

高土石坝关键技术 问题研究

杜延龄 黄丽清 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水利水电科学研究院学术著作专项资助

高土石坝关键技术 问题研究

杜延龄 黄丽清 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

通过“六五”、“七五”和“八五”(1981—1995年)国家科技攻关,我国高土石坝工程由低谷走向规模建设,逐步形成强劲的发展态势。随之,我国高土石坝设计、施工和科研总体技术水平也跨进国际先进行列。本书综述了高土石坝国家科技攻关的研究成果,包括宽级配防渗土料、坝体堆石料、混凝土防渗面板及其接缝止水结构、坝基软弱夹层、设计计算方法、土工离心模型试验、渗流分析与控制、混凝土防渗墙、坝体填筑施工规划和质量控制与全面管理以及原位观测及其统计与反馈分析等十个方面,并简要介绍了攻关情况。

本书行文简洁,重点突出,具有实用价值,既可供土石坝设计、施工和科研人员应用或参考,也可供大专院校相关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高土石坝关键技术问题研究 / 杜延龄, 黄丽清编著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 7

ISBN 978-7-5170-1094-4

I. ①高… II. ①杜… ②黄… III. ①高坝—土石坝—工程施工—研究 IV. ①TV641.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第173112号

书 名	高土石坝关键技术问题研究
作 者	杜延龄 黄丽清 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15印张 356千字
版 次	2013年7月第1版 2013年7月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



序

经过“六五”、“七五”和“八五”的持续国家科技攻关，使我国高土石坝工程发展由低谷期推向规模建设，在推广混凝土面板堆石坝、拓宽筑坝材料范围及大坝设计、施工与试验现代化等方面均取得了综合性与开创性成果，甚至为我们今天问鼎 300m 级高土石坝建设也奠定了基础，堪称我国高土石坝发展的里程碑。尤其当时统筹集合业界优势，联合攻关的精神，更值得传承与发扬。

关于混凝土面板堆石坝建设，我国虽然起步较晚，但起点较高。“七五”和“八五”期间，结合西北口和天生桥一级工程的科技攻关，很快形成了包括设计、施工与科研的成套技术，推动了我国面板堆石坝的迅速发展。据不完全统计，现已建和在建 100m 级以上高面板堆石坝工程已达 60 余座，其中，水布垭工程最大坝高 233m，为世界之最。众所周知，高土石坝的主要优势在于就地取材，因此，拓宽筑坝材料范围，认识各种特殊土料的筑坝特性，是一项需长期不断研究的课题。通过“六五”论证和“七五”实施，鲁布革工程采用宽级配风化土料填筑大坝防渗体取得成功。这是我国继 20 世纪 60 年代成功采用南方红黏土筑坝后，又一次在拓宽筑坝材料方面的突破。该工程的做法与经验，迅速得到普遍推广应用，取得显著经济和社会效益，如瀑布沟工程采用宽级配砾石土填筑坝体防渗体就是突出一例。高土石坝设计计算方面，虽在“六五”期间研究编制或移植了多种计算程序，但其编制语言不统一，前后处理不配套，应用不尽方便。为此，在“七五”和“八五”期间，在以往工作的基础上，研究开发了交互式土石坝设计计算软件系统和坝体优化设计软件系统，使我国土石坝设计计算技术水平上了一个新台阶。在试验研究仪器设备方面，除成功研制和应用了高压大型动静三轴、压缩和渗透等常规试验仪器设备外，还一举研制成功 LXJ-4-450 大型土工离心机，填补了我国当时这方面的空白。该离心机最大加速度 $300g$ ，有效荷载容量 $450g \cdot t$ ，其规模为当时亚洲第一、世界第四。现该离心机又配备了技术先进的双向振动台、机械手等，使其用途更广泛，更具竞争力。土石坝原位观测研究，贯穿了所述三个五年计划的科技攻关，基本实现了观测仪器设备的系列标准化，观测技术的规范化和现代化。上述科技攻关成果曾获多项国家级和省部

前 言

20 世纪 70 年代末和 80 年代初,我国高土石坝建设处于低谷,在建、设计和规划的大型水利水电工程大都采用混凝土坝。但诸多坝址地质条件复杂和当时水泥、钢材供应极度紧张,也给高土石坝研究和发展带来机遇。通过“六五”、“七五”和“八五”(1981—1995 年)国家科技攻关,我国高土石坝工程由低谷走向规模建设,并逐步形成强劲的发展态势。高土石坝列入“六五”、“七五”和“八五”国家科技攻关计划的专题(课题)共 11 个,其中“六五”1 个(课题)、“七五”4 个和“八五”6 个,其攻关内容几乎涵盖了高面板堆石坝和土质防渗体高土石坝的所有关键技术问题。各专题攻关成果均通过了国家技术鉴定,绝大多数总体上达到了当时同类成果的国际先进水平。高土石坝的国家科技攻关,不仅为鲁布革、西北口、小浪底、天生桥一级及瀑布沟等高土石坝工程顺利建设提供了科学依据,创造了可观的经济与社会效益,而且也使我国高土石坝的设计、施工和科研总体技术水平跨入了国际先进行列。这些专题攻关成果曾获多项国家级、省部级科技进步奖及其他科技奖励,其中,由中国水利水电科学研究院主报的《75-17-1-2 土质防渗体高土石坝研究》曾获 1993 年度国家科学技术进步奖一等奖,这是当时土石坝工程界所获得的最高科技荣誉。可见,高土石坝的国家科技攻关,堪称我国高土石坝发展的里程碑,也为我们今天问鼎 300m 级高土石坝建设,在某种程度上奠定了基础。

为进一步推广应用和研究发展高土石坝国家科技攻关成果,传承联合攻关精神,记录这一历史进程,特编写此书——《高土石坝关键技术问题研究》。本书共 11 章。第 1 章为绪论,简要介绍了攻关情况。第 2 章至第 11 章,综述了高土石坝国家科技攻关的宽级配防渗土料、坝体堆石料、混凝土防渗面板及其接缝止水结构、坝基软弱夹层、设计计算方法、土工离心模型试验、渗流分析与控制、混凝土防渗墙、坝体填筑施工规划和质量控制与全面管理以及原位观测及其统计与反馈分析等十个方面的研究成果。因作者业务范围所限,本书不包括地质勘探、混凝土防渗墙施工和施工水力学三专题的内容。本书行文简洁,重点突出,具有实用价值。

在高土石坝国家科技攻关中,在上级主管部门的统一领导和部署下,中

级各种科技奖励，其中，由中国水利水电科学研究院牵头申报的“七五”专题攻关成果《土质防渗体高土石坝研究》曾获1993年度国家科技进步奖一等奖，这是当时土石坝工程界所获得的最高科技奖励。

本书第一作者杜延龄教授系我所老所长。在“六五”攻关中，他是渗流方面的主要完成人之一。在“七五”和“八五”攻关中，他曾担任三个攻关专题负责人和课题专家组秘书（“七五”）与成员（“八五”）。本书就是他在我所黄丽清高级工程师协助下，基于其在攻关过程中的亲历、亲为与体会和收藏的文献资料编写而成的一本科技专著。本书在简要介绍了有关攻关工作后，主要综述了如下十个方面的攻关成果，即宽级配防渗土料、坝体堆石料、混凝土防渗面板及其接缝止水结构、坝基软弱夹层、设计计算方法、土工离心模型试验、渗流分析与控制、混凝土防渗墙、坝体填筑施工规划和质量控制及原位观测与反馈分析。本书行文简洁，内容丰富，记录了那段业绩非凡的科技攻关历史，总结了当时我国高土石坝工程科技攻关的成果，具有很好的实用价值。深信，本书的出版，对进一步推广和发展有关攻关成果，传承和发扬老一辈科技工作者甘于奉献、勇于创新的科研精神，将大有裨益，特此为序。

中国水利水电科学研究院
岩土工程研究所教授、所长



2013年1月26日

国水利水电科学研究院、水利水电规划设计总院、南京水利科学研究院、昆明勘测设计院、成都勘测设计院、黄委会勘测设计院、中国水电第十四工程局、清华大学、河海大学以及成都科技大学等单位，均曾组织精干团队，投入或研制先进设备，高质量如期完成各自的攻关任务。同时，国内知名专家、教授蒋国澄、董育坚、纪云生、杨荫华、汪闻韶、窦宜、董槐三、顾淦臣、刘浩吾、高莲士等同志均在不同时段为专题立项论证、指导攻关研究和成果鉴定等方面付出了令业界铭记的才智与辛劳。这里不可忘怀的还有，中国水科院岩土所孙留玉同志曾在“七五”和“八五”高土石坝国家科技攻关中先后兼任三个专题秘书。他十年如一日，热忱勤奋，认真负责，一丝不苟地完成大量繁杂的专题管理工作。在此，特向所有为高土石坝国家科技攻关作出贡献的单位和个人表示崇高的敬意！

本书的编写工作是从2010年下半年开始的，那时，本人已年届七十又六，是否还有能力编写此书，曾犹豫再三。是时，中国水科院岩土所学术秘书黄丽清同志应邀，愿合作达成此事，并得到了所领导的支持批准。她在搜集资料、制作图表和整理、编排书稿并使之电子化等方面完成大量工作，为编成此书提供了保证。在此，特向她深鞠一躬，表示由衷的谢意！

本人对高土石坝国家科技攻关应算个知情者，即“六五”攻关是渗流分析方面的主要完成人之一，“七五”和“八五”攻关先后为三个专题的负责人，并分别担任攻关专家组的秘书和成员。但因本人理论基础、实践经验和业务范围所限，在引述各专题研究成果中肯定有繁、有简，有深、有浅，错漏之处更是在所难免。为此，除恳请读者批评指正外，更渴望高土石坝国家科技攻关的主持者或参与者著文、编书，以使我国高土石坝发展的这一历史进程更完整、更清晰地呈献给业界借鉴或参考。

杜延龄

2012年6月16日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 从谷底起步——“六五”攻关	1
1.2 曙光在望——“七五”攻关	2
1.3 乘势直追——“八五”攻关	6
1.4 值得发扬的攻关精神	9
第 2 章 宽级配防渗土料	11
2.1 引言	11
2.2 鲁布革工程风化土料	12
2.3 瀑布沟工程冰碛与坡积混合土料	15
第 3 章 坝体堆石料	24
3.1 试样缩尺方法	24
3.2 堆石料的强度与变形特性	28
3.3 堆石料的动力特性	31
3.4 面板碎石垫层料的渗透与渗透变形特性及其反滤保护	37
第 4 章 混凝土防渗面板及其接缝止水结构	38
4.1 防渗面板混凝土配比优化	38
4.2 防渗面板抗裂分析	40
4.3 混凝土防渗面板的接缝止水结构	48
第 5 章 坝基软弱夹层	52
5.1 引言	52
5.2 现场直接慢剪试验	52
5.3 现场取样、室内中型慢剪试验	55
5.4 现场钻孔取样、室内三轴试验	58
5.5 试验成果综合讨论分析	61
第 6 章 设计计算方法	64
6.1 本构模型简介	64
6.2 ERDIDS 和 ASSED 两大软件系统	73
6.3 高堆石坝优化设计软件系统	79
6.4 工程计算分析	83

第 7 章 土工离心模型试验	96
7.1 概述	96
7.2 LXJ-4-450 土工离心机	97
7.3 “七五”工程试验	107
7.4 “八五”工程试验	120
第 8 章 渗流分析与控制	126
8.1 概述	126
8.2 非稳定渗流控制方程研究	127
8.3 复杂岩基渗流分析方法	132
8.4 工程应用及若干渗控措施合理设计原则	143
第 9 章 混凝土防渗墙	150
9.1 概述	150
9.2 小浪底坝基防渗墙有限元分析	151
9.3 瀑布沟坝基防渗墙离心模型试验	165
9.4 讨论与建议	180
第 10 章 坝体填筑施工规划和质量控制与全面管理	182
10.1 坝体堆石料供应与填筑规划仿真模拟软件系统	182
10.2 宽级配防渗土料压实质量控制	186
10.3 坝体堆石料的压实质量控制	189
10.4 坝体填筑质量全面管理	196
第 11 章 原位观测及其统计与反馈分析	204
11.1 引言	204
11.2 观测仪器研制	205
11.3 原位观测技术	213
11.4 统计与反馈分析	214
附录	222
附录 1.1 75-17-1-1 混凝土面板堆石坝研究各项目承担单位及负责人	222
附录 1.2 75-17-1-2 土质防渗体高土石坝研究专题及各子题研究总 报告目录	223
附录 1.3 75-17-1-3 土工离心模型试验技术研究总报告及各组成部分研究 报告目录	224
附录 1.4 75-17-1-4 高土石坝原位观测的研究总报告及各子题研究 报告目录	225
附录 1.5 85-208-02-01 高堆石坝关键技术问题专题及子题研究总报告目录	226
附录 1.6 85-208-02-04 高土石坝抗震关键技术研究所属子题承担单位及负责人	227
参考文献	228
后记	229

第 1 章 绪 论

1.1 从谷底起步——“六五”攻关

20 世纪 70 年代末和 80 年代初,我国高土石坝工程处于低潮,甚至可以说跌到了谷底。当时拟建水电站的拦河坝,均首推混凝土坝,甚至将土石坝列为比较方案都有困难。为此,我国已故著名土石坝专家杨荫华同志曾无奈感叹:中国土石坝快绝种了!但当时坝工建设中所面临的两大难题,也给土石坝崛起带来机遇,即水泥和钢材供应极度紧张和诸多坝址地质条件极为复杂,且地震烈度高。高土石坝研究之所以能列入“六五”国家科技攻关,时任水利电力部科技司水电处处长的王圣培同志功不可没。他上下沟通,奔走呼号,付出了极大努力。

1983 年 5 月 23 日,《高土石坝筑坝关键技术问题的研究》经国家经委科技司正式批准,列入“六五”国家科技攻关计划,编号为 15-1-1。该项目承担单位为水利水电科学研究院(现已更名为“中国水利水电科学研究院”),项目负责人为蒋国澄;主要协作单位为水电部昆明勘测设计院、水电部第十四工程局和南京水利科学研究院。

1985 年 12 月,攻关项目《15-1-1 高土石坝筑坝关键技术问题研究》如期完成原订合同和 1985 年调整计划所规定的任务,共提出研究报告 65 项,仪器设备 15 种。其主要攻关成果简述如下。

1.1.1 风化土料可作为高土石坝坝体防渗土料的论证

利用风化土料作为高土石坝坝体防渗土料,在当时是有争议、无把握的,但其经济效益十分显著。本研究从矿物化学成分(简称矿化成分)、强度与变形特性、渗透与渗透稳定、动力特性以及施工工艺与参数等方面进行了系统的试验室与现场试验研究。试验结果表明,只要遵照严格的施工工艺,加强施工质量控制,在反滤保护下,风化土料是一种良好的高土石坝防渗土料。这一成果被鲁布革工程所采用,且现已推广,其经济和社会效益十分可观。这是我国高土石坝筑坝材料的又一个突破。

1.1.2 研制三维电网络装置,提出若干合理的渗控基本设计原则

鉴于 20 世纪 70 年代末、80 年代初,电子计算机的容量尚不能满足求解大型三维渗流场要求的实际情况,水利水电科学研究院研制了一万节点的大型电网络装置,并配有自动巡回检测设备。利用该装置连续进行了安康、东江和鲁布革等大型水电工程的三维渗流分析。其成果除对各工程的渗流控制措施方案进行了优化,取得显著经济效益外,还总结提出了若干合理的渗控基本设计原则,如灌浆帷幕的防渗效果取决于帷幕与坝基的相对渗透性,其向岸内延伸的有效长度等概念等。



1.1.3 研究编制和移植二维、三维动静有限元程序，并应用于工程设计

研究编制的二维和三维静力有限元程序都达到国内先进水平，与国际上常用计算分析方法也相当。利用这些程序对鲁布革土石坝进行了较系统的分析。其成果对工程设计提出了指导性意见和合理化建议。在土石坝动力分析方面，移植了国外几乎所有的一维、二维和三维程序。对鲁布革土石坝工程所做的计算分析结果表明，在地震过程中，没有发现影响坝体安全的现象或机理，论证了坝体设计是合理的，采用风化石料防渗体和碎石反滤层也是可行的。

1.1.4 研制出土石坝观测仪器系列，可供工程配套选用

通过攻关，共研制提出十种土石坝内部观测仪器，包括可批量生产的电阻应变式测斜仪、电磁式沉降仪、钢弦式孔隙水压力仪三种和可经实际工程埋设考验后再批量生产的土体应变计、水管式沉降仪、水管式孔隙水压力仪、引线式位移计、电阻片式和钢弦式土应力计、电阻片式孔隙水压力计等七种。其中，不少是填补了国内空白，达到国内先进水平，并已在实际工程中埋设，取得很好的经济效益。

1985年12月30日，《15-1-1高土石坝筑坝技术关键问题的研究》攻关成果，通过了水利电力部组织的评审。评审意见认为，该科技攻关项目对当前高土石坝筑坝技术中的主要问题都提出了具有较高水平和可供实用的成果，扩大了使用土料范围，改进了设计计算方法，使有可能在近代土力学基础上进行高土石坝的设计和施工。原型观测设备系列提供了高土石坝安全监测的必要手段。绝大部分科研成果达到国内先进水平，有部分具有国际水平。这些成果已开始在实际工程应用，在节约投资上起了重要作用。推广应用后的社会效益和经济效益将更加显著。

评审意见建议在“七五”期间继续将土石坝关键技术问题的研究列入科技攻关项目，对混凝土面板坝和超高心墙土石坝组织技术攻关，并注意新技术、新材料的研究采用。对原型观测仪器设备研究配套和提高质量，以促进我国高土石坝的建设，为大力开发水电作出贡献。

1986年，《高土石坝筑坝关键技术问题的研究》作为“七五”国家科技攻关先进项目受到国家计委、国家经委、国家科委和财政部的联合表彰，并颁发奖状。该获奖项目的主要完成人：水利水电科学研究院：蒋国澄；昆明勘测设计院：李勋烈；水利电力部第十四工程局：马建勋；南京水利科学研究院：张启岳。

1.2 曙光在望——“七五”攻关

“七五”（1986—1990年）伊始，高土石坝工程的发展形势较“六五”大为好转，可谓曙光在望。是时，西北口（坝高95m）、鲁布革（坝高101m）高土石坝工程在建，天生桥一级（坝高178m）、小浪底（坝高154m）高土石坝也开工有期，还有瀑布沟（坝高195m）等几座高土石坝工程在设计中，一个令人振奋、相当规模的高土石坝工程发展前景即将来临。为适应“七五”和未来一个时期高土石坝工程建设的需要，“七五”国家科技攻关项目第17项《75-17水电工程筑坝技术》所属第一个课题《75-17-1高土石坝



技术研究》设四个专题，就高土石坝工程的设计、施工和安全监测等方面全方位进行科技攻关。这四个专题为：《75-17-1-1 钢筋混凝土面板堆石坝研究》、《75-17-1-2 土质防渗体高土石坝研究》、《75-17-1-3 土工离心模型试验技术研究》和《75-17-1-4 高土石坝原型观测的研究》。

现将上述四个专题的攻关情况简要引述如下。

1.2.1 75-17-1-1 钢筋混凝土面板堆石坝研究

该专题承担单位为能源部、水利部规划设计总院，专题负责人为董育坚、李春敏；主要参加单位为能源部、水利部昆明勘测设计院科研所、能源部、水利部昆明勘测设计院、南京水利科学研究院、水利水电科学研究所和长江葛洲坝工程局施工研究所。该专题各项任务的承担单位及负责人见附录 1.1，其主要攻关成果如下：

(1) 材料性质研究。对堆石料特性进行了系统的试验研究，提出了堆石料等粗粒料室内试验试料的缩尺模拟准则，可用以得出较为符合实际的密度和力学参数。论证了应力路径对强度影响不大，而其应力应变关系有很大差异，建议用近似实际工程的应力路径和等应力比试验确定计算模型及参数。研制成功面板接缝止水带及嵌缝材料，其性能与国外同类产品相当，有些指标还较优越。

(2) 设计理论与方法研究。深入研究和提出了多种改进的粗粒料、面板接缝和接触面的静动力计算模型和参数。编制了自动化程度较高的适合各种计算模型的平面和空间静动力有限元计算程序，考虑了应力路径、接缝及接触面特性等面板坝的特点，可以得出较为合理的堆石体变形计算结果，作为工程设计的重要参考。进行了较系统的振动台模型试验，探索了面板坝的抗震性能。

(3) 施工度汛挡水过水研究。在现场研究了喷混凝土、喷沥青乳剂、铺沥青砂、铺土工薄膜等垫层上游坡面保护措施的施工工艺及防渗性能，在西北口实现了喷混凝土保护的方案以及水泥裹砂半湿喷工艺，经 30 多 m 挡水考验，效果良好。研究了垫层的反滤保护准则。对坝面过水进行了系统水力学试验，并提出了相应保护措施。

(4) 提出了开采具有给定级配堆石料的控制爆破技术，以及使坝料达到高密度的振动碾压技术及参数，在国内首次解决了斜坡碾压设备问题。研究了有创新的无轨滑模及适应面板变厚度的侧模，简化了面板浇筑工艺，加快了浇筑速度。以上试验研究为西北口的大坝施工提供了可行的施工方法和可靠的技术参数，应用效果良好。

1991 年 1 月 20 日，该专题研究成果通过了能源部组织的技术鉴定。鉴定结论认为，该专题为科研导向性项目，在引进消化国外先进技术的基础上有所创新，为国内推广 100m 及以下混凝土面板堆石坝提供了成套技术，并为更高的坝提供重要参考。科研成果总体上达到国际先进水平。

该专题研究在“七五”国家重点科技攻关工作中，成果出得早，见效快，在 1989 年获国家计委、国家科委和财政部颁发的“七五”科技攻关中间成果集体荣誉奖。

1.2.2 75-17-1-2 土质防渗体高土石坝研究

该专题的承担单位为水利水电科学研究所，专题负责人为杜延龄；主要参加单位有清华大学、水电部第十四工程局、黄委会设计院、成都科技大学、河海大学、南京水利科学



院和南京自动化研究所。该专题由13个子题组成,其专题及各子题研究总报告目录见附录1.2。

由于本专题研究内容广泛,项目繁多,又有不少项目是在“六五”攻关的基础上进行,故能否突出重点,把握住方向,是本专题研究成败的关键,这也曾使上级主管部门有所疑虑。为此,在同各子题承担单位和各结合工程设计、施工单位反复磋商的基础上,于1987年10月22—24日,召开了由上级主管部门领导,有关专家、各结合工程设计或施工负责人以及各子题负责人参加的本专题第二次工作会议,对本专题的主攻目标和技术路线进行了深入讨论,并达成共识。事实证明,此次工作会议对该专题圆满完成攻关任务起了重要保证作用。

该专题的主要攻关成果为:

(1) 在筑坝材料及坝基软弱夹层特性研究方面,主要对小浪底工程的防渗土料、坝壳堆石料、坝基软弱夹层,以及瀑布沟工程的冰碛土进行了系统研究,研制了具有国际先进水平的伺服控制应变式现场软弱夹层直剪仪、伺服控制刚性中型直剪仪及NJ—1型扭剪三轴仪。为工程设计提供了较为切合实际的力学参数、本构模型、抗水力劈裂的计算方法以及测定岩基软弱夹层有效强度的技术,丰富了岩土力学的理论和实践。

(2) 在设计计算方面,研究开发成功两个大型软件系统,即土石坝设计交互式软件系统ERDIDS和土石坝设计计算程序微机系列软件包ASED,其覆盖面广,功能齐全,包括土石坝设计全部内容,具有推广使用价值。在结合小浪底和瀑布沟两工程所进行的大量分析计算中,研究建立了新的堆石料浸水软化、地震作用下永久变形、边坡稳定以及裂隙渗流的分析方法,提出了坝基混凝土防渗墙与坝体防渗体合理连接型式的构想。这些分析计算成果为优化工程设计,节约工程投资提供了依据。

(3) 在施工质量控制方面,结合鲁布革土石坝,采用压实度控制方法,进行风化砾石土的压实质量控制,把全面质量管理的基本原理和方法用于土石坝填筑质量管理,使其填筑质量得到充分保证,为我国土石坝填筑提供了施工质量控制的成功经验。同时研制成功具有国际先进水平的压实质量控制面波仪和YS—1型压实计,填补了国内空白。

1990年5月,专题所属13个子题的科研工作胜利结束,并通过技术鉴定,提前7个月完成了全部攻关任务。1990年12月18日,该专题研究成果通过了能源部组织的技术鉴定,鉴定结论认为,本专题研究成果在学术上有深度、有创新;在工程上实用性强,有较大经济效益,在总体上达到国际先进水平,可以在水利水电建设中推广应用。

1993年,《土质防渗体高土石坝研究》获国家科技进步奖一等奖,主报单位为水利水电科学研究院,主要完成人:水利水电科学研究院的杜延龄、陈愈炯、张文正、孙继增、孙留玉、李春华、沈新慧,水电部第十四工程局的庄德威、周成宝,成都科技大学的刘浩吾,清华大学的濮家骝、李广信,黄委会设计院的董遵德;河海大学的钱家欢,南京水利科学研究院的毛昶熙。另外,本专题所属YS—1型压实计此前曾单独获国家科技进步奖二等奖,主要完成人为水利水电科学研究院房纯纲等。

1.2.3 75-17-1-3 土工离心模型试验技术研究

该专题第一承担单位为水利水电科学研究院,专题负责人为刘令瑶。1987年8月,



刘令瑶应水电部对外公司聘请出国工作,故水利水电科学研究院向水电部科技司发文(〔87〕水科岩字第016号),并经批准,将该专题负责人更换为杜延龄和朱思哲同志。

该专题研究总结报告及各组成部分研究报告目录见附录1.3,其攻关成果主要有如下两方面:

(1)由水利水电研究院主持研制成功的LXJ-4-450土工离心机。该离心机最大转动半径5.02m,最大加速度300g,有效负载1.5t,有效荷载容量450g·t,试验吊篮尺寸为1.5m×1.0m×1.5m(长×宽×高)。该离心机研制的成功,使我国在这方面跨入了国际先进行列,其规模为当时亚洲第一,在世界排第四位。

该离心机主机由航空航天部511研究所设计(设计负责人:贾普照),第一重型机器厂制造。该离心机的拖动与调速监控系统 and 数据采集系统分别由南京电力自动化设备厂与东南大学自控系和水利水电科学研究院研制。现在该两系统已由水利水电科学研究院全部更新换代。

(2)由水利水电科学研究院与长江科学院、南京水利科学研究院和成都科技大学与成都勘测设计院科研所分别完成的小浪底、西北口和瀑布沟三项土石坝工程试验,其坝型包括混凝土面板堆石坝、土质防渗斜墙和心墙堆石坝;设计工况包括竣工期、蓄水期和水位骤降等。上述工程试验的规模及其成果的系统性和实用性,当时国内外尚无先例。

1991年3月7日,该专项研究成果通过了能源部组织的技术鉴定,鉴定意见如下:

(1)LXJ-4-450土工离心机研制:该离心机技术指标先进,运行灵活,主机结构合理,采用对称臂、双吊篮、双摆动方式,有利于动平衡。试验吊篮容积大,模型安装方式灵活,有利于提高试验精度。运行全过程由级联微机网络自动控制,调速、稳速精度高,配有安全监测系统。数据采集系统采用数字信号传输方式,提高了抗干扰能力。试验室土建工程布局合理,使用方便,基础抗振性能好。该离心机的总体技术达到国际先进水平。

(2)工程试验:工程试验共完成三项,即小浪底斜墙堆石坝、西北口混凝土面板堆石坝和瀑布沟心墙堆石坝。小浪底工程试验模型尺寸大、加速度高(250g),其规模当时在国内外尚属首次。西北口工程试验对面板堆石坝在各种工况的应力和变形进行了系统研究,这在当时国内外也无先例。瀑布沟工程试验对坝体和坝基防渗墙的应力和变形进行了较系统研究。以上工程试验成果达到国际先进水平。

在此,作者还不禁指出,LXJ-4-450土工离心机是我国自行设计制造、技术指标先进的第一台大型土工离心机,已正常运行20余年。但它的诞生确属不易。当时其研制工作不仅面临种种技术难关的挑战和研制单位间的协调困难,而且面临巨大的资金缺口。该研制项目只是国家科技攻关的资助项目,其资助经费仅为全部造价的16%,故不得不四处奔波,筹措资金。该离心机的研制工作留给当事者记忆里的,虽有成功的喜悦和自信,但更有坎坷、艰辛和无奈。幸好,该离心机如期转了起来,并得到上下左右的认可。

1.2.4 75-17-1-4高土石坝原位观测的研究

该专题的承担单位为南京水利科学研究院,专题负责人为窦宜;主要参加单位为水利水电科学研究院、清华大学、河海大学、南京自动化研究所和南京电力自动化设备厂。

该专题由 10 个子题组成,其专题及各子题研究总报告目录见附录 1.4,其主要攻关成果如下:

(1) 原型观测仪器(亦称为原位观测仪器)的研制。关于面板堆石坝的原位观测仪器,主要研制成功 XCX 斜坡测斜仪和三向测缝针。所研制的 XCX 斜坡测斜仪与美国 Sinco 公司的垂直测斜仪性能相近,总体上具有国内先进水平,测头(包括偏值标定架)达到国际先进水平。三向测缝针的研制成功,首次实现了同步测量三维位移量,设计构思新颖,原理正确,系国内首创。关于土质防渗体土石坝的原位观测仪器,主要研制成功钢弦式位移计,钢弦智能测定仪和应变式测斜仪数据检测装置。上述五种仪器的研制成功,既填补和配套了土石坝原位观测仪器系列,又使自动化水平提高了一步。

(2) 原观仪器埋设和观测技术。在“六五”和“七五”科技攻关和总结近十年来实际观测工作经验的基础上,以手册方式编写了《土石坝观测技术》(张启岳等编,水利水电出版社,1993 年 3 月),其内容包括变形、渗流、应力和温度观测等部分。该书是国内土石坝原型观测的第一本专著,具有实用价值,已在我国土石坝原型观测中起了重要指导作用。

(3) 堆石坝观测资料整理和反馈分析。关于基于原位观测资料反馈分析,主要结合鲁布革和西北口工程进行。鲁布革土石坝反馈分析结果表明,计算孔隙水压力时,应考虑周围压力对渗透系数的影响;变形分析时,应考虑流变变形。同时检验了邓肯模型和南水模型在坝体填筑、竣工和蓄水期不同阶段,其位移、孔隙水压力预报结果的差别。关于西北口面板堆石坝的反馈分析,主要研究了反馈分析所得模型参数与试验值的差别及其各参数的灵敏性。同时,基于等应力比三轴试验资料,研究提出了用幂函数表示的 K—G 本构模型。该模型能反应堆石坝填筑过程中的变形规律,以该模型对关门山面板堆石坝的预报结果与原型观测结果符合较好。

该专题攻关成果通过了能源部组织的技术鉴定,其鉴定结论为国内领先,其中部分达国际先进水平。

1.3 乘势直追——“八五”攻关

随着高土石坝“六五”和“七五”科技攻关成果的实施与推广,大型土石方开挖、运输与压实机械的发展和适于修建混凝土坝的坝址愈来愈少,修建以当地材料为主的土石坝,已成为“八五”(1991—1995 年)期间坝工建设的一个重要发展趋势。“八五”期间在建、拟建或进行规划和初步设计的高土石坝工程就约有 9 座之多,其水电站总装机容量达 3508 万 kW。为此,高土石坝“八五”科技攻关,乘势直追,扩大研究范围,而且其攻关目标,由“七五”的 100m 级直奔 200m 级的高土石坝。国家“八五”科技攻关第 208 项《85-208 高坝关键技术研究》所属第 2 个课题《85-208-2 高土石坝关键技术研究》设有六个专题,即《85-208-2-1 高堆石坝关键技术问题的研究》、《85-208-2-2 混凝土防渗墙墙体材料及接头型式研究》、《85-208-2-3 混凝土防渗墙施工及检测技术研究》、《85-208-2-4 高土石坝抗震关键技术研究》、《85-208-2-5 勘测关键技术及综合应用研究》和《85-208-2-6 高土石坝施工水力学问题研究》。对于上述六个专题,由



于作者对防渗墙施工、地质勘测和施工水力学专业不熟悉,故此书不予涉及,现仅简要引述其余三个专题的攻关情况。

1.3.1 85-208-2-1 高堆石坝关键技术问题的研究

该专题的承担单位为中国水利水电科学研究院,专题负责人为杜延龄;主要协作单位为南京水利科学研究院、昆明勘测设计研究院、中国水利水电第十四工程局和十三陵抽水蓄能电站筹建处。该专题由八个子题组成,专题及各子题研究总报告目录见附录 1.5,其主要攻关成果为:

(1) 研制了高土石坝优化设计软件系统,引入了人工智能技术,初步建立了专家知识与数据库,并采用 Windows 操作系统在微机上加以实现。利用该软件系统对新疆乌鲁瓦提面板堆石坝进行了优化分析,节约了工程投资。

(2) 通过大规模系统的室内外试验研究和综合分析,研究提出了利用宽级配砾石土作高土石坝防渗体的成套技术,包括填筑标准、工程性质、渗透与渗透稳定性的确定或测定和填筑施工质量控制方法等,并已被瀑布沟工程设计所采用,节约了工程投资。

(3) 结合天生桥一级面板堆石坝工程,研究提出了抗裂性能好的混凝土材料配比、面板开裂主要控制因素及防裂措施。系统地研究了面板接缝止水结构的工作机理,并提出了合理的结构型式。进行了 1:1 周边缝模型试验。

(4) 推导论证了离心模型试验技术的基本原理、固有误差,综合提出了大型土工离心机基本设计原则,以及堆石料、弯曲薄板、塑料排水插板、岩基断层和土石坝填筑过程等的模拟方法。完成小浪底和天生桥一级两项高堆石坝工程试验,该成果对解决工程关键技术问题起了重要作用。

(5) 在国内首次开发坝体堆石料供应规划仿真模拟软件,并在天生桥一级面板堆石坝工程施工组织设计中得到实际应用。研究提出和应用了两项无损检测技术,即面波仪法和测量沉降法,建立了功能齐全的全面质量管理软件,使我国高堆石坝施工质量检测进一步现代化。

(6) 在国内首次研制成功 400m 超长水平位移计,并研制或优化了其他原观仪器和设备,使 200m 级高堆石坝原观仪器配套系列化,已被天生桥一级高面板堆石坝工程所采用。对鲁布革、西北口、关门山三座土石坝工程原型观测资料进行了统计分析和反馈分析,所取得的成果对评价工程施工质量和提高设计水平均有指导意义。

1995 年 11 月 7 日,该专题攻关成果通过了电力工业部组织的技术鉴定,鉴定意见认为,本专题研究成果内容丰富,具有显著的经济和社会效益,达到国际先进水平。建议随天生桥一级和白云面板堆石坝等工程的进展,继续加深有关的施工现场研究,大力推广应用已取得的科研成果,鉴于我国在建和拟建的高土石坝甚多,还有一些新的关键技术问题有待继续深入研究。

1.3.2 85-208-2-2 混凝土防渗墙墙体材料及接头型式研究

该专题的承担单位为成都勘测设计研究院,专题负责人为钱兆礼、肖白云;主要协作单位为南京水利科学研究院等。

该专题的主要攻关成果为:



(1) 通过大量的试验研究, 开发研制成功复合混凝土、微风化骨料混凝土和轻骨料混凝土三种新型的高强低弹刚性混凝土防渗墙墙体材料, 以及塑性混凝土防渗墙墙体材料。高强低弹刚性复合混凝土防渗墙墙体材料共有 30MPa、35MPa、40MPa、45MPa 和 50MPa 五个系列, 经在台勒水电站现场试验, 完全满足深度 100m 的混凝土防渗墙浇筑工艺要求, 具备在工程中初步推广应用的条件。低弹中强和低弹低强塑性混凝土在小浪底工程上游围堰(深 68m) 应用成功。

(2) 研究提出了土与混凝土的双屈服面弹塑性本构模型, 编制了全弹塑性的有限元计算程序, 并用于瀑布沟土石坝计算分析, 取得了合理满意的结果, 具有较高的应用价值。

(3) 利用土工离心模型试验对瀑布沟工程坝基防渗墙的受力状态以及与坝体防渗体的连接型式进行了系统研究, 其成果为该工程初步设计所采用。该项试验成果认为, 刚性混凝土防渗墙硬接头型式, 墙顶接触应力及墙体应力较大; 若采用刚性混凝土防渗墙软接头或塑性混凝土方案, 虽墙体受力状态有所改善, 但前者结构复杂, 后者墙体抗渗标号有所降低, 故均不宜作为推荐方案。该试验成果的推荐方案为直接插入型式, 并对防渗墙插入坝体防渗体的深度提出了具体建议。

该专题攻关成果通过了电力工业部组织的技术鉴定, 鉴定结论为整体达到国际先进水平, 其中研制的复合混凝土防渗墙墙体材料和深厚覆盖层上高土石坝离心模型试验技术达到国际领先水平。

1.3.3 85-208-2-4 高土石坝抗震关键技术研究

该专题承担单位为水利水电科学研究院, 专题负责人为常亚屏; 主要协作单位为南京水利科学研究院、大连理工大学、清华大学、河海大学、天津大学、成都科技大学(四川联大) 和黄委水利科学研究院等。该专题由两个子题组成, 各子题承担单位及负责人见附录 1.6, 其主要攻关成果为:

(1) 高土石坝粗粒填筑料动力工程性质及其测试技术的发展: 建立了小应变至大应变的测试装置与方法; 研究提出了高应力水平下几种粗粒料的动应力应变本构关系; 研究了各种因素对饱和砂砾料液化特性的影响, 给出了动孔压特性与相应计算模型以及抗液化措施。

(2) 高土石坝防渗材料的动力特性及其测试技术: 研究提出了防渗土料震裂与拉裂的破坏标准, 高应力水平下瀑布沟防渗土料的动力强度、孔压与变形特性, 防渗土料加筋与不加筋动力性状的比较结果。用多功能扭剪仪研究了主应力轴偏转、中主应力等因素对动强度的影响。提出了能反映防渗体风化料颗粒破碎的饱和土体广义弹塑性本构模型及其参数的测定方法。

(3) 砂土的动强度、液化性状、动应力应变关系及其测试技术: 首次在瀑布沟工程试验中用原位检测波速模拟砂土结构性影响。通过动扭剪试验研究了单向与双向振动对强度的影响。建立了能跟踪塑性变形的循环应变动三轴试验方法, 提出了不导致土样液化或破坏的门槛应变新概念。提出了有 7 个主要参数的动力弹塑性本构模型。

(4) 建立了以等价线性模型为基础的较为完整的动力分析方法, 并相应编制了总应力和有效应力分析计算程序。

(5) 提出了一套包括抗滑安全系数、震陷量、液化度和断裂准则在内的地震破坏