

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.02.019

大兴机场线共构结构总体设计研究

张付宾, 李圣强

(中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京市 100055)

摘要: 轨道交通大兴机场线高架区间长 16.2 km, 其中 7.9 km 为路-轨共构结构。共构结构体系为四层立体布置, 最上层为大兴机场高速公路, 中间层为大兴国际机场线, 地面层为团河路, 布置于桥墩外侧, 两桥墩承台基础之间, 地面以下设置综合管廊。根据高速公路设计要求, 出入共构段线路布置和立交匝道布置的需要, 共构结构桥墩分为双墩柱、三墩柱和四墩柱三种形式。共构结构体系可以节约土地, 提高土地综合利用率。以大兴机场线共构段设计为例, 介绍共构结构体系的确定、共构断面的确定、设计规范选取, 对共构结构桥墩(双墩柱和四墩柱)形式进行研究。

关键词: 共构体系; 共构断面; 设计规范; 结构研究; 共构桥墩

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)02-0068-05

1 概述

共构结构体系一般为路-轨共构, 类似于铁路公铁两用桥^[1], 公路在上, 轨道交通在下。目前国内有两条轨道交通采用共构结构, 分别为上海轨道交通 1 号线与共和新路一体化工程^[2-5](2003 年建成)、宁波轨道交通 4 号线与北环路一体化工程^[6-10](2014 年建成)。桥墩均布置于道路的中央绿化带内, 两桥墩之间不设置地面交通, 上层公路均为双向六车道。

大兴国际机场线高架区间全长 16.2 km, K16+216.13~K24+107.42 段共计 7.9 km 范围内为大兴机场高速公路、大兴机场线、团河路和地下综合管廊四层立体敷设段落, 断面布置如图 1 所示。共构体系桥墩为“开”字形结构, 分为上、中、下三层。上层供高速公路使用, 为双向八车道。中层供大兴机场线使用, 设计时速 160 km。地面层桥墩外侧为团河路, 一级公路, 设计时速 80 km, 在两桥墩承台基础之间、地面之下布置有综合管廊。

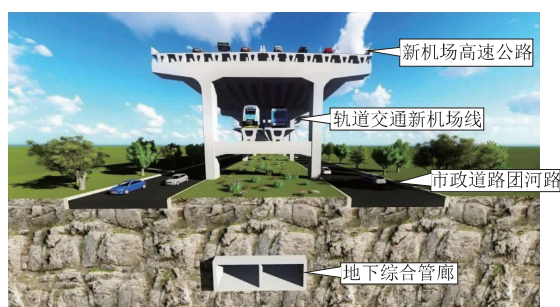


图 1 四层立体共构体系断面图

收稿日期: 2021-04-21

作者简介: 张付宾(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计研究工作。

在高速公路与地面交通互通区域, 适应高速公路匝道布置的需要, 设置四墩柱共构结构。保持两墩柱结构尺寸不变, 墩柱两侧各设上横梁和墩柱。

2 共构结构体系的确定

2.1 方案研究

本工程在下穿京沪高铁后为大兴机场线、高速公路、京雄高铁共走廊段, 三线横断面布置影响建设工期、用地、工程投资等, 需进行方案比选, 确定推荐方案。宁波北环路曾就道路和轨道交通工程的布置形式进行分析研究^[6], 这里将其作为本方案研究参照之一。

共走廊段重点研究三个方案, 分别为:

方案一: 平铺方案, 大兴机场线位于机场高速西侧, 如图 2 所示。

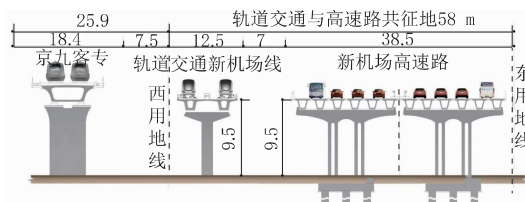


图 2 方案一(单位:m)

方案二: 大兴机场线位于高速公路路中, 如图 3 所示。

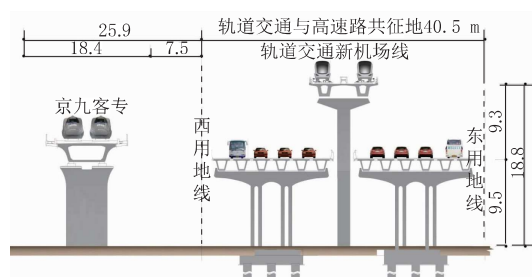


图 3 方案二(单位:m)

方案三:大兴机场线与高速公路共构,如图 4 所示。

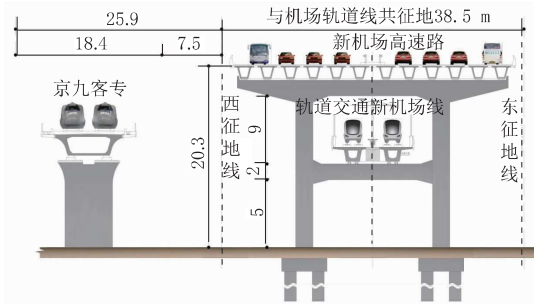


图 4 方案三(单位:m)

方案四:大兴机场线与高速公路、高铁共构,如图 5 所示。

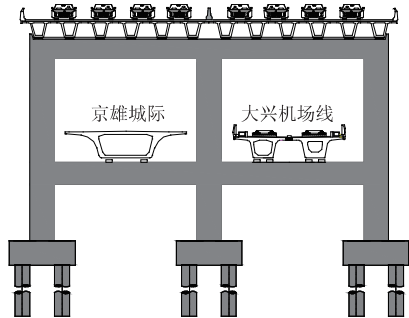


图 5 方案四

方案四对应大兴机场线与高速公路、京雄高铁共结构。机场高速位于上层,大兴机场线和京雄高铁平行布置位于中间层。本方案充分利用了高速公路投影用地,占地最省。

方案四虽然占地最省,但是将轨道交通、铁路、高速公路放在一个结构上,存在协调难度大、景观效果差、后期运营维护困难等特点,鉴于本项目的特点,本方案不列入比选范围。

2.2 方案比选

上述前三个方案,高铁工程独立,且与其他工程距离保持不变。主要研究大兴机场线和高速公路工程的布置和相互关系。上述三种方案均有可实施性,都能满足功能需要,在占地、工程造价、工期等方面各有优缺点。根据实施规划,以 11.1 km 长线路结合项目特点进行综合比选。

2.2.1 工程占地

由表 1 可以看出,方案三征地面积最多可节省 316.35 hm²,征地费最多节省 4.745 亿元。

表 1 共走廊段工程占地比较

项目	桥梁投影宽 /m	占地面积 /hm ²	征地费 /亿元
方案一(路侧)	56.0	316.35	4.745
方案二(路中)	40.5	58.28	0.874
方案三(共构)	37.0	—	—

注:征地费按照 150 万 /hm² 考虑,征地费是和方案三对比后结果。

2.2.2 工程投资

由表 2 可以看出,方案三(共构方案)和方案一(平铺方案)在工程建设费上差异较大,在 11.1 km 的共构段非共构方案比共构方案工程建设费节省 3.18 亿元。方案三根据新机场高速公路的需要,与地面道路立交互通,桥面加宽,共构墩的宽度随之加大。方案三高速公路立交区域投资需增加 1.5 亿元。

表 2 工程投资比较

项目	桥梁投影宽 /m	工程建设费 /亿元	工程建设费对比 /亿元
方案一(路侧)	56.0	36.82	-3.09
方案二(路中)	40.5	37.26	-2.65
方案三(共构)	37.0	39.91	0.00

注:工程建设费对比数值是指和方案三对比结果。

2.2.3 建设工期比较

方案一施工时互不影响,施工方便。

方案二施工时会相互干扰,需做好组织,协调要求和难度较大。

方案三施工时高速公路梁体需桥墩施工完方可施工,高速公路和轨道交通梁体架设需做好协调,施工时序较为明确。

2.3 方案确定

方案三在占地方面优势最大,征用土地费用可节省 4.745 亿元。在工程投资方面,共构结构多花费 4.68 亿元。建设工期方面,方案三比其他方案慢 2~3 个月。

采用方案三可显著节约土地资源,土地综合利用率最大化,能够带来更好的社会效益和经济效益。建设后期,共走廊范围内布置综合管廊。如果采用方案一或方案二,均需重新征用土地。方案三可以将综合管廊布置于共构结构投影范围内,无须重新征地。

综合以上分析研究,部分共走廊段采用路-轨共构方案。

3 共构结构方案研究

3.1 共构结构断面确定

共构结构在地面以上一般为双层结构,公路交通在上,轨道交通在下。根据公路和地面绿化带宽度,断面形式为“Y”字形和“H”字形^[5-6]。

上海共和新路高架桥墩采用“Y”字形,公路为双向六车道,宽 25.5 m。下墩柱外侧宽度为 9.5 m,内侧净宽为 6.9 m。上墩柱桥墩采用 1:3 坡度,上下墩柱截面尺寸保持统一。

宁波轨道交通 4 号线与北环快速路共构结构桥墩采用“H”字形。北环快速路为双向六车道,宽 25 m。

墩柱外侧宽度为 12.0 m,内侧净宽为 9.1 m。上下墩柱截面尺寸保持统一。

“Y”字形下墩柱外侧宽度更小,对地面绿化带宽度要求较低。“H”字形下墩柱外侧宽度较大,对绿化带宽度要求高,但对上层公路纵、平面变化适应性好。

本线共构结构对应高速公路为双向八车道,宽 38 m。轨道交通桥面宽度为 11.4 m,总体设计阶段考虑在两墩柱之间设置规划团河路,一级公路,双向四车道,净宽需 17.0 m。共构段占 7.9 km,轨道交通和高速公路在共构段南北两侧分离,结构形式需适应高速公路纵段和平面的变化。

综合以上因素,大兴机场线共构段采用“H”(开)字形断面。

3.2 设计规范研究选用

共构结构分别承担着高速公路和轨道交通项目,分别对应不同的设计规范。

高速公路梁采用预制混凝土小箱梁,简支结构,桥面连续,汽车荷载采用公路—I级。新机场线采用预制箱梁,简支结构;活载采用市域列车活载,8 辆编组。

高速公路和轨道交通设计分别对应《公路桥涵设计通用规范》(以下简称“公规”)和《铁路桥涵设计规范》(以下简称“铁规”)。前者采用基于“极限状态设计理论”的“荷载系数法”的设计方法^[3];后者按“容许应力法”设计。两种设计理论有着差异,对于共同承受公路桥梁及地铁高架荷载的下立柱及基础,有必要综合考虑安全性与经济性,对两种设计方法加以研究、分析比对。

按照不同工程对应的结构位置,各构件采用的规范见表 3。

表 3 设计规范采用	
主要构件	采用规范
高速公路小箱梁	
上盖梁	公规等相关公路规范
上层墩柱	
轨道交通箱梁	《地铁设计规范》(GB 50157—2013)、《城际铁路设计规范》(TB 10623—2014)等相关铁路规范
下盖梁	
下层墩柱	
承台	分别采用公规、铁规等相关规范计算
桩基础	
抗震设计	1.按照《城市轨道交通结构抗震设计规范》,E1、E2 分别取用地震安评报告 100 a 超越概率 63%及 50 a 超越概率 10%的反应谱函数计算; 2.按照《公路工程抗震设计规范》,E1、E2 取用 50 a 超越概率 10%的反应谱函数计算,并选择相应抗震重要性修正系数

对于下层墩柱、承台和桩基础,按照公规和铁规分别进行计算分析。

按照公规计算下部结构,即按照极限状态法设计。其基本思路是将列车活载(一种特殊车辆与铁规中的附加力)作为可变作用考虑,铁规中的特殊荷载作为偶然作用考虑。其荷载组合分项系数按照规范选取。

按照铁规计算下部结构,即按容许应力法设计。其基本思路是将公路活载作为主力活载考虑。

分别对应不同荷载组合和系数的选取,最终计算结果见表 4。

表 4 主要计算结果			
主要计算结果分项	按公规	按铁规	附注
下墩柱截面配筋率	1.55%	1.67%	由地震力控制墩底截面配筋
上墩柱截面配筋率	1.23%	1.32%	地震力控制墩顶横向、墩底纵向配筋
E1 地震墩底横向弯矩/(kN·m)	12 153	12 855	公规抗震重要性系数取 0.5
E1 地震墩底纵向弯矩/(kN·m)	19 115	20 244	
桥墩纵向刚度(横梁跨中)/(kN·cm ⁻¹)		613	满足城际铁路规范 265 kN/cm 的限值要求
活载最大竖向位移(横梁跨中)/mm		2.5	满足城际铁路规范 L/1 600 的限值要求
顺桥向最大位移(横梁跨中)/mm		14.5	由(汽车制动力+列车制动力+纵向风荷载+温度作用)控制
横桥向最大位移(横梁跨中)/mm		0.58	由(汽车离心力+列车离心力+横向摇摆力+横向风荷载)控制

计算表明,按铁规计算所得配筋率比公规高约 7%,地震力大约 6%。结构的刚度、位移均满足现行规范要求。

通过对比分析可知,按铁规计算所得配筋率比公规高约 7%,因此公路梁、上盖梁、上层墩柱采用公规设计,轨道梁、下盖梁、下层墩柱采用铁规设计。该设计方案经济可行。

抗震设计推荐采用《城市轨道交通结构抗震设计规范》计算。

4 双墩柱结构研究

4.1 截面确定

双墩柱共构桥墩结构截面由地面交通的宽度和净空,轨道交通限界、梁宽,高速公路宽度共同决定。

共构方案确定后,规划团河路位于地面层两墩柱之间,双向四车道,考虑道路宽度和安全距离,净宽 17 m,净空 5.5 m。建设过程中,道路移至墩柱外

侧,墩柱间宽度保持不变,作为综合管廊通道。

轨道交通位于中间层,桥宽 11.4 m(包括栏板),支座+支撑垫石高 0.5 m,梁高 2.0 m,轨道高度 0.6 m,建筑限界 7.25 m,净空按 10.5 m 考虑。

高速公路设计为双向八车道,上横梁宽度为 36.5 m。

根据受力需要,桥墩尺寸横向宽度为 1.8 m,中横梁高度为 2.2 m,上横梁高为 2.505 m(最高点)。由此,标准双墩柱共构结构的截面尺寸确定:高 22.5 m(最小),顶宽 36.5 m,底宽 20.6 m,中横梁高 9.5 m(最小)。

4.2 上横梁截面

共构桥墩上横梁宽 36.5 m,中间向两侧设置横向排水坡,坡度为 2%,截面最高为 2.505 m,纵向宽度为 2.4 m。悬臂长 7.95 m,变高度,由根部截面高 2.65 m 变化为最外侧截面高 1.5 m。悬臂和墩柱采用圆弧过渡。上横梁对应 24 片公路简支小箱梁和支座。采用预应力混凝土结构,混凝土等级为 C50。上横梁体量较大,考虑实心 and 空心两种方案进行比选。

空心方案考虑以下因素:

(1)公路桥梁垫石、混凝土挡块的钢筋预埋和抗震挡块锚栓预埋长度。

(2)横梁预应力钢束的布置。

预应力钢束分为三排,每排 4 根。为满足钢筋长度和预应力钢束布置要求,空心横断面如图 6 所示。

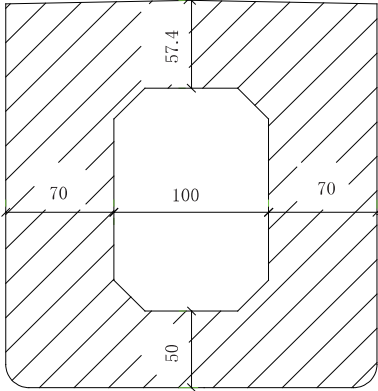


图 6 上横梁空心方案

空心设置范围为上横梁两悬臂根部之间。

空心和实心方案对比情况见表 5。

采用空心截面可以节省 10%混凝土用量,上部公路梁恒载反力为 2 230.7 t,上横梁自重占比为 20.4%,空心截面自重节省重量占比为 2.6%,占总荷载(恒载+活载)的 2%。在成桥状态下,上横梁跨中截面上下缘压应力分别相差 1.0 MPa 和 1.3 MPa。

采用空心截面可以节省部分混凝土,减少自重,

表 5 空心 and 实心方案对比

方案	混凝土 /m³	重量 /t	最大应力 /MPa	
			上缘	下缘
方案一(实心)	220.0	571.6	-3.0	-6.1
方案二(空心)	191.7	498.4	-4.0	-7.4

在相同的预应力钢束作用下,空心方案有更好的应力储备。但增加施工工序,增加模板,降低工效,综合效益不显著。故最终采用方案一(实心方案)。

4.3 施工方案

共构桥墩高至少 22.5 m,上横梁重量 571.6 t,桥墩高,体量大。上海共和新路曾对施工方案进行分析研究^[4,10]。结合本工程特点对施工方案进行了研究和比选:装配式和满堂支架+钢管支架现浇。

共构结构上横梁进行装配式方案研究,如图 7 所示,墩顶上横梁段长 17.25 m 采用预制结构,为不对称截面。预制段吊重 276 t,不平衡弯矩为 514.0 kN·m。桥墩最低为 22.5 m,需 500 t 以上履带吊设备,对设备要求较高,设备供应与工期压力存在较大的矛盾,经济性没有优势。

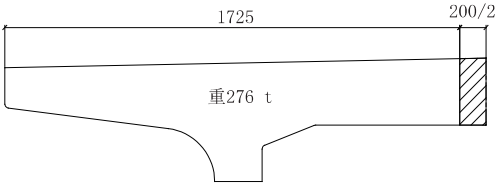


图 7 共构结构上横梁装配式方案(单位:cm)

支架现浇是比较成熟的施工方案,中横梁高 8.5 m 左右,采用满堂支架。上横梁采用钢管立柱+贝雷梁,在桥墩内外两侧设两排钢管立柱,钢管顶设贝雷梁(见图 8)。本方案工艺成熟,搭设方便,施工灵活,安全可靠,对设备要求低,经济性较好,在经济性、安全性和适应性上有较大优势。

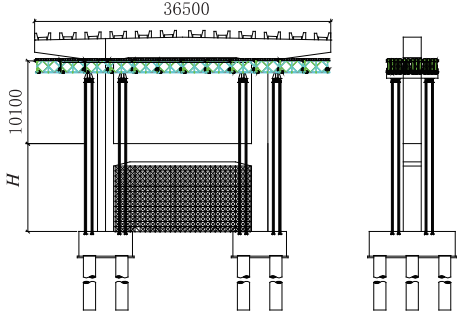


图 8 结构施工支架方案(单位:mm)

4.4 施工顺序对结构的影响

共构结构中横梁和上横梁采用预应力混凝土结构,预应力均采用二次张拉。受工期和现场施工条件影响,梁体分别采用架桥机架设和履带吊吊装方式。架梁作业方式和工序对结构带来不同的影响。

施工顺序一:下墩柱及中横梁施工完成后,张拉中横梁预应力,架设轨道梁,然后施工上墩柱及上横梁,架设公路梁。

施工顺序二:共构桥墩整体浇筑完成,部分张拉中横梁和上横梁预应力钢束后,进行梁体架设作业。

两种工序结构主要截面应力情况见表6。

表6 主要计算结果(成桥阶段)

工序	中横梁 /MPa		上横梁 /MPa		挠度 /mm	
	上缘	下缘	上缘	下缘	上横梁	中横梁
工序一	-8.7	-4.2	-5.3	-5.8	-8.5	-10.2
工序二	-8.5	-4.5	-5.0	-6.0	-8.4	-9.6

经计算分析表明,两种施工工序对中横梁、上横梁应力影响不大,横梁应力损失最大约0.3 MPa,工序二成桥后横梁竖向变形相对较小,中横梁恒载挠度最大相差0.6 mm。

5 四墩柱方案研究

四墩柱结构保持双墩柱结构型式、尺寸和墩间距不变,在团河路外侧增设一墩柱和上横梁,不设中横梁(见图9)。四墩柱上横梁最宽为58.5 m,墩高与双柱墩保持一致。

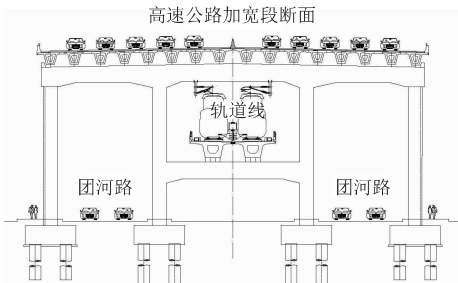


图9 四墩柱结构方案

本设计对最外侧两墩柱和横梁的连接方式进行研究,考虑两个方案:支座连接和墩梁固结。

支座连接是指在外侧墩柱顶设置横向活动支座。支座具有调高调平功能,墩柱和横梁通过支座连接。上横梁在温度力作用下横向伸缩不受约束,墩柱和上横梁之间不会产生附加内力。支座竖向的调高调平功能,可以解决由于基础不均匀沉降产生的附加内力,使得整个结构的受力特性更接近双墩柱结构,结构受力更加简洁。

墩梁固结是指将外侧墩柱和上横梁混凝土浇筑在一起,温度变化、基础沉降等均会影响整体结构内力,受力特性更为复杂。

针对上述两种方案进行计算分析,并对基础沉降和温度变化影响进行分析比较,计算结果见表7。

对比结果表明,基础不均匀变位工况下,两种方案

表7 计算结果对比

单位:MPa

工况	部位	支座连接	墩梁固结
基础沉降	上横梁上缘	-2.99/1.67	-2.76/1.56
	上横梁下缘	-1.67/3.00	-1.52/2.69
	墩顶	0.00	-2.71/1.68
温度力	上横梁上缘	0.00	0.99
	上横梁下缘	0.00	-1.06
	墩顶	0.00	1.81
成桥状态	上横梁上缘	-5.96	-6.72
	上横梁下缘	-9.45	-7.74
	墩顶	-2.17	-5.36

对上横梁上下缘应力影响不大,应力最大相差10.3%。受墩顶约束的影响,墩梁固结方案在墩顶产生最大为1.68 MPa拉应力。温度力作用下,墩梁固结方案中上横梁产生0.99 MPa拉应力,墩顶拉应力为1.81 MPa。成桥状态下,上横梁上下缘和墩顶为受压状态,上横梁最大压应力为9.45 MPa,墩顶最大压应力为5.36 MPa。

两种方案在各工况下,上横梁应力影响较小,墩梁固结方案在基础变位和温度力作用下,最大会产生2.67 MPa的压应力,可通过加强配筋等结构措施来减少影响。如采用支座连接方案,运营阶段会带来支座维护等工作,且对景观不利,故最终采用墩梁固结方案。

6 结 语

共构结构体系节约土地资源,充分发挥土地综合利用水平,本工程共构体系采用四层立体敷设,比以往承担了更多的功能,其应用在国内尚属首次。设计标准、工程体量、结构难度均在国内领先。

本工程还根据线路敷设情况设计四墩柱结构,共构体系的应用取得了良好的社会效益和经济效益。

参考文献:

[1] 刘俊锋,王为玉.郑州黄河公铁两用桥总体设计[J].铁道标准设计,2009(3):53-55.
[2] 俞加康.上海市共和新路高架工程设计介绍[J].上海建设科技,2001(4):10-12.
[3] 陈文艳,吴凤仙,鲍艳玲.上海共和新路一体化高架结构综合设计研究[J].地下工程与隧道,2007(2):6-11.
[4] 顾民杰,章建庆.上海市共和新路高架工程一体化高架桥墩施工设计[J].地下工程与隧道,2002(3):19-23.
[5] 罗建晖,龚慈中.共和新路高架的道路与桥梁工程设计[J].上海建设科技,2003(3):29-32.
[6] 袁胜强.宁波市北环快速路工程总体设计[J].上海公路,2012(1):4-9.

(下转第81页)

4 构造与预应力钢束布置应对措施

本工程属于 PPP 项目，具体设计时除按常规原则外，还须考虑：(1)满足工期进度要求；(2)设计方案与实际施工方案的匹配性；(3)便于后期施工方案调整不影响设计文件。

4.1 构造措施

根据转体方案确定单侧主梁转体段长为 87 m，按 4 m/3.75 m 长节段划分，便于后期施工单位根据实际情况确定现浇段，也为预应力钢束布置确定参考位置。

考虑预应力钢束仅锚固在大节段缝处无法满足结构受力要求，支架大节段现浇钢束锚固常采用箱梁内齿块或梁外齿槽，一般不采用梁外齿块。采用齿块方案增加结构自重；钢束尤其是腹板束存在竖弯和平弯，施工定位要求较高，预应力损失增大；齿块混凝土浇筑要求高；钢束张拉受箱内空间约束，操作不便。采用梁外设置齿槽能避免上述问题，但同时也存在底板齿槽影响支架的布置，须考虑张拉空间，对支架的设计和搭设要求较高，但相对齿块锚固形式仍有较大优势。本项目综合各方因素后，采用顶底板预留齿槽，结合腹板厚度，调整梗腋倒角保证锚下构造要求。

4.2 预应力钢束布置措施

本桥腹板束采用 15Φs15.2，均锚固至底板，在底板设置齿槽。顶板悬臂束采用 13Φs15.2，锚固至腹板齿槽处(见图 3)。顶底板合龙束采用齿块锚固。预应力钢束的布置方案充分利用钢束，避免采用钢束连接器，也方便设计时内力调整。除底板钢束外，与常规施工工艺一致，便于质量控制。整体浇筑完后一次张拉，一次落架。经计算，主梁承载能力极限状态、正常使用极限状态和施工阶段各项指标均满足规范^[2-3]要求，达到预设效果。实际施工张拉后，悬臂段的变形为 +23 mm，与设计值 +21 mm 基本一致，也验证此方案的可行性。

5 结 语

本桥是项目的关键节点，制约项目总工期，按大

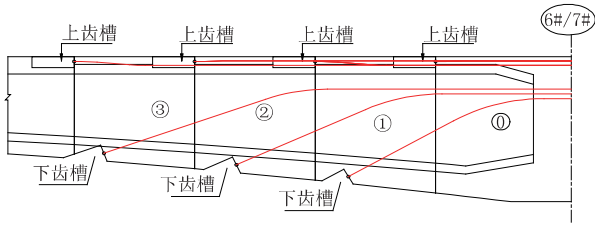


图 3 部分钢束及齿槽示意图

节段整体支架现浇设计，充分考虑项目的特点，悬臂钢束均采用齿槽锚固，达到预设要求。实际施工中，单侧转体段分为 0# 块、1#-3# 块、4#-6# 块、7#-10# 块 4 个长现浇段，保障了项目的顺利贯通，节约了工期。项目在无配重于 2019 年 6 月 19/20 日完成了转体(见图 4、图 5)，后续进行边中跨合龙。项目的顺利实施表明，在条件合适的情况下采用大节段整体支架现浇节约工程造价、加快施工进度，可为同类型桥梁提供类似实践经验。



图 4 转体前平面图



图 5 转体后平面图

参考文献：

[1] 张安林,孙东.大跨度连续箱梁大节段支架现浇设计研究[J].安徽建筑,2020(6):158-159.
[2] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
[3] JTG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].
[9] 周华.宁波市北环快速路与轨道交通一体化工程[J].交通与运输,2016(6):47-48.
[10] 杨培俊,叶辉.盖梁无落地支架施工技术的应用[J].城市道桥与防洪,2004(6):86-91.

(上接第 72 页)

[7] 包海峰.宁波轨道交通 4 号线高架区间总体设计[J].城市道桥与防洪,2015(7):101-105.
[8] 邵晓东.一体化双层高架桥梁结构选型及刚构小箱梁研究[J].城市道桥与防洪,2015(7):85-88.