

界面裂纹对混凝土氯离子扩散系数的影响

陈小荣¹, 毛科峰², 郑建军²

(1. 丽水市建筑工程施工图审查中心, 浙江 丽水 323000; 2. 浙江工业大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要 将混凝土看成是一种由骨料、界面和水泥石基体所组成的三相复合材料, 平行界面裂纹位于骨料表面, 据此构建出圆形单元细胞模型, 并采用推进前沿法尽可能准确地剖分单元细胞, 然后应用有限元法获得混凝土氯离子扩散系数的数值解。通过与已有实验结果的比较, 初步验证了文中数值方法的有效性, 并定量评价了混凝土细观结构对氯离子扩散系数的影响。数值计算表明, 混凝土氯离子扩散系数随裂纹张开角、界面厚度的增大而增大, 但随着骨料直径的增大而减小, 且骨料级配对混凝土氯离子扩散系数有很大的影响。

关键词 混凝土; 界面裂纹; 氯离子扩散系数; 有限单元法

中图分类号: TU528.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2007)04-0030-04

Effect of interfacial cracks on chloride diffusion coefficient of concrete//CHEN Xiao-rong¹, MAO Ke-feng², ZHENG Jian-jun² (1. Audit Center of Building Engineering Drawings of Lishui, Lishui 323000, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Concrete was considered as a three-phase composite material, consisting of aggregate, interfacial transition zone (ITZ) and cement paste, with interfacial cracks located on the aggregate surfaces, and thus a circular unit cell model was developed. Since the ITZ thickness was much smaller than the aggregate size, the advancing front method was adopted to divide the unit cell as accurately as possible, and the finite element method was then used to obtain the numerical solution to the chloride diffusion coefficient of concrete. The validity of the numerical method proposed herein was preliminarily verified with the experimental data, and the effect of the mesostructure of concrete on the chloride diffusion coefficient was evaluated quantitatively. Based on the numerical result, it is found that the chloride diffusion coefficient of concrete increases with the increase of the interfacial crack angle and ITZ thickness, but decreases with the increase of aggregate diameter, and that the aggregate gradation is of significant influence on the chloride diffusion coefficient of concrete.

Key words: concrete; interfacial crack; chloride diffusion coefficient; finite element method

钢筋锈蚀是沿海混凝土结构性能逐步退化、导致最终倒塌的主要原因, 其主要特征是表面混凝土开裂、剥落和结构挠度过大。所以, 为了预测结构强度和刚度的退化规律, 必须先确定混凝土氯离子扩散系数, 为此, 各国学者对此做了大量卓有成效的研究, 取得了许多研究成果^[1-5]。但其中均没有考虑骨料和水泥石界面裂纹对氯离子扩散的影响。混凝土在浇筑成形过程中, 一方面由于水化热作用、泌水作用、骨料的无规则性和质量不均匀性等原因, 混凝土不可避免地存在着毛细孔和界面裂纹等初始缺陷; 另一方面, 由于干缩、温度收缩和外荷载作用, 导致水泥石和骨料间应变差异而形成界面裂纹。界面裂纹的存在对混凝土的物理和力学性能产生很大的影响, 虽然在定量评价界面裂纹对混凝土力学性能影响方面已经做

了许多工作^[6], 但是界面裂纹对混凝土氯离子扩散系数影响方面的工作还未见报道。作为尝试, 笔者对此进行探讨, 提出考虑平行界面裂纹时混凝土氯离子扩散系数的数值计算方法, 并定量评价各细观结构参数对混凝土氯离子扩散系数的影响。

1 单元细胞模型和有限元分析

由于界面的存在, 可以将混凝土看成是一种由骨料、界面和水泥石基体所组成的三相复合材料^[7]。在研究混凝土细观结构特性时, 通常假设混凝土中的骨料(如鹅卵石)是球形的^[8], 并随机地分布在混凝土中。这样, 当用一随机平面去截一混凝土单元时, 截面上的骨料呈圆形。在进行细观力学分析时, 通常选用如图 1 所示的圆形单元细胞来表示混凝土材料。

基金项目: 国家自然科学基金(50578147)

作者简介: 陈小荣(1964—), 女, 浙江丽水人, 高级工程师, 从事建筑工程设计及混凝土结构和材料研究。E-mail: cxxrlsts@126.com

每个细胞单元均由骨料、界面和水泥石三相组成,尽管各单元细胞的大小不尽相同,但各相组分的百分数保持不变。尽管混凝土中的骨料不会相互重叠,但当相邻骨料之间的表面距离小于两倍界面厚度时,它们的界面层将部分重叠。正是由于这种界面重叠的复杂性和随机性,使得界面面积百分数的准确计算十分困难。本文采用文献 9 提出的蒙特卡罗数值模拟方法确定任意骨料级配下的界面面积百分数 A_i 。圆形单元细胞的几何尺寸如图 2 所示,图中,中央部分半径为 a 的圆表示骨料,骨料周围厚度为 $b-a$ 的圆环表示界面层,厚度为 $c-b$ 的圆环表示水泥石基体。这里仅考虑与 y 方向平行的界面裂纹,并用 α 表示裂纹的张开角。为了使该圆形单元细胞与实际混凝土等效, a 、 b 和 c 应满足如下关系:

$$\frac{a}{c} = \sqrt{A_a} \quad \frac{b}{c} = \sqrt{A_a + A_i} \quad (1)$$

式中: A_a 为骨料面积百分数。

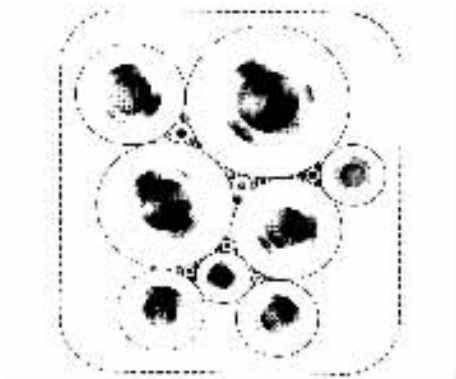


图 1 用圆形单元细胞表示混凝土

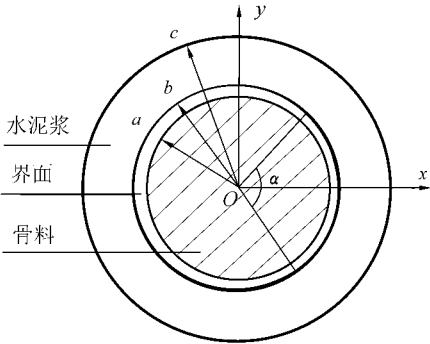


图 2 圆形单元细胞

在应用有限单元法计算混凝土氯离子扩散系数时,首先要对圆形单元细胞进行剖分,实现复杂几何图形的高精度单元剖分是有限元模拟成功的关键。考虑到图 2 中的界面厚度一般远小于骨料直径,故采用几何图形模拟能力较强的推进前沿法^[10],其剖分结果如图 3 所示。一旦生成三角形单元网格后,就可应用有限单元法进行分析。由于混凝土界面裂纹均平行于 y 方向,这属于正交各向异性问题,即 x 方向的混凝土氯离子扩散系数 D_{cx} 与 y 方向的混

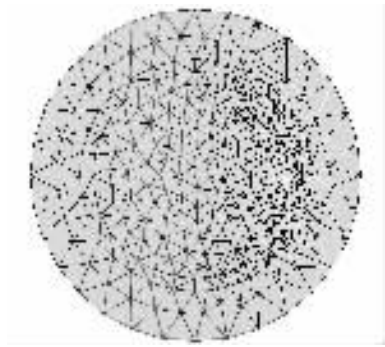


图 3 三角形单元网格

土氯离子扩散系数 D_{cy} 并不相等。由细观力学理论^[11]可知,在计算 k ($k = x, y$) 方向的混凝土氯离子扩散系数 D_{ck} ($k = x, y$) 时,应在图 2 所示的圆形单元细胞边界上施加如下形式的边界条件:

$$C = \frac{C_{1k} - C_{2k}}{2c}k + \frac{C_{1k} + C_{2k}}{2} \quad (k = x, y) \quad (2)$$

式中: C 为氯离子浓度; C_{1k} 、 C_{2k} 分别为边界上 k ($k = x, y$) 方向的最大和最小氯离子浓度。根据上述边界条件,通过有限元分析可求得单元细胞中各点 k ($k = x, y$) 方向的氯离子通量 J_{yk} ,则 k ($k = x, y$) 方向的平均氯离子通量为

$$\bar{J}_{yk} = \frac{1}{S_0} \iint_{S_0} J_{yk} dS \quad (k = x, y) \quad (3)$$

式中: S_0 为单元细胞的面积。由 Fick 第二定律可知, k ($k = x, y$) 方向混凝土氯离子扩散系数 D_{ck} ($k = x, y$) 为

$$D_{ck} = - \frac{2c}{C_{1k} - C_{2k}} \bar{J}_{yk} \quad (k = x, y) \quad (4)$$

2 实验验证

如果能用带界面裂纹混凝土的氯离子扩散系数实验数据来直接验证上述方法的有效性,那是最理想的,但是目前尚未见到此类报道,可能原因是完成这种实验难度太大,因为目前还没有比较合适的方法或措施控制混凝土浇筑过程使得所有的界面裂纹都平行于 y 方向,而且具有相同的张开角。因此笔者选择 Yang 等的砂浆实验结果进行比较^[3],由于 Yang 等的砂浆试件既不受任何约束,也不受任何外荷载作用,可以近似认为不存咱界面裂纹,相当于 $\alpha = 0$ 的极限情形。在这种情况下,混凝土为各向同性介质,即 $D_{cx} = D_{cy} = D_c$ (各向同性混凝土的氯离子扩散系数)。因此,如果本文数值方法能与 Yang 等的实验结果吻合,在某种程度上也间接验证了本文数值方法的合理性和可靠性。

Yang 等为了研究骨料面积百分数对砂浆氯离

子扩散系数的影响,浇注并试验了不同骨料面积百分数的砂浆试件,通过试验获得砂浆氯离子扩散系数与骨料面积百分数之间的定量关系,以进一步评价骨料和界面对砂浆氯离子扩散系数的影响。在他们的实验中,砂浆的水灰比为 0.4,最大骨料直径为 9.5 mm,骨料面积百分数分别为 0%、10%、20%、30%、40%,所测得的砂浆氯离子扩散系数与骨料面积百分数之间的关系如图 4 所示。由于界面厚度一般介于 0.01 ~ 0.05 mm 之间^[7],在验证数值方法时取其均值,即 $h = 0.03$ mm。相对于水泥石和界面来说,骨料是不可渗透的,可取骨料的氯离子扩散系数为零。水泥石基体的氯离子扩散系数等于骨料面积百分数为零时所测得的实际砂浆的氯离子扩散系数,即 $D_m = 2.030 \times 10^{-8}$ cm²/s。界面氯离子扩散系数的测量目前十分困难,本文利用骨料面积百分数 $A_a = 0.4$ 时所测得的砂浆氯离子扩散系数进行数值反演求得 $D_i = 29.354 \times 10^{-8}$ cm²/s。有了 h 、 D_m 和 D_i ,就可以应用上面所提出的有限单元法确定任意骨料面积百分数时的砂浆氯离子扩散系数,其计算结果如图 4 所示。进一步数值分析表明,当骨料面积百分数 A_a 分别为 10%、20%、30% 时,本文数值解与文献[3]实验结果之间的相对误差分别为 1.83%、0.70%、2.25%,均小于 3%。据此认为,本文方法的有效性得到了初步证实。

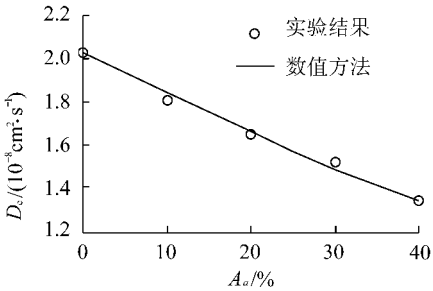


图 4 与 Yang 等的实验结果比较

3 影响因素分析

本文数值方法的有效性得到实验的初步验证后,有必要进一步定量分析混凝土细观结构对氯离子扩散系数的影响。在上面的实验验证中采用界面厚度的均值,因而首先要分析界面厚度变化对混凝土氯离子扩散系数的影响,其次裂纹对混凝土氯离子扩散系数的影响主要体现在最大裂纹长度和裂纹密度(单位面积的裂纹数),而最大裂纹长度与裂纹张开角直接相关,裂纹密度则取决于骨料最大直径和骨料级配,所以,影响因素分析还应当包括裂纹张开角、骨料最大直径和骨料级配 3 个方面。在下面的分析中,令 $D_m = 2.030 \times 10^{-8}$ cm²/s, $D_i = 29.354 \times 10^{-8}$ cm²/s,另

外,根据 Pivonka 等的研究结果^[12],界面裂纹中的氯离子扩散系数 $D_c = 1.07 \times 10^{-6}$ cm²/s。

a. 考虑富勒(Fuller)级配骨料^[8],令最大骨料直径 $D_{max} = 16$ mm,界面厚度 $h = 0.03$ mm,当 α 分别取 0°、90°、180° 时, D_{cx} 和 D_{cy} 与骨料面积百分数之间的关系如图 5 和图 6 所示。从这两个图可以看出,对于给定的骨料面积百分数, D_{ex} 和 D_{ey} 均随着 α 的增大而增大,这是由于界面裂纹的氯离子扩散系数远大于界面层和水泥石的氯离子扩散系数,增大界面裂纹的张开角有利于氯离子扩散。当 $A_a = 0.8$ 时, $\alpha = 180^\circ$ 时的混凝土氯离子扩散系数比 $\alpha = 0^\circ$ 时的氯离子扩散系数分别增大 28% 和 30%。这里值得注意的是,从图 5 可以发现,当 α 从 0° 增大到 90° 时, x 方向的混凝土氯离子扩散系数增大不明显,而当 α 从 90° 增大到 180° 时, x 方向的混凝土氯离子扩散系数增大比较明显。对这种现象可以解释如下:从定性的角度看,由于裂纹的氯离子扩散系数远大于其他相的氯离子扩散系数,因此某一方向的混凝土氯离子扩散系数的增大必然正比于裂纹在该方向的投影长度,即裂纹在该方向的投影长度越长,该方向的混凝土氯离子扩散系数增大越明显,从图 2 可以看出,裂纹在 x 方向的投影长度为 $a(1 - \cos \frac{\alpha}{2})$,很显然,当 α 从 0° 增加到 90° 时,裂纹在 x 方向的投影长度增量近似为 $0.293a$,而当 α 从 90° 增大到 180° 时,裂纹在 x 方向的投影长度增量近似为 $0.707a$ 。因此,当张开角在 0° ~ 90° 方向时,裂纹对 x 方向混凝土

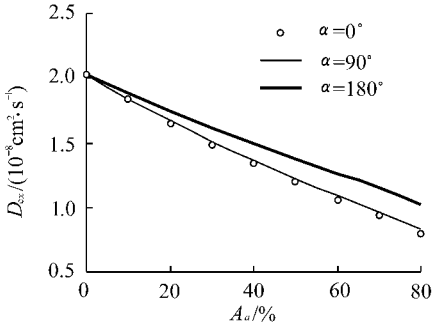


图 5 裂纹张开角对 D_{cx} 的影响

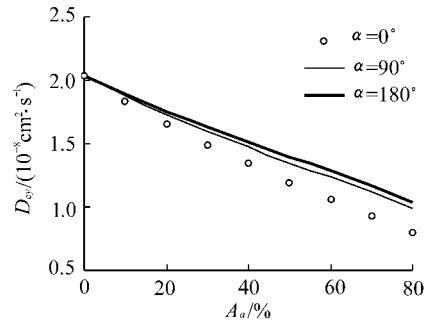


图 6 裂纹张开角对 D_{cy} 的影响

土氯离子扩散系数的影响不明显,而当张开角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 方向时,裂纹对 x 方向混凝土氯离子扩散系数的影响比较明显,这与图 5 的结果相吻合。

b. 考虑富勒级配骨料,令最大骨料直径 $D_{\max} = 16\text{ mm}$, $\alpha = 90^\circ$,当 h 分别取 0.01 mm , 0.03 mm , 0.05 mm 时, D_{cx} 和 D_{cy} 与骨料面积百分数之间的关系如图 7 和图 8 所示。从这两个图可以看出,增大界面厚度可大幅度地增大混凝土氯离子扩散系数,这是因为界面的氯离子扩散系数大于水泥石基体的氯离子扩散系数。当 $A_a = 0.8$ 时, $h = 0.05\text{ mm}$ 时的混凝土氯离子扩散系数比 $h = 0.01\text{ mm}$ 时的氯离子扩散系数分别增大 156% 和 176% 。

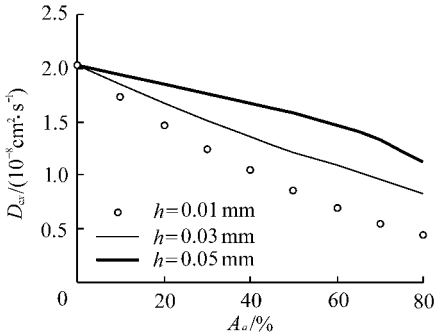


图 7 界面厚度对 D_{cx} 的影响

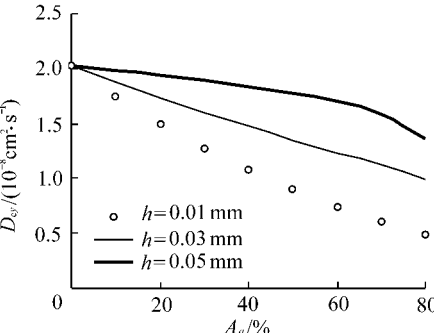


图 8 界面厚度对 D_{cy} 的影响

c. 考虑富勒级配骨料,令 $\alpha = 90^\circ$, $h = 0.03\text{ mm}$, 骨料最大直径 $D_{\max}$ 分别取为 4 mm , 16 mm , 32 mm , D_{cx} 和 D_{cy} 与骨料面积百分数之间的关系如图 9 和图 10 所示。从这两个图可以看出,氯离子扩散系数随着最大骨料直径的减小而增大,这是因为界面面积百分数与单位面积的骨料周长成正比,因此减小最大

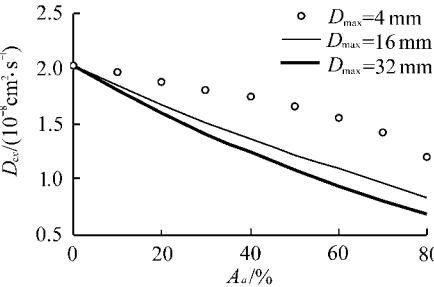


图 9 最大骨料直径对 D_{cx} 的影响

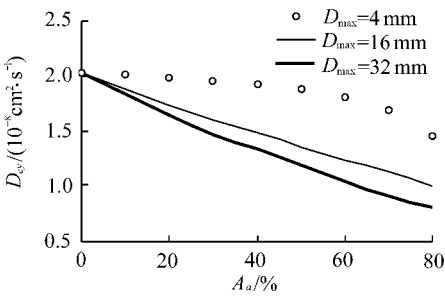


图 10 最大骨料直径对 D_{cy} 的影响

骨料直径会增大单位面积的骨料周长,从而增大界面面积百分数。当 $A_a = 0.8$ 时, $D_{\max} = 4\text{ mm}$ 时的混凝土氯离子扩散系数比 $D_{\max} = 32\text{ mm}$ 时的氯离子扩散系数分别增大 76% 和 82% 。

d. 取 $D_{\max} = 16\text{ mm}$, $\alpha = 90^\circ$, $h = 0.03\text{ mm}$,分别考虑富勒级配骨料和等体积级配骨料(EVF),计算结果如图 11 和图 12 所示。从这两个图可以看出,等体积级配骨料混凝土的氯离子扩散系数大于富勒级配骨料混凝土的氯离子扩散系数,这主要是在等体积级配骨料混凝土中包含更多的小骨料^[8]。

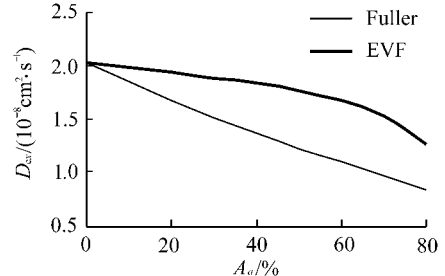


图 11 骨料级配对 D_{cx} 的影响

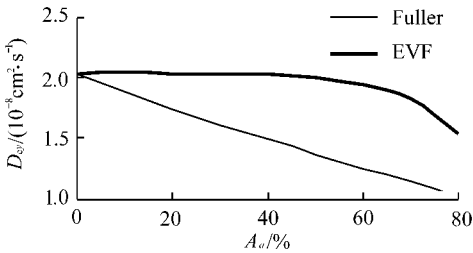


图 12 骨料级配对 D_{cy} 的影响

4 结 论

a. 将混凝土看成是一种由骨料、界面和水泥石基体所组成的三相复合材料,并构建出圆形单元细胞模型。在此基础上提出了混凝土氯离子扩散系数预测的数值方法,并用文献 3 的实验结果进行了初步验证。

b. 计算结果表明,混凝土氯离子扩散系数随着裂纹张开角、界面厚度的增大而增大,但随着骨料直径的增大而减小,骨料级配对混凝土氯离子扩散系数有很大的影响。

(下转第 54 页)

表 2 陕西东雷抽黄(I)灌区东雷二级站排沙漏斗工程截沙率的计算

组号	$Q_i/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	r/m	d_{50}/mm	$\omega/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	Z_h/m	h_p/m	K	$\frac{Z_h}{h_p}$	$\frac{Q_u}{Q_i}\left(\frac{Q_u}{Q_i}\right)^{0.29}$	i	$i^{0.0621}K^{0.0764}\left(\frac{Z_h}{h_p}\right)^{0.32}$	T	S	Y	$P/\%$					
															计算值	原型观测值	相对误差			
7	2.401	8	0.113	1.096	1	1.112	1.226	0.899	0.0433	0.4023	0.1	0.867	1.0157	0.967	0.011	2.491	0.342	85.271	81.46	4.68
8	1.255	8	0.131	1.303	1	1.060	1.690	0.943	0.1076	0.5238	0.1	0.867	1.0409	0.982	0.006	2.252	0.464	100.000	93.74	6.68
9	2.586	8	0.120	1.177	1	1.120	1.398	0.893	0.0476	0.4134	0.1	0.867	1.0259	0.964	0.012	2.518	0.355	89.258	84.53	5.60
10	1.599	8	0.100	0.947	1	1.075	0.937	0.930	0.0738	0.4696	0.1	0.867	0.9951	0.977	0.008	2.342	0.396	92.681	93.62	-1.00
11	1.056	8	0.125	1.234	1	1.050	1.528	0.952	0.1316	0.5554	0.1	0.867	1.0329	0.985	0.005	2.188	0.490	100.000	98.37	1.66
12	2.563	8	0.118	1.154	1	1.117	1.348	0.895	0.0515	0.4231	0.1	0.867	1.0231	0.965	0.012	2.515	0.362	91.061	91.40	-0.37
13	1.728	8	0.132	1.315	1	1.093	1.718	0.915	0.0799	0.4805	0.1	0.867	1.0422	0.972	0.008	2.368	0.422	99.911	97.21	2.78

4 结 语

通过量纲分析,结合室内模型试验和数值分析方法,推导出排沙漏斗截沙率的计算公式,并利用实际工程的原型观测资料对该计算公式进行了验证,验证结果表明公式(8)的计算误差不超过±5%,可供排沙漏斗工程截沙率计算参考。

参考文献:

[1]周著,邱秀云,侯杰,等.漏斗式全沙排沙技术及其应用[J].水科学进展,2001,12(1):95-98.
[2]唐毅.排沙漏斗三维涡流水流结构的研究[D].成都:四川联合大学,1996:15-78.

(上接第33页)

参考文献:

[1]GARBOCZI E J,BENTZ D P. Analytical formulas for interfacial transition zone properties[J]. Advanced Cement Based Materials,1997,1(3):99-108.
[2]DELAGRAVE A,BIGAS J P,OLLIVIER J P,et al. Influence of the interfacial zone on the chloride diffusivity of mortars[J]. Advanced Cement Based Materials,1997,1(3):86-92.
[3]YANG C C,SU J K. Approximate migration coefficient of interfacial transition zone and the effect of the aggregate content on the migration coefficient of mortar[J]. Cement and Concrete Research,2002,32(10):1559-1565.
[4]CARE S. Influence of aggregate on chloride diffusion coefficient into mortar[J]. Cement and Concrete Research,2003,33(7):1021-1028.
[5]ZHENG Jian-jun,XU Shi-lang,ZHOU Xin-zhu. Effect on interfacial transition zone on chloride diffusion coefficient[J]. Key Engineering Materials,2006,302:167-174.
[6]NEMAT-NASSER S,HORI M. Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.,1993:3-8.
[7]ZHENG Jian-jun,LI Chun-qing,ZHOU Xin-zhu. Characterization of microstructure of interfacial transition zone in concrete[J]. ACI Materials Journal,2005,102(4):265-271.

[3]王顺久.漏斗涡流特性研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,1997:20-45.
[4]周著,唐毅,吴持恭.带悬板排沙漏斗的三维贴体网格生成方法[J].新疆农业大学学报,1996,19(1):4-7.
[5]中国水利学会泥沙专业委员会.泥沙手册[M].北京:中国环境科学出版社,1998:58-60.
[6]李琳.排沙漏斗结构优化研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2005:40-62.
[7]王顺久,周著.漏斗式全沙排沙设施模型试验及原型观测[J].水力发电,2000(7):1-4.
[8]徐燕,邱秀云,周著,等.排沙漏斗应用于自来水供水工程的试验研究[J].新疆农业大学学报,2005,28(3):63-67.

(收稿日期:2006-09-08 编辑:熊水斌)

[8]ZHENG Jian-jun,LI Chun-qing. Three-dimensional aggregate density in concrete with wall effect[J]. ACI Materials Journal,2002,99(6):568-575.
[9]郑建军,周欣竹,姜璐,等.混凝土界面面积分数和渗流阈值及其应用(Ⅰ):计算机模拟[J].建筑材料学报,2006,9(6):266-273.
[10]GEORGE P L. Automatic mesh generation: application to finite element method[M]. Chichester: John Wiley & Sons,1991:1-10.
[11]杜善义,王彪.复合材料细观力学[M].北京:科学出版社,1998:5-14.
[12]PIVONKA P,HELLMICH C,SMITH D. Microscopic effects on chloride diffusivity of cement pastes: a scale-transition analysis[J]. Cement and Concrete Research,2004,34(12):2251-2260.

(收稿日期:2006-09-05 编辑:马敏峰)

