

文章编号: 1002-0268 (2005) 08-0049-06

大跨度钢管混凝土窄拱桥的设计实践探索

张 哲, 石 磊, 潘盛山, 滕启杰

(大连理工大学桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以大连理工大学桥梁工程研究所近年来设计的钢管混凝土拱桥为工程背景, 介绍了在大跨度窄桥设计、施工过程中采用到的一些新的设计方法, 对大跨度钢管混凝土窄拱桥的关键技术问题、尤其是拱桥稳定性问题进行了深入地研究分析, 结论表明单片桁架式钢管混凝土拱桥在大跨度窄桥中应用是合理的, 并且具有一定的优越性。

关键词: 钢管混凝土; 拱桥; 窄桥

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

Long Span Concrete-filled Steel Tubular Narrow Arch Bridge Design

ZHANG Zhe, SHI Lei, PAN Sheng-shan, TENG Qi-jie

(Institute of Bridge, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the concrete-filled steel tubular (CFST) arch bridges designed by Bridge Institute of Dalian University of Technology, some new technologies on design and construction were introduced in this paper. It is the first time that arch ribs of the plane truss type have been used in the long-span CFST bridges in China. The rationality of the design for this type of large-span narrow bridge was discussed and justified based on the results of thorough investigation related to some key issues the stability in particular. The main features of this structure are beautiful in shape, convenient in construction and cost effective.

Key words: Concrete-filled steel tubes; Arch bridge; Narrow bridge

0 概述

在公路桥梁建设中常遇到双车道的桥梁, 当桥梁跨径较大时, 其宽跨比将小于 $1/20$, 也就是需要建成窄桥。随着钢管混凝土这种新型材料的广泛应用, 拱桥的跨径越来越大, 而相对斜拉桥与吊桥而言, 由于用钢量减少与施工方法简便, 使钢管混凝土拱桥在一定跨度之内具有较强的竞争力。本文主要以大连理工大学桥梁研究所设计的大连海昌华城桥、浙江铜瓦门大桥和丹东月亮岛大桥, 探讨了单片桁架式钢管混凝土拱桥在窄桥中应用的合理性和优越性。

1 海昌华城桥

1.1 工程概况^[1]

大连是我国北方的一座美丽的海滨城市, 城市建设正在朝着国际化大都市迈进。海昌华城大桥位于大连市中山区, 是连接豪华别墅小区海昌华城和胜利路的桥梁, 它横跨大连电视塔下的老鳌湾水库, 是东北地区的第一座钢管混凝土提篮拱桥 (如图 1、图 2)。全桥长 132m, 桥跨为 110m+12m+10m, 主跨为中承式钢管混凝土拱, 桥面宽 7.5m。主要工程量为: 钢结构 130t, 混凝土 1 150m³。

1.2 技术特点

(1) 主跨采用钢管混凝土拱, 拱轴采用二次抛物线型, 矢跨比为 1:5, 跨径 110m, 拱肋采用单片桁架形式, 2 片拱肋内倾 9.091°。

(2) 拱肋弦杆用 8mm 厚的 16 锰钢板卷制, 直径为 600mm, 但在距拱脚 20m 范围内钢管壁要加厚到

收稿日期: 2004-05-24

作者简介: 张哲 (1944-), 男, 江苏沛县人, 博士生导师, 主要从事现代桥梁设计理论研究. (lei shi shi@163.com)

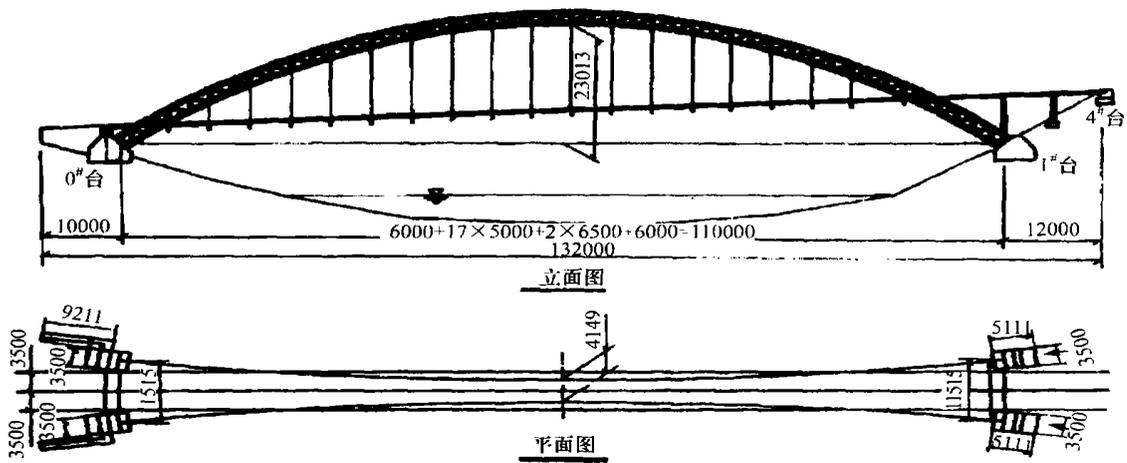


图 1 桥梁总布置图/mm



图 2 建成后的海昌华城桥

10mm; 腹杆采用直径为 73mm (壁厚 8mm) 的钢管; 拱肋架好后, 弦杆内压注 C50 级微胀混凝土; 拱肋焊接需达到一级标准。

(3) 吊杆采用 $\Phi 5$ 高强钢丝束 (抗拉强度为 1 670MPa), 锚具为 LM5-19 和 IM5-26 型, 吊杆采用白色 PE 护套保护。

(4) 吊杆通过弦杆处要设套管, 并在拱肋上弦杆加焊与吊杆相垂直的垫板。

(5) 桥面采用预制横梁上安放槽形车道板后浇 8cm 厚的桥面铺装连成整体。

1.3 施工过程^{2]}

对于钢管混凝土拱桥, 常用的施工方法是缆索吊机吊装法, 对于海昌华城大桥该方法就显得不适用了, 这是因为海昌华城大桥的场地十分狭窄, 无法安装大跨度大吨位的缆索吊, 另外, 缆索吊方案造价高, 经济性能差, 也是我们不用该方案的原因之一。

国内已建成的同类桥的资料, 其施工方法对本桥都不太合适, 所以只能根据本桥的实际情况寻找新的施工方法。桥址附近只有挡水大坝可以作为钢管拱肋的拼装场地, 而大坝的轴线与桥轴并不平行, 而是成 22° 角。据此, 我们提出在大坝上拼装 92m 拱肋, 之后将其旋转 22° 。与桥轴平行, 再将其平移至桥位接

长至 110m, 为其命名为顶升拼装, 转体横移就位方案。其优点是: 无需大型起吊设备, 施工简便, 使用的机具少, 具有较好的经济性。

此方案施工的关键在于, 在拼装钢管拱肋及旋转平移时, 必须保证拱肋轴线与设计轴线相吻合。根据拱结构的特点, 在其自重的作用下, 拱脚会向外张, 为防止这种现象的发生, 可在拱肋两端加固定装置, 也可通过增加受拉下弦的办法使之变为静定结构 (见图 3), 当受拉弦的抗拉能力足以抵消钢管自重产生的外张力时, 钢管拱肋就形成无推力拱式组合体系; 当所设下弦的长度调节到受压拱所要求的范围, 就可以使钢管拱的上下弦杆只承受压力而不产生弯矩, 这样就使上述关键问题得到解决。

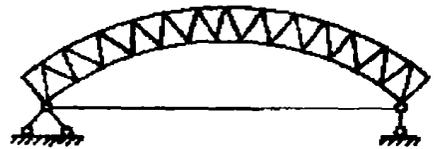


图 3 加下弦约束

根据上述原理, 我们确定了本桥的施工方案, 即: 先拼装中间部分, 加下弦后顶升、接长, 再加下弦, 再提升, 直到拼至 92m; 将拼好的拱肋旋转至与设计桥轴平行的位置, 继续提升, 然后平移至桥位; 继续提升至设计标高, 将两端接长至桥台。

海昌华城桥于 1999 年建成投入使用, 至今运行情况良好。

2 铜瓦门大桥^{3~4]}

2.1 桥位处自然环境和设计要求

象山铜瓦门大桥位于浙江省象山县石浦镇—东门岛之间的铜瓦门海峡。该海峡系大陆和台湾渔船作

业、运输和避风进出港的主要航道,最大水深达50余m,当地每年夏秋两季台风频繁,最大风力为12级;桥位两岸岩石裸露,岩体稳定,整体性较好,坡角 30° 左右;桥两端接线为山岭重丘三级公路。遵照安全、可靠、经济、美观的原则,通过桥型比选,采用一跨过海的中承式钢管混凝土提篮拱桥(图4),并在设计中重点考虑和较好地解决了稳定、疲劳和造价等问题。

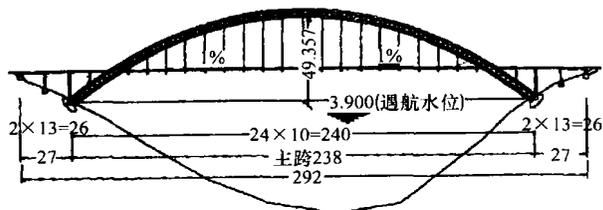


图4 桥梁总布置图/m

2.2 桥梁结构概况

2.2.1 总体设计

象山铜瓦门大桥为钢管混凝土提篮式拱桥,全长292m,主跨长238m,矢高49.35m,矢跨比为1/4.822,拱轴线为修正的二次抛物线。桥面横向宽度为10m,竖曲线半径为3000m,采用中承式提篮型钢管混凝土拱桥一跨过海。吊杆及撑杆间距10m,引桥跨径13m,采用柔性薄壁墩,桥台为刚性U型桥台

2.2.2 主拱设计

由于本桥跨径大桥面窄,所以为了保证拱肋的横向稳定性,把拱肋设计成提篮形式拱,拱脚相距17.456m,拱顶中心距为2.703m,形成两拱肋之间 170° 夹角。在成功的设计了大连市海昌华城桥之后(跨径110m的中承式钢管混凝土拱桥,拱肋由单片桁架组成),我们提出在铜瓦门桥中也采用这种单片桁架拱肋。由2根 $\phi 1150 \times 12$ (14)mm的钢管做为弦杆,中心距为3.5m,以 $\phi 510 \times 10$ mm钢管做为腹杆,组焊成桁架拱肋(图5)。桥面以上两拱肋之间设置桁架式横撑,桥面以下设置K字形联结系。拱肋弦杆内填充50#混凝土。拱肋钢管均采用16Mnq钢板卷制。对接焊缝焊接,1~2m左右折焊成弧线,

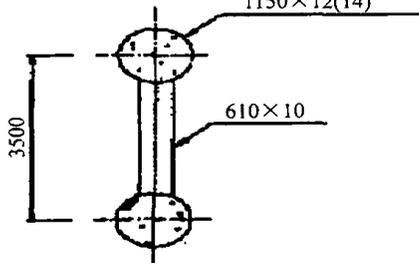


图5 拱肋构造示意图/mm

并将拱肋分成11等份,每份之间用临时法兰盘联结。为了配合安装拱肋的施工,拱脚处设计临时支撑铰,在吊装拱肋时可以转动调节就位。

2.2.3 桥面系和吊杆设计

采用间距10m吊杆吊起预制的部分预应力混凝土横梁,在横梁上安装预制钢筋混凝土空心板。焊接桥面板、横梁的预留钢筋后,浇注混凝土接缝,最后浇10cm厚整体混凝土铺装,使桥面板与横梁连成整体共同受力,其中空心板厚度为65cm,横梁为矩形空心截面,高1.6m,宽60cm,吊杆为37根 $\phi 7$ mm高强度钢丝,外层包热挤压PE护套防护,两端为冷铸锚。吊杆一端吊于拱肋顶,一端锚在横梁底,与拱肋在同一平面,如图6所示。

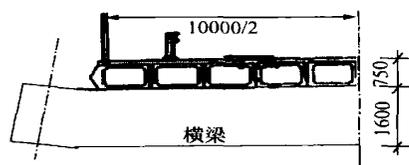


图6 桥面系构造示意图/mm

2.3 施工过程

先做好拱座及临时铰之后,拱肋采用缆索吊机吊装,通过船只将组焊好的拱肋各阶段运到桥位,先安装拱脚第1阶段,用穿销将第1阶段拱肋通过铰及扣索固定在基座上,调整扣索拉力,将第1阶段拱肋调整到适当位置扣定。缆索吊机吊第2阶段拱肋时先用临时法兰盘通过螺栓与第1阶段连接,安装第2根扣索,调整到适当位置后焊接第1、2阶段弦杆钢管,加焊个别腹杆,拆除法法兰盘。调整扣索内力使拱肋处于适当位置。合龙段合龙时要通过调整两侧扣索使合龙段法兰盘与两侧拱肋法兰盘连接,然后焊接,焊接好后拆除法法兰盘,缓慢逐步放松各扣索,让拱肋处于自然平衡状态。加焊拱肋底段短钢管,焊接定位肋板后使拱肋变成无铰拱。在拱肋弦杆钢管拱脚处设压混凝土孔,拱顶处设排气孔。连续不断的由拱脚压入50#微膨胀混凝土,先压下弦杆,待混凝土强度达到60%之后压上弦杆混凝土。拱肋完成后安设吊杆,并用缆索吊机安装横梁,同时在拱肋上焊接钢横梁及钢撑杆。安设横梁要两侧均匀进行。此后再按照均匀吊装的原则吊装桥面板。

3 丹东月亮岛大桥^[9]

3.1 工程概况

丹东月亮岛大桥位于丹东市内。鸭绿江为我国与朝鲜的界河,月亮岛位于距丹东侧岸堤200多米的河

道中, 面积 13.5 万 km^2 。月亮岛大桥修建前河岸与月亮岛之间的土路是岸与岛之间枯水期的临时通道。为了开发月亮岛, 必须修建桥梁以满足建设及交通要求。

3.2 总体设计

设计荷载为两车道汽-20 级, 人群荷载 $3\text{kN}/\text{m}^2$ 。桥全宽 9m (车行道 7m, 两侧各 1m 的人行道)。基本风压为 700Pa , 抗震标准按 7 度设防。

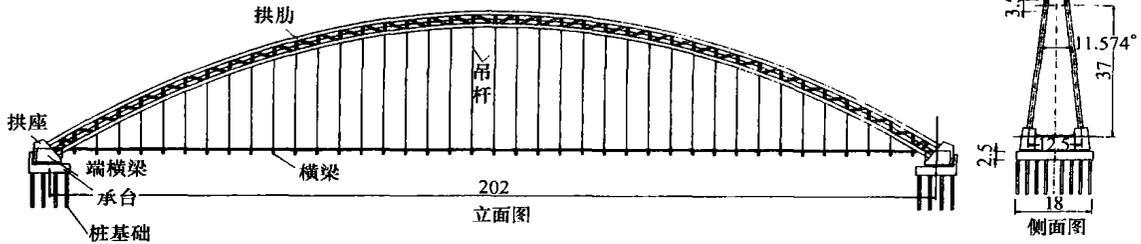


图 7 桥梁结构总布置图

3.3 施工方法

丹东月亮岛大桥施工充分利用现有的土路, 采用滑移顶升方法, 最后在空中合龙。拱肋的制作可在工厂分段卷制成管, 运到工地后, 分别在岸侧与岛侧分成 3 段拼装。基础及拱座施工完毕达到设计强度后, 在现有的土路上将 3 段拱肋推移到河中间后在空中合龙, 然后往管内泵送混凝土。钢筋混凝土横梁也在工地预制好, 在拱肋合龙后, 挂上吊杆, 再安装横梁, 架立模板, 浇注桥面板, 最后进行桥梁附属设施的施工。在施工过程中, 要根据各个工序的不同荷载条件, 分批张拉桥面板中的 35 束预应力筋, 确保大桥安全顺利的施工。图 8 所示为施工中的丹东月亮岛大桥。

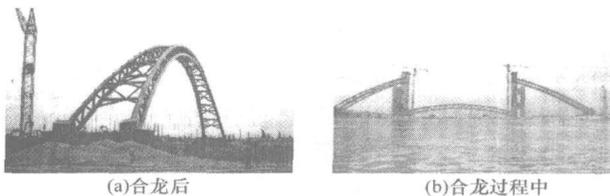


图 8 施工中的丹东月亮岛大桥

丹东月亮岛大桥于 2003 年竣工, 工程造价为 1 000 万人民币。

4 窄桥体系的关键问题研究

4.1 主拱肋设计

钢管混凝土拱桥跨度超过 200m 时, 拱肋一般采用钢管混凝土空间桁肋或钢管混凝土劲性骨架箱肋 (如图 9 所示)。此种拱肋的横向抗弯刚度较大, 侧向

稳定承载力高, 但杆件数量繁多, 施工较复杂, 弦杆、腹杆、平联之间的焊接工作量亦较大, 而且拱肋横向较宽, 占用较大的桥面有效宽度或加大了横梁的跨度, 适于宽桥, 铜瓦门大桥和丹东月亮岛大桥主跨均超过了 200m, 桥面宽仅 10m, 如果采用上述拱肋, 则会显得结构繁杂, 空间视觉效果差, 失去了桥梁美感, 而且从经济上考虑也不合理, 因此两座桥的设计采用了较为合理的仅由 2 根钢管混凝土弦杆和钢管腹杆组成的平面桁架拱肋, 采用这种截面型式, 既减少了焊接工作量, 施工进度快, 节省钢材, 拱肋表面光滑, 通透性较好, 美观大方, 而且截面的面内抗弯刚度可以根据需要加大上下弦管间的距离, 并不像哑铃型截面那样增加较多的用钢量, 大量减少了工程造价。

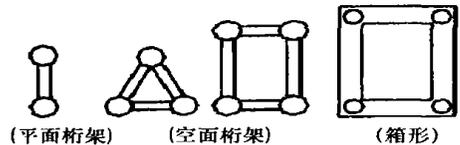


图 9 拱肋类型示意图

4.2 拱肋横向联系设计

对于大跨度拱桥, 横向稳定问题突出, 当桥的宽跨比小于 $1/20$, 所处环境风力较大的时候, 采用合理的横向连结结构是解决横向稳定问题的关键。铜瓦门大桥为中承式拱桥, 采用 X 型双拱肋要比平行双拱肋具有明显的优势, 为此两拱肋设计为内倾形成 17° 夹角, 拱脚相距 17.456m, 拱顶中心线处相距

2.703m。这样,加大了拱脚的横向距离,拱顶部分的横向联系长度缩短,刚度增大,既节省了材料,又减小了结构自重而提高了整体稳定性。拱肋的横向稳定主要由横向联系来保证,特别是该桥采用平面桁架拱肋,其横向抗弯刚度较小,因此该桥的横向联系布置显得尤为重要。考虑到既要保证拱肋的局部和整体稳定性,又不能因过多、复杂的横向联系使结构显得繁杂而令人压抑,经计算分析和综合比较,该桥横向联系设计如下:(1)桥面以下拱肋之间设两处由平面桁架组成的K字形连接系;(2)桥面行车净空以上每10m设置单片平面桁架为横撑连接两拱肋,共17处,仅在靠下两端的9#横撑(拱顶处为1#横撑)处增加斜撑并形成K字形连接系;(3)在主梁与拱肋相交处设一高度为2m的工字形钢板梁与拱肋相连,并作为支撑桥面的横梁,其中,桁架横撑的弦杆为 $\phi 900\text{mm} \times 10\text{mm}$ (16Mnq)钢管,腹杆为 $\phi 360\text{mm} \times 8\text{mm}$ (16Mnq)钢管。丹东月亮岛大桥也采用类似的横向联系设计,靠近拱顶处的横撑增强了对拱肋在拱顶处的扭转变形的约束,其它地方布置成K撑以约束拱肋的相对错动,受力合理,杆件又不显得繁杂。大跨度的钢管混凝土拱桥窄桥最重要的是解决结构的横向稳定问题,通过合理的布置横撑,比如选择合理的横撑型式和横撑布置位置,完全可以满足桥梁的稳定性要求。

4.3 桥面系设计的构思

铜瓦门大桥桥面系采用预制空心板与吊杆横梁固接的方式,既保证了桥面整体性,发挥了吊杆非保向力的作用,又减小了恒载自重,方便了施工,具有很好的经济合理性。

丹东月亮岛大桥是宽跨比为1/22.44的下承式钢管混凝土系杆拱桥,主跨长为202m。大桥的桥面系为柔性体系,由1.25m高的横梁、30cm厚的桥面板与平均厚度为8cm的桥面铺装组成,桥面板中间设有35束 $\Phi 15.24-12$ 的预应力筋。预制的横梁吊装到设计标高处后,与现浇的桥面板结成整体,张拉桥面板中的预应力筋束,使桥面板不但承受桥面的荷载,还成为拱桥的系杆,抵消拱脚的水平分力。这种整体柔性桥面板作为拱桥系杆的设计方法,避免通常系杆拱桥设计中专门设置的系杆的施工,使工期大大缩短。而且,吊杆不需要张拉,仅靠柔性桥面板的变形使吊杆受力,避免了吊杆张拉的大量烦琐工序,加快了施工进度。

4.4 拱肋施工方法的探讨

钢管混凝土窄桥的施工方法比较灵活,可采用多

种方法。如缆索施工法、转体施工法、顶升施工法等。

铜瓦门大桥采用的是分段缆索吊装法施工。结合本桥施工特点:风大浪高水急,两岸地势陡峭、施工场地狭小,无大型机具设备作业的条件,多次研究讨论,最后决定采用钢管拱分段制造、无支架缆索吊装,钢绞线斜拉扣挂、千斤顶张拉锚固控制各段变形的施工方案。

丹东月亮岛大桥施工充分利用现有的土路,采用滑移顶升方法,最后在空中合龙。

海昌华城桥采用的是钢管拱顶升拼装,转体横移就位的施工方法。

4.5 单片拱桥稳定性分析^[3]

铜瓦门大桥用SAP93程序进行整体稳定分析,建立空间模型,拱肋弦管单元的截面特性采用钢管混凝土的换算截面特性,其余构件单元截面特性按实际取值。当地基本风压1.2kPa,稳定分析按以下可能的不利工况进行:

- (1) 恒载+风荷载;
- (2) 恒载+风荷载+2列车全桥满布(偏心)+全桥满布人群荷载;
- (3) 恒载+风荷载+2列车半桥满布(偏心)+半桥满布人群荷载;
- (4) 恒载+风荷载+1列车全桥满布(偏心)+全桥单侧满布人群荷载;
- (5) 恒载+风荷载+1列车半桥满布(偏心)+半桥单侧满布人群荷载;
- (6) 恒载+风荷载+挂车跨中偏心加载;
- (7) 恒载+风荷载+挂车1/4跨处偏心加载。

由以上工况进行稳定计算得到安全系数为5.76~6.21(表1),满足拱桥横向稳定安全系数大于4~5的要求。在钢管混凝土拱桥的稳定计算中,要求安全系数为4~5是合理的,国内几座大型拱桥的整体稳定安全系数都在这个范围。对于这种较窄的大跨度拱桥,要求更高的稳定安全系数是没有必要的。

表1 稳定安全系数 λ

工况	1	2	3	4	5	6	7
λ	6.21	5.76	5.97	5.98	6.09	6.00	6.08

4.6 单片拱桥稳定性研究^[9]

根据拱桥的理论和许多文献的观点,对于钢管混凝土双肋拱桥,横系梁(横撑)的刚度及布置形式、拱肋侧倾角、主拱的矢跨比、桥宽和桥面刚度等均对整体稳定性有较大影响,所以将这些因素列为本文研究的主要对象。

应用 Ansys6.0 对铜瓦门大桥整体稳定性的影响因素进行了探讨, 经过分析比较, 认为拱肋自身横向刚度、横撑形式、拱肋侧倾角对大桥的横向稳定性影响较大, 而矢跨比、宽跨比及桥面刚度等也有一定的影响。

分析认为拱肋自身横向刚度对拱桥的横向稳定性的影响幅度最大, 由于本桥采用单片桁肋拱, 拱肋自身横向刚度很小, 横向稳定性的提高受到很大的限制, 若采用空间桁肋虽然横向抗弯刚度较大, 侧向稳定承载力高, 但杆件数量繁多, 施工较复杂, 而且拱肋横向较宽, 用于这种窄桥是不协调的。从经济和美观的角度来看, 通过采用空间桁肋来继续提高本桥的横向稳定性没有必要。

横撑的布置形式和横撑的刚度均会影响到双肋拱的整体稳定性, 其中横撑的布置形式对拱桥的横向稳定性影响更为显著。铜瓦门大桥采用了较多的平面桁式横撑及 K 撑, 是保证该桥的横向稳定性的重要因素。

分析还表明采用 X 型肋拱比平行肋拱大大地提高了拱桥的横向稳定性, 但在拱肋横向联系非常强大的情况下, 拱肋内倾对提高横向稳定性的作用不太明显。且采用 X 型肋拱会导致拱桥面内极限承载力的降低, 故拱肋侧倾角不宜过大。综合考虑铜瓦门大桥的横向稳定性和对面内极限承载力的影响, 该桥的拱肋内倾角选用 8.5° 是比较合适的。

矢跨比是拱桥的重要参数, 矢跨比增大, 拱桥的整体稳定性相应地提高, 但主拱肋的材料用量和自重也在增加, 一般认为, 钢管混凝土拱桥的矢跨比宜选在 $1/4 \sim 1/5$ 左右。

宽跨比是拱桥的另一个重要参数, 分析认为增大桥宽, 若不相应地加强拱肋的横向联系, 会导致拱桥横向稳定性的降低。

吊杆非保向力效应与桥面横向刚度有关, 铜瓦门大桥的桥面板的横向刚度不大, 但采用桥面板与吊杆横梁固结方式, 保证了桥面系的整体性, 增加了桥面系的横向刚度, 使得吊杆的非保向力作用得到发挥。

其它一些因素也会对该桥的整体稳定性产生影响, 但从整体上讲, 拱肋的形式和行车净空的限制使得本桥的整体稳定性继续提高的幅度有限。

5 结论

铜瓦门大桥由于拱肋采用新的设计思想, 并且在桥面系的设计以及引桥下部结构的设计中都比较经济合理。它的实际工程造价为 1 300 万元人民币, 钢管拱的用钢量约 600t, 平均造价 $4\ 450$ 元/ m^2 。这在同等跨径钢管混凝土拱桥中是非常经济的。铜瓦门大桥已于 2002 年 5 月建成, 并通过浙江大学所做的成桥荷载试验, 由于引线工程未完成, 目前尚未通车, 而桥梁所设计的另二座单片桁架式窄拱桥均以建成交付使用。铜瓦门大桥为现今我国跨径最大的钢管混凝土提篮拱桥, 这几座桥的建成对我国今后长大跨径小宽跨比钢管混凝土拱桥采用提篮拱具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张哲. 大连海昌华城桥施工图 [R]. 大连: 大连理工大学土木建筑设计研究院, 1999.
- [2] 张文辉. 钢管拱桥顶升拼装、转体横移就位施工技术 [J]. 铁道建筑技术, 1998 (5): 3-7.
- [3] 张哲, 邱文亮, 黄才良. 铜瓦门大桥设计与稳定性研究 [J]. 大连理工大学学报, 2002, 142 (4): 456-459.
- [4] 张哲, 严关中. 浙江铜瓦门大桥设计. 第十三届全国桥梁学术会议论文集 [C]. 上海: 同济大学出版社, 1998.
- [5] 张哲. 丹东月亮岛大桥施工图 [R]. 大连: 大连理工大学土木建筑设计研究院, 2000.
- [6] 邓安泰. 铜瓦门大桥稳定性分析与研究 [D]. 大连理工大学, 2003.