度变化见图 7。

由于全桥合龙后体系发生转换,斜拉桥内力进行了重分布,整体的稳定性和刚度远优于最大悬臂施工阶段,从而对温度的敏感性比较小,产生的挠度变形也小于最大悬臂阶段。同时由于端部被约束自由度减小,挠度变化趋势也发生了变化。

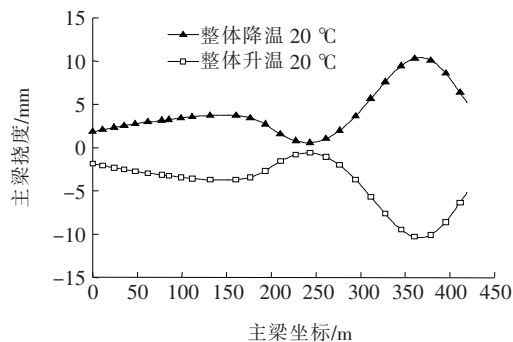


图7 成桥阶段体系温差下的主梁挠度

由图7可知:整体升温作用下,边跨主梁产生较小的向下竖向位移,最大位移3.7 mm。由于主塔处设有竖向支撑,故该处位移基本为零。中跨主梁挠度随着跨度的增加,呈现出抛物线形,最大向下的竖向位移产生在中跨约 $2L/3$ 处,最大值为10.3 mm。由于斜拉索的线性膨胀系数大于主梁,在整体升温作用下,斜拉索的受热伸长占据主导作用,故主梁边跨和中跨都产生相同的位移趋势。在整体降温作用下,主梁的挠度变化相反,最大向上竖向位移为11.1 mm,所以成桥运营阶段对中跨跨度 $2L/3$ 处应加强监测和控制。

5.2 斜拉索上下游温差对主梁扭转的影响

成桥阶段斜拉索上下游温差引起的主梁上下游挠度差值如图8所示。

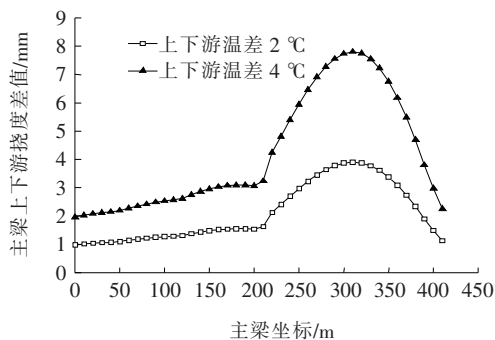


图8 成桥阶段斜拉索上下游温差下的主梁挠度差值

由图8可知:在边跨侧,当上下游温差为4℃时,主梁两端挠度的最大差值为3.2 mm。在中跨侧,由于该桥采用半漂浮体系,在主塔处设有竖向支撑,桥跨端部设有支墩,所以随着跨度的增加呈现出先变大后变小的趋势,约在中跨 $L/2$ 处达到最大值。斜拉索上

下游温差2、4℃时最大值分别为3.9、7.9 mm。与最大悬臂阶段相比挠度差值减少约为3/5。

5.3 日照温差对主梁挠度的影响

成桥阶段温度梯度荷载作用下的主梁挠度见图9。

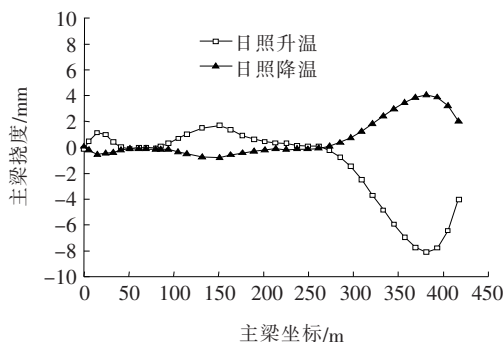


图9 成桥阶段日照温差下的主梁挠度

由图9可知:在日照升温作用下,边跨主梁产生向上位移,最大位移为2.1 mm。在中跨侧产生向下竖向位移,最大位移出现在中跨约 $2L/3$ 处,最大值为8.3 mm。日照升温作用下,中跨侧由于索力的竖向分力减小导致主梁下降,边跨侧由于主梁纵向的累积膨胀变形,并且在边跨端部设有沿纵向位移的约束,从而使边跨斜拉索产生了远离主梁旋转的趋势,边跨产生向上的竖向位移。日照降温作用下,边跨产生的位移分布与日照升温相反,数值小于日照升温产生的位移。

6 结论

(1) 体系温差作用下,边跨主梁在成桥阶段产生了一定的竖向位移。中跨侧,悬臂阶段最大竖向位移远大于成桥阶段,竖向位移随跨度逐渐增大,在最大悬臂端达到最大竖向位移;成桥阶段的位移呈现出抛物线形,最大位移出现在中跨约 $2L/3$ 处。

(2) 斜拉索上下游产生温差情况下,边跨侧,最大扭转均发生在靠近主塔处。中跨侧,悬臂阶段扭转随着跨度的增加逐渐变大,最大扭转发生在悬臂端部;成桥阶段最大扭转则发生在约 $L/2$ 跨度处。

(3) 日照温差作用下,边跨主梁挠度变化不大;中跨侧,日照温差产生的位移趋势与整体升降温基本相同,但最大位移小于体系温差作用下主梁产生的挠度。

参考文献:

- [1] 冯仲仁,施孝基,陈百奔.独塔混合梁斜拉桥施工控制中的参数敏感性分析[J].世界桥梁,2017(6).
- [2] 韩万水,刘建勋,牛宏,等.下白石大桥箱梁悬臂施工控制

宁波三官堂大桥主桥钢梁中跨合龙施工技术

刘杰¹, 吕志林², 姜旭², 魏鹏飞¹

(1. 四川路桥华东建设有限责任公司, 四川 成都 610200; 2. 同济大学 土木工程学院)

摘要: 宁波三官堂大桥主桥为主跨 465 m 的三跨连续钢桁梁桥, 其跨径为目前同类型桥梁的世界第一。结合工程特点及现场情况, 钢梁安装采用从两端边跨向主跨架设, 跨中合龙的总体方案。该文针对宁波三官堂大桥跨度超大、合龙杆件多、安装精度要求高等难点, 对主桥中跨合龙特点进行详细分析, 阐述了各项合龙关键技术。根据合龙口的连续监测结果, 确定中跨合龙方案, 通过合理吊装和合龙口调节措施保证了合龙的精度与速度。

关键词: 城市桥梁; 连续钢桁梁; 安装; 合龙技术; 调整措施; 桥梁施工

1 工程概况

宁波三官堂大桥是连接高新区院士路与镇海区明海大道的主要过江通道, 南起高新区已建的江南路, 北接镇海现状中官西路, 全长约 3 000 m, 横穿甬江及 4 条规划河道。根据现场实际要求一跨过江, 主跨跨径达到 465 m, 且桥位临近庄桥机场, 施工过程中桥梁建筑高度也受到限制, 采用拱式或缆索承重体系桥梁方案时, 矢跨比或塔跨比不在常规取值范围内, 受力体系不合理, 经济性能较差。因此跨甬江主桥采用变高度连续钢桁梁桥, 跨径布置为 $160+465+160=785$ m(图 1),

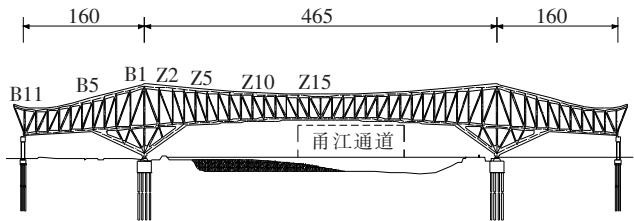


图 1 宁波三官堂大桥总体布置(单位:m)

主桁采用两片桁架组成, 采用变高度“N”形桁式。单片桁架包括上弦杆、下弦杆、竖腹杆、斜腹杆和 V 撑, 桁架节点采用整体式节点, 节段之间采用焊接连接。

桥面系采用正交异性钢桥面板, 板桁结合。

2 钢桁梁安装总体方案及合龙难点

宁波三官堂大桥上部结构钢梁采用板桁连接形式, 且中跨跨径大, 因此安装工艺及精度要求高, 施工难度大。根据桥梁结构的特点及桥址处的现场情况, 钢桁梁分 3 部位进行施工, 分别为南边跨及三角区支架法施工、中跨悬臂拼装施工和北边跨及三角区支架法施工。主桥钢桁梁先架设边跨再架设主跨。首先在边跨架设边跨及三角区钢桁梁安装支架、临时码头, 利用 300 t/50 t(主钩/副钩起重量)+300 t 龙门吊机按顺序分段完成三角区及其边跨钢桁梁的安装, 而钢桁梁中跨节段采用运输船运送至桥位安装点正下方, 利用 1 台 2×325 t 桥面吊机逐段对称安装, 悬臂拼装过程中跟踪测量各特征点位移及应力, 安装下一个节段

技术研究[J]. 中外公路, 2008(1).

[3] 李伟, 冯仲仁. 独塔混合梁斜拉桥合龙控制分析[J]. 中外公路, 2018(4).

[4] 杨永清, 叶浪, 吴德宝. 高低塔斜拉桥在温度作用下的静力特性研究[J]. 世界桥梁, 2017(5).

[5] 刘国坤, 颜东煌, 涂光亚. 混凝土斜拉桥施工控制中温度对主梁标高的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017(6).

[6] 颜东煌, 陈常松, 涂光亚. 混凝土斜拉桥施工控制温度影响及其现场修正[J]. 中国公路学报, 2006(4).

[7] 张永健, 刘旭政, 饶文真. 双肢人字形独塔斜拉桥整体温度效应影响研究[J]. 公路, 2017(2).

[8] 代传广, 李惠成, 时亮, 王兵见. 中央索面斜拉桥主梁施工过程温度影响研究[J]. 公路, 2017(6).

[9] 李克银, 吉小军. 斜拉桥施工控制中的温度影响分析[J]. 铁道工程学报, 2006(5).