

不同环境中杂散电流对钢筋混凝土腐蚀影响

陈迅捷, 欧阳幼玲, 钱文勋, 何 旻

(南京水利科学研究所, 水利部水工新材料工程技术研究中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 研究了在一般环境、氯化物环境、冻融-氯化物环境中, 杂散电流对普通钢筋混凝土和添加适量活性掺合料的耐腐蚀钢筋混凝土腐蚀程度的影响。试验结果表明, 在氯盐-杂散电流双重因素腐蚀条件下, 氯化物环境加速杂散电流对建筑钢筋混凝土结构的腐蚀。与同水胶比普通混凝土相比, 耐腐蚀混凝土内钢筋产生锈蚀的电流密度可提高5倍。耐腐蚀混凝土极大延缓氯盐环境中杂散电流腐蚀破坏时间, 较同水胶比的普通混凝土延长15倍。杂散电流的存在加剧了混凝土在氯化物环境中的冻融破坏。

关键词: 杂散电流; 钢筋混凝土; 腐蚀; 掺合料; 耐腐蚀混凝土

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)02-0033-05

地铁交通和高压变电输送均可能产生杂散电流。杂散电流对钢筋混凝土构造物的腐蚀日益受到人们的重视^[1-4]。有关试验研究表明, 适宜掺量的活性掺合料有利于提高钢筋混凝土抗杂散电流腐蚀耐久性^[5]。在沿海环境中修建的地铁工程和变电站工程, 其钢筋混凝土同时还遭受氯盐侵蚀和冻融循环破坏。在氯盐环境中, 杂散电流对钢筋混凝土腐蚀加剧^[6], 混凝土冻融循环破坏也加剧^[7-8]。而对于同时存在氯盐、冻融以及杂散电流的多重腐蚀条件下, 混凝土的性能劣化规律还未见相关研究报道。

本文通过对几年来多个项目的研究结果分析, 揭示在一般环境、氯化物环境、冻融-氯化物环境中, 杂散电流对普通钢筋混凝土和添加适量活性掺合料的耐腐蚀钢筋混凝土腐蚀程度的影响规律, 为类似环境中的工程设计建设提供参考。

1 试验方案与混凝土试验配合比

1.1 试验研究方案

杂散电流通过钢筋混凝土采用了2种试验方案(见图1): 方案1为杂散电流直接通过钢筋, 不以钢筋外混凝土作为导体; 方案2为杂散电流通过局部混凝土作为导体, 在混凝土内钢筋中形成回路。

采用方案1, 试验分析杂散电流强度在氯化物环境和冻融-氯化物环境中对钢筋混凝土腐蚀程度的影响。混凝土试件尺寸为100 mm×100 mm×200 mm, 并在试件中心位置埋设直径6 mm, 长100 mm钢筋。钢筋两端用导线接出, 用以连通直流电源。试件除了一个100 mm×200 mm的侧面供外界盐离子渗透外, 其余5个表面均用环氧树脂封闭。

采用方案2, 试验分析普通钢筋混凝土和添加适量活

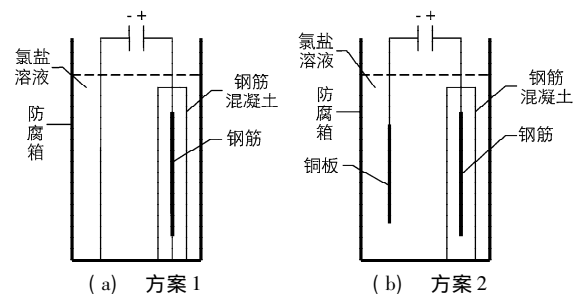


图1 杂散电流通过钢筋混凝土试验方案

Fig. 1 Experiment design of stray current corrosion of steel in concrete

收稿日期: 2013-05-10

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(Y410003)

作者简介: 陈迅捷(1963-), 男, 上海人, 教授级高级工程师, 主要从事水工混凝土试验研究。E-mail: xjchen@nhri.cn

性掺合料的耐腐蚀钢筋混凝土的抗腐蚀耐久性。将尺寸为 100 mm × 100 mm × 200 mm 的混凝土试件中心埋设 $\Phi 6$ mm × 100 mm 的钢筋,在钢筋的一端焊有绝缘铜线,将 5 面封闭的混凝土试件和电极板放入盛有饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液或 3.5% NaCl 溶液的容器内,接直流电源,钢筋接正极,电极板接负极,进行加速腐蚀试验。

1.2 混凝土原材料和试验配合比

混凝土原材料:天山牌 P. O42.5 普通硅酸盐水泥、妈湾电厂 II 级粉煤灰、唐山钢铁厂生产的 S95 级矿渣粉、深圳天地集团提供的中粗江砂和人工砂岩碎石、萘系减水剂(FDN-1)和 DH-9 引气剂。

普通混凝土和掺加 20% 粉煤灰+40% 矿渣的耐腐蚀混凝土试验配合比参数见表 1。表中给出采用 RCM 法^[9]测定的混凝土氯离子扩散系数。

表 1 混凝土试验配合比参数

Tab. 1 Concrete mix proportion

混凝土	水胶比	胶凝材料比例 / %			用水量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂率	坍落度 / mm	含气量 / %	氯离子扩散系数 / $\times 10^{-12}(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
		水泥	矿渣粉	粉煤灰					
普通混凝土	0.38	100	0	0	150	0.41	180	4.5	7.50
耐腐蚀混凝土	0.38	40	40	20	150	0.41	185	4.3	1.84

2 试验结果与分析

2.1 杂散电流密度与钢筋活化电位

试验结果^[5]表明,钢筋混凝土中电流-电压符合欧姆定律。钢筋混凝土在饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液和 3.5% NaCl 溶液中测定的电阻值分别为:普通混凝土 2.42 和 2.66 k Ω ;耐腐蚀混凝土 12.60 和 13.26 k Ω 。可见,在饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液和 3.5% NaCl 溶液中混凝土电阻值相当,耐腐蚀混凝土电阻值较同水胶比普通混凝土高约 5 倍。在相同直流电压下,普通钢筋混凝土需承受的电流密度 5 倍于耐腐蚀混凝土。

依据技术规程 CJJ49-92^[10],混凝土结构中钢筋允许的最大泄漏电流密度为 0.6 mA/dm²。杂散电流直接通过混凝土内钢筋的试验中,采用的杂散电流密度为 3, 15 和 75 mA/dm²,是规范规定的最大允许值的 5 倍、25 倍和 75 倍。采用 0.5V 直流电源分别通过 50, 10 和 2 k Ω 的串联电阻来调节。钢筋混凝土试件干燥后,放入 3.5% NaCl 溶液中浸泡(15 \pm 0.5) h。浸泡过程中,试件中埋设的钢筋通过一定的电流值。浸泡结束后风干 1 h,再放入烘箱,在(80 \pm 5) $^{\circ}\text{C}$ 下烘 6 h,最后拿出冷却 2 h。整个循环过程为 24 h,即一天 1 个干湿循环。不同杂散电流密度下,混凝土内钢筋活化电位检测结果见表 2。

表 2 混凝土中钢筋的半电池电位是指钢筋表面微阳极和微阴极的混合电位。当混凝土中钢筋表面阴极极化性能变化不大时,钢筋半电池电位主要决定于阳极性状,即阳极钝化,电位偏低;阳极活化,电位偏负。根据 SL352-2006^[9]的评估标准,半电池电位负向大于 -350 mV,则此区域发生钢筋腐蚀概率大于 90%。据此试验结果可知,随着杂散电流密度和腐蚀龄期的增加,混凝土中钢筋发生腐蚀的概率增加。在侵蚀早期(30 次循环),普通混凝土与耐腐蚀混凝土中的钢筋半电池电位无明显差别;到侵蚀后期(90 次循环),耐腐蚀混凝土的半电池电位负向明显小于普通混凝土。也就是说,在氯盐-杂散电流双重因素腐蚀条件下,耐腐蚀混凝土内钢筋耐久性明显高于普通混凝土,耐腐蚀混凝土内钢筋产生锈蚀的电流密度 5 倍于普通混凝土。

表 2 混凝土中钢筋的半电池电位

Tab. 2 Half cell potential of the reinforcing bar in concrete

(单位: mV)

混凝土	杂散电流密度 / ($\text{mA} \cdot \text{dm}^{-2}$)					
	3		15		75	
	30 次循环	90 次循环	30 次循环	90 次循环	30 次循环	90 次循环
普通混凝土	-187	-301	-213	-353	-226	-393
耐腐蚀混凝土	-174	-266	-204	-312	-211	-362

2.2 氯化物环境对钢筋混凝土腐蚀程度的影响

采用杂散电流直接通过混凝土内钢筋试验, 经 90 次循环后检测混凝土不同深度氯离子含量, 根据 Fick 第二扩散定律^[11]计算的氯离子扩散系数见表 3。

表 3 不同杂散电流强度下混凝土氯离子扩散系数

Tab.3 Chloride diffusivity coefficients in concrete in different stray current strength environments

混凝土	杂散电流密度/ (mA·dm ⁻²)	侵蚀循环/ 次	氯离子扩散系数 D/ (10 ⁻¹² m ² ·s ⁻¹)	混凝土	杂散电流密度/ (mA·dm ⁻²)	侵蚀循环/ 次	氯离子扩散系数 D/ (10 ⁻¹² m ² ·s ⁻¹)
普通 混凝土	0	90	7.18	耐腐蚀 混凝土	0	90	2.30
	3	90	8.42		3	90	2.27
	15	90	13.10		15	90	2.37
	75	90	13.34		75	90	2.57

试验结果可见, 在氯化物环境中, 普通混凝土的氯离子扩散系数为耐腐蚀混凝土的 3.1 倍。混凝土内钢筋通过直流电流, 电流密度增加提高混凝土氯离子扩散系数。当钢筋中杂散电流密度提高至 15 mA/dm² 时, 普通混凝土氯离子扩散系数提高近 1 倍, 耐腐蚀混凝土氯离子扩散系数仅略有增加。在杂散电流作用下, 普通混凝土的氯离子扩散系数提高为耐腐蚀混凝土的 5.5 倍。

将钢筋混凝土试件和电极板分别不完全浸泡于饱和 Ca(OH)₂ 溶液和 3.5% NaCl 溶液中, 液面距试件顶面保留 5 mm 距离, 以混凝土为导体, 在直流电压为 5V 的条件下进行长时间通电, 加速模拟试验混凝土杂散电流腐蚀。钢筋锈蚀, 混凝土开裂时间见表 4。

表 4 钢筋混凝土杂散电流加速模拟试验

Tab.4 Corrosion accelerated simulation tests of stray current in reinforcement concrete

混凝土	初始电流 / mA		断裂时间 / d	
	饱和 Ca(OH) ₂ 溶液	3.5% NaCl 溶液	饱和 Ca(OH) ₂ 溶液	3.5% NaCl 溶液
普通混凝土	1.05	1.82	161	7
耐腐蚀混凝土	0.24	0.32	660(未裂)	110

加速腐蚀试验结果可见, 在钢筋混凝土内通过直流电流, 相对于一般腐蚀环境, 氯化物环境下钢筋混凝土腐蚀破坏速度明显加快, 普通钢筋混凝土腐蚀破坏速率提高 23 倍。在电流作用下, 氯离子快速进入混凝土达到钢筋表面, 破坏钢筋钝化膜, 钢筋锈蚀膨胀, 混凝土开裂破坏。

耐腐蚀混凝土能够极大延缓氯盐环境中杂散电流腐蚀破坏时间, 在氯化物环境中腐蚀破坏时间较同水胶比的普通混凝土相应延长 15 倍之多。矿物掺合料的掺入可以显著改善水泥石的密实程度, 提高水泥石的电阻率, 降低杂散电流形成的电场强度, 因此矿物掺合料能够抑制杂散电流对固化氯离子的激活作用^[12], 故耐腐蚀混凝土抗杂散电流侵蚀能力较普通混凝土明显增强。

2.3 冻融-氯化物-杂散电流多重腐蚀环境影响

在淡水、3.5% NaCl 溶液和混凝土内钢筋施加电流密度为 15 mA/dm² 的杂散电流的 3.5% NaCl 溶液中, 进行混凝土抗冻性试验。试验结果见表 5。冻融-氯化物-杂散电流多重腐蚀环境下, 混凝土经过 100 次冻融循环后不同深度氯离子浓度检测结果见图 2。

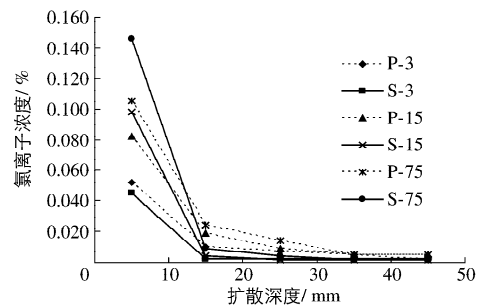


图 2 冻融-氯化物-杂散电流多重腐蚀环境混凝土氯离子扩散浓度

Fig.2 Chloride ion diffusion concentration in concrete in freezing-thawing-chloride-stray current corrosion environments

表 5 不同腐蚀环境中混凝土抗冻性能

Tab.5 Freeze-thaw resistance capability of concrete in different corrosive environments

混凝土	腐蚀环境	相对动弹模量 / %		
		100 次循环	200 次循环	300 次循环
普通混凝土	淡水	98	95	95
	3.5% NaCl 溶液	86	72	疏松断裂
	冻融-氯化物-杂散电流	73	疏松断裂	-
耐腐蚀混凝土	淡水	100	98	95
	3.5% NaCl 溶液	80	74	疏松断裂
	冻融-氯化物-杂散电流	77	疏松断裂	-

混凝土在不同杂散电流密度及盐冻条件下的氯离子扩散性能结果表明,随着杂散电流密度的增加,混凝土中氯离子的浓度是随之增加的。混凝土经过 100 次冻融循环后,耐腐蚀混凝土中的氯离子主要集中在混凝土表层,内部氯离子很少;而普通混凝土中氯离子浓度明显比耐腐蚀混凝土的高,氯离子浓度随着扩散深度而减小。

混凝土抗冻等级为 F300 的混凝土试件,在没有杂散电流存在的条件下,经过 200 次 3.5% NaCl 溶液冻融循环后试件均无破坏,300 次冻融循环后试件疏松破坏。在电流密度为 15 mA/dm² 的杂散电流存在的条件下,混凝土经过 200 次 3.5% NaCl 溶液冻融循环后,试件均已松散冻坏,而其中的钢筋却并无锈胀。由此可知,杂散电流的存在加剧了混凝土在盐溶液中的冻融破坏。

3 结 语

杂散电流密度的增加将加剧混凝土中钢筋的腐蚀。在氯盐-杂散电流双重因素腐蚀条件下,与同水胶比普通混凝土相比,掺加 20% 粉煤灰+40% 矿渣的耐腐蚀混凝土内钢筋产生锈蚀的电流密度可提高 5 倍。

氯盐溶液加速杂散电流对钢筋混凝土建筑结构的腐蚀,腐蚀速率约为淡水环境的 20 多倍。混凝土在氯盐-杂散电流环境下,随着杂散电流密度的增加和侵蚀龄期的增长,混凝土中氯离子的浓度也随之增加。特别是对普通混凝土而言,这种趋势更加明显。杂散电流增加了氯离子在普通混凝土中的扩散系数。耐腐蚀混凝土极大延缓氯盐环境中杂散电流腐蚀破坏时间,较同水胶比的普通混凝土相应延长 15 倍之多。

相同的水胶比条件下,普通混凝土和耐腐蚀混凝土的抗盐冻性能大致相当。随着杂散电流密度的增加,混凝土中氯离子浓度随之增加。经过 100 次冻融循环后,普通混凝土中氯离子浓度明显高于耐腐蚀混凝土。在冻融-氯化物-杂散电流多重腐蚀环境中,主要破坏形式为混凝土疏松破坏。杂散电流的存在加剧了混凝土在盐溶液中的冻融破坏。

参 考 文 献:

- [1] 张誉,蒋利学,张伟平,等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社,2003. (ZHANG Yu,JIANG Li-xue,ZHANG Wei-ping, et al. An introduction to durability of concrete structure [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishing House,2003. (in Chinese))
- [2] 樊云昌,曹兴国,陈怀荣,等. 混凝土中钢筋腐蚀的防护与修复[M]. 北京: 中国铁道出版社,2002. (FANG Yun-chang, CAO Xing-guo, CHEN Huai-rong, et al. Protect and repair to steel bar corrosion of reinforced concrete structures [M]. Beijing: Chinese Railway Publishing House,2002. (in Chinese))
- [3] 蔺安林,周晓军. 地铁迷流对钢筋混凝土中钢筋腐蚀的模拟试验研究[J]. 西部探矿工程,1999(3): 66-71. (LIN An-lin,ZHOU Xiao-jun. Experimental study on metro stray current corrosion of rebars in reinforced concrete [J]. West-China Exploration Engineering,1999(3): 66-71. (in Chinese))
- [4] 耿健. 杂散电流与氯离子共存环境下钢筋混凝土劣化机理的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学,2008. (GENG Jian. The research on the deteriorated mechanisms of reinforced concrete in stray currents and chloride ion coexisted corrosion environment

- [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [5] 陈迅捷,陈基成,欧阳幼玲. 活性掺合料对钢筋混凝土抗杂流腐蚀性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2004(2): 13-15. (CHEN Xun-jie, CHEN Ji-cheng, OUYANG You-ling. Effect of active additives on concrete corrosion resistance to stray current in subway [J]. China Concrete and Cement Products, 2004(2): 13-15. (in Chinese))
- [6] BERTOLINI L, CARSANA M, PEDEFERRI P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current [J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1056-1068.
- [7] 陈迅捷,欧阳幼玲. 海洋环境中混凝土抗冻融循环试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(2): 68-71. (CHEN Xun-jie, OUYANG You-ling. Research on the frost-resistant durability of concrete under sea water conditions [J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(2): 68-71. (in Chinese))
- [8] 李连志,李琦,李剑. 混凝土在氯盐介质条件下的冻融破坏机理[J]. 交通科技与经济, 2008(4): 10-12. (LI Lian-zhi, LI Qi, LI Jian. Freeze-thaw destruction mechanism of concrete under the condition of chlorine salts [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2008(4): 10-12. (in Chinese))
- [9] SL352-2006, 水工混凝土试验规程[S]. (SL352-2006, Test code for hydraulic concrete [S]. (in Chinese))
- [10] CJJ49-92, 地铁杂散电流腐蚀防护技术规程[S]. (CJJ49-92, Technical specification of corrosion and protection on metro stray current [S]. (in Chinese))
- [11] CCES01-2004, 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S]. (CCES01-2004, Guide to durability design and construction of concrete structures [S]. (in Chinese))
- [12] 胡曙光,耿健,丁庆军. 杂散电流干扰下掺矿物掺合料水泥石固化氯离子的特点[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3): 32-34. (HU Shu-guang, GENG Jian, DING Qing-jun. The characters of cement hardened paste with mineral admixtures binding chloride ion under the condition of stray current interfering [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2008, 36(3): 32-34. (in Chinese))

Influences of stray current on corrosion behaviors of reinforcing steel bar in concrete placed in different environments

CHEN Xun-jie, OUYANG You-ling, QIAN Wen-xun, HE Yang

(*Research Center on New Materials in Hydraulic Structures, Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: In this paper, the influences of the stray current on corrosion behaviors of the reinforcing steel bar in the ordinary concrete and anti-corrosion concrete with mineral admixtures placed in the common environment, chloride environment and freezing-thawing-chloride environments have been studied. Testing results show the stray current accelerates corrosion of the reinforcing steel bar in concrete placed in the chloride environment under coupling effects of the chloride and stray current. The current density induced corrosion of the reinforcing steel bar in the anti-corrosion concrete is 5 times the density of the normal concrete which has the same water-binder ratio as the anti-corrosion concrete. Corrosion of the stray current of the reinforcing steel bar in the anti-corrosion concrete can be remarkably retarded by 15 times than that in the normal concrete which has the same water-binder ratio as the anti-corrosion concrete in the chloride environment. Because of presence of the stray current, the freeze-thaw induced damage of concrete placed in the chloride environment is getting worse.

Key words: stray current; reinforced concrete; corrosive environment; admixture; anti-corrosion concrete