

混凝土面板堆石坝 筑坝技术与研究

关志诚 主编

*HUNNINGTU
MIANBAN
DUISHIBA
ZHUBA JISHU YU YANJIU*



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土面板堆石坝筑坝技术与研究/关志诚主编.
北京:中国水利水电出版社,2005
ISBN 7-5084-3234-7

I. 混... II. 关... III. 混凝土面板堆石坝—筑坝
—研究 IV. TV641.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 101159 号

书 名	混凝土面板堆石坝筑坝技术与研究
作 者	关志诚 主编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 25 印张 593 千字
版 次	2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—2300 册
定 价	66.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

随着我国水利水电事业的发展和科技水平的提高,筑坝技术也有了长足的进步。近年来,在我国坝工建设领域中除对常规坝型进行了更为科学的优选与革新外,还因地制宜地大量选用了混凝土面板堆石坝,广泛展开了有关研究。由于混凝土面板堆石坝安全、经济和适应性强等特点,使其在我国水利水电建设中已成为最俱比选坝型之一。

自 1895 年美国建成 54m 高的莫拉坝至今,混凝土面板坝的建设与发展已经历了一个多世纪。我国自 1985 年开始修建混凝土面板堆石坝,截至 2004 年末,已建在建的坝高 30m 以上的混凝土面板堆石坝逾 150 座,其中 100m 以上的近 40 座,已建的天生桥一级坝高 178m,居世界第二,而其库容、坝体体积、面板面积等指标均居世界同类工程之首。在建最高的是我国的水布垭面板堆石坝,坝高 233m,为目前世界第一高混凝土面板坝。与国外相比,我国在混凝土面板堆石坝方面虽然起步较晚,但是起点高、发展快。

在近 20 年建设实践过程中,基于我国复杂的坝工建设条件,如在复杂地形、地质条件,高地震烈度区等特定条件下,建设高混凝土面板堆石坝所开展多学科的综合研究与实践也取得了大量可喜的成就,从而使我国的混凝土面板堆石坝建设不但在数量和规模上成为世界第一大国,而且其科技含量也位居世界前列。为适应高混凝土面板坝建设的需要,我国开展了 200m 级高混凝土面板堆石坝关键技术问题的研究,专题包括筑坝材料、工程特性、坝体应力变形分析、强震区面板坝动力分析、面板混凝土抗裂耐久性、适应大变形的接缝止水结构和止水

材料及新型检测设备研究等。在开创混凝土面板堆石坝筑坝技术新领域方面，除常见的混凝土面板堆石坝和面板砂砾石坝坝型外，我国还创新发展出土心墙与混凝土面板坝结合的堆石坝、喷混凝土堆石坝、溢流面板堆石坝和趾板建在深厚覆盖上的面板堆石坝等新坝型等。

我国工程技术人员，在吸收国外先进技术的同时，对在建项目关键问题进行大量和系统的技术研发，使其应用技术得到发展，设计规范不断完善，施工技术也在不断提高，许多科学研究成果得以在工程实践中广为应用，一大批设计、施工、监理、科研、管理队伍，已在各种规模的混凝土面板堆石坝的建设中迅速成长起来。

中国水利学会混凝土面板堆石坝专业委员会编辑出版的文集覆盖了混凝土面板堆石坝设计、施工、专题、科研等方面的研究与实践成果，较全面的总结了混凝土面板堆石坝设计与施工技术在我国的发展历程，并可为混凝土面板堆石坝筑坝技术与建设管理提供较详细的参考资料。

在此，谨向从事于混凝土面板堆石坝建设的专家、学者和建设者们所做出的贡献表示敬意，并向为在推进我国混凝土面板堆石坝技术的交流与发展方面做出大量组织工作的水利学会混凝土面板堆石坝专业委员会各成员单位表示感谢！并寄望我国混凝土面板堆石坝筑坝技术在我国有更大发展并创造出新的成就。

刘宁
2005年8月8日

前言

混凝土面板堆石坝现已成为世界公认的一种比较经济适用的坝型。它可适应各种地形地质条件，施工方便，填筑材料可就地取材，各类岩石开挖料可分区使用，施工机械比较单一，且施工干扰少，进度快。在我国，这种坝型的采用虽然起步较晚，但发展速度非常快。自 20 世纪 80 年代中期以来，已建和在建的高度为 30m 以上的面板堆石坝已超过 150 座，其中，100m 以上（最高坝 233m 水布垭）的面板坝已近 40 座，随着筑坝技术的发展完善近年来新的设计方法与思路、各种新型材料、防渗结构、新型施工设备、新技术在工程中得到更为广泛地应用；为其今后的发展提供了更为广阔的空间。

为在我国推广混凝土面板堆石坝筑坝技术，1997 年 4 月由水利部水利水电规划设计总院等单位共同发起成立了混凝土面板堆石坝专业委员会，并于 2002 年 8 月换届后正式纳入中国水利学会管理，成立的中国水利学会混凝土面板堆石坝专业委员会挂靠在水利部水利水电规划设计总院。现已经过了两届工作，专业委员会为推广和促进混凝土面板堆石坝筑坝技术开发与应用发挥了巨大作用，并曾参加了 SL228—98《混凝土面板堆石坝设计规范》、《中国混凝土面板堆石坝图册》的编制工作，以及多次组织水利水电工程设计、施工、科研、运行与技术管理等单位参加的学术交流活动。开展的学术研讨会紧密结合我国面板坝建设实际情况和国外先进经验，针对面板坝的设计、施工、运行管理等方面存在的问题，交流了大量具有较高学术水平和实际工程应用价值的论文，涉及了许多已建、在建和正在设计的混凝土面板堆石坝的前沿课题，如针对面板的裂

缝、接缝止水结构及止水材料、坝形设计、基础处理、新施工方法与技术等，客观地反映了我国面板坝建设的技术水平，推动了面板坝应用技术的发展。专业委员会在推广混凝土面板坝建设的科技成果时，也体现了设计、施工、建设、工程管理部门的积极支持与认可。

为配合中国水利学会混凝土面板堆石坝专业委员会第二届第三次会议的召开，我们特组织有关专家、工程技术人员撰写了有关论文，并编辑出版，旨在总结我国混凝土面板堆石坝建设的成功经验与教训，进一步促进业内同行交流和提高，为我国水利水电事业的发展做出新的贡献。

该书在编辑过程中得到了专业委员会各成员单位及有关专家的大力支持，提供了大量学术水平高、实际应用价值大的论文，从设计、施工、科研和运行管理等方面客观地反映了我国混凝土面板堆石坝建设的技术发展水平，是为今后混凝土面板堆石坝的建设提供的有价值参考资料。江河水利水电咨询中心在该书的编辑出版过程中从人员和经费方面给与了大力支持，我们在此一并表示感谢。

由于本书收稿及编辑时间紧，内容涉及广泛，且编者水平有限，故难以做到精益求精，疏漏在所难免，敬请有关专家及读者批评。

编者

2005年7月

目 录

序

前言

综述篇

中国混凝土面板堆石坝建设	蒋国澄 赵增凯 关志诚	3
混凝土面板坝工程应用技术发展综述	关志诚 韩军	18
我国高混凝土面板堆石坝筑坝技术新进展	赵增凯 韩军	25
高混凝土面板堆石坝防止面板脱空及结构性裂缝的探讨	赵增凯	38
关于高混凝土面板堆石坝设计施工的讨论	曹克明 汪易森 张宗亮	45
利用软岩筑面板堆石坝的应用研究	蒋涛 付军	56
用计算机分析论证软岩筑坝的优化	徐泽平 周晓光 梁建辉 吴兴征	74

设计篇

水布垭面板堆石坝设计与创新	杨启贵	83
水布垭面板坝土体参数反馈分析中清华非线性 K-G 模型 参数敏感性分析	刘宁 杜丽惠 廖柏华	90
混凝土面板堆石坝抗震稳定分析	赵剑明 常亚屏 陈宁 关志诚 韩军 黄小宁 章新闻	97
面板堆石坝数值分析的本构模型研究	徐泽平	104
紫坪铺水利枢纽工程混凝土面板堆石坝周边缝止水设计	尹峥 胡良文	114
紫坪铺面板堆石坝关键技术问题的处理	宋彦刚 邓良胜	117
面板堆石坝设计填筑标准的思考	陆恩施 高希章 杨志宏	128
三板溪面板堆石坝设计	蔡昌光 潘江洋	133
三板溪面板堆石坝坝体变形控制	潘江洋	137
三板溪面板堆石坝基础开挖处理设计	宁永升 潘江洋 钟谷良	143
江坪河水电站面板堆石坝筑坝材料与坝体分区设计	欧红光 殷彦高	148
小溪口工程枢纽布置和面板堆石坝趾板设计及渗流控制	杨晓明 黄继平 姚晓敏 梅运生	153

大壩面板堆石坝设计与施工的若干技术问题

..... 阎齐 邹大胜 邹军贤 陈远志	161
高塘混凝土面板堆石坝设计简述..... 周志林	167
柴石滩混凝土面板堆石坝设计与思考..... 陈 静	172
榆树沟水库枢纽工程的设计特点与运行情况	
..... 唐新军 凤炜 凤家骥 庞毅	178
洮河九甸峡水利枢纽工程混凝土面板堆石坝设计	
..... 吕生奎 温续余 庞晓岚	183
龙首二级(西流水)水电站面板堆石坝设计特点..... 武维新	189
株树桥水库大坝导致面板破坏的渗漏原因分析..... 刘庶华 何国连	194
松江河梯级双沟电站面板堆石坝安全监测设计	
..... 李俊富 于柏强 尹慧敏 韩伟	201
混凝土面板堆石坝新技术在公伯峡水电站中的应用..... 陈念水	209

新材料、新技术应用篇

新技术在水布垱面板堆石坝中的应用..... 孙役 徐艳杰 杨占宇	217
粗粒土料动剪模量和阻尼比特性试验中微小应变测试技术的	
应用..... 陈宁 常亚屏 赵剑明 章新闻 黄小宁 关志诚 韩军	226
紫坪铺混凝土面板堆石坝监测布置及仪器选择..... 邓良胜 刘大文 阳莉	234
紫坪铺面板混凝土防裂试验研究..... 罗蓉 杨建 张绍明	242
改性聚丙烯纤维混凝土用于堆石坝面板的几个问题	
..... 钟秉章 朱强 倪建华	248
滩坑水电站面板堆石坝筑坝材料湿化变形研究..... 彭育 陈振文 汤阳	255
公伯峡水电站趾板混凝土配合比试验及防裂技术研究..... 马伊岷 靳谋	265
混凝土面板堆石坝接缝止水技术的新进展	
..... 郝巨涛 鲁一晖 窦铁生 杜振坤 邓正刚	271
超硬岩筑坝面板接缝止水型式与应用的研究..... 夏建平 曾雪艳	276
面板堆石坝 SR 防渗体系止水结构..... 谭建平 张捷	282
大桥水库大坝安全监测..... 王建华 高希章	289
大水沟小粒径石料填筑混凝土面板坝堆石体试验与研究	
..... 李康民 张胜利 程平均 马青海	293
面板堆石坝坝料爆破开采技术研究..... 梁向前 傅海峰	301
聚丙烯腈纤维在水工混凝土面板结构中的应用..... 刘凤茹 张海文 何唯平	306

施工篇

那兰面板坝工程设计与施工..... 杨和明 李娟 徐更晓	313
那兰水电站面板堆石坝坝体填筑料压实规律研究..... 罗伟 于景波 徐更晓	327

公伯峡水电站混凝土面板堆石坝工程坝料质量控制

.....	尹红东 杜七一 李明	333
现场填筑碾压试验方法探讨.....	李体建	340
小溪口大坝混凝土面板施工与防裂措施.....	吴哲 任耕云 杨正贵	343
芭蕉河一级水电站混凝土面板坝的质量控制		
.....	徐中秋 王国欣	349
优化混凝土控制面板裂缝.....	郭菊玲	357
浅析混凝土面板堆石坝密实度的检测技术.....	于子忠 郭新涛 李天华	364
公伯峡水电站混凝土面板施工技术.....	李宜田 李宏伟 范亦农	369
公伯峡水电站料场规划管理与坝体填筑.....	尹红东 张向东	377
大水沟水库面板混凝土施工.....	程平均	385

综 述 篇

中国混凝土面板堆石坝建设

蒋国澄¹ 赵增凯² 关志诚²

(1. 中国水利水电科学研究院 2. 水利水电规划设计总院)

自 1985 年开始我国利用现代技术修建混凝土面板堆石坝已经过 20 年历程。从引进、吸收到自主研究开发和推广应用,均处于快速发展阶段,据不完全统计,至 2004 年我国已建在建 100m 以上面板坝工程已接近 40 座,其数量、规模和技术进步等方面均处于世界前列。为推动这一技术健康发展,总结和回顾工程建设中设计、施工、监测等应用技术具有重要意义。

1 发展概况

我国利用现代技术修建混凝土面板堆石坝从 1985 年开始,起步虽晚,但起点高,发展快。到 2005 年的不完全统计,已建成和在建的坝高大于 30m 的约 150 座,其中坝高大于等于 100m 的近 40 座,见表 1。已建成最高的是天生桥一级,高 178m,居世界第二,而其库容、坝体体积、面板面积、电站装机容量等指标均居世界同类工程之首。在建最高的是水布垭,坝高 233m,为目前世界第一高度混凝土面板堆石坝。

表 1 我国混凝土面板堆石坝(坝高不小于 100m, 2004 年)

序号	坝名	地点	河流	坝高 (m)	坝体体积 (万 m ³)	面板面积 (m ²)	库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	完成 年份
1	水布垭	湖北巴东	清江	233.0	1526	137000	45.80	1600	在建
2	三板溪	贵州锦屏	清水江	185.5	828	84000	40.95	1000	在建
3	洪家渡	贵州黔西	六冲河	179.5	920	75100	49.47	600	在建
4	天生桥一级	贵州、广西	红水河	178.0	1800	177000	102.60	1200	2000
5	滩坑	浙江青田	小溪	162.0	980	95000	41.90	600	在建
6	紫坪铺	四川都江堰	岷江	158.0	1117	108800	11.12	760	在建
7	吉林台	新疆尼勒克	喀什河	157.0	836	74000	24.40	460	在建
8	马鹿塘	云南麻栗坡	盘龙江	154.0	800			300	在建
9	龙首二级	甘肃张掖	黑河	146.5	253	26400	0.86	157	2004
10	瓦屋山	四川洪雅	周公河	140.0	350	20000	5.50	240	在建
11	九甸峡	甘肃	洮河	136.5	385	41300	9.72	300	在建

续表

序号	坝 名	地 点	河 流	坝高 (m)	坝体积 (万 m ³)	面板面积 (m ²)	库容 (亿 m ³)	装机容量 (MW)	完成 年份
12	珊溪	浙江文成	飞云江	132.5	580	70000	18.24	200	2001
13	公伯峡	青海循化	黄河	132.2	476	57500	6.20	1500	2004
14	乌鲁瓦提	新疆和田	喀拉喀什	133.0	649	75800	3.47	60	2000
15	龙马	云南墨江	把边江	130.0				280	在建
16	引子渡	贵州平坝	三岔河	129.5	310	37500	5.31	360	2002
17	街面	福建尤溪	尤溪	129.0	340	30000	18.20	300	在建
18	白溪	浙江宁海	白溪	124.4	403	48400	1.68	18	2001
19	鄂坪	湖北竹溪	汇湾河	124.3	298	43000	2.96	114	在建
20	黑泉	青海大通	宝库河	123.5	540	79000	1.82	12	2000
21	芹山	福建周宁	穆阳溪	122.0	248	42000	2.65	70	1999
22	白云	湖南城步	巫水	120.0	170	14500	3.60	54	1998
23	古洞口	湖北兴山	古夫河	117.6	190	28100	1.48	45	1999
24	芭蕉河	湖北鹤峰	芭蕉河	115.0	192	36000	0.99	34	在建
25	洒南江	云南墨江	洒南江	115.0	297		2.63	200	在建
26	高塘	广东怀集	白水河	111.3	195	26400	0.96	36	2000
27	金造桥	福建屏南	金造溪	111.3	175		0.95	60	在建
28	双沟	吉林抚松	松江河	109.7	258	37300	3.90	280	在建
29	那兰	云南金平	藤条江	108.7	259	40800	2.86	150	在建
30	鱼跳	重庆南川	大溪河	106.0	195	18800	0.95	48	2001
31	鲤鱼塘	重庆开县	桃溪河	105.0	180	25300	1.02	1.5	在建
32	洞巴	广西田林	西洋江	105.0	316	52700	3.15	72	在建
33	茄子山	云南龙陵	苏帕河	103.6	129	22000	1.26	16	2000
34	思安江	广西桂林	思安江	103.4	210	41200	0.94	12	2003
35	盘石头	河南鹤壁	淇河	102.2	548	73500	6.08	10	2003
36	柴石滩	云南宜良	南盘江	101.8	235	38200	4.37	60	2000
37	白水坑	浙江江山	江山港	101.3	150		2.46	40	2003
38	金家坝	重庆酉阳	甘龙河	107.5	251.5	33600	1.6	6.9	在建
39	中梁	重庆巫溪	甘龙河	118.5	250.95	33370	0.99	12.2	在建

我国在混凝土面板堆石坝建设过程中,一方面紧跟世界先进潮流;另一方面也十分重视自主的科学研究和技术开发。曾多次列入国家重点科技攻关项目、国家自然科学基金重点课题及水利水电行业重点科技课题,组织全国相关单位科技力量,对混凝土面板堆石坝建设中的关键问题,进行了大量和系统的科学研究,取得的成果应用于工程实践,推动了科技进步。工程运用实践表明,混凝土面板堆石坝的安全性、经济性和适应性已为坝工界

同仁所公认,而这种坝型也已成为一种富有竞争力的比较坝型,且在很多情况下成为首选坝型。我国的混凝土面板堆石坝已遍布全国,在较强地震、严寒、深覆盖层、不良地形等恶劣自然条件下也成功地修建了不少高面板坝。并在工程实践经验和科技成果的基础上,编制了相应的设计和施工规范,指导混凝土面板堆石坝的建设。还出版了技术专著和刊物,举办讲习班和技术研讨会,进行广泛的技术交流,对推广和完善这种新坝型起了积极作用。同时在建设混凝土面板堆石坝的实践中,成长起来的设计、施工、监理、科研、管理的科技队伍,能够承担各种规模的混凝土面板堆石坝的建设任务。

中国混凝土面板堆石坝的建设成就,也得到国际坝工界的公认。1993年和2000年先后在北京召开了由国际大坝委员会支持的国际混凝土面板堆石坝学术研讨会,并分别出版了论文集。2000年参与主编了国际性的“库克纪念文集——混凝土面板堆石坝”,还撰写了“中国混凝土面板堆石坝”的纪念文章。2004年中国第三届水力发电国际学术研讨会上也有混凝土面板堆石坝的专题。国外同行专家都积极参加了这些会议,达到了广泛交流的目的。

中国混凝土面板堆石坝的建设经验和研究成果,丰富了混凝土面板堆石坝的知识宝库,如工程枢纽布置和坝体结构、三维动静力有限元分析、土工离心模型试验、减少坝体变形和不均匀变形、混凝土面板裂缝控制和处理、先进的施工技术及挖填平衡利用、接缝止水结构和材料、原型观测和资料分析等,在理论和实践方面都有所进展,许多领域已走在世界前列。未来的混凝土面板坝建设,设计、施工及科研人员将更加注重工程建设区的合理布局,合理的分标及施工排序以充分利用各类建筑物开挖料,关注和落实环境保护和水土保持配套建设,并最大限度的节约土地资源。

2 分析与试验

2.1 粗粒料试验

堆石坝坝体材料包含堆石料和砂砾石料两大类,由于需要大型仪器设备和工作量很大的特点,以往做得较少。随着面板堆石坝的兴起,中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、昆明勘测设计研究院科研所等单位都建立了大型三轴、压缩、平面应变、渗透、相对密度等试验仪器,配备了自动化的数据采集和处理系统,进行了大量基本研究工作。

尺寸效应方面,用直径70cm、30cm、10cm的三轴仪进行的比较试验,表明对强度指标影响不大,但应力应变关系不同。试验用模拟级配分别不同情况采用等量替代、平移、综合法制备。平面应变试验的强度指标比三轴试验略大。不同应力路径试验的结果有明显差异。根据大量比较试验结果,参照国外情况,确定以30cm直径的三轴仪作为常规试验设备。由于应力水平和应力路径对试验成果有明显影响,大型三轴仪应能进行高围压和不同应力路径的试验。

由于粗粒料法向应力与剪应力关系曲线有明显的非线性,抗剪强度包线以对数或指数函数形式表达,较为符合强度与应力关系的实际情况。

对应力应变关系而言,常用的有非线性弹性和弹塑性本构模型。在非线性本构模型中,最常用的是邓肯一张的E-B(或E- ν)模型,理论上不能考虑剪胀性等缺陷,但使

用方便,有较多经验;清华的解耦 K-G 模型可以将球应力和偏应力的加载卸载情况分别考虑,较为符合土石坝的实际应力路径,但使用得较少。南水的双屈服面弹塑性模型可以考虑剪缩性的影响,也是用得较多的一种模型。这些模型的计算参数都可以用常规三轴试验确定。

在大型压缩试验中也显示出压力对变形参数的影响,且在一定压力范围内有一低模量区,表现出颗粒破碎作用。因此高压试验也是必要的。

基于大量试验室试验研究的成果,我国制定了粗粒料物理力学性试验的国家标准和行业规范,使工作有所遵循,也使试验成果有可比性。

2.2 应力应变有限元分析

现在应力应变有限元分析的应用已相当普遍。开始时各家计算结果往往相差很远。随着经验的积累和方法的改进,并注意了计算参数的选择,以及对一些细节问题进行适当处理,各家计算结果的差别已不大,其分布大致相似,数值上 E-B 模型略大于双屈服面模型,都在合理范围之内,与原型观测结果有一定的可比性。解耦 K-G 模型的使用经验较少。

由于计算技术的发展,解题的规模和速度都有很大提高。有可能尽量模拟实际施工和蓄水过程,进行仿真计算,使结果更为合理。各主要科研单位、高等院校、设计单位都有自行开发的计算程序,有较强的前后处理功能,并积累了丰富的经验,可以解决各种难题,取得合理的计算成果。但由于土石材料本身性质和施工、运行过程的复杂多变,不可能全部模拟到位,一般在定性上是较为接近的,但定量上会有差别,所以目前仍作为设计的重要参考,而不能作为唯一依据。

应力应变计算成果的验证是一项困难的问题。现在可采用的途径有原型坝观测资料、模型试验资料、室内三轴试验资料的反分析验证,表示在三种不同尺度下的计算成果的符合程度。原型成果应该是足尺模型,代表实际情况,但由于材料的非匀质性及应力途径的难以控制,在仿真计算中要作很多简化假定,使反馈分析成果的真实性有一定影响,而用反分析得到的参数再作正分析,则是较为可信的方法。模型试验是经过缩尺的,但材料性质和应力途径能较好控制,用不同计算方法计算模型坝,以验证计算方法的正确性,是有效的途径,特别是土工离心模型试验,模型的应力水平可做到与原型相当,对验证计算方法的效果当更好。三轴试验是一个试件的尺度,可以用于验证模型及参数的可信度。不管用那种尺度的计算对象,也都要与经验和判断相结合,才能得到更好效果。

2.3 抗震问题

由于我国是强地震多发的国家,位于强震区的混凝土面板堆石坝很多,因此抗震问题得到了应有的重视,进行了许多研究工作,取得了处于国际前列的成果。

用有效应力原理进行土石坝及其地基的动力分析,考虑孔隙水压力的扩散和消散过程,用真非线性的黏弹塑性模型进行三维动力分析,是目前较为先进的方法,并已有相应的参数确定和计算程序,可以在实际工程中应用。这样得到的动力响应过程较为符合实际情况,且还可以在动力分析中直接得出地震残余变形量。对砂砾石地基,为更好考虑砂砾石层的地层结构和原状砂砾石料的结构性。还曾采用现场与室内试验相结合的方法,确定计算参数。

为了将静力和动力耦合进行分析,开发了静动力耦合的试验方法,在三轴试验仪上安装了高精度的变形和压力传感器,以便用一个试件同时进行静力和动力试验,得出静动力力学参数。并为此建立了相应的本构模型,编制了计算程序,可以一次得出静力和动力分析成果,以代替静力和动力分别计算,再叠加起来的方法。

利用振动台模型试验研究面板坝的动力特性和破坏性态,也做了大量工作。由于模型坝尺度很小,应力水平远低于原型,还不能建立原型和模型之间的相似规律,但从破坏性态等方面,与实际地震中观测到的现象十分相似,还是可以从中得出一些定性的规律,如面板对坝体地震反应有一定的抑制作用;坝体破坏从下游坡接近坝顶部位开始,表现为坡面的表层滑动;面板断裂发生在其上部,主要影响因素是坝顶土体的破坏,坝体地震变形引起的面板上部的拉应力也是断裂的诱因;加强坝顶部位的刚度,采用加筋堆石和钉结护面板,适当放缓坝顶下第一级坝坡,坝顶下游坝肩用大石堆砌,防止坝顶附近土体的破坏等,均具有实用价值。

2.4 土工离心模型试验

土工离心模型试验中可以利用离心力提升模型坝中的应力水平,达到与原型相似的水平,这是其他模型试验方法所无法比拟的。中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、长江科学院等科研单位,均建置了大型离心机,做了许多面板坝的试验工作。中国水利水电科学研究院的设备容量为 $450\text{g} \cdot \text{t}$,最大加速度可达 300g ,南京水利科学研究院的设备容量也在同一量级。我国的一些主要混凝土面板堆石坝,如天生桥一级等,都做过这种试验。对面板坝工程中一些难题,也曾用工土工离心模型试验进行论证。

小干沟混凝土面板堆石坝的最大坝高 55m ,为改造不利地形条件,在上游及两坝肩设置了三道混凝土挡墙,高度分别为 25.2m 、 6.2m 、 4.2m 。为论证其可行性,进行了三维有限元分析及土工离心模型试验,得到上游高挡墙蓄水期向下游位移 12mm ,水位降落期向上游位移 13.2mm ,在止水结构的允许范围之内。蓄水 15 年来,其渗漏量不足 3L/s ,运行情况良好。

在分期浇筑混凝土面板时,常发现面板顶部混凝土与垫层料之间有脱空现象,将对面板受力条件有不利影响,这是混凝土与垫层料之间变形不协调所致,其发展深度有一定限度。在天生桥一级混凝土面板堆石坝土工离心模型试验中,做了脱空试验,量测到脱空深度约为 7m ,脱空宽度随深度而收敛。为此一般要求分期浇筑混凝土面板顶部与上部坝体顶面之间的高差不宜小于 5m ,以避免或减小脱空现象。

在试验研究过程中,还解决了一系列试验技术问题,如粗粒料的缩尺、混凝土面板的模拟、分期施加荷载、物理量的量测和传输等,目前正在解决其动力特性试验的问题。

3 恶劣自然条件下的混凝土面板堆石坝

3.1 高寒地区的混凝土面板堆石坝

我国在高寒山区和高纬度严寒地区建成的面板坝将近 20 座。新疆柯柯亚坝,坝高 41.5m ,最低气温达 -32.5°C ,年温差大于 70°C ,昼夜温差在 20°C 以上,要求面板混凝土抗冻标号 D200,并在其表面涂以黑色憎水材料,使水面冰盖与坝面间保持 $1\sim 3\text{cm}$ 的不冻区。在面板下的垫层区采用渗透系数 $k=10^{-2}\sim 10^{-3}\text{cm/s}$ 的材料,运行情况良好。在高

纬度地区的黑龙江莲花面板坝,高 71.8m,年最低温度为 -45.2°C ,冰层厚度达 1.3m,冰期每年达 5 个月之久,年温差达 80°C ,日温差达 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$,运行条件十分恶劣。采取的措施是提高面板混凝土设计标号至 300 号、S8、D300,降低水灰比,掺引气剂使含气量达 $4\%\sim 6\%$,同时在面板表面涂一层防护涂料。面板浇筑后越冬时采取可靠的保温措施,避免混凝土早冻。运行中出现的问题是表面塑性止水材料压接用的膨胀螺栓为冰盖拔出,作了不少处理工作。西藏的查龙坝,坝顶高程为 4388m,为世界上高程最高的面板坝,坝高 39m,1995 年建成,年最低气温达 -41.2°C ,西藏的楚松面板坝,坝顶高程 4190m,情况也极为相似。

其他年气温低于 -30°C 的面板坝还有黑泉(高 123.5m,温度 -33.1°C)、小山(高 86.3m,温度 -40.5°C)、双沟(高 109.7m,温度 -37.7°C)、关门山(高 58.5m,温度 -37.9°C)、卡浪古尔(高 62m,温度 -40.5°C)、小干沟(高 55m,温度 -33.6°C)、山口(高 40.5m,温度 -44.8°C)、龙首二级(高 146.5m,温度 -33°C)、海潮坝(高 56m,温度 -31.5°C)等。

综观上述工程,寒冷地区的面板坝采取的措施有:

(1) 加强坝体碾压,在冬季不能洒水时,采取减薄层厚,增加碾重和碾压遍数等保证压实质量,天暖时坝面连续加水浸润,以增加施工期沉降。

(2) 提高面板混凝土抗渗抗冻标号,掺高效减水剂和引气剂,尽量降低水灰比(如查龙降到 0.35),使含气量达 $4\%\sim 6\%$,有的达 $5\%\sim 7\%$ 。

(3) 面板表面涂黑色憎水(憎冰)涂料,增加热交换,维持冰面和面板间有一层不冻水。

(4) 适当增加面板钢筋含量,在水面变动区及以上增设表层温度筋。

(5) 选择面板混凝土的有利浇筑时机,采取可靠保温措施,避免混凝土早冻。

(6) 改进表面止水与面板混凝土的联结方式,避免膨胀螺栓为冰盖拔出破坏。

3.2 高地震区混凝土面板堆石坝

我国已建在建的高于 100m 的近 40 座面板堆石坝中,坝址位于地震烈度 8 度地震区的有黑泉、茄子山、吉林台(按 9 度设防);地震烈度位于 7 度区的有天生桥一级、乌鲁瓦提、柴石滩、紫坪铺、公伯峡、那兰;其余在 6 度及以下地区。还有大桥水库面板坝(高 95m,按 8.5 度设防)、海潮坝(高 56m)、查龙(高 39m),也在 8 度区。但这些工程都没有经过实际地震的考验。

一般认为面板堆石坝的抗震稳定性是好的,但设计上仍要采取一些抗震措施,如坝上部适当放缓坝坡,预留震陷超高、加大坝顶宽度、坝顶坡面采用大块石砌护、加强坝顶刚度(必要时在坝顶附近采用加筋堆石、上下游坝顶挡墙连成整体)等。我国对堆石坝料物的动力试验及动力分析方面研究得比较深入,取得了达到国际先进,部分达到国际领先的成果,对高地震区的面板堆石坝建设有所促进。

3.3 深覆盖层上的混凝土面板堆石坝

我国有许多河流有深厚覆盖层,特别是西部地区问题更为突出,将面板堆石坝趾板建于覆盖层上,用混凝土防渗墙对砂砾石地基进行防渗处理,以连接板将坝基混凝土防渗墙与混凝土面板连接起来,形成完整的防渗体系,是一种安全而又经济的解决方案。