

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.08.013

# 三官堂大桥合龙段临时锁定温度影响研究

闵玉<sup>1</sup>, 刘杰<sup>1</sup>, 陈方尧<sup>2</sup>, 姜旭<sup>2</sup>

(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桥梁工程系, 上海市 200092)

**摘要:**合龙是桥梁施工过程中的重要环节,三官堂大桥作为超大跨径的连续钢桁梁桥,中跨采用悬拼施工,合龙难度较大。为了保证合龙精度,拟采取临时锁定的方式将合龙段与悬臂端主桁临时连接,但由于连接后的桥梁成为超静定体系,温度变化将在结构内部产生相应内力,其对临时锁定阶段结构的影响便成为关注的重点。利用 ABAQUS 有限元软件针对三官堂大桥合龙段临时锁定的前后状态进行建模分析,研究临时连接件受力及结构应力分布,探讨合龙时的环境温度对桥梁的影响,指出实际施工中需要注意的问题。

**关键词:**桥梁合龙;临时锁定;温度效应;有限元分析

**中图分类号:** U443.35; U445.466 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2022)08-0045-04

## 0 引言

温度效应是桥梁设计时必须考虑的重要问题,其作用来源于温差引起的材料变形,而这又可细分为整体温差作用与局部温差作用<sup>[1]</sup>。整体温差作用下,由于桥梁属于纵向尺度大、横向与竖向尺度相对较小的结构形式,纵桥向变形明显,这部分变形一般通过设置活动支座予以释放<sup>[2]</sup>,少数纵向位移受约束的桥梁如连续刚构桥,整体温差产生的纵桥向变形无法消解,因而导致体系内产生相当大的温度应力,须在设计时特别注意<sup>[3]</sup>。局部温差则来源于桥梁各位置受日照、通风等不同环境条件,例如梁体的竖向温度梯度会引起截面曲率变化和体系相应次内力生成<sup>[4]</sup>。

三官堂大桥位于宁波市东部城区,建成后将成为目前世界上最大跨度的连续钢桁梁桥,跨径布置 160 m+465 m+160 m,变高度箱式主桁,立面布置如图 1 所示。工程首先采用支架施工三角区桁架及边跨部分,然后在中跨两侧各悬臂吊装 10 个节段,合龙并进行体系转换,补完后期铺装工作,具体施工工序如图 2 所示<sup>[5]</sup>。由于悬臂长度超过 150 m,组合截面高度及宽度均在 30 m 以上,钢桁梁的合龙难度较高,考虑先连接主桁及斜杆,然后以此为基础进行桥面系连接,因此主桁的精准对接尤其重要<sup>[6-7]</sup>,临时锁定就是在这种状况下提出的。

所谓临时锁定,是指在合龙段就位之后,将已经定位好的主桁部分通过临时连接件固定,保证后续

收稿日期: 2021-11-15

作者简介: 闵玉(1986—),男,学士,高级工程师,从事桥梁工程相关工作。

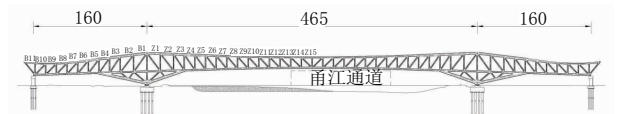


图 1 宁波三官堂大桥立面布置图(单位:m)

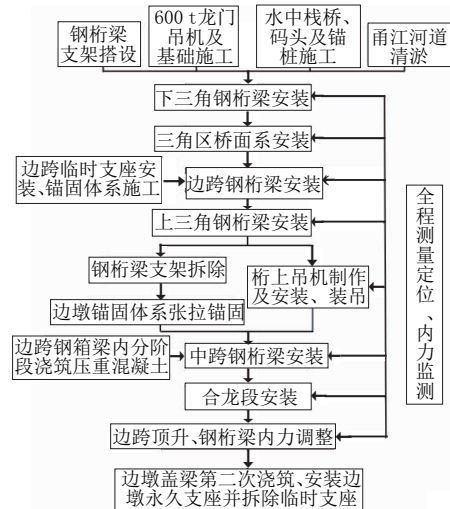


图 2 三官堂大桥主桥总体施工流程

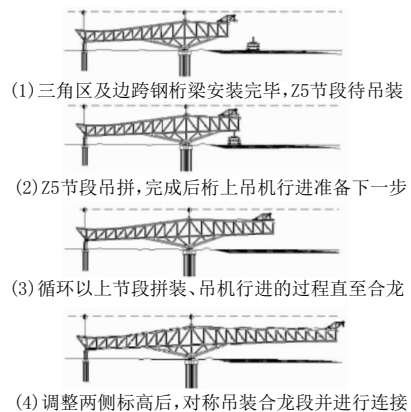


图 3 三官堂大桥中跨钢桁梁悬臂拼装具体流程

焊接过程中两侧主桁不发生相对位移,并在主桁连接完成后拆除,使用的临时连接件通常为粗钢筋或型钢件<sup>[8]</sup>。由于临时锁定时体系自重已完全平衡,仅可能存在温度作用,因此,配置临时连接件需要对其最不利受力状态进行分析。在桥梁临时锁定之前,合龙段两侧均为带锚固跨的大悬臂体系(支座条件分别为滑-固,固-滑),属静定结构,温度效应不产生内力变化;临时锁定之后,完成合龙段连接之前,支座条件并未发生改变(滑-固-固-滑),结构成为超静定体系,温度效应引起的内力变化不可忽视。同时,由于该状态下的桥梁纵桥向变形受到约束,整体温差影响显著,而桁架桥桥面系的竖向温度梯度作用有限,临时连接件的设计主要考虑整体温差的相应内力,因此整体温差作用下的临时连接件强度成为保证临时锁定作用的关键。

此外,临时锁定后,原大悬臂体系的上下弦杆应力将叠加整体温差作用下的温度应力场,有成为施工阶段最不利状态的可能<sup>[9]</sup>。后文将针对合龙段临时锁定时结构的前后状态进行有限元建模分析,确定临时连接件的受力,并研究考虑温度效应后的体系施工安全性,以对类似形式桥梁的合龙施工提供一定的借鉴意义。

## 1 有限元建模

三官堂桥为连续体系钢桁梁桥,主桁为变截面钢箱桁架,多道小纵梁及其上支承的正交异性桥面板组成桥面系,桥面系与主桁下弦杆固结,再连同上弦杆及腹杆组成主要受力截面,并辅以纵横向联结系。

在 ABAQUS 中采用梁单元模拟桁架各杆件,桥面系以刚度和面积等价的方式附加于下弦杆的上下底板,主墩处设置固定铰支座,边墩设置滑动铰支座,建立如图 4 所示有限元模型。如前所述,在小变形、线弹性范围内讨论临时连接件的受力问题,临时连接件仅需承担超静定体系因整体温差产生的内力,而当体系刚度越大时,这一内力也越大,因此可偏于安全地将临时锁定考虑为固接,在模型中以全自由度耦合方式模拟。

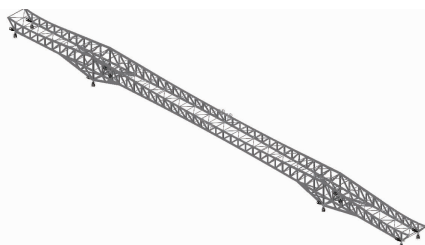


图 4 三官堂大桥有限元模型

结构的初始状态为合龙段吊装工况,两侧带锚固跨的大悬臂体系承担结构自重和桁上吊机的前后支点力作用,合龙段自重与吊机的吊点力平衡,悬臂端与合龙段间断开,即暂不激活锁定区域单元。此时施加自重荷载,两端为悬臂受力状态,合龙段以吊点处的竖向约束模拟吊装过程受力;待自重荷载作用完成后,激活锁定区域单元,去除原吊点边界条件并代以相应吊点力,分别定义整体升温 10℃和整体降温 10℃温度场,进行自重与温度共同影响下的体系受力分析。

## 2 结果与分析

以下汇总环境温度升降 10℃时的结构计算结果,具体分析整体温差对于临时连接件受力的决定性作用,并探讨合龙过程中温度作用影响下的结构应力水平。

### 2.1 温度效应

整体升温 10℃时,温度效应的计算结果如图 5 所示。结构有向外膨胀的趋势,竖曲线变陡,此时中跨因跨径较大,变形相对边跨大得多,在体系受力中起决定性作用。对超静定结构,该变形将在体系中产生次内力,可以说次内力是结构抵抗该变形的结果。三官堂桥为三跨连续钢桁梁桥,整体升温时,中跨纵向扩张受到支座限制,因此呈现明显的压力作用,但由于中跨竖曲线的设计,实际受力形态类似于两铰拱,下缘压应力水平较上缘为更高;边跨水平位移不受约束,作为中跨变形协调的结果向下反拱,下缘出现明显的拉应力。正应力的计算结果体现了这一趋势,最大拉应力 19.1 MPa 出现在边跨下弦杆,最大压应力 34.1 MPa 出现在中跨下弦杆。整体降温与升温状态刚好相反,中跨受拉,上缘拉应力更大。



图 5 整体升温 10℃截面正应力分布示意图(单位:Pa)

作为临时锁定关键构造之一的临时连接件,仅承担温度作用引起的内力,其设计由温度效应控制,在有限元模拟中主要反映为相应区域梁单元的轴力及弯矩,汇总于表 1。表中轴力以拉为正,弯矩以逆时针方向为正,由计算结果可知,临时连接件中轴力数值相当高,弯矩与轴力相比可忽略不计,这一点可通过换算偏心距体现。对大跨度桥梁,跨中梁高通常大于 2 m,而本桥作为钢桁梁桥,采用变高度箱式主桁,

箱室腹板的最小高度为 2.2 m,若采用桥面上下同时锁定的方式,仅需依照轴力要求进行设计,弯矩限值自动满足。

表 1 主桁临时连接件内力计算结果汇总表

状态	上弦杆			下弦杆		
	轴力 /kN	弯矩 / (kN·m)	换算偏心距 /mm	轴力 /kN	弯矩 / (kN·m)	换算偏心距 /mm
整体升温 10℃	-3 260	291	89	-4 450	727	163
整体降温 10℃	3 260	-291	89	4 450	-727	163

## 2.2 温度与自重组合效应

结构初始状态为临时锁定前的合龙段吊装工况,此时两悬臂体系承受结构自重与施工荷载(主要为桁上吊机的前后支点力),合龙段自重与吊点力平衡,两者之间无连接。该状态下的 Mises 应力分布如图 6 所示,极值 249.6 MPa 出现在大悬臂根部下弦杆,该部位主要承受压应力作用;与此同时,上弦杆出现最大拉应力 249.1 MPa。

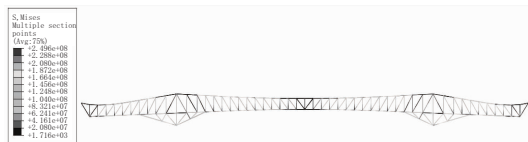


图 6 初始状态结构 Mises 应力分布示意图(单位:Pa)

整体升温 10℃后,将在原初始状态上叠加一个前述升温温度应力场,中跨下弦杆压应力进一步增加,上弦杆拉应力减小,因此危险截面出现在中跨下弦杆处。图 7 所示 Mises 应力云图,极值 281.8 MPa 出现在悬臂中部,为压应力作用区域。极值点的转移是温度应力场与初始应力场在空间分布上的区别所致,两者的聚集区域并不一致。此时上弦杆拉应力最大值为 231.2 MPa。而整体降温时的温度应力场与升温状态相反,拉应力的增长使得上弦杆成为结构受力最不利位置,Mises 应力分布如图 8 所示,极值极值 278.8 MPa 出现在悬臂中部。

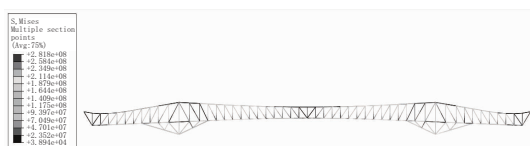


图 7 (自重 + 升温 10℃)结构 Mises 应力分布图(单位:Pa)



图 8 (自重 + 降温 10℃)结构 Mises 应力分布图(单位:Pa)

组合效应的计算结果表明,合龙段吊装工况并非一定是悬臂施工结构的最不利状态,当合龙段临时锁定、支座体系未调整至成桥状态时,超静定体系将因温度效应产生相应温度应力场,使结构的应力分布发生变化,此时应力极值可能更高。三官堂大桥中跨在悬臂拼装过程中,临时锁定阶段将受到温度效应影响,在整体升温或降温 10℃时均会出现应力水平超出限值的状况,这说明需要合理设计合龙时的环境温度及工作时间(环境温度不宜过大,工作时间不宜过长),以保证施工安全。

## 3 总结

钢桁梁合龙段临时锁定时,合龙段的自重由两悬臂端的桁上吊机承担,但整体升降温引起的临时锁定区域内力将完全依赖于临时连接件,因此临时连接件在整体温差下的强度问题成为保证临时锁定作用的关键。此外,临时锁定使得原大悬臂体系的静定结构转变为超静定结构,整体温差的影响作用于三跨连续梁的整体,使原悬臂体系的上下弦杆应力产生变化。在小变形、线弹性的情形下,原上下弦杆的初始状态将叠加升降温温度应力场,需考虑最不利情况分别分析。

对单纯温度作用下的临时连接件内力,和自重与温度共同作用下的结构整体强度进行计算分析后,得出以下结论:

(1)临时连接件主要承受轴力,弯矩及换算偏心距的数量级明显较小。上弦杆连接件所受轴力在升降温 10℃时为 3 260 kN(压拉),弯矩为 291 kN·m,换算偏心距 89 mm;下弦杆连接件所受轴力在升降温 10℃时为 4 330 kN(压拉),弯矩为 727 kN·m,换算偏心距 163 mm。在考虑一定的安全储备后,以上内力值可作为临时连接件的设计参考,且由于临时锁定看作固接后体系刚度相对于实际情况有所提升,按刚度分配的原则该数值本身有一定的保守性。

(2)悬臂施工工法通常由桥梁两侧对称行进直至合龙,在合龙完成前两悬臂体系需各自约束纵向自由度,因此在临时锁定时结构在纵向是超静定的。多数悬臂施工桥梁先合龙边跨,再合龙中跨,纵向约束通常设置在主墩上,因而整体温差导致的中跨纵向变形将在结构中产生数值极高的轴向力。但由于桥梁在线形设计时往往采取向上预拱的方式来抵抗长期挠度的影响,实际临时锁定时的中跨受力类似于两脚拱,整体升温受负弯矩,进一步向上拱起,降

温时受正弯矩,拱顶下移。次内力可以抵消一部分变形,但无法改变整体的变形趋势,因而结构在整体温差下的温度应力最终呈现出类似于小偏心受压或受拉分布。

(3)临时锁定后结构体系发生转变,温度影响下的上下弦杆应力可能超出其在之前施工状态中的极值,甚至达到屈服。三官堂大桥合龙段临时锁定过程中,升降温 $10^{\circ}\text{C}$ 时相应下弦杆或上弦杆应力值都将超出设计强度值。应当注意到,悬臂施工过程中结构为带锚固跨的悬臂梁,悬臂部分受负弯矩控制,负弯矩数值随节段增长持续增加;合龙结束完成体系转换,桥面铺装等二期荷载由三跨连续梁整体承担,仅在主墩附近叠加负弯矩(三角区桁架的形式刚度较大),原中跨危险截面将叠加正弯矩,应力水平有所降低。因此,中跨施工的最危险工况应当是临时锁定后,体系转换前,并综合考虑结构自重、施工荷载及温度效应。

(4)桥梁结构的合龙施工,必需严格保证环境温度范围,缩减合龙连接工作量及工作时间,这不仅是解决传统的合龙精度、线形要求、合龙段配切等问题的需要,更是结构受力的要求。此外,对于大跨长桥,

一方面可以考虑减少临时锁定时结构的纵向约束,相应的温度效应将大大减小,但这在悬臂施工过程中较难做到;另一方面可以探索临时连接件的具体形式,通过合理设计(如插销式构造)削弱连接件纵向刚度,但缺点在于不能控制合龙段的嵌补尺寸,需要更多千斤顶等辅助设施帮助合龙。

#### 参考文献:

- [1] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [2] 刘来君,贺拴海,宋一凡.大跨径桥梁施工控制温度应力分析[J].中国公路学报,2004(1):57-60.
- [3] 伏亚锋,闫忠斌.刚构桥施工监控成桥线形温度因素控制分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(4):174-177.
- [4] 贺君,刘玉擎,李传习,等.钢-混凝土组合简支梁桥温度影响因素及分布模式[J].公路交通科技,2016,33(11):63-68,92.
- [5] 魏鹏飞,吕志林,姜旭.三官堂超大跨径钢桁梁桥施工关键技术[J].施工技术,2019,48(11):6-11,15.
- [6] 柯军圣,万方.芜湖长江大桥主跨钢桁梁斜拉桥跨中合龙施工[J].中国铁道科学,2001(5):118-120.
- [7] 张雷.三跨连续钢桁梁桥施工误差参数敏感性分析[D].西安:长安大学,2010.
- [8] 李清培.钢桁拱桥中跨合龙段临时锁定技术[J].公路,2018,63(9):160-161.
- [9] 姜洋.宁波三官堂大桥桁架制造线形确定方法研究[J].城市道桥与防洪,2016(4):95-97,11.

\*\*\*\*\*  
(上接第41页)

筹实施原则,以合理的共建方案提高投资效率。

## 4 结 语

轨道交通建设中,道路复建设计会涉及多建设主体、多设计单位、多管理部门、多施工单位等,要树立一体化思维,协调一致,力求把复建项目实施好。复建设计技术含量比较高,要求设计者有更强的组

织协调能力和更全面的相关专业知识面。另外,道路复建设计要树立精品意识,不能因为复建投资在总体中的占比较低而轻视。目前,轨道2号线已建成通车,连接济南西站、中心城区的济南站、长途汽车站等重要交通枢纽,缓解了东西向交通压力、支撑带状城市空间拓展,对实现济南“东强、西兴、南美、北起、中优”的城市发展战略具有重大意义。