

# 受力状态下混凝土试件氯离子侵蚀试验(续)

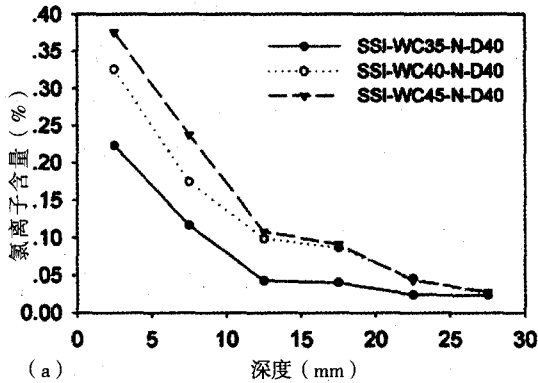
李国平<sup>1</sup> 胡方健<sup>1</sup> 吴用贤<sup>1,2</sup>

(1 同济大学桥梁工程系 上海 200092 2 同济大学建筑设计院桥梁分院 上海 200092)

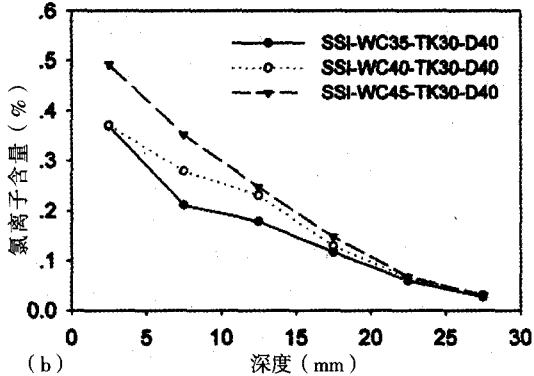
(接上期)

## 3 试验结果

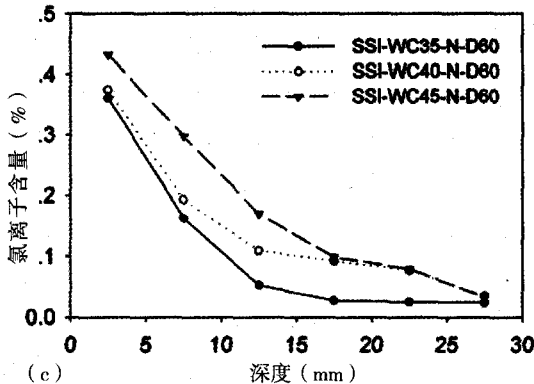
作者对经过浸泡和盐雾试验的试件进行了自由氯离子含量(氯离子占混凝土质量的百分比)的测定,其结果如图6~图8所示。由于在试验前对混凝土拌合材料进行了挑选,并对试件制作过程进行了严格控制,所以认为混凝土初始自由氯离子含量为0%。



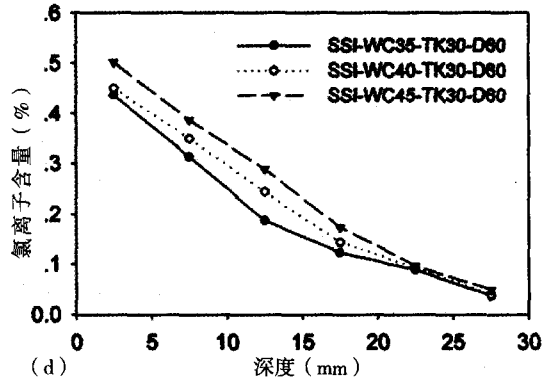
(a)



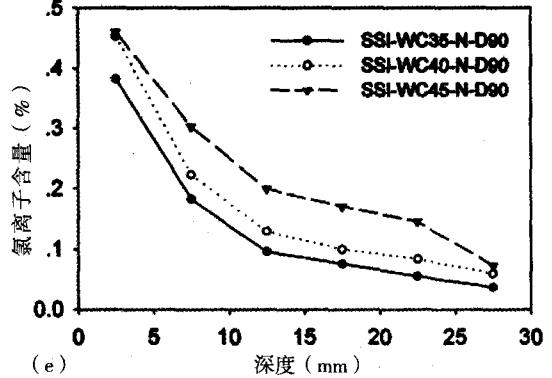
(b)



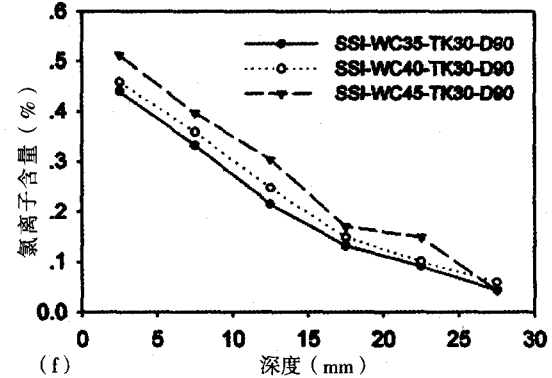
(c)



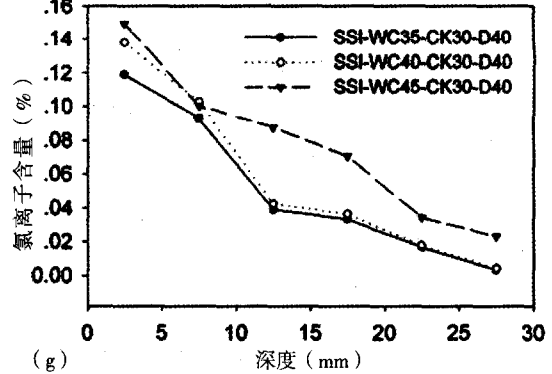
(d)



(e)



(f)



(g)

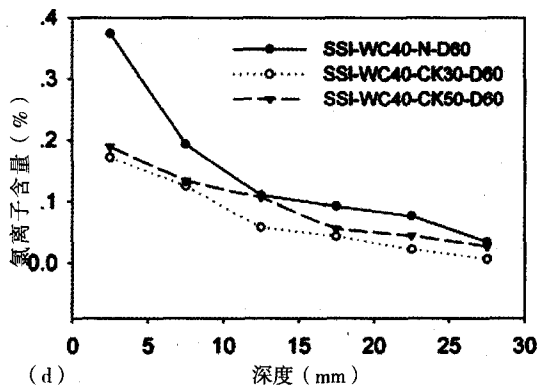
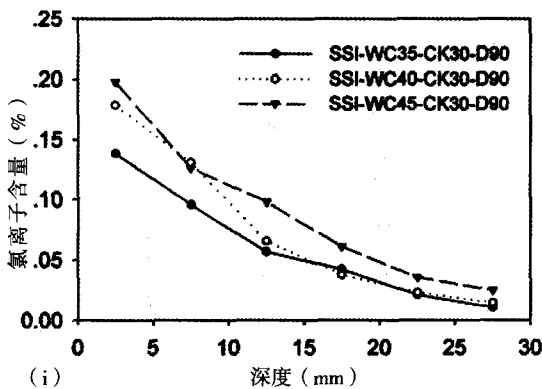
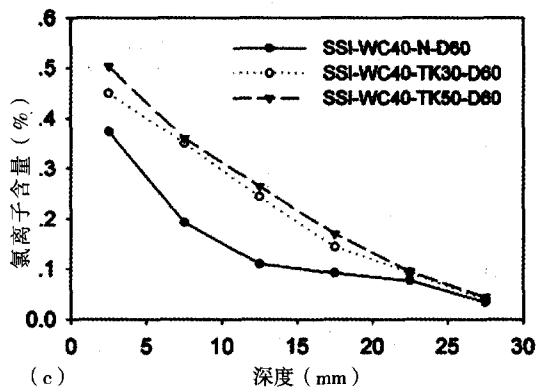
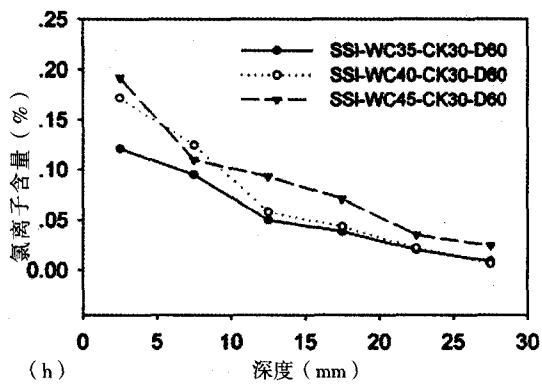
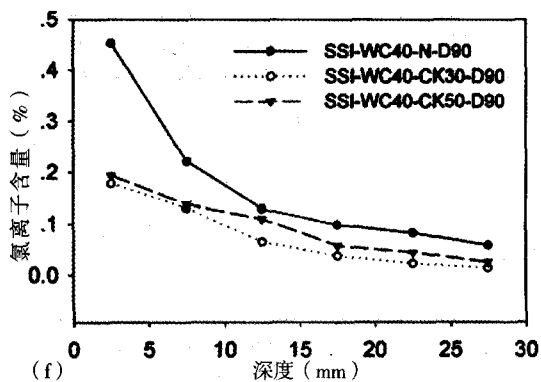
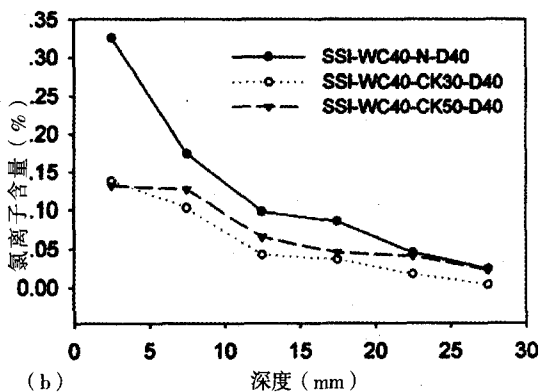
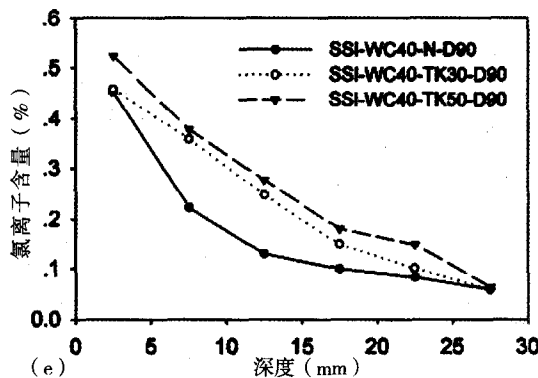
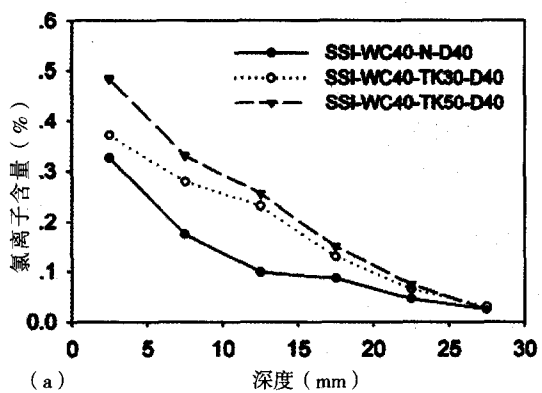


图6 氯离子含量在不同水灰比的试件中沿渗透深度的分布



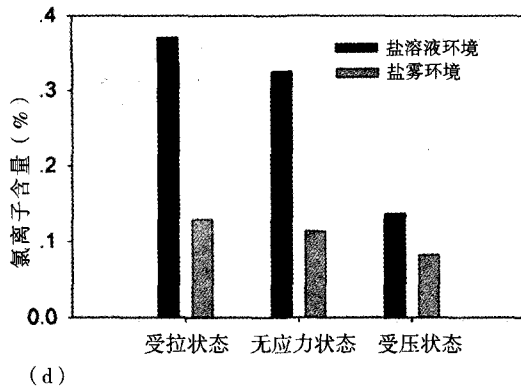
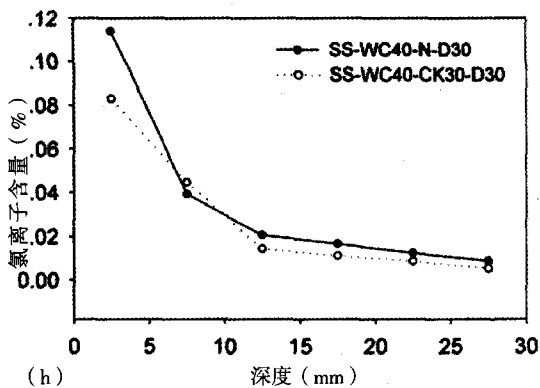
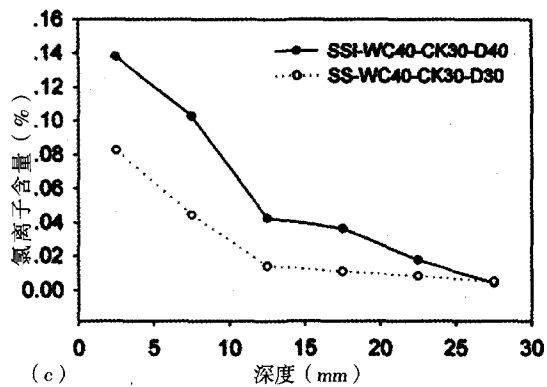
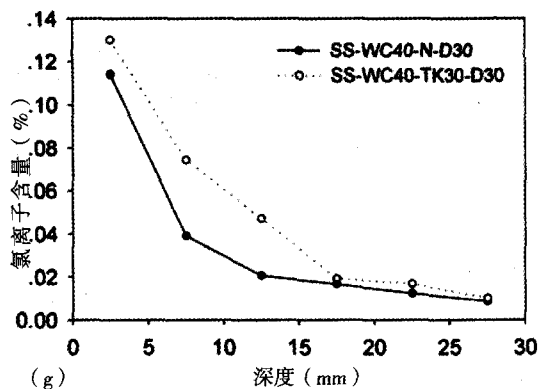


图7 氯离子含量在不同应力状态和水平下的试件中沿渗透深度的分布

图8 盐溶液与盐雾两类环境试验比较

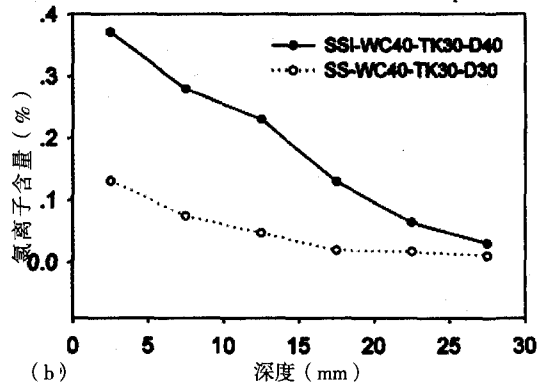
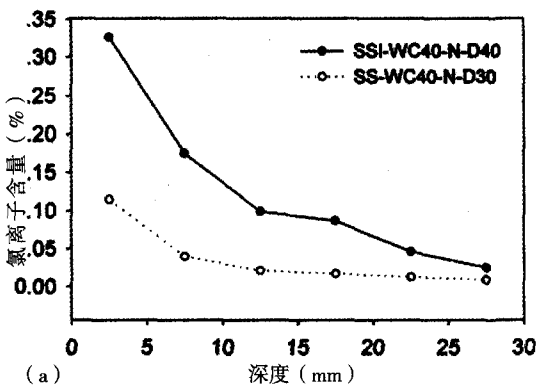
根据试验结果,对混凝土扩散试验分别进行水灰比、受力状态、应力大小和试验环境四个方面的分析。其中有些数据比较离散,这是由于试验本身离散性造成的。

### 3.1 水灰比的影响

图6为水灰比0.35、0.40及0.45的混凝土试件在NaCl溶液浸泡40、60和90d后的自由氯离子含量曲线图。从图中可以看出,降低水灰比可以减少氯离子在混凝土中的含量。总体来看,在相同的应力水平及相同的浸泡天数下,水灰比为0.35的混凝土中自由氯离子的含量最小,水灰比为0.40的次之,水灰比为0.45的最大。这种现象可解释为:通过降低水灰比能减少混凝土中的空隙,提高混凝土的密实度,这有利于提高混凝土的抗氯离子侵蚀能力。

### 3.2 受力状态和应力水平的影响

图7为不同受力状态和应力水平下混凝土中自由氯离子含量沿深度的分布曲线图。从图7中可以看出,试件的受力状态及应力水平对氯离子在混凝土中的分布具有较大的影响。在相同水灰



(a)

(b)

比与相同浸泡天数的情况下,处于拉应力状态下的混凝土内自由氯离子含量最大,无应力状态次之,压应力状态最小。

拉应力状态下,自由氯离子含量在总体上要比无应力状态高,并且试件拉应力水平越大,自由氯离子含量越高。这种现象可以解释为:拉应力引起混凝土内部微裂缝扩展,外界氯离子易侵入混凝土内部。同时微裂缝数量的增加使得氯离子在混凝土中侵蚀速度加快,导致氯化物含量增加。当拉应力水平为 $0.50f_{tk}$ 时,自由氯离子含量比在 $0.30f_{tk}$ 时的要大一些。

压应力状态下,自由氯离子含量在总体上要比无应力状态下要小,但当压应力水平为 $0.50f_{ck}$ 时,自由氯离子含量比在 $0.30f_{ck}$ 时的高。这种现象可以解释为:在压应力作用下,混凝土会变得更加密实;当混凝土压应力在较低水平内增长时,混凝土内部微裂缝会闭合,氯离子传输速率降低,这减缓了氯离子侵入混凝土的进程;但当混凝土压应力在较高水平内增长时,泊松效应产生的横向拉应变增大,微裂缝开展较为严重,导致氯离子传输速率加快,混凝土内部氯化物的含量增加。

压应力状态的试验结果与涂永明(2002)和黄素辉(2007)中的不同,这可能是由于以下原因造成的:(1)在涂永明(2002)的试验中,混凝土所处环境为盐雾,而本文为盐溶液。

(2)在黄素辉(2007)的试验中,混凝土试件所受压应力偏小,最大仅为 $0.22f_{tk}$ ,不能得出氯离子在混凝土处于高应力状态下的侵蚀规律。

### 3.3 试验环境的影响

如图8所示,这两类试验有以下特点:(1)不论在何种受力状态下,自由氯离子含量随深度增加而减小,这是由侵蚀过程自身的性质决定的;(2)拉应力能加快混凝土中自由氯离子的侵蚀,较低范围内的压应力能减缓混凝土中自由氯离子的侵蚀,这种现象可用3.2节中的关于受力状态、应力大小、裂缝发展和氯离子扩散之间的关系来解释。(3)在浸泡环境中,无论在何种受力状态下,氯离子侵蚀速度明显大于在盐雾环

境中的速度,这在混凝土试件表面几层最为明显。这种现象可解释为:在浸泡环境中,表面氯离子浓度较大,加快了表面几层中氯离子的扩散,见图8(d)。

## 4 试验结果讨论

### 4.1 氯离子扩散模型

在一般情况下,我们采用扩散系数来反映氯离子在混凝土中的移动。氯离子在混凝土中的扩散过程被假定为服从Fick第二定律:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (3)$$

式中:

$C$ ——氯离子含量(以氯离子占混凝土重量的百分比表示);

$x$ ——测定点距离混凝土构件受侵蚀表面的距离;

$t$ ——氯离子扩散时间;

$D$ ——氯离子扩散系数。

该方程的初始条件是:(1) $t=0, x>0, C=0$ ;(2) $x=0, t>0, C=C_s$ 。 $C_s$ 是混凝土表面的氯离子含量,取为混凝土构件周围环境的氯离子浓度(例如,在盐溶液浸泡试验中取为3.5%)。式(3)的解见式(4):

$$C(x,t) = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (4)$$

式中:

$C(x,t)$ ——在侵蚀时间为 $t$ 时,深度为 $x$ 处的氯离子含量;

$\operatorname{erf}(\cdot)$ ——误差函数,见式(5):

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt \quad (5)$$

本文中的氯离子扩散系数采用《混凝土结构耐久性评定标准》中的方法进行计算,见式(6):

$$D = \frac{x^2 \times 10^{-6}}{4t [\operatorname{erf}^{-1}(1 - C(x,t)/C_s)]^2} \quad (6)$$

式中:

$\operatorname{erf}^{-1}(\cdot)$ ——误差函数的反函数。

公式中各个变量的单位如下： $D(\text{mm}^2/\text{a})$ ， $x$  (mm)， $t$  (a)， $C(x, t)$  (%),  $C_s$  (%)。

由于式(6)未考虑应力的影响，因此在式(6)中增加应力影响系数，见式(7)：

$$D = D_0 \cdot K_s = \frac{x^2 \times 10^{-6}}{4t[\text{erf}^{-1}(1 - C(x, t)/C_s)]^2} \quad (7)$$

式中：

$D_0$ ——无应力状态下的氯离子扩散系数；

$k_s$ ——应力影响系数，见式(8)：

$$K_s = 1.0 + c_1 \cdot \sigma + c_2 \cdot \sigma^2 \quad (8)$$

式中：

$\sigma$ ——试件表面的正应力；

$c_1$ 和 $c_2$ ——待定系数。

参照涂永明(2002)的方法，在计算扩散系数时考虑了深度修正因子 $\theta(x)$ ，见式(9)：

$$\theta(x) = (x/x_0)^{\sqrt{2}} \quad (9)$$

式中：

$x$ ——每个取样层的中心点距离混凝土试件表面的深度；

$x_0$ ——基准点，取为2.5mm。

扩散系数与时间的关系可采用经验公式(10)表示：

$$D = D_0 \cdot K_s \cdot \theta(x) \cdot t^{-m} \quad (10)$$

式中：

$m$ ——经验系数。

因此，扩散系数的最终表达形式如式(11)

所示：

$$D = D_0 \cdot K_s \cdot \theta(x) \cdot t^{-m} = \frac{x^2 \times 10^{-6}}{4t[\text{erf}^{-1}(1 - C(x, t)/C_s)]^2} \quad (11)$$

文中讨论的扩散系数实际上是混凝土中砂浆的扩散系数。根据Hobbs(1999)和Care(2003)的研究，混凝土的扩散系数可以根据砂浆的扩散系数与骨料体积的百分比求得。

#### 4.2 试验结果分析

根据以上的方法，可以将每个样本中的砂浆的扩散系数分别算出。

以在盐溶液浸泡试验中的水灰比为0.40的试件为例，利用式(7)~(11)计算其扩散系数( $D_0 \cdot k_s \cdot t^{-m}$ )，列于表8。

在每个试件中，取各层扩散系数的平均值作为这个试件的扩散系数，并将各试件在应力状态下的扩散系数与无应力状态下的扩散系数的比值作为这个试件的名义应力影响系数，参见表9。

表8 各试件的氯离子扩散系数 ( $\text{mm}^2/\text{a}$ )

试件编号	氯离子扩散系数						平均值	变异系数
	0~5mm	5~10mm	10~15mm	15~20mm	20~25mm	25~30mm		
SSI-WC40-N-D40	-	18.9381	20.1033	23.2505	21.9489	20.8914	21.0264	0.0790
SSI-WC40-N-D60	-	13.2173	13.9384	15.8625	17.2081	15.2259	15.0905	0.1044
SSI-WC40-N-D90	-	9.4071	9.9032	10.8387	11.7789	11.8334	10.7523	0.1015
SSI-WC40-TK30-D40	-	23.7199	28.6175	26.9045	24.3637	22.0738	25.1359	0.1038
SSI-WC40-TK30-D60	-	17.9838	19.6141	18.7436	18.3361	15.7454	18.0846	0.0797
SSI-WC40-TK30-D90	-	12.1448	13.1604	12.6556	12.5597	11.8549	12.4751	0.0401
SSI-WC40-TK50-D40	-	26.0719	30.0743	28.5303	25.4593	20.8174	26.1906	0.1350
SSI-WC40-TK50-D60	-	18.2915	20.4419	20.0885	18.4812	16.3105	18.7227	0.0881
SSI-WC40-TK50-D90	-	12.5423	13.9543	13.7124	14.5815	12.1508	13.3883	0.0756
SSI-WC40-CK30-D40	-	15.3753	15.4319	17.8664	17.2631	14.4841	16.0841	0.0882
SSI-WC40-CK30-D60	-	11.0112	11.2622	12.5058	12.0501	10.3966	11.4452	0.0733
SSI-WC40-CK30-D90	-	7.4754	7.7917	8.0023	8.1257	8.1964	7.9183	0.0368
SSI-WC40-CK50-D40	-	16.6420	17.5312	19.0131	21.3550	20.6677	19.0418	0.1052
SSI-WC40-CK50-D60	-	11.2955	13.7561	13.4498	14.5026	14.2630	13.4534	0.0948
SSI-WC40-CK50-D90	-	7.3726	8.9234	9.2340	9.0945	9.3177	8.7885	0.0916

注：由于试件表面吸附盐分对测试结果有很大影响，因此在表格中未列出第一层的扩散系数。

表9 各试件的名义应力影响系数

试件编号	$K_s^t$	试件编号	$K_s^c$
SSI-WC40-TK30-D40	1.1954	SSI-WC40-CK30-D40	0.7647
SSI-WC40-TK30-D60	1.1984	SSI-WC40-CK30-D60	0.7580
SSI-WC40-TK30-D90	1.1602	SSI-WC40-CK30-D90	0.7361
SSI-WC40-TK50-D40	1.2456	SSI-WC40-CK50-D40	0.9059
SSI-WC40-TK50-D60	1.2407	SSI-WC40-CK50-D60	0.8916
SSI-WC40-TK50-D90	1.2452	SSI-WC40-CK50-D90	0.8173

根据最小二乘和广义逆的原理,利用以上获得的名义应力影响系数计算试件在弯曲受拉和轴向受压状态下的名义应力影响系数表达式,见式(12)~(13)。同时,将影响系数的表达式绘制成曲线,见图9~10。

$$K_s^t = 1.0 + 0.3027\sigma - 0.0933\sigma^2 \quad (12)$$

$$K_s^c = 1.0 - 0.0542\sigma + 0.00297\sigma^2 \quad (13)$$

式中:

$K_s^t$ ——名义拉应力影响系数;

$K_s^c$ ——名义压应力影响系数。

从图9中可以看出,  $K_s^t$ 随着拉应力的升高而增大。在 $0.50f_{tk}$ 的状态下,  $K_s^t$ 接近1.25。从图10中可以看出,  $K_s^c$ 与压应力水平有关,而且还存在一个阈值。当压应力小于该阈值时,  $K_s^c$ 随着压应力的升高而减小。但当压应力大于该阈值时,  $K_s^c$ 随着压应力的升高而增大。压应力状态下出现的现象可以解释为:由于泊松效应引起的横向拉应变随着正向压应力的升高而不断增长,这使得氯离子侵蚀的速率提升。在试验中,压应力阈值等于 $9.12\text{MPa}$  ( $0.282f_{ck}$ )。

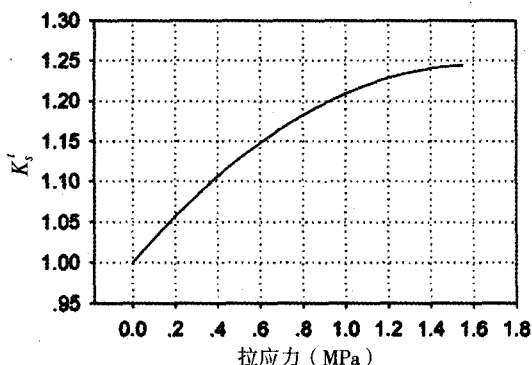


图9 名义拉应力影响系数与拉应力的关系

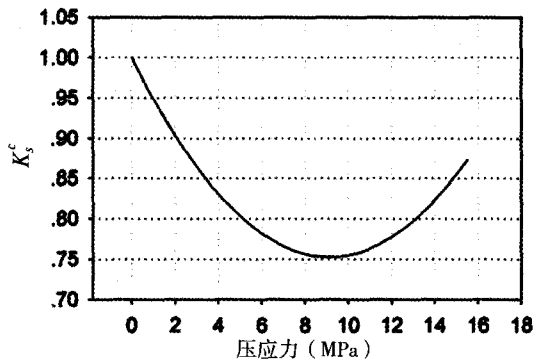


图10 名义压应力影响系数与压应力的关系

其他试件的扩散系数和名义应力影响系数可以通过以上的方法求出。将部分试件的扩散系数与时间的关系绘制成图形进行比较,见图11。从中可以看出,扩散系数随时间的增长而减小,这表明氯离子扩散逐渐趋于稳定。在零应力状态下,扩散系数随水灰比的提高而增大,这是由于混凝土的密实度下降而使得氯离子侵蚀速率提高。但是,这种现象在应力状态下并不十分显著,需要在以后的试验中继续研究。

经验系数可以通过扩散系数进行拟合,见表10。从该表中可以看出,受到水灰比和应力状态的影响,但是根据现有数据还很难总结这三者之间的关系。

#### 4.3 分析结果与其他文献的比较

下面将本文所得的扩散系数和名义压应力系数与其他学者的研究结果进行比较。

首先,选取本试验中水灰比为0.40的试件所得的扩散系数与Mangat和Molloy (1994)、涂永明 (2002) 的结果进行比较。Mangat和Molloy (1994) 的试验环境与本试验相似,但是他们的试件处于零应力状态。在涂永明 (2002) 的试验中,试件的龄期都是60天,因此在图12中仅能做

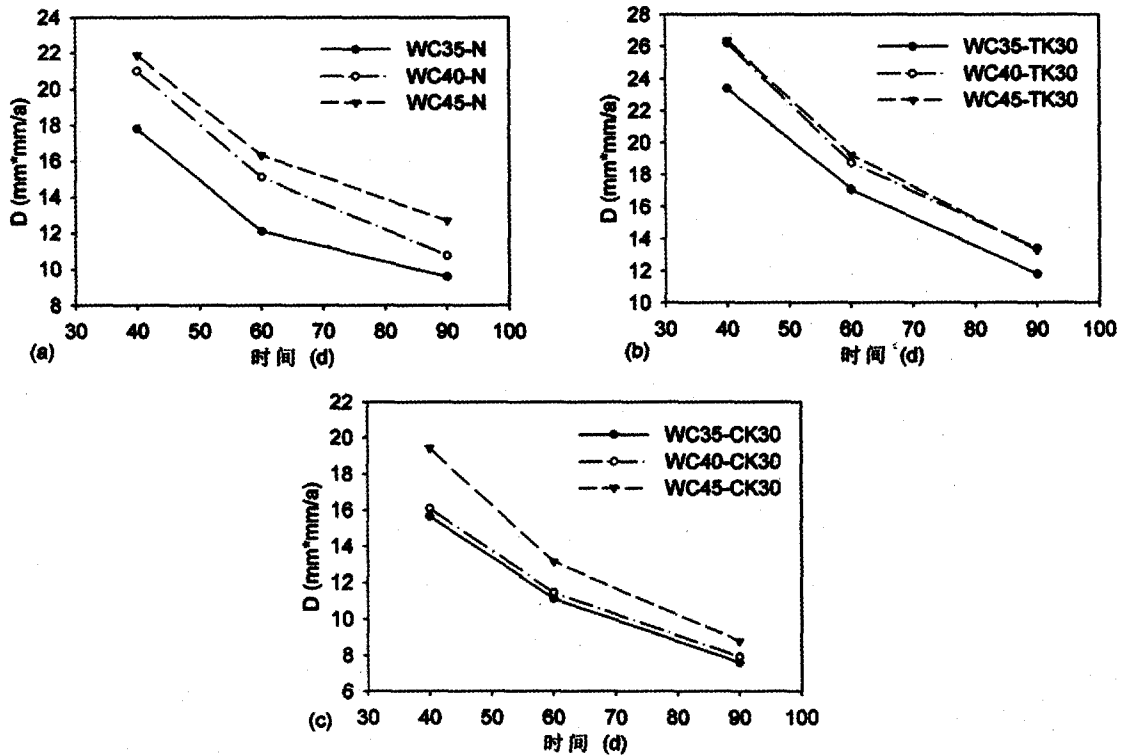


图11 扩散系数比较

表10 各种水灰比和应力状态下的m数值

水灰比	应力状态	$D_0 \cdot k_s \cdot \theta(x)$ (mm <sup>2</sup> /a)	m	水灰比	应力状态	$D_0 \cdot k_s \cdot \theta(x)$ (mm <sup>2</sup> /a)	m
0.35	Zero	3.206	-0.764	0.45	0.30 $f_{tk}$	4.109	-0.844
0.40	Zero	3.382	-0.827	0.35	0.30 $f_{tk}$	2.199	-0.891
0.45	Zero	4.914	-0.673	0.40	0.30 $f_{tk}$	2.341	-0.874
0.35	0.30 $f_{tk}$	3.643	-0.845	0.40	0.50 $f_{tk}$	2.343	-0.954
0.40	0.30 $f_{tk}$	3.748	-0.864	0.45	0.30 $f_{tk}$	2.236	-0.979
0.40	0.50 $f_{tk}$	4.203	-0.828				

出两个点。在图12中，各条曲线的变化趋势基本相似，扩散系数随着时间的增长而逐渐减小并趋于稳定。但是本文的结果与Mangat和Molloy (1994)的结果相差较大，这是因为两者的扩散过程计算模型、应力状态、材料、试验环境以及方法等方面都有差别。在图12中，涂永明 (2002)的结果位于作者所得曲线的下方，这是因为他采用的是盐雾环境，盐雾试验比盐溶液浸泡试验对试件的效果要弱。

由于该类型试验的文献有限，因此本文仅选取了名义拉应力影响系数与其他学者所得的结果进行比较，见图13 (试验参数：Konin等人，C114, w/c=0.39; 涂永明，C50, w/c=0.40; 何世钦，C25, w/c=0.40; 黄素辉，C50, w/c=0.40)。

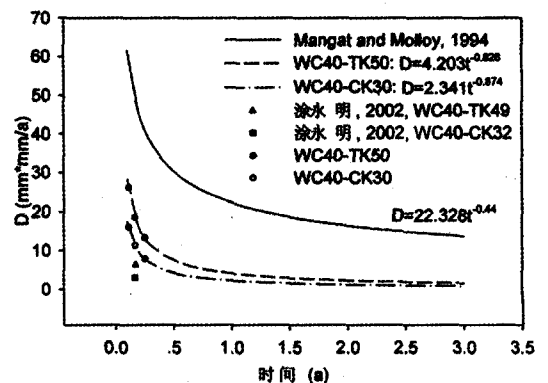


图12 时间—扩散系数函数的比较

从图13中可以看出，名义拉应力影响系数的离散性很大，但是所有的数值都大于1.0并且随着拉应力的升高而增大。何世钦 (2004) 和黄素辉 (2007) 的试验参数与本文的参数比较接近，但

他们的名义拉应力影响系数却与本文所得结果相差较大,因为他们的试验中没有考虑混凝土试件在弯曲受拉状态下的徐变、收缩效应。

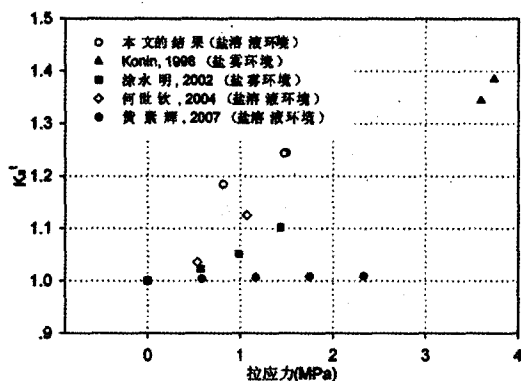


图13 名义拉应力影响系数的比较

## 5 结论

水灰比是反映混凝土内部密实度的一个重要指标。水灰比越小,混凝土中的自由氯离子含量越小,这与Konin等人(1998)、涂永明(2002)和何世钦(2004)的结论类似。受力状态明显影响混凝土中自由氯离子的含量。在相同水灰比和浸泡天数的情况下,拉应力状态中混凝土内自由氯离子含量最大,无应力状态次之,压应力状态最小,这与涂永明(2002)和黄素辉(2007)的结论相同。应力水平也会影响混凝土中自由氯离子的含量。当压应力在较小范围内增大,自由氯离子含量减小,这与涂永明(2002)和黄素辉(2007)的结论相同。但由于该类型试验的离散型较大以及本试验的试件数目不足,暂时无法断定拉应力水平对混凝土中自由氯离子含量的影响。

本试验还得出:当压应力过大时,由于泊松效应产生的横向拉应变增大,使得混凝土内的微裂缝扩展,导致混凝土中自由氯离子含量增加。混凝土结构所处的环境对氯离子在其内部的侵蚀速度有很大影响,但其受到受力状态和应力大小的影响是类似的。从本试验看出,对于混凝土结构来说,盐溶液浸泡环境比盐雾环境更为恶劣。

扩散系数系数所时间的增长而减小并逐渐趋于稳定。在零应力状态下,氯离子扩散系数随水

灰比的增大而增大。但是该现象在拉、压应力状态下并不明显,还需要大量试验以待研究。

名义拉应力影响系数大于1.0,并随着拉应力的升高而增大。名义压应力影响系数与应力水平有关,还存在一个阈值。当压应力小于该阈值时,名义压应力影响系数随压应力的升高而减小。当压应力大于该阈值时,名义压应力影响系数随压应力的升高而增大。

由于预应力混凝土结构的氯离子侵蚀数据有限,加之混凝土本身的离散性很大,本文提出的结论有待进一步完善,还需要更多的实际工程数据加以检验。本试验只是进行了混凝土在简单受力状态下的氯离子侵蚀研究,然而混凝土桥梁构件在实际的工作状态中的受力是十分复杂的,在这方面还有待继续研究。

## 参考文献

- [1] Al-Khaja, W. A. (1997). "Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes." *Construction and Building Materials*, 11(1), 9-13.
- [2] Ann, K. Y., Ahn, J. H. and Ryou, J. S. (2009). "The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures." *Construction and Building Materials*, 23, 239-245.
- [3] Bader, M. A. (2003). "Performance of concrete in a coastal environment." *Cement and Concrete Composite*, 25, 539-548.
- [4] Basheer, L., Kropp, J. and Cleland, D. J. (2001). "Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review." *Construction and Building Materials*, 15, 93-103.
- [5] Boddy, A., Bentz, E., Thomas, M. D. A., Hooton, R. D. (1999). "An overview and sensitivity study of a multimechanistic chloride transport model." *Cement and Concrete Research*, 29, 827-837.
- [6] Care S. (2003). "Influence of aggregates on chloride diffusion coefficient into mortar." *Cement and Concrete Research*, 33, 1021-1028.
- [7] Castro, P., De Rincon, O. T. and Pazini, E. J. (2001). "Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments." *Cement and Concrete Research*, 31, 529-537.
- [8] Chee, B. S., and Eun, K. K. (1995). "Modeling of chloride ion ingress in coastal concrete." *Cement and Concrete Research*, 32, 757-762.
- [9] Costa, A. and Appleton, J. (2002). "Case studies of concrete



- deterioration in a marine environment in Portugal." *Cement and Concrete Composites*, 24, 169-179.
- [9] Ghanem, H., Phelan, S., Senadheera, S. and Pruski, K. (2008). "Chloride ion transport in bridge deck concrete under different curing durations." *Journal of Bridge Engineering*, 13(3), 218-225.
- [10] Gowripalan, N., Sirivivattananon, V. and Lim, C. C. (2000). "Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure." *Cement and Concrete Research*, 30, 725-730.
- [11] Haque, M. N., Kayyali, O. A. and Gopalan, M. K. (1992). "Fly ash reduces harmful chloride ions in concrete." *ACI Materials Journal*, 89(3), 238-241.
- [12] Haque, N. and Al-Khaiat, H. (1999). "Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions." *Materials and Structures*, 32, 533-538.
- [13] Hillier, S. R., Sangha, C. M., Plunkitt, B. A. and Waden, P. J. (2000). "Effect of concrete curing on chloride ion ingress." *Magazine of Concrete Research*, 52(5), 321-327.
- [14] Hobbs D. W. (1999). "Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete." *Cement and Concrete Research*, 29, 1995-1998.
- [15] Hong, K. and Hooton, R. D. (2000). "Effects of fresh water exposure on chloride contaminated concrete." *Cement and Concrete Research*, 30, 1199-1207.
- [16] Jau, W. C. and Tsay, D. S. (1998). "A study of the basic engineering properties of slag cement concrete and its resistance to seawater corrosion." *Cement and Concrete Research*, 28(10), 1363-1371.
- [17] Kaushik, S. K. and Islam, S. (1995). "Suitability of sea water for mixing structural concrete exposed to a marine environment." *Cement and Concrete Composites*, 17, 177-185.
- [18] Kong, J., Ababneh, A. N., Frangopol, D. M., and Xi, Y. (2002). "Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete." *Probabilistic Engineering Mechanics*, 17, 305 - 315.
- [19] Konin, A., Francois, R. and Arliguie, G. (1998). "Penetration of chlorides in relation to the microcracking state into reinforced ordinary and high strength concrete." *Materials and Structures*, 31, 310-316.
- [20] LENG, F. G., FENG, N. Q. and LU, X. Y. (2000). "An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete." *Cement and Concrete Research*, 30, 989-992.
- [21] Mackechnie, J. R. and Alexander, M. G. (1997). "Exposure of concrete in different marine environments." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(1), 41-44.
- [22] Mangat, P. S. and Molloy, B. T. (1994). "Prediction of long term chloride concentration in concrete." *Materials and Structures*, 21, 338-346.
- [23] Mangat, P. S., Khatib, J. M., and Molloy, B. T. (1994). "Microstructure, chloride diffusion and reinforcement corrosion in blended cement paste and concrete." *Cement and Concrete Composites*, 16, 73-81.
- [24] Neville, A. (1995). "Chloride attack of reinforced concrete: an overview." *Materials and Structures*, 28, 63-70.
- [25] Page, C. L., Short, N. R. and Holden, W. R. (1986). "The Influence of different cement on chloride-induced corrosion of reinforcing steel." *Cement and Concrete Research*, 16, 79-86.
- [26] Poupard, O., Hostis, V. L., Catinaud, S. and Petre-Lazar, I. (2006). "Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment." *Cement and Concrete Research*, 36, 504-520.
- [27] Puatatsananon, W. and Saouma, V. E. (2005). "Nonlinear coupling of carbonation and chloride diffusion in concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(3), 264-275.
- [28] Sandberg, P., Tang, L. and Andersen, A. (1998). "Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations." *Cement and Concrete Research*, 28(10), 1489-1503.
- [29] Smith, B. G. (2001). "Durability of silica fume concrete exposed to chloride in hot climates." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(1), 41-48.
- [30] Thomas, M. D. A. and Bamforth, P. B. (1999). "Modeling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag." *Cement and Concrete Research*, 29, 487-495.
- [30] Val, D. V. and Trapper, P. A. (2008). "Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion." *Reliability Engineering and System Safety*, 93, 364-372.
- [32] Zhang, J. and Lounis, Z. (2009). "Nonlinear relationships between parameters of simplified diffusion-based model for service life design of concrete structures exposed to chlorides." *Cement Concrete Comp.*, doi: 10.1016/j.cemconcomp. 2009. 05.008
- [33] 何世钦 (2004). 氯离子环境下钢筋混凝土构件耐久性能试验研究[J]. 博士学位论文, 大连理工大学, 辽宁大连.
- [34] 黄素辉 (2007). 预应力混凝土结构抗氯离子侵蚀的耐久性研究[J]. 中南大学硕士学位论文, 湖南长沙.
- [35] 林毓梅, 冯琳 (1995). 在海水中混凝土应力腐蚀试验研究[J]. 水利学报, (2), 40-45.
- [36] 涂永明 (2002). 现代预应力混凝土结构耐久性机理研究[J]. 东南大学硕士学位论文, 江苏南京.
- [37] 中国工程建设标准化协会标准. CECS220: 2007 混凝土结构耐久性评定标准[J]. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [38] 中华人民共和国行业标准. JTG D62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 人民交通出版社, 北京.