

美国加州 Ridgecrest 地震的地震动特性分析

张琪^{1,2}, 陈希^{1,2†}, 郑向远²

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要:为研究同一地震序列中两场震源相近, 发震时间间隔较短的主要地震活动中获取的地震动时频特性的异同, 选取了 2019 年 7 月美国加州 Ridgecrest 地震序列中震级分别为 M_w 6.4 和 M_w 7.1 的两场地震, 对比研究了两次地震中地震动参数随着震中距的衰减趋势, 并与俞言祥模型进行了对比; 讨论了这两个相近事件中地震动三要素(峰值加速度、反应谱和持时)的异同, 重点分析了两条不利地震动的反应谱; 通过希尔伯特-黄变换(HHT)获得地震动的 HHT 谱, 分析了地震动能量在时间和频率成分上的分布特征. 结果表明: 大部分地震动参数的衰减趋势与俞言祥模型吻合较好; 两场地震的反应谱基本相似; 地震动 HHT 谱最大能量所对应的瞬时频率和地震动时程峰值加速度所在循环的峰-谷频率很接近; 两次大地震相继发生可能会对结构造成更大的损坏.

关键词:地震序列; 地震动特性; 衰减关系; 地震动三要素; 希尔伯特-黄变换

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

Analysis on Seismic Motion Characteristics of the Ridgecrest Earthquakes in California USA

ZHANG Qi^{1,2}, CHEN Xi^{1,2†}, ZHENG Xiangyuan²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;

2. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In order to figure out the different temporal and spectral characteristics between two earthquakes with close hypocenter and short time interval in the same seismic sequence, two main shocks, M_w 6.4 and M_w 7.1 among the 2019 Ridgecrest earthquakes at California USA in July are selected. The attenuation trend of ground motions parameters with the change of epicentral distance for these two earthquakes is compared with Yu's model. The difference of three key elements of ground motions between these two earthquakes, including peak ground acceleration, response spectrum and duration, are analyzed. The potential seismic damage to structures is discussed by the response spectrum analysis of the selected two severest ground motions. The Hilbert-Huang transform (HHT) is adopted to obtain the HHT spectrum of ground motions for identifying the energy distribution in temporal and spectral domains. It shows that the attenuation trend of most of data agrees with Yu's model. The response spectra of the two earthquake events are similar. The instantaneous frequency corresponding to the largest energy of HHT spectrum is close to peak-trough frequency corresponding to the time series cycle with peak ground acceleration. Structures may be severely damaged subjected to two earthquakes occurred successively.

Key words: seismic sequence; ground motion characteristics; attenuation trend; three key elements of a seismic motion; Hilbert-Huang transform

* 收稿日期: 2020-03-03

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0303706), National Key Research and Development Program (2016YFC0303706)

作者简介: 张琪(1992—), 男, 江苏南通人, 清华大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: chenxi18@mails.tsinghua.edu.cn

基于地震动工程特性,选取适当的地震动进行结构物的动力响应分析,对于土木工程结构抗震设计和安全评估具有重要意义.目前世界范围内各地震活跃国家或地区正逐渐建立起覆盖整个区域的强震观测台网,这些观测台网的布设为地震动研究提供了丰富的数据来源.长期以来,地震动的研究主要集中在研究地震动三要素(峰值加速度、反应谱和持时)等时频域工程特性,以及基于地震动数据研究不同场地条件下的地震动衰减关系等.

近年来,基于实际地震动数据,冀昆等人^[1]结合震害调查,对云南鲁甸 M_s 6.5 地震从幅值特征、衰减关系等方面对地震动参数加以分析.在此基础上,戴嘉伟等^[2]将云南鲁甸 M_s 6.5 和云南景谷 M_s 6.6 地震进行对比,发现鲁甸地震地震动参数衰减快于景谷地震,该现象可能与 Q 值(介质品质因子)的区域差异性相关.王恒知等^[3]采用 H/V 单台谱比法分析了地震的场地放大效应,表明台站场地对地震动存在明显的放大现象.夏坤等^[4]对汶川地震部分台站记录进行分析,研究了传播距离和场地条件对远场地震动的影响.国内外多年来涌现出与上述成果类似的研究^[5-6],不一一列出.

2019 年 7 月 4 日和 7 月 6 日,在美国加州同一地点相隔不到 34 h 相继发生 6.4 级和 7.1 级强震,是一个较为特殊的事件.这两次强震同属于一个地震断裂带,且震源相近,属于同一个地震序列.因此,对这两个事件的地震动特征及其影响进行梳理和分析研究具有重要意义.本文基于美国工程强震数据中心(CESMD)获取的地震动信息,首先对地震动衰减关系进行研究;其次,鉴于它们震源相近,本文还对比研究了两次地震动 PGA、反应谱和持时等时频域特性的差异,并利用希尔伯特-黄变换研究了地震动能量在时-频域的分布特征.

1 数据

1.1 地震信息

2019 年 7 月 4 日 10 时 33 分,美国加利福尼亚州南部科恩县里奇克莱斯特(Ridgecrest)附近发生 6.4 级地震,震中位于瑟尔斯谷西南 12 km 处,震源深度 10.7 km.相隔不到 34 h,该地区再次发生强震,震级达 7.1 级,震源深度 8.0 km,震中与早前发生的 6.4 级地震震中十分接近,仅相距 17 km.虽然二者震级仅相差 0.7 级,但基本上不属于双震型事件.目前一致的看法是,后者为主震,前者为前震^[7].事实上,

在二者之间还发生过一个 5.4 级前震.

这是加州近 20 年来破坏性最强的两次地震,均发生在长约 45 km、宽约 15 km 的利特尔莱克断裂带上,震中附近地表出现大量裂痕及偏移,房屋倒塌,道路损毁,甚至引起火灾等次生灾害,造成 1 人死亡,数十人受伤,及超过 50 亿美元的较严重经济损失^[8-9].图 1^[10]和图 2^[11]展示了由 7.1 级地震造成的地表开裂和房屋损坏情况.同时,距离震中约 300 km 的洛杉矶和周边城市以及内华达州拉斯维加斯都有明显震感.



图 1 7.1 级地震引起的地表裂痕^[10]

Fig.1 Surface rupture during the M_w 7.1 earthquake^[10]



图 2 7.1 级地震引起的房屋损坏^[11]

Fig.2 House damage by the M_w 7.1 earthquake^[11]

1.2 数据选取

本文中强震动记录数据来源于美国工程强震数据中心(CESMD).CESMD 自 7 月 4 日至 7 月 11 日,包括主震及次大地震(7.1 级和 6.4 级)在内,共记录到 105 次地震($\geq M_w 3$),剔除震源深度小于等于 0 (可认为是地面塌陷或人为引起的震动)的数据后,得到 94 次地震.各地震震中分布如图 3 所示.图 4 所示为各次地震震级随时间变化曲线,从图中可看出,在 6.4 级的次大地震和 7.1 级的主震之间发生的地震,震级主要集中在 $M_w 3 \sim 4.5$,余震震级主要集中在 $M_w 4 \sim 5.5$.图 5 为地震震级与相应的震源深度

分布散点图,从图中可知,震源深度主要集中于0~13 km,均属于浅源地震(震源深度小于70 km),因此对地面建筑物带来的破坏较为严重.

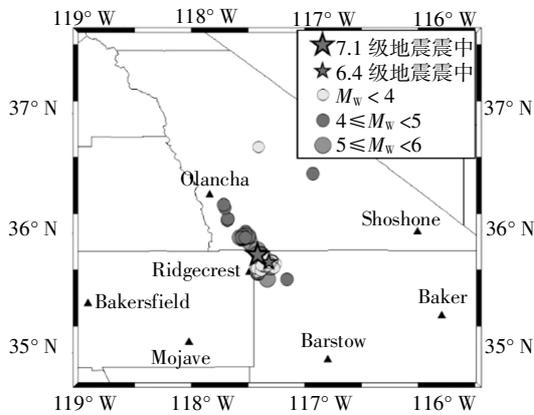


图3 各地震的震中位置分布

Fig.3 Distribution of the selected earthquake epicenters

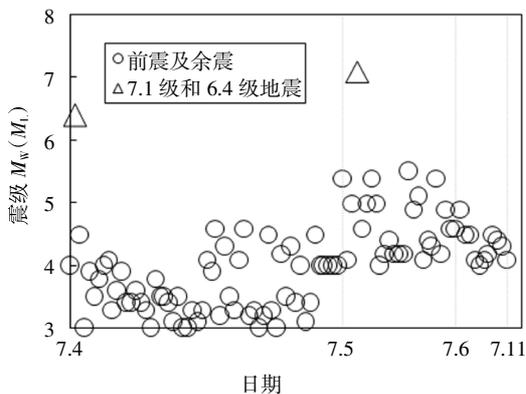


图4 地震震级随日期变化曲线

Fig.4 Earthquake magnitude varying with date

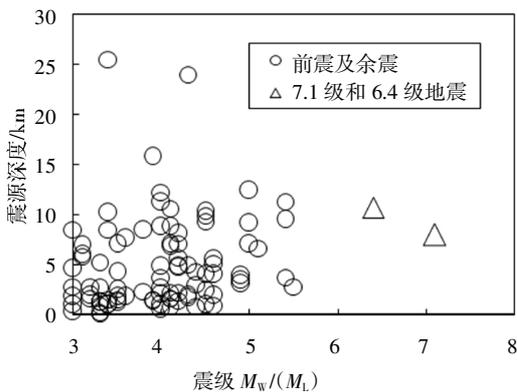


图5 地震震级与相应的震源深度分布

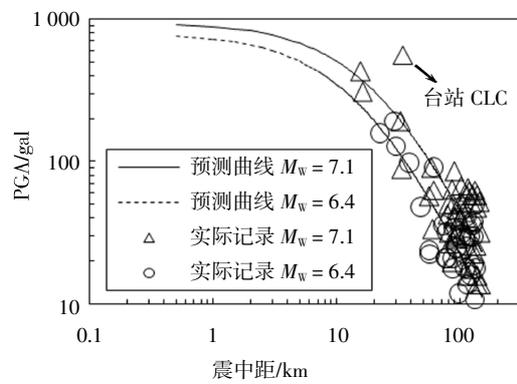
Fig.5 Earthquake magnitude with corresponding focal depth

2 衰减关系

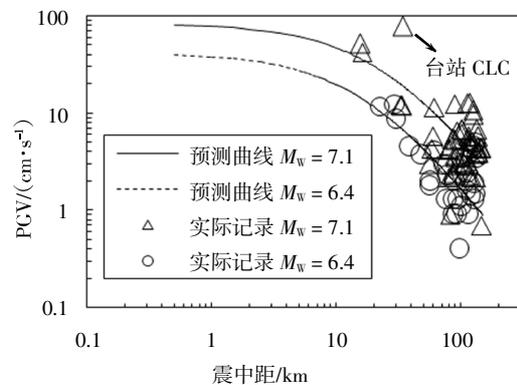
6.4级和7.1级地震震级均较大且相差仅0.7

级,在同一地震序列中能量较接近,因此以这两次地震动记录为例,进行地震动参数衰减关系的讨论.在给定震级、震中距等条件下,利用地震动参数的衰减曲线能够对地震动进行参数估计,从而用这些估计参数作为结构抗震和安全评估计算的输入^[12-15].

鉴于这两次地震在加州的台站均有记录,本文分别选取了两次地震动中峰值加速度(PGA)和峰值速度(PGV)较大的地震动记录,7.1级地震中选取前49条水平地震动记录,6.4级地震中选取前34条水平地震动记录,并分别与已有模型对比.该模型为俞言祥^[16]基于美国西部NGA强震数据库建立的基岩场地水平衰减关系模型,结果如图6所示.



(a)PGA 衰减曲线与实际记录值对比



(b)PGV 衰减曲线与实际记录值对比

图6 地震动衰减模型和测得的PGA与PGV对比

Fig.6 Seismic ground motion attenuation models versus measured PGA and PGV

从图6中可看出,对于7.1级和6.4级地震的PGA和PGV的实际记录值,俞言祥模型曲线基本从这些散点中间穿过.这些记录数据能够较好地反映出PGA和PGV随震中距的增大而衰减的趋势.其中,6.4级地震对应的PGA、PGV的残差平方和(SSR)均小于7.1级地震,如表1所示.这说明该模型对6.4级地震的地震动参数预测更加准确.此外,值得注意的是,在7.1级地震中,震中距 $R=34.5$ km

的台站 CLC,其 PGA 和 PGV 均远远高于俞言祥模型的预测值,造成此差异的原因有二:1)台站 CLC 虽然震中距较大,但是其断层距 $R_{rup} = 2.8 \text{ km}$ 远远小于其余台站,说明该台站与发震断层十分接近,地震波传播路径较短,因而地震动参数较大;2)台站 CLC 所处场地条件为 C 类(软基岩),不满足俞言祥模型的基岩场地条件,可能存在较大程度的场地放大效应,因而地震动参数较大。

表 1 所测地震动衰减参数和俞言祥模型间的残差平方和

Tab.1 SSR of measured seismic ground motions against Yu's attenuation model

震级	残差平方和(SSR)	
	PGA/gal ²	PGV/(cm·s ⁻¹) ²
6.4 级	8.82	16.48
7.1 级	13.61	24.80

3 地震动三要素

为了研究该地震活动中地震动的时频域特性,本文从 6.4 级和 7.1 级两次较大地震中分别选择了 137 条和 126 条地震动记录,并按照震中距的大小分为 <100 km, 100~200 km 以及 >200 km 三类(见表 2),研究两次主要地震中震中距所造成的差异。

表 2 地震动记录分类情况

Tab.2 Classification of earthquake ground motions

分类	震中距范围	地震动记录条数	
		6.4 级	7.1 级
1	< 100 km	34	30
2	100 ~ 200 km	50	50
3	> 200 km	53	46
合计		137	126

3.1 PGA 和持时

表 3 给出了 6.4 级和 7.1 级地震中不同震中距下水平和竖向地震动峰值加速度(PGA)平均值,同时也给出了竖向和水平 PGA 的比值关系.从表 3 中可看出在同一次地震中,随着震中距的扩大,无论是水平还是竖向地震动 PGA 都减小,这与 PGA 随震中距变化的一般规律相同^[7].同时,竖向和水平 PGA 的比值 PGA_V/PGA_H 也随着震中距变大而减小.对于不同震级(M_w 6.4 vs. 7.1)同一震中距分类地震动而言,震级越大则 PGA 越大;另外,震级增大时, PGA_V/PGA_H 也会增大。

表 3 不同震中距下的水平和竖向地震动平均 PGA

Tab.3 The horizontal and vertical PGA of seismic recordings with different epicenter distance

震中距/km	6.4 级			7.1 级		
	PGA _H	PGA _V	PGA _V	PGA _H	PGA _V	PGA _V
	/gal	/gal	/PGA _H	/gal	/gal	/PGA _H
<100	76.61	47.47	0.62	125.61	98.84	0.79
100~200	22.53	10.42	0.46	43.61	21.57	0.49
>200	9.83	3.51	0.36	21.65	8.20	0.38

表 4 列出了 6.4 和 7.1 级地震中不同震中距下水平和竖向地震动持时的平均值.本文采用 90%能量持时^[18-20]来确定地震动持续时间(一般又称为强震持时),是由于这种方法能够更充分地反映地震动的原始特征.该持时定义为地震动能量从总能量的 5% 累积到 95% 所经历的时间,见式(1)和式(2)。

表 4 不同震中距下的水平和竖向地震动平均持时

Tab.4 The averaged horizontal and vertical duration of seismic recordings with different epicenter distance

震中距/km	6.4 级			7.1 级		
	T_H/s	T_V/s	T_V/T_H	T_H/s	T_V/s	T_V/T_H
<100	19.22	21.15	1.10	25.58	26.28	1.03
100~200	28.08	38.36	1.37	30.85	40.23	1.30
>200	55.53	71.75	1.29	74.25	93.27	1.26

$$T_d = T_2 - T_1 \tag{1}$$

$$\frac{\int_0^{T_1} a^2(t)dt}{\int_0^T a^2(t)dt} = 5\%, \frac{\int_{T_1}^{T_2} a^2(t)dt}{\int_0^T a^2(t)dt} = 90\% \tag{2}$$

式中: T 为总持时,其分为 3 段,分别是 $0 \sim T_1$, $T_1 \sim T_2$ 和 $T_2 \sim T$, T_1 、 T_2 分别是总能量的 5% 和 95% 所对应的时间点, T_d 表示 90% 能量持时.从表 4 中可以看出,随着震中距增加,地震动加速度持时也相应增加,尤其在震中距大于 200 km 时,无论是水平向还是竖向地震动,加速度持时增幅最大.另外,对于竖向和水平持时比值 T_V/T_H ,震中距在 100 ~ 200 km 内最大,震中距小于 100 km 最小.值得注意的是,与 PGA 水平和竖向数值大小关系不同的是,对于地震动 90% 能量持时而言,竖向持时始终大于水平向持时.不同的震级也会影响持时大小,在本地震事件中,震级大地震动持时也变大,但是 T_V/T_H 却略有减小。

3.2 反应谱

利用精确法计算地震动的5%阻尼比加速度反应谱^[21-22],并将所有反应谱归一化处理,计算每一类别的平均反应谱,从而对比研究其差异.

图7(a)(b)分别表示两次地震中不同震中距类别的水平和竖向地震动加速度反应谱,纵坐标 β 为归一化的加速度反应谱值.从图中可看出,无论是水平还是竖向反应谱,对于同一次地震(6.4级或者7.1级),随着震中距增大,其谱值向长周期偏移,对于震中距超过200 km的地震动反应谱,其特征周期超过0.8 s,这反映出地震动传播距离越远,高频部分被削弱越多,而低频成分则不断扩大.另外,对于同一震中距分类,不同震级的2条反应谱的差别较小,尤其是对应第一类和第二类震中距(皆小于200 km)的地震动.造成如此结果的原因是这两次地震属于同一个地震序列,同时两次地震震源相近.

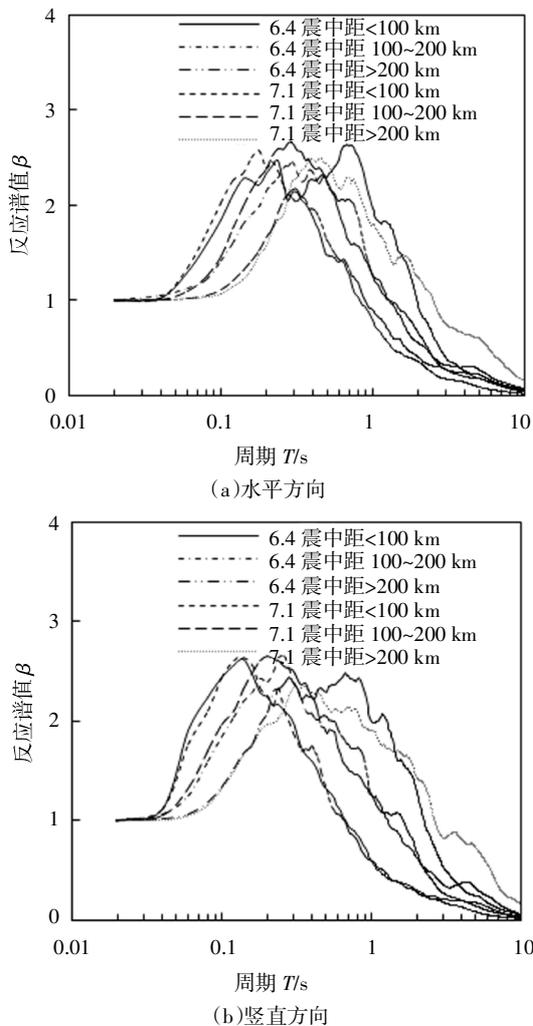


图7 两次地震中不同震中距下的平均地震动反应谱对比
Fig.7 Comparison of averaged seismic response spectra in the two earthquake events by epicenter distances

为了对比7.1级和6.4级地震中最显著反应谱

的差别,本文选择了获取的所有地震动数据中7.1级地震PGA最大的地震动,以及对应于该地震动观测台站记录得到的6.4级地震的地震动数据,分别为R1和R2,具体信息见表5.图8(a)(b)分别表示R1和R2的水平和竖向地震动反应谱(β 为归一化的加速度反应谱值).对于水平方向的反应谱,在周期 $0.2\text{ s} < T < 0.5\text{ s}$ 时,R1反应谱值显著大于R2,因此考虑到7.1级地震在6.4级之后发生,如果在此场地上的结构经受6.4级地震的地震动荷载后产生结构损伤,自振周期变长,在此情况下遭受7.1级地震,结构会受到更加严重的破坏.此外,从竖直方向的反应谱也可看出,R1的反应谱峰值要大于R2.

表5 选取的地震动信息

Tab.5 The selected seismic recordings

分组	地震动编号	震级	所选台站	场地分类	震中距/km
1	R1	7.1	China Lake	B	5.1
	R2	6.4	China Lake	B	14.9
2	R3	7.1	Helendale	D	116.3
	R4	6.4	Death Valley	C	115.4

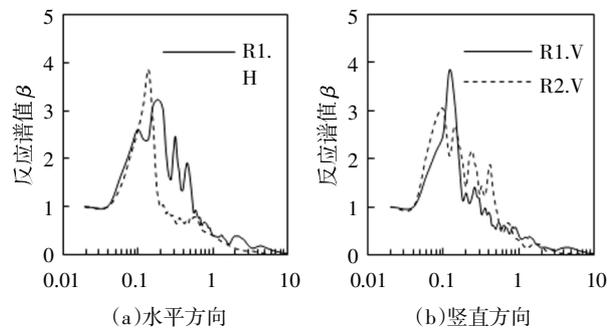


图8 R1和R2地震动反应谱对比
Fig.8 Comparison of response spectra of R1 and R2

图9(a)(b)分别给出了7.1级和6.4级地震中水平地震动反应谱峰值所对应的周期(下称峰值周期)在不同范围的分布图.除了图9(a)中最后一个柱形代表周期大于1.8 s的数据量,其他直方柱的周期间隔都是0.2 s.直方柱的高度表示峰值周期落在某一周期范围内的地震动数量,直方柱顶端数据表示落在此周期范围内的各地震动反应谱峰值的平均值.从图中可看出,无论是7.1级还是6.4级地震,两者大部分地震动峰值所对应的周期都落在0.2~0.4 Hz,在此周期内,7.1级地震的地震动平均反应谱峰值为3.75,比6.4级的平均反应谱峰值3.61略大.另外两

个差别是,对于 6.4 级地震,落在 0.6~0.8 s 范围内的地震动反应谱峰值个数超过 30 次,明显多于 7.1 级地震的地震动;对于 7.1 级地震的地震动,存在 3 条峰值周期大于 1.8 s 的较长周期地震动,而 6.4 级地震则没有。

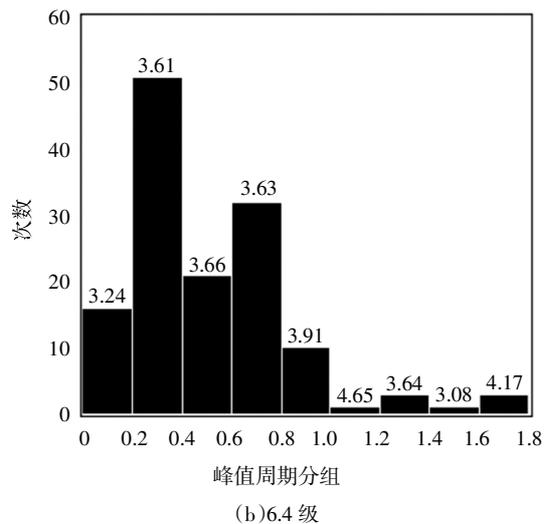
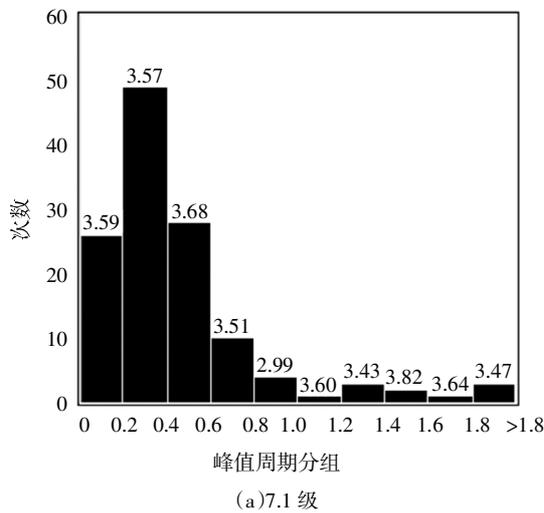


图 9 两次地震中水平地震动反应谱峰值所对应的峰值周期在不同范围的分布次数

Fig.9 Numbers of peak period in horizontal response spectra falling in equidistant intervals for M_w 6.4 and M_w 7.1 earthquakes

4 HHT 谱分析

4.1 希尔伯特-黄变换

针对地震动频域特征所采用的方法一般是傅里叶变换^[23],它更适用于平稳随机过程,即假设频率不随时间变化.然而实际中地震动记录的幅值和频率成分不断随时间变化,在严格意义上是一个非平稳

随机过程^[24],传统的傅里叶变换方法无法对地震动特性进行精细化研究.为了较好地描述地震动从开始激发到强震段,然后衰减结束的全过程,本文采用希尔伯特-黄变换(HHT)^[25-26],研究地震动能量在时间和频率成分中的分布情况.

为了利用 HHT 谱对 7.1 级和 6.4 级地震动进行特征分析,本文从收集的地震动数据库中选择了 2 组数据进行研究.每组中共 2 条地震动,其中第一组中一条是 7.1 级地震中记录到的最大水平地震动,该条地震动由“China Lake”地震台站记录得到,编号记为 R1,另一条是该强震观测台站所获取的 6.4 级地震的水平地震动,编号记为 R2,该组数据可以用来对比不同震级对地震动造成的影响差异.由于该组地震动是两次地震中分别记录的最大和次最大地震动,研究它们的差异是很有意义的.第二组是为了对比不同场地条件地震动 HHT 谱的差异,包含了 7.1 级和 6.4 级地震中不同台站获取的水平地震动数据,它们对应的震中距分别是 116.3 km 和 115.4 km,十分接近,编号分别记为 R3 和 R4,具体信息见表 5.

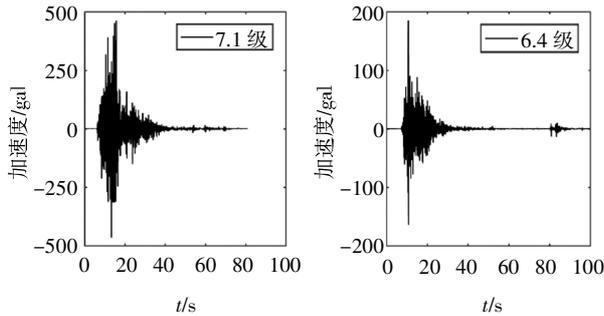
4.2 HHT 谱

4.2.1 第一组

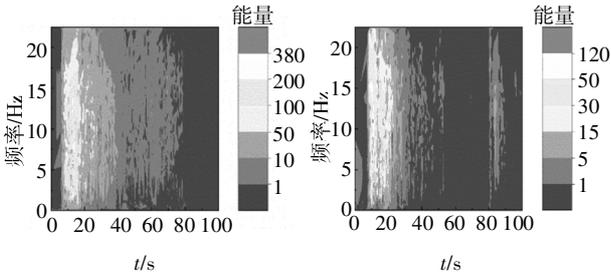
图 10(a)分别给出了第一组中 7.1 级和 6.4 级地震中记录的两条地震动 R1 和 R2 的时程和 HHT 谱.由于这两条地震动都是从同一个强震观测台站获取的,因此它们所在的场地条件是相同的,属于 B 类场地,不同的是震级以及震中距的差别.从图中可看出,R1 的 PGA 为 466.28 gal,而 R2 的为 184.95 gal,这主要是因为 R1 的震级比 R2 的震级大所致,而且震中距明显偏小.另外,R1 的能量持时也比 R2 的大,分别是 15.14 s 和 11.52 s.

图 10(b)(c)反映了 R1 和 R2 的能量在时间和频率上的分布情况.其中,R1 的 HHT 谱中显示最大瞬时能量为 442.7 gal²,所对应的瞬时频率为 5.06 Hz,发生在地震动时程的第 15.6 s. R2 的 HHT 谱中最大瞬时能量为 209.2 gal²,比 R1 最大瞬时能量小很多,这也体现在两者的 PGA 的大小上,其所对应的瞬时频率为 7.21 Hz,大于 R1 的瞬时频率.由此可见,该台站所记录的 7.1 级地震的地震动与 6.4 级地震动相比,主要能量偏向于更低频成分.考虑到 7.1 级地震在 6.4 级之后,这会对结构造成更严重的破坏,这与针对它们反应谱的分析结果一致.

由于通常情况下针对地震动特性的讨论是利用传统傅里叶变换进行频域分析, 本文同样用该方法计算了地震动的卓越频率, 即地震动功率谱中最大谱值对应的频率. 另外, 进一步在时程上计算了各地震动 PGA 所在那个循环的峰-谷频率, 具体结果见表 6. 从表 6 中可看出, 卓越频率是三者中最低的, 而峰-谷频率更接近于 HHT 瞬时频率.



(a)第一组 7.1 级和 6.4 级两条水平地震动 (R1 和 R2)



(b)R1 水平 HHT 谱 (c)R2 水平 HHT 谱

图 10 第一组中地震动及其 HHT 谱(R1 和 R2)

Fig.10 The selected horizontal recordings and the corresponding HHT spectra from Pair 1(R1 和 R2)

表 6 选取的地震动计算结果

Tab.6 The selected seismic recordings and their statistics

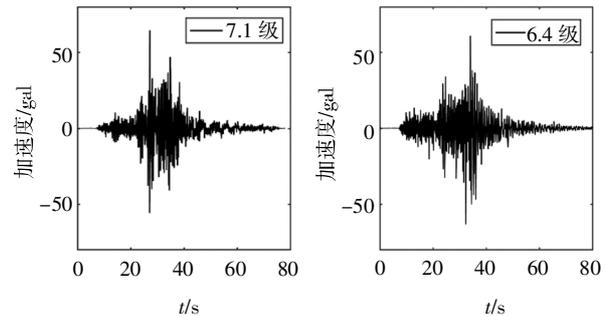
分组	地震动编号	PGA /gal	能量持时/s	卓越频率/Hz	峰-谷频率/Hz	HHT 瞬时频率/Hz
1	R1	466.28	15.14	2.88	4.55	5.06
	R2	184.95	11.52	6.72	7.14	7.21
2	R3	64.81	16.44	1.21	3.45	3.39
	R4	63.48	24.88	1.08	2.17	2.37

4.2.2 第二组

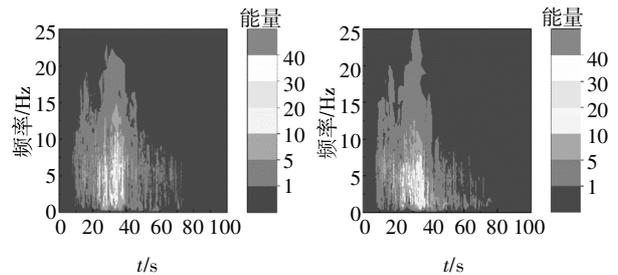
图 11(a)给出了第二组中 7.1 级和 6.4 级地震中记录的两条地震动 R3 和 R4 的时程和 HHT 谱. 这两条地震动对应的震中距分别为 116.3 km 和 115.4 km, 基本一致, 而强震观测台站所在场地分类不同,

分别是 D 类和 C 类场地. 从图中可看出, R3 的 PGA 为 64.81 gal, R4 为 63.48 gal, 两者的 PGA 基本相同, 但是考虑到 R3 和 R4 的震级不同, 一般来说, 震级越大则 PGA 越大, 如第一组地震动数据一样, 但是这一组地震动 PGA 却十分接近, 主要原因在于其场地条件的差异.

图 11 (b)(c) 是 R3 和 R4 的 HHT 谱. 其中, R3 的 HHT 谱中显示最大瞬时能量为 62.36 gal², 所对应的瞬时频率为 3.39 Hz, 而 R3 的卓越频率为 1.21 Hz, 峰-谷频率为 3.45 Hz, 故而与第一组数据类似, 峰-谷频率和 HHT 谱中最大能量对应的瞬时频率更加接近, 而卓越频率是三者中最小的. R4 的 HHT 谱中最大瞬时能量为 55.28 gal², 略小于 R3, 与 PGA 的大小关系一致, 其所对应的瞬时频率为 2.37 Hz, 小于 R1 的瞬时频率. 其卓越频率、峰-谷频率和 HHT 谱瞬时频率的关系与 R3 一致, 见表 6.



(a)第二组 7.1 级和 6.4 级两条水平地震动 (R3 和 R4)



(b)R3 水平 HHT 谱 (c)R4 水平 HHT 谱

图 11 第二组中地震动及其 HHT 谱(R3 和 R4)

Fig.11 The selected horizontal recordings and the corresponding HHT spectra from Pair 2 (R3 and R4)

5 结论

近期美国加州 Ridgecrest 发生的较大地震中, 同一地震序列中存在 6.4 级和 7.1 级两次较大震级的地震活动, 且两者的发生时间及震源较接近, 本文分别收集了二者的地震动记录, 研究它们相应的地震

动特性,得到以下主要结论:

1)两场地震中所选地震动的 PGA、PGV 的衰减趋势与俞言祥模型吻合较好,其中 6.4 级地震的地震动参数与模型的吻合度更高. PGA 和 PGV 大致随震中距的增大而衰减,但是断层距和场地条件的差异也可能造成 PGA 和 PGV 数值的异常.另外,地震动的能量持时随震中距和震级的增大而增大,同一观测站记录的竖向地震动能量持时大于水平向持时.对于同一次地震,随着震中距增大,其反应谱值向长周期偏移.同一地震序列中的两次地震(如本文 6.4 级和 7.1 级),它们的反应谱基本相似,尤其是在震中距小于 200 km 的情况下.

2)HHT 变换可以获得地震动的 HHT 谱,从而用来分析地震动能量在时间和频率上的分布情况.从频率成分来看,地震动 HHT 谱最大能量所对应的瞬时频率和地震动时程 PGA 所在循环的峰-谷频率很接近,卓越频率明显小于 HHT 瞬时频率和峰-谷频率.由于两次地震的震中和发震时间比较接近,因此两次地震中地震动的时-频特性基本相似.但也注意到,二者存在着差异,比如在震中的相同场地条件下,7.1 级地震中所测记录(R1)的卓越频率和 HHT 瞬时频率都明显小于 6.4 级地震的记录(R2),因而对所处区域内的结构的动力响应自然也造成不同程度的影响.

3)通过对上述地震动分析可知,结构若经历 6.4 级地震之后产生损伤,其自振周期会变长,如果再次遭受主要能量更偏向长周期成分的 7.1 级地震的地震动作用,就可能会对结构造成更为严重的破坏.这将通过后续的具体震害调查予以进一步确认和深入分析.

参考文献

- [1] 冀昆,温瑞智,崔建文,等.鲁甸 M_s 6.5 级地震强震动记录及震害分析[J].震灾防御技术,2014,9(3):325—339.
JI K,WEN R Z,CUI J W,*et al.* Observation of strong motion and damage investigation for M_s 6.5 Ludian earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(3): 325—339. (In Chinese)
- [2] 戴嘉伟,冀昆,温瑞智,等.云南景谷 M_s 6.6 级地震地震动特征分析[J].地震工程学报,2015,37(4):969—975.
DAI J W,JI K,WEN R Z,*et al.* Ground motion characteristics of the Jinggu M_s 6.6 earthquake in Yunnan [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 969—975. (In Chinese)
- [3] 王恒知,俞言祥,何斌,等.高邮-宝应 4.9 级地震地面运动特征分析[J].地震地质,2018,40(6):1349—1361.
WANG H Z,YU Y X,HE B,*et al.* Ground motion characteristics of Gaoyou-Baoying M4.9 earthquake [J]. Seismology and Geology, 2018, 40(6): 1349—1361. (In Chinese)
- [4] 夏坤,张令心,董林.汶川地震黄土地区远场地震动特征分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):178—184.
XIA K,ZHANG L X,DONG L. Far-field ground motion characteristics of loess area in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1): 178—184. (In Chinese)
- [5] 汪梦甫,汪帆辉,唐毅.近场脉冲型地震对结构非弹性位移比谱的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(6):9—15.
WANG M F,WANG Z H,TANG Y. Influence of near-fault pulse-type ground motions on inelastic displacement ratio spectra [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(6): 9—15. (In Chinese)
- [6] 潘毅,王忠凯,时胜杰,等.尼泊尔 8.1 级地震加德满都-樟木沿线民居震害调查与分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(3):35—44.
PAN Y,WANG Z K,SHI S J,*et al.* Investigation and analysis on seismic damage of residential buildings along the highway from Kathmandu to Zhangmu in M_s 8.1 Gorkha earthquake [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44 (3): 35—44. (In Chinese)
- [7] ANSS. M7. 1 - 2019 Ridgecrest earthquake sequence [EB/OL]. (2019-07-06) [2019-09-05]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/ci38457511/executive/>.
- [8] ERIKA M,ERIC S. 1st fatality in Ridgecrest earthquake may be man found dead under jeep 100 miles from epicenter:investigators [EB/OL]. (2019-07-09) [2019-09-05]. <https://ktla.com/2019/07/09/1st-fatality-in-ridgecrest-earthquake-may-be-man-found-dead-under-jeep-100-miles-from-epicenter-investigators/>. <https://ktla.com/2019/07/09/1st-fatality-in-ridgecrest-earthquake-may-be-man-found-dead-under-jeep-100-miles-from-epicenter-investigators/>.
- [9] Los Angeles Times. Ridgecrest quake damage estimated above \$5 billion at massive China Lake naval base [EB/OL]. (2019-08-14) [2019-09-05]. <https://ktla.com/2019/08/14/ridgecrest-earthquakes-left-up-to-5-billion-in-damage-to-massive-china-lake-naval-base/>.
- [10] USGS. Update:magnitude 7.1 earthquake in Southern California [EB/OL]. (2019-07-06) [2019-09-05]. https://www.usgs.gov/news/update-magnitude-71-earthquake-southern-california?qt-news_science_products=7#qt-news_science_products.
- [11] JESSICA M. California suffers earthquake damage,rockslides [EB/

- OL]. (2019-07-06)[2019-09-05]. <https://heavy.com/news/2019/07/trona-earthquake-damage-photos/>, <https://heavy.com/news/2019/07/trona-earthquake-damage-photos/>.
- [12] 陈鲲, 俞言祥, 高孟潭, 等. 利用强震记录校正的芦山 7.0 级地震峰值加速度震动图[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 627—633.
CHEN K, YU Y X, GAO M T, *et al.* Shakemap of peak ground acceleration with bias correction for the Lushan, Sichuan earthquake on April 20, 2013 [J]. *Seismology and Geology*, 2013, 35(3): 627—633. (In Chinese)
- [13] LIU K S, TSAI Y B. Attenuation relationships of peak ground acceleration and velocity for crustal earthquakes in Taiwan [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(3): 1045—1058.
- [14] SADIGH K, CHANG C Y, EGAN J, *et al.* Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data[J]. *Seismological research letters*, 1997, 68(1): 180—189.
- [15] YOUNG R, CHIOU S J, SILVA W, *et al.* Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes [J]. *Seismological Research Letters*, 1997, 68(1): 58—73.
- [16] 俞言祥, 汪素云. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(3): 206—217.
YU Y X, WANG S Y. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in eastern and western China [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1(3): 206—217. (In Chinese)
- [17] 张皎. 场地条件对地震动峰值及衰减关系的影响研究 [D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2008: 17—23.
ZHANG J. Study on the effect of site condition to ground motion amplitude and attenuation relations [D]. Beijing: College of Architecture and Civil Engineering of BJUT, 2008: 17—23. (In Chinese)
- [18] 白玉柱, 徐锡伟. 由强震动数据分析芦山地震地面运动持时及周期特征[J]. 地震地质, 2017, 39(1): 92—103.
BAI Y Z, XU X W. Analysis on the characteristics of duration and period of ground motion of the Lushan earthquake based on the station records [J]. *Seismology and Geology*, 2017, 39(1): 92—103. (In Chinese)
- [19] 潘志宏, 洪博. 地震动频谱特性和持时对 IDA 结果影响的研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 155—159.
PAN Z H, HONG B. Influence of spectral characteristics and duration of ground motions on results of IDA [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(5): 155—159. (In Chinese)
- [20] TRIFUNAC M D, BRADY A G. A study on the duration of strong earthquake ground motion [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1975, 65(3): 581—626.
- [21] BIOT M A. A mechanical analyzer for the prediction of earthquake stresses [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1941, 31(2): 151—171.
- [22] NIGAM N C, JENNINGS P C. Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1969, 59(2): 909—922.
- [23] BRACEWELL R N. *The Fourier transform and its applications*[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986: 6—7.
- [24] 欧进萍, 牛荻涛, 杜修力. 设计用随机地震动的模型及其参数确定[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 45—54.
OU J P, NIU D T, DU X L. Random earthquake ground motion model and parameter determination used in a seismic design [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1991, 11(3): 45—54. (In Chinese)
- [25] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903—995.
- [26] HUANG N E. A new spectral representation of earthquake data: Hilbert spectral analysis of station TCU129, Chi-chi, Taiwan, 21 September 1999[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 91(5): 1310—1338.