



高寒地区的水工建筑物

南水北调西线工程参考资料之二

黄委会南水北调项目
黄委会档案情报中心

一九九三年三月

绪 言

南水北调西线工程位于青藏高原多年冻土区东部边缘地带，属中纬度、高海拔、高山型寒冷地区，极端最低气温达 $-34.5^{\circ}\sim-37.5^{\circ}\text{C}$ 。以海拔高程4200m为界，其上为多年冻土区，其下为季节性冻土区。调水工程位于巴颜喀拉山分水岭两侧。通天河调水工程歇马方案在高程4200m左右，存在多年冻土问题；雅砻江、大渡河调水工程属季节性冻土。整个调水工程规模宏大、涉及面广，是复杂的系统工程，有许多重大的技术问题需要研究解决。

调水工程包括一系列的水工建筑物—各种坝工建筑物、泄水建筑物、电站厂房、地下工程、渠系建筑物、过坝建筑物、水工金属结构和机电设备等。这份资料将围绕上述水工建筑物进行阐述（隧洞工程见南水北调西线工程参考资料之三）。高寒地区水工建筑物的设计、施工与位于一般地区及气温条件下的水工建筑物基本相同，故在每一种水工建筑物的论述中，均包括了普通条件下建筑物的发展水平与趋势，以及设计、施工等问题，但考虑到西线调水工程地处高寒地区的特殊性，通过国内外已建工程的实例来说明。

根据黄委设计院1989年4月编印的《南水北调西线工程初步研究报告》及1991年9月编印的《雅砻江调水工程规划研究报告》，经过长期的研究论证和现场查勘测量，曾对几十条引水线路进行分析比较，初步推荐六条可供进一步研究的调水方案，其中提水调水方案有三条线路：通天河的联~多线、雅砻江的长~达线、大渡河的斜~贾线；自流调水方案有二条线路：通天河的歇~玛线、雅砻江的长~恰线；联合自流调水线路一条：联~达线。各条调水方案的最大坝高达340~410m。坝型有混凝土重力坝、重力拱坝、土心墙堆石坝、混凝土面板堆石坝等，共计大坝有23座；最长的引水隧洞为24~

131km, 最大洞径 9~10m; 明渠长度 10~127km, 最大断面尺寸达 30×10m; 引水线路长度为 70~160km, 沿途有渡槽、涵洞、水闸、泵站等建筑物; 提水总扬程 310~489m, 泵站扬程 150~240m, 单机流量约 25m³/s, 总装机容量约 87~180 万 kW; 最大年调水量约 200 亿 m³, 其中通天河调水量 100 亿 m³; 雅砻江、大渡河调水量各为 50 亿 m³; 抽水方案引水时间每年为 8 个月 (4~11 月), 自流方案为 10 个月。

青藏高原高寒地区工程建设的不利条件是: 冬季持续时间很长; 春、秋季节难分, 年平均气温在零度以下 (-1.3°~-1.6°C), 极端最低气温达 -34.5°C~-37.7°C, 严寒加上严重缺氧的高山反应, 对许多内地的工人和技术人员难于适应; 交通运输不便, 生活供应和服务设施条件差; 还存在一些危害建筑物的冻土现象: 地基冰透镜体、热喀斯特、渗流出口处的冰椎等。

当代土石坝工程建设取得显著进展的标志是: 先进国家的土石坝工程建设比重高达 70~98%; 世界上最高的土石坝—苏联罗贡坝, 坝高 335m, 正在建设中; 150~260m 级的高土石坝, 利用先进的施工水平可在 1~2 年内建成; 采用高围堰导流配合半人工厚铺盖防渗, 可使施工导流设计大为简化; 高围堰施工导流配合临时坝体断面施工, 可使首批机组提前投产发电等。一系列成功的经验和先进的配套技术, 可使土石坝工程的总工期和总造价大幅度降低。

当代在坝工建设中有两大潮流: 混凝土面板堆石坝和碾压混凝土坝比较广泛的兴建, 其主要原因是: 施工进度快、造价低, 可节省大量水泥及钢材、简化施工导流, 使施工的均衡性和配套机械化自动化施工得到较好的发挥, 达到高效益、快速施工的目的。

目前世界上已建的最高的混凝土面板堆石坝是巴西的福兹度·阿里亚坝, 高 160m, 1980 年建成; 在建的高坝是巴西的坎姆普斯诺维坝, 高 195m, 哥伦比亚的拉米尔坝, 高 180m, 我国天生桥一级坝, 高 180m, 拟建的最高的坝有尼泊尔的塞蒂坝, 高 227m。我国四川省瀑布沟坝, 高 238m, 甘肃省苗家坝, 高 311m。这种坝型的主要优点是: (1) 工期短、造价低; (2) 具有良好的抗滑稳定性、抗震性和抗冲蚀性, 安全可靠; (3) 能简化施工导流和渡汛措施, 可利用垫

层挡水渡汛；(4)堆石体的施工质量和效率高，便于抢筑临时渡汛断面；(5)坝体断面小，从而可缩短导流洞、电站引水洞和泄洪建筑物的长度，使枢纽布置紧凑；(6)施工效率高，如采用6套滑动模板，140m高的面板坝可在3个月时间将面板浇筑完毕。

世界上已建的最高碾压混凝土坝是日本的玉川坝，高100m，1986年建成；在建的高坝是日本的宫濑坝，高155m；我国岩滩坝，高106m。拟建的高坝是巴西大巴拉坝，高185m。这种坝型的主要优点是：(1)工期短、造价低，约比常规混凝土坝缩短工期和降低造价50%，节省水泥用量 $1/3\sim 2/3$ ；(2)施工效率高、均衡性好，日上坝强度比传统混凝土坝高1.5~3.0倍，月平均上升高度达8~18m。由于施工快，从而使施工导流简化，对于中低坝高，可在一个枯水期内建成；(3)可采用薄层碾压，连续上升，不设纵缝，简化施工工序，达到既快速又经济的目的。

土石坝施工中采用以大型皮带机为主的循环流水作业线是当代最先进的工艺流程。苏联罗贡坝经论证比较后，证明这种方法比自卸汽车上坝，可减少施工道路投资460万卢布；每年可减少施工管理费约1,340万卢布；使石料运输费单价降低60%；每班用工从346人减少到193人，即节省劳力40%；估计可使坝的施工期缩短一半。综合国外工程施工经验，循环流水作业线一般日平均上坝强度达5~8.0万 m^3 ，月平均上坝强度达200万 m^3 。

土石坝工程快速施工技术的发展，再配合坝基处理技术的推广应用和采用高围堰（兼作坝体）和永久建筑物（包括多功能的水工隧洞）进行施工导流，具有突出的优点：(1)使导流隧洞的泄洪规模或条数减少50~70%；(2)截流后当年或次年首批机组即可投产发电；(3)高围堰配合高而短的导流隧洞或截流专用明渠，就可经济、有效地利用天然厚铺盖或人造高含沙水流，从而简化坝基处理和有利于高围堰施工。

根据苏联长期研试，滑动爆破筑高坝成套技术研试成功，“三不”即不导流、不清基、不做防渗体爆破筑坝法，给南水北调西线工程调水线路上的高坝方案提供了快速筑坝的可能，只要地形地质条件具备，依靠目前的技术水平修建300~500m的崩塌爆破堆石坝是

有可能的。

高拱坝具有工程量较少、造价较低、施工快、节省水泥、抗震安全度较高等优点，在国内外均得到了迅速的发展。目前我国正在设计的高拱坝有拉西瓦坝，高 250m；溪落渡坝，高 275m；小湾坝，高 300m；锦屏一级坝，高 310m。在我国“八·五”重点科技攻关项目中，对 200m 以上高拱坝的关键技术也列入了专题研究，这些将推动我国高拱坝的发展。

随着工农业发展的需要，世界各国在气温寒冷、高海拔地区也建设了不少各种类型的高坝。苏联是地处严寒的国家，在建的罗贡坝是目前世界上最高的土石坝，高 335m，坝址处最低气温 -30°C ；科雷姆心墙土石坝，高 126m，坝址处最低气温 -62°C ，1971 年建成；维柳伊及乌斯季—汉塔伊两座心墙土坝，高分别为 74.5m 及 65.0m，均建在北极圈内多年冻土地带；加拿大买加心墙土石坝，高 242m，坝址处最低气温 -30°C ，1973 年建成，拉格朗德二级心墙堆石坝，高 168m，坝址处最低气温 -40°C ，1982 年建成；瑞典买苏尔心墙土石坝，高 101m，昔脱瓦尔心墙堆石坝，高 106m，均建在北极圈内，60 年代建成；哥伦比亚的格里拉斯混凝土面板堆石坝，高 130m，建在海拔高程 3000m 处，最低气温 -20°C ；美国的卡宾溪混凝土面板堆石坝，高 64m，坝址处海拔高程 3660m；秘鲁伊乌混凝土面板坝，高 49m，坝顶高程 4065m，是已建的海拔高程最高的面板坝；奥地利芬斯特塔尔沥青混凝土心墙坝，高 150m，位于阿尔卑斯山高寒地区，坝顶高程 2325m，1980 年建成；美国二座沥青面板坝，即霍姆斯维克和蒙特多玛利坝，高 69m 及 34m，坝顶高程分别为 3131m 及 3300m。在寒冷地区也建了不少混凝土坝：加拿大雷维尔斯托克重力坝，高 175m，坝址处最低气温 -34°C ，1983 年建成；苏联萨扬舒申斯克重力拱坝，高 245m，坝址处最低气温 -42°C ，1978 年建成；我国龙羊峡重力拱坝，高 178m，坝址区海拔高程 2650m，一月份最低平均气温 -9.3°C ，1986 年建成；白山三心重力拱坝，坝高 149.5m，坝址最低气温 -44.5°C ，1983 年建成；在寒冷地区也建了一些混凝土轻型坝：我国辽宁省桓仁单支墩大头坝，高 78.5m，坝址处最冷月份平均气温为 -15.3°C ，1968 年建成；苏联结雅大头支墩坝，高 115.

5m, 坝址处最低气温 -53°C , 1929年建成。从已有的工程实践看: 在严寒、高海拔地区已修建了不少各种类型的高坝, 所建造的这些高坝所采用的设计基本原则与普通气温及海拔高程条件下是相同的, 只是要求施工中需根据具体的工程情况采取一定的防护措施, 以防止不利情况的发生。

我国“六·五”科技攻关项目“高土石坝关键技术问题的研究”和“七·五”科技攻关项目“水电工程筑坝技术”的四个课题是: 高土石坝技术研究; 高混凝土坝技术研究; 高坝坝基技术研究; 定向爆破筑高坝技术研究等, 这将会大大促进我国高坝技术的发展, 特别是三项坝高为100m级成套筑坝技术的研究成果, 即: 100m级混凝土面板堆石坝; 100m级碾压混凝土坝; 100m级定向爆破筑坝设计技术等, 共取得了255项研究成果, 总体上达到国际先进水平, 这为我国的坝工建设和缩小与国外先进水平的差距做出了重大贡献, 也为南水北调西线工程的坝型选择提供了科学依据。

高水头大流量泄洪建筑物和消能工是目前高坝设计和施工中的重要问题。大量的工程实践表明, 有不少的成功经验可以借鉴, 值得提出的是多功能水工隧洞的设计经验和苏联有关“竖井消能工”的研试成果。我国“宽尾墩联合消能工”的研试成果和白山、二滩高拱坝的泄洪消能研试成果, 也均达到了世界先进水平。

水电站建筑物设计和施工的重要进展表现在三个方面: 一是电站进水口采用潜没式结构; 二是采用地下厂房的结构布置并结合先进的施工工艺; 三是利用土石方大开挖成理想的引水渠和尾水渠, 布置重力坝进水口, 埋设岩坡明钢管引水, 配合半地下式或坝后式厂房, 可取消传统的隧洞引水发电。

通航建筑物的重要进展有: 苏联在1976年建成克拉斯诺雅尔斯克斜面升船机, 水头101m, 通航船舶2,000t级, 随后又设计了三座高水头斜面升船机, 其中萨扬舒申斯克拱坝升船机, 水头达220m; 1987年比利时建成斯特勒比—蒂厄双线均衡式垂直升船机, 水头73m, 通航船舶1,350t级; 我国三峡工程设计了世界上最大的均衡式垂直升船机, 水头108m, 通航船舶3,000t级; 苏联研试了一种新型的水坡式升船机, 可运载万吨级船只过坝。在高水头船闸方面,

已建成的最大的船闸为西欧的勒阿弗尔·弗朗索瓦1号船闸(67×400m), 槛上水深12.8~22.8m, 1921年建成; 在建的比利时泽布勒赫船闸(57×500m), 可同时通过4艘万吨级海轮。

水工金属结构的进展表现在: 目前已运行的最高水头闸门是苏联罗贡坝导流泄洪兼用隧洞的工作弧形闸门(3.5×6—200m)及事故检修滑动闸门(3.5×7—200m); 河道上最宽的闸门是苏联列宁格勒防洪横拉闸门, 宽200m、高22.5m, 设计水头41m, 自重8,470t, 用3台380t卷扬机牵引。目前世界上容量最大的卷扬机启闭机达2×900t, 用于苏联伏尔加河水闸, 操作宽110m、高12.93m、自重1,200t的平板闸门。

渠系建筑物的设计和施工, 近年来也有重要进展: 利比亚耗资250亿美元于1991年建成“人工河”引水一期工程; 已建成的最长的倒虹吸工程是苏联北顿涅茨—顿巴斯渠, 全长10.6km, 最大水头90m, 引水流量43m³/s; 西班牙塔霍河调水工程中的渡槽最长, 全长6,227m, 流量33m³/s, 排架距40m, 排架高30~48m; 我国南水北调中线工程穿黄渡槽可行性研究成果: 全长9,395m, 设计流量500m³/s; 采用现代机械化施工建成的大型渠道是巴基斯坦的查什马—杰卢姆渠, 全长102km, 引水流量614m³/s, 渠底宽116m, 总方量7,600m³, 60个工人、两班制, 2年半完成。

地下工程的重要进展是: 世界上第一条横穿两峡的铁路隧洞是日本青函铁路隧洞, 全长53.85km, 于1988年正式通车。我国鲁布革水电站引水隧洞长9.4km, 直径8m, 由日本大成公司用了50个月建成, 月平均进尺231m; 引大入秦水磨沟隧洞, 长11.645km, 开挖直径5.53m, 采用双护盾全面掘进机, 一次成洞, 创造日成洞进尺65.6m的世界纪录, 1年零1个月建成。地下厂房施工中也有先进的工程实例: 加拿大马尼克5号电站, 装机100万kW, 采用大型液压七臂钻台车开挖, 8个月完成, 共开挖石方33万m³; 拉格朗德2A电站, 装机200kW, 厂房尺寸220×22×46m, 全部石方开挖量达270万m³, 仅用14个月即完成。

本资料是针对南水北调西线工程而进行的一项专题情报调研, 考虑到南水北调西线工程涉及面广及地理、气候特点, 在编写过程中

广泛地收集了国内外高寒地区各种水工建筑物的资料，并经过综合分析编写成文。对于每一种水工建筑物均进行了概述、发展水平与趋势及设计施工特点的全面论述，为了更深刻地了解这种水工建筑物的实际情况，还列举了大量的工程实例。由于内容多、篇幅大，共分十一章进行编写，由水利部黄河水利委员会档案情报中心王留荣高级工程师主编，并负责土石坝、混凝土面板堆石坝、沥青混凝土堆石坝、混凝土重力坝、混凝土拱坝等章节的编写；定向爆破堆石坝、泄水建筑物、水电站建筑物、过坝建筑物、水工金属结构及机电设备等章节由黄委会勘测规划设计院卢树春高级工程师编写，并对全稿进行统校；渠道和渠系建筑物由黄委会科技情报站王祥辉同志编写。在该份资料编写过程中，参加翻译的同志有：卢江、王祥辉、朱迎忠、王升、陆德福、孙凤、刘燕茹、吴力行、朱宏生等，王留荣同志负责全部译文的校对工作。全稿由黄委会勘测设计院副院长兼南水北调项目设计总工程师谈英武审查，黄委会总工程师吴致尧核审。因编者水平所限，不当处请批评指正。

编 者

1993年3月

目 录

绪 言	1
第一章 土石坝	1
一、概述	1
二、土石坝的发展简况与趋势	1
三、坝体结构设计要点	7
四、坝基处理	12
五、施工导流与渡汛	21
六、土石坝施工	26
七、土工合成材料在坝工中的应用	30
八、高寒地区的土石坝建设及实例	33
附表 1-1 国外坝高 100m 以上土质防渗体高土石坝主要指标统计表	89
附表 1-2 我国坝高 70m 以上土石坝主要指标统计表	106
第二章 混凝土面板堆石坝	111
一、概述	111
二、发展水平与趋势	111
三、设计与施工要点	118
四、施工导流与渡汛措施	120
五、高寒地区混凝土面板坝工程实例	121
第三章 沥青混凝土堆石坝	140
一、概述	140
二、发展水平与趋势	141
三、设计与施工要点	142
四、高寒地区工程实例	143
第四章 定向爆破堆石坝	152
一、概述	152
二、发展简况	152
三、设计与施工要点	157

四、定向爆破堆石坝工程实例	159
第五章 混凝土重力坝	167
一、概述	167
二、发展水平与趋势	167
三、坝体结构设计要点	172
四、施工要点与快速施工技术研究	174
五、碾压混凝土坝的设计和施工要点	175
六、寒冷气候条件下混凝土的施工及坝工实例	181
第六章 混凝土拱坝	198
一、概述	198
二、发展水平与趋势	198
三、拱坝体型选择与计算要点	200
四、拱坝的构造要点	205
五、坝基处理	206
六、拱坝施工要点	207
七、寒冷地区的拱坝建设及工程实例	208
第七章 泄水建筑物与消能防冲	227
一、概述	227
二、发展水平与趋势	227
三、消能工型式选择与工程实例	233
四、多功能水工隧洞与工程实例	237
五、高寒地区泄水建筑物工程实例	242
第八章 水电站建筑物	251
一、概述	251
二、厂房型式与发展趋势	251
三、厂房型式选择	254
四、进水口结构种类与发展趋势	255
第九章 过坝建筑物	262
一、概述	262
二、过鱼建筑物发展简况	263
三、升船机的发展水平与趋势	265
四、船闸的发展水平与趋势	267
五、通航建筑物设计要点	268

六、高寒地区斜面升船机工程实例	273
第十章 渠道和渠系建筑物	275
一、概述	275
二、建设规模与发展简况	276
三、寒区渠道的设计	278
四、寒区渠道衬砌及抗冻技术	280
五、寒区渠道的冬季运用	282
六、高寒地区渠道工程实例	284
第十一章 水工金属结构及机电设备	299
一、概述	299
二、水工金属结构发展水平与趋势	299
三、水轮发电机组的发展水平与趋势	304
四、高寒地区水工金属结构工程实例	307
主要参考资料	313

第一章 土石坝

一、概 述

用当地材料修建的坝统称为土石坝。土石坝是一种古老的坝型，已知世界上最古老的土坝可上溯至公元前三千多年，只是这些原始的土坝均被洪水冲毁没有保留下来，近代的土石坝通常包括均质土坝、土质心墙土石坝、土质斜墙土石坝、沥青混凝土堆石坝、混凝土面板堆石坝、定向爆破堆石坝和土工膜防渗土石坝，本章只叙述土质防渗体土石坝。

近代土石坝工程取得重大进展的标志是：任何复杂、深厚的冲积层地基经过处理和恶劣的气候条件都可安全地修建土石坝；几乎任何土石料由于采用大功率、高效能的机械施工，都可就近利用上坝；漫洪导流和高围堰施工导流的成功经验，使土石坝的施工和导流取得了重大突破；以皮带运输机为主的循环流水作业法，是当代高土石坝先进的施工方法；地下工程设计和施工的先进技术，对大幅度地降低土石坝的工期和造价起到了巨大的作用；各种高水头、高流速、大流量泄洪建筑物的设计和施工，为土石坝工程的发展，提供了最好的条件。

应用国外高土石坝成功的经验和先进技术，可能给南水北调西线工程的方案选择带来突破性的成果，因此，土石坝和高寒地区的工程实例是编写的重点。

二、土石坝的发展简况与趋势

世界筑坝的历史是极其悠久的，在漫长的年代中土石坝发展成多种具有特殊功能和优点的坝型。土石坝在发展的过程中有兴旺的时期也有停顿的时期。至中世纪后期，经过了近千年的发展，欧洲筑坝再度兴起，一些地区修建比较原始的小型土坝，用于蓄水养鱼或驱动水车，在中欧为养鱼修建了一些土坝，如1298年德国西部山区修建的土坝高10m；1367年捷克南波希米亚修建的土坝高10m，长520m；1460年奥地利中部修建的土坝高8m、长250m；西德哈里（Hary）山老矿区，从1548年起修建了几座土石坝，坝高16m~22m；十七世纪下半叶修建了85座土石坝，高达14m，断面已趋标准化。从1715年开始，将泥炭斜墙移至坝体中央，心墙上下游侧用风化岩作过渡带；1714~1722年修建的欧德（Oder）坝，高21m，完全用风化岩粘性土作心墙。罗马古代曾采用过具有上游挡水墙的坝型，十六世纪末，在西班牙格兰尼拉（Granjilla）2号坝上得到应用。几年后，印度修建了胡桑（Hussain）坝，该坝的挡水墙很厚，为土料支撑的重力坝；意大利在1600年修建的特那瓦索（Ternavasso）坝，砖砌的挡水墙厚0.6m，当库水位降落时，挡水墙靠上游面的支墩维持稳定；法国在1666—1675年修建的圣费里欧（Saint Ferreol）坝，上游填土也能在库水

位降落时维持挡水墙稳定,该坝高36m,曾连续165年期间是世界上最高的土坝。大约在这期间,法国工程师开始提出坝坡和挡水墙的合理分析。1776年陆军工程师库仑宣读了有关土坝计算静力分析的历史性论文,其基本概念是:土体的滑动阻力依靠于粘着力(与接触面积成正比)及内摩擦力(与法向作用成正比)。虽然这一概念很接近于现代的概念,但被忽视达70年之久。随着静力学的发展,法国工程师更倾向于砌石坝,因为对这种坝型可进行更深入的分析,其后果是,使法国土石坝的修建实际上趋于中断。

英国则与法国情况相反,在十八、十九世纪,工业革命后,为了满足城市和航运用水的要求,土坝得到很大的发展。1748年为公园修建了一座粘土心墙土坝,到1776年,当这座坝的设计者拟建另一座类似的土坝时,提出了英国最早的土坝规范。在十九世纪初,对于较大的土坝,普遍采用薄中央心墙。到十九世纪中期,英国修建了35座土坝,坝高均大于15m。以后五十年间修建的土坝数量增至四倍多,这个时期的坝一般均按经验设计,但失事的极少。

美国至1900年修建坝高大于15m的土坝约70座,在竣工后10年内失事的约占8%。失事半数是由于洪水漫顶,其它则由于没有采用成熟的经验,也由于热衷于尝试新概念。

随着坝工的发展,土石坝的筑坝理论也逐步发展:土壤渗透的基本问题于1856年由法国工程师达西所解决;英国工程师1907年在印度首先在竖管中进行直接量测,确定浸润线;1899年贝勒斯福特证实了滤料防止管涌的有效性;1910年布莱根据建在不同土壤上实际建筑物的经验,发表了土壤内渗流允许梯度的经验数值。而土石坝在理论上最重要的里程碑是1925年太沙基教授发表的“土壤物理学基础上的土壤力学”一书。他发现由于土壤孔隙中水压力的消散引起泥土固结的理论,这一理论受到与热扩散同一规律的控制。这一发现使他提出有效应力的概念,成为土力学理论的奠基石。1933年美国加利福尼亚州水电局普洛克脱解决了土壤含水量与压实度的基本关系。

土石坝经过长期实践与理论的发展,为第二次世界大战后土石坝在全世界的迅速发展创造了条件。

近百年来土石坝的发展大致经历了三个阶段:

1850~1940年,是土石坝发展的早期阶段,施工方法采用抛填堆石,没有土质心墙,大多采用木面板堆石坝,坝高在25m,边坡极陡,为1:0.5至1:0.75。在1920~1940年建成了许多30m高的堆石坝。值得注意的是1925年美国肯塔基州建造的迪克斯河坝和1931年加利福尼亚州建造的盐泉坝,坝高分别为84m和100m,均为混凝土面板堆石坝。由于堆石变形大,导致面板出现严重裂缝,影响了坝的正常运行,使混凝土面板坝的修建停顿下来。这时有些国家开始修建沥青混凝土面板堆石坝。同时期,在美国和南美一些国家盛行水力冲填坝,美国先后修建了120座水力冲填坝,坝高10~79m,该坝型在苏联也得到广泛的应用。1938~1941年建成了乌格里奇和雷宾斯克二座水力冲填坝,1945年后,苏联在平原河流上修建的土坝80%是用水力冲填法。齐姆良大坝年冲填量达2,500万 m^3 。伏尔加坝,高45m,坝体土方量2,170万 m^3 ,最大日冲填量达30万 m^3 ,已建成的最高的水力冲填坝是明盖哈尔坝,高80m。目前,水力冲填土坝在苏联仍继续采用。

1940~1965年,是土石坝发展的过渡时期,从施工方法处于抛填堆石与碾压堆石法交叉施工;从防渗体的形式是土质心墙与混凝土面板坝均有修建。混凝土面板堆石坝直到六

十年代初,仍大量采用抛填堆石,该时期的最后一座高坝是新国库混凝土面板堆石坝,1958年兴建,采用混和法施工,即1.2及3.0m一层的碾压堆石和18m一层的抛填堆石结合。当时传统的面板接缝设计,使面板发生裂缝和渗漏。这时,采用过渡的堆石体施工方法是水枪冲填3~3.6m的较薄堆石层,随后用施工汽车和推土机压实。这种施工方法曾用于瑞士的葛兴能坝和日本的御母衣坝。

从1960年以来,由于重型振动碾的出现,碾压心墙堆石坝得到了迅速的发展,使土石坝不论在建坝数量,还是在坝高方面均获得迅速的提高:一些国家坝高100m以上的土石坝占高坝的比率,由五十年代的31%分别跃到六十、七十年代的40%和62%,美国七十年代每年建坝约125座,其中98%为土石坝。目前世界各国已建土石坝的比例是:法国为70%,巴西75%,美国87%,加拿大90%,南朝鲜95%,瑞典98%等。在坝高方面,各国相继建成了一大批100m以上的高土石坝:美国库加尔斜心墙堆石坝,高158m,1964年建成;加拿大波太基山斜心墙土石坝,高183m,1967年建成;美国涅洛维尔斜心墙土石坝,高230m,1968年建成;美国新顿彼德勒斜心墙土石坝,高173m,澳大利亚塔勒宾哥斜心墙堆石坝,高162m,均为1971年建成;加拿大买加斜心墙土石坝,高245m,1972年建成;土耳其凯班心墙堆石坝,高212m,墨西哥安戈斯求拉心墙堆石坝,高146m,均为1974年建成;哥伦比亚契伏斜心墙土石坝,高237m,1975年建成;苏联恰尔瓦克心墙堆石坝,高168m,1977年建成;日本高濑心墙堆石坝,高176m,加拿大拉格兰德二级斜心墙堆石坝,高168m,阿尔巴尼亚非尔泽心墙堆石坝,高167m,均为1978年建成;苏联努列克心墙土石坝,高300m,1979年建成;墨西哥奇柯森心墙土石坝,高261m,1980年建成。1980年以后又建成了不少高土石坝:泰国色里克特心墙堆石坝,高140m,土耳其艾瓦西克心墙堆石坝,高175m,我国石头河心墙砂砾石坝,高114m,均为1981年建成;法国大屋土石坝,高160m,为1984年建成;印度泰恩心墙土石坝,高160m,1986年建成。目前,世界上正在施工的最高土石坝,是苏联的罗贡斜心墙土石坝,高335m。土石坝的高度发展也很快,从三十年代的100m,发展到六十年代200多米,八十年代为335m。当前根据水利建设的需要,还在研究更高的土石坝,如英国为供水工程拟建伊兰谷坝,坝高369.4m;加拿大和美国为北水南调拟建两座高坝,坝高分别为464m和476m。

各个年代建成的100m以上的土石坝见表1-1。

各种坝型100m以上坝高的建设比重变化情况,见表1-2。

已建各种坝型按坝高统计的百分比及相应主要国家建坝总数和所占百分比见表1-3。

表1-1 全球各个年代已建、在建、拟建100m以上土石坝统计表

年份	1929年 以前	1930~	1940~	1950~	1950~	1970~	1980~	施工中	设计中	时间不详	总计
建坝数	2	4	3	12	63	91	94	37	67	38	411

表 1-2 全球各种坝型 100m 以上高坝建设比重情况

建成时期	共计坝数	土石坝		重力坝		拱坝	
		坝数	%	坝数	%	坝数	%
1950 年以前	42	13	31	16	38	13	31
1951—1960	71	22	31	21	30	28	39
1961—1968	110	42	38	24	22	44	40
1969—1974	60	34	56	7	12	19	32
1975—1980	88	55	62	14	16	19	22
总计	371	166	45	82		123	
总计 (至 1986 年)	494	222	45	112		147	

表 1-3 全球已建各种坝型按坝高统计的百分比
及主要国家建坝总数

坝高 (m)	15~30	30~60	60~100	100~150	150~200	>200
坝型, 国家						
土石坝	88.32	66.06	43.56	42.03	39.62	25.00
重力坝	7.99	23.37	32.97	23.55	15.09	16.67
拱坝	2.79	7.73	18.63	30.07	45.29	54.17
支墩坝	0.9	2.84	4.84	4.35	0	4.16
全球坝数	34689	7054	1472	365	88	26
中国	18820	2287	117	13	1	0
美国	5459	1185	319	65	18	4
日本	2228	741	233	47	6	0
印度	1137	220	48	12	2	1
西班牙	737	381	132	32	2	1
加拿大	608	162	45	13	6	2
巴西	516	148	34	8	3	0

坝高 (m)	15~30	30~60	60~100	100~150	150~200	>200
坝型, 国家						
墨西哥	503	168	42	11	1	1
法国	468	167	57	15	4	0
意大利	440	274	88	20	5	1
澳大利亚	409	179	45	10	3	0
苏联	132	101	38	13	5	4

土石坝所以能够得到迅速的发展, 主要基于以下的原因:

1. 经济效益好。在同等的设计条件下, 土石坝坝体方量虽比混凝土重力坝大 4~6 倍, 但其单价, 国外仅为混凝土坝的 $1/15 \sim 1/20$ (最近有些国家下降到 $1/30 \sim 1/70$); 土石坝工程的泄洪、导流、发电站等建筑物的工程量比混凝土坝大, 但基础处理的工程量小得多。而随着设计施工技术的发展, 土石坝工程的泄洪、导流、发电、通航等建筑物的设计和施工均取得了许多重大突破, 施工的机械化水平、劳力、资金和工期都有明显的降低。许多工程设计方案论证和实践对比证明, 土石坝工程的综合经济指标比混凝土坝优越。

2. 由于岩土力学理论、测试手段和电算技术的发展, 完善了土石坝的设计理论和计算方法, 使土石坝工程的质量和安全性显著提高。

3. 由于土石坝工程大型施工机械和施工技术的发展, 并配合以采用新的工艺流程, 可保证土石坝工程施工的高效率、高质量和低消耗。

4. 放宽了对筑坝材料的要求, 可充分发挥就地、就近取材的优点。由于能够充分利用当地材料, 就可节省大量水泥、木材和钢材, 大大减少工地的外线运输量, 这对位于边远、交通不便地区的工程尤为重要。

5. 对于各种地形地质条件适应性较大, 在地质条件差及深厚冲积层的不良坝基, 经过适当措施处理后, 均可修建高土石坝。

6. 比较能适应不良的气候条件, 可以在严寒低温或炎热多雨的地区建造。

7. 抗震安全性能较好, 只要采取相应的抗震措施, 在强震区也可安全可靠地运行。

8. 运行管理费用较低, 通常只有护坡需要进行维修。

9. 由于地下厂房、水工隧洞设计和施工技术水平的综合发展, 对高土石坝工程的发展也起了促进作用。

由于当代科学技术的进步, 使土石坝的建设取得了重大的进展, 土石坝工程的建设日益受到重视并广泛采用, 其发展水平和趋势主要表现在:

1. 土石坝的建设比率不断增大, 更高的土石坝将会不断出现。据墨尔曼 1981 年统计: 全世界 25 座库容大于 430 亿 m^3 的水库大坝中, 有 17 座是土石坝, 占 68%; 在 25 座装机容量大于 240 万 kw 的水电站中, 18 座为土石坝, 占 72%。

2. 施工机械化和自动化的水平不断提高, 从而加快了施工进度, 降低了工程造价, 其

主要特点是：(1) 采用大功能、高效率的施工机械；(2) 选用配套成龙的施工机械，组合成循环流水作业线；(3) 广泛采用电子计算机控制技术；(4) 重视施工机械的保养和现场维修工作等。由于以上原因国外高土石坝可以达到很高的上坝强度，日上坝强度达 $12.5 \sim 23.1$ 万 m^3 ；月上坝强度达 $200 \sim 450$ 万 m^3 。一般的坝体填筑可在 $1 \sim 3$ 年内完成。

3. 施工导流技术有了突破性进展。过去贯例高土石坝的施工导流采用多条大断面的隧洞，这将导致土石坝枢纽工程的工期长、造价高，也是土石坝导流工程的最大难点。随着近代技术的发展，综合国外高土石坝的工程实践，在导流技术方面的突破性进展表现为：

(1) 抢筑高的施工围堰兼作坝体的组成部分，可大大简化导流工作。高围堰的工程实例有：墨西哥安哥斯求拉坝围堰高 $74.5m$ (坝高 $146m$)；美国新美浓坝围堰高 $90m$ (坝高 $190.5m$)；渥洛维尔坝围堰高 $127m$ (坝高 $230m$)。由于采用高围堰，使导流滞洪库容增大几倍，从而使泄洪流量大幅度减少，同时还使同样孔口尺寸的导流隧洞泄流能力成倍地提高。这样就可减少导流隧洞的工程量和造价。

(2) 设计和施工特殊的坝体临时过洪断面，使部分洪水从临时断面上漫流。采用这种临时处理的断面可代替昂贵的大型导流隧洞，其成功的工程实践有：澳大利亚奥得 (Ord) 斜心墙堆石坝填筑至 $28m$ ，用加筋堆石保护，当时泄洪流量 $5,600m^3/s$ ，单宽流量 $46m^3/s$ ，堰上过流水深为 $10.5m$ ，过洪后完好无损；美国 7 号矿井后坝 (Pit7 Afterbay)、津巴布韦莱赛皮 (Lesapi) 坝、澳大利亚古根 (Gogong) 坝等都采用加筋堆石护面过洪，水深 $1.2 \sim 3.0m$ ，过洪后，均无损坏。

(3) 充分利用永久性的泄水建筑物兼作施工导流，或者将施工导流洞改建成永久性的泄水建筑物，采用这种兼用形式，可使专门用于施工导流的隧洞费用大幅度降低，从而降低整个枢纽的造价。埃及阿斯旺大坝利用 6 条、直径为 $15m$ 的发电、泄洪两用洞兼作施工导流用。印尼查蒂卢胡坝采用直径为 $90m$ 、高为 $110m$ 的园柱塔形进水口，巧妙地将导流、泄洪、灌溉、发电洞布置在塔内，并使导流洞与永久性廊道泄水及坝下尾水涵洞相结合，缩短了导流洞的长度。

另外，随着地下工程设计和施工技术的迅速发展，隧洞施工的速度也显著的提高，这为土石坝枢纽工程中必须的隧洞工程加快施工提供了极为有利的条件，如加拿大波太基山坝三条洞径 $14.6m$ ，每条长为 $777m$ 的导流隧洞，马蹄形断面，混凝土衬砌，全部工程量仅用了 17 个月完成。

4. 充分发挥了土石坝就地取材的长处，几乎所有的土石料和开挖渣料经过适当处理后均可利用上坝。由于土石坝的方量很大，故充分利用当地材料，是土石坝设计经济合理的关键问题。随着土力学理论的发展和重型振动碾的出现，大大放宽了对高土石坝筑坝材料的要求。防渗料只要满足防渗要求，如粘性土、砂质粘土、冰碛土、风化岩石等均可使用，美国斯威夫特坝采用细粒砾岩作心墙料，该料无塑性，经碾压后渗透系数为 $10^{-5}cm/s$ ，防渗效果良好。印度比阿斯坝利用隧洞、坝基开挖的砂岩和粉砂岩填筑心墙，该料在开采压实过程中变成细屑，碾压后渗透系数为 $10^{-7} \sim 10^{-5}cm/s$ ；日本鱼梁瀨坝和 wat 坝利用风化砂岩、泥板岩和页岩作为心墙料。目前国外广泛采用粘土和砾石掺合料，这种料的优点是：心墙和坝壳堆石体的弹模比较协调，可防止或减小坝壳的拱效应提高心墙的竖向压应力，可缩小心墙与坝壳间的不均匀沉陷，防止水平裂缝和纵向裂缝的发生。掺砾含量最高的是美