

2025年1月7日西藏定日6.8级地震强震动特征

王江^{1,2}, 卢建旗^{1,2}, 林德昕^{1,2}, 钱亮^{1,2}, 李津丞^{1,2}, 任智豪^{1,2}, 马强^{1,2}

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:2025年1月7日的西藏定日6.8级地震造成了大量建筑倒塌破坏和重大人员伤亡。为分析此次地震震害原因,该文采用国家烈度速报与预警工程台网获取的35组强震动记录,分析了近场地震动的幅频特性与传播衰减规律。通过与中国西南地区地震动预测模型(ZYLW22模型)进行对比分析发现,地震的近场地震动参数(包括加速度峰值和反应谱值)实测值略低于模型的预测值,而远场观测数据则呈现高于模型预测值的特征。研究表明,本次地震的高烈度区地震动具有显著的1.0~3.0 Hz高频能量优势特征。定日地震震中处于农牧区,震区建筑结构以自建低矮石木/土坯和框架民居结构为主,结构整体性较差、自振周期接近地震动特征周期,导致大量民居结构倒塌破坏,这是本次地震致灾的关键因素。此外,定日地震近断层地震动还表现出震源破裂方向性效应特性。

关键词:定日 M_s 6.8地震;地震动峰值;地震动传播衰减;反应谱;方向性效应

中图分类号:P315.9

文献标志码:A

Strong ground motion characteristics of the M_s 6.8 Dingri, Xizang earthquake on January 7, 2025

WANG Jiang^{1,2}, LU Jianqi^{1,2}, LIN Dexin^{1,2}, QIAN Liang^{1,2}, LI Jincheng^{1,2}, REN Zhihao^{1,2}, MA Qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake

Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation,

Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: The M_s 6.8 Dingri earthquake in Xizang on January 7, 2025, caused extensive building collapses and significant casualties. To investigate the causes of seismic damage, this study analyzed the amplitude-frequency characteristics and propagation attenuation characteristics of near-field ground motions using 35 sets of strong motion records obtained from the National Intensity Rapid Reporting and Early Warning Network. Through comparative analysis with the seismic ground motion prediction model (ZYLW22 model) for southwestern China, it was found that the measured values of near-field ground motion parameters (including peak ground acceleration and response spectra) were found to be slightly lower than the model predictions, while far-field observations exhibited higher values than predicted. Spectral analysis revealed a pronounced high-frequency energy dominance in the 1.0~3.0 Hz range within high-intensity zones of the earthquake. The epicentral region of the Dingri earthquake lies in a pastoral-agricultural area, where local buildings predominantly consist of self-built low-rise stone/wood or adobe structures and simple frame residential buildings. The earthquake disaster may be attributed to the poor structural integrity of these buildings, whose natural vibration periods closely match the predominant periods of ground motions, resulting in widespread structural failures. Additionally, the near-fault ground motions of the Dingri earthquake also exhibited source rupture directivity effects.

收稿日期:2025-03-09; 修回日期:2025-06-15

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2025C01);国家自然科学基金项目(42404078)

作者简介:王江(1989—),男,助理研究员,博士,主要从事地震预警技术与近场地震动特征研究。E-mail:wangj@iem.ac.cn

通信作者:马强(1979—),男,研究员,博士,主要从事地震预警与烈度速报研究。E-mail:maqiang@iem.ac.cn

Key words: M_s 6.8 Dingri earthquake; peak ground motion; propagation attenuation; response spectrum; rupture directivity effect

0 引言

据中国地震台网测定,北京时间2025年1月7日9时5分在西藏自治区日喀则市定日县($28^{\circ}30'N$, $87^{\circ}27'E$)发生6.8级地震,震源深度为10 km。此次定日 M_s 6.8地震发生在青藏高原西南缘,靠近南北走向的申扎—定日断裂带。美国地质调查局测定了震源机制解($349^{\circ}/187^{\circ}, 42^{\circ}/49^{\circ}, -103^{\circ}/-78^{\circ}$),表明此次地震为正断层事件。该地震同区域历史地震表现出相似的正断层破裂机制,表明印度板块向北东方向挤压亚欧板块,在藏南地区产生了近东西向的张应力。为了解该地震破裂过程,国内外多家机构(如美国地质调查局、中国地震台网中心、中国地震局地球物理研究所等)基于远场波形、近场强震动记录和地表形变等不同数据给出了各自的震源模型。其中,中国地震台网中心利用了震中200 km范围内8个强震动台站数据,使用迭代反褶积和叠加法进行破裂过程反演^[1],反演模型对近场高频辐射和静态位错约束更强,模型主滑动区与极震区烈度调查范围的吻合度更高。中国地震台网中心反演结果表明,西藏定日地震矩震级为7.1级,破裂持续时间约27 s,震源破裂面基本呈现北南走向,破裂由震中向北延伸,由深部向浅部扩展,破裂长度约55 km,该地震最大破裂点位于震中北侧30 km处,对应滑动量为1.4 m,破裂可能出露地表。

定日地震震区人口密集,震中周围分布多个村镇,震中距定结县34 km、距定日县36 km、距拉孜县67 km、距萨迦县71 km、距昂仁县92 km、距日喀则市164 km。截至8日上午11时,震中共记录到3级及以上余震31次,其中3.0~3.9级地震28次,4.0级以上地震3次,最大为1月7日9点24分发生的4.4级地震。截至2025年1月9日上午6时定日地震共造成遇难126人、188人受伤,导致3612户房屋倒塌,震中附近定日县、拉孜县和萨迦县等地的房屋受损严重。地震发生后,中国地震局派出现场工作队,依照GB/T 18208.3—2011《地震现场工作:调查规范》^[2]、GB/T 17742—2020《中国地震烈度表》^[3]对灾区167个调查点开展了实地震害调查,并充分参考震区断裂构造、仪器烈度、余震分布、震源机制和遥感等科技支撑成果,确定了此次地震的烈度分布,编制完成了《西藏定日6.8级地震烈度图》,确定了西藏定日6.8级地震造成地表破裂约26 km,最高烈度为IX度,VI度区及以上面积约23 986 km²,等震线长轴呈近南北走向,长轴约191 km,短轴约152 km,共涉及西藏自治区日喀则市定日县、拉孜县和定结县等6个县45个乡镇,其中IX度区面积约411 km²,主要涉及西藏自治区日喀则市定日县长所乡、曲洛乡、措果乡、尼辖乡和加措乡,共计5个乡镇,这也是人员伤亡集中的区域。

大地震激发的强地面运动是地震致灾的主因,分析地震动特征能够更好地理解结构震害原因和空间分布规律,同时认识该地区地震动衰减规律以及震源、传播路径和场地特征。本次定日地震造成传统低矮房屋严重破坏和重大人员伤亡。本文基于定日 M_s 6.8级地震的国家烈度速报与预警工程台网35组强震动记录,分析此次地震地震动特征,探讨地震伤亡人数偏多的原因。

1 强震动观测与处理

我国国家地震烈度速报与预警工程于2023年底全面建成,观测站网由基准站、基本站和一般站三类不同性能和密度台站组成。基准站建设在低噪声的基岩上,内部同时配备宽频带地震计和力平衡加速度计(force-balance accelerometers, FBA)。基本站一般建设在基岩或自由场土层上,内部配备FBA^[4]。一般站布设密度最大,配备低成本的微机电加速度传感器(microelectro-mechanical system, MEMS),其竖直向满量程为 $-1.0\sim 3.0 g$,水平分量满量程为 $\pm 2.0 g$ ^[5-6]。PENG等^[7]评估了川滇地区烈度仪的性能,对比同台址FBA观测数据,验证MEMS加速度记录一致性和可靠性。本次定日 M_s 6.8地震震中300 km范围内共有35个台站,其中FBA和MEMS观测记录分别为10组和25组,台站具体位置分布见图1。其中XZ.D0004台站距离震中最近的台站,震中距为33.5 km,东西、南北、垂直向加速度峰值分别为 -99.5 、 108.0 、 -63.3 cm/s^2 ,东西、南北、垂直向速度峰值分别为 -13.1 、 8.7 、 4.7 cm/s ,仪器地震烈度7.3度;位于震中北侧的XZ.D0007台站观测到本次地震的最大地面峰值加速度,震中距67.5 km,南北向加速度峰值为 418.7 cm/s^2 ,仪器地震烈度8.0度。

各台站仪器烈度计算方法详见 GB/T 17742—2020 《中国地震烈度表》^[3]。

本次定日地震的加速度记录采取事件前 10 s 数据进行基线调整,然后使用带宽为 0.075~40.00 Hz 的 2 阶 Butterworth 非因果滤波器进行带通滤波处理,在经一次积分和滤波后获取地面速度时程,由此获得各台站地震动峰值加速度 (peak ground acceleration, PGA) 和地震动峰值速度 (peak ground velocity, PGV) 测量结果。本文在统计地震动衰减规律时,将地震动观测值与西南地区地震动衰减关系 (ground motion prediction equations, GMPE) 对比^[8],其中断层距计算采用中国地震台网中心公布的定日 $M_s6.8$ 地震的有限断层模型中主滑动区,断层模型中虚线范围见图 1。我国工程场地类型以 II 类场地为主,本次对比西南地区 GMPE 的场地条件采用 II 类场地 ($V_{s30} = 400$ m/s)。

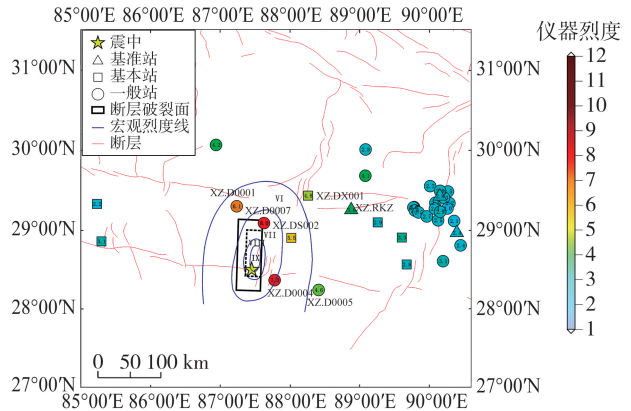


图 1 定日 $M_s6.8$ 地震震中、断层模型与仪器烈度分布图

Fig. 1 Locations of epicenter, fault model and instrument intensity distribution of $M_s6.8$ Dingri earthquake

2 定日 6.8 级地震地震动特征

在地震危险性分析中,地震动预测模型依据震级、断层类型、传播距离和场地条件参数,能够较为可靠地预测地面运动强度,计算方法十分简洁,便于工程应用^[9-11]。不同地区地震的地震传播衰减通常体现出明显区域特征,因此,利用不同地区实际观测记录进行统计回归获得的经验地震动预测模型,才能更可靠地体现地质构造环境与场地条件下地震动衰减特性。在分析定日 $M_s6.8$ 地震的地震动衰减特征时,采用中国西南地区开发的 GMPE(下文简称为 ZYLW22 模型)^[8],比较观测值与预测值的差异,涉及 PGA、PGV 和不同周期等参数,其中地震动峰值取 2 个水平向分量记录的最大值。给定 ZYLW22 模型输入的各项参数分别为 $M_w = 7.1$ 、正断层、倾角为 49° ;场地条件取我国较普遍的 II 类场地,为便于比较,本节统一选用 $V_{s30} = 400$ m/s。地震台网中心提供震源破裂过程反演结果表明,破裂长度约 55 km,而反演设定的断层模型长度约 100 km,因此采用 BOORE 等^[11]提出的方法,在计算断层距 R_{rup} 时,选用主滑动区范围进行计算,断层模型主滑动区范围(虚线矩形)见图 1。近场地震动 PGA、PGV、周期为 0.3、1.0、3.0 s 的 PSA 观测值与对应 GMPE 预测曲线分布见图 2 和图 3。由图可知,该次地震的断层距 200 km 内短周期成分(如 PGA、0.3 s 的 PSA)观测值接近 ZYLW22 模型预测值;PGV、周期为 1.0、3.0 s 的中长周期 PSA 观测高于 ZYLW22 模型预测值。200 km 以外台站高频峰值参数 PGA 和 0.3 s 的 PSA 明显低于 ZYLW22 模型预测值,不过 PGV 和 1.0、3.0 s 的中长周期 PSA 观测值与 ZYLW22 模型预测值接近。整体来看,定日地震的地震动幅值传播衰减特征与西南地区衰减 ZYLW22 模型存在一定差异,具体表现在 ZYLW22 模型高估远场高频地震动而低估近场中低频地震动。

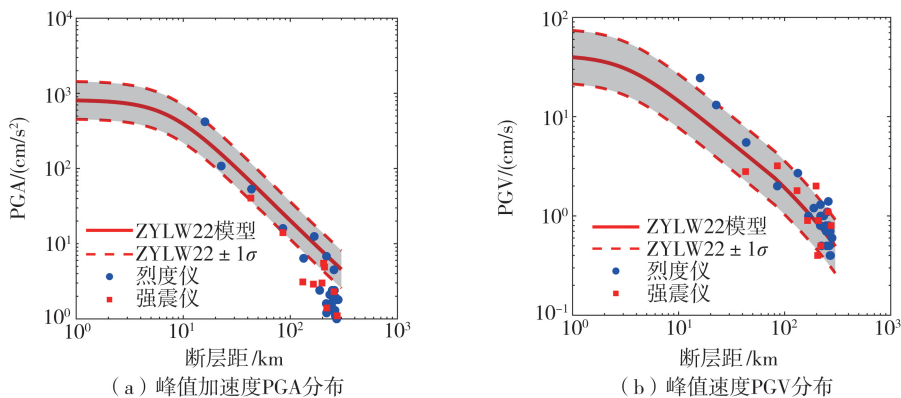


图 2 近场地震动 PGA 和 PGV 随断层距分布图

Fig. 2 Distribution of PGA and PGV with fault distance for near-field ground motions

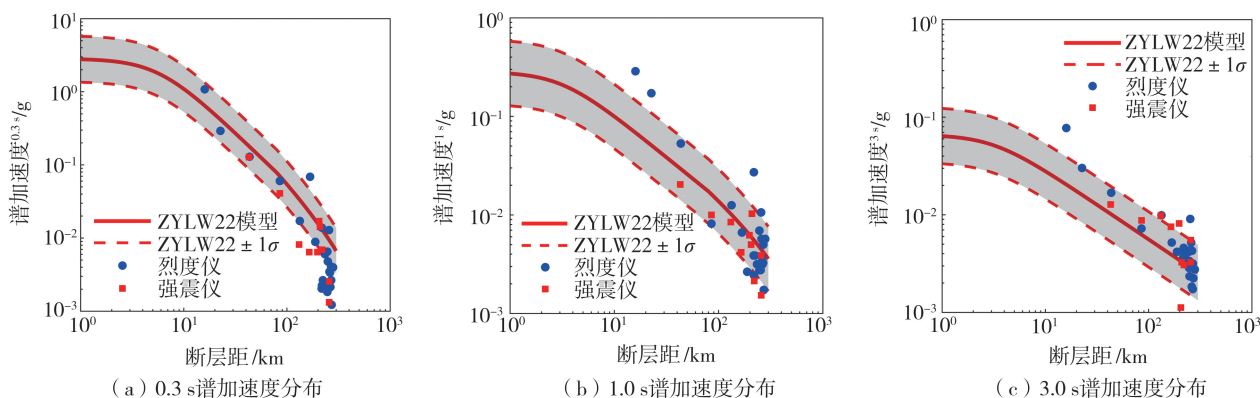


图3 近场地震动 PSA (0.3、1.0、3.0 s) 随断层距分布图

Fig. 3 Distribution of PSA (0.1, 1.0 and 3.0 s) with fault distance for near-field ground motions

为了从地震动幅频特性分析此次震害较重的原因,量化了强震动记录的等效卓越频率 f_{eq} ,计算公式如式(1)所示^[12]:

$$f_{eq} = \frac{PGA}{2\pi PGV} \quad (1)$$

峰值加速度较高记录的等效卓越频率在1 Hz以上,对高自振频率的低矮房屋十分不利,见图4。地震震害特征初步分析报告提供了西藏定日县6.8级地震震区各推测烈度区建筑物结构占比,其中各预测烈度区内未做抗震设计的其他结构类型建筑物面积占比最大,见图5。在承灾体方面,震区农牧区普遍存在的自建石木/土坯结构,整体性差,抗震性能薄弱,结构自振频率约1.0~3.0 Hz,此类结构在高频成分占优的地震动作用下易形成强烈共振效应,这可能是导致震区传统低矮自建民居结构大量倒塌的主要原因。本次地震伤亡人数高,体现在三方面的耦合作用:①震中周围呈现高人口暴露性特征,极震区(IX度区)范围内分布着多层级聚居体系,其中震中5 km范围内分布有2个自然村及1个建制镇,30 km辐射圈涵盖人口逾2万的定结县域中心;②发震时刻正值当地清晨,大多数人仍处于室内睡眠状态,未能及时采取有效紧急避险措施;③震区平均海拔4500 m的高寒山地环境,夜间气温降至-15℃且伴有强风天气,人们在倒塌结构下无法保持体温,增加震后伤亡人员救援治疗难度。

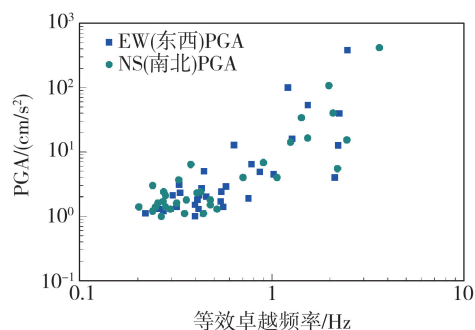


图4 近场地震动 PGA 随等效卓越频率分布图

Fig. 4 Distribution of PGA with equivalent predominant frequency for near-field ground motions

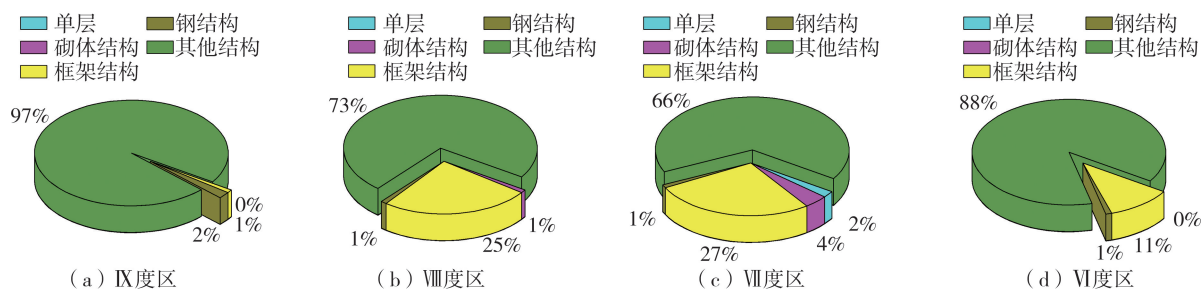


图5 $M_s 6.8$ 定日地震震区各推测烈度区建筑物结构占比图

Fig. 5 Structural percentage of buildings in each predictive intensity zone of the $M_s 6.8$ Dingri earthquake

3 近断层地震动加速度反应谱特征

本节选取宏观烈度VI度以上震区内的4组记录,计算2个水平向5%阻尼比的加速度反应谱,其中XZ.D0004台站和XZ.D0007台站位于VII度圈,XZ.D0001台站和XZ.DS002台站位于VI度圈,并与我国现行规

范中的设计谱进行比较。设计谱场地条件取我国较普遍的 II 类场地。按照规范中不同设计基本地震加速度和设计地震分组,这 4 组记录的反应谱均采用第 1 组分组,计算了罕遇地震作用下地震影响^[13],计算结果见图 6~图 9。由图可知,4 组记录的加速度反应谱存在同一特点,峰值周期均分布在 0.1~0.4 s 范围内,卓越平台较窄,在对应设计谱特征周期之前下降,其中位于断层北侧的 XZ.D0007 台站水平向加速度反应谱峰值高于 7 度罕遇地震设计谱,在设计谱特征周期前迅速降至设计谱以下。鉴于我国中小城市和城镇主要建筑物的结构自振频率范围(1~3 Hz),对应自振周期约 0.3~1.0 s 内,记录的加速度反应谱远低于设计谱,因而此次地震对于这一自振周期范围的建筑破坏影响较小。但是对于本次地震震区传统未抗震设防的低矮房屋其自振周期可能要低于 0.3 s,Ⅷ度高烈度区地震动反应谱峰值很可能高于设计谱,因此,此次地震对于结构自振周期较小的传统民居破坏性较强。

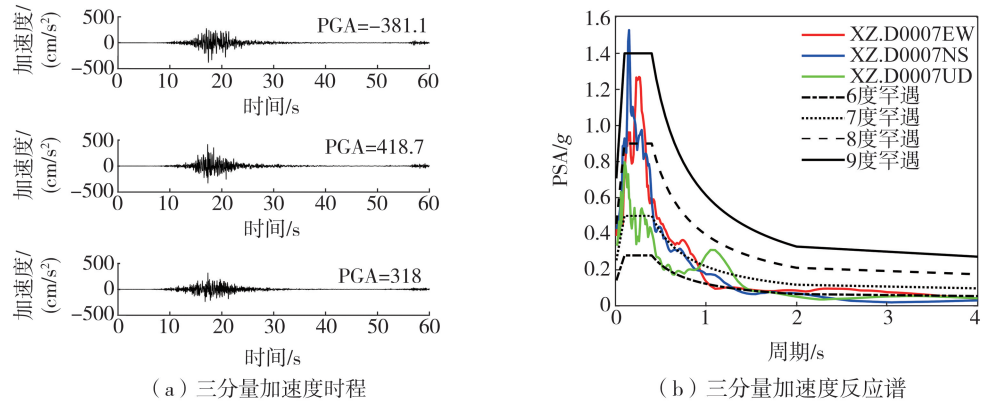


图 6 XZ.D0007 台站加速度时程曲线和反应谱

Fig. 6 Acceleration time history curves and response spectrums of XZ.D0007 station

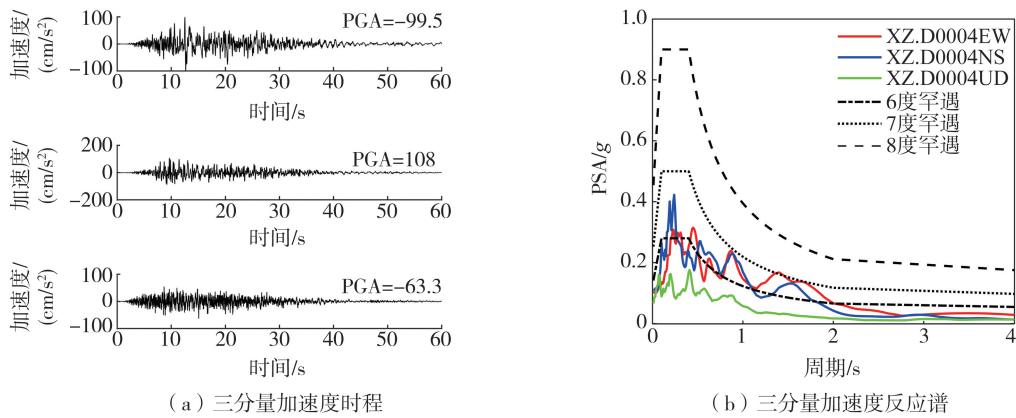


图 7 XZ.D0004 台站加速度时程曲线和反应谱

Fig. 7 Acceleration time history curves and response spectrums of XZ.D0004 station

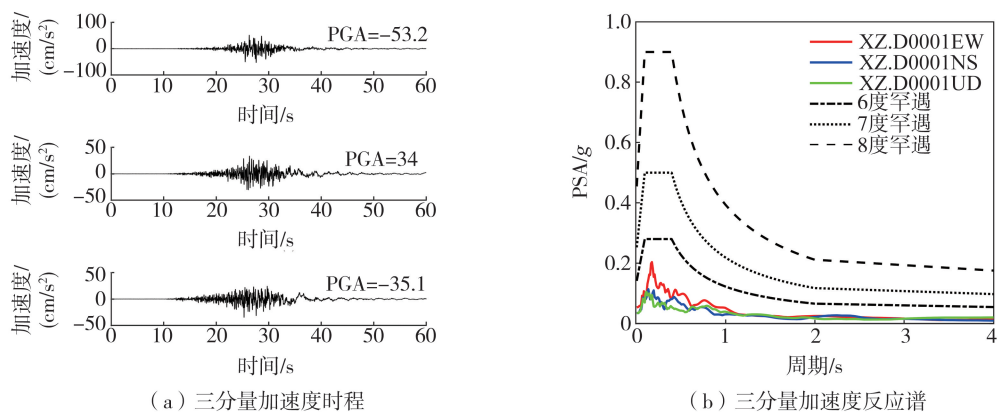


图 8 XZ.D0001 台站加速度时程曲线和反应谱

Fig. 8 Acceleration time history curves and response spectrums of XZ.D0001 station

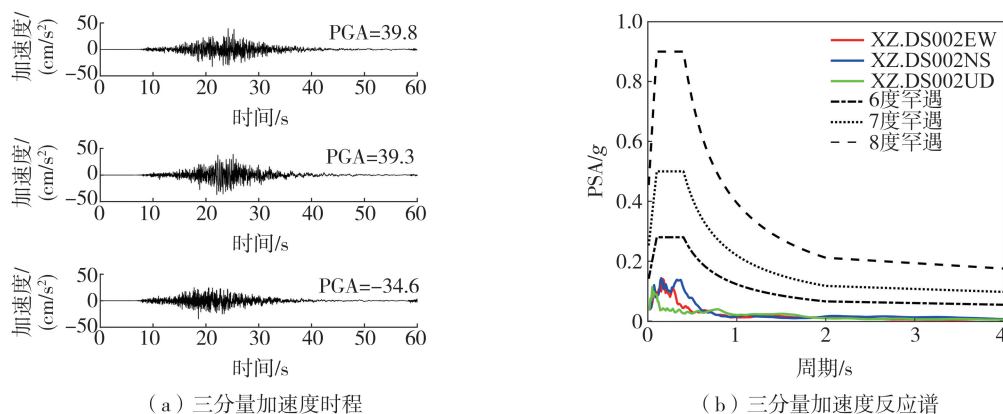


图9 XZ.DS002 台站加速度时程曲线和反应谱

Fig.9 Acceleration time history curves and response spectrums of XZ.DS002 station

4 破裂方向性效应讨论

震源破裂方向性效应,可用多普勒效应解释,一般会引起破裂前方地震动的幅值和频率升高,持时降低,破裂后方的地震动幅值和频率的降低,持时增加^[14-18]。青藏高原腹地强震动观测网络稀疏性(平均台站间距大于 50 km)导致本研究获取的地震动记录存在显著空间离散性制约,难以系统揭示定日 $M_s 6.8$ 地震近场地震动空间分布特征与宽频带能量分布规律。值得注意的是,距震源最近的 XZ.D0007 台站(方位角约 15° , 破裂前方)与 XZ.D0004 台站(方位角约 115° , 破裂侧后方)构成方向性观测对。地震动时程结果表明,破裂前方 XZ.D0007 台站记录呈现显著幅值高而波形压缩特征,其有效持时明显短于较后向 XZ.D0004 台站记录,与 BOATWRIGHT^[15] 提出的破裂方向性效应规律一致,见图 6 和图 7。这 2 个台站水平向地震动反应谱与 ZYLW22 模型预测 PSA 曲线的对比结果见图 10。由图可知,断层破裂前方 XZ.D0007 台站记录的水平向 S_a 在短周期(< 0.5 s)接近 ZYLW22 模型的预测中值,长周期段略高于 ZYLW22 模型;断层破裂侧后方 XZ.D0004 台站记录的水平向 S_a 在短周期(小于 0.5 s)明显低于与 ZYLW22 模型的预测中值,而在中长周期段明显大于模型预测中值。本次地震破裂过程是由初始破裂点向北向延伸,由深部向浅部扩展,位于断层北侧的 XZ.D0007 台站地震动从持时和幅频特性上都符合这种震源破裂方向性效应特征。

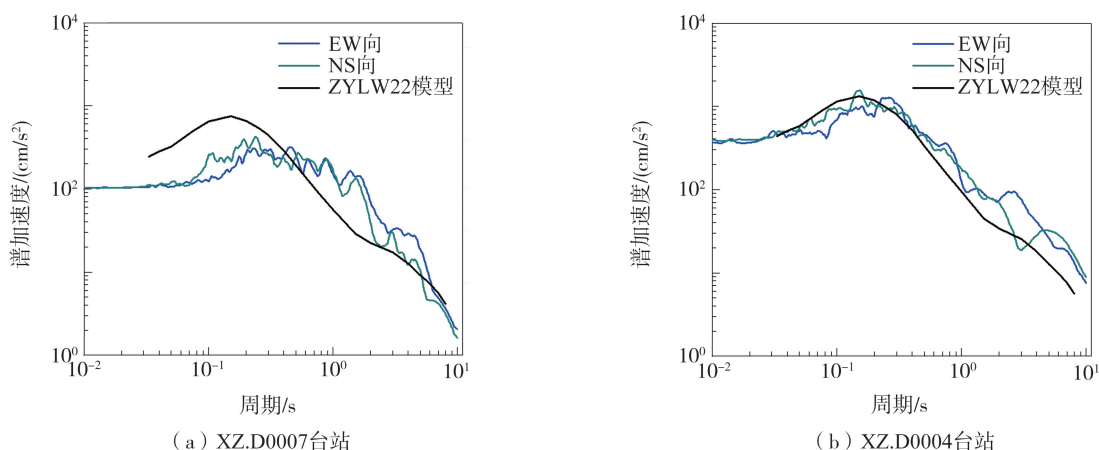


图10 XZ.D0007 台站和 XZ.D0004 台站加速度反应谱与 ZYLW22 模型对比

Fig.10 Comparison of acceleration response spectral at XZ.D0007 station and XZ.D0004 station with the ZYLW22 model

浅源破坏性地震近断层区域常发育速度大脉冲,加剧工程结构破坏程度。仅通过视觉检查地震动速度时程,往往难以将他们归类为清晰的脉冲型或非脉冲型地震动。采用 BALTZOPOULOS 等^[19] 提出的脉冲分析方法进行分类,该方法在 BAKER 等^[20] 提出的速度波形脉冲方法基础上考虑了反应谱形状,提出下列将地震动判定为脉冲状地震动的条件:①脉冲指数(pulse index, PI)不小于 0.85;②在至少 30° 的连续方位范围内持续存在高 PI 值;③提取脉冲的拟速度反应谱 PSV 形状与原始地震动的 PSV 形状局部拟合良好;④提取

脉冲的 PGV 不小于 10 cm/s。将 XZ.D0007 台站与 XZ.D0004 台站记录在 360° 范围内旋转得到的速度脉冲拾取结果见图 11。由图可知,Z.D0007 台站速度脉冲发育,其最大 PI 对应的速度脉冲出现在与断层法向方向近似平行的方向,Z.D0004 台站速度脉冲不发育。

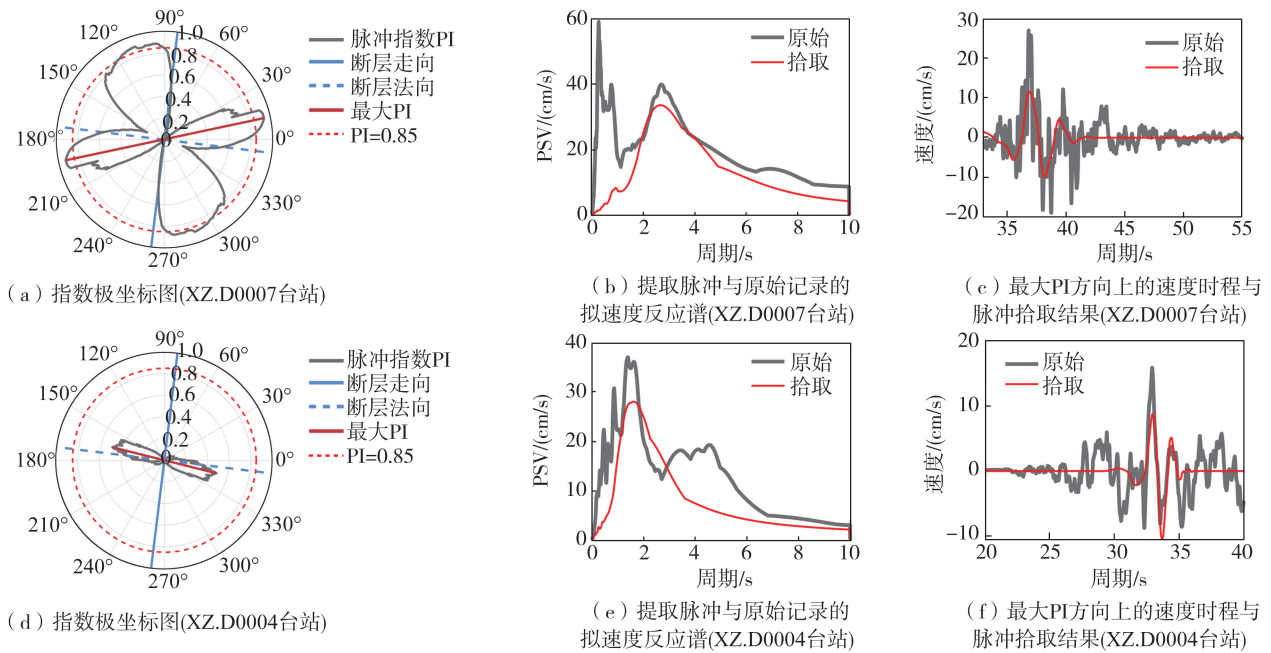


图 11 XZ.D0007 台站和 XZ.D0004 台站强震动记录的速度脉冲拾取结果

Fig. 11 Results of velocity pulses extracting from strong motion records at station XZ.D0007 and station XZ.D0004

此外,受限于一台站缺乏场地钻孔信息,局部场地条件不能明确。根据 ZHOU 等^[21]提出的地形坡度 V_{s30} 估计模型,估计了 2 个台站的场地类型,其中 XZ.D0007 台站 $V_{s30} = 231$ m/s,属中软土场地,XZ.D0004 台站 $V_{s30} = 325$ m/s,属中硬土场地。XZ.D0007 台站场地条件较差,可能对地震动起到一定的选频放大作用,不过出现地震动持时增减的可能性不大。因此,这种地震动幅频特征可能主要反映了本次定日 $M_s 6.8$ 地震震源破裂方向性特性。

5 结论

本文采用国家烈度速报与预警工程台网记录,分析 2025 年 1 月 7 日西藏定日 $M_s 6.8$ 地震的地震动衰减特征、地震动幅频参数特性和震源破裂方向性特征,讨论了地震致灾率高的可能原因,得出如下结论:

1) PGA、PGV 和 PSA 观测值与 GMPE 预测值的分布结果表明,本次定日地震 PGA、PGV、PSA 观测值与西南地区地震动预测模型(ZYLW22)存在一定差异,具体表现为 ZYLW22 模型高估远场高频地震动而低估近场中低频地震动。

2) 定日地震震中处于农牧区,震区建筑结构以自建低矮石木/土坯和框架民居结构为主,结构整体性较差。高烈度区强震动观测记录的等效卓越频率高频成分占优(大于 1 Hz),与震区传统低矮自建民居建筑自振频率接近,是导致大量民居结构倒塌破坏,造成大量人员死亡的主要因素。

3) 在地震动场空间分布上,震中北侧台站强震动记录的加速度反应谱 PSA 在短周期段占优,并且在震中北侧地震动短周期 PSA 强度明显高于东南方向地震动强度 PSA,表明该地震震源存在北向的破裂破裂方向性效应。这与震源由南向北破裂时空过程反演结果一致。

致谢:感谢中国地震局工程力学研究所强震动观测中心为本研究提供数据支持。

参考文献:

[1] ZHANG Y, WANG R J, ZSCHAU J, et al. Automatic imaging of earthquake rupture processes by iterative deconvolution and stacking of high-rate GPS and strong motion seismograms[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2014, 119(7): 5633-5650.

- [2] GB/T 18208.3—2011 地震现场工作 第3部分:调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
GB/T 18208.3—2011 Post-earthquake field works—Part 3: Code for field survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [3] GB/T 17742—2020 中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
GB/T 17742—2020 The Chinese seismic intensity scale[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [4] 江鹏, 李萍萍, 李同林, 等. 2022年四川泸定 M_s 6.8 地震强震动记录特征[J]. 地震研究, 2023, 46(4): 593–602.
JIANG Peng, LI Pingping, LI Tonglin, et al. The characteristics of strong motion records of the 2022 Luding, Sichuan M_s 6.8 earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2023, 46(4): 593–602. (in Chinese)
- [5] TAO D W, LU J Q, MA Q, et al. Analysis of near-field strong motion observations and damages of Menyuan earthquake on 8 January 2022 based on dense MEMS stations[J]. Journal of Seismology, 2022, 26(6): 1245–1265.
- [6] LIN D X, MA Q, XIE Q C, et al. Analysis of ground motion characteristics and near-fault effects for the September 5, 2022, M_s 6.8 Luding earthquake[J]. Journal of Seismology, 2024, 28(1): 169–185.
- [7] PENG C Y, JIANG P, CHEN Q S, et al. Performance evaluation of a dense MEMS-based seismic sensor array deployed in the Sichuan-Yunnan border region for earthquake early warning[J]. Micromachines, 2019, 10(11): 735.
- [8] ZHANG B, YU Y X, LI X J, et al. Ground motion prediction equation for the average horizontal component of PGA, PGV and 5% damped acceleration response spectra at periods ranging from 0.033 to 8.0 s in southwest China[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 159: 107297.
- [9] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1989.
HUO Junrong. Study on attenuation law of near-field ground motion [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1989. (in Chinese)
- [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] BOORE D M, STEWART J P, SEYHAN E, et al. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1057–1085.
- [12] MORALES C A. Predominant frequency in near-field strong ground motion by analysis of displacement response spectra[J]. Buildings, 2023, 14(1): 78.
- [13] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [14] BEN-MENAHEN A. Radiation of seismic surface-waves from finite moving sources[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1961, 51(3): 401–435.
- [15] BOATWRIGHT J. The persistence of directivity in small earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(6): 1850–1861.
- [16] WEN R Z, WANG H W, REN Y F. Rupture directivity from strong-motion recordings of the 2013 Lushan aftershocks[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(6): 3068–3082.
- [17] 安昭, 谢俊举, 李小军, 等. 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, 2019, 62(12): 4658–4672.
AN Zhao, XIE Junju, LI Xiaojun, et al. Directivity effects on strong ground motion from the February 6, 2018 M_w 6.4 Hualien earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(12): 4658–4672. (in Chinese)
- [18] 王江. 面向地震预警的震源参数时域计算方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2023.
WANG Jiang. Time-domain calculation method of source parameters for earthquake early warning [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2023. (in Chinese)
- [19] BALTZOPOULOS G, LUZI L, IERVOLINO I. Analysis of near-source ground motion from the 2019 Ridgecrest earthquake sequence[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2020, 110(4): 1495–1505.
- [20] BAKER J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486–1501.
- [21] ZHOU J, LI X J, TIAN X M, et al. New framework of combining observations with topographic slope to estimate V_{S30} and its application on building a V_{S30} map for mainland of China[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2022, 112(4): 2049–2069.