

“十二五”国家重点图书

水利水电工程施工技术全书

第三卷 混凝土工程

TEZHONG HUNNINGTU SHIGONG

全
书
施
工

第十二册

特种混凝土施工

吕芝林 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水利水电工程施工技术全书

第三卷 混凝土工程

第十二册

特种混凝土施工

吕芝林 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是《水利水电工程施工技术全书》第三卷《混凝土工程》中的第十二册。本书系统阐述了水电工程中除常规的普通钢筋混凝土和碾压混凝土以外的一些特种混凝土及特殊结构混凝土材料的选用、配比、施工机具及施工方法等技术。主要内容包括：沥青混凝土、纤维混凝土、补偿收缩混凝土、自密实混凝土、水下混凝土、模袋混凝土、干贫混凝土、挤压混凝土、预应力混凝土结构等。

本书可作为水利水电工程施工领域的工程技术人员、工程管理人员和高级技术工人的工具书，也可供从事水利水电工程科研、设计、建设及运行管理和相关企事业单位的工程技术人员、工程管理人员使用，并可作为大专院校水利水电工程及机电专业师生教学参考书。

图书在版编目（C I P）数据

特种混凝土施工 / 吕芝林等编著. — 北京：中国水利水电出版社，2016.12
（水利水电工程施工技术全书. 第三卷，混凝土工程；第十二册）
ISBN 978-7-5170-5118-3

I. ①特… II. ①吕… III. ①特种混凝土—混凝土施工 IV. ①TU755

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第325160号

书 名	水利水电工程施工技术全书 第三卷 混凝土工程 第十二册 特种混凝土施工 TEZHONG HUNNINGTU SHIGONG
作 者	吕芝林 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.25印张 219千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	39.00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

《水利水电工程施工技术全书》

编审委员会

顾问：潘家铮 中国科学院院士、中国工程院院士

谭靖夷 中国工程院院士

陆佑楣 中国工程院院士

郑守仁 中国工程院院士

马洪琪 中国工程院院士

张超然 中国工程院院士

钟登华 中国工程院院士

缪昌文 中国工程院院士

名誉主任：范集湘 丁焰章 岳曦

主任：孙洪水 周厚贵 马青春

副主任：宗敦峰 江小兵 付元初 梅锦煌

委员：(以姓氏笔画为序)

丁焰章 马如骐 马青春 马洪琪 王军 王永平

王亚文 王鹏禹 付元初 江小兵 刘永祥 刘灿学

吕芝林 孙来成 孙志禹 孙洪水 向建 朱明星

朱镜芳 何小雄 和孙文 陆佑楣 李友华 李志刚

李丽丽 李虎章 沈益源 汤用泉 吴光富 吴国如

吴高见 吴秀荣 肖恩尚 余英 陈茂 陈梁年

范集湘 林友汉 张晔 张为明 张利荣 张超然

周晖 周世明 周厚贵 宗敦峰 岳曦 杨涛

杨成文 郑守仁 郑桂斌 钟彦祥 钟登华 席浩

夏可风 涂怀健 郭光文 常焕生 常满祥 楚跃先

梅锦煌 曾文 焦家训 戴志清 缪昌文 谭靖夷

潘家铮 衡富安

主编：孙洪水 周厚贵 宗敦峰 梅锦煌 付元初 江小兵

主审：谭靖夷 郑守仁 马洪琪 张超然 梅锦煌 付元初

周厚贵 夏可风

策划：周世明 张晔

秘书长：宗敦峰(兼)

副秘书长：楚跃先 郭光文 郑桂斌 吴光富 康明华

《水利水电工程施工技术全书》

各卷主（组）编单位和主编（审）人员

卷序	卷名	组编单位	主编单位	主编人	主审人
第一卷	地基与基础工程	中国电力建设集团（股份）有限公司	中国电力建设集团（股份）有限公司 中国水电基础局有限公司 葛洲坝基础公司	宗敦峰 肖恩尚 焦家训	谭靖夷 夏可风
第二卷	土石方工程	中国人民武装警察部队水电指挥部	中国人民武装警察部队水电指挥部 中国水利水电第十四工程局有限公司 中国水利水电第五工程局有限公司	梅锦煜 和孙文 吴高见	马洪琪 梅锦煜
第三卷	混凝土工程	中国电力建设集团（股份）有限公司	中国水利水电第四工程局有限公司 中国葛洲坝集团有限公司 中国水利水电第八工程局有限公司	席 浩 戴志清 涂怀健	张超然 周厚贵
第四卷	金属结构制作与机电安装工程	中国能源建设集团（股份）有限公司	中国葛洲坝集团有限公司 中国电力建设集团（股份）有限公司 中国葛洲坝建设有限公司	江小兵 付元初 张 晔	付元初
第五卷	施工导（截）流与度汛工程	中国能源建设集团（股份）有限公司	中国能源建设集团（股份）有限公司 中国葛洲坝集团有限公司 中国水利水电第八工程局有限公司	周厚贵 郭光文 涂怀健	郑守仁

《水利水电工程施工技术全书》

第三卷 《混凝土工程》

编委会

主 编：席 浩 戴志清 涂怀健

主 审：张超然 周厚贵

委 员：（以姓氏笔画为序）

牛宏力 王鹏禹 刘加平 刘永祥 刘志和

向 建 吕芝林 朱明星 李克信 肖炯洪

姬脉兴 席 浩 涂怀健 高万材 黄 巍

戴志清 魏 平

秘 书 长：李克信

副秘书长：姬脉兴 赵海洋 黄 巍 赵春秀 李小华

《水利水电工程施工技术全书》

第三卷 《混凝土工程》

第十二册 《特种混凝土施工》

编写人员名单

主 编：吕芝林

审 稿：周厚贵

编写人员：吕芝林 刘 嫦 任玉香 程春雨

 兰 芳 张海艳 刘亚进 符 强

 孙向楠 肖绪清 王 勇

序 一

水利水电工程建设在我国作为一项基础建设事业，已经走过了近百年的历程，这是一条不平凡而又伟大的创业之路。

新中国成立 66 年来，党和国家领导一直高度重视水利水电工程建设，水电在我国已经成为了一种不可替代的清洁能源。我国已经成为世界上水电装机容量第一位的大国，水利水电工程建设不论是规模还是技术水平，都处于国防领先或先进水平，这是几代水利水电工程建设者长期艰苦奋斗所创造出来的。

改革开放以来，特别是进入 21 世纪以后，我国的水利水电工程建设又进入了一个前所未有的高速发展时期。到 2014 年，我国水电总装机容量突破 3 亿 kW，占全国电力装机容量的 23%。发电量也历史性地突破 31 万亿 kW·h。水电作为我国当前重要的可再生能源，为我国能源电力结构调整、温室气体减排和气候环境改善做出了重大贡献。

我国水利水电工程建设在新技术、新工艺、新材料、新设备等方面都取得了突破性的进展，无论是技术、工艺，还是在材料、设备等方面，都取得了令人瞩目的成就，它不仅推动了技术创新市场的活跃和发展，也推动了水利水电工程建设的前进步伐。

为了对当今水利水电工程施工技术进展进行科学的总结，及时形成我国水利水电工程施工技术的自主知识产权和满足水利水电建设事业的工作需要，全国水利水电施工技术信息网组织编撰了《水利水电工程施工技术全书》。该全书编撰历时 5 年，在编撰过程中组织了一大批长期工作在工程建设一线的中青年技术负责人和技术骨干执笔，并得到了有关领导、知名专家的悉心指导和审定，遵循“简明、实用、求新”的编撰原则，立足于满足广大水利水电工程技术人员的工作需要，并注重参考和指导价值。该全书内容涵盖了水

利水电工程建设地基与基础工程、土石方工程、混凝土工程、金属结构制作与机电安装工程、施工导（截）流与度汛工程等内容目标任务、原理方法及工程实例，既有理论阐述，又有实例介绍，重点突出，图文并茂，针对性及可操作性强，对今后的水利水电工程建设施工具有重要指导作用。

《水利水电工程施工技术全书》是对水利水电施工技术实践的总结和理论提炼，是一套具有权威性、实用性的大型工具书，为水利水电工程施工“四新”技术成果的推广、应用、继承、创新提供了一个有效载体。为大力推动水利水电技术进步和创新，推进中国水利水电事业又好又快地发展，具有十分重要的现实意义和深远的科技意义。

水利水电工程是人类文明进步的共同成果，是现代社会发展对保障水资源供给和可再生能源供应的基本需求，水利水电工程施工技术在近代水利水电工程建设中起到了重要的推动作用。人类应对全球气候变化的共识之一是低碳减排，尽可能多地利用绿色能源就成为重要选择，太阳能、风能及水能等成为首选，其中水能蕴藏丰富、可再生性、技术成熟、调度灵活等特点成为最优的绿色能源。随着水利水电工程建设与管理技术的不断发展，水利水电工程，特别是一些高坝大库能有效利用自然条件、降低开发运行成本、提高水库综合效能，高坝大库的（高度、库容）记录不断被刷新。特别是随着三峡、拉西瓦、小湾、溪洛渡、锦屏、向家坝等一批大型、特大型水利水电工程相继建成并投入运行，标志着我国水利水电工程技术已跨入世界领先行列。

近年来，我国水利水电工程施工企业积极实施走出去战略，海外市场开拓业绩突出。目前，我国水利水电工程施工企业在亚洲、非洲、南美洲多个国家承建了上百个水利水电工程项目，如尼罗河上的苏丹麦洛维水电站、号称“东南亚三峡工程”的马来西亚巴贡水电站、巨型碾压混凝土坝泰国科隆泰丹水利工程、位居非洲第一水利枢纽工程的埃塞俄比亚泰克泽水电站等，“中国水电”的品牌价值已被全球业内所认可。

《水利水电工程施工技术全书》对我国水利水电施工技术进行了全面阐述。特别是在众多国内外大型水利水电工程成功建设后，我国水利水电工程施工人员创造出一大批新技术、新工法、新经验，对这些内容及时总结并公

开出版，与全体水利水电工作者分享，这不仅能促进我国水利水电行业的快速发展，提高水利水电工程施工质量，保障施工安全，规范水利水电施工行业发展，而且有助于我国水利水电行业走进更多国际市场，展示我国水利水电行业的国际形象和实力，提高我国水利水电行业在国际上的影响力。

该全书的出版不仅能提高水利水电工程施工的技术水平，而且有助于提高我国水利水电行业在国内、国际上的影响力，我在此向广大水利水电工程建设者、工程技术人员、勘测设计人员和在校的水利水电专业师生推荐此书。

孙洪水

2015年4月8日

序 二

《水利水电工程施工技术全书》作为我国水利水电工程技术综合性大型工具书之一，与广大读者见面了！

这是一套非常好的工具书，它也是在《水利水电工程施工手册》基础上的传承、修订和创新。集中介绍了进入 21 世纪以来我国在水利水电施工领域从施工地基与基础工程、土石方工程、混凝土工程、金属结构制作与机电安装工程、施工导（截）流与度汛工程等方面采用的各类创新技术，如信息化技术的运用：在施工过程模拟仿真技术、混凝土温控防裂技术与工艺智能化等关键技术，应用了数字信息技术、施工仿真技术和云计算技术，实现工程施工全过程实时监控，使现代信息技术与传统筑坝施工技术相结合，提高了混凝土施工质量，简化了施工工艺，降低了施工成本，达到了混凝土坝快速施工的目的；再如碾压混凝土技术在国内大规模运用：节省了水泥，降低了能耗，简化了施工工艺，降低了工程造价和成本；还有，在科研、勘察设计和施工一体化方面，数字化设计研究面向设计施工一体化的三维施工总布置、水工结构、钢筋配置、金属结构设计技术，推广复杂结构三维技施设计技术和前期项目三维枢纽设计技术，形成建筑工程信息模型的协同设计能力，推进建筑工程三维数字化设计移交标准工程化应用，也有了长足的进步。因此，在当前形势下，编撰出一部新的水利水电施工技术大型工具书非常必要和及时。

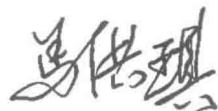
随着水利水电工程施工技术的不断推进，必然会给水利水电施工带来新的发展机遇。同时，也会出现更多值得研究的新课题，相信这些都将对水利水电工程建设事业起到积极的促进作用。该全书是当今反映水利水电工程施工技术最全、最新的系列图书，体现了当前水利水电最先进的施工技术，其

中多项工程实例都是曾经创造了水利水电工程的世界纪录。该全书总结的施工技术具有先进性、前瞻性，可读性强。该全书的编者都是参加过我国大型水利水电工程的建设者，有着非常丰富的各专业施工经验。他们以高度的社会责任感和使命感、饱满的工作热情和扎实的工作作风，大力发展和创新水电科学技术，为推进我国水利水电事业又好又快地发展，做出了新的贡献！

近年来，我国水利水电工程建设快速发展，各类施工技术日臻成熟，相继建成了三峡、龙滩、水布垭等具有代表性的水电工程，又有拉西瓦、小湾、溪洛渡、锦屏、糯扎渡、向家坝等一批大型、特大型水电工程，在施工过程中总结和积累了大量新的施工技术，尤其是混凝土温控防裂的施工方法在三峡水利枢纽工程的成功应用，高寒地区高拱坝冬季施工综合技术在拉西瓦等多座水电站工程中的应用……，其中的多项施工技术获得过国家发明专利，达到了国际领先水平，为今后水利水电工程施工提供了参考与借鉴。

目前，我国水利水电工程施工技术已经走在了世界的前列，该全书的出版，是对我国水利水电工程建设领域的一大贡献，为后续在水利水电开发，例如金沙江上游、长江上游、通天河、黄河上游的水电开发、南水北调西线工程等建设提供借鉴。该全书可作为工具书，为广大工程建设者们提供一个完整的水利水电工程施工理论体系及工程实例，对今后水利水电工程建设具有指导、传承和促进发展的显著作用。

《水利水电工程施工技术全书》的编撰、出版是一项浩繁辛苦的工作，也是一项具有创造性的劳动过程，凝聚了几百位编、审人员近5年的辛勤劳动，克服各种困难。值此该全书出版之际，谨向所有为该全书的编撰给予关心、支持以及为此付出了辛勤劳动的领导、专家和同志们表示衷心的感谢！



2015年4月18日

前 言

由全国水利水电施工技术信息网组织编写的《水利水电工程施工技术全书》第三卷《混凝土工程》共分十二册,《特种混凝土施工》为第十二册,由中国葛洲坝集团第五工程有限公司编写。

水电工程由于施工环境、运营环境及其复杂恶劣,常常对某些部位混凝土提出了许多特殊要求。这些混凝土工程量往往不大,但由于施工环境或使用条件的特殊性,其施工材料、工艺、方法、要求、需要的设备与常规大量使用的普通钢筋混凝土和碾压混凝土明显不同,其质量更难以控制,施工技术难度更大。

近年来,我国水电工程的大量兴建,新材料、新设备、新工艺不断推广应用,又形成了许多新的特殊混凝土施工技术,这些特殊混凝土技术为提高工程质量、降低工程成本,甚至解决工程遇到的难题提供了有效方法。

本书系统总结了我国近30年来在水电工程中使用的一些特殊混凝土和预应力混凝土结构工程的施工技术,共分10章,其内容和作者如下:第1章综述(吕芝林);第2章沥青混凝土(吕芝林、刘嫦、任玉香);第3章纤维混凝土(程春雨);第4章补偿收缩混凝土(兰芳);第5章自密实混凝土(任玉香、孙向楠);第6章水下混凝土(吕芝林);第7章模袋混凝土(王勇、张海艳);第8章干贫混凝土(刘亚进);第9章挤压混凝土(刘亚进、肖绪清);第10章预应力混凝土(吕芝林、符强)本书稿由中国能建集团周厚贵总工校阅和审核。

由于编者的水平有限,书中的谬误和不当之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

作者

2016年10月

目 录

序一

序二

前言

1 综述	1
2 沥青混凝土	3
2.1 生产系统选型与布置	3
2.2 原材料选择及配合比设计	5
2.3 混合料生产	8
2.4 沥青混合料的运输	9
2.5 沥青混凝土心墙施工	10
2.6 沥青混凝土面板施工	15
2.7 沥青混凝土雨季施工及施工期度汛	20
2.8 沥青混凝土低温施工及越冬保护	21
2.9 检测	21
2.10 施工安全	23
2.11 工程实例	23
3 纤维混凝土	30
3.1 纤维的主要类型及其技术指标	30
3.2 纤维混凝土特性	31
3.3 纤维混凝土生产	32
3.4 施工	32
3.5 工程实例	33
4 补偿收缩混凝土	37
4.1 施工条件	38
4.2 补偿收缩方式	39
4.3 配合比设计	39
4.4 施工	41
4.5 工程实例	42

5 自密实混凝土	45
5.1 主要特性及指标	45
5.2 原材料的要求	46
5.3 配合比设计	47
5.4 施工	51
5.5 工程实例	51
6 水下混凝土	55
6.1 施工条件	55
6.2 配合比设计	55
6.3 施工	57
6.4 工程实例	65
7 模袋混凝土	71
7.1 施工条件	71
7.2 配合比设计	71
7.3 模袋设计及制作	72
7.4 模袋混凝土施工	73
7.5 工程实例	74
8 干贫混凝土	79
8.1 施工条件	79
8.2 配合比设计	79
8.3 拌和料生产	79
8.4 施工	79
8.5 工程实例	80
9 挤压混凝土	86
9.1 施工条件	86
9.2 施工设备	86
9.3 配合比设计	87
9.4 施工	87
9.5 工程实例	89
10 预应力混凝土	97
10.1 预应力施工的材料	97
10.2 先张法施工	108
10.3 后张法施工	114
10.4 工程案例	122
参考文献	129

混凝土是水电工程中最主要的建筑材料,由于水电工程施工环境、运营环境或结构的特殊性和复杂性,对混凝土的材料性能、施工工艺也提出了许多特殊要求。这些特殊性能或采用特殊工艺的混凝土与常规大量使用的普通钢筋混凝土和碾压混凝土其施工工艺、需要的设备、施工方法、施工要求明显不同。特别是近年来我国水电工程的大量兴建,新材料、新设备、新工艺不断的推广应用,又形成了许多新的特殊混凝土施工技术,特种混凝土和混凝土施工的特殊工艺也不断发展。这些特殊混凝土技术为提高工程质量,降低工程成本,甚至解决工程遇到的难题提供了有效手段。

如在土石坝和土石围堰中为适应坝体变形大的特点,最早一般采用黏土心墙进行防渗。由于黏土抗渗漏稳定性差,易流失,我国于20世纪80年代中后期开展了在混凝土中加入泥浆和粉煤灰以降低混凝土的弹性模量,形成塑性混凝土浇筑防渗墙的试验研究和初步试用。塑性混凝土虽然其弹性模量不大,但强度低,仍不能满足土石坝大变形的要求,在高水头作用下可能出现结构性裂缝,造成渗漏水形成塑性混凝土的溶蚀,降低工程的安全寿命,故在永久工程中没有推广。沥青混凝土是用沥青将天然或人工砂石骨料、填充料及各种掺加料等胶结在一起所形成的一种人工合成材料,材料稳定、塑性大。沥青混凝土与水泥混凝土相比,具有良好的抗渗性能、变形性能和抗震性能,不需设置接缝、不需较强的后期养护、机械化施工速度快、易于维修等优点,特别适合混凝土面板堆石坝和心墙堆石坝的防渗结构,在工程中得到了广泛应用。

又如为满足一些特殊部位混凝土防裂、变形、提高韧性和抗冲磨等方面的性能,人们采取了不同的胶凝材料或在普通混凝土中加入不同的掺合料,或采取提高平整度、采用在混凝土表面真空吸水等工艺。

我国是一个多泥沙河流的国家,已建大、中型水电工程有60%以上泄水建筑物出现冲磨、空蚀破坏。为了给新建高坝工程和修补工程提供具有高磨蚀性能的新型特种混凝土,早在20世纪60年代,钢纤维混凝土就用于水工混凝土磨蚀破坏的修补。但是室内试验和工程实践表明,普遍钢纤维混凝土用于低流速挟带小颗粒砂石条件下,其抗磨损能力不但没有提高,有时还有所降低。在80年代开始了掺短合成纤维的混凝土和掺硅粉等其他掺合料的抗冲磨混凝土研究,其中开发成功高强高抗磨蚀硅粉混凝土并用于龙羊峡水电站等重要工程。此项科研和工程实践成果,曾荣获国家科技进步奖。90年代以来,结合三峡水利枢纽工程的需要,又开展了高性能抗冲磨混凝土的研究,以硅粉、粉煤灰、膨胀剂等活性混合材取代水泥,既降低水泥用量、提高抗冲磨性能,又降低硅粉混凝土早期干缩偏大的缺点,此项成果已在飞来峡水电站大规模应用成功。

利用MgO所具有的延迟微膨胀性能来补偿混凝土的温度变形防止温度裂缝,可全部

或部分取代传统的混凝土坝温控措施。我国自 1973 年开始,结合白山水电站拱坝使用高镁水泥拌制混凝土的防裂效果,对 MgO 混凝土进行了研究和开发,制定了《氧化镁微膨胀混凝土筑坝技术暂行规定》和“水工轻烧 MgO 材料品质技术要求”并在多项工程中应用,都取得了较好效果。

又如在水电工程施工中难免要进行混凝土的水下浇筑施工,水工建筑物在运行过程中有可能会产生局部的水损,需要浇筑水下混凝土进行修补,必须采取一些特殊的工艺。以往水下混凝土质量的好坏主要取决于施工的优劣,关键是尽量隔断混凝土与水的接触。常用的方法有导管法、袋装堆筑法、开底容器法、混凝土泵压法和预填骨料压浆施工法。近年来又对浇筑机具进行了各种改进和开发,出现了 KDT 施工法等特殊浇筑形式。但使用最多的还是导管法及其基础上的改进。导管法施工与水接触部分混凝土易受水的冲洗而发生水泥浆流失,致使表面混凝土强度降低,底层与基础黏结不牢。20 世纪 70 年代以来,以西德为首,从研究混凝土本身性能的改善来提高水下混凝土的质量,使其具有在浇筑过程中直接与水接触也不易使各组分材料分散的能力。1974 年西德率先在工程上使用成功并定名为水下不分散混凝土 (Non Dispersible Concrete, 简称 NDC)。我国 90 年代初也成功研制出了水下不分散混凝土外加剂,采用这种外加剂(如工艺适当)可以大大提高水下混凝土的浇筑质量。

如对于钢筋过于密集或埋件下不易振捣的部位采用自密实混凝土工艺,对碾压土石坝特殊地基处理或土石坝工程的挡护结构,其对强度要求不高,为节约成本采用了干贫混凝土材料。

钢筋混凝土结构采用预应力工艺,可减少结构物尺寸,改善应力状态,避免和减少裂缝,提高结构的承载能力和耐久性,故其在水电工程的闸墩、引水洞、蜗壳、大型交通桥、门机轨道中得到了广泛应用。随着预应力材料、机具的发展预应力工艺施工更加方便快捷。

特种混凝土和特殊混凝土结构主要有:

- (1) 按材料的特殊性划分,有沥青混凝土、纤维混凝土等。
- (2) 按浇筑环境的特殊性划分,有模袋混凝土、水下混凝土等。
- (3) 按成型方式的特殊性划分,有自密实混凝土、挤压混凝土、喷射混凝土等。
- (4) 按性能的特殊性划分,有补偿收缩混凝土、抗冲磨混凝土、抗侵蚀混凝土等。
- (5) 按结构的特殊性划分,有预应力混凝土等。
- (6) 按配合比的特殊性划分,有断级配混凝土、无砂混凝土、干贫混凝土等。