

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.039

## 揭阳市区进贤门大桥主桥设计

周宇, 魏朝柱, 何海

(广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507)

**摘要:**广东揭阳市区进贤门大桥主桥全长 386 m, 为  $(38+50+210+50+38)$  m 无推力中承式提篮拱桥, 在桥梁方案设计阶段提取进贤楼、莲花、五行山墙等在潮汕具有特色和代表性的元素融入到大桥的设计中, 是连接揭阳市揭东区和空港经济区的一座景观大桥。主拱结构为平行箱形混合拱, 跨度 210 m, 矢高约 52.5 m, 矢跨比为  $1/4.0$ , 拱轴线采用  $m=1.25$  的悬链线, 钢箱拱段跨度为 162.6 m; 主梁采用混合梁, 边跨主梁采用混凝土箱形梁, 中跨采用钢箱梁, 两者通过设置于前横梁的牛腿相连; 主桥设置 16 对吊杆、12 根系杆。采用有限元软件对该桥的静、动力性能进行分析, 并通过实体和板壳单元对全桥进行仿真复核分析, 结果表明各项指标均满足规范要求。

**关键词:**系杆拱桥; 中承式提篮拱桥; 混合拱; 混合梁; 三角刚架; 钢箱拱; 结构分析

## 1 工程概况

广东揭阳市区进贤门大桥是横跨榕江北河连接揭阳市揭东区与空港经济区的景观大桥, 为提高城市形象, 在桥梁方案设计阶段, 建设方增加了景观设计环节, 提出“印象进贤, 水上莲花”的设计主题, 提取进贤楼、莲花、五行山墙等在潮汕具有特色和代表性的元素融入到大桥的设计中。

道路等级为城市主干道, 设计速度 60 km/h, 双向八车道, 主桥桥梁总宽为 44.9 m, 设计基本风速为 39.4 m/s, 设计基本地震动峰值加速度值为  $0.15g$ 。

桥址处河宽约 230 m, 河道较顺直, 水流较为平缓, 航槽内最大水深约 6.8 m。榕江北河为内河Ⅲ级航道, 单孔双向通航可通行 1 000 t 海轮, 通航孔净宽 182 m、净高 18 m。桥址区属亚热带海洋性气候, 每年

7、8、9 月 6 级以上强风占总数的 83%, 历史最大台风风力 11 级, 风速达 28 m/s。

桥址区基岩覆盖层主要为粉质黏土、淤泥、砂类土、碎石土, 厚度为 25~75 m; 基底由燕山期花岗岩及其风化层组成, 岩体一般较为完整, 局部较为破碎。

## 2 主桥设计

## 2.1 总体设计

进贤门特大桥主桥全长 386 m, 为  $(38+50+210+50+38)$  m 无推力中承式提篮拱桥。大桥结构体系可进一步分为下列子结构: 主墩、辅助墩、过渡墩墩身及基础; 三角刚架及混凝土梁; 钢箱拱; 系杆索、吊杆索; 钢箱梁; 连桥; 纵向阻尼限位设备及梁端伸缩缝。桥梁总体布置见图 1。

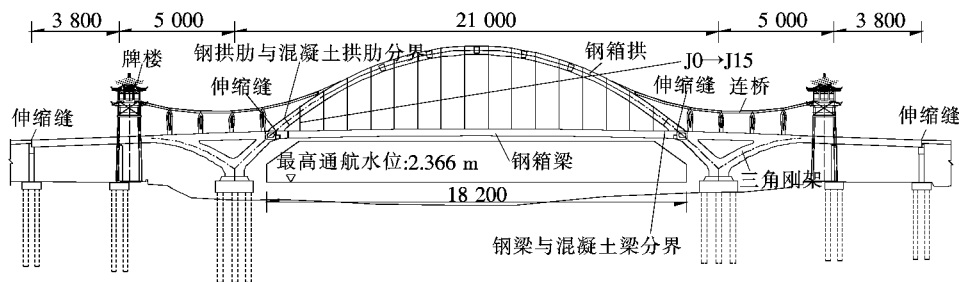


图 1 桥梁总体布置图(单位:cm)

收稿日期:2020-03-10(修改稿)

作者简介:周宇,男,大学本科,工程师, E-mail: 494611802@qq.com

桥面整幅布置,全宽 44.9 m。桥面横向布置为: 3.5 m 人行道+3.2 m 拉索区+15.25 m 行车道+1 m 中央分隔带+15.25 m 行车道+3.2 m 拉索区+3.5 m 人行道。结合“印象进贤,水上莲花”的设计主题,三角刚架上立柱采用中间镂空的形式设计成揭阳市花莲花的花瓣造型,牌楼总体样式采取潮汕风格的进贤门城楼形式,通过连桥将牌楼与主拱连接在一起。每个过渡墩、辅助墩、前横梁各设 4 个球形支座;钢主梁端部横向各设 2 个抗风支座;三角刚架前横梁与钢主梁之间设置纵向阻尼器。

## 2.2 结构设计

### 2.2.1 钢箱拱

主拱结构为平行箱形拱,跨度 210 m(含三角刚架前斜腿,钢拱段跨度 162.6 m),矢高约 52.5 m(含三角刚架前斜腿),主拱矢跨比为 1/4.0,拱轴线采用  $m=1.25$  的悬链线,竖直面布置,拱肋间距 34.1 m。

钢箱拱采用等高度箱形截面,尺寸为宽 2.8 m×高 3.8 m,顶、底板厚 44~32 mm,腹板厚 36~28 mm。钢箱拱沿着桥轴立面分为 19 个节段,单节段最大重量 77 t。钢箱拱节段设 3~7 道横隔板,普通隔板厚度为 20 mm,吊点隔板厚度为 30 mm;顶、底板设 3 道纵向加劲肋(高度 300 mm,厚度 30~26 mm,间距 700 mm);腹板设 6 道纵向加劲肋(高度 300 mm,厚度 30~26 mm,间距 540 mm);吊杆锚垫板通过承压板锚固在内径 175、154 mm 的锚管上。节段间钢箱拱顶板、底板、腹板采用熔透焊接连接,纵向加劲肋采用高强度螺栓连接。钢箱拱横断面图见图 2。

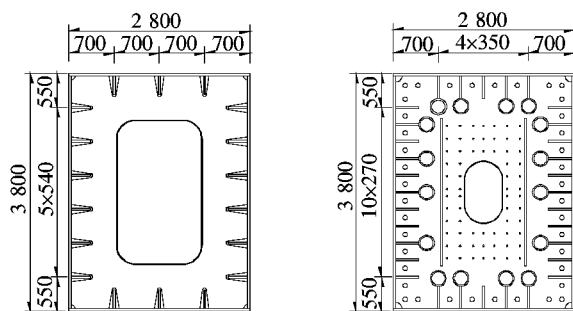


图2 钢箱拱横断面图(单位:mm)

钢混结合段分为钢结构刚度过渡段及钢包混凝土段,两段以 60 mm 厚承压钢板为分界,钢包混凝土段设置 PBL 剪力键及预应力钢束。

两片拱肋通过 5 道钢箱横撑连为一体,钢箱横撑采用等腰梯形断面,上底宽 2 231~2 487 mm、下底宽 2 108~2 362 mm、高 2 670~2 724 mm。横撑与钢拱

肋间设整体节点,整体节点与横撑的连接采用全断面熔透焊接连接。

### 2.2.2 三角刚架及混凝土梁

三角刚架及混凝土梁由主墩、前后斜腿、边跨混凝土梁、前横梁、墩顶横梁、后斜腿横梁及系杆索锚固件等结构组成。

主墩断面为矩形,顺桥向 8.5 m,横桥向 3.8 m。前斜腿中心线位于拱轴线的起始段,后斜腿中心线采用抛物线,均为矩形截面(其中空心断面壁厚 1 m),采用预应力混凝土结构。前斜腿截面高度由下端 5.8 m 渐变至上端钢混结合面 3.8 m,桥面以下部分宽度 3.8 m,桥面以上部分 2.8 m;后斜腿截面高度由下端 5.8 m 渐变至上端与主梁边箱相接处 3.8 m,下缘接入主梁,上缘与主梁以 1 m 圆弧相接。三角刚架构造图见图 3。

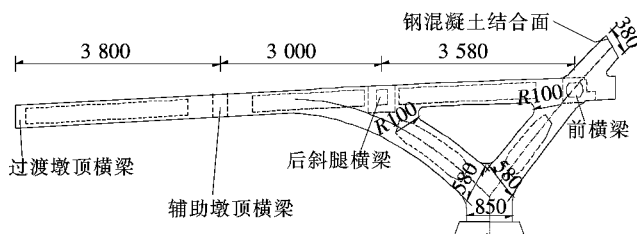


图 3 三角刚架构造图(单位:cm)

边跨混凝土梁为单箱六室箱梁,为预应力混凝土结构,在施工过程中分段浇筑。中箱顶板厚 32 cm,底板厚 30 cm;中腹板厚度由 50 cm 渐变至 80 cm;边箱顶、底板厚 50 cm,腹板厚度由 50 cm 渐变至 65 cm,在横隔板上设置高 80 cm 的拱门形人孔;主梁中心线处梁高 348 cm,边箱梁高 318 cm。混凝土梁横断面图见图 4。

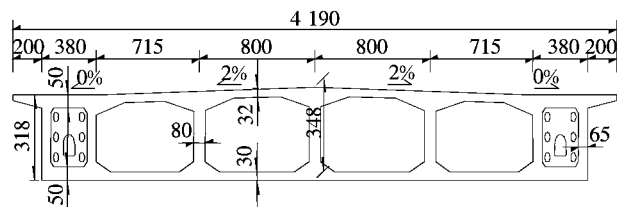


图4 混凝土梁横断面图(单位:cm)

边跨混凝土梁在前斜腿相交处设置前横梁,前横梁为单箱单室截面,宽 4.5 m,梁高在混凝土梁梁底加高 25 cm,壁厚 75 cm,中部设置牛腿,顶部设置伸缩缝预留槽;在后斜腿相交处设置后斜腿横梁,后斜腿横梁采用单箱单室截面,宽 5 m,梁高在混凝土梁梁底加高 50 cm,腹板厚 1.5 m,底板厚 1 m,顶板厚 0.52 m;在辅助墩、过渡墩墩顶处设置墩顶横梁,采用矩形实心截

面,梁高与边跨混凝土梁相同,其中辅助墩墩顶横梁宽 2.8 m,过渡墩墩顶横梁宽 1.8 m。

系杆在边跨混凝土梁边箱内采用锚固块锚固,锚固块与辅助墩墩顶横梁做成一体,一处锚固块锚固 6 根系杆。

### 2.2.3 钢箱梁

中跨主梁采用单箱三室扁平流线形全焊钢箱梁,主跨主梁全长 173.9 m,两端支撑于三角刚架前横梁牛腿上。钢梁桥面总宽 44.9 m,行车道设 2% 横坡,人行道平坡,底部保持水平,标准节段长 10.2 m,最大吊重 234 t。行车道区域、拉索区域、人行道区域顶板厚分别为 16、18、12 mm;底板、斜底板、斜腹板厚 10 mm;直腹板厚 16 mm。行车道区域顶板采用纵向 U 形加劲肋(上口宽 300 mm,底宽 170 mm,高 280 mm,板厚 8 mm,间距 600 mm);行车道区域底板采用纵向 U 形加劲肋(下口宽 500 mm,上底宽 255 mm,高 260 mm,板厚 6 mm,间距 1 000 mm);拉索区域顶板采用板式纵向加劲肋(高 180 mm,板厚 16 mm,间距 400 mm);人行道区域顶板采用板式纵向加劲肋(高 140 mm,板厚 12 mm,间距 400 mm);斜底板、斜腹板采用板式纵向加劲肋(高 120 mm,板厚 10 mm,间距 450 mm)。钢箱梁横断面图见图 5。

钢箱梁横隔板间距为 3.4 m,普通横隔板竖向由上、下两块板组成,上板与钢箱梁顶板一起组装,上、下板通过加劲肋焊接连接。普通横隔板上板厚 16 mm,下板厚 12 mm;拉索区域横隔板板厚 16 mm,吊点处横隔板加厚至 40 mm。除吊点处横隔板采用双面加劲外,其余横隔板均采用单面加劲。吊索连接耳板与吊点处横隔板是同一块板,耳板处顶板预留槽口,该处顶板加劲肋焊接于横隔板上。

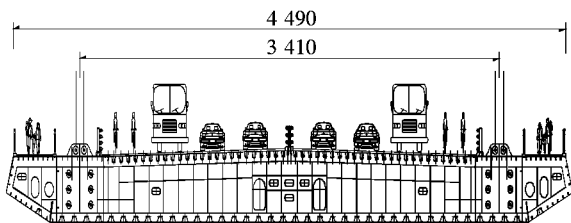


图 5 钢箱梁横断面图(单位:cm)

### 2.2.4 下部结构及基础

#### (1) 主墩下部结构及基础

主墩单个承台尺寸为 16.5 m(顺桥向)×56.278 m(横桥向),厚 5.0 m。为提高整体性,用系梁将两承台连接起来,系梁采用实心混凝土,系梁宽 8 m,与承

台等厚为 5.0 m。主墩基础采用  $3 \times 3 \times 2 = 18$  根  $\phi 2.5$  m 钻孔灌注桩基础,按嵌岩桩设计。拱座为一个棱形柱,底面为 9.8 m(横桥向)×13 m(顺桥向),顶面为 7.8 m(横桥向)×11 m(顺桥向),厚度为 2 m。主墩承台布置图见图 6。

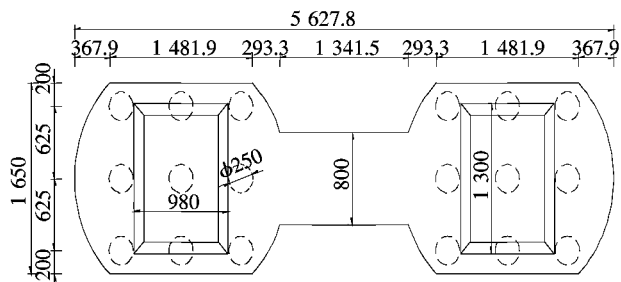


图 6 主墩承台布置图(单位:cm)

#### (2) 辅助墩及过渡墩下部结构及基础

辅助墩采用左右幅分离的花瓶墩。墩身横桥向宽度为 4.0~6.2 m,顺桥向厚度均为 2.5 m,墩顶设喇叭扩头。单个承台平面尺寸为 8.2 m×8.2 m,高 3 m。单个承台底桩基采用 4 根  $\phi 2.0$  m 钻孔灌注桩基础,按嵌岩桩设计。

过渡墩采用等截面双柱墩,横桥向两墩中心间距 20 m,单个墩身横桥向宽度为 4.0 m,顺桥向厚度为 2.2 m,墩顶设预应力盖梁。单个承台平面尺寸为 8.2 m×8.2 m,高 3 m。单个承台底桩基采用 4 根  $\phi 2.0$  m 钻孔灌注桩基础,按嵌岩桩设计。

### 2.2.5 桥面铺装

混凝土梁桥面铺装采用 10 cm 沥青混凝土铺装;钢箱梁采用 4.5 cm 超高韧性混凝土(STC)+3.5 cm SMA-13 组合桥面铺装;人行道铺设 3 cm 花岗岩砖,基底采用 2 cm 环氧砂浆调平层。

### 2.2.6 吊杆索

顺桥向吊杆索中心距为 10.2 m,横桥向设锚点,采用双侧双吊形式,两吊杆索横向间距为 67 cm。吊杆索采用钢绞线整束挤压式拉索体系,为 HDPE 护套索体,上端为钢绞线整束挤压锚头并锚在拱箱拱内隔板上,下端桥面锚点为穿销铰。

### 2.2.7 系杆索

系杆索由高强度低松弛环氧喷涂平行钢丝制成,外包 HDPE 保护层,均设置在主梁箱内,单侧箱内系杆索根数为 6 根。

## 3 结构分析

结构计算分为静力和动力两部分。结构整体计算

按空间杆系理论采用三维程序 Midas 进行计算分析,其中混凝土梁采用折面梁格模型模拟;采用板壳单元对钢箱梁进行仿真分析;采用实体、板壳、梁单元进行全桥仿真复核分析。

3.1 钢箱拱应力分析

钢箱拱分析结果见表 1。由表 1 可知:在基本组合作用下,钢箱拱应力最不利工况是设计基本风荷载

作用工况:拱脚上缘、下缘最大应力为 81.1、86.7 MPa,最小应力为-208.7、-217.0 MPa;四分点上缘、下缘最大应力为 10.3、45.1 MPa,最小应力为-147.0、-123.8 MPa;拱顶上缘、下缘最大应力为-42.0、30.5 MPa,最小应力为-126.7、-92.6 MPa。最大、最小应力满足规范±270 MPa 的限值要求。

表 1 钢箱拱分析结果

荷载工况	拱脚最大 应力/MPa		拱脚最小 应力/MPa		四分点最大 应力/MPa		四分点最小 应力/MPa		拱顶最大 应力/MPa		拱顶最小 应力/MPa		跨中 挠度/ mm
	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	
恒载	-57.0	-48.7	-57.0	-48.7	-59.7	-35.6	-59.7	-35.6	-69.6	-27.5	-69.6	-27.5	
汽车+人群	8.9	5.7	-10.4	-16.2	3.4	5.9	-10.4	-10.2	1.1	2.4	-9.9	-5.4	15.9
设计基本风荷载	79.5	84.8	-79.5	-84.8	49.1	49.8	-49.1	-49.8	18.4	28.2	-18.4	-28.2	
风荷载(25 m/s)	18.8	20.1	-18.8	-20.1	11.6	11.8	-11.6	-11.8	4.4	6.7	-4.4	-6.7	
温度荷载	29.0	30.0	-31.0	-28.2	9.1	13.5	-9.1	-13.7	15.6	20.0	-15.2	-20.5	
沉降	3.0	5.4	-5.6	-2.9	0.7	0.6	-0.8	-1.0	1.1	1.0	-0.6	-1.9	
收缩徐变	-0.6	-6.2	-0.6	-6.2	0.7	3.9	0.7	3.9	-0.3	1.2	-0.3	1.2	

注:压应力为负,拉应力为正。下同。

3.2 三角刚架拱脚处应力分析

三角刚架拱脚处应力计算结果见表 2。由表 2 可知:在频遇组合作用下,后斜腿(拱脚处)上、下缘最大应力为-3.1、-2.7 MPa,前斜腿(拱脚处)上、下缘最大应力为-1.2、-2.1 MPa,均未出现拉应力,满足规范 1.995 MPa 的限值要求。两侧前、后斜腿之间不需通过顶推来消除因收缩徐变导致的向内位移量,故混凝土梁采用单箱六室整体断面是合理的。

3.3 钢箱梁局部受力分析

钢箱梁局部受力分析结果见表 3。

由表 3 可知:钢箱梁最大主压、主拉应力为-118、180 MPa,满足规范±270 MPa 的限值要求;钢箱梁最大剪应力为 72.6 MPa,满足规范 160 MPa 的限值要求。最大主拉应力轨迹线穿过系杆孔位置(内上),需加大该系杆孔加劲肋的厚度。

表 2 三角刚架拱脚处应力

荷载工况	前斜腿(拱脚处) 最大应力/MPa				前斜腿(拱脚处) 最小应力/MPa				后斜腿(拱脚处) 最大应力/MPa				后斜腿(拱脚处) 最小应力/MPa			
	上缘		下缘		上缘		下缘		上缘		下缘		上缘		下缘	
	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧	内侧	外侧
恒载	2.3	0.1	-6.4	-8.6	2.3	0.1	-6.4	-8.6	3.8	0.7	-9.3	-6.2	3.8	0.7	-9.3	-6.2
汽车+人群	0.4	0.4	0.2	0.2	-0.2	-0.3	-0.9	-0.9	0.6	0.6	0.6	0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.6
设计基本风荷载	2.8	2.9	3.3	2.4	-2.8	-2.9	-3.3	-2.4	1.5	1.4	1.4	1.5	-1.5	-1.4	-1.4	-1.5
风荷载(25 m/s)	0.7	0.7	0.6	0.8	-0.7	-0.7	-0.6	-0.8	0.3	0.3	0.3	0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
温度荷载	1.1	0.9	0.8	0.9	-0.9	-0.8	-1.0	-1.1	1.4	0.2	1.1	0.9	-1.4	-0.2	-1.0	-1.1
沉降	0.9	0.9	0.4	0.4	0.4	-0.5	-0.8	-0.8	0.3	0.3	0.7	0.7	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4
收缩徐变	-1.2	-1.4	1.3	1.1	-1.2	-1.4	1.3	1.1	-1.5	-1.2	1.4	1.1	-1.5	-1.2	1.4	1.1
钢束	-6.9	-3.6	-1.4	2.5	-6.9	-3.6	-1.4	2.5	-8.2	-4.5	2.7	-1.4	-8.2	-4.5	2.7	-1.4

表 3 钢箱梁局部受力分析结果

荷载工况	活载作用下跨中挠度/mm	顶、底板应力/MPa		直腹板应力/MPa		直腹板	吊点横隔板应力/MPa		非吊点横隔板应力/Mpa	
		主拉	主压	主拉	主压	Von Mises	主拉	主压	主拉	主压
						应力/MPa				
重轮位于吊点横隔板上	7.3	135.0	—118.0	56.6	—37.7	54.9	180.0	—50.0		
重轮位于非吊点横隔板上	10.5	155.0	—109.0	76.7	—56.3	72.6			75.4	—51.1

3.4 吊杆索、系杆索应力分析

运营状态下吊杆索应力结果见图 7。

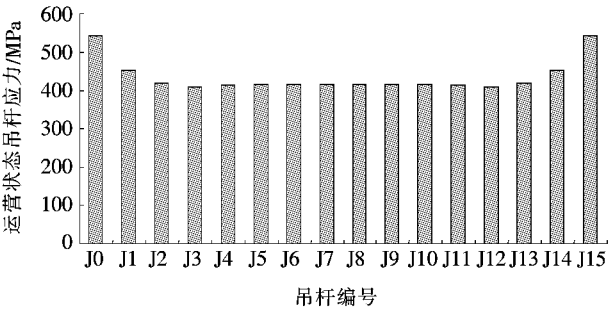


图 7 吊杆索应力

由图 7 可知:最大应力为 541.4 MPa;运营状态下系杆索应力为 576.7 MPa。吊杆索、系杆索抗拉强度标准值均为 1 860 MPa,因此吊杆索设计安全系数为 3.4,系杆索设计安全系数为 3.2,满足规范 2.5 的安全系数限值。

4 结论

(1) 在桥梁方案设计阶段引进“印象进贤,水上莲花”的文化主题,将当地具有特色和代表性的元素融入到大桥的设计中,使历史文化、桥梁功能和景观有效结合,从而突显文化内涵之美。

(2) 拱肋为混合结构,桥面以下采用混凝土拱以利于防船撞和防腐,桥面以上采用钢箱拱以利于减轻自重及便于吊装,在桥面处设钢混结合段;主梁采用混合梁,在边跨和次边跨采用混凝土箱梁,便于支架施

工,增加了边跨压重,有利于减少混凝土拱肋的拉应力;中跨主梁采用扁平闭口钢箱梁,便于施工和减轻自重并提高耐久性。

(3) 次边跨主梁在前横梁处设置隐藏式牛腿,在牛腿上放置中跨钢箱梁,有利于减少拱肋及主梁高度,使结构更轻盈优美。通过牛腿实现三角刚架与柔性梁之间的衔接,避免拱梁交叉处刚度突变造成的不利影响。

(4) 采用实体、板壳、梁单元进行全桥仿真分析,其计算结果与空间杆系模型基本吻合,各项指标均满足规范要求。

参考文献:

[1] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].  
[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 D65—01—2007 公路斜拉桥设计细则[S].  
[4] 李亚东,姚昌荣,梁 艳. 浅论拱桥的技术进步与挑战[J]. 桥梁建设,2012(2).  
[5] 蒋建军,蒋劲松. 攀枝花市新密地大桥主拱圈设计[J]. 桥梁建设,2014(5).  
[6] 李松,强土中,唐英. 钢筋混凝土拱桥极限承载力的参数研究[J]. 西南交通大学学报,2007(3).  
[7] 牟廷敏,梁健,范碧琨,等. 大跨径钢筋混凝土拱桥的新作为[J]. 中国公路,2019(5).  
[8] 吴冲. 现代钢桥(上册)[M]. 北京:人民交通出版社,2006.  
[9] 林春娇,郑皆连. 南盘江特大桥拱圈混凝土斜拉扣索法施工分析[J]. 桥梁建设,2016(5).