

# 攻坚克难，建设桥梁强国

郑皆连

## 各类拱桥跨径世界第一

桥梁是跨越河流、山谷等障碍的人工构筑物，拱桥是以受压的拱圈作为主要承重结构的桥梁，具有受力合理、超载能力强、刚度大、耐久性好等优点，是桥梁最主要的分支。

在古代，由于缺乏抗拉性能好的建筑材料，以受压为主的拱桥在所有桥型中竞争优势明显。中国拱桥建造历史悠久，公元605年建成跨径37.02米的赵州桥，在全世界范围内首次发明了敞肩拱，减轻了上部结构自重，改善了拱脚受力，为拱桥增大跨径找到了一条正确路径。公元1192年建成的卢沟桥为十一孔不等跨连续圆弧石拱桥，曾通过400吨平板车，证明了拱桥优越的耐久性和超载能力。

在当代，梁桥、斜拉桥和悬索桥等桥型迅猛发展，在一定程度上挤占了拱桥的应用空间。在此背景下，力学性能优良的拱桥要获得持续发展，必须要解决两大问题：其一，降低施工风险；其二，降低拱桥安装费。

50多年来，笔者团队围绕这两个难题进行了刻苦攻关和大量实践，取得了系列成果。1968年，笔者提出了斜拉扣挂松索合拢架拱助的方法，在国内外首次实现了建拱桥不搭支架，适合跨径100米内拱桥悬拼，且可以大幅降低施工费用。上世纪七八十年代，广西采用该方法建成40余座跨径100米左右的预制悬拼钢筋混凝土箱型拱桥，单位造价与跨径30米的预应力混凝土简支梁桥持平。

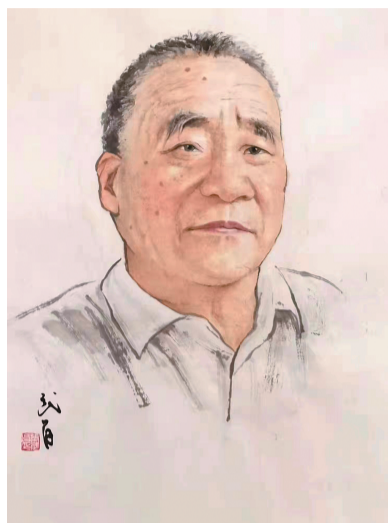
1994年，在建设当时世界最大跨径中承式混凝土拱桥——广西邕宁邕江桥时，笔者提出了斜拉扣挂合拢后松索法，在静态中完成拱桥节段从悬挂结构向拱的体系转换，大大提高了节段悬拼过程的安全性，使悬拼拱桥跨径提高到500米成为可能。在此期间，1977年，中国工程师张联燕提出了拱桥转体施工法，为拱桥无支架施工又提供了新途径。2008年，中国工程师用斜拉索、挂篮悬浇工法首次建成了西攀高速跨径150米钢筋混凝土北沙沟拱桥。上述无支架施工方法的创立，使中国拱桥建设完成了从传统向现代的跨越，在中国拱桥建设史上具有划时代意义。由于拱桥事故多数由支架变形和垮塌导致的，拱桥无支架施工大大降低了施工风险。

无支架施工技术的发展再加上材料、装备的进步，使中国拱桥建造数量迅速增加，跨径获得重大突破。特别是最近30年，伴随着大量建设高速公路、高速铁路带来的需求，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，跨径600米的广西天峨龙滩混凝土拱桥。这些标志着中国各类拱桥跨径均列世界第一，跻身桥梁强国之列。

## 两类拱桥发展最快

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，起源于苏联。该国于1937年和1939年各建成一座，但施工方法是在预制场将钢管分段灌注混凝土，在满堂支架上拼装成拱，未能发挥钢管混凝土拱桥的结构优势、施工优势，从而丧失了经济优势，以致在此后的80余年间，世界再没有用此法建设新的该类拱桥。幸运的是，由于具有良好的技术储备和巨大的工程需求，从上世纪90年代起，钢管混凝土拱桥在中国大放异彩。中国工程师利用自己开发的斜拉扣挂和转体技术架设钢管拱桥，用自



作者郑皆连肖像画。张武昌绘

己研发的真空辅助多级压力连续泵送技术灌注膨胀与收缩可控制的管内混凝土，提高了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，中国建成了钢管混凝土拱桥近500座，其中跨径大于300米的22座，最大跨径达560米。实践证明，钢管混凝土拱桥从跨径100米至近600米均有较大竞争力。与之相比，国外建成的钢管混凝土拱桥最大跨径仅240米。

混凝土拱桥刚度大、耐久性好、结



由郑皆连指导建造的安徽黄山太平湖大桥跨径达330米。图为郑皆连在施工现场。

构材料费用低，但拱助质量是同跨径斜拉桥、悬索桥加劲梁质量的5-10倍，且架设全靠大型临时设施，施工风险大，费用高。对此，1898年，奥地利工程师约瑟夫·米兰发明了施工混凝土拱助的弹性骨架法，即先架设质量约为拱助质量1/10的钢拱骨架，然后在其上挂模浇筑拱助混凝土，促进了世界范围内混凝土拱桥的发展。

中国工程师对推动弹性骨架混凝土拱桥建造技术进步，作出了多方面重要贡献，包括用钢管混凝土拱桥代替钢拱作弹性骨架，用钢量降低50%；开发了分环、多工作面浇筑外包混凝土和斜拉索调载技术，能有效地控制拱助施工时应力及降低永存应力；从而大幅提高了混凝土拱桥的安全性、经济性，推动其高速发展。截至2024年，全世界跨径大于200米的混凝土拱桥有67座，其中弹性骨架混凝土拱桥20座，挂篮悬浇31座；跨径大于300米有20座，其中弹性骨架混凝土拱桥11座，挂篮悬浇5座；跨径大于400米有5座，全是弹性骨架混凝土拱桥；且所有11座跨径大于300米的弹性骨架混凝土拱桥都在中国，最大跨径达600米。而130年来，国外建成弹性骨架混凝土拱桥最大跨径260米。

## 两座拱桥接连刷新世界纪录

近6年来，笔者主持建成了跨径排

名世界第一、第二的拱桥，即天峨龙滩大桥、平南三桥，被公认为是这两种桥型的杰出代表。

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，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、南岸桥台建在基岩上导致的巨大困难。为此，笔者带领团队优化设计，使北台基础几乎处于中心受压，边缘最大应力降到800千帕内。

经对6个卵石注浆模型实验及3块承载板原位加载实验判断，北岸桥台采用“地下连续墙+注水泥浆加固的卵石层”复合基础能满足应力和变形需求，大桥建成后北台在160万千牛恒载重压下、20万千牛水平力作用下，20个月的卵石地基沉降仅为5.2毫米，桥台水平位移3.5毫米，完全满足设计要求。平南三桥的建成，为在非岩地区建造大跨径推力拱桥提供了一个成功范例，扩大了推力拱桥适用范围。

建造过程中，平南三桥实现了上部结构大型化、装配化、工厂化施工，工厂化率达85%；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，715天龄期钢管混凝土超声波速保持在5000米/秒左右，表明管内混凝土不仅没脱粘，还对钢管壁保持一定的压力，突破了阻碍钢管混凝土拱桥发展最重要

的瓶颈；独创以力主动控制方法代替传统刚度被动控制方法控制吊扣塔塔位，不但实现了吊扣塔大幅瘦身，拱桥节段吊运过程中造成的塔顶位移从分米级下降到厘米级。值得一提的是，该技术还应用于世界上最大跨径连拱桥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桥不同步悬拼引起扣索力相差4000千牛导致的偏位问题，大大减小了中间扣塔受力；发明斜拉扣索一次张拉不调索、每组扣索一次拆除工法，加快了拱桥悬拼速度和质量，节省了费用。平南三桥建设期间，零安全事故，质量全优，工期28个月，每平方米造价仅为18152元。中国工程院外籍院士邓文中指出，平南三桥建造技术代表钢管混凝土拱桥最高水平。

天峨龙滩大桥位于广西天峨县境内，跨越龙滩水库库区，水面宽约600米，水深160米，经初步设计比较，混凝土拱桥方案较斜拉桥建安费少1.25亿，100年维护费少4.7亿而胜出。

大桥全长2488.55米，桥宽24.5米，其中主桥为计算跨径600米上承式混凝土双肋拱桥，矢高125米。拱肋采用等宽变高的混凝土箱型截面，拱脚、拱顶箱高分别为12米、8米，宽度均为6.5米；纵向平行设置两肋，肋间距10米，设置13道钢筋混凝土箱型横联；拱肋及横联均采用C60混凝土。采用弹性骨架法施工。

拱肋外包混凝土竖向分为底板、腹板、顶板三环，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泵送，同步浇筑4个工作面，36次完成拱肋外包混凝土浇筑，浇筑过程中，拱桥挠度、应力观测值与按线弹性叠加计算值吻合，最大差值分别为2%、9%。

天峨龙滩特大桥主孔将世界混凝土拱桥跨径世界纪录一次性提高155米，比国外最大跨径混凝土拱桥大210米，建造风险大。主要风险源是在8150吨弹性拱骨架上分36次浇筑质量7万多吨的2.81万立方米外包混凝土，任何一次浇筑都不允许失败，且时程应力和挠度必须控制在限值之内。

围绕这个风险源，笔者团队解决了以下技术难题：一是提出了弹性骨架强约束的合理选择准则，既确保了施工时作为拱架的安全又控制了材料用量；二是通过合理分环和科学设置多工作面同时浇筑，兼顾了结构时程应力抑制和现场施工时效，实现了拱肋外包混凝土的安全、快速施工；三是收缩补偿精细设计和工作性能调控双管齐下，实现了2.81万立方米拱圈外包混凝土不开裂；四是采取综合结构优化措施，使跨径600米混凝土拱桥成桥应力水平与已建成的跨径400米混凝土拱桥持平；五是建立了拱肋纵向配筋优化方法，使纵向配筋减少到原方案的1/16。经43个月施工，大桥于2024年2月1日建成通车，实现了零安全事故，质量全优，不超概算。建成后，大桥还经受了距桥位10千米震中4.4级地震的考验，安然无恙。

进一步研究发现，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，双非线性计算的拱圈承载力安全系数较大。因此，初步推断，用现有工法、材料、装备把两类拱桥跨径增大到700米是可行的。2019年、2023年中国工程院和国际桥梁及结构工程协会以这两桥为参观对象，在中国南宁召开了两次世界大跨径拱桥建造大会，笔者担任大会主席，作主旨报告，大桥建设成就受到与会国内外专家广泛称赞，为国家赢得了声誉。

## 拱桥科创永远在路上

新中国成立75年来，特别是进入新时代以来，中国拱桥建设获得高速发展，到目前为止，世界所有类别拱桥按跨径排序前10名中，中国占8位，还囊括了前6位，且拥有拱桥设计、施工发明专利，是名副其实的世界拱桥第一强国。但我们也必须清醒地意识到，至2022年底，中国建成的113万座桥梁中，拱桥仅占16%，远远未达到这种力学性能最优桥型占比比例。此外，中国在结构计算软件、施工智能化方面与国外还存在差距。

中国著名航天科学家钱学森在其所著的《工程和工程科学》中指出，工程科学家对工程发展的贡献就是在确保工程技术可行前提下，努力做到人力和财力的节省。笔者团队始终遵循这一原则：拱桥经济占优时，我们不畏突破世界跨径纪录；反之我们绝不盲目追求大跨径。中国拱桥工程师将继续秉承这一原则，通过研究与实践，加强国际交流，不断提高拱桥质量，降低造价，继续为中国拱桥建造技术造福世界而奋斗。

(作者郑皆连为著名路桥工程专家、中国工程院院士)

## 科技名家笔谈·75年家国

中国科协科学技术传播中心、陈家康科学奖基金会与本报合作推出



龙滩特大桥建成通车，二〇二四年二月，由郑皆连主持设计的广西天峨大桥计算跨径达六百米。



## 民族体育进校园

近年来，广西梧州将大象拔河、竹竿舞、打陀螺等民族体育项目引进课堂，让学生在享受运动快乐的同时，接受民族团结进步教育。图为近日当地一所小学的学生体验“旱地龙舟”。

新华社记者 黄孝邦摄

感知真实的中国、了解不同民族风情、体验中华优秀传统文化、和同龄人深度交流……金秋九月，一群来自美国的师生在中国之旅中喜迎“丰收”。

近日，应中国人民对外友好协会邀请，由美中青少年学生交流协会组织的美国青少年“青春同行”华盛顿州代表团近百名师生踏上了一场难忘的中国之旅。穿越贵州、四川、山东、北京，代表团的师生们感知不同文化，探寻多彩中国，收获崭新的友谊。

从南到北，美国青少年分批走进中国四地，体验不同的文化与风俗。

在贵州，感受苗寨吊脚楼的独特建筑风格和绚丽多彩的苗族服饰；在四川，欣赏憨态可掬的大熊猫和与之息息相关的竹文化；在山东，感受齐风鲁韵；在北京，参访600余岁的故宫让他们流连忘返。

来自华盛顿州体育场中学的切斯·戈登读过不少与中国相关的书籍，终于踏上北京故宫的他难掩兴奋，一路紧跟导游，连连发问。当得知太和殿前的铜龟、铜鹤腹为空心，放上香料后，烟自它们嘴里吐出，他惊讶地高呼：“这真是古代的高科技！”

“就像是我脑海中的拼图一块块拼上了，书本上那个遥远的中国，终于与我眼前真实的中国连在了一起！”戈登高兴地说。

对并不熟悉中国的克莱顿·谢尔顿而言，每一个新发现都如同打开一个充满惊喜的“盲盒”。在中国大熊猫保护研究中心都江堰基地，一见到大熊猫，谢尔顿就拨通了与家人的视频电话。他将镜头对准熊猫，兴奋地复述着导游的讲解。

“这是我第一次看到真正的大熊猫，它们太可爱了！”谢尔顿告诉记者，这几天他总是迫不及待地想把新学到的知识同远在大洋彼岸的家人们分享。“我现在才知道，竹子除了是大熊猫的食物外，还可以用来编织，这真是太奇妙了。”

有视觉的全新感受，也有味觉的奇妙体验……“终于尝到了真正的中国味道。”华盛顿州西谷高中学生伊莎贝拉·弗格森激动地说，“美国的中餐完全无法与这里相比，四川的辣菜简直让我过足了瘾！”

中国文化的魅力呈现在大江南北的山水之间，也蕴藏在悠悠流淌的历史长河之中。

站在都江堰景区的秦堰楼上，来自华盛顿州福斯高中的伊丽莎白·金特仔仔细细聆听解说，眼前的一切让她深受震撼。“我从未想过，这样一项古老的工程居然至今仍在发挥着重要作用。”金特感慨，人与自然在这里能够和谐共生，“这是真正的伟大成就”。

在贵州学习苗族蜡染技艺，在四川茶艺、制漆扇，在山东领略传统戏曲风采，在北京故宫探寻古建筑之美……一次次的亲密接触，让这群来自大洋彼岸的青少年，对中国的多彩文化和悠久历史有了全新认识。

此次来华参访的美国学生，有不少是美国的印第安人。记者注意到，这些学生对中国的传统文化传承与保护非常感兴趣。在贵州的西江千户苗寨，学生们纷纷拿出手机拍照：“这里就像一个民族博物馆”“不同的民族可以很融洽地生活在一起，这真的很棒”“很难想象中国可以把一个少数民族的文化如此完整地保护下来”……

“中国拥有悠久的历史，众多民族的文化也在这里交织，这次旅程让我有机会触及其中的一小部分。”来自华盛顿州体育场中学的莎拉·凯尔·罗贝格充满期待地说，通过此次行，她对中国的文化和传统产生了浓厚兴趣，她决定回到美国后多学习中国历史。

这是一场文化的交流，更是一场友谊的碰撞。在贵州的乡村、四川的校园、北京的城市篮球场，热爱运动的中美青少年通过一场场篮球赛拉近了彼此的距离。说是比赛，大家似乎都不在意输赢。

林肯中学的崔·科利尔在赛前匆匆找到中国队友，不聊球队战术只为商量如何向观众致敬；美国学生阿德里安·杰斐逊在赛后收藏了中国小伙伴的队服，两人约定着未来再打球……

贵州乡村篮球赛上，作为临时教练的林育中学副校长罗杰克·阿拉-阿门每隔几分钟就要换一批队员上场。“我想让这些积极报名参赛的学生们都有出场机会，感受现场的氛围。”阿拉-阿门说，体育是世界通用的语言，相信这场篮球赛可以让孩子们建立更深厚的友谊。

有激烈的比赛，也有静心的交流。“围棋真是太有意思了！”来自华盛顿州塞拉斯高中的奥特姆·特普翁萨兴奋地分享她第一次下围棋的感受。参访期间，很多美国青少年在中国学生的指导下，逐步掌握了围棋的基本技巧，并从中感受东方的思维方式。

来自北大附中的吴梓萱告诉记者，她事前做足了功课，为的是能巧妙地复杂的围棋规则转化为简洁生动的语言，让美国学生迅速上手。看到美国小伙伴们的喜悦，她的心里也感到暖暖的。

短短一周多的时间，中国这片广袤的土地，打动了一个个远道而来的年轻心灵。互动交流间，中美青少年友谊的种子也在此生根发芽。（新华社记者袁睿、骆飞）

美国师生金秋「丰收」中国行  
探访多彩中国