



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

近断层速度脉冲型地震动相关问题研究

赵晓芬 温增平

Review on issues of near-fault velocity pulse-like ground motions

Zhao Xiaofen, Wen Zengping

引用本文:

赵晓芬, 温增平. 2022. 近断层速度脉冲型地震动相关问题研究. *地震学报*[J], 44(5): 765–782. DOI: 10.11939/jass.20220141

Zhao X F, Wen Z P. 2022. Review on issues of near-fault velocity pulse-like ground motions. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(5): 765–782. DOI: 10.11939/jass.20220141

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220141>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近断层速度脉冲型地震动特征周期的估计与调整

Estimation and adjustment of eigenperiod of response spectrum of near-fault pulse-type ground motion
地震学报. 2020, 42(4): 471–481 <https://doi.org/10.11939/jass.20190155>

近断层地震动最强速度脉冲方向分量特性研究

Characteristics of near-fault velocity pulses in the strongest pulse orientation
地震学报. 2018, 40(5): 673–688 <https://doi.org/10.11939/jass.20170151>

适用于全周期结构的速度脉冲型地震动强度表征参数研究

Intensity measures of pulse-like ground motions in the full periods
地震学报. 2019, 41(4): 536–547 <https://doi.org/10.11939/jass.20190002>

台湾双冬断层近场脉冲型地震动的数值模拟

Numerical simulation of near-field pulse-like ground motion for the Shuantung fault in Taiwan region
地震学报. 2019, 41(3): 377–390 <https://doi.org/10.11939/jass.20180103>

地震动永久位移对结构地震反应影响

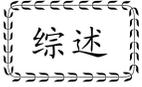
Influence of permanent displacement of ground motion on seismic response of structures
地震学报. 2020, 42(4): 482–490 <https://doi.org/10.11939/jass.20200011>

地震动参数对边坡地震响应的影响规律

Influence law of ground motion parameters on soil slope seismic response
地震学报. 2017, 39(5): 798–805 <https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.013>

赵晓芬, 温增平. 2022. 近断层速度脉冲型地震动相关问题研究. 地震学报, 44(5): 765-782. doi: 10.11939/jass.20220141.

Zhao X F, Wen Z P. 2022. Review on issues of near-fault velocity pulse-like ground motions. *Acta Seismologica Sinica*, 44(5): 765-782. doi: 10.11939/jass.20220141.



近断层速度脉冲型地震动相关问题研究*

赵晓芬 温增平[†]

(北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 近断层速度脉冲型地震动研究对揭示建筑结构的破坏机理、开展抗震设防以及抗震设计具有重要价值。首先,对速度脉冲成因进行了系统的总结,并探讨了区分方向性效应速度脉冲和滑冲效应速度脉冲的思路;其次,系统地介绍了近断层速度脉冲的识别方法,评述了各种脉冲识别方法的优缺点;然后,基于速度脉冲特性,探讨了前方向性效应对速度脉冲特性的影响以及速度脉冲对反应谱的放大作用;最后,对速度脉冲型地震动输入方法以及对结构响应研究进行了系统总结,探讨了速度脉冲型地震动输入的关键问题,基于丰富的理论研究,未来对于速度脉冲型地震动研究工作应当充分结合实际工程需求,推进理论成果的规范标准化与工程实践。

关键词 近断层地震动 速度脉冲 识别方法 地震动输入 结构响应
doi: 10.11939/jass.20220141 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

Review on issues of near-fault velocity pulse-like ground motions

Zhao Xiaofen Wen Zengping[†]

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

Abstract: The study of near-fault velocity pulse-like ground motions is of great value to reveal its damage mechanism, seismic fortification, and seismic design in the near-fault region. In this paper, the formation mechanisms of the pulse are summarized. The idea of distinguishing the pulses caused by the forward directivity effects and fling effects is discussed. Secondly, the identification methods of near-fault velocity pulses are systematically introduced and their advantages and disadvantages are reviewed. In addition, based on the characteristics of the pulse, the influence of the forward directivity effect on the pulse characteristics and the amplification effects of pulses on response spectra are discussed. Finally, the ground motion input

* 基金项目 国家重点研发项目(2020YFA0710603)和中国地震局地球物理研究所基本业务费(DQJB21K44)共同资助。

收稿日期 2022-08-01 收到初稿, 2022-08-22 决定采用修改稿。

作者简介 赵晓芬, 博士, 助理研究员, 主要从事强地震动特性和地震动数值模拟方面的研究, e-mail: 929921908@qq.com; [†]温增平, 博士, 研究员, 主要从事城市及工程震害预测方法与减灾对策、强地面运动、结构动力反应分析方法等方面的研究, e-mail: wenzp@cea-igp.ac.cn



and influence of pulses on structures are summarized. And the key questions of the pulse ground motion input are discussed. In the future, the research work of velocity pulse ground motion should be fully integrated with the actual engineering needs, and the standardization of theoretical results and engineering practice should be promoted.

Key words: near-fault strong ground motion; velocity pulse-like ground motions; identification methods; ground motion input; influence of pulses on structures

引言

与远场地震动相比,近断层地震动有时包含大幅值、长周期的脉冲信号(Somerville *et al.*, 1997; Somerville, 2003; Bray, Rodriguez-Marek, 2004),携带较高能量的脉冲记录,对长周期柔性结构具有特殊的破坏作用(Anderson, Bertero, 1987; Hall *et al.*, 1995; Mavroeidis *et al.*, 2004; Luco, Cornell, 2007; Lin *et al.*, 2018; Ji *et al.*, 2019; Kuo *et al.*, 2019; Ma, Wu, 2019; Sigurðsson *et al.*, 2020). 1971年圣费尔南多(San Fernando)地震虽是中等强度,但对近断层工程结构造成严重震害,这引起了地震工程界的关注. Bertero等(1978)在分析这种特殊的震害现象及其破坏作用时,首次发现了近断层速度脉冲记录并给出结论:近断层震害主要是由速度脉冲引起的. 此后在1979年帝王谷(Imperial Vally)地震、1992年兰德斯(Landers)地震和1994年北岭(Northridge)地震中均陆续观测到这种速度脉冲信号. 多自由度体系的弹性塑性反应分析表明:近断层脉冲记录对结构地震反应及其破坏作用有重要影响,速度脉冲将显著增大结构的非弹性形变,增加结构倒塌的可能(Anderson, Bertero, 1987; Hall *et al.*, 1995). 因此,在近断层区域抗震设防和抗震设计时需要充分考虑速度脉冲的影响.

近断层速度脉冲特征及其影响是近年来国内外研究的热点问题,主要包括速度脉冲记录的识别方法、速度脉冲型地震动特征及速度脉冲信号对结构地震响应的影响等. 此外,结构弹塑性动力时程分析的不确定性与地震动输入的不确定性密切相关. 人造地震动受震源机制、地震波传播过程及场地条件等因素的影响,这使得不同场地的人造地震动时程的模拟难度很大(李英民,刘立平,2011). 因此,如何选择合理的天然地震动作为地震动输入已成为目前结构弹塑性时程分析中亟待解决的问题,在开展近断层地震危险性分析时如何考虑速度脉冲的影响也有待深入研究. 关于速度脉冲型地震动记录选取方法的研究目前还较少,借用常规的地震动记录选波方法选取脉冲记录的方式存在缺陷,而近断层速度脉冲特性研究是近断层速度脉冲型地震动输入方法的基础. 本文拟从近断层速度脉冲成因、速度脉冲型地震动识别方法、速度脉冲特性、速度脉冲型地震动输入及速度脉冲对结构地震反应影响等相关研究的现状进行总结和阐述,深入了解地震动速度脉冲的工程特性,以为近断层概率地震危险性分析、抗震设防和抗震设计中充分考虑速度脉冲的影响提供研究基础.

1 近断层速度脉冲型地震动成因

地震断层破裂的前方向性效应(forward directivity effects)和滑冲效应(fling effects)是产生脉冲信号的两个主要因素. 其中,前方向性效应引起的速度脉冲是由断层破裂方向朝着观测点且破裂速度与介质剪切波速接近时,破裂传播前方的大部分破裂辐射能量几乎同步到达观测点,即由于能量的累积效应,在速度波形的开始阶段即形成了一个峰值、短持时、能量集中的双向脉冲(Somerville *et al.*, 1997; Somerville, 2003; 刘启方等, 2006). 前方向性效应

引起速度脉冲主要是由破裂传播的多普勒效应引起的,它与震源机制、断层破裂速度和破裂方向以及破裂方向与观测点的相对位置等因素有关.滑冲效应引起的速度脉冲与断层破裂出露地表和相关构造变形引起的永久地面位移大小和产生永久位移的时间有关(Somerville *et al.*, 1997; Huang *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2001),它在速度时间过程中表现为单向速度脉冲,其特征为位移波形尾部有明显的残留永久变形.典型的由破裂前方向性效应和滑冲效应引起的近断层脉冲记录的速度和位移时程如图1所示.

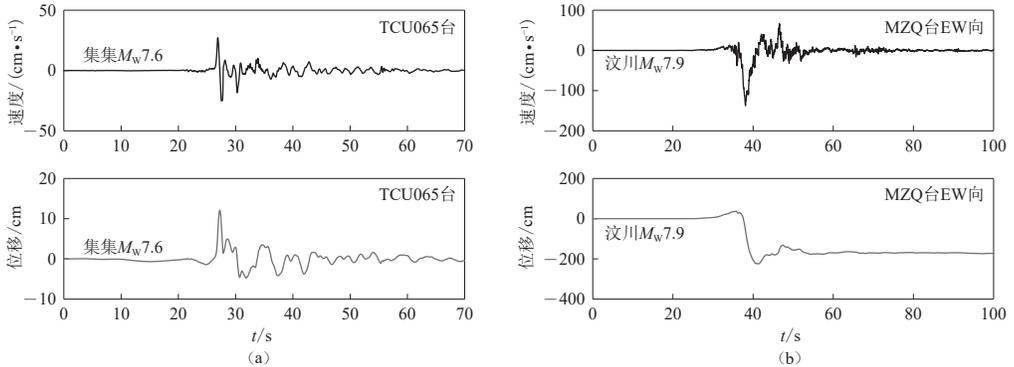


图1 典型地震近断层破裂的前方向性效应(a)和滑冲效应(b)速度脉冲记录的速度和位移时程

Fig. 1 The velocity and displacement time histories of typical pulse-like strong ground motions caused by forward directivity (a) and fling (b) effects

对于走滑断层,破裂前方向性效应引起的速度脉冲主要出现在垂直断层走向的分量上,滑冲效应引起的速度脉冲表现在平行于断层走向的分量上;而对于倾滑断层,破裂前方向性效应和滑冲效应引起的速度脉冲均发生在垂直于断层面方向的分量上,此时这两种速度脉冲叠加在一起,难以区分(Somerville *et al.*, 1997).然而由于近断层地震动有很强的方向性特征,不同方向的地震动分量会有较大差别,虽然速度脉冲在垂直于断层的方向上出现的可能性较大,但速度脉冲并不只出现在垂直于断层的方向上,而是在一个方位角范围内出现(Howard *et al.*, 2005; Boore *et al.*, 2006; Shahi, Baker, 2011).所以,不能仅依据速度脉冲是在垂直或平行断层方向来区分前方向性效应速度脉冲和滑冲效应速度脉冲,而通常是基于速度脉冲的速度和位移时程的波形进行区分.如图1a所示,含有速度脉冲的速度波形中存在双向速度脉冲,且对应的位移波形的永久位移较小,这种脉冲通常与断层破裂传播的前方向性效应有关(Somerville *et al.*, 1997; Somerville, 2003; Bray, Rodriguez-Marek, 2004);而图1b中速度脉冲波形中存在单向速度脉冲,且对应的位移波形末尾有明显的残留永久变形,这种脉冲通常是由滑冲效应引起(Somerville *et al.*, 1997; Huang *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2001).

图1中与前方向性效应有关的速度脉冲来自1999年我国台湾集集 $M_w 7.6$ 地震,与滑冲效应有关的速度脉冲来自2008年汶川 $M_w 7.9$ 地震,这两种速度脉冲通常分别来自于不同地震,但有时在同一地震中也会同时出现这两种类型的速度脉冲,如1999年台湾集集地震(谢俊举, 2014).此外,图1给出的两类速度脉冲很容易通过眼观进行区分,但是有些速度脉冲记录类型则很难区分,如图2所示的2018年台湾花莲地震中HWA012台站记录到的速度脉冲记录,该速度脉冲记录在速度时程中有明显的双向脉冲,但是在位移时程中永久位移高达80 cm.根据Shahi和Baker(2013)的前方向性判断准则、震源机制以及断层破裂情况,

HWA012 台站记录为前方向性效应引起的速度脉冲型记录(图 3). 因此, 快速有效地区分前方向性效应与滑冲效应速度脉冲是未来研究的重点之一. 如果只关注前方向性效应引起的速度脉冲的影响, 可参考 Rupakhety 等(2011)通过采用从加速度时程记录中减去半个正弦脉冲的方法去除永久位移影响的研究.

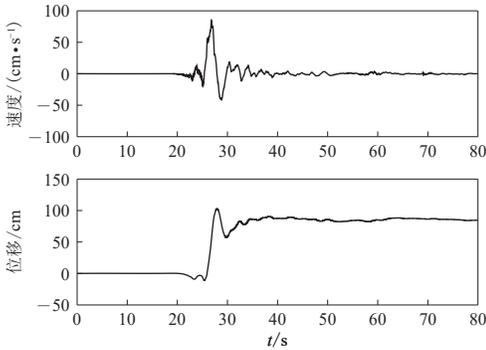


图 2 2018 年台湾花莲 $M_w6.4$ 地震中 HWA012 台站的速度时程和位移时程记录

Fig. 2 The velocity and displacement time histories of pulse-like strong ground motion from the station HWA012 during 2018 Taiwan Hualien $M_w6.4$ earthquake

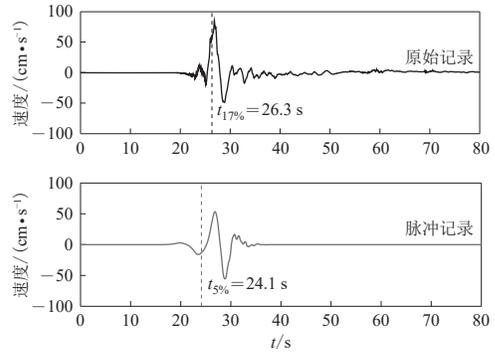


图 3 2018 年台湾花莲地震中 HWA012 台站记录的方向性速度脉冲, 其中 $t_{17\%}$ 和 $t_{5\%}$ 分别为记录能量达到 17% 和 5% 的对应时间

Fig. 3 The pulse caused by directivity effect from the HWA012 station of 2018 Hualien earthquake, $t_{17\%}$ and $t_{5\%}$ present the times of 17% and 5% of the energy of the original ground motion and extracted pulse, respectively

2 近断层速度脉冲型地震动识别方法及其数据库

2.1 强震动记录处理

一般而言, 基线漂移仅会对 20 s 以上周期的反应谱产生影响, 这几乎不具工程意义 (Boore, 2001; Wang *et al.*, 2011). 因此在大多数的工程应用中, 往往采用一种简单的高通滤波对加速度记录进行处理 (Chiu, 1997; Boore, Bommer, 2005). 美国下一代衰减模型 (Next Generation Attenuation, 缩写为 NGA) 数据库系统采用了非因果的巴特沃斯 (Butterworth) 滤波器, 对强震动记录进行频域的巴特沃斯低通或高通滤波处理 (谢俊举等, 2017). 滤波处理能够使位移记录中的高频成分得到较好的恢复, 但却完全抑制了长周期信号. 为了避免影响速度脉冲的识别结果、脉冲形状并保存可靠的永久位移, 建议采用基线校正方法进行数据处理. 基线校正方法众多 (Iwan *et al.*, 1985; Chiu, 1997; Boore, 2001; 王国权, 周锡元, 2004; Wu, Wu, 2007; Wang *et al.*, 2011; 张斌等, 2020), 其中 Wang 等(2011)提出的自动基线校正方法具有效率高和自动化程度高等优点, 且基线校正得到的永久位移与 GPS 观测结果吻合得较好 (Melgar *et al.*, 2013), 目前该方法已在许多重要地震中得到应用 (李雪婧等, 2017; Zhao *et al.*, 2021). 为了考察基线校正的效果, 将由该方法得到的永久位移与 GPS 观测位移进行对比. 以 2018 年台湾花莲 $M_w6.4$ 地震中 HWA008 强震台站为例, 对该台站的三分量 (EW, NS 和 UD) 强震动记录校正后得到加速度、速度和位移时程, 并与距其较近的 GPS 台站 GE46 观测到的同震位移进行比较, 结果如图 4 所示, 可以看出校正后获取到的 EW, NS 和 UD 向

地面永久位移(7.6 cm, -44.5 cm 和-3.4 cm)与 GPS 台站 GE46 观测到的 EW, NS 和 UD 向地面永久位移(7.8 cm, -39.8 cm 和-7.4 cm)较为吻合.

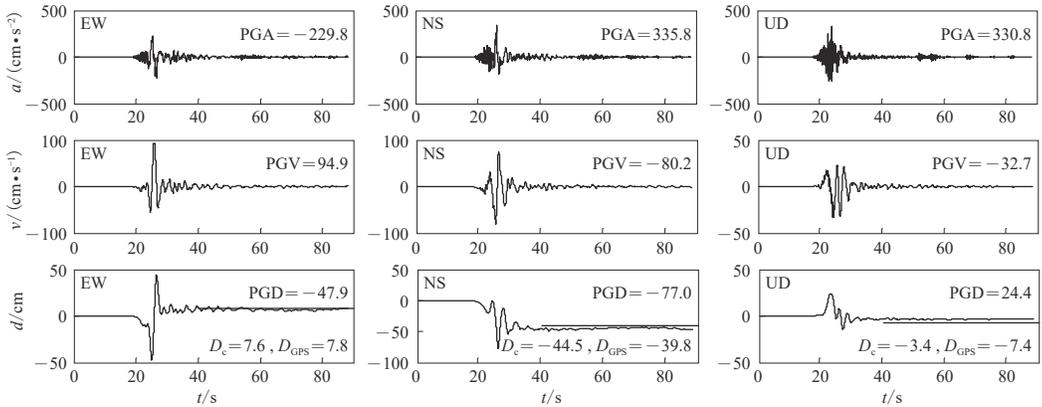


图 4 2018 年台湾花莲 M_w 6.4 地震中台站 HWA008 记录经基线校正后三分量的加速度、速度和位移时程(引自赵晓芬等, 2021)

Fig. 4 Three-component acceleration, velocity and displacement time histories after baseline correction from HWA008 record during 2018 Taiwan Hualien M_w 6.4 earthquake (after Zhao *et al.*, 2021)

2.2 速度脉冲识别方法

以前在挑选脉冲型地震动时, 通常是根据其速度时程, 依靠眼观凭借直观和经验来判断是否含有脉冲, 即定性地识别速度脉冲. 这种定性识别方法具有很大的主观任意性, 因为不同的研究者基于自己的经验对地震动的判别结果可能不一致, 尤其是在脉冲特性不明显. 随后, 一些学者提出采用简化的脉冲模型捕捉速度脉冲的主要特征, 以此对地震动速度时程进行检测, 从而判别是否存在明显的速度脉冲(Hall *et al.*, 1995; Makris, 1997; Alavi, Krawinkler, 2001; Mavroidis, Papageorgiou, 2003; Bray, Rodriguez-Marek, 2004; Dickinson, Gavin, 2011; Tang, Zhang, 2011), 称之为半定量速度脉冲识别方法. 此外, 随着强震数据的不断累积, 面对成千上万条强震动记录, 采用定性方法或半定量方法识别速度脉冲, 其工作量巨大且效率低(常志旺, 2014; 赵晓芬, 2015). 因此, 需要采用高效的定量方法进行速度脉冲识别. 然而对于识别速度脉冲的定量方法, 尚无统一的、明确的判别原则. 目前速度脉冲定量识别方法有基于小波变化的 Baker 方法(Baker, 2007; Shahi, Baker, 2011, 2014)、基于能量的速度脉冲识别方法(Zhai *et al.*, 2013; 常志旺, 2014; Chang *et al.*, 2016)、基于经验模态分解(empirical mode decomposition, 缩写为 EMD)的速度脉冲识别方法(赵晓芬, 2015)以及以希尔伯特-黄(Hilbert-Huang)变换为基础的速度脉冲识别方法(Chen *et al.*, 2019; Chen, Wang, 2020). 其中基于小波变化的速度脉冲识别方法应用较为广泛, 包括 Baker (2007)、Shahi 和 Baker (2011)、Shahi 和 Baker (2014)方法. Baker (2007)选用四阶 Daubechies 小波(db4)作为母小波对垂直或平行断层方向分量的地震动记录进行一维连续的小波变换, 提取原始地震动速度时程中的长周期脉冲信号, 并提出了三个判别标准进行定量识别. 考虑到近断层地震动有很强的方向性差异, 不同方向分量的地震动特性会有较大差别, 且速度脉冲并不仅仅出现在垂直断层方向上, 而是在一个方位角范围内(Howard *et al.*, 2005; Boore *et al.*, 2006; 胡进军, 谢礼立, 2011; Shahi, Baker, 2011; Zhai *et al.*, 2013; 谢俊举等, 2017), 如图 5

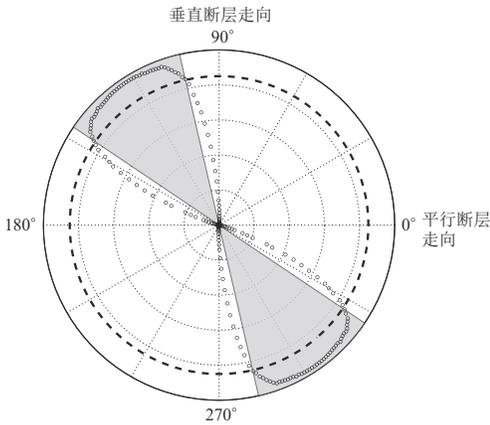


图 5 2008 年汶川地震 51JYT 台记录的显著速度脉冲的方位(引自谢俊举等, 2017)

Fig. 5 Azimuth showing distinct pulse for 51JYT record during 2008 Wenchuan earthquake (after Xie *et al.*, 2017)

中 2008 年汶川地震中 51JYT 台的记录, 阴影为出现显著脉冲的区域(谢俊举等, 2017). Shahi 和 Baker (2011) 采用将水平向地震动记录在水平面内 0—360° 各个方向上旋转并识别. 当某一方向的地震动具有典型速度脉冲特征时, 即判定该记录为脉冲型记录. 该方法克服了 Baker (2007) 只能识别单一方向脉冲容易漏判的缺点, 但其计算成本相对较高. Shahi 和 Baker (2014) 对 Shahi 和 Baker (2011) 的识别方法和过程进行简化, 提出基于两个正交水平分量的地震动速度脉冲识别方法, 该方法大大简化了计算过程, 提高了识别效率, 但谢俊举等(2017)认为该方法可能会对明显的脉冲记录存在漏判问题.

传统的速度脉冲定量识别方法(如小波方法和能量方法)可以有效地识别出单脉冲型地震动, 但对于多脉冲不太适合. 由于前方向性效应引起的脉冲一般包含主、次脉冲(即多脉冲), 且主、次脉冲的周期一般相差较小(Zhai *et al.*, 2018). 多脉冲的定量识别方法是近年来的研究热点. Zhai 等(2018)提出采用速度时程中的半循环捕捉速度脉冲的主要特性, 再基于能量的方法予以定量识别. 该方法可以有效地识别单脉冲、多脉冲以及不规则速度脉冲地震动记录.

2.3 速度脉冲数据库

对于速度脉冲的相关研究, 首先要从强震动记录中识别出速度脉冲记录, 并建立速度脉冲记录数据库. 随着强震动记录的不断累积, 以及速度脉冲的识别方法从定性(Somerville, 2003; Mavroicidis, Papageorgiou, 2003; Bray, Rodriguez-Marek, 2004)到定量(Baker, 2007; Shahi, Baker, 2011, 2014; Zhai *et al.*, 2013; 赵晓芬, 2015)的不断改进, 速度脉冲数据库也在不断地更新, 为速度脉冲的相关研究奠定了重要的数据基础. 2003 年美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, 缩写为 PEER)发起了 NGA 研究计划, 其中 NGA-West1 计划已于 2008 年完成, 并发布了 NGA-West1 强震数据库. 同时 Baker (2007) 提出基于小波分析的速度脉冲识别方法, 利用该方法从 NGA-West1 数据库的 3500 组强震动记录中识别出 91 条速度脉冲记录, 建立了含有速度脉冲的强地震动记录数据库. 2011 年 Shahi 和 Baker (2011) 在 Baker (2007) 的基础上提出考虑速度脉冲方向不确定性的速度脉冲识别方法, 从 NGA-West1 数据库中识别出 179 条含有速度脉冲的强地震动记录. 2013 年美国太平洋地震工程研究中心在 NGA-West1 数据库的基础上又补充了 2003—2011 年全球构造活动区浅地壳地震的强地震动记录, 发布了名为 NGA-West2 强震动数据库, 包括全球范围内发生的 607 次地震中的 2 万 1539 条强震动记录, 其中也涵盖了我国 2008 年汶川 M_w 7.9 地震的主震和 64 次强余震在内的 3950 多条强震动记录(Ancheta *et al.*, 2014). 随着 NGA-West2 强震动数据库的发布, Shahi 和 Baker (2014) 提出了基于多分量的速度脉冲识别方法, 从 NGA-West2

强震动数据库中识别出 244 条含有速度脉冲的强记录. 此后, 赵晓芬等(2022a)采用 Shahi 和 Baker (2011)的速度脉冲识别方法将 2013 年至今国内外发生的地震事件的近断层强震动记录进行速度脉冲识别, 其中有我国的 2014 年鲁甸 $M_S6.5$ 地震、2016 年台湾美浓 $M_W6.4$ 地震、2018 年台湾花莲 $M_W6.4$ 地震和境外的 2015 年尼泊尔 $M_W7.8$ 地震、2016 年日本熊本 $M_W7.0$ 地震等, 将其作为 NGA-West2 速度脉冲记录数据库的补充, 得到 316 条速度脉冲记录组成的速度脉冲记录数据库. 在 NGA-West3 未发布之前, 该数据库是目前较全的速度脉冲记录数据库.

3 近断层速度脉冲特性

近断层速度脉冲的地震动特性研究主要是利用速度脉冲实际观测记录, 基于统计分析方法较为详尽地研究脉冲型地震动的幅值、频谱、周期与震级、断层类型、距离、场地条件等因素之间的关系 (Mavroeidis, Papageorgiou, 2003; Somerville, 2003; Bray, Rodriguez-Marek, 2004; 谢俊举等, 2017; 赵晓芬等, 2018). 此外, 速度脉冲型地震动方向性差异特点以及速度脉冲对反应谱的放大作用是近年来的研究热点.

3.1 地震动方向性差异

断层破裂的前方向性效应对地震动有显著影响. 当破裂沿断层面以剪切波速传播时, 破裂传播前方的大部分破裂辐射能量几乎同步到达观测点. 在能量累积效应的作用下, 在断层破裂向前传播方向所在区域观测到的地震动被明显放大 (谢俊举等, 2018), 如 2008 年汶川地震 (Wang *et al.*, 2010; 谢俊举等, 2010)、2013 年芦山地震 (谢俊举等, 2018) 以及 2018 年台湾花莲地震 (安昭等, 2019). 而对于单个场点所获取的记录, 前方向性效应还会导致地震动强度随记录方向不同而发生显著变化 (韩森等, 2016, 2017; Tian *et al.*, 2019), 即地震动的方向性差异, 主要表现为不同方向上的加速度反应存在显著差异, 且反应的最大方向随自振周期发生变化 (Shahi, Baker, 2014; Bradley, Baker, 2015; 韩森等, 2016; 谢俊举等, 2018; 安昭等, 2019; Tian *et al.*, 2019). 地震动的方向性差异会影响工程结构在地震作用下的位移变形和内力反应 (Howard *et al.*, 2005; Boore *et al.*, 2006; Dai *et al.*, 2014), 但针对于近断层前方向性效应速度脉冲记录的方向性差异及其与近断层普通地震动的方向性差异的对比研究很少涉及. 因此, 开展近断层速度脉冲型地震动的方向性差异研究, 将有助于深入认识近断层地震动速度脉冲特性, 为近断层区域工程结构设计时速度脉冲方向的确定提供重要依据.

赵晓芬等(2021)以 2018 年台湾花莲县近海发生的 $M_W6.4$ 地震为例, 探讨了速度脉冲型地震动方向性差异的特点, 其结果表明: 花莲地震近断层区域内, 速度脉冲记录的方向性差异较非速度脉冲记录更显著. 花莲地震在断层距 30 km 以内地震动具有较强的方向性, 即 $T \geq 1.0$ s 的长周期地震动卓越方向接近垂直断层方向, 这与 Bradley 和 Baker (2015)的结果(断层距 $R_{rup} < 30$ km)以及谢俊举等(2018)的结果($R_{rup} < 35$ km)较为接近, 但明显超过了 Shahi 和 Baker (2014)给出的影响范围($R_{rup} < 5$ km). 值得注意的是, 花莲地震中断层距在 5 km 范围内的强震动记录的方位角最靠近垂直断层方向, 这与谢俊举等(2018)研究芦山地震时发现断层距处于 20—35 km 之间时强震动记录的方位角最靠近垂直断层方向的结果存在差异. 这是由于与近断层普通地震动相比, 速度脉冲记录的方向性差异更明显. 因此, 建议在断层距约 30 km 范围内工程建设中需要考虑地震动方向性差异的影响, 特别是在断层距 5 km 范围内应该考虑速度脉冲记录方向性差异的影响, 以确保工程结构的薄弱位置尽量避开速度脉冲型

地震动的卓越方向. 另外, 赵晓芬等(2021)还表明: 近断层前方向效应对速度脉冲方向性差异的影响更大.

3.2 速度脉冲对反应谱的放大作用

已有学者尝试对以往的地震动预测值进行修正, 以便在地震危险性分析中考虑速度脉冲效应的影响 (Somerville *et al.*, 1997; Abrahamson, 2000; Rowshandel, 2006; Spudich, Chiou, 2008). 早年有学者将近断层地震动所有周期对应幅值或者反应谱相对于以往的地震动预测值一致提高, 称为宽频段模型. 随着研究的不断深入, 相关结果显示发现速度脉冲并不是对所有频段地震动成分一致放大, 而是仅仅放大了部分频段的地震动, 且不同频段范围内的放大倍数也不相同 (Somerville, 2003, 2005; Tothong *et al.*, 2007; Baker, Cornell, 2008; Shahi, Baker, 2011; Chang *et al.*, 2018), 这种模型称为窄频段模型. 在 NGA-West2 中的方向模型中, Shahi 和 Baker (2011) 基于速度脉冲记录建立了脉冲放大作用的经验模型, 其中脉冲的平均放大谱表现为以特征周期 T_p 为中心的单峰曲线, 且在 $0.88T_p$ 附近最强, 向两侧逐渐减弱. 谢俊举等(2017)收集了近年发生的汶川地震、鲁甸地震和美国 NGA 数据库选取的 175 次地震事件的 3661 组强震动记录, 考虑脉冲方向的不确定性, 进一步研究了速度脉冲放大作用预测模型, 其结果显示放大作用预测模型曲线表现为以脉冲特征周期 T_p 为中心的单峰曲线, 在 T_p 处的放大倍数最高可达 3.5 倍, 向两侧逐渐变弱, 主要影响周期范围为 $0.5T_p-2T_p$. Chang 等(2018)的研究表明速度脉冲的放大作用最强处不是一个点而是一个平台段 ($0.75T_p-1.09T_p$), 并在 Shahi 和 Baker (2011) 的基础上提出新的速度脉冲放大作用预测模型. Shahi 和 Baker (2011) 和 Chang 等(2018)能够定量地预测速度脉冲的放大作用. 赵晓芬等(2021)以我国台湾花莲地震为例探讨了上述速度脉冲放大作用预测模型的有效性, 发现花莲地震中速度脉冲平均放大作用曲线形状与 Chang 等(2018)预测模型相似, 且两者的平台段范围及宽度均相近, 但花莲地震速度脉冲的平均放大作用系数曲线的平台段高度明显高于 Chang 等(2018)的预测模型. 随后, 赵晓芬等(2022b)采用更丰富的速度脉冲记录, 基于 Chang 等(2018)模型更新了近断层速度脉冲放大作用预测模型. 此外, Shahi 和 Baker (2013)表明方向性差异对脉冲放大作用系数无显著的影响. 此外, 对应于特定周期的放大系数数值由脉冲周期 T_p 和比值 T/T_p 共同决定, 而速度脉冲周期 T_p 受震源特性、距离及场地条件等因素影响, 放大系数还与场地类别和震源特征等诸多因素有关. 谢俊举等(2017)关于震级和场地剪切波速对脉冲放大作用系数曲线的影响研究表明: 随着震级的增大, 脉冲放大作用影响的周期范围变宽, 放大系数曲线的峰值周期向长周期方向移动; 随着场地剪切波速的增大, 脉冲放大作用的影响范围和峰值均向短周期移动, 与震级相比, 场地剪切波速对放大系数曲线的影响较小. 目前尚无探讨断层距对脉冲放大作用影响的相关研究, 因此, 需要在定性分析的基础上定量研究震级、断层距以及场地条件对脉冲放大作用的影响, 建立考虑脉冲放大作用的地震动参数预测模型, 提出考虑速度脉冲影响的概率地震危险性分析方法, 为近断层抗震设防和抗震设计提供科学依据.

4 近断层速度脉冲型地震动输入

速度脉冲型地震动具有幅值大、周期长等特点, 这与普通地震动特性差异显著. 因此, 需要针对近断层地震动速度脉冲的选取和调整方法加以研究.

4.1 速度脉冲型地震动记录选取调研

总结前人的研究成果, 速度脉冲型地震动选取和调整目前尚无统一的方法, 各国的相关

方法下面分述之。

我国建筑抗震设计规范 GB 50011—2010 (中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010)对近断层速度脉冲记录的选取无具体规定, 缺乏具体的速度脉冲选波方法。因此, 还需加大近场地震动特性及近场地震动输入的研究, 以完善我国规范关于近场地震设防的规定。

UBC97 (International Conference of Building Official, 1997)明确提出考虑近断层地震动效应, 以反应谱放大因子来反映近断层地震动效应, 当震级小于 6.5 时则不予考虑。UBC97 对近场地震的考虑主要体现在以下三方面: ①对地震动反应系数分别乘以大于 1 的值, 这样中短周期设计谱值得以提高; ②对设计谱的平台段乘以近场系数, 加大设计谱的平台宽度; ③设计谱下降段乘以大于 1 的近场因子, 使其变得更为平缓; ④对近场设计谱的长周期下降段增加一个平台, 以期控制响应力, 考虑了长周期地震动的影响。UBC97 对近场地震效应的考虑比较合理, 特别是加大了加速度敏感区的宽度, 较好地考虑了近场地震动的影响。但是, UBC97 未对速度脉冲型地震动记录选取进行具体规定。

NIST (National Institute of Standard and Technology, 2011)用脉冲记录占总选波数量的比例因子来确定速度脉冲型地震动记录的选波数量。NIST 规定: 如果按照设定地震选取速度脉冲, 需要遵守普通地震动选波方法, 即基于地震震级、震中距、场地条件等条件, 并且按照脉冲记录所占比例因子选取; 如果按照谱匹配方法选取脉冲记录, 则含速度脉冲地震动记录反应谱值(脉冲周期对应值)不能超过目标谱的 15%—30%, 且不能小于目标谱值(远离脉冲周期对应值)的 10%—20%; 此外, 在匹配过程中不能丢失备选记录的非平稳性。NIST 给出了指导性的原则, 但未给出具体的实施细则。

Shahi 和 Baker (2014)基于概率地震危险性分析方法建立了脉冲发生的概率模型, 确定了在近断层区选取速度脉冲的数量, 但是尚未详细研究速度脉冲型地震动记录的选取方法; 他们提出在脉冲记录少的情况下需要增加人工速度脉冲地震动, 要求人工速度脉冲地震动与真实的速度脉冲地震动具有相似的特征。这些研究均给出了指导性的建议, 但未给出具体的实施细则。

Hayden 等(2014)提出了速度脉冲记录选取方法的指导意见: ①当选用的地震动记录较少时, 选取的速度脉冲记录的脉冲周期要与结构自振周期接近; ②当选用的地震动记录较多时, 需要尽可能地满足一系列设定地震条件, 如震级、断层距等, 从而与设定地震危险性水平一致; ③脉冲记录与目标谱的匹配过程中应保持脉冲的非平稳性; ④建议采用条件平均谱的概念进行速度脉冲反应谱的谱匹配, 在指定的周期范围(如 $0.2T$ — $1.5T$)进行目标谱匹配, 且在匹配过程中不能消除脉冲的关键时域特征, 也不能通过增加额外的脉冲能量以免产生不真实的时间序列。为此, 规定脉冲周期对应的谱值不得超过脉冲周期对应目标谱的 15%—30%, 不得小于 10%—20%。Hayden 同样只给出了指导性建议, 并未给出具体的论证指导意见的根据, 以及详细的速度脉冲记录选取和调整方法。

此外, 目前比较常用的地震动选取方法有条件平均谱(conditional mean spectrum, Baker, 2011)、条件谱(conditional spectrum, Jayaram et al, 2011)、广义条件参数分布(generalized conditional intensity measure, Bradley, 2010), 其中广义条件参数分布方法可以用于速度脉冲型地震动记录的选取。就速度脉冲型地震动记录选取和调整方法的专题研究而言, 前人给出了较多速度脉冲型地震动记录选取和调整方法的指导性建议, 但尚无系统的、具体的方法性研究。

4.2 速度脉冲型地震动强度表征参数

针对一般地震动记录的地震动强度表征参数(intensity measure, 缩写为IM)的研究较多(王建民, 朱晞, 2006; 叶列平等, 2009; 陈波, 2013; 杜永峰等, 2017). 由于速度脉冲型地震动具有长周期、大幅值、能量瞬时累积大、非平稳性强且对结构有特殊的破坏作用等区别于一般地震动的特征(杨迪雄等, 2005; Baker, 2007; 陈波, 2013; 赵晓芬, 2015), 因此需要研究速度脉冲型地震动强度表征参数. 许多研究(Shome *et al.*, 1998; Luco, Cornell, 2007)已证明基阶模态周期谱加速度 $S_a(T)$ 较其它参数是更有效的IM, 但速度脉冲型地震动的 $S_a(T)$ 之间的相关性随着周期的增大而逐渐减弱, 特别是对于长周期结构 $S_a(T)$ 无法有效地解释结构反应的变异性(Baker, Cornell, 2004, 2008). 因此除 $S_a(T)$ 以外, 需要考虑将速度脉冲非平稳性谱形的参数作为速度脉冲型地震动强度表征参数. 周靖等(2010)提出 $S_a(T)$ 和 PGV 是相对较优的速度脉冲型地震动IM, 但是以其作为IM来估算结构地震响应的离散性, 该离散性随结构体系周期、延性水平的变化较大. Baker和Cornell(2008)选用断层距在20—30 km的70条速度脉冲记录进行研究, 认为 $S_a(T)$ 和谱形参数 $R(T_1, T_2)$ [$R(T_1, T_2) = S_a(T_2)/S_a(T_1)$] 可作为速度脉冲型地震动IM. 由于 T_2 存在很大的不确定性和主观性, 并且 $R(T_1, T_2)$ 无法有效地捕捉脉冲的非平稳性, 因此不适合作为IM. Tothong和Cornell(2008)通过研究70条速度脉冲记录提出采用 $S_a(T)$ 和反应谱偏差参数 ε 作为速度脉冲型地震动IM. 由于 ε 依赖于NGA经验预测模型, 但是现有的经验预测模型未考虑速度脉冲的影响, 因此 ε 不适合作为速度脉冲型地震动IM. Almufti等(2015)分别对比研究脉冲和非脉冲记录与条件平均谱的匹配, 基于危险性分析发现速度脉冲周期是脉冲型地震动记录选取的关键因素. Chioccarelli和Iervolino(2013)基于现有地震动预测模型提出近似脉冲谱(close-impulsive spectrum), 该脉冲谱可以基于设定地震危险性考虑速度脉冲的影响(例如震级、距离以及脉冲周期). 然而Baltzopoulos等(2015)发现由于速度脉冲型地震动记录稀缺, 采用目标谱进行速度脉冲记录选取是不可行的, 因此, 他们忽略了脉冲型地震动的谱形状, 采用与地震危险性相一致的脉冲周期进行脉冲记录选取. 同理, Tarbali(2017)也不考虑脉冲型地震动的谱形, 而是采用广义条件参数分布方法从同时包含脉冲和非脉冲的数据库中进行脉冲记录选取. Kohrangi等(2019)采用与地震危险性相一致的脉冲周期以及对脉冲谱形状敏感的平均谱加速度这两个参数进行速度脉冲型地震动记录的选取. 赵晓芬等(2019)从NGA-West2强震数据库中识别出236条速度脉冲记录, 分析了42种地震动参数之间的相似性和相关性, 其结果显示: 当 $0 < T < 6$ s时, 速度脉冲对加速度反应谱的放大系数可作为速度脉冲型地震动强度表征参数, 但是对于该放大系数如何在速度脉冲型地震动记录输入中应用, 尚需进一步研究.

4.3 地震动预测模型对速度脉冲型地震动的适用性研究

传统的地震动预测模型未考虑速度脉冲的影响, 可能会低估近断层区域的地震危险性(Chiou, Youngs, 2008; Shahi, Baker, 2011; Chang *et al.*, 2018). Shahi和Baker(2011)探讨了NGA-West1的五个地震动预测模型中的Boore和Atkinson(2008)地震动预测模型(以下简称BA2008)对近断层速度脉冲型地震动的适用性, 结果显示BA2008地震动预测模型会低估速度脉冲记录, 但是能够较好地预测提取长周期脉冲后的残余地震动(Shahi, Baker, 2011). 基于更新的强震动记录, NGA-West2还发布了四个新一代地震动预测模型, 分别为ASK2014(Abrahamson *et al.*, 2014), BSSA2014(Boore *et al.*, 2014), CB2014(Campbell, Bozorgnia, 2014)和CY2014(Chiou, Youngs, 2014)模型. 赵晓芬等(2022a)利用小波提取出速度脉冲记录中的

长周期脉冲信号, 基于偏差参数分析方法, 定量地研究 NGA-West2 地震动预测模型分别对速度脉冲原始记录和提取长周期脉冲后的残余记录的适用性. 结果显示, NGA-West2 中的四个地震动预测模型均会低估近断层速度脉冲记录, 特别是在脉冲周期附近的周期段内速度脉冲观测值远远大于此四个预测模型的预测值, 但残余记录观测值与 NGA-West2 中四个地震动预测模型的预测值较吻合. 值得注意的是, CB2014 地震动预测模型能更好地预测残余记录. 因此今后对近断层速度脉冲预测时可以通过修正脉冲周期附近的 NGA-West2 地震动预测模型从而考虑速度脉冲的影响. 这为近断层概率地震危险性分析、抗震设防以及结构抗震设计中考虑速度脉冲的影响提供研究基础, 为 NGA-West2 地震动预测模型的修正(如通过建立速度脉冲放大作用预测模型对地震动预测模型进行修正)从而建立速度脉冲型地震动预测模型, 这将是下一步研究的重点.

5 近断层速度脉冲型地震动对结构的影响

尽管由地震破裂前方向性效应引起的长周期速度脉冲很早就已发现, 但关于它对结构破坏的研究却相对较晚. Bertero 等(1978)最早认识到近断层前方向性效应引起的地震动脉冲可能会对结构产生破坏作用, 并研究了方向性脉冲对柔性结构的影响. 直到 1994 年北岭地震之后, 人们才开始认识到方向性脉冲对长周期结构的危害性 (Hall *et al.*, 1995; Anderson *et al.*, 1999), 于是在工程设计中开始考虑近断层效应的影响. 此后, 关于近断层速度脉冲对结构影响的研究主要集中在以下几个方面.

一是速度脉冲型地震动与非脉冲型地震动对结构影响的对比研究. 杨迪雄等(2005), 李爽和谢礼立(2006)以及 Kalkan 和 Gülkan (2004)等选用近断层含速度脉冲的地震动记录和远场不含速度脉冲地震动记录分别作用于结构进行对比研究. 韦韬(2005), 李明等(2010)和贺秋梅(2012)等选用含速度脉冲的地震动记录和与其具有一致峰值加速度、弹性加速度反应谱和持时的不含速度脉冲的模拟地震动进行对比研究. 赵晓芬(2015)将含速度脉冲地震动记录进行连续的小波分析, 分离出脉冲分量和不含脉冲的剩余分量分别作为含速度脉冲记录和不含速度脉冲记录作用于结构进行研究.

二是速度脉冲型地震动对不同结构类型反应的影响研究. 多自由度体系在脉冲作用下的弹性和非弹性反应分析表明, 脉冲的幅值和周期是控制结构变形的主要参数 (Anderson, Bertero, 1987; Hall *et al.*, 1995; Makris, 1997; Alavi, Krawinkler, 2001; 杨迪雄等, 2005). 近断层脉冲对结构的影响主要有两个方面: 一方面, 考察速度脉冲对简单的单自由度体系或多自由度体系地震反应的影响 (Alavi, Krawinkler, 2001); 另一方面建立实际工程结构的数值模型, 输入实际的地震记录或模拟地震动, 采用试验或数值分析的方法来考察速度脉冲对钢筋混凝土框架结构、钢框架结构和桥梁结构等地震反应的影响 (李爽, 谢礼立, 2006; 赵凤新等, 2008). 一些学者还研究了速度脉冲对隔震结构、巨型结构以及核电厂结构体系的影响 (李新乐, 朱晞, 2004; 杨迪雄等, 2005; 李祥秀等, 2021; 孙亚琪等, 2022).

三是不同类型的速度脉冲型地震动对结构反应影响研究. 不同类型的近断层速度脉冲在周期、幅值和波形上的显著不同都会导致地震作用下结构不同形式和不同程度的破坏 (Kalkan, Kunnath, 2006; Shahi, Baker, 2011). 例如, 前方向性脉冲主要增大结构的高阶振型响应, 导致结构的中上部楼层的层间变形较大, 而滑冲效应脉冲主要激起结构的基本振型响应, 使得结构底部层间变形较大 (Kalkan, Kunnath, 2006). 同时, 滑冲效应速度脉冲可以使隔

震建筑底部的层间变形和楼层剪力明显增大,对长周期建筑结构的破坏相比前方向性速度脉冲更具危害性(杨迪雄,赵岩,2010)。可见不同类型的近断层脉冲对相同结构的影响会有如此显著的差异。此外,李帅等(2017)研究了合成的近断层地震动对超大跨斜拉桥的影响,发现与脉冲循环数为偶数的脉冲型地震动相比,脉冲循环数为奇数的脉冲型地震动对结构的影响更为显著。

6 结论

本文从速度脉冲成因、速度脉冲型地震动识别方法、速度脉冲特性、速度脉冲型地震动输入以及速度脉冲对结构影响等方面对相关研究进行了总结和梳理。

地震断层破裂中的前方向性效应和滑冲效应是产生脉冲记录的两个主要原因,关于两类速度脉冲的定量区分将是下一步的研究重点。速度脉冲识别方法经历了从定性到定量识别的不断改进,但目前的定量识别方法无法做到完全的自适应。此外,能够综合识别单、多以及不规则速度脉冲型地震动记录的定量识别方法也是接下来的研究重点,对滑冲效应速度脉冲型地震动的定量识别方法也需深入研究。目前对速度脉冲幅值、频谱等特性研究较为详尽,但是关于速度脉冲方向性差异以及脉冲放大作用预测模型还需要进一步研究。与普通地震动相比,速度脉冲型地震动有非常明显的非平稳性,因此在速度脉冲型地震动输入方法中需要充分考虑脉冲的非平稳。而现有的速度脉冲型地震动输入方法大都还停留在理论研究阶段。不同类型的速度脉冲型地震动对不同类型结构的研究较多,但速度脉冲对大的建筑群以及城市区域的研究还较少。

速度脉冲相关研究随着速度脉冲观测数据的积累和结构抗震理论的发展与时俱进,但关于速度脉冲的研究大多停留在理论阶段,与工程实践之间还存在衔接问题,下一步重点是较为成熟的理论成果转化为工程应用。

参 考 文 献

- 安昭,谢俊举,李小军,温增平. 2019. 2018年2月6日花莲 M_w 6.4地震近场地震动方向性效应[J]. *地球物理学报*, **62**(12): 4658-4672.
- An Z, Xie J J, Li X J, Wen Z P. 2019. Directivity effects on strong ground motion from the February 6, 2018 M_w 6.4 Hualien earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(12): 4658-4672 (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: 3-4.
- Chang Z W. 2014. *Quantitative Identification and the Characteristics of Near-Fault Pulse-Like Ground Motions*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology: 3-4 (in Chinese).
- 陈波. 2013. 结构非线性动力分析中地震动记录的选择和调整方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 13-25.
- Chen B. 2013. *Ground Motion Selection and Modification Methods for Performing Nonlinear Dynamic Analysis of Buildings*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 13-25 (in Chinese).
- 杜永峰,徐天妮,洪娜. 2017. 不同震源机制的近断层脉冲型地震动频谱特性及强度指标研究[J]. *土木工程学报*, **50**(5): 81-87.
- Du Y F, Xu T N, Hong N. 2017. Spectral and intensity indices of near-fault ground motions based on different focal mechanisms[J]. *China Civil Engineering Journal*, **50**(5): 81-87 (in Chinese).
- 韩森,张文会,朱爱东,孙一林,李进波. 2016. 不同层隔震结构在近断层地震作用下动力响应分析[J]. *振动与冲击*, **35**(5): 120-124.
- Han M, Zhang W H, Zhu A D, Sun Y L, Li J B. 2016. Dynamic response analysis for multi-story structures with different isolation stories under near-fault ground motions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **35**(5): 120-124 (in Chinese).
- 韩森,崔明珠,杜红凯. 2017. 近断层地震动下基础隔震弹簧限位对结构响应影响试验研究[J]. *振动与冲击*, **36**(19):

- 175-179.
- Han M, Cui M Z, Du H K. 2017. Experimental research on the effect of spring displacement-constraint devices on the structural responses of base-isolated structures under near-fault ground motions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **36**(19): 175-179 (in Chinese).
- 贺秋梅. 2012. 地震动的速度脉冲对结构反应及结构减隔震性能影响研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 98-110.
- He Q M. 2012. *Study on the Influence of Seismic Velocity Pulse on Structural Response and Isolation Properties*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 98-110 (in Chinese).
- 胡进军, 谢礼立. 2011. 地震破裂的方向性效应相关概念综述[J]. *地震工程与工程振动*, **31**(4): 1-8.
- Hu J J, Xie L L. 2011. Review of rupture directivity related concepts in seismology[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **31**(4): 1-8 (in Chinese).
- 李明, 谢礼立, 杨永强, 胡进军. 2010. 基于反应谱的近断层地震动潜在破坏作用分析[J]. *西南交通大学学报*, **45**(3): 331-335.
- Li M, Xie L L, Yang Y Q, Hu J J. 2010. Potential damage analysis of near-fault ground motion based on response spectra[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, **45**(3): 331-335 (in Chinese).
- 李帅, 张凡, 颜晓伟, 王景全. 2017. 近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响[J]. *中国公路学报*, **30**(2): 86-97.
- Li S, Zhang F, Yan X W, Wang J Q. 2017. Synthetic method for near-fault ground motions and its influence on seismic response of super-span cable-stayed bridge[J]. *China Journal of Highway and Transport*, **30**(2): 86-97 (in Chinese).
- 李爽, 谢礼立. 2006. 近场脉冲型地震动对钢筋混凝土框架结构影响[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, **22**(3): 406-410.
- Li S, Xie L L. 2006. Effects of near-field pulse-like ground motions on reinforced concrete frame structures[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, **22**(3): 406-410 (in Chinese).
- 李祥秀, 王瑶, 李小军, 刘爱文, 贺秋梅. 2021. 速度脉冲地震动作用下巨-子结构隔震体系的振动台试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, **29**(3): 633-644.
- Li X X, Wang Y, Li X J, Liu A W, He Q M. 2021. Experimental studies on seismic performance of mega-sub isolation system subjected to near-fault ground motions with velocity pulse[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, **29**(3): 633-644 (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).
- 李雪婧, 高孟潭, 吴健. 2017. 2015年尼泊尔Gorkha地震强地面运动记录分析[J]. *地球物理学报*, **60**(9): 3445-3456.
- Li X J, Gao M T, Wu J. 2017. Analysis of strong-motion characteristics of the 2015 Gorkha, Nepal, earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(9): 3445-3456 (in Chinese).
- 李英民, 刘立平. 2011. 工程结构的设计地震动[M]. 北京: 科学出版社: 234-239.
- Li Y M, Liu L P. 2011. *Design Ground Motion of Engineering Structures*[M]. Beijing: Science Press: 234-239 (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 Engineering Vibration*, **26**(1): 1-10 (in Chinese).
- 孙亚琪, 李小军, 刘旭晨, 王晓辉, 陈苏, 邓小芳. 2022. 地震动速度脉冲特性对核电厂清洗转运间结构地震响应的影响[J]. *建筑结构*, **52**(增刊1): 858-862.
- Sun Y Q, Li X J, Liu X C, Wang X H, Chen S, Deng X F. 2022. Effects of velocity pulse of seismic ground motion on seismic response of transfer and purge chamber structure of nuclear power plant[J]. *Building Structure*, **52**(S1): 858-862 (in Chinese).
- 王国权, 周锡元. 2004. 921台湾集集地震近断层强震记录的基线校正[J]. *地震地质*, **26**(1): 1-14.
- Wang G Q, Zhou X Y. 2004. Baseline correction of near fault ground motion recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan

- earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **26**(1): 1–14 (in Chinese).
- 王建民, 朱晔. 2006. 地面运动强度度量参数与双线性单自由度系统变形需求的相关性研究[J]. *地震学报*, **28**(1): 76–84.
- Wang J M, Zhu X. 2006. Correlation study between ground motion intensity measure parameters and deformation demands for bilinear SDOF systems[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **28**(1): 76–84 (in Chinese).
- 韦韬. 2005. 近断层速度脉冲对钢筋混凝土框架结构影响的研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 13–31.
- Wei T. 2005. Study on effects of near-fault velocity pulse on RC framed structures[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 17–31 (in Chinese).
- 谢俊举, 温增平, 高孟潭, 胡聿贤, 何少林. 2010. 2008年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J]. *地球物理学报*, **53**(8): 1796–1805.
- Xie J J, Wen Z P, Gao M T, Hu Y X, He S L. 2010. Characteristics of near-fault vertical and horizontal ground motion from the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(8): 1796–1805 (in Chinese).
- 谢俊举. 2014. 近断层地震动的脉冲运动特性及形成机理研究[D]. 北京: 北京工业大学: 50–57.
- Xie J J. 2014. *The Study on Motion Characteristics and Generation Mechanism of Near Fault Ground Velocity Pulses*[D]. Beijing: Beijing University of Technology: 50–57 (in Chinese).
- 谢俊举, 李小军, 温增平. 2017. 近断层速度大脉冲对反应谱的放大作用[J]. *工程力学*, **34**(8): 194–211.
- Xie J J, Li X J, Wen Z P. 2017. The amplification effects of near-fault distinct velocity pulses on response spectra[J]. *Engineering Mechanics*, **34**(8): 194–211 (in Chinese).
- 谢俊举, 李小军, 温增平, 周宝峰. 2018. 芦山7.0级地震近断层地震动的方向性[J]. *地球物理学报*, **61**(4): 1266–1280.
- Xie J J, Li X J, Wen Z P, Zhou B F. 2018. Variations of near-fault strong ground motion with directions during the 2013 Lushan $M_s7.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(4): 1266–1280 (in Chinese).
- 杨迪雄, 赵岩. 2010. 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响[J]. *地震学报*, **32**(5): 579–587.
- Yang D X, Zhao Y. 2010. Effects of rupture forward directivity and fling step of near-fault ground motions on seismic performance of base-isolated building structure[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(5): 579–587 (in Chinese).
- 杨迪雄, 李刚, 程耿东. 2005. 近断层脉冲型地震动作用下隔震结构地震反应分析[J]. *地震工程与工程振动*, **25**(2): 119–124.
- Yang D X, Li G, Cheng G D. 2005. Seismic analysis of base-isolated structures subjected to near-fault pulse-like ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **25**(2): 119–124 (in Chinese).
- 叶列平, 马千里, 缪志伟. 2009. 结构抗震分析用地震动强度指标的研究[J]. *地震工程与工程振动*, **29**(4): 9–22.
- Ye L P, Ma Q L, Miao Z W. 2009. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **29**(4): 9–22 (in Chinese).
- 张斌, 俞言祥, 肖亮. 2020. 近断层强震记录基线校正的改进方法[J]. *振动与冲击*, **39**(5): 137–163.
- Zhang B, Yu Y X, Xiao L. 2020. An improved method for near-fault strong ground motion records' baseline correction[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **39**(5): 137–163 (in Chinese).
- 赵凤新, 韦韬, 张郁山. 2008. 近断层速度脉冲对钢筋混凝土框架结构地震反应的影响[J]. *工程力学*, **25**(10): 180–186.
- Zhao F X, Wei T, Zhang Y S. 2008. Influence of near-fault velocity pulse on the seismic response of reinforced concrete frame[J]. *Engineering Mechanics*, **25**(10): 180–186 (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).
- 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[J]. *地震学报*, **40**(5): 673–688.
- Zhao X F, Wen Z P, Chen B. 2018. Characteristics of near-fault velocity pulses in the strongest pulse orientation[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **40**(5): 673–688 (in Chinese).
- 赵晓芬, 温增平, 陈波, 刘奕君. 2019. 适用于全周期结构的速度脉冲型地震动强度表征参数研究[J]. *地震学报*, **41**(4): 536–547.
- Zhao X F, Wen Z P, Chen B, Liu Y J. 2019. Intensity measures of pulse-like ground motions in the full periods[J]. *Acta Seismo-*

- logica Sinica*, **41**(4): 536–547 (in Chinese).
- 赵晓芬, 温增平, 谢俊举, 解全才, 刘奕君. 2021. 2018年台湾花蓮 M_w 6.4地震近断层地震动方向性差异[J]. 振动与冲击, **40**(10): 235–243.
- Zhao X F, Wen Z P, Xie J J, Xie Q C, Liu Y J. 2021. Ground motion directionality in the 2018 Taiwan Hualien M_w 6.4 earthquake[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **40**(10): 235–243 (in Chinese).
- 赵晓芬, 温增平, 谢俊举, 解全才. 2022a. NGA-West2地震动预测模型对速度脉冲型地震动各分量的适用性研究[J/OL]. 地震学报, **44**: 1–10. doi: [10.11939/jass.20210176](https://doi.org/10.11939/jass.20210176).
- Zhao X F, Wen Z P, Xie J J, Xie Q C. 2022a. Applicability of the Next Generation Attenuation-West2 ground-motion model to the components of near-fault velocity pulse-like ground motions[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **44**: 1–10. doi: [10.11939/jass.20210176](https://doi.org/10.11939/jass.20210176) (in Chinese).
- 赵晓芬, 温增平, 谢俊举, 解全才, 徐超, 王元杰. 2022b. 考虑近断层方向性效应的速度脉冲放大作用预测模型[J]. 振动与冲击(待刊).
- Zhao X F, Wen Z P, Xie J J, Xie Q C, Xu C, Wang Y J. 2022b. An empirical approach of accounting for the pulse amplification effects induced by near-fault directivity [J]. *Journal of Vibration and Shock* (in Chinese)(in press).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2010. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 6–8.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2010. *GB 50011—2010 Code for Seismic Design of Buildings*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press: 6–8 (in Chinese).
- 周靖, 陈凯亮, 罗高杰. 2010. 速度脉冲型地震地面运动强度表征参数评估[J]. 振动与冲击, **29**(7): 153–158.
- Zhou J, Chen K L, Luo G J. 2010. Evaluation of intensity measures for pulse-like earthquake ground motions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, **29**(7): 153–158 (in Chinese).
- Abrahamson N A. 2000. Effects of rupture directivity on probabilistic seismic hazard analysis[C]//*Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation*. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute: 10–21.
- Abrahamson N A, Silva W J, Kamai R. 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions[J]. *Earthq Spectra*, **30**(3): 1025–1055.
- Alavi B, Krawinkler H. 2001. *Effects of Near-Fault Ground Motions on Frame Structures*[R]. California: Blume Earthquake Engineering Center: 33–40.
- Almufti I, Motamed R, Grant D N, Willford M. 2015. Incorporation of velocity pulses in design ground motions for response history analysis using a probabilistic framework[J]. *Earthq Spectra*, **31**(3): 1647–1666.
- Ancheta T D, Darragh R B, Stewart J P, Seyhan E, Silva W J, Chiou B S J, Wooddell K E, Graves R W, Kottke A R, Boore D M, Kishida T, Donahue J L. 2014. NGA-West2 Database[J]. *Earthq Spectra*, **30**(3): 989–1005.
- Anderson J C, Bertero V V. 1987. Uncertainties in establishing design earthquakes[J]. *J Struct Eng*, **113**(8): 1709–1724.
- Anderson J C, Bertero V V, Bertero R D. 1999. *Performance Improvement of Long Period Building Structures Subjected to Severe Pulse-Type Ground Motion: Pacific Earthquake Engineering Research Center PEER Report 1999/09*[R]. Berkeley: University of California: 21–109.
- Baker J W. 2007. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(5): 1486–1501.
- Baker J W. 2011. Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection[J]. *J Struct Eng*, **137**(3): 322–331.
- Baker J W, Cornell C A. 2004. Choice of a vector of ground motion intensity measures for seismic demand hazard analysis[C]//*Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver BC, Canada, August 1–6, 2004.
- Baker J W, Cornell C A. 2008. Vector-valued intensity measures for pulse-like near-fault ground motions[J]. *Eng Struct*, **30**(4): 1048–1057.
- Baltzopoulos G, Chioccarelli E, Iervolino I. 2015. The displacement coefficient method in near-source conditions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **44**(7): 1015–1033.
- Bertero V V, Mahin S A, Herrera R A. 1978. A seismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records[J].

- Earthq Eng Struct Dyn*, **6**(1): 31–42.
- Boore D M. 2001. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **91**(5): 1199–1211.
- Boore D M, Bommer J J. 2005. Processing of strong-motion accelerograms: Needs, options and consequences[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **25**(2): 93–115.
- Boore D M, Watson-Lamprey J, Abrahamson N A. 2006. Orientation-independent measures of ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **96**(4A): 1502–1511.
- Boore D M, Atkinson G M. 2008. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s[J]. *Earthq Spectra*, **24**(1): 99–138.
- Boore D M, Stewart J P, Seyhan E, Atkinson G M. 2014. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes[J]. *Earthq Spectra*, **30**(3): 1057–1085.
- Bradley B A. 2010. A generalized conditional intensity measure approach and holistic ground-motion selection[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **39**(12): 1321–1342.
- Bradley B A, Baker J W. 2015. Ground motion directionality in the 2010–2011 Canterbury earthquakes[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **44**(3): 371–384.
- 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.
- Campbell K W, Bozorgnia Y. 2014. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5% damped linear acceleration response spectra[J]. *Earthq Spectra*, **30**(3): 1087–1115.
- 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.
- Chang Z W, Sun X D, Zhai C H, Zhao J X, Xie L L. 2018. An empirical approach of accounting for the amplification effects induced by near-fault directivity[J]. *Bull Earthq Eng*, **16**(5): 1871–1885.
- Chen K C, Huang B S, Wang J H, Huang W G, Chang T M, Hwang R D, Chiu H C, Tsai C C P. 2001. An observation of rupture pulses of the 20 September 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake from near-field seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **91**(5): 1247–1254.
- Chen X Y, Wang D S. 2020. Multi-pulse characteristics of near-fault ground motions[J]. *Soil Dyn Earthq Eng*, **137**: 106275.
- Chen X Y, Wang D S, Zhang R. 2019. Identification of pulse periods in near-fault ground motions using the HHT method[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **109**(6): 2384–2398.
- Chioccarelli E, Iervolino I. 2013. Near-source seismic hazard and design scenarios[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **42**(4): 603–622.
- Chiou B S J, Youngs R R. 2008. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra[J]. *Earthq Spectra*, **24**(1): 173–215.
- Chiou B S J, Youngs R R. 2014. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra[J]. *Earthq Spectra*, **30**(3): 1117–1153.
- Chiu H C. 1997. Stable baseline correction of digital strong-motion data[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **87**(4): 932–944.
- Dai Z J, Li X J, Hou C L. 2014. Orientation-independent measures of ground motion made easy[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(3): 1268–1275.
- Dickinson B W, Gavin H P. 2011. Parametric statistical generalization of uniform-hazard earthquake ground motions[J]. *J Struct Eng*, **137**(3): 410–422.
- Hall J F, Heaton T H, Halling M W, Wald D J. 1995. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings[J]. *Earthq Spectra*, **11**(4): 569–605.
- 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.
- Huang B S, Chen K C, Huang W G, Wang J H, Chang T M, Hwang R D, Chiu H C, Tsai C C P. 2000. Characteristics of

- strong ground motion across a thrust fault tip from the September 21, 1999, Chi-Chi, Taiwan earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **27**(17): 2729–2732.
- International Conference of Building Official, 1997. *Uniform Building Code*[S]. Whittier, California: International Conference of Building Official; 1234–1253.
- Iwan W D, Moser M A, Peng C Y. 1985. Some observations on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerometer[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **75**(5): 1225–1246.
- Jayaram N, Lin T, Baker J W. 2011. A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance[J]. *Earthq Spectra*, **27**(3): 797–815.
- Ji K, Ren Y F, Wen R Z, Kuo C H. 2019. Near-field velocity pulse-like ground motions on February 6, 2018 M_w 6.4 Hualien, Taiwan earthquake and structural damage implications[J]. *Soil Dynam Earthq Eng*, **126**: 105–784.
- Kalkan E, Gülkan P. 2004. Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey[J]. *Earthq Spectra*, **20**(4): 1111–1138.
- Kalkan E, Kunnath S K. 2006. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings[J]. *Earthq Spectra*, **22**(2): 367–390.
- Kohrangi M, Vamvatsikos D, Bazzurro P. 2019. Pulse-like versus non-pulse-like ground motion records: Spectral shape comparisons and record selection strategies[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **48**(1): 46–64.
- Kuo C H, Huang J Y, Lin C M, Hsu T Y, Chao S H, Wen K L. 2019. Strong ground motion and pulse-like velocity observations in the near-fault region of the 2018 M_w 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake[J]. *Seismol Res Lett*, **90**(1): 40–50.
- Lin Y Y, Yeh T T, Ma K F, Song T R A, Lee S J, Huang B S, Wu Y M. 2018. Source characteristics of the 2016 Meinong (M_L 6.6), Taiwan, earthquake, revealed from dense seismic arrays: Double sources and pulse-like velocity ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **108**(1): 188–199.
- Luco N, Cornell C A. 2007. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions[J]. *Earthq Spectra*, **23**(2): 357–392.
- Ma K F, Wu Y M. 2019. Preface to the focus section on the 6 February 2018 M_w 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake[J]. *Seismol Res Lett*, **90**(1): 15–18.
- Makris N. 1997. Rigidity-plasticity-viscosity: Can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **26**(5): 571–591.
- Mavroeidis G P, Papageorgiou A S. 2003. A mathematical representation of near-fault ground motion[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **93**(3): 1099–1131.
- Mavroeidis G P, Dong G, Papageorgiou A S. 2004. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single degree-of-freedom (SDOF) systems[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **33**(9): 1023–1049.
- Melgar D, Bock Y, Sanchez D, Crowell B W. 2013. On robust and reliable automated baseline corrections for strong motion seismology[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **118**(3): 1177–1187.
- NIST. 2011. *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses*[R]. Gaithersburg: NEHRP Consultants Joint Venture: 1–18.
- Rowshandel B. 2006. Incorporating source rupture characteristics into ground-motion hazard analysis models[J]. *Seismol Res Lett*, **77**(6): 708–722.
- Rupakhety R, Sigurdsson S U, Papageorgiou A S, Sigbjörnsson R. 2011. Quantification of ground-motion parameters and response spectra in the near-fault region[J]. *Bull Earthq Eng*, **9**(4): 893–930.
- 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: 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.
- Shome N, Cornell C A, Bazzurro P, Carballo J E. 1998. Earthquakes, records, and nonlinear responses[J]. *Earthq Spectra*,

14(3): 469–500.

- Sigurðsson G, Rupakhety R, Rahimi S E, Olafsson S. 2020. Effect of pulse-like near-fault ground motions on utility-scale land-based wind turbines[J]. *Bull Earthq Eng*, **18**(3): 953–968.
- Somerville P G. 2003. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **137**(1/2/3/4): 201–212.
- Somerville P G. 2005. Engineering characterization of near fault ground motions[C/OL]//2005 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference. [2022-06-12]. <https://www.researchgate.net/publication/237522275>.
- 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.
- Spudich P, Chiou B S J. 2008. Directivity in NGA earthquake ground motions: Analysis using isochrone theory[J]. *Earthq Spectra*, **24**(1): 279–298.
- 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.
- Tarballi K. 2017. *Ground Motion Selection for Seismic Response Analysis*[D]. Canterbury: University of Canterbury: 87–96.
- Tian S Z, Gardoni P, Yuan W C. 2019. Coseismic deformation of the 6 February 2018 M_w 6.2 Hualien earthquake based on strong-motion recordings[J]. *Seismol Res Lett*, **90**(1): 108–117.
- Tothong P, Cornell C A, Baker J W. 2007. Explicit directivity-pulse inclusion in probabilistic seismic hazard analysis[J]. *Earthq Spectra*, **23**(4): 867–891.
- Tothong P, Cornell C A. 2008. Structural performance assessment under near-source pulse-like ground motions using advanced ground motion intensity measures[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **37**(7): 1013–1037.
- Wang D, Xie L L, Abrahamson N A, Li S Y. 2010. Comparison of strong ground motion from the Wenchuan, China, earthquake of 12 May 2008 with the Next Generation Attenuation (NGA) ground-motion models[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(5B): 2381–2395.
- Wang R J, Schurr B, Milkereit C, Shao Z G, Jin M P. 2011. An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong-motion records[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(5): 2029–2044.
- Wu Y M, Wu C F. 2007. Approximate recovery of coseismic deformation from Taiwan strong-motion records[J]. *J Seismol*, **11**(2): 159–170.
- 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.
- Zhai C H, Li C H, Kunnath S, Wen W P. 2018. An efficient algorithm for identifying pulse-like ground motions based on significant velocity half-cycles[J]. *Earthq Eng Struct Dyn*, **47**(3): 757–771.
- Zhao X F, Wen Z P, Xie J J, Xie Q C, Ching K E. 2021. Comparison of near-fault velocity pulse-like ground motions from the 2018 M_w 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake with the next generation attenuation (NGA)-West2 ground-motion models and directivity models[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **111**(2): 686–703.