



盐冻循环下粉煤灰再生混凝土 性能劣化规律及寿命预测

王 会, 郑中元

(连云港职业技术学院 建筑工程学院, 江苏 连云港 222006)

摘要: 为研究粉煤灰再生混凝土在高寒、盐渍土地区的耐久性问题, 以质量分数为 3% 的 NaCl 和 5% 的 Na_2SO_4 混合溶液为冻融介质, 采用快冻法对不同粉煤灰掺量的再生混凝土进行冻融循环试验, 测定各组试件的质量损失、抗压强度以及相对动弹性模量的数据, 研究粉煤灰再生混凝土在盐冻耦合作用下的性能劣化规律, 并通过抛物线损伤模型预测再生混凝土的耐久性寿命。研究表明: 在盐冻侵蚀作用下, 不同掺量粉煤灰再生混凝土的相对动弹性模量和抗压强度变化均呈现前期平缓下降, 后期快速下降的趋势, 而质量损失率则前期缓慢增长, 后期快速增加; 抛物线模型能较好表征粉煤灰再生混凝土在复合盐环境下的冻融损伤, 其模型拟合曲线与试验结果符合较好, 具有较高的精度; 当粉煤灰掺量为 20% 时, 再生混凝土的抗冻耐久性寿命最长。

关键词: 再生混凝土; 粉煤灰; 复合盐侵蚀; 冻融循环; 寿命预测

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)02-0030-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.02.020

Performance deterioration law and life prediction of fly ash recycled concrete under salt-freezing cycle

WANG Hui, ZHENG Zhongyuan

(School of Architecture and Engineering, Lianyungang Technical College, Lianyungang 222006, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the durability of fly ash recycled concrete in alpine and saline soil areas, using the mixed solution of 3% NaCl and 5% Na_2SO_4 by mass fraction as the freeze-thaw medium, the freeze-thaw cycle test was carried out on recycled concrete with different fly ash contents by the quick freezing method. The mass loss, compressive strength and relative dynamic elastic modulus of each group of recycled concrete specimens are measured, and the performance degradation law of fly ash recycled concrete under the coupling action of freeze-thaw and compound salt erosion is studied, and durability life of recycled concrete is predicted by parabolic damage model. The research results show that under the action of salt freezing erosion, the relative dynamic elastic modulus and compressive strength of recycled concrete with different contents of fly ash show a trend of gentle decline in the early stage and rapid decline in the later stage, while the mass loss rate increases slowly in the early stage, and increased rapidly in the later period; the parabolic model can better characterize the freeze-thaw damage of fly ash recycled concrete in the compound salt environment, and the model fitting curve is in good agreement with the test results and has high accuracy; When it is 20%, recycled concrete has the longest durability life in the salt-freezing environment.

Key words: recycled concrete; fly ash; compound salt erosion; freeze-thaw cycles; life prediction

收稿日期: 2023-05-26

基金项目: 连云港职业技术学院校级重点项目(XZD202301); 江苏省高等学校自然科学研究项目(21KJD42001); 江苏高校“青蓝工程”资助项目(2021)

作者简介: 王 会(1982—), 男, 副教授, 从事混凝土力学性能和耐久性研究。

再生混凝土是将废弃混凝土经过破碎处理分级后, 部分或者全部替代天然粗骨料, 再加入水泥、砂子和水等配制而成的一种新型混凝土。再生混凝土因具有绿色环保、可持续发展等特点, 目前被广泛地应用于各种陆地和海洋工程建(构)筑物中。由于北方沿海地区高寒、盐渍土以及海洋等自然环境的特殊性, 建筑长期处于冻融循环和复合盐侵蚀的环境中, 易对再生混凝土造成损伤破坏, 直接影响着建筑结构的使用寿命, 因此研究盐冻循环下再生混凝土性能劣化规律非常重要。

近年来, 关于再生混凝土抗冻耐久性研究已取得一定成果, 部分学者研究了不同粗骨料取代率的再生混凝土在硫酸盐侵蚀下的抗冻性能, 贾文亮等^[1]对取代率为 50%、100% 的再生骨料混凝土和普通混凝土分别进行硫酸盐冻融试验, 发现再生混凝土的耐久性能明显低于普通混凝土, 相对动弹性模量能够更好地反应再生混凝土的损伤程度。肖前慧等^[2]针对不同骨料替代率的再生混凝土进行硫酸盐侵蚀的冻融试验, 得出随着盐冻次数和再生骨料替代率增加, 混凝土的抗冻耐久性逐渐降低。POWERS^[3]研究混凝土孔隙内溶液的冰冻试验, 通过静水压和渗透压假说较好地解释了再生混凝土盐冻破坏机理。也有部分学者对不同细骨料掺量的再生混凝土耐久性能做了相关研究, 邱继生等^[4]对煤矸石陶粒混凝土进行冻融循环试验, 得出随着煤矸石陶粒掺量增加, 混凝土抗冻性能呈现先下降后上升再下降的趋势。秦拥军等^[5]针对冻融损伤分析锂渣掺量和再生粗骨料取代率对混凝土质量、动弹性

模量以及抗压强度的影响, 得出适当掺加锂渣和再生粗骨料有利于提高再生混凝土的抗冻性。尽管学者们针对不同粗细骨料掺量的再生混凝土抗冻性进行了一定的研究, 但对于粉煤灰再生混凝土在复合盐侵蚀下抗冻性能研究特别是寿命预测还是相对较少, 其研究成果还需要进一步补充。

因此, 本文以 3% NaCl 和 5% Na₂SO₄ 混合溶液为侵蚀介质, 采用快冻法对不同粉煤灰掺量的再生混凝土进行冻融循环试验, 研究再生混凝土在盐冻侵蚀耦合作用下的损伤劣化机理, 通过建立冻融损伤模型, 预测其抗冻耐久性寿命, 以期为北方严寒、盐渍土以及海洋地区的再生混凝土在实际工程中的应用提供参考。

1 原材料与试验方案

1.1 原材料及配合比

试验采用 P·O42.5 级硅酸盐水泥(山东日照京华牌), 其化学组成及性能指标如表 1 所示。粉煤灰采用连云港新海电厂的 I 级灰, 其各项性能指标如表 2 所示。细骨料为连云港产的中砂, 细度模数为 2.7。天然粗骨料为连云港锦屏镇生产的碎石, 粒径为 5 ~ 25 mm, 颗粒连续级配。再生粗骨料采用实验室废弃混凝土自制而成的粒径为 5 ~ 25 mm 连续级配骨料, 基本性能如表 3 所示。外加剂采用高效的 SJ-3 引气剂和 GJ-1 减水剂, 拌合及养护水为自来水。混凝土配合比中再生粗骨料替代率均为 30%, 分别对粉煤灰掺量为 0%、10%、20% 以及 30% 的再生混凝土进行盐冻试验, 其配合比设计如表 4 所示。

表 1 水泥的性能指标

质量分数/%			烧失量/%	凝结时间/min		安定性	抗压强度/MPa	
SO ₃	MgO	Cl ⁻		初凝	终凝		3 d	28 d
2.46	1.75	0.028	3.54	157	268	合格	27.1	49.4

表 2 粉煤粉的性能指标

级别	细度(45 μm 方孔筛余量)/%	需水量比/%	烧失量/%	SO ₃ 质量分数/%
I 级	10	92	3.5	1.8

表 3 粗骨料的基本性能

骨料类型	堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%	针片状质量分数/%	压碎指标/%	坚固性/%	含泥量/%	微粉质量分数/%
天然粗骨料	1 536	2 687	0.5	5	—	1.0	0.2	0.2
再生粗骨料	1 472	2 417	3.5	3	14	5.2	0.4	0.5

表 4 再生混凝土配合比

编号	粉煤灰 掺量/%	水灰比	原材料用量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)						抗压强度/MPa
			水泥	粉煤灰	砂	天然粗骨料	再生粗骨料	水	
FA0	0	0.45	355	0	585	390	910	160	38.7
FA10	10	0.45	320	35	585	390	910	160	39.5
FA20	20	0.45	285	70	585	390	910	160	40.1
FA30	30	0.45	213	142	585	390	910	160	38.4

注：配合比中再生粗骨料的取代率均为 30%，编号“FA××”中，“××”表示粉煤灰掺量。

1.2 试验方案

试验采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体试件和 100 mm × 100 mm × 400 mm 棱柱体试件，所有试件自然养护 24 h 后拆模，然后放入标准养护箱养护 28 d；试验采用的冻融介质浓度为 3% NaCl 和 5% Na₂SO₄（质量分数）复合盐溶液^[6]，将再生混凝土试件放置于 KDR-V9 系列混凝土快速冻融试验机中，按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》（GB/T 50082—2009）^[7] 的快冻法进行试验，每冻融循环 25 次，测定试件的质量及动弹性模量大小，动弹性模量测量采用的仪器为 NM-4B 型非金属超声检测分析仪。每 50 次冻融循环检测一次试件的抗压强度，采用仪器为 YES-200B 万能压力试验机，粉煤灰掺量 30% 的再生混凝土试块的冻融破坏表现形貌和抗压强度测试破坏如图 1 所示。



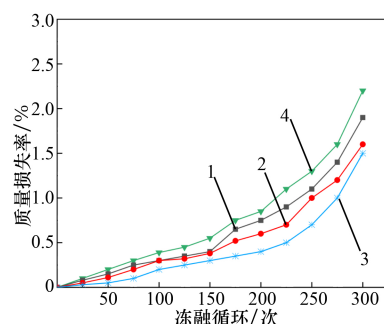
图 1 试块的冻融和抗压破坏

2 结果与讨论

2.1 质量变化

浸泡于 3% NaCl 和 5% Na₂SO₄ 复合盐环境中，不同粉煤灰掺量再生混凝土遭受冻融循环的质量变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可知：再生混凝土质量损失率随着冻融次数的增加呈现前期缓慢增长，中后期快速增



1—FA0；2—FA10；3—FA20；4—FA30。

图 2 再生混凝土质量损失与冻融循环关系

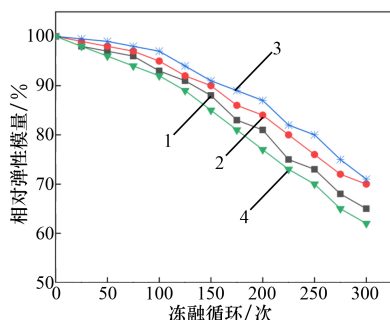
加的趋势，究其原因是在冻融循环前期 100 次以内，复合盐溶液中 Cl^- 和 SO_4^{2-} 侵入混凝土内部孔隙，与水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应产生石膏、钙矾石等水化产物，一定程度填充了混凝土的孔隙，增加了混凝土的密实度和质量，同时在粉煤灰活性效应和微集料效应作用下，延缓和降低了混凝土在早期盐冻作用下微裂纹扩展造成的表面剥落和质量损失；随着中后期（100 ~ 300 次）盐冻加剧，持续生成的钙矾石，产生较大的膨胀应力，使得裂纹继续延展形成贯通裂缝，出现较大的坑蚀和分层剥落现象，质量损失明显增加。

由质量损失曲线可知，在复合盐冻融循环试验周期内，不同粉煤灰掺量的再生混凝土质量损失率从大到小依次为：FA30 > FA0 > FA10 > FA20，由此可见，粉煤灰掺量在 20% 范围内时，随着粉煤灰取代率增加，试件的质量损失逐渐减小，FA20 试件质量损失率最小，表明粉煤灰掺量取 20% 最为理想。这说明适量的粉煤灰掺入，有助于激发水泥的活性效应，改善和细化再生混凝土内部的孔隙结构，使得混凝土内部结构更加密实，较好地抵抗冻融作用下硫酸盐和氯化盐侵蚀能力，减小混凝土的质量损失。当粉煤灰掺量为 30% 时，其活性效应无法充分发挥，导致和易性变差，使得再生混凝土的

工作性能和密实性有所降低,抗碳化性、抗冻性降低明显,相对于未掺粉煤灰的再生混凝土加剧了冻害,产生较大的质量损失。

2.2 相对动弹性模量变化

在质量分数为3%的NaCl和5%的 Na_2SO_4 复合盐溶液中,不同掺量的粉煤灰再生混凝土试件的相对动弹性模量随冻融次数增加的变化规律如图3所示。由图3可知,4组不同掺量的粉煤灰再生混凝土在复合盐和冻融循环耦合作用下,其相对动弹性模量的劣化规律基本一致,即冻融前期平缓下降,中后期快速下降趋势。



1—FA0; 2—FA10; 3—FA20; 4—FA30。

图3 再生混凝土相对动弹性模量与冻融循环关系

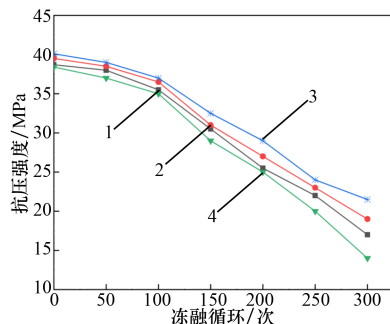
在冻融初期(0~100次)相对动弹性模量缓慢下降,不同粉煤灰掺量的再生混凝土损伤程度区别不大,这主要是因为再生混凝土初始损伤较小,粉煤灰的掺入更好地填充了结构内部细小的孔隙,使得混凝土的匀质性和致密性得到了改善;加上硫酸盐和氯盐侵蚀生成钙矾石和石膏等结晶产物,一定程度上提高了混凝土内部密实性,弥补了初始缺陷,延缓了相对动弹性模量下降趋势;冻融中后期(100~300次),相对动弹性模量下降加速。由于 Cl^- 和 SO_4^{2-} 侵蚀的加深,生成的钙矾石和石膏等结晶产物不断增大,其膨胀和结晶应力以及冻融产生的冻胀力超过试件抗拉强度,产生较多微裂纹,微裂纹进一步扩展形成贯穿裂缝,导致内部损伤愈发严重,使得再生混凝土试件的相对动弹性模量呈现快速下降态势。

由相对动弹性模量曲线可知,在相同的盐冻循环次数下,不同粉煤灰掺量的再生混凝土相对动弹性模量从大到小依次为:FA20>FA10>FA0>FA30,表明粉煤灰掺量在0%~20%时,再生混凝土的相对动弹性模量随粉煤灰掺量的增加而提高,其中当粉煤灰掺量为20%左右时,再生混凝土

的动弹性模量最大,具有较好的抗盐冻作用,而粉煤灰掺量为30%时,相对动弹性模量最低,其试件的冻融劣化作用最为明显,FA30在300次冻融后相对动弹性模量仅为0.628,接近混凝土冻融循环相对动弹性破坏指标0.6的临界值,分析原因主要是由于粉煤灰的形态效应、活性效应以及微集料效应,适量的掺入能够改善再生混凝土结构的匀质性和致密性,提高其宏观力学性能,过多的粉煤灰掺入,降低了混凝土工作性能和力学性能,加剧了盐冻循环产生的渗透冻害作用。

2.3 抗压强度变化

每50个冻融循环周期测定再生混凝土试件的抗压强度,图4表示在复合盐侵蚀作用下不同掺量的粉煤灰再生混凝土抗压强度随冻融循环次数增加的变化规律。



1—FA0; 2—FA10; 3—FA20; 4—FA30。

图4 再生混凝土抗压强度与冻融循环关系

分析图4可知:在复合盐侵蚀下,4组不同掺量的粉煤灰再生混凝土随冻融循环次数的增加,抗压强度均呈现先缓慢下降后加速下降的趋势。在冻融循环和复合盐侵蚀前期,由于 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子与水泥石中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成腐蚀产物和结晶盐,填补了内部孔隙,提高了混凝土试件的密实度,同时粉煤灰的活性效应和二次水化作用,削弱了 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的扩散作用,改善了再生混凝土抗复合盐侵蚀能力,延缓了抗压强度的衰减^[8]。随着后期冻融和侵蚀继续增加,产生了大量的腐蚀产物和结晶盐,且腐蚀产物的膨胀力和硫酸盐结晶压力以及冻融冻胀力共同作用于孔隙壁,使得再生混凝土内部产生了较多的网状裂纹,出现较为严重的分层剥落破坏,导致再生混凝土后期的抗压强度急剧下降。

在盐冻侵蚀作用下,抗压强度损失从大到小

依次为: FA30 > FA0 > FA10 > FA20, 20% 掺量的粉煤灰再生混凝土试件的抗压强度损失最小, 这是由于 FA20 相对于其他粉煤灰掺量, 粉煤灰的微集料效应更加明显, 更好地改善了混凝土的性能, 减小再生混凝土的孔隙扩展, 抑制了盐冻循环对混凝土试件的破坏作用, 使得 FA20 粉煤灰再生混凝土抗压强度损失最小。30% 粉煤灰掺量再生混凝土抗压强度损失最大, 主要是因为过多的粉煤灰掺量, 影响活性二氧化硅在早期未能充分与混凝土水泥水化产物发生反应, 不能有效填充混凝土内部的孔隙, 降低了密实度, 同时由于复合盐溶液的扩散性和渗透性, 产生了较大的结晶压力和渗透压力, 加剧了裂缝的发展, 使得抗压强度迅速下降。

3 冻融损伤模型和寿命预测

3.1 建立冻融损伤模型

再生混凝土的冻融损伤破坏是指其在服役的过程中, 由于冻融以及复合盐耦合侵蚀作用下混凝土内部的微小损伤逐渐累积发展, 最终形成了混凝土力学性能逐渐退化过程, 其相对动弹性模量可以间接表示混凝土的内部密实度, 较好地分析再生混凝土的冻融损伤演变过程。依据宏观损伤力学的相关理论, 引入混凝土冻融损伤度 D_n [9]:

$$D_n = 1 - E_r \quad (1)$$

式中: D_n 为 n 次冻融后的损伤度; E_r 为混凝土的相对动弹性模量。

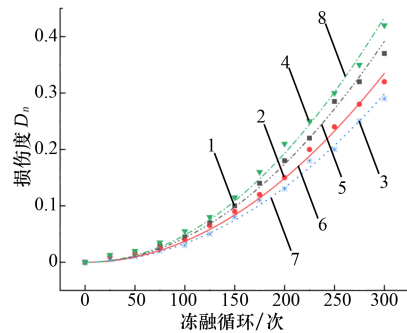
根据文献 [10] 中王立久教授提出的混凝土冻融循环损伤加速度概念, 动弹性模量损伤是由相对动弹性模量损伤加速度造成的, 采用抛物线模型对再生混凝土的冻融损伤进行模拟, 表达式为

$$D_n = \frac{1}{2} e_g n^2 \quad (2)$$

式中: n 为冻融循环次数; e_g 为相对动弹性模量损伤加速度。

根据相对动弹性模量试验结果及式(1)进行计算, 得到各冻融循环下的混凝土损伤度, 通过式(2)的抛物线模型, 利用 Origin 软件分别对 4 组不同粉煤灰掺量的再生混凝土进行冻融损伤拟合, 图 5 为拟合曲线与试验值的关系, 损伤演化系数

如表 5 所示, 各相关系数 R^2 接近于 1, 表明抛物线损伤模型拟合效果较好, 能够较精准预测粉煤灰再生混凝土在盐冻环境下的使用寿命。



1—FA0 试验值; 2—FA10 试验值; 3—FA20 试验值;
4—FA30 试验值; 5—FA0 拟合曲线; 6—FA10 拟合曲线;
7—FA20 拟合曲线; 8—FA30 拟合曲线。

图 5 损伤度试验数据与拟合结果对比

表 5 冻融损伤模型相关参数

编号	R^2	e_g
FA0	0.984	8.701×10^{-6}
FA10	0.986	7.439×10^{-6}
FA20	0.995	6.628×10^{-6}
FA30	0.982	9.652×10^{-6}

注: R^2 为拟合相关系数。

3.2 预测使用寿命

利用抛物线损伤模型预测再生混凝土的抗冻耐久性寿命, 以式(2)计算相对动弹性模量 E_r 下降到 60% ($D_n = 0.4$) 时的最大冻融循环次数 N , 作为粉煤灰再生混凝土破坏失效时室内抗冻融循环次数, 结果如表 6 所示。

表 6 破坏失效时室内抗冻融循环次数

编号	FA0	FA10	FA20	FA30
最大冻融次数	303.2	327.9	347.4	287.9

在实际工程中, 混凝土的耐久性使用寿命是以年进行评估的, 为此需要将室内冻融循环试验转化为混凝土的实际使用寿命。根据混凝土室内外冻融循环次数之间的关系 [11], 寿命预测表达式为

$$T = \frac{kN}{M} \quad (3)$$

式中: T 为混凝土预测使用寿命; k 为室内外冻融循环次数比值系数, 一般取 12; M 为年平均自然冻融循环次数; N 为室内最大冻融循环次数。

结合文献 [12] 的研究成果, 我国的东北、西

北以及华北地区的年平均冻融循环次数 M 分别为 120、118 和 84 次/a, 根据式(3)计算得到不同地区再生混凝土的使用寿命, 如表 7 所示。

表 7 不同粉煤灰掺量再生混凝土使用寿命

地区	T/a			
	FA0	FA10	FA20	FA30
东北地区	30.3	32.8	34.7	28.8
西北地区	30.8	33.4	35.3	29.3
华北地区	43.3	46.8	49.6	41.1

由表 7 可知: 在同一地区盐冻环境下, 取代率为 0% ~ 20% 粉煤灰掺量中, 混凝土的耐久性寿命随着粉煤灰增加逐渐提高, 其中 20% 粉煤灰掺量的混凝土耐久性能达到最优, 使用寿命最长, 而 30% 掺量的粉煤灰再生混凝土抗冻寿命有所降低。在质量分数为 3% 的 NaCl 和 5% 的 Na_2SO_4 复合盐溶液冻融环境中, 同一掺量的粉煤灰再生混凝土抗冻性能, 其华北地区的混凝土使用寿命最高, 西北地区次之, 东北地区最低, 表明东北地区盐冻环境最为恶劣, 加剧了混凝土的劣化。以 20% 粉煤灰掺量再生混凝土为例, 东北和西北地区的抗冻耐久性寿命相比华北地区分别下降了 30%, 28.8%, 表明在质量分数为 3% 的 NaCl 和 5% 的 Na_2SO_4 复合盐溶液中, 东北地区的粉煤灰再生混凝土的抗冻耐久性最差。

4 结 论

(1) 不同粉煤灰掺量的再生混凝土随着盐冻次数增加, 抗压强度呈现逐渐减小, 质量损失逐渐增加的趋势; 粉煤灰掺量在 20% 范围内时, 随着粉煤灰取代率增加, 同盐冻次数下的再生混凝土抗压强度和质量损失降低幅度逐渐减小, 而 30% 掺量时抗压强度和质量损失最大。

(2) 各掺量粉煤灰再生混凝土在复合盐溶液冻融下, 相对动弹性模量的变化趋势均呈现冻融前期平缓下降, 中后期快速下降的变化规律。粉煤灰掺量 30% 时, 粉煤灰的微集料效应无法充分发挥, 降低了水泥的活性, 影响混凝土的颗粒级配及和易性, 导致孔隙率增大, 使得再生混凝土的冻融损伤最为明显, 在 300 次冻融时相对动弹

性模量仅为 0.628, 接近冻融破坏临界值。

(3) 抛物线模型可以较好评价粉煤灰再生混凝土在复合盐环境下的冻融损伤, 拟合精度较高。通过抛物线模型预测了粉煤灰掺量为 0%、10%、20% 以及 30% 的再生混凝土使用寿命分别为 30 ~ 43 a、32 ~ 46 a、34 ~ 49 a 和 28 ~ 41 a, 其中 20% 粉煤灰掺量的再生混凝土抗盐冻性能最优。

参考文献:

- [1] 贾文亮, 李昊, 张琴. 硫酸盐环境下再生骨料混凝土的抗冻性能[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(6): 1816 - 1820.
- [2] 肖前慧, 李阳阳, 邱继生, 等. 冻融与硫酸盐侵蚀耦合作用下不同骨料取代率再生混凝土损伤研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(4): 101 - 107.
- [3] POWERS TC. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete[J]. Journal of the American concrete institute, 1945, 16(4): 245 - 272.
- [4] 邱继生, 王斌, 关斌, 等. 冻融作用下煤矸石陶粒混凝土劣化规律及寿命预测[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(11): 61 - 65.
- [5] 秦拥军, 刘珂, 许富威, 等. 冻融循环下掺锂渣再生混凝土损伤试验[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 262 - 267.
- [6] 徐存东, 李智睿, 李欣达, 等. 盐冻循环下混凝土结构的寿命预测[J]. 混凝土, 2021(11): 29 - 32; 37.
- [7] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [8] 苏秦, 蒋奇, 褚继龙等. 矿物掺合料对沿海混凝土耐久性影响研究综述[J]. 工程建设, 2021, 53(6): 6 - 11.
- [9] 赵燕茹, 张建新, 白建文, 等. 偏高岭土混凝土抗冻性能及寿命预测[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 1160 - 1165.
- [10] 王立久, 汪振双, 崔正龙. 基于冻融损伤抛物线模型的再生混凝土寿命预测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(1): 29 - 35.
- [11] 王晨霞, 张铎, 曹芙波, 等. 冻融循环后再生混凝土的力学性能及损伤模型研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(5): 199 - 207.
- [12] 李金玉, 彭小平, 邓正刚, 等. 混凝土抗冻性的定量设计[J]. 混凝土, 2000(12): 61 - 65.