



TUSHIBA GONGCHENG

# 土石坝工程

● 钟家驹 编著

陕西科学技术出版社

# 土石坝工程

钟家驹 编著

陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

土石坝工程/钟家驹编著. —西安:陕西科学技术出版社,  
2008. 10

ISBN 978 - 7 - 5369 - 4539 - 5

I. 土... II. 钟... III. 土石坝—水利工程 IV. TV641

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 127597 号

---

**出版者** 陕西科学技术出版社  
西安北大街 131 号 邮编 710003  
电话(029)87211894 传真(029)87218236  
<http://www.snstp.com>

**发行者** 陕西科学技术出版社  
电话(029)87212206 87260001

**印刷** 陕西金和印务有限公司

**规格** 850mm × 1168mm 16 开本

**印张** 57.75 4 插页

**字数** 1400 千字

**版次** 2008 年 10 月第 1 版  
2008 年 10 月第 1 次印刷

**定价** 120.00 元

---

版权所有 翻印必究

# 自序



自幼受父亲的影响,1957年以第一志愿考入西安交通大学水利系河川枢纽及水电站建筑专业学习,1962年毕业进入陕西省水利电力勘测设计院工作至今。

家父钟泽球是陕西省水利厅的一名副总工程师,经常下乡出差,在家团聚的日子里,我和弟妹们就围坐在他的身旁,听他讲述农村、农业、农民、水库、渠道、田园、庄稼……一边呼吸着他身上保留着的农村特有的那种泥土芬芳的气息,一边品尝着带回来的城里少见的土特产食品,一边开始着我对水利事业的认识实习。那时我就知道什么小华山水库、冀家河水库、打虎潭水库、渭惠渠、泾惠渠、沔惠渠……假期里我还跟随父亲骑自行车考察泾、灞河、沔河,打虎潭水库和沔惠渠首,我看到灌区的庄稼黑油油、绿茵茵、挺拔旺盛;我看到旱地上的作物小苗疏稀稀、青淡淡,挣扎摇曳。

逐渐地在中学时代我就萌发并树立了要为之奋斗的理想,那就是:

心怀壮志愿终身宿住工棚足迹遍天下筑大坝锁蛟龙兴利灌溉溪水叮咚沃野千里香飘锦绣河山。

献身祖国命江河听从使唤高山把头低建电站辖雷公闪亮明珠机器轰鸣灯火万盏洒满春光人间。

积50年学习和设计实践经历,有的工程快则经过七、八年,有的工程周期长达20年,他们是:西安市供水工程——黑河金盆水利枢纽;冯家山、石头河除险加固设计与研究;黄石滩、涧峪陕西首批混凝土面板坝工程;西郊水库枢纽;陕西省第一座大面积使用复合土膜铺盖防渗的砂基坝——李家梁水库枢纽工程;新疆维吾尔自治区北疆原中苏边界的卡浪古尔水利枢纽工程;南疆地区昆仑山上的高峡平湖——下坂地水利枢纽工程;以及参与咨询的内蒙美岱水利枢纽;甘肃白龙江多儿水利枢纽;广东阳江核电站专用水库枢纽工程等十数座大、中型枢纽工程,这些工程大多经历过选坝、项目建议书、可研报告、初步设计、施工图等完整的设计阶段且大部分工程已经建成投入运行或即将建成。通过这些当地材料坝的设计和施工积累了一定的资料和经验,连同学习心得及笔记一同整理成文。其内容概况为三部分:一、国内外土石坝工程前沿水平和动态;二、设计理念和经验介绍;三、陕西院和我本人参与兴建的一批大中型水利枢纽设计,施工和运行经验。本书汇集了大量的图纸以工程师特有的语言形式,清晰的表达了工程结构的特性和型式。以此将献给陕西院建院50周年,以感

谢培养我和给我以实践机会的设计院,感谢以王建杰院长为首的院领导以及刘海江、焦世礼、米辉等同志,感谢他们为本书的顺利出版所给予的大力支持。献给年青的水利工程师和大专院校水利系的学子,给他们提供一个理论学习结合实践的资料和参考。同时也将此书献给为陕甘水利事业奋斗一生的我的父亲,以表达我对我的第一个专业启蒙老师深深的怀念!

陕西省水利电力勘察设计研究院

钟家驹

2005年10月



# 前 言

土石坝泛称当地材料坝即以坝址附近的当地土、石材料填筑而成的坝工建筑物,其背景为地质学、土力学理论的实践与发展,以及大型施工机具的问世和运用,使在合理的工期内能够完成大量土石方。从而促进了这一古老的被群众掌握的坝型和筑坝技术得以迅猛的发展,国外从20世纪40年代后100米级,200米级甚至300米级土石坝层出不穷,中国的土石坝在坝工建设总量中占95%左右,70年代我国首批百米级土石坝为甘肃白龙江上的碧口心墙坝,陕西石头河上的石头河水库心墙坝,坝高分别为101m及114m。开创了我国百米以上高土石坝的新纪元。水布垭面板堆石坝高233m。正在施工的云南澜沧江上糯扎渡水电站,设计心墙坝坝高261.5m。在“六·五”、“七·五”、“八·五”国家重点科技攻关项目中,都列入了高土石坝研究课题,结合具体工程,进行了系统的试验研究。国产重型施工机具的发展,也促进了高工土石坝建设,从而正在缩小我国与国际先进水平的差距。

当地材料坝的类型:

从施工方法上分有两种:

(1)水力冲填坝,或水中倒土筑坝,该方法筑坝多在砂壤土地区,如陕西省榆林地区红柳河流域、芦河流域,最大坝高可达七八十米,安全运用已达半个世纪以上。

(2)碾压式土石坝、碾压机械有羊足碾、气胎碾、凸块振动碾及振动平碾,碾压式土石坝坝高已超300米以上。

从防渗材料和坝壳材料的分区来说分3大类17种坝型,详见图0.1。

(1)0.1图中的(a)、(b)、(c)是均质坝的3种代表型式。(a)为数量最大的中小型水利工程、群众性水利运动中诞生的大量的型式。黏土、壤土均质土坝,死水位以上的上游护坡是需要的。(b)均质土坝带有排水带的坝型,排水型式有下游排水棱体式的,水平铺垫式的,烟囱排水带型式的等,排水带的作用是降低坝体浸润线,有利于坝坡稳定和采用更经济的设计断面。(c)粉砂、砂均质坝,由于该种筑坝材料可承受的渗透梯度较小。因此需较缓的下游坝坡,在当前人工防渗材料如人工合成土工膜的出现和使用,采用合成土工布作砂坝的防渗材料,大坝的下游坡比设计和常规均质坝一样为强度控制而非渗流控制。

(2)图0.1中的(d)、(e)…(k)、(l)、(m)等10种坝型为组合式土石坝,其特点为筑坝材料有更广泛的种类,除了含腐植质太多的土料而外,几乎所有的土石料都可用作筑坝,只要适当的配置在坝体的合理部位即可。一些不适宜作防渗体的土料,用一定的施工方法或加工处理后也可用作防渗料。丘陵山岗地区,壤土、砂质壤土储量丰富,可采用肥心墙、厚斜墙坝。在高山狭谷地带,石料丰富,且有坝基开挖,泄水建筑物开挖的大量石碴,多采用碾压堆石坝。土料较缺地区或多雨地区,或干旱地区,土料含水量较低,严寒冻土地区,宜采用薄心墙坝。采用铺盖防渗措施的坝多采用斜心墙坝。有水位骤降要求的水库宜采用上游坝壳为透水材料或设置水平排水带。

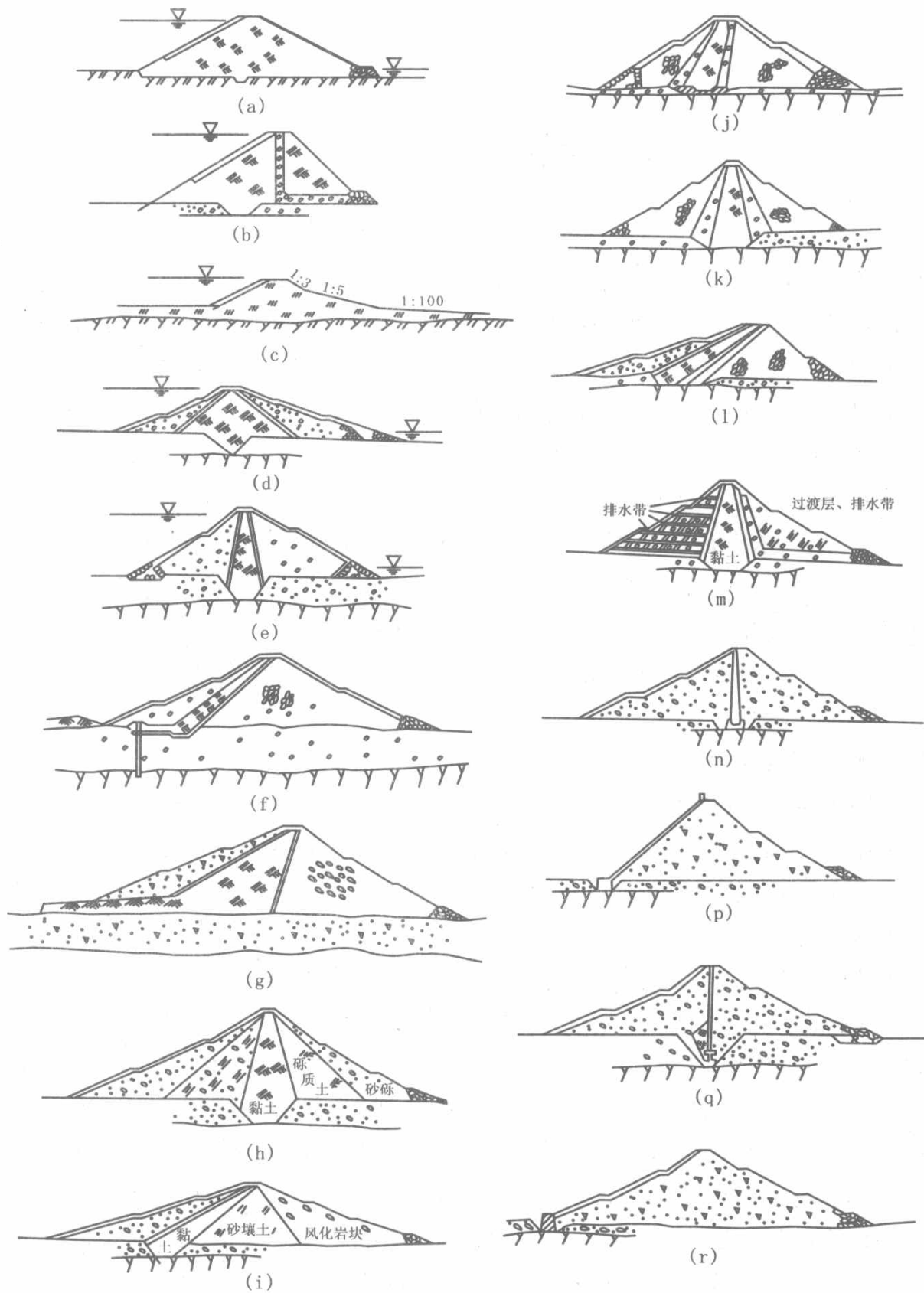


图 0.1 碾压式土坝和土石坝坝型

- (a) 黏土、壤土均质坝; (b) 有排水带的均质坝; (c) 粉土、粉砂、砂均质坝; (d) 黏土、壤土厚心墙坝;  
 (e) 黏土薄心墙坝; (f) 黏土薄斜墙坝; (g) 黏壤土厚斜墙坝; (h) 土心墙多种土质坝;  
 (i) 土斜墙多种土质坝; (j) 黏土斜心墙土石坝; (k) 土心墙土石坝; (l) 土斜墙土石坝;  
 (m) 有排水带的土石坝(坝壳为夹土堆或风化岩块); (n) 钢筋混凝土心墙坝; (p) 钢筋混凝土面板坝;  
 (q) 沥青渣油混凝土心墙坝; (r) 沥青渣油混凝土面板(或斜墙)坝

(3) 图 0.1 中的(h)、(p)、(g)、(r) 坝为刚性心墙或面板坝。筑坝的主体仍然是当地材料,而防渗材料多采用沥青混凝土,这种坝型的最大优点是不占耕地,不毁农田,对我国这样一个人口众多,耕地不多的国情来说,该种坝型 98% 以上的材料都是当地材料,同样具有一

定的优势。

值得说明的是,当地材料坝属非刚体结构,因此具有良好的抗震性能,据资料统计,智利1928年、1965年两次地震,三座尾矿坝溃决,造成较大伤亡。美国1925年、1954年两次大地震,有3座10余米高的低坝因碾压不密实,受灾后溃决。日本新泻地震,有7座小坝溃决。而20米以上的碾压密实的土石坝尚未发生过地震溃坝事故。我国解放后1970年云南通海大地震,震级7.7级,灾区烈度7~10度。1975年2月辽宁海城地震7~9度。1976年唐山大地震,震级7.8级,烈度7~11度,统计土石坝399座,无明显变化的69座,占17.3%,其中轻微裂缝大坝287座,占统计大坝71.9%。产生裂缝较严重者40座仅占10%。说明土石坝良好的抗震性能。

因此当地材料坝是值得推广的,经济节省的,就地取材的,不消耗能源或消耗能源较少的,抗震性能较好的好坝型。

土石坝工程这本书包含两大部分:

第一部分:土石坝(内含沥青砼防渗墙坝,土工膜防渗砂基坝);

第二部分:钢筋混凝土面板堆石坝。

作者

2005年10月



## 目 录

## 第一部分 土石坝

第 1 章	土石坝 .....	( 3 )
1.1	国外土石坝发展动态 .....	( 3 )
1.1.1	混凝土防渗墙最深的土石坝 .....	( 3 )
1.1.2	灌浆帷幕最深的土石坝 .....	( 6 )
1.1.3	工程量最大的典型水平铺盖土石坝 .....	( 10 )
1.1.4	最高土石坝 .....	( 12 )
1.1.5	最陡岸坡高土石坝 .....	( 20 )
1.1.6	国外土石坝发展及技术特点 .....	( 21 )
1.2	国内土石坝发展动态 .....	( 38 )
1.2.1	土心墙坝 .....	( 38 )
1.2.2	土斜墙坝 .....	( 63 )
1.2.3	沥青砼防渗体土石坝 .....	( 72 )
第 2 章	当地筑坝材料 .....	( 104 )
2.1	防渗土料 .....	( 104 )
2.1.1	土的分类与命名 .....	( 104 )
2.1.2	土的主要物理性质指标 .....	( 115 )
2.1.3	土的力学性质指标 .....	( 120 )
2.1.4	一些土的物理力学性质经验值 .....	( 124 )
2.2	反滤料与坝壳料 .....	( 127 )
2.3	填筑标准 .....	( 129 )
第 3 章	有关大坝的计算 .....	( 138 )
3.1	坝高计算 .....	( 138 )
3.1.1	水库正常蓄水位的论证与确定 .....	( 138 )
3.1.2	坝高计算 .....	( 141 )
3.2	当地材料坝渗流计算 .....	( 146 )
3.2.1	流网的基本型式 .....	( 147 )
3.2.2	渗流数解 .....	( 153 )
3.2.3	绕坝渗漏 .....	( 158 )
3.2.4	土石坝渗流破坏实例与控制技术 .....	( 159 )
3.3	当地材料坝的稳定计算 .....	( 162 )
3.3.1	作用在土坝上的力 .....	( 162 )

3.3.2	静力稳定分析	(165)
3.3.3	稳定分析计算标准	(169)
3.4	土石坝的沉降计算	(172)
3.4.1	压缩曲线	(172)
3.4.2	坝体、坝基竖向应力	(173)
3.4.3	沉降计算	(174)
3.5	地震荷载作用下的地基及坝体稳定	(176)
3.5.1	粗判饱和砂土地基液化可能性的方法	(176)
3.5.2	地震荷载作用力与拟静力法	(177)
3.5.3	动力计算	(179)
3.5.4	黑河面板坝静、动力稳定分析成果	(183)
3.6	土石坝应力应变计算	(187)
3.6.1	土的非线性和弹塑性特征	(187)
3.6.2	土的线弹性应力应变关系	(191)
3.6.3	土的非线性双曲线应力应变关系	(193)
3.6.4	土的弹塑性应力应变关系	(197)
3.6.5	非线性分析方法	(200)
3.6.6	应力应变计算在当地材料坝设计中的应用	(203)
<b>第4章</b>	<b>设计实例</b>	<b>(212)</b>
4.1	冯家山水库均质土坝	(212)
4.1.1	古河道处理工程	(220)
4.1.2	筑坝土料设计	(222)
4.1.3	坝基处理工程	(225)
4.1.4	大坝设计	(227)
4.1.5	冯家山水库大坝除险加固设计	(233)
4.2	石头河心墙砂砾石坝壳坝	(241)
4.2.1	土料设计	(245)
4.2.2	大坝基础处理工程	(257)
4.2.3	大坝断面设计	(265)
4.2.4	坝的计算	(270)
4.2.5	心墙坝填筑施工问题	(273)
4.2.6	其他建筑物简介	(274)
4.2.7	石头河水库大坝除险加固研究	(284)
4.3	黑河金盆水利枢纽工程土心墙砂砾石坝壳坝	(288)
4.3.1	工程概况	(288)
4.3.2	坝址选择	(302)
4.3.3	坝型选择	(304)
4.3.4	水库调度	(304)
4.3.5	筑坝土料设计	(306)

4.3.6	心墙厚度研究 .....	(322)
4.3.7	坝基工程处理措施 .....	(335)
4.3.8	坝体结构设计及计算 .....	(337)
4.4	下坂地水利枢纽沥青混凝土心墙堆石坝 .....	(343)
4.4.1	工程概况 .....	(343)
4.4.2	冰川地区水文资料研究 .....	(351)
4.4.3	狭谷地形库坝址防洪保安设计 .....	(354)
4.4.4	下坂地库坝址防渗方案研究 .....	(356)
4.4.5	当地筑坝材料研究 .....	(379)
4.4.6	沥青混凝土心墙坝设计 .....	(411)
4.5	李家梁水坠砂坝 .....	(474)
4.5.1	区域地质概况 .....	(474)
4.5.2	水库区工程地质条件 .....	(475)
4.5.3	坝址工程地质条件 .....	(476)
4.5.4	渗流稳定性评价方法 .....	(479)
4.5.5	榆林地区砂坝破坏实例 .....	(484)
4.5.6	砂基坝的防渗型式 .....	(485)
4.5.7	李家梁砂坝设计 .....	(489)

## 第二部分 钢筋混凝土面板堆石坝

第5章	混凝土面板堆石坝的发展史 .....	(499)
5.1	发展简况 .....	(499)
5.2	坝址选择 .....	(507)
5.2.1	地形地质条件 .....	(507)
5.2.2	气象气候条件 .....	(513)
第6章	混凝土面板堆石坝设计标准和依据 .....	(517)
6.1	建筑物等级 .....	(517)
6.2	坝高设计 .....	(518)
6.3	坝坡设计 .....	(520)
6.4	筑坝材料试样制备 .....	(528)
第7章	混凝土面板堆石坝的坝料分区及填筑标准 .....	(531)
7.1	坝料分区的原则与作用 .....	(531)
7.1.1	分区原则 .....	(531)
7.1.2	填筑标准 .....	(531)
7.2	爆破堆石料 .....	(534)
7.2.1	一些岩石的力学性质 .....	(534)
7.2.2	岩石工程地质分类及综合指标表 .....	(538)
7.2.3	石料性质和压实对堆石模量的影响 .....	(541)

7.3	混凝土面板堆石坝分区设计工程实例 .....	(543)
7.3.1	天生桥面板堆石坝 .....	(543)
7.3.2	洪家渡面板堆石坝 .....	(545)
7.3.3	茄子山面板堆石坝 .....	(547)
7.3.4	水布垭面板堆石坝 .....	(549)
7.3.5	白溪面板堆石坝 .....	(551)
7.4	河床砂砾石料筑坝分区工程实例 .....	(553)
7.4.1	Golillas 坝 .....	(553)
7.4.2	Salvajina 坝 .....	(555)
7.4.3	Aguamilpa 坝 .....	(555)
7.4.4	乌鲁瓦提砂砾石面板坝 .....	(556)
7.4.5	黑泉砂砾石面板坝 .....	(558)
7.5	垫层料 .....	(561)
7.5.1	垫层料的级配 .....	(561)
7.5.2	垫层料的渗透性及渗透稳定性 .....	(563)
7.6	过渡区与排水区 .....	(571)
7.7	压实标准和质量控制 .....	(572)
7.7.1	压实参数 .....	(572)
7.7.2	压实标准控制 .....	(573)
7.8	垫层区的施工 .....	(574)
<b>第 8 章</b>	<b>趾板、面板、混凝土 .....</b>	<b>(579)</b>
8.1	趾板 .....	(579)
8.1.1	趾板设计准则 .....	(579)
8.1.2	趾板布置 .....	(581)
8.2	面板 .....	(583)
8.2.1	面板的厚度和分块 .....	(583)
8.2.2	面板受力变形机理 .....	(584)
8.2.3	面板配筋设计 .....	(587)
8.2.4	面板混凝土 .....	(588)
8.3	面板裂缝及防裂措施 .....	(596)
8.3.1	国外面板堆石坝面板的裂缝现象 .....	(596)
8.3.2	国内面板堆石坝面板裂缝现象 .....	(598)
8.3.3	裂缝机理浅析 .....	(606)
<b>第 9 章</b>	<b>止水结构 .....</b>	<b>(612)</b>
9.1	接缝止水结构型式 .....	(612)
9.1.1	接缝止水结构 .....	(612)
9.1.2	止水材料基本性能要求 .....	(613)
9.2	周边缝 .....	(614)
9.2.1	周边缝的发展过程 .....	(614)

9.2.2	周边缝变形与结构 .....	(617)
9.3	面板垂直缝 .....	(620)
9.4	趾板缝 .....	(621)
9.5	缝型设计工程实例 .....	(622)
9.5.1	万安溪工程 .....	(622)
9.5.2	开荒坪抽水蓄能电站下库 .....	(622)
9.5.3	莲花水电站 .....	(625)
9.5.4	天生桥水电站 .....	(625)
9.5.5	乌鲁瓦提工程 .....	(628)
9.5.6	珊溪工程 .....	(628)
9.5.7	福建芹山工程 .....	(631)
9.5.8	大桥水库工程 .....	(631)
<b>第 10 章</b>	<b>面板坝工程实例 .....</b>	<b>(635)</b>
10.1	新疆塔城卡浪古尔枢纽工程 .....	(635)
10.1.1	工程设计概况 .....	(635)
10.1.2	坝型比较与总体布置 .....	(653)
10.1.3	混凝土面板坝设计 .....	(677)
10.1.4	卡浪古尔面板坝施工运行 .....	(686)
10.1.5	趾板、面板裂缝及修补 .....	(699)
10.2	黄石滩面板坝设计 .....	(702)
10.2.1	混凝土面板坝基础设计 .....	(703)
10.2.2	坝料设计及分区 .....	(709)
10.2.3	坝料分区级配与渗透稳定设计 .....	(714)
10.2.4	趾板、面板、防浪墙 .....	(718)
10.2.5	大坝安全监测设计 .....	(724)
10.2.6	止水结构设计 .....	(727)
10.2.7	数模分析在黄石滩混凝土面板堆石坝方案比选上的运用 .....	(729)
10.3	渭南涧峪水库面板坝设计 .....	(764)
10.3.1	工程概况 .....	(764)
10.3.2	涧峪面板坝断面型式拟定 .....	(769)
10.3.3	三维有限元静、动应力变形分析 .....	(774)
10.3.4	涧峪水库大坝挤压式挡墙施工 .....	(805)
10.3.5	大坝安全监测自动化设计 .....	(809)
10.4	沟后面板坝溃决失事的分析 .....	(844)
10.4.1	枢纽工程设计报告 .....	(844)
10.4.2	溃坝后的调查 .....	(871)
10.4.3	沟后水库溃坝的经验教训 .....	(878)
10.5	美岱水库混凝土面板堆石坝拱效应研究 .....	(889)



10.5.1	美岱水库概况 .....	(889)
10.5.2	拱效应研究 .....	(890)
10.5.3	结论 .....	(891)
参考文献	.....	(907)

# 第一部分 土石坝



# 第 1 章 土石坝

## 1.1 国外土石坝发展动态

### 1.1.1 混凝土防渗墙最深的土石坝

加拿大麦尼夸根三号坝(Manic-3)建于魁北克省·麦尼夸根河上,麦尼夸根河是圣劳伦斯河的一条支流,这条河流上共建有 5 座水电站。

本工程坝址处河谷狭窄,两岸陡峭,上部呈“U”形,下部呈“V”型,基岩为前寒武纪含有斜长石和辉长石的斜长岩构成,岩石有 3 个节理系统,1 个水平 2 个近乎垂直。河床冲积层厚达 130m,由粗砂、卵石和大块石构成,河床中间有数层厚达 20~40m 的细砂层,靠近基岩处粗颗粒较多,还夹杂有大孤石。钻孔抽水试验砂卵石层和细砂层透水系数  $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。河床断面参见图 1.1.1。

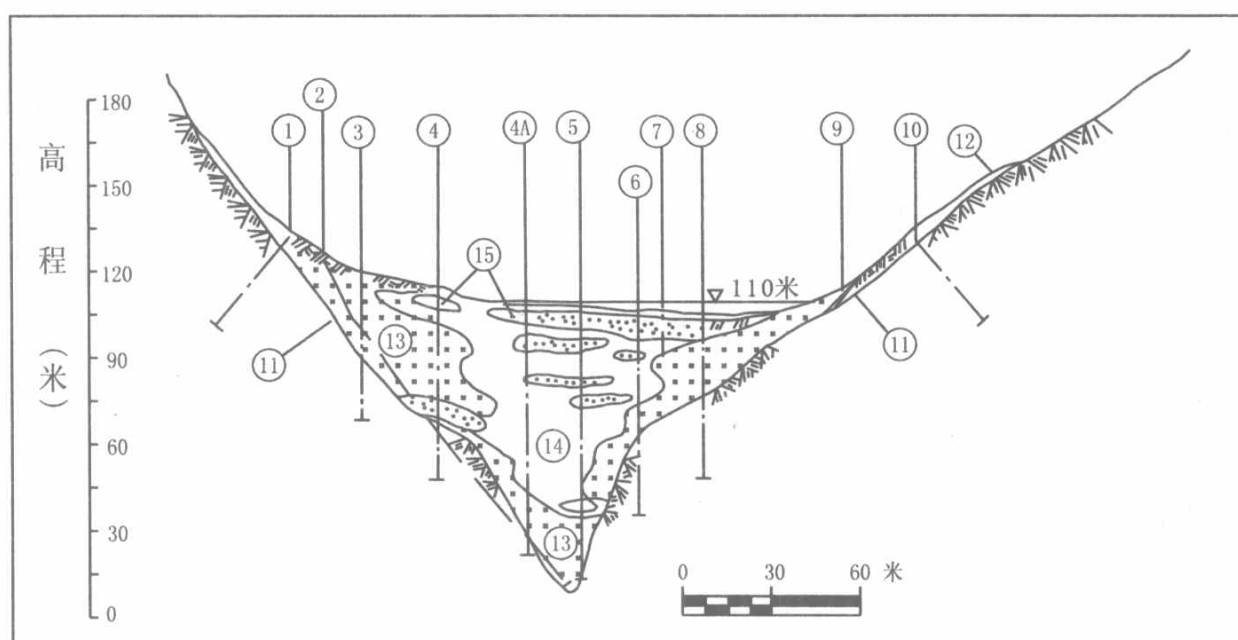


图 1.1.1 麦尼夸根 3 号坝基础断面

①~⑩钻孔;⑪岩基;⑫覆盖层;⑬砾石、大卵石、孤石;⑭砂卵石;⑮细砂

基础处理曾考虑了 3 种处理方案:

- (1) 将冲积层全部或局部挖涂;
- (2) 采用帷幕灌浆;
- (3) 浇筑混凝土连续防渗墙。

经方案比较,认为开挖冲积层工程量太大而且十分艰巨,工期长、造价高。采取灌浆,由于细砂层的渗透系数较小,灌水泥浆有一定困难,同时也不易达到低于  $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  的灌浆效果,因此灌浆方案要采用化学灌浆(硅酸盐和树脂)。论证比较结果采用混凝土隔板防渗墙方案,墙体内予埋 10cm 钢管或塑料管,基岩部分仍用帷幕灌浆防渗。混凝土防渗墙布置为平行两道,墙深最大 131.0m,墙厚均为 0.61m,中心距 3.2m,直插入基岩。墙中心线与