

地震预警系统中利用 P_d 估测 PGV 的改进方法^{*}

刘辰^{1,3}, 李小军^{2,3}, 景冰冰², 尹建明⁴, 郭星⁵, 周越³

(1. 中国再保险(集团)股份有限公司博士后工作站, 北京 100033; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124;
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 4. 中国财产再保险有限责任公司, 北京 100033;
5. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: 针对传统的 $PGV-P_d$ 统计关系进行地震预警时会低估大地震 PGV 的问题, 提出利用 P_d 估测 PGV 的改进方法。采用汶川地震余震芦山地震主震及日本熊本地震主震事件的共 314 组强地震动记录, 进行 $PGV-P_d$ 关系的统计, 得到统计关系 A; 结合统计关系 A, 利用中国台湾集集地震主震、汶川地震主震 163 组强地震动记录得到统计关系 B 和 C。与他人的结果进行对比并进行残差分析后认为: 统计关系 C 比 B 能给出更好的高 P_d 分段估测结果, 建议应用 $PGV-P_d$ 方法时, 当 P_d 达到一定阈值时, 以统计关系 A 来提供一般 PGV 估测值, 同时以统计关系 C 来提供高 PGV 的估测值。

关键词: 地震预警; P_d 方法; PGV 估测; 强地震动记录

中图分类号: P315.914

文献标志码: A

文章编号: 1000-0666(2019)04-0608-08

0 引言

地震预警系统是防震减灾的有效手段之一, 该观点最初由 20 世纪初 Cooper 博士提出, 其原理为: 由首先受到地震波影响的地区发出地震警报, 目标工程场点或区域抢在破坏性地震波到来前采取必要的措施降低地震灾害造成的损失。地震预警系统按照工作原理主要分为原地、异地和综合 3 类: 原地预警系统利用地震波 P 波波速大于 S 波和面波的原理; 异地预警系统利用电磁波波速大于地震波速的原理, 在破坏性地震波到来前用尽可能短的时间估测出地震的基本参数(震中位置、地震震级、发震时刻等), 对最终的震害进行快速评估, 或直接估计预警目标区域的地震动参数进而预估破坏程度, 采取必要的措施降低地震灾害造成的损失; 综合预警系统是异地、原地 2 种预警系统的结合(Nakamura, 1988; Allen, Kanamori, 2003; Wu *et al.*, 2007; 金星等, 2012; 杨黎薇等, 2017, 2018)

一些研究表明, 地震动峰值速度(PGV)与地震烈度 I 之间存在较为明显的相关性: 美国地质调

查局应用的修正默卡尼烈度 IMM 与 $\lg(PGV)$ 存在强相关性(Wald *et al.*, 1999); 马强等(2014)建立了中国大陆地区 24 种地震动参数与烈度的统计回归公式, 认为 PGV 是与 I 相关性最好的参数之一。由于 PGV 与实际震害的相关性良好, 地震发生时对 PGV 进行快速估测成为地震预警的重要方法。利用最大位移幅值 P_d 直接估测 PGV 的方法最初源于 Wu 和 Kanamori(2005)的快速估测地震潜在损失的方法, Wu 等(2005, 2007, 2008)将 P_d 定义为 2 阶高通 Butterworth 滤波器(低频截止频率为 0.075 Hz)滤波后的位移记录中 P 波触发 3 s 内的最大位移幅值, 通过统计南加州、日本、台湾的震中距小于 30 km 的强地震动数据, 得到了 3 s 时窗 P_d 与 PGV 的对数线性关系, 且随着时间窗的增加, P_d 与 PGV 的线性相关性增加。众多学者的相关研究也表明, 以 P_d 估测 PGV 的方法是一种较为稳定可靠、能够快速估测震害的原地预警方法。Zollo 等(2010)利用意大利的地震预警系统数据, 分别统计了 3 s 时窗下震中距为 30 km, 60 km 的强地震动记录的 $PGV-P_d$ 关系, 研究了震中距对 $PGV-P_d$ 关系的影响; 金星等(2012)使用汶川地震主震、中国台湾集集地震(后文简

^{*} 收稿日期: 2019-01-15.

基金项目: 科技部重点研发项目——地震保险损失评估模型及应用研究(2018YFC1504600), 国家自然科学基金联合基金项目——高速铁路地震监测、预警理论与方法研究(U1434210)及国家自然科学基金创新群体项目——重大工程结构抗震与减震控制(51421005)联合资助。

称集集地震)主震和日本 Kiknet 台网数据,得到 3 ~ 10 s 时间窗下利用 P_d 连续估测 PGV 的方法; Peng 等 (2014) 研究了地震预警系统利用 P_d 估测 PGV 的可行性,得到了 3 s, 4 s 时间窗 P_d 与 PGV 的线性统计关系;刘辰等 (2019) 研究了震中距对于地震预警系统 $PGV - P_d$ 关系的影响,建议根据不同的震中距对 PGV 进行估测。

对于原地预警系统中的 $PGV - P_d$ 方法,在对数坐标系下, P_d 高值段的 PGV 观测值都明显大于拟合值,若转换到普通坐标系下,这种情况更加明显。金星等 (2012) 的研究结果表明, P 波触发后的时间窗取 10 s 获得的结果比取 3 s 能明显降低低估效应,这说明通过增加时间窗长能够增加对于断层的采样能力,但在 10 s 时间窗下,仍存在观测值明显高于拟合值的情况。因此,为满足大地震的地震预警需求,本文提出了以 P_d 估测 PGV 的改进方法:在 P_d 观测值较小时,以传统的 $PGV - P_d$ 统计关系进行 PGV 估测;当 P_d 观测值大于一定阈值时,给出 2 种 PGV 估测方法,并通过残差分析对其准确性进行了讨论。

1 强地震动记录数据与处理

为了探讨 P_d 与 PGV 之间的关系,需要收集大量的强地震动记录数据,同时为研究高值段的 P_d 与 PGV 的关系,应选择较多高震级区间的强地震动数据。合理设置地震记录的筛选条件十分必要,如果筛选条件设置太小,数据将会包含许多无预警实效的记录;如果筛选条件设置太高,会造成数据量太小而误差过大的结果。本文强地震动数据选取条件为: $M_w \geq 4.0$ 、 $PGA > 40$ gal。距离参数上选择震中距,由于较低的震级震中距范围较小,随着震级的增大,震中距范围增大,尽可能选择离震中较近的强地震动记录。同时考虑到大地震影响范围大、预警需求范围比较广的特点,参考马强 (2008) 的筛选方案:

$$\lg R \leq 0.86 + 0.17M_w \quad (1)$$

依据以上条件确定的强地震动记录包括:2016 年日本熊本 7.3 级地震主余震强地震动记录 152 组、2018 年汶川 8.0 级地震主余震强地震动记录 99 组、2013 年芦山 7.0 级地震主余震强地震动记录 98 组,1999 年中国台湾集集 7.6 级地震主震强地震动记录 128 组,地震动记录信息如图 1 所示。

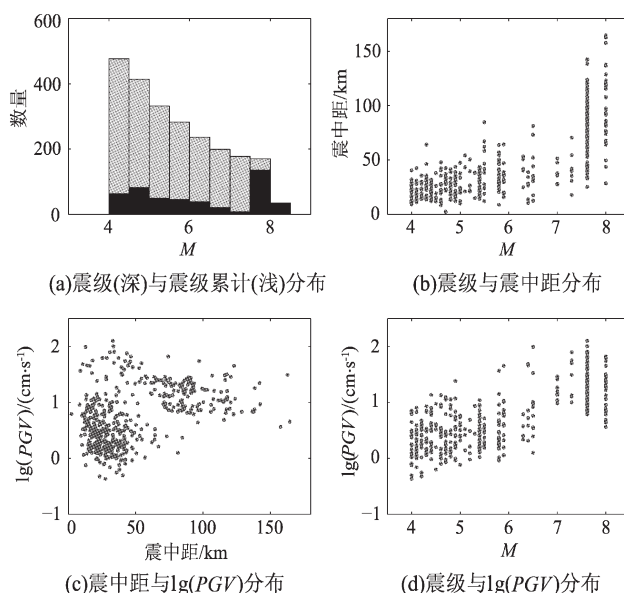


图1 本文选取的强地震动记录信息

Fig. 1 The selected strong ground motion records in this study

数据处理过程:对获得的加速度时程进行积分得到速度时程;采用 Wu 等 (2005, 2007) 的方法,使用一个 0.075 Hz 的高通 Butterworth 滤波器对积分得到的速度、位移时程进行滤波;采用马强 (2008) 使用的 STA/LTA 方法对竖向强地震动记录位移时程进行 P 波的自动触发,并通过人工手段标记 P 波以获得 P_d ;采取矢量合成的方法对 2 个水平向速度时程计算,得到水平向的峰值速度。强地震动记录为非持续触发的记录,某些记录偶尔有丢头的情况,在这些记录之前增加 0 点,对于仍存在异常的数据,进行手动清除。

2 $PGV - P_d$ 关系统计分析

利用汶川地震余震、芦山地震主余震及日本熊本地震主余震事件的 314 组强地震动记录,统计 P_d 与 PGV 之间的关系 (简称统计关系 A)。由于高 P_d 记录较少、低 P_d 记录较多,在进行统计分析时需要提高高 P_d 记录的权重,因此将 314 组记录按 P_d 最大值和最小值平均分为 5 部分,将每个数据点的权重设置为该数据点所处部分数据数量的倒数,使每部分的权重相同、归一,并使用最小二乘法对带权重的 $PGV - P_d$ 关系进行拟合。最终得到统计关系 A,如图 2 所示。统计结

果 A 反映出 2 个特征：①汶川地震余震、芦山地震主余震、熊本地震主余震记录均较均匀的分散于统计关系 A 两侧；②从统计结果的标准差来看，随着时间窗的增加，统计结果并未有明显的提升，因此从地震预警追求更早估测地震动

参数的需求来说，采用 3 s 时窗的 P_d 观测值来估测 PGV 是比较合理的。

将统计关系 A 与汶川地震主震、集集地震主震强地震动记录进行对比，结果如图 3 所示，可以观察到 2 个明显的特征：①通过汶川地震主震、集

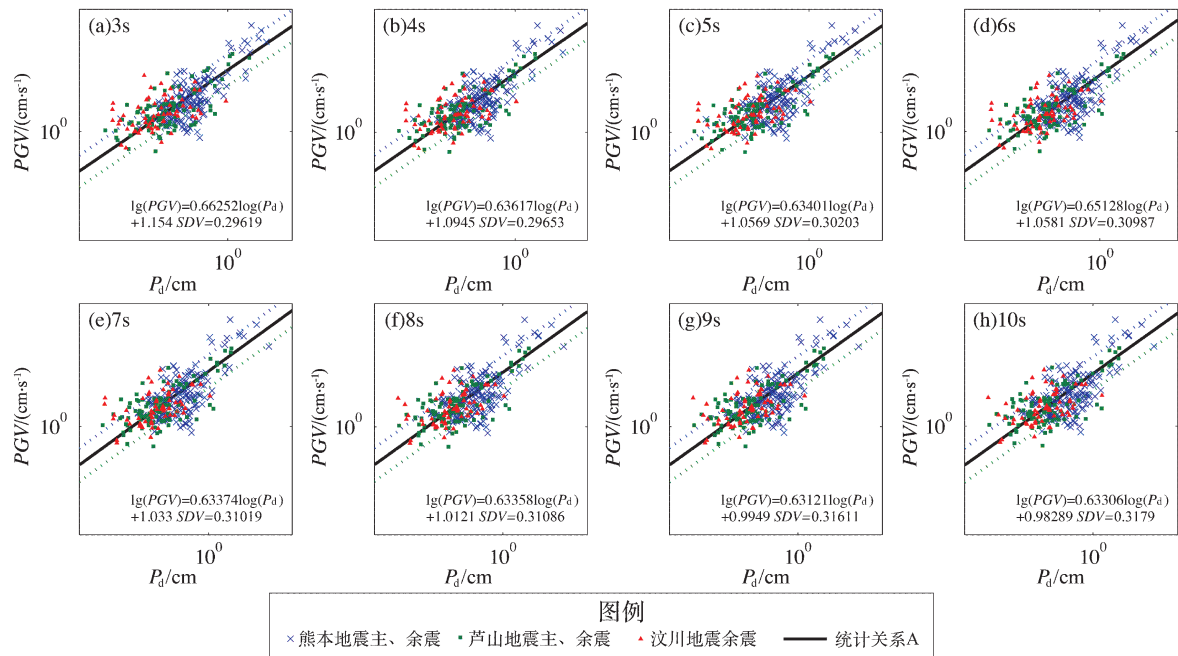


图 2 不同时间窗下 $PGV-P_d$ 线性连续测定方法

Fig. 2 $PGV-P_d$ linear continuous estimation method in different time windows

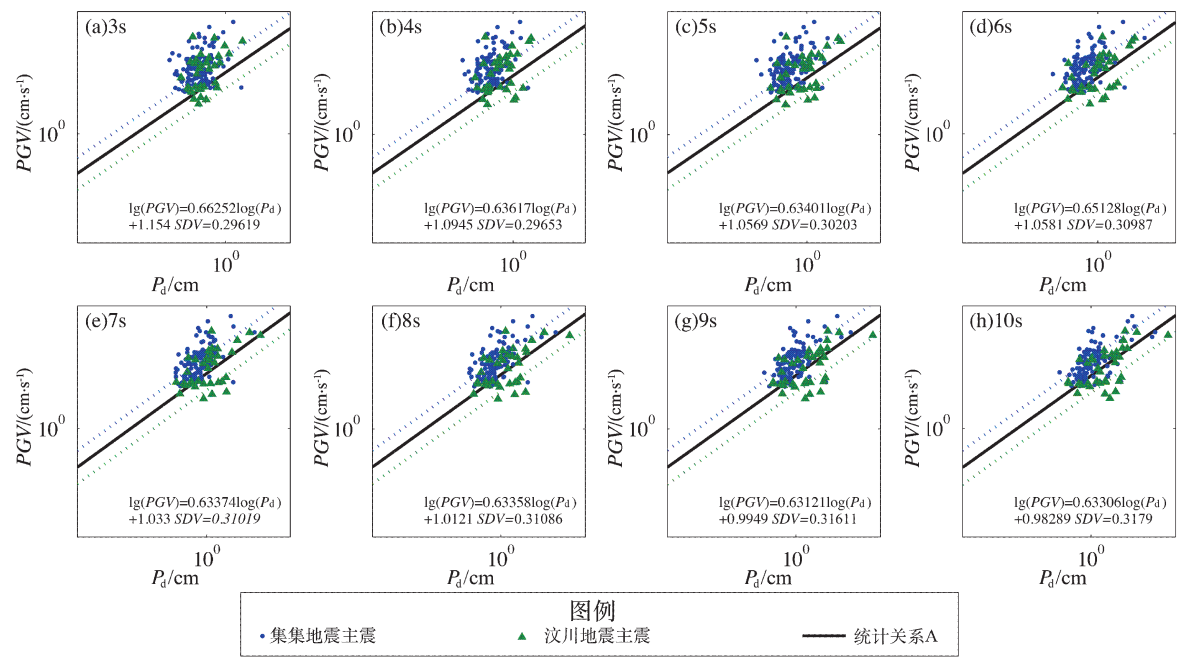


图 3 不同时间窗下统计关系 A 与汶川地震主震、集集地震主震强地震动记录对比结果

Fig. 3 Comparisons of statistical relationship A with strong ground motion records of the mainshocks of the Wenchuan earthquake and the Chi-Chi earthquake in different time windows

集地震主震强地震动记录得到的散点大部分落在统计关系 A 的上方,即存在明显的 PGV 低估现象;②随着时间窗的增加,以统计关系 A 估测汶川地震主震、集集地震主震 PGV 的结果有明显提升的趋势,即 PGV 低估的现象减弱。

图 2, 3 展示出来的特征表明,在原地地震预警系统中统计关系 A 能够较好地估测 PGV ,但当加入汶川地震、集集地震这样的大地震的记录时,对统计关系 A 的影响非常强烈,且存在着明显的低估效应。这可能有 2 方面的原因:①大地震的破裂过程复杂、破裂尺度大,且近场地震动特性与较小的地震存在差异, $PGV-P_d$ 关系在近场与小地震差异也会较大;②大地震能量释放较多、传播的距离较远,从图 1b 的数据分布来看,50 km 范围内的 4, 5, 6 级地震分布相对均匀,而震中距大于 50 km 的记录多来自汶川地震和集集地震的主震。刘辰等 (2019) 研究发现,不同震中距条件下, $PGV-P_d$ 统计关系存在明显差异,将大地震、大震中距的记录用于传统的 $PGV-P_d$ 统计不利于得到可信的统计关系。虽然依靠增加时间窗能够明显地降低加入大地震进行统计得到结果的差异 (图 2, 3),但是与之相对应的有效预警时间将会明显地减少,对于地震预警系统分秒必争的需求来说并不是一个理想的选择。

鉴于以上原因,本文提出利用 P_d 估测 PGV 的改进方法:当 P_d 观测值较小时,以传统的 $PGV-P_d$ 统计关系进行 PGV 估测;当 P_d 观测值大于一定阈值时给出高和一般 2 种 PGV 估测方法供用户和自动控制系统参考。

第一种方法,因为集集地震主震强地震动记录 3 s 时窗下 P_d 的最小值约为 0.1 cm,所以设置分界值 $x_0=0.1$ cm,然后根据统计关系 A 确定分界点 $Q_0(x_0, y_0)$,利用集集地震和汶川地震的主震记录进行过定点 Q_0 的线性拟合,得到用于估测高 PGV 的统计关系 B。一般 PGV 估测结果仍采用统计关系 A 得到,具体如图 4 所示。第二种方法,根据需求任意设计分界值,根据统计关系 A 得到斜率 k ,利用集集地震和汶川地震主震记录拟合平行于统计关系 A 的、用于估测高 PGV 结果的统计关系 C。一般 PGV 估测结果仍采用统计关系 A 得到,如图 5 所示。统计关系 A, B, C 的详细参数见表 1。

图 4, 5 所示的方案具有 3 个特点:①由于采用过定点的拟合方式,所以统计关系 B 与 A 之间保证了连续性;②随着时间窗的增加,无论采用统计关系 B 还是 C, 2 种 PGV 估测方法均趋于一致;③统计关系 B 的标准差比较高,且随着时窗的增加而减小,而统计关系 C 的标准差不仅较为稳定,且较小。

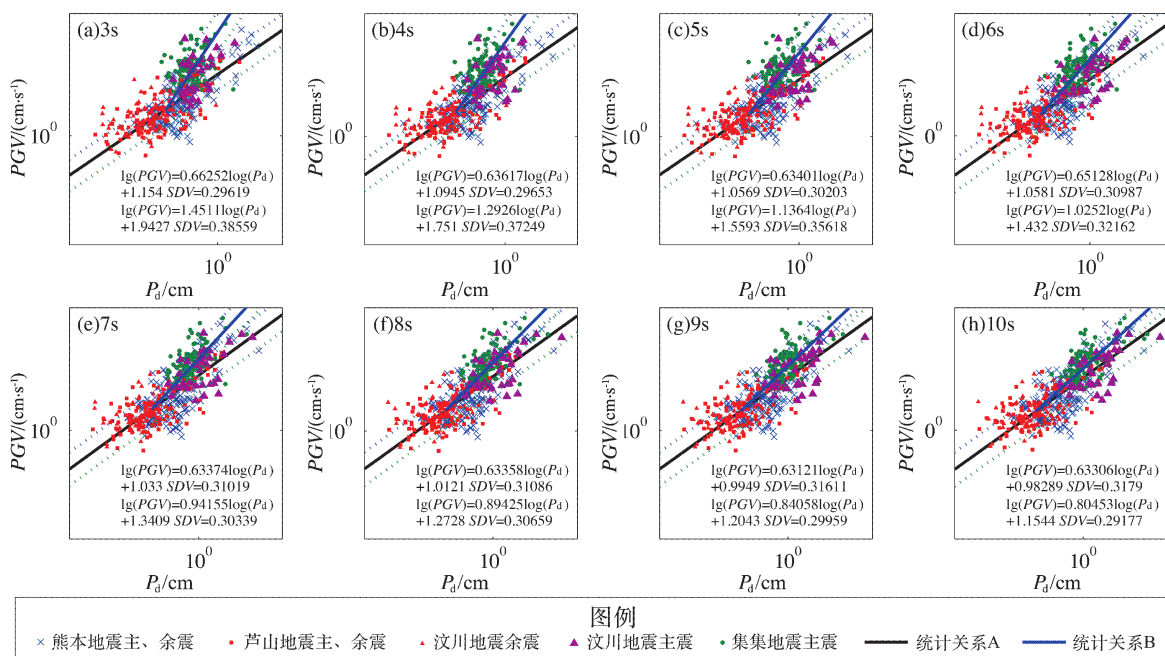


图 4 不同时间窗下由统计关系 A, B 组合得到的包含高、一般 2 种 PGV 估测结果的估测方法

Fig. 4 The high and general PGV estimation methods by combination of relationship A and B in different time windows

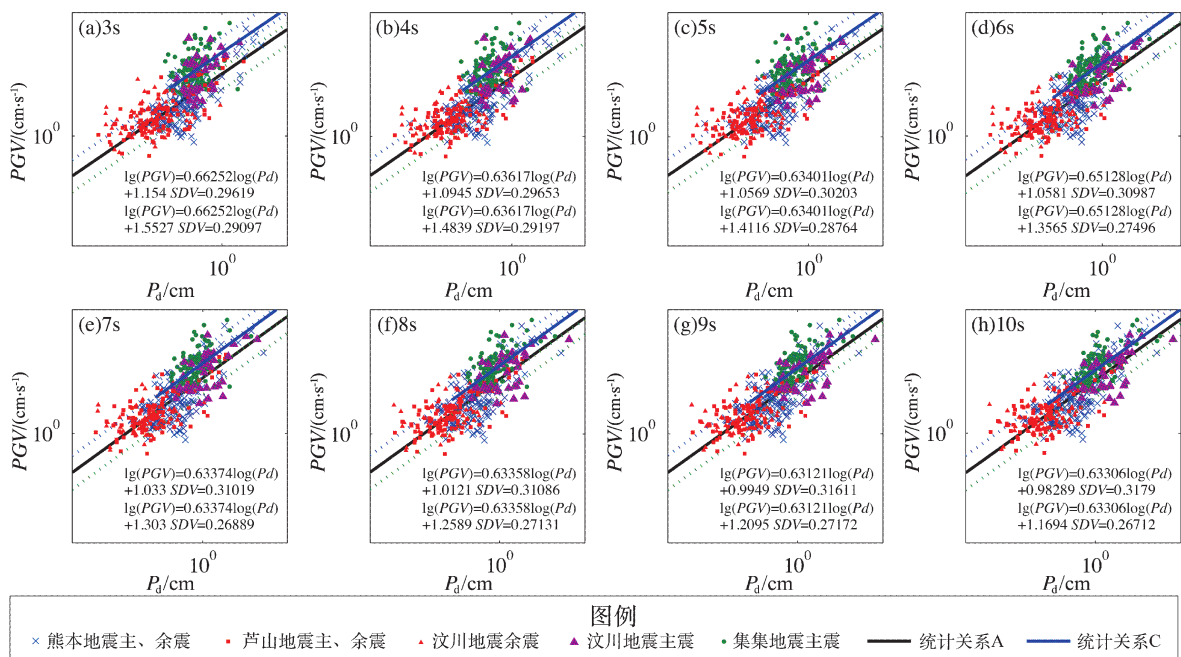


图 5 不同时间窗下由统计关系 A, C 组合得到的包含高、一般 2 种 PGV 估测结果估测方法

Fig. 5 The high and general PGV estimation method by combination of relationship A and C in different time windows

表 1 不同窗长下统计关系 A, B, C 系数及标准差

Tab. 1 Coefficients and standard deviation of relationship A, B and C in different time windows

窗长	统计关系 A			统计关系 B			统计关系 C		
	a	b	SDV	a	b	SDV	a	b	SDV
3 s	0.662 5	1.154 0	0.296 2	1.451 1	1.942 7	0.385 6	0.662 5	1.552 7	0.291 0
4 s	0.636 2	1.094 5	0.296 5	1.292 6	1.751 0	0.372 5	0.636 2	1.483 9	0.292 0
5 s	0.634 0	1.056 9	0.302 0	1.136 4	1.559 3	0.356 2	0.634 0	1.411 6	0.287 6
6 s	0.651 3	1.058 1	0.309 9	1.025 2	1.432 0	0.321 6	0.651 3	1.356 5	0.275 0
7 s	0.633 7	1.033 0	0.310 2	0.941 6	1.340 9	0.303 4	0.633 7	1.303 0	0.268 9
8 s	0.633 6	1.012 1	0.310 9	0.894 3	1.272 8	0.306 6	0.633 6	1.258 9	0.271 3
9 s	0.631 2	0.994 9	0.316 1	0.840 6	1.204 3	0.299 6	0.631 2	1.209 5	0.271 7
10 s	0.633 1	0.982 9	0.317 9	0.804 5	1.154 4	0.291 8	0.633 1	1.169 4	0.267 1

3 讨论

将本文方法与其他学者采用类似方法统计得到的 $PGV - P_d$ 关系进行对比 (图 6), 结果表明: 本文方法和 Peng 等 (2014) 的研究结果非常接近, 这一方面可能是因为汶川余震、熊本地震主余震和芦山地震主余震遵循着相似的统计关系, 另一方面 Peng 等 (2014) 的研究中采用的 296 组记录中仅包含了 4 条主震记录, 在建立统计关系时主震记录所占的权重比较小; Zollo 等 (2010) 在

研究中采用了意大利、日本和中国台湾省的数据, 其中以意大利的数据为主, 中国台湾省的数据所占比重较低, 所得统计结果的斜率稍高于统计关系 A; Wu 和 Kanamori (2005) 在研究中仅采用中国台湾省的数据, 统计关系明显高于其它研究的结果, 因此我们推测地震预警系统 $PGV - P_d$ 统计关系在不同的地区存在差异。

无论 $PGV - P_d$ 统计关系是否存在地区差异, 该关系对于大地震常常会低估 PGV 是一个不争的事实, 在本文、Peng 等 (2014) 以及 Wu 和 Kanamori (2005) 的研究中都存在着这样的现象。受到

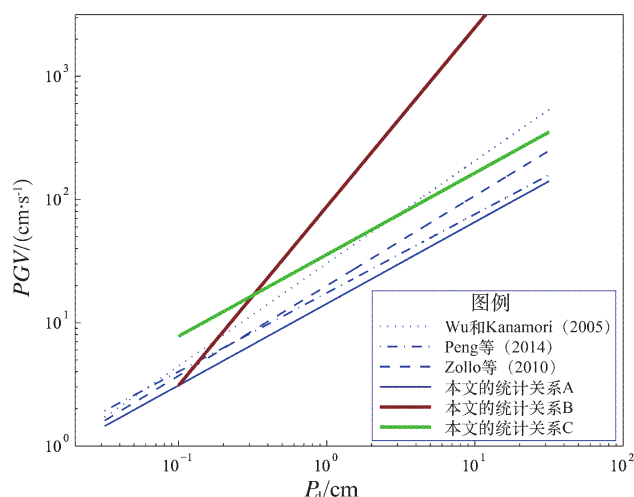


图6 本文结果与其他学者研究结果之间的比较

Fig. 6 Comparisons between the results of this paper and those of others

强地震动记录数量、质量的限制,现有的地震预警系统 $PGV-P_d$ 关系统计研究中,从具有复杂破裂过程的汶川地震和集集地震中获得的强地震动记录数量较少,从而导致在计算中无法直接进行拟合,而如果单纯依靠增加这些强地震动记录的权重,则得到的统计结果可能会低估大地震的 PGV

或高估一般性地震的 PGV 。而本文则是通过大地震的少数记录,结合统计关系A得到统计关系B和C,当 P_d 达到一定阈值时给出高、一般2种 PGV 估测建议值,当 P_d 达到一定阈值时,建议参考这2种方法对 PGV 进行估测。统计关系B作为一种提供高 PGV 估测值的方法,和用于一般 PGV 值估测的统计关系A之间保持了连续性,但其斜率太高导致 PGV 随 P_d 的增加上升过快。统计关系C虽然和统计关系A之间未能保持连续,但统计关系C对数残差最接近正态分布,且与前人的研究较为一致,因此,并未出现 PGV 随 P_d 上升过快的现象。因此建议以统计关系C来提供高 PGV 的估测值。

为了便于比较本文设计的高 PGV 估测方法对数残差的频度分布,将3种方法(A, A&B, A&C)下汶川地震和集集地震主震强地震动记录的对数残差直方图示于图7。从图7a可以看出,统计关系A的 PGV 估测结果和观测值对数残差的优势分布偏离0值,即 PGV 估测值和观测值存在系统偏差, PGV 存在低估现象。图7b, c表明统计关系B和C的对数残差结果优于统计关系A,其中优度最高的是统计关系C。

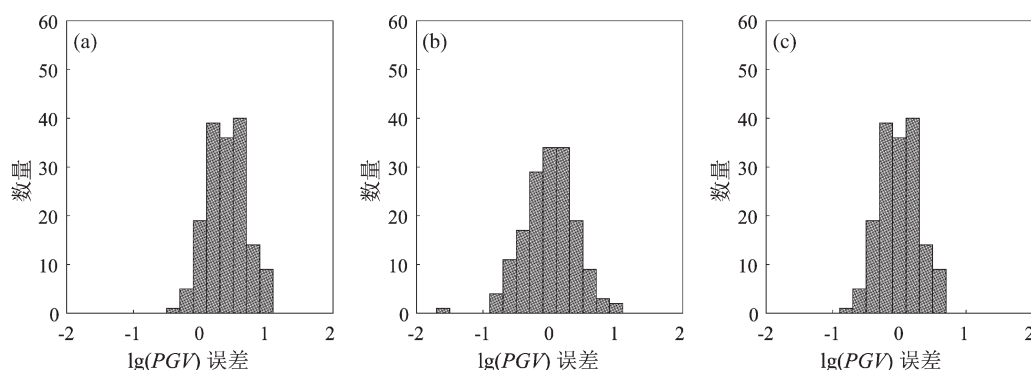
图7 汶川地震和集集地震主震强地震动记录 PGV 观测值与用统计关系A (a)、B (b)、C (c) 估测值的对数残差直方图

Fig. 7 Logarithmic residual histogram between values by the mainshocks of the Wenchuan and Chi-Chi earthquakes strong ground motion records and those by Relation A (a), Relation B (b), Relation C (c)

4 结论

本文筛选熊本地震主余震、汶川地震主余震、芦山地震主余震、集集地震主震强地震动记录,探讨了以 P_d 估测 PGV 的地震预警改进方法,提出

了在 P_d 观测值高于一定阈值后提供高和一般2种 PGV 估测结果的方法,主要结论如下:

(1) 利用我国汶川地震余震、芦山地震主余震、及日本熊本地震主余震事件的314组强地震动记录进行 $PGV-P_d$ 关系的统计,得到以3~10 s为时间窗、以 P_d 连续估测一般 PGV 的统计关系A;

利用汶川地震主震、集集地震主震强地震动记录,结合统计关系 A,得到 2 种用于估测高 PGV 的统计关系 B 和 C。

(2) 通过和前人研究进行对比认为,统计方法 B 虽然在应用过程中和统计关系 A 保持了连续性,但由于斜率过高导致其和前人的研究结果偏差较大,且随着 P_d 的增加, PGV 测值上升太快;而统计关系 C 与前人研究的一致性较好。

(3) 分析了 3 种方法(A, A&B, A&C)的对数残差,发现统计关系 A 存在明显的优势分布偏离现象,再次证明了统计关系 A 在用于大地震时 PGV 的低估现象;统计关系 B 和 C 的对数残差较接近正态分布,统计关系 C 最接近正态分布。

(4) 建议在地震预警系统中应用 $PGV - P_d$ 方法时,当 P_d 达到一定阈值时,利用高、一般 2 种方法对 PGV 进行估测,即以统计关系 A 来提供一般 PGV 估测值,以统计关系 C 来提供高 PGV 的估测值。

由于早期地震信息的不足,实现准确的地震预警仍然是一件具有挑战性的工作,尤其是当大地震发生时,如何通过地震预警系统避免大地震复杂性带来的影响,降低漏报、低报的可能性,仍需要不断研究探讨。本文提出了一种新的思路,在地震发生时给出高、一般 2 种 PGV 估测值,但用户和自动判定系统采取怎样的手段或者如何从更多的途径去获得信息用于决定采用高 PGV 还是一般 PGV 的估测结果仍是一项需要研究的课题。

参考文献:

金星,张红才,李军,等. 2012. 地震预警震级确定方法研究[J]. 地震

学报,34(5):563-610.

刘辰,李小军,景冰冰,等. 2019. 基于地震动记录的距离分段地震预警 $PGV - P_d$ 关系研究[J]. 地球物理学报,62(4):1413-1426.

马强,李水龙,李山有,等. 2014. 不同地震动参数与地震烈度的相关性分析[J]. 地震工程与工程振动,34(4):83-92.

马强. 2008. 地震预警技术研究及应用[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

杨黎薇,林国良,邱志刚,等. 2017. 强震预警中 P 波到时 STA/LTA 和贝叶斯 BIC 双步骤拾拾研究[J]. 地震研究,40(4):619-628.

杨黎薇,林国良,邱志刚,等. 2018. 基于人工神经网络和多特征参数的预警震级估算[J]. 地震研究,41(2):302-310.

Allen R M, Kanamori H. 2003. The Potential for Earthquake Early Warning in Southern California[J]. Science,300(5620):786-789.

Nakamura Y. 1988. On the Urgent Earthquake Detection and Alarm System(UrEDAS) [C]. Tokyo - Kyoto: Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering.

Peng C Y, Yang J S, Xue B, et al. 2014. Exploring the Feasibility of Earthquake Early Warning Using Records of the 2008 Wenchuan Earthquake and Its Aftershocks[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,57:86-93.

Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, et al. 1999. Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California[J]. Earthquake Spectra,15:557-564.

Wu Y M, Kanamori H, Allen R M, et al. 2007. Determination of Earthquake Early Warning Parameters, τ_c and P_d , for Southern California [J]. Geophysical Journal International,170:711-717.

Wu Y M, Kanamori H. 2005. Rapid Assessment of Damaging Potential of Earthquakes in Taiwan from the Beginning of P Waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,95(3):1181-1185.

Wu Y M, Kanamori H. 2008. Development of an Earthquake Early Warning System Using Real Time Strong Motion Signals[J]. Sensors, (8):1-9.

Zollo A, Amoroso O, Lancieri M, et al. 2010. A Threshold - Based Earthquake Early Warning Using Dense Accelerometer Networks[J]. Geophysical Journal International,183(2):963-974.

Improved Method of Estimating PGV Using P_d for Earthquake Early Warning

LIU Chen^{1,3}, LI Xiaojun^{2,3}, JING Bingbing², YIN Jianming⁴, GUO Xing⁵, ZHOU Yue³

(1. Postdoctoral workstation of China Reinsurance (Group) Corporation, Beijing 100033, China)

(2. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

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

(4. China Property and Casualty Reinsurance Company LTD, Beijing 100033, China)

(5. Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China)

Abstract

Referring to PGV underestimation of great earthquake by $PGV - P_d$ relation during earthquake early warning, we proposed an improved method of estimating PGV using P_d . Based on 314 strong ground motion records of the Wenchuan aftershocks, the Lushan earthquake and its aftershocks, the Kumamoto earthquake and its aftershocks, a 3s – 10s time window of the relationship between displacement amplitude P_d and peak velocity PGV of earthquake is analyzed. Comparing the analysis results with 163 sets of strong ground motion records of the Chi – Chi earthquake and the Wenchuan earthquake, we presents a method for PGV estimation by P_d . When P_d is greater than a set threshold, two kinds of estimating results, high and general, are given for reference to users and automatic judging systems, and two schemes are designed to give the overestimation results. Through comparison among our relations and previous studies, as well as residual analysis of our relations, we come to the conclusion of a high and general estimation suggestion.

Keywords: Earthquake early warning system; P_d method; PGV estimation; Ground motion estimation