

近日，位于广西壮族自治区天峨县境内的天峨龙滩特大桥建成并通车，该桥主孔跨径600米，比国外最大混凝土拱桥跨径超出210米，比2016年建成沪昆高铁北盘江桥创造的混凝土拱桥跨径一次性提高了155米，创造了新的世界纪录。不仅如此，与同桥位斜拉桥方案相比，天峨龙滩特大桥刚度更

大、耐久性更好且造价更低。
本报邀请天峨龙滩特大桥总设计师、中国工程院院士郑皆连对该桥设计、建造等情况，特别是创新亮点，进行权威解读。

——编者

中国拱桥 世界跨度

郑皆连



天峨龙滩特大桥雄姿。

广西路桥工程有限公司供图

天峨龙滩特大桥位于广西天峨县境内，是南丹至下老高速公路跨越红水河的一座大桥。该大桥所在河段两岸山岭高耸峻峭，水面宽度约600米，水深160米，年最大水位落差可达45米。

天峨龙滩特大桥全长约2500米，全宽24.5米，双向四车道。其中，主桥为上承式劲性骨架混凝土双肋无铰拱桥，计算跨径600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；拱肋横向平行设置两片，中心间距16.5米，在对应每处拱上立柱位置（40米间隔）的上、下游拱肋间设置一道混凝土箱形横联，全桥共13道，横联顶、底面张拉预应力以提高拱肋的横向稳定性，主拱肋及横联均采用高性能混凝土。主拱肋采用劲性骨架法施工。

每片拱肋的劲性骨架均为四管式钢管混凝土桁架，桁架上、下弦管均为高强度、韧性和耐腐蚀性的钢管。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。拱肋弦管空中接头采用外法兰连接头栓接固定，再管外焊接的形式连接。管内灌注一种自密实微膨胀混凝土。

劲性骨架的钢结构由两列钢管拱肋组成，共重8150吨，在桥位下游6千米的龙滩电站闲置土地建厂制造，形成48个安装单元，采用桅杆吊机吊上船，运至桥位，再采用缆索吊运斜拉扣挂工艺安装，安装单元最大吊重约170吨，并带上了浇注外包混凝土的底模板；拱肋外包混凝土采用分环分段方式浇注，每次由8台压力泵执行混凝土输送，同步浇注4个工作面，36次完成拱肋外包混凝土浇注；桥道梁由预应力混凝土连续刚构及预应力混凝土连续T梁组成。

2023年3月，以施工中的天峨龙滩特大桥为背景，由中国工程院和世界桥梁与结构工程协会联合召开世界大跨径拱桥建造大会，笔者作为会议主席作主旨报告，介绍了天峨龙滩特大桥的设计施工创新，获得国内外专家的高度评价。天峨龙滩特大桥主孔跨径600米，比国外最大混凝土拱桥跨径超出210米，比2016年建成沪昆高铁北盘江桥创造的混凝土拱桥跨径世界纪录一次性提高155米，相当于世界混凝土拱桥跨径100年增长量，与同桥位斜拉桥方案比，刚度大、耐久性更好、几乎零维护，造价还少1.25亿。

2020年，项目业主指定笔者主持大桥设计施工技术工作。虽然笔者曾主持或指导建造了跨径300米级、400米级的劲性骨架混凝土拱桥，但在全世界此前都没有500米级混凝土拱桥建造经验的前提下，建造跨径600米混凝土拱桥存在着巨大风险。天峨龙滩特

大桥2020年6月开工，2024年2月建成通车，近4年来，在参建各方共同努力下，实现了零安全事故、质量全优、造价和工期不超的目标。

恰当选择钢管混凝土 劲性拱骨架强度高

混凝土拱桥拱圈，是在钢管混凝土劲性拱骨架上挂模板浇筑混凝土形成的，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，因此选择恰当强度的劲性拱骨架至关重要。笔者提出，以骨架钢桁质量与外包混凝土质量之比来表征骨架强弱。8座已建成的劲性骨架混凝土拱桥的该比值均在合理区间。

天峨龙滩特大桥拱肋劲性拱骨架钢材重8150吨，外包混凝土2.81万立方米，二者质量之比为1/8.6，其比值较已成劲性骨架混凝土拱桥均大，骨架钢料多用3000吨。即使这样，在灌注管内混凝土及浇注底板混凝土阶段主拱跨中挠度增长值，占外包混凝土浇注完成后总挠度值的60%，在外包混凝土包裹上弦钢管时，相关指标接近容许值。由此可知，钢管混凝土强度的选择是恰当的。

克服浇注外包混凝土过程中产生过大的时程应力

劲性骨架混凝土拱桥拱圈的形成是一个自架设过程。首先，架设钢管混凝土劲性拱骨架；然后，分环浇注外包混凝土，一环混凝土浇注完成获得强度后，与钢管混凝土劲性拱骨架拱肋形成钢-混组合结构，承载能力和刚度得到提高，逐次完成各环混凝土浇注，逐次提高承载能力和刚度，直至完成混凝土拱圈。但值得注意的是，外包混凝土质量达劲性骨架钢管拱肋质量的9—15倍，因此浇注外包混凝土是劲性骨架混凝土拱桥施工最危险的阶段，不但加载重量大，而且加载时间长、加载次数多，每次混凝土浇注一旦失败，就难于补救。采用分环、多工作面、多次浇注，劲性骨架及已获得强度的外包混凝土会产生随时间而变的时程应力，该力有可能会超过材料强度，所以要合理分环、多工作面同时浇注来对其进行控制。外包混凝土浇注完成获得强度后成为受力主体，钢管混凝土劲性拱骨架拱肋埋在混凝土内，增加混凝土拱圈的承载能力和韧性。

天峨龙滩特大桥拱肋外包混凝土



作者郑皆连肖像画。 张武昌绘

2.81万立方米，分3环8个工作面，每次4个工作面同时浇注，共36次完成拱肋外包混凝土浇注。每次浇注外包混凝土800立方米左右，需要7—10小时，由8台泵同时向4个工作面输送混凝土，在此过程中，使时程应力始终处于较低水平。这种控制浇注外包混凝土的时程应力方法由中国工程师发明，并在实践中不断完善、发展。

优化外包混凝土配合比和施工工艺

劲性骨架混凝土拱桥拱圈外包混凝土从浇注到硬化过程中受到劲性骨架的多方向约束，易产生收缩裂缝。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，但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，后期不发生体积变形。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，实时调控混凝土工作性能，保障人模混凝土的稳定性、均匀性。

在施工过程中，应对混凝土内外温湿度进行控制，以减小温差应力、收缩应力，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所有外包混凝土的良好浇注质量及抗裂效果，表面光滑密实无裂缝。另外，对浇注外包混凝土的模板进行了精细化设计、工厂化加工，半机械化安装，实现了国内外外包混凝土浇注最短周期记录，最大限度减少浇注混凝土块间龄期差。由此可见，天峨龙滩特大桥拱肋外包混凝土外掺剂选取及浇注经验有普遍借鉴意义。

根据相关研究和实践 大幅度减少拱肋纵向配筋

现阶段，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的高性能混凝土，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

未明确配筋率计算是否计入劲性骨架的纵向弦管。中国学者党国皇等人研究表明：纵向钢筋对劲性骨架混凝土拱圈截面承载力及韧性的贡献远小于弦管，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。

鉴于现有相关理论不完善，天峨龙滩特大桥最终采用李国豪教授《桥梁结构稳定与振动》一书推荐的公式，计算力矩增大系数并按此力矩增大系数计算截面承载力，得出结论：纵向只需配构造钢筋即可。我们通过进一步分析认识到，混凝土拱肋截面小偏心受压，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年的劲性骨架混凝土拱桥万县长江大桥、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，必要时张拉横向预应力防止混凝土纵向有裂缝发生。

中国拱桥技术和经验 将造福世界

混凝土拱桥拱圈受力极为合理，耐久性好，但是重量大，每米拱圈质量是同跨径斜拉桥、悬索桥加劲梁的5—10倍，且呈曲线形，架设困难，费用高。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，浇注外包混凝土，形成拱圈，国外使用此技术建设的混凝土拱桥最大跨径260米。中国工程师用钢管混凝土拱桥代替钢拱骨架，节省骨架一半用钢量，发明了分环、多工作面、多段浇注混凝土，降低施工中产生的时程应力，降低了建造风险和费用，建造了11座跨径大于300米的劲性骨架混凝土拱桥，包括跨径600米的天峨龙滩特大桥，远远走在世界前列。天峨龙滩特大桥建成后，经过荷载试验静力、动力性能良好，顺利通过交工验收，2月1日正式通车运营。2月15日，天峨县发生4.4级地震，处于震中的天峨龙滩特大桥安然无恙。

最近30年，特别是进入新时代以来，中国桥梁建设取得突飞猛进的发展，建成许多超大跨径世界名桥，得益于中国高速铁路、高速公路大规模建设产生的需求，天峨龙滩特大桥也不例外。天峨龙滩特大桥建成通车，使混凝土拱桥跨径上了一个大台阶，是世界拱桥发展史上的一座里程碑，其技术创新和建造经验将造福世界。

（作者为中国工程院院士、广西大学教授，长期从事拱桥科研和工程技术创新工作，曾获3项国家科技进步奖和茅以升科学技术奖——桥梁大奖、李国豪原创桥梁技术奖等；所主持的大桥项目荣获国际桥梁大会最高奖乔治·理查德森奖、中国土木工程詹天佑奖、中国建设工程鲁班奖等）

卓越工程师风采录

到目前为止，北京是全球唯一一个“双奥”之城。北京城建集团有限责任公司总工程师李久林因为同时担任两届奥运会主要场馆的总工程师，被誉为“双奥总工”。

2003年，35岁的李久林走上国家体育场“鸟巢”工程总工程师的岗位。“鸟巢”不规则的异型建筑，颠覆了传统设计理念，“没有现成的标准，没有可以借鉴的经验，一切只能靠自己摸索。”李久林说。

长轴330米、42000吨的钢结构，给“鸟巢”的柱脚和柱子造成巨大应力，只有采用某种高强度钢才能解决结构的承重问题。但是，当时符合建筑要求的钢材国内没有生产过，依靠国际市场供货也难以实现。

“靠谁都不如靠自己。”凭着“初生牛犊不怕虎”的干劲，李久林带领团队持续攻坚，自主开发出成套焊接技术和工艺参数，将一个个“不可能”变为现实。

“从钢材到施工技术，形成了完整闭环，完全自主可控。”李久林介绍，从“鸟巢”开始，中国一系列地标性建筑都使用了相应的国产钢材，至今已累计生产数百万吨，我国成为这种高强度钢材的生产大国和应用大国。

2018年，李久林就任国家速滑馆“冰丝带”工程总工程师时，似曾相识的难题再次摆在了他的面前：建造场馆的关键材料高钒密闭索，国内没有研发先例。李久林带领团队坚持自主研发，再次突破技术瓶颈，解决了建筑用高钒密闭索长期依赖进口的难题，密闭索价格降低2/3、供货期缩短1/2。

之后，他和团队又攻克超大平面多功能速滑冰场建造技术，以“中国方案”打造了低海拔平原地区“最快的冰”。

谈及“双奥总工”这一殊荣，李久林说：“国家的强大和进步，为我们成长提供了广阔舞台。”

做「双奥总工」 建京华地标

——记北京城建集团有限责任公司总工程师李久林

本报记者 蒋建科



李久林在国家体育场前留影。

新疆2023年科技型中小企业数量同比增长超八成

本报乌鲁木齐电（记者韩立群）近日，记者从新疆维吾尔自治区科学技术厅获悉：截至2023年12月底，新疆科技型中小企业达2256家，同比增长超过80%，涉及电子与信息、生物与医药、新材料、资源与环境、新能源与高效节能等领域。

新疆科技型中小企业数量快速增长，显示了近年来新疆抢抓创新主体梯度培育、推进科技成果转化等方面取得的显著成果。新疆依托高新技术产业开发区、科技企业孵化器、众创空间、星创天地等创新载体，建立科技型中小企业梯度培育发展体系，为企业向科技型中小企业、高新技术企业提升提供专业化、保姆化服务。

同时，新疆有关方面加强与金融机构合作，通过召开银企对接会，积极向各类金融服务机构推送科技项目，向科技型中小企业宣传金融产品，引导企业不断加大研发投入力度。

自治区科技厅高新技术处负责人说，今后，将围绕新疆“八大产业集群”建设，支持更多科技型中小企业承担自治区科技计划任务，引导创新要素向企业聚集；加强科技型中小企业技术开发、技术转让、技术许可、技术服务、技术咨询合同认定登记，提升企业知识产权培育、保护、应用能力；建立联动培育机制，加强宣传引导，吸引更多科技型中小企业入库，为新疆打造区域科技创新高地提供源泉和动力。

安徽省合肥市庐阳区逍遥津街道·元点非遗文化体验馆将传统文化与VR（虚拟现实）技术紧密结合，设置运动VR电竞馆、合肥非遗文化展厅、非遗书院等多个区域，供市民游览体验。图为市民近日在该中心体验VR。赵明摄



科技名家笔谈

中国科协科学技术传播中心与本报合作推出

2月15日，天峨县发生4.4级地震，处于震中的天峨龙滩特大桥安然无恙。广西交科集团有限公司供图