

三峡工程化学灌浆技术

SANXIA GONGCHENG HUAXUE GUANJIANG JISHU

主编 魏 涛 李 珍

顾问 汪在芹 蒋硕忠



长江出版社

三峡工程化学灌浆技术

——三峡工程化学灌浆论文专辑

主编 魏 涛 李 珍
顾问 汪在芹 蒋硕忠



长江出版社

图书在版编目(CIP)数据

三峡工程化学灌浆技术/魏涛,李珍主编.—武汉:
长江出版社,2008.8
ISBN 978-7-80708-442-6

I.三… II.①魏…②李… III.三峡工程—
化学灌浆—文集 IV.TV543-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第105313号

三峡工程化学灌浆技术

魏涛 李珍 主编

责任编辑:高伟

装帧设计:刘斯佳

出版发行:长江出版社

地 址:武汉市解放大道1863号

邮 编:430010

E-mail:cjpub@vip.sina.com

电 话:(027)82927763(总编室)

(027)82926806(市场营销部)

经 销:各地新华书店

印 刷:冶金部安全环保研究院印刷厂

规 格:787mm×1092mm 1/16

18.25印张 420千字

版 次:2008年8月第1版

2008年8月第1次印刷

ISBN 978-7-80708-442-6/TV·88

定 价:40.00元

(版权所有 翻版必究 印装有误 负责调换)

编委会

顾 问 汪在芹 蒋硕忠
主 编 魏 涛 李 珍
编 委 (以姓氏笔画为序)
邓敬森 邝健政 邱 敏 张 捷
郑亚平 屈高见 饶 明 唐玉书
秘 书 蒋 丹 邵晓妹

中国水利学会化学灌浆分会 第五届委员会届中调整后委员名单

名誉主任 蒋硕忠

主任 汪在芹

副主任 (以姓氏笔画为序)

邓敬森 邝健政 张捷 邱敏
屈高见 郑亚平 饶明(女) 唐玉书

秘书长 魏涛

顾问 (以姓氏笔画为序)

冯善彪 包银鸿(女) 张声华 张良秀
李汉阳 杜嘉鸿 肖田元 陈金石
徐家林 曹光钊 梅锦煜 熊厚金
谭日升 薛绍祖

委员 (以姓氏笔画为序)

王杰 冯志强 叶昊 叶林宏
刘孔凡(女) 刘伟区 吉永年 吕联亚
孙亮 师存禄 何巍(女) 张亚峰
李蓉(女) 李亚军 李旺雷 杜天刚
肖长华 邱小佩(女) 陈芙蓉 陈宛平(女)
周和清 周盛东 林天安 武培松
祝红(女) 胡铁桥 骆晓腾 殷素红(女)
涂建湘 黄惠民(女) 焦家训 葛家良
董建军 谢益民 廖国胜 熊进
谭建平 樊盛祥

主办、承办、协办和赞助单位

主办单位 中国水利学会化学灌浆分会

承办单位 长江水利委员会长江科学院

湖南湘禹防水有限公司

深圳市霸魁防水工程有限公司

协办单位 中国葛洲坝集团公司基础工程有限公司

宜昌瑞派尔特种工程技术公司

赞助单位 北京朗巍时代科技公司

广州市泰利斯固结补强工程有限公司等

序 言

举世瞩目的三峡水利枢纽工程即将竣工,这将是令中国人民感到十分自豪和振奋的一件大事!十余年来,规模宏大的三峡工程,得到了全国人民的有力支持,投入了相当部分全国水电建设者的智慧和力量,以科学创新精神为指导,克服了种种技术难关,终于把一座质量世界一流、发电量全球第一的巨型水利工程摆在了世人面前!这是何等的伟业啊!

在三峡工程众多的科技攻关和创新项目中,化学灌浆技术功不可没!我们采用了水泥—化学高压复合灌浆新技术,解决了复杂岩层中断层破碎带含泥软弱夹层的基础处理问题,使处理后的基础变形模量达到了设计要求;我们采用新研制的高浸润、高渗透、固化剂无毒的改性环氧树脂 CW 浆材进行固结灌浆,使浆液渗透到细微裂隙中,恢复了岩体的整体性;我们采用新研制的环保型丙烯酸盐浆材,全面代替了过去长期使用的有毒、致癌的丙凝材料,建造了化学灌浆帷幕;我们采用了包括化学灌浆在内的五道防水措施,解决了大坝泄水闸上游面部分混凝土活缝的修补问题;我们采用了新研制的高压调速变量化学灌浆和密闭型传输浆设备,安全、有效、卫生地实施了化学灌浆作业。

三峡工程水电建设者取得的上述化学灌浆创新成果,是我国化学灌浆界共同努力的结果,代表了我国目前化学灌浆技术的发展水平,十分珍贵!为了让上述三峡工程化学灌浆技术创新成果和宝贵经验能及时得到总结和推广应用,我们特编辑出版这本论文专辑。希望本专辑的出版发行,能对我们今天正在实施的西部水电大开发提供借鉴和参考。

最后,我们衷心感谢编辑出版此专辑过程中论文作者的合作。

中国水利学会化学灌浆分会名誉主任

蒋硕忠

2008年6月

目 录

综 述

- 三峡工程灌浆概况及浅析..... 蒋硕忠 谭日升 薛希亮(2)
三峡大坝化学灌浆的研究..... 谭日升 蒋硕忠 薛希亮(6)
CW 系化学灌浆材料的性能及工程应用 魏涛 汪在芹 薛希亮 蒋硕忠(13)
三峡工程的防排水措施与材料 谭日升 蒋硕忠(17)
三峡工程化学灌浆技术的应用 高大水 陈湘凤 林文亮(23)

浆材研究

- CW 系化学灌浆材料的研制 魏涛 汪在芹 薛希亮 蒋硕忠(30)
三峡工程丙烯酸盐灌浆材料研究 陈昊 王坦(34)
三峡工程基础化灌加固浆材及工艺试验研究 肖田元 邢京萍 李旺雷(39)

理论研讨

- 低渗性闪云斜长花岗岩断层水泥/化学复合灌浆机理研究
..... 董建军 朱寿峰 魏涛 陈彦生(44)
化学灌浆材料配方设计和选择的新概念 薛希亮(53)
三峡工程 f_{1096} 断层自下而上深孔高压化学灌浆技术研究 魏涛 董建军(59)
三峡工程基础化学灌浆设计与应用探讨 周和清(63)
三峡工程基础固结灌浆优化设计对工期影响的分析论证
..... 张孝军 祝红 陈珙新 熊进(68)

工艺研发

- 三峡工程 f_{1096} 断层复合灌浆处理技术 董建军 魏涛 吕书云(74)
三峡永久船闸 f_{1096} 断层处理设计与施工主要技术 祝红 陈珙新 倪锦初(81)
三峡工程复合灌浆加固断层的关键技术 张孝军 祝红 陈珙新(85)
三峡永久船闸化学灌浆工艺 孙义勇 邱敏(89)
三峡工程断层高压复合灌浆技术的研究与应用 祝红 陈珙新 熊进 倪锦初(95)
浅谈 CW 环氧树脂化学灌浆的施工工艺 王玉龙(99)

设备研制

- HGB-1(2) 型化学灌浆设备的开发研制 董建军 尹作仿(104)
高压化学灌浆液压灌浆塞的研制 董建军 魏涛 朱均超 崔开华(108)
HGB-6 型化学灌浆设备的研制 董建军 尹作仿(112)

现场试验

- 三峡工程 F_{215} 断层化学灌浆现场试验研究 尹作仿 董建军(118)
三峡工程 F_{215} 断层复合灌浆处理试验研究 陈珙新 祝红 熊进(124)

三峡工程水泥化学复合灌浆处理软弱断层试验····· 祝红 陈珙新 熊进(130)

施工应用

固结灌浆

- 三峡工程永久船闸北坡第五级竖井周边围岩水泥化学复合灌浆工程实录·····
····· 魏涛 董建军(136)
- 湿磨细水泥/化学复合灌浆在三峡工程基础处理中的应用研究·····
····· 陈昊 董建军 谭日升(141)
- 化学水泥复合灌浆技术在三峡工程永久船闸基础 f_{1050} 断层加固处理中的应用·····
····· 陈昊(147)
- 三峡工程左厂坝段引水压力钢管底部回填灌浆方案研究····· 周厚贵 李焰(151)
- 三峡升船机上闸首基础 f_{548} 断层化学灌浆加固处理····· 陈磊 朱虹(156)
- 三峡水利枢纽永久船闸竖井化学灌浆施工技术····· 姜命强(162)

帷幕灌浆

- 丙烯酸盐化学灌浆材料的研究及其在三峡二期工程中的应用····· 谭日升 蒋硕忠(168)
- 丙烯酸盐灌浆材料在三峡永久船闸右侧中间山体段混凝土防渗墙下的应用·····
····· 董建军 朱均超 谭日升(174)
- 环保型丙烯酸盐灌浆材料及其应用····· 屈高见(178)
- CW 环氧树脂在三峡 C III-2 标坝基帷幕中的应用····· 王昇(183)
- 三峡厂坝二期工程帷幕灌浆概况及补充化学灌浆····· 马善才(188)
- 三峡工程坝基的防渗灌浆处理····· 於习军 徐年丰(192)
- 长江三峡工程用化学灌浆解决基础防渗帷幕的疑难问题····· 吴金球 彭爱华(198)
- 三峡工程大坝防渗帷幕的化学灌浆强化处理····· 李焰 周厚贵(203)
- 三峡工程基础灌浆与围堰防渗施工技术的创新及应用····· 周厚贵 李焰(210)
- 三峡永久船闸地面工程结构缝渗漏检查与处理施工工艺····· 殷国权 党玉辉(217)
- 强风化地质条件下的丙烯酸盐化学灌浆····· 王玉龙(227)

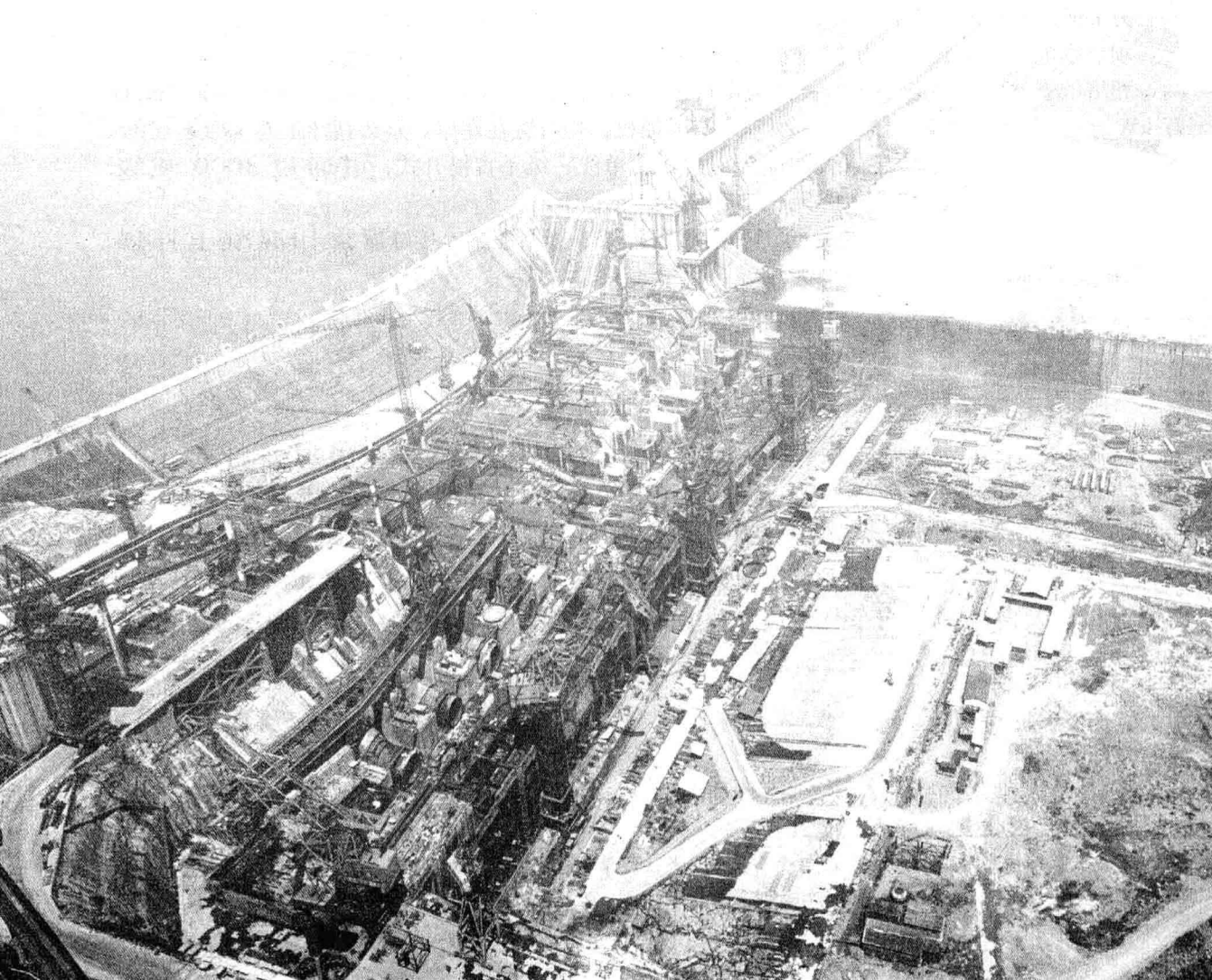
混凝土裂缝灌浆

- 三峡工程泄洪坝段上游面混凝土竖向裂缝的修补处理····· 蒋硕忠 谭日升(232)
- 三峡工程混凝土微细渗水裂缝补强处理措施研究····· 黄良锐 苏杰 廖国胜(236)
- LPL 灌浆材料在三峡工程裂缝处理中的应用····· 杜泽快 教昕 刘春花(244)
- 三峡水利枢纽左岸电站厂房结构缝渗漏处理施工····· 姜命强 何培章(248)
- 三峡工程泄洪坝段上游坝面裂缝处理技术····· 阮征 程义云(253)
- 三峡工程临时船闸坝体横缝渗漏灌浆处理····· 唐经华 陈德堂(260)

效果检查

- 三峡工程 F_{215} 断层复合灌浆效果分析····· 汪在芹 李珍 王燕 魏涛(264)
- 三峡工程 f_{1050} 断层复合灌浆生产试验成果分析····· 尹作仿 董建军(270)
- 三峡永久船闸 f_{1096} 断层复合灌浆处理及效果检验····· 文海家 姜命强 陈云(275)

综 述 ZONGSHU



三峡工程灌浆概况及浅析

蒋硕忠 谭日升 薛希亮

(长江科学院 湖北武汉 430010)

摘要 本文介绍了三峡工程中帷幕灌浆、固结灌浆、接缝灌浆和混凝土补强灌浆的概况,对水泥灌浆及化学灌浆情况作了初步分析,并指出了今后工作中应着重解决的一些问题。

关键词 水泥灌浆;化学灌浆;基础处理;三峡工程

1 工程概述

长江三峡水利枢纽是治理开发长江的关键性骨干工程,具有防洪、发电、航运等巨大的综合效益,是目前世界上在建的最大的水利水电工程。大坝坝址位于湖北省宜昌市三斗坪,坝轴线长 2309.47m,坝顶高程 185m,最大坝高 183m,控制流域面积 100 万 km²,水库正常蓄水位 175m,总库容 393 亿 m³,防洪库容 221.5 亿 m³。枢纽由大坝、水电站和通航建筑物等组成。大坝为混凝土重力坝,水电站为坝后式,分设左右两岸的电站厂房共安装 26 台水轮发电机组,单机容量 70 万 kW,电站总装机容量 1820 万 kW。通航建筑物包括永久船闸和垂直升船机,均布置在左岸。永久船闸为双线五级连续梯级船闸,可通过万吨级船队。升船机为单线一级垂直提升式,可通过 3000 吨级的客货轮。枢纽投资 500.9 亿元,工程浩大,举世瞩目。

三峡工程中涉及灌浆方面的工作有帷幕灌浆、固结灌浆、接缝灌浆和混凝土补强灌浆四个主要方面,可分为水泥灌浆、化学灌浆两大类。

2 灌浆的缘由及部位

2.1 帷幕灌浆

三峡坝基岩体主要为微新(花岗)岩体,局部为弱风化下部岩体,透水性微弱,但由于岩体构造和开挖爆破等原因,使坝基 10~20m 深范围内的表层岩体渗透性普遍增强。为了有效控制坝基渗漏,降低坝基扬压力,减小坝基渗透水力坡降和渗漏量,增强基岩构造面内软弱充填物质的长期渗透稳定性,在大坝坝基、通航建筑物上闸首、山体连接段及两岸坝肩均布置有一定深度的灌浆孔,并在挡水前缘形成一道连续的防渗灌浆帷幕,全长约 3950m,钻灌进尺 33.6 万 m。

2.2 固结灌浆

三峡大坝建基面优质(A级)岩体约占 35%,良质(B级)岩体约占 63%,中等及较

作者简介:蒋硕忠(1939—),男,湖北应城人,长江科学院教授级高级工程师,中国水利学会化学灌浆分会名誉主任委员,主要从事化学灌浆和水工化学材料的研究与推广应用工作。

差(C~D级)岩体仅占2%,极差(E级)岩体所占比例极小。为改善建基面表层浅部岩体及地质缺陷部位岩体的物理力学性能,改善坝基与坝体的应力状况,加强建基面与基础混凝土的整体性,提高大坝稳定性,在大坝坝踵及坝趾各1/4坝基宽度区域、防渗主帷幕上游、封闭帷幕下游和断裂构造及其交切区形成的裂隙密集带均进行一定深度的固结灌浆,钻灌进尺30.7万m。

2.3 接缝灌浆

三峡大坝按工程设计分泄洪、导墙、左右厂房、临时船闸、纵向围堰、左右非溢流坝等八大主体坝段。每个主体坝段又分若干个浇筑坝段,共有80余坝段,每个坝段又分几个坝块进行混凝土浇筑。为使各坝块连成一体,在混凝土设计时有接缝灌浆约45万m²。

2.4 混凝土补强灌浆

三峡大坝混凝土浇筑过程中,由于基岩与老混凝土的约束,温度变化及表面失水干缩,结构应力作用和混凝土浇筑塑性状态时骨料自重下沉及早期养护不当等原因都会引起混凝土产生一些裂缝。设计要求每1万m³混凝土不超过0.5条裂缝。三峡工程混凝土浇筑量为2715万m³,这就可能有大量的裂缝需要补强灌浆处理。

3 水泥与化学灌浆浅析

三峡工程灌浆范围广、部位重要、工艺先进,所用浆材品种多、种类新、用量大,所用设备仪器自动化、电脑化程度高,引起了国内同行的关注。现对上述情况作如下分析。

3.1 水泥灌浆

三峡工程一、二、三期帷幕灌浆钻灌进尺33.6万m,固结灌浆钻灌进尺30.7万m,接缝灌浆45万m²。技术设计审定的帷幕化学灌浆钻灌进尺约1.5万m,只占帷幕灌浆总量的4.4%,其余都是以水泥为灌浆材料的灌浆工程,可见水泥灌浆是灌浆工程的主体。

按设计要求,在水泥帷幕和固结灌浆中,注入率大于10L/min时可用普通水泥,小于10L/min时则要求用湿磨细水泥。而在实际灌浆中,施工单位除在遇到大的吸浆量部位采用普通水泥灌浆外,一般从开始就用湿磨细水泥灌浆直至结束,中途不变换浆材,以避免操作麻烦,所以实际上水泥灌浆又以湿磨细水泥灌浆为主。水泥用525号硅酸盐水泥;水泥湿磨机主要推广应用长江科学院研制的GSM-3型湿磨机,经其湿磨后的水泥细度(粒径) D_{95} 可控制在40 μm 以下。

发达国家干磨细水泥细度(粒径) D_{95} 控制在10 μm 以下,可灌入渗透系数为4.27 $\times 10^{-3}\text{cm/s}$ 的细砂层,在灌浆工程中,可部分取代化学灌浆。目前我国开发的改性水泥(干磨细水泥)比湿磨细水泥粒径细, D_{95} 只有30 μm , $D_{50}\leq 7\mu\text{m}$,可灌入更细的缝隙,其结石强度高,28d强度为62.5MPa,并具有微膨胀性,现已在 f_{1096} 断层破碎带灌浆中正式使用,预计钻灌进尺约4950m,但价格较贵。

3.2 化学灌浆

三峡工程中化学灌浆是用来解决水泥灌浆解决不了的一些细微裂缝的防渗、堵漏

和补强问题的,主要用在基础处理和混凝土裂缝修补上。帷幕灌浆中有一部分是化学灌浆,主要考虑用毒性比丙凝低的丙烯酸盐浆材。固结灌浆中,处理断层破碎带和软弱泥化夹层中的岩石裂隙密集区用环氧浆材,主要是采用长江科学院研制的CW系列浆材,它可灌入0.001mm的裂隙。仅 f_{1096} 断层破碎带,设计用CW浆材处理的,钻灌进尺就有3300m。中化798系列浆材也在 F_{215} 断层破碎带的灌浆试验段上与CW浆材一起使用,两者效果都很好。中国水利水电科学研究院也针对三峡工程基础处理研制了系列环氧浆材,但未在三峡工程试用。在混凝土裂缝处理上,主要考虑使用化学浆材,CW系列环氧浆材是首选,还采用了甲凝等其他化学浆材。

3.3 复合灌浆技术

在三峡工程帷幕、固结、接缝和混凝土补强灌浆工程中,目前主要采用的技术方法仍是水泥灌浆或化学灌浆,但在处理断层破碎带或软弱泥化夹层时,就难以达到设计要求。为此,长江水利委员会三峡设计代表局和长江科学院等单位在丹江口、葛洲坝等工程中采用水泥—化学浆材复合灌浆的实践基础上,通过三峡现场试验,确定了采用高压水泥化学浆材复合灌浆的技术方法。该方法是用3.0~3.5MPa的水压和0.7~0.8MPa的风压高喷冲洗钻孔,使夹层中软弱物质尽可能冲出,随后用水泥浆或水泥砂浆充填被冲空的空间,再用高压水泥浆(5~6MPa)灌注裂隙,使弹模大幅增高,最后用高压化学浆(2~5MPa)灌注更细裂隙,固结未冲尽的软弱夹层,使断层破碎带及泥化夹层恢复整体性。以 F_{215} 断层破碎带试验段为例:处理前呈豆腐渣状的软弱夹层,弹模为1.8~3.2GPa(最低为0.6GPa),透水率为7.52Lu;高压水泥灌浆后弹模为12.3~12.7GPa,透水率为0.37Lu;高压化学灌浆后弹模为14.3~16.0GPa,透水率为0.06Lu(基本不透水)。同时高压复合灌浆后声波测试值提高了15%,满足大坝基础密实性要求。因此,高压水泥化学浆材复合灌浆指标从整体上达到了设计要求。由于复合灌浆效果较好,所以在对 f_{1096} 断层破碎带处理的设计中正式采用此方法,其中设计水泥灌浆钻灌进尺4950m,化学灌浆钻灌进尺3410m。

3.4 灌浆的自动控制与自动记录

三峡工程水泥灌浆已全部实现了灌浆时间、流量、压力和累计灌入量等工艺参数的电脑自动记录与屏幕显示,这对监控灌浆施工作业、检查分析灌浆效果、保证灌浆质量起了很大作用。目前施工单位普遍采用了长江科学院研制的GJY-III灌浆自动记录仪,其测量范围为:流量0~100L/min,精度 $\pm 1\%$;压力0~15MPa,精度 $\pm 1.5\%$;且连续工作时间大于24h。另外,中国水利水电基础工程公司科学研究所与天津大学合作研制的J31C灌浆自记仪及湖南省水利水电勘测设计研究总院和中南工业大学研制的GY-IV灌浆自记仪因各有特色,也在三峡工程灌浆中得到应用。针对断层破碎带的化学灌浆处理,长江科学院研制出HGB型化学灌浆泵,该泵最主要的特点是能够自动调速、稳压,灌浆压力0~24MPa,排浆量(流量)0~11.4L/min,压力及流量在工作范围内可任意调节,很适合断层破碎带的高压水泥—化学复合灌浆工艺需求,也适合混凝土裂缝灌浆的要求。该泵体积小(1000mm×800mm×400mm),重量轻(<150kg),运行时间长且平稳无噪声,已在三峡工程和其他工程中推广应用,取得了较好的效果。

3.5 灌浆与环境保护

灌浆环境污染包括浆材污染和作业污染两个方面。在浆材方面,为减小过去广为采用的丙凝材料(丙烯酰胺)的毒性,长江科学院已研制出第二代丙烯酸盐化学灌浆材料,经同济医科大学鉴定,属实际无毒浆材,可供三峡工程帷幕化学灌浆使用。CW 系列化学灌浆材料也采用了实际无毒的改性胺为固化剂。在化学灌浆作业防止污染方面,长江科学院已研制与 HGB 化学灌浆泵配套的全密封管路系统及储浆系统,在洞内、廊道内进行正常化学灌浆工作时,能把化学浆材的气味降到最低程度,使工作环境有了较大改善。

4 需要改进的问题

(1) 湿磨机研磨出的水泥浆的细度监控问题现仍未得到很好解决。这既需要 GSM-3 型湿磨机本身根据工程的要求进一步改进,也需要完善施工组织管理。我们认为,不必每台湿磨机都配上昂贵的细度测定仪,只要求在一定施工范围内建立细度监测站就可以解决问题。

(2) 灌浆自记仪应防止做假数据,并进一步完善其功能。GJY-III 型灌浆自记仪流量计在插头拔掉断电时,打印机显示的数字为 0,容易给人以达到灌浆结束标准的假象,需要改进。目前的灌浆自记仪大多只能记录流量与压力两种参数,水灰比通过人工测试后用键盘输入,但人工测试水灰比不仅精度不高,还存在人为误差。因此,应研制出能记录更多灌浆参数的灌浆自记仪,使灌浆监控和质量得到进一步保证。

(3) 改性水泥应设法降价使其能推广使用。改性水泥(干磨)比湿磨水泥颗粒细度小,结石强度高,其微膨胀性更适宜细微裂隙的灌浆。但目前价格每吨超过千元,必须在价格上作调整,以便在三峡工程中推广使用。

(4) 进一步研制化学灌浆自记仪,并在工程中应用。目前所用 HGB 灌浆泵,只能稳压、调速(流量)而不能对化学灌浆参数自动记录。应该有针对性地着手研制能自动记录化学灌浆压力、流量和浆材粘度等参数的化学灌浆自记仪,实现化学灌浆作业的监控自动化,保证灌浆质量。

(5) 断层破碎带复合灌浆处理技术还应进一步提高。在 F_{215} 断层破碎带处理工作中,高压水冲洗孔压力只达到 12MPa,裂隙中冲出的软弱物质不多。 $f_{100\%}$ 断层破碎带处理,应首先在高压冲洗上改进,冲洗孔水压力应达 30MPa,将裂隙中软弱物质尽量冲洗干净,然后用高压水泥灌浆和化学灌浆使之充填密实,固结牢实,使弹模进一步提高。

参考文献

[1] 郑守仁,林文亮.三峡工程大坝坝基地质条件与基础处理设计中的技术问题.见:孙剑,夏可风.'98 水利水电地基与基础工程技术交流会论文集[C].天津:天津科技出版社,1999.

[2] 董建军,尹作仿,郭玉,等.三峡水利枢纽 F_{215} 化学灌浆试验施工技术总结报告[R].长江科学院武汉长江工程技术公司,2000.

[3] 汪在芹,陈明祥,李晓鄂,等.三峡工程主体建筑物基础处理帷幕灌浆干磨细水泥性能试验[R].长江科学院,2000.

·原载《长江科学院院报》2000 年第 6 期·

三峡大坝化学灌浆的研究

谭日升 蒋硕忠 薛希亮

(长江科学院 湖北武汉 430010)

摘要 本文扼要叙述了围绕三峡工程开展化学灌浆研究所取得的主要成果,其中包括环氧、MMA、弹性聚氨酯、丙烯酸盐等4种化学灌浆材料的配方、性能和现场试验的效果,希望有助于三峡工程的建设。

关键词 化学灌浆;灌浆;基础处理;混凝土修补

1 引言

三峡工程大坝基础从总体看,工程地质条件是好的。基岩主要为前震旦纪闪云斜长花岗岩,微风化及新鲜岩体湿抗压强度为80~100MPa,变形模量30GPa,透水性弱。但有如下一些问题,必须研究对策^[1]。

(1)风化壳较厚。

(2)局部断裂发育。有些断层带规模较大,构造岩强度及变形模量相对较低,且不均一,有可能沿上述断裂层产生不均匀变形和形成地下水的渗漏通道。

(3)局部岩体透水性较大。

(4)水泥浆对三峡工程基岩中的细微裂隙可灌性差。1959年至1961年间,在三峡工程三斗坪坝址的中堡岛、狮子包、方坪针对弱微风化带、断层破碎带,进行过3组灌浆试验,结果表明,破碎带中的糜棱岩、角砾岩和微风化带,因岩性致密、裂隙细小,普通水泥灌浆难以灌入,有的单耗仅0.16~2.9kg/m。

(5)混凝土方量大,难免出现裂缝。

因此,我们自1959年起,就经国家科委批准立项,针对三峡工程开展了化学灌浆的研究。20世纪60年代的工作是与中国科学院武汉化学研究所(后改名广州化学研究所)、中国科学院化学研究所合作完成的。几十年来连续不断地在室内和三峡以及其他工程的现场进行试验,为三峡工程的建设积累经验^[2]。

2 基础固结和混凝土补强及伸缩缝止水化学灌浆的研究

2.1 环氧树脂灌浆的研究

环氧树脂具有粘接力大、在常温下可以固化,固化后收缩率小、有很高的机械强度和耐热性、稳定性好等优点,是众所周知的“万能胶”。因此,1959年我们邀请中

作者简介:谭日升(1935—),男,湖南安仁人,长江科学院教授级高级工程师,主要从事基础处理和混凝土修补材料与技术的研究工作。

国科学院武汉化学研究所合作,把环氧树脂用于三峡工程固结灌浆作为一个重要研究课题。几十年来,研制出几十个配方,其中有代表性的见表1。

表1 环氧树脂聚液主要配方的组成和性能

组成和性能	配方编号及配比			
	CW ₁	CW ₄	9	10
主剂 CYD-128 环氧树脂	100	100	100	100
辅剂	(糖醛)40	(糖醛)40	(6360)50	(6360)50
	(丙酮)40	(丙酮)40	(501)60	(501)60
	(TP ₁)2	(TP ₁)2		
固化剂	(CD ₃₂)30	(X-89A)30	(T-31)60	(X-89A)50
初始粘度/mPa·s	14	14	168	79.5
固化后抗压强度(1月)/MPa	47.8	33.0	90.9	85.9
与三峡花岗岩粘接强度/MPa	4.7	3.5		>5.35(湿)

2.1.1 三峡 F₂₁₅ 断层破碎带固结灌浆现场试验

F₂₁₅断层自永久船闸北坡,经升船机、临时船闸后消失于左岸非溢流坝段上游,长约1500m,走向55°~70°,倾向NW,倾角72°~83°,与辉绿岩脉相伴,弯曲延伸,断层带宽1~6m,构造岩胶结差,风化强烈,呈疏松~半疏松状。做过一组以湿磨细水泥为浆材的固结灌浆试验,结果表明,灌浆效果不理想。因此提出了高喷冲洗、水泥与化学复合灌浆的试验任务,试验采用了CW和中化798两个系列浆材。灌浆前后进行了钻孔取芯、压水、声波测试、钻孔静弹模检测、钻孔电视录像、芯样物理力学和微观检测等多项效果检测,主要结果见表2。

表2 灌浆前后试验主要性质的变化

检测项目	灌浆前	水泥灌浆后	化学灌浆后	备注
平均透水率/Lu	7.52	0.37	0.06	
平均 V _p 速度/m·s ⁻¹	5302		5484	跨孔
平均静弹模/GPa	3.4	12.7	16.0	
断层芯样平均轴心抗压强度/MPa	呈疏松~半疏松状	-	二25	检7孔除外
断层芯样平均变模/GPa	-	-	二12	同上
断层芯样平均弹模/GPa	-	-	二15	同上

表2表明,复合灌浆后,断层的性质发生了可喜的变化,为设计提供了一种加固断层的手段。

2.1.2 室内模拟灌浆试验

为了论证表1中9号、10号配方的浆液对三峡坝基水下的弱风化带和断层破碎带中的糜棱岩的灌浆效果,按照岩石中剪的要求,专门从三峡坝址7号勘探平洞弱风化带下部和F₇断层破碎带的糜棱岩取回试件进行灌浆试验。

将试验结果用最小二乘法进行计算,得到如下6个回归方程^[3]。

$$\tau_{w-0} = 0.40\text{MPa} + 0.80\sigma (r = 0.9850) \quad (1)$$

$$\tau_{w-9} = 0.93\text{MPa} + 0.95\sigma (r = 0.9695) \quad (2)$$

$$\tau_{w-10} = 1.18\text{MPa} + 1.17\sigma (r = 0.9939) \quad (3)$$

$$\tau_{f-0} = 0.33 \text{MPa} + 0.55\sigma (r = 0.7682) \quad (4)$$

$$\tau_{f-9} = 1.12 \text{MPa} + 1.18\sigma (r = 0.9927) \quad (5)$$

$$\tau_{f-10} = 1.29 \text{MPa} + 1.20\sigma (r = 0.9923) \quad (6)$$

式中： τ ——抗剪断峰值湿强度(MPa)；

σ ——正应力；

r ——相关系数。

(1)、(2)、(3)式分别是三峡坝基弱风化带下部岩石结构面灌浆前和灌注9号、10号环氧树脂浆液后的抗剪断峰值湿强度的回归方程。

(4)、(5)、(6)式分别是三峡坝基断层破碎带中糜棱岩灌浆前和灌注9号、10号环氧树脂浆液后抗剪断峰值湿强度的回归方程。

试验结果表明，由三峡坝址取回的弱风化带下部岩样的断层破碎带中的糜棱岩样，经环氧树脂浆液灌浆后，结构面的抗剪断峰值湿强度、湿粘接强度 C 、湿摩擦系数 f 值都显著提高。

2.1.3 灌注混凝土层面渗水缝的现场试验^[4]

三峡工程永久船闸地下输水洞衬砌混凝土部分浇筑层面渗水、析钙，有的水压达0.2MPa，为了止住渗水，保护钢筋，使混凝土恢复整体，用表1中的CW系列浆材进行了灌浆试验，灌后骑缝钻孔取芯样检查灌浆效果，所有芯样均呈圆柱体，有缝被环氧浆液的聚合物填充饱满，用劈裂抗拉检测抗拉强度为1.07~1.61MPa，达到了试验预期的目的。

2.2 MMA 化学灌浆材料的开发^[5]

MMA 化学灌浆材料是以甲基丙烯酸甲酯(MMA)为主剂的化学灌浆材料，其主要配方的组成与性能见表3。

表3 MMA 化学灌浆材料主要配方的组成和性能

组成	MMA	AA	BPO	DMA	PTS ⁴ A
		100	10	1	1
性能	粘度/mPa·s			固化后湿抗压强度/MPa	
	0.78			83.9	

2.2.1 MMA 化学灌浆材料用于三峡美Ⅲ坝线弱风化带的固结灌浆现场试验

试验部位位于5号平洞试验支洞，为弱风化带下部。

试验工作的程序是：开洞→地质素描→用静力法测变形模量和弹性模量→钻孔→压水→浇混凝土压浆板→洗缝→测声波速度→灌浆→扫孔→原位测声波速度→钻检查孔取岩芯作轴心抗拉→压水→清除压浆板→用静力法原位测变形模量和弹性模量。

共灌了13个孔，灌浆压力0.3~0.6MPa，浆液的凝胶时间一般控制在50~100min，个别有外漏的孔控制在20~30min，灌至孔内吸浆速度小于0.1L/min时结束，共灌入MMA浆液260.5L，平均单耗10L/m。

试验区内灌浆前后工程地质和水文地质主要指标的变化见表4。

地质部门对该灌浆试验效果的工程地质评价是：以该区为代表的弱风化带下部岩体，通过灌浆，岩体透水性减弱，声波速度与变形参数已提高到微新岩体的水平，因