

基于地震动力响应的结构自振周期段划分

王利淳^{1,2}, 来庆辉^{3,*}

1. 中国地震局工程力学研究所, 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨, 150080
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨, 150080
3. 温州理工学院, 建筑与能源工程学院, 温州市韧性城市生命线工程智慧防护应急技术重点实验室, 浙江 温州, 325035

摘要: 本文针对结构抗震分析中自振周期划分方法精度不足的问题, 基于非线性动力响应特征开展结构周期精细化分类研究。采用修正的Clough双折线滞回模型模拟结构在地震作用下的力学行为, 并选取PEER NGA-WEST2数据库中5535条地震动记录作为输入, 计算0~10 s范围内200个离散周期点的最大位移响应, 形成周期-响应矩阵。对不同场地类型下的响应数据进行聚类分析, 并引入标准化模糊误差与Calinski-Harabasz指数作为评价指标, 以确定最优分类数量及周期划分边界。研究表明, 当分类数量取5时, 能够较好地反映结构动力响应差异特征。通过分析得到不同场地条件下的周期分段范围及对应聚类中心, 揭示了周期划分随场地条件变化的规律。本文的研究方法在数据规模与非线性响应刻画方面具有明显优势, 可为结构抗震设计及地震动选取提供更具针对性的参考依据。

关键词: 结构自振周期; 非线性动力响应; 周期划分; 聚类分析

A Study on Refined Classification of Structural Natural Vibration Period Based on Seismic Dynamic Response

Lichun Wang^{1,2}, Qinghui Lai^{3,*}

1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Heilongjiang, Harbin, 150080, China
2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Heilongjiang, Harbin, 150080, China
3. Wenzhou Key Laboratory of Intelligent Lifeline Protection and Emergency Technology for Resilient City, College of Architecture and Energy Engineering, Wenzhou University of Technology, Zhejiang, Wenzhou, 325035, China

Abstract: Aiming at the problem of insufficient accuracy in the natural vibration period classification method for structural seismic analysis, this paper carries out a refined classification study on structural periods on the basis of nonlinear dynamic response characteristics. A modified Clough bilinear hysteretic model is employed to simulate the mechanical behavior of structures subjected to seismic excitation, and 5535 ground motion records from the PEER NGA-WEST2 database are selected as input. The maximum displacement responses at 200 discrete period points within the 0-10 s range are calculated to construct a period-response matrix. Cluster analysis is implemented on the response data corresponding to different site types, and standardized fuzzy error as well as the Calinski-Harabasz index are introduced as evaluation metrics to determine the optimal number of classifications and period division boundaries. The results demonstrate that setting the number of

classifications to 5 can effectively characterize the differential features of structural dynamic responses. The period segment ranges and corresponding cluster centers under various site conditions are derived via analysis, revealing the variation pattern of period division with site conditions. The proposed research method exhibits prominent advantages in data volume and nonlinear response depiction, and can provide more targeted references for structural seismic design and ground motion selection.

Keywords: Natural vibration period of structures; Nonlinear dynamic response; Period division; Cluster analysis

在结构抗震研究中,工程结构类型丰富多样,不同结构在地震影响下会表现出差异明显的动力反应特性。研究表明,结构在地震作用下的动力反应与其自振周期密切相关^[1-5],且周期接近的结构在潜在破坏能力方面往往具有较强的一致性^[1]。因此,按照自振周期对结构实施合理分类,是开展地震破坏程度精细评估的重要方法之一^[6,7]。

针对结构周期区间的划分,谢礼立等^[2]将周期范围分为短、中、长三段,并分别提出各区间对应的最不利地震动;Malhotra^[4]利用地震动参数与加速度反应谱之间的相关关系实现了周期区段划分;Xu^[8]在地震动反应谱的基础上,采用最小变异系数法确定不同结构对应的周期范围;来庆辉等^[9]基于改进三联谱理论,将结构划分为刚性、刚柔性和柔性三个周期区段;Hu等^[10]依据相邻周期相对输入能量相关系数,对周期范围进行了划分;Lai等^[11]利用改进的Newmark-Hall谱法完成RC框架结构的短、中、长三类周期段划分。然而,这些研究采用的地震动记录数量通常较少,使得划分结果的普适性和可靠性受到一定限制;同时,多数研究是在弹性假定基础上开展的,其划分结果难以直接适用于非线性抗震设计情形。

在此基础上,本文建立了非线性单自由度体系的数值模型,计算了0~10s周期范围内200个周期点的结构最大位移响应,构建出周期—响应矩阵;进一步采用Gustafson-Kessel聚类算法对其进行分析,通过标准化模糊误差(NFE)与Calinski-Harabasz(CH)指数,确定最优的周期段划分数量及各区段边界阈值。

1 模型与方法

1.1 模型简介

本文采用OpenSees对单自由度非线性结构进行建模分析,利用Hysteretic材料构建零长度单元,采用Newton-Newmark迭代法。Hysteretic材料能够较为有效地模拟结构在地震作用后出现的强度退化、刚度退化以及滞回捏缩现象^[12]。本文建立的修正Clough双折线模型相关参数见表1。

表1 修正的Clough双折线模型参数

Table 1 Parameters of the Modified Clough Bilinear Model					
模型	u_y	f_y	α_s	$pinch X$	$pinch Y$
修正的Clough双折线模型	1	1	0.02	1.0	1.0

其中, u_y 为屈服位移, f_y 为屈服荷载, α_s 为结构软化阶段与弹性阶段刚度之比。 $Pinch X$ 控制位移方向的滞回捏缩效应, $pinch Y$ 控制力方向的捏缩特征。

模型滞回曲线如图1所示。由图可见,结构屈服并进入塑性阶段后,随着加载循环不断进行,其加载刚度会逐步减小,本文据此对钢筋混凝土结构的性能进行模拟。

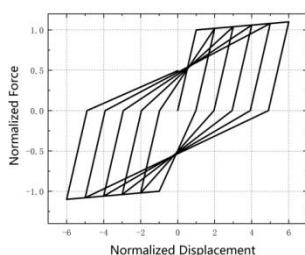


图1 修正的 Clough 双折线模型滞回曲线

Fig. 1 Hysteretic curve of the modified clough bilinear model

将计算周期范围设定为 0~10 s, 以 0.05 s 为步长进行划分。后续的计算分析工作提供数据基础。

1.2 地震动选择

本研究选取太平洋地震工程研究中心 (PEER) NGA-WEST2 数据库内水平加速度超过 50 gal 的 5535 条地震动记录开展计算工作, 依据吕红山等^[13]人适配我国场地类型的反应谱放大系数相关研究成果, 对地震动按照我国场地类别进行划分, 最终分类结果为: 一类场地 1168 条, 二类场地 3381 条, 三类场地 942 条, 四类场地 44 条。

1.3 研究方法

将 PEER 数据库中的 5535 条地震动数据作为输入, 依托建立的修正 Clough 双折线模型开展动力响应计算, 求解结构的最大位移响应结果。各类场地条件下各周期节点对应的结构最大位移可构成一组响应向量, 每类场地均能求解得到一组周期-响应矩阵, 针对四类场地类别, 分别对各类场地所得的周期-响应矩阵实施聚类分析。

1.4 Gustafson-Kessel 聚类算法

本文选用 Gustafson-Kessel (GK) 聚类算法开展研究^[14, 15]。该方法在模糊聚类框架下引入自适应距离度量, 首先设定聚类数、隶属度指数、迭代上限及终止准则; 初始化隶属度矩阵并计算初始聚类中心与协方差矩阵; 随后基于自适应距离更新隶属度矩阵; 判断终止条件, 若满足则输出结果, 否则继续迭代。该方法的目标是最小化样本到各簇中心的加权马氏距离平方和, 其目标函数如式 1 所示:

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m D_{ik}^2 \quad (1)$$

式中 J 为算法的目标函数, n 是样本数量, c 是预设的最大聚类数量, k 表示第 k 样本, i 表示第几个类别, u_{ik} 表示第样本 k 对类别 i 的隶属度, d_{ik} 表示样本 k 到聚类中心 i 的距离。

1.5 聚类评估指标

标准化模糊误差 (NFE) 为 Gustafson-Kessel 聚类的模糊加权簇内紧致性与全局离散性的比值, 可实现聚类效果的归一化评价, 其具体公式如式 2 所示:

$$NFE = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m D_{ik, A_i}^2}{\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m \tilde{D}_{ik, A_i}^2} \quad (2)$$

式中 $\tilde{D}_{ik,A}^2$ 表示样本 k 到全局均值的距离，其他变量意义与公式 (1) 中一致。标准化模糊误差的数值越低，代表样本在各聚类内部的分布更为紧凑，模糊隶属度的划分也更为合理，聚类内部的相似性也更高。

CH 指数是一类依据方差比准则构建的聚类有效性评价指标，可适用于多种聚类算法，其计算表达式如式 3 所示：

$$CH = \frac{\sum_{k=1}^K |G_k| (c_k - c)^T (c_k - c)}{\sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in G_k} (x_i - c_k)^T (x_i - c_k)} \frac{n - K}{K - 1} \quad (3)$$

其中， K 是聚类的数量， G_k 表示第 K 个聚类， x_i 是聚类 G_k 中的第 i 个样本； c_k 是聚类 G_k 内所有样本的均值； c 为整个待聚类数据集的均值， n 是待聚类的样本总数。对不同聚类数计算 CH 指数，CH 指数最大值对应的通常为最优聚类数。

2 结果与分析

2.1 聚类评估指标计算结果

将计算所得的周期-响应矩阵进行聚类分析得到的聚类数量与标准化模糊误差以及其下降量的关系如图 2 所示。从图可以看出，随着聚类数量的增加，各场地类型下的标准化模糊误差 (NFE) 均呈现逐渐减小趋势，但下降幅度在聚类数达到 5 后明显减缓，说明继续增加聚类数对误差改善的贡献有限。

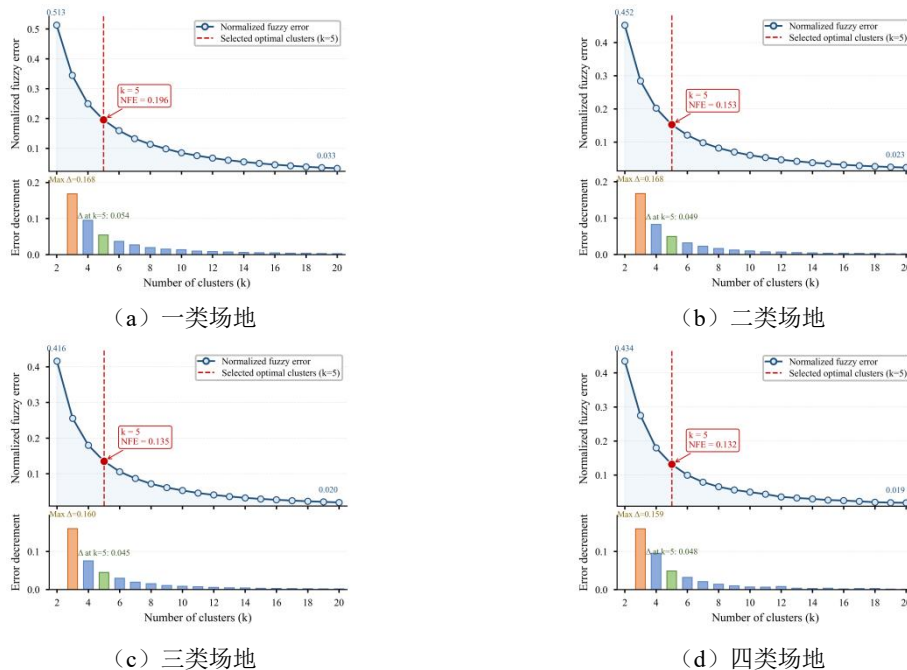


图 2 不同场地类型下聚类数量与标准化模糊误差及误差下降量关系

Fig. 2 Relationship between cluster number and normalized fuzzy error and its reduction under different site conditions

聚类分析得到的聚类数量与 CH 指数的关系如图所示：

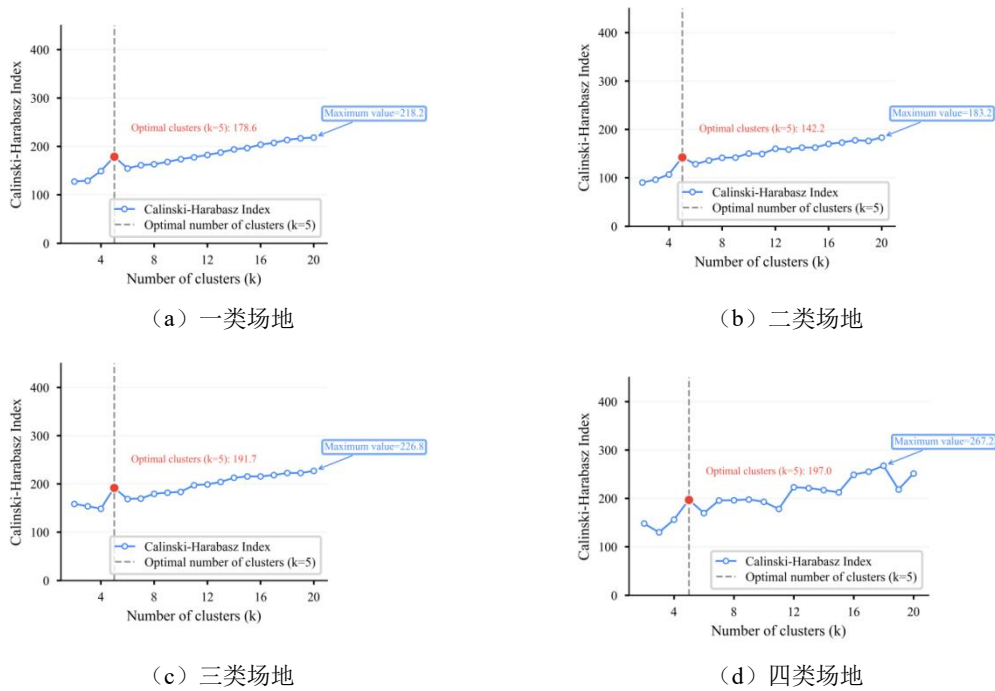


图 3 不同场地类型下聚类数量与 CH 指数关系

Fig. 3 Relationship between cluster number and Calinski-Harabasz index under different site conditions

结合 CH 指数分析结果，可以进一步验证，当聚类数取 5 时，各场地类型均表现出较好的类间分离性与类内紧凑性。且与 CH 指数的最大值相差均在合理的范围内。因此，本文最终确定在四种场地类型下的最优聚类数量均为 5。

2.2 周期划分结果

聚类数量为 5 时四种场地类型下的划分结果如表 2 所示。

表 2 不同场地类型下结构周期划分结果

Table 2 Period classification results under different site conditions

	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段
一类场地	0.05 ~ 0.55 s	0.60 ~ 1.90 s	1.95 ~ 3.95 s	4.00 ~ 6.50 s	6.55 ~ 10.00 s
二类场地	0.05 ~ 0.60 s	0.65 ~ 2.00 s	2.05 ~ 3.95 s	4.00 ~ 6.60 s	6.65 ~ 10.00 s
三类场地	0.05 ~ 0.60 s	0.65 ~ 2.05 s	2.10 ~ 4.10 s	4.15 ~ 6.85 s	6.90 ~ 10.00 s
四类场地	0.05 ~ 0.70 s	0.75 ~ 2.45 s	2.50 ~ 4.50 s	4.55 ~ 7.55 s	7.60 ~ 10.00 s

聚类数量为 5 时四种场地类型下每一段的聚类中心（保留四位小数）如表 3 所示：

表 3 不同场地类型下结构周期划分聚类中心

Table 3 Clustering centers for structural period classification under different site types

	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段
一类场地	0.3228 s	1.3039 s	2.9578 s	5.2437 s	8.3000 s
二类场地	0.4129 s	1.4504 s	3.0200 s	5.3112 s	8.2958 s
三类场地	0.4150 s	1.4339 s	3.1580 s	5.5766 s	8.3606 s
四类场地	0.3553 s	1.7714 s	3.5753 s	5.9990 s	8.6528 s

3 讨论

本文从非线性动力响应角度对结构自振周期划分进行了分析。结果表明，将 0 ~ 10 s 周期范围划分为五个区间较为合理：首先，NFE 在聚类数增加时持续降低，但当聚类数达到 5 后下降趋缓，说明继续细分对误差改善有限；其次，CH 指数结果也表明五类划分具有较好的类内紧凑性和类间分离

性。因此,五段式划分既能较充分地反映不同周期结构的响应差异,又避免了分类过细带来的工程应用复杂性。

不同场地类型下的周期分段结果显示,场地条件会明显影响周期边界。随着场地由一类向四类变软,各周期段边界整体向长周期方向移动,尤其在中长周期范围内更为明显。聚类中心的变化也说明,一类至三类场地的分段规律相对接近,而四类场地中长周期段的聚类中心明显增大,表明软弱场地对中长周期结构动力响应的影响更突出。因此,在抗震设计和地震动选取中,应结合场地类别确定周期区间,不能简单采用统一划分标准。

本文采用 5535 条地震动记录,并结合修正 Clough 双折线滞回模型进行非线性响应分析,相比基于少量记录或弹性假定的研究,结果具有更好的统计基础和工程参考价值。但本文仍以单自由度体系为对象,模型参数和滞回规则也会对结果产生影响,且四类场地记录数量较少,可能影响该类场地结果的稳定性。后续可进一步引入多自由度结构、更多结构类型和更丰富的本构模型,对周期划分结果进行验证和完善。

4 结论

(1) 基于修正 Clough 双折线滞回模型的非线性动力响应计算,通过 Gustafson-Kessel 聚类算法分析与 *NFE*、*CH* 指数验证,将 0~10 s 结构自振周期划分为 5 段。

(2) 不同场地类型的结构自振周期分段边界、聚类中心存在明显差异,周期划分随场地类别变软向长周期方向偏移,该精细化划分结果可为结构抗震设计与地震动选取提供支撑。

参考文献

- [1] Lai Q, Hu J, Xie L. The Effect of the Yield Strength Coefficient and Natural Vibration Period on the Damage Potential Ranking of Ground Motions[J]. Applied Sciences, 2022, 13(1): 392.
- [2] 谢礼立, 翟长海. 最不利设计地震动研究[J]. 地震学报, 2003, (3): 250-261.
- [3] Yu L, Sheng M, Feng H, et al. Seismic Response Analysis of Steel Structure Isolation System Under Long-Period Seismic Motion[J]. Journal of Architectural Research and Development, 2024, 8(3): 147-155.
- [4] Malhotra P. Smooth Spectra of Horizontal and Vertical Ground Motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(2): 507-518.
- [5] 谢礼立, 来庆辉, 胡进军. 工程结构抗震设计地震动排序研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(8): 157-166.
- [6] 谢礼立, 胡进军, 来庆辉. 强地震动按破坏强度的排序研究[M]. 北京: 科学出版社, 2025.3.
- [7] 高鹏林, 龚凌云, 王国旭, 等. 非线性周期结构动力学与波动调控研究进展[J]. 力学进展, 2025, 55(3): 567-641.
- [8] Xu L, Zhao G, Liu Q. Consecutive combined response spectrum[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(4): 623-636.
- [9] 来庆辉. 强地震动按破坏强度的排序研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021: 103-117.
- [10] Hu J, Lai Q, Li S, et al. Procedure for Ranking Ground Motion Records Based on the Destructive Capacity Parameter[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(1): 197-207.
- [11] Lai Q, Hu J, Xie L, et al. A novel method for selecting input ground motions in seismic design based on probability[J]. Structures, 2024, 61: 106133.
- [12] 孔令峰. 地震动持时对结构地震反应影响[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019.
- [13] 吕红山, 赵凤新. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 2007, 29(1): 67-76.
- [14] Chaomurilige, Yu J, Yang M. Deterministic annealing Gustafson-Kessel fuzzy clustering algorithm[J]. Information Sciences, 2017, 417: 435-453.
- [15] Krishnapuram R, Keller J. A possibilistic approach to clustering[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1993, 1(2):

98-110.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52408535); 湖北省自然科学基金面上项目(2024AFB971)。

¹ **第1作者简介:** 王利淳(2000-), 男, 硕士在读, 研究方向: 地震响应与结构周期分段。E-mail: wanglichun2022@163.com。

* **通讯作者简介:** 来庆辉(1992-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 结构抗震, 智能建造。E-mail: 18845117968@163.com。