



砂砾石

地基

垂直防渗

宋玉才 燕 乔 赵献勇 焦家训 张玉莉 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



砂砾石

地基

垂直防渗

宋玉才 燕 乔 赵献勇 焦家训 张玉莉 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书重点讨论了深厚砂砾石地基垂直防渗方面所存在的技术难题,诸如防渗结构型式、设计理论、施工工艺、机具设备配置、防渗墙墙体材料与帷幕灌浆浆液性能以及质量检测方法等方面的内容,收集了大量的工程实践资料,介绍了许多成功的世界级的工程实例。这些实例大部分都是近年来研究以及工程实践成功经验的总结,内容丰富,实用性强。

本书可供从事水利水电工程设计、施工、管理和科研的人员参考使用,亦可作为大专院校相关专业的教材以及培训专业技术人员之用。

图书在版编目(CIP)数据

砂砾石地基垂直防渗 / 宋玉才等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6232 - 5

I. 砂… II. 宋… III. 碎屑岩—岩石基础—渗流控制
IV. TU441

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 007082 号

书 名	砂砾石地基垂直防渗
作 者	宋玉才 燕乔 赵献勇 焦家训 张玉莉 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: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 18.25 印张 433 千字
版 次	2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	52.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

在砂砾石地基上修建挡水建筑物，有关地基防渗问题必须认真对待，慎重处理。因为对地基渗流控制的好坏是决定挡水建筑物能否安全、可靠运行的关键性因素。

20 世纪 80 年代以前，我国在较浅的砂砾石地基防渗方面已取得了显著的进步，地基防渗问题已予解决。但是对于深厚砂砾石地基垂直防渗方面还存在较多技术难题，诸如防渗结构型式、设计理论、施工工艺、机具设备配置以及防渗墙墙体材料与帷幕灌浆浆液性能等方面均待研究解决，致使当时在河流流域开发规划设计中有一些原拟兴建的水利水电工程，就是由于其工程地基砂砾石层厚度较大，地基防渗技术尚不能妥善解决，只能暂缓进行。

20 世纪 80 年代，伴随着水利水电建设的快速发展以及建设工程的需要，我国开始对深厚砂砾石地基防渗技术进行深入研究，对前述存在的技术难题，结合工程具体情况，有针对性地依次安排，逐一解决。从砂砾石层地基地质条件入手，对垂直防渗结构设计和施工工艺进行了系统分析，在室内开展了有关防渗墙墙体材料和帷幕灌浆浆液性能的各项试验，在工地现场安排了百米左右深度的防渗墙槽孔和帷幕灌浆生产性试验。

20 世纪 90 年代，我国已基本上掌握了深厚砂砾石地基防渗技术，并成功地将其应用于一些高坝，例如四川省冶勒水电站、瀑布沟水电站深厚砂砾石地基防渗处理工程，效果明显，取得了良好成绩。进入 21 世纪以后，在这方面又有了更大的进展、更多的创新和更广泛的应用。

本书汇集了近期在深厚砂砾石地基防渗处理方面所取得的工程实践经验和科研成果，包括防渗墙和帷幕灌浆的设计理论，防渗墙和帷幕灌浆多种组合型式的防渗结构，各类防渗结构的应力应变分析和原型观测，钻凿法、接头管法、单反弧法和双反弧法、铣削法等多种墙段连接方式，普通混凝土、黏土混凝土、塑性混凝土、高强低弹混凝土以及自凝灰浆和固化灰浆等各类墙体材料；帷幕灌浆所用不同性能的稳定浆液和膏状浆液，孔口封闭法和预埋花管法等各类灌浆施工方法，帷幕灌浆施工过程中控制灌浆技术的应用，

以及防渗墙和帷幕灌浆质量检查的方法等，内容丰富、全面实用。

本书理论联系实际，资料翔实，立论正确。书中收集了大量的实践资料，介绍了很多成功的工程实例，凡是书中肯定的结论，都是经过检验和行之有效的，对深厚砂砾石地基防渗处理具有重要的参考价值和借鉴作用。同时本书也可作为大专院校相关专业教材和培训专业技术人员之用。

总之，本书的出版，无疑对我国深厚砂砾石地基防渗技术的继续开拓、创新与水利水电建设的发展必将起到积极的推动作用。

孙 创

2008 年 12 月

前言

砂砾石地层在我国分布十分广泛，是水利水电工程中常常遇见的复杂地层，如何改善砂砾石地层的工程特性一直是工程界非常关注的问题。砂砾石地层因为其颗粒间胶结性差、渗透性强，且渗透孔隙分布不均等复杂特征，从而带来了容易垮塌、透水、管涌等一系列对工程不利的问题。国内外资料表明，在砂砾石地基上修建闸坝，因地基渗流控制不当，发生渗流事故和破坏的数量约占总事故的40%~50%。因此，普遍认为渗流控制的好坏是决定闸坝设计是否经济、运行是否安全的决定性因素。

在坝基防渗处理中，防渗型式大体上分为两种：一种是水平防渗（主要是上游水平防渗铺盖）；一种是垂直防渗（包括防渗墙、防渗帷幕灌浆以及两者之间多种组合型式等）。水平防渗具有施工简便、建造成本低等优点，但只能起到延长渗径的作用，不能像垂直防渗设施那样可以完全截阻渗流。其运行效果相对较差，后期维护较为困难，并且防渗规模较小，因此不适用于地层条件复杂、渗透系数较大且防渗要求较高的大型工程。垂直防渗可以在坝基形成完整的墙（幕）体，能够完全截断坝基渗漏，而且地层的适应性强，运行稳定可靠，也便于后期的维护和检修。从许多已建工程的实际使用效果来看，垂直防渗要优于水平防渗。正是由于垂直防渗技术的诸多优点，在我国砂砾石地基防渗处理中应用较为广泛。

我国在较浅的砂砾石层地基防渗方面已取得了显著的进步，地基防渗问题已予解决。随着水电建设的快速发展，在深厚砂砾石地基上建坝的水电工程越来越多，由于需要防渗的规模加大，地质条件以及运行条件更为复杂，对垂直防渗技术在设计、施工以及检测等方面都提出了更高的要求，从而造成深厚砂砾石地基垂直防渗方面还存在较多技术难题，诸如防渗结构型式、设计理论、施工工艺、机具设备配置以及防渗墙墙体材料与帷幕灌浆浆液性能等各方面的一些问题均待研究解决，致使当时在河流流域开发规划设计中有一些原拟兴建的水利水电工程，就是由于该工程地基砂砾石层厚度较大，地基防渗技术尚不能妥善解决，只能暂缓开发。

随着水电建设的快速开发以及工程建设的需要，近年来水利工作者经过不断研究和实践，依托一批在深厚覆盖层上建设的水电工程，从砂砾层地质条件入手，对垂直防渗结构设计和施工工艺进行了系统分析，在室内开展了有关防渗墙墙体材料和帷幕灌浆浆液性能的各项试验，在工地现场安排了百米左右深度的防渗墙槽孔和帷幕灌浆生产性试验，解决了一系列深厚砂砾石层垂直防渗工程的技术难点和施工过程中的关键技术问题，相继建成了一批具有世界级水平的深厚砂砾石地层防渗处理工程，例如四川省冶勒水电站、瀑布沟水电站深厚砂砾石层地基防渗处理工程，效果明显，取得了良好成绩，同时也积累了大量的宝贵经验。进入 21 世纪以后，在这方面又有了更大的进展、更多的创新和更广泛的应用。

随着“西部大开发”战略和“西电东送”宏伟计划的相继实施，在深厚砂砾石地基上建坝的水电工程越来越多，而且防渗规模越来越大，地质条件也越来越复杂。在进行此类工程的建设时，参考和借鉴目前在深厚砂砾石地基垂直防渗处理技术方面所取得的经验和最新研究成果，对于指导此类工程的设计与施工，以及针对工程中的关键技术难题，开展进一步的科学研究，提高工程建设和科技水平是大有裨益的。而目前，砂砾石地基垂直防渗技术还没有成熟的设计理论，特别是在一些大型水电工程中所创造和积累的先进施工技术和丰富经验，大多零星见于期刊和有关报告，还没有进行系统的整理和研究，给类似工程在建设过程中参考和借鉴已有成果时造成了极大不便，不利于科技水平的提高和创新。

为此，葛洲坝集团基础工程有限公司联合三峡大学，依托近期承担并成功实施的一批世界级深厚砂砾石地基垂直防渗工程，结合自身在垂直防渗技术方面的优势和丰富的工程实践经验，理论联系实际，在实践中不断总结提高。联合开展并承担了“堤坝深厚透水层地基垂直防渗技术研究（水利部水利工程安全与病害防治工程技术研究中心开放研究基金，项目编号 S0703）”、“新疆下坂地水利枢纽工程水库坝基垂直防渗试验研究”、“冶勒水电站坝基深厚覆盖层防渗施工技术研究与实践”等项目的研究与实践工作，取得了一系列的研究成果。其中，《深厚覆盖层垂直防渗施工技术研究与工程实践》成果荣获湖北省 2006 年度科技进步二等奖；结合瀑布沟防渗墙工程研制的大型全液压拔管机成果鉴定为“国际先进水平”，并获湖北省 2007 年度科技进步三等奖；获得国家住房和城乡建设部颁发的“混凝土防渗墙墙下帷幕灌浆预埋灌浆管工法”、“孔口封闭水泥灌浆施工工法”、“混凝土取长芯施工工法”三项国家级工法。在所取得的这些成果的基础上，编著了《砂砾石地基垂直防渗》

一书，本书的许多成果在水电、核电以及地下建筑等许多大型工程中都进行了成功应用。

本书结合当前水电建设的热点与难点，系统分析并整理了近期在深厚砂砾石地基防渗处理方面所取得的工程实践经验和科研成果，其中包括防渗墙和帷幕灌浆的设计理论，防渗墙和帷幕灌浆多种组合型式的防渗结构，各类防渗结构的应力应变分析和原型观测，钻凿法、接头管法、单反弧法和双反弧法、铣削法等多种墙段连接方式，普通混凝土、黏土混凝土、塑性混凝土、高强低弹混凝土以及自凝灰浆和固化灰浆等各类墙体材料，帷幕灌浆所用不同性能的稳定浆液和膏状浆液，孔口封闭法和预埋花管法等各类灌浆施工方法，帷幕灌浆施工过程中控制灌浆技术的应用，以及防渗墙和帷幕灌浆质量检查的方法等。书中收集了大量的工程实践资料，介绍了许多成功的典型工程实例。这些实例大部分都是近年来研究以及工程实践成功经验的总结，内容丰富，实用性强，对类似工程的设计、施工和科研工作均具有较大的参考和借鉴价值。

本书的编写得到了孙钊、李允中、孙祥禄、李范伍以及其他一些水利建设方面专家的指导和支持。初稿完成后，又承孙钊先生和有关单位审稿，为本书的编写提供了大量宝贵意见；孙钊老先生还在百忙之中为本书写了序。在此谨向这些专家们表示真诚的谢意！

由于作者水平有限，书中的错误和不足在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2008 年 12 月

目 录

序

前言

第一章 概述	1
第一节 砂砾石层地基防渗技术发展概况	2
一、国内砂砾石层地基防渗技术发展概况	2
二、国外砂砾石层地基防渗技术发展概况	3
第二节 我国在砂砾石层地基防渗方面取得的主要成绩及发展的方向	4
一、防渗墙技术取得的主要成绩	4
二、帷幕灌浆技术取得的主要成绩	5
三、砂砾石层地基防渗技术的发展方向	5
第三节 砂砾石层地基防渗的主要作用及主要特点	5
一、砂砾石层地基防渗的主要作用	5
二、砂砾石层地基防渗的主要特点	6
第二章 砂砾石层地基地质条件研究	7
第一节 砂砾石层地基的成因类型	7
一、现代冲积	7
二、河流加积	7
三、冰川加积	8
四、冰缘冻融泥流加积	8
五、重力堆积加积	8
六、洪积加积	9
七、湖相加积	9
第二节 工程地质条件	9
一、砂砾石层地基的颗粒组成	9
二、砂砾石层地基的工程地质特征	10
三、砂砾石层地基的岩组划分	11
四、覆盖层主要地质问题	12
第三节 水文地质条件	13
一、砂砾石层地基渗透稳定性	14
二、水文地质试验	16

第三章 砂砾石层地基防渗设计理论	18
第一节 砂砾石层地基防渗结构型式	18
一、防渗墙	18
二、帷幕灌浆	18
三、防渗墙与墙下帷幕相结合	19
四、防渗墙与墙下帷幕及墙外帷幕相结合	20
五、特殊型式	22
第二节 防渗结构型式的选用	22
第三节 防渗墙设计	23
一、适用条件	23
二、防渗墙的类型与选择	23
三、防渗墙的布置与构造	25
四、渗透稳定与计算	26
五、防渗墙的深度与厚度	37
六、防渗墙材料	38
七、防渗墙质量检查	40
第四节 帷幕灌浆设计	40
一、适用条件	40
二、灌浆帷幕的防渗标准	41
三、灌浆帷幕的结构类型与选择	41
四、灌浆帷幕的布置	42
五、帷幕渗流分析与计算	42
六、灌浆帷幕厚度与孔排数、深度及孔距	44
七、灌浆浆液	46
八、灌浆方法	47
九、灌浆压力	47
十、灌浆帷幕的质量检测	48
第五节 防渗结构细部设计	48
一、防渗墙细部设计	48
二、灌浆帷幕细部设计	51
三、灌浆廊道	52
第六节 防渗结构原型观测	52
一、防渗墙原型观测	52
二、灌浆帷幕观测设计	54
第七节 防渗墙的应力变形特性	56
一、防渗墙的受力特征及影响因素	56
二、防渗墙应力变形分析	57

第四章 深厚砂砾石层防渗墙施工关键技术	64
第一节 概述	64
第二节 复杂地层造孔成槽机械	64
一、钢绳冲击式钻机	65
二、冲击式反循环钻机	68
三、槽孔掘进机（双轮铣）	72
四、抓斗挖槽机	74
第三节 深槽施工中的护壁泥浆	77
一、泥浆的组成与功用	77
二、泥浆的类型	78
三、泥浆的基本性质与使用方法	80
四、泥浆的性能指标	81
五、泥浆的制备	83
六、泥浆的质量控制	85
第四节 深墙墙体材料	85
一、混凝土的原材料	85
二、墙体材料的种类、性能和配制要求	91
三、混凝土中加入混合材料的注意事项	101
四、深厚砂砾石层高强低弹混凝土防渗墙墙体材料配合比研究与实践	102
第五节 造孔、清淤、混凝土浇筑	103
一、造孔成槽	103
二、复杂地层的造孔	106
三、防渗墙嵌入基岩深度的鉴定	110
四、孔底淤积的清理	110
五、混凝土浇筑	112
第六节 槽段划分与深槽段的连接	114
一、槽段划分	114
二、深槽段的连接	115
第七节 工程质量检查	127
一、造孔检查	127
二、入岩深度检查	130
三、清孔检查	131
四、墙体材料的质量检查	132
五、墙体质量检测	136
第五章 深厚砂砾石层地基帷幕灌浆试验	139
第一节 灌浆试验的目的及任务	139
一、灌浆试验的目的	139
二、灌浆试验的任务	139

三、灌浆试验的内容	140
四、灌浆试验分类	140
第二节 砂砾石层地质条件的调查与研究	140
一、砂砾石层的组成和分布	140
二、砂砾石层的渗透性	140
三、砂砾石层的颗粒级配	141
四、砂砾石层的可灌性	141
第三节 帷幕灌浆室内实验	144
一、室内灌浆试验目的	144
二、室内灌浆试验取材	144
三、试验模型	145
四、工程实例	145
第四节 帷幕灌浆现场试验	146
一、灌浆试验地段的选择	146
二、渗透试验	147
三、钻、灌方法的选用	147
四、灌浆材料和浆液的选用	148
五、灌浆压力的估算	148
六、浆液扩散半径的计算	149
七、地表变形观测	153
第五节 灌浆试验效果检查及试验报告的编写	154
一、灌浆试验效果检查	154
二、灌浆试验报告的编写	154
第六章 深厚砂砾石层地基帷幕灌浆施工技术	156
第一节 概述	156
第二节 灌浆材料及浆液	157
一、灌浆材料	157
二、灌浆浆液	163
第三节 钻孔灌浆机具	177
一、钻孔机械	177
二、测斜仪	183
三、灌浆机械	184
四、灌浆自动记录仪	187
第四节 钻孔	188
一、钻孔	188
二、钻孔孔斜控制	191
三、钻孔特殊事故的预防和处理	194
第五节 帷幕灌浆方法	196

一、传统灌浆方法	196
二、新型灌浆法	200
三、特殊灌浆法	206
第六节 灌浆工艺参数的确定	209
一、帷幕灌浆的施工次序	209
二、灌浆压力的确定	209
三、灌浆段长的划分	211
四、浆液变换	212
五、特殊事故的处理	214
六、地面抬动变形	216
七、结束标准与封孔	217
第七节 质量检查与评价	219
一、质量检查的原则	219
二、检查方法	219
三、其他检测手段	223
四、帷幕灌浆效果检查	225
五、检查方法的创新	226
第七章 工程实例	227
第一节 密云水库坝基防渗设计与施工	227
一、工程地质概况	227
二、地基防渗设计	227
三、防渗墙施工	228
四、帷幕灌浆的施工	230
第二节 长江三峡水利枢纽二期上游围堰混凝土防渗墙	233
一、工程概况	233
二、防渗墙的施工	234
三、墙内仪器埋设和原型观测	236
四、工程质量的检查与评价	240
第三节 冶勒水电站右岸坝基防渗工程设计与施工——防渗墙部分	241
一、概述	241
二、地基防渗系统设计	241
三、防渗墙施工工艺研究	242
四、工效分析与评价	246
五、总结	247
第四节 冶勒水电站右岸坝基防渗工程设计与施工——灌浆部分	247
一、灌浆施工地质条件	247
二、施工设备及机具	247
三、覆盖层帷幕灌浆施工工艺	247

四、施工的难点、特点和处理措施·····	250
五、灌浆质量成果分析·····	251
六、经验及教训总结·····	253
第五节 新疆下坂地水利枢纽坝基防渗工程设计和施工·····	254
一、概述·····	254
二、深厚覆盖层结构特征·····	255
三、防渗墙工程试验施工·····	255
四、帷幕灌浆施工工艺研究·····	259
第六节 四川瀑布沟水电站坝基防渗墙施工实例·····	263
一、概述·····	263
二、施工工艺·····	265
三、工效分析与评价·····	274
参考文献·····	276

第一章 概 述

修建大坝，拦水造库，这是人类征服自然和改造自然，使其为人类造福的一个重要措施。建造大坝，一是要确保大坝长期安全、可靠，否则，一旦失事，将会导致巨大的灾难。

修建大坝，首先必须做好坝基处理工作。作为大坝地基，不论是岩石还是砂砾石层地基，均需具有可靠的渗透稳定性和良好的防渗性。

砂砾石层地基是比较松软的岩层，颗粒组成不均一，有时会有巨大的块石、孤石或漂石，空隙大，孔隙率高，渗透性强。砂砾石层地基防渗的含义实质上就是在砂砾石层地基中采用各种不同的施工技术，最终达到地基防渗的目的。

由于我国西部地区坝址多为深厚砂砾石地层，其坝基防渗处理存在施工难度大、施工技术复杂以及施工设备的适应性等一系列难题，一直是工程重点研究的技术难点之一，也是整个工程建设成败的关键所在。特别是在我国西南地区很多水能资源蕴藏丰富的河流上，虽然存在诸多利于修建大型水利枢纽的地形条件，由于不能有效地解决深厚砂砾石层坝基防渗处理中的一些关键技术问题，限制了一些水利工程的开发建设。

在坝基防渗处理中，防渗型式大体上分为两种：一种是水平防渗（主要是上游水平防渗铺盖）；一种是垂直防渗（包括防渗墙、防渗帷幕灌浆以及两者之间多种组合型式等）。水平防渗具有施工简便、建造成本低，但其只能起到延长渗径的作用，不能像垂直防渗设施那样可以完全截阻渗流，防渗效果有一定限度，而且其运行和后期维护都存在一些问题，不适用于地层条件复杂、渗流系数较大且防渗要求较高的大型工程。垂直防渗可以在坝基形成完整的墙（幕）体，能够完全截断坝基渗漏，而且地层的适应性强，运行稳定可靠，也便于后期维护和检修，是大多数水利工程采用的防渗型式。由于垂直防渗技术在深厚砂砾石层防渗处理方面具有上述诸多优点，因此在我国水库大坝地基防渗处理中应用较为广泛。随着水电建设的进一步发展，在深厚砂砾石地基上建坝的水电工程越来越多，由于需要防渗的规模加大，地层条件以及运行条件更为复杂，从而对垂直防渗技术在设计、施工以及检测等方面都提出了更高的要求，在一定程度上垂直防渗技术的解决成了这些水电工程能否顺利实施的关键所在。随着近年来水利工作者的不断研究和实践，解决了一系列深厚砂砾石层垂直防渗工程的技术难点和施工过程中的关键技术问题，相继建成了一批具有世界级水平的深厚砂砾石地层防渗处理工程，取得了良好的效果，同时也积累了宝贵经验，进而，也在很大程度上推进了深厚砂砾石坝基上建坝的技术进展，加快了西部水利工程建设。

本书围绕这些世界级水平的深厚砂砾石地层防渗处理工程，主要论述垂直防渗技术的应用和发展情况，重点阐述防渗墙、防渗帷幕灌浆以及两者之间多种组合型式的设计与施工技术，不涉及其他造墙型式（如高喷帷幕灌浆、深层搅拌桩等）。

第一节 砂砾石层地基防渗技术发展概况

一、国内砂砾石层地基防渗技术发展概况

宏观地看,可概略地把我国砂砾石层地基防渗发展分为四个阶段:

第一时段为启蒙年代。自1949年中华人民共和国成立之日起至20世纪50年代末期。这一时段内,水工建筑砂砾石层地基深度浅,一般多采用挖除后建造截水墙方法处理。直至1958年山东青岛月子口水库开始,坝基处理采用直径60cm的桩,形成连锁管柱式防渗墙,最大墙深20m,墙厚43cm。此后1959年北京密云水库坝基砂砾石层地基(厚度44m)处理,河床部位采用灌浆帷幕,轴线长度240m;两岸采用混凝土防渗墙,轴线长度953m,最大墙深45m,防渗面积约19000m²。砂砾石层地基防渗处理开始采用了新技术。

第二时段为发展年代。自20世纪60年代初期至80年代初期,也就是由文化大革命至改革开放初期。这一时段内,土石坝和围堰砂砾石地基厚度小于70m,地基防渗多采用防渗墙,因其施工简易,防渗效果好,并且安全、可靠,很少采用帷幕灌浆。因之在防渗墙设计和施工方面从深度和厚度以及施工工艺等均有了很大发展。例如,四川省龚嘴水电站首次将防渗墙用于围堰砂砾石地基(45m)防渗;广西壮族自治区澄碧河水库坝基防渗墙(墙深55.2m);甘肃省黄羊河水库坝基防渗墙(墙深64.4m),以及甘肃省碧口水电站坝基防渗墙(墙深65.5m,墙厚1.2m)施工等,均取得了很好的防渗效果。

第三阶段为跃进年代。自20世纪80年代中期至90年代末期,伴随着改革开放的大发展、大建设,水利水电建设突飞猛进,修建大坝日渐增多,砂砾石地基厚度超过370m,由于工程需要,防渗墙的深度与厚度加大。同时在灌浆方面创新地采用了膏状浆液和控制性灌浆新技术,从而使砂砾石层地基防渗处理重新又采用了帷幕灌浆方法。例如黄河小浪底水利枢纽主坝坝基防渗墙深达81.9m,首次使用高强混凝土($R_{90}=35\text{MPa}$)浇筑;四川省宝珠寺水电站左岸下游护坡防冲墙(最大墙深73.5m)与墙下帷幕组合的创新型式;河北省黄壁庄水库除险加固,防渗墙由坝顶施工,墙底嵌入基岩2m,最大墙深约75m,防渗墙轴线长度4860m,防渗面积约27万多m²,工程量之大,国际上罕见;四川省冶勒水电站砂砾石地基处理,由于工程上的需要,开始进行深厚砂砾石地基帷幕灌浆试验和100m深度的防渗墙施工试验等。短短十几年内,我国在砂砾石层地基防渗处理技术方面有了大的跃进,解决了很多技术难题,出现了令人惊喜的新形势。

第四时段为鼎盛年代。进入21世纪,迎来了水利水电建设新高潮,在砂砾石层地基防渗处理设计和施工方面难度加大,有了更多的创新。例如四川省冶勒水电站右岸砂砾石层地基防渗处理采用了上下双墙、墙对接和下层墙接幕新颖的型式,即下墙(墙深85m)接上墙(墙深70m),下墙墙底下接帷幕(幕深62m),在国际上从未有过的新型防渗结构;新疆维吾尔自治区下坂地水库,砂砾石地基厚度约150m,防渗结构采用了防渗墙(墙深82m左右)与墙下接幕(幕深70m左右)以及防渗墙外又设置了3排帷幕灌浆组合的新型式,这也是在国际上罕见的;四川省向家坝水电站,大坝上、下游以及纵向围堰砂砾石地基处理全部采用防渗墙,最大墙深81.5m,防渗面积达7万多m²;四川省瀑布沟

水电站砂砾石地基处理采用了两道防渗墙（最大墙深 75m），其中一道墙墙下接帷幕，在两道墙间的砂砾石地基表层采用固结灌浆的组合型式；四川省狮子坪水电站大坝砂砾石地基处理防渗墙深度 93.5m；云南小湾水电站上、下游围堰砂砾石地基处理，迫于时间所限，下游围堰采用了帷幕灌浆，上游围堰采用了防渗墙与 5 排灌浆帷幕组合方案等，均取得了良好的防渗效果。

通过这一系列工程的实践，深厚砂砾石层地基防渗设计和施工技术全面发展，攻克了许多难题，取得了最新成果。从某种意义上讲，我国砂砾石层地基防渗设计和施工已进入国际先进行列。

二、国外砂砾石层地基防渗技术发展概况

近 50 年来，砂砾石层地基防渗技术发展很快，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。

防渗墙成为深基础和地下构筑物施工的重要手段，其施工工艺不断改进，形成了许多高效实用的方法，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。日本 1959 年从意大利引进伊科斯法，并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，共有 30 多种。

国际上防渗墙施工机具又有新突破。一些挖掘机挖掘槽孔，深度超过 100m，厚度大于 1m，并能控制精度要求。这种开挖设备除了能在深厚覆盖层中施工外，还能挖掘软层及风化层。以法国软土防渗公司制造的 12000 型挖槽机为例，它是用于美国穆德山大坝防渗墙的开挖机具（1989~1990）。在穆德山土石坝防渗墙槽孔开挖中，有 15 个墙段的深度超过了 100m，最深达 122.5m。12000 型挖槽机以十分精确的开挖精度，使槽孔开挖达到空前未有的精度，偏斜小于 2‰。

1992 年，日本横跨东京湾的高速公路使用 EM—320 型液压铣槽机建成了深 136m、厚 2.8m 的防渗墙，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。

国外槽孔开挖已普遍使用膨润土浆液作为稳定液，以防止开挖期间槽孔发生塌方。例如塔塔里坝、穆德山坝和加拿大 LG—1 水电工程等均使用膨润土。国际常用的标准是英国标准（BSS）和美国石油协会（APT）的标准。

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 号坝防渗墙共埋设了多达 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。

自 20 世纪 50 年代中期首次使用“套阀式注浆法”以后，砂砾石层的灌浆技术逐渐得到使用。在近几十年的时间，大约有 30 多座大坝用这种方法作坝基防渗帷幕灌浆。其中规模较大的有 Sylcnsteitn、Mattmark、Durlassboden、Asswan、Funagiva、Salado、Saddel Aali、Asprokremmos 等坝。其中最著名的就是埃及的 Asswan 大坝，坝基防渗采用与心墙连接的上游水平铺盖加心墙下的帷幕灌浆。坝基排水由设于下游坝趾的排水减压井加