

土石坝 安全监测分析评价技术 与工程应用

● 庞毅 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土石坝

安全监测分析评价技术 与工程应用

庞毅 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书对大坝安全监测技术、安全监测数据分析方法、在线安全评价体系与模型库技术、大坝安全预报预警技术、构架技术、系统运行及安全保障技术等方面进行了系统深入的研究,解决了实现土石坝安全监测的关键创新技术,主要包括:数据采集系统运行效率保证、采集硬件共享、雷区设备保护、测压管深孔封孔和在线分析与安全评价预警等。土石坝安全监测分析评价技术是工程与软件相结合的系统化技术成果,主要技术均通过多项工程实践检验,构建了成熟、实用、先进,适用于不同运行时期的土石坝工程的安全监测分析评价技术集成体系。本项研究成果的最大特点是可为除险加固水库工程提供系统化的、具有继承性和发展性自动化安全监测解决方案。

本书可供相关决策、科研、工程技术人员和大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土石坝安全监测分析评价技术与工程应用 / 庞毅等
编著. — 北京:中国水利水电出版社, 2011.3
ISBN 978-7-5084-8465-5

I. ①土… II. ①庞… III. ①土石坝—安全监测
IV. ①TV698.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第038522号

书 名	土石坝安全监测分析评价技术与工程应用
作 者	庞毅等 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 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17.25印张 409千字
版 次	2011年3月第1版 2011年3月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	58.00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

《土石坝安全监测分析评价技术与工程应用》

编 写 委 员 会

主 编：庞 毅

副主编：王保泽 杨万志 张中午

主要编写人员：

彭凯忠 赵 琳 马 涛 刘 恒 赫永服

参加编写人员：

郭 强 马传波 郭晓亮 周大鹏 李广波

张春哲 田作佳 马艳霞 于国梁 刘德亮

王 嵩 高 峰 刘仔旭 赵 越 倪娜娜

杜丽杰 罗秀娟 李长友 刘玉珍 杨永洁

李 禄 汪玉君 那 利 韩敏华 赵丽华

序

我国是世界上水库大坝最多的国家，水库在抗御洪水灾害、调蓄利用水资源、提供清洁能源等促进经济社会可持续发展方面发挥着巨大的作用。在各类水库大坝中，土石坝数量达到95%以上，全国3万多座病险水库中的绝大多数也是土石坝。

水库大坝工作条件复杂，设计过程中带有一定经验性，施工时也可能存在某些缺陷，在长期运行过程中，受环境作用，坝体要经历筑坝初期的不稳定到逐渐稳定和运行期的健康到病险的发展过程。因此，大坝的安全监测工作需伴随着坝体的全寿命周期，只有及时发现和处理大坝出现的异常现象，才能保证坝体的健康运行，避免出现严重后果。大坝安全是水库工程管理工作中最重要的一项工作，监测工作则是保障安全的重要环节。大坝安全监测分析评价系统，可及时获取坝体安全的各项技术参数指标，通过分析可有效反映坝体、基础等关键部位的性态变化。因此，大坝安全监测分析评价系统长期以来受到各方高度重视，是不断发展的一项重要技术。

辽宁水科院的研究开发人员结合水库大坝安全运行管理的需求，采用“科研—设计—施工”相结合的模式开展工作，在土石坝运行变化规律、安全监测理论、内外部监测设置以及监测系统的设计、施工和在线分析评价等方面获得了很多成果，积累了宝贵经验。有些成果纳入《水利部先进成果指导目录》，并在不少水库大坝中推广应用，为提高水库大坝安全管理做出了积极的贡献。

作者在总结、归纳和提炼已有大量成果的基础上，编著了《土石坝安全监测分析评价技术与工程应用》一书，相信该书的出

版，能对广大读者尤其是工作在大坝安全监测一线同志提供有益的帮助，推动我国大坝安全监测和评价工作迈上新的台阶。

A handwritten signature in black ink, appearing to be the name '王生' (Wang Sheng) in a cursive style.

国际大坝委员会主席
中国大坝协会秘书长
中国水利水电科学研究院副院长

目 录

序

第一章	绪论	1
1.1	水利工程建设	1
1.2	土石坝概述	3
1.3	大坝安全监测概述	9
1.4	我国水库现状及需求情况.....	14
1.5	本项目研究目的及意义.....	16
1.6	国内外研究现状及发展趋势.....	17
1.7	本项目研究内容概述.....	23
第二章	大坝安全监测技术	25
2.1	巡视检查技术.....	27
2.2	坝体监测项目布设原则研究成果.....	33
2.3	坝体安全监测远程测控技术.....	34
2.4	水雨情遥测系统.....	44
2.5	水库气象参数自动观测系统.....	53
2.6	视频监控系统.....	56
第三章	安全监测数据分析方法	59
3.1	数据处理方法分类.....	60
3.2	数据的组成及性质.....	62
3.3	数据的处理方法.....	66
3.4	坝体变形安全分析.....	84
3.5	坝体渗流安全分析.....	87
第四章	在线安全评价体系及模型库技术	109
4.1	综合评价知识库	110
4.2	综合评价模型库	113
4.3	综合评价体系	127
4.4	在线评价体系	138
第五章	大坝安全预报预警技术	140
5.1	超前预警机制	140
5.2	洪水预报模型	141
5.3	水库调度模型	159

5.4	可能最高水位预报	161
5.5	渗透压力水位预报	162
5.6	安全预警模型	163
第六章	安全监测系统构架技术	164
6.1	分层分布式总线体系架构模式研究	165
6.2	无线组网体系架构模式研究	168
6.3	坝体测压管深管封孔与设备埋设关键技术	173
6.4	垂直控制网精确测量技术	175
第七章	系统运行及安全保障技术	178
7.1	系统运行效率保障技术	178
7.2	系统综合防雷保障技术	181
7.3	坝体安全监测设备仪器保护技术	186
第八章	工程应用实例介绍	188
8.1	工程概况	189
8.2	系统总体设计	190
8.3	系统功能设计	193
8.4	数据库设计	260
结束语		263
参考文献		264

绪 论

1.1 水利工程建设

水是基础性的自然资源和战略性的经济资源，是维系生态与环境可持续发展的控制性要素，是人类生活和生产劳动必不可少的重要物质，是最宝贵的自然资源之一。从认识到水是一种具有多种用途的宝贵资源起，人们就开始认真考虑水资源的正确涵义。对水资源的正确涵义存在着不同的见解，直到 1977 年联合国召开的水会议后，联合国教科文组织和世界气象组织共同提出了水资源的涵义：“水资源是指可资利用或有可能被利用的水源，这种水源应当有足够的数量和可用的质量，并在某一地点为满足某种用途而得以利用。”这一涵义为联合国经社理事会所采纳。作为重要资源的水必须具有可以更新补充，可供永续开发利用这样一种不同于其他矿物资源的特点。因此，作为参加水的供需关系分析中的水资源，应当主要指不断通过蒸发、降水、径流的形式参与全球水循环平衡活动的、人类可以控制、开发利用的动态水源。现代水利的发展，不仅要通过多目标的工程，解决兴利除害的问题，还要解决人类活动对水的不良影响，实行工程与技术、生物、社会经济措施的进一步结合，以取得更大的经济、社会、生态等多方面的效益。水利已不仅是农业的命脉、国民经济的命脉，而且将是中华民族生存和发展的命脉。为了对自然界的水进行有效的控制和合理的调配，达到兴利除害的目的而修建的各项工程措施统称为水利工程。水利工程建设促进了水工建筑物科学技术的发展。近些年来，在坝型革新、高坝复杂地基的处理、高坝的泄洪消能、水工结构抗震设计的理论和试验模型、结构优化、计算机软件开发、水工结构可靠性分析、运用管理等方面均取得了不少的成就。

为了综合利用水资源，解决水量在地区和时间上分布不均的自然状况，常需修建各种水利工程，以便对自然界的水进行控制和合理调配，达到防治洪水及满足各用水部门要求的目的。水利工程中采用的各种建筑物称为水工建筑物。在水域的适当地点，为了一种或多种目标而集中布置若干个水工建筑物，各自发挥不同作用并协调工作，构成一有机综合体，称为水利枢纽。按作用及其组成分类，常见的水利枢纽有以下三种。

(1) 蓄水枢纽。为满足防洪、灌溉、发电等各种要求，常需在河流上修建拦河坝，以形成水库，抬高水位，调节径流。这种以拦河坝为主体的水利枢纽称蓄水枢纽（或水库枢纽）。蓄水枢纽除拦河坝外，还包括泄水建筑物和取水建筑物。这三种建筑物是任何一个蓄水枢纽均不可缺少的。除上述三种建筑物外，根据开发目标的不同，还可能有专门建筑

物，如水电站、通航船闸等。

(2) 取水枢纽。为了从河流、湖泊等水源取水，以满足灌溉及其他用水部门的需要，而在渠首河段附近修建的建筑物综合体称取水枢纽。主要包括进水闸、壅水坝（或拦河闸）、防沙及冲沙设施等，对综合利用的取水枢纽，还可能有电站、船闸、鱼道、筏道等专门建筑物。

(3) 泵站枢纽。为了将低处水抽送到高处以达到灌溉、排涝、航运、发电等目的而兴建的以泵站为主体的水工建筑物综合体称为泵站枢纽。组成这种枢纽的建筑物类型，因枢纽任务和工作条件不同而各有差别，但多以泵站及水闸为主体。

蓄水枢纽是以挡水建筑物——拦河坝为主体的水利枢纽，其中水库就是一种重要的蓄水枢纽。水库的作用主要包括以下几个方面。

1. 水库的防洪作用

水库是我国防洪广泛采用的工程措施之一。在防洪区上游河道适当位置兴建能调蓄洪水的综合利用水库，利用水库库容拦蓄洪水，削减进入下游河道的洪峰流量，达到减免洪水灾害的目的。水库对洪水的调节作用有两种不同方式，一种是滞洪作用，另一种是蓄洪作用。滞洪就是使洪水在水库中暂时停留。当水库的溢洪道上无闸门控制，水库蓄水位与溢洪道堰顶高程平齐时，则水库只能起到暂时滞留洪水的作用；在溢洪道未设闸门情况下，在水库管理运用阶段，如果能在汛期前用水，将水库水位降到水库限制水位，且水库限制水位低于溢洪道堰顶高程，则限制水位至溢洪道堰顶高程之间的库容，就能起到蓄洪作用。蓄在水库的一部分洪水可在枯水期有计划地用于兴利需要。当溢洪道设有闸门时，水库就能在更大程度上起到蓄洪作用，水库可以通过改变闸门开启度来调节下泄流量的大小。由于有闸门控制，所以这类水库防洪限制水位可以高出溢洪道堰顶，并在泄洪过程中随时调节闸门开启度来控制下泄流量，具有滞洪和蓄洪双重作用。

2. 水库的兴利作用

降落在流域地面上的降水（部分渗至地下），由地面及地下按不同途径流入河槽后的水流，称为河川径流。由于河川径流具有多变性和不重复性，在年与年、季与季以及地区之间来水都不同，且变化很大。大多数用水部门（例如灌溉、发电、供水、航运等）都要求比较固定的用水数量和时间，它们的要求经常不能与天然来水情况完全相适应。人们为了解决径流在时间上和空间上的重新分配问题，充分开发利用水资源，使之适应用水部门的要求，往往在江河上修建一些水库工程。水库的兴利作用就是进行径流调节，蓄洪补枯，使天然来水能在时间上和空间上较好地满足用水部门的要求。

大坝是水库的重要组成部分，水库大坝在调蓄利用水资源、提供清洁电能、抗御洪水灾害等促进经济社会可持续发展方面起到了重要作用。

水库大坝在调蓄利用水资源方面的作用。中国水资源的一个主要特点是时空分布不均匀，70%的降水集中在每年的6~10月。中国水资源总量约28400亿 m^3 ，但是约23000亿 m^3 的水量流入大海或流出国境。中国气候和地理的特点决定了仅仅依靠河流的自然调蓄不能有效解决国家的供水问题。中国是一个13亿人口的大国，粮食安全基本依靠灌溉农业，每年能够灌溉的耕地约5500万 hm^2 ，还有5500多万 hm^2 的耕地得不到灌溉，每

年约有 2000 万 hm^2 农田受旱。中国目前正在加速城市化和工业化进程，全国有 400 多座城市缺水，预计到 2030 年我国人口达到 15 亿高峰时，水资源供需矛盾将进一步加剧。因此，建设大坝，增加河流供水能力，是保障引水安全、粮食安全、满足城乡经济社会发展的重要保证。

水库大坝在能源供给方面的作用。水电是保障能源安全的重要支撑之一。我国石油紧缺，能源以煤炭为主，但是过度地依赖煤炭必将引发二氧化碳过量排放等问题。因此，中国需要大力发展各种可再生能源，包括水能、风能、太阳能和生物质能等。我国的水资源总量居世界首位，理论蕴藏量近 7 亿 kW，技术可开发量近 6 亿 kW，而且目前我国已经开发的不到 1.2 亿 kW，与发达国家相比，开发程度还很低。大力发展水电，可节约煤炭、石油和天然气等资源，并减少二氧化碳、二氧化硫的排放对大气的污染。

水库大坝在抗御洪水灾害方面的作用。中国河流众多，著名的有长江、黄河等 7 大流域。受太平洋季风和大陆性气候的影响，中国历来是一个洪涝灾害频发的国家。20 世纪，全国共发生较大洪水灾害 60 余次，平均不到两年发生 1 次。如 1933 年黄河大洪水，决口 50 多处，死亡约 2 万人；1931 年长江大洪水，干堤决口 300 多处，死亡 14.5 万多人；1954 年长江大洪水，干堤决口 52 处，死亡 3.3 万人。我国的洪水主要是过度集中的降雨造成的，加上河流中下游两岸人口密集、城镇化水平高、工农业发达，一旦洪水形成灾害，损失往往是巨大的。新中国成立以来，大规模的防洪工程建设，包括大坝建设，使洪水造成的人员死亡大幅度减少，但是经济损失随着经济总量的增长而增加。根据统计分析，1900 年以来全国平均每年的洪涝灾害损失在 1100 亿元左右。由于许多河道本身安全泄洪能力有限，减轻洪水灾害，保护人民的生命财产，必须依靠水库、堤防、分滞洪区等组成的防洪体系来抗御洪水，特别是具有较大调蓄能力的防洪水库。例如长江三峡工程，可使富饶的江汉平原的防洪标准从 10 年一遇提高到 100 年一遇，保证长江中下游免遭毁灭性灾害。再如黄河的小浪底水库，也大大提高了下游抗御大洪水的能力，成为保障黄河下游富饶经济区免遭洪水灾害的关键性骨干工程。

1.2 土石坝概述

大坝是水库中的主要建筑物。按照筑坝材料与坝型的不同，可将大坝分为：用当地土、石料修建的土石坝；用浆砌石、混凝土修建的重力坝和拱坝；用浆砌石、混凝土以及钢筋混凝土修建的大坝和轻型支墩坝等。全国已建成的所有大中小型水库中，土石坝是采用最多的坝型，其次是浆砌石或混凝土重力坝和拱坝；其他坝型采用较少。国外土石坝的数量及其在各种坝型中的比例也是最多，并且还在不断增长。土石坝是一种极为古老的坝型，也是历史悠久的一种坝型。地球上现有的挡水坝中，多数为土石坝。目前世界上两座最高的坝均为土石坝，都建在塔吉克斯坦，一座为罗贡斜心墙坝，坝高 325m，另一座为努列克坝，坝高 317m。据统计，至 20 世纪末，我国坝高 15m 以上的大坝有 18000 多座，其中 85% 以上为土石坝。大坝的分类如图 1-1 所示。

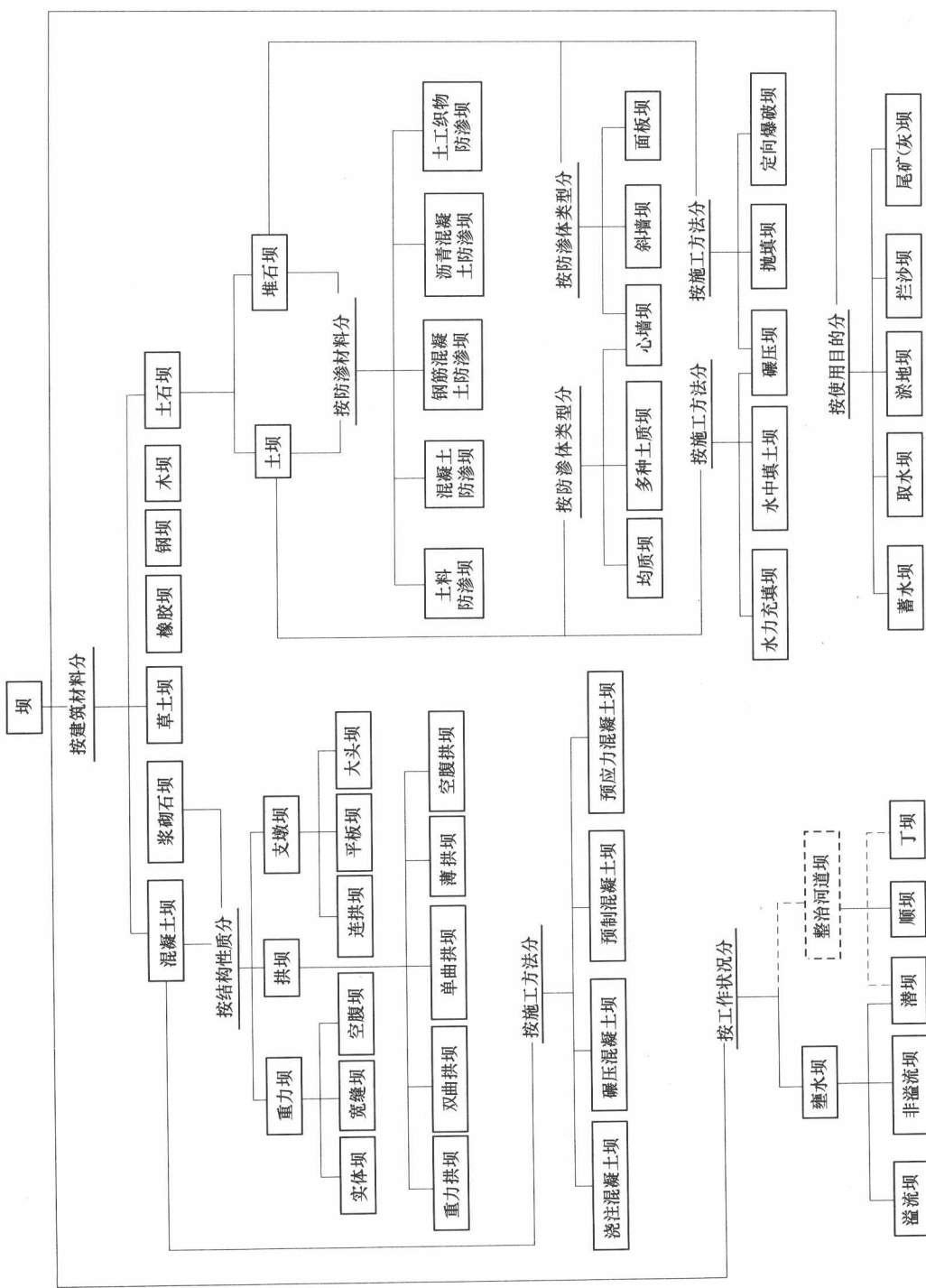


图 1-1 大坝分类结构图

土石坝是利用当地土、石材料造成的一种坝型，也是现代世界各国所普遍采用的一种坝型。这种坝型被广泛采用的原因是：①能最大限度地利用坝址附近可开采的天然土、石材料，与其他坝型相比较，可节省水泥和钢材；②较能适应地基变形，对地形、地质条件的要求在所有坝型中是最低的；③结构简单，施工工序少，施工技术容易掌握，既可用简单机具施工，也可高度机械化施工；④运用管理方便，寿命长，加高、扩建、维修较容易。土石坝的主要缺点是：不允许坝顶溢流，以土坝为挡水建筑物的水库，必须在河岸上另开溢洪道或其他泄水建筑物；在河谷狭窄、洪水流量很大的河道上施工时，导流比较困难；黏性土料的施工受天气的影响较大。下面重点对土石坝的发展概况、土石坝的工作特点及基本要求、土石坝的类型几个方面进行介绍。

1.2.1 土石坝发展概况

根据土石坝的发展进程，可将其大致分为三类，即古代土石坝（19世纪中期以前）、近代土石坝（19世纪中期至20世纪初期）和现代土石坝（20世纪初期以后）。

1. 古代土石坝

早在5000年前古埃及就曾建造土坝，用来灌溉、防洪。我国也记载自公元前600年就开始填筑土堤、防御洪水，并创造了多种不同形式的土石坝，如堰、陂、埝等。

受技术条件的限值，古代土石坝多凭经验建造，在坝体断面形状、筑坝材料以及坝体构造等方面都存在很大的任意性。坝坡一般为1:6~1:7，有的甚至更缓；坝顶也较宽。在筑坝材料和坝体构造方面，往往都是各地根据当地材料来源及筑坝经验而定。另外，土料的开采和运输全靠人力，土料的压实也靠人力或畜力，建坝方法极为原始。

2. 近代土石坝

近代土石坝发展阶段，土石坝的设计理论一直落后于其他坝型。在总结建坝经验和失事教训的基础上，积累了一些应遵守的施工规则和合理的断面尺寸，同时土石坝在高度方面发展速度加快。

从坝体断面形状来看，近代土石坝的上下游坝坡有所变陡，但基本上还是凭借经验而定，仍带有一定任意性。如1850年法国工程师科林曾提出，应该在土料强度试验成果的基础上确定土坝边坡和一种很类似于现在使用的稳定分析方法，但并未引起当时人们的重视和应用。在坝体构造方面，1982年苏格兰的土木工程师特尔福德提出了用夯实黏土作为土石坝的防渗心墙。继黏土心墙之后，又出现了砌石心墙土石坝，到20世纪这种砌石心墙坝被混凝土心墙取代。此后，便逐渐形成了土石坝的三大基本坝型——均质坝、心墙坝和斜墙坝。

3. 现代土石坝

1925年美国学者太沙基的《土力学》专著问世，使得土力学成为一门独立的学科，并逐渐被应用于近代土石坝阶段已经提出的某些土石坝基本理论的深入研究中。之后，随着岩土力学、动力分析、施工技术和计算机的发展，土石坝技术出现了较快的发展。特别是应用土石坝有限元分析方法，对坝体的应力、变形、稳定等问题的分析都逐步深入，并取得了满意的结果。从现代土石坝的发展情况来看，有以下几个主要特点。

(1) 在高坝中所占比例逐渐增大。自20世纪30年代美国建成高度100m以上的盐泉坝之后，高土石坝便不断被设计采用。资料统计表明，地球上100m以上的高坝中，土石

坝所占的比重随年代的增长在逐步增大，50年代以前为31%，60年代为38%，70年代为56%，80年代为65%。出现这一趋势，首先是由于土石坝能充分利用当地材料，降低工程造价；其次，由于坝工技术的发展，使建造高土石坝更加安全可靠；再次，土石坝对地质条件要求相对较低，而具有良好地质条件的高坝址逐渐减少，建造土石坝就显得更加合理。

(2) 对筑坝材料的要求有所放宽。由于设计和施工技术的发展，现在几乎所有的土料(包括砾石料、风化料等)，只要不含大量的有机物和水溶性盐类，都可用于筑坝。在防渗料方面，以往各国多用黏土筑心墙，现在除了用细粒料作为防渗体外，不少工程还采用粗粒料作为防渗体(如砾石土)。在缺乏天然砾石料的地区，还有用人工掺和的砾石料，如20世纪60年代初期我国援建的阿尔巴尼亚菲尔泽心墙堆石坝，心墙用的就是砂砾石与红黏土的掺和料。

(3) 设计、施工技术不断地发展。土石坝发展过程中，人们进行了大量的改革实践，有成功的经验，也有失败的教训。

1) 改革筑坝技术，视图变传统碾压为非碾压式。20世纪30年代，美国和南美一些地区曾一度盛行水力冲填坝，40年代前苏联在平原河道筑坝也盛行这种坝。到50年代后，由于大型运输车辆和碾压设备的出现，使得碾压式土石坝单价降低，加上水力冲填坝筑坝速度慢、施工期易发生滑坡等原因，致使除填筑尾矿坝外，水力冲填技术已不再采用。但是我国西北地区首创并推广到其他地区的水坠坝，却为我国5000多座中小水库的建成和运行发挥了巨大效益。前苏联在40年代已开始采用爆破技术修筑定向爆破堆石坝，但一般坝高不大。我国也积累了丰富的修筑定向爆破堆石坝的经验。但早期坝高较大的抛投式面板堆石坝，因堆石体变形量大，混凝土面板常发生裂缝漏水，所以40年代起，美国停止修建面板堆石坝，而改用土心墙作为防渗体。近代的土石坝筑坝技术自20世纪50年代以后得到较快发展，并促成了一批高坝的建设。到60年代，将重型振动碾应用于堆石和砂卵石的压实，有效地减小了堆石体变形，解决了混凝土面板开裂漏水问题，而且坝体填筑单价明显降低，于是混凝土面板堆石坝又得到迅速发展。随着化学工业的发展，土工薄膜的物理性质、力学性质和抗老化性能得到提高，开始被应用与低坝防渗，目前应用土工膜防渗的土石坝坝高已达百米级。

2) 设法坝顶溢流，试图省略河岸溢洪道。我国前些年就建成了不少的溢流过水土石坝，但大都是低坝。近几年，以大流量、高流速的泄洪洞和溢洪道与之配合的现代土石坝，还有施工期堆石坝坝面过水新技术等的采用，既能有效解决枢纽布置和施工导流的问题，同时还可大量节省泄洪建筑物和导、截流工程的造价，都充分体现了现代土石坝的优越性。目前，土石坝是世界坝工建设中应用最为广泛和发展最快的一种坝型。

1.2.2 土石坝的工作特点及基本要求

土石坝主要是由颗粒松散的土石料填筑而成的挡水建筑物。由于土石料颗粒间联接力较低，水力、自重及其他外力对散粒结构的稳定性影响很大，所以土石坝剖面构造形式的设计要求不同于其他坝型。在渗流、冲刷、沉降、冰冻、地震等因素的作用和影响下，表现出其相应的工作特点，从而决定了土石坝设计时应考虑下述几方面的问题。

1. 稳定

土石坝的断面形状为梯形，断面比较大，在水平水压力的作用下，不会发生沿坝基面的整体滑动。其失稳的主要形式是坝坡滑动或坝坡连同部分地基一起滑动。造成滑塌的原因是土体抗剪强度小，坝坡过陡。坝坡滑动会影响土石坝的正常工作，严重的将导致工程失事。

为了保证土石坝在各种工作条件下能保持稳定，应合理选择土料；根据土料的性质、荷载的条件，合理设计坝坡；施工中认真做好地基处理，严格控制坝的施工质量，使土料填筑压实后达到设计所要求的密实度及抗剪强度。

2. 渗流

土石坝挡水后，水库里的水将通过坝身、坝基及两岸向下游渗透，在坝身和坝基的结合面及坝河其他建筑的结合面更是渗流易于通过而产生集中渗流的地方。

渗流在坝体内的自由水面称为浸润面，浸润面以下的土体为饱和水区。饱和水区的土体受到水的浮力作用而减轻了土的有效重力，并使土的内摩擦角和黏结力减小，同时渗流对土体还作用有动水压力，这些都增加了坝坡滑动的可能性。另外，渗流在土壤中流动时，如果流速和渗透坡降超过一定的界限，会使坝体和坝基以及各结合面附近的土体产生渗透变形，严重时会引起土石坝的失事。渗透流量过大时，会影响到水库的蓄水。

为了消除或减轻渗流的上述不利影响，土石坝必须采用可靠的防渗排水设施，以减少渗漏损失并保证坝体和坝基土的渗透稳定性。对防渗设施与岸坡、坝基及其他建筑物的连接要稳妥可靠。

3. 冲刷

由于土体颗粒间的黏结力很小，因此抗冲击能力低。库内风浪对坝面将产生强烈的冲击淘刷作用，很容易使坝面遭到破坏，甚至产生塌坡事故；下游的尾水有时也会在水位变化范围冲刷坝面；降落在坝上的雨水，也将有一部分沿坝坡下流而冲刷坝面。

因此，上、下游坝坡均需采用有效的防冲保护及坝面排水措施，以免受风浪、雨水甚至动物作穴等有害影响而导致土石坝的破坏。

坝顶不允许过水，也不允许波浪沿坝坡翻越坝顶。为此，土石坝枢纽必须有足够泄洪能力的泄水建筑物，坝顶应在最高水位以上有一定的超高，以保证洪水不至漫溢坝顶。

4. 沉降

由于土粒间存在空隙，且很容易产生相对移动，因此在坝体自重和水压力的作用下，坝体和坝基都会由于压缩而产生沉陷。沉陷过大会造成坝顶高程不足而影响土石坝的正常工作；过大的不均匀沉降会引起坝体开裂，甚至造成漏水的通道而威胁坝的安全。

为了防止由于沉降而引起坝顶低于设计高程，施工中要留有沉降值；为了防止不均匀沉降，要合理设计坝剖面及细部构造，正确选择坝体土料，施工时土料压实要合乎设计标准，质量要均一。

5. 其他

严寒地区，水库水面冬季结冰形成冰盖，冰盖层的膨胀对坝坡产生很大的冰推力，导

致护坡的破坏；位于水位以上的坝体黏性土壤，在冻融作用下，会造成孔穴、裂缝。在夏季，由于含水量的损失，上述土壤也可能干裂。为了防止这些现象的发生，应采取相应的保护措施。

在地震区筑坝，应考虑地震的作用。地震惯性力会增加坝坡坍塌的可能性。当坝体或坝基土层是均匀的中细砂或粉砂时，在强烈振动作用下，还会容易引起液化破坏。

总之，从土石坝的工作特点可以看出，土石坝的破坏是多方面原因造成的。根据国家统计，由于水流漫顶失事的占 30%；由于坝坡坍塌失事的占 25%；由于坝基渗漏失事的占 25%；坝下涵管出问题的占 13%，其他占 7%。因此要求正确地进行设计和施工，运用期间加强管理，以保证土石坝的安全运行并正常工作。

1.2.3 土石坝的类型

按土石坝的坝体最大剖面高度，分高坝、中坝和低坝。坝高在 70m 以上者为高坝；高度在 30~70m 为中坝；低于 30m 者为低坝。根据坝身所用的主要材料，土石坝可分为土坝、堆石坝及土石混合坝三种类型，他们的工作条件、结构形式及施工方法虽无明显区别，但仍然有各自不同的特点。总之，它们的材料比例不同，致使它们的工作条件，施工方法也不完全相同。但是，对它们的结构形式、稳定、渗流控制的要求基本相同。土石坝按照施工方法的不同，可分为碾压式土石坝、水中填土坝、水力冲填坝和定向爆破坝。下面介绍以下几种坝型。

(1) 碾压式土石坝。碾压式土坝的施工时用机械将土料分层压实。一般的土料、砂卵石及风化石渣等均可用于这种坝型，故碾压式土坝是目前采用得最多的一种坝型。

(2) 水中填土坝。水中填土坝的施工是在填土面修筑围埂将填土面分格，在分格内灌水形成水池，在静水中填土，逐层填筑，依靠填土自身重力进行压实和排水固结。固结过程中能适应较大变形，无需机械碾压。只要有充足的水源，有浸水易崩解、有一定透水性、易脱水固结的黄土类土壤、砂质或砾质黏壤土等，均可采用此法施工。

(3) 水力冲填坝。水力冲填坝的施工是用机械抽水到比坝顶高的土场，以水冲击土料形成泥浆，泥浆沿输浆沟渠自流到由围埂围成的坝面后分层填筑，经脱水固结成密实的坝体。细粒料在中部形成防渗体，粗粒料构成坝壳。用这种方法筑坝，不需涂料运输机械及碾压机械，施工方法简单，工效较高，一般成本较低，但要求料场位置合适，并有足够的水和电力。其中水中填土坝和水力冲填坝的共同缺点是：坝的边坡缓，工程量大，固结慢，强度低，若施工速度过快，则易发生滑坡。

(4) 定向爆破坝。定向爆破坝是当坝址两岸地势较高、河谷狭窄及岩石结构较为紧密时，可以利用定向爆破方法建造土石坝。定向爆破筑坝只需在山体内开挖洞室，安放炸药，一次爆破即可形成坝体的大部分甚至绝大部分。这种方法筑坝，节省人力、物力和财力。其缺点是对山体破坏性大，恶化隧洞、溢洪道等建筑物的地质条件，两岸岩体裂隙增大，成为绕坝渗流的通道。

下面重点介绍一下碾压式土石坝的类型。

1.2.4 碾压式土石坝的类型

碾压式土石坝虽然需用较多的碾压机具，但使用的土料范围广，且可以控制含水量使

抗剪强度较高,工程量相对较小,所以仍是当前广泛应用的坝型。根据碾压式土石坝的土料组成和防渗设施的位置不同,可分为以下几种类型。

(1) 均质坝。坝体基本上由一种透水性较弱的黏性土料(如壤土、砂壤土等)填筑而成,坝体既是防渗体又是支撑体。由于黏性土抗减强度较低且施工碾压较困难,故多用于低坝。

(2) 心墙坝。坝体的中央用透水性较弱的土料或其他材料(钢筋混凝土或沥青混凝土或土工膜等人工材料)做成防渗心墙,两侧用透水性较大的土石料做成坝壳。

(3) 斜墙坝。上游侧用透水性较弱的土料或其他材料(钢筋混凝土或沥青混凝土或土工膜等人工材料)做成防渗斜墙,下游侧用透水性较大的土石料做成支撑体。

(4) 多种土质坝。有多种透水性大小不同的土石料筑成,土石料的排列方式有两种:一种是土石料的透水性自上游向下游逐渐增大;另一种是土石料的透水性自中央向两侧逐渐增大。

上述四种坝型除均质坝外,都是将弱透水性材料布置在上游或中央,以达到防渗的目的;将透水性强的材料布置在下游或两侧,以为维持坝坡的稳定。强透水性材料布置在下游侧还起到有利于排水以降低浸润线的作用。尽管土石坝剖面的形式在不断地变化和发展,但这种布置材料的原则不变。

1.3 大坝安全监测概述

大坝安全监测(Safety Monitoring of Dams)是通过仪器观测和巡视检查对大坝坝体、坝基、坝肩、近坝区岸坡和其他与大坝有直接关系的建筑物和设备所作的测量及观察以及通过对测量和观测结果的分析来评价大坝的安全性态等工作环节的总称。此处的“大坝”一般泛指与大坝有关的各种水工建筑物和设备;“监测”既包括对大坝固定测点一定频次的仪器观测,也包括对大坝外表及内部大范围对象的定期或不定期的巡视检查(直观检查和仪器探查)。大坝安全监测系统至少应具备以下两个基本功能(牛运光,1998):能够掌握建筑物整体(全面)性状变化的全过程;应能对建筑物迅速、及时地作出安全评价,并及时实行安全监控。

1.3.1 安全监测的目的和意义

(1) 为水库运行的安全服务。由国内外的相关事例可以知道,即便是优良的大坝,其工程性态也会随着时间的推移而发生变化。如果水库大坝因设计及施工缺陷、运行管理不当等造成带病运行,那便可能酿成较大的恶性事故,有时失事之前甚至难以察觉。大坝安全监测能够起到监视及预警工程运行性态、保障水库大坝安全运行的作用,故安全监测的首要目的便是保障水库大坝的安全、高效运行,这也是对一定规模的工程普遍要求设置相应监测设施的原因所在。

(2) 推动工程设计与施工技术的进步,为坝工技术发展指明方向。任何科学技术的进步都离不开试验研究,但由于大坝工程的特殊性和复杂性,室内试验远不能满足工程技术的研究需要,所以大坝工程的设计、施工以及坝工技术的不断改进在很大程度上仍需依赖于长期有效的安全监测工作。