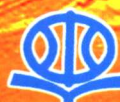


夏可风 主编

2006 水利水电 地基与基础工程

● 中国水利学会地基与基础工程专业委员会 编

技术

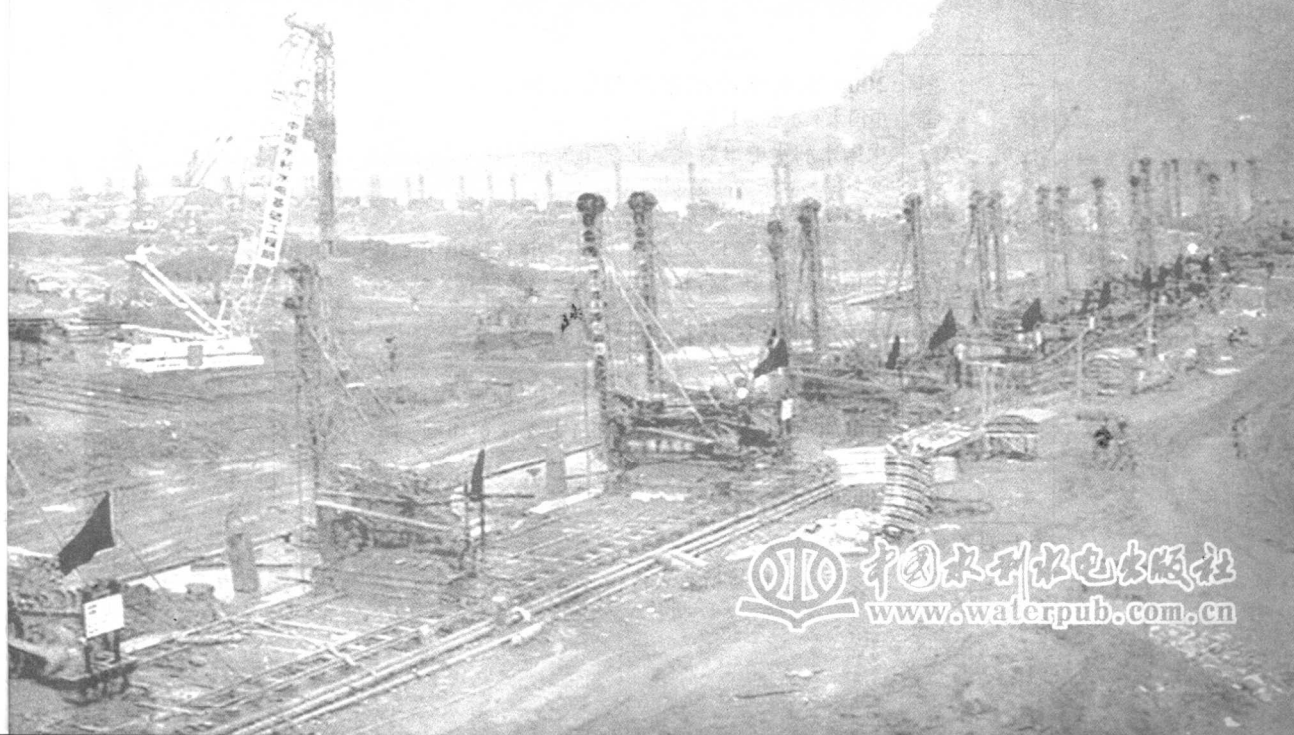
 中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

夏可风 主编

2006 水利水电 地基与基础工程

● 中国水利学会地基与基础工程专业委员会 编

技 术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为第八次水利水电地基与基础工程学术会议论文集。主要内容包
括地基勘测与设计, 灌浆工程, 高喷灌浆工程, 混凝土防渗墙工程, 桩基
工程, 振冲工程, 预应力锚固技术, 钻探技术, 地基试验与研究, 基础工
程检验与监测, 工程设备研制与材料技术, 其他地基防渗与加固技术等,
收录论文 150 多篇, 基本反映了 2004~2006 年间我国水利水电建设地基
与基础工程技术的主要技术成果。

本书内容丰富, 资料翔实珍贵, 实用性强, 可供水利水电行业及其他
建筑领域的工程技术人员、院校师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

2006 水利水电地基与基础工程技术/夏可风主编; 中
国水利学会地基与基础工程专业委员会编. —北京: 中
国水利水电出版社, 2006

ISBN 7-5084-3677-6

I. 2... II. ①夏... ②中... III. ①水利工程—地
基—中国—2006—学术会议—文集②水利工程—基础
(工程)—中国—2006—学术会议—文集③水利发电工
程—地基—中国—2006—学术会议—文集④水利发电工
程—基础(工程)—中国—2006—学术会议—文集

IV. TV223-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 024201 号

书 名	2006 水利水电地基与基础工程技术
作 者	中国水利学会地基与基础工程专业委员会 编 夏可风 主编
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)、68331835 (营销中心)
经 售	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	787mm×1092mm 16 开本 49.25 印张 1168 千字
版 次	2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	100.00 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

中国水利学会地基与基础工程专业委员会组织编撰的《2006水利水电地基与基础工程技术》论文集即将出版了，与此同时，第八次水利水电地基与基础工程学术会议也将要举行，我感到十分高兴，衷心地祝贺论文集的出版和学术会议取得圆满成功。

改革开放以来，我国的经济实现了连续多年的快速发展，目前已进入了新一轮的增长周期，经济的增长不能主要依靠生产要素的投入和规模的扩大，而要靠技术创新和资源配置的优化来推动。为此，党中央制定了今后15年我国科技发展的指导方针：自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来。胡锦涛总书记多次发表讲话指出，提高自主创新能力，是保持经济长期平稳较快发展的重要支撑，是调整经济结构、转变经济增长方式的重要支撑，是建设资源节约型、环境友好型社会的重要支撑，也是提高我国经济的国际竞争力和抗风险能力的重要支撑。要把增强自主创新能力作为科学技术发展的战略基点和调整经济结构、转变经济增长方式的中心环节，努力走出一条具有中国特色的科技创新之路。

自主创新，包括三种途径：一是拥有自主知识产权；二是叫做集成技术，把多种相对简单的单项技术组合起来，形成新的具有更高生产能力的技术；三是引进消化吸收再创新。

我们的水利水电建设、水利水电地基与基础工程技术的发展，也应当遵循自主创新的指导方针。回顾新中国成立初期，我们建设密云水库的时候，引进了前苏联的乌卡斯连锁灌注桩建造防渗墙的技术，但我们没有停留在人家的水平上，而是进行自主创新，开发了先凿主孔、后劈副孔、连孔成槽的新工艺，从此槽孔型的混凝土防渗墙成为我国深厚覆盖层的防渗的主要形式，至今已近半个世纪。再如长江三峡二期大江围堰混凝土防渗墙的施工，咨询外国人要2年工期，要搞5排高喷、2道混凝土防渗墙。我们没有那样搞，我们采用了以1道混凝土防渗墙为主、局部2道墙的方

案，引进了先进的设备——液压铣槽机，但铣槽机只完成了小部分工程量，大部分地层它啃不动，于是，我们进行了消化吸收再创新，搞了集成技术，搞了“铣、钻、抓、砸、爆”，最后在1个枯水期内圆满地解决了问题。这样的例子还有很多，近年来创新的成果也不少，我在这里强调一下，是希望引起大家的重视，响应党中央的号召，认清我国经济发展的形势和趋势，把科学技术工作的重点转移到自主创新的轨道上来，在学会工作中大力倡导和支持技术创新，保持和进一步增强我们的实力，实现可持续的、长盛不衰的发展。

当前，我国的水利水电开发持续升温，许多高坝大库同时兴建，一大批青年工程师担负了这些工程的勘测、设计、施工、监理和管理的重要职责，这是你们的光荣和骄傲，也是你们的幸福。你们都有很高的素质，我相信你们可以出色地完成任务。借此机会，我也想向青年朋友们嘱咐一点，大型水利水电工程关系国计民生，是百年大计、千年大计。当年，周恩来总理要求葛洲坝的建设者，要以“如履薄冰、如临深渊”的精神工作。总理的教导至今仍有现实意义，希望你们时刻牢记，谦虚谨慎，刻苦钻研，理论联系实际，创造出一个个无愧于伟大时代的精品工程来。

陈安仪

2006年3月9日

《2006 水利水电地基与基础工程技术》

编辑委员会

顾问 孙 钊 李允中

主 编 夏可风

副主编 马晓辉

委 员 (以姓氏笔画为序)

毛亚杰 王明森 韦 伟 丛蔼森 安中仁 杨晓东 余开云

赵存厚 高 翔 傅文洵 董建军 蒋振中

秘书长 肖恩尚

审 稿 (以姓氏笔画为序)

马晓辉 邓 安 刘 军 刘 勇 孙树林 朱珍德 余湘娟

张发明 张金接 张富有 李守德 肖树斌 肖恩尚 周继凯

侯玉宾 郝宏录 夏可风 袁宝远 郭海庆 冀木金 彭汉兴

焦家训

编 务 刘丽芬 李 玲

中国水利学会地基与基础工程专业委员会

第二届委员会

名誉主任委员	陈賡仪						
顾问	孙 钊	李允中					
主任委员	夏可凤						
副主任委员	马晓辉	毛亚杰	王明森	韦 伟	丛蔼森	安中仁	
	余开云	杨晓东	赵存厚	高 翔	傅文洵	董建军	
	蒋振中						
秘书长	肖恩尚						
副秘书长	于子忠	刘 勇	张金接	焦家训			
	于洪治	马邦凯	孔祥生	王自高	王松春	王泰恒	
	王爱民	孙晓范	朱汉元	朱鸿兵	何承伟	何培章	
	吴晓铭	张 平	张丕定	张玉莉	张玉华	张维明	
	李 力	李 焰	李范伍	李慎宽	肖立生	陈 俊	
	陈敦刚	周立本	尚 伟	罗朝文	郑亚平	祝 红	
	茹建辉	贺永利	席燕林	涂建湘	曹洪波	梁 真	
	黄灿新	黄炳福	彭春雷	程家文	程聚辰	葛怀光	
	雷有栋	熊 进	薛砺生				
咨 询 专 家	尤立新	王志仁	王学彦	王洪恩	刘传文	刘瑞钾	
	刘德良	张广敦	张月江	张志良	张良秀	张芳芭	
	张运舒	张景秀	张福贤	李思慎	李旺雷	李昌华	
	李绍基	杨月林	肖田元	肖树斌	邱小佩	陈珙新	
	罗鲁生	范锦华	郑 治	查振衡	胡与民	胡迪煜	
	郝鸿禄	陶景良	高广淳	康景俊	温文森	蒋乃明	
	蒋养成	蒋硕忠					
秘 书	李 玲						

(各组名单均以姓氏笔画为序)

**《2006 水利水电地基与基础工程技术》及
第八次水利水电地基与基础工程学术会议**

主要赞助单位

河海大学江苏新技术开发总公司

中国水电基础局有限公司

北京振冲工程股份有限公司

中国葛洲坝集团基础工程有限公司

中国水利水电科学研究院

中国水利水电建设集团公司

山东省水利科学研究院

水利部建设与管理总站

中国华水水电开发总公司

武汉长江工程技术公司

浙江省水电建筑基础工程有限公司

宜昌天通泵业有限公司

天津市水利学会施工专业委员会

天津市水力发电工程学会基础处理施工专业委员会

德国宝峨机械设备有限公司

“十五”期间水利水电地基与基础工程技术进展

夏可风

(中国水利学会地基与基础工程专委会)

[摘 要] “十五”期间我国水利水电建设地基与基础工程技术获得快速发展,为一批高坝大库或建筑在复杂地基上的工程提供了重要的技术支持。本文主要从覆盖层地基处理和岩石地基处理两方面简要介绍其技术发展状况。

[关键词] “十五”期间 地基与基础技术 进展

“十五”期间,我国水利水电建设快速发展,在建项目的数量和规模都达到了前所未有的水平。由于建筑物规模和功能的扩展,它们对地基的要求进一步提高。由于地质的不均一性,即使相对良好的坝址和库区也可能有不良地质地段的存在。还有追求最大经济效益的规则又要求承包商尽量加快施工速度,降低工程造价。所有这些都对地基与基础工程技术提出了新的挑战,促进新技术、新工艺、新设备的开发。本文简要介绍5年来水利水电工程中部分地基与基础技术的发展状况。

1 覆盖层地基处理

1.1 混凝土防渗墙

混凝土防渗墙是覆盖层地基和土石坝(围堰)工程的主要防渗措施。自1998年长江三峡工程二期围堰混凝土防渗墙取得成功以后,我国的防渗墙技术总体上达到了国际先进水平,近年来并不断有新的发展。

1.1.1 工程规模扩大、施工强度增高

2003年建成的河北黄壁庄水库副坝混凝土防渗墙长度4860m、防渗面积271481m²、浇筑混凝土283822m³,是我国工程量最大的混凝土防渗墙,历时4年完成。

四川冶勒水电站坝基覆盖层深度超过420m,坝基及岸坡混凝土防渗墙分上下两段建造,上段在地面施工,下段在专门开挖的隧洞中施工,隧洞的顶部即上下两墙的连接处进行水泥灌浆。防渗墙总深度140m,防渗面积55000m²,其中下墙最大深度达到84.85m,墙厚1.0m,为国内已建成的防渗墙单墙的最大深度,超过了此前的黄河小浪底主坝防渗墙81.9m的深度,工程于2004年建成。

新疆下坂地水库坝基覆盖层最大深度149m,设计拟采用上墙下幕垂直防渗方案,2003年防渗墙及帷幕灌浆现场试验施工了3个防渗墙槽孔和10个帷幕灌浆孔,防渗墙槽孔深度达到102m。至2005年年底正在施工的四川狮子坪水电站坝基混凝土防渗墙,已完成槽孔最大深度达到93.5m,厚度1.2m,这标志着我国混凝土防渗墙的施工能力已经达

到百米深的水平。

施工强度最高的是金沙江向家坝水利枢纽一期围堰混凝土防渗墙,该防渗墙面积 51788m^2 ,厚 0.8m ,最大深度 81.8m ,工期要求5个月,组织了137台冲击钻机、6台抓斗和1台液压铣槽机同时施工,最大施工强度达到造孔 $15661\text{m}^2/\text{月}$,成墙 $23820\text{m}^2/\text{月}$,超过了嫩江尼尔基水库的 $14000\text{m}^2/\text{月}$ 和长江三峡工程二期下游围堰的 $8103\text{m}^2/\text{月}$ 的强度。

1.1.2 施工技术水平提高

防渗墙施工的技术水平主要反映在造孔机械的施工效率上。自长江三峡二期围堰施工引进我国第一台液压铣槽机以来,液压铣槽机、抓斗等高效挖槽机械在大型重要工程中已成为施工的主力设备,基本摆脱了完全依赖旧式冲击钻机的局面。冶勒水电站坝基隧洞中施工的防渗墙采用了高度仅为 5.2m 的低净空液压铣槽机,在粉质土、砂卵石和胶结岩中造孔平均工效达到 $68\text{m}^2/\text{d}$,施工工效为同时施工的冲击反循环钻机的20倍。防渗墙造孔护壁泥浆基本上由当地粘土泥浆发展为较多地采用膨润土泥浆,造孔安全和质量、混凝土浇筑质量得到更好的保证。

墙段接头技术取得了关键性的突破,中国水利水电基础工程局科研所研制的深墙拔管技术在尼尔基水库坝基 4 万余 m^2 的防渗墙工程中,112个一期槽孔、222个接头孔全部采用拔管法施工,墙厚 80cm ,最大深度 39.75m ,100%获得成功。为加快该工程的进度作出了巨大贡献。此后在其他工程中,拔管深度不断加大,直至达到 80.6m (四川狮子坪水电站坝基防渗墙,接头管直径 1.0m),为深墙和高强度的混凝土防渗墙施工提供了有力的技术支持。

1.1.3 墙体材料

近期以来,防渗墙墙体材料呈现多样化。塑性混凝土、普通混凝土、高强混凝土和钢筋混凝土都有应用。冶勒水电站坝基防渗墙混凝土强度等级最大达到 C_{9040} ,是我国水工混凝土防渗墙材料强度最高的。

值得一提的是,塑性混凝土在我国一些工程中已有应用,但还应进一步推广。长江三峡工程二期围堰防渗墙全部采用了塑性混凝土和“柔性材料”(一种风化砂砂浆)。围堰1998年11月建成。施工时塑性混凝土机口取样试验 $R_{28}=5.04\text{MPa}$, $E=1284\text{MPa}$; $K=2.5\times 10^{-8}\text{cm/s}$ 。经过4年运行,2002年11月上游围堰拆除,拆除的墙体取样试验成果 $R=11.4\text{MPa}$, $E=5052\text{MPa}$, $K=3.2\times 10^{-10}\text{cm/s}$ 。可以看出塑性混凝土后期强度、抗渗性能增长较多,这与其他试验研究和观测成果也是一致的,塑性混凝土不仅可以用于临时工程,完全也可以用于永久工程。我国的塑性混凝土水泥用量一般为 $140\sim 320\text{kg}/\text{m}^3$,国外通常少于 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 。

1.1.4 水工混凝土防渗墙技术向其他建筑领域扩展

水工混凝土防渗墙技术为其他建筑领域的深基础施工创造了有利条件。润扬长江公路大桥是我国公路桥梁建设史上规模最大、标准最高、技术最复杂的特大型桥梁工程,其南汉悬索桥主跨径长达 1490m ,位居中国第一、世界第三,南汉桥北锚碇要承受 68 万 kN 的主缆拉力,被誉为“神州第一锚”,是大桥的关键部分,它要建设在一个江心洲的软弱淤泥及疏松粉细砂层上,并且穿过软弱地层坐落和深入到基岩。要开挖一个世界罕见、国内第一的特大深基坑,中国的建桥专家为之曾进行了长期的研究,比较了多种施工方案,

最后决定带案招标。长江水利委员会和中国水利水电基础工程局等单位以水工混凝土防渗墙的巨大优势提出的地连墙方案一举夺标。仅用了5个月的时间完成了长69m、宽50m、平均深56.5m的大型地下连续墙。润扬大桥北锚碇地连墙还拥有我国最重的钢筋笼(99.4t)、最深的V型钢板接头(53.2m)、嵌入坚硬基岩最深(花岗岩7.1m)等多个单项全国第一。润扬大桥北锚碇地连墙的设计水平和施工质量受到了交通部领导和国内外专家的高度评价。此后利用类似的技术还施工了武汉阳逻长江公路大桥南锚碇地连墙、广州黄埔大桥等工程(它们的有些技术指标还超过了润扬大桥),为我国的公路桥梁建设提供了一套新的科学的工法。

1.1.5 防渗墙施工事故

防渗墙施工一般来说是很安全的,但情况不明或处置不当也可能酿成重大事故,特别是在病险水库处理时尤应谨慎。近年来有一些工程在坝体混凝土防渗墙施工时发生了重大事故,导致了巨大的经济损失和严重拖延工期。比较典型的是河北省某水库副坝混凝土防渗墙施工中多次发生槽孔坍塌、坝体塌坑、坝体塌陷,其中最严重的一次塌坑面积 $46.2\text{m} \times 53.5\text{m}$,影响范围 $127\text{m} \times 79.5\text{m}$,最大塌陷深度12.1m,一次流失坝体土体积 3900m^3 ,可能在防渗墙技术史上是最为严重的施工事故。分析事故的原因:一是地质条件复杂,坝基卵石层存在强渗漏带,基岩上部有溶隙、溶槽、溶洞等集中渗漏通道;二是施工工艺不适当,固壁泥浆质量不好,堵漏措施不得力等。该工程的教训给其他防渗墙工程施工提供了必须引以为戒的重要信息。

1.2 深厚覆盖层及基岩灌浆

覆盖层灌浆我国通常采用循环钻灌法(即孔口封闭法),国外较多采用预埋花管法(Soletanche法)。近年来两种方法都有应用,我国在覆盖层防渗工程中广泛采用防渗墙技术的同时,灌浆技术仍然保持着较高的水平。

1.2.1 深覆盖层灌浆

重庆小南海水库地震堆积天然坝体,高度一般60~70m,部分达80~100m,主要由页岩及粉砂质页岩碎石夹孤石组成,坝基为原河床及阶地堆积物,包括砾石层、粘土及粘土夹砾石层,基岩为页岩。天然坝体渗漏严重,并已产生渗透变形,平均渗漏流量达到 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 左右。大坝及坝基防渗处理,经过多种方案比较和灌浆试验确定采用帷幕灌浆,布置3排灌浆孔,最大灌浆深度80m。采用孔口封闭灌浆法施工,无岩芯钻进,泥浆固壁,灌注水泥粘土浆,完成钻灌工程量48124m,注入干料2.2万t,形成帷幕最大透水率11.2Lu,效果良好,于2001年底完工,这是我国已建成的最深的覆盖层帷幕灌浆工程。

1.2.2 幕墙结合垂直防渗

由于防渗墙的施工深度有限,或者防渗墙下面的基岩透水性大,所以在许多工程中采用了防渗墙下接帷幕灌浆的防渗结构形式。长江三峡工程二期围堰为解决堰基覆盖层以下基岩渗漏问题,在防渗墙下布置了单排孔基岩帷幕灌浆。灌浆通过在防渗墙内预埋管进行,埋设的管材为内径 $\phi 120\text{mm}$ 的PVC塑料管或 $\phi 110\text{mm}$ 的钢管(深度大于30m时)。最大埋设深度70m,埋设成功率达到97%以上。三峡工程的经验为深厚覆盖层中采用幕墙结合的防渗形式提供了范例。冶勒水电站坝基防渗墙部分地段下设3排孔的帷幕灌浆,其中2排孔通过防渗墙内预埋灌浆管进行,灌浆管平均埋设深度66m,最大78m,墙下灌

浆深度最大 57.5m。第 3 排孔在防渗墙下游施工, 钻灌深度 75.5~119.5m。新疆下坂地水库坝基防渗采用混凝土防渗墙下接帷幕灌浆的形式, 帷幕由 5 排孔组成, 1 排孔灌浆通过在混凝土防渗墙内埋管进行, 其他 4 排孔分别在防渗墙的前后覆盖层中钻灌。下坂地现场帷幕灌浆试验深度达到 150m, 是我国最深的覆盖层灌浆的记录。

1.2.3 预埋花管法灌浆

预埋花管法, 是国外覆盖层灌浆普遍使用的方法, 我国在 20 世纪 50 年代末期的密云水库砂卵石地基灌浆中首次应用并获得良好效果。后由于混凝土防渗墙技术的推广和预埋花管法造价较高的原因, 使用渐少。近些年来由于工程需要的多样化, 一些覆盖层的灌浆工程又选择了预埋花管法, 例如长江上有的堤防工程和病险水库加固等, 但一般深度较浅。目前, 我国的一些深厚覆盖层的灌浆工程较多选择孔口封闭法, 主要是由于其施工简便, 但从灌浆效果、施工效率等综合比较, 预埋花管法仍有优势, 不应一律弃而不用。

1.3 围堰防渗技术

围堰防渗如采用混凝土防渗墙, 当然可以获得好的效果, 但围堰施工工期毕竟短暂, 防渗标准相对较低, 长期以来人们一直在寻求一种更廉价快速有效的围堰防渗技术。

1.3.1 高喷灌浆

高喷灌浆于 20 世纪 70 年代引进我国, 80 年代在水利工程中获得推广应用, 90 年代国际承包商在二滩工程和小浪底工程完成的高喷防渗幕墙, 设备精良、技术先进、工期短、质量好, 带动了我国高喷技术的发展。近年来有一些大型围堰的防渗工程采用了高喷灌浆技术, 其施工工艺也有新的进步。例如长江三峡二期围堰采用的振孔高喷技术, 成孔速度快, 在钻孔的过程中喷射管同时下入到孔底, 比先行单独钻孔, 之后提钻再下入喷射管不仅节约了时间, 而且也避免了塌孔之虞。这项技术后来在多项工程中推广。由于高压水泵价格比较低, 以前我国高喷多采用高压水、低压浆和压缩空气的三管法, 随着我国自行制造高喷设备的能力增强, 许多工程已经更多地采用了高压浆、高压水和压缩空气的新三管法, 或高压浆和压缩空气的二管法。

值得指出的是, 近年来在不少高喷防渗墙取得成功的同时, 也有一些围堰, 甚至是大型围堰在完成预定的高喷工程量以后, 围堰漏水量依然很大或根本不能闭气。进一步考察, 发现这些围堰的地层大都超出了高喷可适用的范围, 或防渗墙的深度太大, 也有的是施工工艺有问题, 这一情况应当引起注意。

高喷灌浆防渗在水利水电建设中已应用多年, 但一直没有本行业的技术标准。其他建筑行业虽有标准, 但主要是针对地基加固的。在中电联水电标委会的组织和中国水利学会地基与基础工程专业委员会的大力支持下, DL/T5150—2005《水电水利工程高喷防渗墙技术规范》已经正式颁布施行, 这是我国第一部高喷灌浆防渗技术标准。

1.3.2 自凝灰浆防渗墙

自凝灰浆由水泥、水、膨润土加入缓凝剂和分散剂配制而成, 在防渗墙槽孔挖掘过程中不断将这种浆液注入槽孔中起护壁作用, 在槽孔开挖完成以后, 护壁浆液自行凝固成为防渗墙体。自凝灰浆防渗墙是一种快速和廉价的防渗技术, 在国外已应用多年, 在我国大亚湾核电站施工时法国承包商曾经用过。在长江三峡三期围堰施工中, 上游围堰部分堰段采用了这种技术, 施工速度很快, 防渗效果很好。

武汉阳逻长江大桥南锚碇基础围护工程外围挡水帷幕采用了自凝灰浆防渗墙,圆筒形帷幕直径 93m,墙厚 0.8m,墙深平均 52m,防渗面积 1.52 万 m^2 ,是我国已建成的最深、最大的自凝灰浆防渗墙工程。南水北调中线一期穿黄工程北岸竖井外围挡水帷幕深 71.6m,采用置换式自凝灰浆防渗墙,是我国正在建设的最深的自凝灰浆墙。

1.3.3 膏状浆液灌浆

膏状浆液是一种低流动性的膏体浆液,DL/T5148—2001《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》定义为“塑性屈服强度大于 20Pa 的混合浆液”。它在没有外力仅仅在自重的作用下是不流动的,在外力的挤压下它可以流动。膏状浆液灌浆对大空隙地层、高流速地下水的不利条件,具有良好的适应性和可控制性。

20 世纪 80 年代末至 90 年代初,贵州红枫水电站为了在堆砌石坝体中建造一道防渗帷幕,以替代已经腐朽失效的木斜墙,曾经进行了膏状浆液灌浆的系统研究和应用,取得了成功。由红枫水电站采用的膏状浆液的性能和灌浆效果看,我国的膏状浆液灌浆技术当时已经处于国际领先水平。小湾水电站上下游围堰运行时间较长,防渗标准要求较高,施工工期很短。其堰基防渗方案经多方比选,确定上游围堰采用混凝土防渗墙,墙下通过预埋灌浆管进行基岩帷幕灌浆;下游围堰采用膏状浆液帷幕灌浆防渗,灌浆孔分 3 排布置,两边排孔灌注膏状浆液,中间排孔遇砂层时灌注水玻璃系浆液,最大灌浆深度 50m,深入基岩深度 5m。后由于上游围堰混凝土防渗墙施工进度不能满足要求,又将其中的较深部位改为膏状浆液灌浆,布置了 5 排孔,中排孔灌注水玻璃系浆液。小湾围堰堰基防渗工程共完成膏状浆液帷幕灌浆近 1.6 万 m^2 ,水玻璃系浆液灌浆 4810m,历时 3.5 个月,实现了围堰闭气,整个基坑上下游的渗漏量仅 200~300 m^3/h ,达到了施工速度快、防渗效果好的目标。

1.3.4 水泥—水玻璃双液灌浆

水泥—水玻璃双液灌浆是一项传统的灌浆技术,但以前在水利水电工程中并不多用。近年来有的工程将这一技术与水泥灌浆巧妙地结合起来,称其为“控制性灌浆”,在一些小型围堰防渗处理和地下水堵漏中取得了良好效果。洪家渡水电站上游围堰原设计为高喷防渗墙,由于两岸开挖时有大量块石填入河中,形成架空结构,给高喷带来极大困难,遂改为水泥—水玻璃灌浆,布置 2 排孔,使用约 20 天工期,基本上实现了围堰闭气,渗漏量明显减少。

1.3.5 多项技术措施综合防渗

近年来,人们针对具体的工程和地质条件,不拘一格因地制宜地采用了由多项方法组合施工的综合防渗措施,这些措施彼此扬长避短,取长补短,相得益彰,已经在一些工程应用并取得成功的组合措施有:高喷灌浆+水泥灌浆或水泥水玻璃灌浆;膏状浆液灌浆+普通水泥灌浆;深层搅拌+高喷灌浆;振动沉模+高喷灌浆;振切成墙+水泥水玻璃灌浆;灌注桩+旋喷桩;垂直铺塑+深层搅拌;垂直铺塑+高喷灌浆等。有的甚至是 3 种或多种方法组合。最近重庆草街航电枢纽围堰防渗采用振孔高喷、振切成墙与“可控灌浆”等相结合,仅用 26 天完成了 1.1 万 m^2 防渗面积的施工任务,取得了很好的社会经济效益。这种防渗思路也可应用于堤防及病险水库处理。

1.4 堤防及病险水库处理

1998年长江、松花江等流域特大洪水以后,国家投巨资大力整治江河堤防和病险水库。堤防工程和病险水库的险情大都是堤坝本身或地基的渗漏问题,一般具有挡水水头较低、防渗标准相对不高、工程量很大的特点。在这种巨大的市场需求的推动下,几年来我国通过改进、研究开发,涌现了一批工程成本低、施工速度快、防渗和加固效果好的经济实用技术。

1.4.1 深层搅拌水泥土防渗墙

深层搅拌法原是工业民用建筑工程中用来加固地基,提高承载能力的施工方法。它通过搅拌桩机将水泥浆和外加剂注入地层,并与地基土搅拌混合形成水泥土桩柱。将单根的桩柱连锁搭接就形成水泥土连续墙,可以用作堤坝和地基防渗。搅拌施工时加入的水泥量为桩体土重的7%~15%,也可以加入粘土、粉煤灰等。凝固后的水泥土抗压强度为0.5~1.0MPa(粘性土地基)或1.0~3.0MPa(砂性土地基),渗透系数为 $n \times 10^{-6}$ cm/s。深层搅拌桩机由初期的单头、双头,发展到多头,六头搅拌桩机一次成墙长度可达1850~1950mm,墙体厚度20~30cm,每台日成墙面积可达400~500m²。深层搅拌水泥土防渗墙适用于淤泥质土、粘土、粉质粘土、粉土和松砂等地层。施工深度一般在20m以内。由于该项技术质量可靠,施工简便快捷,价格低廉,在长江中下游堤防垂直防渗工程中有60%的工程量采用了深层搅拌水泥土防渗墙。

1.4.2 薄型混凝土或塑性混凝土防渗墙

在深层搅拌法不适宜的堤段,如透水层深度较大、有紧密砂层或卵砾石层等,通常采用薄型混凝土防渗墙。这种防渗墙采用薄型抓斗、射水成槽机、锯槽机或链斗式挖槽机在堤坝或地基中挖掘槽孔(或连续的沟槽),然后浇筑塑性混凝土或混凝土而成。不同的挖槽机械,适用的地层不同,可施工的防渗墙厚度和深度也不同。一般的薄型防渗墙厚度20~40cm,深度20~40m。此法在挖掘连续的沟槽以后,也可以进行垂直铺塑(防渗膜)形成地基防渗结构。

1.4.3 超薄型砂浆防渗墙

砂浆防渗墙通常是在地层中挤入板桩、刀头、模具等,然后通过这些器具向地层注入浆液或砂浆,形成防渗墙体。成墙深度一般在18m以内,墙体厚度在7.5~15cm之间。适用地层为砂性土和粒径较小的砂砾石层。这类方法主要有振动板桩墙法,即通过大型沉桩机械将特制的H型钢板桩沉入地层,然后拔出钢板桩,并同时向板桩下注入浆液,形成单元防渗墙体,将一个个H型单元墙体搭接再形成连续的防渗板墙。振动切槽法,其工作原理是利用振动锤将特制的具有一定厚度和长度的刀头振动切入地层,之后缓缓拔出并向刀头下注入塑性砂浆,形成单元防渗板墙。顺次施工一个个单元板墙衔接成墙。振动沉模法,该法是利用机械振动将空腹模板沉入地层中,然后振动拔出模板,并同时向模板下注入浆液或砂浆,形成单元墙段,连续施工一个个墙段,彼此相接成为连续的防渗板墙。

1.4.4 振冲加固

在坝基覆盖层加固方面,振冲法应用广泛,大功率振冲器普遍应用,加密深度和加密效果都有提高,我国田湾河仁宗海大坝坝基振冲加固碎石桩工程量达到50万m,加固深度25m,是我国规模最大的振冲法地基。特别值得一提的是,在大量工程实践经验的基础

上, DL/T5214—2005《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》已经颁布实施, 这是我国水电行业第一部振冲法技术标准。

1.4.5 土工合成材料应用

土工合成材料是以合成纤维、塑料以及合成橡胶为原材料制成的新型工程材料。它具有质量轻、抗拉强度高、耐腐蚀、应变性能好、加工简单、价格低廉的优点, 土工合成材料的品种很多, 可分为土工织物、土工膜、土工复合材料和土工特种材料四类。土工合成材料可用于防渗、反滤、排水、防护、隔离、加筋等多种用途。近些年来在水利水电工程中, 包括新建工程、病险水库整治、围堰防渗等工程中都获得了广泛应用。在防渗方面, 坝体(或堰体)多用于防渗心墙, 地基多用于垂直铺塑。垂直铺塑最大深度已达 16m。

2 岩石地基处理

2.1 水泥灌浆

水泥灌浆是水工建筑物岩石地基处理的最主要的手段, 我国水泥灌浆的技术水平就其施工效果而言, 处于世界前列, 但施工效率偏低, 能源和材料消耗偏大。施工效率低的原因不仅是我国缺少高效的钻孔和灌浆机械, 更主要的原因是我国对获得高标准灌浆效果的期望, 以及传统灌浆方法和灌浆理念的制约。自乌江渡工程采用孔口封闭灌浆法取得巨大成功以来, 孔口封闭法几乎成为了我国各种灌浆工程主要的甚至惟一的施工方法。随着二滩、小浪底工程的建设, 国际上一些高效率的施工方法, 如 GIN 灌浆法、自下而上纯压式灌浆法、稳定性浆液等引进我国, 我国的灌浆技术呈现向多元发展的趋势, 黄河小浪底和长江三峡是代表性的工程。

2.1.1 黄河小浪底水利枢纽坝基灌浆

小浪底水利枢纽为我国黄河上最大的水利水电工程, 坝基岩石为砂岩、粉砂岩和粘土岩交互地层, 河床有 70~80m 深的覆盖层。大坝为壤土斜心墙堆石坝, 高 154m, 河床覆盖层采用混凝土防渗墙防渗, 两岸岩体进行帷幕灌浆, 斜心墙与基岩接触处进行固结灌浆, 防渗帷幕后及其他部位布置有排水幕、排水孔。各类钻孔和灌浆总工程量达到 76 万 m³之多。其中有的项目设计和施工没有现成的规范可以遵循, 为此, 设计单位进行了大量和深入的研究和试验, 主要有岩体的相对透水性、相对可灌性的研究、灌浆与地下水排水的研究、优选灌浆与地下水排水斜孔产状的研究、稳定性水泥浆的研究、GIN 灌浆法的研究等, 取得了丰富的成果。这些成果部分地应用在工程施工上, 如坝基帷幕灌浆, 工程量 20 多万 m³, 防渗标准 5Lu, 全面使用了稳定性浆液, 部分地段采用 GIN 法灌浆, 计算机集中监控, 最大灌浆压力 3.5MPa。左右岸两段帷幕的单位水泥注入量 222.7kg/m。在粘土斜心墙与基岩接触处进行了固结灌浆, 深入基岩 5m, 总工程量 6 万余 m³, 大部分使用稳定性浆液, 水泥单位注入量 84.77kg/m。灌浆后质量检查表明, 各项灌浆工程质量达到了设计要求。小浪底工程采用 GIN 灌浆法和稳定性浆液的经验后被一些工程借鉴和效仿。

在不同项目、不同地点和不同灌浆阶段采用同一水灰比的稳定性浆液进行灌浆, 这在欧洲和中国都有一些争议; GIN 灌浆法也不宜推广到各种地层, 但小浪底的探索和实践是十分宝贵和有益的。

2.1.2 长江三峡工程坝基灌浆

长江三峡水利枢纽是世界上最大的水利水电工程,大坝为混凝土重力坝,最大坝高181m。坝址基岩以闪云斜长花岗岩为主,局部含片岩捕虏体和闪长岩包裹体以及花岗岩、辉绿岩等岩脉。坝基岩体构造不发育,少数断层规模略大。可利用岩面为弱风化带或微新岩体,总体透水性微弱,但受岩性、断裂构造、岩体结构、地貌形态和河谷卸荷作用影响,渗透性在平面及垂直两个方向上存在较大差异。三峡水利枢纽大坝河床坝段建基面较低,承受较高的下游水位,坝基扬压力较大。

三峡工程防渗灌浆帷幕轴线总长约4173m,帷幕灌浆总进尺约35万m。帷幕的防渗标准:高程160m以下为1Lu;高程160m以上为3Lu;帷幕布置以单排为主,主河床深槽强透水带、地质缺陷部位增加为双排或局部加强。三峡工程坝基防渗需要解决的关键技术问题主要有:建立有效的封闭抽排渗控系统、提高岩体微细裂隙的灌浆效果、选择可灌性好的细水泥灌浆材料、提高帷幕灌浆接触段的灌浆压力、减少河床深厚透水带灌浆施工中的涌水等。上述问题在三峡工程施工中作了深入的研究和试验论证,基本得到了解决。

针对微细裂隙的防渗灌浆处理,采取了小口径孔口封闭高压灌浆法,选用湿磨细水泥浆材作为主要灌浆材料,必要时根据不同需要,分别选用环氧类浆材增加强度,丙烯酸盐类浆材增强防渗性能。针对河床深厚透水带灌浆孔涌水问题,采取了提高灌浆压力、严格灌浆结束条件,以及屏浆、闭浆、待凝、复灌等措施。为了提高建基面接触段帷幕灌浆压力达到不少于2倍的坝前水头,通过现场升压灌浆试验,在有充分盖重的条件下,基本可达到3.5MPa压力。三峡坝基灌浆平均注入量很小,二期工程厂坝工程固结灌浆约为5.1kg/m,帷幕灌浆10.1kg/m。

为了解决与大坝混凝土浇筑在工期上的矛盾,三峡工程坝基固结灌浆部分地采取了无盖重灌浆法,仅浇筑“找平混凝土”后即进行固结灌浆,孔口段表层岩石灌浆质量达不到要求的部位通过预埋灌浆管进行补充灌浆。这一方法对缓解工期矛盾起到了一定的作用。

2.1.3 高坝岩基软弱带灌浆试验

我国的高坝建设已经迈入300m级的水平,拟建和在建的有溪洛渡(278m)、小湾(292m)、锦屏一级(305m)等,这些坝址总的地质条件优良或良好,但也或多或少存在一些软弱夹层或软弱岩带,它们破坏了岩体的均一性和完整性,必须设法加以改造或加固。为此,这些工程都进行了较大规模的前期灌浆试验,以探求通过灌浆方法提高这些软弱岩带的力学性能的可能性。溪洛渡水电站大坝基岩为峨眉山玄武岩,强度高,总体完整性较好。主要构造形迹为一套发育于岩流层层间和层内的构造错动带和节理裂隙系统,工程地质性质较差,对大坝安全不利,需要进行固结灌浆处理。灌浆试验的目的是为了探索坝基弱风化下段岩体、层间层内错动带及节理裂隙系统经灌浆处理后其整体性、刚度和强度改善的程度。通过灌浆试验表明,试区内的岩体,特别是Lc和Ⅲ、Ⅳ类岩体通过灌浆以后,力学性质改善,明显地消灭了低波速,岩体的均匀性提高。小湾水电站坝址基岩由黑云花岗片麻夹片岩、角闪斜长片麻夹片岩等变质岩组成,坝肩和坝基分布有多条蚀变带,强度较低,两岸坝肩岩体卸荷、剪切裂隙发育,卸荷岩体内片岩夹层已风化成软岩或已经泥化,它们对两岸坝肩的抗滑稳定和变形稳定有影响。前期灌浆试验主要针对右岸断层和蚀变带进行。试验的目的是研究以上主要软弱岩体经灌浆处理后力学指标改善情况,

探求在深部范围内的替代置换处理的可能性。初期试验由于试区位置选择不当等原因未达到预期的效果,但试验成果仍然表明,灌后岩体声波和地震波速度、钻孔变模均有不同程度的提高,通过高压固结灌浆可以改善岩体的力学性能。锦屏一级水电站坝址基岩主要由大理岩、砂板岩以及绿片岩组成,并出露有基性云斜煌斑岩脉。大理岩中与坝基密切相关的软弱结构面有多条断层、层内错动带、绿片岩夹层和煌斑岩脉等。灌浆试验的目的是探讨改良这些软弱结构面的可行性。试验表明除煌斑岩外一般岩体的力学指标均可通过灌浆得到明显改善。

2.1.4 高面板坝趾板帷幕灌浆

近年来我国修建的面板堆石坝高度不断升级,对于高面板堆石坝,尤其当坝基岩体的防渗性能很差时,防渗帷幕、特别是趾板基础浅部防渗幕体的抗渗透能力及耐久性等問題,引起了专家的重视。水布垭混凝土面板堆石坝,最大坝高 233m,在世界上同类坝型中居首位。水布垭坝基岩体倾角平缓,岩溶构造发育且富含泥质充填物,趾板上灌浆盖重小,水库运行水头高,后期没有维修补灌条件,为了解决趾板基础浅部防渗幕体的抗渗透能力及耐久性问题,大幅度提高了趾板基础浅部的灌浆压力。通过现场试验确定了采取“均布固结灌浆+帷幕灌浆”、均布锚杆、严格进行灌浆过程控制,包括采用自动报警抬动监测装置等一系列措施,开创性地将趾板浅层岩体灌浆压力由以往的 0.5~0.6MPa 提高到 1~1.5MPa 的水平,对保证帷幕灌浆质量、提高幕体的防渗性能起到了良好作用。

2.1.5 深埋长隧洞高压地下水处理

锦屏二级水电站为引水式发电站,拟建断面积约 30m² 的辅助洞 2 条、长 17.4km;引水洞 4 条,洞径 10m,长 17~18km,最大埋深 2500m。围岩以灰岩、大理岩为主,岩溶发育稍差,以垂直向为主。1989~1995 年进行勘探洞施工时,曾多次发生涌水,最大流量 4.19m³/s,压力一般 6MPa,最大 10.22MPa。2003 年辅助洞的施工开始,为解决上述问题,施工单位自法国、德国购置了多功能液压钻机、超高压孔口封闭器、超高压注浆泵、自动勘探记录系统、自动控制注浆系统、聚氨酯化灌材料以及地质雷达等先进设备,聘请了外国专家现场指导,按照超前勘探、超前注浆的程序进行施工。但问题并未得到完全解决,施工中仍多次发生涌水情况,进展十分困难。2005 年 1~3 月几次发生的突发涌水最大流量 6.7m³/s,压力约 6.9MPa,业主组织有关单位和专家共同攻关,取得了一些效果,但根本解决问题尚需时日。

2.2 水泥灌浆材料

由于工程需求的多样化,因此灌浆材料也呈现了以普通水泥浆为主体的多元化局面,除了前面提到过的膏状浆液、水泥—水玻璃浆液以外,还有:

(1) 稳定浆液。稳定浆液是指掺有稳定剂,2h 析水率不大于 5% 的水泥浆液。小浪底是我国应用稳定浆液灌浆最多的工程。浆液由 0.7:1 的 42.5 级普通硅酸盐水泥浆液,加入 2% 的膨润土和 0.6% 的高效减水剂配制而成,浆液主要性能为密度 1.60~1.67g/cm³,2h 析水率小于 5%,粘聚力小于 4Pa,马氏粘度 28~35s。

(2) 湿磨水泥。湿磨水泥是将水泥浆液通过湿式磨细机磨细,在施工现场现磨现用。三峡工程全部帷幕灌浆和部分固结灌浆(辅助帷幕)采用了湿磨水泥浆,由 42.5 级普通硅酸盐水泥浆经过 3 台串联的湿磨机连续研磨后达到颗粒直径 $D_{95} \leq 40\mu\text{m}$ 。