

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202000418



本刊网刊

基于GM(1,1)的应力损伤轻骨料混凝土抗冻性评估

高 鑫^{1,2}, 孔祥振^{1*}, 申向东³

(1.陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007; 2.内蒙古财经大学 财政税务学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 3.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要:为在特定灾变程度下,对轻骨料混凝土抗冻融性能进行精确定量描述及预测,通过反复加载对轻骨料混凝土预加初始应力损伤来模拟灾变,以相对动弹性模量为评价指标,研究初始损伤度分别为0、0.05、0.12、0.19、0.27的轻骨料混凝土抗冻融性能;将灰色系统理论引入混凝土抗冻耐久性研究中,利用相对动弹性模量实测数据建立基于GM(1,1)的应力损伤轻骨料混凝土抗冻融性能预测模型,与修正的Loland混凝土损伤模型对比并进行精度分析;借助建立的GM(1,1)预测模型定量研究初始应力损伤对轻骨料混凝土抗冻耐久性的影响并预测其抗冻耐久寿命。结果表明:初始应力损伤会加速轻骨料混凝土抗冻融性能劣化,且初始损伤度越大劣化速率越快;各初始损伤度下GM(1,1)模型的平均相对误差均小于4.5%,GM(1,1)模型的预测精度整体上优于修正Loland模型;轻骨料混凝土自身具有良好的抗冻融性能,在内蒙古中西部地区抗冻耐久寿命可达45 a,当初始损伤度为0.05、0.12、0.19、0.27时,抗冻耐久寿命分别缩短至30、25、17.5、10 a。基于GM(1,1)的应力损伤轻骨料混凝土抗冻融性能预测模型可实现对灾变后轻骨料混凝土全寿命周期内抗冻融性能较为精确的定量评估,为指导北方寒旱区轻骨料混凝土工程实践提供理论依据。

关键词:应力损伤;轻骨料混凝土;抗冻性;灰色系统理论;GM(1,1)

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2021)04-0184-07

Freeze-thaw Resistance Evaluation of Lightweight Aggregate Concrete with Stress Damage Based on GM(1,1)

GAO Chu^{1,2}, KONG Xiangzhen^{1*}, SHEN Xiangdong³

(1.State Key Lab. of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Eng. Univ. of PLA, Nanjing 210007, China;

2.School of Finance and Tax, Inner Mongolia Univ. of Finance and Economics, Hohhot 010070, China;

3.College of Water Conservancy and Civil Eng., Inner Mongolia Agricultural Univ., Hohhot 010018, China)

Abstract: The key to the evaluation of freeze-thaw performance of lightweight aggregate concrete after disaster lies in the accurate quantitative description and prediction of its freeze-thaw performance under the specific disaster degree. The initial stress damage of lightweight aggregate concrete was applied by repeated loading to simulate the disaster, and the relative dynamic elastic modulus was taken as the evaluation index to study the freezing-thawing performance of lightweight aggregate concrete with the initial damage degree of 0, 0.05, 0.12, 0.19 and 0.27, respectively. The grey system theory was introduced into concrete frost resistance durability study, the relative dynamic elastic modulus measured data was used to build prediction model of freeze-thaw resistance of stress-damaged lightweight aggregate concrete based on GM(1,1), and corresponding comparison with the revised Loland concrete damage model and accuracy analysis was performed; The GM(1,1) prediction model was used to evaluate the effect of initial stress damage on the frost resistance durability of lightweight aggregate concrete and predict its frost resistance life. The results showed that the initial stress damage could accelerate the freeze-thaw performance degradation of lightweight aggregate con-

收稿日期:2020-05-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51769025; 51808550; 52078133); 中国博士后科学基金(2020M671296)

作者简介:高 鑫(1988—),男,讲师,博士生.研究方向:防灾减灾工程及防护工程. E-mail: gaochu0617@163.com

*通信作者:孔祥振, E-mail: ouckxz@163.com

网络出版时间:2021-06-16 18:05:00

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20210616.1110.001.html>

crete, and the higher the initial stress damage degree was, the faster the deterioration rate would be. The average relative error of GM(1,1) model was less than 4.5% under each initial damage degree, and the prediction accuracy of GM(1,1) model was generally higher than that of the revised Loland model. Lightweight aggregate concrete had a good freezing-thawing resistance, and its freezing-thawing resistance life could reach 45 years in central and western Inner Mongolia. When the initial damage degree was 0.05, 0.12, 0.19 and 0.27, the freezing-thawing resistance life was shortened to 30 years, 25 years, 17.5 years and 10 years, respectively. The prediction model of freeze-thaw performance of stress-damaged lightweight aggregate concrete based on GM(1,1) could accurately evaluate the whole process of freeze-thaw performance of the damaged lightweight aggregate concrete after disaster, which provided theoretical basis for guiding the engineering practice of lightweight aggregate concrete in cold and dry regions of north China.

Key words: stress damage; lightweight aggregate concrete; freeze-thaw resistance; gray system theory; GM(1,1)

北方寒旱区轻骨料混凝土在服役期间常因意外撞击、风沙吹蚀、地震等灾变导致不同程度的应力损伤,严重影响其抗冻使用寿命。研究具有初始应力损伤的轻骨料混凝土抗冻融性能并建立预测模型,对灾变后轻骨料混凝土的耐久性评估及维护加固具有重要意义^[1]。建立轻骨料混凝土冻融损伤预测模型的常规思路是在损伤力学相关理论的基础上,考虑轻骨料混凝土冻融损伤特性并借助试验手段来确定相关参数,通过对普通混凝土抗冻融损伤模型进行修正建立应力损伤轻骨料混凝土冻融损伤模型。Dong等^[2]建立轻骨料混凝土直线和曲线双段式冻融损伤模型并依据试验结果对模型进行验证;牛建刚等^[3]认为塑钢纤维轻骨料混凝土抗压强度冻融损伤模型宜用指数函数型模型;高鑫等^[4]以Loland混凝土损伤模型为基础建立轻骨料混凝土冻融损伤演化模型。轻骨料混凝土骨料和骨料-水泥石界面过渡区(ITZ)的性质与普通混凝土有显著差异^[5-6],相关材料参数的确定方法尚需完善,至今无法获取准确、完善的材料损伤参数信息,故按常规思路建立的轻骨料混凝土冻融损伤模型的适用性有待商榷,尚不能有效指导工程实践。

依据邓聚龙^[7]、刘思峰^[8]等创立的灰色系统理论,轻骨料混凝土冻融损伤预测模型研究呈现出信息不完全、不准确的小数据、贫信息的不确定性系统特征,具备典型的“灰色”特质。灰色系统理论通过对已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,将未知因素弱化,强化已知因素的影响程度,可实现对不确定系统演化规律的正确描述,进而实现对系统未来变化的定量预测。Liu等^[9]利用GM(1,4)模型建立风积沙轻骨料混凝土抗压强度预测模型;冯忠居等^[10]建立高寒盐沼泽区混凝土耐久性的GM(1,1)预测模型。灰色系统理论中的GM(1,1)模型具有建模过程简单、模型表达简洁、应用广泛的突出特点,是灰色预测理论的基本模型。基于此,本研究针对现阶段尚无公认的轻骨料混凝土冻融损伤模型现状,依照系统科学的“简单性原则”和“互克性原理”^[11],尝试利用灰色系统理论的GM(1,1)模型,以不同冻融循环次数下轻骨

料混凝土相对动弹性模量实测数据为依据,建立基于GM(1,1)的轻骨料混凝土抗冻性预测模型,定量研究初始应力损伤对轻骨料混凝土抗冻融性能的影响并预测抗冻耐久寿命。

1 试验方法

1.1 原材料

水泥为冀东P·O 42.5普通硅酸盐水泥,各项指标见表1;细骨料为天然河砂,中砂,级配良好,堆积密度为1 537 kg/m³,表观密度为2 585 kg/m³,含泥量为1.6%;天然浮石轻骨料取自内蒙古中西部地区,各项指标见表2;引气减水剂为AE-11型高效引气减水剂。

表1 P·O 42.5级水泥性能指标

细度/%	凝结时间/min		安定性	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
1.2	75	290	合格	26.6	54.8	5.2	8.3

表2 浮石物理性能指标

堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%	筒压强度/MPa	孔隙率/%	含泥量/%
711	1 330	9.8	2.12	47.25	2.0

1.2 试验设计

试验采用尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的轻骨料混凝土棱柱体试件,配合比为:*m*(水泥):*m*(水):*m*(砂):*m*(浮石):*m*(引气减水剂)=450:180:730:530:9。在标准条件下养护至28 d后利用万能试验机对试件进行纵、横向反复加载预加初始应力损伤(图1)。根据式(1),利用超声波波速定义损伤度,通过调整加载次数*n*和荷载大小,使试件的应力损伤度分别为0、0.05、0.12、0.19和0.27,各组试件均为3块,试件容许误差为±0.01。

$$D_{\sigma} = 1 - \frac{v_{\sigma n}^2}{v_{\sigma 0}^2} \quad (1)$$

式中: D_{σ} 为试件在冻融循环前气干状态下的损伤度; $v_{\sigma 0}$ 、 $v_{\sigma n}$ 分别为试件预加损伤前、后气干状态下的波速, km/s。



图 1 利用万能试验机预加初始损伤

Fig. 1 Prefabrication of initial stress damage by universal testing machine

冻融循环试验按照GB/T50082—2009中“快冻法”进行。试验开始前将各组试件置于15~20℃的清水中浸泡4d,测定其在湿润状态下的初始波速。然后放入快速冻融试验机内进行冻融循环试验(图2),每隔25次冻融循环测试其在湿润状态下的波速,利用式(2)确定不同冻融循环次数下各组试件的相对动弹性模量。

$$E_t = \frac{v_{ft}^2}{v_{f0}^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_t 为试件经 t 次冻融循环后的相对动弹性模量; v_{f0} 、 v_{ft} 分别为预加初始损伤前、经 t 次冻融循环后湿润状态下的波速, km/s。



图 2 利用快速冻融试验机进行冻融循环试验

Fig. 2 Using the rapid freeze-thaw testing machine to carry out the freeze-thaw cycle test

2 试验结果

图3为不同初始应力损伤度下轻骨料混凝土相对动弹性模量随冻融循环次数变化的关系曲线。由图3可知:初始应力损伤度为0.05的轻骨料混凝土抗冻融性能与基准组(初始损伤度为0)相比差异不大;初始应力损伤度为0.12、0.19和0.27的轻骨料混凝土冻融损伤程度明显高于基准组及初始损伤度为0.05的轻骨料混凝土,且初始应力损伤度越大,其冻融劣化速率(即曲线斜率)随冻融循环次数增加显著增大。由此说明:初始应力损伤会加速轻骨料混凝土冻融损伤的发展,从而导致轻骨料混凝土抗冻融性能明显劣化。

3 GM(1,1)抗冻融性能预测模型

3.1 GM(1,1)模型

设原始数据序列为:

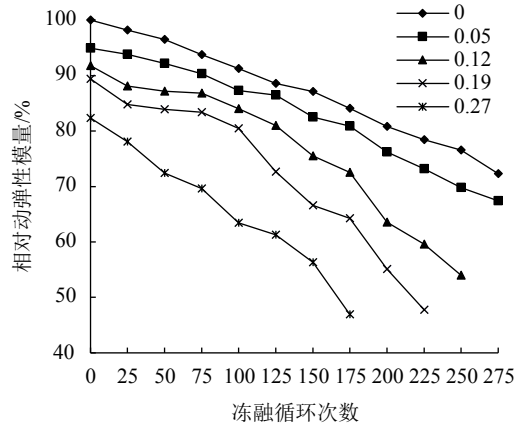


图 3 相对动弹性模量与冻融循环次数的关系

Fig. 3 Relationship between relative dynamic elastic modulus and number of freeze-thaw cycles

$$X^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)});$$

$X^{(0)}$ 的一次累加生成序列为:

$$X^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}).$$

其中, $x_k^{(1)} = \sum_{i=1}^k x_k^{(0)}$, $x_k^{(0)} \geq 0$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

定义 $Z^{(1)} = (z_2^{(1)}, z_3^{(1)}, \dots, z_n^{(1)})$, 其中, $z_k^{(1)} = \frac{1}{2}(x_k^{(1)} + x_{k-1}^{(1)})$, $k = 2, 3, \dots, n$ 。称

$$x_k^{(0)} + az_k^{(1)} = b \quad (3)$$

为均值GM(1,1)模型(EGM)。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (4)$$

为均值GM(1,1)模型的白化微分方程^[8]。其中:参数 a 为发展系数, b 为灰色作用量, a 和 b 的值依赖于原始序列和背景值的构造形式^[12]。

参数向量 $\hat{a} = [a, b]^T$ 运用最小二乘法确定:

$$\hat{a} = [B^T B]^{-1} B^T Y \quad (5)$$

其中:

$$Y = \begin{bmatrix} x_2^{(0)} \\ x_3^{(0)} \\ \vdots \\ x_n^{(0)} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z_2^{(1)} & 1 \\ -z_3^{(1)} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z_n^{(1)} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解白化微分方程式(4)可得均值GM(1,1)模型的时间响应式为:

$$\hat{x}_k^{(1)} = \left(x_1^{(0)} - \frac{b}{a}\right) e^{-a(k-1)}, k = 2, \dots, n \quad (7)$$

对应 $X^{(0)}$ 的时间响应式为:

$$\hat{x}_k^{(0)} = (1 - e^a) \left(x_1^{(0)} - \frac{b}{a}\right) e^{-a(k-1)} \quad (8)$$

3.2 建立GM(1,1)抗冻融性能预测模型

应力损伤轻骨料混凝土相对动弹性模量随冻融循环次数变化试验实测值 $x_k^{(0)}$ 和一次累加值(1-AGO)

$x_k^{(1)}$ 见表3,由表3中数据,根据式(4)~(7)可得,不同初始应力损伤度下轻骨料混凝土相对动弹性模量预测模型见表4,模型中参数 a 和 b 的值见表5。

表3 轻骨料混凝土相对动弹性模量试验实测值

Tab.3 Experimental results of relative dynamic elastic modulus of lightweight aggregate concrete

冻融循环次数	不同初始应力损伤度下相对动弹性模量实测值/%									
	0		0.05		0.12		0.19		0.27	
	实测值	1-AGO	实测值	1-AGO	实测值	1-AGO	实测值	1-AGO	实测值	1-AGO
0	100.0	100.0	95.0	95.0	91.8	91.8	89.4	89.4	82.3	82.3
25	98.2	198.2	93.8	188.8	88.1	179.9	84.8	174.2	78.1	160.4
50	98.0	296.2	92.2	281.0	87.2	267.1	83.9	258.1	72.4	232.8
75	96.8	393.0	90.3	371.3	86.9	354.0	83.4	341.5	69.6	302.4
100	95.3	488.3	87.3	458.6	84.1	438.0	80.5	422.0	63.5	365.9
125	92.9	581.2	86.5	545.1	81.0	519.0	72.7	494.6	61.3	427.2
150	91.8	673.0	82.5	627.6	75.5	594.5	66.6	561.2	56.3	483.5
175	91.1	764.1	80.9	708.5	72.6	667.1	64.3	625.5	46.9	530.4
200	86.9	851.0	76.2	784.7	63.5	730.6	55.1	680.5	—	—
225	84.0	935.0	73.2	857.9	59.6	790.2	47.7	728.3	—	—
250	76.6	1011.5	69.8	927.7	54.0	844.2	—	—	—	—
275	72.3	1083.9	67.4	995.1	—	—	—	—	—	—

注:“—”表示混凝土试件已破坏。

表4 相对动弹性模量预测模型

Tab.4 Prediction model of relative dynamic elastic modulus

初始应力损伤度	相对动弹性模量预测模型
0	$\hat{x}_k^{(1)} = -3\ 582.40e^{-0.029k} + 3\ 580.29$
0.05	$\hat{x}_k^{(1)} = -3\ 056.49e^{-0.033k} + 3\ 052.27$
0.12	$\hat{x}_k^{(1)} = -1\ 983.28e^{-0.051k} + 1\ 976.47$
0.19	$\hat{x}_k^{(1)} = -1\ 537.96e^{-0.065k} + 1\ 530.57$
0.27	$\hat{x}_k^{(1)} = -1\ 191.73e^{-0.074k} + 1\ 189.03$

表5 预测模型参数值

Tab.5 Parameters of prediction model

参数	不同初始应力损伤度下的模型参数值				
	0	0.05	0.12	0.19	0.27
a	0.029	0.033	0.051	0.065	0.074
b	103.820	100.725	100.800	99.487	87.988

4 模型比较与精度分析

4.1 GM(1,1)模型与修正Loland模型比较

将 $k = 2, 3, \dots, n$ (分别对应25, 50, ..., 275次冻融循环)代入表4中的预测模型,并将计算结果 $\hat{x}_k^{(1)}$ 通过式(8)还原为 $\hat{x}_k^{(0)}$,可得到基于GM(1,1)的各初始应力损伤度下轻骨料混凝土在不同冻融循环次数时相对动弹性模量预测值 $\hat{x}_k^{(0)}$ 及对应的相对误差,见图4。

高鑫等^[4]根据损伤力学相关理论^[13],以Loland混凝土损伤模型和Powers的静水压力理论为基础,对轻骨料混凝土冻融损伤演化过程分析,并通过模型修正和简化建立包含初始应力损伤和冻融损伤的轻骨料混凝土力学损伤演化方程,如式(9)所示:

$$D_n^{(2)} = 1 - [(1 - D_\sigma)^c - dt]^{\frac{1}{c}} \quad (9)$$

式中, $D_n^{(2)}$ 为轻骨料混凝土经历 t 次冻融循环后的损伤度, c 和 d 为待定系数。

利用式(9),根据不同冻融循环次数下应力损伤轻骨料混凝土的相对动弹性模量实测值拟合出应力损伤轻骨料混凝土的相对动弹性模量预测模型,简称修正Loland模型,如式(10)所示:

$$\hat{E}_t = [(1 - D_\sigma)^{2.509} - 0.002\ 2t]^{\frac{1}{2.509}} \times 100\% \quad (10)$$

利用式(10),可得到基于修正Loland模型的各初始应力损伤度下轻骨料混凝土在不同冻融循环次数时相对动弹性模量预测值 \hat{E}_t 及对应的相对误差,见图4。

由图4可知:对比GM(1,1)模型与修正Loland模型的相对动弹性模量预测值及相对误差,各初始应力损伤度下的GM(1,1)模型在整个冻融循环过程中预测相对误差都较小且随冻融循环次数变化不大,平均相对误差均低于4.5%,说明GM(1,1)模型具有良好的预测精度和可靠性。在175次冻融循环以前,修正Loland模型与GM(1,1)模型预测精度差异不大;但随

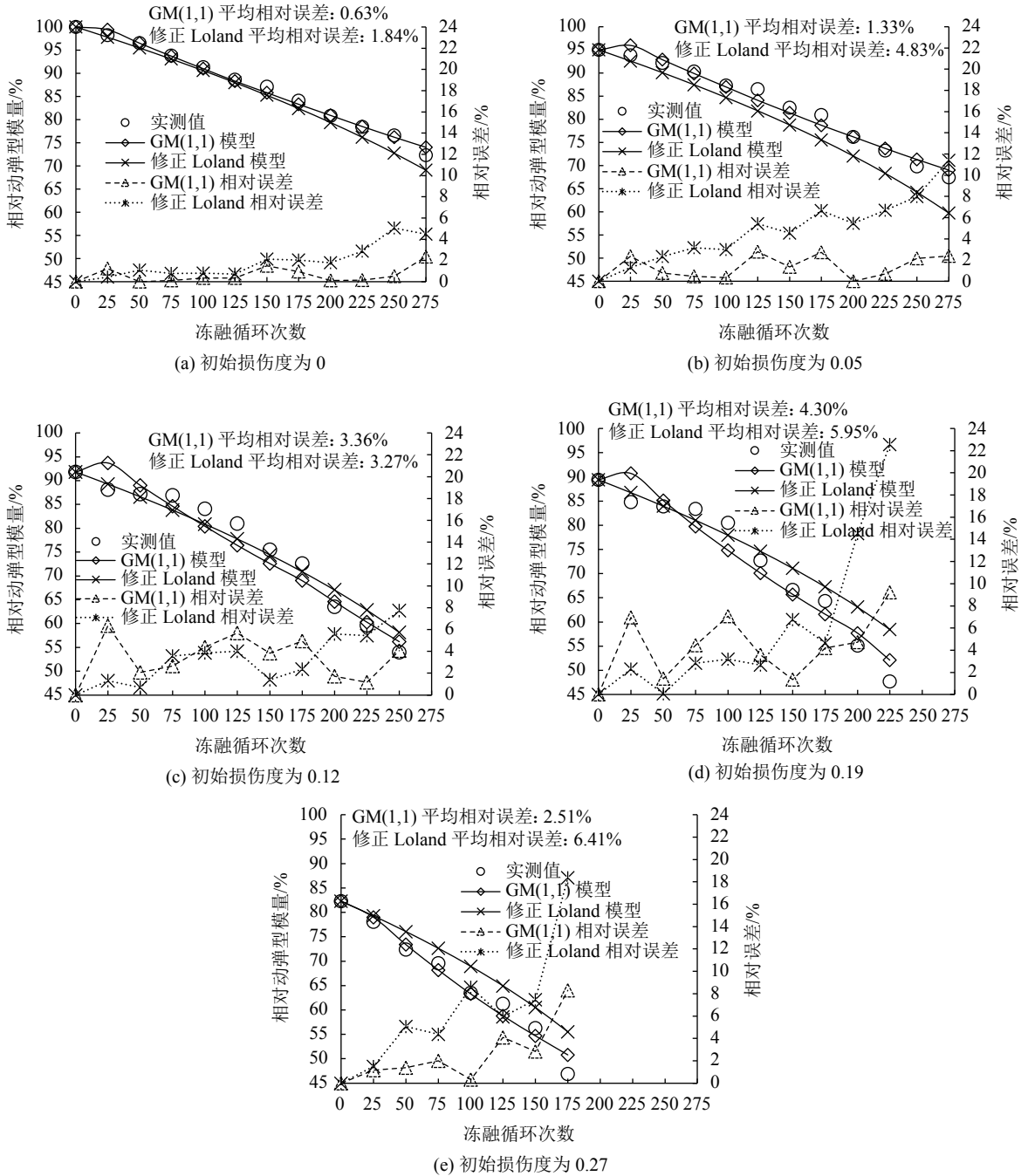


图 4 不同初始损伤度时两模型预测精度比较

Fig. 4 Comparison of prediction accuracy between two models with different initial damage degrees

随着冻融循环次数增加,修正Loland模型的相对误差增大,预测精度显著降低,说明修正Loland模型不适用于对轻骨料混凝土抗冻融性能进行中长期预测。对比不同初始损伤度下两模型的平均相对误差,修正Loland模型除初始损伤度为0.12时略低于GM(1,1)模型,其余初始损伤度下则明显高于GM(1,1)模型。综上所述,GM(1,1)模型预测精度整体上要优于修正Loland模型,利用GM(1,1)模型对应力损伤轻骨料混凝土抗冻融性能全过程进行定量描述及预测具有更

高的精度和可靠性。

4.2 GM(1,1)模型精度分析

为进一步检验建立的GM(1,1)模型能否满足抗冻融性能预测精度要求,对其进行均方差比值检验和小误差概率检验。残差均值与方差分别为:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_k \quad (11)$$

$$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\varepsilon_k - \bar{\varepsilon}]^2 \quad (12)$$

原始数据序列的均值与方差分别为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k^{(0)} \quad (13)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x_k^{(0)} - \bar{x}]^2 \quad (14)$$

均方差比值:

$$C = \frac{S_1}{S_2} \quad (15)$$

小误差概率:

$$p = P(|\varepsilon_k - \bar{\varepsilon}| < 0.674 5S_2) \quad (16)$$

模型精度由均方差比值 C 和小误差概率 p 共同决定,只有两者皆在允许范围内,建立的模型精度才满足要求^[8],如表6所示。

表6 模型精度分级标准

Tab. 6 Standard of model accuracy classification

检验指标	精度等级			
	1级(好)	2级(合格)	3级(勉强)	4级(不合格)
C	<0.35	<0.50	<0.65	≥0.65
p	>0.95	>0.80	>0.70	≤0.70

根据式(11)~(16),可求出模型的均方差比值 C 和小误差概率 p ,不同初始应力损伤度下轻骨料混凝土相对动弹性模量预测模型对应的 C 和 p 计算结果见表7,由表7可知:不同初始应力损伤度下,预测模型精度等级皆为1级(好),满足GM(1,1)模型预测精度要求。根据刘思峰等^[14]的研究可知,当发展系数 $a < 0.3$ 时,GM(1,1)模型可用于中长期预测。由表5可知,不同初始应力损伤度下,轻骨料混凝土相对动弹性模量预测模型的发展系数 a 均远小于0.3。因此,建立的GM(1,1)可用于对应力损伤轻骨料混凝土全寿命周期内抗冻融性能进行定量评估。

表7 GM(1,1)预测模型精度等级

Tab. 7 Model accuracy class of GM(1,1)

检验指标	不同初始应力损伤度下GM(1,1)预测模型精度				
	0	0.05	0.12	0.19	0.27
C	0.09	0.15	0.28	0.29	0.17
p	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
精度等级	1级(好)	1级(好)	1级(好)	1级(好)	1级(好)

5 抗冻融性能评估

以混凝土相对动弹性模量低于60%作为混凝土抗冻融性能失效控制标准,可根据建立的GM(1,1)模型预测出不同初始应力损伤度下轻骨料混凝土可经受的室内最大冻融循环次数。依据金伟良等^[15]的研究:内蒙古中西部地区的年均等效室内冻融循环次数为9~11次,特取均值10次。由此可得不同初始应

力损伤度下,轻骨料混凝土耐久寿命预测结果如表8所示。

表8 轻骨料混凝土抗冻耐久寿命预测结果

Tab. 8 Prediction results of durability life of lightweight aggregate concrete

抗冻融性能预测指标	不同初始损伤度下抗冻耐久寿命预测结果				
	0	0.05	0.12	0.19	0.27
室内最大冻融循环次数	450	300	225	175	100
抗冻耐久寿命/a	45	30	25	17.5	10

由表8可知:初始应力损伤为0时,轻骨料混凝土抗冻耐久寿命可达45 a,说明轻骨料混凝土自身具有良好的抗冻融性能;由前述试验结果可知损伤度为0.05的轻骨料混凝土抗冻融性能与基准组差异不大,而抗冻耐久寿命预测结果却差异较大(分别为45和30 a)。分析主要原因是:对轻骨料混凝土预加初始应力损伤的实质是使轻骨料混凝土内部产生初始微裂纹,初始应力损伤较小(0.05)时,初始裂纹尺寸较小且分布稀疏。由冻融循环引起的混凝土损伤是疲劳损伤,依据疲劳损伤累积假说^[16],在冻融循环前期(275次以前),由应力损伤产生的初始微裂纹等缺陷由于尺寸较小且分布稀疏而发展缓慢,尚未及时暴露出来;而在冻融循环后期,初始微裂纹等缺陷逐渐被“发掘”,初始微裂纹随冻融循环次数增加而加速扩展延伸并萌生出新裂纹,新旧裂纹相互交叉贯穿,从而引起宏观抗冻融性能加速劣化。当初始损伤度为0.12、0.19和0.27时,其抗冻耐久寿命分别为25、17.5和10 a。综上所述:初始应力损伤对轻骨料混凝土抗冻耐久性能劣化具有“加速效应”,且加速速率与初始应力损伤度正相关;在损伤度较小时,冻融循环前期“加速效应”暂时没有显化,后期会逐步暴露出来。因此,对轻骨料混凝土遭受的较小灾变也要引起足够重视,以免使抗冻耐久性预测产生较大偏差,对轻骨料混凝土结构物的服役及维护加固产生不利影响。

6 结论

1)轻骨料混凝土具有良好的抗冻融性能,在内蒙古中西部地区抗冻耐久寿命可达45 a;当初始损伤度为0.05、0.12、0.19和0.27时,抗冻耐久寿命分别缩短至30、25、17.5和10 a,轻骨料混凝土抗冻融性能明显劣化,且劣化速率与初始应力损伤度正相关。

2)各初始应力损伤度下,GM(1,1)模型的平均相对误差均低于4.5%,GM(1,1)模型的预测精度整体上优于修正Loland模型;冻融循环次数大于175时,修正Loland模型预测精度显著降低,已不适用于对轻骨料混凝土抗冻融性能进行中长期预测;GM(1,1)

模型预测精度和可靠性较高,可用于对应力损伤轻骨料混凝土全寿命周期内抗冻融性能进行定量描述及预测。

3)将灰色系统理论引入轻骨料混凝土抗冻融性能研究,利用GM(1,1)模型定量评估初始应力损伤对轻骨料混凝土抗冻融性能的影响,可为轻骨料混凝土在北方寒旱区应用中面临的实际问题提供新的解决思路和理论依据。

参考文献:

- [1] Xu Cundong, Cheng Yu, Wang Rongrong, et al. Analysis of performance deterioration of concrete material with initial freeze-thaw damage under salt-freezing condition[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 17–26. [徐存东, 程昱, 王荣荣, 等. 带初始冻融损伤的混凝土材料受盐冻作用下性能劣化分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 17–26.]
- [2] Dong Wei, Shen Xiangdong, Xue Huijun, et al. Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of Aeolian sand lightweight aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123: 792–799.
- [3] Niu Jiangang, Zuo Fuliang, Wang Jialei, et al. Freeze-thaw damage model of plastic-steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(2): 235–240. [牛建刚, 左付亮, 王佳雷, 等. 塑钢纤维轻骨料混凝土的冻融损伤模型[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(2): 235–240.]
- [4] Gao Chu, Shen Xiangdong, Wang Xiaoxiao, et al. Freeze-thaw resistance of lightweight aggregate concrete with stress damage[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 42(10): 1247–1252. [高矗, 申向东, 王萧萧, 等. 应力损伤轻骨料混凝土抗冻融性能[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(10): 1247–1252.]
- [5] Chung S Y, Abd Elrahman M, Kim J S, et al. Comparison of lightweight aggregate and foamed concrete with the same density level using image-based characterizations[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 211: 988–999.
- [6] Jin Liu, Yang Wangxian, Yu Wenxuan, et al. Dynamic compressive failure and size effect in lightweight aggregate concrete based on meso-scale simulation[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(3): 56–65. [金浏, 杨旺贤, 余文轩, 等. 基于细观模拟的轻骨料混凝土动态压缩破坏及尺寸效应分析[J]. *工程力学*, 2020, 37(3): 56–65.]
- [7] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- [8] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [9] Liu Qian, Shen Xiangdong, Wei Lisi, et al. Grey model research based on the pore structure fractal and strength of NMR Aeolian sand lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2019, 72(1): 536–543.
- [10] Feng Zhongju, Chen Sixiao, Xu Hao, et al. Durability evaluation of concrete in alpine salt marsh area based on gray system theory[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(6): 18–26. [冯忠居, 陈思晓, 徐浩, 等. 基于灰色系统理论的高寒盐沼泽区混凝土耐久性评估[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(6): 18–26.]
- [11] 谭跃进, 陈英武, 罗鹏程. 系统工程原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] Luo Dang, Liu Sifeng, Dang Yaoguo. Grey model GM (1,1) optimization[J]. *Strategic Study of CAE*, 2003, 5(8): 50–53. [罗党, 刘思峰, 党耀国. 灰色模型GM(1,1)优化[J]. *中国工程科学*, 2003, 5(8): 50–53.]
- [13] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [14] Liu Sifeng, Deng Julong. The range suitable for GM(1,1)[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2000, 20(5): 121–124. [刘思峰, 邓聚龙. GM(1,1)模型的适用范围[J]. *系统工程理论与实践*, 2000, 20(5): 121–124.]
- [15] Wu Hailong, Jin Weiliang, Yan Yongdong, et al. Environmental zonation and life prediction of concrete in frost environments[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2012, 46(4): 650–657. [武海荣, 金伟良, 延永东, 等. 混凝土冻融环境区划与抗冻性寿命预测[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(4): 650–657.]
- [16] Wang Ruimin, Song Yupu, Zhao Guofan. Fatigue cumulative damage criterion of concrete[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992(5): 72–76. [王瑞敏, 宋玉普, 赵国藩. 混凝土疲劳累积损伤准则[J]. *水利学报*, 1992(5): 72–76.]

(编辑 张凌之)

引用格式: Gao Chu, Kong Xiangzhen, Shen Xiangdong. Freeze-thaw resistance evaluation of lightweight aggregate concrete with stress damage based on GM(1,1)[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(4): 184–190. [高矗, 孔祥振, 申向东. 基于GM(1,1)的应力损伤轻骨料混凝土抗冻性评估[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(4): 184–190.]