



“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代结构混凝土 耐久性评价与寿命预测

Durability Evaluation and Service Life Prediction of Modern Concrete

孙伟 著

中国建筑工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测

Durability Evaluation and Service Life Prediction of Modern Concrete

孙伟 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测/孙伟著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-112-17365-5

I. ①现… II. ①孙… III. ①结构混凝土-耐用性-研究
IV. ①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 242691 号

责任编辑: 何玮珂

责任设计: 李志立

责任校对: 张颖 姜小莲

现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测

Durability Evaluation and Service Life Prediction of Modern Concrete

孙伟 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 23¼ 字数: 573 千字

2015 年 10 月第一版 2015 年 10 月第一次印刷

定价: 66.00 元

ISBN 978-7-112-17365-5
(26211)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书针对不同地区因工程所处部位的损伤因素的特点,对力学因素、环境因素、材料因素等以不同方式耦合情况试验,结合重大基础工程研究了混凝土损伤劣化过程、规律和特点以及诸因素间正负效应叠加及交互作用,总结了不同损伤因素耦合作用下混凝土的损伤劣化过程、规律和特点,探索了混凝土微结构随时间的正负效应交错及演变机理,揭示了诸损伤因素在不同的耦合情况下损伤叠加的正负效应与交互作用的复杂性和时变性,建立了不同耦合因素作用下耐久性评价体系和寿命预测方法。

本书共分5章,主要内容包括:绪论;高性能混凝土的性能及失效机理研究;单一、双重、多重因素作用下高性能混凝土耐久性评价体系;单一、双重和多重破坏因素作用下混凝土寿命预测新理论与新方法;多重破坏因素耦合作用下的高速铁路钢筋混凝土构件耐久性研究。本书可供建筑材料领域工程技术人员、科研工作者和大专院校相关专业师生参考。

This book contraposed the characteristics of damage factors in the different position of engineerings in different regions, maked an experiment on the mechanical factors, environmental factors and material factors in different coupling ways. United significant basic engineerings, the concrete damage degradation process, regularity and characteristics, as well as the superposition and interaction of positive and negative effects of various factors were studied. Then the concrete damage degradation process, regularity and characteristics under coupling damage factors were summarized.

This book has five chapters, the main contents include: introduction; performance and failure mechanism of high performance concrete (HPC); durability evaluation system of high performance concrete under the action of single, double and multiple factors; the new service life prediction theories and methods of concrete under the action of single, double and multiple damage factors; durability study of reinforced concrete members for high speed railway under coupling damage factors. This book provides a reference for engineering and technical personnels in the field of building materials, science researchers and teachers and students of related profession in junior college.

序一

混凝土材料是当今世界上最大宗的人工制备材料和最主要的建筑与结构工程材料。目前世界上水泥产量已逾 30 亿吨，相应的混凝土材料产量已达百亿吨。随着社会发展和科学技术的进步，对材料产品的使用性能和品质要求越来越高，各种建筑工程也在不断向着更高、更大、更深的空间和规模发展，这就需要通过提高混凝土材料的品质，提高材料的使用寿命，拓展应用领域，减少资源和能源的消耗。

混凝土结构在长期自然环境和长期使用条件下会逐渐老化、损伤和破坏，影响结构使用功能和安全，因此混凝土结构的耐久性问题是近年来学术界关注和研究的重点内容。但是传统的耐久性设计方法只侧重考虑单一环境因素作用下的耐久性而忽视了荷载作用对耐久性能的影响，因此与结构物所处的实际环境不符，不仅造成设计要求与实际环境的偏差等情况，而且据此耐久性设计与服役寿命预测的结果会不安全和不可靠的。

东南大学孙伟院士及其团队十多年来一直致力于研究复杂情况下结构混凝土的耐久性问题，取得了丰硕的成果，具有很强的现实指导意义。《现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测》一书详细介绍了这一领域的具体研究内容以及取得的成果。该书针对影响结构混凝土耐久性的主要因素氯盐、冻融循环、碳化以及硫酸盐侵蚀等的作用机理，对上述损伤因素同荷载的耦合作用进行了深入的研究，分别建立了基于损伤理论的寿命预测模型，并在苏通长江大桥、润扬长江大桥、苏州地铁等国家重点工程中进行了应用，为进一步研究多重因素作用下结构混凝土的耐久性提供了宝贵的参考资料。

该书内容新颖，结论翔实，研究水平处于国内外研究的前沿。该书的出版发行对于结构混凝土耐久性问题的研究有着很好的指导作用。

中国工程院院士
南京工业大学教授



2014 年 9 月

序二

混凝土结构的耐久性问题是困扰国内外工程学术界的重大理论性问题，尤其是如何模拟复杂的现实情况下的混凝土结构耐久性问题一直是学术界的一个难点。东南大学孙伟院士及其团队十多年来一直致力于研究复杂情况下结构混凝土的耐久性，包括多重因素的复合作用及其同应力的耦合，取得了丰硕的成果，具有很强的现实指导意义。《现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测》一书详细介绍了这一领域的具体研究内容以及取得的成果。

该书针对影响结构混凝土耐久性的主要因素氯盐、冻融循环、碳化以及硫酸盐侵蚀等的作用机理，对结构混凝土损伤失效过程，损伤劣化机理进行了深入的研究。特别是针对双重和多重因素耦合作用的过程进行了探索性和开创性的研究。为结构混凝土耐久性的设计和评估提供了可行的依据。书中对上述损伤因素同荷载的耦合作用进行了深入的研究与分析，并分别建立了基于各自理论的寿命预测模型。书中还介绍了基于多重因素耦合作用的耐久性设计在三峡大坝、苏通大桥、润扬大桥以及苏州地铁等工程中的运用。这些都为进一步研究多重因素作用下结构混凝土的耐久性和服役寿命提供了宝贵的参考资料。

该书内容新颖，结论翔实，研究水平处于国内外研究的前沿。该书的出版发行对于结构混凝土耐久性问题的研究有着很好的指导作用。

中国工程院院士
东南大学教授



2014年9月

前言

提高材料的耐久性和服役寿命已遍及材料科学与工程各个领域并列入“十二五”国家科技发展纲要之中。当今我国重大基础工程建设的迅猛发展已引起混凝土科学与工程界的倍加关注,也是耐久性和寿命研究的巨大推动力。基础工程大规模兴建,还是城市化高速推进,无一不与混凝土工程密切相关,且都要耗用巨量水泥和混凝土材料。如不提高土木工程材料的耐久性,延长工程服役寿命,必将给国家造成巨大的经济损失,影响到社会可持续发展,并将为工程的安全服役带来威胁。

近十几年我的科研团队针对我国不同地区因工程所处部位的损伤因素的特点,对力学因素、环境因素、材料因素几十种不同方式耦合情况进行的大量和长期耐久性试验,得到了加载和非加载并与不同环境、材料因素耦合,并结合重大基础工程研究了混凝土损伤劣化过程、规律和特点以及诸因素间正负效应叠加及交互作用,在此基础上总结了不同损伤因素耦合作用下混凝土的损伤劣化过程、规律和特点,探索了在这一过程中混凝土微结构随时间的正负效应交错及演变机理,揭示了诸损伤因素在不同的耦合情况下损伤叠加的正负效应与交互作用的复杂性和时变性,从而结合我国不同地区 and 不同工程以及重大工程的不同部位,如润扬长江公路大桥、苏通长江公路大桥、南京地铁、青藏地区盐湖、杭州湾跨海大桥等,建立了不同耦合因素作用下耐久性评价体系和寿命预测方法,用上述模型和方程来预测结构混凝土和混凝土结构的寿命,更符合工程所处服役条件的实际,因此明显提高了寿命预测的安全性和可靠性。

本书的成果是在国家自然科学基金重点项目《高性能水泥基建筑材料性能及失效机理研究》(59938170)、国家 863 计划课题《高速铁路用钢筋混凝土》(2008AA030704) 和国家 973 重点基础研究发展计划《当代环境友好型混凝土基础研究》(2009CB623203) 资助下完成的,本项目的研究成果,获得了国家科技进步二等奖 2 项(生态型高与超高性能结构混凝土材料的应用与研究,2007;润扬长江公路大桥建设关键技术研究,2008) 和江苏省科技进步一等奖 1 项(高性能水泥基建筑材料性能及失效机理研究,2006)。

曾在本科研发团队中学习、工作过、现就职于深圳信息职业技术学院的袁雄洲博士和中冶建筑研究总院有限公司的曹擎宇博士参与了全书的策划、编写、统稿、整理、校对工作,我的科研团队中余红发教授、慕儒教授、杨鼎宜教授、詹炳根教授、金祖权教授、关宇刚博士在作者的指导下攻读博士学位期间和其后的工作中参加了相关的研究工作,深圳大学徐畏婷博士、江苏建筑科学研究院有限公司的李华硕士和东南大学的武胜平硕士参与了相关章节的编写工作。特别感谢江苏省建筑科学研究院缪昌文院士、刘加平教授、南京大学翟建平教授、中冶建筑研究总院有限公司郝挺宇教授在科研工作中对我们的支持和帮助;中国工程院院士、南京工业大学唐明述教授,中国工程院院士、东南大学吕志涛教授作为本书的主要审稿人对全书进行了详尽的审阅,并提出了宝贵的意见,作者在做研究过程中查阅了大量文献资料,也就一些问题请教过一些专家和同行,从中获得了许多有益的启发和帮助,在此对所有与本书出版相关的有贡献者们表示衷心的感谢!

Preface

It have been all over the field of materials science and engineering to increase the durability and service life, and it also has been involved in the Twelfth Five-year Plan for National Science and Technology Development. Nowadays, the rapid development of construction of major infrastructure projects, which promotes durability and service life research a lot, has caused the concerns of concrete scientific and engineering community. It is closely related to concrete engineering and it need to consume a huge amount of cement and concrete materials that infrastructure projects are constructed in a large scale and urbanization is advanced at a high-speed. Without increasing the durability of civil engineering materials and extending service life of projects, it will cause big economic damage to our country, impact social sustainable development and threat the safely serving of projects.

Nearly a dozen years, my scientific research team has conducted a large number of long-term tests on mechanical factors, environmental factors as well as material factors of dozens of different coupling ways, according to the characteristics of engineering parts of the injury factors in varied regions. We studied about loading and non-loading and coupled it with environment and materials factors, according to which we researched concrete damage and deterioration processes, rules and features, and then explored the process of positive and negative effects of concrete microstructure with time interleaving and evolution mechanism, revealed the complexity and changeability over time of injury factors under different coupling damage superimposing the positive and negative effects. Thus, according to different regions and different projects in our country as well as different parts of major projects, for example, Zhenjiang-Yangzhou Yangtze River Highway Bridge, Highway Bridge of Su-Tong, the Nanjing metro, the Qinghai - Xizang plateau lake, Hangzhou Bay Bridge and so on, we set up a system of durability evaluation and a method of service life prediction under different coupling factors. It consists better with the actual conditions of service to predict life of structure concrete and concrete structure with models and equations above, as a result, it improves the safety and reliability of life prediction.

The result of this book competed in funding of the State Key Program of National Natural Science of China "The performance and mechanism study of cementitious building materials" (59938170), National 863 Plan Projects "reinforced concrete for high speed railway" (2008AA030704) and National Key Basic Research Development Plan 973 "Foundation Study of Modern Environment-friendly Concrete" (2009CB623203). And the research result of this project has gained two of National Scientific and Technological Progress second prizes (Application and research of eco-friendly high performance and ultra-high performance structural concrete material, 2007; Research on key technologies of the Construction

of Runyang Yangtze River Highway Bridge, 2008) and one of Scientific and Technological Progress of Jiangsu Province first prizes (Study on the performance and failure mechanism of high performance cement-based materials, 2006).

Dr. Yuan Xiongzhou who had learned and worked in our research team, and now works in Shenzhen Institute of Information Technology, and Dr. Cao Qingyu now at the China Metallurgical Construction Research Institute, Ltd., as my assistants and associate editors of the book involved in the planning, writing, manuscript, finishing and proofreading. Of my research team, Professor Yu Hongfa, Professor Mu Ru, Professor Yang Dingyi, Professor Zhan Binggen, Professor Jin Zuquan, Dr. Guan Yugang participated in the related research during the PhD study and subsequent work under the guidance of the author. Dr. Xu Weiting working at Shenzhen University Li Hua Master working at Jiangsu Research Institute of Building Science co., Ltd. and Wu Shengping Master at Southeast University participated in the compiling of the relevant sections. Special thanks Miao Changwen Academician and Professor Liu Jiaping in Jiangsu Research Institute of Building Science co., Ltd., Professor Zhai Jianping at Nanjing University, and Professor Hao Tingyu in China Metallurgical Construction Research Institute, Ltd. for the support and help during the scientific research. Chinese Academy of Engineering, Professor Tang Mingshu at Nanjing University of Technology, Chinese Academy of Engineering, Professor Lu Zhitao at Southeast University carried out a detailed review and made valuable suggestions as the main reviewers of the book. During the research, the author referred a large amount of literature, and consulted some experts and peers, then acquired a lot of useful inspiration and help, so heartfelt thanks to all the related contributors!

目录

序一

/56

序二

前言

第1章 绪论/1

1.1 我国现阶段混凝土基础工程建设的现状
/1

1.2 提高重大基础工程的耐久性和服役寿命
的重要意义/1

1.3 混凝土结构耐久性和服役寿命的预测/3

1.4 结构混凝土和混凝土结构耐久性和服役
寿命的保证/5

1.5 结论/6

1.6 本书的创新之处/6

本章参考文献/10

第2章 高性能混凝土的性能及失效机理研究/11

2.1 高性能水泥基材料早期结构形成的特
点与机理/11

2.1.1 高性能水泥基材料早期结构形成
的连续观察与分析/11

2.1.2 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体在水泥水化早期形
成的影响因素及其对硬化浆体性
能的影响/33

2.1.3 粉煤灰对高性能水泥基材料增强
效应的机理探讨/42

2.1.4 粉煤灰火山灰反应残渣的形貌和
成分特征/49

2.1.5 混凝土中钙矾石生长特性的研究

2.2 活性掺合料对水泥基材料产生高性能
的细观与微观机理/64

2.2.1 绪论/64

2.2.2 试样制备及试验方法/66

2.2.3 矿渣对水泥基材料结构形成的贡
献及影响/69

2.2.4 粉煤灰对水泥基材料结构形成的
贡献及影响/84

2.3 普通混凝土、引气混凝土和高强混凝
土在盐湖环境单一、双重和多重因素
作用下的损伤失效机理/92

2.3.1 绪论/92

2.3.2 普通混凝土、引气混凝土和高强
混凝土在单一冻融因素作用下的
冻融破坏机理/93

2.3.3 普通混凝土和引气混凝土在(冻融
+盐湖卤水腐蚀)双重因素作用下
的冻融破坏机理/96

2.3.4 普通混凝土、引气混凝土和高强
混凝土在(干湿循环+盐湖卤水腐
蚀)双重因素作用下的腐蚀产物、
微观结构和腐蚀破坏机理/105

2.3.5 普通混凝土在(弯曲荷载+冻融+
盐湖卤水腐蚀)三重因素作用下的
失效机理/115

2.3.6 结论/116

2.4 高性能混凝土在盐湖环境单一、双重
和多重因素作用下的耐久性形成机理
/119

2.4.1 引言/119	伤失效过程的数据采集系统/154
2.4.2 HPC 在新疆盐湖的单一腐蚀因素作用下的腐蚀破坏机理/119	3.1.4 结论/155
2.4.3 HPC 在(干湿循环+盐湖卤水腐蚀)双重因素作用下的抗卤水腐蚀机理——结构的腐蚀优化机理/121	3.2 高性能混凝土在单一破坏因素作用下损伤失效过程的规律和特点/156
2.4.4 HSC-HPC 在(冻融+盐湖卤水腐蚀)双重因素作用下的高抗冻蚀机理/127	3.2.1 实验设计/156
2.4.5 结论/132	3.2.2 高性能混凝土的冻融损伤规律与抗冻融循环次数/158
2.5 在盐湖环境的单一、双重和多重因素作用下混凝土的氯离子结合能力及其非线性规律/134	3.2.3 引气高性能混凝土的冻融损伤与抗冻融循环次数/159
2.5.1 绪论/134	3.2.4 钢纤维增强高性能混凝土的冻融损伤与抗冻融循环次数/160
2.5.2 试验设计与试验方法/135	3.2.5 钢纤维增强引气高性能混凝土的冻融损伤与抗冻融循环次数/161
2.5.3 含冻融条件的双重和三重因素作用下混凝土的氯离子结合规律/136	3.2.6 不同混凝土的冻融损伤比较与抗冻融循环次数/162
2.5.4 不含冻融条件的单一和双重因素作用下混凝土的氯离子结合规律/140	3.2.7 高性能混凝土在单一硫酸盐腐蚀因素作用下的损伤失效过程、特点与规律/163
2.5.5 混凝土的氯离子结合能力及其非线性问题/142	3.2.8 高性能混凝土在单一盐湖卤水腐蚀因素作用下的损伤失效过程、特点与规律/164
2.5.6 结论/145	3.2.9 结论/166
本章参考文献/147	3.3 高性能混凝土在双重破坏因素作用下损伤失效过程的规律和特点/167
第3章 单一、双重、多重因素作用下高性能混凝土耐久性评价体系/153	3.3.1 高性能混凝土在冻融循环与应力双重因素作用下的损伤失效过程、特点与规律/167
3.1 多重破坏因素作用下混凝土耐久性实验体系的建立/153	3.3.2 高性能混凝土在冻融循环与除冰盐双重因素作用下的损伤失效过程、特点与规律/173
3.1.1 考虑多重破坏因素的混凝土损伤失效过程的实验方案设计/153	3.3.3 高性能混凝土在冻融循环与硫酸盐双重因素作用下的损伤失效过程、特点与规律/178
3.1.2 混凝土在多重破坏因素作用下损伤失效过程的实验加载系统/154	3.3.4 高强混凝土的冻融循环—硫酸铵双因素损伤规律与抗冻融循环次数/181
3.1.3 混凝土在多重破坏因素作用下损	

- 3.4 不同混凝土在冻融循环与盐湖卤水腐蚀双重破坏因素作用下的损伤失效过程、特点与规律/182
 - 3.4.1 不同混凝土在西藏盐湖地区的抗卤水冻蚀性/182
 - 3.4.2 不同混凝土在内蒙古盐湖地区的抗卤水冻蚀性/183
 - 3.4.3 不同混凝土在新疆盐湖地区的抗卤水冻蚀性/183
 - 3.4.4 不同混凝土在青海盐湖地区的抗卤水冻蚀性/184
 - 3.4.5 不同混凝土在干湿循环与盐湖卤水腐蚀双重破坏因素作用下的损伤失效过程、特点与规律/185
 - 3.4.6 不同混凝土在弯曲荷载与盐湖卤水腐蚀双重因素作用下混凝土的抗卤水腐蚀性/186
 - 3.5 ASR 和冻融循环协同作用下混凝土损伤失效过程和机理/187
 - 3.5.1 先冻融循环后 ASR 的损伤演化/187
 - 3.5.2 先碱集料反应后冻融循环的损伤演化/190
 - 3.5.3 ASR 和氯盐腐蚀双重破坏因素作用下混凝土的损伤失效过程和机理/191
 - 3.6 结论/192
 - 3.6.1 冻融循环与应力双重因素/192
 - 3.6.2 冻融循环与除冰盐腐蚀双重因素/192
 - 3.6.3 冻融循环与硫酸盐腐蚀双重因素/193
 - 3.6.4 冻融循环与盐湖卤水腐蚀双重破坏因素/193
 - 3.6.5 干湿循环与盐湖卤水腐蚀双重破坏因素/194
 - 3.6.6 弯曲荷载与盐湖卤水腐蚀双重破坏因素/194
 - 3.6.7 ASR 和冻融循环协同作用/194
 - 3.6.8 ASR 和氯盐腐蚀共同作用/194
 - 3.7 高性能混凝土在多重破坏因素作用下损伤失效过程的规律和特点/194
 - 3.7.1 高性能混凝土在弯曲荷载、冻融循环与除冰盐多重破坏因素作用下的损伤失效过程、特点与规律/195
 - 3.7.2 引气高性能混凝土在弯曲荷载-冻融-除冰盐腐蚀三因素作用下的损伤/197
 - 3.7.3 钢纤维增强高性能混凝土在弯曲荷载-冻融-除冰盐腐蚀三因素作用下的损伤/199
 - 3.7.4 钢纤维增强引气高性能混凝土在弯曲荷载-冻融-除冰盐腐蚀三因素作用下的损伤/200
 - 3.7.5 高性能混凝土在弯曲荷载、冻融循环与盐湖卤水腐蚀多重破坏因素作用下的损伤失效过程/202
 - 3.7.6 结论/202
 - 本章参考文献/206
- ## 第4章 单一、双重和多重破坏因素作用下混凝土寿命预测新理论与新方法/208
- 4.1 基于损伤理论和威布尔分布的混凝土寿命预测理论和模型/208
 - 4.1.1 研究思路/209
 - 4.1.2 混凝土一般耐久性损伤模型的建立/210
 - 4.1.3 一般损伤寿命预测模型的简化处理/213
 - 4.1.4 与冻融相关的理论公式/217

- 4.1.5 结果与分析/218
- 4.1.6 实际环境中混凝土寿命的估算/221
- 4.1.7 小结/223
- 4.2 考虑多种因素作用下的氯离子扩散理论和寿命预测新模型/224
 - 4.2.1 试验部分/225
 - 4.2.2 混凝土使用寿命的构成/226
 - 4.2.3 修正氯离子扩散方程的预备知识、研究背景及新方程的建立/227
 - 4.2.4 混凝土的氯离子扩散理论模型与使用寿命预测理论体系/230
 - 4.2.5 理论模型的实验室验证与工程验证/250
 - 4.2.6 混凝土在氯离子环境中使用寿命的因素影响规律/255
 - 4.2.7 混凝土在典型盐湖环境的使用寿命及其与损伤寿命之间的关系/263
 - 4.2.8 混凝土使用寿命预测的一般步骤及在盐湖地区重点工程的应用/264
 - 4.2.9 小结/266
- 4.3 基于损伤演化方程的混凝土寿命预测的理论和方法/272
 - 4.3.1 加速实验方法预测混凝土使用寿命的相关研究进展/272
 - 4.3.2 试验部分/274
 - 4.3.3 在冻融或腐蚀条件下混凝土损伤演化方程的建立/275
 - 4.3.4 混凝土损伤模式的判别分析与验证/278
 - 4.3.5 混凝土的损伤初速度和损伤加速度及其对混凝土冻融寿命的影响/279
 - 4.3.6 混凝土的损伤参数与其原材料、配合比和养护条件之间的关系/283
 - 4.3.7 混凝土的快速冻融寿命与损伤参数之间的相关性/285
 - 4.3.8 损伤演化方程的验证/288
 - 4.3.9 基于损伤演化方程的混凝土使用寿命的设计与预测方法、实验体系/289
 - 4.3.10 损伤演化方程在重大土木工程混凝土结构的使用寿命预测中的应用/290
 - 4.3.11 小结/294
- 4.4 基于水分迁移重分布的混凝土冻融循环劣化新理论、冻融寿命定量分析与评估模型/296
 - 4.4.1 问题的提出、国内外研究现状与研究方法/296
 - 4.4.2 混凝土冻融循环劣化机理分析/298
 - 4.4.3 混凝土冻融循环劣化模型的建立/304
 - 4.4.4 混凝土抗冻性评估与预测/312
 - 4.4.5 评估与预测方法的验证/313
 - 4.4.6 结论/314
- 本章参考文献/315
- 第5章 多重破坏因素耦合作用下的高速铁路钢筋混凝土构件耐久性研究/321**
 - 5.1 普通低碳钢与细晶粒钢钝化膜在碱性介质中的耐蚀性/321
 - 5.1.1 实验方法/321
 - 5.1.2 结果与讨论/322
 - 5.1.3 小结/326
 - 5.2 混凝土中引起钢筋锈蚀的临界氯离子浓度的研究/327
 - 5.2.1 实验/327
 - 5.2.2 实验结果与分析/328
 - 5.2.3 小结/332

5.3 高速铁路混凝土结构耐久性寿命评估 体系研究/332

5.3.1 疲劳荷载与环境因素耦合作用下 高性能混凝土的耐久性研究/332

5.3.2 疲劳荷载与环境因素耦合作用下 高速铁路用细晶粒钢筋混凝土的 寿命评估/335

5.3.3 高速铁路疲劳荷载与大气环境耦 合作用下高性能混凝土的服役寿 命预测/337

5.3.4 疲劳荷载与氯盐耦合作用下高性

能混凝土的寿命评估/339

5.4 高速铁路疲劳荷载与环境因素耦合作 用下高性能混凝土的服役寿命预测 /342

5.4.1 不同应力水平作用下对寿命影响 /343

5.4.2 不同矿物掺合量对寿命影响/343

5.4.3 保护层偏差对寿命影响/344

5.5 结论/346

本章参考文献/347

Contents

Foreword one

Foreword two

Preface

Chapter I Introduction /1

- 1.1 Current situation of China's concrete foundation construction /1
- 1.2 The importance of improving the durability and service life of major basic engineering /1
- 1.3 Prediction of the durability and service life of concrete construction /3
- 1.4 Assurance of the structural concrete and concrete structures durability and service life /5
- 1.5 Conclusions /6
- 1.6 Innovative point of this paper /6
- References/10

Chapter II Performance and failure mechanism of high performance concrete(HPC) /11

- 2.1 Characteristics and mechanism of high-performance cement-based materials early structure formation /11
 - 2.1.1 Continuous observation and analysis of high-performance cement-based materials early structure formation /11
 - 2.1.2 Influential factors calcium hydroxide crystals to form in the

early hydration of cement and the effects on the performance of hardened paste /33

- 2.1.3 Discussion on the mechanism of fly ash enhance effect on high-performance cement-based materials /42
- 2.1.4 Morphology and composition the residue of fly ash pozzolanic reaction /49
- 2.1.5 Concrete ettringite growth characteristics /56
- 2.2 Mesoscopic and microscopic mechanism of active admixture to produce high performance in cement-basic materials /64
 - 2.2.1 Introduction /64
 - 2.2.2 Specimen preparation experimental method /66
 - 2.2.3 The contribution and influence of slag on cement-basic materials structure formation /69
 - 2.2.4 The contribution and influence of fly ash on cement-basic materials structure formation /84
- 2.3 Damage failure mechanism of ordinary concrete, air entrained concrete and high strength concrete in saline environmental single, double and multiple factors /92

2.3.1	Introduction /92	factors——corrosion to optimize mechanism of structure /121
2.3.2	Freeze-thaw damage mechanism of ordinary concrete, air en- trained concrete and high strength concrete in a single freeze-thaw factor /93	2.4.4 High frost resistance mechanism of HSC-HPC in freeze-thaw and saline brine corrosion dual fac- tors /127
2.3.3	Freeze-thaw damage mechanism of ordinary concrete and air en- trained concrete under the action of freeze-thaw and saline brine factors /96	2.4.5 Conclusions /132
2.3.4	Corrosion products, microstruc- ture and corrosion damage mech- anism of ordinary concrete, air entrained concrete and high strength concrete under wet-dry cycles and saline brine corrosion dual factors /105	2.5 Chloride-binding capacity and nonlin- ear rules of concrete in saline environ- mental single, double and multiple factors /134
2.3.5	Failure damage mechanism of or- dinary concrete under the action of the triple factors (bending load, freeze-thaw and saline brine corrosion) /115	2.5.1 Introduction /134
2.3.6	Conclusions /116	2.5.2 experimental design and method /135
2.4	Durability formation mechanism of high performance concrete in saline environmental sigle, dual and multi- ple factors /119	2.5.3 Chloride-binding rules in con- crete under the action of dual and triple factors containing freeze-thaw factor /136
2.4.1	Introduction /119	2.5.4 Chloride-binding rules in con- crete under the action of dual and triple factors without freeze-thaw factor /140
2.4.2	Corrosion failure mechanism of HPC under the action of Xin- jiang saline single corrosion fac- tor /119	2.5.5 Chloride-binding capacity and nonlinearity of concrete /142
2.4.3	Brine corrosion resistance mecha- nism of HPC in wet-dry cycles and saline brine corrosion dual	2.5.6 Conclusions /145
		References /147
Chapter III Durability evaluation system of high performance concrete under the ac- tion of single, double and multiple factors /153		
3.1	Foundation of durability experimental system of concrete under multiple damage factors /153	
3.1.1	Experimental scheme design of concrete damage failure process	

- considering multiple factors /153
 - 3.1.2 Experimental loading system of concrete damage failure process under multiple damage factors /154
 - 3.1.3 Data acquisition system of concrete damage failure process under multiple damage factors /154
 - 3.1.4 Conclusions /155
- 3.2 The rules and characteristics of high performance concrete damage failure process under the action of single damage factor /156
 - 3.2.1 Experimental design /156
 - 3.2.2 Freeze-thaw damage rules and freeze-thawing resisting cycles of high performance concrete /158
 - 3.2.3 Freeze-thaw damage and freeze-thawing resisting cycles of air-entrained high performance concrete /159
 - 3.2.4 Freeze-thaw damage and freeze-thawing resisting cycles of steel fiber reinforced high performance concrete /160
 - 3.2.5 Freeze-thaw damage and freeze-thawing resisting cycles of steel fiber reinforced air-entrained high performance concrete /161
 - 3.2.6 Comparison of different concrete freeze-thaw damage and freeze-thawing resisting cycles /162
 - 3.2.7 The damage failure process, characteristics and rules of high performance concrete under single sulfate corrosion factor /163
 - 3.2.8 The damage failure process, Characteristics and rules of high Performance concrete under saline brine corrosin factor /164
 - 3.2.9 Conclusions /166
- 3.3 The rules and characteristics of high performance concrete damage failure process under the action of dual damage factors /167
 - 3.3.1 The damage failure process, characteristics and rules of high performance concrete under a double freeze-thaw cycles and stress factors /167
 - 3.3.2 The damage failure process, characteristics and rules of high performance concrete under a double freeze-thaw cycles and deicing salt factors /173
 - 3.3.3 The damage failure process, characteristics and rules of high performance concrete under a double freeze-thaw cycles and sulfate factors /178
 - 3.3.4 Damage failure rules and freeze-thawing resisting cycles of high performance concrete under a double freeze-thaw cycles and ammonium sulfate factors /181
- 3.4 Damage failure process, characteristics and rules of different concrete under a double freeze-thaw cycles and