

赵晓芬, 温增平, 陈波. 2018. 近断层地震动最强速度脉冲方向分量特性研究. 地震学报, 40(5): 673-688. doi: 10.11939/jass.20170151.

Zhao X F, Wen Z P, Chen B. 2018. Characteristics of near-fault velocity pulses in the strongest pulse orientation. *Acta Seismologica Sinica*, 40(5): 673-688. doi: 10.11939/jass.20170151.

近断层地震动最强速度脉冲方向 分量特性研究*

赵晓芬 温增平[†] 陈波

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 为了研究速度脉冲型地震动的最强速度脉冲方向分量与垂直或平行断层方向分量之间的特性差异, 本文采用多分量速度脉冲识别方法从 NGA-West2 强震动数据库的 236 组近断层地震动速度脉冲记录中提取出最强速度脉冲方向分量, 对其脉冲参数随震级 M_w 和断层距 R 变化的统计关系式进行了回归分析, 并对比了最强速度脉冲方向分量与垂直或平行断层方向分量之间的特性差异. 研究表明: 当 $R < 30$ km 时, 最强速度脉冲方向分量的脉冲幅值预测值较垂直或平行断层方向分量的预测值大, 而当 $R > 30$ km 时, 两种分量的脉冲幅值预测值相差不大, 可以忽略; 当 $M_w \leq 7.5$ 时, 最强速度脉冲方向分量的脉冲周期预测值比垂直或平行断层方向分量的预测值大, 而当 $M_w > 7.5$ 时, 两种分量的脉冲周期预测值差异不大, 可以忽略.

关键词 速度脉冲 最强方向分量 脉冲参数 震级 断层距 特性差异
doi: 10.11939/jass.20170151 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Characteristics of near-fault velocity pulses in the strongest pulse orientation

Zhao Xiaofen Wen Zengping[†] Chen Bo

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to explore the characteristic difference of velocity pulse between the strongest velocity pulse component and those of the vertical fault or parallel fault component, the strongest pulse orientation components were extracted from 236 groups of near-fault ground motion velocity pulse records of the strong ground motion database NGA-West2 by using the multi-components velocity pulse identification method. Then, relationships of the pulse amplitude and the period with magnitude and fault distance were also analyzed by regression. Finally, characteristics of pulses in the strongest pulse orientation and in vertical or parallel fault orientation were compared. The following conclusions can be made: When the fault distance is less than 30 km, the predicted value of the peak ground velocity in the strongest pulse orienta-

* 基金项目 国家自然科学基金(51378477, 51508527)、中国地震局地球物理研究所基本业务费(DQJB15B05)和中国地震局地球物理研究所基本科研业务团队创新项目(DQJB17T04)共同资助.

收稿日期 2017-11-26 收到初稿, 2018-03-02 决定采用修改稿.

[†] 通信作者 e-mail: wenzp@cea-igp.ac.cn



tion is larger than that in the vertical or parallel fault orientation. However, with the increase of the fault distance, the difference of the peak velocities in the two orientations can be neglected. The pulse period is smaller in the strongest pulse orientation than in the vertical or parallel fault orientation for records with magnitude M_W smaller than 7.5, whereas when magnitude M_W is greater than 7.5, the difference of the pulse period between the two orientations can be ignored.

Key words: velocity pulse; strongest pulse orientation component; pulse parameters; magnitude; fault distance; characteristics difference

引言

开展近断层速度脉冲型地震动特性研究对揭示近断层区域工程结构的地震破坏机理以及开展抗震设防具有重要价值. 近断层速度脉冲型地震动对工程结构具有特殊的破坏作用, 产生速度脉冲的主要原因之一是断层破裂传播的方向性(Somerville *et al.*, 1997; Somerville, 2003; Bray, Rodriguez-Marek, 2004; 刘启方等, 2006). 速度脉冲具有很强的方向性特征, 目前相关研究通常关注的是垂直断层走向方向的速度脉冲特性, 实际上在与断层走向不垂直的其它部分区域内也已识别出速度脉冲信号(Howard *et al.*, 2005; Boore, 2006; Shahi, Baker, 2011, 2013, 2014; 谢俊举等, 2011). 另外, 开展近断层区域的工程抗震设防也需要详细了解断层附近不同方向上速度脉冲的地震动特性, 特别是近断层地震动最强速度脉冲方向分量, 可为最不利设计地震动参数的确定提供科学依据, 这些都有待深入研究.

迄今为止, 有关速度脉冲型地震动特性、脉冲信号识别及其对工程结构影响的研究大多是针对垂直断层走向和平行断层走向或不考虑方向性的情形开展(李新乐, 朱晞, 2004; 韦韬等, 2006; Kalkan, Kunnath, 2006; 谢俊举等, 2012; 陈波等, 2013; 赵晓芬, 2015). Howard 等(2005)定义含有速度脉冲信号的加速度反应谱峰值的最大值 $S_{a,max}$ 所对应方向的分量为最强速度脉冲方向分量, 并将其与垂直断层走向的分量的 S_a 值进行比较, 结果表明这两个方向上的地震动特性有较大差异, 且与断层类型、断层距紧密相关. 鉴于加速度反应谱峰值不能很好地反映速度脉冲的幅值特性(李明等, 2009; Zhai *et al.*, 2013; 常志旺, 2014; Hayden *et al.*, 2014; Chang *et al.*, 2016), 以 $S_{a,max}$ 定义的最强速度脉冲方向分量有待完善, 且用于研究的脉冲数量较少. 另外, Shahi 和 Baker(2011, 2013, 2014)在开展速度脉冲识别方法研究时发现速度脉冲不仅存在于平行断层走向和垂直断层走向的方向, 还可能出现在与断层走向垂直方向附近的一定区域内, 并且 Shahi 和 Baker(2014)提出了最强速度脉冲方向的概念, 并取对应于最大小波系数的方向为最强速度脉冲方向. 最大小波系数反映了时域和频域内累积的脉冲能量最大, 比峰值速度、峰值加速度及加速度反应谱峰值等参数能够更好地反映速度脉冲的特征. 但 Shahi 和 Baker(2014)未对最强速度脉冲方向分量和垂直断层走向分量的脉冲特性的差异进行比较. 此外, Yang 和 Zhou(2015)研究了1999年台湾集集地震的近断层地震动速度脉冲特性, 并基于33条近断层速度脉冲记录利用回归分析方法, 给出了这次地震最强速度脉冲方向分量的脉冲幅值随断层距的变化规律. 随着速度脉冲记录的不断增多, 关于最强速度脉冲方向分量的特性及其与垂直断层走向或平行断层走向的速度脉冲分量之间的特性差异及相关问题, 还有待进一步研究.

鉴于此, 本文拟采用多分量速度脉冲识别方法, 从 NGA-West2 强震动数据库的 236 组近断层地震动速度脉冲记录中提取出最强速度脉冲方向分量, 计算脉冲幅值 PGV、脉冲周期

T_p 等脉冲参数, 借助统计回归方法确定最强速度脉冲方向分量的脉冲参数随震级 M_w 和断层距 R 变化的统计关系, 并比较最强速度脉冲方向分量与垂直或平行断层方向分量之间的特性差异, 为考虑地震动速度脉冲对近断层工程结构的影响时速度脉冲记录的选取提供参考.

1 最强速度脉冲方向分量获取方法

Shahi 和 Baker (2014) 提出基于连续小波变换的多分量地震动速度脉冲识别方法, 并从速度记录中提取最强速度脉冲方向分量. 其主要思想是将两个正交水平分量(一般取垂直断层走向和平行断层走向分量或南北向和东西向分量)线性组合, 并进行连续小波变换, 选取与最大小波系数对应方向 β 分量, 而后根据脉冲因子 I_p 对其进行判别. 若 β 方向对应的分量为速度脉冲($I_p > 0$), 则该方向分量称为最强速度脉冲方向分量. 具体计算步骤如下:

- 1) 将两个正交水平分量 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 进行线性组合,

$$f(t, \theta) = f_1(t) \cos \theta + f_2(t) \sin \theta; \quad (1)$$

- 2) 对 $f(t, \theta)$ 进行连续小波变换,

$$c(s, l, \theta) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t, \theta) \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt, \quad (2)$$

将式(1)代入式(2), 得

$$c(s, l, \theta) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} [f_1(t) \cos \theta + f_2(t) \sin \theta] \phi\left(\frac{t-l}{s}\right) dt, \quad (3)$$

$$c(s, l, \theta) = c_1(s, l) \cos \theta + c_2(s, l) \sin \theta; \quad (4)$$

- 3) 确定最大小波系数为

$$c_{\max}(s, l) = \max_{\theta} c(s, l) = \sqrt{c_1^2(s, l) + c_2^2(s, l)}; \quad (5)$$

- 4) 确定最大小波系数所对应的方向 β 为

$$c_1(s, l) = c_{\max}(s, l) \cos \beta, \quad (6)$$

$$c_2(s, l) = c_{\max}(s, l) \sin \beta, \quad (7)$$

$$\beta = \arctan \frac{c_2}{c_1}; \quad (8)$$

- 5) 将 β 方向的对应分量记为 H , 根据脉冲因子 I_p 的表达式

$$I_p = -1 \times (13.819 + 9.384P^2 + 0.0004PGV^2 - 17.189P - 0.625PGV + 0.585P \cdot PGV) \quad (9)$$

对其进行判别, 其中

$$P = 0.63R_{PGV} + 0.777R_E, \quad (10)$$

$$R_{PGV} = \frac{V_{\text{res}}}{PGV}, \quad R_E = \frac{V_{\text{res}}^2}{PGV^2}. \quad (11)$$

若 $I_p > 0$, 其为脉冲记录; 若 $I_p < 0$, 其为非脉冲记录; 若 $I_p = 0$, 该方法失效. 若该分量为速度脉冲, 则将 H 分量定义为最强速度脉冲方向分量, 其相对于正北方向的角度记为 φ , 如图 1 所示.

为避免漏判, 重复步骤(4)和(5), 选取前 5 个小波系数最大值分别对应方向分量, 最终将 $I_p > 0$ 且小波系数最大值对应分量取为最强速度脉冲方向分量. 下面以汶川地震中绵竹清平台(51MZQ)的记录为例来说明最强速度脉冲方向分量的确定方法. 首先对 51MZQ 台站记

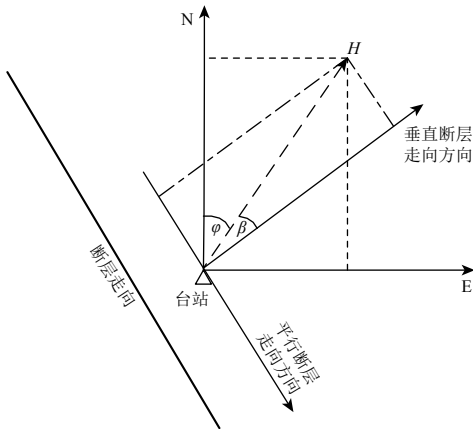


图 1 最强速度脉冲方向分量的空间取向参数 (平行断层走向和正北方向)

Fig. 1 The spatial orientation parameters of the strongest pulse (parallel to the strike of the fault and the positive north direction)

录到的东西向分量和南北向分量线性组合, 然后进行连续小波变换, 选取与前 5 个最大小波系数对应方向的分量. 由式(9)–(11)可得这 5 个方向分量均为速度脉冲($I_p > 0$), 其脉冲幅值 PGV、脉冲因子 I_p 、小波系数 c 、方向 β 列于表 1, 其中 $\beta = 25.39^\circ$ 方向分量所对应的小波系数最大, 且 $I_p > 0$, 故将其取为最强速度脉冲方向分量. 图 2 给出了 51MZQ 台站

表 1 前 5 个最大小波系数对应方向分量的参数
Table 1 The parameters of orientation components with top five of the largest wavelet coefficients

方向分量	PGV/(cm·s ⁻¹)	I_p	c	$\beta/^\circ$
最强速度脉冲方向分量	145.89	9.60	1 837.70	25.39
方向分量 1	146.71	9.77	1 666.80	36.03
方向分量 2	138.63	1.49	1 258.90	9.05
方向分量 3	140.00	10.99	1 340.70	17.89
方向分量 4	140.69	4.02	954.50	11.91

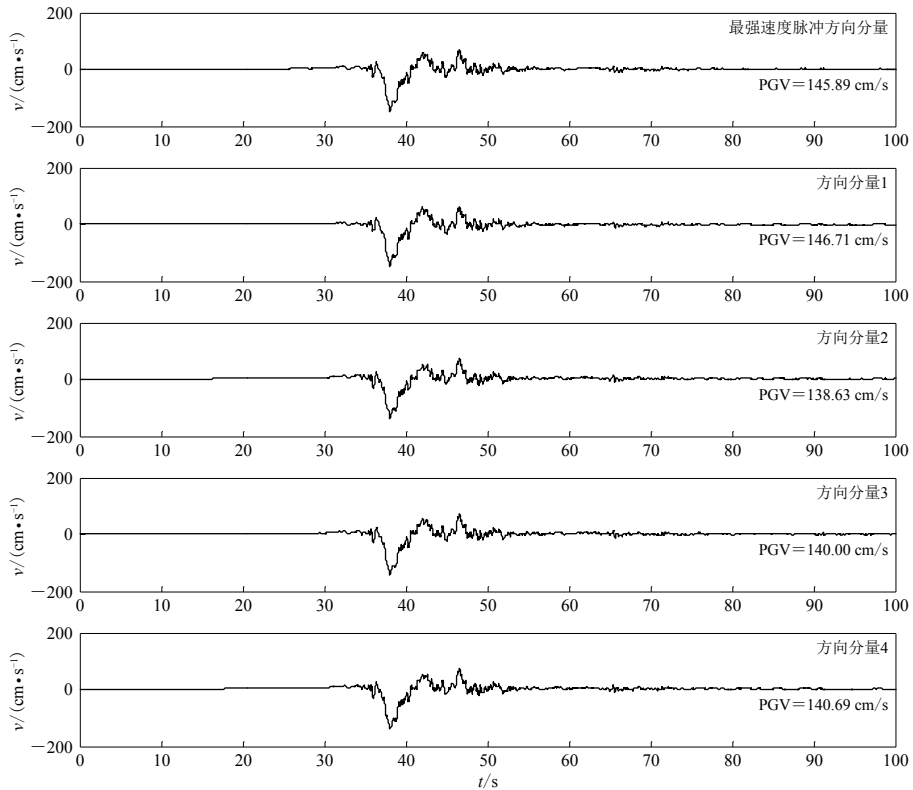


图 2 汶川地震中绵竹清平(51MZQ)台记录到的最强速度脉冲方向分量和其它 4 个方向分量的速度时程

Fig. 2 The time histories of different orientations of the velocity pulse-like recorded at the station 51MZQ during the 2008 Wenchuan earthquake

记录到的最强速度脉冲方向分量和其它 4 个方向分量的速度时程. 当 $I_p > 0$ 时, 取最大的小波系数对应方向分量为最强速度脉冲方向分量.

2 速度脉冲型强地震动记录及参数

数据来源于 [Shahi 和 Baker \(2014\)](#) 从 NGA-West2 强震动数据库中识别出的 244 组速度脉冲记录, 本研究从中选出 236 组地震信息完整、数据质量较高的记录进行研究, 其中震级 M_w 、断层距 R 、脉冲幅值 PGV、脉冲周期 T_p 等参数列于附表 1, 其中 T_p 由母小波的傅里叶谱最大幅值对应周期所确定([Baker, 2007](#); [常志旺等, 2013](#)). 本文采用 52 个地震事件中断层距 $R < 100$ km 范围内的 236 组速度脉冲记录, 其中, 断层距 $R > 60$ km 的记录有 18 条, 占总数据的 7.6%, 这些地震的断层破裂长度较长, 例如 1999 年我国台湾集集地震的断层破裂长度为 100 km. 这 236 组速度脉冲记录的震级 M_w 为 5.0—7.9, 断层距 R 为 0.1—92.7 km, 场地条件 v_{S30} 为 139.21—2 016.13 m/s, 脉冲幅值 PGV 为 23.29—341.77 cm/s, 脉冲周期 T_p 为 0.26—13.12 s. 将这 236 组速度脉冲记录分别按震级、断层距分组统计, 速度脉冲出现频次如图 3 所示, 可以看出: 若按震级分组, 震级处于 6.0—7.0 范围内的速度脉冲记录数量最多(图 3a); 若按断层距分组, 断层距处于 0—30 km 范围内的速度脉冲记录数量最多(图 3b).

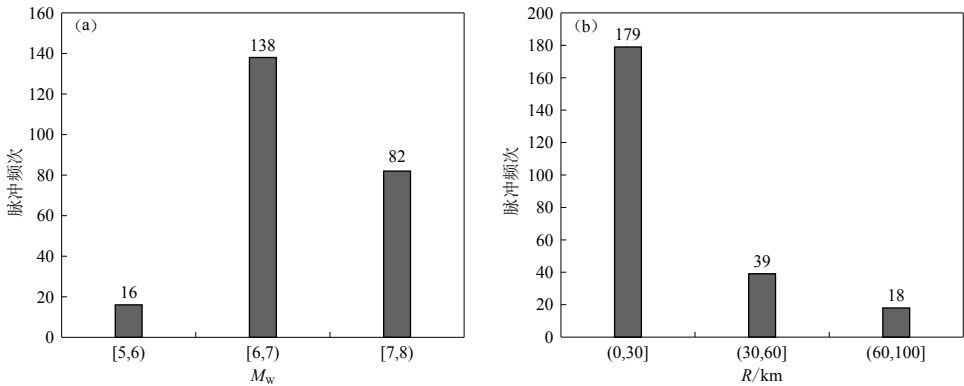


图 3 按震级 M_w (a) 和断层距 R (b) 分组情形下 236 组速度脉冲记录中各组脉冲的出现频次直方图

Fig. 3 Histogram of pulse frequency of 236 sets of velocity pulse records in each group in accordance with moment magnitude M_w (a) and with fault distance R (b)

3 脉冲幅值与震级和断层距的关系

本文统计分析了速度脉冲幅值随震级和断层距变化的分布图, 如图 4 所示. 图中用圆圈分别标出了台湾集集地震 TCU052 和 TCU068 台记录到的速度脉冲幅值 PGV, 分别高达 208.85 cm/s 和 341.77 cm/s. 已有研究([Mavroeidis, Papageorgiou, 2003](#))表明, 产生如此之大的 PGV 值可能是由永久位移和前方向效应共同作用所致. 为了避免个别数据对回归分析结果的影响太大, 本文在统计分析时剔除这两条数据, 回归分析得到最强速度脉冲方向分量的脉冲幅值随震级 M_w 和断层距 R 变化的统计关系为

$$\lg \text{PGV} = 0.105M_w - 0.244\lg R + 1.289, \quad (12)$$

标准差 $\sigma_{\lg \text{PGV}} = 0.4$. 将本文结果与 [Somerville \(1998\)](#), [Tang 和 Zhang \(2011\)](#) 给出的结果进行对比, 结果如表 2 和图 5 所示, 可以看出, [Somerville \(1998\)](#) 模型的 PGV 预测值与本文以及 [Tang](#)

和 Zhang (2011) 的模型预测值相比, 相差较大, 这可能是由于 Somerville (1998) 回归分析所用数据较少且其离散性较大. 与 Tang 和 Zhang (2011) 的对比统计结果显示: 随着震级的增大, 本文模型的预测值比 Tang 和 Zhang (2011) 模型的预测值大, 即随着震级的增大, 最强速度脉冲方向分量的 PGV 预测值比垂直于或平行于断层走向分量的 PGV 预测值大; 当 $R > 30$ km

表 2 速度脉冲幅值随震级 M_w 和断层距 R 变化规律的统计模型

Table 2 Predictive relationships of variation of velocity pulse amplitude PGV with magnitude M_w and fault distance R

统计模型	表达式	脉冲分量
Somerville (1998)	$\lg PGV = 0.5M_w - 0.5 \lg R - 1.0$	垂直或平行于断层走向的分量
Tang 和 Zhang (2011)	$\lg PGV = 0.07M_w - 0.19 \lg R + 1.44$	垂直或平行于断层走向的分量
本文统计模型	$\lg PGV = 0.105M_w - 0.244 \lg R + 1.289$	最强速度脉冲方向分量

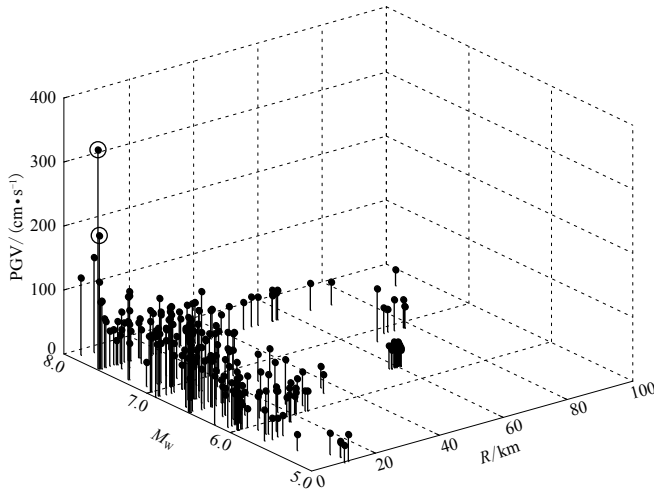


图 4 速度脉冲幅值 PGV 随震级 M_w 和断层距 R 的变化

Fig. 4 Variation of velocity pulse amplitude PGV with moment magnitude M_w and fault distance R

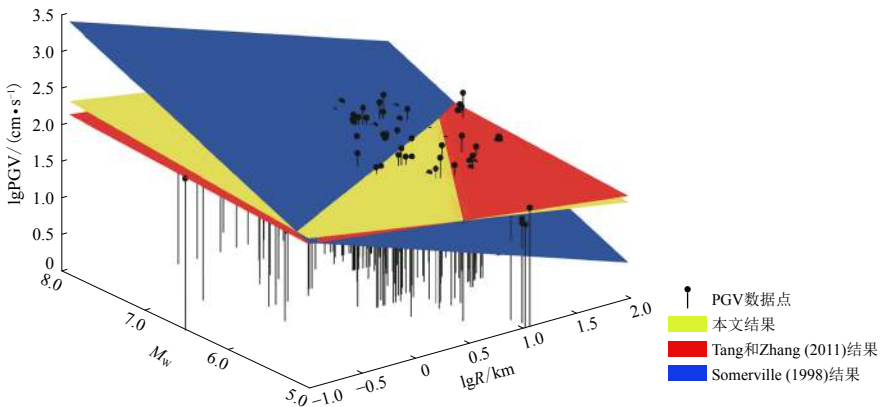


图 5 本文回归得到的速度脉冲幅值 PGV 随震级 M_w 和断层距 R 的变化规律模型及其与前人结果的比较

Fig. 5 Fitted model for velocity pulse amplitude PGV with moment magnitude M_w and fault distance R and its comparison with previous models

时, 两种模型的预测结果较为接近; 当 $R < 30 \text{ km}$ 时, 本文的 PGV 预测值大于 Tang 和 Zhang (2011) 模型给出的 PGV 预测值, 这是由于本文采用了 52 个地震事件的断层距当 $R < 100 \text{ km}$ 的 236 组速度脉冲记录, 较以往研究所用数据相对较多. 此外, 结果的差异主要由近断层地震动具有很强的方向性所引起, 不同方向的地震动分量特性差异较大, 且随着断层距的减小, 方向性越强, 差异越大.

4 脉冲周期与震级的关系

已知震级与脉冲周期的对数值线性相关 (Bray, Rodriguez-Marek, 2004; Baker, 2007; Shahi, Baker, 2013; 王宇航, 2015), 本文经回归分析得到最强速度脉冲方向分量的脉冲周期随震级 M_w 变化的统计关系为

$$\ln T_p = 1.123M_w - 6.548, \tag{13}$$

变化关系如图 6 中黑色直线所示, 可见脉冲周期随震级的增大而增大.

将本文回归得到的 T_p 随 M_w 变化的统计模型与 Bray 和 Rodriguez-Marek (2004), Baker (2007), Shahi 和 Baker (2013) 给出的统计模型进行对比, 结果如表 3 和图 6 所示. Bray 和 Rodriguez-Marek (2004) 以及 Baker (2007) 均采用垂直断层走向或平行断层走向的速度脉冲记录进行回归分析, 但两种模型的预测值差异较大, 这是由于速度脉冲周期 T_p 的计算方法及数据样本量的不同所致. 本文与 Baker (2007) 及 Shahi 和 Baker (2013) 采用相同的速度脉冲周期计算方法, 对比结果显示: 当 $M_w \leq 7.5$ 时, Baker (2007) 模型的脉冲周期预测值较本文及 Shahi 和 Baker (2013) 模型的预测值大, 说明在此震级范围内, 最强速度脉冲方向分量的脉冲周期比垂直或平行断层分量的脉冲周期小; 随着震级的增大, 当 $M_w > 7.5$ 时, 两种不同方向分量的脉冲周期差异逐渐减小, 可以忽略. 总之, 本文的统计模型与 Shahi 和 Baker (2013) 给出的统计模型最为接近, 二者之间的差异可以忽略. Shahi 和 Baker (2013) 的模型是基于方向性效应速度脉冲记录拟合所得, 本文模型则是采用方向性效应和滑冲效应速度脉冲记录进行的拟合, 这说明方向性效应速度脉冲记录和滑冲效应速度脉冲记录在最强速度脉冲方向上的脉冲周期差异较

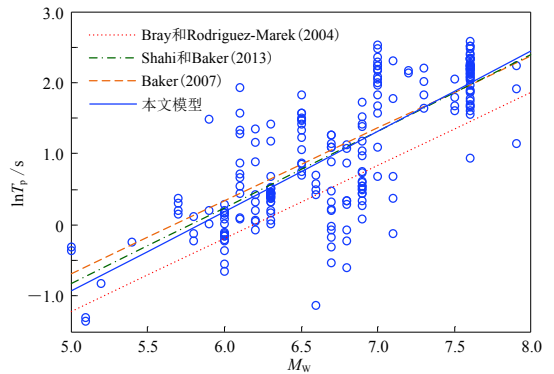


图 6 本文回归得到的速度脉冲周期 T_p 随震级 M_w 变化的定量关系及其与前人结果的比较
Fig. 6 Fitted curve for velocity pulse period T_p with M_w obtained by regression analysis in this study and its comparison with previous models

表 3 速度脉冲周期 T_p 随震级 M_w 变化关系的统计模型

Table 3 Predictive relationships of variation of velocity pulse period T_p with magnitude M_w

统计模型	表达式	脉冲分量	脉冲类型	标准差
Bray 和 Rodriguez-Marek (2004)	$\ln T_p = 1.03M_w - 6.37$	垂直或平行断层分量	不区分脉冲类型	0.38
Baker (2007)	$\ln T_p = 1.02M_w - 5.78$	垂直或平行断层分量	不区分脉冲类型	0.55
Shahi 和 Baker (2013)	$\ln T_p = 1.075M_w - 6.207$	最强速度脉冲方向分量	前方向性效应速度脉冲	0.61
本文统计模型	$\ln T_p = 1.123M_w - 6.548$	最强速度脉冲方向分量	不区分脉冲类型	0.54

小, 可以忽略.

5 脉冲对加速度反应谱的放大作用

从脉冲对加速度反应谱的放大作用角度, 本文研究了不同方向脉冲分量对加速度反应谱的放大作用是否相同. 为了定量地考察脉冲对加速度反应谱的放大作用, 将脉冲记录的加速度反应谱 $S_{a,pulse}$ 表示成 (Shahi, Baker, 2013)

$$\ln S_{a,pulse} = \ln \left(\frac{S_{a,pulse}}{S_{a,res}} \cdot S_{a,res} \right) = \ln(A_f \cdot S_{a,res}) = \ln A_f + \ln S_{a,res}, \tag{14}$$

脉冲对加速度反应谱的放大作用系数 A_f 为

$$A_f = \frac{S_{a,pulse}}{S_{a,res}}, \tag{15}$$

式中 $S_{a,res}$ 表示残余分量的加速度反应谱. 残余分量是指采用 4 阶 Duabechies 小波提取脉冲记录中的长周期脉冲信号后得到的不含速度脉冲信号的剩余记录. 将残余分量的速度时程进行微分得到加速度时程, 再计算其加速度反应谱即 $S_{a,res}$ (Shahi, Baker, 2013). 本文选用 NGA-West1 强震动数据库中 91 条垂直或平行断层方向的速度脉冲记录, 计算其脉冲作用放大系数 A_f 随周期比 T/T_p 的变化曲线, 结果如图 7 所示. 可见: 脉冲作用平均放大系数 \bar{A}_f 随周期比 T/T_p 的变化具有高斯分布的特征, 表现为以脉冲周期 T_p 为中心的单峰值曲线, 放大作用在

$T/T_p = 1.05$ 处最强, 对应 \bar{A}_f 峰值为 3.44, 向两侧逐渐减弱, 脉冲作用最明显的影响周期范围为 $0.5T_p - 2T_p$. Shahi 和 Baker (2013) 采用最强速度脉冲方向分量数据统计得到的脉冲作用平均放大系数曲线的峰值为 3.28, 对应的 T/T_p 为 0.88. 表 4 将本文结果与 Shahi 和 Baker (2013) 结果进行对比, 结果显示, 相对于最强速度脉冲方向分量, 垂直或平行断层分量的脉冲作用平均放大系数曲线的峰值所对应周期向长周期方向移动, 但移动量较少, 且脉冲作用平均放大系数曲线的峰值相近, 因此不同方向分量的速度脉冲在脉冲周期 T_p 附近对加速度反应谱的放大作用相当.

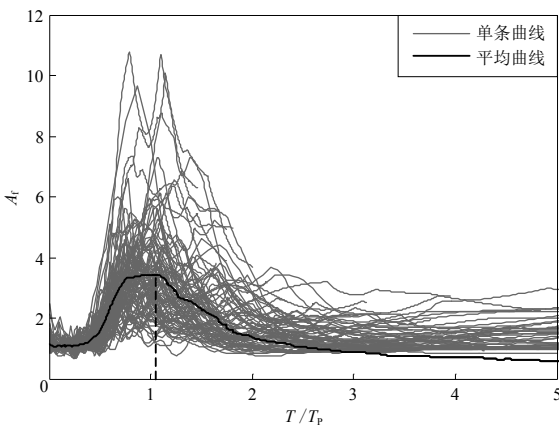


图 7 脉冲作用放大系数 A_f 随周期比值 T/T_p 的变化
Fig. 7 Variation of pulse amplification coefficient A_f with period ratio T/T_p

表 4 不同方向分量的脉冲放大作用最强值及对应周期比的对比

Table 4 Comparison of the strongest pulse amplifications A_f and corresponding largest periods T/T_p in different pulse-like orientations

方法	$\max(\bar{A}_f)$	$\text{peak}(T/T_p)$	脉冲方向
Shahi 和 Baker (2013)	3.28	0.88	最强速度脉冲方向
本文结果	3.44	1.05	垂直断层走向

注: $\max(A_f)$ 表示脉冲对加速度反应谱放大系数曲线的峰值, $\text{peak}(T/T_p)$ 表示放大作用系数曲线峰值所对应的周期比值.

6 讨论与结论

本文采用多分量速度脉冲识别方法提取出最强速度脉冲方向分量,计算其脉冲幅值PGV、脉冲周期 T_p 等脉冲参数,回归分析得到其脉冲参数随震级 M_w 和断层距 R 变化的统计规律,并通过与平行或垂直断层方向分量的速度脉冲特性的对比,比较了各方向分量的特性差异,主要结果如下:

1) 最强速度脉冲方向分量与垂直或平行断层方向分量的脉冲幅值有差异.随着震级的增大,最强速度脉冲方向分量的脉冲幅值预测值比垂直或平行断层方向分量的预测值大;当 $R < 30$ km时,最强速度脉冲方向分量的脉冲幅值预测值比垂直或平行断层走向的预测值大,而当 $R > 30$ km时,两种方向分量的脉冲幅值差异较小,可以忽略.

2) 最强速度脉冲方向分量与垂直或平行断层方向分量的脉冲周期有差异.当 $M_w \leq 7.5$ 时,最强速度脉冲方向分量的脉冲周期预测值比垂直或平行断层方向分量的预测值大,而当 $M_w > 7.5$ 时,两种方向分量的脉冲周期差异较小,可以忽略;方向性效应速度脉冲记录 and 滑冲效应速度脉冲记录在最强速度脉冲方向上的脉冲周期差异较小,可以忽略.

3) 最强速度脉冲方向分量与垂直或平行断层方向分量的速度脉冲在脉冲周期附近对加速度反应谱的放大作用相似.

综上,当 $R < 30$ km且 $M_w \leq 7.5$ 时,需要考虑最强速度脉冲方向分量与垂直或平行断层方向分量的幅值和周期的差异.此外,本文仅研究了最强速度脉冲方向分量与垂直或平行断层方向分量的特性差异,下一步将研究在速度脉冲不同方向分量作用下结构响应的差异.

美国太平洋地震研究中心提供了强震记录数据,斯坦福大学的Jack W. Baker教授和Shrey Kumar Shahi博士在多分量速度脉冲识别方法上提供了程序,大连理工大学杨迪雄教授对本研究中遇到的问题进行了细心解答,两位匿名审稿人提出了宝贵意见,作者在此一并表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 常志旺,翟长海,李爽,谢礼立. 2013. 近场地震动速度脉冲周期的确定[J]. 土木工程学报, 46(增刊2): 130-134.
- Chang Z W, Zhai C H, Li S, Xie L L. 2013. Determination of the pulse period for near-fault pulse-like ground motions[J]. *China Civil Engineering Journal*, 46(S2): 130-134 (in Chinese).
- 常志旺. 2014. 近场脉冲型地震动的量化识别及特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院: 43-65.
- Chang Z W. 2014. *Quantitative Identification and the Characteristics of Near-Fault Pulse-Like Ground Motions*[D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology: 43-65 (in Chinese).
- 陈波,谢俊举,温增平. 2013. 汶川地震近断层地震动作用下结构地震响应特征分析[J]. 地震学报, 35(2): 250-261.
- Chen B, Xie J J, Wen Z P. 2013. Analysis of the seismic response characteristics of building structures subjected to near-fault ground motions from Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 35(2): 250-261 (in Chinese).
- 李明,谢礼立,翟长海. 2009. 近断层脉冲型地震动重要参数的识别方法[J]. 世界地震工程, 25(4): 1-6.
- Li M, Xie L L, Zhai C H. 2009. Identification methods of important parameters for near-fault pulse-type ground motions[J]. *World Earthquake Engineering*, 25(4): 1-6 (in Chinese).
- 李新乐,朱晞. 2004. 近断层地震动等效速度脉冲研究[J]. 地震学报, 26(6): 634-643.
- Li X L, Zhu X. 2004. Study on equivalent velocity pulse of near-fault ground motions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 26(6): 634-643 (in Chinese).
- 刘启方,袁一凡,金星,丁海平. 2006. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 26(1): 1-10.
- Liu Q F, Yuan Y F, Jin X, Ding H P. 2006. Basic characteristics of near-fault ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engin-*

- earing *Vibration*, **26**(1): 1–10 (in Chinese).
- 王宇航. 2015. 近断层区域划分及近断层速度脉冲型地震动模拟[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院: 7.
- Wang Y H. 2015. *The Near-Fault Region Zoning and Near-Fault Velocity Pulse-Like Ground Motion Simulation*[D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University: 7 (in Chinese).
- 韦韬, 赵凤新, 张郁山. 2006. 近断层速度脉冲的地震动特性研究[J]. *地震学报*, **28**(6): 629–637.
- Wei T, Zhao F X, Zhang Y S. 2006. Characteristics of near-fault ground motion containing velocity pulses[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **28**(6): 629–637 (in Chinese).
- 谢俊举, 温增平, 高孟潭, 袁美巧, 何少林. 2011. 2008年汶川地震近断层地震动的非平稳特征[J]. *地球物理学报*, **54**(3): 728–736.
- Xie J J, Wen Z P, Gao M T, Yuan M Q, He S L. 2011. Non-stationary characteristics of near-fault strong motions during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(3): 728–736 (in Chinese).
- 谢俊举, 温增平, 李小军, 李亚琦, 吕红山, 黄隽彦. 2012. 基于小波方法分析汶川地震近断层地震动的速度脉冲特性[J]. *地球物理学报*, **55**(6): 1963–1972.
- Xie J J, Wen Z P, Li X J, Li Y Q, Lü H S, Huang J Y. 2012. Analysis of velocity pulses for near-fault strong motions from the Wenchuan earthquake based on wavelet method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(6): 1963–1972 (in Chinese).
- 赵晓芬. 2015. 近断层地震动速度脉冲的识别方法及对隔震结构的影响研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 7–30.
- Zhao X F. 2015. *Study on Strong Motion Velocity Pulse Identification Method and Influence on Isolated Structures*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 7–30 (in Chinese).
- Baker W J. 2007. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(5): 1486–1501.
- Boore D M. 2006. Orientation-independent measures of ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **96**(4A): 1502–1511.
- Bray J D, Rodriguez-Marek A. 2004. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **24**(11): 815–828.
- Chang Z W, Sun X D, Zhai C H, Zhao J X, Xie L L. 2016. An improved energy-based approach for selecting pulse-like ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **45**(14): 2405–2411.
- Hayden C P, Bray J D, Abrahamson N A. 2014. Selection of near-fault pulse motions[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, **140**(7): 04014030.
- Howard J K, Tracy C A, Burns R G. 2005. Comparing observed and predicted directivity in near-source ground motion[J]. *Earthq Spectra*, **21**(4): 1063–1092.
- Kalkan E, Kunnath S K. 2006. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of building[J]. *Earthq Spectra*, **22**(2): 367–390.
- Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. 2003. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(3): 1099–1131.
- Shahi S K, Baker J W. 2011. An empirically calibrated framework for including the effects of near-fault directivity in probabilistic seismic hazard analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(2): 742–755.
- Shahi S K, Baker J W. 2013. *A Probabilistic Framework to Include the Effects of Near-Fault Directivity in Seismic Hazard Assessment*[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California: 1–77.
- Shahi S K, Baker J W. 2014. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(5): 2456–2466.
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, Abrahamson N A. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. *Seismol Res Lett*, **68**(1): 199–222.
- Somerville P G. 1998. Development of an improved representation of near fault ground motions[C]//*Proceedings of SMIP98 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data*. Oakland: Division of Mines and Geology of the California Department of Conservation: 1–20.
- Somerville P G. 2003. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **137**(1/4): 201–212.
- Tang Y C, Zhang J. 2011. Response spectrum-oriented pulse identification and magnitude scaling of forward directivity pulses in near-fault ground motions[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **31**(1): 59–76.
- Yang D X, Zhou J L. 2015. A stochastic model and synthesis for near-fault impulsive ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*,

44(2): 243–264.

Zhai C H, Chang Z W, Li S, Chen Z Q, Xie L L. 2013. Quantitative identification of near-fault pulse-like ground motions based on energy[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(5): 2591–2603.

附录

表 1 236 条速度脉冲的相关参数
Table 1 Parameters of 236 pulse ground motions

序号	地震地点	台站名称	年份	M_w	R /km	PGV /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_p /s	v_{S30} /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	断层 类型
20	Northern Calif-03	Ferndale City Hall	1954	6.5	27.00	40.29	2.00	219.31	0
51	Wenchuan, China	Deyangbaima	2008	7.9	30.50	37.40	6.75	418.21	3
52	Wenchuan, China	Mianzuqingping	2008	7.9	6.60	146.94	9.37	551.30	3
77	San Fernando	Pacoima Dam (upper left abut)	1971	6.6	1.80	121.73	1.64	2016.13	2
143	Tabas, Iran	Tabas	1978	7.3	2.00	129.56	6.19	766.77	2
147	Coyote Lake	Gilroy Array #2	1979	5.7	9.00	31.92	1.46	270.84	0
148	Coyote Lake	Gilroy Array #3	1979	5.7	7.40	30.75	1.16	349.85	0
149	Coyote Lake	Gilroy Array #4	1979	5.7	5.70	32.03	1.35	221.78	0
150	Coyote Lake	Gilroy Array #6	1979	5.7	3.10	49.53	1.23	663.31	0
159	Imperial Valley-06	Agrarias	1979	6.5	0.70	53.45	2.34	242.05	0
161	Imperial Valley-06	Brawley Airport	1979	6.5	10.40	36.64	4.40	208.71	0
170	Imperial Valley-06	EC County Center FF	1979	6.5	7.30	70.75	4.42	192.05	0
171	Imperial Valley-06	El Centro-Meloland Geot. Array	1979	6.5	0.10	116.27	3.42	264.57	0
173	Imperial Valley-06	El Centro Array #10	1979	6.5	8.60	55.12	4.52	202.85	0
178	Imperial Valley-06	El Centro Array #3	1979	6.5	12.90	55.78	4.50	162.94	0
179	Imperial Valley-06	El Centro Array #4	1979	6.5	7.00	80.75	4.79	208.91	0
180	Imperial Valley-06	El Centro Array #5	1979	6.5	4.00	96.38	4.13	205.63	0
181	Imperial Valley-06	El Centro Array #6	1979	6.5	1.40	121.50	3.77	203.22	0
182	Imperial Valley-06	El Centro Array #7	1979	6.5	0.60	111.80	4.38	210.51	0
184	Imperial Valley-06	El Centro Differential Array	1979	6.5	5.10	73.45	6.27	202.26	0
185	Imperial Valley-06	Holtville Post Office	1979	6.5	7.50	73.28	4.82	202.89	0
204	Imperial Valley-07	El Centro Array #6	1979	5	10.40	26.02	0.69	203.22	0
250	Mammoth Lakes-06	Long Valley Dam (Upr L Abut)	1980	5.9	16.00	43.22	1.02	483.87	0
285	Irpinia, Italy-01	Bagnoli Irpinio	1980	6.9	8.20	38.08	1.71	594.96	1
292	Irpinia, Italy-01	Sturno (STN)	1980	6.9	10.80	71.02	3.27	382.00	1
316	Westmorland	Parachute Test Site	1981	5.9	16.70	60.69	4.39	348.69	0
319	Westmorland	Westmorland Fire Sta	1981	5.9	6.50	52.84	1.22	193.67	0
372	Coalinga-02	Anticline Ridge Free-Field	1983	5.1	11.60	26.26	0.26	437.79	2
373	Coalinga-02	Anticline Ridge Pad	1983	5.1	11.60	23.29	0.27	437.79	2
415	Coalinga-05	Transmitter Hill	1983	5.8	9.50	64.34	0.88	434.83	2
418	Coalinga-07	Coalinga-14th & Elm (Old CHP)	1983	5.2	10.90	32.80	0.44	286.77	2
451	Morgan Hill	Coyote Lake Dam (SW Abut)	1984	6.2	0.50	76.68	1.07	491.97	0
459	Morgan Hill	Gilroy Array #6	1984	6.2	9.90	37.25	1.23	663.31	0
503	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 C00	1986	6.3	59.90	34.76	1.57	309.41	2
504	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 E01	1986	6.3	57.30	36.86	1.39	308.39	2
505	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I01	1986	6.3	60.10	32.84	1.57	275.82	2
506	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I07	1986	6.3	59.70	33.92	1.67	309.41	2
507	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M01	1986	6.3	60.90	26.05	1.39	268.37	2
508	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M07	1986	6.3	58.90	40.34	1.54	327.61	2
510	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 O07	1986	6.3	58.00	28.68	1.53	314.33	2

续表 1

序号	地震地点	台站名称	年份	M_w	R /km	PGV /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_p /s	v_{S30} /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	断层 类型
527	N. Palm Springs	Morongo Valley Fire Station	1986	6.1	12.00	39.35	2.38	398.49	3
566	Kalamata, Greece-02	Kalamata (bsmt) (2nd trigger)	1986	5.4	5.60	27.00	0.79	382.21	1
568	San Salvador	Geotech Investig Center	1986	5.8	6.30	68.27	0.81	489.34	0
569	San Salvador	National Geographical Inst	1986	5.8	7.00	92.10	1.13	455.93	0
595	Whittier Narrows-01	Bell Gardens-Jaboneria	1987	6.0	17.80	30.01	0.82	263.10	3
611	Whittier Narrows-01	Compton-Castlegate St	1987	6.0	23.40	32.81	0.87	262.85	3
614	Whittier Narrows-01	Downey-Birchdale	1987	6.0	20.80	40.06	0.86	245.06	3
615	Whittier Narrows-01	Downey-Co Maint Bldg	1987	6.0	20.80	33.11	0.88	271.90	3
645	Whittier Narrows-01	LB-Orange Ave	1987	6.0	24.50	31.20	0.90	307.97	3
668	Whittier Narrows-01	Norwalk-Imp Hwy, S Grnd	1987	6.0	20.40	27.93	0.90	278.59	3
692	Whittier Narrows-01	Santa Fe Springs-E. Joslin	1987	6.0	18.50	44.21	0.81	339.06	3
722	Superstition Hills-02	Kornbloom Road (temp)	1987	6.5	18.50	33.03	2.13	261.81	0
723	Superstition Hills-02	Parachute Test Site	1987	6.5	0.90	143.80	2.39	348.69	0
725	Superstition Hills-02	Poe Road (temp)	1987	6.5	11.20	42.09	2.87	320.92	0
738	Loma Prieta	Alameda Naval Air Stn Hanger	1989	6.9	71.00	40.76	2.10	190.00	3
758	Loma Prieta	Emeryville-6363 Christie	1989	6.9	77.00	43.95	1.67	198.74	3
764	Loma Prieta	Gilroy-Historic Bldg.	1989	6.9	11.00	43.56	1.64	307.65	3
766	Loma Prieta	Gilroy Array #2	1989	6.9	11.10	46.17	1.73	270.84	3
767	Loma Prieta	Gilroy Array #3	1989	6.9	12.80	44.71	2.64	349.85	3
783	Loma Prieta	Oakland-Outer Harbor Wharf	1989	6.9	74.30	48.19	1.83	248.62	3
784	Loma Prieta	Oakland-Title & Trust	1989	6.9	72.20	36.24	1.39	306.30	3
796	Loma Prieta	SF-Presidio	1989	6.9	77.40	32.85	1.32	594.47	3
802	Loma Prieta	Saratoga-Aloha Ave	1989	6.9	8.50	53.45	4.57	399.44	3
803	Loma Prieta	Saratoga-W Valley Coll.	1989	6.9	9.30	61.91	5.65	356.39	3
808	Loma Prieta	Treasure Island	1989	6.9	77.40	33.39	2.08	155.11	3
825	Cape Mendocino	Cape Mendocino	1992	7.0	7.00	123.97	4.84	522.48	2
828	Cape Mendocino	Petrolia	1992	7.0	8.20	96.64	3.00	429.35	2
838	Landers	Barstow	1992	7.3	34.90	28.81	9.13	384.67	0
879	Landers	Lucerne	1992	7.3	2.20	132.22	5.12	1369.00	0
900	Landers	Yermo Fire Station	1992	7.3	23.60	55.71	7.50	353.63	0
982	Northridge-01	Jensen Filter Plant	1994	6.7	5.40	101.41	3.16	377.39	2
983	Northridge-01	Jensen Filter Plant Generator	1994	6.7	5.40	65.99	3.54	525.79	2
1003	Northridge-01	LA-Saturn St	1994	6.7	27.00	41.60	0.98	308.71	2
1004	Northridge-01	LA-Sepulveda VA Hospital	1994	6.7	8.40	77.78	0.93	380.06	2
1013	Northridge-01	LA Dam	1994	6.7	5.90	86.21	1.62	628.99	2
1044	Northridge-01	Newhall-Fire Sta	1994	6.7	5.90	115.97	1.37	269.14	2
1045	Northridge-01	Newhall-W Pico Canyon Rd.	1994	6.7	5.50	118.14	2.98	285.93	2
1050	Northridge-01	Pacoima Dam (downstr)	1994	6.7	7.00	50.11	0.59	2016.13	2
1051	Northridge-01	Pacoima Dam (upper left)	1994	6.7	7.00	105.99	0.84	2016.13	2
1052	Northridge-01	Pacoima Kagel Canyon	1994	6.7	7.30	56.73	0.73	508.08	2
1054	Northridge-01	Pardee-SCE	1994	6.7	7.50	76.19	1.23	331.98	2
1063	Northridge-01	Rinaldi Receiving Sta	1994	6.7	6.50	148.98	1.25	282.25	2
1084	Northridge-01	Sylmar-Converter Sta	1994	6.7	5.30	106.23	2.98	251.24	2
1085	Northridge-01	Sylmar-Converter Sta East	1994	6.7	5.20	113.88	3.53	370.52	2
1086	Northridge-01	Sylmar-Olive View Med FF	1994	6.7	5.30	130.42	2.44	440.54	2
1106	Kobe, Japan	KJMA	1995	6.9	1.00	105.53	1.09	312.00	0

续表 1

序号	地震地点	台站名称	年份	M_w	R /km	PGV /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_p /s	v_{S30} /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	断层 类型
1114	Kobe, Japan	Port Island (0 m)	1995	6.9	3.30	102.87	2.83	198.00	0
1119	Kobe, Japan	Takarazuka	1995	6.9	0.30	95.46	1.81	312.00	0
1120	Kobe, Japan	Takatori	1995	6.9	1.50	153.07	1.55	256.00	0
1148	Kocaeli, Turkey	Arcelik	1999	7.5	13.50	40.25	7.79	523.00	0
1161	Kocaeli, Turkey	Gebze	1999	7.5	10.90	52.91	5.99	792.00	0
1165	Kocaeli, Turkey	Izmit	1999	7.5	7.20	38.04	5.37	811.00	0
1176	Kocaeli, Turkey	Yarimca	1999	7.5	4.80	90.53	4.95	297.00	0
1182	Chi-Chi, Taiwan, China	CHY006	1999	7.6	9.80	58.26	2.57	438.19	3
1193	Chi-Chi, Taiwan, China	CHY024	1999	7.6	9.60	61.49	6.65	427.73	3
1244	Chi-Chi, Taiwan, China	CHY101	1999	7.6	9.90	108.77	5.34	258.89	3
1402	Chi-Chi, Taiwan, China	NST	1999	7.6	38.40	32.26	7.88	491.31	3
1464	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU006	1999	7.6	72.60	35.81	10.88	607.40	3
1470	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU014	1999	7.6	92.70	27.13	10.37	496.47	3
1471	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU015	1999	7.6	49.80	43.95	9.11	426.00	3
1472	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU017	1999	7.6	54.30	47.45	8.67	558.76	3
1473	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU018	1999	7.6	66.30	42.68	10.23	573.04	3
1475	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU026	1999	7.6	56.10	45.64	8.37	569.98	3
1476	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU029	1999	7.6	28.00	62.63	5.29	406.53	3
1477	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU031	1999	7.6	30.20	63.27	5.93	489.22	3
1478	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU033	1999	7.6	40.90	41.62	8.97	423.40	3
1479	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU034	1999	7.6	35.70	45.20	8.87	393.77	3
1480	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU036	1999	7.6	19.80	63.12	5.38	478.07	3
1481	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU038	1999	7.6	25.40	54.82	9.58	297.91	3
1482	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU039	1999	7.6	19.90	57.78	9.33	540.66	3
1483	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU040	1999	7.6	22.10	47.52	6.43	362.03	3
1485	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU045	1999	7.6	26.00	43.66	9.34	704.64	3
1486	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU046	1999	7.6	16.70	31.29	8.04	465.55	3
1487	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU047	1999	7.6	35.00	44.35	12.31	520.37	3
1489	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU049	1999	7.6	3.80	56.42	10.22	487.27	3
1491	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU051	1999	7.6	7.60	52.71	10.38	350.26	3
1492	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU052	1999	7.6	0.70	208.85	11.96	393.17	3
1493	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU053	1999	7.6	6.00	37.10	13.12	454.55	3
1496	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU056	1999	7.6	10.50	45.27	8.94	403.20	3
1498	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU059	1999	7.6	17.10	63.99	7.78	272.72	3
1501	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU063	1999	7.6	9.80	78.85	6.55	476.14	3
1502	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU064	1999	7.6	16.60	52.21	8.46	645.72	3
1503	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU065	1999	7.6	0.60	136.39	5.74	305.85	3
1505	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU068	1999	7.6	0.30	341.77	12.29	487.34	3
1510	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU075	1999	7.6	0.90	104.76	5.00	573.02	3
1511	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU076	1999	7.6	2.70	71.16	4.73	614.98	3
1514	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU081	1999	7.6	55.50	42.43	9.38	430.47	3
1515	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU082	1999	7.6	5.20	56.12	8.10	472.81	3
1519	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU087	1999	7.6	7.00	45.48	10.40	538.69	3
1520	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU088	1999	7.6	18.20	35.43	11.14	629.34	3
1523	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU094	1999	7.6	54.50	39.58	8.30	589.85	3
1524	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU095	1999	7.6	45.20	42.72	7.67	446.63	3
1525	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU096	1999	7.6	54.50	40.64	9.46	454.58	3

续表 1

序号	地震地点	台站名称	年份	M_w	R /km	PGV /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_p /s	v_{S30} /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	断层 类型
1526	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU098	1999	7.6	47.70	46.79	9.28	346.67	3
1528	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU101	1999	7.6	2.10	76.62	10.32	389.57	3
1529	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU102	1999	7.6	1.50	104.65	9.63	714.27	3
1530	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU103	1999	7.6	6.10	67.08	8.69	494.10	3
1531	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU104	1999	7.6	12.90	56.05	7.19	410.45	3
1548	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU128	1999	7.6	13.10	60.65	9.02	599.64	3
1550	Chi-Chi, Taiwan, China	TCU136	1999	7.6	8.30	61.46	8.88	462.10	3
1602	Duzce, Turkey	Bolu	1999	7.1	12.00	65.73	0.88	293.57	0
1605	Duzce, Turkey	Duzce	1999	7.1	6.60	78.86	5.94	281.86	0
1752	Northwest China-03	Jiashi	1997	6.1	17.70	34.53	1.09	240.09	1
1853	Yountville	Napa Fire Station #3	2000	5.0	11.50	42.33	0.74	331.99	0
2114	Denali, Alaska	TAPS Pump Station #10	2002	7.9	2.70	121.32	3.16	329.40	0
2457	Chi-Chi, Taiwan-03, China	CHY024	1999	6.2	19.60	32.64	3.19	427.73	2
2466	Chi-Chi, Taiwan-03, China	CHY035	1999	6.2	34.50	30.02	1.06	573.04	2
2495	Chi-Chi, Taiwan-03, China	CHY080	1999	6.2	22.40	69.75	1.38	496.21	2
2618	Chi-Chi, Taiwan-03, China	TCU065	1999	6.2	26.10	35.40	1.53	305.85	2
2627	Chi-Chi, Taiwan-03, China	TCU076	1999	6.2	14.70	61.39	0.92	614.98	2
2628	Chi-Chi, Taiwan-03, China	TCU078	1999	6.2	7.60	56.29	3.86	443.04	2
2734	Chi-Chi, Taiwan-04, China	CHY074	1999	6.2	6.20	43.98	2.44	553.43	0
3317	Chi-Chi, Taiwan-06, China	CHY101	1999	6.3	36.00	34.03	3.26	258.89	2
3473	Chi-Chi, Taiwan-06, China	TCU078	1999	6.3	11.50	38.40	4.15	443.04	2
3475	Chi-Chi, Taiwan-06, China	TCU080	1999	6.3	10.20	39.28	1.02	489.41	2
3548	Loma Prieta	Los Gatos-Lexington Dam	1989	6.9	5.00	121.21	1.57	1070.34	3
3634	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I02	1986	6.3	60.10	38.82	1.67	309.41	2
3635	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I03	1986	6.3	60.00	35.52	1.67	314.88	2
3636	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I04	1986	6.3	59.90	34.10	1.67	314.88	2
3637	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I05	1986	6.3	59.80	33.51	1.69	309.41	2
3638	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I06	1986	6.3	59.80	33.52	1.67	309.41	2
3639	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I08	1986	6.3	59.80	36.88	1.67	309.41	2
3640	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I09	1986	6.3	59.80	34.73	1.67	309.41	2
3641	Taiwan SMART1(40), China	SMART1 I11	1986	6.3	60.00	31.25	1.57	309.41	2
3642	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 I12	1986	6.3	60.10	32.65	1.57	275.82	2
3643	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M02	1986	6.3	60.90	29.67	1.48	306.78	2
3644	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M03	1986	6.3	60.50	34.00	1.57	306.78	2
3645	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M04	1986	6.3	59.90	33.09	1.51	306.38	2
3646	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M05	1986	6.3	59.50	36.12	1.57	306.38	2
3647	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M06	1986	6.3	59.10	37.25	1.51	308.39	2
3649	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M09	1986	6.3	59.40	30.79	1.57	321.63	2
3650	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M10	1986	6.3	59.90	30.37	1.60	321.63	2
3652	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 M12	1986	6.3	60.80	24.93	1.44	275.82	2
3655	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 O04	1986	6.3	60.00	36.66	1.44	288.24	2
3656	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 O05	1986	6.3	59.00	33.33	1.48	286.03	2
3657	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 O06	1986	6.3	58.20	34.22	1.60	293.46	2
3658	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 O08	1986	6.3	58.10	31.89	1.44	357.43	2
3660	Taiwan SMART1 (40), China	SMART1 O11	1986	6.3	60.90	27.62	1.23	295.17	2
3744	Cape Mendocino	Bunker Hill FAA	1992	7.0	12.20	80.50	5.36	571.07	2
3746	Cape Mendocino	Centerville Beach, Naval Fac	1992	7.0	18.30	57.42	1.97	466.17	2

续表 1

序号	地震地点	台站名称	年份	M_w	R /km	PGV /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_p /s	v_{S30} /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	断层 类型
3965	Tottori, Japan	TTR008	2000	6.6	6.90	53.16	1.54	139.21	0
4040	Bam, Iran	Bam	2003	6.6	1.70	124.04	2.02	487.40	0
4065	Parkfield-02, CA	Parkfield-Eades	2004	6.0	2.90	35.79	1.22	383.90	0
4097	Parkfield-02, CA	Slack Canyon	2004	6.0	3.00	53.18	0.85	597.72	0
4098	Parkfield-02, CA	Parkfield-Cholame 1E	2004	6.0	3.00	51.59	1.33	333.40	0
4100	Parkfield-02, CA	Parkfield-Cholame 2WA	2004	6.0	3.00	57.84	1.08	173.02	0
4101	Parkfield-02, CA	Parkfield-Cholame 3E	2004	6.0	5.50	30.92	0.52	397.36	0
4102	Parkfield-02, CA	Parkfield-Cholame 3W	2004	6.0	3.60	43.47	1.02	230.57	0
4103	Parkfield-02, CA	Parkfield-Cholame 4W	2004	6.0	4.20	38.28	0.70	410.40	0
4107	Parkfield-02, CA	Parkfield-Fault Zone 1	2004	6.0	2.50	81.85	1.19	178.27	0
4113	Parkfield-02, CA	Parkfield-Fault Zone 9	2004	6.0	2.90	26.96	1.13	372.26	0
4115	Parkfield-02, CA	Parkfield-Fault Zone 12	2004	6.0	2.60	56.47	1.19	265.21	0
4126	Parkfield-02, CA	Parkfield-Stone Corral 1E	2004	6.0	3.80	43.40	0.57	260.63	0
4211	Niigata, Japan	NIG021	2004	6.6	11.30	66.83	0.32	418.50	2
4228	Niigata, Japan	NIGH11	2004	6.6	8.90	65.51	1.80	375.00	2
4451	Montenegro, Yugo	Bar-Skupstina Opstine	1979	7.1	7.00	62.61	1.44	462.23	2
4458	Montenegro, Yugo	Ulcinj-Hotel Olympic	1979	7.1	5.80	62.77	1.97	318.74	2
4480	L'Aquila, Italy	L'Aquila-V. Aterno-Centro Valley	2009	6.3	6.30	42.08	1.07	475.00	1
4482	L'Aquila, Italy	L'Aquila-V. Aterno-F. Aterno	2009	6.3	6.50	31.55	1.18	552.00	1
4483	L'Aquila, Italy	L'Aquila-Parking	2009	6.3	5.40	46.24	1.98	717.00	1
4847	Chuetsu-oki	Joetsu Kakizakiku Kakizaki	2007	6.8	11.90	91.01	1.40	382.29	2
4850	Chuetsu-oki	Yoshikawaku Joetsu City	2007	6.8	16.90	63.72	1.33	550.38	2
4856	Chuetsu-oki	Kashiwazaki City Center	2007	6.8	11.10	125.83	2.93	297.76	2
4874	Chuetsu-oki	Oguni Nagaoka	2007	6.8	20.00	80.26	0.80	550.38	2
4875	Chuetsu-oki	Kariwa	2007	6.8	12.00	154.32	3.08	287.50	2
4879	Chuetsu-oki	Yan Sakuramachi City watershed	2007	6.8	19.00	39.41	1.41	270.37	2
4889	Chuetsu-oki	Joetsu Otemachi	2007	6.8	32.90	34.86	0.55	315.29	2
4891	Chuetsu-oki	Iizuna Imokawa	2007	6.8	66.40	81.37	0.92	588.70	2
4896	Chuetsu-oki	Service Hall: 2.4 m depth	2007	6.8	11.00	125.86	2.39	201.00	2
5658	Iwate	Iwth26	2008	6.9	6.00	56.80	4.00	371.06	2
5810	Iwate	Machimukai Town	2008	6.9	24.10	39.93	4.16	649.02	2
5832	El Mayor-Cucapah	Tamaulipas	2010	7.2	26.60	56.29	8.43	242.05	0
6877	Joshua Tree, CA	Indio-Jackson Road	1992	6.1	25.50	53.21	1.10	293.50	0
6887	Darfield, New Zealand	CBGS	2010	7.0	18.10	59.89	12.62	187.00	0
6897	Darfield, New Zealand	DSL/C	2010	7.0	8.50	65.82	7.83	295.74	0
6906	Darfield, New Zealand	GDLC	2010	7.0	1.20	128.41	6.23	344.02	0
6911	Darfield, New Zealand	HORC	2010	7.0	7.30	106.03	9.92	326.01	0
6927	Darfield, New Zealand	LINC	2010	7.0	7.10	116.36	7.37	263.20	0
6928	Darfield, New Zealand	LPCC	2010	7.0	25.70	30.18	10.63	594.96	0
6942	Darfield, New Zealand	NNBS	2010	7.0	26.80	56.44	8.04	211.00	0
6959	Darfield, New Zealand	REHS	2010	7.0	19.50	65.19	12.02	141.00	0
6960	Darfield, New Zealand	RHSC	2010	7.0	13.60	63.73	9.39	293.00	0
6962	Darfield, New Zealand	ROL/C	2010	7.0	1.50	85.60	7.14	295.74	0
6966	Darfield, New Zealand	SHLC	2010	7.0	22.30	65.66	8.76	207.00	0
6969	Darfield, New Zealand	SMTC	2010	7.0	20.90	64.33	9.35	247.50	0
6975	Darfield, New Zealand	TPLC	2010	7.0	6.10	74.03	8.93	249.28	0
8064	Christchurch, New Zealand	CCCC	2011	6.1	3.30	66.86	1.72	198.00	3

续表 1

序号	地震地点	台站名称	年份	M_w	R /km	PGV /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_p /s	v_{S30} /($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	断层 类型
8066	Christchurch, New Zealand	CHHC	2011	6.1	4.80	81.19	1.96	194.00	3
8067	Christchurch, New Zealand	CMHS	2011	6.1	4.50	48.03	2.04	204.00	3
8090	Christchurch, New Zealand	HPSC	2011	6.1	4.30	48.21	6.85	206.00	3
8119	Christchurch, New Zealand	PRPC	2011	6.1	2.00	123.01	4.82	206.00	3
8123	Christchurch, New Zealand	REHS	2011	6.1	5.10	97.36	1.55	141.00	3
8130	Christchurch, New Zealand	SHLC	2011	6.1	5.60	72.32	3.58	207.00	3
8158	Christchurch, New Zealand	LPCC	2011	6.1	6.10	44.69	3.80	594.96	3
8161	El Mayor-Cucapah	El Centro Array #12	2010	7.2	11.30	72.56	8.72	196.88	0
8164	Duzce, Turkey	IRIGM 487	1999	7.1	2.60	39.19	10.05	690.00	0

注: 序号表示数据在NGA-West2中的地震记录编号; R 为断层距; T_p 为脉冲周期; 断层类型: 0为走滑断层, 1为正断层, 2为逆断层, 3为逆断层-斜滑断层.