

孙亦鸥, 丁海平. 基于小波方法的近断层地震动速度脉冲周期的统计特性 [J]. 华南地震, 2014, 34 (3):24-32. [SUN Yiou, DING Haiping. Statistical Characteristics of Velocity Pulses for Near-fault Strong Motions Based on Wavelet Approach[J]. South china journal of seismology, 2014, 34 (3):24-32.]

基于小波方法的近断层地震动速度 脉冲周期的统计特性

孙亦鸥¹, 丁海平^{1,2}

(1. 苏州科技学院 江苏省结构工程重点实验室, 苏州 215011;
2. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080)

摘要: 采用小波方法筛选出了 180 条断层距在 20 km 之内且 PGV 大于 10 cm/s 的具有速度脉冲特征的近断层地震波, 分别对基岩和土层场地、走滑(SS)和非走滑(NSS)断层、不同脉冲峰值标准情形下近断层脉冲周期和矩震级的关系进行了统计, 得到了不同情形下脉冲周期-震级经验公式回归系数, 以供近场地震动速度脉冲的相关研究参考使用。结果表明: 走滑断层产生的脉冲周期比非走滑断层的大, 但随震级的增大情况发生变化; 无论走滑断层还是非走滑断层, 当震级较小时, 土层场地的脉冲周期比基岩场地的大, 随着震级的增加, 基岩场地的脉冲周期将比土层场地的大; 根据不同标准的速度脉冲峰值 PGV 记录, 得到的周期-震级关系曲线有很大区别。

关键词: 近断层地震动; 小波方法; 速度脉冲; 统计特性

中图分类号: P315.241 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 03-0024-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.03.005

Statistical Characteristics of Velocity Pulses for Near-fault Strong Motions Based on Wavelet Approach

SUN Yiou¹, DING Haiping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Structure Engineering of Jiangsu Province, Suzhou University
of Science and Technology, Suzhou 215011, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: In this paper, 180 records are selected based on wavelet approach. These records show three common features: their rupture distances are less than 20km, their peak ground velocity (PGV) are greater than 10cm/sec and they all show characteristics of velocity pulses for near-fault strong motions. All Records are divided into groups according to different site conditions (rock vs. soil), different fault types (strike-slip fault vs. non-strike-slip fault) and different PGV threshold levels. Regression coefficients of several period-magnitude relationships in different situations are then given. With statistics in hand, several conclusions can be

收稿日期: 2014-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278323), 江苏省研究生科研创新计划项目(CXLX12_0875)

作者简介: 孙亦鸥(1988-), 男, 硕士, 主要从事地震工程研究. E-mail: neosunyiou@126.com.

通讯作者: 丁海平(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地震工程研究. E-mail: hpding@126.com.

made: ① pulse periods in strike-slip faults are greater than those in non-strike-slip faults, but things changed with moment magnitude greater than 7, which is believed to have relationship with insufficient severe earthquake records. With limited severe earthquake records, the result may be affected. ② In both strike-slip faults' and non-strike-slip faults' cases, pulse periods in rock sites are greater than those in soil sites with moment magnitude less than 6.5 or so, and pulse periods in rock sites will be greater than those in soil sites as moment magnitude increases, but the boundary line on which pulse periods change differs according to different fault types. ③ The period-magnitude relationships derived from different PGV threshold levels varies a lot. For non-strike-slip faults, both soil sites and rock sites show the same property, that is, when magnitude is relatively small, the higher the PGV threshold level is, the smaller the pulse periods will be, however, pulse periods increase with the moment magnitude, when the moment magnitude reaches a certain degree, pulse periods from lower PGV threshold levels will be greater than those from higher ones. However, for non-strike-slip faults, in soil sites' cases, it is just the other way around, while in rock sites' cases, such trend is not obvious, which may be caused by limited data volume.

Keywords: Near fault ground motion; Velocity pulse period; Peak ground velocity; Wavelet approach; Site effect

0 引言

由于近断层地震动具有速度脉冲的特征^[1],以及速度脉冲对长周期结构的影响作用^[2],近断层速度脉冲的周期和峰值特征已成为地震工程领域的一个重要研究课题。目前,对速度脉冲周期的研究主要依赖于对近断层脉冲记录的统计分析,主要通过回归分析得到速度脉冲周期与矩震级、断层距等震源参数的关系。如 Alavi 和 Krawinkler^[3]研究发现地震动速度反应谱的峰值所对应的周期值与速度脉冲周期值极为接近,并由 8 条近断层记录回归得到速度脉冲周期随震级的变化关系,得出速度脉冲周期随震级的增大而增长的结论,但限于数据过少,且来自于不同破裂机制,数据离散性较大。Somerville^[4]根据震级在 6.1~7.6 之间断层小于 20 km 的区分基岩场地记录(15 条)与土层场地记录(12 条)的脉冲记录,分别求出两类场地条件下速度脉冲周期与震级的关系模型,结果表明在矩震级低于 7 级时,相较于基岩场地,速度脉冲周期在土层场地会更长,且随着震级变大,两类场地的周期逐渐趋于统一。Mavroeidis 和 Papageorgio^[5]采用小波方法确定了收集的 42 条近断层脉冲型记录的周期,用最小二乘法拟合了脉冲周期-震级的经验公式,且分析了断层类别对速度脉冲周期的影响:速度脉冲周期由大到小依次为走滑断层,倾滑断层。Bray 和 Rodriguez-Marek^[6]利用震级介于 6.1~7.6 之间断层距 20 km 范围内的来自于 13 个地震事件的 50 条脉冲型记录,针对基岩与硬土二者不同的场地类别分别建立速度脉冲周期关于震级的回归模型,分析结果表明,当震级相同时,基岩场地的速度脉冲周期不如硬土

场地的。刘启方^[7]等则通过对均匀弹性全空间中走滑断层附近方向性速度脉冲的定性研究,发现速度脉冲周期随震源时间函数中的上升时间增大而增加。此外,也有学者研究近断层速度脉冲的频谱特征,韦韬^[8]等在大量近断层记录基础上,对有速度脉冲和无速度脉冲记录的特征周期进行了对比,结果表明:无论是相对我国规范的 I 类还是 II 类场地,有速度脉冲记录的特征周期比规范中给出的值都要大,且均在规范值的 2 倍以上。然而,由于一方面在定义脉冲周期时有一定程度的主观性,导致确定周期时出现了差异;另一方面近断层脉冲型记录的匮乏,造成了统计分析的结果误差较大^[9]。本文将采用小波方法从近断层记录中提取长周期信号,并对近断层脉冲信号进行分类,根据不同断层类型、场地类型和脉冲强度,统计分析速度脉冲的周期特征,并研究震级对周期的影响。

1 小波分析方法

1.1 小波简介

小波是一种把数据、函数或算子分割成不同频率成分,用分解的方法研究对应尺度下成分的工具,其在地震数据分析领域中的应用是由 J. Morlet 提出的。主要用于地震滤波、小波处理、波传播的建模和迹线反演等方面。下面给出两种在小波分析中比较常用的母波函数(图 1、图 2)。

1.2 选择最佳小波分析模型应满足条件

(1) 人造小波应为简单的含参表达式。参数少,能代表的物理意义多,能灵活表示近场脉冲。

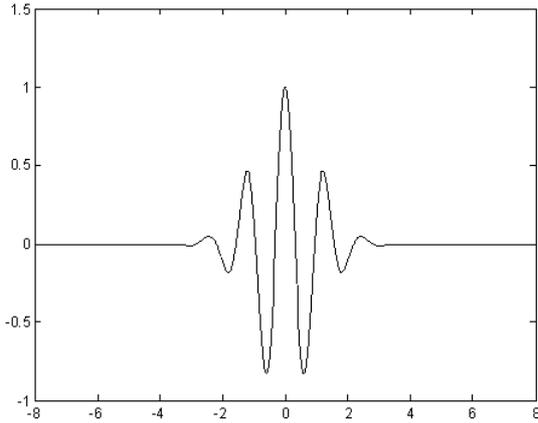


图1 Morlet 小波
Fig.1 Morlet wavelet

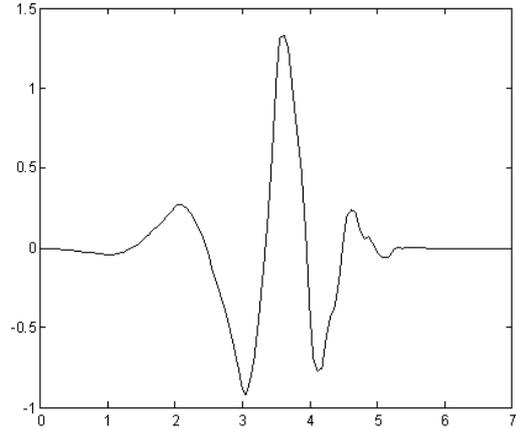


图2 4阶 Daubechies 小波
Fig.2 The fourth order Daubechies wavelet

(2) 人造小波应能模拟尽可能多的近场记录。

(3) 人造小波表达式应易于推导傅里叶变换形式的谱特征的解析解及其反应谱。解析解能简化结构对近场脉冲响应的参数研究。

根据以上条件,George P. Mavroeidis 和 Apostolos S. Papageorgioud 在 2003 年中选用了 Morlet 小波作为母函数(如图 1),发现尽管对 Morlet 小波各种参数组合进行了测试,但对于单个脉冲,其拟合效果并不令人满意。

而 Jack W. Baker 通过对比研究发现,多贝西小波(Daubechies Wavelet)对于大部分速度脉冲的拟合结果都较好,因此确定母函数为多贝西小波(图 2),并引出本方法的具体操作步骤。

- (1) 选取母函数为多贝西小波。
- (2) 对加速度时程进行连续小波变换,得到速度时程。
- (3) 计算脉冲特性指标:

① 脉冲的初步定义,通过脉冲指标(Pulse indicator)实现。由脉冲前后的 PGV 比值 PGV_{ratio} 及剩余波形信号的能量和原始记录的能量的比值 $Eratio$ 得脉冲指标(Pulse indicator),即

$$pulse\ indicator = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 14.6 (PGV_{ratio}) + 20.5 (energy_{ratio})}} > 0.85$$

其中能量通过能量时间函数求得,能量时间函数的表达式为

$$CSV(t) = \int_0^t V^2(u) du$$

② 剔除晚到脉冲的影响。脉冲信号达到总能量 10% 的时刻 $t_{10\%, pulse}$ 出现在原始记录达到总能量 20% 的时刻 $t_{20\%, orig}$ 之前,体现了该脉冲出现在场地运动初期的性质(或称早到脉冲),即 $t_{20\%, orig} > t_{10\%, pulse}$,

否则即为晚到脉冲。

③ 原始记录的速度峰值不能太小,对于脉冲型记录必须满足原始速度峰值大于 30 cm/s,即 $PGV > 30$ cm/s,这一指标的数值在后文有所调整。

④ 同时满足以上①、②、③三个条件的记录才能视为脉冲型记录,这也是本文速度脉冲的选取标准。

⑤ 基于以上条件得到速度脉冲时程及对应的脉冲周期。

1.3 使用小波分析方法计算速度脉冲周期的特点

通过采用检出小波卓越频率的方法,可以识别一个地面运动的速度脉冲,从而可以计算脉冲周期。不同于在傅立叶分析中出现的正弦波,目前对于小波的周期没有明确的定义,但是对应于傅立叶分析中的正弦波周期,小波中的最大傅立叶幅值能定义一个类似的“拟周期”。为了说明这一点,图 3 中同时给出一个示例小波以及与该小波最大傅立叶幅值相同的正弦波周期的例子。

2 近断层强震记录

本文从美国太平洋地震工程中心(PEER)强震数据库中选取了矩震级大于 5.0、断层距在 20 km 以内的 75 个地震事件共计 860 条地震记录,详见表 1。在该数据库中,加速时程记录在水平方向上是以通过旋转到 FN 和 FP 两个相互垂直的分量的形式给出的^[10]。因为速度脉冲主要与破裂的方向性效应有关, FN 方向的时程记录往往含有强烈的速度脉冲,其幅值较大的速度脉冲往往会在 FN 方向而不是 FP 方向。

如何从大量的近断层强震记录中挑选具有速

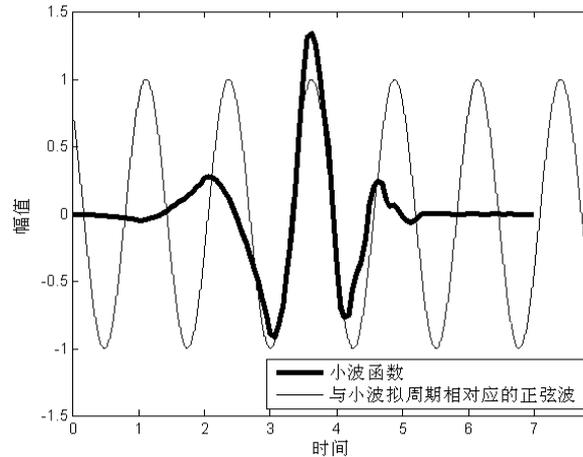


图 3 一个 Daubechies 小波以及一个正弦波(其中该小波的最大傅立叶幅值与正弦波的周期相同)

Fig.3 The comparison between Daubechies wavelet and sine wave

表 1 用于本文研究的地震记录

Table 1 Earthquake records used in this study

序号	地震名称	地震日期	震级 M_w	断层机制	记录数目
1	San Francisco	1957-03-22	5.3	NSS	2
2	Parkfield	1966-06-28	6.2	SS	8
3	Lytle Creek	1970-09-12	5.3	NSS	4
4	San Fernando	1971-02-09	6.6	NSS	4
5	Managua, Nicaragua-01	1972-12-23	6.2	SS	2
6	Point Mugu	1973-02-21	5.7	NSS	2
7	Oroville-01	1975-08-01	5.9	NSS	2
8	Friuli, Italy-01	1976-05-06	6.5	NSS	2
9	Friuli, Italy-02	1976-09-15	5.9	NSS	6
10	Tabas, Iran	1978-09-16	7.4	NSS	4
11	Coyote Lake	1979-08-06	5.7	SS	14
12	Norcia, Italy	1979-09-19	5.9	NSS	4
13	Imperial Valley-06	1979-10-15	6.5	SS	48
14	Imperial Valley-07	1979-10-15	5.0	SS	26
15	Livermore-01	1980-01-24	5.8	SS	4
16	Livermore-02	1980-01-27	5.4	SS	8
17	Anza (Horse Canyon)-01	1980-02-25	5.2	SS	6
18	Mammoth Lakes-01	1980-05-25	6.1	NSS	6
19	Mammoth Lakes-02	1980-05-25	5.7	SS	6
20	Mammoth Lakes-03	1980-05-25	5.9	SS	8
21	Mammoth Lakes-04	1980-05-25	5.7	SS	8
22	Mammoth Lakes-06	1980-05-27	5.9	SS	6
23	Victoria, Mexico	1980-06-09	6.3	SS	6
24	Irpinia, Italy-01	1980-11-23	6.9	NSS	8
25	Irpinia, Italy-02	1980-11-23	6.2	NSS	6
26	Westmorland	1981-04-26	5.9	SS	12
27	Mammoth Lakes-10	1983-01-07	5.3	SS	2
28	Mammoth Lakes-11	1983-01-07	5.3	SS	2
29	Coalinga-01	1983-05-02	6.4	NSS	2
30	Coalinga-02	1983-05-09	5.1	NSS	36
31	Coalinga-03	1983-06-11	5.4	NSS	6
32	Coalinga-04	1983-07-09	5.2	NSS	22
33	Coalinga-05	1983-07-22	5.8	NSS	22

(转下表)

(接上表)

序号	地震名称	地震日期	震级 M_w	断层机制	记录数目
34	Coalinga-07	1983-07-25	5.2	NSS	4
35	Coalinga-08	1983-09-09	5.2	SS	4
36	Borah Peak, ID-02	1983-10-29	5.1	NSS	2
37	Morgan Hill	1984-04-24	6.2	SS	20
38	Nahanni, Canada	1985-12-23	6.8	NSS	6
39	Hollister-04	1986-01-26	5.5	SS	6
40	Mt. Lewis	1986-03-31	5.6	SS	2
41	N. Palm Springs	1986-07-08	6.1	NSS	16
42	Chalfant Valley-01	1986-07-20	5.8	SS	4
43	Chalfant Valley-02	1986-07-21	6.2	SS	6
44	Chalfant Valley-04	1986-07-31	5.4	SS	2
45	San Salvador	1986-10-10	5.8	SS	4
46	Baja California	1987-02-07	5.5	SS	2
47	New Zealand-02	1987-03-02	6.6	NSS	2
48	Whittier Narrows-01	1987-10-01	6.0	NSS	48
49	Whittier Narrows-02	1987-10-04	5.3	NSS	12
50	Superstition Hills-01	1987-11-24	6.2	SS	2
51	Superstition Hills-02	1987-11-24	6.5	SS	14
52	Loma Prieta	1989-10-18	6.9	NSS	34
53	Erzican, Turkey	1992-03-13	6.7	SS	2
54	Cape Mendocino	1992-04-25	7.0	NSS	8
55	Landers	1992-06-28	7.3	SS	6
56	Big Bear-01	1992-06-28	6.5	SS	2
57	Northridge-01	1994-01-17	6.7	NSS	56
58	Double Springs	1994-09-12	5.9	SS	2
59	Kobe, Japan	1995-01-16	6.9	SS	10
60	Dinar, Turkey	1995-10-01	6.4	NSS	2
61	Kocaeli, Turkey	1999-08-17	7.5	SS	8
62	Chi-Chi, Taiwan	1999-09-20	7.6	NSS	130
63	Duzce, Turkey	1999-11-12	7.1	SS	28
64	Upland	1990-02-28	5.6	SS	4
65	Sierra Madre	1991-06-28	5.6	NSS	7
66	Northridge-04	1994-01-17	5.9	NSS	2
67	Northridge-06	1994-03-20	5.3	NSS	41
68	Little Skull Mtn, NV	1992-06-29	5.7	NSS	2
69	San Juan Bautista	1998-08-12	5.2	SS	2
70	Hector Mine	1999-10-16	7.1	SS	2
71	Yountville	2000-09-03	5.0	SS	2
72	Chi-Chi, Taiwan-02	1999-09-20	5.9	NSS	12
73	Chi-Chi, Taiwan-03	1999-09-20	6.2	NSS	22
74	Chi-Chi, Taiwan-04	1999-09-20	6.2	SS	8
75	Chi-Chi, Taiwan-06	1999-09-25	6.3	NSS	8

注: SS表示走滑断层; NSS表示非走滑断层。

度脉冲特征的记录是个问题, 因为我们很难直观地区分其是否含有速度脉冲特性。本文采用具有代表性的 Jack W. Baker^[11]提出的小波方法, 即脉冲型地面运动被认为是具有一个发生在速度时程较早时段内的脉冲的记录, 这样取得的脉冲型记录才主要由方向性效应引起。该文在选取速度脉冲

记录时, 还规定了原始记录的速度脉冲峰值下限, 即 $PGV \geq 30 \text{ cm/s}$ 。我们发现, 速度脉冲峰值 $PGV \geq 30 \text{ cm/s}$ 的规定过于严格, 限制了可用脉冲记录的数量。根据我国《中国地震烈度表(GB/T 17742-2008)》^[12], 这个范围相当于仅选取地震烈度为接近九度及以上地区的地震记录, 而实际中这

样的近断层($R_{np} \leq 20$ km)地震记录较少,因此由少量记录得到的统计结果偏差较大。本文对此进行了调整,降低速度脉冲峰值(PGV)下限,分别取 $PGV \geq 10$ cm/s (即相当于地震烈度为七度及七度以上)、 $PGV \geq 19$ cm/s(即相当于地震烈度为八度及八度以上)和 $PGV \geq 36$ cm/s(即相当于地震烈度为九度及九度以上)分别进行统计。

一般地,在统计建立加速度等地震动参数的衰减关系时,可以根据足够的记录得到基岩和土层等不同场地类型的衰减关系。虽然近断层脉冲记录少,但本文在进行统计时,仍然进行了场地分类。按照美国 IBC 规范^[13],首先按 V_{s30} 对场地进行分类,具体见表 2。由表 2 可知,土层场地和基岩场地的分界对应于 $V_{s30}=360$ m/s 处,考虑到分类过细后将导致各子类数据的不足的因素,本文按照以 360 m/s 为界的分类方法,把 V_{s30} 大于 360 m/s 者视作基岩场地,小于或等于 360 m/s 者视作土层场地。最后场地分为 2 类,即基岩和土层场地。

此外,考虑到断层类型对脉冲周期的影响,以及走滑断层较多的事实,将断层类型也分为 2 类,即走滑断层(SS)和非走滑断层(NSS,包括倾滑断层和正断层等)。同时,根据文献[5]的统计(速度脉冲周期由大到小依次为走滑断层、倾滑断层),本文这样分类也是合适的。

表 2 美国 IBC2009 规范中对场地的分类

Table 2 Site classification in IBC2009

场地类别	描述	等效剪切波速范围/(m/s)
A	硬基岩	$V_{s30} > 1500$
B	基岩	$760 < V_{s30} \leq 1500$
C	软基岩	$360 < V_{s30} \leq 760$
D	坚硬土	$180 < V_{s30} \leq 360$
E	软弱土	$V_{s30} \leq 180$

据上述规定,对收集的 860 条近断层记录进行速度脉冲周期和峰值计算、判断,并进行筛选和分类,最后得到本文用于统计分析近断层脉冲周期特征的各类近断层记录 180 条,具体分布见表 3 和图 4。

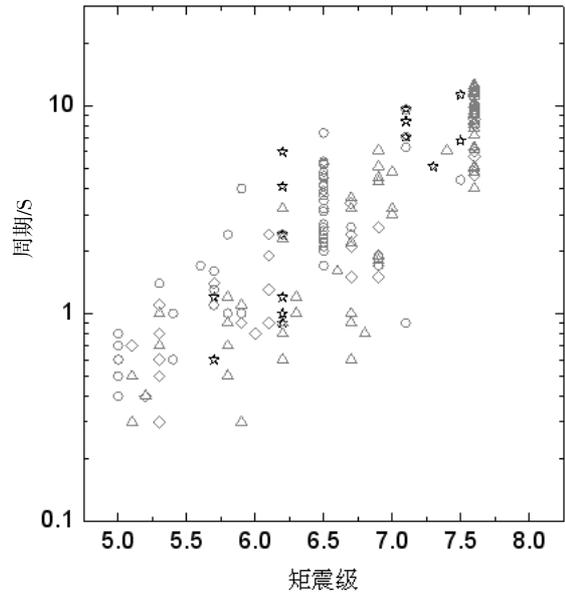
3 速度脉冲周期与震级及断层距的统计关系

引起近断层长周期速度脉冲的因素主要有前方向性效应及永久位移,且速度脉冲周期的大小与震级、断层距等震源参数有关^[14]。由于本文研究

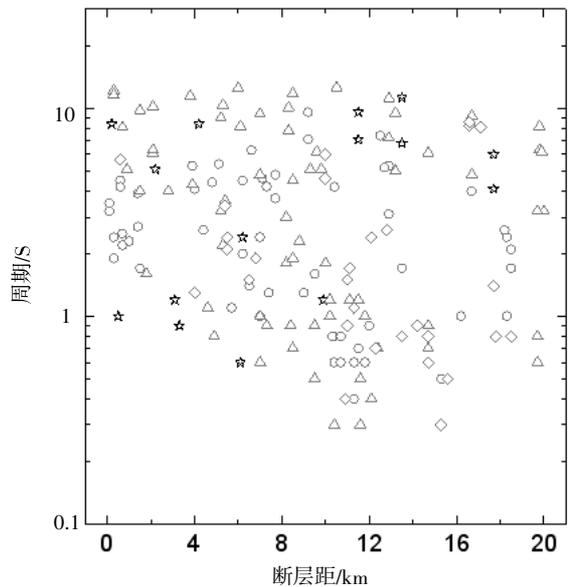
表 3 用于本文统计分析的近断层脉冲记录数目

Table 3 Number of near-fault pulse records used in this paper

PGV /(cm/s)	走滑断层 (SS)		非走滑断层 (NSS)		总数
	基岩	土层	基岩	土层	
≥ 10	15	57	76	32	180
≥ 19	8	42	63	21	134
≥ 36	6	33	48	17	104



(a) 按震级分布



(b) 按距离分布

☆: 走滑断层(基岩)情形; ○ 走滑断层(土层)情形
△ 非走滑断层(基岩)情形; ◇ 非走滑断层(土层)情形

图 4 本文采用的近断层地震记录分布

Fig.4 Distribution of near-fault earthquake records used in this paper

的是近断层地震波速度脉冲周期特性，所有选取记录的断层距 $R_{np} \leq 20$ km，因此没有考虑断层距的影响。与其它统计关系类似，同样采用如下关系式进行拟合：

$$\lg T_p = a + b M_w + \varepsilon \quad (1)$$

式(1)中 T_p 、 M_w 分别为速度脉冲周期和矩震级， a 、 b 为拟合系数， ε 为统计分析误差项，用均方差表示。根据得到的 180 条近断层脉冲周期，分别得到了不同情形下近断层速度脉冲周期与震

级关系的拟合系数 a 、 b 及统计分析误差，见表 4 及表 5。由此得到的速度脉冲周期与震级关系曲线见图 5~9。

4 结论

本文分别对基岩和土层场地、走滑和非走滑断层、不同脉冲峰值情形下近断层脉冲周期和矩震级的关系进行了统计，得到了不同情形下脉冲

表 4 不同情形下近断层脉冲周期与震级关系中系数 a 、 b 的取值

Table 4 The values of regression coefficients from several near-fault pulse period-magnitude relationships in different situations

PGV/ cm/s	走滑断层				非走滑断层			
	基岩场地		土层场地		基岩场地		土层场地	
	a	b	a	b	a	b	a	b
≥ 10	-3.292 40	0.577 30	-2.205 10	0.412 60	-3.219 44	0.536 12	-2.476 25	0.422 50
≥ 19	-3.036 87	0.511 88	-1.605 20	0.317 50	-3.671 30	0.598 36	-2.633 38	0.445 68
≥ 36	-2.626 99	0.456 28	-0.811 72	0.199 93	-4.181 63	0.668 75	-2.896 82	0.484 43

表 5 不同情形下近断层脉冲周期与震级关系中的统计分析误差项

Table 5 The values of ε from several near-fault pulse period-magnitude relationships in different situations

PGV/ cm/s	走滑断层		非走滑断层	
	基岩场地	土层场地	基岩场地	土层场地
	ε	ε	ε	ε
≥ 10	0.825 736	0.293 359	0.316 485	0.289 957
≥ 19	0.463 593	0.445 633	0.457 794	0.473 441
≥ 36	0.542 389	0.642 113	0.679 838	0.570 384

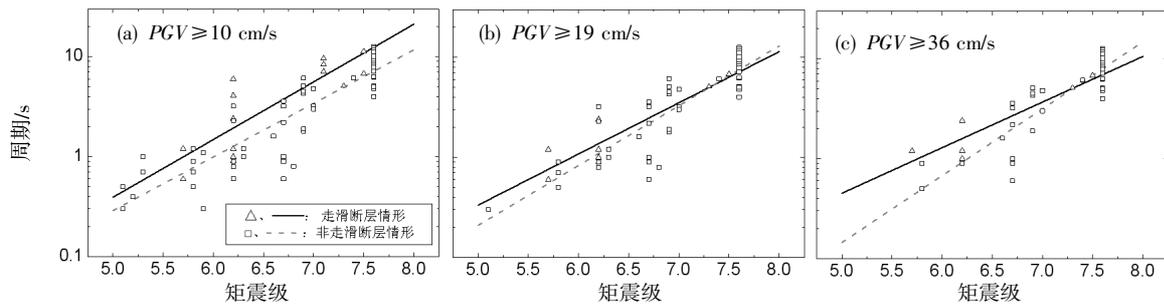


图 5 基岩场地速度脉冲周期-震级关系

Fig.5 Velocity pulse period-magnitude relationship for rock sites

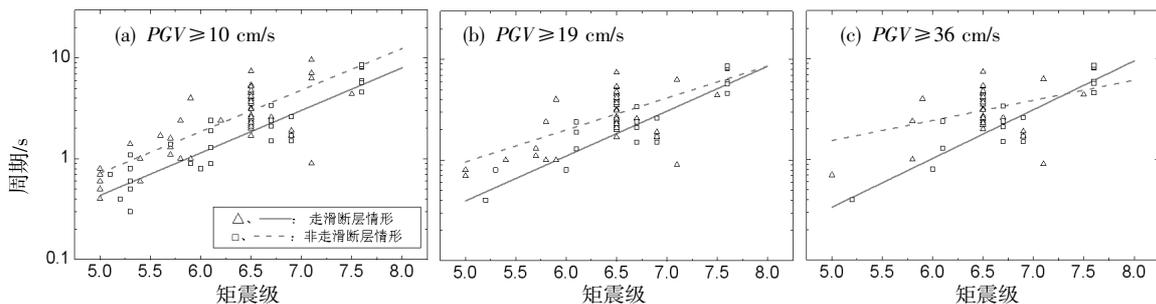


图 6 土层场地速度脉冲周期-震级关系

Fig.6 Velocity pulse period-magnitude relationship for soil sites

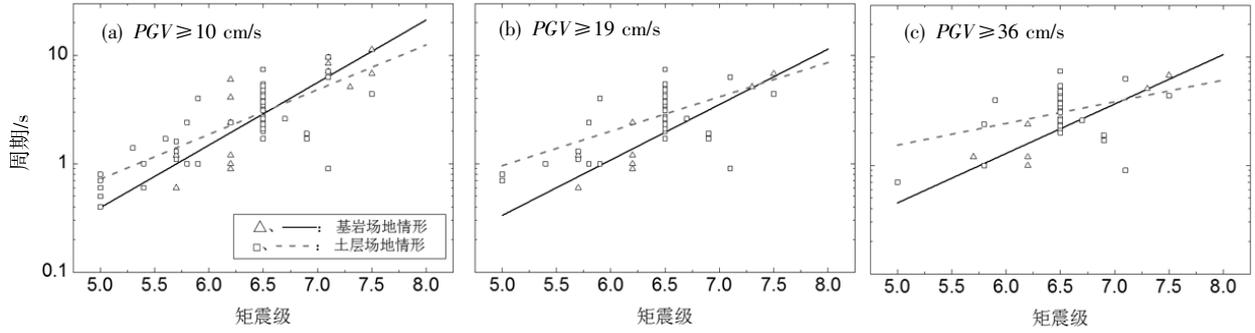


图7 走滑断层速度脉冲周期-震级关系

Fig.7 Velocity pulse period-magnitude relationship for strike-slip faults

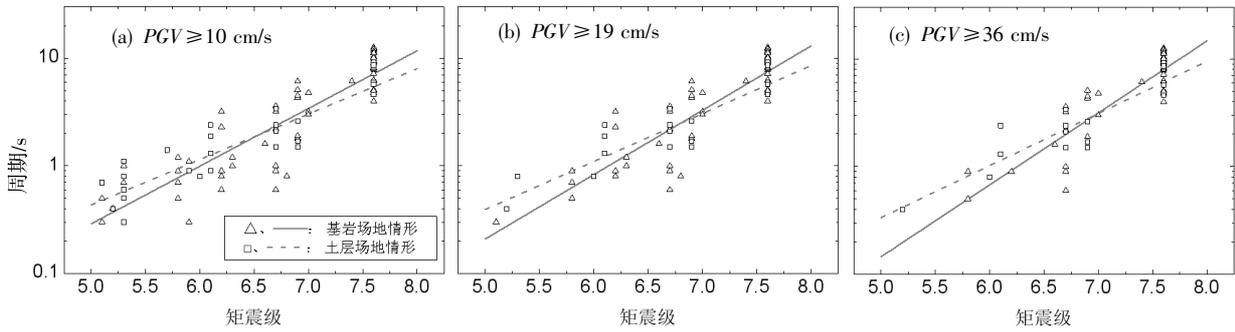


图8 非走滑断层速度脉冲周期-震级关系

Fig.8 Velocity pulse period-magnitude relationship for non-strike-slip faults

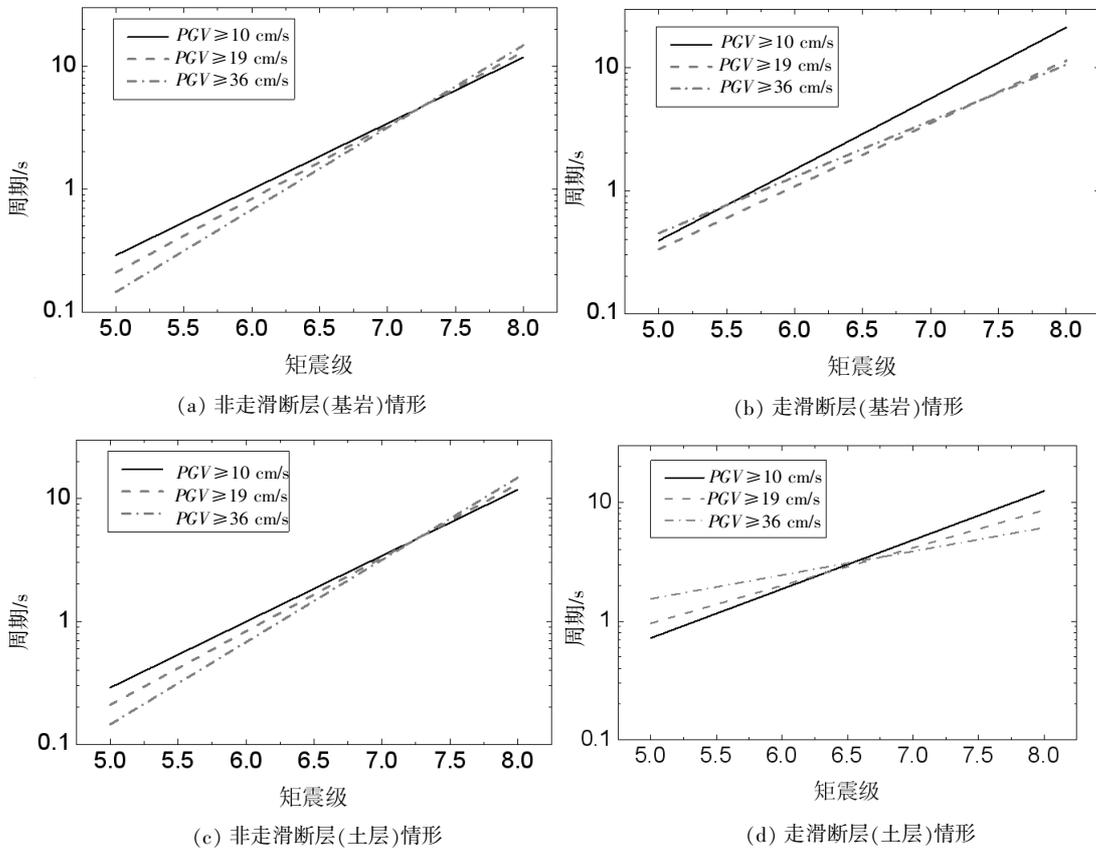


图9 不同速度脉冲峰值 PGV 标准的周期-震级关系

Fig.9 Pulse period-magnitude relationship for different velocity pulse's PGV threshold levels

周期-震级经验公式回归系数。根据上述统计结果,得到以下有关近断层脉冲周期的认识:

(1) 由图 5~6,无论基岩场地还是土层场地,总体来说,走滑断层产生的脉冲周期比非走滑断层的大,这与文献[5]的结论相似。只是当震级较大时,非走滑断层的脉冲周期会稍大,这应该与获得的大震记录较少有关,导致大于 7.5 级的拟合结果偏差较大。

(2) 由图 7~8,无论走滑断层还是非走滑断层,当震级小于 6.5 级左右时,土层场地的脉冲周期比基岩场地的大,随着震级的增加,基岩场地的脉冲周期将比土层场地的大,这与文献[4]的结论相似,但是,发生脉冲周期大小变化的震级分界线有区别。

(3) 不同标准的脉冲峰值 *PGV* 对周期-震级关系有很大影响。由图 9 可以发现,对于非走滑断层,无论是基岩还是土层场地,当震级较小时,定义的 *PGV* 标准的越大,速度脉冲周期越小;但是, *PGV* 标准越大,速度脉冲周期增长幅度越大,当震级大到一定程度时,高 *PGV* 标准的速度脉冲周期反过来会超过低 *PGV* 标准的速度脉冲周期。对于走滑断层,土层场地的规律与非走滑断层的相反;基岩场地的规律不甚明显,这可能与数据数量相对偏少有关。

相对于已有研究成果,本文采用的近断层速度脉冲记录较多,统计分类较细,可以作为选取近断层速度脉冲周期的参考,但需要注意的是,对于震级大于 7.5 级以上的地震,由于记录少,误差将会偏大。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所谢俊举博士为本文提供的帮助。

参考文献:

- [1] 刘启方,袁一凡,金星,等.近断层地震动的基本特征[J].地震工程与工程振动,2006,26(1):1-10.
- [2] 姜慧,黄剑涛,俞言祥,等.地表破裂断层近场速度大脉冲研究[J].华南地震,2009,29(02):1-9.
- [3] Alavi B, Krawinkler H. Consideration of near-fault motion effects in seismic design [C]//New Zealand: 12WCEE, 2000.
- [4] Somerville, P.G. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. Physics of the earth and planetary interiors, 2003, 137 (1): 201-212.
- [5] Mavroeidis, G.P., and A.S. Papageorgiou. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93 (3): 1099-1131.
- [6] Bray J D., Rodriguez -Marek A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region [J]. Soil Dyn Earthquake, 2004, 24 (11): 815-828.
- [7] 刘启方,金星,袁一凡.均匀弹性全空间中走滑断层产生的方向性速度脉冲研究[J].地震工程与工程振动,2007(02):12-19.
- [8] 韦韬,赵凤新,张郁山.近断层速度脉冲的地震动特性研究[J].地震学报,2006,28(6):629-637.
- [9] 谢俊举,温增平,李小军,等.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,2012,55(6):1963-1972.
- [10] Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W., et al. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity [J]. Seismological Research Letters, 1997, 68 (1): 199-222.
- [11] J W Baker. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97 (5): 1486-1501.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17742-2008 中国地震烈度表[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [13] International Code Council. INCIBC2009 International Building Code[S]. USA:Printed unknown, 2009.
- [14] Rodriguez M A, Bray J D, Abrahamson N A. A geotechnical seismic site response evaluation procedure [C]//New Zealand: 12WCEE, 2000.