

基于质量扩散理论再生骨料混凝土 水分迁移有限元分析

郭远臣, 孙可伟, 孙岩

(昆明理工大学 固体废弃物资源化国家工程研究中心, 云南 昆明 650093)

摘要: 采用 ABAQUS 有限元软件质量扩散模块, 对再生骨料混凝土材料在标准干燥条件(环境湿度 $H = 60\%$ 下, 温度 $T = 20^\circ\text{C}$) 内部水分迁移进行了试验研究和有限元分析. 研究表明: 计算值和试验结果吻合得较好, 为后续的再生骨料混凝土干缩应力的分析打下了初步基础; 随着干燥龄期的发展, 水分的蒸发首先从再生骨料混凝土表面开始, 并迅速达到平衡值, 然后逐渐扩展到再生骨料混凝土的内部, 扩展的速度极其缓慢, 最终达到与环境湿度平衡, 而且在扩散过程中, 水分浓度呈梯度分布; 粉煤灰和膨胀剂的添加均减小了再生骨料混凝土水分扩散的速率.

关键词: 再生骨料混凝土; 质量扩散; 水分蒸发; 有限元分析; 混凝土开裂

中图分类号: TU 502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)03-0038-07

Finite Element Analysis of Moisture Migration of Recycled Aggregate Concrete Based on Mass Diffusion Theory

GUO Yuan-chen, SUN Ke-wei, SUN Yan

(National Engineering Research Center of Waste Resource Recovery,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract Using the mass diffusion module of ABAQUS, the experimental study and finite element analysis of moisture migration behavior of recycled aggregate concrete are carried out under the standard drying conditions (Ambient humidity $H = 60\%$; Temperature $T = 20^\circ\text{C}$). The results indicate that the calculated value matches well with the experiment results, which provides a basis for the study of the drying shrinkage stress in recycled aggregate concrete. As the dry age grows, the evaporation of water begins from the surface of recycled aggregate concrete first and reaches the equilibrium value rapidly, then the evaporation gradually extends to the interior, but quite slowly, and eventually reaches the equilibrium value of the ambient humidity. In this diffusion process, the concentration of moisture presents gradient distribution. The addition of fly ash and expansive agent reduces the diffusion rate of moisture in recycled aggregate concrete.

Key words recycled aggregate concrete; mass diffusion; moisture evaporation; finite element analysis; concrete cracking

0 引言

再生骨料混凝土主要指利用建筑废弃物破碎加工而成的再生骨料, 部分或全部代替天然骨料制备而成的新混凝土. 干缩变形是混凝土材料的一个重要特征, 是引起水泥混凝土开裂最主要的原因之一, 因此, 干缩对混凝土结构的长期性能有着十分重要的影响. Hasaba S^[1], 王武祥^[2], Katz A^[3], Debb F^[4], Courard

收稿日期: 2010-03-18 基金项目: 国家财政部产业技术成果转化专项基金计划项目(财建[2007]475号).

作者简介: 郭远臣(1982-), 男, 在读博士. 主要研究方向: 建筑废弃物规模化、资源化技术.

$L^{[5]}$, Domingo-Cabo A^[6], Evangelista L^[7]等国内外大量试验研究结果均表明, 再生骨料混凝土 (RC) 收缩变形较天然骨料混凝土大, 普遍认为, 这主要是因为再生骨料混凝土水分蒸发速率大于同条件下天然骨料混凝土水分蒸发速率所致. 因此, 研究水分迁移对研究再生骨料混凝土收缩变形机理有着及其重要的作用. 目前, 国内外有关学者已对混凝土中的水分运移机理进行了一定的研究^[8-9], 但对再生骨料混凝土中水分扩散机理鲜有报道, 特别是对再生骨料混凝土水分迁移有限元数值模拟尚未见有报道. 现有研究一般只考虑再生骨料混凝土在完全水化的基础之上, 并没有考虑水泥水化所需的结合水, 也没有考虑外加剂掺量和再生骨料取代率对再生骨料混凝土水分迁移的影响.

1 水分迁移数学模型

可以利用水分流速表示混凝土内部水分的迁移过程^[8]:

$$v_{wd} = D_{wd} \frac{\partial R}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: v_{wd} 为混凝土内部水分流速, mm/d; D_{wd} 为水分扩散系数, mm^2/d ; R 为孔隙湿度, %, 可表示为式 (2):

$$R = \left[\frac{w}{w_s} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: w 为混凝土中的含水量, g/mm^3 ; w_s 为饱水条件下混凝土含水量, g/mm^3 . 随着干燥龄期的发展, t 时刻时, 距离表面 x 处的湿度 R 可用下式表示^[10]:

$$R = \left(1 + \lambda_1 - \frac{\lambda_2}{(x/(2\sqrt{t}) + \lambda_3)^2} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为常数, 由实验结果拟合而得 (见表 1).

式 (4) 中, A 表示式 (3) 中孔隙湿度 R 所对应断面面积:

$$A = 2 \int_{x=0}^{x=Z/2} R dx = 100Z \left[1 + \lambda_1 + \lambda_2 \left(\frac{16t}{Z^2 + 4\lambda_3 Z \sqrt{t}} \right) + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right) \left(-\frac{4\sqrt{t}}{Z} \right) \right] \quad (4)$$

式中: Z 为所测试件厚度, mm. A 值 (mm^2) 可根据所测试件重量 w 和 w_s 由式 (5) 表示:

$$A = \frac{V_e}{l} = \frac{W_s - W}{100\rho_w} \quad (5)$$

式中: l 为试样长度, 100 mm; V_e 为混凝土体积, mm^3 ; $W_s - W$ 为水损失质量, g; ρ_w 为水的密度, g/mm^3 .

将 Boltzmann 变量 φ ($\varphi = x/\sqrt{t}$) 引入式 (3), 得:

$$R = \left(1 + \lambda_1 - \frac{\lambda_2}{(\varphi/2 + \lambda_3)^2} \right) \times 100\% \quad (6)$$

扩散系数可根据式 (7) 计算而得:

$$D_{wd} \left(R = R_2 \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi}{dR} \right)_{R_2} \cdot \int_{R_2}^{R=100\%} \varphi dR \quad (7)$$

2 试验方案

2.1 主要原材料

1) 建筑废弃物

试验用建筑废弃物来自昆明市区建筑拆迁所产生的建筑废弃物.

2) 试验用水泥: 滇峨牌 P·S (矿渣硅酸盐水泥) 32.5 产地, 玉溪.

3) 试验用水: 昆明市自来水.

4) 试验用高效减水剂 (FDN): 天艺牌 FDN-2 高效减水剂; 产地: 昆明嘉生混凝土外加剂销售有限责任公司.

5) 试验用膨胀剂 (UEA): 百强牌 UEA-II 型膨胀剂; 产地: 昆明百强建筑材料厂.

6) 试验用 I 级粉煤灰 (FA): 产地为云南省阳宗海发电厂干排灰。

2.2 试验方法

利用表 1 的配合比, 采用混凝土 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 试模制备若干块试件, 将试件在标准养护条件下养护 3 d, 然后将养护好的试件切割成厚度分别为 5 mm、10 mm、20 mm、30 mm、50 mm、100 mm 的试块, 试块共备用两组, 每组各一块, 其中, 一组在 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 条件下烘干至恒重, 称量试块恒重时质量 w_d , 另一组移入标准干缩室, 称量不同干燥时间 t 试块质量 m 。根据水分迁移模型计算需要, 还需称量各试块饱和面干含水量 w_s , 此外, 为保证参数选取的准确性和合理性, 在进行上述称量前, 需在饱和面干状态下, 用环氧树脂分别密封每个试样的 4 边^[10], 以保证水分仅在试块上下表面损失。

表 1 验证试验配合比设计表

Tab 1 Mix design table of verification experiment

试验项目	强度等级	水泥 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	RCA / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂率 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水灰比	减水剂 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	膨胀剂 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
GSC20	C20	299	970	700	200	0.42	0.67	1.50	-	-
GSC30-1	C30	426	1000	560	200	0.36	0.47	2.13	-	-
GSC30-2	C30	426	1000	560	200	0.36	0.47	2.13	34.1	-
GSC30-3	C30	426	1000	560	200	0.36	0.43	2.34	-	42.6
GSC50	C50	476	950	510	200	0.35	0.36	2.38	27.8	80

2.3 试验结果与讨论

通过多组实验值, 利用式 (3) 与式 (4), 采用回归方法即可确定常数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 (见表 2), 根据式 7 可计算再生骨料混凝土各配方扩散系数如表 2 所示。

表 2 再生骨料混凝土水分扩散系数计算表

Tab 2 Calculation table of moisture diffusivity of RC

序号	项目	初始浓度 $/(10^{-7} \text{g} \cdot \text{mm}^{-3})$	溶解度	平衡浓度 $/(\text{g} \cdot \text{mm}^{-3})$	常数值 λ 值 $/10^{-2}$			浓度 $/(10^{-7} \text{g} \cdot \text{mm}^{-3})$	扩散系数 $/(\text{mm}^2 \cdot \text{d}^{-1})$
					λ_1	λ_2	λ_3		
1	GSC20	1.987	0.091	1×10^{-9}	0.79	4.9	45	0.893 61	18.465 5
								1.035 63	27.176 1
								1.316 82	44.445 2
								1.456 41	51.009 2
								1.821 13	68.269 6
								1.954 06	72.833 0
2	GSC30-1	1.856	0.086	1×10^{-9}	0.73	5.6	39	0.826 53	14.692 7
								0.843 37	16.636 8
								1.061 19	27.103 6
								1.219 02	42.801 3
								1.378 02	44.813 9
								1.802	61.568 9
3	GSC30-2	1.817	0.0813	1×10^{-9}	0.71	5.7	34	0.828 4	8.642 7
								0.845 3	9.242 7
								1.063 6	16.426 4
								1.221 8	22.750 8
								1.381 2	24.896 6
								1.806 1	36.005 2

(续表 2)

序号	项目	初始浓度 $/(10^{-7} \text{ g} \cdot \text{ mm}^{-3})$	溶解度	平衡浓度 $/(\text{ g} \cdot \text{ mm}^{-3})$	常数值 λ 值 $/10^{-2}$			浓度 $/(10^{-7} \text{ g} \cdot \text{ mm}^{-3})$	扩散系数 $/(\text{ mm}^2 \cdot \text{ d}^{-1})$
					λ_1	λ_2	λ_3		
4	GSC30-3	1.821	0.082	1×10^{-9}	0.81	3.6	31	0.8274	7.7330
								0.8443	8.7104
								1.0624	14.5718
								1.2204	22.5270
								1.3795	23.9647
								1.8040	33.2805
5	GSC50	1.926	0.091	1×10^{-9}	0.91	6.7	22	0.80808	13.9871
								1.0237	24.0019
								1.12889	27.8578
								1.47422	41.4392
								1.73111	47.2677
								1.91013	52.9632

3 有限元分析

3.1 有限元分析模型的建立

水分迁移几何模型建立所选取截面如图 1(a)所示, 基于结构和初始水分浓度分布的对称性, 只取模型的 1/4 进行分析 (见图 1(a)阴影部分), 部件建立如图 1(b)所示. 水分迁移模型网格划分单元类型定为 DCAX8, 网格划分如图 1(c)所示.

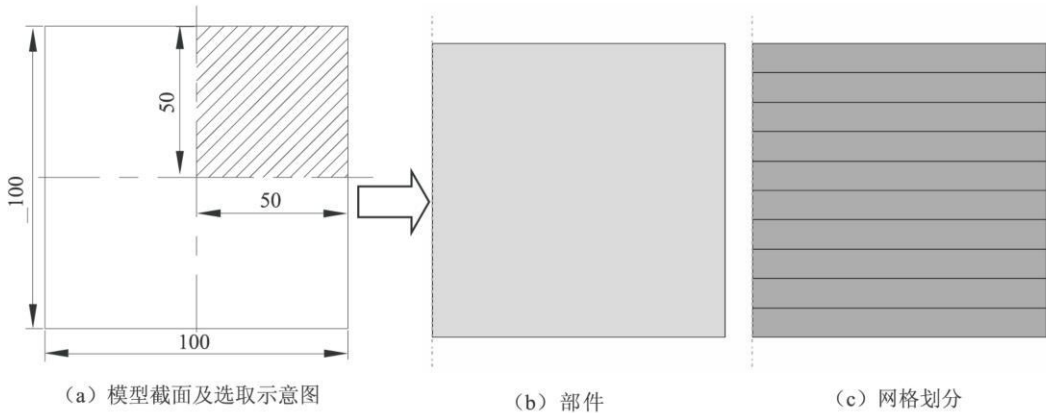


图1 水分迁移模型几何模型

Fig.1 Geometric model moisture migration model

3.2 有限元计算参数的确定

ABAQUS软件质量扩散遵循质量守恒定律:

$$\int_V \frac{dc}{dt} dV + \int_S J \cdot n dS = 0 \quad (8)$$

式中: c 为水在混凝土中浓度, g/mm^3 ; S 为混凝土截面积, mm^2 ; V 为截面积为 S 的混凝土体积, mm^3 ; n 为 S 面的外法线; J 为扩散物质的浓度场; $n \times J$ 是离开 S 面的通量.

结合式 7 可得 ABAQUS 软件质量扩散控制方程为:

$$J = -D \left[s \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \varphi \frac{\partial s}{\partial x} \right] \quad (9)$$

式中: φ 为归一化浓度 (Normalized Concentration, NC), 为模型基本变量, 其表达式为 $\varphi = \frac{c}{c_s}$ 常被认为是扩散物质发生扩散的驱动力; D 为水分扩散系数, mm^2/d ; s 为水在混凝土中溶解度; J 为扩散物质的浓度场.

式 (9)中需用到水在再生骨料混凝土中的浓度 c 和水在再生骨料混凝土中的溶解度 s 两个参数, 其计算公式分别如式 (10)、(11)所示, 计算结果见表 2

$$c = \frac{w - w_d}{V} \quad (10) \qquad s = \frac{w_s - w_d}{w_d} \quad (11)$$

式中: c 为水在混凝土中浓度, g/mm^3 ; s 为水在混凝土中溶解度; w 为干燥时间 t 时再生骨料混凝土试块重量, g w_d 为 $105^\circ C$ 烘干至恒重质量, g w_s 为试块饱和面干重量, g V 为试块体积, mm^3 .

模型初始浓度为再生骨料混凝土试块在饱水状态下水的浓度, 参数的选取见表 2

3.3 边界条件的设定

对本文水分扩散模型, 边界条件的设定为在再生骨料混凝土内部湿度与环境湿度相平衡状态下的平衡质量浓度 c_∞ , 为便于对比研究, 本文统一取值为 1×10^{-9} .

4 计算结果与讨论

暂以 GSC50 为例, 模型以底面为零高度线, $+Y$ 方向高度值 (厚度) 为正 (如图 2 所示), 计算结果如图 3 图 4 所示.

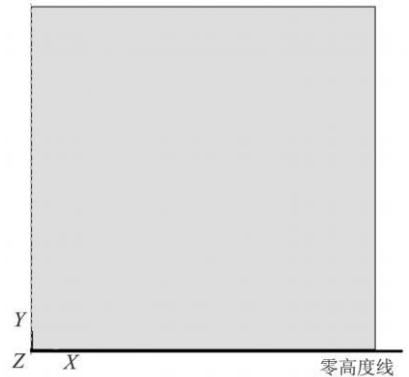


图2 模型X-Y坐标
Fig.2 X-Y coordinates of the model

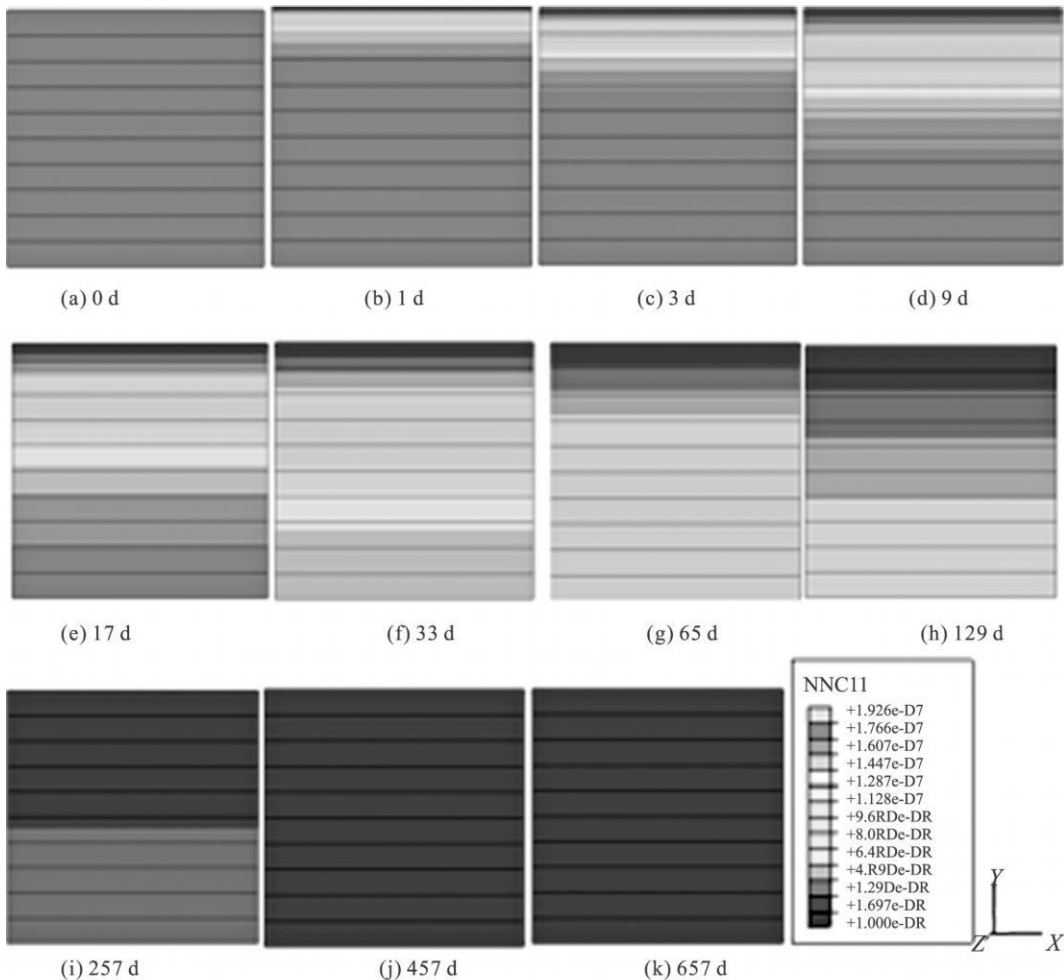


图3 GSC50水分浓度场
Fig.3 Water concentration filed of GSC50

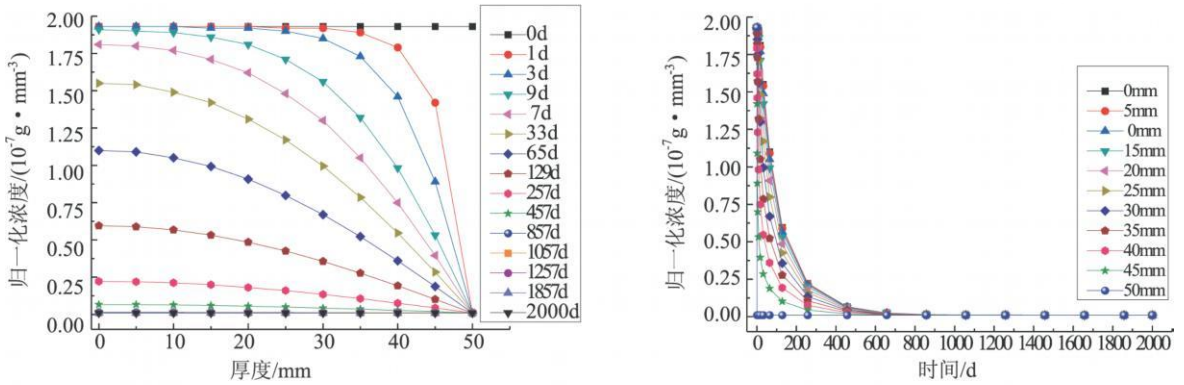


图4 不同厚度GSC50随干燥时间发展归一化浓度曲线
 Fig.4 Distribution curve of normalized concentration of different thickness GSC50 at different drying time

由图 3 图 4 可以看出, 随着干燥时间的发展, 不同配合比再生骨料混凝土中的水分分布状态不同. 但总的规律是一致的: 在干燥初期 ($t = 0$) 再生骨料混凝土内部水分均匀分布, 随着干燥龄期的发展, 水分的蒸发首先从再生骨料混凝土表面开始, 并迅速达到平衡值, 然后这个过程逐渐扩展到再生骨料混凝土的内部, 扩展的速度极其缓慢, 最终达到与环境湿度平衡, 而且在扩散过程中, 水分浓度呈梯度分布. 水分扩散主要集中在干燥早期, 特别是 33 d 以前, 随着干燥龄期的发展, 水分扩散速率变得越来越慢, 约 129 d 后, 水分扩散虽然仍在进行, 但扩散速度变得极小. 水分干燥扩展至 50 mm 厚度时大约需 33~ 65 d 时间, 在同样条件下, Ross A D^[11]通过天然骨料混凝土水分蒸发试验证明, 混凝土一个月的干燥深度达 75 mm, 10 年也不过只有 600mm 可见, 再生骨料混凝土水分扩散速率略大于同条件下的天然骨料混凝土, 从上述分析还可以看出, 干燥主要发生于再生骨料混凝土的表面层, 这就是混凝土干缩值在很大程度上取决于构件尺寸大小的最主要原因. 另外, 根据 GSC2Q GSC30- 1 GSC30- 2 GSC30- 3 GSC50 计算结果 (文中未列出) 还发现, 干燥扩展至 50 mm 厚度时, 不添加粉煤灰和膨胀剂的再生骨料混凝土 GSC30- 1 试块只用了 33 d 左右的时间, 而添加了膨胀剂的再生骨料混凝土 GSC30- 2 试块和添加了粉煤灰的再生骨料混凝土 GSC30- 3 试块却用了 65d 左右的时间. 可见, 粉煤灰和膨胀剂的添加均减小了再生骨料混凝土水分扩散的速率.

为了进一步验证有限元计算结果, 本文将 GSC50 50 mm 厚度再生骨料混凝土 (相当于模型的 25 mm) 计算结果和实验结果进行比较. 利用现有观测手段很难直接测量水分浓度场, 因此, 本文将计算结果按照公式 $\varphi = c/s$ 和公式 (10) 推导出的公式 12 换算成水分相对增量后再与实验结果进行比较, 比较结果如图 5 所示.

$$\Delta w = w_s - (w_d + V \cdot s \cdot \varphi \times 10^7) \quad (12)$$

式中: Δw 为 t 时刻水分扩散量, g ; w_s 为饱和面干质量, g ; w_d 为 105°C 烘干至恒重质量, g ; φ 为归一化浓度, $\times 10^{-7}$; c 为水在再生骨料混凝土中浓度, g/mm^3 ; s 为水在再生骨料混凝土中溶解度.

由图 5 可以看出, 实验值在干燥早期略高于计算值, 但总的来说, 实验值与计算值吻合程度较好. 这说明采用 ABAQUS 有限元软件的质量扩散模块能够很好地模拟分析再生骨料混凝土失水后的水分浓度场分布.

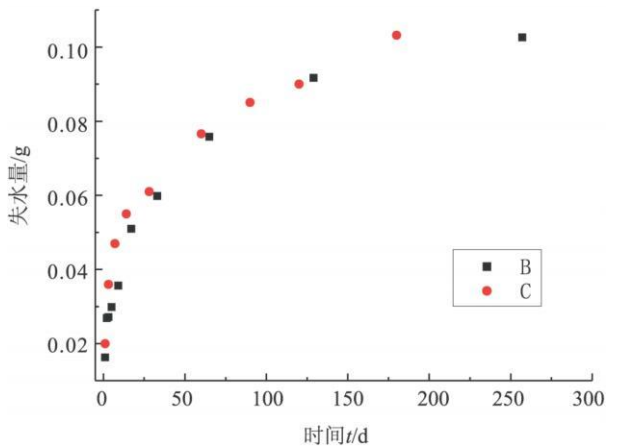


图5 失水量计算值与实验值对比
 Fig.5 Calculated value of water loss compared with experimental test value

5 结 论

1) 随着干燥龄期的发展, 水分的蒸发首先从再生骨料混凝土表面开始, 并迅速达到平衡值, 然后逐渐扩展到再生骨料混凝土的内部, 扩展的速度极其缓慢, 最终达到与环境湿度平衡, 而且在扩散过程中, 水分浓度呈梯度分布;

2) 粉煤灰和膨胀剂的添加均减小了再生骨料混凝土水分扩散的速率.

3) 采用 ABAQUS 有限元软件的质量扩散模块能够很好地模拟分析再生骨料混凝土失水后的水分浓度场分布.

参考文献:

- [1] Hasaba S, Kawamura M. Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregate [J]. *Trans of the Japan Concrete Institute*, 1981(3): 55.
- [2] 王武祥, 刘立, 尚礼忠, 等. 再生混凝土集料的研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2001(4): 9- 12.
- [3] Katz A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33 (5): 703- 711.
- [4] Debieb F, Kenai S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22 (5): 886- 893.
- [5] Courard L, Michel E, Delhez P. Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(3): 1- 6.
- [6] Domingo-Cabo A, Lázaro C, López-Gayarre E, et al. Creep and shrink age of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2009(3): 2545- 2553.
- [7] Evangelista L, Brito J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(1): 9- 14.
- [8] Wong S F, Wee T H. Study of water movement in concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2001, 53(3): 205- 220.
- [9] Andrade C, Sarría J Alonso C. Relative Humidity in the Interior of Concrete Exposed to Natural and ~ artificial Weathering [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(6): 1249- 1259.
- [10] 万惠文, 林宗寿, 水中和. 再生骨料混凝土中的水分扩散机理与模型 [J]. *武汉理工大学学报*, 2003, 25(12): 103- 107.
- [11] A. E. 谢依金. 水泥混凝土结构与性能 [M]. 胡春芝, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.