

1975年海城地震两次5.0级以上余震地震动方向性特点分析

黄勇^{1,2}, 马德宝^{1,2}, 何桦^{1,2}, 田一格^{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: 聚焦于1975年海城地震中两次5.0级以上余震, 深入探究地震动方向性特点及其与发震断层的关系, 并基于结构测点记录分析了几类结构的反应方向性特点。首先对海城地震的背景进行了阐述, 然后基于全方位反应谱、持时谱和输入能量谱等分析方法, 对海城和营口的6个观测台站的记录进行了详细分析。研究发现: 地震动强度在不同方向上的变化显著, 特别是在周期为1.5~3.5 s之间时, 海城余震的地震动强度方向性效应比NGA-West2的SB14模型的预测更为显著。长周期(1.0 s以上)的方向性效应尤为突出, 在长周期频段, 近断层地震动的方向性差异更加明显。在全方位反应谱的高频段中, 东西向卓越方向与F2东西向隐伏断层呈现出高度相关性; 而中低频段则清晰展现出F1北北西向主断层的方向性特征; 结构反应的方向性会因结构自身因素(如结构形式、长短轴方向和场地条件等)而发生一些变化。桥墩地震反应方向性与自由场方向性基本一致, 而房屋结构反应方向性存在一定程度的旋转。

关键词: 海城地震; 走滑断层; 余震; 地震动方向性; 结构反应方向性

中图分类号: TU4; P315

文献标志码: A

Analysis of the directional characteristics of ground motion from two aftershocks with magnitude 5.0 or above in the 1975 Haicheng earthquake

HUANG Yong^{1,2}, MA Debao^{1,2}, HE Hua^{1,2}, TIAN Yige^{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: This study focuses on two aftershocks of magnitude 5.0 or above in the Haicheng earthquake of 1975, and explores in depth the directional characteristics of their ground motion and the relationship with the seismogenic fault. The response directional characteristics of several types of structures were analyzed using structural measurement point records. First, the background of the Haicheng earthquake is explained, subsequently based on analysis methods such as omnidirectional response spectrum, duration spectrum, and input energy spectrum, the vibration records of six observation stations in Haicheng and Yingkou were analyzed in detail. The results show that the variation of ground motion intensity in different directions is significant, especially when the period is between 1.5~3.5 seconds. The directional effect of seismic intensity of Haicheng aftershocks is more significant than that of the SB14 model of NGA-West2. The directional effect of long-period (≥ 1.0 s) is particularly prominent, and in the long-period frequency band, the directional difference of near fault ground motion is more pronounced. In the high-frequency range of the omnidirectional response spectrum, there is a high correlation between the east-west dominant direction and the F2 east-west hidden fault, while the mid low frequency range clearly shows the directional characteristics of the F1 north northwest main fault. The directionality of structural reactions may undergo

收稿日期:2025-03-31; 修回日期:2025-06-04

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(2024B25)

作者简介:黄勇(1969—),男,研究员,博士,主要从事桥梁抗震和结构健康监测研究。E-mail:huangyong@iem.ac.cn

some changes due to structural factors, such as structural form, major and minor axes, site conditions, etc. The seismic response directionality of bridge piers is basically consistent with the free field directionality, while there is a certain degree of rotation in the directional response of building structures.

Key words: Haicheng earthquake; strike slip fault; aftershock; directionality of ground motion; directionality of structural response

0 引言

1975年2月4日中国辽宁省海城地区发生了7.3级强烈地震,震中位于东经 $122^{\circ}48'$,北纬 $40^{\circ}39'$,震源深度12 km,震中烈度为IX度^[1]。主震后中国地震局工程力学研究所派出了流动观测队,取得了7个流动台24次强余震记录^[2],为分析近断层地震动方向性效应提供了宝贵的数据基础。

近断层地震动方向性效应作为显著影响结构响应的关键参数,目前尚未被国内外主要建筑抗震设计规范纳入考量。虽然在美国的AASHTO桥梁抗震设计指南中的概率危险模型中提到地震动方向性效应^[3],但在桥梁抗震设计上仍然采用的是“100%主方向+30%次方向”的组合规则。这一简化方法未能充分反映地震动方向性的统计特性(如RotD谱)与结构实际响应的耦合效应^[4]。对于地震动方向性特征的分析,SOMERVILLE等^[5]基于1994年Northridge地震、1995年阪神地震等历史地震统计,分析修正了考虑破裂方向性振幅和持续时间影响的经验强地震动衰减关系,认为断裂方向性效应会改变断层周围地震动振幅和持续时间的空间变化,并导致水平地震动振幅的断层法向分量和断层平行分量之间的差异。SHAHI等^[6]在NGA-West2项目中提出了一个强震方向性模型(SB14),定量分析地震方向性差异。谢俊举等^[7-8]利用日本K-NET和KiK-net强震动台网获取的距离发震断层100 km以内136个强震动台站的三分量加速度记录,研究熊本7.0级地震地震动的长周期特性,继而又分析了芦山地震近断层地震动方向性。安昭等^[9]研究了2018年2月6日花莲6.4级地震近场强地震动PGA、PGV及周期为0.2~10.0 s加速度谱值空间分布和衰减特征。

日本学者井上和真等^[10]提出一种以水平双向地震动作为输入,计算单自由度体系地震反应得到的全方位反应谱。这种方法能综合展现水平双向地震动的反应谱,更全面地反映地震动反应特征,尤其是方向性特征。HUANG等^[11-14]遵循断层参数习惯表达,改进了井上全方位反应谱的极坐标形式,并提出全方位持时谱来分析地震动持时方向性特点,同时考虑到输入能量谱可以从能量角度分析地震动的特点,提出4种不同本构的全方位输入能量谱。本文将利用这些工具来分析此次地震中地震动方向性特点。

本研究选取了位于近断层区域的3个海城台站和3个营口台站所获取的强余震记录(重点分析两次震级超过5.0级的余震),利用全方位反应谱、全方位持时谱、全方位能量谱分析地震动记录。具体目标包括:①系统揭示海城余震近断层地震动在加速度、速度、位移、持时及能量输入等维度的全方位方向性特征;②探讨这些特征与发震断层走向的关联;③分析地震动方向性与典型结构(砖混、钢筋混凝土)响应方向性的关系。

1 发震断层及余震观测台站位置

研究认为其发震断层是沿北北西向破裂,错动方式为左旋剪切错动^[1]。赵宏阳等^[15]认为破裂主断层为海城隐伏断层F1,同时在其西北端有一近东西向隐伏断层F2,主震震中北有一前震发震断层F3,破裂自震源向外传播触发F2和F3发生破裂。这3个发震断层位置如图1所示。

当年中国地震局工程力学研究所流动台站共有7个强震台站记录了当地时间1975年2月12日至26日的余震^[2]。本文拟对两次5.0级以上的余震进行分析。由于本文重点关注地震动方向性效应,需要水平双向地震动记录来进行分析,故只列出符合条件的记录分析结果。当年流动台站所用的仪器均为北京地质仪器厂生产的RDZ1-12-66型强震加速度仪,频带范围为0.5~35.0 Hz。文献[2]对获得的加速度数据做一次带通滤波,然后用微分-积分法对仪器进行了校正处理。本研究直接采用进行了仪器校正和零线校正后的数字化记录来分析。表1为两次余震的具体信息^[16]。主震震中的空间位置和余震强震观测台站位置如图1所示。可以看出,震中处于山区,而大部分台站处于平地市区,主要包括海城的3个台站和营口的3个台站。本文拟分析这6个台站的记录,析木台在这两次强余震中没有得到记录,故本文不做分析。台站详细信息见表2。

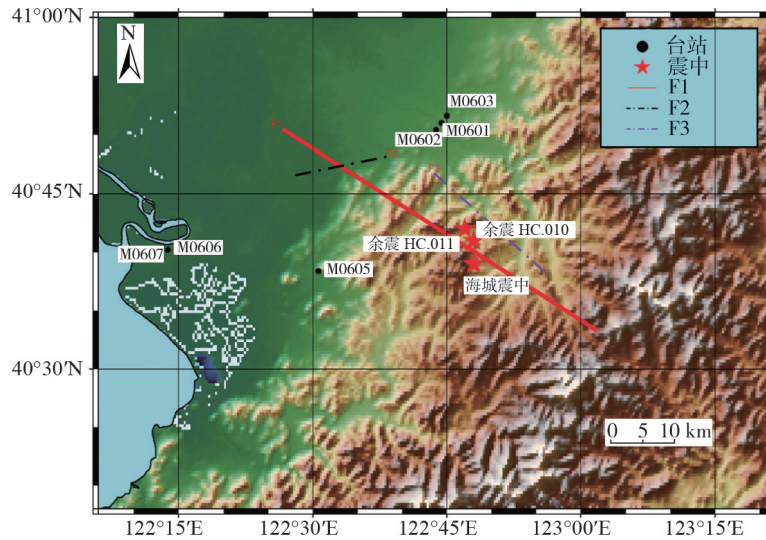


图 1 强震动记录台站及震中空间位置图(基于文献 2 制作)

Fig. 1 Spatial distribution of strong motion recording stations and epicenter (based on the reference 2)

表 1 余震信息

Table 1 Aftershocks information

余震编号	发生时间	震中位置	深度/km	震级/级	断层走向
HC.010	1975-02-15T21:08:02	122°47'E, 40°42'N	12	5.4	N 69°W
HC.011	1975-02-16T22:01:26	122°48'E, 40°41'N	11	5.3	N 57°W

表 2 台站信息

Table 2 Stations information

台站名称	强震台代号	位置	方向及距离	测点	断层距/km	PGA/(cm/s ²)	PGV/(cm/s)
海城 M0601	HG	40°51'N, 122°44'E	震中西北方向、断层东北方向,距震中约 17.5 km	F 点(单层砖房走廊)、G 点(室外地面,距离 10 米左右)	14.9	67.47	8.02
海城 M0602	HD	40°50'N, 122°44'E	震中西北方向、断层东北方向,距震中约 16 km	IH 测点(人防工程内)、小山包顶	14.2	98.62	6.67
海城 M0603	HQ	40°52'N, 122°45'E	震中西北方向、断层东北方向,距震中约 18 km	G 测点(东端桥台南侧地面)、2TP 测点(2# 墩顶)	14.5	39.47	2.15
营口 M0605	PL	40°38'N, 122°31'E	断层和震中西南部,距震中约 24 km	HM 测点	15.6	65.79	8.80
营口 M0606	FD	40°40'N, 122°40'E	断层和震中西南部,距震中约 48.2 km	1F 测点(一楼地面)、5F 测点(5 楼楼板)	26.0	35.57	2.74
营口 M0607	BG	40°40'N, 122°14'E	断层和震中西南部,距震中约 48.06 km	1F 测点(一楼地面)、3F 测点(3 楼楼板)	26.0	24.53	

2 地震动方向性特点分析

2.1 Shahi 和 Baker 方法分析

地震动强度在不同方向上的变化可以通过一些特定的比值来定量描述。通常使用最大值与中值的比值($S_{a, RotD100}/S_{a, RotD50}$)以及最大值与最小值的比值($S_{a, RotD100}/S_{a, RotD00}$)来衡量地震动强度随方向变化的差异程度^[6, 17-18]。这些比值不仅在地震动经验模型中被广泛应用,还在工程结构设计中发挥重要作用^[19]。由于考虑了方向的随机性,地震动强度的最大值和中值在不同标准之间的转换中具有重要意义^[6]。

为了定量分析此次地震中近断层地震动强度随方向的变化,我们计算了加速度反应谱值在不同方向上的最大值/中值比($S_{a, RotD100}/S_{a, RotD50}$)和最大值/最小值比($S_{a, RotD100}/S_{a, RotD00}$)。图 2 给出了两次余震共 12 条记录计算得到的不同周期点的最大值/中值的比值($S_{a, RotD100}/S_{a, RotD50}$)结果。具体而言,对于每条地震记录,我们在 0.1~5.0 s 的时间范围内计算了 50 个周期点的加速度谱值,通过对比不同周期段、不同方向上的最大比值来分析其方向性特征,并与 NGA-West2 的方向性模型 SB14^[6]进行对比分析。最大值/中值比反映了地震

动强度在不同方向上的离散程度,可以发现,周期在 1.5~3.5 s 之间时,海城余震中 $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD50}}$ 比值的平均值显著大于 SB14 模型,在其他周期两者结果较为接近。此次海城余震中获取记录相对较少,因此结果的离散性较大, $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD50}}$ 比值的平均值虽然表现为随周期变化时高时低,但整体上显示出先增加后降低的趋势,且在 2.0 s 周期时达到最大值。说明地震动在 $T=2.0$ s 方向性较强。

图 3 展示了不同周期点上计算得到的最大值与最小值比值($S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD00}}$)的平均值。从图中可以看出, $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD00}}$ 的平均值随着周期的变化呈现出先增大后减小的趋势。此外, $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD00}}$ 的平均值总体上高于 $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD50}}$ 的结果。特别是对于 1.0 s 以上的周期,比值均大于 1.5。这表明在长周期频段,近断层地震动的方向性效应更为显著,与短周期相比,这种方向性差异更加突出。近断层地震动在不同观测方向存在显著强度差异,长周期段($T=1.0$ s 以上)的方向性差异比短周期段($T=0.1$ s 以下)更明显,且在距断层约 35 km 以内具有明显方向性,卓越方向接近垂直断层走向,随断层距增大差异减小^[16]。

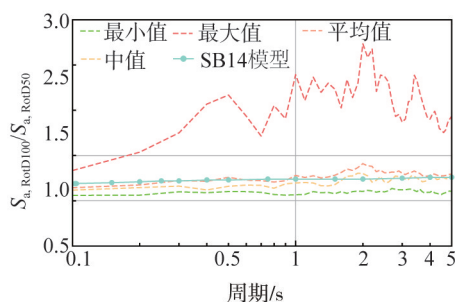


图 2 计算得到不同方向上的反应谱 $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD50}}$ 的比值随周期的变化

Fig. 2 Ratio of $S_{a, \text{RotD100}}$ to $S_{a, \text{RotD50}}$ for near-fault recordings as a function of vibration periods

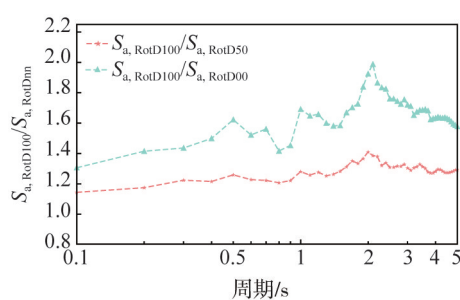


图 3 计算得到不同方向上的反应谱 $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD00}}$ 和 $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD50}}$ 的比值平均值随周期的变化

Fig. 3 Ratio of the average of $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD00}}$ and $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD50}}$ for recordings observed as a function of vibration periods

2.2 全方位谱法分析

本文主要利用全方位反应谱、全方位持时谱、全方位输入能量谱的全方位谱来分析地震动方向性特点。全方位谱是用径向坐标来表示结构周期 T ,用环向坐标来表示方位角,用云图来表示响应值以此来绘制的图形。与传统反应谱方法相比,全方位反应谱方法能同时考虑地震动的多方向特性,明确体现方向性特征;与传统的地震动方向性反应谱值最大值法相比,全方位谱反映了地震动在不同周期和输入方向上的相应指标的变化。因为不同周期卓越方向有可能不同,全方位谱法在分析多个发震断层影响时有独特的优势。在分析结构反应的方向性时也可以结合结构形式和模态周期发挥作用。

2.2.1 M0601 台站记录地震动特点

1) HC.010 余震

全方位反应谱、持时谱和输入能量谱如图 4 所示。可看出 G 测点加速度响应在 0~0.25 s 周期段卓越方向接近东西向,与 F2 断层破裂方向相近;速度响应在 0.10~0.25 s 周期段卓越方向接近东西向,0.50~0.75 s 周期段卓越方向接近北北西向,接近 F1 主断层破裂方向;而位移响应在 1.00~4.50 s 周期区间卓越方向明显接近 F1 主断层破裂方向。显著持时的能量集中释放时段对应 0.25~1.20 s 特征周期区间,方位角在 30°~80°和 210°~260°方位角范围持时较长,而 135°和 315°方位角持时较短,且在 60°和 240°方位角处观测到持时参数的阶跃变化。因 M0601 台站布设的结构是单层砖房,故全方位输入能量谱采用有捏缩特点的 PH 模型进行分析,0.10~0.25 s 卓越方向为 N82°E,接近东西向,0.25~0.50 s 卓越方向接近北北西向。而对于 F 测量点,加速度响应在 0~0.25 s 周期段卓越方向接近东西向,而速度和位移、显著持时和输入能量均表现出与 G 测点方向性明显的不同。G 测点为室外自由场,而 F 测点为一层砖房室内地面,两者的卓越方向有明显区别。从发震的 3 个断层导致地震波传播呈现明显的方向性效应的角度看,G 测点的全方位反应谱和输入能量谱的卓越方向体现出与断层走向平行的方向性,而显著持时谱则正好相反,表现出垂直断层走向的方向性。G 测点自由场地震动与断层走向关联性强,F 测点作为结构反应,其方向性出现的变化,可能与房屋结构长短轴和场地条件有关。

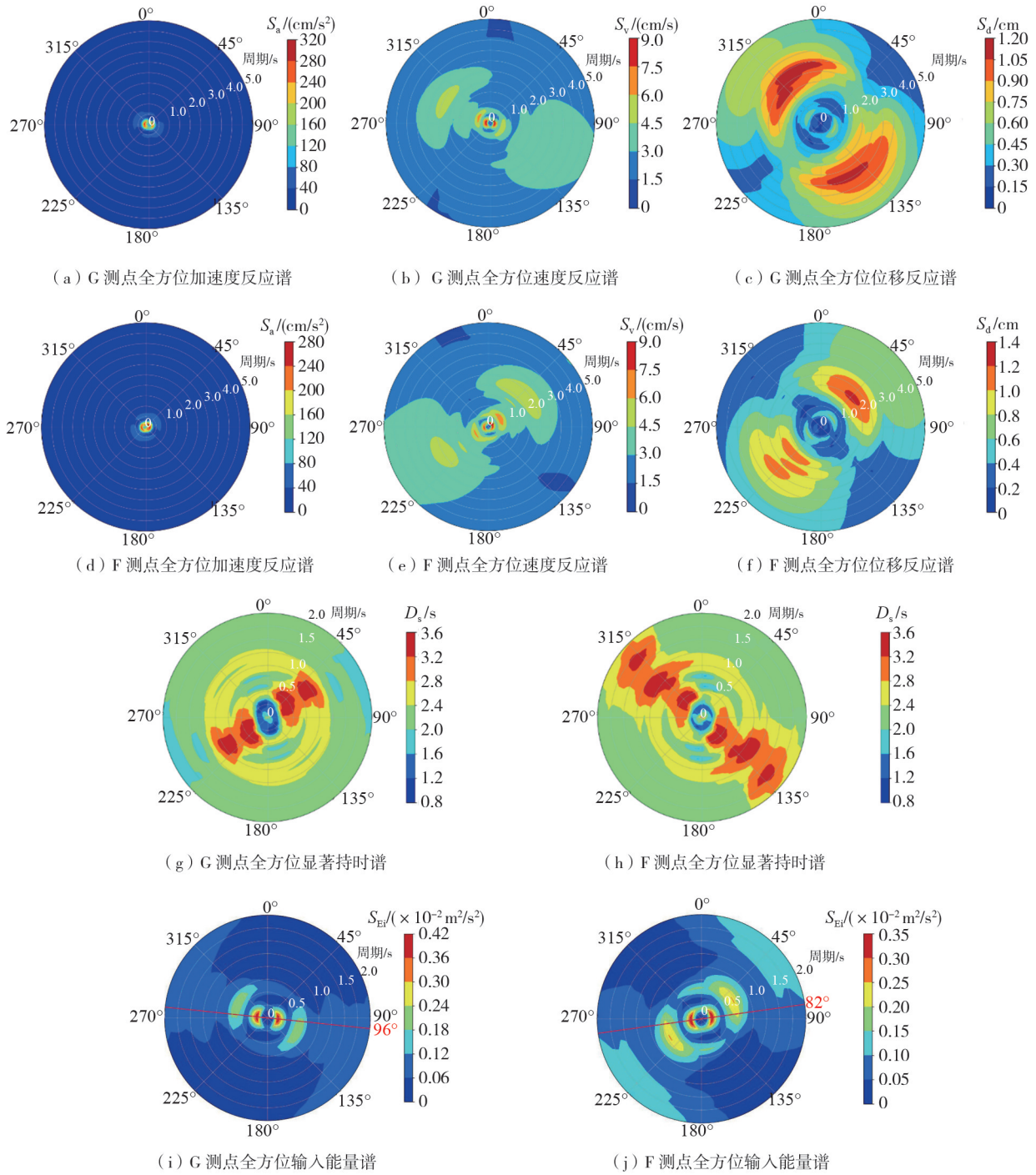


图 4 HC.010 余震下 M0601 台站两个测点全方位反应谱、全方位持时谱和全方位输入能量谱

Fig. 4 Omnidirectional response spectrum, duration spectrum and input energy spectrum of Station M0601 during the HC.010 aftershock

2) HC.011 余震

全方位反应谱、持时谱和输入能量谱如图 5 所示。可看出对于 G 测量点,加速度响应在 0.15~0.25 s 周期段卓越方向接近南北向,与 F2 断层破裂垂直方向相近;在 0.30~0.50 s 周期段卓越方向接近东西向,与 F2 断层破裂方向相近。速度响应在 0.50~0.75 s 周期段卓越方向接近东西向,而位移响应在 1.20~3.00 s 周期区间接近北北西。显著持时在 0.50 s 以内能量主要由 0°向 90°转化过渡的过程。输入能量谱显示的卓越方向大致为东西走向,与 F2 断层破裂方向相近。总体趋势与 HC.010 余震类似,卓越方向略微顺时针旋转了一点。旋转角度与顾浩鼎等^[16]分析的两次数震发震断层走向差 12°基本一致。F 测点也与 HC.010 时的趋势相近。再次体现出 G 测点自由场地震动与断层走向关联性强,F 测点结构反应会因房屋结构长短轴和场地条件等使得方向性有所变化。同时,也可以看出不同余震地震动方向性的略微变化。

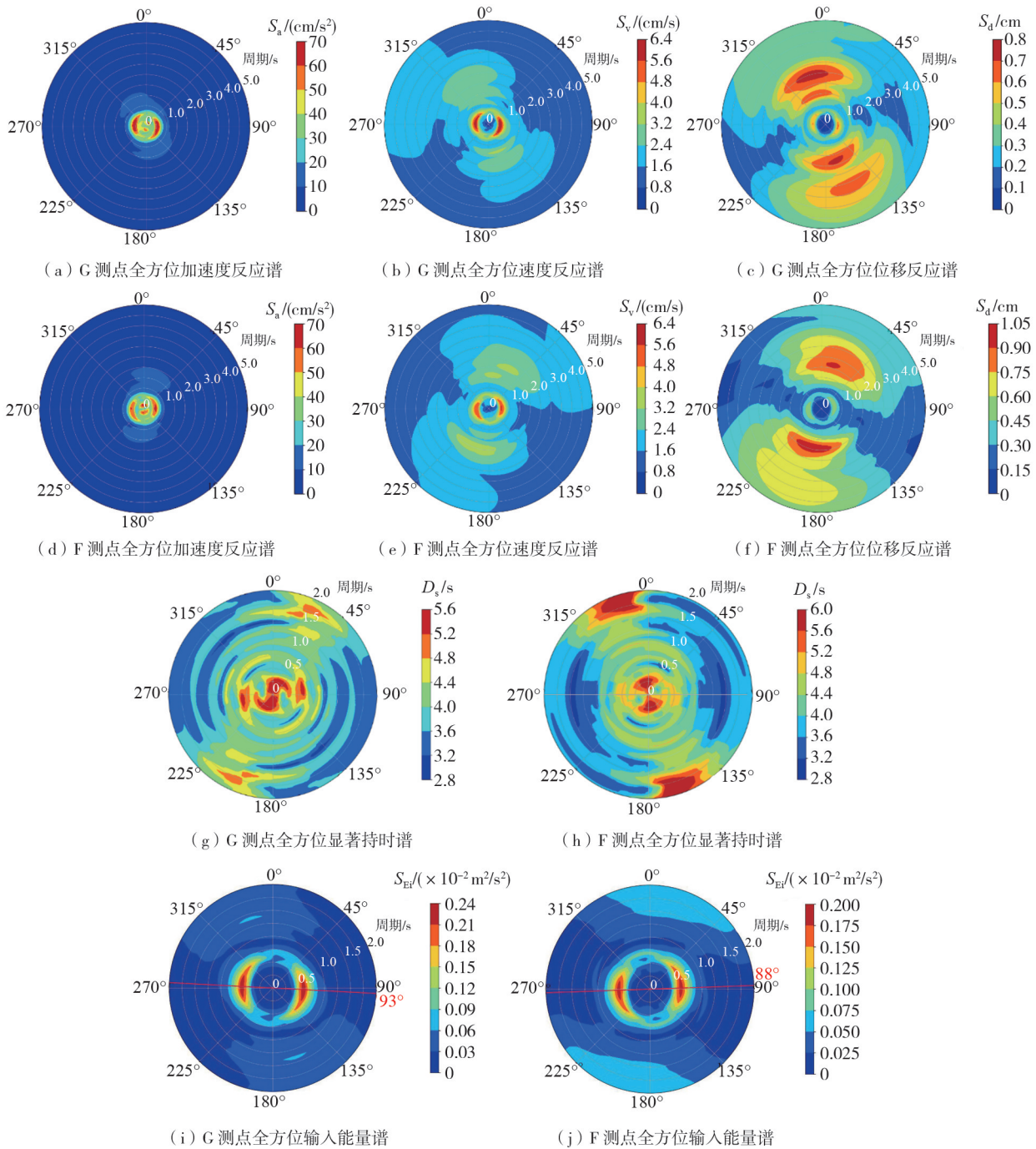


图 5 HC.011 余震下 M0601 台站两个测点全方位反应谱、全方位持时谱和全方位输入能量谱

Fig. 5 Omnidirectional response spectrum, duration spectrum and input energy spectrum of Station M0601 during the HC.011 aftershock

2.2.2 M0602 台站记录地震动特点

该台站只记录到 HC.010 余震的 1 个 IH 测点的记录, 布设于一个基岩山体人防工程地面。IH 测点的全方位谱如图 6 所示, 全方位加速度反应谱显示其卓越方向接近为东西向; 速度响应在 0.20~0.30 s 周期段出现谱峰, 接近东西向; 而位移响应在 1.00~2.00 s 周期区间卓越方向接近北北西。显著持时分析表明: 能量集中释放时段对应 0.25~0.50 s 特征周期区间; 方位角分布呈现, 60°~130° 和 240°~310° 方位角范围持时较长, 而 0° 和 180° 方位角持时较短, 且在 70° 和 250° 方位角处观测到持时参数的阶跃变化。该人防工程采用的建筑材料并不清楚, 为了方便讨论, 我们将采用的砖混常用的 PH 模型和钢筋混凝土常用的 MC 模型和 SSD 模型来承担输入能量谱。可以看出 3 个模型得到的结果差别不大, 卓越方向都是 N93°W, 趋势与 M0601 类似。与 M0601 台分析结果比较, 可以看出, M0602 台方向性特点有些介于 M0601 自由场 G 测点和 F 测点之间。本质上 IH 测点是地下结构的反应输出, 只是在基岩上, 表现出与断层走向相关联的特点。

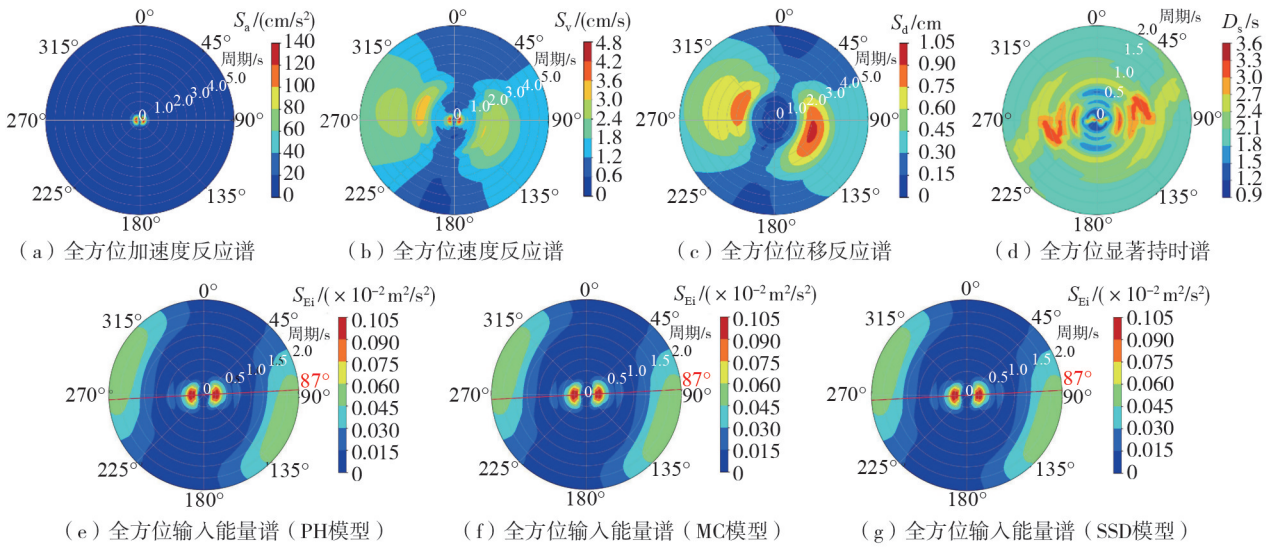


图 6 HC.010 余震下 M0602 台站 IH 测点全方位反应谱、全方位持时谱和全方位输入能量谱

Fig. 6 Omnidirectional response spectrum, duration spectrum and input energy spectrum at IH point of Station M0602 during the HC.010 aftershock

2.2.3 M0603 台站记录地震动特点

该台站设在沈大线建于 1949 年的钢桁梁桥上,桥长 252.9 m, 7 跨 (33.5 m×1+36.1 m×6), 桥墩为混凝土墩。桥梁走向如图 7 所示,为 N36°E。只记录到 HC.010 余震中两个测点,其中 G 测点位于东端桥南侧的地面上,2TP 测点位于 2#墩墩顶。G 测点和 2TP 测点都没有 UD 方向的加速度数据。

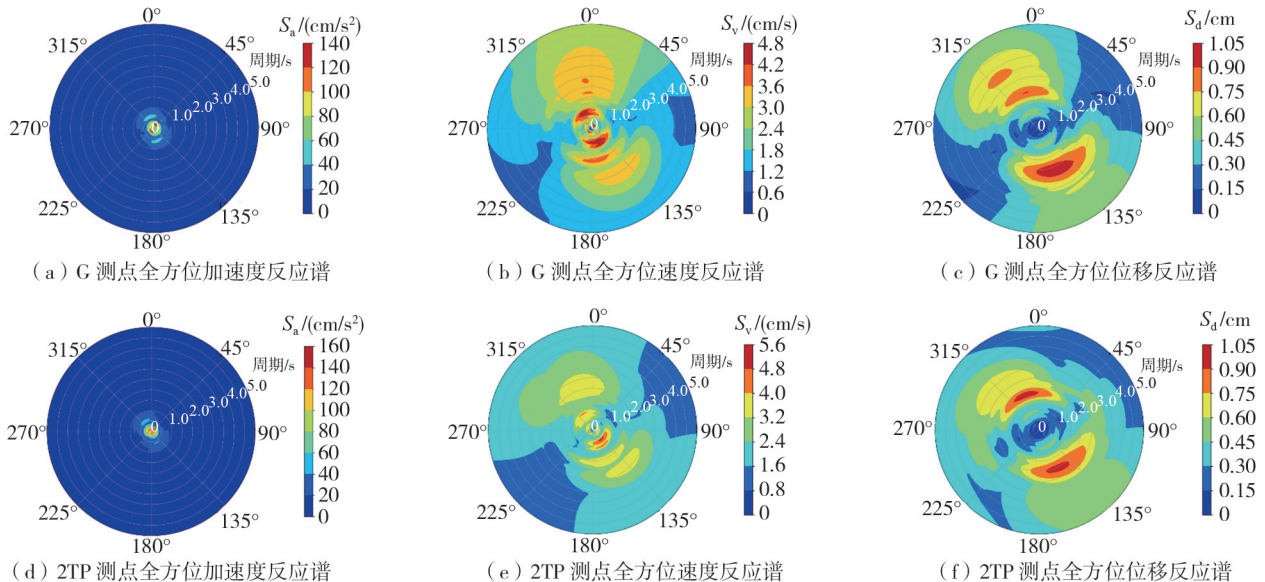


图 7 桥梁俯视图和测点位置

Fig. 7 Plan view of the bridge and location of measurement points

该台站的全方位谱如图 8 所示,G 测点全方位加速度反应谱表明,在 0.10~0.20 s 显示其在垂直于 F1 断层方向卓越,在 0.30~0.50 s 则接近平行 F1 断层方向卓越;速度响应在 0.50~1.00 s 周期段及 1.50~1.75 s 周期段分别出现接近平行 F1 断层和 F2 断层的卓越方向;位移响应在 1.50~2.00 s 周期区间卓越方向接近平行 F1 断层。此外,全方位显著持时谱显示其在垂直于 F1 发震断层方向卓越。桥墩为混凝土桥墩,故全方位能量谱采用了 MC 模型和 SSD 模型,卓越方向均接近平行 F1 断层,两模型基本没有区别。2TP 测点全方位谱与 G 测点比,各卓越方向变化不大。与 M0601 台分析结果比较,可以看出,M0603 台的输入 G 测点与输出 2TP 测点在方向性方面比较一致,这可能是因为桥墩结构比较简单,近似单自由度体系,结构反应并没显著改变方向性。

此外,全方位显著持时谱显示其在垂直于 F1 发震断层方向卓越。桥墩为混凝土桥墩,故全方位能量谱采用了 MC 模型和 SSD 模型,卓越方向均接近平行 F1 断层,两模型基本没有区别。2TP 测点全方位谱与 G 测点比,各卓越方向变化不大。与 M0601 台分析结果比较,可以看出,M0603 台的输入 G 测点与输出 2TP 测点在方向性方面比较一致,这可能是因为桥墩结构比较简单,近似单自由度体系,结构反应并没显著改变方向性。



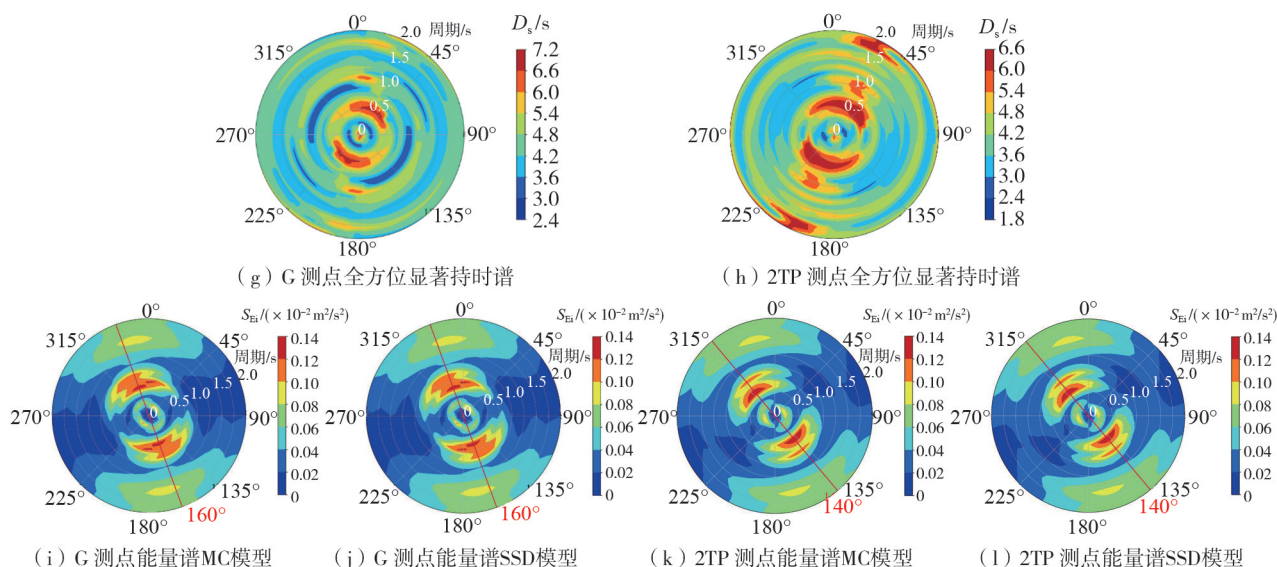


图8 HC.010余震下M0603台站两个测点全方位反应谱、全方位持时谱和全方位输入能量谱

Fig. 8 Omnidirectional response spectrum, duration spectrum and input energy spectrum of Station M0603 during the HC.010 aftershock

2.2.4 M0605 台站记录地震动特点

该台站只记录到 HC.010 余震中一个 HM 测点。全方位谱分析如图 9 所示。加速度全方位反应谱显示卓越方向约为 165° ，速度全方位反应谱显示卓越方向约为 145° ，位移全方位反应谱显示卓越方向约为 170° 。显著持时能量集中释放时段对应 $0.25 \sim 2.00$ s 特征周期区间；方位角分布呈现显著各向异性： $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $180^\circ \sim 270^\circ$ 方位角范围持时较长，而 135° 和 315° 方位角持时较短，且在 20° 、 60° 、 200° 和 240° 方位角处观测到持时参数的阶跃变化。HM 测点的位置在山坡上，全方位能量谱在此使用意义不大，故略去。该台站设置的核心目的是为了观测地形效应的影响，但在两次强余震记录中仅有一个 HM 测点获取了数据，未能实现预期设计目标。若将其视为自由场测点分析，可见其卓越方向与 F1 发震断层走向近乎平行，显著持时则与断层走向呈近似垂直关系。

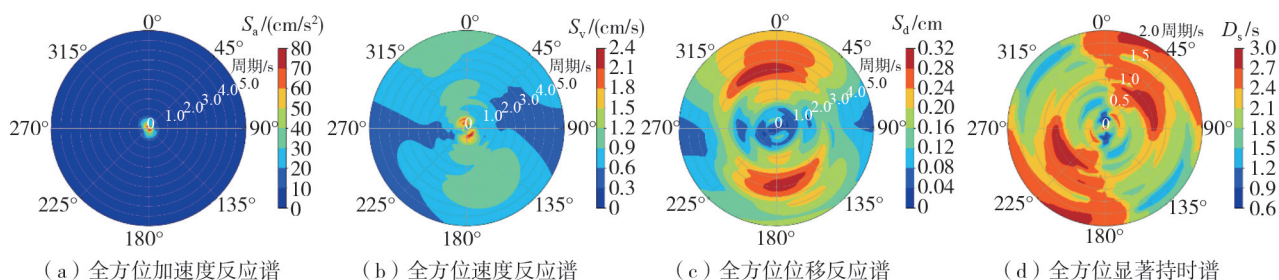


图9 HC.010余震下M0605台站HM测点全方位反应谱、全方位持时谱

Fig. 9 Omnidirectional response spectrum, duration spectrum at point HM of Station M0605 during the HC.010 aftershock

2.2.5 M0606 台站记录地震动特点

该台站只在 HC.011 余震中记录到两个测点。全方位谱如图 10 所示。1F 测点加速度响应在 $0.30 \sim 0.50$ s 周期段卓越方向约为 45° ，接近垂直 F1 断层走向；速度全方位反应谱显示卓越方向约为 130° 接近平行 F1 断层走向；位移全方位反应谱显示卓越方向约为 130° 。显著持时卓越方向约为 30° ，能量集中释放时段对应 $0.25 \sim 0.30$ s 和 $1.25 \sim 1.70$ s 特征周期区间。该台站是一座 5 层的钢筋混凝土框架结构，故采用 MC 模型和 SSD 模型计算全方位输入能量谱，其卓越方向高频段接近垂直于 F1 断层走向，低频段接近平行 F1 断层走向。5F 测点加速度响应在 $0.30 \sim 0.50$ s 周期段呈现显著方向聚集效应，加速度全方位反应谱显示卓越方向约为 150° ；速度全方位反应谱显示卓越方向约为 150° ；位移全方位反应谱显示卓越方向约为 150° 。全方位显著持时谱的卓越方向约为 30° ，能量集中释放时段对应 $0.25 \sim 0.30$ s 和 $1.50 \sim 2.00$ s 特征周期区间。输入能量方向性在 0.50 s 附近变化还是很大的。如果把 1F 作为输入，5F 作为输出，其方向性变化较大。这一点与 M0601 比较一致。从 M0601 中 F 测点导致自由场传来的地震动方向性的变化来看，这个台站 1F 测点无法体现地震输入的方向性。该楼房的结构长短轴和场地条件可能会影响着各层反应的方向特点。

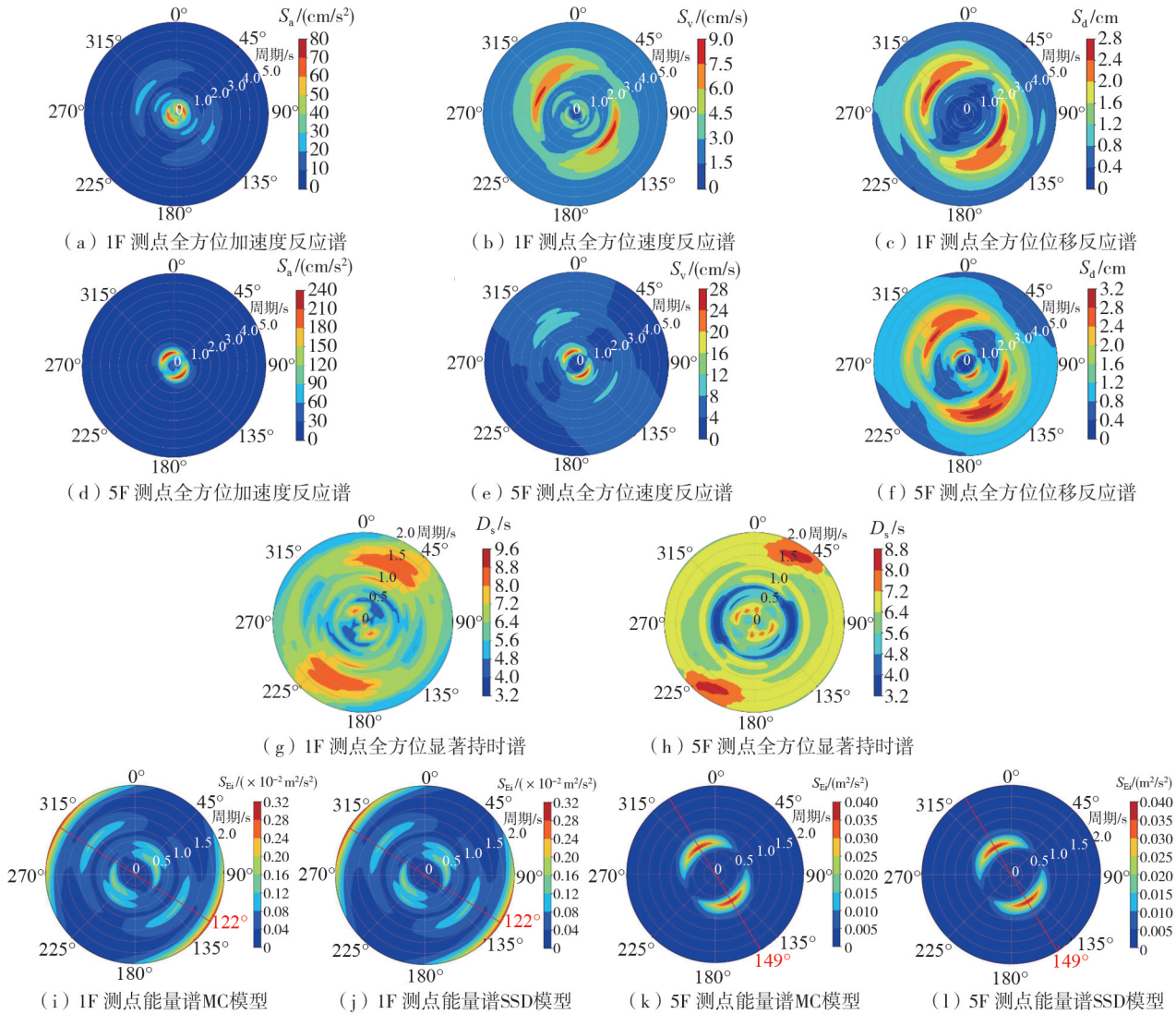


图 10 HC.011 余震下 M0606 台站两测点全方位反应谱、全方位持时谱和全方位输入能量谱

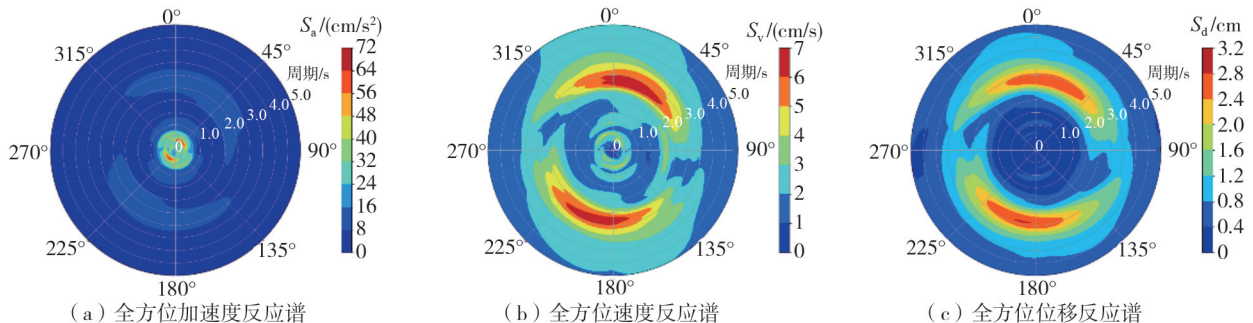
Fig. 10 Omnidirectional response spectrum, duration spectrum and input energy spectrum of Station M0606 during the HC.011 aftershock

2.2.6 M0607 台站记录地震动特点

1) HC.010 余震

M0607 台站在 HC.010 余震中只记录到 1 个测点 1F。全方位谱如图 11 所示。加速度响应在 0.30~0.50 s 周期段卓越方向约为 35°;速度全方位反应谱显示卓越方向约为 30°;位移全方位反应谱显示卓越方向约为 30°。全方位显著持时谱的卓越方向约为 15°,能量集中释放时段对应 0.00~0.30 s 和 0.80~1.20 s 特征周期区间。因该测点结构为砖混结构,由 PH 模型计算输入能量谱,全方位输入能量谱显示的卓越方向约 178°。

与 M0606 台的情况相似,这个台站 1F 测点实质上也无法体现地震输入的方向性。该楼房的结构长短轴和场地条件可能会影响着各层反应的方向特点。



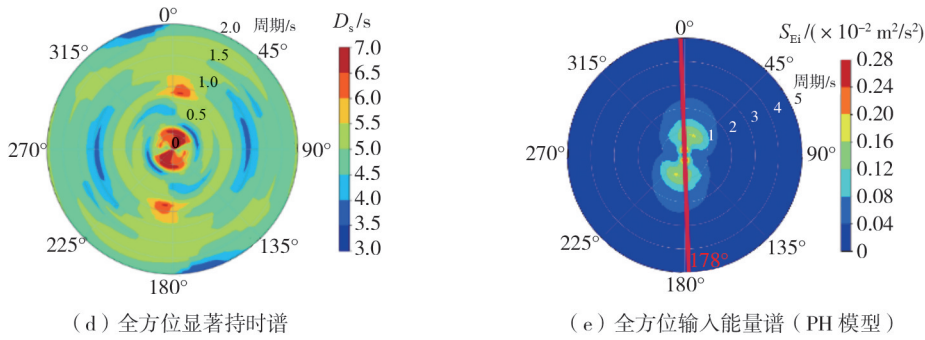
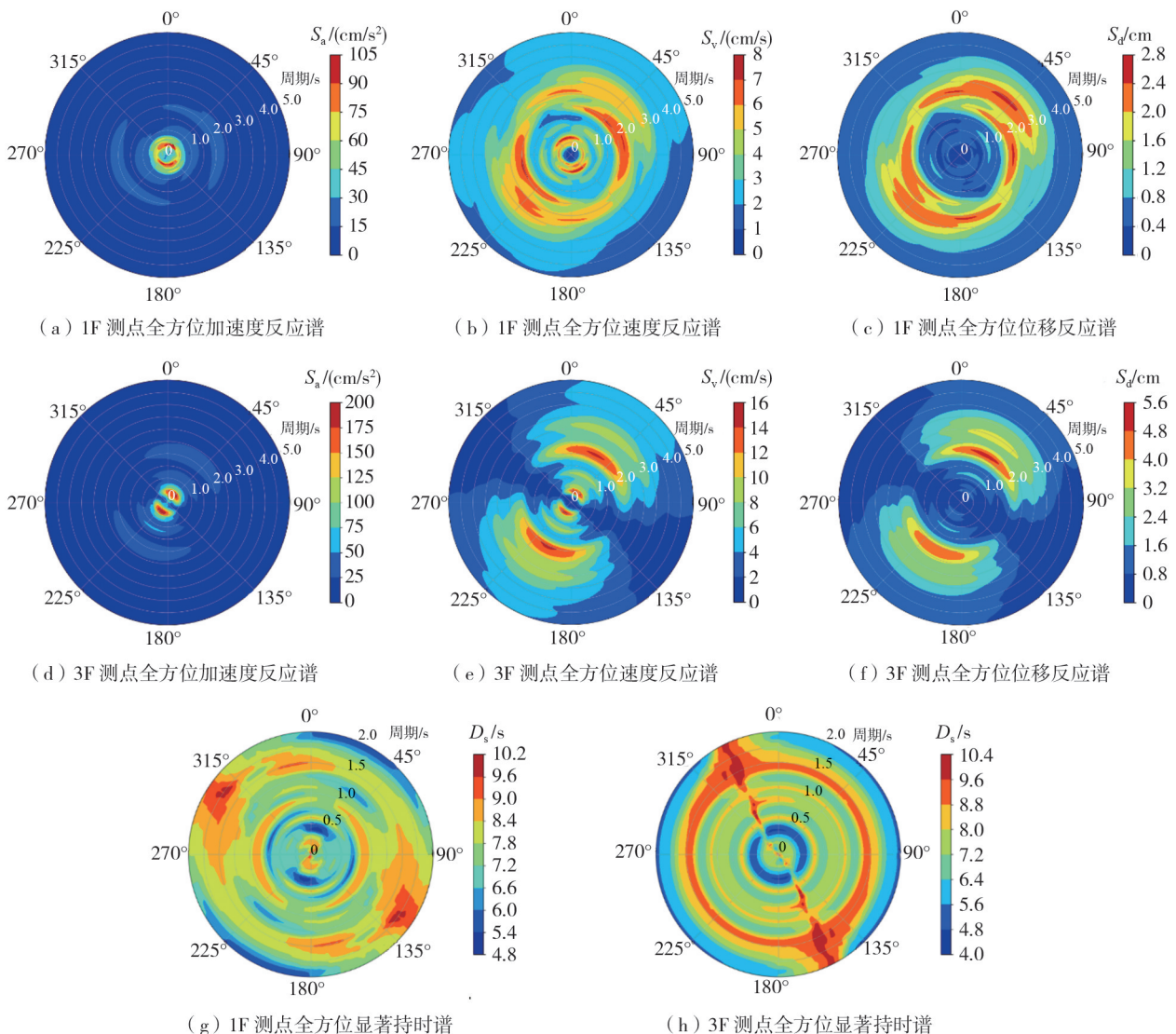


图 11 HC.010 余震下 M0607 台站 1F 测点全方位反应谱、全方位持时谱和全方位输入能量谱

Fig. 11 Omnidirectional response spectrum, duration spectrum and input energy spectrum at 1F point of M0607 station during the HC.010 aftershock

2) HC.011 余震

在 HC.011 余震中,采集到了两个测点数据,1F 和 3F 测点。两个测点的全方位谱如图 12 所示,1F 测点加速度全方位反应谱显示卓越方向接近南北,接近 F2 断层垂直方向;速度卓越方向约为 60°;位移全方位反应谱显示卓越方向约为 45°。全方位持时谱的卓越方向约为 120°。3F 测点加速度全方位反应谱显示卓越方向约为 35°;速度全方位反应谱显示卓越方向约为 30°;位移全方位反应谱显示卓越方向约为 30°。全方位持时谱的卓越方向约为 150°。输入能量谱卓越方向约为 130°。3F 测点卓越方向都有较大变化,主要原因应该是受到该建筑结构形式和场地条件的影响。



(a) 1F 测点全方位加速度反应谱

(b) 1F 测点全方位速度反应谱

(c) 1F 测点全方位位移反应谱

(d) 3F 测点全方位加速度反应谱

(e) 3F 测点全方位速度反应谱

(f) 3F 测点全方位位移反应谱

(g) 1F 测点全方位显著持时谱

(h) 3F 测点全方位显著持时谱

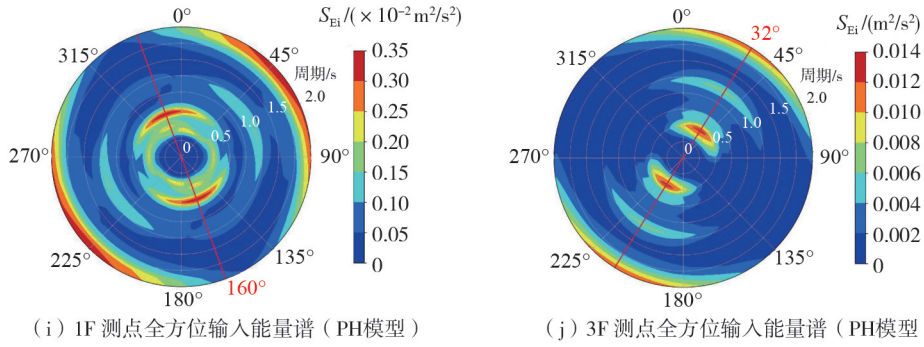


图 12 HC.011 余震下 M0607 台站两测点全方位反应谱、全方位持时谱和全方位输入能量谱

Fig. 12 Omnidirectional response spectrum, duration spectrum and input energy spectrum of Station M0607 during the HC.011 aftershock

为了方便与传统的最大值法比较,我们将 HC.010 余震的全方位输入能量谱和全方位加速度谱的谱值最大方向画出,因为此次余震记录较少,所以这里把 M0607 的 1F 测点作为自由场来进行画图分析。图 13 分别给出了全方位能量谱的卓越方向图和全方位加速度谱的卓越方向图,可以发现能量和加速度卓越方向随断层距显著变化。可以发现, M0601 和 M0602 两个台站自由场测点的加速度卓越方向和能量卓越方向与 F2 东西向隐伏断层平行方向相接近,推测这两个台站主要受到东西向隐伏断层的影响。其他台站的反应谱主要表现出与 F1 北北西向主断层方向近似平行的特征。此次海城余震中的台站断层距都小于 30 km。这几个台站的能量谱卓越方向随着断层距的减小,有平行相应影响大的断层走向的趋势,而加速度反应谱的卓越方向则有垂直相应影响大的断层趋势。同时,我们也能够看出,仅仅靠谱值最大值确定卓越方向,对有 3 个发震断层的海城地震近断层地震动特点的分析存在局限性,无法厘清不同发震断层的影响。而全方位谱法则可以通过不同周期的不同卓越方向来分析,从而得到更为合理的解释。

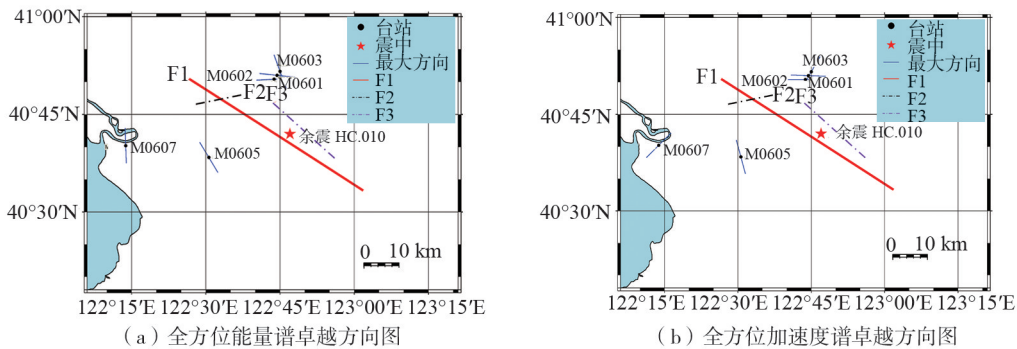


图 13 余震 HC.010 下全方位能量谱和全方位加速度反应谱的卓越方向图

Fig. 13 Predominant directions of the omnidirectional energy spectrum and acceleration response spectrum during the HC.010 aftershock

3 结论

本研究对 1975 年海城地震两次 5.0 级以上余震进行了分析,揭示了近断层地震动的显著方向性特征及其对工程结构的影响。

在地震动方向性方面,可以看出自由场地震动方向性与断层走向具有很强的关联性。①地震动存在显著的方向性效应,且断层距越小,方向性效应越强。②不同地震动参数卓越方向随断层距的变化呈现特定规律:能量谱的卓越方向随着断层距的减小而趋于垂直断层走向;而加速度反应谱的卓越方向则随断层距减小趋于平行断层走向。值得注意的是,远场台站如 M0603 和 M0607 的加速度反应谱卓越方向直接表现为垂直于断层走向。③地震动方向性表现出明显的频谱依赖性:东西向卓越方向与东西向 F2 隐伏断层呈现出高度相关性,这一现象暗示该隐伏断层在高频地震动响应中扮演重要角色;而中低频段则清晰展现出北北西向 F1 主断层的方向性特征,反映出主断层对中低频地震动传播与响应的主导作用。通过比值计算进一步量化发现: $S_{a, RotD100}/S_{a, RotD50}$ 在周期 1.50~3.50 s 时,方向性效应显著高于 NGA-West2 模型 SB14,整体呈先增后减趋

势,且在2.00 s周期达最大值; $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD50}}$ 平均值随周期先增大后减小,总体高于 $S_{a, \text{RotD100}}/S_{a, \text{RotD50}}$ 且1.00 s以上周期均大于1.50,表明长周期频段近断层地震动方向性效应更显著,但记录较少导致结果离散性较大。

在结构反应方向性方面,对于结构反应,桥梁(M0603 台站)结构的地震反应方向性基本与自由场观测到的一致;相比之下,房屋结构的反应方向性则存在一定程度的旋转。这是因为房屋结构长短轴和场地条件等使得反应方向性有所变化,而桥墩结构近似单自由度体系,对输入地震动的方向性变化不大。

后续研究考虑进一步拓展样本范围,纳入更多余震记录及不同地域、类型地震的数据,以全面探究地震动方向性的统计规律及其对各类结构的作用机制。

参考文献:

- [1] 中国科学院工程力学研究所. 海城地震震害[M]. 北京:地震出版社, 1979.
Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Haicheng earthquake damage [M]. Beijing: Seismological Press, 1979. (in Chinese)
- [2] 国家地震局工程力学研究所. 中国强震记录汇报 第二集 第二卷 海城地震校正加速度数字化记录[M]. 北京:地震出版社, 1993.
Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. Report on strong earthquake records in China Volume II Digital records of corrected acceleration of Haicheng earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1993. (in Chinese)
- [3] MURPHY M T P, MARSH B S B L, ANDERSON C, et al. Proposed AASHTO guidelines for performance-based seismic bridge design[R]. Washington, D.C.: National Academies of Sciences, 2020.
- [4] FENG R W, YUAN W C, SEXTOS A. Probabilistic loss assessment of curved bridges considering the effect of ground motion directionality[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(13): 3623–3645.
- [5] 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.
- [6] SHAHI S K, BAKER J W. NGA-West2 models for ground motion directionality[J]. Earthquake Spectra, 2014, 30(3): 1285–1300.
- [7] 谢俊举, 李小军, 温增平. 日本熊本 M_w 7.0 地震的长周期地震动[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4431–4446.
XIE Junju, LI Xiaojun, WEN Zengping. Long period strong ground motion from the April 15, 2016 Kumamoto M_w 7.0 earthquake in Japan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(11): 4431–4446. (in Chinese)
- [8] 谢俊举, 李小军, 温增平, 等. 芦山 7.0 级地震近断层地震动的方向性[J]. 地球物理学报, 2018, 61(4): 1266–1280.
XIE Junju, LI Xiaojun, WEN Zengping, et al. Variations of near-fault strong ground motion with directions during the 2013 Lushan M_s 7.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(4): 1266–1280. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 井上和真, 齋藤溪太, 梅山雄多, 等. 強震動の観測記録に基づく周期特性を考慮した2方向地震動の方向性分析[J]. 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), 2020, 76(4): 205–213.
INOUE K, Saitoh K, Umeyama Y, et al. Evaluation of directionality considering periodic characteristics for strong motion observation records [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), 2020, 76(4): 205–213. (in Japanese)
- [11] HUANG Y, WU Y X, ZHU Z H, et al. Analysis of the long-period ground motion duration directionality and characteristics of seismic damage to the transportation system in the Noto Peninsula earthquake [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2025: 2650199.
- [12] HUANG Y, XIE Y C, ZHU Z H, et al. Omnidirectional input energy spectrum and directionality of ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025, 193: 109333.
- [13] HUANG Y, XIE Y C, ZHU Z H, et al. Energy and directionality characteristics of seismic sequences and typical bridge response in the M_s 6.4 Yangbi earthquake of May 21, 2021 [J]. Structures, 2025, 74: 108607.
- [14] HUANG Y, WEN X, ZHU Z H, et al. Analysis of the directional characteristics of near-fault ground motions and disaster manifestations: A case study of highway system damage during the Luding earthquake [J]. Natural Hazards, 2025, 121(9): 10449–10484.
- [15] 赵宏阳, 陈晓非. 1975年海城 M_s 7.3 地震强地面运动模拟[J]. 地球物理学报, 2017, 60(7): 2707–2715.
ZHAO Hongyang, CHEN Xiaofei. Simulation of strong ground motion by the 1975 Haicheng M_s 7.3 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(7): 2707–2715. (in Chinese)
- [16] 顾浩鼎, 陈运泰, 高祥林, 等. 1975年2月4日辽宁省海城地震的震源机制[J]. 地球物理学报, 1976, 19(4): 270–285.
GU Haoding, CHEN Yuntai, GAO Xianglin, et al. Focal mechanism of Haicheng, Liaoning province, earthquake of February 4, 1975 [J]. Chinese Journal of Sinica, 1976, 19(4): 270–285. (in Chinese)
- [17] BEYER K. Relationships between Median values and between aleatory variabilities for different definitions of the horizontal component of motion [J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(4A): 1512–1522.
- [18] HUANG Y-N, WHITTAKER A S, LUCO N. Maximum spectral demands in the near-fault region [J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 319–341.
- [19] 龚俊, 支旭东, 邵永波, 等. 土木工程结构地震入射方向性效应研究进展 [J]. 工程力学, 2025, 42(8): 1–18.
GONG Jun, ZHI Xudong, SHAO Yongbo, et al. State-of-the-art research on seismic incident directionality effect of civil engineering structures [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(8): 1–18. (in Chinese)