

文章编号:1671-2579(2007)02-0078-06

# 160 m 跨径波形钢腹板混凝土拱桥试设计

黄卿维, 陈宝春

(福州大学, 福建 福州 350002)

**摘 要:** 波形钢腹板混凝土拱桥是混凝土拱圈用波形钢板代替混凝土腹板的一种新桥型。它与混凝土拱桥相比,可减轻拱圈自重,方便施工,并为拱桥向更大跨度发展提供可能。该文以在建的福建宁德岭兜大桥(净跨 160 m)为原型,进行了波形钢腹板混凝土拱桥的试设计分析。初步分析结果表明,与原设计相比,试设计拱桥的拱圈自重可减轻 30%,拱圈轴力可降低 15%~17%,在施工性能上也具有较大的优势。

**关键词:** 拱桥; 混凝土; 波形钢腹板; 新桥型; 160 m; 试设计; 施工

## 1 概述

我国的拱桥不仅数量众多、桥型丰富,而且保持着石拱桥、钢拱桥、钢筋混凝土拱桥和钢管混凝土拱桥跨径的世界纪录。不过,近 20 年来拱桥的研究和发展与其他桥梁(如斜拉桥、悬索桥、预应力混凝土连续梁桥和连续刚构桥)相比却相对落后,特别是钢筋混凝土拱桥,进入 21 世纪后,其修建的数量有下降的趋势,其中在 100~160 m 跨径范围作为最有竞争力的钢筋混

土拱桥的修建数量较以往也有明显的减少。

制约钢筋混凝土拱桥发展的主要问题是其结构自重大、施工架设困难。拱桥在主拱未完成合龙之前,需要依靠临时辅助设施或结构(如支架、拉索等)来支承施工中未成型的主拱结构。随拱圈自重的增加,施工费用与难度也急剧增大。对于大跨度预制拼装的混凝土拱桥来说,《公路砖石及混凝土桥涵设计规范》(JTJ 022-85)仅要求预制拱箱板厚不小于 50 mm,而现行规范《公路圬工桥涵设计规范》(JTGD61-2005)规定预制的拱箱板厚不应小于 100 mm。因此,应用新规

## 3 结论

(1) 施工仿真建模时对墩梁分离结构的模拟宜考虑墩的变形对上部结构的影响以及对成桥累积位移的影响,宜采用主从约束模拟墩梁分离结构的内部约束关系。

(2) 应明确区分应力等效计算模式和位移等效计算模式,根据需要选择适当的计算模式。对于其他类型的桥梁,这两种模式同样也要区别对待,合理选用。

(3) 对于连续-刚构组合梁桥的 4 种可能的体系转换顺序,研究表明先中跨合龙,再解除临时锚固,最

后边跨合龙的施工顺序可以得到较合理的成桥内力,以及有利的成桥累积变位。对于此类桥型建议采用此种体系转换施工顺序。

### 参考文献:

- [1] 马保林,李子青.高墩大跨连续刚构桥[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 欧庆宝.润扬长江公路大桥建设[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [3] 王文涛.刚构-连续组合梁桥[M].北京:人民交通出版社,1995.
- [4] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,1996.

收稿日期:2006-09-14

作者简介:黄卿维,男,博士研究生. E-mail:baochunchen@fzu.edu.cn

范后拱圈的截面有增厚的趋势,预制拱圈节段的自重增大,施工难度将进一步加大。

虽然拱是以受压为主的结构,但大量工程实践证明,弯矩往往成为结构设计的控制内力。由于拱圈结构中腹板的抗弯作用远小于截面的顶底板,所以若用波形钢板取代拱圈中厚重的混凝土腹板,则可以大大减轻拱圈的自重,方便施工,并为混凝土拱桥向更大跨度发展提供可能。为此,本文第二作者提出了波形钢腹板混凝土拱桥的构思,并以 420 m 跨径、采用劲性骨架施工的重庆万州大桥为原型进行了试设计,其分析结果表明该桥型在降低结构内力、施工性能等方面有一定的优势,具有良好的应用前景。

为了推动这种新桥型的应用,有必要对其进行一般跨径的试验桥应用研究。为此,本文以在建的福建

宁德岭兜大桥为原型,进行了净跨 160 m 波形钢腹板混凝土拱桥的试设计研究。在该试设计桥梁中采用斜拉悬臂法施工,并对这种桥型采用非劲性骨架法施工进行探讨。

### 2 岭兜大桥概况

桥梁全长 329.5 m,主跨为 160 m 钢筋混凝土箱形拱,桥面宽度为净 - 9 + 2 × 0.5 m 防撞栏。设计采用旧规范,设计荷载为汽车 - 超 20 级,挂车 - 120,设计地震基本烈度为 6 度,按 7 度构造设防。主跨采用上承式钢筋混凝土悬链线箱形拱,净跨径为 160 m,净矢高为 1/4,拱轴线为悬链线,拱轴系数为 2.114。其主跨的总体布置见图 1。

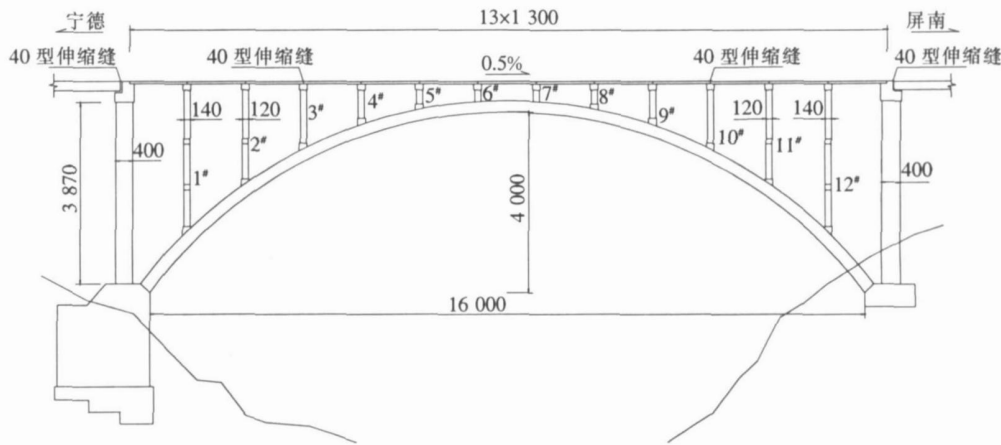


图 1 岭兜大桥总体布置图(单位:cm)

拱圈为单箱四室截面,箱高 250 cm,宽 800 cm,顶板厚 25 cm,底板厚 20 cm,边腹板厚 12 cm,中腹板厚 41 cm,其构造见图 2。每隔 3 m 左右设置一道横隔板,普通横隔板板厚为 10 cm,立柱下加强型横隔板板厚为 15 cm。拱上立柱采用等截面薄壁箱形双立柱结构形式,高度为 2.375 ~ 30.247 m。桥面行车道系由

13 孔跨径为 13 m 的预应力空心板组成,桥面现浇层连续。桥面铺装为 10 cm 的 40# 防水钢纤维混凝土。

初步设计有转体施工与悬臂拼装施工两种施工方案,施工图设计采用悬臂拼装法。主拱圈四片预制拱箱底板、顶板厚分别为 20 cm 和 10 cm,边箱外侧腹板厚 12 cm,其余腹板厚仅 5 cm,见图 2 阴影线部分。每片拱肋纵向分成 7 段预制吊装,每段长度为 26 m 左右,最大吊装重量为 65 t。拱箱吊装、合龙完成后,用 C40 混凝土浇筑节段间横系梁,以增强拱圈的整体性,而后现浇拱箱间的纵缝混凝土以及顶板加厚混凝土,完成拱圈施工,最后进行拱上建筑的施工。

应该指出的是,岭兜大桥是按旧规范设计的,在结构构造方面存在着不满足新规范(JTG D61 - 2005)的地方,如预制板厚小于 100 mm,保护层厚度太薄等。若按新规范重新设计,其工程数量可能将有较大的增

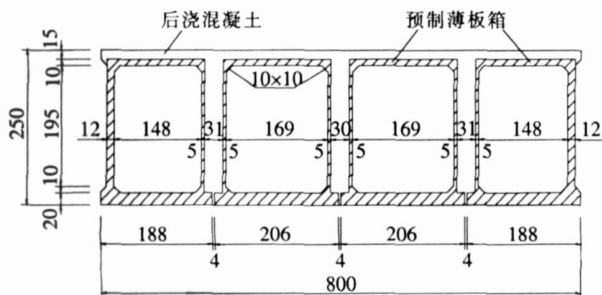


图 2 岭兜大桥主拱圈截面(单位:cm)

加,施工也会更为复杂。

### 3 波形钢腹板混凝土拱桥试设计

为便于分析比较,试设计仍采用原桥的拱上结构,如拱上立柱、桥道系结构等,仅对拱圈进行改动,即用波形钢板代替混凝土腹板,对上下混凝土顶底板进行适当的加厚。由于采用新型的拱圈结构,桥梁结构自重获得大幅度的降低。为了让恒载压力线与拱轴线吻合较好,对拱轴线进行优化,将拱轴系数从原桥的 2.114 调整到 1.8。

#### 3.1 主拱圈构造

试设计拱圈为单箱三室结构,并以波形钢板(4 块)为腹板。拱箱宽度为 800 cm。拱脚至第一根立柱间拱圈截面高度为 250 cm,顶底板厚 40 cm;其余截面高度为 225 cm,顶底板厚 25 cm,如图 3 所示。横隔板的位置与厚度不变,其横截面尺寸相应进行变动。

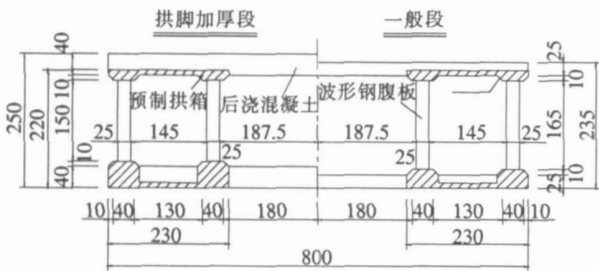


图 3 试设计主拱圈截面(单位:mm)

波形钢板采用 Q345 钢,其中直板段与斜板段长度均为 0.56 m,斜板段在纵向的尺寸  $b$  为 0.5 m,波折角度为  $27^\circ$ ,波高为 0.25 m,一个波长为 2.12 m,钢板厚度  $t$  为 8 mm。其构造见图 4。

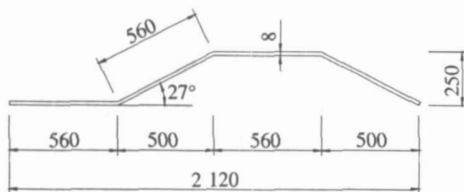


图 4 波形钢腹板构造(单位:mm)

波形钢腹板与混凝土顶底板的接合部主要用来抵抗两者接触面之间的纵向剪力,防止两者之间产生相对滑移,还承担着横向面外弯矩,使波形钢腹板与混凝土板能共同承受荷载。该接合部是这种新型结构设计的关键环节,经过综合比较,采用嵌入式连接件形式,以充分利用了埋入混凝土板中的波形钢腹板斜板段抗

剪的效能,减少抗剪部件的使用,减少焊接工作量,方便施工。其具体尺寸构造见图 5。

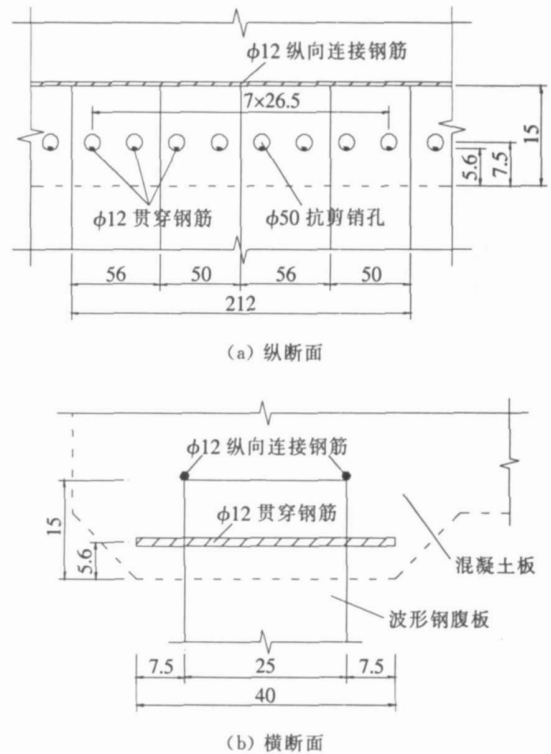


图 5 嵌入式连接件构造(单位:cm)

试设计中波形腹板垂直于拱轴线,在立面上的布置呈一条曲线,但在实际施工中波形板不宜弯制成曲线(容易发生扭转,而且制作工艺复杂),而是以若干直线段的波形板来代替,然后通过连接钢板拼接成所需的拱轴线性,这样在两块波形腹板的接合部必然会存在一斜交角(图 6)。为了防止该角度过大,应控制其直段长度,考虑到施工的便利,直段长度一般选取波形钢板波长的整数倍。在本试设计中,直段长度取 3 倍的波形板的波长,即为 6.36 m,计算出拼接处的最大交角  $\beta = 4^\circ$ ,假定两个节段下缘波形板的弯折点重合在一起,此时两块波形板上缘之间的距离  $(L_2 - L_1)$  仅为 0.13 m,远小于波形板直板段的长度(0.56 m)。因此,在施工过程中可调整连接处两块波形板上下缘的

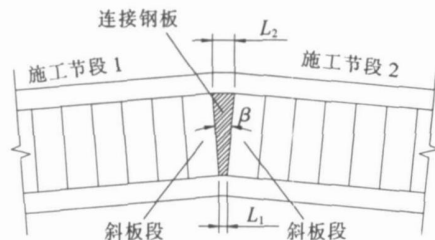


图 6 波形钢腹板之间接合部示意

距离,以便于连接钢板与两个施工节段波形板的焊接或者栓接。不过,连接处波形板上缘距离  $L_2$  应控制在一个直板段长度内,以保证波形板的连续性,防止连接处的波形板发生屈曲破坏。

由于试设计的拱上结构与原桥大致相同,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原桥减少了 33%;钢材用量为 148.6 t,比原桥增加了 38.1 t。主拱圈自重从原桥的 3 495.5 t,减小到 2 427.6 t,自重减轻近 31%。

表 1 拱圈工程数量表

项目	混凝土/ $m^3$	钢材/t	总重/t
原设计(L)	1 354	110.5	3 495.5
试设计(S)	911.6	148.6	2 427.6
S/L	0.67	1.34	0.69

### 3.2 内力计算与分析

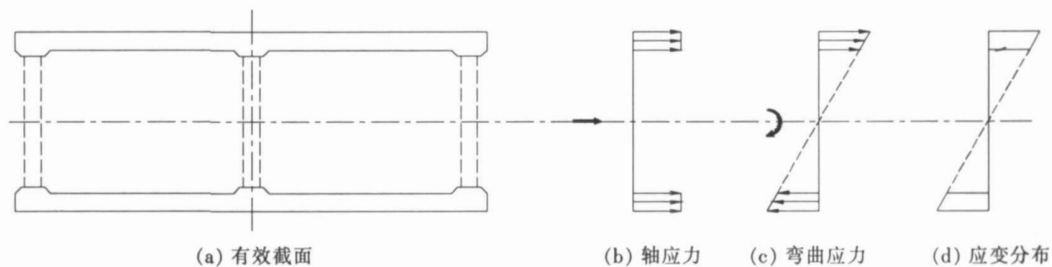


图 7 波形钢腹板拱箱结构的抗弯有效截面及应力应变分布

表 2 给出了两座桥梁在结构自重作用下拱圈内力计算结果。从表中可以看出:与原设计相比,试设计桥梁拱圈各截面在自重作用下轴力都显著降低,拱顶轴力为 28 990 kN,比原设计的 34 930 kN 减小了 17%;拱脚轴力为 43 810 kN,与原设计的 51 570 kN 相比,

利用通用有限元程序分别建立岭兜大桥原设计与试设计桥梁的平面计算模型,以比较它们在恒载和活载作用下的总体受力状况。为了便于进行分析比较,试设计的结构计算与原设计一样,仍以旧规范(JTJ 021-89)和(JTJ 023-85)为依据。在承载能力极限状态的计算中,由于拱结构中的剪力较小,因此假定波形钢腹板与连接件在受力过程中并不发生破坏,结构失效是由于受压区混凝土被压碎而造成的。

由于波形钢板具有折迭效应,在轴向力作用下其变形很大,因此其实际的弹性模量很小,经过相关公式计算,其有效弹性模量仅为钢板原有弹性模量的 1/1 321。因此,在试设计中近似认为波形钢板不承受轴力与弯矩,截面的轴向与弯曲刚度仅计入上下混凝土板的刚度,不考虑波形钢腹板的贡献,另外还假定上下混凝土板的纵向应变符合线性分布的规律,波形钢腹板拱箱结构的抗弯有效截面及应力应变分布见图 7。

降低了 15%。大部分控制截面的弯矩都有不同程度的降低,只有拱脚截面的弯矩有所增加,其原因主要是由于结构本身自重大幅度的减轻,以及采用了较低的拱轴线系数( $m=1.8$ )的缘故。

表 2 结构自重作用下的拱圈内力计算

项目	拱顶		立柱 7#		3L/8		L/4		L/8		拱脚	
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N
原设计( $m=2.114$ )	7 294	34 930	11 430	35 110	8 288	36 060	- 3 268	38 270	- 5 961	41 660	3 773	51 570
试设计( $m=1.8$ )	2 032	28 990	6 264	29 160	4 588	30 000	- 361	31 920	- 161	37 240	- 15 190	43 810

注:表中 M 的单位为  $kN \cdot m$ ; N 的单位为 kN,下同

表 3 为试设计桥梁拱圈内力计算结果。表中温度效应按整体升降温 15 进行考虑,收缩效应按温降 15 进行计算。试设计桥梁拱圈正截面强度验算结果见表 4,其中组合为  $1.2 \times$ 结构重力 +  $1.4 \times$ 汽车 - 超 20;组合为  $1.1 \times$ 结构重力 +  $1.3 \times$ 汽车 - 超 20 +  $1.3 \times$ (混凝土收缩 + 温度)。经过计算,波形钢腹板混凝土拱

桥各截面的承载力极限值均大于荷载效应。

## 4 施工方案

该桥的原设计采用斜拉悬臂拼装法施工,试设计仍采用斜拉悬臂法,但对悬臂拼装和悬臂现浇进行了

表 3 试设计拱圈内力计算

项目	拱顶		立柱 7#		3L/8		L/4		L/8		拱脚		
	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	M	N	
恒载	结构重力	2 032	28 990	6 264	29 160	4 588	30 000	- 361	31 920	- 161	37 240	- 15 190	43 810
	收缩	2 331	- 174	2 291	- 174	1 937	- 170	720	- 157	- 1 429	- 138	- 4 704	- 116
汽车	Max	7 032	1 690	8 764	1 662	9 919	1 598	9 201	1 037	3 826	881	16 610	1 783
	Min	- 3 915	1 140	- 4 723	1 252	- 6 956	1 463	- 8 159	1 913	- 4 103	2 314	- 16 500	1 680
可变荷载	挂车 Max	6 420	1 109	8 864	1 124	9 401	1 085	8 151	545	4 316	750	10 180	903
	挂车 Min	- 2 185	497	- 3 147	615	- 4 897	873	- 5 138	1 095	- 2 872	1 288	- 12 630	1 041
温度 (15℃)	升温	- 2 331	174	- 2 291	174	- 1 937	170	- 720	157	1 429	138	4 704	116
	降温	2 331	- 174	2 291	- 174	1 937	- 170	720	- 157	- 1 429	- 138	- 4 704	- 116

表 4 拱圈在使用阶段的强度验算结果

项目	拱顶		立柱 7#		3L/8		L/4		L/8		拱脚	
	组合	组合	组合	组合	组合	组合	组合	组合	组合	组合	组合	组合
轴向力 $N/kN$	37 154	33 634	37 319	33 786	38 237	34 636	40 982	37 803	47 928	43 613	54 924	50 073
截面抗力 $N_u/kN$	53 913	45 775	44 256	38 359	44 900	39 898	55 502	54 625	65 920	60 106	55 754	55 754
$N_u/N$	1.45	1.36	1.19	1.14	1.17	1.15	1.35	1.44	1.38	1.38	1.02	1.11

比较。试设计将拱圈分成两个预制边箱和中间的现浇段。预制拱箱宽 230 cm,高 220 cm,顶底板厚度均为 10 cm,见图 3 中阴影线部分。每片拱肋纵向分成 6 段预制吊装,每段长度为 31 m 左右,最大吊装重量为 60 t。拱箱吊装、合龙完成后,用 C40 混凝土浇筑节段间横系梁,以增强拱圈的整体性,而后按照对称加载的施工顺序浇筑拱箱底部加厚混凝土板、中箱混凝土底板以及加厚混凝土顶板,形成主拱圈。最后进行拱上建筑的施工,完成全桥施工。

上述的悬臂拼装法为了减小吊装重量,将截面分成预制部分和现浇部分,既要预制场地,还有大量的现

浇工作量,施工工序复杂,且预制与现浇混凝土的收缩徐变不同,可能在接缝处产生裂缝。为此,试设计也考虑了悬臂浇筑这种施工方法。主拱圈现浇应用移动挂篮从两拱脚对称悬臂向跨中推进,全拱分成 34 个现浇段(一边 17 段,每段长大约 5.5 m)和一个合龙段(2 m),悬臂半拱由锚固于交界墩和临时塔架上的扣索提供抗力,并设置横向风缆以防止横向失稳。扣索分临扣和正扣,在浇筑混凝土段用临扣斜拉住,待其达到一定强度后每 2~3 个节段组成一个正扣扣段,用正扣扣住后将前面的临扣拆除,临扣可重复使用。主拱圈的悬臂浇筑施工示意如图 8 所示。

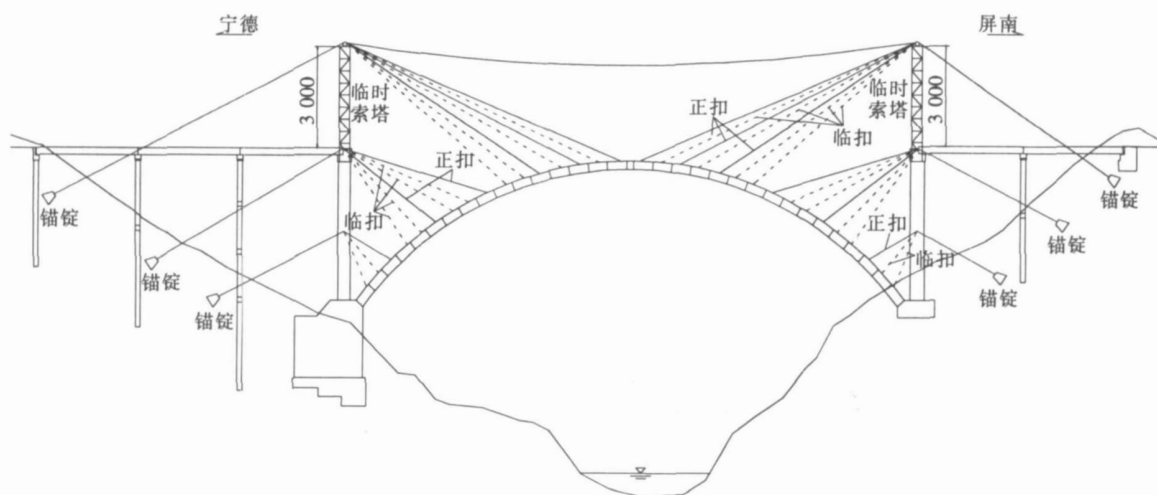


图 8 主拱圈悬臂浇筑施工示意图(单位:cm)

根据规范 J TJ 023 - 85, 还需对施工阶段的压应力进行验算, 考虑到在裸拱施工完成后, 拱上结构的架设一般按照对称均匀加载, 因此施工阶段只选取了裸拱和成桥的两个工况进行应力验算, 其结果如表 5 所示。从表中可发现, 在施工过程中, 拱圈上下翼缘的应力值都小于容许压应力; 除了拱脚外, 大部分截面均处于全截面受压状态, 且拱脚截面下翼缘的拉应力也小

于混凝土的抗拉应力。

与原桥相比, 该新桥型采用预制悬拼法施工时, 预制节段的吊装重量从 65 t 降低为 60 t, 预制节段可适当加长, 将节段数量从 7 段减为 6 段, 并省了一根横系梁。若试设计桥梁采用悬臂浇筑法施工, 与钢筋混凝土拱桥相比, 可省去腹板现浇混凝土的工序, 方便了施工、缩短了施工周期。

表 5 拱圈在施工阶段的应力验算结果

项目		拱顶		立柱 7 <sup>#</sup>		3L/8		L/4		L/8		拱脚	
		上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘
边缘纤维应力/MPa	裸拱	0.55	4.81	0.61	4.77	1.15	4.36	3.55	2.73	4.33	2.57	4.69	0.11
	成桥	4.65	9.96	3.09	11.61	4.25	10.88	8.63	7.79	10.16	8.80	13.57	-0.81
混凝土容许压应力/MPa		17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17

## 5 结语

本文对 160 m 波形钢腹板混凝土拱桥试设计分析结果表明, 与原设计相比, 其拱圈自重可减轻 30%, 拱圈轴力可降低 15%~17%, 且在施工性能上也具有较大的优势。

本文所进行的试设计研究还是初步的。在计算分析方面, 应从现有的平面有限元分析向空间有限元分析发展。还有许多计算分析要在下一步研究中进行, 如考虑波形钢腹板剪切变形影响的挠度计算、几何非线性对结构受力的影响, 施工阶段考虑混凝土收缩徐变、温度效应的内力和应力, 扣索索力调整、横向稳定性等。此外, 为了便于与原桥进行比较, 试设计并未考虑对拱圈高度进行变化, 仅采取加厚混凝土板的方法来满足结构受力要求, 因此, 可对拱圈进行适当的加高, 以提高其面内刚度, 从而减小混凝土板厚, 进一步减轻结构自重。在计算分析的基础上, 还要尽早开展模型试验研究。

波形钢腹板混凝土拱桥作为一种具有创新意义的

新桥型, 需对其进行全面深入的应用基础研究, 为时机成熟时的实际应用打下坚实的基础, 为我国的桥梁事业做出贡献。

## 参考文献:

- [1] 陈宝春. 拱桥技术成就与展望[C]. 第二届全国公路科技创新高层论坛论文集, 2004.
- [2] J TJ 022 - 85, 公路砖石及混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] J TGD61 - 2005, 公路圬工桥涵设计规范[S].
- [4] 陈宝春, 黄卿维. 波形钢腹板 PC 箱梁桥应用综述[J]. 公路, 2005(7).
- [5] J TJ 021 - 89, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [6] J TJ 023 - 85, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [7] 朱万勇. 波形钢腹板 PC 组合箱梁桥设计理论与方法研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2003.
- [8] 吴文清, 叶见曙, 万水, 等. 波形钢腹板 - 混凝土组合箱梁截面变形的拟平截面假定及其应用研究[J]. 工程力学, 2005(5).
- [9] 刘玉擎. 组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

## 我国主跨 400 m 以上的桥梁

我国已建成和正在建设中的桥梁, 主跨在 400 m 以上者, 共有 70 座, 其中斜拉桥 38 座, 悬索桥 23 座, 拱桥 9 座, 梁桥 0 座。

一、斜拉桥(共 38 座): 1. 以梁的材料分: 混凝土梁斜拉桥 11 座、钢梁斜拉桥 11 座、组合梁斜拉桥 6 座、混合梁斜拉桥(钢筋混凝土)6 座、混合梁斜拉桥(组合 - 混凝土)2 座、不明 2 座; 2. 以主跨跨径区段分: >1 000 m 2 座、800~1 000 m 1 座、600~800 m 8 座、400~600 m 27 座。

二、悬索桥(共 23 座): 1. 以加劲梁的材料分: 钢加劲梁 21 座、混凝土加劲梁 1 座、筒易桥面 1 座; 2. 以主跨跨径区段分: >1 000 m 9 座、800~1 000 m 5 座、600~800 m 3 座、400~600 m 6 座。

三、拱桥(共 9 座): 1. 以主拱圈材料分: 钢拱 4 座、钢管混凝土拱 4 座、钢筋混凝土拱 1 座; 2. 以主跨跨径区段分: 500 m 3 座、400~500 m 6 座。