

文章编号:1005-0523(2014)06-0103-05

湿热环境下混凝土受酸雨腐蚀的试验研究

谢力^{1,2}, 韩英俊¹, 陈梦成¹

(1.华东交通大学建筑过程模拟与控制江西省重点实验室,江西 南昌 330013;2.南昌大学建筑工程学院,江西 南昌 330031)

摘要:为了揭示酸雨环境下混凝土性能的劣化规律,分别配置pH1.5、pH2.5和pH3.5的3种溶液来模拟不同酸度的酸雨,在实验室自动喷淋装置中模拟降雨和加热干燥,采用干湿交替的试验方法对100个C40混凝土试件进行不同程度的加速腐蚀,得出不同腐蚀状态下混凝土外观、质量、中性化、抗压强度的变化规律。试验结果表明:随着腐蚀时间的延长混凝土的外观有不同程度的劣化,中性化深度不断加深。混凝土质量、抗压强度在pH2.5和pH3.5条件下都是先短暂地增大后逐渐减小,而在pH1.5条件下是一直递减。

关键词:酸雨;酸沉降;湿热;腐蚀;混凝土

中图分类号:TU528

文献标志码:A

混凝土结构的耐久性问题是当今土木工程界重点关注的对象,而酸雨是影响混凝土耐久性的重要因素之一。我国已成为继欧、北美后第三大酸雨区,酸雨面积已超过国土面积的30%^[1]。近年来,我国南方酸雨区域无明显变化,北方在不断扩展,酸度有所减弱,但全国酸雨形式依然严峻^[2]。随着建设步伐的加快,越来越多的桥梁和房屋结构遭受酸雨的侵蚀,目前,大型水利桥梁等基础设施的环境评价也涉及到了酸雨的影响^[3]。因此,开展酸雨环境下混凝土的侵蚀试验研究对实际工程具有重要的理论指导意义。

关于酸雨对混凝土性能影响方面国内外学者进行了一系列的试验研究,众多学者^[4-10]采用浸泡加速腐蚀的方法以及部分学者^[3,11-14]采用喷淋的方法,对酸雨单因素以及多因素耦合作用下混凝土的质量、中性化、抗压强度等进行试验研究。然而像江西、贵州、重庆等省市在中国属于酸雨重灾区,湿热也非常严重,但在上述模拟试验中鲜有将酸雨喷淋和温度这两者结合起来进行研究。拟配制pH1.5、pH2.5和pH3.5的3种酸雨溶液,在酸雨喷淋-湿热装置中进行实验室快速腐蚀试验,讨论不同腐蚀龄期混凝土在质量、外观、中性化、抗压强度4个方面的劣化规律,为后期研究混凝土构件和结构试验提供试验依据和理论基础。

1 试验设计

1.1 试验材料及配合比

试验采用C40普通硅酸盐混凝土,坍落度为180 mm;水泥为洋房牌P·O 42.5级普通水泥;砂子为赣江中沙;石子采用粒径为10~15 mm的青碎石;水采用自来水;粉煤灰等级为I级;减水剂为聚羧酸系高效减水剂;各材料参数及配合比见表1。

1.2 试件制作

根据试验需求,制备100个立方体试件(150 mm×150 mm×150 mm)测量混凝土质量、抗压强度变化,6个长方体试件(100 mm×100 mm×400 mm)测量中性化深度变化。试验混凝土设计强度为40 MPa,试件成

收稿日期:2014-10-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51378206,51468017);江西省教育厅项目(GJJ126963)

作者简介:谢力(1978—),男,实验师,博士研究生,主要研究方向为工程结构材料耐久。

通讯作者:陈梦成(1962—),男,教授,博导,主要研究方向为工程结构材料耐久性。

型24 h后脱模,标准养护28 d后进行喷淋试验,测得立方体抗压强度为42.2 MPa。中性化试件用环氧树脂密封相邻的两个面。

表1 混凝土配合比设计

Tab.1 Mix proportion of the concrete

配合比组成/(kg·m ⁻³)						水胶比	砂率/%
水泥	粉煤灰	水	碎石	砂	减水剂		
313	120	137	1 082	748	3.9	0.45	40

1.3 试验模拟及方法

参照江西地区酸雨的酸度和离子浓度配制模拟溶液,采用喷淋的方式模拟酸雨的溶蚀和冲刷,通风加热的方式对试件进行干燥。运用喷淋-加热的循环方式模拟自然条件下酸雨对混凝土的侵蚀。

1.3.1 溶液模拟及装置

模拟酸雨溶液各离子浓度分别为: SO_4^{2-} 为 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ 为 $0.002 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, Mg^{2+} 为 $0.002 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。溶液pH值分别为1.5, 2.5和3.5,试验过程中采用日岛pSH-25数显酸度计测量并用稀硝酸调节溶液pH,每天3次,每5天更换1次溶液。

试验装置是集喷淋与通风加热于一体的封闭装置,通风加热同时工作,并且由时间和温度控制器自动控制。选用抽水量为 $60 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、扬程为7 m的磁力驱动耐腐蚀泵,溶液经倾角为 60° 的管道微孔斜向上喷至挡板后自由下落,自由下落高度为1 550 mm。

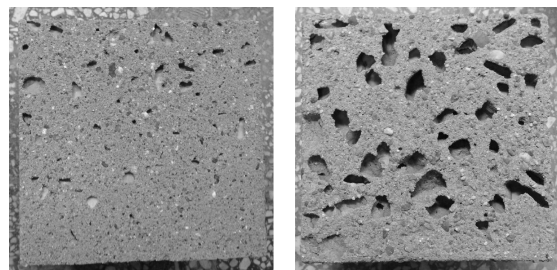
1.3.2 试验方法

采用干湿交替的腐蚀试验方法,每喷淋3 h-静置2 h-通风加热2 h-静置1 h为1个循环,每天3个循环,每10 d对试件进行拍照以及质量、强度和中性化深度测量,每次喷淋开始前调节溶液pH,加热时温度控制在 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。立方体抗压及抗拉试验每组分别3个试块,每到预定的腐蚀龄期将试件自然干燥5 d后进行试验。强度试验按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002)规定进行。每隔10 d在试件上切下50 mm的厚度,用清水清洗并干燥后用裂缝测宽仪测量中性化深度。

2 试验结果与分析

2.1 混凝土外观

随着试验的进行,经3种溶液腐蚀后的混凝土试件外观发生了不同程度的变化。置于pH3.5的溶液中腐蚀30 d过程中,混凝土颜色从最初的浅灰色变成浅黄色,腐蚀到40 d时混凝土表面局部有轻微麻面现象,在之后的腐蚀过程中,试件表面黄色逐步加深并且有砂砾脱落现象。经pH2.5的溶液腐蚀10 d,试件表面呈浅黄色,腐蚀30 d表面砂浆轻微脱落,腐蚀50 d后,局部有坑蚀现象,60 d时粗骨料外露,此后,随着腐蚀时间延长坑蚀数量增多,总面积增大。受pH1.5的酸雨溶液腐蚀10 d时试件表面就有坑蚀现象,随后,坑蚀逐渐严重。后期粗骨料在酸雨的冲刷腐蚀作用下也被溶蚀且深度逐步增大。这是因为随着腐蚀时间的延长混凝土硫酸根离子浓度增大,使得试件表面黄色加深,溶液溶蚀作用使得细骨料松动脱落,加上冲刷作用最终使得试件表面产生不同程度的坑蚀现象。试验现象如图1所示。



(a) pH2.5-60 d

(b) pH1.5-50 d

图1 腐蚀后试件外观

Fig.1 Specimen appearance after corrosion

2.2 试件质量

混凝土质量变化与腐蚀时间的关系如图2所示。由图2(a)可知,试件在pH1.5的酸雨溶液中经过30个

干湿循环后就有质量损失,整个试验过程中损失量和腐蚀时间大致呈线性关系,试验进行到90 d时,试件最终质量损失达到1.435 kg。由图2(b)可知,在pH2.5和pH3.5两种酸雨溶液中,混凝土质量在前10 d有所增加之后逐渐减小,增加量分别为0.039 kg和0.023 kg,最后质量损失总量分别为0.136 kg和0.067 kg。试件质量损失速率为 $\text{pH}1.5 > \text{pH}2.5 > \text{pH}3.5$ 。

这些试验现象是因为酸雨对混凝土的腐蚀包括 H^+ 的溶蚀、雨滴的冲刷作用和硫酸盐的侵蚀, H^+ 的溶蚀和雨滴的冲刷都会促使混凝土质量损失,而硫酸盐的侵蚀是有新物质的生成使得混凝土的质量增大,混凝土质量在pH1.5的条件下以及pH2.5和pH3.5的下降段说明 H^+ 的溶蚀和雨滴的冲刷作用要大于硫酸盐的侵蚀作用,而在pH2.5和pH3.5的上升段则刚好相反。溶液酸度越大,溶蚀冲刷作用越明显。

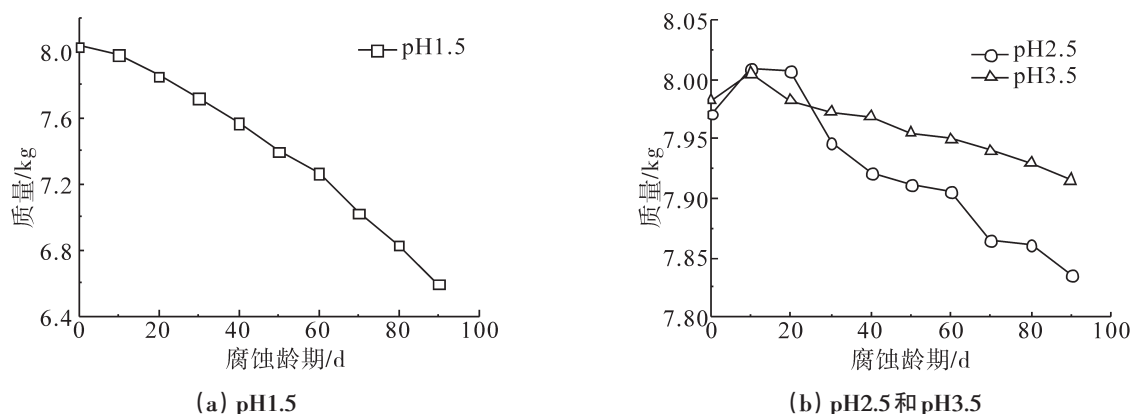


图2 质量变化与腐蚀时间关系

Fig.2 Relationship between mass loss and corrosion time

2.3 试件中性化深度

在3种腐蚀环境下混凝土中性化深度与腐蚀时间的关系如图3所示。从图中可以看出,混凝土的中性化深度随着时间不断增大,中性化增大速率随着酸度的增大而减小。腐蚀时间相同时,pH值越小中性化深度越大。在pH2.5和pH3.5酸雨侵蚀下,混凝土中性化发展较为缓慢而且数值较为接近,试验末期中性化深度仅有1.991 mm和1.625 mm。经pH1.5的酸雨侵蚀后混凝土中性化深度增大较快,腐蚀30 d时,中性化深度为1.117 mm,到60 d时增加了69.1%,到90 d时又增加73.4%,说明酸度和腐蚀时间都是影响中性化的重要因素。在pH3.5溶液中湿热循环腐蚀后混凝土中性化深度的测试结果要比文献^[14]的结果大得多,说明干湿循环会促使中性化的加深。中性化深度越深,钢筋的保护层就越小,钢筋越易发生锈蚀。酸雨溶液中的 H^+ 与混凝土中水泥水化产物发生中和反应是中性化深度增大的最主要因素,同时在湿热循环加速腐蚀条件下,硫酸盐侵蚀会使混凝土内部产生细小裂纹从而加速溶液的渗透速率,因此,试件的中性化深度随着腐蚀时间在不断增大。

2.4 抗压强度

不同腐蚀环境下混凝土立方体抗压强度变化如图4所示。从图上可以看出,腐蚀环境不同混凝土抗压强度的变化规律不尽相同。在pH3.5酸雨溶液条件下前40 d湿热循环腐蚀过程中,混凝土抗压强度呈上升趋势,之后缓慢下降,最大值为47.0 MPa,比试验初期增大了9.8%,腐蚀末期最小值为42.1 MPa,比腐蚀前仅降低了0.7 MPa。在pH2.5条件下前30 d抗压强度在不断增大,但增大速率要略小于pH3.5的情况,下降段速率明显快于前者。腐蚀循环第70 d时强度已低于混凝土设计值,试验末期抗压强度最小值为36.3 MPa,比试验初降低了15.2%。对于pH1.5酸雨溶液中的试件,其抗压强度随腐蚀时间一直下降,后期的下降速率要大于前期。腐蚀90 d时混凝土抗压强度为27.5 MPa,比试验初降低了35.7%,已经远小于试件的设计强度。

在自然环境中,pH < 3.5的酸性降雨极其少见,酸度较小的酸沉降对混凝土的腐蚀是一个缓慢的过程。在本试验干湿循环的条件下硫酸盐侵蚀机理多为结晶型侵蚀,当晶体膨胀应力较小时,结晶产物可以

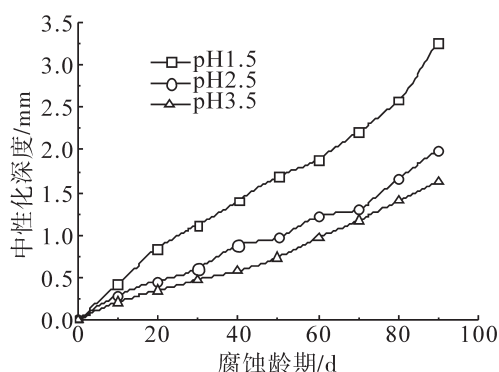


图3 中性化深度与时间关系

Fig.3 Concrete neutralization depth versus time

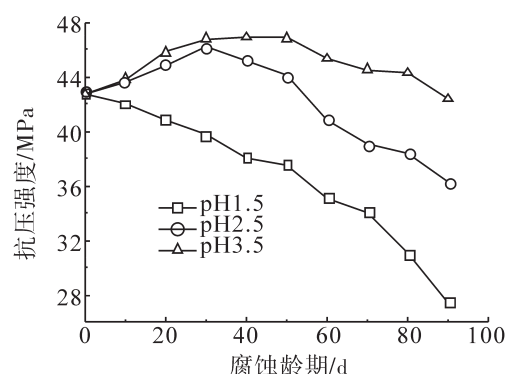


图4 立方体抗压强度与腐蚀时间的关系

Fig.4 Relationship between cube compressive strength and corrosion time

填充混凝土内部空隙,从而使得抗压强度有所增大,随着膨胀应力的增大内部裂纹不断增多,以及酸性介质的冲刷、溶蚀作用三者共同作用又使强度降低。在酸度较大的情况下,溶液的溶蚀、冲刷作用占主导地位,使得混凝土强度一直下降。

3 结论

1) 在湿热酸雨环境中,不同pH的模拟酸雨溶液对混凝土的腐蚀情况不同。pH2.5和pH3.5的酸雨溶液使混凝土试块质量先增大后减小,而pH1.5的模拟酸雨溶液对试块的腐蚀能力更强,其质量损失始终增大。混凝土中性化深度随着腐蚀时间不断增大,溶液酸性越强中性化深度越大,在pH2.5和pH3.5两种条件下中性化深度相差不大。

2) 在湿热酸雨环境中,混凝土抗压强度损失随着pH的减小而增大,其中在pH2.5和pH3.5溶液中混凝土抗压强度先短暂地增大后逐渐减小,而在pH1.5条件下则是一直递减。

参考文献:

- [1] 吴丹,王式功,尚可政. 中国酸雨研究综述[J]. 干旱气象,2006,24(2):70-77.
- [2] 张新民,柴发合,王淑兰,等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究,2010,23(5):527-532.
- [3] 范颖芳,王大为,栾海洋. 模拟酸雨沉降环境混凝土梁承载性能研究[J]. 工程力学,2014,31(4):147-155.
- [4] FATTUHI N I, HUGHES B P. The performance of cement paste and concrete subjected to sulphuric acid attack[J]. Cement and Concrete Research,1988,18(4):545-553.
- [5] 张英姿,范颖芳,李宏男,等. 模拟酸雨环境下混凝土抗拉性能试验研究[J]. 建筑材料学报,2012,15(6):857-862.
- [6] XIE S, QI L, ZHOU D. Investigation of the effects of acid rain on the deterioration of cement concrete using accelerated tests established in laboratory[J]. Atmospheric Environment, 2004,38(27):4457-4466.
- [7] 张英姿,范颖芳,刘江林,等. 模拟酸雨环境下C40混凝土抗压性能试验研究[J]. 建筑材料学报,2010,13(1):105-110.
- [8] 许崇法,曹双寅,范沈龙,等. 应力、碳化及酸雨作用下混凝土中性化试验研究[J]. 土木工程学报,2014,47(5):64-70.
- [9] KISHIMOTO Y, HOKOI S, HARADA K, et al. Influences of acid rain on the neutralization process[C]//Proceedings of the 3th International Building Physics Conference Research in Building Physics and Building Engineering, Canada: Montreal, QC, 2006: 209-216.
- [10] 牛荻涛,周浩爽,牛建刚. 承载混凝土酸雨侵蚀中性化试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2009,28(3):411-415.
- [11] 胡晓波. 酸雨侵蚀混凝土的试验模拟分析[J]. 硅酸盐学报,2008,36(Z1):147-152.

- [12] 王大为. 模拟酸雨环境下钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[D]. 大连:大连海事大学,2011.
- [13] OKOCHI H, KAMEDA H, HASEGAWA S, et al. Deterioration of concrete structures by acid deposition—an assessment of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field exposure experiments using mortar specimens [J]. *Atmospheric Environment*, 2000(34):2937–2945.
- [14] 尹健,龚胜辉,张贤超,等. 基于酸雨和碳化耦合作用的混凝土耐蚀性能分析[J]. *铁道科学与工程学报*,2011,8(4):28–34.

Experimental Study on Acid Corrosion of Concrete in Moist Heat Environment

Xie Li^{1,2}, Han Yingjun¹, Chen Mengcheng¹

(1. Key Laboratory of Construction Process Simulation and Control of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In order to analyze the corrosion of concrete exposed to the acid rain environment, 3 kinds of solutions with pH of 1.5, 2.5 and 3.5 were prepared to simulate the acid situation. The tests were carried out in an automatic rainfall device with the wet-heat drying cycle method. One hundred C40 concrete specimens were exposed to the different simulated acid environments for certain periods to investigate the variation of concrete appearance, quality, neutralization and compressive strength. The results show as follows: Appearance of the concrete deteriorated gradually with the extension of corrosion time; Neutralization depth continued to increase along with time, and the lower the pH of the solution was, the greater the depth of neutralization became; Quality, compressive strength of the concrete decreased briefly first, then increased gradually under the condition of pH of 2.5 and 3.5, but constantly decreased under the condition of pH1.5.

Key words: acid rain; acid precipitation; moist and heat; corrosion; concrete