

混凝土结构耐久性丛书

地下结构混凝土

硫酸盐腐蚀机理及性能退化

Mechanism and Performance Degradation
of Underground Structure Attacked by Sulfate

杜健民 梁咏宁 张风杰 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

混凝土结构耐久性丛书

地下结构混凝土硫酸盐 腐蚀机理及性能退化

杜健民 梁咏宁 张风杰 著



中国铁道出版社

2011年·北京

内 容 简 介

地下结构混凝土受到地下水和土壤中硫酸盐的腐蚀,从而导致混凝土及结构性能退化,对地下结构的安全性产生影响。本书是作者近年来从事地下结构硫酸盐腐蚀研究的总结,介绍了硫酸盐腐蚀的机理和混凝土腐蚀层厚度的检测方法,建立了多种环境条件下的腐蚀速率模型,提出了腐蚀损伤度的定义,重点论述了硫酸盐腐蚀后钢筋与混凝土之间的粘结性能退化规律和预计模型,钢筋混凝土受弯构件和压弯构件的承载力与腐蚀损伤度之间的关系,建立了与腐蚀损伤度相关的承载力预计模型。本书最后还对抗硫酸盐腐蚀的方法进行了简单介绍。

本书可供土木工程专业领域的科学研究人员、工程技术人员以及研究生、本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地下结构混凝土硫酸盐腐蚀机理及性能退化/杜健民,梁咏宁,张风杰著.
北京:中国铁道出版社,2011.4

(混凝土结构耐久性丛书)

ISBN 978-7-113-12188-4

I. ①地… II. ①杜… ②梁… ③张… III. ①地下建
筑物-混凝土结构-腐蚀-损伤-研究 IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 230633 号

书 名: 混凝土结构耐久性丛书
地下结构混凝土硫酸盐腐蚀机理及性能退化
作 者: 杜健民 梁咏宁 张风杰 著

策划编辑: 时 博

责任编辑: 张 婕

电话: 010-51873141

电子信箱: crph_zj@163.com

封面设计: 冯龙彬

责任校对: 焦桂荣

责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

刷 厂: 三河市华丰印刷厂

版 次: 2011年4月第1版 2011年4月第1次印刷

开 本: 720 mm × 1 000 mm 1/16 印张: 11.75 字数: 219 千

书 号: ISBN 978-7-113-12188-4

定 价: 32.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话: 市电(010)51873170, 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话: 市电(010)63549504, 路电(021)73187

《混凝土结构耐久性丛书》序

我国正处于土木工程基础设施大规模建设阶段,钢筋混凝土材料仍是土木工程基础设施中最重要的建筑材料,水泥基混凝土用量已达到人均世界第一的水平。但是,我们必须清醒地看到,土木工程基础设施的百年大计问题,特别是混凝土结构耐久性方面,尚有很多问题需要去解决。值得庆幸的是,混凝土结构的耐久性问题不仅得到了学术界的重视,而且也得到了工程界的关注。在混凝土结构耐久性设计方法、使用寿命预测,以及既有结构耐久性加固修复等方面,学术界已开展广泛的研究,同时在工程实践过程中,特别是重大工程,其耐久性问题也得到了高度重视。

中国矿业大学混凝土结构耐久性课题组在国家自然科学基金的多次资助下,经过十余年的不懈努力,在混凝土结构耐久性方面获得了较系统的研究成果,在国内外重要学术刊物和重要学术会议上发表了近百篇论文。为进一步推动混凝土结构耐久性研究的深入开展,现将本课题组所得到的研究成果汇总成这套丛书。

本丛书所论述的混凝土结构耐久性问题主要包括两个方面:一是大气环境氯盐侵蚀引起的地面混凝土结构钢筋锈蚀耐久性问题,二是岩土环境硫酸盐侵蚀引起的地下结构混凝土腐蚀耐久性问题。

丛书由以下五本著作组成:

- (1) 钢筋混凝土的全寿命过程与预计
- (2) 混凝土构件的钢筋锈蚀与退化速率
- (3) 锈蚀混凝土构件的承载性能评估与设计
- (4) 锈蚀混凝土结构的耐久性修复与保护
- (5) 地下结构混凝土硫酸盐腐蚀机理及性能退化

前四部著作以论述大气环境氯盐侵蚀引起混凝土内钢筋锈蚀所产生的一系列耐久性问题为主线,分别从不同角度、途径对此进行深入论述,相互之间又存在着衔接、递进的关系。著作(1)将钢筋起始锈蚀条件、钢筋锈胀力分布和发展、钢筋锈胀开裂预计和锈胀开裂后的锈蚀演进联系起来,考察混凝土结构的全寿命过程,提出了钢筋锈蚀速率变化的时变模型,可以预计全寿命过程的各个时段长度。著作(2)通过混凝土内钢筋锈蚀速率的研究,将混凝土结构的服役时间、锈蚀程度联系起来;在基本电化学预测模型基础上,综合了构件受荷载作用引起横向裂缝的影响,以及构件钢筋骨架配筋的影响;钢筋锈蚀速率模型可以预测与时间相关的钢筋锈蚀量。著作(3)基于人工气候和自然气候氯盐侵蚀环境的试验研究,论述了普通混凝土结构和预应力混凝土结构内钢筋的力学性能及粘结性能以及构件结构性能的退化规律,建立与锈蚀程度相关的钢筋强度与构件承载能力预计概率模型,提出了锈蚀混凝土构件承

载性能评估与设计的体系与方法。著作(4)论述混凝土结构的耐久性修复问题,其中重点考虑了本体混凝土与修复材料之间存在的早期物理、力学性能与电化学性能相容性问题;如不很好解决加固修复中的不相容问题,将不能达到恢复结构耐久性的目的。

著作(5)以地下混凝土结构为对象,考虑岩土环境硫酸盐侵蚀作用,介绍了混凝土受硫酸盐腐蚀的试验和检测方法,论述了侵蚀物类型、浓度、地下水压力以及荷载应力等因素对混凝土腐蚀速率的影响,建立了混凝土腐蚀速率预计模型;论述了混凝土强度及粘结性能,以及构件结构性能的退化规律,提出了受硫酸盐腐蚀构件结构性能评估方法及抗硫酸盐腐蚀的设计建议。

《混凝土结构耐久性丛书》的作者均是本课题组主要研究人员。每部著作均以作者本人研究成果为主,同时还综合历届研究生相应成果撰写而成;另外,为达到论述系统、便于阅读的目的,每部著作还兼顾介绍了有关的背景和基础知识。

感谢国家自然科学基金会对《混凝土结构耐久性丛书》相关研究工作的资助,感谢中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室和煤矿深井建设技术国家工程实验室对本丛书出版的资助。

中国矿业大学教授



2010年8月

前 言

随着近年来我国基本建设的蓬勃发展,大量的土木工程项目已经竣工和正在建造中,混凝土的使用量快速增长。通过工程实践和研究发现,混凝土并不是坚不可摧的,在各种腐蚀条件下,大量的混凝土结构并没有到达设计使用年限而发生了非力学破坏,现阶段对于混凝土耐久性的研究主要集中在硫酸盐腐蚀而导致混凝土自身及混凝土构件和结构的性能退化问题。

本书结合作者及课题组多年的研究成果并参考大量的国内外文献,对地下结构混凝土硫酸盐腐蚀的相关问题进行了论述,主要包括以下内容:第1章主要介绍硫酸盐腐蚀的危害和我国土壤和地下水中硫酸盐分布的概况,并且介绍了典型的硫酸盐腐蚀案例;第2章主要是介绍硫酸盐对普通硅酸盐混凝土的腐蚀机理;第3章是混凝土硫酸盐腐蚀层厚度的检测技术包括超声检测、化学分析和微观观测等,并且通过化学分析的方法对超声检测的结果进行了验证和修正;第4章是硫酸盐腐蚀导致混凝土力学性能的退化,提出了腐蚀损伤度的概念,通过不同腐蚀损伤度混凝土棱柱体试块的试验研究,建立了受腐蚀混凝土与腐蚀损伤度相关的本构关系等;第5章通过对混凝土试块中的变形钢筋进行拔出试验,研究了不同保护层混凝土腐蚀损伤度对钢筋与混凝土的粘结性能的影响,提出了极限粘结强度降低系数 k_u ,建立了 k_u 与保护层混凝土腐蚀损伤度之间的关系,可以通过未腐蚀混凝土与钢筋之间的极限粘结强度和 k_u 得到不同 d_c/c 下的腐蚀混凝土与钢筋之间的极限粘结强度;第6章是硫酸盐腐蚀导致混凝土构件性能的退化,主要针对受弯构件和压弯构件,研究了二者随腐蚀损伤度的增加其承载力和延性的退化规律;第7章是各种环境因素下混凝土硫酸盐腐蚀速率的研究,研究了混凝土水灰比、粉煤灰掺量和硫酸盐浓度对腐蚀速率的影响,得到了硫酸盐腐蚀速率模型;第8章根据硫酸盐腐蚀机理和腐蚀速率的影响因素,介绍了抗硫酸盐腐蚀的方法及水泥和混凝土抗硫酸盐腐蚀的试验方法。

本书所涉及到的研究内容及研究成果以及本书的写作均得到了导师袁迎曙教授的悉心指导,得到了课题组郑凤硕士和秦国顺硕士提供的数据和资料支持,得到了课题组李果老师、耿欧老师、李富民老师和姬永生老师的细心审阅,同时在本书的写作过程中还引用了大量国内外专家的文献资料,在此作者对上述各方面的指导和帮助表示衷心感谢!

虽然作者在本书的写作中尽可能将研究成果全面的论述,但对于混凝土的硫酸盐腐蚀问题的研究依然比较肤浅,还有很多需要进一步深入研究的问题。并且由于作者水平有限,在本书中难免出现疏忽和错误之处,恳请读者能够批评指正!

作 者
2010 年 8 月

符号与注释

- A_f ——腐蚀损伤混凝土的面积
- A ——试件横截面面积
- C ——介质的浓度
- d_f ——腐蚀层厚度
- d_{tc} ——超声检测腐蚀层厚度结果
- d ——化学分析腐蚀层厚度结果
- d_{fn} ——硫酸盐浓度影响系数修正后的腐蚀厚度
- d_{f0} ——基准腐蚀厚度
- E_d ——混凝土的动弹性模量
- E'_c ——受腐蚀混凝土的弹性模量
- E_c ——未腐蚀混凝土的弹性模量
- E_s ——钢筋弹性模量
- f'_c ——受腐蚀混凝土(截面由损伤层和未损伤层两部分组成)的强度
- f_c ——混凝土的初始强度
- f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值
- f_y ——钢筋抗拉强度设计值
- f ——粉煤灰掺量
- K_s ——水灰比影响系数
- K_d ——强度损失占未腐蚀混凝土强度的比例系数
- l ——对测法时超声测距
- l_0 ——声速突变点处两换能器之间的间距
- M_{umax} ——界限破坏时的抗弯承载力,即 N_u-M_u 曲线中的最大抗弯承载力
- M_{uf} ——受压区内腐蚀混凝土承担的极限弯矩
- M_{uc} ——受压区内未腐蚀混凝土承担的极限弯矩
- N_{ub} ——界限破坏时的抗压承载力
- n ——硫酸盐浓度
- R_d ——强度损失占未腐蚀混凝土强度的比例
- s ——水灰比
- t ——对测法检测到的超声波在测距 1 下传播所用的时间
- t_f ——超声波在腐蚀层传播所用的声时

t_a ——超声波在未腐蚀层传播所用的声时
 T ——腐蚀持续时间
 T_0 ——强度开始降低的时间
 v' ——受腐蚀混凝土的超声声速
 v ——混凝土的初始超声声速
 v_{f0} ——基准腐蚀速率
 v ——混凝土的超声声速
 v_f ——超声波在腐蚀层混凝土中的传播速度
 v_a ——超声波在未腐蚀层混凝土中的传播速度
 x ——穿过腐蚀层传播路径的水平投影
 x_c ——受压区内未腐蚀混凝土的高度
 y ——介质压力
 φ' ——受腐蚀后混凝土的力学性能,包括:单轴抗压强度、峰值应变、弹性模量
 φ ——未腐蚀混凝土的力学性能
 ε'_{c0} ——受腐蚀混凝土的峰值应变
 ε_{c0} ——未腐蚀混凝土的峰值应变
 ε_{cu} ——非均匀受压时混凝土极限压应变
 σ ——压应力
 σ_p ——腐蚀混凝土膨胀内应力
 ε ——压应变
 η ——膨胀内应力对混凝土强度的影响系数
 ∂_1 ——等效应力系数

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 地下结构混凝土硫酸盐腐蚀的危害	1
1.2 地下结构硫酸盐腐蚀的典型案例分析	3
1.2.1 百家岭隧道混凝土腐蚀案例 ^[34]	3
1.2.2 四川崇州某水电站引水隧洞混凝土腐蚀 ^[35]	5
1.3 我国地下水及土壤中硫酸盐的分布概况	6
1.3.1 分布概况	6
1.3.2 区域分类	7
第 2 章 硫酸盐对硅酸盐混凝土的腐蚀机理	11
2.1 混凝土的材料组成及化学组分	11
2.1.1 混凝土组成及分类	11
2.1.2 水泥水化及混凝土凝结硬化机理	12
2.1.3 硅酸盐水泥耐腐蚀特性	15
2.2 硫酸盐对硅酸盐混凝土的腐蚀机理	15
2.2.1 混凝土的腐蚀类型	15
2.2.2 硫酸盐腐蚀的机理	16
2.2.3 受硫酸盐腐蚀后混凝土微观结构变化	20
2.3 粉煤灰的抗硫酸盐腐蚀性	22
2.3.1 粉煤灰在混凝土中的效应及其对耐久性的影响	22
2.3.2 粉煤灰对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响	22
第 3 章 硫酸盐对混凝土腐蚀的检测技术	24
3.1 硫酸盐腐蚀对混凝土微观结构影响	24
3.1.1 实验设备及分析方法	24
3.1.2 受腐蚀混凝土微观结构变化	24
3.2 受腐蚀混凝土损伤度的超声检测技术	25
3.2.1 混凝土结构的非破损检测研究	25
3.2.2 非损检测方法的评价	26
3.2.3 混凝土强度的超声检测	28

3.2.4	混凝土表层损伤层厚度的超声检测	29
3.3	受腐蚀混凝土化学成分分析方法	32
3.3.1	试验方法	32
3.3.2	化学分析结果	32
3.4	利用化学成分分析方法对超声平测法的验证	33
3.5	小 结	36
第4章	硫酸盐腐蚀导致混凝土力学性能的退化	37
4.1	试验研究	37
4.1.1	粉煤灰混凝土的力学性能	37
4.1.2	试验目的	38
4.1.3	试件设计与分组	38
4.1.4	腐蚀方法	39
4.1.5	测试方法	39
4.2	超声波法测定腐蚀层厚度	40
4.2.1	腐蚀层的确定	40
4.2.2	超声波法检测腐蚀层厚度	41
4.2.3	计算腐蚀层厚度	45
4.2.4	平测法检测腐蚀层厚度的可靠性评价	46
4.2.5	腐蚀层厚度与超声声速之间的关系	47
4.2.6	腐蚀损伤度的定义	48
4.3	受硫酸盐侵蚀混凝土单轴抗压试验结果及分析	49
4.3.1	受腐蚀混凝土表面特征	49
4.3.2	受腐蚀混凝土破坏形态	49
4.3.3	受腐蚀混凝土力学性能退化规律及机理分析	50
4.3.4	受腐蚀混凝土应力—应变全曲线	55
4.4	受硫酸盐侵蚀混凝土力学性能退化模型研究	56
4.4.1	与腐蚀损伤度相关的受腐蚀混凝土力学性能退化模型	56
4.4.2	未腐蚀混凝土的受压本构关系	58
4.4.3	受腐蚀混凝土本构关系	59
4.5	受硫酸盐侵蚀后腐蚀层混凝土力学性能退化模型研究	61
4.5.1	基本假定	61
4.5.2	腐蚀层混凝土平均抗压强度的计算	62
4.5.3	腐蚀层混凝土本构关系	63
4.5.4	腐蚀层混凝土强度计算模型	64
4.6	小 结	67

第 5 章 硫酸盐腐蚀导致混凝土与钢筋粘结性能的退化	69
5.1 混凝土与钢筋粘结性能	69
5.2 硫酸盐腐蚀的粘结性能试验	71
5.2.1 试件的设计和制作	71
5.2.2 加速腐蚀方法	72
5.2.3 加载装置及加载制度	72
5.3 试验结果及分析	73
5.3.1 不同腐蚀阶段的保护层腐蚀损伤度测量	73
5.3.2 未腐蚀构件粘结应力—滑移关系曲线	73
5.4 与保护层腐蚀损伤度相关的平均粘结应力—滑移关系曲线	75
5.5 受腐蚀后混凝土与变形钢筋粘结本构关系	77
5.5.1 破坏形态	77
5.5.2 极限粘结强度 τ'_u	77
5.5.3 τ — s 本构关系	78
5.6 小 结	79
第 6 章 硫酸盐腐蚀对混凝土构件性能的影响	80
6.1 地下箱形结构受力分析	80
6.2 压弯构件受硫酸盐腐蚀性能退化规律	82
6.2.1 试验研究	83
6.2.2 受硫酸盐侵蚀的钢筋混凝土压弯构件试验结果及分析	85
6.2.3 压弯板正截面承载力预测方法	92
6.3 受弯构件受硫酸盐腐蚀性能退化规律	99
6.3.1 试验研究	99
6.3.2 受硫酸盐侵蚀的钢筋混凝土受弯板试验结果及分析	101
6.3.3 受硫酸盐侵蚀的钢筋混凝土受弯板正截面承载力预测方法	104
6.4 小 结	107
第 7 章 硫酸盐对混凝土腐蚀速率预计	109
7.1 国内外已有的研究成果	110
7.1.1 溶液温度的影响	110
7.1.2 溶液浓度的影响	110
7.1.3 溶液 pH 值的影响	111
7.1.4 混凝土的强度及成分	112
7.1.5 干湿交替和冻融循环的影响	112

7.1.6	应力状态的影响	113
7.2	硫酸盐对混凝土腐蚀速率的试验研究	114
7.2.1	试验材料	115
7.2.2	影响因素	115
7.2.3	试验方法	115
7.2.4	测定设备与方法	116
7.3	混凝土受硫酸盐腐蚀速率的基准模型	117
7.3.1	腐蚀速率的定义	117
7.3.2	初始腐蚀时间 t_0 的定义	118
7.3.3	混凝土受硫酸盐腐蚀的基准模型	118
7.4	考虑混凝土水灰比的腐蚀速率模型	119
7.4.1	试验结果与分析	119
7.4.2	水灰比影响的机理	122
7.4.3	水灰比影响系数 K_a 的确定	123
7.5	粉煤灰掺量的影响	125
7.5.1	粉煤灰的组成和物理化学性质	125
7.5.2	试验结果与分析	126
7.5.3	粉煤灰掺量影响的机理	128
7.5.4	粉煤灰掺量影响系数 K_a 的确定	130
7.6	腐蚀溶液浓度的影响	133
7.6.1	试验结果与分析	133
7.6.2	腐蚀溶液浓度影响的机理	134
7.6.3	腐蚀溶液浓度影响系数 K_a 的确定	134
7.7	地下水压力的影响	137
7.7.1	介质压力的定义及试验方法	137
7.7.2	试验研究	137
7.7.3	试验结果与分析	140
7.7.4	介质压力影响的机理	141
7.7.5	介质压力作用下腐蚀厚度及速率模型	142
7.8	小结	146
第8章	地下结构混凝土抗硫酸盐腐蚀方法	148
8.1	地下结构混凝土抗硫酸盐腐蚀方法	148
8.1.1	提高混凝土的密实度和强度	148
8.1.2	外掺矿物掺合料法	148
8.1.3	选用耐侵蚀水泥	149

8.1.4	加强地下结构外排水措施	150
8.1.5	使用密实的与混凝土不起化学作用的材料,在衬砌外表面做隔离防水层	150
8.1.6	向衬砌混凝土背后压注防蚀浆液	150
8.1.7	提高施工与养护质量	150
8.2	水泥抗硫酸盐检测方法综述	150
8.2.1	我国检测标准	150
8.2.2	日本工业标准 JIS 方法	151
8.2.3	美国 ASTM C1012 方法	152
8.3	混凝土抗硫酸盐腐蚀试验方法	152
8.3.1	混凝土抗硫酸盐侵蚀试验(GBT 50082—2009)	152
8.3.2	自然暴露试验研究	154
8.3.3	混凝土材料抗硫酸盐腐蚀浸泡加速试验	155
8.4	地下工程抗硫酸盐腐蚀设计介绍	156
8.4.1	天津地铁钢筋混凝土的腐蚀及防护	156
8.4.2	秦岭隧道地下水化学异常对衬砌混凝土的腐蚀及防治对策	157
8.5	小 结	158
参考文献		160

Contents

1	Introduction	1
1.1	THE HARM OF SULFATE CORROSION OF CONCRETE UNDERGROUND STRUCTURE	1
1.2	THE TYPICAL CASE OF SULFATE CORROSION OF CONCRETE UNDERGROUND STRUCTURE	3
1.2.1	<i>The case of baijialing tunnel's concrete corrosion</i>	3
1.2.2	<i>Dicersion tunnel's concrete corrosion of a hydroelectric Station in chongzhou sichuan</i>	5
1.3	THE DISTRIBUTION OF SULFATE IN GROUNDWATER AND SOIL	6
1.3.1	<i>Distribution</i>	6
1.3.2	<i>Territorial classification</i>	7
2	The Mechanism of Sulfate Corrosion in Portland Concrete	11
2.1	THE MATERIAL AND CHEMINAL COMPOSITION OF CONCRETE	11
2.1.1	<i>Composition and classification of concrete</i>	11
2.1.2	<i>The Mechanism of cement Hydration and concrete hardens</i>	12
2.1.3	<i>The corrosion resistance of portland cement</i>	15
2.2	THE MECHANISM OF SULFATE CORROSION IN PORTLAND CONCRETE	15
2.2.1	<i>The corrosion types of concrete</i>	15
2.2.2	<i>The mechanism of sulfate corrosion</i>	16
2.2.3	<i>The microstructure change of after sulfate corrosion concrete</i>	20
2.3	THE SULPHATE RESISTANCE OF FLY ASH	22
2.3.1	<i>The effect of fly ash in concrete and on its durability</i>	22
2.3.2	<i>The effect of fly ash on the sulphate resistance of concrete</i>	22
3	The Measurement Technique of Sulfate Corrosion Concrete	24
3.1	THE MEASUREMENT TECHNIQUE OF DAMAGE DEGREE OF CORRODED CONCRETE	24
3.1.1	<i>The research on the nondestructive test of concrete structure</i>	24

3.1.2	<i>The evaluation of the nondestructive test</i>	24
3.2	THE INFLUENCE OF CONCRETE MICROSTRUCTURE BY SULFATE CORROSION	25
3.2.1	<i>The nondestructive test of concret structures</i>	25
3.2.2	<i>The evaluation of nondestructive test method</i>	26
3.2.3	<i>The ultrasonic test of concrete strength</i>	28
3.2.4	<i>The ultrasonic testing of the concrete surface damage Layer thickness</i>	29
3.3	THE CHEMICAL COMPOSITION ANALYSIS OF THE CORROSIVED CONCRETE	32
3.3.1	<i>The test method</i>	32
3.3.2	<i>The result of chemical analysis</i>	32
3.4	THE VERIFICATION OF THE ULTRASONIC LEVEL MEASUREMENT BY THE METHOD OF CHEMICAL COMPOSITION ANALYSIS	33
3.5	SUMMARY	36
4	The Performance Deterioration of Concrete by Sulfate Corrosion	37
4.1	THE TEST RESEARCH	37
4.1.1	<i>The performance of ash concrete</i>	37
4.1.2	<i>The test objective</i>	38
4.1.3	<i>Design and group of specimen</i>	38
4.1.4	<i>The corrosion method</i>	39
4.1.5	<i>The test method</i>	39
4.2	THE THICKNESS OF CORROSION LAYER BY ULTRASONIC DETECTION	40
4.2.1	<i>The determination of corrosion layer</i>	40
4.2.2	<i>The thickness of corrosion layer by ultrasonic detection</i>	41
4.2.3	<i>The calculation of the thickness of corrosion layer</i>	45
4.2.4	<i>The reliability evaluation of the thickness of corrosion layer by ultrasonic level measurement</i>	46
4.2.5	<i>The relationship between the thickness of corrosion layer and the speed of ultrasound</i>	47
4.2.6	<i>The definition of the degree of corrosion damage</i>	48
4.3	THE TEST RESULT AND ANALYSIS OF THE UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH OF SULFATE CORRODED CONCRETE	49
4.3.1	<i>The apparent characteristics of corroded concrete</i>	49
4.3.2	<i>The failure mode of corroded concrete</i>	49

4.3.3	<i>The mechanical performance deterioration law and the mechanism analysis of corroded concrete</i>	50
4.3.4	<i>The stress-strain curve of corroded concrete</i>	55
4.4	THE RESEARCH ON THE MECHANICAL PERFORMANCE DETERIORATION MODEL OF AFTER SULFATE CORROSION CONCRETE	56
4.4.1	<i>The mechanical performance deterioration model of after sulfate corrosion concrete associated with the degree of corrosion damage</i>	56
4.4.2	<i>The compressive constitutive relation of uncorroded concrete</i>	58
4.4.3	<i>The constitutive relation of corroded concrete</i>	59
4.5	THE RESEARCH ON THE MECHANICAL PERFORMANCE DETERIORATION MODEL OF THE CONCRETE CORROSION LAYER AFTER SULFATE CORROSION	61
4.5.1	<i>The basic assumption</i>	61
4.5.2	<i>The calculation of the average compressive strength of concrete corrosion layer</i>	62
4.5.3	<i>The compressive constitutive relation of concrete corrosion layer</i>	63
4.5.4	<i>The strength model of concrete corrosion layer</i>	64
4.6	SUMMARY	67
5	The Deterioration of the Bonding Performance of Concrete and Sreel due to Sulfate Corrosion	69
5.1	THE BONDING PERFORMANCE OF CONCRETE AND SREEL	69
5.2	THE BONDING PERFORMANCE TEST OF SULFATE CORROSION	71
5.2.1	<i>Design and production of specimen</i>	71
5.2.2	<i>The method of accelerated corrosion</i>	72
5.2.3	<i>Loading device and loading system</i>	72
5.3	TEST RESULT AND ANALYSIS	73
5.3.1	<i>The measurement of the corrosion damage degree of protection layer in different corrosion stages</i>	73
5.3.2	<i>The bond stress-slippage curve of uncorroded component</i>	73
5.4	THE AVERAGE BOND STRESS-SLIPPAGE CURVE ASSOCIATED WITH THE CORROSION DAMAGE DEGREE OF PROTECTION LAYER	75
5.5	THE CONSTITUTIVE RELATION OF BONDING WITH CONCRETE AND STEEL AFTER CORROSION	77
5.5.1	<i>The failure mode</i>	77
5.5.2	<i>The ultimate bond strength τ'_u</i>	77