



硫酸盐侵蚀作用下纤维锂渣混凝土裂缝的分形特征

张广泰 陈勇 鲁海波 李雪藩

Fractal characteristics of fiber lithium slag concrete cracks under sulfate attack

ZHANG Guang-tai, CHEN Yong, LU Hai-bo, LI Xue-fan

引用本文:

张广泰, 陈勇, 鲁海波, 李雪藩. 硫酸盐侵蚀作用下纤维锂渣混凝土裂缝的分形特征[J]. 工程科学学报, 2022, 44(2): 208–216. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.09.10.001

ZHANG Guang-tai, CHEN Yong, LU Hai-bo, LI Xue-fan. Fractal characteristics of fiber lithium slag concrete cracks under sulfate attack[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(2): 208–216. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.09.10.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.09.10.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

初始损伤对混凝土硫酸盐腐蚀劣化性能的影响

Influence of initial damage on degradation and deterioration of concrete under sulfate attack
工程科学学报. 2017, 39(8): 1278 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.08.019>

聚丙烯纤维加筋固化尾砂强度及变形特性

Strength and deformation properties of polypropylene fiber-reinforced cemented tailings backfill
工程科学学报. 2019, 41(12): 1618 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.12.14.002>

缝合线分形特征及其对石灰岩强度的影响

Stylolite fractal characteristics and the influence of stylolite on strength of limestone
工程科学学报. 2017, 39(12): 1802 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.12.004>

偏心框架结构采用扭转调谐液柱阻尼器的设计方法

Design method for torsional tuned liquid column damper for eccentric frame structure
工程科学学报. 2017, 39(5): 802 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.05.020>

侧向冲击荷载下钢筋混凝土墩柱的性能

Performance of reinforced concrete pier columns subjected to lateral impact
工程科学学报. 2019, 41(3): 408 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.03.015>

具有微米纤维碳的硅/石墨/碳复合材料的制备及在锂离子电池中的应用

Preparation of silicon/graphite/carbon composites with fiber carbon and their application in lithium-ion batteries
工程科学学报. 2019, 41(10): 1307 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.06.08.001>

硫酸盐侵蚀作用下纤维锂渣混凝土裂缝的分形特征

张广泰^{1,2)}✉, 陈 勇¹⁾, 鲁海波¹⁾, 李雪藩¹⁾

1) 新疆大学建筑工程学院, 乌鲁木齐 830046 2) 新疆维吾尔自治区建筑结构与抗震重点实验室, 乌鲁木齐 830046

✉通信作者, E-mail: zgtlxh@126.com

摘 要 为探究新型混凝土受硫酸盐侵蚀后的力学性能, 采用质量分数为 5% 的硫酸盐溶液全浸泡加速侵蚀法, 对 11 组聚丙烯纤维混凝土(PC)试块、11 组聚丙烯纤维锂渣混凝土(PLiC)试块、8 根 PC 大偏心受压柱和 8 根 PLiC 大偏心受压柱进行侵蚀试验, 得到了不同侵蚀时间下混凝土的力学性能。基于分形理论分析了试块及构件破坏时表面裂缝分布的分形特征, 详细讨论了试块及构件表面裂缝分形维数与其侵蚀时间、抗压强度、极限承载力之间的关系。研究表明, PC 和 PLiC 立方体抗压强度随侵蚀天数先增加后降低, 在 120 d 达到最大; 试块及构件破坏时表面裂缝分布具有分形特征, 试块表面裂缝分形维数随侵蚀天数的增加呈现先增加后减少再增加的规律, 随试块抗压强度的提高而减少; PC 及 PLiC 混凝土大偏心柱极限承载力随侵蚀天数的增加先增加后减少, 锂渣的掺入可以提高聚丙烯纤维混凝土柱的抗硫酸盐侵蚀能力, 构件破坏时表面裂缝分形维数随硫酸盐侵蚀天数呈现震荡上升的趋势; 因此混凝土表面裂缝的分形特征可作为判定构件损伤程度的指标之一, 可为今后对在役混凝土结构承载力和寿命预测提供参考。

关键词 硫酸盐侵蚀; 分形理论; 混凝土大偏心柱; 聚丙烯纤维; 锂渣

分类号 TU503

Fractal characteristics of fiber lithium slag concrete cracks under sulfate attack

ZHANG Guang-tai^{1,2)}✉, CHEN Yong¹⁾, LU Hai-bo¹⁾, LI Xue-fan¹⁾

1) School of Architecture and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2) Xinjiang Uygur Autonomous Region Key Lab of Building Structure and Earthquake Resistance, Urumqi 830046, China

✉ Corresponding author, E-mail: zgtlxh@126.com

ABSTRACT Natural corrosion of concrete structure due to sulfate poses a serious threat to people's lives and property. Therefore, it is of great practical significance to study the phenomenon of sulfate corrosion on concrete. In order to explore the mechanical properties of a new type of concrete corroded by sulfate, a full immersion accelerated erosion method was used with 5% sulfate solution. Erosion tests were performed on 11 groups of polypropylene fiber reinforced concrete (PC) specimens, 11 groups of polypropylene fiber lithium slag concrete (PLiC) specimens, 8 PC columns with large eccentricity, and 8 PLiC large eccentric columns. The mechanical properties of concrete under different erosion times are obtained. Based on the fractal theory, the fractal characteristics of surface crack distribution of specimens and columns are analyzed. In addition, the relationship between the fractal dimension of surface crack and erosion time, compressive strength, and ultimate bearing capacity is discussed. Results show that the compressive strength of PC and PLiC initially increases and then decreases with increased erosion days, reaching a maximum of 120 days. The distribution of surface cracks is observed to be fractal when they are broken. With increased erosion days, fractal dimension of surface cracks initially increases, then decreases, and finally increases again. On the other hand, a decreasing trend of fractal dimension of surface cracks is observed with increased compressive strength. The ultimate bearing capacity of PC and PLiC columns with large eccentricity increases first and then decreases with erosion days. Addition of lithium slag is observed to improve the sulfate resistance of polypropylene fiber reinforced

收稿日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51968070)

concrete columns. With broken members, fractal dimension of surface cracks presents a rising trend of shock with sulfate erosion days. Results signify that fractal characteristics of concrete surface cracks can be used as one of the indexes to determine the damage degree of members, which can provide reference for the prediction of bearing capacity and service life of concrete structures in the future.

KEY WORDS sulfate attack; fractal theory; large eccentric column; polypropylene fiber; lithium slag

混凝土结构在盐渍土地区长期服役受硫酸盐侵蚀影响,混凝土发生膨胀、开裂、剥落,对结构造成不可逆的损伤,进而使混凝土结构失去完整性和稳定性^[1-5]。为减缓混凝土受硫酸盐侵蚀的影响,部分学者在混凝土中掺入纤维及矿物掺合料^[6],并通过实验室浸泡法来模拟硫酸盐的侵蚀情况,纤维的掺入可以增强混凝土的抗拉强度,矿物掺合料的掺入可以较好地发挥二次水化反应,提高试件密实度,从而增强试件抗侵蚀性能^[7-12],但很少有学者将荷载因素考虑其中,即未考虑混凝土试件受硫酸盐侵蚀和荷载共同影响的实际情况,且侵蚀后混凝土破坏形态分析方法较为单一。

Mandelbrot^[13]在20世纪70年代提出了分形几何学,并利用分形理论证明了钢的断裂面具有分形特征,随后分形理论作为一种数学工具用于分析复杂的空间几何、裂缝、轮廓等,可通过计算研究对象的分形维数,得出分形维数与研究对象之间的定量关系。国内外学者将分形理论用于混凝土领域,并取得丰硕的成果。在混凝土材料方面,Armandei与de Souza^[14]对钢纤维混凝土的断裂面进行研究,将断裂轨迹的分形维数用于表征钢纤维混凝土材料的不完整性与非均匀性,发现断裂轨迹的粗糙度越高,钢纤维混凝土破坏强度与设计强度的差值就越大。Yan等^[15]对混凝土断口三维形貌进行了测量,研究发现分形维数随着水胶比的增加而增大。在水胶比相同的情况下,分形维数随着骨料粒径的增大而增大,碎石(CG)混凝土分形维数最高,轻质碎石(LG)混凝土分形维数最低。Ince等^[16]研究了不同尺寸的混凝土力学性能,利用多重分形标度法分析了试验结果中的峰值荷载,此方法可用于确定素混凝土/钢筋混凝土构件的抗拉强度。Konkol与Prokopski^[17]测量了偏高岭石改性混凝土断裂面的分形维数,得出了临界应力强度因子与分形维数之间的函数关系。在混凝土构件方面,成盛等^[18]基于数字图像技术,提出了一种混凝土裂缝图形化提取方法,为混凝土裂缝定量研究提供了有力工具。曹茂森与任青文^[19]证明已损伤的钢筋混凝土构件的表面裂缝具有分形特征,揭示了表面裂缝分形维数特征量与结构物性参数的关系。焦楚杰等^[20]基于分形理论研究了高强混凝土

的分形损伤演化规律,推导了高强混凝土损伤演化的动态损伤本构方程。陈万春等^[21]基于分形理论分析了钢筋混凝土梁式桥裂缝的分布特征,桥梁主梁裂缝的分形维数可以作为衡量结构老化程度的重要指标。李艳艳等^[22]采用分形理论对8根集中荷载作用下钢筋混凝土梁开裂和破坏过程进行了定量化分析,认为分形维数可以反映裂缝发展的密集与复杂程度,并建立了混凝土梁表面分形维数与损伤变量的关系。范颖芳等^[23]证明了受腐蚀钢筋混凝土构件在荷载作用下裂纹的演化具有分形特征。栾海洋等^[24]研究了酸雨环境下CFRP布增强混凝土梁表面裂缝的分形特征,探讨了分形维数与构件各个力学性能的关系。上述研究中钢筋混凝土构件较为单一,多集中于梁构件的研究,且对于混凝土柱在硫酸盐侵蚀条件下的研究较少。

本文研究新型混凝土材料,在混凝土中加入聚丙烯纤维和锂渣取代部分水泥,通过实验室全浸泡法模拟硫酸盐侵蚀环境,得到了不同侵蚀龄期下的纤维锂渣混凝土试块及纤维锂渣混凝土大偏心柱试验结果,采用分形理论探讨了裂缝分形维数与混凝土强度及构件力学性能参数之间的关系,为判定材料的侵蚀程度提供一个新角度。

1 试验方案

1.1 试验原材料

试验材料包括普通硅酸盐水泥、中砂、粒径为6~25 mm连续级配的卵石、自来水以及聚羧酸高效减水剂(减水率为20%)。锂渣由乌鲁木齐锂业厂工业废料提供,化学组成见表1;聚丙烯纤维采用江苏博特有限公司生产的抗裂防渗I型,物理指标见表2;侵蚀溶液选用质量分数为5%的硫酸钠溶液。

表1 锂渣粉末主要成分

Table 1 Main components of lithium slag powder							%
Chemical composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	Li ₂ O	
Mass fraction	54.30	1.80	1.40	8.30	7.90	0.70	

1.2 试验配合比

试验混凝土设计强度等级为C30,在该基准配合比的基础上选取锂渣取代水泥质量,取代率为20%,详细混凝土配比见表3。

表 2 聚丙烯纤维参数

Table 2 Parameters of polypropylene fibers

Fiber type	Length/mm	Density/(g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa	Diameter/μm	Elasticity modulus/GPa
Polypropylene fiber	19	0.91	530	33	>3.5

表 3 混凝土配合比

Table 3 Mix proportions of concrete

Type of test block	Polypropylene fiber/(kg·m ⁻³)	Lithium slag/%	Cement/(kg·m ⁻³)	Cobblestone/(kg·m ⁻³)	Sand/(kg·m ⁻³)	Water/(kg·m ⁻³)	Water reducer/(kg·m ⁻³)
PC	1.2	0	382	1161	682	172.8	1.92
PLiC	1.2	20	308	1161	682	172.8	1.92

1.3 试块设计

试验共制作 22 组 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试块, 每组 3 块, 其中 11 组聚丙烯纤维混凝土试块 (PC), 11 组聚丙烯纤维锂渣混凝土试块 (PLiC), 标准养护 28 d 后分别浸泡在清水和溶液浓度为 5% 的硫酸钠溶液中。

1.4 试件设计

试验共制作 16 根混凝土大偏心受压柱, 其中 8 根聚丙烯纤维混凝土大偏心受压柱, 8 根聚丙烯纤维锂渣混凝土大偏心受压柱。试件主要变量为硫酸盐溶液侵蚀天数、应力比和锂渣取代率。试件几何尺寸及配筋图如图 1 所示。混凝土柱截面尺寸为 1200 mm×350 mm×150 mm, 混凝土保护层厚度为 20 mm。

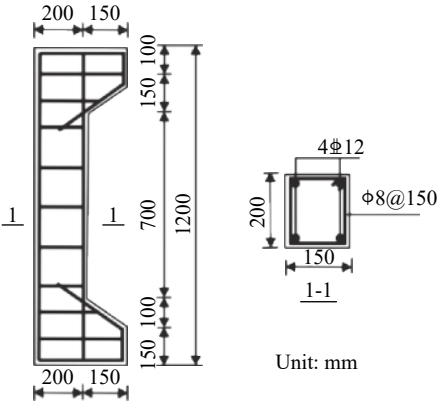


图 1 试件尺寸及配筋

Fig.1 Specimen size and reinforcement

1.5 试验内容及方法

本次试验采用实验室加速全浸泡法, 配置质量分数为 5% 的硫酸钠溶液, 将试块及试件经标准养护 28 d 后浸泡在溶液中, 侵蚀龄期为 0、30、60、90、120 和 150 d。为保证硫酸钠溶液的浓度, 每月更换一次溶液。同时考虑混凝土柱在服役期间长期受荷载的影响, 本次试验选取 0.1、0.2 和 0.35 的应力比对混凝土柱施加荷载。加载装置采用团队

实用新型发明专利——加载装置及混凝土梁荷载与环境耦合试验装置, 首先对加载装置进行标定, 通过试验确定弹簧压缩量与荷载的关系, 通过压缩柱两端的蝶形弹簧片施加荷载, 在施加荷载时, 采用对称施加, 均匀受力, 并避免螺栓产生松弛现象。图 2(a) 为已施加荷载的钢筋混凝土柱。

1.6 加载方案

立方体抗压强度试验按照 GB/T50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[25] 进行。混凝土柱加载方案按照 GB/T50152—2012《混凝土结构试验方法标准》^[26] 进行, 加载分两阶段, 第一阶段为力控制加载, 加载速率为 0.2 kN·s⁻¹, 每增加 5 kN 为一级荷载, 每级荷载持荷 2 min, 加载至 160 kN 时进入第二阶段, 第二阶段为位移控制加载, 加载速率为 0.02 mm·s⁻¹, 直至荷载下降到破坏荷载的 80% 时停止试验。钢筋混凝土柱大偏心受压试验如图 2(b) 所示。

2 试验结果分析

2.1 试块分析

图 3 为不同侵蚀天数下纤维锂渣混凝土试块受硫酸盐溶液侵蚀的情况, 将试块从侵蚀溶液取出晾干后, 由于试块表面水分蒸发, 导致在试块表面析出白色硫酸钠晶体, 侵蚀天数为 30 d 和 60 d 的试块表面未有明显坑蚀, 侵蚀痕迹不明显, 侵蚀时间大于 90 d 的试块表面出现坑蚀现象, 且随着侵蚀时间的增加, 侵蚀现象逐渐加重, 试块表面坑蚀现象明显。

2.2 试块破坏过程

不同侵蚀时间下混凝土试块的破坏特征大致相同, 但随侵蚀天数的增加, 试块破坏时表面裂缝条数逐渐增多, 裂缝宽度逐渐增加。由于混凝土内部的聚丙烯纤维的“侨联作用”, 试块破坏时只有少量混凝土碎屑掉落, 试块整体较为完整, 在达到



图2 混凝土柱侵蚀及试验图. (a)已施加荷载的钢筋混凝土柱; (b)混凝土柱大偏心受压试验

Fig.2 Corrosion and test of reinforced concrete column: (a) loaded reinforced concrete column; (b) large eccentric compression test of reinforced concrete column

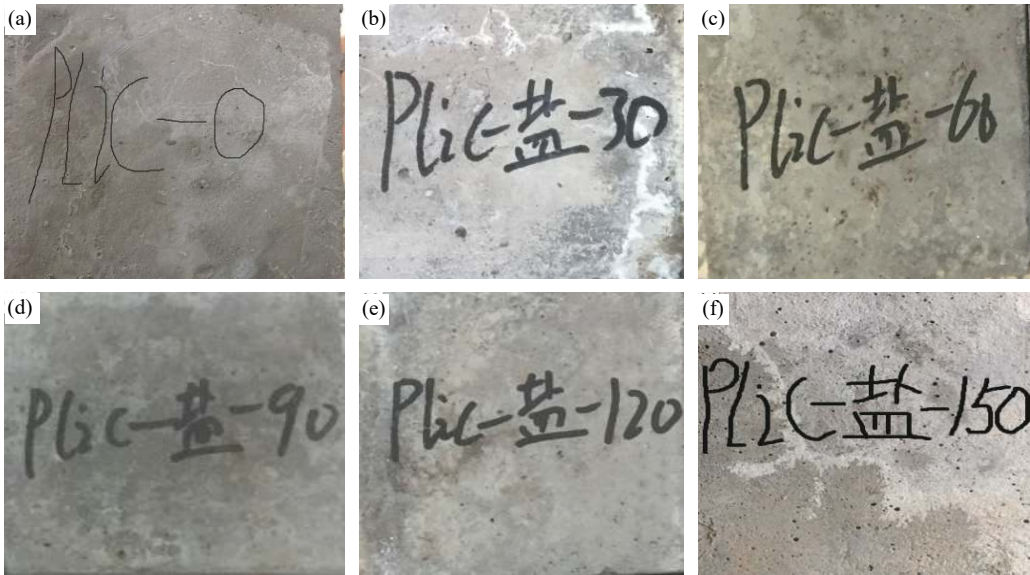


图3 不同侵蚀时间下的聚丙烯纤维锂渣混凝土外观形貌. (a)0 d; (b)30 d; (c)60 d; (d)90 d; (e)120 d; (f)150 d

Fig.3 Appearance morphology of polypropylene fiber lithium slag concrete under different erosion times: (a) 0 d; (b) 30 d; (c) 60 d; (d) 90 d; (e) 120 d; (f) 150 d

破坏荷载时,发出密集的撕裂破碎响声,随之试块被压缩破坏.

2.3 试件分析

PC试件与PLiC试件破坏过程大致相同,在第一阶段加载过程中,加载至极限荷载的13%~15%时,通过全自动裂缝测宽仪进行观测,此时混凝土柱受拉区出现微小裂纹,裂缝分布较为均匀,呈水平方向发展,并向受压区延伸贯通;当荷载逐渐增大时,裂缝宽度逐渐增加,裂缝数目也逐渐增多,并从较宽的裂缝周围处发展许多细小的微裂缝并继续延伸;当荷载加载至160 kN时,混凝土受拉受压区裂缝已经贯通,裂缝裂缝最大宽度为0.45 mm;在第二阶段的加载过程中采用位移控制加载,加载速率为 $0.2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,此时裂缝宽度逐步增大,上下牛腿附近出现细微裂纹,继续加压,混

凝土柱伴随受压响声随之破坏. 图4为PC和PLiC混凝土大偏心受压柱破坏图,图中PC-90-0.35代表聚丙烯纤维混凝土柱在硫酸盐溶液中浸泡90 d,浸泡期间所施加的应力比为0.35.

3 试块裂缝分形特征及抗压强度

3.1 试块裂缝分形维数计算

分形维数的计算方法有盒计数法、随机游走法和频域法等,其中盒计数法是一种常用的分形维数计算方法. 其计算过程为,取边长为 r 的方盒,用方盒覆盖图形区域,计数多少方盒内部含有图形,将所得非空盒子数记为 $N(r)$,然后缩小盒子尺寸,继续上述操作,最终得到一系列的 $(r, N(r))$ 数据,通过回归分析得到 $\ln N(r) - \ln(1/r)$ 曲线,若所得曲线为线性相关的直线,则证明图形具有分形

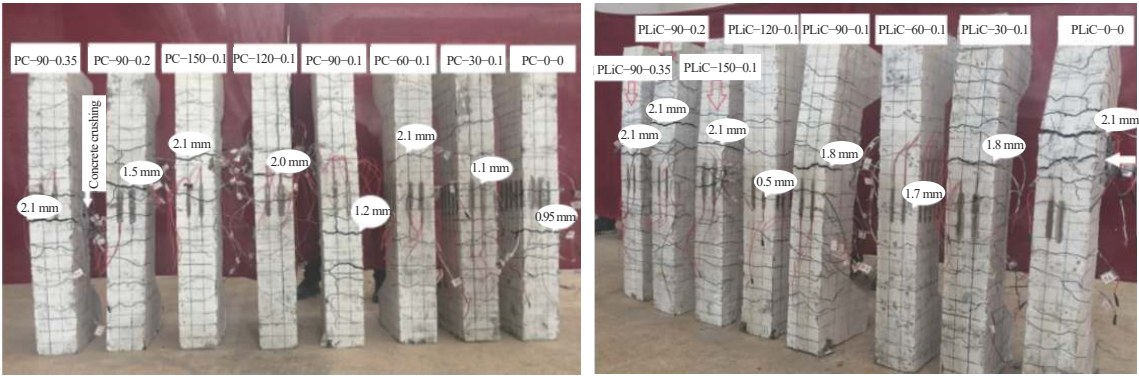


图 4 PC 混凝土柱和 PLiC 混凝土柱破坏形态

Fig.4 Failure modes of PC concrete column and PLiC concrete column

特征, 由 Mandelbrot^[27] 给出的盒维数定义分形维数 D_f 如式(1)所示.

$$D_f = \ln N(r) / \ln(1/r) \quad (1)$$

图 5 为 PLiC 立方体受压试块破坏时的裂缝图, 通过盒计数法得到 $(N(r), r)$ 数据, 经分析计算得 $\ln N(r) - \ln(1/r)$ 曲线符合线性相关的特性, 表明立方体试块破坏时的裂缝有自相似性, 其裂缝特征具有良好的分形特征, 通过计算 $\ln N(r) - \ln(1/r)$ 曲线的斜率即为裂缝分形维数 D_f .

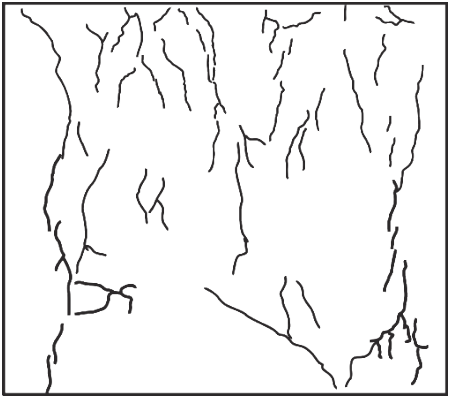


图 5 PLiC 试块破坏裂缝图

Fig.5 Failure fracture diagram of PLiC test block

PLiC 立方体试块破坏时的分形维数计算结果如图 6 所示, 由图可知 $\ln N(r) - \ln(1/r)$ 有明显的线性关系, 线性回归相关系数为 0.991, 说明试块表面的裂缝具有分形特征, 不同侵蚀龄期下 PC 和 PLiC 立方体抗压强度及试块破坏时的分形维数和拟合优度见表 4.

3.2 不同侵蚀时间下的立方体抗压强度

侵蚀天数与立方抗压强度的关系如图 7 所示, 随着侵蚀天数的增加, PC 和 PLiC 立方体试块的抗压强度先增加后降低, 前 120 d 混凝土试块的抗压强度逐渐增加, 第 120 天时 PLiC 立方体的抗压

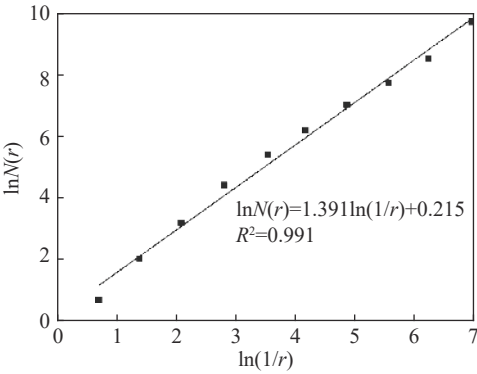


图 6 PLiC 试块裂缝 $\ln N(r) - \ln(1/r)$ 曲线

Fig.6 $\ln N(r) - \ln(1/r)$ curve of PLiC test block crack

强度比 PC 立方体抗压强度高 5.8%. 以上现象可从两个角度解释, 一是硫酸根离子从混凝土表面侵入到混凝土内部, 与水泥的水化产物反应产生膨胀性的侵蚀产物^[28], 将混凝土内部的天然微孔隙填充, 使得混凝土更加密实; 二是锂渣中的二氧化硅和无定型氧化铝与水化产物发生二次水化反应^[29], 生成的水化产物填充了混凝土的内部孔隙, 也增大了混凝土的密实度. 第 150 天时, 混凝土抗压强度降低, 这是由于硫酸根离子与水泥中的氢氧化钙和水化铝酸钙反应生成石膏和钙矾石, 这两种物质都有体积膨胀性, 在混凝土内部形成并造成极大的内部应力, 当膨胀应力大于混凝土的抗拉强度时, 内部裂纹延伸至表面造成细小裂纹的生成, 进而硫酸根离子逐渐侵蚀到混凝土深处, 对混凝土构件造成更严重的侵蚀.

3.3 试块侵蚀天数与分形维数的关系

如图 8 所示, 试块表面裂缝分形维数随侵蚀天数呈现先增加后减少再增加的规律. 30 d 至 120 d 时, PC 试块表面裂缝分形维数逐渐降低, 到第 120 天达到最低点, 这是由于硫酸根离子与混凝土内部材料发生水化反应, 使得混凝土的密实度增加, 试块破坏时裂缝分布较为均匀, 试块较为完

表 4 不同侵蚀时间下试块抗压强度及裂缝分形维数

Table 4 Compressive strength and fracture fractal dimension of test block under different erosion times							
Type of test block	Cube compressive strength /MPa	Fractal dimension	R^2	Type of test block	Cube compressive strength /MPa	Fractal dimension	R^2
PC-0	41.3	1.407	0.982	PC-sulfate-0	41.3	1.407	0.988
PC-30	42.7	1.425	0.991	PC-sulfate-30	42.0	1.415	0.987
PC-60	43.9	1.435	0.994	PC-sulfate-60	43.4	1.402	0.995
PC-90	46.6	1.451	0.991	PC-sulfate-90	45.0	1.396	0.994
PC-120	57.8	1.379	0.982	PC-sulfate-120	54.3	1.364	0.981
PC-150	54.3	1.375	0.993	PC-sulfate-150	51.6	1.438	0.989
PLiC-0	43.9	1.391	0.991	PLiC-sulfate-0	43.9	1.391	0.985
PLiC-30	44.7	1.401	0.989	PLiC-sulfate-30	44.0	1.402	0.993
PLiC-60	49.7	1.474	0.992	PLiC-sulfate-60	45.8	1.356	0.987
PLiC-90	52.3	1.441	0.987	PLiC-sulfate-90	49.5	1.365	0.986
PLiC-120	59.6	1.425	0.994	PLiC-sulfate-120	57.5	1.385	0.993
PLiC-150	55.3	1.483	0.992	PLiC-sulfate-150	55.8	1.435	0.991

Note: PC-sulfate-30 represents that polypropylene fiber concrete corroded in sodium sulfate solution for 30 days.

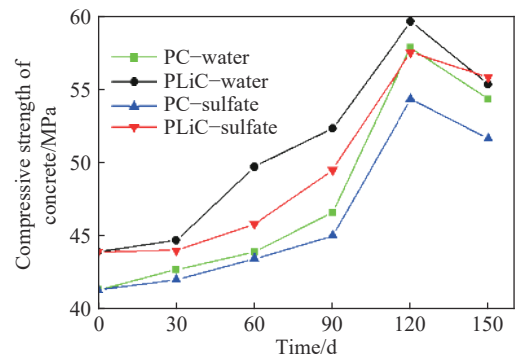


图 7 不同侵蚀时间下立方体抗压强度

Fig.7 Compressive strength of cube at different times of erosion

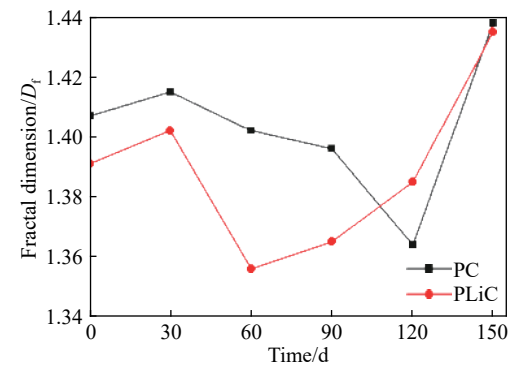


图 8 侵蚀天数与分形维数的关系

Fig.8 Relationship between erosion days and fractal dimension

整, 裂缝分形维数呈现逐渐减少的趋势; PLiC 试块表面裂缝分形维数先减少后增加, 到第 60 天时达到最低点, 这是由于在锂渣和硫酸盐溶液的双重作用下, PLiC 试块内部孔隙填充速率高于 PC 试块, 在 60 d 时 PLiC 试块的密实度已经达到一个较

高的状态, 在 60 d 至 150 d 时, PLiC 试块分形维数不断增加, 这是由于生成的具有膨胀性的水化产物在混凝土内部产生了应力, 但其大小还未达到混凝土的抗拉强度, 在混凝土内部形成一个应力平衡的状态, 在外荷载的作用下, 混凝土内部应力平衡被打破, 裂缝更易随内部孔隙和应力的方向发展, 最终形成试块裂缝分形维数随侵蚀时间增加而增加的规律. 侵蚀 150 d 时, PLiC 试块与 PC 试块裂缝分形维数陡然增加, 此时由于硫酸盐的侵蚀作用, 混凝土内部生成的微膨胀水化产物, 对混凝土造成初始损伤和细小裂纹, 在加载过程中裂缝发展较快, 此时混凝土抗压强度降低. 可以得出, 硫酸盐侵蚀混凝土是一个增维的过程, 裂缝分形维数与硫酸盐侵蚀混凝土时间之间存在明显的定量关系, 通过裂缝分形维数、抗压强度、侵蚀天数等信息对硫酸盐侵蚀混凝土做出定量分析有待进一步研究.

3.4 试块抗压强度与分形维数的关系

混凝土抗压强度与分形维数的关系如图 9 所示, 由图可知, 试块破坏时表面裂缝分形维数随试块抗压强度增加呈下降趋势, 因此表面裂缝特征可用于预测混凝土强度, 相关研究有待进一步展开.

4 构件力学性能及裂缝分形特征

4.1 构件裂缝分形维数计算

利用盒计数法计算混凝土大偏心柱破坏时的

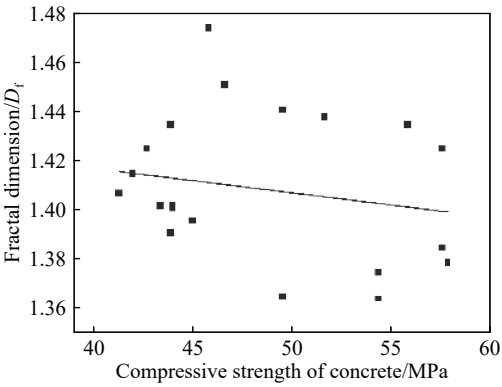


图 9 试块抗压强度与分形维数的关系

Fig.9 Relationship between the compressive strength of test block and fractal dimension

裂缝分形维数, 图 10 为 PLiC-0.1-30 混凝土大偏心柱破坏时的裂缝图, 通过盒计数法得到 $(N(r), r)$ 数据, 经分析计算得 $\ln N(r) - \ln(1/r)$ 曲线符合线性相关的特性 (图 11), 线性回归相关系数为 0.993, 表明混凝土大偏心受压柱破坏时裂缝分布具有自相似性, 符合分形特征. 不同侵蚀时间下 PC 和 PLiC 大偏心受压柱承载力及破坏裂缝分形维数如表 5 所示.

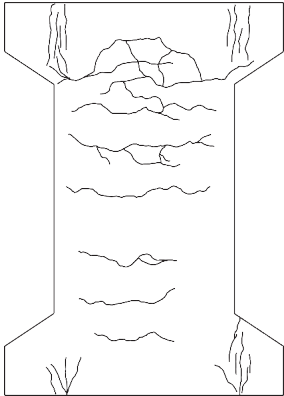


图 10 PLiC-30 受压柱破坏裂缝图

Fig.10 Failure fracture diagram of PLiC-30 compression column

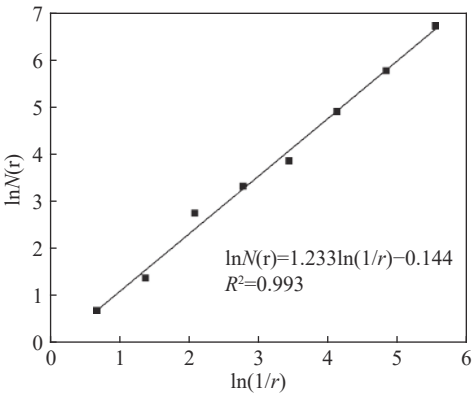


图 11 PLiC-30 受压柱裂缝 $\ln N(r) - \ln(1/r)$ 曲线

Fig.11 $\ln N(r) - \ln(1/r)$ curve of PLiC-30 compression column crack

4.2 构件极限承载力与分形维数的关系

图 12 为混凝土大偏心柱极限承载力与侵蚀天数的关系, 由图可知, 极限承载力受硫酸盐侵蚀的影响先升高后降低, 在侵蚀 120 d 时, 极限承载力达到峰值, 120 d 至 150 d 时随着硫酸盐侵蚀深度的不断增加, 极限承载力不断下降; PLiC 柱极限承载力在不同侵蚀时间下均高于 PC 柱, 说明锂渣的掺入可以提高聚丙烯纤维混凝土柱的抗硫酸盐侵蚀能力.

4.3 侵蚀时间与分形维数的关系

如图 13 所示侵蚀天数与构件表面裂缝分形维数的关系呈现震荡上升的趋势, PC 构件的分形维数大于 PLiC 构件, 这是由于锂渣的微集料作用和水化反应, 增加了混凝土的密实度; 分形维数在侵蚀 0 至 60 d 均呈下降趋势, 这是由于硫酸盐进入混凝土内部, 填充了构件的微小孔隙; 侵蚀天数 60 至 150 d, 试件破坏裂缝分形维数不断增加, 震荡上升.

4.4 分形维数与构件极限承载力的关系

如图 14 所示, 构件破坏时表面裂缝分形维数

表 5 PC 和 PLiC 大偏心受压柱承载力及破坏裂缝分形维数

Table 5 Bearing capacity of large eccentric compress reinforced concrete column and fractal dimension of failure crack

Type of test block	Ultimate load/ kN	Fractal dimension	R^2	Type of test block	Ultimate load/ kN	Fractal dimension	R^2
PC-0-0	175	1.261	0.997	PLiC-0-0	180	1.253	0.991
PC-30-0.1	180	1.224	0.991	PLiC-30-0.1	194	1.233	0.993
PC-60-0.1	188	1.142	0.995	PLiC-60-0.1	200	1.133	0.994
PC-90-0.1	192	1.342	0.993	PLiC-90-0.1	205	1.291	0.995
PC-120-0.1	200	1.212	0.994	PLiC-120-0.1	220	1.181	0.991
PC-150-0.1	185	1.265	0.997	PLiC-150-0.1	205	1.324	0.996
PC-90-0.2	198	1.228	0.996	PLiC-90-0.2	220	1.267	0.994
PC-90-0.35	175	1.279	0.994	PLiC-90-0.35	182	1.265	0.993

Note: PC-30-0.1 represents polypropylene fiber concrete with stress ratio of 0.1 and erosion days of 30 d.

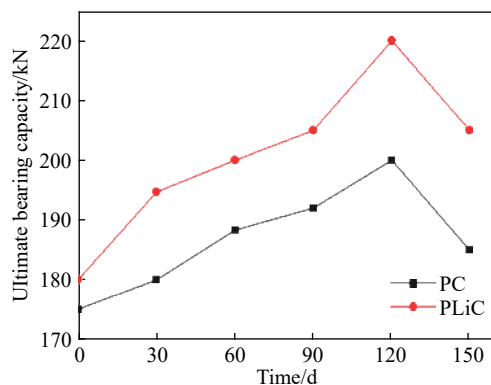


图 12 构件极限承载力与侵蚀天数

Fig.12 Ultimate bearing capacity and erosion days of members

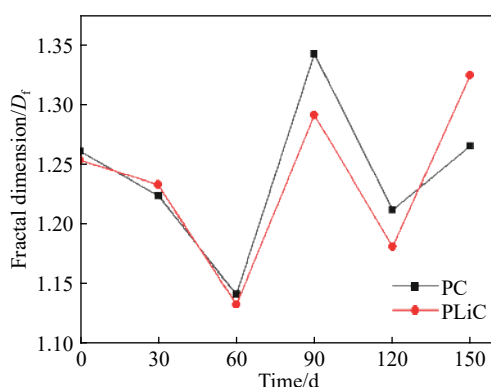


图 13 侵蚀天数与分形维数的关系

Fig.13 Relationship between erosion days and fractal dimension

随构件极限承载力的提高呈下降趋势, 可通过在役构件表面裂缝分形维数预测构件极限承载力, 进而对构件进行损伤评价, 但由于数据量不足, 相关研究内容有待进一步开展。

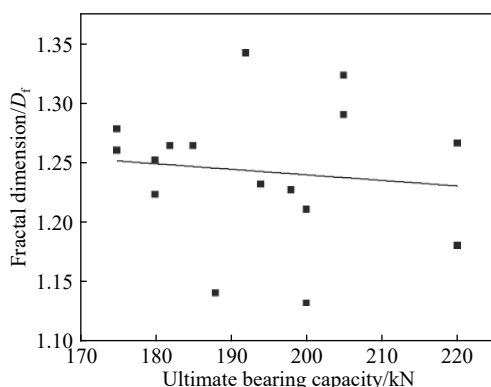


图 14 分形维数与极限承载力的关系

Fig.14 Relationship between fractal dimension and ultimate bearing capacity

5 结论

(1) 部分锂渣取代水泥后可提高混凝土抗压强度, 随侵蚀天数的增加, PC 和 PLiC 立方体试块

的抗压强度呈现先增加后降低的规律, 侵蚀天数为 120 d 时抗压强度最大。

(2) 纤维锂渣混凝土试块裂缝分布具有分形特征, 试块表面裂缝分形维数随侵蚀天数的增加呈现先增加后减少再增加的规律, 裂缝分形维数随立方体试块抗压强度的增加而减少。

(3) 混凝土大偏心受压柱破坏时表面裂缝具有明显的分形特征, 构件破坏时表面裂缝分形维数与构件侵蚀天数的关系呈现震荡上升的趋势, 分形维数随构件极限承载力的增加呈现下降趋势, 因此可将分形维数作为衡量构件损伤的指标, 为今后预测在役混凝土结构损伤和寿命预测提供参考。

参 考 文 献

- [1] Han Y D, Liu C, Wang Z B, et al. Uniaxial compressive behavior of ECC under sulfate erosion in drying-wetting cycles. *J Build Mater*, 2020, 23(4): 846
(韩宇栋, 刘畅, 王振波, 等. 硫酸盐干湿循环下 ECC 的轴压力学行为. *建筑材料学报*, 2020, 23(4): 846)
- [2] Zhang Z Y, Zhou J T, Zou Y, et al. Effect of sulfate attack on the shear performance of concrete. *China Civil Eng J*, 2020, 53(7): 64
(张中亚, 周建庭, 邹杨, 等. 硫酸盐侵蚀对混凝土抗剪性能的影响. *土木工程学报*, 2020, 53(7): 64)
- [3] Wee T H, Suryavanshi A K, Wong S F, et al. Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures. *ACI Mater J*, 2000, 97(5): 536
- [4] Mangat P S, Khatib J M. Influence of fly-ash, silica fume, and slag on sulfate resistance of concrete. *ACI Mater J*, 1993, 92(5): 542
- [5] Bai W F, Liu L A, Guan J F, et al. The constitutive model of concrete subjected to sulfate attack based on statistical damage theory. *Eng Mech*, 2019, 36(2): 66
(白卫峰, 刘霖艾, 管俊峰, 等. 基于统计损伤理论的硫酸盐侵蚀混凝土本构模型研究. *工程力学*, 2019, 36(2): 66)
- [6] Kou J L, Liu F F, Zhao D D, et al. Experimental study on resistance to sulfate attack of active powder concrete under normal temperature curing condition. *J Nat Disast*, 2020, 29(3): 76
(寇佳亮, 刘菲菲, 赵丹丹, 等. 常温养护条件下活性粉末混凝土抗硫酸盐侵蚀性能试验研究. *自然灾害学报*, 2020, 29(3): 76)
- [7] Shi L, Xie D, Wang X M, et al. Effect of liquid erosion inhibitor on water absorption and salt crystallization resistance of concrete. *Mater Rev*, 2020, 34(14): 14093
(石亮, 谢德擎, 王学明, 等. 抗侵蚀抑制剂对混凝土吸水性能及抗盐结晶性能的影响. *材料导报*, 2020, 34(14): 14093)
- [8] Li B X, Fang Q, Fang P. Durability of high-volume mineral admixture concrete half immersed in sodium sulfate solution. *J Harbin Eng Univ*, 2020, 41(6): 892
(李北星, 方晴, 方鹏. 大掺量掺合料混凝土半浸泡于硫酸盐溶液中的耐久性. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(6): 892)

- [9] Lu J Z, Tian L Z, Liu Y, et al. Experimental study of the durability of concrete under coupling effect of axial compression and sulfate attack. *J Basic Sci Eng*, 2020, 28(2): 386
(逯静洲, 田立宗, 刘莹, 等. 轴压与硫酸盐实时耦合作用下混凝土耐久性试验研究. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 386)
- [10] Xiao Q H, Cao Z Y, Guan X, et al. Degradation law of recycled concrete under the coupling of freeze-thaw and sulfate erosion. *Bull Chin Ceram Soc*, 2020, 39(2): 352
(肖前慧, 曹志远, 关虢, 等. 冻融与硫酸盐侵蚀耦合作用下再生混凝土劣化规律. 硅酸盐通报, 2020, 39(2): 352)
- [11] Li B L, Huo B B, You N Q, et al. Sulfate resistance of steel slag blended / GGBFS blended cement mortars under different curing conditions. *J Southeast Univ Nat Sci*, 2019, 49(6): 1144
(李保亮, 霍彬彬, 尤南乔, 等. 不同养护条件下钢渣/矿渣复合水泥胶砂的耐硫酸盐侵蚀性能. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1144)
- [12] Tuerkmen I, Gavgali M. Influence of mineral admixtures on the some properties and corrosion of steel embedded in sodium sulfate solution of concrete. *Mater Lett*, 2003, 57(21): 3222
- [13] Mandelbrot B B, Passoja D E, Paullay A J. Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*, 1984, 308(5961): 721
- [14] Armandei M, de Souza Sanchez Filho E. Correlation between fracture roughness and material strength parameters in SFRCs using 2D image analysis. *Constr Build Mater*, 2017, 140: 82
- [15] Yan A, Wu K R, Zhang D, et al. Influence of concrete composition on the characterization of fracture surface. *Cem Concr Compos*, 2003, 25(1): 153
- [16] Ince R G, Alyamaç K E, et al. Multi-fractal scaling law for split strength of concrete cubes. *Mag Concr Res*, 2016, 68(3): 141
- [17] Konkol J, Prokopski G. Fracture toughness and fracture surfaces morphology of metakaolinite-modified concrete. *Constr Build Mater*, 2016, 123: 638
- [18] Cheng S, Jin N G, Tian Y, et al. New graphic method for quantitatively analyzing characteristic parameters of concrete cracks. *J Zhejiang Univ Eng Sci*, 2011, 45(6): 1062
(成盛, 金南国, 田野, 等. 混凝土裂缝特征参数的图形化定量分析新方法. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(6): 1062)
- [19] Cao M S, Ren Q W. Damage detection of reinforced concrete structures based on fractal characteristic factor. *China Civil Eng J*, 2005, 38(12): 59
(曹茂森, 任青文. 钢筋混凝土结构损伤检测的分形特征因子. 土木工程学报, 2005, 38(12): 59)
- [20] Jiao C J, Li X B, Cheng C M, et al. Dynamic damage constitutive relationship of high strength concrete based on fractal theory. *Explos Shock Waves*, 2018, 38(4): 925
(焦楚杰, 李习波, 程从密, 等. 基于分形理论的高强混凝土动态损伤本构关系. 爆炸与冲击, 2018, 38(4): 925)
- [21] Chen W C, Shi H J, Chao Z Q. Developing nature of cracks in reinforced concrete beam bridge with fractal theory. *J Chang'an Univ Nat Sci*, 2003, 23(6): 44
(陈万春, 师晖军, 晁宗棋. 基于分形理论的钢筋混凝土梁式桥裂缝发育特征. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(6): 44)
- [22] Li Y Y, Rong X, Wang T C. Fractal characteristics of crack distribution of concrete beams with high strength stirrup. *Eng Mech*, 2009, 26(Suppl1): 72
(李艳艳, 戎贤, 王铁成. 高强箍筋混凝土梁裂缝分布的分形特征. 工程力学, 2009, 26(增刊1): 72)
- [23] Fan Y F, Zhou J, Feng X. Fractals in failure of corroded reinforced concrete members. *Eng Mech*, 2002, 19(5): 123
(范颖芳, 周晶, 冯新. 受腐蚀钢筋混凝土构件破坏过程的分形行为. 工程力学, 2002, 19(5): 123)
- [24] Luan H Y, Fan Y F, Wang D W, et al. Study on the flexural behavior of the CFRP-reinforced concrete beam with fractal theory. *Eng Mech*, 2015, 32(4): 160
(栾海洋, 范颖芳, 王大为, 等. 基于分形理论的CFRP布增强混凝土梁抗弯性能研究. 工程力学, 2015, 32(4): 160)
- [25] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50081—2019 *Standard for Test Methods of Concrete Physical and Mechanical Properties*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019
(中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50081—2019混凝土物理力学性能试验方法标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019)
- [26] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T50152—2012 *Standard for Test Method of Concrete Structures*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012
(中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50152—2012混凝土结构试验方法标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012)
- [27] Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1982
- [28] Liu J H, Zhao L, Ji H G. Influence of initial damage on degradation and deterioration of concrete under sulfate attack. *Chin J Eng*, 2017, 39(8): 1278
(刘娟红, 赵力, 纪洪广. 初始损伤对混凝土硫酸盐腐蚀劣化性能的影响. 工程科学学报, 2017, 39(8): 1278)
- [29] Wen Y, Xu H, Han D M. Study on the effect of lithium slag powders upon the sulfate corrosion resistance of cement material. *Concrete*, 2010(12): 90
(温勇, 徐虎, 韩东明. 锂渣粉对水泥基材料抗硫酸盐侵蚀性能的影响. 混凝土, 2010(12): 90)