

DOI: 10.11779/CJGE2016S2002

城市地下结构污染腐蚀耐久性的若干问题

刘松玉^{1, 2}, 李洪江^{1, 2}, 童立元^{1, 2}, 宋文峰³

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096;

3. 山东正元建设工程有限责任公司, 山东 潍坊 250100)

摘要: 随着城市化进程的加快, 城市地下结构污染腐蚀耐久性成为工程人员关注的焦点问题。根据大量文献调研, 系统总结了国内外地下结构污染腐蚀耐久性研究历史、现状, 同时对城市地下结构混凝土、内部钢筋的污染腐蚀机理、试验方法以及耐久性影响因素等重要问题进行了论述。比较和梳理了各种污染介质扩散模型及地下结构腐蚀劣化典型室内试验结果, 并对 SO_4^{2-} 和 Cl^- 双侵蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳耦合作用下的地下结构耐久性寿命预测理论进行了探讨。列举了两类城市地下工程, 继而分析了两类典型城市地下结构的污染腐蚀耐久性响应特性。最后, 在已有研究成果基础上分析了城市地下结构污染腐蚀耐久性研究方面存在的问题和不足, 并指出和强调今后的研究思路和发展方向, 以期更好地推进城市地下工程污染腐蚀耐久性的研究。

关键词: 城市地下结构; 耐久性; 地铁; 污染腐蚀; 寿命预测

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0007-11

作者简介: 刘松玉(1963-), 男, 江苏靖江人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面研究。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

Some problems on polluted erosive durability of urban underground structures

LIU Song-yu^{1, 2}, LI Hong-jiang^{1, 2}, TONG Li-yuan^{1, 2}, SONG Wen-feng³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground

Engineering and Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Shandong Zhengyuan Construction Engineering

Co., Ltd., Weifang 250100, China)

Abstract: With the speeding up of urbanization, the study on polluted erosive durability of urban underground structures has become the focus of the engineering researchers. Based on a lot of literatures, the worldwide research history and situations of polluted erosive durability of urban underground structures are summarized, and the corrosion mechanism, test methods and influence factors for concrete and reinforcement are discussed. The conclusions of the existing pollution diffusion models as well as some typical laboratory test results about degradation of underground structures are compared, while the life prediction theories of structural durability under coupling action from double corrosion of SO_4^{2-} and Cl^- , stress corrosion and corrosion fatigue and the polluted erosive durability characteristics of two kinds of typical urban underground projects are analyzed. Finally, the problems and insufficiently, research thinking and development direction are put forward after summarizing the existing research results so as to promote intensive study on polluted erosive durability of urban underground structures.

Key words: urban underground structure; durability; subway; polluted erosion; life prediction

0 引言

随着人口的急剧增加和城市化进程的加快, 国内外对地下空间的需求空前加剧。在中国, 城市地下基础设施建设已经迎来高速发展的时期。城市地下空间开发的服役环境复杂, 已有地下结构又往往遭受各类污染介质的侵蚀, 因此在满足地下空间建设安全性的前提下, 城市地下结构的污染腐蚀耐久性问题成为土木工程领域的研究热点。

城市地下污染腐蚀来源较其它工程建设更加多样, 如酸碱厂、石油化纤厂、煤气厂、污水厂、燃料库、印染、造纸、制药等企业, 包括某些金属矿、冶炼厂、铸钢厂、垃圾填埋场等场地的地基土都会受到

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330641); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ01B02)

收稿日期: 2016-05-19

*通讯作者 (E-mail: lihongjiang55@126.com)

污染。处于及邻近上述工业区的城市地下设施建设,被迫遭受污染介质运移和扩散影响,其结构耐久性 & 长期服役寿命问题尤为重要。早期城市地下结构的耐久性问题为人们所忽视,未受到各国学者的关注,针对性的研究较少。本文旨在对城地结构污染腐蚀耐久性研究中的若干重要问题及其研究思路、成果进行系统介绍,提出一些看法以促进国内城市地下结构耐久性相关科学技术的发展。

1 城市地下结构污染腐蚀耐久性研究现状

1991年东京地下空间国际学术会议通过的《东京宣言》中指出:21世纪是人类地下空间开发利用的世纪。

城市地下结构主要涉及与城市建设密切相关的地下空间拓展及由其带来的系列设施营建,包括城市地下综合体、地下管线、贮藏室或填埋场、地铁工程、基坑工程等。埋置于地表以下的结构物服役过程,是一个长期的结构-土(水)相互作用过程,土体污染会使材料性能衰减劣化,最终诱发地下结构功能失效、服役寿命大幅缩短等病害。对于土体污染问题,西欧各国最先关注,并在土体污染机理及污染防治方面取得了一系列成果^[1-2]。国内20世纪60年代,化工部南京勘察公司率先开展了污染地基的勘察和评价工作^[3]。李相然等^[4]以济南市污染土为研究对象,指出地基土污染腐蚀前后存在较大的物理力学性质差异。刘汉龙等^[5]通过室内制备酸碱污染土,研究了污染物浓度对土体有机物含量、土粒比重和液塑限的影响规律。路世豹^[6]依据室内对比模拟试验,阐释了酸性污染土的腐蚀过程。刘全义^[7]认为土的结构性和其粒度构成是影响地基土污染程度的决定因素。刘松玉等^[8-9]对污染土性质、评价方法、处理工艺及污染地基结构物耐久性进行了系统性研究。

对埋地构件污染腐蚀耐久性的研究,中国一直落后于欧美国家^[10]。ASTM(American Society for Testing and Materials)1974年出版的地下金属材料污染腐蚀防控丛书,标志着美国学者开始重视地下结构的腐蚀问题^[11]。随后各国学者陆续开展了相应的研究和规范编制工作。国内第一本有关污染土腐蚀性著作—《全国土壤腐蚀试验网站资料选编》^[12]于1987年出版,虽然时间上不比美国落后多少,但该《选编》的研究局限性很大,缺少对腐蚀机理的探讨。后期,中国建筑科学研究院建材所在混凝土污染腐蚀方面,特别是围绕污染地基中的钢筋混凝土腐蚀特性和力学性能做了重要贡献,掀起了一番研究热潮。近年来各类城市

地下结构污染腐蚀耐久性问题越来越突出,Zhou等^[13]开展了地下工程水泥砂浆的污染腐蚀特性试验;徐洪^[10]模拟了砂浆锚固体内部腐蚀介质的传递规律,建立了以Fick定律为基础的砂浆内部腐蚀介质扩散模型;Tao^[14]和Delatte等^[15]分别对地铁工程钢筋混凝土污染腐蚀因素及腐蚀规律进行研究,总结了其可靠性影响因素;杜应吉^[16]引入模糊多属性决策理论对多因素下地铁工程混凝土耐久寿命进行了评价。当下,地下空间开发热潮给科研工作者创造了新的天地,也提出了巨大的挑战。

2 城市地下结构混凝土污染腐蚀

2.1 混凝土污染腐蚀破坏机理

混凝土的污染腐蚀耐久性取决于污染介质在混凝土孔隙中的物理扩散和化学作用。混凝土作为结构材料,内部存在大量微裂缝,这些微裂缝为污染介质的进入提供了天然通道。已有的研究表明,混凝土的抗污染腐蚀性能取决于自身微观结构,尤其是材料孔隙率,当有外界荷载施加时,混凝土的离子扩散系数会增大,侵蚀速率加快,抗腐蚀性能降低。文献^[17]将混凝土结构破坏概括为物理、化学和力学三者之间的耦合作用,并用图1进行表示。

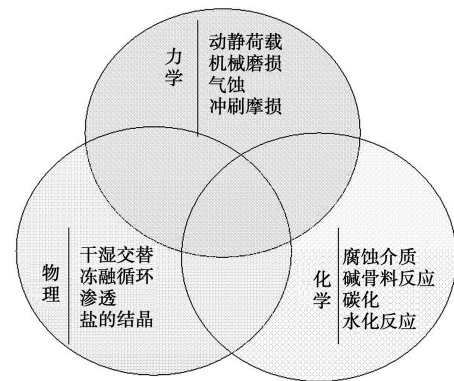


图1 混凝土结构破坏分类

Fig. 1 Damage classification of concrete structures

对于硫酸盐侵蚀,参考已有的试验结果和文献,其侵蚀过程如图2所示,具体分为5步。

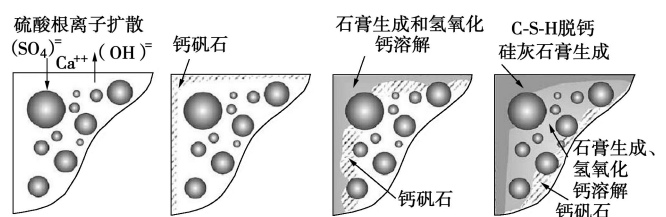


图2 硫酸盐侵蚀过程^[18]

Fig. 2 Schematic representation of sequence of sulfate attack

表 1 几类典型的介质扩散模型
Table 1 Typical diffusion models for media

文献来源	扩散介质浓度方程	模型说明	文献来源	扩散介质浓度方程	模型说明
基础模型 ^[19]	$C(x,t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$	一维线性扩散, 扩散系数恒定	Takeshi 模型 ^[22]	$\frac{C}{C_f} = 1 - \frac{\cos(\sqrt{\xi}\chi)}{\cos(\sqrt{\xi})} e^{-\xi y} - \frac{16\xi}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n w_0 \{ (2n+1)\pi\chi/2 \}}{(2n+1) \{ 4\xi - (2n-1)^2\pi^2 \}} \times e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 y}{4\xi}}$	考虑介质扩散长度为有限值, 且表面介质浓度在扩散过程中非恒定
Mangat 模型 ^[20]	$C = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{D_0 t_0^\alpha}{1-\alpha} t^{1-\alpha}}} \right) \right]$	扩散系数呈指数函数变化, 考虑水灰比影响			
孙伟模型 ^[21]	$C = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{H \cdot D \cdot t_0^n}{(1+R)(1-n)} t^{1-n}}} \right) \right]$	综合考虑介质结合能力、扩散系数改变、结构缺陷	特殊截面模型 ^[23]	$C = C_0 \left\{ \sqrt{\frac{4Dt}{\pi}} \left[\frac{1}{R} \exp\left(-\frac{R^2}{4Dt}\right) - \frac{1}{r} \exp\left(\frac{-r^2}{4Dt}\right) \right] + \operatorname{erf}\left(\frac{R-r}{4Dt}\right) \right\}$	不局限于矩形截面, 适用于轴对称构件

表 2 混凝土耐久性影响因素及腐蚀特性变化

Table 2 Influencing factors for concrete durability and change of corrosion characteristics

自变量	因变量 (耐久性响应变化)								
	离子渗透性	电阻率	抗压强度	腐蚀速率		腐蚀电位		钢筋表面离子浓度	
				(标准态)	(侵蚀态)	(标准态)	(侵蚀态)	(标准态)	(侵蚀态)
水灰比	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	××	↑
气含率	××	××	↓	××	↓	↑	↑	××	××
粗骨料	↓	↑	↑	↓	↓	××	↑	××	××
细骨料	↓	↑	↑	↓	↓	××	××	××	××
矿物掺合料	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	××	◎◎	◎◎	◎◎
水泥类型	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎

注: ↓(↑)因变量随自变量增加而减小(增大); ×× (◎◎) 因变量随自变量增加受影响不明显 (影响显著); 标准环境: 温度 21℃, 空气相对湿度 75%, Cl⁻ 浓度 1.8 kg/m³; 侵蚀环境: 温度 38℃, 空气相对湿度 98%, Cl⁻ 浓度 6 kg/m³。

- (1) 硫酸根离子扩散和氢氧化钙侵出。
- (2) 钙矾石生成。
- (3) 石膏生成和氢氧化钙溶解。
- (4) C-S-H 脱钙。
- (5) 硅灰石膏生成。

2.2 介质扩散与耐久因素

现今混凝土内部介质扩散模型大都以 Fick 第二扩散定律为基础, 在考虑多种机制影响情况下, 对扩散模型进行推广与修正。本文列举了几类典型的污染介质扩散模型, 如表 1 所示。对于钢筋混凝土结构, 混凝土对内部钢筋起着包裹和免受污染物侵蚀的作用, 混凝土一旦遭受破坏, 整个工程结构使用寿命将大幅缩短。混凝土的性能通常受限于工作环境的化学和力学影响, 包括污染离子扩散、碳化、机械裂缝影响等等。裂缝的出现为水、氧气和污染介质的快速扩散提供通道, 加速钢筋混凝土的腐蚀速率。在不考虑机械裂缝情况下, 表 2 列出了影响混凝土耐久性的几类因素, 并在试验研究基础上归纳了水灰比、气含率、

粗骨料、细骨料、矿物掺合料、水泥类型对混凝土抗腐蚀影响规律。

2.3 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 双侵蚀下混凝土污染腐蚀特征

对于城市地下结构, 氯盐和硫酸盐侵蚀是最常见的污染盐类侵蚀。文献调研显示, 有关混凝土在单一盐类侵蚀下的耐久性研究较多, 理论相对完备, 而多种侵蚀因素共同作用下的耐久性问题研究不足。特别是多侵蚀耦合下的离子扩散规律、混凝土渗透性能变化、侵蚀劣化性状、微观结构特征等问题有待深入开展。

陈晓斌等^[24]曾针对广州某城市地下结构受 SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 双侵蚀影响环境特点, 开展过双侵蚀作用下的混凝土污染腐蚀试验研究。试验采用表 3 的混凝土配合比, 浓度 3.5% NaCl+5%Na₂SO₄ (体积比 1:1) 的侵蚀溶液, 采用喷淋和完全浸泡两种方式进行侵蚀环境的模拟 (图 3)。侵蚀时间为 60, 90, 120, 150 d, 喷淋试件每天喷淋 2 次, 每次喷淋 5 mL。

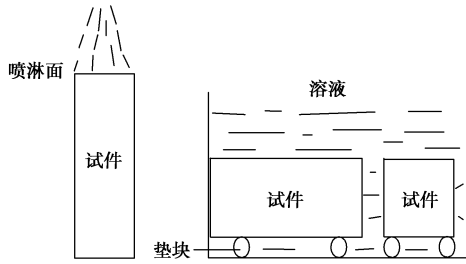


图3 试件喷淋和浸泡示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spray and soak

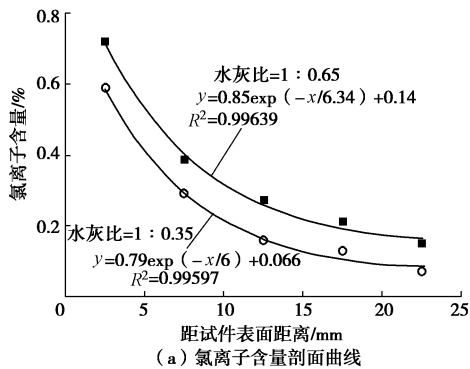
表3 试验用混凝土配合比

Table 3 Mixed proportions of concrete

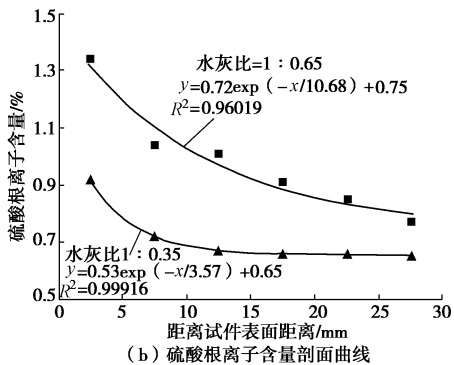
编号	C	F _A	W	S	G	减水剂/%
A1	1	0	0.35	1.61	2.20	0.8
A3	1	0	0.65	1.61	2.20	0.0
A4	0.8	0.2	0.35	1.39	2.59	1.4

注: C 为水泥用量比例, F_A 为粉煤灰用量比例, W 为用水量比例, S 为砂用量比例, G 为碎石用量比例。

图4为绘制的120 d双侵蚀因素下离子含量剖面曲线, 试验结果表明: 120 d双侵蚀下, Cl⁻离子含量百分数随距试件表面距离的增加而降低, 其衰减规律与单一Cl⁻离子侵蚀规律相似。不同之处在于, SO₄²⁻离子的存在降低了Cl⁻离子的扩散量, 其降低程度受水灰比的影响显著(图4(a)); 与之相似, SO₄²⁻离子也随剖面深度呈衰减趋势, 水灰比越大, SO₄²⁻离子整体侵入量越大(图4(b))。



(a) 氯离子含量剖面曲线



(b) 硫酸根离子含量剖面曲线

图4 120 d双侵蚀因素下离子含量剖面曲线

Fig. 4 Profile curves of ion content under double erosion of 120 d

微观测试表明, SO₄²⁻和Cl⁻双侵蚀下混凝土有较大的孔洞及劣化现象(图5), 内部发现了导致结构劣化的 Friede 盐、钙矾石(Aft)和硫酸钠结晶物。进一步采用 EDS 试验, 分析指出: 腐蚀产物主要为 Ca, Si, Na, Cl 和 S 等元素, Ca 和 Si 源于混凝土本身的 CaCO₃ 和 SiO₂, Na, S 和 Cl 则源于 3.5%NaCl 和 5% Na₂SO₄ 的腐蚀溶液, 表明 SO₄²⁻和 Cl⁻已侵入到了混凝土内部(图6)。

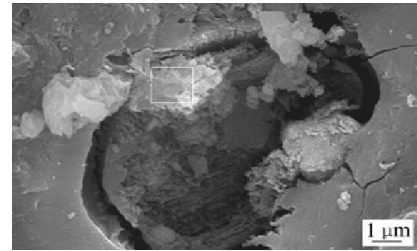


图5 污染腐蚀混凝土微观结构特征

Fig. 5 Microstructural properties of polluted erosive specimens

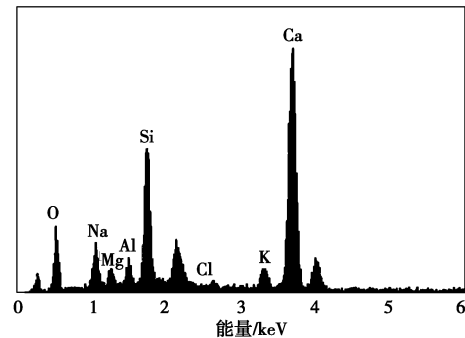


图6 污染腐蚀产物 EDS 分析结果

Fig. 6 EDS analysis results of polluted erosive concrete specimens

3 城市地下结构内部钢筋污染腐蚀特性

3.1 钢筋污染腐蚀机制

刘西拉等^[25]、Hausmann 等^[26]、Hussain 等^[27]对钢筋的污染腐蚀进行过深入研究, 提出钢筋污染腐蚀的物理模型, 发现引起钢筋腐蚀的[Cl⁻]/[OH⁻]值约为0.60, 且[Cl⁻]/[OH⁻]临界值随 pH 减小而增大。Biondini F^[28]提出污染物扩散的细胞自动机法, 引入破坏指数因子分析应力-腐蚀耦合作用下钢筋混凝土的力学衰减规律。

已有研究指出, 氯离子侵蚀是埋地钢筋污染腐蚀的最主要因素, 氯离子可以穿透混凝土保护层。氯离子的扩散存在临界阈值, 临界阈值标志着钢筋表面的钝化膜开始消失, 钢筋开始锈蚀。文献[29]采用 Mazars 损伤模型和 Fick 扩散定律研究了氯离子侵蚀下的钢筋混凝土耐久性问题, 图7为给出的钢筋混凝土构件结构抗力随侵蚀时间的变化曲线, 可以看出, 不同水灰比下构件的抗力衰退规律大致一样, 氯离子污染腐蚀会大幅度降低钢筋混凝土结构的正常使用寿命。

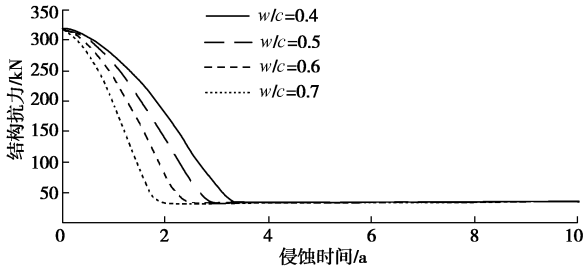


图 7 结构抗力衰减曲线

Fig. 7 Decay curves of structural resistance

3.2 钢筋污染腐蚀寿命预测模型

钢筋污染腐蚀与构件的可靠度密切相关, 对于城地结构, 以腐蚀率 ρ 描述钢筋腐蚀程度^[30]:

$$\rho = M_{tb} / M_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, M_{tb} 为 t 时刻单位长度钢筋质量损失(g); M_0 为单位长度钢筋质量 (g), $M_0 = \pi R^2 \times 7.8 \times 10^3$ (R 为钢筋半径)。

根据法拉第定律, ($t, t+dt$)钢筋质量损失为^[30]

$$dw_t = \frac{M}{nF} I_t dt \quad (2)$$

式中, dw_t 为 dt 时间内钢筋质量腐蚀损失 (g), M 为铁的原子量 (55.8 g/mol), n 为铁离子电荷, 腐蚀下为+3 价铁, 故 $n=3$, F 为法拉第常数, $F=96500$ 库伦/克当量, I_t 为 t 时刻的腐蚀电流, 可以写成, $I_t = i_t A_t$ 。

对于预应力钢筋的污染腐蚀问题, 其由于自身应力的存在, 在发生质量腐蚀损失时, 同时伴随蠕变损伤的出现。毋玲等^[31]在传统 Lemaitre-Chaboche 损伤模型基础上, 引入应力腐蚀损伤累积概念, 建立预应力筋的应力腐蚀损伤模型:

$$\frac{dD}{dt} = \begin{cases} \gamma \frac{[\sigma^e(\sigma, D) - \sigma_{th}]^\alpha}{(1-D)^\beta} & (\sigma^e > \sigma_{th}) \\ 0 & (\sigma^e \leq \sigma_{th}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, D 为材料的损伤度, α, β, γ 为非负的材料与环境响应参数, σ_{th} 为应力腐蚀门槛值, 由试验获取, $\sigma^e = \sigma / (1-D)$, 根据应变等效原理计算。

文献[32]在计算含裂纹钢筋腐蚀疲劳特性时, 考虑金属裂尖腐蚀溶解, 依据 Lai 和 Weiss 的腐蚀-钝化-损伤模型, 对钢筋裂纹腐蚀疲劳寿命进行了初步预测。文献[33]在已有裂纹钢筋屈服变形基础上, 建立了含随机裂纹损伤的仿 Mises 屈服准则, 损伤有效屈服强度 \tilde{f}_y 与孔隙率 ϕ 的关系为

$$\tilde{f}_y = f_{y0} [(1-\phi)(1-2.86\phi)/(1+6.25\phi/9)]^{0.5} \quad (4)$$

式中, f_{y0} 为未有裂纹扩展时的钢筋屈服强度。

4 力学-环境耦合作用城市地下结构耐久性分析

4.1 应力腐蚀耦合作用

城市地下结构在服役过程中, 其应力来源主要有外加荷载应力、温度应力、腐蚀内应力 3 点。

试验研究表明, 应力腐蚀环境下的材料特征具有明显的临界现象, 文献[34]引入临界应力强度因子 K_{ISCC} 对地下结构物断裂时间、腐蚀特征及寿命预测进行研究。当前, 有关地下结构应力腐蚀 SCC 寿命预测的难点有两个: ①较难定量认识裂纹萌生期的物理-力学-化学机理; ②难以获得符合现场 SCC 实际规律的裂纹扩展速率数据。对于在特定介质中的材料来说, 其应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt 是应力强度因子 K_I 的函数, 即 $da/dt=f(K_I)$, 由此得到应力腐蚀裂纹扩展曲线。Andresen 等^[34]给出了经典的 SCC 裂纹扩展时间关系式:

$$t = t_{init} + t_{CPR} \quad (5)$$

式中, t_{init} 为裂纹萌生时间, t_{CPR} 为裂纹扩至断裂时间。

Andresen 模型将应力腐蚀裂纹扩展分为裂纹萌生和裂纹扩展至断裂两部分, 形式简单, 物理概念清晰。表 4 恒载(CL)、慢应变速率(IGSCC)两种材料裂尖应变速率

Table 4 Strain rates of crack tip for steels

材料	304 SS	A533B(LAS)
CL	$6 \times 10^{-14} K^4$	$4.8 \times 10^{-13} K^4$
IGSCC	$5 \varepsilon_{app}$	$10 \varepsilon_{app}$

注: K 为应力强度因子, ε_{app} 为外加应变速率 (s^{-1})。

对于应力腐蚀耦合下的裂纹扩展速率, 须综合考虑裸露金属溶解、滑移及再钝化过程对裂纹扩展速率的影响。Ford 和 Andresen 根据滑移-溶解机理提出 SCC 滑移-溶解 (S-D) 寿命预测模型^[35], 分别给出恒载荷 (CL)、慢应变速率 (IGSCC) 下的裂尖应变速率参数表达, 见表 4。牛林等^[35]给出了裂纹扩展速率 V 的一种解析表达方程:

$$V = \frac{M}{ZF\rho} \cdot \frac{\dot{\varepsilon}}{NnB\varphi} \cdot \frac{4+6E}{0.03-E} \{1 - \exp[-NmB\varphi(0.03-E)/\dot{\varepsilon}]\} \quad (6)$$

式中, 参数意义见文献[35]。

文献[37]引入损伤参数对预应力筋应力腐蚀进行损伤预测, 考虑 3 种损伤影响因素, 导出以下模型:

$$D = f_1(\text{material})f_2(\text{enviroment})f_3(\text{stresstate}) \quad (7)$$

式中, f_1 为表征材料敏感度对损伤参数的影响, f_2 为表征氧浓度、温度、流体传导率对损伤的影响, f_3 为表征预应力筋张拉应力对损伤的影响。

需要指出的是, 各类模型中必须区别分析埋地钢筋腐蚀损伤的特殊性, 即地下结构的某些部位由于氧气供给不足, 可能会发生厌氧腐蚀或者缺氧腐蚀, 以上钢筋腐蚀损伤预测模型须做出相应的修正分析。

4.2 腐蚀疲劳耦合作用

城市地下结构的腐蚀疲劳是另一类重要的耐久

性问题。污染会加剧城地结构的疲劳损伤, 疲劳荷载又会加速腐蚀损伤进行, 二者存在显著促进效应^[38]。

在结构腐蚀疲劳耦合研究方面, 孙伟^[39]研究了工程结构受环境多损伤因素耦合的叠加及交互作用, 讨论了预测结构腐蚀疲劳的方法。胡超^[40]以残余应变为损伤变量, 建立了构件在污染腐蚀环境下的疲劳损伤累积方程。Sánchez 等^[41]采用了界面单元法模拟混凝土构件腐蚀疲劳特性。Miner^[42]基于 Palmgren 理论提出了著名的线性疲劳累积损伤理论, 同时给出了 Palmgren-Miner 公式。

陈拴发^[17]开发了构件腐蚀疲劳加载装置(见图8), 研究了高性能混凝土在腐蚀疲劳环境下的弯拉强度和抗Cl⁻渗透性。试验采用Na₂SO₄腐蚀溶液及三分点疲劳荷载加载方式, 设置了标准养护环境、腐蚀浸泡与腐蚀疲劳环境3种对比试验。

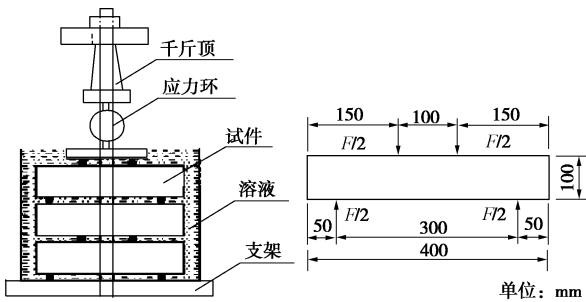


图8 腐蚀疲劳加载示意图

Fig. 8 Schematic diagram of loading of corrosion fatigue

研究结果表明: 腐蚀疲劳试件抗拉强度的衰减幅度明显大于腐蚀浸泡试件、标准养护试件, 强度损失率接近浸泡试件的2倍。渗透性对比试验方面, 腐蚀疲劳试件的扩散系数损失率最大, 扩散系数损失率达279.9%。从腐蚀程度看, 腐蚀疲劳试件>腐蚀试件>标准养护试件, 文中指出污染腐蚀与疲劳荷载共同效应是混凝土劣化的根本原因。

总结国内外的大量研究资料, 目前城市地下结构污染腐蚀和疲劳耦合作用的研究主要集中在以下几个方面: ①城市地下结构的污染场响应及疲劳耦合分析; ②埋地钢筋与混凝土(砂浆)在腐蚀疲劳耦合下的黏结特性; ③腐蚀疲劳下城市地下结构的整体承载能力; ④埋地钢筋混凝土结构腐蚀疲劳损伤与安全可靠性; ⑤埋地钢筋混凝土结构腐蚀疲劳寿命预测研究。

5 两类典型城市地下工程建设污染腐蚀耐久性问题

5.1 地下结构支护锚杆耐久性能研究

地下结构锚杆使用过程中, 如何延缓锚杆的破坏、

增长它的使用寿命是研究锚杆技术的重要课题。因锚杆耐久性不足而诱发的城市工程问题很多: 美国世贸大厦地下锚杆的腐蚀断裂^[43], 北京车站基坑支护锚杆的脆断^[44], 酒仙桥污水处理厂附近高边坡锚索应力的衰退^[45], 美国某边坡锚索的断裂^[46]等都源于地下水的污染腐蚀性。

肖玲等^[47]曾对服役于某城市地下巷道长达10 a的锚杆进行过腐蚀调研, 并对污染物来源、锚杆腐蚀形态及承载力变化情况进行研究。

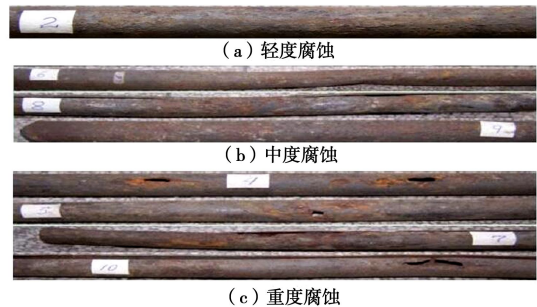


图9 不同腐蚀程度下的锚杆外观

Fig. 9 Anchor appearance under different degrees of corrosion

如图9所示, 埋地锚杆外表面腐蚀以坑蚀为主, 内表面腐蚀不够明显。研究亦指出, 锚杆外表面的坑蚀和穿孔对锚杆杆体力学性能的影响很大, 锚杆延伸率损失较极限承载力损失大(图10), 污染腐蚀改变了埋地锚杆的塑性特征。

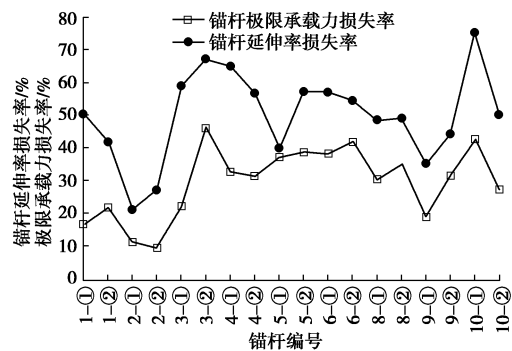


图10 杆体极限承载力损失率与延伸率损失率关系^[47]

Fig. 10 Loss rates of ultimate bearing capacity and elongation

文献[48]以Na₂SO₄溶液作为腐蚀溶液, 研究SO₄²⁻腐蚀与梯级荷载作用下的埋地锚杆承载力衰退情况。试验SO₄²⁻浓度共分5个等级, 分别为0.3% (300 kN), 0.9% (600 kN), 2.7% (900 kN), 8.1% (1200 kN)和24.3% (1500 kN)。图11所示, 不同荷载作用下, 锚杆极限承载力随腐蚀时间的增加均出现明显的降低现象。由于临界腐蚀浓度的差异, 各级荷载下的曲线存在重叠和交叉现象, 荷载高者腐蚀液浓度也高, 超过临界浓度后腐蚀速率又开始降低。

文献[49]通过室内加速腐蚀试验, 研究污染腐蚀后砂浆锚固体的锚固性能, 得到了锚杆界面剪切刚度、黏结特性随腐蚀时间的变化关系。研究表明: 锚杆-砂浆界面剪切刚度随腐蚀时间的增加而减小, 砂浆-基体界面间的剪切刚度受影响相对较弱。图 12, 随着腐蚀时间的增加, 锚杆-砂浆-基体三者界面间的黏结强度均呈下降趋势, 呈较好的线性下降规律。

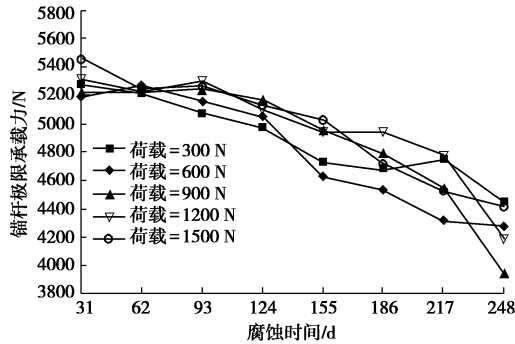


图 11 锚杆极限承载力与腐蚀时间的关系

Fig. 11 Ultimate bearing capacity - corrosion time curves

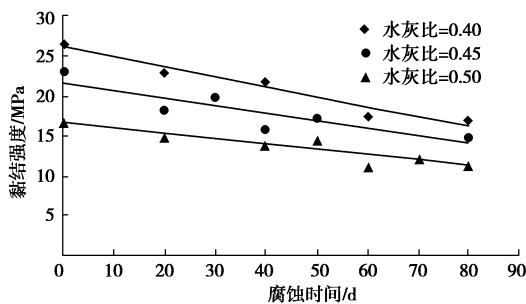


图 12 锚杆-砂浆界面黏结强度变化

Fig. 12 Anchor-mortar interface bond strength curves

5.2 城市地铁工程污染腐蚀耐久性问题

地铁是未来城市公共交通的优先发展方向。地铁中的钢筋混凝土结构, 除应满足承载力极限状态要求外, 还应满足正常使用极限状态, 应该有足够的耐久性。相较于地面工程, 地铁结构长期处于潮湿和地下水流经环境中, 其受地下环境污染腐蚀问题尤为突出。据文献调研, 整个地下结构耐久性的研究相对滞后, 地铁工程耐久性研究更是近乎空白。

黄文新等^[50-51]曾以广州地铁为研究对象, 分析地下水中 Cl^- 离子、 SO_4^{2-} 离子对地铁混凝土的侵蚀规律。岩土工程勘察报告显示: 水样中 Cl^- 含量为 7203 mg/L, SO_4^{2-} 含量为 2805 mg/L, 属对混凝土中等腐蚀, 对钢筋为强腐蚀。

图 13, 14 分别为试验所得 Cl^- 含量、 SO_4^{2-} 含量随龄期变化。结果表明: 随龄期增长, 渗入混凝土的 Cl^- 含量逐渐增加, 且干湿循环与 60℃ 环境下的 Cl^- 含量

均高于 20℃ 标准养护条件下的 Cl^- 含量。图 13 所示, 标准养护环境下, 40 d 龄期后 Cl^- 平均含量高达 0.096%, 接近地铁工程的 0.1% 限制标准。

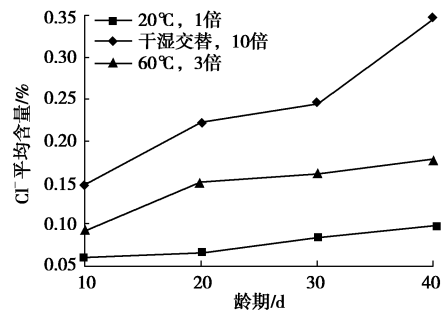


图 13 Cl^- 平均含量随龄期变化关系

Fig. 13 Change curves of average content of Cl^- with age

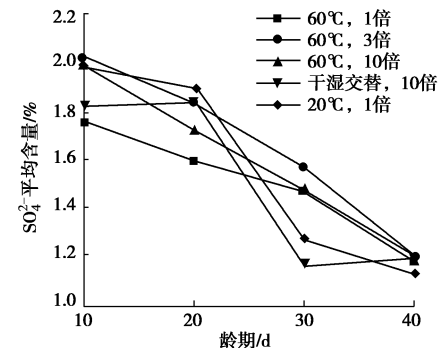


图 14 SO_4^{2-} 平均含量随龄期变化关系

Fig. 14 Change curves of average content of SO_4^{2-} with age

对于 SO_4^{2-} 侵蚀, 不同于 Cl^- 含量变化规律, 混凝土内部可溶性 SO_4^{2-} 含量随龄期增长而降低。分析原因为: 硫酸盐侵蚀混凝土生成难溶解的石膏和钙矾石, 真实检测到的 SO_4^{2-} 为渗透进入混凝土内部的 SO_4^{2-} 含量减去已发生腐蚀反应的 SO_4^{2-} 含量。

杜应吉^[16]以南京地铁高性能混凝土耐久性为依托, 研究了硫酸盐侵蚀条件下的高性能混凝土抗折强度衰减规律。指出, 抗折强度衰减速率 $\text{d}R_t/\text{d}t$ 与抗折强度差成正比, 也就是:

$$\frac{\text{d}R_t}{\text{d}t} = -\lambda(R_t - R_0) \quad (8)$$

即得 $R_t = aR_0 e^{-\lambda t}$ (9)

式中, a 为待定系数, R_t , R_0 分别是 t 龄期和初始龄期混凝土抗折强度。

依据式 (9) 进一步建立以抗折强度为指标, 考虑硫酸根浓度 n , 水胶比 s 和掺合料掺量 c 的混凝土腐蚀寿命预测模型:

$$t = -500 \left\{ \ln \frac{3.06R_t e^{0.178c}}{(1 - 0.0176n^2 + 0.123n)R_0 s^{-1.246}} \right\} \quad (10)$$

预测指出, 南京地铁所选用的 C30 高性能混凝土具有较强的抗硫酸盐侵蚀能力, 符合耐久性设计要求。

6 存在的问题及今后研究趋势

虽然国内外对城市地下结构污染腐蚀耐久性进行了一些研究,也取得了许多成果,但由于其环境效应的多样性以及耐久设计的复杂性,目前难以形成相对统一的研究理论方法,尚存在许多不足且有大量工作有待进一步深入开展。

6.1 存在的问题

国内外对地下结构腐蚀耐久性研究已有较多成果,但由于试验方法、试验条件及选用材料的差异,研究成果还难于进行比较,城市地下结构耐久性的系统分析、评估、设计方法有待进一步研究。工程实际中,结构耐久性劣化一般是多种因素共同作用造成的,研究时应重视多种因素的综合叠加效应。

现有地下结构污染腐蚀耐久性研究成果与工程设计和施工控制、结构残余寿命评估等行为脱节,无法在统一的结构安全可靠度基础上进行控制,相关技术规范及标准的制定也较落后,国内外在城市地下结构污染腐蚀耐久性方面尚无系统的、成文的规范或标准。

已有研究成果多从室内缩尺、加速腐蚀试验中获取,对地下结构材料的污染腐蚀机理较难阐述清楚,加之缺少工程实测耐久性指标和统计资料,建立的耐久性预测模型可应用性不强,也不足以反映真实的地下结构服役寿命。

对已有地下结构的残余寿命评估研究不够深入,对现役地下结构的腐蚀状态和耐久性能还不能给出很好的定量的评价,虽有很多研究成果,但已有的评价体系多为定性化或半量化评价,研究层次和深度都有待进一步加强。

6.2 建议与研究趋势

鉴于城市地下结构污染腐蚀耐久性研究现状的严重性和紧迫性,本文认为今后应加强以下5方面的研究:

(1)城市地下结构与地上结构污染腐蚀耐久性研究有相通之处,因而在研究地下结构耐久性规律时充分借鉴已有地上结构的研究经验是可行的也是必要的。同时注意到城市地下结构污染腐蚀耐久性研究的特殊性,避免完全照搬地面结构耐久性的设计理论与方法。

(2)按照耐久寿命来设计地下结构将成为土木工程设计的必然选择,今后应发展以混凝土和钢筋污染腐蚀耐久性为控制目标的结构设计理论,建立钢筋混凝土材料的全生命周期优化预测模型。

(3)对于埋地混凝土在各单一因素下的耐久性劣化问题已进行了诸多研究,但对于多因素耦合作用下

混凝土污染腐蚀耐久性评价至今未产生权威性的研究成果,这也是今后耐久性研究的方向之一。

(4)可以预计,今后很长一段时间内城市地下工程的大量返修都将是各国必须面对的严重问题,后期应加强地下结构污染腐蚀耐久性提升技术和耐久性修复加固技术,同时重视新材料(如FRP等)在增强地下结构抗腐蚀性方面的研究工作。

(5)继续加强加深对多场耦合作用下的城市地下结构耐久性研究工作,在已有的应力腐蚀耦合、腐蚀疲劳耦合研究基础上,适时开展污染腐蚀环境下的地下结构抗震性能评估并发展适于腐蚀结构的抗震设计理论方法。

参考文献:

- [1] SRIDHARAN A, NAGARAJ T S, SIVAPULLAIAH P V. Heaving of soil due to acid contamination[J]. *Géotechnique*, 1980(2): 258 - 267.
- [2] HO Y A, PUF AHL D E, BARBOUR S L. Effects of brine contamination on volume change behavior of fine-grained soils, *Materials from Theory to Practice*[C]// *Proceedings of the 42nd Canadian Geotechnical Conference*. Winnipeg: Manitoba, 1989: 272 - 279.
- [3] 朱春鹏, 刘汉龙. 污染土的工程性质研究进展[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(3): 625 - 630. (ZHU Chun-peng, LIU Han-long. Study of engineering properties of polluted soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(3): 625 - 630. (in Chinese))
- [4] 李相然, 姚志祥, 曹振斌. 济南典型地区地基土污染腐蚀性变异研究[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(8): 1229 - 1233. (LI Xiang-ran, YAO Zhi-xiang, CAO Zhen-bin. Study on physical and mechanical property variation of pollution erosive foundation soils in typical district of Jinan[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(8): 1229 - 1233. (in Chinese))
- [5] 刘汉龙, 朱春鹏, 张晓璐. 酸碱污染土基本物理性质的室内测试研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(8): 1213 - 1217. (LIU Han-long, ZHU Chun-peng, ZHANG Xiao-lu. Fundamental physical properties of soil polluted by acid and alkali in laboratory[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(8): 1213 - 1217. (in Chinese))
- [6] 路世豹, 张建新, 雷扬, 等. 某硫酸库地基污染机制的探讨[J]. *岩土工程界*, 2002, **6**(5): 37 - 39. (LU Shi-bao, ZHANG Jian-xin, LEI Yang, et al. Discuss the polluted mechanism for a foundation of vitriol storeroom[J]. *Geotechnical Engineering World*, 2002, **6**(5): 37 - 39. (in Chinese))

- [7] 刘全义. 软土地区化学侵蚀地基沉降机理初步研究[J]. 工程勘察, 1998, **5**: 8 - 10. (LIU Quan-yi. A preliminary study on the chemical erosion mechanism of foundation settlement in soft soil area[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1998, **5**: 8 - 10. (in Chinese))
- [8] LIU S, CHEN L, HAN L. Experimental study on electrical resistivity characteristics of contaminated soils[C]// Transportation Research Board 87th Annual Meeting. Washington, 2008.
- [9] 刘松玉, 詹良通, 胡黎明. 环境岩土工程研究进展[C]// 第十二届土力学及岩土工程学术大会. 上海, 2015. (LIU Songyu, ZHAN Liangtong, HU Liming. Research progress of environmental geotechnical engineering[C]// The 12th soil mechanics and geotechnical engineering academic conference. Shanghai, 2015. (in Chinese))
- [10] 徐洪. 砂浆锚杆锚固体耐久性基础研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. (XU Hong. Basic research on durability of mortar bolt anchorage body[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese))
- [11] PARIS P C, TADA H, ZAHOR A, et al. The theory of instability of the tearing mode of elastic-plastic crack growth[M]//Elastic-plastic fracture. JD Landes, JA Begley, and GA Clarke, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, 1979.
- [12] 王光雍. 自然环境的腐蚀与防护: 大气·海水·土壤[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997. (WANG Guang-yong. Corrosion and protection of the natural environment: Atmospheric · seawater · soil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1997. (in Chinese))
- [13] ZHOU Shi-feng, DONG Sui-cheng. Research on durability of concrete with erosion surroundings in underground work[J]. Journal of Protective Engineering, 1998, **6**(1): 43 - 48.
- [14] TAO S M S. AC admittance method for the measurement of corrosion of rebar in concrete[J]. Corrosion & Protection, 1997, **3**: 005.
- [15] DELATTE N, CHEN S, MAINI N, et al. Application of nondestructive evaluation to subway tunnel systems[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2003, **1845**: 127 - 135.
- [16] 杜应吉. 地铁工程混凝土耐久性研究与寿命预测[D]. 南京: 河海大学, 2005. (DU Ying-ji. Study on the durability of the subway concrete structure and service life prediction[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [17] 陈拴发. 高性能混凝土应力腐蚀与腐蚀疲劳特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2004. (CHEN Shuan-fa. Study on stress corrosion and corrosion fatigue of high performance concrete[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese))
- [18] IRASSAR E F, BONAVETTI V L, GONZALEZ M. Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature[J]. Cement and Concrete Research, 2003, **33**(1): 31 - 41.
- [19] AMEY S L, JOHNSON D A, MILTENBERGER M A, et al. Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology[J]. ACI Structural Journal, 1998, **95**(2).
- [20] MANGAT P S, MOLLOY B T. Prediction of long term chloride concentration in concrete[J]. Materials and Structures, 1994, **27**(6): 338 - 346.
- [21] 孙伟, 余红发, 陈肇元, 等. 混凝土结构工程的耐久性与寿命研究进展[J]. 北京: 土建结构工程的安全性及耐久性, 2001: 274 - 285. (SUN Wei, YU Hong-fa, CHEN Zhao-yuan, et al. The research process of durability and life of concrete structural engineering[J]. Beijing: The security and the Durability of Civil Structural Engineering, 2001: 274 - 285. (in Chinese))
- [22] OSHIRO T. Corrosive environment and salt induced damage of RC structures[J]. University of the Ryukyus, 1999.
- [23] 向晓东. 流体中污染物对轴对称物体的扩散模型及其简化研究[J]. 安全与环境学报, 2004, **4**: 66 - 69. (XIANG Xiao-dong. Simplified pollutant-diffusing model for axial symmetrical objects in fluid[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, **4**: 66 - 69. (in Chinese))
- [24] 陈晓斌, 唐孟雄, 马昆林. 地下混凝土结构硫酸盐及氯盐侵蚀的耐久性实验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(7): 2803 - 2811. (CHEN Xiao-bin, TANG Meng-xiong, MA Kun-lin. Underground concrete structure exposure to sulfate and chloride invading environment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, **43**(7): 2803 - 2811. (in Chinese))
- [25] 刘西拉, 苗澍柯. 混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算[J]. 土木工程学报, 1990, **23**(4): 69 - 78. (LIU Xi-la, MIAO Shu-ke. Steel corrosion and durability calculation of concrete structures[J]. Chinese Civil Engineering Journal, 1990, **23**(4): 69 - 78. (in Chinese))
- [26] HAUSMANN D A. Steel corrosion in concrete--How does it occur?[J]. Materials Protection, 1967, **26**(11): 19 - 23.
- [27] HUSSAIN S E, AL-GAHTANI A S. Chloride threshold for corrosion of reinforcement in concrete[J]. ACI Materials

- Journal, 1996, **93**(6).
- [28] BIONDINI F, BONTEMPI F, FRANGOPOL D M, et al. Cellular automata approach to durability analysis of concrete structures in aggressive environments[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, **130**(11): 1724 - 1737.
- [29] LIBERATI E A P, NOGUEIRA C G, LEONEL E D, et al. Nonlinear formulation based on FEM, Mazars damage criterion and Fick's law applied to failure assessment of reinforced concrete structures subjected to chloride ingress and reinforcements corrosion[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, **46**: 247 - 268.
- [30] PARKINS R N. Laboratory Measurements and Life Prediction for Structures Suffering SCC[C]// Proc Symp Plant Aging and Life Prediction. Sapporo, 1995.
- [31] 毋玲, 陈召涛, 孙秦. 应力腐蚀损伤裂纹起始寿命计算模型[J]. 机械强度, 2004, **26**(增刊): 58 - 59. (WU Ling, CHEN Shao-tao, SUN Qin. Damage mechanics model for the initiation life of stress corrosion cracking[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, **26**(S0): 58 - 59. (in Chinese))
- [32] 岳希峰. 基于损伤力学的预应力混凝土结构应力腐蚀寿命研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2007. (YUE Xi-feng. Study on life of stress corrosion cracking of pre-stressed concrete structure based on damage mechanics[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [33] 金祖权, 孙伟, 赵铁军, 等. 在不同溶液中混凝土对氯离子的固化程度[J]. 硅酸盐学报, 2009, **37**(7): 1068 - 1073. (JIN Zu-quan, SUN Wei, ZHAO Tie-jun, et al. Chloride building in concrete exposure to corrosive solutions[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, **37**(7): 1068 - 1073. (in Chinese))
- [34] ANDRESEN P L, FORD F P. Modeling of irradiation effects on stress corrosion crack growth rates[J]. CORROSION/89, 1988, **497**.
- [35] FORD F P, ANDRESEN P L. Development and use of a predictive model of crack propagation in 304/316L, A533B/A508 and Inconel 600/182 alloys in 288 °C water[C]// Proceedings of the Third International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. Warrendale, 1988.
- [36] 牛林, 张长桥, 林海潮. 应变速率和电位对应力腐蚀裂纹扩展的影响[J]. 物理化学学报, 2003, **19**(7): 616 - 620. (NIU Lin, ZHANG Chang-qiao, LIN Hai-chao. Effect of strain rate and potential on the propagation of stress corrosion crack[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2003, **19**(7): 616 - 620. (in Chinese))
- [37] MAES M A, WEI X, DILGER W H. Fatigue reliability of deteriorating prestressed concrete bridges due to stress corrosion cracking[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, **28**(4): 673 - 683.
- [38] 卢木. 混凝土耐久性研究现状和研究方向[J]. 工业建筑, 1997, **27**(5): 1 - 6. (LU Mu. Recent study and research directions of concrete durability[J]. Journal of Industrial building, 1997, **27**(5): 1 - 6. (in Chinese))
- [39] 孙伟. 荷载与环境因素耦合作用下结构混凝土的耐久性与服役寿命[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, **36**(增刊 2): 7 - 14. (SUN Wei. Durability and service life of structure concrete under load and environment coupling effects[J]. Journal of Southeast University (Natural and Science Edition), 2006, **36**(S2): 7 - 14. (in Chinese))
- [40] 胡超. 锈蚀钢筋混凝土梁低周疲劳试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010. (HU Chao. Experimental Research on the low-cycle fatigue of corroded R.C.Beams[D]. Changsha: Hunan University, 2010. (in Chinese))
- [41] SÁNCHEZ P J, HUESPE A E, OLIVER J, et al. Mesoscopic model to simulate the mechanical behavior of reinforced concrete members affected by corrosion[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, **47**(5): 559 - 570.
- [42] MINER M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, **12**(3): 159 - 164.
- [43] 李铮, 汪波, 何川, 等. 多重防腐锚杆抗腐蚀性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(4): 1071 - 1077. (LI Zheng, WANG Bo, HE Chuan, et al. Experimental study of corrosion resistance of multiple anticorrosive bolts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(4): 1071 - 1077. (in Chinese))
- [44] 郑静, 曾辉辉, 朱本珍. 腐蚀对锚索力学性能影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(12): 2469 - 2474. (ZHENG Jing, ZENG Hui-hui, ZHU Ben-zhen. Test study of influence of erosion on mechanical behavior of anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(12): 2469 - 2474. (in Chinese))
- [45] 周金飞. 砂浆锚固体腐蚀后结构微观分析及力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. (ZHOU Jin-fei. Structure microstructure analysis and mechanical properties of mortar anchor solid under sulfate attack[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese))
- [46] 杨启贵, 高大水, 吴海斌. 对我国岩土预应力锚索防腐措施和标准的探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1558 -

1562. (YANG Qi-gui, GAO Da-shui, WU Hai-bin. Discussion on antiseptic measures and standards of geotechnical pre-stressed anchorage cables in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1558 - 1562. (in Chinese))
- [47] 肖 玲, 李世民, 曾宪明. 地下巷道支护锚杆腐蚀状况调查及力学性能测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 2): 3791 - 3797. (XIAO Ling, LI Shi-min, ZENG Xian-ming. Corrosion investigation and mechanical behavior test on support of bolts in underground drift[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S2): 3791 - 3797. (in Chinese))
- [48] 肖 玲, 李长松, 曾宪明. 承载锚杆与非承载锚杆腐蚀力学性能对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(4): 720 - 726. (XIAO Ling, LI Chang-song, ZENG Xian-ming. Comparison test study on mechanical performance of loaded bolt and unloaded bolt against corrosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(4): 720 - 726. (in Chinese))
- [49] 张永兴, 徐 洪. 砂浆受腐蚀锚固体的锚固特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3058 - 3062. (ZHANG Yong-xing, XU Hong. Test research on bond characteristics of mortar corroded anchoring body[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3058 - 3062. (in Chinese))
- [50] 黄文新, 殷素红, 刘 行. 广州地铁混凝土耐腐蚀性能的模拟研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, **35**(2): 125 - 130. (HUANG Wen-xin, YIN Su-hong, LIU Xing. Simulated study on corrosion resistance of Guangzhou metro engineering concrete[J]. Journal of South China University of Technology, 2007, **35**(2): 125 - 130. (in Chinese))
- [51] 黄文新. 广州地铁混凝土结构在环境多因素作用下抗侵蚀耐久性的研究[J]. 华南理工大学学报, 2010. (HUANG Wen-xin. Research on the anti-corrosion durability of concrete structure of GZ metro under multiple environmental factors[J]. South China University of Technology, 2010. (in Chinese))

(责任编辑 胡海霞)