



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Bridge Engineering—Review

中国钢管混凝土拱桥

郑皆连^a, 王建军^{b,c,*}

^a College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China

^b Guangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning 530022, China

^c Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530011, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 May 2017

Revised 25 July 2017

Accepted 5 December 2017

Available online 8 December 2017

关键词

钢管混凝土拱桥

劲性骨架混凝土拱桥

斜拉扣挂悬拼

真空辅助灌注管内混凝土

斜拉扣索调载

摘要

近20多年来,中国钢管混凝土拱桥和以钢管混凝土为骨架的混凝土拱桥获得大发展,跨径增大很快,在桥梁发展史上罕见。高速公路和高速铁路的大规模建设为大跨径拱桥的发展提供了需求,设计及施工技术的进步为修建大跨径拱桥提供了可能。作为这段历史的参与者,我们通过本文来介绍中国钢管混凝土拱桥和以钢管混凝土为劲性骨架的混凝土拱桥的发展状况及主要创新技术,内容主要包括钢管混凝土拱桥关键建设技术,如钢管拱桥设计、制造与安装,管内混凝土制备与灌注等技术,以世界最大跨度钢管混凝土拱桥——合江长江一桥为工程实例进行了详细介绍;以及劲性骨架混凝土拱桥的主要建设技术,如斜拉扣挂悬拼施工、斜拉扣索调载、拱肋外包混凝土浇注等,并对广西邕宁邕江大桥和云桂铁路南盘江特大桥两个工程实例进行了介绍。中国钢管混凝土拱桥取得了同类桥型世界领先的地位,随着关键技术的持续创新,将成为推动拱桥发展突破的新领军者。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

桥梁的诞生来源于人类对自然现象的观察和实践,拱为自然界最常见的形状之一,由此人类发明了拱桥。采用天然石材建成的拱桥优美、坚固且耐久,在古罗马和中国得到广泛应用,赵州桥是其中的杰出代表。近现代随着优质人工材料如混凝土、铁和钢的发明及应用,拱桥跨径快速攀升。其中混凝土拱桥从1875年诞生到1997年的万州长江大桥跨径突破400 m,经历了一百多年,2016年建成了跨径445 m的沪昆高铁北盘江特大桥,创造了新的世界纪录。

钢管混凝土拱桥是一种优良的钢混组合桥梁,主要结构中钢管因混凝土的填充提高了局部稳定性,混凝土

因钢管的套箍作用增大了韧性和强度。钢管混凝土拱桥起源于20世纪30年代的苏联,在建成两座该类型桥梁后,因未能发挥其结构及施工优势,故未再接着修建。中国工程师对钢管混凝土拱桥受力机理和施工方法进行深入研究,取得了许多创造性的成果,推动了钢管混凝土拱桥在中国的大量修建,20多年来建成的数量超过了400座,最大跨径达到了530 m,至今仍保持着高速发展态势(部分钢管混凝土拱桥见图1)。同时还推动了以钢管混凝土为劲性骨架的混凝土拱桥跨径的突破,全世界跨径超过400 m的混凝土拱桥共4座,均为劲性骨架混凝土拱桥,且都建造于中国,其中3座于2016年建成,创造了世界桥梁发展史上的奇迹(部分劲性骨架混凝土拱桥见图2)。

* Corresponding author.

E-mail address: wjjerry@163.com (J. Wang).

2. 钢管混凝土拱桥

2.1. 发展状况

1990年, 中国建成第一座钢管混凝土拱桥——四川旺苍东河大桥, 之后每年以18座左右的数目迅速增长, 中国钢管混凝土数量增长情况见图3。据统计, 截至2015年年底, 中国建成的钢管混凝土拱桥已超过400座, 其中, 跨径超过200 m的54座, 超过300 m的11座(表1), 超过400 m的4座。2013年通车的合江长江一桥是目前世界最大跨径的钢管混凝土拱桥, 在各类拱桥中跨径排第三。目前在建钢管混凝土拱桥中跨径超过400 m的还

有3座, 包括跨径430 m的拉(萨)林(芝)铁路上的藏木雅鲁藏布江桥。钢管混凝土拱桥最大跨径增长情况见图4。

2.2. 钢管拱桥的架设

钢管拱桥架设是钢管混凝土拱桥最重要的施工阶段, 在中国广泛采用斜拉扣挂悬拼、转体和大节段提升三种方法。

2.2.1. 斜拉扣挂悬拼

1968年, 中国工程师开发了钢丝绳斜拉扣挂悬拼松

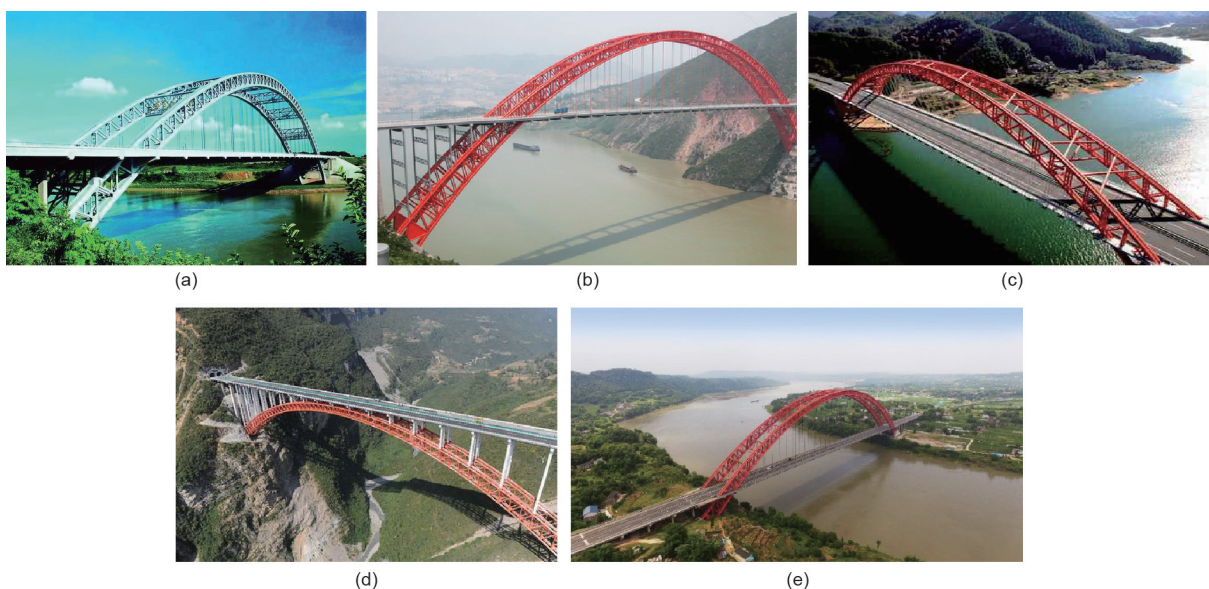


图1. 中国钢管混凝土拱桥。(a) 广西三岸邕江大桥(主跨270 m, 1998年建成); (b) 四川巫山长江大桥(主跨460 m, 2005年建成); (c) 安徽太平湖大桥(主跨352 m, 2007年建成); (d) 沪蓉西支井河特大桥(主跨430 m, 2009年建成); (e) 合江长江一桥(主跨530 m, 2013年建成)。

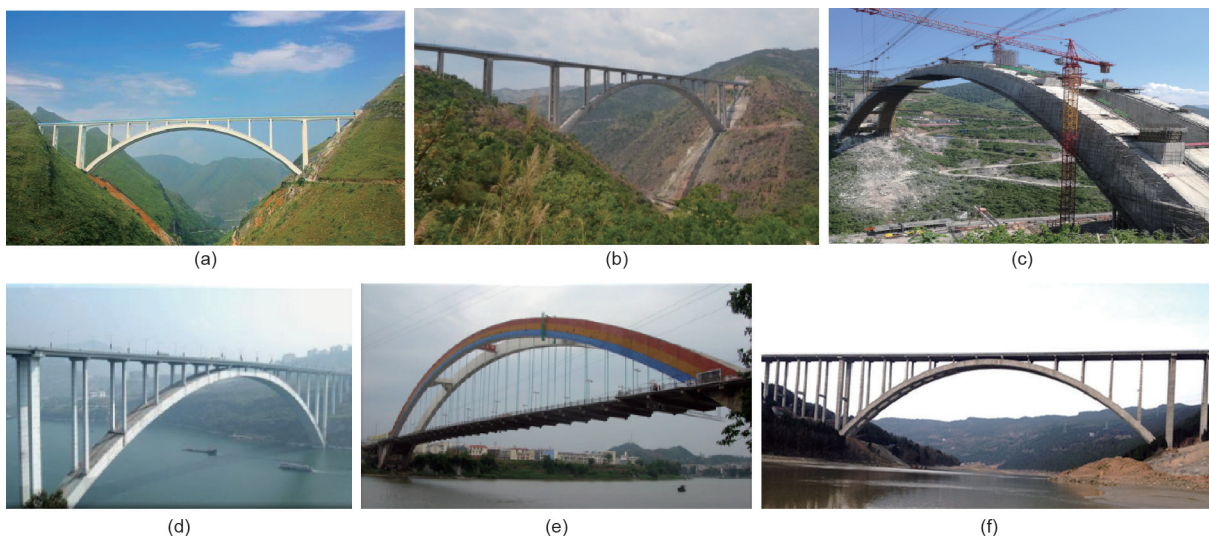


图2. 部分中国劲性骨架混凝土拱桥。(a) 沪昆高铁北盘江特大桥(主跨445 m, 2016年建成); (b) 云桂铁路南盘江特大桥(主跨416 m, 2016年建成); (c) 渝黔快铁夜郎河特大桥(主跨370 m, 2016年建成); (d) 万州长江大桥(主跨420 m, 1997年建成); (e) 广西邕宁邕江大桥(主跨312 m, 1996年建成); (f) 昭化嘉陵江特大桥(主跨364 m, 2012年建成)。

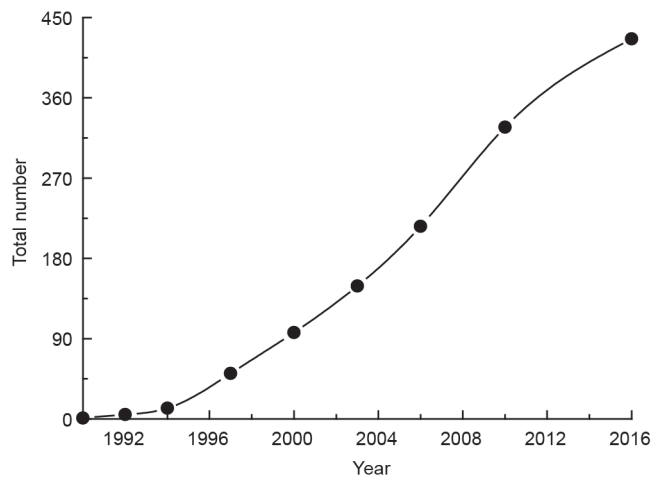


图3. 钢管混凝土拱桥数量增长趋势图。

索合龙工法，首次实现了拱桥无支架施工[1]。该工法能保证5个拱段以内、跨径100 m左右拱圈（拱肋）的悬拼施工安全和快捷。因为扣挂系统简单，所以施工费用低廉。按每平方米桥面计算对比，100 m跨径的混凝土拱桥与30 m跨径的混凝土简支梁桥的单价持平。上千座拱桥的拱圈采用了此工法完成架设，其代表是1972年建成的长沙湘江双曲拱大桥，其总长1250 m，最大跨径为76 m。

1994年开发了钢绞线斜拉扣挂悬拼合龙后松索工法，首次成功应用于跨径312 m的钢管劲性拱骨架的悬拼安装。通过千斤顶收放钢绞线斜拉扣索，控制精度可达到毫米级。该工法在施工过程中拱段逐段扣挂、逐段固结，无论总拼装段数多少，合龙时仅三段，且在静态中完成，适用于100 m以上跨径拱桥的悬拼施工。采用此工法完成了数百座拱桥拱圈架设，包括跨径550 m的上海卢浦大桥、跨径530 m的合江长江一桥、跨径420 m

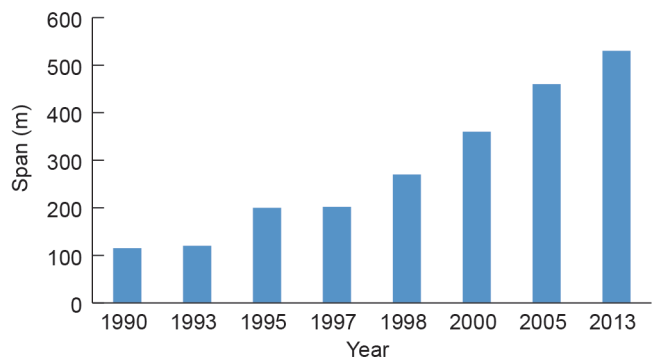


图4. 钢管混凝土拱桥最大跨径增长趋势图。

的万州长江大桥以及跨径445 m的沪昆高铁北盘江特大桥。

上述两种工法同时用在杭州复兴大桥上（图5），实现了两天合龙一孔的高速施工，为两年建成跨越钱塘江、全长1370 m、双层总桥面积70 000 m²的大桥作出了贡献。

陈宝春教授[2]对能收集到的103座钢管混凝土拱桥的施工方法进行统计，缆索吊运斜拉扣挂占67%。跨径超300m的11座钢管混凝土拱桥中10座采用了缆索吊运斜拉扣挂施工（表1）。

2.2.2. 转体

1977年中国工程师开发了拱桥转体施工方法，包括平转、竖转和平竖转组合三种方式，至今已完成了70多座桥梁的建设[3]。平转的典型工程之一为跨径236 m的上承式钢管混凝土拱桥——贵州水柏铁路北盘江大桥，竖转的典型工程之一是跨径175 m的中承式钢管混凝土系杆拱桥——广西梧州桂江三桥，平竖转组合的典型工程是广州丫髻沙大桥（图6），其主桥为（76+360+76）m

表1 中国建成的钢管混凝土拱桥一览表(跨径 $L \geq 300$ m)

Bridge	Bridge type	Year of completion	Span (m)	Cross-section	Construction method
First Hejiang Yangtze River Bridge	Half through	2013	530	Four-tube truss	Cable swing, cable-stayed fastening
Wushan Yangtze River Bridge	Half through	2005	460	Four-tube truss	Cable swing, cable-stayed fastening
Hurongxi Expressway Zhijing River Bridge	Deck arch	2009	430	Four-tube truss	Cable swing, cable-stayed fastening
Xiangtan Liancheng Bridge	Half through	2007	400	Six-tube truss	Cable swing, cable-stayed fastening
Zhunshuo Railway Yellow River Bridge	Deck arch	2015	380	Four-tube truss	Cable swing, cable-stayed fastening
Yiyang Maocao Street Bridge	Half through	2006	368	Four-tube truss	Cable swing, cable-stayed fastening
Guangzhou Yajisha Bridge	Half through	2000	360	Six-tube truss	Rotation construction
Hurongxi Expressway Xiao River Bridge	Deck arch	2009	338	Six-tube truss	Cable swing, cable-stayed fastening
Anhui Huangshan Taiping Lake Bridge	Half through	2007	336	Transverse dumbbell truss	Cable swing, cable-stayed fastening
Nanning Yonghe Bridge	Half through	2004	338	Transverse dumbbell truss	Cable swing, cable-stayed fastening
Chun'an Nanpu Bridge	Half through	2003	308	Four-tube truss	Cable swing, cable-stayed fastening

的三跨中承式钢管混凝土刚架系杆拱桥，转体质量达到13 850 t、转出水平长度为180 m，均为目前的最高纪录。转体施工方法的优点是对桥下空间干扰最少、转体过程中结构受力不变、施工安全性好，缺点是构筑转盘等转动体系投入较大，阻碍了转体工法应用于更大跨径的拱桥。

2.2.3. 大节段提升

在中国大吊段提升的钢拱桥有两座。其一是2007年建成的广州新光大桥[4]，主桥为(177+428+177)m三跨连续刚架钢桁系杆拱桥，跨越珠江，两边跨在原位低支架上拼装、整体提升，中跨分三大段在预制场制作好，船运至桥位采用同步液压提升技术，提升至支架上合龙，其单件最大质量达2850 t，施工对通航的阻碍时间仅为56 h。

另一座是2013年建成的广州南沙凤凰三桥(图7)，总长1196 m，主桥为(40+61+308+61+40)m三跨钢桁系杆拱桥，吊段长为249.5 m、质量为4080 t，通过船运至桥位，采用同步液压设备整体提升合龙成拱。

这项技术的高空作业减到了最少，可通过临时系杆来降低拱桁的施工应力，使增大吊段长度成为可能，而吊重的增加可通过相应增加千斤顶来解决，因此大节段

提升方法施工的钢拱桥跨径还能继续增大，成为特大跨径钢管拱桁架设的一种优选方法。

2.3. 典型工程实例

合江长江一桥是目前世界上最大跨径的钢管混凝土拱桥[图1(e)]，净跨径为500 m，按多跨桥梁跨径计算方法，跨径达530 m，在世界所有拱桥中位列第三。大桥共有四车道，位于泸(州)渝(重庆)高速公路上，由四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院设计，广西路桥工程集团有限公司施工，于2013年建成通车。

合江长江一桥主拱圈采用中承式钢管混凝土桁拱结构，拱脚、拱顶截面径向高分别为16 m、8 m，肋宽为4 m。每肋有4根 $\Phi 1320$ mm钢管拱桁，壁厚按位置不同而变化，分别为22 mm、26 mm、30 mm、34 mm。管内灌C60混凝土。横联钢管为 $\Phi 762$ mm \times 16 mm，腹杆为 $\Phi 660$ mm \times 12 mm。拱桁采用缆索吊机吊运、斜拉扣挂悬拼合龙后松索工法施工。

2.3.1. 钢管拱桁设计、制造与安装

在进行钢管拱桁设计时，除按其他桥梁一样进行整体静力、动力计算外，还应进行吊段设计。合江长江一



图5. 杭州复兴大桥斜拉扣挂悬拼。



图6. 广州丫髻沙大桥转体。



(a)



(b)

图7. 凤凰三桥。(a) 成桥照片；(b) 主拱肋大吊段提升照片。

桥钢管拱桁分两肋，每肋分为18个吊段，吊段间弦杆设内法兰栓接，同时加填半圆钢管焊接，接头得到加强且施工方便。每个吊段设一道横向风构，既能保证成桥后的整体稳定，也能保证每一吊段悬拼过程中的稳定。拱脚设临时铰，在安装过程中使用。标准吊段可参见图10(b)。

在钢管拱桁的制造与安装中，中国工程师首推大吊段，吊段质量通常为100~200 t。目前缆索吊机跨径已达1196 m，最大吊段质量达400 t。吊段无论制作和拼装都会产生误差，从而降低钢管拱桁的承载能力，研究表明钢管拱桁面内反对称误差的影响较大。另外，制作误差还会影响拼装的顺利进行。

合江长江一桥总重7270 t的钢拱桁在武昌船舶重工有限公司制造，共分为54个吊段，其中含18个横向风构和36个大型拱肋吊段，最大吊段质量为192 t，尺寸为4 m×16 m×45 m。为提高吊段制作精度，建立了全桥主拱三维模型，将预拱度值加入到对应的坐标值中。考虑各杆件焊接收缩量、切割设备精度、装配误差等因素后确定杆件的几何尺寸。通过逐级匹配制造消除误差累积。制造总体方案为：筒节制造→单元件制造→弦管片装分段制造→单侧2+1卧拼耦合制作→主拱肋立拼检验→涂装。经多次验证，吊段制造误差控制在3 mm内，可取消立拼耦合校验（图8）。最后1/3数量的吊段直接由卧拼耦合制作完成（图9），经斜拉扣挂悬拼检验，能保证拱桁线型精度和接头法兰密贴。立拼耦合校验的取消，避免了用龙门架实施大型吊段翻转的风险，加快了制造速度，降低了费用，为制造更大跨径钢管拱桁提供了经验。

合江长江一桥钢管拱桁两肋共36个吊段，通过船运至桥址，由缆索起重机吊运，每岸9组钢绞线斜拉扣索（包括3组临时扣索）进行扣挂，在扣塔上与背扣平衡张拉。合江长江一桥扣挂、吊运系统总体布置见图10。

缆索起重机主跨554 m，吊装能力为2×1000 kN，主索可移动到构件安装位置。承重索由2×8根Φ50 mm密封钢丝绳组成。扣塔架高度达到150 m，为钢管混凝土格构，吊塔高29.6 m，铰接在扣塔顶。

两肋各悬拼一个吊段后，安装横向风构及侧风缆。每半拱分为9个吊段，悬拼到第6段时固结临时铰，悬拼到第9段后，在气温稳定时段合龙。在封铰前、合龙前各调整一次拱桁标高，通过扣索、侧风缆来控制拱桁的标高和轴线，最终保证了内法兰密贴（图11）。

全桥36个吊段和全部横联安装共用时58个工作日，

精度高于规范[5]要求。合龙后，两岸和两肋从拱脚至拱顶对称放松斜拉扣索，形成钢管桁拱。表2示出了拱肋对称点高差，最大为0.030 m，远小于规范规定的 $L/3000=0.167$ m，该偏差对承载能力影响较大；表3示出了拱轴线误差，最大为10 mm，远小于规范规定的 $L/6000=83$ mm。

2.3.2. 管内混凝土

(1) 钢管与混凝土共同工作机理。钢管混凝土拱桥的承载能力和耐久性是靠钢管及其管内混凝土联合工作来保证的，中国学者研究并通过试验测试了界面抗剪黏结力，主要分成四类[6]：化学胶结力、机械咬合力、“宏观咬合力”和摩阻力。其中，化学胶结力占比很小，并且在小应变导致的局部滑移情况下即会丧失；“宏观咬合力”和摩阻力则在产生大应变滑移以后才发挥作用；机械咬合力则在发生小应变滑移之后、较大应变滑移之前的阶段存在。钢管内脱黏和脱空影响界面抗剪黏结力



图8. 拱桁吊段立拼耦合校验。



图9. 拱桁吊段卧拼耦合制作。

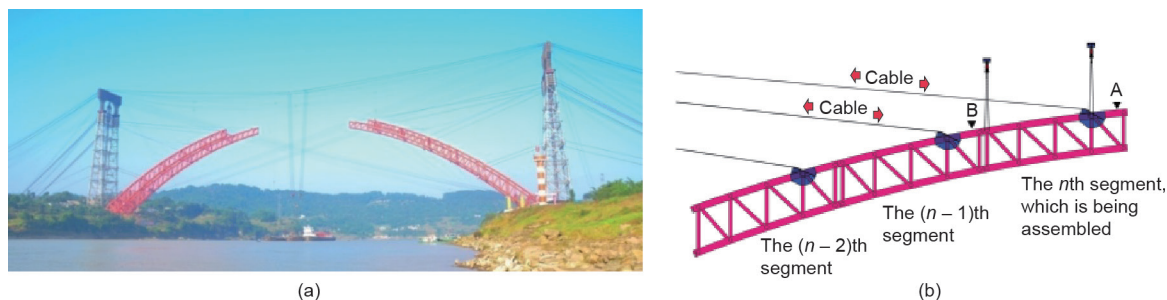


图10. 合江长江一桥扣挂、吊运系统总体布置。(a) 扣挂、吊运系统整体布置；(b) 扣挂布置。

和钢管局部稳定性, 要想避免脱黏和脱空, 首先要在管内混凝土灌注过程中保证密实, 其次要解决混凝土全生命周期内的膨胀与收缩不匹配的问题。

(2) 管内混凝土制备技术。目前管内混凝土制备主要需解决自填充和无收缩两个关键问题, 实现施工阶段高流态与稳定性的协同和分阶段全过程收缩抑制。中国工程师团队提出通过界面吸附分散调控和剪切行为调控保证稳定性、通过间隙液黏度调控和水膜层厚度调控来

降低黏度[7], 从而保证混凝土的流变性能, 解决高流态与稳定性的协同; 通过塑性膨胀解决凝缩问题, 通过化学减缩[8]、补偿收缩[9]和内养护技术解决自干燥收缩问题, 从而保证分阶段、全过程的收缩抑制, 实现管内混凝土膨胀收缩可设计, 还能按设计需求保存一定压应力储备。高流态、高稳定性及无收缩混凝土制备技术的研发和应用, 在保证管内混凝土施工方便快捷的基础上, 为解决钢管混凝土长期工作性能中存在的脱黏、脱空等问题奠定了基础。

(3) 管内混凝土灌注工艺的发展。钢管混凝土拱桥管内混凝土的灌注方式经历了现场分仓浇筑、泵送压力顶升法灌注、真空辅助压力顶升法灌注几个发展阶段。

为保证管内混凝土灌注密实性, 合江长江一桥在建设过程中, 进行了常规压力灌注和真空辅助灌注管内混凝土的大比例模型对比试验, 证明钢管内抽真空至负压 $-0.09 \sim -0.07$ MPa条件下压注混凝土比传统的压力灌注管内混凝土密实度大许多。以试验成果为基础, 结合工程实践研发了真空辅助压力灌注管内混凝土工法[10,11]。大桥拱桁一根弦杆钢管弧长近600 m, 需要灌注C60混凝土近800 m³, 采用了三级连续泵送真空辅助压力灌注工法(图12)。分级连续泵送降低了混凝土需



图11. 内法兰密贴情况

表2 拱肋1#~9#节段复测标高数据列表(单位: m)

No.	Upstream			Downstream		
	Chongqing	Yibin	Height difference ^a	Chongqing	Yibin	Height difference ^a
1	264.452	264.422	0.030	264.429	264.449	-0.020
2	284.555	284.535	0.020	284.515	284.540	-0.025
3	301.751	301.727	0.024	301.724	301.749	-0.025
4	316.117	316.114	0.003	316.101	316.114	-0.013
5	327.779	327.778	0.001	327.772	327.769	0.003
6	336.819	336.818	0.001	336.828	336.801	0.027
7	343.298	343.301	-0.003	343.300	343.286	0.014
8	347.291	347.285	0.006	347.277	347.269	0.008
9	348.826	348.825	0.001	348.803	348.805	-0.002

^a Height difference of symmetric points in ribs.

表3 3#~9#节段轴线偏位汇总表(单位: mm)

No.	Shore in Chongqing		Shore in Yibin	
	Upper chord	Lower chord	Upper chord	Lower chord
3	-6	-9	5	10
4	-9	-7	5	—
5	-4	-3	7	5
6	8	-10	5	7
7	-5	7	-5	9
8	7	4	-8	2
9	-10	0	0	10

Positive values denote deviation in the upstream, while negative values denote deviation in the downstream. The symbol “—” indicates that the measuring tube of the segment was damaged or invisible.

要保持高流动性的时间,减少了泵送阻力,可根据管内混凝土量及施工能力决定分级数。用不断改变索力的斜拉扣索调载,减少了拱顶瞬时上挠[12,13]。平均用12 h完成一条弦杆管内混凝土的灌注,33天完成主拱全部8根弦杆管内混凝土灌注。在管内混凝土3天龄期时,用超声波检验144个内法兰处混凝土密实度,合格率达100%,优良率达92%,保证了管内混凝土的灌注质量。此外,真空辅助灌注工法还加快了灌注速度,从而降低了施工费用。

真空辅助灌注管内混凝土方法成功解决了钢管混凝土拱桥发展的最大技术瓶颈,加上制造安装技术的进步,2013年建成的世界最大跨径钢管混凝土拱桥——主跨530 m的合江长江一桥,竣工造价2.6亿元人民币,造价之低廉,是任何其他桥型都不可能达到的。比同期建成的混凝土斜拉桥——跨径420 m的合江长江二桥的造价低了1.1亿元人民币。建成的合江长江一桥经过荷载试验(图13)表明,建造质量完全达到设计要求。

2.4. 更大跨径钢管混凝土拱桥建设研究

2013年建成了主跨530 m的世界最大跨径钢管混凝土拱桥,研发了500 m级钢管混凝土拱桥的成套施工技术。以此为基础,中国工程师以四川某高速公路的一处桥位为背景,开展700 m级钢管混凝土拱桥的试设计与建造可行性研究[14](图14)。初步结论是净跨650 m的钢管混凝土拱桥静力、动力性能都满足规范要求,采用现有制造设备和技术、缆索吊机吊运和斜拉扣挂悬拼等技术能完成施工。700 m级的钢管混凝土拱桥可替代千米级的悬索桥跨越山谷,其经济价值更为可观。

3. 以钢管混凝土为劲性骨架的混凝土拱桥

3.1. 发展概况

劲性骨架混凝土拱桥(steel reinforced concrete arch bridge)由奥地利工程师Josef Melan(约瑟夫·米兰)在1898年发明,又称米兰拱。其拱圈施工程序是:首先架

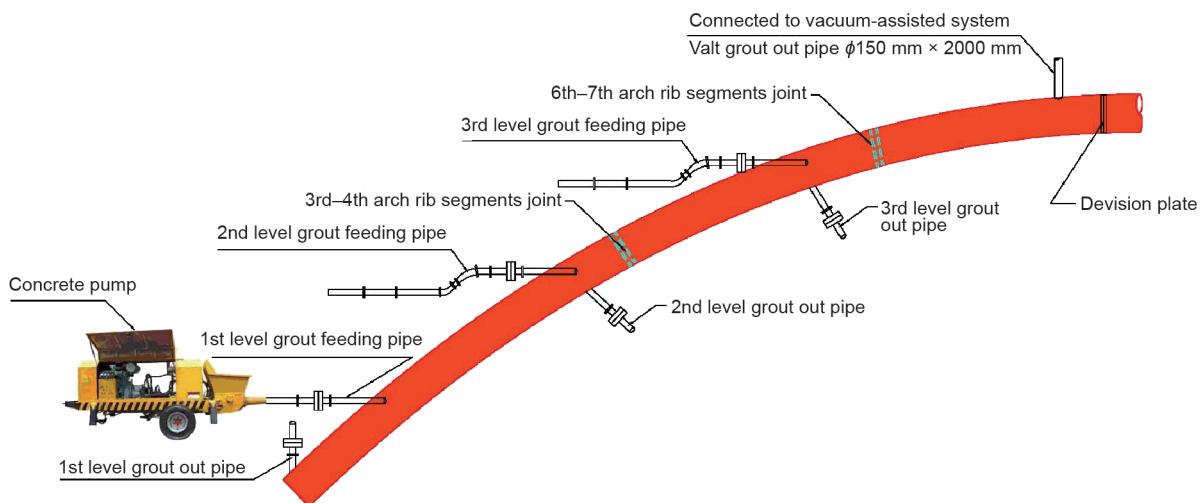


图12. 真空辅助三级接力灌注管内混凝土布置方案。

设钢劲性骨架，在其上挂模板浇筑拱圈混凝土，两者共同构成钢混组合的拱圈。20世纪90年代，中国工程师首先提出用钢管混凝土拱替代钢拱桁作为劲性骨架[15]，减少了劲性骨架一半左右的用钢量。跨度300 m以上混凝土拱桥的劲性骨架，除鸭池河大桥采用型钢外，其余8座桥均采用钢管混凝土。

钢管拱桁质量约占混凝土拱圈总质量的1/14左右(表4)，虽然在灌完管内混凝土后其承载能力及刚度得到提高，但是钢管混凝土劲性拱骨架要承担拱圈外包混凝土自重，这比拱圈二期恒载及活荷载总和还要大得多。而骨架弦管内混凝土初始压应力储备少，极易导致瞬时拉应力超过容许状态，因此必须采取调载措施。中国工程师开发了斜拉扣索调载[16]、拱圈混凝土分环、环内混凝土多工作面同时浇注的工法[17,18]，具体就是把拱圈混凝土分成若干环，一环混凝土获得一定强度后与劲性骨架形成组合结构再浇注下一环混凝土，这样逐次组合，承载能力逐渐提高，减少了劲性拱骨架的受力。以每一环或者每一次浇注的混凝土荷载加上后结构保持安全为原则来确定分环方案[19]。但因为一环混凝土不可能瞬时完成浇注和加载，在浇注过程中若不采取措施，会产生比完成一环浇注后大得多的瞬时应力和变形(图14)，采用多工作面同时浇注，减少了劲性骨架承受的瞬时应力、变形，再通过斜拉扣索调载就能把瞬时应力、变形控制在安全范围内，还能降低劲性骨架的永存应力。实践证明中国工程师提出的钢管混凝土劲性骨架混凝土拱桥施工方法比国外流行的两端挂篮悬浇+中间劲性骨架施工方法风险更小、工期更短、费用更低。

中国2016年建成的世界最大跨径混凝土拱桥——445 m跨径的沪昆高铁北盘江特大桥及416 m跨径的云桂铁路南盘江特大桥，原批准的初步设计就是两端挂篮



图13. 合江长江一桥成桥荷载试验。

悬浇+中间钢管混凝土劲性骨架施工方法，后经反复比较后放弃了原方法，改而采用了全跨钢管混凝土劲性骨架、斜拉扣索调载、拱圈混凝土分5环、环内混凝土6工作面同时浇注的工法，最终获得成功[18]。中国修建劲性骨架混凝土拱桥30多年来，修建了跨径超过400 m的桥梁4座、超过300 m的桥梁9座，而国外修建劲性骨架混凝土拱桥100多年来，最大跨径仅达到260 m，中外施工方法的不同是其中的主要原因。

尽管中国工程师1968年就开发了拱桥斜拉扣挂悬拼工法[1]，1977年开发了拱桥转体施工工法[3]，2008年首次进行了拱桥挂篮悬浇施工[20]，上述三种工法都能建成跨径400 m内的混凝土拱桥，但是至今中国采用这三种工法建成的最大跨径混凝土拱桥仅为210 m，跨径超过300 m的混凝土拱桥全是劲性骨架混凝土拱桥(表4)。国外跨径超过300 m的混凝土拱桥共4座(表5)，全部采用悬拼或悬浇施工。

表6中昭化嘉陵江大桥钢管劲性骨架重1866 t，为拱圈混凝土质量的1/14.9，工期比采用挂篮悬浇的美国胡佛大桥少2年，费用仅为其1/8，这是中国跨径超过300 m的混凝土拱桥不采用悬浇、悬拼的主要原因。

3.2. 斜拉索调载

斜拉索调载公式为[16]

$$\Delta\sigma_K = \sum_{i=1}^n F_i \cdot \sigma_{Ki} \quad (1)$$

式中， F_i 表示编号为*i*的一对斜拉索施加的拉力； σ_{Ki} 表示编号为*i*的一对斜拉索索力为*I*时，在*K*截面产生的应力。 σ_{Ki} 是系数，可用有限元计算，也可在桥梁现场简单地直接量测，因此是可信的； $\Delta\sigma_K$ 表示斜拉索在*K*截面产生的应力。

在一次连续浇注混凝土过程中 σ_{Ki} 不变，截面应力不断改变，当控制截面应力超过容许值时，改变 F_i ，使 $\Delta\sigma_K$ 与控制截面应力组合值在容许值范围内，其他截面

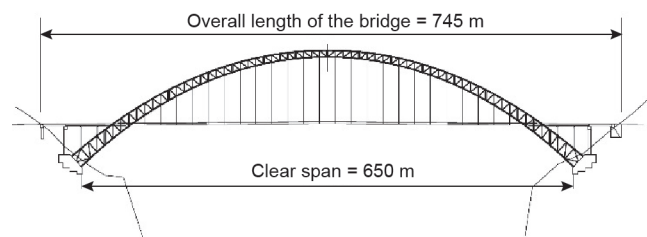


图14. 桥跨总体布置。

应力也不超标；利用 σ_{ki} 随拱结构刚度增大而减小的特性，在结构刚度小时拉上索力，在刚度大时撤除索力，就能降低控制截面上的永存应力，降幅大小取决于对其他截面应力的不利影响在可接受范围内。

斜拉索调载的效果取决于索的作用位置和索力大小、施加及撤除时机。借用悬拼劲性骨架的斜拉索，几乎不花成本就完成了调载。斜拉扣索调载法首创于广西邕宁邕江大桥，发展于云桂铁路南盘江特大桥[16,18,19]。

3.3. 工程实例

3.3.1. 广西邕宁邕江大桥

1996年建成通车的广西邕宁邕江大桥是当时世界上最大跨径的中承式混凝土肋拱桥，计算跨径 $L=312\text{ m}$ ，

矢跨比为1/6，桥面总宽度为18.9 m[21]。

这座以钢管混凝土作劲性骨架的混凝土拱桥，钢管拱桁为等宽变高的双肋结构，总质量为851 t，每肋分成9个吊段，25天完成钢管拱桁斜拉扣挂悬拼合龙，28天完成管内混凝土压力灌注。双肋混凝土共4702 m³，分四环在钢管混凝土劲性拱骨架上浇注。在世界上首次通过三组不断变化索力的斜拉索调载，耗时40 h实现了底板混凝土从两端 $L/12$ 至拱顶 $L/2$ 的连续浇注，浇注全过程控制瞬时应力不超标、拱顶几乎不上挠，总索力最大值为2200 kN[16]。

3.3.2. 云桂铁路南盘江特大桥

云桂铁路南盘江特大桥是以钢管混凝土作劲性骨架

表4 中国跨径大于300 m的劲性骨架混凝土拱桥

Bridge	Span (m)	Amount of steel used for stiff skeleton (t)	Volume of concrete (m ³)	Weight ratio of concrete and steel skeleton	Year of completion	Cost (100 million CNY)
Shanghai-Kunming High-Speed Railway Beipan River Bridge	445	4 709	26 500	14.2	2016	4.50
Chengdu-Guiyang High-Speed Railway Yachi River Bridge	436	11 580	17 140	3.7	Under construction	5.20
Yunnan-Guangxi Railway Nanpan River Bridge	416	4 011	24 000	15.0	2016	4.00
Chongqing-Guizhou High-Speed Railway Yelang River Bridge	370	5 531	29 370	13.2	2016	—
Dali-Ruilu Railway Lancang River Bridge	342	5 520	16 800	7.6	Under construction	—
Zhengzhou-Wanzhou High-Speed Railway Meixi River Bridge	340	2 545	14 210	13.9	Under construction	—
Zhaohua Jialing River Bridge	364	1 866	11 130	14.9	2012	2.08
Wanzhou Yangtze River Bridge	420	2 091	11 000	13.2	1997	1.33
Guangxi Yongning Yong River Bridge	312	851	4 702	13.8	1996	0.45

The symbol “—” indicates unavailable data.

表5 国外跨径大于300 m的混凝土拱桥一览表

Bridge	Country	Span (m)	Construction technology	Year of completion
Gladesville Bridge	Australia	305	Precast cantilever assembly	1964
Krk Bridge	Croatia	390	Precast cantilever assembly	1980
Mike O'Callaghan-Pat Tillman Memorial Bridge	United States	323	Suspended-basket grouting	2010
Almonte Viaduct	Spain	384	Suspended-basket grouting	2016

表6 劲性骨架混凝土拱桥与挂篮悬浇混凝土拱桥比较

Bridge	Country	Span (m)	Structure type	Construction method	Year of completion	Construction period	Cost (million CNY)
Zhaohua Jialing River Bridge	China	364	CFST stiff-skeleton arch bridge	Stiff-skeleton-based method	2012	3 years	208
Mike O'Callaghan-Pat Tillman Memorial Bridge	United States	323	CFST arch bridge	Suspended-basket grouting	2010	5 years	1670

的混凝土拱桥[图2 (b)], 通行客货双线铁路, 跨径为416 m。拱圈为单箱三室, 箱高8.5 m, 拱脚、拱顶分别宽28 m、18 m。首先分38段斜拉扣挂悬拼质量为4000 t的钢管拱桁架(图15), 然后在弦管内灌注混凝土后形成钢管混凝土劲性骨架, 再分5环浇注24 000 m³外包混凝土形成拱圈, 拱圈刚度比劲性骨架提高了7.9倍, 满足高铁对桥梁刚度的要求。图16显示底板6795 m³混凝土从拱脚至拱顶连续浇注, 劲性骨架上、下弦管内混凝土应力的变化过程从图中可以看出, 瞬时名义拉应力达24 MPa、压应力达42 MPa, 均集中在拱脚, 大大超过

浇注环末应力, 其他截面瞬时应力较小, 显然不采取措施, 瞬时应力会导致拱脚破坏。从图16分析, 采用多工作面同时浇注能降低瞬时应力, 在拱脚附近设倾斜向上的拉索, 能高效降低拱脚截面劲性骨架的瞬时应力, 对其他截面的负面影响小[18]。

南盘江大桥拱圈外包混凝土共24 000 m³, 分5环浇注, 计算每环分6工作面浇注, 如图17所示分3次完成一环浇注。两组共4000 kN斜拉索在底板混凝土第一次浇注时加上, 在完成边室底板、腹板、顶板三环混凝土浇注并获得强度后撤除, 可使上弦管内混凝土增加



图15. 南盘江特大桥劲性骨架及混凝土拱圈。

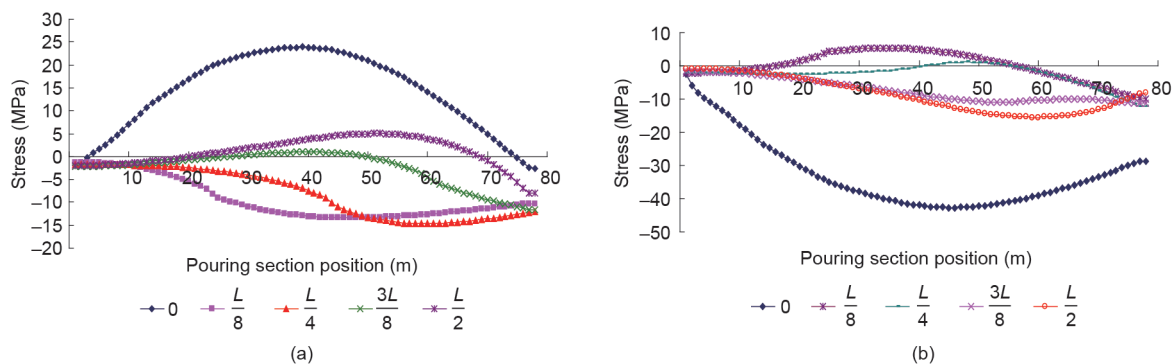


图16. 底板混凝土连续浇注劲性骨架上、下弦管内混凝土瞬时应力。(a) 上弦管; (b) 下弦管。

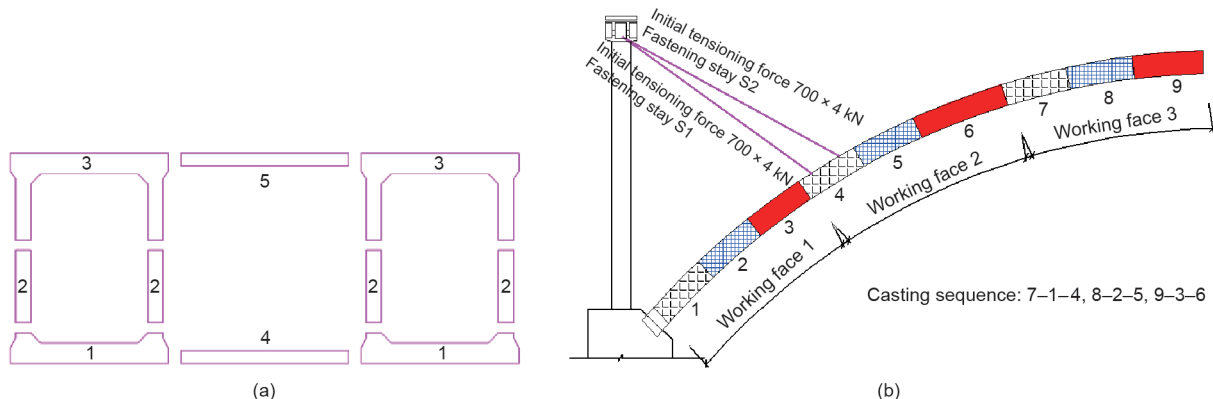


图17. 外包混凝土浇注工序示意图。(a) 拱圈分环示意图; (b) 工作面(半个拱圈)划分示意图。

5.51 MPa压应力储备,使下弦管内混凝土永存压应力减少5.40 MPa,在整个浇注阶段没出现超过容许值的拉应力。如无斜拉索调载,上弦管内混凝土在第35个混凝土浇注阶段出现拉应力,最大值达7.39 MPa,下弦管内混凝土压应力超标。因为工地混凝土生产、泵送能力不足,边室底板、腹板、顶板三环各分6次,中室顶、底板各分3次,共分24次,完成了24 000 m³外包混凝土在4000 t钢管混凝土拱桁上的浇注,每一次的拱桁变形实测值与理论值都很相近(表7和图18)。

图19是底板混凝土从拱脚至拱顶一次连续浇注和分6工作面、3次浇注两种不同情况下拱顶挠度的比较,显然后者的控制效果好得多。

对南盘江大桥拱圈外包混凝土分环连续浇注进行了研究,共分6环,设3组不断改变索力的斜拉索,3组索力最大值分别为3500 kN、3000 kN、1500 kN。可实现

每一环混凝土从拱脚至拱顶连续浇注,并且能降低劲性骨架控制截面的永存应力。分环连续浇注施工速度快、环内混凝土无工作缝,但要求混凝土生产和浇注能力达到500 m³·h⁻¹,因工地条件不具备而放弃了该方案。

4. 结语

钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥,同属广义的劲性骨架混凝土拱桥。只是钢管混凝土拱桥混凝土灌注在弦管内,无需模板,因此施工更为方便,拱圈形成时间很短、造价更低,跨径增大更快,已建和在建跨径超400 m的钢管混凝土拱桥已达7座,广泛应用于公路和城市桥梁中,少量应用于铁路桥梁中。中国拉(萨)林(芝)铁路藏木雅鲁藏布江特大桥——跨径430 m的钢管混凝土拱桥正在施工,预计将于2018年建成。如果

表7 南盘江特大桥外包混凝土浇筑过程中拱桁变形、最终偏差及混凝土累计方量

Stage of concrete casting	Cumulative deformation measured at different locations (m)												Cumulative concrete volume (m ³)
	L/8		L/5		L/4		L/3		3L/8		L/2		
	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated	Measured	Calculated	
Bottom slab of side box													
7-1-4 half done	0.013	0.013	0.006	0.006	0.002	0.002	0.004	0.004	-0.001	-0.001	0.003	0.003	1 400
7-1-4 completed	0.010	0.010	0.000	0.000	-0.007	-0.007	-0.021	-0.021	-0.037	-0.037	-0.052	-0.052	2 681
8-2-5 half done	0.005	0.004	-0.008	-0.007	-0.016	-0.015	-0.033	-0.031	-0.050	-0.052	-0.067	-0.069	3 845
8-2-5 completed	0.002	0.001	-0.012	-0.011	-0.023	-0.023	-0.042	-0.042	-0.061	-0.065	-0.080	-0.085	4 870
9-3-6 half done	-0.001	-0.003	-0.021	-0.022	-0.036	-0.041	-0.058	-0.061	-0.079	-0.086	-0.103	-0.110	5 872
9-3-6 completed	-0.004	-0.004	-0.025	-0.023	-0.042	-0.047	-0.071	-0.075	-0.098	-0.105	-0.124	-0.142	6 759
Lower web of side box													
7-1-4 half done	-0.005	-0.007	-0.028	-0.028	-0.046	-0.052	-0.076	-0.080	-0.100	-0.106	-0.118	-0.135	7 446
7-1-4 completed	-0.008	-0.012	-0.034	-0.034	-0.051	-0.058	-0.080	-0.082	-0.106	-0.112	-0.124	-0.141	8 107
8-2-5 half done	-0.011	-0.015	-0.041	-0.039	-0.056	-0.062	-0.084	-0.087	-0.112	-0.120	-0.130	-0.147	8 701
8-2-5 completed	-0.014	-0.018	-0.046	-0.044	-0.062	-0.067	-0.089	-0.094	-0.119	-0.128	-0.138	-0.156	9 262
9-3-6 half done	-0.016	-0.019	-0.052	-0.048	-0.068	-0.076	-0.096	-0.103	-0.128	-0.139	-0.149	-0.172	9 873
9-3-6 completed	-0.017	-0.021	-0.054	-0.054	-0.071	-0.083	-0.100	-0.111	-0.132	-0.151	-0.153	-0.193	10 428
Upper web and top slab of side box													
7-1-4 half done	-0.023	-0.026	-0.063	-0.064	-0.080	-0.095	-0.110	-0.124	-0.137	-0.157	-0.148	-0.186	11 747
7-1-4 completed	-0.028	-0.031	-0.072	-0.071	-0.090	-0.102	-0.121	-0.133	-0.149	-0.168	-0.156	-0.197	13 040
8-2-5 half done	-0.032	-0.034	-0.077	-0.076	-0.097	-0.108	-0.130	-0.141	-0.159	-0.180	-0.166	-0.210	14 873
8-2-5 completed	-0.036	-0.037	-0.083	-0.079	-0.104	-0.113	-0.138	-0.148	-0.169	-0.192	-0.180	-0.232	16 362
9-3-6 half done	-0.042	-0.043	-0.092	-0.087	-0.113	-0.123	-0.148	-0.159	-0.181	-0.204	-0.192	-0.244	17 966
9-3-6 completed	-0.049	-0.049	-0.099	-0.095	-0.124	-0.134	-0.160	-0.171	-0.194	-0.217	-0.209	-0.261	19 080
Bottom slab of middle box													
7-1-4 completed	-0.051	-0.051	-0.103	-0.098	-0.132	-0.139	-0.172	-0.177	-0.208	-0.224	-0.224	-0.269	19 818
8-2-5 completed	-0.053	-0.052	-0.108	-0.101	-0.139	-0.143	-0.180	-0.183	-0.218	-0.232	-0.236	-0.279	20 530
9-3-6 completed	-0.056	-0.053	-0.112	-0.103	-0.144	-0.147	-0.188	-0.190	-0.227	-0.242	-0.247	-0.294	21 332
Top slab of middle box													
7-1-4 completed	-0.058	-0.055	-0.116	-0.105	-0.150	-0.151	-0.195	-0.195	-0.235	-0.247	-0.256	-0.300	22 064
8-2-5 completed	-0.060	-0.056	-0.119	-0.107	-0.154	-0.154	-0.199	-0.199	-0.241	-0.254	-0.263	-0.309	22 703
9-3-6 completed	-0.061	-0.057	-0.122	-0.109	-0.157	-0.158	-0.204	-0.205	-0.246	-0.262	-0.269	-0.321	23 385
Final error (cm)	-0.4		-1.3		-0.1		0.1		1.6		5.2		

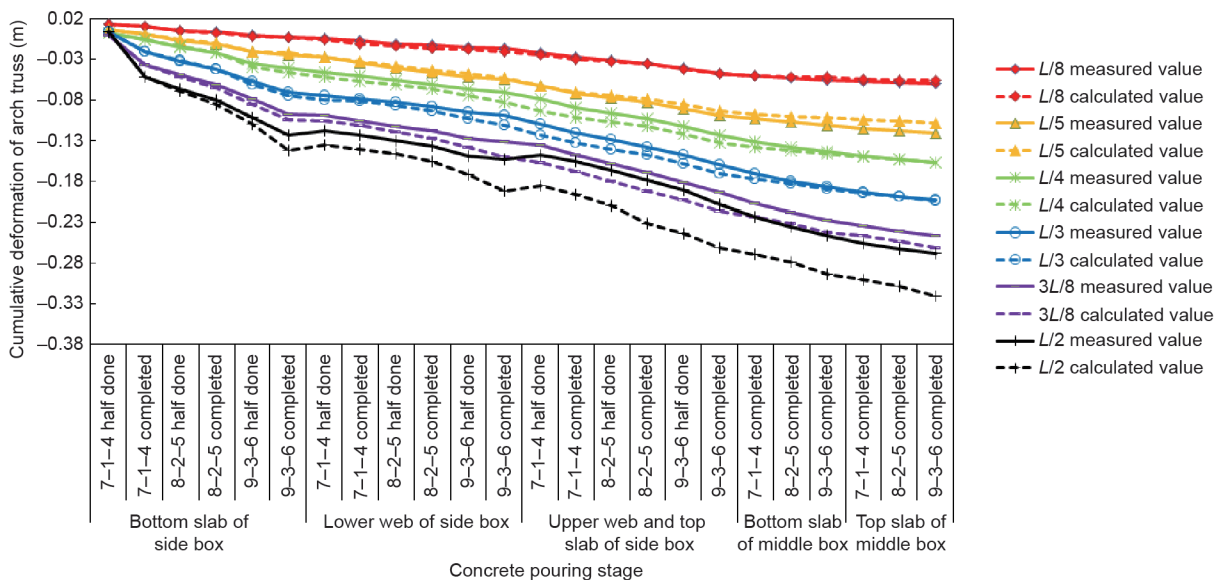


图18. 外包混凝土浇筑过程中拱桁挠度图。

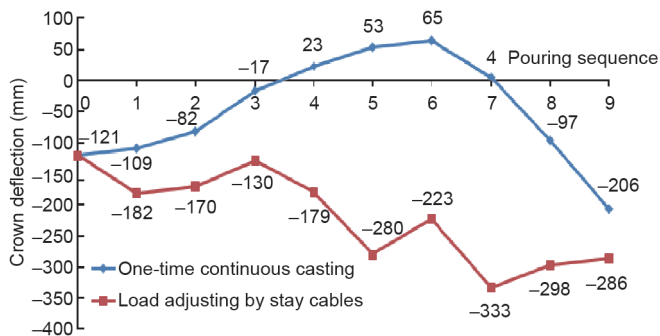


图19. 两种浇注方法下拱顶挠度计算值比较。

进一步验证钢管混凝土拱桥对日温差不敏感，还会将其应用于高铁上。劲性骨架混凝土拱桥刚度更大、日温差不敏感、耐久性好，最适合在高铁上应用，近年来在中国获得井喷式发展，在高铁上同时建设了5座跨径超过300 m的劲性骨架混凝土拱桥。钢管混凝土拱桥跨径的增大，必然推动以钢管混凝土为劲性骨架的混凝土拱桥跨径继续增大。构件轻、施工不需大型机械的钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥更适合建在山区，在替代跨径大得多的斜拉桥和悬索桥跨越峡谷时经济优势更为突出。

虽然中国工程师在钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥的设计与施工中取得了成功，但还不能完全满足世界一带一路以及中国公路、铁路建设的需要。在技术上仍需继续创新，比如通过对提高焊接节点抗疲劳性能、斜拉索调载的最优控制方法、分环和工作面的最优化设置等技术的研究，进一步降低劲性骨架重量、减少

施工费用及风险、缩短工期，继续增大跨径。目前我们已初步论证了净跨650 m的钢管混凝土拱桥的可行性[14]，期待着混凝土拱桥跨径早日超过700 m，成为新的纪录保持者，并引领拱桥的发展。

致谢

感谢中铁二院工程集团有限责任公司副总工程师陈克坚、国家设计大师马庭林，中铁十八局云桂铁路南盘江特大桥经理部，广西路桥工程集团有限公司总工程师韩玉，四川省交通厅公路规划设计研究院副总工程师牟廷敏为本文提供资料。

Acknowledgements

The authors would like to thank Deputy Chief Engineer Kejian Chen of the China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., the nationally recognized designer Tinglin Ma, the Management Department of the Yunnan-Guangxi Railway Nanpan River Bridge, affiliated with the China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Chief Engineer Yu Han of Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., and Deputy Chief Engineer Tingmin Mu of Sichuan Communication Surveying and Design Institute for providing materials for this paper, and thank the National Natural Science Foundation of China (51738004) for the support.

Compliance with ethics guidelines

Jielian Zheng and Jianjun Wang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Reference

- [1] Zheng JL. Discussion on technology of suspending and connecting for the RC Bridge with an unusual big span. *China J Highw Transport* 1999;1:42–9. Chinese.
- [2] Chen BC, Yang YL. Investigation and analysis of concrete-filled steel tube arch bridges. *World Bridges* 2006;2:73–7. Chinese.
- [3] Zhang LY, Cheng MF, Tan BM, Chen JQ. Construction of bridge rotation. Beijing: China Communications Press; 2002. Chinese.
- [4] Li Y, Zhang JF, Lu RS, Luo JS, Guo X, Zhang ZT. Guangzhou Xinguang Bridge. Beijing: China Communications Press; 2009. Chinese.
- [5] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China; General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50923–2013: Technical code for concrete-filled steel tube arch bridges. Chinese standard. Beijing: China Planning Press; 2014. Chinese.
- [6] Cai SH. Modern steel tube concrete structure. Beijing: China Communications Press; 2003. Chinese.
- [7] Guo F, Liu JP, Tian Q, Yao T, Zhang SZ. Autogenous volume deformation of concrete due to MgO under the temperature history of a diversion tunnel concrete. *Appl Mech Mater* 2013;357–60:1399–404.
- [8] Liu JP, Tian Q, Miao CW. No access investigation on the plastic shrinkage of cementitious materials under drying conditions: mechanism and theoretical model. *Mag Concr Res* 2012;64(6):551–61.
- [9] Liu JP, Wang YJ, Tian Q, Zhang SZ. Temperature sensitivity of light calcined magnesia expansion agent and its mechanism analysis. *J South Univ (Nat Sci Ed)* 2011;41(2):359–64.
- [10] Zheng JL, Wang JJ, Feng Z, Han Y, Qin DY. Vacuum aided concrete grouting process test of concrete filled steel tube arch segment. *China J Highw Transport* 2014;27(6):44–50. Chinese.
- [11] Zheng JL, Han Y, Qin DY, Feng Z, Luo YF, Pang BX, et al., inventors; Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd, assignee. Vacuum assisted perfusion method and infusion system of concrete in large concrete-filled steel tube. China Patent CN 201210184040. 2013 May 15. Chinese.
- [12] Zheng JL. Discussion on placing concrete uninterruptedly on closure arch rigid skeleton. *J Chongqing Jiaotong Univ (Nat Sci)* 2011;30(S2):1099–105.
- [13] Zheng JL, Wang JY, Xu FY, Li YQ, Lin CJ, Huang HD, et al., inventors; Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd, assignee. A construction method of steel reinforced concrete arch bridge. China Patent CN 201510143960. 2016 Aug 24. Chinese.
- [14] Zheng JL, Wang JJ, Mou TM, Feng Z, Han Y, Qin DY. Feasibility study on design and construction of concrete filled steel tubular arch bridge with a span of 700 m. *Eng Sci* 2014;16(8):33–7. Chinese.
- [15] Yang ZH. Design of Wanxian Yangtze River Bridge. In: Proceedings of bridge academic symposium of bridge and structural engineering society, Chinese Highway Society in 1996; 1996 Nov 14; Nanning, China. Beijing: China Communications Press; 1996. p. 38–52. Chinese.
- [16] Zheng JL. Regulating mechanism of stay cables in construction of steel reinforced concrete arch bridge. *Bridge* 2013;5:34–6. Chinese.
- [17] Chen KJ, Zheng JL, Xu Y, You LH, Ren W, Hu YZ, et al., inventors; China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, assignee. An arching method of steel reinforced concrete arch bridge. China Patent CN 201510643470.4. 2017 Mar 22. Chinese.
- [18] Lin CJ, Zheng JL. Analysis of construction of main arch rib concrete of Nanpan River Bridge using fastening stay method. *Bridge Constr* 2016;46(5):116–21. Chinese.
- [19] Xie YP, Zhao L, Xie JP, Pu QH, Tang XB. Construction stability analysis of 420-meter reinforced concrete box arch in Wanxian Yangtze River Bridge. *Bridge Constr* 1995;1:77–81. Chinese.
- [20] Yang J, Zhou SX, Han HJ. Design and construction technology of concrete arch bridge with cantilever method. Beijing: China Communications Press; 2015. Chinese.
- [21] Xu FY, Li YQ, Weng YR, Wu B, Li HQ, Xiao YD. Design of Yong River Bridge in Guangxi Yongning. In: Proceedings of bridge academic symposium of bridge and structural engineering society, Chinese Highway Society in 1996; 1996 Nov 14; Nanning, China. Beijing: China Communications Press; 1996. p. 9–29. Chinese.