

# 悬臂浇筑连续梁中跨锁定合龙设计施工研究

倪伟

(中国五冶集团有限公司, 成都 610056)

**摘要:** 悬臂浇筑连续梁中跨合龙是连续刚构桥施工控制重点,但目前常规锁定合龙技术还存在较多弊端。为此,研究更加先进高效的锁定合龙技术非常必要,结合蓬安嘉陵江三桥主跨220 m悬臂浇筑混凝土中跨锁定合龙施工技术开展研究,提出单向自动限位劲性骨架锁定合龙施工技术;优化中跨合龙临时锁定设计,并针对临时锁定施工前的测量、应力、温度等进行严格监控,从而有效解决了合拢段劲性骨架、体系转换等施工技术难题,为类似工程施工提供参考。

**关键词:** 连续梁; 中跨合龙; 自动限位; 临时锁定; 体系转换

**中图分类号:** U445.466 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)02-0064-06

目前,桥梁建设行业中公认悬臂浇筑预应力连续刚构桥施工成败的关键为合龙段施工<sup>[1]</sup>。而常规合龙段施工技术采用内、外双劲性骨架做临时锁定连接<sup>[2]</sup>,但此种合龙段的锁定与合龙施工技术存在以下几点不足:①只能在当天夜晚最低气温时进行顶推骨架锁定及混凝土浇筑<sup>[3]</sup>,锁定及混凝土浇筑操作时间非常紧张;②保证顶推千斤顶稳压期间合龙口不回缩的难度较大,对千斤顶稳压要求高;③夜晚工人高处作业危险性较大,安全风险高;④锁定时短时间内耗费的人工、物资比较集中,经济性不高。

为有效缩短低温作业时长,解决资源占用集中、焊接时间紧、顶推力稳压性不足等施工难题;就必须对锁定合龙施工技术进行更深入的研究,形成更高效、质量安全更可靠的锁定合龙工艺。

## 1 工程概况

蓬安嘉陵江三桥,位于南充市蓬安县,全长1 239 m、宽度39 m、分左右两幅,设计标准为一级公路,设计速度为80 km/h,荷载等级公路-I。主跨跨越嘉陵江三级航道,采用连续刚构、桥跨布置为126+220+126 m,是顺蓬营一级公路的关键控制性工程;桥梁上部结构采用挂篮悬臂浇筑施工,全桥共划分30个节段。中跨合龙段为第30节段,为单箱双室截面,长度为2 m,箱梁顶宽为18.75 m,底宽为11.75 m,顶板厚为0.3 m,腹板厚为0.45 m,底板厚为0.32 m,箱梁截图如图1所示。

## 2 中跨合龙临时锁定设计

### 2.1 设计要点

连续刚构桥悬臂浇筑节段施工常规应进行线型、高程监控与调整控制,对关键部位和重要工序的严格监测及准确控制,及时调整梁端立模标高和中线位置<sup>[4]</sup>;才能在中跨合龙前使悬臂“T”构位置精准,进而对合龙口进行顶推并锁定,以消除合龙温差、后期收缩徐变因素引起的墩顶水平位移、跨中下挠、合龙段开裂等问题<sup>[5]</sup>,改善结构受力。由此可见合龙口的顶推与锁定实施极为重要。

(1)考虑高效完成中跨锁定,减少锁定过程的操作时间,基于顶推时同步完成劲性骨架自锁的思路进行设计,消除顶推稳压持荷下劲性骨架的高危焊接作业。

(2)将传统的“一字”形单根劲性骨架锁定结构,设计为可单向位移的“三角”形联排整体支撑骨架。

(3)单向自动限位劲性骨架锁定设计包括两个分别设置在合龙口两端待合龙的梁体上且沿同一直线分布的主纵钢梁、设置在两个主纵钢梁之间且与主纵钢梁楔紧的自落体。

(4)主纵钢梁靠近自落体的一端设置有与自落体接触且用于增加摩擦的夹片,夹片与自落体连接的面为同锥度的圆锥面,夹片靠近自落体的面上设置有凹槽或防滑花纹。

收稿日期: 2023-10-22

基金项目: 中国五冶集团有限公司科技研发项目(ZGWY2019-114)

作者简介: 倪伟(1990—),男,四川内江人,工程师,研究方向为道路桥梁施工技术。

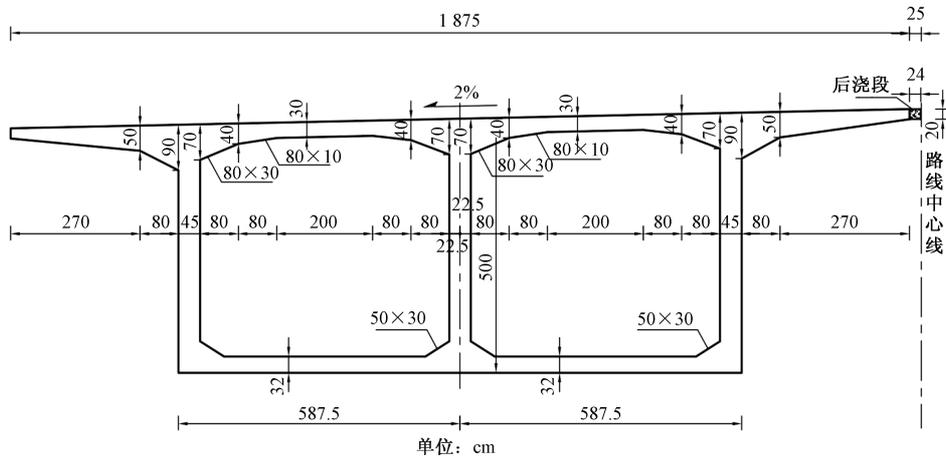


图 1 合龙段箱梁横断面

(5)自落体上表面连接立柱,立柱的自由端铰接有两个分别与主纵钢梁一一对应且转动、滑动连接的斜拉杆,拉杆与主纵钢梁的连接处设置有用于加强主纵钢梁的加劲钢板。

(6)沿梁体的宽度方向,主纵钢梁设置有若干对,相邻两对主纵钢梁上的立柱通过横向连接杆连接。合龙段劲性骨架锁定设计如图 2 和图 3 所示。

### 2.2 工作原理

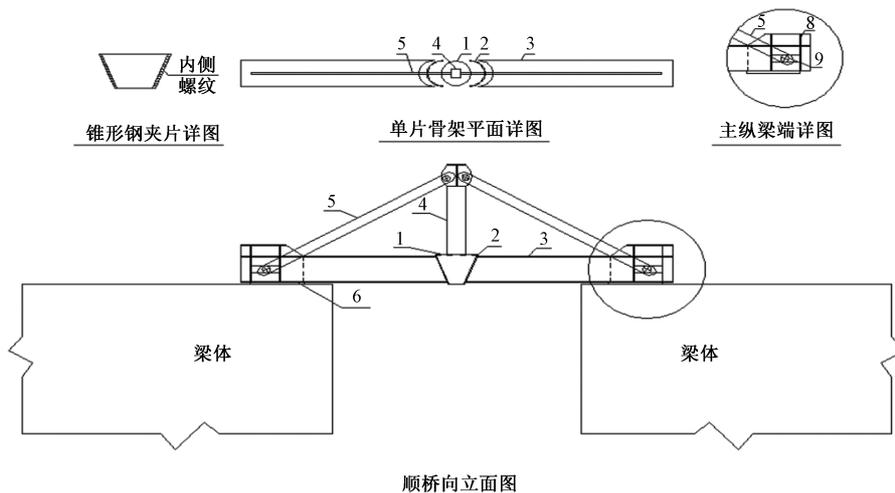
先将主纵钢梁端部分别焊接于合龙段两端箱梁顶、底板的预埋钢板上,然后安装自落体及立柱、斜拉杆、横向连接杆等。夜晚气温降低使得主纵钢梁以及梁体受冷而收缩或者使用千斤顶顶推合龙口两端的梁体,使得梁体的间距增大从而增加两根主纵钢梁之间的间距。此时,自落体在重力的作用下向下移动自动填补增加的间距。

在环境温度上升后主纵钢梁和梁体膨胀或在

千斤顶顶推泄压后,主纵钢梁端部间距有缩小趋势,主纵钢梁对自落体产生挤压力,通过主纵钢梁靠近自落体的一端设置的与自落体接触的夹片,夹片靠近自落体的面上设置有凹槽或防滑花纹,来增加夹片与自落体的摩擦力,限制自落体向上移动,防止主纵钢梁在环境温度升高后受热膨胀或者千斤顶回油卸顶之后导致间距再度变小,以此能够使得主纵钢梁与主纵钢梁之间的始终保持最大的间距。

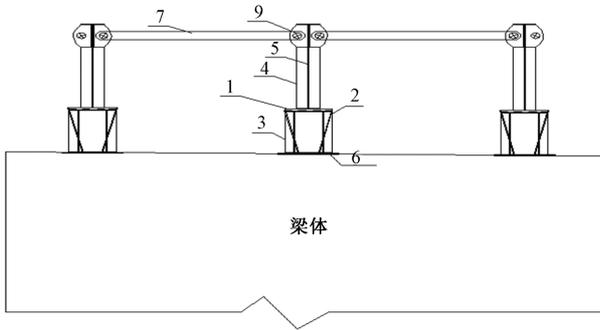
合龙口单向锁定后,锁定装置主要受梁体顶推力的反力(由监控单位根据实际情况计算报设计复核后确定)、温度上升梁体增长导致的挤压力;为确保锁定稳固,还需设置临时张拉预应力进行反向锁定<sup>[6-7]</sup>。临时预应力顶板 4 束、底板 4 束均按照每束张拉力 300kN 控制,其中由温度变化产生的力  $N_0$ 。按式(1)计算公式为

$$N_0 = \Delta l \times K \quad (1)$$



1 为自落体,2 为夹片,3 为主纵钢梁,4 为立柱,5 为斜拉杆,6 为预埋钢板,7 为横向连接杆,8 为加劲钢板,9 为销轴

图 2 合龙段劲性骨架锁定装置构造



1 为自落体,2 为夹片,3 为主纵钢梁,4 为立柱,5 为斜拉杆,  
6 为预埋钢板,7 为横向连接杆,8 为加劲钢板,9 为销轴

图3 合龙段劲性骨架锁定装置侧视

式中: $\Delta l$  为温度变化; $K$  为主墩墩柱抵抗刚度。其中  $\Delta l = l \times r \times \Delta t$ ,  $l$  为悬臂梁体长, 95.5 m;  $r$  为现浇梁体线膨胀系数,  $r = 0.00001$ ;  $\Delta t$  为温度变化极值。

$$K = (12EI)/H^3 \quad (2)$$

式中: $E$  为混凝土弹性模量; $I$  为主墩截面惯性矩,  $I = 2ab^3/12$ ,  $a$  为主墩宽度, 16.5 m,  $b$  为主墩厚度, 2.0 m;  $H$  为主墩墩柱高度, 24.6 m。

### 3 中跨合龙施工方法

#### 3.1 临时锁定前线形、应力、温度控制

##### 3.1.1 线形控制

悬臂浇筑结构线形控制分为水平位置控制及纵向高程控制。

(1) 水平位置控制是在桥梁悬臂结构实施前在两岸的稳定处, 设置不少于 2 个基准点构成基准网; 施工过程中每个块件施工前后均要复测调整, 以确保合龙段两侧的水平偏差超过设计图纸规定。

(2) 纵向高程控制是在 0# 块顶部及箱室内靠近墩柱位置各设置不少于 4 个高程基准点; 在梁段立模、混凝土浇筑前后、预应力张拉后, 需要观测主

梁挠度及悬臂端高程变化, 与设计挠度曲线进行对比分析, 进行过程高程纠偏, 以确保合龙段两侧高差不超过 8 mm<sup>[8]</sup>。

##### 3.1.2 应力控制

悬浇块件施工过程中应同步设置应力传感器, 根据埋设的应力计测得实际施工状态时箱梁内控制截面的应力, 并研究其变化规律与理论控制值进行分析对比, 确保应力控制在理论可控范围。

##### 3.1.3 温度控制

(1) 大量的理论与工程实践表明大跨度连续钢构桥施工中温度应力不容忽视, 随着温差的增大, 结构产生轴向位移也越大<sup>[9]</sup>, 温度应力甚至会成为主荷载。因此为保证悬臂浇筑桥合龙段施工质量, 在合龙段实施前一周应每隔 2 h 进行一次温度监测<sup>[2]</sup>, 监测点分别在顶板和底板设置不少于 3 个, 每个温度监测点距顶板顶面和底板底面约为 10 cm。

(2) 根据温度监测结果, 确定温度与合龙设计温度相符且温差变化相对稳定的时段开展合龙段体系转换与混凝土浇筑施工, 才能将应力及位移变化控制到最小, 有效保证合龙段施工质量。

#### 3.2 临时锁定劲性骨架施工

(1) 分别在箱梁顶、底板的顶面提前预埋钢板, 钢板预埋入砼里的一侧根据受力计算设计“U”形锚筋确保连接可靠, 预埋钢板位置距离合龙段端口面净距不小于 25 cm。临时锁定装置数量及位置根据设计图纸布置如图 4 所示。

(2) 刚性支撑骨架采用型钢组合而成, 其中, 主纵钢梁为双拼工字钢 I40a 设计总长根据合龙段长度及预埋钢板位置考虑, 钢梁一端加工切割为弧锥型并与弧型带防滑纹钢夹片可靠焊接, 夹片厚度不小于 3 cm。安装临时锁定刚性支撑骨架时, 先将锁定装置每一组两根主纵钢梁端部分别焊接于合龙段两端箱梁顶、底板的预埋钢板上, 再沿型钢与预

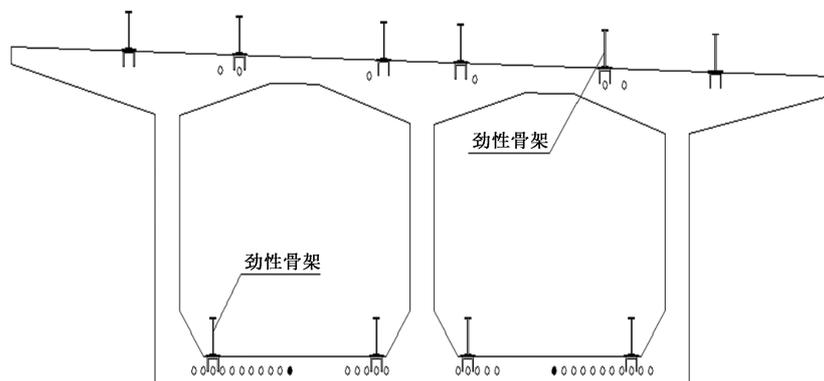


图4 中跨合龙段劲性骨架布置

埋钢板接触边采用三面围焊,以加强锁定装置与梁体的整体连接性。安装时应控制锁定装置刚性支撑骨架的每一组两根主纵钢梁轴线对齐,且偏差不得大于 2 mm。

(3)主纵钢梁安装完成后,紧接着安装自落锥体,并确保自落锥体与主纵钢梁弧锥型接触面两者防滑纹贴实、无光滑面。再将型钢立柱与自落锥体顶面预埋件螺栓连接,最后通过斜拉杆销轴连接成一体。然后按照锁定设计位置安装多个锁定装置刚性支撑骨架,两相邻刚性支撑骨架用拉杆销轴连接成为整体。

### 3.3 体系转换施工

#### 3.3.1 配重

为了合龙段混凝土浇筑过程中顺利进行荷载置换,采用水箱在合龙口两侧悬臂梁进行对称配重,单侧加载的最低重量按等弯矩法计算确定(即加载重量 $\times$ 水箱中心到零号块的距离=浇筑的混凝土重量 $\times$ 合龙段中心到零号块的距离),以保持悬臂梁体受力稳定,浇筑混凝土时再等荷卸重。同时考虑一个挂篮前移做支撑模板、另一个挂篮后移作为荷载配重的部分。现场需重点控制两端口变形量及高差,两端荷载效应控制应尽量平衡<sup>[10]</sup>。

在中跨两端及边跨侧进行水箱配重<sup>[11]</sup>,每个水箱所加配重的理论重量应在合龙段砣(扣除钢筋、已安装的预应力束重量)重量基础上增加 1t。以保证单侧悬挂支撑浇筑混凝土时荷载能同步且满荷载置换。

#### 3.3.2 顶推

顶推应考虑在温度、挠度及应力变化较小的时段进行,根据相关资料及实测分析在凌晨 01:00 至

早上 07:00 左右的温度、挠度和应力变化均较小<sup>[12-13]</sup>。因此,顶推开始时间定为凌晨 1 点,按两边各 30 t 的预定推力进行控制,分顶推力的 20%、60%、100%三级施加,顶推时温度应接近设计要求温度<sup>[14]</sup>,当施加 20%的推力持荷约 2 min 无异常后,继续施加 60%顶推力同前者亦持荷观测,无异常则施加 100%的顶推力,保持持荷状态,测量各基准点和两个主墩 0#块中心点的位移和高程。

分析各项测量数据,并与理论模型的数据进行对比,并根据需要进行二次校正顶推,以确保实际顶推后的线型、受力状态与理论模型基本吻合,达到合龙线型控制精度要求。

#### 3.3.3 单向自锁

在水箱配重完成后,采用千斤顶施加顶推力,随着顶推力的增大悬臂端间距逐渐增长,悬臂端处劲性骨架锁定装置主纵钢梁逐渐向两侧移动,同时自动限位劲性骨架上的自落体因自重下落楔紧锁定装置的同组主纵钢梁;达到劲性骨架锁定的效果。每次分级推力实施完成后,需对自落体的自锁情况进行检查,锁定稳定且自落体保持垂直后方能进行下一级顶推,否则应缓慢顶推调整自落体垂直度。

随着温度的降低,合龙口间距增大,限位间隙将自动填充,固定限位劲性骨架。然而随着温度的上升,合龙口间距存在收缩趋势,利用锁定装置无收缩的特点,限定合龙口间距缩小,使得合龙口间距保持在最大值。以控制合龙口的间距满足设计要求,且稳定可靠。

#### 3.3.4 临时张拉反锁

采用张拉临时预应力束进行反向锁定<sup>[7]</sup>,按照

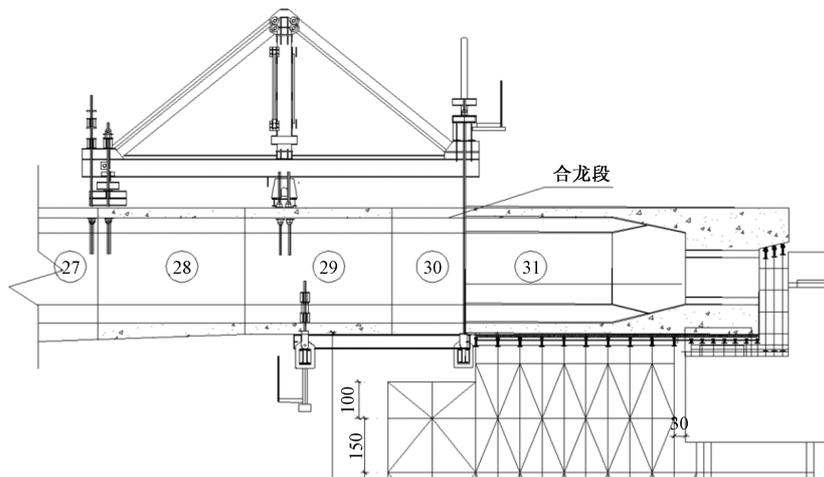


图 5 边跨合龙段挂篮位置

“由上到下,由中到边”的顺序对顶板、底板第一束钢筋线进行临时张拉;确保双向锁定牢固。

### 3.4 混凝土施工

#### 3.4.1 模板安装

合龙段模板均采用原有悬臂挂篮模板系统<sup>[15]</sup>。中跨合龙采用悬臂端一支挂篮合龙,另一支悬臂挂篮则后退至前一个箱梁节段锚固作为配重如图5和图6所示。

合龙段挂篮行走至前钢吊带与合龙口另一侧悬臂端面止,并锁定锚固挂篮主纵梁,采用1.5 cm厚钢板在底篮纵向分配梁上拼装焊接吊带处底模,并使底模伸入合龙口另一侧悬臂箱梁底板至少5 cm。

利用 $\Phi 32$  mm精轧螺纹钢穿过合龙口另一端箱梁顶板预留孔,将内、外导滑梁伸入合龙口另一端箱梁锚固,将挂篮内模板和外模板通过内、外导滑梁往合龙口另一侧拖动50 cm作为合龙段内外侧模板。

收紧穿过箱梁预留的 $\Phi 32$  mm精轧螺纹钢、后锚 $\Phi 60$  mm钢棒、前吊带和拉杆,锚固固定滑梁、前后下横梁,使内、外模板与已浇筑混凝土交接处

应密贴,并对模板上的孔洞及缝隙采用焊接小钢板或密封胶封堵防漏浆。

#### 3.4.2 浇筑与养护

按照底板、后腹板、再顶板的顺序,采用地泵对称布料,水平分层、斜向分段、两侧腹板对称浇筑。混凝土竖向浇筑分层厚度为30 cm,每层纵向均匀分3个布料点,不得在同一处连续布料。浇筑顺序如图7所示。

浇筑中跨合龙段混凝土时,同步卸载中跨合龙口挂篮支撑端一侧的配重水,每浇筑 $1\text{ m}^3$ 则应对应水箱卸载2.5 t水。

砼浇筑完毕后采用塑料薄膜覆盖结合淋水覆盖法<sup>[16]</sup>及洒水法对合龙段顶底板及侧墙进行7 d养护。洒水保持砼有足够的湿润度,同时尽量减少作业,避免施工或其他振动对合龙段砼造成质量影响。

## 4 结语

单向自动限位施工技术是对悬臂浇筑桥梁现有合龙施工技术的完善,同时助推连续刚构桥施工工艺更加系统及成熟,提升了连续刚构桥合龙重要环节的控制水平。

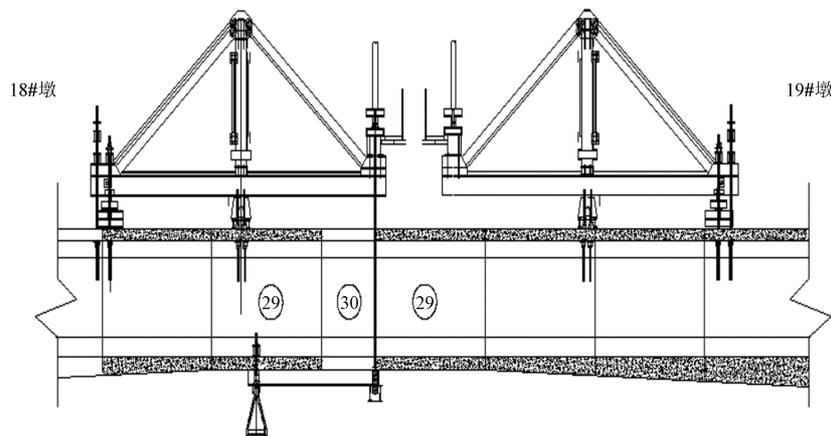


图6 中跨合龙段挂篮位置

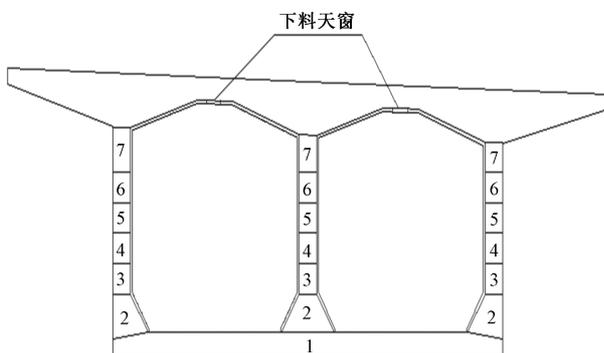


图7 混凝土浇筑顺序

(1)单向自动限位劲性骨架锁定合龙施工技术,消除了顶推漏压回缩、顶推操作不同步导致锁口间距不等反复调整造作工序,采用自重楔紧锁定能有效保证锁口间距始终保持最大。

(2)有效规避锁口夜间焊接作业,能在白天进行锁定劲性骨架焊接作业,既提升了焊接的质量保证,又消除了夜间焊接作业降效;安全效益与经济效果显著。

(3)以嘉陵江三桥为载体,研究表明优化后的中跨锁定合龙技术在临时锁定、体系转换及混凝土

浇筑方面均显著提效,平均每合龙段能节约工期约 1.5 d;大大缩短了中跨合龙段施工时间,为后续类似工程合龙施工提供了参考。

### 参考文献

- [1] 罗利,杨志刚. 悬臂浇筑连续梁合龙段施工质量控制要点[J]. 四川建筑, 2017, 37(4): 216-218.
- [2] 李广华,金明阳. 预应力混凝土连续梁桥中跨合龙施工关键技术研究[J]. 施工技术, 2018, 12(47): 663-665.
- [3] 王永峰. 216m 大跨非对称刚构连续梁合龙施工关键技术[J]. 桥梁工程, 2020(4): 69-77.
- [4] 郑国庆,袁俊桃,王卫锋. 大跨度连续刚构桥的施工监控[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(29): 7338-7342.
- [5] 朱汶迁. 预应力混凝土连续刚构桥合龙控制[J]. 桥梁工程, 2011, 3(29): 59-61.
- [6] 刘彬,朱世萍,肖子旺. 多跨连续刚构桥施工合拢技术[J]. 黑龙江交通科技, 2011 (6): 175-177.
- [7] 李聪林,户东阳,李冲杰,等. 高烈度地震区高墩大跨连续刚构桥的设计关键技术及创新[J]科学技术与工程, 2020, 34(20): 14252-14256.
- [8] 区展锴. 大跨度连续刚构桥悬臂施工控制分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 12(9): 7561-7564.
- [9] 卢云贵. 大跨度连续刚构桥低温合龙技术[J]. 世界桥梁, 2013, 41(5): 35-38.
- [10] 朱月平. 大跨度连续梁桥悬臂浇筑合龙控制关键技术研究[J]. 技术园地, 2020, 38(1): 62-66.
- [11] 李彦飞. 连续刚构桥中跨合拢施工技术[J]. 技术与市场, 2017, 24(8): 123-127.
- [12] 罗建飞. 连续刚构桥悬臂施工阶段温度效应研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(8): 1851-1854.
- [13] 郑国庆,王卫锋. 大跨度连续刚构桥悬臂施工阶段温度效应研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(29): 7343-7347.
- [14] 刘宇航. 六跨连续刚构桥中跨合龙顶推力计算与分析[J]. 建筑结构, 2023, 37(2): 569-572.
- [15] 余文科,张建军,杨美良. 一种新的连续刚构桥合龙方式探讨[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(2): 135-139.
- [16] 杨开勇,王永康,汪涛,等. 竖向混凝土结构淋水覆盖养护技术及应用[J]. 科学技术与工程, 2014. 14(12): 274-276.

## Design and Construction Study of Mid-Span Locking of Cantilevered Continuous Beam

NI Wei

(China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Cantilever pouring continuous beam mid-span Helong is the key point of continuous rigid bridge construction control, but there are still many drawbacks of conventional locking Helong technology. Therefore, it is necessary to study more advanced and efficient locking Helong technology, and the construction technology of 220 m cantilever poured concrete was combined with the main span of the Peng'an Jialing River Three Bridges to carry out research, and a one-way automatic limit rigid skeleton locking Helong construction technology was proposed. The design of temporary locking of the middle span Helong was optimized, and the measurement, stress, temperature, etc. were strictly monitored before the temporary locking construction, so as to effectively solve the construction technical problems such as the rigid skeleton and system conversion of the closing section, and provide reference for similar engineering construction.

**Keywords:** continuous beams; mid-span Helong; automatic limiting; temporary lockdown; system transformation