



国家出版基金资助项目
“十二五”国家重点图书
材料研究与应用著作

混凝土结构材料的损伤特性 及其本构模型

DAMAGE CHARACTERISTICS OF
MATERIALS FOR CONCRETE STRUCTURE
AND THEIR CONSTITUTIVE MODELS

钱春香 徐亦冬 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS



国家出版基金资助项目
“十二五”国家重点图书
材料研究与应用著作

混凝土结构材料的损伤特性 及其本构模型

DAMAGE CHARACTERISTICS OF
MATERIALS FOR CONCRETE STRUCTURE
AND THEIR CONSTITUTIVE MODELS

钱春香 徐亦冬 著

 东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书在国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No:2009CB623203)和国家自然科学基金项目(No:51008276)的资助下,对不同腐蚀环境下混凝土结构材料的耐久性损伤问题开展了大量理论分析、数值模拟及试验研究工作。全书共 5 章,内容包括碱硅酸反应、溶蚀、硫酸盐侵蚀混凝土以及锈蚀钢筋的损伤特性与表征,并建立相应的内蕴损伤变量的本构模型,以期为混凝土结构耐久性评估、寿命预测及计算机仿真提供理论指导。

本书可供土木建筑、工程材料、桥梁市政、港口水运、道路与铁道工程等专业的科研人员与工程技术人员从事科研、工程设计、检测、维护与管理时参考,也可供大专院校的教师、研究生及高年级本科生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构材料的损伤特性及其本构模型/ 钱春香,
徐亦冬著. —南京:东南大学出版社,2015. 12
ISBN 978-7-5641-5489-9

I. ①混… II. ①钱… ②徐… III. ①混凝土—
建筑材料—损伤(力学)—研究 IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 023320 号

责任编辑:张 莺

出版发行:东南大学出版社

社 址:南京市四牌楼 2 号 邮 编:210096

出 版 人:江建中

网 址:<http://www.seupress.com>

经 销:全国各地新华书店

印 刷:南京工大印务有限公司

开 本:660mm×980mm 1/16

印 张:32

字 数:558 千

版 次:2015 年 12 月第 1 版

印 次:2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5641-5489-9

定 价:128.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830。

序

钢筋与混凝土是目前世界上使用最为广泛的土木工程结构材料。科技工作者从不断发生的混凝土结构材料腐蚀劣化所导致的结构失效中意识到,必须深化混凝土结构材料的基础研究。在不同腐蚀环境作用下,混凝土结构材料的耐久性损伤特性究竟有何差异,这些差异究竟会对其力学性能造成怎样的影响,都是国内外学术与工程界关注的问题。

该书针对不同腐蚀环境下混凝土结构材料的耐久性损伤问题,通过材料科学与力学的交叉,从微/细/宏观多尺度出发,开展了大量理论分析、数值模拟及试验研究工作,探明了碱硅酸反应、溶蚀、硫酸盐侵蚀混凝土以及锈蚀钢筋的损伤特性,并建立了不同结构材料的损伤本构模型,实现了通过微细观结构行为去解读复杂宏观现象的理念,具有重要的理论和现实意义。

东南大学材料科学与工程学院长期从事混凝土结构材料耐久性的研究与应用。编写组成员在东南大学特聘教授、东南大学绿色建材研究所所长钱春香教授的带领下,对国家 973 计划项目和国家自然科学基金项目的研究成果进行了总结与凝练,这本著作正是该团队众多科研人员的智慧结晶。

本书内容丰富、体系完整,不仅是最新科研成果的展示,更是一本可供高校师生、科技人员及工程技术人员参考的高水平专业读物。我很高兴看到此书的出版,特为之序。

孙伟

中国工程院院士
二〇一四年十月

前 言

钢筋混凝土结构是目前世界上使用最为广泛的结构形式。在可预见的未来,钢筋与混凝土依然是工程建设中最主要的结构材料,其耐久性仍将是国内外学术界与工程界关注的重大科技问题。要准确掌握耐久性损伤引起的结构性能变化规律,就必须正确认识混凝土结构材料的腐蚀特性及其所导致的力学性能退化规律,并建立内蕴损伤变量的本构关系。因此开展混凝土结构材料耐久性损伤的系统研究,不仅为既有结构的维修加固决策提供科学依据,也将为混凝土结构耐久性设计提供科学依据,对国家基础设施建设有着十分重要的理论和现实意义。

作者及其课题组成员在国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No:2009CB623203)和国家自然科学基金项目(No:51008276)的资助下,对不同腐蚀环境下混凝土结构材料的损伤特性及本构模型开展了大量理论分析、数值模拟及试验研究工作,取得了一系列成果,本书是对作者近年研究工作的总结。

全书共 5 章。

第 1 章:从混凝土结构所处的不同环境入手,系统阐述了混凝土结构所受的各类耐久性损伤,并阐明了耐久性损伤引起的本构模型变化对于工程结构分析的重要性,最后对国内外研究现状进行了综述。

第 2 章:围绕混凝土碱硅酸反应(ASR)膨胀这一中心问题,提出了基于力学和化学因素的 ASR 膨胀计算模型,揭示了 ASR 膨胀及其对混凝土力学性能的影响,建立了 ASR 混凝土单轴受压下的应力—应变全曲线,并由膨胀率出发实现了 ASR 混凝土单轴受压本构关系的数值模拟。

第 3 章:围绕溶蚀—力学耦合作用下混凝土材料的力学特性,分析了水泥基材料的溶蚀机理,确定了适合表征现场混凝土结构溶蚀损伤程度的方法,

实现了水泥基材料中钙离子溶出的数值模拟,建立了宏观上描述溶蚀混凝土单轴压缩的本构方程与溶蚀—力学耦合作用下混凝土弹塑性损伤本构模型。

第4章:针对硫酸盐腐蚀环境,确定了干湿循环—硫酸盐侵蚀耦合作用后混凝土损伤评价指标,定义了与承载力相关联的损伤度,揭示了硫酸盐侵蚀混凝土微结构损伤及其力学性能演化规律,建立了基于试验数据与扰动状态理论的硫酸盐侵蚀混凝土受压本构关系,提出了基于细观力学的硫酸盐侵蚀混凝土受压本构关系的数值模拟方法。

第5章:紧紧围绕不同腐蚀条件下混凝土内钢筋不均匀锈蚀特征的科学表征及其本构关系这一中心问题,建立了钢筋不均匀锈蚀性状的科学表征方法,揭示了不同腐蚀条件下混凝土中钢筋的不均匀锈蚀几何特征,探明了不同锈蚀特征对钢筋拉伸性能的影响,实现了锈蚀钢筋拉伸全过程的细观数值模拟与本构关系预测。

本书编写分工如下:钱春香——第1章;庄园、钱春香——第2章;黄蓓、钱春香——第3章;聂彦锋、钱春香——第4章;徐亦冬、钱春香——第5章。全书由东南大学钱春香、浙江大学宁波理工学院徐亦冬负责审阅、统稿,并对各章节做了部分修改。参编人员均为本人指导的博士研究生,编写的内容为其在东南大学攻读博士学位期间所做的工作。

感谢科技部、国家自然科学基金委员会等单位对本书研究工作的资助,感谢国家出版基金对本书出版的资助,最后要特别感谢孙伟院士对作者研究工作的大力支持,并为本书作序予以鼓励。

由于混凝土结构材料耐久性损伤所涉及的问题较为复杂,尚有许多问题有待进一步研究,加之本书作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者不吝赐教。

东南大学钱春香
二〇一四年十月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 混凝土碱硅酸反应(ASR)损伤	3
1.2.2 混凝土溶蚀损伤	4
1.2.3 混凝土硫酸盐侵蚀损伤	5
1.2.4 钢筋锈蚀损伤	7
1.3 本书内容体系	9
1.3.1 绪论	9
1.3.2 碱硅酸反应(ASR)混凝土的损伤及其本构模型	9
1.3.3 溶蚀混凝土的损伤及其本构模型	10
1.3.4 硫酸盐侵蚀混凝土的损伤及其本构模型	11
1.3.5 不同腐蚀条件下混凝土内钢筋的锈蚀特征及其本构模型	12
第 2 章 碱硅酸反应(ASR)混凝土的损伤及其本构模型	13
2.1 有效碱及 ASR 化学反应过程计算模型	13
2.1.1 混凝土 ASR 机理的提出	14
2.1.2 混凝土 ASR 的有效碱	20
2.1.3 基于扩散的 ASR 化学反应过程计算模型	22
2.1.4 基于固相反应的 ASR 化学反应过程计算模型	27
2.2 混凝土 ASR 膨胀的计算模型	31
2.2.1 ASR 凝胶成分及体积分析	31
2.2.2 基于弹性力学的 ASR 膨胀模型	33
2.2.3 基于弹塑性力学的模型	36
2.3 混凝土 ASR 膨胀试验研究与数值计算	42
2.3.1 ASR 对混凝土膨胀及力学性能影响的试验研究	43

2.3.2	试验结果分析	48
2.3.3	混凝土 ASR 膨胀模型的实例计算	51
2.4	ASR 混凝土单轴受压本构关系	55
2.4.1	单轴受压应力—应变全曲线试验	56
2.4.2	试验现象与分析	59
2.4.3	ASR 混凝土损伤分析	63
2.4.4	应力—应变全曲线的拟合	67
2.5	基于细观力学的 ASR 混凝土的数值模拟	79
2.5.1	材料非线性问题的有限元求解	80
2.5.2	混凝土材料二维骨料模型的生成方法	87
2.5.3	二维随机圆形骨料的生成	94
2.5.4	ASR 混凝土二维细观力学模型的数值分析	101
2.6	本章小结	119
第 3 章	溶蚀混凝土的损伤及其本构模型	123
3.1	溶蚀混凝土的损伤表征方法	123
3.1.1	试验方法及配合比	123
3.1.2	与强度衰减相关联的表征方法对比	130
3.1.3	溶蚀混凝土单轴压缩本构关系试验研究	134
3.2	溶蚀混凝土结构损伤及溶蚀机理分析	144
3.2.1	试验原材料及配合比	146
3.2.2	测试方法	146
3.2.3	试验结果	148
3.3	混凝土中钙离子溶出过程数值模拟	157
3.3.1	钙离子溶出试验研究	158
3.3.2	混凝土中钙离子溶出模型	163
3.3.3	钙离子溶出过程模拟	167
3.4	溶蚀—力学耦合作用下混凝土弹塑性本构模型	180
3.4.1	混凝土弹塑性损伤本构模型建立	180
3.4.2	模型中各参数的确定及计算过程	190
3.5	本构模型数值模拟及验证	193
3.5.1	溶蚀水泥基材料的应力—应变关系试验研究	193
3.5.2	溶蚀混凝土弹塑性本构模型数值模拟	207

3.5.3 基于细观结构的溶蚀水泥基材料损伤本构模型	214
3.6 本章小结	230
第4章 硫酸盐侵蚀混凝土的损伤及其本构模型	233
4.1 基于粗糙集理论的硫酸盐侵蚀评价指标重要性分析	233
4.1.1 粗糙集	234
4.1.2 硫酸盐侵蚀试验设计及试验结果	238
4.1.3 粗糙集决策模型	244
4.1.4 应用	254
4.2 硫酸盐腐蚀混凝土单轴受压本构关系试验研究	254
4.2.1 试验研究方案	255
4.2.2 硫酸盐侵蚀混凝土损伤分析	259
4.2.3 受硫酸盐侵蚀混凝土应力—应变曲线与分析	263
4.2.4 受硫酸盐侵蚀混凝土应力—应变曲线拟合	268
4.3 硫酸盐侵蚀混凝土微结构损伤及其力学性能研究	279
4.3.1 试验原材料及配合比	280
4.3.2 测试方法	281
4.3.3 试验结果及分析	287
4.4 基于扰动状态理论的硫酸盐侵蚀混凝土受压本构模型	301
4.4.1 扰动状态理论	302
4.4.2 扰动状态理论研究方法	305
4.4.3 硫酸盐侵蚀混凝土扰动模型	314
4.4.4 模型验证及方法提炼	325
4.5 基于细观力学的硫酸盐侵蚀混凝土的数值模拟	332
4.5.1 混凝土细观力学研究方法	332
4.5.2 硫酸盐侵蚀混凝土细观数值模拟	338
4.5.3 数值模拟结果及分析	347
4.6 本章小结	359
第5章 不同腐蚀条件下混凝土内钢筋的锈蚀特征及其本构模型	363
5.1 钢筋不均匀锈蚀几何特征的特征方法	363
5.1.1 分形理论简介	364

5.1.2	试验研究方案	369
5.1.3	蚀坑平面形态的表征	374
5.1.4	蚀坑深度的表征	381
5.1.5	断口分析	387
5.1.6	锈蚀损伤变量的建立	391
5.2	不同腐蚀条件下混凝土中钢筋的不均匀锈蚀几何特征	393
5.2.1	试验研究方案	393
5.2.2	氯盐及其与应力耦合作用下混凝土内钢筋的锈蚀特性	398
5.2.3	杂散电流及其与应力耦合作用下钢筋的锈蚀特性	411
5.2.4	碳化及其与应力耦合作用下钢筋的锈蚀特性	424
5.2.5	试验结果分析与讨论	432
5.3	不同锈蚀特征对钢筋拉伸性能的影响	436
5.3.1	不同锈蚀特征对钢筋力学性能影响的有限元分析	437
5.3.2	锈蚀钢筋力学性能退化规律	448
5.4	基于 GTN 模型的锈蚀钢筋拉伸过程模拟及本构关系预测	454
5.4.1	GTN 含孔洞材料细观损伤模型	455
5.4.2	修正 GTN 模型参数分析及确定	461
5.4.3	基于修正 GTN 模型的锈蚀钢筋损伤演化的数值模拟	470
5.5	本章小结	475
参考文献		478

第1章 绪论

1.1 引言

钢筋混凝土结构是目前世界上使用最为广泛的结构形式。在可预见的未来,钢筋与混凝土依然是基本工程建设中最主要的结构材料,其耐久性和使用寿命仍将是国内外学术界关注的重大科技问题。

混凝土结构耐久性是指混凝土结构及其构件在可预见的工作环境及材料内部因素的作用下,在预期的使用年限内抵抗大气影响、化学侵蚀和其他劣化过程中,不需要花费大量资金维修,也能保持其安全性、适用性和外观要求的功能。在实际工程环境中,混凝土结构常见的耐久性破坏因素有钢筋锈蚀、碱—集料反应、溶蚀、硫酸盐侵蚀、冻融循环等。

据统计,世界各国的腐蚀损失平均占国民生产总值(GDP)的2%~4%,其中与钢筋锈蚀相关的可达40%^[1]。美国所有的结构破坏中钢筋腐蚀破坏可占55%左右,每年钢筋锈蚀成本超过1500亿美元;日本目前大约有21.4%的钢筋混凝土结构损害是因钢筋锈蚀引起的,其引以为豪的新干线使用不到10年,就出现大面积混凝土开裂、剥蚀现象。在我国,钢筋锈蚀引起的混凝土结构耐久性问题也十分严重,漫长海岸线上的海港码头、仍大量使用除冰盐的北方地区以及冶金与化工等工业建筑等,都存在发生钢筋锈蚀的危险。浙江大学结构工程研究所自2004年起在浙江省范围内选择了金华、宁波、湖州、嘉兴、杭州、绍兴以及台州等地现役37座公路桥梁及厂房结构进行了耐久性调查,结果表明,许多结构在达到其设计使用年限之前,就出现了钢筋锈蚀、保护层锈胀剥落,更严重的甚至出现锈蚀钢筋外露等现象,严重地影响到了结构的安全性^[2]。

在大坝结构中,比较典型的碱—集料反应破坏实例有加拿大博赫尔洛依斯水电站^[3],该站1928年起建,1960年全部建成。1940年就发现该电站南部坝体出现裂缝而渗漏,其后在进水系统和办公大楼均发现开裂和变形,1972年发现其上游两座吊桥因碱—集料反应而严重开裂和变形。根据Durand的资料,在魁北克水利局属的480个大坝中有30%受碱—集料反应的破坏;巴

西东北部的 Moxoto 坝^[4], 建于 1972~1977 年, 自 1980 年以后, 相继观察发现混凝土发生开裂, 特别是一些较薄的混凝土部位, 对变质的混凝土钻芯取样分析检测, 观察到整个试样普遍出现碱—集料反应, 有些出现开裂, 有些则无, 有些开裂到颗粒的深部, 几乎所有的试样都能观察到深暗色的反应环和数量变化的碱—硅凝胶; 位于法国南部阿尔卑斯山脉中的桑本坝, 兴建于 20 世纪 30 年代, 建成后运行 50 年开始出现了碱—集料反应的膨胀开裂, 后复经 12 年膨胀反应持续发展, 该坝不堪服役, 泄洪闸门启闭受阻, 大坝渗流加剧, 坝体出现畸形变形^[5]。

前苏联的 A. A. 贝科夫在 1926 年的研究论文中指出: 任何以波特兰水泥制成的混凝土建筑物, 都必然要经受石灰的溶出作用, 并在一定期限内丧失全部胶凝性而遭受破坏^[6]。根据国家电力监管委员会大坝安全监察中心对国内运行多年的多座大坝的调研中发现, 我国的丰满、佛子岭、新安江、响洪甸、磨子潭、梅山、古田溪、陈村、云峰等混凝土坝, 都存在着不同程度的溶蚀腐蚀。每年从坝体混凝土中溶出的离子含量(主要是钙离子)就高达 9 t; 从坝基帷幕中溶出的离子含量达 6.48 t, 即每年从整个大坝混凝土中溶出的离子总量高达 15.48 t。美国农垦局在 20 世纪 40 年代开始, 对大坝混凝土溶蚀腐蚀进行了研究, 初步探讨了混凝土溶蚀对抗压强度的影响, 研究认为 1912 年美国的科罗拉多(Colorado)拱坝的报废、1924 年鼓后池(Drum After Bay)拱坝的报废, 均主要与溶蚀破坏有关^[79]。

美国公路委员会^[10]于 1965 年首次公布了由于硫酸盐侵蚀导致混凝土破坏的实例, 接着在加利福尼亚州发现由于硫酸盐侵蚀造成混凝土基础的破坏。英国建筑研究院^[11, 12]的调查报告同样发布了近 100 座建筑物由于硫酸盐的侵蚀造成破坏。日本新干线在使用不到 10 年便出现了混凝土开裂和剥落现象, 硫酸盐侵蚀同样是重要原因^[13]。我国同样存在硫酸盐侵蚀造成严重损失的现象。我国盐渍土分布较为广泛的西部地区所建桥梁、建筑和电线杆塔等由于遭受硫酸盐的严重侵蚀而破坏, 造成了巨大的经济损失^[14]。近年来的武广客运专线和石太客运专线等铁路工程同样遇到了混凝土硫酸盐侵蚀破坏的问题^[15]。对于正在使用并遭受硫酸盐侵蚀的跨海大桥、海工结构、港工结构等同时处于干湿循环状态下, 侵蚀作用更为严重。

材料的本构关系作为抽象化理想物质本构行为的数学力学表达, 是构筑固体力学理论体系的三大基石之一, 一直是学术与工程技术界关注的焦点之一。为了确定所考察物质在外来因素作用下待求的全部相应量(含位移、应变和应力分量), 必须同时满足三大方程(即平衡方程、几何方程和本构方

程)。要正确评估既有混凝土构件承载力的下降程度,准确掌握耐久性损伤引起的结构性能变化规律,就必须正确认识混凝土结构材料的腐蚀特性及其所导致的力学性能退化规律,探明耐久性损伤对其本构关系的影响,建立内蕴锈蚀损伤变量的本构关系,才能完整地反映其真实的力学行为^[16]。我国《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)中对结构耐久性做了如下定义:在设计确定的环境作用和维修、使用条件下,结构构件在设计使用年限内保持其适用性和安全性的能力^[17]。必须指出的是,混凝土结构耐久性是材料耐久性的进一步深化,耐久性问题实际上是环境与荷载耦合作用引起的适用性和安全性问题,因此适时开展混凝土结构材料腐蚀特性及其本构关系的系统研究,将为混凝土结构耐久性评估、寿命预测及计算机仿真提供理论指导,对国家基础设施建设有着十分重要的理论和现实意义,具有广阔的应用前景。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 混凝土碱硅酸反应(ASR)损伤

碱硅酸反应(Alkali Silica Reaction, ASR)是碱—集料反应的一种,是指混凝土孔隙溶液中的碱性物质与活性骨料中的活性 SiO_2 发生反应,生成吸水膨胀的碱硅凝胶,导致混凝土开裂破坏;混凝土表面往往产生网状无序裂缝,孔隙中有碱硅凝胶。

ASR 是一个化学、力学和热学耦合的复杂反应过程,与介质环境的碱度、温湿度、骨料的活性和粒径,以及反应时间等因素关系密切。作为影响 ASR 的重要参数,骨料粒径一直是 ASR 研究的一个热点,在实际工程结构中,选用粒径、级配合理的骨料可以有效地预防、降低 ASR 造成的危害。早在 1940 年,Stanton 首次发现碱骨料反应时就提出,该反应引起的膨胀取决于系统中活性骨料的粒径。1974 年,S. Diamond^[18]通过试验研究也认为活性骨料粒径与膨胀关系密切。但是直至今日,人们对于活性骨料粒径对 ASR 及其产生膨胀影响的看法仍然存在分歧。有的学者认为 ASR 膨胀随活性骨料粒径的增加而减小^[19, 20],有的学者则认为 ASR 膨胀随活性骨料粒径的增加而增加^[21, 22],而另有学者则提出活性骨料粒径和 ASR 膨胀存在“最不利尺寸”效应^[23-25],即活性骨料达到某一粒径或者粒径范围时试件的膨胀达到最大,大于或者小于此粒径,膨胀均有所减小。

针对混凝土材料 ASR 膨胀的计算模型比较多,比如 UFO 模型^[26]、

Nielsen^[27]模型、Sellier/Poyset 模型^[28]、Pesavento 模型^[29]、Suwito /Xi 模型^[30, 31]、Bažant 模型^[32]、Moranville^[33]、Comi^[34]模型、Lemarchand^[35]模型等。这类模型的一个显著特点是,简化处理宏观的膨胀过程及混凝土力学性能的损伤,从化学反应动力学出发,重点研究各种化学离子以及形成的产物在基体、骨料中的扩散过程。从模型研究的侧重点来看,这类模型通常也可称为化学模型,通常选取简化体系中的代表性体积单元(Relative Elementary Volume, REV)作为研究对象。

对 ASR 作用下混凝土的应力状态分析,具有十分重要的意义。但遗憾的是,在这方面的研究开展得较少也较晚。直到 20 世纪末,才有针对 ASR 混凝土单轴受压本构关系的文献报道。Pantazopoulou^[36]针对普通骨料混凝土和完全采用活性骨料取代的混凝土在相同养护条件下的单轴受压应力—应变全曲线进行了研究,结果表明在经受 ASR 的侵蚀之后,混凝土的峰值应力由 40 MPa 下降到 27 MPa,峰值应变则由 $1\,500 \times 10^{-6}$ 增加到 $1\,800 \times 10^{-6}$ 。Giaccio^[37]采用 0.42 的水灰比,研究了掺有天然活性细骨料、低活性粗骨料和高活性粗骨料的混凝土试件在经 ASR 侵蚀后的力学性能变化。试验结果表明,ASR 的作用使混凝土的峰值应力下降了约 25%,峰值应变显著增大,其中掺有高活性粗骨料的混凝土峰值应变甚至增加了一倍以上。在 ASR 的作用下,掺有活性粗骨料的试件,250 d 抗压强度由 47.4 MPa 下降到 30 MPa,250 d 弹性模量则由 37.8 GPa 降低到 25.1 GPa;掺有天然活性细骨料的试件,250 d 抗压强度和弹性模量则分别为 37.8 MPa 和 13.1 GPa。

1.2.2 混凝土溶蚀损伤

水泥基材料处于软水或其他介质环境作用下,发生溶蚀,实际上是水泥水化产物氢氧化钙在孔隙溶液与外部环境的物质的量浓度梯度下不断流失,从而引起 C-S-H 凝胶、钙矾石不断脱钙溶出,导致孔隙溶液中钙离子物质的量浓度逐步下降,pH 值不断减小,并逐渐使水化产物失去胶凝性的一种腐蚀现象。

Faucon^[38]对水泥基材料受软水腐蚀的物理化学机理做了比较详细的论述,认为溶蚀过程实际上是溶解与扩散两种机制的耦合作用,是水泥基材料由于渗漏而产生的一种内在的本质性的病害。水泥基材料受软水溶蚀的过程受局部化学平衡控制,而钙离子的溶出过程受扩散控制。Mainguy^[39]认为,由于细骨料及界面过渡区的影响,砂浆中钙离子的溶出量比水泥浆少,可以用其中水泥石的质量分数作为折减系数,并通过数值模拟验证了这种做法

是可行的。Le Bellégo^[40]使用酚酞与离子探针法分别对水泥石的溶蚀深度进行了测量,试验表明,溶蚀深度与溶蚀时间的平方根呈良好的线性关系,可以用菲克定律来描述。这也证实了钙离子的溶出过程是受离子扩散控制的。

钙离子的溶出是一个十分缓慢的过程,试验研究周期较长,而且影响因素众多,所以通过试验对钙离子溶出的过程进行评估是非常困难的,而且由于水泥基材料的孔结构受钙离子溶出的影响,其力学性能很快就变成非线性,所以不能仅仅依靠试验对水泥基材料性能劣化做出可靠的预测。因此,很多学者基于不同理论提出了各种模型,采用数值方法模拟了钙离子的溶出过程,常见的模型有 Gérard 模型^[41]、Detlf Kuhl 模型^[42, 43]、Kenichiro Nakarai 模型^[44]等。

除了溶蚀腐蚀的时间,水泥基材料的水灰比、水泥种类、掺合料、材料本身的密实度,以及孔隙、裂缝等内部因素都会对溶蚀腐蚀过程产生影响。Maltais^[45]研究认为,对水泥基材料溶蚀动力学特性影响最大的因素是水灰比,降低材料的水灰比能增加材料的密实度,从而有效地提高材料的抗溶蚀性能。当水灰比一定时,材料含砂量越大,钙离子的溶出量越小;当含砂量一定时,水灰比越小,钙离子的溶出量也越小。Kamali^[46]的试验也证明了这一观点。

一些环境因素如水体环境、外部温度、水压力等对水泥基材料溶蚀过程也有影响。水体的化学成分,特别是其中氢氧化钙的物质的量浓度与其他影响氢氧化钙溶解度的物质的物质的量浓度,以及溶液的更新速度都对溶蚀有很大影响。Kamali^[46]使用 3 种不同的介质对水泥石进行溶蚀试验,试验表明: NH_4NO_3 溶液中 19 d 的溶蚀深度比在纯水中浸泡 114 d 大 4.5 倍,比在饱和石灰水中浸泡 114 d 大 5 倍。不同的水力梯度对水泥基材料的溶蚀也会造成不同程度的影响,当水泥基材料在溶蚀过程中不受水压力或所受水压力较小时,此时的溶蚀称为接触溶蚀;反之,当水泥基材料在溶蚀过程中受水压力较大时就会发生渗透溶蚀。水泥基材料与介质的接触面积越大溶蚀越厉害;而水泥基材料的渗透性溶蚀,很大程度上受水压力大小的影响,一般而言,随着水压力的增加,水泥基材料的渗透性增大,溶蚀程度也随之增大。

1.2.3 混凝土硫酸盐侵蚀损伤

自从 1892 年 Michalis 首次发现硫酸盐对混凝土产生侵蚀作用的“水泥杆菌”(钙矾石)后,国内外学者对硫酸盐侵蚀进行了卓有成效的试验研究。前苏联 B. M. 莫斯克文^[6]在 20 世纪初对硫酸盐侵蚀开展研究,并将硫酸盐侵蚀

划分为三大腐蚀理论中的第Ⅲ类腐蚀,美国学者米勒^[5]同样在含有硫酸盐的土壤中进行混凝土的抗硫酸盐侵蚀试验;我国自 20 世纪 50 年代起,对水泥基材料抗硫酸盐侵蚀试验方法、影响因素和破坏机理进行探索研究,取得了丰富的成果。

目前,关于水泥基材料受硫酸盐侵蚀损伤程度评价指标的选取并没有统一的规定,而是按照不同研究目的选取不同的评价指标对试验结果进行分析评价。从已有的评级指标看,可分为三种类型:力学性能类评价指标、外观物理性能类评价指标和介质扩散或内部结构变化类评价指标。

力学性能类评价指标主要包括抗压强度、抗折强度和劈拉强度等。我国《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)主要以“强度抗蚀系数”来评价混凝土的抗侵蚀能力。日本工业标准 JIS 方法中同样以抗压抗蚀系数、抗折抗蚀系数作为混凝土抗硫酸盐侵蚀能力的评价指标。Ahmed^[47]和 Sotiriadis^[48]试验研究均应用力学性能类指标来比较不同水泥基材料的抗硫酸盐侵蚀能力。

外观物理性能类评价指标包括膨胀率、质量变化率和外观形貌的变化。ASTM C452 和 ASTM 1012 中规定某个龄期段内所测量的膨胀率作为水泥基材料抗硫酸盐侵蚀能力的评价指标,而我国《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)并没有具体规定采用膨胀率衡量混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力,建议观察混凝土表面破损情况。在试验研究中,大多数国外学者选取膨胀率作为评价指标研究水泥基材料的抗硫酸盐侵蚀性能,Ranjani^[49]和 Martin^[50]应用该指标试验研究了掺入矿物掺合料后混凝土在不同硫酸盐侵蚀环境中的变化趋势;而国内学者^[51]选取质量变化率作为评价指标。

介质扩散或内部结构变化类评价指标是指硫酸盐离子的渗透系数、扩散系数和超声波速(动弹性模量)等。Tumidajski 等^[52]借鉴快速氯离子渗透试验的电化学方法,测得硫酸盐离子的扩散系数来评价混凝土抗硫酸盐侵蚀性能。陈建康^[53]课题组采用超声波速研究硫酸盐侵蚀水泥基材料的损伤劣化过程及特点。

目前,关于混凝土硫酸盐侵蚀的单轴受压本构关系研究文献较少。梁咏宁、袁迎曙^[54, 55]基于室内快速硫酸盐侵蚀试验方法,研究了不同侵蚀时期混凝土的应力—应变全曲线。结果表明侵蚀后混凝土的无量纲化的应力—应变曲线可以应用混凝土规范中所建议的应力—应变曲线方程进行拟合,方程中的参数与腐蚀后混凝土的峰值应力密切相关;峰值应力、弹性模量随着侵

蚀时间的持续呈现先增大后减小的趋势,峰值应变却先降低后增大;同时通过数学回归分析建立峰值应变、弹性模量、拐点应力等与腐蚀程度之间的数学关系,它们之间以线性关系为主。陈朝晖^[56]采用长期浸泡的试验方法,得到了不同浸泡时间的硫酸盐侵蚀混凝土的应力—应变全曲线。所得到的试验结论与上述结论有所不同,受硫酸盐溶液长期浸泡的混凝土的弹性模量、峰值应力和残余变形能力降低,并没有出现弹性模量和峰值应力先增加后降低的现象,可能在于长期浸泡时间间隔太长(数月)。随着腐蚀程度的加深,加载过程中掉渣和剥落现象越普遍,主裂缝相对于其他裂缝的发展较为显著。李杰^[57]课题组通过试验与数值模拟相结合的办法得到受侵蚀混凝土的本构关系。针对硫酸盐侵蚀的非均匀性,首先对试件截面进行分区;然后,利用 Fick 第二定律和假设腐蚀介质对砂浆和界面过渡区的蚀强率与腐蚀溶液浓度成正比,通过试验结果和模拟结果的对比得到蚀强率,将得到的蚀强率对硫酸盐腐蚀后砂浆和界面过渡区的细观本构关系进行修正;最后,通过 MIMICS 技术将 CT 扫描得到的受侵蚀混凝土信息进行三维重构,对每个区的力学性能进行均匀化处理,应用有限元软件 ABAQUS 进行计算得到硫酸盐侵蚀本构关系。

1.2.4 钢筋锈蚀损伤

引起混凝土结构中钢筋锈蚀的因素主要有氯盐、碳化以及杂散电流,此外在特定环境与荷载作用下还有发生应力腐蚀的可能。D. A. Koleva^[58, 59]从微观尺度上对混凝土—钢筋界面的微结构与孔隙网络进行了探索,并对水泥基材料中钢筋锈蚀的电化学机理进行了阐述;M. Saremi^[60]采用电化学测试技术,研究了模拟混凝土孔溶液中氯离子引起的钢筋去极化机理;董荣珍^[61]采用背散射电子成像及拉曼光谱微观测试手段,分析了钢筋—混凝土界面处锈蚀产物的分布状态及成分。针对锈蚀钢筋的力学性能,Abdullah A. Al-musallam^[62]采用恒电流通电的方法加速混凝土构件内钢筋的锈蚀,采用锈蚀质量损失率对钢筋锈蚀程度进行表征,对锈蚀钢筋力学性能进行了研究,结果表明当锈蚀率大于 12% 时,钢筋将呈现脆性断裂;Y. G. Du^[63]对钢筋的种类与直径对锈后钢筋力学性能的影响进行了探讨;袁迎曙^[64]分析比较了人工气候与恒电流通电两种锈蚀环境下钢筋各项力学性能指标的变化,发现两种环境引起的钢筋表面锈蚀特征、锈蚀钢筋名义强度和延伸率均有明显的差异;范颖芳^[65]与安琳^[66]则针对锈蚀钢筋坑几何参数对钢筋力学性能的影响进行了探索。Zhang Weiping^[67]对锈蚀钢筋的静载和动载性能进行了系统研究,与静力性能相比,锈蚀对钢筋疲劳性能影响更为显著。