

文章编号: 1000-4750(2016)08-0150-08

# 汶川地震和鲁甸地震的脉冲型地震动比较研究

曲 哲, 师 骁

(中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 河北, 三河 065201)

**摘 要:** 近年来我国在近断层地震动观测及其对建筑结构地震反应的影响方面开展了有意义的工作, 但我国大陆地区获取的近断层脉冲型地震动数量仍非常有限。2014 年发生在云南省鲁甸县的  $M_w 6.3$  级地震造成了与其震级不相称的严重伤亡和建筑震害, 除建筑抗震能力和次生灾害等因素之外, 破坏力强大的近断层脉冲型地震动也是重要的致灾因素。该文采用基于小波变换的脉冲识别方法, 分析了在鲁甸地震中获取的地震动记录的脉冲特性, 并与 2008 年汶川地震中的近断层脉冲型地震动进行了比较。结果显示, 与汶川地震中的脉冲型地震动相比, 鲁甸龙头记录速度脉冲周期较短, 但其速度峰值很大, 在 6 级左右的中等地震中非常少见。此外, 该记录的能量分布具有明显的方向性。但由于该站震中距很小, 其成因能否用向前方向性效应解释仍有待商榷。

**关键词:** 鲁甸地震; 汶川地震; 近断层脉冲型地震动; 小波变换; 脉冲识别; 向前方向性

中图分类号: TU312.1; P315.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.01.0039

## COMPARATIVE STUDY ON THE PULSE-LIKE GROUND MOTIONS IN THE WENCHUAN AND THE LUDIAN EARTHQUAKES

QU Zhe, SHI Xiao

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Sanhe, Hebei 065201, China)

**Abstract:** Although many efforts have been taken in the past years to study the near-fault ground motion observation and its effects on the seismic responses of building structures, the number of near-fault pulse-like ground motion records in mainland China is still very limited. The  $M_w 6.3$  Ludian earthquake in 2014 caused high fatality and severe building damages disproportional to its earthquake magnitude. Despite the insufficient seismic performance of the local buildings and the influence of secondary disasters, the significant near-fault pulse-like ground motion was another important factor. The velocity pulses in the Ludian Earthquake motion records are identified by a quantitative method incorporating wavelet transformation. The characteristics of these pulses are compared with those obtained in the 2008 Wenchuan Earthquake. The comparison shows the velocity pulse in the LLT record has much shorter period but higher peak velocity, which is rare for moderate earthquakes of magnitude about 6. Furthermore, directivity of the pulse energy distribution of the LLT record is observed. Further investigations are needed before attributing the significant velocity pulse to the forward directivity because the LLT station is too close to the epicenter.

**Key words:** Ludian Earthquake; Wenchuan Earthquake; near-fault pulse-like ground motion; wavelet transformation; pulse identification; forward directivity

近断层脉冲型地震动是指在近断层区域(通常指断层距小于 20 km 的区域)出现的含有单一强速度脉冲的地震动。该速度脉冲往往周期较长, 且蕴

含的能量占整个地震动能量的比重很大。多种原因可能导致在近断层区域形成脉冲型地震动。向前方向性效应(Forward directivity)和滑冲效应(Fling step)

收稿日期: 2015-01-14; 修改日期: 2015-06-02

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费面上项目(2013B13); “十二五”国家科技支撑计划课题项目(2015BAK17B03)

通讯作者: 曲哲(1983), 男, 陕西人, 副研究员, 工学博士, 从事建筑结构减隔震方面的研究(E-mail: quz@iem.ac.cn).

作者简介: 师骁(1989), 男, 四川人, 硕士生, 从事建筑结构隔震方面的研究(E-mail: shixiao3882@gmail.com).

是目前普遍认为的两个主要原因。其中,滑冲效应产生的速度脉冲会伴随明显的地表永久位移。向前方向性效应则是当断层破裂速度接近于土层剪切波速时,地震释放能量在破裂朝向的观测点不断累积而形成明显的长周期脉冲的现象<sup>[1]</sup>。在1994年美国北岭地震、1995年日本阪神地震和1999年我国台湾集集地震中均记录到由向前方向性效应产生的脉冲型地震动。近断层脉冲型地震动的形成机理相当复杂,除向前方向性效应和滑冲效应之外,其他一些因素也可能导致近断层脉冲型地震动,比如高体(asperity)的破裂可能在其周边场地产生速度脉冲。

地震工程界之所以关注近断层脉冲型地震动,是因为其包含的长周期强速度脉冲可能对现代抗震结构产生超出设计考虑范围的不利影响(如文献[2])。近年来我国学者开始重视对近断层地震动的研究(如文献[3-4]),从不同角度针对近断层脉冲型地震动对建筑结构的影响开展了有针对性的研究(如文献[5-9])。但这些研究往往采用国外数据库中的地震动数据(如PEER数据库)。

随着2007年底我国新一代数字地震观测系统的建成使用,我国大陆地区获取的地震动记录在数量和质量上都有大幅提高。特别是在2008年汶川地震及其之后的多次破坏性地震中,在近断层区域得到不少强震记录。这为研究我国近断层地震动的特性创造了条件。郭俊峰等利用文献[10]提出的基于小波变换的脉冲识别方法,在汶川地震强震记录中识别出3条脉冲型地震动,分别属于绵竹清平台(MZQ)、江油地震台(JYD)和江油含增台(JYH)<sup>[11]</sup>。利用同样的方法,谢俊举等<sup>[12]</sup>在汶川地震近断层区域5个台站的7个分量的地震记录中识别到强速度脉冲,并与集集地震和北岭地震中的脉冲型地震动进行了详细的比较。王东升等<sup>[13]</sup>通过人工观察速度时程记录的方式,认定汶川地震中5个台站的记录为脉冲型地震动,并从弹性和弹塑性反应谱的角度比较了汶川地震近断层脉冲型和非脉冲型地震动的特性。尽管因为信号处理与识别方法的差异,脉冲识别结果有所不同,上述工作对于认识我国大陆地区近断层脉冲型地震动的特性具有重要意义。

2014年云南鲁甸地震虽然震级不大,却造成严重的人员伤亡和财产损失。鲁甸地震灾区经济发展相对落后,房屋抗震能力较差等因素对产生如此严重的伤亡有很大的影响,但鲁甸地震本身的地震动

特性也是不容忽视的因素。通过与汶川地震的脉冲型地震动进行比较,本文分析鲁甸地震强震记录的速度脉冲特性。

## 1 鲁甸地震概况

鲁甸地震震中位于云南省昭通县龙头山镇(东经 $103.3^{\circ}$ ,北纬 $27.1^{\circ}$ )。根据中国地震局地球物理研究所陈运泰课题组的反演结果,主震矩震级 $M_w=6.3$ ,震源深度11 km,倾角 $87^{\circ}$ ,滑动角 $6^{\circ}$ ,为典型的走滑型地震。

此次地震中,国家强震动台网中心共获取74组三分量加速度记录。其中,仅在震中附近的鲁甸龙头台(LLT)、铅厂台(QQC)和马树台(QJX)记录到地面峰值加速度 $PGA>100\text{ cm/s}^2$ 的地面运动,且随着震中距的增大,地面运动的PGA迅速减小,如图1所示。通过与我国西部地区的经验衰减模型进行比较,文献[14]指出鲁甸地震具有地震动衰减快的特点。

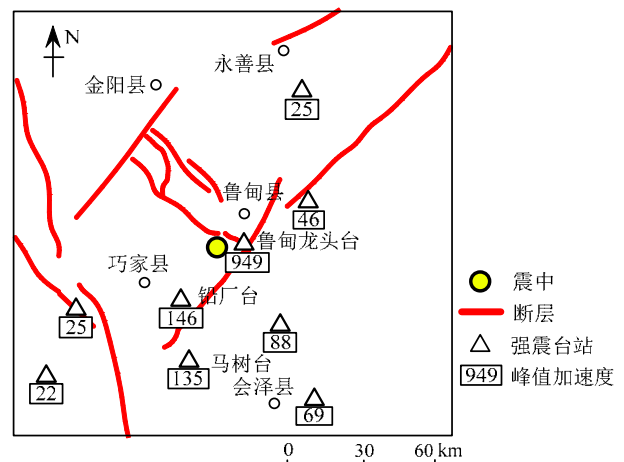


图1 鲁甸地震震中附近台站与断层分布

Fig.1 Strong motion stations and faults near Ludian

记录到高达 $949\text{ cm/s}^2$ 的PGA的龙头山镇是本次地震的宏观震中,建筑破坏严重。除了非抗震设防的土木结构和非约束砌体结构大量倒塌之外,抗震设防的砌体结构和钢筋混凝土框架结构也发生了严重的破坏乃至倒塌<sup>[15]</sup>。文献[15]通过按现行规范设计的钢筋混凝土框架的非线性地震反应分析表明,鲁甸地震中的鲁甸龙头记录的破坏力略小于2008年汶川地震中的什邡八角记录,而二者的破坏力均显著大于在2013年芦山地震中获取的PGA高达 $1005\text{ cm/s}^2$ 的宝兴地办记录。通过下文分析可以看出,鲁甸龙头记录蕴含显著的速度脉冲。这可以

从一个侧面解释其巨大的破坏力。

## 2 基于连续小波变换的速度脉冲识别

在各国学者使用的近断层地震动速度脉冲的各种识别方法中, Baker 提出的基于连续小波变换的识别方法是目前为数不多的不依赖于专家经验且无需人工干预的自动化识别方法<sup>[11]</sup>。本文以该方法为基础, 按以下步骤进行速度脉冲识别。

### 2.1 地震动记录的预处理

首先对国家强震动台网中心提供的原始加速度记录进行线性基线修正与带宽滤波(低通 25 Hz, 高通 0.1 Hz), 以使地面运动速度在地震结束后为零。地面运动速度时程由加速度时程积分得到。

然后对东西(EW)和南北(NS)方向的速度时程做旋转处理。理论上, 由向前方向性效应产生的速度脉冲在垂直断层方向最为显著。因此在考察近断层脉冲型地震动时经常将其旋转至垂直断层和平行断层方向。但是, 由于实际破裂断层的形状非常复杂, 对于近断层场地, 难以准确地定义垂直与平行断层方向。因此, 本文不人为地定义垂直或平行断层方向, 而是将地震动旋转至可能产生最大速度脉冲的方向。理论上可以先识别地震动在各个方向上的速度脉冲, 再找到最大脉冲所在的方向。但这样做计算量较大。文献[16]建议了一种简化方法。其基本步骤如下:

1) 分别对 EW 和 NS 方向的地震动记录进行连续小波变换, 得到小波变换系数矩阵  $[C_{NS}]_{s,l}$  和  $[C_{EW}]_{s,l}$ 。行号  $s$  和列号  $l$  分别表示小波基的尺度参数和位置参数。小波基定义如下式所示:

$$\Phi_{s,l}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \quad (1)$$

其中:  $\Phi$  为小波母函数;  $t$  为时间;  $s$  为缩放小波母函数的尺度参数;  $l$  为平移小波母函数的位置参数。

本文选取 4 阶 Daubechies 小波作为小波母函数。对于给定的小波基(即给定  $s$  和  $l$ ), 连续小波变换系数  $C_{s,l}$  通过下式所示的卷积计算。

$$C_{s,l} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-l}{s}\right) \dot{x}_g(t) dt \quad (2)$$

其中,  $\dot{x}_g$  为地面运动的速度时程。

2) 计算 EW 和 NS 两个方向上小波变换系数矩阵对应元素的平方和, 并找到使平方和最大的行、列位置, 记为  $s_m$  和  $l_m$ , 小波变换系数矩阵中相应位置的元素记为  $C_{EW,m}$  和  $C_{NS,m}$ 。

3) 按式(3)计算最大脉冲方向与正东方向的夹角  $\theta$  (逆时针为正), 并将地震动记录旋转至该方向。由此得到的最大脉冲方向实际为小波变换系数绝对值最大的方向。

$$\theta = \arctan\left(\frac{C_{NS,m}}{C_{EW,m}}\right) \quad (3)$$

### 2.2 速度脉冲的提取

首先对旋转至最大脉冲方向上的速度时程记录进行一次连续小波变换, 确定小波变换系数矩阵中绝对值最大的元素所对应的尺度参数  $s_1$  和位置参数  $l_1$ , 计算其对应的小波基。原速度时程减去该小波基即得到第一次提取的剩余速度时程。

对该剩余速度时程记录在  $[l_1-s_1/2, l_1+s_1/2]$  窗口范围内的部分再反复进行 9 次提取, 将每次提取得到的小波基与第 1 次提取的小波基相加, 即为最终提取的速度脉冲, 原速度时程减去该速度脉冲即为最终的剩余速度时程。

### 2.3 脉冲型地震动的判断

文献[11]通过线性回归分析建议了用于自动判别脉冲型地震动的脉冲指标, 本文记作  $I_{p1}$ 。它是剩余速度时程与原速度时程的地面峰值速度之比 ( $PGV_r$ ) 和能量之比 ( $E_r$ ) 的函数, 如式(4)所示。在计算  $E_r$  时, 速度时程的能量取为速度平方对时间的积分。对于  $PGV$  不小于 30 cm/s 的地震动记录, 当  $I_{p1} > 0.85$  时, 认为其为脉冲型地震动, 当  $I_{p1} < 0.15$  时为非脉冲型地震动, 在 0.15  $I_{p1}$  0.85 范围内为过渡区。

$$I_{p1} = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 20.5E_r + 14.6PGV_r}} \quad (4)$$

为进一步提高识别的准确性和自动化程度, 文献[16]提出了以  $PGV$  和由式(5)定义的  $PC$  为参数的改进的识别指标, 本文记作  $I_{p2}$ 。该指标大于零时为脉冲型, 小于零时为非脉冲型。

$$PC = 0.63 \cdot PGV_r + 0.777 \cdot E_r \quad (5)$$

## 3 鲁甸和汶川地震的脉冲型地震动

### 3.1 基本特性

采用上述方法, 对分别在鲁甸地震和汶川地震中获取的  $PGA > 100$  cm/s<sup>2</sup> 的 3 条和 22 条地震动记录进行速度脉冲识别。根据文献[11]的判别准则, 共有 5 条地震动记录被判定为脉冲型地震动。其中, 对于汶川地震, 绵竹清平、德阳白马、江油含增和江油地震台等 4 个台站的记录被判定为脉冲型地震

动。这 4 个台站包含文献[10]所判定的 3 个台站，是文献[12]与文献[13]分别判定的 5 个台站的交集。对于鲁甸地震，仅位于宏观震中的鲁甸龙头台的记录为脉冲型地震动。

根据文献[16]建议的判别准则，对于汶川地震，只有绵竹清平和德阳白马被判定为脉冲型地震动，而江油含增和江油地震台记录则被排除在外。对于鲁甸地震，仍只有鲁甸龙头记录为脉冲型。

通过图 2 对文献[11]和文献[16]中判别准则的比较可以看出，二者在很大范围内给出一致的判别结果，但在边界区域有所差别。鲁甸地震中的强震记录均远离边界区域，其脉冲或非脉冲特征非常明显。但汶川地震中的德阳白马、江油含增和江油地震台记录则因为  $PGV$  比较接近 30 cm/s 的限值而靠近脉冲判别的边界区域。其中江油含增和江油地震台记录恰好被排除在文献[16]的判别边界之外。该判别边界是以美国西部地区强震记录的统计分析为基础的，用于我国地震动记录的脉冲判别时未必完全准确。为扩大比较范围，下文仍将按文献[11]准则判定为脉冲型的 5 条记录均纳入比较范围。

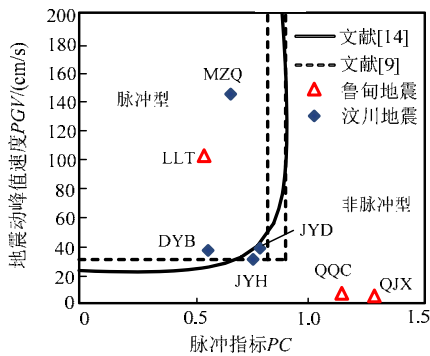


图 2 脉冲型地震动判别结果

Fig.2 Identification of pulse-like ground motions

这些脉冲型地震动的基本特性如表 1 和图 3 所示。表 1 中， $PGA$ 、 $PGV$  为原地震动参数。 $PGV_p$  为按第 2 节方法提取的速度脉冲的峰值速度，脉冲周期  $T_p$  为按照文献[11]建议的以正弦波匹配的方法得到的第 1 次提取的小波基的周期。采用文献[11]建议的累积速度平方(CVS)表示脉冲能量，按式(6)

表 1 鲁甸地震和汶川地震中的脉冲型地震动的基本参数

Table 2 Properties of near-fault pulse-like ground motions in the Ludian and the Wenchuan earthquakes

| 台站         | 地震 | 震级        | 断层距/km | $PGA/(cm/s^2)$ | $PGV/(cm/s)$ | $I_{p1}$ | $I_{p2}$ | $PGV_p/(cm/s)$ | $T_p/s$ | $CVS/(J/kg/Hz)$ |
|------------|----|-----------|--------|----------------|--------------|----------|----------|----------------|---------|-----------------|
| 鲁甸龙头(LLT)  | 鲁甸 | $M_w 6.3$ | 0.7    | 1055           | 108.0        | 1.0000   | 19.86    | 108.0          | 0.70    | 0.35            |
| 绵竹清平(MZQ)  | 汶川 | $M_w 7.9$ | 1.0    | 799            | 143.8        | 0.9991   | 19.72    | 69.4           | 9.10    | 1.62            |
| 德阳白马(DYB)  | 汶川 | $M_w 7.9$ | 41.9   | 134            | 36.2         | 0.9999   | 3.12     | 32.6           | 6.58    | 0.31            |
| 江油含增(JYH)  | 汶川 | $M_w 7.9$ | 11.6   | 368            | 30.1         | 0.9920   | -1.04    | 25.3           | 9.10    | 0.22            |
| 江油地震台(JYD) | 汶川 | $M_w 7.9$ | 18.8   | 419            | 37.7         | 0.9785   | -0.42    | 25.0           | 8.12    | 0.19            |

计算。它具有单位质量单位频率上的能量的量纲，即  $J/kg/Hz$ 。

$$CVS = \int_0^{t_0} \dot{x}_p^2 dt \quad (6)$$

其中： $\dot{x}_p$  为脉冲速度时程； $t_0$  为地震动结束的時刻。

值得注意的是，鲁甸龙头记录所包含的速度脉冲的峰值速度  $PGV_p$  高达 108.0 cm/s，与原速度时程的  $PGV$  相同，远高于汶川地震中 4 条脉冲型地震动的  $PGV_p$ 。尽管如此，由于其脉冲周期  $T_p$  仅为

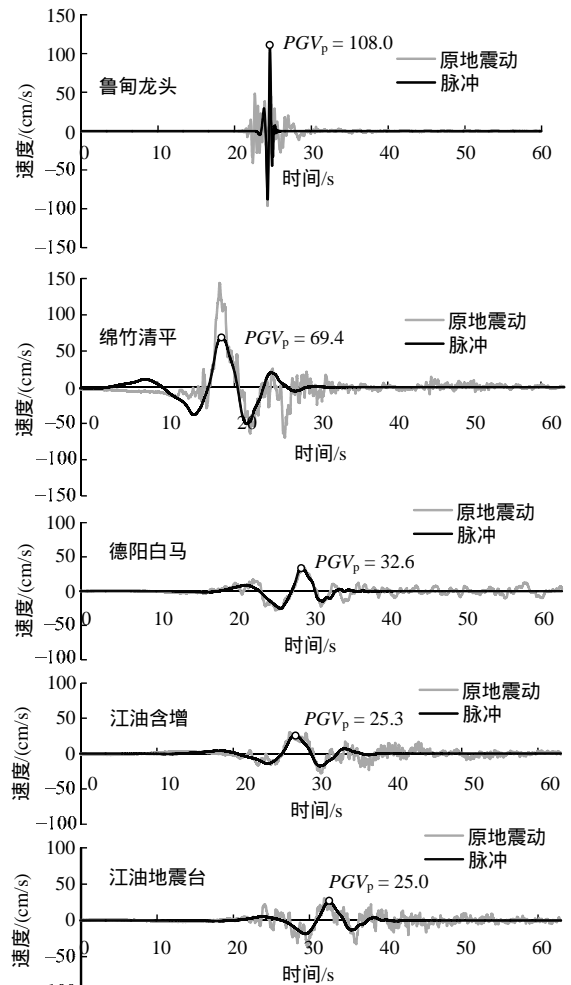


图 3 鲁甸、汶川地震中脉冲型地震动的速度时程

Fig.3 Velocity time histories of pulse-like ground motions in the Ludian and the Wenchuan earthquakes

0.7 s, 远远小于汶川地震中的 4 条脉冲型地震动的脉冲周期(6.58 s~9.10 s), 该脉冲所蕴含的能量  $E_p$  反而小于汶川地震中绵竹清平记录的速度脉冲的能量。

图 4 和图 5 分别将上述识别得到的 5 条脉冲型地震动的  $PGV$  和  $T_p$  与文献[11]基于 PEER 数据库给出的 91 条脉冲型地震动作了比较。

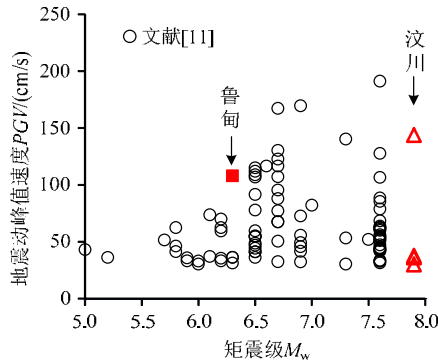


图 4 脉冲型地震动  $PGV$  与震级的关系

Fig.4  $PGV$  versus earthquake magnitude for pulse-like ground motions

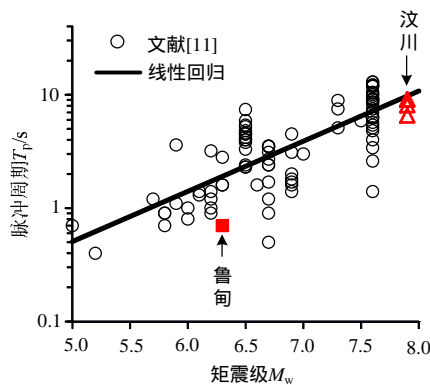


图 5 脉冲型地震动脉冲周期  $T_p$  与震级的关系

Fig.5 Pulse period versus earthquake magnitude for pulse-like ground motions

对于  $M_w=6.3$  的鲁甸地震而言, 鲁甸龙头记录的  $PGV$  明显高于平均水平。与此同时, 虽然鲁甸与汶川地震中脉冲型地震动的脉冲周期基本符合与震级正相关的关系, 但鲁甸龙头记录的脉冲周期明显低于线性回归线。可见, 鲁甸龙头记录具有  $PGV$  大且脉冲周期短的特点, 在 6 级左右的中等地震中比较少见。

### 3.2 速度脉冲的方向性

图 6 在鲁甸地震和汶川地震的烈度图上标出了当地的断层分布以及上述脉冲型地震动的最大脉冲方向, 并以箭头的长度标示了各个速度脉冲的峰值速度  $PGV_p$ 。汶川地震的发震断层走向比较明确,

自西南向东北方向破裂。上述记录到脉冲型地震动的 4 个台站按震中距由小到大排序为绵竹清平 德阳白马 江油含增 江油地震台。从图 3 的速度时程中也可以观察到相似的速度脉冲出现的先后顺序。除断层距较大的德阳白马台之外, 其他 3 个台站的最大脉冲方向比较一致, 且都与断层走向大致垂直, 表现出明显的向前方向性效应。

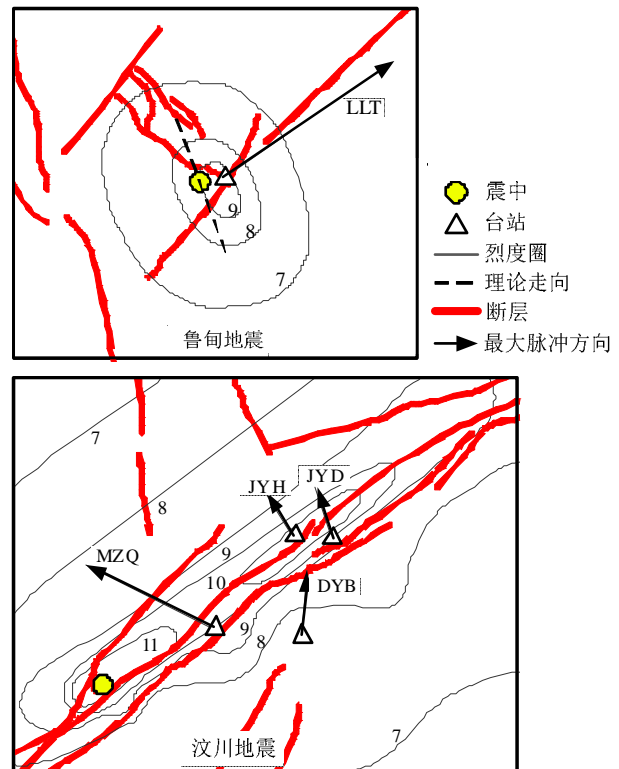


图 6 获得近断层地震动记录的台站及最大脉冲方向

Fig.6 Stations that obtained pulse-like ground motion records and the direction of maximum pulse

鲁甸地震的断层走向相对不明显。一般认为其破裂面为北西-南东走向<sup>[14]</sup>, 如图 6 中虚线所示。鲁甸龙头记录的最大脉冲方向与该理论走向基本垂直。这可能与向前方向性效应有关。但需要指出的是, 根据向前方向性效应中的波动累积机制, 在距离断层很近但距离震中有一定距离的场地容易形成强速度脉冲。然而鲁甸龙头台的震中距不足 15 km, 在如此短的距离内何以形成  $PGV$  高达 108 cm/s 的强速度脉冲, 仍有待进一步分析。

虽然本文采用的数据基线纠正与滤波方法会同时移除近断层地震动记录中可能存在的由滑冲效应产生的永久位移, 但从图 3 中的速度时程波形可以看出, 鲁甸龙头记录的速度脉冲与滑冲效应关系不大。



图 6 中给出的最大脉冲方向是按照本文 2.1 节介绍的简化方法得到的。图 7 则给出了将地震动记录旋转至不同方向时的累积速度平方 CVS, 同时标出了按简化方法计算的最大脉冲方向。

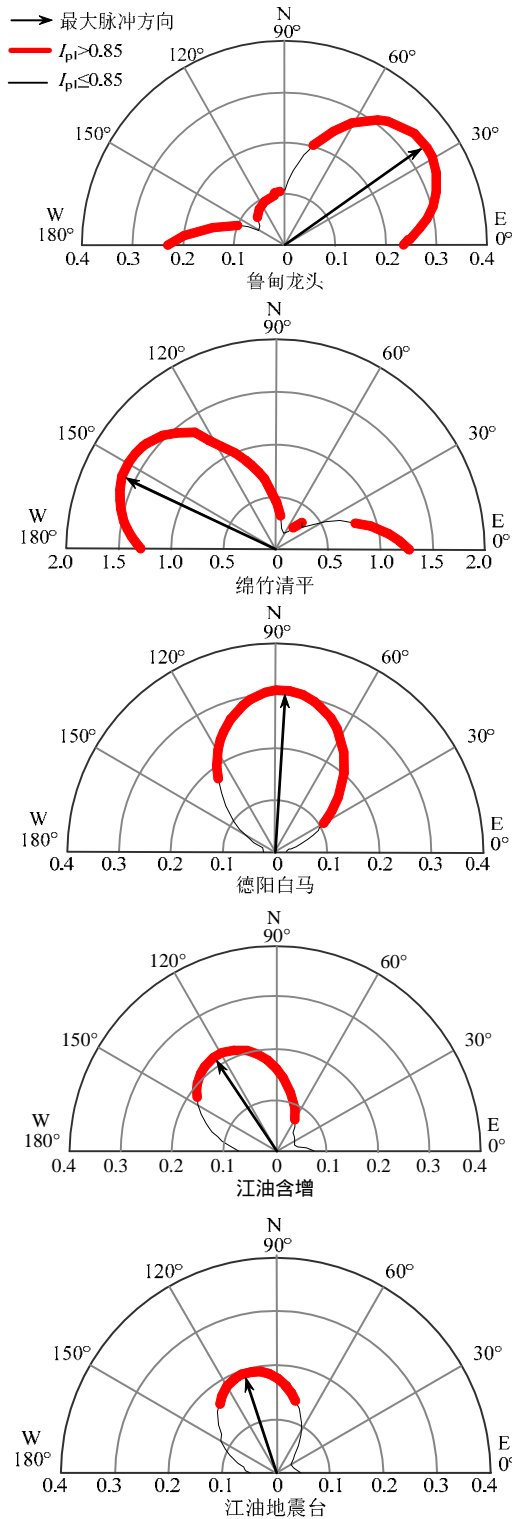


图 7 脉冲型地震动累积速度平方的空间分布  $(J/kg/Hz)$

Fig.7 Spatial distribution of CVS of pulse-like ground motions

可见, 2.1 节介绍的简化方法能够有效地确定使能量最大的方向。对于本文识别的 5 个台站的地震动记录, 其 CVS 随空间角度的分布基本呈哑铃形, 均表现出明显的方向性。

在图 6 中同时用粗实线标示出使脉冲指标  $I_p > 0.85$ , 即可被识别为脉冲型地震动的方向。对于鲁甸龙头记录, 在与最大脉冲方向的正交方向上, 亦即与断层走向大致平行的方向上, 也可被识别为脉冲型地震动。绵竹清平记录在与最大脉冲方向大致呈  $100^\circ$  夹角的方向上也可能被识别为脉冲型地震动, 但其能量远小于最大脉冲方向。

### 3.3 反应谱特性

图 8 将鲁甸龙头和绵竹清平记录的拟加速度反应谱与我国现行规范 8 度罕遇地震(二类场地)对应的弹性反应谱做了比较。绵竹清平记录在各个周期段的拟加速度谱值普遍大于规范反应谱。鲁甸龙头记录的拟加速度谱在周期大于 2 s 的范围内小于规范谱, 但当周期小于 2 s 时, 其谱值远远大于规范 8 度罕遇地震的弹性谱(鲁甸县的抗震设防烈度为 7 度)。鲁甸地震的矩震级仅为 6.3, 属于中等地震。但在此次地震中记录到如此强烈的地震动, 这一现象值得注意。

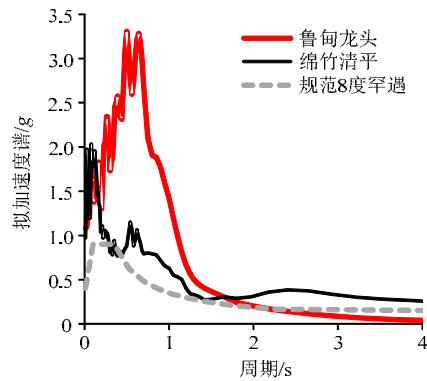


图 8 拟加速度反应谱(5%阻尼比)

Fig.8 Pseudo acceleration spectra (5% damping)

在基于能量的抗震设计方法中, 常采用地震输入能量谱或能量等效速度谱作为地震输入<sup>[17]</sup>。地震输入能量  $E_I$  是与地面运动加速度对应的惯性力在单自由度体系上所做的功, 按式(7)计算。通过动能的计算公式可将其转换为具有速度量纲的能量等效速度  $V_E$ , 如式(8)所示。

$$E_I = -\int_0^{t_0} m\ddot{x}_g \dot{x} dt \quad (7)$$

式中:  $m$  为结构质量;  $\ddot{x}_g$  为地面运动加速度;  $\dot{x}$  为结构的速度反应;  $t_0$  为地震动结束的时刻。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E_1}{m}} \quad (8)$$

图9比较了鲁甸龙头和绵竹清平记录的等效能量速度谱。图中同时给出了原时程和脉冲时程的等效能量速度谱,并与日本基于能量的抗震设计中采用的第二水准能量谱进行了比较。日本的第二水准在设计谱值方面略高于我国8度罕遇地震水平。对于常见的非脉冲型地震动,能量谱在长周期段会有明显的衰减,而设计谱在长周期段取定值的做法一般被认为是偏于保守的。但对于像绵竹清平记录这样的脉冲型地震动,长周期段的能量谱值甚至会明显高于设计谱。与此不同,鲁甸龙头记录长周期成分并不显著,而是在中短周期段有明显的脉冲,能量也主要集中在这一周期段。

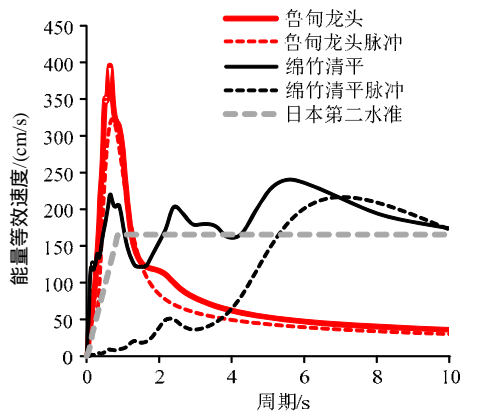


图9 能量等效速度谱(10%阻尼比)

Fig.9 Energy-equivalent velocity spectra (10% damping)

文献[18]通过分析不同层数的钢框架结构在标准正弦脉冲作用下的非线性地震反应指出,脉冲周期与结构基本周期之比是影响建筑结构非线性地震反应的重要因素。但对于实际脉冲型地震动,脉冲周期的确定存在困难。以图9为例,鲁甸龙头记录的等效能量速度谱峰值对应的周期为0.64s,与上文采用文献[11]的方法确定的脉冲周期 $T_p$ 比较接近;但对于绵竹清平记录,其等效能量速度谱峰值对应的周期为5.5s,明显小于其脉冲周期 $T_p$ (9.1s)。尽管如此,与现有的其他特征周期指标相比,本文采用的脉冲周期 $T_p$ 在反映脉冲型地震动的频谱特性方面仍有优势。例如,文献[19]针对近断层地震动提出了基于修正的有效峰值速度( $IEPV$ )和修正的有效峰值加速度( $IEPA$ )的特征周期 $T_g$ ,如式(9)所示。其中, $IEPV$ 和 $IEPA$ 分别是速度反应谱和加速度反应谱在各自峰值所对应的周期附近( $\pm 0.2$ s)的谱值的平均值。

$$T_g = 2\pi \frac{IEPV}{IEPA} \quad (9)$$

对于鲁甸龙头和绵竹清平记录,按式(9)计算的特征周期分别为0.64s和0.95s。可见,对于绵竹清平记录,该特征周期并未正确地反映其显著的长周期成分。

## 4 结论

基于小波变换的脉冲识别结果显示,2014年 $M_w 6.3$ 级鲁甸地震中获取的鲁甸龙头记录是典型的近断层脉冲型地震动。通过与汶川地震中的脉冲型地震动进行对比分析,对该记录的脉冲特性主要有如下认识:

(1) 该记录的速度脉冲周期短,基本符合脉冲周期随震级减小而减小的规律,但其巨大的速度幅值在中等地震中较为少见。

(2) 与汶川地震中的近断层脉冲型地震动类似,鲁甸龙头记录的脉冲能量分布关于断层走向具有明显的方向性。但鲁甸地震断层破裂短,且鲁甸龙头台震中距很小。该脉冲型地震动的成因能否用向前方向性效应解释值得商榷。

(3) 鲁甸龙头记录的拟加速度反应谱值在短周期段远超我国规范设计谱,其速度脉冲对中短周期结构的输入能量也远超日本第二水准抗震设计水平。这从地震动输入的方面解释了鲁甸地震宏观震中建筑震害严重的现象。

## 参考文献:

- [1] Somerville P G, Smith N F, Graves R W, Abrahamson N A. 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.
- [2] Hall J F, Heaton T H, Halling M W, Wald D I. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings [J]. *Earthquake Spectra*, 1995, 11(4): 569-605.
- [3] 王海云, 谢礼立. 近断层强地震动的特点[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(12): 2070-2076.  
Wang Haiyun, Xie Lili. Characteristics of near-fault strong ground motions [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(12): 2070-2076. (in Chinese)
- [4] 刘启方, 袁一凡, 金星, 丁海平. 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.  
Liu Qifang, Yuan Yifan, Jin Xing, Ding Haiping. Basic characteristics of near-fault ground motion [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese)

- [5] 符蓉, 叶昆, 李黎. LRB 基础隔震结构在近断层脉冲型地震作用下的碰撞响应[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 II): 298-302.  
Fu Rong, Ye Kun, Li Li. Seismic response of LRB base-isolated structures under near-fault pulse-like ground motions considering potential pounding [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Suppl II): 298-302. (in Chinese)
- [6] 周靖, 周飞, 蔡健, 王里佳. 脉冲型竖向地震作用下大跨度 RC 带腋撑框架结构弹塑性动力响应分析[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 113-119.  
Zhou Jing, Zhou Fei, Cai Jian, Wang Lijia. Seismic elastic-plastic response of long-span RC frame structure with haunched members subjected to pulse-like vertical ground motions [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(6): 113-119. (in Chinese)
- [7] 江义, 杨迪雄, 李刚. 近断层地震动向前方向性效应和滑冲效应对高层钢结构地震反应的影响[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 103-110.  
Jiang Yi, Yang Dixiong, Li Gang. Effects of forward directivity and fling step of near-fault ground motions on seismic responses of high-rise steel structure [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9): 103-110. (in Chinese)
- [8] 杨迪雄, 赵岩. 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, 2010, 32(5): 579-587.  
Yang Dixiong, Zhao Yan. 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, 2010, 32(5): 579-587. (in Chinese)
- [9] 韩淼, 段燕玲, 孙欢, 绳雯. 近断层地震动特征参数对基础隔震结构地震响应的影响分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 8-13.  
Han Miao, Duan Yanling, Sun Huan, Sheng Wen. Influence of characteristics parameters of near-fault ground motions on the seismic responses of base-isolated structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 8-13. (in Chinese)
- [10] Baker J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.
- [11] 郭俊锋, 董银峰, 李英民, 等. 汶川地震强震记录处理及速度脉冲识别[J]. 土木建筑与环境工程学报, 2010, 32(增刊 2): 133-135.  
Guo Junfeng, Dong Yinfeng, Li Yingmin, et al. The pulse identification of strong motions in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2010, 32(Suppl 2): 133-135. (in Chinese)
- [12] 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.  
Xie Junju, Wen Zengping, Li Xiaojun, et al. Analysis of velocity pulses for near-fault strong motions from the Wenchuan earthquakes based wavelet methods [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 1963-1972. (in Chinese)
- [13] 王东升, 李晓莉, 孙治国, 等. 汶川地震动弹性和弹塑性反应谱分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(2): 43-54.  
Wang Dongshen, Li Xiaoli, Sun Zhiguo, et al. Elastic and elastoplastic response spectra of the Wenchuan earthquake ground motions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(2): 43-54. (in Chinese)
- [14] 冀昆, 温瑞智, 崔建文, 等. 鲁甸  $M_s6.5$  级地震强震动记录及震害分析[J]. 震灾防御技术, 2014, 9(3): 325-339.  
Ji Kun, Wen Ruizhi, Cui Jianwen, et al. Observation of strong motion and damage investigation for  $M_s6.5$  Ludian earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(3): 325-339. (in Chinese)
- [15] 陆新征, 林旭川, 田源, 叶列平. 汶川、芦山、鲁甸地震极震区地面运动破坏力对比及其思考[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 1-7.  
Lu Xinzheng, Lin Xuchuan, Tian Yuan, Ye Lieping. Comparison and discussion on destructive power of the ground motions recorded in the hardest-hit regions of Wenchuan, Lushan and Ludian earthquakes [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 1-7. (in Chinese)
- [16] Shahi S K, Baker J W. An efficient algorithm to identify strong velocity pulses in multi-component ground motions [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2456-2466.
- [17] 秋山宏. 基于能量平衡的建筑结构抗震设计方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 10-25.  
Akiyama H. Earthquake-resistant design method for buildings based on energy balance [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 10-25. (in Chinese)
- [18] Kalkan E, Kunnath S K. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 367-390.
- [19] Yang D X, Pan J W, Li G. Non-structure-specific intensity measure parameters and characteristic period of near-fault ground motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, 38(11): 1257-1280.