

文章编号:1003 - 4722(2002)03 - 0055 - 05

钢管混凝土拱桥施工问题研究

陈宝春

(福州大学土木建筑工程学院,福建 福州 350002)

摘要:对钢管混凝土拱桥施工过程中的钢管拱架设方法、施工应力与变形分析、施工稳定分析、局部受力分析等方面的研究进展进行了综述。

关键词:拱桥;钢管混凝土;桥梁施工;综述

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

Study on Construction of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge

CHEN Bao-chun

(College of Civil Engineering and Architectures, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The studies on construction of concrete-filled steel tube arch bridges, such as the erection methods of steel tubular arches, the analysis methods for stress, deformation and stability of the structures during the construction period as well as the partially force analysis are summarized.

Key words: arch bridge; concrete-filled steel tube; bridge construction; summarization

钢管混凝土拱桥已在我国得到广泛的应用^{[1],[2]}。其施工方法、施工工艺与施工过程中的受力都有自身的特点,作者最近在主编《钢管混凝土拱桥实例集(一)》时,收集了大量有关钢管混凝土拱桥施工问题研究方面的资料,并对其进行归纳整理,形成本文。

1 钢管拱架设方法研究

钢管混凝土拱桥的施工方法本质上是劲性骨架方法,虽然钢管骨架较之钢筋混凝土轻许多,但跨径增大以后,钢管骨架本身的架设也具有很大的难度。对于100 m以下的跨径,钢管骨架一般分为3段,吊装重量一般仅十几吨,可根据实际情况采用浮吊、汽车吊等进行吊装,边段用扣索扣住进行合龙,也可以采用少支架支撑。当跨径超过百米以后,常用的架设方法,主要是缆索吊装和转体施工方法,在条件许可的地方还提出了整体吊装和分段吊装的施工方法。

缆索吊装施工方法是我国修建大跨度拱桥的主要方法之一。在跨径较大的钢管混凝土拱桥中,由于钢管拱肋节段多、重量大,因此对传统的缆索吊装方法进行了改造与创新,采用了一些新技术、新工艺。

在主跨为312 m的广西邕宁邕江大桥中,钢管劲性骨架分9段制作安装,最大节段重达59 t,传统的卷扬机钢丝绳斜拉扣挂悬臂系统设备较多,拉力大,调整困难,施工难度大。因此在该桥的施工中开发研究了千斤顶斜拉扣挂悬拼架设法^{[3],[4]},以千斤顶张拉系统实现钢管骨架标高调整时的扣索张拉和抬放。这一方法还可于用调整灌注管内混凝土时钢管劲性的内力与变形。跨径达420 m的万县长江大桥^[5]、重庆合川大桥、武汉江汉五桥等钢管骨架的安装也都采用了缆索吊装千斤顶斜拉吊挂架设方法。因此可以说,千斤顶斜拉扣挂技术为我国大跨径拱桥的施工提供了一个新的技术与思路。

我国首座跨径跃上200 m大关的广东南海三山

收稿日期:2001-11-05

作者简介:陈宝春(1958-),男,教授,博士生导师,1982年毕业于福州大学路桥专业,获学士学位,1986年毕业于福州大学结构工程专业,获硕士学位。

西大桥,钢管拱肋也采用缆索吊装架设。钢管拱肋分17段吊装,除两岸靠拱脚的4段用斜拉扣索固定外,其余13段均采用吊桥式缆索吊装就位。单段最大吊重为490 kN。为增大钢管拱肋在吊装和灌注管内混凝土时的刚度,缆索系统设置了悬挂钢管拱肋的主缆^[6]。每段钢管拱肋吊装后,按先后顺序悬挂在承重主索上,因此,每一段拱肋的吊装,对已经悬挂在主索上的拱肋段的坐标值都有影响,施工控制的目的是使最后一段拱肋吊装到位时,其它各拱肋段均在设计坐标值的位置附近,以便使拱肋合龙时,调整各段坐标值的工作量最小,并使成桥后的拱轴线与设计拱轴线相吻合。因此,在施工计算时,应考虑各节段拱肋和悬挂系统受几何非线性的影响。三山西大桥在施工控制计算时采用前进法确定主索最终的受力状态,以及各段拱肋吊点位置的坐标,然后再用倒退分析法确定各段拱肋在吊装时的吊点抬高量。该桥的施工结果表明,其控制计算的结果较为理想。

如果说广西邕宁邕江大桥施工中所采用的千斤顶斜拉吊挂技术是引进斜拉桥的施工技术到拱桥施工中的话,广东南海三山西大桥施工中所采用的主缆悬挂技术则是引进悬索桥的施工技术到拱桥的施工之中。

转体施工方法是近年来在钢管混凝土拱桥施工中得到广泛应用与迅速发展的又一技术。竖转法、平转法都有采用,而且还出现了竖转与平转相结合的施工方法,转体重量也有了极大的提高,转体施工技术已进入新的发展阶段^{[7]、[8]}。

竖转法先在国外出现,它是将拱肋竖向拼装或浇筑然后放下合龙的方法。我国在应用竖转法时,拱肋是在低位浇筑或拼装,然后向上拉升达到设计位置,与国外的下放法相比,提升法为竖转法适应于更大跨径和与平转法相结合提供了可能。竖转法在钢管混凝土拱桥施工中也得到了应用和发展,1996年施工的三峡莲沱大桥(主跨114 m)采用的就是竖转法^[9]。

对于跨径较大的钢管混凝土拱桥采用竖转法施工时,由于钢管拱肋自重较大、悬臂较长,要求牵引力较大、牵引索也较多,有时除了悬臂自由端拉索外,还要增加拉索组数,采用传统的卷扬机则无法多索同步受力,而应采用千斤顶液压同步提升系统。1999年主跨175 m的广西鸳江钢管混凝土拱桥、2001年主跨235 m的徐州京杭运河钢管混凝土提篮拱桥均采用了以液压同步提升技术为技术核心的

竖转法^{[10]、[11]},使桥梁竖转施工技术跃上了新的台阶。

拱桥平面转体施工法是我国首创的拱桥施工方法。1977年在四川省遂宁市采用该法建成1孔70 m钢筋混凝土箱肋拱^[12]。随后,这一方法在我国的钢筋混凝土拱桥中得到推广应用。1990年建成的四川涪陵乌江大桥,采用无平衡重的双箱对称同步转体施工方法,跨径达200 m,使我国钢筋混凝土拱桥的跨径跃上200 m大关^[13]。转体施工方法也在钢管混凝土拱桥中得到了应用^[14]。主跨130 m的钢管混凝土劲性骨架刚架拱-江西太白桥^[15]、主跨160 m的上承式钢管混凝土拱桥黄柏河大桥和下牢溪大桥^{[16]、[17]}均采用了平转法施工。黄柏河、下牢溪大桥两桥的4个半拱根据靠背的山势不同平转的角度由180~110°不等,整体平转就位后在跨中合龙。转盘由轴心(球铰)、环形滑道上板、底板等组成。球铰直径为2.2 m,由两台特制的ZLD-100张拉千斤顶牵引。两桥的转体重量均达3 600 t,转体重量为当时国内最大,采用千斤顶牵引也比过去的卷扬机牵引动力大、易近控制。两座桥均已于1996年建成。

将竖向转体与平面转体结合是钢管混凝土拱桥施工中对转体施工方法发展所做的突出贡献,它使桥梁转体施工法进入了一个新的发展时期。1995年安阳文峰路135 m的钢管混凝土拱桥首次采用这一方法转体成功^[18]。1999年10月广州丫髻沙大桥也采用此法顺利合龙。丫髻沙大桥的平转重量达13 685 t。它的建成使我国的桥梁转体施工技术取得了重大的突破,进入了世界领先水平^{[19]、[20]}。

广州丫髻沙大桥主桥为带悬臂的中承式刚架系杆拱,主跨360 m。主跨为钢管混凝土桁式肋拱,边跨为上承钢管混凝土劲性骨架箱肋悬臂半拱。将半跨、主跨和一个边跨作为一个转动单元,沿河岸搭支架拼装边跨劲性骨架,并在低支架上拼装半跨主跨钢管拱肋,竖转主跨钢管拱肋就位,然后利用边跨为平衡重,平转就位、合龙。

竖转动系统采用液压同步提升技术,张拉千斤顶布置于边跨端部。竖转时实行索力和标高双控。竖转角度为24.701 4°。每肋使用10台千斤顶。拉索共有2组,互相连通。1号拉索前端锚于主拱肋转体结构端部,2号索前端锚于主拱肋L/4处。在张拉(转动)过程中,保持各台千斤顶同步和1、2号拉索力以合理比例关系同步。脱架时将扣索张拉至设计起动张拉力的100%,如果此时主拱肋

仍未完全脱架,则起动主拱顶端助升千斤顶(实际施工中未采用)。脱架后停置 12 h 以上,检查整个竖转系统各重要部位有无异常现象,观测温度变化对整个体系的影响规律。

竖转到位后,然后解除边跨支架的约束,临时固结拱脚,尔后进行平转。

整个上部结构的重量均作用在上转盘上,主要由撑脚传递至下转盘,中心转轴主要起定位作用。每个拱座设置 7 个撑脚,撑脚与环道接触部分设置千岛走板。下转盘环道直径 33 m,宽 1 100 mm。环道面层为钢板,表面粘 1 层 3 mm 厚镜面不锈钢板。环道高差控制在 ± 0.5 mm 以内。平转牵引体系由牵引索、牵引千斤顶、助推千斤顶、牵引索转向滑轮等组成。在下转盘上增设转向滑轮组满足一次平转到位,平转过程不需更换千斤顶位置。

由千斤顶、泵站和主控台三部分组成的 ZTD 自动连续转体系统能够实现多台千斤顶同步不间断地匀速牵引结构转体到位。平转起动静摩擦系数按 10% 控制设计。平转角速度控制不大于 0.57 9 min,主拱端水平线速度不大于 1.2 m/min,加速度不大于 0.003 m/s^2 。平转到位后进行轴线校正,锚固边跨尾端竖向拉杆,并依此恢复边拱支架,收紧两组浪风。

丫髻沙大桥的合龙采用了瞬时合龙和永久合龙 2 个合龙阶段。设置瞬时合龙构造,一方面满足瞬时合龙要求,减小合龙段在焊接过程中温度影响,另一方面以调整拱肋内力和轴线。

2 施工应力与变形分析

施工过程的结构受力一般以应力叠加进行计算。由于管内混凝土采用现浇所带来的一些问题引起了研究者的关注,如钢管拱大变形对结构受力的影响、管内混凝土的刚度取值、管内混凝土的水化热与环境温度引起的应力、管内混凝土凝固前对钢管的流体压力作用等。

文献[21]~[26]对几何非线性对结构受力的影响进行了分析,主要结论如下: 施工过程的大挠度对结构内力的影响,对大跨径钢管混凝土劲性骨架拱桥较大,对钢管混凝土拱桥较小。大挠度对内力的影响,主要是对弯矩 M 的影响,对轴力 N 影响很小。当拱肋为桁肋时,弯矩影响转化成上下弦杆的轴力后,其影响程度将相应降低。

一些钢管混凝土拱桥在施工监测监控中对拱肋钢管进行了应力测试。然而,针对各具体桥梁所进

行的实测数据受各种因素的影响,规律性并不十分明显,也缺乏系统的研究。文献[24]对石潭溪大桥灌注管内混凝土过程的应变测试与分析中,对管内混凝土的刚度采用了随时间呈对数增长的模式,考虑了管内混凝土凝固前对钢管流体压力作用,计算结果与测试结果吻合较好,在文献[27]又考虑了管内混凝土水化热与环境温度引起的温度应力后,计算结果与测试结果更为吻合了。

文献[24]、[27]在考虑管内混凝土凝固前对钢管产生的流体压力时,是直接叠加在将管内混凝土作为荷载作用在钢管拱上产生的内力与应力。文献[28]、[29]则认为应将管内混凝土荷载分解为沿拱轴方向的流体压力和沿钢管径向的荷载,这样计算的结果,就石潭溪大桥而言,其受力比直接将管内混凝土作为荷载加在钢管拱上的还要小,与测试的结果相差会更大。因此,管内混凝土凝固前的流体压力应如何计算还有待进一步探讨。

为了保证钢管混凝土拱桥成桥时的线形满足设计要求,需对施工过程中的线形进行控制。文献[30]对以缆索吊装钢管拱的线形控制提出了扣索动态控制技术,对主跨为 208 m 的湖北秭归龙潭河特大桥的分析表明,采用该技术较传统的一次张拉或多次张拉法,能大大减小扣索的索力,降低塔架和地锚等施工设备和原材料的投入。

钢管拱合龙后的线形控制计算,主要与计算时管内混凝土的刚度和钢管混凝土的刚度的选取有关,然而这方面的研究还比较少,文献[24]提出未达到强度时管内混凝土的刚度按照文献[31]提供的按对数曲线的取值计算方法。

此外,由于钢管混凝土拱桥先合龙钢管,再灌注管内混凝土,施工过程中的应力与线形还与管内混凝土的灌注顺序有很大的关系,尤其是桁式拱,钢管数量较多,因此许多实桥都在设计阶段对此进行分析,提出最佳方案,施工中再根据施工监测结果进行适当的调整,以减小施工中钢管的应力和拱轴线的误差。

3 施工稳定分析

拱桥作为压弯结构,稳定问题历来受到重视。钢管混凝土拱桥属于自架设体系,施工稳定性问题更是受到工程界的高度重视。现有介绍钢管混凝土拱桥设计与施工的文献,几乎都提到施工稳定性问题。

施工过程中的稳定问题主要有钢管骨架架设与

合龙时的稳定问题和后续加载过程中的稳定问题等。对于施工中的弹性分枝点失稳问题采用大型通用有限元程序求解的方法,已为工程界所熟悉,且实例很多。当跨径较大或采用钢管混凝土作为施工劲性骨架时,考虑到结构刚度较弱,一些研究者进行了考虑大变形的稳定分析,编制了应用程序^{[21]、[22]、[23]、[32]}。在这些分析中,一般不考虑材料的非线性问题,考虑结构的大变形对平衡方程的影响,以结构的荷载~挠度曲线达到极值点作为极值点失稳的临界荷载。这种方法无法求得在对称的施工荷载作用下的分枝点失稳模态和临界荷载值,而且一般情况下,变形较大时材料已进入非线性。因此,这种分析可作为弹性分枝点失稳分析的补充。当二者的失稳模态不同时,通过二者的临界荷载的比较,认为考虑大变形的几何非线性稳定分析比弹性分枝点稳定分析精度更高、更安全的说法缺乏理论依据。

文献^[24]对于采用缆索吊装的石潭溪大桥在进行施工稳定分析时考虑了索和横向缆风索的作用。对于单肋吊装单肋合龙方案,用SAP93程序计算得到的弹性分枝点失稳稳定系数仅2.609,显然很低,而考虑2根1组 $\phi 33.5$ mm的钢丝绳缆风索和单根 $\phi 37.5$ mm的斜扣索作用后,用自编程序计算所得的稳定系数达到19。上述计算为施工单位采用单肋吊装单肋合龙方案提供了理论依据。

4 施工过程局部受力问题

对于哑铃形钢管混凝土拱肋,在灌注腹腔内混凝土时容易出现爆管事故。文献^[33]对一座净跨128 m、采用钢管混凝土哑铃形拱肋的桥梁,在灌注腹腔混凝土时,腹腔与上弦管的焊缝出现长达7.75 m开裂的事故进行了分析。该桥的施工,先灌注下管、再灌注腹腔、最后灌注上弦管,而且腹腔钢板没有加劲构造,分析认为,腹腔与圆管交接处的应力集中现象非常突出,圆管(上弦管)承受局部压力也极为不利是造成爆管事故的主要原因。在工程应用上,为防止哑铃形钢管混凝土拱肋在灌注腹腔内混凝土时出现爆管事故,常用的做法是采用对拉杆和型钢加劲,以改善腹板的受力; 在施工顺序上,先灌注上下弦管的管内混凝土、最后灌注腹腔内混凝土,以避免空钢管局部承压; 腹腔内的混凝土采用分仓灌注,以减小腹腔内的混凝土流体压力。当然,更为根本的解决办法是竖哑铃形断面腹腔内不灌注混凝土、横哑铃形桁式断面改为全桁式断

面^[34]。

对于桁式拱肋,灌注管内混凝土时节点会产生局部变形,它对整体结构受力的影响,文献^[35]提出整体分析与结构分析相结合的方法,并对净跨达338 m的南宁永和桥进行了分析。结果表明,节点局部变形对整体结构分析的影响很小,进行整体结构分析时可以略去局部变形的影响。

5 结 语

随着钢管混凝土拱桥应用推广,它的施工问题日益受到重视,并已取得了相当的研究成果。除众多实桥为保证顺利建成所进行的研究外,2000年国家自然科学基金资助了《大跨度钢管混凝土拱桥施工过程变形及应力模拟(50068001)》项目(广西大学承担)。研究成果除本文前述内容之外,在钢管拱肋制作工艺与技术要求、管内混凝土配合比与泵送技术等方面,针对具体桥梁进行了大量的应用性研究,这些研究成果在文献^[1]和新近出版的《公路施工手册—桥涵》一书^[36]中均有所反映。在标准方面,新修订的《公路桥涵施工技术规范JTJ-41-2000》^[37]增加了钢管混凝土拱桥的内容,《公路工程质量检验评定标准JTJ-071-98》^[38]也对原标准JTJ071-94中有关钢管混凝土拱桥的内容进行了修订。此外,由重庆交通科研所主编的交通部规范《钢管混凝土拱桥施工技术规范》也在进展之中,于2001年6月在广西南宁召开了统稿会议,现已形成了征求意见稿,有望明年颁布。相信通过广大桥梁工作者的努力,我国钢管混凝土拱桥的施工技术会取得更大的进步。

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] 郑皆连, 徐风云, 唐柏石, 等. 广西邕宁邕江大桥千斤顶斜挂扣悬拼架设钢骨拱桁架施工仿真计算方法[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会 1996年桥梁学术讨论会论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 1996. 214-228.
- [4] 王勤耘. 邕宁邕江大桥钢骨拱桁架千斤顶斜挂扣悬拼架设工艺简介[A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会 1996年桥梁学术讨论会论文集[C]. 北京: 人民交通出版社, 1996. 241-252.
- [5] 万中茎, 徐基伟, 李文琪. 万县长江大桥劲性骨架的安

- 装[A].四川省公路学会桥梁学术研讨会[C].成都:西南交通大学出版社,1996.107-117.
- [6] 周汉东,许晓锋,黄福伟.大跨径钢管混凝土拱桥钢管拱吊装施工控制[J].哈尔滨建筑大学学报,1997,(增刊):121-125.
- [7] 陈宝春,孙 潮,陈友杰.桥梁转体施工方法在我国的应用与发展[J].公路交通科技,2001,(2):24-28.
- [8] 孙 潮,陈宝春,陈友杰.钢管混凝土拱桥转体施工[J].工程力学,2001,(增刊):515-519.
- [9] 王道斌,彭济南,陈佑新,等.莲沱大桥钢管拱肋竖转吊装的方案设计与施工[J].桥梁建设,1997,(2):18-23.
- [10] 唐建国,向宝成,肖仁富,等.桂江三桥钢管拱肋提升竖转施工技术[A].中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十四届年会论文集[C].上海:同济大学出版社,2000.368-372.
- [11] 孙 潮,陈宝春,谢云举,等.徐州京杭运河特大桥竖转受力分析[J].福州大学学报(自然科学版)(已录用).
- [12] 张联燕.拱桥转体施工方法的发展[A].国际公路运输技术交流会与展览会学术会议论文集[C].北京:1989.
- [13] 胡玉山,杨嘉璞.大跨拱桥转体施工工艺研究—涪陵乌江大桥转体施工[A].中国公路学会桥梁和结构工程学会1991年桥梁学术讨论会论文集[C].贵阳:1991.166-170.
- [14] 刘玉擎,陈宝春,彦坂熙.中国における钢管コンクリート合成アーチ橋および水平旋回架設工法の発展[J].桥梁と基礎,1999,(2):41-44.
- [15] 程懋方,陈俊卿.大跨径刚架拱桥的设计与施工[J].哈尔滨建筑大学学报,1995,(增刊):103-106.
- [16] 周 璞,任旭初.长江三峡两座转体拱桥的施工实践[A].中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十二届年会论文集[C].广州:1996.351-354.
- [17] 范应心.160 m 钢管混凝土拱桥转体施工[A].中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十二届年会论文集[C].广州:1996.362-366.
- [18] 乔景川,崔玉惠.钢管混凝土在拱桥上的应用[J].哈尔滨建筑大学学报,1997,(增刊):113-117.
- [19] 庄卫林,黄道全,谢邦珠,等.丫髻沙大桥转体施工工艺设计[J].桥梁建设,2000,(1):37-41.
- [20] 尹浩辉.广州丫髻沙大桥转体工艺设计构思的特色和探讨[J].福州大学学报(自然科学版),2000,(4):60-65.
- [21] 赵 雷,杜正国.大跨度钢筋混凝土拱桥钢管混凝土劲性骨架施工阶段稳定性分析[J].西南交通大学学报,1994,(4):446-452.
- [22] 谢幼藩,赵 雷,谢邦珠,等.用劲性骨架法建造大跨钢筋混凝土拱桥的施工安全度分析[A].四川省公路学会桥梁学术研讨会论文集[C].成都:西南交通大学出版社,1996.46-53.
- [23] 颜全胜,韩大建.钢管混凝土系杆拱桥的非线性与稳定分析[A].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,1998.491-498.
- [24] 陈宝春,孙 潮.石潭溪大桥施工受力分析[J].中国公路学报,1998,(4):51-57.
- [25] 盛洪飞,郭 伟,王 锐,等.无风撑钢管混凝土中承拱桥非线性试验分析[J].哈尔滨建筑大学学报,1997,(4):53-56.
- [26] 刘 忠.大跨径钢-混凝土复合桥梁的时间、几何、材料、温度非线性空间分析[D].同济大学博士论文,1996.
- [27] 陈宝春,孙 潮,徐爱民.钢管混凝土拱桥温度内力计算时温差取值分析[J].中国公路学报,2000,(2):52-56.
- [28] 谢尚英.钢管混凝土拱桥在泵送混凝土时的行为特点[J].桥梁建设,1998,(3):72-73.
- [29] 李 勇,王晓红,侯念春,等.钢管内流态混凝土受力机理研究[J].哈尔滨建筑大学学报,2001,(增刊):114-116.
- [30] 张开银,刘三元,何雨微,等.大跨度钢管混凝土拱桥线形动态控制技术[J].武汉交通科技大学学报,2000,(1):1-4.
- [31] 饶 勃.实用混凝土工手册[M].上海:上海交通大学出版社,1993.
- [32] 赵长军,王锋君,陈 强,等.大跨度钢管混凝土拱桥空间稳定性分析[J].公路,2001,(2):15-17.
- [33] 秦 荣,谢肖礼,彭文立,等.钢管混凝土拱桥钢管开裂事故分析[J].土木工程学报,2000,(3):74-77.
- [34] 陈宝春.钢管混凝土拱桥设计探讨[A].中国土木工程学会桥梁与结构学会第十四届学术讨论会论文集[C].上海:同济大学出版社,2000.505-512.
- [35] 彭文立.大跨度钢管混凝土拱桥节点局部变形及其对整体结构分析的影响研究[D].广西大学硕士学位论文,2000.
- [36] 交通部第一公路工程总公司主编.公路施工手册—桥涵[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [37] JTJ - 041 - 2000,公路桥涵施工技术规范[S].
- [38] JTJ - 071 - 98,公路工程质量检验评定标准[S].