研究论文|Research Article
热带海岛工程|Tropical Island Engineering

Open Access

引用格式: 刘月芳, 谢志恒, 余化龙, 等. 全再生粗骨料混凝土抗氯离子侵蚀试验与细观数值分析 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(1): 40−50.

Citation: LIU Yuefang, XIE Zhiheng, YU Hualong, et al. Experimental study on chloride erosion resistance of fully recycled coarse aggregate concrete with mesoscale numerical analysis[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(1): 40−50.

全再生粗骨料混凝土抗氯离子侵蚀试验与细观数值分析

刘月芳[1,2], 谢志恒[1], 余化龙[1], 金立兵[1,2] ✉, 刘志勇[1]

(1. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南工大设计研究院有限公司, 河南 郑州 450001)

摘　要: 氯离子是引起海洋环境下混凝土服役过程中耐久性能降低的关键原因之一。本文采用试验与细观分析相结合的方法探究氯离子在全再生粗骨料混凝土中的传输规律。首先通过氯盐−干湿循环试验, 对 4 种不同再生粗骨料含量的再生混凝土进行了试验研究, 随后通过对软件二次开发建立了氯离子传输的细观分析模型, 试验与模拟结果吻合较好, 表明利用该模型分析全再生粗骨料混凝土中的氯离子的传输规律具有可行性,最后探讨了旧砂浆厚度和再生骨料体积等关键因素对氯离子传输性能的影响。试验结果发现, 旧砂浆厚度的增大会加快氯离子的扩散, 但影响不明显; 再生粗骨料体积分数的增加则促进了氯离子在再生混凝土中的扩散。本文所提出的随机凸多边形骨料模型能够有效模拟氯离子扩散, 并具有良好的稳定性。

关键词: 再生混凝土; 氯离子; 凸多边形骨料; 细观数值模拟; 随机性

中图分类号: TU528.1　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004-1729(2026)01-0040-11

DOI: 10.65658/j.hndk.2024120201　　CSTR: 32403.14.hndk.2024120201

Experimental study on chloride erosion resistance of fully recycled coarse aggregate concrete with mesoscale numerical analysis

LIU Yuefang[1,2], XIE Zhiheng[1], YU Hualong[1], JIN Libing[1,2] ✉, LIU Zhiyong[1]

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan University of Technology Design and Research Academy Co., Ltd, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Chloride ion is one of the major factor affecting the durability of concrete in marine environments. The paper employs a combination of experimental and mesoscale analysis to investigate the transport mechanisms of chloride ions in fully recycled coarse aggregate concrete. Four types of recycled concrete with varying recycled coarse aggregate contents were experimentally investigated using chloride salt dry-wet cycling tests. Subsequent to these tests, a mesoscale analytical model of chloride transport was developed through a secondary software development. The favorable correlation between the test and simulation results confirmed the viability of the model. Subsequently, the impact of critical factors, such as the thickness of the old mortar and the volume of recycled aggregate, on chloride ion diffusion performance was investigated. Although an increase in the thickness of old mortar accelerated the diffusion of chloride ions, but this effect

Received: 2024−12−02; **Revised:** 2025−03−05; **Accepted:** 2025−03−12; **Available online:** 2025−10−15
✉ **Corresponding author(s):** JIN libing, E-mail: jinlb@haut.edu.cn

was not significant. In contrast, a higher volume fraction of recycled coarse aggregate significantly enhanced the diffusion of chloride ions in the recycled concrete. Furthermore, the stochastic convex polygonal aggregate model proposed in this paper demonstrated stable performance in simulating chloride ion diffusion.

Keywords: recycled concrete; chloride ions; convex polygonal aggregate; mesoscale numerical simulation; stochasticity

0 引 言

混凝土是过去几年建筑业二氧化碳排放的主要来源之一[1−2]。城市化的快速发展导致建筑固体废弃物和建筑拆除与施工过程中的碳排放量大幅增加,给环境保护带来了巨大挑战[3−4]。

据统计,全球每年产生约 45 亿 t 建筑垃圾[5],约 85% 的固体废物被丢弃在垃圾填埋场,回收和再利用率很低[6]。有必要重视建筑垃圾的再利用,以节约有限的资源。使用再生粗骨料(recycled coarse aggregate, RCA)代替天然骨料(natural aggregate,NA)制备再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC),可降低材料成本[7−8],减少 58% 的不可再生资源消耗和 65% 的温室气体排放[9]。因此,使用 RAC 有利于可持续发展,并有助于实现碳中和目标[10]。

Ferreira[11] 指出,造成沿海混凝土钢筋腐蚀、耐久性退化的重要因素之一是海洋环境中的氯化物。RCA 相较于 NA,其表面更加粗糙,其上附着的旧砂浆和界面过渡区有众多微裂缝,这些都会影响到 RAC 的渗透性能[12]。尤其对于沿海、盐渍土及地下水等恶劣环境来说,受到外部环境中腐蚀性介质的侵蚀现象更为严重[13]。

由于 RCA 疏松多孔,使得氯离子在 RAC 中的扩散过程变得更加复杂[12]。近几年来,学者们对氯离子在 RAC 中的扩散情况进行了研究。在试验方面,Shicong 等[14] 研究了不同再生粗骨料替代率 R_{RCA} 下 RAC 的性能,发现 RAC 抗氯离子渗透的能力会随着 R_{RCA} 的增加而逐渐降低。Qin 等[15] 研究了水灰比、R_{RCA} 和各种矿物质(粉煤灰、硅灰和矿渣)的添加对 RAC 抗氯离子扩散的影响,发现随着 R_{RCA} 含量的降低、水灰比的减小和矿物添加量的增加,扩散系数会有效降低。上述学者的试验大多研究了 R_{RCA} 对 RAC 性能的影响,而 Zhu 等[16] 和 Bun 等[17] 的研究发现,用 RCA 替代所有天然骨料的 RAC 更节能减碳、绿色环保,被认为是一种可持续的解决方案。

数值模拟方面,Xiao 等[18] 提出将 RAC 作为一种五相复合材料进行建模,并针对单颗骨料,研究局部再生骨料参数敏感性分析。2013 年 Ying 等[19] 在文献 [18] 的基础上,提出了 RAC 五相复合球模型,并用 4 种不同 RCA 取代率的 RAC 模型来描述 RCA 分布对氯化物扩散的影响。2020 年 Hu 等[20] 建立三维复合球状 RAC 模型,对其各相扩散系数的影响进行了定量分析。在此前的研究中,所采用的再生骨料模型大多采用圆形或者球状模型,但有研究发现,骨料形状和大小对 RAC 氯离子扩散系数也有显著影响,圆形或球形骨料的建立并不贴合真实骨料的形状,对 RAC 抗氯离子侵蚀的研究具有一定的局限性[21]。因此,本文通过 Matlab 软件自编程序建立随机凸多边形骨料模型,随机凸多边形骨料模型具有骨料粒径、位置和大小 3 随机的特性,其生成更符合真实骨料形状,故此研究其参数对 RAC 中氯离子传输的影响是有必要的。

综上所述,本文采用更绿色环保的全再生粗骨料混凝土制作了 4 种不同 RCA 体积含量的试件,并通过干湿循环试验探究了不同 RCA 含量的 RAC 中氯离子的传输规律。此外,在数值建模方面,通过开发程序建立了 RAC 的五相骨料模型,利用二维随机凸多边形骨料模型研究了 RAC 中旧砂浆和 RCA 的组成对 RAC 中氯离子扩散的影响,这为富含氯离子环境下(如沿海地区)RAC 的耐久性设计提供了理论基础。

1 模型建立

1.1 RAC 氯离子传输模型 氯离子在混凝土内部的传输主要以扩散为主,在二维的 RAC 细观模型中,氯离子任何方向的扩散均遵循 Fick 第二定律[22]:

$$\frac{\partial C(x,y,t)}{\partial t}=D_k\left(\frac{\partial^2 C(x,y,t)}{\partial x^2}+\frac{\partial C^2(x,y,t)}{\partial y^2}\right),\ k=1,2,3,4,5 \tag{1}$$

其中, $C(x, y, t)$ 为 t 时刻 (x, y) 位置处的氯离子浓度, mol·m^{-3}; x 为侵蚀深度, mm; t 为侵蚀时间, d; D_k 为每一相的氯离子扩散系数, m^2·s^{-1}。

1.2 各相扩散系数的确定 为方便研究各参数对RAC氯离子扩散性能的影响, 利用Matlab软件自编程序生成100 mm×100 mm的随机凸多边形粗骨料模型, 模型结果及网格划分如图1所示。根据Fuller级配理论, 将粗骨料粒径划分为(5,10]、(10,15]和(15,20] mm 3个级配区间。据现有研究表明, ITZ厚度在0~100 μm[23], 假设ITZ厚度均为100 μm。

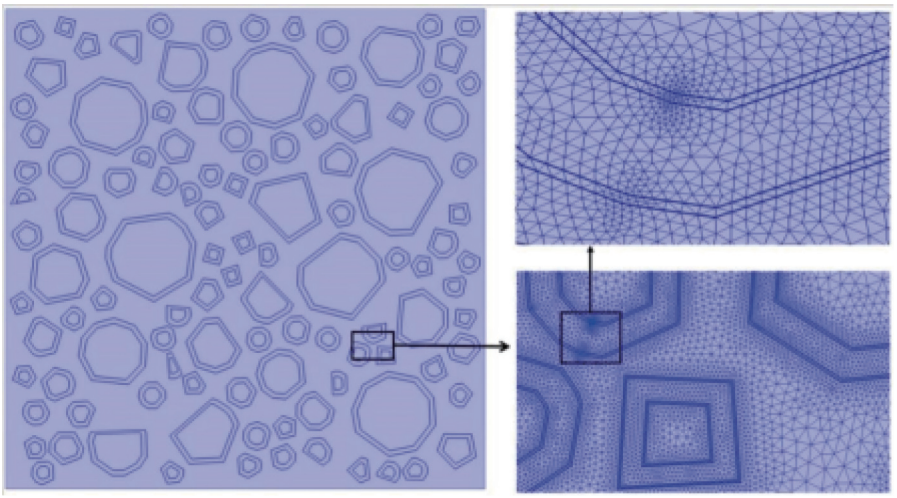


图1 模型生成结果及网格划分

随机骨料生成步骤如下:

步骤1 初始参数的设定和随机生成圆。

通过Range命令设定骨料投放范围的长 L 和宽 W, 则模型面积为 A=L×W。利用Rand(1)命令生成(0,1)的随机数 x_c 和 y_c, 为了使随机生成的圆在指定区域内, 故将随机数分别扩大 L 和 W 倍作为圆心坐标 x 和 y。

步骤2 边界效应及骨料重叠判断。

为了使生成的骨料更加贴合实际, 并且保证随机生成的圆形完全在给定范围内, 需要设定安全系数, 使模型边界与骨料之间有一定的安全距离。为了防止新生成的骨料与已有骨料发生重叠, 需要对2个骨料间的距离进行计算, 保证2个圆圆心距大于等于半径之和。

步骤3 随机确定圆上点的数量和位置。

利用Rand命令随机在圆上确定顶点数量, 再次利用Rand命令随机生成角度, 并利用sort命令对其进行排序, 最后利用三角函数原理确定顶点的具体位置。

步骤4 连接圆上点并计算骨料面积。

逆时针依次连接顶点, 生成多边形; 完成后计算骨料面积是否符合要求, 保存位置信息并输出, 完成骨料生成。

黏结旧砂浆的氯离子扩散系数是新砂浆的0.2~5.0倍[18−19], 选取 $D_{\mathrm{old,mor}}$=2$D_{\mathrm{new,mor}}$[24]。其界面过渡区相氯离子扩散系数和砂浆相氯离子扩散系数之比在1.3~16.2倍内变化[24−25], 取 D_{ITZ}=10D_{mor}[26]。核心天然骨料区结构致密, 渗透系数较小。因此在数值分析中假设核心区天然骨料的扩散系数与其他四相相比较, 氯离子扩散系数 D_{agg} 为0.2×10^{-12} m^2·s^{-1}。

Zheng等[27]通过研究提出了计算新砂浆氯离子扩散系数($D_{\mathrm{new,\,mor}}$)的公式:

$$D_{\mathrm{new,mor}}=\frac{2\varphi_{\mathrm{p}}^{2.75}D_{\mathrm{p}}}{\varphi_{\mathrm{p}}^{1.75}(3-\varphi_{\mathrm{p}})+\mathrm{n}(1-\varphi_{\mathrm{p}})^{2.75}} \tag{2}$$

$$\varphi_p = \frac{w/c - 0.17\alpha}{w/c + 0.32} \tag{3}$$

其中，$D_{new,\ mor}$ 表示新砂浆氯离子扩散系数，$m^2 \cdot s^{-1}$；D_p 表示氯离子在孔隙溶液中的扩散系数，取 $D_p = 1.07\times10^{-10}\ m^2 \cdot s^{-1}$[26]；n 为常数，取 14.44[27]；$\varphi_p$ 表示水泥砂浆的孔隙率；w/c 为水灰比；α 表示水化程度，取值 0 ~ 1[26]。

2 试验和分析

2.1 原材料 本试验中水泥选用普通硅酸盐水泥，试验所用细骨料选用天然河砂，从河南工业大学试验场选取废弃试块进行破碎作为 RCA。通过筛分试验，测得的 RCA 粒径级配情况如表 1 所示，可发现其满足连续级配的试验要求。RCA 和细骨料的物理性能如表 2 所示。

表 1 RCA 的筛分结果

试验次数	筛余/%	筛孔尺寸/mm				
		26.50	19.00	16.00	9.50	4.75
第一次	各级	0	4.67	26.48	30.25	37.93
	累计	0	4.67	31.15	61.40	99.33
第二次	各级	0	4.83	25.05	32.73	36.17
	累计	0	4.83	29.88	62.61	98.78

表 2 RCA 和细骨料的基本参数

类型	表观密度/(kg · m^{-3})	堆积密度/(kg · m^{-3})	含泥沙量/%	吸水率/%
RCA	2 583	1 250	2.5	4.22
细骨料	2 508	1 510	1.2	4.22

2.2 样品制备 如表 3 所示的配合比，通过人工搅拌的方式将上述原材料混合制成边长尺寸为 100 mm 的立方体试块，随后将其倒入提前备好的模具中，振捣 30 s。将浇筑面抹平后，放入标准恒温恒湿养护箱，24 h 后对试块进行拆模并做好标记，继续养护至 28 d。养护结束后，为有效模拟氯离子的一维扩散，实验前需选择一个较为平整的非浇筑面作为氯盐−干湿循环实验的侵蚀面，其余 5 个面不参与侵蚀，需要均匀涂刷一层环氧树脂。

表 3 RAC 试件配合比

类型	水胶比	水/(kg · m^{-3})	水泥/(kg · m^{-3})	细骨料/(kg · m^{-3})	粗骨料/(kg · m^{-3})	粗骨料体积含量/%
粗骨料	0.55	405	736	998	0	0
		352	640	723	536	20
		293	532	583	939	35
		225	408	461	1 341	50

2.3 试验过程 干湿循环是影响海洋环境中混凝土耐久性的一个关键因素。在干湿循环条件下，混凝土的氯离子浓度场和孔隙流体饱和度场的梯度比完全浸泡条件下更明显，氯离子在混凝土中的扩散速度比饱和状态下更快。因此，在海洋环境中，干湿循环对混凝土耐久性的破坏最为严重。采用干湿循环法分析 RCA 含量对氯离子扩散行为的影响，通过电极法测定不同侵蚀周期下 RAC 中的自由氯离子浓度。氯离子浓度可由 Nernst 方程拟合得出

$$E = E_0 - \mathrm{K} \cdot \lg[C] \tag{4}$$

其中，E_0 为原电池的电动势（当氯离子浓度为 1 mol · L^{-1} 时）；K 为能斯特方程斜率常数，20 ℃ 下取 0.059 1；C 为氯离子浓度，mol · L^{-1}。

当达到预定的干湿循环次数后,采用分层取样法对RAC进行钻孔取粉。使用直径为12 mm的混凝土台钻在侵蚀表面0~50 mm处钻孔取粉,共分8层。每层采集不少于10 g的粉末。将8 g粉末溶解到80 mL水中,摇匀并静置24 h后进行氯离子质量分数测定。公式如下:

$$W=\frac{M\times C\times V}{G}\times 100\% \tag{5}$$

其中,W为自由氯离子浓度占粉末样品的质量分数,%;M取35.452 7 g·mol^{-1};C为溶液的氯化物浓度,mol·L^{-1};V为溶解粉末样品所需去离子水的量,L;G为粉末样品的质量,g。

2.4 试验结果 氯盐干湿循环80、120、160、210和250 d后,RCA体积含量分别为0(C_1)、20%(C_2)、35%(C_3)和50%(C_4)时,其质量分数变化曲线如图2所示。

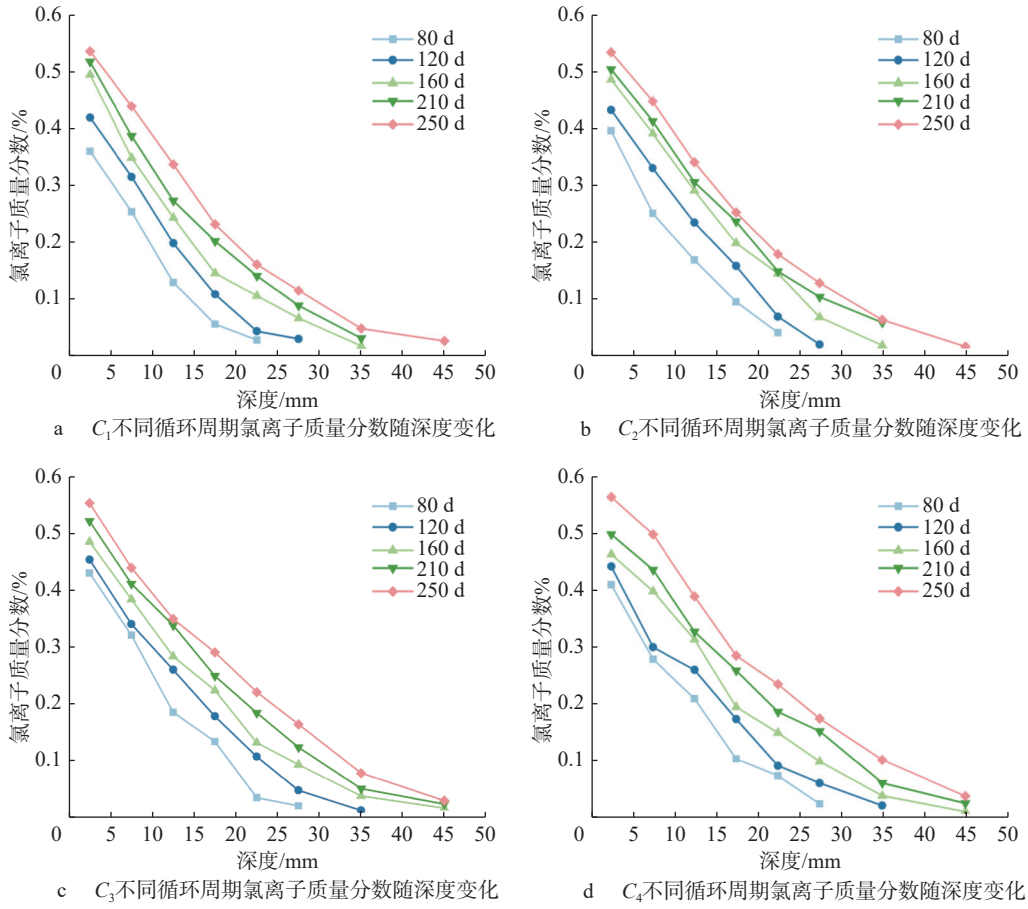


图2 不同干湿循环周期对不同RCA含量氯离子扩散行为的影响

从图2中可以看出,当RCA体积含量一定时,干湿循环周期的增加会加剧RAC中氯离子的扩散行为,导致其质量分数和扩散深度增加。当RCA体积含量为0和20%时,干湿循环周期由80 d增大到250 d时,氯离子扩散深度也由22.5 mm增大到45.0 mm。同样地,当RCA体积含量为35%和50%时,干湿循环周期由80 d增大到250 d时,氯离子扩散深度也由27.5 mm增大到45.0 mm。

当干湿循环周期一定时,RCA体积含量的增大也会导致氯离子质量分数和扩散深度的增大。当干湿循环周期达到80、120和160 d时,RCA体积含量由0增大到50%,氯离子扩散深度有明显增加;类似地,当干湿循环周期为210 d时,RCA体积含量为0的氯离子扩散深度为35.0 mm,而当体积含量增加到20%、35%和50%时,氯离子扩散深度增加到45.0 mm。

3 模型验证

为验证所建立数值模型的可行性,利用不同RCA含量下氯离子质量分数随深度变化的数据对模型

进行了验证，旧砂浆黏结率为 0.2，水化程度取 0.7，界面过渡区厚度均为 100 μm，新砂浆扩散系数取 10.57×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，旧砂浆扩散系数取 21.14×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，新界面过渡区扩散系数取 100×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，旧界面过渡区扩散系数取 211.4×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，骨料扩散系数取 0.2×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}。数值模拟与实验的结果对比如图 3 所示。从图 3 中可以看出，两者吻合情况较好，证明了所提出的细观模型可以用来模拟氯离子在 RAC 中的扩散情况。

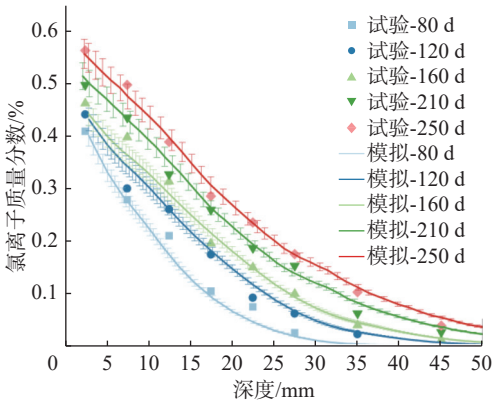


图 3　试验结果与数值分析对比

4　参数分析

4.1　旧砂浆厚度　由于再生骨料外部附着一层黏结旧砂浆的影响，导致再生骨料疏松多孔，进而影响其抗渗性能。为了探究旧黏结砂浆厚度 $T_{old,mor}$ 的影响，设定 $T_{old,mor}$ 为 0.5、1.0 和 1.5 mm 3 种不同工况。$T_{old,mor}$ 对 RAC 中氯离子扩散的影响如图 4 所示。从图 4 中可以看出，在同一扩散深度下，氯离子质量分数随旧砂浆厚度增大而增大，其中孔隙结构的变化为氯离子扩散提供了通道，导致旧砂浆含量的增加降低了 RAC 抗氯离子侵蚀能力。因此，在实际工程中，要尽量减小再生骨料中旧砂浆的含量。

4.2　RCA 体积分数　为探究 RCA 体积分数 V 的影响，设置了 6 组不同体积分数 (0、10%、20%、30%、40% 和 50%)。数值分析过程中，新砂浆扩散系数取 8×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，旧砂浆扩散系数取 16×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，新界面过渡区扩散系数取 80×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，旧界面过渡区扩散系数取 160×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，骨料扩散系数取 0.2×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}。不同体积分数对 RAC 氯离子扩散的影响，如图 5 所示。从图 5 中可以看出，当 V 从 0 增大到 50% 时，会加剧氯离子的渗透，导致同一深度处质量分数显著提高，这主要是由于 RCA 包裹着 ITZ 和旧黏结砂浆，其渗透性很强，随着粗骨料含量的增加，ITZ 和旧黏结砂浆含量随之增大。

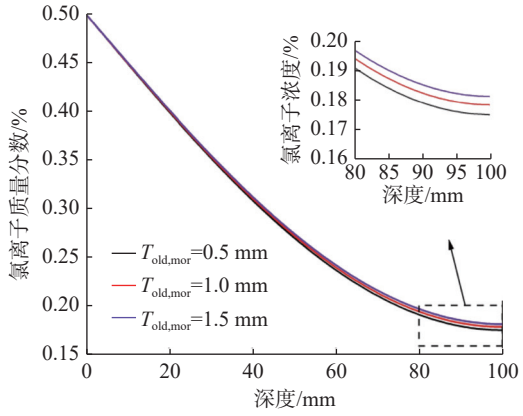


图 4　旧砂浆厚度的不同对氯离子扩散的影响

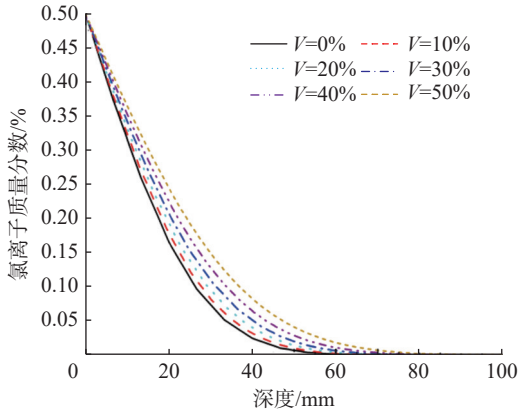


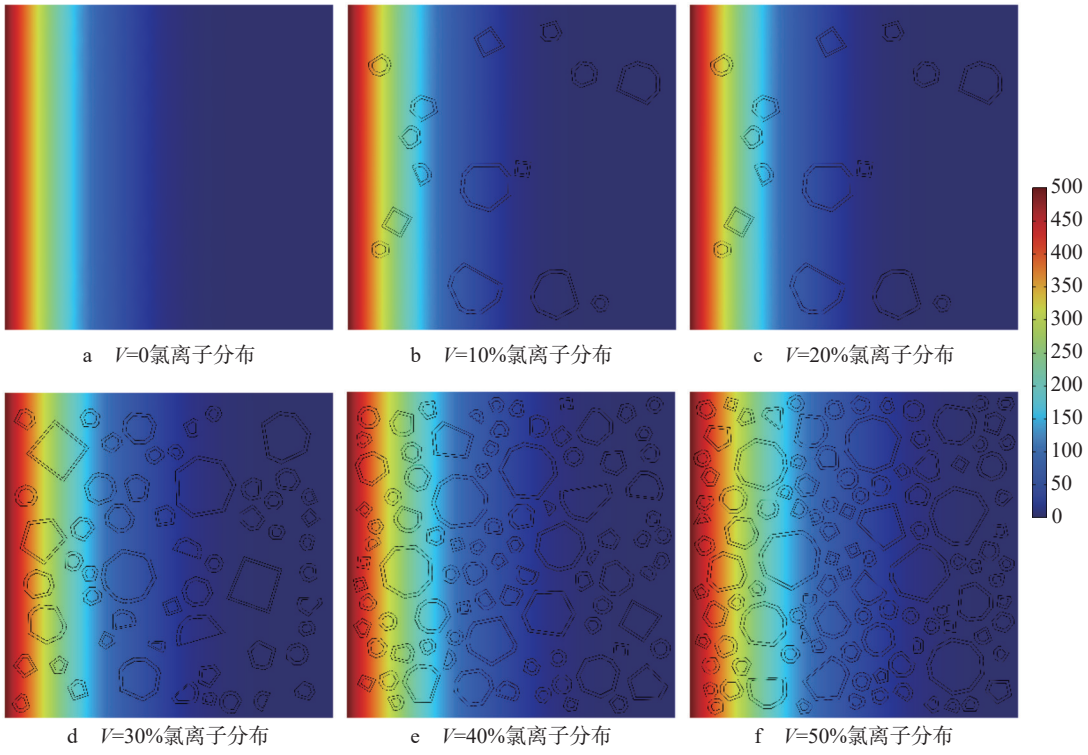
图 5　体积分数 V 对氯离子扩散的影响

为更加清楚地表示体积分数 V 的影响，RCA 体积分数 0 ~ 50% 的侵蚀云图如图 6 所示。从图 6 中可以看出，其扩散深度显著增加。

4.3　RCA 随机分布　为探究 RCA 的随机分布对氯离子传输的影响，利用编程软件对 RCA 进行随机投放，并探究在同一高度 y 和深度 x 下不同骨料分布对氯离子质量分数的影响。5 种骨料随机投放下，表面氯离子质量分数设置为 0.5%，侵蚀时间设置 300 d 的氯离子侵蚀云图如图 7 所示。数值分析中，新砂浆扩散系数取 8×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，旧砂浆扩散系数取 16×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，新界面过渡区扩散系数取 80×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，旧界面过渡区扩散系数取 160×10^{-12} m$^2\cdot$s^{-1}，骨料扩散系数取 0。

在氯离子扩散深度为 x=0 ~ 100 mm 时，可得到直线上各点的氯离子质量分数(x=40 mm 时的截线如图 8 所示)，扩散深度 0 ~ 100 mm 时各线上氯离子质量分数的最大值和平均值，如图 9 所示。从图 9 中可以看出，氯离子质量分数随着扩散深度的增加而逐渐降低。由于再生骨料的随机性，氯离子质量分数会

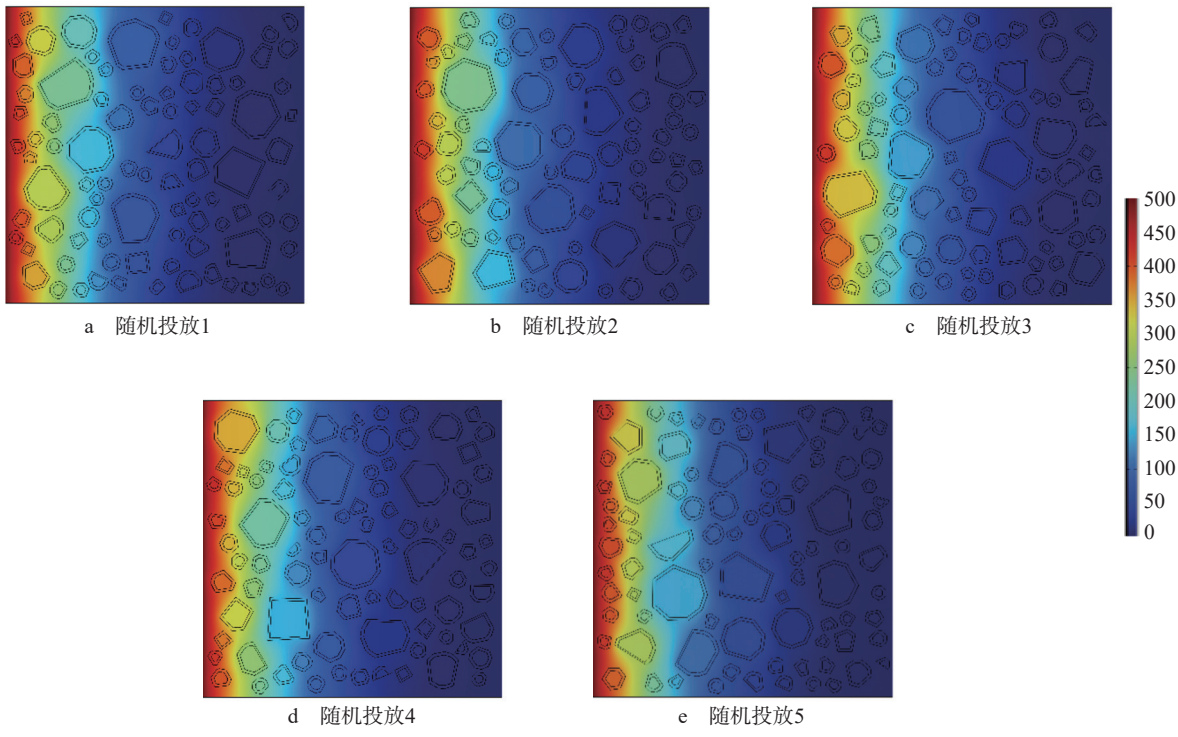
有一定的波动,但波动范围较小,对氯离子的扩散影响不大,说明此模型具有较好的稳定性。



a V=0氯离子分布 b V=10%氯离子分布 c V=20%氯离子分布

d V=30%氯离子分布 e V=40%氯离子分布 f V=50%氯离子分布

图 6 不同体积分数下氯离子侵蚀云图 (t= 300 d)



a 随机投放1 b 随机投放2 c 随机投放3

d 随机投放4 e 随机投放5

图 7 5 种随机投放侵蚀结果

同样地,在高度(y 方向)分别为 20、40、60 和 80 mm 时,氯离子质量分数也是如此,高度 y = 40 mm 处截线,如图 10 所示。在不同高度(y 方向)测量的氯离子质量分数随深度变化的曲线,如图 11 所示。从图 11 中可以看出,不同高度处氯离子质量分数随扩散深度逐渐降低,由于再生骨料位置不同,导致不同

高度处氯离子质量分数会有所波动，但对氯离子质量分数影响不大。

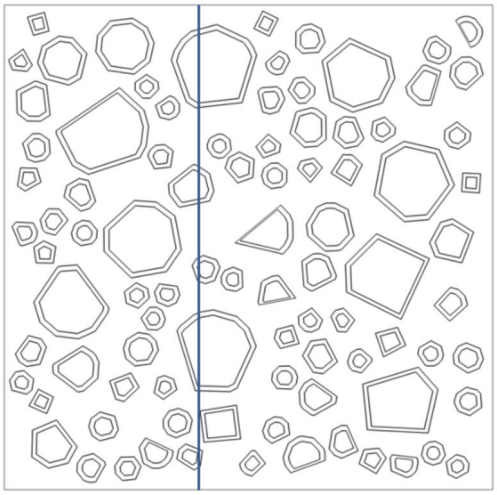
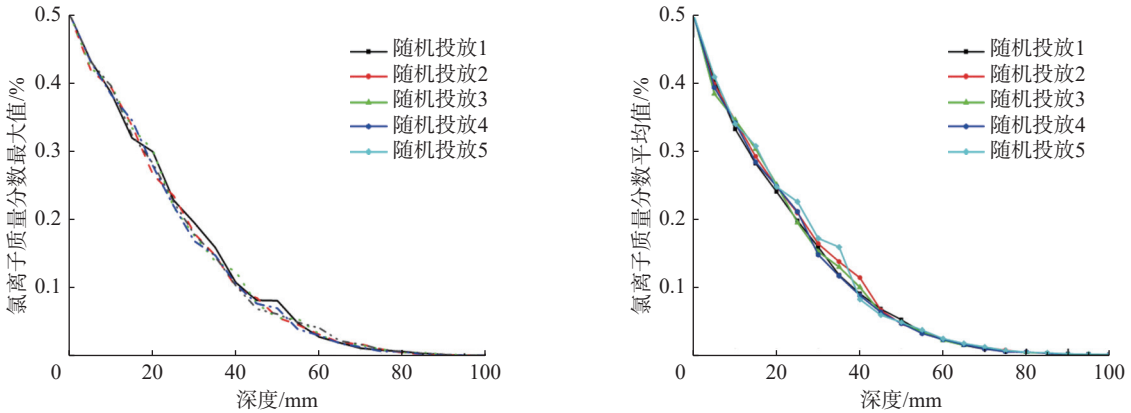


图 8　深度 x=40 mm 处截线



a　氯离子质量分数最大值　　b　氯离子质量分数平均值

图 9　不同深度处氯离子质量分数最大值和平均值

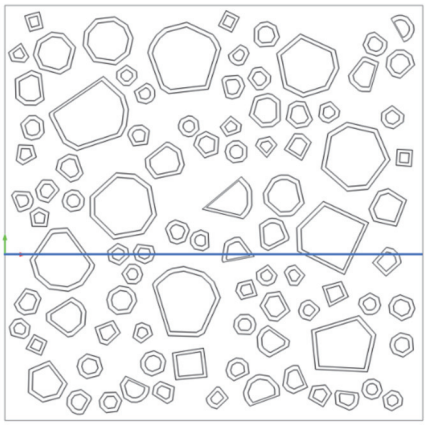


图 10　高度 y=40 mm 处截线

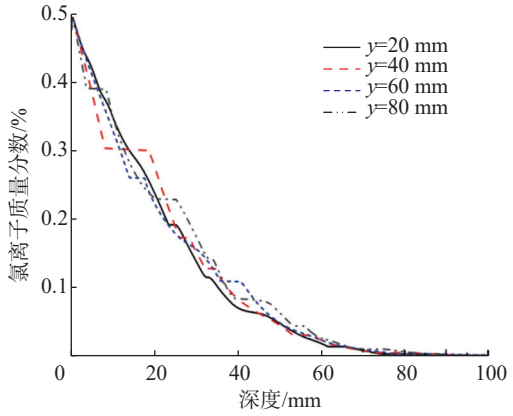


图 11　不同高度处氯离子质量分数变化值

5　结　论

本研究采用构建了再生混凝土五相细观模型，并结合氯离子传输理论，建立了氯离子传输的细观分析模型，通过实验对该模型进行了验证，得出以下结论：

（1）通过氯盐−干湿循环试验，探究不同 RCA 体积含量对氯离子传输的影响，干湿循环周期和

RCA体积含量的增大都会加剧氯离子扩散。通过与模拟结果对比,发现其吻合度较好,表明此模型具有可行性。

(2)旧砂浆厚度不断增大,氯离子质量分数在同一扩散深度处亦逐渐增大;再生骨料体积分数的增加会加快氯离子的传输速率。当RCA体积分数从0增加到50%时,经计算可得氯离子扩散系数提升了102.0%,氯离子扩散深度扩大了23.9%。

(3)RCA随机分布的模型在相同扩散深度处氯离子质量分数最大值和平均值均在某点处上下波动,说明本文所提出的模型具有较好的稳定性。同样地,不同高度处氯离子质量分数的变化也证明了这一结论。

下一步对RAC耐久性的研究不应仅限于氯离子的侵蚀,还应考虑多种离子的耦合侵蚀;开发RAC的多相模型,如带有额外孔隙和微裂缝的RAC模型。此外,原始混凝土特性的不确定性导致RAC特性的不确定性,而RAC特性的变异性更大。因此,未来需要对随机再生骨料的RAC性能可靠性进行研究,以推进其在工程中的应用。

参考文献:

[1] HABERT G, MILLER S A, JOHN V M, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(11): 559−573.

[2] MIKULČIĆ H, KLEMEŠ J J, VUJANOVIĆ M, et al. Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 136: 119−132.

[3] KISKU N, JOSHI H, ANSARI M, et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material[J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 721−740.

[4] KIM K, SHIN M, CHA S. Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 499−507.

[5] ALYASEEN A, PODDAR A, KUMAR N, et al. Influence of silica fume and *Bacillus subtilis* combination on concrete made with recycled concrete aggregate: experimental investigation, economic analysis, and machine learning modeling[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02638.

[6] ALYASEEN A, PODDAR A, ALAHMAD H, et al. High-performance self-compacting concrete with recycled coarse aggregate: comprehensive systematic review on mix design parameters[J]. Journal of Structural Integrity and Maintenance, 2023, 8(3): 161−178.

[7] CHEN W, JIN R Y, XU Y D, et al. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: a review of the scientific literature[J]. Construction and Building Materials, 2019, 218: 483−496.

[8] ZHENG L N, WU H Y, ZHANG H, et al. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China[J]. Construction and Building Materials, 2017, 136: 405−413.

[9] PARK W J, KIM T, ROH S, et al. Analysis of life cycle environmental impact of recycled aggregate[J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 1021.

[10] MARVILA M, DE MATOS P, RODRÍGUEZ E, et al. Recycled aggregate: a viable solution for sustainable concrete production[J]. Materials, 2022, 15(15): 5276.

[11] FERREIRA R M. Optimization of RC structure performance in marine environment[J]. Engineering Structures, 2010, 32(5): 1489−1494.

[12] WANG J B, CHE Z H, ZHANG K F, et al. Performance of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials (fly ash, GBFS, silica fume, and metakaolin): mechanical properties, pore structure, and water absorption[J]. Construction and Building Materials, 2023, 368: 130455.

[13] 金立兵, 王振豪, 武甜, 等. 受压混凝土中硫酸根离子的扩散与损伤机理分析 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(2):

121−128.
JIN L B, WANG Z H, WU T, et al. Analysis of sulfate ion diffusion and damage mechanism in compressed concrete[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(2): 121−128.

[14] SHICONG K, POON C S. Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2006, 21(4): 130−136.

[15] QIN H Y, ZHAO Y L, LUO B G, et al. Experimental study on the chloride diffusivity of recycled aggregate concrete[J]. Advanced Materials Research, 2011, 168−170: 1404−1408.

[16] ZHU P H, HAO Y L, LIU H, et al. Durability evaluation of recycled aggregate concrete in a complex environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 122569.

[17] BUN P, CYR M, LANIESSE P, et al. Concrete made of 100% recycled materials-feasibility study[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 180: 106199.

[18] XIAO J Z, YING J W, SHEN L M. FEM simulation of chloride diffusion in modeled recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29: 12−23.

[19] YING J W, XIAO J Z, SHEN L M, et al. Five-phase composite sphere model for chloride diffusivity prediction of recycled aggregate concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(9): 573−588.

[20] HU Z, MAO L X, XIA J, et al. Five-phase modelling for effective diffusion coefficient of chlorides in recycled concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 70(11): 583−594.

[21] WU Y, XIAO J Z. Multiscale digital-image driven stochastic finite element modeling of chloride diffusion in recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 239−252.

[22] 姚泽良, 令狐恬晶, 祁亚伦, 等. 随机球形骨料再生混凝土氯离子扩散研究 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40(11): 184−188, 194.
YAO Z L, LINGHU T J, QI Y L, et al. Chloride diffusion in recycled concrete with random spherical aggregates[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(11): 184−188, 194.

[23] LIU Q F, FENG G L, XIA J, et al. Ionic transport features in concrete composites containing various shaped aggregates: a numerical study[J]. Composite Structures, 2018, 183: 371−380.

[24] 金立兵, 余化龙, 王振清, 等. 再生混凝土抗氯离子渗透的五相细观数值模拟 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(1): 83−89.
JIN L B, YU H L, WANG Z Q, et al. Five-phase mesoscopic numerical simulation of chloride permeation resistance in recycled aggregate concrete[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(1): 83−89.

[25] YU Y, LIN L. Modeling and predicting chloride diffusion in recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 120620.

[26] 刘晶, 陈宣东, 虞爱平, 等. 再生混凝土氯离子扩散多相细观数值模拟 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(5): 1111−1118.
LIU J, CHEN X D, YU A P, et al. Multi-phase mesoscopic numerical simulation of chloride ion diffusion in recycled aggregate concrete[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(5): 1111−1118.

[27] ZHENG J J, ZHOU X Z. Analytical solution for the chloride diffusivity of hardened cement paste[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(5): 384−391.

作者贡献声明

金立兵、刘月芳负责研究构思与设计、提出研究问题、设计实验方案、确定理论框架等。

刘月芳、谢志恒、刘志勇负责数据收集与处理，进行实验、调查、访谈、仿真、数据采集与整理等。余化龙、刘志勇负责数据分析与解释，使用统计工具、理论分析、数据可视化、结果解读等。刘月芳、谢

志恒负责论文撰写,撰写初稿、修订内容、润色语言等。金立兵提供学术指导、实验设备、经费支持、数据资源等,对论文内容提出关键修改意见、逻辑调整等。

利益冲突声明

作者声明,不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

不适用:本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2024120201。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件中。如需获取与本文相关的其他数据,可向通信作者提出申请。

致谢(Acknowledgements)

本文得到河南省重点研发与推广专项(232103810080, 252102320021)、河南工业大学拓新团队培育项目(2024TXTD15)以及河南工业大学自科创新基金(2022ZKCJ06)支持。

This work was supported by the Special Focus on the Development and Promotion of Henan Province (232103810080, 252102320021), the Cultivation Project of Tuoxin Team in Henan University of Technology (2024TXTD15), and the Innovative Funds Plan of Henan University of Technology (2022ZKCJ06).

作者简介

刘月芳(1985—),女,广东韶关人,高级工程师,硕士,研究方向:新型仓储结构建筑与结构理论,E-mail: afang8511@163.com

金立兵(1976—),男,河南濮阳人,教授,博士,研究方向:混凝土结构基本理论和长期性能,E-mail: jinlb@haut.edu.cn

(责任编辑:高 喆,英文校对:张海滨)

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.