第 48 卷第 5 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 5
2020 年 5 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　May，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.2020.05.20190756

综 合 评 述

海洋环境下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究进展

鲍玖文[1,2]，魏佳楠[1]，张　鹏[1]，李树国[1]，赵铁军[1]

(1. 青岛理工大学土木工程学院，山东 青岛 266033；
2. 大连理工大学，海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024)

摘　要：氯离子侵蚀已成为影响海洋环境下混凝土结构耐久性最主要的因素；混凝土耐久性破坏是一个长期的过程。试验室常采用人工加速模拟的方法研究混凝土耐久性劣化过程。然而，针对混凝土耐久性室内模拟与实海暴露的研究，目前在试验方法、试验制度及加速因素等方面尚未形成统一认识与规范，使研究成果在工程中应用推广具有一定局限性。若能建立真实暴露条件和室内模拟混凝土氯离子侵蚀试验两者之间的相似性关系，更能准确地分析海洋环境下混凝土结构耐久性和预测其使用寿命。考虑环境(温度和湿度)和材料性能(水胶比和矿物掺合料)等因素影响，基于单因素和多因素作用，主要从试验研究、理论分析及数值模拟 3 个角度，分别综述了混凝土抗氯离子侵蚀的研究进展，总结了海洋环境下混凝土抗氯离子侵蚀相似性研究成果，并对其进行了讨论和展望，为未来的理论研究及实际工程应用提供一定依据。

关键词：混凝土；实海暴露；人工室内模拟；氯离子侵蚀；相似性
中图分类号：TU528　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0454–5648(2020)05–689–16
网络出版时间：2020–03–06



Research Progress of Similarity of Resistance to Chloride Ingress into Concrete Exposed to Marine Environment

BAO Jiuwen[1,2], *WEI Jianan*[1], *ZHANG Peng*[1], *LI Shuguo*[1], *ZHAO Tiejun*[1]
(1. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Chloride-induced corrosion is one of the major deterioration mechanisms of reinforced concrete that may seriously affect the durability of the structures in marine environment. The deterioration of concrete durability as a long-term process is usually investigated by lab-scale artificial acceleration simulation. However, there is no normative standard in the corresponding test methods, test systems and acceleration factors in the indoor simulation and coastal exposure research on concrete durability, thus restricting the engineering application of the research results. It is necessary for the durability of concrete structure research more practical engineering significance to establish the similarity relationship of chloride ion ingress into concrete between the coastal exposure environment and the indoor simulated environment. It could accurately evaluate the durability and predict service life of concrete structures in the marine environment. From the viewpoints of single factor and multi-factor effects, the available experimental, theoretical analysis and numerical simulation of the similarity of chloride ion ingress into concrete were introduced, respectively. The research findings on the similarity of chloride ion ingress into concrete exposed to marine environment were summarized. The relevant discussion and expectation of this subject were conducted, thus providing a basis for future theoretical research and practical engineering application.

Keywords: concrete; real-sea exposure; artificial indoor simulation; chloride penetration; similarity

混凝土材料因其良好的性能，已被广泛地应用于各种建筑物或构筑物中[1]，由于面对各种复杂的

收稿日期：2019–11–20。　修订日期：2019–12–19。
基金项目：国家自然科学基金(51922052，51778309，51908307，U1706222)；山东省自然科学基金(ZR2018JL018)；源头创新计划(19-6-2-7-cg)；大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室开放课题基金资助项目(LP1902)。
第一作者：鲍玖文(1989—)，男，博士，副教授。
通信作者：张　鹏(1981—)，男，博士，教授。

Received date: 2019–11–20.　**Revised date:** 2019–12–19.
First author: BAO Jiuwen (1989–), male, Ph.D., Associate Professor
E-mail: baojiuwen@qut.edu.cn
Correspondent author: ZHANG Peng (1981–), male, Ph. D., Professor.
E-mail: peng.zhang@qut.edu.cn

服役环境，如氯盐侵蚀、冻融作用和干湿循环等，导致其混凝土结构严重的耐久性破坏问题，主要是由于钢筋锈蚀、冻融破坏、碳化、碱骨料反应和硫酸盐侵蚀等单因素或多因素的耦合作用[2–5]；其中，氯离子引起钢筋锈蚀是最主要的原因，因此，研究混凝土抗氯离子侵蚀性能对评估新建混凝土结构使用寿命及既有混凝土结构耐久性具有重要意义[6–8]。通常，钢筋混凝土结构耐久性试验方法包括真实试验法和模拟试验法；前者具有结果真实、可靠的优点，但试验周期长、操作性复杂；而后者一般采用加速法，控制程度和可重复性高，但无法完全反映真实的服役环境条件，导致测试结果与实际情况有一定差距[9–10]。若将真实试验与模拟试验的结果相互联系，建立两者之间的相似关系，更能准确有效地开展海洋环境下钢筋混凝土结构全寿命分析与评估，对实际工程混凝土耐久性能提升具有重要意义。

相似理论作为一个重要的科学分析手段，现已广泛地应用到自然科学及工程领域，并取得了巨大成果[11–12]。即使考虑了相似系数，由于工程结构所处环境的复杂性、参数的不确定性和信息的不完备，将模拟试验的结果用于实际环境中也与真实结果相差较大[13–14]。合理设计模拟试验，将实际试验数据与模拟试验进行对比，找到二者之间的相似关系，是亟需要解决的问题。尽管目前关于混凝土抗氯离子侵蚀性能方面已有大量研究，但是针对海洋环境下氯离子侵蚀的相似性研究进展仍缺乏相应的归纳总结。为保证混凝土结构使用安全性和延长结构服役寿命，有必要开展室内人工模拟和实海暴露条件下氯离子侵蚀的对比分析。

本工作主要基于单因素作用和多因素作用 2 个方面，从试验研究、理论分析及数值模拟角度，分别综述混凝土抗氯离子侵蚀的研究进展，总结海洋环境下混凝土抗氯离子侵蚀相似性研究成果，并对其进行了讨论和展望。

1 混凝土耐久性相似理论含义

相似理论是说明自然界和工程中各相似现象相似原理的学说[15]。相似理论最大的作用是用来指导模型试验，通过参数和介质性能的改变或尺度的缩放等方法，设计与实际相似的模型，目的在于以最低的成本和最短的运转周期内分析所研究对象模型的内部规律性等结论[16]。模型的设计及有关试验数据的处理与推广都是基于相似三定理进行的[17]，并在特定情况下，根据经过处理的数据，提供建立微分方程的暗示。对于一些复杂的物理现象，相似理论还可进一步帮助人们科学而简捷地去建立一些经验性的指导方程。

混凝土耐久性相似理论是指不同环境作用下混凝土劣化损伤过程、机理和结果等方面相似或一致，即两者之间存在共性。目前的研究多集中在相似性试验中，通过对现场暴露实际参数的选取来设计室内模拟试验，进行 2 种环境作用下混凝土耐久性问题的研究，建立两者之间的相似关系。混凝土耐久性相似理论在试验中的应用步骤：1)通过分析研究对象，确定模拟试验所需要的方程和参数；2)根据相似第二定理建立相似准则；3)确定模型的几何缩比；4)按照相似准则来设计试验模型；5)试验后用相似准则来处理试验数据。

2 单因素作用下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究

氯离子引起钢筋锈蚀是耐久性破坏最主要的原因。如何将暴露试验与模拟试验的结果相互关联，建立两者之间的相似关系，已成为目前混凝土耐久性相似性研究的焦点[18–21]。如今研究者针对单因素作用下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性进行了大量的研究工作。

2.1 实验研究

氯离子环境混凝土相似试验多根据实际环境的参数来设计室内加速试验，并依据 2 种环境得到的数据分析建立两者之间的相似关系。卢振永[22]依据实际海洋(实海)暴露环境下混凝土中氯离子的侵蚀机理和环境特点，设计了室内加速试验方案，并与实海暴露试验进行了对比研究，建立了考虑时间相似性的氯离子扩散模型。黄俊等[23]以实际海洋环境为例，模拟现场环境参数完成了室内模拟试验，对比了现场暴露环境与室内模拟环境的数据结果，给出了现场试验和室内模拟试验混凝土试件自由氯离子浓度分布的对比曲线(见图 1)，分析表明：室内模拟试验在对流区厚度、自由氯离子峰值浓度以及有效扩散系数等参数方面，与现场暴露试验的性能参数有一定相似性。高延红等[24]研究了模拟潮差环境和实际环境下混凝土氯离子侵蚀对流区深度的相似性，结果表明，在 2 种试验环境条件下，氯离子在暴露一段时间后均在 4 mm 左右深度处形成对流区，存在一定的相似性。刘如泰等[25]研究了舟山实际暴露环境和人工模拟环境下氯离子的含量分布和扩散系数，发现混凝土氯离子扩散系

数的相似率与水灰比有关。Roy 等[26]研究了 5 种不同类型混凝土暴露于海洋环境不同区域(大气区、潮汐区与水下区)的氯盐侵蚀情况，通过现场数据拟合其扩散系数，与试验室数据具有较好的相关性。

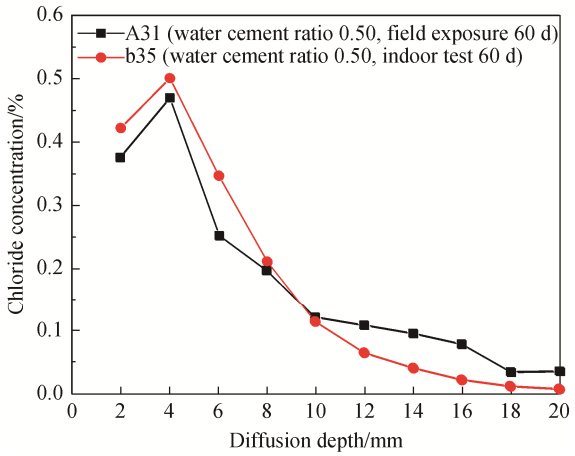


图 1　现场与室内模拟试验混凝土自由氯离子浓度分布[23]

Fig. 1　Free chloride concentration distribution of concrete specimens in field and indoor simulation test[23]

研究者们设计了不同的试验方案，探索了环境(温度、湿度和侵蚀溶液浓度等)、材料特性(水胶比、矿物掺合料)等因素对混凝土中氯离子扩散行为的影响。Lindvall[27]研究了不同环境下氯盐浓度和温度对混凝土抗侵蚀性能的影响，在全世界 12 个海洋地点暴露同一类型的混凝土试样，并在实验室条件下进行了相同的平行试验。结果表明，暴露环境下海水温度是影响氯离子侵蚀的主要因素，而实验室试验氯盐浓度为主要因素。Berube 等[28]研究了实海暴露和室内条件下，不同环境对高、低碱混凝土中自由氯离子、总氯离子以及可溶性钠和钾离子浓度的影响，结果表明：2 种环境对上述离子的影响具有相同的规律，在表层孔隙溶液中氯离子和钠离子浓度增加，而钾离子和氢氧根离子浓度以及 pH 值降低。

氯盐环境下混凝土内钢筋锈蚀严重，易引起混凝土发生耐久性破坏。Meira 等[29]开展了实际大气与试验室环境钢筋混凝土结构氯离子阈值分析，发现 2 种环境之间氯离子含量呈线性关系，如图 2 所示。Castor 等[30]针对海洋自然风化和盐雾室环境中，对不同暴露时间混凝土的腐蚀速率、腐蚀电位和氯离子含量进行了监测，试验表明：腐蚀强度与暴露时间存在双对数关系，且自然暴露和室内加速环境结果呈线性关系。

钢筋混凝土劣化损伤在实际环境中是一个缓慢的过程，实验室中常采用人工加速模拟试验方法来研究混凝土耐久性问题。但是目前研究中的试验方案各异，使研究成果具有局限性。耿欧等[31]提出了建立标准的人工加速模拟试验的思路，通过大量的人工加速试验和现场暴露试验的数据，建立了一种能应用于实际工程的人工加速与实际暴露环境之间的定性关系。

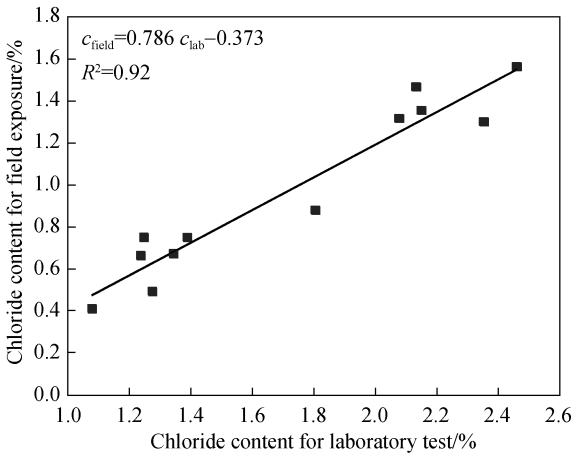


图 2　暴露试验与室内试验氯离子阈值的关系[29]

Fig. 2　Relationship between chloride threshold from field experiments and those from laboratory[29]

鉴于影响因素大多具有时变性的特点，金立兵[32]根据多重环境时间相似理论(multi-environmental time similarity theory，METS)方法，进行第三方、现场暴露试验和室内模拟试验，结合氯离子扩散系数和表面氯离子浓度的时变性，得出了室内加速试验与自然环境下混凝土性能劣化的时间相似关系。周丽萍等[33]基于表面氯离子浓度的时变性，建立了实际环境与人工加速模拟试验结果在时间上的相似关系，并提出了相似系数表达式。Zhang 等[34]研究了水灰比、矿物掺量和暴露时间对氯离子浓度、氯离子扩散系数的影响，建立了氯离子扩散系数的时变和瞬变模型，同时得到了模拟环境和自然潮汐环境下混凝土氯离子扩散系数时变性的相似关系。达波等[35−36]基于修正氯离子扩散模型和可靠度理论的寿命预测，分析了南海海域全珊瑚海水混凝土表观氯离子扩散系数(D_a)、表面氯离子浓度(c_s)及时间依赖指数(m)的变化规律，结果表明：D_a 和 c_s 分别随时间延长呈幂函数的降低和增长趋势。

上述研究工作均从宏观方向出发，未考虑混凝土内部微观结构对混凝土劣化损伤的影响，从而无法描述混凝土微观结构对混凝土中氯离子扩散行为的影响。陈伟[37]通过人工模拟潮差区实验，并结合压汞试验，研究了混凝土氯离子扩散系数与孔隙特征的关系，结果表明：氯离子扩散系数与总孔隙率、

毛细孔率存在一定的相关性[见式(1)]；扩散系数与混凝土内微、大毛细孔的表面分型维数存在负相关关系[见式(2)]。

$$\frac{D}{D_0}=\frac{[-0.059\varepsilon_c^2-0.459(\varepsilon_t-\varepsilon_c)+4.925]\times10^{-12}}{2.03\times10^{-9}} \tag{1}$$

$$D=(aN^2-bN+c)\times10^{-12} \tag{2}$$

式中：D/D_0 为氯离子相对扩散率，即氯离子在混凝土中扩散系数同其在水中扩散系数的比值；ε_c 为毛细孔隙率；ε_t 为总孔隙率；D 为氯离子扩散系数(m^2/s)；a、b、c 为拟合系数；N 为孔表面分形维数。Audenaert 等[38]通过对氯离子在实验室和实际结构中渗透行为的研究，发现氯离子扩散系数具有明显的时间依赖性；同时引入毛细孔隙度作为参数来描述混凝土成分的影响。Mohammed 等[39]利用压汞法(MIP)、扫描电子显微镜(SEM)和能谱仪(EDS)技术，研究了不同类型自密实混凝土内部孔隙结构和过渡界面区微观特征对氯离子扩散系数的影响，研究表明：临界孔径对自密实混凝土氯离子扩散系数的影响比平均孔径更明显，并且过渡区厚度对氯离子渗透速度起重要作用。

上述工作只是针对海洋环境下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究，在除冰盐环境和盐碱地环境下同样存在着混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究。刘洋[40]研究了室内模拟环境和现场暴露环境作用下抗除冰盐混凝土的力学性能和耐久性，结果表明：两种环境下抗冻性能具有一定的相似性，且抗除冰盐混凝土的抗冻性能良好。Bouzoubaâ 等[41]开展了掺有外加剂的混凝土在室内和现场暴露试验条件下抗冻性能研究，结果表明：使用固化剂可提高混凝土抗冻性能。蒋卫东等[42]研发了一种掺有粉煤灰和高效减水剂且适用于盐渍区域的混凝土，并在室内环境和现场暴露环境对混凝土的抗渗性能和抗腐蚀性能进行了研究，结果表明：双掺混凝土的抗侵蚀盐腐蚀性能和抗渗透性能显著提高。郭飞[43]和胡宸瑞[44]依据现场环境(典型盐渍土特性的区域)设计了室内加速试验，并同时进行了现场暴露试验；以相对质量和相对动弹性模量参数为评价指标，通过 SEM、EDS、XRD 等微观方法揭示了混凝土劣化损伤机理；基于室内模拟试验，利用加速系数 K 值法对服役结构进行寿命预测。

室内加速模拟试验评价氯离子传输性能一般采用电化学方法，主要有电通量法或快速氯离子迁移系数法(RCM)法，即电场作用下快速氯离子渗透试验，氯离子迁移的主要驱动力为电迁移作用。然而，实海暴露环境下混凝土中的氯离子传输机理主要包括对流、扩散和电迁移作用，不同暴露环境下氯离子传输方式不同，例如：海洋环境水下区氯离子主要依靠浓度梯度为驱动力进行传输；干湿循环区主要以对流与扩散的耦合机制；而电迁移作用在海洋环境下氯离子迁移过程中影响较小，一般不予考虑。因此，室内加速与实海暴露环境下混凝土内传输驱动力的不同也是造成氯离子侵蚀规律存在差异的一个关键因素。

这些研究工作较好地分析了在室内模拟环境和现场暴露环境下混凝土受氯离子侵蚀的相似性，对以上典型研究进行了总结[23–25, 29–30, 34, 45–49]，如表 1 所示。由于现场环境复杂，研究人员根据现场参数设计的室内模拟加速试验各不相同，得到两者之间的相似关系也不同，仅能针对特定的混凝土结构进行耐久性寿命预测，却无法较为广泛地应用于实际混凝土结构。

2.2 理论分析

多数研究者基于经典相似理论的相似三定理，在 Fick 第二定律的基础之上引入相似系数建立相似准则或相似模型。张瀚宇等[50]运用相似理论推导了混凝土内氯离子扩散的相似准则[见式(3)]，并进行了室内模拟试验，根据相似第二定理建立了氯离子扩散过程的准则方程[见式(4)]。

$$\pi_1=\frac{tD}{x^2},\pi_2=\frac{c_i}{c_{s2}},\pi_3=\frac{c}{c_{s2}},\pi_4=\frac{x_0}{x},\pi_5=\frac{T\sigma}{D} \tag{3}$$

$$\frac{x^2}{tD}=2.5146\left(\lg\left(\frac{c_{s2}}{c_i}\right)\right)^{236\,02} \tag{4}$$

式中：π_1 为谐时准则；π_2、π_3 为浓度准则；π_4 为几何准则；π_5 为氯离子扩散系数准则；x 为平面坐标(m)；t 为时间(s)；c_i 为时间 t 时某深度处的氯离子浓度(%)；c_{S2} 为混凝土表面的氯离子浓度(%)；c 为混凝土中点的氯离子浓度(%)；x_0 为深度(m)；σ 混凝土电阻率；T 为温度。刘鹏[46]提出了基于内部微环境响应相似的人工模拟试验设计方法，验证了公式(4)的适用性，发现其准则方程(4)仅适用于氯盐单一环境；同时采用 Fick 第二定律，基于 S 曲线形式对 G 误差函数进行了拟合[见式(5)]，发现拟合效果较好。

$$\mathrm{erf}(z)=1.009\,58-\frac{1.614\,5}{1+\exp\left(\dfrac{z-0.185\,26}{0.376\,11}\right)} \tag{5}$$

表 1　室内试验参数影响室内模拟试验与实海暴露试验相似关系的研究情况

Table 1　Research on the influence of laboratory test parameters on the similar relationship between indoor simulation and marine exposure test

Solution concentration	Time ratio of dry to wet	Period/d	Similarity relationship	References
4% NaCl	4: 3	7	Relationship of chloride threshold between laboratory and exposure test: c_{field}=0.786c_{lab}–0.373.	[29]
4% Comp Sel	5: 1	2	Chloride diffusion coefficient of concrete exposed to the marine and indoor simulated environment satisfies the logarithmic function: D_{marine}=k lnD_{indoor}+B.	[45]
5% NaCl	23: 1	2	Convection zone depth in the field is twice that of the real-sea exposure; the peak chloride concentration is 1.7 times; and chloride diffusion coefficient is 1.84 times.	[23]
			The time function of corrosion parameters exhibits a linear relationship between natural weathering and indoor salt spray environment.	[30]
	427:5	3	The correlation of chloride erosion in concrete between natural and artificial simulated environments was established.	[46]
	1: 1	1	The time similarity coefficient for prestressed concrete varies smaller when the time decay coefficient linearly varied with the square root of prestress.	[47]
12.5% NaCl	11: 1	2	The convection depth for the artificial simulation test and the natural tidal environment was about 4 mm.	[24]
			The peak chloride concentration and diffusion coefficient have similar rules; the similar multiples increase with increasing of water-cement ratio.	[25]
			The time-varying character of chloride diffusion coefficient was similar.	[34]
			The peak chloride concentration in the artificially simulated tidal zone is 2.65 times that of the marine tidal environment; the chloride diffusion coefficient is 3.03 times.	[48]
14.5% Comp Sel	5: 1	2	The dynamic elastic modulus conforms to the exponential function under two environments; the acceleration coefficient for the indoor dry-wet cycle test is 2.3–2.7.	[49]

Jin 等[51−53]以经典相似理论为基础，根据相似第三定理提出了 METS 模型，通过引入与研究对象具有相似环境条件且具有一定服役年限的第三方参照物，来研究不同环境之间研究对象性能劣化的相似性。由于实际工程的复杂性，混凝土结构耐久性寿命预测存在大量随机的、不完善的信息。因此，需要采用概率统计的方法来弥补上述缺陷。将相对信息熵引入多重环境相似理论中，提出了一种更为可靠的海工混凝土结构寿命预测方法，基于 Fick 第二定律建立了氯离子侵入的时变模型，并结合 Monte-Carlo 方法预测了沿海混凝土服役寿命[54]。

鉴于影响因素大多具有时变性的特点，石佳乐[48]开展了自然海洋潮差区、人工模拟盐雾区和潮差区的混凝土抗氯离子侵蚀试验，得到了不同氯盐环境下混凝土氯离子扩散系数时变模型[见式(6)]。

$$D(t,T)=k[A_1(r)^2+B_1(r)+C_1]\left(\frac{28}{28+t}\right)^{A_2(r)^2+B_2(r)+C_2} \tag{6}$$

式中：$D(t, T)$为绝对温度 T 条件侵蚀时间为 t 的氯离子扩散系数(10^{-12}m^2/s)；k 为时变模型参数；r 为水水灰比；A_1、B_1、C_1、A_2、B_2、C_2 为模拟参数。黄俊[55]参考 Mangat 模型和 Tang 模型得到了氯离子扩散系数时间衰变规律，并得到了室内模拟和现场暴露氯盐侵蚀随时间变化的相似性。余红发等[56−58]基于 Fick 第二定律，建立了考虑混凝土氯离子结合能力、氯离子扩散系数的时变性和混凝土结构微观性能影响的氯离子扩理论模型[见式(7)]，并将理论模型进行了试验和工程验证，并进一步开展了海洋环境下混凝土结构预期使用寿命研究。

$$c_f=c_0+(c_s-c_0)\left[1-\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{KD_0t_0^m}{(1+R)(1-m)}\cdot t^{1-m}}}\right)\right] \tag{7}$$

式中：c_f为自由氯离子浓度(%)；c_0为混凝土内部初始氯离子浓度(%)；c_s为混凝土暴露表面的氯离子浓度(%)；erf 为误差函数；K 为混凝土氯离子扩散性能的劣化效应系数；R 为氯离子结合能力。

环境因素(温度和湿度等)对混凝土中氯离子扩散行为影响显著，其可主导混凝土内氯离子传输机理。刘鹏[46]、Yu 等[59]考虑了温度、相对湿度和暴露时间等因素对氯离子扩散行为的影响，建立了氯离子扩散系数模型[见式(8)、式(9)]。

$$D_e=D_{app}\cdot f_t\cdot f_T\cdot f_{RH} \tag{8}$$

$$f_{RH}=\left[1+\left(\frac{1-h}{1-h_c}\right)^4\right]^{-1},\ f_T=(T/T_0)\times \mathrm{e}^{q\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)},\ f_t=\begin{cases}(t/t_0)^m;t_0<t<t_{max}\\(t_0/t_{max})^m;t\geqslant t_{max}\end{cases} \tag{9}$$

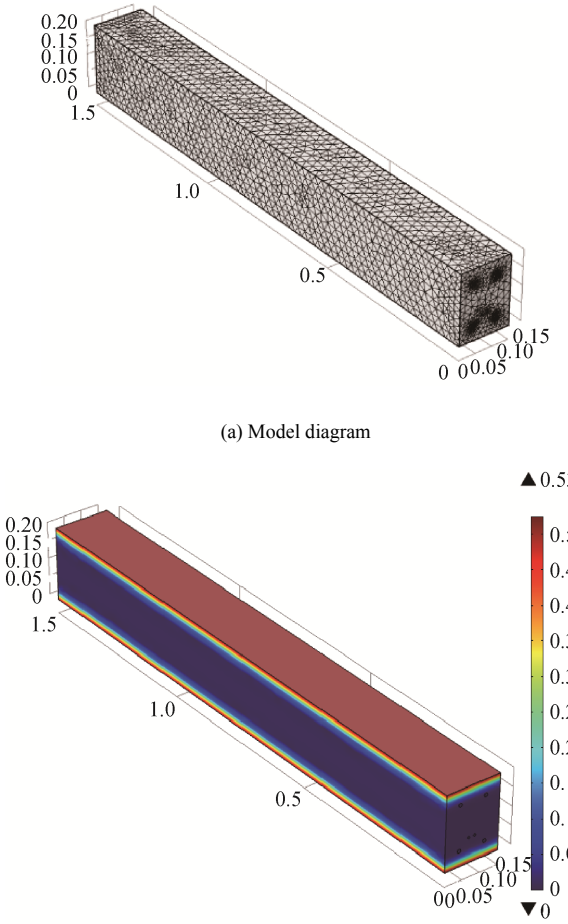
式中：f_t、f_T、f_{RH} 分别为暴露时间、温度和相对湿度影响系数；h 为混凝土中的湿度(%)；h_c 为临界湿度(%)；T_0 和 T 分别为与两温度值对应的温度值(K)；q 为活化系数；t_0 为参照氯离子扩散系数对应的时间(s)；t 为侵蚀持续时间(s)；m 为时间衰减系数。

2.3 数值模拟研究

有限元法是模拟氯离子在混凝土中扩散行为的一种有效方法，不少研究者开始用有限元法模拟氯离子扩散来进行混凝土耐久性及寿命预测。金立兵[60]利用 COMSOL Multiphysics 有限元数值分析软件，进行了混凝土内氯离子扩散行为数值分析，考虑氯离子浓度与扩散系数的依时性，预测了杭州湾跨海大桥混凝土结构主要构件的服役寿命。卢振永[61]基于 Boltzmann 变量$\phi(\phi=0.5xt^{-1/2})$转换的数学方法建立计算模型，得到了浓度、时间和深度的变化对氯离子扩散系数的影响，但没有解决试验数据拟合度低的问题；鉴于此，将 Fick 第二定律的解用有限差分方法来求解，模型的计算结果与实测数据拟合度较高，并将有限差分法的计算模型用于分析时间相似问题。Song 等[62]基于有限差分法中 Crank-Nicolson 格式，建立了考虑了混凝土表层修复或更换以及表面氯离子浓度和扩散系数时变性的扩散模型，并对修复后的混凝土结构进行了寿命预测。Lin 等[63]考虑结构性能衰减、传热和传湿之间相互作用，建立了热-湿-力耦合模型，描述了非饱和混凝土中热量、水分和氯离子输运的控制方程，并在空间和时间域上通过有限元法进行了数值求解，数值计算结果与实测数据拟合度高，验证了数值模型的准确性。

以上这些数值模拟工作均从宏观尺度出发，将混凝土视为连续均匀介质。实际上，混凝土为非均质的复合材料，内部孔隙连通结构与微裂缝对混凝土氯离子扩散行为具有较大影响，因此，更应进一步从多尺度角度出发研究氯离子在混凝土中的传输行为。傅巧瑛[64]应用氯离子扩散系数分布表达式和表面氯离子浓度模型，通过 COMSOL Multiphysics 有限元数值分析软件中的稀物质传递模块，对人工加速模拟试验进行了数值模拟(见图 3)，模拟得到的结果与实际结果接近，说明用此方法研究氯离子侵蚀问题的合理性。鲍玖文等[65]利用伽略金加权余数法给出了非饱和混凝土氯离子传输的一维非线性对流扩散方程的有限元形式，采用细观格构网络模型分析了干湿循环周期和循环机制对水分及氯离子传输性能的影响，结果表明：干湿循环作用下，非饱和混凝土中水分及氯离子的侵入深度在相同干燥时间时主要取决于湿润时间，混凝土表面氯离子含量取决于干燥时间和循环周期。同样，乔峭等[66]采用有限元分析方法，建立了考虑了混凝土孔隙溶液中的氯离子扩散、电迁移以及毛细吸附等运输方式的盐渍土环境下混凝土抗氯离子侵蚀模型。

以上数值模拟研究工作对混凝土中氯离子扩散行为的理解有较大的帮助，但是数值模拟中参数的选取具有很大的经验性和随机性。另外，这些研究工作大多针对氯盐单一环境，但实际结构大都处于多耦合作用的环境中，单一环境作用下的试验结果与实际结果相差较大，无法有效地应用于混凝土耐久性寿命预测。



(a) Model diagram

(b) 3D chloride diffusion

图 3 混凝土模型示意图和氯离子三维扩散图[64]

Fig. 3 Schematic diagram of concrete model and three-dimensional chloride diffusion[64]

2.4 工程实例分析

众多学者进行了混凝土抗氯离子侵蚀的理论研究，但理论模型的实用性值得商榷，主要问题是不同环境下氯离子侵蚀混凝土的情况各异，通过对实

际工程进行分析，验证理论模型的准确性和实用性。

广州市东部毗邻珠江的一座桥梁，处于典型的亚热带季风气候区，桥梁主要暴露环境为盐雾区。薛鹏飞等[67]利用修正后的氯离子扩散模型，推导出定值法、基于概率性能和基于时变可靠度的混凝土寿命预测方法，将 3 种方法分别用于桥梁寿命预测，结果表明：3 种预测方法的结果吻合，验证了模型的有效性。

杭州湾属于亚热带季风气候，冬季平均气温高，海水氯离子平均含量为10.79 g/L，平均潮位达4.52 m；对服役结构进行耐久性调查，发现混凝土结构腐蚀严重，主要是由氯离子侵蚀导致钢筋腐蚀引起的。金立兵[60]采用 METS 方法对杭州湾跨海大桥的不同部位进行了寿命预测，通过与 MCSLPS 模型、N.P.lee 模型、DuraCrete 方法、基于 MonteCarlo 方法[68]进行比较，发现不同方法得到的变化趋势一致，但采用 METS 方法更加接近实际结果，验证了此方法的准确性和合理性。

青海察尔汗盐湖地区，盐湖气候炎热干燥、日照时间长、湖内形成高浓度的卤水并逐渐结晶成盐粒。余红发等[69]基于 Fick 第二定律且考虑了氯离子结合能力、氯离子扩散系数的时间依赖性以及混凝土结构微缺陷的影响，建立了预测青海湖地区的氯离子扩散理论模型；同时对暴露 19 a 普通混凝土电杆进行氯离子浓度检测，将实测数据与理论模型预测值进行对比分析，结果表明：理论模型的预测值与实测值吻合较好，验证了模型的准确性。

2.5　分析与讨论

现有的试验、理论及数值模拟工作均说明了混凝土氯离子侵蚀的相似性研究对预测混凝土耐久性寿命有重要意义。总的来说，室内模拟加速试验与实海暴露试验在氯离子侵蚀参数(对流区深度、表面氯离子浓度、氯离子扩散系数等)上有一定的相似关系。表面氯离子浓度与氯离子扩散系数具有时变性，基于此得到了混凝土氯离子侵蚀参数时变模型的相似性，修正后的氯离子扩散模型验证更符合实际情况。由于混凝土在实际环境中受到复杂因素作用，氯离子在混凝土中的传输行为研究涉及结构力学、损伤力学以及断裂力学等多方面知识，是一个综合性的课题，目前的研究还有很多不足之处：

1) 对于混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究多集中于单一氯盐环境。而实际混凝土结构大多处于复杂因素作用，混凝土中氯离子传输行为及劣化损伤程度均区别于单一环境作用，因此还需对多因素作用下氯离子传输行为进行相应研究。在除冰盐和盐碱地环境下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究较少，众多工作只是单纯地进行了室内模拟试验和实际暴露试验，并没有建立两者之间的相似关系。因此，有必要开展两类环境下混凝土抗氯离子侵蚀的相似关系研究，并需要与海洋环境进行对比分析。

2) 试验研究中，研究者在模拟试验中的温度、湿度及干湿时间比等参数取值没有达成共识且缺乏取值依据，需继续进行人工加速模拟试验的研究，力争形成统一规范为实际工程提供依据。另外，氯离子在混凝土中扩散的相似性研究得到的相似关系多针对特定环境，适用范围较窄，且试验结果离散性较大，难以推广及应用。

3) 理论分析方面，混凝土材料具有明显的非均质性，这种非均质性使氯盐作用下混凝土材料内部劣化损伤具有强不均匀性，造成混凝土中氯离子扩散研究比较复杂。因此，建立符合真实情况的氯离子扩散模型是今后研究工作的重点。

4) 针对混凝土中氯离子的扩散行为已有大量的数值研究，但目前对氯离子扩散行为相似性方面的数值模拟研究依然较少，且已有的研究多针对饱和混凝土中氯离子扩散行为，而真实环境下混凝土多处于非饱和状态，研究得到的规律对实际工程并不适用。因此，建立非饱和混凝土氯离子侵蚀相似性的数值模拟方法，进而对混凝土耐久性进行评估及预测也是今后研究工作的重点。

3　多因素作用下混凝土抗氯离子侵蚀相似性研究

实际环境中服役的混凝土往往处于多因素作用，与单因素作用对混凝土耐久性劣化损伤程度有很大区别，其研究成果仅适用于特定环境，无法推广且普遍应用于混凝土耐久性寿命预测，因此，开展多因素作用下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究有重要意义。

3.1　实验研究

不同因素对氯离子侵蚀参数的影响是多因素作用下混凝土中氯离子扩散行为研究的核心问题。孙玮琨[70]研究了室内模拟与自然潮差环境下侵蚀时间、弯曲荷载水平以及水灰比等因素对预应力混凝土中氯离子侵蚀参数的影响，基于经典相似理论，分析了混凝土自由氯离子浓度峰值和氯离子扩散系数的时变性及时变相似性。后奕锟[45]研究了混凝土在复合盐溶液中不同腐蚀环境(浸泡、盐雾和干湿循

环)的室内模拟试验和实海暴露试验的劣化损伤规律，分析了不同水胶比和矿物掺合料对混凝土中氯离子扩散性能的影响，给出了海洋暴露与室内模拟(大气区和潮汐区)条件下混凝土氯离子扩散系数之间的拟合关系(如图 4)，结果发现：两种环境之间具有相似的规律性，且氯离子扩散系数呈对数函数关系。同样，邓嘉骏[49]对化学-力学耦合作用下混凝土中腐蚀离子的侵蚀机理进行了研究，分析了不同腐蚀环境、水胶比、矿物掺合料、腐蚀时间以及弯曲荷载等因素对混凝土劣化损伤的影响，揭示了混凝土劣化损伤的时变规律，发现了室内模拟与现场暴露环境的动弹性模量之间呈指数函数关系。周胜兵[71]研究了环境与弯曲荷载耦合作用下混凝土的氯离子扩散性能和碳化规律，分析了荷载水平、水灰比和养护龄期对混凝土损伤劣化的影响，结果表明：混凝土扩散系数的时变性和碳化深度规律具有相似关系。余红发等[72–73]基于损伤力学的原理，通过试验研究了混凝土在单一、双重和多重因素作用下损伤失效过程的规律与特点；并分析了多因素作用下混凝土结构的冻融服役寿命，结果表明：混凝土在双重损伤因素作用下双因素寿命与单因素寿命呈线性关系；在单损伤或多损伤作用下多因素寿命均与单因素寿命呈幂函数关系。

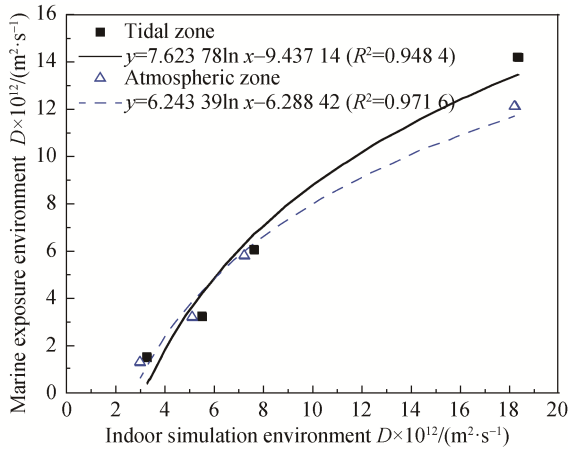


图 4 海洋暴露环境与室内模拟条件下混凝土氯离子扩散系数之间的拟合关系[45]

Fig. 4 Fitting relationship of the chloride ion diffusion coefficient of concrete between the marine exposed environment and indoor simulated environment[45]

由于混凝土中氯离子侵蚀参数具有时变性的特点，Li 等[47]以海洋大气环境下某预应力混凝土结构为参考，根据现场参数设计并进行了人工模拟加速试验，分析了两种环境下预应力混凝土中氯离子迁移的时间相似关系。Lv 等[74]研究了钢筋混凝土梁在酸烟雾和二氧化碳复合作用下的劣化损伤过程，通过对现场服役结构和室内试验混凝土梁的中和深度强度损失、钢筋锈蚀速率和裂缝宽度的变化，得到了以上参数在两种环境下的时间关系。

以上研究主要考虑了宏观性能的变化规律，事实上微/细观结构对混凝土中氯离子扩散也有较大影响。彭智[75]研究了荷载作用下混凝土中氯离子扩散行为，通过荷载对混凝土孔隙、平均孔径以及孔径分布的影响，建立了荷载作用下氯离子侵蚀模型。沈达满[76]研究了复合盐溶液-干湿循环-弯曲荷载耦合作用下水泥基材料孔变化规律，结果表明：受压区孔隙率和有害孔数量明显低于受拉区，且应力比的降低、硫酸盐浓度的降低和干湿循环频率的减缓都有效抑制水泥基材料劣化损伤。同样，Qi 等[77]针对盐溶液-干湿循环-弯曲荷载耦合作用，分析了再生混凝土氯离子扩散过程，结果表明：混凝土中氯离子分布与混凝土的粗骨料和弯曲荷载有关。

针对除盐环境和盐碱地环境，目前也开展了相似研究。张云清[78]通过室内快速盐冻试验以及室外自然暴露盐冻试验，对混凝土中氯离子扩散机理、表面剥蚀及其损伤过程、相对动弹性模型变化和抗弯承载力等规律进行了研究，建立了钢筋混凝土结构在盐冻作用下的承载力计算模型和服役寿命预测模型。Wang 等[79]研究了一种新型外加剂可用于提高混凝土的抗盐冻性能，通过室内试验和现场暴露试验测试了该外加剂对混凝土物理力学性能和耐久性的影响，结果表明：此外加剂有效改善了混凝土的抗盐冻性能。张延文[80]研究了模拟西北大气环境(除冰盐、$NaHSO_3$、除冰盐+$NaHSO_3$)和实际大气暴露环境下普通桥梁钢 Q345q 的腐蚀机理，分析验证了加速试验的加速性与相关性，并建立了室内模拟与现场暴露之间的时间相似关系如下：

$$\ln t_f = a \ln t_i - b \tag{10}$$

式中：t_f为大气暴露腐蚀时间(h)；t_i为室内加速腐蚀时间(h)。余红发[81]通过青海盐湖现场暴露和室内模拟实验，研究了高性能混凝土在盐湖地区多重因素作用下的损伤机理与规律，建立了基于损伤演化方程混凝土结构使用寿命预测理论体系，并将理论应用于预测实际工程的使用寿命。陈丁山[82]进行了室内模拟和西宁地区现场暴露试验，通过对相对质量和相对动弹性模量指标变化研究，设定了两个指标相对应的耐久性评价参数 ω_1 和 ω_2，并依据室内外试验参数 ω，得到了加速系数 K，基于此建立了混凝土剩余寿命计算模型，并对服役结构进行了剩余寿命预测。张立明等[83]采用氯离子三维扩散理论，

在盐湖轻盐渍土现场暴露和室内干湿循环试验中，对不同类型混凝土(普通、高强和高性能混凝土)的氯离子扩散系数进行了研究，结果表明：高性能混凝土抗氯离子侵蚀性能最为显著。

混凝土在服役环境中易受到复杂因素相互作用，但影响混凝土结构破坏的主要因素取决于混凝土所处真实环境、力学荷载作用及混凝土本身的材料特性。因此，在进行混凝土耐久性研究时应先进行现场调研，例如：海洋环境下通常主要考虑单一氯盐侵蚀作用；寒冷地区除冰盐环境下考虑氯盐与冻融耦合作用；西北盐碱地环境下考虑复合盐和冻融耦合作用等。由于我国地域辽阔，环境差异显著，因此，针对混凝土结构耐久性分析，特别是海洋环境下混凝土抗氯离子侵蚀性能的研究，由于服役环境复杂使其实际工程问题更为复杂，需综合考虑主、次要或二者耦合因素影响，因此，分析不同环境作用下混凝土耐久性劣化机理的影响因素对准确预测服役寿命具有重要意义。

3.2　理论分析

由于氯离子在混凝土中的传输过程十分复杂，因此建立多因素耦合作用下混凝土的氯离子传输模型，需基于基础理论模型考虑众多因素的影响。祁兵[84]研究了干湿循环-荷载-盐溶液耦合作用下的损伤过程，考虑了表观氯离子扩散系数的影响因素(材料影响参数 K_m、荷载影响参数 K_λ，氯离子结合影响参数 K_R 和时间依赖参数)和表面氯离子浓度的影响因素(表面氯离子浓度的时变规律和再生粗骨料取代率)，建立了多因素耦合作用下再生混凝土的氯离子传输模型[见式(11)、式(12)]，其中因考虑表面氯离子浓度的时变性，表面氯离子浓度的初始条件为 $c(t=0, x>0)=C_0$，边界条件为 $c(x=0, t>0)=kt^{-1/2}$。

$$c(x,t)=k\sqrt{t}\left[\mathrm{e}^{\frac{x^2}{4K_m\cdot K_\lambda\cdot A}}-\left(\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{K_m\cdot K_\lambda\cdot A}}\right)\mathrm{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{K_m\cdot K_\lambda\cdot A}}\right)\right] \tag{11}$$

$$A=\frac{D_0t_0^m}{(1+R)(1-m)}t^{1-m} \tag{12}$$

Meijers 等[85]建立了考虑环境温湿度和化学影响(氯离子结合、扩散和对流作用以及碳化作用)因素的钢筋混凝土结构寿命预测模型，通过室内模拟试验与真实暴露试验验证了模型的有效性，并将此模型与干湿循环环境下的误差函数模型进行对比，结果表明：误差函数模型忽略了水分波动的影响，迫使模型采用了偏离材料特性的方法，使其所得的结果与实测数据一致。杨绿峰等[86]研究建立了一种考虑材料特性(水胶比、胶凝材料种类)和暴露时间等多因素耦合影响的 $c_{s,spl}$ 时变模型[见式(13)]，通过与现场暴露试验数据和所建模型的对比，验证了此模型具有真实性和广泛性。

$$c_{s,spl}=\beta A_{cb}r_b\cdot\frac{\alpha A_{ct}t}{1+\alpha A_{ct}t} \tag{13}$$

式中：α、β 为拟合参数；A_{cb} 为胶凝材料因子的材料系数；r_b 为水胶比；A_{ct} 为胶凝材料因子的时间系数；t 为暴露时间(a)。

目前对腐蚀环境下混凝土结构寿命预测主要依赖于室内试验数据，若建立混凝土氯离子扩散行为的室内模拟与实际暴露环境的关系，以室内模拟试验为基础，以内外相关关系为纽带，更加准确地预测实际混凝土结构使用寿命。张立明[87]以室内长期浸泡环境为基准，引入室内外相关系数，利用混凝土表面氯离子含量 c_s、表观氯离子扩散系数 D_0 和时间依赖系数 m 的室内外相关系数 K_C、K_D 和 K_m 对氯离子扩散方程进行了修正，并对此修正模型[见式(14)]进行了验证，结果表明修正模型更适用于实际工程。

$$c_f=K_Cc_{S0}\left[1-\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{K_DKD_0t_0^{K_m m}}{(1+R)(1-K_m m)}\cdot t^{1-K_m m}}}\right)\right] \tag{14}$$

徐现正[88]通过对连云港服役结构的耐久性检测，基于相似理论设计了室内模拟试验方案，根据试验数据建立了环境-应力-时间相似模型，考虑了环境因素、材料因素和应力水平多种因素的影响，并对氯离子有效扩散系数进行修正，验证后发现氯离子有效扩散系数模型[见式(15)、式(16)]更符合实际工程。

$$D^*=D_0f(\sigma)\left(\frac{t_0}{t}\right)^m \tag{15}$$

$$m=ar_b+b \tag{16}$$

式中：D^*为氯离子有效扩散系数(m^2/s)；$f(\sigma)$为应力影响系数；σ 为应力水平即应力与混凝土抗压强度的比值。杨金木[89]考虑了环境温湿度和荷载作用对混凝土中氯离子扩散行为的影响，基于此对 Fick 第二定律进行了修正，推导出钢筋初锈时间的计算方法；研究了在氯盐与荷载耦合作用下，混凝土构件内钢筋锈蚀率、钢筋锈胀力以及锈蚀钢筋与混凝土之间粘结强度的相似模型，建立了基于不同性能参

数的时间相似模型。陈素碧[90]基于经典相似理论制定了干湿交替环境的室内模拟试验方案，并开展了现场暴露与室内模拟的预应力混凝土氯离子传输试验，分析了材料特性(水胶比、粉煤灰掺量)和预应力张拉水平对氯离子扩散行为的影响，建立了预应力混凝土内氯离子扩散的时间相似系数表达式[见式(17)]，并用实际工程验证了模型的准确性。

$$\lambda=\frac{T}{\left[3\sqrt{\eta}\left(2.5r_{\mathrm{b}}-0.6+0.45w_{\mathrm{F}}\right)\right]\sqrt{D_{28}/D_0 28}} \tag{17}$$

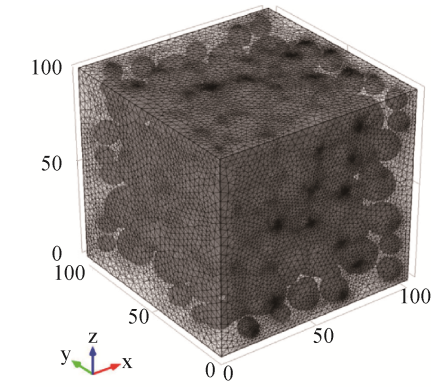
式中：λ 为时间相似系数；T 为现场环境侵蚀时间(s)；η 为预应力筋的有效张拉应力与抗拉强度的比值；w_{F} 为粉煤灰在胶凝材料中所占百分比；D_{28} 为人工模拟环境侵蚀 28 d 的氯离子表观扩散系数(m^2/s)。刘荣桂等[91]根据经典相似理论，以氯离子扩散系数为纽带，建立了实海暴露与人工模拟之间的时间相似关系，通过数据拟合得到氯离子扩散系数，并依据其时间衰减关系得到海洋大气区内实际结构的时间相似系数，对实际服役结构的寿命预测提供了理论基础。

这些研究工作促进了混凝土中氯离子扩散相似理论模型的研究，但是理论研究多基于试验数据进行拟合分析，并进行了大量的假设，无法真正实现现场结构所受到复杂因素作用，从而获得的结论与实际结果相差较远，研究结果仍具有很大局限性。

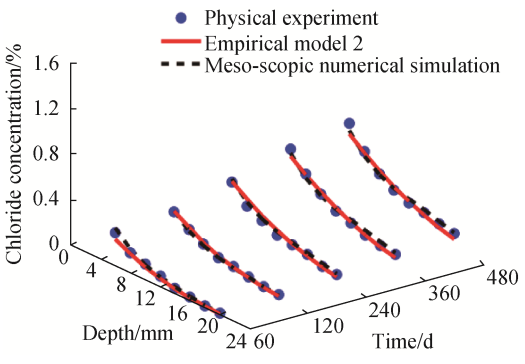
3.3 数值模拟研究

近年来，不少研究者从细观角度出发，将混凝土视为由骨料、界面和砂浆基质组成的三相复合材料，对多因素耦合作用下混凝土中氯离子的扩散行为进行了研究。Jiang 等[92]建立了一个考虑水胶比、ITZ(界面过渡区)效应、外部氯化物浓度、骨料体积分数和孔隙率时变性的二维、三相的介观数值模型，研究了氯离子在冻融条件下的扩散机理，结果表明：影响因素对氯离子扩散系数的相关程度从高到低依次为：水胶比、骨料体积分数、外部氯离子浓度、ITZ 扩散系数。Wang 等[93–96]对开裂非饱和混凝土的水分及氯离子传输性能进行了研究，建立了基于裂缝的混凝土细观格构网络模型，研究了裂缝参数对物质传输的影响。同时，将冻融对混凝土的损伤分为界面过渡区裂缝的形成和砂浆孔隙率的增大两部分，用于研究在冻融环境下混凝土的氯离子扩散过程，结果表明：此数值模拟方法获得的结果与试验结果拟合效果较好。杜修力等[97–98]研究了开裂混凝土以及在荷载作用下混凝土中氯离子的扩散行为，考虑了混凝土细观结构的非均质性并建立了细观模型。Huang 等[99]基于混凝土中氯离子扩散方程与热传导方程的相似性，利用 ANSYS 有限元软件的热分析模块对混凝土中氯离子扩散过程进行了数值模拟，结果表明：利用 ANSYS 热分析模块计算混凝土结构中的氯离子浓度与试验结果相吻合，说明此数值模拟方法是一种可行的计算方法。Wang 等[100]将混凝土视为由砂浆、粗骨料和 ITZ 组成的三相复合材料(见图 5a)，结合细观有限元的数值模拟方法，来预测氯离子在混凝土中的长期扩散性能，并建立了考虑表面氯离子浓度和氯离子扩散系数时间依赖性的混凝土扩散模型；如图 5b 所示，给出了物理试验、经验模型[见式(18)]和数值模拟方法计算得到的混凝土中氯离子浓度分布图，结果表明：模拟方法与经验模型和试验结果一致。

$$\begin{cases} c_{\mathrm{m2}}(x,t)=c_{\mathrm{s(m2)}}(t)\left[1-\mathrm{erf}\left(\dfrac{x}{2\sqrt{\dfrac{D_{0(\mathrm{m2})}}{1-m}\left(\dfrac{t_0}{t}\right)^m t}}\right)\right] \\ c_{\mathrm{s(m2)}}(t)=0.212\,0\ln t-0.336 \\ D_{0(\mathrm{m2})}=4.114\times10^{-12}\ \mathrm{m^2/s} \\ m=0.608\,3 \end{cases} \tag{18}$$



(a) 3D finite element model of concrete



(b) Comparison of results

图 5 三种方法计算得到的混凝土氯离子浓度分布[100]

Fig. 5 Chloride concentration profiles in concrete specimens calculated by three methods[100]

以上数值模拟研究促进了对多因素作用下混凝土中氯离子扩散特性的认识，但数值模拟中氯离子扩散模型的选取具有很大的经验性和随机性。另外，这些研究工作虽然考虑了多种因素的影响，但仍然与实际环境作用下混凝土受到的影响因素相差较大，应用于混凝土耐久性预测仍具有局限性。

3.4　工程实例分析

青岛海湾大桥是我国首座冰冻海域特大型桥梁，遭受盐冻作用显著，耐久性问题严重。彭艳周等[101]建立了考虑了时间、温度、湿度、氯离子结合和冻融损伤作用的氯离子扩散模型，并依据李金玉等[102]、李晔等[103]和张云清等[104]的研究结果对模型进行了验证，试验结果与模拟值吻合较好，表明所建模型可应用于混凝土结构寿命预测；基于此将模型应用于青岛海湾大桥寿命预测。

PLA7811 造船厂于 1981 年在青岛市建造，该码头混凝土强度等级为 C18，水胶比为 0.55，采用钻孔法测试了混凝土中的氯离子浓度。Yuan 等[105]建立了考虑温度、湿度、混凝土龄期、掺合料和碳化等多因素的氯离子扩散模型，将模型应用于此结构并计算其氯离子含量，发现计算结果与实测结果相吻合，验证了此模型的实用性。

特隆赫姆港码头位于挪威，属于北温带海洋性气候，盛行东南风，少雾，年平均气温冬季为–6 ℃、夏季为 19 ℃，港内不冰冻。Liu 等[106]基于 Fick 第二定律，建立了考虑孔隙率、氯离子结合能力和预应力等因素的硫酸盐侵蚀下预应力混凝土氯离子扩散模型；将模型计算结果与 Gjørv[107]实测结果作比较，计算结果与实测结果相吻合，验证了模型的准确性。

3.5　分析与讨论

多因素作用下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究，较好地实现了真实环境作用下混凝土抗氯离子的侵蚀过程，研究结果更加符合实际情况，能更加准确地预测混凝土耐久性使用寿命。目前研究者已对多因素作用下氯离子扩散性能进行了大量的研究，现有的研究促进了对氯离子扩散行为相似性机理的认识，对实际的工程应用亦有一定的参考价值。为了更好地服务于混凝土耐久性设计、寿命预测以及结构修复问题，依旧需要对这一课题进行深入研究。

1) 试验研究方面，由于研究人员对室内模拟试验所采用的试验参数、试验装置以及试验操作不同，研究结果得到的相似关系具有较大的离散性。目前还没有建立能合理统一表征多因素影响的分析模型。因此，为准确预测混凝土耐久性寿命，室内模拟试验的环境参数、试验方法都有待于进一步完善。

2) 理论研究工作中，目前主要针对宏观角度氯离子扩散行为的研究，并根据试验结果建立宏观上的相似关系，而实际上微观孔隙结构对氯离子扩散行为有显著影响，目前缺乏对微观角度上相似关系的研究。混凝土所受环境复杂，所建立的氯离子扩散模型中考虑影响因素不足。因此，有必要建立更加符合实际环境、考虑微观孔结构影响的氯离子扩散模型，并建立宏观与微观相结合的相似关系，揭示氯离子扩散行为机理，是今后研究的重点。

3) 目前多针对饱和混凝土中氯离子扩散行为的相似性问题进行研究，对非饱和混凝土中氯离子扩散的相似性问题的研究还相对薄弱。实际上，非饱和多因素作用下混凝土中氯离子的扩散机制与饱和情形下有许多本质差别，现有工作依然未能全面揭示氯离子在多因素作用下的扩散机理。对于干湿交替作用下非饱和混凝土中氯离子扩散相似性的探究，应是后续工作的重要研究方向。

4) 现有关于多因素作用下混凝土中氯离子扩散行为的数值分析还远远不够，众多研究人员对宏观尺度模型进行研究，而对多尺度非均质材料的研究较少；目前，数值模拟多进行二维分析，实际混凝土中氯离子扩散过程存在“三维效应”，但此效应难以分析。因此，亟待建立更为合理准确的三维多尺度数值分析模型与方法，为探究多因素作用对混凝土中氯离子扩散行为影响提供理论支持。

4　结束语与展望

1) 混凝土抗氯离子侵蚀的相似性试验研究表明，以实际环境参数设计室内模拟试验，并通过室内模拟与真实环境获得的结果建立两者之间的相似关系，能较好地预测特定混凝土结构使用寿命，并且氯离子扩散系数和表面氯离子浓度等参数在两种环境下具有良好的相似性。虽然混凝土抗氯离子侵蚀相似性试验研究较多，但是试验结果具有较大的离散性，后续工作中应对试验室模拟参数、试验方法和试验装置等进行完善，制定合理统一的室内模拟方案。另外，混凝土构件在真实环境中受到复杂因素作用，而氯盐侵蚀仅仅是引起混凝土劣化损伤的主要原因之一，碳化、冻融、硫酸盐侵蚀和碱集料反应等问题也是造成混凝土劣化损伤的重要因素。因此，应开展碳化、冻融和硫酸盐等多因素耦

合作用下的相似性问题研究。氯盐条件下混凝土抗氯离子侵蚀研究不仅仅针对海洋环境，还包括除冰盐和盐碱地环境，而在这两种环境作用下，混凝土的劣化损伤更为严重，目前对两种环境作用下混凝土抗氯离子侵蚀的相似性研究较少，因此，亟需开展此方面的研究，对解决严酷环境下服役结构的耐久性问题有重要意义。而不同环境下氯离子侵蚀机理不同，因此还需将除冰盐环境和盐碱地环境与海洋环境进行对比分析。实海暴露实验与室内加速试验产生差异的重要影响因素之一是氯离子传输的动力学机理，在两种环境下氯离子传输方式不同导致反应机理不同，然而目前大多数相似性研究中未考虑动力学因素对氯离子侵蚀规律的影响，因此，有必要进一步建立考虑动力学关联的不同环境下氯盐传输的相似关系。

2) 混凝土抗氯离子侵蚀的相似性理论研究是在经典相似理论的相似三定理的基础上，根据 Fick 第二定律建立了相似准则和相似模型，并引入内外相关系数对氯离子扩散模型进行修正，修正后的模型经验证更适用于在实际结构中的应用。但理论研究设定了大量的假设，且存在考虑影响因素较少的问题，从而使研究结果有较大的局限性。此外，相似性理论在微、细观方面的研究较少，孔隙结构实际上对混凝土劣化损伤影响显著，如何将氯离子扩散行为与孔隙结构相结合，并考虑建立微、细观角度室内外的相似关系是以后研究的方向。

3) 数值分析方法已成为研究氯离子在混凝土中扩散行为的一种有效方法，能够真实可靠地描绘混凝土中氯离子扩散过程。但是，现在关于氯离子扩散行为的数值分析研究还远远不够，而且众多工作主要研究了氯盐环境作用下混凝土中氯离子扩散行为，对多因素耦合作用下氯离子扩散机理不够明确，并且以往研究多针对宏观方面。因此，考虑微/细观结构对氯离子扩散行为的影响，建立力学-化学-热学多场多尺度耦合分析模型，进而探究多因素作用下混凝土中氯离子扩散行为的影响机制，是今后研究工作的重点。

4) 由于服役结构所处的环境不同，遭受氯离子侵蚀的情况各异，所以理论模型的实用性值得商榷，通过对工程案例进行分析，验证了理论模型的准确性。但理论模型仅适用于个例，无法广泛应用于服役结构。因此，建立不同服役环境下且具有广泛性与实用性的混凝土结构理论模型是今后研究的重点也是难点。

参考文献:

[1] 金伟良, 袁迎曙, 卫军, 等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[2] 金伟良. 混凝土耐久性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

[3] RODRIGUEZ P, RAMIREZ E, BONZALEZ J. Methods for studying corrosion in reinforced concrete[J]. Mag Concr Res, 1994, 46: 81–90.

[4] 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.

[5] MEHTA P K, MONTEIRO P J M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials[M]. USA: McGraw-Hill Education Press, 2014.

[6] BERTOLINI L, ELSENER B, PEDEFERRI P, et al. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair[M]. Berlin: Wiley-VCH, 2004.

[7] 余红发, 孙伟, 鄢良慧. 混凝土使用寿命预测方法的研究 I、II、III[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 686–701.
YUN Hongfa, SUN Wei, YAN Lianghui. J Chin Ceram Soc, 2002, 30(6): 686–701.

[8] 吴瑾, 吴胜兴. 氯离子环境下钢筋混凝土结构耐久性寿命评估[J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 59-63.
WU Jin, WU Shengxing. Chin Civ Eng J (in Chinese), 2005, 38(2): 59–63.

[9] 金立兵, 金伟良, 赵羽习. 沿海混凝土结构耐久性现场试验方法的优选[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36(S2): 61-67.
JIN Libing, JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. J South Uinv (in Chinese), 2006, 36(S2): 61–67.

[10] 李云峰, 吴胜兴. 现代混凝土结构环境模拟实验室技术[J]. 中国工程科学, 2005, 7(2): 81–85, 96.
LI Yunfeng, WU Shengxing. Eng Sci (in Chinese), 2005, 7(2): 81–85, 96.

[11] 刘奎芳, 陈洁. 塑料在湿热和亚湿热气候大气暴露与人工加速试验相关性探讨[J]. 环境技术, 2001, 19(4): 8–13.
LIU Kuifang, CHEN Jie. Environ Technol (in Chinese), 2001, 19(4): 8–13.

[12] 王振尧, 于国才, 郑逸苹, 等. 锌的加速腐蚀与大气暴露腐蚀的相关性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(4): 239–244.
WANG Zhenyao, YU Guocai, ZHENG Yiping, et al. J Chin Soc Corros Protect (in Chinese), 1999, 19(4): 239–244.

[13] BERTOLINI L, LOLLINI F, REDAELLI E. Durability design of reinforced concrete structures[C]. Proceedings of the ICE-Constr Mater, 2011, 164(6): 273–282.

[14] LOLLINI F, REDAELLI E, BERTOLINI L. Analysis of the parameters affecting probabilistic predictions of initiation time for carbonation-induced corrosion of reinforced concrete structures[J]. Mater Corros, 2012, 63(12): 1059–1068.

[15] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.

[16] 徐挺. 相似方法及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

[17] 周明华. 土木工程结构试验与检测[M]. 南京: 东南大学出版社, 2013.

[18] SHIM H. Design & analysis of corrosion free service life of concrete structures using Monte Carlo method[J]. KSCE J Civil Eng, 2005, 9(5): 377–384.

[19] SUWITO C, XI Y. The effect of chloride-induced steel corrosion on

service life of reinforced concrete structures[J]. Struct Infrastr Eng, 2008, 4(3): 177–192.

[20] 林刚, 向志海, 刘应华, 等. 置于氯盐环境中混凝土结构钢筋起锈时间预测[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 147-153.
LIN Gang, XIANG Zhihai, LIU Yinghua, et al. Eng Mech (in Chinese), 2010, 27(9): 147-153.

[21] YANG D H, LI G P, YI T H, et al. A performance-based service life design method for reinforced concrete structures under chloride environment [J]. Constr Build Mater, 2016, 124: 453–461.

[22] 卢振永, 金伟良, 王海龙, 等. 人工气候模拟加速试验的相似性设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(6): 1071–1076.
LU Zhengyong, JIN Weiliang, WANG Hailong, et al. J Zhejiang Univ (Eng Sci) (in Chinese), 2009, 43(6): 1071–1076.

[23] 黄俊, 张俊芝, 吴灵杰, 等. 干湿循环条件下混凝土氯离子侵蚀的模拟试验及相似性[J]. 混凝土, 2012(12): 4–5+8.
HUANG Jun, ZHANG Junzhi, WU Lingjie, et al. Concrete (in Chinese), 2012(12): 4–5+8.

[24] 高延红, 赵静, 郑盈盈, 等. 模拟自然潮差环境混凝土氯离子侵蚀对流区深度的相似性与随机性[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 63–69.
GAO Yanhong, ZHAO Jing, ZHENG Yingying, et al. J Nat Disast (in Chinese), 2018, 27(5): 63–69.

[25] 刘如泰, 庄华夏, 黄俊, 等. 人工气候环境模拟自然潮差环境混凝土氯离子侵蚀的相似性[J]. 混凝土, 2014(11): 24–26.
LIU Rutai, ZHUANG Huaxia, HUANG Jun, et al. Concrete (in Chinese), 2014(11): 24–26.

[26] ROY S K, CHYE L K, NORTHWOOD D O. Chloride ingress in concrete as measured by field exposure tests in the atmospheric, tidal and submerged zones of a tropical marine environment[J]. Cem Concr Res, 1993, 23(6): 1289–1306.

[27] LINDVALL A. Chloride ingress data from field and laboratory exposure – Influence of salinity and temperature[J]. Cem Concr Compos, 2007, 29(2): 88–93.

[28] BÉRUBÉ M A, DORION J F, DUCHESNE J, et al. Laboratory and field investigations of the influence of sodium chloride on alkali–silica reactivity[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(1): 77–84.

[29] MEIRA G R, ANDRADE C, VILAR E O, et al. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone[J]. Constr Build Mater, 2014, 55: 289–298.

[30] CASTRO P, VELEVA L, BALANCAN M. Corrosion of reinforced concrete in a tropical marine environment and in accelerated tests[J]. Constr Build Mater, 1997, 11(2): 75–81.

[31] 耿欧, 袁迎曙, 李果. 钢筋混凝土耐久性人工气候加速退化试验的相关性研究[J]. 混凝土, 2004(1): 29–31.
GONG Ou, YUAN Yingshu, LI Guo. Concrete (in Chinese), 2004(1): 29–31.

[32] 金立兵, 金伟良, 王海龙, 等. 多重环境时间相似理论及其应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(4): 789–797.
JIN Linbing, JIN Weiliang, WANG Hailong. J Zhejiang Univ (Eng Sci) (in Chinese), 2010, 44(4): 789–797.

[33] 周丽萍, 刘荣桂, 陈妤. 海工混凝土表面氯离子浓度时间相似关系研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(3): 803–808+815.
LIU Liping, LIU Ronggui, CHEN Yu. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2017, 36(3): 803–808+815.

[34] ZHANG Y, ZHOU X, ZHAO J, et al. Time dependency and similarity of decay process of chloride diffusion in concrete under simulated marine tidal environment[J]. Constr Build Mater, 2019, 205: 332–343.

[35] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 热带岛礁环境下全珊瑚海水混凝土结构服役寿命的可靠性[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(11): 1613–1621.
DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(11): 1613–1621.

[36] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海海域珊瑚混凝土结构的耐久性影响因素[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 253–260.
DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(2): 253–260.

[37] 陈伟. 模拟潮差环境下水泥基材料氯离子渗透时变相似性及微观机理[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
CHEN Wei. Time-varying similarity and micro mechanism of chloride ion penetration in cement-based materials in simulation tidal environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.

[38] AUDENAERT K, YUAN Q, SCHUTTER G D. On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(3): 396–402.

[39] MOHAMMED M K, DAWSON A R, THOM N H. Macro/micro-pore structure characteristics and the chloride penetration of self-compacting concrete incorporating different types of filler and mineral admixture[J]. Constr Build Mater, 2014, 72: 83–93.

[40] 刘洋. 北方地区水泥混凝土路面结构耐久性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
LIU Yang. Study on the durability of cement concrete pavement structure in the north China[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.

[41] BOUZOUBAA N, BILODEAU A, FOURNIER B, et al. Deicing salt scaling resistance of concrete incorporating fly ash and (or) silica fume: laboratory and field sidewalk test data[J]. Can J Civil Eng, 2011, 38(4): 373–382.

[42] 蒋卫东, 陈啸, 闫俊, 等. 盐渍地区抗腐蚀混凝土耐久性试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(2): 280–283.
JIANG Weidong, CHEN Xiao, YAN Jun, et al. J Northeastern Univ (Nat Sci) (in Chinese), 2008, 29(2): 280–283.

[43] 郭飞. 西部盐渍土地区混凝土耐久性试验研究及寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
GUO Fei. Experimental study on durability of concrete in western saline soil area and life prediction[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.

[44] 胡宸瑞. 现场暴露混凝土耐久性试验研究及基于 Wiener 方法的寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
HU Chenrui. Experimental study on durability of exposed concrete and life prediction based on Wiener method[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.

[45] 后奕锟. 室内加速试验和海洋暴露条件下的配筋混凝土损伤劣化规律研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
HOU Yikun. Durability of concrete under the corrosion of indoor acceleration testing and marine environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2013.

[46] 刘鹏, 余志武. 人工模拟与自然的氯盐环境中混凝土氯盐侵蚀相似

性研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 136–138.
LIU Peng, YU Zhiwu. China Railway Sci (in Chinese), 2014, 35(4): 136–138.

[47] LI C Q, WANG R J, LIU R G. Similarity study on chloride corrosion of prestressed concrete in marine atmosphere[C]. IOP Conference Series: Mater Sci Eng, 2018, 307: 012054.

[48] 石佳乐. 不同干湿循环环境下水泥基材料抗氯离子侵蚀试验及相似性[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
SHI Jiale. Experimental study on chloride penetration in cement-based materials under different dry-wet cycling environments and similarities analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.

[49] 邓嘉骏. 化学-力学耦合作用下海工混凝土劣化规律与机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
DENG Jiajun. Research on the deterioration law and mechanism of marine concrete under chemistry-mechanical coupled effect[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[50] 张瀚宇, 简笮, 李培, 等. 氯离子在混凝土中扩散过程的相似理论研究[J]. 工程与试验, 2009, 49(1): 15–17+22.
ZHANG Hanyu, JIAN Yun, LI Pei, et al. Test Technol Test Machine (in Chinese), 2009, 49(1): 15–17+22.

[51] JIN W L, JIN L B. A multi-environmental time similarity theory of life prediction on coastal concrete structural durability[J]. Int J Struct Eng, 2009, 1(1): 40–58.

[52] JIN W L, LI Z Y, CHEN J, et al. Dynamic life prediction of RC structures on multi-environmental time similarity method[J]. Adv Mater Res, 2011, 255: 220–224.

[53] JIN W L, LI Z Y, XU C. Life prediction method of concrete structures based on relativistic information entropy[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on the Durability of Concrete Structures, Belfast UK, 2012.

[54] 金伟良, 李志远, 许晨. 基于相对信息熵的混凝土结构寿命预测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(11): 1991–1997.
JIN Weiliang, LI Zhiyuan, XU Chen. J Zhejiang Univ (Eng Sci) (in Chinese), 2012, 46(11): 1991–1997.

[55] 黄俊. 潮差区水泥基材料氯离子侵蚀模拟试验的相似性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
HUANG Jun. Study of Similarity on Simulation Experiment considering Chloride Ion Corrosion in Cement-based Material under the Tidal Zone[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.

[56] 余红发, 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.
YU Hongfa, SUN Wei, YAN Lianghui, et al. J Chin Ceram Soc, 2002, 30(6): 686–690.

[57] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 II——模型验证与应用[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 691–695.
YU Hongfa, SUN Wei, YAN Lianghui, et, al. J Chin Ceram Soc, 2002, 30(6): 691–695.

[58] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 III——混凝土使用寿命的影响因素及混凝土寿命评价[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 696–701.
YU Hongfa, SUN Wei, YAN Lianghui, et al. J Chin Ceram Soc, 2002, 30(6): 696–701.

[59] YU Z W, CHEN Y, LIU P, et al. Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying–wetting alternation condition chloride environment[J]. Constr Build Mater, 2015, 93: 205–213.

[60] 金立兵. 多重环境时间相似理论及其在沿海混凝土结构耐久性中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
JIN Libing. Multi-environmental time similarity (METS) theory and its application in coastal concrete structural durability[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[61] 卢振永. 氯盐腐蚀环境的人工模拟试验方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
LU Zhenyong. Artificial accelerated test method simulating chloride ingress environment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[62] SONG H W, SHIM H B, PETCHERDCHOO A, et al. Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method[J]. Cem Concr Compos, 2009, 31(2): 120-127.

[63] LIN G, LIU Y, XIANG Z. Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments[J]. Cem Concr Compos, 2010, 32(8): 571–579.

[64] 傅巧瑛. 海洋大气环境下预应力混凝土构件耐久性损伤相似理论研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
FU Qiaoying. Research on damage similarity theory of pre-stressed concrete specimens in marine atmospheric environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.

[65] 鲍玖文, 王立成. 干湿交替下水分及氯离子在混凝土中传输的细观数值模拟[J]. 海洋工程, 2014, 32(1): 68–74.
BAO Jiuwen, WANG Licheng. Ocean Eng (in Chinese), 2014, 32(1): 68–74

[66] 乔峭, 夏文俊, 赵阳, 等. 盐渍土环境下氯离子侵入混凝土模型研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(10): 153–158.
QIAO Di, XIA Wenjun, ZHAO Yang, et al. J Highway Transport Res develop (in Chinese), 2011, 28(10): 153–158.

[67] 薛鹏飞, 项贻强. 修正的氯离子在混凝土中的扩散模型及其工程应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(4): 831–836.
XUE Pengfei, XIANG Yiqiang. J Zhejiang Univ (Eng Sci) (in Chinese), 2010, 44(4): 831–836.

[68] 吕忠达. 杭州湾跨海大桥关键技术研究与实施[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 78–82+87.
LV Zhongda. China Civil Eng J (in Chinese), 2006, 39(6): 78–82+87.

[69] 余红发, 孙伟, 麻海燕, 等. 盐湖地区钢筋混凝土结构使用寿命的预测模型及其应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(4): 638–642.
YU Hongfa, SUN Wei, MA Haiyan, et al. J Southeast Univ (Sci Technol) (in Chinese), 2002, 32(4): 638–642.

[70] 孙玮琨. 潮差区受弯 RC 构件的氯离子侵蚀及模拟试验的相似性[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
SUN Weikun. The chloride ion erosion of RC members under flexural loads and the similarity of simulation test in tidal range[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[71] 周胜兵. 环境因素与弯曲荷载对混凝土抗腐蚀性能影响的试验研究[D]. 杭州：浙江工业大学, 2011.
ZHOU Shengbing. Study on experiment for the influence of environment factors and bending load on anti-corrosion performance of

concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

[72] 余红发, 孙伟, 张云升, 等. 在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法Ⅰ——损伤演化方程与损伤失效模式[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(S1): 128−135.
YU Hongfa, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. J Chin Ceram Soc, 2008, 36(S1): 128−135.

[73] 余红发, 慕儒, 孙伟, 等. 弯曲荷载、化学腐蚀和碳化作用及其复合对混凝土抗冻性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(4): 492−499.
YU Hongfa, MU Ru, SUN Wei, et al. J Chin Ceram Soc, 2005, 33(4): 492−499.

[74] LV H L, WU Y Z, FANG Z, et al. Deterioration behavior of reinforced concrete beam under compound effects of acid-salt mist and carbon dioxide[J]. Constr Build Mater, 2015, 77: 253−259.

[75] 彭智. 干湿循环与荷载耦合作用下氯离子侵蚀混凝土模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
PENG Zhi. Model of chloride penetration concrete under the drying and wetting cycles coupled with load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[76] 沈达满. 多因素耦合作用下水泥基材料损伤劣化研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
SHEN Daman. Research on the degradation of cement-based materials subject to multi-factor[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[77] QI B, GAO J, CHEN F, et al. Chloride penetration into recycled aggregate concrete subjected to wetting–drying cycles and flexural loading[J]. Constr Build Mater, 2018, 174: 130−137.

[78] 张云清. 氯化物盐冻作用下混凝土构件的耐久性评估与服役寿命设计方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
ZHANG Yunqing. Durability and service life design of RC members exposed to chloride salt-frost damage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[79] WANG Y, ZHANG D L, CHEN C H. Study and application of salt-scaling resistant admixture in concrete[J]. Key Eng Mater, 2009, 405-406: 361−366.

[80] 张延文. 桥梁钢 Q345q 在西北典型大气环境中的腐蚀行为研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
ZHANG Yanwen. A study on corrosion behavior of Q345q bridge steel in typical atmospheric environment in northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.

[81] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土的耐久性、机理与使用寿命预测方法[D]. 南京: 东南大学, 2004.
YU Hongfa. Study on high performance concrete in salt lake: durability, mechanism and service life prediction[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.

[82] 陈丁山. 西宁地区现场暴露混凝土耐久性试验研究及寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
CHEN Dingshan. Experimental research on the durability and life prediction of the ordinary concrete field exposure in Xining[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.

[83] 张立明, 余红发, 何忠茂. 盐湖地区混凝土的氯离子扩散性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(6): 1752−1755.
ZHANG Liming, YU Hongfa, HE Zhongmao. J Central South Univ (Sci Technol) (in Chinese), 2011, 42(6): 1752−1755.

[84] 祁兵. 多因素耦合作用下再生混凝土抗侵蚀性能与机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
QI Bing. Erosion resistance and mechanism of recycled aggregate concrete under multi coupling factors[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[85] MEIJERS S J H. Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection, drying-wetting cycles and carbonation[J]. Mater Struct, 2005, 38(2): 145−154.

[86] 杨绿峰, 陈昌, 余波. 海洋浪溅区混凝土的多因素时变环境作用模型[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(11): 1−8.
YANG Lvfeng, CHEN Chang, YU Bo. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(11): 1−8.

[87] 张立明. 基于现场暴露试验与室内耐久性试验之间相关性的混凝土结构耐久性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
ZHANG Liming. Research on durability of reinforced concrete structure based on the correlation between field exposure test and indoor durability test[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[88] 徐现正. 海洋环境下水下区预应力混凝土构件氯盐侵蚀效应相似关系研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
XU Xianzheng. Study on similarity relation of chloride erosion effect of pre-stressed concrete members under underwater zone in marine environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.

[89] 杨金木. 氯盐与荷载耦合作用下混凝土结构性能劣化相似性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
YANG Jinmu. Research on similarity of performance degradation of concrete structures under the coupling effect of chloride and load[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.

[90] 陈素碧, 刘荣桂, 李琮琦, 等. 海洋大气区预应力混凝土氯离子传输时间相似关系研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(11): 3338−3344.
CHEN Subi, LIU Ronggui, LI Zongqi, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2015, 34(11): 3338−3344.

[91] 刘荣桂, 徐洁, 陈素碧, 等. 基于相似理论的海工预应力混凝土构件寿命预测[J]. 水利水运工程学报, 2015(3): 18−23.
LIU Ronggui, XU Jie, CHEN Subi, et al. Hydro-Sci Eng (in Chinese), 2015(3): 18−23.

[92] JIANG W Q, SHEN X H, XIA J, et al. A numerical study on chloride diffusion in freeze-thaw affected concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 179: 553−565.

[93] 王立成, 鲍玖文. 干湿交替下开裂混凝土中水分传输的细观数值分析[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 986−995.
WANG Licheng, BAO Jiuwen. J Hydraulic Eng (in Chinese), 2016, 47(8): 986−995.

[94] WANG L, BAO J, UEDA T. Prediction of mass transport in cracked-unsaturated concrete by mesoscale lattice model[J]. Ocean Eng, 2016, 127: 144−157.

[95] WANG L, UEDA T. Mesoscale modelling of the chloride diffusion in cracks and cracked concrete[J]. J Adv Concr Technol, 2011, 9(3): 241−249.

[96] WANG L, UEDA T. Mesoscale modeling of chloride penetration in unsaturated concrete damaged by freeze-thaw cycling[J]. J Mater Civil Eng, ASCE, 2013, 26(5): 955−965.

[97] 杜修力, 张仁波, 金浏. 开裂混凝土中氯离子扩散行为的细观数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(4): 542−549.

DU Xiuli, ZHANG Renbo JIN Liu. J Beijing Univ Technol (in Chinese), 2015, 41(4): 542–549.

[98] 杜修力, 金浏, 张仁波. 压缩荷载作用下混凝土中氯离子扩散行为细观模拟[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 65–71.
DU Xiuli, JIN Liu, ZHANG Renbo. J Build Mater (in Chinese), 2016, 19(1): 65–71.

[99] HUANG Y, WEI J, DONG R Z, et al. Numerical stimulation method of chloride concentration in the concrete structure exposed to chloride aggressive environment[J]. Appl Mech Mater, 2012, 193: 466–471.

[100] WANG Y, WU L, WANG Y, et al. Prediction model of long-term chloride diffusion into plain concrete considering the effect of the heterogeneity of materials exposed to marine tidal zone[J]. Constr Build Mater, 2017, 159: 297–315.

[101] 彭艳周, 高军, 徐港, 等. 盐冻融环境下钢筋混凝土结构锈蚀寿命预测[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 44–49.
PENG Yanzhou, GAO Jun, XU Gang, et al. Adv Sci Technol Water Resour (in Chinese), 2019, 39(3): 44–49.

[102] 李金玉, 彭小平, 邓正刚, 等. 混凝土抗冻性的定量化设计[J]. 混凝土, 2000, (12): 61–65.
LI Jinyu, PENG Xiaoping, DENG Zhenggang, et al. Concrete (in Chinese), 2000, (12): 61–65.

[103] 李晔, 姚祖康, 孙旭毅, 等. 铺面水泥混凝土冻融环境量化研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 1408–1412.
LI Ye, YAO Zukang, SUN Xuyi, et al. J Tongji Univ (Nat Sci) (in Chinese), 2004, 32(10): 1408–1412.

[104] 张云清, 余红发, 王甲春. 盐冻条件下混凝土结构表面的损伤规律研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 57–63.
ZHANG Yunqing, YU Hongfa, WANG Jiachun. China J Highway Transport (in Chinese), 2009, 22(4): 57–63.

[105] YUAN C F, NIU D T. Chloride ion diffusion model of the concrete under multiple factors[J]. Mater Sci Forum, 2016, 866(1): 43–48.

[106] LIU R G, LI J, LI H. Research on chloride diffusion model in pre-stressed concrete with sulfate attack[J]. Appl Mech Mater, 2012, 166-169: 1935–1940.

[107] GJØRV O E. Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.