

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240312002

考虑时域和频域特征的图片时序数据解析方法*

——以地震动数据为例

程庆乐¹, 任昊天¹, 田源², 陆新征³, 李爱群¹

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京科技大学城镇化与城市安全研究院, 北京 100083;
3. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 时序数据对于理解和应对地震等自然灾害具有重要意义,但由于保密、获取途径的限制等原因,需要从时域、频域数据的图片中获取时序数据。传统方式下通过直接对图片中时序数据数字化得到的时序数据在时域和频域上均存在较大误差。针对该问题,提出了考虑时域和频域特征的图片时序数据解析方法。该方法首先从图片中通过数字化方法获取时域和频域数据,以识别得到的较为准确的频域数据曲线作为目标频域数据,采用连续小波变换修正从图片中直接识别得到的时序数据,从而提高图片时序数据的解析精度。以地震动这一典型时序数据为例对所提出的方法进行了展示与说明,并与传统直接从图片识别的数字化地震动方法和基于反应谱匹配的频域方法进行了对比。进一步将该方法应用于2022年台湾省台东县6.5级地震的破坏力评估中。主要结论有:提出的图片时序数据解析方法能够兼顾图片中时域和频域的信息,从而能够解析得到更为准确的时域数据,用于后续工程防灾分析时的误差也更小,为从时序数据图片中识别数据提供了重要方法。

关键词: 强震动记录; 图片时序数据解析; 连续小波变换; 反应谱; 时频域

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0110-09

Image Time-series Data Analysis Method Considering Time and Frequency Domain Characteristics: A Case Study of Ground Motion Data

CHENG Qingle¹, REN Haotian¹, TIAN Yuan², LU Xinzheng³, LI Aiqun¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Research Institute of Urbanization and Urban Safety, School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Time-series data is crucial for understanding and responding to natural disasters such as earthquakes. However, due to confidentiality, access restrictions, and other reasons, time-series data are often extracted from images containing time and frequency domain data. Traditional methods of di-

* 收稿日期:2024-03-12;修回日期:2024-05-31

基金项目:国家自然科学基金(52308478)资助

作者简介:程庆乐(1994—),男,副研究员,博士。主要从事城市与复杂工程安全与防灾减灾研究。

E-mail: chengql94@163.com

通信作者:田源(1991—),男,副教授,博士。主要从事城市与复杂工程安全与防灾减灾研究。E-mail: ytian@ustb.edu.cn

rectly digitizing time-series data from these images tend to have significant errors in both the time and the frequency domains. To address this issue, an image time-series data analysis method with the inclusion of time and frequency domain characteristics was proposed. First, the time and frequency domain data were extracted from the images using digital method, with the more accurate frequency domain data curve identified as the target frequency domain data. Continuous wavelet transform was then used to correct the time-series data directly extracted from the images, so as to improve the accuracy of the time-series data analysis. The proposed method was demonstrated and explained using the typical time-series data of ground motion as an example. A comparison was made with the traditional method of digitizing earthquake motion directly from images and frequency domain method based on response spectrum matching. Furthermore, the method was applied to the damage assessment of the 6.5-magnitude earthquake in Taitung County, Taiwan Province in 2022. The primary conclusions are as follows: the proposed image time-series data analysis method can take into account both the time and frequency domain information, allowing for more accurate extraction of time domain data. This results in smaller errors when used in subsequent engineering disaster prevention analysis, providing an important method for data identification from time-series images.

Keywords: strong ground motion record; image time-series data analysis; continuous wavelet transform; response spectrum; time and frequency domains

0 引言

时序数据在医疗、工业制造、电力能源、工程等领域有着广泛应用。例如,在地震工程领域,强震动数据是一种典型的时序数据^[1-3],一般为地震中记录到的地面加速度。强震动数据的观测被视为地震工程学科的四大支柱之一^[4-6],所测的强震动记录是研究地震发生机理、震源特征、震源机制等的重要基础数据,也是地震工程设计和评估中的重要数据,是地震研究和地震工程领域中不可或缺的数据来源,对于理解和应对地震灾害具有重要意义^[7-9]。但是,由于某些原因,研究人员只能获取到时序数据在时域和频域的图片数据。例如,以强震动记录为例,对于一些年代比较久远的强震动记录,只保存强震动记录时程和反应谱图片;或者出于保密等原因,无法获取到强震动的原始数据记录,亦或者是论文、报告中的强震动记录。此时获取时序数据的方法主要有两种:(1)直接从图片中解析数据;(2)通过频域解析的数据再构造时序数据。

(1) 直接从图片中解析数据。该方法直接对图片进行数字化,是获取时序数据的最基本也是最常用的方法(后文将该方法处理得到的数据统一称为“数字化时序数据”),该方法一般通过目视判别或

者对图片中像素进行识别来得到时序数据曲线上每个数据点的时间和纵坐标。但该方法面临难以兼顾时域和频域特征的挑战。例如,对于强震动数据,由于强震动时程数据的特殊性,即时间步长很小且数据变化大,对于强震动时程图片的识别准确率很低,以至于识别出的强震动记录的反应谱距离真实反应谱存在很大误差,如图1所示。

(2) 通过频域解析的数据再构造时序数据。由于时域数据在频域的特征(如傅里叶谱、功率谱、强震动的反应谱等)相对时程数据更为光滑,识别的准确率可以很高,因此,可以先从频域图片中解析出频域数据,再根据频域数据构造时序数据。以强震动的频域数据反应谱为例,目前,根据频域反应谱生成强震动时程的方法主要有三类^[10]:①频域的方法;②基于小波的方法;③基于连续小波变换的方法。其中,频域的方法的典型代表为SIMQKE^[11],该方法通过调整随机过程的频域成分,直到达到和目标反应谱匹配的水平,应用该方法的典型软件如SeismoArtif^[12]。基于小波的方法主要通过添加小波来调整种子记录的时域信息^[13],应用该方法的典型软件如SeismoMatch^[14]。而基于连续小波变换的方法主要是在时频域对种子记录进行修正^[15-16]。

上述方法为解析时序数据提供了基础,其中,

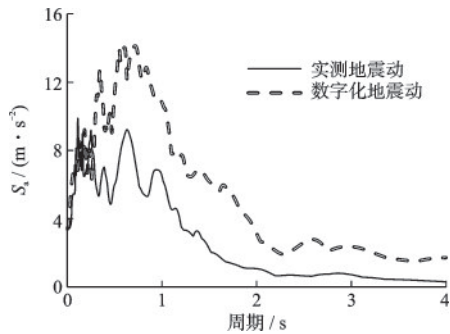


图1 数字化地震动时序数据反应谱与真实反应谱对比 (20220316 日本福岛 7.7 级地震中 MYG016 台站 EW 方向记录)

Fig.1 Comparison between response spectrum of digitized ground motion time-series data and actual response spectrum (Records from MYG016 station in the EW direction during 7.7-magnitude earthquake in Fukushima, Japan, on March 16, 2022)

由于基于连续小波变换的方法能够综合考虑时序数据在时域和频域的信息,因此该方法为从时序图片中解析数据提供了新思路,将有望综合考虑时序数据的时域和频域特征,解决图片时序数据解析精度低的难题。综上,本文基于连续小波变换,提出了考虑时域和频域特征的图片时序数据解析方法。本文的第一节将对所提出的方法进行详细介绍;第二节将以强震动这一典型时序数据为例,对所提出方法进行说明和讨论,并与传统直接从图片识别的数字化地震动方法和基于反应谱匹配的频域方法进行了对比,以说明本文方法的优势;第三小节将该方法应用于实际地震的强震动记录破坏力评估中;论文的第四节将介绍主要结论。

1 方法框架

为了从图片中提取时序数据,本文提出了一种考虑时域和频域特征的图片时序数据解析方法,该方法的框架如图 2 所示,运用该方法得到的时序数据后文统一称为“解析数据”,该方法主要包括以下三步:

步骤 1:对时序数据图片进行数字化,得到数字化时序数据和频域数据记录,将频域数据记录作为连续小波变化输入的目标频域数据。

对时序的时域数据和频域数据图片进行预处理和二值化,预处理可以去掉如图例、坐标轴名称等干扰项,可通过设定阈值将距离边界的数据直接删除;然后,确定时间轴和纵轴的最大和最小值,建立图片像素坐标和数据坐标的映射关系,通过映射关系确定每个曲线像素点对应的数值,从而得到数字化的时序数据和频域数据,其中,频域数据一般可以直接作为后续连续小波变换的目标频域数据;

步骤 2:处理数字化时域数据得到种子时域数据。

为服务于后续连续小波变换,需要对数字化的时域数据进行处理。首先,一个实际数据点会用多个像素来表示,所以会存在一个 x 数据对应多个 y 数据的情况,此时需要先去掉均值加减标准差外的数据点,然后取均值即可;然后,对处理的时域数据按照等间距进行插值采样,采样频率可取 100 Hz 或 200 Hz,将处理后的时域数据作为连续小波变化输入的种子时域数据,即待修正的时域数据;

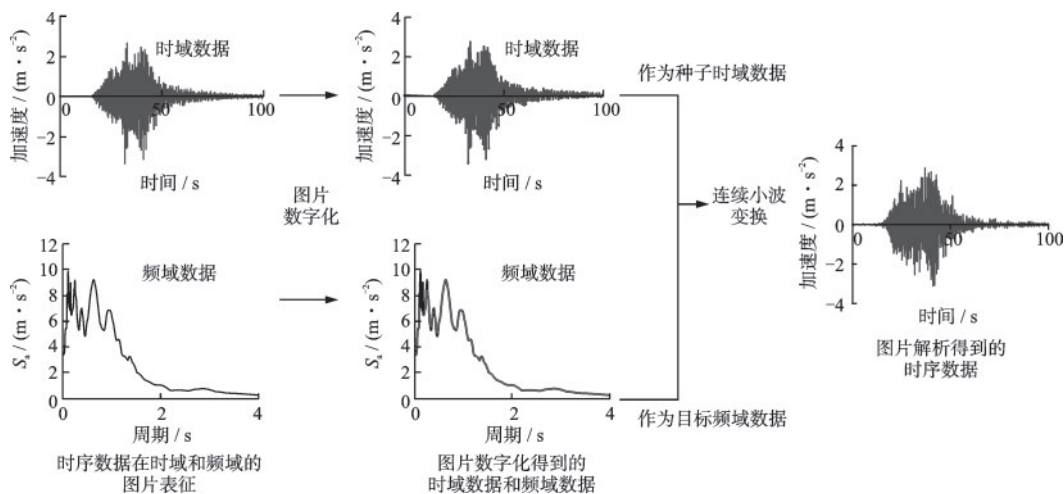


图2 考虑时域和频域特征的图片时序数据解析方法框架

Fig.2 Framework of image time-series data analysis method considering time and frequency domain characteristics

步骤3:通过种子时域数据和目标频域数据,利用连续小波变换方法构造时域数据。

本文采用连续小波变换修正种子时域数据,得到与目标频域数据匹配的时域数据,以此作为从图片中解析得到的时序数据。具体地,首先对种子时域数据 $f(t)$ 进行连续小波变换,得到小波系数 $C(s, p)$, 见式(1), 然后根据目标频域数据与种子时域数据频域数据之间的比值 R 对每个小波系数进行调幅, 并通过逆小波变化得到调整后的时序数据(式(2)), 计算并对比生成时序数据的频域数值与目标频域数据, 重复上述步骤, 直到二者误差小于相应限值或达到迭代次数(一般可取30次)时, 得到最终修正的时序数据。

$$C(s, p) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{s,p}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-p}{s}\right) dt \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{1}{K_\psi} \int_0^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{s^2} R(T) C(s, p) \psi_{s,p}(t) dp \right) ds = \frac{1}{K_\psi} \int_0^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{s^2} R\left(\frac{2\pi}{\Omega} s\right) C(s, p) \psi_{s,p}(t) dp \right) ds \quad (2)$$

式中, s 和 p 分别为伸缩因子和平移因子; 星号表示共轭复数; K_ψ 为常数; $\psi(t)$ 表示小波函数, 小波函数选取的是在震动分析中广泛使用的小波函数^[13], 见式(3):

$$\psi(t) = e^{-\zeta|\Omega t|} \sin(\Omega t) \quad (3)$$

式中, ζ 和 Ω 分别为定义小波形状和中心频率的参数。对于上述小波函数, 伸缩因子 s 与周期 T 的关系见式(4):

$$T = \frac{2\pi}{\Omega} s \quad (4)$$

关于此方法的更多介绍可以参考文献[16]。

2 案例研究——以强震动数据为例

2.1 震动时程对比

本节选取强震动数据作为典型的时序数据, 对所提出的方法进行展示和说明。随机挑选了2022年3月16日日本福岛7.7级地震中MYG016台站记录到的强震动数据(EW方向)^[17]进行分析, 该时序数据在时域的代表即为震动时程曲线, 如图3(a)所示, 而在频域的代表则选取地震工程领域

广泛采用的反应谱来表征。本方法解析的震动与真实震动时程曲线对比如图3(b)所示, 反应谱对比如图4所示, 可以看出, 本方法解析得到的震动数据能够兼顾时域和频域的信息。需要说明的是案例所使用的震动是随机选取的, 对其他震动本方法同样适用, 由于篇幅原因仅展示了一条记录。

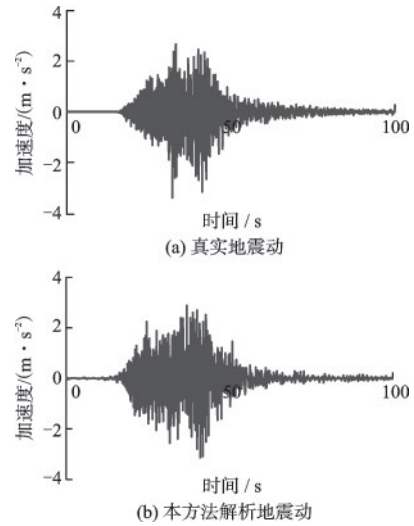


图3 本方法解析的震动与真实震动时程对比

Fig.3 Comparison of ground motion time history analyzed by this method and actual ground motion time history

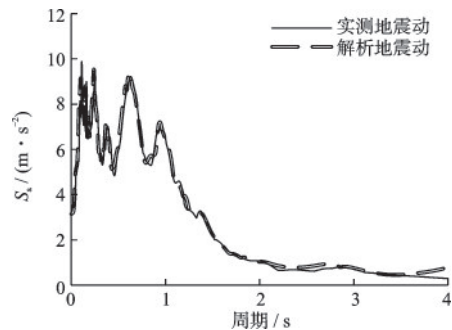


图4 本方法解析的震动和真实震动反应谱对比

Fig.4 Comparison of ground motion response spectrum analyzed by this method and actual ground motion response spectrum

进一步地, 表1对比了不同方法得到的震动的震动强度指标, 其中, 反应谱误差采用广泛应用的反应谱误差指标^[18-19], 见式(5), I_a 为 Arias 强度, D_{55-95} 为重要持时(选用5%~95% I_a 的时间间隔)。同时, 分析了本方法中种子震动采用不同采样频率对解析得到的震动的影。从可以看出, 采样频率对本方法解析得到的震动有一定影响, 当取100 Hz 和 200 Hz 时能够取得较好的预测结果, 为

此, 本文建议采用频率可取 100 Hz 或者 200 Hz。相比于传统的对地震动直接进行数字化的方法, 本文所提出的方法能够得到与实测地震动更为接近的地震动时程数据。

$$E_{IDW} = \frac{\sum_i \omega(T_i) \left[\ln(S_a(T_i)_{\text{predict}}) - \ln(S_a(T_i)_{\text{actual}}) \right]^2}{\sum_i \omega(T_i)} \quad (5)$$

表 1 不同方法得到的地震动的地震动强度指标对比

Table 1 Comparison of ground motion intensity indexes of ground motion obtained by different methods

指标及误差	地震动指标				误差/%				
	PGA/(m·s ⁻²)	PGV/(m·s ⁻¹)	I _a /(m·s ⁻¹)	D _{S5-95} /s	PGA	PGV	I _a	D _{S5-95}	反应谱
实测地震动	3.40	0.35	3.11	23.19	—	—	—	—	—
本方法 (采样频率 400 Hz)	3.28	0.39	3.32	23.78	3.53	11.43	10.87	2.54	75.43
本方法 (采样频率 200 Hz)	3.28	0.39	3.26	24.26	3.53	11.43	9.13	4.61	30.23
本方法 (采样频率 100 Hz)	3.49	0.4	3.38	24.23	2.65	14.29	13.11	4.48	38.71
本方法 (采样频率 50 Hz)	3.19	0.39	3.37	23.92	6.18	11.43	12.78	3.15	129
数字化地震动	3.39	1.81	7.12	24.24	0.40	414.2	129.0	4.53	223.11
SIMQKE	3.40	0.30	3.73	18.96	0.10	14.9	19.8	18.24	1.74

2.2 对结构时程分析影响

由于强震动记录的一个主要作用是服务于工程结构设计, 为此, 本文选择了一栋典型框架结构, 分析不同方法得到的地震动对建筑地震响应计算结果的影响。该钢筋混凝土框架结构按照中国规范^[20]的 6 度、7 度、8 度设防进行设计, 建筑基本自振周期分别为 0.60、0.59、0.48 s。其立面布置如图 5 所示。采用 OpenSees 软件建模, 混凝土采用 Concrete01 本构模型, 钢筋采用 Hysteretic 本构模型, 其中每一梁、柱均采用 6 个 dispBeamColumn 单元来模拟, 每个单元采用 3 个高斯积分点^[21]。

将实测地震动、数字化地震动和本文解析得到的地震动输入到三个框架中, 可以得到层间位移角的对比结果, 如图 6 所示, 表 2 进一步给出了三种地震动计算得到的层间位移角的定量比较。从图 6 和

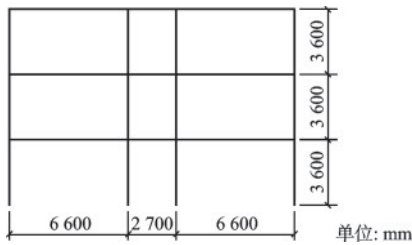


图 5 典型三层框架结构立面布置

Fig.5 Elevation layout of typical three-story frame structure

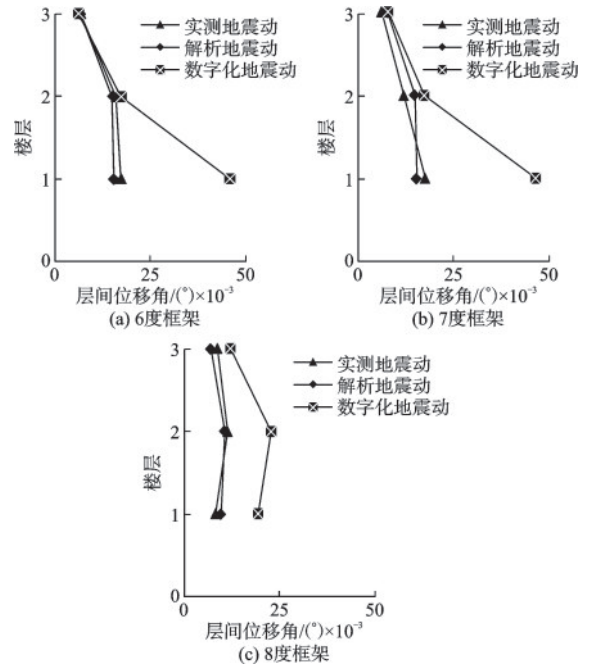


图 6 三种地震动作用下 3 层框架层间位移角结果对比

Fig.6 Result comparison of inter-story drift ratios of the three-story frame structure under three types of ground motions

表 2 可以看出, 相比于对图片直接数字化得到的地震动数据, 本方法解析得到的地震动计算的结构地震响应与实测地震动更为接近, 从而能够更好地服务于工程结构的抗震设计。

表2 不同地震动计算得到的框架层间位移角

Table 2 Inter-story drift ratios angles of the frame calculated using different ground motions

	设防烈度	层间位移角/(°)×10 ⁻³			层间位移角误差/%		
		1层	2层	3层	1层	2层	3层
实测地震动	6度	17.3	16.1	6.6	—	—	—
	7度	17.4	12.0	6.3	—	—	—
	8度	8.3	11.5	8.8	—	—	—
解析地震动	6度	15.5	15.0	6.7	11	7	1
	7度	15.3	14.8	7.6	12	24	22
	8度	9.6	10.7	7.0	16	7	20
数字化地震动	6度	45.7	17.4	6.2	164	8	6
	7度	46.2	17.4	7.9	165	45	27
	8度	19.4	22.7	12.0	133	98	37
SIMQKE	6度	11.9	19.6	8.5	31	22	29
	7度	16.2	16.0	7.9	7	33	26
	8度	10.3	12.4	9.0	24	8	2

2.3 与其他反应谱匹配的地震动构造方法对比

本文进一步与反应谱匹配的人工地震动构造方法进行了对比,该方法通过频域修正随机过程来构造匹配目标反应谱的地震动时程数据^[11](后续简称为“SIMQKE方法”),该方法构造的地震动时程和反应谱如图7所示,地震动强度指标、结构计算得到层间位移角的定量比较见表1、表2。可以看出,SIMQKE方法可以得到与目标反应谱匹配的地震动时程数据,频域信息能够得到较完整的保证,但

较多时域信息丢失, D_{S5-95} 误差更大,导致结构响应计算的误差更大。因此,相比于SIMQKE这种基于频域修正的方法,本文方法综合了图片中时域和频域的信息,从而能够得到与实测地震动更为接近的地震动数据。

综上,本文所提出的方法主要优势在保证反应谱误差较小的前提下,尽可能的从图片地震动中保留地震动的时域信息,这是本文方法能够取得更为准确的结构响应的主要原因。

3 实际应用——2022年台湾台东县6.5级地震破坏力分析

本文方法一个典型的应用场景是评估强震动记录的破坏力。由于数据获取的限制,有些时候无法直接获取强震动记录的原始数据,只能从公开报告中获取其图片数据。例如,2022年9月17日21时41分,台湾省台东县发生6.5级地震,本次地震在玉里镇造成了较多破坏,为分析本次强震动记录的破坏特征,本文通过公开报告^[22]获取了玉里台站所记录到的强震动和反应谱图片,如图8所示。采用本文的方法解析了该台站强震动时程数据,本方法解析得到的强震动记录的反应谱与传统数字化方法得到的反应谱对比如图9所示,可以看出本方法解析得到的强震动记录的反应谱与实测结果更为接近,特别是对于工程结构主要关心的短周期段。

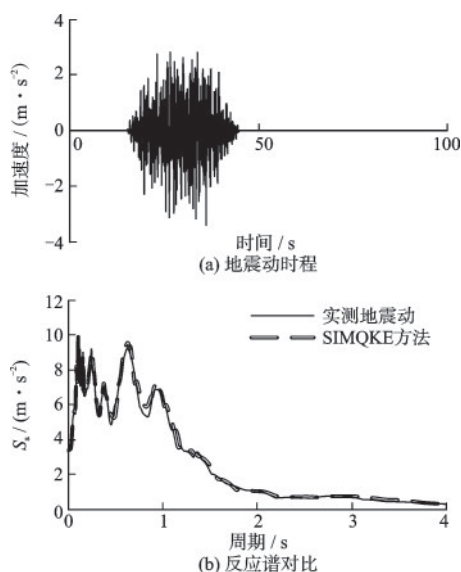


图7 SIMQKE方法得到的地震动时程和反应谱

Fig.7 Ground motion time history and response spectrum obtained by SIMQKE method

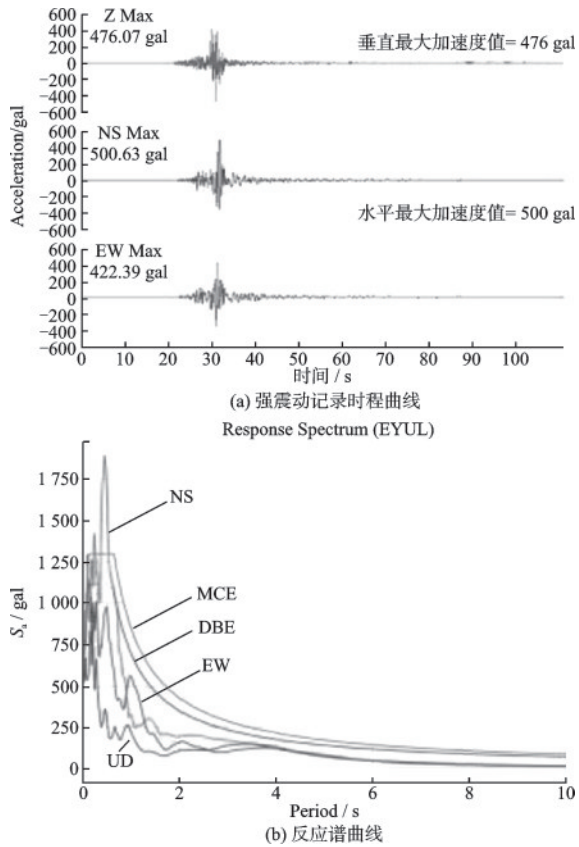


图8 报告中所获取的强震动记录和反应谱图片

Fig.8 Strong ground motion records and response spectrum image obtained in the report

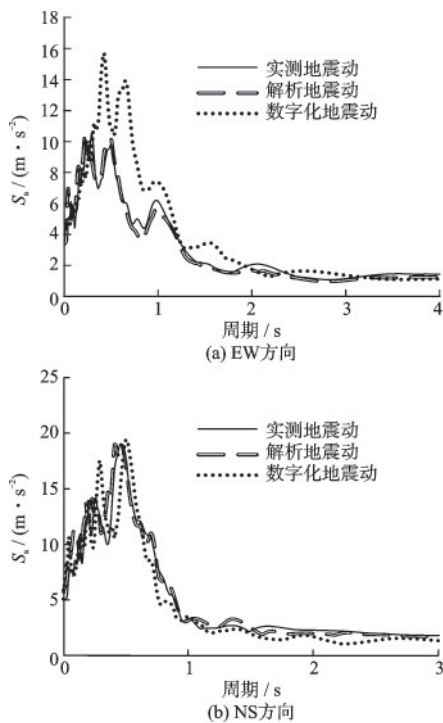


图9 不同方法得到的强震动记录反应谱对比

Fig.9 Comparison of response spectra of strong ground motion records obtained by different methods

在解析得到强震动记录数据后,即可开展强震动记录的破坏力分析^[19,23]。例如,对于2.2节中所分析的框架,本文进一步对比了不同方法得到的强震动记录计算得到的结构响应,如图10所示。可以看出,本方法解析得到的记录计算得到的层间位移角误差更小,为后续工程结构地震响应分析以及地震破坏力的分析提供了重要数据。

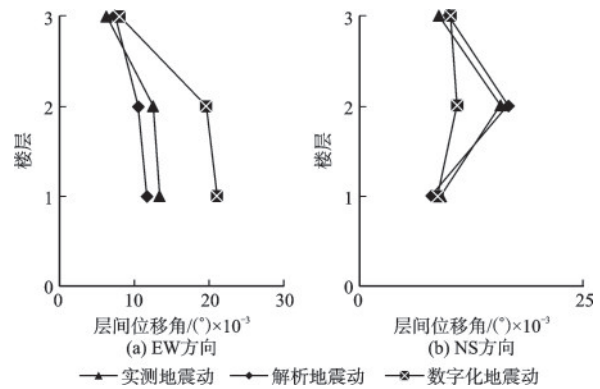


图10 不同方法得到的强震动记录计算的结构层间位移角对比

Fig.10 Comparison of inter-story drift ratios angles of structure calculated from strong ground motion records obtained by different methods

4 结论

针对时序的数据图片数据识别精细精度不高的问题,本文提出了考虑时域和频域特征的图片时序数据解析方法,该方法综合利用了从图片中获取到的时序数据的时域和频域特征,以识别得到的较为准确的频域数据曲线作为目标频域数据,采用连续小波变换修正从图片中直接识别得到的时域数据,从而提高图片时序数据的解析精度。相比于传统直接从图片识别数字化时域数据方法和基于频域数据匹配的频域方法,本文提出的图片时序数据解析方法能够兼顾图片时序数据中时域和频域的信息,从而能够解析得到更为准确的时序数据,用于后续分析(如工程结构地震响应分析)误差也更小,能够满足实际工程需求,为从时序图片中识别时序数据提供了重要方法。

需要说明的是,本文案例和实际应用只选择了一组强震动数据作为案例,但对于其他强震动记录和其他类型的时序数据,如波高时程、水质点速度时程等数据,本文方法同样适用。

参考文献:

- [1] 王振宇,赵培培,谢志南,等.川滇甘陕地区长周期地震动反应谱特征参数的研究[J].自然灾害学报,2022,31(2):198-203.
Wang Z Y, Zhao P P, Xie Z N, et al. Study on characteristic parameters of response spectrum for long-period ground motion in Sichuan Yunnan Gansu Shaanxi regions[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(2):198-203.(in Chinese)
- [2] 陆新征,程庆乐,孙楚津,等.基于动力弹塑性时程分析和实测地面运动的地震破坏力速报系统[J].自然灾害学报,2019,28(3):34-43.
Lu X Z, Cheng Q L, Sun C J, et al. Rapid reporting system of earthquake destructive power based on the nonlinear time-history analysis and actual ground motion records[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(3): 34-43. (in Chinese)
- [3] 许立英,林友勤,吴应雄,等.近场脉冲型地震动的频谱与反应谱特征分析[J].自然灾害学报,2023,32(3): 23-35.
Xu L Y, Lin Y Q, Wu Y X, et al. Spectral and response spectrum characteristics of near-field pulse-like ground motions[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(3): 23-35. (in Chinese)
- [4] 任叶飞,谢俊举,李平,等.《强震动观测及其工程应用》专辑序言[J].地震研究,2019,42(4):455-456.
Ren Y F, Xie J J, Li P, et al. Preface to the strong ground motion observation and its engineering applications[J]. Journal of Seismological Research, 2019, 42(4): 455-456. (in Chinese)
- [5] 刘恢先.论地震力[J].土木工程学报,1958(2):86-106.
Liu H X. Seismic forces on structures[J]. China Civil Engineering Journal, 1958(2): 86-106. (in Chinese)
- [6] 冀昆,温瑞智,任叶飞.适用于我国抗震设计规范的天然强震记录选取[J].建筑结构学报,2017,38(12):57-67.
Ji K, Wen R Z, Ren Y F. Ground motion recordings selection for seismic design code[J]. Journal of Building Structure, 2017, 38(12): 57-67. (in Chinese)
- [7] 李山有,金星,刘启方,等.中国强震动观测展望[J].地震工程与工程振动,2003(2):1-7.
Li S Y, Jin X, Liu Q F, et al. Prospect of strong motion observation in China[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003(2): 1-7. (in Chinese)
- [8] 温瑞智.我国强地震动记录特征综述[J].地震学报,2016,38(4):550-563.
Wen R Z. A review on the characteristics of Chinese strong ground motion recordings[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(4): 550-563. (in Chinese)
- [9] 周宝峰.强震观测中的关键技术研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2012.
Zhou B F. Some key issues on the strong motion observation [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)
- [10] Gascot R L, Montejo L A. Spectrum-compatible earthquake records and their influence on the seismic response of reinforced concrete structures [J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(1): 101-123.
- [11] Vanmarcke E, Gasparini D. Simulated earthquake ground motions [C]//Structural mechanics in reactor technology. San Francisco, CA: IASMiRT, 1977: K1/9.
- [12] Seismosoft. SeismoArtif - artificial earthquake accelerograms [CP/OL]. Pavia, Italy: Seismosoft Ltd, 2022. [2023-11-29]. <https://seismosoft.com/products/seismoartif/>.
- [13] Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson N A, et al. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2006, 10(sup1): 67-89.
- [14] Seismosoft. SeismoMatch - response spectrum matching [CP/OL]. Pavia, Italy: Seismosoft Ltd, 2022. [2023-11-29]. <https://seismosoft.com/products/seismomatch/>.
- [15] Suárez L E, Montejo L A. Generation of artificial earthquakes via the wavelet transform[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(21): 5905-5919.
- [16] Montejo L A, Suarez L E. An improved CWT-based algorithm for the generation of spectrum-compatible re-record[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2013, 5(1): 26.
- [17] 防灾科学技术研究所. NIED K-NET, KiK-net [EB/OL] (2019-03-28) [2023-11-29]. https://nied-ir.bosai.go.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=2146&item_no=1&page_id=13&block_id=245.
- [18] Wang G, Youngs R, Power M, et al. Design ground motion library: an interactive tool for selecting earthquake ground motions[J]. Earthquake Spectra, 2015, 31(2): 617-635.
- [19] 程庆乐.基于实测地震动的近实时震损评价方法研究[D].北京:清华大学,2021.

- Cheng Q L. Near-real-time seismic damage assessment method using recorded ground motion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021. (in Chinese)
- [20] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [21] 许镇,赵鹏举,郑哲,等.中国宜宾、日本山形、美国加州 Ridgecrest 地震破坏力分析与对比[J].工程力学, 2019, 36(11): 195-202.
- Xu Z, Zhao P J, Zheng Z, et al. Analysis and comparison of seismic damage in China Yibin, Japan Yamagata and U. S. California Ridgecrest earthquakes [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (11) : 195-202. (in Chinese)
- [22] 周中哲,吴俊霖,柴骏甫,等.2022年臺灣關山地震及池上地震勘災報告(第三版 V3.0) [R].台北:台湾省地震工程研究中心,2022.
- Zhou Z Z, Wu J L, Chai J F, et al. Reconnaissance report on seismic damage caused by Guanshan earthquake and Chihshang earthquake, Taiwan, 2022 (third edition, v3.0) [R]. Taipei: Taiwan Center for Research on Earthquake Engineering, 2022. (in Chinese)
- [23] 程庆乐,熊琛,田源,等.中国地震学会团体标准:T/SSC 1—2021《基于强震动记录的地震破坏力评估》简介[J].地震科学进展,2022, 52(3): 120-125.
- Cheng Q L, Xiong C, Tian Y, et al. Introduction to group standard of seismological society of China: T/SSC 1—2021 seismic destructive power evaluation based on strong motion records[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(3): 120-125. (in Chinese)
- (本文编辑:张艺)



(上接第 109 页)

- [16] Lamorski K, Pachepsky Y, Sławiński C, et al. Using support vector machines to develop pedotransfer functions for water retention of soils in Poland[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(5): 1243-1247.
- [17] 陈勇,邹皓天,苏剑,等.基于数据挖掘的土水特征曲线影响分析及预测研究[J].应用基础与工程科学学报,2023, 31(2): 451-466.
- Chen Y, Zou H T, Su J, et al. Impact analysis and prediction research of soil-water characteristic curves based on data mining[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(2): 451-466. (in Chinese)
- [18] Qin W, Fan G. Estimation and predicting of soil water characteristic curve using the support vector machine method[J]. Earth Science Informatics, 2023, 16(1): 1061-1072.
- [19] Zhan J, Li Z, Yu X, et al. Pedo-transfer functions of the soil water characteristic curves of the vadose zone in a typical alluvial plain area in the lower reaches of the Yellow River using machine learning methods[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2022, 194 (12): 850.
- [20] Nemes A, Schaap M G, Leij F J, et al. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251 (3-4): 151-162.
- [21] Pham K, Kim D, Le C V, et al. Machine learning-based pedotransfer functions to predict soil water characteristics curves[J]. Transportation Geotechnics, 2023: 101052.
- [22] Zhang W, Wu C, Zhong H, et al. Prediction of undrained shear strength using extreme gradient boosting and random forest based on Bayesian optimization [J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(1): 469-477.
- [23] Chen Y, Xu Y, Jamhiri B, et al. Predicting uniaxial tensile strength of expansive soil with ensemble learning methods[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 150: 104904.
- [24] Sanders R. The pareto principle: its use and abuse[J]. Journal of Services Marketing, 1987, 1(2): 37-40.