

海工码头结构混凝土耐久性检测与评估

赵 晖^{1,2}, 张亚梅², 明 静²

(1. 金陵科技学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210001)

摘要: 为研究环境因素对结构混凝土耐久性的影响, 现场检测了宁波某海工码头工作平台不同结构区域的结构混凝土耐久性能. 检测结果表明碳化深度和钢筋保护层厚度的特征值与设计值的比值为大气区>水位变动区>水下区; 混凝土表面氯离子浓度和碱含量为水下区>水位变动区>大气区; 表观氯离子扩散系数为水位变动区>水下区>大气区. 大气区混凝土易受 CO₂ 侵蚀而导致混凝土钢筋保护层劣化. 有害介质氯离子与 CO₂ 共同侵蚀导致水位变动区混凝土钢筋锈蚀和钢筋保护层劣化. 作业时间有限和环境恶劣降低了水下区混凝土对钢筋的保护能力, 导致钢筋锈蚀速度和钢筋保护层劣化加快.

关 键 词: 环境因素; 结构混凝土; 耐久性; 检测与评估

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)05-0054-07

20 世纪 70 年代以来, 我国很多混凝土工程出现了不同程度劣化破坏. 华南、华东地区 20 世纪 50—70 年代末建造的港口码头结构, 七八年后就出现钢筋锈胀混凝土开裂、剥落情况. 20 世纪 80 年代中后期建造的海港码头运行 10~15 年后大部分码头构件发生轻度和中度破坏^[1-3]. 结构混凝土性能劣化程度与结构区域所处环境密切相关, 环境因素引起结构混凝土损伤有两大类, 一类是有害物质通过混凝土传输到钢筋, 导致钢筋锈蚀而引起混凝土膨胀, 膨胀力引起混凝土本身开裂. 另一类是冻融循环、硫酸盐腐蚀、碱集料反应引起混凝土本身膨胀破坏^[4-5].

选择宁波海工码头工作平台板梁(大气区), 东侧西墩(水位变动区)与墩基础(水下区)等典型区域的结构混凝土, 对结构混凝土力学性能、碳化深度、自由氯离子含量和表观氯离子扩散系数、碱含量、钢筋保护层厚度进行现场检测. 研究东南沿海地区环境因素变化对结构混凝土损伤破坏影响, 为建立不同环境因素下海工结构混凝土寿命预测模型提供数据支撑.

1 工程概述

宁波海工码头建于 20 世纪 90 年代, 码头包括架空式引桥、工作平台、人行便桥及浆砌片石海堤等, 工作平台由板梁、系船墩、墩基础结构组成, 工作平台各区域混凝土配合比与性能如表 1 所示.

表 1 各个结构区域混凝土配合比与力学性能

Tab. 1 Mix proportion and mechanical properties of concrete at different structural regions

构件区域	混凝土各材料用量/(kg·m ⁻³)				外加剂	用水量/	坍落度/	混凝土抗压强度/MPa	
	水泥	粉煤灰	河砂	5~25 mm 碎石	掺量/%	(kg·m ⁻³)	mm	3 d	28 d
板 梁	385	80	696	1 085	0.65% 木钙	186	180	31.6	52.8
东侧西墩	370	70	685	1 110	0.58% 木钙	212	220	32.4	54.6
墩基础	480	0	688	1 070	0.62% 木钙	215	215	33.2	53.2

收稿日期: 2013-03-22

基金项目: 西部交通建设科技支持项目(2006ZB01-2); 金陵科技学院博士启动项目(JIT 40610042)

作者简介: 赵 晖(1970-), 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 博士, 主要从事土木工程材料与桥梁结构混凝土耐久性研究.

E-mail: njzhaohui@163.com

2 结构混凝土耐久性现场检测

本文试验中,外观调查主要参照《港口工程质量检验评定标准》进行.碳化深度检测按《公路桥梁承载能力检测评定规程》进行.混凝土自由氯离子含量检测,对0~5 mm,5~10 mm,10~20 mm深度混凝土进行钻孔取样,混凝土中自由氯离子含量按下式计算: $P = \frac{0.03545(C_{\text{AgNO}_3}V)}{GV_1/V_2} \times 100\%$,其中: P 为单位质量混凝土中自由氯离子含量(%); C_{AgNO_3} 为硝酸银标准溶液的浓度(mol/L); V 为滴定时消耗的硝酸银溶液量(mL); V_1 为浸泡试样的水量(mL); V_2 为每次滴定时提取的滤液量(mL); G 为试验液质量(g).

混凝土表观氯离子扩散系数按以下方程^[6-8]求得:

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_c^* t}} \right) \right]$$

其中: $C_{x,t}$ 为 t 时刻 x 深度处的氯离子浓度(%); C_0 为初始浓度(%); C_s 为表面浓度(%); D_c^* 为表观氯离子扩散系数(cm^2/s); $\operatorname{erf}(u)$ 为误差函数, $\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-t^2) dt$.

混凝土中碱含量按《水泥化学分析方法》测定,总碱量按下式^[9]计算:

$$A = M \times X_{\text{Na}_2\text{O}} = \rho \frac{(m - G)}{m} \times X_{\text{Na}_2\text{O}}$$

其中: A 为混凝土中的总碱量(kg/m^3); M 为混凝土中可测试组分质量(kg/m^3); ρ 为混凝土密度(kg/m^3); m 为单位混凝土总质量(kg); G 为单位混凝土中骨料的质量(kg); $X_{\text{Na}_2\text{O}}$ 为样品中 Na_2O 当量质量分数,即样品碱含量(%).

钢筋保护层厚度按《公路桥梁承载能力检测评定规程》^[10]规定方法检测.

3 结构混凝土检测及分析

3.1 结构混凝土外观

海工码头工作平台结构混凝土易受到外力破坏和海水冲刷或浸泡,进而导致部分构件混凝土破损、露筋、开裂.宁波某海工码头工作平台结构混凝土外观见图1.经测量,工作平台结构混凝土裂缝最大宽度为0.18 mm,长度为1.5~1.8 m,结构混凝土还存在破损、露筋等现象.

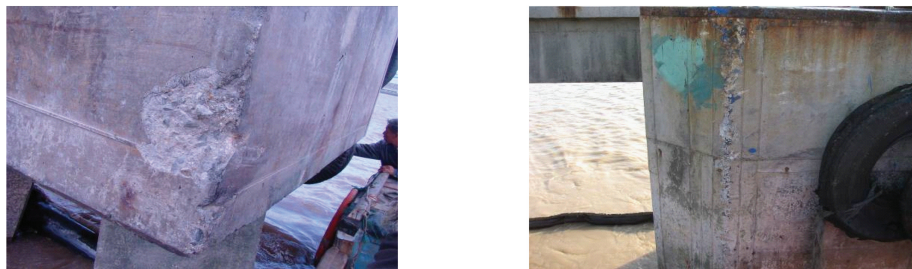


图1 工作平台纵向裂缝

Fig.1 Vertical crack at working platform

3.2 混凝土碳化深度

混凝土碳化深度检测结果见表2.从表2可见,不同测区的板梁(大气区)、东侧西墩(水位变动区)与墩基础(水下区)混凝土碳化深度在0.5~8.0 mm,0.5~2.0 mm,0.5~1.5 mm之间波动.大气区、水位变动区、水下区混凝土碳化深度标准偏差为1.68,0.22和0.13,相对标准偏差值大小为大气区>水位变动区>水下区,这说明由于大气区受空气中 CO_2 作用,大气区混凝土碳化深度波动性比水位变动区、水下区混凝土更

大、大气区、水位变动区、水下区混凝土平均碳化深度分别为 2.65,1.20,0.87 mm,混凝土平均碳化深度水平面分布规律为大气区>水位变动区>水下区,同一水平面上混凝土碳化深度从上部到下部呈逐渐减小趋势^[11].这归因于混凝土碳化深度变化与混凝土内部的饱水程度,大气区混凝土因 CO₂ 扩散速度较快,所以混凝土碳化深度较大,水位变动区和水下区混凝土内部湿度接近饱和或处于水下,空气中 CO₂ 很难扩散到混凝土内部,故混凝土碳化深度较小.

表 2 工作平台结构混凝土碳化深度
Tab.2 Carbonation depth of structural concrete at the working platform

测试部位	测点序号										标准 偏差	相对标准 偏差	平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
板 梁	4.0	3.5	4.0	4.0	4.0	1.5	1.5	0.5	2.0	2.0	1.68	63.60 %	2.65
	2.0	2.0	2.0	3.0	2.5	3.0	4.5	3.0	2.5	2.0			
	4.0	3.0	6.0	3.0	2.5	4.5	4.0	4.0	4.0	3.0			
	0.5	0.5	2.0	2.5	2.0	2.0	8.0	8.0	7.5	6.0			
	2.0	2.0	2.0	3.0	2.5	3.0	4.5	3.0	2.5	2.0			
	2.5	2.5	2.5	3.0	2.5	3.0	4.5	3.0	2.5	2.0			
	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.0	2.0	2.0			
	2.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0			
	1.5	3.0	2.5	1.5	2.5	2.0	1.0	2.0	3.0	2.0			
	1.0	1.5	3.5	2.0	4.0	3.5	1.5	2.0	1.5	1.5			
	1.5	1.5	4.0	2.0	4.0	4.0	1.5	2.0	1.5	1.5			
	2.0	1.5	3.5	2.0	4.0	3.5	1.5	2.0	2.0	2.0			
东侧西墩	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	1.0	2.0	1.5	2.0	1.0	0.22	18.33%	1.20
	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.5	1.5	0.5	2.0			
墩 基 础	1.0	1.0	1.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	1.0	0.13	14.94%	0.87
	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	0.5	1.5	0.5			

3.3 混凝土氯离子含量与表观氯离子扩散系数

工作平台结构部位混凝土自由氯离子含量分布、表面氯离子浓度和氯离子扩散系数见表 3 和图 2.

表 3 工作平台结构部位混凝土表面氯离子浓度和氯离子扩散系数

取样部位	龄期/ a	表面氯离子浓度/ %	表观氯离子扩散系数/ (10 ⁻⁹ cm ² ·s ⁻¹)
板 梁	13	0.076 8	1.048
东侧西墩	13	0.235 3	5.468
墩 基 础	13	0.637 2	3.174

如图 2 所示,随取样深度增加,板梁(大气区)、东侧西墩(水位变动区)、墩基础(水下区)混凝土自由氯离子含量下降,相同取样深度自由氯离子浓度大小为水下区>水位变动区>大气区.从表 3 可看到工作平台各个区域混凝土表面氯离子浓度分别为 0.076 8%,0.235 3%和 0.637 2%,水下区自由氯离子浓度比大气区自由氯离子浓度高,这与混凝土持续接触海水有关^[12-13].混凝土表观氯离子扩散系数为水位变动区>水下区>大气区,大气区混凝土表观氯离子扩散系数(1.048×10⁻⁹ cm²/s)低于其他结构区域,主要因为混凝土表观氯离子扩散系数与水胶比有关,大气区混凝土水胶比为

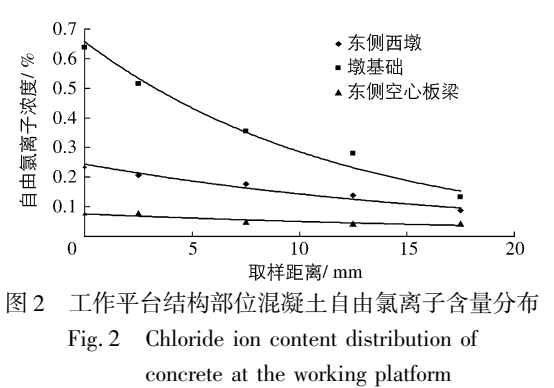


图 2 工作平台结构部位混凝土自由氯离子含量分布
Fig.2 Chloride ion content distribution of concrete at the working platform

0.40,比水位变动区、水下区混凝土的水胶比要小.

3.4 混凝土碱含量

工作平台板梁(大气区)、东侧西墩(水位变动区)、墩基础(水下区)结构混凝土碱含量如表4所示. 为了保证混凝土碱含量检测的准确性, 大气区、水位变动区、水下区结构混凝土碱含量为3个样品平均值. 从表4可见, 大气区、水位变动区与水下区部位平均混凝土碱含量为1.668, 4.263和5.324 kg/m³, 相同取样深度下碱含量大小是水下区>水位变动区>大气区, 水下区混凝土具有比大气区和水位变动区更大的碱含量, 主要由于水下区混凝土持续接触海水和受到海水中氯离子的侵蚀, 外界有害氯离子渗透进混凝土内部, 同时带入了海中里的盐份, 导致水下区混凝土碱含量高于大气区和水位变动区混凝土碱含量^[14-16]. 对照《混凝土碱含量的极限》标准^[17]可见, 水位变动区和大气区结构部位混凝土碱含量已超过规范所规定的混凝土碱含量不大于3.0和3.5 kg/m³的极限.

表4 工作平台结构部位混凝土碱含量

Tab.4 Alkali content of concrete at the working platform

结构部位	样品号	K ₂ O 含量/ (ug · mL ⁻¹)	Na ₂ O 含量/ (ug · mL ⁻¹)	0.658K ₂ O+Na ₂ O 含量/ (ug · mL ⁻¹)	每克浆体碱含量/ ug	碱含量/ (kg · m ⁻³)	平均碱含量/ (kg · m ⁻³)
板 梁	1-1	3.374	4.043	6.263	587.523	1.395	1.668
	1-2	3.374	4.043	6.263	466.344	1.107	
	2-1	5.785	5.391	9.198	831.646	1.975	
	2-2	6.267	5.840	9.964	723.602	1.718	
	3-1	6.267	5.840	9.964	833.110	1.978	
	3-2	3.374	4.942	7.162	772.600	1.835	
东侧西墩	1-1	16.872	18.870	29.971	2 638.292	6.265	4.263
	2-1	10.123	11.231	17.892	1 655.134	3.930	
	3-1	6.749	8.536	12.976	1 092.255	2.594	
墩基础	1-1	9.159	19.543	25.570	2 506.863	5.953	5.324
	2-1	5.785	14.826	18.633	1 971.746	4.682	
	3-1	4.821	18.870	22.042	2 246.891	5.336	

3.5 钢筋保护层厚度

工作平台结构混凝土钢筋保护层厚度统计和评定见表5和6。

表5 工作平台结构混凝土钢筋保护层厚度

Tab.5 Protective layer thickness of structural concrete at the working platform

构件	测区	测试数据/mm										D_n	S	K	D_{ne}	D_{nd}	D_{ne}/D_{nd}
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						
板梁	1-1	32	25	25	36	30	30	30	35	30	30	32.00	4.37	1.595	25.03	30.00	0.83
		32	34	37	33	34	34	37	36	32	38						
		32	33	30	34	37	36	37	32	34	30						
		30	25	30	30	30	30	30	30	30	30						
	1-2	45	41	30	30	47	48	26	26	24	25	30.55	6.01	1.595	20.5	30.00	0.70
		26	28	30	27	29	30	34	27	28	30						
		28	26	25	24	23	24	30	29	32	32						
		30	31	34	28	29	30	30	37	38	31						

表 6 工作平台结构混凝土钢筋保护层厚度评定

Tab.6 Thickness measurement of the protective layer at the working platform

构件编号	平均值/mm	S	K	D_{ne}	D_{nd}	D_{ne}/D_{nd}	评定标度	对结构钢筋耐久性的影响
板梁	31.280	5.190	1.595	22.765	30	0.770	3	有影响
东侧西墩	49.180	6.970	1.595	38.050	50	0.760	3	有影响
墩基础	45.920	6.150	1.595	36.110	50	0.720	3	有影响

注: D_{ne} 为混凝土保护层厚度特征值; $D_{ne}=D_n-KS_D$; D_n 为混凝土保护层厚度平均值; D_{nd} 为混凝土保护层厚度设计值; K 为混凝土保护层厚度合格判定系数值, $16\leq n\leq 24$ 时, $K=1.645$, $n\geq 25$ 时, $K=1.595$; S_D 为测量部位测点保护层厚度标准差.

从表5和6可见,大气区结构混凝土不同测点钢筋保护层厚度的波动范围为23~48 mm,水位变动区的为23~71 mm,水下区的为35~63 mm,大气区、水位变动区、水下区结构混凝土钢筋保护层厚度标准差为5.19,6.97和6.15,水位变动区混凝土钢筋保护层厚度比大气区和水下区混凝土具有更大波动性.对大气区、水位变动区、水下区不同测点混凝土钢筋保护层厚度进行平均,结果表明大气区、水位变动区、水下区混凝土钢筋保护层厚度平均值为22.77,38.05和36.11 mm.大气区、水位变动区、水下区混凝土钢筋保护层 D_{ne}/D_{nd} 平均值分别为0.77,0.76和0.72,钢筋保护层厚度 D_{ne}/D_{nd} 变化规律为大气区>水位变动区>水下区.通过钢筋保护层厚度变化对结构钢筋耐久性影响评判标准进行判定,结构区域变化对结构混凝土钢筋耐久性有影响,水下区混凝土钢筋保护层厚度明显减少,其主要原因是水下区结构混凝土施工质量不理想,降低了保护钢筋能力,导致海水化学腐蚀作用更严重.

4 结 语

选取宁波某已建海工码头工作平台板梁(大气区)、东侧西墩(水位变动区)、墩基础(水下区)区域结构混凝土进行现场检测与评估,结果表明:

(1)海工码头结构混凝土因受外力破坏和海水冲刷或浸泡,导致部分构件混凝土存在破损、露筋、开裂等现象.

(2)混凝土碳化深度和钢筋保护层 D_{ne}/D_{nd} 变化规律为大气区>水位变动区>水下区.随着取样深度增加,板梁(大气区)、东侧西墩(水位变动区)、墩基础(水下区)混凝土自由氯离子含量下降.相同取样深度下,表面氯离子浓度和碱含量分布规律大小为水下区>水位变动区>大气区;表观氯离子扩散系数分布规律为水位变动区>水下区>大气区.

(3)大气区混凝土易受 CO_2 侵蚀,而导致大气区混凝土钢筋保护层劣化.水位变动区由于有害介质氯离子与 CO_2 共同侵蚀而导致混凝土钢筋锈蚀和钢筋保护层劣化.水下区结构混凝土因为作业时间有限和作业环境恶劣降低了保护钢筋的能力,使水下区混凝土钢筋锈蚀速度和钢筋保护层劣化加快.

参 考 文 献:

- [1] 刘秉京. 混凝土结构耐久性设计[M]. 北京:人民交通出版社,2007:127-156. (LIU Bing-jing. Durability design of concrete structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 127-156. (in Chinese))
- [2] MATHER B. Concrete durability[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(5): 3-4.
- [3] 唐明述. 中国水泥混凝土发展现状与展望[J]. 东南大学学报:自然科学版,2006,36(增刊2):1-6. (TANG Ming-shu. State-of-art and prospect of cement and concrete industries in China[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(Suppl2): 1-6. (in Chinese))
- [4] 孙伟. 荷载与环境因素耦合作用下结构混凝土的耐久性与服役寿命[J]. 东南大学学报:自然科学版,2006,36(4):7-14. (SUN Wei. Durability and service life of structure concrete under load and environment coupling effects[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(4): 7-14. (in Chinese))
- [5] ALEXANDER M G, BALLIM Y, STANISH K. A framework for use of durability indexes in performance based design and specifications for reinforced concrete structures[J]. Materials and Structures, 2008, 41(7): 921-936.
- [6] 仲伟秋,贡金鑫. 氯离子侵蚀环境下混凝土结构的耐久性评估[J]. 混凝土,2002,11(5):3-4. (ZHONG Wei-qiu, GONG Jin-xin. Durability evaluation of concrete structures suffering from chloride ions invasion[J]. Concrete, 2002, 11(5): 3-4. (in Chinese))
- [7] 林宝玉,单国良. 南方海港浪溅区钢筋混凝土耐久性研究[J]. 水运工程,1998,1(3):1-5. (LIN Bao-yu, SHAN Guo-liang. The research of the durability of reinforced concrete exposed at the wave-splashed area of southern sea port[J]. Port & Waterway Engineering, 1998, 1(3): 1-5. (in Chinese))
- [8] 李顺凯,刘可心,秦明强,等. 基于现场耐久性检测的承台海工混凝土寿命预测[J]. 混凝土,2008,11(5):117-119. (LI Shun-kai, LIU Ke-xin, QIN Ming-qiang, et al. Service life prediction of platform marine concrete based on spot durability inspection[J]. Concrete, 2008, 11(5): 117-119. (in Chinese))

- [9] 王景贤. 既有结构混凝土中碱含量的检测[J]. 建材技术与运用, 2009, 3(6): 3-5. (WANG Jing-xian. Detection of the alkali content of the available structural concrete[J]. Journal of Building Materials Technology and Application, 2009, 3(6): 3-5. (in Chinese))
- [10] JGT/T J21-2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程[S]. (JGT/T J21-2011, Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridge[S]. (in Chinese))
- [11] 陈道普. 风对混凝土碳化速度影响的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (CHEN Dao-pu. A study of the influence on carbonization speed of concrete by wind[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [12] 陈浩宇, 余红发, 刘连新, 等. 混凝土在海洋环境和除冰盐条件下的氯离子扩散行为[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2005, 9(7): 48-52. (CHEN Hao-yu, YU Hong-fa, LIU Lian-xin, et al. Chloride diffusion of concretes exposed to marine environment and deicing salt[J]. Journal of HUST (Urban Science Edition), 2005, 9(7): 48-52. (in Chinese))
- [13] TANG Lu-ping, ANDERSEN A, NILSSON L. Chloride ingress data from five years field exposure in a Swedish marine environment[C] // Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modeling the Chloride Ingression to Concrete, Paris, 2000: 105-119.
- [14] BERUBE M A, DORION J, DUCHESNE J, et al. Laboratory and field investigations of the influence of sodium chloride on alkali-silica reactivity[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(9): 77-84.
- [15] CARÉ S. Influence of aggregates on chloride diffusion coefficient into mortar, Cement and Concrete Research[J]. 2003, 33(7): 1021-1028.
- [16] SIBBICK R G. Mechanism affecting the development of alkali-silica reaction hardened concretes exposed to saline environments[J]. Magazine of Concrete Research, 1998, 50(2): 147-159.
- [17] CECS 53-1993, 混凝土碱含量限值标准[S]. (CECS 53-1993, Standard for maximum alkali content in concrete[S]. (in Chinese))

Tests and evaluation of structural concrete durability at Ningbo marine wharf

ZHAO Hui^{1,2}, ZHANG Ya-mei², MING Jing²

(1. Architectural Engineering Institute, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210001, China)

Abstract: In order to study the influence of environment factors on the structural concrete durability, the durability properties of concrete at different structural regions of the working platform of a marine wharf in Ningbo are tested. The test results show that the carbonation depth and the characteristic value and designed value of bar protective layer thickness change from high to low, namely those in the atmosphere zone are greater than those in the water level fluctuating zone, and those in the water level fluctuation zone are greater than those in the underwater zone. The change in the apparent chloride concentration and alkali content of the concrete is: that in the underwater zone is higher than that in the fluctuating water level zone and that in the fluctuating water level zone is higher than that in the atmosphere zone. In terms of the apparent chloride diffusion coefficients, the fluctuating water level zone is greater than the underwater zone and the underwater zone is greater than the atmosphere zone. Concrete in the atmosphere zone is much exposed to CO₂, which results in deterioration of the protective layer thickness. The combined action of chloride ion with CO₂ erosion leads to deterioration of the protective layer thickness in the fluctuating water level zone. The limitation of operation time and bad environment lower the ability of reinforced protection, and a faster steel corrosion and the deterioration of the layer thickness can be found in the underwater zone.

Key words: environmental factors; structural concrete; durability; inspection and evaluation