

ZHONGGUO
DANGDAI
TUSHIBA
GONGCHENG



中国水电工程顾问集团公司 编
CHINA HYDROPOWER ENGINEERING CONSULTING GROUP CO.

中国当代 土石坝工程

王柏乐 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

该书是在全面总结已建、在建工程的筑坝技术、经验和存在问题的基础上,为在建和今后建设的土石坝工程提供设计和施工的方法及思路。该书收集了大量近期建设的工程实例资料,共有 31 项具有代表性的土石坝工程,包括 10 项土料防渗土石坝工程;14 项混凝土面板坝工程;5 项沥青防渗的土石坝工程;2 项土工膜防渗的土石坝工程。这些工程代表了我国当代最新的筑坝技术,标志着我国土石坝筑坝技术达到了世界领先水平。该书适用于水利水电勘测、设计、施工人员作为设计手册和施工手册,也适用于科研单位、大专院校作为研究资料,同时可为水利水电工程各项工作提供指导和参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国当代土石坝工程/王柏乐主编. —北京:中国水利水电出版社, 2004
ISBN 7-5084-2436-0

I. 中... II. 王... III. 土石坝—水利工程—中国
IV. TV641

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 109594 号

书 名	中国当代土石坝工程
作 者	王柏乐 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	鸿昊排版室
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	889mm × 1194mm 16 开本 26.75 印张 702 千字
版 次	2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—3400 册
定 价	78.00 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

《中国当代土石坝工程》

编 审 委 员 会

主 编：王柏乐

副主编：吴鹤鹤 刘瑛珍 丁永生 吕明治

编 委：胡 斌 姚群钦 陈建苏 钮新强 陈振文 高广淳
谭继文 杨泽艳 彭卫军

审 稿：王柏乐 吴鹤鹤 刘瑛珍 袁 玖 陈建苏 王绪源
洪重光 王道平 刘更新 李金龙 吴立新

编 写：（按姓氏笔画排序）

王柏乐	王小红	王绪源	叶发明	龙 文	冯业林
刘吉祥	刘瑛珍	孙荣博	余吉安	李 蜀	李岳军
李中方	李治明	李润伟	吴吉才	吴曾谋	吴毅瑾
苏 萍	何顺斌	严培德	周良景	杨泽艳	陈振文
陈念水	罗光其	罗松涛	庞家林	胡良文	郑芝芬
赵 轶	党立本	郎玲芳	张宗亮	张运建	张 琦
张向前	姜忠见	姚群钦	姚元成	徐建军	翁建良
徐 静	徐唐锦	高广淳	袁友仁	曹国利	彭卫军
赖 寒	谭顺仕	谭继文	熊泽斌	潘江洋	

序

土石坝是一种应用最广的坝型，在具有适宜的地形、地质和建筑材料的条件下，土石坝极可能是一种结构简单、较为经济和施工快速的坝型，因此，在水工设计的坝型比较中，土石坝往往是不可缺少的。

20 世纪以来，土石坝工程在发达国家（如美国、加拿大、前苏联等）和部分发展中国家得到了快速的发展，并出现了 300m 以上的高土石坝。我国在 20 世纪也建成了大量的土石坝，但绝大多数为 70m 以下的中低坝，建成的少数高坝其最大高度仅在 180m 以下。进入 21 世纪后，随着我国水利水电建设的快速发展和实施“西电东送”水电工程的要求，众多高土石坝的建设被提上了议程，特别在深厚覆盖层河谷、地质条件较差、地震烈度较高、坝高较大（尤其 250m 以上）的坝址，多数选择了或拟选择土石坝。

在适宜的条件下，高土石坝的施工简易性、施工快速性和工程经济性是毋庸置疑的，但对土石坝工程的安全性，尤其在需要宣泄较大洪水流量的河流上兴建土石坝，部分技术人员和业主对其存在一定的疑虑。据统计，失事的大坝中，土石坝所占比重也较大，所以，产生土石坝不如混凝土坝安全的想法是可以理解的。随着土石坝工程建设的发展，土石坝的设计技术已经有了长足的进步，我国通过 20 世纪实施的多项国家科技攻关项目，更使土石坝工程设计、施工、管理

等诸方面的技术得到了全面的提升；近几年来，国内有多座200m级高土石坝的建设，也已经和正在为土石坝工程的设计和施工提供众多的经验。因此，目前我们完全可以说，土石坝与混凝土坝具有同样的安全性。

土石坝工程的设计具有不同于混凝土坝的特点，首先，枢纽布置的难度和重要性较混凝土坝更高，由于泄洪建筑物只能布置于两岸，对于泄洪流量较大的工程，尤其要解决好泄洪布置和下游消能以及可能带来的泄洪建筑物高边坡的问题；其次，当地质条件较差时，要妥善解决好发电厂房和其他水工建筑物的布置问题；还有十分重要的一点是，对土石坝工程的建坝材料必须给予充分的重视，必须在工程前期工作中投入足够的人力和物力，必须做到完全落实并留有余地，在这方面，工程的经验教训也是很多的。近年来，土石坝坝体的计算理论和计算手段已有了巨大的进步，计算成果已能基本反映土石坝的运行状态。但由于土石坝筑坝材料的特殊性，计算成果不可能做到完全与原型成果一致，因此，除了要继续提高设计理论水平外，还要求技术人员在土石坝的建设中，客观全面地分析计算成果，做到理论分析与工程经验判断的有机结合，认真做好坝体构造设计，最终实现科学的决策和完善的设计。

本书收集了我国20世纪80年代以来已建、在建各种类型的31座坝高位于国内前列的土石坝工程实例，内容涵盖土石坝的主要设计成果、施工方法和部分工程运行后的原型监测成果，这对我国今后土石坝工程的建设具有重要的参考和借鉴价值。愿本书的出版对推动我国土石坝工程建设技术的进一步发展起到积极作用，同时希望我国从事土石坝工程建设的单位和技术同仁，继续发挥自己的智慧，群策群力、交流提高，共同为使我土石坝工程建设技术走向世界前列做出新的贡献。

王柏松

2004年9月

前言

土石坝工程是最普及、最常见的坝型，坝高从几米到300m，如今我国已建成数以万计的土石坝工程。土石坝以其经济性和更适应各种地形地质条件的优势，雄踞各类坝型的首位。尤其是混凝土面板堆石坝问世以来，不再受当地防渗土料和筑坝材料的限制，利用建筑物的开挖料直接上坝碾压，使土石坝的建设几乎不受任何条件的制约，显示了土石坝工程明显的优势和强大的生命力。

21世纪以来，我国经济建设蓬勃发展，在“西电东送、大力发展水电”的大好形势下，大江大河的龙头水电站及多年调节水库相继进入了建设阶段。这些巨型水电工程也相应造就了一大批高土石坝工程。云南澜沧江上的糯扎渡工程为心墙堆石坝，坝高261.5m，其心墙料含水量偏高，经过大量的科学研究，我国已掌握了近300m级土石坝的筑坝技术；正在建设的清江水布垭混凝土面板坝工程，坝高235m，是国内最高的混凝土面板坝，通过“八五”、“九五”科技攻关，取得了大量的科研成果，我国已成功掌握建设水布垭混凝土面板坝工程的所有关键技术问题；天荒坪抽水蓄能电站上水库全库盆采用沥青混凝土防渗技术的成功实例，使我国更全面地掌握了沥青混凝土材料的性能及防渗技术；汉江上已建成的王甫洲土石坝工程，采用土工膜防渗，在坝高不高，但坝长很长的工程中，显示出其明显的优势，该工程大量尝试采

用土工膜防渗，使土石坝防渗材料进一步拓广，从而使水利水电工程土石坝的前景更加广阔。

《中国当代土石坝工程》旨在全面总结已建、在建工程的筑坝技术、经验和存在问题，为在建和今后建设的土石坝工程提供设计和施工的方法及思路。本书收集了大量近期建设的工程实例资料，共有31项具有代表性的土石坝工程，包括10项土料防渗土石坝工程，14项混凝土面板坝工程，5项沥青防渗的土石坝工程，2项土工膜防渗的土石坝工程。这些工程代表了我国当代最新的筑坝技术，标志着我国土石坝筑坝技术达到了世界领先水平。

本书为水利水电工程界提供了最新的最具代表性的工程实例。适用于水利水电勘测设计单位、施工单位作为设计手册和施工手册，也适用于科研单位、大专院校作为研究资料，同时可为水利水电工程各项工作提供指导和参考。

本书由中国水电工程顾问集团公司和水利水电土石坝工程信息网联合组织编写，得到了各设计院的大力支持。北京勘测设计研究院、成都勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、长江水利委员会勘测规划设计研究院、华东勘测设计研究院、黄河水利委员会勘测规划设计研究院、东北勘测设计研究院、贵阳勘测设计研究院、新疆水利水电勘测设计研究院、西北勘测设计研究院、中南勘测设计研究院、四川省水利水电勘测设计研究院、陕西省水利水电勘测设计研究院、云南省水利水电勘测设计研究院积极组织投稿，提供了大量的文献资料，在此一并表示感谢！

尽管我们在编写过程中做出了很大努力，但受到知识和工程经验的局限，仍难免有不妥之处，热忱欢迎广大读者对本书提出宝贵的意见和建议。

编 者

2004年9月

目 录

序

前言

中国土石坝工程建设新进展	1
--------------	---

土料防渗的土石坝工程

糯扎渡水电站心墙堆石坝	11
瀑布沟水电站砾石土心墙堆石坝	23
小浪底水利枢纽斜心墙堆石坝	36
黑河引水工程粘土心墙堆石坝	49
狮子坪水电站碎石土心墙堆石坝	61
鲁布革水电站心墙堆石坝	75
水牛家水电站碎石土心墙坝	89
满拉水利枢纽心墙堆石坝	101
云龙水库心墙堆石坝	118
徐村水电站心墙堆石坝	130

混凝土面板堆石坝工程

水布垭水电站混凝土面板堆石坝	141
天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝	154
三板溪水电站混凝土面板堆石坝	169
洪家渡水电站混凝土面板堆石坝	179
紫坪铺水利枢纽混凝土面板堆石坝	196
吉林台一级水电站混凝土面板堆石坝	206
珊溪水库混凝土面板堆石坝	218
乌鲁瓦提水利枢纽混凝土面板堆石坝	238
公伯峡水电站混凝土面板堆石坝	252
引子渡水电站混凝土面板堆石坝	262
白溪水库混凝土面板堆石坝	275
桐柏抽水蓄能电站下水库混凝土面板堆石坝	289
泰安抽水蓄能电站上水库混凝土面板堆石坝	303
琅琊山抽水蓄能电站上水库混凝土面板堆石坝	313

沥青防渗的土石坝工程

天荒坪抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板堆石坝·····	325
张河湾抽水蓄能电站上水库沥青混凝土面板堆石坝·····	338
三峡茅坪溪沥青混凝土心墙堆石坝·····	348
冶勒水电站沥青混凝土心墙堆石坝·····	368
尼尔基水利枢纽沥青混凝土心墙堆石坝·····	380

土工膜防渗的土石坝工程

王甫洲水利枢纽复合土工膜斜墙堆石坝·····	393
西霞院水利枢纽复合土工膜斜墙堆石坝·····	410

中国土石坝工程建设新进展

王柏乐 刘瑛珍

土石坝工程,施工简便、就地取材、料源丰富、地质条件要求低、造价便宜,因其诸多优势,成建数量极多,是水利水电工程中极为重要的一种坝型。土石坝工程的建设,历史久远,有丰富的成功经验。自有混凝土坝出现后,似乎总认为高坝大库最适合混凝土坝,其枢纽布置既方便,又安全可靠。事实上从多方面因素来衡量,土石坝仍有其特定优势,有更经济合理的枢纽布置条件,国际上最高的坝则是土石坝。土石坝的发展,一直经久不衰。随着科学技术的进步,今天的土石坝工程,涵盖了土料防渗、混凝土面板防渗、沥青混凝土防渗、土工膜防渗等土石坝工程。

鉴于我国疆域辽阔,东北和西藏气候寒冷,西北地区干旱,南方潮湿多雨,各地气候、地质和经济条件等多方面有巨大差异,土石坝工程建设中所遇到的技术问题,也大不相同。我国土石坝工程建设,在逐步改进施工工艺的同时,对所遇的问题采取有针对性的措施,结合当地情况研究使用新材料、新结构,很好地吸收国内外多方面实践经验和教训,同时还在理论上深入开展有益的科研工作和探索,从而使其建设水平和技术不断提高和发展。特别是20世纪80年代以来,随着我国社会经济的发展,水利水电工程建设突飞猛进,土石坝坝高开始向300m级高度研发和建设。尤其对筑坝技术难题的攻克,我国已积累了大量的工程建设经验,并在理论上有所突破。现仅简述以下几方面,足见成绩极为显著。

1 土料防渗土石坝

土料防渗土石坝包括心墙、斜墙和均质坝等。

1.1 坝高

我国建造的土料防渗土石坝,过去除台湾的石门和曾文工程超过百米外,大部分在80m以下,云南毛家村心墙坝是82.5m。20世纪70年代后期到80年代初期,才出现像甘肃碧口工程(因施工条件原因,心墙体型较特殊)、陕西石头河工程(采用人工开挖倒挂井防渗墙)坝高达到百米级。近二十年建成的云南鲁布革工程为风化料心墙坝,坝高103.8m;陕西黑河金盆水库工程,坝高130m;即将建成的新疆8度地震区恰布其海心墙坝125m高;还有即将建设的四川狮子坪工程、水牛家工程,都是百米级的土料防渗土石坝。已建成的黄河小浪底工程,为斜心墙土石坝,坝高已达到167m,并建在70多m深的覆盖层上,可以说是我国当前在土料防渗土石坝建设中,最具代表性的工程。在建的四川瀑布沟工程为粘土心墙土石坝,坝高186m,即将建设的云南澜沧江上的糯扎渡工程为心墙堆石坝,坝高261.5m,是我国最高的土石坝工程。随着这些工程的建设 and 运行,将使我国土石坝筑坝技术再上一个

新台阶。

1.2 防渗土料

防渗土料是选定土料防渗土石坝的决定性条件。我国南北东西的不同地区,土质也不尽相同,加上气候冷暖,雨水多少,给防渗土料的选用和施工方式及质量,带来不少难题。一般冲积粘土的使用比较简单。西北地区有湿陷性黄土及黄土类土和分散性土,鄂皖中原地区有较多膨胀性土,南方多雨地区有含水量高的南方红粘土,有些地区则为冰碛土。国内结合不同地区的特定条件,经过工程实践,采取不同的相应措施,都有不少成功经验。分散性土可增加石灰或水泥改性,并要求做好反滤;膨胀性土要求在一定范围内,即其临界压力值附近,采用非膨胀性土保持其足够的压强,都可得到相应的有效解决。例如,黄土类土加强压实功能。在黄河小浪底工程斜心墙中的使用。云南云龙工程,坝高77m,心墙土料的多种土体团粒结构,干密度差别大,其最优含水量相差也很大,最大在20%以上,采用混合使用,也得到较好解决。近些年对宽级配砾质土、碎石土风化石料作为防渗土料的应用,如鲁布革工程,坝高103.8m,为风化石料心墙坝,又拓宽了用作防渗土料的范围。不同土料在施工上采取相应的有效措施,工程建设都是成功的。

1.3 施工措施

对风化石料采用“薄层重碾”,既能改善其级配,又能满足相应密实度及防渗效果。南方红粘土含水量不同,普遍偏高,其干密度不同,这是由于其团粒结构所特有的性状,据实践经验及科研论证得知,只要能满足相应力学指标,含水量和干密度在此种情况下已非主要问题,否则反而适得其反,难以压实。再者一个地区多种土料,土粒结构不同及最优含水量差别很大的粘土,采取混合使用,土料变化后按相应压实度控制其碾压质量,也是成功的。对南方多雨地区含水量较大的土料,在很好了解其土料级配的基础上,采用增加掺和料,以改善其级配及相应最优含水量,可取得较好的压实效果。而新疆“635”工程为砂砾石心墙坝,坝高73m,由于粘粒含量高达60%,曾考虑掺砾石35%,但掺和难以均匀,效果不好,则维持了采用未掺砾粘土心墙。目前云南澜沧江糯扎渡工程土料含水量高,正在研究掺砾石的措施。这都说明土料防渗土石坝建设技术,还在不断发展和提高。

我们已建造了位居世界上海拔最高、气候条件非常恶劣、地处高地震区的满拉土石坝工程,它在施工条件差、施工工期短的情况下建成,也是一个有代表性的工程。

2 混凝土面板堆石坝

我国在20世纪80年代开始面板堆石坝建设,起点就比较高,如西北口、沟后、成屏一级和株树桥等,都在70m以上,有的接近百米级。其发展非常快,真所谓日新月异,遍地开花。但也应注意到,有成功经验,也有惨痛教训,在总结经验和吸取教训的基础上,大大提高了工程质量。总的来说,成绩是主要的,而且仍在持续发展。

2.1 坝高

目前,坝高在50m、60m以下的工程已非常普遍,坝高百米级的也已很多。土石坝工程信息网已经编印了面板坝图册共5册,已近60个工程可供参考。已建浙江珊溪工程利用开挖料筑坝,坝高132.5m,白溪工程坝体填料为开挖料,坝高124.4m,云南茄子山工程坝

体填料为花岗岩石料,坝高 107m,在建的新疆吉林台工程砂砾石面板坝,地震基本烈度 8 度,坝高 157m,黄河公伯峡工程面板堆石坝,地震设计烈度 8 度,坝高 132.2m 等。坝高接近 200m 级,且超过 200m 级也不算少。已建成的天生桥一级面板堆石坝,采用溢洪道开挖料石填筑,分区分期填筑,坝高 178m,在建的四川紫坪铺工程坝高 156m,贵州洪家渡工程坝高 179.5m,湖南三板溪工程坝高 185.5m。还有,在建的湖北清江水布垭工程坝高 233m。面板堆石坝如此快的发展并非偶然,它很好地体现了这些年我国大量科研成果的结晶和工程实践的成果,浸透了众多水利水电科技工作者的汗水。

2.2 防渗面板及趾板

面板堆石坝的成功经验是多方面的。其核心是保证面板少裂缝和不出现裂缝,特别是不要出现贯穿性裂缝,还要尽可能减少分缝之间的渗漏。高面板堆石坝作为国家重点科技攻关项目,对其在温度变化、边界约束,以及不同受力等条件下,提出了不少有益的相应改善措施,已在工程中采用。虽说面板坝完全不漏水是不可能的,但必须保证渗水不大,并不影响正常运行或能够自愈止渗。

近些年,很多工程采取改良混凝土,增强其抗裂性能。浙江珊溪和白溪工程,一个是增加微膨胀剂、引气剂,另一个是在部分面板混凝土中增加聚丙烯纤维,再加强浇筑后的养护,效果都不错。青海公伯峡掺加减缩剂。贵州洪家渡工程,在满足抗渗抗冻标号的基础上增加微膨胀剂和引气剂外,还掺用了粉煤灰,另外拟在部分面板混凝土增加聚丙烯纤维或钢纤维,做了不少研究工作,这些措施虽在进一步摸索,但已见有益的成效。同时在混凝土面板表面涂养护剂,面板及趾板裂缝采用帕斯卡堵漏剂处理,也是很好的经验。湖北清江水布垭工程面板混凝土,也采用了添加高效多功能复合外加剂和 I 级粉煤灰 15%~25%,并研究了掺加纤维混凝土的措施,用以改善混凝土抗裂性能。岩基上趾板多不设永久缝,为减少趾板裂缝,采用两序浇筑,第一序较长,浇筑一定时间后,在一序的两个浇筑块之间,用一小段微膨胀性混凝土填筑。整体趾板上再填筑一层粉细土以备有裂缝时,能自愈吻合不渗。这些都是减少混凝土裂缝的重要措施。临近坝体的混凝土建筑物与面板的连接缝,采用高趾墙处理,公伯峡工程高趾墙最高约 50m,都有很好的经验。

面板分缝的止水嵌缝材料“GB”、“SR”,是我国科研单位自行研制的成果,其性能还在逐步改进,已成为当前面板坝分缝防渗处理不可缺少的材料。永久缝相交处的异形止水,在工厂模制加工,质量很好。

2.3 筑坝料及施工

根据料源具体情况选用不同级配不同强度的料分区填筑,已成定规。小区料、垫层料、过渡料、垫层料部分的反滤料,以及其在趾板和面板下游侧的用料要求都比较严格。大量用料是主堆石料、次堆石料,主堆石硬岩料主要堆筑在坝轴线上游侧,对支撑面板、减小面板受力变形及受力不均的不利影响,有重要意义。坝下游侧浸润线以上部分,可填筑较差的石料(即次堆石料),这样既保证坝体质量,又比较经济。主堆石料也有用砂砾石的,只要在坝坡上有所变化,如在表层部分采用一定厚度的硬好岩石,仍能达到一般堆石坝坡度。乌鲁瓦提面板坝工程坝高 138m,采用砂砾石料、外坡仍为 1:1.5。筑坝材料无论采用何种料,均必须达到要求的压实标准。坝料可使用砂砾石,开挖块石、风化岩等多种料,主次堆石分区填筑于不同位置。坝体分区填筑料的使用和用料拓宽,使面板坝的生命力更强。在填筑料施工中,为保证其压实质量,减少变形对面板的不利影响,洪家渡工程在次堆石料填筑时,

4 中国土石坝工程建设新进展

采用冲碾压实的技术,提高了工效,加大了碾压密实度,值得在今后施工中研究推广。填筑料还可以与枢纽其他建筑物开挖料平衡使用,可大大降低造价。目前在各水利水电工程设计中,已形成一种趋势,在枢纽布置方案中几乎都少不了将面板堆石坝方案作为一个重要坝型参与比较,足见面板坝在水工建筑中的重要地位。

面板浇筑,一般均采用无轨滑模施工,面板分期浇筑只设施工缝,一般无永久缝。个别基岩上矮坝,也有采用分离块面板防渗,需作好分缝处防渗处理。

对于陡峭边坡,洪家渡工程在填筑料中,局部采用普通料添加少量水泥 50kg,使用少量水,用铲车简单拌和、装运,使其形成干硬性堆石,用以补强陡峻岩坡,接着填筑一般料,与一般填筑料同时碾压,这对坝体在边坡部分的变形有一定的控制。

在东北 -45°C 左右严寒地区修建了莲花混凝土面板堆石坝,在西藏高海拔、气候变化剧烈的地区,也建成了那曲地区的查龙面板堆石坝,这为在寒冷地区建造面板堆石坝积累了有益的经验。

面板堆石坝还有更多的细部结构和特别处理措施,如垫层料级配、分缝止水等,各工程实际情况不同,办法也不同,经验是丰富的,这都是今后具体施工和设计中的宝贵财富。当然,仍存在一些不尽如人意的地方,有待进一步改进和提高。目前在已有经验基础上,制定了我国自己的设计和施工规程规范,对正确指导设计和施工非常重要,说明我国的建设经验已基本成熟。

3 沥青混凝土防渗堆石坝

沥青混凝土防渗堆石坝有心墙坝和斜墙或面板坝。

过去除香港高岛坝外,国内所建心墙坝均较低,有碾压式也有浇筑式。如甘肃党河、辽宁碧流河坝都不足 30m,重庆洞塘坝建造较晚,坝高 47m,运行都很好。斜墙式面板坝较高,为 70m 左右。如陕西石砭峪工程、浙江牛头山工程、湖北恩施车坝、河南南谷洞工程等,运行均不够理想,渗漏较大。早期“设计导则”规定,沥青混凝土防渗工程,不宜大于 70m。这里有沥青原材料问题,也有施工工艺问题。近些年,沥青混凝土防渗工程,在引进国外技术及总结国内经验基础上,已出现较大进步。对基础覆盖层较厚、又缺乏合适防渗土料的地区,具有非常有价值的实用意义。

沥青混凝土心墙防渗,已建成的百米级三峡茅坪溪工程为碾压式沥青混凝土心墙坝,底部有时可能受双向水压,坝高 104m。在建的四川冶勒工程坝高 125.5m,河床不对称覆盖层厚大于 420m。即将修建的新疆下半地工程,坝高 80 多 m,基础覆盖层也有 140 多 m。这些工程的建设将为今后进一步发展沥青混凝土防渗,提供极为宝贵的经验。

沥青混凝土面板或斜墙坝,虽然过去已建成数座工程,但一般尚存在一些问题,有的已进行处理,如陕西石砭峪工程,采用加一层粘结式土工膜,提高了防渗效果。有的正在处理或有待处理,如河南南谷洞工程正在修补裂缝,牛头山工程尚待确定修补方案,应当说它们都积累了很多较好的经验。近年建成的天荒坪抽水蓄能电站上库为沥青混凝土面板坝,质量很好,虽因基础问题,曾出现过裂缝,也已处理,至今已投入运行近 7 年,效果很好。这为抽水蓄能电站库盆建在软弱基础上进行全面防渗,选用沥青混凝土面板防渗,以及沥青混凝土面板与边岸的连接,库底与库坝坡的弧面过渡处理等,创造了非常好的经验。目前正在建设的河北张河湾抽水蓄能电站上库,山西西龙池抽水蓄能电站的上下库,均采用这种防渗型式。这对今后沥青混凝土防渗技术的进一步发展与提高,具有重要意义。

东北尼尔基沥青混凝土心墙坝,虽然坝不高(41.5m),但其工程量很大,而且同时采用碾压式沥青混凝土和浇筑式沥青混凝土,将碾压式沥青混凝土断面扩大、清理,然后进行浇筑式沥青混凝土施工,将两者连接在一起。该工程中采用碾压式和浇筑式混凝土,适应当地施工和气候等条件,有其优点及适宜性,必将对今后的应用借鉴具有实践意义。

4 土工膜防渗土石坝

用土工膜防渗,过去多用在临时性工程,如水口电站、三峡工程 and 新疆“635”工程的围堰,以及部分江河堤防的修补工程和水渠工程。对于永久性工程或较重要建筑物挡水工程,尚存诸多顾虑。主要问题除强度外,接缝处理能否保证质量和能否保证长期运用不老化的,尚没有可靠数据。虽有不少科技工作者作了很多研究论证,但仍未能顺利地付诸实施。近年来,汉江王甫洲工程进行了大胆尝试,采用了土工膜,用作水平铺盖和坝体防渗,总面积120万 m^2 ,反滤土工织物31万 m^2 。虽说坝高不高(21m),并在初期运行,下游土工布反滤曾被细颗粒堵塞导致浸润线抬高,使下游部分坝坡发生塌滑,后经加强排水予以解决,至今已正常运行5年。正在修建的黄河西霞院工程(洛阳附近),是小浪底工程的反调节池,坝高也是21m,土工膜防渗面积16万多 m^2 ,基础覆盖层为混凝土防渗墙,土工膜与混凝土防渗墙联合防渗。泰安抽水蓄能电站上库为混凝土面板堆石坝,库底为土工膜防渗,水头约40m,整体上库是土工膜与混凝土面板联合防渗。这些工程水头虽说都不大,但都是在大江大河或重要的大型电站挡水建筑物所采用的防渗措施,其工程重要性就可说明其土工膜防渗的重要意义。这些工程今后的运行,将为进一步探索土工膜的使用提供有力的参考价值。

特别还要介绍一点,西安石砭峪水库20世纪60年代即已建成,原为沥青混凝土面板(斜墙)防渗,坝高85m,由于面板下面,作为面板基底的堆石不均匀变形问题,该水库多年来,屡屡发生裂缝和塌坑,多次修复仍未奏效,不能正常蓄水运行,最后采用在面板上铺筑一层土工膜的防渗方案(这一方法在国外某面板坝严重漏水,不能蓄水的工程曾使用),土工膜接缝采用粘结的方式,表层加一薄层混凝土予以保护,已很好解决了多年(约40年)未能解决的问题,现已运行约5年,蓄水深70多m,坝体几乎未见渗漏,目前只有部分绕坝渗漏。这说明土工膜下的基底做好(本工程为原沥青混凝土面板作基底),对确保防渗作用是非常有效的。

5 土石坝的深覆盖层处理

土石坝对覆盖层软基的适应性,要比混凝土坝好得多。在深覆盖层而又不能挖除时,就只能选择土石坝。

覆盖层的防渗处理,采用混凝土防渗墙、帷幕灌浆等,早有成功的经验。而对于特别深覆盖层处理,经验还不多。采用高喷和塑性混凝土防渗墙,在永久性和重要的工程中选用,还有待于进一步研究。

已建成的小浪底斜心墙土石坝工程,覆盖层采用混凝土防渗墙,深达70多m,局部与岩体接触部位或倒悬的陡壁处采用了高喷相接,上游围堰覆盖层深60多m,采用了塑性混凝土防渗墙。小浪底工程基础处理,采用既厚且深的混凝土防渗墙,创造了不少先进的经

验,如“两钻一抓”;为使两段墙更好地连接,采用在接头处套打一钻,以引进的横向槽孔塑性混凝土保护下的平板式接头技术;同时对夹沙层进行了特殊处理,都是成功的。在帷幕灌浆工作中,引进了GIN灌浆法(控制灌浆强度值法)及稳定浆液法,对保证灌浆质量极为有效。这些都为今后更深的基础防渗处理,积累了不少宝贵经验。

目前在建的四川冶勒沥青混凝土心墙坝工程,基础覆盖层最深达420m,右岸部分采用130多m悬挂式防渗墙,根据地形条件创造性地采用双层接力措施,上下墙之间建造一条施工廊道,将防渗墙分为上下两段,上段为混凝土防渗墙70m左右,下段为帷幕灌浆,深80m左右,可更好保证施工质量,这在深覆盖层的防渗处理方面,树立了一个新的范例。

新疆下半地沥青混凝土心墙坝,覆盖层也有150多m,该工程采用基础处理上一半为混凝土防渗墙(悬挂式墙),下部与深层灌浆防渗相连接,这也是一种深覆盖层的防渗处理措施。这说明我国在处理深覆盖层的问题中,正采取不同措施,摸索研究,一步步前进。

采用混凝土防渗墙施工工艺也在不断提高,而其效果也是其他处理方式难以比拟的。河北黄壁庄工程,过去采用粘土铺盖,一直未能很好解决基础渗漏及其冲蚀作用,近年不得不改为全部防渗墙的处理方式,以免再罹后患。

三峡工程二期上游高围堰,采用粗砂风化石料,经振冲加密,再作防渗墙,墙上段又加一段土工膜连接,其防渗处理深度也有60多m。对于振冲加密,再作防渗墙,国内外都有先例,同样可用于覆盖层先填筑一层砾料作为坝体的一部分,超出水面,在水面上进行操作,同时振冲基础和填料,填料部分再作防渗墙,可起到坝体防渗同样效果。这样施工要方便得多,三峡工程围堰如此,广东飞来峡永久性工程,也曾采用过这种方法。

近年对塑性混凝土防渗墙的研究和应用,也有很大的进展,由于担心其耐久性和均匀性,一般能较好地用在非永久性工程或补强加固工程,小浪底围堰工程采用了塑性混凝土防渗墙,塑性混凝土防渗墙已可做到弹强比150:1,水泥用量150kg,膨润土50kg,水灰比1:53。水口电站塑性混凝土防渗墙,弹强比为250:1,效果都很好,尚需在工程实践中进一步研究推广。

6 土石坝中几个新结构措施

近几年在土石坝工程设计中,根据其所遇到的具体条件和特定要求,创造性地采取了一些有特色的结构措施,很值得在今后工程建设中根据需要进一步推广。

(1) 抗震。一般土石坝为满足抗地震要求,除基础浅层有细砂透晶体,需作振冲加碎石桩处理外,坝坡坡度均较缓,如新疆吉林台工程为混凝土面板砂砾石坝,抗8度地震,坡度为1:1.7~1:1.9,比常规面板坝坡度缓。也有将靠坝坡外侧的一部分填筑料,取用抗滑能力较强的堆石,坡度仍可选用在1:1.4或稍缓。大多数面板堆石坝抗震性能好,与其堆石填料有关。在此之外,为减少坝体填筑料,还要满足抗震要求,西藏满拉心墙土石坝工程抗9度地震,采用坝体内加设混凝土框格,以增强其抗滑力。黄河公伯峡工程,抗8度地震,在坝体内加设钢筋网,以增强其抗滑能力。小浪底工程中,左坝头端部有一裹头,受地形影响,坡度较陡,抗滑能力不足,也采取增加钢筋的办法,以维持其抗滑稳定。总之,这些措施,都为设计提供了很好的思路,在处理抗震或抗滑问题时,不失为一种好办法。

(2) 抗波浪爬高。对大型水库,水库面积大,且当地风力也大时,其风浪爬坡作用巨大,为此,东北尼尔基工程,经过与大连理工大学共同试验研究,推荐采用一种台阶式坝坡及格栅配合压浪结构,共同作用使波浪爬坡减少近1m左右,这是一种有特色的创新结构,

类似工程完全可以借鉴或套用,一定能取得更好的效益。

(3) 连接板。建在覆盖层上的混凝土面板堆石坝,覆盖层内防渗墙需与面板趾板相连,以达到全面防渗效果。近几年所建覆盖层上面板坝,均在防渗墙与趾板间设置了一段连接板,连接板与趾板下游一定范围内,予以振冲或强夯加密,以适应坝体与防渗墙不同变形,以保证防渗墙与面板的共同联合防渗作用。这对面板坝的建设,又拓展了一条新的思路,很好解决了软基上建面板坝的问题,目前新疆察汗乌苏工程正在研究其深覆盖层高混凝土面板坝采用这一措施的可行性。

(4) 过水面板坝。在特殊的地形条件下,水库没有合适的溢洪道位置,在洪量不大的情况下,研究采用坝面过水,也是一个途径。新疆哈密榆树沟工程,首先尝试了这一举措,经研究试验,在面板坝顶设一无门的非常溢流坝段,虽流量和落差均不大,该工程已经过一个汛期过水,效果很好,这是一个创举,为今后进一步改进和提高,起到很好的示范作用。目前桐柏蓄能电站下库,也采取了这一方式。广东惠州蓄能电站也在研究这一措施。这种措施的结构正在逐步改进完善,势必还会进一步推广。

(5) 挤压式挡墙固坡。面板坝的上游坡压实,对面板受力影响很大,一般需要初次填坡,二次削坡,然后斜坡碾压,再表面水泥砂浆或乳化沥青固坡,再浇筑面板。面板坝上游坡的填筑,一般较陡 1:1.4,施工及放线,甚为不便,对质量也难以保证。现在有的工程已开始采用挤压式挡墙固坡,一次成型,既方便施工,对质量也有保证。挤压式挡墙为低标号低弹模混凝土,弹模小,强度低,以保证与填筑料的变形协调。这一措施尚在进一步摸索改进,有的工程担心浇筑模板后,是否会发生坝体填料与固坡脱离现象,这将在填筑坝体程序和靠墙部分填料碾压压实改进解决,国外已有一些工程采用,设备保密,但我国已研制出自己的设备,效果很好。总之,这种方法会大大改善施工,并对缩短工期大有意义。

(6) 干硬性堆石。洪家渡工程为避免坝体填筑在与陡峭岩坡接触带,产生相对较大的变形,特在距趾板及边岸处面板较近的区域,采用自然填筑料中增加少量水泥,用铲车简单拌和,与一般填料同时碾压,以形成干硬性堆石,既不同于混凝土,比混凝土强度低,也不同于堆石,而比堆石又多些强度,可与普通填料同时填筑和碾压。这种措施虽增加一些费用,但其效果,比削岩坡或补坡要经济得多,值得借鉴使用。还可进一步总结推广于其他工程方面,肯定有良好的效果。

7 理论计算与分析

土石坝稳定计算,长期以来,主要采用滑弧稳定计算,而且以瑞典滑弧及直线滑块法为主,近几年,已发展为考虑分条侧压力影响的改良 Bishop 法, Morgenstern 法或通用条分法等,同时安全系数也相应作了修改。随着工程建设的发展及有限元分析方法的普遍应用,更进一步推动了科学理论研究的前进。为更好了解高土石坝和堆石坝的应力应变性状,各科研单位,包括南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院、河海大学、清华大学等,提出了多种不同本构模型及相应的计算方法和理论,有根据邓肯—张理论演变出来的线弹性和非线性弹性 $E-\mu$ 、 $E-B$ 模型,有考虑应力路径影响的非线性弹性 $K-G$ 模型,有双屈服面弹塑性模型等。这些模型和计算方法所用的基本参数,都有其相应的土石料物理力学参数。由于各种土石料,包括土料、砾石土、风化土、堆石、砂砾石、风化岩料等,都有其不同的特性,而且即使同一种土料,就目前的试验手段,所得数据也有很大的离差性,所以利用不同本构模型的计算方法,其计算成果有时相差也很大。近些年的计算分析成果,结合实测数

据,逐渐取得了一些初步印象, $E-\mu$ 模型计算成果偏大, $E-B$ 模型计算较好,对于 $K-G$ 模型和双屈服面模型,各单位各有选择,也有同时采用两种模型计算的,成果也不尽相同。对于地震动力,以上几种模型,多按静力加载路径分析,但对地震波的加载过程尚难很好反应,大连理工大学又推出一种三维动静力耦合非线性数值计算方法,可以说是又进了一步。尽管方法不少,这些成果也仍限于基本参数的不稳定性,其结果不够稳定,有待进一步优化。当前在各工程建设中,加强了原型观测及反馈分析,这对验证相应的计算模型成果,是很好的依据。可以预计,在根据实际观测成果,进行不断验证的经验累积过程中,定会促使基本理论的研究进一步提高。

8 结语

随着社会经济发展,水利水电工程的建设以及土石坝建设技术水平也在不断提高。从以上几点,可以看出,土石坝由于其对地质条件的适应性,其坝高、坝料及基础处理技术等,都在继续发展和提高。而面板堆石坝的发展,更是突飞猛进,国内目前在建最高的坝,则是面板堆石坝(暂不计待建的糯扎渡心墙坝)。关于沥青混凝土防渗,无论是沥青混凝土心墙,还是面板或斜墙,都在进一步发展和提高,有的已取得显著成效。土工膜防渗的使用,虽坝高不高,但已运用在大江大河及重要工程中,这将为今后发展和采用,取得了很好的经验。总之,土石坝本身及相应结构,都在近几年取得了很大成绩。但应重视前进中存在的问题,越是发展,越应当谨慎从事。土石坝的土料问题,有些中小型坝,还有不尽放心的情况。面板坝的裂缝问题,有的出现裂缝较多,有的漏水偏大等,还需进一步改进和优化,以防止过去出现的惨痛教训。沥青混凝土面板裂缝问题,也需在实践中总结经验,予以改进。土工膜长期运行问题,接缝的有效处理问题,都需在工程实践中,予以研究解决。在所有工程中,都应总结经验,吸取教训,优化设计,保证施工质量。同时,还应探讨相应的理论性问题,使整个土石坝工程在科技理论和施工工艺水平等方面,取得更大的成绩。