

汶川地震后 工程结构安全与防灾新进展

主 编 黄兴棣 顾瑞南

副主编 邱洪兴 俞伟根 刘荣桂

江苏大学出版社

汶川地震后 工程结构安全与防灾新进展

主 编 黄兴棣 顾瑞南

副主编 邱洪兴, 俞伟根 刘荣桂

江苏大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

汶川地震后工程结构安全与防灾新进展/黄兴棣,顾
瑞南主编. —镇江:江苏大学出版社,2009.12
ISBN 978-7-81130-123-6

I. 汶… II. ①黄…②顾… III. 土木工程—防灾—工程
结构—学术会议—文集 IV. TU35-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 222778 号

汶川地震后工程结构安全与防灾新进展

主 编/黄兴棣 顾瑞南

责任编辑/徐云峰 许 龙 郭 杰

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编:212003)

电 话/0511-84446464

排 版/镇江文苑制版印刷有限责任公司

印 刷/丹阳市教育印刷厂

经 销/江苏省新华书店

开 本/880 mm×1 230 mm 1/16

印 张/13.5

字 数/420 千字

版 次/2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-81130-123-6

定 价/36.00 元

本书如有印装错误请与本社发行部联系调换

◇序◇

2008年5月12日14时28分,四川汶川发生里氏8.0级强烈地震,造成了大量房屋建筑、桥梁、道路、市政、水利、通讯等土木工程和基础设施严重破坏或损毁,以及严重的人员伤亡和财产损失。我国是一个自然灾害频发的国家,除地震外,洪水、台风、冰雪、雷电等自然灾害时常发生。因此与人民生命和财产息息相关的土木工程如何安全抵御自然灾害,已愈来愈被关注和重视。新中国成立60年来,特别是改革开放以后,随着经济和社会的高速发展,我国土木工程和基础设施建设规模增长迅猛。尽管建设要求和建设标准也不断提高,但是,由于种种原因,土木工程及基础设施因自然灾害给人们带来的生命和财产损失仍然十分巨大。

为贯彻党中央、国务院有关重要指示,江苏省土木建筑学会工程鉴定与加固专业委员会、全国建筑物鉴定与加固标准技术委员会江苏分会将于近期主办一次全省土木工程结构安全与防灾学术交流会暨江苏省第三届工程鉴定与加固学术交流会,并由江苏大学协助承办。为配合这次会议的召开,他们还专门编辑出版了《汶川地震后工程结构安全与防灾新进展》一书。

本书收集了近几年特别是汶川地震以后,土木工程界相继开展的一些工程结构安全与防灾领域的最新研究成果和工程应用实例,包括:既有土木工程和基础设施安全及综合防灾能力的鉴定与评估技术、加固改造提升技术以及相应的新材料、新工艺;也包括一些对在建和新建工程在抵御自然灾害方面的最新研究成果和设计、施工建议等。

本书可供从事土木工程安全与防灾领域科研人员、工程技术人员和管理人员以及大中专院校师生参考之用,并从中获益。

我,作为江苏省土木建筑学会理事长,十分感谢本书的各位作者,在汶川地震后短短一年多时间内,对土木工程结构安全与防灾领域所作出的新贡献。

中国工程院院士

吴志清

2009年12月5日

目 录

► 结构耐久与安全

FRP-混凝土界面在不同断裂模式下黏结性能的理论研究/安峰辰 曹双寅 潘金龙 魏红雳	1
冻融条件下预应力构件氯离子扩散理论与耐久性研究/陈 妤 刘荣桂 汤 灿 张益多	5
海洋环境下既有混凝土结构耐久性寿命评定方法研究/汤 灿 刘荣桂 陈 妤	10
氯盐侵蚀条件下“双掺”高性能混凝土抗冻融性能试验研究/易永胜 李 雁 吕恒林 朱晓文	16
煤矿副井钢筋混凝土井架安全性检测与评定/许更龙 丁士杰 许春华 冯守志	20
室温固化耐高温型结构胶粘剂的研制/张 勇 万 霆 杨苏杭	25
遗传算法在工程结构可靠度计算中的应用/李志华 姜 堰	28
预应力技术在托梁拔柱工程中的应用/杜吉坤 张群梅	32
预制拼装塔机基础抗倾覆稳定系数 k_{stb} 的合理确定/从卫民 岳晨曦	38
预制拼装塔机基础在地下室顶板上的应用/从卫民 岳晨曦	41
中小学校舍安全性及抗震鉴定中关键问题的探讨/周淑春 马 英 吕恒林 温海燕 王 浩	45
中小学砖混结构校舍安全性及抗震鉴定/姬 倩 付中英 吕恒林 宋亚林 韩 剑	51
不同屈服点钢筋混凝土结构研究/韩 军 刘 平	57

► 结构评估与加固

改造加固技术设计施工一体化利于提高企业的科技含量/万 霆 顾大圣 王晓健	62
钢板-砖砌体组合抗震加固砖混/混杂结构/敬登虎 曹双寅	65
高效预应力拉杆在砖混结构抗震整体性加固中的应用/李延和 杨 阳 李树林 杨 斌	71
基于摩擦-胶接机理的混合锚固技术的有限元分析/李厚海 艾 军 潘建伍 钱 江	75
既有建筑中增设牛腿的几种作法/李兰英 刘跃华	79
石砌挡土墙工程倒塌事故的加固处理/张 亮 李 庆 李延和	84
公司综合楼火灾后结构损伤检测与鉴定/徐志纯 刘光祥 敬登虎	88
跨线桥梁整体顶升移位工程关键技术设计研究/杨苏杭 唐 理 韩文星 王 枫	92
煤矿装车煤仓破损劣化机理及修复加固技术/刘 矿 吕恒林 吴元周	98
水泥厂钢板仓钢料斗加固的设计与施工/潘宇翔 曹双寅	103
南京近代砖木结构加固与改造设计/张伟斌 禹永哲	107
浅谈汶川地震后民房修复加固技术/周碧澄 张 幼 张志强 王亚军	112

嵌入式构造柱在砖混结构抗震加固中的应用/李延和 朱 斌 盛 超 王 冰	116
嵌入式圈梁在砖混结构抗震加固中的应用/李延和 周 佳 从卫民	121
轻型钢结构加固实例/刘跃华	125
四川某六层砖混结构震后加固设计/徐海华 夏长春	129
一种新型砖混结构加固修复系统的介绍/张伟斌 张 明	132
预应力 CFRP 布加固 RC 梁固有频率的试验/陆耀清 艾 军 徐春林 钱 江	138
预应力 FRP 布在结构加固中的应用/李文品 周海涛	143
运行变电站打桩加固沉降基础的应用研究/杨 敏 宋明志	147
织物增强混凝土加固 RC 梁斜截面抗剪研究综述/肖保辉 荀 勇	152
浅析混凝土结构加固改造设计的几个问题/李丽平 刘彩霞 张伟斌	156
关于断裂力学在加固工程中的理解和应用/李家青	161

► 结构减灾与防灾

CFRP 索斜拉试验桥的静动力分析/周士金 邓程远 李十全 陈 蓓	165
CFRP 应用于大跨缆索支承桥梁的研究现状和展望/陈 蓓 周士金	172
船舶撞击桥梁理论计算模型的初探/徐春林 艾 军 杨 杰	178
从汶川地震浅析我国桥梁抗震设计规范的现状/蔡东升	181
高速公路滑坡破坏分析/朱 斌 张 亮 吴 戈	185
南京六合金融大厦结构设计与研究/赵 伟 米金星	189
体外预应力加固钢网架结构的力学性能有限元分析/杨晓燕 曹双寅 沈 炜	194
汶川地震后的思考/夏传琦	198
砖砌体结构建筑大空间改造方法的讨论/吴 婷 曹双寅 敬登虎	201
汶川地震砖房震害的启示/高本立 肖 飞	205

FRP-混凝土界面在不同断裂模式下黏结性能的理论研究

安峰辰, 曹双寅, 潘金龙, 魏红雳

(东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:从断裂力学的角度探讨了 FRP-混凝土界面在不同加载模式下的断裂行为特征。首先介绍了 FRP 加固混凝土梁的剥离极限破坏中 FRP-混凝土界面处的三种不同断裂模式的概念以及特征, 然后在该双材料界面为线弹性假设的基础上, 采用 FRP 黏结混凝土棱柱的单剪试件作为理论模型, 对张开型断裂模式(即 Mode I)和滑移型断裂模式(即 Mode II)荷载的作用下的 FRP-混凝土界面的断裂能进行了理论推导。在上述二者的基础上, 采用叠加原理, 进而求得在 FRP-混凝土界面在混合模式(即 Mixed Mode)作用下的断裂能。本文关于 FRP-混凝土界面双材料的理论研究将为日后对 FRP 加固混凝土梁在不同模式的界面剥离这一极限条件下的极限承载力的计算提供坚实的理论支撑。

关键词:断裂力学线弹性; 张开型断裂模式; 滑移型断裂模式; 混合型断裂模式

The theoretical study regarding the bonding performance on the FRP-concrete interface

An Fengchen, Cao Shuangyin, Pan Jinlong, Wei Hongli

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: This study is to attain the characterization of fracture behavior of the FRP-concrete interface under different loading modes in the perspective of fracture mechanics. The concept and characterization of three fracture modes (i. e. shear mode, opening mode, mixed mode) of the FRP-concrete interface are introduced in the first chapter of this study when the retrofitted beams fails due to debonding in the FRP-concrete interface. And then the theoretical study regarding fracture energy of the FRP-concrete loaded under shear and opening modes is articulated on the hypothesis that the materials involved in the interface, such as adhesive and adhesion, perform as linear elastic materials in the whole process of interface fracture, on basis of which the fracture energy is obtained through combination of the fracture energy applying the superposition principle. These theoretical results will serve as a solid basis for calculating ultimate bearing capability of the concrete beams, which is controlled by the debonding of the FRP-concrete interface.

Key words: fracture mechanics linear elastic; opening mode; sliding mode; mixed mode

1 研究概述

国内外的大量专家学者对 FRP 加固梁的加载试验表明, 绝大多数的 FRP 加固梁会在 FRP-混凝土界面发生过早的剥离破坏, 而非 FRP、钢筋或混凝土材料的强度破坏。根据 FRP 加固钢筋混凝土梁中引起 FRP-混凝土界面剥离裂缝的位置不同, 其剥离破坏形式可分为以下几种: 片端剥离(张开型破坏)、纯弯段剥离(滑移型破坏)、弯剪段剥离(混合型破坏)(如图 1 所示)。

(1) 片端剥离破坏: 裂缝亦起始于梁的末端位置, 该裂缝两侧均有 FRP, 该裂缝一般为梁的最后一条裂缝, 在该模式的破坏中, 因裂缝两侧竖向相对位移所造成的断裂占主导地位, 该 FRP-混凝土界面的剥离与断裂力学中的张开型断裂相似; 故本文将其定义为断裂力学中的张开型模式(即 Mode I)。

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2007567)

作者简介: 安峰辰(1984—), 男, 研究生, 主要从事纤维复合材料方面的研究。

曹双寅(1962—), 男, 教授, 博导, 主要从事结构加固、改造与鉴定的研究工作。

(2) 跨中弯曲裂缝所导致的剥离:产生于跨中加载点附近弯曲主裂缝处,随着外荷载的增大,梁的挠度增大,该弯曲主裂缝宽度也随之增大。因 FRP 与其附近的混凝土变形不协调,FRP-混凝土界面发生了剥离。值得注意的是,该裂缝两侧只有水平相对位移,几乎没有竖直相对位移,与断裂力学中的滑移型断裂相似;故本文将其定义为断裂力学中滑移型模式(即 Mode II)。

(3) 跨中弯剪段的剥离:剥离开始于跨中加载点附近弯剪斜裂缝处,向裂缝两侧发展。因在该模式的剥离中,由裂缝水平位移的张开导致 FRP-混凝土界面的剥离和由裂缝两侧的错动导致 FRP-混凝土界面剥离的贡献均处于不可忽略的地位,故本文将其定义为断裂力学中混合模式(即 Mixed Mode)。

FRP-混凝土界面的三种断裂模式均为脆性剥离破坏且承载力低,张开型模式和混合型模式这两种模式的剥离破坏尤为严重;究其原因,在于裂缝附近应力集中的缘故(剪应力或垂直应力或二者的组合作用)。

Sharif et al^[1], Garden and Holloway^[2], Khalifa et al^[3,4], Smith and Teng^[6]等人已经通过大量的试验研究证明,采取诸如螺栓锚固、L 形板、U 形箍等对 FRP 末端锚固的措施,确实能够有效地防止 FRP-混凝土界面的末端剥离(即本文所述的 FRP-混凝土界面的张开型破坏)。但是,随着 FRP 锚固端的加强,FRP 加固梁的剥离的最薄弱位置会由梁的末端转移到加固梁的跨中的弯剪区段,导致 FRP-混凝土界面混合型的剥离破坏^[6]。对于那些加固前带有弯剪裂缝工作的梁,这种问题尤为严重。

2 理论研究

在研究 FRP-混凝土界面的理论研究中,采用拉压单剪试验模型(见图 2、图 3、图 4)作为理论研究对象,故在此假设混凝土的宽为 B ,高为 H ;FRP 的黏结宽度为 b ,厚度为 t 。以下推导过程中,拟采用如下假定:(1) 混凝土、胶层、FRP 片材均为匀质线弹性材料;(2) 胶层和 FRP 的厚度在黏结范围内均匀不变;(3) FRP 的宽度在黏结范围内不变。

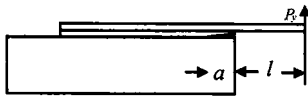


图 2 张开型模式加载示意图



图 3 滑移型模式加载示意图

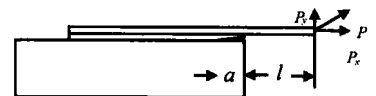


图 4 混合型模式加载示意图

FRP-混凝土界面的剥离是个复杂现象,因随着预制裂纹在黏结界面或其附近位置的开裂,各种各样的能量扩散机制均可能产生。但本文仅考虑黏结界面弹性应变能在断裂过程中的释放;即认为在剥离过程中,总弹性应变能的释放量(新截面消耗能) D 均转化为形成新裂纹所需的能量^[7],可用式(1)表示:

$$D = U_{e,1} - U_{e,2} \quad (1)$$

根据断裂能的相关定义得断裂能与断裂能释放率关系如下^[7]:

$$G = \frac{dD}{dA} \quad (2)$$

2.1 Mode I 的断裂能推导

当该双材料界面的裂缝长度由 a 增长到 $a + da$,则该双材料界面剥离前后的弹性应变能 $U_{e,1}$ 和 $U_{e,2}$ ^[8],分别表达为

$$U_{e,1} = \int_0^{l+a} b \left[\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{P^2 x^2}{I^2} \cdot y^2 dy \right] dx \quad \left(-\frac{t}{2} \leq y \leq \frac{t}{2} \right) \quad (3)$$

因本课题在加载过程中,采用位移控制加载方法。因而在 FRP 剥离前后,该 FRP 因荷载产生的挠度是不变的。故根据材料力学中关于悬臂梁挠度与集中力的相关关系^[8]得

$$P' = \frac{P(l+a)^3}{(l+a+da)^3} \quad (4)$$

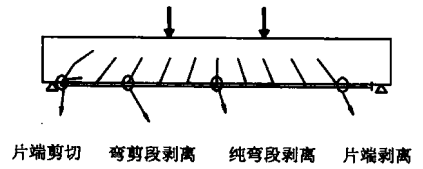


图 1 FRP 加固混凝土梁的剥离破坏形态

$$U_{e,2} = \int_0^{l+a+da} b \left[\int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{P'^2 x^2}{I^2} \cdot y^2 dy \right] dx \quad \left(-\frac{t}{2} \leq y \leq \frac{t}{2} \right) \quad (5)$$

当裂缝从 a 扩展到 $a+da$, 则该双材料界面弹性应变能的减少量, 即形成新裂缝表面所需的消耗能 D 为

$$\begin{aligned} D &= U_{e,1} - U_{e,2} \\ &= b \cdot \frac{P^2 t^3 (l+a)^3}{24EI^2} \left[1 - \left(\frac{l+a}{l+a+da} \right)^3 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)代入式(2)中, 在忽略无穷小量 da 对结果的影响的基础上, 作进行相应的等量变换, 即可得到形成单位面积的新裂缝所需的能量 G 为

$$G = \frac{P^2 t^3 (l+a)^2}{8EI^2} \quad (7)$$

式中, b 表示 FRP 的黏结宽度; $\bar{E} = \frac{E}{1-\nu_n^2}$ 表示 FRP 材料平面应变的弹模; P 表示垂直于 FRP-混凝土界面, 并使该双材料界面发生张开型破坏的初始剥离力; l 为 FRP 的自由长度; a 为 FRP-混凝土界面的预裂裂缝; I 为 FRP 材料的惯性矩(这里忽略了 FRP 自由端和预裂裂缝处因胶水厚度不同造成的抗弯刚度的差异); t 为 FRP 的厚度; y 为 FRP 材料界面上的某一点与界面中轴线的距离。

2.2 Mode II 断裂能的推导

当该双材料界面间裂缝长度由 a 扩展到 $a+da$, 则该双材料界面剥离前后的弹性应变能 $U_{e,1}$ 和 $U_{e,2}$, 分别表达为

$$U_{e,1} = (l+a) \cdot b \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{P^2}{A_p^2} dy + ab \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{P^2}{A_c^2} dy \quad \left(-\frac{t}{2} \leq y \leq \frac{t}{2} \right) \quad (8)$$

因笔者在加载 FRP 粘贴混凝土构件的过程中, 如前所述, 采用位移控制的加载方法; 因而在 FRP 剥离前后, 该 FRP 因荷载产生的拉伸量不变的。故根据材料力学中^[8]关于杆件挠度 δ 与集中力 P 的相关关系 $\delta = \frac{Pl}{EA}$ (其中, P 为杆件的轴向荷载, l 为杆件的长度, E 为杆件的弹性模量, A 为杆件的截面面积), 进而得到

$$P' = \frac{P(l+a)}{(l+a+da)} \quad (9)$$

$$U_{e,2} = (l+a+da) \cdot b \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{P'^2}{A_p^2} dy + ab \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{P^2}{A_c^2} dy \quad \left(-\frac{t}{2} \leq y \leq \frac{t}{2} \right) \quad (10)$$

当裂缝的长度从 a 增长到 $a+da$, 该双材料截面的弹性应变能的减少量, 即形成新裂缝所需的表面消耗能 D , 可以表达为

$$\begin{aligned} D &= U_{e,1} - U_{e,2} \\ &= \frac{bt \cdot (l+a)}{2} \cdot \frac{1}{E} \frac{P^2}{A_p^2} \left[1 - \left(\frac{l+a}{l+a+da} \right)^2 \right] + \frac{BH \cdot a}{2} \cdot \frac{1}{E} \frac{P^2}{A_c^2} \left[1 - \left(\frac{a}{a+da} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)代入式(2)中, 在忽略微量 da 对结果的影响的基础上作相应的简化, 则有如下关系式

$$G = \frac{1}{b} \cdot \frac{P^2}{E_p A_p} + \frac{1}{b} \cdot \frac{P^2}{E_c A_c} \quad (12)$$

在上述的公式推导中, 作者忽略了试验中由于 MTS 加载的偏心而在 FRP 和混凝土体内造成的弯矩所形成的应变能。

2.3 Mixed Mode 断裂能的推导

由于上述关于滑移型和张开型断裂模式的推导过程中, 采取线弹性假设; 所以模型在混合型荷载作用下的力学响应, 应是上述二者的线性组合。那么, 在混合型断裂模式加载下(如图 4 所示), $G_{angular}$ 可用下式表示:

$$G_{angular} = \frac{1}{l+a} \cdot \frac{(P \cos \theta)^2 t}{E_p A_p} + \frac{1}{a} \cdot \frac{(P \cos \theta)^2 H}{E_c A_c} + \frac{(P \sin \theta)^2 t^3 (l+a)^2}{8EI^2} \quad (13)$$

式中, θ 为 FRP-混凝土界面的荷载与水平线间的夹角。将相关的 FRP-混凝土界面的剥离试验中的初始值 P_{ini} , 代入式(13)中, 即可确定该双材料界面在混合型荷载作用下的断裂能。

3 结 语

本文关于 FRP-混凝土界面的双材料的理论研究, 从断裂力学的角度为 FRP 加固混凝土梁在不同模式界面剥离这一极限条件下承载力的计算, 提供了坚实的理论依据。

参考文献

- [1] Sharif A, Al-Sulaimani G J, Basunbul I A, Baluch M H, and Ghaleb B N. Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates[J]. *ACI Struct J*, 1994, 91(2): 160 - 168.
- [2] Garden H N, and Hollaway L C. An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fiber composite plates used to strengthen reinforced concrete beams[J]. *Compos Struct*, 1998, 42(2): 175 - 188.
- [3] Khalifa A, Gold W J, Nanni A, and Aziz A M I. Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members[J]. *J Compos Constr*, 1998, 2(4), 195 - 202.
- [4] Khalifa A, and Nanni A. Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites[J]. *Cem Concr Compos*, 2000, 22, 165 - 174.
- [5] Smith S T, and Teng J G. Interfacial stresses in plated beams[J]. *Eng Struct*, 2001, 23(7), 857 - 871.
- [6] Ching Au, and Oral Büyüköztürk. Peel and shear fracture characterization of debonding in FRP plated concrete affected by moisture[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006; 35 - 47.
- [7] 陆毅中. 工程断裂力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- [8] 孙训方, 方晓淑, 关来泰. 材料力学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.

冻融条件下预应力构件氯离子扩散理论与耐久性研究

陈 妤, 刘荣桂, 汤 灿, 张益多

(江苏大学 土木工程系, 江苏 镇江 212013)

摘 要:针对季节性冰冻地区的结构,以预应力混凝土氯离子扩散模型为基础,综合考虑冻融损伤、氯离子扩散系数的时间依赖性等因素,建立冻融条件下预应力混凝土结构氯离子扩散模型。以混凝土保护层厚度、氯离子扩散速度以及表面氯离子浓度为参数,运用可靠度理论,建立了冻融循环下预应力混凝土结构耐久性可靠度分析模型。分析结构表明:冻融循环是引起混凝土破坏的动力,应力水平加速了混凝土的损伤与劣化过程,且应力水平越高混凝土损伤程度越大;水化龄期的选取对提高氯盐侵蚀下的结构耐久性起非常重要的作用;同时从耐久性分析中可知,混凝土保护层厚度对氯离子侵蚀下的 PC 结构耐久性影响最大,表面氯离子浓度及氯离子扩散速度次之。

关键词:预应力混凝土;冻融循环;扩散;数值模拟;耐久性

Research on theory and durability of chloride diffusion for prestressed concrete structure in freeze-thaw damage

Chen Yu, Liu Ronggui, Tang Can, Zhang Yiduo

(Department of Civil Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Aimed at chloride diffusion equation for prestressed structure, which considered freeze-thaw damage and time dependence of diffusion coefficients, the model of chloride ion diffusion for prestressed concrete structure in freeze-thaw and deicing salt damage was deduced. By taking thickness of concrete cover, chloride diffusion velocity and surface chloride concentration as main parameters, an analytical model on durability of marine prestressed concrete is presented by use of reliability theory. It was discovered that freeze-thaw cycles is the driving force to concrete damage and the injury and deterioration of concrete were accelerated by stress level. The higher stress level is, the more serious damage is. It was found that age was essential to durability of chloride-resistant. Analytical results show that the cover thickness has the largest influence on durability of marine PC structure, and the other two parameters have the second influence.

Key words: prestressed concrete; freeze-thaw cycles; diffusion; numerical simulation; durability

寒冷地区的混凝土路面、桥梁等结构,在冬季为了保障交通通畅,通常会撒除冰盐,导致结构过早破坏,即所谓“盐害”,这在国内外都比较常见。在寒冷的海洋环境中和使用除冰盐条件下的混凝土结构还存在冻融现象,从而使这些结构同时面临盐冻破坏和氯离子渗透诱发的钢筋锈蚀破坏的危险。冻融循环作用既会使混凝土结构表面剥蚀,同时也会在混凝土内部产生微裂纹损伤。Gérard 等^[1]的试验结果表明, W/B 为 0.45 的非引气混凝土经 31, 61, 95 次冻融循环后,混凝土的相对氯离子扩散系数分别增大了约 1.5, 3.5, 7.5 倍。这表明对于季节性冰冻地区的混凝土结构冻融损伤作用会加速其氯离子扩散速度。但是余红发^[2]通过盐冻和常温下盐溶液浸泡的对比试验研究了冻融作用对混凝土氯离子扩散性能的影响,认为普通混凝土、高强混凝土、纤维混凝土、纤维增强高性能混凝土氯离子扩散的冻融循环劣化系数小于 1,即冻融循环能够抑制氯离子的扩散,这一结论与 Gérard 的相矛盾。究其原因,混凝土的氯离子扩

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878098)

作者简介:陈 妤(1982—)女,博士研究生,主要从事预应力混凝土结构耐久性方面研究。

刘荣桂(1957—)男,博士,教授,博导,主要从事预应力混凝土结构方面研究。

散速度受温度影响明显,温度越低,氯离子扩散速率越慢^[3]。余红发的研究结论可以反映常年冰冻地区混凝土氯离子扩散特性,不适用于季节性冰冻地区的混凝土结构。

目前,在进行寒冷地区预应力混凝土抗氯离子渗透性能设计时,大都没有考虑冻融损伤的加速作用。主要这方面的研究工作还不够深入。因此,有必要进一步研究冻融损伤作用对预应力混凝土氯离子扩散性能的影响规律。为此,笔者根据试验数据,建立冻融条件下预应力混凝土结构氯离子扩散模型,研究了冻融至不同损伤程度时应力水平和水化龄期与渗透深度之间的关系。并对该环境下的结构耐久性进行了分析研究。

1 冻融循环下预应力混凝土结构损伤原理

1.1 冻融损伤机理

由于 1 m^3 的水冻结后体积变成 1.09 m^3 ,因此水泥浆中的毛细孔的水受冻膨胀,当膨胀后体积大于所容许的空间,则空隙中多余的水为膨胀压力排出。这一毛细孔水压的大小,主要取决于水分饱和程度、水泥浆的渗透度和最近气孔的距离、冷却速度以及保持在冰冻温度的时间多少;当压力超过任何一点水泥浆的抗拉强度时,就会出现局部开裂。在冻融循环期间,融化时进入空隙的水将再为冰冻,因而混凝土被连续地损坏。

1.2 冻融循环下预应力结构损伤机理

预应力混凝土结构一直处于高应力状态下工作,当受到冻融循环作用时其破坏形态与普通混凝土有很大不同,表现出突然的脆性破坏。应力水平越大,破坏力越强,相应的试件相对动弹性模量下降越快,混凝土能承受的冻融循环次数越少。应力水平加速了混凝土的损伤与劣化过程。当外部弯曲应力和冻融循环同时作用下,应力对混凝土抗冻融循环次数的影响可以用式(1)表示:

$$N_{\text{SL}}/N_0 = \beta \quad (1)$$

其中, N_{SL} 为应力作用下混凝土的抗冻融循环次数; N_0 为应力为 0 时混凝土的抗冻融循环次数; β 为比例常数,应力水平为 0, 0.1, 0.25 和 0.5 时的值分别为 1.00, 0.32, 0.08 和 0.04^[4]。

冻融条件下预应力混凝土结构的损伤与失效可以看做是预加弯曲应力、水胶比和冻融循环三重因素作用下的损伤复合效应。东南大学孙伟院士等人认为^[4]三因素作用下混凝土的相对动弹性模量受外部应力的影响最大,随着应力比的增大,相对动弹性模量急剧下降,重量损失增加。

2 冻融条件下预应力混凝土结构氯离子扩散模型的建立

从前面的分析可知,冻融次数、应力水平和龄期系数都是影响氯盐-冻融破坏环境下预应力混凝土耐久性的三个主要因素。根据已建立的预应力混凝土氯离子侵蚀下的扩散方程^[5]为基础,考虑冻融循环的影响,建立冻融条件下预应力混凝土结构氯离子扩散方程:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\beta \cdot k \cdot D_{\text{Cl},1} \cdot t^{-m}}{1 + 1/w_e} \cdot \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} \quad (2)$$

其中, $D_{\text{Cl},1}$ 是影响氯盐侵蚀环境下预应力混凝土耐久性的一个重要因素^[6],主要受到混凝土水化龄期的影响。目前,公认的水化龄期依赖性为

$$D_{\text{Cl},t} = D_{\text{Cl},t_0} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (3)$$

对于 t_0 时刻的扩散系数 D_{Cl,t_0} ,采用美国混凝土学会 365(使用寿命预测)委员会建议的各种类型混凝土 28 天龄期的 Cl^- 扩散系数为^[7]

$$D_{\text{Cl},28} = 10^{(-12.06 + 2.4W/B)} (\text{m}^2/\text{s}) \quad (4)$$

β 为比例常数,按照文献^[4]取值; w_e 为可蒸发水的体积比。

$$k = \left[1 + A_{\text{cl}(t)} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{cl}(t)}}{f_{\text{cl}(t)}} \right) \right]^2 \cdot \frac{T}{T_0} \times \exp \left[q \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \cdot \left(\frac{E'}{E_0} \right)^{-1} \cdot \left[1 + \left(\frac{1 - RH}{1 - RH_c} \right)^4 \right]^{-1} \quad (5)$$

E_0, E' 为冻融前后混凝土动弹性模量,当 W/B 为 0.4, 0.5, 0.6 时^[8],相对动弹性模量 E'/E_0 分别取 $e^{-0.05N}$, $e^{-0.14N}$, $e^{-0.3N}$,其余参数见文献^[9]。

由此得出冻融条件下预应力混凝土结构氯离子扩散模型为

$$C(x, y, t) = C_0 + (C_s - C_0) \times \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{\beta k D_{cl,1} t^{1-m}}} \right) \right] \quad (6)$$

式中 $\operatorname{erf}(z)$ 为误差函数, 其表达式为

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (7)$$

3 多种环境指标下关于扩散模型的讨论

针对除冰盐环境, C_s 主要取决于具体使用除冰盐的频度、除冰盐的类别以及用量, 一般可以假定为某一定值。对除冰盐环境下的城市桥梁进行分析, 桥面氯离子浓度 C_s 最大值在正常情况下可达到 0.85% (立方混凝土质量百分比)^[10]。

3.1 不同应力水平和冻融次数下对模型的影响

根据试验, 取除冰盐情况下预应力混凝土表面 Cl^- 浓度 C_s 为 0.156 9% (立方混凝土质量百分比), 水胶比为 0.4。采用 MATLAB 数值分析软件中的 PDE 工具箱对该情况下的 Cl^- 扩散行为进行有限元模拟。图 2 示为两种不同应力水平的预应力混凝土在不同冻融循环次数下不同深度处的氯离子浓度分布。

根据图 1, 可以看出冻融循环对预应力混凝土结构耐久性的影响极大, 冻融循环损伤是引起混凝土破坏的动力, 经过 50 次冻融循环的氯离子扩散速度是未经冻融的十几倍。同时, 应力水平对混凝土 Cl^- 扩散分布的影响也比较明显。在相同冻融次数下应力水平为 0.5 的氯离子扩散速度要比应力水平为 0.3 快得多, 达到几倍的关系。

3.2 龄期系数的选取

将上述模拟结果与假定氯离子扩散系数 D_{cl} 恒定 (此时的 Cl^- 扩散系数取水化龄期 5 年时的扩散系数 $D_{cl,1}$) 时情况进行对比分析, 结果如图 2 所示。图中分别选取 0.6 和 0.3 两个不同的龄期系数, 其龄期分别为 5 年、10 年、15 年和 20 年。

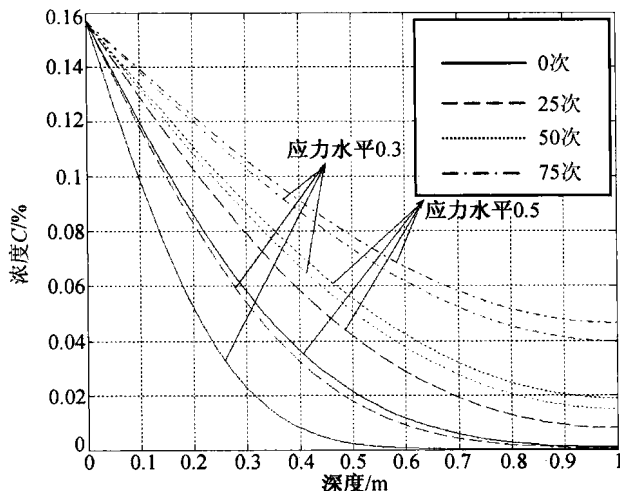


图 1 不同应力水平和冻融次数下预应力结构 Cl^- 扩散分布横截面

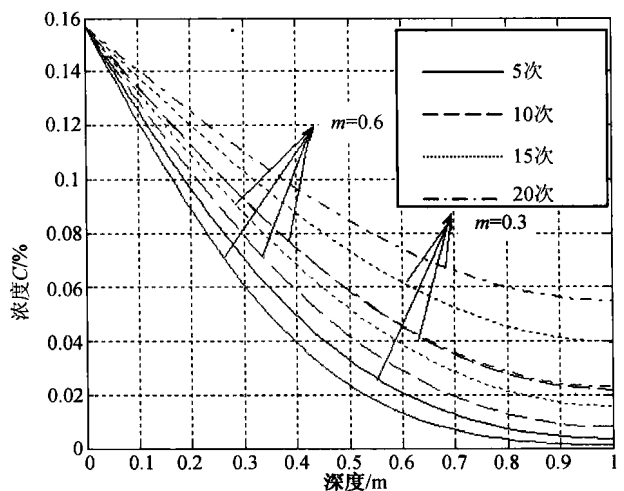


图 2 除冰盐环境下考虑不同龄期系数的模拟结果对比分析

从图 2 可以看出, 随着混凝土使用年限的增长, 水化龄期因素对 Cl^- 扩散浓度分布的影响将逐渐加大, 有时甚至是几倍的关系。因此, 可以认为混凝土水化龄期对冻融和氯盐侵蚀共同作用下 (如冻融和除冰盐情况) 的侵蚀有着十分重要的影响, 在分析时对龄期系数 m 值的选取是至关重要的。

4 冻融与氯盐侵蚀共同作用下结构耐久性分析

4.1 冻融和氯盐作用下的极限状态方程及失效概率模型

当预应力筋表面处的自由氯离子浓度达到临界浓度时,预应力筋就有可能发生腐蚀^[11]。由于预应力结构从主筋腐蚀到结构破坏时间间隔较短,且容易发生应力腐蚀断裂的脆性破坏,所以冻融和氯盐共同作用下,预应力结构的耐久性极限状态方程表示为

$$Z(t) = C_{crit} - C_0 - \alpha_c \cdot C_f(x, t) = 0 \quad (8)$$

式中, C_{crit} 表示混凝土自由氯离子临界浓度(%); α_c 表示氯离子扩散计算模式不定性参数,取 1.0。

则结构失效概率 P_f 为

$$P_f = P\{C_f(x, t) > C_{crit} - C_0\} = 1 - P\{C_f(x, t) < C_{crit} - C_0\} = 1 - \Phi[\beta(t)] \quad (9)$$

式中, $\beta(t)$ 为冻融与氯盐共同作用下结构耐久性时变可靠指标,可按式(10)计算:

$$\beta(t) = \frac{\mu_{C_{crit}} - C_0 - \mu_{C_f(x, t)}}{\sqrt{\sigma_{C_{crit}}^2 + \sigma_{C_f(x, t)}^2}} \quad (10)$$

4.2 多种因素在冻融和氯盐作用下对耐久性的影响

把混凝土保护层厚度 d , 表面氯离子浓度 C 以及氯离子扩散系数 $D_{cl,1}$ 视为分析变量,来考察预应力混凝土结构在冻融和氯盐共同作用下耐久性可靠度指标与时间的关系,如图 3,图 4,图 5 所示。

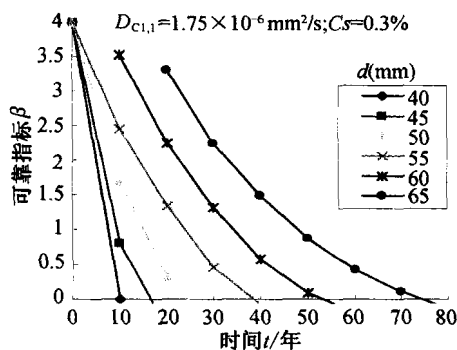


图3 保护层厚度对预应力结构可靠指标影响

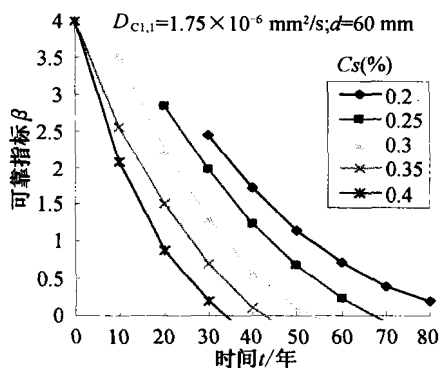


图4 表面氯离子浓度对预应力结构可靠指标影响

5 结 论

(1) 当考虑到混凝土氯离子扩散系数以及表面氯离子浓度两者随时间变化(时变)这一因素时,只能通过有限元数值解的思想,其中 MATLAB 软件的 PDE 工具箱进行有限元中的“扩散”模块便是数值分析方法之一。

(2) 冻融循环对预应力混凝土结构的影响极大,是引起混凝土破坏的动力;应力水平加速了混凝土的损伤与劣化过程,且应力水平越高混凝土损伤程度越大;同时水化龄期对盐冻侵蚀具有重要的影响,因此在分析时对龄期系数的选取是至关重要的。

(3) 混凝土保护层厚度是影响海工环境预应力结构的主要因素,表面氯离子浓度以及氯离子扩散速度次之。所以设计合理的保护层厚度是提高海工预应力结构耐久性的最有效措施。同时,也不能忽视影响保护层质量的水灰比、混凝土强度、养护条件等一系列因素。

参考文献

- [1] Grard B, Marchand J. Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials Part I: Influence of continuous cracks on the steady-state regime[J]. *Cem and Concr Res*, 2000, 30(1): 37-43.

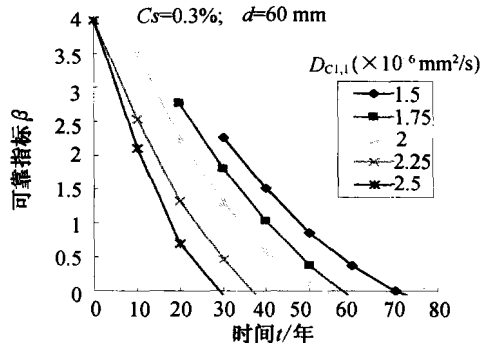


图5 氯离子扩散系数对预应力结构可靠指标影响

- [2] 陈浩宇,余红发,李美丹,等. 高强高性能混凝土在沈阳除冰盐环境下的氯离子扩散行为[J]. 混凝土,2006(1):23-26.
- [3] 幕 儒. 冻融循环与外部弯曲应力、盐溶液复合作用下混凝土的耐久性与寿命预测[D]. 南京:东南大学,2000.
- [4] Paulo J M Monteiro, Kimberly E Kurtis. Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003(33):987-993.
- [5] 刘荣桂,陈 好,颜庭成. 氯盐环境条件下预应力混凝土氯离子侵蚀模型研究[J]. 混凝土,2006(9):1-4.
- [6] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:科学出版社,2003:58-62.
- [7] Ayman Ababneh, Farid Benbondjema and Xi Yunping. Chloride penetration in nonsaturated concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003(15):183-191.
- [8] Mohammed T U, Hamada H. Relationship between free chloride and total chloride contents in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003(33):1487-1490.
- [9] Erik P Nielsena, Mette R, Geiker B. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003(33):133-138.
- [10] Narayanan R S, Brooker O. *How to Design Concrete Structures Using Eurocode 2: Introduction to Eurocodes*[M]. Camberley: The Concrete Centre, 2005.
- [11] Boulfiza M. Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 2003, 100(1):597-610.

海洋环境下既有混凝土结构耐久性寿命评定方法研究

汤 灿, 刘荣桂, 陈 好

(江苏大学 土木工程系, 江苏 镇江 212013)

摘 要:通过海洋环境下混凝土结构中钢筋锈蚀的发生和发展,分析了结构性能的衰退过程,将混凝土表面出现可接受最大外观损伤作为海洋环境下普通混凝土结构构件的耐久性极限状态。根据海洋环境下结构耐久性寿命评估模型,分析了影响海洋环境下结构耐久性寿命评估中主要随机参数的因素,指出寿命评估模型中表面氯离子浓度、临界氯离子浓度、钢筋处氯离子浓度、氯离子扩散系数等参数应优先通过实际工程现场检测数据推算得到。考虑寿命评估模型中的主要参数可得信息的不完整性或参数本身的模糊性,将分布参数描述为模糊变量,建议一种基于模糊随机概率可靠度理论的模型来预测与评估结构的耐久寿命。

关键词:混凝土结构;海洋环境;耐久性;寿命评定;模糊随机可靠度

Durability service life assessment of concrete structures in marine environment

Tang Can, Liu Ronggui, Chen Yu

(Department of Civil Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The degenerative processes of structure performances were analyzed according to the occurrence and development of steel bars corrosion of concrete structures under marine environment. Appearing the most acceptable appearance of injury in concrete surface was to be assessed as the durability limit state. The models of structure durability service life assessment were summarized; and the influencing factors of major random parameters of the models were analyzed. Field investigation dates were used to calculate the durability parameters(chloride concentration of concrete surface, chloride concentration at steel-concrete interface, chloride diffusion coefficient). Taking the uncompleted information or indistinct parameters of the service life assessment models into account, distributed parameters were described as fuzzy variable. A model based on fuzzy probability and reliability theory was suggested to predict and evaluate the durability service life of structures.

Key words: reinforced concrete structure; marine environment; durability; life assessment; fuzzy random reliability

海洋环境下的结构,如海港、码头、大坝等在使用过程中容易遭受氯离子侵蚀,从而引起钢筋锈蚀,在没有达到使用寿命前已严重老化,带来了很大的经济损失。

海洋环境下钢筋混凝土结构的耐久性寿命评估已成为国内外学者关注的课题^[1-4]。吴瑾等^[5]通过分析混凝土表面浓度、扩散系数、混凝土保护层厚度等参数的随机性,建立混凝土中氯离子浓度分布的随机模型,评估了氯离子环境下钢筋混凝土结构耐久性寿命。Nguyen等^[6]进行了不同掺合物的混凝土中氯离子渗透性能的试验研究,将氯离子的渗透性用于混凝土结构的服役寿命预测。

现有耐久性寿命评估模型中的主要参数大多由经验或借鉴已有统计资料得出,由于统计资料的不完善与不完备性,这些已给定的参数并非四海皆准,无法很好应用于特定环境下待估结构构件的耐久性寿命评估。因此有必要研究一种由待估结构构件现场检测数据推算耐久性寿命评估模型中主要参数的寿命评估方法。

由于结构实际遭受的破坏与其所处环境密切相关,是环境条件与多重因素(包括偶然因素)共同作用的结果,存在大量随机性和模糊性。随机性可以概率论为基础的概率可靠性方法解决;模糊性则

要应用模糊数学理论。因此有必要研究一种基于模糊随机可靠度理论的耐久性极限状态模分析方法。

文章由海洋环境下结构性能的衰退过程,得出耐久性寿命模型,分析模型中影响耐久性寿命评估的随机参数,最后给出耐久性极限状态模糊随机可靠度的分析方法。

1 结构性能的衰退过程

海洋环境下,氯离子极强的穿透力和去钝化作用使结构中钢筋产生锈蚀,锈蚀一旦发生其体积将逐渐膨胀,随之保护层开裂、剥落甚至使结构失效。结构使用耐久性寿命的定义是与时间相关,在结构使用过程中,损伤不断增加,性能不断退化。因此,钢筋锈蚀是海工结构耐久性差和提前破坏的主要原因,是决定海工结构服役寿命的关键。对于氯离子侵蚀环境下的混凝土构件,分析钢筋锈蚀的发生和发展过程,其性能退化过程可以由图 1 表示。

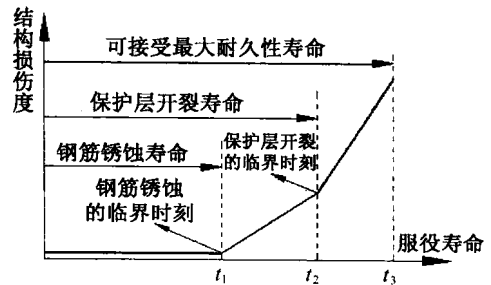


图 1 结构性能衰退过程

根据结构所处环境及使用要求,可以选择不同的劣化过程作为极限状态。目前国内外钢筋锈蚀耐久性极限状态(大多基于钢筋锈蚀状况来确定)有以下几种:

(1) 钢筋锈蚀寿命 t_1 ——对下一目标使用年限内不允许钢筋锈蚀或严格不允许保护层锈胀开裂的构件,可将钢筋开始锈蚀作为耐久性极限状态。如预应力构件等。

(2) 保护层锈胀开裂寿命 t_2 ——对于下一目标使用年限内一般不允许出现锈胀裂缝的构件,可将保护层锈胀开裂作为耐久性极限状态。如地下室结构等。

(3) 出现可接受最大耐久性寿命 t_3 ——对于下一目标使用年限内允许出现锈胀裂缝或局部破损的构件,目前没有统一的寿命终结标准。如文献[5]将混凝土保护层纵向裂缝宽度达 1 mm 时作为结构寿命终结的标志。

2 耐久性寿命模型

2.1 钢筋锈蚀寿命模型

氯离子在混凝土中扩散积聚,当达到氯离子临界值时,钢筋开始锈蚀。影响钢筋开始锈蚀时间的因素有:原始氯离子含量、氯离子在混凝土中的扩散速度、临界氯离子浓度等。

不考虑氯离子扩散系数的时间依赖性时,钢筋开始锈蚀时间 t_1 按式(1)计算:

$$t_1 = (c/K)^2 \times 10^{-6} \quad (1)$$

其中,

$$K = 2 \sqrt{D} \operatorname{erf}^{-1}(1 - M_{cr}/M_s) \quad (2)$$

式中, t_1 为钢筋开始锈蚀时间; c 为混凝土保护层厚度; K 为氯盐侵蚀系数; D 为氯离子扩散系数; erf 为误差函数; M_s 混凝土表面氯离子浓度; M_{cr} 为钢筋锈蚀临界氯离子浓度。

需考虑氯离子扩散系数时间依赖性时,钢筋开始锈蚀时间 t_1 按下式计算:

$$t_1 = \left\{ \frac{c^2 \times 10^{-6}}{4D_0 [\operatorname{erf}^{-1}(1 - M_{cr}/M_s)]^2} \right\}^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3)$$

式中, D_0 为检测时刻氯离子扩散系数; α 为氯离子扩散系数时间依赖性系数,宜用每隔 2~3 实测数据推算的 D 值确定,不能实测时按下式确定: $\alpha = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70)$,式中: $\%FA$ 为粉煤灰占胶凝材料百分比; $\%SG$ 为矿渣占胶凝材料百分比。

根据混凝土中氯离子分布检测结果推算氯离子扩散系数:

$$D_0 = \frac{x^2 \times 10^{-6}}{4t_0 [\operatorname{erf}^{-1}(1 - M(x, t_0)/M_s)]^2} \quad (4)$$

式中, D_0 为氯离子扩散系数; x 为氯离子扩散深度; t_0 为结构建成至检测时的时间; $M(x, t_0)$ 为检测时 x 深度处氯离子浓度; M_s 为实测混凝土表面氯离子浓度。