

# 210 m下承式钢箱提篮系杆拱桥总体设计

张志坚, 李亮, 田卿

(长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 武汉市左岸大道通顺河桥采用210 m下承式钢箱提篮系杆拱桥, 为双向六车道带人非混行道的城市快速路桥梁。主拱采用提篮式钢箱拱, 主梁采用“钢纵横格子梁+混凝土桥面板”式组合梁体系, 主纵梁兼作刚性系梁, 主纵梁箱内设置钢绞线柔性系杆索。主体结构采用顶推法施工。桥梁方案的设计构思可为类似工程提供参考。

**关键词:** 下承式; 钢箱拱; 组合梁; 顶推

**中图分类号:** U448.22+5 **文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2022)03-0051-04

## 1 工程概况

武汉市左岸大道(万家湖南路~小军山)建设工程作为长江主轴的重要组成部分, 是以交通功能为主、兼具观景、游憩综合功能的滨水快速干道, 线路全长约6.54 km。线路整体沿长江左岸展线, 与在建的轨道交通16号线基本平行, 采用桥梁方式穿越长江滩地, 桥梁起终点采用路堤结合的方式与长江堤防平交, 桥梁全长5.44 km。

通顺河桥是全线控制线节点, 跨越长江一级支流通顺河, 位于河口附近, 与河道斜交约46°, 该河道有通航需求, 见图1。

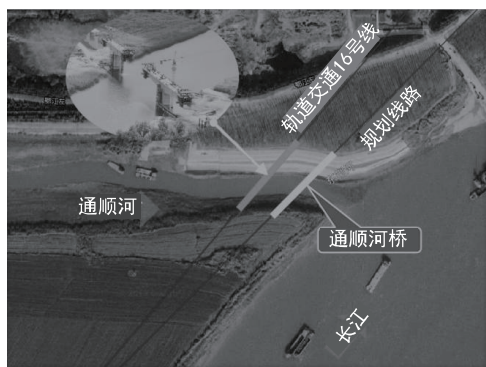


图1 通顺河桥平面示意图

## 2 建设条件

### 2.1 水文

武汉市长江段洪水出现时间一般为5~10月, 较大洪水主要出现在6~9月, 7月份最多。通顺河

的洪水一般均与长江高水位遭遇。根据1990年国务院批准的《长江流域综合利用规划简要报告》, 与桥梁衔接的长江堤防设计洪水位为28.23~28.42 m (1985国家高程基准, 下同)。

### 2.2 地质

覆盖层: 表层为杂填土( $Q^{ml}$ )、素填土( $Q^{ml}$ )和淤泥质土( $Q^l$ ), 其下从浅部往深部依次为第四系全新统湖积成因( $Q_4^{al}$ )的淤泥质粉质黏土、冲积成因( $Q_4^{al}$ )的粉质黏土、砂土, 上更新统冲洪积成因( $Q_3^{al+pl}$ )黏性土和碎石土层和坡洪积成因( $Q^{dl+pl}$ )粉质黏土、残积成因( $Q^{dl}$ )粉质黏土。覆盖层厚度约13~28 m。

基岩: 下伏基岩岩性变化大、种类多, 分别有白垩系-第三系( $K-E$ )粉砂质泥岩、灰岩质砾岩; 三叠系大冶组( $T_{1d}$ )泥灰岩、二叠系( $P$ )炭质灰岩、石炭系( $C$ )泥灰岩、志留系( $S_{2f}$ )泥岩。

## 3 技术标准

(1)道路等级: 城市快速路, 双向六车道;

(2)设计基准期: 100 a;

(3)设计使用年限: 主体结构 100 a;

(4)设计行车速度: 60 km/h;

(5)桥面标准宽度: 5.5 m (人非混行道及护栏)+11.75 m (机动车道)+1.5 m (中分带)+11.75 m (机动车道)+5.5 m (人非混行道及护栏)=36 m;

(6)设计洪水位: 堤防设计水位 28.42 m, 1/100 设计水位 28.06 m, 1/300 设计水位 28.84 m;

(7)通航标准: 内河Ⅵ级航道, 最高通航水位为 25.02 m, 最低通航水位为 12.56 m;

(8)地震: 地震基本烈度为 6 度。

收稿日期: 2021-06-18

作者简介: 张志坚(1973—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

## 4 总体方案

### 4.1 跨径布置

通顺河桥跨径布置主要由通航标准控制。通顺河航道规划为Ⅵ级航道,根据《内河通航标准》(GB 50139—2014),采用双向通航孔,净宽应按不小于40 m控制。此外,考虑到拟建大桥轴线与上游在建的轨道交通16号线跨越通顺河桥梁轴线距离仅127.5 m,不满足《内河通航标准》关于两座相邻水上过河建筑物的轴线间距要求,故拟建大桥通航孔布置,应覆盖轨道交通16号线桥梁的可通航水域。轨道交通16号线跨通顺河主跨为140 m,扣除墩柱及防撞设施宽度,净跨径为130 m,通航孔两侧桥墩沿桥轴线法线方向宽8 m,桥梁斜交角度 $39^\circ$ ,则桥梁净跨径投影到垂直航道方向的通航水域宽度为: $130 \times \cos 39^\circ - 8 \times \sin 39^\circ = 96$  m。

按照通航水域宽度不小于96 m布置桥跨,同时考虑桥梁主跨宜一跨过河,避免基础深水施工,将两岸基础尽量置于河道边坡处,得到桥梁主跨约210 m。此时桥梁实际通航水域宽度为109.8 m,满足通顺河航道单孔双向通航孔所需的96 m净宽需求且略有富余,桥梁规模是合理的,见图2。

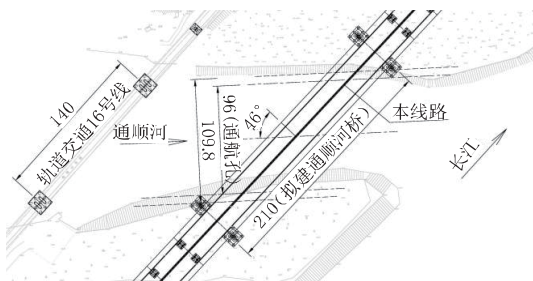


图2 通顺河桥通航净宽布置图(单位:m)

### 4.2 桥型选择

桥梁主跨210 m,适宜的桥型主要有拱桥、独塔斜拉桥和独塔自锚式悬索桥。

独塔斜拉桥和独塔自锚式悬索桥的优点主要在于景观效果较好,结构高耸、挺拔,气势恢宏,但单位长度经济性指标一般高于拱桥,导致造价偏高。而拱桥线条亦非常优美,且采用下承式结构可不设配跨,桥长更短,经济性上有明显优势,故作为推荐方案。

### 4.3 总体布置

通顺河桥布置为210 m下承式钢箱系杆拱桥,计算跨径206 m,主拱采用提篮式钢箱拱,主梁采用钢混组合梁体系。桥梁结构体系内部超静定、外部简支,对基础的要求相应较低<sup>[1]</sup>。桥梁立面布置见图3。

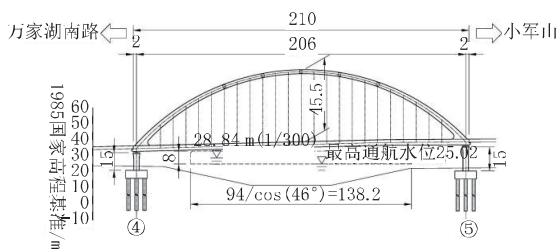


图3 通顺河桥立面布置图(单位:m)

桥梁横断面整幅布置,人非车道悬挑于拱肋外侧以保证整体景观效果,则桥幅布置为:5.5 m(人非混行道)+3.6 m(结构宽度)+11.75 m(行车道)+1.5 m(中央分隔带)+11.75 m(行车道)+3.6 m(结构宽度)+5.5 m(人非混行道)=43.2 m,见图4。

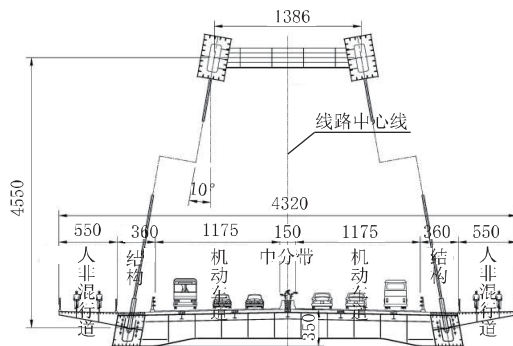


图4 通顺河桥标准横断面布置图(单位:cm)

## 5 结构设计

### 5.1 主拱

本桥桥面较宽,适合采用提篮式主拱。提篮拱相对于平行拱可达到更强的稳定性、更短的横撑及内敛的景观效果<sup>[2]</sup>。根据对既有提篮拱设计经验进行总结,拱肋内倾角度一般控制在 $3^\circ \sim 15^\circ$ 之间, $10^\circ$ 左右为佳<sup>[3]</sup>。本桥拱肋内倾取 $10^\circ$ ,通过5道横撑连成整体。主拱理论跨径206 m,竖平面内矢高 $f=45.5$  m,矢跨比 $f/L=1/4.527$ 。钢拱桥由于钢材各向同性,对拱轴线要求不高<sup>[3]</sup>,经试算,本桥拱轴线取二次抛物线。

拱肋采用变截面钢箱拱,与钢桁拱相比,具有钢件数量少、结构简洁明快特点<sup>[4]</sup>。拱肋截面形式采用单箱单室,截面尺寸由拱顶处的 $2.5$  m $\times$  $2.5$  m(宽 $\times$ 高)渐变至拱脚处的 $2.5$  m $\times$  $4$  m(宽 $\times$ 高),拱肋顶、底及腹板均采用板肋进行纵向加劲。两拱肋间设置5道横撑,横撑亦采用钢箱形截面。拱肋顶底板及腹板根据受力情况进行变厚度设计,变厚范围介于20~40 mm。主拱材质采用Q345qD。

### 5.2 主梁

主梁采用钢混组合梁体系,由钢纵、横梁组成梁格体系,在其顶面布置剪力钉与预制钢筋混凝土桥

面板形成组合梁,组合梁截面中心梁高 3.5 m,见图 5。钢纵、横梁体系构造简单、受力明确,便于后期维护<sup>[5]</sup>。相对于正交异性钢桥面板,混凝土桥面板适应性更强,避免了钢桥面板与铺装层间防水、抗滑移、高温稳定等问题,总体造价相对较低<sup>[6]</sup>。本桥主梁设计能确保在一对吊杆失效时桥面结构可以正常工作,便于更换吊杆或支座。

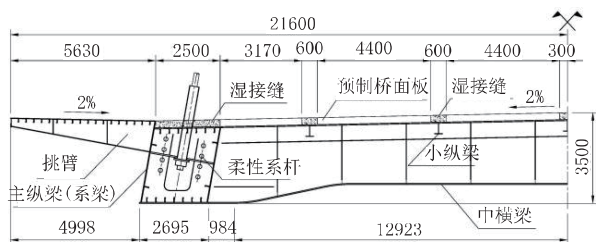


图 5 吊杆处主梁断面图(单位:mm)

钢梁部分由主纵梁(系梁)、中横梁、端横梁、小纵梁及挑臂组成双主梁梁格体系,采用全焊钢结构,材质为 Q345qD。

主纵梁(系梁)共设 2 道,中心距 29.906 m,布置于拱肋面内。采用箱形截面,腹板内倾 10° 与拱肋对齐,截面宽 2.695 m、高 2.962 m。主纵梁箱内另布置柔性系杆索用于协助主纵梁平衡部分拱肋水平推力。柔性系杆索主要有钢绞线系杆索和平行高强钢丝索两类。平行高强钢丝索锚具需在工厂与索体预先连接,且实际索长需考虑张拉变形,施工工艺复杂,下料长度精度要求极高;而对于拱桥,系杆索并非悬于空中,基本不存在风致振动问题,其动应力问题没有斜拉索问题突出,故更多采用钢绞线索<sup>[7]</sup>。本桥系杆索采用可换索式环氧喷涂钢绞线成品索,抗拉强度标准值  $f_{pk}=1\ 860\ \text{MPa}$ ,锚固在主纵梁端部。每组系杆索由 7 根工作索及 1 根备用索组成,单根拉索型号为  $\phi 15.2-31$ ,单根系杆索张拉控制力为 3 667 kN。备用索在施工阶段不穿索,仅作为运营阶段换索储备。

中横梁顺桥向标准间距为 4 m,全桥共 47 道。采用工字形截面,顶板设 2%横坡,底板变高,跨中梁高 2.5 m,端部梁高 2.962 m。

端横梁设置于桥梁两端,采用单箱四室箱形截面,顶板设 2%横坡,底板水平,跨中梁高 3.23 m。端横梁引桥侧设牛腿支承引桥主梁。

横梁间均匀布置 5 道小纵梁,采用工字形截面,梁高 0.45 m。

拱肋外侧设置长度为 5.63 m 的挑臂,其面板布置人行道及非机动车道。挑臂与横梁位置一一对应,端部梁高 0.35 m,根部梁高 1.2 m。

混凝土桥面板分块预制,吊装就位后现浇纵、横向湿接缝形成整体。预制板厚 26 cm,采用 C50 混凝土;现浇湿接缝厚 27 cm,采用微膨胀钢纤维混凝土。钢梁和钢筋混凝土桥面板通过布置在湿接缝处的  $\phi 22$  剪力钉形成钢混组合梁。

### 5.3 吊杆

吊杆采用环氧喷涂钢绞线成品索,抗拉强度标准值  $f_{pk}=1\ 860\ \text{MPa}$ ,单根拉索型号为  $\phi 15.2-31$ ,布置在拱肋面内,全桥设 46 对吊杆,顺桥向布置间距 8 m。吊杆拱端、梁端锚头均为冷铸锚,梁端张拉,两端均设置球铰以适应吊杆微小转角。

## 6 施工方案

钢箱拱桥施工的关键工序是拱肋的现场拼装。拱肋作为桥梁结构的主承力构件,合龙后可为其余构件的安装提供支承。本桥对钢箱拱肋的几种常规施工方法进行了比选,包括支架法、缆索吊悬臂拼装法、大节段整体提升法、转体法及顶推法<sup>[8]</sup>。

支架法原理最简单,但不能满足本桥的通航需求。

缆索吊悬臂拼装法属于典型的结构自架设施工方法,一般与斜拉扣挂法一并采用,以近似实现拱肋的无应力拼装,如武汉市江北快速路新河大桥[1]。但采用此方法施工相对工期较长,且缆索吊装及斜拉扣挂系统造价较高,不是本桥的最佳施工方案。

大节段整体提升法基本技术原理是“钢绞线承载、计算机控制、液压千斤顶集群作业”,在柳州官塘大桥施工中取得了较好的效果<sup>[9]</sup>。主拱大节段整体提升安装具有拱肋安装精度高、结构整体性好、工期短、不影响通航、易于保证质量、简化施工、风险小及安全可靠等优点,但该方法需要建设专用拼装场,动用特型船舶,要有保证船舶浮运的水深,本桥沿长江堤岸布置,桥位处水深不足以保证特型船舶浮运的吃水深度,不适合采用此方法。

转体法包括平转法、竖转法及竖、平转结合法,其原理是在非设计轴线位置拼装成形后,转盘将结构整体旋转到位的一种施工方法,如佛山东平大桥<sup>[10]</sup>。转体法将桥跨的建造从不具备支架法施工地点移到岸上进行,然后转到桥轴线处合龙,具有节约施工材料、施工设备少、快速便捷,且不影响通航、不中断通车等优点,但本桥远离堤岸,施工期全线 5.44 km 高架桥基础均被淹没,不具备支架施工条件,不适合采用此方法。

顶推法将钢拱、钢梁在岸上先期组拼为一体,利



用顶推设备将钢拱和钢梁整体顶推就位,桥面板后期安装,如杭州九堡大桥<sup>[11]</sup>。顶推法要求顶推前结构形成稳定体系,故一般适用于与本桥类似的带有刚性系梁的梁拱组合体系,梁拱组合体系成型后增设少量临时撑杆即可保证顶推过程中的结构稳定。对于本工程,大桥两侧有足够长的引桥可作为顶推拼装平台,与前述施工方法相比,顶推法采用的施工临时措施少、造价低、工期短,故本桥经综合考虑后选择采用顶推法施工,见图6。

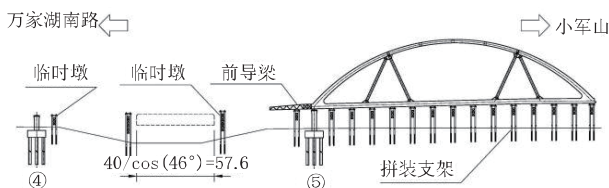


图6 通顺河桥顶推施工示意(单位:m)

本桥顶推法施工流程如下:

- (1)永久墩、水中临时墩、岸上顶推临时墩、墩顶临时支架施工;
- (2)大桩号侧搭设顶推拼装平台,在永久墩、临时墩和临时支架顶部安装顶推装置;
- (3)分段吊装拱梁节点、钢主梁,钢主梁焊拼合龙;
- (4)在钢主梁上安装拱肋、横撑拼装支架;
- (5)分段吊装拱肋和横撑,拱肋焊拼合龙;
- (6)安装顶推用前导梁,对拱梁体系整体进行持续多点顶推;
- (7)顶推就位,拆除前导梁;
- (8)安装并张拉部分吊杆;
- (9)拆除主拱临时撑杆,安装并张拉剩余吊杆;
- (10)拆除临时墩和拼装平台;
- (11)桥面铺装、护栏、栏杆等附属结构施工;
- (12)根据监控结果,对比成桥吊杆力理论值和

实测值,调整吊杆力;

(13)桥梁动、静载试验,通车运营。

## 7 结 语

武汉市左岸大道通顺河桥沿长江左岸滩地顺江布置,根据通航需求采用210 m主跨,考虑经济性上的优势采用下承式钢箱系杆拱桥,根据工程特点因地制宜选择顶推法施工主体结构。大桥主拱采用提篮式钢箱拱,主梁采用“钢纵横格子梁+混凝土桥面板”式组合梁体系,主纵梁兼作刚性系梁,主纵梁箱内设置钢绞线柔性系杆索,结构布置合理、受力明确,体现了桥梁力与美的结合。大桥预计2021年底开工建设。

参考文献:

- [1] 田卿,何俊荣,尹邦武,等.中承式钢箱提篮拱桥设计[J].世界桥梁,2020,48(1):11-16.
- [2] 周博.钢箱拱肋提篮系杆拱人行桥设计[J].北方交通,2018(5):35-38.
- [3] 徐君兰,孙淑红.钢桥(第二版)[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [4] 李国普,李斐然.大跨度连续下承式钢箱拱桥设计[J].世界桥梁,2016,44(2):12-15.
- [5] 徐林,徐欣,彭元诚.苏岭山大桥主桥设计与施工[J].世界桥梁,2018,46(4):6-11.
- [6] 詹建辉,彭晓彬.大跨度组合梁斜拉桥结构设计方案研究[J].桥梁建设,2016,46(4):85-91.
- [7] 崔秀鹏.柔性系杆拱桥系杆力损失与系杆更换技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [8] 四川公路桥梁建设集团有限公司,四川路桥建设股份有限公司.公路桥梁施工系列手册:拱桥[M].北京:人民交通出版社,2014.
- [9] 唐利科.大跨度提篮式钢箱拱桥动力特性及地震响应分析[D].成都:西南交通大学,2018.
- [10] 彭立志,李德钦,刘炜,等.佛山东平大桥竖转施工工艺的设计特色[J].公路,2006(3):139-145.
- [11] 史文杰,曾明根,苏庆田,等.九堡大桥主桥受力特性分析[J].桥梁建设,2010(6):37-39,48.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)