

文章编号:1673-9469(2011)04-0014-04

## 基础混凝土构件腐蚀损伤研究

安新正<sup>1,2</sup>, 易成<sup>2</sup>, 姜新佩<sup>1</sup>, 高延安<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:**基于部分地下水和场地土环境(岩土环境)下基础钢筋混凝土构件的检测数据,分析了在役基础混凝土结构的腐蚀损伤特征,以及抗压耐腐蚀系数与碳化深度随其服役时间的变化特征。结果表明:岩土环境对基础混凝土结构的腐蚀损伤作用是普遍存在的,且腐蚀损伤进程与岩土环境的类型、介质因素密切相关;大多数基础混凝土的抗压耐腐蚀系数随其服役时间的增长而减小,碳化深度随其服役时间的增长而增大。

**关键词:**基础钢筋混凝土结构;岩土环境;调查;腐蚀损伤

**中图分类号:**TU375.1

**文献标识码:**A

### Research on corrosion damage of foundation reinforced concrete members in geotechnical environment

AN Xin-zheng<sup>1,2</sup>, YI Cheng<sup>2</sup>, JIANG Xin-pei<sup>1</sup>, GAO Yan-an<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the test data of service foundation reinforced concrete structure under ground water and ground soil environment (geotechnical environment), the corrosion damage characteristic and the evolution characteristic of the anti-corrosion coefficient and the carbonation depth were studied. The results showed that the corrosion damage effects of geotechnical environment were ubiquity to the foundation reinforced concrete structures. And the corrosion damage evolution of reinforced concrete structure was closely related to the type of geotechnical environment and the corrosion medium factors; the anti-corrosion coefficient decreased with the increase of attended time. At the same time, the carbonation depth increased with the increase of attended time.

**Key words:** foundation reinforced concrete structure; geotechnical environment; investigation; corrosion damage

基础混凝土构件上连上部建筑结构,下接地下岩土工程,是承上启下的重要工程构件,其耐久性寿命的长短直接决定了上部工程结构的寿命。由于基础混凝土构件通常处于干湿交替循环环境或地下岩土环境之中,因此其耐久性也必然受到环境腐蚀的影响。一方面,在港口、海洋、盐湖、寒冷等环境区域,已有的研究成果发现服役中的基础混凝土结构常常因遭受到环境侵蚀介质、冻融的侵蚀而引发出各种各样的耐久性问题;另一方面,随着现代工业化的快速发展,一些城市的地下

水、场地土壤也被严重污染,被腐蚀性介质污染后的地下水、场地土与基础混凝土结构形成干湿交替循环、半浸泡、全浸泡的密切接触与作用环境,复杂的地下环境因素客观上导致了基础混凝土结构耐久性问题的发生,并且这一环境因素最终成为基础混凝土结构耐久性寿命加速退化的主要因素。

相关基础混凝土构件的耐久性损伤问题,国内外学者已开展了相关的研究。例如:James and Edworthy 以及 Park 对处于地下侵蚀性环境中混凝

收稿日期:2011-10-22

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2010001034) 特约专稿

作者简介:安新正(1963-),男,河南镇平人,博士,副教授,从事结构耐久性检测方面的研究。

土材料进行了耐久性试验研究,证实了侵蚀性环境对混凝土材料的性能具有加速退化作用<sup>[1-2]</sup>;马孝轩<sup>[3-5]</sup>对长期遭受地下水和土壤中各种腐蚀性介质侵蚀的硅酸盐混凝土进行了研究,认为地下水和土壤中各种腐蚀性介质对硅酸盐混凝土及钢筋都有较强的侵蚀作用;江云安等<sup>[6]</sup>针对地下及海工类建筑的特点通过在混凝土中掺加 SCRA 和优质粉煤灰来改善混凝土结构的抗腐蚀性,并取得了一定的成果;余红发<sup>[7]</sup>基于氯离子扩散探讨了钢筋混凝土构件的寿命预测模型;安新正等<sup>[8]</sup>通过室内加速试验方法研究了硫酸盐与冻融循环环境对混凝土损伤效应的影响。然而,当下相关实际工程基础混凝土构件耐久性损伤特征方面的研究文献报导还比较缺乏。本文基于来自近海区域、盐湖区域、内陆地区的部分基础混凝土构件及其工作环境的现场检测与取样检验数据,对基础混凝土构件的腐蚀损伤特征,以及几个典型工程基础混凝土构件的抗压耐腐蚀系数、碳化深度随其服役时间的演化特征进行了分析研究,旨在为基础混凝土结构的耐久性设计与施工提供有益的参考。

## 1 岩土环境因素

调查结果表明,我国近海区域、盐湖区域、内陆地区建筑基础混凝土结构的岩土环境中(具体来说,即为地下水和场地土环境)广泛存在着侵蚀性介质(如:  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  等)因素、特殊作用因素(具体来说,即为干湿交替、冻融循环作用)<sup>[5,9]</sup>。基于大量近海区域、盐湖区域、内陆地区岩土环境现场勘察资料,基础混凝土结构的岩土环境大体上可划分为如下五个类型:

- (1) 相对干燥环境(环境相对湿度小于 30% RH);
- (2) 相对潮湿环境(环境相对湿度大于 95% RH);
- (3) 浸泡环境(混凝土构件完全被侵蚀介质溶液淹没);
- (4) 干湿交替环境(浸泡环境与相对干燥环境交替循环发生);
- (5) 冻融循环环境(冻结与融化交替循环发生)。

### 1.1 环境介质腐蚀因素

近海区域由于长期受到海水的渗透作用,其地下水、场地土的化学成分比较复杂。研究发

现<sup>[10-11]</sup>,近海区域的地下水、场地土中海水中的化学成分主要包含  $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$ 。因此,在这些区域  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  是普遍存在的,并且大多数情况下其浓度都大大高于规范<sup>[12-13]</sup>规定的限值;盐湖区域环境的地下水、场地土中含有高浓度的: $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等介质,其中氯离子质量浓度有的可高达 92~204 g/L<sup>[14]</sup>;另外,近 20 年来随着内陆城市工业化的快速发展,城市化工生产区及其周围区域中的地下水、场地土中也普遍存在高浓度  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等侵蚀性介质<sup>[15-16]</sup>。因此,在以上侵蚀性岩土环境的长期作用下, $\text{Cl}^-$  诱发基础混凝土构件中的钢筋产生锈蚀损伤, $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{CO}_2$  分别诱发混凝土发生硫酸盐腐蚀损伤和碳化损伤。

### 1.2 特殊作用因素

我国的华北、西北、东北等寒冷、严寒地区的基础混凝土结构,在每年结冻的月份里,由于晚间的环境温度通常在零度以下,内部富含水分的基础混凝土便被冻结。当白天日照充足时,环境温度升高到 0℃ 以上并持续足够时间时,被冻结的基础混凝土便开始融解。在以上地区,冻结和融解(即冻融循环)在地面以上及地面以下约 100 mm 左右区域的基础混凝土构件中比较常见,同时这一区域也是干湿交替循环作用的频发区。研究表明,大量基础混凝土构件的损伤失效都直接源于环境对混凝土的冻融循环与干湿交替循环作用<sup>[17]</sup>。受海水潮汐潮落的影响,在近海区域环境中也广泛存在着干湿交替循环现象。干湿交替循环的存在加速了侵蚀性介质对混凝土构件的腐蚀进程,从而对混凝土结构的耐久性构成了严重的威胁。

岩土环境对基础混凝土结构的腐蚀作用与岩土环境的类别密切相关,侵蚀性介质因素和特殊作用因素将会通过基础混凝土相应的岩土环境因素影响基础混凝土构件的腐蚀损伤进程,并最终决定基础混凝土结构的耐久性寿命,必须引起足够的重视。

## 2 基础混凝土构件劣化特征

相对于建筑物上部结构来说,基础混凝土结构所处的外部环境就复杂多了。调查发现大多数服役 20 年左右的基础混凝土结构,其构件的腐蚀损伤甚至失效都是由于腐蚀介质与干湿交替循

环、冻融循环或干湿交替循环+冻融循环共同作用的结果。本文针对近海区域、盐湖区域及内陆地区的部分基础混凝土构件现场检测与取样检验结果进行了统计分析,发现基础混凝土结构的腐蚀损伤现象基本呈现出如下特征:

(1)随着服役时间的增长混凝土的PH值渐趋中性化,抗压强度逐渐降低软化,外观质量离散性较大;

(2)在干湿循环作用区范围内,混凝土的碳化速度高于干湿循环作用区范围之外的混凝土;

(3)混凝土构件内钢筋普遍锈蚀,锈蚀程度随岩土环境与服役年限的不同而存在一定的差异;

(4)混凝土构件表面常伴随顺筋裂缝和垂直于纵向受拉钢筋的竖向裂缝。

基础混凝土构件外观检测数据显示,大多数构件的底部混凝土存在蜂窝麻面之类的不密实现象,这也就造成了在相同岩土环境及腐蚀因素条件下混凝土构件被腐蚀的程度具有较大的差异。可见基础混凝土构件的施工质量不容忽视,加强施工质量的监督与管理很有必要。

### 3 实例分析

侵蚀性介质因素与特殊作用因素对基础混凝土构件的腐蚀作用具有复杂性,不同的环境作用条件,其作用结果有着较大的差异。为了说明环境作用对基础混凝土结构的腐蚀演化过程,在表1中列出了4个具有代表性的基础工程(称之为:1#、2#、3#和4#基础工程)的部分基础混凝土地基梁及其周围环境的现场检测与取样检验结果。

在此取混凝土抗压耐腐蚀系数来研究基础混凝土的抗压强度腐蚀演化规律,以碳化深度随服役时间的变化来研究基础混凝土的碳化腐蚀演化规律。

经对1#、2#、3#和4#工程基础混凝土构件室内外检测数据进行统计整理与分析,得到了基础混凝土抗压耐腐蚀系数随服役时间的演化规律(图1),以及碳化深度随服役时间的演化规律(图2)。

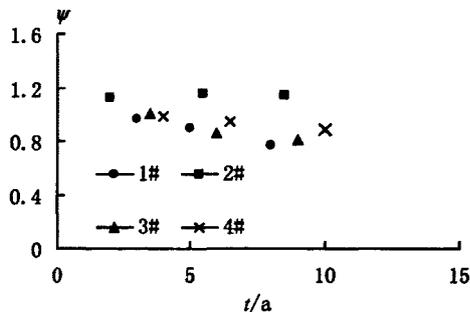
由图1可以看出,基础混凝土构件服役期间,

表1 基础混凝土构件及其岩土环境检测结果

Tab.1 Test results of foundation reinforced concrete members and its geotechnical environment

项目	服役年限/a	基础混凝土构件检测结果					环境水主要介质含量检测结果/(mg·L <sup>-1</sup> )		环境条件	
		平均碳化深度/mm	抗压强度/MPa		钢筋状态	抗压耐腐蚀系数Ψ	表面混凝土状态	Cl <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
			标准值	实测值						
#1	3	1.2		19.3	锈蚀	0.965	基本完好	2107.6	1728.5	冻融干湿
	5	3.0	20	18.0	中度锈蚀	0.900	顺筋开裂	2123.8	3030.4	
	8	11.2		15.4	严重锈蚀	0.770	顺筋开裂起鼓酥松	2136.7	3440.0	
#2	2	0.4		33.9	完好	1.130	基本完好	851.3	734.6	相对潮湿
	5.5	1.0	30	34.7	轻微锈蚀	1.157	竖向开裂	917.5	689.1	
	8.5	1.43		34.5	轻微锈蚀	1.150	竖向开裂	782.2	701.4	
#3	3.5	1.45		20.2	无锈蚀	1.010	基本完好	2015.3	2103.6	冻融干湿
	6	4.9	25	17.5	锈蚀	0.857	竖向开裂	1960.5	2115.1	
	9	15.8		16.2	中度锈蚀	0.810	顺筋开裂	2040.1	2304.5	
#4	4	1.8		24.6	锈蚀	0.984	竖向开裂	2000.8	1692.4	冻融干湿
	6.5	3.5	20	23.8	锈蚀	0.952	顺筋开裂	2035.7	1745.6	
	10	8.1		22.1	锈蚀	0.884	顺筋开裂骨料外露	2113.5	1837.4	

1#、3#和4#工程的抗压耐腐蚀系数均呈现出缓慢下降的趋势,表明岩土环境的作用已导致基础混凝土腐蚀损伤的发生,并将随着时间的推移,基础混凝土的腐蚀损伤将更加严重。从1#、3#和4#工程的岩土环境情况来看(表1),岩土环境中有害介质 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 的含量较高,且基础混凝土的工作环境为冻融循环环境,这些环境因素是导致1#、3#和4#工程基础混凝土发生腐蚀损伤病害的主要因素。同时,由图1也可以得知2#工程的抗压耐腐蚀系数表现为缓慢增长并趋稳定的趋势,表明岩土环境作用对该工程基础混凝土的影响较小。从2#工程的岩土环境情况来看(见表1),岩土环境中有害介质 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 的含量均是较低的,且基础工程的岩土环境只为相对潮湿环境。另外,检测还发现2#工程基础混凝土比较密实,可有效阻止

图1  $\psi$ 与 $t$ 的关系Fig. 1 Relationship of  $\psi$  and  $t$ 

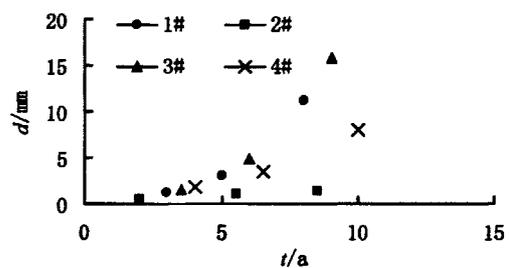
#### 4 结论

岩土环境对基础混凝土结构的腐蚀损伤作用是普遍存在的,岩土环境对基础混凝土结构的腐蚀作用与岩土环境的类别密切相关。当基础混凝土构件周围环境侵蚀介质的浓度超过限值时,侵蚀性介质(如: $\text{CO}_2$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ )将在多次干湿交替循环(或浸泡)的作用下,沿孔隙、裂缝(构件表面的裂缝宽度 $>0.3\text{ mm}$ )进入混凝土内部,与水泥基材料发生一系列反应,并最终导致混凝土硫酸盐侵蚀与炭化,使得混凝土结构松散、强度降低。同时,随着混凝土炭化深度的增加,当达到钢筋表面后钢筋表面的钝化膜逐渐遭到破坏,这就为钢筋的锈蚀创造了条件,并最终造成钢筋锈蚀。当有冻融循环同时发生时,冻胀作用也加剧了基础混凝土腐蚀损伤的进程。

侵蚀性介质因素和特殊作用因素将会通过基础混凝土相应的岩土环境因素影响基础混凝土构件的腐蚀损伤进程,并最终决定基础混凝土结构的耐久性寿命。基础混凝土结构腐蚀不容情况

了有害介质对混凝土材料的侵蚀作用。这些因素保证了2#工程基础混凝土良好的抗腐蚀性能。

由图2可以看出,1#、2#、3#和4#工程基础混凝土均发生了碳化损伤,且碳化深度随其服役时间的增长而均呈现为增大的趋势。1#、3#和4#工程基础混凝土构件的碳化深度随其服役时间的增长速度较快,表明随着时间的推移,1#、3#和4#工程基础混凝土的碳化损伤将更加严重。但2#工程基础混凝土构件的初始碳化深度(3年时)较小,只有 $0.4\text{ mm}$ ,且随其服役期间的增长,其增长幅度也较小。这与2#工程基础混凝土比较密实关系密切,密实的混凝土能够有效阻止 $\text{CO}_2$ 介质对混凝土材料的碳化侵蚀作用。这些因素使得2#工程基础混凝土具有良好的抗碳化性能。

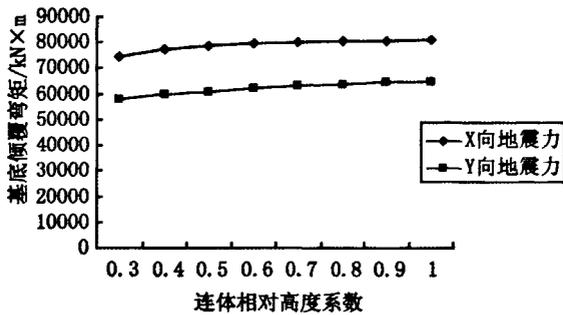
图2  $d$ 与 $t$ 的关系Fig. 2 Relationship of  $d$  and  $t$ 

不容乐观,更不应该忽视。加强基础混凝土结构腐蚀情况调查与监测,及时对其腐蚀环境进行治疗,是基础混凝土结构安全、耐久工作的保障。

#### 参考文献:

- [1] JAMES, A N EDWORTHY, K J. Effects of water interactions on engineering structures[J]. Hydrological Sciences Journal, 1985(30): 395-406.
- [2] PARK, YOUNG SHIK. Strength deterioration of high strength concrete in sulfate environment[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29: 1397-1402.
- [3] 马孝轩, 陈从庆, 仇新刚. 硅酸盐材料在地下耐久性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1995(4): 8-11.
- [4] 马孝轩, 仇新刚, 陈从庆. 混凝土及钢筋混凝土材料在地下的耐腐蚀性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 1997(6): 6-11.
- [5] 马孝轩. 我国主要土壤对混凝土材料腐蚀性分类[J]. 混凝土与水泥制品, 2003(6): 6-7.
- [6] 江云安, 李光达, 杨毅. SCRA耐蚀材料提高混凝土耐久性的研究[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2008(2): 58-60.

(下转第29页)

图5  $\beta_c$  对结构基底倾覆弯矩的影响Fig. 5 Impact on structural base over moment of  $\beta_c$ 

由图4及图5可见:(1)随着 $\beta_c$ 的改变,结构的基底剪力及倾覆弯矩变化平缓。不同的连体设置高度对结构的基底剪力及倾覆弯矩影响较小。(2)结构的基底剪力及倾覆弯矩随 $\beta_c$ 的加大而略显增大。因此,采用较小的连体设置高度可略减结构的基底剪力及倾覆弯矩。

## 5 结论

1)连体相对高度系数的变化可以在较大程度上改变结构的自振模态,对非对称双塔连体结构的低阶振型产生较大影响。

2)连体相对高度系数可使结构的自振周期产

生显著变化,其总体变化趋势随着连体相对高度系数的增大而减小。

3)连体的介入使非对称双塔连体结构的平扭耦联程度增强。对该类结构进行动力特性分析时必须采用CQC法,同时必须考虑连体对结构的贡献,进行整体分析。

4)非对称双塔连体结构的基底剪力及倾覆弯矩受连体设置高度的影响较小,但较小的连体设置高度可适当减少结构的基底剪力及倾覆弯矩。

## 参考文献:

- [1] GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].
- [2] 黄坤耀.双塔连体结构的静力、抗震和抗风分析[D].杭州:浙江大学,2001.
- [3] 包世华,王建东.大底盘多塔楼连体结构的受力分析[J].建筑结构,1996(11):7-13.
- [4] 卞朝东,李爱群,娄宇,等.高层连体结构振型及其参与系数的分析[J].建筑科学,2002,18(4):20-24.
- [5] 刘晶波,李征宇,石萌,等.大跨高层连接体建筑结构动力分析[J].建筑结构学报,2004,25(1):45-52.
- [6] 焦柯,李松柏,陈润辉.东莞海德广场双塔连体高层结构动力弹塑性分析[J].建筑结构,2009,39(8):17-98.

(责任编辑 刘存英)

(上接第17页)

- [7] 余红发,孙伟.混凝土使用寿命预测方法I-理论模型[J].硅酸盐学报,2002,30(6):686-690.
- [8] 安新正,易成,刘燕,等.硫酸盐侵蚀与冻融循环作用下混凝土损伤试验研究[J].混凝土与水泥制品,2010,(2):1-3.
- [9] 程祖锋,张永永,王合玲.邯郸市市场地土的腐蚀性评价研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2008,25(3):12-14.
- [10] 龚洛书,柳春圃.混凝土的耐久性及其防护修补[M].北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [11] 张筛存.基础工程中混凝土抗硫酸盐侵蚀试验研究[J].江苏水利,2002(11):17-18.
- [12] GB50021-2001,岩土工程勘察规范[S].

- [13] GB50007-2002,建筑地基基础设计规范[S].
- [14] 余红发,孙伟,麻海燕,等.盐湖地区钢筋混凝土结构使用寿命的预测模型及其应用[J].东南大学学报:自然科学版,2002,32(4):638-642.
- [15] 程祖锋,余金.邯郸市地下水对建筑基础的腐蚀性研究[J].河北工程学院学报:自然科学版,2011,28(1):14-18.
- [16] 刘惠兰,黄艳,韩云屏.环境水对砂浆、混凝土的侵蚀性研究[J].混凝土与水泥制品,1997(6):12-15.
- [17] 吉伯海,张宇峰,彭昌宪.环保型裂缝修复材料对混凝土耐化学侵蚀和抗冻融性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2009(4):48-51.

(责任编辑 马立)