

CONCRETE FACE ROCKFILL DAM ENGINEERING

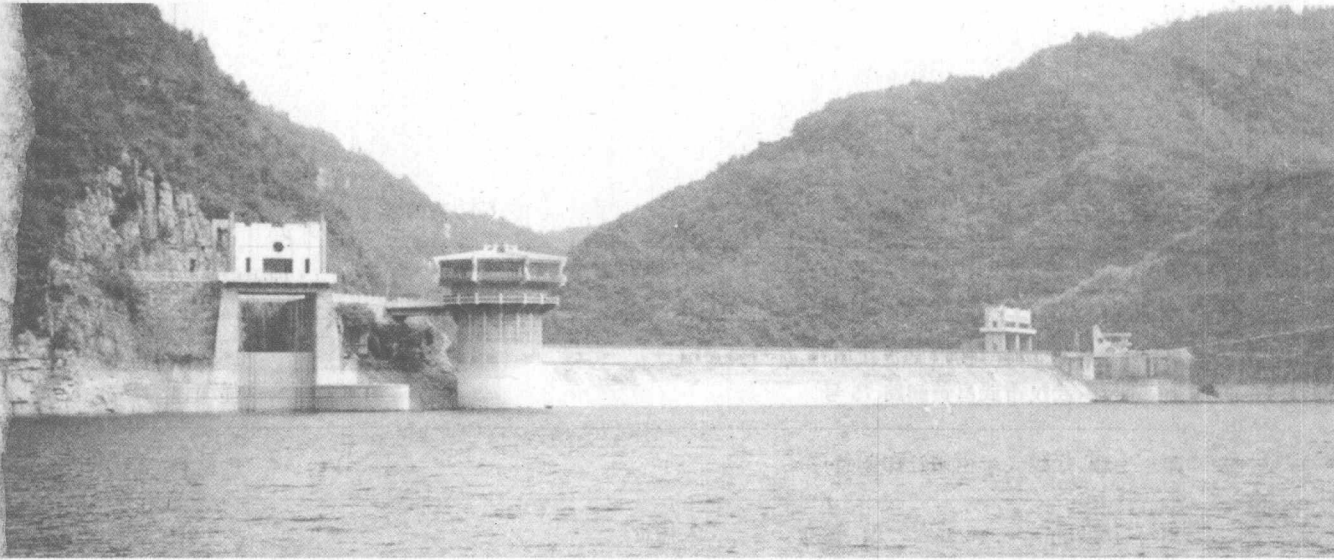
主要内容

本书共分十二章，较系统地介绍了混凝土面板堆石坝工程
设计、施工、运行、维护、加固、拆除等各个环节的理论和
实践经验，可作为从事该专业工作的工程技术人员、设计
人员和管理人员的培训教材，也可供从事该专业工作的工程
技术人员、设计人员和管理人员参考。

混凝土 面板坝工程

湖北科学技术出版社

蒋国澄
傅志安 主编
凤家骥



CONCRETE FACE ROCKFILL DAM ENGINEERING

序 言 1

随着我国水利水电建设的发展,混凝土面板堆石坝成为近 10 多年来得到很大发展的一种新的坝型。据不完全统计,目前我国超过 50m 高的混凝土面板堆石坝已建成和基本建成的 20 座,其中西北口水库大坝最高, 95m。在建坝高超过 50m 的混凝土面板堆石坝 30 座,其中 178m 的天生桥一级水电站大坝,是当前我国在建最高的混凝土面板坝。此外,正在设计和进行坝型方案比较的有几十座,其中,清江水布垭(高 232m)、乌江洪家渡(高 182.3m)等,坝高均处于同类坝型的世界前列。混凝土面板堆石坝所以能迅速发展的主要原因是具有充分利用当地材料、适用性广、施工简便、工期较短、造价较低等优点。它是较适合我国水利水电工程条件和国情,具有较强的生命力。

我国混凝土面板堆石坝的发展经历了引进、消化、实践和总结的过程。同时,得到国家科委、电力部、水利部、国家自然科学基金委的支持,列入“七五”、“八五”国家重点科技攻关计划和重点计划,进行了多学科试验研究,也促使设计、科研、施工各部门紧密结合。不仅获得一批工程的枢纽布置、坝体设计和趾板设计、接缝止水设计、坝体材料选择、混凝土面板的工艺和配比设计、泄洪和导流等课题研究成果;而且通过不断总结,逐步趋向理论研究,取得了丰硕成果。这些是我们长期从事混凝土面板堆石坝工程的同志们辛勤劳动的成果。

虽然我们取得了很好的成果,但与国际先进水平比较仍有差距。目前世界上高于 100m 的混凝土面板堆石坝,已建和在建的有 37 座,我国占 10 座。其中已完成最高的是墨西哥阿瓜密尔巴(Aguamilpa)坝,高 187m;正在修建的马来西亚巴昆(Bakun)水电站大坝,高达 205m;完成最早的是美国盐泉坝(Salt Springs, 100m, 1931 年)。由于我国发展起步晚,时间短,虽有许多高难度技术课题有待攻克,但从发展速度、规模、数量和攻克难度来衡量,成绩是显著的。

我国混凝土面板堆石坝学术活动十分活跃。1993 年北京召开国际高土石坝会议,刊印研究论文集;电力部颁发《混凝土面板堆石坝设计导则(DL5016-93)》和水利部颁发《混凝土面板堆石坝施工规范(SL49-94)》;在青海省沟后的大坝失事后,组织溃坝失事原因分析,刊印论文集;1995 年在昌平召开中国混凝土面板堆石坝十年纪念讨论会,刊印论文集;出版了《面板堆石坝通讯》季刊和《混凝土面板堆石坝》科技专著以及中国混凝土面板堆石坝图集等。这些活动极大地推动了混凝土面板坝的发展,使其更趋于广泛和规范化。

我国混凝土面板堆石坝学术活动的大规模开展以及先后几批混凝土面板坝的建成,积累了大量实践经验。虽然在 1993 年编著了《混凝土面板堆石坝》科技专著,还不能满足我国当前混凝土面板堆石坝发展的需要。经中国水利学会施工专业委员会面板堆石坝学组和中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会研究决定,认为在原书

基础上进行补充修改，重新编辑出版《混凝土面板坝工程》一书，很有必要。

本书汇集了国内外混凝土面板堆石坝科研成果和建设经验，基本理论和工程实践相结合，使本书具有广泛实用价值，以促进混凝土面板坝技术更深入和更广泛的发展。作者们都参加过实际工程设计、科研、施工等各方面工作，具有实践经验。

我深信本书的出版将会促使混凝土面板堆石坝在我国取得更大的发展。

原 水 利 部 副 部 长 陈贻仪
中国长江三峡工程开发总公司顾问

1996年9月18日于北京

序 言 2

混凝土面板堆石坝是近二三十年内发展起来的一种坝型。与常规的粘土心墙堆石坝相比，它具有投资省、工期短、安全性好、就地取材、施工方便、导流简易、适应性广等优点，受到国内外坝工界的普遍重视，是极有发展前途的一种新坝型。

我国水电资源富冠全球，亟待加速开发利用，水电建设正方兴未艾。但在高坝中采用土石坝的比例较小，这有历史和认识上的因素，也确实存在修建高土石坝时面临的一些困难，例如，水电富矿地区雨季较长，河流导流流量巨大，峡谷河段缺乏合适的防渗土料以及断面过大等。混凝土面板堆石坝的问世，恰好在这些方面提供了解决的途径。因此，这种坝型在我国得到迅速发展和广泛采用，并将在今后坝工建设中成为具有很强竞争力的坝型，决不是偶然的。

我国的混凝土面板堆石坝筑坝技术自列入国家“七五”科技攻关项目以来，已有较大的发展。起步虽晚，但起点高，发展快，10多年间，据不完全统计，已建和在建的已达60余座。其中坝高在100m以上的有10座；在建的天生桥一级坝高178m；已设计待开工的乌江洪家渡面板堆石坝坝高182.3m；正在可行性论证的清江水布垭面板堆石坝坝高达232m。这种坝型在中国的建设和发展，已积累了丰富的实践经验和成套的科研试验成果，短时间内在数量上、规模上、高度上和难度上都达到当前的国际水平。

在国家“七五”科技攻关项目研究成果和第一批9座混凝土面板堆石坝建成后，本书的作者们曾于1993年编辑出版过《混凝土面板堆石坝》专著，受到面板坝建设者的欢迎。此后又有更多、更高的混凝土面板堆石坝兴建，同时又开展了大量的研究试验工作和观测反馈工作，取得了可贵的和有特色的成果。在总结新的经验和教训的基础上，重新编辑出版《混凝土面板坝工程》一书，以迎接更大的建设高潮是极为必要的。

本书是中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会和中国水利学会施工专业委员会面板堆石坝学组在水利电力有关部门的支持下，组织国内专家们集体编写的，执笔同志均参加过混凝土面板堆石坝实际工程的设计、施工或科研工作，具有实践经验。全书不仅对混凝土面板堆石坝的整个领域——包括材料特性、设计、基础处理和防渗、施工和监测作了较全面的介绍和提供了工程经验、工程实录，保持了原来编辑出版《混凝土面板堆石坝》的优点外，而且充实了国内外关于面板坝枢纽布置、材料选择、坝体设计、细部构造和施工技术等方面的新经验和新发展，增补了一些新的工程实录，所以又具有时代上的先进性。因此它既是一本极富实用价值和具有中国特色的专著，又是一本跟上国内外最新发展的新书。我相信本书的出版将对我国面板坝的推广和发展起到良好的作用。

我国的混凝土面板堆石坝技术虽然发展很快，但由于这种坝本身具有十分复杂的结构，在某些问题上专家们尚有不同见解。因此，今后我们还将面临许多挑战，继续研究的任务仍然艰巨。例如，如何确定碾压堆石体的更合理的本构模型、测定其参数；如何更精确地进行坝体在施工期和运行期中的静动力及变形分析，做好止水设计；预测坝体在强烈震动后的形态及稳定性；如何在不利气候条件下快速大面积浇筑面板而防止开裂；如何在较软弱的地基上设计和修建混凝土面板堆石坝以及特高（200m 及以上量级）混凝土面板堆石坝中的问题等等。这些问题都不是在一次攻关中能彻底解决的，我们期待着中国的坝工界能通过研究和实践取得更多的突破，使我国混凝土面板堆石坝技术能跃居国际领先水平。我谨以此致意于本书的编者和读者。

电 力 工 业 部 技 术 顾 问
中 国 工 程 院 副 院 长 、 院 士
中 国 科 学 院 院 士 潘家铮
中 国 长 江 三 峡 开 发 总 公 司 技 术 委 员 会 主 任
中 国 大 坝 委 员 会 主 席
1996 年 8 月 26 日

前 言

混凝土面板堆石坝是60年代后期在国际上重新兴起的新坝型,以其安全性、经济性、适应性好的特点,而受到坝工界的普遍重视。国内外已建在建100m以上高混凝土面板堆石坝已达37座,最大坝高在建达205m,已建成达187m,运行情况都良好,设计和施工技术也日趋完善。中国现代混凝土面板坝的研究和建设始于1985年,起步虽晚,但起点高、发展快,到1996年已建成27座,在建39座,其中坝高在100m以上的有10座,还有一批已选定坝型的待建工程,坝高有的达到200m量级。这种新坝型在中国的研究应用和创新,积累了丰富的实践经验和成套的科研成果,在国际上也有一定地位。现在混凝土面板堆石坝已成为富有竞争力的坝型之一,并成为水利水电行业重点推广项目之一。

1992年,为了推广国家科技攻关项目《混凝土面板堆石坝筑坝技术研究》成果,能源部科技司曾委托有关单位在中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会和中国水利学会施工专业委员会面板堆石坝学组协助下,组织出版了由傅志安、凤家骥主编的《混凝土面板堆石坝》一书。这一科技专著的出版,对促进我国面板堆石坝的发展起到了较好的作用。该书现已销售一空。为了满足我国面板堆石坝蓬勃发展的需要,在该书的基础上,进一步收集国内外面板堆石坝建设的新成果、新经验,重新编写一本反映当前新水平的《混凝土面板坝工程》一书,很有必要。

本书以国内外建设混凝土面板堆石坝的实践经验和科研成果为基础,系统介绍和论述其枢纽布置、筑坝材料特性及坝体设计、防渗结构与坝基处理、施工方案和导流渡汛、坝料的开采、运输和填筑、混凝土面板与趾板的施工及原型监测等方面的最新成就及各种学术观点,着重于一些基本概念的阐述和工程实录,使本书有较强的系统性和实用性,以推动这项新技术在水利水电工程中的更广泛应用为目的。同时也使本书能成为从事设计、施工、科研、管理各方面工作的科技人员及大专院校相关专业师生的重要参考书。

本书共分10章,由从事混凝土面板堆石坝的建设、开发和研究的专家和科技人员分别执笔编写,他们是蒋国澄(中国水利水电科学研究院),第1、2章;司洪洋(南京水利科学研究院),第3、10章;凤家骥(新疆八一农学院),第4、5章;金诚和(水利部江河水利水电工程咨询中心),第6章;傅志安(中国水利水电工程总公司宜昌中水科技发展有限公司),第7章;吴哲(葛洲坝股份有限公司施工科学研究所),第8、9章。全书由主编蒋国澄统稿修订,由主审纪云生、赵增凯审定。

本书是在中国电力工业部科技司主持和支助下,由中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会和中国水利学会施工专业委员

会面板堆石坝学组组织编辑，并得到电力工业部水电水利规划设计总院、水利部水利水电规划设计总院、湖北清江水电开发有限公司、中国人民武装警察部队水电一总队、中国电力企业联合会标准化工作部、中国葛洲坝集团公司施工研究所、青海省小干沟工程管理局、浙江省水利水电勘测设计院、中国南方电力联营公司天生桥建设管理局和浙江省水利水电工程局、中国水利水电总公司宜昌中水科技发展有限公司等单位赞助，在此一并表示感谢。

我们诚恳希望读者对本书的缺点和错误批评指正。

编者

1996年8月

目 录

1 概论	1
1.1 混凝土面板堆石坝的发展	1
1.1.1 国际	1
1.1.2 国内	5
1.2 现代混凝土面板堆石坝的特点	13
1.2.1 薄层碾压堆石	13
1.2.2 滑模浇筑面板混凝土	15
1.2.3 薄型趾板	16
1.2.4 级配垫层料	17
1.3 混凝土面板堆石坝的优点	18
1.3.1 安全性	18
1.3.2 经济性	20
1.3.3 适应性	21
2 坝址选择与枢纽布置	24
2.1 坝址选择	24
2.1.1 地形条件	24
2.1.2 地质条件	25
2.1.3 对地形地质条件的人工改造	26
2.1.4 当地建筑材料	28
2.2 坝轴线及趾板线选择	29
2.3 枢纽布置	31
2.3.1 枢纽建筑物土石方的挖填平衡	31
2.3.2 坝顶泄洪	32
2.3.3 关于放空洞	38
2.3.4 老坝加高问题	40
3 筑坝材料的工程性质	47
3.1 概述	47
3.2 筑坝材料的岩石性质	48
3.2.1 岩性	48
3.2.2 岩石的基本性质	49
3.2.3 岩石的抗压强度分类	49
3.2.4 岩石的风化程度	50
3.2.5 堆石按岩块及级配特性的分类	50
3.3 堆石料的工程性质	51
3.3.1 堆石料的级配特性	51
3.3.2 堆石料的密度性质	53

3.3.3	堆石料的压缩变形性质	55
3.3.4	堆石的强度与应力应变性质	62
3.3.5	堆石料的渗流性质	74
3.3.6	堆石料的压实性质	77
3.4	砂卵石料的工程性质	78
3.4.1	砂卵石料的级配性质	78
3.4.2	砂卵石料的密度性质	81
3.4.3	砂卵石料的压缩变形性质	83
3.4.4	砂卵石料的强度性质	85
3.4.5	砂卵石料的渗流性质	86
3.4.6	砂卵石料的压实性质	88
4	坝体设计	90
4.1	坝体轮廓规划	90
4.1.1	坝顶构造	90
4.1.2	坝坡	93
4.2	堆石坝体分区	94
4.2.1	坝体材料分区的目的与原则	94
4.2.2	坝体材料分区	95
4.3	垫层区设计	96
4.3.1	垫层设计思想的演变	96
4.3.2	垫层料的选择	99
4.3.3	垫层尺寸的设计	102
4.3.4	垫层小区的设计	104
4.3.5	垫层表面的保护措施	105
4.3.6	天生桥一级坝垫层设计实例	105
4.4	主堆石区设计	108
4.4.1	主堆石坝料选择	108
4.4.2	堆石区分区设计	111
4.4.3	砂砾石坝体设计	117
4.4.4	软岩堆石体设计	127
4.5	坝料填筑标准的设计	132
4.6	地震区的混凝土面板堆石坝	135
4.6.1	混凝土面板堆石坝的受震实例	136
4.6.2	混凝土面板堆石坝的动力分析与计算	141
4.6.3	堆石坝体的地震反应	142
4.6.4	混凝土面板堆石坝的地震稳定性粗估方法	145
4.6.5	混凝土面板堆石坝地震永久变形的估算	149
4.6.6	混凝土面板堆石坝抗震措施	153
4.7	设计计算	155
4.7.1	面板堆石坝坝坡稳定分析	156

4.7.2	面板堆石坝变形估算	158
4.7.3	面板堆石坝应力应变分析	161
4.7.4	面板堆石坝渗透估算	164
5	防渗结构与地基处理	168
5.1	趾板与趾板地基渗流控制	168
5.1.1	趾板设计	168
5.1.2	趾板岩石地基处理	176
5.2	混凝土面板设计	179
5.2.1	面板的分块与分缝	180
5.2.2	面板厚度	184
5.2.3	面板的配筋	185
5.2.4	面板混凝土设计	186
5.2.5	关于面板的裂缝问题	192
5.3	面板接缝设计	196
5.3.1	面板接缝的结构及止水设计	196
5.3.2	几座已建面板坝的接缝变形和漏水情况	202
5.3.3	面板接缝止水材料基本性能	203
5.4	建造在覆盖层上的混凝土面板堆石坝	207
5.4.1	建造在覆盖层上的面板坝实例	209
5.4.2	在覆盖层上建造面板坝的工程措施	215
5.5	堆石体地基处理	216
5.6	坝头岩体的处理	217
6	导流渡汛与施工方案	219
6.1	概述	219
6.2	导流渡汛标准	220
6.2.1	《水利水电工程施工组织设计规范(SDJ338-89)》的有关规定	220
6.2.2	面板堆石坝导流渡汛标准的实际情况	223
6.3	导流方式及其选择	225
6.4	施工期渡汛及坝体填筑分期	227
6.4.1	坝体以临时断面挡水渡汛	227
6.4.2	坝体先期过流,后期挡水渡汛	231
6.4.3	河床留缺口过水或分期导流、坝体分段填筑、分期渡汛	238
6.4.4	围堰挡水、基坑全年施工	241
6.5	围堰设计	246
6.5.1	围堰设计的基本要求	246
6.5.2	围堰的类型与选择	246
6.5.3	土石围堰	248
6.5.4	坝体过流渡汛	248
6.5.5	围堰和坝体过水的防护设计	249
7	坝料开采	256

7.1	料场复查	256
7.1.1	料场复查的意义	256
7.1.2	料场复查的内容	257
7.2	料场规划	257
7.2.1	料场规划的原则	257
7.2.2	开采区规划	259
7.2.3	场地布置	260
7.2.4	坝料开采的进度	261
7.2.5	坝料开采方式	262
7.2.6	开采工艺与机械设备配套	262
7.3	坝料开采梯段爆破	263
7.3.1	爆破的设计思想和爆破与地质条件的关系	263
7.3.2	梯段爆破的参数设计	266
7.3.3	微差爆破技术	271
7.3.4	挤压爆破技术	272
7.3.5	起爆网络设计	273
7.4	坝料开采洞室爆破	275
7.4.1	洞室爆破适用条件和设计原则	275
7.4.2	影响爆破效果的主要因素及控制途径	276
7.4.3	药包布置	277
7.5	爆破试验	279
7.5.1	爆破试验的作用和要求	279
7.5.2	爆破试验实例	279
7.6	爆破施工与质量控制	281
7.6.1	钻孔作业及其质量控制	281
7.6.2	装药及其质量控制	282
7.6.3	料场的质量控制	283
7.7	垫层料的制备	284
7.7.1	破碎和掺配法制备	284
7.7.2	微差挤压爆破法制备	285
7.7.3	利用砂砾石料作垫层料	285
7.8	枢纽建筑物有效挖方的利用	286
7.8.1	概述	286
7.8.2	建筑物开挖料的特点	286
7.8.3	建筑物开挖料的采用	286
7.8.4	工程实例	287
8	坝料运输与坝体填筑	289
8.1	概述	289
8.2	坝体填筑规划	290
8.2.1	填筑规划的内容与原则	290

8.2.2	工程实例	291
8.2.3	施工强度的确定	291
8.3	坝料运输	294
8.3.1	运输设备	294
8.3.2	施工道路	294
8.4	坝面填筑工艺	296
8.4.1	坝面填筑的流水作业法	296
8.4.2	坝料铺填	296
8.4.3	坝体各区的填筑及接合部的处理	298
8.4.4	坝体与岸坡接合部的填筑	299
8.4.5	坝体分期分段填筑时接合部的施工	299
8.4.6	下游护坡	300
8.5	坝料压实与碾压试验	300
8.5.1	坝料压实的方法	300
8.5.2	振动碾	301
8.5.3	填筑参数对压实效果的影响	305
8.5.4	碾压试验	306
8.5.5	碾压参数的选定	309
8.6	垫层坡面碾压与防护	309
8.6.1	坡面修整	310
8.6.2	斜坡碾压	310
8.6.3	垫层坡面防护	312
8.6.4	施工排水及反渗水处理	314
8.7	填筑的质量检验与控制	315
8.7.1	质量检查与控制的目的和内容	315
8.7.2	坝体填筑质量的检查方法与控制标准	315
8.7.3	坝体填筑密实度的检测方法	317
8.8	国外面板坝碾压堆石经验综述	321
9	趾板与面板混凝土施工	325
9.1	概述	325
9.2	趾板施工	326
9.2.1	趾板施工程序	326
9.2.2	趾板地基开挖和处理	326
9.2.3	趾板混凝土浇筑	329
9.3	面板施工	330
9.3.1	混凝土配料与拌和	330
9.3.2	混凝土运输	331
9.3.3	面板钢筋的架设	332
9.3.4	面板滑模机具	332
9.3.5	面板滑模工艺	335

9.3.6	施工缝处理	337
9.3.7	面板混凝土养护	337
9.3.8	特殊气候条件下的施工	338
9.4	面板混凝土的防裂措施	339
9.5	面板接缝止水施工	341
9.5.1	铜止水片的施工	342
9.5.2	橡胶或塑料止水带的施工	343
9.5.3	嵌缝填料的施工	344
10	原型观测	346
10.1	概述	346
10.1.1	观测目的	346
10.1.2	观测内容与重点	346
10.1.3	观测的数据、资料与成果	347
10.1.4	关于观测自动化	347
10.2	观测布置设计	347
10.2.1	观测布置设计的考虑因素	347
10.2.2	布置方法	348
10.2.3	监测布置仪器项目、数量的一般规模	348
10.3	观测项目及分项监测技术	349
10.3.1	坝的表面观测	350
10.3.2	混凝土面板与其接缝的观测	351
10.3.3	堆石坝体的观测	352
10.3.4	防渗墙的监测	355
10.3.5	渗流量的观测	355
10.4	面板坝的监测性态与规律	356
10.4.1	面板坝的一般监测性态	356
10.4.2	一些主要监测量的变化性质与规律	358
10.5	地震反应观测	366
10.5.1	观测意义与现状	366
10.5.2	观测项目与观测仪器	367
10.6	观测系统的转轨与调整	368
10.6.1	观测系统的历史阶段性与转轨运行	368
10.6.2	观测内容的调整与加强	368
10.6.3	观测系统运行机制的调整与完善	369

1 概 论

混凝土面板堆石坝是土石坝的主要坝型之一。坝主体由堆石或砾石组成，起支承作用，其上游面设置混凝土面板起防渗作用。面板坝在 19 世纪中叶起源于美国，开始采用抛填堆石加木面板防渗，以后改用混凝土面板。到 20 世纪 60 年代末引入振动碾，进行薄层碾压堆石施工，使坝体密实而较少变形，这种坝型才得到很快的发展，迄今已建成许多高坝和大型工程，设计和施工技术也日趋成熟。由于其安全性好，适应性强，工期短，造价低，而受到坝工界的重视，成为一种富有竞争力的坝型。中国从 20 世纪 60 年代开始修建了一些抛填式混凝土面板堆石坝，但没有得到更多发展。用现代技术修建碾压式混凝土面板堆石坝始于 1985 年，起步虽晚，发展却很快，目前无论是工程的数量和规模，还是技术进展，都居于世界前列。

1.1 混凝土面板堆石坝的发展

1.1.1 国际

根据库克 (J. B. Cooke) 的意见^[1,2]，虽然用石料筑坝在古代已有，但一般认为堆石坝是在 1870 年于美国加利福尼亚州发展起来的。他将堆石坝的发展进程划分为三个阶段，即 1850~1940 年以抛填堆石为特征的早期阶段；1940~1965 年从抛填堆石到碾压堆石的过渡阶段；1965 年以后推广碾压堆石的现代阶段。

a. 早期阶段 堆石坝都是不透水面板型，直到 1940 年左右才出现土质心墙坝型。当时在塞拉山上的水力淘金矿山需要蓄水备淘金之用，当地适用于筑坝的材料是岩石和树木，而矿工们又有爆破采石的技术，所以第一座坝就是木面板的抛填堆石坝，其边坡极陡，达到 1:0.5~1:0.75，抛填时坡面用人工整理。到 1900 年混凝土面板堆石坝已成为一种典型的堆石坝。在 1920~1940 年间建成了许多 30m 以上的面板堆石坝，而且坝越来越高，如 1925 年建成的迪克斯河 (Dix River) 坝，高 84m；1931 年建成的盐泉 (Salt Spring) 坝，高 100m 等。1939 年 J. D. 格罗威 (J. D. Galloway) 在美国土木工程师协会论文集上发表的文章^[3]中，介绍了早期的 29 座堆石坝，其中最高的 2 座坝，即迪克斯河和盐泉，都曾有过面板破坏而导致大量渗漏，但运行是安全的，从而得出结论认为抛填式混凝土面板堆石坝的合理最大高度大致是 60m。同时从这些工程实例可看到下游坝坡从 1:0.5 至 1:0.75 变到

1:1.3, 因为后者是抛填堆石的自然坡度, 再陡就要用人工砌筑了。

b. 过渡阶段 由于抛填堆石坝的大量变形, 导致混凝土面板裂缝和大量渗漏, 虽然安全并不成为问题, 但大量渗漏是不希望发生的, 因此在本世纪 40~50 年代有一个停滞时期, 没有更多推广普及。同时由于有反滤层的土质心墙的柔性能较好适应抛填堆石的大量变形, 而得到相应发展, 坝高达到 150m。1960 年美国土木工程师协会的论文集^[4], 发表了美国一次堆石坝学术会议的论文和讨论文章。在 C. M. 劳勃茨 (C. M. Roberts) 的讨论文章^[5]中, 介绍了 1958 年完成的库契 (Quoich) 坝采用碾压式堆石的例子, 每层厚度 0.6m, 先用 10t 平碾压平, 然后用 3.5t 振动碾振动压实, 高 38m 的坝体的最大沉降不过 1.9cm。这是最早采用薄层碾压堆石的工程^[6]。

在同一会议上, K. 太沙奇 (K. Terzaghi) 的讨论文章^[7]中, 发表了一些重要意见。他强调抛填堆石没有压实, 并产生分离, 水枪冲洗不能达到使细颗粒冲填大孔隙的目的, 而只能使石料软化, 使棱角处易于压碎。抛填堆石的压缩性远大于碾压堆石。随着坝高的增大, 高压缩性的有害影响随坝高的二次方而增加。因此在修建很高的坝时, 应优先采用分层碾压堆石代替抛填堆石。

在这一阶段的最后一座高面板堆石坝, 是高 150m 的新国库坝 (New Exchequer), 它是由 1.2m 及 3.0m 一层的碾压堆石和 18m 一层的抛填堆石混和修建的, 但以抛填堆石为主, 因此面板还是发生破坏, 并产生严重渗漏。

c. 现代阶段 1965 年实质上已完成了抛填堆石到碾压堆石的过渡, 这标志着堆石坝开始进入现代阶段。碾压堆石层厚一般不超过 2m, 用振动碾压实, 作为坝的主要结构。薄层碾压堆石坝体密实而较少变形, 使混凝土面板的工作状况大为改善, 从而使这种坝型又重新崛起, 日益成为常用的坝型, 并向更高的坝发展。自 1971 年澳大利亚建成高 110m 的塞沙那 (Cethana) 坝, 就奠定了现代混凝土面板堆石坝的技术基础。到 1980 年建成的巴西阿里亚 (Foz do Areia) 坝, 高 160m; 1985 年建成的哥伦比亚萨尔瓦兴娜 (Salvajina) 坝, 高 148m; 再经过巴西的塞格雷多 (Segredo) 坝, 高 145m; 辛戈 (Xingo) 坝, 高 140m; 到 1993 年建成的当前世界最高的墨西哥的阿瓜密尔巴 (Aguamilpa) 坝, 高 187m, 几经改进, 设计和施工方法日趋成熟, 运行性状良好, 而在世界范围内得到广泛应用。马来西亚的巴昆 (Bakum) 坝, 高 205m, 已在 1996 年开工建设。另据报导^①, 哥伦比亚的苏加莫索 (Sogamoso) 坝, 高 190m, 老挝的南岗三级 (Nam Ngum 3) 坝, 高 220m, 都将在 1996 年下半年招标。工程规模也大有发展, 如巴西的 3 座坝, 水库库容达 30~58 亿 m³, 装机容量达 1 260~5 000MW, 泄洪流量达 11 000~33 000m³/s, 阿里亚坝的体积达 1 400 万 m³, 辛戈坝的导流流量达 10 500m³/s。

另外一个明显的趋势是建设重点向发展中国家转移。面板堆石坝起源于美国, 然后传到澳大利亚, 继而传到南美洲的巴西、哥伦比亚, 80 年代以来中国也有很大发展, 而在欧美发达国家, 则几乎没有进展。

在这一阶段, 土质心墙堆石坝也有很大发展。目前世界上坝高大于 200m 的 10 座土石坝都是土质心墙堆石坝, 最大坝高达到 300m。与混凝土面板堆石坝一起, 成为高土石坝的两种主要坝型。图 1-1 为堆石坝坝型和坝高的发展情况。表 1-1 为世界上坝高大于 100m 的混凝土面板堆石坝的统计表。

^① Cooke J. B., The Concrete Face Rockfill Dam (CFRD), 1996 (待发表)

总结现代阶段工程经验和技術进展的技术文献是众多的，主要有以下一些^[2]：

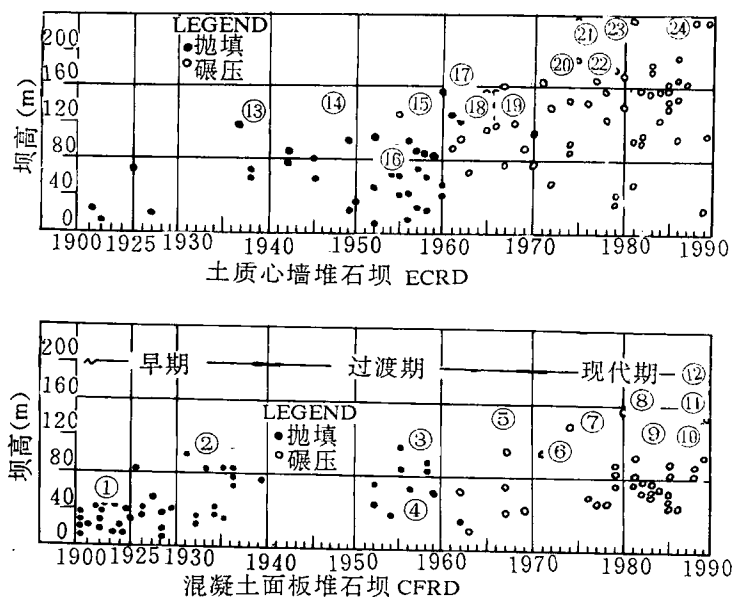


图 1-1 堆石坝坝型和坝高的发展趋势^[2]

- ①草莓 ②盐泉 ③帕拉台拉 ④库契 ⑤新国库 ⑥塞沙那
 ⑦安其卡亚 ⑧阿里亚 ⑨高兰 ⑩塞格雷多 ⑪阿瓜密尔巴 ⑫天生桥#1
 ⑬圣加勃利尔 ⑭泥山 ⑮恩布克劳 ⑯勃郎尼 ⑰郭兴能 ⑱考加尔
 ⑲阿考松波 ⑳新美依 ㉑契伏 ㉒达特茅斯 ㉓努列克 ㉔瓜维奥

(1) 库克 1982 年在太沙基讲座上的报告^[1]，题为“堆石坝的进展”，论述了混凝土面板堆石坝和土质心墙堆石坝的发展历程，以及抛填式和碾压式堆石，并以契伏 (Chivor) 和阿里亚坝为例介绍了最新的高坝实践。文中有一个表列举了所有高混凝土面板堆石坝的主要设计特性，如面板厚度、含筋率、趾板宽度等，可以看到采用较薄面板和较小含筋率的趋势。

(2) 1985 年美国土木工程师协会 (ASCE) 的混凝土面板堆石坝学术讨论会。有 37 篇论文，介绍了现代世界各国大多数碾压式混凝土面板堆石坝，讨论了其设计、施工及运行特性。其会议论文集是现代混凝土面板堆石坝的系统性文件^[8]。这次会议对推动面板坝的发展有重要作用。

1987 年，ASCE 会刊的岩土工程分册^[9]，出了一期专集，发表了库克和谢腊德 (J. L. Sherard) 对 1985 年会议的 2 篇总结性文章^[10,11]，以及 45 篇讨论文章和 25 篇总结讨论。讨论中介绍了会议上发表的各坝的运行资料，给出设计方面的意见，并补充了一些其他坝的资料，如墨西哥的阿瓜密尔巴、中国的天生桥一级等。在总结文章中指出混凝土面板堆石坝有很高安全度，特别是抗强震方面；坝顶沉降是很小的，沉降速率在最初几年内迅速减小；坝体不需要进行静力稳定分析等，并认为可以用于很高的坝；在坝面上修建溢洪道是安全和合理的。文中还对设计和施工中的一些细部提出了意见，对现代实践经验及趋势给以评价，给出一些经验性的技术规定。

(3) 1988 年在美国旧金山召开的第 16 届国际大坝会议上，有 1 个专题专门讨论非土质防

表 1-1 国外已建成和在建 100m 以上混凝土面板堆石坝

序号	坝名	国家	坝高 (m)	坝顶长 (m)	坝体积 (10 ⁶ m ³)	坝坡		施工方法	坝料 岩性	面板 面积 (m ²)	库容 (10 ⁶ m ³)	泄洪 流量 (m ³ /s)	装机 容量 (MW)	完成 年份	备注
						上游	下游								
1	南岗	老挝	220												招标
2	巴昆	马来西亚	205	740	15.6	1.4	1.4	CR	硬砂岩、泥岩	120 000	44 000	15 000	2 400		在建
3	苏加美索	哥伦比亚	190												招标
4	阿瓜密尔巴	墨西哥	187		13.0	1.5	1.4	CG/CR	砂砾石/石渣	130 000		14 900	960		1993
5	雅肯布	委内瑞拉	160.5	150	3.0	1.5	1.7	CG	砂砾石	6 000	436				在建
6	阿里亚	巴西	160	828	14.0	1.4	1.4	CR	玄武岩	139 000	5 800	11 000	2 511		1980
7	新国库	美国	150	427	4.1	1.4	1.4	DR/CR	变质安山岩		1 260		80		1966
8	米苏可拉	希腊	150		1.4	1.4	1.4	CR	灰岩	50 000					1995
9	萨尔瓦兴娜	哥伦比亚	148	362	3.9	1.5	1.4	CG/CR	砂砾石/硬砂岩	50 000	906	3 300	270		1 985
10	塞格雷多	巴西	145	705	7.3	1.3	1.3	CR	玄武岩	87 000	3 000	15 800	1 260		1992
11	安奇卡亚	哥伦比亚	140	280	2.5	1.4	1.4	CR	角闪岩	22 300	45	4 600	340		1974
12	辛戈	巴西	140	850	12.7	1.4	1.4	CR	花岗岩片麻岩	120 000	3 800	33 000	5 000		1994
13	柯曼	阿尔巴尼亚	133												1986
14	荷兰	泰国	130	1 000	8.0	1.4	1.4	CR	灰岩	140 000	9 500	3 200	300		1984
15	谢罗罗	尼日利亚	130	560	3.9	1.3	1.3	CR	花岗岩	50 000	7 000		600		1984
16	格里拉斯	哥伦比亚	127	110	1.3	1.6	1.6	CG	砂砾石	14 300	252	300			1982
17	希拉塔	印度尼西亚	125	453	3.8	1.5	1.5	CR	角砾岩/安山岩		2 160	2 600	1 000		1987
18	下比曼	澳大利亚	122	360	2.7	1.3	1.3~1.5	CR	辉绿岩	37 800	641	4 742			1986
19	杜米利奎	委内瑞拉	115			1.4	1.5	CR	灰岩	53 000					1984
20	帕尔台拉	葡萄牙	112	540	2.7	1.3	1.3	DR	花岗岩	55 000					1955
21	塞沙那	澳大利亚	110	213	1.4	1.8	1.3	CR	石英岩	23 700		2 000			1971
22	尤柳艾	马来西亚	110			1.3	1.4	CR	砂岩	48 000					1989
23	拉马	南斯拉夫	110			1.3	1.3	CR							1967
24	圣塔扬娜	智利	106	390	2.7	1.5	1.6	CG	砂砾石	27 000	160	1 075			1995
25	福蒂纳	巴拿马	105			1.3	1.4	CR	安山岩						1987
26	皮屋奈可	罗马尼亚	105		2.4	1.7	1.7	CR	云母片麻岩	30 000					1986
27	盐泉	美国	100	395	2.3	1.1~1.4	1.4	DR	花岗岩	10 900					1931

注:DR—抛填堆石;GR—碾压堆石;CG—碾压砂砾石