

基于合成地震动的2014年鲁甸 M_s 6.5地震 场地效应分析*

魏勇¹, 崔建文², 王秋良^{1*}, 沈雨忆¹

(1. 中国地震局地震研究所 地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430000; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 鲁甸 M_s 6.5地震造成了严重的人员伤亡与工程结构破坏, 选取记录到该地震强震动的迤车强震台和龙头山强震台。利用随机有限断层法, 合成了这2个台的地震动时程, 并利用土层等效线性化法, 分析了龙头山强震台的场地效应。结果表明, 龙头山强震台场地存在较强的非线性效应, 对0.08~5 s周期范围内的地震动存在较强的放大作用。结合龙头山镇的建筑物与场地情况, 分析认为地震动的场地效应是造成该区域严重震害的重要原因之一。

关键词: 鲁甸地震; 随机有限断层法; 等效线性化; 场地效应; 地震动

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)01-0032-06

0 引言

2014年8月3日16时30分, 云南省昭通市鲁甸县发生 M_s 6.5地震, 该地震造成鲁甸县及其周边地区严重的人员伤亡和工程结构破坏。位于云南和四川省的80多个强震台获取了主震的强震动记录。震中距约36 km的迤车强震台, 其强震动记录最大峰值加速度为88.2 gal。而震中距约4.4 km的龙头山强震台, 其强震动记录最大峰值加速度达948.5 gal, 此记录是我国在极震区内获取的最大地面峰值加速度(崔建文等, 2014)。

地震所产生的强地面运动是导致构筑物地震破坏的主要原因。强震动主要受震源、传播路径、场地因素的影响。震源动力学反演结果显示, 鲁甸 M_s 6.5地震属于高应力降的浅源地震, 断层破裂接近地表, 是产生较高地面峰值加速度的因素之一(刘成利等, 2014; 张振国等, 2014; 张勇等, 2014)。龙头山镇在此次地震中人员伤亡最多, 构筑物破坏最严重。钻孔与物探结果显示, 其场地存在一洪积扇, 土层较为软弱, 局部场地效应加重了震害(庞卫东等, 2016)。

如何能真实可靠地估算此次地震的场地效应, 为重建工作提供可靠的建议, 是需要关注的问题。

本文采用能反映地震震源特性与地震动传播特点的随机有限断层法, 合成此次地震中迤车与龙头山2类典型场地的地震动时程。将合成的龙头山强震台基岩地震动时程作为输入地震动, 进行场地土层等效线性化, 分析此次地震中龙头山强震台的场地效应。最后结合龙头山镇的场地情况与代表性建筑物的自振特征, 进一步探讨此次地震产生重大伤亡的原因。

1 随机有限断层法合成地震动

随机有限断层法是一种广泛应用的地震动合成方法。其基本原理是将大断层划分为数个小断层, 将小断层看作点源模型, 计算每一个点源在目标场点的地震动, 考虑位错上升时间与破裂时间对于加速度时程的延迟, 累加所有子断层在场点的地震动, 得到整个断层在场点的地震动, 其方向与模拟目标发震断层走向一致(Boore, 1983; Motazedian, Atkinson, 2005)。王国新和史家平(2009)、崔建文等(2008)和王俊等(2012)分别利用随机有限断层法合成了汶川地震、2001年云南永胜 $M_6.0$ 地震、1979年江苏溧阳 $M_6.0$ 地震的地震动时程。结果表明, 随机有限断层法较好地反映了震源的主要特征, 适用于中等强度及以上地震的地震动合成。

* 收稿日期: 2017-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41572354)资助.

✉ 通讯作者: 王秋良(1972-), 副研究员, 主要从事工程地震方面的研究工作. E-mail: wql0703@163.com.

1.1 震源参数计算

利用随机有限断层法合成地震动时，断层面积 S 与震级 M 的经验关系为（王国新，史家平，2009）：

$$\lg S = -3.49 + 0.91M \tag{1}$$

为了方便子断层的划分，本文取断层沿倾向的宽度 $W = 12\text{ km}$ ，结合（1）式与震源动力学的反演结果，取断层沿走向的长度 $L = 18\text{ km}$ 。

子断层尺度与震级的经验关系式为（崔建文等，2008）：

$$\lg \Delta L = -2 + 0.4M \tag{2}$$

从（2）式可得， $\Delta L = 3\text{ km}$ ，沿断层走向与倾向划分的子断层个数分别为： $N_L = 6$ ， $N_W = 4$ ，子断层总数为 24。

已知子断层尺度（ ΔL ），应力降（ $\Delta\sigma$ ），则子震所释放的地震矩计算公式为：

$$M_E = \Delta\sigma \cdot \Delta L^3 \tag{3}$$

从式（3）可得， $M_E = 7.56 \times 10^{16}\text{ N}\cdot\text{m}$ 。子震个数按照下式计算：

$$N_i = \frac{M_0}{M_E} \tag{4}$$

式中： M_0 为大震所释放标量地震矩； M_E 为每个子断层作为子震破裂时释放的地震矩。

从（4）式计算得子震个数为 26，子震数量大于子断层数量，说明个别子断层发生过多次数破裂。子断层的划分与滑移分布情况如图 1 所示。

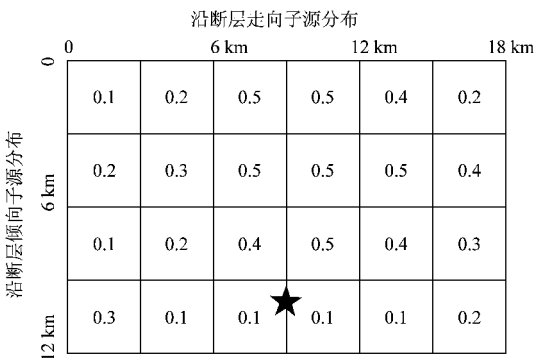


图 1 子断层划分及其滑移分布（方格代表子断层，数值为其滑移量，单位：m）

Fig. 1 Sub-fault division and its slip distribution in finite fault model (the grid represents the sub-fault, and the number is the slip, unit: m)

地震动路径持时和几何扩散采用 Beresnev 和 Atkinson（1998）提出的模型：

$$P(R) = \begin{cases} 0 & (R < 10\text{ km}) \\ 0.16R & (10 \leq R \leq 70\text{ km}) \\ -0.03R & (70 \leq R < 130\text{ km}) \\ 0.04R & (R \geq 130\text{ km}) \end{cases} \tag{5}$$

$$G(R) = \begin{cases} 1/R & (R \leq 70\text{ km}) \\ 1/R^0 & (70 < R \leq 130\text{ km}) \\ 1/R & (R > 130\text{ km}) \end{cases} \tag{6}$$

式中： $P(R)$ 为路径持时模型； $G(R)$ 为几何扩散模型； R 为震源距。

鲁甸地区 S 波品质因子采用苏有锦等（2006）提出的模型。震源及其他相关参数如表 1 所示。

表 1 震源参数
Tab. 1 Source parameters

震源参数	数值
矩震级 M_W （刘成利等，2014）	6.1
震中位置	(103.37°E, 27.08°N)
断层走向和倾角/（°）	162, 86
大断层尺度 $L \times W/\text{km}^2$	18 × 12
断层类型	走滑型
断层上界面深度 h/km	1
大震标量地震矩 $M_0/(\text{N}\cdot\text{m})$ （刘成利等，2014）	1.97×10^{18}
应力降 $\Delta\sigma/\text{bar}$ （刘成利等，2014）	28
子断层尺度 $(\Delta L \times \Delta W)^2/\text{km}^2$	3 × 3
子震个数 $(N_i \times N_j)$	6 × 4
子震个数	26
Kappa 值（王晓荣等，2011）	0.04
Q 值模型（苏有锦等，2006）	$Q_f = 199.6f^{0.44}$
地震动路径持时	0 ($R < 10\text{ km}$)
	0.16R ($10 \leq R \leq 70\text{ km}$)
	-0.03R ($70 \leq R < 130\text{ km}$)
	0.04R ($R \geq 130\text{ km}$)
几何扩散模型	1/R ($R \leq 70\text{ km}$)
	1/R ⁰ ($70 < R \leq 130\text{ km}$)
	1/R ($R > 130\text{ km}$)
子震标量地震矩 $M_e/(\text{N}\cdot\text{m})$	7.56×10^{16}

1.2 台站参数

鲁甸地震发生时，分布于云南与四川省的 80 余个强震台获取了此次地震的强震动记录。

本文选取龙头山、迺车 2 个典型场地的强震台为研究对象，基于合成地震动和土层场地等效线性化的方法，比较分析龙头山强震台的局部场地效应，台站基本参数如表 2 所示。

表 2 台站参数
Tab. 2 Station parameters

台站名称	台站代码	场地土类别
迺车强震台	053HYC	基岩
龙头山强震台	053LLT	土层

1.3 迺车强震台地震动合成

场地强震动观测记录包含 2 个水平分量（东西、南北向），将其旋转到沿断层走向和垂直断层走向的地震动（合成地震动方向沿断层走向）。

利用表 1、2 所示的震源、台站参数，合成了

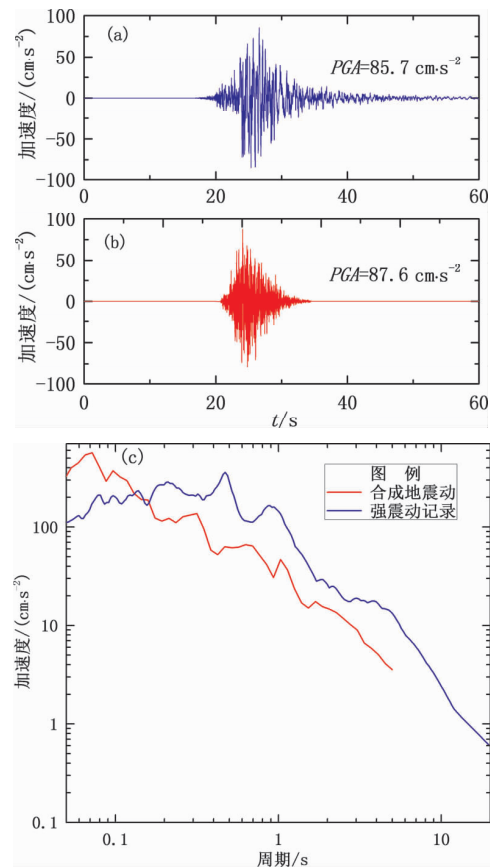


图 2 迺车强震台观测记录 (a)、合成地震动 (b) 及二者反应谱比较 (c)

Fig. 2 The strong motion observation (a), simulated ground motion (b) records at Yiche strong motion station and the comparison of response spectrums of these two records (c)

迺车强震台的地震动时程（图 2a、b）。比较基岩场地地震动（PGA 为 85.7 cm/s²）与沿断层走向地震动（PGA 为 87.6 cm/s²）可知，两者的最大峰值加速度相近。图 2c 所示，两者的加速度反应谱拟合程度也较高。迺车强震台地震动合成结果说明，表 1 中所选取的参数是合理的，且迺车强震台局部场地效应不强。因此，利用上述参数合成龙头山强震台基岩场地强震动，其结果也应是合理的。

1.4 龙头山强震台基岩地震动合成

在不考虑局部场地效应的情况下，利用随机有

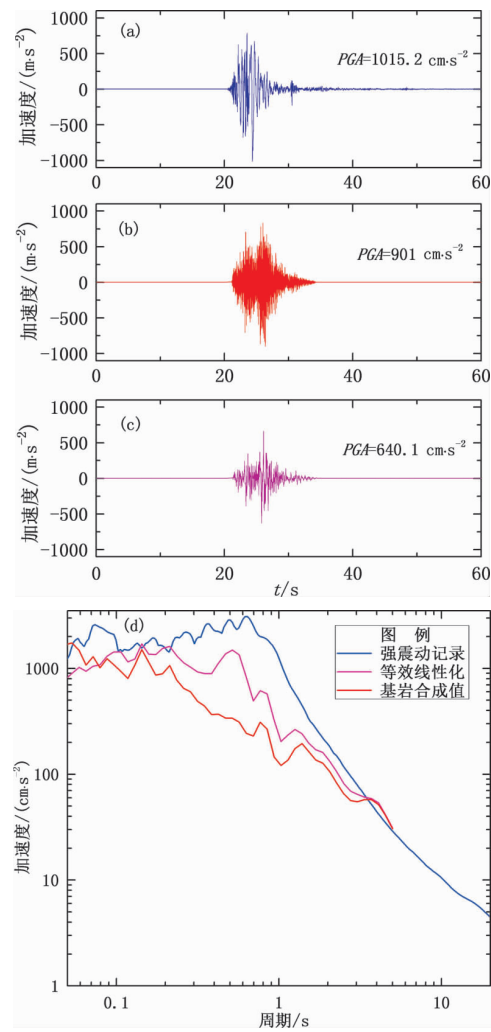


图 3 龙头山强震台沿断层走向强震动记录 (a)、基岩合成值 (b)、等效线性化值 (c) 及三者的反应谱比较 (d)

Fig. 3 The strong ground motion along fault (a), the simulated bed rock value (b) equivalent linearization value (c) at Longtoushan strong motion station and the comparison of response seectrums these three records (d)

限断层法,合成龙头山强震台基岩场地地震动。比较基岩合成值与沿断层走向地震动反应谱(图3a、b)发现,在周期小于2 s的部分,合成地震动加速度反应谱值远小于观测值(图3d)。由于该强震台站场地存在厚度约26 m的土层,需考虑该土层对于地震动的影响。

2 等效线性化法分析局部场地效应

当地震动超过一定阈值时(100~200 gal),土层场地会出现明显的非线性效应,其主要表现为土体的剪切波速降低、地震动峰值加速度降低、阻尼比升高、场地卓越频率降低(王伟,2008)。

土层等效线性化法是场地非线性效应分析的常用方法之一。其基本原理为:在总体动力学效应大致相当的意义上,用一个等效的剪切模量和阻尼比代替所有不同应变幅值下的剪切模量和阻尼比,将非线性问题转化为线性问题,利用频域线性波动方法求解。当场地土层等效剪切波速变化率不足20%时,场地地震反应分析可不计入场地非线性效应(王伟等,2011)。龙头山场地存在厚度约26 m的覆盖层,且龙头山强震动峰值加速度远超上述阈值。根据上述条件初步判断,鲁甸 $M_s6.5$ 地震中,龙头山强震台土层场地应该存在场地非线性效应。

对于覆盖层厚度为 H 的场地,其场地卓越周期计算公式为:

$$T_g = \frac{4H}{V} \quad (7)$$

式中: V 为场地等效剪切波速,用下式表示:

$$V = d_0/t \quad (8)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_i/v_{si}) \quad (9)$$

式中: d_0 为计算深度(m),取覆盖层厚度和20 m两者的较小值; d_i 为第 i 土层厚度(m); v_{si} 为第 i 土层剪切波速(m/s)。

由实际钻孔资料可得,龙头山强震台场地等效剪切波速 $v_s = 254$ m/s,场地卓越周期 $T_g = 0.41$ s。由我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)场地分类标准确定,该场地属于Ⅱ类场地。

利用等效线性化法分析场地效应时,龙头山强震台的土层参数按照表3取值,土体动剪切模量比

与动剪切阻尼比采用Darendeli(2001)模型。

表3 龙头山强震台场地土层参数

Tab.3 Site soil parameters of Longtoushan strong motion station

序号	土层名称	深度/m	厚度/m	土层重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	杂填土	3.2	3.2	15	185
2	圆砾	11.8	8.6	19	281
3	砾砂	26.0	17.4	21	319
4	白云质灰岩	30.0	4.0	24	758

将合成的龙头山强震台基岩地震动作为输入地震动,假定场地土层为水平均匀层状,地震动输入位置为地下30 m的基岩处。经土层等效线性化后,得到土层地面强震动的等效线性化值(图3c)。一维土层线性反应分析中,软土层对地震动有着较强的滤波作用,因此经土层等效线性反应后,地震动最大峰值加速度较基岩输入地震动显著降低(王伟等,2011)。等效线性化加速度反应谱如图3d所示,从图中可见,等效线性反应后的地震动反应谱显著升高。土层等效线性化值与基岩输入地震动反应谱的比值如图4所示,在周期为0.08~5 s范围内,等效线性化值高于基岩输入地震动反应谱值,地震动被放大。土层等效线性化后得到的土层剪切波速值明显低于初始的钻孔剪切波速(图5)。综上所述,该场地在此次地震中存在较强的场地非线性效应(王伟等,2011)。

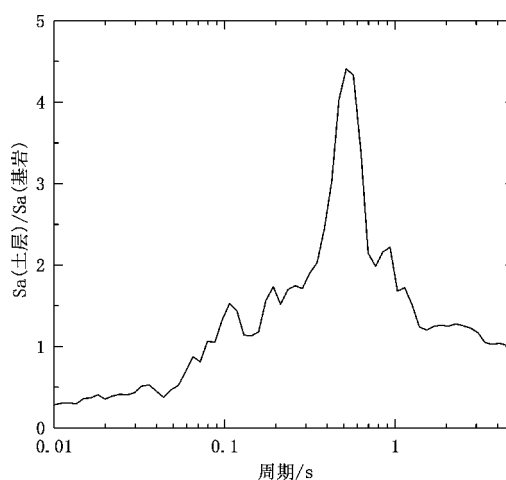


图4 龙头山强震台等效线性化值与基岩地震动反应谱比值

Fig.4 The comparison of the equivalent linearization value and input ground motion response spectrum

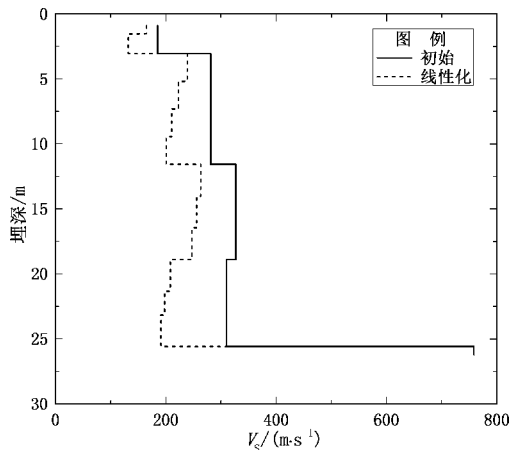


图5 等效剪切波速与钻孔剪切波速比较

Fig. 5 The comparison of equivalent shear wave velocity and borehole shear wave velocity

3 讨论与结论

利用能反映震源特点的随机有限断层法, 合成了鲁甸 $M_s 6.5$ 地震的地震动时程。选取迤车强震台、龙头山强震台作为目标台站, 其中迤车强震台为基岩台, 不考虑局部场地效应, 龙头山强震台位于土层场地, 考虑局部场地因素对于地震动的影响。将强震动水平观测记录转换为沿断层走向、垂直断层地震动, 对比迤车强震台合成地震动与沿断层走向地震动发现, 随机有限断层法合成的地震动与沿断层走向地震动拟合程度较高。这表明, 所确定的震源参数与地震动传播路径参数是可靠的。

将合成的龙头山强震台基岩地震动作为输入地震动, 采用等效线性化法, 分析了龙头山强震台的场地非线性效应。结果显示, 该场地在此次地震中存在显著的非线性效应。其主要表现为土层等效剪切波速降低, 对于周期在 $0.08 \sim 5$ s 范围内的地震动存在较强的放大作用。龙头山强震台的场地卓越周期 T_g 约为 0.41 s (图7), 正好处于放大周期范围内, 使得实际地面运动被放大。这是导致龙头山地区震害加重的场地因素, 同时, 也是强震动记录反应谱平台较宽的原因之一 (图5)。

龙头山场地对于周期为 $0.4 \sim 0.6$ s 范围内的地震动放大作用最明显。由于我国中小城市主要建筑结构的自振周期处于 $0.3 \sim 1.0$ s 之间 (冀昆等, 2014), 该场地对于这一周期范围内的地震动又存在最强的放大作用, 所以此自振周期的建筑物震害最严重。

本文通过合成鲁甸 $M_s 6.5$ 地震的地震动, 比较合成地震动与沿断层走向强震动观测记录认为, 随机有限断层法合成地震动较好反映了震源的主要特征, 可应用于震害估计。同时, 通过分析龙头山强震台的场地非线性效应, 认为龙头山镇重建过程中, 应充分考虑工程场地条件对地震动的放大作用, 加强工程结构的抗震设防。

参考文献:

- 崔建文, 刘琼仙, 段建新, 等. 2014. 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震强震动观测记录及初步分析[J]. 地震研究, 37(4): 542-548.
- 崔建文, 卢大伟, 高东, 等. 2008. 基于合成地震动的震区烈度划分[J]. 地震研究, 31(4): 388-393.
- 冀昆, 温瑞智, 崔建文, 等. 2014. 鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震强震动记录及震害分析[J]. 震灾防御技术, 9(3): 325-339.
- 刘成利, 郑勇, 熊熊, 等. 2014. 利用区域宽频带数据反演鲁甸 $M_s 6.5$ 级地震震源破裂过程[J]. 地球物理学报, 57(9): 3028-3037.
- 庞卫东, 杨润海, 陈俊磊, 等. 2016. 2014 年鲁甸 $M_s 6.5$ 地震龙头山镇场地高密度电法勘探[J]. 地震研究, 39(4): 622-629.
- 苏有锦, 刘杰, 郑斯华, 等. 2006. 云南地区 S 波非弹性衰减 Q 值研究[J]. 地震学报, 38(2): 206-212.
- 王国新, 史家平. 2009. 随机有限断层法在汶川强地震动合成中的应用[J]. 自然科学进展, 19(6): 664-669.
- 王俊, 霍祝青, 詹小艳, 等. 2012. 基于随机有限断层法的地震烈度计算研究[J]. 地震研究, 35(3): 374-380.
- 王伟, 周正华, 王玉石, 等. 2011. 典型场地在不同地震动输入水平下的反应[J]. 岩土力学, 32(4): 1089-1094.
- 王伟. 2008. 场地地震反应的非线性效应分析及计算方法改进[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 王晓荣, 易立新, 李鹏. 2011. 利用随机有限断层法计算海河断裂的地震动[J]. 地震研究, 34(2): 188-193.
- 张勇, 许力生, 陈运泰, 等. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_w 6.1$ ($M_s 6.5$) 地震破裂过程[J]. 地球物理学报, 57(9): 3052-3059.
- 张振国, 孙耀充, 徐建宽, 等. 2014. 2014 年 8 月 3 日云南鲁甸地震强地面运动初步合成及烈度预测[J]. 地球物理学报, 57(9): 3038-3041.
- GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].
- Beresnev I A, Atkinson G M. 1998. FINSIM—A FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults[J]. Seismological Research Letters, 69(1): 27-32.
- Boore D M. 1983. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 73(6A): 1865-1894.
- Darendeli M B. 2001. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves[D]. Austin: University of Texas at Austin.
- Motazedian D, Atkinson G M. 2005. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(3): 995-1010.

Analysis on Site Effect of 2014 Yunnan Ludian $M_s6.5$ Earthquake Based on Simulating Ground Motion

WEI Yong¹, CUI Jianwen², WANG Qiuliang¹, SHEN Yuyi¹

(1. Key laboratory of Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China)

(2. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

Ludian earthquake caused serious casualties and structural damages. The maximum peak acceleration of Longtoushan site reaches 948.5 gal and its is about 4.4 km far from the epicenter. We choose Longtoushan site and Yiche site as target stations to simulate ground motion by using stochastic finite fault method. Based on synthetic ground motion, we also analyzed the site effect of Longtoushan station in the earthquake. The result shows that there was a site soil nonlinear behavior in Longtoushan site. Besides, there was a strong amplification of ground motion in the period of 0.08 ~ 5 s. In further discussion, we analyzed the site factors, which caused much more damage in the Ludian earthquake.

Keywords: Ludian earthquake; stochastic finite fault method; equivalent linearization; site effect; ground motion