

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220668

基于随机多边形骨料再生混凝土抗氯离子侵蚀研究

姚泽良^{a,b}, 令狐恬晶^{a,b}, 祁亚伦^{a,b}, 党发宁^{a,b}, 崔婷婷^{a,b}

(西安理工大学 a. 土木建筑工程学院; b. 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于氯离子扩散模型和骨料级配理论, 采用 PYTHON 语言和 COMSOL 软件构建再生混凝土随机多边形骨料细观计算模型, 并结合已有试验结果验证模型有效性, 开展新老砂浆扩散系数、老砂浆厚度及再生骨料取代率等不同工况下再生混凝土抗氯离子侵蚀计算分析, 研究氯离子在再生混凝土内部的扩散规律及各细观组分等关键因素对再生混凝土抗氯离子侵蚀的影响规律。结果表明, 模拟结果与试验结果吻合较好, 该方法能较好地模拟氯离子在再生混凝土内部的扩散过程; 再生混凝土氯离子扩散浓度与深度的关系曲线呈现不连续性特征; 随着新老砂浆扩散系数的增加, 混凝土内氯离子浓度逐渐增大; 再生混凝土抗氯离子侵蚀能力随老砂浆厚度、再生骨料取代率的增加而降低。

关键词: 再生混凝土; 随机骨料; 氯离子模型; 扩散特性; 数值模拟

中图分类号: TV431⁺.9; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0163-04

1 引言

随着建筑业的快速发展, 废旧混凝土的处置成为急需解决的问题^[1]。目前, 再生混凝土技术是解决废弃混凝土回收利用最有效的方式之一。氯离子作为造成混凝土结构耐久性下降的主要原因之一, 当钢筋表面氯离子含量达到临界值后, 表面的钝化膜会发生破坏, 从而导致钢筋锈蚀、受力性能退化^[2], 而再生骨料成分来源复杂, 宏观试验产生的离散性更大, 计算机技术及数值模拟方法的发展既可以减少各种误差, 又可以直观反映氯离子侵入混凝土内的扩散行为, 将细观结构与宏观性能联系起来。近年来, 相关研究都是在细观层次下将再生混凝土视为五相复合材料, 如延永东等^[3]利用 Matlab 建立包含纳米覆盖层的再生混凝土二维随机圆形骨料模型, 计算结果表明纳米强化技术可降低氯离子扩散速度, 从而提升再生混凝土耐久性; 胡志等^[4]将再生骨料简化为圆形, 建立五相随机数值分析模型, 研究其细观组成对整体侵蚀性能及氯离子时空分布的影响。然而已有的再生混凝土细观数值模型, 大多视再生骨料为圆形, 过于简化, 难以满足一般的工程要求。因此, 本文基于氯离子扩散模型和骨料级配理论, 采用 PYTHON 语言和 COMSOL 软件构

建了再生混凝土随机多边形骨料细观计算模型, 开展了新老砂浆扩散系数、老砂浆厚度及再生骨料取代率等不同工况下再生混凝土抗氯离子侵蚀计算分析, 研究了氯离子在再生混凝土内部的扩散规律及各细观组分等关键因素对再生混凝土抗氯离子侵蚀的影响规律。

2 基本理论

2.1 氯离子扩散模型

一般认为氯离子在饱和状态混凝土中传输方式以扩散为主, 这在很大程度上也适用于再生混凝土, 应敬伟^[5]通过试验验证了氯离子侵入再生混凝土过程服从 Fick 第二定律, 表达式为:

$$\partial C / \partial t + \partial(-D_{app} \partial C / \partial x) / \partial x = 0 \quad (1)$$

式中, C 为混凝土内氯离子浓度, %; t 为侵蚀龄期; D_{app} 为表观氯离子扩散系数, m^2/s 。

2.2 骨料级配理论

借助最大密实度理想级配曲线, 满足该级配曲线浇筑的再生混凝土具有最优的密实度和强度, Walraven 公式^[6]将三维骨料分布概率转化到二维平面上, 即:

$$P_c(D < D_0) = P_k(1.065 D_0^{0.5} D_{max}^{-0.5} - 0.053 D_0^4 D_{max}^{-4} - 0.012 D_0^6 D_{max}^{-6} - 0.0045 D_0^8 D_{max}^{-8} + 0.0025 D_0^{10} D_{max}^{-10}) \quad (2)$$

收稿日期: 2022-04-06, 修回日期: 2022-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208422); 陕西省教育厅资助项目(20JS092)

作者简介: 姚泽良(1976-), 女, 博士(后)、副教授、硕导, 研究方向为土木工程, E-mail: yaozeliang@sina.com

式中, P_c 为任意截面内粒径小于 D_0 的骨料分布概率; D_0 为再生骨料粒径; D_{max} 为最大粒径; P_k 为粗骨料所占的体积百分比。

3 再生混凝土细观模型

3.1 多边形随机骨料模型

再生混凝土可视作由原始骨料、老界面区(OITZ)、老砂浆、新界面区(NITZ)和新砂浆组成的五相复合材料^[4,5]。再生粗骨料来源不同,周围老砂浆附着量、分布情况亦不同,模型简化为老砂浆均匀包裹在原始骨料表面。界面区厚度一般在 $5 \sim 60 \mu\text{m}$ 之间^[7],本文设新老界面区厚度均为 $50 \mu\text{m}$,老砂浆厚度为 1 mm ^[8]。

依据 PYTHON 语言,首先定义骨料投放区域($A=LW$)、骨料投放率、粒径范围等基本参数,其次依据 Monte Carle 方法随机获得骨料粒径及骨料圆心坐标,实现骨料的随机投放,通过 Walraven 公式确定再生混凝土内不同粒径区间骨料面积率。多边形骨料生成依据 random 随机函数生成 n 个 $0 \sim 360^\circ$ 之间的实数,利用“sort”命令对角度进行升序排序,筛除偏小的角度,再依次连接顶点坐标生成多边形骨料。多边形面积计算依据剖分法,即将多边形分成 n 个三角形,然后将这些三角形面积相加得到,三角形面积用向量积法计算。

在生成多边形骨料后,沿骨料界面相继生成新老界面区和老砂浆界面区。最后依据第三方库 pyautocad 使骨料模型在 CAD 绘图软件中自动生成。生成的多边形随机骨料模型见图 1。

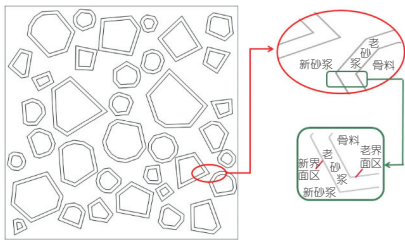


图 1 随机多边形骨料模型

Fig. 1 Random polygon aggregate model

3.2 数值模拟过程

考虑到再生混凝土非均质性的影响,其不同细观组成相(新砂浆、老砂浆、骨料、NITZ、OITZ)对氯离子侵蚀程度影响不同。在建模过程中,应保证各相材料氯离子扩散系数、模型的初始条件和边界条件参数正确合理。再生混凝土抗氯离子渗透的五相细观数值模拟过程如下。

步骤 1 采用多边形随机骨料模型建立再生混凝土细观数值模型,将在 CAD 绘图软件中生成的随机骨料模型转成 .dxf 文件导入有限元软

件 COMSOL Multiphysics 中,运用其中的稀物质传递模块模拟混凝土中氯离子的扩散行为。

步骤 2 设置初始条件及边界条件。考虑氯离子扩散只沿模型的一个面向混凝土内部扩散,其余表面设为无通量属性。设置边界条件,考虑表面氯离子浓度的时变性 $C_s(t)$,将左边界作为再生混凝土细观数值模型的侵蚀面。并设置初始时刻混凝土内浓度为 0。

步骤 3 确定各相材料的氯离子扩散系数。新砂浆氯离子扩散系数 $D_{new\ moter}$ 计算公式^[9]为:

$$D_{new\ moter} = \frac{2V_p^{2.75} D'_0}{V_p^{1.75} (3 - V_p) + 14.44(1 - V_p)^{2.75}} \quad (3)$$

$$V_p = (\omega/c - 0.17\alpha) / (\omega/c + 0.32) \quad (4)$$

式中, D'_0 为孔隙溶液中的氯离子扩散率, $D'_0 = 1.07 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$; V_p 为砂浆孔隙率; ω/c 为水灰比; α 为水化度,范围为 $0 \leq \alpha \leq 1$ ^[10]。

由文献[4,5,7]可知,老砂浆扩散系数为新砂浆的 0.2~5.0 倍,界面区扩散系数为砂浆扩散系数的 1.3~16.2 倍。原始粗骨料较为致密,氯离子扩散系数设为 0。考虑到混凝土不断水化的影响,混凝土对氯离子扩散系数的影响会随着龄期的增长而减小^[10],其关系式为 $f(t) = (t_0/t)^m$,其中 $f(t)$ 为龄期影响系数; t_0 为参考时间,取 30 d; m 为时间衰减系数。

步骤 4 将步骤 2、3 中确定的参数输入有限元数值模型中,划分网格,最后设置计算步长及扩散时间即可进行研究计算。

3.3 模型验证

为验证模型的可行性,将数值模拟结果与文献[11]试验结果进行对比,试件再生粗骨料表观密度为 $2580 \text{ kg}/\text{m}^3$,粗骨料粒径范围为 $5 \sim 20 \text{ mm}$,室温下将再生混凝土试件自然浸泡在 3.5% NaCl 溶液中。根据结果拟合再生混凝土时变表面氯离子浓度为 $C_s(t) = 0.07298 \ln t + 0.1342$,再生混凝土其他数值参数和氯离子扩散系数见表 1。计算 270 d 后混凝土细观模型中氯离子侵蚀的浓度分布,选取 3 个随机位置(图 2 中的 Line-1、Line-2、Line-3)从左侧起提取氯离子浓度模拟数据,将模拟结果同试验数据对比见图 2,对比结果表明其模拟计算值与试验值吻合良好,证明了该方法的可靠性。

表 1 验证模型数值参数

Tab. 1 Verifies the model numerical parameters

扩散时间 /d	体积分数 /%	水灰比	时间衰减系数 m	扩散系数/($10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)				
				原始骨料	新砂浆	老砂浆	新界面区	老界面区
270	40	0.5	0.325	0	6.64	13.28	66.4	132.8

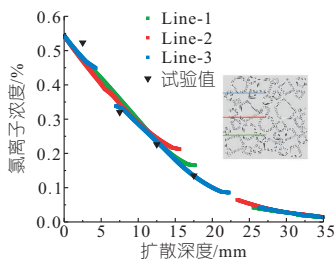


图 2 模型验证

Fig. 2 Model verification

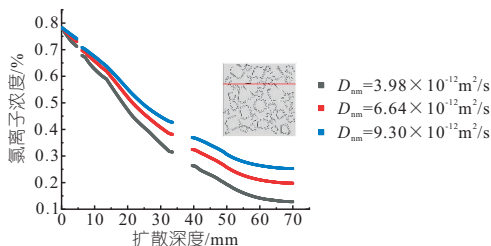


图 4 不同新砂浆扩散系数下氯离子浓度-深度曲线

Fig. 4 Curves of chloride concentration vs depth under different diffusion coefficients of new mortar

4 变参数分析及讨论

在实际情况下,氯离子引起的钢筋腐蚀导致混凝土结构劣化是一个长期的过程。当考虑耐久性时,有必要研究再生混凝土抗氯离子侵蚀的长期性。考虑新砂浆扩散系数 D_{nm} 、老砂浆扩散系数 D_{om} 、老砂浆厚度 T_{om} 及再生骨料取代率作为关键影响因素,计算分析扩散 20 年后的氯离子浓度分布。

4.1 新砂浆扩散系数对氯离子浓度的影响

从氯离子侵蚀面起,氯离子经由砂浆的孔隙扩散到混凝土内部,而新砂浆在再生混凝土中占比极大,新砂浆扩散系数对混凝土内部氯离子浓度起控制作用。分别建立 D_{nm} 为 3.98×10^{-12} 、 6.64×10^{-12} 、 $9.30 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 三种工况,计算分析新砂浆扩散系数对混凝土抗氯离子侵蚀的影响。图 3 为不同新砂浆扩散系数下扩散 20 年后的氯离子浓度分布云图。由图 3 可看出,随着新砂浆扩散系数的增加,扩散深度不断加深,氯离子含量不断增加。选取三个模型同一位置(图 4 中沿线位置)从左侧起提取氯离子浓度随扩散深度变化曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,三条氯离子浓度曲线趋势相似,均随扩散深度增加而降低,且曲线呈现不连续性特征。这是由于再生混凝土微观模型考虑非均质性影响,骨料区域的氯离子浓度为 0,从而出现与均质模型有较大差异的曲线特征。不同新砂浆扩散系数对氯离子浓度影响明显,且随着扩散深度的加深,影响越显著。

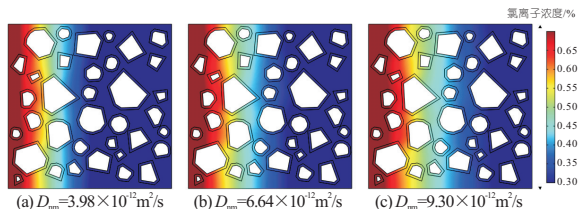


图 3 不同新砂浆扩散系数下氯离子浓度分布云图

Fig. 3 Cloud chart of chloride concentration distribution with different diffusion coefficients of new mortar

4.2 老砂浆扩散系数对氯离子浓度影响

再生骨料表面黏附一层老砂浆,导致再生混凝土具有多重界面结构,为氯离子渗透提供了便捷通道。分别建立 D_{om} 为 7.97×10^{-12} 、 13.28×10^{-12} 、 $18.59 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 三种工况,计算分析老砂浆扩散系数对混凝土抗氯离子侵蚀的影响。图 5(a)为不同老砂浆扩散系数下氯离子浓度随扩散深度变化曲线图。随着老砂浆扩散系数增加,氯离子含量不断增加,在扩散深度较小的位置,氯离子浓度增加不明显,甚至出现略微下降的现象,这与肖建庄等^[7]的研究结果相似。较之新砂浆扩散系数对氯离子扩散的影响,老砂浆影响稍小。提取距氯离子侵蚀面 25 mm 处,平均氯离子浓度随时间变化图,如图 5(b)所示。平均氯离子浓度随时间推移呈弧形增长,随着扩散时间增加,老砂浆扩散系数的影响程度不断增强。基于氯离子浓度与时间的关系曲线可为从微观角度预测氯盐环境下再生混凝土结构的使用寿命提供参考。

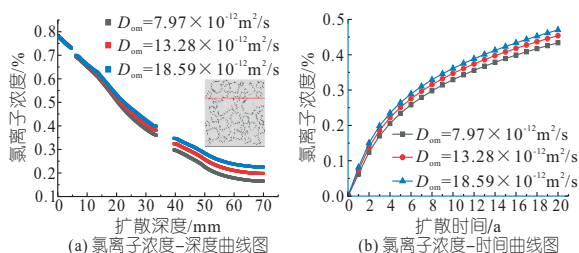


图 5 不同老砂浆扩散系数下氯离子浓度与深度和时间曲线图

Fig. 5 Curves of chloride concentration vs depth and time under different diffusion coefficients of old mortar

4.3 老砂浆厚度对氯离子浓度影响

老砂浆作为混凝土与再生混凝土的重要区别,老砂浆的含量对氯离子浓度分布的影响不容忽视。分别计算分析老砂浆厚度 T_{om} 为 0.5、1.0、1.5 mm 三种工况对混凝土抗氯离子侵蚀的影响。图 6 为不同老砂浆厚度下氯离子浓度随扩散深度变化曲线图。由图 6 可知,在同一扩散深度,氯离子浓度随老砂浆厚度增加而增大,老砂浆含量的增加降低了混凝土抗氯离子侵蚀能力。

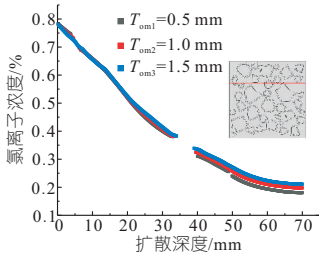


图 6 不同老砂浆厚度氯离子浓度—深度曲线

Fig. 6 Curves of chloride concentration vs depth under the different thicknesses of old mortar

T_{om1} 曲线在扩散深度接近 50 mm 处出现不连续性原因为老砂浆厚度发生变化时,界面区位置、骨料位置也发生了一些变化。

4.4 再生骨料取代率对氯离子浓度的影响

为从细观角度分别模拟分析再生骨料取代率为 0%、30%、50%、70%、100% 五种工况下扩散 20 年后的氯离子浓度分布。提取距氯离子侵蚀面 25 mm 处,平均氯离子浓度随时间变化曲线(图 7)及再生骨料取代率为 30%、50%、70% 时的氯离子扩散云图(图 8)。由图 7、8 可知,再生混凝土中氯离子渗透深度随再生骨料取代率增加而显著加深。侵蚀 20 年后,当再生骨料取代率由 0% 分别增加至 30%、50%、70%、100% 时,平均氯离子浓度分别增加了 3.68%、7.79%、16.7%、19.19%。这是由于再生骨料增加,表面附着老砂浆含量增加,促进了氯离子的渗透。这表明在实际工程中,适当控制再生骨料取代率,有助于提高再生混凝土抗氯离子渗透性能。

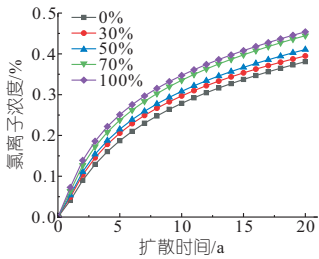


图 7 不同再生骨料取代率下氯离子浓度—时间曲线

Fig. 7 Curves of chloride concentration vs time under different replacement ratios of recycled aggregate

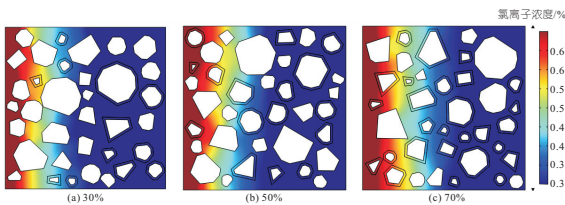


图 8 不同取代率下氯离子浓度分布云图

Fig. 8 Cloud chart of chloride concentration distribution with different replacement ratios of recycled aggregate

5 结论

a. 依据 PYTHON 语言建立再生混凝土细观

模型,考虑骨料粒径、位置的随机性,生成的多边形骨料符合实际骨料形状。该模型对再生混凝土氯离子扩散数值模拟结果与试验值吻合较好,表明该模型能较好地模拟氯离子在再生混凝土中的扩散行为。

b. 再生混凝土氯离子浓度与深度的关系曲线呈现不连续性特征,随着新老砂浆扩散系数的增加,混凝土内氯离子浓度逐渐增大,老砂浆对氯离子扩散影响程度比新砂浆弱。

c. 随着老砂浆厚度增加,再生混凝土抗氯离子侵蚀能力降低。随着再生骨料取代率的增加,附着老砂浆含量、界面区含量增加,加速了氯离子渗透,导致混凝土内相同深度处的氯离子浓度显著增加。

参考文献:

- [1] 尤忆, CHEW BOON CHEONG. 建筑垃圾在公路路基填筑中的有效应用[J]. 工业建筑, 2021, 51(10): 258-258.
- [2] 陈宣东, 刘光焰, 王晓峰, 等. 基于混凝土三维 CT 重构氯离子扩散过程数值模拟[J]. 水电能源科学, 2020, 38(3): 117-120.
- [3] 延永东, 刘甲琪, 徐鹏飞, 等. 考虑骨料表面强化的再生混凝土内氯离子传输细观数值模拟[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 441-449.
- [4] 胡志, 毛丽璇, 刘清风. 再生骨料混凝土抗氯离子侵蚀的多相数值研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(8): 2425-2432.
- [5] 应敬伟. 再生混凝土氯离子扩散规律与基本特征[D]. 上海: 同济大学, 2013.
- [6] WALRAVEN J C. Aggregate interlock: a theoretical and experimental analysis [D]. Delft, Netherlands: Delft university of technology, 1980.
- [7] 肖建庄, 应敬伟. 模型再生混凝土二维 Cl-扩散细观数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(7): 1051-1057.
- [8] 姚泽良, 崔婷婷, 段东旭, 等. 基于 Python 的再生混凝土细观性能模拟方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(2): 167-172.
- [9] ZHENG JIANJUN, ZHOU XINZHU. Analytical solution for the chloride diffusivity of hardened cement paste[J]. Journal of materials in civil engineering, 2008, 20(5): 384-391.
- [10] CHEN XUANDONG, YU AIPING, LIU GUANGYAN, et al. A multi-phase mesoscopic simulation model for the diffusion of chloride in concrete under freeze-thaw cycles[J]. Construction and building materials, 2020, 265: 120223.
- [11] 祁兵. 多因素耦合作用下再生混凝土抗侵蚀性能与机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.

不同水胶比下的最优配合比,此时浆液工作性和经济性良好,可为浆液最优配合比优化提供理论依据。

c. 浆液性能的时变演化规律要求注浆窗口期应设定在缓慢期和加速期前段,并在 120~180 min 前完成。

参考文献:

- [1] 纪国晋,陈改新,姜福田. 变态混凝土浆液的试验研究[J]. 水利水电科技进展,2005,25(6):31-33.
- [2] 胡晓鹏,牛荻涛,张永利. 粉煤灰混凝土早期强度的现场调查与试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(6):676-680.
- [3] LEI DONGYI, GUO LIPING, SUN WEI, et al. A new dispersing method on silica fume and its influence on the performance of cement-based materials [J]. Construction and building materials, 2016, 115: 716-726.
- [4] 杨志全,侯克鹏,郭婷婷,等. 黏度时变性宾汉体浆

液的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩土力学, 2011,32(9):2697-2703.

- [5] WONG H H C, KWAN A K H. Packing density of cementitious materials: part 1-measurement using a wet packing method[J]. Materials and structures, 2007,41(4):689-701.
- [6] 方国华,黄显峰. 多目标决策理论、方法及其应用[M]. 科学出版社,2011.
- [7] LIU HENGRUI, SUN XIAO, TIAN ZHENGHONG, et al. Effects and threshold of water film thickness on multi-mineral cement paste[J]. Cement and concrete composites, 2020, 112: 103677.
- [8] 孙虎. 石材加工业废料在水泥混凝土工业中的应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- [9] KOCAK Y. A study on the effect of fly ash and silica fume substituted cement paste and mortars[J]. Scientific research & essays, 2010, 5(9): 990-998.
- [10] 韩静,李双喜. 低水胶比大掺量多元复合胶凝体系水化特性研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 152-155, 163.

Characterization and Time-varying Properties of Grout-enriched Roller Compacted Concrete Slurry Containing Micro-silica Powder

WANG Yao, SUN Xiao, LIU Heng-rui, LU Xue-ying

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To deal with the problems such as grouting pipe blocking and uneven diffusion of grout-enriched roller compacted concrete, the rheology, fluidity, stability, strength and time-varying properties of slurry containing micro-silica powder were studied. The entropy weight ideal point method was used to determine the optimal mix proportion by considering the working characteristics of the slurry and economic cost. The results show that adding micro-silica powder can reduce the bleeding rate and improve the compressive strength. When $W/B=0.4$, micro-silica powder reduces the yield stress and fluidity, and increases the plastic viscosity. When $W/B=0.5-0.7$, the yield stress and plastic viscosity increase with the addition of micro-silica powder. The rheology of slurry is related to the thickness of water film. With the increase of water-binder ratio, the effect of micro-silica powder on slurry's performance gradually weakens. The yield stress increases linearly with time, and the plastic viscosity increases exponentially with time. Based on entropy weight ideal point method, the optimal mixture ratio of different schemes with fixed water-binder ratio can be obtained.

Key words: micro-silica powder; working characteristics; time-varying characteristics; entropy weight ideal method; optimum mix proportion

(上接第 166 页)

Research on Chloride Resistance of Recycled Concrete Based on Random Polygonal Aggregate

YAO Ze-liang^{a,b}, LINGHU Tian-jing^{a,b}, QI Ya-lun^{a,b}, DANG Fa-ning^{a,b}, CUI Ting-ting^{a,b}

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the chloride ion diffusion model and aggregate gradation theory, the mesoscopic model of recycled concrete random polygonal aggregate was constructed using PYTHON and COMSOL. The validity of the model was verified by the existing experimental results. The calculation and analysis of the chloride ion erosion resistance of recycled concrete under different working conditions such as the diffusivity of new and old mortar, the thickness of old mortar and the replacement ratio of recycled aggregate was carried out. And then the diffusion law of chloride ion in recycled concrete and the influence law of critical factors on the chloride ion erosion resistance were studied. The results show that the simulation results are close to the experimental values, and the method can better simulate the diffusion of chloride ions in recycled concrete. The relationship curve between chloride concentration and depth shows discontinuous characteristics. With the increase of diffusion coefficient of new and old mortar, the chloride ion content increases gradually. The chloride ion erosion resistance of recycled concrete decreases with the increase of the thickness of old mortar and the replacement ratio of recycled aggregate.

Key words: recycled aggregate concrete; random aggregate; chloride ion model; diffusion characteristics; numerical simulation