

城市节段预制拼装箱梁桥结构设计的技术特点与创新

吴东升

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092)

摘要:介绍了城市桥梁采用分箱式主梁、整体大悬挑横梁墩梁固结的新型节段预制拼装箱梁结构形式。针对城市预制拼装桥梁的特点,从结构体系、结构构造及施工方法等方面系统地提出了分箱室节段箱梁、半固结结构体系、基于施工效率的混合配束预应力体系、预应力转向锚固构造集成设计、横断面标准化、剪力键标准化、耐久性设计以及双幅同步架设施工等技术措施,深入研究多主梁空间受力性能,探索城市高架桥梁新型节段预制拼装箱梁结构设计的标准化,详细论述了设计所考虑的技术要点与创新。

关键词:节段预制拼装箱梁;分箱式主梁;墩梁固结;多幅同步架设;桥梁结构设计

1 工程概况

洪都大道高架桥为南昌市一环线的东环,全长约7.6 km。高架桥为双向六车道,城—A级荷载,设计速度为80 km/h。

高架桥采用节段预制拼装箱梁结构,箱梁标准横断面布置见图1,桥梁面积约270 000 m²,预制节段约6 500榀。

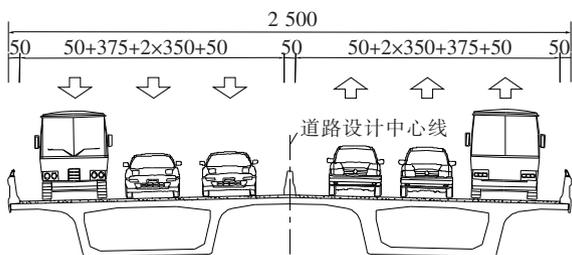


图1 标准横断面布置图(单位:cm)

虽然节段预制拼装箱梁结构在公路和轨道交通桥梁上有所应用,但在量大面广的城市桥梁中尚未得到推广,作为大规模采用节段预制拼装箱梁的城市桥梁,需要通过精细化设计,达到技术先进、施工便捷、造价经济、结构耐久的目标,以充分展现节段预制拼装箱梁的技术与经济竞争力。

2 结构设计

2.1 总体设计及布置

主线高架桥标准段桥宽25 m,标准跨径35 m,非标准跨径为30~40 m,2~4跨一联,逐跨拼装施工;路口大跨采用50 m或60 m主跨大跨连续梁,悬臂拼装施工。最小平面曲线半径为383.75 m,最大纵坡为3%。

2.2 横断面形式

城市高架桥(桥宽25 m)常用横断面形式见图2。

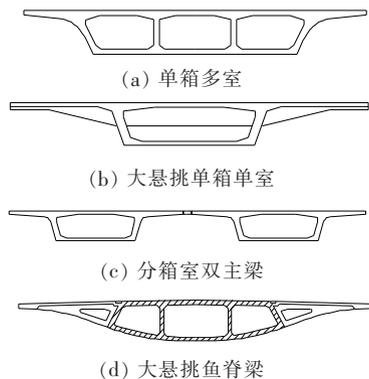


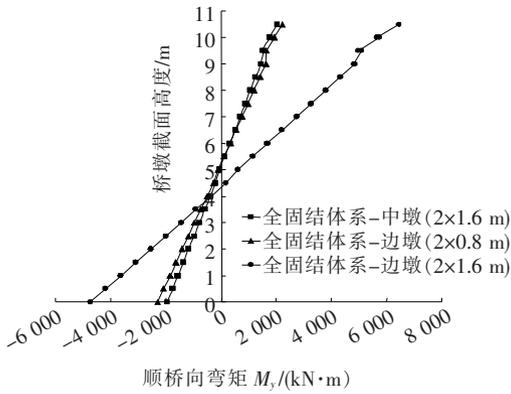
图2 箱梁横断面形式

国内外双向六车道桥梁基本上采用整幅式单箱多室断面(施工难度大、工效低)或分离式双幅桥梁(占地大、适用郊外)。施工快速化是预制拼装结构的核心优

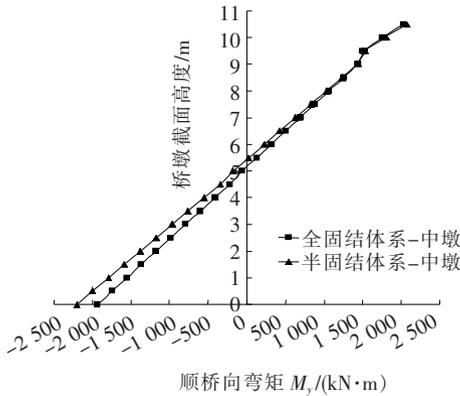
收稿日期:2020-04-04

基金项目:上海建工集团重点科研基金项目(编号:16YJKF-21);上海市政总院科研基金项目(编号:K2017J011);上海市政总院启明星计划项目(编号:K2016K102)

作者简介:吴东升,男,硕士,高级工程师, E-mail:wudongsheng@smedi.com



(a) 全固结中、边墩内力



(b) 全、半固结中墩内力

图 6 两种固结体系的桥墩内力图

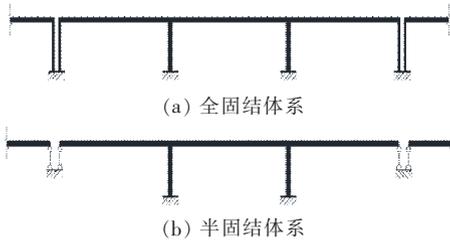


图 7 结构体系示意图

分发挥体外预应力施工效率高、体内束承载力效率高的各自优点。其关键在于体内、外预应力配置比例的合理确定,经研究提出具体配置原则为:架桥机拼装过程仅张拉体外束,满足施工阶段受力需求;非控制工序(架桥机过孔后)再张拉剩余体内钢束,满足二期恒载和运营阶段受力需求。

基于上述原则,最终确定的体内和体外预应力的配置比为 4 : 6。

具体为每个箱室配置 6 束 $\phi^s 15.2-31$ 和 $\phi^s 15.2-37$ 体外束;中墩处配置 2 束 $\phi^s 15.2-17$ 形心体外束;底板配置 6 束 $\phi^s 15.2-12$ 和 $\phi^s 15.2-15$ 体内束;墩顶配置 8 束 $\phi^s 15.2-12$ 体内束(图 8);纵向体外预

应力在跨中设置限位块,提高极限承载力。按桥面面积统计,体外钢束指标约为 20.4 kg/m^2 ,体内钢束指标约为 12.9 kg/m^2 。

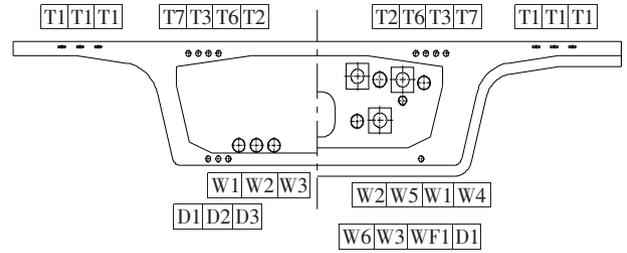


图 8 钢束布置横断面图

2.6 关键构造

2.6.1 锚固转向构造

预应力锚块和转向块增加箱梁预制难度、降低工效。较以往锚块和转向块分散设置不同,从提高工效出发,该文提出一种新的思路,将锚块和转向块集成设计,此方法可将标准节段数量提高 50%。具体实现方式为:在体外束转向块处增设体内束锚固齿块,形成集钢束转向与锚固构造于一体的集成式转向构造(图 9)。

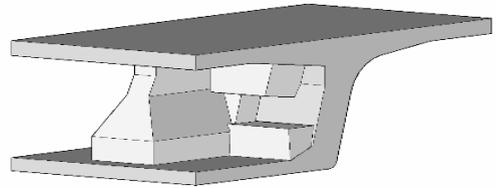


图 9 集成式转向构造示意图

2.6.2 剪力键构造

剪力键设计除了考虑规范构造要求外,还应考虑节段的标准化,剪力键规格和位置在设计时遵循节段标准化原则,以减少预制端模类型,提高预制工效。

对于节段间的环氧胶接缝,若多余的胶体不能被挤出,临时预应力作用时可能会引起键槽挤裂,结构设计时需设置出胶槽便于多余环氧胶挤出。

2.6.3 横断面标准化

基于提高箱梁节段预制效率,该文在常规箱梁断面的基础上进行研究改进,标准化断面仅翼缘、顶底板等厚段变宽,倒角、变厚段尺寸保持不变(图 10),同时,构造尺寸与变宽段统一整体考虑确定,模板整个工程通用,提高标准化程度。

经分析,箱梁顶板应力随顶板挑臂长度和箱室内部等厚段长度的变化如图 11 所示。该标准横断面的顶板挑臂变化段的适应长度范围为 $0 \sim 1.8 \text{ m}$,顶板跨中变化适应长度范围为 $0.5 \sim 3.5 \text{ m}$,理论上能适应

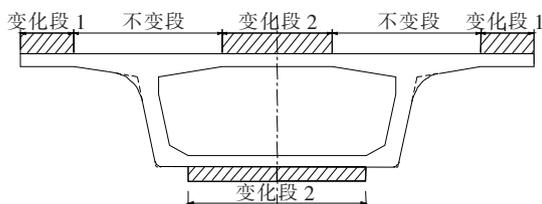


图10 标准化横断面图

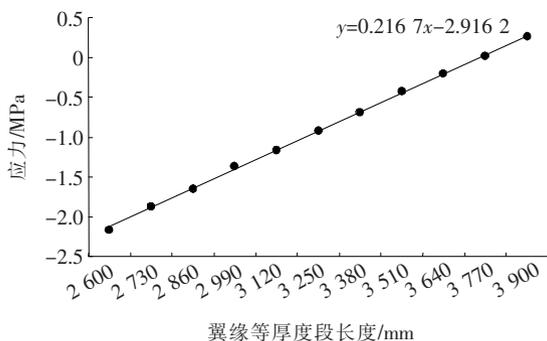


图11 箱梁顶板应力随等厚段长度变化关系

9.5~16 m,这可为变宽度梁的标准化设计提供条件。

2.7 横梁分块方案

横梁分块方案设计考虑纵向分段、横向分块、纵横向分块及整体预制4种方案,主要考虑因素为节段的重量和几何尺寸。如图12所示。

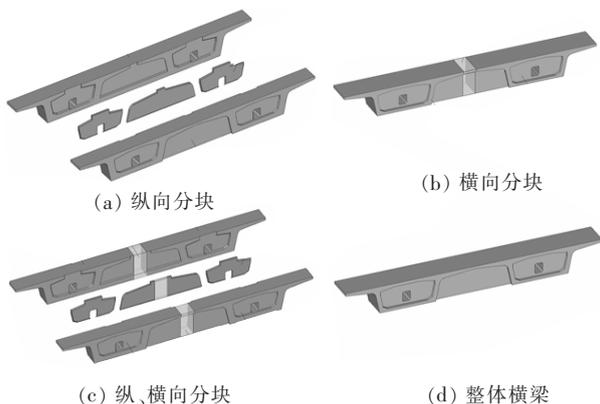


图12 横梁分块方案示意图

横梁总重约380 t,运输吊装均超过目前大部分城市桥梁的运输条件;分成2块单块重190 t,与目前已建工程预制盖梁节段重相差不大,运输吊装均可行;若分成4块单块重为95 t则更为便捷。纵向分块宽厚比较小、构造复杂且施工难度大,横向分段整体性好、受力可靠、构造相对简单且施工难度小。因此横向分块是较为合适的横梁分块方案。

2.8 耐久性设计

耐久性设计是节段预制拼装箱梁结构设计需要重

点考虑的内容之一。接缝部位是耐久性薄弱环节,设计考虑适当提高预应力度按全预应力构件设计,使节段之间胶接缝一直处于受压状态,提高耐久性。体外预应力采用耐久性好的单根可换式环氧钢绞线,实现全寿命周期内的可检、可修、可换。全线桥梁每个端横梁、中横梁均设置检修人孔,在底板设检修人孔,实现检修通道全桥贯通。

首次对节段梁临时孔洞封堵开展系统研究,经研究认为,封堵材料的性能对封堵效果影响最大,推荐采用高性能的防水材料进行封堵;吊装孔和临时预应力锚固孔应在以往圆柱形的基础上予以改进,推荐采用锥形孔洞构造提高孔洞封堵可靠性;并提出无孔洞设计的理念,采用预埋式钢齿坎方案和利用体内束管道张拉临时预应力。

桥面防水层采用两级防水加强设计,第一级为基层防水,采用水泥基渗透结晶型无机防水材料;第二级防水为柔性防水层,采用聚合物改性沥青防水涂料。当然,上述设计技术措施还需要精细化的施工来实现。

3 空间受力性能

3.1 结构总体受力分析

体外预应力节段梁承载能力极限状态计算目前不能够直接利用有限元分析软件进行,根据在编规范结合自编程序进行计算和设计。在该工程设计和实践中,对在编规范提出了关于结构抗弯和接缝抗剪承载能力计算参数、环氧胶接缝压缩量取值等的修正建议,并得到标准编制组采纳,公式修正后体外预应力承载力可提高约10%。

主梁正截面极限抗弯承载能力计算结果见图13。由图13可知:基本组合作用下,主梁跨中最大弯矩为68 745 kN·m,对应抗力为72 933 kN·m,满足规范要求。

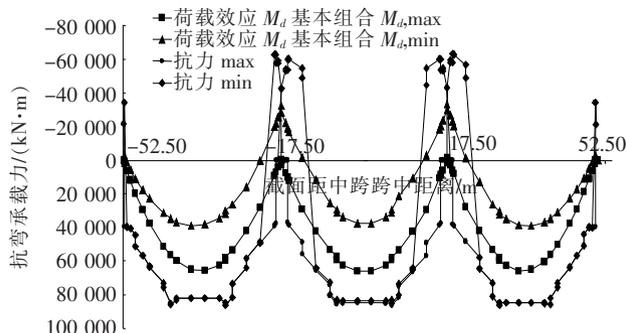


图13 主梁正截面抗弯极限承载力计算结果

3.2 墩顶大悬挑横梁受力性能

墩顶大悬挑横梁受力空间效应明显,与常规横梁不同,横梁除了承受竖向荷载外,还承受纵向体外预应力锚固荷载,且横梁受人孔和体外束管道严重削弱带来的应力集中。横梁空间模型受力计算结果如表 2 所示。

表 2 横梁空间模型计算结果 MPa

| 构件 | 横向正应力 | 剪应力 | 位置 | 竖向正应力 | 锚下应力 |
|-----|-------|-----|------|-------|------|
| 中横梁 | -1.30 | 1.1 | 近跨中侧 | — | 7.1 |
| | -0.80 | 2.2 | 远跨中侧 | — | 14.9 |
| 端横梁 | -4.02 | 0.5 | 近跨中侧 | 4.1 | — |
| | -1.38 | 1.0 | 远跨中侧 | — | 12.2 |

注:表中锚下应力为锚下竖向应力,受压为负。

由表 2 可知:横梁受力空间效应和应力集中效应明显,短期组合下,中横梁横向正应力为 -0.8 MPa ,剪应力为 2.2 MPa ,中横梁纵向体外束锚下竖向应力为 14.9 MPa ,需进行专项特殊配筋设计;此外端横梁体外束锚固的背面由于强大的锚固力作用,横梁竖向应力达 4.1 MPa ,但沿横梁厚度方向远离表面迅速减少,与常规横梁受力具有明显差异,需进行特殊加强配筋设计。

考虑孔洞削弱后按应力域法(图 14)进行配筋验算,采取增设横梁抗剪箍筋和锚固面竖向抗拉钢筋,以满足规范受力和抗裂要求。横梁应力域编号和钢筋加强设计如图 15 所示。

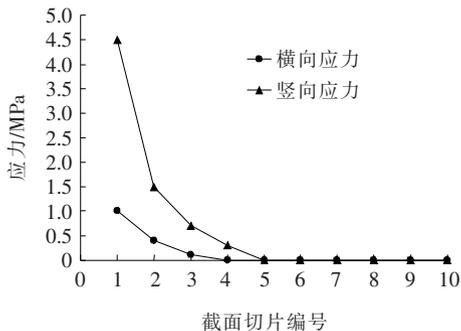


图 14 横梁应力图

3.3 多主梁箱梁施工顺序及空间受力性能

由于采用了墩梁固结的整体式墩顶横梁、分箱室双主梁结构,左右幅箱梁受力相互影响,合龙体系转换和预应力施加顺序是一个挑战。对于分箱室双主梁可选用的施工顺序有:①先合龙一幅主梁并施加预应力

再施工另一幅主梁;②先合龙一幅主梁不施加预应力,待合龙另一幅主梁后同步施加预应力;③双幅主梁同步拼装合龙后张拉预应力。对不同施工顺序进行详细分析,各主梁轴力如图 16 所示。

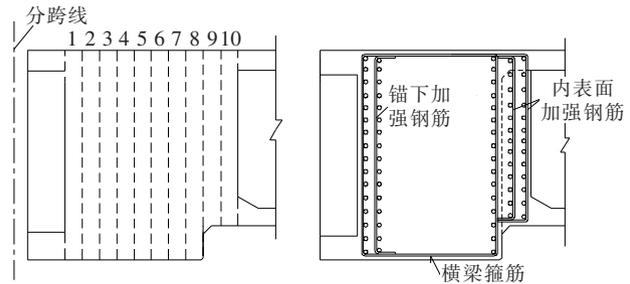


图 15 横梁应力域编号和钢筋示意图

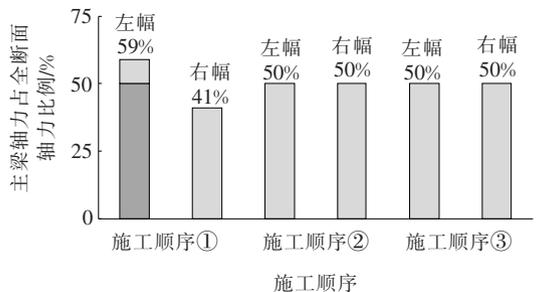


图 16 不同施工顺序下各主梁预应力轴力

由图 16 可知:主梁架设顺序对结构内力影响较大,施工顺序①左右幅不同步施工,先合龙的左幅主梁除承受左幅已张拉的体外预应力,同时还承受后合龙右幅主梁体外预应力的 9% ,达到全断面体外预应力 59% ,而后合龙的右幅主梁仅承受全断面体外预应力 41% ;因此在先合龙左幅主梁落架的预应力需求和后期右幅主梁的附加预应力之间难以兼顾平衡;施工顺序②虽然左右幅轴力相同,但由于先合龙的左幅未施加预应力,不能落架,在实际施工中可行性差;该文提出的双幅同步架设施工方法,左右幅同步合龙体系转换,同步施加预应力,确保了左右幅主梁及桥墩结构受力均匀,且同步架设也使拼装速度提高 1 倍。

此外,若由于箱梁节段存梁期不同产生收缩和徐变的差异,或者施工过程中产生的左右幅的差异,则可以通过调整预应力达到设计要求。

4 施工工艺

预制节段箱梁采用逐跨拼装施工,大跨采用悬臂拼装施工,梁段运输方式为陆路运输,桥位处吊装,架

桥机采用上行式架桥机。该工程考虑到预制厂的制梁能力,墩顶横梁和下部墩柱最终采用钢筋模块整体工厂化生产、现场浇筑的方式。

逐跨拼装施工的主要工序为:架桥机吊装箱梁节段,匹配后涂抹环氧胶并张拉临时预应力,锁定湿接缝处劲性骨架浇筑湿接缝,张拉跨间体外束,拆除临时预应力及劲性骨架,箱梁落架,解除临时固结,架桥机移至下一跨,依次逐跨进行拼装。

由于中国未采用过双幅同步架设的施工工艺,因此需研发专用的架桥机设备(图17)。为保证左右两幅架桥机在起吊箱梁节段和前移过程中保持同步,采用两台架桥机串联、同一台电脑控制系统实现。在起吊箱梁节段和架桥机前移过程中,采用实时监测系统对架桥机支腿、吊机位移和油缸反力进行监测,偏差超出允许范围立即进行纠偏调整,保证两台架桥机的同步性。桥梁建成后实景图见图18。



图17 双幅同步架设施工



图18 桥梁建成后实景图

5 结语

洪都大道为大规模采用节段预制拼装箱梁结构的

城市桥梁,提出了适用于城市桥梁的分箱式主梁、整体大悬挑横梁、墩梁固结的结构形式。针对城市预制拼装桥梁的特点,从结构体系、结构构造及施工方法等方面系统性提出了分箱室节段箱梁、半固结结构体系、基于施工效率的混合配束预应力体系、预应力转向锚固构造集成设计、横断面标准化、剪力键标准化、耐久性设计以及双幅同步架设施工等技术措施,深入研究多主梁空间受力性能,探索城市高架桥梁新型节段预制拼装箱梁结构设计的标准化,详细论述了设计所考虑的技术要点与创新。

洪都大道于2019年4月建成通车,经工程实践,通过设计标准化引领施工快速化,单节段预制平均2.5d,拼装平均6d一跨,进一步提高了中国城市桥梁建造的工业化水平。

参考文献:

- [1] 李国平,沈殷.体外预应力筋极限应力和有效高度计算方法[J].土木工程学报,2007(2).
- [2] 徐栋.桥梁体外预应力设计技术[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [3] 张门哲,涂光亚,王双喜,等.短线拼装法施工的宽幅多节段混凝土箱梁的预制控制[J].中外公路,2018(6).
- [4] 殷新锋,王成煜,黄屿等.体外预应力桥梁转向块的受力性能分析[J].中外公路,2017(5).
- [5] 徐光兴,李朝红,梁亮,等.平潭海峡公铁两用大桥北东口水道桥两孔连做节段拼装技术[J].桥梁建设,2018(3).
- [6] 黄虹,许树壮,卢永成.上海长江大桥60m跨预制拼装主梁设计[J].世界桥梁,2009(增刊1).
- [7] DG/T J08-2255-2018 节段预制拼装预应力混凝土桥梁设计标准[S].
- [8] CJJ/T 111-2006 预应力混凝土桥梁预制节段逐跨拼装施工技术规程[S].
- [9] 黄运林,杨聪,万和安,等.石首长江公路大桥宽幅短线预制混凝土箱梁横向受力有限元计算模型分析[J].中外公路,2019(1).
- [10] 肖金军,李传习.小半径曲线箱梁非对称增大截面加固分析与试验研究[J].中外公路,2019(2).
- [11] 华勇,黄鹏,胡伟邦,等.强台风下曲线现浇箱梁移动模架设计及施工关键技术[J].中外公路,2020(1).