



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308142

引用格式:黄跃文,杨文瑞,刘利爱,等.盐-干湿循环耦合侵蚀下玄武岩纤维再生混凝土耐久性评价及寿命预测[J].科学技术与工程,2025,25(2):763-772.

Huang Yuewen, Yang Wenrui, Liu Li'ai, et al. Durability evaluation and life prediction of basalt fiber recycled concrete under salt-dry-wet cycle coupling erosion[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 763-772.

盐-干湿循环耦合侵蚀下玄武岩纤维再生混凝土 耐久性评价及寿命预测

黄跃文,杨文瑞*,刘利爱,周海,张勋,李成炜,熊小龙,钟勛文

(东华理工大学土木与建筑工程学院,南昌 330013)

摘要 为了研究盐溶液侵蚀下玄武岩纤维对再生混凝土耐久性能的影响,开展了不同玄武岩纤维掺量下再生混凝土试块在受到盐-干湿循环耦合侵蚀后耐久性能变化规律研究。基于熵权法建立了综合耐久性指标 D 值来评价再生混凝土耐久性能,分析了盐溶液干湿循环周期和玄武岩纤维掺量对 D 值的影响,并构建了 GM(1,1) 均值模型,用以揭示再生混凝土 D 值的时变规律,得到了不同条件下再生混凝土的预测寿命。结果表明: D 值可以反映出不同盐溶液干湿循环周期及玄武岩纤维掺量对再生混凝土耐久性能影响规律。随着盐溶液干湿循环周期的增加,试件 D 值呈现出逐渐下降的趋势,且变化趋于剧烈,表现为 D 值下降速率逐渐增大;玄武岩纤维的掺入可以有效提高再生混凝土 D 值,改善再生混凝土的耐久性能;玄武岩纤维掺量为 1.0% 时,耐久性能改善效果最佳;在数据量较少时,GM(1,1) 模型可以较为精确地预测再生混凝土在盐-干湿循环耦合侵蚀下 D 值的时变规律。

关键词 玄武岩纤维;再生混凝土;盐-干湿循环耦合侵蚀;耐久性;寿命预测

中图分类号 TU528.572; 文献标志码 A

Durability Evaluation and Life Prediction of Basalt Fiber Recycled Concrete under Salt-Dry-Wet Cycle Coupling Erosion

HUANG Yue-wen, YANG Wen-rui*, LIU Li-ai, ZHOU Hai, ZHANG Xun,

LI Cheng-wei, XIONG Xiao-long, ZHONG Xu-wen

(School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

[Abstract] In order to study the effect of basalt fiber on the durability of recycled concrete under the erosion of salt solution, the durability of recycled concrete specimens with different basalt fiber contents after salt-dry-wet cycle coupling erosion was studied. A comprehensive durability index D value was established to evaluate the durability of recycled concrete based on the entropy weight method. The effects of dry-wet cycle period of salt solution and basalt fiber content on D value were analyzed. A GM(1,1) mean model was constructed to reveal the time-varying law of the D -value of recycled concrete, and the predicted life of recycled concrete under different conditions was obtained. The results show that the D value can reflect the influence of different salt solution dry-wet cycle cycles and basalt fiber content on the durability of recycled concrete. As the salt solution's dry-wet cycle increased, the D value of the specimen gradually decreased, indicating a severe change. However, adding basalt fiber to the recycled concrete can effectively enhance its D value and durability. When the content of basalt fiber is 1.0%, the durability of recycled concrete is the best. The GM(1,1) model can more accurately predict the time-varying pattern of D values of recycled concrete under coupled salt-dry-wet cycle erosion when the amount of data is small.

[Keywords] basalt fiber; recycled concrete; salt-dry-wet cycle coupled erosion; durability; life prediction

再生混凝土是建筑垃圾回收利用以及缓解环境污染和资源损耗的有效方法之一^[1-5],其应用减

少了天然碎石和天然河沙的开采,减缓了自然资源过度开发造成的不良影响。由于再生混凝土中

收稿日期:2023-10-29; 修订日期:2024-10-17

基金项目:国家自然科学基金(51178361,52368012);江西省自然科学基金(20232BAB204066,20181BAB216027);江西省重点研发计划(20202BBG73037);江西省教育厅科技项目(GJJ170486);江西省交通运输厅科技项目(2017C0002)

第一作者:黄跃文(2000—),男,汉族,江西宜春人,硕士研究生。研究方向:纤维再生混凝土性能。E-mail:2100775192@qq.com。

*通信作者:杨文瑞(1986—),女,汉族,江西南昌人,博士,副教授。研究方向:新型材料应用与结构耐久性。E-mail:wryang99@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

分布着较多的再生骨料,其表面还残留着原始水泥砂浆(original cement mortar, OCM), OCM 的结构表现为松散多孔,外部和内部均分布着细小的微裂缝,从而导致新老砂浆与再生骨料之间的黏结强度大大降低,以致再生混凝土的相关力学性能和耐久性无法达到预期效果^[6-9]。对此,研究者们通过不同方法对再生混凝土进行改性处理。例如,通过添加纤维(钢纤维、玻璃纤维、聚乙烯醇纤维、玄武岩纤维等)的方法提高再生混凝土的抗裂性、抗渗性和耐腐蚀性^[10-12];通过内置或外置纤维增强复合材料玻璃纤维筋(glass fiber reinforced polymer, GFRP)和玄武岩纤维筋(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)等改善构件的力学性能^[13-15];通过对再生骨料进行预处理,主要包括水泥浆预包裹^[16-17]和化学试剂预处理等方法^[18-20]对再生混凝土进行改性处理。其中,玄武岩纤维(basalt fiber)作为一种新型的绿色环保型材料,其弹性模量和抗拉强度分别达到了 9 100 ~ 11 000 kg/mm 和 3 800 ~ 4 800 MPa,在耐久性方面具有较好的耐高温性、耐水性、耐腐蚀性,与碳纤维、芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维被列为中国四大重点发展的纤维材料,如今已被广泛用于各行业中。

在中国沿海地区及盐湖地区混凝土结构常遭受盐侵蚀,导致混凝土耐久性能下降,使用寿命缩短。在气候的影响下甚至还表现为盐-干湿循环耦合侵蚀,此耦合作用影响下对混凝土的劣化效应更为显著^[21-23]。盐侵蚀中主要包括了金属离子(Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Ca^{2+})、非金属离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})以及众多的有机物和无机物,当混凝土受到潮湿环境和结合水的耦合影响后,其内部局部成分会发生物理反应和化学反应,对混凝土造成物理和化学的双重侵蚀损伤,从而影响混凝土的相关性能。针对盐侵蚀下混凝土性能的损伤劣化情况,中外学者采取不同的方法改善其劣化程度,如添加粉煤灰和高炉矿渣可以减缓氯离子的侵蚀^[24-26],还有研究表明添加纤维材料后也可以减缓盐类对混凝土的侵蚀影响^[27-29]。

为确保混凝土结构使用安全,研究人员提出了质量^[30]、抗压强度^[31]、抗劈拉强度^[32]和膨胀率^[33]等耐久性指标对混凝土耐久性劣化过程进行评价。然而,现有研究大多采用单一耐久指标对混凝土耐久性能进行评价,并不能全面反映混凝土的耐久性能,且采用单一耐久性指标进行评价时常会与其他指标评价结果产生矛盾。因此,建立一种混凝土耐

久性综合评价体系是有必要的。

混凝土寿命预测是耐久性研究的一个重要目的。许多学者根据试验数据,采用灰色系统理论建立了混凝土的寿命预测模型^[34-36]。侯永利等^[35]以相对动弹性模量为指标,利用 GM(1,1)模型的原始差分、均值、均值差分、离散 4 种形式建立了玄武岩纤维再生混凝土的抗冻性预测模型,预测了 BFRC 在内蒙古地区受冻融循环单因素作用的使用寿命。徐存东等^[37]采用灰色系统理论和 Weibull 理论对 3 种不同冻融工况下,不同玄武岩纤维掺量的混凝土和普通混凝土进行冻融试验研究,并对其耐久性寿命进行预测,结果发现灰色预测和 Weibull 两种模型的寿命预测结果大致相似,其中灰色预测模型所需样本容量较小。众多研究表明了运用灰色系统理论对混凝土进行寿命预测的可行性,灰色系统理论的特点是以少数据、贫信息系统进行科学的建模预测,可有效节约试验成本与时间。

针对以上问题,现开展玄武岩纤维再生混凝土复合盐-干湿循环耦合侵蚀试验,根据再生混凝土的质量、抗压强度和抗劈拉强度 3 个耐久性指标试验值,采用熵权法建立综合耐久性指标 D 值来评价再生混凝土的耐久性能,讨论盐溶液干湿循环周期及玄武岩纤维掺量对 D 值的影响,最后建立 GM(1,1)均值模型对再生混凝土的寿命进行预测,以期对盐-干湿循环耦合侵蚀下玄武岩纤维再生混凝土在实际工程中的应用提供参考。

1 试验设计

1.1 试验材料和试件设计

再生粗骨料取自于正在维修的施工道路,进行破碎后根据骨料的连续级配 5 ~ 20 mm 对再生骨料进行筛分。相关研究表明:当再生骨料替代率为 25% 时,混凝土的 7 d 强度会略有提高,且平均弹性模量降低幅度最小仅为 4%,与其他再生骨料替代率相比对混凝土的工作性能的影响较小;另一方面,瑞士政府也规定所有的公共建筑至少使用 25% 的再生骨料^[38-40]。因此,再生骨料替代率选取为 25%。本次试验使用强度等级为 42.5 的硅酸盐水泥,纤维增强复合材料选取玄武岩纤维,相应的玄武岩纤维物理特性如表 1 所示。玄武岩纤维和再生骨料破碎筛分过程分别如图 1 和图 2 所示。本次试验配合比参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011),具体数值如表 2 所示。混凝土试件的设计参数如表 3 所示。

表1 玄武岩纤维相关参数

Table 1 Basalt fiber related parameters

纤维类型	密度/ (g·cm ⁻³)	拉伸强 度/MPa	弹性模 量/GPa	长度/ mm	极限伸 长率/%
玄武岩纤维	2.65	1 050	7.6	12	3

表2 再生混凝土配合比

Table 2 Mixing ratios of recycled concrete

水泥	NCA	RCA	砂子	水	粉煤灰	减水剂
1	2.37	0.79	1.92	0.46	0.21	0.01

注:NCA为天然粗骨料;RCA为再生粗骨料。

表3 试件分组设计

Table 3 Specimen grouping design

试件编号	纤维掺 量/%	立方体抗压试件	
		尺寸(mm×mm×mm)	数量
BRC-0-0	0	150×150×150	3
BRC-30-0		150×150×150	3
BRC-60-0		150×150×150	3
BRC-90-0		150×150×150	3
BRC-0-0.5	0.5	150×150×150	3
BRC-30-0.5		150×150×150	3
BRC-60-0.5		150×150×150	3
BRC-90-0.5		150×150×150	3
BRC-0-1.0	1.0	150×150×150	3
BRC-30-1.0		150×150×150	3
BRC-60-1.0		150×150×150	3
BRC-90-1.0		150×150×150	3
BRC-0-1.5	1.5	150×150×150	3
BRC-30-1.5		150×150×150	3
BRC-60-1.5		150×150×150	3
BRC-90-1.5		150×150×150	3

注:BRC为玄武岩纤维再生混凝土;0、30、60和90为干湿循环周期;0、0.5、1.0和1.5为玄武岩纤维掺量。



图1 玄武岩纤维

Fig.1 Basalt fibers

1.2 试件制作与试验方法

利用单卧轴搅拌机进行混合料搅拌,随后进行装模,待试件浇筑成型静置24 h后脱模取出试件,如图3所示。

沿海地区的盐土中表层盐浓度一般为0.6%~1.0%,本次试验溶液浓度设置为普通沿海地区盐土浓度的5倍以上,即处于3%~5%。NaCl和

Na₂SO₄溶液的配制选取分析纯等级的无水氯化钠和无水硫酸钠,浓度均为5%。试件采用半浸泡的方式进行干湿循环。具体方式为,将试件浸泡于复合盐溶液中,溶液更换周期为30 d(届时利用电热棒和温度计实时保持水温处于30℃的温度),在30 d内,试件每在溶液中浸泡12 h后取出擦干表面水分,在30℃的烘箱内静置12 h,以此为一个干湿循环,即1 d为一个干湿循环周期。在干湿循环周期分别达到0、30、60、90 d时间节点时,取出试件开始试验,测量试件的质量、抗压强度和抗劈拉强度。



图2 再生粗骨料破碎筛分过程

Fig.2 Recycled coarse aggregate crushing and screening process



图3 混凝土浇筑和静置

Fig.3 Concrete pouring and standing

2 基于熵权法的再生混凝土耐久性综合评价

经过实际环境下复合盐-干湿循环耦合侵蚀作用的影响,再生混凝土的各项力学性能和耐久性指标都会发生不同程度的变化。由于这些指标对再生混凝土性能的影响程度不同,因此需要综合考虑多种评价指标对其性能的影响。然而,简单地对这些指标进行叠加并不科学,因此需要使用权重反映它们对再生混凝土性能的影响程度。兰素恋等^[41]提出了一种综合评估混凝土性能指标的

公式,定义为本文的综合耐久性评价 D 值,计算公式为

$$D = \sum_{i=1}^n q_i S_i \quad (1)$$

式(1)中: q_i 为盐-干湿循环耦合侵蚀下再生混凝土第 i 个指标的权重; S_i 为盐-干湿循环耦合侵蚀下再生混凝土第 i 个指标标准化处理后的样本值。

2.1 标权重计算步骤

克劳修斯为了描述热力学循环中温度及热的变化关系,提出了“熵”的概念,后来,申农则将热力学的“熵”引入信息论中,从而出现了信息熵的概念^[42]。在工程评价中,熵权法是一种客观赋权法,通过使用信息熵对各个指标进行赋权,可以客观地反映初始数据的重要性。具体计算权重的步骤如下。

(1)假设混凝土耐久性性能指标有 m 个评价对象, n 个指标个数,那么初始指标矩阵为

$$A = (a_{ij})_{mn}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式(2)中: a_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个评价对象的样本值。

(2)由于各个指标量纲不同,所以需要对初始指标矩阵进行标准化处理消除量纲。对各个指标进行无量纲化处理得到的标准化指标矩阵 $X = (x_{ij})_{mn}$, 计算公式为

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{1j}}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

(3)比重矩阵 $P = (p_{ij})_{mn}$ 。 p_{ij} 作为计算信息熵时的概率,计算公式为

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

(4)评价指标的信息熵矩阵 $E = (e_j)$ 。 e_j 表示第 j 个性能指标的信息熵,计算公式为

$$e_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} I_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式(5)中: $I_{ij} = -\ln p_{ij}$, 为混凝土第 j 个指标下第 i 个评价对象的信息量。

(5)权重矩阵 $W = (w_j)$, w_j 表示混凝土第 j 个指标的权重,计算公式为

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式(6)中: $d_j = 1 - e_j$, 为混凝土第 j 个指标的信息效用值。指标的信息熵越大,携带信息量越少,信息效用值越小。

2.2 综合耐久性指标 D 值的确定

选取质量、抗压强度和抗劈拉强度作为综合评价混凝土耐久性能的指标,16 组复合盐-干湿循环耦合侵蚀作用下的再生混凝土试件作为评价对象。试件数据如表 4 所示,通过以下步骤计算不同指标权重。

(1)根据试验数据,构建初始耐久性指标矩阵 A , 公式为

$$A = \begin{bmatrix} 31.7 & 2.84 & 7.948 \\ 32.7 & 2.93 & 8.075 \\ 34.3 & 3.08 & 7.867 \\ 33.3 & 3.04 & 7.904 \\ 30.7 & 2.75 & 7.923 \\ 31.6 & 2.83 & 8.055 \\ 33.1 & 2.95 & 7.846 \\ 32.2 & 2.90 & 7.883 \\ 29.4 & 2.63 & 7.878 \\ 30.2 & 2.70 & 8.009 \\ 31.3 & 2.80 & 7.810 \\ 30.8 & 2.78 & 7.848 \\ 28.2 & 2.47 & 7.848 \\ 28.8 & 2.53 & 7.997 \\ 30.1 & 2.62 & 7.773 \\ 29.3 & 2.58 & 7.812 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(2)对初始指标矩阵 A 进行标准化,采用式(3)对矩阵 A 进行计算,得到标准化指标矩阵 X , 公式为

$$X = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 1.0315 & 1.0317 & 1.0160 \\ 1.0820 & 1.0845 & 0.9898 \\ 1.0505 & 1.0704 & 0.9945 \\ 0.9685 & 0.9690 & 0.9969 \\ 0.9968 & 0.9959 & 1.0135 \\ 1.0442 & 1.0387 & 0.9872 \\ 1.0158 & 1.0228 & 0.9918 \\ 0.9274 & 0.9272 & 0.9912 \\ 0.9527 & 0.9507 & 1.0077 \\ 0.9874 & 0.9859 & 0.9826 \\ 0.9716 & 0.9793 & 0.9874 \\ 0.8896 & 0.8697 & 0.9874 \\ 0.9085 & 0.8908 & 1.0062 \\ 0.9495 & 0.9225 & 0.9780 \\ 0.9243 & 0.9085 & 0.9829 \end{bmatrix} \quad (8)$$

(3)分别对质量、抗压强度和抗劈拉强度 3 个指标采用式(4)计算出不同评价对象比重,得出比重矩阵 P , 公式为

$$P = \begin{bmatrix} 0.0637 & 0.0639 & 0.0628 \\ 0.0657 & 0.0659 & 0.0638 \\ 0.0689 & 0.0693 & 0.0622 \\ 0.0669 & 0.0684 & 0.0625 \\ 0.0617 & 0.0619 & 0.0626 \\ 0.0635 & 0.0636 & 0.0637 \\ 0.0665 & 0.0664 & 0.0620 \\ 0.0647 & 0.0654 & 0.0623 \\ 0.0591 & 0.0593 & 0.0623 \\ 0.0607 & 0.0608 & 0.0633 \\ 0.0629 & 0.0630 & 0.0618 \\ 0.0619 & 0.0626 & 0.0621 \\ 0.0567 & 0.0556 & 0.0621 \\ 0.0579 & 0.0569 & 0.0632 \\ 0.0605 & 0.0590 & 0.0615 \\ 0.0589 & 0.0581 & 0.0618 \end{bmatrix} \quad (9)$$

(4)分别对质量、抗压强度和抗劈拉强度3个指标采用式(5)计算出信息熵矩阵 E , 公式为

$$E = [0.9995 \quad 0.9993 \quad 1.0000] \quad (10)$$

(5)分别对质量、抗压强度和抗劈拉强度3个指标采用式(6)计算出权重矩阵 W , 公式为

$$W = [0.4200 \quad 0.5628 \quad 0.0172] \quad (11)$$

表4 试件数据表

Table 4 Specimen data sheet

试件编号	抗压强度/MPa	抗劈拉强度/MPa	质量/kg
BRC-0-0	31.7	2.84	7.948
BRC-0-0.5	32.7	2.93	8.075
BRC-0-1.0	34.3	3.08	7.867
BRC-0-1.5	33.3	3.04	7.904
BRC-30-0	30.7	2.75	7.923
BRC-30-0.5	31.6	2.83	8.055
BRC-30-1.0	33.1	2.95	7.846
BRC-30-1.5	32.2	2.90	7.883
BRC-60-0	29.4	2.63	7.878
BRC-60-0.5	30.2	2.70	8.009
BRC-60-1.0	31.3	2.80	7.810
BRC-60-1.5	30.8	2.78	7.848
BRC-90-0	28.2	2.47	7.848
BRC-90-0.5	28.8	2.53	7.997
BRC-90-1.0	30.1	2.62	7.773
BRC-90-1.5	29.3	2.58	7.812

将混凝土各指标权重和标准化后的样本值代入式(1),可得综合评价指标 D ,各组试件 D 值计算结果如表5所示。

2.3 盐溶液干湿循环周期对再生混凝土 D 值的影响

通过标准化公式[式(3)]消除量纲后,可以根

据 D 值对质量、抗压强度和抗劈拉强度三个指标进行综合评价来衡量混凝土的性能, D 值越大说明混凝土的性能越好。同一纤维掺量下, D 值随复合盐溶液干湿循环周期变化情况如图4所示。从图4可以看出,随着复合盐溶液干湿循环周期的增加,试件 D 值呈现出逐渐下降的趋势,且随着干湿循环周期的增加,试件 D 值的变化趋于剧烈,表现为 D 值下降速率逐渐增大。在复合盐溶液干湿循环周期为0~30 d时,试件 D 值变化速率较为缓慢,变化幅度较小,此时各纤维掺量下, D 值的下降百分比分别为3.08%、3.37%、3.85%和3.90%;干湿循环周期为30~60 d时,试件 D 值下降速率增大,此时各纤维掺量下 D 值下降百分比分别为4.21%、4.43%、5.15%和4.23%;干湿循环周期为60~90 d时,试件 D 值下降速率最大,此时各纤维掺量下 D 值下降百分比分别为5.20%、5.48%、5.24%和6.13%。

出现该现象的原因为:在复合盐溶液干湿循环初期,再生混凝土受侵蚀影响较小,侵蚀现象不明显,再生混凝土性能影响较小, D 值变化缓慢;随着干湿循环周期的增加,再生混凝土复合盐溶液干湿循环的影响逐渐增大,侵蚀现象逐渐明显,试块表面有明显的侵蚀痕迹,再生混凝土的性能下降, D 值下降速率增大;干湿循环周期为60~90 d时,侵蚀现象最为明显,再生混凝土表皮存在剥落现象,性能影响严重, D 值的变化最剧烈。

表5 D 值计算结果

Table 5 D value calculation results

干湿循环周期/d	不同纤维掺量(%)下的 D 值			
	0	0.5	1.0	1.5
0	1.0000	1.0314	1.0818	1.0607
30	0.9692	0.9966	1.0401	1.0193
60	0.9284	0.9525	0.9865	0.9762
90	0.8801	0.9003	0.9348	0.9164

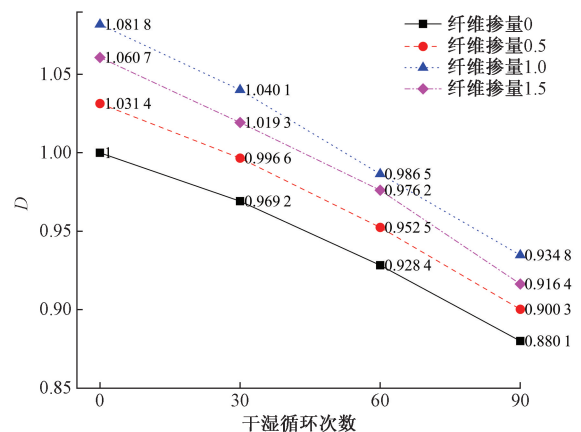


图4 不同干湿循环周期下 D 值变化

Fig. 4 Variation of D value under different dry-wet cycle period

2.4 玄武岩纤维掺量对再生混凝土 D 值的影响

不同玄武岩纤维掺量下 D 值变化如图 5 所示。从图 5 可以看出,干湿循环周期相同时,再生混凝土 D 值随纤维掺量的变化大致经历了两个阶段:玄武岩纤维掺量为 0 ~ 1.0% 时,随着纤维掺量的增加,各干湿循环周期下的再生混凝土 D 值上升至峰值,分别为 1.081 8、1.040 1、0.986 5 和 0.934 8;达到峰值后,随着纤维掺量的增加,四种干湿循环周期下的再生混凝土 D 值开始下降,在纤维掺量达到 1.5% 时, D 分别为 1.060 7、1.019 3、0.976 2 和 0.916 4。在整个掺入纤维的过程中,再生混凝土 D 值均高于未掺入纤维的 D 值。结果表明,玄武岩纤维的合理掺入可以提高盐溶液干湿循环下再生混凝土的耐久性能,且玄武岩纤维掺量为 1.0% 时,对再生混凝土的耐久性能改善效果最佳。

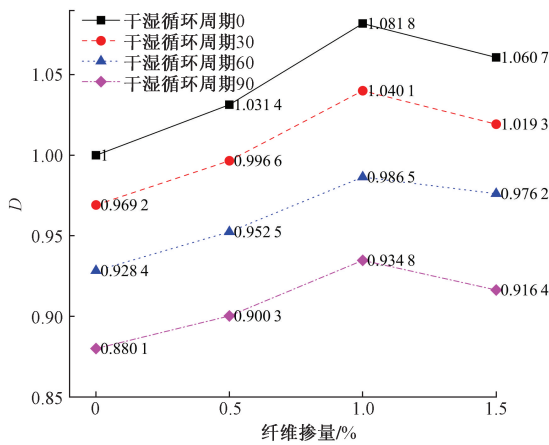


图 5 不同纤维掺量下 D 值变化

Fig. 5 The change of D value under different fiber content

在再生混凝土中,掺入一定量的玄武岩纤维,能够提高混凝土的密实性,同时纤维在再生混凝土中可以起到桥接作用,加强再生混凝土内部骨料间的黏结性,从而提高混凝土的抗压强度及抗劈拉强度,减少再生混凝土在复合盐溶液干湿循环下的质量损失,能有效地改善再生混凝土的耐久性能;随着玄武岩纤维的不断掺入,过量的纤维会产生纤维成团现象,从而降低玄武岩纤维对再生混凝土耐久性能的改善效果。因此,在实际工程中,应选用掺入 1.0% 的玄武岩纤维来改善再生混凝土的耐久性能。

3 运用 GM(1,1) 模型对混凝土进行寿命预测

GM(1,1) 模型以少数据、贫信息系统进行科学的建模预测,可有效节约试验成本与时间,且在数据量较少时,GM(1,1) 模型的预测结果较为精确。

3.1 GM(1,1) 模型的建立及精度检验

采用 GM(1,1) 模型的均值形式对再生混凝土

的耐久性值进行预测。

将复合盐溶液浸泡下某纤维掺量的玄武岩纤维再生混凝土经历 90 d 干湿循环周期所得 D 值作为原始序列,记为 X^0 。

$$X^0 = \{x^0(1), x^0(2), \dots, x^0(n)\} \quad (12)$$

将原始序列 X^0 进行一次累加,得到新序列 X^1 , 则

$$X^1 = \{x^1(1), x^1(2), \dots, x^1(n)\} \quad (13)$$

式(13)中: $x^1(k) = \sum_{i=1}^k x^0(i)$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

定义 $Z^1 = \{z^1(1), z^1(2), \dots, z^1(n)\}$, 其中 $z^1(k) = \frac{1}{2}[x^1(k) + x^1(k-1)]$, $k = 2, 3, \dots, n$ 。

GM(1,1) 的均值形式为

$$x^0(k) + az^1(k) = b \quad (14)$$

白化微分方程为

$$\frac{dx^1}{dt} + ax^1 = b \quad (15)$$

式中: a 为发展系数; b 为灰色作用量。

定义向量 $A = (a, b)^T$, 采用最小二乘法计算向量 A 。

$$A = (a, b)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (16)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x^0(2) \\ x^0(3) \\ \vdots \\ x^0(n) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$B = \begin{bmatrix} -z^1(1) & 1 \\ -z^1(2) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^1(n-1) & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

通过计算,可以得到 GM(1,1) 模型的均值时间响应方程为

$$\hat{X}(k) = \left[x^0(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

用累减公式对式(19)进行还原,即可计算出模型预测值序列,即

$$\hat{X} = \{\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)\} \quad (20)$$

模型建立完成后,为保证模型的可靠性,还需对模型进行精度检验。根据均方差比值 C 和小误差概率 p 两个指标来评定模型预测精度等级。

模型残差序列为 $\varepsilon^0 = \{\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(n)\}$, 其中 $\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

X^0 的均值与方差分别为 \bar{x} 和 S_1^2 , 残差序列的均值与方差分别为 $\bar{\varepsilon}$ 和 S_2^2 。

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^0(k) \\ S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \{x^0(k) - \bar{x}\}^2 \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon^0(k) \\ S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \{\varepsilon^0(k) - \bar{\varepsilon}\}^2 \end{cases} \quad (22)$$

则均方差比值为

$$C = \frac{S_2}{S_1} \quad (23)$$

小误差概率为

$$p = P(|\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745S_1) \quad (24)$$

3.2 D 值预测结果及分析

根据试验数据即可计算出 GM(1,1) 模型各参数,结果如表 6 所示。模型精度等级参照表如表 7 所示。

根据 GM(1,1) 模型预测结果可知,模型的预测值与试验值非常接近,在干湿循环周期为 60 d 时,

表 6 GM(1,1) 模型预测结果

Table 6 GM(1,1) model prediction results

纤维掺量/%	干湿循环周期/d	试验值 <i>D</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	预测值 <i>D</i>	<i>C</i>	<i>p</i>
0	0	1.000 0	0.048 0	1.042 1	1.000 0	0.043 8	1
	30	0.969 2			0.970 5		
	60	0.928 4			0.925 0		
	90	0.880 1			0.881 6		
0.5	0	1.031 4	0.050 6	1.075 7	1.031 4	0.043 8	1
	30	0.996 6			0.998 1		
	60	0.952 5			0.948 8		
	90	0.900 3			0.902 0		
1.0	0	1.081 8	0.053 3	1.125 7	1.081 8	0.003 8	1
	30	1.040 1			1.040 0		
	60	0.986 5			0.986 0		
	90	0.934 8			0.934 8		
1.5	0	1.060 7	0.052 8	1.105 4	1.060 7	0.074 2	1
	30	1.019 3			1.022 1		
	60	0.976 2			0.969 5		
	90	0.916 4			0.919 6		

表 7 精度检验等级参照表^[43]

Table 7 Reference table of model accuracy check levels^[43]

评定指标	优(I级)	良(II级)	中(III级)	差(IV级)
均方差比值 <i>C</i>	0.35	0.50	0.65	0.80
小误差概率 <i>p</i>	0.95	0.80	0.70	0.60

表 8 GM(1,1) 模型再生混凝土寿命预测值

Table 8 Predicted values of recycled concrete life for the GM(1,1) model

纤维掺量/%	预测值/d
0	191
0.5	199
1.0	213
1.5	205

GM(1,1) 模型的预测值与试验值误差最大,各玄武岩纤维掺量下,GM(1,1) 模型预测值与试验值的最大误差分别为 0.36%、0.39%、0.05% 和 0.68%,误差均小于 5%;且模型在 4 种不同玄武岩纤维掺量下的均方差比值均小于 0.35,小误差概率均大于 0.95,则模型的预测精度均为 I 级,表明模型预测结果可靠,可采用 GM(1,1) 模型对复合盐溶液干湿循环下的玄武岩纤维再生混凝土的耐久性值进行预测。

3.3 再生混凝土寿命预测

根据 GM(1,1) 模型,对复合盐溶液干湿循环下再生混凝土耐久性值 *D* 的预测结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,随着干湿循环周期的增加,再生混凝土耐久性值 *D* 逐渐减小,玄武岩纤维的掺入能有效提升再生混凝土耐久性值 *D*,玄武岩纤维的最佳掺量为 1.0%。

类比抗压强度耐蚀系数,参照混凝土耐久性相关规范,认为 *D* 值下降至 0.75 时试件失效,得到复合盐溶液干湿循环下再生混凝土预测寿命值,如表 8 所示。

由表 8 可以看出,玄武岩纤维的掺入对复合盐溶液干湿循环下再生混凝土的寿命影响显著,掺入玄武岩纤维能有效提升再生混凝土的寿命,各玄武岩纤维掺量下,再生混凝土寿命分别提升了 4.19%、11.52% 和 7.33%,最佳玄武岩纤维掺量为 1.0%。

4 结论

(1) 基于熵权法,考虑了再生混凝土质量、抗压强度和抗劈拉强度三个耐久性指标,建立了综合耐久性指标 *D* 值来评价再生混凝土耐久性能,为综合

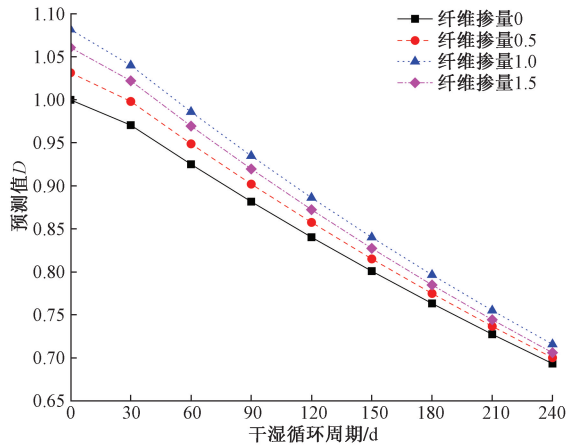


图6 不同纤维掺量下GM(1,1)模型预测值D

Fig. 6 The predicted value D of GM (1,1) model under different fiber content

评价再生混凝土耐久性提供了依据。

(2)随着复合盐溶液干湿循环周期的增加,试件D值呈现出逐渐下降的趋势,且随着干湿循环周期的增加,试件D值的变化趋于剧烈,表现为D值下降速率逐渐增大。干湿循环周期为60~90d时,试件D值下降速率最大,此时各纤维掺量下D值下降百分比分别为5.20%、5.48%、5.24%和6.13%。

(3)干湿循环周期相同时,再生混凝土D值随纤维掺量的变化先上升后下降,各干湿循环周期下的再生混凝土D值峰值分别为1.0818、1.0401、0.9865和0.9348。在盐溶液干湿循环下,掺入一定量的玄武岩纤维能够提高再生混凝土的耐久性,且试验的最佳掺量为1.0%。

(4)根据灰色理论建立了盐-干湿循环耦合作用下再生混凝土的寿命预测模型,并验证了GM(1,1)模型的可靠性。GM(1,1)模型预测值与试验值的最大误差小于5%,模型预测精度为I级。掺入玄武岩纤维能有效提升再生混凝土的寿命,最佳掺量为1.0%。

参 考 文 献

[1] 霍晓伟, 盛冬发, 蔡猛, 等. 废弃纤维再生混凝土非线性蠕变模型[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1170-1175.
Huo Xiaowei, Sheng Dongfa, Cai Meng, et al. Nonlinear creep model of waste fiber recycled concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(3): 1170-1175.

[2] 周剑, 石立, 邓文婷, 等. 再生混凝土动态冲击性能[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(35): 15727-15734.
Zhou Jian, Shi Li, Deng Wenting, et al. Dynamic impact properties of recycled concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(35): 15727-15734.

[3] 马士宾, 牛宗岳, 刘月钊, 等. 建筑垃圾再生骨料性能强化研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(6): 1-13.

Ma Shibin, Niu Zongyue, Liu Yuezhao, et al. Research progress on performance strengthening of recycled aggregate from construction waste[J]. Journal of Architectural Science and Engineering, 2022, 39(6): 1-13.

[4] Yu F, Li X, Song J, et al. Experimental study on flexural capacity of PVA fiber-reinforced recycled concrete slabs[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21: 1-23.

[5] Zhang H, Liu W, Lin X, et al. To ameliorate the performance of recycled aggregate concrete (RAC) by pre-treating aggregate in sulfoaluminate cement slurry and water glass solution[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103364.

[6] 牛海成, 张耀宗, 吉珈琨, 等. 玻璃-聚乙烯醇纤维再生混凝土基本力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2022(7): 91-94, 98.
Niu Haicheng, Zhang Yaozong, Ji Jiakun, et al. Experimental study on basic mechanical properties of glass-polyvinyl alcohol fiber recycled concrete[J]. Concrete, 2022(7): 91-94, 98.

[7] 边昊博, 刘元珍, 白睿奇, 等. 玄武岩纤维再生混凝土的轴心抗压性能研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(5): 649-653.
Bian Haobo, Liu Yuanzhen, Bai Ruiqi, et al. Study on axial compressive properties of basalt fiber recycled concrete[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 45(5): 649-653.

[8] Shatarat N, Alhaq A A, Katkhuda H. Investigation of axial compressive behavior of reinforced concrete columns using recycled coarse aggregate and recycled asphalt pavement aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217: 384-393.

[9] Alqarni A S, Abbas H, Al-Shwikh K M, et al. Treatment of recycled concrete aggregate to enhance concrete performance[J]. Construction and Building Materials, 2021, 307: 124960.

[10] 丁东, 张丽娟, 赵军, 等. 聚丙烯纤维再生混凝土断裂性能研究[J]. 混凝土, 2022(6): 74-79, 84.
Ding Dong, Zhang Lijuan, Zhao Jun, et al. Study on fracture properties of polypropylene fiber recycled concrete[J]. Concrete, 2022(6): 74-79, 84.

[11] 魏康, 李犇, 孙峤. 玄武岩纤维改善再生混凝土抗氯离子渗透性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1656-1662.
Wei Kang, Li Ben, Sun Qiao. Study on the improvement of chloride ion permeability of recycled concrete by basalt fiber[J]. Silicate Bulletin, 2022, 41(5): 1656-1662.

[12] Yang W, Tang Z, Wu W, et al. Effect of different fibers on impermeability of steam cured recycled concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 127063.

[13] 杨文瑞, 袁娇, 黎惠莹, 等. 蒸养GFRP筋钢纤维再生混凝土梁受弯性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(8): 71-76.
Yang Wenrui, Yuan Jiao, Li Huiying, et al. Study on flexural behavior of steam-cured GFRP reinforced steel fiber recycled concrete beams[J]. Building Structure, 2021, 51(8): 71-76.

[14] 彭长岭, 刘华新, 陈明, 等. 再生粗骨料取代率对无腹筋BFRP筋再生混凝土梁抗剪性能的影响[J]. 建筑结构, 2020, 50(22): 89-92, 98.
Peng Changling, Liu Huaxin, Chen Ming, et al. Effect of recycled coarse aggregate replacement rate on shear behavior of recycled concrete beams reinforced with BFRP bars without web reinforcement[J]. Building Structure, 2020, 50(22): 89-92, 98.

[15] Ahmad H, Sheikh M N, Hadi M N S. Behavior of GFRP bar-rein-

- forced hollow-core polypropylene fiber and glass fiber concrete columns under axial compression[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 103245.
- [16] 程璐璐, 杨建森, 刘源, 等. 包浆再生骨料混凝土力学与收缩性能试验研究[J]. *混凝土*, 2020(4): 50-54.
Cheng Lulu, Yang Jiansen, Liu Yuan, et al. Experimental study on mechanical and shrinkage properties of slurry-encapsulated recycled aggregate concrete[J]. *Concrete*, 2020(4): 50-54.
- [17] 曹鑫铖, 金宝宏, 侯玉飞. 包浆再生粗骨料对自密实混凝土力学性能及抗冻性的影响[J]. *土木与环境工程学报*, 2022, 44(1): 149-159.
Cao Xincheng, Jin Baohong, Hou Yufei. Effect of recycled coarse aggregate on mechanical properties and frost resistance of self-compacting concrete[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(1): 149-159.
- [18] 王炳监, 胥民尧, 沈俊宇, 等. 改性再生粗骨料对混凝土力学性能和渗透性能的影响[J]. *水利水电技术*, 2023, 54(1): 199-206.
Wang Bingjian, Xu Minyao, Shen Junyu, et al. Effects of modified recycled coarse aggregate on mechanical properties and permeability of concrete[J]. *Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2023, 54(1): 199-206.
- [19] Verma A, Babu V S, Arunachalam S. Characterization of recycled aggregate by the combined method: acid soaking and mechanical grinding technique[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 49: 230-238.
- [20] 朱亚光, 王祥瑞, 陈飞, 等. MICP 浸泡方式对再生砂浆骨料的性能影响试验研究[J]. *混凝土*, 2020(2): 118-122.
Zhu Yaguang, Wang Xiangrui, Chen Fei, et al. Experimental study on the effect of MICP soaking method on the performance of recycled mortar aggregate[J]. *Concrete*, 2020(2): 118-122.
- [21] 朱红兵, 李咏灿, 姚晨, 等. 复合盐溶液侵蚀与环境因素影响下混凝土耐久性研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(14): 5641-5649.
Zhu Hongbing, Li Yongcan, Yao Chen, et al. Research progress on the durability of concrete under the influence of composite salt solution erosion and environmental factors[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(14): 5641-5649.
- [22] 覃源, 关科, 马颖彪, 等. 硫酸盐干湿循环下纤维混凝土的耐久性及其寿命[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(9): 141-150.
Qin Yuan, Guan Ke, Ma Yingbiao, et al. Durability and service life of fiber reinforced concrete under sulfate dry-wet cycle[J]. *Acta Hydroelectrica Sinica*, 2021, 40(9): 141-150.
- [23] 亓泽霖. 复合盐侵蚀作用下聚丙烯纤维混凝土劣化机理试验研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2021.
Qi Zelin. Experimental study on deterioration mechanism of polypropylene fiber reinforced concrete under composite salt erosion [D]. Alaer: Tarim University, 2021.
- [24] Sun R, Wang D, Wang Y, et al. Study on durability against dry-wet cycles and chloride ion erosion of concrete revetment materials at the water-level-fluctuations zone in Yellow River Delta Wetlands [J]. *Wetlands*, 2020, 40: 2713-2727.
- [25] Lekatou A, Tsouli S, Nikolaidis C, et al. Effect of fly ash on the corrosion performance and structural integrity of stainless steel concrete rebars in acid rain and saline environments[J]. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2019, 13(50): 423-437.
- [26] Junior J R H, Balestra C E T, Medeiros-Junior R A. Comparison of test methods to determine resistance to chloride penetration in concrete; Sensitivity to the effect of fly ash[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 277: 122265.
- [27] Xu W, Li Y, Li H, et al. Corrosion mechanism and damage characteristic of steel fiber concrete under the effect of stray current and salt solution [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 314: 125618.
- [28] Ji Y, Liu W, Jia Y, et al. Durability investigation of carbon fiber reinforced concrete under salt-freeze coupling effect [J]. *Materials*, 2021, 14(22): 6856.
- [29] 张广泰, 耿天娇, 王明阳, 等. 氯盐-荷载耦合作用下纤维混凝土梁受弯性能研究[J]. *混凝土*, 2022(1): 11-16.
Zhang Guangtai, Geng Tianjiao, Wang Mingyang, et al. Study on flexural behavior of fiber reinforced concrete beams under chloride-load coupling[J]. *Concrete*, 2022(1): 11-16.
- [30] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性及其损伤模型[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(7): 855-864.
Long Guangcheng, Yang Zhenxiong, Bai Chaoneng, et al. Durability and damage model of self-compacting concrete with filling layer under load-freeze-thaw coupling[J]. *Silicate Journal*, 2019, 47(7): 855-864.
- [31] 翟思敏, 黄金霞. 建筑用不同取代率粉煤灰再生混凝土的力学性能及耐久性能研究 [J]. *功能材料*, 2024, 55(4): 4121-4126.
Zhai Simin, Huang Jinxia. Study on mechanical properties and durability of fly ash recycled concrete with different replacement rates for construction[J]. *Functional Materials*, 2024, 55(4): 4121-4126.
- [32] 宗翔, 顾宏华. 掺硅粉对普通硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合胶凝体系混凝土耐久性的影响研究[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2024, 25(1): 7-11.
Zong Xiang, Gu Honghua. Study on the effect of silica fume on the durability of ordinary Portland cement-sulphoaluminate cement composite cementitious system[J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 25(1): 7-11.
- [33] Dillard R J, Murray C D, Deschenes R A. Belitic calcium sulfoaluminate cement subjected to sulfate attack and sulfuric acid [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 343. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.128089.
- [34] 王宗熙, 姚占全, 何梁, 等. 纳米 SiO₂ 对混凝土耐蚀性能和溶蚀寿命的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(4): 766-773.
Wang Zongxi, Yao Zhanquan, He Liang, et al. Effect of nano-SiO₂ on corrosion resistance and corrosion life of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(4): 766-773.
- [35] 侯永利, 吕东朔, 周磊磊, 等. 基于抗冻性指标的玄武岩纤维再生混凝土的寿命预测 [J]. *功能材料*, 2021, 52(12): 12084-12089, 12094.
Hou Yongli, Lü Dongshuo, Zhou Leilei, et al. Life prediction of basalt fiber recycled concrete based on frost resistance index [J]. *Functional Materials*, 2021, 52(12): 12084-12089, 12094.
- [36] 王坚强, 王起才, 代金鹏, 等. 基于 GM(1, 1) 模型对 -3 ℃ 养护和标准养护混凝土强度的灰色预测 [J]. *混凝土*, 2023(12): 25-28.
Wang Jianqiang, Wang Qicai, Dai Jinpeng, et al. Based on the

- GM (1, 1) model, the gray prediction of the strength of concrete cured at $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and standard curing[J]. *Concrete*, 2023(12): 25-28.
- [37] 徐存东, 李智睿, 连海东, 等. 冻融循环下玄武岩纤维混凝土的耐久性寿命预测[J]. *混凝土*, 2022(1): 1-6.
Xu Cundong, Li Zhirui, Lian Haidong, et al. Durability life prediction of basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles [J]. *Concrete*, 2022(1): 1-6.
- [38] Yang W, Huang Y, Tang Z, et al. Impermeability performance and corrosion resistance mechanism of basalt fiber recycled concrete under the coastal tidal environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134510.
- [39] Wang B, Yan L, Fu Q, et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 171. DOI:10.1016/j.resconrec.2021.105565.
- [40] Plaza P, del Bosque I F S, Frías M, et al. Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes: physical and mechanical properties and CO_2 emissions [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 285. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122926.
- [41] 兰素恋, 田威, 张红日, 等. 基于熵权法和灰色理论的钢渣粗骨料混凝土耐久性评估及寿命预测[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(10): 3710-3721.
Lan Sulian, Tian Wei, Zhang Hongri, et al. Durability evaluation and life prediction of steel slag coarse aggregate concrete based on entropy weight method and grey theory [J]. *Silicate Bulletin*, 2023, 42(10): 3710-3721.
- [42] 张文. 基于改进熵权法和可变模糊集法的岸桥安全性评价[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
Zhang Wen. Safety evaluation of quay cranes based on improved entropy weight method and variable fuzzy set method [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [43] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Liu Sifeng. Grey system theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 2017.