

Grey Correlation Analysis of SCC Energy Characteristics under Different Dry-wet Cycle Conditions

Yongjun Jiang¹ Renhong Ding^{2*} Sihong Wang¹ Haiwen Yang¹

1. Nanchang Railway Engineering Co., Ltd. China Railway 24th Bureau Group, Nanchang, Jiangxi, 330000, China

2. School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou, 550025, China

Abstract

Variations in the mechanical properties and energy characteristics of self-consolidating concrete (SCC) under different wet-dry cycles are of significant research interest. This study employs Grey Relational Analysis (GRA) to systematically examine changes in the static elastic modulus and energy parameters of SCC across multiple wet-dry cycles (0, 20, 40, and 60 cycles). The results indicate that with an increasing number of cycles, both the elastic modulus and failure energy density of SCC rise. Additionally, as cycles progress, the energy storage coefficient increases, the loss factor decreases, and the dissipation factor grows. Among all factors, failure energy density under different wet-dry cycles exhibits the strongest correlation with peak stress, whereas its correlation with peak displacement is relatively weak.

Keywords

self-consolidating concrete; elastic modulus; energy; grey relational analysis

不同干湿循环条件下 SCC 能量特征的灰色关联分析

姜勇军¹ 丁仁洪^{2*} 汪思弘¹ 杨海文¹

1. 中铁二十四局集团南昌铁路工程有限公司, 中国·江西 南昌 330000

2. 贵州大学土木工程学院, 中国·贵州 贵阳 550025

摘要

自密实混凝土 (SCC) 的力学性能和能量特征在不同干湿循环次数下的变化规律具有重要的研究价值。为探究这一变化, 本研究基于灰色关联分析 (GRA) 方法, 系统分析了 SCC 在不同干湿循环次数 (0、20、40、60) 下的静弹性模量和能量变化特征。研究结果显示, 随着干湿循环次数的增加, SCC 的弹性模量逐渐增大, 达到破坏时总能量密度也逐渐增加。同时, 随着干湿循环次数的增加, SCC 的储能率逐渐上升, 损耗因子逐渐减小, 耗散因子逐渐增大。在众多因素中, 干湿循环次数下 SCC 的总能量与峰值应力的相关性最强, 而与峰值位移的相关性则相对较弱。

关键词

自密实混凝土; 弹性模量; 能量; 灰色关联

1 引言

自密实混凝土 (SCC) 具有高流动性、均匀性和稳定性, 浇筑时无需外力振捣, 因而广泛应用于形状复杂、配筋密集、薄壁以及清水混凝土结构中^[1]。对于在水环境中服役的混凝土而言, 干湿循环作用对其性能的影响尤为显著^[2]。混凝土在干湿循环作用下会逐渐产生劣化、衰变, 严重影响其服役状态及使用寿命^[3]。Chen 等^[4]的研究结果表明, 经干湿循环作用后, 混凝土动态弹性模量不断减小并趋于稳定, 混

土失重率不断增加并逐渐变缓。由此可见, 准确描述自密实混凝土的强度与干湿循环作用机理是进行工程安全性和稳定性评价的理论基础^[5,6]。

热力学定律表明, 能量转化是物质发生物理变化的核心特征, 而物质破坏则是能量引起的状态不稳定的表现^[7]。因此, 研究 SCC 破坏过程中的能量变化规律, 有助于揭示其在外部载荷下的强度变化和破坏特征。近年来, 国内外学者已在这方面进行了广泛研究, 试图通过能量分析方法来解释混凝土材料的变形和破坏行为^[8,9]。

灰色关联理论^[10,11]被用于研究不确定系统, 通过计算数据序列的灰色关联系数来反映各因素之间的关联程度。在对 SCC 材料的分析中, 灰色关联有助于分析解释总能量密度与各因素之间的关系, 从而为进一步优化 SCC 材料在不同环境条件下的力学性能提供重要参考。

【作者简介】姜勇军 (1989-), 男, 中国湖南邵阳人, 本科, 高级工程师, 从事桥梁工程、混凝土研究。

【通讯作者】丁仁洪 (1999-), 男, 中国贵州安顺人, 硕士, 助理工程师, 从事桥岩土工程研究。

论文研究不同干湿循环次数下 SCC 的力学性能和能量特征,通过灰色关联分析,探讨在压缩破坏过程中总能量密度与弹性模量、干湿循环次数、峰值位移、弹性应变能等因素之间的关系,为优化 SCC 材料在不同环境下的性能提供理论依据。

2 试验方法及步骤

试验所需的 SCC 个数为 12 个,尺寸大小为 100×100mm。SCC 中水泥、粉煤灰、砂子、粗骨料、水、外加剂的质量比为 150 : 300 : 1071 : 469 : 212 : 5.9,养护时间为 28d,待养护完成后,将 SCC 试件放入硫酸盐干湿循环箱中。论文使用应力-应变三轴仪进行单轴压缩试验,通过收集和整理试验数据,进一步分析了 SCC 的能量特征变化及其相关机理。

3 试验结果分析

3.1 能量计算方法

假定 SCC 处于封闭系统中,与外界环境无热量交换。当试验机加载引起试件变形破坏时,根据热力学第一定律,输入的总能量等于外力对 SCC 所做的总功,即为释放的弹性能与 SCC 耗散能之和。由此,总输入能量 U 的计算公式如式(1)所示^[7,12,13]:

$$U = U_e + U_d \quad (1)$$

其中, U_e 为弹性应变能; U_d 为耗散应变能; σ_1 为轴向应力; ε_1 为轴向应变。根据广义胡克定律得到:

$$U_e = \frac{1}{2E_i} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu_1(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (2)$$

其中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为最大、中间和最小主应力; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别为最大、中间和最小主应力下的应变; E_i 为岩石的弹性模量,可在应力峰值的 40%~50% 范围内选择计算弹性模量; ν 为泊松比。单轴压缩加载时,即 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$,式(2)可简化为:

$$U_e = \frac{\sigma_1^2}{2E_i} \quad (3)$$

在 SCC 单轴压缩过程中,由轴向应力 σ_1 所产生的应变能 U ,可以通过对应力-应变曲线进行积分来计算:

$$U = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma_1 d\varepsilon \quad (4)$$

根据式(1)与式(4)得到耗散应变能 U_d 的计算公式为:

$$U_d = U - U_e \quad (5)$$

3.2 弹性模量分析

由图 1 得,随着干湿循环次数的增加,SCC 的峰值应力逐渐增大。经计算,在初始状态下(干湿循环 0 次),试件的弹性模量为 22.28GPa,表明其刚度相对较低。然而,随着干湿循环次数增加至 20 次,弹性模量显著提升至 33.56GPa,增加幅度为 50.7%,这表明在初期阶段,材料可能由于微裂纹的愈合、后续水化反应的继续进行,或内部孔隙结构的调整而增强了刚度。干湿循环至 40 次时,弹性模量进一步增至 36.063GPa,虽然增幅减少至 7.4%,但材料刚度仍在增加。至 60 次干湿循环时,弹性模量达到 41.03GPa,较前一阶段增加了 13.8%,表明材料的刚度在此阶段继续增加,但增速已放缓。

尽管弹性模量整体上随着循环次数的增加而增大,但在 40 次和 60 次干湿循环之后,增长速度有所下降,这可能是因为多次循环后 SCC 开始产生微观结构损伤或局部疲劳现象,导致试样刚度的增长趋势减缓。

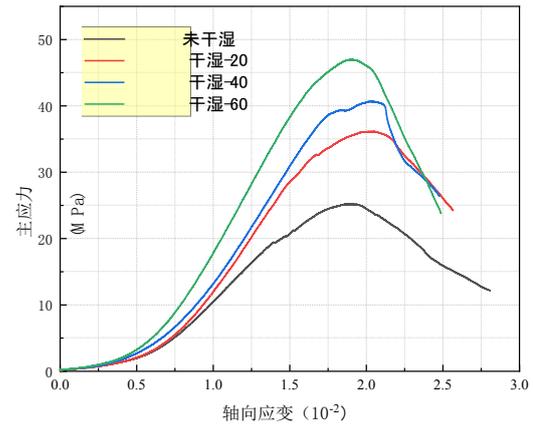


图 1 不同干湿循环次数下 SCC 的应力-应变曲线

3.3 能量特征分析

根据式(1)~(4)对试验数据进行处理,得到 SCC 单轴压缩过程中,能量密度变化如表 1 所示。

表 1 不同干湿循环次数下 SCC 的能量密度变化

干湿循环次数	峰值能量密度 (kJ/m ³)	U (kJ/m ³)	U _e (kJ/m ³)	U _d (kJ/m ³)	U _d /U _e	U _e /U	U _d /U
0	20.558	37.742	14.237	23.505	1.651	0.377	0.623
20	31.827	48.004	19.457	28.547	1.467	0.405	0.595
40	34.971	49.722	21.985	27.737	1.262	0.442	0.558
60	36.776	58.939	26.91	32.029	1.190	0.457	0.543

随着干湿循环次数的增加,SCC 的总能量密度从 37.742kJ/m³ 增加到 58.939kJ/m³,峰值能量密度从初始的 20.558kJ/m³ 增加到 36.776kJ/m³,增幅分别为 56.2% 和 78.9%。弹性应变能密度 U_e 和耗散应变能密度 U_d 也显著增

加,达到 88.9% 和 36.3%,这表明 SCC 承载能力和弹性恢复能力的增强。在 0~20 次干湿循环之间,SCC 的各项性能指标都表现出了最大的增幅,总能量密度、弹性模量、峰值能量密度、弹性能量密度、耗散能密度增幅分别为 27.2%、

50.7%、54.8%、36.7%、21.5%，进一步说明在这一阶段材料的性能得到了显著的提升。

随着干湿循环次数的增加，SCC 的能量特征发生了明显变化。在干湿循环初期，SCC 吸收的能量主要以弹性能量的形式储存，储能率逐渐增大，而损耗因子和耗散因子则逐步减小，说明材料在较少循环次数下具有更高的弹性恢复能力，能量利用效率较高。随着干湿循环次数进一步增加，损耗因子和耗散因子的下降幅度趋于平缓，表明材料的能量损失比例逐渐减少，同时储能率的增幅也逐渐减小。这一变化趋势显示，虽然材料在高循环次数下仍能保持较好的弹性性能，但能量储存和损耗之间的平衡逐渐稳定，表明材料的耐久性和能量利用效率随着干湿循环次数的增加而得到改善，但改善幅度逐渐减弱。下面从 SCC 试样受压破坏的四个阶段来具体描述其受压破坏时的能量变化规律：

①初始线性弹性阶段：轴向应力约占抗压峰值强度的 30% 以内，该阶段 SCC 处于弹性工作阶段，此时，能量主要以弹性应变能 (U_e) 的形式存在。②非线性弹性—塑性转变阶段：轴向应力约占抗压峰值强度的 30%~80%；此阶段反映了 SCC 的非线性弹性行为和塑性变形的开始。SCC 内部微裂纹开始逐渐扩展和发展，裂纹之间可能发生摩擦滑动和局部闭合。部分能量继续以弹性应变能的形式储存，但更多的能量开始转化为耗散应变能 (U_d)，如裂纹扩展、摩擦等。③塑性变形和裂纹扩展阶段：轴向应力约占抗压峰值强度的 80%~100%；此阶段为塑性变形的主要阶段，同时也是微裂纹迅速扩展并且相互贯通的过程。SCC 的刚度逐渐降低，内部产生了大量的耗散应变能 (U_d)。由于裂纹的相互连接和贯通，能量在 SCC 破裂过程中被耗散掉，此时耗散因子接近最大。④失稳破坏阶段：此时轴向应力达到抗压峰值强度的百分百后骤降；此阶段表明 SCC 已经达到并超过了其承载极限，发生了失稳和破坏。微裂纹相互贯通，形成了贯穿试件的破坏面。总能量 U 主要被耗散于裂纹扩展、摩擦滑动等不可逆过程，SCC 的承载能力显著下降。

4 总能量与各因素之间的灰色关联度分析

为进一步研究自密实混凝土试件在干湿循环过程中能量的变化特征，现将采用灰色关联度分析 GRA 法来探讨总能量密度与峰值应力、峰值位移、弹性模量、弹性应变能密度等因素之间的关联性。根据已有的公式^[14-16]，我们计算了各个因素与总能量密度之间的灰色关联系数 (R_i)。峰值应力与总能量密度的关联度最高，达到了 0.934，表明其对总能量大小影响最为显著，其次是弹性应变能 U_e (0.917)、干湿循环次数 (0.898)、弹性模量 (0.887) 和耗散应变能 (0.886)，峰值能量密度 (0.825) 的关联度稍低，而峰值位移 (0.601) 与主能量密度的关联度最低。各因素之间的因子权重分别为：0.101、0.157、0.139、0.154、0.149、0.149、0.151。

5 结语

本研究在不同干湿循环次数条件下对自密实混凝土 (SCC) 进行单轴压缩试验，基于 GRA 法分析了其能量特

征变化和弹性模量变化，得出以下结论：

①自密实混凝土 (SCC) 的弹性模量随着干湿循环次数的增加而逐渐增大。这种增长在前期较为明显，随后逐渐减缓，表明 SCC 的刚度逐渐增强，但在高循环次数下出现了劣化迹象。② SCC 的总能量密度和峰值能量密度均随干湿循环次数的增加而增大，弹性应变能密度和耗散应变能密度也显著增加。这表明 SCC 的承载能力和弹性恢复能力在不同干湿循环次数下得到了增强，但其改善幅度逐渐减弱。③在干湿循环初期，SCC 储能率增加，损耗因子和耗散因子下降，说明试件在较少循环次数下具备较高的弹性恢复能力和能量利用效率。④灰色关联分析显示，峰值应力与 SCC 的总能量密度的关联度最高，表明它对总能量的变化影响最为显著。相比之下，峰值位移对总能量密度的影响最小。各个因素的灰色关联度和权重值为进一步优化 SCC 材料在不同环境条件下的力学性能提供了参考依据。

参考文献

- [1] 刘俊霞.干湿循环-硫酸盐侵蚀对钢纤维SCC弯曲性能的影响研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(12):118-124.
- [2] 邵化建.干湿循环作用下混凝土力学性能及微观结构研究[J].硅酸盐通报,2021,40(9):2948-2955.
- [3] 王成.干湿循环对混凝土性能的影响研究综述[J].材料导报,2023,37(S2):208-217.
- [4] Chen D P, Zou J J, Zhao L, et al. Degradation of Dynamic Elastic Modulus of Concrete under Periodic Temperature-Humidity Action[J]. Materials (Basel),2020,13(3).
- [5] 高嵩普.再生骨料自密实混凝土基本力学性能研究综述及展望[J].混凝土,2022(5):69-73.
- [6] 朱俊儒.自密实混凝土高温冷却后的抗压性能试验研究[J].建筑结构,2024,54(16):93-99.
- [7] 谢和平.基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J].岩石力学与工程学报,2005(17):3003-3010.
- [8] 杨晓.碳纤维及碳纤维布混凝土抗冻性及能量耗散试验研究[J].复合材料科学与工程,2024(7):62-69.
- [9] 王莉.动载下玄武岩纤维混凝土能量耗散特征与破坏损伤规律[J].硅酸盐通报,2024,43(2):456-465.
- [10] 徐存东.基于灰色关联的多因素耦合作用下混凝土材料耐久性评估[J].混凝土,2018(9):64-69.
- [11] 靳江伟.基于灰色关联支持向量机的混凝土抗压强度预测[J].郑州大学学报(理学版),2015,47(3):59-63.
- [12] 袁璞.不同龄期碱矿渣陶粒混凝土抗压强度试验与能量特征分析[J].硅酸盐通报,2022,41(7):2292-2298.
- [13] 谢成龙.不同应力条件下含充填物砂岩的能量演化规律[J].矿业工程研究,2022,37(4):8-15.
- [14] 范凌燕.水泥石无侧限抗压强度影响因素的灰色关联度分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(3):476-479.
- [15] 赵顺波.再生砖细骨料混凝土抗氯离子渗透性能与孔结构的灰色关联分析[J].建筑材料学报,2012(2):1-13.
- [16] 叶永.基于灰色关联改进模型的沥青混凝土本构参数影响评价[J].三峡大学学报(自然科学版),2016,38(5):64-67.