

碾压式土石坝设计手册

上册

能源部 水利部 水利水电规划设计总院

一九八九年 北京

碾压式土石坝设计手册

上 册

能源部
水利部 水利水电规划设计总院

北 京

一 九 八 九 年

前 言

《碾压式土石坝设计手册》多年以来几经修改、补充，于中华人民共和国成立四十周年之际，把它奉献给水利水电战线上的广大读者。

由于建筑土石坝，可就地取材；节省大量水泥、钢材和木材；便于群众修建；用料广泛且对坝址地质条件要求较低；造价比较便宜。因此，我国各地兴建了大量的土石坝工程。据统计，我国现有大型水库340多座、中型水库2400多座，其中，90%左右为土石坝；小型水库80000多座，其中绝大多数为土石坝。我国已为世界上拥有土石坝最多的国家。

《碾压式土石坝设计手册》系在总结我国土石坝建设经验的基础上，并收集了国内外土石坝工程大量资料编写成的。书中，结合有代表性的工程实例，对筑坝材料、坝址坝型选择、设计条件和方法做了介绍；对坝基处理和抗震设计也提供了一些具体的工程措施；为了适用起见，还列举了一些计算实例。

众所周知，由于土石坝的天然筑坝材料各地差异很大、具有多变性，设计理论也不尽完善，所以土石坝工程的设计既不能套用定型设计，也不宜以类似的工程用简单的类比方法进行设计，而必须结合科学试验，用现代技术加以分析计算。本书不可能代替设计人员对某一工程设计作判断，而可供设计人员作判断时参考。

《碾压式土石坝设计手册》系水利水电规划设计总院委托原水利电力部昆明勘测设计院主编的。参加编写的单位还有：西北勘测设计院、黄河水利委员会勘测设计院、广西水利水电厅；陕西、辽宁、黑龙江等省水利水电勘测设计院；南京水利科学研究所、浙江省水利科研所、浙江大学、成都科技大学和广西大学等。

《碾压式土石坝设计手册》编写过程中，曾得到原水利部副部长、总工程师冯寅同志的指导以及许多专家的帮助，在此一并致以谢意。水利水电规划设计总院曾对本书稿组织了审查工作，参加总体审查的有毛昶熙、杨荫华、卞富宗、张槐、朱建业、王寿昌等同志。

《碾压式土石坝设计手册》中可能存在有论述不够全面、不妥或错误之处，恳切希望广大读者提出并给予指正。

水利水电规划设计总院

1989年10月

编写者

- 第一篇** 方大风
- 第二篇**
- 第一章 屈定伸 冯维遂
- 第二章 屈定伸 冯维遂
- 第三章 屈定伸 冯维遂
- 第四章 冯维遂 屈定伸
- 第三篇** 黄家森
- 第四篇**
- 第一~七章 方大风
- 第八章 柯尊敬 黄崇东 庞永胜 杨朝海
- 第九章 王观平
- 第十章 王铁儒 洪重光
- 第五篇**
- 第一~六章 黄家森
- 第七、八章 吴锡瑾 何娟
- 第九、十章 黄家森
- 第六篇**
- 第一章 徐 诚
- 第二章 王铁儒
- 第三章 徐 诚 单跃和
- 第四章 洪重光

内 容 提 要

本书是在总结我国土石坝建设经验基础上并收集了国内外土石坝工程大量资料编写成的，是一本具有实用价值的土石坝设计手册。

全书分上、下两册。本书为上册，主要内容包括：工程地质勘察；坝址、坝轴线及坝型选择；碾压式土石坝设计基本资料；坝体结构设计；坝基处理等。

本书主要供水利水电工程技术人员参考，也可供高等院校水利水电专业的师生参考。

目 录

前 言

第一篇 概 述

第二篇 工程地质勘察

第一章 工程地质勘察阶段的划分与勘察内容	13
第一节 工程地质勘察阶段的划分	13
第二节 工程地质勘察的内容	13
第三节 对各勘察阶段应提出的要求	17
第二章 坝址的工程地质勘察	23
第一节 土基坝址的工程地质勘察	24
第二节 岩基坝址的工程地质勘察	25
第三节 主要工程地质问题的勘察研究	30
第三章 天然建筑材料的勘察	29
第一节 勘察内容、精度要求与取样试验	92
第二节 产地的选择及风化土料、石渣料的应用	95
第三节 参考资料与参考数据	96
第四章 土石材料的试验	98

第三篇 坝址、坝轴线及坝型选择

第一章 坝址选择	109
第一节 高山深谷地带的坝址选择	110
第二节 丘陵地带的坝址选择	114
第三节 平原河道的坝址选择	117
第二章 坝轴线选择	120
第一节 地形地质条件	120
第二节 施工、交通、经济技术、枢纽布置、坝型和运行等条件	121
第三节 向上游弯曲的坝轴线形式	122
第四节 特殊型式的坝轴线	123
第三章 坝型选择	128
第一节 土石坝坝型分类	128
第二节 坝型选择	131

第四篇 碾压式土石坝设计基本资料

第一章 风及地震资料	137
------------------	-----

第一节	风	137
第二节	地震	140
第二章	筑坝土石料基本性质	146
第一节	土壤分类及野外鉴定	146
第二节	土的物理性质及常用指标的换算	155
第三节	土的水力性质	157
第四节	土的力学性质	160
第五节	土的矿化性质及对工程的影响	164
第六节	石料的物理力学性质	170
第三章	筑坝土、石料物理力学性质的参考数据	172
第一节	土的天然性质及土料物理力学性质的参考数据	172
第二节	石料物理力学性质的参考数据	177
第三节	工程实例及几种代表性土料数据	184
第四章	筑坝土石料原始资料的整理分析	212
第一节	试验要求及项目	212
第二节	试验资料的整理方法	214
第五章	筑坝土石料的选择	220
第一节	防渗土料的选择	220
第二节	筑坝石料的选择	223
第三节	反滤料、过渡料及排水材料的选择	230
第六章	砾石土	231
第一节	砾石土的压实性	232
第二节	砾石土的渗透性	234
第三节	砾石土的力学性质	235
第四节	软弱岩石风化石料经过破碎而成的砾石土	237
第七章	红土	239
第一节	红土的一般特性	239
第二节	红土的特殊性质——红土具有干燥脱水不可逆性	240
第八章	胀缩土	243
第一节	胀缩土的特征	243
第二节	胀缩土的判别和评价方法	243
第三节	胀缩土的物理性质	246
第四节	胀缩土的胀缩特性	249
第五节	胀缩土的力学性及渗透性	251
第六节	胀缩土的矿物及化学成分	255
第七节	胀缩土筑坝实例	256
第九章	分散性粘土	261
第一节	分散性粘土的成因、性质及危害	261
第二节	鉴定分散性粘土的试验	265
第三节	分散性粘土筑坝的可能性及处理措施	268

第四节 分散性粘土的分散机理简介	271
第十章 地基土	273
第一节 软土	273
第二节 黄土	277

第五篇 坝体结构设计

第一章 坝体防渗结构的基本要求和型式	289
第一节 坝体防渗结构的基本要求	289
第二节 常用的坝体防渗结构型式	289
第二章 均质坝	290
第一节 概况	290
第二节 均质坝的形状与构造	290
第三节 均质坝坝体尺寸的拟定	292
第四节 均质坝与坝基、岸坡及其它建筑物的连接	299
第三章 土质心墙坝	306
第一节 概况	306
第二节 粘土心墙土石坝的形状与构造	306
第三节 粘土心墙和斜心墙应考虑的条件	309
第四节 心墙宽度尺寸的决定	309
第五节 心墙土石坝坝体断面初步拟定	313
第六节 心墙与基础、岸坡和混凝土建筑物的连接	338
第四章 土质斜墙坝	343
第一节 概况	343
第二节 土质斜墙土石坝的形状与构造	343
第三节 土质斜墙选择应考虑的条件	343
第四节 斜墙厚度尺寸的确定	344
第五节 斜墙土石坝坝体断面的初步拟定	349
第六节 斜墙与基础、岸坡和混凝土建筑物的连接	349
第五章 人工材料心墙坝	356
第一节 混凝土心墙坝	356
第二节 沥青混凝土心墙坝	364
第三节 其它防渗材料的心墙坝	375
第六章 人工材料面板坝	377
第一节 混凝土面板坝	377
第二节 沥青混凝土面板坝	399
第三节 塑料薄膜防渗面板坝	425
第四节 木面板坝	427
第七章 风浪计算及坝顶构造	431
第一节 风浪计算	431
第二节 坝顶构造	463

第三节	防浪墙	466
第八章	护坡设计及坝面排水	472
第一节	护坡型式与防护范围	472
第二节	护坡计算	484
第三节	护坡构造	495
第四节	坝面排水	497
第九章	过水土石坝	499
第一节	概况	499
第二节	块石护坡堆石过水围堰的设计	499
第三节	过水堆石坝采用钢筋加固的设计	504
第四节	过水堆石坝采用钢筋笼护面加固的设计	509
第五节	过水土石坝采用人工材料护面的设计	512
第十章	坝体运用中的问题	516
第一节	坝体裂缝	516
第二节	两岸坡之间的拱效应	524
第三节	心墙与坝壳的相互作用	525
第四节	应用不均匀沉降斜率法预测心墙裂缝	528

第六篇 坝 基 处 理

第一章	砂砾石地基处理	531
第一节	各种垂直防渗措施	532
第二节	上游防渗铺盖	611
第三节	下游排渗设备及透水盖重	617
第二章	软弱粘土地基处理	625
第一节	软弱粘性土的工程特性	625
第二节	软弱粘土地基处理方法	628
第三节	压重法	631
第四节	垫层法	636
第五节	砂井预压法	640
第六节	降水预压法	671
第七节	真空预压法	673
第八节	电渗排水	675
第九节	振冲法和挤密法	679
第十节	水泥搅拌法	695
第十一节	高压旋喷法	700
第十二节	强夯法	706
第十三节	加筋土及土工织物	710
第十四节	填土加荷速率的控制	727
第三章	岩石地基处理	733
第一节	结合面的处理	737

第二节	岩石基础的灌浆处理	739
第三节	岩基断层处理	766
第四节	岩溶处理	776
第五节	岸坡岩层处理	789
第四章	黄土坝基的处理	797
第一节	黄土地基的处理	797
第二节	黄土地基沉降计算	800

第一篇 概 述

我国水利资源丰富，河流遍布全国，古代劳动人民为了防洪、抗旱、发展农业生产，早在公元前两千多年以前，就开始兴修水利，修堤筑坝，让江河为人民造福，并从自身的生产实践中积累了丰富的知识和经验。解放以后，党和政府对水利水电事业给予了极大的关怀和重视，使之得以迅速的发展。据1980年统计，我国已建成的大、中、小型坝约有86000座，其中大中型坝约有2500座，而土石坝就有2289座，占91%。但是100m以上的高坝仅有2座，即陕西省石头河水库的土石坝，坝高105m；四川省白龙江碧口水电站的土石坝，坝高101m。此外，目前正在设计和施工的尚有黄河小浪底水库工程的土石坝，坝高163m；云南、贵州界河——黄泥河鲁布革水电站，坝高101m；拟建的龙门、天生桥高坝、及潘口等工程，坝高120~200m以上。

在世界坝工建设中，土石坝是发展最快的一种坝型。无论在坝高及其在建坝中所占比例方面，均超过混凝土坝。就百米以上的高坝而言，在1968年以前，全世界土石坝所占的比例仅有31%~38%，但在1969~1974年期间，就上升到56%，至1975年以后，就增加到75%。美国已建大坝中土石坝占87%，其中百米以上者有56座，正拟建一座476m高的土石坝。日本在60年代以后，修建了大量的土石坝，百米以上者有33座，1978年竣工的高濑坝，坝高为178m。苏联目前已建百米以上高土石坝有12座，在今后15~20年内拟建70余座土石坝，已建成的努列克坝，坝高317m，正在施工修建的罗贡坝，坝高325m，分别为当前已建和在建的土石坝最高者。土耳其已建10座高土石坝，其中有9座高于150m。墨西哥已建8座高土石坝，如奇科森坝，坝高263m，已建的土石坝的比重，法国为20%，巴西为75%，瑞典为98%。目前全世界正在施工的百米以上高土石坝约100座。加拿大和英国拟建的高坝，其高度可分别达369.4m和464m。世界各国所建主要高土石坝见表1-1-1。

高土石坝在国外之所以能迅速兴建，其主要原因是：

(1) 土石坝具有断面大、坝底宽的特点，其自重压力及水压力传递到坝基上，其应力较之混凝土坝小的多，因此对基础要求就低的多，一般来说，只要能进行防渗处理的地基，均可满足修建土石坝的要求。而目前适宜建造混凝土坝的良好坝址大部分已被开发，而越来越少，所以土石坝坝型更宜被选用。

(2) 近年来对筑坝材料的研究，有了很大的进展，由过去粘性土、细粘土筑坝发展到砾石土、粗粒土及至风化料均可用于作防渗料，由过去要求新鲜、坚硬岩石作坝壳料，发展到用软岩、风化岩及开挖料作坝壳料，使得就近采料，合理修建安全可靠的土石坝有了可能。

(3) 大型施工机械的产生，使规模巨大的土石方工程，从开挖、运输到填筑的施工都能作到机械化。如10~11.5m³的单斗挖掘机；每小时产量2500m³的斗轮式挖掘机；385~700Hp的堆土机；100~110t的自卸卡车；57.5m³的铲运机；1.37m宽、19.7km长的皮带机；50~100t的汽胎碾及16t的振动平碾及振动凸块碾等。这些大型设备的研制成功

表 1-1-1

世界各国主要土石坝一览表

坝 名	国 家	坝高(m)	完工年代	坝 型
盐 泉 (Salt Spring)	美 国	100	1931	混凝土防渗面板堆石坝
圣加别勒1级(San Gabriel No.1)	美 国	111	1939	斜心墙堆石坝
泥山(Mud Mountain)	美 国	130	1948	心墙堆石坝
安德森伦奇	美 国	139	1950	厚防渗体土坝
肯 尼(Kery)	加 拿 大	104	1952	斜心墙堆石坝
卡加开(Kajakai)	阿 富 汗	100	1952	心墙堆石坝
安布克劳(Ambuklao)	菲 律 宾	129	1955	心墙堆石坝
帕拉台拉(Paradela)	葡 萄 牙	110	1958	混凝土防渗面板堆石坝
宾加(Binga)	菲 律 宾	107	1958	斜心墙堆石坝
勃朗利(Brownlee)	美 国	120	1959	斜心墙堆石坝
郭兴能(Goscheneralp)	瑞 士	155	1960	心墙堆石坝
御 母 衣	日 本	131	1960	斜心墙堆石坝
特兰斯赖特(Transyltet)	瑞 典	125	1961	斜心墙堆石坝
牧 尾	日 本	105	1961	心墙堆石坝
德本地汗(Derbendgkhan)	伊 拉 克	128	1961	心墙堆石坝
福尔纳斯(Furnas)	巴 西	127	1962	斜心墙堆石坝
垂尼佛(Trinity)	美 国	164	1962	土 坝
英菲尔尼罗(El infiernillo)	墨 西 哥	148	1963	心墙堆石坝
内瓦乔	美 国	123	1963	土 坝
库加尔(Cougar)	美 国	136	1964	斜心墙堆石坝
圆 岗(Round Butte)	美 国	134	1964	斜心墙堆石坝
玛尔帕索	墨 西 哥	138	1964	堆 石 坝
查 帕 茨	奥 地 利	153	1965	心墙堆石坝
阿科索德(Akosombo)	加 纳	141	1965	心墙堆石坝
卡力玛一級(Calima No.1)	哥 伦 比 亚	115	1965	心墙堆石坝
鱼 梁 滩	日 本	115	1965	心墙堆石坝
克瑞玛斯塔(Kremasta)	希 腊	165	1966	心墙堆石坝
波太基山(Portage Mt)	加 拿 大	183	1967	厚防渗体堆石坝
萨特伐雷(Seitevare)	瑞 典	105	1968	心墙堆石坝
蒙谢尼(Mont—Cenis)	法 国	120	1968	斜心墙堆石坝
渥洛维尔(Oroville)	美 国	235	1968	斜心墙堆石坝
九 头 龟	日 本	118	1968	斜心墙堆石坝
水 窟	日 本	105	1969	心墙堆石坝
阿斯旺高坝(High Aawan)	埃 及	111	1971	心墙堆石坝
台尔宾果(Talbingo)	澳 大 利 亚	162	1971	堆 石 坝
新顿彼德勒(New Den Pedro)	美 国	178	1971	心墙土坝
大 霍 恩	加 拿 大	150	1972	土 坝
买 卡(Mica)	加 拿 大	242	1972	斜心墙土坝
下 小 岛	日 本	119	1973	心墙堆石坝
卡台尔(Carters)	美 国	140	1974	心墙堆石坝
凯 朋(Keban)	土 耳 其	207	1974	心墙堆石坝
安哥斯托拉(La Angostora)	墨 西 哥	146	1974	心墙堆石坝
新 冠	日 本	103	1974	心墙堆石坝
契 伏 尔(Chivor)	哥 伦 比 亚	237	1975	斜心墙堆石坝
马 尼 克(Manico)	加 拿 大	108	1975	心墙堆石坝
塔 贝 拉(Tarbeta)	巴 基 斯 坦	143	1976	斜心墙堆石坝
科 培 顿(Copeton)	澳 大 利 亚	113	1976	厚防渗体堆石坝

续表

坝 名	国 家	坝高(m)	完工年代	坝 型
岩 屋	日 本	128	1976	斜心墙堆石坝
菲 尔 译 (Fier Ze)	阿 尔 巴 尼 亚	167	1976	心墙堆石坝
斯梯雷特15号坝	美 国	132	1976	土 坝
查尔瓦克(Чорвакскы)	苏 联	168	1977	堆 石 坝
达特茅斯(Dartmouth)	澳 大 利 亚	180	1978	心墙堆石坝
欧申涅克(Oscheniksee)	奥 地 利	116	1978	防渗面板堆石坝
高 濑	日 本	176	1978	心墙堆石坝
濑 户	日 本	111	1978	心墙堆石坝
七 仓	日 本	125	1978	心墙堆石坝
拉格兰德2	加 拿 大	168	1978	斜心墙堆石坝
科 利 玛	苏 联	126	1978	堆 石 坝
那达尔沙	伊 朗	175	1978	土 坝
阿里古拉	阿 根 廷	130	1978	土 坝
哈桑马克鲁(Hasan vgrlu)	土 耳 其	175	1979	斜心墙堆石坝
万 昭 宁(Srinagvind)	泰 国	140	1979	心墙堆石坝
手 取 川	日 本	153	1979	心墙堆石坝
莫尔诺斯(Mornos)	希 腊	126	1979	土 坝
新麦罗尼斯	美 国	191	1979	土 石 坝
凡斯特塔尔	奥 地 利	150	1980	堆 石 坝
佛士度阿利亚(Foz Do Arica)	巴 西	160	1980	混凝土面板堆石坝
努 列 克	苏 联	317	1980	心墙堆石坝
拉格兰德4	加 拿 大	125	1981	堆 石 坝
安波拉松	巴 西	158	1982	心墙堆石坝
麦 嘎 特	菲 律 宾	114	1982	心墙堆石坝
莫 祖 尔	伊 拉 克	131	1983	土 坝
高 滋 阔 伊	土 耳 其	180	1983	土 石 坝
大 内	日 本	102	1984	堆 石 坝
亚 坎 布	委 内 瑞 拉	158	1984	土 石 坝
德 山	日 本	161	1984	堆 石 坝
巴恩康梯上坝	美 国	143	1985	土 石 坝
大 买 桑	法 国	160	1985	土 坝
克 伊 绍	印 度	253	1985	土 石 坝
隆尔瓦吉那	哥 伦 比 亚	160	1985	土 石 坝
汤 姆 森	澳 大 利 亚	164	1985	堆 石 坝
泰 恩	印 度	160	1986	堆 石 坝
奈 良 俱	日 本	158	1986	堆 石 坝
罗斯莱内斯	智 利	179	1986	土 坝
坎 伊 尔	马 来 西 亚	150	1986	堆 石 坝
伊塔帕雷卡	巴 西	105	1986	土 石 坝
阿尔丁卡亚	土 耳 其	195	1986	堆 石 坝
瓜 维 约	哥 伦 比 亚	243	1987	堆 石 坝
玛 卡 林	约 旦	164	1987	堆 石 坝
嘎立托西埃古	秘 鲁	112	1988	土 石 坝
圣佛利克斯	巴 西	160	1989	土 石 坝
阿塔图尔克	土 耳 其	184	1990	土 石 坝
博 鲁 卡	哥 斯 达 黎 加	267	1990	堆 石 坝
台 贺	印 度	261	1990	土 石 坝

续表

坝 名	国 家	坝高(m)	完工年代	坝 型
科 尔 蒂	智 利	116	1990	土 坝
乌 尔 拉	哥 伦 比 亚	170	1991	堆 石 坝
塞 奇 雷 多	巴 西	145	1961	堆 石 坝
加 那 累 斯(Canales)	西 班 牙	156		心 墙 堆 石 坝
古 拉 阿 培 托(Gvra Apeto)	罗 马 尼 亚	168		心 墙 堆 石 坝
阿 连 诺 斯(Arenos)	西 班 牙	106		斜 心 墙 堆 石 坝
奇 柯 森(Chicoasen)	墨 西 哥	263		心 墙 堆 石 坝
罗 贡(Rogun)	苏 联	326		斜 心 墙 堆 石 坝
寒 河 江	日 本	115	1982	心 墙 堆 石 坝
玉 原	日 本	116	1982	心 墙 堆 石 坝

都有助于扩大筑坝材料的利用范围和提高施工的经济性。

(4) 由于上述大型施工机械的使用,大大提高了土石坝的施工速度。月上坝方量可达 $(200\sim 300)\times 10^4\text{m}^3$,如加拿大波太基山坝月上坝方量达 $290\times 10^4\text{m}^3$;美国圣路易斯坝达 $203\times 10^4\text{m}^3$;巴基斯坦的塔贝拉坝则高达 $450\times 10^4\text{m}^3$ 。波太基山坝日上坝方量达 $12.7\times 10^4\text{m}^3$;塔贝拉坝日上坝方量达 $22.5\times 10^4\text{m}^3$ 。

(5) 土石坝造价一般比混凝土坝低的多,土石坝每立方米的造价与混凝土每立方米造价之比,大约为 $1:10\sim 1:15$ 。如美国混凝土坝、堆石坝、土坝三者单价之比为 $27:1.9:1$,而三者体积比为 $1:3:4.5$,则混凝土坝坝身的造价比土石坝约高5倍左右。但土石坝尚需修建相应的泄水建筑物,如果工程泄洪量不大,而河谷较宽,坝体方量大,则土石坝一般是便宜的。

(6) 土石坝有较好的抗震性能,在强地震区建坝,则以土石坝较为安全可靠。如墨西哥奇科森坝,苏联的努列克坝及罗贡坝皆修建在强地震活地震区。

(7) 在20世纪初期,缺乏雨量、流量及洪水的观测资料,因此不可能在可靠的基本资料基础上进行泄洪建筑物的设计,近年来,水文学及水文统计学的发展,观测资料的密度及精度的提高,加之洪水调查等方法使用等,使有可能设计安全的泄洪建筑物。从而提高了土石坝的安全度。

(8) 当前伴随高土石坝的出现,常须修建大型的开敞式溢洪道及导流泄洪隧洞,而高边坡开挖、衬护措施,大型隧洞的开挖及支护技术的产生,使修建这些建筑物的经济性 & 施工速度有了明显的提高,从而使土石坝更增加了优越性。

我国土石坝在坝工建设中高坝所占的比重尚很小,主要是因为待开发的资源很多,不乏建高混凝土坝的坝址,而且水泥单价偏低,加之过去缺乏大型施工设备、对防渗土料的使用还局限于细料上等原因。但随着国家对水泥价格的调整,大型设备的引进及自产,对防渗土料选择的范围扩大,都将会使我国土石坝的发展进入到一个新阶段。

土石坝是由散粒材料组成的塑性体,在水库蓄水以后,如果坝体变形或不均匀沉降很大,则会产生裂缝,以致漏水,则会导致坝体失事;或遇洪水漫顶,或遇强地震也会使坝体遭到破坏。因此设计时对于水文资料的分析,土料指标的选择及坝体细部设计均需十分

注意。

据统计1900~1965年所发生的205件事故，其中由于滑动、不均匀沉降、漏水和管涌等原因引起的占80%，由于泄洪设备不足而导致漫顶破坏的占15%。另外一种统计为由于坝体破坏导致失事者占49%，而由地基原因引起失事者占33%，但近年来由地基导致失事的比例已逐渐增多。

据已发生事故实例，分析其原因和发生过程，可综合归纳如下所示：

暴雨、洪水	漫顶
泄洪设备被破坏	
泄流能力不足	
坝体沉降，而未预留超高	漏水→管涌
水库坍岸、地震、风而引起波浪	
坝基或坝体防渗性能差	
坝基或坝体发生裂缝	滑动
坝基或坝体与混凝土接触面处理不当	
基础处理不当	
坝基中水溶性物质的溶解	
水力劈裂	
坝基或坝体强度不足	
坝基或坝体内孔隙水压力增加	
地震	
水位骤降时	

在我国已建成大量水库，并发挥了重要的作用，但也时有垮坝事故发生，平均垮坝率为3.4%。其中运行期垮坝占25%，施工期或停建工程垮坝占2.5%。

从坝的高度分析，大多数溃决的坝，坝高在15~20m。35m以上的溃坝极少，其溃坝率仅为0.4%。

从破坏的部位分析，溃于坝身占85.6%，溃于坝基者占1.3%。

分析其垮坝原因，主要有以下几个方面：

(1) 漫坝：包括防洪标准低和超标准洪水漫顶。占垮坝总数的51.5%。

(2) 质量问题：包括坝体、基础、溢洪道和泄水道等质量原因。占垮坝总数的38.5%。

(3) 管理不当：包括水库超蓄，维护运用不良，无人管理和溢洪道筑坎等原因。占垮坝总数的4.2%。

(4) 其它原因：包括库区或溢洪道边坡坍方堵塞，人为扒口泄洪和设计布置不当等原因。占垮坝总数的4.6%。

(5) 原因不详：占垮坝总数的1.2%。

按坝发生事故而未溃决的统计，坝的事故原因如下：

(1) 由于裂缝者占25.3%。

(2) 由于异常渗流者占26.4%。

(3) 由于管涌、滑坡和塌陷者占16.2%。

(4) 其它原因占32.1%。

尽管如此，土石坝仍不失为安全的坝型，这是因为：近年来水文资料精度的不断提高，水力学的发展，坝体预留有足够的超高等原因，由于洪水漫顶而垮坝的事故已日渐稀少；坝体产生裂缝、漏水、管涌等问题，亦可在坝料选择、铺设反滤层及控制施工质量等方面加以解决。

当今土石坝的发展趋势，主要在于建坝材料的使用及坝型选择两个方面。

在筑坝材料中，防渗土料的选择已由50年代以前选用粘性大、细粒土为主，发展到粗粒土、砾石土及风化料。前者有极好的防渗性能，但是压缩性较大，对含水量敏感，压实性能较差。反之，粗粒土具有较高的强度，较低的压缩性，防渗性能可以满足要求，容易施工。60年代国外就在许多高坝中采用了风化料作防渗体，在我国，高101m的鲁布革土石坝是第一个采用风化料作防渗体的高坝，和用粘土料作防渗体相比，可节约工程投资300万元。由此可见风化料的推广使用，将为土石坝的发展开辟了广阔的途径。

对于坝壳石料，由于振动平碾的出现和应用，使坝壳的修筑由抛填堆石改为碾压堆石，因此对石料的强度、粒径的要求，已大为放松，如今，软弱岩石（如泥砂岩、泥岩、砂岩、板岩和片岩等）、砾石和石渣料都可作为填筑坝壳的材料，这是因为用振动碾进行薄层碾压，使软岩或砾石之间能互相嵌紧，达到较高的密度，从而获得一定的强度和较低的压缩性。我国碧口大坝的坝壳就是由砂卵石、千枚岩石渣，凝灰岩石渣和堆石组成，正在设计的天生桥一级电站大坝的堆石体就采用了一部分砂泥岩料。

总之近代选择筑坝材料的基本点，已不再是能否找到合适的材料筑坝，而是如何利用坝址附近的材料，合理修建安全可靠的土石坝。

在坝型选择方面，国际上近年来已呈现出向混凝土面板堆石坝发展的趋势，近15年来碾压堆石坝大约修建了60座，目前已建成的或正在设计、施工中的大于100m的约20余座（见表1-1-2）。现代混凝土面板堆石坝之所以发展迅速，是由于碾压堆石的出现，设计上的改进是以面板底座代替截水槽、薄面板、低钢筋率、不设水平缝的大面积面板之下设有半透水性质的垫层区等。实践证明，这种坝型是安全可靠的，亦能安全承受剧烈的地震荷载。高160m的佛土度阿利亚坝（Foe Do Areia）就是近代碾压堆石混凝土面板坝高坝的范例。表1-1-2示出高度大于50m的部分面板坝及其设计资料。我国目前也正在积极研究和修建这种坝型，如正在施工的西北口水库，坝高95m，关门山水库，坝高58.5m，正在设计的潘口电站，大坝高123m，天生桥一级水电站，坝高180m。

今后高面板坝的展望：可在坝体高100m左右的部位以下，面板上游，铺设厚粘土层，其防渗体可视为由斜心墙及面板组成，并在混凝土面板下设置加工的反滤料，使其具有粘土斜心墙和面板坝的结构特点，其梯度可按10左右设计，基础处理要求与心墙堆石坝相同；对于堆石体在靠近面板的堆石体，大约是坝轴线上游部分，要求具有较高的变形模量，而在坝轴线下游部分，厚层填筑区，不需要具有高变形模量；在坝底部要求具有高透水性。

一般来说，在有下述条件时，希望修建更高的面板坝，如：要求坝体有强抗震性；降

表 1-1-2

高度大于50m的部分面板坝及其设计资料

坝名	坝高 (m)	国家或地点	建成 年份	坝 坡		堆石材料	混凝土 面积 (m ²)	面板厚度 计算公式	每向配筋率 (%)	面板底宽度 (或型式) (m)	I区水平宽度 (m)
				上游	下游						
New Exchequer	150	California	1966	1.4	1.4	DR-变质安山岩(主要 堆石区)CR-支承坝体区		$0.30+0.0067H$	0.5		
Cabin Creek	76	Colorado	1967	1.3	1.3	CR			0.5		
Pades	70	France	1967	1.3	1.3	CK-花岗岩	16,500	$0.35+0.0042H$	0.5	4.0	
Rama	110	Yugoslavia	1967	1.3	1.3	DR					
Kangaroo creek	59	Australia	1968	1.3	1.4	CR-片岩	8,000	$0.30+0.005H$	0.5	3.7	3.8
Portuna	65	Panama	1982	1.3	1.4	CR-安山岩	22,000	$0.411+0.003H$	0.5	4.0	$5+0.02H$
Portuna, Raisad	105	Panama	1983	1.3	1.4	CR-安山岩		$0.411+0.003H$	0.5	4.0	$5+0.02H$
Glennies Creek	67	Australia	1983	1.3	1.3	CR-凝灰岩	24,500	0.30	0.43	3~4	4.0
Salvajina	145	Colombia	1983	1.5	1.5	CR-开挖石堆	50,000	$0.30+0.003H$	0.40	4.0~8.0	5.0
Bastayan	75	Australia	1983	1.3	1.5	CR-流纹岩	18,600	0.25	0.50*	3~3.8	3+3
Boondooma stage I	63	Australia	1983	1.3	1.3	CR-流纹岩	25,000	0.50(等厚)	0.40	3.5~5.5	3.5
Boondooma stage I	73	Australia	P								
Khao laem	105	Thailand	1984	1.4	1.4	CR-灰岩	140,000	$0.3+0.003H$	0.50	4.5(隧道)	3.5