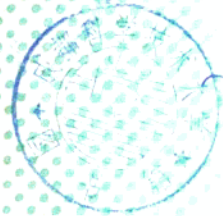


- 886154

碾压高堆石坝

刘颂尧 主编



94

34



内 容 提 要

本书较详细地论述了碾压高堆石坝的发展概况、型式和布置、筑坝材料、细部设计、基础处理、内力和稳定分析、原型观测以及事故实例和分析，还着重介绍了近二三十年来世界上高堆石坝的成就和进展。书中有较详细的工程实例、设计资料和插图以及有关的统计数据。

本书可供水利水电工程设计、施工和运行人员及有关高等院校师生参考。

前 言

由于现代科学技术的突飞猛进，世界坝工建设也有了新的发展。在坝型方面，随着设计理论、计算手段、施工实践和施工机械的进展及革新，近30年来，碾压堆石坝日益受到重视和广泛采用。世界各国在水利水电工程中采用碾压堆石坝越来越多，在坝高和建坝的数量上逐渐超过混凝土坝，成为今日高坝发展的趋势。

为了在我国水利水电工程建设中提倡对碾压堆石坝的研究，介绍现代碾压高堆石坝的设计情况和资料，前电力工业部水电建设总局刘颂尧副总工程师曾主编了《碾压式高堆石坝》一书。该书采用重点介绍体裁，着重介绍近代世界上一些高堆石坝及其设计情况。

当前，国内不少水利水电工程正在研究或采用堆石坝，如坝高为220m的红水河龙滩水电站大坝，设计中比较了堆石坝方案，高180m的天生桥一级水电站的大坝，采用了混凝土面板堆石坝方案，这说明采用堆石坝的观念已日益为国内坝工建设界所重视。这与国际上的趋势是一致的。

《碾压式高堆石坝》一书曾于1980年内部刊印，深受有关技术干部的欢迎。为了满足广大读者的要求，在水利电力部水利水电规划设计院的支持和科技司王圣培、陈宗梁二同志的关心下，我们对此书作了修改，并更名为《碾压高堆石坝》公开出版。本书内容包括：第一章发展概况、第二章型式和布置、第三章至第六章介绍建坝材料包括混凝土面板坝和沥青混凝土防渗体堆石坝、第七章细部设计、第八章基础处理、第九章内力和稳定分析，第十章原型观测和第十一章事故实例和分析。

参加本书编写工作的有李浩钧、汝乃华、高济、朱春泉和张钟禄同志。参加部分工作的有，刘泊生、刘景云和刘更新等同志。全书主要由汝乃华、高济二位同志执笔，刘颂尧同志对全书作了修改、补充和审核。由于编者和审者的水平有限，不妥之处希读者批评指正。

《碾压高堆石坝》编写组

1987年11月

EA 55318

目 录

前 言

第一章 发展概况	1
第一节 堆石坝的发展过程.....	1
第二节 碾压堆石坝的特点和现状.....	3
第三节 堆石坝的发展原因.....	6
第四节 堆石坝在我国的适用性.....	9
第二章 型式和布置	12
第一节 型式.....	12
第二节 影响坝型选择的因素.....	20
第三节 布置.....	23
第三章 筑坝材料	33
第一节 材料的使用情况和发展趋势.....	33
第二节 材料的分类和要求.....	34
第三节 防渗体土料.....	41
第四节 反滤层和过渡区的材料.....	46
第五节 坝壳堆石材料.....	47
第六节 劣质石料的利用.....	51
第七节 堆石材料的强化.....	57
第四章 土质防渗墙及反滤层	61
第一节 防渗墙尺寸的决定.....	61
第二节 防渗墙与地基连接.....	64
第三节 防渗墙材料.....	65
第四节 反滤层.....	66
第五节 过渡区.....	69
第五章 混凝土面板	71
第一节 概述.....	71
第二节 面板堆石坝的特点.....	73
第三节 混凝土面板堆石坝设计.....	74
第四节 抗震性能.....	82
第五节 工程实例——塞沙纳混凝土面板堆石坝.....	83
第六章 沥青混凝土防渗墙	97
第一节 概述.....	97
第二节 沥青混凝土面板.....	98
第三节 面板垫层及截水齿墙.....	103

第四节	沥青混凝土心墙的连结	109
第五节	其它材料的防渗措施	111
第六节	沥青混凝土心墙坝实例	112
第七章	细部设计	117
第一节	坝顶宽度	117
第二节	坝体超填	118
第三节	坝顶超高	121
第四节	护坡	122
第五节	堆石坝和混凝土坝的联接	123
第六节	有关地震的一些细部设计	126
第七节	坝面坡度	127
第八节	坝的加高和分期施工	128
第八章	地基和两岸坝座的处理	130
第一节	基岩开挖处理	131
第二节	地基接触处理	135
第三节	固结灌浆和帷幕灌浆	138
第四节	透水地基的防渗处理	141
第九章	内力和稳定分析	156
第一节	概述	156
第二节	抗剪强度	156
第三节	分析方法	168
第四节	安全系数	170
第十章	原型观测	177
第一节	概述	177
第二节	外部观测	178
第三节	内部观测	186
第四节	地震的动态特性观测	206
第五节	仪器的选用和管理	208
第十一章	事故实例和分析	210
第一节	概述	210
第二节	巴西奥罗斯坝	211
第三节	美国赫耳洞坝	213
第四节	美国提堂坝	218
第五节	澳大利亚洛瓦伦坝	226
第六节	意大利柯加坝	230
第七节	澳大利亚斯可茨峰坝	234
第八节	事故原因的探讨	237
附录	国内外部分堆石坝技术指标表(坝高80m以上)	242

第一章 发展概况

第一节 堆石坝的发展过程

堆石坝的历史远没有土坝悠久。据统计^[1]迄至1925年,全世界坝高超过30m的堆石坝仅12座,其中8座在美国。最早的堆石坝出现在美国西部的偏远矿区。那里对外交通不便,但石料、木材丰富,又有现成的采矿堆运设备。所以早期建造的都是上游面用木防渗板的小型堆石坝。

随着坝高增加,木防渗板被混凝土防渗板所代替。到1931年,坝的高度已达到100m。美国的盐泉坝可以作为代表(图1-1)。这种坝存在着沉陷大,面板易损坏、漏水等缺陷,现在已可称之为老式的堆石坝。它的主要特点有:

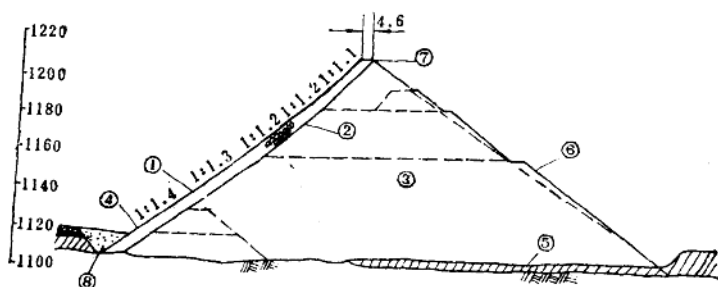


图 1-1 盐泉坝(单位: m)

①混凝土面板; ②干砌块石垫层; ③抛填堆石; ④外覆木板层(最低水位以下); ⑤压实大砾石;
⑥为达到1:1.4边坡所超填的边坡; ⑦另加沉陷超高(最大1.8m); ⑧填土

1) 坝体主要由三部分组成: a) 抛填的堆石体; b) 上游临水的防渗层; c) 介于上述二者之间的干砌块石垫层。

2) 石料都用采石场、溢洪道等开挖新鲜石碴。石质坚硬有棱角, 石块尺寸最小的为10cm, 最大的石料重可达10t以上, 由运输能力决定。

3) 块石堆筑采用高层抛填、高压水冲实的办法, 冲水压力约0.4—0.7MPa, 用水量约为堆石体积的2~4倍。

4) 坝体上、下游坡接近天然休止角, 一般在1:1.3~1.4之间, 砌石垫层厚度3~5m, 石块重约0.5~10t。

5) 混凝土面板用水平、垂直缝分割成12~18m见方。缝内设铜片止水, 并留有间隙(水平约1.3~1.9cm, 垂直约1.9~2.5cm), 以适应沉陷。面板厚度最小约30cm, 以0.6~0.7%的比率随深度增加。配筋率约0.5%, 双向配置。

6) 绝大多数坝都修建在岩基上, 并在砌石垫层的底部设截水齿墙及帷幕灌浆。齿墙深嵌入岩石内, 同时用作混凝土面板的支承。

7) 坝体在施工期和建成后有较大的沉陷。施工期沉陷平均为坝高的4.5%；建成后几年逐渐减少，累计约为坝高的1%。绝大部分是垂直沉陷。但在V形河谷中，也有从两岸向中央的水平移动，促使两岸坝肩区受拉，中部受压。第一次蓄水后会有向下游方向的水平移动，约为相应垂直沉陷量的50%。这些沉陷是造成防渗面板破损和坝体漏水的原因。

8) 坝体设计大都凭工程经验判断。滑动稳定分析都沿用土坝设计中采用的极限平衡概念，将坝体视作刚体分析。对于坝内的应力、应变、位移等几乎一无所知。但是已建坝的运行经验证明，这种坝有较高的安全度，至今尚没有发现因稳定不足导致失事的记录。

40年代起，堆石坝有了新的发展，出现了以土为防渗体的高堆石坝^①。坝高为130m的泥山(Mud Mountain)土心墙坝(1941年)和坝高为80m的南塔哈拉(Nantahala)土斜墙坝(1941年)可以作为代表(图1-2、1-3)。前者是土坝经验的一种推广，而后者则可能是对老式防渗面板的一种改进。但是土防渗体的引用，却使土坝上一些成功的施工技术，在堆石坝上得到推广。而其中影响最大的，莫过于堆石的填筑，象土坝施工那样采

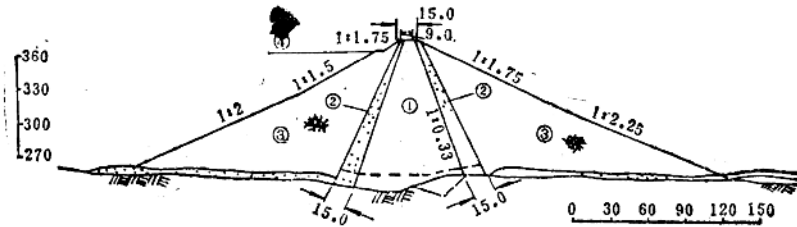


图 1-2 泥山土心墙坝(单位: m)
①心墙; ②反滤层; ③堆石; ④溢流堰顶高程

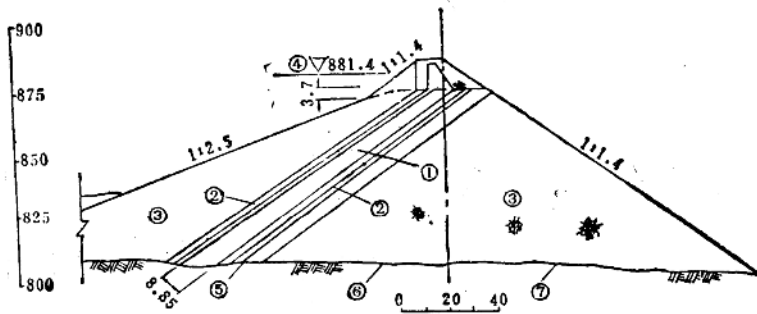


图 1-3 南塔哈拉斜墙坝(单位: m)
①碾压斜墙; ②反滤层(轧石、砂); ③采石场毛料; ④最高水位; ⑤斜墙地基(坚硬岩石);
⑥地基——开挖到良好岩基; ⑦地基——表面清理到岩基

① 在这之前虽然已建造许多土石混合的低坝，但是填土和堆石的填筑功能都不清楚，填土下游侧也无反滤层，因此经常因管涌失事，这类坝不能认为是堆石坝。

用薄层碾压来代替原来的高层抛填。这一改变是配合振动碾的采用而实现的。其重大意义在于：a)使堆石坝的密实度增加，稳定性提高；b)使坝体蓄水后的沉陷显著减小，消除了过去堆石坝沉陷大的重大缺陷；c)使石料的选用范围（不论在物理性质上、或级配上）大为放宽；d)使石料和土料（当采用土防渗体时）可以用相同的设备和工艺同时施工，而且施工工序也得到简化；e)使坝内埋设各种观测仪器成为可能。这样逐步形成了一种新型的碾压式堆石坝。这个过程，是在50年代随着施工机械的发展而完成的。除此之外，沥青防渗墙也在这段时间开始出现。

第二节 碾压堆石坝的特点和现状

现代碾压堆石坝的主要特点有以下几方面：

1)采用薄层碾压填筑堆石，每层填筑的厚度约0.6~0.9m，随石块的最大粒径而定。然后用6~14t的振动碾碾压（一般4次）。填压过程中不再用高压水冲填，而改为在碾压前和碾压时淋水润湿。用水量约为堆石量的15%。这样压实的堆石容重一般可达2~2.2t/m³。

2)采用大型施工机械，如50~60t气胎碾，10~14t振动碾，4~6m³单斗挖掘机，32~65t自卸汽车或16~24.5m³铲运机等，以提高施工强度。一般月上坝量可达200~300万m³，日上坝量可达5~10万m³，如买卡（Mica）坝5.3万m³、涅洛维尔（Oroville）坝9.4万m³、塔贝拉（Tarbela）坝9.5万m³、波太基山（Portage Mt.）坝12.7万m³。

3)石料选用范围放宽，不再限于开采坚硬有棱角的块石。较软的、风化的岩石，较小的卵石、砾石甚至松散岩石，如页岩、片岩也可研究利用。堆石料的粒径一般在0.6~610mm之间。尽可能利用溢洪道和隧洞开挖料。山麓堆积，河床砂砾石等也可选用于合适的部位。

4)混凝土面板堆石坝高度已达到165m以上。面板后的干砌块石垫层已改用压实的小石块垫层代替。混凝土面板采用滑动模板连续浇筑，水平缝已基本取消。垂直接缝中设置止水，但填料也趋向取消。支承面板的底座不一定用深嵌入岩基的截水墙，而是直接浇在岩面，并用锚筋锚着基岩。图1-4为1980年竣工的巴西阿里亚河口坝，高156m。

5)土防渗体的堆石坝一般包括以下五部分：a)压实的土防渗体；b)由级配砂组成的滤层；c)滤层两侧的过渡层，由级配良好较小的石块、砾石、砂组成；d)由石块组成的排水层；e)堆石坝壳，由碎石、卵石、砾石组成，最大粒径50~100cm，最小约有10~20%通过孔径4.76mm的筛。

6)现有200m以上的高堆石坝都采用土防渗体。防渗体的位置多数在中央，最近通过观测研究，认为将心墙位置略为偏向上游并稍有倾斜的斜心墙最优越。当受水压后它的变形比老式斜墙小；也可避免中央式心墙那样当坝体发生不均匀沉陷时，因心墙内发生拱作用而形成水平裂缝。此外，还能适当增加下游堆石量，提高坝的稳定性。巴西的福纳斯（Furnas）、美国的涅洛维尔以及加拿大的买卡等一些重要高坝，都采用这种型式（图1-5）。

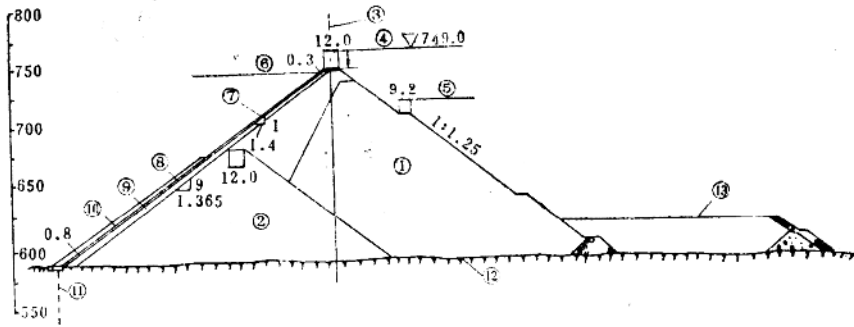


图 1-4 巴西阿里亚河口坝 (单位: m)

①碾压堆石体层厚1.6; ②碾压堆石体层厚0.8(第一期坝体); ③坝轴线; ④坝顶; ⑤交通路; ⑥正常最高水位; ⑦混凝土面板; ⑧厚度从0.8到0.3; ⑨碾压的级配区; ⑩不透水铺盖; ⑪灌浆帷幕; ⑫假定基岩线; ⑬弃土

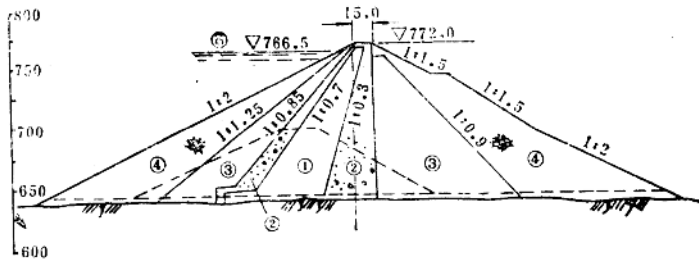


图 1-5 巴西福纳斯坝 (单位: m)

①不透水心墙; ②过渡层; ③任意料; ④堆石坝壳; ⑤最高水位

7) 坝体建成后的沉陷显著减少。如前所述, 抛填式堆石坝施工期沉陷量达坝高的 4~5%, 运行期约为 1%。采用薄层碾压后, 施工期的沉陷可在碾压过程中基本完成, 运行期的沉陷仅为坝高的 0.2% 左右 (实例如表 1-1)。

8) 坝体的稳定、应力和变形分析, 已可以采用有限元法和模型试验进行研究。用有限元计算时, 坝体可以作为线性弹性或非线性弹性处理。自重、水压可按实际施工程序分段施加, 可以求出坝内各部位的位移, 动力分析的速度、加速度, 应力和应变的过程。计算和试验的手段日益完善。但由于输入计算中的原始数据——堆石体的力学特征, 目前还不能准确测定 (成果一般比原型偏低) 以致分析结果只能反映安全下限。还不能全面了解坝的性状。

9) 坝内埋设各种仪器, 在施工期和运行期进行观察监视。观测项目包括: 水平、垂直位移, 各个方向应力、应变, 孔隙水压力, 通过心墙、地基、坝肩的渗漏, 以及地震影响等。各种观测目前已成为改进设计方法、保证大坝安全的重要措施。

60年代起, 堆石坝在技术理论方面也有迅速发展。1960年美国土木工程学会专门召开堆石坝学术讨论会。1970年第10届国际大坝会议起, 历届都有专题交流。到70年代, 有关堆石坝材料试验 (如大型三轴剪切试验)、压实性能、坝体的静力和动力分析以及原型观

表 1-1

混凝土面板堆石坝 ⁽¹⁾			
坝 名		盐 泉	塞 沙 纳 (Cethana)
坝 高		101.3m	110m
建 成 年 份		1931年	1971年
施 工 方 法		高层抛填	薄层碾压
面 板 沉 陷	最 大 值	170cm(1.7%H)	1.3cm(0.012%H)
	时 间	蓄水后27年	蓄水后1年
	位 置	0.4坝高处	0.4坝高处
接 缝 张 开 值		2.54cm	1.15cm
土防渗墙堆石坝 ⁽²⁾			
名		英 非 尔 尼 罗	渥 洛 维 尔
坝 高		148m	236m
建 成 年 份		1963年	1967年
施 工 方 法		外部抛填内部碾压	碾 压
堆 石 位 移	垂 直	12cm(0.085%H)	5cm(0.022%H)
	水 平	12cm	3.7cm
	位 置	0.56H	0.5H

测, 都已有系统的经验。以致在70年代各国都陆续出版了土石坝的专著^①。

理论和施工技术的发展, 使堆石坝崛起成为一种重要的坝型, 遍布世界各地。最大坝高达到300m以上, 建坝的高度和数量在大多数国家中已超过混凝土坝。例如美国^[1]在70年代每年建坝约125座, 其中98%是土石坝。1975~1979年内建成或施工中的60m以上高坝共48座, 其中堆石坝24座占50%。土坝15座占31%^[4]。巴西70年代施工和建成的80m以上的高坝共16座, 其中7座是堆石坝、5座土坝、4座土石—混凝土混合坝^[6]。日本1969~1978年共建较高的坝317座, 其中50%为土石坝, 43%为重力坝, 其他坝型占7%。上述317座坝中, 高于100m的有16座, 其中堆石坝6座, 重力坝4座, 拱坝6座。

各个年代几个主要国家中堆石坝的发展概况见表1-2。

60年代起, 修建80m以上高堆石坝的国家从北美、西欧扩展到南美(巴西、哥伦比亚、萨尔瓦多)、东欧(南斯拉夫、罗马尼亚)、非洲(加纳、南非)以及亚洲(中国、日本、印度、巴基斯坦、土耳其、阿富汗、印尼、菲律宾等), 象马来西亚、泰国、尼泊尔等国家也都建造了100m以上的堆石坝。各个年代高堆石坝的发展概况列于表1-3。

各国正在兴建和拟建的堆石坝规模和高度都在继续增长。加拿大的拉格朗德(La Grand)水电开发工程, 包括一批堆石坝, 总填筑量达1.57亿m³。英国拟建的伊兰谷坝高369.4m, 加拿大和美国为北水南调计划拟建的堆石坝, 高度分别达464m和476m。

① 见本章末参考文献。

表 1-2

几个主要国家80m以上的堆石坝数目

国 家	年 代	50	60	70
哥 伦 比 亚		0	1	4
墨 西 哥		2	4	6
加 拿 大		1	4	7
苏 联		0	1	8
巴 西		0	2	12
澳 大 利 亚		3	3	12
美 国		9	14	12
日 本		0	6	32

表 1-3

80m 以上堆石坝的建设概况

年 代	40 以 前	40	50	60	70
最大坝高(m)	100	122	153	225	325
建坝数量(座)	5	3	20	58	117
数量增长百分比(%)			100%	290%	585

第三节 堆石坝的发展原因

分析堆石坝迅速发展原因,首先是由于堆石坝对自然条件有广泛的适应性。它对地基的要求比混凝土坝低,适应不均匀沉降的能力强。因此,在岩基、冲积层地基上都能建造。同时堆石坝抗地震性能良好,对气候条件的适应性又比土坝优越,可以适用于地震区和多雨、寒冷以及交通不便的偏远地区。例如,加拿大北部乌塔尔德2号坝冬季温度在零下25~35℃,夏季温度在20~25℃,施工历时3年,建成后运行良好;拉格朗德坝,坝址平均最低温度为-28.9℃,每年有185天在0℃以下。苏联甚至在北极圈最寒地区修建堆石坝。菲律宾和印尼等曾在炎热多雨地区修建高堆石坝;干旱地区则可以建非土质防渗墙堆石坝。堆石坝的这些优越性,促使在一些水力开发程度较高的工业化国家里,可以继续利用剩下地形地质条件比较差的坝址。而在一些发展中国家里,则由于其同时具有经济上的优越性,往往被列为优先考虑开发的方案。

堆石坝迅速发展的第二个原因是由于它的经济性。堆石坝可以就地取材,利用工程中溢洪道、隧洞、厂房等开挖的石碴,采用外来材料较少,减少了大量对外的运输量。堆石坝和混凝土坝相比,虽然坝体方量可能大4~6倍,但堆石材料的单价在国外一般为混凝土的1/15~1/20。因此,即使包括了工程费用较高的导流、溢洪道建筑设施在内,其总的经济比较仍然是有利的。表1-4为日本御母衣坝两种坝型的投资比较^[6]。另外堆石坝还有便于分期施工,使工程提早受益,减少投资积压的优点。

堆石坝可以节约大量水泥,这一点对于发展中国家来说,更为重要。因此,巴西、墨西哥以及亚洲一些国家都往往由于这一原因而广为选用这种坝型。例如,土耳其的哈桑·乌

表 1-4

狮母衣坝型比较投资表 (亿日元)

项 目	主 体 工 程							设 备						其 他	总 计
	围 堰	导 流 隧 洞	溢 洪 道	坝 体	基 础 处 理	其 他	小 计	机 械	电 气 设 备	铁 路	公 路 桥 梁	其 他	小 计		
堆石坝	1.3	9.6	22.0	40.0	7.6	0.4	80.9	22.3	0.2	1.0	3.3	1.5	28.3	8.2	117.4
重力坝	0.6	1.6	1.5	91.5	33.0	0.4	128.6	25.8	0.6	3.0	3.5	3.1	36.0	3.0	167.6

古鲁 (Hason Ugurlu) 坝, 高175m, 曾比较了拱坝、重力拱坝和堆石坝三种方案。比较结果堆石坝不仅抗震性能较好, 施工工期比拱坝方案短, 而且经济上也稍为有利, 并能节约当地缺少的水泥, 因而最后决定采用堆石坝^[7]。

国外堆石坝迅速发展的第三个原因是由于近20年来施工机械的发展和施工的高度机械化。60年代机械制造和施工技术的进步, 使得可以采用大型的采挖、掘进、运输设备和有效的压实机械, 如每小时2500m³的斗轮式挖掘机, 10~11.5m³的单斗挖掘机, 385~700马力的推土机, 100~110t自卸卡车, 57.5m³铲运机, 1.37m宽、19.7km长的皮带机, 16.0t振动碾等。大型机械的日利用率不少于20h, 机械完好率一般达85~90%。由于采用了重型设备, 使庞大土石方量的采、运、堆筑以及导流隧洞的开挖, 能优质高效地完成。例如马来西亚的特门加尔 (Temenger) 坝, 高115m, 土石方量700万m³, 从75年中到77年, 以近2年半的时间建成; 巴基斯坦的塔贝拉坝, 高143m, 体积1.27亿m³, 填筑期4年; 美国涅洛维尔坝, 高236m, 体积5964万m³, 填筑期4年。表1-5内列有若干代表性堆石坝的施工进度。

表 1-5

国外若干代表性堆石坝的施工进度

工 程	国 家	坝 高 (m)	坝体工程量 (万m ³)	坝 填 筑 期		从导流隧洞施工到发电	
				月 数	时 段	月 数	时 段
塔 贝 拉	巴基斯坦	143	12700	48		96	63~76.7
买 卡	加 拿 大	243	3211	45	69.3~72.12	96	67~74
波 太 基 山	加 拿 大	183	4370	29	65.5~67.9	78	62.4~68.9
契 伏 尔	哥 伦 比 亚	237	1080	34	72.12~75.9	62	
涅 洛 维 尔	美 国	236	5964	46	64.1~67.10	72	
哈 桑 · 乌 古 鲁	土 耳 其	175	960	42	75.1~78.6	60	74.1~78.12
岩 屋	日 本	127.5	578	32	73.3~75.1	42	73.9~76.3
九 头 龙	日 本	128	630	28	65.7~67.11	36	65.5~68.5
特 门 加 尔	马 来 西 亚	115	448	24	75.8~77.7	46	74.2~77.12
万 昭 宁	泰 国	140	1210	29	76.1~78.5	60	74.7~79.6

此外, 和混凝土坝相比, 堆石坝的施工设备也是比较单一的。

堆石坝迅速发展的第四个原因是由于它的安全性。这种坝有良好的抗震性。目前在地震区修建的高堆石坝已有50座以上, 其中设防烈度在8度以上的21座, 少数达9~12度

(参见表2-2)。有几座坝,如墨西哥的英菲尔尼罗坝1979年经受一次强地震,坝顶地震加速度达0.35g,坝顶最大沉降仅13cm,有少量纵缝都在坝顶上部8m范围内,基本不影响坝的正常运行。其他如日本御母衣坝、美国渥洛维尔坝都曾经受过6~8度地震考验,情况基本良好。后者经美国加州水利资源局的研究(耗资190万美元,历时3年半),认为即使发生比1975年8月的5.7级更大的地震,坝也是安全的^[8]。墨西哥契柯森堆石坝,高245m,位于两岸岸坡为70~80度的峡谷中,设计洪水17400m³/s。设计中比较了拱坝和堆石坝两种坝型,从坝址地形看更适宜于建造拱坝。但由于坝址位于强地震区,附近又有大断层,在地震时可能发生错动。经过反复的方案比较以后,因而否定了拱坝,采用了堆石坝^[12]。美国加州奥本(Auburn)坝,高210m,已按选定的双曲拱坝施工,完成了坝基开挖和部分基础处理,花费近1.1亿美元。1975年当地发生一次5.7级地震后,经组织了专门小组研究地震影响,认为该处有可能发生里氏6.5级的地震,通过坝基的断层在地震时将有12.5cm的错动。这样的位移对于拱坝显然无法承受的。负责该坝设计施工的垦务局已决定放弃拱坝,拟改用堆石坝,认为只要对堆石坝过渡区设计得当,可以适应这样大的错动。

堆石坝抗渗漏的能力也比较强。土坝因渗漏管涌可以迅速溃决(例如1974年美国140m高的提堂土坝,从发现坝上小股渗漏到垮坝约只经5h)。混凝土坝也有因地基缺陷而骤然失事(如1959年法国马耳巴塞拱坝在几分钟内突然崩溃)。然而堆石坝,尤其是混凝土防渗面板堆石坝,即使渗漏量比较多(达到7m³/s)^[9]仍能及时进行抢险处理。

同时,对于堆石坝建设中过去认为难于处理的问题,如坝体沉陷,深覆盖层防渗等,现在都已有解决的办法。试验设备和计算手段的进步,已改变了过去大都凭经验设计的状态,而可以对坝内的应力、应变进行比较合理的静力和动力分析。由于设计理论和施工方法的不断改进,使工程技术人员对于堆石坝的安全可靠性具有更大的信心,因而堆石坝的建造数量日益增加,建坝的高度也不断增高,已超过混凝土坝,而达到300m以上的纪录^[10]。

当然,堆石坝也存在一些缺点。首先,它和土坝一样,对溢洪道的泄洪能力要求比较高,溢洪设施在造价中占的比重比较大。其次是施工导流要求也较高,堆石坝虽它有一定的临时过水能力,但不能像混凝土坝那样,可以在施工期利用坝体缺口或底孔导流过水。

表 1-6

工 程	国 家	坝 高 (m)	导 流 流 量 (m ³ /s)	导流隧洞尺寸 (m)
买 卡	加 拿 大	242	4250	2-φ13.7
波 太 基 山	加 拿 大	183	7050	3-φ14.6
契 柯 森	墨 西 哥	245	4500	1-8×7 2-13×13
阿 利 西 河 口	巴 西	156	6000	2-φ12
福 纳 斯	巴 西	127	6500	2-φ15
努 列 克	苏 联	300	3200	3-103m ²
卡 列 姆	苏 联	126	—	400m ²

尤其在峡谷、高坝、大流量的情况下，要解决导流问题，往往先需要打大断面的隧洞（见表1-6），有时会在工期上、造价上限制堆石坝的选用。

此外，堆石坝所用的材料——土和石料——是千差万别，因地而异的，需要进行比较大量而细致的勘探、试验和研究工作，包括室内、野外和施工试验，以及施工期的现场质量控制和观测，特别是防渗体的设计和施工，更为重要。这些工作的好坏，往往对工程的进度、造价、质量有很大的影响。

第四节 堆石坝在我国的适用性

上述对国际上堆石坝发展原因的分析，同样也适用于我国。但是，我国水利水电工程中，采用堆石坝的不多，高于100m者仅三座，石头河土石坝最大坝高114m，鲁布革堆石坝最大坝高103.5m，碧口堆石坝最大坝高101m。过去我国堆石坝采用较少，有其主客观上的原因，如：缺少大型堆石坝施工所需的成套设备；很多高坝是修建在洪水流量较大的大江大河上，泄洪、导流流量大；我国水泥的价格与国际市场价格比相对便宜；缺乏高堆石坝设计、施工经验，而对混凝土坝的设计施工经验相对较为成熟，并拥有成龙配套、有一定程度的机械化施工设备。近年来，随着改革和开放政策的实施，中外技术交流的增多，在水利水电工程建设中，对坝型、坝址的选择，尽量采用堆石坝的观念已日益为水利水电建设者所接受。如高101m的鲁布格粘土心墙堆石坝及多座混凝土面板堆石坝正在施工；高180m的天生桥一级堆石坝正在设计，并已列入“七·五”计划；初步设计已经审查的堵河潘口水电站，其设计方案为面板堆石坝；高220m的龙滩水电站及高180m的瀑布沟水电站，正在研究堆石坝方案。推广采用堆石坝，在我国正处于方兴未艾的发展阶段。

首先，随着我国现代化建设的发展，水电站的建设逐渐向腹地纵深拓展，水资源丰富的红水河和拥有巨大水力资源的长江中上游干支流——金沙江、雅鲁江、大渡河、岷江的开发，已经在进行或即将提到议事日程上来。特别是长江中上游干支流河道，覆盖层深厚，地处偏远，交通不便，采用堆石坝可以简化基础处理工程，有利于就地取材减少建材运输量，还可节约供应日趋紧张的三材，虽然洪水流量大，只要选择适宜的地形条件，布置好泄洪、导流设置，完全有条件优先选用堆石坝。

其次，就建筑材料而言，据有关统计^①，我国采用混凝土坝型的大型水电站的三材平均耗用量：钢材为0.06t/kW；木材为0.17m³/kW；水泥为0.58t/kW。如今后每年水电站投产以150~200万kW计，且都采用混凝土坝，则每年的三材耗用量为：钢材9~12万t；木材26~34万m³；水泥87~116万t。这是一个巨额的数量，特别是经济建设蓬勃发展，各行各业的建设均需要大量三材，采用就地取材的堆石坝，对节约三材，具有重要意义。另外，随着改革、开放，我国过去三材单价偏低的情况已有改变，逐步和国际价格靠拢，这几年三材单价有较大幅度上升，采用堆石坝更具有现实的经济意义。

最后，就堆石坝的施工而言，80年代以前，我国缺乏堆石坝的设计经验以及高效率施

① 《水电统计资料汇编(1949~1983年)》水利水电建设总局编，1983年12月。

工机械设备和施工经验,因而导致堆石坝的施工效率低、单价高、工期长,在设计方案比较中缺乏竞争力。这种情况近年来已有所变化,因而,采用堆石坝的优势已逐渐被认识。事实上,国外堆石坝施工中实际所用的设备并不很多,而且,很多仍采用常规的中型设备。如加拿大买卡(Mica)坝,总土石方量3240万 m^3 ,全部施工机械为275台;土耳其的哈桑·乌古鲁坝,土石方工程量约960万 m^3 ,所用筑坝机械共70台,施工期为三年半(见表1-5和图1-6),整个工程的施工机械共200台,价值2000万美元(1978年10月价格)。这与我国各水电工程局所拥有的固定资产和施工机械设备相比,并不算多,而且大部份设备我国已经能够自己制造或已有进口,目前主要的问题是通过工程实践使之成龙配套及积累施工生产和组织管理的经验,提高施工效率、掌握施工质量。

表 1-5

设备名称	规格	各部位所用台数			
		土心墙	反滤层	过渡层	堆石
挖掘机	1.5~4.0 m^3	1	1	4	1
装料机	2.0~7.0 m^3	2		2	1
推土机	180~410HP	2	2	3	5
振动碾	15 t	1			2
自卸车	22.5~45.4 t	20			20
平土机	125HP	1			
洒水车	5t	2			
合计		29		41	
工程量 (万 m^3)		112.5	84		738.5

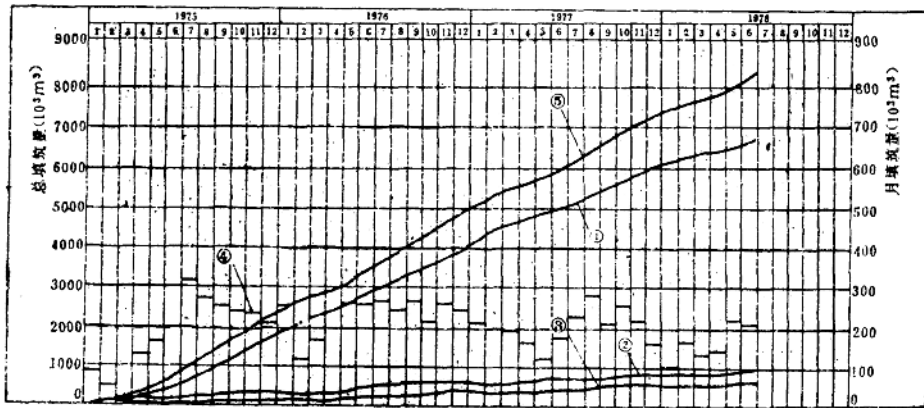


图 1-6 土耳其哈桑·乌古鲁坝填筑记录

①堆石; ②土心墙; ③反滤层; ④月填筑量; ⑤累计填筑量

我国早在50年代就曾建设抛填式堆石坝（如狮子滩），但进入60年代后，除少数定向爆破堆石坝（如南水、东川口等）外，很少修建。70年代以来，虽有高度超过百米的碧口堆石坝和石头河土石坝，并援建了阿尔巴尼的菲尔泽高土石坝，取得了一定的经验，但和国外水平及在坝工建设中所占比重相比，差距甚大。今后，随着改革和开放政策的进一步深入，体制改革的深化，施工招标承包制的普及和设计招标制的试行，水电站建设的设计和施工将进一步注重经济效果，促进堆石坝的技术经济优势的进一步发挥。

参 考 文 献

- [1] Handbook of Dam Engineering, 坝工手册(美国), 第七章, 1978.
- [2] Earth and Rockfill Dams, 土坝和堆石坝(印度), 1976.
- [3] Water power, 水力发电(英国), p-13, 1976.2.
- [4] Thirteenth Internotinal Congress on Large Dams, 十三届国际大坝会议论文集, 美国总报告, 1979.
- [5] Construcao Pesada, 大坝建设(巴西), 1978.12.
- [6] 亚洲, 远东地区大坝水库讨论会会议录.
- [7] 大坝(日本)第85期 21-36页, 1978.
- [8] Engineering News Record, 工程新闻记录(美国), 1979, 4.26.
- [9] 最新填筑坝工学(日本), 1972.
- [10] Каменно-Земляные Плотины, 土石坝(苏联), 1977.
- [11] 加拿大水电工程技术资料汇编, 1977.
- [12] Presas De Tierra y Enrocamiento, 土石坝(墨西哥), 1975.
- [13] Large Dam Engineering, 大坝工程(澳大利亚), 1976.

第二章 型式和布置

第一节 型式

根据防渗体的不同，堆石坝可以分为土质和非土质防渗墙两种。

土质防渗墙堆石坝（图2-1）是最常见的一种坝型，坝的高度已达到300m以上。防渗墙的位置可以从平行于坝的上游面，一直变化到垂直地位于坝的中央。一般可分为心墙式、斜墙式、斜心墙式。

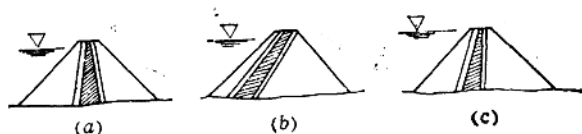


图 2-1 土质防渗墙堆石坝
(a)心墙式；(b)斜墙式；(c)斜心墙式

非土质防渗墙堆石坝（图2-2），包括：混凝土防渗墙，沥青混凝土防渗墙，塑料防渗墙，钢板防渗墙和木板防渗墙。混凝土防渗墙已在156m高的坝上采用；沥青混凝土防渗墙已在107m高坝上采用。其他常用在低坝或中等高度的坝上。非土质防渗墙的位置也可分为面板式和心墙式两种。但是绝大多数现代建造的坝都用面板式，只有沥青混凝土和钢板防渗墙仍有继续采用心墙式的。

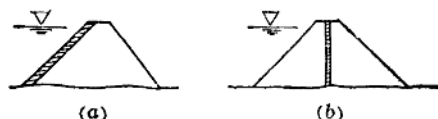


图 2-2 非土质防渗墙堆石坝
(a)面板式；(b)心墙式

据统计，在188座80m高以上的堆石坝中，有土斜墙坝18座，土心墙坝100座，土斜心墙坝43座。混凝土面板坝21座。沥青混凝土防渗墙坝6座。

(1) 土斜墙堆石坝 早期（1940~1955年）抛填式堆石坝广泛采用土斜墙，其优点是：a) 堆石体（占坝体大部分）可以先施工，受气候影响较小，与防渗墙的施工干扰少，并有利于堆石在防渗墙施工前完成初期沉陷（堆石体上游坡陡于1:1.3时，仍要同时施工，如日本御母衣坝）；b) 坝的稳定性较高，墙后整个堆石体对坝的稳定都起作用；c) 坝体传给地基的压力比较均匀；d) 分期施工方便，第一期工程量少。斜墙的尺寸可以较薄，如美国的南塔哈拉坝（Nantahala），坝高80m，因当地缺少不透水料，斜墙顶厚（垂直坡面）4m，底厚仅8.85m，见图1-3。其他如美国勃朗利坝（图2-3），加拿