

基于分形维数的RC框架地震损伤识别与评估

马 选, 刘 猛*

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年6月8日; 录用日期: 2026年6月30日; 发布日期: 2026年7月13日

摘 要

本研究旨在提出一种基于分形维数的钢筋混凝土(RC)框架结构地震损伤识别与评估方法。研究通过ABAQUS软件建立了一个三层单跨的RC框架有限元模型, 选取El Centro波、Kobe波和一条人工地震波作为输入。采用盒计数法计算结构在地震作用下位移和加速度响应信号的分形维数(D_B)。研究对比了损伤前后响应信号分形维数的变化, 分析了分形维数与地震波中心频率、楼层位置以及结构损伤程度的关联。研究发现, 响应信号的分形维数随损伤程度的增加而显著增大, 且加速度信号的分形维数对损伤更为敏感。基于此, 论文提出了一种新的“分形损伤指数”(FDI), 并给出了与“基本完好”、“轻微损伤”和“中等损伤”三个等级相对应的FDI建议阈值, 旨在为结构损伤预警和震后快速评估提供补充性指标。

关键词

分形理论, 钢筋混凝土框架, 地震响应, 损伤指数, 盒计数法

Fractal Dimension-Based Seismic Damage Identification and Assessment of RC Frames

Xuan Ma, Meng Liu*

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: June 8, 2026; accepted: June 30, 2026; published: July 13, 2026

Abstract

This study aims to propose a seismic damage identification and assessment method for Reinforced Concrete (RC) frame structures based on fractal dimension. A three-story, single-bay finite element model of an RC frame was established using ABAQUS software, with the El Centro wave, Kobe wave, and an artificial seismic wave selected as inputs. The box-counting method was employed to calculate

*通讯作者。

the fractal dimensions (D_B) of displacement and acceleration response signals of the structure under seismic excitation. The study compared the changes in fractal dimensions of the response signals before and after damage and analyzed the correlations between the fractal dimension and the central frequency of the seismic wave, the story level, as well as the degree of structural damage. The results indicate that the fractal dimension of the response signals increases significantly with the degree of damage, and the fractal dimension of the acceleration signal is more sensitive to damage. Based on these findings, a novel “Fractal Damage Index” (FDI) is proposed, along with suggested FDI thresholds corresponding to three damage levels: “Basically Intact”, “Slightly Damaged”, and “Moderately Damaged”. This aims to provide a supplementary indicator for structural damage early warning and rapid post-earthquake assessment.

Keywords

Fractal Theory, Reinforced Concrete Frame, Seismic Response, Damage Index, Box-Counting Method

Copyright © 2026 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

地震作为一种极具破坏性的突发自然灾害,会在短时间内对结构造成不同程度的损伤。钢筋混凝土(RC)框架结构是我国应用最广泛的结构体系之一,在地震作用下易发生复杂的非线性损伤演化,准确描述其损伤程度和演化过程一直是抗震领域的难点。目前,结构健康监测和震后损伤评估主要依赖固有频率、振型等模态参数,这些指标各有所长,但对局部损伤的敏感性和损伤程度的界定上稍有不足。所以将分形理论[1]引入结构响应信号的分析,其核心参数——分形维数(Fractal Dimension)可以更细致地量化响应信号的波动性,从而探索一种能准确反映结构损伤程度及演化状态的新指标。

分形一词最初是由数学家本华·曼德勃罗(Benoit B. Mandelbrot)创造的,用来量化复杂系统内在的无序结构和演化规律,分形维数作为分形理论最革命性的概念,采用非整数维来刻画曲线或曲面填充空间的能力[2] [3]。近年来,分形维数已在土木工程的多个领域得到了广泛应用,展现出广阔的发展前景[4]-[8]。对于混凝土材料,分形维数多用于表征其损伤演化状态[9]-[12]。Li等[13]通过分形维数精准评估了掺再生混凝土粉末的纤维增强混凝土的损伤行为,提出了一种新型损伤-应变模型。在孔隙结构方面,分形维数可以定量表征孔隙的复杂性,从而与其他变量建立联系[14] [15]。薛慧君等[16]发现不同风积沙掺量下引气混凝土孔结构具有一定分形特征,其孔结构分形维数具有分段性。在岩石力学中,解北京等[17]利用分形维数对冲击荷载下饱水红砂岩的动力学响应及其破坏特征进行了深入解析。Hu等[18]将岩屑分形维数作为评估地震诱发岩爆烈度的定量指标。与此同时,分形理论在大型结构的损伤分析和健康监测领域也展现出巨大的潜力[19]。陈韵竹[20]基于声发射强度分形维数及声发射b值理论,提出定量指标能够有效识别混凝土结构损伤程度。

目前,分形理论在结构监测中的应用较少涉及位移和加速度这类振动信号的变化,鉴于此,本文利用ABAQUS软件建立了一个单跨三层的RC框架结构,采集三条不同特征地震波下结构各层的响应信号。探究结构在不同地震作用下响应分形维数的变化以及分形维数与结构损伤状态的关联,验证其能否成为传统监测指标的补充,为现有损伤评估体系的发展提供理论依据与分析工具。

2. 研究模型

2.1. 模型参数

根据现行规范设计了一个三层单跨的 RC 框架结构, 首层层高 3.0 m, 其他层层高均为 2.8 m, 结构总高为 8.6 m, 模型跨度为 3.0 m。柱截面尺寸为 300 mm × 300 mm, 梁截面尺寸为 250 mm × 300 mm。混凝土等级为 C30, 钢筋等级为 HRB400, 楼面恒荷载为 3.0×10^{-3} MPa, 楼面活荷载为 2.0×10^{-3} MPa。测点选择各层梁与柱的交点位置, 模型尺寸及测点分布如图 1 所示。

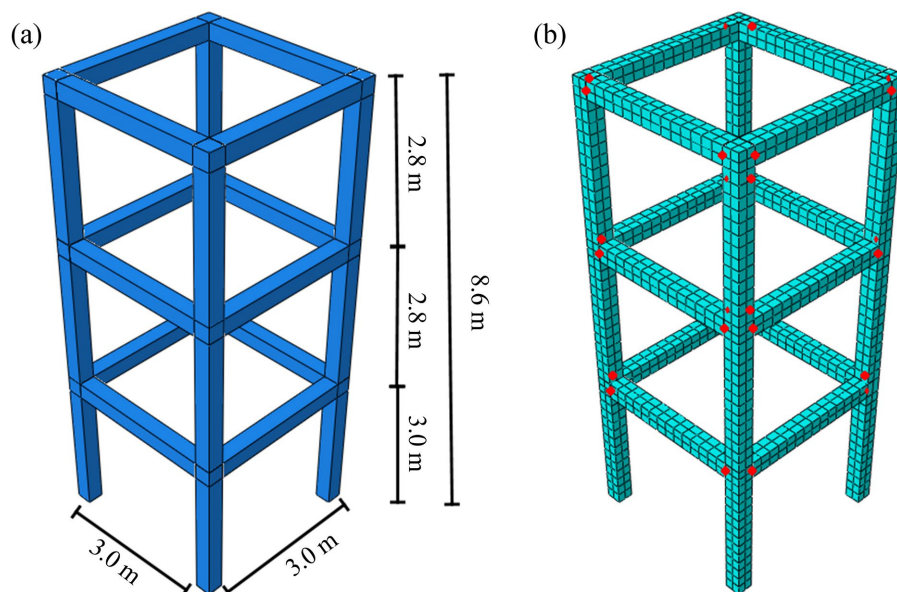


Figure 1. Dimensions and measurement point locations of the RC frame structure

图 1. RC 框架结构尺寸及测点位置

2.2. 模型构建

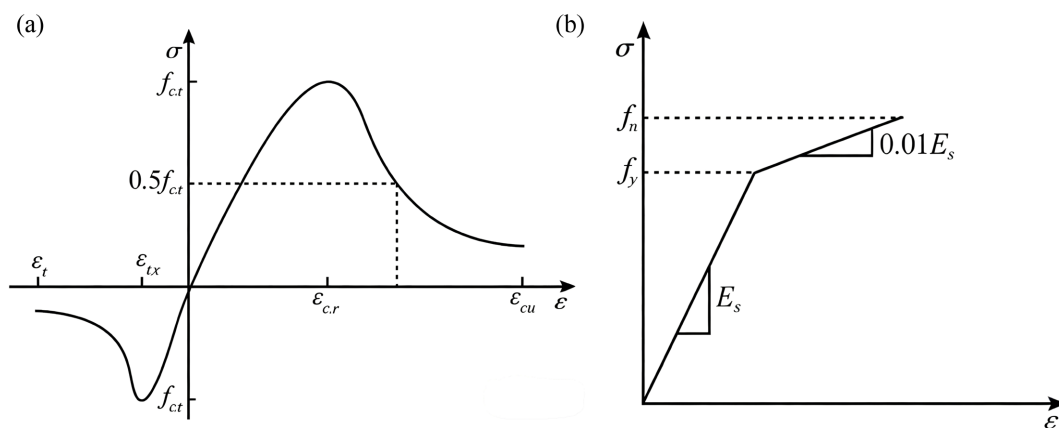


Figure 2. Stress-strain curves of concrete (left) and steel reinforcement (right)

图 2. 混凝土(左)和钢筋(右)的应力 - 应变曲线

使用 ABAQUS 软件中内置的混凝土损伤塑性模型(Concrete Damaged Plasticity, CDP), 其多用于单向

加载、循环加载以及动态加载等场合, 通过非关联多硬化塑性和各向同性损伤弹性相结合的方式描述混凝土破碎过程中发生的塑性损伤, 该特性使得 CDP 具有更好的收敛性[21]。钢筋的本构曲线采用双折线模型, 具有较好的模拟效果和数值稳定性。根据 2024 年修订的《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010-2010), 混凝土应力 - 应变曲线和钢筋应力 - 应变曲线如图 2 所示。图中 σ 为应力, ε 为应变, f_{ct} 为轴心抗压或抗拉强度, ε_{cr} 为峰值应变, ε_{cu} 为极限压应变, ε_{tx} 和 ε_t 通常指受拉区的特征应变; f_y 为屈服强度, f_n 为极限强度, E_s 为初始弹性模量。混凝土抗压强度为 31.7 MPa, 弹性模量为 0.301×10^5 MPa; 钢筋屈服强度为 465.9 MPa, 极限强度为 645.5 MPa。

混凝土与钢筋分别采用减缩积分实体单元 C3D8R 和桁架单元 T3D2 进行分离式建模, 自由度耦合采用 Embed 技术, 以此来模拟钢筋与混凝土间的黏结滑移。混凝土损伤塑性参数取值为: 膨胀角为 30° , 偏心率为 0.1, $f_{bo}/f_{co} = 1.16$, $K = 0.667$, 黏性系数为 0.0005。

3. 地震波

3.1. 地震波的选择

依照 2024 年修订的《建筑抗震设计规范》(GB/T 50011-2010)相关规定, 选取三条具有不同频谱特性的强震记录作为地震输入: 1940 年 El Centro 波(RSN 6)、1995 年 Kobe 波(RSN 1106)和一条人工波, 该人工波采用三角级数法生成, 通过迭代调整使加速度反应谱与规范目标谱吻合, 下文简称地震 1、2、3, 地震波时程及傅里叶谱曲线如图 3 所示。由图可得, 地震 1 在中低频上较强, 整体能量最高; 地震 2 中低频成分占绝对主导, 频带最窄, 高频部分最弱; 地震 3 在中低频上能量分布相近, 能量随频率增大而衰减。为使不同地震波能在同一标准下进行比较分析, 对三条地震波进行了归一化处理。场地类别选为 II 类, 抗震设防烈度 7 度, 设计地震分组选第二组。

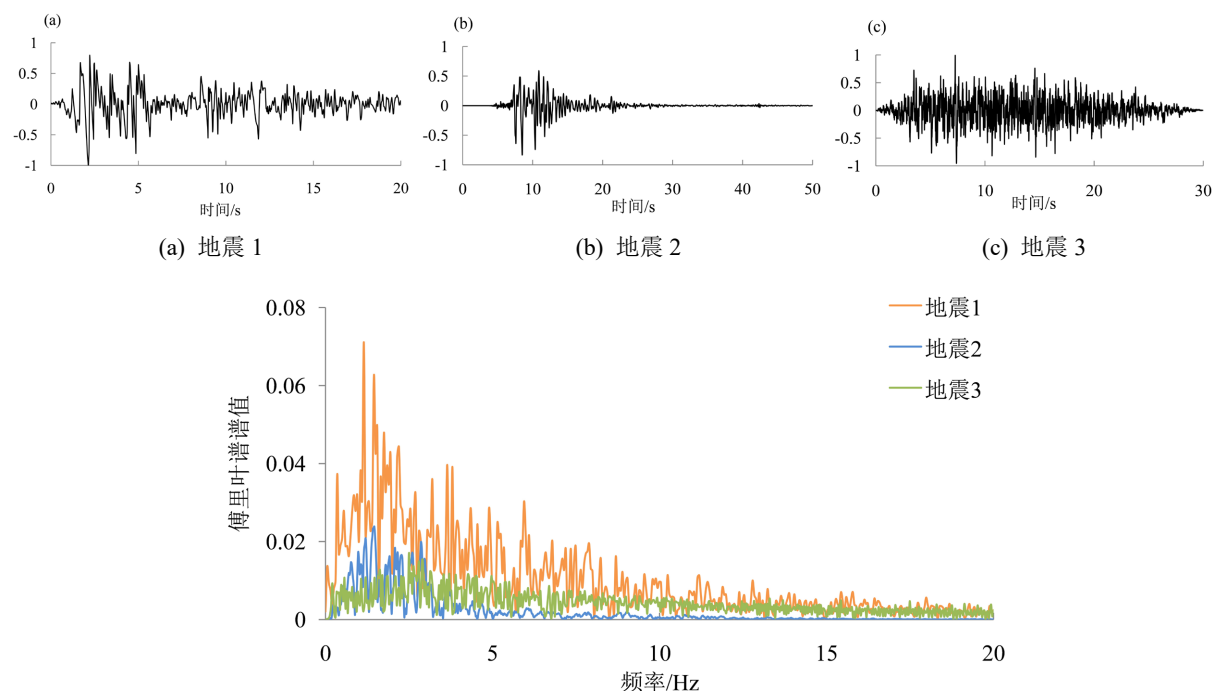


Figure 3. Seismic waves and their Fourier spectra
图 3. 地震波及其傅里叶谱曲线

3.2. 中心频率

傅里叶幅值谱表现的是不同频率下能量的变化情况, 没有考虑到全频带能量的综合分配。而中心频率本质上是求功率谱密度的“重心”频率, 它反映的是地震动能量在频域的整体集中位置, 常用于描述地震动整体频率特性。中心频率的计算表达式如下:

$$G(f_k) = \frac{2 \cdot A(f_k)^2}{T} \quad (1)$$

$$m_0 = \sum_k G(f_k) \Delta f \quad (2)$$

$$m_1 = \sum_k f_k \cdot G(f_k) \Delta f \quad (3)$$

$$f_c = \frac{m_1}{m_0} \quad (4)$$

其中, $A(f_k)$ 为单边傅里叶幅值谱; $G(f_k)$ 为单边功率谱密度; $T = N\Delta t$ 是总持时; m_0 和 m_1 分别为零阶矩和一阶矩; f_c 即为中心频率。

计算得到三条波的中心频率分别为 3.50 Hz、2.03 Hz 和 7.52 Hz, 可以看出地震 1 和地震 2 的整体频率倾向中低频, 地震 3 的整体频率倾向中高频。

4. 动力响应分析

在 ABAQUS 中将输入地震波的峰值地面加速度(PGA)控制在 0.2 g, 整理各监测点的位移和加速度响应数据, 取平均值绘制时程曲线, 计算各曲线的分形维数。

4.1. 响应曲线的分形维数

分形维数是用来度量不规则几何对象复杂度的一个量[22]-[24], 是对传统欧几里得维数(1 维的线、2 维的面、3 维的体)的推广。本文采用盒计数法求解分形维数: 把转换后的二维时程曲线置于边长为 α 的正方形网格下, 通过不断缩小 α , 观测覆盖曲线所需盒子数目的变化规律, 分形维数由下式给出:

$$D_B = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\log N(\alpha)}{\log(1/\alpha)} \quad (5)$$

其中, D_B 为分形维数; $N(\alpha)$ 为覆盖分形对象的最小盒子数; α 为盒子尺寸。

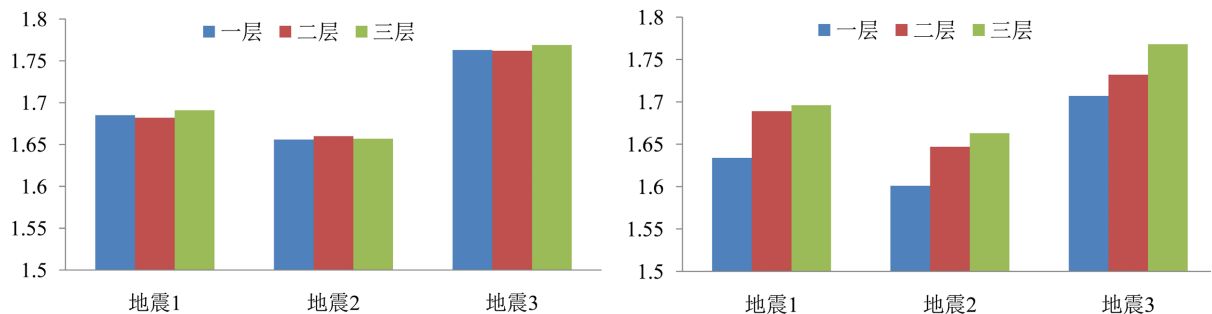


Figure 4. Fractal dimensions of displacement (left) and acceleration (right) response curves

图 4. 位移(左)和加速度(右)响应曲线的分形维数

计算得到结构在不同地震作用下各层响应曲线的分形维数如图 4 所示。由图可知, 位移和加速度响

应的 D_B 大小与所作用地震波的中心频率成正相关, 这是因为地震动高频分量比重的增加导致时程曲线不规则度、复杂度增大; 同一地震作用下, 结构各层的位移 D_B 大小接近, 而加速度 D_B 随层数的增大而增大, 原因是位移由基本振型控制, 高频成分弱小且各层相似, 波形粗糙度无大差异, 加速度会放大高阶振型, 楼层越高, 高频振荡叠加越显著, 信号不规则度急剧上升。

4.2. 损伤前后分形维数的变化

为探究结构在震后的损伤状态, 根据《建筑抗震设计规范》的相关规定, RC 框架在多遇地震下的弹性层间位移角限值是 $1/550$, 在罕遇地震下薄弱部位弹塑性层间位移角限值是 $1/50$ 。图 5 中不同地震波作用下, 结构的最大层间位移角均未超过弹塑性层间位移角限值, 表明该结构设计符合要求。PEEQ (等效塑性应变) 是通过一个不累加的正值, 来衡量材料一点上塑性变形的累积总量, 其大小直接反映了特定位置的材料屈服和累积损伤程度[25], PEEQ > 0 的区域就代表已发生屈服且数值越大越严重。如图 5 所示, 结构靠近梁柱节点的某些部位已发生损伤, 而且损伤程度与响应曲线的分形维数呈正相关。

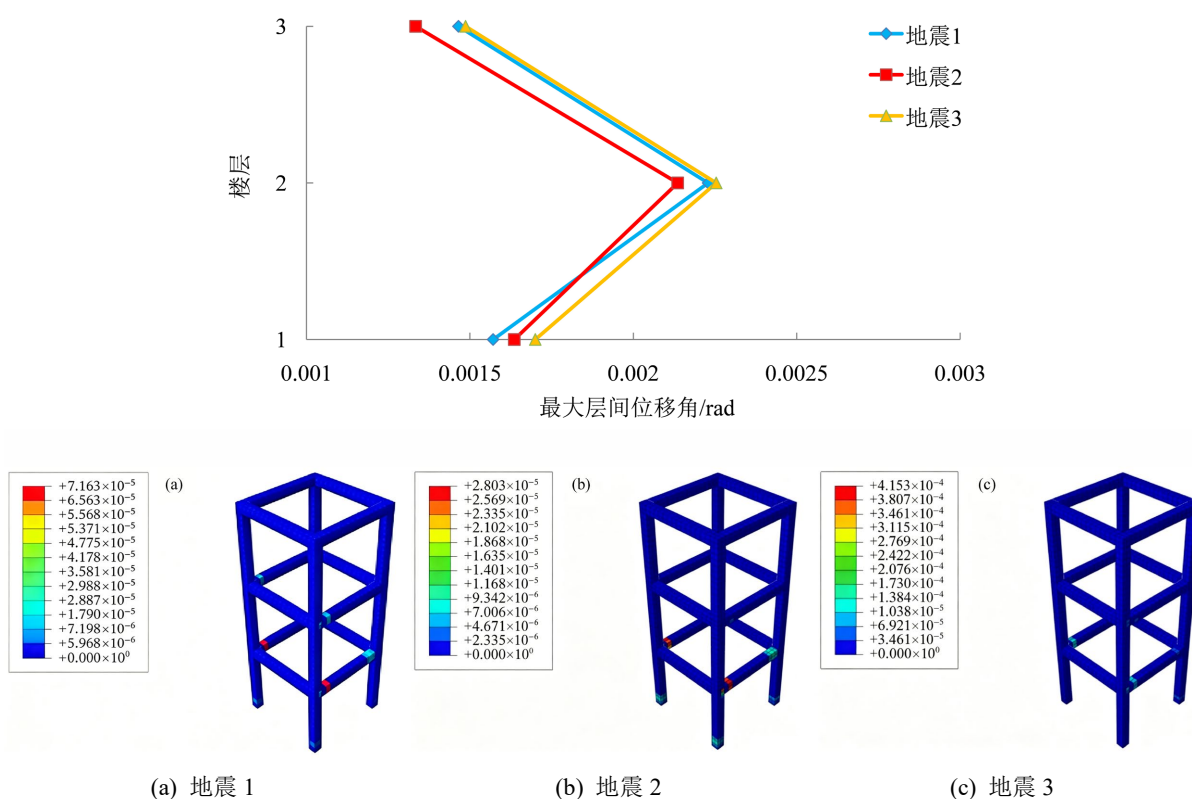


Figure 5. Maximum inter-story displacement ratio and PEEQ contour plots

图 5. 最大层间位移角及 PEEQ 云图

为了探究结构在损伤前后响应曲线 D_B 的变化, 在震前和震后分别对静止状态的结构加载幅值在 $\pm 0.04 \text{ m/s}^2$ 范围内的高斯白噪声[26], 持续时间 20 s, 如图 6 所示, 用来模拟结构在长期监测时受到的环境振动。计算得到位移和加速度响应曲线在损伤前后的分形维数, 比较损伤前后的变化情况, 如图 7 所示。可以观察到, 位移和加速度响应的 D_B 在结构出现损伤后都有了显著的增长, 同时由于损伤程度及损伤位置的差异, 不同地震作用下结构各层的响应 D_B 的增幅不尽相同。

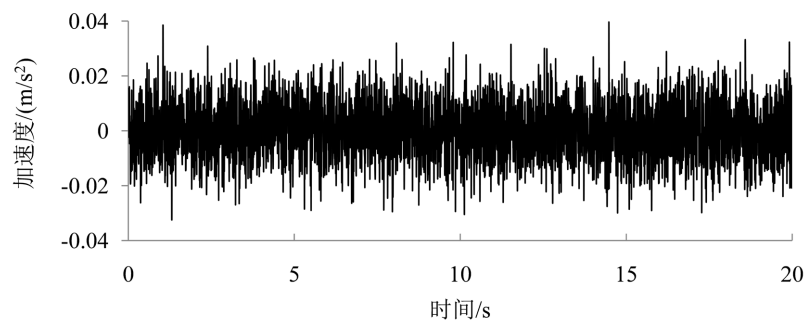


Figure 6. Gaussian white noise
图 6. 高斯白噪声

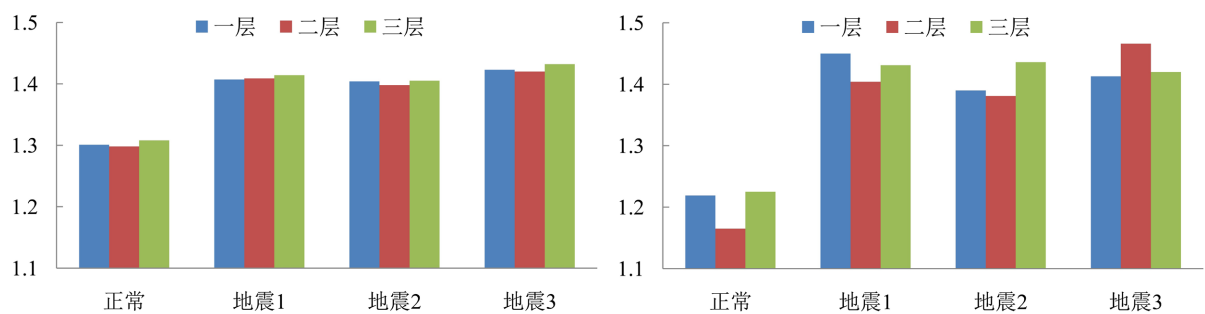


Figure 7. Changes in fractal dimensions of structural displacement (left) and acceleration (right) before and after damage
图 7. 损伤前后结构位移(左)和加速度(右)分形维数变化

结构损伤后各层的位移和加速度响应 D_B 增长率如表 1 和表 2 所示。由表可知, 位移和加速度的 D_B 增长率随着结构损伤程度的增大而上升; 相同程度的损伤, 加速度的 D_B 增长率要大于位移的 D_B 增长率, 表明其对损伤的反应更为灵敏。背后的原因是结构损伤本质上为系统引入了新的非线性源, 使振动响应不再平滑, 而加速度响应相当于一个高频放大器, 损伤造成的任何高频变化, 都会在加速度信号中被显著放大。

Table 1. Growth rate of displacement fractal dimension after structural damage
表 1. 结构损伤后位移分形维数增长率

	地震 1	地震 2	地震 3
一层	8.15%	7.92%	9.38%
二层	8.55%	7.70%	9.40%
三层	8.10%	7.42%	9.48%

Table 2. Growth rate of acceleration fractal dimension after structural damage
表 2. 结构损伤后加速度分形维数增长率

	地震 1	地震 2	地震 3
一层	13.05%	10.07%	14.83%
二层	13.84%	13.44%	18.24%
三层	13.92%	13.83%	15.78%

4.3. 新的损伤监测指标

基于上述分析, 可以得知分形维数对结构损伤后的波动信号极其敏感, 所以在此提出分形损伤指数 (Fractal Damage Index, FDI) 作为新的结构损伤监测指标。本指数以结构特定部位在日常检测下处于正常状态的响应分形维数 D_{BI} 为基准, 选取不同时段监测所得的分形维数 D_{BR} , 计算相对增长率, 即:

$$FDI = \frac{D_{BR} - D_{BI}}{D_{BI}} \times 100\% \quad (6)$$

为验证 FDI 的可行性并量化其与结构损伤程度之间的关系, 控制各地震 PGA 在 0.05~0.5 g 范围内, 统计结构的最大层间位移角 θ_{max} 和 PEEQ 值。参考《建筑抗震设计规范》和文献[27]对结构损伤状态的划分, 将结构损伤定义为基本完好、轻微损伤、中等损伤三个等级, 结果如表 3 所示。

Table 3. Damage index values corresponding to different damage levels

表 3. 不同损伤等级对应损伤指标值

损伤等级	FDI	θ_{max}/rad	PEEQ
基本完好	$<3\%$	$<1/550$	0
轻微损伤	$3\% \leq FDI < 20\%$	$1/550 \leq \theta_{max} < 1/200$	$0 < PEEQ < 1 \times 10^{-3}$
中等损伤	$20\% \leq FDI < 35\%$	$1/200 \leq \theta_{max} < 1/100$	$1 \times 10^{-3} < PEEQ < 1 \times 10^{-2}$

日常监测中可以将 FDI 作为结构健康监测的辅助判据, 与传统监测指标互补使用。当用于震后评估时, 由于结构在震前可能已存在退化或缺乏历史监测数据, 可借助同一类结构在相同场地条件下的统计均值作为参考基准, 或采用相邻未损楼层信号作为内部参考。损伤预警时, 则需在监测系统中建立实时信号处理流程: 通过滑动时间窗口持续计算分形维数, 并与地震动触发阈值联动, 一旦在强震过程中发现 FDI 瞬时增量超过预设警戒值, 即可触发预警信号。通过分时段环境振动建立响应的 FDI 基线, 并形成位移与加速度双分形维数联动的损伤预警机制; 在强震发生后, 则基于震后响应快速计算增量, 初步判定结构损伤等级, 为后续精细检测提供优先级排序。结构损伤导致构件刚度退化, 进而引起整体结构动力特性的改变——具体表现为结构自振频率降低、阻尼比增大。刚度退化使振动信号中的非线性成分增加, 尤其在高频段引入更多由裂缝开合及材料塑性引起的瞬态冲击分量, 从而显著提高加速度响应的不规则度, 反映为分形维数的上升。因此, FDI 的增长本质上与刚度退化率及模态阻尼变化呈正相关。FDI 从新的视角为结构损伤状态提供了补充度量, 有望形成更加综合、鲁棒的损伤评估体系。后续研究可聚焦于不同结构体系的分形维数变化与不同损伤阶段之间的精确量化模型等。

5. 结论

本文把响应分形维数作为 RC 框架结构的损伤监测和判别指标, 与地震作用下结构损伤状态建立了量化关系, 得到以下结论:

- 1) 响应信号的分形维数与所作用地震波的中心频率呈正相关, 相同地震作用下, RC 框架各层的位移分形维数大小接近, 加速度分形维数随层数的增加而增大。
- 2) 结构出现损伤后, 位移和加速度响应的分形维数显著增大, 由于损伤程度及损伤位置的差异, 不同地震作用下 RC 框架各层的响应分形维数的增幅各不相同。位移和加速度的分形维数增长率随着结构损伤程度的增大而增加, 其中加速度响应的分形维数对损伤的反应更灵敏。
- 3) 提出的分形损伤指数 FDI 可以作为与传统监测指标互补的辅助判据, 适用于日常损伤预警和快速判定结构损伤等级。

参考文献

- [1] 姜绍飞, 苏莹. 分形理论在土木工程领域中的应用[J]. 工程力学, 2009, 26(S1): 148-152+162.
- [2] 龚函, 戚燕顺, 缪浩杰, 等. 考虑裂纹分形维数的平行黏结模型细观参数标定的神经网络模型[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 327-336.
- [3] Pavičić, I., Dragičević, I., Vlahović, T., *et al.* (2017) Fractal Analysis of Fracture Systems in Upper Triassic Dolomites in Žumberak Mountain, Croatia. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, **32**, 1-13. <https://doi.org/10.17794/rgn.2017.3.1>
- [4] 郑芳, 邓津, 安亮. 黄土微观参数指标与阻尼比关联度研究[J]. 世界地震工程, 2021, 37(3): 180-188.
- [5] Carpinteri, A. and Brighenti, R. (2010) Fracture Behaviour of Plain and Fiber-Reinforced Concrete with Different Water Content under Mixed Mode Loading. *Materials & Design*, **31**, 2032-2042. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.021>
- [6] 宋宇, 刘保国, 任大瑞, 等. 基于分形理论构建随机粗糙节理模型的方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 101-112.
- [7] 饶平平, 王齐苒, 吴健. 基于分形理论的雷电冲击土体等离子体通道发展研究[J]. 上海理工大学学报, 2023, 45(6): 610-619.
- [8] 孙杰, 申紫豪, 廖海峰. 基于分形理论的冻融荷载耦合作用下纤维混凝土的抗压强度[J]. 复合材料学报, 2024, 41(11): 6101-6110.
- [9] Yu, L.C., Huang, M.M., Wang, C., *et al.* (2023) Underwater Structure Health Status Assessment Using Fractal Theory-Based Crack Detection Algorithm. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **37**, Article 04023023. <https://doi.org/10.1061/jpcfev.cfeng-4418>
- [10] 郭伟, 秦鸿根, 陈惠苏, 等. 分形理论及其在混凝土材料研究中的应用[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7): 1362-1368.
- [11] 刘鹏波, 孟祥, 刘磊, 等. 高温后玄武岩纤维增强混凝土冲击能量耗散及破碎分形特征研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(17): 46-53.
- [12] 吴剑锋, 黄雨悦, 李赫赫, 等. 混凝土单轴压缩表面裂纹分布的一致分形特征[J]. 材料导报, 2025, 39(4): 98-104.
- [13] Li, X., Ma, R., Sun, H., Liu, R., Bao, Y. and Wen, L. (2025) Unraveling Meso-Structural Evolution in Fiber-Reinforced Concrete with Recycled Powder: Evidence and Insights from X-Ray Computed Tomography (CT) and Fractal Theory. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **14**, 1355-1375. <https://doi.org/10.1080/21650373.2025.2502142>
- [14] Jiang, Z., Cai, G., Liu, Y., Wang, P. and Yu, S. (2024) Pore Structure and Mechanical Characteristics of CRS Mortar Based on NMR and Fractal Theory. *Construction and Building Materials*, **457**, Article 139459. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139459>
- [15] Song, Y.Q., Dong, W., Xue, G., *et al.* (2025) Capillary Water Absorption Characteristics of Aeolian Sand Concrete: Fractal Theory-Based Analysis and Numerical Simulation with Experimental Verification. *Construction and Building Materials*, **492**, Article 142994. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142994>
- [16] 薛慧君, 郑建庭, 邹春霞, 等. 风积沙对引气混凝土强度及孔结构的影响[J]. 建筑结构, 2022, 52(8): 112-117.
- [17] 解北京, 蔺淑蓉, 汪泉, 等. 冲击载荷下饱水红砂岩力学响应与破碎特征[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(7): 2582-2592.
- [18] Hu, L.H., Zhang, Z.H., Liang, X., *et al.* (2021) Fractal Analysis of Fragmentation Distribution of Rockbursts Induced by Low-Frequency Seismic Disturbances. *Advances in Civil Engineering*, **2021**, Article 6679891. <https://doi.org/10.1155/2021/6679891>
- [19] 于江, 皮滢杰, 秦拥军. 循环载荷下再生混凝土损伤声发射特性[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13011-13017.
- [20] 陈韵竹. 声发射系统的研发及混凝土损伤监测研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [21] 胡亮, 钱德玲, 刘杰, 等. 基于ABAQUS的RC框架节点的有限元分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(5): 657-661.
- [22] Li, P.F., Cui, X.P., Wei, Y.J., *et al.* (2023) Calibration Method of Mesoscopic Parameter in Sandy Cobble Soil Triaxial Test Based on PFC3D. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **17**, 1924-1933. <https://doi.org/10.1007/s11709-023-0028-4>
- [23] 蔡江东, 刘志, 陈亚东, 等. 爆炸冲击波在RC模型板跨中及板端传播特性[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1064-1067.
- [24] 宋肖龙, 耿东阳, 高文学, 等. 基于周界分形维数的隧道围岩爆破损伤非线性特征研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(6): 159-167.
- [25] Cheraghi, K., Tavana, M.H. and Aghayari, R. (2023) Investigating the Effect of Low-Yield Yielding Dampers on the Seismic Behavior of Steel Frames. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **67**, 925-935. <https://doi.org/10.3311/ppci.21804>

-
- [26] 康帅, 王自法, 周荣环, 等. 基于小波散射变换的 RC 框架结构震后损伤异常智能检测[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(2): 27-38.
- [27] 邓夕胜, 周紫娟, 赖馨粤, 等. 基于 BP 神经网络的 RC 框架结构主余震易损性分析[J]. 地震研究, 2025, 48(3): 496-506.