

THE HYDRAULIC STRUCTURE
DESIGN SERIES
DESIGN OF ARCH DAMS

水工建筑物设计丛书
潘家铮主编

拱 坝

黎展眉 编著

水利电力出版社

内 容 提 要

本书由绪论、基本资料、坝体布置及断面初选、基础变位计算、拱圈计算和纯拱法、拱冠梁法、试载法、分析拱坝的有限单元法、其他应力分析方法、温度荷载和温度应力计算、抗震设计、坝头稳定分析、拱坝优化设计等十三章组成。

本书首先扼要阐述了拱坝拱圈形式、坝体类型及其布置和断面选择等要求；然后介绍了对拱坝的各种设计计算方法，从传统的设计计算到利用有限元和优化设计，都作了详细地叙述和分析比较；最后还着重叙述了拱坝温度应力、抗震设计和坝头稳定设计，并提出了各种解算和分析方法。

本书文字精炼、内容新颖，附有图表，可供广大水利水电设计人员工作参考，也可供大专院校有关专业师生阅读。

水工建筑物设计丛书 潘家铮主编

拱 坝

黎展眉 编著

*

水利电力出版社出版

(北京前门外大街66号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本12.875印张 341千字

1982年12月第一版 1982年12月北京第一次印刷

印数 0001—6110册 定价 1.35元

书号 15143·5014

目 录

序 言

第一章 绪论	1
第一节 拱坝的结构特点	1
第二节 国内外拱坝发展概况与趋向	2
第二章 基本资料	15
第一节 筑坝材料及其物理力学指标	15
第二节 作用荷载及其组合	20
第三节 允许应力及安全系数	28
第三章 坝体布置及断面初选	34
第一节 拱圈形式	34
第二节 坝体类型	38
第三节 坝体布置	47
第四节 断面初选	52
第四章 基础变位计算	57
第一节 基础变位的种类及基本算式	57
第二节 拱座和梁基的变位	68
第五章 拱圈计算和纯拱法	77
第一节 计算弹性拱的基本理论	77
第二节 等截面圆拱的计算	88
第三节 变截面拱圈的计算	94
第六章 拱冠梁法	100
第一节 简易试载法	101
第二节 导数解法	124
第七章 试载法	138
第一节 概论	138

第二节	试载法的解算步骤	143
第三节	应力计算	156
第四节	几个问题的讨论	168
第五节	试载法电算成果举例及与拱冠梁法比较	176
第八章	分析拱坝的有限单元法	185
第一节	一维有限单元法	185
第二节	壳体有限单元	192
第三节	三维有限单元	195
第四节	拱坝孔口应力	197
第九章	其他应力分析方法	202
第一节	网格法	202
第二节	格栅法	206
第三节	内力平衡分载法	207
第十章	温度荷载和温度应力计算	212
第一节	拱坝温度荷载理论解	213
第二节	拱坝温度荷载数值解	227
第三节	拱坝温度应力计算	231
第十一章	抗震设计	231
第一节	概论	231
第二节	拟静力法	236
第三节	动力分析	247
第四节	反应谱法	255
第五节	拱坝抗震设计中的一些经验	264
第十二章	坝头稳定分析	269
第一节	概述	269
第二节	刚体极限平衡分析法	275
第三节	赤平投影分析	291
第四节	更复杂情况的分析	305
第五节	抗滑稳定分析中应注意的问题	306
第十三章	拱坝优化设计	309
第一节	拱坝有关参数的数学描述	309

第二节	拱坝优化方法·····	314
附录 1	等截面圆拱内力系数及拱冠径向变位系数表·····	325
附录 2	变截面圆拱内力系数及拱冠径向变位系数表·····	363
附录 3	等截面圆拱承受地震时的内力系数表·····	396

第一章 绪 论

第一节 拱坝的结构特点

拱坝为主要的坝型之一，它的外荷载主要是通过拱的作用传递到坝端两岸，坝体应力状态以受压为主，这一特性能适应坝体材料（混凝土或砌石）抗压强度高的特点，使材料的强度较能充分发挥，从而节省工料。

既然拱坝的荷载主要是通过拱的作用传到坝端两岸，所以拱坝的稳定性主要依靠坝端两岸岩体维持，而不像重力坝主要靠自重维持。因此拱坝体积一般较重力坝小得多，在坝址、坝高条件相同的情况下，拱坝体积可为重力坝的 $1/1.5 \sim 1/5$ 。一般来讲，拱的作用越强，坝身体积也就越小。当然，拱坝的经济性和稳定性是对坝体能充分发挥拱的作用及两岸基岩稳定可靠而言的。为此，对坝的体型和坝基地质地形条件就有所要求。一般适应河谷形状的双曲体型是较优的拱坝体型；狭窄河谷、基岩坚硬完整、具有厚实的坝头是优良的拱坝坝址。但是，客观条件往往不十分理想，这时便须采取相应的地基处理及结构措施，使其满足设计要求。随着近代拱坝建筑及地基处理技术的发展，对拱坝坝址条件的要求已逐渐放宽。

由于拱坝的体型特点和工作原理与重力坝不同，所以在拱坝中渗透压力与重力等作用荷载的影响要比在重力坝中小，而温度变化及坝体混凝土收缩则上升为主要荷载之一。

拱坝属高次超静定的空间壳体结构，它的承载能力是相

当强的。拱坝超载后，坝体应力可以自行调整，只要坝头稳定可靠，坝体的安全裕度一般较大。国内外拱坝结构模型破坏试验表明，混凝土拱坝所能承担超荷载的能力，可以达到设计荷载的5~11倍。据国内外资料，除个别工程（如法国马尔巴塞拱坝）因坝头失稳引起失事外，拱坝本身破坏的事例极少。

由上可知，拱坝不仅是经济性与安全性都比较优越的一种坝型，而且随着拱坝建筑和地基处理技术的发展，使这一坝型的适应性逐渐扩大，成为近代刚性材料坝中比较先进的坝型之一。

第二节 国内外拱坝发展概况与趋向

人类修建拱坝具有悠久的历史。早在一、两千年以前，人们已意识到拱结构有较强的拦蓄水流的能力，开始修建高十余米的圆筒形圉工拱坝。十三世纪末，伊朗修建了一座高约60米的砌石拱坝。到二十世纪初，美国开始修建较高的拱坝，如1910年建成的巴菲罗比尔拱坝，高99米。这一时期坝的应力分析方法，已由简单的圆筒公式发展为开始考虑中央悬臂梁的作用。到第一次世界大战以前，国外坝高15米以上的拱坝大约有40座。

第一次世界大战以后，拱坝逐渐被引进欧洲。1920年建成的瑞士蒙特萨文斯拱坝，采用了坝体竖向弯曲、水平拱为悬链曲线的变截面体形。1939年意大利建成坝高76.8米、设置垫座及边缘缝的奥西尔埃塔双曲薄拱坝。1923~1935年美国提出考虑切向变位与水平扭转变位的新概念，即为以后试载法的基础，并于1936年建成第一座坝高超过200米的鲍尔

德重力拱坝。

第二次世界大战以后，拱坝有了进一步发展，修建数量显著增加。如意大利在1955~1960年间，所建拱坝有90余座。法国五十年代所建的32座混凝土坝中，拱坝占26座。葡萄牙在这期间所建的坝，基本上为拱坝。这一时期修建的拱坝中，有不少为双曲薄拱坝。如意大利1960年所建瓦扬特拱坝，为一座高265.5米的双曲薄拱坝。五十年代中，西欧各国拱坝分析方法，除少数采用试载法外，多数用纯拱法或拱冠梁法，并主要通过结构模型试验来验证。

六十年代美国及欧洲某些国家修建拱坝较多，这一时期所建的较高的拱坝普遍采用双曲体型，如美国1968年建成的坝高185米的莫西罗克拱坝。目前世界上最高的拱坝为六十年代修建的，高达271.5米的苏联英古里双曲拱坝。

六十年代以后，国外拱坝技术发展迅速，主要表现在以下几方面：

(一) 结构形式多样 高而薄的双曲拱坝数量增加，工程难度增大。水平拱型式发展为多心拱、椭圆拱、抛物线拱和对数螺旋线拱。在宽河谷坝址，采用往两岸曲率减小的水平拱形状，可以节省坝体工程量及增强坝头稳定性。意大利、瑞士、美、苏、日、西班牙、葡萄牙等国多采用双曲坝型，且有不少坝高超过一、二百米的，其中意大利尤喜采用结构轻巧、设置周边缝的双曲拱坝。法国所建拱坝，水平拱多采用对数螺旋线形，拱端推力方向易于调整，坝体轮廓平顺，计算公式简单。瑞士则多采用抛物线形，认为拱端与地面的交角有利，可减小弯矩，计算也方便。日本、美国也多采用非圆弧拱，如三心拱、抛物线形拱等。美国认为当河谷宽高比 >2.5 时，采用三心拱可比一般圆拱减小径向变位和应力，

节省工程量。美国还研究了空心拱坝、预应力拱坝等结构，以进一步减少坝体工程量。

国外某些拱坝的主要参数如表1-1所示。

(二) 重视地基处理 如意大利认为即使坝址地质条件较差，在通过地基处理来改善坝基后修建拱坝，往往仍是较经济的。法国对于坝基灌浆与排水特别重视，帷幕孔深一般要求0.5~0.8倍水头，灌浆压力40~60公斤/厘米²。瑞士也重视坝基帷幕灌浆与固结灌浆，如莫瓦桑拱坝总灌浆孔数量达7.6万米，灌浆幕面积为28.2万平米。西班牙双曲拱坝也很重视坝基灌浆、排水及锚固。日本一些拱坝修建在复杂地基上，其地基处理工作也是相当复杂和庞大的，如川俣、黑部川第四等坝。目前国外对于拱坝地基中的缺陷，倾向于通过适宜的地基处理措施（如灌浆、锚固、混凝土塞等）予以改善，以取代过去常采用的大量挖除的手段。

(三) 坝址地质地形条件放宽 过去认为在宽河谷及坝基地质条件较差的坝址，不宜修建拱坝。目前条件有所放宽，已能解决在较宽（宽高比大于5的）河谷修建高拱坝的问题，如南非罗克斯拱坝，高109米，宽高比为7。又如法国设计的南非亨德列·维尔沃特拱坝，高90米，河谷宽900米，宽高比达10。美国认为当坝址地质条件适合时，即使在不对称或其他不规则河谷中，宽高比达10~12时仍可考虑修建拱坝。瑞士在宽而不对称的河谷中修建了一些拱坝。日本在地震烈度较高、地质较复杂的坝址修建了高拱坝，如高186米的黑部川第四拱坝、高155米的奈川渡拱坝。这些坝址区基岩断裂都较发育，前者坝区设计地震烈度且达10度。墨西哥的苏勒达特双曲拱坝，高91.5米，坝基岩性较软且不均匀，其弹模仅为坝体混凝土弹模的1/2~1/8，当然，上面所说的对拱

表 1-1 国外某些拱坝

坝名	国别	坝型	坝高 (米)	顶厚 (米)	底厚 (米)	厚高比	坝址地质	修建年份	备 注
英 古 里	苏 联	双曲多心	271.5	10	50~90	0.33	石灰岩	1965~1982	1978年发电
瓦 扬 特	意 大 利	双曲薄拱	265.5	4	23	0.087	石灰岩、白云岩	1956~1960	水库于1962年因库岸崩塌，淤满而报废，但坝仍完好
美 瓦 桑	瑞 士	双 曲	237	14	53.5	0.232	片 岩 (砂岩、页岩)	1951~1957	
契 瓦 尔	苏 联	双 曲	233	6	30~82	0.352	石灰岩	1963~1976	
康 特 拉	瑞 士	双 曲 (椭圆拱)	220	7	25	0.11	片麻岩 (页岩、云母岩)	1961~1965	
鲍尔德(胡佛)	美 国	重力拱坝	222	13.7	20.2	0.9	安山岩、角砾岩	1930~1936	库容 386 亿立方米
姆 拉 丁 其	南斯拉夫	双曲三心	220	4.5	22	0.1	石灰岩	1968~1973	
格 兰 峡	美 国	重力拱坝	216	10	91.5	0.42	砂 岩	1956~1963	库容 346 亿立方米
柳 松 斯	瑞 士	双 曲	208	10	35	0.17	片麻岩	1958~1963	
罗 巴 列 维 (迪兹)	美 国	双 曲	202	10	95	0.47	花岗岩、片麻岩	1937~1949 (第一期)	
阿尔曼德拉	伊 朗	双 曲	203	4.5	21	0.10	砾岩	1956~1963	
	西 班 牙	双曲三心	203	10	27	0.13		1965~1971	

续表

坝名	国别	坝型	坝高 (米)	坝顶 (米)	底厚 (米)	坝高比	坝址地质	修建年份	备 注
马塔	奥地利	双曲	200	8	41	0.2	片麻岩	1974~1978	
卡里	赞比亚	双曲	128		30	0.234		1960年发电	库容1600 亿立方米
卡博拉巴	赞比亚	双曲	163.5		23	0.111		1978年建成	库容>500 亿立方米
萨舒申	莫三鼻给	重力拱坝	242		114	0.471		1978年发电	库容313 亿立方米
戈尔	苏联	双曲	140		18	0.129		1978年建成	库容140 亿立方米
普蓬	澳大利亚		154		52	0.338		1964年建成	库容122 亿立方米
托拉	法国		90	1.5	拱冠2.43 拱座4.2			1961年建成	1961年蓄水 后岸边坝体出 现裂缝,后加 固
莫西罗	美国		185		18	0.09			河谷宽高比 12.1、坝高比 12.1
穆瓦林·里保	法国		13.8						
亨德列·维尔沃特	南非	双曲	90					1971年建成	河谷宽高比 10、法国设计
罗克斯	南非		109					1968年建成	河谷宽高比 7、法国设计

注 本表主要摘自文献 [1]。

坝址地质地形条件的放宽，是与坝体设计、施工及地基处理技术水平的提高分不开的。

(四) 应力分析方法改进 过去多用试载法分析拱坝应力，现在已用电算取代手算。同时广泛应用有限元法，除分析坝体应力外，还可用于分析坝基应力、孔口应力、温度变化影响等。

(五) 提高允许应力 根据近年来各国对拱坝设计的实践，有提高拱坝的允许应力的趋势。如意大利允许压应力一般达70~80公斤/厘米²，允许拉应力达8~10公斤/厘米²；法国最大允许压应力已达100公斤/厘米²；日本黑部川第四拱坝，允许压应力为90公斤/厘米²，考虑地震时，可提高到105公斤/厘米²；美国拱坝设计允许压应力一般为70~80公斤/厘米²，安全系数取值，正常荷载组合下可为3，考虑地震时可用到2。1966年建成的美国黄尾双曲拱坝，坝高159米，考虑地震时，计算最大压应力为134公斤/厘米²，拉应力为44公斤/厘米²。允许应力的提高充分反映了拱坝建设经验的积累及筑坝技术水平的提高，这也是国外一些高而薄的拱坝以及地震烈度较高的地区之所以能修建高拱坝的主要原因之一。

(六) 拱坝的抗震设计 以前一般采用静力法分析，由于近代电算技术的发展及有限元法的广泛应用，某些拱坝逐渐采用动力分析方法。

(七) 坝身大孔口泄洪 不少薄拱坝坝身设大孔口宣泄大流量。如赞比亚和罗得西亚的卡里巴拱坝，高128米，厚30米，坝身设6个9×9米²的孔口，泄洪量达一万秒立米。莫三鼻给高163.5米的卡博拉巴萨双曲拱坝，厚23米，坝身设8个6×7.8米²的孔口，泄洪量达1.3万秒立米。日本拱

坝也注意利用坝身泄洪，如殿山拱坝，高64.5米，坝身开6个 $10.5 \times 8.2 \sim 5.2 \times 6$ 米²的大孔口，另设6孔表面溢流。而美国也认为通过拱坝坝身泄洪较经济，但当泄洪量很大时，应考虑其他方式。

(八) 厂坝结合的泄洪方式 对于河谷狭窄、泄量较大的坝址，采用厂坝结合的枢纽布置，结构紧凑，经济可靠。如葡萄牙、法国建于狭窄河谷的拱坝，多采用这种方式，利用坝顶及厂房顶形成滑雪式泄洪道。苏联建于大河流上的双曲拱坝，也注意采用这种布置方式，认为经济、简单。

(九) 拱坝布置选型方面 优化设计的研究有所发展。

(十) 拱坝模型试验及原型观测方面 如进行大比例尺模型试验、在原型上取得坝体振动参数等。

(十一) 施工方面 采用现代化的机械化施工技术，大大加快了拱坝施工进度。为提高坝体质量，有的采用干硬性混凝土，如意大利、法国等地。法国拱坝多建于严寒地区，对混凝土的耐久性要求较高。美国拱坝坝体不设纵缝，坝块最大长度有达55米者。前述拱坝发展中的某些特点，如结构形式多样、提高允许应力等方面，是与拱坝施工技术的进步分不开的。

我国修建拱坝也有悠久历史。本世纪三十年代，四川就建有一批小型砌石溢流拱坝。1927年福建厦门所建上里浆砌块石拱坝，高27.3米，迄今运用正常。在五十、六十年代，我国开始修建了一批混凝土拱坝，如1958年建成的响洪甸重力拱坝及流溪河溢流拱坝，坝高分别为86.5及78米。七十年代以来，我国拱坝建设有了新的发展。一方面继续修建了一批大中型混凝土拱坝，如1973年建成的陕西石门双曲拱坝，坝高88米，1974年建成的广东泉水双曲薄拱坝，坝高80米。

近年建成的湖南凤滩空腹重力拱坝，坝高 112.5 米。1970 年建成的湖南欧阳海双曲拱坝，坝高 58 米，开设大孔口泄洪（孔口面积 80.5 米^2 ），取得成功。贵州猫跳河梯级中先后（在六十、七十年代）建成的三座中型拱坝，因地制宜，体型多样。三级修文水电站单曲拱坝采用厂房顶溢流的型式；四级窄巷口水电站为避免复盖层开挖，采用溢流双拱坝型式；六级红岩水电站采用双曲薄拱坝中孔泄洪型式。另一方面，七十年代中遍布十余省的中小型砌石拱坝迅速发展。据十六个省不完全统计，坝高 15 米以上的砌石拱坝修建座数，五十年代为 21 座（在这之前仅 2 座），六十年代为 112 座，七十年代猛增到 621 座。前后三十年修建数之比为 $1 : 5.3 : 29.6$ 。七十年代以来砌石拱坝的发展趋向也与国外情况类似，如坝的体型多样（有单曲、双曲、变截面拱、设周边缝拱坝等）、允许应力的提高、坝身增高、坝体渐薄、建坝条件有所放宽等方面。目前国内最高的砌石拱坝，为 1971 年建成的河南省的群英重力拱坝，高 101.3 米。国内不少中型砌石拱坝采用细石混凝土作胶结材料，提高了砌体的整体性和强度，体型上多采用双曲拱坝，有利于发挥坝体材料的抗压强度，使结构趋向轻型化。如 1972 年建成的浙江桐坑溪双曲拱坝，坝高 48 米，底厚 5 米，厚高比仅 0.104。另外，有的地方修建了设置周边缝的薄的小拱坝，如安徽寨西拱坝，坝身为浆砌块石，单曲溢流，于 1972 年建成。该坝高 15.9 米，厚高比 0.075。目前已建较高的周边缝砌石拱坝有广西天生桥拱坝（最大坝高 31.63 米，底缝以上坝高 25.8 米）及白云江拱坝（最大坝高 35.1 米，底缝以上坝高 23.1 米）。我国砌石拱坝能在不很长的时期内得到如此广泛的发展，究其原因主要有两方面：一方面是拱坝所具有的安全性和经济性强的优点在中小工程中显

得更为突出；另一方面，是砌石拱坝同样具有其他当地材料坝的优点，如就地取材，施工简易，温控问题相对易于解决（与混凝土坝相比）等。当然，砌石拱坝在发展过程中也出现一些问题有待今后研究解决，如防渗防裂问题，允许应力的合理确定以及砌体的非均质性对结构的影响等。

目前我国大型水电工程，正在修建混凝土高拱坝，其中包括重力拱坝和较薄的双曲拱坝。如正在修建的白山重力拱坝，高 149.5 米，水平拱圈采用三心圆拱。东江双曲拱坝，高 157 米。龙羊峡重力拱坝，高 175 米。地方兴建的中小型砌石拱坝仍在持续发展，其中包括规模渐大的中型工程。我们相信，通过这些工程的修建，我国拱坝技术必将发展到新的阶段。

国内若干混凝土拱坝情况如表 1-2 所示，砌石拱坝情况如表 1-3 所示。

表 1-2 国内若干混凝土拱坝

坝名	地点	坝型	坝高 (米)	坝顶长 (米)	顶厚 (米)	底厚 (米)	厚高比	坝址地质	建成年份	备 注
大成	台湾	双曲周边缝	181	290	4	20	0.111	石英岩、页岩	1974	
龙羊峡	青海	重力拱坝	175					花岗岩	施工中	
东江	湖南	双 曲	157	438	9	35	0.223	花岗岩	施工中	两岸滑雪道
白山	吉林	重力拱坝	149.5	670	9	64	0.428	变质岩	施工中	
风滩	湖南	空腹重力拱坝	112.5	488	6	65.5	0.582	砂岩	施工中	坝顶溢流
石门	陕西	双 曲	88	260	5	27	0.307	石英岩、片岩	1973	坝身孔口泄洪
响洪甸	安徽	重力拱坝	86.5	361	5	43	0.497	正长岩、凝灰岩	1958	
泉水	广东	双曲薄拱坝	80	210	3	9	0.113	花岗岩	1974	两岸滑雪道
流溪河	广东	双 曲	78	255	2	22	0.282	花岗岩	1958	坝顶泄洪
陈村	安徽	重力拱坝	75	419	8	53	0.707	砂岩、页岩	1972	
雅溪	浙江	双 曲	75	180	3.5	25.9	0.345	凝灰岩	1977	左岸重力墩、右岸推力墩

续表

坝名	地点	坝型	坝高 (米)	坝顶长 (米)	顶厚 (米)	底厚 (米)	宽高比	坝址地质	建成年份	备 注
里石门	浙江	双 曲	74.3	265.5	4	15.5	0.208	凝灰岩	1977	
恒 山	山西	双 曲	68.7	150	2.5	15	0.218	灰岩	1961	
红 岩	贵州	双 曲	60	133	3	9	0.150	白云岩	1974	孔口泄洪
大水峪	河北		59	216	4	18	0.305	花岗岩	1972	
苇子水	河北	双 曲	58.5	130	3.4	13.4	0.229		已成	
关门山	辽宁		58.1	207	3	18	0.310	安山岩	施工中	
欧阳海	湖南	双 曲	58	243	3.3	13.9	0.240	花岗岩	1970	孔口泄洪
窄巷子	贵州	双 曲	54.8	152	3	8.7	0.159	石灰岩	1970	双拱坝, 以基础拱桥跨过河床
丰 乐	安徽	双 曲	54	207	2.5	12.5	0.232	砂岩、页岩	1976	
修 文	贵州	单 曲	49	111	3	10.8~16	0.22	白云岩	1961	厂房顶溢流

注: 本表主要摘自文献[1]。