



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

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



Research
Civil Engineering—Feature Article

中国大跨度拱桥建造技术创新与实践

郑皆连*

School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 October 2023

Revised 13 April 2024

Accepted 19 May 2024

Available online 21 June 2024

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
非岩地基抗推力拱座基础
劲性骨架
外包混凝土浇筑
纵向配筋优化

摘要

拱桥在适宜的条件下表现出显著的技术经济性。过去30年,在施工工艺、工程材料、施工装备等方面技术进步的支撑下,钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥已逐渐发展成为现代拱桥中两个极具经济竞争力和跨径增长潜力的分支。最近5年,笔者先后主持建造了跨度560 m的平南三桥和跨度600 m的天峨龙滩特大桥,两次打破拱桥跨径世界纪录,钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥建造技术又取得系列重大突破。本文以这两座世界最大跨度拱桥为例,系统总结我国在钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥上的最新建造技术创新和实践经验。对于钢管混凝土拱桥,重点介绍了在平南三桥上综合运用的钢管拱桁斜拉扣挂悬拼合拢工法、管内混凝土新材料与灌注新工艺、非岩地基大跨推力拱桥拱座基础综合设计技术以及降低拱桁架设大型临时设施费用关键技术;对于劲性骨架混凝土拱桥,详细论述了600 m级拱桥在劲性拱骨架强度选择、外包混凝土浇筑、外包混凝土材料、降低混凝土应力水平以及拱肋纵向配筋上面面临的技术挑战和解决手段。此外,还指出了这两类拱桥建造技术在未来的主要发展和重点研究方向。

© 2024 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

在梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥这四种基本桥型中,拱桥不仅造型美观,而且受力最为合理,如果恒载分布恰当、优选拱轴系数,拱圈在恒载作用下接近中心受压,在荷载标准组合下处于小偏心受压,因此没有疲劳问题,耐久性好,刚度大。建于1400年前的河北赵县的安济桥至今不倒,800年前建成的卢沟桥通过400 t平板车的考验,毫发无损,这些实例都充分证明了拱桥的耐久性和超强的承载能力。但同时,拱桥的拱圈属曲面,质量大,且拱圈架设全靠大型临时设施完成,因而建造费用高,风险大,

事故多,而且随着拱桥跨径增大,这些劣势更为突出,严重地影响了拱桥的采用和跨径的增长。

拱桥发展历史证明,增大拱桥跨径,提高拱桥经济竞争力,主要是靠施工技术进步来实现的。因此,中国工程师在努力解决拱圈施工难题、降低施工风险的同时,还通过各种技术途径降低施工中大型临时设施费用,提高拱桥经济竞争力,取得了系列创新成果。

特别是近30年,中国开展了大规模高速公路、铁路建设,对拱桥尤其是大跨径拱桥的需求迫切,中国工程师对拱圈施工工艺、工程材料、施工装备等的研究取得巨大进步,使中国建造的钢拱桥、钢管混凝土拱桥、混凝土拱

* Corresponding author.

E-mail address: tubing2018@gxu.edu.cn (J. Zheng).

桥、公路拱桥、铁路拱桥跨径都位居世界第一。据2022年统计数据,我国共有公路拱桥167 186座,占全部桥梁总座数的16.2%,还远未达到这种优秀桥型应占的比例。近30年,笔者团队对钢管混凝土拱桥及以钢管混凝土拱桥为骨架的混凝土拱桥进行了全面深入的研究,发现这两个拱桥分支除具有拱桥结构的普遍优势外,施工较易,对瞬时温度变化不敏感,体系温度内力较低,增大跨径难度较低,经济优势明显。经过艰苦科技攻关,在这两种桥型的建造技术和建造实践方面取得重大突破,跨径远远领先世界,且完全具有自主知识产权。2018年笔者在*Engineering*期刊上发表了“Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridges in China”一文,对当时钢管混凝土拱桥及混凝土拱桥的发展状况与技术创新做了详细介绍[1]。

从2018年至今的5年多时间内,笔者又有幸主持建造两座世界最大跨径拱桥,分别为跨径560 m的钢管混凝土拱桥——广西平南三桥和跨径600 m的混凝土拱桥——广西天峨龙滩大桥。随着广西平南三桥于2020年年底建成通车,标志着特大跨径钢管混凝土拱桥建造技术已臻完善。美国工程院院士、中国工程院外籍院士邓文中指出:“平南三桥的成功建设,系统检验了近30年来中国在钢管混凝土拱桥领域的技术积累,代表了现代钢管混凝土拱桥建造的最高水平。”广西天峨龙滩大桥主桥是劲性骨架混凝土拱桥,它把混凝土拱桥跨径世界纪录从445 m大幅提高到600 m,该桥已于2024年2月1日建成通车。本文第2节、第3节将以这两座桥为例分别介绍我国钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥近年来的技术发展和实践经验。

2. 钢管混凝土拱桥

钢管混凝土拱桥是以钢管混凝土为拱圈主要受力构件的拱桥。在钢管混凝土拱圈中,管内混凝土使钢管的局部稳定性得到保障,而钢管又给混凝土提供了套箍作用,提高其韧性和强度,因此钢管与管内混凝土形成了优良的钢-混组合结构。同时,特大跨径钢管混凝土拱桥拱桥用钢量约为钢桁拱桥用钢量的一半,其在施工中起拱架、模板作用,廉价的管内混凝土代替另一半钢拱桥承受压力,因此比钢拱桥造价低,安装重量轻。此外,对于钢管混凝土拱圈这种自架式结构,钢管拱桥较混凝土先架,因此钢较混凝土先受力,受力大,正好能充分发挥组合结构中钢材强度高的作用,这是极为合理的。由于以上优点,钢管混凝土拱桥在适宜的条件下表现出显著的技术经济性。

例如,近年来广西路桥工程集团有限公司建造的5座特大跨径钢管混凝土拱桥比相应的斜拉桥方案平均减少投

资25%。因此,在各类桥型的激烈竞争下,短短30年内,中国就建设(包括在建)近500座钢管混凝土拱桥,其中跨径300 m以上的51座,跨径400 m以上的19座(表1),仅近4年就增加约100座。

下面笔者将以广西平南三桥为例,详细介绍特大跨径钢管混凝土拱桥在拱桥制造与架设、管内混凝土材料研发与灌注、非岩地区基础处理、大型临时设施优化等方面的最新技术突破。

2.1. 平南三桥概况

广西平南三桥是广西壮族自治区荔浦至玉林高速公路匝道跨越浔江的一座特大桥,全长1105 m。主桥采用中承式钢管混凝土拱桥方案,计算跨径560 m,居当时世界各类拱桥跨径之首,桥面宽35 m,拱圈矢跨比1/4。钢管拱桥总重8440 t,分44个悬拼节段,最大悬拼节段重214 t、长37.1 m。为克服悬拼节段制造过程中的累计误差,保证节段间连接精度,采用3+1卧式耦合制造,缆索吊运,斜拉扣挂悬拼施工。拱桥弦管直径为1400 mm,分4级真空辅助压力泵送管内混凝土,12 h完成单根管内958 m³混凝土的连续灌注。图1给出了平南三桥拱肋1#弦管在7天、14天、28天和715天混凝土龄期的超声波波速情况,可见,715天龄期超声波速在4600~5100 m·s⁻¹之间,超过了规范规定的密实钢管混凝土超声波速阈值4500 m·s⁻¹,而且垂直方向和水平方向的超声波速几乎无差异,说明不仅没有出现脱黏脱空,而且管内混凝土对钢管壁存在压力。

桥道梁为钢格子梁上铺钢-混凝土组合板组合结构,钢格子梁分37个节段缆索吊运。拱桥和桥道钢梁均在广东江门工厂制造,水运到桥址。主桥上部结构施工时间仅402天,如表2所示,远短于同跨径斜拉桥、悬索桥的上构施工时间。图2为平南三桥成桥后拱桥应力、变形。该桥于2018年8月开工,2020年12月建成通车,工期为28个月,竣工决算建安费为54 501万元,低于施工承包价,施工过程没发生安全事故,竣工验收评定质量优良,成桥后实景见图3。

中国工程师几十年持续对钢管混凝土拱桥建造技术开展深入研究,把成果运用到建桥实践中,并颁布了国家标准、行业标准,把钢管混凝土拱桥打造成了一个十分具有竞争力的拱桥分支,平南三桥即为杰出代表。笔者认为,修建拱桥时若具备工厂制造悬拼节段能力并有水运条件,应首选钢管混凝土拱桥。此外,笔者已于2014年在《中国工程科学》杂志发文论证建造700 m级钢管混凝土拱桥的可行性,指出继续增大跨径仍有可能[2]。但有必要指

表1 跨径400 m以上的钢管混凝土拱桥列表

No.	Bridge	Main span (m)	Bridge type	Year of completion
1	Pingnan Third Bridge	560	Half through	2020
2	Bosideng Bridge	518	Half through	2013
3	Hejiang Yangtze River Highway Bridge	507	Flying swallow type	2021
4	Dejiang–Yuqing Highway Wujiang River Bridge	504	Deck arch	2023
5	Wushan Yangtze River Bridge	492	Half through	2005
6	Daxiaojing Bridge	450	Deck arch	2019
7	Lhasa–Nyingchi Railway Zangmu Yarlung Tsangpo River Bridge	430	Half through	2021
8	Zhijing River Bridge	430	Deck arch	2009
9	Renhuai–Zunyi Highway Dafaqu Bridge	410	Deck arch	2022
10	Qianwei Minjiang River Bridge	400	Half through	2021
11	Liancheng Bridge	400	Half through	2007
12	Xiniu Heihui River Bridge	518	Deck arch	Under construction
13	Huangtong–Baise Railway Hongshui River Bridge	512	Deck arch	Under construction
14	Leye–Wangmo Highway Yazhe Hongshui River Bridge	508	Half through	Under construction
15	Sichuan–Xizang Railway Jinsha River Bridge	500	Deck arch	Under construction
16	Ninglang–Shangri La Highway Luoji River Bridge	420	Half through	Under construction
17	Zhenba–Guangan Highway Baima Qujiang River Bridge	418	Half through	Under construction
18	Pingshan Second Minjiang River Bridge	410	Half through	Under construction
19	New Chongqing–Hunan Highway Shuangpu Bridge	405	Deck arch	Under construction

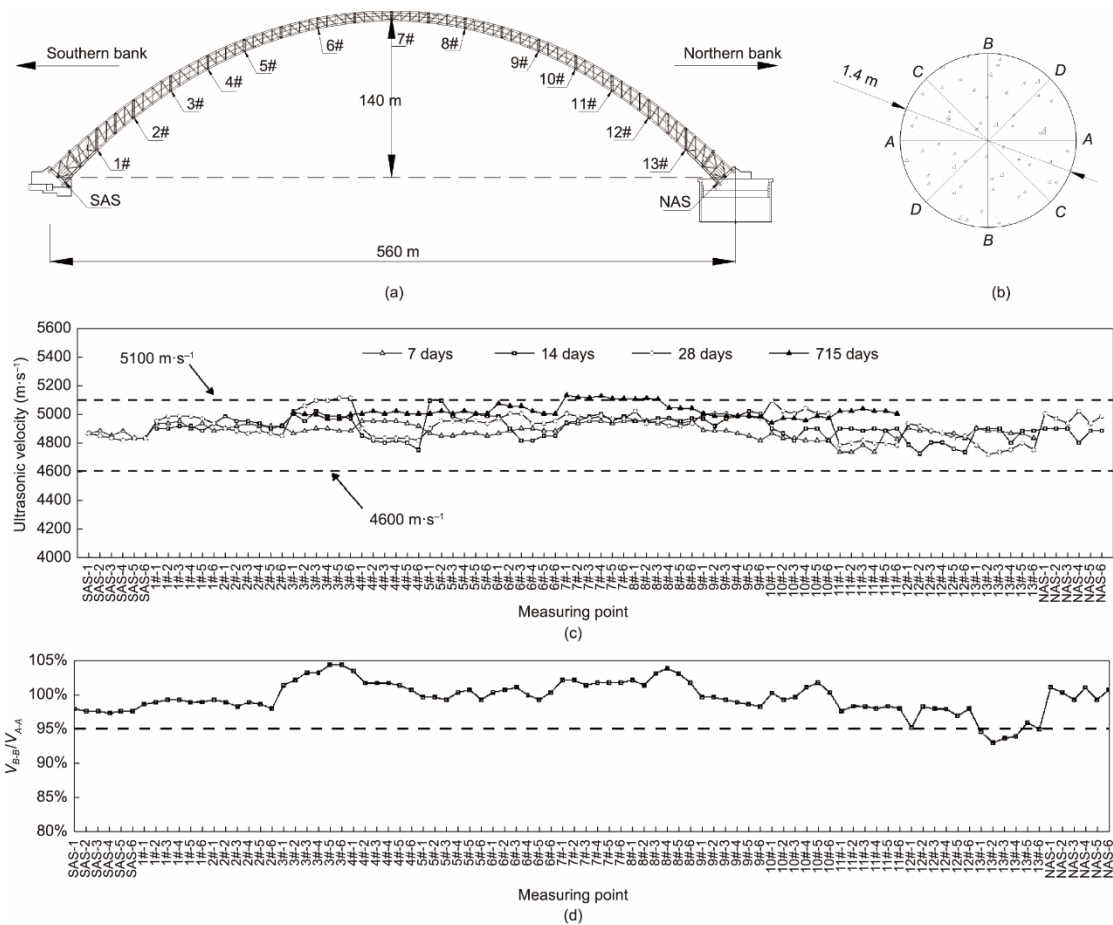


图1. 平南三桥拱肋超声检测结果。(a) 检测断面设置；(b) 检测断面内测点布置；(c) 1#弦管B-B方向不同混凝土龄期的超声波波速；(d) 1#弦杆在28 d龄期时B-B方向超声波波速 V_{B-B} 与A-A方向超声波波速 V_{A-A} 的比值。SAS: 南拱形弹簧；NAS: 北拱形弹簧。

表2 平南三桥关键工序施工时间

Construction phase	Start time (month/day/year)	Complete time (month/day/year)	Duration (d)
Overall construction	8/7/2018	12/27/2020	873
Arch rib erection	10/12/2019	1/10/2020	90
In-tube concrete filling	4/17/2020	5/12/2020	25
Traffic beam installation	7/4/2020	9/1/2020	59
Removal of the arch erection system	9/5/2020	11/1/2020	57
Bridge deck paving construction	9/2/2020	11/19/2020	78
Load test	12/26/2020	12/27/2020	2

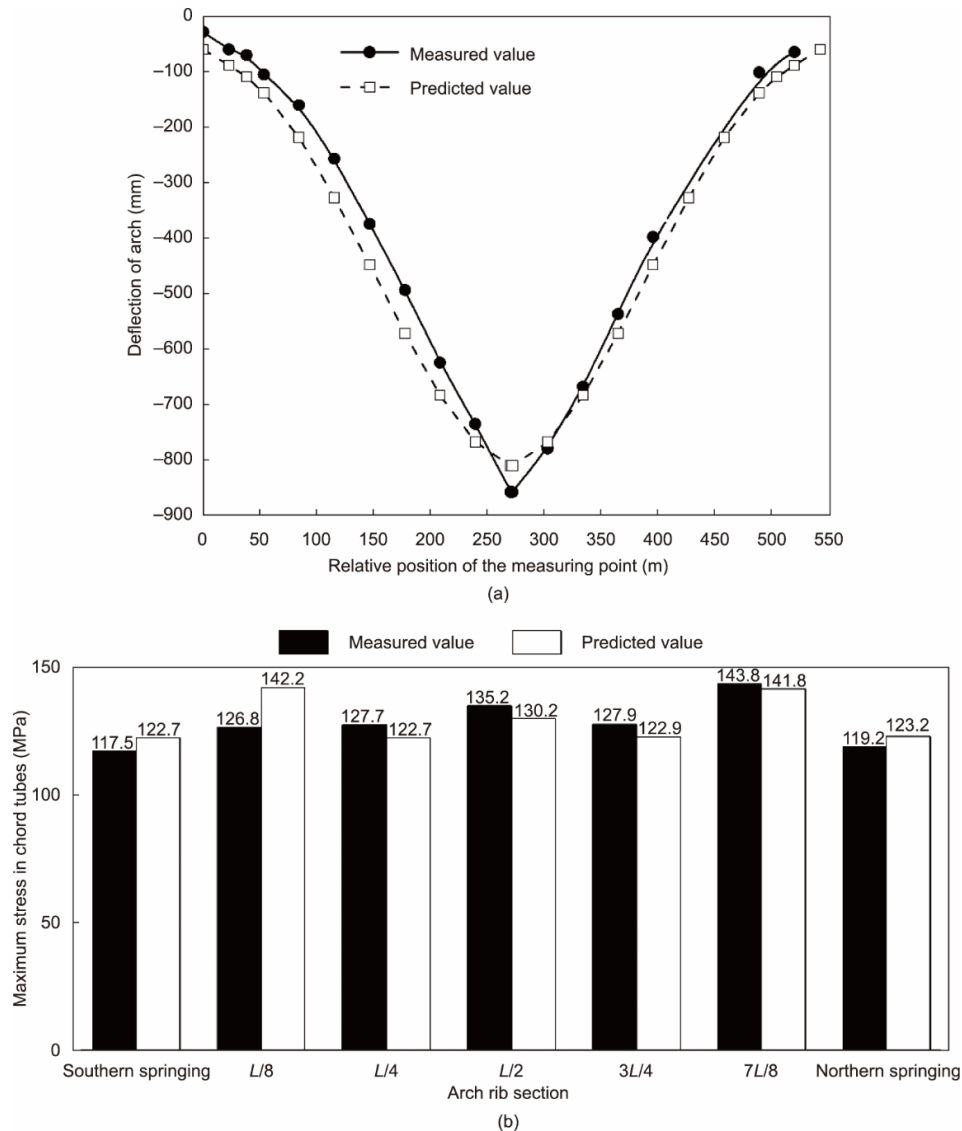


图2. 平南三桥成桥阶段拱桁应力与变形。(a) 挠度；(b) 弦杆钢管最大应力。

出，截至2022年年底，全世界跨径超过700 m的所有类型桥梁只有116座，700 m级钢管混凝土拱桥的市场规模与实际需求已不大。

2.2. 斜拉扣挂悬拼合拢工法

1968年，笔者针对双曲拱桥拱圈架设，开发了钢丝

绳斜拉扣挂悬拼松索合拢工法(图4)[3]，首次实现了拱桥的无支架施工。该工法因为是在放松扣索和起重索的过程中完成拱的体系转换，即拱肋轴向力形成与失去索力支撑同时发生，类似支架上施工拱肋脱架过程，因此可按支架上施工拱肋计算内力。该工法工艺简单，悬拼速度快，



图3. 平南三桥实景图。

大型临时设施费用低。工程实践表明，采用此工法施工的100 m左右跨径的混凝土拱桥与30 m跨径混凝土简支梁桥的单价持平。

1994年，笔者又发明了钢绞线斜拉扣挂悬拼合拢后松索工法（图5）[3]，在悬拼过程中逐段扣挂，逐段固结，合龙段配切，无应力合龙，在静态中完成从悬臂梁到

拱的体系转换；随后放松并拆除扣索，完成拱圈的架设，拱肋成拱内力等于悬臂梁应力与在拱上放松扣索产生内力之和。理论上，该工法可以安全悬拼任何跨径、任何段数的拱桁。

近年来，四川省公路规划勘察设计研究院有限公司在巫山长江大桥设计中首次提出了基于双竖杆的新型主拱悬拼单元，见图6。区别于常规结构，在满足吊、扣需要前提下，该新型主拱悬拼单元比常规单元重量减轻了1/3，高空接头焊接量也减少了1/3。此外，由于在悬拼单元弦管法兰栓接后就可以继续悬拼，可以实现一天悬拼一段，因此钢管拱桁施工风险大幅度降低。

据不完全统计，已建的钢管混凝土拱桥中采用斜拉扣挂悬拼工法的占70%以上，其中跨径超300 m的52座中有51座采用了钢绞线斜拉扣挂悬拼合拢后松索工法[4]。另外，值得一提的是，转体施工也是架设拱桁的成熟方法，具体每座桥采用哪种工法需要比较后确定。

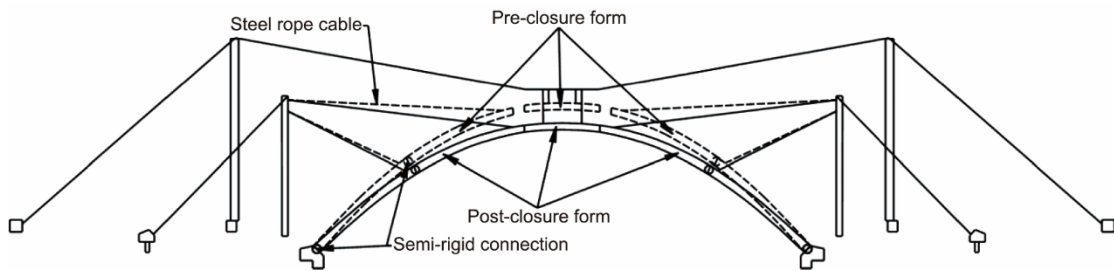


图4. 钢丝绳斜拉扣挂悬拼松索合拢工法示意图。

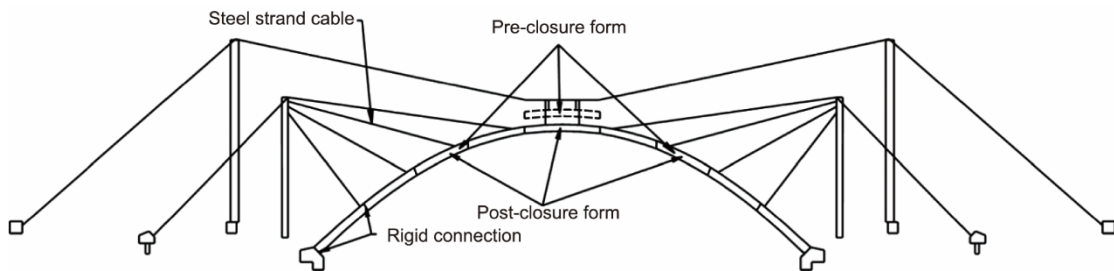


图5. 钢绞线斜拉扣挂悬拼合拢后松索工法示意图。

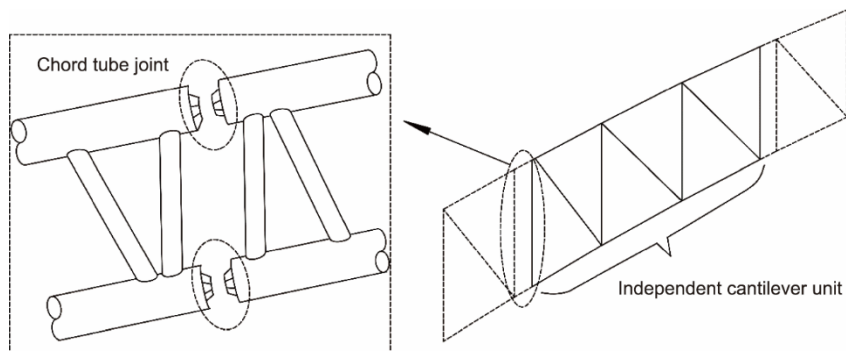


图6. 基于双竖杆的新型主拱悬拼单元。

钢管拱桁悬拼节段的制作首选工厂，如无节段运输条件，也应由工厂制造单元件。实践证明，无论工厂还是工地，只有采用“ $n+1$ ”耦合制作悬拼节段，才能消除累计误差，保证悬拼节段间的连接精度。

2.3. 管内混凝土新材料与灌注新工艺

管内混凝土的连续灌注是确保钢管混凝土拱肋受力整体性和施工速度的必要前提。为此，广西路桥工程集团有限公司在1994年邕宁邕江大桥施工中发明了钢管混凝土拱桁管内混凝土连续泵送顶升灌注施工工艺，将混凝土在泵压力作用下从两拱脚向拱顶顶升，依靠混凝土自身重力挤压密实填充管腔。随后，针对大跨径拱桥管内混凝土方量大、顶升高的特点，进一步发明了分级顶升灌注方法，显著降低了混凝土堵管事故的发生，其中分级长度根据混凝土灌注速度及工作性能损失速度综合确定。近年来，为解决连续泵送顶升管内混凝土过程中包裹空气及空气上浮易集聚在管顶形成空洞、脱黏，从而导致灌注密实度不足等问题，笔者又发明了真空辅助压力灌注方法。此方法是在钢管拱肋顶部安装抽真空设备，抽取拱肋内的空气，使其处于准真空（即管内空气压降为0.01~0.03 MPa）状态，大幅提升了管内混凝土灌注的密实度和速度[5-6]。

在材料方面，管内混凝土通常具有水胶比低、黏度大、泵送距离长等特点，良好的流动性、均匀性及经时稳定性是保障其灌注密实性的关键。为此，东南大学刘加平教授研发了高效外加剂，对管内混凝土工作性能的变化全过程进行调控，即通过羧基及碱响应酯基、稳健触变性功能材料的接枝及应用，实现了管内混凝土高稠度、低黏度、大流动性与高抗离析稳定性的统一，并有效降低了工作性能对原材料、温度、时间等因素波动的敏感性[7]。同时，丁庆军、陈正教授等对解决弦管内混凝土现场顺利灌注问题作出了贡献，在管内混凝土制备时采用了原材料均化技术，以入泵时刻的混凝土工作性能作为控制目标，保障入泵混凝土的均匀性[8]。

此外，高胶材用量、低水胶比的配比特征使得管内混凝土在硬化过程产生持续且较大的收缩，是产生混凝土与

管壁脱黏病害的一个主要原因。对此，东南大学刘加平教授[9-10]提出使用复合补偿收缩材料对混凝土硬化不同阶段的不同程度收缩进行精准补偿。具体来说是基于混凝土体积变形时变规律分析，通过改性偶氮二甲酰胺补偿塑性阶段收缩，钙质膨胀材料、高活性和中低活性MgO分别补偿前期、中期和后期收缩，实现了全龄期的管内混凝土膨胀和收缩可设计。

以上管内混凝土新材料技术及真空辅助压力泵送工法成功克服了管内混凝土脱黏、脱空的顽疾，保证了钢管混凝土拱肋钢-混凝土组合结构的正常工作。

2.4. 非岩地基大跨推力拱桥基础综合设计技术

大跨度拱桥的技术经济性十分显著，但拱脚处通常有极大的水平推力，对基础的稳定性要求很高，过去的常规做法是将基础放置在岩石地基上。然而，平南三桥位于平原地区，南岸岩石裸露，北岸从上到下分布有各约15 m厚的黏土层及卵石层，按一般原则不适合建推力拱桥。为此，笔者提出结合上部结构优化和基础形式创新，分别减小荷载效应和增大抗力，提出了非岩地基大跨推力拱桥基础通用性综合设计技术，解决了在平原卵石地基上修建大跨推力拱桥拱座基础的难题。

在上部结构优化方面，有效降低上部结构恒载对拱座基础产生的竖向力、水平推力和弯矩；同时，将基础中心沿拱轴线后移，增大了恒载竖向力产生的力矩，使之与水平推力产生的力矩基本平衡，基础受力均匀，边缘应力降低。优化后跨径560 m钢管混凝土拱桥的地基承载力需求只有800 kPa，见表3。

在增大抗力方面，在砂卵石地层注浆模型试验及原位荷载试验的基础上，提出“地下连续墙+注浆加固的卵石层”推力拱桥新型复合基础结构[11]，见图7。即采用地连墙深入地基岩石，并对地连墙内的卵石层诱导灌注水泥浆加固，提高其承载力，基础置于卵石层顶面。原位荷载试验结果表明，注浆加固后的卵石层基本容许承载力相比加固前提高0.53倍，形变模量也显著提高，满足了设计要求；注浆后42个月，基础的实测沉降仅为5.2 mm，远小

表3 平南三桥北岸地基承载力验算结果

Load case	Stress at front of the foundation bottom (kPa)	Stress at back of the foundation bottom (kPa)	Anti-sliding coefficient	Anti-overturning coefficient
1	647.7	694.2	1.41	61.88
2	720.2	606.9	1.54	24.76
2	755.8	582.8	1.53	16.52
4	615.9	715.4	1.43	28.38
Allowable criterion	≤ 800.0	≤ 800.0	≥ 1.30	≥ 1.50

于设计容许沉降 30 mm 的要求；同时，卵石层还起到减震作用[12]。

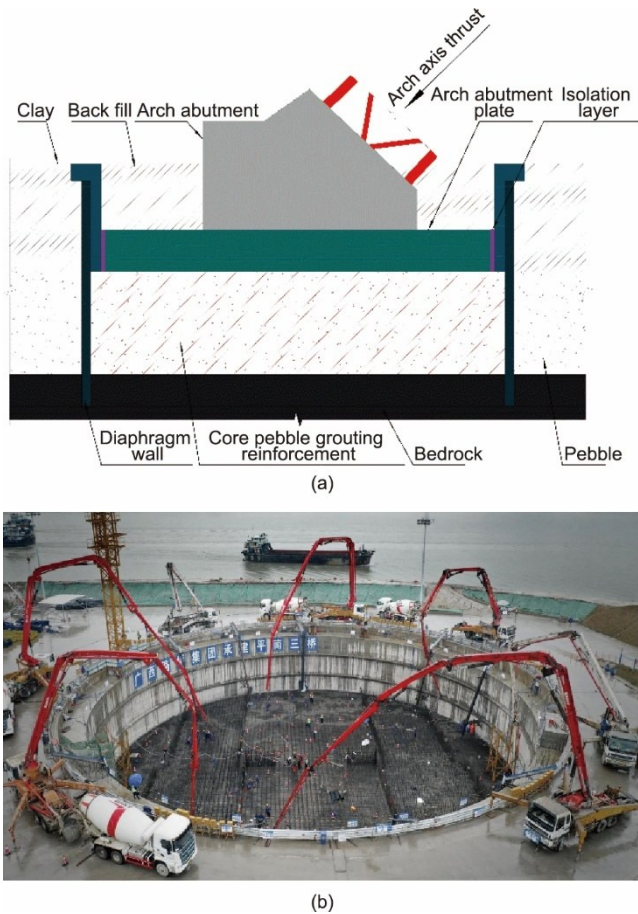


图7.“地下连续墙+注浆加固的卵石层”推力拱桥新型复合基础结构。(a) 构造示意；(b) 施工实景。

以上综合技术将特大跨径推力拱桥从岩石地基扩展到非岩地基，由山区扩展到平丘区，显著扩大了推力拱桥的适用范围。

2.5. 降低拱桁架设大型临时设施费用关键技术

与斜拉桥、悬索桥不同，大跨钢管混凝土拱桥拱桁安装主要依靠大型临时设施完成，如不能降低大型临时设施费用，与其他桥型竞争时其经济性必将处于劣势。

现阶段，大跨钢管混凝土拱桥拱桁安装多采用缆索吊运、斜拉扣挂悬拼、合拢后松索法，其中，吊、扣塔是悬拼系统的重要临时受力结构且占大型临时设施费用比例大。拱肋节段吊运过程中，吊、扣塔塔顶受主缆传来的水平力产生水平位移，从而导致扣挂在其上的拱肋联动偏位，并使塔身产生较大弯矩。传统对策是把吊、扣塔分设，或者吊、扣塔合建在其间设铰，能排除吊塔对扣塔的影响，但费用高；如吊、扣塔合建取消铰，只有加大塔自

身水平抗推刚度和增加风缆来减小塔顶位移，属刚度被动控制，同样存在成本高的问题，且位移控制精度通常仅能达分米级。

对此，笔者发明了力主动控制塔顶位移方法，即采用千斤顶对控制缆索主动施力，直接平衡塔顶水平力，从而控制塔顶位移[13]。在此基础上，研发了相应的智能控制系统，主要控制流程为利用北斗卫星系统动态监测塔顶偏位，智能千斤顶适时主动调力让塔顶复位，见图8。

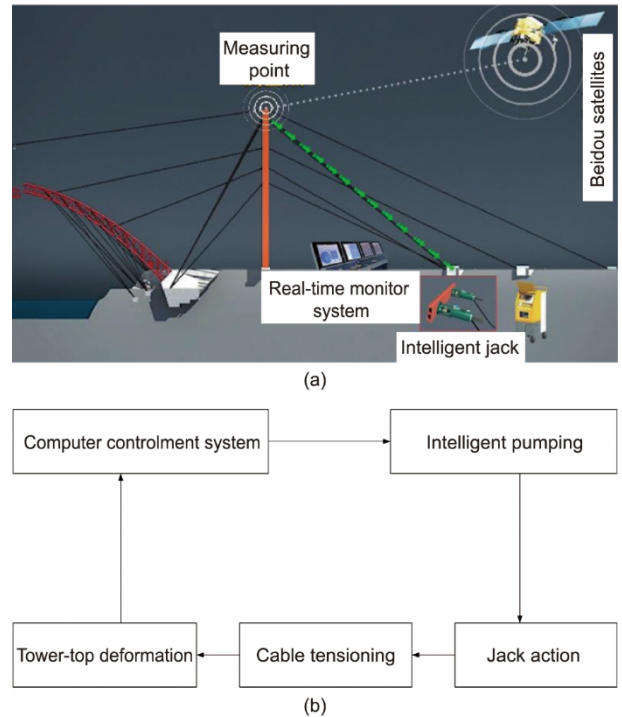


图8. 力主动控制吊扣塔位移技术。(a) 控制原理；(b) 工作程序。

用力主动控制代替传统的刚度被动控制，塔只需满足强度及稳定需求，从而实现了塔结构大幅瘦身，而风缆由于只承担抗风作用，用量也显著减小，节省了施工临时费用；同时，力主动控制的塔顶水平位移的精度只由位移测量精度和系统反应速度决定，从分米级提高到厘米级。平南三桥202 m高吊、扣塔，顺桥向仅宽12 m。塔架位移控制系统6 s完成一次测量、调力作业，在吊运200 t级的钢管拱桁过程中，塔顶水平位移控制在 ± 2 cm内，见图9。此外，该技术还用在跨径 2×405 m的钢管混凝土连拱桥——渝湘复线高速公路双堡特大桥，成功解决了其中间扣塔由于两跨拱桁不同步悬拼引起扣索力相差4000 kN导致的偏位问题，大大减小了中间扣塔受力。

扣索是斜拉扣挂悬拼系统的另一个重要组成部分，各扣索的张拉、拆除方法及索力值不仅对施工安全和成桥线形影响显著，还在很大程度上决定施工速度和扣索用量。

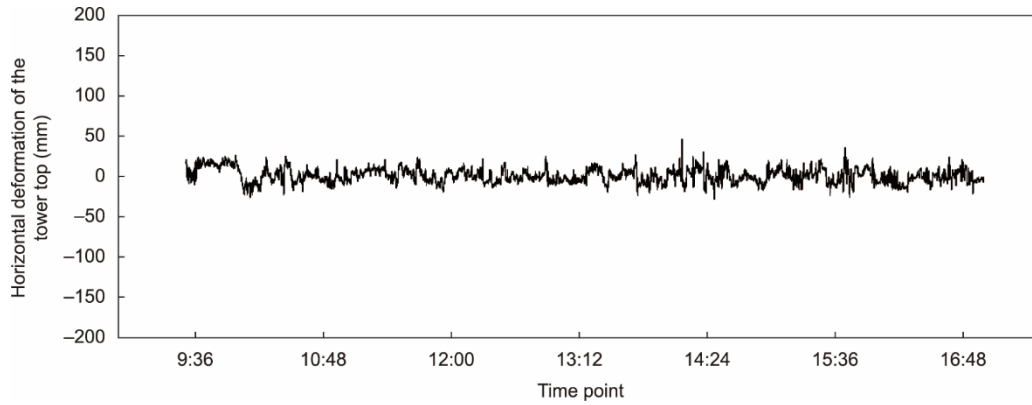


图9. 平南三桥安装4#钢管拱桥节段时南塔塔顶水平位移随时间变化曲线。

针对传统扣索张拉方法需要多次张拉扣索且安装过程拱肋线形和索力变化幅度大等不足, 秦大燕等[14-15]提出了一种基于影响矩阵原理和“过程最优”控制原则的拱肋线形控制方法。具体来说, 是以拱肋安装过程竖向位移和横向偏位偏差最小作为优化目标, 建立了斜拉扣挂施工扣索力和侧缆风索力的优化计算模型, 并通过计算确定每组扣索的初始索力以及悬拼段的初始高程和轴线偏位, 实现了各节段扣索的一次张拉、不调索。优化模型可简写为:

$$\text{Find: } x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \quad (1)$$

$$\text{To minimize: } f(x) = \|\mathbf{u}_h(x) - \mathbf{u}_t\| \quad (2)$$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} x_i \geq 0 \\ \|\mathbf{u}_n(x) - \mathbf{u}_t\|^2 \leq \Delta u^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_i 为第*i*根扣索的初始张拉力; \mathbf{u}_t 、 $\mathbf{u}_n(x)$ 分别为桥梁合龙后拱轴线位移的目标矢量和真实矢量; $\mathbf{u}_h(x)$ 为拱轴线的预抬高值; Δu 为位移偏差阈值。

扣索一次张拉不调索使得扣索索力变化小, 受施工过程中最大索力控制的扣索用量得以明显降低, 一般可减少扣索材料15%~20%。图10为采用该扣索一次张拉方法后, 天峨龙滩特大桥下老岸下游5#钢管骨架节段前端竖向位移随整个骨架拱桥吊装过程的变化规律。

对于合拢后的扣索拆除, 提出一种从拱脚到1/4跨和1/4跨到拱顶交替一次拆除扣索的快速拆索方法, 实现了扣索的一次拆除, 缩短了施工工期[16]。

综上所述, 笔者团队对特大跨径钢管混凝土拱桥建造技术进行了长期的研究与实践, 发明了斜拉扣挂悬拼拱桥工法, 解决了拱桥无支架施工难题; 提出了真空辅助压力多级连续灌注管内混凝土工艺, 发明了管内混凝土新材料, 成功克服了管内混凝土脱黏、脱空的顽疾, 保证了拱肋钢-混组合结构的正常工作; 提出了一种桥台基础新结构及卵石地基承载能力提高方法, 解决了在非岩地区建造特大跨径推力拱桥的难题, 扩大了推力拱桥的适用范围;

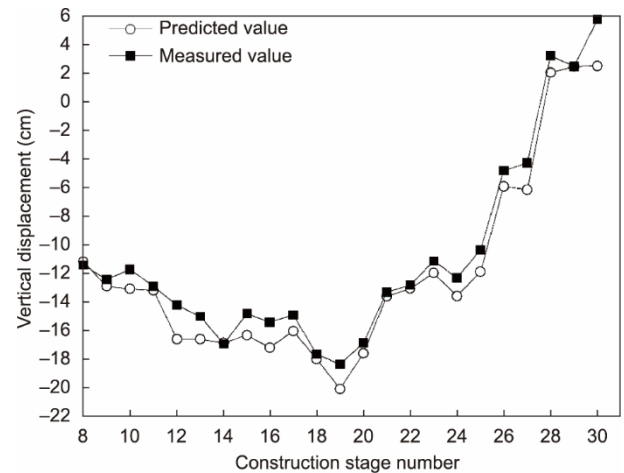


图10. 天峨龙滩特大桥下老岸下游5#骨架节段前端竖向位移在整个骨架拱桥吊装过程中的变化规律。

发明了塔架位移力主动控制方法代替传统刚度控制方法, 使吊扣塔大幅瘦身, 并对拱桥节段的制造、扣索施工方法进行研究, 降低了架设拱桥的大型临时设施费用及风险。这些研究成果使钢管混凝土拱桥成为一个十分具有竞争力的拱桥分支, 也全部成功应用在平南三桥上。此外, 这些研究成果也部分被中华人民共和国国家标准《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB50923—2013)[17]和中华人民共和国行业标准《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D6—2015)[18]采纳。

3. 劲性骨架混凝土拱桥

混凝土拱桥拱圈受力极为合理, 但是其重量大, 每米拱圈质量是同跨径斜拉桥、悬索桥加劲梁的5~10倍, 且呈曲线型, 架设困难, 费用高。为此, 在1898年奥地利工程师约瑟夫·米兰提出了劲性骨架法, 先架设仅为外包混凝土重量1/10甚至更轻的钢拱骨架, 然后在其上挂模板, 浇筑外包混凝土, 形成拱圈。

中国工程师用钢管混凝土拱桁代替钢拱骨架，然后在其上挂模板，分环、多工作面、多段浇筑混凝土。由于环间混凝土龄期差异大，应特别注意防裂。以天峨龙滩特大桥为例，该桥拱肋底板环与腹板环混凝土龄期相差两月，若不采取措施，腹板混凝土硬化过程中因收缩受底板约束，将产生3.7 MPa的拱轴向拉应力；实际工程中腹板混凝土加含缓凝成分的膨胀剂后，体积膨胀，不产生拉应力，见图11。段间混凝土龄期差在10天内，按施工缝处理即可。架设钢管混凝土拱桁的工艺与2.2节内容相近，只是腹杆多用型钢，以利于与混凝土连接。

截至2024年，全世界跨径 ≥ 200 m的混凝土拱桥共有67座，其中劲性骨架混凝土拱桥20座；跨径 ≥ 300 m的混凝土拱桥共有20座（表4），其中劲性骨架混凝土拱桥

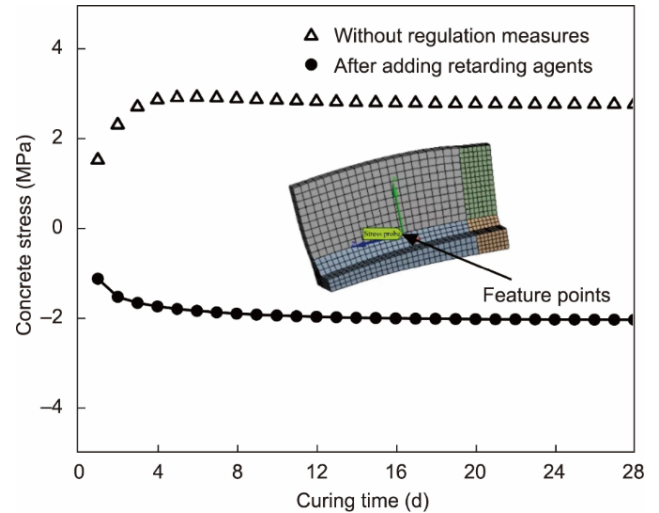


图11. 天峨龙滩大桥拱圈腹板混凝土控制点约束应力随时间演化规律。

表4 跨径300 m以上的混凝土拱桥列表

No.	Bridge	Main span (m)	Bridge type	Construction method of the arch	Year of completion
1	Tian'e Longtan Bridge	600.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Stiff skeleton method	2024
2	Xining River Bridge	510.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Stiff skeleton method	Under construction
3	Shanghai-Kunming High Speed Railway Beipan River Bridge	445.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Stiff skeleton method	2016
4	Wanzhou Yangtze River Bridge	420.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Stiff skeleton method	1997
5	Nanning-Kunming High Speed Railway Nanpan River Bridge	416.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Stiff skeleton method	2016
6	Krk Bridge	390.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Cantilever assembly in form of truss	1980
7	Almonte Railway Bridge	384.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Hanging-basket-assisted in situ casting	2016
8	Leshan-Xichang Highway Suba Bridge	370.5	Reinforced concrete deck arch bridge	Stiff skeleton method	Under construction
9	Yelang River Bridge	370.0	X-style reinforced concrete deck arch bridge	Stiff skeleton method	2018
10	Zhaohua Jialing River Bridge	364.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Stiff skeleton method	2012
11	Dali-Ruili Railway Lantsang Bridge	342.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Two-stage vertical rotation	2022
12	Zhengzhou-Chongqing Railway Meixi River Bridge	340.0	X-style reinforced concrete deck arch bridge	Stiff skeleton method	2022
13	Luzhou-Gulin Highway Shuiluo River Bridge	335.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Hanging-basket-assisted in situ casting	Under construction
14	Jiangjie River Bridge	330.0	Truss-type prestressed concrete deck arch bridge	Cantilever assembly	1995
15	Tajo Railway Bridge	324.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Hanging-basket-assisted in situ casting	2019
16	Mike O'Callaghan-Pat Tillman Memorial Bridge	323.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Hanging-basket-assisted in situ casting	2010
17	Wen'an-Machangpin Railway Wujiang River Bridge	320.0	Reinforced concrete deck arch bridge	Cantilever assembly	Under construction
18	Yongning Yong River Bridge	312.0	Half-through concrete arch bridge	Stiff skeleton method	1996
19	Gladesville Bridge	304.8	Reinforced concrete deck arch bridge	Assembly on bracket	1964
20	Guansheng Qujiang River Bridge	300.0	Half-through concrete arch bridge	Stiff skeleton method	2019

11座,且这11座特大跨径劲性骨架混凝土拱桥全在中国;跨径 ≥ 400 m的混凝土拱桥共有5座,全部为劲性骨架混凝土拱桥。2016年建成的跨径445 m的沪昆高铁北盘江桥,曾创混凝土拱桥的跨径世界纪录,目前该纪录已被天峨龙滩特大桥大幅度提升至600 m。

中国不断创造混凝土拱桥跨径新纪录,主要靠两大技术支持:一是采用钢管混凝土骨架代替型钢骨架,减少一半钢用量,造价降低,且中国钢管混凝土拱桥建造技术的飞速发展,也间接支撑了混凝土拱桥的发展;二是研发了调整浇筑外包混凝土过程骨架时程应力和降低永存应力技术。世界首个设计钢管混凝土拱桥代替型钢作劲性骨架的是四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,用在跨径420 m的万县长江大桥中;世界首个施工钢管混凝土拱桥,并调整浇筑拱桥外包混凝土过程中的骨架拱桥时程应力、降低永存应力的是广西路桥工程集团有限公司,用在跨径312 m的邕宁邕江桥上。这两大技术在笔者2018年发表在*Engineering*期刊上的论文中已做了详细论述[1],这里不再赘述。

国外大跨径混凝土拱桥拱肋多数采用挂篮悬浇施工,全世界跨径大于200 m的67座混凝土拱桥中,国外采用挂篮悬浇20座,最大跨径是2016年建成的跨径384 m的西班牙阿尔蒙特桥,中国采用挂篮悬浇施工拱肋的混凝土拱桥有9座,跨径最大的是四川泸(州)古(蔺)高速路水落河桥,跨径335 m。挂篮悬浇与劲性骨架法的经济性比较同样可详见笔者的论文[1]。

本节后续部分将以笔者主持建造、跨径600 m的最大跨度拱桥——广西天峨龙滩特大桥为例,系统介绍建造劲性骨架混凝土拱桥的最新建造技术创新与实践。

3.1. 天峨龙滩特大桥概况

天峨龙滩特大桥位于广西壮族自治区天峨县境内,是南丹至天峨下老高速公路的控制性工程。大桥位于龙滩水库库区,距龙滩电站大坝6 km,河槽呈“U”形,两岸山岭高耸峻峭,水面宽度约600 m,水深160 m,年最大水位落差为45 m。

大桥全长2488.55 m,其中主桥为上承式劲性骨架混凝土双肋拱桥。主拱肋轴线为悬链线,计算跨径为600 m,计算矢高为125 m,矢跨比为1/4.8,拱轴系数为1.9。拱肋采用等宽变高的混凝土箱形截面,拱脚、拱顶箱高分别为12 m、8 m,宽度均为6.5 m;拱肋横向平行设置两片,中心间距为16.5 m,在对应每处拱上立柱位置(40 m间隔)的上、下游拱肋间设置一道混凝土箱形横联,全桥共13道;主拱肋及横联均采用C60高性能混

土。主拱肋采用劲性骨架法施工。桥梁总体布置见图12。

每片拱桁骨架均为四管式钢管混凝土桁架,桁架上、下弦管均为管径900 mm、壁厚30~35 mm的Q420qD钢管[19]。弦管间的腹杆和平联杆均采用角钢焊接组合杆,以节点板的形式与弦管连接。拱桁弦管空中接头采用先外法兰接头栓接固定、再管外焊接的形式连接。管内灌注C80自密实微膨胀混凝土。骨架断面见图13。

拱桁骨架采用缆索吊运斜拉索扣挂工艺安装,见图14。单片拱桁骨架分为24个节段,最大吊重为169 t。拱桁外包混凝土采用分环分段方式浇筑,即拱圈竖向分为底板环、腹板环、顶板环三环,每环分8个工作面对称浇筑,每次由8台压力泵执行混凝土输送,同步浇筑四个工作面,共36次完成总计28 100 m³的拱桁外包混凝土浇筑,见图15。外包混凝土浇筑过程中拱桁挠度、应力变化曲线如图16所示,可见实测值与计算值吻合良好。目前,天峨龙滩特大桥已建成通车。表5列出了大桥各主要工序的用时。图17为拍摄于2024年2月的大桥照片。

天峨龙滩特大桥主孔跨径达600 m,将混凝土拱桥跨径世界纪录一次性提高155 m,按过去的平均增长速度计,相当于世界混凝土拱桥跨径100年的增长量,建造风险非常大,但混凝土拱桥刚度大、耐久性好,几乎零维护,造价比斜拉桥少1.25亿元,经济效益显著。尽管笔者曾主持或指导建造了跨径300 m级、400 m级的劲性骨架混凝土拱桥,但在全世界都没有500 m级混凝土拱桥建造经验的前提下,建造跨径600 m混凝土拱桥存在着巨大风险。下面以天峨龙滩特大桥为例,论述建造超大跨劲性骨架混凝土拱桥的技术挑战及解决手段。

3.2. 钢管混凝土劲性拱骨架强度选择

钢管混凝土劲性拱骨架的设计、制造、架设在第2节中已论述,本节只论述其作用和强度选择。

劲性骨架混凝土拱桥的拱圈是在钢管混凝土劲性拱骨架上挂模板浇筑外包混凝土形成的,钢管混凝土劲性拱骨架在拱圈施工过程中起拱架作用,因此强骨架是降低拱圈施工风险的首选,但强骨架必然增加拱骨架的施工难度,降低拱桥的经济性,因此选择合适强度度的劲性拱骨架是十分重要的。笔者提出以骨架钢管拱桁质量与外包混凝土质量之比来表达骨架强弱,该方法简单、明了,但不准确。显然,这个比值应随桥梁跨径的增大而增大。8座已建成的劲性骨架混凝土拱桥的该比值在1/13.2~1/15之间,见表6。天峨龙滩特大桥拱肋劲性拱骨架的钢管拱桁重8150 t,外包混凝土体积达28 100 m³,二者质量比为1/8.6,比已建成桥梁大许多,但劲性骨架仍不能单独承担

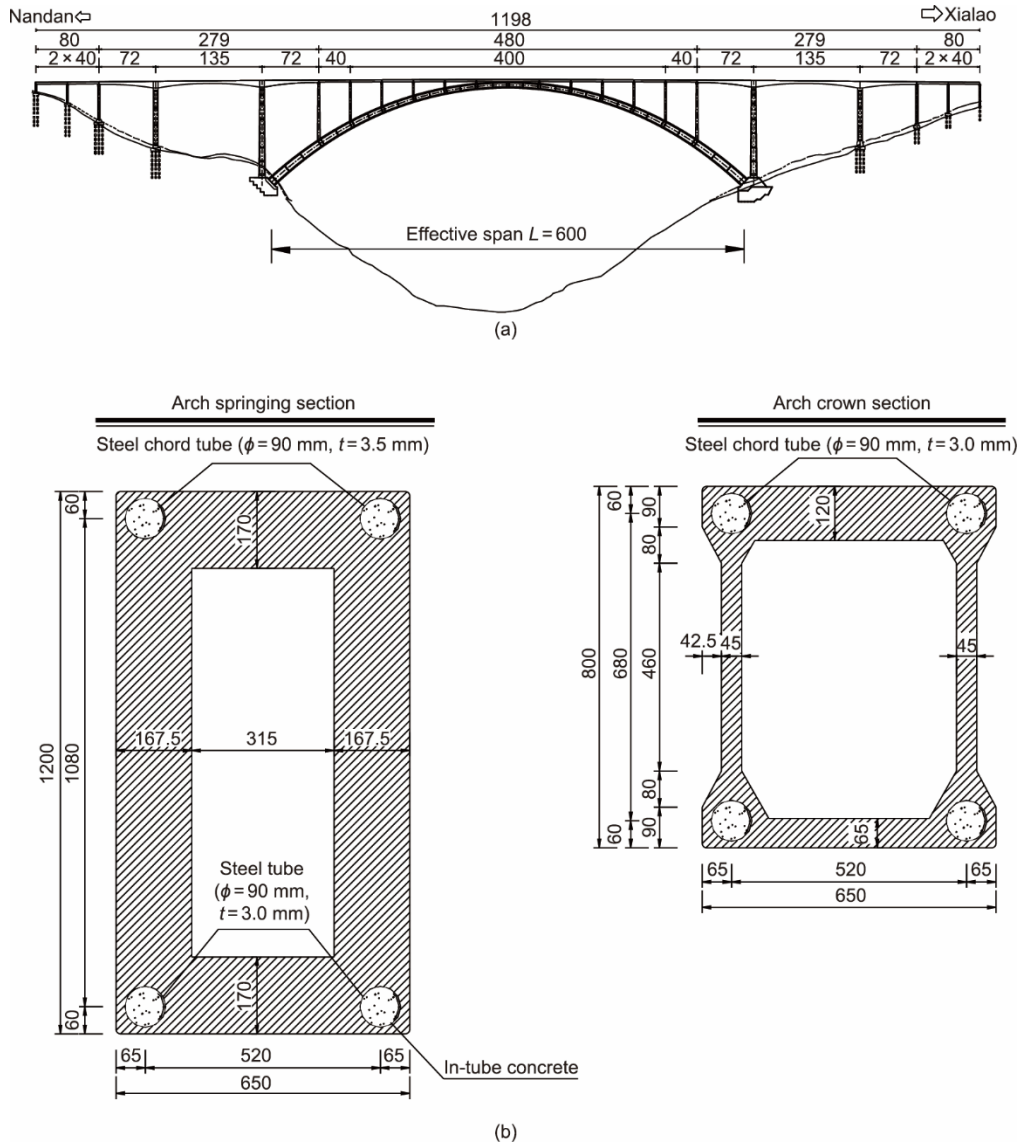


图12. 天峨龙滩特大桥结构设计总体布置。(a) 桥型布置图(单位:m); (b) 拱肋截面示意图(单位:cm)。

外包混凝土7万多吨的重量,只能分环浇筑。这区别于钢管混凝土拱桥,如跨径560m的平南三桥,8440t的钢管拱桁能单独承担20000t管内混凝土,可以一次灌注。

天峨龙滩特大桥拱桁外包混凝土分底板、腹板、顶板三环浇筑,其混凝土工程量分别是8800m³、11000m³、8300m³,每环分8个工作面,每个工作面分6次浇筑,每次同时浇筑4个工作面,12次完成一环浇筑。

骨架应力、挠度增长最快的阶段是灌注管内混凝土和浇筑底板环阶段,这两个阶段拱顶挠度增长698mm,占外包混凝土浇筑完成后总挠度(1156mm)的60%,为浇筑腹板、顶板两环混凝土挠度的9.3倍,上弦钢管应力增长210MPa,占外包混凝土浇筑完成后累计应力(340MPa)的61%,为浇筑腹板、顶板两环混凝土上弦钢管应力增量的4.7倍。尽管腹板、顶板混凝土质量之和

是管内混凝土与底板混凝土之和的1.6倍,但因浇筑管内混凝土、底板混凝土时的承力结构分别是刚度较低的钢管拱桁、钢管混凝土拱桁,钢管拱桁的强刚度也因此主要由这两个施工阶段决定。同时,尽管钢管混凝土拱桁与底板混凝土组合后刚度显著提高,此后拱肋挠度、应力增加较小,但骨架上弦管被顶板混凝土覆盖前的最大应力达340MPa,已接近中国《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB 10091—2017)考虑施工荷载和节点固结提高后的Q420D钢容许应力360MPa [19]。此外,在浇筑底板环外包混凝土过程中,天峨龙滩特大桥钢管混凝土劲性骨架还成功抵御了因混凝土泵管堵塞造成两半跨对称点加载相差3250kN的影响。外包混凝土浇筑完成后,钢管混凝土劲性骨架被埋在拱圈混凝土中,增强混凝土拱圈的强度和韧性。由此可见,天峨龙滩特大桥钢管骨架的强刚度选择是

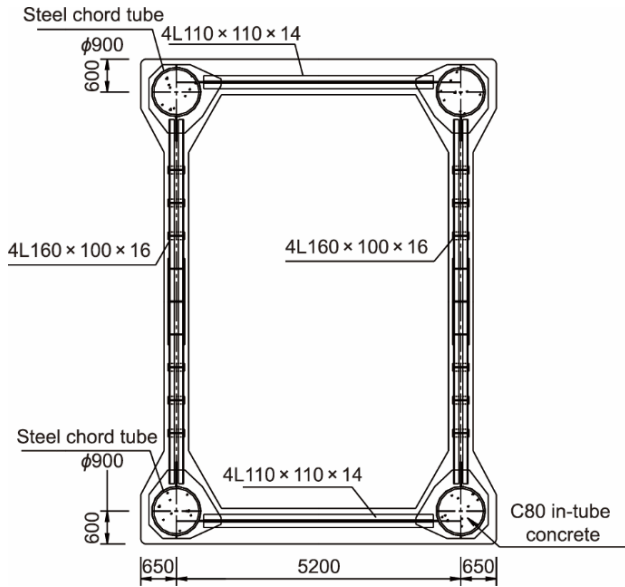


图13. 天峨龙滩特大桥劲性骨架断面示意图(单位: mm)。 $aLb \times c \times d$: a 表示焊接角钢构件的数量; L 表示“L”型焊接角钢构件; b 、 c 和 d 分别表示单个焊接角钢构件的截面长度、宽度和厚度。

合适的。

根据以上分析可知, 劲性骨架混凝土拱桥设计中对抗性骨架的强劲度选择要注意其充当拱架作用, 尤其要注意浇筑第一环外包混凝土时的应力和变形。

3.3. 外包混凝土浇筑

在中国, 混凝土拱桥多采用劲性骨架法施工拱圈, 在该工法下拱圈的形成是一个自架设过程。在国外采用较多的是挂篮悬浇+劲性骨架组合法, 即拱圈拱脚段采用挂篮全断面悬浇混凝土, 中间段用钢劲性骨架, 边段与中段间设临时铰, 如跨径145 m的日本帝释川桥[20]。但随跨径增大, 临时铰制造、安装难度加大, 施工工艺复杂, 因此用此工艺建造的混凝土拱桥跨径最大, 仅260 m。

在中国, 首先架设钢管混凝土拱桁劲性骨架, 然后分环浇筑外包混凝土, 一环混凝土浇筑完成获得强度后, 与钢管混凝土拱桁形成钢-混凝土组合结构, 承载能力和刚度得到提高, 逐次完成各环混凝土浇筑, 逐次提高承载能

力和刚度, 直至完成混凝土拱圈的施工。显然, 中国采用的全劲性骨架法更简单, 在自架设过程中提高拱圈承载能力和刚度的速度快。这也是中国在2016年建成跨径445 m的沪昆高铁北盘江桥, 今年建成跨径600 m的广西天峨龙滩特大桥, 不断创造混凝土拱桥跨径世界新纪录的原因。但值得注意的是, 外包混凝土质量通常达劲性骨架钢管桁质量的9~15倍, 因此浇筑外包混凝土是劲性骨架混凝土拱桥施工的最危险阶段, 不但加载重量大, 而且加载时间长, 加载次数多, 每次混凝土浇筑一旦失败将难以补救。因为采用分环、多工作面、多次浇筑, 劲性骨架及已获得强度的外包混凝土会产生随时间增长而变化的应力, 称为时程应力, 有时时程应力会超过材料强度, 要靠合理分环、多工作面同时浇筑来控制。外包混凝土浇筑完成获得强度后成为受力主体。

天峨龙滩特大桥拱桁28 100 m³外包混凝土分3环8工作面, 每次4个工作面同时浇筑, 共36次完成拱桁外包混凝土浇筑。为保证浇筑外包混凝土过程中的拱桁横向稳定, 除在每40 m间距有一道钢筋混凝土箱形永久横联外, 拱桁上弦管间加设20个临时横向X钢管撑, 在完成腹板环混凝土浇筑并获得强度后拆除, 施工阶段拱桁弹性整体稳定系数变化曲线见图18。

每次浇筑外包混凝土约800 m³, 需要7~10 h, 由8台泵同时向4工作面输送混凝土, 无需斜拉索调载, 浇筑过程中骨架上弦管内混凝土无拉应力出现, 外包混凝土时程拉应力也小于1 MPa。时程应力控制好的原因是使用了8台泵, 能在4个工作面同时浇筑混凝土, 而不是每侧一台泵逐次浇筑各工作面混凝土。这种浇筑方式创新主要基于笔者已有研究成果[1]。具体来说是研究发现, 浇筑外包混凝土阶段, 拱桁的拱脚截面受力最大, 尤其是拱脚负力矩较大。其影响线规律是拱脚至 $L/4$ (L 为拱的计算跨径) 范围内的外包混凝土自重产生拱脚负力矩, $L/4$ 至拱顶范围内的外包混凝土自重产生拱脚正力矩, 4工作面、8工作面同时浇筑使得在正、负力矩影响区各有1个或2个浇

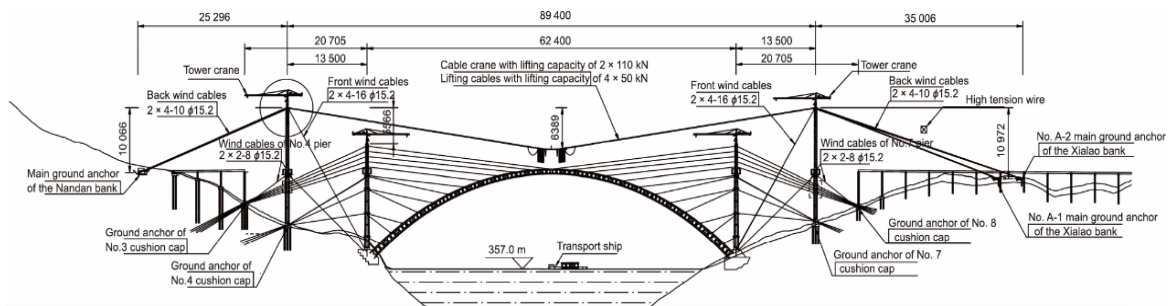


图14. 天峨龙滩特大桥骨架安装的缆索吊装、斜拉扣挂系统(单位: cm)。 $l \times m - n$: l 表示风缆的数量; m 表示每根风缆中钢绞线束的数量; n 表示每根钢绞线束中钢绞线的数量。

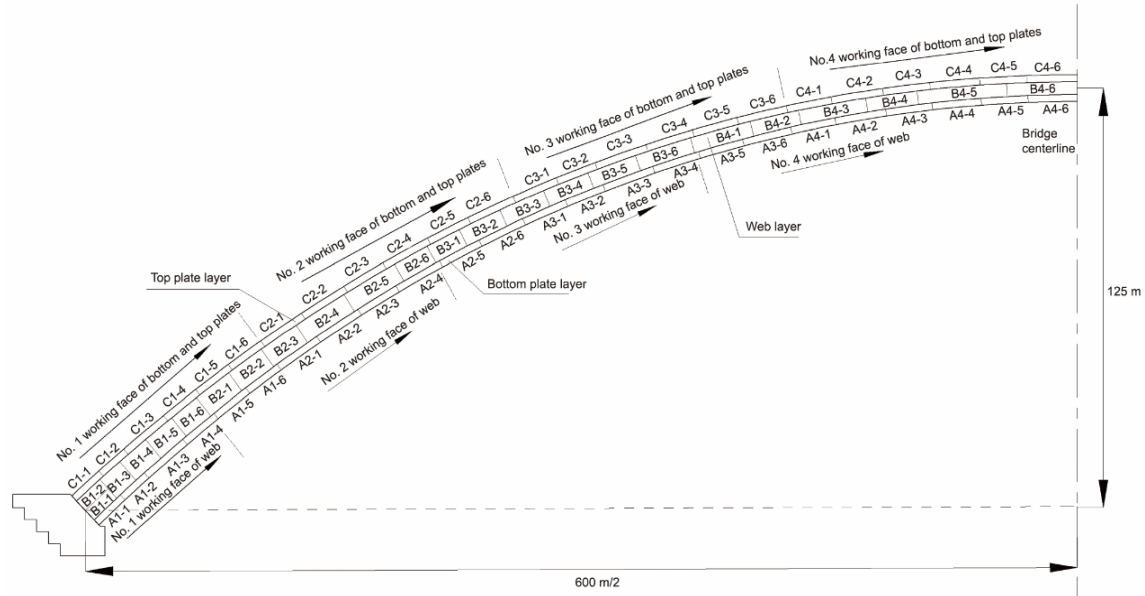


图 15. 天峨龙滩特大桥拱桁外包混凝土浇筑分环、分段及工作面设置示意。拱上标注的“B1-2”等符号代表外包混凝土段的浇筑顺序。第一个字母代表该段所在层的标识符，A、B和C分别代表底层、腹板层和顶层层；第二个数字代表每个层内工作面的顺序；第三个数字代表在每个工作面内本段的浇筑顺序。

表 5 天峨龙滩特大桥关键工序施工时间

Time (month/day/year)	Key construction phase	Duration (d)
2/28/2022	Erection of the first steel tube stiff skeleton segment	100
6/6/2022	Steel tube stiff skeleton closure	
7/29/2022	In-tube concrete filling of the first two chord tubes of the stiff skeleton	10
8/9/2022	In-tube concrete filling of the last two chord tubes of the stiff skeleton	
9/15/2022	First pouring of the encasing concrete in bottom plates	54
11/8/2022	Final pouring of the encasing concrete in bottom plates	
11/26/2022	First pouring of the encasing concrete in webs	80
2/17/2023	Final pouring of the encasing concrete in webs	
3/10/2023	First pouring of the encasing concrete in top plates	50
4/30/2023	Final pouring of the encasing concrete in top plates	
4/15/2023	Start of construction of spandrel columns	138
8/31/2023	Completion of construction of spandrel columns	
10/5/2023	Start of traffic beam installation	36
11/9/2023	Completion of traffic beam installation	
12/2/2023	Start of bridge deck paving	24
12/26/2023	Completion of deck paving	

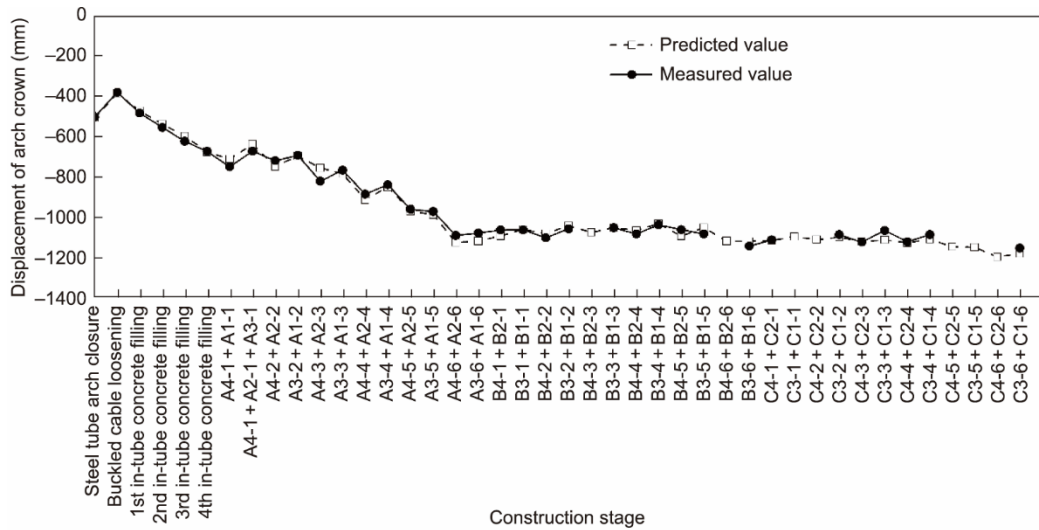
筑面，比6工作面更容易实现拱脚力矩平衡。

3.4. 外包混凝土材料

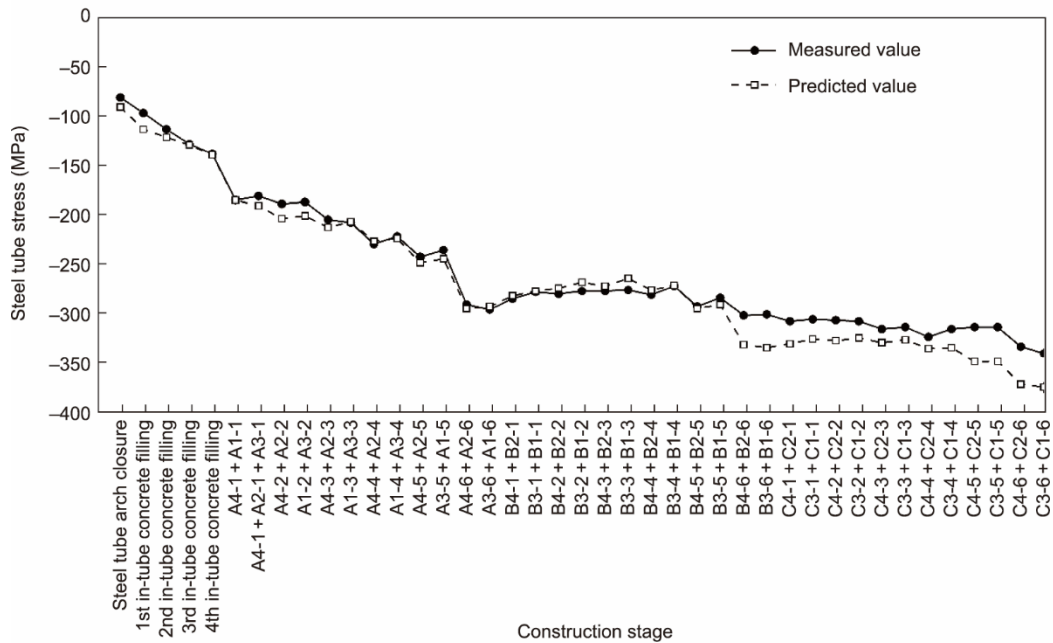
劲性骨架混凝土拱桥拱桁外包混凝土从浇筑到硬化过程中受到劲性骨架的多方向强约束，易产生收缩裂缝。显然多配钢筋对于提高外包混凝土的抗收缩裂缝作用不大。在混凝土中掺加纤维对外包混凝土抗裂性能的提高有一定作用，但在混凝土长距离泵送过程中聚合物纤维易成团打绞，工作性能较难调控。因此，解决强约束产生收缩裂缝

问题最好的途径是掺入膨胀材料以抵消收缩。此外，在工作性能控制层面，应进行原材料均化，尽可能避免原材料差异导致的混凝土工作性能不稳定的问题；在泵送现场应实时调控混凝土工作性能，保障入模混凝土的稳定性、均匀性。

在体积变形控制层面，外包混凝土由于内部存在复杂约束，在后期持续膨胀作用下，表面易产生体积不均匀变形造成的开裂。在天峨龙滩大桥12 m拱肋段的足尺模型试验中，采用了含氧化镁的长期膨胀剂，混凝土浇筑完成



(a)



(b)

图16. 天峨龙滩特大桥施工过程关键结构响应演化曲线。(a) 拱顶位移；(b) 拱脚截面上弦杆钢管应力。



图17. 天峨龙滩特大桥近照（拍摄于2024年2月）。

3月后产生第一次裂缝，262天还发现新裂缝。分析其原因应该是膨胀产生的拉应力必然发生累积，当超过了混凝土的抗拉强度时就会使混凝土开裂。具体机理为：足尺模型外包混凝土外部直接与养护水接触，因此水化早于内部混凝土，当时间发展至数月后，外部混凝土基本水化完全而不发生体积变形，而内部混凝土由于后期膨胀剂的持续作用，仍然存在膨胀趋势，这种不均匀的体积变形使得结构内部形成了拉应力，从而造成了最终的开裂。此外，众所周知，温度变化、干湿变化等效应引起的开裂往往发生在早期。因此，应考虑胶凝材料的水化进程，采用适用于外包混凝土的膨胀剂，实现前期补偿收缩，后期不发生体

表6 跨径300 m以上SRC拱桥材料用量表

No.	Bridge	Main span (m)	Steel consumption of stiff skeleton (t)	Encasing concrete consumption (m ³)	Weight ratio of steel in stiff skeleton to encasing concrete
1	Shanghai–Kunming High Speed Railway Beipan River Bridge	445	4709	26 500	1/14.2
2	Nanning–Kunming High Speed Railway Nanpan River Bridge	416	4011	24 000	1/15.0
3	Chongqing–Guizhou Railway Yelang River Bridge	370	5531	29 370	1/13.2
4	Dali–Ruili Railway Lantsang Bridge	342	5520	16 800	1/7.6
5	Zhengzhou–Chongqing Railway Meixi River Bridge	340	2545	14 210	1/13.9
6	Zhaohua Jialing River Bridge	364	1866	11 130	1/14.9
7	Wanzhou Yangtze River Bridge	420	2091	11 000	1/13.2
8	Yongning Yong River Bridge	312	852	4 816	1/14.7
9	Tian'e Longtan Bridge	600	8150	28 100	1/8.6

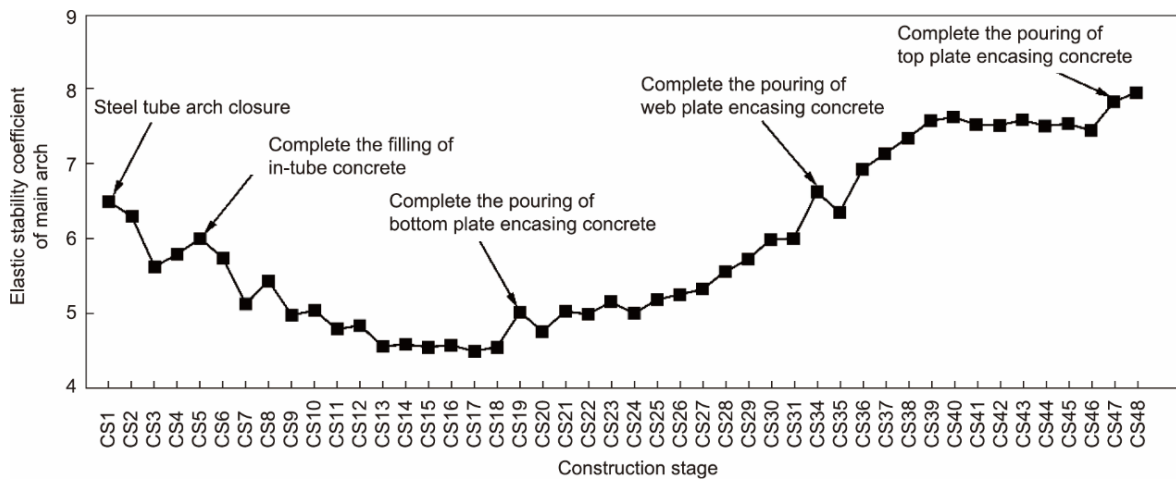


图18. 天峨龙滩特大桥施工过程中主拱圈整体弹性稳定系数演化曲线。CS: 施工阶段。

积变形, 见图19。

在施工过程中, 应对外包混凝土内、外温、湿度进行控制, 以减小温差应力、干缩应力; 严格控制混凝土制备、运输、泵送、入模温度。在养护阶段采取外界覆膜保温措施, 同步降低内外温差; 此外, 对外包混凝土表面进行持续性喷水、喷雾保湿养护, 以减少混凝土表面的干缩。通过以上措施, 实现了天峨龙滩特大桥外包混凝土的良好浇筑及抗裂效果, 表面光滑密实无裂缝。由此可见, 天峨龙滩特大桥拱桁外包混凝土外掺剂选取及浇筑经验具

有普遍借鉴意义。

3.5. 降低混凝土应力水平

据统计, 特大跨径劲性骨架混凝土拱桥拱圈恒载应力占恒、活载应力之和的92%~96%, 见表7; 拱圈重量占上部结构总重量的60%左右, 见表8, 且钢管混凝土拱骨架的强度和材料用量也是由外包混凝土重量决定的。因此, 降低主拱应力主要需减少拱圈重量。天峨龙滩特大桥将拱圈断面由单箱3室改为双箱肋, 取消中室顶、底板(图20), 双箱肋底板、腹板、骨架弦管变厚, 把外包混凝土

表7 代表性大跨度SRC拱桥恒载占总荷载比例统计

Bridge classification	Bridge	Main span (m)	Dead load/dead load + live load
Highway bridge	Tian'e Longtan Bridge	600	94.6%
	Sichuan Modaoxi Bridge	266	94.2%~95.1%
	Zhaohua Jialing River Bridge	364	94.6%~95.0%
	Xining River Bridge	510	95.8%~96.6%
Railway bridge	Huangtong–Baise Railway Hongshui River Bridge	512	92%~93%
	Nanning–Kunming High Speed Railway Nanpan River Bridge	416	91.7%

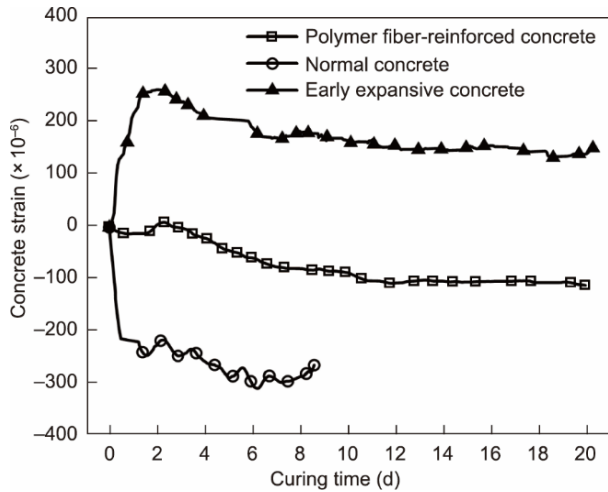


图19. 不同配合比外包混凝土自由应变时演化曲线。

由 $3.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 减到 $2.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

鉴于混凝土拱桥拱脚通常由恒载作用下负力矩控制设计，桥道梁布置时拱脚至 $L/4$ 宜轻， $L/4$ 至拱顶不宜太轻，

这是因为前、后者对拱脚分别产生负力矩、正力矩。因此，天峨龙滩特大桥 600 m 主孔，拱脚附近段拱上结构采用预应力混凝土连续刚构，其余采用 40 m 跨径预应力混凝土 T 梁跨越，未采用较轻的钢梁或钢混凝土组合梁。以上综合措施实现了 600 m 级混凝土拱桥应力与 400 m 混凝土拱桥持平，见表 9。降低应力减少了混凝土徐变，提高了拱的安全储备。

此外，天峨龙滩特大桥拱桁外包混凝土分底板、腹板、顶板三环依次浇筑，拱肋形成时，顶板混凝土应力几乎为零，增大顶板恒载压应力只能靠桥道梁自重，而 $L/4$ 至拱顶段桥道梁自重能产生拱脚顶板混凝土压应力，这也是桥道梁不能太轻的原因。天峨龙滩特大桥拱脚顶板混凝土恒载压应力最小，为 3.49 MPa，标准组合下压应力为 0.88 MPa。最大混凝土压应力发生在底板，标准组合下不超过 21 MPa。采取强骨架和调应力措施使天峨龙滩特大桥有较大承载能力储备，而且证明了继续增大混凝土拱桥

表8 代表性大跨度SRC拱桥和CFST拱桥主拱重量占上部结构整体重量比例统计

Bridge	Bridge type	Main span (m)	Weight of main arch (t)	Weight of superstructure (t)	Weight of main arch/weight of whole superstructure
Dejiang–Yuqing Highway Wujiang River Bridge	Deck-type CFST arch bridge	475	22 001	38 181	58%
Tian'e Longtan Bridge	Deck-type CFST arch bridge	600	92 000	1 25 000	74%
Yongning Yong River Bridge	Half-through SRC arch bridge	312	13 700	21 600	63%
Daxiaoqing Bridge	Deck-type CFST arch bridge	450	22 300	40 700	55%
Nanning – Kunming High Speed Railway Nanpan River Bridge	Deck-type SRC arch bridge	416	69 200	100 700	69%
Shanghai – Kunming High Speed Railway Beipan River Bridge	Deck-type SRC arch bridge	445	69 500	102 500	68%
Bosideng Bridge	Half-through CFST arch bridge	515	21 810	39 000	56%
Hejiang Yangtze River Highway Bridge	Flying-swallow-type CFST arch bridge	507	29 380	38 500	76%
Pingnan Third Bridge	Half-through CFST arch bridge	560	29 620	50 000	59%
Xining River Bridge	Deck-type SRC arch bridge	510	61 230	97 700	63%
Wanzhou Yangtze River Bridge	Deck-type SRC arch bridge	420	26 300	43 500	60%
Zhaohua Jialing River Bridge	Deck-type SRC arch bridge	364	28 400	50 100	57%
Luzhou–Gulin Highway Shuiluo River Bridge	Deck-type reinforced concrete arch bridge	335	32 100	63 200	51%
Leshan–Xichang Highway Suba Bridge	Deck-type SRC arch bridge	350	33 370	60 700	55%

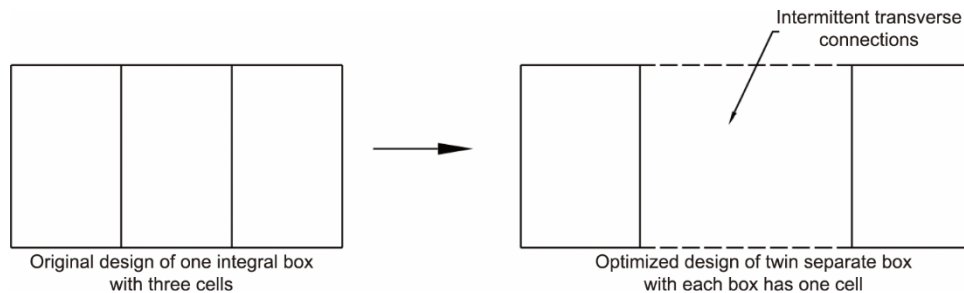


图20. 天峨龙滩特大桥拱圈截面构型优化。

表9 跨径600 m天峨龙滩特大桥与跨径416 m云桂铁路南盘江特大桥拱肋最大压应力对比

Location	Dead load (MPa)		Dead load + live load (MPa)	Standard load combination (MPa)
	Nanpan River Bridge	Tian'e Longtan Bridge	Tian'e Longtan Bridge	Tian'e Longtan Bridge
Bottom plates	-18.0	-17.5	-18.5	-20.7
Webs	-16.0	-13.0	-14.0	-15.8
Top plates	-8.7	-9.2	-10.9	-12.6

跨径的可能性。以上分析表明,对于大跨径劲性骨架混凝土拱桥,拱上立柱和桥道梁采用钢结构,不但提高造价,而且对提高拱圈顶板恒载压应力储备是不利的。

3.6. 拱肋纵向配筋

目前,劲性骨架混凝土拱桥无设计施工行业规范、国家标准,拱圈纵向配筋参照相近规范。天峨龙滩特大桥拱肋外包混凝土强度等级为C60 [21],国内外相近规范规定的全截面纵向最小配筋率为0.6%~1%,但未明确是否包含劲性骨架的纵向弦管[21-25]。中国学者尧国皇等的研究表明:纵向钢筋对劲性骨架混凝土拱圈承载能力及韧性的贡献远小于钢管,甚至小于箍筋[26],因此计算全截面纵向最小配筋率时应考虑劲性骨架的纵向弦管。并且,只要考虑劲性骨架的纵向弦管,绝大多数劲性骨架混凝土拱桥能满足全截面纵向最小配筋率要求,纵向钢筋按构造需要配置即可。

除规定最小配筋率外,国内外规范还提出了近似考虑材料、几何双重非线性计算混凝土拱截面极限承载能力的方法,即按偏心受压柱弯矩与挠度的微分方程计算截面弯矩增大系数。但这些方法均只考虑了验算截面竖向挠度的弯矩增大效应,未考虑水平位移的影响,从而使得计算的弯矩增大系数偏大,且各规范计算弯矩增大系数相差数倍,见表10 [21-25]。即使弯矩增大系数取各规范计算结

果中的较小值3.61,计算的满足天峨龙滩特大桥拱肋截面承载能力所需的纵向钢筋数量仍巨大,远超过去同类桥梁配筋数量,这显然不尽合理。事实上,已有多位学者研究指出混凝土拱肋的弯矩增大效应通常不大。例如,西南交通大学李俊博士在世界上首次开展了模型拱肋弯矩增大系数试验,实测跨径4.5 m模型拱肋的拱脚力矩增大系数仅为1.039 [27];西南交通大学谢幼藩教授研究后也认为拱圈刚度大,无需考虑二次力矩增大[28]。

鉴于现有相关理论的不完善,最终采用李国豪教授《桥梁结构稳定与振动》专著中推荐的公式计算天峨龙滩特大桥关键截面的弯矩增大系数[29],取值1.51,按此弯矩增大系数计算截面承载能力,纵向只需配构造钢筋即可。进一步分析可知,混凝土拱肋截面通常小偏心受压,其截面力学行为与预应力混凝土梁无异,而预应力混凝土梁纵向只配构造筋已成共识。此外,已通车26年的大跨劲性骨架混凝土拱桥——万县长江大桥和邕宁邕江大桥——的纵向配筋水平与天峨龙滩特大桥相当,至今拱圈混凝土无横向裂缝。

因此,笔者认为劲性骨架混凝土拱桥拱圈如处于小偏心受压,劲性骨架弦管能满足规范最小含钢率要求,纵向按构造配筋即可。同时,横向宜加强普通钢筋配置,必要时张拉预应力,以防止混凝土纵向有害裂缝发生。

表10 采用不同设计规范推荐公式计算天峨龙滩特大桥拱肋截面弯矩增大系数结果对比

Sectional force combination case	Checking section	Design specification				
		JTJ 023-85 [22]	GB 50010-2002 [23]	DIN 1045-3 [24]	BS 5400-4 1990 [25]	JTG 3362-2018 [21]
Maximum moment	Arch springing	2.33	2.23	2.22	2.34	2.12
	L/8	8.39	3.15	3.29	4.85	2.97
	L/4	12.82	5.56	4.82	8.30	4.01
	3L/8	7.38	4.19	3.80	6.12	3.66
	Arch crown	3.67	4.43	3.98	6.48	3.87
Maximum axial force	Arch springing	2.24	6.84	5.87	8.59	3.70
	L/8	6.55	4.23	4.22	6.84	3.46
	L/4	7.91	12.62	9.77	19.72	6.76
	3L/8	11.77	10.16	8.12	16.53	6.12
	Arch crown	3.50	8.70	7.32	14.65	5.77

JTJ 023-85: Code for highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts; GB 50010-2002: Code for design of concrete structures; DIN 1045-3: Concrete, reinforced and prestressed concrete structures-part 3: execution of structures; BS 5400-4 1990: Steel, concrete and composite bridges-part 4: code of practice for design of concrete bridges; JTG 3362-2018: Code for highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts.

3.7. 新型拱肋结构形式探索

劲性骨架混凝土拱桥拱桁外包混凝土通常分底板、腹板、顶板三环浇筑,其中腹板混凝土浇筑最难。对于跨径400 m以上的拱桥,腹板混凝土浇筑时间为两月左右,环间混凝土龄期差为两个月左右,存在后浇环混凝土受约束开裂的风险。如取消腹板,顶板环不存在环间约束,与底板环一样,只存在段间混凝土龄期差,一般只有8~10天。此外,若取消腹板,外包混凝土数量可减少1/3,工期可缩短两月。取消腹板造成拱圈竖向刚度、横向刚度减小,这可用其他技术措施解决。由于拱圈处于小偏心受压,剪力小,混凝土腹板用加强腹杆替代是有可能的。

基于以上考虑,笔者的设想是用耐候钢管作腹杆,提出钢腹杆-混凝土顶底板新型组合箱拱结构,见图21。腹杆内可灌注混凝土,也可不灌注,这样与混凝土腹板一样无需养护,一样耐久,拱桁的焊接、栓接接头均埋在顶板、底板混凝土中。目前,笔者团队正对该新型拱结构进行分析计算和试验验证。

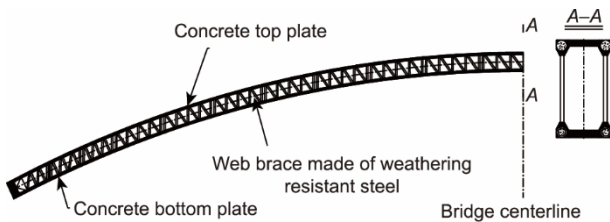


图21. 钢腹杆-混凝土顶底板新型组合箱拱结构示意图。

4. 结语

钢管混凝土拱桥、劲性骨架混凝土拱桥均属广义的劲性骨架混凝土拱桥。前者的劲性骨架是钢管拱桁,后者是钢管混凝土拱桁。平南三桥与天峨龙滩特大桥的实测钢、混凝土应力水平较低,按双重非线性计算的拱圈承载能力安全系数较大,因此,可以推断用现有工法、材料和装备把钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥跨径增大到700 m是可行的。这两座拱桥在建造过程中,实测挠度和钢材应力与考虑施工过程的线弹性理论计算挠度、应力叠加值接近。人们担心的分环施工的劲性骨架混凝土拱桥因环间受约束造成后浇环混凝土开裂的现象,在使用超过26年的万县长江大桥和邕宁邕江大桥中未发现。

跨径相近的平南三桥与天峨龙滩特大桥的技术经济比较如下:①前者刚度是后者的1/2;②拱圈重量是后者的1/3;③拱圈造价是后者的70%;④拱圈工期是后者的1/2;⑤建造拱圈所耗工日比后者少7万。

对这两座桥的比较,也能大概反映两种拱桥分支的特

点。钢管混凝土拱桥拱圈工厂化水平超过85%,实现了施工无模板化,现场用工少,施工方便;劲性骨架混凝土拱桥运营期几乎免维护,耐久性更好,刚度更大。因此,如能在工厂加工大型骨架,又能水运大型骨架,应首选钢管混凝土拱桥。

30多年来中国工程师对建造钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥的科学技术问题进行持久、深入研究和大规模实践,成功解决了关键技术问题和质量瓶颈,降低了风险,提高了经济竞争力,拥有构造、工法、材料、装备的主要发明专利。中国建造的这两类拱桥的数量、跨径远远超过国外,不但为国家节省了大量建桥资金,而且获得国外同行的盛赞。

下一步,对于钢管混凝土拱桥,要研究悬拼节段间栓接不影响焊接的外法兰栓焊连接。该新型连接比内法兰连接可减少2/3的高空焊接作业,还能减少泵送灌注管内混凝土受到的阻碍,此连接结构已被笔者团队发明并成功应用在天峨龙滩特大桥的钢管拱桁骨架中,但尚未应用在钢管混凝土拱桥中。此外,目前已实现管内混凝土膨胀率可设计,但混凝土膨胀引起的混凝土对钢管的预膨胀力太大,对直缝焊管焊缝不利,太小则升温时钢管与混凝土可能脱黏,因此要研究合理的预膨胀力范围。

对于混凝土拱桥,则要继续研究如何减少劲性骨架外包混凝土数量,提高模板、钢筋安装、混凝土浇筑等关键工序的机械化水平,减少用工量。总之,要在工程中寻找课题,不断研究解决办法,才能推动拱桥建造技术更快发展。

致谢

论文写作过程中,广西路桥工程集团有限公司罗小斌、杜海龙、秦大燕工程师,广西交通设计集团有限公司商从晋工程师,四川省公路规划勘察设计研究院有限公司牟廷敏工程师,广西交科集团有限公司王龙林工程师提供了资料、照片,广西大学陈正教授、郭晓工程师提供了写作帮助,广西大学涂兵副教授和重庆交通大学王敏副教授对全文做了校正。论文研究还受到了广西重点研发计划项目(桂科AB22036007)的资助。在此一并表示感谢。

References

- [1] Zheng JL, Wang JJ. Concrete-filled steel tube arch bridges in China. *Engineering* 2018;4(1):143-55.
- [2] 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. *Strategic Study CAE* 2014;16(8):33–37. Chinese.
- [3] Zheng JL. Discussion on technology of suspending and connecting for the RC bridge with an unusual big span. *China J Highw Transp* 1999; 12(1): 42–9. Chinese.
- [4] Chen BC, Yang YL. Investigation and analysis of concrete-filled steel tube arch bridges. *World Bridges* 2006;2:73–7. Chinese.
- [5] 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.
- [6] 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 Transp* 2014;27(6):44–50.
- [7] Liu JP, Zhou DL, Ran QP, Yang Y, Liu JZ, inventors; Jiangsu Sobute New Materials Co. Ltd., Bute Building Materials (Tianjin) Co., Ltd, assignees. A slump-guaranteed polycarboxylic acid-type superplasticizer. China patent CN 102976655B. 2012 Aug 29.
- [8] Cheng Z, Cheng B, Wu CJ, Li KL, Li J, Nong YM, et al., inventors; Guangxi University, assignee. Concrete mix design method based on regulation of pouring construction performance. China patent CN 113910447 B. 2012 Oct 21.
- [9] Liu JP, Wang YJ, Tian Q, Zhang SZ. Temperature sensitivity of light calcined magnesia expansion agent and its mechanism analysis. *J Southwest Univ* 2011; 41(2):359–64. Chinese.
- [10] Liu JP, Xu W, Wang YJ, Yao T, Li M, Tian Q, inventors; Jiangsu Sobute New Materials Co. Ltd., assignee. A specific admixture for self-compacting and non-shrink concrete in concrete-filled steel tubular structures. China patent CN 107200500B. 2019 Dec 27.
- [11] Zheng JL, Zhang Z, Mei GX, Huang DG, Mi DC, inventors; Guangxi University, assignee. Construction method suitable for long-span arch bridge foundation. *Nederland patent NLB 12031612*. 2023 Apr 3.
- [12] Wang TC, Yang JH, Zhang Z, Duan YR, Mei GX. Seismic behavior of arch bridge abutments under sandy-gravel foundations with different grouting depths: insights from shaking table tests. *J Bridge Eng* 2023;28(7):05023003.
- [13] Zheng JL, Deng NC, Wang JJ, Yang ZF, Han Y, Li CX, et al., inventors; Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd, Guangxi University, assignee. A displacement control system and its application method of cable crane tower for arch bridge construction. China patent CN 107620260B. 2018 Jun 1.
- [14] Qin DY, Zheng JL, Du HL, Han Y, Kui LJ. Optimization method and application of for one time tensioning of buckle cables in cable-stayed buckle system. *China Railw Sci* 2020;41(6):52–60. Chinese.
- [15] Qin DY, Du HL, Han Y, Luo XB, Zheng J, Wu GG, et al., inventors; Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd, assignee. An optimized calculation method for cantilever assembly construction of arch bridges. China patent CN 108038326B. 2020 Jul 24.
- [16] Qin DY, Zheng JL, Du HL, Han Y, Luo XB, Wu GG, et al., inventors; Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd, assignee. An efficient method for loosening buckle cables of arch ribs. China Patent CN 111321666B. 2020 October 30.
- [17] Ministry of Housing and Urban-Rural Development, 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.
- [18] Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T D65–06-2015: Specifications for design of highway reinforced concrete-filled steel tubular arch bridges. Chinese standard. Beijing: China Communication Press; 2015. Chinese.
- [19] National Railway Administration of the People's Republic of China. TB 10091-2017: Code for design on steel structure of railway bridge. Chinese standard. Beijing: China Railway Press; 2017. Chinese.
- [20] Japanese Civil Engineering Society. Construction of the Teishicho Bridge-a 600 meter-span long arch bridge. Japanese standard. Tokyo: the Association; 2003. Japanese.
- [21] Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG 3362-2018: Code for highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts. Chinese standard. Beijing: China Communication Press; 2018. Chinese.
- [22] Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTJ 023-85: Code for highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts. Chinese standard. Beijing: China Communication Press; 1985. Chinese.
- [23] Ministry of Housing and Urban-Rural Development, General Administration of Quality Supervision, Inspection, Quarantine of the People's Republic of China. GB 50010-2002: Code for design of concrete structures. Chinese standard. Beijing: China Architecture & Building Press; 2002. Chinese.
- [24] DE-DIN. DIN 1045-3: Concrete, reinforced and prestressed concrete structures-part 3: execution of structures. German standard. Berlin: Beuth Verlag Berlin; 2005. German.
- [25] Civil Engineering and Building Structures Standards Committee. BS5400-4 1990: Steel, concrete and composite bridges-part 4: code of practice for design of concrete bridges. British standard. London: British Standard Institute; 1990.
- [26] Yao GH, Li YJ, Liao FY. Behavior of concrete-filled steel tube reinforced concrete columns subjected to axial compression. *J Build Struct* 2013; 34(5): 114–21. Chinese.
- [27] Li J. The study on moment magnification factor of reinforced concrete arch bridge [dissertation]. Chengdu: Southwest Jiaotong University; 2012.
- [28] Xie YF, Che HM, He GH, Lu HL. Railway reinforced concrete bridge. Beijing: China Railway Press; 1982. Chinese.
- [29] Li GH. Stability and vibration of bridge structures. Beijing: China Railway Press; 1992. Chinese.