

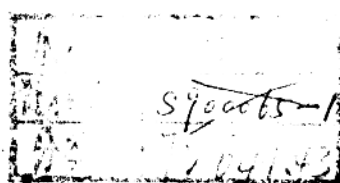
混凝土面板堆石坝会议论文集

Proceedings of the Conference on Concrete Face Rockfill Dams

中国水利学会施工专业委员会面板堆石坝学组 编
长江葛洲坝工程局施工科学研究所

107

河海大学出版社



006868 水利部信息中心

混凝土面板堆石坝会议论文集

Proceedings of the Conference
on Concrete Face Rockfill Dams

名誉主编

纪云生 蒋国滂

主 编

司洪洋 金诚和

编 委 (以姓氏笔划为序)

凤家骥	卢立生	司洪洋	孙永娟	孙玉琳	孙学勇	许红波
阮以弘	李 新	李允中	李良福	李春敏	陈宗梁	邴凤山
杨荫华	杨毓泰	金诚和	查一民	洪重光	徐法根	聂容亮
韩正海	童达林	傅志安	蒋颂涛			

河 海 大 学 出 版 社

内 容 提 要

中国水利学会施工专业委员会面板堆石坝学组于1989年5月18日至20日在宜昌市召开了第一届年会。本论文集以该年会上的论文为基础,又征集十几位专家、教授的专题论文编辑而成。内容包括:发展水平报告、国外考察报告、设计与施工、试验研究四部分。这些论文,来自我国首批在建、拟建与进行可行性研究的混凝土面板堆石坝工程项目,从不同侧面反映了当前我国混凝土面板堆石坝的发展水平;同时还反映了国外混凝土面板堆石坝的部分情况。

本书可供从事水利水电工程的设计、施工、科研人员和大专院校师生参考。

责任编辑:李良福 吴 哲

混凝土面板堆石坝会议论文集

中国水利学会施工专业委员会面板堆石坝学组
长江葛洲坝工程局施工科学研究所 编

•
河海大学出版社出版、发行
长江葛洲坝工程局印刷厂印刷

•
787×1092毫米16开 22.63印张
1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷
印数1—2000册 字数:524千字

ISBN7-5630-0322-3/TV·40

定价:7.00元

序 言

当代混凝土面板堆石坝的发展是比较迅速的,其主要原因是这种坝型兼有土石坝和混凝土坝的优点,而克服了二者的某些局限性。土石坝的优点主要是就地取材,节省水泥及场外运输量,并较易适应不良的工程地质条件。但土石坝也有其难点,主要是:(1)施工导流、渡汛及泄洪设施的布置比较复杂,如遭遇超标准洪水较难处理;(2)选用防渗材料有一定困难,如选用土料则有土料质量、储量、运距、占用耕地,以及雨天、冬季施工不便等问题;如选用其他材料,如风化料、沥青混凝土、高分子化学材料等也都各有其制约条件。混凝土坝的优点主要是施工导流、渡汛及泄洪设施容易布置,较易抵御超标准洪水。但其难点主要是:(1)必须具备一定的工程地质条件,地基处理较复杂;(2)使用较多的水泥,场外运输量也较大。而当代混凝土面板堆石坝就是在这种情况下应运而生的。面板坝除具有一般土石坝的特点外,还有以下的优点。即,(1)坝的主体可就地取材,开采石料或河床砂砾石,或就近利用建筑物开挖石料,基本上不用土料,也就不占或少占耕地;(2)采用薄层振动碾压筑坝,坝的断面比一般土石坝小,节省了工程量,也使导流洞或溢洪道缩短;(3)利用混凝土面板防渗,效果好而用水泥不多,可使用通用的施工设施和施工机械;(4)在同标准下,施工期利用垫层挡水或堆石坝体过水,有条件简化施工导流和渡汛措施,争取了工期;(5)施工基本不受或少受气候影响,争取较多的工作日,缩短了工期;(6)运行中有条件检修或补强,而且不致发生危害性漏水。基于以上优点,在坝型选择上,就使面板坝在比较质量、安全、工期和造价方面,常处于有利地位,因而是一种具有竞争力的坝型。

从我国国情出发,水力资源大部分集中了西部边远地区,交通不便,地质条件复杂,开发这些资源的自然条件和施工条件越来越困难;即使在中部和东部地区,由于耕地减少,劳动力和水泥价格急剧上涨等因素,促使水利水电建设在坝型选择上必须有所突破才能适应这种新形势。面板坝和碾压混凝土坝就是在这种形势下引进我国的。这两种坝型引进后,发展都是很快的,与国际上的差距逐渐缩小,并有所创新。当然,坝型选择主要需因地制宜,综合比较,不能勉强推广某种坝型。一般混凝土重力坝和拱坝,土质防渗心墙或斜墙的石土坝都各有其特点,在特定的条件下仍是优选的坝型。以上不过说明面板坝是值得重视的坝型。原已开工的辽宁关门山水库和湖北西北口水库,都是在1985年决定改为面板坝的。全国水利水电系统都曾派人参观学习这两座水库的设计和施工经验,促进了这种坝型的发展。据不完全统计,在建的坝高50m以上的面板坝有7座;在可行性研究阶段或初步设计阶段列为比较方案,或已定方案坝高70m以上的面板坝有25座。当前我国的面板坝往两个方面发展。一方

面是各省兴建或拟建中、低坝高的中小型水利水电工程，数量较多，推广也快；一方面是坝高、库容和装机容量都较大的大型水利水电工程，数量也不少，但都处于前期工作阶段，还没有开工。当然这二者并行不悖，相辅相成：前者建设项目多，进展快，及时总结设计、施工和运行的经验，正好为后者打下基础，进一步提高我国面板坝的技术水平，缩小与国际上的差距。

为积极推广面板坝，中国水利学会施工专业委员会面板堆石坝学组、长江葛洲坝工程局施工科学研究所，编辑出版了这本《混凝土面板堆石坝会议论文集》，用以纪录我国当前的技术水平。我们希望，今后有更多的新资料、新内容贡献给读者。目前面板坝的设计基本上还属于经验性阶段，在很大程度上依赖于已成工程的经验。因此，学习、借鉴、参考国外工程的经验是必要的。但这究竟是别人的经验。我们还需要不断探索、研究、积累自己的经验，有所创新，走出适合我国国情的道路，才能取得更大的发展。



1989年10月

目 录

序 言	纪云生 (1)
-----	---------

发展水平报告

我国混凝土面板堆石坝的发展	金诚和 赵增凯 (1)
国外混凝土面板堆石坝近况	蒋国澄 (25)
混凝土面板堆石坝的施工技术试验研究	傅志安等 (41)
建造在覆盖层上的混凝土面板堆石坝	凤家骥 (60)
混凝土面板堆石坝原型观测技术的发展	司洪洋 (72)

国外考察报告

塔斯马尼亚混凝土面板堆石坝设计特点	曹克明 徐法根 (87)
寒冷地区修建混凝土面板堆石坝的几个问题	蒋颂涛 (111)

设计与施工

西北口坝坝型的变迁与混凝土面板坝建设	黄 峰 (114)
西北口工程枢纽布置和混凝土面板堆石坝的设计	王元烈等 (119)
西北口坝混凝土面板的施工	李良福 吴 哲 (130)
关门山混凝土面板堆石坝的设计与施工	韩正海 (139)
关门山混凝土面板堆石坝的施工工艺	杨立忱 (154)
成屏一级混凝土面板堆石坝的设计与施工	徐法根 (161)
沟后混凝土面板堆石坝的设计特点	洪重光 (167)
小干沟坝设计和施工方案的决策	张江甫 (174)
小干沟混凝土面板砂砾石坝的设计	袁 辉 (182)
天生桥混凝土面板堆石坝的设计	杨世源 (191)
龙滩混凝土面板堆石坝方案设计	安申义 (203)
洪家渡坝的设计	陈德川 杨泽艳 (216)

试验研究

西北口坝面板混凝土的研究与应用	杨德福等 (225)
西北口坝混凝土面板施工方案与滑模机具研究	王端良等 (233)
西北口坝施工期渡汛挡水防护试验研究	司洪洋等 (242)

西北口混凝土面板堆石坝应力应变分析·····	沈珠江等(251)
混凝土面板堆石坝有限元动力分析·····	顾淦臣 董爱农(260)
混凝土面板堆石坝抗震设计的粗估方法·····	杜士斌(273)
设计混凝土面板堆石坝的若干体会·····	沈英武(280)
关门山坝变形的若干特点·····	朱明听 陈希富(288)
小干沟坝利用砂砾石试验研究·····	司洪洋 朱 铁(297)
堆石的压实·····	杨荫华(305)
混凝土面板堆石坝石料开采爆破设计块度预测·····	黄绍钧(317)
连续级配理论在混凝土面板堆石坝坝料设计中的应用·····	凤家骥(324)
面板堆石坝反滤保护研究和优良级配选择·····	吴良骥(336)
株树桥堆石坝料含泥量试验研究·····	林水生 刘思君(349)
编 后·····	(354)

我国混凝土面板堆石坝的发展

金诚和

赵增凯

(水利部水工程技术咨询中心)(能源部、水利部水利水电规划设计总院)

【提要】本文通过几座已建工程和几项选坝比较方案,论述了我国最近几年混凝土面板堆石坝的发展、技术适应、设计经验和科研成果,并展望了发展趋势。

一、前言

我国水资源开发任重道远,如何降低大坝造价和缩短建设周期一直是一项重大课题,其中重要途径之一就是开发筑坝新技术。

近二十年来,土石坝的主要进展要算是混凝土面板堆石坝;混凝土坝的主要进展是碾压混凝土坝。这是两大类坝型互相渗透、互相竞争、互相兼容和取长补短的结果。从而使两种坝型都产生了新的、更高一层的技术经济竞争能力。

就混凝土面板堆石坝而言,据统计全世界已建有110余座。自从1971年澳大利亚建成塞沙那(110m)高坝、1980年巴西建成福兹多阿里亚(160m)高坝以来,这两座坝作为成功的实例传遍世界。在这一基础上,促使美洲坝工界又进行了200m级的高坝设计。从低坝发展到200m级高坝的这一进程,国外大约经历了25~30年时间。

我国现代混凝土面板堆石坝虽起步较晚,但从80年代以来发展较快,已成为有竞争力和发展前景的一种坝型。据初步统计,目前我国大中型水利水电工程中,已经采用混凝土面板堆石坝或进行此种坝型方案比较的共有60多项。其中,已建成和基本建成的8项,在建的1项,初步设计(或可行性研究)已审定采用混凝土面板堆石坝坝型的达10项,另外尚有约40多项,正在进行设计和坝型方案比较。

二、工程概要、经济效益及技术进展

(一) 工程概要

从1980年算起,我国已建、在建的9座混凝土面板坝,以坝高和工程规模为序,各坝工程指标如表1所示。这批坝的分布地域十分辽阔,从东北寒冷地区的辽宁到湖南、湖北;从东海之滨的浙江到大西北青藏高原的青海和新疆。这一情况表明,这种坝的施工不受地域和

气候的制约, 是其一大优势。以上 9 座坝中, 6 座是混凝土面板堆石坝, 3 座是混凝土面板砂砾石坝。其中, 堆石坝最早开工的是西北口坝, 最先竣工的是关门山坝, 砂砾石坝最先建成的是柯柯亚坝。

截止 1989 年 12 月的统计, 正在规划设计中的约有 40 余座。这些坝的高度多在 70 m 以上, 还有几座 200 m 级的高坝, 其主要工程指标见表 2。

从国情出发, 我国地域辽阔, 水资源集中于云、贵、川大西南地区, 那里山峦起伏, 交通不便, 但石料丰富; 长江、黄河发源地的青海以及新疆有大量砾石可利用。因此这一坝型对水资源的开发必将产生深远影响。

(二) 经济效益

在国外, 通常认为混凝土面板堆石坝是一种比较经济的坝型。根据我国首批各工程的不同方案比较 (包括近期正在设计的大型工程), 结论是相同的。诚然, 水利枢纽的方案涉及多种因素, 不完全取决于坝型, 但这里列举的资料反映了一些方案比较的情况, 表明采用面板堆石坝常常在缩短建设周期和提高受益上占很大便宜。

1、对混凝土坝比较

重要的一点是, 修建混凝土面板堆石坝, 避开了我国国民经济中“三材 (水泥、钢材、木材)”长期求过于供的困难局面, 有可能使耗用“三材”大户的水电工程, 从供应和不断涨价的困扰中得以根本解脱。

首批中的关门山工程就是一个实例。这座坝原来为混凝土双曲拱坝, 因水泥无法供应而搁浅, 后来经过比较改为混凝土面板堆石坝。

关门山工程位于辽宁省本溪县太子河支流小汤河上, 水库主要是给本溪钢铁公司供水, 兼有防洪、发电及灌溉效益。对坝型重新论证表明, 以混凝土面板堆石坝取代, 可节省水泥 $1.8 \times 10^4 \text{ t}$ 、钢材 500 t 和木材 4000 m^3 。

通常, 根据坝工设计经验, 在狭窄河谷建造 100~150 m 高坝, 不同坝型的体积有约略相应的比例关系 (表 3)。因此, 一定条件下拱坝与混凝土面板堆石坝是一竞争对手。但根本上取决于混凝土和采石筑坝单价的比例关系。在国外, 填筑坝的堆石料单价远低于混凝土坝的混凝土单价, 七十年代美国和日本堆石料单价只有混凝土单价的 $\frac{1}{30} \sim \frac{1}{70}$, 加拿大为 $\frac{1}{30} \sim \frac{1}{38}$ 。由表 3 可知, 当两种单价之比为 1 : 15 左右时, 拱坝对混凝土面板堆石坝具有同等的竞争能力。因此, 公认混凝土面板堆石坝是一种比较经济的坝型。

在我国, 情况有所不同。据统计, 1951~1976 年建造的 11 座混凝土重力坝, 大坝平均综合单价为 79.486 元/ m^3 ; 1956~1970 年建造的 5 座拱坝, 大坝平均综合单价为 172.744 元/ m^3 ; 另 3 座闸坝式水电站的混凝土平均综合单价为 194.13 元/ m^3 ; 而 1954~1970 年已建的 13 座土石坝, 平均综合单价为 9 元/ m^3 。其单价比为:

土石坝 : 重力坝 = 1 : 8.8

土石坝 : 薄拱坝 = 1 : 19.2

土石坝 : 闸坝 = 1 : 21.6

这一时期, 混凝土坝仍具有一定的竞争能力。

我国首批建造的混凝土面板堆石坝 (或砾砂石) 坝

表 1

坝 名	地 址	库 容 (亿m ³)	装 机 容 量 (万kW)	坝 高 (m)	顶 长 (m)	堆 石 工程 量 (万m ³)	坝 坡		坝 料	面 板			建成年		
							上 游	下 游		面 积 (万m ²)	工 程 量 (万m ³)	厚 度 (m)		纵缝距 (m)	钢 筋 (%)
西 北 口	湖 北	2.1	1.6	95	222	162	1 : 1.4	1 : 1.4	白云质灰岩	2.93	1.319	0.3—0.6	12/6	4—5	90年
株 树 桥	湖 南	2.78	2.4	78	245	82	1 : 1.4	1 : 1.7	灰岩、板岩	2.33	0.979	0.3—0.54			
成 屏 一 级	浙 江	0.52	0.8	74.6	198	72	1 : 1.3	1 : 1.3	凝灰岩	1.58	0.474	0.3	12/6	3—5	88年
沟 后	青 海	0.033		70	260	89	1 : 1.6	1 : 1.5	砂卵石	2.22	1.000	0.3—0.6	14/7	4—5	89年
关 门 山	辽 宁	0.81	0.12	58.5	184	44	1 : 1.4	1 : 1.3	安山岩	0.82	0.328	0.3—0.5	12/6	4	88年
龙 溪	浙 江	0.256	1.6	56	140.5	38	1 : 1.3	1 : 1.3		0.707	0.283	0.4	12/6	4	
小 干 沟	青 海	0.101	3.2	55	104	21	1 : 1.55	1 : 1.6	砂卵石	0.518	0.155	0.3	12/6	4	90年
柯 柯 亚 ¹	新 疆	0.12	0.375	41.5	120	44	12 : .75	1 : 1.75~2	砂卵石						88年
罗 村 ²	浙 江	0.2	0.1	57.6	208.6	63.9	1 : 1.2	1 : 1.2 ~1.4	砂卵石	1.6	0.48	0.3	12/6		90年

1.2: 柯柯亚坝为素混凝土面板, 罗村坝为抛填堆石坝体。

续表 2

文	会	江	西	0.328	63	200	1:1.4	1:1.4	1:1.7	砂	岩	1.24	2.2	初设招标
南	车	江	西	1.53	62	184	1:1.4	1:1.4	1:1.4				0.62	初 设
斗	晏	江	西	1.81	3	223	1:1.4	1:1.4	1:1.4	花	岗	1.87	0.63	可行性
琅	琊	山	安	0.148	40	460	1:1.4	1:1.4	1:4.1-1.5	灰	岩	2.86	1.10	可行性
塔	斯	特	新		43.1	41								

表2

规划设计中拟建的土石坝堆石坝

坝名	地 址	库 容 (亿m ³)	装 机 容量 (万kw)	坝 顶 宽 度 (m)	坝 顶 长 度 (m)	坝 坡		坝 料	面 积 (万m ²)	工 程 量 (万m ³)	备 注
						上 游	下 游				
苗家坝	甘肃	43	100	311	634	1:1.4	1:1.4	变质凝灰岩	16.9	9.94	可行性
构皮滩	贵州	36.6	200	240	1400			灰 页岩			
瀑布沟	四川	50.64	330	238	550	1:1.5	1:1.4-1.5		13.6	9.8	可行性
水布垭	湖北	47.4	149.1	228	595	1:1.5	1:1.4	灰 岩	12.5	32	可行性
龙滩	广西	272.7	540	216.5	818	1:1.4	1:1.4	砂岩、板岩	16.3	8.44	
洪家渡	贵州	45.9	54	191	490	1:1.4	1:1.4	灰 岩	7.64	4.9	初 设
天生桥一级	贵州广西	10	120	180	1137	1:1.4	1:1.4	灰岩、砂泥岩	15.6	11.83	初 设
滩坑	浙江	35.3	60	161	506	1:1.4	1:1.4	熔结凝灰岩、集块岩	6.8	7	初 设
紫坪铺	四川	10.2	65	159	698	1:1.4	1:1.5	砂岩、灰岩	12.68	6.22	可行性
大柳树	宁夏	98.6	174	156	770	1:1.6	1:1.4-1.7	变质长石砂岩	13.8	8.6	可行性
响水洞	安徽	0.1664	100	153	516	1:1.4	1:1.4	花 岗 岩	4.2	1.6	可行性
吉林台	新疆	24.4	46	152	392	1:1.5	1:1.5	凝 灰 岩	7.4	4.85	初 设
独口	山西	125		140	1150	1:1.4	1:1.4	砂岩、粉砂岩	22.1	11.06	可行性
公伯峡	青海	5.5	150	134	454	1:1.4	1:1.4	花岗岩、片麻岩	2.6	2.66	初 设
冶勒	四川	3.13	20	128	377	1:1.4	1:1.6	闪 长 岩	5.12	2.76	初 设
芹山	福建	2.57	7	127	262						
百色	广西	57	48	126.5	720	1:1.4		灰岩、辉绿岩	10.43	4.66	可行性
黑河	陕西	1.73	1.82	125	405	1:1.8	1:1.8	天然砂卵石		3.62	初 设
清江	湖北	24.6	50	123	322	1:1.4	1:1.5	石灰岩、硅质岩	4.62		

附表 2

郑 州	湖 北	2.55	5.1	120	291	276	1:1.4	1:1.5	变质砂岩、板岩	3.7	2.05	可行性
白 云	湖 南	3.21	5	110	170	156	1:1.3	1:1.4	砂岩、灰岩	1.45	2.5	初 设
双 沟	吉 林	3.91	25	109.7	297	257.9	1:1.4	1:1.4	安山岩、玄武岩	4.08	1.82	初 设
柏 叶 口	山 西	2.94	80	107	385	400	1:1.4	1:1.4	花岗岩、混合岩			可行性
白 莲 堡	安 徽	4.34	2.5	101.4	312.5	248	1:1.3	1:1.3	片麻岩、花岗岩	3.44	1.72	可行性
积 石 峡	青 海	2.4	100	100	300	203.4	1:1.4	1:1.4	片岩、砾岩	16.9	9.94	可行性
天荒坪(下)	浙 江	0.085		98.5	238.9	141.7						可行性
东 津	江 西	8	6	95.5	315	176						
茅 坪 溪	湖 北			95	980	794	1:1.5	1:2				
万 安	福 建	2.28	4.5	93	212	125	1:1.4	1:1.3	花 岗 岩	1.40		招标设计
亭 子 口	四 川	31.8	70	92	668	573						
小 山	吉 林	1.07	16	86.2	295.3	143	1:1.4	1:1.4	安山岩、玄武岩	2.54	1.13	初 设
天荒坪(上)	浙 江	0.03		85.5	453.7	95.1						
芭 蕉 滩	四 川	3.16	2.2	79	350	128	1:1.4	1:1.4	砂 岩	2.3	1.65	优化设计
松 山	吉 林	1.38		79	234	151.6	1:1.4	1:1.4	安山岩、玄武岩	2.65	1.27	初 设
青山石	江 苏	0.059	12	78	444	188	1:1.4	1:1.4	石 灰 岩	3.2	1.6	可行性
响水洞(副)	安 徽	0.166	100	70	270	68.2	1:1.4	1:1.4	花 岗 岩	1.6	0.58	可行性
港口湾	安 徽	9.58	6	70	270	102	1:1.4	1:1.4	石英质砂岩	1.83	0.55	可行性
西 湾	江 苏	0.168	15	66.8	648	306	1:1.4	1:1.4	石英砂岩	5.0	2.66	可行性
鱼 塘	贵 州	0.7	4.8	64.7	284	52	1:1.3	1:1.4	灰 岩	1.46	0.69	可行性
富 湖	江 西	1.7	2	63.6	210	81	1:1.4	1:1.4	闪长岩、砂岩	1.3	0.8	初设复核

表3

坝型与体积的对比

坝 型	体 积 比
土石坝：薄拱坝	15—20 : 1
土石坝：重力坝	4 : 1
土石坝：混凝土面板堆石坝	1.4—1.5 : 1
混凝土面板堆石坝：薄拱坝	10—14 : 1
混凝土面板堆石坝：重力坝	2.7 : 1

但是，八十年代以来，我国“三材”价格一再上涨，近几年混凝土单价已上涨 1 倍以上。与此同时，填筑坝堆石料却相对稳定，涨价幅度不大，单价仍维持在 8~10 元/m³左右。这一客观经济动向也促进了土石坝和混凝土面板堆石坝的发展。

1989年底竣工的成屏一级混凝土面板堆石坝，大坝造价为1826.27万元。这项工程曾就三种坝型进行比较，其中混凝土面板堆石坝的造价比混凝土重力坝节省约161%，且工期短。其经济比较与投资计算单价如表4、5所示。

就高坝与大型水电站而言，减少工程投资是一方面，而大坝工期提前常可带来更大的经济效益。

四川都江堰紫坪铺水库工程，1989年的可行性研究报告比较了三种坝型，其中混凝土重力坝对混凝土面板堆石坝的投资、工期和首台机组发电时期比较结果如下：

枢纽总投资： 重力坝：混凝土面板堆石坝 = 1 : 0.76

表4 成屏工程两种坝型经济比较

项 目	混凝土面板堆石坝		混凝土重力坝	
	造价(万元)	%	造价(万元)	%
基础开挖及处理	200.67	11	219.5	4.6
坝体填筑	909.26	50	—	—
混凝土	583.58	32	4445.03	93.2
止水	132.81	7	105	2.2
总造价(万元)	1826.27	100	4769.53	100
工 期	3 年		4 年	

注：此工程有一座坝趾廊道，混凝土工程量1万m³，造价160.86万元。若此项除外，大坝造价为1665.41万元

表 5

成 屏 工 程 核 算 单 价

项 目	单 价	备 注
1. 堆 石	10.59 元/m ³	主要材料计算价格: 1. 水泥 210元/t 2. 钢材 1500元/t 3. 木材 500元/m ³ 4. 柴油 1400元/t 5. 汽油 1700元/t
2. 垫 层	19.07 元/m ³	
3. 过 渡 层	13.41 元/m ³	
4. 干砌护坡	15.77 元/m ³	
5. 廊道混凝土	148.84 元/m ³	
6. 面板混凝土	139.5 元/m ³	
7. “L”墙混凝土	187.0 元/m ³	
8. 钢筋制作及安装	1819.88 元/m ²	
9. 斜坡碾压	0.97 元/m ²	
10. 砂浆固坡	6.84 元/m ²	

坝体投资: 重力坝: 混凝土面板堆石坝 = 1 : 0.38

总工期: 重力坝: 混凝土面板堆石坝 = 1 : 0.74

首台机组发电时限: 重力坝: 混凝土面板堆石坝 = 1 : 0.69

就主体工程而言, 重力坝工程量约为混凝土面板堆石坝的40%, 但面板坝方案可节约投资4.65亿元, 工期提前2.5年。

此外, 还有一个水电站, 经过三种坝型方案比较, 其投资比例为:

重力坝: 拱坝: 混凝土面板堆石坝 = 1 : 0.96 : 0.86

其中, 如果重力坝和面板坝均限7.5年发电, 则面板坝方案的总工期可缩短一年, 初期发电量多81亿度, 发电收入多11亿元。而且面板坝还可进一步缩短工期, 把发电工期缩短到6.5年, 增加初期发电166亿度。

2、对沥青混凝土面板堆石坝比较

西北口坝原为沥青混凝土面板堆石坝。改变坝型后, 坝体积缩小, 基础开挖由181.3万m³减至112.9万m³, 减少了37.7%; 坝体填筑由199.6万m³减至161.8万m³, 减少了19%; 混凝土由10.2万m³缩减到8.9万m³, 减少了12.7%。体积缩小还导致枢纽布置的优化。坝轴线上移42.2m, 避开了坝肩高边坡开挖; 岸边溢洪道缩短, 减少了47.8万m³挖方; 高压主洞和发电支洞各缩短150m。这样, 大坝加溢洪道的造价由3723.66万元降至3258.16万元, 少花了465.5万元。

新疆的柯柯亚坝, 也是由沥青混凝土面板坝改为混凝土面板坝的。此工程两种方案比较, 前者造价为110.3万元, 后者为80.4万元, 节省了27.1%。

3、对土心墙堆石坝比较

天生桥一级坝可行性研究阶段进行了这项比较。土心墙堆石坝的堆石料填筑量为2084.54

万 m^3 ，混凝土面板堆石坝为1877.94万 m^3 ，减少了206.6万 m^3 。投资由20392万元降为12563万元，少投资7829万元，节约38.4%。1986年《坝型选择报告》中对投资进一步估算，投资大大减少，约节省1.5亿元，并缩短工期1~1.5年。

青海沟后混凝土面板砂砾石坝对土质心墙坝进行了比较，填筑量约减少30%，投资相当于后者的87%。

此外，另一混凝土面板砂砾石坝（坝高125 m），也对土质心墙坝进行了方案比较。比较结果，可减少填筑量74万 m^3 ，直接费88.2万元，总投资减少约800万元，总工期提前1年。

以上充分表明，混凝土面板堆石坝，在工程量、投资、工期、首台机组发电等方面，其综合经济效益往往处于明显的优势。

（三）在砂砾石覆盖层上建造混凝土面板砂砾石坝

八十年代初期，我国新疆建成了柯柯亚混凝土面板砂砾石坝。此坝建在较厚的砂砾石覆盖层上，最大深度37.5 m，覆盖层内修建了混凝土防渗墙，坝身采用素混凝土面板防渗，面板的趾板在上游13 m处与基础防渗墙的墙顶连接，连同混凝土面板共同构成整体防渗体。

柯柯亚坝的面板为 5×7 m 的素混凝土板块，板厚25~40 cm。接缝以焦油—塑料填充。此填料在气温—30℃时仍有足够的适应变形能力，有较强的附着混凝土的能力，水稳定性良好，并在混凝土面板表面全铺了焦油塑料防护层。这个防护层兼有蓄热功能，用于防止冻害。水库已蓄水运行6年，经历了一27℃严寒的考验。

柯柯亚坝蓄水后，仅左岸有两块板出现沉降裂缝，经修补并经高水位考验，工作正常。1987年6~9月监测，大坝渗漏量为241/s；进一步观测，岸边有绕坝渗流，最大渗流量也仅261/s。主坝段浸润线最高处仍在原河床以下3.7 m处。

从技术资料中了解到，5年后罗马尼亚建造了与柯柯亚坝类似的Vilcele坝，坝高23 m（图1）。

可见，座落在天然冲积层上，建造40 m高度的这种坝是成功的。再根据沥青面板砂砾石坝的建造经验，可以认为在覆盖层较深（70 m以内）的坝基上，坝高70 m（甚至100 m）是可

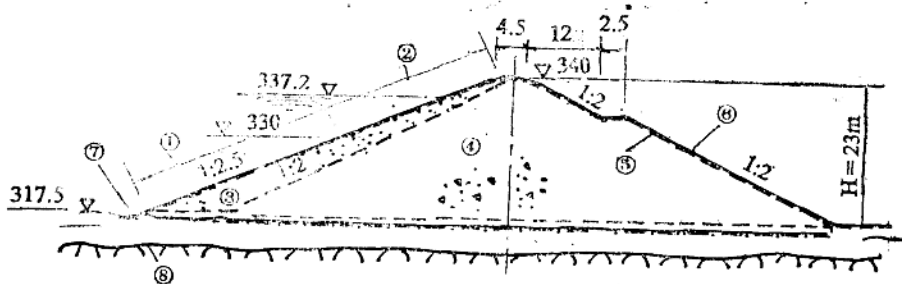


图1 Vilcele坝

- 1、面板(25cm)； 2、面板(20cm)； 3、砾石滤水层； 4、砾石填筑体；
5、草皮； 6、设计坝坡； 7、砾石滤水层； 8、砾水墙。

以研究选用这一坝型的。但是,混凝土截水墙顶帽与混凝土面板的连接结构(应力及变形条件)及截水墙的结构、材料和型式均是进一步研究的课题,应先在中等高度的坝上进行试验。

在国外,哥伦比亚修建了Salvajina与Golillas坝,皆用砂砾石筑坝。经监测,这两座坝的沉降变形量远低于巴西Areia坝(表6)

表6 国外两座砂砾石坝的沉降量

坝 名	坝 高 (m)	河谷宽高比	施工期最大沉降量 (cm)	比 较
Salvajina	148	2.4	60	Areia坝最大 沉降量为358cm
Golillas	130	0.86	39	

现在,我国青海省也修建了两座这样的坝,即沟后和小干沟坝。

沟后水库位于黄河支流沟后河上,处世界屋脊青藏高原的东北缘,海拔3200m以上。坝区属典型的大陆性高原气候,年平均气温为 34°C ,最低月平均气温为 -13.4°C ,结冰期自11月至次年3月,最大冻土深度1.3m,年平均降雨量为312mm,最大风速为 26m/s 。

沟后坝的下游3.25公里属黄河冲积高阶地,砂砾石料储量丰富,可利用层25~36m,最大粒径400mm,不均匀系数 C_u 为78,砾石含量59~74%,平均67%,级配良好。这座混凝土面板砂砾石坝设计了较陡的坝坡,上游为1:1.6,下游为1:1.5。

小干沟水电站位于青海省西部格尔木市南约40公里的格尔木河上,该河穿越戈壁滩广阔深厚的砂砾石层,埋藏量丰富,是良好级配的坝料。小干沟坝利用了河流转弯的地形,坝的一侧设了挡墙。这里的砂砾石料有较好的力学性质($\phi=41\sim 43^{\circ}$),因而也采用了较陡的坝坡,上游为1:1.55,下游为1:1.6。(见图2)

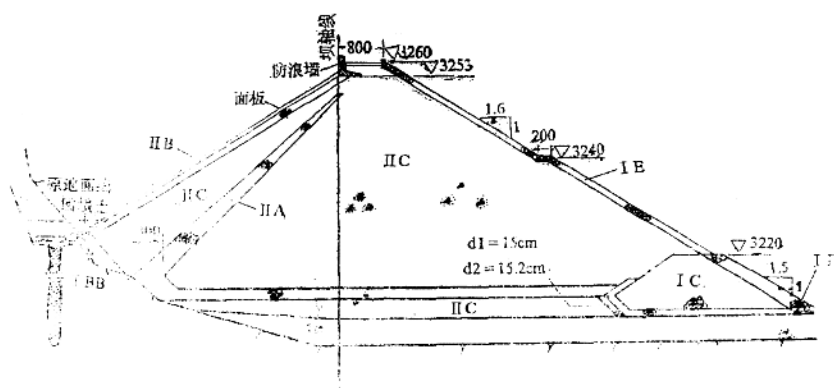


图2 小干沟坝断面图

(四) 施工技术开发

1、爆破采石与坝料压实

能否开采出优良级配石料关系到填筑体的压实程度或坝的变形。

我国工程师利用近代岩石爆破技术理论和实践进行了开采级配石料的试验；同时利用了近代的高效振动碾进行压实试验。结果表明，不仅可以由天然山岩中开采出级配良好的主堆石料和过渡层料，有时也可以开采出级配良好的细粒径垫层料，且价格便宜。同时表明，这种坝料通过振动碾碾压，控制一定的碾压参数可以达到相当高的密实度。

例1：关门山坝的坝料为抗压强度约140MPa的安山岩。用深孔台阶微差挤压爆破法开采出设计要求的级配石料（见表7和图3），其中垫层料的原设计级配较粗，避免了机械破碎节约了投资。这种级配石料用规定的碾压参数可以达到该坝的设计要求（表8）。其中垫层料的压实干密度均值为 $2.07\text{g}/\text{cm}^3$ ，主堆石的平均干密度为 $1.99\text{g}/\text{cm}^3$ 。

例2：西北口坝的坝料，在坝下游约1公里处进行三次大型岩石爆破试验。岩性为寒武纪上统三游洞组白云岩，节理裂隙较发育，岩块单轴抗压强度在150MPa以上。爆破设计的

表7 关门山坝级配石料爆破开采指标

坝料	孔距 (m)	排距 (m)	孔深 (m)	微差时间 (ms)	药量 (kg/m ³)	Cu	Cc	超径 (%)
主堆石	5.5—7.0	2.5—3.0	14—17	40—80	0.5—5.5	9.8	1.3	>60cm, 极少
垫层料1	2.9—3.4	1.7—1.5	10	10—25	1.54	14	1.7	>15cm, 1%
垫层料2	3.0—2.7	2.0—1.7	14	10—25	1.35	14	1.3	>15cm, 4%

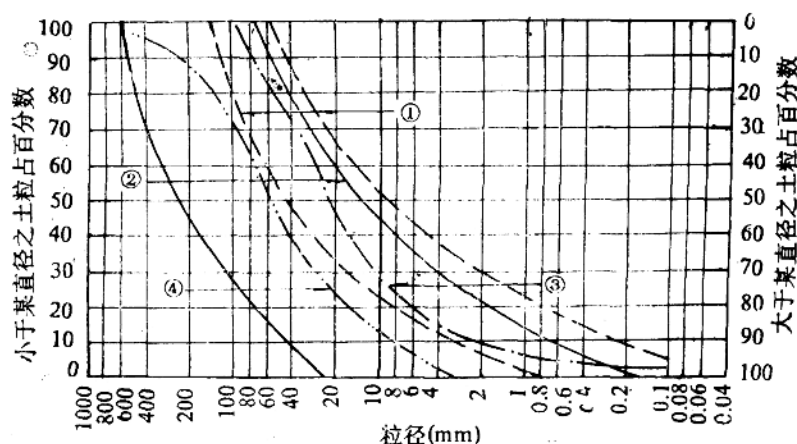


图3 关门山坝坝料级配

①垫层区设计外包线 ②垫层区填筑平均线 ③主堆石区设计外包线 ④主堆石区填筑平均线