田微,邓亚虹,慕焕东,等.隐伏地裂缝场地地表脉动响应特征研究——以西安F_5地裂缝为例[J].地震工程学报,2027,49(1):227-239.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240824001.

Tian Wei, Deng Yahong, Mu Huandong, et al. Pulsation-response characteristics of the ground surface of hidden fissure sites: a case study of the F_5 fissure in Xi'an City[J].China Earthquake Engineering Journal,2027,49(1):227-239.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240824001

隐伏地裂缝场地地表脉动响应特征研究
——以西安F_5地裂缝为例

田 微[1], 邓亚虹[1,2], 慕焕东[1,2,3], 钱法桥[1], 孙朴烁[1]

(1.长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054;
2.长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安 710054;
3.西安理工大学 岩土工程研究所,陕西 西安 710048)

摘要:西安地裂缝发育众多,致灾严重,在地表呈断续出露。与出露地表的地裂缝相比,隐伏地裂缝的数量更为庞大,且由于其隐蔽性,潜在的危害可能更大。因此,以西安F_5地裂缝为研究对象,通过地脉动测试及三种频谱分析法,揭示了隐伏地裂缝场地地表的脉动响应特征,并对比分析了隐伏与出露地裂缝场地动力响应特征的异同。结果表明:(1)隐伏和出露地裂缝场地的卓越频率基本一致,均不受地裂缝影响,均值约为2.60 Hz;(2)隐伏与出露地裂缝均对场地的动力响应具有放大效应,在地裂缝端点处放大倍数最大,隐伏段放大倍数明显小于出露地裂缝场地,两者分别为1.3和1.8;(3)在近地裂缝范围内,隐伏段与出露段均表现出一定的上盘效应,隐伏段上下盘放大倍数分别为1.22和1.17,在0~1.5 m范围内上盘略大于下盘,出露段上下盘放大倍数为1.68和1.59,在0~6 m范围内表现出一定的上盘效应;(4)隐伏地裂缝场地的放大效应影响范围远小于出露地裂缝场地,隐伏段上下盘影响范围为7.4 m和6.9 m,出露段上下盘均为16.2 m,隐伏段上下盘可适度减小设防范围,而出露段下盘需适度增大设防强度。

关键词:西安;地脉动测试;隐伏地裂缝;脉动响应;放大倍数;影响范围

中图分类号:TU435 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2027)01-0227-13

DOI:10.20000/j.1000-0844.20240824001

收稿日期:2024-08-24

基金项目:国家自然科学基金(42372336);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102262505)

第一作者简介:田 微(1999-),女,硕士研究生,主要从事岩土工程及地震工程研究。E-mail:2022126086@chd.edu.cn。

通信作者:邓亚虹(1978-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为土动力学与岩土地震工程、地质灾害成因机理与防灾减灾。E-mail:dgdyh@chd.edu.cn。

Pulsation-response characteristics of the ground surface of hidden fissure sites: a case study of the F_5 fissure in Xi´an City

Tian Wei[1], Deng Yahong[1,2], Mu Huandong[1,2,3], Qian Faqiao[1], Sun Pushuo[1]

(*1.School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*
2.Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3.Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Ground fissures are numerous in Xi′an and have caused severe disasters. They typically exhibit intermittent surface exposures. Notably, hidden fissures are more abundant than their exposed counterparts, posing potentially greater hazard risks because of their concealed nature. Therefore, taking the Xi′an F5 ground fissure as a case study, this research investigates the pulsation-response characteristics of the ground surface of a hidden fissure site by integrating microtremor testing with three spectral analysis methods. A comparative analysis (similarity and difference) of the dynamic responses between hidden and exposed fissure sites shows the following: (1) the predominant frequencies of both site types are essentially identical and unaffected by the fissures, averaging approximately 2.60 Hz. (2) The hidden and exposed fissures amplify the dynamic response of the site, with the fissure endpoints exhibiting the highest amplification factor; this factor is significantly smaller for the hidden segment (1.3) than for the exposed segment (1.8). (3) The hidden and exposed sections exert a hanging wall effect near the fissure. In the hidden section, the amplification factors for the hanging wall and footwall are 1.22 and 1.17, respectively, with the hanging wall being slightly larger within a 0—1.5-m range. For the exposed section, the hanging wall and footwall amplification factors are 1.68 and 1.59, respectively, showing a hanging wall effect within a 0—6-m range. (4) The influence range of the amplification factor at the hidden fissure site is considerably smaller than that at the exposed fissure site. For the hidden section, the influence ranges are 7.4 m (hanging wall) and 6.9 m (footwall); both are 16.2 m in the exposed section. Consequently, the mitigation ranges for both walls in the hidden section can be moderately reduced, while the fortification intensity for the footwall in the exposed section requires an appropriate increment.

Keywords: Xi′an; microtremor test; hidden ground fissure; pulsation response; amplification ratio; influence range

0 引言

我国地裂缝发育规模大、分布广,西安地区出现最早且最具代表性。西安地裂缝呈带状分布,总体走向与临潼—长安断裂平行,每条地裂缝的延伸长度均可达数公里至数十公里[1]。众多学者就西安地区地裂缝展开讨论并提出不同成因学说,形成如构造成因说、地下水开采成因说和内外耦合成因说等成因机制[2-4]。西安地裂缝延伸总长度约 160 km,具有很好的连续性,在地表表现为断续性,未出露段实际以隐伏的形式存在地下。隐伏地裂缝是指地表上没有破坏形迹,但在地表下存在裂缝的情况,可分为两种[5]:一种是隐伏在地表下,没有明显活动迹象;另一种则是曾经出露在地表,但是受到外力作用后,裂缝发生“愈合”。西安地裂缝活动以地下隐伏地裂缝的蠕滑活动为主[6],在西安上世纪过度开采地下水诱发地面大规模沉降这一背景下,位于西安城区的隐伏地裂缝活动剧烈,并出现明显位移。与已经出露到地表的地裂缝相比,隐伏地裂缝的数量更为庞大,严重制约着城市规划以及地下空间的开发利用。

随着人类活动的不断加剧,隐伏地裂缝在不断

地向上扩展发育，而隐伏地裂缝的扩展过程与出露地表位置受到众多因素影响[7]。在不同土层结构中，隐伏地裂缝破裂扩展过程不完全相同，但可概括为初始破裂阶段、发展阶段以及扩展至地表阶段[7-8]。在受到地下水超采引起的地面沉降以及地震动与强降雨等因素影响下，隐伏地裂缝将快速破裂至地表。隐伏地裂缝扩展过程中，会引起周围土体应力场和位移场的变化，对地铁等工程有一定影响[9-11]。而隐伏正断型和隐伏逆断型地裂缝引起的土体应力及位移变化的差异明显，正断型地裂缝上盘土体应力降低，下盘土体应力增强；随着地裂缝向上扩展，土体变形范围明显增大，且上盘影响范围大于下盘[12-13]。逆断型地裂缝主要影响上盘，并且影响范围与深度皆小于正断型[14]。不同隐伏裂缝倾角对地表的破坏不同，倾角越大，对地表的影响范围越大[15]。目前，对于隐伏地裂缝的研究主要集中在隐伏地裂缝破裂扩展规律、影响因素及对周围土体的影响，对隐伏地裂缝场地动力特性的研究不足。

在地裂缝的场地动力效应研究方面，学者主要通过振动台模型试验[16-18]、数值模拟[19-21]等手段研究了地震荷载作用下地裂缝场地动力响应规律。结果表明，越靠近地裂缝，峰值加速度越大，远离地裂缝，峰值加速度逐渐减小并最终趋于稳定。在对地裂缝现场勘探方法上，相较于钻探、槽探以及地震反射波等方法，地脉动测试属于无损探测法，且具有便捷、耗资少等优点[22-24]。因此，部分学者借助地脉动测试对典型地裂缝场地的动力响应特征进行了研究，结果均表明地脉动信号可以用以分析地裂缝场地动力响应特征并能揭示其放大效应和变化规律[25-26]。但以上研究皆针对出露地裂缝，未涉及隐伏地裂缝场地。利用地脉动研究隐伏地裂缝在地表的脉动响应特征，可为隐伏地裂缝场地建筑物避让距离提供参考。同时，在实际地裂缝场地勘察中，可辅助钻探方法，快速地确定隐伏地裂缝的大致位置，减少勘察地裂缝所用的人力物力。

鉴于此，本文以西安F_5地裂缝为研究对象，通过地脉动测试和频谱分析法（直接傅里叶谱分析法、加速度反应谱分析法以及Arias烈度分析法），揭示了隐伏地裂缝场地在地表的脉动响应特征，并与出露地裂缝场地的动力响应特征进行对比，研究成果可为类似场地工程结构抗震设防提供参考和依据。

1　地脉动测试及分析方法

1.1　地脉动基本原理

地脉动是地表一种平稳的非重复性随机波动，主要是由目标测试场地周围的风、海浪活动等自然振源和周围的机械振动、交通工具等人工振源激发产生的一种振动，振幅为μm级，在非常安静的山地基岩上的振幅约为10^{-8} cm，在大城市约10^{-4} cm[27]。地脉动激发源与波的成分具有随机性，但是由于经过不同土层的反射和折射，在传播过程中会携带反映场地固有特性的信息。因此，利用地脉动代替地震动，来获取地裂缝场地的动力响应特征。

1.2　地脉动测试仪器

本次地脉动测试仪器为EPS-2数字地震仪（图1）。该仪器可同时记录3个方向（2个水平方向和1个垂直方向）的地脉动数据，记录的加速度时程精度可达0.000 01g。在夜间选择开阔场并避开特定的振动源地进行地脉动测试，采样频率设置为100 Hz。

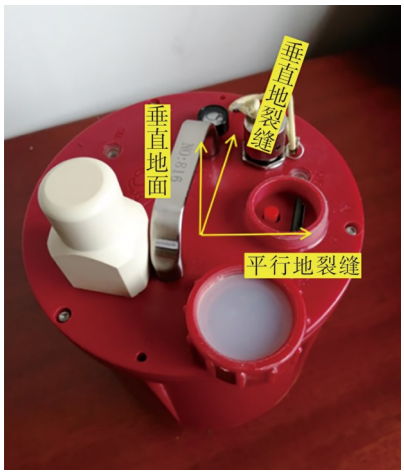


图1　EPS-2数字地震仪

Fig. 1　EPS-2 digital seismograph

1.3　场地工程地质条件及测线测点布设

F_5地裂缝总体走向N70°E，与古迹岭黄土梁的走向大体一致，倾向S，倾角72°～80°，平面展布形态总体上呈波状，局部出现分叉现象，延伸约15.8 km。据西安高新区云轨示范项目的勘察资料，在云水一路与鱼斗路南约120 m发育有F_5隐伏地裂缝，埋深约30 m，附近土层由上到下依次为Q_4^{ml}素填土、Q_4^{al+pl}黄土状土、Q_3^{al}粉质黏土、Q_2^{al}粉质黏土以及粉质黏土与砂土互层（图2）。经实地踏勘，在距离该隐伏段约890 m处有出露在地表的F_5地裂缝发育，两地的

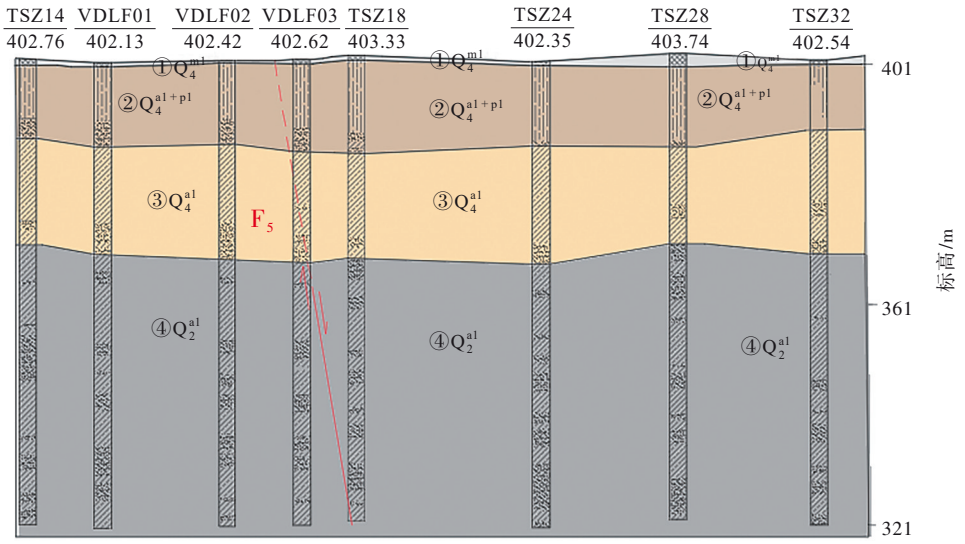


图 2 F_5地裂缝场地工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological profile of the F_5 ground fissure site

地层结构基本一致。

在隐伏段布设测线 F5-1，在出露段布设测线 F5-2，测线与地裂缝走向基本垂直，测线布设图如图 3 所示。

测点布设如图 4 所示，地裂缝两侧上下盘各 12 个测点（H 表示上盘，F 表示下盘），共计 25 个测点，测点与地裂缝垂直距离依次为 0、1.5、3、4.5、6、7.5、9、10.5、12、13.5、15、20、25 m。其中，由于隐伏段地裂缝未显露在地表，据资料推测的位置为中心向两侧布设[28]。

1.4 数据采集与处理方法

每个测点监测 10 min 以上，在进行数据处理时，在每一测点的数据中至少选取 6 段步长 10 s 的平稳波段作为分析样本，以代表该测点所得场地信号特征。野外实测直接记录的是加速度时程，利用 SeismoSignal 软件进行基线校正以及 0.1～5 Hz 的带通滤波处理后，进一步得到傅里叶谱、加速度反应谱和 Arias 烈度曲线。

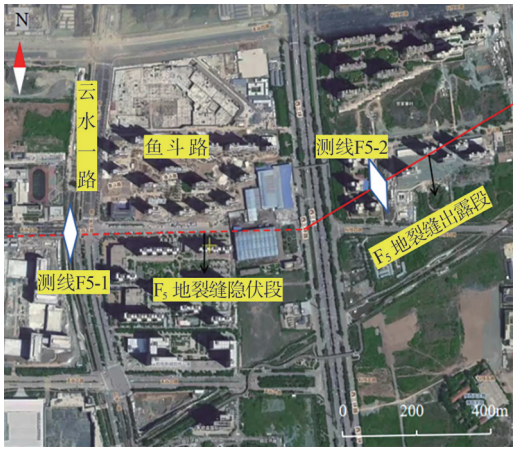


图 3 F_5地裂缝及测线 F5-1 和 F5-2 布设位置

Fig. 3 Layout of the F5 ground fissure and survey lines F5-1 and F5-2

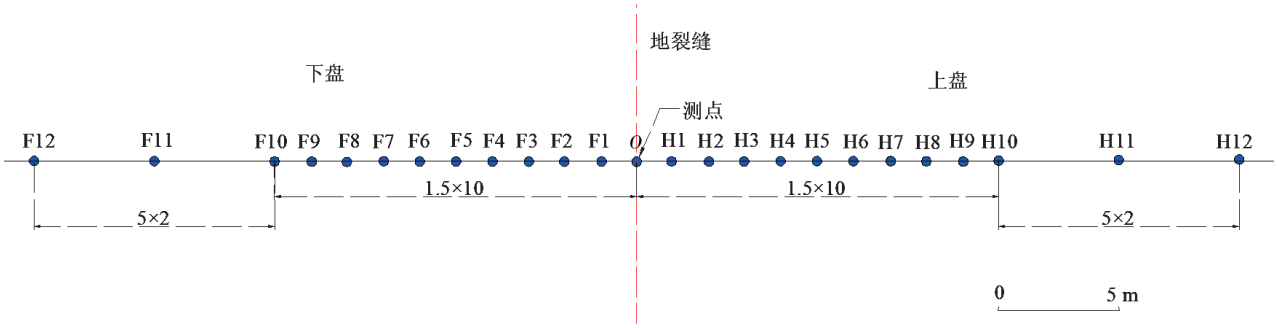


图 4 地脉动测点布设图（单位：m）

Fig. 4 Layout of microtremor measurement points (unit: m)

1.4.1　傅里叶谱分析法

利用快速傅里叶变换可以将时域函数 $X(t)$ 转换到频域的傅里叶积分：

$$X(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：ω 为角频率，$\omega=2\pi f$，f 是频率。

将地脉动信号经过傅里叶谱分析后，可得到场地土层固有信息，通过分析傅里叶谱谱型特征、场地卓越频率及傅里叶谱幅值，可以得到场地地层条件、卓越频率以及地裂缝对场地动力响应的影响。

1.4.2　加速度反应谱分析法

加速度反应谱是具有相同阻尼，不同自振周期的 SDOF 单质点体系在同一振动作用下加速度反应随质点自振周期变化的曲线，当阻尼比 $\lambda^2\ll1$，加速度反应谱为：

$$\begin{aligned}\ddot{y}(t)&=\frac{\omega^2}{\omega_\mathrm{d}}\int_0^t a(\tau)\mathrm{e}^{-\lambda\omega(t-\tau)}\sin\left[\omega_\mathrm{d}(t-\tau)+2\theta\right]\mathrm{d}\tau\\&=-\omega^2x(t)\end{aligned} \tag{2}$$

式中：ω_d 为有阻尼的自振圆频率；$\omega_\mathrm{d}=\omega\sqrt{1-\lambda^2}$；$\tan\theta=\dfrac{\lambda}{\sqrt{1-\lambda^2}}$。

对不同测点特征周期和反应谱峰值进行对比，得到场地不同区域地脉动响应的分布特征，获得地裂缝场地动力响应特征。

1.4.3　Arias 烈度分析法

Arias 烈度用以描述场地地脉动强度随时间不断累积的动态特征，可以更好反映地脉动在频域上的整体强度大小，不会因为某一时刻幅值过大或过小而影响整体动力响应强度，定义为：

$$I_\mathrm{a}=\frac{\pi}{2g}\int_0^{\infty}a(t)^2\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：I_a 是单位时间内的 Arias 烈度；$a(t)$ 是以重力加速度为单位的加速度时程。

借助 Arias 烈度评判场地地裂缝两侧不同范围动力响应的强弱，可以更好地揭示放大效应特征。

2　地脉动测试结果分析

2.1　隐伏段

测线 F5-1 各测点傅里叶谱如图 5 所示，实测共 25 个测点。H1(F1)至 H12(F12)为上(下)盘由近至远的多个测点。从图中可发现，测线所处场地的傅里叶频谱幅值多为双峰或多峰形式，与场地所处地层的结构特征吻合。主峰最突出的幅值为卓越频率，可发现场地的卓越频率都较为集中，主要分布在 2.34～3.13 Hz 之间，其中上盘场地卓越频率均值为 2.57 Hz，上盘均值为 2.62 Hz，上下盘卓越频率相差较小，其大小与位置无明显相关性。

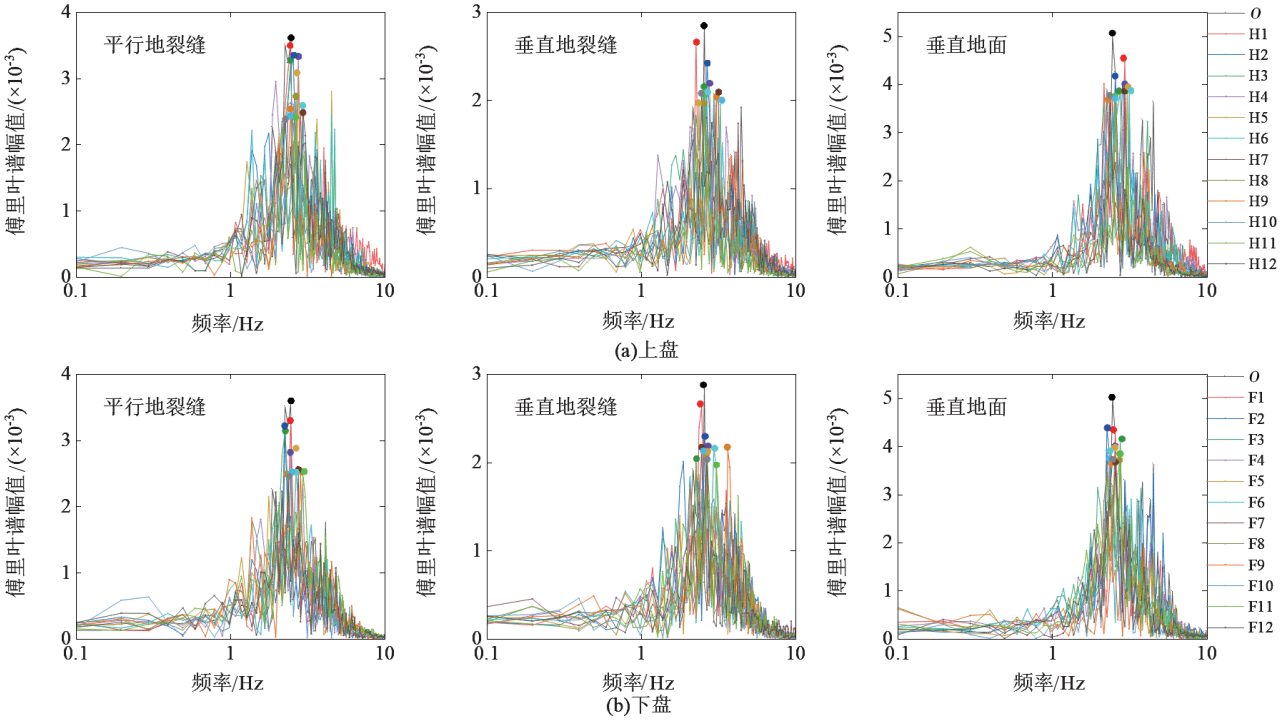


图 5　测线 F5-1 傅里叶频谱特征曲线图

Fig. 5　Fourier spectrum characteristic curves of survey line F5-1

测线F5-1场地内各测点阻尼比λ=0.05的加速度反应谱如图6所示。从图中可看出,反应谱主峰集中较为明显,多表现为双峰,频带较宽。主峰最突出的幅值为卓越周期,可发现该场地的卓越周期较集中,主要集中在0.24~0.44 s之间,其中上盘卓越周期均值为0.35 s,下盘均值为0.37 s,相差较小。同时,频率与傅里叶谱卓越频率无较大差异,卓越周期大小与位置亦无明显相关性。

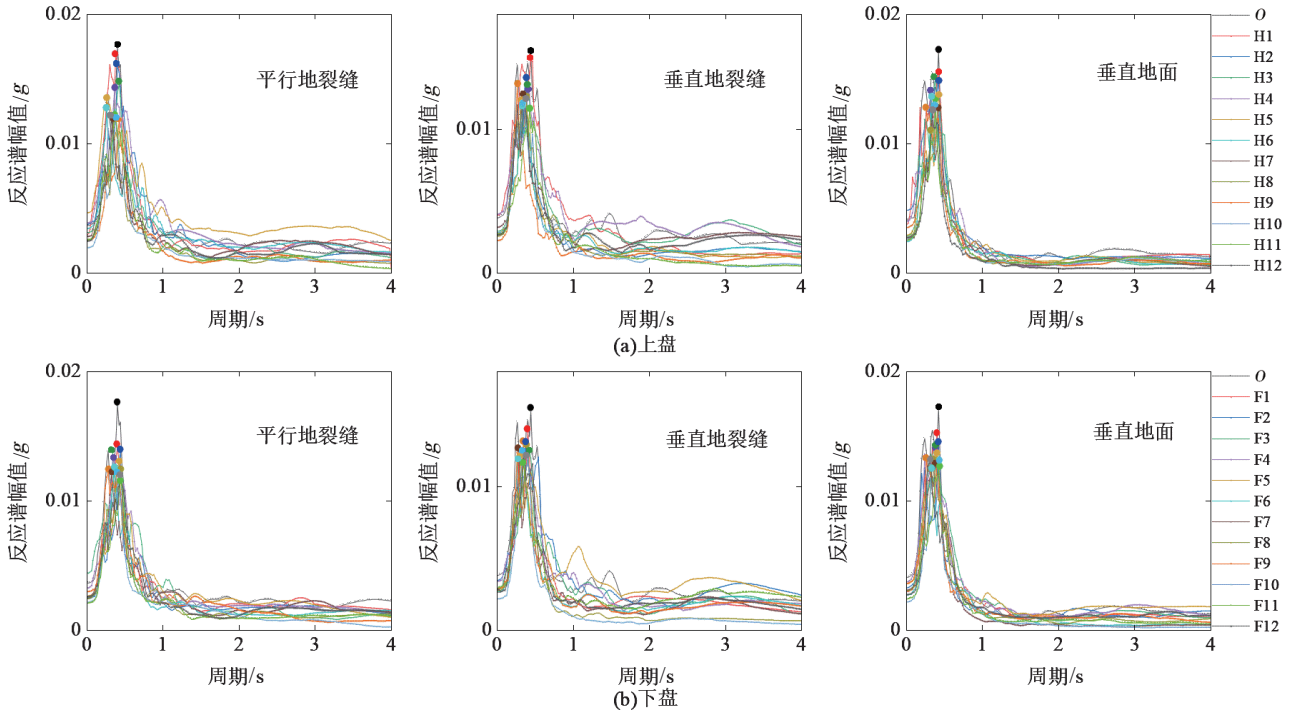


图6 测线F5-1加速度反应谱频谱特征曲线图(λ=0.05)

Fig. 6 Acceleration response spectrum characteristic curves of survey line F5-1(λ=0.05)

测线F5-1上各测点的Arias烈度曲线如图7所示。Arias烈度曲线反映各测点地脉动强度随着时间增大而不断累积的过程,曲线均呈上升趋势,由于各测点上升速度的快慢,能量累积有较大差异。从图中可看出,测点O的烈度曲线增加速度相对较快,不同方向上的Arias烈度幅值最大值均出现在测点O处,随着远离测点O的测点烈度曲线交织重合,烈度变化小。

图8为测线F5-1各测点谱峰值的三向均值变化曲线图。从图中可以看出,傅里叶谱峰值三向均值在测点O处最大,达到0.003 8,远离测点O的测点峰值均值平稳在0.002 7左右,上盘H1均值为0.003 6,较高于下盘F1均值0.003 4。加速度反应谱峰值三向均值在测点O处最大,达到0.016g,远离测点O的测点加速度反应谱峰值均值平稳在0.012g以下,在测点O两侧3 m内,上盘的测点峰值略高于下盘。Arias烈度峰值三向均值在测点O处最大,达到0.002 9 cm/s,远离测点O的测点峰值均值平稳在0.002 1 cm/s左右,在测点O两侧3 m内,上盘的Arias烈度略高于下盘。

各谱峰值均在测点O处达到最大值,随着与测点O距离的增大,各测点峰值逐渐减小,在距离约7.5 m后,逐渐趋于平稳,且在测点两侧3 m范围内,上盘的谱峰值整体略高于下盘。因此,可以认为测点O与推测的隐伏地裂缝发育位置基本一致。

2.2 出露段

测线F5-2场地内地脉动傅里叶谱如图9所示。可发现该地裂缝场地的直接傅里叶变换谱型与测线F5-1相似,主峰突出,次峰发育较多,以多峰形式为主,频带宽度相对较窄。傅里叶幅值峰值较为集中,卓越频率主要集中在2.34~3.03 Hz,上、下盘场地卓越频率均值分别为2.67 Hz和2.57 Hz,上、下盘各测点的卓越频率大小与位置亦无明显相关性。

测线F5-2上各测点的加速度反应谱如图10所示。从图中可看出,反应谱亦表现为双峰或多峰形式,主峰尖锐突出。该场地的卓越周期主要集中在0.28~0.44 s之间,上、下盘卓越周期均值分别为0.37 s和0.38 s,对应卓越频率为2.70 Hz,与其傅里

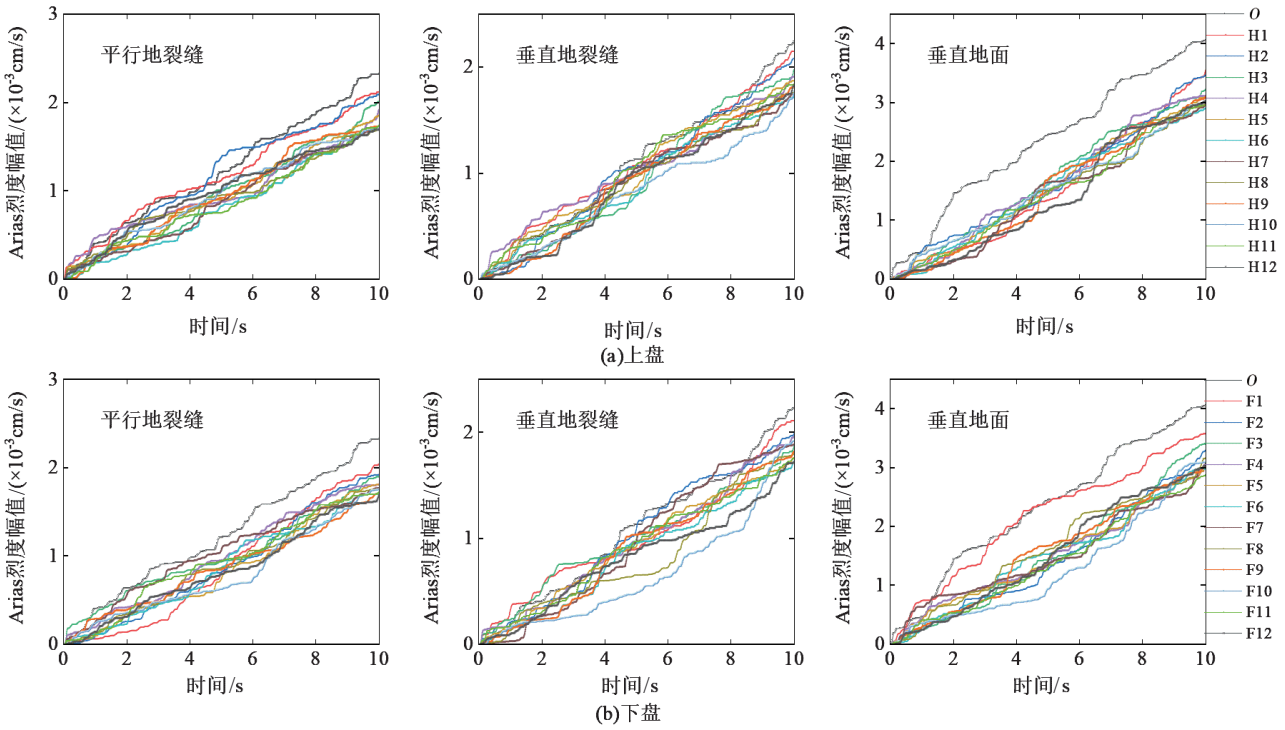


图 7　测线 F5-1Arias 烈度频谱特征曲线图

Fig. 7　Arias intensity spectrum characteristic curves of survey line F5-1

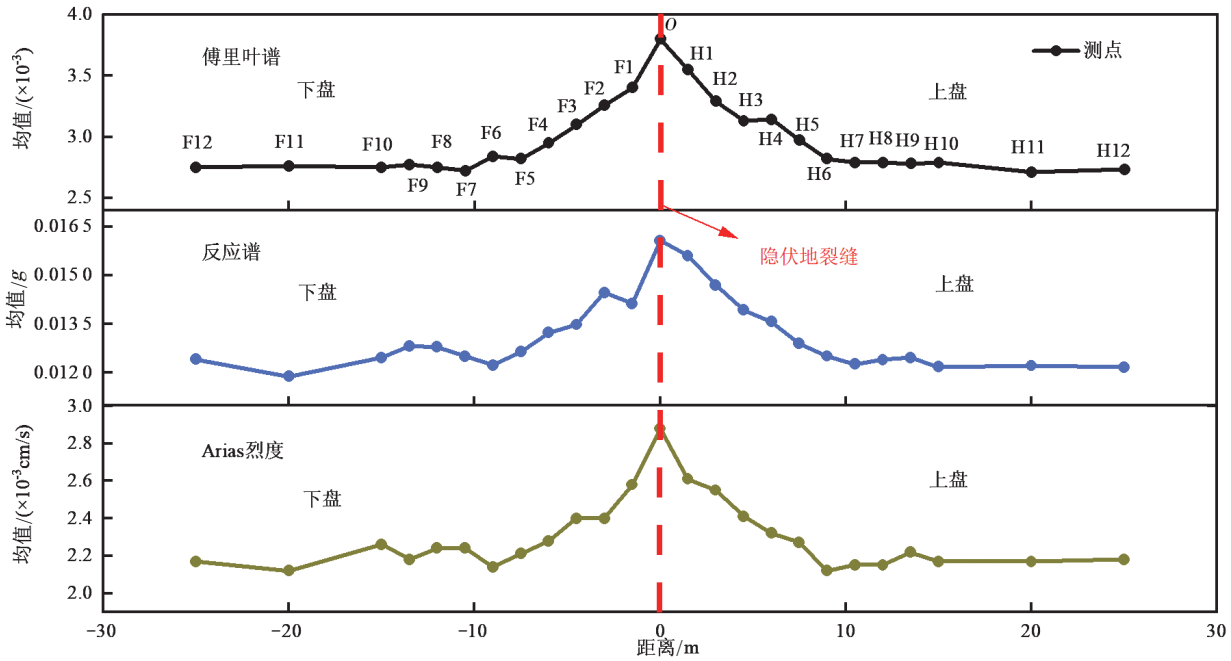


图 8　测线 F5-1 峰值衰减曲线

Fig. 8　Peak attenuation curves of survey line F5-1

叶卓越频率接近，且测线上各测点的卓越周期大小也与位置无明显相关性。

测线 F5-2 上各测点的 Arias 烈度曲线如图 11 所示。从图可看出，上、下盘上各测点在三个方向上的烈度均随时间的变化以不同速度攀升，其中测点 O 处的烈度曲线攀升最快，随着远离地裂缝，测点烈度曲线增加速度逐渐变慢，幅值逐渐减小，最终平稳在一定范围内。

图 12 为测线 F5-2 各测点谱峰值的三向均值变化曲线图。从图中可以看出，傅里叶谱峰值三向均

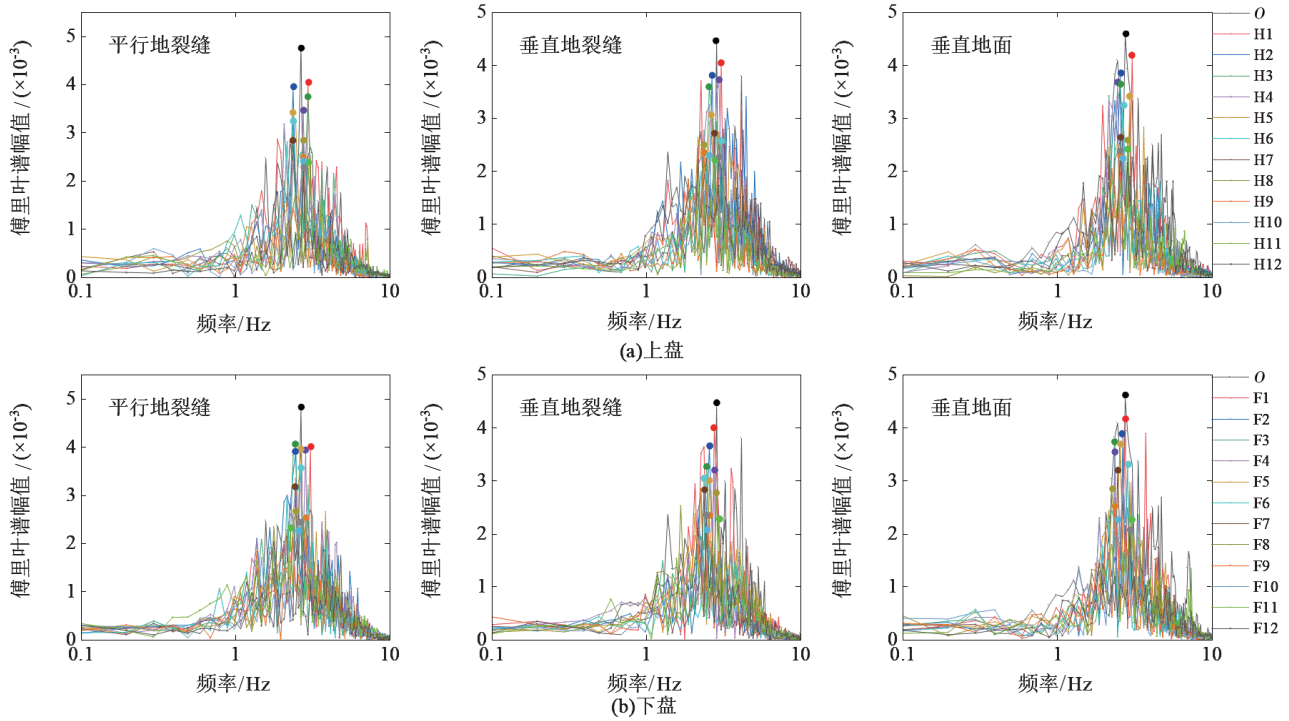


图 9 测线 F5-2 傅里叶频谱特征曲线图

Fig. 9 Fourier spectrum characteristic curves of survey line F5-2

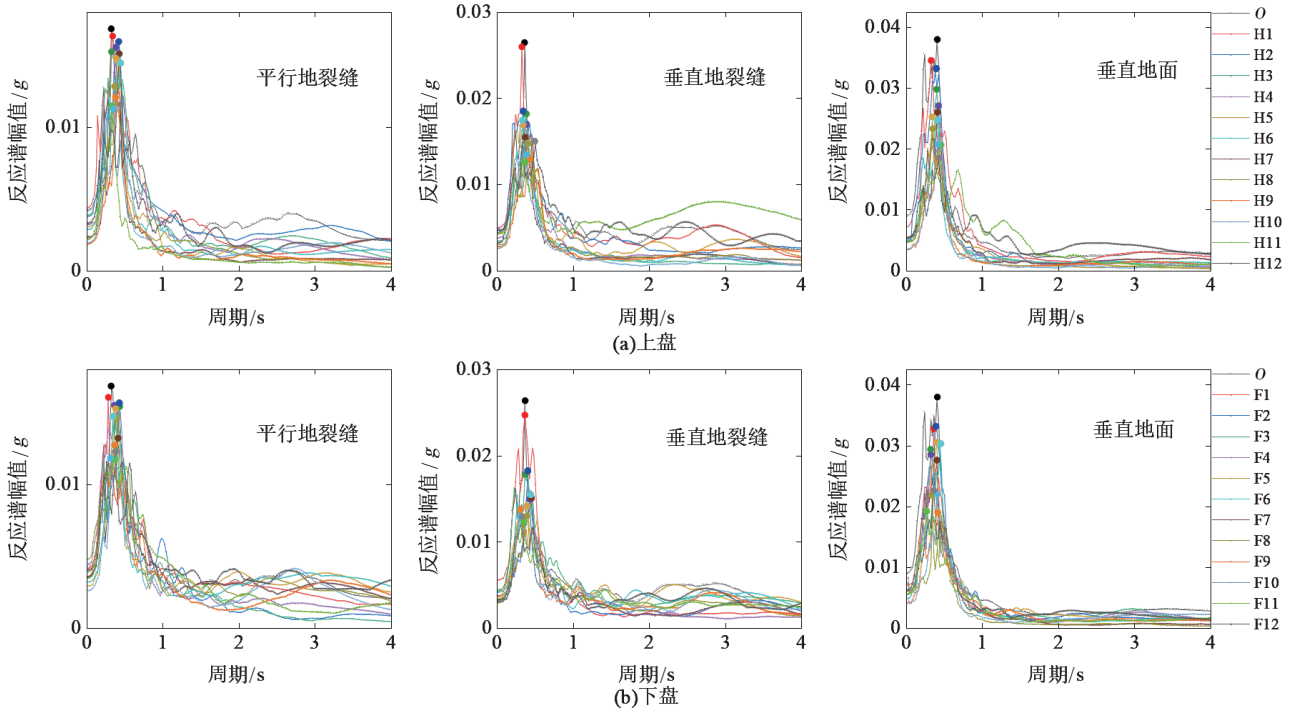


图 10 测线 F5-2 反应谱特征曲线图(λ=0.05)

Fig. 10 Response spectrum characteristic curves of survey line F5-2 (λ=0.05)

值在地裂缝测点 O 处最大,达到 0.004 6,远离地裂缝的测点峰值均值逐渐减小,在距离 15 m 后均值平稳在 0.002 2 左右,离地裂缝 4.5 m 范围内,相同距离的上、下盘测点的峰值接近,上盘微高于下盘。加速度反应谱峰值三向均值在地裂缝测点 O 处最大,达到 0.027g,远离地裂缝的测点加速度反应谱峰值均值平稳在 0.015g 左右,在地裂缝两侧 0~4.5 m 范围内,上盘的峰值同样略高于相对位置的下盘。

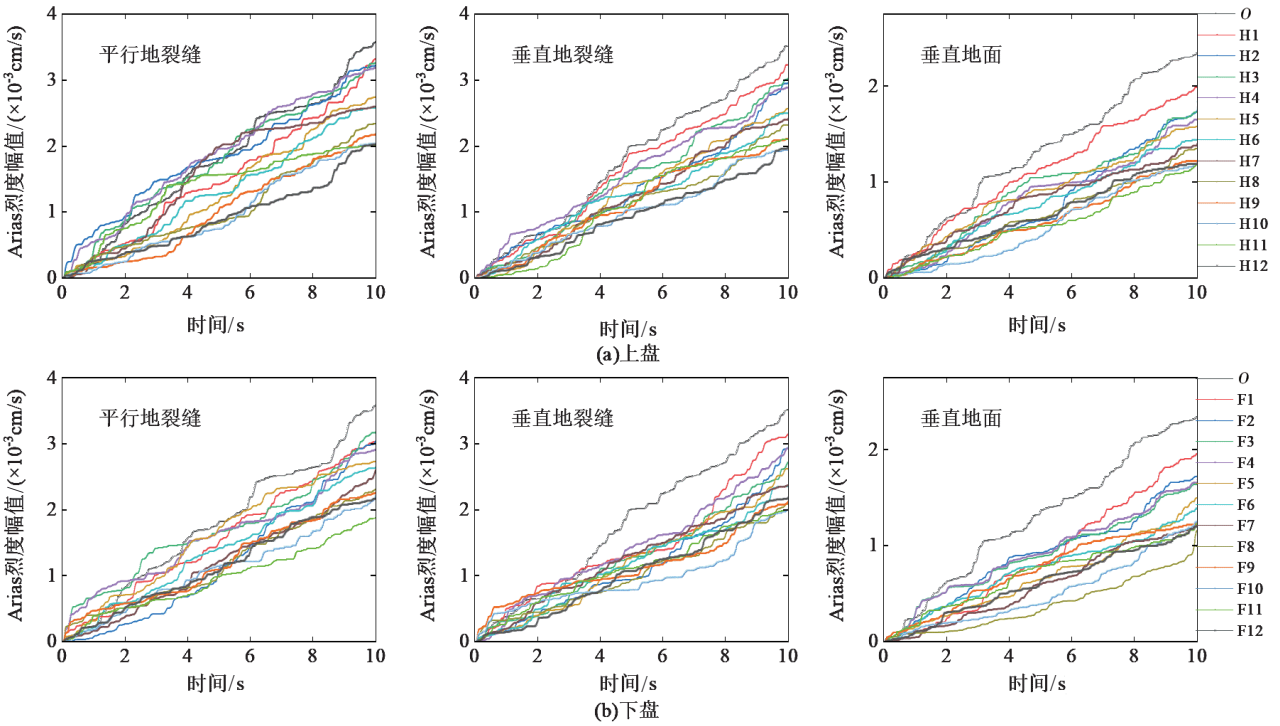


图 11　测线 F5-2 Arias 烈度特征曲线图

Fig. 11　Arias intensity characteristic curves of survey line F5-2

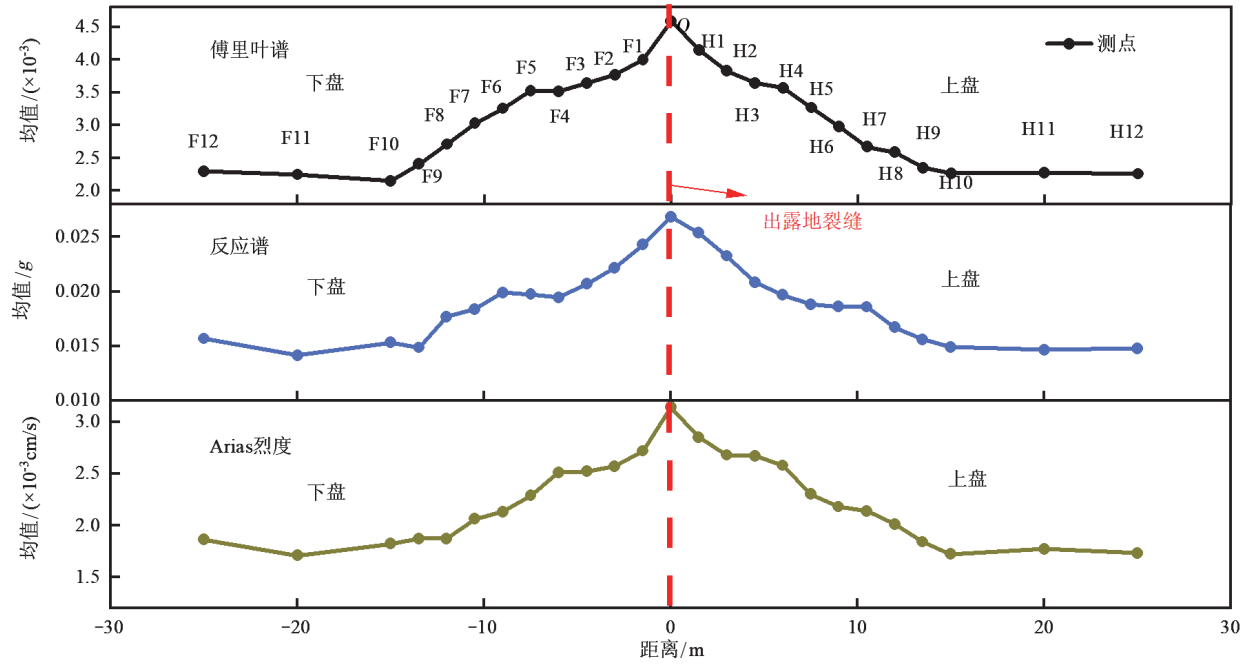


图 12　测线 F5-2 峰值衰减曲线

Fig. 12　Peak attenuation curves of survey line F5-2

Arias 烈度峰值三向均值在地裂缝测点 O 处最大，达到 0.003 1 cm/s，远离地裂缝的测点峰值均值平稳在 0.001 5 cm/s 左右，在地裂缝两侧 0～6 m 范围内，相同距离条件下的地裂缝场地上盘测点的烈度峰值高于下盘。

3　隐伏段与出露段场地动力响应特征差异分析

通过上述分析可知，隐伏地裂缝与出露地裂缝对场地动力响应均具有放大作用。在地裂缝处傅

里叶幅值、反应加速度及Arias烈度最大，随着远离地裂缝，幅值降低趋于平稳，表明放大效应具有一定的影响范围。

将幅值趋于稳定的场地视为不受地裂缝影响的原场地，以各距离测点的谱峰值与原场地峰值间的比值作为放大因子来直观表征场地内的放大效应，其中原场地峰值用各谱峰值三向均值的平稳值来代替[29]。测线F5-1与测线F5-2的各测点放大因子分别如表1、表2所列。

由表1、表2可知，测线F5-1与测线F5-2的傅里叶谱法放大因子、反应谱分析法放大因子、Arias烈度分析法放大因子均在测点O处达到最大值，随着远离地裂缝，放大因子逐渐减小，最终趋于1.0。

隐伏段傅里叶谱法放大因子、反应谱分析法放大因子和Arias烈度分析法放大因子最大值分别为1.36、1.23、1.31，三种分析方法得到的放大因子均值为1.30；出露段分别为1.99、1.79、1.75，均值1.84。出露段放大倍数约为隐伏段的1.42倍，出露段放大倍数明显大于隐伏段放大倍数。隐伏段上盘H1放大倍数均值为1.22，下盘F1放大倍数均值为1.17，表现出一定的上盘效应。而出露段上盘H1—H4放大倍数均值高于下盘F1—F4，也表现出一定的上盘效应。由于该条地裂缝倾角较大，以及上下盘房屋建筑以及地下水系分布的不同，该条测线上表现为较微弱的上盘效应，并不显著。但值得注意的是无论是隐伏段还是出露段，放大效应皆在地裂缝端点处最为显著。

表1 测线F5-1放大因子统计表

Table 1 Amplification factor statistics of survey line F5-1

测点	谱分析			测点	谱分析		
	傅里叶谱	反应谱	Arias烈度		傅里叶谱	反应谱	Arias烈度
O	1.36	1.23	1.31				
H1	1.26	1.20	1.19	F1	1.21	1.13	1.17
H2	1.17	1.13	1.16	F2	1.16	1.16	1.09
H3	1.11	1.07	1.10	F3	1.11	1.08	1.09
H4	1.12	1.04	1.05	F4	1.05	1.06	1.04
H5	1.06	0.99	1.03	F5	1.01	1.01	1.00
H6	1.01	0.97	0.96	F6	1.01	0.98	0.97
H7	1.00	0.95	0.98	F7	0.97	1.00	1.02
H8	1.00	0.95	0.98	F8	0.98	1.02	1.02
H9	0.99	0.96	1.01	F9	0.99	1.03	0.99
H10	1.00	0.94	0.99	F10	0.98	1.00	1.03
H11	0.97	0.94	0.99	F11	0.99	0.95	0.96
H12	0.98	0.94	0.99	F12	0.98	0.96	0.99

表2 测线F5-2测点放大因子统计表

Table 2 Amplification factor statistics of measurement points on survey line F5-2

测点	谱分析			测点	谱分析		
	傅里叶谱	反应谱	Arias烈度		傅里叶谱	反应谱	Arias烈度
O	1.99	1.79	1.75				
H1	1.76	1.69	1.58	F1	1.74	1.52	1.51
H2	1.66	1.48	1.49	F2	1.64	1.38	1.43
H3	1.58	1.39	1.48	F3	1.58	1.29	1.4
H4	1.55	1.31	1.43	F4	1.53	1.21	1.39
H5	1.42	1.25	1.28	F5	1.54	1.23	1.27
H6	1.30	1.24	1.21	F6	1.42	1.24	1.18
H7	1.16	1.24	1.19	F7	1.32	1.15	1.14
H8	1.13	1.11	1.11	F8	1.17	1.11	1.04
H9	1.02	1.04	1.02	F9	0.99	0.93	1.04
H10	0.99	0.99	0.9	F10	0.94	1.02	1.01
H11	0.99	0.98	0.98	F11	0.98	0.94	0.95
H12	0.98	0.98	0.96	F12	1.00	1.04	1.03

将表1、表2的放大因子进行综合拟合，得到测线F5-1、F5-2上下盘各测点放大因子变化曲线，如图13所示。将放大因子低于1.03的测点视为不受地裂缝影响。

图13(a)为两条测线上盘各测点放大因子与地裂缝距离的曲线变化图，根据拟合曲线可得到地裂缝场地上盘动力响应放大效应的具体影响范围，如表3所列。从表3可发现，隐伏段地裂缝对场地动力响应的影响范围为7.4 m，出露段平均为16.2 m，

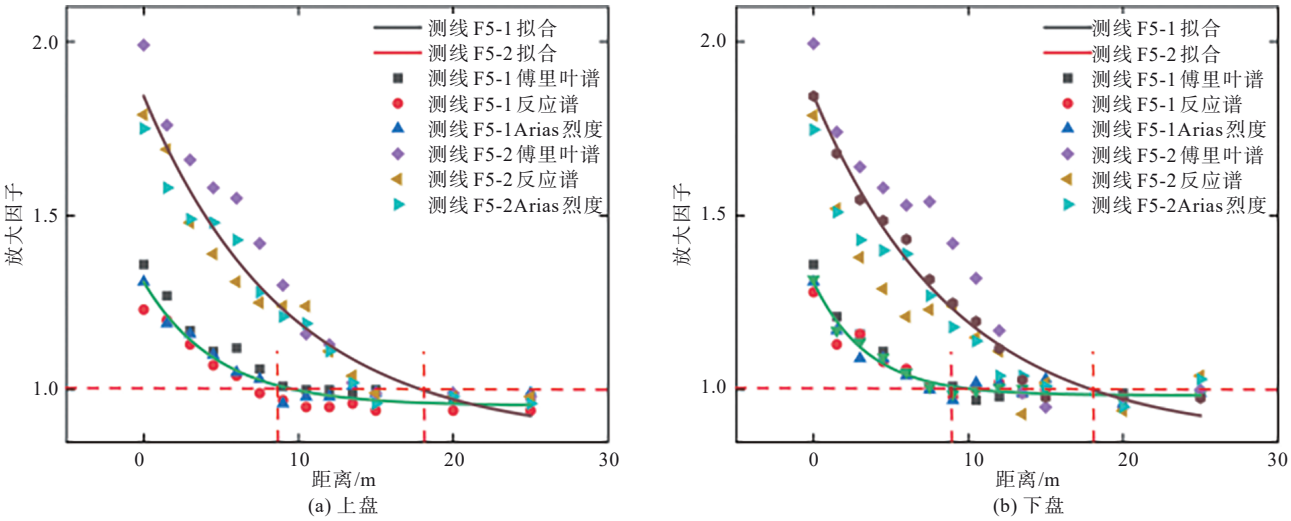


图 13　测线 F5-1、F5-2 上下盘各测点放大因子曲线变化图

Fig. 13　Variation curves of amplification factors of measurement points on the hanging wall and footwall of survey lines F5-1 and F5-2

出露段影响范围约为隐伏段的 2.2 倍，出露段影响范围显著大于隐伏段。

图 13(b)为两条测线下盘各测点放大因子与地裂缝距离的曲线变化图，根据拟合曲线可得到地裂缝场地下盘动力响应放大效应的具体影响范围，如表 3 所列。隐伏段地裂缝对场地动力响应的影响范围为 6.9 m，出露段平均为 16.2 m，出露段影响范围约为隐伏段的 2.35 倍，出露段影响范围显著大于隐伏段。可见，出露段上、下盘的影响范围均显著大于隐伏段。

表 3　地裂缝场地影响距离统计表

Table 3　Statistics of influence distance of the ground fissure site

位置	测线	影响距离/m	位置	测线	影响距离/m
上盘	F5-1	7.4	下盘	F5-1	6.9
	F5-2	16.2		F5-2	16.2

隐伏段地裂缝端点埋深约 30 m，与出露段相比可见，随着地裂缝端点埋深的增大，放大倍数与影响范围均减小。规范法规定的一般地裂缝影响范围宽度为上盘 0～20 m，下盘 0～12 m。本研究结果表明，隐伏段上下盘范围分别为 7.4 m 和 6.9 m，出露段上下盘影响范围均为 16.2 m，隐伏段上下盘可适度减小设防范围，而出露段下盘需适度增大设防强度。可为规范法对类似场地的抗震设防提供参考。

4　结论

本文通过对西安 F_5 地裂缝的隐伏段与出露段进行的地脉动测试，利用直接傅里叶谱、加速度反应谱与 Arias 烈度分析法，首先揭示了隐伏地裂缝场地的动力响应特征，其次与出露地裂缝进行了对比，从放大倍数与影响范围比较了隐伏段与出露段场地放大效应的差异。主要结论如下：

（1）地裂缝对场地的卓越频率和卓越周期无影响。隐伏段傅里叶卓越频率均值 2.62 Hz，反应谱卓越周期均值 0.37 s，出露段傅里叶卓越频率均值 2.64 Hz，反应谱卓越周期均值 0.37 s，均不受地裂缝发育的影响。

（2）隐伏地裂缝与出露地裂缝均对场地的动力响应有放大效应。各测点在不同方向上的傅里叶谱峰值、加速度反应谱峰值、Arias 烈度峰值皆在地裂缝处最大，并随远离地裂缝而衰减，最终在一定距离后趋于平稳。

（3）隐伏段与出露段对场地的放大效应有明显差异。隐伏段综合放大倍数约 1.30，出露段综合放大倍数约 1.84，出露段放大倍数显著大于隐伏段。隐伏段上下盘放大倍数分别为 1.22 和 1.17，在 0～1.5 m 范围内表现出一定的上盘效应，出露段上下盘分别为 1.68 和 1.59，在 0～6 m 范围内表现为一定的上盘效应。

（4）隐伏段上下盘影响范围分别为 7.4 m 和 6.9 m，出露段上下盘影响范围皆为 16.2 m，出露段上下盘影响范围均大于隐伏段。可为规范法对类似场地的抗震设防提供参考。

参考文献(References)

[1] 张家明. 西安地裂缝场地勘察[C]//中国地质学会工程地质专业委员会.2006年学术年会暨"城市地质环境与工程"学术研讨会论文集. 广州:机械工业勘察设计研究院, 2006: 244-247.
Zhang Jiaming. Field survey on ground fractures in Xi′an Ctiy [C]//The Engineering Geology Professional Committee of the Geological Society of China. 2006 Annual Committee of China Geological Society and "Urban Geological Environment and Engineering" Collection of Surgical Seminars. Guangzhou: Mechanical Industry Survey and Design Research Institute, 2006: 244-247.

[2] 邓亚虹, 彭建兵, 李丽, 等. 渭河盆地基底伸展与地裂缝成因关系探讨[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 92-96.
Deng Yahong, Peng Jianbing, Li Li, et al. Causative relationship between basement stretching and ground fissures formation in Weihe Basin[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 92-96.

[3] 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.

[4] Peng J B, Qiao J W, Leng Y Q, et al. Distribution and mechanism of the ground fissures in Wei River Basin, the origin of the Silk Road [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 718.

[5] 卢全中, 赵富坤, 彭建兵, 等. 隐伏地裂缝破裂扩展研究综述[J]. 工程地质学报, 2013, 21(6): 898-907.
Lu Quanzhong, Zhao Fukun, Peng Jianbing, et al. Overview on rupture propagation studies of buried ground-fissures [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(6): 898-907.

[6] 刘国昌. 西安的地裂缝[J]. 长安大学学报(地球科学版), 1986, 8(4): 9-22.
Liu Guochang. The ground fissures in Xi′an, Shaanxi[J]. Journal of Chang′an University Earth Science Edition, 1986, 8(4): 9-22.

[7] 石玉玲, 门玉明, 彭建兵, 等. 西安城区地裂缝破裂扩展的数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 56-60.
Shi Yuling, Men Yuming, Peng Jianbing, et al. Numerical simulation of ground-fissure cracking and extending in Xi′an[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 56-60.

[8] 杨亚磊, 韩文卿, 卢全中, 等. 隐伏地裂缝破裂扩展物理模型试验研究[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(2): 95-99, 123.
Yang Yalei, Han Wenqing, Lu Quanzhong, et al. Study on the physical modeling of buried geofracture crack expansion [J]. Journal of Gansu Sciences, 2020, 32(2): 95-99, 123.

[9] 黄强兵, 杨涛, 王震, 等. 跨地裂缝地铁隧道竖向地层压力计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1705-1711.
Huang Qiangbing, Yang Tao, Wang Zhen, et al. Calculation of vertical strata load of metro tunnel crossing ground fissure zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1705-1711.

[10] 袁立群, 门玉明, 刘洪佳, 等. 西安出露及隐伏地裂缝与地铁隧道相互作用数值模拟分析[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 11-13, 33.
Yuan Liqun, Men Yuming, Liu Hongjia, et al. A numerical simulation of interactions between ground fissures and Xi′an metro tunnel[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(2): 11-13, 33.

[11] 黄强兵, 高欢, 刘妮娜, 等. 地裂缝场地地铁隧道地震动力响应的振动台试验研究[J]. 地质力学学报, 2018, 24(6): 785-794.
Huang Qiangbing, Gao Huan, Liu Nina, et al. Shaking table model test on seismic response of metro tunnel crossing ground fissure site [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(6): 785-794.

[12] 黄强兵, 彭建兵, 闫金凯, 等. 地裂缝活动对土体应力与变形影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 903-908.
Huang Qiangbing, Peng Jianbing, Yan Jinkai, et al. Model test study of influence of ground fissure movement on stress and deformation of soil mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 903-908.

[13] 彭建兵, 陈立伟, 黄强兵, 等. 地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1826-1834.
Peng Jianbing, Chen Liwei, Huang Qiangbing, et al. Large-scale physical simulative experiment on ground-fissure expansion mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1826-1834.

[14] 石玉玲, 门玉明, 彭建兵, 等. 逆断层地裂缝在黄土中破裂扩展的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(5): 47-50.
Shi Yuling, Men Yuming, Peng Jianbing, et al. Numerical simulation of reversed ground-fissure cracking and extending in loess [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(5): 47-50.

[15] 罗文超. 裂缝倾角对正断型地裂缝破裂扩展的影响[J]. 工程技术研究, 2019, 4(13): 11-13.
Luo Wenchao. Effect of fracture displacement angle on fracture growth propagation of normal-fault ground fractures [J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4 (13): 11-13.

[16] 刘妮娜, 黄强兵, 门玉明, 等. 地震荷载作用下地裂缝场地动力响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 1024-1031.
Liu Nina, Huang Qiangbing, Men Yuming, et al. Model test on dynamic response of ground with fissures under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 1024-1031.

[17] 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(S1): 3139-3149.

[18] 慕焕东，邓亚虹，李荣建，等. 西安地裂缝场地动力响应规律及影响因素分析[J]. 地震工程学报，2019，41(2)：418-427.
Mu Huandong, Deng Yahong, Li Rongjian, et al. Dynamic response and influencing factors of ground fissure sites in Xi′an [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2): 418-427.

[19] 慕焕东，邓亚虹，纪帆，等. 不同缝面形态地裂缝场地地震响应规律研究[J]. 防灾减灾工程学报，2022，42(3)：425-435.
Mu Huandong, Deng Yahong, Ji Fan, et al. Study on the seismic response law of ground fissure sites with different fracture surfaces [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 425-435.

[20] 范文，聂忠权，陈党民，等. 地裂缝地震影响效应研究：以陕西咸阳为例[J]. 灾害学，2014，29(4)：82-88.
Fan Wen, Nie Zhongquan, Chen Dangmin, et al. Study on seismic effect of ground fissure: a case study on a ground fissure in Xianyang, Shaanxi [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 82-88.

[21] 刘聪，彭建兵，陈立伟，等. 西安地裂缝场地地震效应分析[J]. 工程地质学报，2012，20(6)：979-985.
Liu Cong, Peng Jianbing, Chen Liwei, et al. Finite element analysis of seismic effects on ground fissures in Xi′an[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 979-985.

[22] 张磊刚，邓亚虹，薛捷，等. 地裂缝场地地脉动响应特征初探：以西安 F_6 地裂缝为例[J]. 工程地质学报，2017，25(3)：784-793.
Zhang Leigang, Deng Yahong, Xue Jie, et al. Preliminary research on dynamic response characteristics of microtremor at ground fissure sites: illustrated with F_6 ground fissure in Xi′an [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 784-793.

[23] 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.

[24] 崔思颖，邓亚虹，曹歌，等. 河北平原典型地裂缝场地动力响应特征研究[J]. 煤田地质与勘探，2022，50(6)：81-93.
Cui Siying, Deng Yahong, Cao Ge, et al. Research on dynamic response characteristics of typical ground fissure sites in Hebei Plain [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50 (6): 81-93.

[25] Chang J, Deng Y H, Cao G, et al. The dynamic amplification effect of a site with earth fissures: a case study in the Taiyuan Basin, China [J]. Journal of Seismology, 2023, 27 (4): 769-788.

[26] Deng Y H, Xuan Y, Mu H D, et al. Microtremor-based analysis of the dynamic response characteristics of a site containing grouped earth fissures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2023, 22(3): 689-702.

[27] 许建聪，简文彬，尚岳全. 福建沿海地区场地土对地脉动动力响应的研究[J]. 岩土力学，2003，24(增刊2)：606-610.
Xu Jiancong, Jian Wenbin, Shang Yuequan. Study on dynamical response of ground soil on microtremor in coastal area of Fujian[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 606-610.

[28] 孙常青，申斌，孙振岳，等. 西安云轨地裂缝专项勘察及影响范围分析[J]. 岩土工程技术，2021，35(2)：122-127.
Sun Changqing, Shen Bin, Sun Zhenyue, et al. Special investigation and influence range of the ground fissure in Xi′an skyrail[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2021, 35(2): 122-127.

[29] 常江. 汾渭盆地典型地裂缝场地动力响应特征及其抗震设防研究[D]. 西安：长安大学，2022：114-116.
Chang Jiang. Research on dynamic response characteristics and seismic fortification of representative earth fissure sites in Fenwei Basin [D]. Xi′an: Chang′an University, 2022: 114-116.

（本文编辑：贾源源）