

西安典型地裂缝场地地脉动测试及地震响应特征分析

王 晗, 邓亚虹, 慕焕东, 薛 捷

Ground pulsation tests and analysis on seismic response of typical ground fissure sites in Xi'an

WANG Han, DENG Yahong, MU Huandong, and XUE Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202053>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于连续小波变换的斜坡动力响应特征分析

Time-Frequency characteristics and seismic response analyses of the 6.0-magnitude earthquake, Changning County of Yibin in Southwest China's Sichuan Province

金刚, 王运生, 何先龙, 史丙新, 周宇航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 1-8

肯尼亚裂谷区地裂缝特征及成因分析

Analysis of the characteristics and causes of ground fissures in Kenya rift region

谭鹏, 刘阳, 蒋富强, 温欣岚, 王飞永, 贾智杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 53-62

高烈度区双洞隧道洞口段地震响应分析与振动台模型试验

$\{\text{suggestArticle.titleEn}\}$

皇民, 苑俊杰, 赵玉如, 毕洁同, 王松 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(1): 113-119

融雪诱发黄土滑坡活动特征与应急响应模式——以新疆伊犁则克台滑坡为例

Kinematic characteristics and emergency response model of loess landslide driven by snowmelt: take the Zeketai Landslide in Yili, Xinjiang as an example

魏学利, 陈宝成, 赵龙, 赵楠, 李宾 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 78-90

地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake

王来贵, 向丽, 赵娜, 刘向峰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 18-25

CORS网和GNSS技术在地面变形监测中的应用

Application of CORS network and GNSS technology in ground deformation monitoring: Taking southeast Zhejiang Province as an example

王伟, 党亚民, 章传银, 杨强 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 73-77



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202053

王晗, 邓亚虹, 慕焕东, 等. 西安典型地裂缝场地地脉动测试及地震响应特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 55-64.

WANG Han, DENG Yahong, MU Huandong, *et al.* Ground pulsation tests and analysis on seismic response of typical ground fissure sites in Xi'an[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 55-64.

西安典型地裂缝场地地脉动测试及地震响应特征分析

王 晗¹, 邓亚虹², 慕焕东³, 薛 捷⁴

- (1. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 4. 河南水利与环境职业学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 西安地裂缝广泛发育, 严重的制约了城市的建设和规划。地裂缝的存在使得建筑场地在地震作用下表现出不同的地震响应特征, 因此, 研究西安地裂缝场地地震响应特征对地裂缝场地的建筑抗震设防具有重要意义。以西安地区典型地裂缝为研究对象, 通过野外调查获得了西安地裂缝场地特征; 在此基础上选取典型地裂缝场地, 通过地脉动现场测试方法, 获取了地裂缝场地卓越频率这一反映地层动力特性的重要参数, 通过不同测点傅里叶谱分析得出了场地动力响应规律抗震设防距离。研究表明: 西安地裂缝场地的卓越频率在 2.79~3.16 Hz, 平均卓越频率为 2.96 Hz; 地裂缝处场地地震响应明显, 随着距地裂缝距离的增加场地地震响应逐渐减小, 影响范围为 15 m 左右; 地裂缝场地地震响应放大倍数上盘大于下盘, 表现出“上盘效应”, 放大倍数在 1.64~2.38。研究结果对西安地裂缝场地工程抗震设防具有重要意义。

关键词: 黄土; 地裂缝场地; 地脉动; 地震响应; 频谱分析

中图分类号: P694; TU435

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)04-0055-10

Ground pulsation tests and analysis on seismic response of typical ground fissure sites in Xi'an

WANG Han¹, DENG Yahong², MU Huandong³, XUE Jie⁴

- (1. Shaanxi Railway Institute, Weinan, Shaanxi 714000, China; 2. College of Geological Engineering and Mapping, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 4. Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: The extensive development of ground fissures in Xi'an severely restricts the construction and planning of the city. The existence of ground fissures makes the building sites show different seismic response characteristics under earthquakes. Therefore, it is of great significance to study the seismic response characteristics of ground fissure sites in Xi'an for the seismic fortification of ground fissure sites. Taking typical ground fissures in Xi'an as the research object, the characteristics of ground fissures in Xi'an were obtained on the basis of field investigation; the predominant frequency of the ground fissure sites, which

收稿日期: 2022-02-25; 修订日期: 2022-05-10

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 陕西铁路工程职业技术学院 2017 年科研基金项目(Ky2017-059); 国家自然科学基金面上项目(41772275); 陕西省教育厅科学研究计划专项项目(20JK0801); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(2022JQ-289); 陕西省重点研发计划项目(2022SF-197)

第一作者: 王 晗(1989-), 男, 陕西临潼人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为地裂缝动力响应监测与数值模拟。E-mail: wanghchn@126.com

通讯作者: 邓亚虹(1978-), 男, 湖南安化人, 博士, 教授, 主要研究方向为土动力学与地质灾害减灾防灾研究。E-mail: dgdyh@chd.edu.cn

is an important parameter reflecting the dynamic characteristics of the formation, is obtained. The seismic fortification distance of the dynamic response law of the site is obtained through the Fourier spectrum analysis of different measuring points. The research shows that the predominant frequency of the ground fissure site in Xi'an is in the range of 2.79–3.16 Hz, and the average predominant frequency is 2.96 Hz; the influence range is about 15 m; the seismic response magnification of the hanging wall is greater than that of the footwall, showing the "hanging wall effect", and the magnification is between 1.64 and 2.38. The research results are of great significance to the seismic fortification of Xi'an ground fissure site engineering.

Keywords: loess; ground fissure site; ground pulsation; seismic response; spectrum analysis

0 引言

地裂缝作为一种危害严重的地质灾害,在世界多个国家地区发育^[1-2]。在我国其广泛发育于汾渭盆地、华北地区及苏锡常地区^[3-8],其中以发育于汾渭盆地的西安地裂缝最为典型^[3-8]。西安地裂缝自 1959 年在城南小寨西路和西北大学等地发现以来^[9-10],目前已发展为 14 条^[11],因其发育广泛及致灾严重而倍受关注。西安地裂缝是一种特殊的城市地质灾害,其专指在过量开采承压水产生不均匀地面沉降条件下,临潼—长安断裂带(F_N)西北侧(断裂带上盘)的一组北北东走向的隐伏断裂带出现活动在地表形成的裂缝,因而其发育具有构造属性,表现出明显的定向性、成带性和似等间距性^[11]。

西安地裂缝是我国地裂缝灾害发育最为典型的代表,许多学者对西安地裂缝成因机理展开研究。张家明等^[12]从地貌标志入手,通过分析演绎论证了西安地裂缝与地貌的生成关系,得出地裂缝的活动强度严格受隐伏断层活动强度控制的结论;刘玉海等^[13]从地裂与地面沉降研究现状、致灾机理、灾害防治对策和措施等主要方面作了研讨;宋彦辉等^[14]根据临潼—长安断裂带内两场地地层勘探剖面,证实了临潼—长安断裂带内地裂缝的存在,研究表明其与发育在临潼—长安断裂带上盘的西安地裂缝具有相同的性质和特征,其产生与构造活动受临潼—长安断裂的控制;彭建兵等^[15-16]、邓亚虹等^[17]提出了西安地裂缝的成因,即深部构造孕育地裂缝、盆地伸展萌生地裂缝、黄土介质响应地裂缝、断层活动伴生地裂缝、应力作用群发地裂缝、抽水作用加剧地裂缝、表水渗透开启地裂缝的耦合作用。在成因机理研究的基础上,学者们围绕地裂缝的活动特征及其工程致灾特性展开研究。于文才等^[18]通过物理模型试验研究了不同活动速率下隐伏地裂缝的破裂扩展模式;李勇^[19]基于西安地裂缝监测数据,分析得到了西安地裂缝活动已由地下水开采引发的地面不均匀沉降转变为断裂构造的活动影响,当进入地质活跃期后,地裂缝活动量(尤其是

西南郊区)开始反弹,且在垂向相对运动中显示出一定的区域规律性;石玉玲等^[20]结合西安地裂缝的分布及活动特点,详细分析了地裂缝活动引起的长安路立交的破坏形式和特点;张茂省等^[21]建立了地下水开采、城市建设附加荷载和黄土湿陷引起的地面沉降预测数学模型并分别进行了预测计算。结果表明,引起地面沉降的因素中地下水开采的风险最大,黄土湿陷次之,附加荷载最小,控制地下水位是防止地面沉降与地裂缝的根本措施。

上述学者对西安地裂缝的分布特征、发育特征、活动特征、成因机理及地裂缝工程致灾特征进行了较为系统的研究,研究成果对西安地裂缝灾害减灾防灾具有重要的理论实际意义。然而,就西安地裂缝而言,其自身活动不仅会对建(构)物产生变形破坏,还会对场地地震响应产生影响,尤其是地裂缝在城市的广泛发育使得其场地建(构)筑物的抗震设防水平发生变化,如何最大限度的减少地裂缝的存在对建(构)筑物抗震设防的影响,保证其在地震作用建(构)筑物的使用寿命显得尤为重要。考虑到现有规范规定地裂缝场地上的抗震设防烈度不予提高,仍按《建筑抗震设计规范》执行。因此,要想得出合理的、且能够直接服务于工程抗震设防(避让带、设防带)及防灾减灾的结论,还需进行更为深入的研究。现有学者结合地震模拟振动台试验、数值模拟方法已开展了相关研究。熊仲明等^[22]、胡志平等^[23]、王启耀等^[24]、Liu 等^[25]、慕焕东等^[26]学者对地裂缝场地的动力响应进行了数值分析和振动台模拟,结果表明地裂缝对场地动力效应存在放大作用,并为地裂缝场地工程结构的抗震设防提供了有效依据。以上研究从各角度证实了断层和地裂缝场地具有明显的放大效应。然而,强震发生时地裂缝场地的放大效应实时记录和震害统计数据稀少,而数值模拟无法完全反应真实的场地情况,为了分析地裂缝场地动力特性,在地震活动性较低且很难获取到具有代表性的地震动数据时,可以利用地脉动分析地裂缝场地动力特性。为此,从地震响应层面出发,以地脉动频谱分析法为手段,对西安地裂缝场地进行地震响应研究,试图找出更为合理的量化避让距

离具有重要理论实际意义。

地脉动是一种没有特定振源, 且在任何时候都能探测到其存在微小振动, 振幅通常只有几个微米。自 20 世纪 50 年代开始, 地脉动就开始被用于实际工程中, Kiyoshi 等^[27-28]、Kabayashi^[29]、Field 等^[30]、Finn^[31]认为可以将地脉动作为工程场地地震响应性能评价的一种技术手段, 提出了用地脉动频谱分析对场地进行评价。随着研究的进一步深入地脉动被广泛应用于不同地层结构地震响应研究^[32-33]。

上述学者对地裂缝场地的地震响应已经展开了较为系统的研究工作, 但基于现场地脉动测试方法开展地裂缝场地地震响应规律研究较少, 而地脉动现场测试得到的结果更能指导工程实践。因此, 文中以西安黄土地区 F_1 和 F_2 地裂缝为研究对象, 通过野外调查获取西安地裂缝场地特征, 在此基础上基于现场地脉动测试, 获取地裂缝场地卓越频率这一反映地层动力特性的重要参数, 研究西安地裂缝场地地震响应特征及响应规律, 研究结果对西安地裂缝场地工程抗震设防具有重要意义。

1 西安地裂缝基本特征

1.1 平面分布特征

自 20 世纪 50 年代以来, 西安共发现地裂缝 14 条 (自北向南编号依次是 F_1 — F_{14}), 均匀分布在临潼—长安断裂带上盘, 其间以洼地、黄土梁间隔。地裂缝向东西两侧延伸, 东至浐河, 西过皂河, 覆盖面积 250 km² 左右, 总延伸长度超 160 km, 地表出露超 70 km (图 1)。

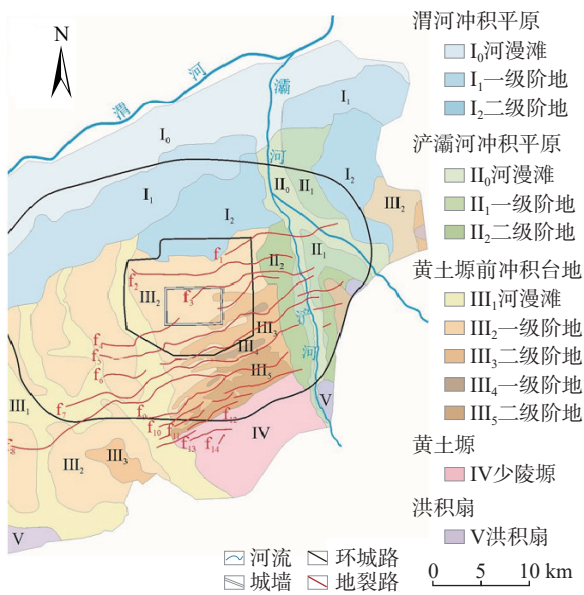


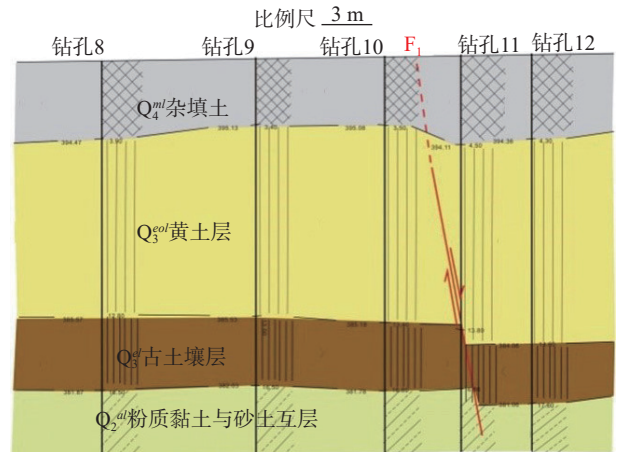
图 1 西安地裂缝平面分布图

Fig. 1 Distribution map of ground fissures in Xi'an

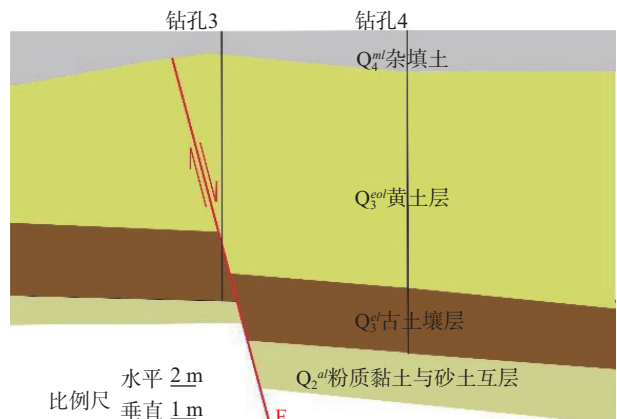
F_1 和 F_2 地裂缝位于地裂缝群最北侧。其中, F_1 地裂缝西起孙家湾, 东至广运潭及灞河小区, 总体走向 NE75°, 倾向 SE, 倾角 75°, 总长度 9.7 km。 F_2 地裂缝西起汉长安城遗址东南角白家口立交油库专用铁路线北侧, 东至米家岩, 总体走向 NE70°—NE85°, 倾向 SE, 倾角 80°, 总长度约 15 km。

1.2 剖面结构特征

西安地裂缝为典型的正断型非发震裂缝, 由于地裂缝的活动, 上下盘接受沉积剥蚀存在差异性, 使地层结构在厚度和深度上产生差异, 因此, 需要先明确 F_1 和 F_2 地裂缝场地上下盘各地层厚度和垂直错距。通过搜集整理 F_1 和 F_2 地裂缝区域钻孔资料和地质剖面资料, 得到 F_1 和 F_2 地裂缝测试区域地层结构由上至下依次为 Q_4^{ml} 杂填土、 Q_3^{eol} 黄土层、 Q_3^t 古土壤层和 Q_2^{al} 粉质黏土与砂土互层。该地层结构中发育有一层红褐色古土壤, 且具有明显错距, 地裂缝走向 SE, 倾角约为 75°。 F_1 和 F_2 地裂缝地层剖面结构如图 2 所示。



(a) F_1 地裂缝地层剖面



(b) F_2 地裂缝地层剖面

图 2 F_1 和 F_2 地裂缝地层剖面

Fig. 2 Stratigraphic profiles of F_1 and F_2 ground fissures

1.3 活动特征

F₁ 地裂缝 20 世纪 80 年代末 90 年代初在辛家庙附近活动强烈, 致灾严重, 破裂带发育宽度可达 15 m。地裂缝主要作垂直活动, 并伴随有水平拉张和左旋扭动。F₁ 地裂缝中两个观测点资料表明东西两段的累计活动量有较大差异, 如西安重型机械厂一中处的简易观测点累计下沉 37.97 mm, 北郊前进耐火厂处的简易观测点累计下沉 150.15 mm, 两者相差达 112.18 mm。

F₂ 地裂缝 20 世纪 80—90 年代在味精厂、外语学校活动强烈, 地表错坎约 30 cm。根据以往的统计资料和水准监测资料, F₂ 地裂缝在 1960—1980 年间地裂缝活动不明显, 1980—1985 年间地裂缝活动明显加剧。1960—1989 年间的年平均活动速率为 0.43 mm/a; 1990—1996 年间达到最大 16.9 mm/a, 此后逐渐降低; 1997—2005 年平均活动速率降至 10.6 mm/a, 呈进一步下降趋势。

2 地裂缝场地地脉动现场测试

2.1 地脉动现场测试基本原理

地脉动是受自然与人为随机振源激发后经不同岩土层界面多次反射和折射后传播到地面的一种稳定的非重复性随机波动, 这种周期为 1 s 以下的波动在传播后会包含场地地基土层的固有特性, 并表现出以下统计规律性:

(1) 具有各态历经性的近似的平稳随机过程, 即某观测点上某波形的某段观测曲线的概率特征值可以代表总体平均值:

$$m_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) dt \quad (1)$$

$$R_x(\tau, k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) x_k(t + \tau) dt \quad (2)$$

式中: m_x ——时间平均值;

$x_k(t)$ ——随机过程 $x(t)$ 的抽样函数;

T ——记录时间;

$R_x(\tau, k)$ ——时间 t 上所求得的自相关函数, 下文同。

(2) 任何时候测试所得一族波点呈高斯正态分布, 记录时间 T 足够长则地脉动过程的期望值为零:

$$\frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = 0 \quad (3)$$

(3) 脉动源可视为白噪声, 即波形 $x(t)$ 由无数多个频率分量不同但强度相等的正弦波叠加而成。

(4) 时间特性上地脉动信号夜间振幅 y 明显小于白天振幅 x , 且不同时间测量地脉动的卓越周期比较

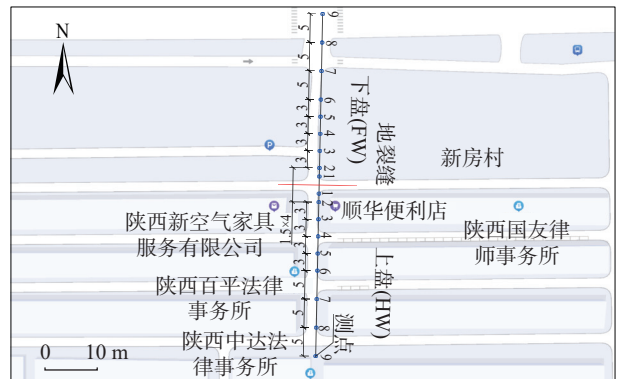
稳定:

$$y = 0.3x^{1.5} \quad (4)$$

式中: y ——夜间的振幅/ μm ;

x ——白天的振幅/ μm 。

据此在夜间开阔场并避开特定的振动源地进行地脉动测试。测线垂直于地裂缝, 上(HW)、下(FW)盘各布设测点 9 个, 测线全长 60 m, 且裂缝附近加密测点以提高分析精度(图 3); 每个测点 x 、 y 、 z 三向同时记录 10 min 以上, 以保证地脉动过程期望趋近于零。



(a) 测线F₁-1具体位置示意图



(b) 测线F₂-1具体位置示意图

图 3 测线位置示意图

Fig. 3 Diagram of measuring line location

2.2 地脉动现场测试仪器及要求

地脉动现场测试采用日本东京测振公司生产的伺服型速度网络地震仪(CV-374AV, 图 4), 仪器采样频率 0.1 ~ 100 Hz, 灵敏度 1 000 mv·s/cm。该地脉动测试仪具有灵敏度高, 通频带宽, 便于操作, 携带以及数据导出便捷等优点。

依据地脉动现场测试的基本原理, 需要在夜间开阔场并避开特定的振动源地进行地脉动测试。为避免过多的干扰因素, 测试时避开风雨复杂天气, 且多选择晴朗的夜晚凌晨 1 点至凌晨 5 点时间段, 测试过程中采用透明塑料箱扣盖。在进行测试前, 应先检查测试地点周



图 4 CV-374AV 伺服型速度网络地震仪

Fig. 4 Servo-type velocity network seismograph of CV-374AV

围是否有固定的振源(如运行的机械,行驶的车辆)、地下管道、电缆等,测试过程中如有车辆和行人等经过仪器附近时,应详细记录发生时间,以便后期进行数据剔除,按照上述要求进行测试,获取的地脉动信号是一个平稳的随机过程。

2.3 地脉动现场测试测点布设

综合考虑 F_1 和 F_2 地裂缝场地地形地貌、地层结构和地裂缝走向等因素,选取 F_1 和 F_2 地裂缝东北段进行测试线布设,其中 F_1 、 F_2 地裂缝各布设测线一条,测线基本情况如表 1 所示。

表 1 地脉动测试统计表

Table 1 Statistical table of micro-tremor test

测线编号	工程地质分区	测线地点	走向
F_1 -1	II ₂ -1	新房村	WE
F_2 -1	II ₂ -1	老人仓村	NE80°

地脉动测线布设方向与地裂缝走向垂直 2 条测线布设具体位置如图 3 所示。

地脉动测线总长 60 m,上下盘各 30 m。为对比地裂缝上下盘响应情况,两盘测点对称布设,上下盘各布设测点 9 个,2 条测线共计 36 个测点,且裂缝附近加密测点以提高分析精度;每个测点 x 、 y 、 z 三向同时记录 10 min 以上,以保证地脉动过程期望趋近于零,测点布设如图 5 所示。

2.4 地脉动现场测试数据分析

地脉动现场测试后,在每个测点的平稳波段中至少选取 6 段步长 10 s 的地脉动信号作为分析样本,以代表该测点所得场地信号特征。将所截取波段求导至加速度时程曲线,使用 Butterworth 滤波器进行 0.1 ~ 15 Hz 的带通滤波处理,并进行基线校正,利用快速傅里叶变换(FFT)可以将时域函数 $X(t)$ 转换到频域的傅里叶积分:

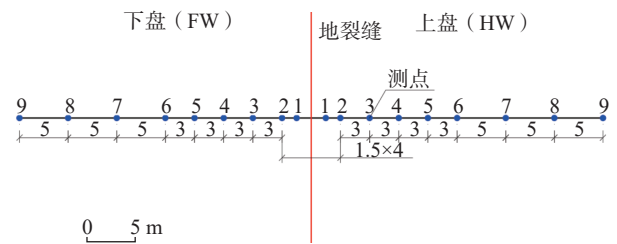


图 5 测点布设详图

Fig. 5 Detailed drawing of layout of measuring points

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-T/2}^{T/2} X(t) e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

傅里叶谱分析可以获得场地土层固有信息,分析频域曲线的波形中各频率的波占有量,其谱峰特性可以得到场地地层条件、卓越频率、地裂缝对场地地震响应的影。

3 地裂缝场地地脉动响应特征分析

3.1 数据处理方法

对于采集到的地脉动速度时程数据,截取平稳和均匀的波段进行数据分析,文中截取的数据单元时间长度 T 根据式(6)^[6]确定:

$$T = N\Delta t, \quad \Delta t = 1/2f \quad (6)$$

式中: N ——数据单元长度内采样点个数;

Δt ——采样点时间间隔;

f ——数据单元长度内最大周期倒数。

3.2 频谱特征分析

对 F_1 -1 测线的测试结果进行傅里叶频谱分析,得到如图 6 所示频谱特征(图中从上至下分别为 F_1 -1 测线上、下盘 x 、 y 和 z 方向,下文相同)。从图 6(a)可以看出,测点每一方向傅里叶幅值谱谱型基本一致,均是“单峰”型谱型,主峰突出,频带窄,谱面积较小,主峰附近会出现大量次级峰值。

与此同时, F_1 -1 测线上盘卓越频率集中分布于 2.34 ~ 3.32 Hz,下盘卓越频率集中分布于 2.25 ~ 3.61 Hz。 x 、 y 和 z 三个方向上卓越频率存在差异但差异性不大,无明显规律。对 F_1 -1 测线上、下盘每一测点每个方向卓越频率及相应峰值进行统计,得到结果如表 2、表 3 所示。

绘制表 2 和表 3 中上下盘不同测点频谱峰值与距离的变化曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出,上、下盘最大峰值分别为 0.082 0 和 0.076 6,上盘最大谱峰值大于下盘;上盘平稳段峰值平均值为 0.034 5,下盘为 0.042 8,下盘大于上盘;谱峰值随着距离地裂缝距离的增大而逐渐减小,15 m 以后谱峰值趋于平稳。

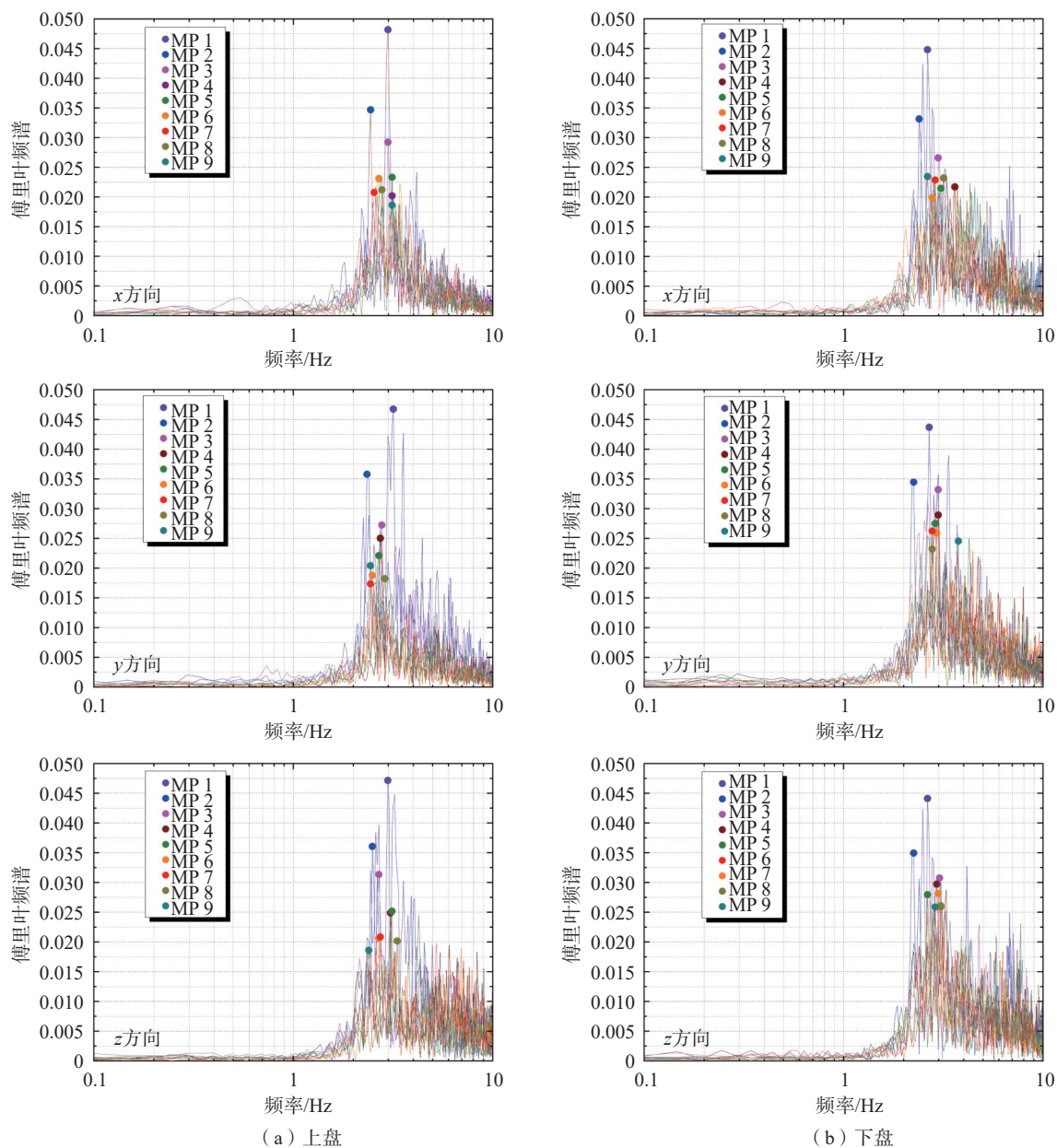


图 6 F₁-1 测线傅里叶频谱

Fig. 6 The Fourier spectrum of measuring line F₁-1

对 F₂-1 测线的测试结果进行傅里叶频谱分析,得到如图 8 所示频谱特征。从图 8 可以看出,测点每一方向傅里叶幅值谱谱型基本一致,均是“单峰”型谱型,主峰突出,频带窄,谱面积较小,表明场地土层均匀且较硬,上下盘近地裂缝测点幅值明显大于远地裂缝测点。

对上、下盘每一测点每个方向卓越频率及相应峰值进行统计,得到结果如表 4、表 5 所示。结合表 4、表 5 可以看出,上、下盘的卓越频率分布在在 2.72 ~ 3.81 Hz 的范围内, x, y 和 z 三个方向上卓越频率存在差异但差异性不大,每一方向上不同测点的卓越频率也存在差

异,无明显规律。

绘制表 4 和表 5 中上下盘频谱峰值与距离的关系变化曲线图如图 7 所示。从图 7 中可以看出, F₂-1 测线上下盘最大峰值分别为 0.082 9 和 0.079 3,上盘最大谱峰值大于下盘;上盘平稳段峰值平均值为 0.044 3,下盘为 0.048 4,下盘大于上盘;谱峰值随着距离地裂缝距离的增大而逐渐减小, 15m 以后谱峰值趋于平稳。

统计 F₁-1、F₂-1 测线测得的地裂缝上下盘平均卓越频率、平稳段峰值、放大因子以及影响范围如表 6 所示。由表 6 可知, F₁-1、F₂-1 测线平均卓越频率较接近,

表 2 F₁-1 测线上盘卓越频率及峰值统计表

Table 2 Superior frequency and peak statistical table of F₁-1 hanging wall

测点编号	卓越频率/Hz				合成振幅	距离/m
	f_x	f_y	f_z	\bar{f}	\bar{A}	
HW1	2.98	3.17	2.98	3.04	0.082 0	1.5
HW2	2.44	2.34	2.49	2.42	0.061 5	3
HW3	2.98	2.78	2.69	2.82	0.050 8	6
HW4	3.13	2.73	3.08	2.98	0.040 7	9
HW5	3.13	2.69	3.13	2.98	0.040 8	12
HW6	2.69	2.49	2.69	2.62	0.036 2	15
HW7	2.54	2.44	2.73	2.57	0.034 1	20
HW8	2.78	2.88	3.32	2.99	0.034 5	25
HW9	3.13	2.44	2.39	2.65	0.033 3	30
平均卓越频率				2.70	放大因子	2.38

注: $f = (f_x + f_y + f_z)/3$, $\bar{A} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$, 下文同。

表 3 F₁-1 测线下盘卓越频率及峰值统计表

Table 3 Superior frequency and peak statistical table of F₁-1 footwall

测点编号	卓越频率/Hz				合成振幅	距离/m
	f_x	f_y	f_z	\bar{f}	\bar{A}	
FW1	2.64	2.69	2.64	2.66	0.076 6	1.5
FW2	2.39	2.25	2.25	2.30	0.059 2	3
FW3	2.98	2.98	3.02	2.99	0.052 5	6
FW4	3.61	2.98	2.93	3.17	0.046 8	9
FW5	3.08	2.88	2.65	2.87	0.044 7	12
FW6	2.78	2.93	3.08	2.93	0.041 7	15
FW7	2.88	2.78	2.98	2.88	0.044 7	20
FW8	3.17	2.78	3.08	3.01	0.041 9	25
FW9	2.64	3.76	2.88	3.09	0.042 7	30
平均卓越频率				2.88	放大因子	1.79

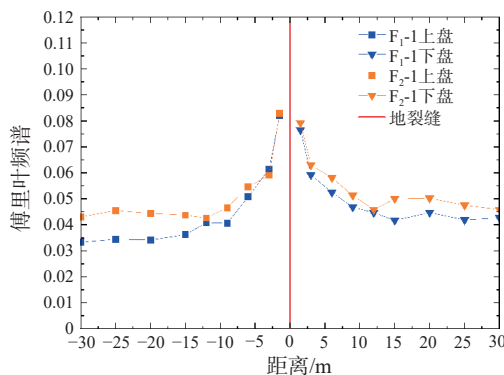


图 7 上下盘频谱峰值曲线

Fig. 7 Spectrum peak curves of hanging wall and footwall

上盘 F₁-1 测线上盘与下盘平稳段峰值存在一定的差异。

由图 7 可知, F₁-1、F₂-1 测线平均卓越频率较接近, 这与 2 条测线所在场地地层结构相似有关, 2 条测线放大因子均是上盘大于下盘, 且上下盘均呈现出谱峰值随

表 4 F₂-1 测线上盘卓越频率及峰值统计表

Table 4 Superior frequency and peak statistical table of F₂-1 hanging wall

测点编号	卓越频率/Hz				合成振幅	距离/m
	f_x	f_y	f_z	\bar{f}	\bar{A}	
HW1	3.81	2.78	2.64	3.08	0.082 9	1.5
HW2	3.08	2.59	2.69	2.79	0.059 1	3
HW3	2.93	3.13	2.83	2.96	0.054 6	6
HW4	2.73	2.78	2.64	2.72	0.046 6	9
HW5	3.42	2.44	2.49	2.78	0.042 7	12
HW6	2.93	2.93	2.49	2.78	0.043 8	15
HW7	2.93	3.13	2.83	2.96	0.044 5	20
HW8	2.83	3.81	3.96	3.53	0.045 6	25
HW9	2.78	3.13	2.54	2.82	0.043 1	30
平均卓越频率				2.94	放大因子	1.87

表 5 F₂-1 测线下盘卓越频率及峰值统计表

Table 5 Superior frequency and peak statistical table of F₂-1 footwall

测点编号	卓越频率/Hz				合成振幅	距离/m
	f_x	f_y	f_z	\bar{f}	\bar{A}	
FW1	3.03	3.86	3.71	3.53	0.079 3	1.5
FW2	3.86	3.86	2.73	3.48	0.064 6	3
FW3	2.93	2.73	3.42	3.03	0.058 1	6
FW4	3.22	2.88	2.73	2.94	0.046 8	9
FW5	2.39	3.86	2.54	2.93	0.045 9	12
FW6	3.66	2.83	2.64	3.04	0.050 1	15
FW7	3.66	4.00	2.49	3.38	0.050 2	20
FW8	3.37	2.88	2.78	3.01	0.047 6	25
FW9	2.64	3.96	2.59	3.06	0.045 8	30
平均卓越频率				3.16	放大因子	1.64

表 6 F₁-1 和 F₂-1 测线地脉动响应特征

Table 6 Response to micro-tremor of F₁-1 and F₂-1

测线	位置	平均卓越频率/Hz	平稳段峰值	放大因子	影响范围/m
F ₁ -1	上盘	2.79	0.034 5	2.38	15
	下盘	2.88	0.042 3	1.79	15
F ₂ -1	上盘	2.94	0.044 3	1.87	15
	下盘	3.16	0.048 4	1.64	15

着距离地裂缝距离增大而减小的规律, 距地裂缝 15 m 的范围内, 谱峰值衰减较快, 15 m 以后谱峰值趋于平稳, 亦即基于地脉动测试方法得到的地裂缝场地地震响应的影响范围约为 15 m。

4 结论

通过现场 36 个测点地脉动测试试验, 计算分析得到了 F₁-1、F₂-1 地裂缝场地卓越频率, 并对其进行傅里叶频谱分析, 得到以下结论:

(1) F₁ 和 F₂ 地裂缝场地傅里叶频谱均是“单峰”型

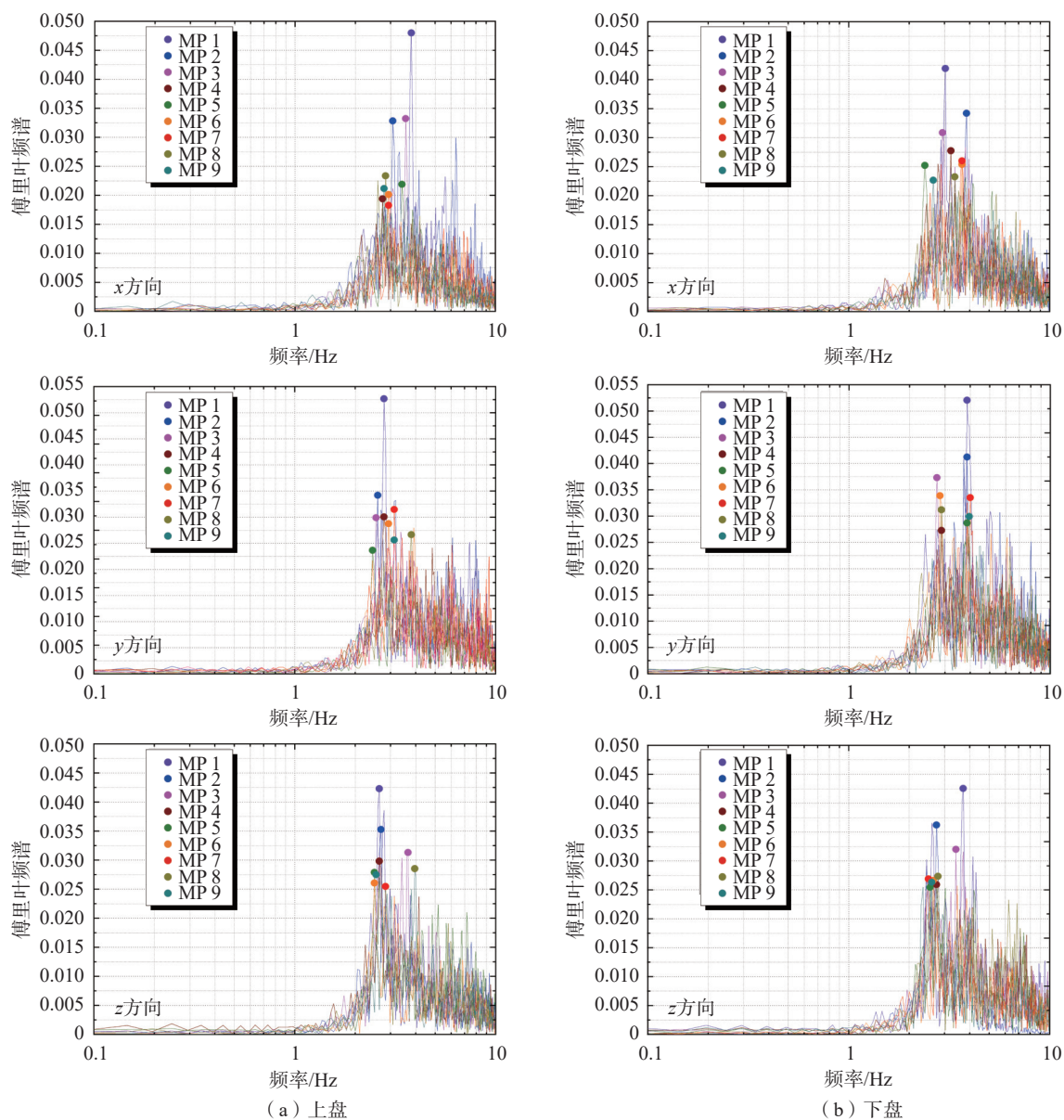


图 8 F₂-1 测线傅里叶频谱

Fig. 8 The Fourier spectrum of measuring line F₂-1

谱型,主峰突出,频带窄,谱面积较小,主峰附近会出现大量次级峰值,F₁地裂缝场地卓越频率在 2.8 Hz 左右,F₂地裂缝场地卓越频率在 3.0 Hz 左右。

(2)地裂缝处场地地震响应明显,随着距离地裂缝距离的增加场地地震响应逐渐减小,地裂缝场地地震响应放大倍数上盘大于下盘,表现出“上盘效应”,放大倍数在 1.64 ~ 2.38。

(3)基于地脉动测试方法得到的地裂缝场地地震响应影响范围约为 15 m。

参考文献(References):

[1] LEONARD R J. An earth fissure in southern Arizona [J] . *The*

Journal of Geology, 1929, 37: 765 – 774.

[2] 谭鹏,刘阳,蒋富强,等.肯尼亚裂谷区地裂缝特征及成因分析 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6): 53 – 62. [TAN Peng, LIU Yang, JIANG Fuqiang, et al. Analysis of the characteristics and causes of ground fissures in Kenya rift region [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 53 – 62. (in Chinese with English abstract)]

[3] 万佳威,李滨,谭成轩,等.中国地裂缝的发育特征及成因机制研究——以汾渭盆地、河北平原、苏锡常平原为例 [J] . *地质论评*, 2019, 65(6): 1383 – 1396. [WAN Jiawei, LI Bin, TAN Chengxuan, et al. Characteristics and mechanism of earth fissures in China: A case study of Fenhe river—Weihe river

- basin, Hebei plain and Suzhou—Wuxi—Changzhou plain [J]. *Geological Review*, 2019, 65(6): 1383–1396. (in Chinese with English abstract)
- [4] 乔建伟, 彭建兵, 郑建国, 等. 中国地裂缝发育规律与运动特征研究 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1016–1027. [QIAO Jianping, PENG Jianbing, ZHENG Jianguo, et al. Development rules and movement characteristics of earth fissures in china [R]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 1016–1027. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 吴玉涛, 杨为民, 周俊杰, 等. 河北隆尧地裂缝灾害及其安全避让距离分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(2): 67–73. [WU Yutao, YANG Weimin, ZHOU Junjie, et al. Study on Longyao ground fissure disaster and safety avoidance distance [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(2): 67–73. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 贺鸣, 翟栋梁, 乔建伟, 等. 山西运城盆地大吕-白张地裂缝的基本特征与成因分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(6): 74–83. [HE Ming, ZHAI Dongliang, QIAO Jianwei, et al. Basic features and mechanism of Dalyu-Baizhang ground fissure in Yuncheng Basin, Shanxi Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(6): 74–83. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 孟令超, 彭建兵, 卢全中, 等. 山西太原盆地地裂缝群发机制与深部构造关系 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 76–85. [MENG Lingchao, PENG Jianbing, LU Quanzhong, et al. Relationship between mechanism of ground fissure group and deep tectonic structures in Taiyuan basin, Shanxi Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 76–85. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 龚绪龙, 杨蕴, 朱锦旗, 等. 苏南平原区地裂缝现状及其需要解决的几个问题 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, 26(2): 103–109. [GONG Xulong, YANG Yun, ZHU Jinqi, et al. Ground fissures in south plain of Jiangsu Province and related issues [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(2): 103–109. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李永善. 西安地裂缝 [M]. 北京: 地震出版社, 1986. [LI Yongshan. *Ground fissures in Xi'an* [M]. Beijing: Seismological Press, 1986. (in Chinese)]
- [10] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论与应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000. [WANG Jingming. *Theory of ground fissures hazards and its application* [M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 2000. (in Chinese)]
- [11] 彭建兵. 西安地裂缝灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. [PENG Jianbing. *Ground fissure disaster in Xi'an* [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [12] 张家明, 佟永贺, 徐光黎, 等. 西安地裂缝与地貌生成关系研究 [J]. *地质灾害与防治*, 1991, 2(2): 67–73. [ZHANG Jiaming, TONG Yonghe, XU Guangli, et al. Genetic relationship between Xi'an ground fractures and landform [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1991, 2(2): 67–73. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘玉海, 陈志新, 倪万魁. 西安地裂缝与地面沉降致灾机理及防治对策研讨 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1994, 5(增刊1): 67–74. [LIU Yuhai, CHEN Zhixin, NI Wankui. A study on hazard-forming mechanisms of geofracture and land subsidence and control countermeasure in Xi'an [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1994, 5(Sup 1): 67–74. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 宋彦辉, 李忠生, 李新生, 等. 临潼—长安断裂带内地裂缝特征 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2012, 23(2): 50–54. [SONG Yanhui, LI Zhongsheng, LI Xinsheng, et al. Characteristics of ground fissures located at Lintong-Chang'an fault zone [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2012, 23(2): 50–54. (in Chinese with English abstract)]
- [15] PENG J B, QU W, REN J, et al. Geological factors for the formation of Xi'an ground fractures [J]. *Journal of Earth Science*, 2018, 29(2): 468–478.
- [16] 彭建兵, 范文, 李喜安, 等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题 [J]. *工程地质学报*, 2007, 15(4): 433–440. [PENG Jianbing, FAN Wen, LI Xi'an, et al. Some key questions in the formation of ground fissures in the Fen-Wei Basin [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(4): 433–440. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 邓亚虹, 彭建兵, 慕焕东, 等. 渭河盆地深部构造活动的地裂缝孕育机理 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(2): 521–527. [DENG Yahong, PENG Jianbing, MU Huandong, et al. Ground fissures germination mechanism of deep structure activities in Weihe basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(2): 521–527. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 于文才, 杨亚磊, 卢全中, 等. 不同活动速率下隐伏地裂缝的模型试验研究 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(2): 98–105. [YU Wencai, YANG Yalei, LU Quanzhong, et al. Comparative study on physical model test of concealed ground fissure rupture propagation under different activity rates [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 98–105. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李勇. 西安地裂缝常规监测方法及近期活动规律 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2014, 25(1): 33–37. [LI Yong. The monitoring methods and recent activities orderliness of Xi'an fissure ground [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard*

- and Control, 2014, 25(1): 33 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 石玉玲, 门玉明, 彭建兵, 等. 西安市地裂缝对长安路立交桥致灾机理调查研究 [J] . [中国地质灾害与防治学报](#), 2009, 20(2): 65 – 69. [SHI Yuling, MEN Yuming, PENG Jianbing, et al. Analysis on Xi'an ground-fissure destruction to Chang'an Road overpass [J] . [The Chinese Journal of Geological Hazard and Control](#), 2009, 20(2): 65 – 69. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张茂省, 董英, 张新社, 等. 地面沉降预测及其风险控制对策——以大西安西咸新区为例 [J] . [中国地质灾害与防治学报](#), 2013, 24(4): 115 – 118. [ZHANG Maosheng, DONG Ying, ZHANG Xinshe, et al. Prediction of land subsidence and Its mitigation methods: A case study in the new urban district of Xi'an-Xiayang [J] . [The Chinese Journal of Geological Hazard and Control](#), 2013, 24(4): 115 – 118. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 熊仲明, 韦俊, 陈轩, 等. 跨越地裂缝框架结构振动台试验及数值模拟研究 [J] . [工程力学](#), 2018, 35(5): 214 – 222. [XIONG Zhongming, WEI Jun, CHEN Xuan, et al. Research on shaking table test and numerical modelling of frame structure crossing ground fissure [J] . [Engineering Mechanics](#), 2018, 35(5): 214 – 222. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 胡志平, 王启耀, 罗丽娟, 等. “y”形地裂缝场地地次裂缝地震响应差异的振动台试验 [J] . [土木工程学报](#), 2014, 47(11): 98 – 107. [HU Zhiping, WANG Qiyao, LUO Lijuan, et al. Shaking table test on seismic response difference between primary and secondary ground fissures on sites with y-shape ground fissure [J] . [China Civil Engineering Journal](#), 2014, 47(11): 98 – 107. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王启耀, 胡志平, 王瑞, 等. 地震作用下地裂缝场地地表加速度响应的振动台试验研究 [J] . [铁道学报](#), 2015, 37(12): 121 – 128. [WANG Qiyao, HU Zhiping, WANG Rui, et al. Shaking table test study on seismic acceleration response of ground fissure sites under horizontal seismic action [J] . [Journal of the China Railway Society](#), 2015, 37(12): 121 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [25] LIU N, FENG X Y, HUANG Q B, et al. Dynamic characteristics of a ground fissure site [J] . [Engineering Geology](#), 2019, 248: 220 – 229.
- [26] 慕焕东, 邓亚虹, 常江, 等. 西安地裂缝场地动力响应规律振动台模型试验研究 [J] . [岩石力学与工程学报](#), 2020, 39(增刊 1): 3139 – 3149. [MU Huandong, DENG Yahong, CHANG Jiang, et al. Shaking table model test study on dynamic response of Xi'an ground fissure site [J] . [Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2020, 39(Sup 1): 3139 – 3149. (in Chinese with English abstract)]
- [27] KIYOSHI K, TEIJI T. Measurements of the micro-tremor [J] . [Bulletin of the earthquake research Institute](#), 1954, 34(4): 302 – 306.
- [28] KIYOSHI K, TEIJI T. On Micro-tremors [J] . [Bulletin of the earthquake research Institute](#), 1961, 39: 97 – 114.
- [29] KABAYASHI H K. Report on seismic microzoning studies of the Mexico earthquake of Septembe 19, 1985. Part I measurement of micro-tremors in and around Mexico D. F, Tokyo inst. Tech, 1986: 1 – 98.
- [30] FIELD E, HOUGH S, JACOB K. Using microtremors to assess potential earthquake site response: A case study in Flushing Meadows, New York City [J] . [Bulletin of the Seismological Society of America](#), 1990, 80: 1456 – 1480.
- [31] FINN L. Geotechnical engineering aspects of microzonation [C] . [Proceedings of the 4th International Conference on Seismic zonation](#), 1991(1): 199 – 259.
- [32] 陶夏新, 师黎静, 董连成. 中日地脉动台阵联合观测 [J] . [世界地震工程](#), 2002, 18(2): 24 – 31. [TAO Xiaxin, SHI Lijing, DONG Liancheng. Sino-Japan joint microtremor array observation [J] . [World Information on Earthquake Engineering](#), 2002, 18(2): 24 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 师黎静, 陶夏新, 赵纪生. 地脉动台阵方法的有效性分析 [J] . [岩石力学与工程学报](#), 2006, 25(8): 1683 – 1690. [SHI Lijing, TAO Xiaxin, ZHAO Jisheng. Validation of microtremors array method [J] . [Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#), 2006, 25(8): 1683 – 1690. (in Chinese with English abstract)]