

中国碾压混凝土薄拱坝 发展历程与创新

李春敏

2015.9

一.中国碾压混凝土薄拱坝发展历程

- 中国的碾压混凝土坝起步较晚，但发展很快。从**1979**年开始研究碾压混凝土，做了大量的基础研究，中国第一座**RCC**碾压混凝土坝坑口重力坝于**1986**年**5**月建成，坝高**56.8m**，坝长**122.5m**，碾压混凝土**4.3万m³**；
- 中国第一座碾压混凝土拱坝普定是**1993**年建成，坝高**75.0m**，坝长**195.7m**，厚高比**0.376**，碾压混凝土**12.7万m³**；

坑口碾压混凝土坝（1986建成）



普定碾压混凝土拱坝（1994建成）



- 中国碾压混凝土筑坝技术，经过十年的探索，於九十年代开始研究碾压混凝土薄拱坝筑坝技术；
- (1). 1996年建成世界第一座碾压混凝土薄拱坝-溪柄，溪柄位于福建省龙岩市九龙江西溪支流溪柄溪中游河段上，流域处在亚热带湿润季风区，气候温暖湿润，雨量较多，多年平均气温 18.2°C 。坝址座落在变质石英砂岩上，岩性坚硬，但节理裂隙发育，弱风化岩层深，左岸有顺河向断层，上游坝踵区有陡倾角F2断层横切河床，坝址地形陡峻，为“V”形河谷。

■ 溪柄碾压混凝土薄拱坝（1996建成）



- 该坝体型为同心圆拱坝，无倒坡，但拱下游加贴脚形成双曲拱，最小中心角 19° ，最大中心角 105° ，坝体上游面在高程 595.0m 以下为铅直面，以上有 $1:0.082$ 的坡度，坝体下游面为 $1:0.065$ 的坡度。坝顶高程 644.0m ，坝顶弧长 95.5m ，坝底高程 580.5m ，坝高 63.5m ，坝顶宽 4.0m ，坝底宽 12.0m ，厚高比 0.189 ;

- 在龙岩溪柄坝的研究设计中，首次提出了“温度断裂”理论，认为温度造成的压力和拉力会让坝体开裂，并利用“温度断裂”理论成功设计了人工缝。他们通过温度断裂理论分析，预测坝体的可能开裂位置，并在这些位置做了可以控制的人工缝，通过事先设计好的人工缝，让原本可能开裂的地方止于开裂；

- 在拱坝上游两坝肩**585.0m**高程往上设置有止水的人工折缝，止水以防压力水深入坝体，人工短缝折**45度**转向坝体低应力区，坝体下游面高程**590.0m**至高程**620.0m**之间，在拱冠附近设置三条人工短缝，缝沿径向，高程**610.0m**以下的径向缝深为**2.0m**，**610.0m**以上的径向缝深为**1.5m**；

- 仿真计算表明：人工短缝可释放水压荷载作用下的拉应力，也释放了整体拱上、下游面的温度应力，尤其是拱向应力，具体说就是设置人工短缝后，沿拱坝上游坝肩宏观拉应力大大下降为微压应力，下游拱冠拉应力也大大下降。实测人工短缝开度 $>1.0\text{mm}$ ，止缝槽钢后仅 $37\mu\text{m}$ ，短缝保持稳定；

- 溪柄碾压混凝土薄拱坝是世界上第一座，又在结构上采用人工短缝，创造两项世界第一，开创了我国碾压混凝土薄拱坝新纪元。
- 溪柄碾压混凝土薄拱坝，列入《国际水电及大坝建设》1998年年鉴。

- (2). 2001年建成龙首碾压混凝土薄拱坝
- 龙首 位于甘肃省张掖市境内的黑河干流莺落峡峡口处，坝址以上流域面积 10009km^2 ，流域地处我国西北地区腹地，大陆性气候，夏季严热，雨量稀少，蒸发强烈，冬季严寒，冰冻期达四个月之久。多年平均降水量 171.6mm ，多年平均蒸发量 1378.7mm ，年平均气温 8.5°C ，绝对最高温度 37.2°C ，绝对最低温度 -33.0°C ，最大冻土深 1.5m ；

龙首碾压混凝土薄拱坝(2001建成)

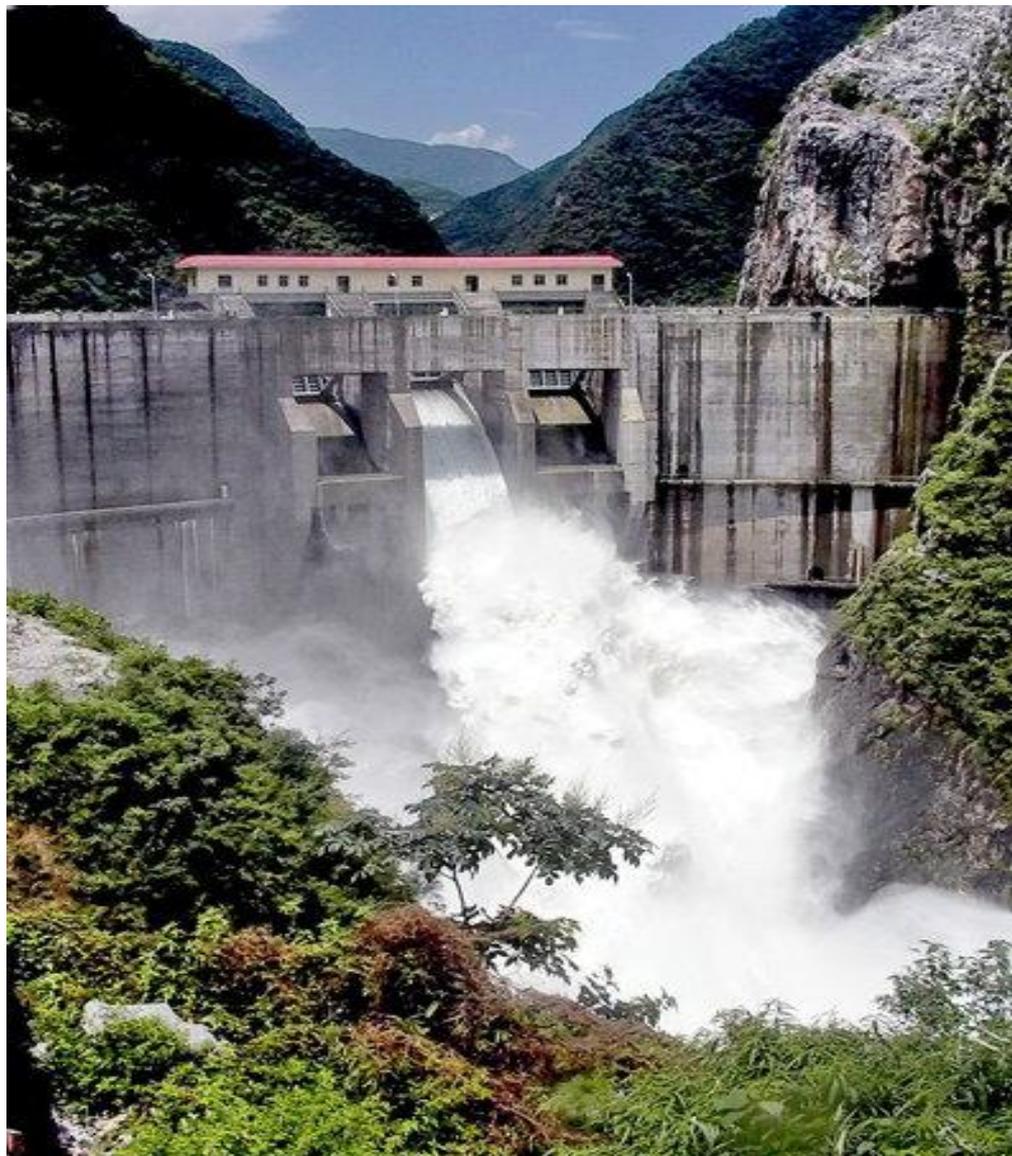


- 龙首碾压混凝土薄拱坝，体型为抛物线变厚双曲薄拱坝，拱冠梁上、下游面曲线为三次抛物线，水平拱圈中心轴为二次抛物线，曲率半径沿高程按三次曲线变化；
- 坝顶高程1751.5m，最大中心角 94.58° ，最小中心角 54.79° ，最大曲率半径54.5m，最小曲率半径32.75m，坝顶最大弧长140.84m，最大坝高80.0m。坝顶宽度5.0—7.0m，坝底宽度13.5m，厚高比0.17，拱冠梁最大倒悬度1:0.08；

- 龙首碾压混凝土薄拱坝，在诸多方面创造世界领先水平。龙首坝坝高80.0m，厚高比0.17，是当时世界最高碾压混凝土薄拱坝；龙首拱坝坝身设两表孔和三中孔是世界开设孔口最多的碾压混凝土薄拱坝；
- 龙首拱坝采用周边缝和诱导缝相结合的新型坝体结构；
- 龙首拱坝是在高寒（ -33.0°C ）、高温（ 37.2°C ）、高蒸发（1378.7mm）和高地震（Ⅷ度）恶劣的外部环境下建成的碾压混凝土高薄拱坝。

- (3). 2006年建成百米级碾压混凝土薄拱坝-招徠河；
- 招徠河位于湖北省长阳县清江左岸一级支流招徠河上，坝址以上流域面积792.0km²，流域地处亚热带季风气候区，暖湿多雨，多年平均降雨量1203.0mm，多年平均气温16.4℃，极端最高气温42.1℃，极端最低气温-12.0℃，多年平均流量16.5m³/s，坝址区岩体主要为奥陶系下统南津关组第二、三段中一厚层灰质白云岩、白云岩及灰岩等，岩石较完整。地震基本烈度为VI度。

招棗河碾压混凝土薄拱坝(2006)



- 招徠河碾压混凝土薄拱坝为同层变厚、变曲率中心的对数螺旋线型双曲拱坝。
- 坝顶高程305.5m，最低建基面高程198.5m，最大坝高107.0m，坝顶宽度6.0m，坝底宽度18.5m，厚高比0.173，坝顶轴弧长198.05m，相应弦长178.2m，最小曲率半径30.72m，最大曲率半径167.85m，拱冠梁最大倒悬度0.22，下游坝面最大倒悬度达0.31。
- 招徠河碾压混凝土双曲薄拱坝建成后，又创一个新的世界纪录。

- (4). 2006年同时又建成碾压混凝土薄拱坝-大花水；
- 花大水位于贵州省开阳县与福泉市交界处，为乌江一级支流清水河的第一个梯级，位于清水河中游；
- 枢纽工程主要由碾压混凝土拱坝、左岸重力墩、坝顶开敞式溢流表空、泄洪兼冲沙中孔、左岸引水系统及地面厂房、开关站等组成。

花水碾压混凝土薄拱坝（2006建成）



- 花大水拦河大坝为抛物线双曲拱坝+左岸重力墩，右岸为双曲拱坝，大坝轴线总长287.56m，最大坝高134.50m，厚高比0.171，是当时世界建成的最高碾压混凝土双曲薄拱坝；
- 坝身设有两个泄洪中孔和三个溢流表孔，在拱坝下游还布置了一个集水井和一个吊物井，坝体设置两条诱导缝，两岸设置周边短缝，拱坝坝身较高且体型结构复杂；

- 在施工中灵活采用了真空溜管、BOX管等多种混凝土入仓方式，既保证了混凝土快速高效地浇筑，也减小了运输过程中对混凝土质量的影响，为类似工程提供了宝贵的经验；
- 大花水水电站大坝施工质量优良，数控质量优良率达到**86%**，外观质量良好，并创造了碾压混凝土连续上升**33.5m**的中国企业施工新纪录。

- (5). 2008年建成世界最高的碾压混凝土薄拱坝-云龙河三级;
- 云龙河三级水电站是清江上游一级支流云龙河梯级开发中的最后一级，主要建筑物有：碾压混凝土三圆心双曲薄拱坝，建基面高程839m，坝顶高程974m，最大坝高135m(含河谷凹槽6m)，拱梁顶厚5.5m，底宽18.1m，厚高比0.134，最大拱端厚度22.12m，碾压混凝土量为17.5万m³；为世界最高、最薄碾压混凝土拱坝之最。

■ 云龙河三级碾压混凝土薄拱坝(2008建成)



■ 二. 发展与创新

- 经过近10年的学习探索，中国碾压混凝土薄拱坝筑坝技术，从设计理论、筑坝材料、薄拱坝体形、施工工艺、施工方法和原观反馈分析等领域都取得丰硕成果及重大突破，已达到世界先进水平，在有些领域已达世界领先水平。

■ 1. 地域分布：

- 中国可在高温、高寒、高震区、潮湿多雨和干燥少雨任何地域修建了碾压混凝土薄拱坝。在炎热多雨的福建龙岩修建了溪柄碾压混凝土薄拱坝，坝高**63.5m**，碾压混凝土**2.5万m³**；
- ;在高温差(**70.2°C**)、高蒸发(**1378.7mm**)和高震区(VIII)的甘肃修建了龙首碾压混凝土薄拱坝，坝高**82m**，碾压混凝土**19.5万m³**；

■ 2.地质地形

- 突破在坝址地质条件较差、地形不对称的河谷修建碾压混凝土薄拱坝禁忌；

■ 3.薄拱坝体形：

- 从单一同心圆拱发展到抛物线变厚双曲拱，又发展到同层变厚、变曲率中心的对数螺旋线型双曲拱；从拱冠下游坝面垂直发展到最大倒悬度**0.31**；

■ 4.坝体结构：

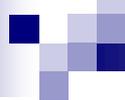
- 在高碾压混凝土薄拱坝应力和承载能力计算分析方面，普遍采用非线性有限元法计算；

- 在高碾压混凝土薄拱坝采用的整体三维有限元分析方法，它能较好地模拟复杂的地基条件，合理地考虑拱坝整体刚度与地基的相互作用；
- 采用仿真设计高碾压混凝土拱坝，考虑主要荷载的连续增加过程，应力性质的改变(如应力集中点韧性改变)，参数的正确性等又是一例创新；

- 在渗流分析和防渗结构研究中，提出了非均质成层材料单元、缝面薄层单元及无厚度二维缝面单元模型，解决了碾压混凝土成层结构体渗流数值分析的数学模型；在计算方法上，提出同时解得渗流场和高精度渗流量的“结点四自由度变分法”形成碾压混凝土渗流计算成套技术；

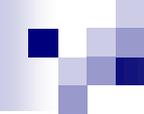
- 为解决大仓面内外温差的约束，运行期温降带来整体拱坝温度初应力，在溪柄碾压混凝土薄拱坝设计中，采用在碾压混凝土拱坝上游坝肩拉力区设置人工应力释放缝、在拱冠下游拉力区设置人工径向短缝，以释放水压及温度拉应力，并在缝端组合应力断裂区设置止裂结构以防裂缝延伸。

- 4. 施工工艺:
- 复杂体形碾压混凝土拱坝薄拱坝自升、翻转滑模技术获重大突破;
- 改进的负压溜槽、百米级真空溜管管带技术, 解决了V形河谷建高碾压混凝土薄拱坝施工难题;
- 创造碾压混凝土薄拱坝连续上升33.5m的纪录。



■ 参阅文献：

- 1.李春敏水利水电技术2001年11期文章
- 2.李春敏谢2012年9期水利水电技术文章.
- 3.田育功碾压混凝土快速筑坝技术010年
- 4.清华大学-碾压混凝土薄拱坝新结构研究
2002年
- 5.中国百米级碾压混凝土坝-工程图集2006
年
- 6.中国碾压混凝土筑坝技术2008年



谢谢!

李春敏

2015.9