

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.015

延永东, 刘荣桂, 陆春华, 等. 沿海服役混凝土结构氯离子质量分数检测和分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 106-111. (YAN Yongdong, LIU Ronggui, LU Chunhua, et al. Detection and analysis of chloride ions in marine concrete structures in service [J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 106-111. (in Chinese))

沿海服役混凝土结构氯离子质量分数检测和分析

延永东, 刘荣桂, 陆春华, 陈 好

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为了弄清沿海服役混凝土的氯离子质量分数分布规律及影响因素,对江苏连云港码头部分泊位不同区域的氯离子进行了取样检测,分析了浸水时间、所处方位、开裂状态、维修历史等因素对混凝土内氯离子质量分数的影响。分析结果表明:水位变动区混凝土内的氯离子质量分数积累速度最快,且基本随高程增加而增大;开裂位置的氯离子质量分数明显大于相同环境下的非开裂位置;不同方位混凝土经历的光照时间不同,造成其内部氯离子质量分数有一定差异,其中向海侧混凝土内的氯离子质量分数峰值出现在混凝土浅层,背海侧的则出现在混凝土深层;混凝土表面维修后内部氯离子会向表面迁移,造成质量分数峰值出现在试件内部某一深度。

关 键 词: 钢筋混凝土; 沿海码头; 耐久性; 氯离子; 水位变动区

中图分类号: TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)04-0106-06

对海洋环境中服役的钢筋混凝土构件来说,海水中所含的氯离子侵入混凝土造成钢筋锈蚀是其耐久性失效的主要原因^[1]。已有研究表明,一般沿海码头在服役 20~30 年即出现钢筋锈蚀、混凝土胀裂等现象^[2-4],使用寿命无法达到预期的设计寿命。了解氯离子在沿海混凝土码头内的侵蚀及分布规律,可预测混凝土内钢筋开始锈蚀及混凝土胀裂的时间,从而为沿海码头的设计、维护提供重要理论依据。

目前国内外学者在这方面已进行了一些研究。姬永生等^[5]检测发现水位变动区(包括潮差区、浪溅区)混凝土的耐久性劣化最为严重。金伟良等^[6]检测分析了杭州湾区域水位变动区混凝土码头内的氯离子质量分数,发现海水年浸润时间比例为 0.3~0.5 区域的平均表面氯离子质量分数和氯离子扩散系数均较大。董建锋等^[7]通过试验指出,迎风面、背风面、侧风面混凝土内的氯离子质量分数有所不同。Da Costa 等^[8]对一服役 25 年的近海钻井平台取样,分析了非饱和状态下混凝土中氯离子的分布情况,指出进行海洋环境下混凝土结构寿命分析时必须考虑水分对氯离子传输的作用。Kwon 等^[9]现场观测了服役 7 年和 11 年后码头混凝土中的氯离子质量分数,得到了不同服役时间段内的表观氯离子扩散系数取值,在此基础上采用 Monte Carlo 方法预测了开裂混凝土的寿命。

上述文献各从某一方面指出实际环境中影响氯离子在混凝土内侵蚀的因素。实际上影响氯离子在混凝土构件内侵蚀的因素众多,且部分因素之间存在耦合作用。为此,有必要对沿海混凝土结构不同暴露区域的氯离子积累规律进行研究,分析实际环境中的各种因素对氯离子传输的影响,从而为待建结构的设计及施工提供指导。本文以江苏沿海的连云港码头为例,通过现场取样检测来探究服役年限、海水接触频率、混凝土开裂、维修等因素对氯离子在混凝土内分布规律的影响,以期对沿海钢筋混凝土结构的设计、评估提供参考。

收稿日期: 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608233, 51578267, 51778272, 51508234)

作者简介: 延永东(1982—),男,陕西榆林人,副教授,主要从事氯盐环境下混凝土结构耐久性研究。

E-mail: yand@ujs.edu.cn

1 工程资料

连云港港位于江苏省东北部,处于季风海洋性气候地带,四季分明,光照充足,雨量适中。常风向偏东,强风向偏北。年最大风速为 28 m/s;年平均降水量 852.8 mm,每年 6—9 月为雨季,占全年降水量 60% 以上,年均降雨天数近百日;年平均气温 14 ℃^[10]。海域海水的化学组成见表 1^[11]。

连云港港主港区和灌河口港区均为不冻港区,为不规则浅海半日潮港。平均涨潮历时 5.62 h,落潮历时 6.8 h。潮位相关数据如表 1 所示(采用 1985 国家高程基准)。

表 1 连云港港区海水及潮位相关数据

Tab. 1 Data of seawater and tidal level in Lianyungang port

离子类型	浓度/(mg · L ⁻¹)	潮位类别	数值/m
Cl ⁻	13 111	平均海面	2.94
Ca ²⁺	186	平均潮差	3.39
K ⁺	167	平均大潮高潮位	4.93
Na ⁺	2 369	平均大潮低潮位	-0.86
Mg ²⁺	476	平均小潮高潮位	4.61
SO ₄ ²⁻	419	平均小潮低潮位	1.79

2 检测方案

针对连云港港区码头众多,建成时间不一致的特点,根据实际可操作性选择了部分代表性的泊位进行检测。并对同一泊位尽可能考虑区域、构件、高程、方位的差异进行取样。具体方案如下:

(1)4 号泊位:位于港区的海峡南岸中部,建成于 1974 年^[12],取样时已服役 39 年,采用的混凝土强度等级为 C40,水灰比为 0.4。2003 年曾对表面保护层 40 mm 厚的混凝土进行过替换处理。该泊位主要用于装卸通用件杂货和一些小袋装的散杂货。设计吞吐能力为 30 万 t。其结构形式及取样区域、编号如图 1 所示。

根据 4 号泊位的实际布置及可操作性制定了取样方案,详情见表 2,示意图 1。其中编号 4-9 的位置存在 1 条最大宽度 0.15 mm,长度 1.2 m 的裂缝,如图 1 所示。

表 2 4 号泊位取样详情

Tab. 2 Sampling from 4th berth

编号	高程/m	所处区域	构件类型	编号	高程/m	所处区域	构件类型
4-1	5.05	大气区	横梁	4-6	3.30	水位变动区	桥墩
4-2	5.00	大气区	横梁	4-7	2.80	水位变动区	桥墩
4-3	4.95	大气区	横梁	4-8	2.30	水位变动区	桥墩
4-4	4.50	水位变动区	盖梁	4-9	5.03	大气区	横梁
4-5	3.80	水位变动区	桥墩				

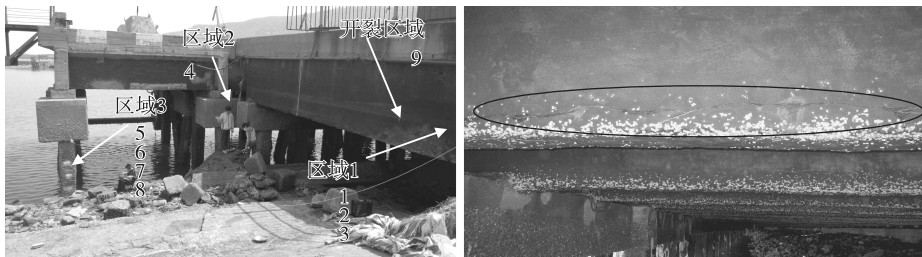


图 1 4 号泊位结构分布、取样区域及取样编号

Fig. 1 Structure distribution, sampling area and sampling ID of 4th berth

(2)60 号泊位:60 号泊位建成于 1995 年,取样时已服役 20 年,采用 C40 混凝土。取样位置分别为:浪溅区的盖梁(区域 1,逆时针方向四边分别记为 A1,B1,C1,D1),潮差区的桥墩(区域 2,从上到下分别为 1,2,3),潮差区的桥台(区域 3,从上到下分别为 4,5,6,7)。取样位置如图 2 所示,取样详情见表 3。

表 3 60 号泊位取样详情
Tab. 3 Sampling from 60th berth

编号	60-1	60-2	60-3	60-4	60-5	60-6	60-7	60-A1	60-B1	60-C1	60-D1
高程/m	5.05	5.00	4.95	4.50	3.80	3.30	2.80	5.05	5.05	5.05	5.05
构件类型	横梁	桥墩	桥墩	桥台	桥台	桥台	桥台	盖梁	盖梁	盖梁	盖梁

注:取样所处区域为水位变动区。

(3)69 号泊位:建成于 2008 年,取样时已服役 5 年,采用 C40 混凝土。主要用于装卸通用件杂货和小袋装的散杂货。设计吞吐能力 30 万 t。

69 号泊位的取样位置分别为:大气区的桥台(区域 1,从上到下为 1,2),潮差区的桥墩(区域 2,从上到下为 3,4),潮差区的桥台(区域 3,从上到下为 5,6,7,见图 3)。

对每一区域用直径 12 mm 的钻头取 3 个位置,同一位置沿深度每 5 mm 取 1 个粉样,取至 50 mm 深。将取得的粉样密封装入自封袋,带回实验室后将同一深度的试样混合均匀,放入烘箱内烘干,然后用孔径为 0.63 mm 的方孔筛筛除较大颗粒,取出 1.5 g 进行水溶性 RCT 测试。此方法检测准确性高、速度快。

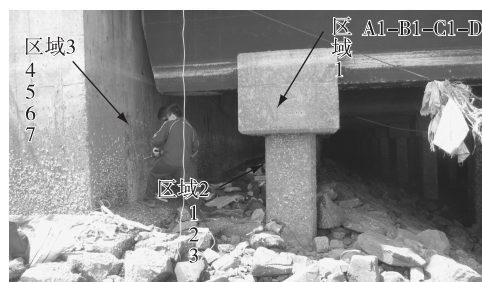
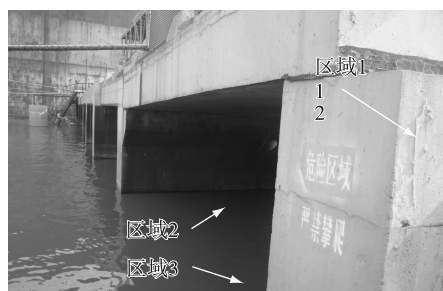
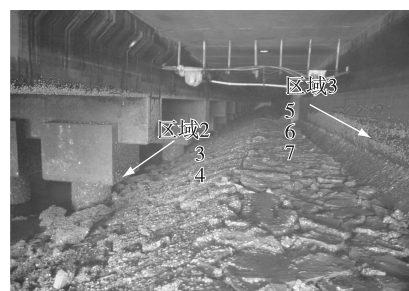


图 2 60 号泊位结构布置及取样区域、编号
Fig. 2 Structure distribution, sampling area and sampling ID of 60th berth



(a) 69 号泊位区域 1



(b) 69 号泊位区域 2 及区域 3

图 3 69 号泊位取样编号

Fig. 3 Sampling ID of areas 1, 2 and 3 of 69th berth

3 结果分析

3.1 4 号泊位的氯离子质量分数

4 号泊位不同区域的氯离子质量分数检测结果如图 4 所示。可以看出,大气区(区域 1)的混凝土横梁由于进行过维修,氯离子质量分数随着深度的增加呈现降低-增加-降低的趋势。与采用常规扩散定律计算出的曲线走向(沿深度增加逐渐降低)有所不同。这是因为在维修过程中曾对表层(0~40 mm)的混凝土进行过替换处理。由此导致表层混凝土(0~40 mm)的氯离子质量分数有所下降,不同标高处混凝土内的氯离子质量分数差别不大。另外,比较图 4(a)与图 4(b)的数据可知,相同深度处开裂位置的氯离子质量分数明显大于非开裂位置,且开裂位置混凝土表层 20 mm 内氯离子质量分数均达到峰值。

盖梁位于浪溅区,氯离子质量分数在表层一定深度内(0~25 mm)基本恒定,之后随深度增加逐渐减小。桥墩位于潮差区,除表层 0~5 mm 的分布较为特殊外,其余深度的氯离子质量分数基本呈现随深度增加逐渐减小的趋势,其分布基本符合采用 Fick 第二定律计算的结果。

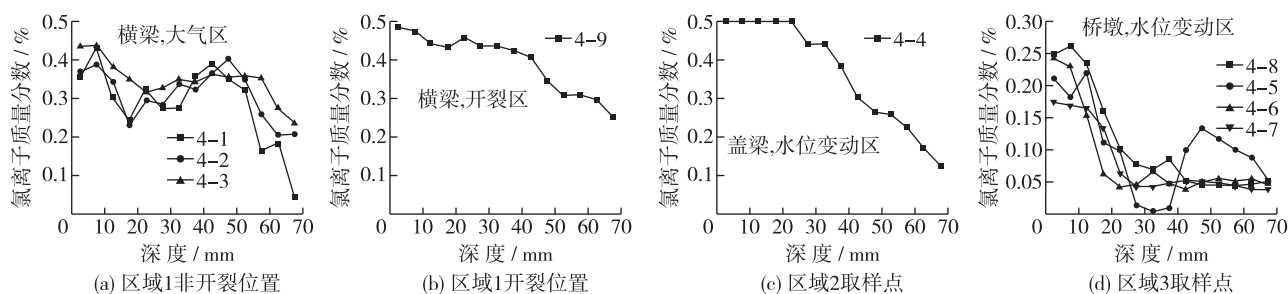


图4 4号泊位各区域取样点氯离子质量分数分布

Fig. 4 Chloride ion concentration distribution at sampling points of 4th berth

3.2 60号泊位氯离子质量分数分布

60号泊位不同取样位置检测得到的氯离子质量分数随深度分布见图5。其中图5(a)展示了相同高度处不同方位混凝土内的氯离子质量分数。图5(a)和(b)展示了同一构件相同方位不同高程处的氯离子质量分数。

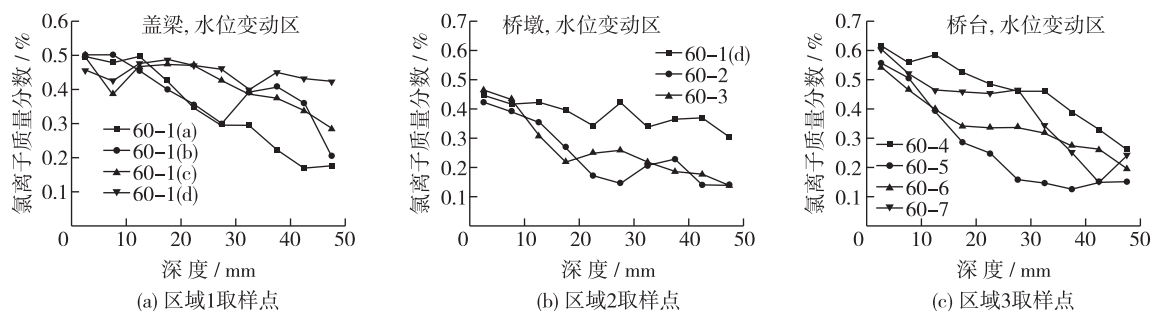


图5 60号泊位取样点氯离子质量分数分布

Fig. 5 Chloride ion concentration distribution at sampling point of 60th berth

可以看出,不同方位处的氯离子质量分数分布有所不同,向海一侧混凝土(C1,D1)浅层处(0~15 mm)的氯离子质量分数较高,而背海一侧混凝土(A1,B1)深层处(15~50 mm)的氯离子质量分数较高。这可能是由于外侧混凝土接触太阳照射较多,且无其他构筑物掩护,造成干燥期此部位的混凝土表面水分蒸发较快,导致水分由内向外迁移,因此会带动内部部分氯离子向外输运,由此造成浅层混凝土内氯离子质量分数较大,而深层混凝土内氯离子质量分数较小。

3.3 69号泊位氯离子质量分数分布

取样检测得到的69号泊位的氯离子质量分数分布如图6所示。

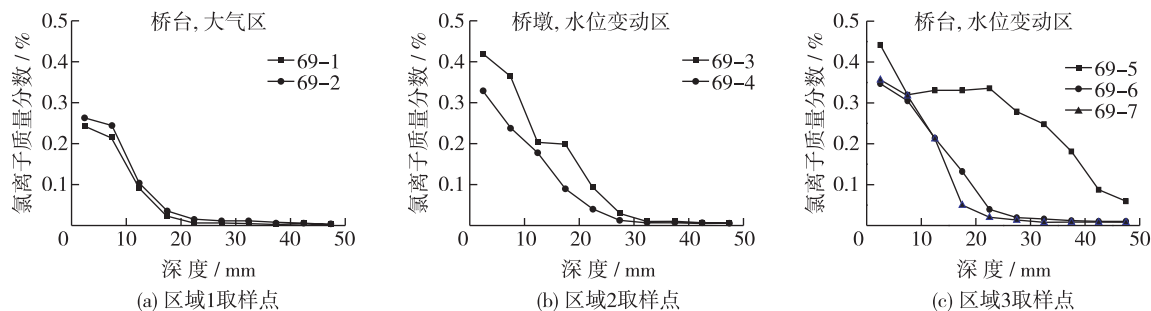


图6 69号泊位氯离子质量分数分布

Fig. 6 Chloride ion concentration distribution at sampling point of 69th berth

可见,自由氯离子质量分数基本呈现随深度增加逐渐减小的趋势,另外还可以看出:①对同一种构件来说,大气区的氯离子质量分数要明显小于水位变动区,这主要是因为大气区环境中的氯离子质量分数要小于水位变动区的氯离子质量分数,由此造成大气区混凝土表面氯离子质量分数也小于水位变动区的表面氯离子质量分数。②对均处于水位变动区的混凝土构件来说,相同深度的氯离子质量分数随高程增加而增大。

4 结 语

通过对连云港码头部分泊位混凝土进行的氯离子质量分数检测及分析可得出如下结论:

- (1) 水位变动区的氯离子侵蚀速度要大于大气区,且随高程增加而增大。
- (2) 混凝土开裂后其内部氯离子质量分数要明显大于非开裂位置的氯离子质量分数。
- (3) 同一构件不同方位混凝土内的氯离子质量分数有一定差别,其中外侧(向海侧)混凝土浅层处氯离子质量分数较高,内侧(背海侧)混凝土深层处氯离子质量分数较高。
- (4) 混凝土表面维修后内部氯离子会重新分布,其中部分氯离子会向外表面迁移,造成质量分数最大值出现在试件中间某一部位。

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 Lixue, ZHANG Weiping, et al. Durability of concrete structures[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998. (HONG Dinghai. Corrosion and protection of steel bar in concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1998. (in Chinese))
- [3] 金伟良. 浙东沿海高桩码头耐久性调查和研究报告[R]. 杭州: 浙江大学, 2002. (JIN Weiliang. Durability report and research of long piled wharf in east of Zhejiang Province[R]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. (in Chinese))
- [4] 徐强, 俞海勇. 大型海工混凝土结构耐久性研究与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (XU Qiang, YU Haiyong. Study and practice on durability of large scale marine concrete structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [5] 姬永生, 袁迎曙. 干湿循环作用下氯离子在混凝土中的侵蚀过程分析[J]. 工业建筑, 2006, 36(12): 16-19, 23. (JI Yongsheng, YUAN Yingshu. Transport process of chloride in concrete under wet and dry cycles[J]. Industrial Construction, 2006, 36(12): 16-19, 23. (in Chinese))
- [6] 金伟良, 金立兵, 延永东, 等. 海水干湿交替区氯离子对混凝土侵入作用的现场检测和分析[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 364-371. (JIN Weiliang, JIN Libing, YAN Yongdong, et al. Field inspection on chloride ion-intrusion effect of seawater in dry-wet cycling zone of concrete structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 364-371. (in Chinese))
- [7] 董建锋, 邢峰, 戴虹, 等. 混凝土不同面的氯离子侵蚀规律研究[J]. 混凝土, 2013(1): 18-20, 27. (DONG Jianfeng, XING Feng, DAI Hong, et al. Experimental study on chloride ingress properties of different surfaces in concrete[J]. Concrete, 2013(1): 18-20, 27. (in Chinese))
- [8] DA COSTA A, FENAUX M, FERNÁNDEZ J, et al. Modelling of chloride penetration into non-saturated concrete: case study application for real marine offshore structures[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43(6): 217-224.
- [9] KWON S J, NA U J, SANG S P, et al. Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion[J]. Structural Safety, 2009, 31(1): 75-83.
- [10] 李俊. 南方海港高桩码头钢筋混凝土结构耐久性评估及修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (LI Jun. Durability detection and repair of reinforced concrete structure in the open-type pier on piers in the Southern Coastal Areas[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [11] 卞雷, 方永浩, 郇洪流, 等. 连云港码头钢筋混凝土检测维修与结构耐久性分析[J]. 水运工程, 2008(3): 69-72. (BIAN Lei, FANG Yonghao, HUAN Hongliu, et al. Inspection, repairing and durability analysis of reinforced concrete at Lianyungang Harbor[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(3): 69-72. (in Chinese))

Detection and analysis of chloride ions in marine concrete structures in service

YAN Yongdong, LIU Ronggui, LU Chunhua, CHEN Yu

(*Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

Abstract: In order to understand the distribution and influence factors of chloride ions in the marine concrete structures in service, typical berths serving for different time periods in the Lianyungang port were sampled and the chloride ions in the marine concrete structures located in different regions were detected to find the influences of exposure zone, and the impacts of soaking time, locations and directions, cracking state and maintenance history on the chloride ions concentration of the marine concrete were analyzed in this study. The analysis results show that the accumulation rate of the chloride concentration in the concrete structures placed in the water level fluctuation zone is the fastest, which is larger than that in the atmospheric zone, and it increases with the increase of the elevation; the chloride ions mass fraction at the cracking position is obviously larger than that at the uncracked position in the same environment; the chloride ions' ingress rate is also influenced by the orientation which accepts the different illumination time, the peak value of the chloride ions mass fraction of the concrete to the sea side appears in the concrete cover, while the peak value of the chloride ions mass fraction of the back sea side appears in the concrete deep layer. The chloride ions in the concrete will transport from the inner to the surface when the surface layer of the concrete is repaired, which will make the peak value of the chloride profile appear at a certain depth of the concrete specimen.

Key words: reinforced concrete; coastal port; durability; chloride ions; water level fluctuation zone