

建筑结构地震响应混沌特性及影响因素分析

陈思坚^{1,2}, 吴琛^{1,2}, 杨超^{1,2}, 郑志煌^{1,2}

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 采用混沌时间序列分析方法分别对以经典混沌信号和地震动为激励的结构响应进行混沌特性分析, 从关联维数、Kolmogorov 熵及最大 Lyapunov 指数等定量指标的角度, 考察结构自振周期、地震动的类型和幅值等因素对结构地震响应的非线性特性的影响。研究表明: 在经典混沌信号和地震动作用下, 经过结构的放大和滤波作用, 结构加速度响应仍然保留了混沌特性, 且通过混沌参数的变化程度能够判断结构是否进入弹塑性状态。结构自振周期为结构加速度响应的混沌特性的主要影响因素; 幅值对经典混沌信号作用结构下加速度响应的混沌特性影响较为显著; 而地震动的类型、幅值等因素对地震动作用下响应的混沌特性影响更为显著。

关键词: 混沌时间序列分析方法; 定量指标; 混沌特性; 结构加速度响应

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)01-0036-07

Chaotic characteristics of the seismic response of building structures and analysis of the influencing factors

CHEN Sijian^{1,2}, WU Chen^{1,2}, YANG Chao^{1,2}, ZHENG Zhihuang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Chaotic time series analysis method was used to analyze the chaotic characteristics of structural responses excited by classical chaotic signals and ground motions. The effects of natural vibration period and damping, type and amplitude of ground motion on the non-linear characteristics of the structure's seismic response were investigated from the perspective of such quantitative indicators as the correlation dimension, Kolmogorov entropy and the maximum Lyapunov exponent. Results show that, under the action of classical chaotic signal and ground motion, the acceleration response of the structure retains the chaotic characteristics through the amplification and filtering of the structure. The degree of the variation of chaotic parameters can be used to judge whether the structure has entered the elastic-plastic state. The natural vibration period of the structure is the main factor affecting the chaotic characteristics of the acceleration response of the structure. The amplitude has a significant influence on the chaotic characteristics of the acceleration response under the action of classical chaotic signals, while the type and amplitude of ground motions have a more significant impact on the chaotic characteristics of the response under the action of ground motions.

Keywords: chaotic time series analysis method; quantitative indicators; chaotic characteristics; acceleration response of the structure

收稿日期: 2018-09-26

基金项目: 福建省高校产学研合作项目(2019Y4011); 福建省新世纪优秀人才支持计划项目(GYZ-160144); 福建工程学院科研发展基金(GYZ-160126)

第一作者简介: 陈思坚(1995-), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 研究方向: 结构抗震理论与工程应用。

通信作者: 吴琛(1978-), 女, 福建福州人, 教授, 博士, 研究方向: 计算力学与工程应用。

由于我国处于环太平洋地震带和欧亚地震带交汇处,地震活动区分布较广,地震发生频繁且震级普遍较高。因此,分析结构地震响应的内在规律,快速、高效地检测出结构在地震作用后的损伤状态,对减少事故损伤有较大的应用价值。

20 世纪 60 年代兴起的混沌理论是一种国内外公认的理想研究方法,已被广泛应用于气象学、生命科学、经济学、音乐艺术和物理学等领域。在地震工程领域,杨迪雄等^[1]和吴琛等^[2]采用混沌时间序列分析方法证明了地震动本身具有混沌特性。建筑结构抗震设计依赖于结构地震响应分析,因此,了解地震动作用下结构地震响应是否也具有混沌特性是值得研究的重要问题。

本文将采用混沌时间序列分析方法,对结构地震响应是否依然存在混沌特性展开进一步的研究。由于单自由度体系是复杂结构抗震分析的基础,因此,本文以单自由度系统为例,分析其在经典混沌信号与地震动作用下的结构响应,探讨结构响应混沌特性及主要影响因素。

基于混沌理论的分析方法研究结构地震响应的可行性有以下几点:

1) 混沌系统属于非线性动力系统,它的运动轨迹是长期不可确定的,结构地震响应也是不可预测的。

2) 结构地震响应本身是一种时间序列,采用混沌时间序列分析方法可拓宽其研究视野。

3) 混沌系统对初始值具有敏感依赖性,而结构地震响应对初始条件也比较敏感,例如:结构自振周期和激励幅值等参数。

1 混沌特性的定量判别

混沌特性的判别方法大体上可分为定性判别与定量判别两大类^[3]。定性判别仅用于判断系统是否具有混沌特性,常见包括功率谱分析法、主成分分析法和改进的伪最邻近点法等。定量判别^[4]既能判断系统的混沌特性,又能表征其强弱程度,通常通过相空间重构计算时间序列的非线性特征参数,如关联维数、Kolmogorov 熵和最大 Lyapunov 指数等。因此,本文采用定量判别用于表征系统是否具有混沌特性及其强弱程度。

1.1 延迟时间和嵌入维数

对时间序列进行混沌分析前,首先需要确定延迟时间与嵌入维数^[5],才能对所研究的时间序

列进行相空间重构,进而计算得到混沌定量指标。因此,计算混沌信号的 3 个定量指标时,选取合适的延迟时间与嵌入维数至关重要。

(1) 延迟时间

延迟时间通过互信息法确定,进行相空间重构。假设已知的时间序列为 X_1 , 根据组合信号 $\{X_1, X_2\}$, 可获得 X_2 的平均信息量, 即 $I\{X_1, X_2\}$, 也称之为 X_1 与 X_2 的互信息, 其表达式为:

$$I\{X_1, X_2\} = H(X_1) + H(X_2) - H\{X_1, X_2\} \quad (1)$$

其中, $H(X_1)$ 为时间序列 X_1 的信息熵; $H(X_2)$ 为时间序列 X_2 的信息熵; $H\{X_1, X_2\}$ 为联合熵。

(2) 嵌入维数

嵌入维数通过 G-P 算法计算关联维数 D , 由 Takens 定理 $m \geq 2D + 1$ 最终确定^[6]。通过 Takens 定理, 对一个时间序列为: $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行相空间重构, 则重构后的时间序列为:

$$Y = \{y_j | y_j = [x_j, x_{j+\tau}, \dots, x_{j+(m-1)\tau}]^T, j = 1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

其中, m 为嵌入维数; τ 为延迟时间; n 为相空间内时间序列的维数; $M = n - (m - 1)\tau$ 为相空间中的行数。

1.2 定量判别方法

(1) 关联维数

关联维数刻画了混沌吸引子的分形维数, 是判断系统是否存在混沌的重要指标。关联维数在相空间重构的基础上提出, 并采用 G-P 算法^[7]确定。

$$D_{GP} = \frac{\ln C_n(r)}{\ln r} \quad (3)$$

其中, r 为正数(充分小, 但不能太小); $\ln C_n(r)$ 为关联积分; D_{GP} 为关联维数。

当关联维数为分数维时, 说明系统具有混沌特性, 并且关联维数越大, 系统吸引子越复杂。

(2) Kolmogorov 熵

Kolmogorov 熵是用于度量系统非线性程度的重要特征量, K 熵值的大小可衡量系统的运动性质: 当 $K = 0$ 时, 系统为周期或规则运动; 当 $K = \infty$ 时, 则为随机运动; 当 $0 < K < \infty$ 时, 系统处于混沌状态, 且 K 值越大, 表示系统无序程度越强, 混沌程度越大。 K 熵的定义即为系统信息的平均损

失率,Kolmogorov 熵同样采用 G-P 算法确定^[8]。

$$K = \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n\tau} \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (4)$$

其中, r 为正数(充分小,但不能太小); τ 为延迟时间; n 为相空间内时间序列的维数; P_i 为联合概率; K 为 Kolmogorov 熵值。

(3) Lyapunov 指数

Lyapunov 指数可以定量地刻画初始相邻两条轨道随时间分离的敏感度。当非线性系统的 Lyapunov 指数大于零,表明该系统处于混沌状态。以延迟时间 τ 和嵌入维数 m 对时间序列进行相空间重构后,计算基本轨道上第 i 对最邻近点经过 j 个离散时间步长后的距离 $d_i(j)$ 。通过小数据量法^[9]获得离散时间 j 对应的 $\ln d_i(j)$ 的平均值 $\text{vas}(j)$ 。

$$\text{vas}(j) = \frac{1}{q\Delta t} \sum_{i=1}^q \ln d_i(j) \quad (5)$$

其中, Δt 为时间步长; q 是非零 $d_i(j)$ 的数目。

作出 $\text{vas}(j) - j$ 曲线图,利用最小二乘法获得回归直线,该直线的斜率为最大 Lyapunov 指数。

2 经典混沌信号作用下单自由度体系加速度响应混沌特性及影响因素分析

Chen's 吸引子^[10]是经典的混沌系统,如图 1 所示。以 Chen's 吸引子 X 相的混沌时间序列作

为激励信号,研究结构自振周期和激励幅值等参数对结构加速度响应混沌特性的影响。

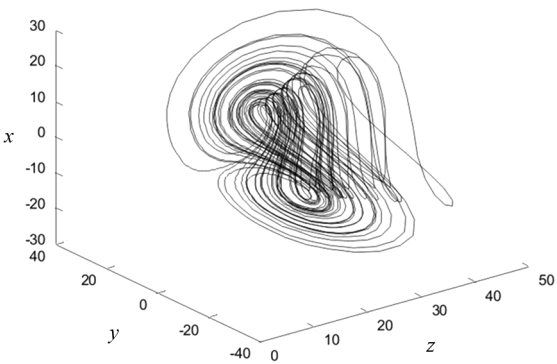


图 1 Chen's 系统吸引子
Fig.1 Chen's system attractor

以单自由度体系(SDOF)为对象,选用刚度退化三折线恢复力模型^[11]进行弹塑性时程分析,通过分析位移响应是否突破开裂位移和屈服位移来研究结构塑性发展过程。若结构位移响应穿越了开裂位移,表明结构进入了弹塑性阶段;若穿越了屈服位移,表明结构进入了屈服阶段。本文以试验为依据,设定开裂位移为 50 mm、屈服位移为 120 mm^[12]进行分析。

2.1 结构自振周期对结构响应混沌特性的影响
(1) 混沌特性判别

以加速度幅值为 2 m/s² 的 Chen's 信号为激励,分别输入到自振周期为 0.25、0.4、0.8、2 s 的 4 类结构中,结果如表 1 所示。

表 1 Chen's 信号作用下不同结构自振周期的加速度响应的混沌参数

Tab.1 Chaotic parameters of the acceleration response of the structure with different natural vibration cycles under the action of Chen's signals

| 激励幅值/ (m·s ⁻²) | 结构周期/ s | 延迟时间 τ | 嵌入维数 m | 关联维数 D | K 熵 | 最大 Lyapunov 指数 |
|-------------------------------|------------|----------------|-------------|-------------|---------|-------------------|
| 2 | 0.25 | 6 | 7 | 2.661 6 | 1.667 8 | 2.700 0 |
| | 0.40 | 9 | 8 | 3.343 2 | 1.083 9 | 1.896 7 |
| | 0.80 | 13 | 9 | 3.084 0 | 1.058 7 | 0.752 2 |
| | 2.00 | 14 | 11 | 4.531 9 | 1.228 8 | 1.037 5 |

根据表 1 显示,在经典混沌信号作用下,不同自振周期的结构,其加速度响应的关联维数为分数维, K 熵值为大于零的有限数,最大 Lyapunov

指数大于零。这表明,在经典混沌信号作用下,地震动经过结构的放大和滤波作用后,输出的结构加速度响应仍然保留了混沌特性。

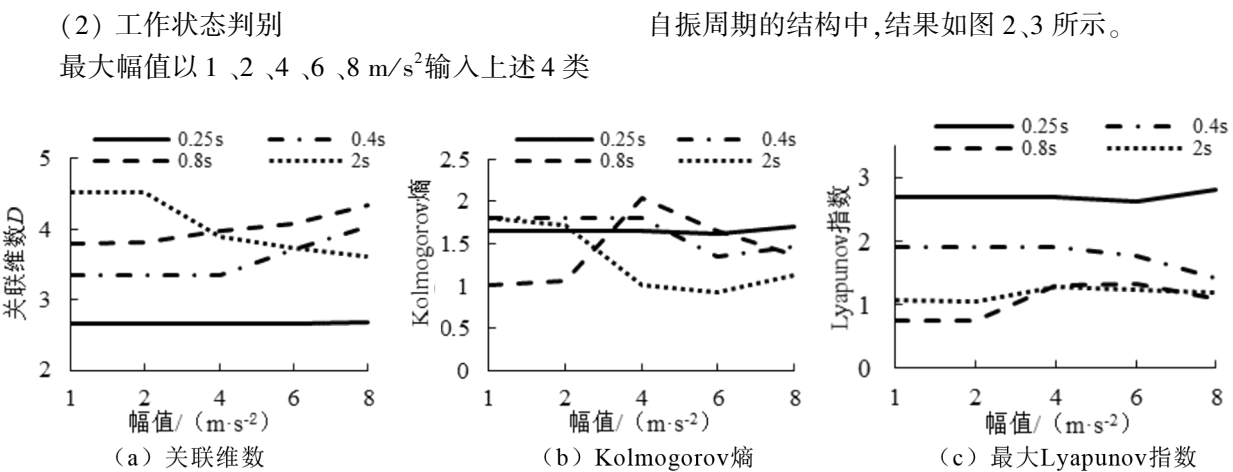


图 2 激励幅值与结构周期对加速度响应混沌参数的影响

Fig.2 Effects of excitation amplitude and structure period on the chaotic parameters of the acceleration response

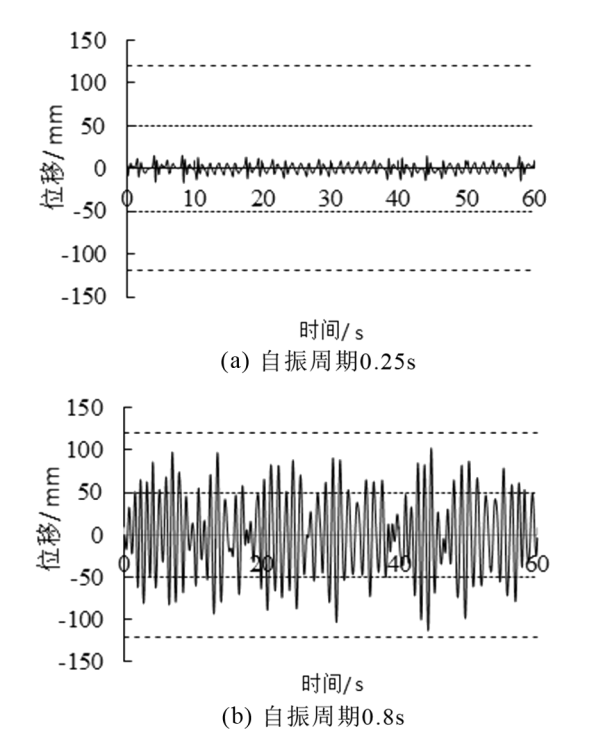


图 3 不同自振周期下结构响应的位移时程曲线图

Fig.3 Displacement-time curves of the structure's response under different periods of natural vibration

根据图 2、3 显示,当结构自振周期为 0.25 s 时,其加速度响应的关联维数、K 熵与 Lyapunov 指数的变化较小。表明该结构未进入弹塑性阶段;且其结构响应的位移时程曲线的最大位移值并未超越开裂位移,也表明结构未进入弹塑性阶

段。当结构自振周期超过 0.25 s 时,加速度响应的各个混沌参数的变化较为显著。表明该结构进入弹塑性阶段;且其相应的位移时程曲线的最大位移值超越了开裂位移,表明结构进入了弹塑性阶段。说明通过混沌参数的变化程度可以判断结构所处的状态。因此,在判别结构损伤状态或健康监测时,可通过混沌参数的变化程度判断结构是否进入了弹塑性状态。

2.2 激励幅值对结构响应混沌特性的影响

由上可知,当结构自振周期超过 0.25 s 时,加速度响应混沌参数的变化表现得较为显著。选用自振周期为 0.8 s 的结构研究,分别计算最大幅值为 1、2、4、6、8 m/s^2 的结构响应,结果如表 2 和图 4 所示。

根据表 2 和图 4 显示:

1) 在 Chen's 信号作用下,结构加速度响应的关联维数为分数维,K 熵值为大于零的有限数,最大 Lyapunov 指数大于零,表明仍然保留了混沌特征。

2) 当荷载为 1~2 m/s^2 时,其加速度响应的关联维数、K 熵与 Lyapunov 指数变化较小;当荷载幅值超过 2 m/s^2 时,其加速度响应的各个混沌参数变化较为显著。这表明,激励为小幅值时,混沌参数变化较小,结构基本处于弹性阶段;激励为较大幅值时,混沌参数变化较大,结构进入弹塑性阶段。

表 2 Chen's 信号的不同幅值激励下结构加速度响应的混沌参数

Tab.2 Chaotic parameters of the acceleration response of the structure excited by different amplitudes of Chen's signals

| 结构周期/ s | 激励幅值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) | 延迟时间 τ | 嵌入维数 m | 关联维数 D | K 熵 | 最大 Lyapunov 指数 |
|------------|---|----------------|-------------|-------------|---------|-------------------|
| 0.8 | 1 | 13 | 9 | 3.783 8 | 1.017 9 | 0.758 8 |
| | 2 | 13 | 9 | 3.804 0 | 1.058 7 | 0.752 2 |
| | 4 | 9 | 9 | 3.976 4 | 2.046 5 | 1.296 2 |
| | 6 | 10 | 10 | 4.083 9 | 1.647 8 | 1.322 1 |
| | 8 | 16 | 10 | 4.337 0 | 2.366 0 | 1.088 9 |

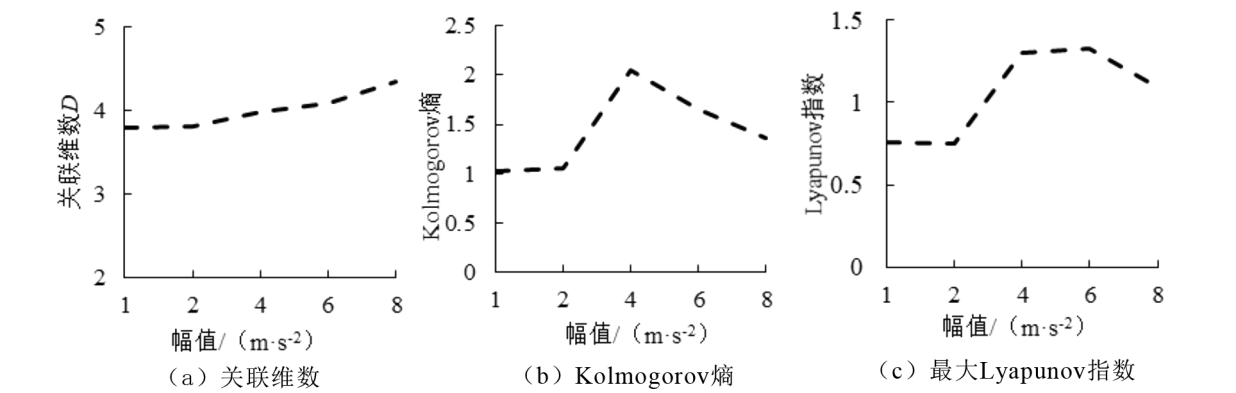


图 4 激励幅值与结构周期对加速度响应混沌参数的影响

Fig.4 Effects of excitation amplitude and structure period on the chaotic parameters of the acceleration response

3 地震动作用下结构响应的混沌特性分析

为研究地震动作用下结构加速度响应混沌参数与经典混沌信号激励下是否具有相同的规律,本文从太平洋地震中心选取了 3 种不同类型的地震动,其中两条近场脉冲型地震动为 TCU130 和 TCU120,两条远场类谐和地震动为 CHY093 和 ILA048,两条普通地震动为 Northridge 和 San Fernando。

3.1 地震动类型对结构响应混沌特性的影响

以近场脉冲型地震动、远场类谐和地震动和普通地震动为激励。为排除地震动要素对计算结果产生影响,将上述 6 条地震动的最大加速度幅值统一调整为 2 m/s^2 ,采样频率调整为 50 Hz,分别输入到自振周期为 0.8 s 的结构中。经弹塑性时程分析,计算 6 条地震动作用下结构加速度响应混沌参数,结果如表 3 所示。

表 3 不同类型的地震动结构加速度响应的混沌参数

Tab.3 Chaotic parameters of the acceleration response of the structure with different types of ground motions

| 地震动类型 | 台站 | 延迟时间 τ | 嵌入维数 m | 关联维数 D | K 熵 | 最大 Lyapunov 指数 |
|----------|--------------|----------------|-------------|-------------|---------|-------------------|
| 近场脉冲型地震动 | TCU103 | 20 | 7 | 2.695 1 | 0.404 5 | 0.832 6 |
| | TCU120 | 14 | 7 | 2.978 9 | 0.703 2 | 0.765 1 |
| 远场类谐和地震动 | CHY093 | 15 | 3 | 0.593 0 | 0.110 0 | 0.309 0 |
| | ILA048 | 24 | 3 | 0.509 4 | 0.044 5 | 0.614 0 |
| 普通地震动 | Northridge | 8 | 9 | 2.672 8 | 1.860 7 | 0.553 6 |
| | San Fernando | 10 | 3 | 0.961 9 | 0.132 3 | 0.138 1 |

表 3 表明:

1) 在地震动作用下,其加速度响应的关联维数为分数, K 熵值为大于零的有限数, 最大 Lyapunov 指数大于零,表明仍保留着混沌特性。

2) 远场类谐和地震动作用下,其加速度响应的关联维数和 K 值较小,表明远场类谐和地震动下的加速度响应混沌程度较小。而近场脉冲型地震动作用下,其加速度响应的关联维数和 K 值在

三者之中都较大,表明近场脉冲型地震动作用下响应的混沌程度较为显著。说明不同类型的地震动作用下,其结构加速度响应的混沌特性保留程度不同。

3.2 地震动幅值对结构响应混沌特性的影响

分别调整上述 3 种类型地震动的最大幅值,计算其加速度响应的混沌参数,结果如图 5-7 所示。

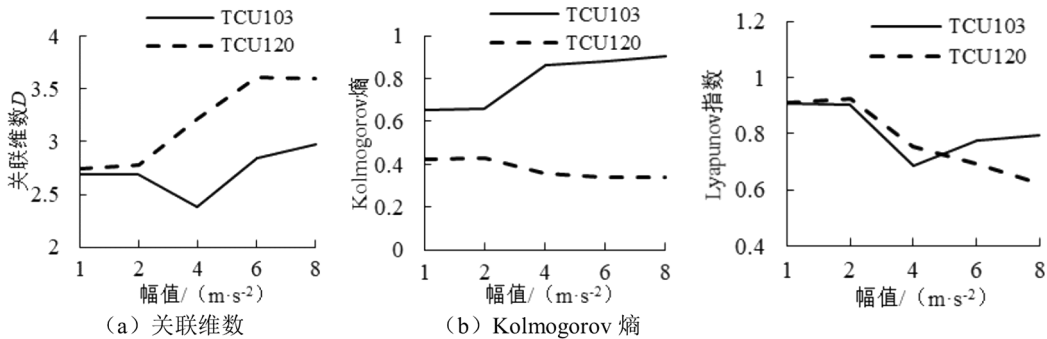


图 5 近场脉冲型地震动作用下幅值对结构响应混沌参数的影响

Fig.5 Effects of amplitudes on chaotic parameters of the structure's acceleration response under the action of near-field impulsive ground motions

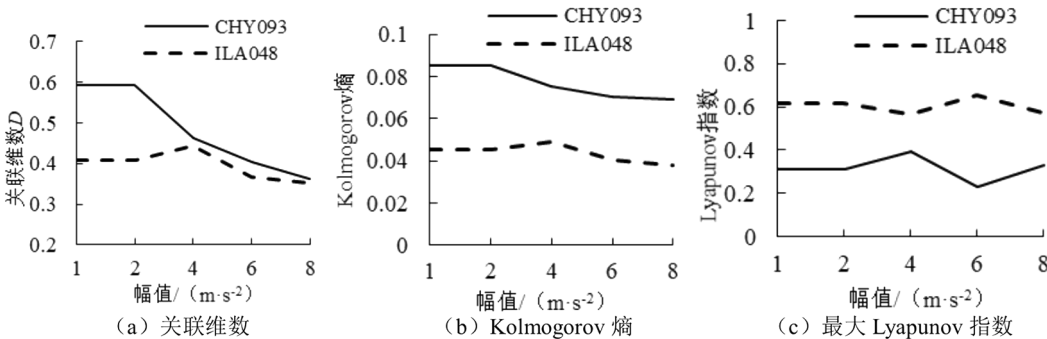


图 6 远场类谐和地震动作用下幅值对结构响应混沌参数的影响

Fig.6 Effects of amplitudes on chaotic parameters of the structure's acceleration response under the action of far-field harmonic-alike ground motions

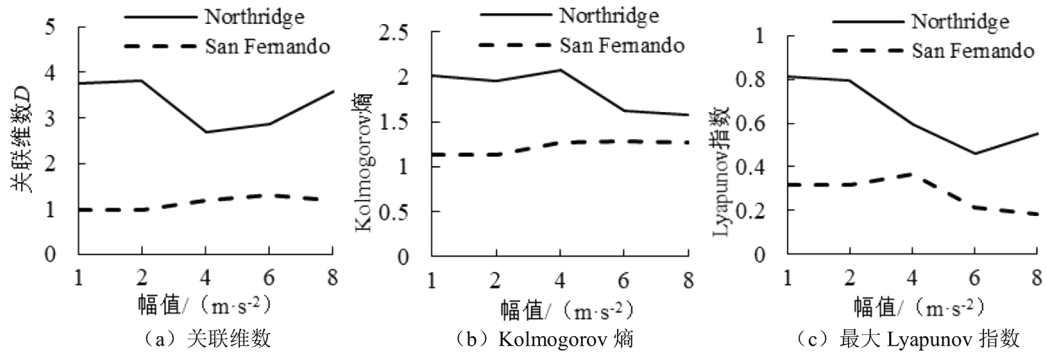


图 7 普通地震动作用下幅值对结构响应混沌参数的影响

Fig.7 Effects of amplitudes on chaotic parameters of the structure's acceleration response under the action of ordinary ground motions

图 5-7 表明:

1) 3 种类型的地震动最大幅值为 $1 \sim 2 \text{ m/s}^2$ 时,其加速度响应的混沌指标均变化较小,表明结构尚处于弹性状态;幅值超过 2 m/s^2 时,其指标变化较为显著,表明结构进入弹塑性状态。

2) 近场脉冲型地震动和普通地震动作用下,其加速度响应的混沌指标随着幅值的变化没有呈现出明显的规律,与经典混沌信号激励下的加速度响应的混沌特性相似。

3) 远场类谐和地震动作用下,随着外荷载幅值的增大,其加速度响应的关联维数和 K 熵值均呈减小趋势,而对最大 Lyapunov 指数的影响较小,表明混沌程度减小。

4 结语

1) 在经典混沌信号和地震动作用下,结构加

速度响应仍然保留了混沌特征。通过混沌参数的变化程度可以判断结构是否进入了弹塑性状态。当混沌参数变化较小时,表明结构处于弹性状态;当混沌指标变化较为显著时,表明结构进入弹塑性状态。

2) 较小周期和较小幅值时,对结构加速度响应的混沌特性影响较小;较大周期和较大幅值时,对结构加速度响应的混沌特性影响较为显著。

3) 不同地震动类型作用下,其结构加速度响应的混沌特性的保留程度也不同;远场类谐和地震动作用下的结构响应混沌程度较小;而近场脉冲型地震动结构响应的混沌程度更为显著。

参考文献:

- [1] 杨丕鑫, 杨迪雄. 单自由度体系地震动力响应的混沌特性分析[J]. 计算力学学报, 2010, 27 (5): 834-838, 844.
- [2] 杜喜朋, 吴琛, 项洪, 等. 地震动混沌特性判别及影响因素分析[J]. 福建工程学院学报, 2018, 16 (3): 236-241.
- [3] 韩敏. 混沌时间序列预测理论与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [4] 杨丕鑫. 近断层地震动和单自由度体系地震动力响应的混沌特性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [5] 杨迪雄, 杨丕鑫. 强震地面运动的混沌特性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29 (3): 252-260.
- [6] 杜喜朋. 基于混沌理论的结构地震动力响应分析及损伤研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2018.
- [7] 付强, 李晨溪, 张朝曦. 关于 G-P 算法计算混沌关联维的讨论[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15 (3): 275-282.
- [8] 胡雪兰. 三维自治混沌系统的分析、同步与电路实现[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [9] 张挺. 基于混沌理论检测微弱地震信号方法的探讨[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [10] 陆君安, 吕金虎, 陈士华. Chen's 混沌吸引子及其特征量[J]. 控制理论与应用, 2002 (2): 308-310.
- [11] 陈予恕, 唐云. 非线性动力学中的现代分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [12] 项洪. 基于 Hilbert-Huang 变换的长周期结构地震响应规律与破坏机理研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2016.

(责任编辑: 陈雯)