



ABAQUS 在混凝土中 氯离子时变扩散中的应用*

陈庆军^{1,2}, 黄培州¹, 张成天¹, 薛 华¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 为验证 ABAQUS 有限元软件在混凝土中氯离子时变扩散分析的可行性, 对已有试验采用 ABAQUS 有限元程序进行分析, 并通过编写 USDFLD 子程序考虑扩散系数、表面氯离子浓度随时间变化的影响。同时也对有限元分析中的单元尺寸、模型尺寸进行了讨论。分析结果表明, ABAQUS 有限元分析能很好地拟合试验数据; ABAQUS 内置的 Mass Diffusion (MD) 模块可以较好地模拟不考虑时变效应时的氯离子扩散情况, 而利用 USDFLD 子程序可以进一步地考虑扩散系数及表面氯离子浓度的时变影响。研究的有限元模型中, 单元尺寸小于扩散方向长度的 5% 时, 可以达到较高的精度水平; 不同厚度的模型之间的氯离子扩散存在着差异。

关键词: 氯离子扩散; ABAQUS; 有限元分析; 子程序

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0027-07

Application of ABAQUS in time-dependent chloride diffusion in concrete

CHEN Qing-jun^{1,2}, HUANG Pei-zhou¹, ZHANG Cheng-tian¹, XUE Hua¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to verify the feasibility of FEM software ABAQUS's application to the chloride diffusion in concrete, we carry out an analysis of the previous test by ABAQUS, and develop a subroutine based on USDFLD in ABAQUS to take the time-dependent coefficients, i. e. the diffusion coefficient and the surface chloride concentration into account. We also discuss the influence of the element size and the FEM model dimension on the results. The results indicate that the ABAQUS analysis has a good agreement with tests results, proving that the mass diffusion (MD) module in ABAQUS is able to simulate the chloride diffusion without concerning time-dependent coefficients; while with the developed USDFLD subroutine, the time-dependent chloride diffusion problem can also be solved. For the FEM model, good precision can be obtained when the element size is smaller than 5% of the dimension in the diffusion direction. The models with different thicknesses have distinctions about the chloride diffusion.

Keywords: chloride diffusion; ABAQUS; FEM analysis; subroutine

氯离子渗透引起的混凝土构件内钢筋锈蚀是最常见的混凝土耐久性问题之一。当前对于氯离

子在混凝土中渗透作用的研究, 大多是基于试验, 但试验耗费大量的时间和经费, 因此, 数值模拟

收稿日期: 2015-03-13

*基金项目: 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题项目 (2013ZC19); 华南理工大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2014ZZ0026)

作者简介: 陈庆军 (1975—), 男, 博士, 副教授, 从事混凝土结构、结构仿真分析、结构耐久性研究。

对于预测结构使用寿命、评估混凝土的耐久性是另一种重要的手段。

扩散是氯离子在混凝土中渗透的主要形式。1970 年意大利科学家 Collepardi 开始基于 Fick 定律对氯离子的扩散行为进行研究^[1]。Fick 方程解析解的应用需假设材料的氯离子扩散系数是恒定的,许多工程应用是基于这个假设,但是诸多实践和理论分析表明,扩散系数、表面氯离子浓度在长期扩散分析中作为定值来考虑会造成较大误差,很多学者对此提出了修正^[2],而修正方程往往无法直接得到解析解,需通过数值方法求解。1993 年 Saetta^[3]开始将有限元数值方法运用到混凝土材料的一维扩散问题的研究上;Xi 等^[4]于 1999 年采用有限差分法研究了氯离子扩散模型,模型中考虑了温度、湿度以及氯离子束缚结合等影响;Funahashi^[5]、施养杭^[6]采用有限差分法对一维扩散进行模拟;王东方^[7]采用有限差分法对圆形、方形截面的二维扩散进行模拟;Sergi^[8]应用最小平方方法数值模拟了混凝土中氯离子的一维扩散;Bitaraf 等^[9]提出无网格法分析氯离子在混凝土中的二维扩散的方法;赵羽习等^[10]基于 BP 神经网络预测混凝土中氯离子的浓度分布。由于有限元法物理意义明确、通用性强,是研究氯离子扩散问题的经典方法,吴静新等^[11]采用 COMSOL 软件、付传清等^[12]采用 ANSYS 软件对混凝土氯离子扩散进行了基于有限元方法的分析;胡少伟等^[13]结合阻盐系统的基本方程,建立了强制电流保护下氯离子扩散的有限元模型。

已有的文献中,多数采用自编程序来考虑扩散系数、表面氯离子浓度时变,程序的正确性尚需进行严格的验证。ABAQUS 是国际上最先进的大型通用有限元计算分析软件之一,具有强大的计算功能、广泛的模拟性能,在弹塑性分析领域得到广泛应用,但关于其在氯离子扩散分析的研究尚较少见,本文将介绍一种基于 ABAQUS 进行氯离子扩散研究,并通过编制子程序考虑氯离子时变扩散的研究方法。

1 ABAQUS Mass Diffusion 模块

ABAQUS 质量扩散模块 (Mass Diffusion, 简称 MD) 内置 Fick 方程(1)、广义化学扩散控制方程(2),可考虑温度 (Soret) 效应、压力效应,可以研究一维到三维的扩散问题,其一维形式分别为:

$$\frac{\partial C_x}{\partial t} = D \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C_x}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -sD \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} + \kappa_s \frac{\partial}{\partial x} \ln(\theta - \theta^Z) + \kappa_p \frac{\partial p}{\partial x} \right] \quad (2)$$

式中: D 为扩散系数; C_x 为扩散物质浓度; s 为溶解度; ϕ 为归一化扩散物质浓度; κ_s 为温度 (Soret) 效应系数; κ_p 为压力效应系数; θ 为摄氏温度, θ^Z 为绝对零度的摄氏温度; p 为压强。

ABAQUS MD 模块虽无法直接考虑 D 随时间变化的问题,但 ABAQUS 内置了强大的 USDFLD 子程序,通过 FORTRAN 语言编程与 ABAQUS 进行链接,可以在有限元计算的基础上自定义时间相关函数 $D(t)$,并将其引入到材料属性扩散系数的定义中,将时间作为状态变量,每一步计算根据函数关系更新扩散系数 D 的值,从而实现时变分析。

2 ABAQUS MD 模块的验证

本文采用文献 [14] 的自然浸泡试验数据对 ABAQUS MD 模块分析进行验证。自然浸泡试验分别截取某挡浪坝 (编号 DLB)、某码头 (编号 MT) 内部未受海水侵蚀部分的芯样 (100 mm),将其饱水并冷却至常温后,芯样侧面用石蜡密封,顶面未密封,浸泡在 23 ℃ 海水中,分别浸泡 40、80 d 后测量各芯样的氯离子浓度分布。试验中测定的扩散系数 D 、理论表面氯离子浓度 C_{sa} 、原有混凝土中氯离子浓度 C_0 见表 1。

表 1 自然浸泡试验测定参数

样本	$D / (10^{-6} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$C_{sa} / \%$	$C_0 / \%$
MT 40 d	4.28	0.232	0.064 8
MT 80 d	3.87	0.253	0.064 8
DLB 40 d	2.21	0.219	0.052 4
DLB 80 d	1.96	0.224	0.052 4

注: 浓度按照氯离子质量占混凝土总质量百分比。

根据试验芯样的情况, 在 ABAQUS 中进行建模, ABAQUS MD 分析模块一般分析流程如下:

1) 在 ABAQUS 软件的 Part 中建立长度为 100 mm 的二维壳单元模型, 并在 Mesh 中划分 1 mm × 1 mm 网格, 定义单元类型为 DC2D8 单元 (图 1)。

2) 按表 1 在 Property 的 Other 菜单中添加 Diffusivity 和 Solubility 并定义各材料的扩散系数, 然后在 Load 中按实际试验条件施加 Mass concentration 扩散边界条件。

3) 在 Step 中选择 Mass diffusion 分析模块并设 2 个分析步: 第 1 个分析步按稳态分析 (Steady-state) 达到原有混凝土中氯离子浓度 C_0 ; 第 2 个分析步为瞬态分析步 (Transient), 分析氯离子由扩散边界往里扩散情况。

4) 运行分析。

浸泡 80 d 的 MT 试件的 ABAQUS 分析结果见图 1, 图 2 是各试件的试验数据、ABAQUS 分析数据及经典 Fick 方程解析解的对比。表 2 是 ABAQUS 分析结果与试验结果及解析解之间的相关系数计算。结果显示 5 mm 以内部分的浓度分布有所偏差, 大于 5 mm 部分浓度分布吻合良好, 这是由于在距离表面 3 ~ 5 mm 深度内存在“对流区”^[14], 此区域氯离子分布会稍偏离 Fick 定律, 但随深度增大, 扩散成为混凝土内部氯离子渗透的主要形式, 其浓度分布基本符合基于 Fick 定律的有限元计算结果。从表 2 和图 2 可以看出, ABAQUS 计算结果与 Fick 定律解析解基本重合, 相关系数在 0.999 5 以上; 在 40 ~ 80 d 的试验时长内, ABAQUS 分析与试验数据的相关系数均在 0.998 7 以上, 总体上能应证分析的正确性。此试验时间较短, 可以不考虑氯离子扩散系数随时间的变化关系, 故有限元分析中假定扩散系数为恒定值是合理的。

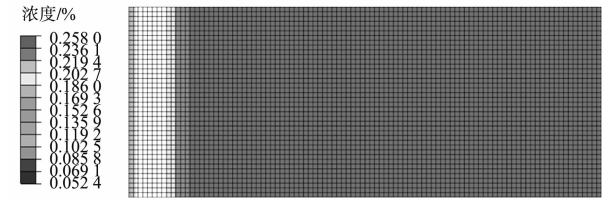


图 1 MT 80 d 模型及 80 d 浓度分布

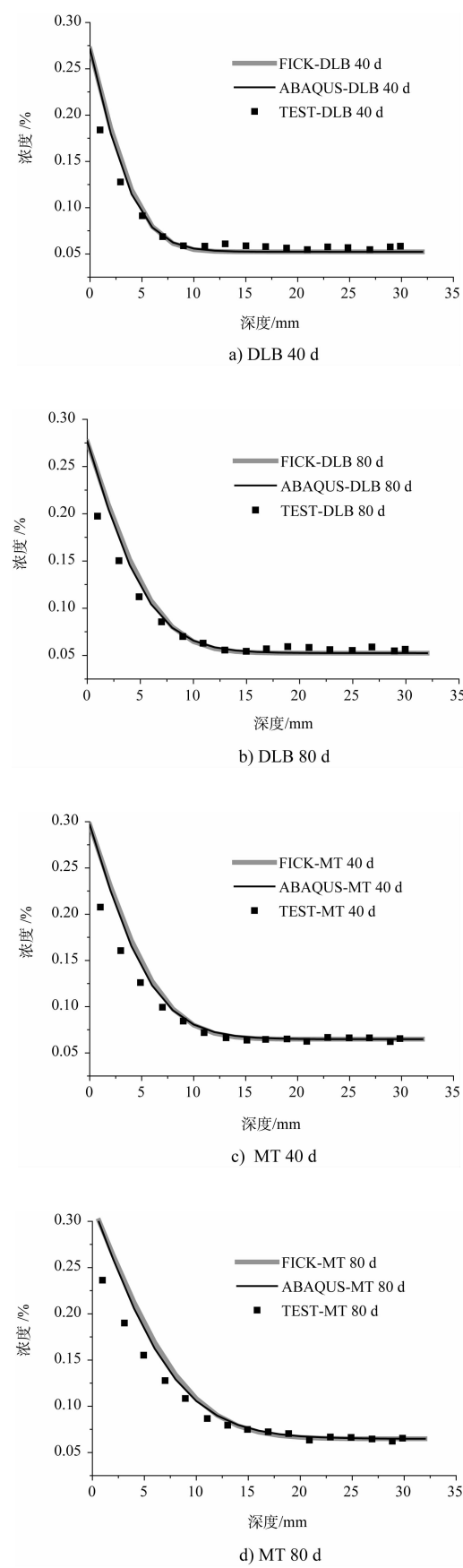


图 2 各试件氯离子浓度实测与分析

表 2 自然浸泡试验与分析的氯离子浓度分布相关系数

试件	DLB 40 d	DLB 80 d	MT 40 d	MT 80 d
ABAQUS 与 Fick 解析解相关系数	0.999 6	0.999 6	0.999 6	0.999 5
ABAQUS 与试验相关系数	0.998 7	0.998 9	0.999 1	0.999 3

3 ABAQUS 时变扩散分析

3.1 ABAQUS 时变扩散分析的方法和作用

在实际工程中经常需要对服役几年甚至几十年的混凝土结构进行耐久性预测或评估，此时不能忽略氯离子扩散的时变效应。因此，为使分析结果更为准确，在用 ABAQUS 有限元软件分析时，可在明确氯离子扩散时变模型后，通过 Amplitude 的设置来考虑扩散边界条件（表面氯离子浓度）的时变效应，并通过采用 FORTRAN 语言编写子程序 USDFLD 来实现考虑扩散系数的时变效应的模拟。一般分析方法如下：

1) 参照第 2 节在 ABAQUS 中建立相应的模型、根据二维或三维情况分别选取单元类型并划分网格，施加边界条件。

2) 根据已有文献模型或自定义模型明确表面氯离子浓度、扩散系数与时间的函数关系。

3) 在 Tool 菜单中创建 Tabular 类型的 Amplitude，输入表面氯离子浓度与时间的相关数据，并在 Load 中设置 Mass concentration 扩散边界条件时选用该 Amplitude 进行施加。

4) 在 Property 的 Diffusivity 中增加一个变量 Field1，把扩散系数与时间分别输入到 D、Field1 中，通过用 FORTRAN 语言编写子程序 USDFLD 实现将 Field1 中的时间变量作为每增量步迭代的状态变量参与每一时刻 D 的求解，其中关键语句如下：

```
C  __ Use the TIME(2) as field(1) _____  
FIELD(1) = TIME(2)  
  
C  __ Store TIME(2) as a solution dependent  
state variable _____  
STATEV(1) = FIELD(1)
```

5) 在 Step 中选择 Mass diffusion 分析模块并设置相应的稳态和瞬态分析步。

6) 在 Property 的 General 中添加 Depvar 和 User Defined field，把 Depvar 中的 Number of solution-dependent state variables 设为 1，然后在建立 Job 时在 General 的 User subroutine file 中读取子程序 for 文件以完成子程序连接，运行分析。需要注意的是，由于分析中采用了 Fortran 子程序，因此系统中必须安装有如 Intel Visual Fortran 的 Fortran 编辑器，才能顺利编译求解。

通过以上步骤，可以求解得到不同时变参数下混凝土中氯离子的扩散情况。实际工程中混凝土结构构件的材料特性、边界形式更为复杂，若同时考虑其时变影响，普通解析求解方法存在难度，而个人编写的有限元程序又往往并不十分全面，很难兼顾到有限元分析中的各个方面。参照此节中介绍的方法可较好地求解混凝土中的氯离子时变扩散问题，还可以在这个基础上考虑更复杂的多参数影响，并可通过结果分析进行结构耐久性的设计和预测。

3.2 ABAQUS 时变扩散分析验证

为研究长期暴露于海洋环境下氯离子扩散的时变效应，Chalee 等在泰国某海湾潮汐区，将混凝土暴露 2~5 a 后测量其氯离子扩散情况，并基于 Fick 定律提出时变分析模型^[15]。Petcherdchoo 根据 Chalee 的试验数据，提出改进理论模型^[16]，该模型更好地结合了理论研究并且与试验数据相符合。本节采用 3.1 中的求解过程利用 ABAQUS 软件对试验试件进行时变扩散分析和验证。

Petcherdchoo 的时变扩散改进模型基于以下理论和公式^[16]：

1) 氯离子扩散系数。
自然环境中，在持续的水化反应、火山灰反应等因素的影响下，氯离子扩散系数会随时间减小。Petcherdchoo 模型基于美国的 Life-365 耐久性分析程序^[17-18]，对服役年限小于 30 a 的结构采用公式（3）考虑时间对扩散系数的影响。

$$D(t) = D_0(t_0/t)^m \tag{3}$$

式中： t_0 为结构开始暴露于氯盐环境时混凝土的龄期，按 28 d 计； m 是时间依赖性系数，有研究表明其与粉煤灰取代率有关，Life-365 程序采用式(4)：

$$m = 0.2 + 0.4 \times (\%FA/50) \tag{4}$$

式中： D_0 是混凝土龄期为 28 d 龄期时的氯离子扩散系数。Petcherdchoo 将试验数据进行回归，得到其数值与水灰比 W/B 、粉煤灰取代率 $\%FA$ 关系：

$$D_0 = 10^{[1.776 + 1.364 \times (W/B)] + [5.806 - 18.69 \times (W/B)] \times (\%FA)} \tag{5}$$

式中：水灰比 W/B 即配置混凝土时水的质量与水泥或水泥粉煤灰混合料质量的比值；粉煤灰取代率 $\%FA$ 即水泥粉煤灰混合料中粉煤灰所占百分比。

2) 表面氯离子浓度。

试验表明，表面氯离子浓度随时间增长，并

且增长速度逐渐降低。Chalee 针对其试验数据提出表面氯离子浓度按时间的对数增长的分析模型^[15]，但该模型公式可能出现负数表面浓度，且与有限差分法(FDM)结果并不能很好吻合。为改善这些缺陷，Petcherdchoo 提出改进模型，认为表面氯离子浓度按时间平方根增长，并与混凝土材料水灰比有关，经拟合分析，提出模型：

$$C_s(t) = 10^{[0.814(W/B) - 0.213]} + 2.11 \sqrt{t} \tag{6}$$

式中： t 为暴露在氯盐环境下的时间(a)。此节中浓度单位按照氯离子质量占水泥或水泥粉煤灰混合料质量百分比。

由式(3)、(6)可计算得到试验试件的 ABAQUS 扩散模拟参数(表 3)。结合表 3 参照 3.1 的方法对试验试件进行 ABAQUS 的氯离子时变扩散分析。

表 3 ABAQUS 扩散模拟参数

水灰比(W/B)	粉煤灰取代率($\%FA$) /%	$D_0/(mm^2 \cdot a^{-1})$	m	$D(t)/(mm^2 \cdot a^{-1})$	$C_s(t)/\%$
0.45	0	245.36	0.2	$D(t) = 146.82 \times t^{-0.2}$	$C_s(t) = 1.42 + 2.11 \sqrt{t}$
	25	180.25	0.4	$D(t) = 62.54 \times t^{-0.4}$	
	50	115.13	0.6	$D(t) = 24.67 \times t^{-0.6}$	
0.55	0	335.89	0.2	$D(t) = 200.99 \times t^{-0.2}$	$C_s(t) = 1.72 + 2.11 \sqrt{t}$
	25	224.05	0.4	$D(t) = 80.22 \times t^{-0.4}$	
	50	112.22	0.6	$D(t) = 24.04 \times t^{-0.6}$	
0.65	0	459.83	0.2	$D(t) = 275.15 \times t^{-0.2}$	$C_s(t) = 2.07 + 2.11 \sqrt{t}$
	25	301.27	0.4	$D(t) = 107.87 \times t^{-0.4}$	
	50	142.71	0.6	$D(t) = 30.58 \times t^{-0.6}$	

注：浓度按照氯离子质量占水泥或水泥粉煤灰混合料质量百分比，时间单位为 a。

图 3 分别为水灰比 0.45 ~ 0.55、粉煤灰掺量 0% ~ 50%、试件在海洋环境中暴露 5 a 的试验数据，采用 Petcherdchoo 改进模型的计算结果和 ABAQUS 基于该模型的有限元结果也列于图中，与试验数据进行对比。结果显示：不同的材料配合比，Petcherdchoo 的改进模型的计算结果基本上与试验数据吻合良好，其模型所采用的假定和计算公式是符合试验规律的。从图中数据分析发现：高水灰比不利于混凝土的抗氯盐性能；掺加粉煤灰能大大改善混凝土的抗氯盐性能。图 4 是 0.65 水灰比不掺粉煤灰的普通混凝土在 2 ~ 5 a 实测的浓度分布试验数据以及 Petcherdchoo 计算

结果、ABAQUS 有限元解结果，扩散深度随时间逐步发展的规律也能与试验数据很好地吻合。表 4 是对应图 3 的试验与分析之间氯离子浓度分布相关系数分析。表 5 是对应图 4 的试验与分析之间氯离子浓度分布相关系数分析。图 3、4 及表 4、5 显示，ABAQUS 有限元计算的浓度分布与 Petcherdchoo 解析解的结果是基本重合的，相关系数达到 0.99 以上，这说明子程序成功编译；ABAQUS 分析结果与实测数据的相关系数也达到 0.96 以上，这表明可以运用 ABAQUS 有限元方法考虑时变分析，并能真实反映实际渗透随时间变化的规律。

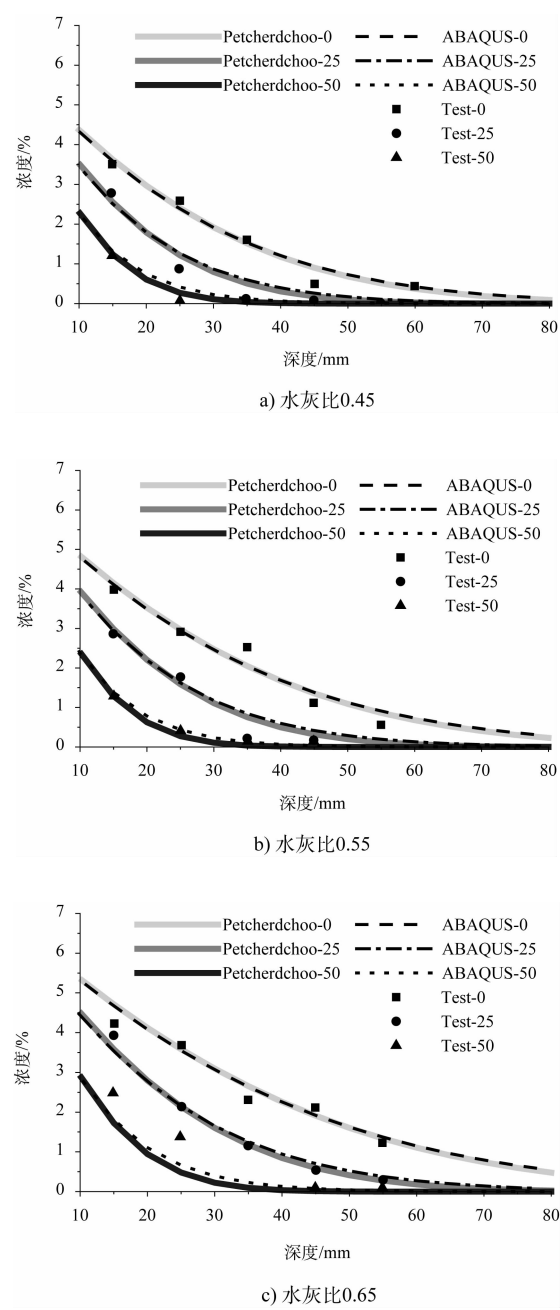


图 3 不同水灰比扩散 5 a 氯离子浓度分布

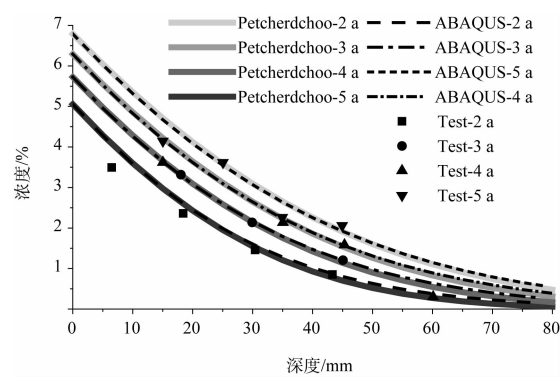


图 4 扩散 2~5 a 氯离子浓度分布

表 4 扩散 5 a 试验与分析之间氯离子浓度分布相关系数

水灰比 (W/C)	粉煤灰取代率 (% FA) /%	ABAQUS 与 Petcherdchoo 相关系数	ABAQUS 与 试验相关系数
0.45	0	1.000 0	0.983 9
	25	0.999 8	0.980 4
	50	0.996 8	0.972 7
0.55	0	1.000 0	0.973 5
	25	1.000 0	0.975 9
	50	0.996 5	0.997 4
0.65	0	1.000 0	0.978 1
	25	1.000 0	0.975 9
	50	0.996 7	0.981 5

表 5 扩散 2~5 a 水灰比为 0.65 且不掺粉煤灰试验与分析之间氯离子浓度分布相关系数

扩散时间/a	ABAQUS 与 Petcherdchoo 相关系数	ABAQUS 与 试验相关系数
2	0.999 9	0.999 5
3	1.000 0	0.999 7
4	1.000 0	0.974 9
5	1.000 0	0.966 7

4 有限元单元及模型尺寸

ABAQUS 软件基于有限元数值方法，单元尺寸、边界效应对有限元方法计算影响显著，以下将以第 3 节中的计算模型按单元尺寸、模型尺寸对计算结果的影响进行讨论。

1) 单元尺寸。

在第 3 节中 0.65 水灰比且不掺粉煤灰混凝土的扩散模型基础上，以单元尺寸 0.5~20 mm，建立模型分别编号 E0.5、E1、E5、E10、E20，分析并提取距离表面 30 mm 位置 2~5 a 氯离子浓度数据。以 E0.5 的结果作为基准值校验其他模型的误差百分比，列于表 6。表 6 显示，单元越小计算偏差越低，足够小的单元尺寸能够更好地模拟细部局部的扩散现象，提高计算精度。当单元尺寸达到 20 mm（模型氯离子扩散方向长度的 13.3%）时，结果出现较大偏差，而当模型单元尺寸小于 10 mm（模型氯离子扩散方向长度的 6.6%）时，其偏差已小于 0.002 5%。因此建议建模时单元尺寸小于模型氯离子扩散方向尺寸的 5%，就可以满足比较高的精度要求。而若要获取模型边界处氯离子浓度变化较快区域的数值时，建议单元尺寸可取得更小些，如 1~5 mm。

2) 模型尺寸。

同样将距离表面 30 mm 位置浓度变化作为研

研究对象, 改变模型在氯离子扩散方向的厚度, 建立厚度为 60 ~ 300 mm 的模型进行分析, 以厚度最大的 300 mm 模型作为基准值与其他不同厚度的模型进行对比, 结果列于表 7。从表 7 可以看出, 模型厚度越小, 产生的差异越大, 当模型尺度小于所研究节点到表面距离的 3 倍 (即 90 mm) 时, 其差异达到 0.706 1%, 接近 1%。

表 6 不同单元尺寸计算偏差				%
时间/a	单元编号			
	E1	E5	E10	E20
2	0.000 0	0.000 6	0.002 5	8.464 1
3	0.000 0	0.000 0	0.000 5	7.107 3
4	0.000 0	0.000 0	0.000 4	6.259 9
5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	5.672 9

表 7 不同模型厚度计算差异				%
时间/a	模型厚度/mm			
	150	120	90	60
2	0.000 0	0.003 1	0.132 9	4.577 4
3	0.000 0	0.007 4	0.264 6	6.768 2
4	0.000 4	0.015 9	0.457 1	8.930 2
5	0.000 7	0.029 0	0.706 1	10.936 4

5 结论

- 1) 本文对自然浸泡试验进行模拟, 验证了 ABAQUS 内置的 Mass Diffusion (MD) 模块可以较好地模拟不考虑时变效应时的氯离子扩散情况。
- 2) 利用 ABAQUS 的 USDFLD 子程序开发功能, 可以实现扩散系数、表面氯离子浓度的时变扩散分析, 并结合试验数据拟合分析, 证明了其正确性和可操作性。
- 3) 本文研究的有限元模型中, 单元尺寸小于扩散方向长度的 5% 时, 可以达到较高的精度水平; 不同厚度的模型之间的氯离子扩散存在着差异。

参考文献:

[1] Collepardi M, Marcialis A, Turriziani R. Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1972, 55(10): 534-535.

[2] 王立成. 氯盐环境条件下混凝土氯离子侵蚀模型及其研究进展[J]. 水运工程, 2004(4): 5-9.

[3] Saetta A V, Schrefler B A, Vitaliani R V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials[J]. Cement

and Concrete Research, 1993, 23(4): 761-772.

[4] Xi Y, Bazant Z P. Modeling chloride penetration in saturated concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(1): 58-65.

[5] Funahashi M. Predicting corrosion-free service life of a concrete structure in a chloride environment [J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(6): 581-587.

[6] 施养杭, 罗刚. 含多种因素的氯离子侵入混凝土的有限差分计算模型[J]. 工业建筑, 2004, 34(5): 7-10.

[7] 王东方. 钢筋砼构件氯离子侵蚀下钢筋初始锈蚀时间的计算方法[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.

[8] Sergi G, Yu S W, Page C L. Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment[J]. Magazine of Concrete Research, 1992, 44(158): 63-69.

[9] Bitaraf M, Mohammadi S. Analysis of chloride diffusion in concrete structures for prediction of initiation time of corrosion using a new meshless approach[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(4): 546-556.

[10] 许晨, 赵羽习, 金伟良. 基于神经网络预测混凝土中氯离子浓度的分布[J]. 混凝土, 2010(6): 6-8.

[11] 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.

[12] 付传清, 金贤玉, 田野, 等. 多场耦合作用下氯离子分布场的数值模型[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010(S2): 119-125.

[13] 胡少伟, 朱雅仙, 游日, 等. 外加电场作用下氯离子在钢筋混凝土结构中的扩散模拟[J]. 水运工程, 2010(8): 7-11.

[14] 范宏. 混凝土结构中的氯离子侵入与寿命预测[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.

[15] Chalee W, Jaturapitakkul C, Chindapasirt P. Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater[J]. Marine Structures, 2009, 22(3): 341-353.

[16] Petcherdchoo A. Time dependent models of apparent diffusion coefficient and surface chloride for chloride transport in fly ash concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 497-507.

[17] Thomas M, Bentz E C. Life-365 Manual [R]. Canada : University of Toronto, 1955.

[18] 仲维亮, 芦志强, 苏永生. Life-365 在海港混凝土耐久性设计中的应用[J]. 水运工程, 2014(5): 64-68.

(本文编辑 武亚庆)