

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202004021

远场类谐和地震波加速度反应谱的双峰特征分析*

曹国绒, 王博, 杨柯, 李哲, 刘伯权

(长安大学建筑工程学院, 陕西西安 710061)

摘要: 远场类谐和地震波作为一种特殊的长周期地震波,其加速度反应谱具有显著区别于其他类型地震波的双峰特征,本研究对其产生原因进行分析。首先,分析了集集地震和汶川地震中部分典型的远场类谐和地震动的运动特征;然后,基于希尔伯特-黄变换时频域分析方法及等效简化法,分析了远场类谐和地震波时域特征对其加速度反应谱双峰特征的影响规律。结果表明,所选远场类谐和地震波加速度反应谱长周期段的峰值与高频段的峰值比(峰值比系数 α)较大,对该地区内基本自振周期为5~7s的高层结构影响显著;当远场类谐和地震波存在脉冲周期和脉冲幅值较大的类谐和脉冲时,其加速度反应谱表现出明显的双峰特征。

关键词: 远场类谐和地震波; 加速度反应谱; 双峰特征; 希尔伯特-黄变换; 卓越分量

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0480-10

Analysis of the Bimodal Characteristics of Acceleration Response Spectra of Far-field Harmonic-like Ground Motions

CAO Guorong, WANG Bo, YANG Ke, LI Zhe, LIU Boquan
(Chang'an University, School of Civil Engineering, Xi'an 710061, China)

Abstract: Far-field harmonic-like ground motion is a special type of long-period ground motion, which has the bimodal characteristics in its acceleration response spectrum, significantly distinguished from other ground motions. The focus of this paper is the cause of bimodal characteristics. Firstly, the motion characteristics of typical far-field harmonic-like ground motions acquired from Chichi earthquake and Wenchuan earthquake were analyzed. Then based on the Hilbert-Huang Transform (HHT) time-frequency analysis and equivalent simplification methods, the influence of time-domain characteristics of far-field harmonic-like ground motion on the bimodal characteristics was analyzed. The analyzing results indicate that the ratio of peak value in long period part to that in the high frequency part (the peak ratio coefficient α) of the acceleration response spectrum for far-field harmonic-like ground motion is large, which significantly influences the high-rise buildings with the basic natural periods of 5~7s in this area. The bimodal characteristics of acceleration response spectra for far-field harmonic-like ground motions is caused by the harmonic-like pulse with larger pulse period and pulse amplitude in predominant component.

Keywords: far-field harmonic-like ground motion; acceleration response spectrum; bimodal characteristic; Hilbert-Huang Transform (HHT); predominant component

* 收稿日期:2020-04-09;修回日期:2020-11-11

基金项目:国家自然科学基金(51708037,51978076)、中央高校高新技术研究培育项目(300102280202)资助

作者简介:曹国绒(1995—),女,博士研究生。主要从事工程结构抗震方向的研究工作。E-mail: cgrchd@163.com

通讯作者:王博(1985—),男,教授,博士。主要从事工程结构抗震方向的研究工作。E-mail: chn wangbo@chd.edu.cn

引言

长周期地震波是由震级较大的俯冲带地震或地壳地震,通过有效的传播路径及场地的面波效应,在远距离的沉积盆地或冲积平原场地上形成的。因其具有低频成分丰富及持时较长的特点,易使超高层建筑、大跨桥梁、大跨度建筑及隔震的建筑结构等长周期结构发生破坏^[1-4]。远场类谐和地震波作为一种特殊的长周期地震波,不仅具有长持时、低频成分丰富的特点,其速度时程曲线中还存在多个明显的循环脉冲,类似谐和振动^[5],且既有研究表明,远场类谐和地震波比远场非类谐和地震波具有更大的破坏作用^[6]。

对远场类谐和地震波特性的定性及定量分析是揭示其作用下长周期结构响应规律的基础。近年来,不少学者针对远场类谐和地震波的频谱特性及结构响应特征开展了大量研究。文献[7-11]指出,远场类谐和地震波的加速度反应谱具有区别于远场非类谐和地震波及普通地震波的双峰特征,且第二峰对应周期约为5 s左右;双峰特征造成远场类谐和地震波在5 s附近的平均加速度反应谱值高于目前地震作用取值水平最高的日本《建筑基准法》(简称BSL)^[12]的设计谱值,这可能是导致长周期结构在远场类谐和地震波作用下的结构响应大于远场非类谐和地震波作用下结构响应的主要原因。但现有研究并未阐述清楚远场类谐和地震波加速度反应谱双峰特征的产生原因。因此,本文首先分析多条典型远场类谐和地震波的运动特征;然后,基于希尔伯特-黄变换对地震波进行时频域特性分

析,进一步通过对地震动波时程曲线中类谐和脉冲段进行等效简化,初步定量分析了远场类谐和地震波中类谐和脉冲段的脉冲周期及脉冲幅值对加速度反应谱双峰特征的影响规律。

1 远场类谐和地震波加速度反应谱特性分析

1.1 远场类谐和地震波的运动特征

参考目前长周期地震波的常用界定方法,如李雪红等^[13]提出 β 谱在2~10 s之间的加权平均值大于0.4的地震波为长周期地震波;许智星等^[14]认为地震波的速度峰值与加速度峰值比,即 PGV/PGA ,大于0.2可作为一个识别长周期地震波的指标,再结合远场类谐和地震波速度时程曲线具有明显脉冲谐和段的图形特征,最终从美国太平洋地震工程研究中心数据库网站(<http://peer.berkeley.edu>)选择了1999年台湾集集地震中的8条典型的远场类谐和地震波,从中国地震局工程力学研究所“国家强震波台网中心”提供的2008年汶川地震波数据中选择了8条典型的远场类谐和地震波,并根据中美两国规范中场地土分类间的关系^[15],将场地类型统一表示为中国抗震规范中的场地分类,16条地震波的时域特征见表1。由表1可知,所选远场类谐和地震波的 PGV/PGA 均大于0.2,且第9~16条地震波的 PGV/PGA 均值大于第1~8条地震波的,这与地震波的震中距和震级相关。

地震波的频谱特性可通过傅里叶谱分析得到,对地震波进行快速傅里叶变换(FFT)得到代表性远场类

表1 远场类谐和地震波的基本信息

Table 1 Basic information of far-field harmonic-like ground motions

地震波 编号	地震 (年份,震级)	台站-分量	震中距/km	场地类型	PGA/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	PGV/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	PGV/ PGA/s	t/s
1		ILA004-NS	139.48	IV	62.70	25.68	0.41	135
2		ILA004-EW	139.48	IV	71.69	29.60	0.41	135
3		ILA041-NS	138.41	III	61.94	21.82	0.35	119
4	集集地震	ILA041-EW	138.41	III	99.53	29.99	0.30	119
5	(1999, M7.6)	ILA048-NS	139.67	III	75.16	24.40	0.32	148
6		ILA055-NS	140.81	II	68.04	23.37	0.34	203
7		ILA055-EW	140.81	II	74.57	29.02	0.39	203
8		ILA056-NS	142.69	III	64.48	31.00	0.48	156
9		061DAL-NS	743.61	III	31.60	10.01	0.32	363
10		061GAL-NS	660.96	III	62.80	17.62	0.28	396
11		061WEN-NS	691.38	III	30.60	19.35	0.63	247
12	汶川地震	064CHX-NS	862.39	III	21.60	16.64	0.77	203.37
13	(2008, M8.0)	064GWU-NS	748.99	III	14.06	5.52	0.39	284.39
14		064LIJ-EW	821.87	III	13.80	12.89	0.93	244.05
15		014HJN-NS	847.83	III	17.40	8.06	0.46	382
16		041XXT-NS	1081.1	III	10.66	10.62	1.00	259

谐和地震波 ILA004-NS 及 041XXT-NS 的傅里叶幅值谱,如图 1 和图 2 所示,图 1 为 ILA004-NS 及 041XXT-NS 的时程曲线。由图 1 和图 2 可知,远场类谐和地震波表现出低频成分丰富及长持时的特征,ILA004-NS 的傅里叶幅值主要分布在 0.1~1.05 Hz 之间,041XXT-NS 的傅里叶幅值主要分布在 0.06~0.6 Hz 之间,能量集中在更低的频段,这与地震动高频成分的非弹性衰减随震中距的增加而增加有关。

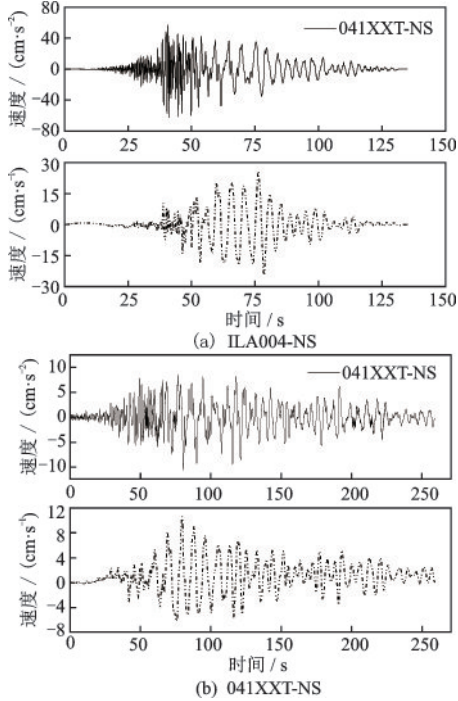


图 1 时程曲线
Fig.1 Time-history curves

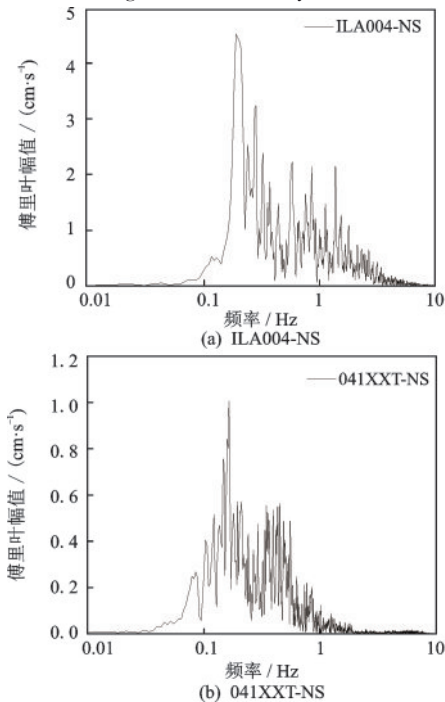


图 2 傅里叶幅值谱

图 2 Fourier amplitude spectra of partial ground motions

1.2 加速度反应谱特性分析

加速度反应谱可直观反映地震波的频谱特性对结构地震响应的影响情况^[14]。

图 3 为地震波的标准加速度反应谱,纵坐标 β 为动力放大系数,是绝对地震波加速度反应谱与地震波加速度峰值的比值。为了进一步反映远场类谐和地震动的类谐和特征对长周期结构响应的影响,SDOF 体系的自振周期取为 0 s 至 10 s,阻尼比取 5%。由图 3 可知,表 1 中的远场类谐和地震波的谱值分布较为广泛,主要分布在 0~10 s 之间;远场类谐和地震波的标准加速度反应谱在长周期段 ($T > 3$ s) 存在一个明显的峰值,即远场类谐和地震波的加速度反应谱具有明显的双峰特征。为定量反映远场类谐和地震波标准加速度反应谱的双峰特征,将长周期段的峰值与高频段的第一峰值之比定义为峰值比系数 α 。远场类谐和地震波加速度反应谱长周期段的显著峰值对应周期及 α 值见图 4。

由图 4 可知,集集地震波的加速度反应谱第二峰值对应周期分布较为集中,主要分布在 5 s 附近,

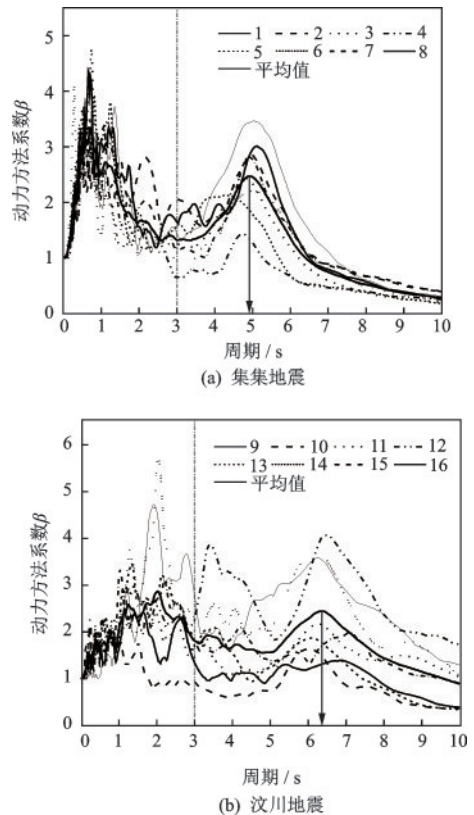


图 3 远场类谐和地震波标准加速度反应谱

Fig.3 Normalized acceleration response spectra for far-field harmonic-like ground motions

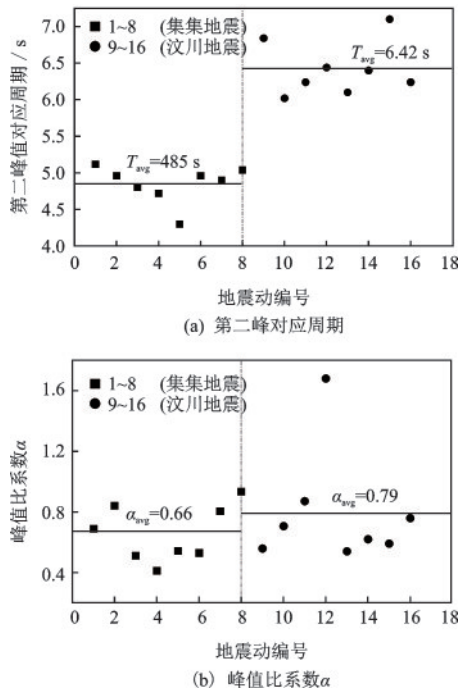


图4 远场类谐和地震波加速度反应谱第二峰对应周期及 α 值的分布

Fig.4 Distributions of the second peak period and α value of acceleration response spectra for far-field harmonic ground motions

峰值比系数 α 均值为0.66;汶川地震波的加速度反应谱第二峰对应周期分布较分散,平均周期为6.42 s,峰值比系数 α 均值为0.79,其第二峰对应周期及峰值比系数 α 均大于集集地震波的,这与地震动高频成分的非弹性衰减快于低频成分的有关。

上述分析表明,表1中的远场类谐和地震波对该地区基本自振周期为5~7 s的建筑结构影响显著。另外,由于目前《建筑抗震设计规范》^[16]给出的地震影响系数曲线中的周期值最大值为6 s,超过6 s的曲线并未明确给出,而结构基本自振周期超过6 s的超高层结构数量不断增加,因此应对远场类谐和地震波加速度反应谱双峰特征进行深入研究。

2 远场类谐和地震波加速度反应谱双峰特征定性分析

通过希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, 简称为HHT)非平稳信号时频域分析方法^[17]可得到原始信号的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, 简称为IMF)及各分量的边际谱;然后,依

次逐一去除地震波中可能对加速度反应谱双峰特征有影响的IMF分量,叠加其余IMF分量,相应得到一条重构地震波;通过对比原始地震波与重构地震波的加速度反应谱特征,初步得到远场类谐和地震波中影响加速度反应谱双峰特征形成的主要成分。

2.1 希尔伯特-黄变换

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, 简称为EMD)和Hilbert谱分析是HHT变换的两个主要步骤^[18]。首先,原始地震波经EMD得到多个IMF分量,这些分量表征了原始信号从高频到低频的成分,最后的残余分量表征了原始信号的振动发展趋势,原始振动信号可以表示为各IMF分量与残余分量的总和,见公式(1);然后,对每个IMF分量进行Hilbert谱分析得到各IMF分量的Hilbert谱,最终汇总可得到原始信号的Hilbert谱,见式(2); $H(\omega, t)$ 通过对时间积分可得Hilbert边际谱 $h(\omega)$,见式(3),边际谱主要反应了信号幅值在频域内的分布情况;各IMF分量的平均周期取为其边际谱的平均周期^[15],计算公式见(4)、(5)。

$$x(t) = \sum_{k=1}^n c_k(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中, $c_k(t)$ 为IMF分量; $r_n(t)$ 为残余分量; n 为IMF分量的个数。

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{k=1}^n a_k(t) e^{j \int \omega_k(t) dt} \quad (2)$$

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (3)$$

$$f_{\text{IMF}} = \frac{\sum h_i^2 f_i}{\sum h_i^2} \quad (4)$$

$$T_{\text{AVE}} = \frac{1}{f_{\text{IMF}}} \quad (5)$$

式中, h_i 为示边际谱的幅值; f_i 为与 h_i 对应的频率。

图5为代表性地震波ILA055-EW通过EMD得到的11个IMF分量及1个残余分量。表2为代表性远场类谐和地震波ILA055-EW依据公式(1)~(5)计算得到的各IMF分量的平均周期及峰值。

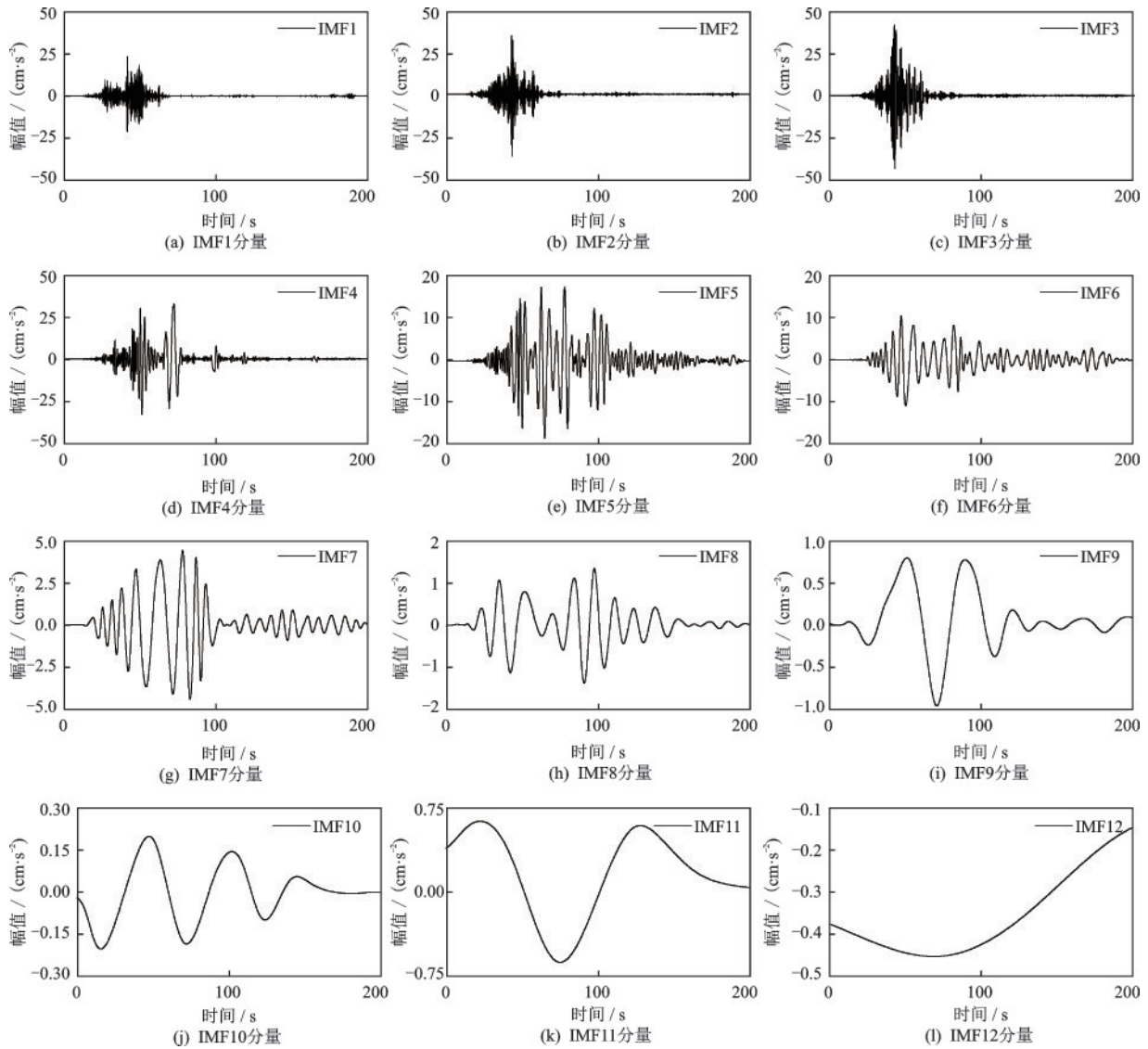


图5 ILA055-EW地震波的IMF分量

Fig.5 IMF components of ILA055-EW

由表2可知:IMF分量呈现从高频到低频的分布特征,其峰值先增加后减小;另外,考虑到地震波中的后六个IMF分量峰值较小,且IMF平均周期的

均值为31.34 s,远大于ILA055-EW加速度反应谱第二峰对应的周期,因此在加速度反应谱双峰特征成因分析时可不予考虑。

表2 ILA055-EW地震波各IMF分量的平均周期和峰值

Table 2 Average periods and peak values of each IMF component for ILA055-EW

分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	IMF8	IMF9	IMF10	IMF11	IMF12
平均周期 T/s	0.24	0.45	0.86	3.06	4.09	5.62	9.29	14.37	24.65	23.24	31.50	49.16
峰值/(cm·s ⁻²)	23.63	36.98	43.51	32.86	18.39	10.98	4.36	1.53	0.62	0.14	0.24	0.12

2.2 双峰特征原因分析

依次去除ILA055-EW中的前六个IMF分量,得到相应的六条重构地震波,依次命名为GM1、

GM2、GM3、GM4、GM5、GM6,其中GM1为原始地震波中去除了IMF1分量的地震波,GM2为原始地震波中去除了IMF2分量的地震波,其余同理。

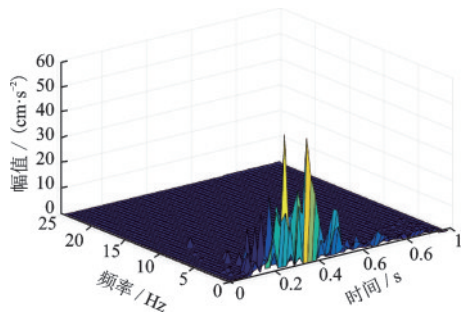


图6 ILA055-EW地震波的3-D Hilbert幅值谱
Fig.6 3-D Hilbert amplitude spectrum of ILA055-EW

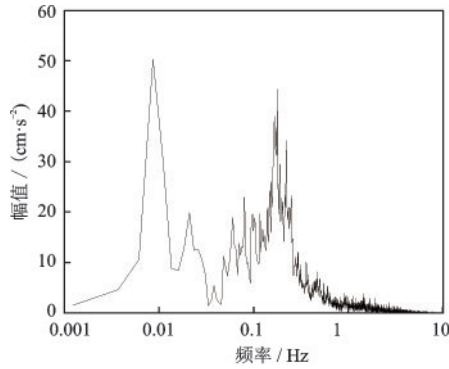
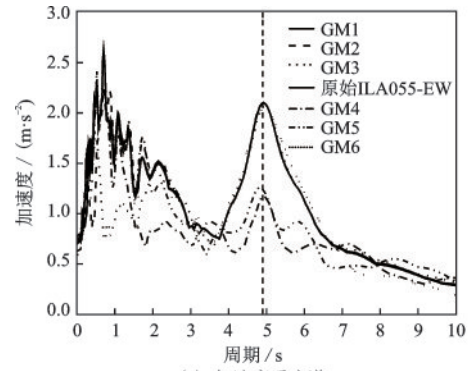


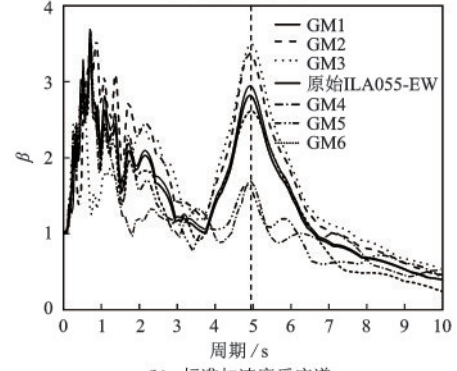
图7 ILA055-EW地震波的边际谱
Fig.7 Marginal spectrum of ILA055-EW

为分析地震波的不同IMF分量对双峰特征的影响,对比分析原始地震波与各重构地震动的标准加速度反应谱及加速度反应谱,如图8所示。表3为ILA055-EW原始地震波与六条重构地震波的第二峰值、第二峰值变化率及 α 值。为分析高频成分对双峰特征的影响规律,将IMF1~IMF3分量合并构成仅含高频成分的高频地震波,其余IMF分量合并构成以低频成分为主的地震波,图9(a)和图9(b)分别为原始地震波、纯高频地震波与低频地震波的加速度反应谱和标准加速度反应谱。

由图8、图9及表3可知:当去除IMF1~IMF3分量时,加速度反应谱第二峰值基本未发生变化,变化主要集中在低频部分,而加速度放大系数谱第二峰值增加,双峰特征更明显,这是因为随着高频分量的去除,地震动的加速度峰值降低,从而导致 β 增大。当去除IMF4和IMF5分量时,加速度反应谱和加速度放大系数谱第二峰值均显著降低,尤其是当去除IMF5分量时,第二峰值降低幅度最大,结合图5及表2可知,IMF5分量时程曲线的后期存在多个明显的循环脉冲,且该分量的平均周期与加速度反应谱第二峰对应周期接近。因此,可认为,当远场类谐和地震波时程曲线中存在多个峰值较大的循环脉冲,且平均周期较大的IMF分量时,其加速度反应谱表现出明显的双峰特征。

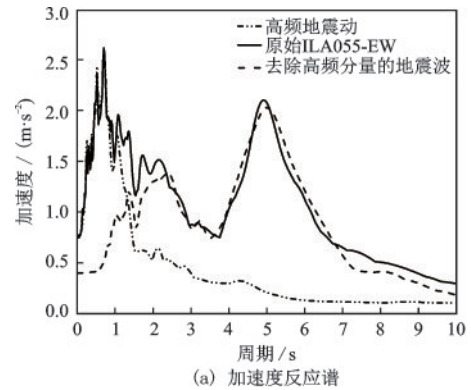


(a) 加速度反应谱

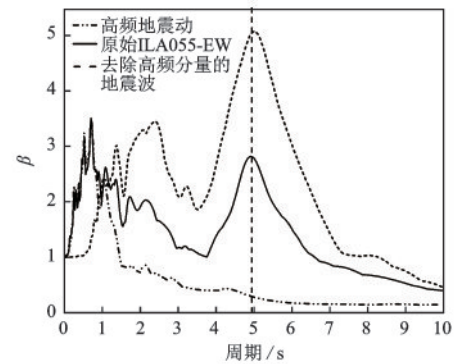


(b) 标准加速度反应谱

图8 ILA055-EW地震波与各重构地震波反应谱对比情况
Fig.8 Comparison of response spectra for ILA055-EW and recombined ground motions



(a) 加速度反应谱



(b) 标准加速度反应谱

图9 原始地震波、高频地震波及去除高频分量地震波反应谱对比情况

Fig.9 Comparison of response spectra for original, high frequency and low frequency ground motions

表3 ILA055-EW原始地震波与重构地震波标准加速度反应谱的比较

Table 3 Comparison of normalized acceleration response spectra of original ILA055-EW wave and recombined ground motions

地震波	第二峰值/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$)	相对变化率	峰值比系数 α
原始地震波	2.82	0	0.77
GM1	2.94	-4.26%	0.78
GM2	3.38	-19.86%	1.01
GM3	3.47	-23.08%	1.20
GM4	1.72	39.01%	0.44
GM5	1.61	42.91%	0.45
GM6	2.56	9.22%	0.73

注:相对变化率为(原始地震波第二峰值-重构地震波第二峰值)/原始地震波第二峰值

这里将对双峰特征影响最大的IMF分量定义为卓越分量,其峰值为卓越分量峰值,其边际谱平均周期为卓越分量平均周期。表4为所选远场类谐和地震波的卓越分量及其特征值,表中的周期差为卓越分量平均周期与加速度反应谱第二峰对应周期差值的绝对值。由表4可知,汶川地震波的周期差平均值约为集集地震波的2倍。这表明,将边际谱的平均周期作为震中距较远,长周期成分更为突出的远场类谐和地震波IMF分量的表征周期的合理性还有待于进一步研究。

表4 远场类谐和地震波卓越分量的基本信息

Table 4 Basic information of predominant components for far-field harmonic ground motions

地震 (时间、震级)	台站-分量	双峰卓越分量	卓越分量峰 值/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$	卓越分量 平均周期/s	第二峰对应 周期/s	周期差/s
集集地震 (1999, M 7.6)	ILA004-NS	IMF5	14.86	5.31	5.12	0.19
	ILA004-EW	IMF4	33.25	3.54	4.96	1.42
	ILA041-NS	IMF5	18.05	4.27	4.8	0.53
	ILA041-EW	IMF6	18.10	4.71	4.72	0.01
	ILA048-NS	IMF4	35.27	3.53	4.3	0.77
	ILA055-NS	IMF6	21.24	5.12	4.96	0.16
	ILA055-EW	IMF5	18.39	4.09	4.9	0.81
	ILA056-NS	IMF5	40.72	4.17	5.04	0.87
汶川地震 (2008, M 8.0)	061DAL-NS	IMF6	10.28	6.11	6.84	0.73
	061GAL-NS	IMF6	11.98	5.92	6.02	0.1
	061WEN-NS	IMF6	12.50	7.19	6.24	0.95
	064CHX-NS	IMF5	16.72	4.75	6.44	1.69
	064GWU-NS	IMF6	4.70	5.28	6.1	0.82
	064LIJ-EW	IMF5	8.76	5.63	6.4	0.77
	014HJN-NS	IMF6	7.28	4.20	7.1	2.9
	041XXT-NS	IMF6	5.07	5.87	6.24	0.37

3 远场类谐和地震波加速度反应谱双峰特征定量分析

参考文献[19],采用简谐波函数对长周期地震动类谐和脉冲时程进行简化,将长周期地震动类谐和脉冲周期的平均值作为简谐波的周期,将长周期地震动类谐和脉冲幅值的平均值作为简谐波的幅值,采用识别出来的长周期地震动类谐和脉冲持时作为简谐波的持时,利用MATLAB软件,对表4中各条远场类谐和地震波卓越分量的类谐和脉冲部分进行等效简化;然后,依次调整等效简化后谐波脉冲的幅值及周期;通过对比调整前后的加速度反应谱特征,分析卓越分量的类谐和脉冲段对远场类谐和地震波双峰特征的影响规律。

图10为代表性远场类谐和地震波ILA056-NS卓越分量IMF5类谐和脉冲时程等效简化前后的加速度时程曲线对比图,等效简化得到的正弦脉冲峰值为36.21 gal,正弦脉冲周期为4.955 s;用简化后的IMF5分量替换原始IMF5分量,得到对应于原始地震波的等效地震波。图11为原始地震波ILA056-NS与等效地震波的反应谱对比图。由图可知:原始地震波与等效地震波的加速度放大系数谱吻合较好,表明了本文所有等效简化方法的合理性。

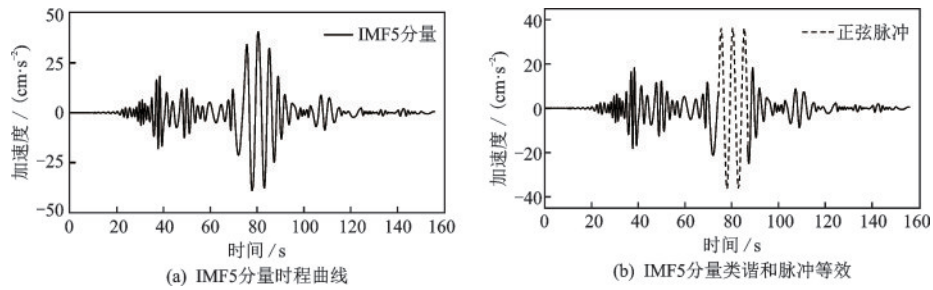


图 10 ILA056-NS 地震波卓越分量的等效简化

Fig.10 Equivalent simplification of predominant component of ILA056-NS

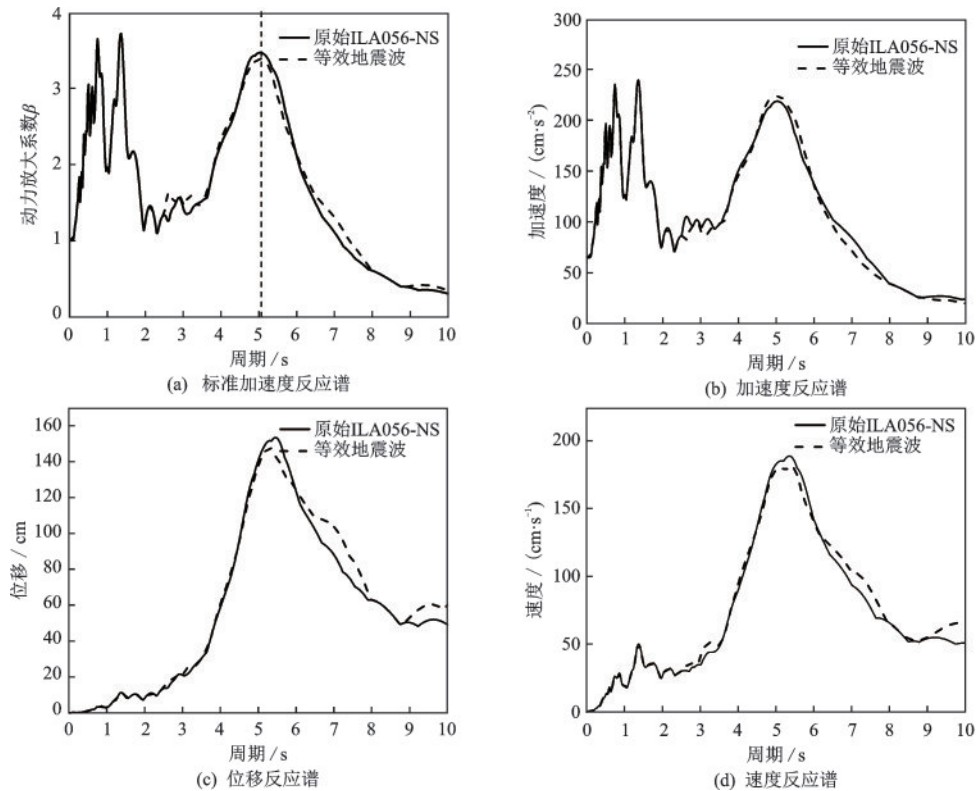


图 11 原始地震波与等效地震波反应谱对比

Fig.11 Comparison of response spectra of original ILA056-NS and equivalent ILA056-NS

为分析卓越分量类谱和脉冲部分的脉冲周期对加速度反应谱双峰特征的影响规律,保持等效 IMF5 分量的脉冲幅值不变,依次将脉冲周期由 4.955 s 调整为 3.955 s 和 2.955 s,如图 12 所示;然后用调整脉冲周期后的 IMF5 分量替换等效地震波中的等效 IMF5 分量,相应得到两条重构地震波,依次命名为 TM1、TM2;等效地震波与 TM1、TM2 的加速度放大系数谱,如图 13 所示。同理,为分析卓越分量类谱和脉冲部分的脉冲幅值对加速度反应谱双峰特征的影响规律,保持等效 IMF5 分量的脉冲周期不变,依次将脉冲幅值由 36.21 gal 调整为 15、10、0 gal,如图 14(a) 所示;然后用调整脉冲幅值后的 IMF5 分量替换等效地震波中

的等效 IMF5 分量,相应得到三条重构地震波,依次命名为 PM1、PM2、PM3;等效地震波与各重构地震波的加速度放大系数谱,如图 14(b) 所示。

图 13 及图 14 中地震波卓越分量中谐和脉冲周期和峰值对标准加速度反应谱双峰特征的影响规律验证了 2.2 节的结论,即当远场类谱和地震波卓越分量中含有脉冲周期较长及脉冲幅值较大的类谱和脉冲段时,其加速度反应谱呈现明显的双峰特征。图 13 中,标准加速度反应谱第二峰值随卓越分量周期的减小呈现逐渐增加的变化规律,这是由于 ILA056-NS 时程曲线中 40 s 附近存在接近循环脉冲周期的地震波。

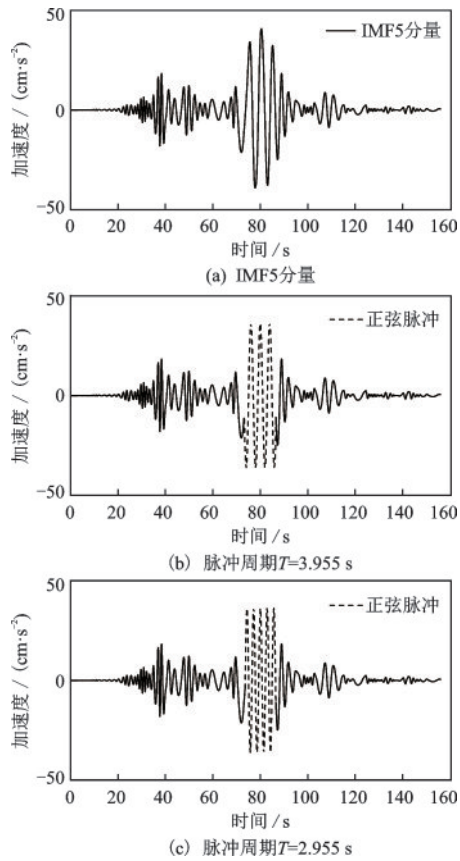


图12 ILA056-NS地震波卓越分量脉冲周期的调整
Fig.12 Adjustment of predominant component's pulse period of ILA056-NS

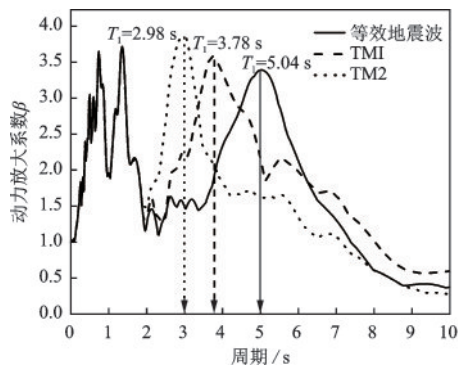


图13 等效地震波与重构地震波标准加速度反应谱对比
Fig.13 Comparison of normalized acceleration response spectra of original ILA056-NS and recombined ground motions

按照相同的步骤定量分析了表4中其余远场类谐和地震波卓越分量脉冲幅值及脉冲周期对其加速度反应谱双峰特征的影响规律,结论与ILA056-NS相同,即远场类谐和地震波中脉冲周期和脉冲幅值较大的类谐和脉冲段使远场类谐和地震波的加速度反应谱表现出明显的双峰特征。

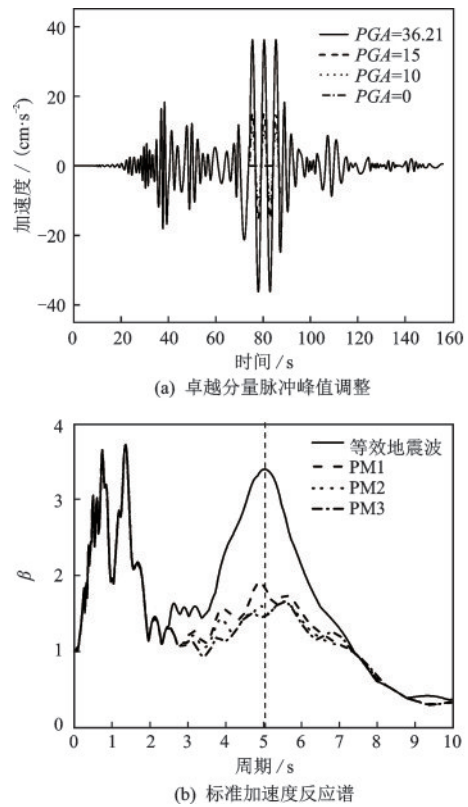


图14 ILA056-NS地震波卓越分量脉冲峰值的调整及等效地震波与重构地震波标准加速度反应谱对比

Fig.14 Adjustment of predominant component's pulse peak of ILA056-NS wave and comparison of normalized acceleration response spectra of original ILA056-NS and recombined ground motions

4 结论

本文基于HHT变换及等效简化方法分析了远场类谐和地震波时域特征对其加速度反应谱双峰特征的影响规律,引入了峰值比系数 α (远场类谐和地震波加速度放大系数谱中第二峰值与第一峰值之比)及卓越分量(时程曲线中含有多个循环脉冲,峰值较大,且平均周期与加速度反应谱第二峰对应周期接近的地震波IMF分量)的概念,主要结论如下:

(1) 远场类谐和地震波加速度反应谱具有明显的双峰特征,统计发现,集集地震中选择的远场类谐和地震波加速度反应谱第二峰对应周期主要分布在5s附近,汶川地震波主要分布在6.42s附近;另外,集集地震波的峰值比系数 α 均值为0.66,汶川地震波的峰值比系数 α 均值0.79,所选地震动的 α 均较大,不容忽视。

(2) 远场类谐和地震波卓越分量中脉冲周期及脉冲幅值较大的类谐和脉冲段使远场类谐和地震波加速度反应谱具有显著的双峰特征。

参考文献:

- [1] Viens L, Denolle M A. Long-period ground motions from past and virtual megathrust earthquakes along the Nankai Trough, Japan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2019, 109(4): 1312-1330.
- [2] Rabiee R, Chae Y. Adaptive base isolation system to achieve structural resiliency under both short and long-period earthquake ground motions[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(1): 16-31.
- [3] Kabir M R, Billah A M, Alam M S. Seismic fragility assessment of a multi-span RC bridge in Bangladesh considering near-fault, far-field and long duration ground motions [J]. Structures, 2019, 19: 333-348.
- [4] Hu R P, Xu Y L, Zhao X. Long-period ground motion simulation and its impact on seismic response of high-rise buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 22(7): 1285-1315.
- [5] 王博. 多类型长周期地震动作用下高层结构的动力行为与设计方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- Wang B. Study on dynamic behavior and design method of high-rise structures under multi-type long-period ground motions[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] 颜桂云, 方艺文, 吴应雄, 等. 远场类谐和地震动下大底盘单塔楼隔震结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(18): 86-94.
- Yan G Y, Fang Y W, Wu Y X, et al. Shaking table tests on single-tower isolated structures with a large chassis under far-field harmonic-alike ground motions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(18): 86-94. (in Chinese)
- [7] 韩建平, 石金辉. 特殊长周期地震动作用下超限高层建筑结构地震响应分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(5): 72-76.
- Han J P, Shi J H. Seismic response analysis of an out-of-code high-rise building structure under special long-period ground motion[J]. Building Structure, 2017, 47(5): 72-76. (in Chinese)
- [8] 王博, 刘伯权, 吴涛, 等. 长周期地震动低频脉冲特性及反应谱分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(3): 142-151.

- Wang B, Liu B Q, Wu T, et al. Analysis of low-frequency pulse characteristics and response spectrum for long-period ground motions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(3): 142-151. (in Chinese)
- [9] 李英民, 赵晨晓, 谭潜. 基于HHT地震动分量分离的长周期地震动界定方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7): 164-171, 219.
- Li Y M, Zhao C X, Tan Q. Classification method for long period ground motions based on component decomposition with HHT [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(7): 164-171, 219. (in Chinese)
- [10] 颜桂云, 肖晓菲, 潘钦锋, 等. 远场长周期地震动下高层摩擦摆基础隔震结构的减震性能[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(2): 99-110.
- Yan G Y, xiao X F, Pan Q F, et al. Seismic absorption performance of base-isolated high-rise structures using friction pendulums subjected to far-field long-period ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(2): 99-110. (in Chinese)
- [11] 谭潜, 李英民, 向渊明, 等. 远场长周期地震动特征[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(5): 177-188.
- Tan Q, Li Y M, Xiang Y M, et al. Study on characteristics of far-field long period ground motion [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(5): 177-188. (in Chinese)
- [12] 李慧. 中、美、欧、日建筑抗震规范地震作用对比研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- Li H. The seismic action comparison between Chinese, American, European and Japanese seismic design codes for buildings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] 李雪红, 王文科, 吴迪, 等. 长周期地震动的特性分析及界定方法研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(5): 685-692.
- Li X H, Wang W K, Wu D, et al. The bounded method and characteristics analysis for long-period ground motions [J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(5): 685-692. (in Chinese)
- [14] 许智星, 孙颖, 谷音, 等. 长周期地震动参数及频谱特征[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 760-764.
- Xu Z X, Sun Y, Gu Y, et al. The parameter and spectrum signature of long-period ground motion [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 760-764. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)

(下转第 498 页)