

# 波形钢腹板混凝土拱桥新桥型构思

陈宝春,王远洋,黄卿维

(福州大学土木工程学院,福建 福州 350002)

**摘要:**介绍了波形钢腹板在桥梁结构中的应用发展概况和国外大跨度混凝土拱桥最新的研究进展,提出了波形钢腹板混凝土拱桥新型桥梁结构,并以重庆万州长江大桥为原型进行了试设计,对试设计初步成果进行了介绍。分析结果表明,这种新桥型在减轻拱圈自重、方便施工、缩短工期等方面具有相当的优越性,为混凝土拱桥向大跨径发展提供了一个新的思路。

**关键词:**拱桥;波形钢腹板;混凝土结构;试设计

**中图分类号:** U448.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-7767(2006)04-0010-05

## 1 波形钢腹板 PC 箱梁应用发展概况

用轻质高强的波形钢板代替厚重的混凝土腹板而成的波形钢腹板 PC 组合箱梁桥,能有效地降低自重,可提高预应力的效率,减少下部结构的工程量,方便施工,进而可降低工程总造价,因此,自 1986 年法国修建了科尼亚克(Cognac)高架桥以来,它在国外发展得很快<sup>[1]</sup>。在日本,波形钢腹板 PC 组合箱梁还被推广应用到部分斜拉桥和斜拉桥中<sup>[2]</sup>。我国在 2005 年相继建成两座波形钢腹板 PC 组合箱梁桥,分别是单跨 25 m 的重庆大堰河桥和 4 孔 30 m 的先简支后连续的河南泼河大桥,填补了我国在这种新型桥梁结构领域的空白。

## 2 大跨度混凝土拱桥研究进展

目前世界上跨径最大的混凝土拱桥是重庆万州(原四川万县)长江大桥,其跨径为 420 m。尽管近几十年来,混凝土拱桥的修建在世界范围内不是很多,但近些年国外学者对大跨径混凝土拱桥的研究又活跃起来,不断提出修建超大跨径混凝土拱桥的设想,并开展了相应的研究。

克罗地亚在 1979 年建成了主跨 390 m 的克尔克(Krk)桥 1 号桥,为当时跨径最大的混凝土拱桥。最近他们又相继提出了修建跨径达 432 m 的巴卡尔(Bakar)桥的设计构思以及跨径分别为 500 m、750 m 和 1 000 m 混凝土拱桥的试设计研究<sup>[3,4]</sup>。这些桥的设计方案或构思均选用了活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete,简称 RPC)作为桥梁结构的主要材料,以减轻结构自重,满足结构受力要

求,同时在结构优化和施工方法上进行了有益的探讨。

日本是一个山地岛国,也修建了大量的钢筋混凝土拱桥。截止到 2003 年 3 月,日本修建的跨径在 100 m 以上的钢筋混凝土拱桥有 38 座,此外还有 13 座正在设计<sup>[5]</sup>。日本土木学会于 2003 年出版了《600 m 跨径级的混凝土长大拱桥的设计与施工》<sup>[6]</sup>一书。

2004 年 12 月建成通车的法国米勒高架桥在国际方案竞标中,也出现了主跨 602 m 的混凝土拱桥方案<sup>[7]</sup>。该方案以主孔为 602 m 跨径的混凝土拱桥一跨跨越塔恩河谷,气势磅礴、雄伟壮观,与周围环境极为协调。由于该方案未能中标,因此也未对其进行深入的研究,但方案中的一些构思对于大跨径混凝土拱桥还是具有很大的借鉴意义。

## 3 波形钢腹板混凝土拱桥新桥型的提出

拱桥按主要材料来分,可分为石拱桥、钢拱桥、钢筋混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥。石拱桥和钢拱桥向更大跨径的突破,从正常的工程技术经济角度而言已十分困难,前者主要受到材料强度低、自重大、施工困难、对地质条件要求较高等因素的制约,后者主要由于高强的钢材用于以受压为主的拱结构中,需耗费大量的材料在增强结构的刚度上,而且与斜拉桥相比,其施工架设困难且费用高。对于钢管混凝土拱桥来说,跨径继续增大到 500 m 和 500 m 以上是有可能的。然而,对这种桥型结构的基本受力性能、设计理论的研究还处于发展之中,向长大化

收稿日期:2006-04-24

作者简介:陈宝春(1958-),男,教授,1982年毕业于福州大学路桥专业,工学学士,1986年毕业于福州大学结构工程专业,工学硕士,2003年获日本九州大学工学博士学位。

发展虽具有相当的潜力,但在实际应用中应当持谨慎的态度。以廉价的抗压强度高的混凝土作为结构主要材料的混凝土拱桥从结构方面而言无疑是合理的,综合考虑强度与刚度的因素,优于石拱桥与钢拱桥,适合于以受压为主的拱桥结构,设计理论与工程实践比钢管混凝土拱桥成熟,因此,在4种拱桥桥型中,钢筋混凝土拱桥向超大跨径方向发展是最值得研究的<sup>[8,9]</sup>。

大跨径混凝土拱桥的主要问题是结构自重较大、施工困难,因此减轻其结构自重是其向更大跨径发展需要研究的关键问题之一。

应用轻质高强的混凝土材料是减轻结构自重的方法之一,如前述的国外几座大跨径混凝土拱桥试设计研究中都提到的RPC混凝土。然而RPC混凝土目前尚处于研究与试应用阶段,仅在小跨径桥和人行桥中得到应用,它对于大跨径拱桥的应用,还有许多研究工作要做。减轻拱桥结构自重的另一个有效途径就是采用钢-混凝土组合结构。2004年克罗地亚建成的跨径为204m的克尔克桥,桥道系采用了钢-混凝土组合结构,整个结构的自重比同在克罗地亚的跨径为200m的原马斯利尼察(Maslenica)桥减轻了35%。在其比选方案中,提出拱圈截面采用钢-混凝土组合式拱截面的思路,用重量为546t的钢空间桁架来替代具有相同结构性能的重量7470t的混凝土拱<sup>[10]</sup>。

混凝土拱桥向大跨径发展的另一个要解决的主要问题是其施工架设。大跨径混凝土拱桥常用的施工方法有悬臂施工法(含斜拉悬臂和悬臂桁架)、劲性骨架法和二者相结合的方法。

悬臂施工法是国内外大跨径拱桥使用最为广泛的施工方法,其施工经验较为成熟,但悬臂长度随跨径的增大而增大,使悬臂施工的难度成倍增加。采用劲性骨架法是修建大跨径混凝土拱桥的另一种有效办法,但早期采用型钢作为劲性骨架时,耗用钢材数量很大,经济性能较差。我国采用钢管混凝土作为劲性骨架,使得这一方法的经济性得到改善,这也是我国的邕宁邕江大桥和万州长江大桥跨径能有较大突破的一个重要原因。

根据以上分析,本文创新性地提出波形钢腹板混凝土拱桥新桥型的构想。

波形钢腹板混凝土拱桥新桥型是指混凝土箱拱桥的腹板采用波形钢板代替混凝土腹板,以减轻拱圈的自重并减小截面尺寸(主要是顶底板厚度),方便施工并降低对墩台基础的要求。施工方法仍采用

劲性骨架法,由于省去了浇筑腹板混凝土的工序,极大简化了施工、缩短了施工周期,且有利于施工安全。

我国是一个多山的国家,拱桥技术已取得巨大的成就,在今后的交通建设中,拱桥仍有着广泛的应用范围,特别是在西南山区,大跨度混凝土拱桥仍有着很强的竞争力,波形钢腹板混凝土拱桥有着良好的应用前景。

#### 4 波形钢腹板混凝土拱桥试设计方案介绍

根据波形钢腹板混凝土拱桥的构思,以目前世界上跨径最大的混凝土拱桥-主孔跨径420m的重庆万州长江大桥为对象,进行了试设计分析。作为初步分析,仅将原混凝土腹板用波形钢腹板代替,其余所有设计参数都维持不变。

##### 4.1 总体布置

重庆万州长江大桥,设计荷载为汽车-超20、挂车-120、人群荷载 $3.5\text{ kN/m}^2$ ,桥面宽度为净 $2\times 7.5\text{ m}$ 行车道+ $1.0\text{ m}$ 分隔带+ $2\times 3.0\text{ m}$ 人行道,总宽24m。桥梁采用上承式钢筋混凝土箱拱,桥长439.35m,计算跨径424.59m,计算矢高84.86m,矢跨比 $1/5$ ,拱轴线系数 $m=1.6$ 。拱上立柱共12对,高度从0.93~59.94m不等,主梁统一采用 $L=30.668\text{ m}$ 跨度的后张预应力混凝土T梁,每孔设置10片,主梁梁高1.75m,间距2m。

试设计时上部结构尺寸与原桥相同,仅将原混凝土腹板改为波形钢腹板。施工仍采用钢管混凝土劲性骨架施工法,由于腹板采用波形钢腹板,因此其劲性骨架中连接主弦管的竖向桁片用波形钢板代替。试设计桥梁的总体布置示意图1。

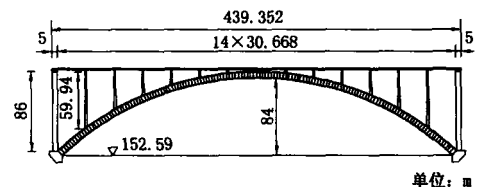


图1 总体布置示意

##### 4.2 主拱圈构造

拱圈为单箱三室截面(见图2),横向采用等宽16m,纵向采用外形等高7m,其中中箱宽7.6m,边箱宽3.8m,拱圈拱脚至第1根立柱间为变厚段,顶、底板混凝土厚度由0.8m线性变化至0.4m,腹板采用波形钢板,取用Q345号钢板,厚度10mm,直接与上下主弦管焊接,具体尺寸详见图3。为了增强拱圈截面整体性和局部屈曲稳定性,大约每15

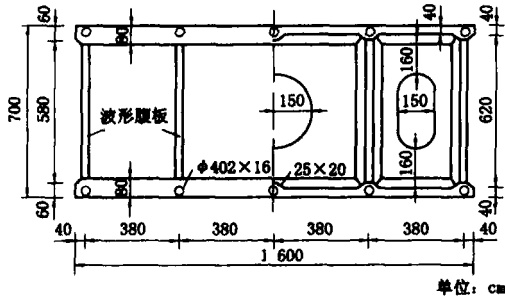


图2 主拱圈横截面

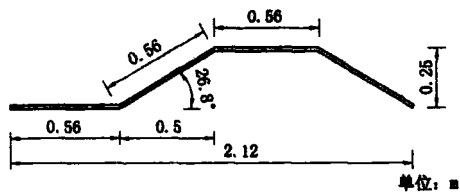


图3 波形钢腹板尺寸

m 设置 1 道混凝土横隔板,隔板厚 0.25 m。

由于试设计的拱上结构与原桥相同,故表 1 仅给出了拱圈的主要工程数量。从表中可以看出,波形钢腹板混凝土拱桥的混凝土数量比万州长江大桥减少了 31%;劲性骨架钢材用量 2 487 t,较之万州长江大桥增加了 19%。主拱圈自重从原设计的 29 730 t,减小到 21 597 t,减轻自重达 27%。

表 1 拱圈工程数量表

	万州长江大桥	试设计
混凝土/m <sup>3</sup>	11 054	7 644
钢材/t	2 095	2 487

### 4.3 施工方案

劲性骨架安装分 36 个节段全宽预制,缆索吊装<sup>[11]</sup>。每段横向由 4 桁片组成,每一桁片由波形钢腹板与主弦管焊接而成,上下弦管仍采用 φ402 × 16 mm(16Mn)无缝钢管,通过节点板,顶、底风构联结系杆件把 4 块桁片组焊为一个约 7 m × 13 m × 16 m 的空间桁段起吊单元,每个空间桁段重约 69 t,比原桥吊装重量(60 t)略重。待骨架合龙后,再灌注主弦管内 C60 混凝土,最后浇筑顶、底板混凝土及横隔板。待拱圈强度形成后,进行拱上结构施工,其施工方法与万州长江大桥相同。

万州长江大桥外包混凝土的数量达 9 865 m<sup>3</sup>,采用传统的均衡浇注法施工。横向分环本着“先中箱,后边箱,先底板,后腹板,再顶板”的浇筑原则,分为 8 个浇筑工况,分别为劲性骨架弦杆管内混凝土、中箱底板、中箱腹板下半段、中箱腹板上半段、中箱顶板、边箱底板、边箱腹板和边箱顶板。计算表明浇筑中箱腹板时安全系数较低,因此将中箱腹板浇筑

按一次浇筑一半高度,分为 2 个工况。横向每环的纵向浇注共分 6 个工作面对称同步浇注。6 个工作面浇筑时,拱圈底板分为 13 个浇筑工作段,除拱座承托区工作段全宽浇筑 3.5 m 外,其余工作段浇筑长度均为 6.43 m;腹板混凝土每工作面分为 6 个浇筑工作段,每工作段浇筑长度 13 m;顶板混凝土每工作面分为 12 个浇筑工作段,每工作段浇筑长度为 6.55 m。

万州长江大桥外包混凝土实际施工花了 224 d,其中腹板 70 d。因此,如果采用波形钢腹板将省去 70 d 的浇筑混凝土的时间。

### 5 试设计方案初步计算结果分析

利用通用有限元程序 ANSYS 分别建立万州长江大桥与试设计的波形钢腹板混凝土拱桥的平面模型,以比较它们在恒载和活载作用下的总体受力状况。两模型均将内埋劲性骨架的拱圈简化为普通钢筋混凝土结构,并不考虑拱圈劲性骨架的钢管对核心混凝土的紧箍力<sup>[11]</sup>。所以试设计模型与万州长江大桥一样,拱圈刚度仅计入主弦管与混凝土的刚度,采用以下公式进行等效:

$$EA = E_c A_c + E_s A_s$$

$$EI = E_c I_c + E_s I_s$$

式中,EA、EI 分别为主拱圈全截面的抗压和抗弯刚度;E<sub>c</sub>、E<sub>s</sub> 分别为混凝土和钢管的弹性模量;A<sub>c</sub>、A<sub>s</sub> 分别为混凝土(包括套箍混凝土和外包混凝土)和钢管的截面积;I<sub>c</sub>、I<sub>s</sub> 分别为混凝土和钢管的惯性矩。

由于波形钢板具有折迭效应,经过计算,其有效弹性模量仅为钢板原有弹性模量的 1/1 524,所以试设计桥梁中拱圈轴向与弯曲刚度没有考虑波形钢腹板的贡献<sup>[12]</sup>。

万州长江大桥与试设计拱圈各控制截面在恒载作用下的弯矩、轴力值以及温度活载作用下的内力值见表 2。波形钢腹板混凝土拱桥在结构自重作用下的弯矩示意图 4。与万州长江大桥相比,试设计桥梁拱圈各截面在自重作用下轴力都显著降低,拱脚轴力为 - 300 800 kN,降低了 17%,水平推力为 226 753 kN,比原桥降低了 17%,且由于拱圈刚度的减小,温度变化和混凝土收缩产生的附加内力也下降了。弯矩方面,拱脚、3/8 等截面在自重作用下弯矩有不同程度的增大,拱脚截面为 - 214 400 kN · m,增加了 20%,拱顶截面的弯矩为 163 200 kN · m,降低了 3%。试设计桥梁的拱圈自重减轻了,自重作用下的各截面的弯矩按理也应相应减小,

之所以出现拱圈各截面弯矩有升有降的变化,初步分析认为是由于拱圈自重减轻引起悬链线拱轴系数  $m$  的变化在本次试设计中没有考虑。

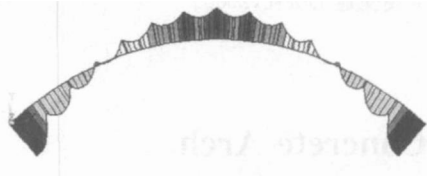


图4 波形钢腹板混凝土拱桥恒载弯矩示意  
表2 试设计拱圈内力计算表

截面位置	恒载		温度(温降、混凝土收缩共 - 30 )	
	$N_g/kN$	$M_g/kN \cdot m$	$N_t/kN$	$M_t/kN \cdot m$
试设计				
拱脚	- 300 800	- 214 400	2 080	- 156 560
1/8	- 268 800	- 83 630	2 336	- 49 829
1/4	- 243 900	- 738	2 559	21 558
3/8	- 230 800	92 180	2 691	62 511
拱顶	- 227 200	158 200	2 740	75 855
万州长江大桥				
拱脚	- 364 200	- 178 500	2 351	- 176 400
1/8	- 324 500	- 88 900	2 655	- 55 935
1/4	- 295 100	- 13 290	2 895	24 480
3/8	- 279 500	90 860	3 045	70 635
拱顶	- 275 100	163 200	3 092	85 680

表3所示为试设计拱圈截面的验算结果,其中组合 为结构重力+汽超-20+人群+混凝土收缩(按温度降低-10考虑),组合 为结构重力+汽超-20+人群+混凝土收缩+温度影响力(-20)<sup>[13,14]</sup>。经过计算,波形钢腹板混凝土拱桥各截面轴向力承载力极限值均大于轴力设计值,轴向力偏心距也都小于规范规定的容许偏心距<sup>[15]</sup>。

表3 拱圈截面验算结果

截面	荷载	轴向力 $N/kN$	偏心距/ $m$	截面抗力 $N_u/kN$	$N_u/N$
拱脚	组合	- 390 045	1.58	555 071	1.42
	组合	- 313 676	1.96	499 193	1.59
1/8	组合	- 356 021	0.55	370 705	1.04
	组合	- 286 670	0.68	365 245	1.27
1/4	组合	- 313 878	- 0.47	373 651	1.19
	组合	- 249 082	- 0.54	371 168	1.49
3/8	组合	- 300 481	- 0.94	352 143	1.17
	组合	- 238 258	- 1.15	338 906	1.42
拱顶	组合	- 296 785	- 1.19	336 324	1.13
	组合	- 235 270	- 1.46	317 828	1.35

6 结 语

根据拱桥的发展与国内外最新研究成果,结合波形钢腹板在桥梁中的应用,本文首次提出了波形钢腹板混凝土拱桥新桥型的构思。波形钢腹板混凝土结构具有质轻高强、抗剪能力强、施工方便等方面的优点,若将它应用于拱圈结构中代替厚重的混凝土

土腹板,可起到减轻结构自重、方便施工(免浇筑腹板混凝土)的作用,为混凝土拱桥向大跨度的发展提出了新的思路。

本文以万州长江大桥为原型进行了试设计的初步分析。分析表明,波形钢腹板混凝土拱桥的拱圈自重可减轻27%,采用钢管混凝土劲性骨架施工的吊装重量略有增加,施工中少了浇筑腹板混凝土的工序可节约工期70d。初步计算表明,拱圈在自重作用下的轴力降低了,但由于试设计仍采用万州长江大桥的拱轴线,其压力线与拱轴线可能存在着较大偏离,导致了一些截面的弯矩增大,因此,有必要对拱轴线、截面尺寸进行进一步的优化。

虽然波形钢腹板近期在桥梁中得以广泛应用,但将之用于拱桥还是首次提出,本文的分析也只是初步的。波形钢腹板混凝土拱桥要在实际工程中得到应用,还要在其局部受力性能、构造处理、施工方法与工艺、对拱极限承载力、稳定、变形、动力特性等方面的影响开展深入的研究。

参 考 文 献:

- [1] 陈宝春,黄卿维. 波形钢腹板 PC 箱梁桥应用综述[J]. 公路,2005,(7):45-53.
- [2] 陈宝春,黄玲,吴庆雄. 波形钢腹板部分斜拉桥[J]. 世界桥梁,2004,(4):5-8.
- [3] 陈昫明,陈宝春,吴炎海,等. 432 m 活性粉末混凝土拱桥的设计[J]. 世界桥梁,2005,(1):1-5.
- [4] 王远洋,陈宝春. 1 000 m 跨径混凝土拱桥研究[J]. 世界桥梁,2006,(1):1-3.
- [5] 陈宝健,许有胜,陈宝春. 日本钢筋混凝土拱桥调查与分析[J]. 中外公路,2005,(4):99-101.
- [6] 日本土木学会. コニケリー ト長大アーチ - 支間 600 m クラヌー の設計施工[M]. 东京:日本土木学会,2003.
- [7] 陈宝春,黄卿维. 600 m 跨径混凝土拱桥的试设计研究[J]. 中外公路,2006,(1):80-82.
- [8] 陈宝春. 拱桥技术成就与展望[A]. 第二届全国公路科技创新高层论坛论文集[C]. 北京:朝华出版社,2004.
- [9] 陈宝春. 超大跨径混凝土拱桥探索研究[A]. 中国土木工程学会桥梁与结构工程学会第十七届年会论文集[C]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [10] Jure Radic, Zlatko Savor, Alex Kindij. Development of Arch Bridges[A]. Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Conference on New Dimensions in Bridges [C]. Fuzhou, China 2005. 249-256.
- [11] 四川省交通厅,四川省公路规划勘察设计研究院,四川公路桥梁建设集团有限公司. 万县长江公路大桥技术

- 总结[M]. 成都:电子科技大学出版社,2001.
- [12] 刘玉擎. 组合桥梁结构[M]. 北京:人民交通出版社, 2005.
- [13] 顾安邦,范立础. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [14] 交通部公路规划设计院. 公路桥隧设计规范汇编(2001版)[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [15] 顾懋清,石绍甫. 公路桥涵设计手册拱桥(上)[M]. 北京:人民交通出版社,2000.

## Conception of New Type of Concrete Arch Bridge with Corrugated Steel Webs

CHEN Bao-chun, WANG Yuan-yang, HUANG Qing-wei  
(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract :** This paper gives a summarized account of the application and development of corrugated steel webs used for bridge structures, the latest research advancement of long span concrete arch bridges abroad and proposes a new type of concrete arch bridge structure composited with corrugated steel webs. By taking Wanzhou Changjiang River Bridge in Chongqing as the prototype, the trial design of the proposed new type of the arch bridge is carried out and preliminary achievements of the trial design are presented. The results of the design and analysis show that the new type of the bridge structure has considerable advantages in aspect of decreasing dead weight of main arch ring, making construction easier and shortening construction time schedule, and the type of the bridge provides a new alternative for the development of concrete arch bridges towards still longer spans.

**Key words :** arch bridge; corrugated steel web; concrete structure; trial design

(上接第9页)

**Abstract :** The structural behavior of the two-way curved half-through arch bridge of butterfly shape is clear, rational and the type of the bridge is a one that deserves further study and design. In this paper, in the light of the conceptual design and calculation of a certain bridge, the design key points, structural behavior and construction methods of the type of the bridge are described, and the subjects and suggestions for further study of the type of the bridge in the future are put forward as well.

**Key words :** two-way curved arch bridge; butterfly-shape bridge; bridge design