

沪太路飞云桥开口截面组合钢箱梁设计要点

胡冰原

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 沪太路飞云桥为主跨125 m跨径的开口截面组合连续梁桥,分幅布置,单幅桥宽为15.75 m,采用上下分层、人行道外挂的结构形式。主梁为大挑臂单箱单室组合连续钢箱梁,横隔系除支点处采用实腹式横梁外,其余位置均采用空腹式横隔板,采用少支架钢梁节段拼装、桥面板先跨中后支点的间断施工法。分析总结了大跨径开口截面组合连续钢箱梁的总体布置、结构概况、施工方法及设计要点,并对比了边中跨比较小情况下边支点压重和顶升处理方式对结构受力的影响,研究成果可为同类桥梁的设计提供借鉴。

关键词: 桥梁工程;组合连续梁;钢箱梁;预制桥面板;间断施工法;总体设计;边支点顶升

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0090-06

Design Essentials on Open-section Composite Steel Box Girder of Feiyun Bridge in Hutai Road

HU Bingyuan

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The Feiyun Bridge in Hutai Road is an open-section composite continuous girder bridge with a main span of 125 m. It is arranged in two separate sections, and a single section width is 15.75 m. Its structural form is the upper and lower layers, and outside-hung sidewalk. The main girder is a large-cantilever single-box single-cell composite continuous steel box girder. The solid-web beam is adopted at the fulcrum for the diaphragm system, the open-web diaphragm plate is used at the rest positions. The discontinuous construction method of steel beam segment assembly with less support and bridge deck slab first span middle and then fulcrum is adopted. The overall layout, structural overview, construction methods and design essentials of the long-span open-section composite continuous steel box girder are analyzed and summarized. The influence of side fulcrum compression and jacking treatment on the structural force is compared in the case of small side midspan ratio, which can provide reference for the design of the similar bridges.

Keywords: bridge engineering; composite continuous girder; steel box girder; precast deck slab; discontinuous construction method; overall design; side fulcrum jacking

0 引言

钢混组合梁是由混凝土桥面板和钢梁刚性连接而构成的,因其能发挥出两种材料各自的优势、整体受力而具有良好的经济性以及方便施工的特点,从而在国内外得到广泛应用^[1]。其中,对于主跨跨径 ≥ 50 m的连续梁桥,单箱的开口截面是最为经济简洁且受力明确的组合梁结构形式之一。为了适应更大跨度、更宽桥面的需求,可通过在钢主梁上设置直接支撑桥面板的大横肋以满足受力要求,降低桥面板厚度,同时也能提高槽型钢梁的抗扭刚度。

现代组合钢箱梁桥的主跨最长已能超过200 m,跨径布置弹性较大。根据已建成的组合钢箱梁桥工程实例统计,边中跨比通常分布在0.6~0.8,特殊情况可达到0.5~1.0。组合梁的梁高与跨径之比根据钢箱结构形式和施工方法不同,通常在1/20~1/40的范围内,当钢梁具有良好的施工阶段受力条件时,高跨比可取小值^[2]。总体而言,采用变高的桥式布置、设置横肋支撑以降低混凝土桥面板厚度,并采用双层组合结构、满堂支架方法施工,可有效降低组合梁高跨比。

1 工程概况

吴淞江工程(上海段)新川沙河段流域综合治理工程为吴淞江工程的先行实施项目,河道全长约

收稿日期: 2024-08-01

作者简介: 胡冰原(1993—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

7.8 km,地理位置如图 1 所示^[3]。由于现状河道较窄,河口宽度仅为 20 ~ 30 m,工程实施后大部分跨河通道将无法同时满足行洪和通航要求,需拆除重建。



图 1 新川沙河段地理位置图

新川沙河段初始规划为 IV 级航道,现已调整为规划 III 级航道,最高通航水位为 3.8 m,通航净宽为 76 m,主墩承台净距不小于 85 m,过河建筑物通航净空标准断面采用矩形断面,通航净高为 7 m。河口宽 96 m,两侧陆域控制线范围宽均为 15 m。

沪太路飞云桥为新川沙河段 7 座重建新建跨河桥梁中的一座,位于上海市宝山区,老桥为 (13+16+13)m 简支空心板梁桥,现状河口宽约 22 m,新开挖河道后,该桥不再能满足行洪和通航要求,需拆除重建。桥位为南北走向,主桥轴线的法线与新川沙河水流方向呈 13.4° 夹角。路线总长 1.33 km,其中桥梁总长 788 m,主桥长 261 m,东西分幅布置。道路等级为一级公路,兼做城市主干道;主线为双向 6 车道,并在外侧布置非机动车道和人行道。由于主桥两侧边墩处东西向现状道路的限制,下层人行过河通道仅布置在主跨及北侧 48 m 边跨范围内,跨越新川沙河后通过梯坡道落地。受限于车道纵坡和横向道路的通行净空,非机动车道无法单独落地,因而与机动车道一同布置于上层桥面,同时在此期间可临时兼做机动车道,形成单幅桥双向 4 车道的临时通行方案,以便分幅施工交通组织。

2 结构设计

2.1 总体布置

沪太路飞云桥主桥采用组合连续钢箱梁桥,东西分幅布置,单幅桥宽 15.75 m,中央分隔带宽 1 m,跨径布置为 (68+125+68=261) m;主梁为大挑臂单箱单室组合连续钢箱梁,桥面板宽 15.45 m,箱室宽 8 m,单侧挑臂长 3.725 m;混凝土桥面板及钢梁横肋顶板采用单向 2% 横坡,梁底平坡,腹板铅垂;主桥中支点处梁高 6 m,高跨比为 1/20.8,边支点及跨中梁高 4 m,

高跨比为 1/31.25,梁底曲线采用二次抛物线。单幅桥立面布置如图 2 所示。

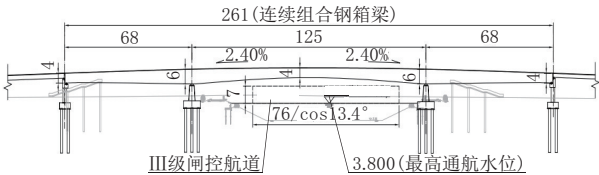


图 2 主桥单幅桥立面布置图(单位:m)

为控制单幅桥梁宽,主桥采用上下分层、人行道外挂的结构形式。上层桥面布置为:0.5 m(防撞栏杆、加高屏障)+2.5 m(非机动车道)+0.25 m(栏杆)+12 m(机动车道)+0.5 m(防撞栏杆)+1.0 m(分隔带)+0.5 m(防撞栏杆)+12 m(机动车道)+0.25 m(栏杆)+2.5 m(非机动车道)+0.5 m(防撞栏杆、加高屏障)=32.5 m。主梁腹板外侧下缘外挂人行道,人行道布置为 0.25 m(栏杆)+3.0 m(人行道)+0.5 m(挑梁、装饰板)=3.75 m。考虑行人通行安全性,上层桥面非机动车道外侧防撞栏杆加高并设置了防护措施,下层人行道内侧挑梁处设置了装饰板防止落梁。中支点及跨中标准断面布置如图 3 所示。

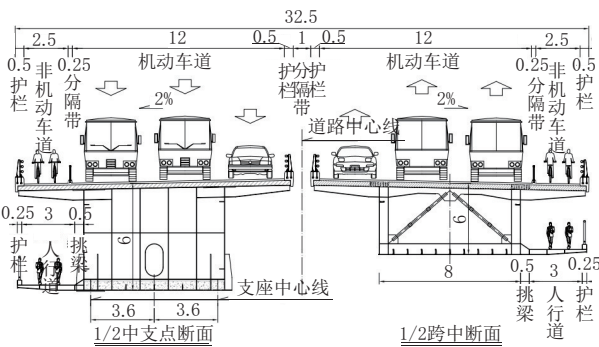


图 3 主桥横断面布置图(单位:m)

2.2 主梁

开口截面钢箱梁梁高 3.74 ~ 5.74 m,按二次抛物线渐变。主纵梁顶板板厚 16 ~ 50 mm,宽 1.2 m,在中支点附近向内变宽至 1.8 m;腹板板厚 16 ~ 28 mm;箱宽 8 m,底板板厚 14 ~ 36 mm。本桥人行道外挂在主梁的外侧下缘,使得单幅桥的车道布置不对称,对于主梁来说,其恒载和活载的偏载效应较大,对主梁的抗扭性能要求较高。为了增加箱梁整体的抗扭刚度,在中支点附近 16.6 m 长范围内加焊 16 mm 厚钢顶板作为局部闭口截面组合钢箱梁,对于负弯矩区桥面板裂缝的控制也有好处。

箱梁的横隔系采用空腹式横隔系,顺桥向标准间距 4 m,支点处局部采用带加劲的实腹式横梁。横隔系由铅垂布置的钢梁腹板、腹板竖向加劲、水平布

置的底板横向加劲、顶板大横肋以及角钢撑杆组成。在边支点附近及负弯矩区的横隔板之间等间距布置T形腹板竖向加劲肋,以增加受压区腹板的稳定性。空腹式横隔板及主纵梁断面如图4所示,主梁中支点附近顶、底平面布置如图5所示。

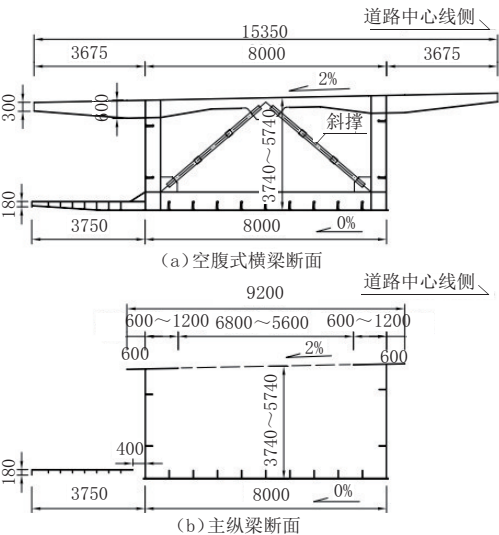


图4 钢箱梁截面布置图(单位:mm)

考虑减薄墩顶钢梁底板的厚度,在中支点两侧各14 m范围内采用混凝土双结合。通过在钢梁底板上浇注0.5 m厚的C50混凝土,并在底板及加劲上设置焊钉连接件,与钢底板形成组合结构一同承担荷

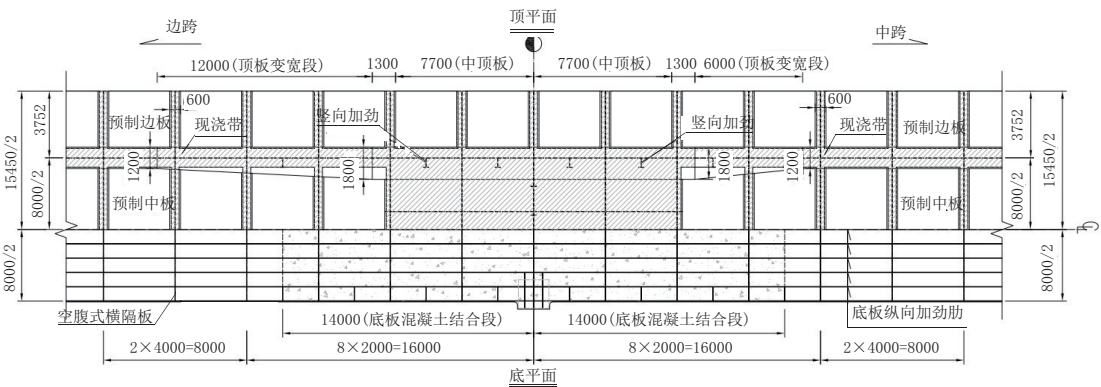


图5 主梁中支点附近顶、底平面布置图(单位:mm)

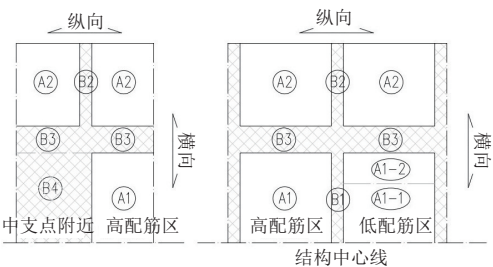


图6 各区段桥面板配筋示意图

标准预制桥面板采用C60混凝土,负弯矩区拉应力较高区段的预制桥面板采用C60钢纤维混凝土,墩顶现浇段桥面板采用C60钢纤维微膨胀混凝土,纵横向现浇缝采用C60合成纤维微膨胀凝

载作用。
中支点附近36 m范围内应力较高的部分顶板和腹板采用Q420qD钢材,撑杆采用Q355D型钢,其余部位均采用Q345qD钢材,箱梁外腹板因外挂人行道需采用Z向板。主梁合计用钢量为0.350 t/m²。

2.3 混凝土桥面板

主桥全长范围内桥面板等厚布置,均为26 cm,施工采用工厂预制、现场现浇湿接缝的方法。预制桥面板横桥向分3块,尺寸根据钢梁顶板及横肋布置分为三种尺寸,边板横桥向宽为320.5 cm,中板横桥向宽为696 cm,边、中板顺桥向宽分为353、253、203 cm三类。顺桥向湿接缝宽104 cm,横桥向湿接缝跨中宽47 cm,梁端处宽97.5 cm。中支点处钢梁顶板封闭范围内混凝土桥面板均为现浇,仅边板为预制板,现浇段长16.47 m。

桥面板为普通钢筋混凝土体系,预制板纵向配筋根据总体计算受力不同,分为高配筋区和低配筋区。为了控制裂缝,在负弯矩区设置较高的配筋率;在受力较小的正负弯矩交汇段以及桥面板受压的跨中正弯矩区设置相对较低的配筋率;现浇缝内预制板纵横向预留钢筋均以环形套箍的方式连接。桥面板不同区段配筋划分见图6和表1。

土。标准边板吊重约7.65 t/块,标准中板吊重约16.6 t/块。

2.4 下部结构及基础

主桥主墩采用矩形断面双柱墩,斜交正做,与承台呈13.45°夹角,底部断面尺寸为3.476 m(横)×3.476 m(顺),顶部断面尺寸为2.5 m(横)×2.5 m(顺),墩高5.58 m。主墩承台采用整体式承台,承台顶埋深约1.0 m,厚3.0 m,垫层厚0.15 m。平面尺寸为13.0 m(横)×9.0 m(顺)。主墩基础采用11根φ1.2 m扩底灌注桩,桩长75 m,均为摩擦桩,持力层为⑨₁₂灰色粉细砂。主墩基础构造如图7所示。

表 1 各区段桥面板配筋 单位:mm

区段	上缘纵向 钢筋	下缘纵向 钢筋	上缘横向 钢筋	下缘横向 钢筋
纵向湿接缝(B3)	D22@130	D22@130	D22@140	D22@140
中支点 区段	预制边板 (A2/B2)	D25@130	D25+D20 @130	D22@140
	顶板现浇段 (B3)	D25@130	D25+D20 @130	D22@140
高配 筋区	预制边板 (A2/B2)	D25@130	D25@130	D22@140
	预制中板 (A1/B1)	D25@130	D25+D20 @130	D22@140
低配 筋区	预制边板 (A2/B2)	D22@130	D22@130	D22@140
	预制中板 (A1-1/B1)	D22@130	D22@130	D22@140
	预制中板 (A1-2/B1)	D20@130	D20@130	D22@140

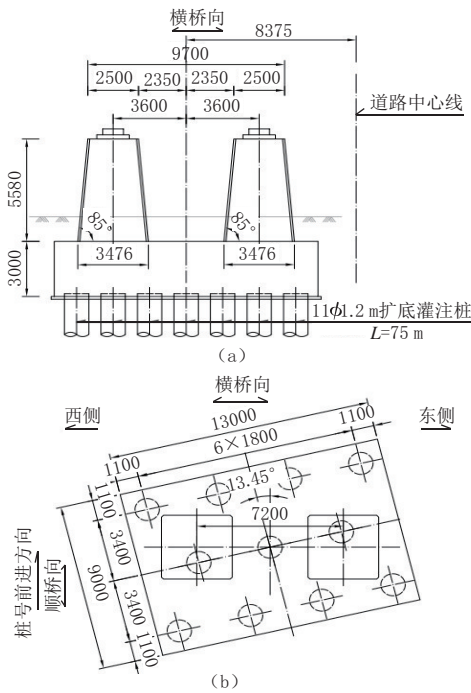


图 7 主墩基础构造图(单位:mm)

南北两侧边墩均采用盖梁+独柱墩的形式。盖梁为预应力构件,长 14.42 m,截面尺寸为 2.9 m(高)×3.682 m(宽);墩柱为矩形断面,截面尺寸 4.0 m(横)×2.0 m(顺)。承台采用整体式承台,承台顶埋深约 0.9 m,厚 2.5 m,垫层厚 0.15 m,平面尺寸为 9.4 m(横)×5.8 m(顺)。边墩基础采用 6 根 $\phi 1.2$ m 扩底灌注桩,桩长 65 m,均为摩擦桩,持力层为 $\textcircled{9}_{11}$ 灰色粉细砂。

3 施工方法

施工方法对结构应力分布的影响很大,满堂支架施工在主梁一次落架的过程中几乎不产生应力,

待拆除支架后,再安装中支点附近 1/4 跨径范围内的桥面板,并通过现浇湿接缝使其与钢梁结合,能有效减小支点处的施工荷载应力,同时可防止中支点桥面板在施工过程中开裂。这与先中跨后支点、间断浇筑的针对大跨径现浇桥面板组合梁、在欧洲命名为“皮尔格法”的施工方法相似。

对于带横肋的槽型组合箱梁断面,在分块预制桥面板时,箱梁上翼缘和横梁可以作为现浇缝施工的模板。这种施工方法可以减小现场作业量,加快施工速度,且通过提前预制和存梁可以减少混凝土收缩徐变的影响。预制桥面板之间的接缝受力较为薄弱,必须保证接缝处配筋的连续性并提高接缝混凝土浇注时的水密性,同时需要在预制板端预留槽口或剪力键以保证预制与现浇分界面的传力性能。

沪太公路的现状交通流量大,施工期间不可断交,需分幅施工,老桥拆除与新桥施工需交替进行。因沪太路飞云桥所处桥位处的现状河道较窄,可采用少支架钢梁节段拼装的施工方案。由于大节段钢梁断面尺寸超过了陆地运输高宽限制,无法从钢结构加工厂整体运送至施工现场,因而在单幅桥主梁纵向分为 19 个大节段的基础上,每个节段横桥向切分为 9 个单元:主梁底板、主梁内腹板上翼缘、主梁外腹板上翼缘、空腹式隔板上横梁、两个斜撑、两侧桥面板挑臂、人行道挑臂,按从下到上、从内到外的顺序依次分块吊装,并在支架上焊接形成整体节段。施工步骤如表 2 所列。

表 2 施工步骤

步骤	施工内容
CS1	拆除老桥东幅、中幅东半幅上部,保留老桥其余部分
CS2	施工主桥东半幅下部,工厂预制主梁钢结构和桥面板
CS3	搭设支架
CS4	钢梁节段分块吊装就位,焊接接缝形成连续结构
CS5	浇筑中支点主梁底缘混凝土结合段
CS6	铺放正弯矩区桥面板,现浇纵横湿接缝
CS7	拆除支架
CS8	铺放剩余桥面板,现浇湿接缝及中支点顶板范围桥面板
CS9	桥面系施工,施加二恒
CS10	拆除剩余老桥,翻交,同样步骤施工西半幅主桥

4 静力分析设计要点

4.1 总体计算原则

对组合梁上部结构的总体分析应采用线弹性分析方法,考虑温度、混凝土收缩徐变带来的次效应及施工顺序等因素的影响。未开裂截面抗弯刚度需按弹性模量比将混凝土桥面板及钢梁换算成组合截

面;计算开裂截面抗弯刚度时,保守估计仅计入混凝土板有效宽度范围内的主筋,而不计入受拉区混凝土的影响。

对作为普通钢筋混凝土构件设计的混凝土桥面板采用开裂分析法,此时开裂区范围内取开裂截面的抗弯刚度,其余区段截面按未开裂截面计入。根据欧洲规范,开裂区长度可按应力计算法和经验法两种方法求得。经验法是取中支点两侧各15%的跨径长度作为开裂区长度,目前国内组合梁规范^[4]也采用此种方式确定开裂区;根据国外学者的研究成果,假定开裂范围为0.15L,对于实际开裂范围在0.08~0.25L之间的组合梁是足够精准的,误差在5%以内。应力计算法是通过非开裂模型进行计算,得出标准值组合下混凝土板上缘应力,如果混凝土的拉应力超过 $2f_{ctm}$,则截面处于开裂区^[5]。对于本桥,两种计算方式得出的开裂区范围相差不大,默认按照国内组合梁规范和经验法认定开裂范围为0.15L。

总体静力计算利用MIDAS软件建立单梁模型。考虑长期运营状态下因混凝土桥面开裂产生应力重分配问题,分别建立成桥初期桥面板未开裂模型和远期桥面板全开裂模型,两种模型示意如图8所示。

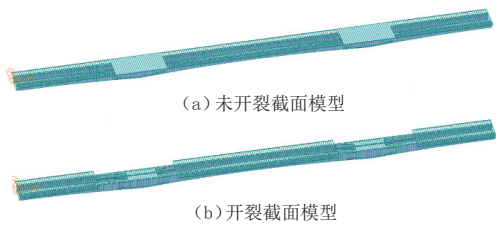


图8 总体计算模型

4.2 负弯矩区设计

如何恰当地处理中支点的负弯矩区是设计组合连续梁的关键,一方面是混凝土板受拉的问题,另一方面是钢梁底板受压和稳定性的问题。

负弯矩区混凝土桥面板受拉,按照允许出现裂缝但限制裂缝宽度的原则处理,过大的受拉区混凝土裂缝会导致钢筋易受腐蚀,从而影响整体结构的耐久性。为了保证主梁的使用性能,必须采取合理而有效的措施降低中支点附近负弯矩以控制裂缝宽度。目前的工程实践上常通过负弯矩区桥面板滞后结合与支点升降的施工方法^[6]。滞后结合的桥面板避免了钢梁一次落架时的不利影响,而跨中范围的先期结合段则处于有利的受力状态。支点升降的施工法是指在负弯矩区桥面板结合之前对中支点进行

顶升,在桥面板产生预应力,待剩余桥面板与钢梁结合后再回落。这种施工方法可使桥面板在成桥状态下具有一定的压应力储备,改善受力情况。

在中支点附近钢梁底板浇注混凝土,并通过刚性连接形成双结合断面共同受力,也是一种在工程实践中探索出来的设计方法,能利用下翼缘钢板作为混凝土浇筑模板,施工方便,且能发挥混凝土承压强的特点,有助于改善组合结构的受力性能、降低用钢量,现已发展为大跨组合梁桥设计的常用措施。

4.3 边跨压重与边支点顶升

根据连续梁的受力特点,当采用三跨或多跨连续结构时,综合考虑内力分配、经济性和其他因素,边跨一般取中跨的0.6~0.8倍。当采用更大的边中跨比时,将因为结构受力不合理而影响经济性,一般只在特殊情况下采用;当采用过小的边中跨比时,边跨弯矩受力将以负弯矩为主,边支点恒载压力储备小,活载偏载作用下极易发生支座脱空,需设置压重或者在边支点采用竖向调节装置进行顶升处理。

沪太路飞云桥需上跨飞云路,而受限於地面道路和河道位置,边跨跨径需小于68 m或大于98 m,综合考虑经济性和受力性能,将边跨跨径定为68 m,边中跨比为0.544。为避免由于边中跨比过小而在偏载工况下产生边支点负反力,考虑压重及顶升两种解决方案。承载能力极限状态下结构应力及正常使用极限状态下的开裂截面混凝土桥面板裂缝宽度对比如表3至表5所列。

表3 成桥初期桥面板钢筋及钢结构应力				单位:MPa
断面	钢筋应力 (不顶升)	钢筋应力 (顶升)	钢结构最大应力 (不顶升)	钢结构最大 应力(顶升)
中支点	134.38	72.14	211.24(削峰)	206.03(削峰)
边跨0.15L	87.70	56.27	168.91	147.49
中跨0.15L	74.00	24.35	145.51	108.71
中跨跨中	—	—	230.93	273.89

表4 成桥十年后桥面板钢筋及钢结构应力				单位:MPa
断面	钢筋应力 (不顶升)	钢筋应力 (顶升)	钢结构最大应力 (不顶升)	钢结构最大 应力(顶升)
中支点	105.37	84.67	235.68(削峰)	217.17(削峰)
边跨0.15L	102.59	74.93	183.54	165.81
中跨0.15L	97.07	52.59	168.20	136.48
中跨跨中	—	—	212.39	251.18

由上表可知,边支点顶升方案虽然能改善负弯矩区结构受力、帮助控制混凝土桥面板裂缝,但同时会显著增加中跨跨中正弯矩区钢结构应力,未能有

表 5 桥面板裂缝宽度 单位:mm

纵向位置	中支点			高配筋区		
横向位置	B4	A2/B2	B3	A1/B1	A2/B2	B3
裂缝宽度 (不顶升)	0.138	0.081	0.088	0.145	0.092	0.094
裂缝宽度 (顶升)	0.121	0.064	0.072	0.119	0.067	0.070

效降低钢材用量,提升经济性。考虑到顶升施工中的不确定性及施工措施费用的增加,最终采用了在主桥梁端边支点附近各压重 50 m³ C30 素混凝土的方案。

5 结 语

沪太路飞云桥为新川沙河段 7 座重建新建跨河桥梁中的一座,南北走向,主线与新川沙河斜交呈 13.4° 夹角。主桥为主跨 125 m 跨径的开口截面组合连续钢箱梁,东西分幅布置,单幅桥宽 15.75 m,根据工程特点因地制宜地采用了少支架钢梁节段拼装、桥面板先跨中后支点的间断施工法。本文对沪太路

飞云桥的总体布置、结构概况、施工方法及设计要点进行了分析总结,并对比了在边中跨比较小情况下边支点压重和顶升处理方式对结构受力的影响,可为同类桥梁的设计提供借鉴。

本桥于 2022 年开工,于 2023 年 7 月西半幅通车,2024 年 5 月已全线建成通车。

参考文献:

[1] 刘效尧,徐岳.梁桥[M].2 版.北京:人民交通出版社,2011.
[2] 邵长宇.梁式组合结构桥梁[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
[3] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司.吴淞江工程(上海段)新川沙河段沪太路飞云桥工程可行性研究[Z].上海:上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2020.
[4] JTG/T D64-01—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
[5] Ioannis Vayas, Aristidis Iliopoulos. Design of Steel-Concrete Composite Bridges to Eurocodes[M]. Greece: Taylor & Francis Group LLC, 2014.
[6] 邵长宇.主跨 105 m 连续组合箱梁桥设计构思[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会,重庆市建设委员会,重庆市交通委员会.第十七届全国桥梁学术会议论文集(上册).上海:上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2006:273-278.

(上接第 67 页)

专用公路)综合改造为例,结合现状条件,着重从道路平纵线形、横断面,合理布设互通立交、景观提升等方面提供了解决思路,可供其他类似工程参考。

参考文献:

[1] 朱琪.景区旅游道路改扩建设计实践与研究[J].市政技术,2022,40(1):87-90;97.
[2] 王希宝,袁松,张生,等.公路美学与景区公路规划设计[J].福建建材,2021(7):30-32.