

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221212

含硅微粉变态混凝土浆液性能影响评价及时变演化规律

王 铖, 孙 啸, 刘恒瑞, 路学莹

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对变态混凝土注浆施工中出现浆液堵管、扩散不均等问题,研究了不同硅微粉掺量对浆液的流动性、流变性、稳定性、强度和时变特性的影响。采用熵权理想点法综合考虑浆液工作性及经济性确定最优配合比。试验结果表明,掺加硅微粉可改善浆液泌水率,提高抗压强度。水胶比 0.4 时,掺硅微粉使浆液屈服应力与流动度减小、塑性粘度增大;水胶比 0.5~0.7 时,流变参数随硅微粉掺量增加而增大,浆液流变性与水膜厚度呈线性相关。随水胶比增大,硅微粉对浆液性能的影响逐渐减弱。浆液屈服应力随时间呈线性增长趋势,塑性粘度呈指数增长。基于熵权理想点法,可得到固定水胶比下的最优配合比方案。

关键词: 硅微粉;工作特性;时变特性;熵权理想点法;最优配合比

中图分类号: TV42⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)04-0167-05

1 引言

碾压混凝土坝迎水面、岸坡、廊道等部位常采用插孔注浆方式提高防渗性能。然而,浆液制备普遍根据工程经验,尚无成熟完善的配合比规范可供参考^[1],导致浆液由于流变性、稳定性差,常出现注浆堵管、扩散不均等问题。水泥基浆液中常掺加粉煤灰以降低成本,提高流动性、密实度等,但大量掺入粉煤灰会降低水泥基早期强度^[2]。研究表明,硅微粉有助于改善水泥基浆体的物理力学性能和耐久性,但由于其高比表面积导致掺加后浆液流动性显著降低^[3]。因此,混掺硅微粉与粉煤灰有助于抵消各自缺点,但浆液性能的特征更为复杂,不仅在于混掺对多种工作性能耦合作用的影响,更在于浆液性能随时间不断演化^[4]。鉴此,本文对掺硅微粉的水泥粉煤灰浆液性能进行表征,根据水膜厚度与流变参数的关系,探究硅微粉对浆液流变性能影响机理,旨在为变态混凝土浆液的配合比优化提供理论支撑,亦可为注浆施工时间窗口期把握提供参考依据。

2 试验方法

2.1 原材料

试验水泥为海螺牌 P·O42.5 普通硅酸盐水

泥,比表面积 372 m²/kg;粉煤灰为镇江产 II 级粉煤灰,比表面积 606 m²/kg;硅微粉是由天然石英石经过物理研磨加工制成的超微细粉体,比表面积 827 m²/kg。材料主要化学成分见表 1。

表 1 材料主要化学成分

Table 1 Material chemical composition							
成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	%
水泥	20.90	65.37	3.05	4.80	1.08	2.63	0.16
粉煤灰	44.88	39.71	3.69	5.48	0.60	0.55	0.24
硅微粉	97.05	0.36	0.58	0.50	0.55	0.03	0.33

2.2 试验制备与测试

2.2.1 配合比方案

采用 NJ-160 型水泥净浆搅拌机制备了 16 种不同水胶比及硅微粉含量的水泥浆样品,具体配合比方案见表 2。

表 2 变态混凝土浆液配合比方案

Table 2 Metamorphic slurry matching scheme				
样品编号	水泥	粉煤灰	硅微粉	水胶比
Si-0.4/0.5/0.6/0.7-0	50	50.0	0.0	0.4/0.5/0.6/0.7
Si-0.4/0.5/0.6/0.7-2.5	50	47.5	2.5	0.4/0.5/0.6/0.7
Si-0.4/0.5/0.6/0.7-5	50	45.0	5.0	0.4/0.5/0.6/0.7
Si-0.4/0.5/0.6/0.7-10	50	40.0	10.0	0.4/0.5/0.6/0.7

注:Si-W/B-A 中 W/B 代表水胶比;A 表示硅微粉掺量。

2.2.2 测试方法

(1)流变性。采用 RVDV-1T 型旋转粘度计

收稿日期:2022-05-09,修回日期:2022-07-02

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51909072)

作者简介:王铖(1998-),男,硕士研究生,研究方向为工程施工新技术与新材料,E-mail:1014337198@qq.com

通讯作者:孙啸(1986-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为工程施工新技术、新材料,E-mail:xiaos@hhu.edu.cn

测试浆液剪切应力和剪切速率,用改进宾汉模型拟合获得流变参数:

$$\tau = \tau_0 + \eta\gamma + c\gamma^2 \quad (1)$$

式中, τ 为剪切应力; τ_0 为屈服应力; η 为塑性粘度; γ 为剪切速率; c 为二阶参数。

(2)流动性。以流动度指标表示,提起截锥圆模(高度 60 mm,顶部直径 36 mm,底部直径 60 mm),浆液在玻璃平面上自由流淌的最大直径即为流动度。

(3)稳定性。由泌水率 σ 表示,在有机玻璃容器中注入高度 h_0 的浆液并密封,每隔 15 min 观察 1 次水面高度 h_1 与浆面高度 h_2 ,直至液面稳定,以浆面上渗出的水面高度占初始浆面高度表示泌水率 σ ,计算公式为:

$$\sigma = (h_1 - h_2) / h_0 \quad (2)$$

(3)抗压强度。采用边长 70.7 mm 的立方体试块,在养护 7、28 d 后分别进行抗压强度测试,取 3 个试样的平均值作为抗压强度。

(4)水膜厚度。混合粉体堆积密度采用湿填充法^[5]测量。利用堆积密度和比表面积,水膜厚度 T 计算公式为:

$$T = \frac{\mu_w - \mu_s(1 - \mu_p) / \mu_p}{R_c A_c + R_f A_f + R_s A_s} \quad (3)$$

式中, μ_w 为混合水的体积; μ_s 为固体颗粒的体积; μ_p 为颗粒的堆积密度; A_i 、 R_i 分别为胶凝材料的比表面积和体积分数;下标 c、f、s 分别为水泥、粉煤灰、硅微粉。

(5)综合评价方法。熵权理想点法是结合熵权法和理想点法的多指标综合评价方法^[6]。熵权法通过指标的变化程度来确定指标权重。对于第 i 个指标,熵值为 e_i ,熵权 ω_i 的计算公式为:

$$\omega_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

理想点法通过比较各方案与理想点和反理想点的距离来衡量各方案的优劣性。评判方案的贴近度 T_j 计算公式为:

$$T_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} = \frac{1}{1 + D_j^+ / D_j^-} \quad (5)$$

式中, D_j^+ 、 D_j^- 分别为与正、负理想点之间的距离。

3 结果与分析

3.1 流动性

浆液流动度试验结果见图 1。水胶比(W/B)在 0.4~0.7 时,流动度随硅微粉掺量增加而减

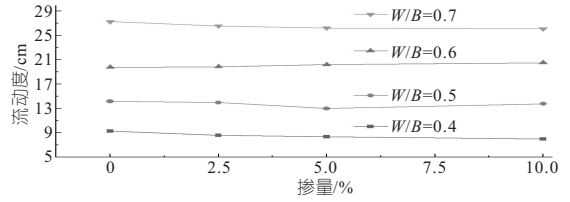


图 1 浆液流动度曲线

Fig. 1 Fluidity curves of slurry

小;相反, $W/B=0.6$ 时,流动度随硅微粉掺量增加而增大; $W/B=0.5$ 时,流动度随硅微粉掺量增加先减小后增大。硅微粉对浆液流动性的影响主要取决于填充效应(增加流动性)和表面效应(降低流动性)的平衡。低水胶比下,硅微粉的高比表面积会导致浆体需水量提高,流动性降低。相反,水胶比增大时,由于自由水增多,掺加硅微粉可以改善浆液级配,使流动性增大。相较于水胶比为 0.4(10% 硅微粉掺量使得流动度降低 14.1%)时, $W/B=0.7$ 时,浆液的自身流动性较大,硅微粉对流动性的影响减弱(10% 掺量使得流动度降低 4.3%)。

3.2 流变性

浆液流变参数拟合曲线见图 2。浆液流变性由屈服应力和塑性粘度共同决定,直接影响浆液的渗透填充效果。由流变曲线可知,在注浆施工中,不同水胶比下掺加硅微粉均会使浆液的剪切应力增加,即扩散阻力增加。在 $W/B=0.4$ 时,剪切应力随剪切速率的减小而减小,由图 2 可看出,掺加硅微粉后浆液塑性粘度迅速增大,屈服应力随硅微粉掺量增加而减小; $W/B=0.5 \sim 0.7$ 时,屈服应力和塑性粘度随硅微粉掺量增加而增大。屈服应力表示打破相互作用的颗粒间的附着力和摩擦力而形成悬浮液的临界应力,主要受物理想因素影响,即填充效应和形态效应。在 $W/B=0.4$ 时,由于颗粒间距较小,水膜厚度对流变参数的影响作用放大^[7],此时掺入硅微粉能有效改善浆液级配,使颗粒间阻力减小,抵消形态效应带来

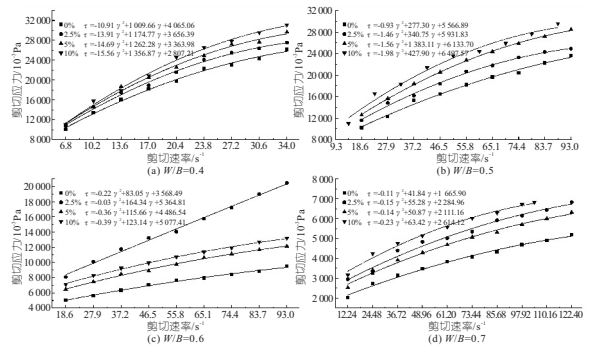


图 2 浆液流变参数曲线

Fig. 2 Rheological curves of slurry

的负面作用,表现为屈服应力减小。当水胶比增大时,颗粒间距增大,填充效应减弱,硅微粉的高比表面积导致屈服应力增大。塑性粘度表征浆体内部结构阻碍流动的能力,同时受物理和化学因素影响。硅微粉中含有部分活性的 SiO_2 、 Al_2O_3 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成水化硅酸钙(C-S-H),会增加水泥浆体内部颗粒间的结合力^[8],导致塑性粘度增大。

流变参数与水膜厚度的相关函数呈线性相关,表明水膜厚度是影响流变参数的重要因素。其中,浆液的流变性主要受胶体吸引力、重力、布朗力控制。水膜厚度影响水泥浆体流变性,且存在阈值^[7],超过阈值时水膜厚度的变化对流变参数的影响减小,表现为随水胶比增大,硅微粉对流变参数的影响减弱。相反,低于阈值时水膜厚度变化对流变参数的影响大。其中, $W/B=0.4$ 时屈服应力与水膜厚度呈负相关,这是由于低水胶比下流变参数对水膜厚度变化更为敏感,硅微粉有效改善了浆液级配,颗粒间阻力减小,抵消了形态效应的影响。

3.3 稳定性

图 3 为浆液泌水率。由图 3 可知,除 $W/B=0.4\sim 0.6$ 时, $\text{Si}-2.5$ 与 $\text{Si}-5$ 泌水率基本相同,其他水胶比下掺加硅微粉均能减小泌水率。在不同水胶比下,掺加硅微粉一定程度上可促进浆液达到泌水稳定,这是因为硅微粉、粉煤灰、水泥的三元混合物提高了混合物的填充密度,单个粒子的运动受到周围粒子的限制,导致粒子沉降速率降低;其次,硅微粉的比表面积较大需要更多的水来覆盖表面形成水膜,从而使游离水分减少,泌水率减小。在实际的注浆过程中,浆液泌水、沉淀会导致注浆管堵塞、扩散不均匀等问题,掺加硅微粉可以提高浆液的稳定性。

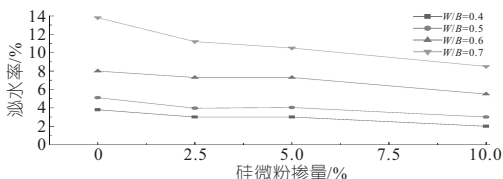


图 3 浆液泌水率

Fig. 3 Slurry bleeding rate

3.4 抗压强度

图 4 为抗压强度。由图 4(a)可知,硬化浆体 7 d 抗压强度随硅微粉掺量增加而增大。其中, $\text{Si}-4-10$ 浆体抗压强度提高 129%,这种趋势随水胶比增大逐渐减弱, $W/B=0.6/0.7$ 时,5% 硅微粉掺量的抗压强度仅略高于 2.5% 掺量。掺加硅

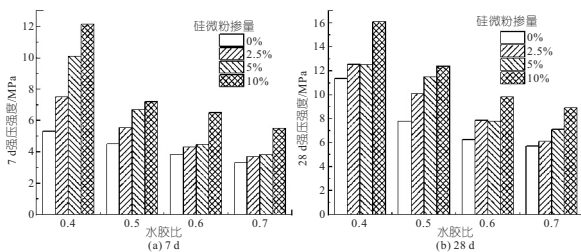


图 4 抗压强度

Fig. 4 Compressive strength

微粉提高了粉煤灰水泥浆体的早期抗压强度,原因是微集料效应和火山灰效应。硅微粉可以优化混合粉体的颗粒级配,使水泥石结构致密。其次,火山灰活性的 SiO_2 、 Al_2O_3 与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应形成额外的 C-S-H,可以有效提高硬化浆体早期强度^[8]。然而,随着水胶比增大,浆体内部自由水增多、颗粒间距增大,硅微粉对浆体强度影响减弱。

由图 4(b)可知,硅微粉对 28 d 抗压强度的影响弱于 7 d,这是由于粉煤灰需要一定的碱度才能激发其活性,龄期约 14 d^[9]。此时,粉煤灰中的硅酸盐开始与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H,提高硬化浆体的抗压强度,因此硅微粉对抗压强度的影响减弱。

掺加硅微粉可改善大掺量粉煤灰水泥浆体早期强度低的问题,同时能达到较高的后期强度,保证了工程质量。

3.5 最优配合比

图 5 从多维角度展示了浆液的屈服应力、塑性粘度、流动度、泌水率及 7 d 与 28 d 抗压强度之间的关系。浆液流动度增加、流变参数减小会对浆液泌水率及抗压强度带来不利影响。获得所有性能优秀的配合比方案不具备可行性,需要选出相对的最优配合比方案满足注浆要求。

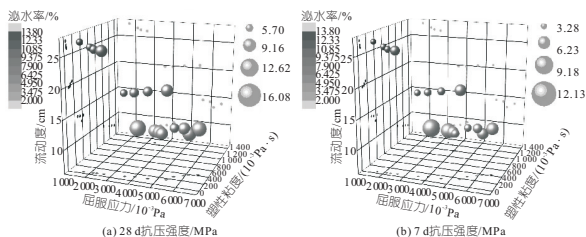


图 5 浆液工作性能多维离散点图

Fig. 5 Multidimensional discrete point diagram of slurry working performance

选取屈服应力、塑性粘度、流动度、泌水率、7 d 强度、28 d 强度及经济性 7 个指标确定最优配合比方案。其中,经济性指标用配置相同质量浆液所需原材料价格表示。不同水胶比下各指标的熵权见图 6(a),不同配合比方案的贴适度见图 6(b)。

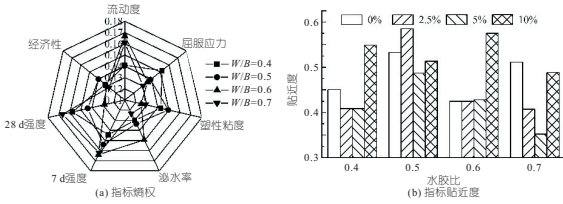


图6 综合评价指标

Fig. 6 Comprehensive evaluation index

其中 Si-4-10、Si-5-2.5、Si-6-10、Si-7-0 分别对应不同水胶比下的最优配合比。W/B=0.4 时,掺加 2.5%、5.0% 硅微粉对流动性、流变性 & 经济性带来不利影响,但 10% 掺量能很好地改善其强度及稳定性,抵消负面影响;W/B=0.5 时,掺加少量硅微粉就能很好地改善其稳定性、强度,掺量过多反而会提高价格降低性价比;W/B=0.6 时,掺加硅微粉还可以改善浆液的流动性,因此 Si-6-10 性价比最高;在 W/B=0.7 时,硅微粉对浆液性能的影响减弱,提高掺量反而会提高价格。

3.6 浆液性能时变特性

3.6.1 流动性时变特性

由浆液流动度-时间试验结果可知,流动度随时间呈下降趋势。其中,流动度变化可分为 3 个阶段:①第 1 阶段(0~30 min)。流动性变化幅度小,流动度呈缓慢下降或略有上升(如 Si-4-0)的趋势,此时浆液仍具有较好的流动性;②第 2 阶段(30~120 min)。流动度损失速率提升,此阶段浆液粘度增加,不利于其注浆扩散;③第 3 阶段(120 min 以后)。此时浆液趋于初凝,流动度逐渐稳定,已开始不具备可施工性。

3.6.2 流变性时变特性

图 7、8 分别绘制了浆液屈服应力、塑性粘度的时间函数曲线。图 7 表明,浆液的屈服应力随时间呈缓慢的线性增长趋势。其中,屈服应力的增长主要来源于水化产物。从 150~180 min 开始,屈服应力快速增大,说明浆液进入水化加速期,此时水化产物大量生成,在浆液内部形成絮凝

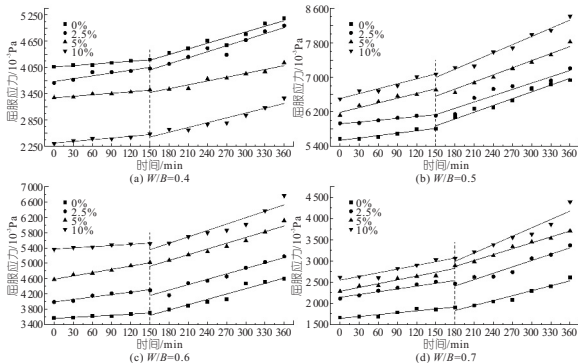


图7 屈服应力-时间函数曲线

Fig. 7 Yield stress-time curve

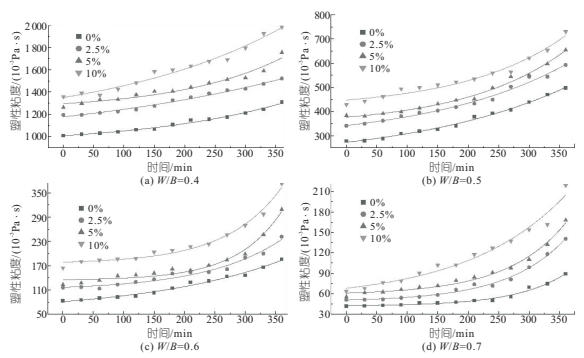


图8 塑性粘度的时间函数曲线

Fig. 8 Plastic viscosity-time curve

结构,并且水化反应中自由水被消耗,润滑减阻作用削弱。如图 8 所示,浆液塑性粘度的变化趋势与屈服应力不同,呈指数增长趋势。水化反应前期,塑性粘度增长速率很小接近线性增长,与屈服应力相似,从 150~180 min 开始,塑性粘度急剧增长。浆液的流变参数 180 min 后快速增长,不利于注浆扩散,为保证工程质量,应尽快完成注浆作业。

浆液的流变参数在 180 min 后的增速均显著上升,不利于注浆扩散,为保证工程质量,应早于该时间完成注浆施工作业。

3.6.3 注浆窗口期

随着水化进程的发展,浆液的性能呈时变特性,具体可划分为缓慢期、加速期和稳定期 3 个阶段。其中,缓慢期主要对应水化诱导期^[10],此时浆液性能稳定,有利于注浆扩散。当浆液进入加速期,此时浆液的流动性呈加速减小趋势,流变参数开始呈加速增长趋势,浆液可施工性变差。稳定期的浆液流动度损失较大,已不具备施工条件(图 9)。因此,为了保证注浆效果,注浆窗口期应设定在缓慢期和加速期前段,并在 120~180 min 之前完成注浆作业。

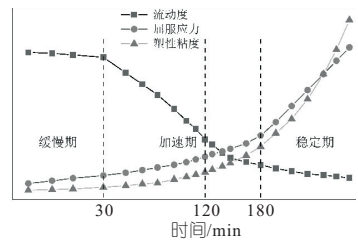


图9 流动度(流变参数)-时间特征曲线

Fig. 9 Fluidity (rheological parameters)-time curves

4 结论

a. 硅微粉能有效改善浆液泌水稳定性、提高浆体强度。流变性能与水膜厚度呈线性相关。

b. Si-4-10、Si-5-2.5、Si-6-10、Si-7-0 分别对应

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-ruì, 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