



水工混凝土建筑物 修补技术及应用

黄国兴 陈改新 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TV688.2

H. 1



水工混凝土

建筑物修补技术及应用

黄国兴 陈改新 编著

国家自然科学基金资助项目

水利部科技专著出版基金资助项目

中国水利水电出版社

内 容 提 要

该书系统论述了水工混凝土建筑物老化病害的分类、裂缝修补技术、渗漏处理技术和剥蚀(冻融破坏、冲磨空蚀破坏、钢筋锈蚀破坏等)修补技术,在修补技术中着重介绍修补方法、修补材料、修补工艺及工程实例。另外,还简要介绍了结构补强加固技术。

该书可供从事水工混凝土建筑物和其他混凝土建筑物老化病害修补处理和补强加固设计、科研、施工、管理等技术人员与高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工混凝土建筑物修补技术及应用/黄国兴,陈改新编著. —北京:中国水利水电出版社, 1998

ISBN 7-80124-694-2

I. 水… II. ①黄… ②陈… III. 混凝土结构-水工建筑物-维修 IV. TV698.2

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第29690号

书 名	水工混凝土建筑物修补技术及应用
作 者	黄国兴 陈改新 编著
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: sale@waterpub.com.cn 电话:(010)63202266(总机)、68331835(发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	850×1168毫米 32开本 8.75印张 230千字
版 次	1999年3月第一版 1999年3月北京第一次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	22.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

出 版 说 明

书籍是人类进步的阶梯。科技图书集聚着科学研究和发明创造的成果，凝结着人们生产活动、科学实验的实践经验和聪明才智。当今，在振兴中华的“四化”建设中，要把科学技术转化为现实的生产力，科技图书的出版是一个重要的环节。它担负着传播科技信息，扩大科技交流，推广科技成果，普及科技知识，培养科技人才，积累科学文化，提高全民族科技意识和劳动者素质的重任，是科技事业的一个重要组成部分。

改革开放以来，我国的科技出版事业取得了飞速的发展。但在还很不完善的社会主义市场经济中，科技图书出版的合理经营机制尚未形成，“出书难、买书难、卖书难”一直困扰着许多科技人员和出版工作者。特别是一些专业性很强的科学专著，发行范围有限，出版更为困难，影响了科学技术的发展。广大知识分子在不断呼吁，出版界也竭力探索解决这一问题的途径。1985年以来，中央领导同志和中宣部曾多次指示，要求国家和各主管部门筹款，为专家学者撰写学术专著建立出版基金。其后，从中央到地方各类出版基金陆续建立，有力地推动了学术专著的出版。

水利在我国具有悠久的历史，对治国安邦起着重要的作用。新中国建立40多年来，水利建设事业取得

了举世瞩目的成就，已成为我国国民经济的基础设施和基础产业，是发展工农业生产的命脉。为了支持水利科技专著的出版，以适应我国水利科研、设计、建设、管理、教学的需要，水利部于1991年9月5日向全国发布了《水利部科技专著出版基金试行条例》，拨出专款用于资助科技专著的出版，并相应地建立了出版基金评审委员会和办公室。

本出版基金主要用于资助有明显社会效益而印数较少的水利优秀科技著作的出版，包括：学术水平高、内容有创见、在学科上居领先地位的水利基础学科理论专著；反映水利重大科研成果或填补我国水利科技某个空白领域的学术专著；在水利工程技术和经济管理方面有重大科学和实用价值的专著；对我国水利科技发展有重要参考价值的国外水利科技著作的中译本。申请者在已有详细编写提纲和部分样稿时，即可向本基金办公室提出申请。

本出版基金申请项目的评审，坚持“专家评议，公平竞争，择优支持”的原则，其做法是：对所有申请项目，先由基金办送请三名同行专家评议，然后再提交评审委员会讨论、评选。对被通过的申请项目，即转入中国水利水电出版社的计划，由基金赞助出版。

我们希望本出版基金的实施对推动水利科技的进步和人才培养，对促进水利建设事业的发展，会起到积极的作用。为此，我们热切地希望水利界的学者、专家，能潜心将自己的创见和经验撰写成专著，踊跃向本出版基金提出申请出版，为繁荣我国的水利科技事

业添砖加瓦，奉献自己的才智和力量。

水利部科技专著出版基金委员会

1997 年 11 月

前 言

1949年中华人民共和国成立以来,我国兴建了大量水利水电工程,为经济建设和社会进步作出了巨大贡献。但是,随着工程运行年限的增加,水工混凝土建筑物的老化与病害问题日益突出,尤其是那些设计欠妥、施工质量差、管理不善的工程,老化病害问题更为严重,有的已危及安全运行,使水利水电工程不能发挥应有的经济效益和社会效益。为此,水利水电主管部门曾组织几次全国性的水工混凝土建筑物老化病害及其处理技术的调查研究。通过调研,基本掌握了我国水工混凝土建筑物老化病害及处理技术的现状,这对各级水利水电部门对水工混凝土建筑物老化病害处理的决策,将起很大作用。

我国自60年代开始进行水工混凝土建筑物老化病害修补以来,至今已近40年,在水工混凝土建筑物修补技术方面积累了大量经验,但没有进行系统整理分析。为此,国家自然科学基金重点项目(1992~1995年)——水工混凝土建筑物老化病害的防治与评估研究中专门对一个子题,进行水工混凝土建筑物老化病害修补技术的研究,要对水工混凝土建筑物的裂缝、渗漏、剥蚀(冻融破坏、冲磨气蚀破坏、钢筋锈蚀破坏、化学侵蚀破坏等)病害的调查与检测、修补方法、修补材料及工艺,进行系统的整理分析,并结合具体工程,阐述各种修补技术的应用及

修补效果情况,该成果已于1996年通过验收。根据以上研究成果编写《水工混凝土建筑物修补技术及应用》这本书,以供水利水电工程管理局在进行水工混凝土建筑物老化病害处理时参考。

本书共分五章:第一章介绍水工混凝土建筑物老化病害的分类,主要有裂缝、渗漏、剥蚀三大类;第二章介绍裂缝修补技术;第三章介绍渗漏处理技术;第四章介绍剥蚀修补技术,而修补技术着重介绍修补方法、修补材料、修补工艺,以及工程实例;第五章介绍结构补强加固技术,主要介绍补强加固设计、方法及工艺。本书附录为水工混凝土建筑物常用修补材料表,介绍各种修补材料的主要用途、研制或生产单位及联系地址等。

本书的前言、第一章、第二章及第五章由黄国兴执笔,第三章、第四章及附录由陈改新执笔,全书由黄国兴统稿。在编写本书过程中,曾得到中国水利水电科学研究院结构材料所领导及同志们们的热情支持与帮助,在此一并致谢。

因作者理论知识和实际经验所限,书中可能存在一些缺点和错误,诚恳希望读者,尤其是从事这方面工作的同志给予指正。

作 者

1998年8月

目 录

出版说明

前 言

第一章 水工混凝土建筑物老化病害的分类	1
第一节 裂缝.....	1
第二节 渗漏.....	4
第三节 剥蚀.....	5
参考文献.....	7
第二章 裂缝修补技术	8
第一节 裂缝调查、检测及成因分析.....	8
第二节 裂缝修补与补强加固的判断.....	22
第三节 裂缝的修补方法.....	26
第四节 裂缝修补材料.....	28
第五节 裂缝修补工艺.....	57
第六节 工程实例.....	60
参考文献.....	86
第三章 渗漏处理技术	87
第一节 渗漏调查.....	87
第二节 渗漏成因分析及处理判断.....	89
第三节 渗漏处理的原则和方法.....	94
第四节 渗漏处理的常用材料.....	109
第五节 工程实例.....	121
参考文献.....	137
第四章 剥蚀破坏修补技术	138
第一节 水工混凝土的剥蚀破坏机理.....	139
第二节 剥蚀破坏的诊断和修补处理对策.....	144

第三节	剥蚀破坏修补的工艺要点·····	160
第四节	剥蚀破坏的修补材料·····	164
第五节	工程实例·····	182
	参考文献·····	208
第五章	结构补强加固技术·····	210
第一节	补强加固设计·····	210
第二节	补强加固方法·····	210
第三节	补强加固工艺·····	218
第四节	补强加固的检查与效果确认·····	236
第五节	工程实例·····	236
	参考文献·····	256
附录	·····	257

第一章 水工混凝土建筑物 老化病害的分类

水工混凝土建筑物老化病害从现象上来看主要有裂缝、渗漏、剥蚀等三种，而每一种病害又是由多方面原因造成的。裂缝主要由荷载、温度、干缩、地基变形、钢筋锈蚀、碱骨料反应、地基冻胀、混凝土质量差、水泥水化热温升等原因引起；渗漏主要是由混凝土密实性差、裂缝、伸缩缝止水失效等原因引起的；剥蚀主要是由冻融、冲磨气蚀、钢筋锈蚀、化学侵蚀、碱骨料反应及低强风化等原因导致的。

第一节 裂 缝

裂缝是水工混凝土建筑物最普遍、最常见的病害之一，不发生裂缝的混凝土建筑物是极少的。而且混凝土裂缝往往是多种因素联合作用的结果。裂缝对水工混凝土建筑物的危害程度不一，严重的裂缝不仅危害建筑物的整体性和稳定性，而且还会产生大量的漏水，使闸坝及其他水工建筑物的安全运行受到严重威胁。另外，裂缝往往会引起其他病害的发生与发展，如渗漏溶蚀、环境水侵蚀、冻融破坏及钢筋锈蚀等等。这些病害与裂缝形成恶性循环，会对水工混凝土建筑物的耐久性产生很大危害。

混凝土是多相复合脆性材料，当混凝土拉应力大于其抗拉强度，或混凝土拉伸变形大于其极限拉伸变形时，混凝土就会产生裂缝。裂缝按深度不同，可分为表层裂缝、深层裂缝和贯穿裂缝；按裂缝开度变化可分为死缝（其宽度和长度不再变化）、活缝（其宽度随外界环境条件和荷载条件变化而变化，长度不变或变化不

大)和增长缝(其宽度或长度随时间而增长);按产生原因分,裂缝可分成温度裂缝、干缩裂缝、钢筋锈蚀裂缝、超载裂缝、碱骨料反应裂缝、地基不均匀沉陷裂缝等。

一、温度裂缝

大体积混凝土浇筑后,由于水泥水化热使内部混凝土温度升高。当水化热温升到达高峰后,由于环境温度较低,因此混凝土温度开始下降。温降过程中混凝土发生收缩,在约束条件下,当温降收缩变形大于混凝土极限拉伸变形时,混凝土容易发生裂缝,这种裂缝通常称为温度裂缝。还有一种温度裂缝是由于混凝土内外温差引起的,例如混凝土遭受寒潮侵袭或夏天混凝土经阳光曝晒后突然下雨,都会使混凝土内部与表层产生很大温差,混凝土表层温度下降,而内部温度基本不降,这样内部混凝土对表层混凝土起约束作用,同样会导致温度裂缝。

为了减少温度裂缝,一般选用中热水泥或具有微膨胀性的中热水泥(自生体积变形为膨胀变形,如水泥中 MgO 含量较高,但不大于 5%)和热膨胀系数小的骨料。如石灰岩骨料混凝土热膨胀系数为 $(5\sim 6)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,而砂岩骨料混凝土热膨胀系数为 $(10\sim 12)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,同样温度降低 1°C ,砂岩骨料混凝土温度变形比石灰岩骨料混凝土的温度变形大 1 倍。同时在施工中还应严格采取温控措施,尽量避免裂缝发生。

二、干缩裂缝

置于未饱和空气中的混凝土因水分散失而引起的体积缩小变形,称为干燥收缩变形,简称干缩。干缩仅是混凝土收缩的一种,除干燥收缩外,混凝土还有自生收缩(自缩)、温度收缩(冷缩)、碳化收缩等。干缩的扩散速度比温度的扩散速度要慢 1000 倍。例如,对大体积混凝土,干缩扩散深度达到 6 cm 需花 30 天时间,而在这段时间内,温度却可传播 6 m 深^[1]。因此,对大体积混凝土内部不存在干缩问题,但其表面干缩是一个不能忽视的问题。正

因为干缩扩散速度小，混凝土表面已干缩，而其内部不缩，这样内部混凝土对表面混凝土干缩起约束作用，使混凝土表面产生干缩应力。当混凝土干缩应力大于混凝土抗拉强度时，混凝土就会产生裂缝，这种裂缝称为干缩裂缝。

实际上，水工混凝土建筑物产生干缩裂缝，也包含有混凝土自生体积收缩和碳化收缩作用的结果。

三、钢筋锈蚀裂缝

混凝土中钢筋发生锈蚀后，其锈蚀产物（氢氧化铁）的体积将比原来增长 2~4 倍^[2]，从而对周围混凝土产生膨胀应力。当该膨胀应力大于混凝土抗拉强度时，混凝土就会产生裂缝，这种裂缝称为钢筋锈蚀裂缝。钢筋锈蚀裂缝一般都为沿钢筋长度方向发展的顺筋裂缝。

四、碱骨料反应裂缝

碱骨料反应主要有碱—硅酸反应和碱—碳酸盐反应，它们都是水泥中的碱（ Na_2O 、 K_2O ）和骨料中的某些活性物质如活性 SiO_2 、微晶白云石（碳酸盐），以及变形石英等发生反应而生成吸水性较强的凝胶物质。当反应物增加到一定数量，且有充足水时，就会在混凝土中产生较大的膨胀作用，导致混凝土产生裂缝，这种裂缝称碱骨料反应裂缝。碱骨料反应裂缝不同于最常见的混凝土干缩裂缝和荷载引起的超载裂缝，这种裂缝的形貌及分布与钢筋限制有关，当限制力很小时，常出现地图状裂缝，并在缝中伴有白色浸出物；当限制力强时则出现顺筋裂缝^[3]。

五、超载裂缝

当建筑物遭受超载作用时，其结构构件产生的裂缝称超载裂缝。

此外，常见的混凝土裂缝还有地基不均匀沉陷裂缝、地基冻胀裂缝等。

第二节 渗 漏

水工混凝土建筑物的主要任务是挡水、引水、输水和泄水，都是与“水”密切相关，而水又是无孔不入，特别是压力水。因此，渗漏也是水工混凝土建筑物常见的主要病害之一。渗漏会使建筑物内部产生较大的渗透压力和浮托力，甚至危及建筑物的稳定与安全；渗漏还会引发溶蚀、侵蚀、冻融、钢筋锈蚀、地基冻胀等病害，加速混凝土结构老化，缩短建筑物的使用寿命。同时渗漏会导致水量损失，影响经济效益和社会效益。

按照渗漏的几何形状可以把渗漏分为点渗漏、线渗漏和面渗漏三种。

点渗漏和面渗漏一般是由混凝土施工质量差造成的。如生产混凝土所用原材料不合格、搅拌不均匀、浇筑振捣不密实或漏振、骨料分离、早期冻害、塑性收缩裂缝等使混凝土疏松、不密实，抗渗等级低或在其内部形成相互连通的蜂窝孔隙，从而导致集中或零散渗漏和大面积散渗发生。

线渗漏较为常见，发生率高。线渗漏又可分为病害裂缝渗漏和变形缝渗漏两种。

根据渗漏水的速度，渗漏又可分为慢渗、快渗、漏水和射流等四种，渗漏水量与渗径长度、静水压力、渗流截面积等三个因素有关。

水工混凝土建筑物的渗漏问题是一种较为普遍的病害。归纳起来造成渗漏的原因主要有以下几个：

(1) 裂缝，尤其是贯穿性裂缝是产生渗漏的主要原因之一，而漏水程度又与裂缝的性状（宽度、深度、分布）、温度及干湿循环等有关。冬季温度低、裂缝宽度大，在同样水位下其渗漏量就大。

(2) 止水结构失效，沥青止水并混进了水泥浆、止水片材性能不佳，发生断裂、腐烂，伸缩缝变形大导致绕止水带渗漏，还有止水带施工工艺不当等也会引起渗漏。

(3) 混凝土施工质量差, 密实度低, 甚至出现蜂窝孔洞, 从而导致水在混凝土中渗漏。

(4) 基础灌浆帷幕破坏是引起基础渗漏的主要原因, 如帷幕灌浆施工没有达到设计要求; 运行中帷幕受环境水的侵蚀而破坏; 基础处理不善, 基岩出现不均匀沉降, 导致帷幕断裂失效等。

渗漏对水工混凝土建筑物的危害性很大, 其一是渗漏会使混凝土产生溶蚀破坏。所谓溶蚀, 即渗漏水对混凝土产生溶出性侵蚀。众所周知, 混凝土中水泥的水化产物主要有水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化铁铝酸钙及氢氧化钙, 而足够的氢氧化钙又是其他水化产物凝聚、结晶稳定的保证。在以上水化产物中, 氢氧化钙在水中的溶解度较高。在正常情况下, 混凝土毛细孔中均存在饱和氢氧化钙溶液。而一旦产生渗漏, 渗漏水就可能把混凝土中的氢氧化钙溶出带走, 在混凝土外部形成白色碳酸钙结晶。这样就破坏了水泥其他水化产物稳定存在的平衡条件, 从而引起水化产物的分解, 导致混凝土性能的下降。当混凝土中总的氢氧化钙含量(以氧化钙量计算)被溶出 25% 时, 混凝土抗压强度要下降 50%; 而当溶出量超过 33% 时, 混凝土将完全失去强度而松散破坏^①。由此可见, 渗漏对混凝土产生溶蚀将造成严重的后果。其二是渗漏会引起并加速其他病害的发生与发展。当环境水对混凝土有侵蚀作用时, 由于渗漏会促使环境水侵蚀向混凝土内部发展, 从而增加破坏的深度与广度; 在寒冷地区, 由于渗漏, 会使混凝土的含水量增大, 促进混凝土的冻融破坏; 对水工钢筋混凝土结构物, 渗漏还会加速钢筋锈蚀等等。

第三节 剥 蚀

水工混凝土产生剥蚀破坏是由于环境因素(包括水、气、温

^① 水利电力部水工混凝土耐久性调查组, 全国水工混凝土建筑物耐久性病害处理调查总结报告, 1987. 5。

度、介质)与混凝土及其内部的水化产物、砂石骨料、掺合料、外加剂、钢筋相互之间产生一系列机械的、物理的、化学的复杂作用,从而形成大于混凝土抵抗能力(强度)的破坏应力所致。最常见的剥蚀破坏有下列四种。

一、冻融破坏

混凝土产生冻融破坏,从宏观上看是混凝土在水和正负温度交替作用下而产生的疲劳破坏。在微观上,其破坏机理有多种解释,较有代表性和公认程度较高的是美国学者 T.C. Powers 的冻胀压和渗透压理论。这种理论认为,混凝土在冻融过程中受到的破坏应力主要有两方面来源,一个是混凝土孔隙中充满水时,当温度降低至冰点以下而使孔隙水产生物态变化,即水变成冰,其体积要膨胀 9%,从而产生膨胀应力;与此同时,混凝土在冻结过程中还可能出现过冷水在孔隙中的迁移和重分布,从而在混凝土的微观结构中产生渗透压。这两种应力在混凝土冻融过程中反复出现,并相互促进,最终造成混凝土的疲劳破坏。

二、冲磨与空蚀

在水工建筑物过流部位往往容易发生冲磨和空蚀破坏,但冲磨与空蚀的破坏机理是不同的。冲磨破坏是一种单纯的机械作用,它既有水流作用下固体材料间的相互摩擦,又有相互间的冲击碰撞。不同粒径的固体介质,当它的硬度大于混凝土硬度时,在水流作用下就形成对混凝土表面的磨损与冲击,这种作用是连续的和不规则的,最终对混凝土面造成冲磨破坏。而空蚀破坏是在高速水流下由于水流形态的突然变化,在局部产生负压,从而使水气化而形成空穴(气泡),这些空穴随水流运动到高压区时又迅速破灭,此时对混凝土表面产生类似爆炸的剥蚀应力,从而形成混凝土表面的空蚀破坏。

三、钢筋锈蚀破坏

水工混凝土中钢筋锈蚀的原因主要有两方面:一是由于混凝

土在空气中发生碳化而使混凝土内部碱度降低,钢筋钝化膜破坏,从而使钢筋产生电化学腐蚀现象,导致钢筋生锈;二是由于氯离子侵入到混凝土中,也使钢筋的钝化膜破坏,从而形成钢筋的电化学腐蚀。因此,钢筋锈蚀过程实际是大气(CO_2 、 O_2)、水、侵蚀介质(Cl^- 等)向混凝土内部的渗透、迁移而引起钢筋钝化膜破坏,并产生电化学反应,使铁变成氢氧化铁的过程。钢筋生锈后,其锈蚀产物的体积比原来增长2~4倍,从而在其周围的混凝土中产生膨胀应力,最终导致钢筋保护层混凝土开裂、剥落。而保护层的剥落又会进一步加速钢筋锈蚀。这一恶性循环将使混凝土结构的钢筋保护层大量剥落、钢筋截面积减小,从而降低结构的承载能力和稳定性,影响结构物的安全。

四、水质侵蚀

水质侵蚀引起混凝土剥蚀破坏的原因也较复杂,从总体上看,都是可溶性侵蚀介质随着水渗透扩散到混凝土中,再与混凝土中水泥水化产物或其他组分发生化学反应,生成膨胀性产物或溶解度较大的反应产物,从而使混凝土产生胀裂剥蚀或溶出性剥离。水工混凝土受到水质侵蚀出现的破坏主要有两类,一类是硫酸盐侵蚀,属膨胀型破坏。当这些溶解度小而又有体积膨胀的产物不断增加时,在混凝土孔隙中将产生不断增加的膨胀应力,最终导致混凝土开裂和剥蚀;另一类是酸性水的溶出性侵蚀,溶出性侵蚀会促使混凝土中的氢氧化钙不断溶出,从而引起水泥水化产物分解、水泥石结构疏松,混凝土强度降低。

参 考 文 献

- 1 黄国兴,惠荣炎编著.混凝土的收缩.北京:中国铁道出版社,1990
- 2 邸小坛,周燕编著.旧建筑物的检测加固与维护.北京:地震出版社,1992
- 3 吴中伟.水泥制品必须预防碱-集料反应.混凝土与水泥制品.1993