

新型石渣坝

——粗粒土筑坝的理论与实践

四川大学 屈智炯 何昌荣 编著
刘双光 胡德金



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

新型石渣坝

——粗粒土筑坝的理论与实践

四川大学 屈智炯 何昌荣 编著
刘双光 胡德金



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

新型石渣坝: 粗粒土筑坝的理论与实践/屈智炯等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2002

ISBN 7-5084-1252-4

I. 新… II. 屈… III. 石渣-筑坝-研究 IV. TV541

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 084313 号

书 名	新型石渣坝——粗粒土筑坝的理论与实践
作 者	四川大学 屈智炯 何昌荣 刘双光 胡德金 编著
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: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 350 千字
版 次	2002 年 12 月第一版 2002 年 12 月第一次印刷
印 数	0001—3100 册
定 价	33.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

QIAN YAN

新型石渣坝主要是以粗粒土填筑防渗体和坝壳而成的土石坝，它具有就地取材、少占农田、抗震力强、施工时受雨季影响小、工程造价低、施工快速等优点，是当前推广的一种坝型。

本书主要根据我国粗粒土填筑石渣坝的科研成果、建设经验，以及我们多年来的调查、试验研究成果编著而成的。早年我们结合教学、科研工作，实地调查了山东卧虎山水库，陕西汤峪水库，甘肃碧口电站，湖北白莲河水库、葛洲坝工程，广西澄碧河水库，江西柘林水库，四川三岔水库等 13 个石渣坝及密云、官厅、冯家山、石砭峪等若干土石坝。同时，受水利部门的委托，为配合水利电力部修订《土工试验操作规程》、《碾压式土石坝设计规范》，1974 年开始对四川地区简阳石盘水库、南充升钟水库、剑阁五·一水库等 6 座水库的砂岩、粘土岩的筑坝特性做了比较系统的试验研究，探索了修造石渣坝的一些技术问题。同时在参加国家“六五”、“七五”及“八五”高土石坝关键技术攻关和自然科学基金项目中，对西南地区云南鲁布革电站、天生桥电站，贵州洪家渡电站及四川瀑布沟电站等土石坝开展了粗粒土作防渗体和坝壳材料的系统深入的试验研究。本书还介绍了国外建筑土石坝的理论和实践。

全书共分十章，分别介绍粗粒土筑坝的发展，粗粒土的级配和压实特性，粗粒土的渗透性和渗透变形，粗粒土的本构模型，石渣坝的渗流计算、变形计算和稳定分析，石渣坝设计，

石渣坝的施工质量、事故实例分析和安全指南等。书中着重一些基本概念和机理的阐述,如对粗粒土的压实标准的确定、粗粒土的防渗效果等,同时对设计中有关实际问题,如粗粒土适宜反滤层的选择、坝体过渡区的设计等进行分析和评述。书中还列举了多个计算和分析实例。本书编写时尽量与土力学的理论和《土工试验操作规程》、《碾压式土石坝设计规范》、《混凝土面板堆石坝设计规范》等新规范紧密结合,使本书具有较强系统性、理论基础和实用性,从而能在水利水电工程和其他有关工程建筑中得到应用和推广。

本书由四川大学屈智炯、何昌荣、刘双光和胡德金编著。由屈智炯统稿。在本书编写过程中,得到了四川大学水电学院岩土教研室和学院领导的大力支持,谨向他们表示深切的谢意。同时,向支持我们科研的昆明水利水电勘测设计研究院、贵阳水利水电勘测设计研究院、成都水利水电勘测设计研究院、水利部水利水电规划总院、水利水电科学研究院、黄河水利委员会勘测设计研究院、清华大学水利系等单位 and 参加科研工作的屈智炯、刘双光、刘峻、刘开明、刘昌贵、肖晓军、张远清和研究生曾以宁、蒙进、保华富、黄英、张斌、张智、何迎红、李创迹和徐广峰等表示衷心的感谢。

由于作者的水平有限,书中难免有不妥和错误之处,希望读者多加指正。

作 者

2002年10月

内 容 提 要

本书是一本专门讲述粗粒土筑坝特性和本构模型以及石渣坝的设计和施工等内容的著作。全书共分十章, 主要内容包括粗粒土筑坝的发展简述, 粗粒土的级配和压实特性, 粗粒土的渗透特性, 粗粒土的力学特性, 粗粒土的本构模型, 石渣坝的渗流计算, 石渣坝的变形计算, 石渣坝的稳定分析, 石渣坝的设计, 石渣坝的施工质量、事故和安全指南等。为便于应用, 有关部分还附有计算和分析的实例。

本书可供从事粗粒土筑坝特性和本构模型的研究人员和石渣坝设计人员参考, 也可供大专院校有关专业的师生使用。

目 录

前 言

第一章 粗粒土筑坝的发展	1
第一节 概述	1
第二节 坝壳选用材料的进展	1
第三节 防渗体选用材料的进展	5
第四节 新型石渣坝的特点和推广	8
第二章 粗粒土的级配和压实特性	10
第一节 概述	10
第二节 粗粒土的颗粒级配	10
第三节 粗粒土的压实特性	20
第四节 粘性粗粒土的压实特性	26
第三章 粗粒土的渗透特性	30
第一节 概述	30
第二节 试验仪器和方法简述	30
第三节 无粘性粗粒土的渗透特性	32
第四节 粘性粗粒土的渗透特性	37
第四章 粗粒土的力学特性	44
第一节 概述	44
第二节 试验仪器和方法	44
第三节 无粘性粗粒土的力学性质	46
第四节 粘性粗粒土的力学特性	61
第五章 粗粒土的本构模型	70
第一节 概述	70
第二节 土的本构模型发展评述	70
第三节 成都科大的简化 $K-G$ 模型	77
第四节 成都科大的修正 $K-G$ 模型	84
第六章 石渣坝的渗流计算	90
第一节 概述	90

第二节	石渣坝的渗流计算	90
第三节	水位降落时坝体的浸润线	99
第四节	石渣坝的渗透稳定计算	104
第七章	石渣坝的变形计算	107
第一节	概述	107
第二节	单向压缩分层总和法	110
第三节	判断坝体裂缝的近似法	126
第四节	坝体裂缝估算的有限元法	129
第八章	石渣坝的稳定分析	137
第一节	概述	137
第二节	圆弧滑动(条分)法	137
第三节	非圆弧滑动法	151
第四节	坝坡稳定的安全分析	157
第九章	石渣坝的设计	160
第一节	概述	160
第二节	坝型比较和选择	160
第三节	坝体横断面和分区设计	168
第四节	石渣坝的渗流控制	186
第十章	石渣坝的施工质量、事故和安全指南	203
第一节	概述	203
第二节	石渣坝的施工质量	203
第三节	裂缝分析、防止和加固	214
第四节	石渣坝的工程安全指南	225
参考文献		227

第一章 粗粒土筑坝的发展

第一节 概 述

土石坝是利用当地天然材料修建的挡水建筑物，这些材料的工程性质以及能否针对其质量和数量的具体情况合理利用，直接影响坝的安全和造价。过去，土石坝对防渗材料和坝壳材料的要求，都是比较严格的。近 30 年来，随着土工试验技术，特别是大型土工试验仪器的发展以及震动平碾的使用，对坝料的限制有较多的突破和放宽，因而国内外在筑坝材料选择方面出现了一些新的趋向，即坝壳和防渗体都可采用粗粒土，同时成功地修建了许多由不同类型粗粒土填筑的土石坝。

第二节 坝壳选用材料的进展

长期以来人们喜欢选用坚硬的、大块石料作为土石坝的坝壳料。但客观情况常常是坝址附近只有大量的软弱劣质岩石或从枢纽建筑物中开挖出来的废弃石渣。1958 年以后，我国山东、广西、湖北地区采用开挖溢洪道的石渣或山坡风化岩渣作坝壳材料。自 1974 年开始，我们对四川地区石盘水库、升钟水库等（图 1-1、图 1-2）的砂岩、粘土岩石渣料的筑坝特性在大型土工试验设备中进行了系统的试验，并调查探索国内石渣筑坝的若干技术问题，同时对计算模型和分析方法作了研究。经过多年的实践，国内已成功修建了多座石渣坝，见表 1-1。

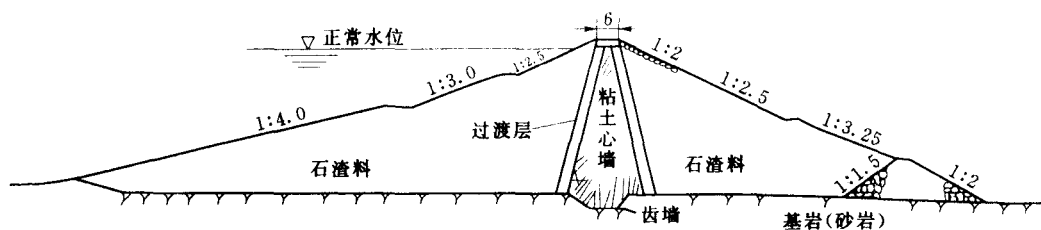


图 1-1 石盘粘土心样石渣坝

从表 1-1 可以看出，无论是岩浆岩、沉积岩还是变质岩的新鲜和风化的石渣，都是筑坝的良好材料，并且广泛填筑于较高的坝中，其中以碧口坝为最高，高度达到 101.0m，如图 1-3 所示。

国外也于 1958 年开始采用石渣筑坝，如苏格兰高溪坝曾利用经过处理的隧洞废渣填筑。其后许多国家曾利用振动压实石渣填筑坝体，促进了石渣坝的发展，见表 1-2。

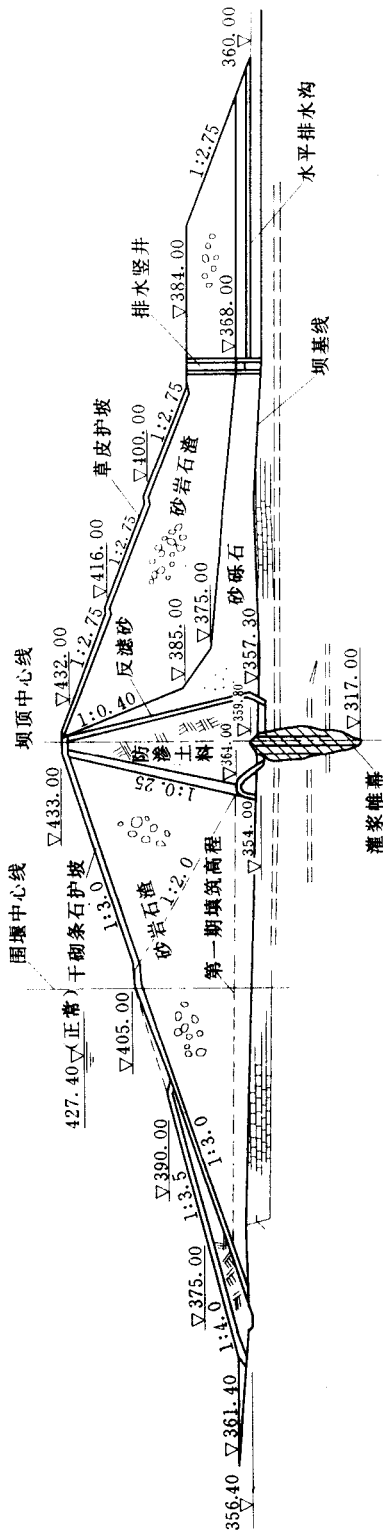


图 1-2 升钟水库大坝剖面图(高程单位:m,尺寸单位:cm)

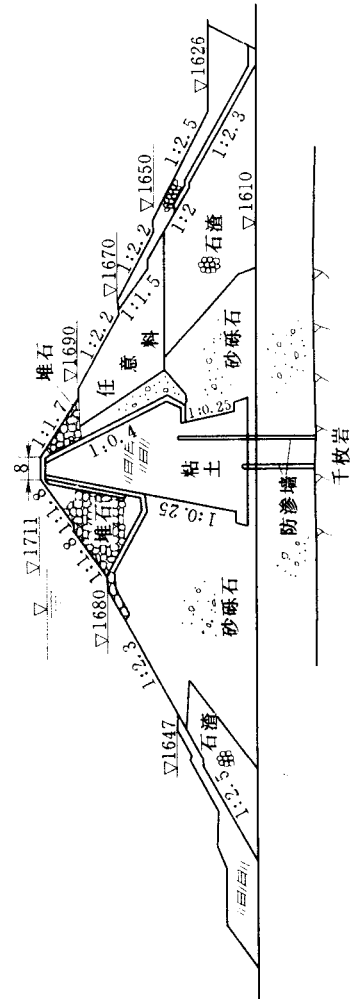


图 1-3 碧口土石坝

表 1-1 国内石渣料筑坝举例 (坝高 30m 以上)

石渣坝名称及地点	建筑时间	最大坝高 (m)	坝 型	工程量 (万 m ³)	坝 体 组 成
1. 卧虎山 (山东)	1959	46	宽心墙	208.4	坝壳为含石土、页岩碎屑
2. 鸭河口 (河南)	1960	31.0	心 墙	484	坝壳下游干燥部分为风化岩块, 其他为砂砾
3. 白莲河 (湖北)	1959~1960	69.0		131.4	上、下游坝壳为风化、半风化岩块
4. 青狮滩 (广西)	1958~1961	59.0			上、下游坝壳为风化、半风化岩块
5. 岗 南 (河北)	1958~1960	62.0	斜 墙	1070	下游干坡为风化石料
6. 黄 材 (湖南)	1963	60.5	心 墙	170	坝壳为土夹风化板、页岩块
7. 富 水 (湖北)	1964	45.0		464	风化页岩代替料
8. 漳 河 (湖北)	1965	64.5	厚斜墙	500	下游干坡为风化粘土岩石渣
9. 澄碧河 (广西)	1958~1966	68.5	心 墙	400	上、下游坝壳为风化石料
10. 毛尖山 (广西)	1958~1965	72.0			上、下游坝壳为风化石料
11. 柘林 (江西)	1970~1972	62.0		380	上、下游坝壳为石英砂岩、板岩石渣
12. 汤峪 (陕西)	1972	41.0	斜 墙	44	坝壳为二云母石英片岩石渣
13. 张家岩 (四川)	1970~1973	52.0	厚斜墙	60	坝壳为含石土、页岩石渣
14. 碧口 (甘肃)	1969~1975	101.0	心 墙	395	坝壳下部为砂卵石、干枚岩石渣, 上部为凝灰岩石渣、堆石
15. 三岔 (四川)	1976	35.5	斜 墙	182	坝壳为砂页岩石渣
16. 石盘 (四川)	1978	43.5	心 墙	83.3	坝壳为砂岩石渣

表 1-2

国外用风化岩、软岩等劣质石料的堆石坝

坝 名	国 别	坝 型	坝高 (m)	建成时间	岩 石 类 别	施工方法
契伏坝	哥伦比亚	斜心墙 堆石坝	237	1974	溢洪道开挖的石英岩、泥质板岩、千枚岩	薄层碾压
卡尔台尔	美 国	心墙堆石坝	141	1969	外坝壳为石英, 内坝壳为泥质板岩及千枚岩	薄层碾压
萨买尔 斯威尔	美 国	斜心墙 堆石坝	119	1966	中等硬度细粒砂岩和页岩, 坝壳由内向外分三个区, $D_{\max}$ 分别为 22.5、45、60cm	薄层碾压
鱼梁滩	日 本	心墙堆石坝	115	1965	粘板岩、砂岩、开挖石渣	薄层碾压
濑 户	日 本		110.5	1980	砂岩、页岩及砂页岩互层	薄层碾压
水 窑	日 本		105	1969	砂岩、页岩开挖石渣	薄层碾压
里恩拜恩	英 国		90	1971	泥 岩	薄层碾压
拜 雷	美 国	混凝土 面板堆石坝	96	1979	溢洪道开挖的砂页岩	薄层碾压
大 雪	日 本	心墙堆石坝	87	1975	粘板岩、开挖石渣, $D_{\max}=800\text{mm}$	薄层碾压
寺 内	日 本		83	1977	片岩, $D_{\max}=1500\text{mm}$	薄层碾压
安 东	韩 国		83	1976	风化花岗岩	
深 山	日 本	沥青混凝土 面板堆石坝	76	1974	溶结凝灰岩	
本 泽	日 本	心墙堆石坝	73	1968	砂岩、粘板岩、卵石	薄层碾压
斯喀门达	英 国	斜墙坝	73	1969	石灰纪砂岩	薄层碾压

从表 1-2 可以看出, 高度 100m 以上的石渣筑坝数量增加较快, 1972 年竣工的加拿大的迈卡坝高度达到 244m, 如图 1-4 所示。

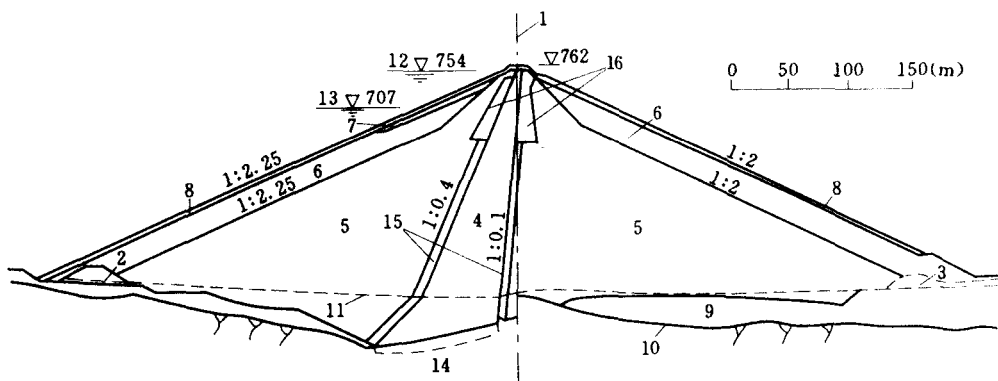


图 1-4 迈卡土石坝

1—坝轴线; 2—上游围堰; 3—下游围堰; 4—冰碛土心墙; 5—砂和砾石内坝壳; 6—砂石或堆石外坝壳; 7—卵石、块石抛石区; 8—护面层; 9—河床冲积层; 10—岩石面; 11—原河床面; 12—水库正常水位; 13—最低消落水位; 14—心墙加宽下切部分; 15—过渡区, 厚 6m, 砂和砾石; 16—心墙支撑区, 砂和砾石或块石

为推广此种新坝型, 1981 年我们编写了《石渣坝》^①, 该书的出版, 对国内石渣筑坝的

① 屈智炯、刘双光、**刘峻**、陈代录编著, 冯国栋主审, 四川人民出版社出版。

发展起到了很好的促进作用。

第三节 防渗体选用材料的进展

一、国外的研究和实践

土石坝、石渣坝的防渗材料，以往多选用纯细粒粘土，其原因是粘土塑性好，能适应坝体的变形，而且防渗抗冲能力强。但实际上，有些坝址近处没有细粒粘土，要获得细粒粘土，要花巨大的运费从远处开采。近年来一些研究者指出，任何细粒粘土在不利的水力条件下都可能会有冲蚀，单纯依靠细粒粘土来抵抗集中渗流的管涌冲蚀，显然是不安全的。目前认为防渗心墙的主要作用是防渗，防止渗透变形或管涌冲蚀的任务，则应该设置反滤层来解决。20 世纪 50 年代以来，国外一些缺少或没有细粒粘土的地区已成功建成许多土石坝、石渣坝，其防渗体由渗透系数小于 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 的砾石土、风化料及冰碛土等粗粒土修筑（见表 1-3、表 1-4、表 1-5），其中美国的新美浓斜心墙坝，坝高达到 190m（见图 1-5），加拿大的迈卡心墙坝，坝高 244m。从以上的研究成果和成功实践可以看出，土石坝、石渣坝的防渗材料一定要选用纯细粒粘土的观点是不全面的。虽然粗粒土属于无粘性、少粘性的，容易受到集中渗流的冲蚀，但国外修建土石坝、石渣坝的经验说明，粗粒土不但填筑防渗体是可行的，而且还有下列优点：①由于粗粒土可加大防渗体的密实度和刚度，减少坝壳防渗体之间的不均匀沉陷，有利于防渗体裂缝及随后冲刷的防止；②粗粒土本身承载力高，排水性能也好，更适于重型机械作业；③可以减少含水量处理的困难，便于施工控制。

表 1-3 国外土石坝砾质土防渗体的实例

坝 名	国 名	坝 型	坝高 (m)	粗粒 (>5mm) 含量 P_5 (%)		最大粒径 (mm)
				范围值	平 均	
鱼梁滩	日 本	心 墙	115	73~40 54~35	47	
谢尔庞桑	法 国		123.5		54	75% d_{90}
郭兴能	瑞 士		155		55	75% d_{90}
寒泥山	法 国		120	52~65		150
盖伯奇	奥地利		153	37~64	50	80
斯维福特溪	美 国		153		50	100
特利尼梯		厚心墙	122		64	75
胡特优维	挪 威	心 墙	93	40~60		约 200
迈 卡	加拿大		244	10~50, 一般 25~47.5	35	200
布利安尼	英 国		91 (111)	25~40, 设计允许 50		150
希尔思溪	美 国		104	60~70		100
齐厘尔	哥伦比亚	斜心墙	237	55%大于 200 号筛		150
菲尔泽	阿尔巴尼亚	心 墙	165.6	25~40		60

表 1-4

利用风化料、软岩作防渗料的土石坝

坝 名	国 家	坝 型	坝 高 (m)	建成时间	防 渗 料
新美浓	美 国	斜心墙堆石坝	190.5	1979	溢洪道开挖的风化岩
特里尼提		厚心墙土坝	164	1962	基础开挖的风化安山变质岩经羊足碾压实后粉碎为粉质砂土
库加尔		斜心墙堆石坝	158	1963	滑石和风华岩
巴斯康蒂		心墙土坝	143	—	土碎石块严重风化岩和坝基及前池的开挖料
曾 文	中国台湾	厚心墙土坝	138.5	1973	溢洪道开挖的砂岩、页岩
比阿斯	印 度	心墙土坝	134.2	1973	砂岩和粘土页岩的混合物
九头龙	日 本	心墙堆石坝	128	1968	溢洪道开挖的风化页岩、砂岩、粘板岩、砾岩
拉姆刚加	印 度	心墙土坝	126	—	砂页岩页岩: $<0.005\text{mm}$, 20%; $<0.074\text{mm}$, 80% 砂岩: $<0.005\text{mm}$, 9%; $<0.074\text{mm}$, 44%
金字塔坝	美 国		119	1974	风化页岩
鱼梁滩	日 本	心墙堆石坝	115	1965	砂岩、页岩、风化粘板岩及山麓堆积料
滩 户			111	1978	页岩为主夹有一部分砂岩的风化层
水 洼			105	1969	页岩风化岩和风华残积土
大 雪			87	1975	风化粘板岩与湖积细粒土混合
寺 内			83	1977	风化片岩
安 东	韩 国		83	1976	风化花岗岩

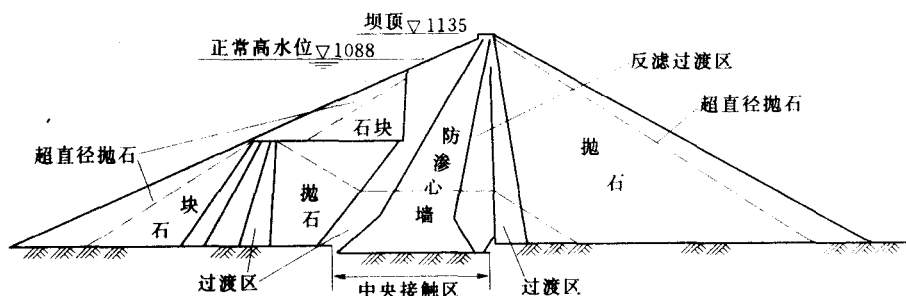


图 1-5 美国新美浓大坝典型剖面图

二、国内的研究和实践

国内对粗粒土如砾石土、风化和冰碛土填筑防渗体的研究开展得比较晚，1967年修筑完成的昭平台水库的情况表明，砾质土能完全符合筑坝的防渗材料的要求。80年代以来，结合天生桥、鲁布革和瀑布沟工程，国内开展了对风化和冰碛土填筑防渗体的试验研究，同时我们还重点研究了这些粗粒土的应力—应变—强度特性和计算模型，国内在粗粒土填筑防渗体方面取得了不少研究成果，并在一些工程中得到了应用。例如风化料填筑防渗体的研究在鲁布革工程中首先得到应用，该坝高达104m（见图1-6），1989年建成，投入运行后效果良好。又如瀑布沟工程经过多次论证和咨询，最后采用了宽级配的冰碛土（砾石土）

表 1-5 国外用冰碛土作防渗体的高土石坝实例 (坝高 70m 以上)

名 称	国 别	建筑时间	坝高 (m)	防渗体型式及尺寸	下游反滤层的特点
泥 山 (Mud Mountain)	美 国	1939~1941	130	心 墙 上、下游 1:0.3	开始过渡层, 后来加反滤层
谢尔邦松 (Serre Ponson)	法 国	1957~1960	122	心 墙 上、下游 1:0.2	反滤层 (采用较细料组成)
特兰斯赖特 (Trongslet)	瑞 典	1955~1960	120	斜 墙	设三层细、中、粗反滤层
波太基山 (Toreage mountain)	加拿大	1963~1967	183	心 墙 上游 1:1, 下游 1:0.1	级配恰当的反滤层
买苏尔 (Messaure)	瑞 典	1957~1962	101	心 墙 上、下游 1:0.135	冰碛砂组成过渡区
马特马克 (Mattmark)	瑞 士	1962~1967	120	斜 墙	用 8mm 以上冲积层作反滤
马尔莫列拉		1951~1954	70	心 墙	用半透水料填筑过渡区
海特龙维特 (Hyttjuvet)	挪 威	1964~1965	93	狭窄直立心墙	过渡段
昔腊瓦尔 (Seitevare)	瑞 典	1962~1967	107	心 墙	设有反滤层和过渡段
格柏奇 (Gepatsch)	奥地利	1961~1965	153	心 墙 上、下游 1:0.125	混合粒径砂卵石过渡层
乌塔特—4 (Qutardes—4)	加拿大	1965~1968	122	心 墙 上游 1:0.5, 下游 1:0.28	冰碛天然砂卵石过渡层
麦尼克—8 (Manic—8)		1963~1973	108	心 墙	过渡段
麦 卡 (Mica)		1965~1973	245	斜心墙 上游 1:0.4, 下游 1:0.3	密实砂砾石组成厚过渡层
斯伐提范 (Svartevatn)	挪 威	1972~1980	125	心墙 (底宽 25m)	细料、砾石组成反滤层
拉格兰德—2 (Lagrande—2)	加拿大	1973~1980	160	斜心墙 (下游直立)	反滤层和砂卵石过渡层
下诺奇 (Lower Noten)		1967~1971	123.5	心墙 (底/高=0.64)	级配好砂卵过渡层
维达尔斯瓦丁 (Viddalsvatn)	挪 威	1970~1971	75	斜心墙	筛分洞挖料的反滤层

作防渗体材料, 该坝高 190.0m (见图 1-7)。为有限元法和计算模型 (包括我们提出的模型) 在设计中的推广应用, 我们编写了《土的塑性力学》(1987), 该书被国内多所高校选作研究生教材。1986 年我们提出的简化 $K-G$ 模型和后来修改完善的粗粒土修正 $K-G$ 模型, 通过在鲁布革、洪家渡、天生桥等工程中的应用, 表明能较好地应用于土石坝工程的有限元非线性分析。

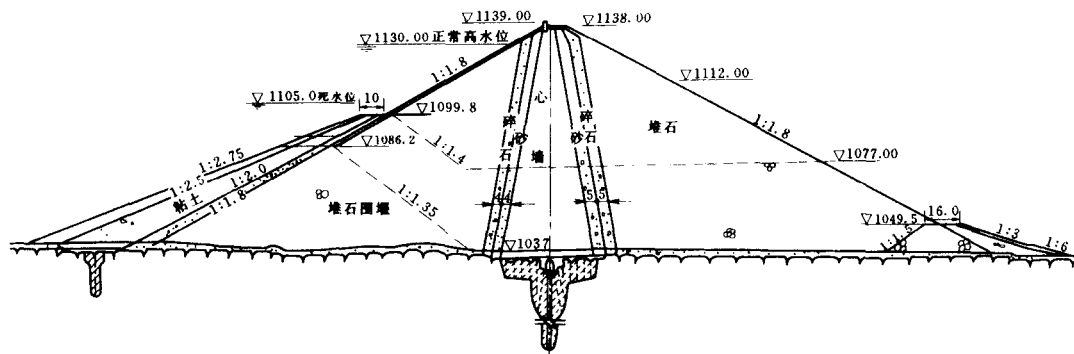


图 1-6 鲁布革心墙土石坝剖面图

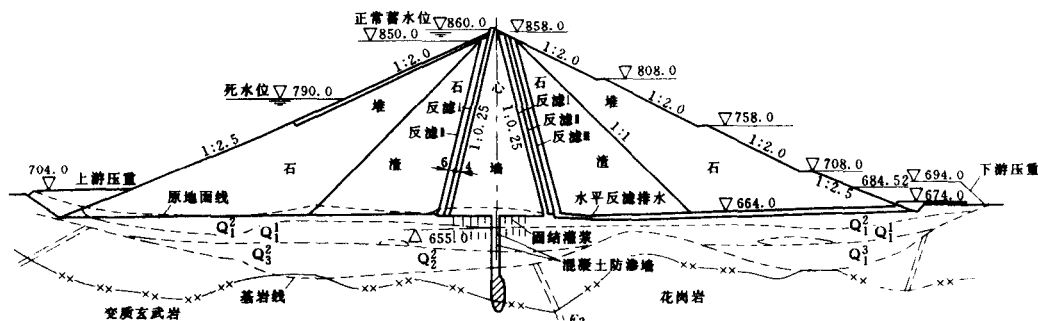


图 1-7 瀑布沟冰碛土心墙堆石坝剖面图

第四节 新型石渣坝的特点和推广

粗粒土填筑的石渣坝近年来之所以能在国内外得到迅速发展,除它具有一般土石坝就地取材、造价经济、受地质限制小、抗震性能好等优点外,还在于它有下列的特点:

(1) 新型石渣坝能够充分利用从建筑物中开挖的各种石渣。过去,对这些材料的特性认识不够,常将其废弃不准上坝;随着土工试验技术的发展,施工方法的改变,人们在实践中逐渐地掌握其特性,论证了软弱岩石石渣填筑坝壳的可行性。另外,新型石渣坝采用砾质土、风化和冰碛土等粗粒土代替细粒粘土作防渗体材料也是可行的。总之,各种石料石渣、砾质土、风化和冰碛土的试验研究和坝工实践表明:这些粗粒土原则上都可以上坝填筑坝壳和防渗体,从而把这些近处材料充分利用起来,扩大了料源,真正做到了就地取材,降低了造价。

(2) 重型机械其中特别是振动碾压设备的使用,有力促进了石渣坝的发展。修建石渣坝采用重型平碾或振动碾,可根本改善粗粒土的压实条件和坝面上升速度,同时也保证了施工压实质量;加之,可在坝址附近就地大规模开采坝壳和防渗体选用的粗粒土。如果道路运输系统布置合理,即使在半机械化和人力施工条件下,也能达到较高的上坝强度。这对于缩短工期,提高工效具有非常重要的意义。

(3) 粗粒土筑坝, 受雨季的影响小, 因而对多雨地区尤为有利。过去采用细粒粘土筑防渗体的石渣坝受雨季影响较大, 降雨限制了坝面升高速度, 甚至造成雨季停工。如采用粗粒土作防渗体的新型石渣坝, 既可少占农田, 又可在降雨期大量填筑整个坝体, 加快了施工进度, 降低了造价。