

# 2016年日本熊本 $M_w$ 7.0 地震强震动记录特征分析<sup>\*</sup>

解全才<sup>1</sup>, 马强<sup>1</sup>, 张景发<sup>2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
2. 中国地震局地壳应力研究所 中国地震局地壳动力学重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 对2016年日本熊本  $M_w$  7.0 地震 K-net 和 Kik-net 强震动台网获取的强震动记录进行校正处理, 分析了峰值加速度与峰值速度幅值特征, 将观测结果与日本常用的3组衰减关系进行了对比, 最后分析了强震动记录的持时特征和频谱特征。结果表明: ①本次地震 EW, NS 及 UD 向最大峰值加速度分别为 1 156.95 gal, -786.60 gal, 874.40 gal, 与日本地区峰值加速度和峰值速度衰减公式预测值比较吻合; ②5% - 75% 和 5% - 95% 的2种能量持时整体上符合随距离增大而增大的规律; ③KMMH16 台站3个方向的加速度反应谱在 0.5 ~ 1.2 s 都超过1995年阪神地震中 JR Takaroti 台站的反应谱, 本次地震对木结构房屋和低矮及中层钢筋混凝土房屋破坏严重。

**关键词:** 熊本地震; 仪器地震烈度; 峰值加速度; 持时; 频谱

**中图分类号:** P315.91

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2020)01-0125-09

## 0 引言

据日本气象厅正式测定, 日本时间2016年4月16日1时25分5.47秒, 在九州岛熊本县(32.755°N, 130.763°E)发生  $M_w$  7.0 地震, 震源深度12 km。根据熊本地震震源机制解及震后余震分布情况, 结合日本学者现场调查地表破裂特征, 可以确定熊本地震发震构造为日奈久—布田川断层系统(解全才, 2018)。对本次地震强震动记录进行深入分析可以为认识该地区地震动特征和工程震害调查提供参考资料。震后许多学者利用地震记录及大地测量数据做过关于滑动分布反演研究(Yagi *et al.*, 2016; Asano, Iwata, 2016)以及震害调查(Goda *et al.*, 2016; Sakai, 2016)等方面的研究。

本文对日本防灾科学研究所(NIED) K-net 台网和 Kik-net 台网获取的熊本地震强震动记录进行校正处理, 在此基础上分析了该次地震的峰值加速度与峰值速度幅值特征, 并将观测结果与日本常用的3组衰减关系进行了对比, 计算得到

5% - 95% 与 5% - 75% 能量持时, 与国际主流持时衰减关系进行对比, 详细分析了震中区的反应谱特征。

## 1 幅值特征

基于阪神地震的经验教训和日本未来可能发生大地震的假设, NIED 在自由地表安装了1 000多个强震加速度计组成 K-net 强震动台网, 台间距约20 km; 建设约700个由地表和井下加速度计组成的 KiK-net 强震动台网(Kinoshita, 1998; Aoi *et al.*, 2010)。2003—2008年 NIED 利用 K-net02, K-net02A 和 KiK-net06 系统替换 K-net 和 KiK-net 强震动台网的1 700多个台站的 K-NET95 和 SMAC-MDK 系统(井下传感器除外), 替换后仪器的数据采集系统具有连续观测的能力(解全才等, 2017)。日本 K-net 与 Kik-net 台网强震仪器数据采样率都为100 Hz。K-net 台网采用 K-net02 和 K-net02A 强震仪器, 2种仪器可测量最大加速度都为4 000 gal, 动态量程都为132 dB, 数据传输都采用 TCP/IP 协议, 都支持 Linux 编程, 其中 K-net02 系

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-06-30.

**基金项目:** 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2019B06)和国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0109800)联合资助。

统采用凯尼公司的 FBA - FS 加速度计, 记录能力为 512 MB; K-net02A 系统采用日本电子航空工业公司的 JA40GA 加速度计, 记录能力为 768 MB (Aoi *et al*, 2010); Kik-net06 系统可测量的最大加速度为 4 000 gal, 井下最大加速度为 2 000 gal, 地表加速度计采用日本电子航空工业公司的 JA40GA 加速度计, 井下加速度计采用日本 Akashi 公司的 V404 加速度计, 动态量程为 132 dB, 记录能力为 768 MB, 数据传输采用 TCP/IP 协议, 支持 Linux 编程 (Aoi *et al*, 2010)。

在日本熊本地震中, K-net 强震动台网获取 365 组强震动记录; Kik-net 强震动台网获取 660 组强震动记录, 包含 330 组自由地表加速度记录与 330 组井下加速度记录。熊本地震获取记录台站分布如图 1 所示。本文采用国家强震动台网中心 (CSMNC) 强震数据处理方法对日本 K-net 和 Kik-net 强震动台网获取的加速度记录进行处理 (于海英等, 2009; 解全才等, 2018), 结果如下:

#### (1) Kik-net 强震动台网的 KMMH16 台站记录

到 EW 向和 UD 向最大峰值加速度分别为 1 156.95 gal 和 873.401 gal, 如图 2a 所示; KMMH03 台站记录到 NS 向最大峰值加速度为 -786.60 gal, 如图 2b 所示。

(2) 校正峰值加速度和速度分布如图 3 所示, 由图可见, EW, NS 及 UD 向峰值加速度范围分别在 0.15 ~ 1 156.95 gal, 0.22 ~ 786.60 gal 及 0.09 ~ 873.40 gal; EW, NS 及 UD 向峰值速度范围在 0.13 ~ 134.47 cm/s, 0.16 ~ 85.63 cm/s 及 0.13 ~ 58.13 cm/s。

(3) 按照《仪器地震烈度计算暂行规程》中算法 (中国地震局监测预报司, 2015), 利用三分向数据计算强震动记录得到仪器地震烈度分布如图 4a 所示, 仪器地震烈度为 1.0 ~ 10.1; 按照日本气象厅仪器烈度标准 (Yamazaki *et al*, 1998), 利用三分向数据计算强震动记录得到仪器地震烈度分布如图 4b 所示, 仪器地震烈度为 0 ~ 6.4。Kik-net 强震动台网的 KMMH16 台站记录取到本次地震的最大仪器地震烈度。

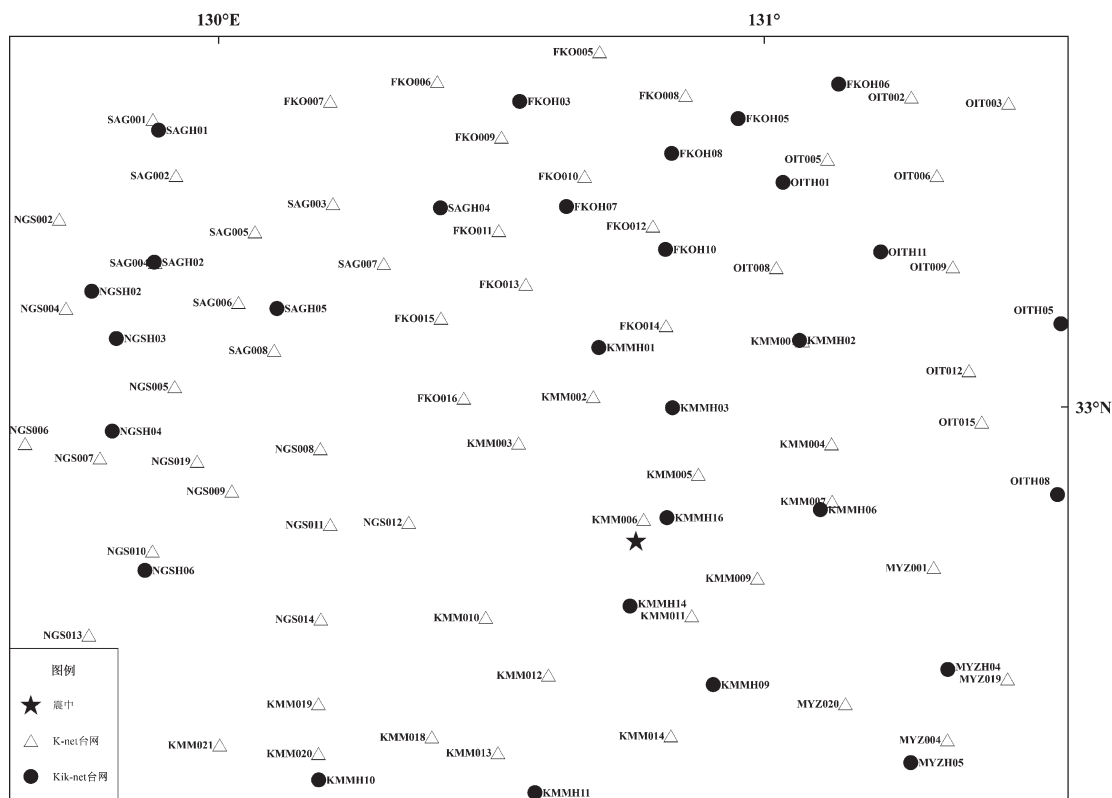


图 1 熊本地震获取记录台站分布图

Fig. 1 The station distribution map of the Kumamoto earthquake

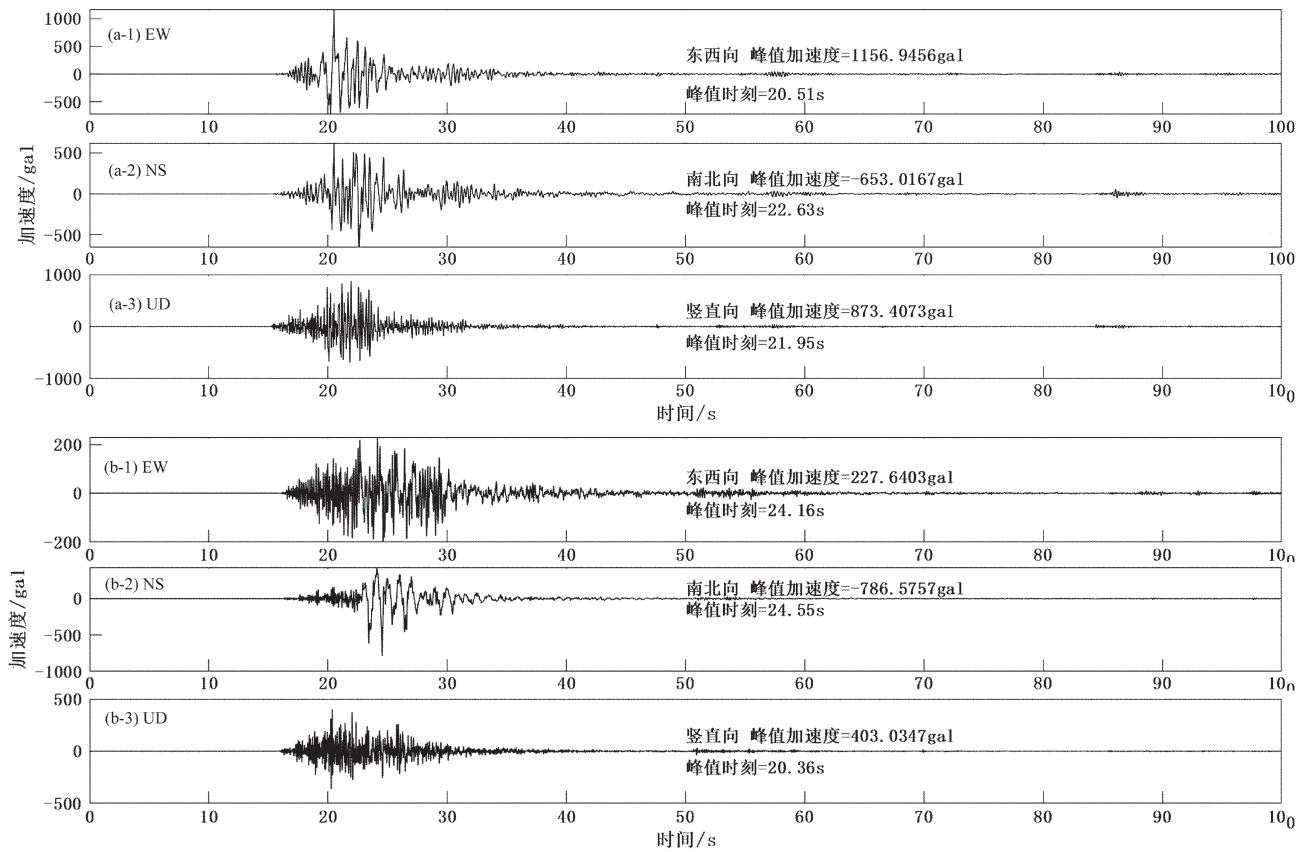


图 2 KMMH16 (a) 与 KMMH03 (b) 台站记录的加速度时程曲线  
Fig. 2 The accerlergram of stations of KMMH16 (a) and KMMH03 (b)

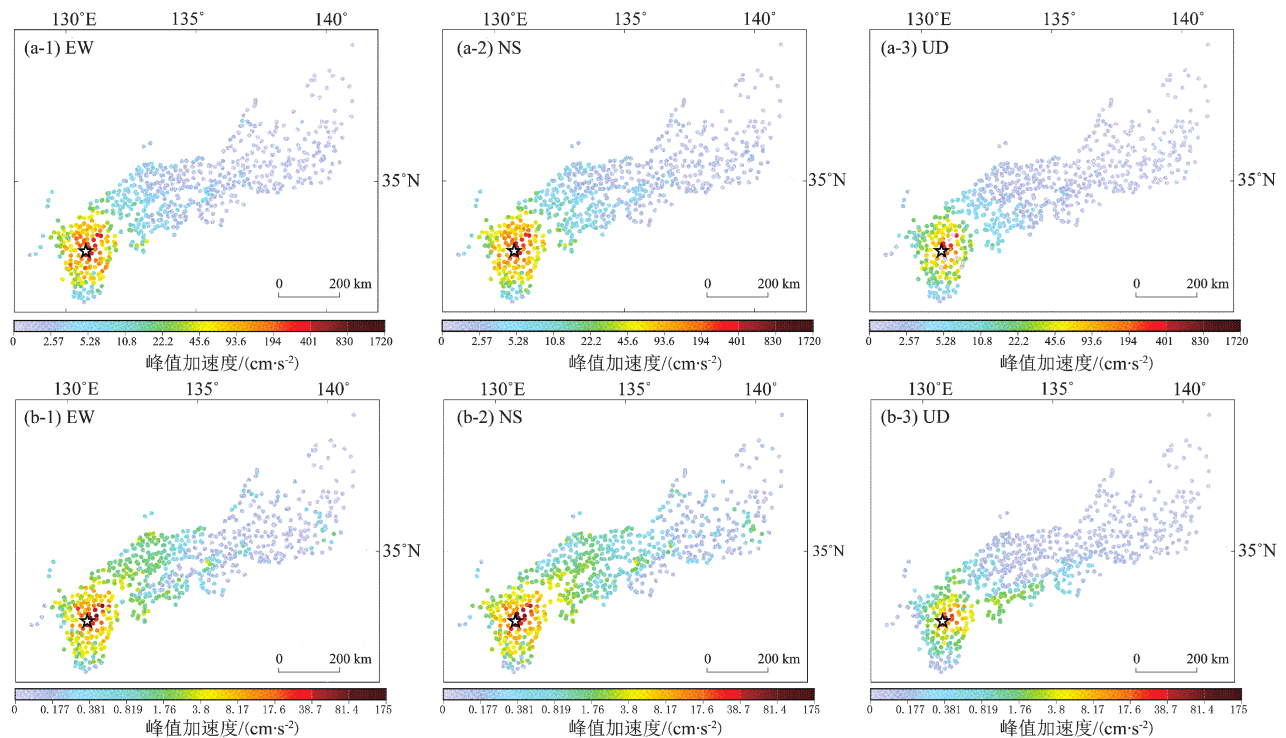


图 3 校正峰值加速度 (a) 与校正峰值速度 (b) 分布图

Fig. 3 Corrected peak ground acceleration (a) and peak ground velocity (b) distribution map

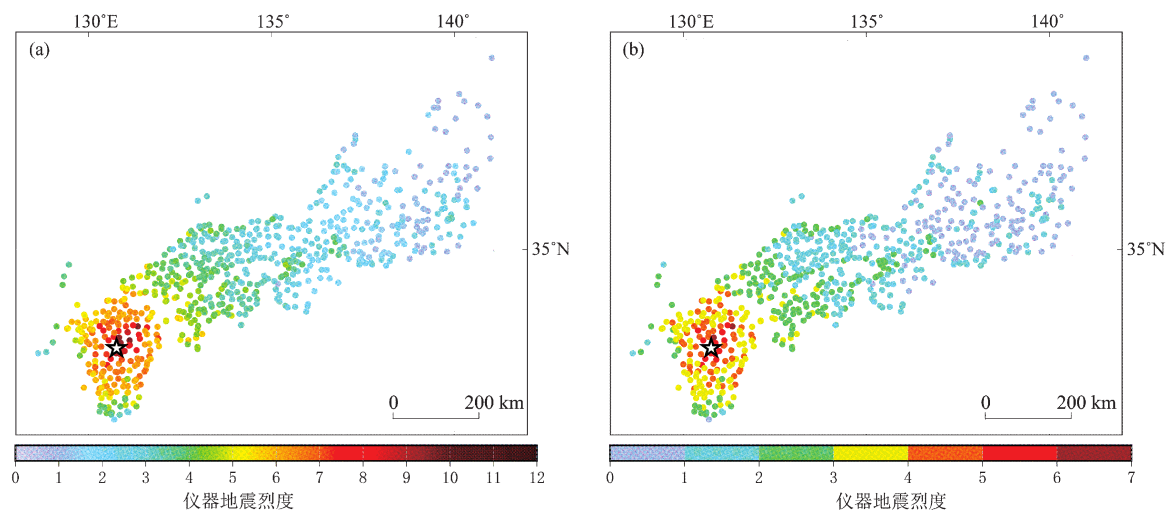


图4 按照中国仪器地震烈度标准 (a) 及日本气象厅仪器地震烈度标准 (b) 得到熊本地震仪器地震烈度分布图

Fig. 4 Instrumental seismic intensity map of China seismic intensity scale (a) and Japan seismic intensity scale (b)

Si 和 Midorikawa (1999) 提出的日本的峰值加速度衰减公式和峰值速度衰减公式被广泛应用于日本地震动衰减预测中 (Headquarters for Earthquake Research Promotion, 2009), 本文利用该公式对熊本地震地震动衰减特征进行分析:

$$\lg(PGA) = 0.50 \times M_w + 0.0043D + d - \lg(X + 0.0055 \times 100.5 \times M_w) + 0.003X + 0.61 \tag{1}$$

$$\lg(PGV) = 0.58 \times M_w + 0.0038D + d - \lg(X + 0.0028 \times 100.5 \times M_w) - 0.002X - 1.29 \tag{2}$$

式中:  $X$  为断层距离;  $D$  为震源深度;  $M_w$  为矩震级;  $d$  代表不同地震类型的系数, 对于地壳地震、板间地震、板内地震,  $PGA$  的  $d$  取值分别是 0.0, 0.01, 0.22;  $PGV$  的  $d$  取值分别为 0.0, -0.02, -0.12; 根据日本气象厅发布的地震定位结果和日本防灾科学研究所发布的震源机制结果, 熊本地震  $D$  取 12.45,  $M_w$  为 7.1。

将本文得到的观测数据与 Kataoka 等 (2006)、Kanno 等 (2006) 和 Si 和 Midorikawa (1999) 的衰减公式进行对比, 发现本次地震观测峰值加速

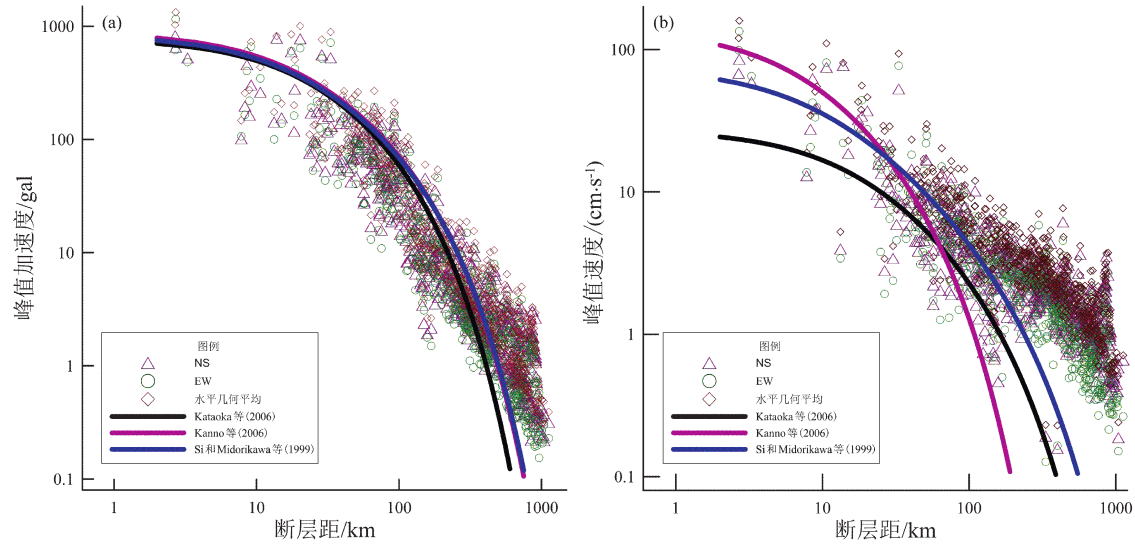


图5 观测  $PGA$  (a) 和  $PGV$  (b) 与对应衰减关系的比较

Fig. 5 Comparison of the observed horizontal  $PGA$  (a) and  $PGV$  data (b) with related attenuation relationship



度与 Si 和 Midorikawa (1999)、Kataoka 等 (2006)、Kanno 等 (2006) 地震动衰减公式预测结果较一致。断层距在 200 km 内, 观测峰值速度与 Si 和 Midorikawa (1999)、Kanno 等 (2006) 衰减公式比较一致, 高于 Kataoka 等 (2006) 衰减公式; 断层距超过 200 km 后, 观测峰值速度比 Si 和 Midorikawa (1999)、Kataoka 等 (2006) 以及 Kanno 等 (2006) 地震动衰减公式预测结果衰减缓慢。

## 2 持时特征

关于地震动持时, 学术界有许多不同的定义, 一般分为括号持时、一致持时、有效持时和能量持时 4 种类型 (Bommer, Martinez, 1999)。能量持时通常基于加速度积分得到 (Arias, 1970)。能量持时计算过程如下:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_0} a(t)^2 dt \quad (3)$$

$$D_{xy} = t_x - t_y \quad (4)$$

$$x = \frac{100\%}{I_a} \int_0^{t_x} [a(t)]^2 dt \quad (5)$$

$$y = \frac{100\%}{I_a} \int_0^{t_y} [a(t)]^2 dt \quad (6)$$

式中:  $I_a$  为 Arias 强度;  $D_{xy}$  代表不同取值时的能量持时;  $g$  为重力加速度;  $t_0$  为加速度时程总持续时间;  $a(t)$  为加速度记录;  $t_x, t_y$  分别为能量比达到  $x$  或者  $y$  的时刻。通常  $x, y$  有 2 种取法, 分别是  $x = 5\%, y = 75\%$  或者  $x = 5\%, y = 95\%$ , 即通常说的 5% - 75% 和 5% - 95% 能量持时。Brendon (2011) 指出 5% - 95% 能量持时在目前工程实践中广泛应用, Bommer 等 (2009) 研究指出 5% - 75% 能量持时一般只包含体波的能量, 5% - 95% 能量持时同时包含体波和面波的能量。

本文利用经过校正处理的熊本地震加速度数据计算得到 5% - 95% 和 5% - 75% 能量持时, 如图 6 所示。由图可见, EW 向 5% - 95% 能量持时和 5% - 75% 能量持时分别为 6.49 ~ 197.41 s 和 2.22 ~

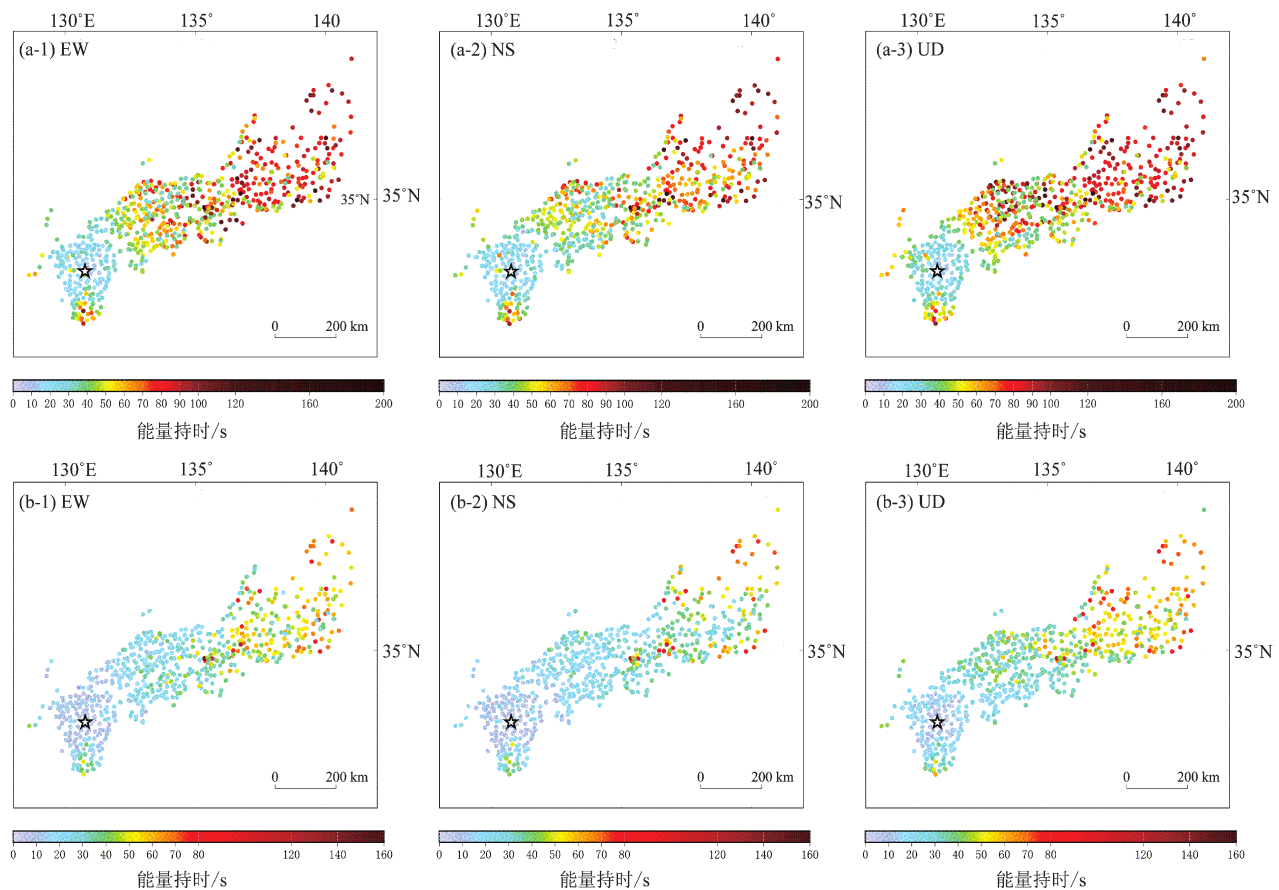


图 6 5% - 95% (a) 与 5% - 75% (b) 能量持时分布图

Fig. 6 The 5% - 95% (a) and 5% - 75% (b) significant duration distribution map

155.58 s; NS 向 5% - 95% 和 5% - 75% 能量持时分别为 7.45 ~ 157.66 s 和 2.01 ~ 131.26 s; UD 向 5% - 95% 和 5% - 75% 能量持时分别为 4.16 ~ 174.86 s 和 2.31 ~ 126.80 s。熊本地震 5% - 95% 能量持时为 4.16 ~ 197.41 s, 主要集中在 30 ~ 60 s; 5% - 75% 能量持时为 2.01 ~ 155.58 s, 主要集中在 10 ~ 50 s。总体来说, 5% - 75% 和 5% - 95% 能量持时符合随震中距增大而增大的规律。

针对 5% - 95% 能量持时, 分别选用 Boomer 等 (2009) 基于 NGA 数据库的全球模型以及 Trifunac 和 Brady (1975) 的美国加州模型进行能量持时衰减分析。由图 7a 可见, 水平向观测

数据的 5% - 95% 能量持时与 Trifunac 和 Brady (1975) 能量持时预测模型结果一致, 整体上符合随着断层距离增大而增大的规律。在断层距超过 100 km 后, 水平向观测数据的 5% - 95% 能量持时远高于 Boomer 等 (2009) 的预测模型。针对 5% - 75% 能量持时, 选用 Boomer 等 (2009) 能量持时衰减模型进行分析, 由图 7b 可见, 在断层距小于 100 km 时, 水平向观测数据的 5% - 75% 能量持时与 Boomer 等 (2009) 预测模型比较一致, 在断层距超过 100 km 后, 水平向观测数据的 5% - 75% 能量持时远高于 Boomer 等 (2009) 的预测模型。

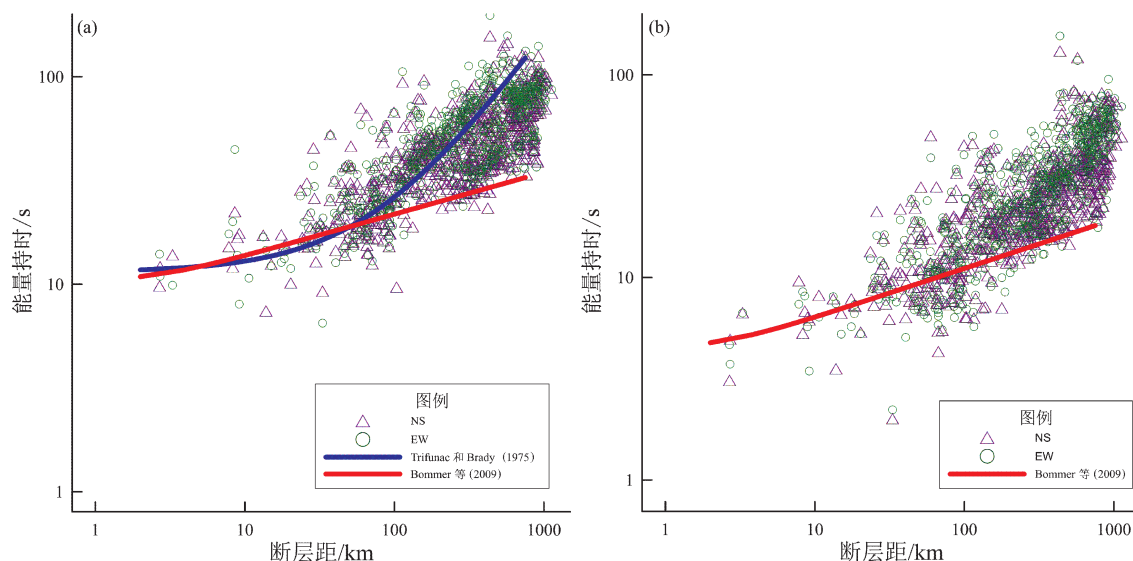


图 7 水平向观测数据 5% - 95% (a) 和 5% - 75% (b) 能量持时与相应衰减关系的比较

Fig. 7 Comparison of the observed 5% - 95% (a) and 5% - 75% (b) horizontal significant duration with related attenuation relationship

### 3 频谱特征

图 8 为熊本地震中获取最大峰值加速度的 KMMH16 与 KMMH03 台站的加速度反应谱与 1995 年阪神地震 JR Takatori 台站的反应谱对比, 图中 TAK 为 JR Takaroti 台站。由图 8 可见, 震中距为 7 km 的 KMMH16 台站 EW, NS 及 UD 向记录到的峰值周期分别为 0.40 s, 0.30 s 及 0.25 s 左右; 震中距为 28 km 的 KMMH03 台站 EW, NS 及 UD 向记录到的峰值周期分别为 0.18 s, 0.90 s 及 0.09 s 左右。KMMH16 台站 3 个方向的反应

谱在 0.5 ~ 1.2 s 时都超过 JR Takaroti 台站的反应谱, 该周期范围与结构破坏严重程度密切相关 (Sakai, 2009)。与日本 BSL 规范 (Yuji, Hans, 1987) 中软土设计谱比较, 可以发现 KMMH16 台站水平向反应谱在 0.05 ~ 2 s 都超过规范设计谱, 竖直向反应谱在 0.05 ~ 0.5 s 超过该地区设计谱, KMMH03 台站 NS 向在 0.05 ~ 2 s 也超过该地区设计谱, 故本次地震中熊本地区木结构房屋和低矮及中层钢筋混凝土建筑破坏严重, 与 Sakai (2016) 在震害调查中指出的木结构房屋倒塌比例高达 50% 的结果一致。KMMH16 与 KMMH03 台站 NS 方向在 1 ~ 2 s 的反应谱仍然较

高,对高层建筑及其他长周期结构也会产生一定程度的破坏。Goda等(2016)指出在离震中非常近的KMM006台站南方发现了钢筋混凝土结构的9层公寓产生了破坏,在KMMH16台站附近的益城町发现了桥梁破坏情况,日奈久断层东

段穿过的西原村附近沿着日本28号公路上一些桥梁、大坝、隧道发现较大的破坏,导致难以进入阿苏地区。以上震害调查依据证实了本次地震会对高层建筑及其他长周期结构产生一定程度的破坏。

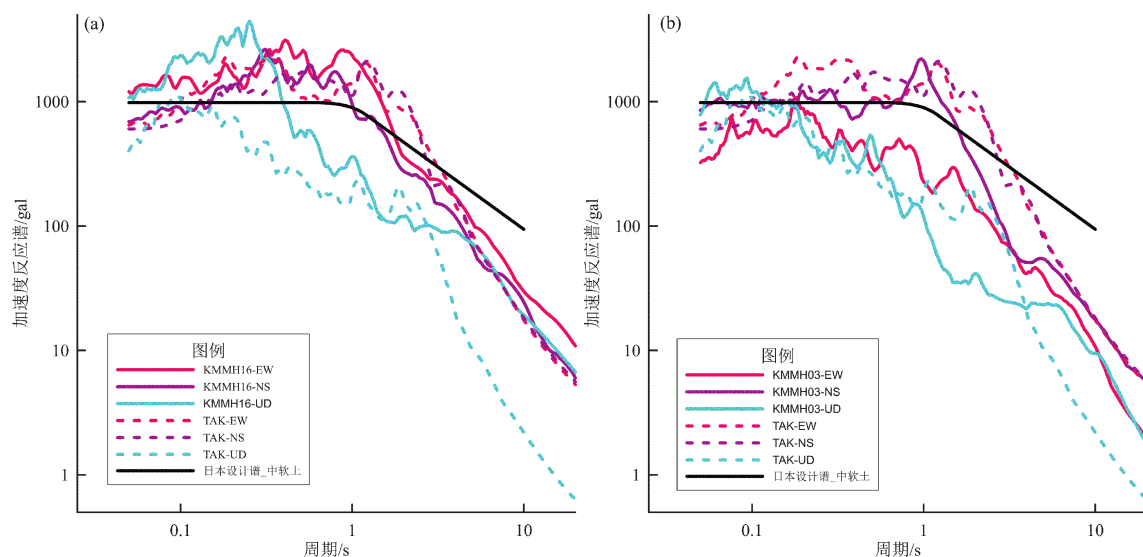


图8 熊本地震中KMMH16 (a), KMMH03 (b) 台站记录加速度反应谱与阪神地震中JR Takatori 台站记录的加速度反应谱对比图

Fig. 8 Comparison of acceleration response spectra between KMMH16 (a), KMMH03 (b) with JR Takatori stations

## 4 结论

本文对日本防灾科学研究所(NIED) K-net 强震动台网和 KikK-net 强震动网记录到的熊本地震强震记录进行处理,得到1 025组强震动记录,对其强震动特征进行分析,并前人研究结果进行对比,得到如下结论:

(1) 经过校正处理, KikK-net 台网的 KMMH16 台站记录到最大的EW向和UD向峰值加速度分别为1 156.95 gal和873.40 gal。KikK-net 台网的KMMH03台站记录到最大的NS向峰值加速度为-786.60 gal。本次地震观测峰值加速度和峰值速度与Si和Midorikawa(1999)的衰减公式预测结果比较一致,断层距超过200 km后,峰值速度衰减比预测结果缓慢。按照中国地震局《仪器地震烈度计算暂行规程》中的计算方法和日本气象厅仪器烈度计算方法分别计算了全部自由地表强

震记录的仪器地震烈度, KMMH16 台站记录到了本次地震的最大仪器地震烈度,高达中国地震烈度的10.1度,日本地震烈度的6.4度。

(2) 选取幅值较大的KMMH16和KMMH03台站进行反应谱特征分析, KMMH16台站峰值周期在0.4 s以内, KMMH16台站3个方向的加速度反应谱在0.5~1.2 s范围时都超过了1995年阪神地震最大强震记录JR Takaroti台站,本次地震对木结构房屋和低矮及中层钢筋混凝土房屋破坏严重。同时,这2个台站在1~2 s周期反应谱仍然较高,会对高层建筑及其他长周期结构产生一定程度的破坏。

(3) 熊本地震5%~95%能量持时为4.16~197.41 s,主要集中在30~60 s;水平向观测数据的5%~95%能量持时与Trifunac和Brady(1975)能量持时预测方程结果一致。在断层距小于100 km时,水平向观测数据的5%~95%能量持时与Boomer等(2009)的能量持时预测方程比较一致,

断层距超过 100 km 后, 水平向观测数据的 5% - 95% 能量持时远高于 Boomer 等 (2009) 的预测方程。5% - 75% 能量持时为 2.01 ~ 155.58 s, 主要集中在 10 ~ 50 s。在断层距小于 100 km 时, 水平向观测数据的 5% - 75% 能量持时与 Boomer 等 (2009) 能量持时预测方程比较一致, 但在断层距离超过 100 km 后, 水平向观测数据的 5% - 75% 能量持时远高于 Boomer 等 (2009) 预测方程。5% - 75% 和 5% - 95% 能量持时符合随震中距离增大而增大的规律。

感谢日本防灾科学研究所 (NIED) K-net 强震动台网与 Kik-net 提供的强震动数据。

#### 参考文献:

- 解全才, 马强, 王丽艳, 等. 2018. 2017 年九寨沟 7.0 级地震强震动记录处理与分析 [J]. 地震工程与工程振动, 38(5): 111 - 119.
- 解全才, 马强, 杨程. 2017. 强震动数据库发展现状与展望 [J]. 地震工程与工程振动, 37(3): 48 - 56.
- 解全才. 2018. 断层滑动分布反演及实时校正场地放大系数研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 于海英, 江汶乡, 解全才, 等. 2009. 近场数字强震仪记录误差分析与基线校正方法 [J]. 地震工程与工程振动, 29(6): 1 - 12.
- 中国地震局监测预报司. 2015. 仪器地震烈度计算暂行规程 [M]. 北京: 地震出版社, 1 - 10.
- Aoi S, Kunugi T, Nakamura H, *et al.* 2010. Deployment of new strong motion seismographs of K - NET and KiK - net [M]//Sinan A, *et al.* Earthquake Data in Engineering Seismology. Dordrecht: Springer, 167 - 186.
- Arias A. 1970. A measure of Earthquake intensity [M]//Hansen R J, *et al.* Seismic Design for Nuclear Power Plants. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology Press, 438 - 483.
- Asano K, Iwata T. 2016. Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data [J]. Earth, Planets and Space, 68(1): 147 - 158.
- Bommer J J, Martinez P A. 1999. The effective duration of earthquake strong motion [J]. Journal of Earthquake Engineering, 3(2): 127 - 172.
- Bommer J J, Stafford P J, Alarcon J E. 2009. Empirical equations for the prediction of the significant, bracketed, and uniform duration of earthquake ground motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(6): 3217 - 3233.
- Brendon A B. 2011. Correlation of significant duration with amplitude and cumulative intensity measures and Its use in ground motion selection [J]. Journal of Earthquake Engineering, 15(6): 809 - 832.
- Goda K, Campbell G, Hulme L, *et al.* 2016. The 2016 Kumamoto earthquakes: cascading geological hazards and compounding risks [J]. Frontiers in Built Environment, 2(19): 1 - 23.
- Headquarters for Earthquake Research Promotion. 2009. Technical report on national seismic hazard maps for Japan [R].
- Kanno T, Narita A, Midorikawa A, *et al.* 2006. A New attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data based on recorded data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 96(3): 879 - 897.
- Kataoka S, Satoh T, Matsumoto S, *et al.* 2006. Attenuation relationships of ground motion intensity using short period level as a variable [J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu A, 62(4): 740 - 757.
- Kinoshita S. 1998. Kyoshin Net (K - NET) [J]. Seismological Research Letters, 69(4): 309 - 332.
- Sakai Y. 2009. Reinvestigation on period range of strong ground motions corresponding to buildings damage - including data of the 2007 Notohanto and Niigata - ken Chuetsu - Oki earthquakes [J]. J Struct Constr Eng, AIJ, 74(62): 1531 - 1536.
- Sakai Y. 2016. A Preliminary Report on the Strong Ground Motions during the Kumamoto Earthquake and Damage [EB/OL]. (2016 - 04 - 27) [2019 - 06 - 30]. <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/kmm.htm>.
- Si H, Midorikawa S. 1999. New attenuation relationships for peak ground acceleration and velocity considering effects of fault type and site condition [J]. J Struct Constr Eng, AIJ, 64(523): 63 - 70.
- Trifunac M D, Brady A G. 1975. A study on the duration of strong earthquake ground motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 65(3): 581 - 626.
- Yagi Y, Okuwaki R, Enescu B, *et al.* 2016. Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation with the thermal structure around Aso volcano, 2016 [J]. Earth, Planets and Space, 68(118): 1 - 6.
- Yamazaki F, Noda S, Meguro K. 1998. Developments of early earthquake damage assessment systems in Japan [C]. Proc. of 7th International Conference on Structural Safety and Reliability, 1573 - 1580.
- Yuji I, Hans J R. 1987. Comparison of seismic provisions of 1985 NBC Canada, 1981 BSL of Japan and 1985 NEHRP of the USA [C]. Proc. of 5th Canada Conference Earthquake Engineering, 747 - 756.



## The Characteristics of Strong Motion Records of the Kumamoto $M_w 7.0$ Earthquake Occurred on Apr. 16, 2016

XIE Quancai<sup>1</sup>, MA Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Jingfa<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

(2. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

### Abstract

The strong motion records obtained by the Japan K-net and Kik-net strong motion network during the 2016  $M_w 7.0$  Kumamoto earthquake were collected and processed. The characteristics of peak ground acceleration (PGA) and peak ground velocity (PGV) were analyzed. Then, the observation results were compared with three attenuation relationship formulas commonly used in Japan. Finally, the characteristics of significant duration and of frequency spectrum were analyzed. The results show that: (1) The PGA of EW, NS, UD component is 1 156.95 gal, -786.60 gal, 874.40 gal, respectively. The observed PGA and PGV consistent well with the PGA and PGV attenuation formulas commonly used in Japan. (2) The 5% ~ 75% significant duration and 5% ~ 95% significant duration were calculated, the significant duration grow with the epicenter distance in the whole. (3) The acceleration response spectrum of KMMH16 station exceeded those obtained by the JR Takatori station triggered during the 1995 Kobe earthquake in the 0.5 ~ 1.2 s period range. It will cause server damage to wooden houses and low to mid-rise reinforced concrete buildings.

**Keywords:** Kumamoto earthquake; peak ground acceleration; peak ground velocity; significant duration; response spectrum