

海洋环境结构混凝土耐久性试验研究综述

张 萍^{1 2} 秦鸿根^{1 2} 庞超明^{1 2} 孙 伟^{1 2}

(1. 东南大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189 ; 2. 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京 211189)

摘要 综述了海洋环境结构混凝土暴露试验及室内加速试验的特征及现状,总结了国内外海洋环境结构混凝土耐久性试验方法,指出该领域的发展趋势是对不饱和状态、载荷与环境多因素耦合作用下的混凝土耐久性进行研究,进而探索海洋暴露试验与室内模拟环境加速试验之间的相关性,并建立结构混凝土的损伤劣化与寿命预测模型,从而利用室内模拟环境加速试验的模型预测海洋环境下结构混凝土损伤劣化规律和使用寿命。

关键词 海洋环境 结构混凝土 耐久性 暴露试验 室内加速试验 综述

中图分类号 :P754.5 文献标志码 :A 文章编号 :1006-7647(2012)03-0081-05

Review of durability testing of reinforced concrete in marine environment//ZHANG Ping^{1 2}, QIN Hong-gen^{1 2}, PANG Chao-ming^{1 2}, SUN Wei^{1 2} (1. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China ; 2. Jiangsu Key Laboratory of Construction Materials, Nanjing 211189, China)

Abstract : This paper presents a review of the characteristics and status of exposure tests in marine environment and indoor accelerated tests of reinforced concrete, and summarizes the durability testing methods at home and abroad. The authors point out that the development trend in this area is to study the durability of reinforced concrete in an unsaturated state and the coupling effect of load and marine environment. An important task is to explore the correlation between the exposure tests in a marine environment and the accelerated tests in an indoor simulative environment, and develop a damage deterioration and life prediction model for reinforced concrete. Thus the deterioration rules and the service life of the reinforced concrete in the marine environment can be predicted based on the results of the indoor accelerated tests.

Key words : marine environment ; reinforced concrete ; durability ; exposure test ; indoor accelerated test ; review

国内外相关机构从环境与材料的角度出发,对混凝土结构的耐久性研究较为深入。据不完全统计,美国正在进行的研究项目中,和混凝土耐久性有关的就有 12 项,例如预制预应力混凝土桩海洋环境下的耐久性研究。该项目以提高格鲁吉亚海洋环境中混凝土桥梁的耐久性为主要目的,于 2011 年完成^[1]。荷兰的研究项目——海洋环境中混凝土耐久性研究,拟设计可靠的室内氯离子加速侵蚀试验,对暴露于氯盐环境中的混凝土结构进行评估,最终获得改善混凝土耐久性的方法,将于 2012 年完成。

除了研究混凝土结构耐久性影响机理,如何较好处地进行海洋环境结构混凝土寿命预测,也是重要的研究内容之一。目前,海洋环境结构混凝土耐久性研究采用的试验方法可分为 3 种:现场取样检测、自然环境暴露试验和室内模拟环境加速试验。本文

将对以上方法的研究现状进行综述。

1 试验方法

1.1 现场取样检测

现场取样检测是混凝土结构耐久性测试的基本手段,通常在现场取样和测试,并对取得的试样、检测结果和测试数据进行检测、计算和分析^[2]。国外对海洋大气环境下距海平面不同高度和距海岸线不同距离的混凝土表面氯离子浓度分布做过大量调查,也取得一些珍贵资料,但由于数据分散性大,对混凝土的寿命预测工作较难实现^[3]。

目前现场取样检测多用于对在役混凝土结构进行耐久性评估,或对不同使用年限的混凝土结构取样进行试验分析,与所得室内试验结果和理论模型相验证。

1.2 自然暴露试验

1.2.1 国外暴露试验站现状及试验内容

建立实际环境中的长期暴露试验站,可以获得与实际结构相一致的动态数据,用以对耐久性设计时的关键参数进行监测和调整。

世界上许多沿海国家均建立了不同目的的海洋暴露试验站,其中有专门研究混凝土结构耐久性的场站,有的已经积累了40余年研究数据,不少成果已经反映在近年颁布的各类标准之中。

美国是拥有暴露站较多的国家,20世纪初,通过材料在本土自然环境中的长期暴露试验(大气25~35 a、海水20~25 a、土壤40~45 a)和系统的研究,积累了大量的数据。美阿特拉斯(ATLAS)气候服务集团的海洋暴露站具有诸多环境类型,例如北方寒冷环境、典型地中海气候、亚热带潮汐、沉浸环境、热带海洋气候、临海轻工业环境、多阳光、温度高及湿度大的环境等,承担着世界各地、各机构的科研和生产项目。

TreatIsland(建于1936年)是世界上建造最早同时也是最著名的长期暴露试验站。该暴露试验站设立在潮差区,如图1所示,摆放在暴露站的试件每天可以被海水浸没2次,涨落潮的高差达6.7 m,冬天的最低气温在 -10°C ,试件每年可以经受100~160次冻融循环破坏,试件经受海水浸泡和风干,从而导致氯离子侵入试件内部,引起试件腐蚀及内部钢筋锈蚀。该暴露站目前有22个研究计划正在进行,包括美国建设工程技术研究实验室的海水和冻融对纤维混凝土抗弯强度和其他性能影响的研究项目,美



(a) 潮差区暴露试样



(b) 试样放置

图1 TreatIsland 暴露站混凝土试件

国预应力混凝土项目对不同应力状态下端头锚索的寿命进行的暴露试验等^[4]。

在欧洲,Hudson等^[5]早在20世纪30年代已开始自然环境试验,法国、瑞典、英国等国家均拥有10个以上的各类大气、海洋环境暴露站。加拿大和英国合作,在BRE(building research establishment)暴露站进行了为期10 a的暴露试验,分析了不同混凝土强度等级、不同粉煤灰掺量及类型对粉煤灰混凝土在海洋环境中的性能影响^[6-7]。

其他国家也不同程度地开展了自然环境暴露试验,前苏联于20世纪50年代在本土和我国进行了大量的暴露试验。日本在开展大量金属材料的自然环境试验的同时,与中国、泰国、美国等国家合作,在建筑材料方面也积极地进行研究^[8]。印度、越南、韩国等国也均建立诸多暴露站,有些还加入了全球典型自然环境试验网络^[3]。同时,很多暴露试验为了节约成本并更接近工程实际情况,也借助水坝、海工等场所进行研究^[9-10]。

1.2.2 国内暴露试验站情况及试验内容

截止2003年,全国材料自然环境腐蚀试验网站投入腐蚀试验材料6大类、353种,共9万多个试件,现已积累大气、海水腐蚀环境8~10 a的自然腐蚀数据^[11],数据通过专家评审,已在国家建设中获得应用,并取得了显著的社会效益和经济效益。又经过5 a的发展,我国已经在生态环境、材料环境腐蚀、特殊环境和大气本底、地球物理等4个领域建设了105个国家野外站^[12]。其中典型海洋环境暴露试验站有八所港暴露试验站(亚热带海洋环境)、厦门港湾暴露试验站、华南海港工程材料腐蚀暴露试验站(高温高湿环境氯离子腐蚀)、青岛市小麦岛暴露场、渤海湾现场试验暴露站(冬寒夏热,冬季常结冰,平均潮差为2~3 m,盐度高达3.3%)。近年来,我国在青岛、东海大桥等处又建立了多处暴露试验站,用于对海洋环境下的桥梁混凝土结构耐久性的监测与评估。各研究机构为了得到现场暴露数据,也分别建立自己的暴露试验站。例如,南京水利科学研究院等单位于1968—1978年在湛江港、天津港和上海港开展了钢筋混凝土裂缝试件暴露试验站的研究工作。

国内的暴露试验站承担了众多科研项目,例如孙伟院士主持的973项目“环境友好现代混凝土的基础研究”,其中海洋环境结构混凝土的损伤劣化研究工作在青岛小麦岛暴露场进行,主要研究海洋大气区、潮汐区化学-力学耦合作用下配筋混凝土的长期损伤劣化规律。中港集团建筑材料重点实验室分析了高温高湿环境下,暴露时间、水胶比、掺和料等因素对海工混凝土耐久性的影响。

试件所处的劣化环境即为真实环境,因此现场暴露试验的结果真实可靠,可直接反应材料在实际环境中的损伤劣化情况。与现场取样检测方法相比,暴露试验不会对在役结构造成损伤,工作面好,操作方便。但是,暴露试验所需时间长,试验成本较高,使工作效率和经济效益降低。同时由于暴露环境针对性强,可变因素多,试验可重复性差,难以适用于多变的真实使用环境。目前,如何将复杂环境下测得的数据和资料更准确地用来进行寿命预测和指导新建工程成为研究重点。

1.3 室内加速试验

为了缩短试验周期,增强可重复性,研究者通过室内模拟加速试验来研究混凝土结构的耐久性问题。室内加速试验首先能够模拟实际环境,或者使室内环境和自然环境具有相关性,其次能够加速腐蚀和损伤进程。

海洋潮汐环境混凝土耐久性加速试验较多地采用干湿循环方法,可以分为周期性浸泡干湿循环方法和周期性喷淋干湿循环方法^[13-14]。周期性浸泡干湿循环方法是将试件在溶液中浸泡一段时间,然后在一定温度下干燥一段时间,如此循环进行海水干湿循环模拟。周期性喷淋是定时将溶液喷淋在试件上,然后用灯照等方式干燥一段时间,如此交替进行模拟。其各环节中氯离子含量、温度、相对湿度、干燥时间、浸泡时间、循环周期等参数的设置均未有统一标准。目前使用较多的为单因素模拟,而多因素、荷载与环境因素耦合作用下混凝土结构的损伤劣化室内加速试验也正在研究中,其试验方法也未有统一标准。

2 室内加速试验与现场暴露试验的相关性

室内加速试验是目前混凝土耐久性试验普遍采用的方法,但是用几个月或几年的试验结果来判断近百年的使用寿命,偏差会较大,因此,研究者逐渐采用相应的暴露试验来验证室内加速试验的结果,目前已取得一定的成果。例如“环境对钢筋混凝土耐久性的影响”(DURACON)项目由巴西、阿根廷等11个国家共同资助,其前期结果表明,经过21个海洋暴露试验站的腐蚀状况统计和概率分析,其暴露试验结果和室内电化学试验结果基本吻合^[15]。加拿大CANMET实验室和美国德州奥斯汀大学也对室内加速试验方法及现状进行了研究^[16],认为需要进一步改进和完善测试方法,以提供准确可靠的结果,以期和暴露试验结果有更好的关联。浙江大学金伟良教授将相似理论应用于混凝土结构耐久性的研究,提出多重环境时间相似理论(METS),解决了室内加

速试验环境与现场实际环境之间的相似性问题^[17]。

如何在不同模拟环境条件下统一室内加速试验方法的相关标准,如何由单因素模拟转向多因素、荷载与环境因素耦合模拟,使室内加速试验得到的离子运动特性及规律、混凝土损伤失效过程以及使用寿命预测模型与实际环境具有更好的相关性,尚有待进一步研究。

3 现有理论成果及存在的问题

目前取得的研究成果主要在损伤规律、影响因素和模型建立等方面。

在损伤规律和影响因素方面,根据多年暴露试验结果,结合室内加速试验,取得了以下一致的观点^[18-20]:①不同部位混凝土的表面氯离子浓度和临界氯离子浓度受气候条件、海水中化学物质含量、混凝土配合比、掺和料种类的影响较大;②随着混凝土服役龄期的延长,表面氯离子浓度提高,氯离子扩散系数逐渐衰减,其衰减系数与水胶比、掺和料种类等有关;③降低混凝土水胶比,掺入粉煤灰、矿渣微粉等活性掺和料会显著降低混凝土的表观氯离子扩散系数,增强混凝土的抗氯离子渗透能力,提高混凝土的耐久性;④涂层干膜厚度200~400 μm,且质量良好的涂层能使距表面不同深度的氯离子积聚量降低很多,能够有效抵抗氯离子对混凝土的渗透和扩散作用,可有效延长海工混凝土结构使用寿命,且施工简便,涂层保护费用低。

目前,模型的建立主要通过室内加速试验,结合少量暴露试验结果来研究,且主要集中在饱和条件下氯离子的扩散与结合。采用Fick第二定律来计算离子扩散系数已得到广泛的认同,其基本数学模型如下:

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{tD}}\right)$$

式中: $C(x,t)$ 为在深度 x 、时间 t 的氯离子质量分数,%; C_i 为初始氯离子质量分数,%; C_s 为混凝土暴露表面氯离子质量分数,%; t 为暴露时间,s; x 为深度,m; erf 为误差函数; D 为扩散系数, m^2/s 。

不少学者对该模型进行了修正,如考虑扩散系数的时间依赖性的Mangat理论模型,考虑线性函数和幂函数边界条件的Amey理论模型,考虑指数函数边界条件的Kassir理论模型,欧洲Duracrete项目的Mejlbro理论模型等。在此基础上,余红发等^[21]综合考虑氯离子结合能力、氯离子扩散系数的时间依赖性和结构微缺陷影响,提出了修正模型。

在实际服役环境中,混凝土并非始终处于饱和状态。在海洋潮汐区、浪溅区以及大气区等环境,在

离子侵蚀、干湿循环和应力耦合作用下,多数混凝土处于不饱和状态。这些复杂环境下混凝土耐久性的研究成果,尤其是寿命评估与预测模型方面的研究成果极少。对于海洋潮汐区和浪溅区多采用浸烘或干湿交替方法来模拟加速海洋潮汐环境^[13-14],主要集中于水分在不同温度和湿度下的传输^[22-26]。Tetsuya 等^[27]建立了水分在水泥基材料中的传输模型,后扩展研究到任意温度。陈伟等^[28]基于 Fick 定律提出了计算混凝土干燥影响深度和受影响区边界氯离子浓度的方法,对 Fick 扩散模型的边界条件进行了修正,并采用有限差分法进行求解。李春秋等^[29]采用有限元模拟并分析了在饱和与非饱和状态下的水分影响深度,并通过研究认为,水分传输的合理边界条件为混凝土表面空气湿度等于环境湿度。有少量研究者对比了离子研究与水分研究的区别,沈春华等^[30]认为,由于盐溶液改变了液体的表面张力和黏度,氯化钠溶液在砂浆中的传输速率大于在纯水中的传输速率,且传输速率最大的氯化钠浓度为 1 mol/L。最早将裂缝或荷载与氯离子渗透性能结合起来的是法国的 Francois 等^[31]。LI Chun-qing 教授^[32]对处于自然盐水喷洒和荷载作用的混凝土构件的腐蚀开始时间进行了初步研究。韩国分别在国家实验室和混凝土设计和施工规范标准化项目资助下,进行了海洋环境下钢筋混凝土的耐久性研究^[33-34],提出了多因素下的预测模型,并以 15 周的室内加速试验和使用 10 a 的混凝土桥梁来验证。

总体来说,目前干湿循环理论主要结合毛细吸附理论和扩散理论两方面进行研究,但研究成果极不完善,仅有沈春华等^[25]提出毛细吸附理论和扩散理论的叠加,并通过数值方法求解水分的传输总量,其损伤失效规律和寿命预测模型尚有待进一步的研究。

影响混凝土耐久性的因素众多,彼此相互耦合,因此对混凝土结构进行寿命评估和预测是一项意义重大且非常困难的工作,建立的各种模型多数基于实验室模拟,与现场实际情况往往有很大的差别。此外,对于多重环境化学-力学耦合作用下混凝土的耐久性及其寿命预测的研究非常有限,尚不存在可靠的数学模型。

4 结 语

通过现场取样和暴露试验,各国对海洋环境结构混凝土耐久性的各影响因素有了详尽的数据资料,室内加速试验方法也不断改进,但它们之间的相关性仍需要进一步探讨。多因素作用下混凝土失效特征和机理,海洋潮汐区、浪溅区以及大气区等不饱

和混凝土及化学-力学耦合作用下的海洋环境结构混凝土的耐久性研究等现已有所涉及,但是仍未有能够普遍应用的模型,还有待通过结合各种试验方法和经过长期系统试验来确定模型中的关键技术参数的可靠性,从而建立更准确、更适合于工程应用的混凝土寿命预测模型。

参考文献:

- [1] SUPRIYA K. Transportation research board: research in progress[EB/OL]. [2012-04-26]. <http://rip.trb.org/browse/dproject.asp?n=25288>.
- [2] 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,2006,11(36):61-67.
- [3] VENKATESAN P, PALANISWAMY N, RAJAGOPAL K. Corrosion performance of coated reinforcing bars embedded in concrete and exposed to natural marine environment[J]. Progress in Organic Coatings 2006 56(1):8-12.
- [4] WILSON M L. Concrete in the marine environment-treat island marine exposure Station[EB/OL]. (2012-04-28). http://www.cement.org/tech/dur_treat_island.asp.
- [5] HUDSON N W. Soil and water conservation in semi-arid areas [M]. Rome:FAO Land and Water Conservation Service, 1987.
- [6] MATTHEWS J. Concrete durability studies at BRE's marine exposure site. [EB/OL]. (2010-06-26). <http://www.allbusiness.com/management/933248-1.html>.
- [7] THOMAS M D A, MATTHEWS J D. Performance of pfa concrete in a marine environment: 10-year results[J]. Cement & Concrete Composites 2004 26(1):5-20.
- [8] YOSHIKI T, HIROTAKA K, HIROSHI W, et al. Study on cover depth for prestressed concrete bridges in airborne-chloride environment[J]. PCI Journal 2006 51(2):42-55.
- [9] COST A, APPLETON J. Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal[J]. Cement & Concrete Composites 2002 24(1):169-179.
- [10] POUPARD O, HOSTIS V L, CATINAUD S, et al. Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment[J]. Cement and Concrete Research 2006 36(3):504-520.
- [11] 柯伟.中国腐蚀调查报告[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [12] 科学技术部办公厅.我国科技工作的若干重要进展(三):科技工作情况[EB/OL]. (2008-04-16). <http://www.most.gov.cn/cbw/zl/kjgzqk/2008/200807/P020080704355218777714>.
- [13] 张玉敏,马静,矫强.盐溶液侵蚀环境下混凝土耐久性的研究[J].应用科技,2003,30(10):55-58.
- [14] 李岩.氯离子在混凝土中的渗透性能与钢筋腐蚀临界浓度的试验研究[D].南京:南京水利科学研究所,2003.6.

[15] RINCÓN O.TROCÓNIS D ,SÁNCHEZ M ,et al. Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in iberoamerican countries :DURACON project/CYTED[J]. Corrosion Science ,2007 ,49(7) 2832-2843.

[16] IDEKER J H ,EAST B L ,FOLLIARD K J. The current state of the accelerated concrete prism test[J]. Cement and Concrete Research ,2010 ,40(4) 550-555.

[17] 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.

[18] 范志宏 ,杨福麟 ,黄君哲 ,等.海工混凝土长期暴露试验研究[J].水运工程 ,2005(9) 45-49.

[19] 杜宇 ,蒋林华 ,仇高山 ,等.膨胀混凝土延迟膨胀损伤模型[J].水利水电科技进展 ,2010 ,30(4) 4-7.

[20] 黄君哲 ,周欲晓 ,王胜年 ,等.海工混凝土结构表面涂层暴露试验及应用效果[J].中国港湾建设 ,2002(6) :71-74.

[21] 余红发 ,孙伟.混凝土氯离子扩散理论模型[J].东南大学学报 :自然科学版 ,2006 ,36(增刊 2) 68-77.

[22] ISHIDA T ,MAEKAWA K ,KISHI T. Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history[J]. Cement and Concrete Research ,2007 ,37(4) 565-578.

[23] 陈伟 ,许宏发.考虑干湿交替影响的氯离子侵入混凝土模型[J].哈尔滨工业大学学报 ,2006 ,38(12) :2191-2193.

[24] LI Chun-qiu ,LI Ke-fei ,CHEN Zhao-yuan. Numerical analysis of moisture influential depth in concrete during drying-wetting cycles[J]. Tsinghua Science and Technology ,2008 ,15(5) :696-701.

[25] 沈春华.水泥基材料水分传输的研究[D].武汉 :武汉理

工大学 ,2007.

[26] KOICHI M , TETSUYA I , TOSHIHARU K. Multi-scale modeling of structural concrete[M]. London : Taylor & Francis ,2009.

[27] TETSUYA I ,KOICHI M ,TOSHIHARU K. Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history[J]. Cement and Concrete Research ,2007 ,37(4) 565-578.

[28] 陈伟 ,许宏发.确定混凝土中氯离子扩散系数的方法及适用性评价[J].混凝土 ,2004 ,12 :12-15.

[29] 李春秋 ,李克非 ,陈肇元.混凝土中水分传输的边界条件研究[J].工程力学 ,2009 ,26(8) 74-81.

[30] 沈春华 ,水中和 ,周紫晨.水泥基材料水分传输及动力学研究[J].武汉理工大学学报 ,2007 ,29(9) 85-88.

[31] FRANCOIS R ,MASO J C. Effect of damage in reinforced concrete on carbonation or chloride penetration[J]. Cement and Concrete Research ,1988 ,18(6) 961-970.

[32] LI Chun-qing. Corrosion initiation of reinforcing steel in concrete under natural salt spray and service loading-results and analysis[J]. ACI Materials Journal ,2000 ,97(6) :690-697.

[33] OH B H ,JANG S Y. Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures[J]. Cement and Concrete Research ,2007 ,37(1) :47-53.

[34] PACK S W ,JUNG M S ,SONG H W. Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment[J]. Cement and Concrete Research ,2010 ,40(2) 302-312.

(收稿日期 2011-09-22 编辑 :周红梅)

(上接第 42 页)

参考文献 :

[1] 石振明 ,李建可 ,鹿存亮 ,等.堰塞湖坝体稳定性研究现状及展望[J].工程地质学报 ,2010 ,18(5) 657-663.

[2] 童煜翔.山崩引致之堰塞湖天然坝体稳定性之量化分析[D].台北 :台湾中央大学 ,2008.

[3] 柴贺军 ,刘汉超 ,张俦元 ,等.天然土石坝稳定性初步研究[J].地质科技情报 ,2001 ,20(1) 77-81.

[4] 水库大坝病险与溃坝规律研究[R].南京 :南京水利科学研究院 ,2010.

[5] 李云 ,李君.溃坝模型试验研究综述[J].水科学进展 ,2009 ,20(2) 304-310.

[6] 李云 ,王晓刚 ,宣国祥 ,等.均质土坝漫顶溃坝模型相似准则研究[J].水动力学研究与进展 :A 辑 ,2010 ,25(2) :270-276.

[7] 彭学彬.大坝稳定性分析方法与应用实例[J].中国西部科技 ,2009 ,8(4) 49-50.

[8] 陈祖煜.土质边坡稳定分析 :原理·方法·程序[M].北京 :中国水利水电出版社 ,2003.

[9] 李宗坤 ,王鹏飞 ,赵凤遥.基于流固耦合理论的土石坝稳定性分析[J].郑州大学学报 :工学版 ,2009 ,30(3) :44-47.

[10] 孙丽丽 ,李宗利.基于强度折减法的土石坝边坡稳定性分析与探讨[J].水资源与水工程学报 ,2009 ,20(5) :113-116.

[11] ERMINI L ,CASAGLI N. Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index[J]. Earth Surface Processes and Landforms ,2003 ,28 31-47.

[12] KORUP O. Geomorph metric characteristics of New Zealand landslide dam[J]. Engineering Geology ,2004 ,73 :13-35.

[13] 张文彤.SPSS 统计分析高级教程[M].北京 :高等教育出版社 ,2004.

[14] 谢任之.溃坝水力学[M].济南 :山东科学技术出版社 ,1993.

(收稿日期 2011-10-13 编辑 :熊水斌)