

2024年中国台湾花莲县 M_S 7.3 地震动特征 及灾害分析

徐龙军¹, 张建宇², 田浩³, 靳超越³, 谢礼立^{1,4}

(1. 江汉大学 精细爆破国家重点实验室, 湖北 武汉 430056; 2. 江汉大学 数字建造与爆破工程学院, 湖北 武汉 430056;
3. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074; 4. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 2024年4月3日7时58分, 中国台湾花莲县海域(23.81°N, 121.74°E)发生 M_S 7.3 地震, 为逆冲型破裂。此次地震是继“9·21”集集大地震后发生的最大规模地震。为了较全面地认识此次地震的特征和灾害效应, 从中汲取地震灾害经验和教训, 首先结合发震机制说明了此次地震成因; 其次, 选取台湾地区气象局地震台网中心 238 个台站记录到的三分量记录共 714 条地震动, 对其中断层距 32 km 以内的近断层强震动的工程特征进行分析; 最后, 结合震害调查资料, 重点探究了本次地震与土木工程结构破坏间的联系及震害的分布规律。结果表明: 此次地震的地震动具有中高频成分显著且地震动峰值加速度 (peak ground acceleration, PGA) 和加速度反应谱 (acceleration response spectrum, Sa) 随断层距的增加衰减缓慢的特征, 对中短周期结构的破坏显著; 震害分布集中于花莲县、新北市和台北市附近, 沿台东纵谷地壳对接带东侧随断裂带的发育呈线性分布, 其中花莲县由于距震源较近震害最为严重, 新北市和台北市虽距震源较远但地震动的山地放大效应和盆地放大效应致使其震害也较为严重。相关研究可为中短周期结构的抗震设防和地震区划研究提供参考。

关键词: 花莲县 M_S 7.3 地震; 地震动特征; 灾害调查; 震害分布

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

Characteristics and disaster analysis of M_S 7.3 ground motion in Hualien County, Taiwan, China in 2024

XU Longjun¹, ZHANG Jianyu², TIAN Hao³, JIN Chaoyue³, XIE Lili^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China; 2. School of Digital Construction and Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: At 7:58 on April 3, 2024, an M_S 7.3 earthquake occurred (23.81°N, 121.74°E) in the waters of Hualien County, Taiwan, China, which was characterized as a thrust rupture. This earthquake is the largest earthquake since the “9·21” Chi-Chi earthquake. To comprehensively understand the characteristics and disaster effects of the earthquake and learn from the experience and lessons of the earthquake disaster, the cause of the earthquake is explained in combination with the mechanism of earthquake generation. Then, 714 strong ground motions recorded by 238 stations of the Earthquake Network Center of the Meteorological Bureau of Taiwan within 32 km of the fault are selected to analyze the engineering characteristics of these ground motions. Based on disaster investigation data, the relation between the earthquake and the structural damage of civil engineering as well as the distribution pattern of earthquake damage are discussed. The results show that ground motions of this earthquake

收稿日期: 2024-08-01; 修回日期: 2025-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(地震联合)重点项目(U2139207); 湖北省自然科学基金(创新群体)重点项目(2023AFA030)

作者简介: 徐龙军(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事防灾减灾工程研究。E-mail: jhxulongjun@163.com

通信作者: 田浩(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事地震工程方面的研究。E-mail: tianhaohust@hust.edu.cn

have the characteristics of significant middle-to-high frequency contents with slow attenuation of PGA and Sa over rupture distance, causing the damage to medium-to-short period structures. The distribution of earthquake damage is concentrated in Hualien County, New Taipei City and Taipei City, and along the east side of the crustal butt belt of Taitung longitudinal Valley, the distribution is linear with the development of the fault zone. Hualien County is the most serious earthquake damage due to its proximity to the focal point, while New Taipei City and Taipei City are far away from the focal point, but the earthquake damage is also more serious due to the mountain amplification effect and basin amplification effect of ground motions. The relevant study can provide reference for the research of seismic fortification and seismic regionalization of medium-to-short period structures.

Key words: Hualien County M_s 7.3 Earthquake; ground motion characteristics; disaster investigation; seismic disaster distribution

0 引言

北京时间2024年4月3日7时58分,根据中国地震台网中心^[1]测定,中国台湾花莲县发生 M_s 7.3 地震,震中位于花莲县东海域(23.81°N,121.74°E),震源深度达12 km,并伴随多次强余震。据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)^[2]发布的数据,此次地震的震中烈度为Ⅷ度(modified mercalli intensity scale, MMI 烈度),台湾气象部门^[3]测得震中烈度为6度强,并指出此次花莲地震是“9·21”集集大地震发生25年后的最大规模地震。强震导致的地质灾害及土木工程灾害严重阻碍了当地应急救援工作的开展,威胁着台湾地区人民的生命和财产安全。截至2024年4月27日,此次地震已造成18人死亡、1155人受伤,另有2人失联^[4];灾害发生后,苏花路廊全线中断,花莲县一时间沦为“孤城”,救援工作难以开展。强震也迫使我国沿海多段铁路采取相应的避险措施,部分地区铁路线临时封锁。

灾害是超越承灾体自身承载能力的突发事件^[5],其造成人类生命、财产、资源和生态环境严重损失,深刻影响着人类的生存与发展。过往研究表明,近断层区域的地震动特征与土木工程结构的破坏特征间具有强相关性^[6-10],对近断层区域地震动特征进行探究可以认识震害发生的重要机理。本文基于收集到的238个台站的714条三分量地震动记录,挑选出其中32 km以内26个台站的78条三分量近断层强震动记录,从发震机制、强震动特征以及地震灾害展开探究和分析,给出了此次强震动的工程特征及震害的分布情况,针对现阶段强震动工程特征研究中存在的不足,提出了新思考,以期对后续实现土木工程震害的防御、抗震减灾工作的区域化开展提供借鉴。

1 发震机制

此次地震发生在台湾花东纵谷断裂带北段,震源位于菲律宾海板块与欧亚板块间俯冲带上,为逆冲型破裂且呈现双侧破裂,破裂持续时间约35 s,主要破裂长度约50 km^[11]、走向26°、倾角58°^[12],断层最大滑移为2.6 m,断层滑移分布的截面如图1所示^[12]。逆断层的运动机制为两盘盘体相互挤压,断层上盘盘体相对于下盘盘体向上运动推覆,伴随有显著的上盘效应(上盘地震动幅值显著大于下盘)^[13],断层两盘运动过程如图2所示^[14]。我国台湾岛位于欧亚板块东南缘与菲律宾海板块的斜向聚合处,属西太平洋板块聚合带-火山岛弧带-地震带的一部分,如图3所示^[4]。以台东纵谷地壳对接带为界,西部属欧亚大陆板块,东部属菲律宾海板块。在台湾地区南部,欧亚大陆板块以南海海洋地壳为先导向东俯冲至菲律宾海板块之下;在台湾地区东北部,菲律宾海板块向北西俯冲至欧亚大陆板块之下,形成了独特的双俯冲带——马尼拉海沟与琉球海沟。双俯冲带显著控制了台湾岛及附近海域的地质特征及大地构造^[15]。

菲律宾海板块与欧亚大陆板块的相互挤压碰撞,导致台湾岛及其附近地区地壳运动十分活跃,在台湾地区东部,7级及以上地震并不罕见,该区域地震频发是板块运动、地质构造复杂等多种因素耦合作用的结果。台湾地区东部地处俯冲带上,俯冲带通常指大洋板块俯冲于大陆板块之下的构造带,是地震活动带^[16],板块间碰撞俯冲导致地壳剧烈缩短并发生斜向剪切变形,板块运动碰撞后积蓄的能量释放是台湾地震频发的主要原因^[17]。台湾岛地质构造复杂,发育了如左旋走滑的纵谷断裂及其以西的近南北向逆断层系,特别是台

东的中央山脉,其为台湾岛上的最大断裂带^[18],亦是台湾地震的主要活动区,而中央山脉东侧发育的南北走向断裂带是此次地震发生的断裂带即花东纵谷断裂带,断层盘体间的相对运动是破坏性地震发生的重要原因。

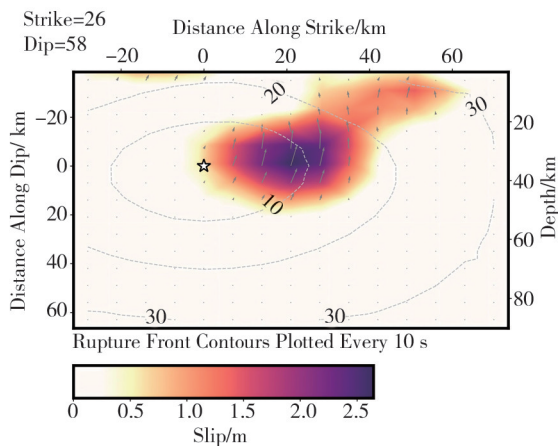


图1 断层滑移分布横截面^[12]

Fig. 1 Cross section of fault slip distribution^[12]

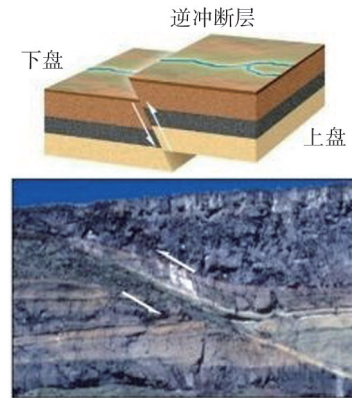


图2 逆冲断层运动示意图^[14]

Fig. 2 Schematic diagram of thrust fault movement^[14]

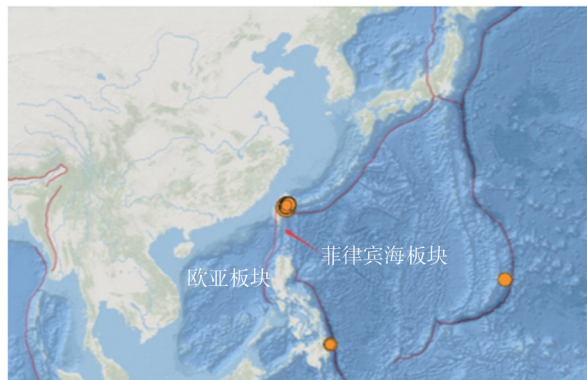


图3 我国台湾花莲 $M_S 7.3$ 地震所处板块边界^[4]

Fig. 3 Plate boundary at the $M_S 7.3$ earthquake in Hualien, Taiwan, China^[4]

2 强震动特征分析

此次强震事件是台湾地质灾害及土木工程灾害的主要原因,对强震动特征的分析和研究是地震工程领域中的重要课题。本节基于台湾地区的强震动记录,对地震动特征加以分析。

2.1 强震动记录选取及处理

地震动记录是强震动特征分析的基础,其承载着地震动的时域以及频域等探究地震破坏能力的关键信息。由于环境噪声和仪器倾斜等因素的存在,未经处理的地震动记录通常包含地震信息以外的干扰信息^[19-20],因此,对地震动记录进行处理是有必要的,处理过程主要包括基线校正和滤波^[21]。

本文收集了台湾气象部门地震台网中心 238 个台站记录到的三分量记录 714 条,参考李明等^[22]对近断层区域的划分研究从中挑选出断层距 32 km 以内的 26 个台站记录到的三分量自由场记录 78 条近断层地震动进行重点探究,图 4 给出了近断层台站与断层地表投影的位置关系。为降低仪器倾斜、环境噪声等因素干扰,采用基线校正的方式使加速度时程回归零基线。采用 BOORE 等^[23-24]提出的基线校正方法,滤波器选择 4 阶 Butterworth 非因果滤波^[25-26],截止频率设置为 0.1~25.0 Hz,抑制干扰频率,提高信噪比,相比于因果滤波,采用非因果滤波的方式可以保证位移时程不失真^[27]。表 1 列出了近断层的 26 个台站收集到的地震动信息,其中通过计算台站到断层地表迹线的垂直距离^[28] R_x (horizontal coordinate of the site with respect to the top of the rupture) 对台站与断层的相对位置进行判定,上盘台站 20 个,下盘台站 6 个。

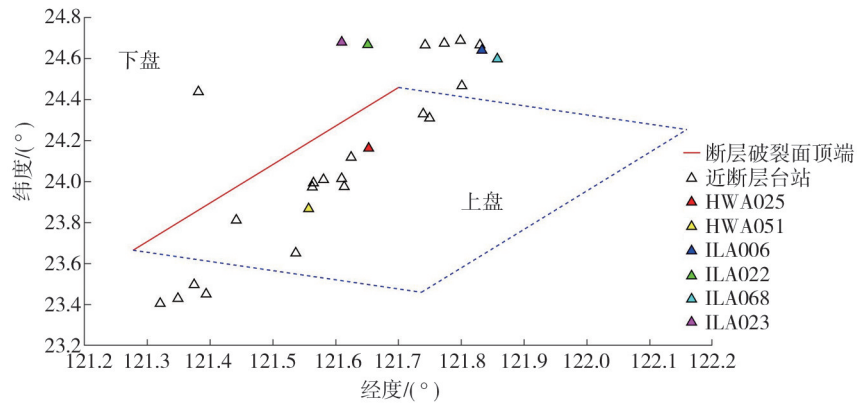


图 4 近断层台站与断层地表投影面的分布关系

Fig. 4 Distribution relationship between near fault stations and projection surface of fault surface

表 1 近断层台站信息

Table 1 Information of near-fault stations

| 台站编号 | 断层距/km | R_x /km | 相对断层位置 | PGA_EW/(cm/s^2) | PGA_NS/(cm/s^2) | PGA_UD/(cm/s^2) |
|---------------|--------|-----------|--------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| E006(ILA006) | 24.69 | 3.30 | 上盘 | 167.04 | 162.00 | 77.01 |
| E022(ILA022) | 24.15 | -14.60 | 下盘 | 65.28 | 88.56 | 40.10 |
| E023(ILA023) | 26.55 | -18.96 | 下盘 | 104.35 | 138.84 | 66.48 |
| E026(ILA026) | 25.43 | -3.80 | 下盘 | 137.23 | 135.21 | 69.13 |
| E042(ILA042) | 27.72 | -2.13 | 下盘 | 112.17 | 178.36 | 62.19 |
| E046(ILA046) | 23.83 | -6.18 | 下盘 | 107.02 | 109.14 | 78.50 |
| E053(ILA053) | 11.48 | 9.88 | 上盘 | 298.27 | 257.57 | 247.98 |
| E059(ILA059) | 26.90 | 1.76 | 上盘 | 111.52 | 172.00 | 28.05 |
| E062(ILA062) | 11.47 | 8.83 | 上盘 | 224.04 | 213.93 | 234.68 |
| E067(ILA067) | 28.56 | -28.08 | 下盘 | 285.50 | 313.74 | 81.35 |
| E068(ILA068) | 22.72 | 7.61 | 上盘 | 189.66 | 182.57 | 97.94 |
| F015(HWA015) | 12.31 | 11.14 | 上盘 | 253.47 | 218.17 | 384.42 |
| F019(HWA019) | 16.56 | 15.68 | 上盘 | 253.17 | 456.16 | 183.41 |
| F020(HWA020) | 9.46 | 7.91 | 上盘 | 260.05 | 200.50 | 127.66 |
| F025(HWA025) | 11.78 | 10.09 | 上盘 | 304.87 | 333.25 | 545.54 |
| F026(HWA026) | 11.19 | 9.69 | 上盘 | 401.44 | 377.48 | 429.54 |
| F028(HWA028) | 14.31 | 13.38 | 上盘 | 254.48 | 205.14 | 425.39 |
| F036(HWA036) | 21.30 | 17.14 | 上盘 | 104.20 | 113.04 | 74.39 |
| F037(HWA037) | 26.08 | 21.14 | 上盘 | 166.50 | 178.71 | 120.99 |
| F044(HWA044) | 23.66 | 24.44 | 上盘 | 351.70 | 357.86 | 168.34 |
| F045(HWA045) | 12.90 | 11.80 | 上盘 | 352.95 | 362.75 | 230.62 |
| F048(HWA048) | 12.13 | 10.98 | 上盘 | 417.89 | 200.96 | 378.41 |
| F049(HWA049) | 11.99 | 10.31 | 上盘 | 398.92 | 352.07 | 359.08 |
| F051(HWA051) | 16.48 | 15.74 | 上盘 | 496.72 | 540.91 | 259.95 |
| F053(HWA053) | 29.27 | 16.65 | 上盘 | 40.67 | 34.53 | 23.61 |
| F054(HWA054) | 27.09 | 18.07 | 上盘 | 78.78 | 65.80 | 41.88 |

2.2 近断层强震动工程特征

强震动工程特征的三要素为幅值、频谱和持时^[29],其中强震动的幅值是表征地震强度的重要指标,频谱

成分反映了地震动频率成分的分布,二者均为表征地震动潜在破坏势的重要指标。目前工程中针对强震动持时的应用与评估相对笼统^[30],故本节重点探究此次强震动工程特征中的幅值和频谱特征。

此次地震所选的 238 个台站记录到的三分量地震动峰值加速度(PGA)大小范围分别为:EW 向 $19.10 \sim 496.72 \text{ cm/s}^2$ 、NS 向 $17.32 \sim 540.91 \text{ cm/s}^2$ 、UD 向 $10.38 \sim 545.54 \text{ cm/s}^2$,台站距离的分布为震源距 $23.08 \sim 162.54 \text{ km}$,断层距 $9.46 \sim 99.42 \text{ km}$ 。统计发现此次地震的地震动竖向 PGA 最大值大于水平向最大值,分析认为,可能由于此次发震机制地震断层类型为逆冲断层,且对应的两台站按照美国 UBC 场地分类标准^[31]均为 C 类即硬土或基岩,但 HWA025 断层距小于 HWA051 断层距,距离震源更近,表现出记录到的竖向地震动的峰值加速度最大值高于水平向的最大值。结合图 4 和表 1,可以看出分别位于断层上下两盘且断层距相近的两对台站(ILA006 和 ILA022、ILA068 和 ILA023)记录到的三分量 PGA 上盘两台站显著高于下盘两台站,且位于断层上盘的台站记录到的三分量 PGA 普遍大于断层下盘的台站,表现出明显的上盘效应。图 5 和图 6 分别给出了所选台站记录中 PGA 的记录所对应的加速度、速度、位移时程和阻尼比为 5% 的加速度反应谱 S_a 示例。针对所选记录的最大水平向(EW/NS)和竖向(UD)PGA 进行重点探究,台站 HWA051 的断层距 16.48 km ,其 EW 向 PGA 为 496.72 cm/s^2 ,NS 向 PGA 540.91 cm/s^2 ,UD 向 PGA 264.44 cm/s^2 。台站 HWA025 的断层距 11.78 km ,其中 EW、NS 和 UD 分量的 PGA 分别为 304.87 、 333.25 、 545.54 cm/s^2 。HWA051 台站 EW 向的反应谱卓越周期为 0.52 s 、NS 向为 0.46 s 、UD 向为 0.09 s ,HWA025 台站 EW 向的反应谱卓越周期为 0.47 s 、NS 向为 0.30 s 、UD 向为 0.09 s 。两台站记录对应的 S_a 在 $0.30 \sim 0.52 \text{ s}$ 短周期段幅值大、大于 1.0 s 长周期段幅值小,因此在水平方向上会对中短周期结构的影响大,竖向上对 0.09 s 左右的短周期结构影响明显。图 7 给出了由近断层台站记录到的水平和竖向地震动计算得到的阻尼比为 5% 的加速度反应谱卓越周期与断层距的分布关系,可以看出此次地震中近断层强震动加速度反应谱卓越周期范围主要分布在 $0 \sim 1.0 \text{ s}$ 范围内,且水平向卓越周期显著高于竖向,因此,可以认为此次近断层地震动尤其是竖向地震动具有中高频成分显著的特征。

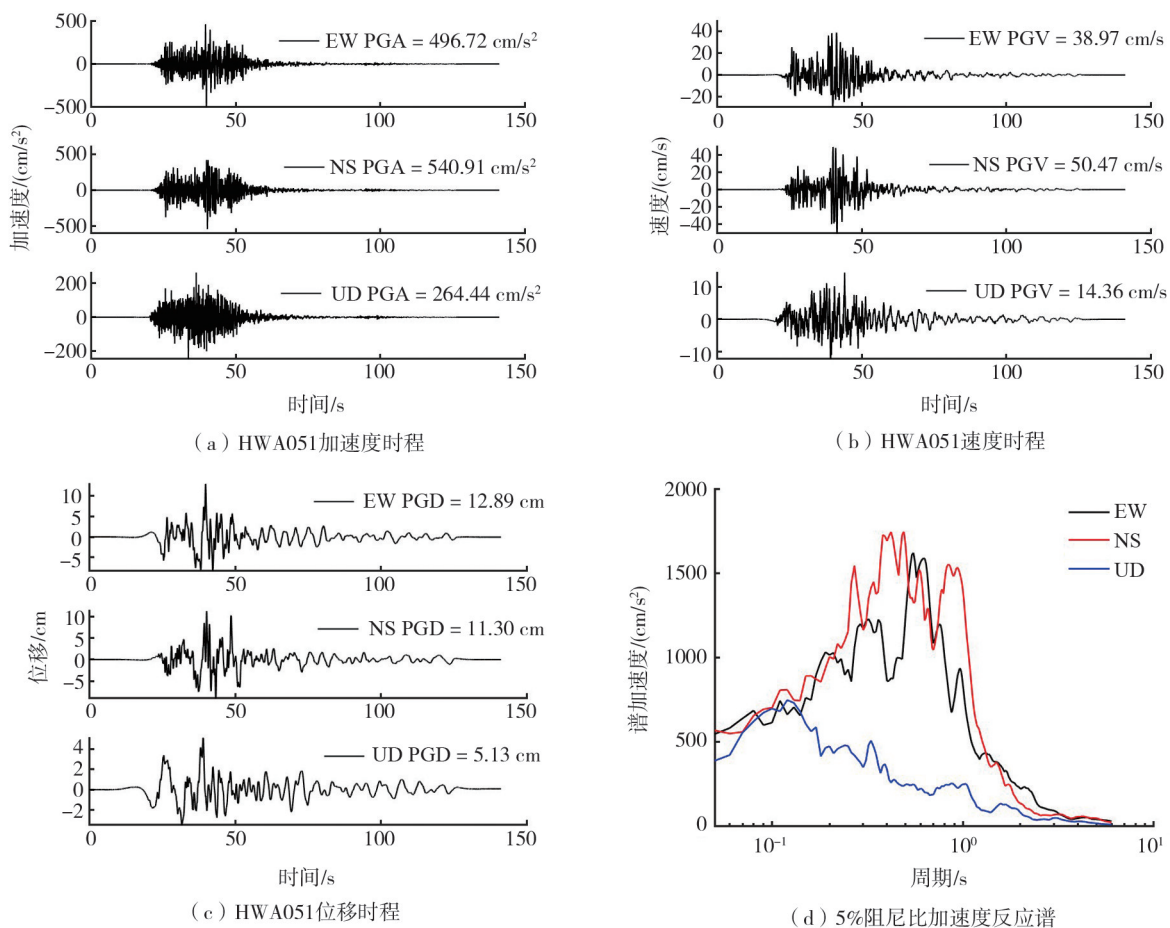


图 5 HWA051 台站三分量地震动记录及加速度反应谱

Fig. 5 Three-component ground motion records and acceleration response spectra at HWA051 station

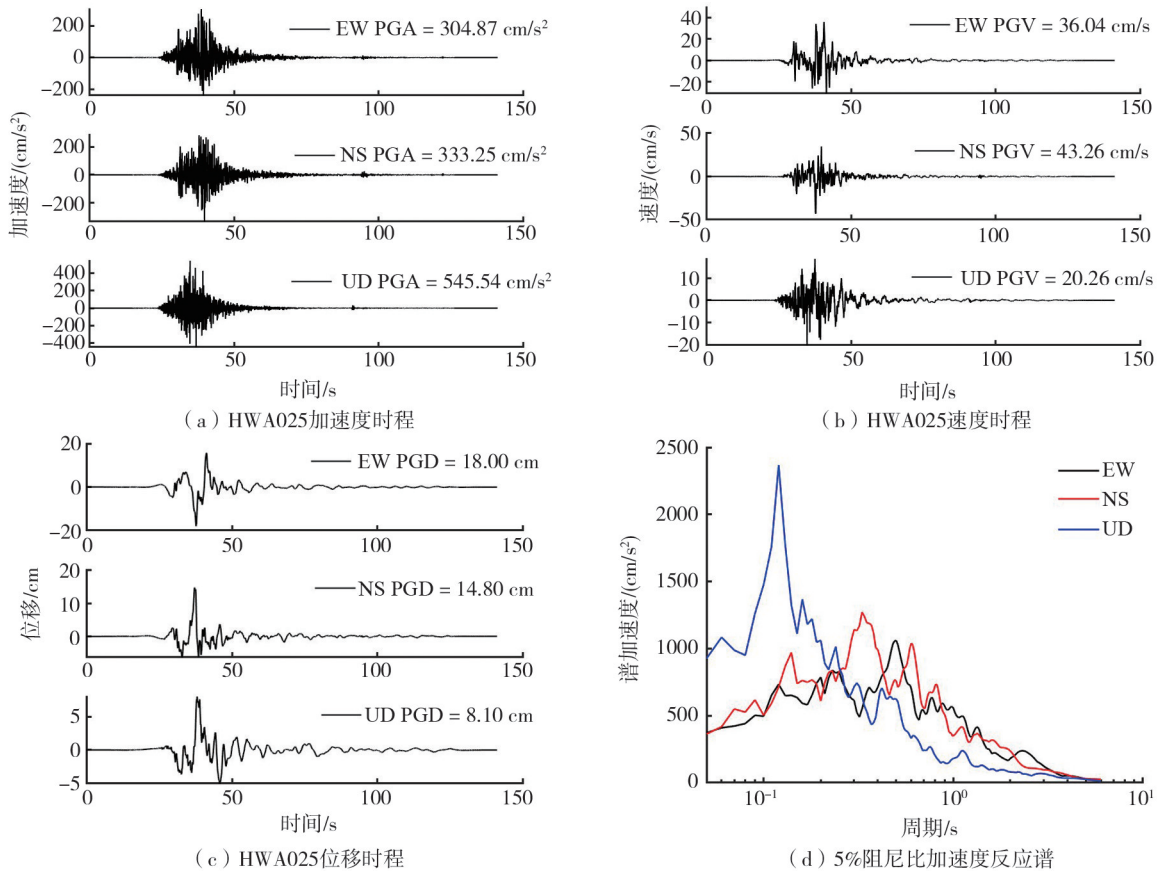


图 6 HWA025 台站三分量记录及加速度反应谱

Fig. 6 Three-component ground motion records and acceleration response spectra at HWA025 station

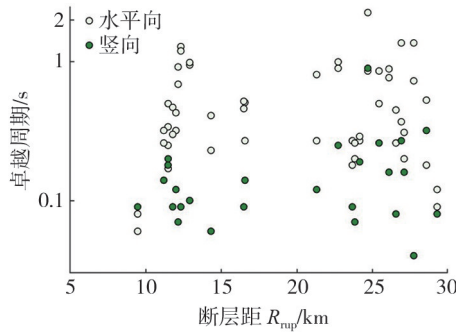


图 7 近断层台站计算的加速度反应谱卓越周期与断层距的分布关系

Fig. 7 Distribution relationship between the preeminent period of acceleration response spectra and rupture distance calculated from near fault stations

2.3 强震动记录衰减特征

地震动衰减关系也被称为地震动预测方程(ground motion prediction equations, GMPEs),即采用模型化的方式对地震动参数进行预测^[32],是地震动区划、概率地震危险性分析、重大工程场地地震安全性评价等地震工程学研究中的关键一环。因此,分析此次地震的衰减特征是必要的。

此次地震事件发生在双俯冲带——马尼拉海沟与琉球海沟地区,断层类型为逆断层,震源深度为12 km,其小于 50 km,震源位于俯冲板块海沟和海岸线之间,据美国 USGS^[33]给出的资料显示矩震级 M_w 7.4,因此,根据 MONTALVA 等^[34]的研究此次地震事件被划分为板间地震。鉴于上述条件,故选用 LIN 等^[35]和 CHAO 等^[36]针对台湾俯冲带地区提出的两个经验预测模型与此次地震进行对比,探究此次地震中水平向地震动的衰减特征。值得注意的是,两个预测模型中针对俯冲带地区考虑了震源类型和场地条件等解释变量,进而可以表征不同场地条件下震源类型为俯冲带板间和俯冲带板内地震的地震动参数(PGA, S_a)随距离的衰减规律。

为直观反映我国台湾花莲县 M_s 7.3 地震的衰减特性,结合 SEYHAN 等^[37]的场地效应模型,利用 KANNO

等^[38]的归一化方法对 238 个台站记录到的地震动观测值进行处理,归一化条件为 $V_{S30} = 467 \text{ m/s}$,绘制了水平向 PGA、给定周期为 $T=0.1 \text{ s}$ 、 $T=0.5 \text{ s}$ 、 $T=1.0 \text{ s}$ 时加速度反应谱 Sa 随距离的变化并与 LIN 等^[35](Lee08)和 CHAO 等^[36](Chao20)提出的两个经验模型进行对比,如图 8 所示。需要指出的是 Lee08 和 Chao20 采用了不同类型的水平成分以及距离参数,因此,为保证对比的科学性,本文在对比时与其保持一致。即与 Lee08 模型对比时,取水平两分量(EW、NS)的几何平均值,采用震源距(R_{hyp})作为输入变量;与 Chao20 模型对比时,分别取水平两分量的实际观测值以及断层距(R_{rup})作为输入变量,断层模型采用美国 USGS 公布的随机有限断层模型^[12],并从我国台湾强震测站厂址工程地质资料库^[39]中获得各台站的地表以下 30 m 深度内的平均剪切波速(V_{S30})。

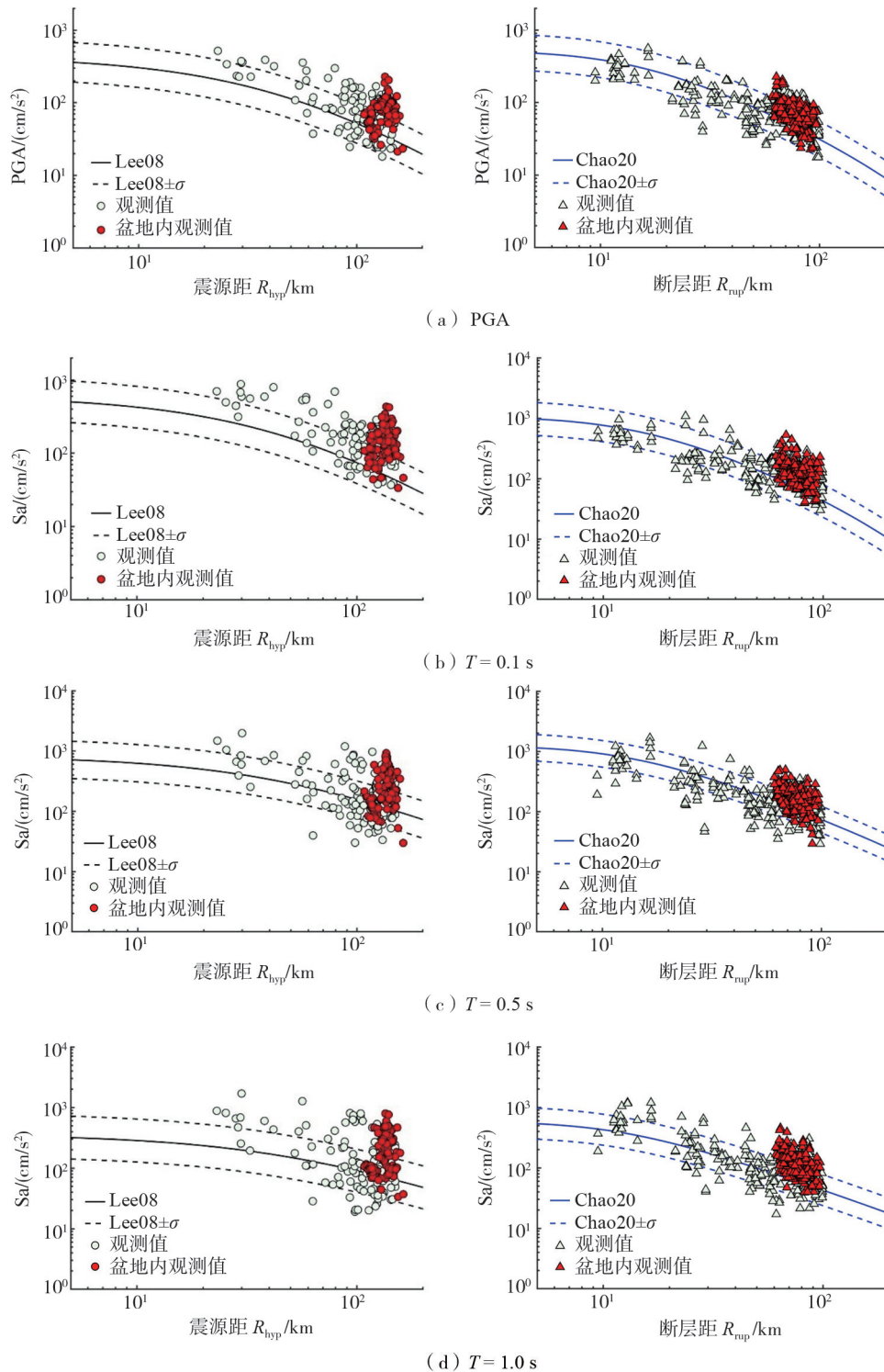
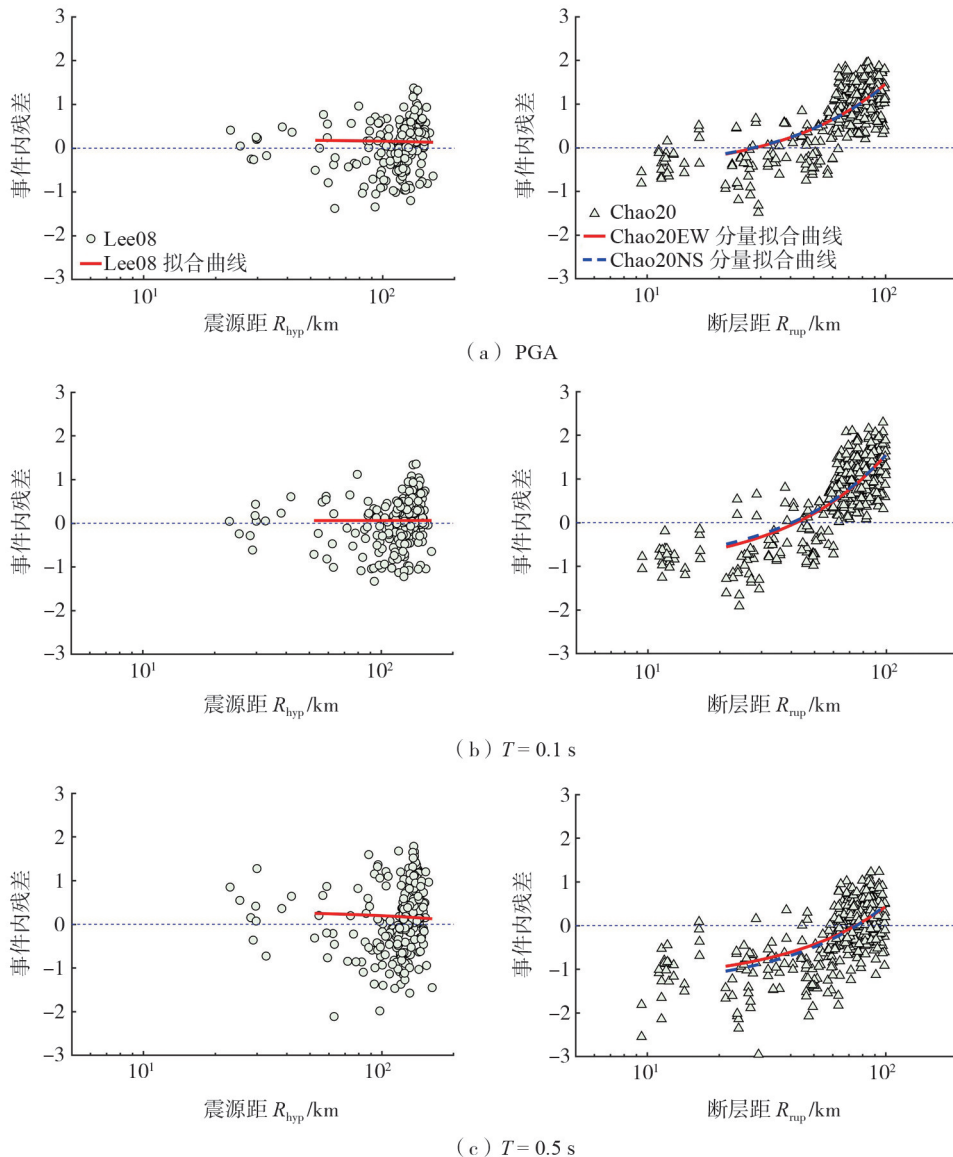


图 8 水平向 PGA 和给定周期下的 Sa 与距离的关系及 GMPEs

Fig. 8 Relationship between horizontal PGA and Sa at a given period to distance base on GMPEs

从图 8 整体来看,所选 2 个模型的预测趋势与此次地震水平向地震动的 PGA 和 Sa 随距离的衰减率均存在偏差,尤其是近断层区域,该区域的 PGA 和 Sa 观测值普遍高于 Lee08 模型的预测均值,且普遍低于 Chao20 模型的预测均值。图 8(d)可以看出在 $T=1.0$ s 的 Sa 观测值大都分布在 Chao20 模型预测均值 ± 1 倍标准差范围内,说明 Chao20 较好地捕捉到了该周期下的 Sa 衰减规律。结合图 8(a)和图 8(b)发现 PGA 和 Sa($T=0.1$ s)的观测值,在断层距 60 km 范围内基本均匀分布在 Chao20 模型均值 ± 1 倍标准差范围内,但在断层距 60~100 km 范围内观测值显著高于 Chao20 模型的预测均值,出现断崖式偏大这一现象(相比 60 km 以内的数据)且基本均匀分布在 Chao20 模型的预测均值+1 倍标准差附近,在震源距 80~160 km 范围内 PGA 和 Sa($T=0.1$ s)的观测值也大都分布在 Lee08 模型均值+1 倍标准差附近。结合台站分布情况以及台湾区域地质来看,断层距为 60~100 km 范围内的大量台站与震源间隔着山脉,且共有 92 个台站位于盆地之中(台北和台中盆地),可能山地场地放大效应^[40-41]和盆地场地放大效应^[42-43]导致了观测值在断层距为 60~100 km 范围内出现断崖式偏大这一现象(相比 60 km 以内的数据)。

为进一步探究此次地震动的衰减速率特征,采用了残差分析的方法进行讨论。过往研究中^[44-45],针对区域地震动衰减速率进行分析时,常用基于地震动预测模型与地震事件的事件内残差随距离的分布情况进行分析,利用 BOORE 等^[46]提出的拟合方法进行回归分析,回归分析得到的拟合曲线趋势分为平坦、下降、上升三种,分别代表着衰减速率的匀速、快速、缓慢。因此,基于上述所选的 2 个地震动预测模型,利用总残差减去事件间残差得到事件内残差,在回归分析中考虑到数据的可靠性针对两个模型分别限制的数据范围为 $R_{hyp} > 50$ km、 $R_{rup} > 20$ km,绘制了水平向 PGA 和给定周期下的 Sa 事件内残差与距离的关系,如图 9 所示。



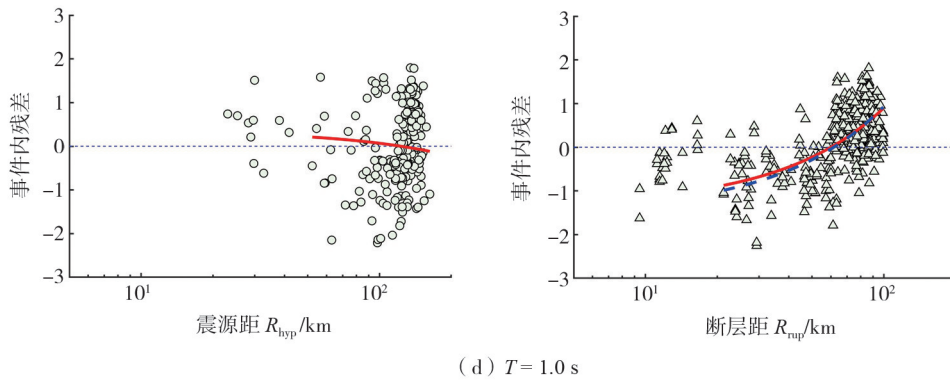


图 9 基于 GMPEs 绘制的水平向 PGA 和给定周期下的 Sa 事件内残差与距离的关系

Fig. 9 Relationship between the within-event residuals of horizontal PGA and Sa at a given period to distance based on GMPEs

从图 9 可以看出,此次地震动水平向 PGA 和给定周期下的 Sa,与 Lee08 模型相比事件内残差的拟合曲线较为平坦,随震源距的增加衰减较为匀速,与 Chao20 模型相比事件内残差的拟合曲线呈上升趋势,随断层距的增加衰减缓慢。

3 地震灾害分析

强震导致了诸多地质灾害及土木工程灾害,本节针对震害的成因及分布情况进行调查,结合地震动特征进行灾害分析。

3.1 地质灾害

此次地震诱发了严重的自然地质灾害,如山体滑坡、落石等,造成了严重交通阻塞,切断了当地的生命线,阻断了与外界的联系。滑坡是岩体或土体在重力作用下整体顺坡下滑造成的自然灾害^[47]。落石指常见于地形陡峭山区的一种地质灾害现象^[48],多与滑坡灾害伴随,地震在基岩山区常诱发落石崩塌。地震动强度与地震滑坡、落石之间密切相关,高震级、高烈度地震是诱发滑坡和泥石流地质灾害的关键因素^[49],通常 $M_s > 5$ 就会形成较大规模落石^[50],此次地震面波震级为 $M_s 7.3$ 符合大规模地震落石的形成条件。图 10 为地震导致台中山区道路旁山体塌方产生落石使得 21 人当场受困^[51];图 11 和图 12 为强震导致我国台湾花莲县山体滑坡、苏花公路崇德隧道口前大量落石,造成十多人伤亡、当地车辆无法正常通行双向交通受阻^[52,4];图 13 为位于宜兰县头城镇的著名景点龟山岛,其发生部分断裂,下方溅起粉尘^[53]。



图 10 地震导致落石塌方^[51]

Fig. 10 Landslides caused by earthquakes^[51]



图 11 我国台湾花莲县山体滑坡^[52]

Fig. 11 Landslide in Hualien County, Taiwan, China^[52]



图 12 苏花公路崇德隧道口大量落石^[4]

Fig. 12 Numerous rockfalls at the entrance of Chongde Tunnel on Suhua Highway^[4]



图 13 我国台湾龟山岛部分断裂^[53]

Fig. 13 Partial fracture of Guishan Island, Taiwan, China^[53]

此次地震滑坡、落石等地质灾害多位于台东与台中地区,由于当地山区众多,山地地形放大效应的存在为地质灾害的发育提供了条件。在极震区地震传播过程中的P波导致坡体上下向的高频震动导致岩体结构面中岩桥或底部软弱基座连接力下降产生裂隙^[54],后续的S波带有横向剪切作用使得土石体中裂隙扩展并贯通,最终体波衍生出强大面波,并伴随山区地形的加速度放大效应,发生滑坡与落石^[55]。

3.2 土木工程灾害

土木工程灾害是指土木工程原因导致工程失效、失稳而引发的灾害,其本质是土木工程抗灾能力不足所致^[5]。在地震作用下如果土木工程设施缺乏必要的抗震能力就会发生破坏甚至倒塌,对人类的生命和财产安全造成巨大威胁。此次地震对我国台湾花莲县造成重大的土木工程灾害,严重危害了当地百姓的生命财产安全,也重创了当地的经济发展,阻断了当地部分区域的交通,阻碍了救援工作的开展。

对当地房屋建筑震害进行调查如下:图14中地震导致新北市新店区安泰路发生地基塌陷,致使8间连栋建筑发生坍塌,附近居民住宅几乎悬空,住户生命安全受到威胁,附近12住户紧急撤离,另有10多辆汽车发生损毁^[56];图15中花莲县中山路天王星大楼因强震而发生大幅度倾斜,住宅楼地上9层和地下1层住有75户,整栋楼以45°倾角陷入地下,造成部分人员伤亡、受困,救援工作开展受阻^[4];图16为花莲市女子中学校舍内多处墙体发生破坏,墙内钢筋弯曲变形,墙体碎片散落满地,且墙体破坏中表现为窗户旁的框架柱破坏,导致该校停工停课^[57];图17为台北市新庄区和松山区居民楼砌体填充墙发生剪切破坏,部分瓷砖发生脱落,对地面车辆通行及行人安全受到影响^[58-59]。



图14 新北市房屋地基塌陷^[56]

Fig. 14 Foundation collapse of a residential building in New Taipei City^[56]



图15 花莲县天王星大楼发生倾斜^[4]

Fig. 15 Tilting of Uranus building in Hualien County^[4]



图16 花莲县女子中学校舍内多处墙体发生破坏^[57]

Fig. 16 Many walls damaged in the Girls' Middle School building in Hualien County^[57]



图17 台北市居民楼墙体破坏^[58-59]

Fig. 17 Damage to the walls of residential buildings in Taipei City^[58-59]

对当地交通工程设施进行调查如下:图18为强震所致新北市环线板新站至中原站间桥体发生错位钢箱梁局部位移,此外板新站至桥和站下行轨共有7处轨道错位,新北捷运全线停驶并疏散旅客,桥下车道也暂停行驶,人民的工作和生活遭受严重影响^[60];从图19和图20分别可见强震导致花莲县秀林乡大清水隧道前约20m处桥梁发生断裂,路基消失,途径车辆无法通行,苏花公路现场道路产生大裂缝,旁侧山体发生落石砸毁汽车砸伤民众,致使苏花路廊全线中断^[61-62],据台湾交通部门统计^[62],强震导致的受阻路段集中在道台8线、台9线,其中台8线花莲路段是观光线路的重要路段、台9线是苏花路廊的交通运输要道,公路及桥梁隧道的破坏切断了当地交通干线,一时间花莲县变成了“孤城”。图21中花莲港内道路破裂、西堤25号码头发生陷落地表下沉,无法正常作业^[63]。

土木工程灾害与强震动工程特征之间存在着密切联系,此次地震强震动具有中高频成分显著且幅值大的特征,卓越周期接近低层建筑、建筑内部隔墙、小跨度桥梁等中短周期结构的自振周期产生共振效应导致其受损严重。通过震害调查结合过往研究进行分析。地震作用下地基的砂土水体系可能会发生残余孔隙水压力不断积累和消散的变化,砂土骨架经过扰动由稳定到失稳再到稳定^[64],最终表现为地基沉降;水平向地震动会使得桥梁在水平方向受到地震激励作用后发生往复运动^[65],伴同行波效应^[66]的存在,桥梁纵向受到地震的非一致激励作用在不同位置产生不同位移,局部存在的位移差可能造成桥体的错位^[67-68];竖向地震作用是框架柱破坏的直接原因,竖向地震动幅值较大会影响框架柱的抗弯承载能力引发框架柱的拉压破坏^[69],同时水平地震作用可能进而造成其二次破坏即剪切破坏^[70],从而降低框架结构的整体刚度,甚至引起其倾斜与倒塌;此外,砌体结构的竖向抗震能力不足也会导致墙体的脱落^[71];此次地震动幅值衰减缓慢,致距离震源较远的新北市与台北市建筑受损也较为严重;强震作用下,公路因不规则的张拉剪切而发生断裂^[72],公路外侧挡墙、土体的滑移与破坏导致不均匀沉降,常表现为路基路面的破裂并伴随错动与滑移。



图 18 新北市环线桥体错位^[60]

Fig. 18 Dislocation of bridge body of New Taipei City Circle Line^[60]



图 19 花莲县秀林乡大清水隧道前桥梁断裂^[61]

Fig. 19 Bridge fracture in front of Daqingshui Tunnel in Xiulin Township, Hualien County^[61]



图 20 现场道路发生大破裂^[62]

Fig. 20 Large road rupture at the site^[62]



图 21 花莲港西堤 25 号码头陷落^[63]

Fig. 21 Collapse of Pier 25 of the West Embankment of Hualien Port^[63]

3.3 震害分布

震害调查的结果显示,此次地震对台东地区和台北地区造成的震害较为严重,集中于花莲县、台北市、新北市 3 个区域。结合我国台湾区域地质^[18]发现,此次地震震害最为严重的区域位于台东纵谷地壳对接带东侧即花莲县附近,且伴随断裂带的发育呈线性分布。从地震动观测结果来看:震害最为严重区域与近断层台站的分布基本吻合,沿台湾岛东部海岸线分布的烈度较大且显著高于非沿海地区,且震害较为严重的区域与地震烈度较大的区域极为重合,但同时也表现出了部分地区虽距震源较远但仍产生较大震害的异常现象,尤其是台北区域的台北市和新北市。结合表 2 给出的台站信息可以看出,5 个台站断层距相近但高程差异明显,地处山地的台站(TAP103)以及台北盆地的两台站(TAP014、TAP125)记录到的 PGA 显著高于一般台站(TCU129、CHY024),分析认为新北市和台北市震害较为严重可能是地震动的山地放大效应^[40-41]和盆地放大效应^[43]的存在造成的。由于台北市和新北市与震源之间隔着雪山山脉和中央山脉^[4],存在山地放大效应,并且两城市地处台北盆地^[73],存在盆地放大效应,使得地震波在传播过程中地震动幅值衰减缓慢甚至增大,所以该区域震害也较为严重。

表2 台站信息
Table 2 Station information

| 台站编号 | 位置 | 高程/m | 纬度 | 经度 | 断层距/km | PGA (cm/s ²) |
|--------------|-----|------|--------|---------|--------|--------------------------|
| A014(TAP014) | 台北市 | 16 | 25.06° | 121.55° | 68.07 | 106.58 |
| A125(TAP125) | 新北市 | 12 | 25.07° | 121.65° | 67.81 | 215.10 |
| A103(TAP103) | 新北市 | 728 | 25.07° | 121.78° | 68.56 | 178.19 |
| B129(TCU129) | 南投县 | 113 | 23.88° | 120.69° | 64.19 | 59.71 |
| C024(CHY024) | 云林县 | 101 | 23.76° | 120.62° | 68.35 | 78.89 |

4 结论

对于震害的防御和阻断通常需要从地震动特征入手,结合其作用的对象土木工程结构调查与分析,找出二者间的主要特征和联系,进而采取有效的手段开展抗震设防与减灾工作。本文结合此次地震的发震机制、收集到的地震动记录以及震害调查资料进行分析,着重探究了地震动的工程特征及其衰减规律并结合震害分布的情况进行讨论得出以下认识:

1) 此次地震发震机制为逆冲型破裂,地震断层类型为逆冲断层,可能导致此次地震记录到的所有三分量地震动峰值加速度中,竖向峰值加速度最大(545.54 cm/s²)。但结合台站的观测情况整体来看,此次地震的水平向地震动峰值加速度普遍大于竖向峰值加速度。

2) 对比 Chao20 模型的预测结果来看,此次地震具有水平向 PGA 和 Sa 随断层距增加衰减缓慢的特征。两模型对此次地震的近断层地震动的 PGA 和 Sa 随距离的衰减预测均存在偏差,在距离较远处可能是山地地形和盆地地形放大效应的存在,导致部分台站的观测值高于两个模型的预测均值。针对俯冲带区域地质构造极为复杂,考虑该震源类型的地震动预测模型亟待完善。

3) 根据震害调查的结果显示,此次地震震害集中位于花莲县、新北市、台北市,震害最严重的区域位于花莲县附近,且伴随断裂带的发育呈线性分布。同时发现新北市、台北市虽距离震源较远但震害也较为严重这一现象,结合当地地形和相关台站信息进行分析认为,地震动的山地放大效应和盆地放大效应可能导致了这一现象的出现;此外,震害较为严重的区域与地震烈度较大的区域几乎重合,表现出震害分布与地震动分布特征的密切相关性。

4) 此次地震导致的土木工程灾害以中短周期结构为主,如低层建筑、建筑内部隔墙、小跨度桥梁等,结合本次地震的地震动工程特征来看此次地震动也具有中短周期成分显著的特征。表明地震动特征与土木工程结构中具有相同成分,由此产生的共振效应是导致土木工程结构破坏的重要原因。

致谢:感谢中国台湾气象局地震台网中心提供的花莲地震强震动记录数据。

参考文献:

- [1] 中国地震台网中心. 台湾花莲县海域 7.3 级地震[EB/OL] [2024-04-03] <https://news.ceic.ac.cn/CC20240403075809.html>.
China Earthquake Networks Center. Taiwan's Hualien County area 7.3 earthquake [EB/OL] [2024-04-03] <https://news.ceic.ac.cn/CC20240403075809.html>. (in Chinese)
- [2] United States Geological Survey. *M*_{7.4}-15 km S of Hualien City, Taiwan ShakeMap [EB/OL] [2024-04-02] <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000m9g4/shakemap/intensity>.
- [3] 台湾气象署第 019 号 4 月 3 日 7 时 58 分规模 7.2 花莲县政府南南西方 14.9 公里(位于花莲县寿丰乡) [EB/OL] [2024-04-03] <https://scweb.cwa.gov.tw/zh-tw/earthquake/imgs/2024040307580972019>.
Taiwan Meteorological Agency No.019 April 3 7:58 Scale 7.2 South South West of Hualien County Government 14.9 km (located in Shoufeng Township, Hualien County) [EB/OL] [2024-04-03] <https://scweb.cwa.gov.tw/zh-tw/earthquake/imgs/2024040307580972019>. (in Chinese)
- [4] 高孟潭. 台湾花莲 7.3 级地震的分析与反思[J]. 防灾博览, 2024(3): 26-33.
GAO Mengtan. Analysis and reflection of *M*_{7.3} earthquake in Hualien, Taiwan, China[J]. Overview of Disaster Prevention, 2024(3): 26-33. (in Chinese)
- [5] 谢礼立, 曲哲. 论土木工程灾害及其防御[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(1): 1-10.
XIE Lili, QU Zhe. On the civil engineering disaster and its mitigation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(1): 1-10. (in Chinese)

- [6] 张斌, 李小军, 林国良, 等. 2021年5月21日漾濞 M_S 6.4地震近场地震动特征和方向性效应分析[J]. 地球物理学报, 2021, 64(10): 3619-3631.
ZHANG Bin, LI Xiaojun, LIN Guoliang, et al. Analysis of strong ground motion characteristics and directivity effect in the near-field for the May 21, 2021 M_S 6.4 Yangbi earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(10): 3619-3631. (in Chinese)
- [7] LI J, XU L H. Seismic performance improvement of continuous rigid-frame bridges with hybrid control system under near-fault ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 168: 107858.
- [8] ALAVI B, KRAWINKLER H. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2004, 33(6): 687-706.
- [9] DABAGHI M, DER KIUREGHIAN A. Stochastic model for simulation of near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(6): 963-984.
- [10] KAZAZI, BILGEI H, GÜRBÜZ M. Near-fault ground motion characteristics and its effects on a collapsed reinforced concrete structure in Hatay during the February 6, 2023 M_w 7.8 Kahramanmaraş earthquake[J]. Engineering Structures, 2024, 298: 117067.
- [11] 王钦莹, 陈鲲, 王永哲, 等. 2024年4月3日台湾省花蓮县海域7.3级地震的快速产出参数[J]. 地震科学进展, 2024(4): 286-291.
WANG Qinying, CHEN Kun, WANG Yongzhe, et al. Quick output parameters related to the 3 April 2024 $M7.3$ earthquake in the sea area of Hualien County, Taiwan Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024(4): 286-291. (in Chinese)
- [12] United States Geological Survey. $M7.4-15$ km S of Hualien City, Taiwan Finite Fault [EB/OL][2024-04-02] <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000m9g4/finite-fault>.
- [13] 王志岗, 陶连金, 石城, 等. 逆断层错动作用下双仓管廊结构力学特性和抗断设计研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(07): 37-50.
WANG Zhigang, TAO Lianjin, SHI Cheng, et al. Study on structural mechanical characteristics and fracture resistance design of double-bin pipe corridor under the action of reverse fault dislocation[J]. Journal of Civil Engineering, 2024, 57(7): 37-50. (in Chinese)
- [14] 中国地质科学院地质研究所. 认识正断层 [EB/OL] [2023-03-09] <http://www.igeo.cgs.gov.cn/kpyd/dxzs/201812/W020181207571988825133.jpg>.
Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. Know the normal fault [EB/OL] [2023-03-09] <http://www.igeo.cgs.gov.cn/kpyd/dxzs/201812/W020181207571988825133.jpg>.
- [15] 黄奇瑜, 闫义, 赵泉鸿, 等. 台湾新生代层序: 反映南海张裂, 层序和古海洋变化机制[J]. 科学通报, 2012, 57(20): 1842-1862.
HUANG Qiyu, YAN Yi, ZHAO Quanhong, et al. Cenozoic sequence in Taiwan: Reflecting the rifting, sequence and paleoceanic change mechanism of the South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(20): 1842-1862. (in Chinese)
- [16] 肖文交, 宋东方, 张继恩, 等. 俯冲带结构演变解剖与研究展望[J]. 地球科学, 2022, 47(9): 3073-3106.
XIAO Wenjiao, SONG Dongfang, ZHANG Jien, et al. Anatomy of the structure and evolution of subduction zones and research prospects[J]. Earth Science, 2022, 47(9): 3073-3106. (in Chinese)
- [17] 黄少华, 万永革, 冯溢, 等. 2022年9月17日中国台湾地震序列的触发机制及其动力学成因[J]. 地质力学学报, 2023, 29(5): 674-684.
HUANG Shaohua, WAN Yongge, FENG Gan, et al. Trigger mechanism and dynamic causes of the Taiwan region earthquake sequence on September 17, 2022[J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(5): 674-684. (in Chinese)
- [18] 张开毕, 徐维光, 陈淑华, 等. 台湾区域地质概论[J]. 福建地质, 2017, 36(2): 79-93.
ZHANG Kaibi, XU Weiguang, CHEN Shuhua, et al. Geological survey in Taiwan area[J]. Geology of Fujian, 2017, 36(2): 79-93. (in Chinese)
- [19] 田浩, 胡进军, 谭景阳, 等. 海底长周期地震动预测模型: 以日本相模湾海域为例[J]. 振动与冲击, 2024, 43(5): 188-201.
TIAN Hao, HU Jinjun, TAN Jingyang, et al. Long-period ground motion prediction model for submarine: A case study of Sagami Bay area in Japan[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(5): 188-201. (in Chinese)
- [20] 田浩, 胡进军, 谭景阳, 等. 基于特征分类排序的典型海底地震动记录研究[J]. 震灾防御技术, 2022, 17(2): 360-371.
TIAN Hao, HU Jinjun, TAN Jingyang, et al. Recommendation of ranked typical seafloor ground motions records according to characteristic classification[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2022, 17(2): 360-371. (in Chinese)
- [21] 张斌, 俞言祥, 肖亮. 近断层强震记录基线校正的改进方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(5): 137-142, 163.
ZHANG Bin, YU Yanxiang, XIAO Liang. An improved method for near-fault strong ground motion records' baseline correction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(5): 137-142, 163. (in Chinese)
- [22] 李明, 谢礼立, 翟长海, 等. 近断层地震动区域的划分[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(5): 20-25.
LI Ming, XIE Lili, ZHAI Changhai, et al. Scope division of near-fault ground motion[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(5): 20-25. (in Chinese)
- [23] BOORE D M, STEPHENS C D, JOYNER W B. Comments on baseline correction of digital strong-motion data: Examples from the 1999 Hector Mine, California, earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002; 92(4): 1543-1560.
- [24] BOORE D M, BOMMER J J. Processing of strong-motion accelerograms: Needs, options and consequences[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(2): 93-115.
- [25] 姚鑫鑫, 任叶飞, 岸田忠大, 等. 强震动记录的数据处理流程: 去噪滤波[J]. 工程力学, 2022, 39(增刊1): 320-329.
YAO Xinxin, REN Yefei, KISHIDA T, et al. The procedure of filtering the strong motion record: Denoising and filtering[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(Sup. 1): 320-329. (in Chinese)

- [26] 姚鑫鑫,任叶飞,岸田忠大,等. 满足数据同一性的强震动记录去噪滤波后处理输出方法[J]. 工程力学, 2025, 42(1): 152-163.
YAO Xinxin, REN Yefei, KISHIDA T, et al. A post processing method of strong motion record filtering satisfying the compatibility[J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(1): 152-163. (in Chinese)
- [27] 胡进军,田浩,谭景阳,等. 海域和陆地地震动输入能量与强度指标相关性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(9): 7-18.
HU Jinjun, TIAN Hao, TAN Jingyang, et al. Correlation between input energy and intensity measures of offshore and onshore ground motions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(9): 7-18. (in Chinese)
- [28] SPUDICH P A, FLETCHER J B, HELLWEG M, et al. Earthquake ground motions in extensional tectonic regimes; 96-292[R]. Nevada: U. S. Geological Survey, 1996.
- [29] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006: 91-95.
HU Yuxian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 2006: 91-95. (in Chinese)
- [30] 公茂盛,左占宣,赵一男,等. 地震动持时对工程结构地震反应影响研究进展[J]. 世界地震工程, 2023, 39(3): 142-153.
GONG Maosheng, ZUO Zhanxuan, ZHAO Yinan, et al. State-of-the-art review for the influence of strong ground motion duration on structural seismic response[J]. World Earthquake Engineering, 2023, 39(3): 142-153. (in Chinese)
- [31] LEE C T. Site classification of Taiwan free-field strong-motion stations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 91(5): 1283-1297.
- [32] 肖亮,俞言祥. 我国大陆地区常用浅壳地震的地震动参数衰减关系[J]. 地震学报, 2022, 44(5): 752-764.
XIAO Liang, YU Yanxiang. Review on the commonly-used ground motion parameters attenuation relationships for shallow crustal earthquakes in Chinese mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(5): 752-764. (in Chinese)
- [33] USGS. $M7.4-15$ km S of Hualien City, Taiwan[EB/OL][2024-04-02] <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000m9g4/moment-tensor>.
- [34] MONTALVA G A, BASTÍAS N, RODRIGUEZ-MAREK A. Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2017, 107(2): 901-911.
- [35] LIN P S, LEE C T. Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in northeastern Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(1): 220-240.
- [36] CHAO S H, CHIOU B, HSU C C, et al. A horizontal ground-motion model for crustal and subduction earthquakes in Taiwan[J]. Earthquake Spectra, 2020, 36(2): 463-506.
- [37] SEYHAN E, STEWART J P. Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations[J]. 2014, 30(3): 1241-1256.
- [38] KANNO T. A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(3): 879-897.
- [39] 中国台湾地震工程研究中心. 中国台湾强震测站厂址工程地质资料库[EB/OL]. [2024-04-03]. <https://egdt.ncree.org.tw>.
Taiwan Earthquake Engineering Research Center, China. Engineering geological database of the strong earthquake survey station site in Taiwan, China[EB/OL]. [2024-04-03]. <https://egdt.ncree.org.tw/>. (in Chinese)
- [40] 王海云,谢礼立. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(7): 1631-1638.
WANG Haiyun, XIE Lili. Effects of topography on ground motion in the Xishan park, Zigong city[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(7): 1631-1638. (in Chinese)
- [41] 贾晓辉,叶迎春,冯向东,等. 山地与平原地形对地震动影响的对比分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(1): 242-249.
JIA Xiaohui, YE Yingchen, FENG Xiangdong, et al. Comparison of the effects of mountainous regions and sedimentary plains on ground motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 242-249. (in Chinese)
- [42] 于彦彦,丁海平. 盆地深度对盆地地表地震动及次生面波的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(3): 147-156.
YU Yanyan, DING Haiping. Effects of basin depth on seismic ground motion and basin-induced surface wave[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(3): 147-156. (in Chinese)
- [43] 于彦彦. 三维沉积盆地地震效应研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.
YU Yanyan. Research on seismic effect of three-dimensional sedimentary basin[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016. (in Chinese)
- [44] XU P B, REN Y F, WEN R Z, et al. Observations on regional variability in ground-motion amplitude from six $M_w6.0$ earthquakes of the north-south seismic zone in China[J]. Pure and Applied Geophysics, 2020, 177(1): 247-264.
- [45] REN Y F, WANG H W, XU P B, et al. Strong-motion observations of the 2017 $M_w7.0$ Jiuzhaigou earthquake: Comparison with the 2013 $M_s7.0$ Lushan earthquake[J]. 2018, 89(4): 1354-1365.
- [46] 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]. 2014, 30(3): 1057-1085.
- [47] 陈龙伟,汪云龙,袁晓铭,等. 2023年甘肃积石山6.2级地震中川乡液化流滑灾害调查及诱因初析[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(1): 187-193.
CHEN Longwei, WANG Yunlong, YUAN Xiaoming, et al. Preliminary analysis for the triggering of soil flowslide that occurred in Zhongchuan Town following the 2023 Jishishan $M_s6.2$ earthquake in Gansu Province[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(1): 187-193. (in Chinese)

- [48] 田婷婷, 吴中海, 马志邦, 等. 青海玉树断裂带地震落石的地震地质意义[J]. 地质通报, 2014, 33(4): 567-577.
TIAN Tingting, WU Zhonghai, MA Zhibang, et al. A tentative discussion on the seismic and geological significance of the seismic rockfall along the Yushu faulted zone in Qinghai Province[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(4): 567-577. (in Chinese)
- [49] 白仙富, 杨志全, 胡斌, 等. 区域地震滑坡灾害定量评估研究进展和展望[J]. 地震工程学报, 2023, 45(6): 1408-1424.
BAI Xianfu, YANG Zhiqian, HU Bin, et al. Research progress and prospect of the quantitative evaluation of regional earthquake-induced landslide disasters[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(6): 1408-1424. (in Chinese)
- [50] 谢洪, 王士革, 孔纪名. “5.12”汶川地震次生山地灾害的分布与特点[J]. 山地学报, 2008, 26(4): 396-401.
XIE Hong, WANG Shige, KONG Jiming. Distribution and characteristics of mountain hazards induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan, China[J]. Mountain Research, 2008, 26(4): 396-401. (in Chinese)
- [51] U.S. News. The Aftermath of Taiwan's Earthquake [EB/OL] [2024-04-03] <https://www.usnews.com/photos/2024/04/03/the-aftermath-of-taiwans-earthquake>.
- [52] U.S. News. Taiwan earthquake rescuers face threat of landslides, rockfalls; death toll at 12 [EB/OL] [2024-04-04] <https://www.usnews.com/news/world/articles/2024-04-04/taiwan-searches-for-18-still-missing-after-earthquake>.
- [53] 中国新闻网 台湾龟山岛部分断裂! 专家解析地震成因[EB/OL] [2024-04-03] <https://www.chinanews.com.cn/gn/2024/04-03/10192320.shtml>.
China News Network. Chinatimes.com Part of Guishan Island in Taiwan has broken off! Expert analytic earthquake cause [EB/OL] [2024-04-03] <https://www.chinanews.com.cn/gn/2024/04-03/10192320.shtml>. (in Chinese)
- [54] 赵波. 川西北高烈度峡谷区大型地震滑坡成因机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
ZHAO Bo. Genetic mechanism of large earthquake landslide in high-intensity canyon area of northwest Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [55] 陈鹏, 邱梁才, 姚宜斌, 等. 基于 InSAR 和光学影像解译的 2023 年甘肃积石山 $M_s6.2$ 震后地表形变和灾害分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 257-270.
CHEN Peng, QIU Liangcai, YAO Yibin, et al. Surface deformation and hazard analysis after the 2023 $M_s6.2$ earthquake in Jishishan, Gansu Province based on InSAR and optical imagery interpretation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(2): 257-270. (in Chinese)
- [56] 中时新闻网 7.2 强震震中区域百年来最大 专家: 余震将持续半年[EB/OL] [2024-04-04] <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240404001008-260405 chdtv>.
China Times. The largest expert in the epicenter area of the 7.2 strong earthquake in a century: Aftershocks will last for six months long [EB/OL] [2024-04-04] <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240404001008-260405 chdtv>. (in Chinese)
- [57] 中时新闻网 花莲 7.2 大震! 花莲女中多出校舍倾斜梁柱开裂钢筋弯曲露出[EB/OL] [2024-04-03] <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240403001601-260402 chdtv>.
China Times. Hualien 7.2 earthquake! Hualien girls at school more sloping beams reinforced beams bending show [EB/OL] [2024-04-03] <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240403001601-260402 chdtv>. (in Chinese)
- [58] 三立新闻网. 居民楼砌体墙体破坏[EB/OL] [2024-04-03] <https://www.setn.com>.
Sanlih News Network. Masonry wall damage of residential building [EB/OL] [2024-04-03] <https://www.setn.com>. (in Chinese)
- [59] 新华网 台湾花莲县海域发生 7.3 级地震[EB/OL] [2024-04-03] <http://www.news.cn/photo/20240403/6d8e6bf7ac794d40a1da09970f13cacb/c.html>.
Xinhua News Agency. 7.3-magnitude earthquake hits waters off Hualien County, Taiwan [EB/OL] [2024-04-03] <http://www.news.cn/photo/20240403/6d8e6bf7ac794d40a1da09970f13cacb/c.html>. (in Chinese)
- [60] 中时新闻网 新北环状线爆灾捷运局证实: 板新至中原站间位移[EB/OL] [2024-04-03] <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240403001487-260405 chdtv>.
China Times. New North Ring line explosion disaster Bureau confirmed: New plate to the central station displacement between [EB/OL] [2024-04-03] <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240403001487-260405 chdtv>. (in Chinese)
- [61] 中时新闻网. 苏花路廊航拍[EB/OL] [2024-04-03 14:33] https://www.chinatimes.com/cn/realtimenews/20240403004156-260405 ctrack=pc_main_life_p02&chdtv.
China Times. Aerial photo of Suhua road corridor [EB/OL] [2024-04-03] https://www.chinatimes.com/cn/realtimenews/20240403004156-260405 ctrack=pc_main_life_p02&chdtv. (in Chinese)
- [62] 台湾交通部公路局 台湾东部海域地震公路局巡查省道路况台 8 线及台 9 线苏花路廊全线封闭[EB/OL] [2024-04-03] https://www.thb.gov.tw/News_Content_table.aspx n=12181&s=249549.
Taiwan Ministry of Communications Highway. Bureau Taiwan Eastern Sea Seismic Highway Bureau inspect provincial road conditions Taiwan Line 8 and Taiwan Line 9 Suhua Road corridor closed [EB/OL] [2024-04-03] https://www.thb.gov.tw/News_Content_table.aspx n=12181&s=249549. (in Chinese)
- [63] 中时新闻网 花莲县西堤码头出现地表凹陷凸起[EB/OL] [2024-04-03] <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240403005928-260405 chdtv>.
China Times. Hualien county west causeway pier in the surface concave convex [EB/OL] [2024-04-03] <https://www.chinatimes.com/realtimenews/20240403005928-260405 chdtv>.

- realtimenews/20240403005928-260405 chdtv. (in Chinese)
- [64] 向庆刚, 陈洪凯, 廖云平, 等. 强震区桥台地基沉降失效破坏机理研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(增刊1): 563-565.
XIANG Qinggang, CHEN Hongkai, LIAO Yunping, et al. Mechanism study on ground subsidence damage of abutment failure in meizoseismal area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(S1): 563-565. (in Chinese)
- [65] 张昊宇, 黄勇, 汪云龙. 基于倾斜摄影建模的硫磺沟铁路桥震害分析[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 39-47.
ZHANG Haoyu, HUANG Yong, WANG Yunlong. Earthquake damage analysis of Sulfangou railway bridge based on oblique photographic modeling[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(2): 39-47. (in Chinese)
- [66] XIN C L, WANG Z, HAJIRASOULIHA I, et al. Seismic response mechanisms of casing-shape composite tunnel lining: Theoretical analysis and shaking table test verification[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 162: 107440.
- [67] YI J, YANG H Y, LI J Z. Experimental and numerical study on isolated simply-supported bridges subjected to a fault rupture[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 127: 105819.
- [68] LIN Y Z, CHEN Y Q, ZONG Z H, et al. A new hybrid input strategy to reproduce across-fault ground motions on multi-shaking tables[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2021, 49(2): 691-712.
- [69] 潘毅, 任靖哲, 任宇, 等. 考虑台地效应的泸定 6.8 级地震某框架结构震害调查与分析[J]. 土木工程学报, 2024, 57(6): 136-151.
PAN Yi, REN Jingzhe, REN Yu, et al. Seismic damage investigation and analysis of frame structures in Luding $M_s6.8$ earthquake considering platform effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(6): 136-151. (in Chinese)
- [70] 谢贤鑫, 潘毅, 寇创琦, 等. 泸定 6.8 级地震学校建筑典型震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 12-24.
XIE Xianxin, PAN Yi, KOU Chuangqi, et al. Typical seismic damage investigation and analysis to school buildings in the Luding $M_s6.8$ earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(6): 12-24. (in Chinese)
- [71] 张聪, 周宝峰, 任叶飞, 等. 2022 年四川泸定 $M_s6.8$ 地震强震动特性研究[J]. 世界地震工程, 2024, 40(1): 13-24.
ZHANG Cong, ZHOU Baofeng, REN Yefei, et al. Strong motion characteristics of the 2022 Luding $M_s6.8$ earthquake, Sichuan province[J]. World Earthquake Engineering, 2024, 40(1): 13-24. (in Chinese)
- [72] 朱明, 李杰, 赵飞, 等. 2022 年 $M_s6.8$ 级泸定地震公路震害特征分析[J]. 世界地震工程, 2024, 40(2): 197-207.
ZHU Ming, LI Jie, ZHAO Fei, et al. Analysis of highway damage characteristics from 2022 Luding $M_s6.8$ earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2024, 40(2): 197-207. (in Chinese)
- [73] 李咸亨, 吴志明, 罗胜元, 等. 台北盆地地盘震动反应分析探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, (2): 154-158.
LI Xianheng, WU Zhiming, LUO Shengyuan, et al. Seismic response analysis in Taipei Basin [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, (2): 154-158. (in Chinese)