



大坝基础防渗墙

高钟璞 等 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



大坝基础防渗墙

高钟璞 等 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书总结了我国自引进混凝土防渗墙技术以来,特别是近 20 年来该项技术的发展成就,系统地介绍了混凝土防渗墙施工的方法和经验,其中不少是作者亲自研究的成果。同时也介绍了当前国外混凝土防渗墙的先进技术。

各章的内容主要有:防渗墙的设计,防渗墙的施工机械、施工准备、施工工艺,墙体材料,检测方法和原型观测等。最后附有国内外若干大型混凝土防渗墙工程实例。

本书主要供水利水电工程技术人员,特别是防渗墙设计、施工、监理和检测试验人员参考使用,也可供其他建筑行业技术人员和大专院校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

大坝基础防渗墙/高钟璞编著.-北京:中国电力出版社, 2000.1

ISBN 7-5083-0216-8

I. 大… II. 高… III. 挡水坝-截水墙 IV. TV640.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 75362 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 2 月第一版 2000 年 2 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 11.25 印张 296 千字
印数 0001—2500 册 定价 32.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

混凝土防渗墙是一种广泛应用和十分重要的水工建筑物。

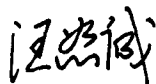
我国每年都要兴建大量的水利水电工程，这些工程特别是修建在覆盖层上的土石坝（包括围堰）工程，许多都要使用混凝土防渗墙作坝基或坝体的防渗结构。我国有很多运行多年需要维修或扩建的水库，其中不少也要使用防渗墙进行补强加固。为了摆脱洪水的威胁，我国的长江、黄河等各大江河有数万公里的堤防需要防渗加固，其中有的地段也需要建造混凝土防渗墙。除此之外，混凝土防渗墙还在一些情况下用于挡土、防冲、承重等。

在枢纽建筑物中，防渗墙关系到地基的稳定、大坝的安危。许多大坝失事，大都是防渗体系失效或遭到破坏。

防渗墙工程是隐蔽工程，如何通过周密的设计、严谨的施工和有效的监督，来达到设计目的，有它独特的规律和要求。防渗墙的技术发展很快，施工机械、工艺、材料等不断有新的成果涌现出来。防渗墙技术被传播到其它建筑领域，其它行业的先进技术也不断地移植到防渗墙工程上。所有这些都需要我们经常加以总结和提高。

本书作者高钟璞同志有志于此。他长期从事水利水电地基处理和基础工程的技术工作，曾亲自主持负责了许多重要的混凝土防渗墙工程的施工。针对生产实践的需要，他刻苦学习，潜心研究，反复试验，大胆创新，在深厚覆盖层坝基防渗技术方面，特别是防渗墙技术方面取得了许多成果，对促进我国防渗墙技术的发展，缩小与发达国家的差距，作出了贡献。长年的劳累使他牺牲了自己的健康，不幸过早地离开了我们。《大坝基础防渗墙》一书是他一生辛勤劳动、不断钻研的结晶。他本来打算还要写几本书，可惜已经无法实现了。

混凝土防渗墙的设计和施工，专业性、实践性和对经验的依赖性很强，关于它的著作特别是专著比较稀少，希望《大坝基础防渗墙》一书的出版，能够填补这方面的部分空缺，对我国防渗墙技术的提高和水利水电建设事业的发展起到有益的作用。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '汪震' (Wang Zhen), written in a cursive style.

一九九九年八月九日

序 二

《大坝基础防渗墙》一书正式出版了，这是对已故作者高钟璞同志的最珍贵的纪念。

中华人民共和国建国初期，由于大规模水利水电建设的需要，我们从前苏联引进了乌卡斯冲击式钻机建造混凝土防渗墙，在此基础上又加以创新，创造了“钻劈法”建造槽孔式防渗墙的施工工艺，并迅速推广应用，成为我国在覆盖层上修建土石坝的主要垂直防渗形式。几十年来，防渗墙技术已经由大型工程普及到中小型工程，由永久工程推广到临时围堰工程，由土石坝扩展到其它坝型，由新建工程延伸到病险水库的防渗处理，由适用简单的地质条件发展到用于各种复杂地层，由水利水电工程延伸到其它行业的建筑工程，防渗墙所使用的施工设备、墙体材料、施工工艺都不断进步，从而完成了许多高难度的、在世界上也不多见的工程。

高钟璞同志长期从事水利水电地基与基础工程施工技术工作，曾参加四川渔子溪、龚嘴、铜街子水电站，新疆乌拉泊水库，长江三峡水利枢纽等防渗墙工程的施工、科研或技术咨询，亲自负责修建了我国第一道塑性混凝土防渗墙——福建水口水电站围堰防渗墙和我国目前最深的混凝土防渗墙——黄河小浪底水利枢纽主坝防渗墙；主持完成了多项国家重点科技攻关专题，并多次获奖。他在防渗墙建筑方面积累了丰富的经验，收集了大量的资料，并把这些成果加以总结，编著成《大坝基础防渗墙》一书。他做了一项很艰苦而又很有意义的工作，这本书的出版对于促进我国防渗墙技术的进步，必将起到积极的作用。

高钟璞同志写作此书的时候，已经身患绝症，但他置生死于度外，与病魔争时间，在病榻上坚持撰稿，直至最后一刻。他的

精神值得我们学习，并将激励后人为水利水电事业而努力学习和勤奋工作。也要感谢他的同事们，他们同心协力，帮助完成了这部著作，使它得以和读者见面。

陈安仪

一九九九年八月十日

目 录

序一

序二

第一章 概论	1
--------------	---

第二章 防渗墙设计	16
-----------------	----

第一节 防渗形式的选择	16
-------------------	----

第二节 防渗墙的布置与构造	20
---------------------	----

第三节 防渗墙的渗透计算	24
--------------------	----

第四节 防渗墙的结构分析	31
--------------------	----

第三章 造孔机械	36
----------------	----

第一节 钢绳冲击式钻机	36
-------------------	----

第二节 冲击式反循环钻机	42
--------------------	----

第三节 回转式钻机	50
-----------------	----

第四节 多头钻机	55
----------------	----

第五节 抓斗挖槽机	60
-----------------	----

第六节 液压铣槽机	65
-----------------	----

第七节 其它造孔机械	70
------------------	----

第四章 施工临时设施	75
------------------	----

第一节 导墙及施工平台	75
-------------------	----

第二节 泥浆系统	79
----------------	----

第三节 混凝土系统	86
-----------------	----

第四节 施工供电	91
----------------	----

第五节 施工供水	94
----------------	----

第五章 围壁泥浆 98

第一节	泥浆的性能	98
第二节	泥浆性能指标的测定	104
第三节	制浆材料	113
第四节	制浆	122
第五节	泥浆回收和净化	126

第六章 墙体材料 131

第一节	普通混凝土	132
第二节	黏土混凝土	148
第三节	粉煤灰混凝土	156
第四节	塑性混凝土	165
第五节	自凝灰浆和固化灰浆	173
第六节	墙体材料的耐久性	180

第七章 造孔 195

第一节	造孔成槽	195
第二节	不分槽段的施工方法	200
第三节	复杂地层的造孔	202
第四节	孔底淤积的清理	207
第五节	常见事故的预防及处理	212

第八章 钢筋笼下设与混凝土浇筑 217

第一节	钢筋笼的制作、运输和下设	217
第二节	混凝土浇筑	221
第三节	固化灰浆的施工	228
第四节	常见事故的预防及处理	235

第九章 墙段连接 243

第一节	钻凿法连接	243
第二节	拔管法连接	245
第三节	双反弧连接	252
第四节	铣削法连接	254
第五节	在接缝中设置止水	255

第十章 质量检查 257

第一节	造孔检查	257
第二节	清孔检查	261
第三节	混凝土质量的检查	263
第四节	墙体质量检测	271

第十一章 墙内仪器埋设和观测 277

第一节	主要观测仪器及工作原理	277
第二节	仪器的埋设方法	289
第三节	原型观测实例	298

第十二章 大型混凝土防渗墙实例 305

第一节	密云水库白河主坝防渗墙	305
第二节	柘林水库主坝补强加固防渗墙	309
第三节	葛洲坝水利枢纽大江上游围堰防渗墙	311
第四节	小浪底水利枢纽主坝防渗墙	316
第五节	三峡水利枢纽二期上游围堰防渗墙	322
第六节	加拿大马尼克 3 rd 工程主坝防渗墙	328
第七节	加拿大大角坝防渗墙	333

附录 1 国外部分混凝土防渗墙工程情况表

附录 2 我国大型混凝土防渗墙工程情况表

后记 348

混凝土防渗墙是在松散透水地基或土石坝（堰）坝体中连续造孔成槽，以泥浆固壁，在泥浆下浇筑混凝土而建成的，起防渗作用的地下连续墙，是保证地基稳定和大坝安全的工程措施。

一、国外防渗墙施工技术的发展和现状

地下连续墙技术起源于欧洲，它是综合了水井、石油钻井以及水下浇筑混凝土技术而发展起来的。1950年前后开始在意大利和法国等国应用，这是因为意大利米兰和法国巴黎的地基是由砂砾石和石灰岩构成的，不便采用打桩或打板桩的办法进行基础施工，特别是临近已有建筑物部位的施工更加困难。在这种情况下首先出现了由桩柱排列形成的防渗墙，1951~1952年在巴舍斯的导流围堰下修建了连锁桩柱型防渗墙。1954~1955年在玛利亚—奥—拉哥坝 42m 深的含有大漂石的砂砾石层中修建了同样的防渗墙。接着，为了建造等厚度的防渗墙又发展了槽孔式防渗墙施工法，在莱茵河侧渠电站修建了深 40m、厚 0.8m 的围堰防渗墙，并迅速向其它建筑领域扩展，成为深基础和地下构筑物施工的重要手段，建筑的数量和规模不断扩大。与此同时，施工工艺不断改进，形成了许多高效实用的工法。较著名的有意大利的采用抓斗和冲击钻联合作业成槽的伊科斯（ICOS）法，单斗挖槽的埃尔塞（ELSE）法；法国的冲击回转式钻机成槽的索列丹斯（Soletanche）法；德国的反循环法等。

1959 年日本从意大利引进伊科斯法，用于中部电力田畑坝的防渗墙施工。1961 年在地下铁道 4^号线的方南街段用伊科斯法建造了箱型隧道的边墙。此后，日本各大公司陆续开发研制成功了许多独创的地下连续墙施工设备和相应的施工方法，如以多头钻

切削成槽的 BW 工法,以双头滚刀式成槽机成槽的 TBW 工法,以凿刨式成槽机成槽的 TW 工法等等,共有三十多种。

其它各国根据自己的需求,也都先后引进开发了适宜的地下连续墙技术。但欧、日至今仍领导着这项技术的潮流。

近五十年来,防渗墙施工技术发展很快,在机具、工艺、墙体材料、检测手段等各个方面都有很大的进步。

1. 造孔机具

造孔机具主要有冲击钻机、回转钻机、钢绳抓斗、液压抓斗以及液压铣槽机。它们各有其特点和适用性,对于复杂的地层,一般是几种机具配套应用。迄今为止,还没有一种机具能全面适应于任何地层的防渗墙施工。

冲击式钻机是最早采用的防渗墙造孔机械,它构造简单,操作简便,可适用于各种常见地层,更适宜于钻进漂石和基岩,可钻凿深度达 150m。国外早期的许多防渗墙包括 70 年代修建的加拿大马尼克 3[#] 坝的深 131m 的防渗墙,都是用这类钻机建成的。冲击钻机的排渣方式由抽筒出渣逐渐发展为正循环出渣和反循环出渣,现在三种方式都有应用。

在软弱的土层、砂层及砂砾石层中钻孔,回转式钻机的效率高于冲击式钻机。回转钻排渣分为正循环和反循环两种方式。回转钻只能钻圆形孔,造槽孔必须用其它机械进行整形加工,因此常常用它钻进导孔。

多头钻实际是几台回转钻的组合,可以一次成槽。这种钻机对均质土层的适应性好,挖槽速度快,机械化程度较高,但设备复杂,自重大,维修保养要有熟练的技术。1966 年,日本研制的多头钻——BW 钻机投入使用。这种钻机由多台潜水钻机和反循环排渣装置组成,挖槽时用钢索悬吊,全断面钻进,一次成槽,深度可达 50m。

80 年代以来,国外大量使用抓斗挖槽机造墙。抓斗对于土、砂、砾卵石等土层均适用,遇到块石、漂卵石时辅以重凿冲击破碎。由于抓斗不需要对土渣进行充分破碎,所以在一般情况下比

上述机械工效高。抓斗可分为机械式和液压式两类，悬吊方式有钢索和导杆两种。机械式抓斗构造简单，操作方便，便于维修，但控制孔斜的能力较差，抓斗闭合切土能力决定于抓斗自身的重量，一般挖槽深度在 60m 以内。液压抓斗有的装有纠偏装置，可控制孔斜，它的闭斗力是靠高压油来控制的，最大闭斗力可达 637.4kN。液压抓斗适宜的挖槽深度不及钢绳抓斗。

当前，液压铤槽机被认为是最先进的防渗墙造孔设备。这种机械于 1973 年由法国开始研制，次年第一台铤槽机在巴黎完成了 12000m² 的地下连续墙。1986 年各国使用的铤槽机已达 15 台，完成的总工程量达数十万平米。液压铤槽机的一次铤槽长度 2.4~2.8m，一般钻深 35~50m，最大深度 100m，可适用于各种土层和抗压强度低于 100MPa 的基岩。该钻机的缺点是不适用于软硬不均的地层和漂石、块球体。当遇到这种地层时，仍需使用重锤冲击钻进。铤槽机价格十分昂贵，因而造墙成本较高。

1992 年，日本横跨东京湾的高速公路使用 EM—320 型液压铤槽机建成了深 136m、厚 2.8m 的防渗墙（图 1-0-1），这是现今世界上最深的防渗墙，反映了国外防渗墙的最高水平。

2. 固壁泥浆

国外对造孔固壁泥浆的制作、使用、管理及回收利用均十分认真，一般采用优质膨润土制成低固相的优质泥浆。根据不同地层对泥浆性质的要求，可掺加分散剂、增黏剂、加重剂等改善泥浆性能。

泥浆的拌制使用高速搅拌机，有回转式和喷射式两种。喷射式搅拌机是以后发展起来的，生产率高（可达 60m³/h），搅拌效果好。

泥浆一般均经回收处理后再用，回收率 60%~85%，每挖掘 1m³ 土体约需浆 0.4~0.5m³。泥浆处理系统生产率一般为 50~250m³/h，最大的可达 500m³/h。

国外对清孔换浆要求十分严格，浇筑混凝土前，一定要用新鲜泥浆置换孔内的带钻渣的泥浆，避免因泥浆含砂量过大而影响

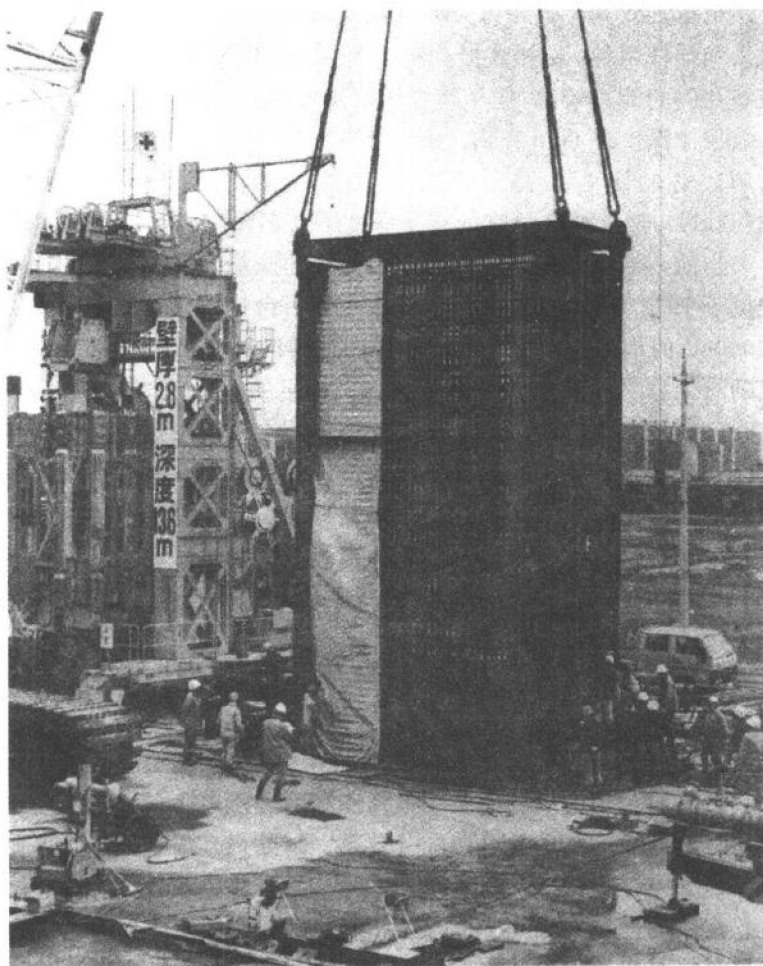


图 1-0-1 世界上最深的地下连续墙施工现场（日本）

混凝土质量。用冲击钻和抓斗施工的槽孔，清孔换浆用潜水砂石泵潜于孔底，将含有钻渣的泥浆抽出，同时注入新浆。

3. 墙间接缝

防渗墙槽段间接缝的质量是防渗墙施工质量的关键，国外对接缝的型式和施工方法不断改进。

钻凿法，即在二期槽孔混凝土浇完后，将其两端凿除一个孔位，形成新鲜面与二期墙段的混凝土相连。此法主要适用于冲击式钻孔，由于工效低、消耗大，现在已不多用。

双反弧接头法，用冲击钻施工的防渗墙有的做成若干墙段或桩柱，墙段或桩柱之间用双反弧钻头钻凿，然后浇筑混凝土连成墙。加拿大马尼克 3[#] 坝防渗墙深槽段就是用此法施工的。

拔管法，这是在二期槽孔的两端下设接头管或接头板，而后浇筑混凝土，待混凝土浇完后拔出接头管或接头板形成干净的接触面，以利于与二期墙段的混凝土相连接。这种办法施工的接头深度一般不超过 50m。

在接缝设置止水，即在二期槽孔的接头部位下设预制混凝土板，其一半先固定在接头管或回填的砂砾中，或用气囊保护，另一半浇入混凝土中；而后撤出接头管或气囊，或挖除砂砾，施工二期槽孔，用高压水冲净露出的接头板上的泥渣，再浇筑混凝土，预制混凝土板即被跨缝埋设在两期防渗墙墙段之中。预制混凝土板也可以型钢代替，近年来更近一步发展为设置橡胶或塑料止水片。

使用液压铣槽机施工混凝土防渗墙，可以有效地解决墙段接头问题，该机在铣钻二期槽孔时，即将二期槽孔混凝土的端部铣出新鲜的表面，并留下若干沟槽，对止水极为有利。

4. 墙体材料

国外对墙体材料的研究比较深入，依据不同的要求使用性能各异的材料。

高强混凝土，有些高坝地基覆盖层较深，防渗墙也深，墙体受力大，设计选用高强混凝土或钢筋混凝土。如加拿大马尼克 3[#] 坝防渗墙要求 28d 抗压强度达到 33~34MPa（实际达 35~42MPa），大角坝防渗墙的混凝土的 28d 抗压强度为 28MPa。

塑性混凝土，这种混凝土强度不高，一般只有 1.0~1.5MPa，弹性模量很低，仅为 400~800MPa，水泥用量少，仅为 80~120kg/m³。法国维尔尼土石坝坝基覆盖层深 75m，防渗墙最大墙深 50m，

悬挂式塑性混凝土墙，使用的混凝土 28d 变形模量为 200~300MPa，与覆盖层变形模量基本相同。28d 抗压强度为 1~1.2MPa。每立方米混凝土仅用胶凝材料水泥 47kg、黏土 117kg。智利的坎文托·维约坝基塑性混凝土防渗墙 28d 抗压强度 0.45MPa，变形模量 125MPa。每立方米混凝土用水泥 74kg、黏土 75kg、膨润土 25kg。智利的科尔本土石坝坝高 110m，防渗墙深 68m，也采用了塑性混凝土。

自凝灰浆是由水泥、膨润土、缓凝剂和水配置而成的一种浆液，在造孔过程中，起固壁作用，造孔完成后自行凝固成墙。1968 年，法国首先在下罗纳河圣瓦来水电站围堰采用了这种自凝灰浆防渗墙，最大墙深 26m。后来又有许多工程采用，墨西哥的特南哥坝自凝灰浆防渗墙最大墙深已达 50m。自凝灰浆凝固体，无侧限极限应变为 0.6%~1.0%。侧限压力为 0.1~0.3MPa 时，极限应变 3%~5%，这些指标与土层接近。其允许渗透坡降为 20~30，渗透系数 10^{-7} ~ 10^{-6} cm/s。采用自凝灰浆能减少浇筑混凝土的工序和墙段接头处理工作，建墙速度比普通防渗墙快 2~5 倍，造价降低 30%~50%。常用于低坝和临时工程中。

5. 运行观测

国外在很多防渗墙工程中埋设了大量的观测仪器和设备，以监测墙体的运行情况。马尼克 3 号坝防渗墙埋设了多达 430 件各种仪器。电子计算机按照事先编制的程序对观测数据自动采集、记录、储存并加以处理，然后传输给大坝管理部门的终端，以便管理人员随时掌握墙体的变形、受力和防渗效果等情况。

国外部分深度超过 40m 的混凝土防渗墙工程详见附录 1。

二、我国混凝土防渗墙施工技术的发展状况

我国防渗墙的建设开始于 50 年代末期。在这以前，国内对埋藏较浅的覆盖层大多采用开挖后回填黏土形成截水齿槽的防渗办法。对于埋藏较深的覆盖层，常采用上游水平防渗，下游排水、减压的办法。

1958 年湖北省明山水库创造了连锁管柱防渗墙。同年在山东

省青岛月子口水库用这种办法在砂砾石地基中首次建成了桩柱式防渗墙,共完成直径 60cm 的桩柱 959 根,在斜墙土坝的坝踵形成了一道长 472m,深 20m,有效厚度 43cm 的混凝土防渗墙。

1959 年,北京市密云水库创造出的一套以钻劈法建造槽孔防渗墙的新方法,仅用 7 个月就修建了一道长 953m、深 44m、厚 0.8m 的槽孔式混凝土防渗墙,截水面积达 1.9 万 m^2 。这道防渗墙的建成开创了我国防渗墙施工技术的先河,钻劈法成为我国至今仍在使用的传统施工方法。

云南省毛家村水电站的大坝基础防渗墙也是我国早期的代表性工程。毛家村黏土心墙坝高 82.5m,是当时全国最高的土坝。坝基为冲积层,最深处 33m,渗透系数最大为 $5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。坝基处理原计划采用灌浆帷幕,后改为防渗墙方案,最大墙深 44m,面积 7831 m^2 。建成后坝基渗透流量为 $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ (包括绕坝渗漏),小于设计值 $0.053 \text{ m}^3/\text{s}$,防渗效果良好。

北京市崇各庄水库坝基防渗墙,长 920m,最大墙深 20m,面积 12860 m^2 。黏土斜墙坝上游原已修建铺盖作水平防渗,后很快失效,决定增设混凝土防渗墙,解决了问题。

由于混凝土防渗墙在初期的发展中显示了施工简便,速度快,消耗少,防渗效果好的优点,因而受到了工程师们普遍的青睐,防渗墙成为我国水利水电工程覆盖层防渗处理的首选方案。

在已经取得的经验的基础上,1963 年,原水利电力部水电建设总局编制颁发了《水工建筑物砂砾石基础槽孔混凝土防渗墙工程施工技术试行规范》。这是我国第一部防渗墙技术规范,它的颁布实行,进一步推动了防渗墙技术的发展。此后,1979 年、1996 年两次对规范进行了修订,形成了现行的 SL174—96《水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范》(本书简称 96《墙规》)。

1967 年,在四川省大渡河上的龚嘴水电站,首次用防渗墙作大型土石围堰的防渗设施。该围堰高 35m,覆盖层深 45m。在围堰中修建的防渗墙最大深度达 52m,墙厚 0.8m,上下游两墙总面积 12382 m^2 ,是当时我国已建成的防渗墙中深度较大的一座。这一