

粉煤灰混凝土力学特性及耐久性研究

周雨, 刘恺德, 王定波, 刁露, 郭亚茹

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年5月25日; 录用日期: 2023年6月15日; 发布日期: 2023年6月27日

摘要

粉煤灰是高性能混凝土的主要掺合料之一, 掺加粉煤灰直接影响到混凝土的各方面性能, 本文利用添加粉煤灰掺合料的混凝土进行力学性能及耐久性能的试验, 通过添加“硅酸盐水泥 + 粉煤灰(兼掺减水剂)”制作试块, 分析了添加后粉煤灰混凝土的力学特性等, 验证粉煤灰会提高混凝土各项性能的猜想, 总结出其变化规律, 为将来粉煤灰混凝土在实际工程中的应用提供科学依据。

关键词

粉煤灰, 混凝土, 力学性能, 耐久性

Study on Mechanical Properties and Durability of Fly Ash Concrete

Yu Zhou, Kaide Liu, Dingbo Wang, Lu Diao, Yaru Guo

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: May 25th, 2023; accepted: Jun. 15th, 2023; published: Jun. 27th, 2023

Abstract

Fly ash is one of the main admixtures of high-performance concrete, which directly affect the various aspects of concrete mixed with fly ash performance. This paper uses concrete with added fly ash admixtures to conduct mechanical and durability tests. By adding “Portland cement + fly ash (also mixed with water reducing agent)” to make test blocks, the mechanical properties of added fly ash concrete, etc. are analyzed, the conjecture that fly ash can improve the properties of concrete is verified, and its change law is summarized, which provides scientific basis for the application of fly ash concrete in practical engineering in the future.

Keywords

Fly Ash, Concrete, Mechanical Properties, Durability

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

针对粉煤灰混凝土在工程中的广泛应用以及其力学特性和耐久性的重要性,本研究对其进行了深入探究。粉煤灰混凝土作为一种新型建筑材料,其在工程结构中的应用已经得到了广泛推广。然而,由于其材料特性的独特性,其力学特性和耐久性仍需要深入研究。因此,本研究的目的是通过实验研究和理论分析,全面了解粉煤灰混凝土在不同条件下的力学特性和耐久性表现,为其在实际工程中的应用提供科学依据和理论支持。

曹芙波课题组[1] [2]以氯盐、硫酸盐以及氯盐、硫酸盐和镁盐组成的复合盐为冻融介质,对盐浓度、冻融循环次数和混凝土强度对应力-应变特征值的影响进行了分析,建立了在该工况下的应力-应变全曲线方程;王建刚[3]、黄斌斌[4]研究了普通混凝土与再生混凝土的抗冻性能,试验结果表明再生粗骨料替代率的增加导致再生混凝土抗冻性大幅下降,并且黄斌斌使用 ansys 进行有限元分析;田威[5]采用 CT 技术,从微观角度解释了原因;肖前慧课题组[6]采用“快冻法”,研究了硫酸盐对再生混凝土耐久性的影响,使用扫描电镜、能谱分析、XRD 技术进行微观揭示,曹芙波课题组[7] [8] [9] [10]以水、氯盐、硫酸盐以及氯盐、硫酸盐和镁盐组成的复合盐为冻融介质,研究盐浓度、冻融循环次数和混凝土强度对耐久性的影响,依据抗压强度损失、质量损失、相对动弹性模量建立了衰减模型,采用 SEM、XRD 技术,从微观角度进行原因解释。

国内外众多学者[11] [12]研究了粉煤灰对混凝土力学性能的影响,通过试验数据发现粉煤灰和矿渣的加入可以提高混凝土的强度;李小山[13]研究发现,粉煤灰替代率的提高,降低了混凝土早期抗压强度,以养护 28 d 为例,粉煤灰替代率从 0 涨至 20%时,抗压强度降低了 15.4%; Guodong Xu [14]也得到粉煤灰会降低混凝土早期抗压强度的结论; Yu Zhu [15]对粉煤灰等大掺量混凝土进行了研究,粉煤灰等大掺量替代水分会降低立方体抗压强度,并建立了抗压强度分别与挠度、韧性指数、断裂能、抗弯强度、首次开裂载荷、峰值载荷的关系。Jing Yu [16]对 80%粉煤灰替代率的 C45 混凝土进行了研究,试验结果表明:标养 28 d 后,抗压强度可以超过 60 MPa,与 C45 商品混凝土相比,可以减少 70%的碳排放,经济成本降低 15%以上; My Ngoc-Tra Lam [17]对粉煤灰混凝土抗压与劈裂抗拉性能进行了研究,并提出了粉煤灰抗压强度预测模型。

综上所述,目前对于粉煤灰混凝土的力学性能,抗碳化和抗冻性能的相关研究进行了大量的试验,取得了丰硕的研究成果,但是对于粉煤灰混凝土相关性能的理论分析还不成熟、完善,没有形成系统的理论成果,而且对于复掺粉煤灰和其他掺合料的性能试验还有很多工作要做,因此对粉煤灰混凝土性能仍有待于进一步的研究。

2. 试验

试块制备

混凝土力学性能试验依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/50081-2002)进行。

1) 原材料准备。根据国家有关标准和规定,对课题研究所需混凝土原材料如水泥、砂、石等进行试

验准备,包括粗骨料、细骨料的严格筛选以及确保其余原材料能正常使用。

2) 混凝土配合比设计:混凝土设计等级为 C40,坍落度 180 mm,强度标准差 5 Mpa,减水剂掺量为 0.8%,水胶比 0.42。

3) 制备混凝土试块。

将预备材料按预定方案比例进行搅拌均匀;搅拌期间将试块模具清理干净并且刷上脱模油;将混凝土装入刷好油的模具内,在振动台上振动至表面出浆;将表面多余的混凝土刮出,使混凝土表面保持平整;已制作好的混凝土放入养护箱养护;等待 24 h 后混凝土硬化脱模,继续养护 28 天。

4) 普通混凝土物理力学性能试验

① 抗压强度试验: 100 mm × 100 mm × 100 mm;

② 劈裂抗拉强度试验: 100 mm × 100 mm × 100 mm;

③ 轴心抗压强度试验: 150 mm × 150 mm × 300 mm;

④ 静力受压弹性模量试验: 150 mm × 150 mm × 300 mm。

5) 普通混凝土长期性能及耐久性能试验

普通混凝土抗冻性能试验: 快冻法 100 mm × 100 mm × 400 mm。

6) CT 扫描受冻混凝土细观结构分析试验: 100 mm × 100 mm × 100 mm。

7) 混凝土三轴压缩力学性能试验: Φ100 mm × 200 mm 试件。

3. 结果与分析

3.1. 抗压强度试验

抗压试验采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 的标准立方体试块,加载设备为 MTS-2000 微机控制电液伺服万能试验机,立方体抗压强度试验与轴心抗压强度试验各做三组,最后将每组三个试验结果的算术平均值作为本组试验的结果。抗压强度的计算公式如下:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (1)$$

f_c ——混凝土立方体试件抗压强度(MPa); F ——试件破坏荷载(N); A ——试件承压面面积(m²)。

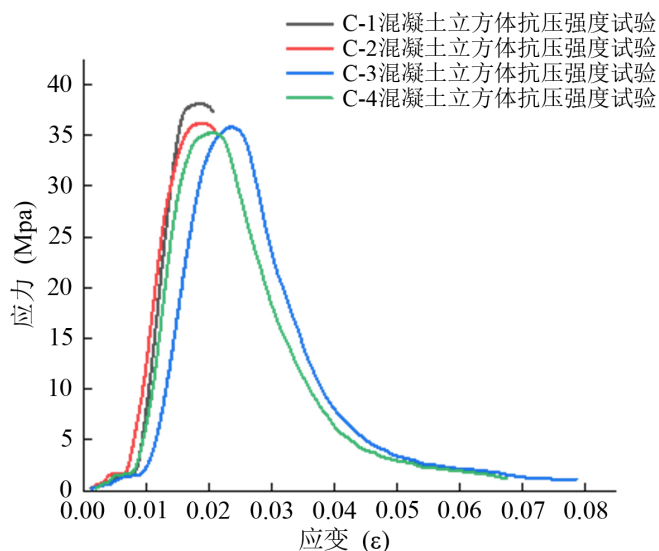


Figure 1. Compressive stress-strain diagram of concrete cube

图 1. 混凝土立方体抗压应力应变图

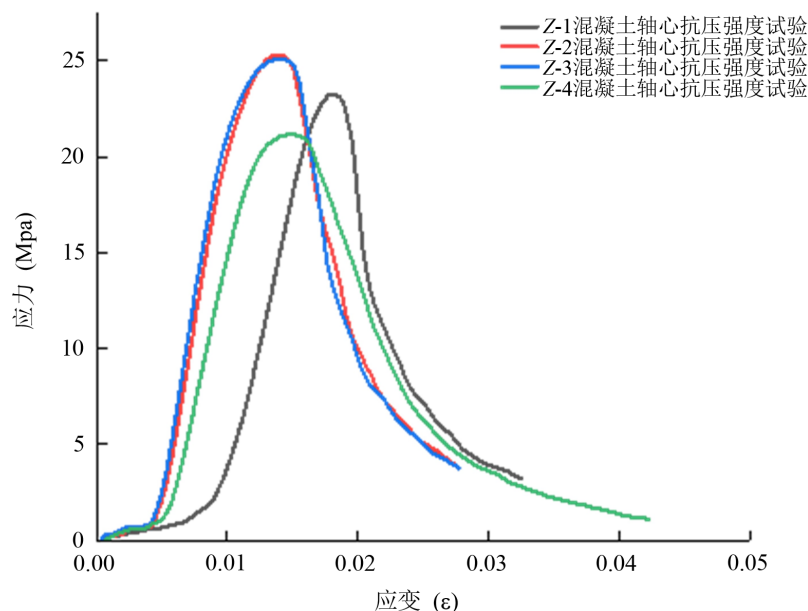


Figure 2. Diagram of axial compressive stress and strain of concrete
图 2. 混凝土轴心抗压应力应变图

GB50204《混凝土结构工程施工质量验收规范》中明确规定：混凝土立方体抗压强度标准值，当试件尺寸为 100 mm 立方体或骨料或最大粒径 ≤ 31.5 mm 时，应乘以强度尺寸换算系数 0.95。当试件尺寸为 200 mm 立方体或骨料最大粒径 ≤ 63 mm 时，应乘以强度尺寸换算系数 1.05。折减计算后抗压强度试验数据，如表 1、表 2 所示，应力应变图如图 1、图 2 所示。

由图可以看见，混凝土在受压过程中有一小段的压密过程，表明混凝土内部孔隙率不高，压密过程结束后混凝土表现出明显的塑性性能，应变在逐渐增加但是力却没有增大，塑性阶段结束后试验进入弹性阶段，应力应变曲线呈近似直线增长直至抗压强度顶端，之后试块破坏，曲线没有立即以 90° 直线下跌，而是以平滑曲线的状态下路，表明混凝土内部连接紧密，其塑性特征明显高于脆性特征，抗压的破坏状态与曲线反应的状态相似，混凝土表面呈现剥落式脱落，并没有听见明显的爆裂声。

Table 1. Cube compressive strength

表 1. 立方体抗压强度

试块	受压面积(mm^2)	破坏载荷(KN)	抗压强度(MPa)	试件组抗压强度代表值(MPa)
1	10,000	402.03	38.19	36.8
2	10,000	381.52	36.29	
3	10,000	377.28	35.82	

Table 2. Axial compressive strength

表 2. 轴心抗压强度

试块	受压面积(mm^2)	破坏载荷(KN)	抗压强度(MPa)	试件组抗压强度代表值(MPa)
1	22,500	564.56	25.09	25.0
2	22,500	552.89	24.57	
3	22,500	569.08	25.29	

3.2. 劈裂试验

利用 100 mm × 100 mm × 100 mm 试块做劈裂试验测试混凝土的抗拉强度, 加载设备为 MTS-2000 微机控制电液伺服万能试验机。

抗拉强度的计算公式为:

$$f_{ts} = \frac{2P}{A\pi} = 0.637 \frac{P}{A} \quad (2)$$

f_{ts} ——混凝土劈裂抗剪强度, MPa; P ——破坏荷载, N; A ——试件劈裂面积, mm^2 。

C40 混凝土经计算后劈裂抗拉强度数据, 如表 3 所示, 应力应变曲线如图 3 所示。由图可知, 四块试样在受拉时都有很明显的压密过程, 压密过程后紧接着一段类似弹性过程, 曲线呈现近似直线状态上升, 之后进入塑性状态, 曲线呈现水平状态。塑性状态后立即呈直线上升进入弹性状态, 上升至抗拉强度峰值后除了 PL-4 试块以外所有的曲线均呈缓慢下降的状态。

Table 3. Splitting tensile strength

表 3. 劈裂抗拉强度

试块	受压面积(mm^2)	破坏荷载(KN)	抗拉强度(MPa)	试件组抗拉强度代表值(MPa)
1	10,000	47.626	3.03	2.74
2	10,000	48.612	3.10	
3	10,000	36.603	2.33	
4	10,000	39.434	2.51	

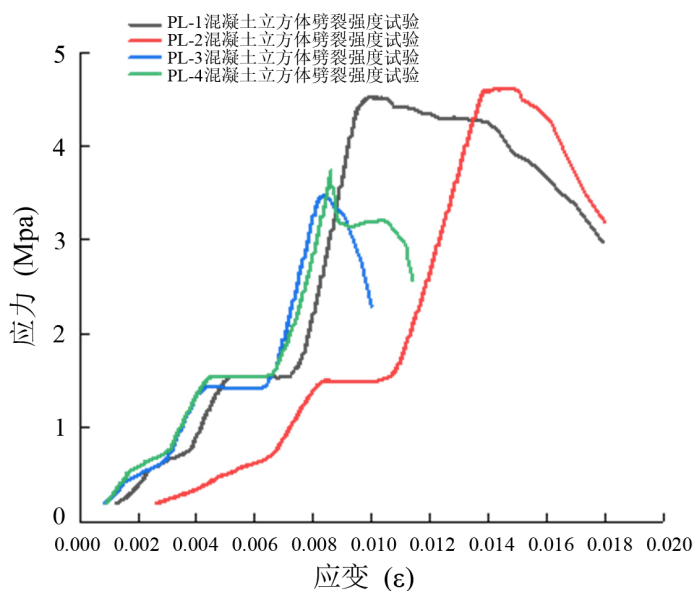


Figure 3. Diagram of concrete splitting tensile stress and strain

图 3. 混凝土劈裂抗拉应力应变图

3.3. 静力受压弹性模量

本试验采用 150 mm × 150 mm × 300 mm 的标准混凝土立方体试块, 加载设备为 MTS-2000 微机控制电液伺服万能试验机, 混凝土弹性模量应该按下式计算:

$$E_c = \frac{F_a - F_0}{A} \times \frac{L}{\Delta n} \quad (3)$$

E_c ——混凝土弹性模量, MPa; F_a ——应力为 1/3 轴心抗压强度时的荷载, N; F_0 ——应力为 0.5 MPa 时的初始荷载, N; A ——试件承压面积, mm^2 ; L ——测量标距, mm; Δn ——最后一次从 F_0 加荷至 F 时试件两侧变形的平均值, mm。

根据 JTJ023 规范, 本次试验所得静力受压弹性模量数据, 如表 4 所示。

Table 4. Elastic modulus under static compression

表 4. 静力受压弹性模量

试块	受压面积(mm^2)	初始荷载(KN)	控制荷载(KN)	测量标距(mm)	静力受压弹性模量(MPa)
1	22,500	11.25	186.75		32,200
2	22,500	11.25	186.75	150	32,600
3	22,500	11.25	186.75		33,000

3.4. 混凝土三轴试验

混凝土三轴试验中使用到的是 $\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 圆柱形试件。

根据混凝土的围压、轴向以及径向应变绘制多级围压下混凝土的应力应变曲线, 如图 4 所示。由图可知, 随着围压的增加, 混凝土圆柱的轴向应变数值也随之增大, 与此同时偏应力大小也在增加。在峰值后, 混凝土的特征主要表现为塑性性能逐步提高, 试件破坏性质逐渐由脆性破坏到塑性软化, 最终达到塑性硬化。

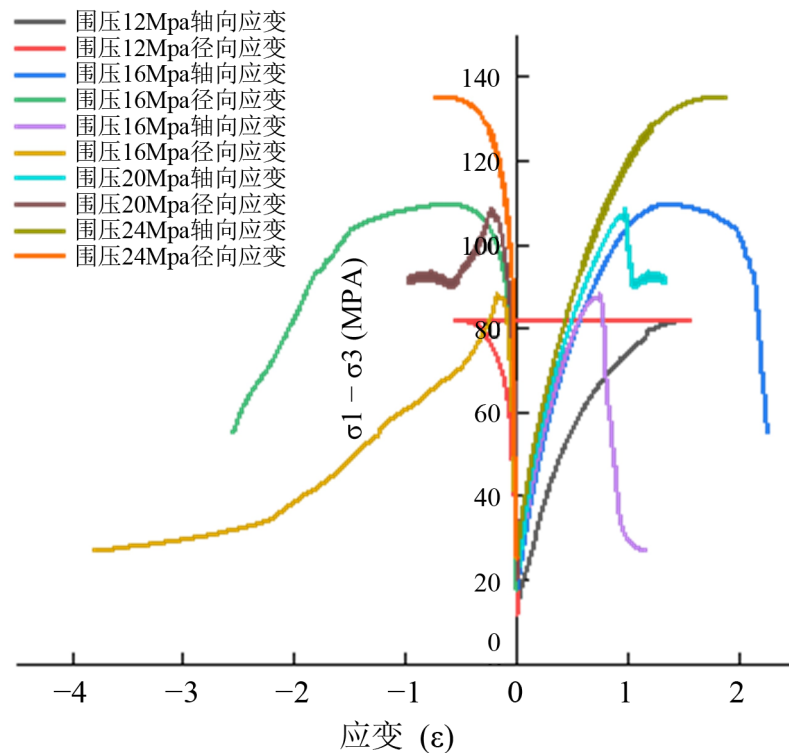


Figure 4. Triaxial stress - strain diagram of concrete

图 4. 混凝土三轴应力应变图

3.5. 抗冻性能试验

试验采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 大小的标准混凝土立方体试块, 试验使用的设备为多功能冻融试验箱和混凝土超声波检测仪。根据试验绘制出的冻融次数 - 动弹模量曲线及冻融次数 - 质量损失曲线如图 5、图 6 所示。

相对动弹性模量公式:

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\% \quad (4)$$

f_0 ——初始频率, Hz; f_n ——冻融 n 次后的频率, Hz。

质量损失率公式:

$$W_n = \frac{G_0 - G_n}{G_0} \times 100\% \quad (5)$$

G_0 ——初始质量, Kg; G_n ——冻融 n 次后的质量, Kg。

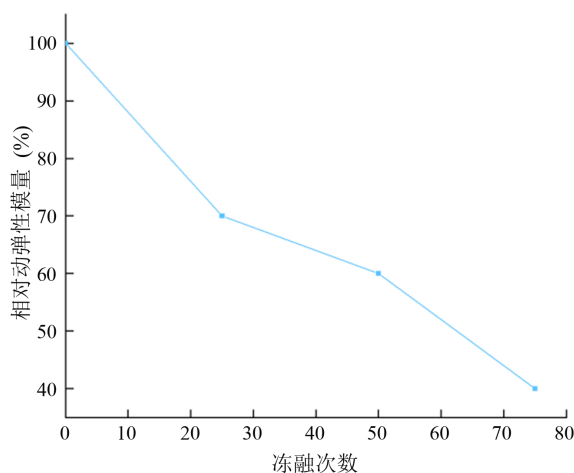


Figure 5. Freeze-thaw times - dynamic modulus curve

图 5. 冻融次数 - 动弹模量曲线

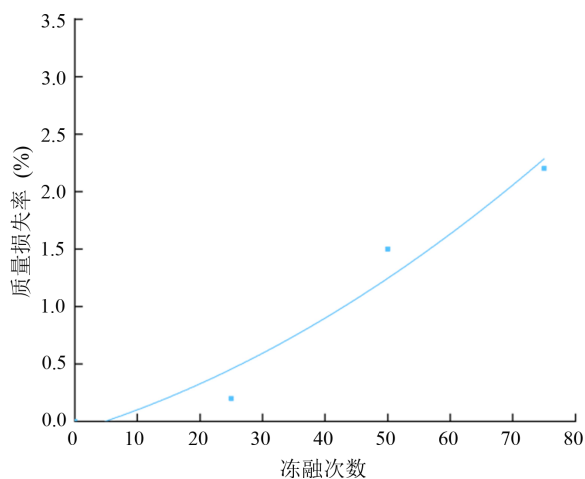


Figure 6. Freeze-thaw times - mass loss curve

图 6. 冻融次数 - 质量损失曲线

3.6. 碳化试验

所谓混凝土的碳化,是指大气中的 CO_2 通过混凝土的孔隙进入混凝土内部,与其中水泥水化生成的碱性物质发生反应的现象。水泥水化过程中产生的可碳化物质有氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$, 简称为 CH)、水化硅酸钙($3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, 简称为 CSH)以及部分未水化的硅酸三钙($3\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$, 简称为 C_3S)和硅酸二钙($2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$, 简称为 C_2S)。水化反应过程中会发生化学收缩、自由水的蒸发与游离水残留,因此形成的混凝土是含有固相、液相和孔隙的非均质体,空气中 CO_2 的通过孔隙扩散进入混凝土,溶于混凝土中的液相中后反应进行碳化。将制作好的混凝土放在微机控制电液伺服万能试验机上进行劈裂。将劈裂完成的混凝土试块取出,在混凝土表面上喷酚酞溶液,将混凝土收集起来观察不同时间下混凝土的碳化深度。试验结果如图 7 所示。



Figure 7. Carbonation test results
图 7. 碳化试验结果

3.7. 混凝土 CT 扫描

混凝土是一种复杂的人工合成材料,组成结构复杂且非均质,其损伤破坏过程也比较复杂。具有不规则几何形状的各层次缺陷其形态和分布杂乱无章,在载荷等外部因素作用下,裂纹必然率先在微裂隙、颗粒边界及孔洞周围萌生、扩展、贯通,最终导致混凝土的宏观破裂。面对这些具有不规则几何形状的缺陷,可以用微观的方法例如 CT 扫描去检测混凝土。混凝土试件损伤的演化过程具有分形特征。可以对混凝土材料内部结构的复杂程度进行精细描述。实验结果如图 8 所示。

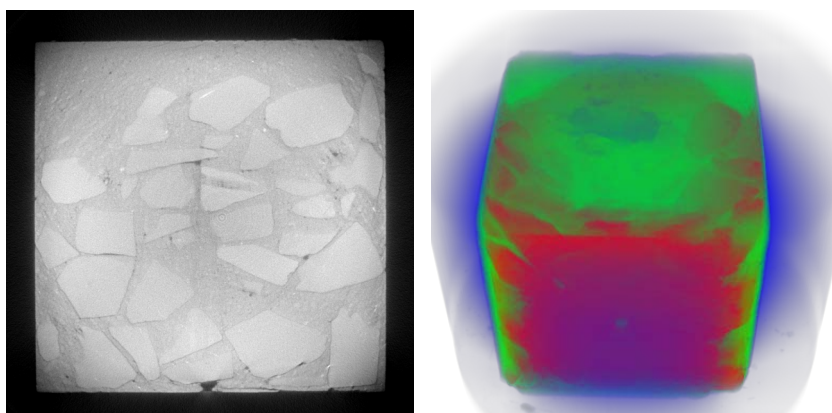


Figure 8. CT scan results
图 8. CT 扫描结果

4. 总结

粉煤灰的添加可以降低混凝土的用水量,改善混凝土的泌水性,减弱了混凝土的离析作用,从而改善混凝土的工作性能。粉煤灰随着围压的增加,抗压强度也随之提高并且塑性也逐渐增强。掺加粉煤灰的混凝土抗碳化能力和抗氯离子渗透能力减弱,应设计合理的混凝土配合比,控制粉煤灰的掺量,从而提高掺粉煤灰混凝土的耐久性能。

参考文献

- [1] 张梦培. 再生混凝土高浓度复合盐冻后抗冻性及轴心受压试验研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
- [2] 刘路. 盐冻循环作用下再生混凝土力学性能与微观结构研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- [3] 王建刚, 张金喜, 党海笑, 丁博. 碳化、干湿与冻融耦合作用下再生混凝土耐久性能[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(6): 616-624.
- [4] 田威, 谢永利, 党发宁. 冻融环境下混凝土力学性能试验及损伤演化[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 38-44.
- [5] 曹志远. 冻融与硫酸盐作用下再生混凝土损伤研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [6] 王晨霞, 刘路, 曹芙波, 路兰. 冻融循环后再生混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 193-202.
- [7] 曹芙波. 冻融循环后再生混凝土力学性能及与钢筋黏结试验研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [8] 王晨霞, 张铎, 曹芙波, 吴亚轩, 叶昌, 李兰. 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.
- [9] 罗菲. 盐冻作用下再生混凝土力学性能及与钢筋黏结-滑移性能研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- [10] Shafiqh, P., Nomeli, M.A., Alengaram, U.J., Mahmud, H.B. and Jumaat, M.Z. (2016) Engineering Properties of Lightweight Aggregate Concrete Containing Limestone Powder and High Volume Fly Ash. *Journal of Cleaner Production*, **135**, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.082>
- [11] 刘娟红, 宋少民. 粉煤灰和磨细矿渣对高强轻骨料混凝土抗渗及抗冻性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(4): 528-532.
- [12] 李小山. 冻融循环与硫酸盐溶液耦合作用下混凝土力学性能宏-微观试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [13] Xu, G.D., Tian, Q., Miao, J.X. and Liu, J.P. (2017) Early-Age Hydration and Mechanical Properties of High Volume Slag and Fly Ash Concrete at Different Curing Temperatures. *Construction and Building Materials*, **149**, 367-377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.080>
- [14] Zhu, Y., Zhang, Z.C., Yang, Y.Z. and Yao, Y. (2014) Measurement and Correlation of Ductility and Compressive Strength for Engineered Cementitious Composites (ECC) Produced by Binary and Ternary Systems of Binder Materials: Fly Ash, Slag, Silica Fume and Cement. *Construction and Building Materials*, **68**, 192-198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.080>
- [15] Yu, J., Lu, C., Leung, C.K.Y. and Li, G.Y. (2017) Mechanical Properties of Green Structural Concrete with Ultrahigh-Volume Fly Ash. *Construction and Building Materials*, **147**, 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>
- [16] Lam, M.N.T., Jaritngam, S. and Le, D.H. (2017) Roller-Compacted Concrete Pavement Made of Electric Arc Furnace Slag Aggregate: Mix Design and Mechanical Properties. *Construction and Building Materials*, **154**, 482-495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.240>
- [17] Gholampour, A. and Ozbakkaloglu, T. (2017) Performance of Sustainable Concretes Containing very High Volume Class-F Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Journal of Cleaner Production*, **162**, 349-362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.087>