

# 劲性骨架混凝土拱桥改进施工工艺可行性研究

任泓锦<sup>1</sup>, 许红胜<sup>1</sup>, 颜东煌<sup>1</sup>, 周大庆<sup>2</sup>, 廖万辉<sup>2</sup>, 李明<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 2.贵州省公路工程集团有限公司)

**摘要:**为缩短劲性骨架混凝土拱桥的施工工期,基于传统的先劲性骨架成拱再分环浇筑拱圈外包混凝土的施工工艺,提出一种将拱圈混凝土底板随劲性骨架一同吊装,再分环浇筑拱圈顶腹板混凝土的改进施工工艺。利用有限元分析软件 Midas/Civil 建立了某在建劲性骨架混凝土拱桥的分析模型,对比传统工艺和改进工艺两种施工方法下的钢管混凝土劲性骨架结构应力及底板混凝土应力,研究劲性骨架带底板节段吊装法新工艺的可行性。分析结果表明:通过优化施工工序,新工艺可以保证施工过程中主体结构受力安全,且与传统工艺相比在改善底板应力不均匀现象方面具有一定优势。

**关键词:**桥梁工程;拱桥;劲性骨架;拱圈混凝土;带底板吊装;有限元分析

劲性骨架混凝土拱桥是以内部劲性骨架作为施工过程中受力结构的特殊混凝土拱桥,一般先架设钢管劲性骨架,并将其作为分环、分段浇筑的外包拱圈混凝土的施工支架。该桥型具有施工难度较低、建造经济性较好、后期维护成本低等优点,在中国大跨度混凝土拱桥中一直具有较强的竞争力。

劲性骨架截面占主拱圈总面积比例较小,劲性骨架重量较轻,外包混凝土重量一般是劲性骨架重量的10倍以上。在外包拱圈混凝土浇筑过程中,劲性骨架挠度变化较大,劲性骨架结构存在一定应力超限的风险。因此,中国学者对劲性骨架外包混凝土浇筑施工进行了大量研究。目前,劲性骨架混凝土拱桥外包拱圈混凝土主要施工方法有分环分段均衡浇筑法和分环连续浇筑法。

贵州某在建钢管混凝土劲性骨架拱桥,由于施工工期限制,拟采用主拱圈劲性骨架带底板吊装的改进施工工艺。该文通过对比该改进施工工艺与原设计分环分段均衡浇筑法的仿真计算结果,分析该改进施工工艺的可行性。

系数  $m=1.988$ 。

拱圈拱轴线范围内均为等截面,拱圈高度 360 cm,宽度 850 cm,单箱两室断面,拱圈顶、底板以及边、中腹板厚度均为 35 cm,拱圈混凝土为 C55 高性能混凝土。弦管采用等直径、等厚度的圆形钢管(型号:  $\phi 377\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ ),内灌注 C80 高强自密实高性能混凝土;腹杆采用组合角钢(型号:4 根  $\angle 75\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ );上、下平联以及横联采用单肢等边角钢(型号:  $\angle 140\text{ mm} \times 140\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ )。腹杆、平联及横联均按 X 形交叉布置。

该桥主拱圈立面图如图 1 所示,横断面图如图 2 所示。

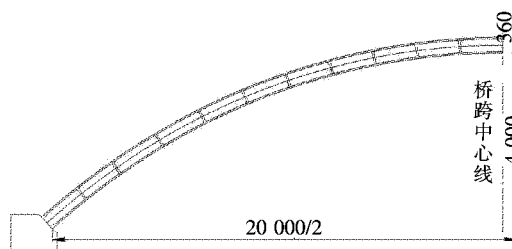


图 1 主拱圈立面图(单位:cm)

## 1 工程概况及模型简介

### 1.1 工程概况

该桥为主孔净跨径 200 m 上承式钢管混凝土劲性骨架箱拱,净矢跨比 1/5,主拱轴线为悬链线,拱轴

### 1.2 仿真分析模型

该桥主拱圈施工采用 Midas/Civil 空间有限元软件进行仿真分析。劲性骨架各杆件均采用梁单元进行模拟,拱圈外包混凝土采用板单元进行模拟,梁、板单元之间通过共用节点进行耦合。模型中劲性骨架包括

1 264 个节点、3 516 个单元,混凝土板单元总计 756 个。根据设计文件提供的混凝土体积和钢材用量对相应材料重度进行换算,主拱圈混凝土重度取:26.55 kN/m<sup>3</sup>,弦管重度取:83.14 kN/m<sup>3</sup>,平联重度取:87.00 kN/m<sup>3</sup>,横联重度取:117.10 kN/m<sup>3</sup>,Q390 钢材弹性模量取 2.06×10<sup>5</sup> MPa,C80、C55 混凝土弹性模量分别取 3.8×10<sup>4</sup>、3.55×10<sup>4</sup> MPa。

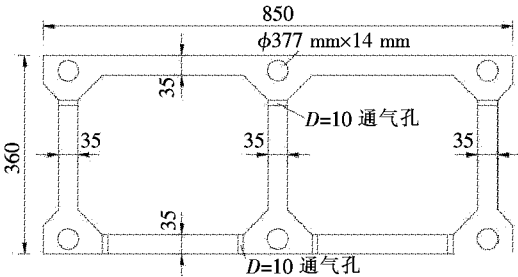


图 2 主拱圈横断面图(单位:cm)

2 主拱圈施工方案对比

该桥主拱圈劲性骨架划分为 18 个节段(拱顶 20 cm 合龙段除外),拱圈截面自拱脚向拱顶依次编号,编号与劲性骨架分段编号一致,如图 3 所示。主拱圈施工过程中,外包混凝土浇筑分为底板、腹板、顶板 3 环。该文拟对第 1 环(底板外包混凝土)施工过程进行研究。为研究主拱圈劲性骨架带底板吊装施工方法的可行性,基于分环分段均衡浇筑法,拟定两个方案如下:

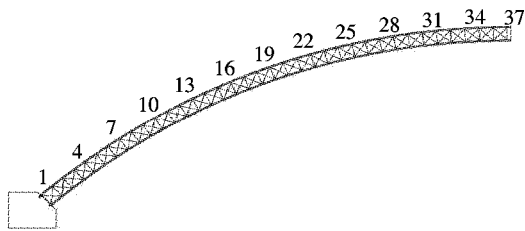


图 3 拱圈截面编号

方案 1:主拱圈外包混凝土沿拱圈纵向分 6 个工作面,如图 4 所示。拱圈外包混凝土进行两岸同步对称浇筑,各工作面长度基本相同,约为 36 m,每个工作面分为 6 个浇筑段,单次浇筑长度约为 6 m。混凝土浇筑需经过 6 次循环,每次浇筑都是从工作面 1 开始至工作面 3 结束,浇筑方向为拱脚至拱顶,具体施工工序如表 1 所示。

方案 2:主拱圈劲性骨架在梁场预制底板混凝土,从而实现劲性骨架的带底板施工。前后两吊装节段接头处,底板混凝土各预留 60 cm 作为底板湿接缝。湿

接缝滞后节段吊装两个节段开始浇筑即吊装 3 节段以后浇筑 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 节段之间底板混凝土湿接缝。为了优化拱脚下弦管受力状况,2<sup>#</sup> 节段吊装完成后提前灌注 1<sup>#</sup> 节段下弦管混凝土。主拱圈拱脚封铰后,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 节段扣索索力值较小,且会对拱脚处底板封铰混凝土受力造成不利影响。因此,7<sup>#</sup> 节段吊装完成以后,提前拆除 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 节段扣索,以保障拱脚底板混凝土的安全。具体施工工序如表 2 所示。

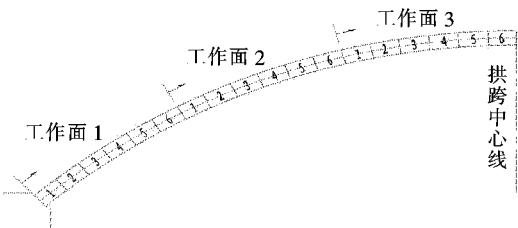


图 4 混凝土浇筑工作面及浇筑段

表 1 方案 1 施工工序

工序编号	施工工序
CS1~CS10	逐段吊装劲性骨架 1~9,劲性骨架合龙
CS11	浇筑弦管管内混凝土
CS12	拆除所有扣索
CS13	浇筑工作面 1 的 1 段混凝土 (以下简称为 1-1 混凝土)
CS14	浇筑 2-1 混凝土
CS15	浇筑 3-1 混凝土
CS16~CS30	依次浇筑 n-i 混凝土(n:1~3,i:2~6)

表 2 方案 2 施工工序

工序编号	施工工序
CS1、CS2	吊装 1 <sup>#</sup> 、2 <sup>#</sup> 节段
CS3	灌注 1 <sup>#</sup> 节段下弦管管内混凝土
CS4	吊装 3 <sup>#</sup> 节段
CS5	浇筑底板接缝 1、2
CS6、CS7	吊装 4 <sup>#</sup> 、5 <sup>#</sup> 节段
CS8	浇筑底板接缝 3、4,拱脚封铰
CS9	吊装 6 <sup>#</sup> 节段
CS10	浇筑底板接缝 5
CS11	吊装 7 <sup>#</sup> 节段
CS12	拆除扣索 1、2
CS13	吊装 8 <sup>#</sup> 节段
CS14	浇筑底板接缝 6、7
CS15	吊装 9 <sup>#</sup> 节段
CS16	劲性骨架合龙,浇筑所有剩余底板接缝
CS17	拆除所有扣索
CS18	灌注弦管混凝土

### 3 计算结果分析

主拱圈混凝土在分环浇筑施工过程中,第1环的浇筑风险最大,且方案1、2在第2、3环混凝土浇筑过程中浇筑工序完全一致,因此,该文仅对第1环混凝土施工完成以前的主拱圈施工过程进行分析。通过对比各关键控制截面的结构应力,对主拱圈劲性骨架带底板吊装施工方法进行研究。

#### 3.1 主拱圈弦管应力分析

弦管在主拱圈施工过程中的结构应力(瞬时应力)水平不高,且小于一环完成后的环末应力(永存应力)。因此,主拱圈弦管应力分析仅考虑方案1、2的弦管永存应力。上、下弦管应力变化曲线如图5所示,图中应力以受拉为正、受压为负(下同)。

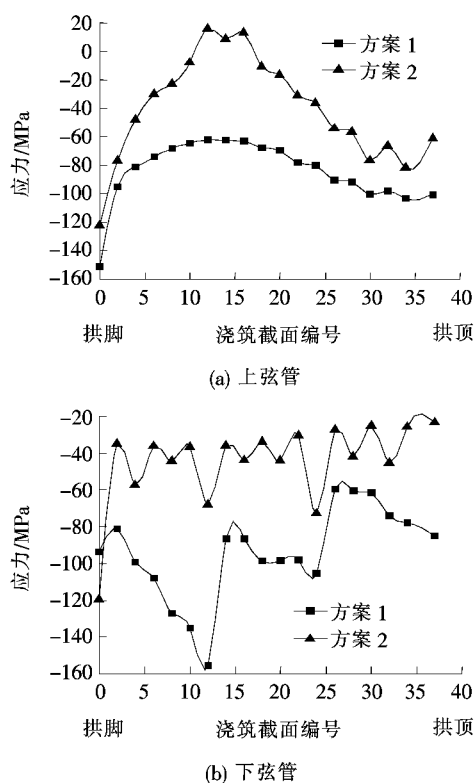


图5 拱圈上、下弦管永存应力图

由图5可知:

(1) 方案2上弦管各截面永存应力均小于方案1。方案1、2拱脚截面上弦管永存应力值分别为-151.2、-122.2 MPa;拱顶截面上弦管永存应力值分别为-100.6、-61.0 MPa; $L/4$ 截面上弦管永存应力值分别为-67.6、-10.9 MPa。方案2中拱脚、拱顶及 $L/4$ 截面的永存应力仅为方案1中永存应力的80.82%、

60.64%、16.12%。

(2) 由于方案1主拱圈分为6个外包混凝土浇筑工作面,各工作面交界处下弦管应力水平较高且变化较大。因此,应力图中明显存在2次较大的应力水平波动。方案2的应力图也存在一定的波动,各波谷位置均对应于底板混凝土湿接缝处下弦管。方案1、2拱脚截面下弦管永存应力值分别为-93.7、-119.8 MPa,后者比前者增加了27.85%;拱顶截面下弦管永存应力值分别为-85.0、-23.2 MPa,后者比前者减小了72.71%; $L/4$ 截面下弦管永存应力值分别为-98.7、-33.7 MPa,后者比前者减少了65.86%。方案2中,拱脚处有1.5 m拱脚底板封铰混凝土,该处混凝土在拱脚封铰后进行浇筑。因此,在拱脚封铰之前,拱脚处承受的压力仅由下弦管承受。尽管方案2中提前灌注了1#节段下弦管管内混凝土,可以降低下弦管钢管应力水平,但是方案2节段重量远大于方案1,所以方案2拱脚处下弦管应力值大于方案1。除靠近拱脚截面处,方案2下弦管应力水平均远小于方案1,且应力波动幅值较小。

#### 3.2 主拱圈底板混凝土应力分析

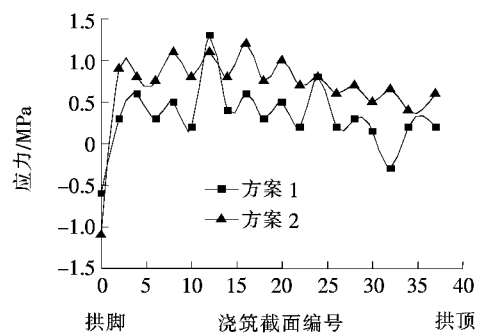
混凝土抗压性能好,拱圈底板混凝土不会出现压应力超限风险。因此,仅对方案1、2中底板混凝土最大应力即可能存在的拉应力进行对比分析。

根据JTG D62-2012《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》,C55混凝土抗拉强度标准值 $f_{tk}=2.74$  MPa、抗拉强度设计值 $f_{td}=1.89$  MPa,对施工过程中底板混凝土瞬时应力设定1.8 MPa预警值。方案1在浇筑3-5底板混凝土时,3#、4#节段接头处混凝土应力为2.2 MPa,超出预警值;方案2在CS7-5#节段吊装时,3#节段底板混凝土前端拉应力超出预警值,达到1.9 MPa。方案1、2瞬时应力均小于2.74 MPa,满足规范要求。

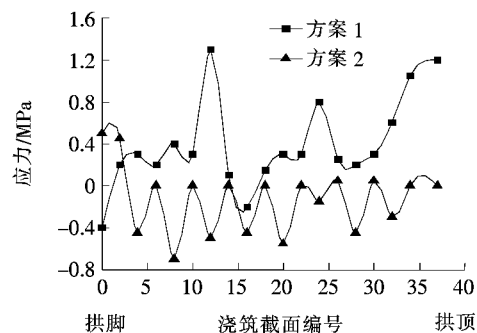
方案1、2的拱圈顶板混凝土永存应力如图6所示。

由图6可知:

(1) 由于方案1在底板混凝土浇筑过程中劲性骨架刚度较低,主拱圈反复变形给底板混凝土带来一定风险。混凝土底板采用板单元进行模拟,且图中所给定底板应力值均为该处截面位置各个板单元中应力最大值,所以会出现底板顶面、底面均产生拉应力的情况。例如:在4号截面即1#、2#节段接头处,底板混凝土顶面的边缘有0.6 MPa拉应力,底板混凝土底面的中心有0.3 MPa压应力。



(a) 底板顶面



(b) 底板底面

图 6 拱圈底板混凝土永存应力图

(2) 方案 1 中底板顶面最大拉应力为 1.3 MPa,且图形存在两个明显波峰,此处为工作面交界处。方案 2 中底板顶面最大拉应力为 1.2 MPa,此处为靠近  $L/4$  的节段底板湿接缝处。对比两方案的底板顶面应力,方案 2 最大拉应力略小于方案 1,应力波动变化较小(除拱脚处),平均应力水平高于方案 1,但两者均可满足规范要求。

(3) 方案 1 中底板底面最大拉应力为 1.3 MPa,满足规范要求,但远大于方案 2 中的 0.5 MPa。相比方案 1,方案 2 应力变化幅度较小,底板混凝土底面受力更合理。

### 3.3 主拱圈弦管管内混凝土应力分析

方案 1 弦管管内混凝土瞬时应力均小于永存应力,因此,仅对永存应力进行分析,应力图如图 7 所示。在方案 2 中,1# 节段下弦管预灌管内混凝土在拱脚处有最大 -13.1 MPa 压应力,其他各截面应力值均接近 0。方案 1、2 中弦管管内混凝土压应力水平低,且不产生拉应力,受力状况良好。

## 4 结论

通过分环分段均衡浇筑法和带底板劲性骨架吊装法的仿真计算结果对比,得出如下结论:

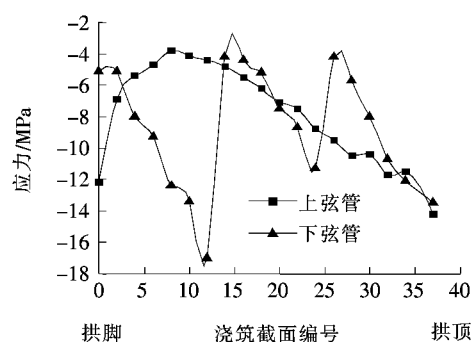


图 7 方案 1 弦管管内混凝土永存应力图

(1) 劲性骨架带底板吊装施工工艺具备可行性。通过对环段外包拱圈混凝土施工工序的优化控制,该方法可保障主拱圈外包混凝土施工过程中的安全性。

(2) 与传统分环分段均衡浇筑法相比,带底板劲性骨架吊装施工工艺可以有效降低钢管弦管应力水平,并对底板混凝土永存应力不均匀现象起到一定改善作用。

(3) 采用带底板劲性骨架吊装法施工主拱圈时,拱脚及节段交界处结构应力变化较大,这些关键截面的安全性控制是该改进施工工艺中的重要环节。

### 参考文献:

- [1] 赵人达,张正阳.我国钢管混凝土劲性骨架拱桥发展综述[J].桥梁建设,2016(6).
- [2] 王业飞,蔡金标,杨国静.劲性骨架混凝土拱桥施工稳定性分析[J].桥梁建设,2011(3).
- [3] 郑皆连.在劲性拱骨架上实现混凝土连续浇注的探讨[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011(S2).
- [4] 张富贵,张永水,董义,等.大跨劲性骨架拱桥外包混凝土浇筑方案[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012(2).
- [5] 董创文,廖龙辉,李传习,等.猛洞河大桥斜拉扣挂方案的确定与优化[J].公路交通科技,2012(5).
- [6] 冯丛,云桂铁路南盘江特大劲性混凝土拱桥施工技术探讨[J].铁道建筑技术,2012(8).
- [7] 张二华,黄珍.大跨径劲性骨架钢管拱桥拱肋施工过程仿真分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013(S1).
- [8] 王达,唐成,张海萍,等.大跨度 CFST 劲性骨架拱桥外包混凝土浇筑施工研究[J].中外公路,2016(5).
- [9] 林春姣,郑皆连.南盘江特大桥拱圈混凝土斜拉扣挂法施工分析[J].桥梁建设,2016(5).
- [10] 于长彬.大跨度拱桥拱圈混凝土斜拉扣挂和分环分段组合施工技术[J].铁道建筑技术,2016(6).
- [11] 林春姣,郑皆连,李翔,等.斜拉扣索调整南盘江特大桥拱圈的结构应力[J].广西大学学报(自然科学版),2017(1).