

文章编号:1673-2049(2008)03-0032-05

氯盐环境下桥梁混凝土结构的 腐蚀行为及破坏机理

马昆林, 谢友均, 龙广成

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:为了解决氯盐导致钢筋混凝土结构耐久性破坏的问题,通过测试处于氯盐侵蚀环境中混凝土内部 Cl^- 含量、pH 值及含碱量的分布规律,探讨了氯盐对混凝土结构的腐蚀行为和破坏机理;揭示了氯盐侵蚀下钢筋混凝土曲线桥梁过早劣化的机理,并对此类病害的防治及治理提出了合理建议。结果表明:干湿循环条件下,大量 Cl^- 侵入混凝土内部并且到达钢筋表面,造成钢筋锈蚀、混凝土胀裂,且随 Cl^- 含量增加,混凝土 pH 值下降,含碱量增大;在含有 Cl^- 的区域,混凝土 pH 值均降低;氯盐入侵后,增大了混凝土碱骨料破坏的可能性,混凝土内部孔结构发生了明显粗化。

关键词:混凝土结构;腐蚀行为;破坏机理;干湿循环;结构耐久性

中图分类号:TU528

文献标志码:A

Corrosion Behavior and Destructive Mechanism of Bridge Concrete Structure Under Chloride Salt Environment

MA Kun-lin, XIE You-jun, LONG Guang-cheng

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: Aimed at the problem that chloride salt was the key factor that induced the destruction of reinforced concrete structural durability, the distributing rules of chloride ion content, pH values and alkali content were discussed by testing concrete samples got from chloride salt corrosion environment, and the corrosion behavior and destructive mechanism of concrete structure under chloride salt were studied. The deterioration mechanism of reinforced concrete curve bridge attacked by chloride salt was discussed and reasonable suggestions that how to protect and deal with such problems were proposed. Results show that under drying and wetting cycles condition, lots of chloride ions invade concrete and get to reinforce surface, which cause steel rusted and concrete cracked. With chloride ions contents increasing in concrete, pH values decreased but alkali content increased. With chloride ions coming into concrete, pH values in concrete is on the decline, so in the process of concrete corroded by chloride salt, it is possible to take place concrete alkali-aggregate destructing reaction. The pore structure of corresponding concrete is coarsened distinctly.

Key words: concrete structure; corrosion behavior; destructive mechanism; wetting-drying cycle; structural durability

收稿日期:2008-06-03

基金项目:国家自然科学基金项目(50678174);中南大学研究生教育创新工程基金项目(063710044)

作者简介:马昆林(1976-),男,云南昆明人,工学博士研究生,E-mail:mark-mkl@163.com。

混凝土含碱量测试。试样中碱含量测定采用原子吸收分光光度法。称取磨细粉末试样 0.5 g 置于 100 mL 烧杯中,加入 50 mL 水,置于加热板上,溶解试样至体积约为 10 mL,取下烧杯冷却,再加水至 100 mL 摇匀后澄清 4 h 备用,最后采用原子吸收分光光度仪分析测试试样的消光度并与标准曲线比较,从而测定 Na_2O 、 K_2O 的量,并将 Na_2O 与 0.635 倍 K_2O 的量的和作为混凝土中碱的总含量。碱含量以占分析测试用混凝土试样的质量分数表示。

混凝土微观形貌及孔结构测试。微观形貌采用电镜(SEM)进行测试,对微观测试中的可疑物质采用 X 射线衍射(XRD)方法判断。

2 试验结果及分析

2.1 混凝土中的 Cl^- 含量

混凝土中 Cl^- 含量(质量分数)变化如图 3 所示。图 3(a)为受到腐蚀较为严重的桥墩、盖梁顶和预应力梁从表面到内部的 Cl^- 含量。由图 3(a)可知:曲线内侧混凝土中 Cl^- 含量均从表面向内部减少,且曲线内侧的预应力梁端、盖梁顶部以及距地面 1 m 的桥墩处 Cl^- 含量较高,特别是距表面 0~5 mm 范围内, Cl^- 含量分别达到了 0.58%、0.68% 和 0.70%;但从混凝土表面至混凝土内部, Cl^- 含量下降,到了距表面 45~50 mm 范围内以及 95~100 mm 范围内 Cl^- 含量均不超过 0.20%。桥墩下部 Cl^- 含量最大,主要是因为首先大量含 Cl^- 的溶液从桥上撒落下来,部分飘溅到桥墩下部,造成了 Cl^- 在该区域聚集;其次,更多的盐溶液直接从曲线内侧预应力梁和盖梁上流到桥墩周围的土壤中,造成了在地表至地表约 20 cm 的土壤层中可溶性盐聚集,经测试在该区域土壤中 Cl^- 的平均含量达到 0.46%,且经现场观察,桥墩下部区域寸草不生,而距离大桥 15 m 以外为农田,庄稼生长良好,这说明土壤中的盐分主要来自于桥上货车经过时流下的盐溶液,在桥墩下部可观察到许多墩身下部有盐向上泛白,下雨天桥墩下部泛潮严重,而且,大桥位于中国北方,气候干燥,由于混凝土中毛细孔虹吸作用,造成了盐溶液的干湿交替,使土壤中的 Cl^- 富集于桥墩下部,在氯盐富积的桥墩下部,混凝土中钢筋锈蚀严重,见图 4(a)。 Cl^- 含量在曲线内侧盖梁顶部及预应力梁端含量也较高,这主要是由于盐溶液直接流到盖梁和预应力梁造成的,特别是下雨天,含 Cl^- 的盐水直接流到梁体和盖梁上,见图 4(b)。由

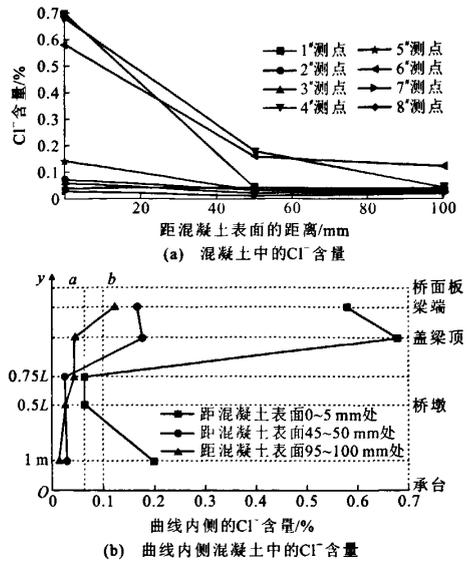


图 3 Cl^- 含量测试结果

Fig. 3 Test Results of Chloride Contents

于盐溶液基本从曲线内侧流下,所以曲线外侧桥墩、盖梁及预应力梁的 Cl^- 含量均较内侧曲线的相应部位低。在对混凝土进行微观分析测试时,发现混凝土内部有大量结晶体,经 XRD 测试,该结晶体为 NaCl 晶体,如图 5 所示。该桥首先是在干湿循环条件下,大量氯盐侵入混凝土表层并结晶引起混凝土表层破坏,破坏的表层导致更多的氯盐侵入混凝土内部造成混凝土中钢筋锈蚀,这样形成了盐结晶-氯盐侵蚀的恶性循环。

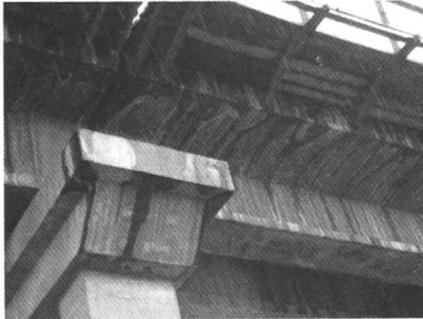
大桥曲线内侧 Cl^- 含量沿桥高度(y)分布特征如图 3(b)所示,从上至下分别为预应力梁端、盖梁顶、0.75L、0.5L 和距离地面 1 m 的位置。图 3(b)中的直线 a 、 b 分别为美国 ACI 201 规范中所规定的预应力构件和非预应力构件中 Cl^- 含量的极限值,即 0.06% 和 0.1%,直线 a 的右侧表示 Cl^- 含量均大于 0.06%,直线 b 的右侧表示 Cl^- 含量均大于 0.1%。由图 3(b)中直线 a 可知:预应力梁端 0~100 mm 区域 Cl^- 含量均已经超过 0.06%;由直线 b 可知,桥墩表面除了 0.5L~0.75L 区域,盖梁及预应力梁全部区域 Cl^- 含量都超过了极限值。

2.2 混凝土中的 pH 值

混凝土中的 pH 值变化如图 6 所示。由图 6(a)可知,混凝土中的 pH 值是由外至内逐渐升高的,但是曲线内侧 pH 值较曲线外侧相对应测点的 pH 值降低较为严重。已有的研究表明^[7-8],混凝土中的高碱性会使其内部的钢筋表面生成一层致密的钝化



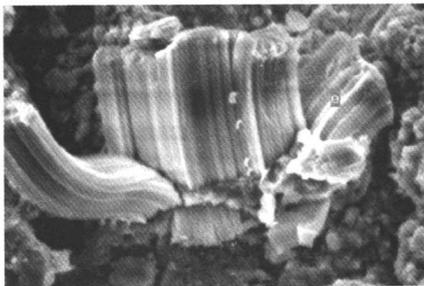
(a) 桥墩下部



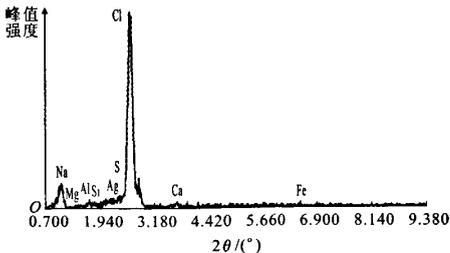
(b) 梁体和盖梁

图 4 受到氯盐侵蚀的桥

Fig. 4 Bridge Attacked by Chloride Salt



(a) 结晶物的SEM

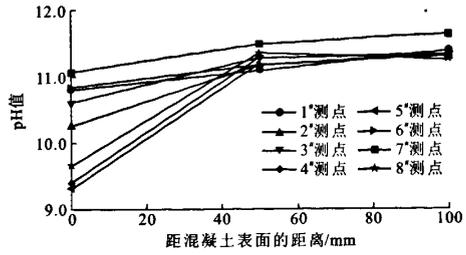


(b) 结晶物的XRD分析

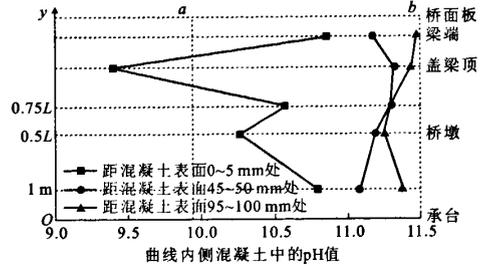
图 5 混凝土中结晶物的微观测试结果

Fig. 5 Microcosmic Test Results of Crystal Substance in Concrete

膜,而钝化膜对钢筋有很强的保护作用,但 Cl^- 侵入混凝土会造成混凝土孔溶液中 pH 值下降,使钝化



(a) 混凝土中的pH值



(b) 曲线内侧纵向构件中混凝土pH值

图 6 混凝土中 pH 值测试结果

Fig. 6 Test Results of pH Values in Concrete

膜破坏造成钢筋锈蚀。当混凝土中 pH 值小于 11.5 时,钝化膜就开始不稳定,处于该 pH 值区域的钢筋可能生锈;当 pH 值小于 9.88 时,钝化膜就开始破坏。大桥曲线内侧混凝土中 pH 值沿桥高度分布特征如图 6(b)所示,从上至下分别为预应力梁端、盖梁顶、0.75L、0.5L 和距离地面 1 m 的位置,图 6(b)中直线 a、b 分别表示 pH 值等于 9.88 和 pH 值等于 11.5。由图 6(b)可知,整座桥从混凝土表面至内部 100 mm 范围内 pH 值均小于 11.5,也就是说在整座桥混凝土的 0~100 mm 范围内钢筋都处于钝化膜的不稳定时期,混凝土中的钢筋都有生锈的可能,并且盖梁顶表层混凝土上下区域的 pH 值已经小于 9.88。

2.3 混凝土中的含碱量

混凝土中的含碱量变化见图 7。由图 7(a)可知,混凝土内的含碱量是由外至内逐渐降低的,且曲线内侧混凝土含碱量均大于曲线外侧混凝土相对应的测试点,混凝土中的含碱量除了混凝土材料自身含有的外,主要就是外界环境侵入混凝土中的盐溶液中带来的。本文中含 Cl^- 的盐溶液主要是 NaCl 溶液,盐溶液在干湿循环的加速作用下,大量侵入混凝土,混凝土中也聚集了大量的含碱离子,当碱离子含量达到一定程度时,混凝土结构就会受到碱骨料反应的破坏。该桥曲线内侧混凝土含碱量沿桥高度分布特征如图 7(b)所示,从上至下分别为预应力梁

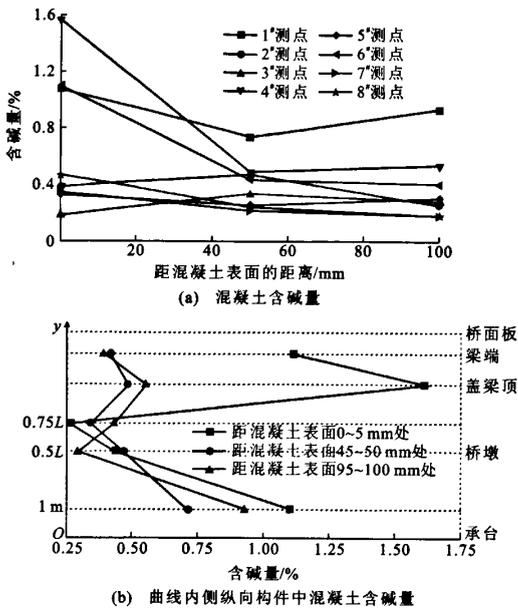


图7 混凝土含碱量测试结果

Fig. 7 Test Results of Alkali Contents in Concrete

端、盖梁顶、0.75L、0.5L 和距离地面 1 m 的位置,含碱量为 0.125% 相当于规范规定^[9]的混凝土中含碱量极限值 $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由图 7(b)可知,该桥混凝土结构中从表面至内部 100 mm 处,含碱量均超过规范的极限值,只要条件适合很可能碱骨料发生反应,但是该桥混凝土结构未发生反应,主要原因是由于其混凝土所使用的骨料为非活性骨料。

3 结语

(1) 氯盐对混凝土结构的结晶侵蚀破坏是混凝土耐久性破坏的一种重要特征,且氯盐的结晶型破坏作用较氯盐的渗入型破坏对混凝土结构的危害更严重。在干湿循环作用下,大量含 Cl^- 盐溶液侵入混凝土内并形成结晶,从而造成该区域内混凝土破坏严重,并导致更多氯盐侵入混凝土到达钢筋表面使钢筋锈蚀。

(2) 氯盐侵入混凝土降低了混凝土孔溶液的 pH 值,在含有 Cl^- 的混凝土层, pH 值均降低,使混凝土中钢筋表面钝化膜不稳定,极易导致钢筋锈蚀。氯盐的侵入会增加混凝土的含碱量,造成混凝土碱骨料反应的几率增大。

(3) 得出了曲线内侧 Cl^- 含量、pH 值变化和含碱量沿大桥结构从预应力梁端-盖梁-桥墩的分布图,可为该桥的修补与加固提供可靠的依据,并为该条件下混凝土结构性设计提供实用的参数。

参考文献:

References:

[1] 洪定海. 钢筋混凝土的腐蚀与防护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
HONG Ding-hai. Protection and Corrosion of Reinforced Concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1998.

[2] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
JIN Wei-liang, ZHAO Yu-xi. Durability of Concrete Structures[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[3] 宋玉普, 宋立元, 赵敏. 混凝土海洋平台抗氯离子侵蚀耐久寿命预测试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(5): 707-711.
SONG Yu-pu, SONG Li-yuan, ZHAO Min. Experimental Study of Durable Life Prediction Resisting Chloride Ion Penetration for Concrete Offshore Platforms[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(5): 707-711.

[4] 乔宏霞, 何忠茂, 朱彦鹏, 等. 盐渍土地区高性能混凝土耐久性研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 32-37.
QIAO Hong-xia, HE Zhong-mao, ZHU Yan-peng, et al. Durability Study of High Performance Concrete in Salt Region[J]. China Railway Science, 2006, 27(4): 32-37.

[5] LUBELLI B, VANH R P J, GROOT C J W P. Sodium Chloride Crystallization in a "Salt Transporting" Restoration Plaster[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(8): 1467-1474.

[6] 谢友均, 龙广成, 马昆林. 京广上行线唐庄特大桥梁病害特征检测与评价[R]. 长沙: 中南大学, 2005.
XIE You-jun, LONG Guang-cheng, MA Kun-lin. Disease Characters and Appraisalment of Tangzhuang Railway Bridge[R]. Changsha: Central South University, 2005.

[7] 吴海军, 陈艾荣. 桥梁结构耐久性设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 57-61.
WU Hai-jun, CHEN Ai-rong. Study of Durability Design Method for Bridge Structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 57-61.

[8] 洪乃丰. 混凝土中钢筋锈蚀与防护技术(3)——氯盐与钢筋锈蚀破坏[J]. 工业建筑, 1999, 29(10): 60-63.
HONG Nai-feng. Corrosion and Protective Technology of Rebar in Concrete(3)—Rebar Corrosion by Chloric Salt[J]. Industrial Construction, 1999, 29(10): 60-63.

[9] CECS 53:93, 混凝土碱含量限值标准[S].
CECS 53:93, Limited Standard of Alkali Content in Concrete[S].

氯盐环境下桥梁混凝土结构的腐蚀行为及破坏机理

作者: [马昆林](#), [谢友均](#), [龙广成](#), [MA Kun-lin](#), [XIE You-jun](#), [LONG Guang-cheng](#)
作者单位: [中南大学, 土木建筑学院, 湖南, 长沙, 410075](#)
刊名: [建筑科学与工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF ARCHITECTURE AND CIVIL ENGINEERING](#)
年, 卷(期): 2008, 25 (3)
被引用次数: 3次

参考文献(9条)

1. [洪定海](#) [钢筋混凝土的腐蚀与防护](#) 1998
2. [金伟良](#); [赵羽习](#) [混凝土结构耐久性](#) 2002
3. [宋玉普](#); [宋立元](#); [赵敏](#) [混凝土海洋平台抗氯离子侵蚀耐久寿命预测试验研究](#)[期刊论文]-[大连理工大学学报](#) 2005 (05)
4. [乔宏霞](#); [何忠茂](#); [朱彦鹏](#) [盐渍土地区高性能混凝土耐久性研究](#)[期刊论文]-[中国铁道科学](#) 2006 (04)
5. [LUBELLI B](#); [VANH R P J](#); [GROOT C J W P](#) [Sodium Chloride Crystallization in a "Salt Transporting" Res-toration Piaster](#)[外文期刊] 2006 (08)
6. [谢友均](#); [龙广成](#); [马昆林](#) [京广上行线唐庄特大桥病害特征检测与评价](#) 2005
7. [吴海军](#); [陈艾荣](#) [桥梁结构耐久性设计方法研究](#)[期刊论文]-[中国公路学报](#) 2004 (03)
8. [洪乃丰](#) [混凝土中钢筋锈蚀与防护技术\(3\)--氯盐与钢筋锈蚀破坏](#)[期刊论文]-[工业建筑](#) 1999 (10)
9. [CECS 53-1993](#). [混凝土碱含量限值标准](#)

本文读者也读过(1条)

1. [赵筠](#) [钢筋混凝土结构的工作寿命设计-针对氯盐污染环境](#)[期刊论文]-[混凝土](#)2004 (1)

引证文献(3条)

1. [张峰](#). [蔡建军](#). [李树忱](#). [牛平霞](#). [李守凯](#) [混凝土冻融损伤厚度的超声波检测](#)[期刊论文]-[深圳大学学报\(理工版\)](#) 2012 (3)
2. [胡红梅](#). [宋明辉](#). [姚志雄](#). [陈晓鸿](#) [提高海工混凝土抗氯离子渗透性的关键技术](#)[期刊论文]-[建筑科学与工程学报](#) 2009 (1)
3. [赵羽习](#). [杜攀峰](#). [金伟良](#) [混凝土防腐涂料抗氯离子侵蚀性能试验研究](#)[期刊论文]-[建筑科学与工程学报](#) 2009 (2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_xbjzgcxyxb200803007.aspx