

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.04.023

引用格式:莫永祥.高墩六跨预应力混凝土连续刚构桥合龙顺序研究[J].公路与汽运,2024,40(4):103-107+123.

Citation:MO Yongxiang.Research of closing sequence of six-span prestressed concrete continuous rigid frame bridge with high piers[J].Highways & Automotive Applications,2024,40(4):103-107+123.

# 高墩六跨预应力混凝土连续刚构桥合龙顺序研究

莫永祥

(长沙理工检测咨询有限责任公司,湖南长沙 410076)

**摘要:**以典型高墩六跨连续刚构桥为工程实例,构建全桥有限元模型,针对这类桥梁合龙特点设计 3 种合龙方案,对比分析采用不同合龙顺序时恒载作用下主梁及桥墩受力状态。结果表明,3 种合龙顺序对高墩连续刚构桥主梁受力状态的影响较小;采用方案 1 时主梁成桥恒载累积挠度极值最大,采用方案 1、方案 3 时桥墩顶部水平纵向位移及底部应力状态较好;综合比较,采用方案 3 进行合龙对主梁及桥墩全寿命周期的受力有利。

**关键词:**桥梁;连续刚构桥;合龙顺序;高墩;受力状态

中图分类号:U448.215

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)04-0103-05

连续刚构桥采用墩梁固结,其结构整体性好<sup>[1-2]</sup>。连续刚构桥桥跨数量较多,多在三跨以上,其主梁多采用悬臂现浇施工。较多学者对连续刚构桥合龙段施工工艺进行了研究,如吴锋等以桥墩受力状态为控制参数,对多跨连续刚构桥合龙顶推力进行了研究<sup>[3]</sup>;陈金盛以桥墩顶部水平纵向位移作为控制参数,对吉溪闽江特大桥顶推方案进行了优化<sup>[4]</sup>;铁木尔以某山区高墩连续刚构桥为例,研究主梁不对称悬臂浇筑施工工艺,并分析了合龙顺序对结构受力的影响<sup>[5]</sup>;薛君、黄文浩、陈词等对连续刚构桥边中跨同时合龙施工时合龙段受力特征进行了分析<sup>[6-8]</sup>。部分学者进一步开展了多跨连续刚构桥合龙顺序研究,如解亚东、杨庆国、何斌等对特定连续刚构桥合龙方案进行对比,分析了不同方案下结构的受力特点<sup>[9-11]</sup>。基于现有研究成果,本文以一座高墩六跨预应力混凝土变截面连续刚构桥为工程背景,提出 3 种合龙顺序,研究合龙顺序对六跨高墩连续刚构桥成桥受力及成桥 10 年后受力状态的影响,确定合理的合龙顺序。

## 1 工程概况

湘西机场道路高乐吉一桥主桥上部结构为 50 m+4×90 m+50 m 预应力混凝土变截面连续刚构,下部结构采用桩基础双肢薄壁墩(见图 1)。主桥箱梁采用单箱单室箱形变截面,梁底线形按 2.0

次抛物线变化,箱梁根部梁高为 5.60 m,跨中梁高为 2.60 m;箱梁顶板宽度为 12.00 m,厚度为 1.20~0.28 m(跨中);箱梁底板宽度为 6.50 m,厚度为 0.80~0.32 m(跨中)。主桥箱梁采用纵向、横向、竖向三向预应力体系,主梁采用挂篮悬浇施工。箱梁截面见图 2。主墩采用双肢薄壁墩,各桥墩高度均超过 60.00 m,桥墩双肢净距为 4.40 m,单肢厚度为 1.80 m,横向宽度为 6.50 m,采用整体式承台,墩身中间位置和顶部横向连接,以提高整体性。

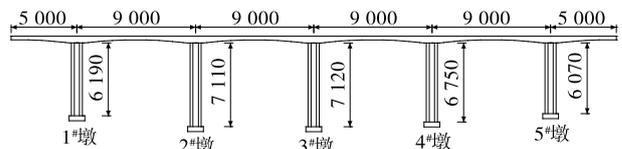


图 1 高乐吉一桥桥型布置(单位:cm)

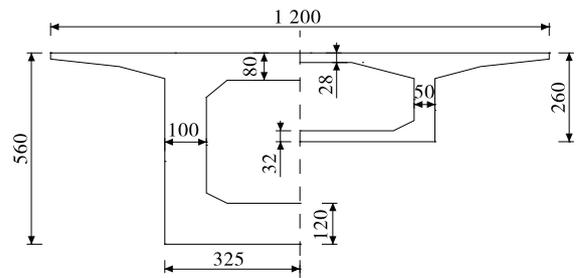


图 2 箱梁截面图(单位:cm)

## 2 桥梁有限元模型

采用 MIDAS/Civil 构建全桥杆系单元模型,上

部结构与下部结构均采用梁单元模拟,桥墩顶部采用刚性连接与主梁 0# 块绑定,下部结构承台底部采用固结支承,桥台处限制竖向及横向位移。桥墩采用爬模施工,主梁采用悬臂浇筑施工。全桥共划分为 311 个节点、294 个单元,共设置 49 个施工阶段。主梁采用 C50 混凝土,桥墩采用 C40 混凝土,桥墩底部承台采用 C30 混凝土,主梁预应力束采用强度为 1 860 MPa 的  $\phi 15.2$  mm 钢绞线。图 3 为全桥有限元模型。

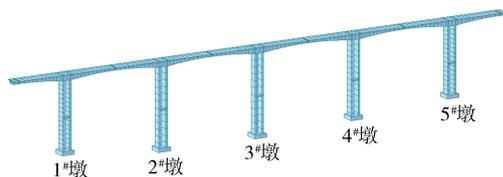


图 3 全桥有限元模型

### 3 合龙方案

参考现有桥梁合龙施工顺序,将该桥主梁对称分为三部分,分别为第 1 跨与第 6 跨、第 2 跨与第 5 跨、第 3 跨与第 4 跨,提出 3 种合龙顺序。

(1) 方案 1:第 2 跨、第 5 跨合龙(次边跨),同步

张拉合龙段预应力→施加顶推力,第 1 跨、第 6 跨合龙(边跨),同步张拉合龙段预应力→施加顶推力,第 3 跨、第 4 跨合龙(中跨),同步张拉合龙段预应力。

(2) 方案 2:第 1 跨、第 6 跨合龙(边跨),同步张拉合龙段预应力→施加顶推力,第 3 跨、第 4 跨合龙(中跨),同步张拉合龙段预应力→施加顶推力,第 2 跨、第 5 跨合龙(次边跨),同步张拉合龙段预应力。

(3) 方案 3:第 1 跨、第 6 跨合龙(边跨),同步张拉合龙段预应力→施加顶推力,第 2 跨、第 5 跨合龙(次边跨),同步张拉合龙段预应力→施加顶推力,第 3 跨、第 4 跨合龙(中跨),同步张拉合龙段预应力。

## 4 各方案下桥梁恒载受力状态分析

### 4.1 主梁应力分析

#### 4.1.1 成桥恒载作用下应力分析

提取采用不同合龙方案时成桥恒载作用下主梁内力数据,绘制图 4 所示成桥恒载作用下主梁应力响应图,以拉应力为正,压应力为负。

由图 4 可知:成桥恒载作用下,采用 3 种不同合

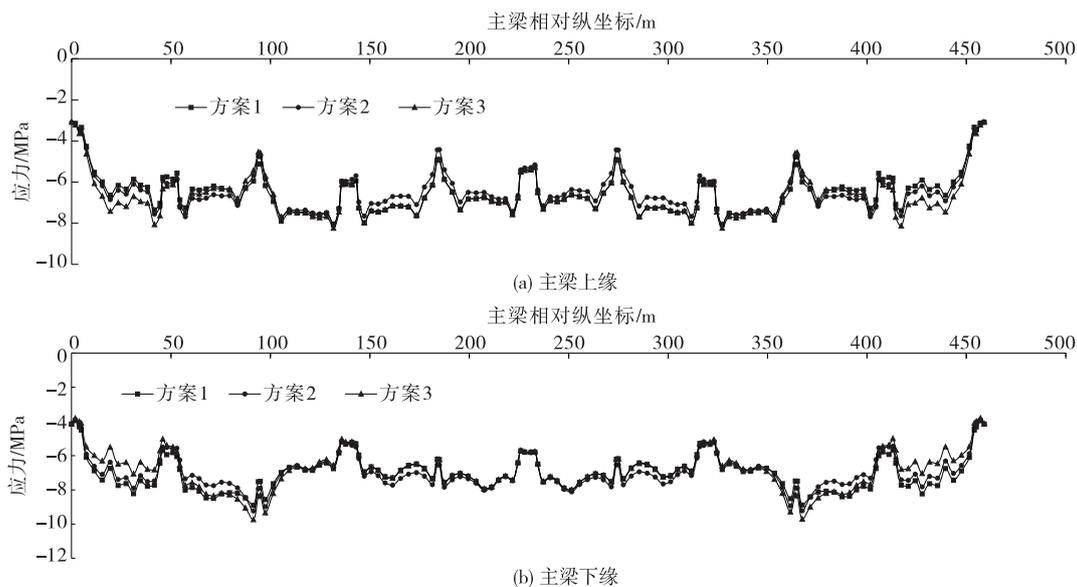


图 4 采用不同合龙方案时成桥恒载作用下主梁应力响应

龙方案,主梁上缘、下缘整体应力状态及趋势基本一致,均为主梁全截面受压;采用方案 1 和方案 3 时主梁上缘、下缘应力在第 2 跨跨中截面至第 5 跨跨中截面较接近;采用方案 1 和方案 2 时主梁上缘、下缘应力在两侧边跨较接近。3 种合龙方案下 3# 桥墩附近主梁应力较接近,采用方案 1 时 1# 墩、5# 墩两

侧主梁区域内上缘应力最小,下缘应力最大;采用方案 2 时 2#~4# 墩间主梁区域内上缘应力最小,下缘应力最大;采用方案 3 时 1#~2# 跨主梁跨中截面、5# 跨主梁跨中截面至 6# 墩区域主梁上缘应力最小,下缘应力最大。成桥恒载状态下,采用方案 1 进行合龙对 1# 墩、5# 墩两侧主梁受力有利,采用方

案 2 进行合龙对 2<sup>#</sup>墩、4<sup>#</sup>墩两侧主梁受力有利。

#### 4.1.2 成桥 10 年恒载作用下应力分析

提取采用不同合龙方案时成桥 10 年恒载作用

下主梁内力,绘制图 5 所示成桥 10 年恒载作用下主梁应力响应图。

对比图 5 与图 4 可知:成桥 10 年恒载作用下,

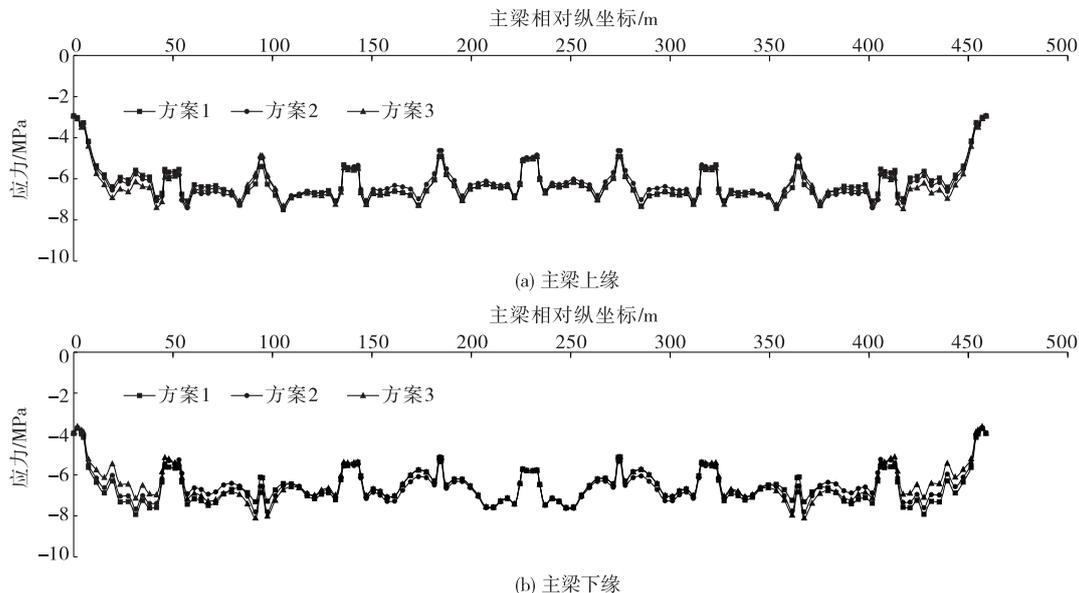


图 5 采用不同合龙方案时成桥 10 年恒载作用下主梁应力响应

采用 3 种不同合龙方案,主梁上缘、下缘应力分布规律与成桥恒载作用下主梁应力分布规律基本相同,数值有一定程度减小,说明在混凝土收缩徐变过程中,3 种合龙方案下主梁受力状态变化规律基本一致。

恒载状态下,采用 3 种不同合龙方案,主梁应力较接近,不同合龙顺序对高墩连续刚构桥主梁受力

的影响较小。

#### 4.2 主梁累积挠度分析

##### 4.2.1 成桥恒载作用下累积挠度分析

提取采用不同合龙方案时成桥恒载作用下主梁累积挠度,绘制图 6 所示成桥恒载作用下主梁累积挠度响应图,以挠度向上为正、向下为负。

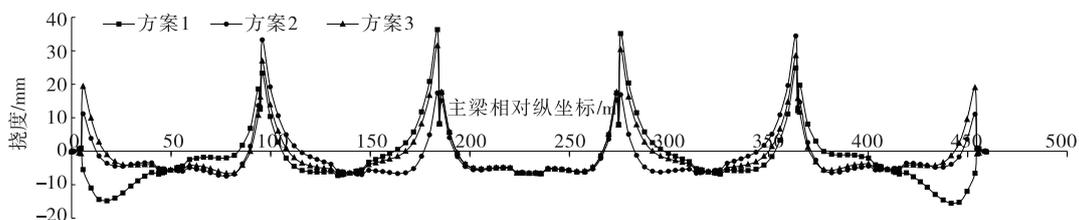


图 6 采用不同合龙方案时成桥恒载作用下主梁累积挠度响应

由图 6 可知:成桥恒载作用下,采用 3 种不同合龙方案,3<sup>#</sup>墩两侧主梁挠度基本一致;采用方案 1 和方案 3,第 2 跨跨中至第 5 跨跨中区域主梁恒载挠度较接近;主梁最大下挠值(-15.5 mm)出现在采用方案 1 时两侧边跨,最大上挠值(36.3 mm)出现在采用方案 1 时第 3 跨与第 4 跨跨中区域附近;采用方案 2,主梁最大下挠值为-7.4 mm,最大上挠值为 34.5 mm;采用方案 3,主梁最大下挠值为-6.8 mm,最大上挠值为 31.5 mm。

成桥恒载作用下,采用方案 1 时主梁最大累积上挠值和下挠值均大于方案 2 和方案 3,采用方案 2

和方案 3 时主梁最大累积挠度较接近。成桥恒载作用下,合龙顺序对主梁累积挠度的影响较大,方案 2 和方案 3 下主梁累积挠度状况优于方案 1。

##### 4.2.2 成桥 10 年恒载作用下累积挠度分析

提取采用不同合龙方案时成桥 10 年恒载作用下主梁累积挠度,绘制图 7 所示成桥 10 年恒载作用下主梁累积挠度响应图。

由图 7 可知:成桥 10 年恒载作用下,采用 3 种不同合龙方案,3<sup>#</sup>墩两侧主梁挠度基本一致;在 2<sup>#</sup>墩、5<sup>#</sup>墩两侧区域,采用方案 2 和方案 3 时主梁恒载挠度较接近;主梁最大下挠值(-22.4 mm)出

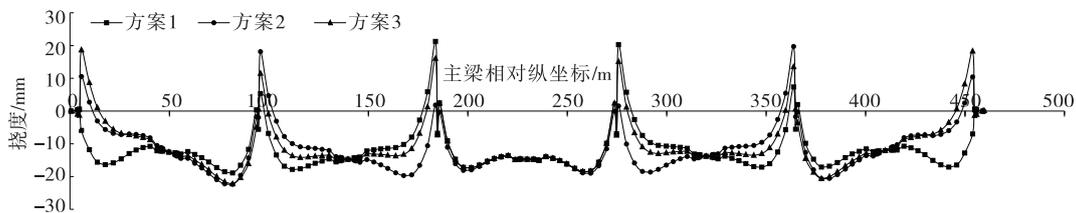


图 7 采用不同合龙方案时成桥 10 年恒载作用下主梁累积挠度响应

现在采用方案 2 时第 2 跨跨中附近,最大上挠值(21.3 mm)出现在采用方案 1 时第 3 跨与第 4 跨跨中区域附近;采用方案 1 时主梁最大下挠值为 -18.9 mm,最大上挠值为 21.3 mm;采用方案 2 时主梁最大下挠值为 -22.4 mm,最大上挠值为 19.7 mm;采用方案 3 时主梁最大下挠值为 -22.2 mm,最大上挠值为 18.7 mm。

对比图 7 与图 6,成桥 10 年恒载作用下,2<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>墩处主梁出现较大累积下挠,且各跨主梁随着桥墩下挠出现一定下挠;成桥 10 年恒载作用下主梁累

积挠度分布规律与成桥恒载作用下主梁累积挠度分布规律基本一致,但各方案之间主梁累积挠度差值逐渐增加。成桥 10 年恒载作用下 3 种方案的主梁累积挠度极值较接近,说明混凝土收缩徐变 10 年后,合龙顺序对主梁挠度的影响较小。

#### 4.3 桥墩顶部水平纵向位移分析

分别提取采用不同合龙方案时成桥恒载作用和成桥 10 年恒载作用下桥墩顶部水平纵向位移,结果见表 1。墩顶水平纵向位移以向大桩号方向为正、向小桩号方向为负。

表 1 各合龙方案下桥墩顶部水平纵向位移

单位:mm

桥墩编号	位置	采用不同合龙方案时成桥恒载作用下 桥墩顶部水平纵向位移			采用不同合龙方案时成桥 10 年恒载作用下 桥墩顶部水平纵向位移		
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
1 <sup>#</sup>	左侧	-42.03	8.49	-35.10	1.66	52.47	8.89
	右侧	-47.00	3.59	-39.98	-4.35	46.54	2.99
2 <sup>#</sup>	左侧	-30.06	-3.19	-27.40	-6.69	19.89	-4.16
	右侧	-35.55	-8.70	-32.88	-13.30	13.27	-10.75
3 <sup>#</sup>	左侧	3.46	2.03	3.47	5.50	4.08	5.52
	右侧	-2.17	-3.59	-2.15	-1.23	-2.65	-1.21
4 <sup>#</sup>	左侧	27.96	4.60	25.43	8.74	-14.34	6.32
	右侧	22.75	-0.63	20.23	2.40	-20.68	0.01
5 <sup>#</sup>	左侧	46.32	0.40	39.45	6.67	-39.57	-0.52
	右侧	41.43	-4.43	34.65	0.74	-45.41	-6.34

由表 1 可知:1) 成桥恒载作用下,采用方案 1 和方案 3,各墩顶部水平纵向位移趋势基本一致,1<sup>#</sup>墩、2<sup>#</sup>墩向小桩号侧倾斜,4<sup>#</sup>墩、5<sup>#</sup>墩向大桩号侧倾斜,且桥墩顶部水平纵向位移量沿 3<sup>#</sup>墩竖向断面基本对称;采用方案 2,2<sup>#</sup>跨两侧桥墩向 2<sup>#</sup>跨跨中倾斜,5<sup>#</sup>跨两侧桥墩向 5<sup>#</sup>跨跨中倾斜,且 3<sup>#</sup>墩顶部水平纵向位移与采用方案 1 和方案 3 时基本一致,其余桥墩顶部水平纵向位移远小于采用方案 1 和方案 3 时对应桥墩顶部水平纵向位移。2) 成桥 10 年恒载作用下,采用方案 1 和方案 3,桥墩顶部水

平纵向位移总体减小,采用方案 2 时桥墩顶部水平纵向位移总体增加。采用方案 1 时,1<sup>#</sup>墩、2<sup>#</sup>墩向小桩号侧倾斜,4<sup>#</sup>墩、5<sup>#</sup>墩向大桩号侧倾斜;采用方案 2 时,1<sup>#</sup>墩、2<sup>#</sup>墩向大桩号侧倾斜,4<sup>#</sup>墩、5<sup>#</sup>墩向小桩号侧倾斜;采用方案 3 时,2<sup>#</sup>跨两侧桥墩向 2<sup>#</sup>跨跨中倾斜,5<sup>#</sup>跨两侧桥墩向 5<sup>#</sup>跨跨中倾斜。3) 对比分析,成桥恒载作用下,采用方案 2 时桥墩顶部水平纵向位移小于采用方案 1 和方案 3 时;成桥 10 年恒载作用下,采用方案 1 和方案 3 时桥墩顶部水平纵向位移小于采用方案 2 时。成桥恒载状态

下,采用方案 2 时桥墩顶部水平纵向位移优于采用方案 1 和方案 3;成桥 10 年恒载状态下,采用方案 1 和方案 3 时桥墩顶部水平纵向位移优于采用方案 2。采用方案 1 和方案 3,桥梁全寿命周期内桥墩顶部水平纵向位移状态更合理。

#### 4.4 桥墩底部应力分析

分别提取采用不同合龙方案时成桥恒载作用和成桥 10 年恒载作用下桥墩底部最大应力,结果见表 2。

由表 2 可知:1) 成桥恒载作用下,采用 3 种合

表 2 各合龙方案下桥墩底部最大应力

单位:MPa

桥墩编号	位置	采用不同合龙方案时成桥恒载作用下 桥墩底部最大应力			采用不同合龙方案时成桥 10 年恒载作用下 桥墩底部最大应力		
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
1 <sup>#</sup>	左侧	-1.43	-2.93	-1.30	-2.84	-0.95	-2.57
	右侧	-0.76	-3.11	-1.05	-3.11	-1.85	-3.10
2 <sup>#</sup>	左侧	-2.58	-3.03	-2.50	-3.51	-2.84	-3.41
	右侧	-2.08	-3.21	-2.18	-3.36	-3.12	-3.41
3 <sup>#</sup>	左侧	-3.43	-3.38	-3.43	-3.40	-3.44	-3.40
	右侧	-3.43	-3.46	-3.43	-3.41	-3.43	-3.41
4 <sup>#</sup>	左侧	-2.14	-3.28	-2.25	-3.20	-2.94	-3.28
	右侧	-2.60	-3.07	-2.52	-3.38	-2.66	-3.30
5 <sup>#</sup>	左侧	-0.79	-3.16	-1.07	-3.07	-2.02	-3.08
	右侧	-1.55	-3.04	-1.40	-2.87	-1.18	-2.59

龙方案,桥墩底部应力均为压应力;采用方案 1 和方案 3 时桥墩底部压应力较接近,且从中间向两侧逐渐减小;采用方案 2 时各桥墩底部压应力较接近,3<sup>#</sup>墩底部压应力与采用方案 1 和方案 3 时接近,其余桥墩底部压应力均大于采用方案 1 和方案 3 时对应桥墩底部压应力。2) 与成桥恒载作用下各桥墩底部压应力相比,成桥 10 年恒载作用下,3<sup>#</sup>墩底部压应力基本不变;采用方案 1 和方案 3 时,除 3<sup>#</sup>墩外,其余桥墩压应力均增大;采用方案 2 时,除 3<sup>#</sup>墩外,其余桥墩压应力均减小。成桥 10 年恒载作用下各桥墩底部压应力变化规律与各桥墩顶部水平纵向位移变化规律基本一致。

成桥恒载状态下,采用方案 2 时桥墩底部应力状态优于采用方案 1 和方案 3 时;成桥 10 年恒载状态下,采用方案 1 和方案 3 时桥墩底部应力状态优于采用方案 2 时。采用方案 1 和方案 3,在桥梁全寿命周期内桥墩底部应力状态更合理。

## 5 结论

本文以高墩六跨预应力混凝土连续刚构桥为例,分析 3 种合龙顺序下主梁及桥墩在成桥恒载和成桥 10 年恒载作用下的应力及位移响应,结论

如下:

(1) 恒载作用下,各合龙方案下主梁应力响应较接近,合龙顺序对高墩连续刚构桥主梁受力状态的影响较小。

(2) 采用方案 1 时主梁成桥恒载挠度极值明显大于采用方案 2 和方案 3 时,成桥 10 年恒载作用下各方案主梁累积挠度极值较接近。

(3) 在桥梁全寿命周期内,采用方案 1 和方案 3 时桥墩顶部水平纵向位移及底部应力状态优于方案 2。

(4) 综合比较,六跨连续刚构桥采用方案 3 进行合龙,对主梁及桥墩全寿命周期受力状态有利。

#### 参考文献:

- [1] 彭元诚.大跨度空腹式连续刚构桥设计理论与方法[J].桥梁建设,2020,50(1):74-79.
- [2] 周军生,楼庄鸿.大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J].中国公路学报,2000,13(1):31-37.
- [3] 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(自然科学版),2017,37(5):65-72.

(下转第 123 页)