

# 桑园子黄河大桥中跨合龙技术研究

杨黎明 王 伟 王克兵 (通讯作者) 李文涛

中铁大桥科学研究院有限公司 湖北武汉 430034

**【摘要】**桑园子黄河大桥主桥左右幅分别为 $(57+94+328+57+94)$  m和 $(57+94+328+57+94)$  m的双塔双索面叠合梁斜拉桥,中跨合龙段长4m,重77.3t,中跨合龙难度较大。采用Midas Civil软件建立主桥有限元模型,对主桥中跨合龙进行施工控制。针对主桥施工工艺、桥址环境及结构体系特点,采用温度配切法作为中跨合龙方案;在合龙前对合龙口进行敏感性分析,选择合龙口等待温度及压重相结合的方式调整合龙口空间姿态;对合龙口温度及长度进行准确预测,钢梁栓接同时解除中跨侧塔梁临时固结纵向约束。合龙后的索力,线形偏差均较小,合龙状态较好。

**【关键词】**叠合梁;中跨合龙;温度配切;敏感性分析;有限元法

## 1 引言

组合梁斜拉桥的设计充分利用了混凝土的优异抗压特性和钢材的良好抗拉伸性能,这带来了结构轻便、横跨能力出众等一系列优点,因而在桥梁施工领域的使用日益普遍<sup>[1-3]</sup>。然而,建造斜拉叠合梁桥的作业流程繁琐、环节众多,而成桥后的内部力量分布和形状轮廓的确立与中间跨度的成功对接有着紧密的联系<sup>[4-7]</sup>。

眼下,在国内外桥梁施工中,常用的两种梁段连接方法是顶推法和温控配切法。这两者的本质差异在于:顶推法连接时不会对梁段的预定长短做出调整,但需要事先撤除塔梁的暂时加固,此举可能导致结构因应力释放而变形;而温控配切法在梁段连接过程中,必须依据实际测量的梁端宽度进行调剪,使得梁段的实际长度发生改变。王昌喜团队<sup>[8]</sup>运用阻尼装置实施桥梁上部结构的顶推作业,通过调节合龙处的宽度、高差和轴线偏移等因素,确保桥梁合龙时姿态正确;位东升诸人<sup>[9]</sup>不再采取传统的反“梯形”方式,而是转而使用“梯形”方法来达成中跨的精准对接,并通过扁担起重技术同步吊装,防止了因合龙不平衡而带来的结构内力问题;代强波等<sup>[10]</sup>选用温度配切策略进行中跨合龙作业,合龙前对接口处进行敏感性评估,并采纳横向拉缆与端点配重相配合的方法来调整合龙口的空间方位,以保证精确合龙。总而言之,施工中的温控与施工方法对钢结构斜拉桥的合龙作业在跨中部位起着决定性作用<sup>[11-14]</sup>。因此在考虑实际工程情况、保证施工和成桥合理状态的前提下,如何确定合理的主梁合龙方式,是保证组合梁斜拉桥安全及质量的关键。

文章选取兰州市的桑园子黄河大桥为研究对象,运用Midas Civil程序模拟建构了大桥的有限元分析模型,并就

大桥闭合段施工过程中的影响参数进行了灵敏度分析,再根据实际施工条件确定了适宜的闭合技术,其研究成果对类似桥梁的闭合施工具有借鉴价值。

## 2 工程概况

位于兰州市桑园子的黄河跨越部分,由一座主跨长630米的钢与混凝土混合材质构成,采用半漂浮支撑体系的斜拉桥横跨其上。双塔桥构采用了棱形结构的“孪生塔”设计,其中南侧的塔高达152米,北侧的塔则为133米。这些塔根据其外形及所处的方位被划分为塔柱的上部和下部。南北两座塔的上部柱体各自达到97米高,而南塔的底部柱高为55米,北塔的底部柱高则是36米。双柱的桥塔结构采用了渐变截面设计,其塔柱构造为独立的单室箱形剖面。沿着桥的方向,其上部的柱宽达到6.5米,而其跨越桥面的宽度则为4.5米。南端的下部塔柱,在桥的延伸方向的宽度介于6.5至10米之间,其跨桥宽度在4.5至9米范围变化;北端的相应宽度分别介于6.5至8.3米以及4.5至7米之间。在这种结构中,顺着桥延长方向的壁面厚度为1.2米,而侧向跨度方向的厚度则减为0.7米。图1展示了主桥的具体布局安排。

该桥梁设计为双向分布,东侧跨度组成为 $(57+94+328+57+94)$ 米,西侧则为 $(45+106+328+57+94)$ 米。采用的是混合型主梁结构,即结合了钢质主梁和钢筋混凝土甲板共承载重量,二者经由剪力钉紧密联接。构建由梁组成的末端,横梁的垂直距离测量自钢质主梁中央点至顶端为2.86米。横向贯穿桥面的双主梁以工字型截面显现,其立梁部分高度为2.5米,两根主梁在桥横向上的中心点之间相隔20.75米。侧廊桥重压区和支撑墩的顶部采取将混凝土填充进钢箱内的横向梁以增加重量。跨梁部分选

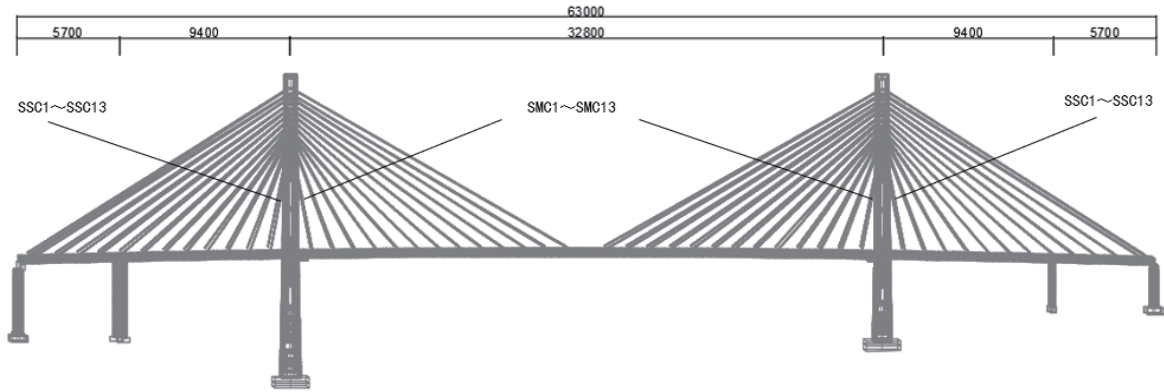


图1: 主桥布置图 (单位: cm)

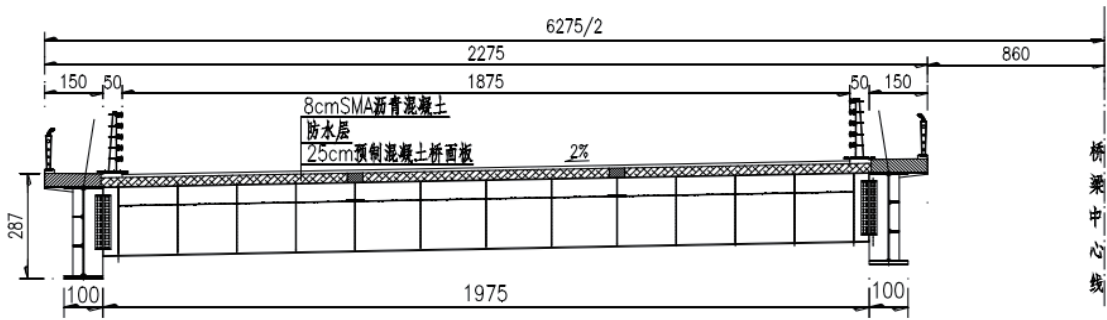


图2: 主梁标准断面图 (单位: cm)

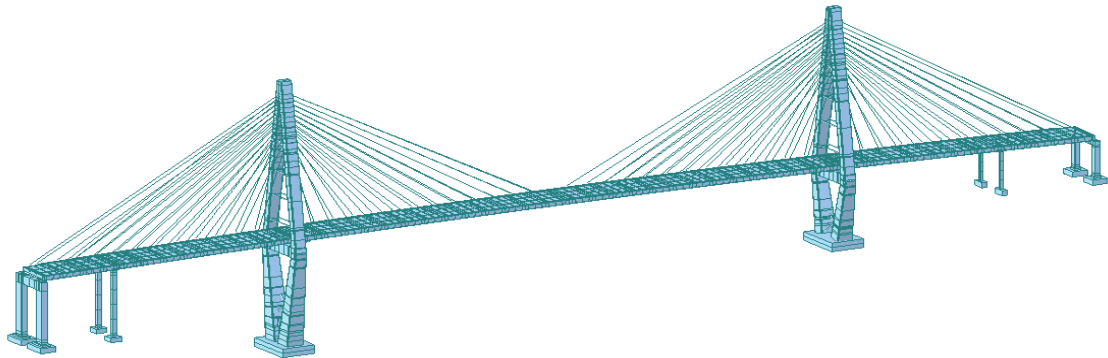


图3: 桑园子黄河大桥有限元模型

用经焊接形成的工字型钢作为横截面, 且该梁的高度为1.9米。次梁与主梁之间通过使用高强度的螺栓进行联接。结构设计上, 该桥采取了将预先制造的分段板件通过吊装来安装, 并在板件之间设置横向与纵向的现浇接缝, 以形成一体化结构。预制板件须至少存放六个月, 而接缝则使用了微膨胀型混凝土以确保质量。桥梁的路面板选用了厚度为25厘米的预制钢筋混凝土板材, 这些板材沿桥的方向安置了锯齿状的抗剪插槽, 且其所用混凝土为C55级。在横梁中增设两根辅助纵向梁, 目的是划分桥面板为多个横向区块, 从而减轻桥面板的吊装重量并稳定横梁。这些辅助纵向梁顶部装有橡胶隔层, 它们不承担桥面板的整体结构载荷。主梁的横截面示意图见附图2。

### 3 中跨合龙方案比选

#### 3.1 中跨合龙方案选择

桥梁在中跨合龙前后的承受力状况出现了明显的转变, 由此可见, 中跨合龙的计划对于桥梁构造的完工状态产生了较为重要的作用。当前在叠合梁的跨接合作业中, 主流的技术方法主要包括温度控制切割技术与顶推对接技术<sup>[15-18]</sup>。

对桑园子黄河大桥的建造技术、选定的桥梁位置的环境以及其结构系统的独特性, 本研究将两种中间跨度接合方案进行了比较分析, 具体成果见表1。

表1: 中跨合龙方案比选

方案	温度配切 (方案1)	顶推 (方案2)
优点	塔梁临时锚固无需解除; 施工难度小、风险小; 栓接有利于合龙段快速连接。	合拢口宽度可调, 施工时间充裕; 提前解除两侧塔梁临时固结, 能较快完成体系转换。
缺点	受环境影响较大; 对合龙温度要求较高; 对合龙段长度精度要求高; 合龙后需及时完成体系转换。	塔梁临时锚固需解除; 顶推力、顶推距离较大; 框架结构钢梁顶推空间受限; 施工难度大、风险高。

由表1可知，方案1施工风险小，更有利于施工控制；且钢梁间的栓接有利于方案1合龙段快速连接，故选择方案1。

### 3.2 合龙姿态敏感性分析

合龙口姿态是能否合龙的关键，合龙姿态的影响因素通常有温度、配重及索力。运用有限元软件Midas Civil 202对桑园子黄河大桥中跨合龙姿态影响因素进行模拟，其中，塔梁采用临时固结，过渡墩、辅助墩与梁单项铰接，数值模型共计2875个单元、2307个节点，有限元模型如图3所示。

合龙口两端压重取合龙段重量77.3t、索力（C13索230t，部分索力允许偏差±10%）取-10%，温度取+5℃用于分析合龙姿态变化情况，结果如图4和图5所示。

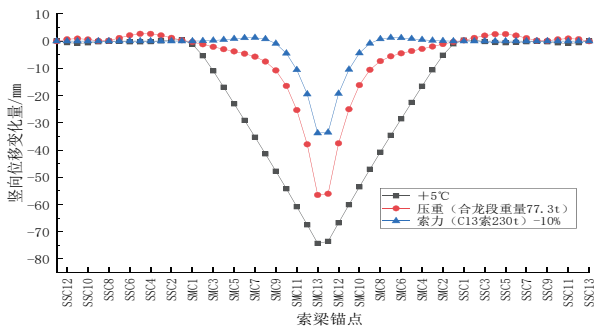


图4：合龙姿态竖向位移变化曲线

由图4可以看出，在各种工况下，+5℃温度变化对主梁竖向线形有着决定性的影响，最大可达74mm，总体来看，压重（合龙段重量77.3t）变化和索力（C13索230t）-10%变化要略小于+5℃温度变化影响。

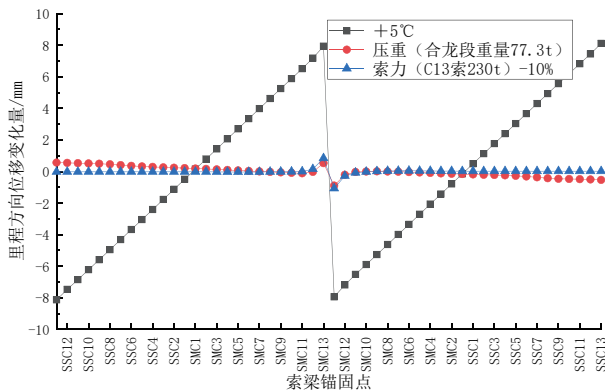


图5：合龙姿态里程方向位移变化曲线

由图5可以看出，在各种工况下，+5℃温度变化对主梁里程向线形有着决定性的影响，单边最大可达8mm，总体来看，压重（合龙段重量77.3t）变化和索力（C13索230t）-10%变化影响较小。

总体来看，当温度波动增加5摄氏度时，对比起承重部分（即合龙段的重量为77.3吨）的改变以及索力（C13索为230吨）减少10%的影响，对拼接接口的空间位置造成的影

响是最为显著的，温度的变动对合龙部位的空间定位产生较大干扰。鉴于此，施行中跨对接时，必须精确掌控对接段的配切尺寸，并选取气温相对平稳、偏低的时间进行中跨对接作业，以防对接段无法顺利插入对接孔。在对接过程中，应结合气温变化和对接孔施加的压力，细致调整对接孔的空间位置和姿态，以确保对接的高精度完成。

## 4 中跨合龙施工监测

### 4.1 合龙口观测及数据确定

在合拢前应对桥梁状态进行全面测试，包括中跨合拢段长度，其中，合龙口间隙测量布置方式如图6所示。

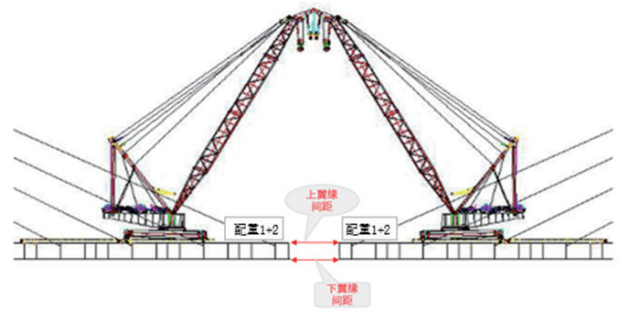


图6：中跨合拢段长度测量

当有阳光照射时，下游比上游、上翼缘比下翼缘合拢口间隙变化速率快，且合拢口间隙变化量为3~8mm/℃。右幅合拢时间为9月15日，确定右幅合拢温度为20℃，中跨合拢口间隙温度影响下变形值见表2所示。根据现场观测数据确定进行配切定孔位，梁厂开孔。

表2：中跨合拢段长度

位置	初值 (18.8℃)	变化量	制造长度 (直线、20℃)
上游合龙口上翼缘间隙 (mm)	4044	-7	4037
上游合龙口下翼缘间隙 (mm)	4043	-7	4036
下游合龙口上翼缘间隙 (mm)	4053	-8	4045
下游合龙口下翼缘间隙 (mm)	4046	-8	4038

### 4.2 合龙控制效果

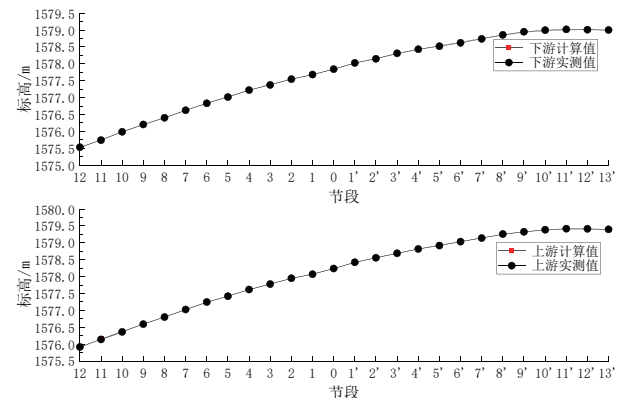


图7：南塔右幅合拢前标高

桑园子黄河大桥中跨合龙采用温度配切方案,其南塔右幅调索前线形和索力如图7和图8所示。

由图7可知:南塔右幅标高较为平顺,主梁实测标高与计算标高相近,最大应力偏差为0.019m,满足规范要求。

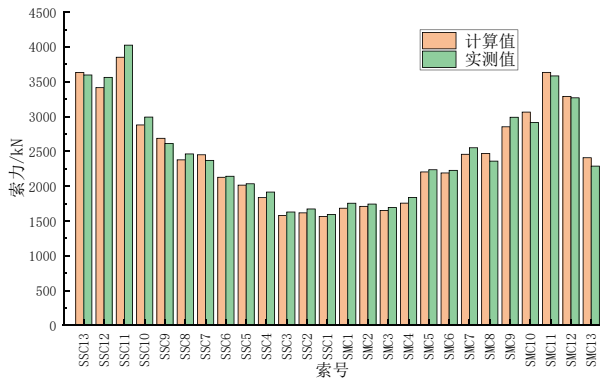


图8: 南塔右幅索力

由图8可知:南塔右幅索力实测值与计算值相近,最大索力偏差为4.9%,满足规范要求。

## 5 结论

黄河上的桑园子跨河大桥采用了一种具有两座塔和两层索面的斜拉桥设计,其主跨的两侧各自延伸出(57+94+328+57+94)米和(45+106+328+57+94)米。该桥中央跨度的对接部分长度为4米,重达77.3吨,而且这一对接工作相当复杂。运用Midas Civil程序构建大桥的有限元分析模型,在大桥中部接合时进行施工监控。针对大桥主体施工过程、所处自然环境和结构特征,选用了温度调剂法来进行主跨的闭合作业;在闭合操作前,对接口进行了灵敏度分析,决定了以观测待定温度并辅以压载调整接口的空间方位;通过对接口的温度和长度做出精确估测,在钢梁结合处螺栓联接的同时,取消了主跨边塔与梁段之间暂时性的纵向刚固连接。连接完毕时,索的力的最大误差达到了4.9%,而线的形状的最大误差是0.019米,这均达到了标准规定的要求。

## 参考文献:

[1] 彭元诚, 刘新华. 大跨度混合式叠合梁斜拉桥设计特色与关键技术[J]. 中外公路, 2017(1): 135-138.  
 [2] 周潇. 六广河特大桥混凝土桥面板设计[J]. 交通科技, 2017(2): 50-53.

[3] 陈亮, 邵长宇, 汤虎. 大跨径组合梁斜拉桥经济性研究[J]. 世界桥梁, 2017, 45(5): 39-43.

[4] 文强, 卢皓, 康炜, 陈应陶. 高速铁路大跨钢桁加劲PC箱梁斜拉桥设计关键技术研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(j05): 107-113.

[5] 袁助. 低塔柔性斜拉桥组合梁快速安装技术研究[J]. 公路, 2022, 67(07): 233-237.

[6] 付立宏, 黄景新. 非对称布置斜拉桥超宽钢箱梁安装技术研究[J]. 公路, 2023, 68(05): 182-187.

[7] 李毅. 大跨预应力混凝土双塔斜拉桥主梁施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2017(10): 62-65.

[8] 王昌喜, 章斌, 左翼. 千米级不对称斜拉桥主跨合龙施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2021, 51(05): 116-122.

[9] 位东升, 彭旭民. 七都大桥北汊桥主桥中跨无顶推梯形合龙技术[J]. 结构工程师, 2021, 37(05): 175-180.

[10] 代强波, 陈飞, 王云, 蔡雄庭. 调顺跨海特大桥主桥中跨合龙施工控制关键技术[J]. 世界桥梁, 2023, 51(S1): 71-77.

[11] 易云焜, 谢泽福, 牛海喜. 厦漳跨海大桥南汊主桥定时合龙技术[J]. 桥梁建设, 2013, 43(2): 105-109.

[12] 涂光亚, 李辉, 李亮辉. 超大跨度混合梁斜拉桥中跨合龙温度影响及对策[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 61-64.

[13] 陶路, 曾德礼. 大跨度钢箱梁斜拉桥中跨合龙关键技术[J]. 铁道建筑, 2020, 60(1): 19-22.

[14] 刘俊胜, 王宏, 王智龙, 等. 大跨径结合梁斜拉桥的主跨合龙技术[J]. 公路交通技术, 2010(4): 67-70.

[15] 吴运宏, 岳青, 朱利明, 等. 金塘大桥主通航孔斜拉桥合龙控制措施[J]. 施工技术, 2011, 40(3): 15-17.

[16] 赵建钢. 七都大桥北汊桥主桥中跨合龙施工关键技术研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(03): 135-137.

[17] 位东升, 彭旭民. 七都大桥北汊桥主桥中跨无顶推梯形合龙技术[J]. 结构工程师, 2021, 37(05): 175-180.

[18] 陈山亭, 孙乾栋. 珠海洪鹤大桥主桥中跨合龙施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(18): 51-53.

## 作者简介:

杨黎明(1977-),男,汉族,甘肃兰州人,高级工程师,工程硕士,研究方向:大跨度桥梁施工技术研究。