

不同应力状态下混凝土抗氯离子侵蚀的研究

袁承斌¹ 张德峰² 刘荣桂³ 梁正平⁴ 吕志涛⁵

(1.扬州大学水利与建筑工程学院 江苏 扬州 225009 ;2.上海市建筑科学研究院 上海 200032 ;
3.江苏大学基建处 江苏 镇江 212013 ;4.河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098 ;
5.东南大学土木工程学院 江苏 南京 210096)

摘要 提出混凝土试件在不同应力状态下氯离子侵蚀试验的方法 ,分析了混凝土的应力水平、水灰比对氯离子侵蚀速度的影响 ,建立了混凝土在应力状态下氯离子侵蚀速度预测的数学模型 ,推断出预应力混凝土抗氯离子侵蚀能力强于普通混凝土的结论。
关键词 混凝土 ;应力水平 ;水灰比 ;氯离子侵蚀速度
中图分类号 :TU528.01 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2003)01-0050-05

钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的一个主要因素 ,而氯离子侵蚀是导致钢筋锈蚀的主要起因之一 ,是影响混凝土结构使用寿命的重要指标 ,但是 ,目前国内外氯离子对混凝土侵蚀的研究 ,主要是在单因素侵蚀、无荷载作用下进行 ,与钢筋混凝土结构的实际运行环境不太吻合^[1] ,为此 ,本文通过对混凝土施加荷载后进行快速氯离子侵蚀试验 ,研究了荷载与氯离子侵蚀同时作用下混凝土的耐久性。

1 试验设计

1.1 原材料

水泥采用江南水泥厂生产的“金宁羊”牌 42.5 强度等级普通硅酸盐水泥 ;细骨料采用芜湖产河沙 ,细度模数 2.4 ,级配Ⅱ区 ;粗骨料采用最大粒径为 20 mm 的石灰岩碎石 ;外加剂采用 FDN 减水剂。

1.2 材料配合比

混凝土配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比
Table 1 Mix proportions of concrete

水灰比	水泥/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	碎石/(kg·m ⁻³)
0.4	450	180	673	1097
0.5	360	180	744	1116

注 :为改善混凝土的和易性 ,水灰比为 0.4 的混凝土加入掺量为水泥质量 0.45% 的 FDN。

1.3 试件制作

混凝土试件分为无应力、压应力、拉应力状态 3 类 ,对压应力、拉应力状态试件的制作分为 3 步 :首先加工预埋铁件 ,再按设计要求进行混凝土浇筑与养护 ,最后按应力水平施加荷载 ,试件尺寸均为 100 mm × 100 mm × 400 mm。

1.3.1 压应力状态试件制作

压应力试件见图 1 ,试件预先留有孔道 ,采用后张法 ,通过施加预应力使试件产生预期的受压状态 ,为减少预应力损失 ,采用墩头锚具 ,加载时采用双重控制 :一是通过粘贴在预应力筋上的电阻应变片控制力筋的

收稿日期 2002-04-29
基金项目 :国家自然科学基金资助项目(59978008)
作者简介 :袁承斌(1968—),男,江苏如东人,讲师,主要从事建筑材料和施工技术研究。

应力值,二是通过张拉钢筋时千斤顶油压表的读数控制施加于混凝土上的压力值,并以油压表读数为准.施加的压应力 σ_c 控制为 $0.3f_c$ $0.5f_c$ $0.7f_c$ (f_c 为试件混凝土的抗压强度),见表 2.

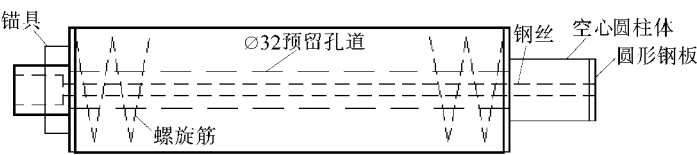


图 1 受压状态试件示意图

Fig.1 Compressed concrete specimens

表 2 受压状态混凝土试件的施加应力值

Table 2 Compressive stress upon compressed concrete specimens

试件编号	水灰比	抗压强度 f_c /MPa	施加压应力 σ_c	计算值 /MPa	实测值 /MPa	试件编号	水灰比	抗压强度 f_c /MPa	施加压应力 σ_c	计算值 /MPa	实测值 /MPa
DC—1	0.4	20.3	$0.3f_c$	6.09	6.27	DC—4	0.5	15.5	$0.3f_c$	4.65	4.79
DC—2	0.4	20.3	$0.5f_c$	10.15	10.45	DC—5	0.5	15.5	$0.5f_c$	7.75	7.98
DC—3	0.4	20.3	$0.7f_c$	14.21	14.64	DC—6	0.5	15.5	$0.7f_c$	10.85	11.18

1.3.2 拉应力状态试件制作

受盐雾箱空间的限制,拉应力状态试件的氯离子侵蚀试验以试件的弯曲受拉代替轴向受拉.事实上,实际工程中轴向受拉情况很少,绝大部分情况都是弯曲受拉.拉应力状态试件见图 2.在螺杆及混凝土拉应力作用一侧贴应变片,然后用扳手拧螺帽,施加荷载,通过其应变片读数来控制其应力值.根据设计要求,施加拉应力 σ_t 分别为 $0.3f_t$ $0.5f_t$ $0.7f_t$ (f_t 为试件混凝土的抗拉强度),见表 3.

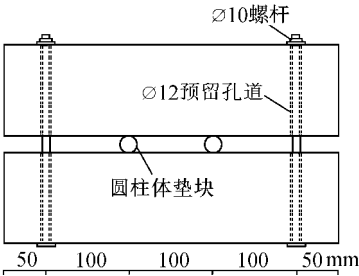


图 2 受拉状态试件示意图

Fig.2 Tensile concrete specimens

表 3 受拉状态混凝土试件的施加应力值

Table 3 Bending stress upon tensile concrete specimens

试件编号	水灰比	抗拉强度 f_t /MPa	施加压应力 σ_t	计算值 /MPa	实测值 /MPa
DT—1	0.4	1.84	$0.3f_t$	0.552	0.576
DT—2	0.4	1.84	$0.5f_t$	0.920	1.036
DT—3	0.4	1.84	$0.7f_t$	1.288	1.290
DT—4	0.5	1.53	$0.3f_t$	0.459	0.667
DT—5	0.5	1.53	$0.5f_t$	0.765	1.015
DT—6	0.5	1.53	$0.7f_t$	1.071	1.291

1.4 快速试验方法

本试验选用 FQY25 型盐雾箱作为混凝土试件氯离子的侵蚀环境,目的是模拟一些长期受空气中含有一定 NaCl 成分侵蚀的海工建筑物受氯离子侵蚀的状况.每批均用 5% 的 NaCl 溶液进行喷雾.试验时间 2 个月.

1.5 氯离子含量测定

本试验中的氯离子含量测定,采用测定硬化混凝土中砂浆的水溶性氯离子含量的方法,来计算氯离子含量及扩散速度.在氯离子含量测定时,最关键的一步是如何对试件进行准确取样.本试验中试件暴露面分 3 层取样,表面下 0~1 cm 为第 1 层、1~2 cm 为第 2 层、2~3 cm 为第 3 层.在取每一层样时,可先用劈裂法将所取层劈裂成 1 cm 厚的薄层,然后在混凝土中取出两份均为 50 g 砂浆,对于拉应力试件取样应在中间纯弯段 10 cm 长的范围内进行.取样后的砂浆按《水运工程混凝土试验规程》JTJ270—98 进行水溶性氯离子含量的测定^[2].

2 试验结果

2.1 不同应力状态下混凝土试件中氯离子的含量

用上述方法测定出混凝土试件不同应力水平下的氯离子含量值,列于表 4 表 5.

表 4 受压状态混凝土试件中氯离子含量及其扩散系数

Table 4 Chloride contents and diffusion coefficients of compressed concrete specimens

试件编号	应力水平	水灰比	试件表面	氯离子含量/%			氯离子扩散系数 ($\times 10^{-6}\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
				第 1 层	第 2 层	第 3 层	
DC—1	$0.3f_c$	0.4	A 面	0.235	0.060	0.006	10.368
			B 面	0.082	0.016	0.002	8.959
DC—4	$0.3f_c$	0.5	A 面	0.480	0.104	0.015	11.159
			B 面	0.310	0.067	0.006	9.570
DC—2	$0.5f_c$	0.4	A 面	0.218	0.050	0.005	9.784
			B 面	0.066	0.011	0.001	7.694
DC—5	$0.5f_c$	0.5	A 面	0.372	0.092	0.011	11.149
			B 面	0.234	0.048	0.005	9.265
DC—3	$0.7f_c$	0.4	A 面	0.184	0.041	0.004	9.568
			B 面	0.051	0.007	0.001	6.690
DC—6	$0.7f_c$	0.5	A 面	0.241	0.078	0.008	11.099
			B 面	0.161	0.030	0.002	8.553

注 :A 面朝上 ,B 面朝下 .

表 5 受拉及无应力状态混凝土试件中氯离子含量及其扩散系数

Table 5 Chloride contents and diffusion coefficients of tensile or unstressed concrete specimens

试件编号	应力水平	水灰比	氯离子含量/%			氯离子扩散系数 ($\times 10^{-6}\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
			第 1 层	第 2 层	第 3 层	
DW—1	0	0.4	0.057	0.003	0.000	3.850
DW—2	0	0.5	0.108	0.014	0.002	6.125
DT—1	$0.3f_c$	0.4	0.067	0.003	0.000	3.855
DT—4	$0.3f_c$	0.5	0.162	0.018	0.003	6.327
DT—2	$0.5f_c$	0.4	0.077	0.003	0.000	4.103
DT—5	$0.5f_c$	0.5	0.206	0.025	0.003	6.560
DT—3	$0.7f_c$	0.4	0.081	0.004	0.000	4.116
DT—6	$0.7f_c$	0.5	0.224	0.029	0.004	6.633

根据上述不同应力水平下混凝土试件中氯离子含量的检测结果 ,描绘了如下 3 种氯离子含量曲线 :压应力状态(受压试件 A 面)氯离子含量曲线(图 3(a)) ,压应力状态(受压试件 B 面)氯离子含量曲线(图 3(b)) ;拉应力及无应力状态氯离子含量曲线(图 4) .

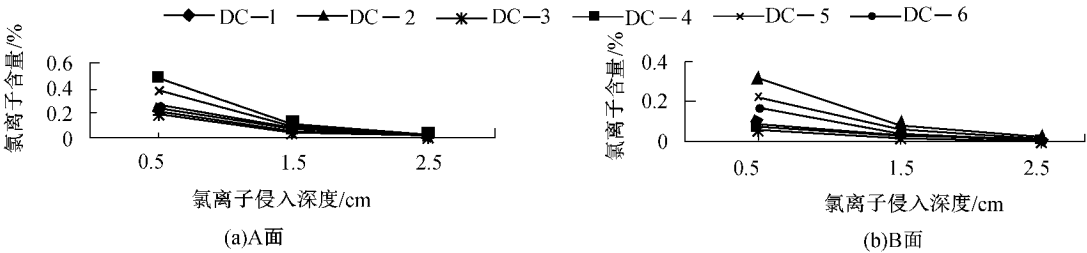


图 3 受压状态混凝土试件中氯离子含量曲线

Fig.3 Chloride contents of compressed concrete specimens

在压应力状态中 ,试件的两个暴露面(A ,B 面)在盐雾箱中摆放的位置不同 ,A 面朝上 ,B 面朝下 .它们受盐雾侵蚀环境存在较大差别 ,因此分两种情况进行对比分析 .拉应力及无应力状态 ,由于受施加荷载方法及盐雾箱设备等因素的制约 ,只能横行放置 ,施加拉应力的混凝土部位以侧向盐雾侵蚀为主 ,且与压应力状态试件分批制作、分批喷雾试验 ,为消除以上各因素对试验结果的影响 ,另将拉应力及无应力状态进行单独分析 .

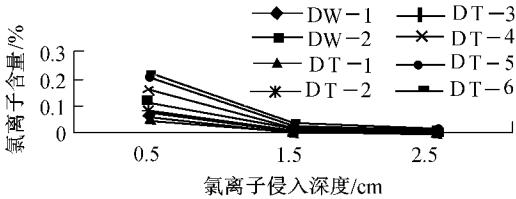


图 4 受拉及无应力状态混凝土试件中氯离子含量曲线

Fig.4 Chloride contents of tensile or unstressed concrete specimens

2.2 应力状态下氯离子扩散速度的预测数学模型

研究者通常认为氯离子在混凝土中的扩散符合 Fick 第二定律：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{1}$$

其边界条件为 $C = C_0, x = 0, t > 0$,初始条件为 $C = 0, x > 0, t = 0$.求解式(1)得

$$1 - \frac{C}{C_0} = \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_e t}}$$

即

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right]$$

式中： $C(x, t)$ ——混凝土深度 x 处、 t 时刻的氯离子含量，%； C_0 ——混凝土表面的氯离子含量，%； D_e ——氯离子有效扩散系数， $10^{-6}\text{mm}^2/\text{s}$.

由式(1)可知，混凝土试件中氯离子侵蚀速度在相同外界环境条件下主要取决于氯离子的有效扩散系数，而到目前为止，大多研究者均未考虑应力水平对氯离子扩散的影响。式(1)中的 D_e 是在无应力状态下试验而得。事实上，应力水平对氯离子扩散的影响是不容忽视的。拉应力在混凝土中产生的微裂缝使氯离子的扩散系数增大，从而加快了氯离子的腐蚀过程，减短结构的使用寿命。相反，压应力作用会使混凝土更加密实，从而降低氯离子的扩散速度。根据本次试验结果，可知应力状态下的氯离子扩散系数与无应力状态下的氯离子扩散系数及所加名义应力值存在相关关系^[3]。通过对试验数据的拟合，推导出如下经验公式。

a. 压应力状态下氯离子扩散系数的经验公式

(a)压应力状态(受压试件 A 面)下氯离子扩散系数的经验公式：

$$D_{\sigma_C} = D_e + A_1 \sigma_C + A_2 \sigma_C^2 \tag{2}$$

式中： D_{σ_C} ——压应力状态下氯离子的有效扩散系数， $10^{-6}\text{mm}^2/\text{s}$ ； D_e ——无应力状态下氯离子的有效扩散系数， $10^{-6}\text{mm}^2/\text{s}$ ； σ_C ——名义压应力值，MPa； A_1, A_2 ——经验系数，分别为 0.08446 和 -0.01100。

(b)压应力状态(受压试件 B 面)下氯离子扩散系数的经验公式：

$$D_{\sigma_C} = D_e + B_1 \sigma_C + B_2 \sigma_C^2 \tag{3}$$

式中： $D_{\sigma_C}, D_e, \sigma_C$ ——同式(2)； B_1, B_2 ——经验系数，分别为 0.09295 和 -0.01896。

b. 拉应力状态下氯离子扩散系数的经验公式：

$$D_{\sigma_t} = D_e + C_1 \sigma_t + C_2 \sigma_t^2 \tag{4}$$

式中： D_{σ_t} ——拉应力状态下氯离子有效扩散系数， $10^{-6}\text{mm}^2/\text{s}$ ； D_e ——无应力状态下氯离子的有效扩散系数， $10^{-6}\text{mm}^2/\text{s}$ ； σ_t ——名义拉应力值，MPa； C_1, C_2 为经验系数，分别为 -0.01250 和 0.20820。

利用上述公式计算的应力状态下氯离子的扩散系数与其实测值的最大偏差、均方误差等均符合拟合精度要求。采用拟合后的公式，可完全满足需要。

在实际工程应用中，由于无应力状态下氯离子的有效扩散系数可较方便地通过试验得出，根据上述经验公式，便可推知应力状态下氯离子的有效扩散系数的大小，再利用公式(1)来推知实际工程应用中混凝土试件的氯离子扩散情况，因此这些经验公式的建立具有一定的理论价值和实际意义。

3 分析与讨论

a. 不同应力水平下氯离子的侵蚀速度不同。施加压应力，混凝土的氯离子侵蚀速度减小；施加拉应力，侵蚀速度增大。应力水平不同时，氯离子的侵蚀速度亦不同。究其原因，主要是因为施加应力之后对混凝土内部的微细裂缝起到了抑制或扩展的作用。预应力混凝土结构因对混凝土预先施加了压应力，以使其在使用过程中，不产生或产生较小的拉应力，将有利于提高混凝土的耐久性。

b. 水灰比对氯离子的侵蚀速度影响明显。试验结果表明，水灰比与氯离子侵蚀速度明显相关。水灰比小，则氯离子侵蚀明显减慢，抗氯离子侵蚀能力明显加强。其原因主要是水灰比小的混凝土，水泥水化后残留的水分少，混凝土密实性高，孔隙率小，盐雾不易渗透与扩散，因而抗侵蚀能力大大加强。

c. 不同环境下，氯离子的扩散速度不同。氯离子侵入混凝土中一般有几个途径：(a)作为混凝土的组分；(b)通过扩散作用进入；(c)在干湿条件下通过毛细管吸入；(d)在压力水的作用下渗透。在本试验中，第

一种情况不存在,第3种情况因笔者没有采用干湿交替的侵蚀条件也不存在。因此,第2种和第4种情况是可能存在的两种侵入方式。对于压应力状态的A面是以扩散和渗透共同作用进行侵蚀的,而且其盐雾喷洒面广量大,因而A面氯离子的侵蚀深度及含量尤为明显,而B面则以扩散作用为主,且其喷雾量和喷雾强度明显减小,因而氯离子的侵蚀速度明显减慢。而拉应力及无应力状态,主要是侧向扩散为主,兼有微弱的横向渗透,其侵蚀程度大为减弱。

4 结 语

a. 本文提出了在应力状态下进行氯离子侵蚀快速试验的方法,使混凝土的氯离子侵蚀试验更吻合于实际工作状况,试验结果更有价值。

b. 本文建立了混凝土试件在应力状态下氯离子侵蚀速度的预测数学模型,但由于试验数据有限,加之离散性较大,因此,对本文所建立的氯离子扩散速度预测数学模型,尚需进一步通过试验与实测的结果加以验证。

c. 不同应力状态下,混凝土试件的氯离子侵蚀能力存在差异。因此,对拉应力试件应更加重视采取必要的预防氯离子侵蚀的措施,从而提高其耐久性。

d. 水灰比对混凝土的氯离子侵蚀速度影响明显。水灰比小的混凝土质量好,抗氯离子侵蚀能力强。

e. 从本文的研究结果可推知,预应力混凝土结构有利于提高混凝土抗氯离子侵蚀的能力。

参考文献:

- [1] 袁承斌,梁正平.预应力混凝土结构的耐久性研究综述[J].水利水电科技进展,2002,22(1):59—61.
- [2] JTJ270—98 水运工程混凝土试验规程[S].
- [3] 张德峰.现代预应力混凝土结构耐久性研究[D].南京:东南大学,2001.

Diffusivity of chloride in concrete in different stress states

YUAN Cheng-bin¹, ZHANG De-feng², LIU Rong-gui³, LIANG Zheng-ping⁴, LU Zhi-tao⁵

- (1. College of Hydraulics and Civil Engineering, Yangzhou Univ., Yangzhou 225009, China;
- 2. Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai 200032, China;
- 3. Capital Construction Division, Jiangsu Univ., Zhengjiang 212013, China;
- 4. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
- 5. College of Civil Engineering, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract: Some methods are presented for test of chloride diffusivity in concrete in different stress states. Based on the analysis of influences of the stress level and water-cement ratio on the diffusion velocity of chloride in concrete, mathematical models were developed for predicting the diffusion velocity of chloride. It is concluded that the anti-chloride corrosion capability of prestressed concrete is superior to that of ordinary concrete.

Key words: concrete; stress level; water-cement ratio; velocity of chloride corrosion