

混凝土结构耐久性研究现状

夏 宁 ,于孝民 ,任青文

(河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 :从混凝土结构耐久性退化的原因、耐久性退化构件的研究、结构耐久性评估和寿命预测 3 个方面综述了混凝土结构耐久性的研究现状 ,并就目前的研究水平进行了评述 ,提出了今后研究中需进一步探讨的问题。

关键词 :混凝土 ;钢筋构件 ;结构耐久性

中图分类号 :TU37 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2005)04-0063-04

Current situation of research on durability of concrete structures//XIA Ning , YU Xiao-min , REN Qing-wen(College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :The level of research was commented from aspects of causes of durability degradation , study on components of which the durability was degraded , and durability evaluation and service life prediction for structures . Some problems for further study were also discussed .

Key words :concrete ; reinforcement component ; durability of structure

混凝土结构是土木工程领域中应用最广的一种结构形式 ,但在近一个世纪的使用历史中 ,人们发现混凝土结构都出现了不同程度的病害 ,导致安全性和适用性下降 .混凝土结构的耐久性引起了广泛关注 ,成为一个新的研究热点 ,形成了土木工程研究领域内一门独立的新学科 .结构耐久性的研究内容涵盖很广 ,本文从混凝土结构耐久性退化的原因、耐久性退化构件研究、结构耐久性评估和寿命预测 3 个方面综述混凝土结构耐久性的研究现状 .

1 混凝土结构耐久性退化的原因

1.1 钢筋锈蚀的必要条件

钢筋锈蚀是结构耐久性退化的首要原因 ,钢筋钝化膜的破坏是钢筋锈蚀的前提条件 .混凝土碳化和氯盐侵蚀是导致钢筋钝化膜破坏的两种最常见介质 .

1.1.1 混凝土的碳化

混凝土碳化的研究内容包括碳化机理、影响因素和碳化深度预测模型等 .Papadakis 等^[1]从分子层次上阐述了碳化机理 ,基于反应动力学分析了碳化过程中的主要物理化学反应 ,为碳化过程的定量分析奠定了基础 .影响混凝土碳化程度的因素有混凝土的自身因素 :混凝土的组分和配合比 ;施工过程因素 :养护方法和龄期 ;环境因素 :湿度、温度和 CO₂ 的浓度 .

碳化是钢筋锈蚀的前提和结构使用寿命预测的关键 ,国内外学者提出了许多碳化深度预测模型 ,大致可分为两类 :一类是基于试验数据或实际结构的碳化深度实测值 ,采用数学统计或神经网络等方法拟合得到的经验模型 ,如牛荻涛等提出的混凝土碳化的概率模型^[2]以及双系数碳化深度平均值预测模型和碳化深度标准差的预测模型^[3] ,袁群等提出的基于随机时间序列法的碳化深度 ARIMA(1 ,1 ,0)预报模型^[4] ,金伟良等基于函数型神经网络建立的混凝土碳化深度的预测模型^[5] ;另一类为基于碳化反应过程的定量分析建立的理论模型 ,如阿列克谢耶夫模型^[6]、Papadakis 模型^[1]、张誉等提出的混凝土碳化深度实用数学模型^[7] .这些碳化深度预测模型均可统一为如下的形式 :

$$D = \alpha t^\beta \tag{1}$$

式中 :D 为混凝土碳化深度 ,mm ;t 为时间 ,a ;α ,β 分别为碳化系数和碳化指数 .

以上模型的不同之处主要在于 α 和 β 的取值 .造成这种差异的原因一是分析时采用的数据来源于不同环境条件下不同配合比的混凝土 ,二是建模时考虑的因素不同 .

就目前的研究成果而言 ,经验模型虽然应用方便 ,但是均未考虑可碳化物质含量对碳化速度的影

响,而且采用的数据是基于特定的环境和材料得到的,模型中系数的物理概念不是很明晰,因此模型的适用范围有限.理论模型建模过程概念清晰,各个参数都有明确的定义和量纲,但是模型中参数选取和计算有一定的困难,缺乏一定的实用性.

1.1.2 氯盐侵蚀

氯盐侵蚀研究包括氯离子在混凝土中的扩散机理及影响因素、扩散深度和浓度的预测、引起钢筋去钝化的临界氯离子浓度等.1970年,Collepardi首次应用Fick第二扩散定律建立了氯离子在混凝土中的扩散模型^[8],得到了广泛认可.在此基础上,Tuutti建立了氯离子扩散过程的一维模型^[9];东南大学的余红发等推导出综合考虑氯离子结合能力、扩散系数的时间依赖性和混凝土结构微缺陷影响的扩散方程^[10];Funahashi考虑了温度、盐的种类及用量、混凝土的种类等参数的影响,采用有限差分法得到未来氯离子的浓度分布^[11].

氯离子在混凝土内部扩散的影响因素分为内因和外因.内因主要指混凝土的孔结构、扩散系数和保护层厚度,而外因指环境温度、湿度和混凝土表面氯离子浓度.其中氯离子扩散系数是反映混凝土耐久性的指标,它主要与混凝土内部孔结构的数量和特征等内在因素有关,同时也受温度等环境因素的影响.此外引起钢筋去钝化的临界氯离子浓度是判断锈蚀发生可能性的重要参数.随着氯离子去钝化机理研究的深入,人们逐渐发现采用参数 $[Cl^-]/[OH^-]$ 来表征氯离子引起钢筋去钝化的可能性更为合理,并给出了氯离子在不同引进方式下,不同种类的混凝土中,不同pH值的混凝土孔隙液中的 $[Cl^-]/[OH^-]$ ^[12].

Fick第二定律是目前研究氯离子在混凝土中迁移过程的理论基础,但是基于该定律建立的氯离子扩散深度、浓度和时间的关系与实际出入较大,根本原因是它的假设,如均匀材料、扩散半无限平面、恒定的扩散系数等在实际问题中很难满足,而且氯离子在混凝土内的迁移是各种机理共同作用的结果,而并非单纯的扩散过程.如当构件开裂以后,扩散就不再是氯离子迁移的主要方式.

1.2 钢筋锈蚀的发展过程

钢筋发生锈蚀后,锈蚀发展模式、速度及其对周围混凝土产生的力学作用成为影响构件及结构耐久性的关键因素.

Bazant基于化学反应质量守恒定律、Fick第一扩散定律、Maxell静电方程及化学反应动力学对海洋环境下的钢筋锈蚀过程进行了定量和完整的描述^[13].

许多学者提出了钢筋锈蚀量的预测模型,研究了混凝土保护层开裂前后的锈蚀量,及其与裂缝宽度之间的关系.现有的预测模型分为两类:一类是基于腐蚀电化学原理建立的理论模型,如Bazant提出的海洋环境下钢筋锈蚀的物理模型^[14],牛荻涛等建立的大气环境混凝土开裂前后锈蚀量预测模型^[15,16],金伟良等认为氧气扩散系数与时间相关,考虑钢筋锈蚀后的半径变化,采用了一般的混凝土碳化表达式,提出了混凝土开裂前钢筋锈蚀率预测模型^[17];另一类锈蚀量预测模型是根据试验数据和工程调研,基于若干构件特征参数建立的经验模型,如惠云玲根据大量试件的观察和破坏试验得到的锈蚀开裂前后钢筋锈蚀重量损失率、裂缝宽度与各影响因素之间的关系式^[18],Morinaga提出的钢筋锈蚀速度随温度、相对湿度、氧气浓度、氯离子含量等环境参数变化的经验表达式^[6].

理论模型较为全面地反映了锈蚀过程,模型理论依据充分,概念清楚,但是由于模型中参数的实际取值有难度,实际应用尚有难度.经验公式的形式虽简单,但是往往不能全面包含影响因素,而且不同环境条件下不同结构实测钢筋锈蚀量的离散性较大,因此现有的经验模型还有待工程实测结果的进一步验证和修正.

2 耐久性退化构件的研究

耐久性退化构件的研究包括锈蚀构件各项力学性能、构件锈蚀前后破坏形态的对比分析以及锈蚀构件裂缝和形变的发展规律、锈蚀构件的承载力计算方法、锈蚀钢筋与混凝土黏结性能的衰退规律等.

锈蚀构件的承载力研究分为试验研究和数值分析两大类.西安建筑科技大学^[19]、中国矿业大学^[20]、浙江大学^[21]、冶金部建筑研究总院^[22]进行了锈蚀程度对梁、柱等构件承载力及延性影响的研究.采用的构件来自于电化学快速锈蚀、长期自然暴露、实际老化结构3个途径.研究结果表明锈蚀构件的承载力、延性和塑性明显降低,脆性明显增加.在数值分析研究中,Ting等研究了锈蚀对钢筋混凝土梁抗弯承载力的影响,并编制了不同锈蚀程度下 $M-\phi$ 曲线的计算机仿真程序^[23];惠卓等假设钢筋沿梁跨度锈蚀量按抛物线分布,采用三维非线性有限元分析了锈蚀对梁抗弯承载力的影响^[4];袁迎曙等利用钢筋混凝土结构有限元法和钢筋与混凝土黏结性能的退化数学模型,对梁的结构性能退化机理进行了研究^[20];李永和等基于钢筋锈蚀一般是椭球面轮廓线的假定,把三维锈蚀层面的任一点看成虚拟不连续位移的板单元模型,建立了三维数值离散化模

型^[25]。现有的构件承载力计算模型大多可以统一为如下形式:

$$M = kM_0 \quad (2)$$

式中: M 为锈损构件的承载力; M_0 为完好构件的承载力; k 为构件承载力降低系数, 它的确定考虑构件的截面损伤、锈蚀钢筋的力学性能和钢筋与混凝土黏结性能的劣化等因素, 通常表示为构件截面的几何参数、裂缝宽度和钢筋锈蚀率等变量的函数。

钢筋锈蚀会导致钢筋与混凝土之间黏结力下降。Al-Sulaimani 等^[26]进行了局部锈蚀钢筋的拔出试验和钢筋均匀锈蚀梁的加载试验, 研究了无裂缝、出现裂缝、开裂、开裂后 4 个锈蚀阶段的黏结性能。文献^[27]研究了试件在拔出、推出、推拔 3 种不同加载方式下的黏结锚固性能和失效模式。文献^[28]根据钢筋快速锈蚀试件的黏结破坏试验, 建立了考虑混凝土保护层厚度、混凝土强度、钢筋直径、种类和位置 5 种因素的极限黏结强度与钢筋锈蚀率的本构关系模型。袁迎曙等考虑钢筋平均锈蚀率、保护层厚度和钢筋直径 3 个因素, 建立了锈蚀钢筋与混凝土的黏结应力-滑移关系的退化模型^[20]。同济大学^[29]和浙江大学^[30]提出的锈蚀钢筋与混凝土的黏结本构关系模型都考虑了锚固位置对锈后钢筋混凝土黏结滑移本构关系的影响, 为锈后钢筋混凝土构件的有限元计算提供了依据。

构件的耐久性研究已初步建立起构件的锈损程度同构件承载力和黏结滑移性能之间的关系, 研究成果大多是根据快速锈蚀构件得出的。外加电流的快速锈蚀试验法是一种在短期内获得预定锈蚀程度构件的简单易行的试验方法, 但是已有学者指出通电锈蚀和自然锈蚀下, 钢筋表面的锈蚀发展规律和构件耐久性下降的劣化机理并不相同。因此, 要使目前的研究成果能真正应用于实际工程中, 还必须根据长期暴露试验和实际工程老化构件的检测数据, 对目前已有的模型和公式进一步修正。

3 结构耐久性评估和使用寿命预测

3.1 结构耐久性评估

耐久性指标集的确定和评估方法的选取是结构耐久性评定的关键。耐久性指标是反映结构老化程度的定性或定量指标。文献^[31]将结构耐久性指标集分为恶化程度和恶化速度两套指标体系。文献^[32]提出代表混凝土不均匀程度的超声声速和回弹分维数以及裂缝的分维数可以作为衡量结构老化程度的有效指标。

由于结构耐久性是一个由相互关联、相互制约的众多因素构成的复杂系统, 因此目前多采用层次

分析法、灰色系统理论和模糊系统理论作为结构耐久性评估的理论基础。评定方法有多指标分级加权评定法、基于剩余使用寿命的评定方法和模糊综合评判法等^[7]。

文献^[31]以灰色关联度为准则对结构进行耐久性评定和剩余寿命预测。文献^[33]基于模糊数学, 运用多元隶属函数法进行耐久性等级评定, 并将耐久性等级和混凝土构件剩余寿命联系起来。为了使结构耐久性评估规范化, 美国的 ACI Committee 364 制定了一部适用于工业与民用建筑混凝土结构耐久性评估的规范——《Guide for Evaluation of Concrete Structure Prior to Rehabilitation》。

3.2 使用寿命预测

根据不同的寿命终结标准定义, 结构的使用寿命可以分为保护层老化寿命、构件开裂寿命、钢筋锈蚀寿命和构件可靠度寿命。

保护层老化寿命以碳化深度达到钢筋表面的时间或钢筋表面的氯离子浓度达到临界值的时间作为结构的使用寿命, 它的预测模型是以混凝土碳化深度预测模型和基于 Fick 第二定律的氯离子扩散方程为基础建立的, 如徐力等提出的预应力结构设计使用碳化寿命模型^[34], Maage 等基于 Fick 第二扩散定律提出的既有结构使用寿命预测的实用模型^[8]。

构件开裂寿命是以锈胀导致的顺筋裂缝达到一定宽度的时间作为结构的使用寿命。惠云玲以纵向裂缝宽度达到 0.6 mm 作为承载力终结的标志, 提出钢筋混凝土构件的剩余寿命预测公式^[35]。Bazant^[14]和 Liu 等^[36]以混凝土表面锈胀开裂为极限状态, 分别提出了各自的海洋环境下构件使用寿命的预测模型。

钢筋锈蚀寿命是以钢筋锈蚀面积或质量损失达到一定程度的时间作为结构的使用寿命。日本建筑学会以因钢筋锈蚀引起截面减小, 使钢筋应力达到屈服应力时的时间作为寿命终点。YJB219-89《钢铁工业建(构)筑物可靠性鉴定规程》以钢筋全面锈蚀(钢筋直径小于 10 mm)或锈蚀面积大于 6%(钢筋直径大于 10 mm)作为寿命终结标志提出了剩余寿命的理论预测公式。

可靠度寿命以构件某项功能指标的动态可靠度降低到最低允许水平的时间作为结构的使用寿命。Lif^[37]提出了全寿命周期锈蚀混凝土结构性能评估的结构抗力老化模型, 将强度和可靠性极限状态作为结构性能的评估准则确定锈蚀混凝土结构的寿命周期。Enright 等^[38]采用将恒载和活载均视为随时间变化的时变系统可靠度方法对侵蚀环境中的钢筋混凝土公路桥的可靠度进行使用寿命预测。在进行结构使用寿命的预测时, 需要考虑社会经济发展水平

和人们对风险的承受能力.文献 [39]提出了基于可靠性和经济优化相结合的在役混凝土结构剩余使用寿命预测模型.

结构的耐久性和剩余寿命是在进行结构的维修加固之前最为关注的问题,目前提出的方法虽不少,但其本质仍停留在构件层次,没有能全面合理地反映构件的耐久性对结构耐久性的影响.结构的使用寿命研究已建立了许多的预测模型,这些模型的完善和验证需要大量的工程实测数据,但是目前还没有建立实际结构使用性能数据反馈的有效机制,现场检测方法和仪器还有待进一步改进.

4 结 语

到目前为止,结构耐久性的研究基本上已经完成了基础性的研究工作,正在向更高层次的研究水平迈进.在今后的研究中,笔者认为应加强研究的深度和广度,注重研究成果的实用性,特别对于以下几个问题应重点研究:

a. 加强多因素复合作用下材料耐久性的研究,建立包括多种因素协同作用的材料耐久性预测模型.

b. 目前材料耐久性的预测模型分为理论模型和经验模型两大类,两类模型在建模和应用上各有优点,但也有不可避免的不足.今后的研究应结合两类模型的优点,建立既有充分理论依据,又兼具实用性和适用性的材料耐久性预测模型.

c. 构件的耐久性研究不能以快速锈蚀试验的结果为主要依据,应该加强真实环境下构件的耐久性研究,提高检测水平,从实际结构中获取反应构件耐久性的真实信息,对已有的模型进行修正.

d. 建立材料的物理力学参数和构件的耐久性能随时间发展的数据库,为建立结构耐久性的经时变化模型提供依据.

e. 就目前的研究现状来说,需要进一步加强结构层次的耐久性研究.结构的耐久性评估和剩余寿命是耐久性研究的最终目的,实现这个目标,不仅需要理论上的创新,也需要研究方法上的突破.结构耐久性是一个系统工程问题,它的评估模型还有待进一步研究.

参考文献:

[1] Papadakis V G, Vayenas C G, Fardis M N. Modeling and experimental investigation of concrete carbonation[J]. ACI Material Journal, 1991, 88(4): 363—373.
[2] 牛荻涛, 石玉钊, 雷怡生. 混凝土碳化的概率模型及碳化可靠性分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 1995, 27(2): 252—256.
[3] 牛荻涛, 陈亦奇, 于澍. 混凝土结构的碳化模式与碳化寿命

分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 1995, 27(4): 365—369.
[4] 袁群, 赵国藩. 混凝土碳化深度随机时间序列预报模型[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(3): 344—347.
[5] 金伟良, 张亮, 鄢飞. 函数型神经网络法在混凝土碳化分析中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 1998, 32(5): 519—525.
[6] 张誉, 张伟平, 蒋利学, 等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003. 42—43.
[7] 张誉, 蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑, 1998, 28(1): 16—19.
[8] Maage M, Helland S, Poulsen E. Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment[J]. ACI Materials Journal, 1996, 99(6): 602—608.
[9] Clifton J R. Predicting the service life of concrete[J]. ACI Material Journal, 1993, 96(6): 611—617.
[10] 余洪发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 I——理论模型[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 686—690.
[11] Funahashi M. Predicting corrosion-free service life of a concrete structure in a chloride environment[J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(6): 581—587.
[12] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与防护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998. 30—31.
[13] Bažant Z P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—theory[J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(6): 1137—1153.
[14] Bažant Z P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—application[J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(6): 1155—1166.
[15] 牛荻涛, 王庆霖, 王林科. 锈蚀开裂前混凝土中钢筋锈蚀量的预测模型[J]. 工业建筑, 1996, 26(4): 8—10.
[16] 牛荻涛, 王庆霖, 王林科. 锈蚀开裂后混凝土中钢筋锈蚀量的预测[J]. 工业建筑, 1996, 26(4): 11—13.
[17] 金伟良, 鄢飞, 张亮. 考虑混凝土碳化规律的钢筋锈蚀率预测模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2000, 34(2): 430—434.
[18] 惠云玲. 混凝土结构中钢筋锈蚀程度评估和预测试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 6—9.
[19] 史庆轩, 李小健, 牛荻涛. 钢筋锈蚀前后混凝土偏心受压构件承载力试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1999, 31(3): 218—221.
[20] 袁迎曙, 贾福平, 蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 47—52.
[21] 金伟良, 赵羽习. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(5): 9—11.
[22] 惠云玲, 李荣, 林志伸, 等. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 14—18.
[23] Ting S C, Nowak A S. Effect of reinforcing steel area loss on flexural behavior of reinforced concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(3): 309—314.
[24] 惠卓, 王庆霖. 受损构件承载力的计算机模拟[J]. 西安建筑科技大学学报, 1997, 29(4): 431—434.

(下转第 70 页)

公路管理局联合发布了最终研究报告^[10],介绍了在维吉尼亚预应力混凝土桩试验的4种牺牲阳极保护系统工程费用的估算结果,见表^[10].

表 1 4 种牺牲阳极保护系统工程费用 美元/m ²		
保护系统类型	材料费	安装费
电弧喷铝-锌-钢	29.60	78.40~99.40
锌箔/导电黏结剂	63.51	44.49~65.49
锌网/水泥浆护套	209.75(860 美元/根)	400.25(1640 美元/根)
锌网/压板	195.10(800 美元/根)	402.90(1650 美元/根)

4 结 语

氯化物环境钢筋混凝土结构物在未达到设计使用年限的情况下过早腐蚀破坏造成的经济损失是十分巨大的.氯化物引起钢筋腐蚀是造成钢筋混凝土结构破坏最主要的原因.为有效控制钢筋混凝土的腐蚀,延长其使用寿命,应在设计阶段采取有效的腐蚀预防措施和对已建结构物采取有效的腐蚀控制措施.

20 世纪 80 年代后,发达国家开发研制了多种牺牲阳极保护系统用于氯化物环境钢筋混凝土结构的腐蚀控制.牺牲阳极保护系统具有安装简便,在运行过程中不需要维护管理,保护效果可靠等优点,而且能够用于预应力钢筋混凝土结构.目前,我国牺牲阳极保护技术已被广泛应用于钢结构的防腐蚀,而在钢筋混凝土结构上的应用尚属空白,与国外的差距较大,尽早开展钢筋混凝土牺牲阳极保护技术的研究是十分必要和迫切的.

参考文献:

[1] 梁逢伍.大型钢筋混凝土桩基码头耐久性研究[J].水运工程,2003(12):23—26.

[2] Kessler R. Zinc anode coating protects coastal bridges[R]. FHWA-SA-96-045, Federal Highway Administration, Washington DC, 1996.

[3] 洪定海.混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M].北京:中国铁道出版社,1998.81—142.

[4] Tettamanti M, Rossini A. Cathodic prevention and protection of concrete elements at the sydney opera house[J]. Material Performance, 1997, 36(9):21—25.

[5] Sagues A A, Power R G. Sprayed-zinc sacrificial anodes for reinforced concrete in marine service[J]. Corrosion, 1996, 52(7):508—522.

[6] Daily S F. Galvanic cathodic protection of reinforced and prestressed concrete using a thermally sprayed aluminum coating[J]. Concrete Repair Bulletin, 2003, 16(4):12—15.

[7] 王伟, 季明堂.钢筋混凝土构筑物牺牲阳极保护研究进展[J].科学视野, 2001, 25(5):18—20.

[8] Bennett J E, Shue T J. Galvanic cathodic protection of reinforced concrete bridge members using sacrificial anodes attached by conductive adhesives[R]. FHWA-RD-96-073, Federal Highway

Administration, Washington DC, 1996.

[9] Leng D L. Zinc mesh cathodic protection systems[J]. Material Performance, 2000, 39(8):28—33.

[10] Clemeña G G, Jackson D R. Evaluation of anodes for galvanic cathodic prevention of steel corrosion in prestressed concrete piles in marine environments in virginia[R]. VTRC Report No.00-R3, Virginia Transportation Research Council, 1999.

[11] Page C L, Sergi G. Developments in cathodic protection applied to reinforced concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(1):8—15.

(收稿日期 2004-05-18 编辑 熊水斌)

(上接第 66 页)

[25] 李永和, 葛润修.在役钢筋混凝土结构三维锈蚀层面模型与数值分析[J].中国科学(E 辑), 2002, 32(5):653—661.

[26] Al-Sulaimani G J, Kaleemullah M, Basunbul I A. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete member[J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(2):220—231.

[27] Abrishami H H, Mitchell D. Analysis of bond stress distributions in pullout specimens[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(3):255—261.

[28] 潘振华, 牛荻涛, 王庆霖.锈蚀率与极限粘结强度关系的试验研究[J].工业建筑, 2000, 30(5):10—12.

[29] 张伟平, 张誉.锈胀开裂后钢筋混凝土粘结滑移本构关系研究[J].土木工程学报, 2001, 34(5):40—43.

[30] 赵羽习, 金伟良.钢筋与混凝土粘结本构关系的试验研究[J].建筑结构学报, 2002, 23(1):32—37.

[31] 卢木.基于耐久性评定的钢筋混凝土结构的剩余寿命预测[J].建筑科学, 1999, 15(2):23—28.

[32] 袁群, 赵国藩.老化钢筋混凝土结构的分形性质分析[J].水利学报, 2000(12):21—25.

[33] 赵鹏飞, 王娟明.模糊数学在混凝土构件耐久性评定中的应用初探[J].工业建筑, 1997, 27(5):7—10.

[34] 徐力, 杨小平, 刘荣桂, 等.预应力结构设计使用寿命模型[J].江苏大学学报(自然科学版), 2002, 23(1):71—74.

[35] 惠云玲.混凝土结构钢筋锈蚀耐久性损伤评估及寿命预测方法[J].工业建筑, 1997, 27(6):19—22.

[36] Liu Y P, Weyers R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6):675—681.

[37] Li C Q. Life-cycle modeling of corrosion affected concrete structures: propagation[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(6):753—761.

[38] Enright M P, Frangopol D M. Service-life prediction of deteriorating concrete bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(3):309—317.

[39] 赵尚传, 赵国藩, 贡金鑫.混凝土结构基于可靠度和优化理论剩余寿命分析[J].工业建筑, 2002, 32(4):37—39.

(收稿日期 2004-06-10 编辑 熊水斌)