

# 地下防渗墙施工技术 研究及应用

DIXIA FANGSHENQIANG SHIGONGJISHU  
YANJIU JI YINGYONG

郭麒麟 马 明 黄金城 窦 斌 等著



中国地质大学出版社

# 地下防渗墙施工技术 研究及应用

DIXIA FANGSHENQIANG SHIGONG JISHU  
YANJIU JI YING YONG

郭麒麟 马 明 黄金城 窦 斌 等著

中国地质大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

地下防渗墙施工技术研究及应用/郭麒麟,马明,黄金城,窦斌等著. —武汉:中国地质大学出版社,2007.12

ISBN 978-7-5625-2184-6

I. 地…

II. ①郭…②马…③黄…④窦…

III. 地下工程-截水墙-工程施工

IV. TV543 TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 115010 号

地下防渗墙施工技术研究及应用

郭麒麟 马 明 黄金城 窦 斌 等著

责任编辑:方 菊

责任校对:戴 莹

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电话:(027)67883511

传真:67883457

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cn>

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16

字数:270 千字 印张:10.5

版次:2007 年 12 月第 1 版

印次:2007 年 12 月第 1 次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-2184-6

定价:32.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

# 前 言

这是一本论述地下防渗墙施工技术及其应用的专著。

我国的防渗墙技术是从 1958 年修建青岛月子口水库第一座防渗墙开始发展起来的,随后在北京密云水库修建了一座槽孔式混凝土防渗墙。和其他国家一样,我国也是在水利水电工程中开始应用防渗墙技术的,著名的长江三峡工程和黄河小浪底工程都使用了地下防渗墙。地下防渗墙作为一种防渗措施在大坝等工程中也有较长的应用历史。1998 年我国发生特大洪水后,国家投入大量资金用于堤防建设。据初步统计,防渗处理涉及堤段分布于湘、鄂、赣、皖四省,防渗处理沿线长 457km,总计 530 万  $\text{m}^2$ 。

本书所说的地下防渗墙施工技术主要是指垂直防渗技术及地基加固技术。本书内容包括:射水法建造地下防渗墙技术,锯齿掏槽修建地下防渗墙技术,液压开槽机连续成槽技术,多头小直径深层搅拌桩防渗技术,高压旋喷防渗墙施工技术,垂直铺塑防渗技术,振动沉模板墙防渗技术,液压抓斗建造地下连续墙技术,钢板桩施工技术,固结灌浆和帷幕灌浆防渗施工技术,连续成槽连续成墙建造技术,等等。

本书是笔者多年来收集国内外资料,结合长江堤防隐蔽工程、三峡水利枢纽、皂市水利枢纽及西藏水库施工的实践以及科研试验的体会与经验写成的,希望能给读者提供有关地下防渗墙施工、科研、推广应用和发展情况的实用资料,以资在工程中参考使用。本书在编写过程中广泛吸取了水利水电有关单位的先进技术和经验,在此对被引用的单位和个人表示衷心感谢!

本书在编写过程中得到了众多专家、学者、工程技术人员及博士、硕士研究生的帮助,中国地质大学出版社及其有关人员也为该书的出版花费了大量心血,谨此,向他们表示深深的谢意! 本书编写分工如下:第一章、第二章、第四章、第十五章由郭麒麟编写,第五章、第十三章、第十四章、第十六章由马明编写,第六章、第七章、第九章、第十章由黄金城、孙昕编写,第三章由丁晔编写,第八章由窦斌编写,第十一章、第十二章由索巴编写。

由于作者水平有限,书中不足和错误之处在所难免。敬请读者批评指正。

# 目 录

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 第一章 绪 论               | (1)  |
| 第一节 概 述               | (1)  |
| 第二节 国外地下防渗墙施工技术的发展和现状 | (3)  |
| 第三节 国内地下防渗墙施工技术的发展现状  | (5)  |
| 第四节 地下防渗墙材料及其应用       | (7)  |
| 第二章 射水法建造地下防渗墙技术      | (11) |
| 第一节 概 述               | (11) |
| 第二节 施工技术              | (11) |
| 第三节 成槽质量控制            | (14) |
| 第三章 锯齿掏槽修建地下防渗墙技术     | (15) |
| 第一节 施工原理              | (15) |
| 第二节 成墙工艺              | (15) |
| 第四章 液压开槽机连续成槽技术       | (17) |
| 第一节 技术原理与特点           | (17) |
| 第二节 施工工艺及主要技术指标       | (17) |
| 第五章 多头小直径深层搅拌桩防渗技术    | (22) |
| 第一节 成墙原理              | (22) |
| 第二节 施工准备              | (23) |
| 第三节 深层搅拌施工要求          | (25) |
| 第四节 施工工艺流程            | (27) |
| 第五节 深搅施工质量控制要点        | (28) |
| 第六节 施工质量保证措施          | (29) |
| 第七节 质量检测              | (30) |
| 第八节 施工作业场地维护与清理       | (31) |
| 第六章 高压旋喷防渗墙施工技术       | (32) |
| 第一节 施工准备              | (32) |
| 第二节 钻孔和喷浆作业要求         | (33) |

|      |                       |      |
|------|-----------------------|------|
| 第三节  | 高喷墙质量要求 .....         | (35) |
| 第四节  | 高喷施工工艺 .....          | (36) |
| 第五节  | 施工质量控制 .....          | (40) |
| 第六节  | 质量检验 .....            | (40) |
| 第七节  | 特殊情况处理 .....          | (41) |
| 第七章  | 垂直铺塑防渗技术 .....        | (42) |
| 第一节  | 施工方法和工艺 .....         | (42) |
| 第二节  | 施工质量保证措施 .....        | (43) |
| 第三节  | 技术经济分析 .....          | (43) |
| 第八章  | 振动沉模板墙防渗技术 .....      | (44) |
| 第一节  | 振动沉模的成墙机理 .....       | (44) |
| 第二节  | 施工设备 .....            | (45) |
| 第三节  | 振动沉模成墙特点 .....        | (45) |
| 第四节  | 振动沉模防渗墙施工工艺 .....     | (45) |
| 第五节  | 振动沉模施工技术措施 .....      | (46) |
| 第六节  | 质量控制 .....            | (47) |
| 第九章  | 德国宝峨公司薄型防渗墙施工技术 ..... | (48) |
| 第一节  | 薄型防渗墙设备 .....         | (48) |
| 第二节  | 薄型防渗墙施工工艺 .....       | (50) |
| 第三节  | 浆液生产 .....            | (51) |
| 第四节  | 薄型防渗墙施工 .....         | (53) |
| 第五节  | 质量检测 .....            | (54) |
| 第十章  | 薄型抓斗防渗墙施工技术 .....     | (56) |
| 第一节  | 施工工艺 .....            | (56) |
| 第二节  | 特点与优势 .....           | (57) |
| 第三节  | 影响成槽效率的主要因素 .....     | (58) |
| 第四节  | 技术难点与对策 .....         | (59) |
| 第五节  | 墙体质量控制与检查 .....       | (60) |
| 第十一章 | 液压抓斗在西藏高原的工程实例 .....  | (61) |
| 第一节  | 工程概述 .....            | (61) |
| 第二节  | 防渗墙施工方案 .....         | (63) |
| 第三节  | 高原工程施工特点 .....        | (65) |
| 第四节  | 防渗墙施工设备配置 .....       | (65) |
| 第五节  | 生产性试验 .....           | (65) |

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| 第六节 施工工艺及方法 .....                 | (66)  |
| 第七节 导向墙施工方案 .....                 | (66)  |
| 第八节 成槽成墙施工方法 .....                | (68)  |
| 第九节 高原施工关键问题处理 .....              | (70)  |
| 第十节 保证深槽接头处连接质量的措施 .....          | (73)  |
| 第十一节 成槽的检验和验收 .....               | (73)  |
| 第十二节 成墙后检验和验收 .....               | (74)  |
| 第十二章 不同防渗墙工法的比较 .....             | (76)  |
| 第十三章 不同工法成墙墙体间搭接研究 .....          | (82)  |
| 第十四章 钢板桩施工技术及应用 .....             | (86)  |
| 第一节 概 况 .....                     | (86)  |
| 第二节 钢板桩施工技术准备 .....               | (86)  |
| 第三节 钢板桩施工技术 .....                 | (88)  |
| 第四节 钢板桩施工的技术控制 .....              | (89)  |
| 第五节 异形钢板桩的制作 .....                | (90)  |
| 第六节 钢板桩施工工程实例 .....               | (92)  |
| 第十五章 基础灌浆施工技术及应实例 .....           | (100) |
| 第一节 固结灌浆试验施工技术要求 .....            | (100) |
| 第二节 帷幕灌浆试验施工技术要求 .....            | (104) |
| 第三节 皂市水利枢纽灌浆施工试验 .....            | (112) |
| 第十六章 拉槽法地下防渗墙施工新技术研究 .....        | (145) |
| 第一节 概 况 .....                     | (145) |
| 第二节 LC-2 数显全自动监控拉槽机及浇筑设备的研制 ..... | (147) |
| 第三节 拉槽法建造薄壁混凝土防渗墙施工新技术工程实例 .....  | (151) |
| 参考文献 .....                        | (158) |

# 第一章 绪 论

## 第一节 概 述

地下防渗墙是利用各种挖槽机械,借助于泥浆的护壁作用,在地下挖出窄而深的沟槽,并在其内浇筑适当的材料而形成一道具有防渗功能的连续地下墙体。堤防是长江防洪的基础,是两岸人民抵御洪水的直接屏障。堤防的堤身、堤基的防渗问题不解决,就不能发挥防洪减灾效益,就不能保证人民生命财产安全。地下防渗墙可以起到加固堤防的作用。地下防渗墙作为一种防渗措施在大堤中应用也有较长的历史,但是在1998年大洪水前,在长江堤防中尚未使用,1998年以后才得到了大量的应用,保护了堤防安全。在水利行业,地下防渗墙主要用于水利枢纽的基础防渗和堤防的堤基、堤身防渗。

近十年来,我国公路交通得到了较快的发展,但等级公路尤其是高等级公路主要分布在东部和南部经济发达地区,广大中西部地区交通状况尚未得到根本改善。作为“西部大开发战略”的一部分,我国将在西部地区修筑公路约35万km。我国地势西部海拔较高,山势险峻,石崖密布,不同路段高差悬殊较大,将会出现大量的高填土路堤工程。为获得结构稳定、使用耐久的高路堤路基,需要采用加固措施。为保证公路的工程质量,必须对挡土墙的结构特征和适用条件进行理论分析、经济性分析和适应性分析。

堤防安危关系到人民生命财产的安全和国民经济的发展。长江干堤绵延3000多千米,横亘湘、鄂、赣、皖、苏、沪的长江两岸,起着拦水引流、保护万顷良田和亿万人民生命财产的重要作用。然而,由于历史的条件和技术水平所限,过去千百年逐渐形成或加高培厚的堤坝,留下了许多隐患,特别是在高水位且持续时间长的情况下,给防汛工作带来巨大的压力,堤防险象环生,严重的管涌、渗漏、溃口时有发生。因此,如何进行堤防工程的有效治理和加固,是摆在水利工程技术人员面前的课题。

1998年大洪水之后,我国掀起了以堤防防渗加固为重点的防洪工程建设的高潮,施工进度快、效果好、造价较低的新型垂直防渗技术不断出现,并得到大规模的应用。

长江中下游平原一般为第四系冲积层,上部为黏性土,厚度1~10m,往下是粉砂、细砂等,砂层间也有黏性土夹层,再往下则是粗砂、砂砾及卵石等强透水层。长江中下游3000多千米的堤防,正是修筑在第四系平原上。由于长江修筑堤防缺少全流域的统一管理,以及受到当时许多条件的限制,使得堤身下的基础处理质量,既没有做前期勘测设计工作,也没有针对不同的地质条件做适当的地基处理,加之由于历年的修堤取土或挖渠,表层防渗层遭到不同程度的破坏,有些堤内是溃口的渊塘或古河道。在高洪水位时,堤内大量出现渗漏、管涌、流土滑坡甚至溃口等险情。另外,堤身土质复杂,受当时施工条件和技术水平所限,使得堤身的质量严重缺陷,加之堤身存在多种动物的洞穴,因此,在高水位、长时间浸泡、风浪冲蚀及堤顶荷载等条



件下,极易形成沉陷、崩塌等。而下列情况使堤基(身)的渗透稳定情况进一步恶化:

- (1)防御水位提高,渗水压力增大,堤坝表层的黏性土盖层厚度不够;
- (2)历史上溃口段内黏土层遭到破坏,复堤后,堤内有渊塘,里面常有管涌发生;
- (3)历年在堤内取土加培堤防,抢险时更可能在近堤处取土,将黏性土盖层挖薄;
- (4)建闸后渠道挖方及水流冲刷将黏性土盖层减薄,成为这种地质堤段建闸时的难题;
- (5)由于其他原因使堤内黏性土盖层变薄。

汛期高水位时,由于渗水流经强透水层时水头损失很小,堤内数百米范围内黏性土层下面仍承受很大的水压力,如果黏性土盖层没有足够的厚度,渗水压力就会冲破黏性土层,产生管涌。据不完全统计,长江中下游主要堤防中地基属于表层黏性土盖层较薄甚至没有黏性土盖层、有翻砂鼓水险情发生的堤防长度约 757km。

根据长江中下游防洪规划,长江中下游主要堤防(包括确保堤防、重点防洪城市堤防、干流重要江堤和洞庭湖重点垸堤防、鄱阳湖区十万亩以上重点垸堤防)按防御 1954 年洪水的标准进行加高加固,经过多年努力,大部分已形象达标,即堤顶高度、宽度、内外边坡达标,但堤防质量,特别是堤基的渗流稳定问题仍是制约堤防实际防洪能力的主要因素,甚至被认为是一种不确定的因素。遇到像 1983 年、1991 年、1996 年以及 1998 年那样较大的洪水,仍需投入大量人力物力去对付堤身散浸、内脱坡、漏洞、跌窝及管涌等险情,一旦抢险不力,就会造成堤防溃决的洪水灾害。

据不完全统计,仅 1995 年、1996 年及 1998 年的洪水,长江中下游主要堤防分别出现险情 4 635 处、9 108 处和 73 816 处。堤防工程越来越不能抵御特大洪水的袭击,堤基(身)质量呈现下降的趋势。

据不完全统计,在长江中下游主要堤防中,有约 757km 堤段的堤基存在翻砂鼓水险情,其地层为二元结构,上部为较薄的粉质黏土和粉土,局部夹淤泥透镜体,下部为粉砂、含砾中细砂、砂砾石层,厚 10~100m。解放以来,科研人员对该类堤段的堤基做过大量的处理工作,积累了较多的工程实践经验。概括起来,主要采取了压排相结合的工程方案,工程措施包括填塘固基、压浸平台、减压井及导渗沟等。填塘固基和压浸平台由于工程量浩大,尤其是取土困难、挖压土地等,其工程标准普遍不高,工程实施后,仍时有险情出现;减压井及导渗沟又存在使用寿命短的突出弱点,实施范围不大。总之,目前普遍采用的压排相结合的堤基处理方案对控制堤基渗流破坏起到了一定的作用,但也存在很多问题。因此按照“标本兼治”的原则,在长江中下游主要堤防约 757km 堤基存在问题的堤段中,根据其堤基地质条件,在部分适宜堤段,进一步采用防渗效果好的垂直防渗措施是非常必要的。

另外,在城市建设的热潮中,高层建筑大量出现。为了满足其结构稳定性及开发地下空间的要求,一般设计了一层或多层地下室。而这些建设项目多处于闹市区,施工场地狭窄,道路及地下管网密布,必须进行基坑支护。在高地下水位地区,基坑的止水防渗工作则是施工的关键环节。在施工中经常采用管井和轻型井点来降低地下水位,此类方法较为成熟,得到广泛使用。但是由于地下水位的降低,土体三相结构发生变化,导致土体颗粒有效应力增加,土体压缩变形,在临近建筑物及管线道路区,容易发生沉陷、变形等问题。在一些基坑处理中,采用地下连续墙或利用深层搅拌等方法,做成多种形状的重力式挡土墙,此类结构兼有支护和挡水功能,在一般情况下,效果不错。但这些方法或者施工成本过高、或者受场地作业面限制,不具备广泛的适应性。再就是利用深层搅拌桩或旋(摆)喷桩,配合以排桩式支护结构进行挡水,此方

法应用较为普遍,但因为其施工位置的不连续性,防水效果受多种因素影响,难以做到高可靠性。应该说,目前此类方法在综合防水效果、施工效率、工程造价等各方面,还存在不足之处。近年来,在我国应用的地下连续防渗墙施工技术,较好地解决了这些问题。

## 第二节 国外地下防渗墙施工技术的发展 and 现状

地下连续墙技术起源于欧洲,它是根据打井和石油钻井所用膨润土泥浆护壁以及水下浇灌混凝土施工方法的应用而发展起来的。1950年前后开始用于工程建设中,当时以法国和意大利用得最多。这是因为巴黎和米兰的地基是由砂砾和石灰岩构成的,在这样的地质条件下建造地下结构物,如果采用打桩或打板桩的办法,是相当困难的,尤其是在市区与周围现有建筑物十分邻近的地方进行施工,难度会更大。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)含有大漂石的砂砾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方法,在莱茵河水电站修建了深40m、厚0.8m的围堰防渗墙。

地下连续墙除了用作防渗以外,还迅速向建筑领域扩展,成为深基础和地下构筑物施工的重要手段,使用地下连续墙的建筑数量和规模不断扩大。与此同时,施工工艺不断改进,形成了多种高效实用的工法。较著名的有意大利采用的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(EIE)法,法国采用冲击回转式钻机成槽的索列丹斯(Soletanche)法。

1959年日本从意大利引进伊科斯法,用于中部电力田雉坝的防渗墙施工。此后,日本的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30多种。

近几十年来,一些国家根据自己的需要,也都先后引进开发了适宜的地下连续墙技术,使地下连续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。

### 一、造孔机具

造孔机具主要有冲击钻机、回转钻机、钢绳抓斗、液压抓斗以及液压铰槽机。它们各有自己的特点和适用性。对于复杂的地层,一般是几种机具配套使用。

冲击式钻机是最早采用的地下连续墙造孔机械,它构造简单、操作简便,可适用于钻进漂石和基岩,钻凿深度可达150m。国外早期的许多连续墙,包括20世纪50年代修建的加拿大马尼克3号坝的防渗墙,都是用此类钻机建成的。现在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,不过目前三种方式都有使用。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,造槽孔必须用其他机械进行整形加工,因此常常用它钻进导向孔。

多头钻实际上是几台回转钻的组合,可以一次成槽。这种钻机对匀质土层的适应性好,挖

槽速度快,机械化程度高,但设备复杂,自重大,维修保养需要有熟练的技术。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。

20世纪80年代以来,国外大量使用抓斗挖槽机造墙。抓斗对于土、砂、砾卵石等地层均适用,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质量,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,它的闭斗能力是靠液压油来控制的,最大闭斗力可达6374kN,但液压抓斗适宜的挖槽深度不及钢绳抓斗。

当前,液压铣槽机被认为是最先进的地下连续墙造孔设备。这种机械于1973年由法国开始研制,次年第一台铣槽机在巴黎完成了12000m<sup>2</sup>的地下连续墙施工。1986年各国使用的铣槽机已达15台。

## 二、固壁泥浆

国外地下连续墙施工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。喷射式搅拌机是在回转式以后发展起来的,生产率高,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1m<sup>3</sup>土体约需浆0.4~0.5m<sup>3</sup>。泥浆处理系统生产率一般为50~250m<sup>3</sup>/h,最大的可达500m<sup>3</sup>/h。

施工时对清孔换浆要求如下:浇筑混凝土之前,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混凝土或固化灰浆质量。

## 三、墙间接缝

地下连续墙槽段间接缝的质量是地下连续墙施工质量的关键,国外对接缝的形式和施工方法也在不断改进。

钻凿法,即在一期槽孔混凝土或固化灰浆浇完后,将其两端凿除一个孔位,形成新鲜面与二期墙段的混凝土或固化灰浆相连。此法主要是适用于冲击式钻孔。

双反弧接头法,用冲击钻施工的地下连续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号坝防渗墙深槽段就是用此法施工的。

拔管法,这是在一期槽孔的两端下设接头管或接头板,而后浇筑混凝土或其他墙体材料,待浇筑完后拔出接头管或接头板形成干净的接触面,以利于与二期墙断面相连接。这种办法施工的接头深度一般不超过50m。

此外还有其他的一些方法,如在接缝设置止水、使用液压铣槽机施工等。

## 四、运行观察

国外在很多地下连续墙工程中埋设了大量的观察仪器和设备,以监测墙体的运行情况。

马尼克 3 号坝就埋设了多达 430 件的各种仪器。电子计算机的运用,可以按照事先编制的程序对观察数据自动采集、记录、储存并加以处理,传给管理部门的终端,从而可以随时观察墙体的变形、受力和成墙效果等。

### 第三节 国内地下防渗墙施工技术的发展现状

我国地下连续墙的建设开始于 20 世纪 50 年代末期,也是始于防渗工程。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、减压的方法。

1958 年在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 0.60m 的桩柱 959 根,在土坝的坝踵形成了一道长 472m、深 20m、有效厚度 0.43m 的混凝土防渗墙。

1959 年,北京市密云水库创造出一套以钻劈法建造槽孔的新方法,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  $\text{m}^2$ ,这道防渗墙的建成开创了我国地下连续墙的先河,钻劈法成为我国至今仍在使用的传统施工方法。

由于混凝土地下连续墙在初期的发展显示了施工简便、速度快、消耗少、防渗效果好的优点,因而受到了工程师的普遍青睐,地下连续墙成为我国水利水电工程防渗的首选方案。1967 年,在四川省大渡河上的龚嘴水电站,首次使用地下连续墙做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 12 382 $\text{m}^2$ ,是当时我国已建成的防渗墙中深度最大的一座。这一工程成为我国水利水电工程的围堰用地下连续防渗墙防渗的先例。

20 世纪 60 年代后期,许多地质条件差的工程都纷纷采用了混凝土防渗墙方案。如四川岷江上的映秀湾水电站闸基防渗墙和渔子溪一级水电站闸基防渗墙。这些防渗墙的建成,为在山区河谷的大粒径漂卵石地层中修建防渗墙积累了经验,标志着我国防渗墙施工技术达到了一个新的水平。

20 世纪 70 年代,混凝土防渗墙作为病险土石坝处理的最佳手段被广泛应用。主要工程有 1974 年建成的广西百色澄碧河水库大坝防渗墙,甘肃省武威黄羊河水库坝体防渗墙,以及 1978 年建成的江西省永修柘林水库坝体防渗墙。柘林水库坝体防渗墙墙深 65.2m,墙厚 0.8m,墙底嵌入基岩深度 3.5~5.0m,总面积达 30 000 $\text{m}^2$ ,是当时规模最大的防渗墙。1977 年建成的甘肃省碧口水电站大坝是当时国内最高的心墙土坝,坝高 101m。坝基采用两道防渗墙防渗,墙深分别是 41m 和 65.5m,总面积为 11 955 $\text{m}^2$ 。其中上游墙墙厚 1.3m,是当时国内厚度最大的防渗墙。

万里长江第一坝——葛洲坝水利枢纽于 20 世纪 70 年代末到 80 年代初建成。该坝大江围堰采用混凝土防渗墙作为防渗体。防渗墙最大深度为 47.3m,墙厚 0.8m,总面积 74 421 $\text{m}^2$ ,其规模仅次于长江三峡工程围堰防渗墙。该墙首次引进了日本液压导板抓斗挖槽,首次进行了用拔管法施工防渗墙接头的试验。

四川省铜街子水电站左深槽承重防渗墙和围堰固化灰浆防渗墙于 1986 年建成。承重墙设有两道,其间用五道横隔墙连接,主墙厚 1m,最大深度 74.4m,面积 6 896.2 $\text{m}^2$ ,部分墙间接

缝用拔管法施工,最大拔管深度 61m,在四个部位埋有观测仪器。大型防渗墙兼作承重墙,这是第一例,其深度也创当时国内记录。此外,铜街子围堰防渗墙首次采用了固化灰浆做墙体材料,墙厚 0.8m,最大深度 25m,总计造墙面积 6 839m<sup>2</sup>。

1990 年建成了福建省水口水电站主围堰防渗墙。该围堰高 44.55m,防渗墙最大深度 43.6m,厚 0.8m,总面积 17 800m<sup>2</sup>。该墙在我国首次使用塑性混凝土,取得良好的效果。以后的很多工程都相继使用了塑性混凝土,例如河南小浪底水利枢纽上游围堰防渗墙以及长江三峡大江围堰防渗墙等,其材料都是塑性混凝土。福建水口水电站工程的另一个进步是在部分地段首次应用了“两钻一抓”法建造防渗墙,这种方法比单纯用冲击钻造孔提高工效近一倍,降低成本 23%。现在“两钻一抓”法已得到推广。

1997 年在四川省冶勒水电站完成了我国迄今为止最深的混凝土防渗墙的试验施工。该墙段深 100m、长 78m、厚 1.0 m,由一个槽孔、一个单孔和一个双反弧接头孔组成,为我国防渗墙施工跨越百米深度准备了条件。

1998 年建成的小浪底主坝防渗墙是迄今为止我国墙体材料强度最高的混凝土防渗墙。小浪底主坝防渗墙墙深 81.9m,墙厚 1.3m,右岸部分防渗面积 10 541m<sup>2</sup>,墙体混凝土设计强度 35MPa。施工中采用了缓凝型高强混凝土材料,解决了墙体混凝土强度过高给钻凿接头带来的困难。其左岸部分防渗墙面积 5 101m<sup>2</sup>,由法国地基建公司承建,使用钢绳抓斗挖槽,以先期施工的塑性材料垂直短墙作为墙段之间的接头。此法连接可靠,施工简便,工效很高。

施工生产带动了科学技术的发展,我国一直十分重视防渗墙施工技术的引进、开发和研究。密云水库创造的钻劈法就是对引进的前苏联凿井技术加以改进发展而成的。进入 20 世纪 80 年代后,我国对防渗墙施工技术,施工机具、工艺,墙体材料,仪器埋设和检测手段等,进行了系统的研究。

## 一、造孔机械的研究

我国研制成功了冲击式反循环钻机,该钻机比老式钢绳冲击钻机提高工效 2~3 倍,在小浪底、三峡和其他许多防渗墙工程中发挥了显著的作用,成为老式钢绳冲击钻机的替代产品。引进研制了抓斗挖槽机,包括液压抓斗和钢绳抓斗。研制了专用于薄防渗墙施工的射水法成槽机,链斗式挖槽机、锯槽机、全自动拉槽机和薄型抓斗。

## 二、施工方法的研究

在借鉴国外经验的基础上,研制完善了“两钻一抓”法。研制了具有 2 000kN 起拔力的拔管机,开发了拔管、拔板和安设 PVC 止水带的墙段接头施工方法。

## 三、墙体材料的研究

对塑性混凝土进行了研究,其力学性能优于国外的水平。对固化灰浆也有所研究,并已应用到实际工程中。

## 四、测孔仪器和仪器埋设的研究

我国研制成功了超声波孔形孔径测量仪,性能达到了国外同类产品的水平,并研究了用液压缸定位法埋设土压力计,弥补了挂布埋设法的不足,完善了防渗墙仪器埋设的方法。

所有这些成果应用于生产实践,极大地推动了防渗墙技术的发展。

总之,近 40 年来,我国的防渗墙施工技术不断发展,在各项水利水电工程中建造的防渗墙已不计其数,其中深度超过 40m 的防渗墙有四五十道,许多工程的难度,在世界上都是罕见的。我国的防渗墙技术整体上已接近国际先进水平,有的工程已达到国际先进水平。

## 第四节 地下防渗墙材料及其应用

地下连续防渗墙墙体材料,根据其抗压强度和弹性模量可以分为刚性材料和柔性材料。刚性材料是指抗压强度大于 5MPa,弹性模量大于 1 000MPa,包括普通混凝土(或钢筋混凝土)、黏土混凝土和粉煤灰混凝土等;柔性材料是指抗压强度小于 5MPa,弹性模量小于 1 000MPa,包括塑性混凝土、自凝灰浆和固化灰浆等。

### 一、普通混凝土

地下连续防渗墙所用的普通混凝土是指胶凝材料除水泥外不参加其他混合材料,在高流动性泥浆下浇筑的混凝土。

有关混凝土的抗压强度、弹性模量、渗透系数等性能此处就不再赘述。但是由于本文中的混凝土是用于地下连续防渗墙,因此对混凝土的要求又与用于建筑的混凝土有所不同。这主要是因为防渗墙混凝土必须通过直径较小的导管在泥浆下浇筑,浇入的混凝土不可能振捣,而是依靠自重泥浆下流动,因而混凝土拌和物的性能十分重要。在一般情况下,对地下连续防渗墙混凝土的具体要求如下:

- (1)较好的和易性。一般要求地下连续防渗墙混凝土的人孔塌落度为 18~22cm。
- (2)较小的泌水率。一般要求泌水率小于 4%,这样混凝土拌和物有较好的黏聚性。
- (3)初凝时间不小于 6h,终凝时间不大于 24h。
- (4)密度不小于 2 100kg/m<sup>3</sup>,不宜采用密度过小的骨料。

### 二、黏土混凝土

黏土混凝土就是在混凝土中掺加一定量的黏土。黏土混凝土不仅可以节省水泥,还可降低混凝土的弹性模量,使混凝土具有更好的变形性能。同时也改善了混凝土拌和物的和易性,使浇筑时不易堵管。另外,黏土混凝土早期强度较低,特别有利于接头孔的钻凿,给施工带来很大的方便。

对黏土混凝土材料和混凝土拌和物的要求与普通混凝土基本相同。由于要在混凝土中掺加黏土,所以对砂的含泥量的要求可以放宽到 8%,对石子的含泥量的要求也可以适当放宽。

黏土混凝土的主要性能如下:

(1)抗压强度。黏土混凝土的抗压强度一般都在 10MPa 左右。影响黏土混凝土强度的主要因素是混凝土的水灰比(水灰比越小,强度越高),其次是掺土率(随着掺土率的增大,强度呈降低趋势)。与普通混凝土相似,黏土混凝土的抗压强度随着龄期的增长而增长,其增长率也与普通混凝土相似。

(2)弹性模量。一般 28d 抗压强度为 10MPa 的黏土混凝土的弹性模量为 1 100~

1 400MPa。

(3) 渗透性能。黏土混凝土的抗渗性比不掺黏土者差。当水泥用量为  $250 \sim 380 \text{ kg/m}^3$ , 黏土掺加率不大于 30% 时, 其抗渗标号基本可达到 S8 (连续 64h 最大不透水压力为 0.8MPa)。但若再降低水泥用量或增加黏土用量, 则抗渗性能将大幅下降。

### 三、粉煤灰混凝土

粉煤灰是电厂燃烧煤粉后获得的工业废料, 将粉煤灰作为一种外加活性矿物材料来配制的混凝土就是粉煤灰混凝土。

粉煤灰的加入对粉煤灰混凝土性能具有以下影响:

(1) 后期抗压强度大。与普通混凝土相比, 粉煤灰混凝土早期的强度较低, 但到 90d 或更长一些龄期时, 粉煤灰混凝土的强度一般能赶上甚至超过不掺粉煤灰的基准混凝土, 并在 3~5a 以后, 其后期强度仍不断增长。这是因为在粉煤灰的细粉末中含有火山灰质材料, 它具有二次反应性能, 即: 可溶性的活性  $\text{SiO}_2$  与水泥水化所产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  相结合, 产生水化化合物——水化硅酸钙和水化铝酸钙。

(2) 混凝土和易性得到改善。混凝土中加入粉煤灰后, 粉煤灰的密度只有水泥的  $2/3$ , 故按质量取代水泥后, 会使灰浆的体积增加。增加的灰浆填充了混凝土骨料之间的空间并使之润滑, 增加了拌和物的黏聚力和可塑性, 从而提高了混凝土的和易性。

(3) 延长混凝土的凝结时间。由于粉煤灰的掺入, 使混凝土中的水泥用量减少, 而粉煤灰的水化需在水泥的水化之后才能进行, 因而延长了混凝土的凝结时间。

(4) 后期抗渗性能好。一般说来, 28d 龄期以前的粉煤灰混凝土的抗渗性能不如不掺粉煤灰的混凝土, 而且抗渗能力随着粉煤灰掺量的增加而降低, 到 60d 龄期, 粉煤灰混凝土的抗渗能力就接近不掺粉煤灰的混凝土, 90d 龄期开始超过不掺粉煤灰的混凝土, 四个月粉煤灰混凝土的抗渗性能还能进一步提高。

### 四、塑性混凝土

塑性混凝土是用黏土和(或)膨润土取代普通混凝土中的大部分水泥形成的一种柔性墙体材料。

国外自 20 世纪 60 年代末开始采用塑性混凝土作为地下连续防渗墙的墙体材料。如: 智利的科尔本(Colburn)心墙土石坝高 116m, 地下连续防渗墙使用塑性混凝土, 配合比为每  $1 \text{ m}^3$  塑性混凝土用水泥 75kg、砂和砾石 148kg、黏土 121kg、膨润土 19kg、水 423kg。该墙的防渗效率为 99.8%。我国 1989 年在福建水口水电站主围堰防渗墙首次应用成功, 随后在其他工程中推广。

塑性混凝土的性能如下。

(1) 塑性混凝土拌和物的密度一般为  $2000 \sim 2200 \text{ kg/m}^3$ , 泌水率不超过 3%, 稳定性与和易性较好, 塌落度随时间的增长而减少。初凝时间比普通混凝土的初凝时间延长 0.6 倍, 终凝时间延长 4 倍。

(2) 对于龄期与强度的增长关系而言, 塑性混凝土的抗压强度早期增长速度较低, 而后期强度增长速率较高。

(3) 水泥用量为  $80 \sim 120 \text{ kg/m}^3$  的膨润土塑性混凝土, 其  $c$  值为  $0.2 \sim 0.3 \text{ MPa}$ ,  $\varphi = 20^\circ \sim$

30°。

(4)普通混凝土经养护后,完全干燥时的干缩率仅为 0.006%~0.009%,而塑性混凝土的干缩率为 0.3%左右,比普通混凝土的干缩量大,因而只适宜用于水下环境中。

(5)塑性混凝土的渗透系数  $K$  值主要受混凝土中的水泥、膨润土和外加剂的种类及用量影响,其变化范围在  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$  时,能满足地下连续防渗墙的要求。

## 五、自凝灰浆

自凝灰浆是 20 世纪 60 年代末由法国地基公司首先采用的。这种材料由在膨润土固壁浆液中加入水泥和缓凝剂制成,凝固前作为造孔的固壁浆液,槽孔造成后即自行凝固成为墙体。

自凝灰浆的常用配比为:固化体需水泥  $200 \sim 300 \text{ kg/m}^3$ 、膨润土  $30 \sim 60 \text{ kg/m}^3$ 、水  $850 \text{ kg/m}^3$  左右,也有掺加混合料(如砂、粉煤灰、石),当水灰比为 0.2~0.4 时,弹性模量为  $40 \sim 300 \text{ MPa}$ 。墙体的渗透系数可以达到  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。

自凝灰浆能增加地下连续防渗墙的防渗性能,原因是自凝灰浆的主要成分是膨润土,由于膨润土的颗粒很细,在槽孔内可以渗入砂砾层,填充于地层的空隙中,从而增强地下连续墙的防渗性。

除单独使用自凝灰浆做墙体材料外,还可以和装配式钢筋混凝土及钢板桩配合使用。即利用工厂预制成的墙板或钢板桩,在槽孔完成后插入槽内,墙或钢板桩与槽壁之间的空隙由自凝灰浆所填充,使预制墙或钢板桩与地层紧密连接,预制墙板或钢板桩之间的接缝防渗也由自凝灰浆来承担。

1985 年,在我国的深圳大亚湾核电站,由法国地基公司施工,做成了我国的第一道自凝灰浆防渗墙。该墙是为了保障一面临海、三面环山的“核岛”基坑开挖(深 12m)而修建的,长约 1 004m,平均深度为 12.5m,最大深度 16m,墙厚 0.8m。此墙 28d 的抗压强度不低于 0.2MPa,渗透系数达到  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。

## 六、固化灰浆

固化灰浆是在自凝灰浆的基础上发展起来的。它是在单元槽段造孔完毕后,向槽孔内的泥浆中加入水泥等固化材料,砂、粉煤灰等掺和料以及水玻璃等固化剂和外加剂,经机械搅拌或压缩空气搅拌后,凝固成墙。

### 1. 固化灰浆与自凝灰浆的区别

自凝灰浆是在造孔的过程中将自凝灰浆浆液注入槽孔内,造孔时起固壁作用;槽孔完成后,不需要更换浆体,也不需要浇筑混凝土,灰浆成为墙体的材料,此时灰浆起承压防渗的作用。固化灰浆是在造孔工序完成后,加入槽孔泥浆中,同时加入水泥、外加剂、固化剂等。因此固化灰浆不必像自凝灰浆,受造孔时间的限制(使用自凝灰浆,槽孔造孔速度慢时,造孔尚未完成,槽内泥浆已凝固),浆液浓度可适当增加,浆体密度较高,其强度和抗渗性能都比自凝灰浆高。

### 2. 固化灰浆的材料

(1)泥浆。泥浆必须满足一定的性能要求,才能在造孔过程中主要起固壁和悬浮钻渣等作



用,造孔完成后成为固化灰浆的基本材料。

(2)水泥。水泥是主要的固化材料,可以采用 325 号或 425 号硅酸盐水泥或矿渣水泥。采用普通混凝土,水泥会和膨润土(黏土)很快发生絮凝反应,使混合物迅速凝固,这会影响固化灰浆的均匀性,所以采用矿渣水泥较好一些。

(3)水玻璃。水玻璃是起固化剂的作用,可以与固化灰浆的材料发生反应而使固化灰浆固化。

(4)粉煤灰。粉煤灰在固化灰浆中是一种填料。一般使用磨细的粉煤灰。

(5)砂。砂在固化灰浆中起骨料作用。但加砂过多,不易在槽孔内搅拌均匀,使槽孔内的固化灰浆凝固体性质不均匀。砂可以在碱性激发剂作用下发生水化反应,因此它能提高固化灰浆凝固体的强度、抗渗性和耐久性,并能减少泌水和体积收缩。

(6)外加剂。外加剂的成分较多,有少量的木质素磺酸钙、硫酸钠、氯化钙等。主要是为了提高固化灰浆的性能。

### 3. 固化灰浆性能的影响因素

由于固化灰浆是一种新型的地下连续防渗墙墙体材料,目前对其性能的认识不是十分明朗,固化灰浆各性能的影响因素只能粗略地总结如下。

(1)抗压强度。影响固化灰浆抗压强度的因素极为复杂。不同产地的膨润土泥浆或黏土泥浆所形成的固化灰浆具有不同的强度;黏土(膨润土)掺加量不同,固化灰浆的强度也不同;外加剂不同,所得到的固化灰浆强度也不同。

(2)弹性模量。影响固化灰浆弹性模量的因素也是很复杂的,固化灰浆的抗压强度和弹性模量之间没有很好的相关关系。

(3)渗透系数。固化灰浆凝结体的渗透系数可以满足一般低水头防渗墙的要求。影响固化灰浆渗透系数的因素有水泥、黏土、固化剂的用量等。