

# 多跨连续刚构桥边中跨同时合龙关键技术

解亚东<sup>1</sup>, 王少辉<sup>1</sup>, 吕志强<sup>1</sup>, 文八斤<sup>1</sup>, 彭涛<sup>2</sup>

(1. 中交一公局第一工程有限公司, 北京市 102205; 2. 长沙理工大学 土木工程学院)

**摘要:**多跨连续刚构桥采用边中跨同时合龙施工,在有效缩短工期、节约施工成本的同时,给施工带来了新的挑战。为解决边中跨同时合龙施工的关键技术问题,该文以白坪1号大桥为研究对象,首先建立其施工全过程的有限元模型,论证一次性合龙施工方法的可行性;其次,提出了基于多目标优化的连续刚构桥合龙顶推力计算方法;最后,为了避免合龙段混凝土在养护阶段开裂,提出了一种合龙段混凝土应力控制方法。研究表明:多跨连续刚构桥采用边中跨同时合龙相较于常规的逐跨合龙,成桥状态的主梁最大应力值相差不大,但主梁成桥线形有一定差别,合龙方式变更后需要调整施工预拱度和合龙顶推力值;提出的基于多目标优化的连续刚构合龙段顶推力确定方法和合龙段养护阶段应力控制方法效果良好,为多跨连续刚构桥边中跨同时合龙方法的实施提供了技术支撑。

**关键词:**桥梁工程;连续刚构;一次性合龙;多目标优化;顶推力

连续刚构桥合龙是其由施工阶段的静定结构向成桥阶段的超静定结构进行转换的关键环节,直接影响其成桥状态的內力和线形。传统的多跨连续刚构桥合龙施工一般按照“先边后中”的逐跨合龙顺序进行,该方法需要进行多次合龙施工才能完成体系转换,而采用边中跨同时合龙工艺,只需一次合龙就可完成体系转换,可大大缩短合龙工期,减少施工成本。合龙方式的变化不但影响结构成桥状态的內力和线形,而且影响结构合龙施工期的安全性。采用边中跨同时合龙时,结构一次性转换到多次超静定的最大连续长度状态、温度变化和混凝土收缩徐变等因素对合龙段混凝土的影响比传统的多次合龙方法大大增加,合龙段混凝土养护待强过程中极易开裂,需要有效的控制方法和技术措施确保结构的安全。

目前,国内外学者围绕连续刚构桥的合龙施工进行了广泛研究,取得了一系列的研究成果。胡清和等以主梁与桥墩的变形为控制目标,对多跨连续刚构桥合龙方案及合龙段顶推量进行了比较分析;张刚刚等以两座连续刚构桥为背景,探讨了顶推力的确定原则;魏建斌等基于有限元分析和相关工程经验确定了考虑混凝土收缩徐变和温度等因素的合理顶推力;陈准等基于数值仿真对主梁合龙顺序、合龙顶推力和边跨支架拆除时机等关键问题进行了研究;李军等基于有限

元数值模拟验证了大跨径连续刚构桥顶推合龙施工的合理性;殷任宏等研究了连续刚构桥合龙顺序对主梁、主墩应力和线形的影响;吴锋等提出了一种基于线性规划对连续刚构合龙段顶推力进行求解的方法;刘建彪等探讨了连续刚构桥的不同合龙顺序对结构內力及位移的影响;马玉荣等研究了考虑不同温差的一次性合龙方式的连续刚构桥梁合龙顶推力;陈金盛分析了多跨连续刚构桥合龙时墩顶水平变位与顶推力的关系;徐鹏等探讨了连续刚构桥边、中跨同步合龙方案对成桥线形及应力的影响;铁木尔分析了某大跨连续刚构3种不同施工方案对结构应力与变形的影响。

综上所述,现有研究成果主要集中于刚构桥合龙方案、合龙顺序、合龙顶推力的计算、一次性合龙方式的可行性等方面,对边中跨同时合龙施工关键技术的系统性研究仍较为欠缺。该文以贵州剑榕高速公路的白坪1号大桥为背景,对边中跨同时合龙方案的可行性、合龙顶推力的计算以及合龙段养护阶段应力控制方法等关键技术展开研究。

## 1 工程背景

贵州剑榕高速公路白坪1号大桥主桥为跨径组合(80+2×150+80)m的分幅4跨预应力混凝土连续

收稿日期:2021-06-30(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51478049,52078058)

作者简介:解亚东,男,硕士,高级工程师, E-mail: xieyadong@cfhec.com

刚构桥,桥型布置立面如图 1 所示。主梁采用标号为 C55 的单箱单室预应力混凝土箱形梁,主梁梁高由跨中 3.5 m 按 1.8 次抛物线变化为根部的 9.0 m,箱梁顶、底板宽分别为 12.125、6.5 m;主梁采用挂篮悬臂浇筑施工,0<sup>#</sup> 块总长 14.0 m,单幅桥梁共设 4 个合龙段(单个长度 2.0 m)。为了适应桥位处起伏较大的地形,大桥主墩采用墩高为 93~115 m 不等的带系梁的双肢墩,主墩墩身采用 C40 混凝土,主墩纵向总宽度 12 m,双肢间净距 5 m;每肢采用单箱截面空心薄壁墩,横桥向宽度 6.5 m,壁厚 85 cm;顺桥向宽度 3.5 m,壁厚 60 cm。为了加快施工进度,施工时对大桥的合龙方案进行了变更,即从原方案的先边跨后中跨的常规合龙方式变更为边中跨同时合龙的方式。

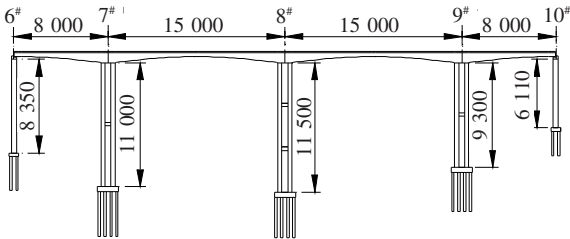


图 1 白坪 1 号大桥桥型立面(单位:cm)

2 边中跨同时合龙的可行性分析

白坪 1 号大桥合龙方案的变更必然影响大桥成桥状态的內力和线形,有必要对边中跨同时合龙方式的可行性进行论证,为此,采用 Midas/Civil 有限元软件分别建立大桥的原方案常规逐跨合龙方式和边中跨同时合龙方式下的施工全过程计算模型,对两种合龙方式下成桥状态的內力、应力和线形进行对比分析,考虑到论证的对比性,两种计算模型采用相同的荷载和边界条件,仅体系转换和合龙施工的施工程序定义不同。结构自重按照单元重量由程序自动施加,桥面铺装、防撞护栏等二期恒载按设计图纸计算得到其重量后,按均布线荷载形式施加于主梁;两种计算模型均假定在设计合龙温度 15℃ 条件下进行体系转换。大桥有限元模型,全桥结构共划分为 261 个节点,252 个单元,主梁各跨在  $l/4$ 、 $l/8$  和跨中截面设置了节点,0 号块节点进行了适当加密,其余标准梁段均划分为 1 个单元;主墩单元尺寸设置为 4 m 左右。模型边界条件为:桥墩墩底固结,主墩和主梁之间采用刚臂连接;边梁支座采用弹性连接模拟,其横向与竖向刚度按照支座刚度换算得到。混凝土收缩徐变参数按照 JTG

3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》定义,环境相对湿度按照设计文件定义为 70%,构件的理论厚度按照实际截面的特性值计算得到,混凝土加载龄期设为 7 d。限于篇幅,该文仅给出两种合龙方式下主梁的应力和变形计算结果。

2.1 主梁应力

多跨连续刚构桥逐跨合龙方式和边中跨同时合龙方式下,主梁成桥状态关键截面顺桥向的最大正应力如表 1 所示。从表 1 可得:两种合龙方式下主梁最大正应力值均未超过规范允许值,两种合龙方式的主梁各墩顶和跨中截面的最大正应力值较为接近,最大相差 0.18 MPa,表明合龙方式的变化对主梁的受力影响较小,从主梁受力角度看,边中跨同时合龙方案可行。

表 1 不同合龙方式下主梁最大顺桥向正应力比较

截面位置	截面上最大应力/MPa		相差值/ MPa
	同时合龙	逐跨合龙	
6 <sup>#</sup> 墩墩顶	-3.51	-3.50	-0.01
6 <sup>#</sup> 和 7 <sup>#</sup> 墩间跨中	-10.80	-10.70	-0.10
7 <sup>#</sup> 墩墩顶	-8.86	-8.73	-0.13
7 <sup>#</sup> 和 8 <sup>#</sup> 墩间跨中	-8.61	-8.71	0.10
8 <sup>#</sup> 墩墩顶	-8.66	-8.74	0.08
8 <sup>#</sup> 和 9 <sup>#</sup> 墩间跨中	-8.62	-8.75	0.13
9 <sup>#</sup> 墩墩顶	-8.87	-8.73	-0.14
9 <sup>#</sup> 和 10 <sup>#</sup> 墩间跨中	-9.72	-9.54	-0.18
10 <sup>#</sup> 墩墩顶	-3.51	-3.50	-0.01

2.2 主梁线形

多跨连续刚构桥边中跨同时合龙和逐跨合龙方式下,主梁成桥状态的累计竖向位移比较如图 2 所示。由图 2 可得:逐跨合龙和边中跨同时合龙方式下,主梁在成桥状态的最大竖向位移分别为 -54.26、-56.21 mm,二者相差 3.48%;各截面的位移趋势基本一致,大部分截面的累计竖向位移值较为接近,但部分位置数值有一定的差别,两种方案的竖向位移的最大差值为 14.50 mm,出现在 8<sup>#</sup> 和 9<sup>#</sup> 墩之间跨中位置,结果表明:两种合龙方案的主梁成桥线形有一定差别,需要按照实际的合龙方式重新计算各悬臂浇筑节段的施工预拱度值以及合龙顶推力,为确保成桥线形达到设计目标可通过调整施工预拱度值和合龙顶推力等方式调整主梁成桥线形,因此从主梁线形的角度看,边中跨同时合龙方案也是可行的。

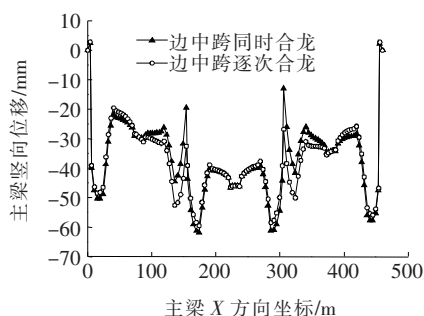


图2 不同合龙方式下主梁累计竖向位移

### 3 基于多目标优化的合龙顶推力计算

#### 3.1 多目标优化模型的建立

在混凝土收缩徐变及合龙温差等因素作用下,混凝土连续刚构桥合龙后桥墩墩顶将向跨中方向发生一定量的位移,导致桥墩的顶、底端产生较大附加弯矩。目前,一般采用合龙前在合龙口对梁体施加水平顶推力的方法改善墩身的受力和线形,因此合龙顶推力的计算是多跨刚构桥施工的关键技术环节,目前已有众多学者和工程师对合龙顶推力的计算或优化提出了各种方法,但现有的方法大都以主墩的墩顶水平位移或应力为控制目标,采用单目标的优化方法计算顶推力,而成桥后桥墩的墩顶水平位移和应力以及主梁的线形都与顶推力的大小相关,如何确定顶推力值使得刚构成桥后墩身的受力及主梁线形达到最优,实质上是一个多目标优化问题。该文将多目标优化的思想和求解方法引入到多跨连续刚构桥边中跨同时合龙顶推力计算中,提出基于多目标优化的合龙顶推力计算方法。由于多跨连续刚构桥为变截面多次超静定结构,考虑到混凝土收缩徐变及其引起的次内力、实际与设计合龙温度差异等因素影响,顶推力与成桥状态桥墩内力之间为非线性关系,因此计算不采用简化分析的解析法,而是基于有限元分析完成。如果实际合龙温度与设计合龙温度有差异,可通过调整模型中温度作用的数值考虑实际温差作用的影响。

具有  $r$  个合龙段、 $n$  个桥墩的多跨连续刚构桥边中跨同时合龙的顶推力计算简图如图3所示。

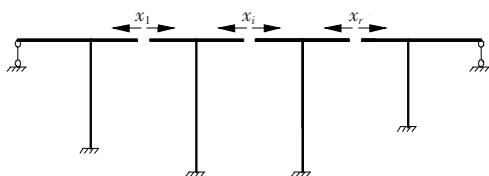


图3 刚构桥合龙顶推力计算简图

竖直刚构桥桥墩铅垂无偏位时,其受力状态最优。为了使成桥状态下桥墩受力最优、主梁线形达到最接近设计线形状态,取成桥10年状态各主墩墩顶偏位为目标函数  $F_1$ ,其表达式如下:

$$F_1 = \sum_{i=1}^n U_i^2 \quad (1)$$

式中:  $U_i$  为第  $i$  个主桥墩成桥10年时的墩顶位移值;  $n$  为主桥墩总数。

取主梁关键截面线形与设计状态之间的偏差为目标函数  $F_2$ ,其表达式如下:

$$F_2 = \sum_{j=1}^m D_j^2 \quad (2)$$

式中:  $D_j$  为主梁第  $j$  个截面成桥10年时的标高与设计标高的偏差值;  $m$  为主梁关键截面总数,取边跨的跨中、1/4截面,中跨的跨中、1/4和1/8截面为关键截面。

取各施工阶段桥墩受力安全,各截面应力满足规范要求为约束条件,具体定义如下:

$$\begin{cases} \sigma_{t\max} - [\sigma_t] \leq 0 \\ \sigma_{c\max} - [\sigma_c] \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{t\max}$ 、 $\sigma_{c\max}$  分别为施工全过程中桥墩各截面的最大拉应力和压应力;  $[\sigma_t]$ 、 $[\sigma_c]$  分别为施工过程中的允许拉应力和压应力。

多目标优化的设计变量为各合龙口的顶推力,表示如下:

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_r] \quad (4)$$

式中:  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $\dots$ 、 $X_r$  分别为第1、2、 $r$ 合龙口的顶推力。

#### 3.2 优化过程

基于多目标优化的连续刚构桥合龙顶推力计算的实质是以构建包含桥墩和主梁应力和线形参数的目标函数为优化目标,采用合适的多目标优化算法,寻求最优顶推力的过程。具体实施是通过自编程序将软件 Matlab 的多目标优化算法模块和 Ansys 有限元软件的结构分析结合起来实现顶推力的优化求解。运用 Batch 模式,可实现 Ansys 有限元软件只在后台运行,并输出指定的结果;有限元分析完成后,再利用 Matlab 程序调用相应的分析结果;刚构桥模型的建立、计算和输出全部采用 Ansys 有限元软件的 APDL 语言编写相应代码完成。

首先定义合适的参数,在 Ansys 有限元软件中建立多跨刚构桥结构的参数化计算模型,并对各个模型参数进行初始值定义,设置各合龙段顶推力的初始数



值及取值范围;然后对其参数化的计算模型进行有限元分析,完成后提取下一步优化计算需要的各类结果并按指定的格式写入到输出文件,例如桥墩和主梁的位移值、应力值等;随后 Matlab 程序读取以上输入、输出文件,进入多目标优化模块进行相关计算与操作,通过设置的优化算法的控制条件,完成对连续刚构桥合龙顶推力多目标优化的求解,采用 Ansys 有限元软件建立的多跨刚构桥参数化计算模型如图 4 所示,基于多目标优化的顶推力计算流程如图 5 所示。

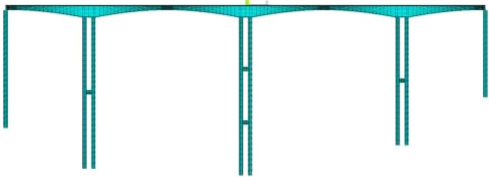


图 4 多跨连续刚构桥 Ansys 模型图

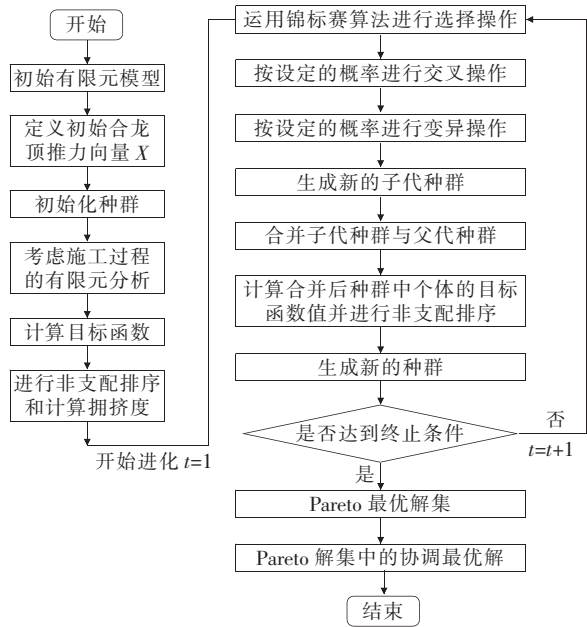


图 5 基于多目标优化的顶推力计算流程

3.3 优化结果

采用 NSGA-Ⅱ 算法对顶推力进行优化求解,种群个体数设为 20,交叉概率设为 0.9,变异概率设为 0.1,最大进化代数设为 50。优化后得到 Pareto 前沿及 Pareto 协调最优解,白坪 1 号大桥合龙顶推力的最优协调解为  $X = [1\ 255, 1\ 369]$  kN,即多目标优化后在设计合龙温度 15℃ 下 7<sup>#</sup> 和 8<sup>#</sup> 墩之间合龙口的顶推力为 1 255 kN,8<sup>#</sup> 和 9<sup>#</sup> 墩之间合龙口的顶推力为 1 369 kN。原设计方案的两个合龙口的顶推力均为 1 000 kN,将原设计顶推力和多目标优化后的顶推力

作用下大桥运营 10 年桥墩和主梁的线形进行对比,限于篇幅,该文仅列出两种顶推力作用下主墩墩顶位移值(表 2),主梁各跨在大桥运营 10 年时的预测标高与设计标高的最大偏差值如表 3 所示。其中,主梁在运营 10 年的预测标高是以合龙前主梁的实测标高为基础,加上后续各个施工阶段以及考虑混凝土收缩徐变等累计变形计算得到。从表 2 可得:顶推力经多目标优化后,各墩在大桥运营 10 年状态的墩顶位移比原顶推力方案下的墩顶位移显著减小,最大值从 12.9 mm 减小到 3.5 mm;从表 3 可得:顶推力经多目标优化后,主梁各跨在大桥运营 10 年时的预测标高与设计标高之间的偏差最大值也有一定的减小,最大值从 11.5 mm 减小到 7.1 mm。因此,多目标优化后的成桥 10 年时的主墩偏位得到了较大改善,主梁也更接近设计线形。

表 2 顶推力优化前后的墩顶位移比较

位置	原设计顶推力下位移/mm	顶推力优化后位移/mm
8 <sup>#</sup> 墩	12.9	3.5
9 <sup>#</sup> 墩	-7.0	-2.3
10 <sup>#</sup> 墩	-8.8	2.8

表 3 顶推力优化前后的主梁标高偏差比较

位置	原设计顶推力下 标高偏差/mm	顶推力优化后 标高偏差/mm
6 <sup>#</sup> 和 7 <sup>#</sup> 墩之间跨	7.1	5.6
7 <sup>#</sup> 和 8 <sup>#</sup> 墩之间跨	10.6	6.9
8 <sup>#</sup> 和 9 <sup>#</sup> 墩之间跨	11.5	7.1
9 <sup>#</sup> 和 10 <sup>#</sup> 墩之间跨	6.3	4.8

4 合龙段养护阶段应力控制

多跨连续刚构桥边中跨同时合龙时,多个合龙口的劲性骨架要求全部锁定后才浇筑合龙段混凝土,而劲性骨架锁定后其结构体系已转换为多次超静定结构。合龙段混凝土浇筑后在养护待强过程中,由于结构体系为多次超静定且边跨支座存在一定的顺桥向摩阻力,在温度变化和混凝土收缩徐变等因素作用下,主梁会发生竖向及顺桥向变形,使得合龙段两端会发生一定量的错动变形。相比于常规的逐次合龙,边中跨同时合龙是结构一次性转化为最大连续长度,因此温度变化和混凝土收缩徐变等因素对合龙段的影响比常规合龙方法大大增加,合龙段混凝土养护待强过程中极容易开裂。

为了保证多跨连续刚构桥边中跨同时合龙的顺利实施,该文提出一种合龙段养护阶段应力控制方法,控制装置的立面如图7所示。该方法的原理是在合龙段混凝土内布置一定数量的带温度测试的应变计和临时预应力钢束,应变计分别绑扎在合龙段的顶板、底板位置处的纵向钢筋上,通过传感器实时感知混凝土养护待强过程中的应变和温度,应变采集器通过导线可以收集到应变和温度数据,并将其传入到主控电脑;然后利用建立的有限元模型进行数值分析,根据计算结果决定是否需要张拉临时预应力钢束,如需要张拉时,进一步计算得到需对预应力筋施加的张拉力,预应力筋由张拉端锚具、锚固端锚具的作用反过来对合龙段混凝土施加压应力以抵消拉应力,确保合龙段混凝土不开裂。提出的新装置和方法操作简单,施工方便,可以控制养护阶段合龙段混凝土的应力状态,防止裂缝的产生,在贵州剑榕高速公路的两座多跨连续刚构桥施工中进行了应用,取得了良好的效果,实桥合龙后各合龙段混凝土均未出现裂缝。

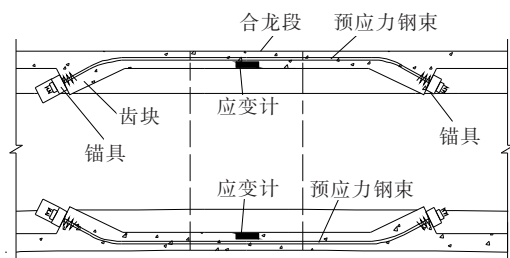


图6 合龙段养护阶段应力控制装置的立面示意图

## 5 结论

(1) 边中跨同时合龙和逐跨合龙两种不同合龙方式的主梁各截面最大应力值较为接近,最大差值在0.2 MPa以内;两种不同合龙方式的主梁大部分截面竖向位移值较为接近,但部分截面数值有一定的差别;表明合龙方式的变化对主梁的受力影响较小,而对主梁成桥线形有一定影响,合龙方式变更后需要通过调整施工预拱度和合龙顶推力值等方式调整主梁成桥线形,边中跨同时合龙方案可行。

(2) 取各合龙段的顶推力为设计变量,分别以各主墩墩顶成桥10年时的偏位平方和、主梁关键截面线形与设计状态之间的偏差平方和为优化目标,以各施工阶段桥墩截面应力满足规范要求为约束条件,构建了确定顶推力的多目标优化模型,并基于NSGA-II算法进行求解,提出了一种基于多目标优化的多跨连续刚构桥边中跨同时合龙时顶推力的计算方法。

(3) 针对采用边中跨同时合龙方法时,合龙段混凝土养护待强过程中极容易开裂的难题,提出了一种简单易行的合龙段混凝土养护阶段应力控制方法,并在贵州剑榕高速公路两座多跨连续刚构桥施工中的应用,取得了良好的效果。

## 参考文献:

- [1] 胡清和,邓江明,周水兴,等. 多跨连续刚构桥顶推合龙方案研究[J]. 中外公路, 2009(3).
- [2] 张刚刚,吴男. 连续刚构桥合龙段顶推力设计探讨[J]. 中外公路, 2011(5).
- [3] 魏建斌,魏家乐,马玲. 高墩大跨连续刚构桥顶推合龙控制技术研究[J]. 世界桥梁, 2014(4).
- [4] 陈淮,陈鹏飞,李杰. 刚构—连续组合梁桥主梁合龙关键技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(1).
- [5] 李军,曾一帆,陈辉,等. 大跨径连续刚构桥中跨合龙顶推力研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(2).
- [6] 殷任宏,安平,冯伟琼. 多跨连续刚构桥合龙顺序[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2017(1).
- [7] 吴锋,王斌,宋旭明,等. 基于线性规划的连续刚构桥合龙段顶推力研究[J]. 长安大学学报, 2017(5).
- [8] 刘建彪,朱德庆,朱德祥. 连续刚构桥施工过程中调整合龙顺序对结构内力的影响分析[J]. 公路交通科技, 2018(3).
- [9] 马玉荣,陈海波,等. 基于一次性合龙方式的多跨连续刚构桥梁顶推力[J]. 沈阳大学学报, 2018(4).
- [10] 陈金盛. 多跨连续刚构桥合龙顶推力计算及分析控制[J]. 公路, 2019(2).
- [11] 徐鹏,王达,程东亚. 同步合龙方案下刚构桥线形及应力的影响[J]. 交通科学与工程, 2019(2).
- [12] 铁木尔. 长边跨高墩大跨连续刚构桥施工方案比较[J]. 中外公路, 2019(5).