



续写千年建桥传奇 打造当代工程经典

# 让中华拱桥技术更好造福世界

郑皆连



作者郑皆连肖像画。

本版画家 张武昌画

桥梁历来是人类跨越江河湖海、高山峡谷的最主要方式。自上世纪50年代，现代桥梁形成了四种基本桥型即梁桥、拱桥、悬索桥、斜拉桥。它们的结构不同，跨越能力和工程造价、施工方式各异。每一座桥梁建设时选择什么样的桥型，必须根据跨越功能的需要、桥位和周边环境的特点而定。

在四种桥型中，拱桥的历史源远流长，受力最为合理，承受的垂直力自动转化为拱圈轴向压力，承载能力强、刚度大、耐久性好。中国古代对世界拱桥建造技术贡献最大，1400年前建成的跨径37米的赵州桥是已知世界第一座敞肩石拱桥，比欧洲出现类似桥型早500多年，至今还屹立在河北省赵县的洨河上，被誉为“世界土木工程里程碑”。

令人遗憾的是，近100年来，中国除在石拱桥方面继续保持世界领先地位外，在混凝土拱桥、钢拱桥方面均落后于西方。1898年，奥地利工程师约瑟夫·米兰发明了劲性骨架混凝土拱桥。1964年，澳大利亚用支架法建成跨径304.8米的混凝土拱桥—格莱兹维尔大桥。1977年，美国建成跨径518米钢桁拱桥—新河谷桥。1980年，南斯拉夫用悬拼法建成跨径390米的钢筋混凝土拱桥—KRK桥。直到1982年，中国才建成跨径156米的丹东沙河河口钢筋混凝土拱桥，跨径与世界纪录相距甚远。

中国工程师奋起直追。1968年，笔者提出了斜拉挂挂松索合拢架设拱肋的方法，解决了建拱桥不搭支架的难题，适合跨径100米左右拱肋悬拼。使用该方法可以大大降低建桥施工费用。据测算，跨径100米左右的拱桥单位造价可以降低到跨径30米的简支梁桥的造价持平。1994年，笔者提出了斜拉挂挂合拢索法，在静态中完成悬臂梁向拱的转化，使悬拼拱桥跨径大幅提高到500米成为可能。1977年，中国工程师张联燕提出了拱桥转体施工工法，为拱桥无支架施工又提供了新途径。在笔者看来，无支架施工是传统拱桥和现代拱桥的分水岭，上述施工方法和工法的创新使中国拱桥建设完成了从传统向现代的跨越，在中国拱桥建设史上具有划时代意义。

得益于施工技术、材料技术、计算技术的进步，拱桥建造风险降低、质量提高，竞争力增强，中国拱桥建造数量迅速增加，跨径获得重大突破。近30年来，中国建成了一系列世界最大跨径拱桥，其中有跨径146米的山西丹河石拱桥，跨径550米的上海卢浦钢箱拱桥，跨径552米的重庆朝天门钢桁拱桥，跨径445米的沪昆高铁北盘江混凝土拱桥，跨径430米的拉林铁路藏木钢管混凝土拱桥，跨径560米的广西平南钢管混凝土拱桥。它们的建成表明，中国在石拱桥、钢拱桥、钢管混凝土拱桥、混凝土拱桥、公路拱桥、铁路拱桥跨径均列世界第一，建造技术已挺进到世界前列。

最近30年，中国拱桥发展最快的分支有两个：钢管混凝土拱桥和劲性骨架混凝土拱桥。



郑皆连主持建设的四川泸州合江长江一桥（二〇一三年建成）是国家高速公路网成渝地区环线控制性工程，跨径五百三十米，是当时最大跨径的钢管混凝土拱桥。图为郑皆连在桥前留影。

钢管混凝土拱桥的拱肋杆件采用钢管混凝土截面，是优良的钢、混凝土组合结构，其中，管内混凝土提高了钢管壁的局部稳定性，而钢管的套箍作用则增强了管内混凝土的韧性和承载能力，也可认为，钢管混凝土拱桥是从钢拱桥发展而来，在受压的拱圈中，用廉价的混凝土取代了部分钢，降低了造价，加快了拱圈形成速度，因此多数情况下，钢管混凝土拱桥必然会替代钢拱桥。

钢管混凝土拱桥源于苏联，该国于1937年和1939年各建成一座该类拱桥。其施工方法是预制将钢管分段灌注混凝土，在满堂支架上拼装成拱，未能使钢管混凝土拱桥的结构优势、施工优势、经济优势发挥出来，以致在此后约80年间，苏联和之后的俄罗斯再也没有建设新的该类拱桥。

钢管混凝土拱桥在中国大放异彩，本土工程师利用自己开发的斜拉挂挂技术、转体技术架设钢管拱肋，真空辅助压力连续灌注管内混凝土，提高钢管混凝土拱桥质量，降低了造价，缩短了工期，增强了竞争力。30年来，各地建成了钢管混凝土拱桥近500座，最大跨径达到560米，创世界各门类拱桥跨径纪录且拥有自主知识产权。在中国，钢管混凝土拱桥建造之多，跨径发展之快在世界拱桥史上都是罕见的。所以我们有充足理由说，具有工程价值的钢管混凝土拱桥是中国工程师开发的。

2013年建成通车的合江长江一桥，是四川泸渝高速公路上的一座钢管混凝土拱桥，跨径530米，为当时国内外各类拱桥跨径之最，也是第一座跨径超过500米的钢管混凝土拱桥。该桥在拱桥、桥道梁施工中开展大型化、装配化、工厂化建造试点，拱桥采用缆索吊运，斜拉挂挂悬拼，合拢后松索工法安装，开发了真空辅助压力多级连续灌注管内混凝土工艺及设备，历时三年成功建成，竣工造价2.6亿元人民币，获第36届国际桥梁大会乔治·理查德森奖、国家科技进步二等奖、中国土木工程詹天佑奖、中国建设工程鲁班奖。

2021年建成通车的合江长江三桥，是一座钢管混凝土系杆拱桥，跨径507米，为同类桥跨径世界之最。该型拱桥比钢拱桥拱圈重，系杆用量增大，但是拱圈用钢量减少一半，其经济优势依然存在。经多方案比较，合江长江三桥最终采用了钢管混凝土系杆拱桥方案。

2020年建成的广西平南三桥，是一座跨越浔江的钢管混凝土拱桥，计算跨径560米，为同类拱桥跨径之最。其建设不仅要成功解决超大跨径难题，而且还必须克服北岸桥台建在卵石层上、南岸桥台建在基岩导致的巨大困难。为此，笔者带领团队经过计算分析和原位试验，反复论证后，推荐北岸桥台采用“地下连续墙+注浆加固的卵石层”复合基础，取得了在16万吨恒载重压下，20个月的卵石地基沉降仅为5.2毫米的世界工程奇迹，完全满足设计要求，为非岩地区建造大跨推力拱桥提供了一个成功范例。

平南三桥还实现了大型化、装配化、工厂化建造，上部结构工厂制造率达85%，整个上部结构施工实现了无模板化。平南三桥拱桥施工中，一侧拱桥分22段，最大节段质量214吨，长、宽、高分别为37.1米、4.2米、13.0米，采用跨度601米、吊重220吨的缆索起重机吊运。平南三桥建设中，中国工程师还研制了大流动性、自密实、膨胀收缩可设计的混凝土材料，使管内C70混凝土灌注密实与钢管结合紧密，突破了钢管混凝土拱桥发展最重要的质量瓶颈；独创以力主动控制代替传统被动控制吊扣塔位移，不但实现了吊扣塔瘦身，塔顶位移从分米级下降到厘米级；独创斜拉扣索一次张拉不调整，每组扣索一次拆除工法，加快了拱桥悬拼速度和质量。

在施工中，技术团队还创新大型桥梁施工管理范式，打造信息化、规范化施工典范工程。把质量、安全放在首位，坚持文明施工，环境保护。建立施工监控指挥中心和混凝土集控中心，集成BIM技术和其他信息化技术，辅以无人机、鹰眼监控系统、深基坑安全监测系统、大体混凝土温控系统、塔机安全监控管理系统等十余个智能施工管理系统，实现了对工程质量、安全、进度、费用全天候、多维度的实时监控。在施工监控指挥中心就能完成所有数据采集和生产调度，平南三桥的施工管理水平受到国内外同行的高度赞扬。

位于广西壮族自治区平南县浔江上的平南三桥是郑皆连团队的经典之作，全长一千零三十五米，主桥跨径五百七十五米。图为平南三桥雄姿。

## 科技名家笔谈

本版携手科学出版社推出

2019年12月8日，以平南三桥为背景成功举办世界大跨度拱桥建设技术大会。在会上，世界拱桥大会永久性学术委员会主席布鲁诺·布利斯拉说：“就平南三桥而言，施工现场整洁且建造技术和管理能力在世界上都是一流的。”

平南三桥已经成为桥梁界的“世界明星”，不仅质量优秀，而且建设周期短至28个月，工程造价低（按桥面面积计算，每平方米造价仅为18152元）。平南三桥的成功进一步增强了中国工程师的信心，根据初步论证，我们认为，建造700米级的钢管混凝土拱桥是现实可行的。

劲性骨架混凝土拱桥是1898年奥地利工程师约瑟夫·米兰发明的。120年来，国外用此法建成的该类拱桥最大跨径240米。最近30年间，我国把劲性骨架混凝土拱桥的跨径提高到445米。

中国工程师对劲性骨架混凝土拱桥的贡献是多方面的，其中包括用钢管混凝土拱桥代替钢拱桥作劲性骨架，用钢量降低50%；开发了分环、多工作面浇注外包混凝土



郑皆连（左一）在平南三桥加工制造现场。

和斜拉索调载技术，能有效地控制瞬时应力及降低永存应力，从而提高了安全性、经济性，推动其高速发展。

1996年建成的广西邕宁邕江大桥是跨径312米的劲性骨架混凝土拱桥，跨径居当时同类世界第一，拱肋分3环浇筑，用3组斜拉索调载，实现了底板混凝土连续浇注，至今也是世界唯一实现一环混凝土连续浇注的劲性骨架混凝土拱桥。技术攻关团队凭借开发的拱桥悬拼技术和斜拉索调载技术世界领先，摘得国家科技进步二等奖。

2016年建成通车的跨径445米的沪昆高铁北盘江劲性骨架混凝土拱桥，是世界最大跨径的混凝土拱桥。跨径416米的云桂高铁南盘江劲性骨架混凝土拱桥，跨径居客、货共线铁路混凝土拱桥之首。两桥在劲性骨架钢材重量仅为外包混凝土重量的1/15情况下，通过系列调载技术，保证了外包混凝土浇注安全，降低了造价。目前，中国已建成9座跨径超过300米的劲性骨架混凝土拱桥，正在建造跨径600米的广西天峨龙滩劲性骨架混凝土拱桥，预计于2023年建成。

多年来，笔者带领大跨拱桥关键技术研究团队矢志不渝推动拱桥科研和工程技术创新，取得了系列重大成就，赢得了诸如全国创新争先奖等殊荣。巨龙飞架，天堑变通途。让我们无比自豪的是，见证并助力一座座雄伟的中华拱桥飞架祖国万里锦绣河山，不仅成为中华民族走向富强的标志性符号，而且为国际桥梁科技进步、提升世界各国交通基础设施建设水平贡献了中国智慧。中国拱桥已经赢得世界声誉，无论是建造技术还是数量，都已挺进到世界前列。

科技进步无止境，科技变革一日千里。中国工程师要奋勇攀登、风雨兼程，把拱桥科技推向新的、更高境界，继续书写中华千年建桥传奇，打造更多当代桥梁经典，更好造福世界。

（作者为多项工程院院士，广西大学土木建筑工程学院教授，首创多项拱桥施工工艺，主持建造了多项创世界纪录的拱桥工程。）

“唱支山歌给党听，我把党来比母亲……”一个冬日的午后，中央民族大学音乐教育民族班大三学生奚溪李以“云课堂”“云支教”的形式给广西壮族自治区河池市都安瑶族自治县高岭镇加全小学的孩子上了一堂音乐启蒙课。

目前，一些乡村学校（教学点）仍存在专业教师缺口，音乐、体育、美术等课程仍难以开全，制约着乡村孩子的全面发展。高岭镇加全村是2015年“感动中国十大人物”之一莫振海的故乡，由于自然条件恶劣，这里曾是广西确定的深度贫困村，到2020年整村才实现脱贫“摘帽”。随着近年来附近几个教学点撤改并，加全小学成了周围几个山区村仅存的教学点，在校学生大部分是“留守儿童”。为了改变现状，加全村第一书记陈燕辉发扬莫振海校长“化缘”办学精神，筹集善款，对加全小学进行全面改造，建成一所集教学楼、振兴图书馆、耕读花园、智能书法室等为一体的公益性的封闭式教学环境，培养塑造学生们自主、自立、自强的进取精神。为了充分激发孩子潜能，促进全面发展，陈燕辉提出了“加全村青苗成长计划”。积极借助有关方面的力量特别是吸引高校大学生参与，让他们在传统文化、音乐、美术、书法、英语等方面通过“云支教”的形式辅导孩子们。

本次“云支教”活动，得到了北京广西文化艺术促进会（以下简称“文促会”）的大力支持。当文促会常务副会长卢天友得知加全小学面临的困难后，积极响应，第一时间组织协调奚溪李参与到此次活动中来。奚溪李生长在广西武鸣，是一位地地道道的壮族姑娘，从小就有“壮乡小百灵鸟”之称，曾参与录制央视音乐频道合唱春晚，多次参与广西在京人士欢庆“壮族三月三”活动。

“文促会是由在京工作的桂籍文艺界人士自愿联合发起成立，旨在致力于京桂两地的文化艺术交流与社会公益。文促会成立以来，通过整合各方面资源，开展了一系列促进京桂文化交流与发展的活动。接下来，我们会与各方共同努力，共同振兴家乡乡村教育。”卢天友表示。

“云支教”吸引很多朋友的关注及参与。这种形式很适合像我们村这样偏远山区里的孩子，让他们也能享受到优质教育资源，获得全面发展的机会。”陈燕辉说。

2022年元旦节后，加全小学已与故宫博物院副研究员、书法家杨频对接好开展“传统文化进课堂”活动，孩子们将通过“云课堂”领略传统文化之美。“我们正继续努力探索，让‘云支教’常态化，成为提升乡村教育水平的核心渠道之一。希望更多的人加入，助力乡村教育振兴。”陈燕辉说。（刘永娜）

## 两轮电动车行业高速发展

本报电 在近日于京举行的“两轮绿色出行高质量发展研讨会”上，中国电子信息产业发展研究院副院长宋显珠表示，两轮电动车已成为中国民众绿色出行的重要方式之一；2020年，中国两轮电动车产量约3000万辆，保有量约为3亿辆；中国已成为全球最大的两轮电动车生产国、销售国和出口国。

宋显珠指出，自1983年永久牌DX-130电动自行车成为中国第一款产业化的电动自行车问世以来，特别是最近10多年来，中国两轮电动车行业快速发展，形成了庞大的规模，成长起来诸如哈啰出行这样的创新企业。这不仅得益于持续快速发展的经济环境、国家支持绿色出行的产业政策和消费政策，而且是科技进步特别是信息科技快速发展的结果。

随着电机、电池技术日益提升，物联网、移动通信、定位、人工智能、大数据、云计算等技术快速渗透，两轮电动车搭载智能化软硬件与数据交互传输系统，具备车辆智能、车控智能以及数据智能，使骑行者能获得更智能、高效、便捷、安全的绿色出行体验。交通运输部发布的《综合运输服务“十四五”发展规划》指出，加快构建绿色运输发展体系，其中提到“十四五”期间，将选择100个左右的城市开展绿色出行行动，力争其中60%以上的城市绿色出行比例达到70%，绿色出行服务满意率不低于80%。两轮电动车出行将有望达成上述目标作出更大贡献。（文心）



2021年以来，山东烟台教育部门把推动“双减”落地与学生兴趣爱好培养相结合，积极构建更加健康的教育生态。

图为在近日举行的烟台市青少年创客沙龙上，一名小学生进行操控无人机越障训练。唐克摄