

文章编号:1005-9865(2018)02-0073-10

# 粗骨料对混凝土界面过渡区氯离子扩散性能影响

王元战<sup>1,2</sup>, 吕彦伟<sup>1,2</sup>, 龙俞辰<sup>3</sup>, 吴林键<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 天津 300072; 3. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘 要:**通过室内干湿循环条件下混凝土中氯离子扩散试验, 实测得到 6 种不同粗骨料体积分数的混凝土试件在不同时刻、不同深度处的氯离子浓度。经回归分析得到了不同粗骨料体积分数下混凝土的氯离子整体扩散系数, 其值随粗骨料体积分数的增加而减小。同时, 探讨了粗骨料的稀释、曲折和界面过渡区效应对混凝土中氯离子扩散的影响。在此基础上, 同时考虑粗骨料体积分数  $V_f$  和界面过渡区厚度  $h$  的影响系数  $\alpha(V_f, h)$ , 建立混凝土界面过渡区氯离子扩散系数模型, 界面过渡区氯离子扩散系数随粗骨料体积分数的增大呈近乎线性地减小, 随界面过渡区厚度的增大先显著减小而后逐渐趋于平稳。最后, 将建立的界面过渡区氯离子扩散系数模型应用于混凝土中氯离子扩散的三维细观数模中。结果表明: 细观数模计算结果与物理试验实测数据在变化趋势和数值大小上均能够吻合, 可验证界面过渡区氯离子扩散系数模型的正确性与合理性。

**关键词:**粗骨料; 界面过渡区; 氯离子扩散系数; 细观数模

中图分类号: TU528 文献标志码: A DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2018.02.009

## Effect of coarse aggregate on chloride diffusion properties in the interfacial transition zone of concrete

WANG Yuanzhan<sup>1,2</sup>, LYU Yanwei<sup>1,2</sup>, LONG Yuchen<sup>3</sup>, WU Linjian<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Simulation and Security, Tianjin 300072, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. China Communications Fourth Design Institute of Navigation, Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** The chloride ion content at different time and different depths of concrete specimens with six different coarse aggregates' volume fraction was measured in the chloride diffusion test under dry-wet cycling conditions. And the chloride diffusion coefficients of concrete with different coarse aggregates' volume fraction were obtained by regression analysis. Chloride diffusion coefficients decreased with the increase of coarse aggregate volume fraction. Meanwhile, the effects of dilution, tortuous and ITZ on chloride ion diffusion in concrete were discussed. On the basis of these, the chloride diffusion coefficients model of ITZ was established by introducing the influence coefficient  $\alpha(V_f, h)$  considering the coarse aggregate volume fraction and the thickness of ITZ. The chloride diffusion coefficients of ITZ decreased linearly with the increase of coarse aggregate volume fraction, and decreased with the increase of the thickness of ITZ and then tended to be steady. Finally, the chloride diffusion coefficient model of ITZ was applied to three dimensional mesoscopic numerical simulation of chloride diffusion in concrete. The results show that microscopic numerical simulation results and physical test data are able to match in the trend of change and numerical size. And correctness and rationality of the chloride diffusion

收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(51679166); 国家重点研发计划(2016YFC0802204); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51321065); 交通运输部交通建设科技项目(2014328224040)

作者简介: 王元战(1958-), 男, 河北人, 教授, 博导, 主要从事港口海岸及近海工程结构设计理论和方法、岩土力学及土与结构相互作用研究。E-mail: yzwang@tju.edu.cn

通信作者: 吕彦伟。E-mail: lvyanwei1@126.com

coefficient model of ITZ are verified.

**Keywords:** coarse aggregate; ITZ; chloride diffusion coefficient; mesoscopic numerical simulation

钢筋混凝土结构在港口工程中广泛应用,在海洋环境中,氯离子引起的结构耐久性破坏已经成为工程设计中不可忽视的问题。混凝土的细观结构可认为是由水泥砂浆、粗骨料和界面过渡区这三相介质共同构成<sup>[1]</sup>。其中,界面过渡区是指混凝土中粗骨料与水泥砂浆之间的一层很薄的区域,但并没有十分明显的界限区分。由于界面过渡区中的孔隙率较砂浆基体更高,这对该区域中氯离子扩散系数的提升效果尤为显著<sup>[2]</sup>。目前国内外学者针对混凝土界面过渡区开展了大量的研究工作,Shane等<sup>[3]</sup>通过电镜扫描实验,认为界面过渡区厚度范围为15~50 μm;Basheer<sup>[4]</sup>经研究表明:界面过渡区厚度取值范围为0~100 μm,其内氯离子扩散系数的取值可为砂浆扩散系数的1~100倍;Yang<sup>[5]</sup>通过物理模型试验,证明了粗骨料体积分数会影响混凝土中氯离子的扩散系数,并计算得出界面过渡区中氯离子扩散系数约为砂浆扩散系数的100倍,其厚度约为50 μm;孙国文<sup>[6]</sup>通过物理模型试验,验证了粗骨料的存在将会改变混凝土中砂浆的孔隙结构,其中界面过渡区特殊的微观结构可增加氯离子的传输性能;吴静新<sup>[7]</sup>通过有限元模型计算得出界面过渡区厚度的增加使得同深度处的氯离子含量增大;何明伟<sup>[8]</sup>基于细观有限元数值模拟方法,定性评估了界面过渡区扩散系数和厚度对混凝土中氯离子扩散有明显的影响。

在上述研究成果中,混凝土界面过渡区内氯离子扩散系数和界面过渡区厚度的取值范围变幅相对较大,且大多忽略了粗骨料体积分数对界面过渡区性质的影响。混凝土由于抗压强度、配合比及其功能用途的不同,其内粗骨料体积分数可在20%~70%之间发生变化<sup>[9]</sup>,因此,粗骨料体积分数对混凝土中氯离子扩散的影响不可忽略,尤其是孔隙较大、厚度不均一的界面过渡区。同时,界面过渡区的厚度及其内氯离子扩散系数的取值对混凝土细观数模中氯离子的扩散特性影响较大。因此,为了更加准确地预测混凝土中氯离子的扩散,确立一个同时考虑粗骨料体积分数和界面过渡区厚度影响的混凝土中界面过渡区氯离子扩散系数的定量评估方法便显得尤为重要。

通过室内干湿循环条件下的混凝土中氯离子扩散试验,实测得到6种不同粗骨料体积分数的混凝土试件在不同时刻、不同深度处的氯离子浓度。经回归分析得到了不同粗骨料体积分数下混凝土的氯离子整体扩散系数。同时,探讨了粗骨料的稀释、曲折和界面过渡区效应对氯离子扩散的影响,在此基础上,引入同时考虑粗骨料体积分数 $V_f$ 和界面过渡区厚度 $h$ 的影响系数 $\alpha(V_f, h)$ ,建立混凝土界面过渡区氯离子扩散系数模型,最后,将建立的界面过渡区氯离子扩散系数模型应用于混凝土中氯离子扩散的三维细观数模当中,验证界面过渡区氯离子扩散系数模型的正确性与合理性。

## 1 氯离子传输试验

采用人工海洋环境自动化模拟装置开展混凝土中氯离子扩散的室内干湿循环试验,该实验装置的功能及构造请详见文献[10]。通过在不同的干湿循环次数(本实验分别取为30、60、90、130和170次),分别测定各组混凝土试件在不同深度处的氯离子浓度,用以研究其内氯离子扩散系数与粗骨料体积分数之间的关系。

### 1.1 原材料及混凝土配合比

本次试验选用普通硅酸盐水泥,水泥标号为PO.42.5,密度为3 100 kg/m<sup>3</sup>;为了避免外掺氯离子对本实验结果的影响,细骨料选用细度模数为2.7,表观密度为2 610 kg/m<sup>3</sup>的河砂;粗骨料采用表观密度为2 690 kg/m<sup>3</sup>的碎石,根据规范[11]配置不同体积分数的粗骨料;混凝土试件详细配合比如表1所示。

试验中将所有混凝土试件制备为边长100 mm的立方体试件,共计6组,其编号分别为C0、C1、C2、C3、C4、C5,如表1所示,分别代表粗骨料体积分数为0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5,粗骨料最大粒径为31.5 mm,每组5个试件,分别用于不同干湿循环次数的氯离子取样,混凝土试件共计30个。

表 1 混凝土配合比  
Tab. 1 Mix proportion

编号	水灰比	配合比/(kg·m <sup>-3</sup> )				粗骨料最大 粒径/mm	粗骨料 体积分数	砂浆 体积分数
		水泥	水	细骨料	粗骨料			
C0	0.4	977	390	780	0	31.5	0.0	1.0
C1		879	351	702	275		0.1	0.9
C2		781	312	624	550		0.2	0.8
C3		684	273	546	825		0.3	0.7
C4		586	234	468	1 100		0.4	0.6
C5		488	195	390	1 375		0.5	0.5

## 1.2 试样制作

### 1.2.1 混凝土试件制作

按照表 1 中配合比浇筑混凝土试件,振捣密实后移至标准养护箱中(温度  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 90% 以上)<sup>[12]</sup>,养护 24 h 后拆除模具。而后,将初凝后的混凝土试件置于饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液中养护 28 d,养护温度保持在  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。28 d 后取出试件,刮去试件表面的浮浆,用酒精清洁试件表面。选取混凝土试件一个侧面作为氯离子扩散渗透面,剩下 5 个面均用环氧树脂密封。

### 1.2.2 干湿循环试验

在人工海洋环境自动化模拟装置的干湿循环试验箱中配置 3.5% 的 NaCl 溶液来模拟海水,将所有制备好的混凝土立方体试件放置在试验箱中。干湿循环周期为 24 h(12 h 干燥、12 h 浸湿),分别在 30、60、90、130、170 次循环之后,各取出相应混凝土试件,测量其内自由氯离子随扩散深度的浓度大小及分布。

### 1.2.3 试验样品制作

本次试验采用混凝土打磨机对混凝土试件的预留渗透面进行打磨,前 10 mm 深度范围内以每 1 mm 为一层逐层磨粉取样,超过 10 mm 之后,按照每 2 mm 为一层进行磨粉,直至 20 mm 的深度处。根据规范[13],对所磨取的粉末样品采用 0.63 mm 筛子分筛,筛后置于铝土盒内并在烘干箱内烘干 2 小时( $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ ),随后冷却至室温。

## 1.3 氯离子含量测试方法

CL-E 型氯离子含量快速测定仪采用离子选择电极法(ISE 法),可快速测定混凝土等物质的水溶性氯离子含量。称取处理后的样品粉末 20 g,置于清洗干净的 300 ml 锥形瓶中,向锥形瓶中加入 200 ml 的蒸馏水,在磁力搅拌器上继续搅拌 24 h,充分静止后,取上层清液,将清洗好并用滤纸吸干的氯离子电极和参比电极同时插入取好的上层清液中,用标定好的 CL-E 型氯离子含量快速测定仪测定单位质量混凝土粉末的自由氯离子含量(%)。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 氯离子含量分布及扩散系数

将编号 C0~C5 对应的混凝土试件在不同干湿循环次数所实测得到的不同深度处氯离子浓度结果绘制成图,如图 1 所示。将干湿循环次数为 30 次和 130 次对应的混凝土试件在不同粗骨料体积分数所实测得到的不同深度处氯离子浓度结果绘制成图,如图 2 所示。

从图 2 中分析可以得出,混凝土试件中氯离子浓度随扩散深度的增大而显著减小,最后逐渐趋于稳定;在同一深度下,氯离子浓度随扩散时间的延伸而逐渐增加;在同一深度,同一时刻下,氯离子浓度随粗骨料体积分数的增大而减小。综上所述,本文试验的实测数据结果与其他学者的研究规律<sup>[5-7]</sup>相吻合。

在干湿交替作用下,氯离子在混凝土中的传输行为主要有两种:在混凝土表面为对流区域,内部为扩散区域。目前,众多学者通常采用式(1)描述干湿交替作用下混凝土中氯离子的传输过程<sup>[18]</sup>,其表达式为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \omega \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

式中:  $C$  为氯离子的体积浓度(%);  $t$  表示氯离子传输的时间(s);  $x$  表示计算位置与混凝土表面的距离(m);  $D$  为氯离子扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $\omega$  为混凝土孔隙液的渗透速率( $\text{m}/\text{s}$ )。

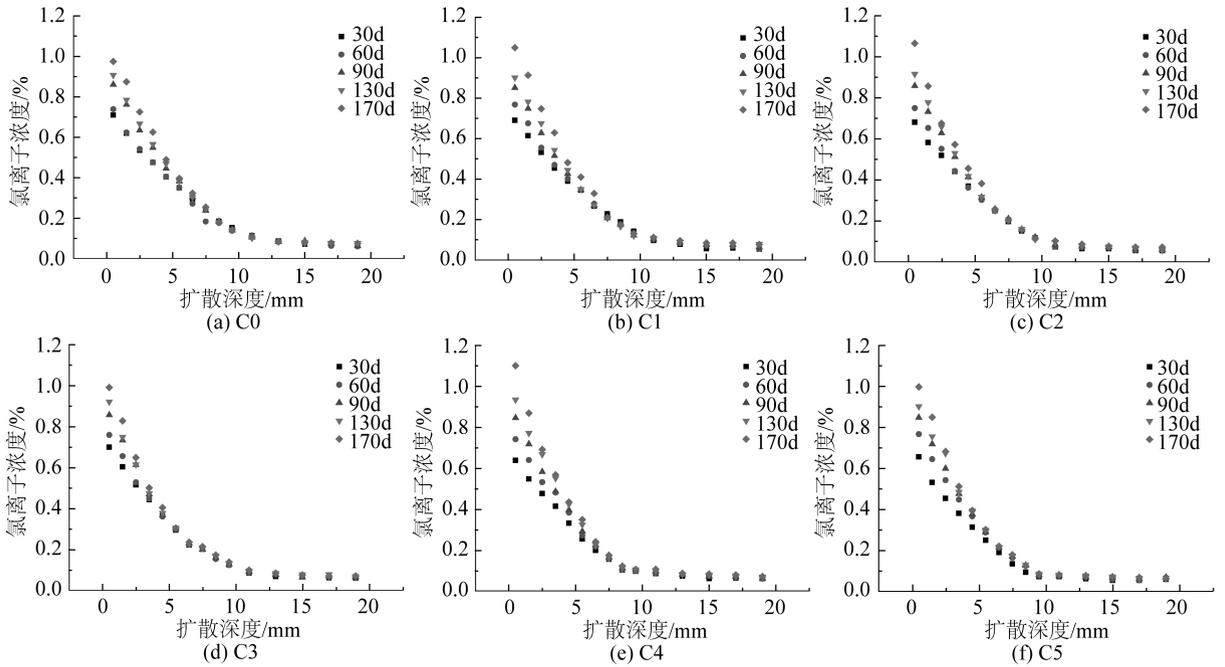


图1 C0~C5 试件中氯离子浓度随深度变化

Fig. 1 Changes of chloride ion content with depths in C0~C5 specimens

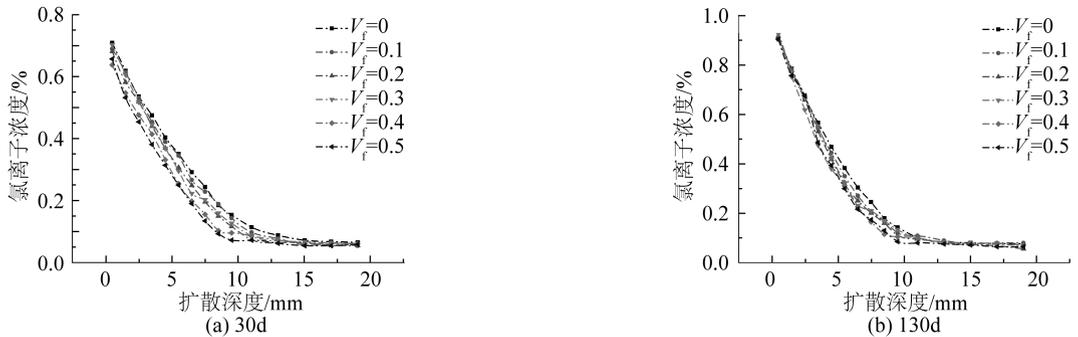


图2 干湿循环30次和130次时氯离子浓度随深度变化

Fig. 2 Changes of chloride ion content with depths after 30 times and 130 times of dry-wet cycling

由于混凝土表面对流区较小,混凝土内部主要以氯离子扩散为主,而本文主要研究氯离子在混凝土内部的扩散性能,故本文暂时不考虑对流区,采用目前国内外认可的 Fick 第二定律来描述氯离子在混凝土内部扩散区域的非稳态扩散过程。其表达式为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中:  $x$  表示计算位置与扩散起始位置的距离(m);其余符号意义同上。

同时, Calcepari 给出了初始边界条件:

$$C|_{x=0} = C_s, C|_{t=0, x>0} = C_0, C|_{x=\infty} = C_0 \quad (3)$$

式中:  $C_0$  表示最开始时刻的氯离子浓度;  $C_s$  为混凝土表面的氯离子浓度。

根据初始边界条件,可以得到式(2)的解析解为:

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (4)$$

式中:  $C(x, t)$  表示距离混凝土保护层表面  $x$  深度处暴露时间为  $t$  的氯离子浓度;  $\operatorname{erf}(\cdot)$  表示高斯误差函数,

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-z^2) dz。$$

将物理试验实测得到的混凝土中不同深度处的氯离子浓度,结合式(4)可回归得到在不同时刻、不同粗骨料体积分数的混凝土试件中氯离子的整体扩散系数,如图 3 所示,  $V_f$  为混凝土中的粗骨料体积分数。图中所示可以看出:在同一粗骨料体积分数下,氯离子整体扩散系数随干湿循环次数的增加而显著减小;同一干湿循环次数下,氯离子整体扩散系数随粗骨料体积分数的增大而近乎线性减小。

## 2.2 粗骨料体积分数影响系数

混凝土是一种水硬性材料,其内部水泥颗粒的水化反应是一个长期的过程。随着反应时间的增长,水化程度的不断提高,混凝土内部细观结构的密实度也相应地增加,这也将导致氯离子扩散系数随着混凝土龄期的增加而逐渐减小,这一规律可从图 3 中得知。因此,氯离子的整体扩散系数应呈现出非常显著的时变特性,其时变模型表达式如下<sup>[14]</sup>:

$$D(t) = D_{Cl} \left( \frac{t_{28}}{t} \right)^m \quad (5)$$

式中:  $D(t)$  为  $t$  时刻的氯离子扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $D_{Cl}$  为 28 d 时的氯离子扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $m$  为龄期衰减系数。

将图 3 中同一粗骨料体积分数、不同时刻下的氯离子整体扩散系数结合式(5),可回归得到不同粗骨料体积分数的混凝土试件 28 d 氯离子整体扩散系数,其结果如图 4 所示。  $D_{Cl}$  为粗骨料体积分数为  $V_f$  的混凝土试件的 28 d 氯离子整体扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $D_0$  为水泥砂浆(粗骨料体积分数为 0)中的 28 d 氯离子整体扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )。从图 4 中可以看出混凝土试件 28 d 的氯离子整体扩散系数随粗骨料体积分数的增加呈现出良好的线性关系,且随粗骨料体积分数的增大而逐渐减小。

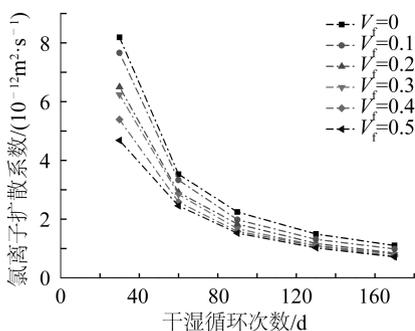


图 3 氯离子整体扩散系数变化

Fig. 3 Changes of chloride diffusion coefficients

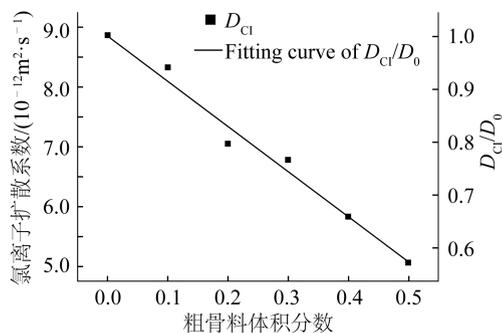


图 4 28 d 氯离子整体扩散系数随粗骨料体积分数变化

Fig. 4 Changes of 28 d chloride diffusion coefficients with coarse aggregate volume fraction

基于上述回归结果,可定义得到氯离子扩散系数的粗骨料体积分数影响系数  $f(V_f)$ :

$$f(V_f) = \frac{D_{Cl}}{D_0} \quad (6)$$

式中各符号意义同上。通过对图 4 中试验数据进行整理、拟合,可得  $f(V_f)$  的表达式如下:

$$f(V_f) = 1 - 0.8525V_f \quad (7)$$

相关系数  $R^2 = 0.9834$ 。故式(5)中的  $D_{Cl} = f(V_f)D_0$ 。

## 2.3 粗骨料对混凝土中氯离子扩散的影响

Shah<sup>[15]</sup>等提出粗骨料对混凝土中氯离子扩散的影响共包含 4 个方面:稀释效应、曲折效应、界面过渡区效应以及逾渗效应。其中,稀释效应和曲折效应会降低混凝土中氯离子的扩散系数,界面过渡区效应和逾渗效应会增大氯离子扩散系数<sup>[6]</sup>。Yang 等<sup>[16]</sup>研究表明当粗骨料体积分数小于等于 0.5 时,逾渗效应可以忽略

不计。故本文将重点研究并探讨粗骨料的稀释、曲折和界面过渡区这三种效应对混凝土中氯离子扩散系数的影响。

### 2.3.1 稀释效应(Dilution effects)

由于粗骨料的渗透性较水泥砂浆而言要小很多,故可将其视为非渗透介质,即认为粗骨料中的氯离子扩散系数为0。粗骨料的存在会减少砂浆的相对体积,从而降低混凝土中的氯离子扩散系数,这一影响被称为稀释效应。粗骨料的稀释效应对混凝土的扩散系数影响大小与粗骨料体积分数相关,当只考虑粗骨料稀释效应时,混凝土中氯离子扩散系数的表达式为<sup>[17]</sup>:

$$D_D = D_0(1 - V_f) \quad (8)$$

式中: $D_D$ 为只考虑稀释效应时混凝土中氯离子扩散系数; $D_0$ 为砂浆中氯离子扩散系数; $V_f$ 为混凝土中粗骨料体积分数。

### 2.3.2 曲折效应(Tortuosity effects)

同理,由于粗骨料的非渗透性,其存在于水泥砂浆介质中会使得氯离子的扩散路径发生曲折,从而使得氯离子的扩散路径变长,进而降低混凝土中氯离子的扩散系数,这一影响效应被称之为曲折效应。当同时考虑粗骨料的稀释效应与曲折效应时,混凝土中氯离子扩散系数的表达式可写为<sup>[17]</sup>:

$$D_T = D_0(1 - V_f)^{3/2} \quad (9)$$

式中: $D_T$ 为同时考虑稀释效应与曲折效应时混凝土中氯离子扩散系数。

### 2.3.3 界面过渡区效应(Interfacial transition zone effects)

相比于水泥砂浆而言,由于界面过渡区有着更高的孔隙率,故界面过渡区的氯离子扩散系数也较水泥砂浆更大,从而影响混凝土中的整体氯离子扩散系数,这一影响效应被定义为界面过渡区效应。

将C0试件(水泥砂浆试件)的实测数据拟合得到的28 d氯离子整体扩散系数 $D_0 = 8.87 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$ 代入式(8)、式(9)中,可计算得出当只考虑稀释效应以及同时考虑稀释效应和曲折效应的混凝土中氯离子扩散系数随粗骨料体积分数的变化规律,结果如图5所示。

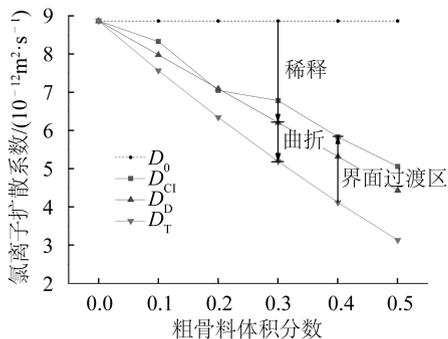


图5 粗骨料对氯离子扩散系数的影响效应

Fig. 5 Effects of coarse aggregate on chloride diffusion coefficients

从图5可以看出:粗骨料的稀释和曲折效应会降低混凝土中的氯离子扩散系数,界面过渡区效应则会提高氯离子扩散系数。当粗骨料体积分数为0.1和0.2时,界面过渡区效应对氯离子扩散系数的提升率分别为9.9%和11.1%,相比较而言影响较小,此时,粗骨料的稀释效应和曲折效应起主导作用;当粗骨料体积分数为0.3、0.4、0.5时,界面过渡区效应对氯离子扩散系数的提升率分别为30.6%、41.6%、61.4%。由此可知,基于本文物理试验的实测结果,当粗骨料体积分数大于0.2时,粗骨料的界面过渡区效应对氯离子扩散系数的影响效果更为显著。

## 2.4 界面过渡区体积分数

为了更加深入地研究界面过渡区中氯离子扩散系数的变化规律,将界面过渡区体积分数定义为:混凝土中所有粗骨料表层界面过渡区的全部体积占整个混凝土试件总体积的百分比。文中,将混凝土中粗骨料简化为三维球形颗粒,假定界面过渡区在粗骨料周围分布均匀,厚度相等(即文中假设界面过渡区的几何形状为一空心球壳),则界面过渡区体积分数计算表达式为:

$$V_i = \frac{1}{V_z} \sum \frac{4}{3} \pi \left[ \left( \frac{d_i}{2} + h \right)^3 - \left( \frac{d_i}{2} \right)^3 \right] \quad (10)$$

式中: $V_i$ 为界面过渡区体积分数, $V_z$ 为混凝土试件总体积, $d_i$ 为第*i*个球形粗骨料直径, $h$ 为界面过渡区厚度。由于粗骨料体积分数 $V_f$ 的表达式为

$$V_f = \frac{1}{V_z} \sum \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_i}{2} \right)^3 \quad (11)$$

对式(10)进行整理可得:

$$V_1 = V_f \frac{\sum [(d_i + 2h)^3 - d_i^3]}{\sum d_i^3} = V_f \sum \frac{[(d_i + 2h)^3 - d_i^3]}{\sum d_i^3} = V_f \sum \frac{d_i^3}{\sum d_i^3} \frac{[(d_i + 2h)^3 - d_i^3]}{d_i^3} \quad (12)$$

定义  $R_i = d_i^3 / \sum d_i^3$ , 则界面过渡区体积分数计算表达式为:

$$V_1 = V_f \sum \frac{R_i}{d_i^3} [(d_i + 2h)^3 - d_i^3] \quad (13)$$

式中:  $R_i$  为第  $i$  个球形粗骨料占有所有粗骨料的质量百分数;  $V_f$  为混凝土中的粗骨料体积分数。由于实际混凝土中界面过渡区体积分数难以通过实验直接测定得到, 故本文采用混凝土三维球形随机骨料模型, 根据粗骨料的最大、最小粒径以及体积分数先随机地生成不同粒径的球形粗骨料, 而后将生成的球形粗骨料根据球心坐标信息不重叠地随机投放到指定尺寸的混凝土试件当中, 图 6 所示为当  $V_f = 0.3$  时的混凝土三维球形随机骨料模型。同理, 可分别生成  $V_f = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  的混凝土球形骨料模型。文中假定界面过渡区的厚度分别为 10、20、30、40、50、70  $\mu\text{m}$ , 可根据式 (13) 计算得到不同粗骨料体积分数和不同界面过渡区厚度下的界面过渡区体积分数, 如图 7 所示。从图 7 中可以看出界面过渡区体积分数随粗骨料体积分数和界面过渡区厚度的增加而近乎线性地增大。

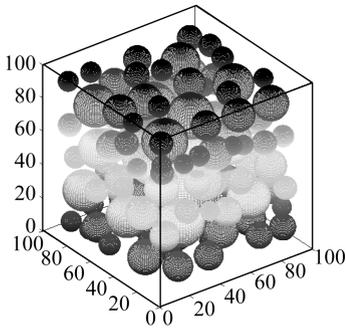


图 6 混凝土三维球形随机骨料模型 ( $V_f = 0.3$ )

Fig. 6 Three-dimensional random aggregate model of concrete ( $V_f = 0.3$ )

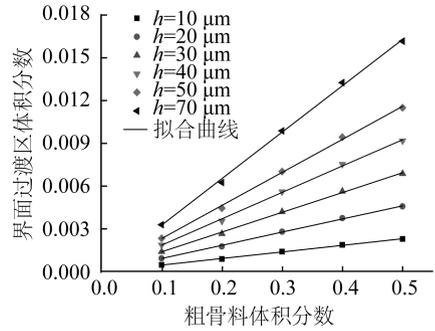


图 7 界面过渡区体积分数变化

Fig. 7 Changes of volume fraction of ITZ

通过引入  $\frac{h}{s}$  ( $s$  为粗骨料最大粒径, 单位为  $\mu\text{m}$ , 根据文中表 1 混凝土配合比,  $s = 31\ 500\ \mu\text{m}$ ), 对图 7 中的结果进行线性拟合回归, 可得界面过渡区体积分数  $V_1$  随粗骨料体积分数  $V_f$  以及界面过渡区厚度  $h$  的表达式:

$$V_1 = 14.584\ 5 \frac{h}{s} V_f \quad (14)$$

### 3 界面过渡区氯离子扩散系数模型

#### 3.1 模型建立

由于混凝土中界面过渡区的形状及其厚度的不均匀性, 因此其内氯离子扩散系数很难通过试验手段来直接测定, 大多需要通过物理试验的结果来间接计算得到<sup>[6]</sup>。本文假设同一类混凝土试件中界面过渡区的氯离子扩散系数相同, 当考虑粗骨料影响效应时, 混凝土中氯离子扩散系数可以表达为<sup>[16]</sup>:

$$D_{\text{Cl}} = D_0 (1 - V_f)^{3/2} + (D_{\text{ITZ}} - D_0) V_f \quad (15)$$

式中:  $D_{\text{ITZ}}$  为界面过渡区氯离子扩散系数,  $D_0$  为砂浆中氯离子扩散系数,  $V_f$  为界面过渡区体积分数,  $V_f$  为粗骨料体积分数。该公式是由两个部分共同组成, 其中,  $D_0(1 - V_f)^{3/2}$  是同时考虑粗骨料稀释效应和曲折效应的氯离子扩散系数,  $(D_{\text{ITZ}} - D_0) V_f$  则是考虑界面过渡区影响效应的氯离子扩散系数。

本文定义混凝土中氯离子扩散的界面过渡区影响系数:

$$\alpha = \frac{D_{\text{ITZ}}}{D_0} \quad (16)$$

结合式 (15) 可得界面过渡区影响系数  $\alpha$  的表达式如下:

$$\alpha = \frac{D_{cl}/D_0 - (1 - V_f)^{3/2}}{V_f} + 1 \quad (17)$$

将式(7)和式(14)代入式(17)中可得:

$$\alpha = \frac{1 - 0.8525V_f - (1 - V_f)^{3/2}}{14.5845 \frac{h}{s} V_f} + 1 \quad (18)$$

综上,建立同时考虑粗骨料体积分数和界面过渡区厚度的界面过渡区氯离子扩散系数模型:

$$D_{ITZ} = \left( \frac{1 - 0.8525V_f - (1 - V_f)^{3/2}}{14.5845 \frac{h}{s} V_f} + 1 \right) D_0 \quad (19)$$

式中各符号意义同上。从式(18)中可以看出,氯离子扩散的界面过渡区影响系数 $\alpha$ 与粗骨料的体积分数 $V_f$ 以及界面过渡区厚度 $h$ 这两个参数相关。根据前文所述,取 $V_f = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ,界面区过渡厚度 $h = 10, 20, 30, 40, 50, 70 \mu\text{m}$ ,根据式(18)可计算得到不同粗骨料体积分数和不同界面过渡区厚度下的界面过渡区影响系数 $\alpha$ ,结果如图8、图9所示。

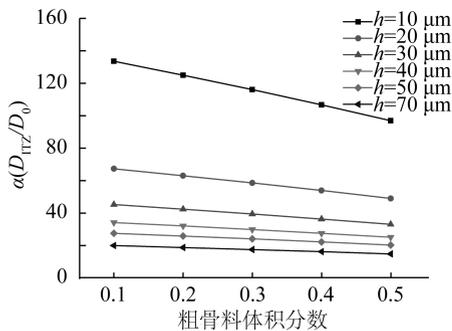


图8  $\alpha$ 随粗骨料体积分数变化

Fig. 8  $\alpha$  varies with coarse aggregate volume fraction

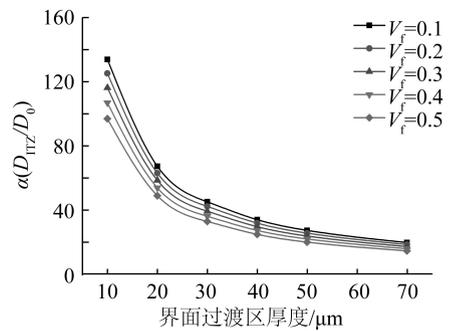


图9  $\alpha$ 随界面过渡区厚度变化

Fig. 9  $\alpha$  varies with thickness of ITZ

由图8、图9可知,不同粗骨料体积分数和不同界面过渡区厚度下的界面过渡区氯离子扩散系数差异明显。在同一界面过渡区厚度情况下,界面过渡区氯离子扩散系数随粗骨料体积分数的增大而近乎线性减小,当粗骨料体积分数由0.1增大到0.5时,界面过渡区氯离子扩散系数减小了将近27%;在同一粗骨料体积分数下,界面过渡区氯离子扩散系数随界面过渡区厚度的增大先显著减小,后逐渐趋于稳定,当界面过渡区厚度由 $10 \mu\text{m}$ 增大到 $70 \mu\text{m}$ 时,界面过渡区氯离子扩散系数的减小率高达将近85%。综上可知,粗骨料体积分数和界面过渡区厚度对界面过渡区氯离子扩散系数的影响十分显著,对后者(界面过渡区厚度)的变化尤为敏感。

### 3.2 模型在细观数模中的应用与验证

本文采用混凝土三维细观数值模型,将建立的界面过渡区氯离子扩散系数模型应用于其中,并将细观数模计算结果与物理试验的实测数据相对比,用以验证本文界面过渡区氯离子扩散系数模型的正确性与合理性。

本文采用大型通用有限元分析软件COMSOL中的稀物质传递模块来模拟混凝土细观数值模型中氯离子的扩散过程。采用前文中所提及的混凝土三维球形随机骨料模型导入到有限元软件当中,通过设置氯离子侵蚀面,并在粗骨料周围设置界面过渡区,输入表面氯离子浓度,界面过渡区厚度,砂浆、粗骨料和界面过渡区中的氯离子扩散系数等计算参数;生成网格,利用瞬态求解步模拟混凝土试件中的实时氯离子浓度大小。

根据式(19)可知,界面过渡区氯离子扩散系数主要由界面过渡区厚度和粗骨料体积分数决定。现保证粗骨料体积分数不变( $V_f = 0.3$ ),界面过渡区厚度 $h$ 分别取为 $10, 40$ 及 $70 \mu\text{m}$ ,带入式(18)中,计算出 $\alpha = 116.2, 29.6, 17.3$ ;同时,保证界面过渡区厚度不变( $h = 40 \mu\text{m}$ ),粗骨料体积分数取为 $0.1, 0.3$ ,带入式(18)中,计算出 $\alpha = 34.0, 29.6$ 。将这些参数分别输入后,计算得出当干湿循环次数为60次时的混凝土中氯离子

浓度随深度的分布图,文中以  $V_f=0.3, h=40 \mu\text{m}$  的计算结果为例,如图 10 所示。从图示中可以明显看出:氯离子浓度随着深度的增加而显著减小,最后趋于零。

将细观数模的计算结果与本文中通过室内干湿循环条件下的混凝土中氯离子扩散试验实测得到的数据进行相互对比,如图 11、图 12 所示。图 11 为粗骨料体积分数为 0.3、干湿循环次数为 60 次、不同界面过渡区厚度  $h$  下的氯离子浓度数模计算值与去除初始氯离子浓度的 C3 试件(粗骨料体积分数为 0.3)、干湿循环次数为 60 次的实测值对比图;图 12 为粗骨料体积分数为 0.1、干湿循环次数为 60 次、界面过渡区厚度为  $40 \mu\text{m}$  的氯离子浓度数模计算值与去除初始氯离子浓度的 C1 试件(粗骨料体积分数为 0.1)、干湿循环次数为 60 次的实测值对比图。

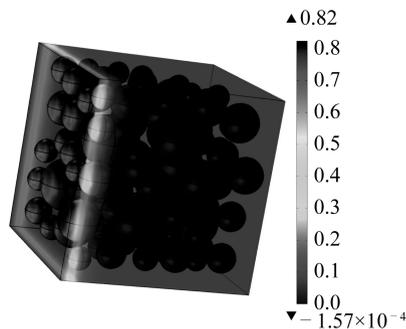


图 10 C3 试件氯离子浓度 ( $V_f=0.3, h=40 \mu\text{m}, t=60 \text{ d}$ )

Fig. 10 Chloride ion content of C3 specimen ( $V_f=0.3, h=40 \mu\text{m}, t=60 \text{ d}$ )

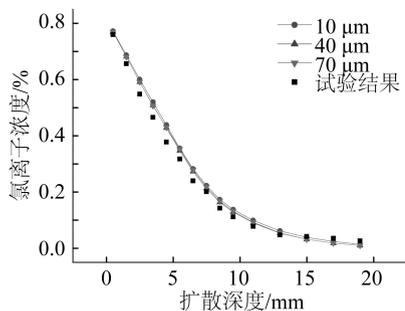


图 11 C3 试件不同界面过渡区厚度  $h$  的氯离子浓度数模计算值与实测值对比 ( $V_f=0.3, t=60 \text{ d}$ )

Fig. 11 Comparison of calculated values and measured values of chloride ion content with different thickness of ITZ ( $V_f=0.3, t=60 \text{ d}$ )

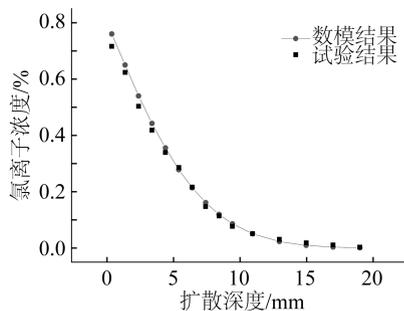


图 12 C1 试件氯离子浓度数模计算值与实测值对比 ( $V_f=0.1, t=60 \text{ d}, h=40 \mu\text{m}$ )

Fig. 12 Comparison of calculated values and measured values of chloride ion content ( $V_f=0.1, t=60 \text{ d}, h=40 \mu\text{m}$ )

从图 11、图 12 中可以看出:在同一粗骨料体积分数 ( $V_f=0.3$ ) 下,当界面过渡区厚度  $h$  分别为 10、40 和  $70 \mu\text{m}$  时,混凝土中氯离子浓度随深度的分布曲线几乎重合,且与物理试验实测数据变化趋势相同,相比于物理试验实测数据,10、40 和  $70 \mu\text{m}$  下的氯离子浓度数模计算值最大相对误差分别为 18%、14% 和 16%;在同一界面过渡区厚度 ( $h=40 \mu\text{m}$ ) 下,当粗骨料体积分数  $V_f$  分别为 0.1 和 0.3 时,混凝土模型中的氯离子浓度数模计算值与物理试验实测数据变化趋势相同,最大相对误差分别为 9% 和 14%。综上分析可知:各种工况下的最大误差均小于 20%,符合工程实际要求,验证了界面过渡区氯离子扩散系数模型的正确性和合理性,采用本文中的界面过渡区氯离子扩散系数模型能够有效地模拟氯离子在混凝土试件中的扩散特性和传输规律。

## 4 结 语

通过室内干湿循环模拟试验以及细观数模计算,得到以下结论:

- 1) 在混凝土中,氯离子整体扩散系数随干湿循环次数的增加而显著减小,随粗骨料体积分数的增大而近乎线性减小。
- 2) 粗骨料稀释效应和曲折效应会降低氯离子扩散系数,界面过渡区效应则会提高氯离子扩散系数。当粗骨料体积分数小于 0.2 时,粗骨料的稀释效应和曲折效应起主导作用,界面过渡区效应影响较小;当粗骨料体积分数大于 0.2 时,粗骨料的界面过渡区效应对氯离子扩散系数的影响效果更为显著。
- 3) 基于混凝土三维球形随机骨料模型计算结果,拟合出了界面过渡区体积分数的计算公式,结果表明:

界面过渡区体积分数随粗骨料体积分数和界面过渡区厚度的增大而增大。

4) 通过引入考虑粗骨料体积分数  $V_f$  和界面过渡区厚度  $h$  的影响系数  $\alpha(V_f, h)$ , 建立了混凝土界面过渡区氯离子扩散系数模型。界面过渡区氯离子扩散系数随粗骨料体积分数的增大呈近乎线性地减小, 随界面过渡区厚度的增大先显著减小而后逐渐趋于平稳。

5) 建立混凝土氯离子扩散三维细观数值模型, 将界面过渡区氯离子扩散系数模型应用于细观数模中, 结果表明: 细观数模计算结果与物理试验实测数据在变化趋势和数值大小上均能够相吻合, 验证了界面过渡区氯离子扩散系数模型的正确性与合理性。

#### 参考文献:

- [1] BRETON D, CARLES-GIBERGUES A, BALLIVY G, et al. Contribution to the formation mechanism of the transition zone between rock-cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 1993, 23(2): 335-346.
- [2] WITTMANN F H. Structure of concrete with respect to crack formation[M]. *Fracture Mechanics of Concrete*. London; New York; Elsevier, 1983: 43-74.
- [3] SHANE J D, MASON T O, JENNINGS H M, et al. Effect of the interfacial transition zone on the conductivity of Portland cement mortars[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, 83(5): 1 137-1 144.
- [4] BASHEER L, KROPP J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2001, 15(2): 93-103.
- [5] YANG C C. Effect of the percolated interfacial transition zone on the chloride migration coefficient of cement-based materials[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2005, 91(2): 538-544.
- [6] 孙国文, 孙伟, 张云升, 等. 骨料对氯离子在水泥基复合材料中扩散系数的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2011, 39(4): 662-669. (SUN Guowen, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. Influence of aggregates on chloride ion diffusion coefficient in cement-based composite materials[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2011, 39(4): 662-669. (in Chinese))
- [7] 吴静新. 混凝土内氯离子传输模型及其数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012. (WU Jingxin. Modeling and simulation of chloride ions transmission in concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese))
- [8] 何明伟. 钢筋混凝土中氯离子传输三维细观数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2016. (HE Mingwei. Three dimensional mesoscopic numerical simulation of chloride diffusion in reinforced concrete[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese))
- [9] 刘恒. 粗骨料对混凝土中氯离子扩散影响试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2015. (LIU Heng. Research on experiments of chloride diffusion in concrete considering the effects of coarse aggregate[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese))
- [10] WANG Y Z, LI Q M. Chloride diffusion analysis of concrete members considering depth-dependent diffusion coefficients and effect of reinforcement presence[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(5): 04015183-1-8.
- [11] JTS202-2011, 水运工程混凝土施工规范[S]. 2011. (JTS202-2011, Code for construction of concrete for water transport engineering[S]. 2011. (in Chinese))
- [12] GB/T50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB/T50081-2002, Standard test method for mechanical properties of common concrete[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [13] JTJ270-1998, 水运工程混凝土试验规程[S]. 1998. (JTJ270-1998, Code for concrete test of water transport engineering[S]. 1998. (in Chinese))
- [14] THOMAS M D A, BAMFORTH P B. Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(4): 487-495.
- [15] S P SHAH. High performance concrete, past, present and future[C]//LEUNG C K, LI Z, DING J T, Eds. *High Performance Concrete-Workability, Strength and Durability*. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2000: 3-29.
- [16] YANG C C, SU J K. Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of aggregate content on the migration coefficient of mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(10): 1 559-1 565.
- [17] YANG C C, CHO S W. Influence of aggregate content on the migration coefficient of concrete materials using electrochemical method[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 80(3): 752-757.
- [18] 向发海. 氯离子在混凝土中的传输机理研究[D]. 湖南: 中南大学, 2011. (XIANG Fahai. Research on the transport mechanism of chloride ion in concrete [D]. Hunan: Zhongnan University, 2011. (in Chinese))