

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: 25220051302579

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

电阻传感器在钢筋腐蚀检测中的应用研究

Application Studies On Monitoring Of Rebar Corrosion By  
Means Of The Electrical Resistance Sensors

吴 旭

指导教师姓名: 石建光 教授

专 业 名 称: 结构工程

论文提交日期: 2008 年 5 月

论文答辩时间: 2008 年 6 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008 年 5 月

---

**A Dissertation Submitted To XiaMen University For The  
Degree Of Master Engineering**



**Application Studies On Monitoring Of  
Rebar Corrosion By Means Of The  
Electrical Resistance Sensors**

**By  
Wu Xu**

**Major subject: Structural Engineering**

**Supervisor: Prof. Jianguang Shi**

**XiaMen University, XiaMen, China**

**June 2008**

---

## 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

2008年 月 日

---

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密（ ），在            年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：\_\_\_\_\_

日期：2008 年    月    日

导师签名：\_\_\_\_\_

日期：2008 年    月    日

# 目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
<b>第一章 绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1 引言.....	1
1.2 国内外钢筋混凝土结构耐久性研究现状.....	2
1.2.1 国外混凝土耐久性研究的现状.....	2
1.2.2 国内混凝土耐久性研究的现状.....	5
1.3 钢筋混凝土结构耐久性研究中钢筋腐蚀的重要性.....	7
1.4 钢筋混凝土结构耐久性研究涉及问题及钢筋腐蚀检测意义.....	9
1.4.1 材料层次的耐久性研究.....	9
1.4.1 构件层次的耐久性研究.....	9
1.4.1 结构层次的耐久性研究.....	10
1.5 本文研究的主要内容.....	10
参考文献.....	12
<b>第二章 混凝土结构中钢筋锈蚀机理、影响因素及检测方法.....</b>	<b>16</b>
2.1 引言.....	16
2.2 混凝土结构中钢筋腐蚀机理及原因.....	16
2.3 混凝土结构中钢筋腐蚀影响因素.....	18
2.4 混凝土结构中钢筋锈蚀的检测方法.....	22
2.4.1 分析法.....	22
2.4.2 物理法.....	22
2.4.3 电化学方法.....	24
2.4.4 迅速发展的其他检测方法.....	26
参考文献.....	29

<b>第三章 电阻法原理和电阻传感器的制作设计</b> .....	<b>31</b>
3.1 引言.....	31
3.2 钢筋腐蚀的电阻传感器法检测原理.....	32
3.3 自行研制电阻传感器的制作设计.....	33
3.3.1 电阻传感器制作原理及制作过程.....	33
3.3.2 电阻传感器尺寸、截面形式及测试说明.....	34
3.3.3 电阻传感器制作材料及特征.....	37
3.4 自行研制电阻传感器腐蚀量理论推导.....	38
3.5 电阻传感器的优缺点.....	40
3.5.1 电阻传感器的优点.....	40
3.5.2 电阻传感器的缺点.....	40
参考文献.....	42
<b>第四章 电阻传感器法检测混凝土中钢筋的腐蚀试验</b> .....	<b>44</b>
4.1 引言.....	44
4.2 电阻传感器腐蚀实验之模拟液实验.....	44
4.2.1 实验所需材料及仪器.....	44
4.2.2 电阻传感器模拟液实验.....	44
4.2.3 实验结论及分析.....	44
4.3 电阻传感器腐蚀实验之埋入实验.....	48
4.3.1 实验所需材料及仪器.....	48
4.3.2 电阻传感器埋入实验.....	49
4.3.3 实验结论及分析.....	53
4.4 电阻传感器腐蚀实验影响因素及不足之处.....	58
4.4.1 温度的影响.....	58
4.4.2 外加电压的影响.....	58
4.4.3 腐蚀产物对测量的影响.....	58
4.4.4 宏电池反应的影响.....	58

4.5 结论及展望.....	59
参考文献.....	60
<b>第五章 电阻传感器在检测/监测工作中的计算分析.....</b>	<b>63</b>
5.1 引言.....	63
5.2 电阻传感器在混凝土结构中钢筋腐蚀检测中的计算分析.....	64
5.2.1 电阻传感器法在国内外的研究现状.....	64
5.2.2 氯离子在混凝土结构中的渗透计算分析.....	65
5.2.3 电阻传感器腐蚀时间计算分析.....	70
5.3 氯离子环境下电阻传感器腐蚀时间的校核.....	73
5.4 结论及展望.....	74
参考文献.....	76
<b>第六章 结论与展望.....</b>	<b>78</b>
6.1 结论.....	78
6.2 展望.....	79
<b>致    谢.....</b>	<b>80</b>
<b>攻读硕士学位期间发表的论文目录.....</b>	<b>81</b>

# CONTENT

<b>Abstract in Chinese.....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract in English.....</b>	<b>II</b>
<b>Chapter 1 Preface.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction .....	1
1.2 Durability actuality of reinforced concrete structure internally and abroad.....	2
1.2.1 Durability research actuality of RC structure abroad.....	2
1.2.2 Durability research actuality of RC structure internally.....	5
1.3 The importance of rebar corrosion in durability research of concrete structure.....	7
1.4 Interfix problems of rebar corrosion in durability research of concrete structure ....	9
1.4.1 Durability research of the material aspect .....	9
1.4.2 Durability research of the component aspect.....	9
1.4.3 Durability research of the structure aspect.....	10
1.5 Objective and contents of the dissertation .....	10
Reference.....	12
<b>Chapter 2 The mechanism of rebar corrosion and the methods of rebar corrosion.....</b>	<b>16</b>
2.1 Introduction .....	16
2.2 The mechanism of rebar corrosion in the reinforced concrete structure.....	16
2.3 The reason of rebar corrosion in the RC structure.....	16
2.4 The influence factors of rebar corrosion in the RC structure.....	18
2.5 Methods in monitoring rebar corrosion in the RC structure.....	22
2.5.1 Analytical method .....	22
2.5.2 Physical method.....	22
2.5.3 Electrochemical method .....	24



2.5.4 Other rapid developing monitoring methods.....	26
Reference.....	29

**Chapter 3 The principle of rebar corrosion by means of the electrical resistance sensors and its design..... 31**

3.1 Introduction.....	31
3.2 Principle of rebar corrosion by means of electrical resistance sensors.....	32
3.3 Design of electrical resistance sensors personally.....	33
3.3.1 Process and facture principle of the electrical resistance sensors.....	33
3.3.2 Explanation of dimension, form of section and testing .....	34
3.3.3 Material of the electrical resistance sensors and their characters.....	37
3.4 Deducible corrosion value by means of the electrical resistance sensors.....	38
3.5 Advantage and disadvantage of the electrical resistance sensors.....	39
3.5.1 Advantage of the electrical resistance sensors.....	40
3.5.2 Disadvantage of the electrical resistance sensors.....	40
Reference.....	42

**Chapter 4 Corrosion experimentation used by means of the electrical resistance sensors in Rebar corrosion ..... 44**

4.1 Introduction.....	44
4.2 Simulation fluid experimentation of electrical resistance sensors.....	44
4.2.1 Material and instrument .....	44
4.2.2 Simulation fluid experimentation.....	45
4.2.3 Conclusion and analysis.....	45
4.3 Embedding experimentation of electrical resistance sensors.....	48
4.3.1 Material and instrument.....	48
4.3.2 Embedding experimentation.....	49
4.3.3 Conclusion and analysis.....	53

4.4 Influencing factor and shortage of electrical resistance sensors.....	58
4.4.1 Influencing factor of temperature.....	58
4.4.2 Influencing factor of voltage in addition.....	58
4.4.3 Influencing factor of corrosion production.....	58
4.4.4 Influencing factor of macro cell.....	58
4.5 Conclusion and forecast.....	58
Reference.....	60

**Chapter 5 Application of electrical resistance sensors in rebar  
corrrsion monitoring..... 63**

5.1 Introduction.....	63
5.2 Analysis of electrical resistance sensors in the reinforced concrete structure.....	64
5.2.1 Electrical resistance sensors research internally and abroad.....	64
5.2.2 Time analysis of chlorine ion infiltration.....	65
5.2.3 Time analysis of corrosion of sensors.....	70
5.3 Time check of sensors' corrosion in chlorine ion environment.....	73
5.4 Conclusion and prospect.....	74
Reference.....	76

**Chapter 6 Conclusion and prospect..... 78**

6.1 Conclous.....	78
6.2 Prospect.....	78

**Thanks..... 80**

**Paper published during master's degree..... 81**

## 摘 要

腐蚀环境下服役的钢筋混凝土结构由于长期受到腐蚀作用,造成混凝土性能劣化、钢筋锈蚀、钢筋与混凝土之间粘结退化,导致钢筋混凝土结构耐久性降低而提前发生破坏。目前,由于腐蚀造成钢筋混凝土结构耐久性退化已成为当今土木工程界面临的一大灾害,引起人们的普遍关注,成为研究的一大热点。

本论文在系统总结目前国内外对钢筋混凝土结构耐久性研究的情况基础上,陈述了钢筋在混凝土结构中腐蚀的原理,总结了各种由于腐蚀引起的钢筋腐蚀检测技术。通过设计检测钢筋腐蚀的电阻传感器,在主要考虑受氯离子影响的情况下,结合实验对传感器在钢筋混凝土结构中的腐蚀进行了检测。以电阻传感器法为主线,对受腐蚀钢筋混凝土结构耐久性展开了一定的研究,主要研究工作包括:

首先,对目前国内外钢筋混凝土结构耐久性研究的情况进行了总结分析。

其次,通过对钢筋锈蚀原理的陈述,总结了各种钢筋腐蚀检测技术,主要分为了四类,分析法,物理法和电化学方法,以及目前发展很快的一些检测方法。在对电阻传感器法原理探讨的基础上,自行研制了适合于工程实际应用的电阻传感器,对电阻传感器的制作做了详细的说明。

再次,通过设计专用电阻传感器,在主要考虑受氯离子影响情况下进行了电阻传感器的模拟液试验,测试了电阻传感器腐蚀与电阻变化的关系,建立了钢筋腐蚀量和探头电阻变化关系。测试和分析表明,用电阻腐蚀探头可以获得稳定的钢筋腐蚀状态参数。接着,将电阻传感器埋入混凝土试块中,通过 RCM 法对混凝土的渗透性进行了评价,利用电阻法检测电阻传感器在混凝土试块中的腐蚀情况,并将其与电化学传感器法进行对比实验。实验表明,电阻传感器在混凝土中与模拟液中有相同的表现——随着腐蚀的进行,电阻增大,但在混凝土中更易受温度的影响。与电化学传感器法的对比实验表明,两种方法的检测结果是相同的。

最后,对电阻传感器在混凝土结构中的应用做了计算分析。为实际工程检测钢筋腐蚀提供了一种新的方法。

关键词: 钢筋混凝土结构 钢筋腐蚀 电阻传感器 检测

# Abstract

Reinforced concrete structures are corrupted by durative environment action. It causes performance inferior, rebar corrosion and inosulation degradation of reinforced concrete structure, which causes reinforced concrete structure depressed and destroyed ahead. Presently, durability degeneration of reinforced concrete structure has become a disaster to our civil engineering because of corrosion. It arouses attentions and becomes a hotspot.

This paper summarizes durability research of reinforced concrete structures internally and abroad presently, states the rebar corrosion principle of reinforced concrete structures, summarizes monitoring technology of rebar corrosion. Design special electrical resistance sensors used to monitor rebar corrosion, combine experiment to monitor rebar corrosion of sensors, which consider  $\text{Cl}^-$  mainly. According to electrical resistance sensors, corroded reinforced concrete structures are researched. The primary works include:

Firstly, summarize and analysis durability actuality of reinforced concrete structure internally and abroad.

Secondly, state the principle of rebar corrosion, summarize manifold methods of monitoring, which include analytical method, physical method, electrochemical method, other rapid developing monitoring methods. Based on the principle of electrical resistance sensors, manufacture sensors fit for application of practice project. Detailed explain is presented.

Thirdly, design special electrical resistance sensors used to monitor rebar corrosion, simulation fluid experimentation is conducted to test the relation between corrosion and the change of resistance, which consider  $\text{Cl}^-$  mainly. According to the result and analysis, it showed that the stable electrical resistance can be obtained using the special corrosion sensors. Through embedding the electrical resistance sensors personal manufactured, using RCM to appraise penetrability of the concrete, then, monitoring corrosion of the sensors in the concrete, and contrasting with the electrochemical sensors. It showed the same behavior between simulation fluid experimentation and embedding experimentation — with corrosion developing, the resistance magnifies, but easier influenced by temperature in the concrete. Experimentation contrasting with the electrochemical sensors shows the monitoring result is the same.

Finally, analysis of electrical resistance sensors is made, which provide a new method for monitoring the environment of rebar corrosion.

**Key words:** Reinforced concrete structure      Rebar corrosion      Electrical resistance  
sensors Monitoring

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 第一章 绪 论

## 1.1 引言

钢筋混凝土是现代社会广泛使用的建筑材料，具有来源广、价格低廉、坚固耐用等优点，作为主要的建筑材料被广泛应用于各行各业构筑物的建造。对国民经济建设起着极大的作用。通常情况下，钢筋混凝土结构可以经受各种不同的环境条件。但是由于混凝土碳化、氯化物侵蚀等引起的钢筋混凝土结构的过早失效是当今世界普遍关注并日益突出的灾害，同时由于混凝土结构中钢筋腐蚀所造成钢筋混凝土结构的失效给世界各国国民经济造成了极大的损失<sup>[1]</sup>。

混凝土结构的耐久性是指结构及其各组成部分，在所处的自然环境和使用寿命等因素的长期作用下，抵抗材料性能劣化、仍能维持结构的安全和适用功能的能力。结构在正常使用条件下，不须重大维修而仍能满足安全和适用功能所延续的时间，称为适用寿命（年限），可作为表达结构耐久性的数量指标。

根据工程事故的调研和有关的试验、理论研究，混凝土结构的耐久性失效主要包括以下几类：渗透、冻融、碱—骨料反应、混凝土碳化、化学（氯盐）腐蚀和钢筋锈蚀等<sup>[2]</sup>。其他的还有疲劳、摩擦损伤、生物腐蚀、钢筋的应力腐蚀等。但已有的调查研究表明钢筋腐蚀造成混凝土结构的提前失效是当今世界日益突出的灾害。其中，混凝土碳化和氯化物侵蚀（来源主要是除冰盐和海水等环境）是导致混凝土中钢筋腐蚀的主要原因。混凝土中的碳化是指空气中的二氧化碳等酸性气体侵入混凝土中与孔隙液中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生中和反应，导致孔隙液的 PH 值下降，低于 9 时，钝化膜遭到严重破坏。影响混凝土的碳化主要因素有：材料因素、施工因素以及环境因素。氯离子透过混凝土到达钢筋与混凝土界面，当累积到一定浓度时，就会破坏钢筋表面的钝化膜，使钢筋发生腐蚀。影响混凝土中氯离子浓度的因素主要有：材料因素以及环境因素。由于腐蚀破坏的混凝土结构如图 1.1 所示：

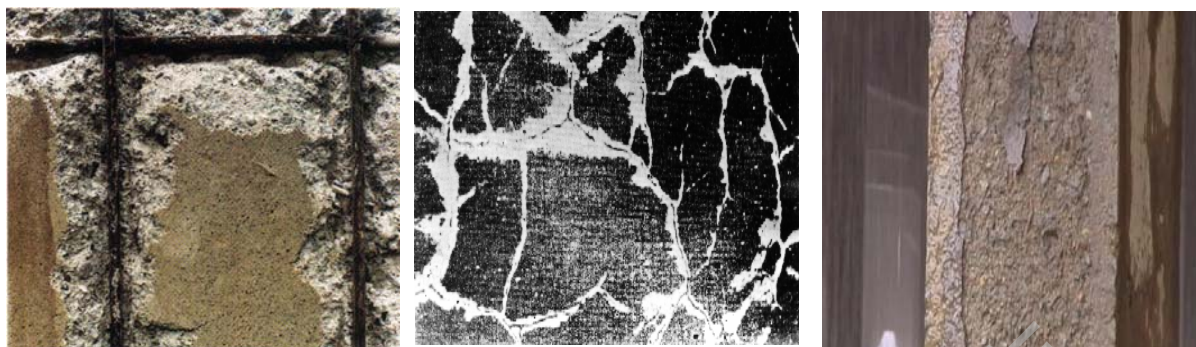


图 1.1 腐蚀造成的混凝土结构破坏

钢筋混凝土结构中的混凝土材料本身是非均质的脆性材料，抗拉和抗弯能力差，为了承受拉应力，所以加入了钢筋这种抗拉性能好的材料。正是依靠钢筋与混凝土间良好的粘结力，保证了钢筋与混凝土的共同作用。而这种共同作用都为对方提供了良好的保护措施。一方面，钢筋承受了拉应力，提高了结构或者构件的受力；另一方面，混凝土为钢筋提供了物理和化学的双重保护，不仅可以部分阻挡侵蚀性介质对钢筋的直接接触，还因为其孔溶液的高碱性可以使钢筋表面钝化。但是由于外界环境侵蚀作用，使得这种共同作用在未达到预定的目标年限前已经失效。因此，混凝土结构的耐久性研究就成为了当今世界急需解决的难题之一。

## 1.2 国内外钢筋混凝土结构耐久性研究现状

### 1.2.1 国外混凝土耐久性研究的现状

1991年召开的第二届混凝土耐久性国际会议上，Metha教授在题为“混凝土耐久性——五十年进展”的报告中指出<sup>[3]</sup>，“当今世界，混凝土结构破坏的原因，按重要性递降排列的顺序是：钢筋锈蚀，寒冷气候下的冻害，侵蚀环境的物理化学作用”。随着除冰盐应用的日增，水、土壤、大气污染的加剧，造成当今混凝土耐久性问题的日益严重，实际环境中由于腐蚀作用造成钢筋混凝土结构的各种事故、病害频繁发生。

美国是当今发达的资本主义国家。据统计混凝土基础工程的总价为6万亿美元，但今后每年用于维修和重建的费用将高达3000亿美元。由于广泛使用除冰盐，造成过早破坏，1989年美国交通部门的一份报告估计，由撒除冰盐和海水侵蚀引起的州间高速公路桥梁的钢筋腐蚀破坏，经济损失累计高达1500亿美元。

30 年代建造的美国俄勒冈州 Alsea 海湾上的多拱大桥，施工质量极好，但由于钢筋腐蚀引起结构破坏，用传统的局部修补的方法修补破坏处，不久在修补处的附近，钢筋又加剧腐蚀，不得不拆除、更换。美国旧金山海湾上第一座跨海湾的 SanMateo-Hayward 大桥、Hood 航道桥东半部以及瑞典的 Oland 桥也出现了类似的情况。建于 60 年代的美国旧金山海湾第二座 SanMateo-Hayward 跨海湾大桥上处于浪溅区的预制横梁，因腐蚀严重在建后 20 年就不得不耗资巨大进行维修<sup>[4]</sup>。英国，由于腐蚀引起钢筋混凝土结构的严重破坏现象也日益突出，1953 年建于英国南威尔斯 Afan 河的一座名为 Ynysy-Gwas 的单跨后张预应力混凝土桥，在建成 5 年后便由于除冰盐引起钢筋严重腐蚀而破坏。英格兰岛的中环线快车道上有 11 座高架桥，全长 21km，总建造费(1972 年)是 2800 万英镑，由于冬季撒盐除冰，两年后就发现钢筋腐蚀使混凝土胀裂，到 1989 年的 15 年间，修补费已高达 4500 万英镑，为造价的 1.6 倍，估计到 2004 年的维修费用将达到 1.2 亿英镑，接近总造价的 6 倍。

就土木工程而言，混凝土结构受到周围环境介质腐蚀作用的危害和日益加剧的事态也远远超出人们的意料。腐蚀造成的破坏问题同样出现在澳大利亚、波兰、德国等发达国家。美国腐蚀控制技术委员会(CCT)报道，当今世界面临的重大问题之一就是基础设施的破坏，特别是腐蚀引起的混凝土破坏。整个世界正在进行着混凝土基础设施防腐蚀损失的战斗。混凝土易碎易裂，钢筋易锈蚀等，使混凝土桥梁的破坏尤其突出。

其实随着水泥混凝土的使用，混凝土结构的耐久性问题就随之出现，耐久性问题也就越来越得到了人们的注意，同时也对耐久性问题展开了研究。19 世纪 40 年代，法国工程师 Buka 为探索码头被海水毁坏的原因，对石灰以及用石灰和火山灰制成的砂浆性能进行了抗腐蚀研究，并著有《水硬性组分遭受海水腐蚀的化学原因及防护方法研究》一书，成为混凝土受海水腐蚀破坏的第一部研究著作<sup>[5]</sup>。19 世纪 80 年代，钢筋混凝土开始应用于工业建筑，人们便着手研究钢筋混凝土能否在活性物质腐蚀条件下安全使用，以及工业大气中混凝土的耐久性问题。20 世纪初，Grun. R.，Kleinlogel. A 等对工业建筑中使用的混凝土和钢筋混凝土的腐蚀问题进行了系统研究。1925 年，在美国人 Miller. D. G 为了获得 25 年、50 年甚至更长时间的混凝土腐蚀数据，进行了混凝土在硫酸盐含量极高的



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库