

混凝土面板堆石坝 施工技术

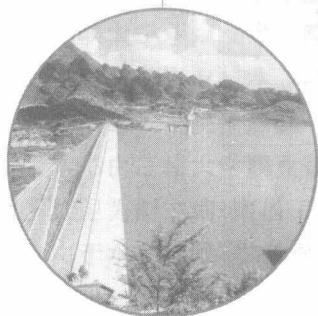
- 主 编 顾志刚
- 副主编 胡杏兰 罗红卫
- 主 审 许 明



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

混凝土面板堆石坝 施工技术

- 主 编 顾志刚
- 副主编 胡杏兰 罗红卫
- 主 审 许 明



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍混凝土面板堆石坝施工技术,共分七章,内容包括混凝土面板堆石坝基本知识、坝料的开采与制备、坝体填筑施工、趾板施工、面板混凝土施工、接缝止水施工、安全监测等。

本书可作为高职高专水利水电建筑工程专业的选修课教材,也可作为水电行业施工技术人员培训教材,或工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土面板堆石坝施工技术/顾志刚主编. —北京:中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-2992-9

I. 混... II. 顾... III. 混凝土面板堆石坝-施工技术-高等学校-教材 IV. TV641.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 093310 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005年8月第一版 2005年8月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 8.625印张 188千字

印数 0001—3000册 定价 18.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

混凝土面板堆石坝作为一种富有竞争力的坝型,以其特有的安全性、经济性和适应性等优势,倍受国内外坝工界的青睐。近20年来,我国的混凝土面板堆石坝无论是在建坝的数量上还是在筑坝技术等方面,都有着超乎寻常的快速发展。

本书是在有关教师广泛调研和自编内部教材使用的基础上,编写完成的一部专业选修课教材。该教材对现代混凝土面板堆石坝的主要施工技术作了较全面的介绍,并力求反映近年来在混凝土面板堆石坝工程中得到推广应用的新技术、新工艺、新材料、新设备,如坝料高效率开采技术、坝基强夯处理施工、软岩填筑施工、挤压边墙施工、堆石体冲碾压实技术、混凝土面板防裂技术、新型止水材料的开发及应用等。为达到理论联系实际的要求,教材中涉及的许多施工技术问题都是通过列举典型工程案例进行说明的。此外,在每一章的后面都编有“实训项目”,作为提高学生动手能力的训练课题。

本书由下列同志分工编写而成:

三峡大学职业技术学院顾志刚、邱凤娥——第一章;

三峡大学职业技术学院顾志刚、南昌工程学院罗红卫——第二章;

三峡大学职业技术学院应东亮、顾志刚——第三章;

三峡大学职业技术学院胡杏兰——第四章;

三峡大学职业技术学院顾志刚、胡杏兰——第五章;

三峡大学职业技术学院胡杏兰、顾志刚——第六章;

南昌工程学院罗红卫——第七章。

本书由三峡大学职业技术学院顾志刚主编,三峡大学职业技术学院胡杏兰、南昌工程学院罗红卫为副主编,南昌工程学院许明主审。

由于水平有限,本书难免存在一些错误或不足之处,欢迎批评指正。

编者

2005年7月

目 录

前言

第一章 混凝土面板堆石坝基本知识	1
1.1 混凝土面板堆石坝发展概况	1
1.2 混凝土面板堆石坝的主要优点	3
1.3 混凝土面板堆石坝枢纽布置	5
1.4 坝体构造与坝料分区	7
1.5 混凝土面板堆石坝的导流与度汛	9
工程实例一 公伯峡混凝土面板堆石坝枢纽布置	12
工程实例二 水布垭面板堆石坝工程的导流度汛方案	13
实训项目一	15
实训项目二	15
第二章 坝料的开采与制备	16
2.1 坝料的性质	16
2.2 料场规划和料源平衡	19
2.3 坝料开采方式	21
2.4 垫层料制备	24
工程实例一 洞室爆破在珊溪面板堆石坝坝料开采中的应用	25
工程实例二 三板溪混凝土面板堆石坝坝料性质和碾压要求	26
工程实例三 黑泉面板堆石坝砂砾石垫层料制备	27
实训项目一	28
实训项目二	28
第三章 坝体填筑	30
3.1 堆石体地基与岸坡处理	30
3.2 坝体填筑规划	31
3.3 坝料碾压试验	34
3.4 坝体填筑工艺	37
3.5 垫层区上游坡面施工	42
3.6 坝体填筑的质量检验与控制	47
3.7 堆石体冲击压实技术简介	50
工程实例一 引子渡面板堆石坝工程的料场规划	52

工程实例二	水布垭面板堆石坝的分期填筑	52
工程实例三	龙首二级面板堆石坝的挤压边墙冬季施工	53
实训项目一		54
实训项目二		54
实训项目三		55
第四章	趾板施工	56
4.1	概述	56
4.2	趾板基础开挖	59
4.3	趾板基础处理	59
4.4	趾板混凝土施工	61
工程实例一	公伯峡面板堆石坝趾板基岩灌浆	65
工程实例二	水布垭一期趾板混凝土浇筑	67
实训项目		68
第五章	面板混凝土施工	70
5.1	概述	70
5.2	混凝土配合比设计	74
5.3	面板混凝土施工准备	76
5.4	混凝土拌和与运输	81
5.5	混凝土浇筑	84
5.6	面板混凝土防裂	87
工程实例一	公伯峡混凝土面板堆石坝超长面板施工	89
工程实例二	严寒地区面板混凝土抗冻措施	91
工程实例三	天生桥工程混凝土面板的结构性裂缝分析	92
实训项目一		94
实训项目二		94
实训项目三		95
第六章	接缝止水施工	96
6.1	接缝种类	96
6.2	接缝止水材料	98
6.3	接缝止水施工	99
6.4	接缝止水质量检验	106
工程实例一	洪家渡面板堆石坝周边缝止水结构	107
工程实例二	不锈钢止水材料在黑泉面板堆石坝的应用	108
实训项目一		110
实训项目二		110

7.1 概述·····	111
7.2 安全监测仪器埋设·····	115
7.3 安全监测仪器观测·····	120
工程实例一 水布垭工程混凝土面板安全监测仪器埋设施工工艺·····	122
工程实例二 白溪混凝土面板堆石坝安全监测·····	126
实训项目一·····	127
实训项目二·····	128

混凝土面板堆石坝基本知识

1.1 混凝土面板堆石坝发展概况

混凝土面板堆石坝是指以堆石料或（和）砂砾石料分层碾压填筑、主要以混凝土面板作上游防渗体的一种土石坝。

现代面板堆石坝的发展过程大体可分为三个时期：1850~1940年为抛填堆石坝时期，坝体采用木面板、钢面板及钢筋混凝土面板防渗。这期间建成了许多高度在30m以上的抛填堆石坝，其中最高的是美国的盐泉坝，坝高100m，采用钢筋混凝土面板防渗。1940~1965年为抛填堆石坝到碾压堆石坝的过渡时期。由英国率先进行振动碾压实坝体堆石的尝试，从而开始了由抛填堆石向碾压堆石的过渡，最终发展成以薄层碾压堆石为特征的现代混凝土面板堆石坝。1965年以后是推广应用碾压堆石坝的时期。随着科学技术的不断发展，大型振动碾的出现，使堆石体填筑密度明显提高，变形减小，渗水减少，筑坝材料的选用范围也有所扩大，且安全性、经济性、适应性俱佳，因此成为一种富有竞争力的新坝型。

据不完全统计，至2003年底，全世界已建和在建的现代混凝土面板堆石坝已超过200座，其中坝高在100m以上的有50多座。

国外有代表性的混凝土面板堆石坝：1971年在澳大利亚建成的塞沙那坝，高110m，该坝奠定了现代高混凝土面板坝筑坝技术的基础。1993年在墨西哥建成的阿瓜密尔巴坝，高187m，是世界上已建的最高混凝土面板坝。目前在建的老挝南岗三级面板堆石坝，坝高220m；马来西亚巴昆面板堆石坝，坝高205m。

我国以现代技术建设混凝土面板堆石坝始于1985年。第一座开工建设的面板堆石坝是湖北西北口水库大坝，高95m；第一座完建的面板堆石坝是辽宁关门山水库大坝，高58.5m。与国外相比，我国的面板堆石坝建设起步虽晚，但起点高，发展快。截至2003年底，全国已建和在建的面板堆石坝已超过140座，其中坝高大于100m的有32座，占我国高度在100m以上高坝总数的近三成。我国已建、在建的坝高大于100m的混凝土面板堆石坝见表1-1。

表 1-1 我国已建、在建的坝高大于 100m 的混凝土面板堆石坝

序号	坝名	地点	河流	坝高 (m)	坝顶长 (m)	坝顶宽 (m)	坝体积 (万 m ³)	面板面积 (万 m ²)	总库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	备注
1	水布垭	湖北巴东	清江	233	660	12	1526	13.84	45.8	1840	在建
2	三板溪	贵州锦屏	清水江	185.5	423.7	10	961	9.41	40.9	1000	在建
3	洪家渡	贵州黔西	六冲河	179.5	427.8	11	900	7.64	45.9	540	在建
4	天生桥一级	广西贵州	南盘江	178	1104	12	1800	17.3	102.57	1200	已建
5	滩坑	浙江	小溪	162			980	9.5	41.9	600	

续表

序号	坝名	地点	河流	坝高 (m)	坝顶长 (m)	坝顶宽 (m)	坝体积 (万 m ³)	面板面积 (万 m ²)	总库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	备注
6	紫坪铺	四川都江堰	岷江	156	634.8	12	1180	13.2	10.8	760	在建
7	吉林台	新疆尼勒克	喀什河	152	392	12	920	7.4	24.4	460	在建
8	龙首二级	甘肃张掖	黑河	146.5	191	10	253	2.64	0.86	157	在建
9	公伯峡	青海循化	黄河	139	429.8	10	498	6.12	6.92	1500	在建
10	瓦屋山	四川洪滩	周公河	139	295	12	350	2.0	5.5	240	在建
11	珊溪	浙江文成	飞云江	132.5	448	10	589	6.88	18.24	200	已建
12	乌鲁瓦提	新疆和田	喀拉喀什	131.8	365	12	606	7.22	3.47	60	已建
13	引子渡	贵州平坝	三岔河	129.5	276	12.1	310	1.2	4.55	360	在建
14	街面	福建	尤溪	129	478	8	342	5.8	10.58	300	在建
15	白溪	浙江宁通	白溪	124.4	298	8	390	4.8	1.68	18	已建
16	鄂坪	湖北竹溪	汇湾河	124.3	296	10	291	4.39	2.96	76	在建
17	黑泉	青海大通	宝库河	123.5	433	10	540	7.9	1.82	12	已建
18	芹山	福建周宁	穆阳江	122	259.8	9	248	4.2	2.65	70	已建
19	白云	河南城步	巫水	120	200	8.5	170	1.45	3.6	54	已建
20	古洞口	湖北兴山	古夫河	117.5	190	8.5	190	2.81	1.38	36	已建
21	芭蕉河	湖北鹤峰	淡水芭蕉河	115	280	8	192	3.6	0.99	34	在建
22	洒南江	云南	洒南江	115			297		2.63		在建
23	高塘	广东怀集	白水河	110.7	288	8.6	195	2.64	0.96	36	已建
24	双沟	吉林抚松	松江河	109.7	312	7	258	3.73	3.9	280	已建
25	那兰	云南	藤条江	109	259			4.08	2.86	150	在建
26	茄子山	云南龙陵	苏帕河	106.1	258	10	140	2.2	1.21	16	已建
27	鱼跳	重庆南川	大溪河	106	223.8	6	195	1.88	0.95	48	已建
28	洞巴	广西	西洋江	105			316	5.27	3.15	72	在建
29	思安江	桂林漓江	思安江	103.4	385.9	6.5	210	4.12	0.94	12	在建
30	柴石滩	云南宜良	南盘河	103	316	10	217	3.82	4.37	60	已建
31	盘石头	河南鹤壁	洪河	102.2	606	8	510	4.5	6.08	10	在建
32	白水坑	浙江江山	江山港	101	228	8	160	约 1.8	2.46	40	在建

由表中资料知,我国已建最高的面板堆石坝是洪家渡面板堆石坝,高 179.5m。在建最高的面板堆石坝是水布垭水电站大坝,高 233m,同时也是世界上最高的面板堆石坝。

我国在建设混凝土面板坝的过程中,积累了丰富的实践经验,并且开展了大量和系统的科学研究工作,在一些关键技术问题的研究方面,如坝料的高效率开采、软岩填筑施工、挤压式边墙施工、堆石体冲碾压实技术、坝体填筑施工质量控制、混凝土面板防裂、新型止水材料的开发及应用等,都取得了举世瞩目的成果。目前我国的混凝土面板堆石坝建设,无论是在工程规模、坝高方面,还是在筑坝技术水平上,都位居世界前列。

1.2 混凝土面板堆石坝的主要优点

1.2.1 安全性

(1) 抗滑稳定性

在坚硬的岩基或密实砂砾石层上建造的混凝土面板堆石坝，都具有良好的抗滑稳定性。由于整个堆石体都位于水荷载的下游，与作用在面板上的水荷载的垂直分量一起，抵抗作用在面板上的水荷载的水平分量。对 1:1.3 的上游坝坡来说，水荷载的垂直重量与水平推力之比将大于 6:1，水荷载也将传到坝轴线上游的坝基上，因此发生倾覆和水平滑动的可能性是不存在的。我国已建的坝高在 100m 以上的混凝土面板堆石坝，上游坝坡多为 1:1.4。

(2) 抗渗稳定性

由于堆石是非冲蚀性材料，在有渗透水流通过时，不会因细颗粒被带走而发生类似土体的管涌等渗透破坏问题，因此不存在渗透稳定问题。特别是碾压堆石，其本身密实度高，粗粒组成的骨架比较稳定，其细粒含量远不能填满粗粒间的孔隙，即使有游离的细粒被带走或在粗粒孔隙内移动的现象，也不会影响骨架的稳定性，或因此产生较大变形。

(3) 抗震性能

根据面板堆石坝的结构及实际震害情况，国内外坝工界的专家认为碾压式面板堆石坝具有良好的抗震性能，不论在强地震区还是非地震区，都可以采用同样的设计。其主要依据是：由于面板堆石坝的整个堆石体都是干燥区，因此不会因地震而产生附加的孔隙水压力，而降低堆石抗剪强度和整体稳定性。由于碾压堆石已达到密实状态，地震只能使坝体产生较小的永久变形量，是面板堆石坝可以承受的。在非常强烈的地震作用下，混凝土面板可能开裂，而引起渗流量增加，但通过面板裂缝及垫层区的渗流量很容易通过主堆石体排泄，不会威胁到大坝的整体稳定。

(4) 变形特性

从面板堆石坝的运行实践来看，现代碾压堆石的变形量很小，而且稳定得快。除了极少数工程外，一般混凝土面板堆石坝在施工期可完成绝大部分沉降变形，剩余值也在蓄水后头 3 年基本完成。

1.2.2 经济性

(1) 与混凝土坝比较

通常在狭窄河谷内修建 100 ~ 150m 的高坝，不同坝型的坝体体积大致有一个比例关系。如以混凝土面板堆石坝的体积为 1，则混凝土重力坝约为 1/2.7，薄拱坝约为 1/10 ~ 1/14，因此其经济性将取决于彼此的工程单价之比。如两者单价之比为 1:15 左右时，拱坝与混凝土面板石坝将具有相似的竞争力。

在施工方面，混凝土面板堆石坝所需施工机械及工艺流程都较混凝土坝简单，采用现代大容量土石方机械可以达到很高上坝强度，施工干扰少。由于其具备快速施工条件，发电工期和总工期都可以较混凝土坝缩短，即可为工程提前受益创造有利条件。如考虑贷款

利息, 物价上涨等因素, 从动态投资看快速施工的得益更大。

此外, 修建面板堆石坝主要利用当地材料, 可以节省水泥、钢材、木材等外来材料, 除降低造价外, 受材料供应和运输等条件的制约较小, 便于快速施工。

四川紫坪铺水库在可行性研究报告中作过坝型比较, 混凝土面板堆石坝方案在枢纽总投资、大坝投资、总工期、首台机组发电工期等方面分别为重力坝方案的 0.76、0.38、0.74 和 0.69。

(2) 与土质心墙堆石坝比较

混凝土面板堆石坝是所有土石坝型中断面最小的一种, 坝体填筑量约可比其他土石坝减少 40%~50% 以上, 因而也是最经济的。而且面板堆石坝坝坡陡, 底宽小, 可相应减少泄水、输水建筑物长度, 使枢纽布置更为紧凑。面板堆石坝可以少用或不用防渗土料, 从而可少占耕地。

混凝土面板堆石坝可以利用未完成的部分坝体直接挡水或过水度汛, 从而施工导流和度汛得到简化, 并保证坝体施工期的安全。面板堆石坝各个施工工序, 如趾板施工、灌浆施工、坝体填筑、面板浇筑等, 均可独立进行, 互不干扰。坝体料物品种不多, 都是全天候材料, 堆石体内部及坡面均可根据需要留施工道路及灵活分块分缝。而土质心墙施工则要受气候条件影响。因此面板坝更有利于提高施工强度和質量, 实现快速施工, 在提前发电工期和总工期方面占有优势。面板堆石坝还便于对坝体未竣工前提前蓄水受益作出安排, 对坝体后期的加高十分方便, 可以实现分期施工。

天生桥一级水电站, 在初步设计中对土质心墙堆石坝和面板堆石坝两种方案作过比较。由于面板堆石坝方案可以节省投资 1.5 亿元, 并缩短工期 1~1.5 年, 因此被最后选定。

(3) 与沥青混凝土面板堆石坝比较

混凝土面板堆石坝断面比沥青混凝土面板堆石坝小, 前者的上游坝坡一般为 1:1.3~1:1.4, 后者至少需要 1:1.7。前者施工都可采用通用机具, 而后者则需专门的机具设备, 而且施工时的环境条件较差, 国产高品位的沥青不多, 抗老化性能不及水泥混凝土。因此在一般情况下, 前者在经济和技术上都有一定优势。但沥青混凝土面板坝具有防渗性能好, 适应变形能力强, 维修方便等优点, 也有其实用价值。

1.2.3 适应性

混凝土面板堆石坝对坝址地形, 地质, 气候及各种类型的工程都有较好的适应性, 使这种坝型具有广泛的应用领域。

面板堆石坝对各种河谷地带有较强的适应性。在已建成的面板坝中, 既有位于峡谷地区的, 也有位于宽阔河谷的。随着技术的进步, 有些原来不利建坝的地形条件, 可以改造成适合建面板堆石坝。当没有合适的布置岸边溢洪道的位置时, 对流量不大的河流还可采用坝面泄洪的布置方案。

面板堆石坝对坝址地质条件也有较强的适应性。过去曾对趾板地基的要求是坚硬的、不冲蚀的、可灌浆的基岩, 而现在这种经典的提法已被大大突破, 国内外已有许多面板堆石坝工程的趾板地基为强风化岩石、砂砾石覆盖层、残积土等, 都只要经过适当处理即可

完全运行。

面板堆石坝还对不同坝址气候条件具有较强的适应性。在多雨地区，心墙堆石坝的心墙挖运和填筑受降雨影响较大，不能全年施工，而面板堆石坝则可不受限制。

面板堆石坝还特别适应于扩建加高及分期施工。

1.3 混凝土面板堆石坝枢纽布置

以混凝土面板堆石坝为主要挡水建筑物的枢纽工程，其主要建筑物一般包括面板堆石坝、溢洪道或泄洪隧洞、导流隧洞、放空洞、发电厂房系统等。图 1-1 为混凝土板坝枢纽工程典型平面布置图。

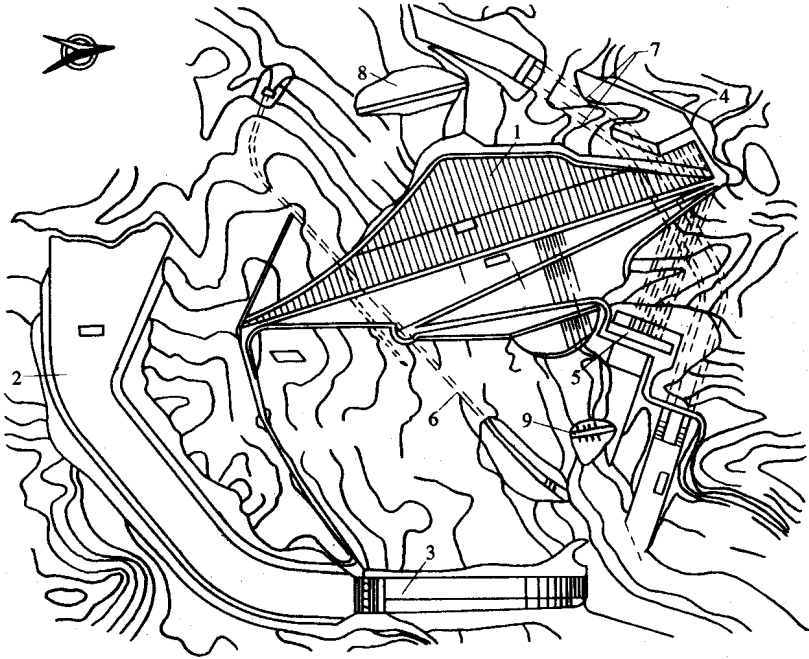


图 1-1 天生桥一级水电站面板坝枢纽布置

1—混凝土面板堆石坝；2—溢洪道引渠；3—溢流堰；4—水电站进口；
5—主厂房；6—放空洞；7—导流隧洞；8—上游围堰；9—下游围堰

1.3.1 坝轴线选择

混凝土面板坝的混凝土面板堆石坝的坝轴线选择，既要考虑坝址的地形地质条件，又要考虑面板堆石坝的特点，且有利于其他建筑物的布置。重点是选择较理想的趾板线位置，使趾板地基尽量置于坚硬、非冲蚀性和可灌的岩基上，尽量避开断裂发育、强烈风化、夹泥、岩溶等不利地质因素，使趾板开挖量和趾板地基处理工作量减少。另一方面要选择有利的地形，使坝轴线采用直线型式，并尽可能与河道正交，以节省坝体工程量和方便施工。

1.3.2 泄洪建筑物

面板堆石坝枢纽工程通常以开敞式溢洪道为主要泄洪建筑物，其优点是运行可靠、超泄能力大；当布置开敞式溢洪道有困难时，也可采用进口为开敞式溢流，后接泄洪隧洞的方式。由于混凝土面板堆石坝，尤其是高混凝土面板坝一般不容许水流漫顶，以前规定面板堆石坝不宜采用隧洞为泄水建筑物；随着科技的进步，泄洪隧洞及金属结构的可靠性大为增强，因此现代面板堆石坝工程也允许采用隧洞作为泄洪建筑物。例如白云水电站面板堆石坝，高 120m，1998 年完工。在枢纽布置中就采用隧洞作为惟一的泄水建筑物。隧洞是利用导流洞改建成龙抬头形式的无压泄洪洞，断面尺寸为 $7.5\text{m} \times 9.2\text{m}$ ，长 468m，最大泄洪量为 $1473\text{m}^3/\text{s}$ 。左岸引水发电隧洞尾部分为两条交叉洞，一条用作发电，另一条用于放空水库，工程现已蓄水运行。

对于中小型工程，当泄洪流量不太大，且开挖溢洪道有困难时，也可在坝顶设置溢洪道，以较经济地解决泄洪问题。如澳大利亚的克罗蒂（Crotty）坝，高 83m，在坝顶设置溢洪道，设计泄洪流量 $245\text{m}^3/\text{s}$ ，建成后曾安全泄洪。我国新疆的榆树沟面板坝，采用坝体溢洪道泄洪，设计泄洪流量为 $389\text{m}^3/\text{s}$ ，于 2002 年 7 月正式泄洪。

1.3.3 导流洞和放空洞

放空洞的设置主要是为了面板堆石坝发生大量变形和渗漏问题时，能很快放空水库或降低水库水位进行处理。放空洞还可兼作面板坝施工和运行期的导流、泄水建筑物，例如天生桥一级面板堆石坝枢纽的放空洞就兼具后期导流和蓄水期向下游供水的功能。水布垭面板堆石坝的放空洞，将在工程的中、后期导流阶段承担泄洪任务。

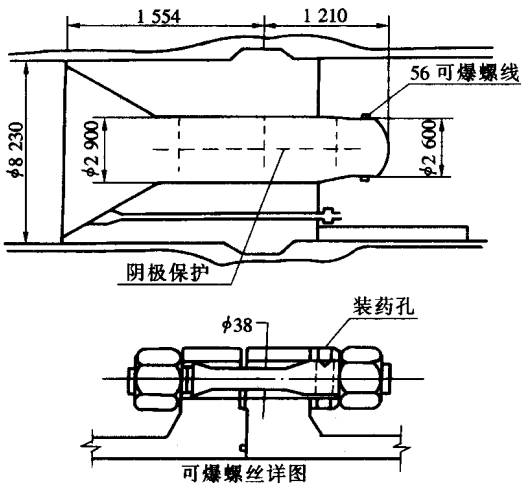


图 1-2 澳大利亚默奇松坝可爆堵头放空洞

澳大利亚塔斯马尼亚水电局采用碾压堆石修建了十余座面板坝，虽然其稳定漏水量都很小，从来没有放空水库进行检修的必要，但在设计上仍利用导流洞堵头段设置放空底孔，用可爆破断开的螺栓安装钢闷头，使用时用炸药断开连接螺栓，打开钢闷头泄水。这种放空管的最大过水能力达 $340\text{m}^3/\text{s}$ ，直径为 $2.6 \sim 3.75\text{m}$ 。图 1-2 为澳大利亚默奇松坝放空洞构造示意图。我国的芭蕉河面板堆石坝也采用了这种可爆堵头放空洞形式。

随着混凝土面板堆石坝设计和施工技术的日趋成熟，对堆石体碾压的质量越来越高，使坝体变形得到有效控制；同时，随着接缝止水结构设计的优化及新型止水材料的应用，使面板坝对变形的适应性增强，发生事故的可能性减小。此外，大型水库仅靠放空洞也很难在较短时间内放空水库；因此我国近年来开工兴建的部分高混凝土面板堆石坝工程，就没有考虑设置专用的放空洞。如引子渡、三板溪等面板堆石坝就没有设置放空洞。

1.3.4 发电厂房系统

面板坝枢纽工程发电厂房的布置型式主要有坝后式、河岸式和地下式，主要根据地形地质条件进行选择。

1.4 坝体构造与坝料分区

1.4.1 坝体构造

混凝土面板堆石坝的基本结构主要包括趾板、面板、坝料、防浪墙等。

(1) 趾板

趾板的主要作用是保证混凝土面板与地基的不透水连接，提供基础灌浆用的压帽，同时作为面板底端的支承和面板滑模施工的起始点。趾板宜建在坚硬、不冲蚀和可灌浆的弱风化至新鲜基岩上。对于强风化或有地质缺陷的基岩，则要进行专门处理，以消除被冲蚀的可能性。中低坝的趾板可置于砂砾石地基上，高坝应经过专门论证。趾板的宽度可根据趾板下基岩的允许水力梯度和地基处理措施确定，其最小宽度为 3m。趾板的厚度可小于相连接的面板厚度，但不小于 0.3m。

(2) 混凝土面板

混凝土面板设置在堆石坝体的上游面，其主要作用是防渗。要求具有较高的耐久性、抗渗性、抗裂性和施工和易性。高混凝土面板坝面板的顶部厚度宜取 0.3m，并向底部逐渐增加。我国 DL/T 5016—1999《混凝土面板堆石坝设计规范》推荐的面板厚度计算公式：

$$t = 0.3 + (0.002 \sim 0.0035)H \quad (1-1)$$

式中 t ——面板厚度，m；

H ——计算断面至面板顶部的高度。

中低面板堆石坝可采用 0.3~0.4m 厚的等厚面板。面板的垂直缝间距可为 12~18m。混凝土趾板、面板布置型式见图 1-3。

(3) 防浪墙

防浪墙位于混凝土面板坝的坝顶并与面板顶部连接，既是坝顶的防浪结构，又可节省一部分堆石工程量。防浪墙多采用“L”型，这种型式便于设计、施工和运行。其高度一般为 4~6m，墙顶高于坝顶 1.0~1.2m。防浪墙的布置型式如图 1-4 所示。

(4) 堆石坝体

堆石坝体是混凝土面板下游用不同粗细材料分区填筑体的统称。面板堆石坝按组成坝体材料特性的不同，可分为硬岩堆石坝、软岩堆石坝、砂砾石坝和堆石与砂砾石组合坝等。一般以岩石饱和和无侧限抗压强度大于（含等于）或小于 30MPa 作为区

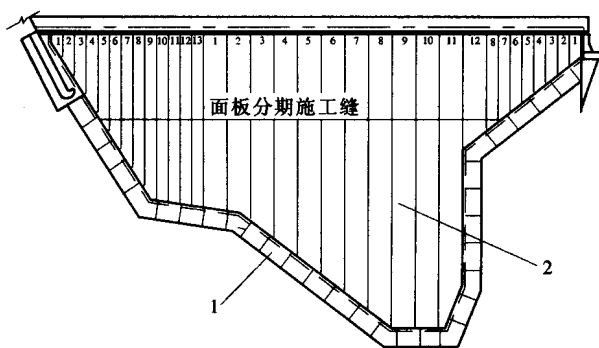


图 1-3 混凝土面板堆石坝趾板、面板示意图

1—趾板；2—面板

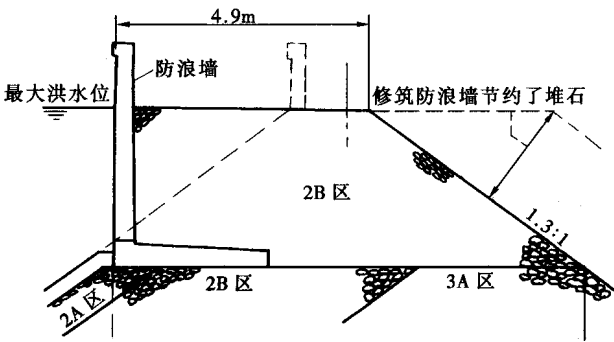


图 1-4 坝顶防浪墙布置

层区 (2A)、特殊垫层区 (2B)、过渡区 (3A)、主堆石区 (3B)、下游堆石区 (3C)、抛石区 (3E) 等。图 1-5 为岩基上硬岩堆石坝体分区示意图。

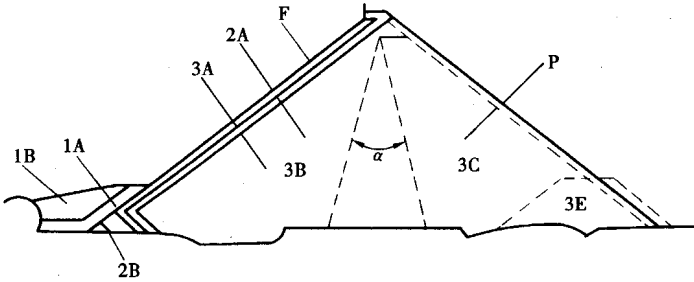


图 1-5 岩基上硬岩堆石坝体分区示意图

(1) 上游铺盖区 (1A)

面板堆石坝设计规范要求 100m 以上的高混凝土面板堆石坝，在面板下部的上游侧设置上游铺盖区，也称粘土防渗层。其设置目的是，当周边缝或低高程的面板产生张开裂缝时，粘土可以把裂缝堵塞。

(2) 盖重区 (1B)

该区是在上游铺盖区的上游侧，用弃料将粘土防渗层覆盖，目的是为了增强防渗安全。

(3) 垫层区 (2A)

该区是混凝土面板的支承层。要求上游表面均匀平整，有足够的抗剪强度，而且应是半透水的。即使面板有裂缝或接缝止水有缺陷，形成漏水通道，半透土层也可以防止大量漏水。施工时期，在未做面板前也可临时挡水，但须防止浸水坍塌。2A 区的材料粒径级配是经过加工的、含有足够数量砂粒和粉粒的小石，水平宽度一般不小于 3 m。

(4) 特殊垫层区 (2B)

也称小区料，设置在周边缝下侧，对面板周边起到均匀支承作用，为周边止水充当第二道防线，且对粉煤灰或粉细砂具有反滤作用。

(5) 过渡区 (3A)

分硬岩和软岩的界限。不同坝体材料的面板坝，其设计和施工的技术要求有所不同。

1.4.2 坝料分区

堆石坝体应根据料源及对坝料的强度、渗透性、压缩性、施工方便和经济合理等要求进行分区。用硬岩堆石料填筑的高混凝土面板坝体，从上游到下游依次可分为上游覆盖区 (1A)、盖重区 (1B)、垫

该区是位于垫层与主堆石之间的过渡区，其变形特点和强度介于垫层与主堆石之间，水平宽度不应小于 3 m。

(6) 主堆石区 (3B)

该区是大坝的主体和主要承载结构，对坝体稳定具有重要意义，应满足抗剪强度高、压缩性低和透水性强要求。

(7) 下游堆石区 (3C)

该区承受水荷载很小，其压缩性对面板变形影响较小，因此可采用强度较低的石料如软岩填筑。有的工程将 3C 区分为两部分，上方称次堆石区，下方称下游堆石区（代号 3D）。

(8) 抛石区 (3E)

该区设置在坝体下游坝趾处，为硬岩抛石体，可同时作为下游围堰的组成部分。

坝体主要用砂砾石填筑的面板坝，在我国已建、在建的面板坝中占有一定比例，其坝体分区如图 1-6 所示。与硬岩堆石坝的主要区别是，为满足坝料的排水要求，多在坝体内设置有竖向和水平向排水区。

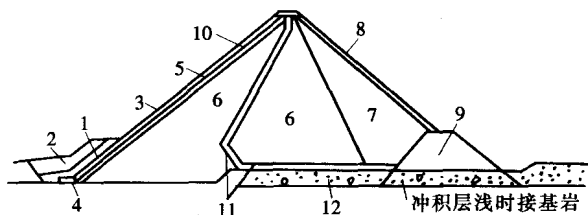


图 1-6 砂砾石坝体分区示意图

- 1 (1A) —上游铺盖区；2 (1B) —盖重区；3 (2A) —垫层区；4 (2B) —特殊垫层区；5 (3A) —过渡区；6 (3B) —主堆石（砂砾石）区；7 (3C) —下游堆石（砂砾石）区；8 (3D) —下游护坡；9 (3E) —滤水坝趾区；10 (F) —混凝土面板；11 (3F) —排水区；12—坝基冲刷层

1.5 混凝土面板堆石坝的导流与度汛

导流与度汛是面板坝施工方案的重要组成部分，通常包括围堰挡水的早期导流、坝体挡水的中期导流及导流泄水建筑物封堵后的后期导流等三个阶段。实际上，面板坝工程的施工导流与整个工程的施工分期和总进度计划密切相关。

1.5.1 导流标准

中国面板坝工程的导流标准应根据 SDJ338—1989《水利水电工程施工组织设计规范》，并结合工程特点和安全因素确定。导流建筑物的导流建筑物设计洪水标准，则根据建筑物的类型和级别，并结合风险度综合分析，使所选择标准经济合理，对失事后果严重的工程要考虑对超标准洪水的应急措施。

导流建筑物一般为Ⅲ～Ⅴ级，早期导流时，土石围堰的防洪标准分别按 50～20 年一遇、20～10 年一遇、10～5 年一遇的洪水确定。若截流后第一个汛期采用坝体挡水，则围堰可按同一导流标准的枯水期洪水设计。过水围堰的防洪标准，应根据工程初期面板坝基础处理及河床段趾板施工的需要，一般采用 30～20 年一遇枯水期洪水为导流标准。

坝体挡水的中期导流标准根据拦洪库容大小确定，当拦洪库容超过 1 亿 m^3 时，导流标准应大于 100 年一遇的洪水；若面板坝的级别在Ⅱ级以上，则导流标准为 200～100 年一遇及 500～200 年一遇。坝体过水的泄水标准一般按 20 年一遇或 30 年一遇洪水防护。

1.5.2 导流与度汛方式

面板坝的导流与度汛方式,应根据水文、气象、地形、地质及施工条件进行选择。

(1) 隧洞导流、一次断流的导流度汛方式

面板坝工程一般宜优先采用隧洞导流、一次断流的导流度汛方式。具体有3种方案。

1) 高围堰挡水、导流隧洞过水度汛方案。在条件适宜时,采用高围堰挡水、导流隧洞过水方案,可争取基坑全年施工的条件,对缩短工期有利。巴西的辛戈面板坝和国内的黑泉坝均采用过这种方案。但这种方案,会大大增加导流工程量和投资,因此必须经过技术和经济论证。

2) 导流隧洞过水、坝体挡水度汛方案。该方案采用低围堰挡水,导流隧洞导流,围堰一般按10年一遇或20年一遇枯水期流量的导流标准设计。坝体全断面或临时断面在一个枯水期内填到度汛水位以上挡水度汛。这是最能体现混凝土面板堆石坝特点、最为经济可靠的导流度汛方案,应作为面板坝工程导流度汛的首选方案,实际上也是国内面板坝工程最常用的方案,如乌鲁瓦提、白溪、芭蕉河等高面板坝采用了这种导流度汛方案。

由于要在一个枯水期内将坝体填筑到度汛高程,施工强度高,需采取有效措施促其实现。

3) 导流隧洞和坝体同时过流度汛方案。该方案的特点是在截流后的第一个汛期由导流隧洞与堆石坝体联合过水,第二个汛期利用坝体挡水度汛。适用于坝体填筑在一个枯水期不能达到挡水度汛高程的情况。这种方案的过水围堰一般按20年一遇或10年一遇枯水期流量的导流标准设计,坝体过流保护则按30年一遇或20年一遇的洪水设防。具体有两种做法:

对峡谷地区或较小的河流,可采用挡水与过水相结合的方式,利用枯水期抢筑大坝堆石体,同时在下游坡面设置防冲固坡措施,达到截流后第一个汛期的度汛高程时为止。汛期过水时停止大坝填筑。

对较宽阔的河谷,可在大坝堆石体一定高程处留缺口过流,并对过流面及下游坡面加以保护,两岸或一岸在汛期仍继续填筑,汛后迅速将缺口抢筑至第二个汛期的度汛高程。国内采用这种导流度汛方案的典型实例有天生桥一级水电站面板坝工程。该工程坝址河谷宽阔,1994年底截流后,第一个汛期利用原河床与导流洞共同过水,第二个汛期,河床部位坝体填筑到一定高程,并完成了坝面的过流保护,实现了导流洞与坝面同时过水度汛。汛期曾多次过水,两岸堆石体的填筑在汛期继续施工,为下一年挡水度汛创造条件。第三个汛期则采用坝体临时断面度汛。天生桥一级水电站面板坝的坝面过流布置如图1-7所示。

导流隧洞和坝体同时过流度汛方案比较安全,但要增加围堰和坝体过流保证措施的费用。以砂砾石填筑的坝体表面不得采用过水度汛方案。采用挡水度汛方案时,宜在汛前浇筑混凝土面板,或加强垫层上游坡面的防护措施。

(2) 河床分期导流方式

在宽河谷、大流量的河道上修建面板堆石坝,可采用河床分期导流方式。这种导流方式并不需要修建纵向围堰,分期围护两岸基坑。而是在截流前将围堰及坝体堆石从一岸或