

钢管混凝土拱桥调查与分析

陈宝春, 杨亚林

(福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 收集了大量的国内已建和待建的钢管混凝土拱桥的基本资料, 对其数量、跨径、结构形式、施工方法、材料等方面进行分析与总结, 为此类桥梁的结构设计与施工提供参考。

关键词: 拱桥; 钢管混凝土结构; 设计; 施工; 调查; 分析

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

文章编号: 1671-7767(2006)02-0073-05

1 概况

钢管混凝土使拱桥近十几年在我国应用发展很快, 本文作者在 1997 年、1999 年和 2002 年发表的文献中所收集到的钢管混凝土拱桥分别为 31、72 和 109^[1-3] 例。最近在进行《钢管混凝土拱桥设计与施工(第二版)》的撰写时, 对钢管混凝土拱桥的桥例再次进行了比较全面的收集, 共收集到 50 m 以上跨径的钢管混凝土拱桥 229 座, 限于篇幅本文未将收集资料过程中所参考的文献一一列出。在资料收集整理的基础上, 从数量、跨径、结构形式、施工方法、材料等方面进行了分析与总结, 以期为此类桥梁的工程应用与研究提供参考。

调查的对象为跨径大于或等于 50 m 的钢管混凝土拱桥, 截止时间为 2005 年 3 月, 调查共收集到桥梁 229 座, 其中跨径达 100 m 及以上的 131 座。在后面的分析中, 均以跨径大于或等于 100 m 的桥梁为基本资料, 对于具体统计时则以已知该参数的桥梁为分析对象。受篇幅限制, 表 1 仅给出了跨径达 200 m 及以上的 33 座桥梁的简要情况。

钢管混凝土拱桥的结构类型非常丰富, 按车承形式可分为上承式、中承式和下承式, 按有无推力可分为有推力和无推力(无推力中又可分为拱梁组合和刚架系杆拱), 按拱肋截面可分为单圆管、哑铃形和多肢桁式等。本文在统计分析中, 将拱的结构根据车承形式与有无推力的组合来划分, 共分为(有推力)上承式、有推力中承式、无推力中承式(飞鸟式)、拱梁组合体系(下承式)和下承式刚架系杆拱 5 类。在这 5 种桥型中, 主跨的跨径对于有推力的上承式和中承式拱是指净跨径, 对于无推力拱按梁式桥考虑, 主跨跨径是指墩到墩的中心距。

表 2 给出了按上述 5 种结构划分的 131 座跨径

表 1 跨度大于或等于 200 m 的钢管混凝土拱桥一览表

桥名	建成年份	跨径 /m	结构形式	施工方式
湖北恩施南泥渡大桥	2002	220	上承式	缆索吊装
水柏铁路北盘江大桥	2001	236	上承式	转体施工
杭新景高速公路千岛湖 1 号桥	在建	252	上承式	
重庆奉节梅溪河桥	2001	288	上承式	缆索吊装
湖北支井河大桥	在建	430	上承式	缆索吊装
湖北武汉江汉三桥	2000	280	下承式刚架系杆拱	缆索吊装
辽宁丹东月亮岛大桥	2003	202	下承式系杆拱	其它
宜昌长江铁路大桥	在建	264	连续刚构柔性拱	转体施工
湖北秭归龙潭河大桥	1999	200	中承式	缆索吊装
重庆合川嘉陵江大桥	2002	200	中承式	缆索吊装
张家界王村酉水河大桥	2003	200	中承式	缆索吊装
广西六景郁江大桥	1999	220	中承式	缆索吊装
浙江铜瓦门大桥	2001	238	中承式	缆索吊装
贵州落脚河大桥	1998	240	中承式	
浙江三门健跳大桥	2001	245	中承式	缆索吊装
湖北秭归青干河大桥	2002	248	中承式	缆索吊装
宜宾市金沙江戎州大桥	2004	260	中承式	缆索吊装
广西三岸邕江大桥	1998	270	中承式	缆索吊装
象山县三门口北门大桥	在建	270	中承式	缆索吊装
象山县三门口中门大桥	在建	270	中承式	缆索吊装
浙江淳安县南浦大桥	2003	308	中承式	缆索吊装
广西南宁永和大桥	2004	335.4	中承式	缆索吊装
安徽黄山太平湖大桥	在建	336	中承式	缆索吊装
四川巫山长江大桥	2005	460	中承式	缆索吊装
广东南海三山西大桥	1995	200	飞鸟式	缆索吊装
四川绵阳涪江大桥	1997	202	飞鸟式	
南昌生米特大桥	在建	228	飞鸟式	缆索吊装
江苏徐州京杭运河特大桥	2002	235	飞鸟式	转体施工
武汉市江汉五桥	2000	240	飞鸟式	缆索吊装
广东东莞水道大桥	2005	280	飞鸟式	缆索吊装
广东广州丫髻沙大桥	2000	360	飞鸟式	转体施工
湖南南县茅草街大桥	在建	368	飞鸟式	缆索吊装
湘潭湘江四大桥	在建	400	飞鸟式	缆索吊装

收稿日期: 2005-10-26

作者简介: 陈宝春(1958-), 男, 教授, 博导, 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年毕业于日本九州大学, 工学博士。

等于或大于 100 m 的分布情况,从中可见,在钢管混凝土拱桥中,上承式仅占 8%,其余均为中、下承式(占了绝大多数)。中、下承式中又以有推力的中承式拱所占的比例最大,占到所有桥梁的 47%,接近一半的比例。

表 2 调查的拱桥的结构形式

结构形式	桥数	百分比 / %
上承式	11	8
有推力中承式	62	47
飞鸟式	24	18
拱梁组合体系	18	14
下承式刚架系杆拱	16	13
合计	131	100

图 1 给出了随时间增长的修建的钢管混凝土拱桥的跨径和数量,从中可以发现在 1995 年以前,我国较少修建跨径大于 100 m 的钢管混凝土拱桥。此后,随着计算理论的完善和施工技术的进步,钢管混凝土拱桥的跨径和数量随时间的推移在不断地增大。各个时期具有代表性的桥梁有:1990 年建成的四川旺苍东河桥,跨径 115 m;1995 年建成的广东南海三山西大桥,跨径 200 m;2000 年建成的广东丫髻沙大桥,跨径 360 m;2005 年建成的四川巫山长江大桥,跨径 460 m。5 种结构形式已建成桥梁的跨径纪录分别为:上承式拱——主跨 288 m 的重庆奉节梅溪河桥,有推力中承式拱——主跨 460 m 的四川巫山长江大桥,飞鸟式——主跨 360 m 的广州丫髻沙大桥,下承式拱梁组合拱——主跨 202 m 的辽宁丹东月亮岛大桥,下承式刚架系杆拱——主跨 280 m 的湖北武汉江汉三桥。

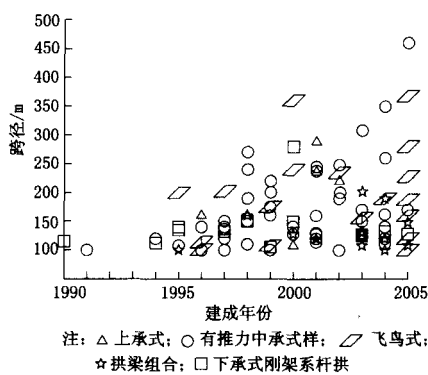


图 1 钢管混凝土拱桥跨径的变迁

2 施工方法

从表 3 所给出的已知施工方法的 103 座桥梁的统计结果可以看出,钢管混凝土拱桥拱肋的架设方法主要有转体施工法、缆索吊装法、支架施工法,也

有少数桥梁采用了悬臂拼装等方法。其中采用缆索吊装的有 69 座,占了 67%,除了拱梁组合桥以支架施工为主外,缆索吊装方法在其它 4 种桥梁中都是主要的施工方法,对于有推力的中承式拱,这种方法的采用率更高达 85%。

表 3 调查的拱桥所采用的施工方法

结构形式	缆索吊装	转体施工	支架施工	其它方法	小计
上承式	5	3	1	1	10
有推力中承式	39	4	3		46
飞鸟式	12	4	3		19
拱梁组合体系	4	2	6	1	13
下承式刚架系杆拱	9	2	3	1	15
合计	69	15	16	3	103

图 2 表示的是施工方法与跨径之间的关系。支架施工方法主要用于跨径不大的桥梁,主要是拱梁组合体系桥。钢管混凝土拱桥的一个主要优点就是拱肋可先架设空钢管拱肋,然后灌注管内混凝土形成钢管混凝土拱肋。自重较轻的钢管拱肋容易实现无支架施工,所以对于有推力的拱和无推力的刚架系杆拱,除少数跨径不大、水深较浅的桥梁采用支架施工外,极少采用支架施工方法。对于拱梁组合体系桥,一方面这种桥型的跨径一般不大,另一方面它的施工无论是采用先拱后梁还是先梁后拱的方法,无支架施工均有一定的困难,所以较多地采用了支架施工方法。但这种支架施工方法通常是采用少支架,较少采用满堂架,有时会采用缆索吊装和少支架定位相结合的方法。

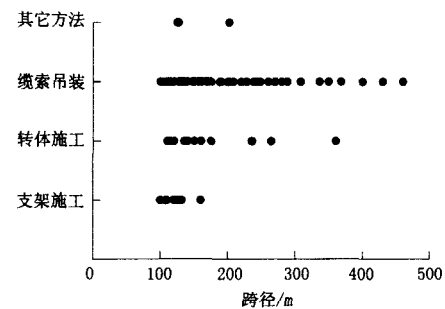


图 2 架设方法与跨径的关系

拱桥中的转体施工法,尤其是水平转体施工法,是一种极具中国特色的施工方法,在许多特定条件下能取得很好的效果,这种施工方法在峡谷地区、桥下通航(行)要求较高等情况下用得较多。但转体施工方法要有合适的地形条件和结构条件,普及程度也不如缆索吊装广,所以转体施工法的应用也比缆索吊装法少。采用水平转体施工法的典型桥例有三峡的黄柏河大桥、下牢溪大桥、北盘江铁路桥等,采用竖向转体施工的典型桥例有三峡莲沱大桥、江

苏京杭运河大桥和广西梧州桂江大桥等,采用水平与竖向组合转体施工的有河南安阳文峰路立交桥、广州丫髻沙大桥等,其中广州丫髻沙大桥水平转体重量达 13 600 t,是我国目前桥梁转体重量最大者。

缆索吊装方法在我国拱桥施工中得到广泛的应用,采用千斤顶斜拉扣挂的技术,较之传统的缆索吊装技术有了很大的进步,也使之成为钢管混凝土拱桥拱肋架设的最主要方法。已建和在建的跨径在 300 m 以上的 8 座钢管混凝土拱桥中,除丫髻沙大桥采用转体施工法外,其余 7 座均采用缆索吊装法,其中跨径达 460 m 的四川巫山长江大桥已经建成。因此,缆索吊装法适用的桥型和跨径范围在 3 种方法中最广,预计仍将是今后钢管混凝土拱桥拱肋架设的主要方法。

钢管混凝土拱桥拱肋的架设在实际施工过程中根据不同的施工条件还可以采用不同的施工方法。如辽宁丹东月亮岛大桥拱肋的两端拱脚段采用竖向转体施工,然后通过设置在桥跨内的塔架垂直提升中间段;湖南天子山大桥采用悬臂拼装拱肋。中小跨径的钢管混凝土拱桥拱肋施工方法的选择则更多。锡宜高速公路跨京杭运河桥(跨径 90 m)的拱肋采用两段浮运吊装,福建莆田阔口大桥(跨径 99 m)运用了整体浮托方法安装拱肋。

3 结构参数分析

3.1 矢跨比与拱轴线

矢跨比是拱的一个重要参数。矢跨比小,拱的推力大,拱所受的轴力大,拱以受轴力为主的优势也更明显,但超静定结构的附加内力也越大,同时,拱的推力大了以后,下部工程的造价也越高,反之亦然。实际的矢跨比,主要根据线形规划、地形条件等决定。从图 3 的跨径与矢跨比的关系看,二者关联性不是太大,对于小跨径桥梁,矢跨比选择的范围大些,对于大跨径基本上都在 1/5 附近。从图 4 也可看出大多数桥梁的矢跨比在 1/4 ~ 1/5 间,以 1/5 最多,从具体桥例分析可知,采用较大 (>1/4) 或较小 (<1/5.5) 矢跨比的桥梁往往是一些景观桥梁。

为充分发挥钢管混凝土的材料性能,拱轴线应接近压力线。表 4 和图 5 为关于拱轴线的统计,在统计的上承式钢管混凝土拱桥中全部采用了悬链线,抛物线在中下承式的拱桥应用得较多。在全部统计的桥梁中,拱轴线大多数为悬链线和抛物线,以悬链线最多,达到了 68%;少数桥梁采用了样条曲线和圆弧形。当拱轴线为悬链线,拱轴系数的变化

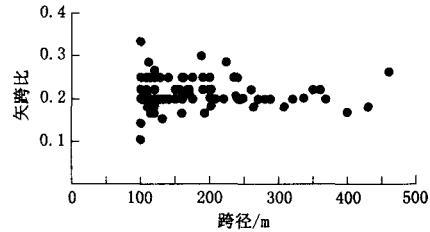


图 3 跨径与矢跨比的关系

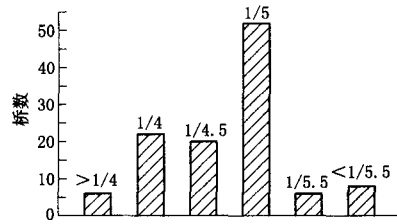


图 4 不同矢跨比统计

影响到拱肋的弯矩。图 6 为拱轴系数 m 与跨径的关系图。拱轴系数 m 与跨径之间不存在相关性,拱轴悬链线系数大多在 1.0 ~ 1.7 范围内。图 7 为 5 种结构形式拱轴系数和矢跨比之间的关系图,除上承式拱桥的拱轴系数和矢跨比存在一定的正比关系外,在其它结构的拱桥中,这两者也不存在相关性。

表 4 各类结构形式采用的拱轴线形统计

结构形式	悬链线	抛物线	其它	小计
上承式	10			10
有推力中承式	33	15	2	50
飞鸟式	13	5	2	20
拱梁组合体系	4	10		14
下承式刚架系杆拱	14	1		15

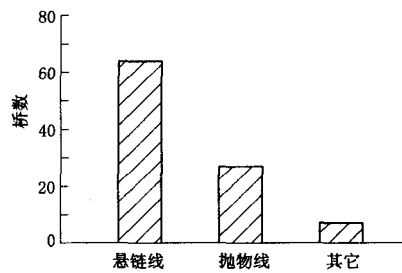


图 5 拱轴线统计

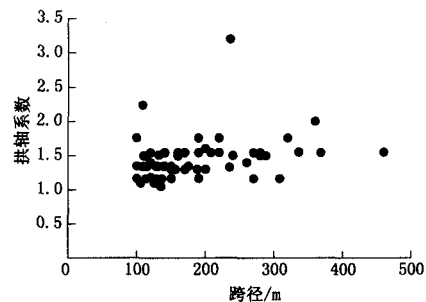


图 6 拱轴系数与跨径的关系

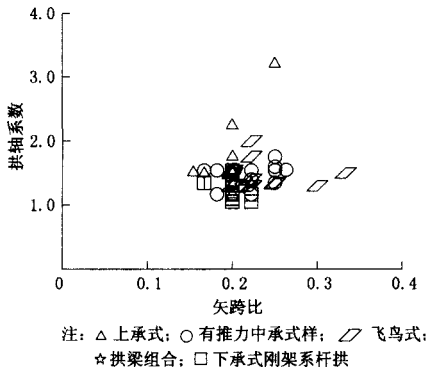


图7 拱轴系数与矢跨比的关系

3.2 拱肋

图8为拱肋截面形状统计图。跨径在100m以上的钢管混凝土拱桥拱肋采用的截面以桁式截面最多,哑铃形截面次之。在统计的66座采用桁式截面的拱桥中,有24座采用了横哑铃形截面,超过了1/3。但是,横哑铃形截面由于横腹板的受力特性与圆钢管混凝土相差很大,设计上不能采用套箍理论,在施工过程中也容易出现爆管问题,因此在实际应用中应慎重选择。此外,也有部分桥梁拱肋采用了集束式、圆端形等截面。图9为拱肋截面和跨径的关系图。贵州落脚河大桥采用集束五管变截面,跨径达到了240m;哑铃形截面适用的跨径不大,在已建成的桥梁中采用哑铃形截面的最大跨径为160m;桁式截面的适用跨径较广,因此大跨径钢管混凝土拱桥宜优先考虑采用多肢全桁式截面。

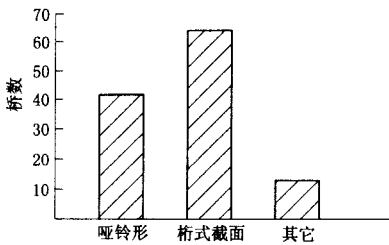


图8 拱肋的截面形状统计

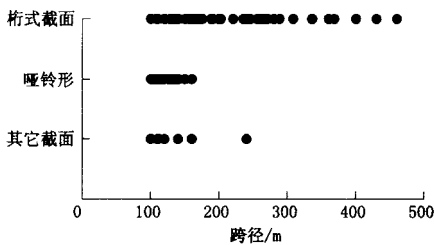


图9 拱肋截面与跨径的关系

图10和图11为不同的设计汽车荷载下等高度拱肋截面桥梁的跨高比与跨径的关系。从图中可以看出,钢管混凝土拱肋的高跨比大多在1/40~1/60

之间。图12是不同的汽车荷载下变高度拱肋截面桥梁跨高比与跨径的关系。在这些桥梁中,设计荷载为汽-20的桥梁拱肋与跨径的比值在1/40~1/100之间变化,而设计荷载为汽超-20的桥梁则在1/20~1/80变化。

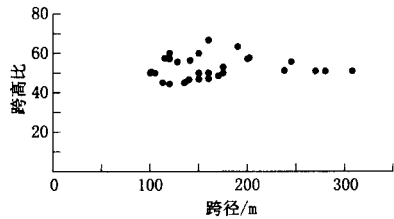


图10 汽-20荷载下跨高比与跨径的关系

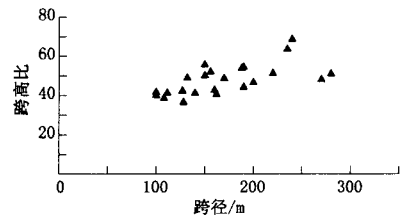


图11 汽超-20荷载下跨高比与跨径的关系

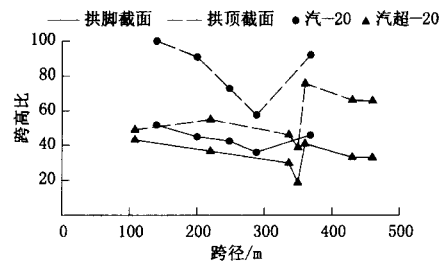


图12 变高度拱肋截面桥梁跨高比与跨径的关系

3.3 拱肋材料

钢管和混凝土本身的性能对钢管混凝土力学性能的影响很大,在统计中,拱肋钢材采用Q345的桥梁约占统计桥梁的80%,其余的桥梁均采用Q235。为了保证钢管混凝土构件具有良好的力学性能,并具有较好的经济性,管内混凝土等级不宜过低。反过来,管内混凝土等级也不必过高。因为,目前钢管混凝土拱桥设计计算一般采用应力叠加法,大量的设计计算结果是钢管的应力控制设计,而管内混凝土的应力值较低,如果混凝土等级过高,不仅使其施工难度上升,而且降低了经济性。另一方面,如果设计不考虑钢管的初应力问题,而直接从成桥状态按极限状态法进行钢管混凝土拱肋的强度验算,由于钢管混凝土拱肋具有很高的强度,对于细长且受压为主的拱一般是稳定控制,而在稳定计算中高强度

混凝土的弹模增大是有限的。图 13 为拱肋所采用的混凝土强度的统计图。随着施工技术的发展,混凝土强度从早期比较常用的 C40 过渡到 C50。由于统计的对象跨径大于 100 m,这些桥梁大多在 1995 年以后才建成,因此混凝土强度采用 C50 的比例较高。混凝土强度采用 C30 仅在 20 世纪 90 年代初建成的旺苍东河桥、佛陈大桥等 4 座桥梁采用过,而 C60 就只有巫山长江大桥和重庆奉节梅溪河桥采用。同样,钢管和混凝土如何“匹配”,同样对钢管混凝土的力学性能有着重要的影响。调查结果表明,钢管混凝土拱肋钢管和混凝土材料的组合一般是 Q235 钢配 C30 或 C40 级混凝土;Q345 钢配 C40、C50 级混凝土。

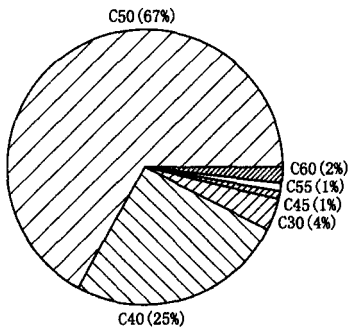


图 13 拱肋的混凝土

4 结 语

钢管混凝土拱桥在我国走过了十余年的发展历程,无论是其应用规模之大、跨径增大的速度之快,还是结构类型之丰富、应用范围之广都是惊人的。我国目前正处于大规模的交通基础设施建设的时期,钢管混凝土拱桥以其自身特有的优势,预计还将被大量地应用,对其设计计算理论、结构构造、施工方法等方面的研究都有待进一步深入。本文通过对收集到的实际资料进行分析总结,以期对我国钢管混凝土拱桥的应用现状有一较全面的了解,同时通过对结构主要参数和施工方法等方面的参数分析,为今后这类桥梁的实际应用提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥发展综述 [J]. 桥梁建设, 1997, (2): 8 - 12
- [2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工 [M]. 北京:人民交通出版社, 1999.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集 (一) [M]. 北京:人民交通出版社, 2002
- [4] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥施工问题研究 [J]. 桥梁建设, 2002, (3): 55 - 59.
- [5] 楼庄鸿. 楼庄鸿桥梁论文集 [M]. 北京:人民交通出版社, 2004

Investigation and Analysis of Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridges

CHEN Bao-chun, YANG Ya-lin

(Institute of Civil and Architectural Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: This paper collects a great deal of essential information of concrete-filled steel tube arch bridges having been built and to be built in the near future in China, analyzes and summarizes the numbers, span length, structural types, construction methods and materials of the type of the bridges with the aim of providing reference for the structural design and construction of more of the bridges

Key words: arch bridge; concrete-filled steel tube structure; design; construction; investigation; analysis