

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.007

# 滨海非饱和钢混结构中氯离子传输的数值模拟

贾立哲, 张英姿, 王开源, 段一鸣, 徐田欣

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

**摘要:** 为探究非饱和状态下钢混结构中氯离子质量分数的分布情况, 定义容量矩阵、传递矩阵和氯离子通过率向量, 并与瞬态热平衡方程中的各参量进行等效, 给出了基于 ANSYS 热分析模块模拟非饱和混凝土中氯离子传输的数值方法, 在验证方法有效性的同时, 探究钢筋混凝土梁遭受单向、双向、三向侵蚀后梁内的氯离子质量分数分布规律. 研究表明: 数值模拟程序所得氯离子质量分数值与试验结果非常接近, 非饱和混凝土氯离子传输的数值模拟方法有效; 钢筋混凝土梁遭受单向侵蚀时混凝土中氯离子质量分数衰减的最快, 双向侵蚀其次, 三向侵蚀时氯离子质量分数衰减最慢; 在遭受多向氯离子侵蚀时, 箍筋及纵筋表面氯离子质量分数比单向侵蚀时大; 受侵蚀的相邻截面越多, 钢筋越容易锈蚀, 且距离越近的截面对其影响越大; 氯离子从3个方向侵蚀的计算结果略大于从两个方向侵蚀的计算结果, 左侧氯离子在10年侵蚀时间内有部分通过梁宽方向传输至右侧, 因此, 在长时间的侵蚀作用下, 受到多向侵蚀的钢混梁内钢筋的腐蚀情况更为严重.

**关键词:** 非饱和钢筋混凝土; 数值模拟; 氯离子传输; 滨海环境

**中图分类号:** TU375

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0367-6234(2015)12-0038-07

## Numerical simulation for chloride transport of nonsaturated R.C at coastal zone

JIA Lizhe, ZHANG Yingzi, WANG Kaiyuan, DUAN Yiming, XU Tianxin

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

**Abstract:** Capacity Matrix, Transfer Matrix and Chloride Passing Rate Vector are associated with variables in transient heat balance equation, and a numerical simulation method by ANSYS thermal analysis module for chloride transport in nonsaturated concrete is proposed to investigate the chloride transport model in nonsaturated concrete. The numerical results are validated by experimental data. A R.C beam is corroded with chloride from three different directions, respectively. The results indicate that the chloride concentration by numerical simulation is very close to the experimental results. Numerical simulation provide another way for modeling chloride transport of nonsaturated concrete. For corrosion of R.C beam from single direction, the decay of chloride concentration is the quickest. The decay speed for corrosion from three directions is the slowest, and corrosion from two directions is in the middle. Corrosion from multiple directions leads to that the chloride concentration on the surface of rebar and stirrup is higher than single direction. Corrosion from multiple adjacent sections cause more easily rebars corrosion. The closer section will induce corrosion more seriously. Chloride transport to the right from the left of beam section within ten years, and the results of corrosion from two directions is a slightly more than that from three directions. Therefore, chloride penetration from multiple directions will induce more serious corrosion to the rebar in a long time.

**Keywords:** nonsaturated reinforced concrete; numerical simulation; chloride transport; coastal zone

滨海环境中, 海风、海雾中夹带的氯离子不断在混凝土表面沉积, 进而通过扩散和对流等物理作用向处于水分饱和与完全干燥之间的非饱和混凝土内部

传输, 从而导致钢筋过快锈蚀而丧失结构耐久性, 造成巨大经济损失<sup>[1]</sup>. 对于非饱和混凝土中氯离子的传输问题, 部分学者将广泛用于饱和混凝土的 Fick 第二定律用于非饱和混凝土<sup>[2]</sup>, 也有学者将扩散和对流分开考虑, 认为氯离子在混凝土表层一定深度处通过对流进行传输, 超过这一深度则以扩散的形式传输<sup>[3]</sup>, 这些研究工作均未能如实地考虑非饱和混凝土氯离子传输过程中扩散和对流作用之间的耦合效应. 为了考虑扩散和对流之间的耦合作用, 在 Xi 等<sup>[4]</sup>提

收稿日期: 2014-10-01.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB013600); 国家自然科学基金(51308166); 山东省自然科学基金(ZR2011EEQ028).

作者简介: 贾立哲(1978—), 男, 副教授, 硕士生导师.

通信作者: 张英姿, zhyzhit@aliyun.com.

出的饱和混凝土氯离子传输模型基础上, Ababneh 等<sup>[5]</sup>采用质量守恒定律和 Fick 第一定律,建立了考虑对流作用的氯离子在非饱和混凝土中的传输模型,但在水的质量守恒方程中忽略了对流作用引起的水的改变量。Suwito 等<sup>[6]</sup>在 Fick 第一定律方程中认为氯离子或者水的扩散通量与该截面处的氯离子质量分数梯度以及水的质量分数梯度总和成正比,而质量方程仍仅含有扩散作用引起的水的改变量,将 Ababneh 模型中不能满足质量守恒的问题归结到 Fick 第一定律中去解决,导致质量守恒仍然无法满足。

基于 Fick 定律的氯离子传输模型虽具有精度较高的优点,但所涉及参数如水分扩散系数、孔隙液体积等在实际工程中较难获得,且该方法不能考虑钢筋混凝土结构中钢筋的存在对氯离子传输的影响。因此,发展基于大型软件的面向实际工程的氯离子传输过程的数值模拟方法变得十分迫切。王显利<sup>[7]</sup>利用 ANSYS 建立了饱和状态混凝土梁的模型,模拟混凝土梁在单向和多向界遭受氯离子侵蚀时内部氯离子浓度质量分数分布规律。赵宇翔<sup>[8]</sup>基于 ANSYS 热分析模块给出了饱和混凝土中氯离子质量分数随时间和空间变化的二维分布模型。冷冰<sup>[9]</sup>同样基于 ANSYS 研究了钢筋存在情况下,异形截面饱和状态混凝土中氯离子质量分数分布的预测方法。基于大型通用有限元软件的氯离子传输数值模拟方法具有计算代价小、简单方便、适用实际工程等特点,但以往研究成果中的数值模拟都是针对饱和和钢筋混凝土进行的<sup>[7-9]</sup>,是否适用滨海区域的非饱和混凝土还有待进一步考究。因此,为预测滨海区域非饱和钢混结构中氯离子的分布规律、减缓氯离子对滨海混凝土结构中钢筋的侵蚀,亟需研究基于大型有限元软件的非饱和钢混结构中氯离子传输过程的数值模拟方法。

本文首先从机理上论证了采用 ANSYS 热分析模块模拟非饱和混凝土中氯离子传输的可行性,进而基于物质守恒定律,通过定义容量矩阵、传递矩阵和氯离子通过率向量,并与瞬态热平衡方程中的比热矩阵、传导矩阵和热流量向量进行等效,给出基于 ANSYS 热分析模块模拟非饱和混凝土中氯离子传输的数值方法,并通过与以往研究结果的对比验证数值模拟方法的有效性,接着对钢筋混凝土梁遭受单向、双向、三向侵蚀后的氯离子质量分数分布规律进行对比分析。

## 1 非饱和状态混凝土中氯离子传输的数值模拟

### 1.1 模拟方法的基本原理

非饱和混凝土中每时每刻都有氯离子通过对流

和扩散的方式流入,此过程与瞬态传热过程十分相似。热对流和热传导是瞬态传热的主要方式,热传导进行的程度由温度梯度大小决定,非饱和混凝土中氯离子扩散作用的大小同样取决于氯离子质量分数梯度的大小;热对流的大小取决于温度随时间的变化量,非饱和混凝土中氯离子对流作用的大小亦取决于氯离子质量分数随时间的变化量。因此,可以将氯离子扩散和对流过程同热传导和热对流过程一一对应,从物理过程上将非饱和状态混凝土中氯离子传输问题与热学中两种介质之间的热传递问题一一对应,是实现利用 ANSYS 模拟非饱和混凝土中氯离子传输的基础。

依据能量守恒定律,单位时间热流量等于由于热对流产生的热流量与由于热传导产生的热流量之和,即瞬态热平衡方程可写为

$$[C] \cdot \dot{T} + [K] \cdot T = \{Q\}. \quad (1)$$

式中:  $[C]$  为比热矩阵,包含物质比热  $c$ ;  $[K]$  为传导矩阵,包含物质导热系数  $k$ ;  $\dot{T}$  为温度对时间的导数;  $T$  为温度向量;  $\{Q\}$  为单位时间热流量向量。

同理,依据物质守恒定律,单位时间内氯离子通过率等于由于对流作用流入的氯离子的量和由于扩散作用产生的氯离子的量之和,为保持与瞬态热平衡方程形式相同,可将氯离子传输过程写为

$$[A] \cdot \dot{C} + [B] \cdot C = \{W\}. \quad (2)$$

式中:  $[A]$  为容量矩阵,包括容量系数  $a$ ;  $[B]$  为传递矩阵,包括氯离子传递系数  $b$ ;  $\dot{C}$  为浓度对时间的导数;  $C$  为浓度向量;  $\{W\}$  为单位时间氯离子通过率向量。

单位混凝土中氯离子质量分数上升 1% 的氯离子质量称之为容量系数,通过对量纲进行分析,可得其表达式为

$$a = \frac{100}{(101 - n) \cdot (100 - n)}, \quad (3)$$

式中  $n$  为某时刻氯离子质量分数,当不超过 2% 时,可取 2%<sup>[9]</sup>。

氯离子传递系数  $b$  对应于热传导中的导热系数,其表达式为

$$b = D/\rho a. \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为混凝土密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $D$  为氯离子扩散系数<sup>[9]</sup>,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

### 1.2 数值模拟过程和有效性验证

利用 ANSYS 建立长 300 mm, 宽 100 mm, 厚度 20 mm 的混凝土板(见图 1), 将其划分为  $30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  大小的单元, 氯离子传输时间为 90 d, 混凝土内部氯离子质量分数为 0%, 上表面氯离子

质量分数为 0.6%，其余参数与美国道路与运输协会试验<sup>[10]</sup>所用混凝土板保持一致，以便和试验结果进行对比。

在模型建立前，按照式(3)、(4)计算容量系数和传递系数，见表 1。计算容量系数时，因氯离子最大质量分数仅为 0.6%，小于 2%，所以  $n$  取 2%；计算传递系数时，混凝土密度取  $2\ 400\ \text{kg}/\text{m}^3$ ，氯离子扩散系数按 Ababneh 等<sup>[5]</sup>的计算结果取  $2.322\ \text{cm}^2/\text{s}$ 。

ANSYS 数值模拟具体步骤为：

1) 进入热分析模块，确定单元类型。过滤图形用户界面，进入 ANSYS 中 Thermal 热分析模块，进入前处理，选用 Solid70 实体单元来模拟热分析中的混凝土。

2) 输入模型材料属性，按照表 1 依次输入混凝土容量系数、传递系数、混凝土密度和弹性模量。

3) 建立所需要的几何图形，建立混凝土板作为分析的几何模型，见图 1。

4) 对已有几何图形划分单元网格，沿板的宽度方向每隔 5mm 划分一次网格，见图 2。

表 1 数值模拟相关参数

容量系数	传递系数/ ( $\text{cm}^5 \cdot (\text{kg} \cdot \text{s})^{-1}$ )	混凝土密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ )
0.010 3	77 669.9	2 400	33 500

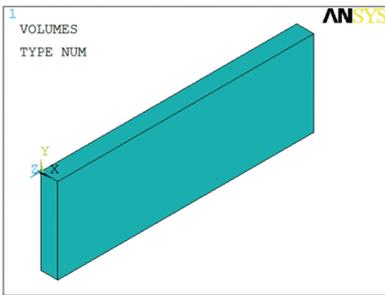


图 1 混凝土板几何模型

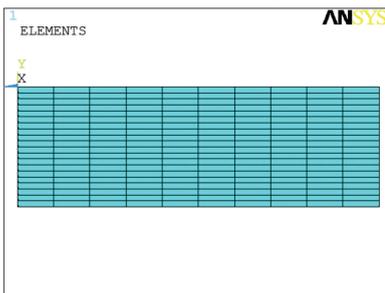


图 2 混凝土板有限元模型

5) 定义分析类型，为与瞬态传热过程保持一致，将 ANSYS 求解层 (SOLU) 中的分析类型设置为瞬态分析 (TRANS)。

6) 输入传输时间、设置初始及边界质量分数值，输入传输时间为 90 d，设置混凝土内部初始质量

分数值，边界质量分数以荷载方式施加。

7) 设置输出控制、求解，进行后处理，输出混凝土中氯离子等值线图、各层混凝土中氯离子质量分数随时间的变化关系，以及各层混凝土中氯离子质量分数值。

通过以上步骤，可得混凝土中氯离子等值线见图 3，各层混凝土中氯离子质量分数随时间的变化关系见图 4。

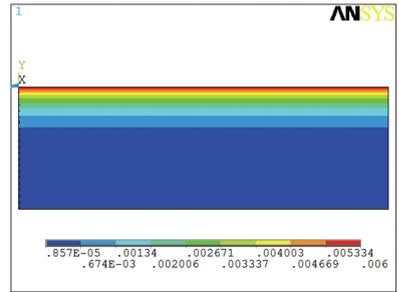


图 3 混凝土板氯离子等值线

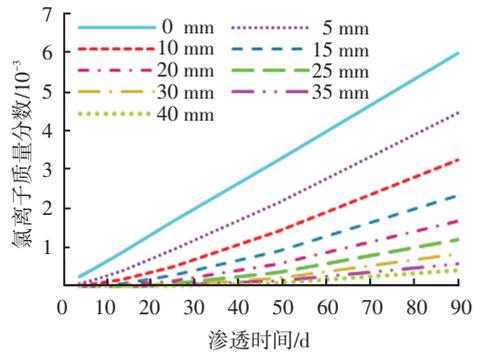


图 4 氯离子质量分数时变关系

从图 3 可较为直观的看出各层混凝土中氯离子质量分数大小，图 4 可反映出各层混凝土中氯离子质量分数随传输时间的增长而变大，距暴露面越近的混凝土中氯离子质量分数增长速度越快。

将本文提出的数值模拟方法计算结果与 Ababneh 等<sup>[5]</sup>的氯离子传输理论模型的求解结果，以及美国道路与运输协会的试验结果<sup>[10]</sup>进行对比，见图 5。

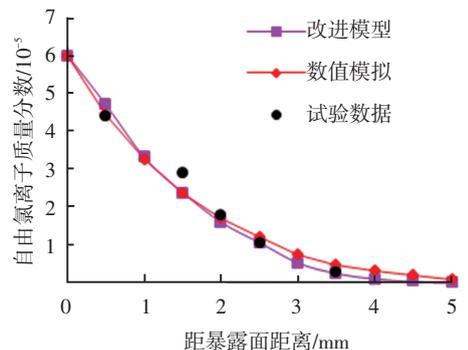


图 5 数值模拟与理论模型及试验数据对比

采用理论模型应先确定方程中吸水能力 ( $\partial w/\partial H$ )、水分扩散系数 ( $D_H$ )、氯离子的结合能力

( $\partial C_i / \partial C_i$ )、氯离子扩散系数( $D_{cl}$ )以及对流过程影响因子( $\mu_1, \mu_2$ )等基本参数. 这些基本参数取决于混凝土的基本组成、材料特性等自身条件, 可由和混凝土相关的基本参量来表达, 这些基本参量可通过一定试验手段得到. 为更好地与 Ababneh 等<sup>[5]</sup>提出的氯离子渗透模型以及美国道路与运输协会<sup>[10]</sup>的试验数据进行对比, 本文不再单独进行试验来确定这些基本参量, 所涉及的各个参量的取值均与 Ababneh 等<sup>[5]</sup>所用的混凝土板以及美国道路与运输协会试验所用混凝土板<sup>[10]</sup>保持一致, 与理论模型计算相关的基本数据列于表 2. 为了与 Ababneh 等<sup>[5]</sup>所采用的模型进行对比以验证本文所编程序的可靠

性, 本文依据 Ababneh 等<sup>[5]</sup>的氯离子渗透模型, 通过 MATLAB 编程得到 Ababneh 等<sup>[5]</sup>模型中所列不同深度处的氯离子质量分数, 见图 6. 美国道路与运输协会试验所用混凝土的相关参数如下: 水灰比 0.4, 水泥含量  $390 \text{ kg/m}^3$ , 水含量  $156 \text{ kg/m}^3$ , 塌落度 50 mm, 空气含量 7.9%, 所用水泥为 ASTM C 150 I 型波特兰水泥, 粗骨料为质密石灰岩, 细骨料为天然硅砂. 运用上述混凝土浇筑尺寸为  $600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的混凝土板, AASHTO T 259 试验则在该板的基础上钻取直径为 100 mm 的试件, 并将其暴露在质量分数为 3% 的氯化钠溶液中 90 d, 然后通过在不同深度的钻孔取样来测定相应位置的氯离子质量分数.

表 2 渗透方程中相关参数值

水灰比	水泥含量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水含量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粗骨料含量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	细骨料含量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	坍落度/ mm	孔隙率/ %	强度	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
0.4	390	156	1 140	714	50	7.9	C45	2 400
养护湿度/%	养护时间/d	骨料总体积/ $\text{m}^3$	$\partial w / \partial H_{\text{agg}}$	$\partial w / \partial H_{\text{cp}}$	$f_{\text{agg}}$	$f_{\text{cp}}$	$\partial w / \partial H_{\text{conc}}$	$g_i$
50	28	0.802	0.524	0.743	0.772	0.228	0.574	0.725
$D_{H_{\text{cp}}}$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$D_{H_{\text{conc}}}$ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$D_{\text{cp}}$	$V_p^c$	$H$	$H_c$	$U$	$T$	$n_{\text{cp}}(H, T)$
5.856	4.246	0.573	0.03	0.5	0.75	43.8	293.15	0.478
$n_{\text{agg}}(H, T)$	$n(H, T)$	$w_{C-H-s}$	$\beta_{C-H-s}$	$w_{\text{sol}}$	$\rho_{\text{sol}}$	$\beta_{\text{sol}}$	$\mu_1$	$\mu_2$
0.862	0.774	394.67	0.395	0.747	3.78	0.204	0.0138	0.163

从图 6 可看出, 本文依据原模型编程计算得到的结果与 Ababneh 等<sup>[5]</sup>所用模型得到的数据吻合度很高, 说明本文编写程序有效, 在此基础上进行改进工作有意义.

另外, 从图 5 可明显看出, 数值模拟程序所得的氯离子质量分数与试验结果非常接近. 经计算, 总体误差仅为  $4.73 \times 10^{-7}$ , 可以认为所使用的非饱和混凝土氯离子传输的数值模拟方法有效. 数值模拟结果与氯离子传输理论模型结果吻合也较好, 总体误差仅为  $3.91 \times 10^{-7}$ .

差大, 主要原因: 1) 数值模拟使用宏观参数, 不如氯离子传输的理论模型的微观材料参数数量多, 精度高; 2) 数值模拟并未区分自由氯离子和结合氯离子, 所得结果是氯离子的总和, 所以总体偏大,

虽然数值模拟方法相比于理论传输模型精确度稍逊一筹, 但数值模拟方法所需要的参数数目较少、获取难度较小, 是一种计算代价较小、应用性较强的方法. 对于计算精度要求不高的大规模混凝土工程, 数值模拟方法具有很高的使用价值.

## 2 钢筋混凝土梁氯离子传输的数值模拟

### 2.1 钢筋混凝土梁数值模型的建立

同 1.2 节利用 ANSYS 建立钢筋混凝土梁的模型, 梁的基本信息见表 3, 混凝土容量系数、传递系数、混凝土密度和弹性模量同 1.2 节, 见表 1. 实际工程中的钢筋混凝土梁上表面一般由上部混凝土板保护, 其余 3 个方向都有可能遭受氯离子的侵蚀, 本部分依次按单向、双向、三向 3 种不同氯离子侵蚀状况进行分析, 其中混凝土表面氯离子质量分数为 0.6%, 本部分工作只为探究氯离子在钢筋混凝土梁中的传输规律, 与实际环境略有差异, 为使得计算数据有较好的区分度, 取传输时间为 10 a.

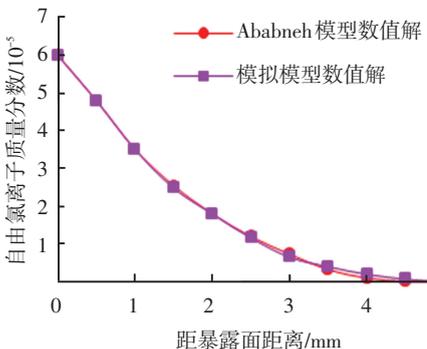


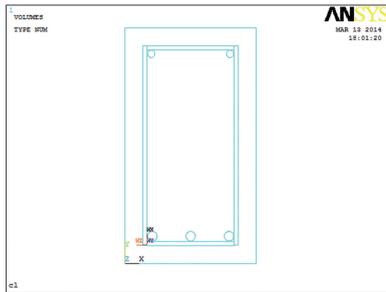
图 6 文献[5]模型数据和本文求解原模型数据对比

数值模拟结果与试验结果之间的总体误差比氯离子传输的理论模型结果与试验结果之间的总体误

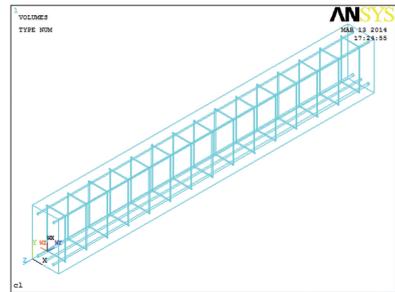
表 3 钢筋混凝土梁的基本信息

截面尺寸/mm	长度/mm	受力钢筋	架立钢筋	箍筋	保护层厚度/mm
250×450	3000	3C18	2C16	C8@200	40

本部分所建立的钢筋混凝土梁截面配筋和梁长方向配筋见图 7.

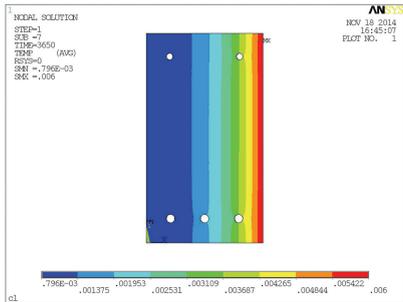


(a) 梁截面

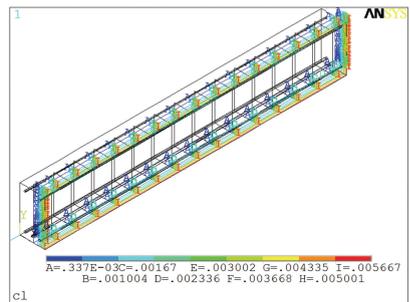


(b) 梁长方向

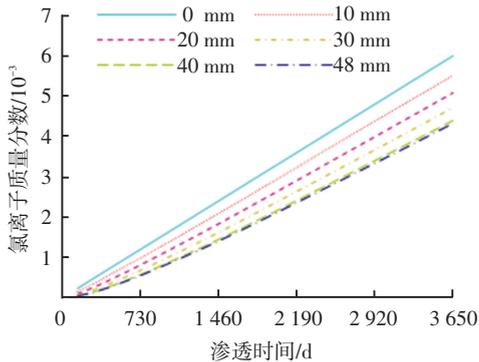
图 7 钢筋混凝土梁配筋图



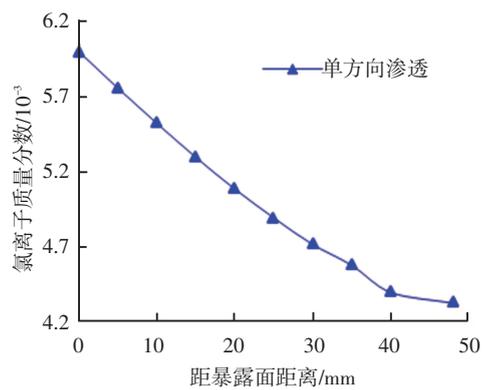
(a) 梁截面的氯离子质量分数分布



(b) 梁长方向氯离子质量分数分布



(c) 氯离子质量分数随时间变化



(d) 氯离子质量分数随距离变化

图 8 单方向氯离子侵蚀计算结果

### 2.2.2 双方向传输

当氯离子从右侧和下侧双方向侵入时,梁横截面处和梁长方向氯离子质量分数分布、各层混凝土中氯离子质量分数随时间变化关系以及混凝土中氯离子质量分数随距暴露面距离变化关系见图 9.

### 2.2.3 三方向侵蚀

当氯离子从左侧、右侧、下侧 3 个方向侵入时,梁横截面处和梁长方向氯离子质量分数分布、各层混凝土中氯离子质量分数时变关系以及混凝土中氯离子质量分数随距暴露面距离变化关系见图 10.

## 2.2 不同方向传输的计算结果和规律

### 2.2.1 单方向传输

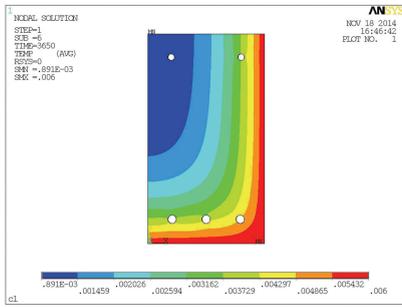
当氯离子从右侧单方向侵入时,梁横截面处和梁长方向氯离子质量分数分布、各层混凝土中氯离子质量分数随时间变化关系以及混凝土中氯离子质量分数随距暴露面距离变化关系见图 8.

将单向、双向、三向 3 种情况所得的距暴露面不同距离处混凝土内部氯离子质量分数值进行比较,见图 11.

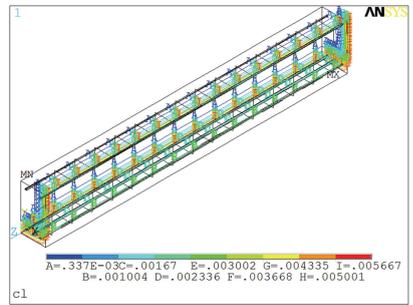
从图 8~11 可得:1) 钢筋混凝土梁中距暴露面越远的位置氯离子质量分数越小,这一趋势与钢筋混凝土梁暴露在滨海环境中侧面的数目无关,单向侵蚀时混凝土中氯离子质量分数衰减的速度最快,双向侵蚀其次,三向侵蚀时氯离子质量分数衰减速度最慢;2) 钢筋混凝土在遭受多向氯离子侵蚀时,其箍筋及纵筋表面氯离子质量分数比单向受侵蚀时

大,说明对于钢混构件中某根钢筋来说,受侵蚀的相邻截面越多,钢筋越容易锈蚀,且距离越近的截面对其影响越大;3)氯离子从左侧、右侧、下侧 3 个方向侵入和从右侧、下侧两个方向侵入的计算结果有一

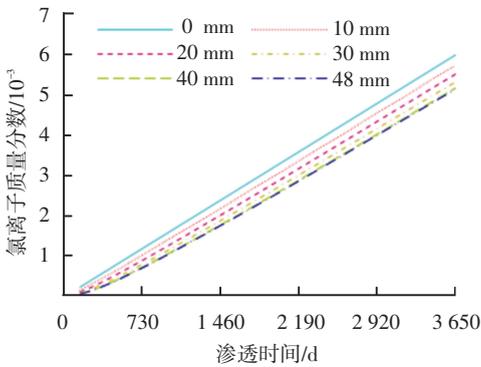
定差别,原因是在 10 a 的侵蚀时间内,左侧部分氯离子通过梁宽的方向传输至右侧,因而右侧氯离子质量分数得到加大,使得三向侵蚀的氯离子质量分数略大于双向侵蚀的情况。



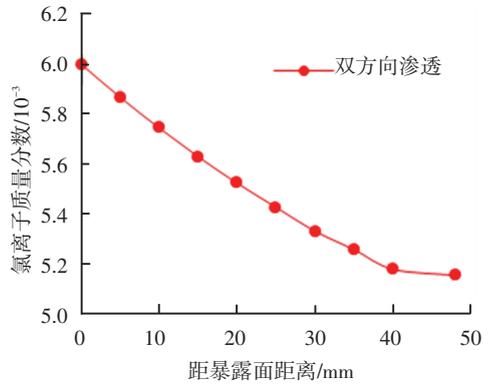
(a) 梁截面的氯离子质量分数分布



(b) 梁长方向氯离子质量分数分布

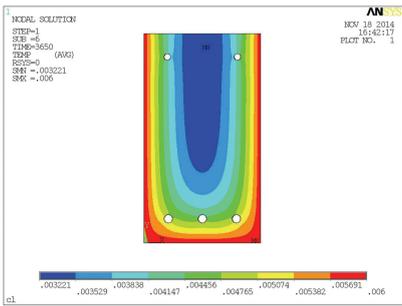


(c) 氯离子质量分数随时间变化

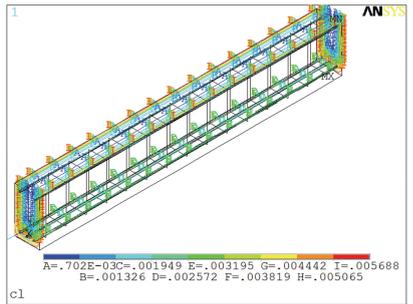


(d) 氯离子质量分数随距离变化

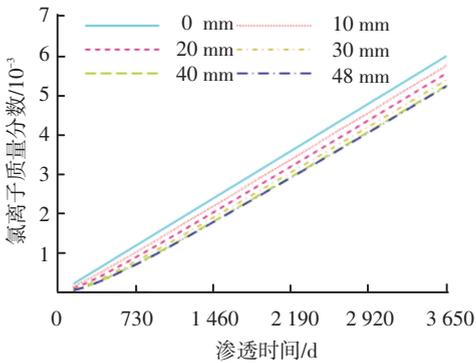
图 9 双向氯离子侵蚀计算结果



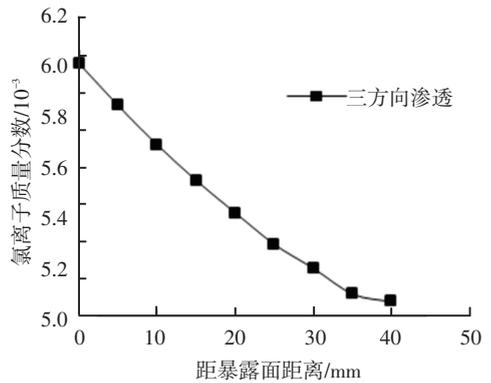
(a) 梁截面的氯离子质量分数分布



(b) 梁长方向氯离子质量分数分布



(c) 氯离子质量分数随时间变化



(d) 氯离子质量分数随距离变化

图 10 三方向氯离子侵蚀计算结果

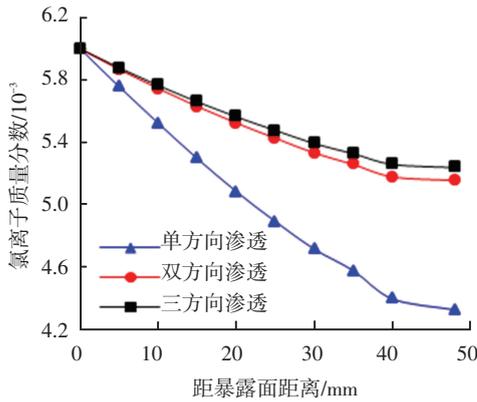


图 11 不同方向侵蚀的结果对比

### 3 结 论

1) 数值模拟程序所得氯离子质量分数与试验结果非常接近, 总体误差仅为  $4.73 \times 10^{-7}$ , 可以认为所使用的非饱和混凝土氯离子传输的数值模拟方法有效. 数值模拟结果与氯离子传输理论模型结果吻合也较好, 总体误差仅为  $3.91 \times 10^{-7}$ .

2) 钢筋混凝土梁中距暴露面越远的位置氯离子质量分数越小, 这一趋势与钢筋混凝土梁暴露在滨海环境中侧面的数目无关, 单向侵蚀时混凝土中氯离子质量分数衰减速度最快, 双向侵蚀其次, 三向侵蚀时氯离子质量分数衰减速度最慢.

3) 钢筋混凝土梁在遭受多向氯离子侵蚀时, 其箍筋及纵筋表面氯离子质量分数比单向侵蚀时大, 说明对于钢混构件中某根钢筋来说, 受侵蚀相邻截面越多, 钢筋越容易锈蚀, 且距离越近的截面对其影响越大.

4) 氯离子从左侧、右侧、下侧 3 个方向侵蚀和从右侧、下侧两个方向侵蚀的计算结果有一定差别, 三向侵蚀的计算结果较大, 原因是在 10 a 的侵蚀

时间内, 左侧氯离子有部分通过梁宽的方向传输至右侧, 因而右侧氯离子质量分数得以加大.

### 参考文献

- [1] 我国环境腐蚀问题调查[R]. 北京: 中国工程院, 2002.
- [2] 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.
- [3] 王传坤, 高祥杰, 赵羽习, 等. 混凝土表层氯离子含量峰值分布和对流区深度[J]. *硅酸盐通报*, 2010, 29(2): 262-267.
- [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] ABABNEH A, BENBOUDJEMA F, XI Y. Chloride penetration in nonsaturated concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(2): 183-191.
- [6] SUWITO A, XI Y. Parallel finite element method for coupled chloride moisture diffusion in concrete [J]. *International Journal of Numerical Analysis and Modeling*, 2006, 3(4): 481-503.
- [7] 王显利. 氯离子侵蚀的钢筋混凝土结构锈蚀损伤[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [8] 赵翔宇. 基于氯离子渗透的混凝土结构耐久性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [9] 冷冰. 混凝土中氯离子浓度分布预测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [10] ANDRADE C, WHITING D. A comparison of chloride ion diffusion coefficients derived from concentration gradients and non-steady state accelerated ionic migration [J]. *Materials and Structures*, 1996, 29(8): 476-484.

(编辑 赵丽莹)