

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201912002

# 地震作用下地裂缝场地地表动力响应特性研究\*

熊仲明<sup>1</sup>, 王靖东<sup>1,2</sup>, 张朝<sup>1</sup>, 霍晓鹏<sup>1</sup>, 王丙锐<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为了准确描述地裂缝场地动力特征, 利用ABAQUS有限元软件建立了地裂缝场地三维动力数值分析模型, 定量分析了地裂缝场峰值加速度(*PGA*)、峰值速度(*PGV*)、Housner强度(*HI*)和Arias强度( $I_a$ )在不同地震作用下的变化趋势, 获得了地裂缝场地动力响应规律, 并与振动台模型试验结果进行了对比, 表现出较好的一致性。结果表明: 上盘的动力响应放大系数及影响范围均比下盘大, 在地裂缝附近达到最大并向两侧递减, 呈“λ”分布; 随着地震烈度增大, 土体软化程度增强, 动力响应放大系数和裂缝两侧放大系数的差值逐渐减小; 场地下盘的地震动长周期分量较丰富, 平均周期相对上盘表现出较大的特性; 在同一地震烈度不同输入方向引起的上、下盘动力响应中, 垂直地裂缝方向作用的地震波对场地破坏较为严重。其研究结果可为地裂缝场地的工程应用提供重要参考。

**关键词:** 地裂缝场地; 动力响应; 特征描述; 数值模拟; 无限元

**中图分类号:** TU435   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0060-09

## Dynamic Response and Characteristics of the Ground Fissure Site under Earthquake

XIONG Zhongming<sup>1</sup>, WANG Jingdong<sup>1,2</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, HUO Xiaopeng<sup>1</sup>, WANG Bingrui<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co. Ltd, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to accurately describe the dynamic characteristics of the ground fissure site, a 3-D dynamic numerical simulation model of the ground fissure site was established with the ABAQUS program. The dynamic response of peak ground acceleration (*PGA*), peak ground velocity (*PGV*), Housner Intensity (*HI*) and Arias Intensity ( $I_a$ ) was obtained under strong earthquake. The validity of the simulation was verified with a shaking table model test. The results show that the dynamic amplification factor and the range of influence of the hanging wall were larger than those of the footwall. The maximum value of the dynamic amplification factor was recorded close to the ground fissure and decreased from the ground fissure to both sides, showing λ-shaped. With the increase of seismic intensity, the amplification factor and the difference of dynamic response between the hanging wall and footwall gradually decreased due to the non-linear and softening behavior of the soil. Because the seismic long-period component of the footwall was more abundant, the mean period of the hanging wall was

\* 收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-03-29

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51278395)、陕西省自然科学基金研究计划重点项目(2018JZ5008)、住建部科学技术基金项目(2019-k-044)资助

**作者简介:** 熊仲明(1966—), 男, 教授, 博导。主要从事结构隔震减震控制研究。E-mail: xiongzhmgh@xauat.edu.cn

**通讯作者:** 王靖东(1994—), 男, 硕士研究生。主要从事特殊场地抗震方面的研究。E-mail: 18792676492@163.com

larger than that of the footwall. It was more serious to site damage during an earthquake along the vertical direction of the ground fissure with the same seismic intensity. The results provide references for engineering application of ground fissures sites.

**Keywords:** ground fissure site; dynamic response; characteristics description; numerical simulation; infinite element

## 引言

西安作为我国第9大国家中心城市,城市建设正处在前所未有的发展阶段。然而,广泛分布的地裂缝灾害严重制约着该城市用地和规划;加之,高烈度的地震作用使得西安地区工程建设面临着严重的考验<sup>[1-2]</sup>。

地裂缝的存在导致了场地的不完整及不连续,且上盘和下盘的错动造成地裂缝两侧的土层结构表现出明显的差异,这些特征均会对场地的振动特性及动力响应产生较大影响。目前,对地裂缝场地的动力响应研究仅仅局限于峰值加速度这一指标<sup>[3-6]</sup>,不能完全反映地裂缝场地的动力本质特性。一些学者发现,相比于峰值加速度(PGA),峰值速度(PGV)和Housner强度等与结构最大响应的相关性更高<sup>[7-9]</sup>,特别是Arias强度与地表地震破坏程度关系更为密切<sup>[10]</sup>。因此,对地裂缝场地地震动强度指标进行系统研究显得尤为迫切,且具有重要的工程实用价值。

本文在西安某地裂缝场地振动台模型试验的基础上,利用ABAQUS有限元软件建立了三维模型进行数值模拟,分析了地裂缝场地峰值加速度、峰值速度、Housner和Arias强度在不同地震波激励下的动力响应变化特性,获得了相应的变化规律,为合理描述地裂缝场地动力特性提供科学依据。

## 1 动力分析模型

### 1.1 计算模型及参数

采用ABAQUS软件进行三维动力计算分析。考虑到地裂缝场地上、下盘变形区的宽度,为了减小边界条件的影响<sup>[11]</sup>,取长高宽为100 m×22.5 m×22.5 m的区域作为计算模型。其中,上、下盘长度均为50 m,裂缝倾角设为80°,模型土体剖面

如图1所示。为充分反映地裂缝场地的土质特性,参考《岩土工程地勘报告》确定地裂缝场地模型各层土壤的力学参数,见表1。

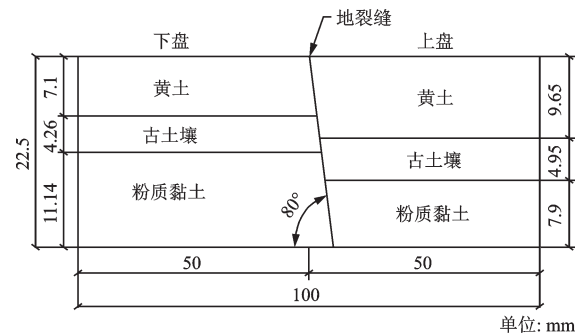


图1 地裂缝场地地层结构

Fig.1 Geological condition of the ground fissures site

表1 场地各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of soil

土壤名称	天然密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	弹性模量/ MPa	剪切模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
黄土	1 680	0.34	296.11	110.49	48.00	27.60
古土壤	1 780	0.34	373.73	139.45	49.00	27.30
粉质黏土	1 900	0.34	437.74	163.34	45.00	26.60

对地裂缝场地进行动力模拟时,本构模型采用等效线性模型(粘弹性kelvin模型)<sup>[12]</sup>来反映土体在动荷载下的滞回性能,模型阻尼比取0.2<sup>[13]</sup>。有限元模型中网格的划分可以根据王松涛等<sup>[14]</sup>提出,考虑上、下方向传播的剪切波,结合数值分析经验,单元高度可以按以下方法取得。

$$h \leq (1/5 \sim 1/8) \lambda_s \quad (1)$$

$$\lambda_s = V_s / f_{\max} \quad (2)$$

式中, $\lambda_s$ 为剪切波长; $V_s$ 为剪切波速; $f_{\max}$ 为截取的最大波动频率。根据《唐延路地下人防工程岩土工程地勘报告》,其中 $V_s$ 取293.20 m/s, $f_{\max}$ 取30 Hz,通过公式(1)、(2)可以得到单元格 $h=1.5$  m。

对于地裂缝处土体的相互作用,采用

ABAQUS 面接触中的有限滑移,法向为硬接触,切向采用罚摩擦公式,摩擦系数取为 0.3。考虑到实际场地是一个半无限空间体,对模型计算区域采用有限单元进行模拟,而在有限域外采用无限单元来模拟无限域;计算及无限元区域分别采用三维实体单元 C3D8 和三维实体缩减积分单元 INC3D8R 模拟,计算模型(图 2)。

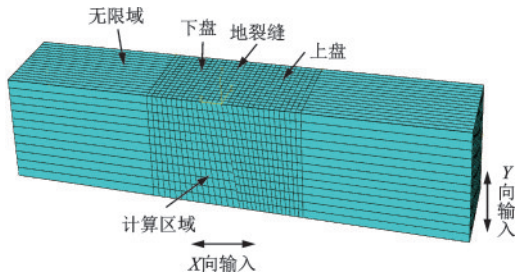


图 2 计算模型  
Fig.2 Numerical model

### 1.2 数值模拟工况及监测点布置

为模拟地震波对地裂缝场地动力响应的影响,根据西安场地类别选取 EL Centro 波、Northridge 波和兰州波作为地震输入。地震输入方向为 X 水平正向、负向(垂直裂缝方向)以及 Y 水平向(平行裂缝方向)。为减小持时对场地动力响应的影响,输入地震波均取 15 s 范围进行计算。此次分析共计 27 个工况,见表 2。

表 2 计算工况  
Table 2 Simulation conditions

输入峰值及方向	地震波类型	地震烈度	持时/s
0.1g X(±向)	EL Centro	6度基本烈度	15
	Northridge	6度基本烈度	15
	兰州	6度基本烈度	15
0.2g X(±向)	EL Centro	7度基本烈度	15
	Northridge	7度基本烈度	15
	兰州	7度基本烈度	15
0.4g X(±向)	EL Centro	8度基本烈度	15
	Northridge	8度基本烈度	15
	兰州	8度基本烈度	15

模型各监测点以地表裂缝为中心向两侧依次编号布设,上、下盘的测点编号分别为  $B_1 \sim B_{13}$ 、 $A_1 \sim A_{13}$ ,如图 3 所示。其中,上盘测点  $B_1 \sim B_7$  间距为

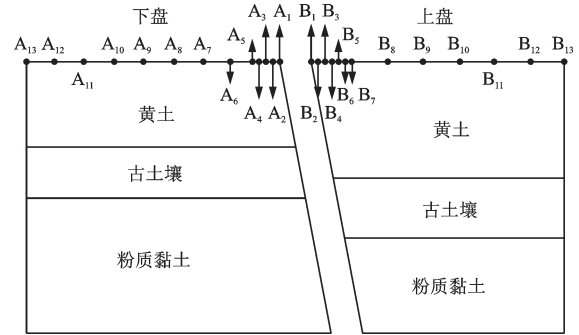


图 3 测点布置  
Fig.3 Layout of measuring points

1.5 m,其余间距为 6 m;下盘测点  $A_1 \sim A_5$  间距为 1.5 m,  $A_5$  与  $A_6$  间距为 2.6 m,其余间距为 5.2 m。

### 1.3 振动台试验

为了研究地震作用下地裂缝场地动力响应规律,进行了西安地裂缝场地的大型振动台模型试验<sup>[15]</sup>,试验采用西安建筑科技大学结构重点实验室的 4 m×4 m 三维六自由度振动台进行地震模拟。试验模型长宽高尺寸为 3 m×1.5 m×1.5 m,裂缝倾角设置为 80°。试验以模型尺寸、密度和加速度作为控制变量,根据 Buckingham  $\pi$  定理推导出其他物理量之间的相似关系。其中,几何相似比  $S_l = 1/15$ ,密度相似比  $S_\rho = 1$ ,加速度相似比  $S_a = 2$ ,弹性模量相似比  $S_E = 2/15$ ,内聚力相似比  $S_c = 2/15$ ,内摩擦角相似比  $S_\phi = 1$ ,时间相似比  $S_T = 0.1826$ 。

试验模型采用 f<sub>1</sub> 地裂缝场地土作为模拟材料,并在 13 层剪切型土箱中分层填充、夯实。根据西安地裂缝带的土质力学参数,模型试验采用粉细砂与熟石灰的混合物模拟地裂缝土质<sup>[16]</sup>。地裂缝中的土质采用粉细砂与熟石灰的混合物进行模拟,试验模型见图 4。

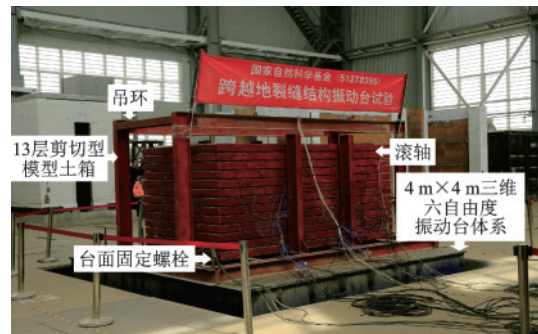


图 4 试验模型  
Fig.4 Test model

## 2 模型验证

为验证有限元模拟效果,在数值分析之前对上述试验模型进行1:1建模试算,采用图2计算模型及表2模拟工况。其中,对表2取其中一个工况进行对比分析。地表测点在EL Centro地震波作用下的数值模拟和试验结果对比如图5所示。

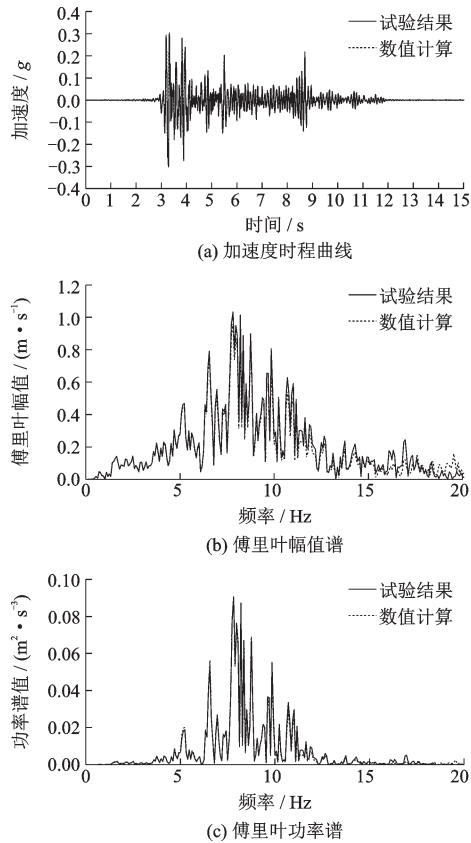


图5 频谱特征曲线

Fig.5 Spectral characteristic curves

由图5可以看出,有限元计算得出的加速度时程曲线、傅里叶谱、傅里叶功率谱与试验结果较为吻合。为定量描述两者差异,计算图5中加速度时程、傅里叶幅值谱和功率谱的偏差值 $\mu$ , $\mu$ 值按下式求出:

$$\mu = \frac{\|x_i - y_i\|}{\|x_i\|} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum x_i^2}} \quad (3)$$

式中, $x_i$ 为试验测得的信号; $y_i$ 为数值计算的信号。 $\mu$ 值越接近0,说明2个信号之间差异越小。

计算所得加速度时程、傅里叶幅值谱和功率谱的 $\mu$ 值分别为0.20、0.14、0.08,均不超过0.2,说明数

值模拟结果和试验结果吻合较好,数值模型是合理的。

## 3 计算结果分析

### 3.1 地震动强度指标

#### (1) 峰值加速度(PGA)

峰值加速度(Peak Ground Acceleration)可以直接由地震记录获得的强度指标,也是目前许多国家结构抗震设计采用的地震动参数,而且在试验中,加速度也是最易测量且最可靠的参数。数学关系式定义为:

$$PGA = \max |a(t)| \quad (4)$$

式中, $a(t)$ 为地震加速度时程。

但各种分析研究和震害经验表明,仅用PGA强度指标设计和分析是不合理的,与中长周期结构最大响应的相关性较差<sup>[17-18]</sup>。

#### (2) 峰值速度(PGV)

峰值速度(Peak Ground Velocity),与地面运动最大动能相关,数学关系式定义为<sup>[18]</sup>:

$$PGV = \max |v(t)| \quad (5)$$

式中, $v(t)$ 为地震速度时程。

S. Akkar等<sup>[19]</sup>和F. Neumann<sup>[20]</sup>认为用PGV比PGA更能体现地震动强度等级,更适合中长周期结构的损伤分析,日本目前就采用PGV作为评价地震烈度的物理指标。

#### (3) Arias能量强度( $I_a$ )

Arias强度(Arias Intensity),是指以单位质量弹塑性体系的总滞回耗能作为结构地震响应参数,包含了振幅和持时等特征,可以反映地震振动过程中释放的能量,与结构输入能量有较好的相关性<sup>[21]</sup>,数学关系式定义为<sup>[22]</sup>:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} a^2(t) dt \quad (6)$$

式中, $g$ 为重力加速度; $t_d$ 为地震记录总持时; $a(t)$ 为地震加速度时程。

#### (4) Housner强度(HI)

Housner强度(Housner Intensity),可表示为周期在0.1~2.5 s内拟速度反应谱所围成面积的平均值<sup>[23]</sup>,数学关系式定义为:

$$HI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi = 5\%, T) dT \quad (7)$$

式中,  $PSV(\xi=5\%, T)$  为阻尼比 5% 时的拟速度谱;  $T$  为 SDOF 体系的自振周期。

### 3.2 地裂缝场地地震动强度放大效应

本文对地裂缝场地三维模型进行动力计算, 提取图 3 中各监测点的计算结果进行分析, 并将计算

所得 X 正向输入的加速度响应结果与试验结果对比, 由此揭示地裂缝场地地表动力响应分布规律。地震动强度 ( $PGA$ 、 $PGV$ 、 $I_a$  和  $HI$ ) 放大系数定义为地裂缝场地地表地震动强度与输入地震动强度的比值, 地裂缝场地各监测点在 27 个工况作用下的放大系数如图 6、7 所示。

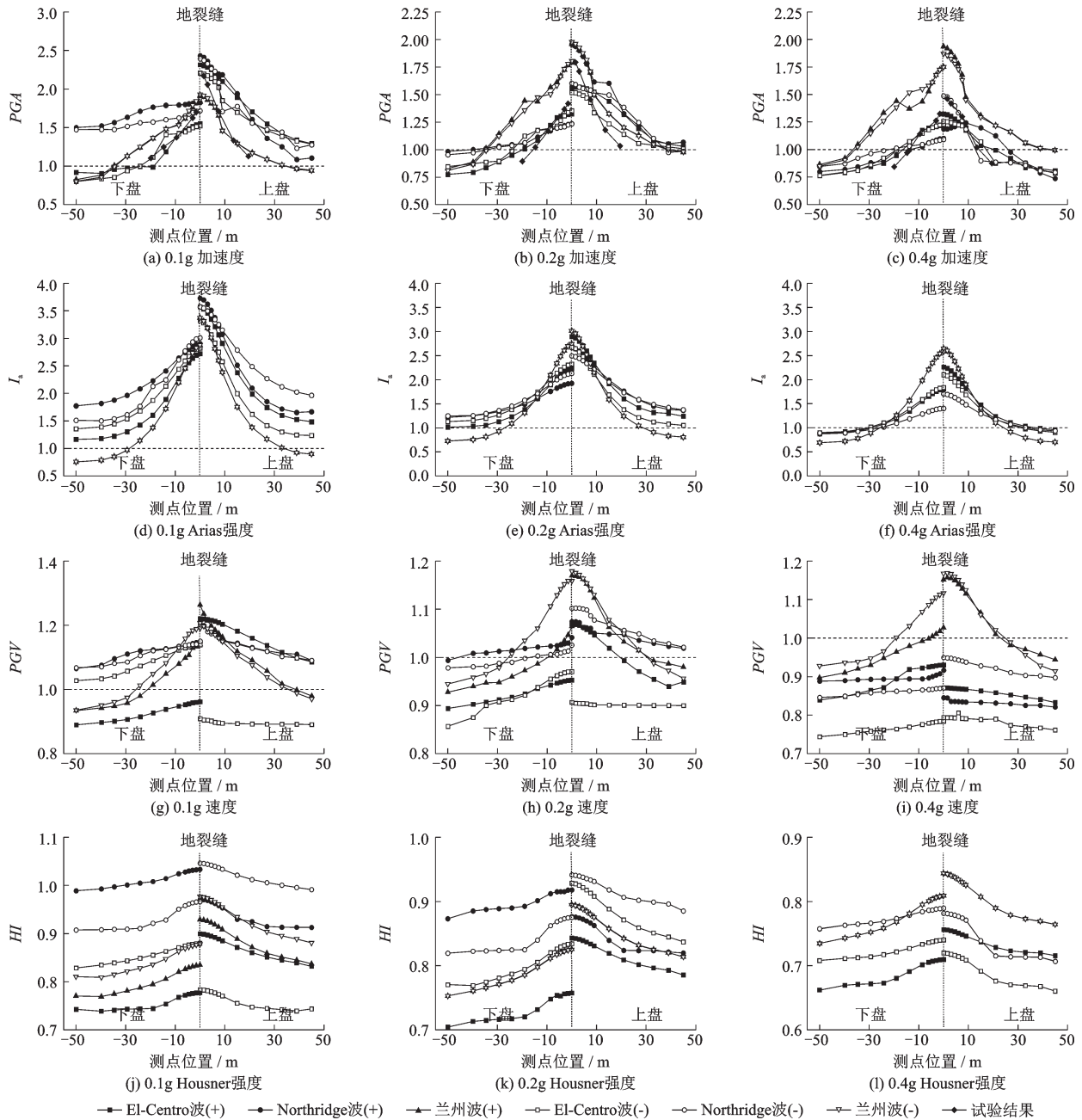


图 6 X(正、负)向地震作用下地裂缝场地动力响应放大系数

Fig.6 Amplification factors of dynamic response on ground fissure site under X (positive and negative) horizon seismic

由图 6 和图 7 可以看出:

(1) 计算所得在 X 向地震作用下的加速度响应与试验结果有较好的一致性; 各监测点的动力响应

放大系数在地表变化规律基本一致, 均在靠近裂缝处达到最大值, 放大系数随着测点距裂缝距离的增加而逐渐减小, 下盘测点的动力响应曲线衰减速度

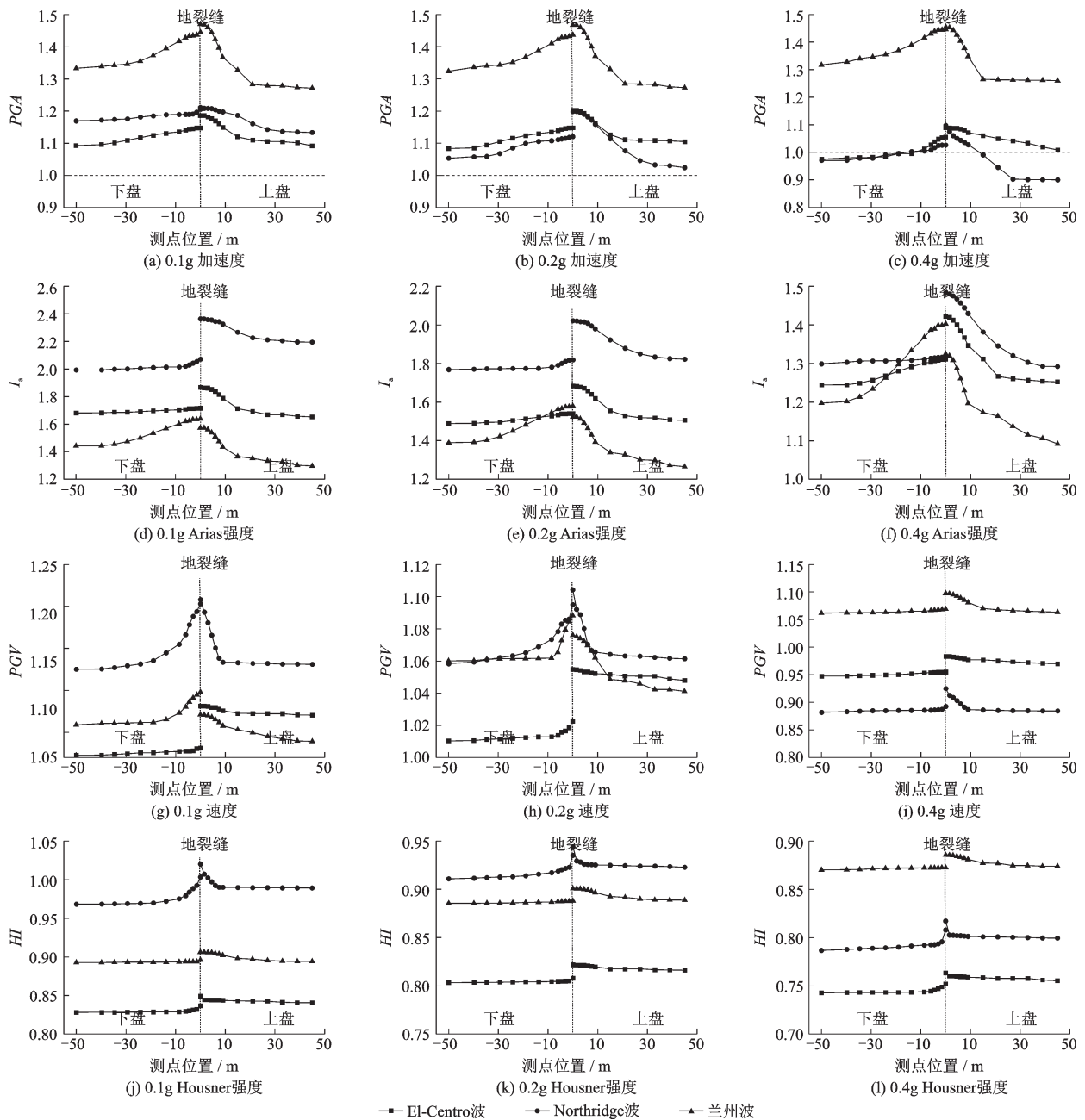


图7 Y向地震作用下地裂缝场地动力响应放大系数

Fig.7 Amplification factors of dynamic response on the ground fissure site under Y horizon seismic action

较上盘缓慢。

(2) 对于  $PGA$  和  $I_a$  响应,表现出上盘的动力响应比下盘更大的趋势,上盘大于1的放大系数分布范围更广,呈“λ”字形分布,这与文献[3-5]结果一致,这是由于地裂缝的存在导致地震波的传播途径发生了变化,从而引起上盘加速度响应更大并且能量释放更快,这与文献[6]中地裂缝场地破坏特征分析结果一致;但对于  $PGV$  和  $HI$  响应,部分工况出现下盘的动力响应比上盘更大的现象。

(3) 地震波类型对地裂缝场地的动力放大效应

影响较大。在同一强度不同类型地震波作用下,  $PGA$  放大系数的变化与  $PGV$ 、 $I_a$  和  $HI$  放大系数的变化并不一致。例如0.1g地震作用下,由兰州波引起的加速度响应比EL Centro波引起的大,但兰州波引起Arias强度响应却比EL Centro波小,这是由于不同地震波其频谱以及持时的不同,而  $PGA$  在很大程度上受高频、短持时脉冲的影响,随机性较大,随场地条件不同会有很大变化。因此,仅使用  $PGA$  作为衡量地表破坏的标准是不科学的,需要引入  $PGV$ 、 $I_a$  和  $HI$  来综合考虑地表在地震动下的破坏

情况。

(4) 地震波沿 X 正向或 X 负向输入对 PGA 和  $I_a$  响应的影响较小,而对 PGV 和 HI 响应影响较大;地震波沿 X 向输入引起的动力响应比沿 Y 向引起的响应更剧烈,即地震波沿垂直地裂缝方向输入对场地破坏更严重。

### 3.3 放大系数随输入地震波峰值变化规律分析

对地表测点的动力放大系数随输入地震烈度增加的变化规律进行分析,发现各工况作用下测点具有相同的规律。因此本文以 X 向 EL Centro 波为例进行说明,如图 8 所示。

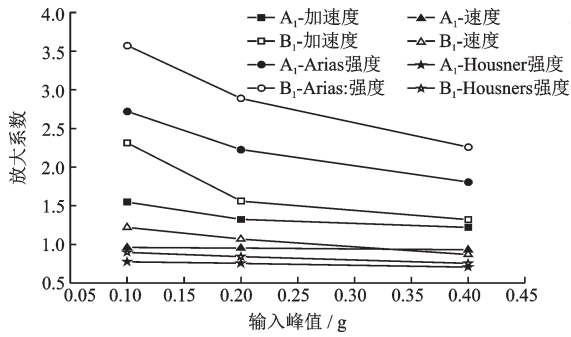


图 8 EL Centro 波作用下  $A_1$  和  $B_1$  测点的动力放大系数  
Fig.8 Amplification factors of dynamic response of  $A_1$  and  $B_1$  under EL Centro seismic action

由图 8 可以看出:当输入加速度峰值  $\leq 0.2g$  时,PGA、PGV、 $I_a$  和 HI 放大系数随地震烈度的增加迅速下降;当输入加速度峰值  $> 0.2g$  时,放大系数随着地震烈度的增加变化基本平稳;随着地震烈度增

加,由于土体逐渐软化进入非线性,上、下盘动力响应放大系数差值逐渐减小。

### 3.4 地裂缝场地的频谱特性

E. M. Rathje 等<sup>[24]</sup>对 1 208 条强地震动记录频谱特性的四个周期参数进行回归分析,认为 Fourier 幅值谱平均周期  $T_m$  是最佳的频谱参数,其能更好地区分强地震动的频率成份。因此,通过对上、下盘各监测点的地震波时程进行 FFT 计算,求得 0.1g、0.2g 和 0.4g 地震作用下各监测点地震响应的平均周期,计算结果如表 3~5 所示。

分析表 3~5 中数据可知:

(1) 在各工况地震作用下,地裂缝场地地表地震动的平均周期均在裂缝处达到最小,从裂缝处向两侧递增,越靠近地裂缝,加速度变化越剧烈,从地裂缝处向两侧逐渐趋于稳定。

(2) 地裂缝场地下盘地震动的平均周期均大于上盘场地的对应值,说明下盘场地的地震动长周期分量较丰富。

(3) 地裂缝场地在 X 向地震波作用下地表测点的平均周期比在 Y 向作用下更小,说明地震波沿垂直地裂缝方向输入造成的加速度变化较频繁,引起的动力响应更剧烈。

## 4 结 论

本文以西安  $f_4$  地裂缝场地为研究对象,通过数值计算与振动台模型试验对比,分析地裂缝场地的

表 3 X 正向地震作用下地表各测点平均周期

Table 3 Mean period (s) of each point under X positive seismic action

单位:s

地震强度		下盘					上盘				
		$A_{12}$	$A_{10}$	$A_8$	$A_5$	$A_3$	$B_3$	$B_5$	$B_8$	$B_{10}$	$B_{12}$
0.1g	EL Centro 波	0.429	0.409	0.364	0.309	0.299	0.290	0.299	0.352	0.403	0.423
	Northridge 波	0.451	0.438	0.414	0.377	0.371	0.309	0.319	0.362	0.416	0.432
	兰州波	0.332	0.302	0.266	0.225	0.215	0.204	0.212	0.262	0.302	0.331
0.2g	EL Centro 波	0.440	0.422	0.378	0.318	0.307	0.304	0.314	0.365	0.418	0.427
	Northridge 波	0.486	0.472	0.448	0.409	0.402	0.336	0.345	0.374	0.410	0.434
	兰州波	0.337	0.308	0.268	0.227	0.218	0.205	0.209	0.259	0.299	0.323
0.4g	EL Centro 波	0.447	0.426	0.386	0.330	0.320	0.310	0.322	0.374	0.423	0.444
	Northridge 波	0.506	0.487	0.458	0.417	0.410	0.374	0.382	0.414	0.444	0.468
	兰州波	0.344	0.311	0.267	0.227	0.218	0.202	0.209	0.258	0.297	0.328

表4 X负向作用下地表各测点平均周期

Table 4 Mean Period of each point under X negative seismic action

单位:s

地震强度		下盘					上盘				
		A <sub>12</sub>	A <sub>10</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>8</sub>	B <sub>10</sub>	B <sub>12</sub>
0.1g	EL Centro波	0.431	0.413	0.374	0.319	0.311	0.279	0.290	0.343	0.405	0.425
	Northridge波	0.446	0.433	0.392	0.366	0.359	0.326	0.335	0.367	0.423	0.440
	兰州波	0.332	0.302	0.266	0.225	0.215	0.204	0.212	0.262	0.302	0.331
0.2g	EL Centro波	0.448	0.429	0.388	0.329	0.320	0.294	0.307	0.357	0.416	0.436
	Northridge波	0.463	0.444	0.410	0.382	0.375	0.355	0.363	0.402	0.432	0.449
	兰州波	0.337	0.308	0.268	0.227	0.218	0.201	0.209	0.259	0.299	0.328
0.4g	EL Centro波	0.456	0.434	0.394	0.335	0.325	0.311	0.324	0.370	0.416	0.441
	Northridge波	0.506	0.487	0.458	0.417	0.410	0.374	0.382	0.414	0.444	0.468
	兰州波	0.344	0.311	0.267	0.227	0.218	0.202	0.209	0.258	0.297	0.328

表5 Y向作用下地表各测点平均周期

Table 5 Mean Period (s) of each point under Y seismic action

单位:s

地震强度		下盘					上盘				
		A <sub>12</sub>	A <sub>10</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>8</sub>	B <sub>10</sub>	B <sub>12</sub>
0.1g	EL Centro波	0.419	0.416	0.413	0.399	0.395	0.391	0.392	0.396	0.401	0.403
	Northridge波	0.432	0.430	0.429	0.427	0.425	0.414	0.415	0.423	0.429	0.431
	兰州波	0.308	0.305	0.291	0.290	0.286	0.264	0.266	0.277	0.285	0.290
0.2g	EL Centro波	0.422	0.425	0.421	0.407	0.404	0.399	0.400	0.404	0.410	0.413
	Northridge波	0.442	0.439	0.433	0.433	0.432	0.422	0.424	0.432	0.432	0.432
	兰州波	0.309	0.306	0.295	0.293	0.288	0.267	0.268	0.277	0.285	0.290
0.4g	EL Centro波	0.422	0.426	0.414	0.408	0.404	0.395	0.396	0.403	0.410	0.415
	Northridge波	0.466	0.461	0.452	0.446	0.446	0.439	0.441	0.448	0.448	0.450
	兰州波	0.316	0.310	0.300	0.299	0.294	0.267	0.269	0.282	0.292	0.297

动力响应特征,得出以下结论:

(1) 动力响应放大系数在靠近裂缝处达到最大值,随着距地裂缝距离增加而减小,且上盘的值减小速率较快;上盘的PGA和I<sub>a</sub>响应比下盘大,放大效应范围较广,呈“λ”字形分布;

(2) 地震波类型、输入方向对地裂缝场地的动力响应影响较大。其中,相同强度不同类型地震波引起的PGA、PGV、I<sub>a</sub>和HI放大系数变化规律并不一致;相同强度不同输入方向引起的上、下盘动力响应中,垂直地裂缝方向作用的地震波对场地破坏较为严重。

(3) 地震作用下,由于输入地震烈度的增加,土体逐渐软化而进入非线性,PGA、PGV、I<sub>a</sub>和HI响应放大系数均逐渐减小,且地裂缝两侧放大系数的差值随着输入强度的增大逐渐减小。

(4) 地震作用下,地裂缝场地地表地震动的平均周期在裂缝处达到最小,从裂缝处向两侧递增,距地裂缝越近,加速度变化越剧烈;下盘平均周期均大于上盘,下盘场地的地震动长周期分量更为丰富。

#### 参考文献:

- [1] 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 J B, Fan W, Li X A, 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)
- [2] 彭建兵. 西安地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

- Peng J B. Xi'an ground fissures disaster [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [3] 熊仲明,王艺博,龚宇森,等.地震作用下地裂缝场地的动力响应研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(3):309-315.  
Xiong Z M, Wang Y B, Gong Y S, et al. Research on seismic response of ground fissure site under earthquake [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science), 2016, 48(3): 309-315. (in Chinese)
- [4] 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 N N, Huang Q B, Men Y M, 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. (in Chinese)
- [5] 胡志平,王启耀,罗丽娟,等."y"形地裂缝场地主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 Z P, Wang Q Y, Luo L J, 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)
- [6] 熊仲明,张朝,陈轩.地震作用下地裂缝场地地震动参数试验研究[J].岩土力学,2019,40(2):421-428.  
Xiong Z M, Zhang C, Chen X. Model test on ground motion parameters of ground with fissures under seismic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 421-428. (in Chinese)
- [7] 蒋崇文,易伟建,庞于涛.地震动强度指标与大跨度刚构桥梁损伤的相关性[J].中国公路学报,2016,29(9):97-102.  
Jiang C W, Yi W J, Pang Y T. Correlation between seismic intensity indices and damages of large span rigid frame bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(9): 97-102. (in Chinese)
- [8] 韩建平,周伟,李慧.基于汶川地震数据的地震动强度指标与中长周期SDOF体系最大响应相关性[J].工程力学,2011,28(10):185-196.  
Han J P, Zhou W, Li H. Correlation between ground motion intensity indices and SDOF system responses with medium-to-long period based on the Wenchuan earthquake data [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(10): 185-196. (in Chinese)
- [9] 安栋,屈铁军.砌体结构有限元模型在结构地震响应中的应用[J].地震工程与工程振动,2014,34(1):123-130.  
An D, Qu T J. Application of finite element model of masonry to seismic response analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 123-130. (in Chinese)
- [10] 王秀英,聂高众,张玲.汶川地震触发崩滑与Arias强度关系研究[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(4):645-656.  
Wang X Y, Nie G Z, Zhang L. Relationship between landslides induced by the Wenchuan earthquake and Arias intensity [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4): 645-656. (in Chinese)
- [11] 陈立伟.地裂缝扩展机理研究[D].西安:长安大学,2007.  
Chen L W. Study on the propagation mechanism of ground fissures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [12] 蒋通,邢海灵.水平土层地震反应分析考虑频率相关性的等效线性化方法[J].岩土工程学报,2007,29(2):218-224.  
Jiang T, Xing H L. An equivalent linear method considering frequency-dependent soil properties for seismic response analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 218-224. (in Chinese)
- [13] 尚宏世.原状黄土基于动扭剪试验的动力特性研究[J].科技创新与生产力,2016(3):105-107,110.  
Shang H S. Study on dynamic properties of undisturbed loess under dynamic torsional shear test [J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2016(3): 105-107, 110. (in Chinese)
- [14] 王松涛,曹资.现代抗震设计方法[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.  
Wang S T, Cao Z. Modern seismic design method [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [15] 熊仲明,张朝,霍晓鹏,等.地裂缝场地加速度响应振动台试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(3):520-526.  
Xiong Z M, Zhang C, Huo X P, et al. Shaking table tests on acceleration response of ground fissure site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 520-526. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)

(下转第134页)