

大跨径多孔空腹式连续刚构桥设计及施工关键技术

张谦

(中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 空腹式连续刚构桥作为一种新型的桥梁结构, 通过减小跨中实腹段长度、降低自重, 提高结构承载效率, 实现了刚构桥跨越能力的提升。文中以 166m+3×320m+166m 的六枝特大桥为对象, 对大跨径多孔空腹式连续刚构桥的结构设计、双层挂篮双层扣挂法的索力控制、临时索拆除时机以及合龙顺序进行了研究, 它可以为同类型桥梁的关键构造设计、大桥施工控制提供一些参考。

关键词: 大跨径多孔; 结构设计; 临时索张拉力; 拆除时机; 合龙顺序

中图分类号: U442.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2023) 03—0115—04

1 引言

随着我国桥梁建造技术的高速发展, 各种结构形式的桥梁早已遍布江河湖海。其中预应力混凝土连续刚构桥作为一种古老的结构体系, 由于具有受力性能好、结构刚度大、行车平稳舒适、后期养护简单等特点, 在高速公路桥梁建设中得到了广泛应用。一般情况下, 预应力混凝土连续刚构桥主跨不超过 200m, 突破该跨径后, 自重引起的弯矩占比不断增大, 结构承载效率显著降低, 技术风险增加, 且跨中梁体过度下挠问题突出, 易诱发腹板斜向裂缝和顶底板纵向裂缝等桥梁病害^[1]。

表 1 典型大跨刚构主跨下挠量

桥梁	主跨/m	下挠量/cm	挠跨比
Y 蟹沙大桥副桥	160	23.0	1/696
洛溪大桥	180	60.0	1/300
鹦鹉渡口桥	195	63.5	1/307
Stwset	220	20.0	1/1100
虎跳河大桥	225	27.3	1/824
江津长江大桥	240	31.7	1/757
黄石长江大桥	245	33.5	1/731
虎门铺航道桥	270	27.0	1/1000

若要进一步提升预应力混凝土连续刚构桥的跨越能力, 从结构体系上予以优化是一种直接且高效的方式。一种思路是采用钢-混结构, 即在跨中一定梁长范围内采用轻质高强的钢箱替代混凝土梁, 这样可有效减小恒载弯曲效应, 降低主梁根部弯矩, 提升跨越能力。但钢-混结构的缺点在于结合部位的构造与受力较为复杂, 工程造价增加。

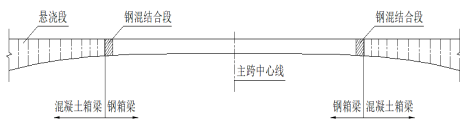


图 1 钢-混结构体系示意图

另一种思路是, 借鉴拱桥传力模式, 形成拱梁组合受力体系, 即空腹式连续刚构桥。预应力混凝土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^[2]。空腹段上下弦与桥墩形成闭环三角区, 上弦为预应力混凝土偏心受拉构件, 下弦和桥墩为混凝土偏心受压构件。该体系可以充分发挥混凝土抗压强度高的优势, 挖空的三角区可有效减小跨中实腹段长度、节省材料、降低自重, 提高结构承载效率, 从而实现跨越能力的提升。

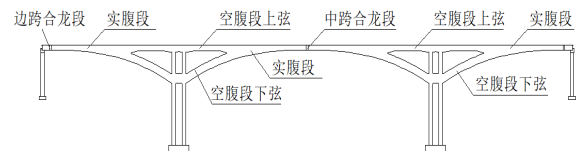


图 2 空腹式连续刚构结构体系示意图

2 工程实例

2.1 项目概况

六枝特大桥位于构造侵蚀-溶蚀中山地貌区, 地震动峰值加速度为 0.10g, 设计地震分组为第二组, 地震动反应谱特征周期为 0.40s。主桥横跨北北西的老鸦河谷, 河谷呈 U 字形, 河床宽度在 50m ~ 70m, 两岸均未阶地, 流量暴涨暴落, 属典型山区峡谷河流特征, 不具备通航条件。两岸谷坡地形较陡, 呈 35 ~ 65° 自然坡角。

主桥上构采用预应力混凝土空腹式连续刚构箱梁, 桥跨布置为 166m+3×320m+166m, 单幅桥宽 16.55m。

6~9 号主墩采用变截面空心双肢薄壁墩, 5 号过渡墩采用变截面空心薄壁墩、10 号过渡墩采用等截面空心薄壁墩, 桩基础均采用钻孔灌注桩^[3], 总体布置如下。

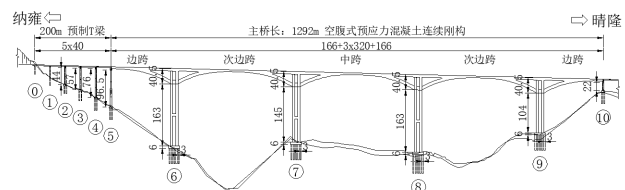


图 3 主桥桥型总体布置图 (m)

2.2 结构设计

主梁采用 C60 混凝土，墩顶处高 40.5m，跨中处高 5.0m，底缘线采用 2.5 次抛物线。下弦斜腿部分为箱型等截面，梁高 8.0m，宽 8.5m，顶板厚 0.8m，底板厚 1.0m，腹板厚 0.95m。上弦采用单箱单室截面，标准断面梁高 6.5m，两侧悬臂长 4.025m，悬臂端部厚 0.2m，根部 0.80m，顶板厚 0.32m，底板厚 0.32m，腹板厚 0.95m；上弦设六个节段通过二次抛物线过渡到梁高 8m，与下部斜腿交汇形成整体。

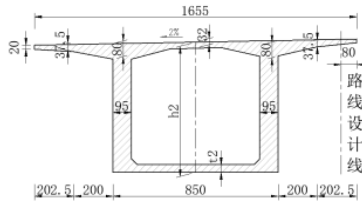


图 4 空腹段上弦断面 (cm)

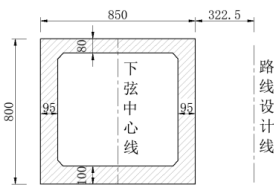


图 5 空腹段下弦断面 (cm)

主桥上部结构采用三向预应力，按全预应力混凝土构件设计，全部采用 ϕ s15.2 的钢绞线，搭配金属波纹管。

主墩采用 C60 混凝土，墩高分别为 163m、145m、163m 和 106 (91) m，变截面空心双肢薄壁墩，顺桥向 6m，壁厚 1.0m，横桥向由 9.1m 按 1% 坡度变宽至墩底，壁厚 1.25m。

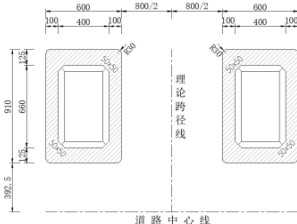


图 6 主墩标准断面 (cm)

2.3 主要计算结果

利用 MIDAS 建模，采用平面杆系有限元计算方法对全桥结构进行动静力验算。对于主桥墩柱、箱梁、斜腿、临时塔等，采用梁单元模拟，临时扣索则采用桁杆单元模拟，离散后的空间模型如图 7 所示。

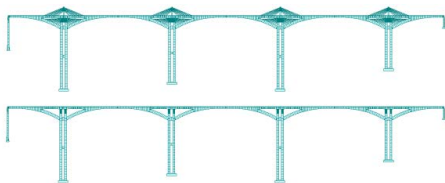


图 7 施工和成桥状态下离散模型

主要计算结果如下：

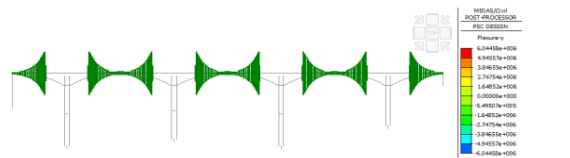
(1) 实腹段箱梁正截面抗弯、斜截面抗剪承载力，以及空腹段上弦偏心受拉、下弦偏心受压承载力均满足要求。

(2) 频遇组合下，实腹段箱梁、上弦和下弦均未出现拉应力，正截面抗裂验算满足要求。主梁最大主拉应力 0.026MPa，斜截面抗裂符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG 3362-2018 中 $\sigma_{tp} \leq 0.4f_{tk}=1.14\text{MPa}$ 规定。

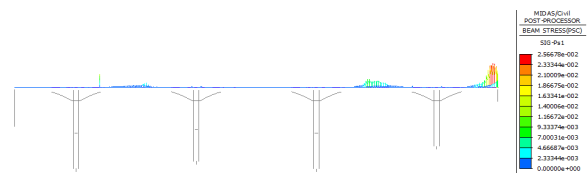
(3) 标准值组合下，实腹段箱梁和上弦上缘最大压应力为 -18.25MPa，下缘最大压应力为 -16.05MPa，满足规范规定的 $\sigma_{kc} + \sigma_{pt} \leq 0.5f_{ck}=19.25\text{MPa}$ 要求。实腹段箱梁和上弦最大主压应力为 -18.25MPa，符合规范 $\sigma_{cp} \leq 0.6f_{ck}=23.1\text{MPa}$ 的规定。

(4) 主跨活载 (汽车) 频遇值产生最大竖向向下位移为 6.31cm，考虑长期增长系数 1.4 后位移为 8.83cm， $\delta/L = 1/3622 < 1/600$ ，刚度验算满足要求。

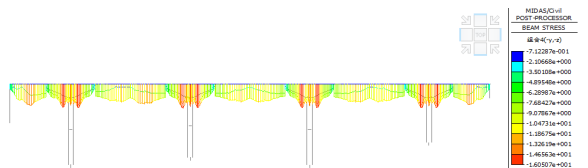
(5) 主墩偏心受压承载能力满足要求，频遇组合下，最大裂缝宽度 0.167mm，小于规范限制 0.2mm。



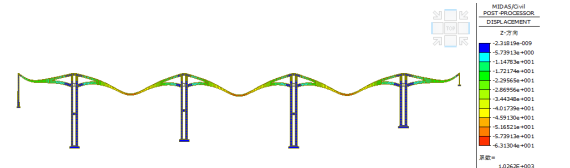
a. 实腹段箱梁抗弯承载力包络 (kN·m)



b. 频遇组合主拉应力包络 (MPa)



c. 标准组合主梁下缘应力包络 (MPa)



d. 活载作用下主桥挠度值 (mm)

图 8 内力、应力及挠度验算图

3 临时索张力设置与拆除时机

大桥三角区采用双层挂篮双层扣挂法施工，即在主墩墩顶设置临时钢索塔，利用上弦挂篮悬浇上弦梁段，

张拉临时拉索；利用下弦斜向行走挂篮浇筑下弦梁段，张拉临时扣索；并保持上弦滞后下弦 2 个施工节段，直至汇合段^[4]。

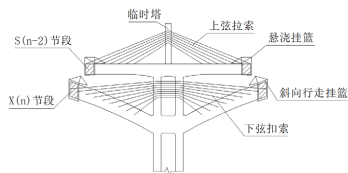


图 9 三角区施工示意

该施工方法优点在于上下弦施工相对独立，工程质量易控制，施工风险小，工期短。其施工控制的关键点在于对下弦扣索与上弦拉索张拉力的确定，以及二者拆除时机^[5]。

通过建模分析，发现施工阶段主梁最大拉、压应力均出现在空腹段三角区，下弦根部和交汇处截面下缘容易出现较大拉应力，而上弦 1#~2# 节段则易出现较大压应力，下图显示了在不同扣索力和拉索力下三角区的最大应力值变化趋势，压力取负值，拉力取正值。

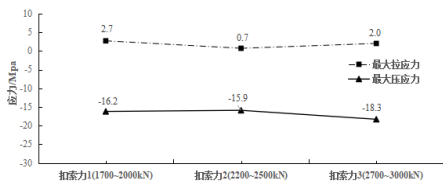


图 10 施工阶段下弦索力对三角区应力影响

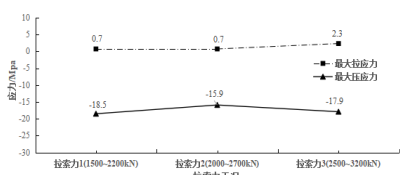


图 11 施工阶段上弦索力对三角区应力影响

可见临时扣索（拉索）张拉力对空腹段三角区受力影响很大。扣索（拉索）与斜拉桥的斜拉索有相似之处，都可以通过调整索力改善关键位置结构受力，不同之处在于，空腹式刚构桥结构自重和刚度较大，临时扣索（拉索）可调节内力幅值有限，数据显示有效影响范围仅限于三角区，对于汇合段之外的实腹段内力及变形影响非常小。

因此，确定扣索（拉索）张拉力的原则应该是保证施工时三角区的稳定性以及上下弦拉、压应力不超过规范限值。六枝河特大桥下弦扣索（X1~X13）索力范围在 2200~2500kN，上弦拉索（S1~S12）索力范围在 2000~2700kN，施工阶段最大拉应力为 0.7MPa，最大压应力为 -15.9MPa，稳定系数 9.0，满足规范要求。

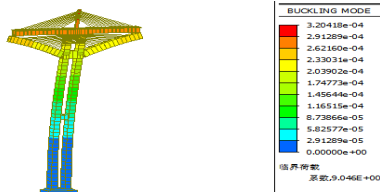


图 12 施工阶段三角区一阶屈曲模态

针对上弦拉索拆除时机问题，共设五个工况进行研究分析，即分别考虑在汇合段外第 15#、20#、25#、30#、35# 节段予以拆除，相关数据详见表 2，压力取负值，拉力取正值，挠度向上为正，向下为负。

表 2 不同工况主梁应力及变形 (MPa, mm)

拆除时机		15#	20#	25#	30#	35#
施工阶段	最大拉应力	3.4	3.4	3	1.3	1
	最大压应力	-15.7	-15.8	-15.8	-15.9	-17.7
运营阶段	最大拉应力	0.2	0	-0.2	-0.2	-0.2
	最大压应力	-18.3	-18.3	-18.3	-18.3	-18.3
成桥状态	中跨跨中挠度	80.0	79.9	79.7	79.5	79.2
	次边跨跨中挠度	95.5	95.4	95.2	95.0	94.6
	边跨跨中挠度	26.6	26.6	26.5	26.4	26.1

研究结果表明：

(1) 拉索拆除的时机对运营状态下结构受力和变形影响较小，对施工阶段的影响较大。

(2) 在施工阶段下，随着拆除时间推迟，三角区拉应力逐渐由 3.4MPa 减小到 1.0MPa，而压应力在 30# 节段以前，并无明显变化。同时注意到，施工阶段最大拉应力出现在交汇处下缘，最大压应力出现在上弦 1#~2# 节段上缘或下缘。

(3) 在运营阶段下，随着拆除时间推迟，结构最大拉应力由 0.2MPa 逐渐减小为 -0.2MPa 压应力，且 25# 节段后保持不变，最大拉应力出现在次边跨 31# 节段上缘；最大压应力始终为 -18.3MPa，出现在次边跨 25# 节段下缘。

(4) 成桥状态下，中跨、次边跨和边跨的跨中挠度变化幅值较小。

可见，延后拆除上弦拉索对结构受力是有利的，但考虑到施工过程中，施工设备、材料堆放、人员通行等往往受到上弦拉索和临时塔的限制，又需要尽可能早地将其拆除。因此，确定上弦拉索拆除时机的原则应该是保证施工时三角区的应力水平合理，同时又不影响后续施工，达到二者平衡。六枝河特大桥最后确定为 30# 节段施工完成后拆除上弦拉索及临时塔。

下弦临时扣索对结构受力和稳定有利，且不影响悬浇段施工，因此考虑在合龙完成之后再予以拆除。

4 合龙顺序分析

大跨径多孔空腹式连续刚构桥的合龙顺序在整个施工过程中占有重要地位，因合龙顺序的不同，结构在混凝土收缩徐变和温度效应的作用下会产生较大的内力差别，且成桥线形与之关联较大。六枝特大桥按照顺序向可依次划分为边跨、次边跨和中跨，详见图 3。

根据国内外相关研究，并结合现有的常规施工方案，本桥共设定三种合龙工况进行分析^[6-7]，见表 3。

表3 合龙工况划分

工况名称	合龙顺序
工况一	边跨 → 次边跨 → 中跨
工况二	次边跨 → 边跨 → 中跨
工况三	中跨 → 次边跨 → 边跨

4.1 成桥应力分析

通过建模计算，将具有代表意义的截面上下缘应力汇总如下，压力取负值。

表4 成桥状态下主梁应力 (MPa)

位置	工况一	工况二	工况三	
最大压应力	-15.53	-15.49	-15.51	
边跨跨中	顶缘	-9.58	-9.62	-9.66
	底缘	-8.30	-8.25	-8.21
6#墩顶	顶缘	-8.18	-8.17	-8.18
	底缘	-13.70	-13.70	-13.70
次边跨跨中	顶缘	-5.08	-5.01	-5.01
	底缘	-7.04	-7.08	-7.10
7#墩顶	顶缘	-8.08	-8.09	-8.08
	底缘	-13.70	-13.70	-13.70
中跨跨中	顶缘	-4.97	-4.97	-4.96
	底缘	-7.01	-7.01	-6.92

结果表明：

主梁应力受合龙顺序影响较小；在三种合龙工况下，结构均处于全截面受压状态，压应力储备良好。

4.2 成桥线形分析

将成桥状态下，三种工况对应的主梁挠度（仅考虑恒载）汇总，如图13所示，挠度向上取正，向下取负。

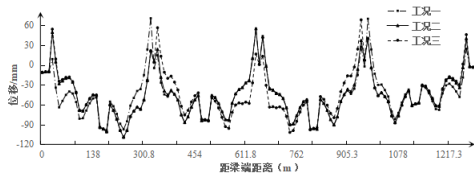


图13 成桥状态下主桥挠度值

可见三种工况下，主梁挠度变化规律大致相同，即跨中大，墩顶小，符合基本力学常识。但合龙段挠度值存在较大差异，找出不同合龙顺序下合龙段最大挠度值，见表5。

表5 成桥状态下合龙段最大挠度值 (mm)

位置	工况一	工况二	工况三
边跨合龙段	8.9	49.3	54.1
次边跨合龙段	63.0	40.2	69.2
中跨跨中	55.0	54.8	16.4

数据显示：

合龙顺序对合龙段累积线形挠度有较大影响，工况三的绝对挠度值最大，工况二挠度值较为平均，工况一边跨合龙段挠度值最小。

最早施工的合龙段挠度值也相应最小，这是由于先合龙的桥跨在后续施工过程中可以发生变形而抵消掉一部分预应力等引起的上拱。

另一方面，由于合龙顺序影响成桥线形，因此施工阶段各节段的立模标高也需随之调整，设置相应的预拱度，减小合龙段两侧的标高差，确保主桥顺利合龙。

由表6数据可知，工况一合龙段两侧的位移差值相对较小，最有利于施工控制。

表6 合龙段两侧位移差值 (mm)

位置	工况一	工况二	工况三
边跨合龙段	18.6	59.6	64.6
次边跨合龙段	42.3	2.4	34.5
中跨跨中	11.4	12.4	3.3

综上，通过对比三种合龙顺序下结构的应力和挠度，六枝特大桥最终合龙方案确定为边跨一次边跨-中跨，该方案结构受力合理，线形较好，施工控制最为有利。施工时若因为其他原因更改合龙方案，则需要相应调整合龙段预应力、顶推力和预拱度，以保证大桥受力和线形满足设计要求。

5 结语

本文依托六枝特大桥实际工程案例，对大跨径多孔空腹式连续刚构桥的结构设计和施工等关键技术问题进行研究和探索。文中提供了详细的设计和计算数据，为同类型桥梁的关键构造设计、大桥施工控制提供了很好的借鉴，一定程度上推动了这种在200~400m跨径极具竞争力的新型桥梁结构的应用与发展。

参考文献：

- [1] 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):71-76.
- [2] 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.
- [3] 易蓓, 宗昕. 六枝特大桥总体设计[J]. 世界桥梁, 2022,50(4):18-24.
- [4] 韩洪举, 黄坤全. 290m 空腹式刚构桥三角区施工技术[J]. 桥梁建设, 2011(3):81-84.
- [5] 汪金育, 彭元诚, 颜艳强. 北盘江特大桥施工临时扣索索力优化研究[J]. 世界桥梁, 2013,41(5):63-66.
- [6] 何春博. 合龙顺序对连续梁桥成桥状态影响分析[J]. 内蒙古公路与运输, 2021(5):30-32,36.
- [7] 何剑. 多跨连续刚构桥梁合龙顺序分析[J]. 四川建筑, 2022,42(5):139-140,144.