

## 边中跨同时合龙对高墩大跨连续刚构桥性能影响分析

黄文洁<sup>1</sup>, 田仲初<sup>1</sup>, 薛飞<sup>2</sup>, 文八斤<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中交一公局一公司, 北京 102200)

**摘要:** 目前绝大多数刚构桥的合龙成桥顺序是由边跨向中跨逐次合龙, 合龙段施工时需进行多次结构体系转换。文中以贵州某大桥主桥为研究背景, 通过有限元建模, 分析高墩大跨连续刚构桥在边中跨同时合龙下成桥工况和运营 10 年后的结构性能变化, 同时根据桥墩受力最优原则, 结合影响矩阵法与最小二乘法优化计算合龙前的顶推力。结果表明, 不同合龙顺序对桥墩最大应力和主梁最大应力影响较小, 对主梁成桥线形及运营 10 年后线形有一定影响; 在优化后顶推力作用下, 运营 10 年后主墩纵向偏位较小, 边中跨同时合龙方案可行。

**关键词:** 桥梁; 连续刚构桥; 边中跨同时合龙; 受力性能; 线形; 顶推力

中图分类号: U448.23

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)02-0111-04

合龙段施工是刚构桥施工阶段至关重要的工况, 合龙质量在一定程度上决定成桥运营后的整体质量。贵州某大桥主桥施工中采用边跨和中跨同时合龙, 避免逐次合龙时的多次结构体系转换及应力重分布等问题。该文对比分析边中跨同时合龙和逐次合龙时成桥工况、运营 10 年后各结构部位的受力状态及线形情况, 并对合龙前顶推力进行优化计算, 确保大桥能在节省工期和降低成本的前提下顺利安全合龙。

## 1 工程概况

贵州某大桥主桥整幅桥宽 24.5 m, 半幅桥宽 12.125 m, 左右幅间距 0.25 m。主桥是边中跨比为 0.533 的变截面连续刚构桥, 跨径组成为 80 m + 150 m + 150 m + 80 m。为简化设计, 各墩按路线中心线共划分为 17 对箱梁梁段, 0<sup>#</sup> 块采用托架现浇, 1<sup>#</sup> ~ 17<sup>#</sup> 块采用三角挂篮对称悬臂泵送砼现浇施工, 单幅四跨每个合龙段长度均为 2.0 m。下部结构的 8<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>、10<sup>#</sup> 主墩为墩身高度依次为 89.6、135.9、90.2 m 的双肢空心薄壁墩, 墩顶横向风撑连接可增强其整体稳定性; 底部全部采用桩基础。主桥立面布置见图 1。

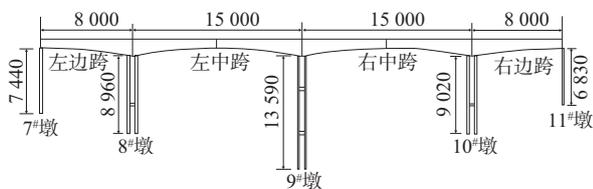


图 1 贵州某大桥主桥立面布置(单位: cm)

施工中严格遵循完全对称的原则。主桥合龙方案为边跨和中跨同时合龙, 为防止横向风撑开裂, 桥梁左右幅同时顶推, 然后进行劲性骨架锁定并同时浇筑合龙。

## 2 有限元模型建立

主桥的整体结构分析和箱梁横框架的施工过程仿真模拟均使用 MIDAS/Civil 综合程序。由于左右幅参数相同, 任取一幅进行建模分析。将主桥整体简化成平面杆系结构进行离散化分析, 全桥共划分为 223 个节点、212 个梁单元。模型的边界条件为下部结构墩底节点全固结约束, 与引桥相衔接的主桥两外端支座处约束 Z 方向平动自由度, 采用弹性连接中的刚性连接模拟桥墩与主梁的固结状态。全桥结构有限元模型见图 2。



图 2 桥梁结构有限元模型

## 3 受力分析

### 3.1 桥墩应力分析

多跨连续刚构桥由最初的静定单 T 构到成桥时的超静定结构, 边中跨同时合龙下结构只需进行一次体系转换, 而逐次合龙下结构需经过多次体系转换。对该桥主桥在两种合龙成桥顺序下桥墩应力

进行分析对比,结果见表1。

表1 不同合龙顺序下桥墩最大应力 MPa

位置	不同合龙方案下桥墩最大应力		差值
	同时合龙	逐次合龙	
8 <sup>#</sup> 墩前肢	-7.01	-6.70	-0.31
8 <sup>#</sup> 墩后肢	-6.42	-6.36	-0.06
9 <sup>#</sup> 墩前肢	-7.79	-7.85	0.06
9 <sup>#</sup> 墩后肢	-7.74	-7.79	0.05
10 <sup>#</sup> 墩前肢	-6.84	-6.77	-0.07
10 <sup>#</sup> 墩后肢	-7.57	-7.25	-0.32

注:正值为拉应力,负值为压应力。下同。

由表1可知:各桥墩在同时合龙与逐次合龙方案下的最大应力较接近,原因是成桥前各合龙段的施工顺序对成桥后各墩最大应力影响不大。应力相差最大的是10<sup>#</sup>墩后肢,相差4.23%;应力相差最小的是9<sup>#</sup>墩后肢,相差0.65%。两种方案下,8<sup>#</sup>墩前肢、10<sup>#</sup>墩后肢的最大应力相应比8<sup>#</sup>墩后肢、10<sup>#</sup>墩前肢的大,这是顶推力作用的结果。

### 3.2 主梁应力分析

不同合龙方案下主梁的最大应力见图2、表2。

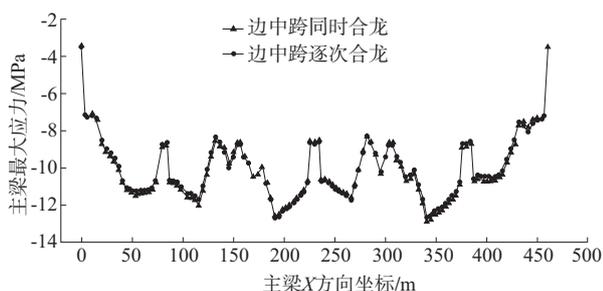


图3 不同合龙顺序下主梁最大应力对比

表2 不同合龙顺序下主梁最大应力

位置	主梁 X 方向坐标/m	主梁最大应力/MPa		差值 /MPa
		同时合龙	逐次合龙	
左支点	0.75	-3.51	-3.50	-0.01
左边跨跨中	40.00	-10.80	-10.70	-0.10
8 <sup>#</sup> 墩墩顶	80.00	-8.86	-8.73	-0.13
左中跨跨中	155.00	-8.61	-8.71	0.10
9 <sup>#</sup> 墩墩顶	230.00	-8.66	-8.74	0.08
右中跨跨中	305.00	-8.62	-8.75	0.13
10 <sup>#</sup> 墩墩顶	380.00	-8.87	-8.73	-0.14
右边跨跨中	420.00	-9.72	-9.54	-0.18
右支点	459.25	-3.51	-3.50	-0.01

由图2、表2可知:边中跨同时合龙方案下,主梁的最大应力为右中跨3L/4箱梁上缘位置的压应力12.90 MPa,主梁未出现拉应力;边中跨逐次合龙方案下,主梁的最大应力为左中跨3L/5箱梁上缘位置的压应力12.70 MPa,主梁未出现拉应力。出现最大应力的位置不同,但大小相差不大,主梁的最大应力均在规范允许范围内,结构强度满足要求。不同合龙方案下主梁最大应力的最大差值为0.30 MPa,相差2.50%,出现在左中跨L/3附近处箱梁上缘。成桥工况下主梁的最大应力不会因为合龙方案不同出现较大波动,且两种合龙方案都切实可行。

## 4 线形分析

大跨度箱梁悬臂对称浇筑施工时,挠度控制非常重要。为确保桥面平顺,以便成桥后顺利进行二期铺装层施工,需严格控制梁截面高度、横坡坡度及砟表面的平顺性。合龙段施工前,需在各静定单T构的最后几个悬臂节段立模前进行全桥标高联测,根据现场实测标高对比理论值来调整最后几个最大悬臂状态节段的立模标高,确保合龙段与现浇段之间的精准对接。

### 4.1 主梁成桥线形分析

该桥主跨跨径达150 m,最大悬臂长度68 m,合龙段施工关系到立模时各节段总预拱度的设置,还影响运营阶段箱梁结构的受力安全。对两种合龙方案下主梁合龙成桥工况的线形进行对比分析,结果见图4(“+”代表垂直向上,“-”代表垂直向下)。

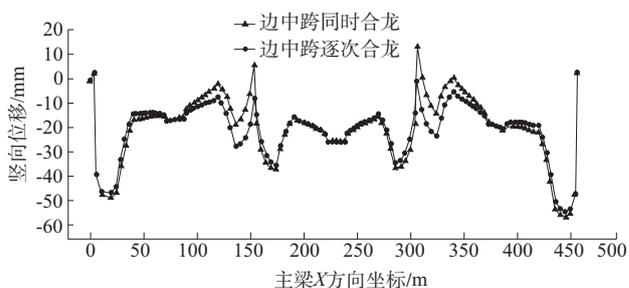


图4 不同合龙顺序下主梁成桥线形对比

由图4可知:合龙成桥工况下,主梁在边中跨同时合龙方案下的最大竖向位移为-56.21 mm,逐次合龙方案下的最大竖向位移为-54.26 mm,相差3.48%,出现在右边跨接近合龙段位置。由于各墩高度不同,竖向位移差值较大的是左中跨跨中和右中跨跨中位置,两方案下的最大差值达14.50 mm,出现在右中跨跨中位置,其余位置竖向位移差值都很小。主梁

在成桥工况下的结构线形与合龙顺序关系密切。

#### 4.2 主梁砣10年收缩徐变后线形分析

鉴于连续刚构桥的体系特征,主梁砣因材料特性原因在长期收缩徐变作用下其结构受力与整体线形将发生重大变化。分析砣完成10年收缩徐变作用后,主梁在结构自重、二期荷载、均匀升降温和正负温度梯度荷载、预应力荷载、砣收缩徐变等荷载组合作用下的线形情况,结果见图5。

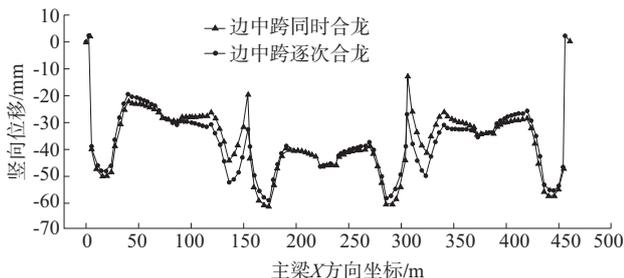


图5 不同合龙顺序下主梁10年收缩徐变线形对比

由图5可知:在砣10年收缩徐变作用后,边中跨同时合龙方案下主梁最大竖向位移为 $-61.72\text{ mm}$ ,逐次合龙方案下最大竖向位移为 $-59.45\text{ mm}$ ,且都出现在左中跨 $3L/5$ 处;左中跨跨中及右中跨跨中位置的位移存在较大差值,最大竖向位移差值出现在右中跨跨中位置,达 $13.87\text{ mm}$ 。主梁结构线形因不同合龙顺序会由于砣10年收缩徐变影响而产生较大不同。

### 5 顶推力优化分析

桥梁结构从最大悬臂端到全桥合龙的过程中发生体系转换,各梁段在底板预应力筋张拉、降温变化

及后期结构砣收缩徐变等作用下各主墩间的箱梁长度缩减,使各主墩墩顶向跨中方向发生偏移。因此,合龙段浇筑施工前需预先对中跨合龙段两端作用水平方向顶推力,给墩顶提供一定的预偏量来部分抵消桥墩在施工中向中跨方向发生的偏移,使桥墩趋向理想的受力状态,保证其在运营阶段不会发生受力破坏。

#### 5.1 墩顶水平位移分析

该桥主桥桥墩均为高墩,墩身高度在一定程度上影响桥梁结构的安全性及稳定性。墩高越大,墩顶水平位移的影响越显著。原设计为在设计合龙温度下中跨梁段采用千斤顶顶推来调整 $8^\#$ 、 $10^\#$ 桥墩的墩身内力(左右幅桥梁同时顶推),顶推力为 $1\ 000\text{ kN}$ ,预偏就位后边跨及中跨立刻安装劲性骨架进行锁定。在未施加顶推力和顶推力 $1\ 000\text{ kN}$ 作用下,边中跨同时合龙方案下合龙成桥阶段和砣10年收缩徐变阶段各墩墩顶水平位移见表3(纵向位移以水平向左为负、水平向右为正)。

由表3可知:在顶推力作用下,成桥阶段 $8^\#$ 、 $10^\#$ 墩均向边跨方向偏移, $9^\#$ 墩处于垂直状态。随着时间的推移,考虑砣10年收缩徐变作用, $8^\#$ 、 $10^\#$ 墩均向中跨方向偏移, $9^\#$ 墩保持垂直状态。墩顶向跨中方向的偏移量将对桥墩结构产生附加弯矩,桥墩在偏向跨中侧将出现附加压应力,远离跨中侧出现附加拉应力,影响墩体的受力状态和工作性能。过大的附加应力还可能造成墩体的受压侧压溃或受拉侧拉裂现象。因此,需优化顶推力,使桥墩在砣10年收缩徐变后尽量保持垂直状态,避免附加应力对桥墩受力的影响。

表3 不同顶推力下墩顶水平位移

mm

位置	纵向位移				改变量
	无顶推力		1 000 kN 顶推力		
	成桥阶段	10年收缩徐变	成桥阶段	10年收缩徐变	
$8^\#$ 墩前肢	21.09	52.41	-15.43	15.98	36.43
$8^\#$ 墩后肢	16.60	46.38	-20.07	9.79	36.59
$9^\#$ 墩前肢	-0.06	-3.89	-0.14	-3.96	0.07
$9^\#$ 墩后肢	-4.47	-10.03	-4.56	-10.09	0.06
$10^\#$ 墩前肢	-22.27	-61.77	33.97	-5.56	-56.21
$10^\#$ 墩后肢	-27.00	-68.08	29.07	-12.02	-56.06

#### 5.2 顶推力优化分析

一般认为桥墩处于垂直状态无偏位时,桥墩的受力状态最有利。通过影响矩阵法,运用MIDAS/

Civil建立桥梁结构顶推力模型,结合最小二乘法计算最优顶推力。设刚构桥处于线弹性状态,无顶推力时,主墩在砣10年收缩徐变后的纵向偏位逐次为

52.41、46.38、-3.89、-10.03、-61.77、-68.05 mm, 即 $\{R\} = \{52.41, 46.38, 61.77, 68.05\}$ , 影响矩阵可由在 1 000 kN 单位力作用下砟 10 年收缩徐变后每个主墩墩顶的水平位移求得,  $[A] = [36.43, 36.59, 0, 0; 0, 0, 56.21, 56.06]^T$ , 将 $[A]$ 和 $\{R\}$ 代入式(1), 得 $\{T\} = \{1\ 254.49\}$ , 即优化后顶推力为 1 255 kN。为

论证优化后顶推力是否与实际情况相符, 将顶推力 1 255 kN 代入程序重新进行计算, 砟 10 年收缩徐变后各墩顶水平位移见表 4。

$$[A]\{T\} = \{R\} \quad (1)$$

式中: $[A]$ 为顶推力对控制目标的影响矩阵; $\{T\}$ 为待求的顶推力; $\{R\}$ 为控制目标量。

表 4 顶推力优化前后纵向位移对比

mm

位置	纵向位移				改变量
	1 000 kN 顶推力		1 255 kN 顶推力		
	成桥阶段	10 年收缩徐变	成桥阶段	10 年收缩徐变	
8# 墩前肢	-15.43	15.98	-24.78	6.65	9.33
8# 墩后肢	-20.07	9.79	-29.46	0.42	9.37
9# 墩前肢	-0.14	-3.96	-0.17	-3.97	0.01
9# 墩后肢	-4.56	-10.09	-4.58	-10.11	0.02
10# 墩前肢	33.97	-5.56	48.37	8.83	-14.39
10# 墩后肢	29.07	-12.02	43.43	2.33	-14.35

由表 4 可知: 由于 9# 墩受到对称的顶推力作用, 其作用效果相互抵消, 优化后顶推力对其几乎无影响; 而 8#、10# 墩在优化后顶推力 1 255 kN 顶推作用后, 主桥结构在 10 年后各墩的纵向偏位均在 1 cm 之内, 最小的甚至不足 1 mm。说明在优化后顶推力作用下成桥 10 年后主墩没有较大纵向偏位, 主墩处于有利的轴心受压状态, 不会因为受到过大的附加弯矩而产生应力超标现象。

## 6 结论

(1) 边中跨同时合龙和逐次合龙顺序下, 各桥墩出现的最大应力较接近, 即不同合龙顺序对成桥后各桥墩最大应力的影响较小; 不同合龙顺序对主梁最大应力的影响不大, 且都能满足受力要求。

(2) 不同合龙顺序对主梁成桥线形将产生一定影响, 在各主墩高度不同的情况下, 两种方案的最大差值为右中跨跨中处同时合龙比逐次合龙的标高高出 14.50 mm; 桥梁运营 10 年后的主梁线形也因合龙顺序不同而有所差别, 最大差值同样是右中跨跨中处同时合龙比逐次合龙的标高高出 13.87 mm。各节段砟的立模标高应根据不同合龙方案确定。

(3) 在设计合龙温度下, 根据桥墩受力最优原则, 结合影响矩阵法与最小二乘法对边中跨同时合龙顶推力进行优化计算, 优化后顶推力比原设计值大 25.5%。在优化后顶推力作用下, 10 年后主桥 8#、10# 主墩向 11# 墩方向纵向偏位均在 1 cm 内, 主墩没有较大的纵向偏位, 处于有利的轴心受压状

态, 不会产生压溃或拉裂现象。

(4) 边中跨同时合龙与逐次合龙方案下桥梁结构的受力和线形相差不大, 都能满足规范要求。边中跨同时合龙方案可行, 可作为一种合龙方式供桥梁合龙设计和施工选择。

## 参考文献:

- [1] 吴关良. 高墩大跨连续刚构桥设计计算分析及合龙方案优化研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
- [2] 钟长伟. 高墩大跨连续刚构桥施工控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [3] Mari Antonio R, Valdes Manuel. Long-term behavior of continuous precast concrete girder bridge model[J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(1).
- [4] 田仲初, 莫冬华. 高墩大跨连续刚构桥合龙施工预顶力及预顶效应研究[J]. 公路与汽运, 2008(5).
- [5] 林新元, 王学礼, 张峰, 等. 连续刚构桥多跨一次合龙关键技术及应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [6] 吴章华. 多跨悬浇 PC 连续刚构桥施工阶段监测与控制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [7] 邢志辉. 公路悬臂现浇连续刚构桥线形施工技术[J]. 交通世界, 2018(18).
- [8] 陈熹, 鞠丹, 张文明. 高墩大跨连续刚构桥合龙方案选择与顶推控制研究[J]. 现代交通技术, 2018(3).
- [9] 陈娅玲, 曾有艺, 张铭. 高墩刚构—连续组合体系梁桥不同合龙次序对成桥后力学性能的影响[J]. 公路与汽运, 2016(1).

收稿日期: 2019-08-02