

XLDGCHZFWNJYYLSDCQJSYJYSJ

林秀山 沈凤生 著



小浪底工程 后张法无粘结 预应力隧洞衬砌 技术研究与实践

54
黄河水利出版社

小浪底工程后张法无粘结预应力 隧洞衬砌技术研究与实践

林秀山 沈凤生 著

黄河水利出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

小浪底工程后张法无粘结预应力隧洞衬砌技术与实践/林秀山, 沈凤生著. —郑州: 黄河水利出版社, 1999.9
ISBN 7-80621-347-3

I. 小… II. ①林… ②沈… III. 水利工程: 隧道工程-预应力混凝土-混凝土衬砌 IV. TV554

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 43244 号

责任编辑: 吕洪予

封面设计: 谢 萍

责任校对: 裴 惠

责任印制: 常红昕

出版发行: 黄河水利出版社

地址: 河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层 邮编: 450003

E-mail: yrcp@public2.zz.ha.cn

印 刷: 黄河水利委员会印刷厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 10.50 插 页: 4

版 别: 1999 年 9 月 第 1 版

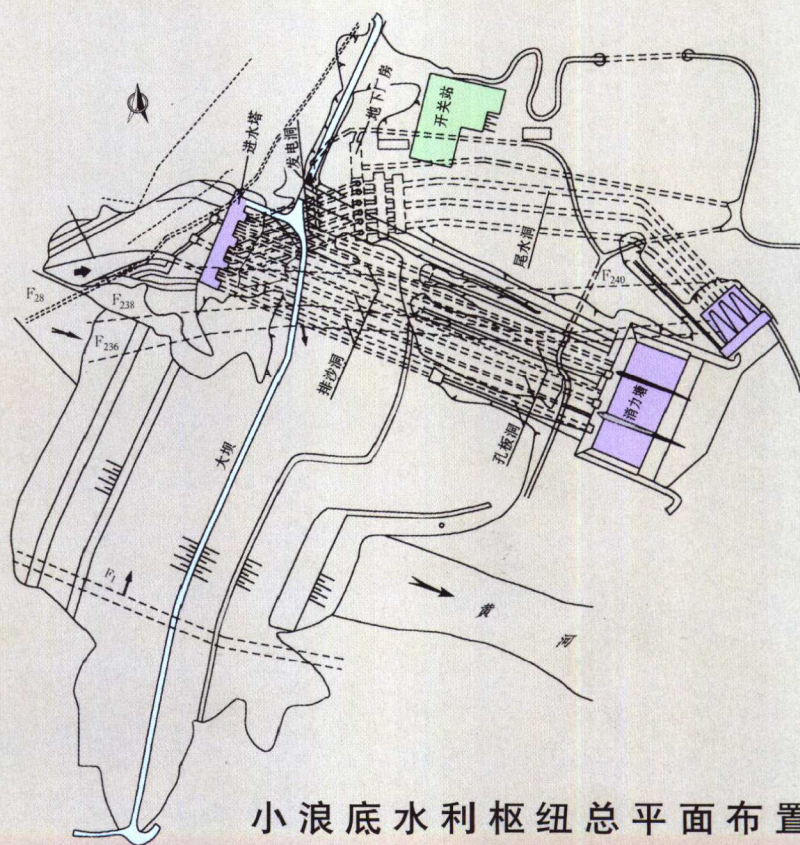
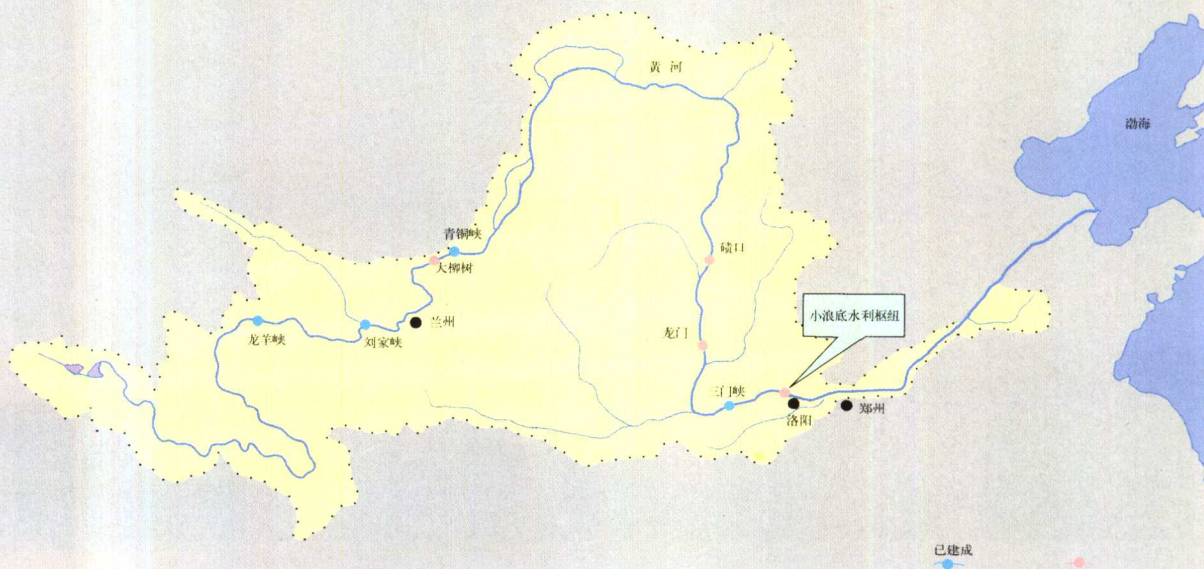
印 数: 1-1300

印 次: 1999 年 9 月 郑州第 1 次印刷

字 数: 243 千字

定价: 41.00 元

小浪底水利枢纽位置图



小浪底水利枢纽总平面布置图



小浪底水利枢纽进水塔远景

摄影 刘凤翔



小浪底水利枢纽泄水建筑物出口（在建）

摄影 刘凤翔



无粘结后张预应力室外1:1
模型锚索布置

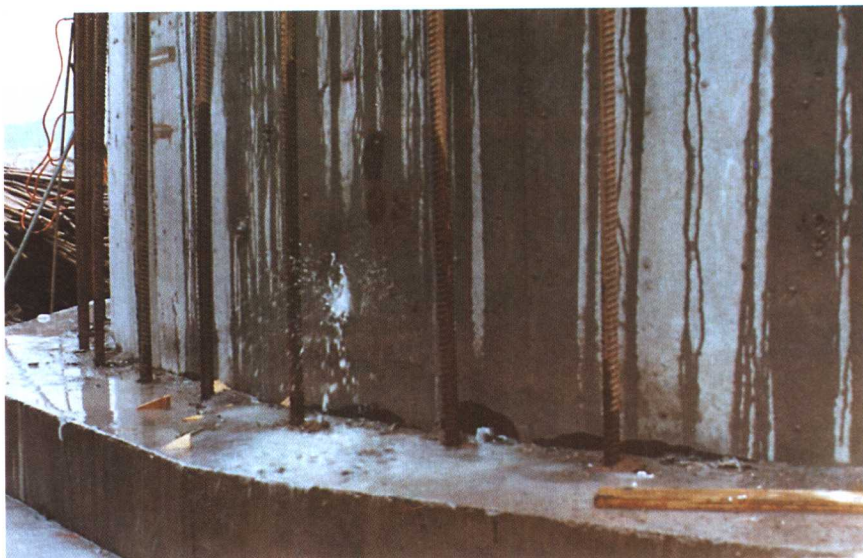


有粘结后张预应力室
外1:1 模型锚索布置



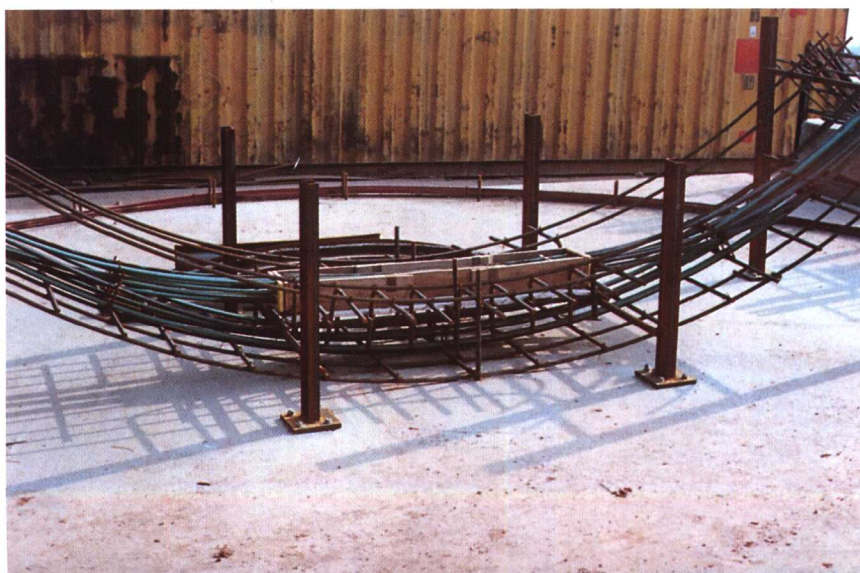
室外1:1 模型水压试验

室外 1:1 模型产生纵向
裂缝后漏水情况



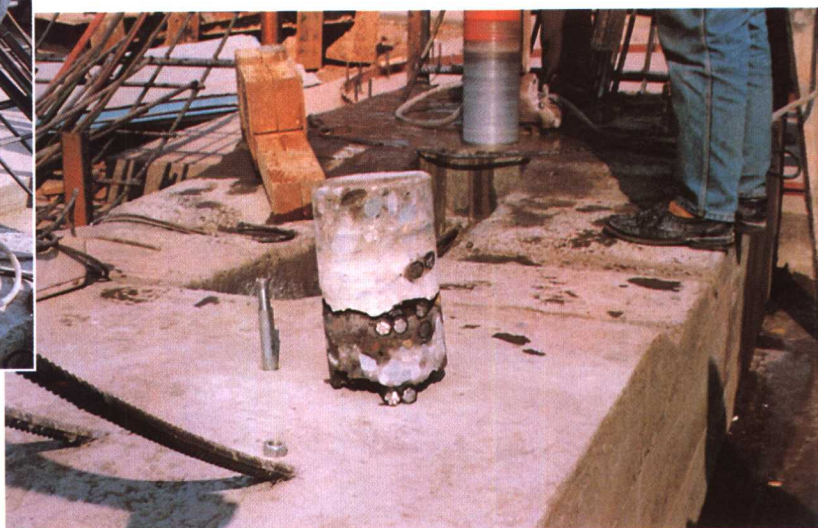
排沙洞预应力衬砌
钢绞线安装工艺试验

锚具槽附近钢绞线空
间交叉情况

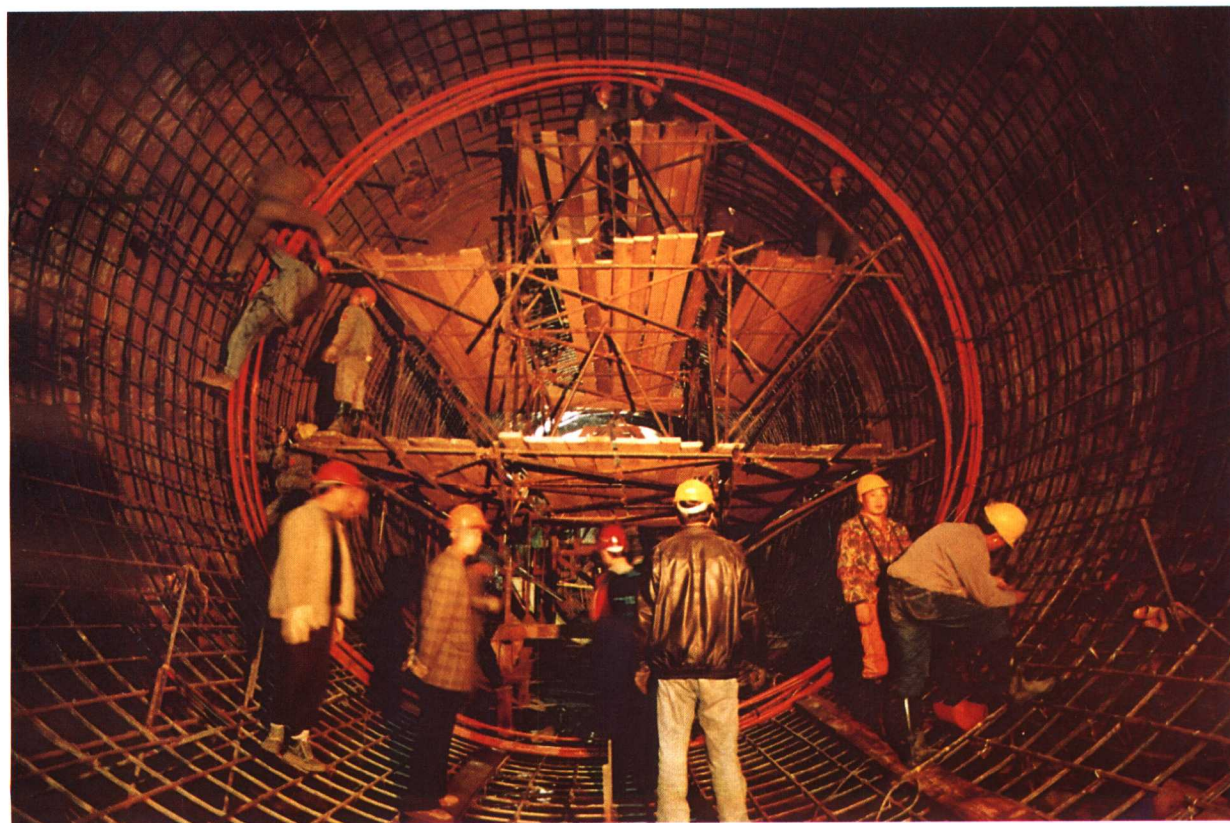




锚具槽附近钢绞线最密集区混凝土芯样



锚具槽附近钢绞线最密集区混凝土钻孔取样

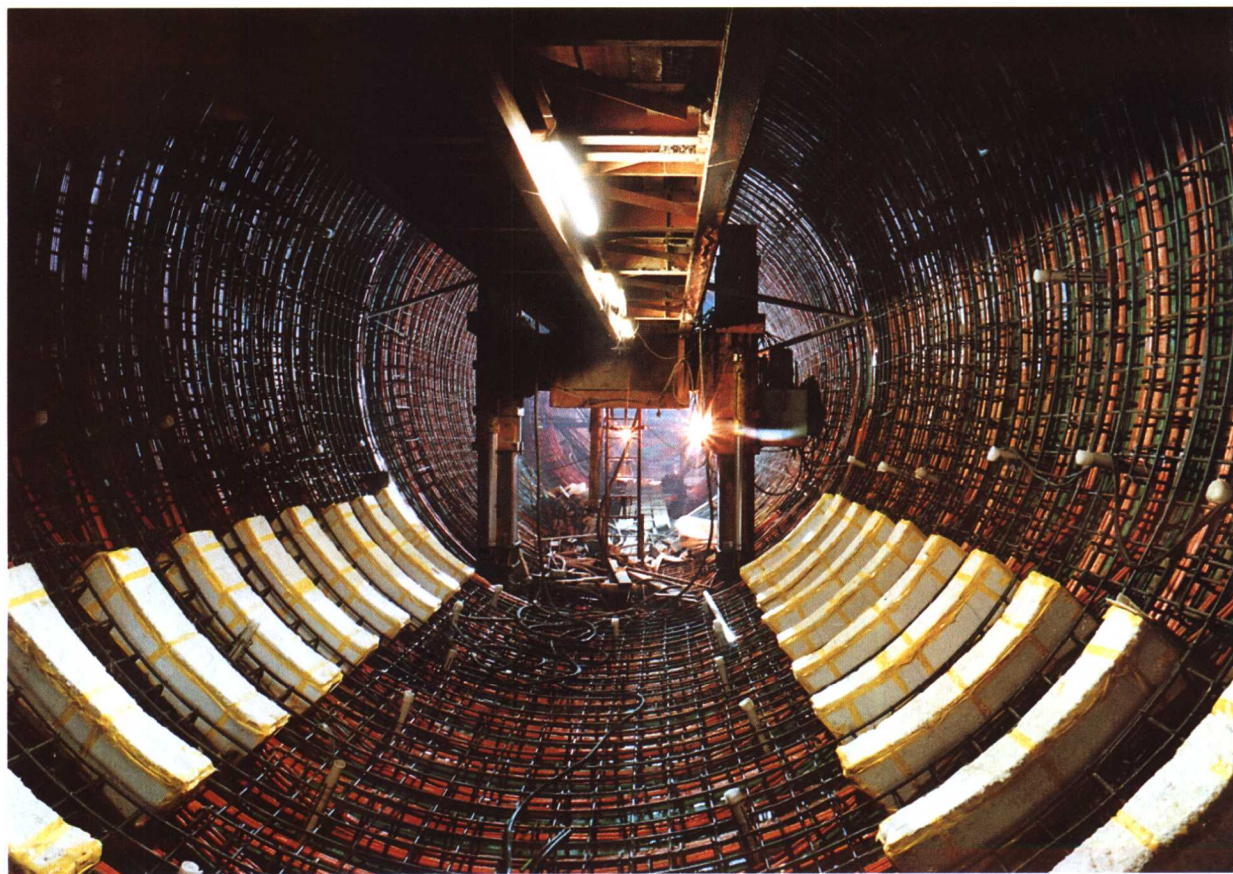


排沙洞预应力衬砌钢绞线的绑扎

摄影：史敬辰

排沙洞预应力衬砌
锚具槽的固定

摄影：史敬辰



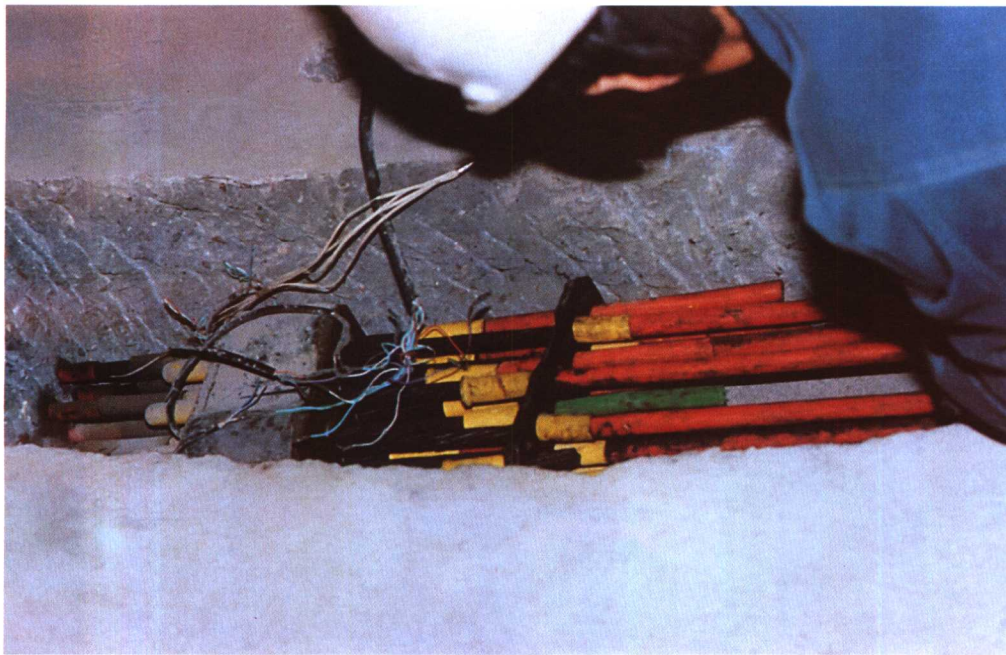
排沙洞预应力衬砌钢绞线及钢筋绑扎就位

摄影：部 森



混凝土衬砌浇筑完成后锚索张拉前锚具槽的准备

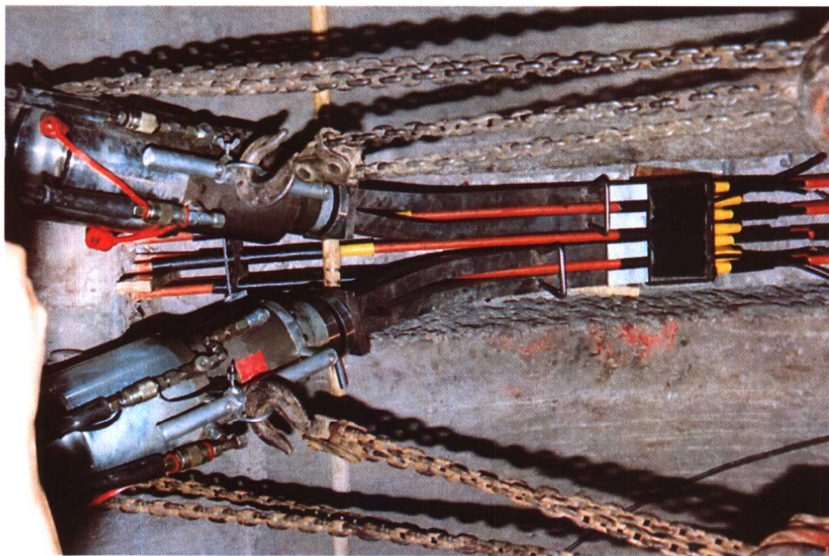
摄影：史敬辰



锚具应变计的安装

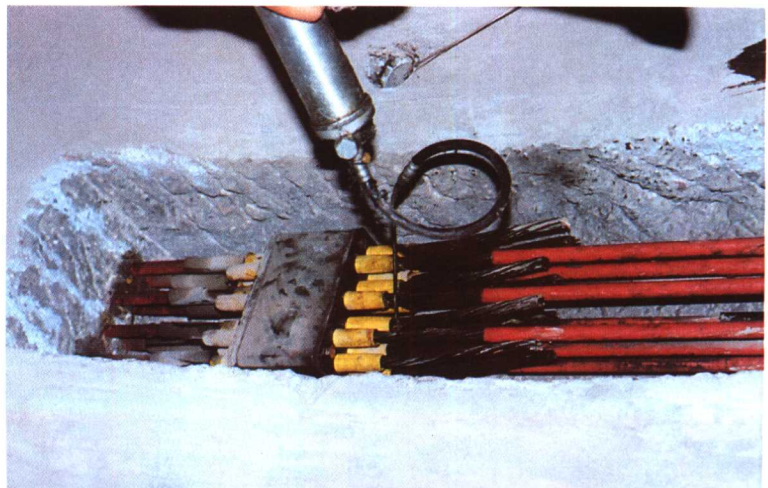


偏转器和千斤顶的安装



锚索的张拉

锚具及钢绞线的防腐注油施工



(照片除署名外均为张阳摄影)

序

在水工隧洞结构中采用后张法预应力混凝土衬砌以承受高内水压力,是代替钢板衬砌的经济和实用的方法。我国在预应力混凝土衬砌技术研究和应用方面起步较晚,小浪底工程排沙洞采用国际先进的后张法无粘结预应力混凝土衬砌技术,填补了我国无粘结预应力在水工隧洞中应用的空白,使我国在这方面的技术研究和应用水平跻身国际领先行列,是水工建设中极具生命力的一种新结构。

清江隔河岩水电站和南盘江天生桥一级水电站的引水发电隧洞是我国采用预应力隧洞衬砌的尝试,取得了许多宝贵经验,但同时也发现了一些不足。由于这些工程都采用了有粘结后张预应力技术,预埋波纹管堵塞现象严重,张拉时断丝和滑丝时有发生,施工程序复杂,结构应力不均匀,易引起混凝土裂缝等。小浪底工程采用无粘结预应力技术,每根无粘结钢绞线分别放入充满油脂的 PE 套管内,并逐根均匀分布在隧洞衬砌内。预应力绞线的布设可和普通钢筋一样在混凝土浇筑前绑扎,与有粘结预应力技术相比,不仅减少了张拉前穿绞线的工序,而且可在混凝土衬砌内形成更加均匀的环向压应力场;摩擦系数的显著减小,大大提高了预应力效率,使无粘结筋采用双圈布置形式成为可能,从而有效地减小了锚具槽附近小圆弧处的应力集中现象和减小了工程量,就小浪底工程实践而言,采用无粘结预应力系统较原有粘结预应力设计可节省约 50% 的锚具和相应的工程量。在 4 320 束锚索张拉中仅有 3 股钢丝由于液压千斤顶中的工具锚夹片受力不均匀而断裂,断丝率仅为 0.0012%;平均每两天完成一个长 12.05m 的浇筑块的施工,包括钢绞线和普通钢筋布设、混凝土浇筑、锚具槽准备、锚束的张拉、锚具槽回填等全部施工作业。因此,无粘结预应力混凝土衬砌具有经济合理、可靠性高、施工简便等特点,合理选择混凝土标号和参数还可以提高抗泥沙和高速水流磨蚀的能力,从而可适用于不同用途的水工隧洞。

黄委会勘测规划设计研究院林秀山和沈凤生同志,在亲自主持和参与小浪底工程无粘结预应力水工隧洞衬砌的设计、研究的基础上,进行了大量的总结工作,编著了《小浪底工程后张法无粘结预应力隧洞衬砌技术研究与实践》一书。该书先简要总结了我国已建的后张有粘结预应力水工隧洞的经验,然

后全面叙述了小浪底工程无粘结预应力水工隧洞衬砌的设计、研究和施工的全过程,并列出了大量宝贵的试验和工程数据,阐述了突破现有规范的参数的论证及使用。我相信,这本书不仅可以为从事水工隧洞设计施工的工程技术人员提供借鉴,而且将对我国有压隧洞的设计水平和预应力混凝土技术的发展,起到积极推动作用。

后张法无粘结预应力水工隧洞衬砌是件新生事物,国内尚属首次采用,国外虽有采用的,其规模不能与小浪底工程相比,本书提供的经验是可贵的。我希望作者们今后继续密切注意运行中的监测情况,及时总结反馈,使这项新技术能更趋成熟,以利发展和推广。

潘家铮

1999年8月

前 言

在水工隧洞中采用预应力混凝土衬砌技术,国外已有多年的研究和实践。20 世纪 40 年代和 50 年代,在德国、南斯拉夫、法国、意大利、奥地利和瑞士等国,相继在许多工程中采用了预应力混凝土衬砌,预应力型式有灌浆式、拉筋式、钢箍式等。70 年代以来,以瑞士 VSL 为代表的欧洲预应力工程公司,在多项工程中推广采用了张拉钢绞线施加预应力的混凝土衬砌结构,形成了一套比较成熟的后张法预应力混凝土衬砌技术和施工机具,按照绞线在张拉前后的保护型式分有粘结和无粘结两种系统。根据国外水工隧洞预应力混凝土衬砌的实践经验,我国进行了一系列的研究和应用,其中白山水电站部分采用了灌浆式预应力混凝土衬砌。小浪底工程于 1985 年在国内首次提出采用后张法预应力混凝土衬砌技术,并进行了深入试验研究。在 90 年代,隔河岩水电站和天生桥一级水电站的引水隧洞中分别采用了后张法有粘结预应力混凝土衬砌结构,并使用国产钢绞线和锚具,两个工程都已投入了使用。

小浪底工程排沙洞后张法预应力混凝土衬砌设计研究,历时十多年,经历了从后张法有粘结预应力混凝土衬砌方案到无粘结衬砌方案的转变过程。在国内外有压水工隧洞中经常采用有粘结预应力混凝土衬砌结构型式,主要是人们认为有粘结预应力钢绞线经过张拉灌浆后预应力是有保障的,而无粘结预应力绞线仅靠锚具夹片锚固,其长期预应力是否有保障为大家所担心。技术的发展在解除人们这种担心的同时,给工程带来的是更经济合理可靠的结构型式。

小浪底工程排沙洞由以德国旭普林公司为责任方的中德意联营体(Ⅱ 标承包商)承建,该承包商在合同协议书备忘录第十一条,提出了基于采用无粘结预应力衬砌的一种替代方案,并承诺如果所提出的无粘结方案没有被工程师批准采纳,仍将按原合同条件根据原设计的有粘结预应力方案进行施工;同时指出所提出的方案一旦经工程师批准,将对该永久性工程的设计和施工负有全部责任。为此在 1997 年 5 月至 7 月于小浪底工地分别进行了 1:1 原有粘结预应力方案的模型和无粘结替代方案的模型的张拉和压水试验。在张拉过程中,两个模型均出现了严重的环向裂缝,有粘结方案还出现断丝和滑丝现象。但试验资料表明,无粘结预应力摩擦系数相当低,小于我国《无粘结预应力混凝土结构技术规范》(JGJ/T 92-93)规定的摩擦系数 0.12 的 1/3,体现了无粘结预应力衬砌明显的优点,即具有很高的预应力效率,衬砌结构内应力分布均匀,施工简便,可以避免有粘结预应力衬砌张拉施工中出现的波纹管堵塞、张拉时绞线严重的断丝和滑丝等现象。

1997 年 9 月在小浪底工地召开的世界银行特别咨询团会议以及国内预应力咨询专家会议,都认为小浪底工程排沙洞采用无粘结预应力衬砌技术比采用有粘结预应力衬砌方案具有不可替代的优点。小浪底咨询有限公司泄洪代表部以文 6599/ST/DXB 通知承包商同意在排沙洞采用无粘结后张预应力衬砌技术。经承包商委托,水利部黄委会勘测规划设计研究院进行了无粘结预应力衬砌的设计研究工作。黄委会设计院根据模型试验的成果,进行分析研究,提出结构应力好、施工方便的两排锚具槽的结构型式,采取拉大双

圈无粘结预应力绞线在径向的距离,以增加绞线间混凝土浇捣的空间,并对结构进行优化设计,在设计原则不变的条件下把锚具槽间距从 0.45m 增加到 0.50m。无粘结预应力系统的采用,使小浪底工程排沙洞节约了近 50% 的锚具和相应的工程量。1997 年 12 月完成全部设计研究工作。

1998 年 3 月至 5 月,承包商按照设计研究提出的施工技术规范在 1 号排沙洞的第 9 和第 10 浇筑块的普通钢筋混凝土段进行现场后张预应力衬砌的试验研究。试验主要针对张拉程序、混凝土温度应力影响、超挖对结构应力的影响、预应力效率、摩擦系数和防腐施工等进行全面的监测,证实了设计参数和施工程序的可靠性。

1998 年 5 月至 1999 年 5 月完成了 3 条排沙洞全部 2 169m 的后张预应力衬砌的施工工作。施工中除 1 号排沙洞第 19 浇筑块因混凝土浇筑出现冷缝,导致张拉后出现整块断裂,以及在全部施工中有 3 股钢丝发生断丝外,钢绞线张拉、张拉端绞线防腐处理及锚具槽回填施工顺利完成。

本书总结了小浪底排沙洞后张法预应力衬砌十多年来的设计研究成果和施工中的经验和教训,着重阐述了无粘结预应力混凝土衬砌技术的论证过程和研究成果,以及在小浪底工程的施工实践。本书内容翔实,资料可靠,可供工程技术人员参考借鉴,希望这项技术能进一步得到推广,发挥其潜在的社会经济效益。

在本书编写过程中,得到了小浪底水利枢纽建设管理局、小浪底工程咨询公司、小浪底 II 标承包商的大力支持,在此向他们致以深切的谢意。参加本书编写工作的还有李珠、张阳、李斌等,在此一并表示感谢。

作者

1999 年 7 月于小浪底工程建设工地

目 录

第一章 概述	(1)
1.1 小浪底水利枢纽总体布置	(1)
1.2 排沙洞的特点和面临的挑战	(6)
第二章 后张预应力混凝土技术应用和研究现状	(9)
2.1 后张预应力混凝土技术的应用概况	(9)
2.2 后张预应力混凝土材料研究应用现状	(11)
2.3 后张预应力混凝土在水工应用中值得关注的几个研究课题	(12)
第三章 研究内容、方法和结论	(13)
3.1 研究内容和预期目标	(13)
3.2 研究方法和技术路线	(14)
3.3 重点解决的技术难点及预期成果	(14)
3.4 研究采用的国内外有关规范	(15)
第四章 小浪底排沙洞地质条件	(16)
4.1 坝址地形地貌	(16)
4.2 坝址基岩	(16)
4.3 岩石物理力学性质	(17)
4.4 岩体的变形特征	(17)
4.5 排沙洞工程地质情况	(18)
第五章 排沙洞有粘结预应力混凝土衬砌的设计研究	(21)
5.1 概述	(21)
5.2 后张法无粘结预应力混凝土衬砌的初期试验研究	(21)
5.3 水工预应力混凝土衬砌的考察咨询和调研	(35)
5.4 排沙洞后张法有粘结预应力混凝土衬砌方案的设计研究	(40)
5.5 国内有粘结后张法预应力隧洞衬砌的工程实践和研究	(44)
第六章 排沙洞预应力混凝土衬砌室外模型试验研究	(51)
6.1 研究背景	(51)
6.2 模型试验概况	(51)
6.3 有粘结预应力混凝土衬砌模型试验	(52)
6.4 无粘结预应力混凝土衬砌模型试验	(61)
6.5 模型试验研究结论	(72)
第七章 排沙洞预应力混凝土衬砌室外模型试验的仿真数值分析	(73)
7.1 两种预应力方案的优缺点比较	(73)
7.2 基本条件	(74)
7.3 三维有限元仿真模拟计算	(77)

7.4 仿真数值分析结论	(94)
第八章 排沙洞无粘结后张预应力混凝土衬砌结构分析研究	(95)
8.1 基本结构型式的确定	(95)
8.2 结构分析研究	(95)
8.3 锚具槽夹角为 90°和 120°的对比研究	(116)
8.4 锚具槽张拉施工顺序研究	(119)
8.5 断层及其影响带的衬砌结构分析	(121)
8.6 结论	(121)
第九章 排沙洞无粘结后张预应力衬砌试验段现场测试分析研究	(123)
9.1 试验段布置	(123)
9.2 测试仪器布置	(123)
9.3 张拉系统的率定	(128)
9.4 材料的性能	(129)
9.5 预应力锚索的安装与张拉	(130)
9.6 仪器监测	(133)
9.7 试验结果及分析	(133)
9.8 裂缝分析	(143)
9.9 结论	(148)
第十章 排沙洞无粘结后张预应力衬砌的施工实践	(149)
10.1 预应力方案研究概况	(149)
10.2 排沙洞衬砌混凝土级配的确定和实施	(149)
10.3 锚具槽预应力锚固系统的防腐	(151)
10.4 预应力混凝土衬砌的施工及现象分析	(152)
10.5 结论	(154)
附录 1 小浪底工程排沙洞无粘结预应力混凝土衬砌施工技术规范	(156)
附录 2 小浪底工程排沙洞后张预应力衬砌设计研究记事	(159)