

粉煤灰-硅灰透水再生混凝土冻融损伤研究

孙 杰¹, 王厚安¹, 彭金龙¹, 廖海峰²

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 武汉 430065;
2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 武汉 430010)

摘 要: 针对透水混凝土存在的力学性能低、抗冻性能差等问题, 以粉煤灰和硅灰为掺杂相, 探究了不同掺量的粉煤灰和硅灰对透水再生混凝土力学性能的影响, 并选取力学性能最优的透水再生混凝土在不同冻融介质中进行冻融循环试验, 以质量损失率和相对动弹性模量为依据, 利用 Weibull 函数对透水再生混凝土进行寿命预测。结果表明: 适量的粉煤灰和硅灰能提高透水再生混凝土的力学性能, 且粉煤灰掺量为 10%, 硅灰掺量为 6% 时透水再生混凝土的性能最优; 5% NaCl、5% Na₂SO₄ 均能加速透水再生混凝土的冻融破坏, 5% Na₂SO₄ 环境下的冻融破坏最严重。建立的损伤预测模型能够精准的预测透水再生混凝土的使用寿命, 为透水再生混凝土在寒冷及盐渍地区的工程应用提供了理论依据。

关键词: 透水再生混凝土; 力学性能; 冻融循环; 损伤度; 预测模型

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0007-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.002

Study on Freeze-Thaw Damage of Fly Ash-Silica Fume Pervious Recycled Concrete

SUN Jie¹, WANG Houan¹, PENG Jinlong¹, LIAO Haifeng²

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;
2. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research
Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: To address the inherent problems of low mechanical properties and poor frost resistance of pervious recycled concrete, fly ash and silica fume were adopted as admixtures. The effects of different dosages of fly ash and silica fume on the mechanical properties of pervious recycled concrete were investigated. The pervious recycled concrete with the optimal mechanical performance was selected to conduct freeze-thaw cycle tests under different freeze-thaw media. Based on the mass loss rate and relative dynamic elastic modulus, the Weibull function was employed to predict the service life of pervious recycled concrete. The results show that appropriate dosages of fly ash and silica fume can effectively improve the mechanical properties of pervious recycled concrete. The optimal comprehensive performance is observed at a 10% the fly ash content and a 6% silica fume content. Both 5% NaCl solution and 5% Na₂SO₄ solution can accelerate the freeze-thaw deterioration of pervious recycled concrete, and the more severe freeze-thaw damage is under the 5% Na₂SO₄ environment. Furthermore, the established damage prediction model can accurately predict the service life of pervious recycled concrete, providing a theoretical basis for the engineering application of pervious recycled concrete in cold and saline regions.

材料科学

Key words: pervious recycled concrete; mechanical properties; freeze-thaw cycle; damage degree; prediction model

0 引言

随着“海绵城市”的发展理念深入人心,透水再生混凝土(Pervious recycled concrete, PRC)广泛应用于轻交通路面^[1]。透水再生混凝土具有内部孔隙多、吸水率高、强度低等特点^[2],易遭受冻融破坏,且寒冷地区冬季喷洒除冰盐会加剧冻融损伤,因此提高透水再生混凝土的耐久性成为不可忽视的问题。

目前国内外学者对透水再生混凝土的耐久性展开了一系列研究,但针对不同冻融介质下的透水再生混凝土耐久性的研究较少。Hilal^[3]研究了再生骨料(Recycled coarse aggregates, RCA)取代率对透水混凝土性能的影响,结果表明,RCA置换导致总空隙率、孔隙率和渗透率增加,而坍落度和硬化密度降低;张卫东等^[4]得出了透水再生混凝土的性能随冻融循环次数或再生骨料取代率的增大而下降;尹志刚等^[5]通过研究不同冻融介质下的透水再生混凝土冻融循环后的性能变化,得出了氯盐环境下更易引起冻融破坏;周璐等^[6]研究得出了适量的粉煤灰和硅灰能够显著提高透水混凝土的力学性能、渗透性能和抗冻性能;刘小梅等^[7]为研究硅粉和活化煤矸石粉不同取代率下对透水混凝土强度和耐久性的影响规律,发现掺入10%~15%的硅粉和10%的活化煤矸石粉可以有效提高混凝土强度,且硅粉对强度的提升效果更为明显;赵伟等^[8]将6、12 mm的玄武岩纤维掺入混凝土中,掺量相同时,6 mm的玄武岩纤维混凝土有更高透水性;文星^[9]通过试验获得干湿循环条件下透水混凝土强度、峰值应变和弹性模量等主要力学参数的变化规律,为透水混凝土的工程应用提供了必要的理论支持;李凯等^[10]揭示骨料形状对混凝土水渗透性的影响,混凝土的水分渗透系数随骨料体积分数增大呈现先降低后增加的变化趋势;陈守开等^[11]分析了废玻璃颗粒对再生骨料透水混凝土力学性能和渗透性能的变化规律及影响机理。采用废玻璃颗粒替代天然河砂后,能够促进水泥水化,提高砂浆的工作性能,改善再生骨料透水混凝土的孔结构,并较大幅度提高其力学性能;

张超等^[12]发现再生骨料透水混凝土的破坏模式与胶凝材料性能和再生骨料质量分数相关,可为再生骨料透水混凝土设计和应用提供参考;何松松等^[13]分析了骨料粒径和孔隙率对HSFRPC工程性能的影响规律。发现骨料粒径为2.36~4.75 mm、设计孔隙率为20%的HSFRPC工程性能优越且各项性能均衡,可供寒区道路工程参考;陈尚鸿等^[14]发现采用钢渣作为骨料制备透水混凝土,可有效优化界面过渡区的微观性能,改善钢渣-矿渣透水混凝土的力学性能;乔宏霞等^[15]基于Weibull分布对不同冻融介质下的PRC进行了可靠度建模,预测了PRC使用寿命,为透水再生混凝土的实际工程应用提供了参考。

基于此,探究粉煤灰和硅灰对透水再生混凝土力学性能的影响并将最优性能下的透水再生混凝土在不同冻融介质中(清水、5% NaCl溶液、5% Na₂SO₄溶液)进行冻融循环试验,以质量损失率和相对动弹性模量为退化指标建立了不同冻融环境下的冻融损伤模型,为严寒地区透水再生混凝土的推广应用提供了参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

采用P·O 42.5级水泥,比表面积为3 349 cm²/g,密度为3.07 g/cm³,粉体粒径主要集中在3~35 μm。粉煤灰为超细Ⅱ级粉煤灰,其性能参数见表1;硅灰性能参数见表2。

表1 粉煤灰的性能指标

Table 1 Performance indicators of fly ash			/%
比表面积/(m ² /kg)	密度/(g/cm ³)	活性指数/%	
403	2.21	75	

表2 硅灰的物理化学性能指标

Table 2 Physical and chemical properties of silica fume			
SiO ₂ 含量/%	平均粒径/μm	比表面积/(mm ² /kg)	损失/%
90.25	0.12	20 000	3.72

1.2 配合比设计

参考CJJ/T 253—2016《再生骨料透水混凝土应用技术规程》,设计透水再生混凝土强度等级为C40,孔隙率为20%。以再生粗骨料取代率为30%作为基准^[16],矿物掺合料采用全掺法^[17]等比例取代水泥,

粉煤灰的体积取代率为 5%、10%、15%，硅灰的体积取代率为 3%、6%、9%，透水混凝土水胶比为 0.30，试验配合比设计方案见表 3。

表 3 透水再生混凝土配合比
Table 3 Mix proportion of the pervious recycled concrete

编号	比例	混凝土	粉煤灰	硅灰	水	NCA	RCA	减水剂
								/(kg/m ³)
1	FA0+SF0	472.15			141.65	1617.0		4.72
2	FA5+SF0	448.54	23.61		141.65	1131.9	485.1	4.72
3	FA10+SF0	424.93	47.22		141.65	1131.9	485.1	4.72
4	FA15+SF0	401.33	70.82		141.65	1131.9	485.1	4.72
5	FA0+SF3	458.00		14.16	141.65	1131.9	485.1	4.72
6	FA5+SF3	434.38	23.61	14.16	141.65	1131.9	485.1	4.72
7	FA10+SF3	410.77	47.22	14.16	141.65	1131.9	485.1	4.72
8	FA15+SF3	387.17	70.82	14.16	141.65	1131.9	485.1	4.72
9	FA0+SF6	443.82		28.33	141.65	1131.9	485.1	4.72
10	FA5+SF6	420.21	23.61	28.33	141.65	1131.9	485.1	4.72
11	FA10+SF6	396.60	47.22	28.33	141.65	1131.9	485.1	4.72
12	FA15+SF6	373.00	70.82	28.33	141.65	1131.9	485.1	4.72
13	FA0+SF9	429.65		42.50	141.65	1131.9	485.1	4.72
14	FA5+SF9	406.04	23.61	42.50	141.65	1131.9	485.1	4.72
15	FA10+SF9	382.43	47.22	42.50	141.65	1131.9	485.1	4.72
16	FA15+SF9	358.83	70.82	42.50	141.65	1131.9	485.1	4.72

1.3 试验方法

1.3.1 透水再生混凝土的力学性能

为研究不同掺量下透水再生混凝土的力学性能，设计了 32 组共 96 个试件，抗压试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm，抗折试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm，试件成型后在标准养护室内养护 28 d 后取出，用湿毛巾擦干表面水分，按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》规范进行试验，测试透水再生混凝土的抗压强度和抗折强度。

1.3.2 透水再生混凝土的抗冻性能

为研究不同掺量下透水再生混凝土的抗冻性能，设计了 16 组共 48 个试件，尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm，成型后置于标准养护室内，养护 28 d，在 24 d 时将透水再生混凝土试件取出并放入 20 ℃的水中浸泡 4 d。冻融介质分为清水、5%Na₂SO₄ 溶液、5%NaCl 溶液。依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》规定的快冻法测试透水再生混凝土试件的抗冻性能。试验冻融循环设定为试件在 (−18±2) ℃环境中冻融 3 h，在 (5±2) ℃环境中融化 3 h，共计 6 h。每 25 次冻融循环后取出试件测定其相对动弹性模量和质量损失。

2 结果与分析

2.1 透水再生混凝土力学性能分析

2.1.1 抗压强度

由图 1 可知，不同取代率的粉煤灰和硅灰均能提高透水再生混凝土的抗压强度。因为掺入的粉煤灰和硅灰具有火山灰效应和微集料填充效应，改善了骨料-水泥石界面的微结构以及水泥石的内部结构。单掺 10%粉煤灰的透水再生混凝土的抗压强度最高为 42.62 MPa，提高了约 13%。单掺 6%硅灰的透水再生混凝土的抗压强度最高为 41.95 MPa，提高了约 12%，硅灰掺量为 6%，粉煤灰掺量为 10%时试件的抗压强度最高为 44.21 MPa，提高了约 18%。表明复掺粉煤灰和硅灰对透水再生混凝土抗压强度的提升优于单掺粉煤灰和硅灰，而单掺粉煤灰或硅灰对透水再生混凝土抗压强度的提升效果差别不大。

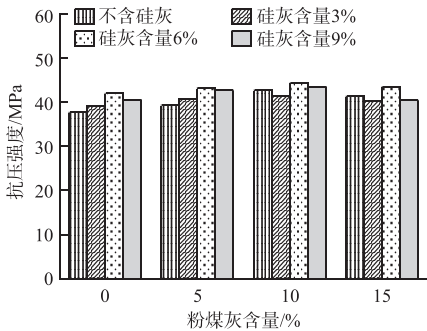


图 1 透水再生混凝土抗压强度
Fig. 1 Compressive strength of the pervious recycled concrete

2.1.2 抗折强度

由图 2 可知，少量硅灰的掺入会降低透水再生混凝土的抗折强度，适量的粉煤灰和硅灰掺入能显著提高透水再生混凝土的抗折强度，且粉煤灰掺量为 10%，硅灰掺量为 6%时透水再生混凝土试件的抗折强度最高为 5.03 MPa，提升了约 9%。

这主要是由于粉煤灰的活性强于硅灰的活性，在反应过程中粉煤灰活性先被激发，与水泥水化物发生二次水化反应，生成了 C-S-H 胶凝材料，改善了水泥骨料界面；后期硅灰所含的碱性激发，使反应速度加快。随着粉煤灰和硅灰掺量的增加，粉煤灰和硅灰水化需要大量 Ca(OH)₂，而水泥水化产生的 Ca(OH)₂ 是一定的，导致大量的粉煤灰和硅

材料科学

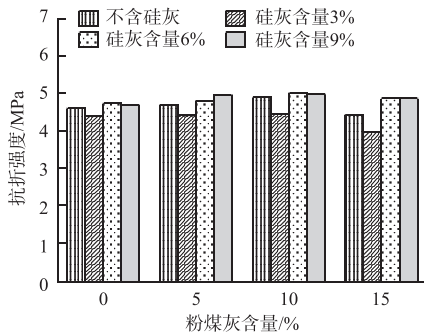


图2 透水再生混凝土抗折强度

Fig. 2 Flexural strength of the pervious recycled concrete

灰无法进行反应,而粉煤灰和硅灰具有较大的比表面积,水泥水化所需要的大量自由水被粉煤灰和硅灰包裹,水泥浆体水化不充分,导致试件的抗折强度急剧下降。

2.2 透水再生混凝土抗冻性能分析

2.2.1 质量损失率

由图3可知,不同冻融介质中试件的质量损失率都随冻融循环次数的增加而增大,但在冻融循环不超过75次时,试件的质量损失率变化较为平缓,质量损失不大且不同冻融介质中的试件质量损失率差别不大。随着冻融次数的增加,试件的质量损失率开始加剧,其中以5% Na_2SO_4 溶液中的试件质量损失率最大。经过200次冻融循环后,清水、5% NaCl 溶液和5% Na_2SO_4 溶液中试件的质量损失率分别达到1.75%、1.86%、1.92%,相较于清水,5% Na_2SO_4 溶液中的试件质量损失率提高了约9%。由此可知三种冻融介质作用下透水再生混凝土试件质量损失速率的大小关系是:5% $\text{Na}_2\text{SO}_4 > 5\% \text{NaCl} > \text{水}$ 。

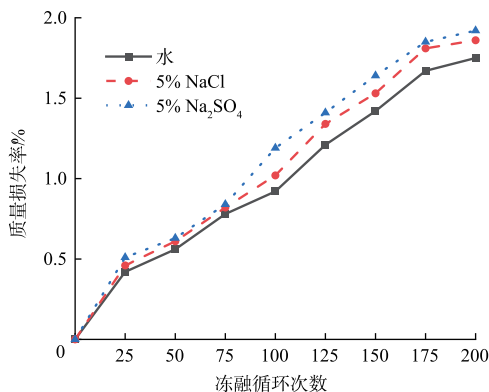


图3 透水再生混凝土质量损失率

Fig. 3 Mas loss of the pervious recycled concrete

原因在于试件自身的连通孔隙较大,可以适当的减缓内部水溶液结冰引起的冻胀开裂,故冻融前期的质量损失率主要为水泥浆体和细骨料的流失。随着冻融循环次数的增加,侵蚀性离子和内部盐析出速度加快,提高了再生混凝土中水的饱和度,再生骨料与水泥浆体之间的黏结性能不足以抵抗冻融产生的疲劳应力,导致了试件产生了骨料剥落和断裂等现象,加剧了冻害。

2.2.2 相对动弹性模量

由图4可知,冻融循环前期,不同冻融介质中的透水再生混凝土试件相对动弹性模量变化均不超过5%,且相差不大;随着冻融循环次数的增加,试件的相对动弹性模量开始急剧下降,且不同冻融介质中的试件相对动弹性模量变化差别明显。当冻融次数达到200次时,清水溶液、5% NaCl 溶液和5% Na_2SO_4 溶液三种环境下试件的相对动弹性模量分别下降了22.4%、24.8%、26.6%。相较于清水中,5% Na_2SO_4 溶液中的试件相对动弹性模量下降了约18.7%。主要原因在于冻融初期,透水再生混凝土试件的损伤较小,损伤主要集中在试件的表面,相对动弹性模量下降呈缓慢趋势^[18];冻融中期时,损伤向透水再生混凝土试件内部发展。由于试件中掺加了再生骨料,再生骨料内部存在大量孔隙,孔隙中吸收了大量水分,水结冰后体积膨胀,使透水再生混凝土试件内部出现损伤;冻融后期,盐溶液会提高水的渗透性,促进透水再生混凝土裂缝的扩展,使冻融损失加剧,导致相对动弹性模量快速下降。试验结果表明,相同冻融循环次数下,透水混凝土

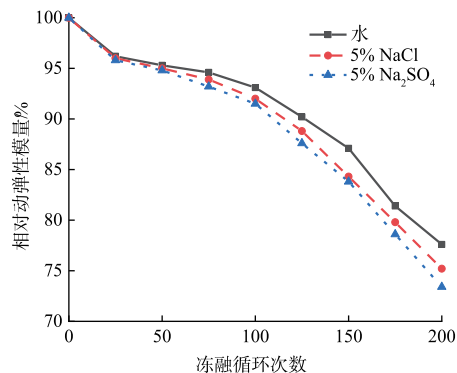


图4 透水再生混凝土相对动弹性模量

Fig. 4 Relative dynamic elastic modulus of the pervious recycled concrete

试件损伤程度由强到弱依次为: 5% Na₂SO₄ 溶液、5% NaCl 溶液、清水。

2.3 基于 Weibull 分布的冻融损伤分析和寿命预测

透水再生混凝土试件在冻融循环过程中, 其物理性能指标如质量、强度和动弹性模量等会发生变化, 成为了衡量试件冻融损伤程度的标准。目前混凝土抗冻性失效的判定往往采用相对动弹性模量和质量损失率。将相对动弹性模量作为损伤度的判断标准, 分析试件在不同冻融介质中相对动弹性模量的变化, 建立相应的冻融损伤方程, 研究不同冻融介质作用下的冻融损伤演化规律。根据宏观损伤力学, 冻融损伤累积程度计算如下:

$$D(n) = 1 - \frac{E_n}{E_0} = 1 - E_r \quad (1)$$

式中: $D(n)$ 为 n 次冻融循环后混凝土的冻融损伤度; E_n 为 n 次冻融循环后的相对动弹性模量; E_0 为混凝土的初始动弹性模量; E_r 为 n 次冻融循环后的相对动弹性模量。

Weibull 分布可以用来预测脆性材料的寿命或建立给定寿命下的疲劳强度模型, 而混凝土的冻融损伤破坏正是由于周期性的静水压力和渗透压力联合作用下引起的疲劳应力, 因此可以用 Weibull 分布模型来描述冻融损伤演变的过程。PRC 材料的失效概率与其随机变量有关, 根据 Weibull 分布函数模型, 得到混凝土失效概率密度函数:

$$f(N) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{N}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{N}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (2)$$

式中: β 为 Weibull 形状因子; α 为比例因子; N 为冻融循环次数。

Weibull 分布函数失效概率是呈增加的趋势, 当透水混凝土材料冻融次数达到最大, 失效概率 $P_f(N) = 1$ 。随着 N 的增加, 失效概率不断进行累积, 最终产生的损伤为 $D(N)$ 。由于失效概率和损伤度上升幅度大致相同, 因此可将损伤度等效于失效概率。

$$P_f(N) = D(N) \quad (3)$$

$$D(N) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (4)$$

Weibull 分布模型符合混凝土的实际寿命特征, 而混凝土损伤度等效于失效概率, 其两者具有一致

性的原则, 因此在建立冻融损伤方程时, 将损伤等效于材料失效率。将上式移项并做对数变换得到:

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1-D} \right) = \beta \ln(N) - \beta \ln \alpha \quad (5)$$

式 (5) 是类似于 $Y=aX+b$ 的一次函数形式, 将参数 a 、 b 运用极大似然法估计, 使离散点达到最优状态, 得到拟合线性回归系数表, 见表 4。

表 4 Weibull 分布特征参数值
Table 4 Weibull distribution characteristic parameter values

名称	a	b	α	R^2
水	-7.436 2	1.523 4	109.102	0.996 1
5% NaCl	-7.326 4	1.426 1	106.145	0.991 5
5% Na ₂ SO ₄	-6.941 2	1.321 4	104.523	0.992 4

将拟合得到的数据代入式 (5) 中可得不同冻融介质作用下的透水再生混凝土冻融损伤模型, 如式 (6)、(7)、(8)。

$$D(N)_{\text{water}} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{109.102} \right)^{1.5234} \right] \quad (6)$$

$$D(N)_{\text{NaCl}} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{106.145} \right)^{1.4261} \right] \quad (7)$$

$$D(N)_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{N}{104.523} \right)^{1.3214} \right] \quad (8)$$

各项相关系数 R^2 均大于 0.99, 表明建立的 Weibull 模型精度较高。由 Weibull 分布建立的透水再生混凝土冻融损伤模型能够准确地演化透水再生混凝土的冻融损伤过程, 能够较为准确的预测 n 次冻融循环后透水再生混凝土的耐久性。

利用 Weibull 损伤模型预测再生混凝土的抗冻耐久性, 当透水再生混凝土损伤度达到 0.4 时即认定试件破坏^[19], 计算透水再生混凝土的冻融循环次数, 结果见表 5。

表 5 透水再生混凝土冻融循环次数
Table 5 Number of freeze-thaw cycles of the pervious recycled concrete 次

H ₂ O	5% NaCl	5% Na ₂ SO ₄
303.58	276.67	253.93

结合文献 [20] 东北、华北、西北地区的年平均冻融次数分别为 120、84、118 次, 自然环境中 12 次冻融循环相当于室内快速冻融循环 1 次。由此计算透水再生混凝土在中国北方各地区的耐久性, 结果见表 6。

材料科学

表 6 透水混凝土耐久性

Table 6 Durable life of the pervious recycled concrete /年

地区	H ₂ O	NaCl	Na ₂ SO ₄
东北地区	30.4	27.7	25.4
华北地区	43.4	39.5	36.3
西北地区	30.9	36.3	25.8

在 5% Na₂SO₄ 溶液中试件耐久性最短。以华北地区为例，透水再生混凝土在 5% NaCl 溶液和 5% Na₂SO₄ 溶液中的耐久性相比清水中分别下降了 8.9% 和 16.4%，表明在盐溶液中的透水再生混凝土更易遭受冻融破坏。透水再生混凝土试件在硫酸盐溶液中遭受的冻融破坏比氯盐溶液更严重。

3 结论

通过试验探究了不同掺量的粉煤灰和硅灰对透水再生混凝土力学性能的影响，分析了不同冻融介质（清水、5% NaCl 溶液、5% Na₂SO₄ 溶液）下透水再生混凝土质量损失率和相对动弹性模量的变化。具体结论如下：

（1）掺入适量的粉煤灰和硅灰能改善透水再生混凝土的力学性能。当粉煤灰体积掺量为 10%，硅灰体积掺量为 6% 时，透水再生混凝土的力学性能提升最大。

（2）不同冻融介质作用下，随着冻融循环次数的增加，透水再生混凝土的质量损失逐渐增加，相对动弹性模量随之下降；冻融损伤劣化程度由强到弱依次为 5% Na₂SO₄ 溶液、5% NaCl 溶液、清水，表明盐溶液更易引起透水再生混凝土冻融破坏，且硫酸盐溶液比氯盐溶液的冻融破坏更强。

（3）建立的 Weibull 模型可以较好的表征透水再生混凝土在不同冻融介质中的冻融损伤，各项的相关系数均在 0.99 以上，精确度较高。利用建立的 Weibull 模型对透水再生混凝土在不同冻融介质中的寿命进行预测，结果表明在 5% Na₂SO₄ 溶液中的耐久性最差，相比清水中的耐久性下降了约 16%。

参 考 文 献

[1] WANG Y, DENG Z H, XIAO J Z, et al. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under multiaxial compression [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23 (12): 2529-2538.

[2] 张阳. 高强透水混凝土制备及在园林景观道路中的应用研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (4): 64-68.

[3] HILAL EL - HASSAN, PEIMAN KIANMEHR, SOUHAIL ZOUAOU. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag [J]. Construction and Building Materials, 2019, 212.

[4] 张卫东, 董云, 彭宁波, 等. 冻融循环下透水再生混凝土力学性能损伤分析 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (2): 292-296.

[5] 尹志刚, 张恺, 范巍, 等. 不同冻融介质作用下再生骨料透水混凝土耐久性试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (7): 2137-2143.

[6] 周璐, 范宗青, 安生霞, 等. 矿物掺合料对透水混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2018 (9): 1-5.

[7] 刘小梅, 吴文强. 硅粉和活化煤矸石粉改性透水混凝土强度和耐久性研究 [J]. 金属矿山, 2024 (5): 318-324.

[8] 赵伟, 满晨, 刘龙刚, 等. 玄武岩纤维增强混凝土的力学和透水性能分析 [J]. 高科技纤维与应用, 2024, 49 (2): 59-63.

[9] 文星. 干湿循环作用下透水混凝土力学性能试验研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7 (3): 30-32.

[10] 李凯, 杨璐璐, 史才军. 基于不规则骨料堆积结构的混凝土水渗透性的研究 [J]. 材料导报, 2024, 38 (12): 99-106.

[11] 陈守开, 刘洋, 赵云鹏, 等. 废玻璃颗粒对再生骨料透水混凝土的改性作用 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26 (1): 37-44.

[12] 张超, 任鹏鹏, 邓鹏, 等. 再生骨料透水混凝土力学性能和耐久性研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2023, 50 (3): 185-194.

[13] 何松松, 焦楚杰, 欧旭. 高强抗冻透水混凝土的配合比设计与性能评估 [J]. 材料导报, 2023, 37 (21): 132-138.

[14] 陈尚鸿, 林佳福, 杨政险, 等. 钢渣-矿渣透水混凝土力学性能的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (5): 1767-1777.

[15] 乔宏霞, 苏睿, 李琼, 等. 基于 Weibull 分布的不同冻融介质下再生骨料透水混凝土耐久性能研究 [J]. 功能材料, 2023, 54 (3): 134-142.

[16] 韩云婷, 杨利香, 陈海燕. 再生粗骨料透水混凝土制备工艺及配合比优化研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45 (6): 21-24.

[17] 陈守开, 陈家林, 汪伦焰, 等. 再生骨料透水混凝土关键性能统计及预测分析 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22 (2): 214-221.

[18] 孙家瑛, 梁山. 再生混凝土集料透水性混凝土性能研究及应用 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15 (6): 747-750.

[19] 赵燕茹, 范晓奇, 王利强, 等. 不同冻融介质作用下混凝土力学性能衰减模型 [J]. 复合材料学报, 2017, 34 (2): 463-470.

[20] 李金玉, 彭小平, 邓正刚, 等. 混凝土抗冻性的定量化设计 [J]. 混凝土, 2000 (12): 61-65.