

# 湖北云南庄特大桥设计关键技术

刘新华<sup>1,2</sup>, 李秋<sup>1</sup>, 彭元诚<sup>1</sup>, 张建仁<sup>2</sup>

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 长沙理工大学)

**摘要:**湖北云南庄特大桥为(150+280+150) m 拱梁组合空腹连续刚构桥, 结构形式新颖, 通过加大根部主梁高度对腹板进行挖孔, 形成空腹三角区, 实现突破常规连续刚构桥主跨跨越能力受限的目的。拱梁组合空腹连续刚构桥受力复杂、技术难度大。研究得出, 桥型结构融合拱桥与梁桥的受力模式, 空腹区段非常规梁段的受弯构件, 其上弦为偏心受拉构件、下弦为偏心受压构件; 针对上、下弦梁体汇合处, 提出一种“Y”字形关键传力构造。计算表明: 结构传力明确、安全可靠、施工便捷; 根据桥型特点, 提出空腹区段上、下弦均采用临时扣索辅助挂篮悬浇的创新施工方式, 比选了上弦临时索塔及扣索的合理拆除时机; 研究了箱梁根部空腹区高度对主梁刚度及下弦根部内力的影响规律, 提出空腹区设计高度为主跨跨径的1/7.5~1/8.5的建议取值。

**关键词:**拱梁组合; 空腹连续刚构; 受力模式; Y字形构造; 临时扣索; 主梁空腹高度

## 1 引言

连续刚构桥技术发展成熟、结构受力清晰明确、与路线平纵曲线适应性强、桥面行车平稳、运营期间桥梁管养工作投入成本较低。其主梁为现浇预应力混凝土结构, 通常采用挂篮逐段对称悬浇, 避免了在桥下搭设临时支架, 因此连续刚构桥施工受地形条件限制较小, 能够很好地适应山区峡谷等复杂自然环境, 已成为中国高速公路中最为常用的桥型方案。

虽然连续刚构桥造价不高且应用广泛, 但也存在一些缺点: 主梁为混凝土结构, 上部结构自重较大, 恒载占比较高, 严重制约其跨径的发展, 同时在地震烈度地区, 自重较大也意味着其整体结构的地震内力较大。基于混凝土材料收缩徐变的特性, 当跨径较大时, 连续刚构桥常常出现跨中下挠甚至导致开裂的情况。连续刚构桥通过配置体内预应力束来增强截面的承载力, 但体内束的力臂受梁高限制, 同时预应力束的数量也受截面布束空间限制, 当跨径较大梁段较多时, 往往会出现截面配束空间有限且预应力损失较大的情况。由于以上原因, 连续刚构桥的跨径很难得到突破, 目前中国所建连续刚构桥最大跨径基本在220 m以内。

拱梁组合空腹连续刚构桥充分结合普通连续刚构桥的优势, 并在此基础上进行改进。在主梁靠近主墩

一定区域范围内将箱梁整体截面改变为上下分离的两个部分, 并通过拉高根部截面高度在上下分离体之间形成空腹区, 最终整体结构改变成拱梁组合式受力体系, 在增加梁高的同时减轻了结构的自重, 大大提高了主梁的承载能力, 突破了普通连续刚构桥的最大跨径。经研究, 拱梁组合空腹连续刚构桥的经济跨径为220~360 m, 在其经济跨径区间内, 该桥型比其他桥型造价更经济、后期维护更方便, 极具竞争力。

## 2 项目概况

云南庄特大桥位于湖北省恩施土家族苗族自治州鹤峰县容美镇庙湾村境内, 为路线跨九峰河沟谷而建设, 桥位处为深切“V”形峡谷, 谷底至桥面高差约为240 m, 桥位轴线走向方位为SW204°, 主桥采用造型优美的拱梁组合空腹连续刚构桥, 桥跨布置为(150+280+150) m=580 m, 立面布置见图1。桥梁为双向四车道, 标准宽度为25 m, 分为左、右两幅, 单幅桥梁标准宽度为12.25 m, 中央分隔带为0.5 m。地震基本烈度为Ⅵ度, 基本地震动加速度峰值值为0.05g, 特征周期为0.35 s。

桥梁空腹区段箱梁上弦高度为6.5~5 m, 斜腿高度为7 m; 箱梁跨中高度为4.5 m; 斜腿根部至梁顶中心高度为34 m; 箱梁高度及梁顶至斜腿底缘距离按

2.5次抛物线变化。悬浇T箱梁顶板厚为0.3m,底板厚度由跨中0.32m按二次抛物线变化至0.9m(汇合段);箱梁腹板厚度为0.8~0.45m,分两次过渡。主梁断面构造见图2。

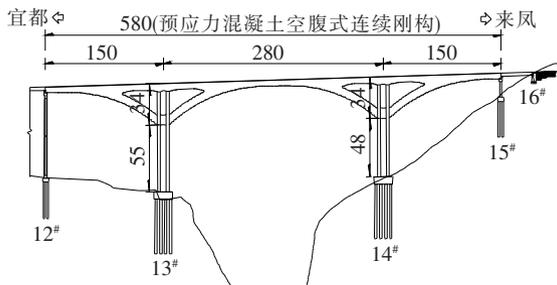


图1 总体立面布置(单位:m)

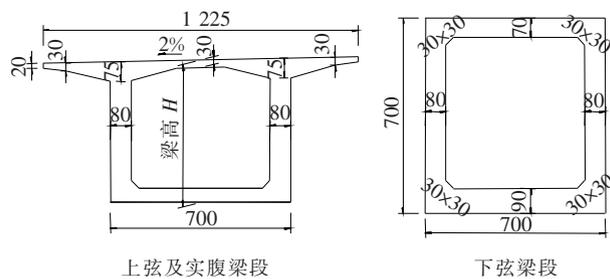


图2 主梁断面图(单位:cm)

### 3 设计关键技术

#### 3.1 空腹区结构受力模式

拱梁组合空腹式连续刚构桥主要由桥墩、空腹段上弦、空腹段下弦、实腹段箱梁四部分组成,见图3。

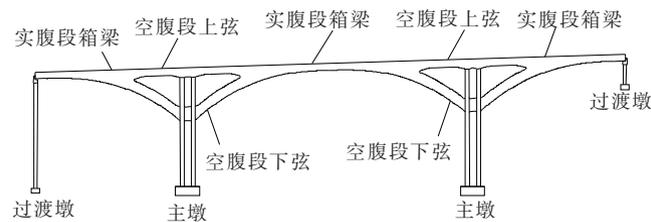


图3 空腹式刚构主要组成部分

云南庄特大桥的支撑体系采用主墩墩底与承台桩基相连,桩基采用考虑桩土效应的一般约束,过渡墩梁端设竖向支座。设计时考虑恒载、支座沉降、汽车活载、温度荷载以及风荷载等多种荷载的组合作用,其中恒载及汽车荷载为主要荷载。经计算对比得出:主要荷载作用下,主桥上构除了产生弯矩以外,空腹区范围内上弦还会产生巨大的轴向拉力作用,同时下弦会产生轴向压力作用,而实腹段箱梁基本无轴向力,与普通

连续刚构桥相比,整体结构受力形式发生改变。

根据结构分析,荷载作用下空腹式连续刚构的不同部位表现出不同的受力模式,其中实腹段箱梁表现为受弯构件,空腹段上弦表现为偏心受拉构件,空腹段下弦表现为偏心受压构件。对于预应力混凝土桥梁,受弯构件及偏心受压构件比较常见,而偏心受拉构件则很少遇见,因此在设计计算时应特别注意,这也是与以往桥梁结构所不同的受力特征。

由于施工过程中及后期运营过程中下弦主要为承压和抗剪构件,不宜布置相应纵向预应力,而上弦及实腹梁段分别为偏心受拉构件和受弯构件,因此需配置相应的纵向预应力钢束。下弦和实腹梁段计算模式与常规连续刚构桥一致,空腹段上弦箱形截面作为预应力混凝土偏心受拉构件,以往验算较少,其承载力计算图式见图4。

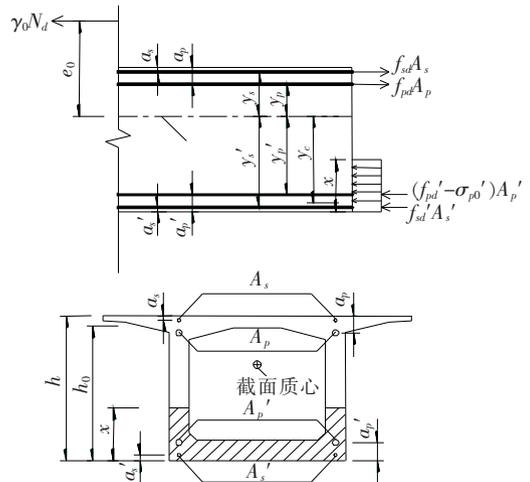


图4 上弦截面偏心受拉承载力计算图式

混凝土受压区高度  $x$  按下式计算:

$$\gamma_0 N_d = f_{pd} A_p + f_{sd} A_s - (f_{pd}' - \sigma_{p0}') A_p' - f_{sd}' A_s' - f_{cd} A_c \quad (1)$$

轴力下对应的弯矩应满足:

$$\gamma_0 M_d \leq f_{pd} A_p y_p + f_{sd} A_s y_s + (f_{pd}' - \sigma_{p0}') A_p' y_p' + f_{sd}' A_s' y_s' + f_{cd} A_c y_c \quad (2)$$

式中:  $A_c$  为受压区混凝土面积;  $\sigma_{p0}'$  为受压区预应力钢筋合力点处混凝土法向应力为零时的预应力钢筋应力。

运营阶段,云南庄特大桥上弦跨中在基本组合下,最大轴力为205 463 kN,弯矩为373 331 kN·m,按偏心受拉构件验算抵抗矩为603 091 kN·m,满足结构受力要求。

#### 3.2 上下弦汇合角隅“Y”字形关键构造

大桥上、下弦交汇处的角隅构造是该桥设计中的

重中之重,此处受力复杂,应力集中,为保证传力的流畅过渡,汇合节点应使得上、下弦与主梁间的传力平顺,且角隅构造应有一定的横向刚度采用框架效应来限制畸变,北盘江大桥采用 X 叉板式构造形式,将上、下弦的箱室在汇合处变为单箱室截面,然后再把单箱室竖向分成 3 个隔室,此构造可以起到分散集中力的作用,较好地实现了力的传递。但计算分析中发现,此构造 X 形上、下交汇处存在明显的拉、压应力分界交叉点,应力仍较集中,通常采用加强配筋及表面设置钢筋网的方式进行加强,另外 X 形构造隔室较多、相邻箱室空间较小、存在施工不便、质量难控制等问题。

该桥对多种构造进行计算优化比选,提出一种施工便利、质量易控制、传力顺畅的 Y 字形构造,见图 5。上下弦在汇合后,采用一字形水平隔板的形式继续延长 2~3 个节段长度,与角隅竖向隔板间距为 1.5 m。采用这种构造将上弦、下弦的力汇合后,通过隔板的延长距离将力传递至腹板,再进行顺畅分散至整个箱梁断面。

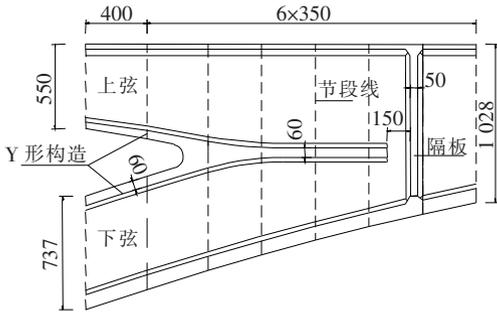


图 5 汇合区 Y 形构造图(单位:cm)

为了解其受力特征,通过 Ansys 有限元软件建立 Y 形构造有限元数值分析模型,见图 6。

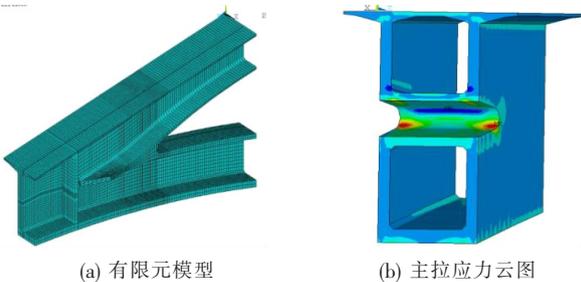


图 6 Y 形构造有限元分析图

局部分析结果表明:① 上下弦角隅节点的应力在交汇处实现了较好的融合,由于 Y 形构造的传递作用,结构应力较均匀,主梁最大主拉应力出现在水平隔板的末端与腹板的交汇处,最大主应力为 1.59 MPa;② 水平隔板为钢筋混凝土构件,受力较为复杂,最大

名义拉应力出现在水平隔板末端分叉点位置,最大名义拉应力为 3.78 MPa,需要对此处水平隔板加强配筋;③ 限制畸变的竖向横隔板受力较好,最大主应力为 2.27 MPa;④ 中隔板与腹板相连的角点局部区域,腹板内侧竖向受压,腹板外侧竖向受拉,该区域受力复杂,但腹板竖向应力钢束对其受力状况进行了有效改善,使得腹板竖向正截面受压,大部分区域不超过 0.4 MPa 主拉应力;⑤ 上下弦交汇圆弧段边角处有较小范围的应力集中,最大出现 2.9 MPa 主拉应力,需要加强该位置处配筋。通过 Y 形构造的合理过渡,较好地实现了力的传递,计算结果表明结构安全可靠。

### 3.3 空腹三角区关键施工方案

大跨度空腹式刚构桥梁结构新颖,跨度较大,三角区受力复杂。下弦施工处于高墩之上,不适合采用支架现浇,上弦截面尺寸及抗弯刚度与常规刚构桥相比均较小,随着施工过程中悬臂长度的不断增加,上弦将难以承受其自身重量。因此,该桥上弦及下弦的施工均需采用一定的辅助工程。

已建成的贵州省北盘江特大桥为中国首座大跨预应力混凝土空腹式连续刚构桥。其三角区采用的施工方法,解决了悬臂浇筑时下弦截面抗弯刚度不足的问题,又利用下弦顶部的钢管支架解决了悬臂浇筑时上弦截面抗弯刚度不足的问题,为同类桥梁提供了很好的借鉴。但此施工方法存在上、下弦施工不独立,容易产生干扰的问题。同时拆除钢管支架前上、下弦的自重全部由下弦独自承担,而拆除钢管支架时上、下弦自重需进行内力重新分配,因此结构受力体系将产生较大变化。此外,采用钢管支架施工,存在较多的施工干扰。

针对此问题,设计对云南庄特大桥三角区的施工方案进行了创新探索,经反复研究计算对比,提出空腹区上、下弦均采用临时扣索辅助挂篮悬浇的施工方式(图 7)。此工法主要为挂篮悬浇下弦梁段并张拉临时扣索;主墩墩顶设置临时钢扣塔,挂篮悬浇上弦梁段并张拉上弦临时拉索。

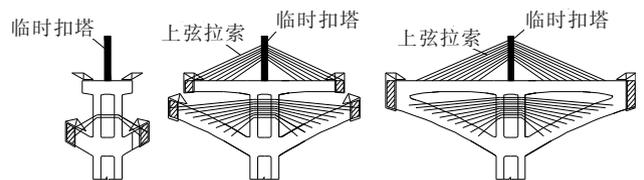


图 7 空腹三角区施工示意图

此方案上、下弦施工过程中受力独立,不存在相互之间恒载内力重分配的问题。由于施工过程中下弦不

需承担上弦的自重,因此在设计中可适当减小下弦的截面尺寸及下弦临时扣索的规格,有利于减小恒载重量,优化结构受力。

### 3.4 临时扣索合理拆除时机

大桥空腹段上、下弦均采用临时扣索辅助挂篮悬臂浇筑方法施工,设计时不仅应确定各个施工阶段临时扣索的合理张力,同时也应确定上、下弦临时扣索的拆除时机。当临时扣索拆除后,原本由临时扣索承担的恒载将分配到已浇筑的箱梁节段承担,从而引起箱梁内力及线形产生一定变化。上、下弦临时扣索不同的拆除时机,将导致箱梁不同的应力及线形结果。

对于下弦临时扣索拆除时机,在对北盘江特大桥的研究中,通过对比发现,全桥合龙完成阶段拆除下弦临时扣索不仅对三角区施工阶段的受力更有利,而且施工线形更容易控制。经过计算分析,云南庄特大桥下弦扣索拆除时机的规律与北盘江特大桥基本一致,因此考虑到三角区受力及成桥线形的可控性,云南庄特大桥下弦扣索采用在全桥合龙后拆除的施工方案。

对于上弦临时扣索拆除时机,云南庄特大桥作为同类桥梁中采用在墩顶设置临时扣塔,利用扣索辅助上弦悬浇的空腹式刚构桥,上弦扣索的拆除时机至关重要,基于此,对研究提出的上弦临时扣索拆除时机的4种可行方案(方案1:空腹区施工完成后拆除上弦扣索;方案2:常规梁段施工完成一半后拆除上弦扣索;方案3:最大悬臂状态拆除上弦扣索;方案4:全桥合龙后拆除上弦扣索)对主梁受力的影响进行了详细对比研究。选取结构的关键截面见图8,不同方案下施工阶段关键截面应力分析结果见表1。

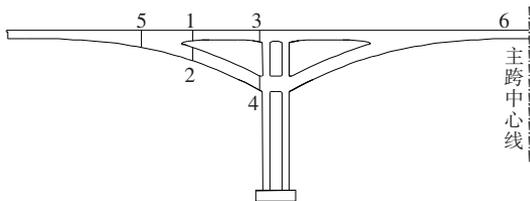


图8 关键截面位置示意图

不同的施工阶段拆除上弦临时扣索计算结果表明:①对施工过程中主梁应力影响较大,因此需选择合理的拆除时间,避免施工过程中应力超限;②对最终成桥时主梁的应力基本无影响;③不同悬臂施工阶段拆除上弦扣索,对汇合区下弦(截面2)的最大应力及上弦根部(截面3)的最小应力影响最为显著,其变化规律见图9。图9中梁的编号11#~33#为主梁汇合区段到跨中梁段的节段号。

表1 施工阶段4种方案关键截面最小/最大应力

截面编号	位置	最大/最小应力/MPa			
		方案1	方案2	方案3	方案4
1	上缘	-11.3 / -0.1	-11.7 / -0.1	-11.8 / -1.7	-11.8 / -1.7
	下缘	-6.0 / 0.1	-6.0 / 0.6	-5.7 / 0.7	-5.4 / 0.7
2	上缘	-13.6 / 0	-13.6 / 0	-13.6 / 0	-13.6 / 0
	下缘	-5.0 / 2.5	-5.0 / 0	-7.1 / 0.1	-7.1 / 0.1
3	上缘	-13.6 / 0.1	-15.6 / 0.1	-18.2 / 0.1	-18.2 / 0.1
	下缘	-7.1 / 0.3	-7.0 / 0.3	-7.1 / 0.3	-7.2 / 0.3
4	上缘	-15.5 / 0.2	-15.6 / 0.2	-16.8 / 0.2	-16.8 / 0.2
	下缘	-8.7 / 1.4	-8.6 / 1.4	-8.5 / 1.4	-8.5 / 1.4
5	上缘	-11.2 / 0.1	-11.2 / 0.1	-11.2 / 0.1	-11.2 / 0.1
	下缘	-8.0 / 0.2	-8.0 / 0.2	-8.0 / 0.2	-7.9 / 0.2
6	上缘	-4.8 / -2.5	-4.8 / -2.5	-4.8 / -2.5	-4.8 / -2.5
	下缘	-11.2 / -6.7	-11.2 / -6.7	-11.2 / -6.7	-11.1 / -6.7

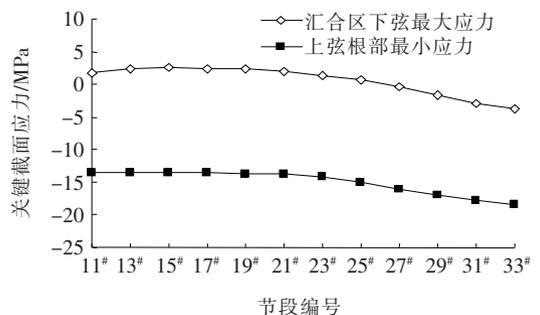


图9 不同阶段拆除上弦扣索关键截面应力曲线图

研究分析以上结果,施工过程中扣索对上弦节段施加轴力及弯矩作用,以平衡梁段自重及施工临时荷载。后续施工时,主梁纵向钢束的预应力效应与扣索的作用力相互叠加,上弦扣索拆除越晚,则上弦根部压应力水平越高,因此方案3、4施工过程中上弦根部截面的最大压应力大于方案1、2。但如果上弦扣索拆除过早,由于后续实腹梁段对下弦的压应力储备不足,则将导致拆除扣索时汇合区下弦截面产生较大的拉应力。

考虑到施工过程中桥面施工人员、机具活动频繁,临时索塔及扣索占用施工场地,因此在保证施工过程中结构受力安全的前提下,应尽早拆除上弦临时扣索。通过计算对比,设计建议采用方案 2,施工步骤为完成常规一半悬臂梁段浇筑后拆除上弦扣索,根据图 9 可知:此方案施工阶段汇合区下弦截面不会出现拉应力,同时上弦根部最大压应力为 $-15.7\text{ MPa}$ ,主梁应力状态合理可靠。

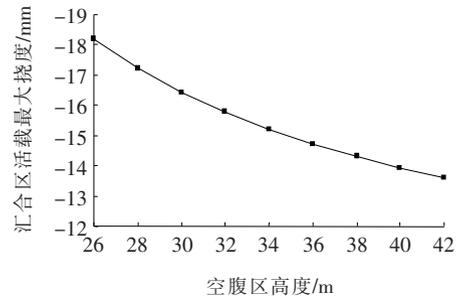
### 3.5 空腹区高度对受力及刚度的影响

对于常规连续刚构桥,箱梁根部梁高一般为主跨跨径的 $1/16\sim 1/17$ 。空腹式连续刚构为桥梁新型结构,为研究空腹区高度对结构受力及刚度的影响规律,分别在保证云南庄特大桥其他参数不变的前提下,对比空腹区高度为 26、28、30、32、34、36、38、40、42 m 时,活载作用下汇合区位移及下弦根部内力的变化,计算结果见图 10。

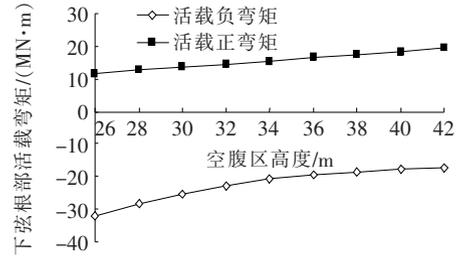
图 10 表明:随着空腹区高度的增加,活载作用下汇合区的竖向挠度不断减小,即主梁竖向刚度与空腹区高度成正相关。随着空腹区高度的增加,活载作用下下弦根部的正弯矩不断增大,而负弯矩及轴压力则不断减小。根据空腹区高度对主梁受力及刚度的影响规律,并结合实际工程项目,建议设计时空腹区的根部高度在主跨跨径的 $1/7.5\sim 1/8.5$ 范围内选取,该桥空腹区高度为 34 m,为主跨跨径的 $1/8.2$ ,结构构造及受力状态较为合理。

## 4 结 语

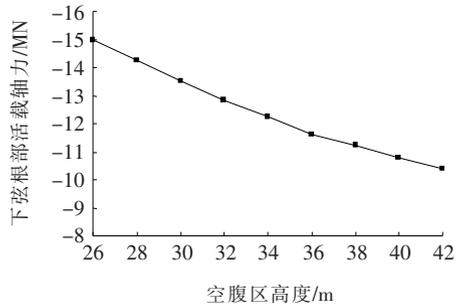
拱梁组合空腹连续刚构桥作为一种新型桥梁,外形优美,结构形式新颖,在跨径为 220~360 m 时极具竞争力。该文以湖北云南庄特大桥为工程背景,分析了拱梁组合空腹连续刚构桥与以往连续梁结构表现不同的受力特征,其空腹段上弦、空腹段下弦、实腹段箱梁分别为偏心受拉构件、偏心受压构件和受弯构件;提出的“Y”字形关键传力构造,解决了空腹段受力复杂、应力集中的问题;提出的上、下弦均采用临时扣索辅助挂篮悬浇的创新施工方式,并建议上弦扣索在常规梁段浇筑一半完成后拆除,下弦扣索在全桥合龙后拆除的施工方式,这样克服了上下弦施工难的问题;根据空腹区根部主梁高度对结构刚度和下弦内力的影响规律,并结合已有工程案例,提出拱梁空腹连续刚构桥根部设计高度取值建议为主跨跨径的 $1/7.5\sim 1/8.5$ 。大桥已开工建设,计划于 2021 年建成通车。



(a) 汇合区活载最大竖向挠度



(b) 下弦根部活载弯矩



(c) 下弦根部活载轴力

图 10 汇合区位移及下弦内力变化图

### 参考文献:

- [1] 冯鹏程. 连续刚构桥设计关键技术问题的探讨[J]. 桥梁建设, 2009(6).
- [2] 宗昕, 彭元诚, 吴游宇, 等. 北盘江特大桥结构设计[J]. 公路, 2010(8).
- [3] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 湖北宜都至来凤高速公路鹤峰东段云南庄特大桥施工图设计[Z], 2019.
- [4] 杨金龙, 孙琦. 峡谷大跨度空腹式刚构桥关键施工工序分析与实践[J]. 施工技术, 2014(S2).
- [5] 彭元诚, 周水兴, 徐略勤. 空腹式 PC 连续刚构桥结构设计参数经济性比较[J]. 中外公路, 2017(6).
- [6] 舒江, 李志刚, 陈杨明, 等. 福州马尾大桥主桥设计关键技术[J]. 桥梁建设, 2018(5).
- [7] 马振栋, 刘安双. 控制大跨连续刚构桥梁过度下挠的技术措施[J]. 桥梁建设, 2015(2).
- [8] 郭文君. 大跨度连续刚构桥跨中下挠问题原因及对策研究[J]. 桥梁建设, 2017(30).