

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211115056

## 不同缝面形态地裂缝场地地震响应规律研究\*

慕焕东<sup>1,2</sup>, 邓亚虹<sup>2</sup>, 纪帆<sup>3</sup>, 宣友<sup>2</sup>, 白逸松<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;  
3. 中铁一局集团第四工程有限公司, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 地裂缝作为非连续地质界面对场地动力响应的影响是显而易见的, 对不同缝面形态地裂缝场地进行地震响应规律研究是进行地裂缝场地建筑物抗震设防的基础。为此以西安典型地裂缝为研究背景, 进行了单缝型地裂缝场地动力响应振动台模型试验, 获得了地裂缝场地动力响应规律及响应特征; 在此基础上通过 MIDAS 数值软件对西安单缝型、“y”字型、正“八”型和倒“八”型地裂缝, 以及苏锡常地区基岩潜山型和基岩陡崖型 6 种缝面形态地裂缝场地地震响应规律进行了研究。结果表明: 单缝型地裂缝呈现出越靠近地裂缝峰值加速度越大, 随着距地裂缝距离越来越远, 峰值加速度逐渐减小后趋于稳定的响应规律; “y”字型、正“八”型和倒“八”型地裂缝具有明显的“双峰”特征, 即地表峰值加速度在靠近主、次地裂缝处都有明显的增大; 基岩潜山型地裂缝场地地震响应规律与西安地区正“八”型地裂缝场地相似具有“双峰”特征, 随着距主、次地裂缝距离增加地表峰值加速度逐渐减小后趋于稳定; 基岩陡崖型地裂缝场地与西安地区单缝形地裂缝场地地震响应规律相似, 但在地裂缝处场地地表峰值加速度响应更加明显, 地表峰值加速度曲线更加陡峭。

**关键词:** 缝面形态; 地裂缝; 地震响应; 振动台试验; 数值模拟

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0425-11

## Study on the Seismic Response Law of Ground Fissure Sites with Different Fracture Surfaces

MU Huandong<sup>1,2</sup>, DENG Yahong<sup>2</sup>, JI Fan<sup>3</sup>, XUAN You<sup>2</sup>, BAI Yisong<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Department of geology Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. China Railway First Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

**Abstract:** The influence of ground fissures as a discontinuous geological interface on the dynamic response of the site is obvious, and the seismic response law of ground fissure sites with different fracture surface forms is the basis for seismic fortification of buildings on ground fissure sites. Therefore, based on the Xi'an typical ground fissures, a single-fracture ground fissure site dynamic response shaking table model test was carried out, and the dynamic response law and response characteristics of the ground fissure site were obtained. Based on the numerical software MIDAS, the seismic response law of ground fissure sites has been studied, such as the shape of ground fissures are "y", "splayed" and

\* 收稿日期: 2021-10-04; 修回日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(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)资助

作者简介: 慕焕东(1989—), 男, 实验师, 硕士。主要从事岩土工程抗震研究。E-mail: mhd3373@126.com

"fall splayed". The seismic response law of the bedrock buried hill type and bedrock cliff type in the Suzhou, Wuxi, and Changzhou areas has also been studied. The research results show that in the condition of the single-fracture ground fissures, the peak acceleration is larger as the distance from the ground fissure gets closer, and the peak acceleration gradually decreases as the distance from the ground fissure becomes more and more stable; splayed-shaped and fall-splayed-shaped ground fissures have obvious "double peaks" characteristics, i.e., the peak acceleration of the surface increases significantly near the primary and secondary ground fissures; the seismic response law of the bedrock buried-hill ground fissure site similar to the splayed-shaped ground fissure site in Xi'an area, it has the characteristics of "double peaks". As the distance between the primary and secondary ground fissures increases, the peak surface acceleration gradually decreases and then stabilizes; the seismic response law of the bedrock cliff-type ground fissure site is similar to the ground fissure site in Xi'an area. But the peak acceleration response of the site surface at the ground fissures is more obvious, and the peak surface acceleration curve is steeper.

**Keywords:** suture surface morphology; ground fissure; seismic response; shaking table model test; numerical simulation

## 引 言

地裂缝灾害作为一种危害严重的地质灾害,自1918年于美国得克萨斯州发现以来,已在全球范围内许多国家和地区发展成为不同类型、不同规模的缓变型地质灾害。地裂缝长期的缓慢变形活动往往可能引发诸如道路差异沉降<sup>[1]</sup>、桥梁错位<sup>[2]</sup>、轨道交通失稳<sup>[3]</sup>、房屋建筑开裂<sup>[4]</sup>、地下管廊破坏<sup>[5]</sup>、建(构)筑物动力稳定失效等一系列严重危害工程建(构)筑物安全的工程灾害,尤其是在我国西安及苏锡常地区,地裂缝灾害多位于人口密集的市区,因城市用地紧张致使建筑物“傍缝而建”的现象非常普遍,地裂缝的存在必然对工程安全存在安全隐患。

长期以来,人们对地裂缝的研究主要集中于地裂缝的分布发育、成因机理、活动特性、破坏特性、防治措施等地裂缝自身变形活动引发的工程建(构)筑物安全<sup>[6-9]</sup>,换言之其考虑的仅仅是地裂缝静力稳定性问题,而对地裂缝动力稳定性问题较少涉及,如地裂缝场地的地震响应(包括地裂缝场地地震响应规律及上覆结构的地震响应规律)和地裂缝带建(构)筑物的抗震设防(包括抗震设防等级、设防距离)等研究相对较少。与此同时,现有的《建筑抗震设计规范》<sup>[10]</sup>在地裂缝场地建(构)筑物抗震设防中也并未明确规定地裂缝场地的抗震设防烈度,而是仍按一般场地执行。从理论研究的角度来说,可见现有的研究不足以支撑亦或证明地裂缝的存

在会对场地地震响应产生显著影响。但是,随着跨地裂缝场地建(构)筑物越来越多且其等级、重要性越来越高,地裂缝场地抗震设防若仍按一般场地进行必然存在较大安全隐患,因此不得不考虑地裂缝的存在对场地建(构)筑物抗震设防的影响,这也促使研究人员加大了对地裂缝场地结构抗震性能的研究。

熊仲明等<sup>[11-12]</sup>对跨地裂缝和无地裂缝场地建(构)筑物进行了模拟地震振动台试验,证明了在跨地裂缝结构中处于地裂缝上盘的构件损伤程度明显大于下盘,在相同地震激励作用下跨地裂缝结构的动力响应与无地裂缝结构的动力响应相比更加剧烈。胡志平等<sup>[13]</sup>、王启耀等<sup>[14]</sup>对“y”字型地裂缝场地主次地裂缝进行模拟地震振动台试验,证实了“y”字型地裂缝的存在对场地地震响应规律有显著影响,且越靠近地裂缝处其响应越明显;刘妮娜等<sup>[15-17]</sup>建立了穿越活动地裂缝场地的地铁隧道振动台模型,对其破坏机制和响应规律进行了研究。范文等<sup>[18]</sup>以咸阳市某地裂缝为例,通过数值模拟研究随机地震荷载作用下地裂缝场地的动力响应规律,确定了该地裂缝场地上盘60 m至下盘30 m为放大效应显著区域;刘聪等<sup>[19]</sup>利用数值模拟方法探究了西安地裂缝在不同类型(远源、中源、近源)地震作用下的场地地震响应规律,证明了不同类型地震作用下地裂缝对场地地震响应规律存在差异,在影响范围上也表现出远源地震>中源地震>近源地震;张磊刚等<sup>[20]</sup>通过地脉动测试方法对西安F<sub>6</sub>地裂缝

场地的地脉动响应规律进行了探究,得到了地裂缝场地上、下盘傅立叶谱和反应谱峰值的变化规律;杨觅等<sup>[21]</sup>以西安穿地裂缝带的地铁隧道工程为背景,分析了地裂缝邻近土体振动的基本特征及隧道断面尺寸和形状对振动响应的影响。研究认为近振源处的土体以高频振动为主,远振源处的土体以低频振动为主;对于穿地裂缝带的分段式马蹄形隧道,隧道正上方地裂缝附近土体加速度响应强于远离地裂缝的土体;袁立群等<sup>[22]</sup>通过建立与地裂缝正交马蹄形地铁隧道动力响应数值模拟计算模型,证明了在模拟地震振动台模型试验中,可以用点荷载加载方式来代替移动荷载;慕焕东等<sup>[23]</sup>从抗震设防的角度出发,以西安典型地裂缝为研究对象进行模拟地震振动台试验及数值模拟,提出了地裂缝场地抗震设防等级和近似的抗震设防距离。

上述关于地裂缝场地地震响应的研究已经取得了一些创新性的成果,但现有在研究地裂缝问题时往往统一将地裂缝假设为单一型亦或“y”字型,而实际地裂缝的形成机理与其所受的力学作用相关,往往会呈现出不同的剖面结构形态,如正八型、倒八型、基岩潜山型、基岩陡崖型等,剖面结构形态的差异对场地地震响应规律必然存在明显差异,这样在研究地裂缝场地地震相应规律的问题上若将地裂缝均假设为单一型显然是存在问题的。

本文在现有研究的基础上,以西安及苏锡常地区典型地裂缝为研究对象,概化出不同缝面形态典型地裂缝剖面结构模型,并通过模拟地震振动台试验和数值模拟方法,对不同剖面结构类型(不同缝面形态)地裂缝场地地震响应规律进行研究,得到其响应特征和响应规律,并总结出不同缝面形态地裂缝场地地震抗震设防距离,研究成果为西安及其他地区不同缝面形态地裂缝场地工程抗震设防提供了重要的理论依据。

## 1 不同缝面形态地裂缝结构模型

地裂缝灾害是一种与时间效应相关的缓变型地质灾害,其往往具有不同类型的缝面形态,亦即地裂缝在剖面中所呈现出的形态,本质上不同的剖面结构形态反映了地裂缝形成过程中所受的力学作用。一般而言,构造型地裂缝会呈现出单缝型、“y”字型、正“八”型、倒“八”型形态,根据成因的不同,还会出现基岩潜山型和基岩陡崖型地裂缝,不

同缝面形态地裂缝结构如图1所示。

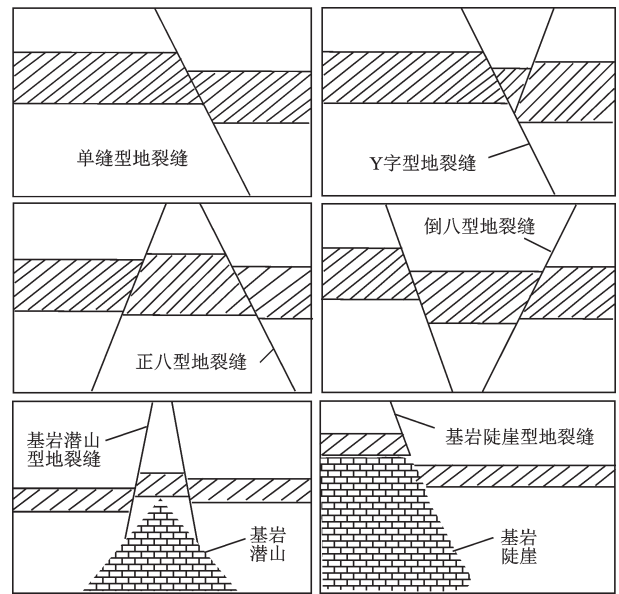


图1 不同缝面形态地裂缝结构

Fig.1 Diagrams of ground fissure structures with different fracture surface forms

## 2 不同缝面形态西安地裂缝场地地震响应规律研究

为分析地裂缝的存在对场地地震响应的影响,首先需分析无地裂缝时场地地震响应规律,其次需分析地裂缝存在时场地地震响应规律,最后将无地裂缝与地裂缝存在时场地地震响应规律进行对比即可得到地裂缝的存在对场地地震响应的影响。在此基础上,对比分析不同缝面形态地裂缝场地地震响应规律,揭示其响应幅值和影响范围。

使用MIDAS-GTX有限元软件对有、无地裂缝场地地震响应规律进行数值模拟,其中无地裂缝场地则通过选取典型西安地层剖面模型为建立数值计算模型的原型;地裂缝场地以第1节得到的典型地裂缝剖面结构模型,建立数值计算模型。以单缝型地裂缝场地为例,其数值计算模型如图2所示。

图2中的数值计算模型其土层剖面结构自上而下分别为 $Q_3$ 黄土、 $Q_3$ 古土壤、 $Q_2$ 粉砂互层,各层土材料物理力学参数见表1。数值计算选取摩尔库伦本构模型,模型尺寸为 $200\text{ m} \times 80\text{ m}$ ,边界条件设置为模型两侧自由边界施加自由场单元,底部自由边界施加固定约束,上部自由边界不约束。

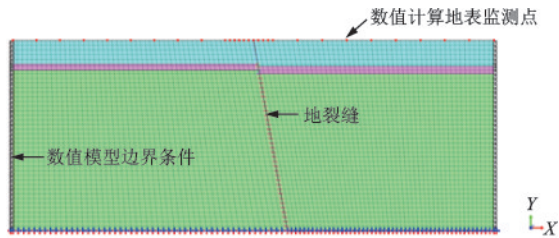


图2 单缝型地裂缝场地数值计算模型  
Fig.2 Numerical calculation model of the single slit ground fissures site

表1 典型地裂缝场地数值计算模型土层参数

Table 1 Soil layer parameters of numerical calculation model for a typical ground fissure site

材料名称	容重/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比 $\mu$	动剪切模量/ MPa
Q <sub>3</sub> 黄土	18.5	0.30	305.81
Q <sub>3</sub> 古土壤	18.6	0.28	330.03
Q <sub>2</sub> 粉砂互层	19.5	0.31	498.75

## 2.1 无地裂缝时场地地震响应规律

无地裂缝时场地地震响应规律数值计算时分别考虑0.1、0.2、0.3、0.4g四种地震动强度(分别对应Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ四种抗震设防烈度)和EL Centro波、Taft Lincoln波、Northridge波、西安人工波(10%超越概率)4种地震波类型,数值计算结果分别如图3和图4所示。

图3为输入西安人工波时不同地震动强度地表峰值加速度曲线。由图3可知无地裂缝时场地地震响应表现出放大效应且土层对地震波的放大效应基本一致,亦即地表峰值加速度相比输入时增大且其变化规律曲线几乎为直线;随着输入地震动强度

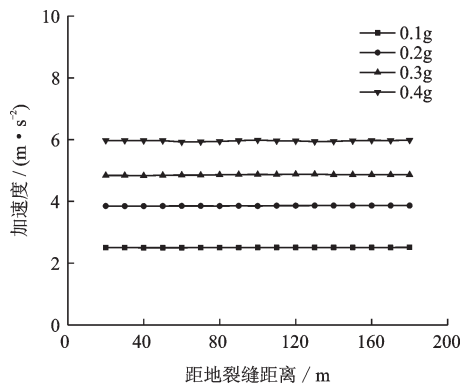


图3 不同地震动强度地表峰值加速度曲线  
Fig.3 Peak acceleration curves of different earthquake intensities

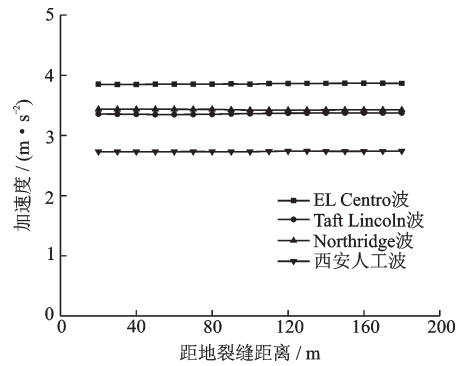


图4 不同地震波地表峰值加速度曲线  
Fig.4 Peak acceleration curves of different seismic waves

的增大地表峰值加速度逐渐增大,但地表峰值加速度的放大倍数逐渐减小,如在输入地震动强度为0.1g时其放大倍数(增幅)接近2.6倍,而在输入地震动强度为0.4g时其放大倍数仅为1.5倍。

图4为输入地震动强度为0.1g时不同地震波地表峰值加速度曲线,由图可知不同输入地震波时地表峰值加速度呈现出放大效应且土层对地震波的放大效应基本一致,亦即地表峰值加速度相比输入时增大且其变化规律曲线几乎为直线;随着输入地震波的类型不同,地表峰值加速度无明显变化规律但略存有差异,即输入西安人工波地表峰值加速度最小,输入EL Centro波地表峰值加速度最大,输入Taft Lincoln波和Northridge波时地表峰值加速度居中且两者大小较为接近。

## 2.2 单缝型地裂缝场地地震响应规律

### 2.2.1 振动台试验概况及结果分析

为分析地震作用下单缝型地裂缝场地的地震响应规律,以西安典型地裂缝场地为研究对象,通过模拟地震振动台试验分析场地地震响应规律。模拟地震振动台的台面尺寸4m×4m,限制加速度为±1.5g。试验时,采用剪切模型箱(图5),每一层

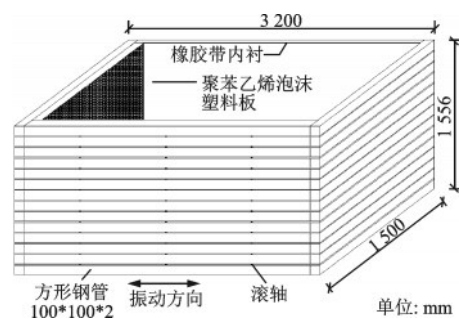


图5 模型箱示意  
Fig.5 Diagram of the model box

均由尺寸为100 mm(长)×100 mm(长)×2 mm(厚)的方形钢管组成,层与层之间通过设置滚轴实现滑动,考虑振动台台面尺寸及制样的难易程度,设置模型箱尺寸为3.2 m(长)×1.5 m(宽)×1.556 m(高)。

试验选取的地裂缝场地剖面结构土层与无地裂缝时场地土层剖面结构一致,即选取Q<sub>3</sub>黄土层、Q<sub>3</sub>古土层及Q<sub>2</sub>黄土粉砂互层作为模型试验土层,地裂缝采用干燥细砂模拟制作,试验通过在模型地表埋设加速度传感器采集地裂缝场地地表加速度响应数据,试验输入地震波为西安人工波,输入前对其进行滤波和基线校正,并将其最大峰值加速度调整为与西安地区抗震设防相一致的0.2g(对应Ⅷ度抗震设防烈度),试验输入的原始地震波加速度时程曲线如图6所示。

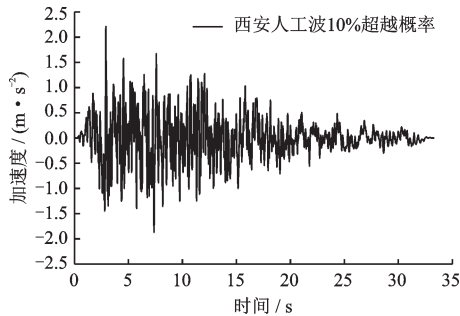


图6 西安人工波加速度时程

Fig.6 Acceleration time history of Xi'an artificial wave

整理振动台试验中输入地震动峰值加速度为0.2g时距地裂缝不同距离加速度传感器所采集最大峰值加速度并绘制其与距地裂缝距离的关系曲线如图7所示。从图7可以看出,模拟地震振动台作用下,与无地裂缝场地地震响应规律不同,地裂缝场地地表峰值加速度在地裂缝处最大,随着距离地裂缝距离的增加,地表峰值加速度逐渐衰减至一定

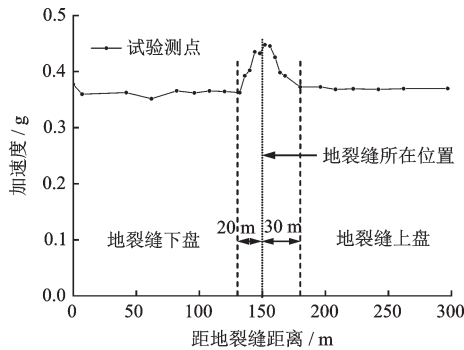


图7 峰值加速度曲线

Fig.7 Peak acceleration curve

范围内趋于稳定;与此同时,受地裂缝的影响上盘峰值加速度大于下盘,表现出“上盘效应”;地表峰值加速度趋于稳定的范围在地裂缝的上盘和下盘略有差异,其中上盘趋于稳定的范围约为30 m,下盘趋于稳定的范围约为20 m。

若将振动台试验得到的地表峰值加速度曲线与无地裂缝场地的数值计算结果进行对比分析(取200 m宽度),可得到如图8所示的地表峰值加速度响应规律。从图8可以看出,地裂缝的存在对场地地震响应具有显著放大效应,模拟地震振动台试验的峰值加速度相比无地裂缝场地峰值加速在数值上整体偏小,也间接说明了数值模拟地震作用场地地震效应时存在边界效应。

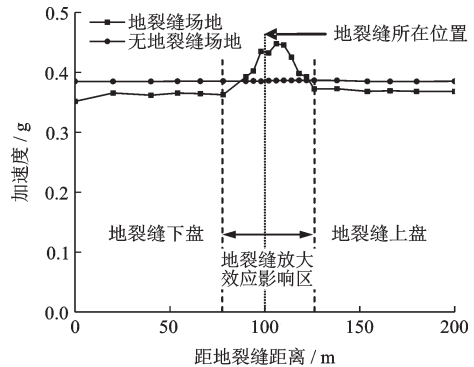


图8 不同场地峰值加速度对比曲线

Fig.8 Contrast curves of peak acceleration at different sites

### 2.2.2 数值模拟结果与分析

图9为输入地震动强度0.1g~0.4g时单缝型地裂缝场地加速度响应云图。由图9可以看出,单缝型地裂缝场地加速度在地裂缝处地震响应最强烈,且随着与地裂缝之间距离的增大、土层深度的增大而逐渐减弱,最终稳定在一定范围内;随着地震动强度的增大,其加速度响应不断增强,受地震动强度的影响其加速度响应边界效应更为明显。

为进一步分析地裂缝场地地震响应规律,可进行不同输入地震动强度及不同输入地震波作用下地裂缝场地地震响应数值模拟分析。根据不同地震动强度作用下单缝型地裂缝场地加速度响应云图及地表监测点的监测数据可得到如图10~11所示的加速度响应规律曲线。

图10为输入西安人工波时不同地震动强度地表峰值加速度曲线,由图10可知不同地震动强度作用下单缝型地裂缝场地地表峰值加速度均表现出在地裂缝处达到最大且随着与地裂缝之间距离的

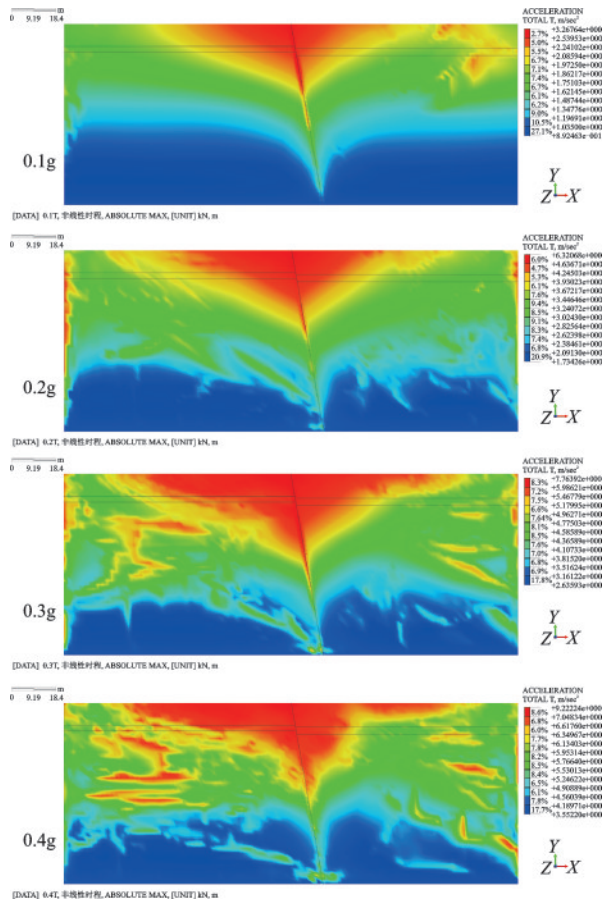


图9 不同地震动强度单缝型地裂缝场地加速度响应云图  
Fig.9 Contours of acceleration response of single fracture sites with different ground motion intensities

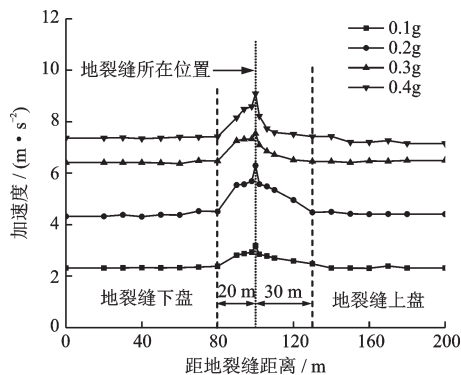


图10 不同地震动强度单缝型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.10 Peak acceleration curves of single fissures with different ground motion intensities

逐渐增大其地表峰值加速度逐渐减小的响应规律,与模拟地震振动台试验结果响应规律一致;随着输入地震动强度的增大,地表峰值加速度逐渐增大,亦即地表峰值加速度在输入地震动强度为0.4g时最大,在输入地震动强度为0.1g时最小。

图11为输入地震动强度为0.1g时不同地震波

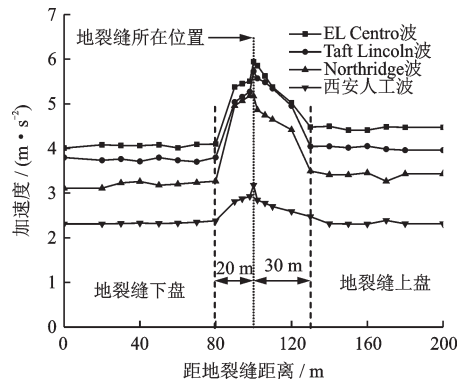


图11 不同地震波单缝型地裂缝峰值加速度曲线

Fig.11 Peak acceleration curves of single fissures types with different seismic waves

地表峰值加速度曲线,由图11可知不同地震波作用下单缝型地裂缝场地地表峰值加速度均表现出现在地裂缝处达到最大且随着与地裂缝之间距离的逐渐增大其地表峰值加速度逐渐减小的响应规律,与模拟地震振动台试验结果响应规律一致;不同地震波作用下,西安人工波作用下场地地表各点峰值加速度均为最小、Northridge波次之、EL Centro波和Taft Lincoln波在地表各点峰值加速度接近且最大。将输入地震波为西安人工波、地震动强度为0.2g的数值结果与前述模拟地震振动台试验结果进行对比分析,可得到如图12所示的加速度响应规律。

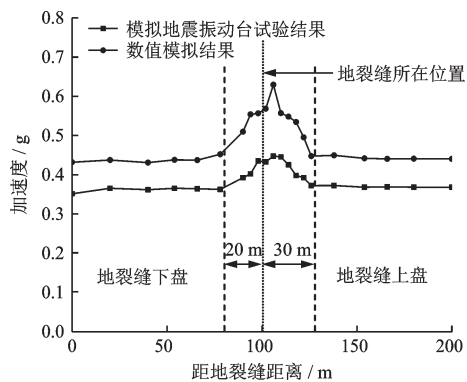


图12 数值模拟与振动台试验峰值加速度对比曲线

Fig.12 Comparison curves of peak acceleration between numerical simulation and shaking table test

从图12可以看出,采用数值模拟与模拟地震振动台试验方法分析地裂缝场地地震响应规律时具有一致性,但数值模拟方法相比模拟地震振动台试验得到的峰值加速度在数值上整体偏大,也间接说明了数值模拟地震作用时存在边界效应。

### 2.3 “y”字型地裂缝场地地震响应规律

由第1节建立的“y”字型地裂缝数值分析模型,对其进行非线性时程分析,探究其在不同地震动强度和地震波作用下的场地地震响应规律。图13为输入西安人工波时不同地震动强度地表峰值加速度曲线。

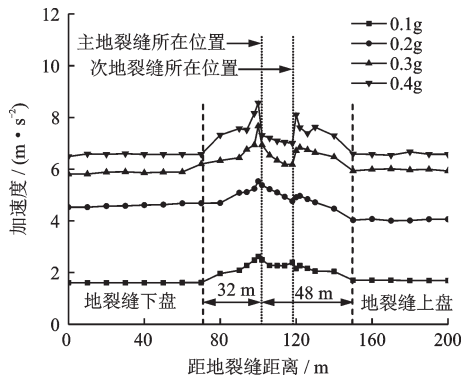


图13 不同地震动强度“y”字型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.13 Peak acceleration curves of "y" shaped ground fissures with different ground motion intensities

由图13可知不同地震动作用下,与单缝型地裂缝场地地表峰值加速度响应规律不同,“y”字型地裂缝场地地表峰值加速度响应规律表现出明显的“双峰”特征,主地裂缝的响应相比次地裂缝略为明显,地表峰值加速度在距主地裂缝下盘约32 m、上盘约48 m范围趋于稳定,可见相比于单缝型地裂缝上下盘50 m影响区,“y”字型地裂缝上下盘将产生80 m影响区;随着输入地震动强度的逐渐增大,地表峰值加速度逐渐增加,但增幅逐渐减小,即地表峰值加速度在输入地震动强度为0.4g时最大,在输入地震动强度为0.1g时最小。

图14为输入地震动强度为0.1g时不同地震波

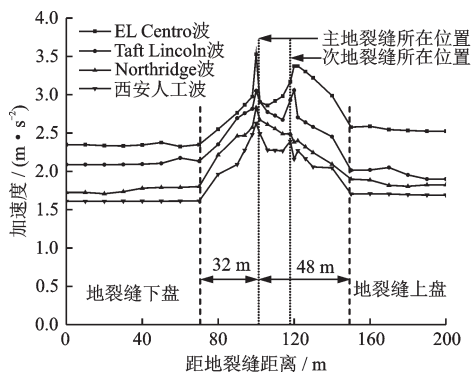


图14 不同输入地震波“y”字型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.14 Peak acceleration curves of "y" shaped ground fissures with different input seismic waves

地表峰值加速度曲线,由图14可知不同地震波作用下“y”字型地裂缝场地地表峰值加速度均表现出“双峰”效应,在主地裂缝和次地裂缝处达到最大,随着与地裂缝之间距离的逐渐增大其地表峰值加速度逐渐减小;不同地震波作用下,西安人工波作用下场地地表各点峰值加速度均为最小、Northridge波次之、EL Centro波和 Taft Lincoln波在 地表各点峰值加速度接近且最大。

### 2.4 正“八”型地裂缝场地地震响应规律

由第1节建立的正“八”型地裂缝数值分析模型,对其进行非线性时程分析,探究其在不同地震动强度和地震波作用下的场地地震响应规律。图15为输入西安人工波时不同地震动强度地表峰值加速度曲线,由图15可知不同地震动作用下,正“八”型地裂缝场地地表峰值加速度响应规律亦表现出明显的“双峰”特征,但与“y”字型地裂缝场地地表峰值加速度响应规律不同,两条地裂缝的峰值加速度基本一致且处于地裂缝上盘的峰值加速度略大于处于下盘的峰值加速度,在曲线上呈现出“U”型谷特征,地表峰值加速度在地裂缝上下盘将产生80 m影响区;随着输入地震动强度的逐渐增大,地表峰值加速度逐渐增加,即地表峰值加速度在地震动强度为0.4g时最大,0.1g时最小。

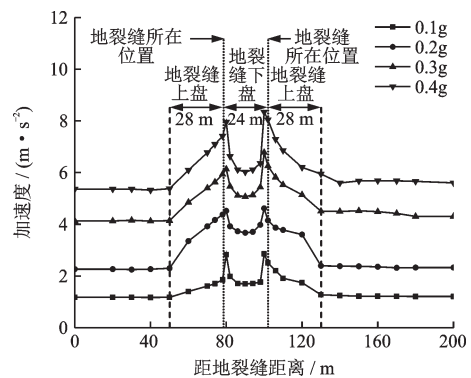


图15 不同地震动强度正“八”型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.15 Peak acceleration curves of "splayed" shaped ground fissures with different ground motion intensities

图16为输入地震动强度为0.1g时不同地震波地表峰值加速度曲线,由图16可知不同地震波作用下正“八”型地裂缝场地地表峰值加速度均表现出“双峰”特征,处于地裂缝上盘的峰值加速度略大于处于下盘的峰值加速度,在曲线上呈现出“U”型谷特征。不同地震波作用下,西安人工波作用下场地

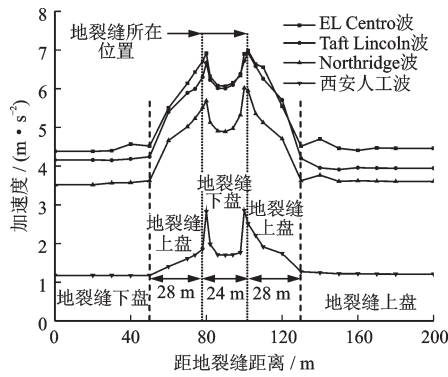


图 16 不同输入地震波正“八”型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.16 Peak acceleration curves of "splayed" shaped ground fissures with different input seismic waves

地表各点峰值加速度均为最小、Northridge波次之、EL Centro波和 Taft Lincoln波在地表各点峰值加速度接近且最大。

### 2.5 倒“八”型地裂缝场地地震响应规律

由第 1 节建立的倒“八”型地裂缝场地数值分析模型,对其进行非线性时程分析,探究其在不同地震动强度和地震波作用下的场地地震响应规律。图 17 为输入西安人工波时不同地震动强度地表峰值加速度曲线,由图 17 可知不同地震动作用下,倒“八”型地裂缝场地地表峰值加速度响应规律表现出明显的“双峰”特征,处于地裂缝上盘的峰值加速度略大于处于下盘的峰值加速度,在曲线上呈现出宽阔型“U”型谷特征,地表峰值加速度在地裂缝上下盘将产生 110 m 影响区;随着输入地震动强度的逐渐增大,地表峰值加速度逐渐增加,即地表峰值加速度在地震动强度为 0.4g 时最大,在 0.1g 时最小。

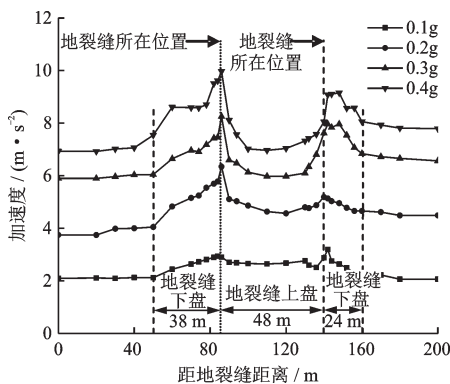


图 17 不同地震动强度倒“八”型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.17 Peak acceleration curves of "fall splayed" shaped ground fissures with different ground motion intensities

图 18 为输入地震动强度为 0.1g 时不同地震波地表峰值加速度曲线,由图 18 可知不同地震波作用下倒“八”型地裂缝场地地表峰值加速度均表现出“双峰”特征,处于地裂缝上盘的峰值加速度略大于处于下盘的峰值加速度,在曲线上呈现出宽阔型“U”型谷特征;不同地震波作用下,西安人工波作用下场地地表各点峰值加速度均为最小、Northridge波次之、EL Centro波和 Taft Lincoln波在地表各点峰值加速度接近且最大。

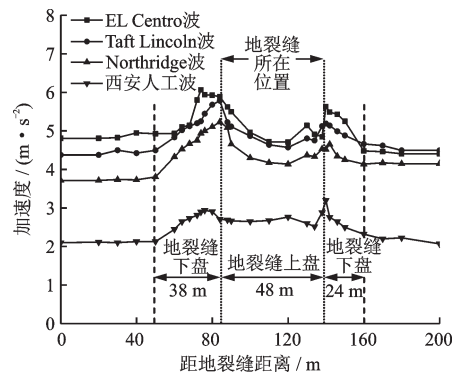


图 18 不同输入地震波倒“八”型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.18 Peak acceleration curves of "fall splayed" shaped ground fissures with different input seismic waves

## 3 不同缝面形态苏锡常地裂缝的场地地震响应规律数值模拟研究

### 3.1 基岩陡崖型地裂缝场地地震响应规律

由第 1 节建立的基岩陡崖型地裂缝数值分析模型,对其进行非线性时程分析,探究其在不同地震动强度和地震波作用下的场地地震响应规律。

图 19 为输入西安人工波时不同地震动强度地表峰值加速度曲线,由图 19 可知不同地震动作用下,与“y”字型、正“八”型、倒“八”型地裂缝场地地表峰值加速度响应规律所表现出的“双峰”特征不同,基岩陡崖型地裂缝地表峰值加速度呈现出“单峰”特征,但受基岩陡崖的影响,在地裂缝下盘陡崖侧地表峰值加速度大于地裂缝上盘远离陡崖侧地表峰值加速度;随着与地裂缝之间距离的逐渐增大其地表峰值加速度逐渐减小,在距地裂缝下盘约 32 m、上盘约 38 m 范围趋于稳定,地表峰值加速度在地裂缝上下盘将产生 70 m 影响区;随着输入地震动强度的逐渐增大,地表峰值加速度逐渐增加,即地表峰值加速度

在地震动强度为0.4g时最大,在0.1g时最小。

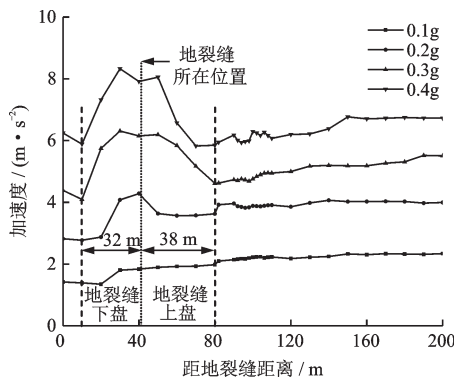


图19 不同地震动强度基岩陡崖型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.19 Peak acceleration curves of ground fissures of scarp type in bedrock with different seismic intensities

图20为输入地震动强度为0.1g时不同地震波地表峰值加速度曲线,由图20可知不同地震波作用下基岩陡崖型地裂缝地表峰值加速度均表现出“单峰”特征,但受基岩陡崖的影响,在地裂缝下盘陡崖侧地表峰值加速度大于地裂缝上盘远离陡崖侧地表峰值加速度;不同地震波作用下,西安人工波作用下场地地表各点峰值加速度均为最小、Northridge波次之、EL Centro波和 Taft Lincoln波在地表各点峰值加速度接近且最大。

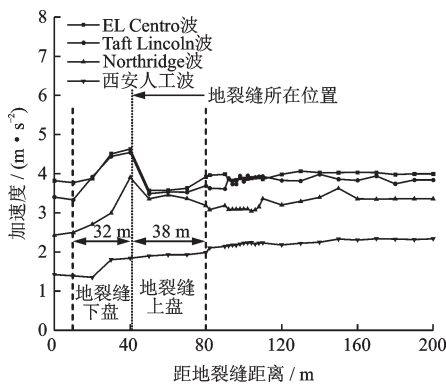


图20 不同输入地震波基岩陡崖型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.20 Peak acceleration curves of ground fissures of scarp type in bedrock with different input seismic waves

### 3.2 潜山型地裂缝场地地震响应规律

由第1节建立的潜山型地裂缝数值分析模型,对其进行非线性时程分析,探究其在不同地震动强度和地震波作用下的场地地震响应规律。

图21为输入西安人工波时不同地震动强度地表峰值加速度曲线,由图21可知不同地震动作用

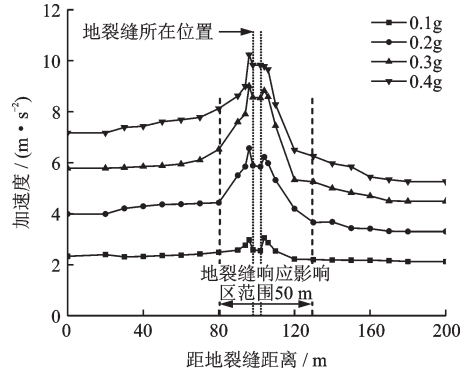


图21 不同地震动强度基岩潜山型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.21 Peak acceleration curves of ground fissures of buried hill in bedrock with different seismic intensities

下,基岩潜山型地裂缝场地地表峰值加速度响应规律表现出“双峰”特征,但与前述“y”字型、正“八”型和倒“八”型地裂缝所呈现的“双峰”特征具有差异,具体表现为其受基岩潜山的影响,地表峰值加速度最大值出现在基岩潜山地裂缝的两侧,加速度最大值形成的“双峰”之间呈现出狭窄的“V”型谷,随着与地裂缝之间距离的逐渐增大其地表峰值加速度逐渐减小,地表峰值加速度在地裂缝上下盘将产生50 m影响区;随着输入地震动强度的逐渐增大,地表峰值加速度逐渐增加,即地表峰值加速度在地震动强度为0.4g时最大,在0.1g时最小。

图22为输入地震动强度为0.1g时不同地震波地表峰值加速度曲线,由图可知不同地震波作用下基岩潜山型地裂缝场地地表峰值加速度均表现出“双峰”特征,与其他缝面形态不同的是受基岩潜山的影响,地表峰值加速度最大值出现在基岩潜山地裂缝的两侧,随着与地裂缝之间距离的逐渐增大其地表峰值加速度逐渐减小;不同地震波作用下,西安人工波作用下场地地表各点峰值加速度均为最

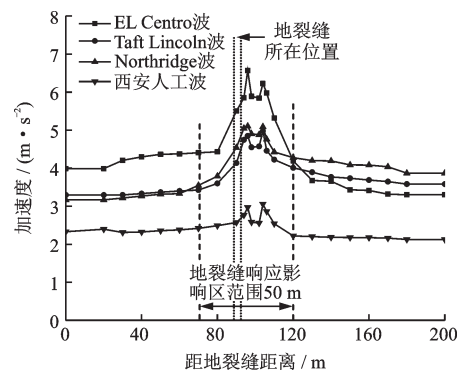


图22 不同输入地震波基岩潜山型地裂缝峰值加速度曲线  
Fig.22 Peak acceleration curves of ground fissures of buried hill in bedrock with different input seismic waves

小、Northridge 波次之、EL Centro 波和 Taft Lincoln 波在地表各点峰值加速度接近且最大。

## 4 结 论

对不同缝面形态的西安地裂缝和苏锡常地裂缝场地地震响应规律进行分析, 所得结论如下:

(1) 不同缝面形态地裂缝均表现出在地裂缝处地表峰值加速度最大, 随着与地裂缝之间距离的逐渐增大其地表峰值加速度逐渐减小的响应规律, 其中单缝型、基岩陡崖型地裂缝地表峰值加速度表现出“单峰”特征, “y”字型、正“八”型、倒“八”型地表峰值加速度表现出 U 型谷“双峰”特征, 基岩潜山型地裂缝地表峰值加速度表现出 V 型谷“双峰”特征;

(2) 不同缝面形态地裂缝场地, 单缝型、基岩潜山型地裂缝上下盘将产生 50 m 影响区, “y”字型和正“八”型地裂缝上下盘将产生 80 m 影响区, 倒“八”型地裂缝上下盘将产生 110 m 影响区, 基岩陡崖型地裂缝上下盘将产生 70 m 影响区;

(3) 不同缝面形态地裂缝场地, 随着输入地震动强度的逐渐增大, 峰值加速度响应逐渐增加, 随着输入地震波的变化, 西安人工波作用下场地地表各点峰值加速度均为最小、Northridge 波次之、EL Centro 波和 Taft Lincoln 波在地表各点峰值加速度接近且最大。

### 参考文献:

- [1] Fan W, Peng X L, Deng L S, et al. The study of road deformation induced by ground fissure in Xi'an, Central China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13 (15): 1-12.
- [2] 石玉玲, 门玉明, 彭建兵, 等. 地裂缝对不同结构形式桥梁桥面的破坏试验研究 [J]. *岩土力学*, 2009, 30 (10): 2917-2922.  
Shi Y L, Men Y M, Peng J B, et al. Damage test study of different types structures of bridge decks by ground-fissure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30 (10): 2917-2922. (in Chinese)
- [3] Wang Z F, Shen S L, Cheng W C, et al. Ground fissures in Xi'an and measures to prevent damage to the Metro tunnel system due to geohazards [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 1-11.
- [4] 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 J W, Li B, Tan C X, 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)
- [5] Zhang D, Hu Z P, Lu G G, et al. Experimental study on deformation mechanism of a utility tunnel in a ground fissure area [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020(11): 1-15.
- [6] 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 J W, Peng J B, Zheng J G, et al. Development rules and movement characteristics of earth fissures in china [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28 (5): 1016-1027. (in Chinese)
- [7] 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 Y H, Peng J B, Mu H D, 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)
- [8] 彭建兵, 范文, 李喜安, 等. 渭河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)
- [9] 张结红, 刘洋, 李凯玲, 等. 地裂缝环境下马蹄形地铁隧道与土体相互作用的研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2011, 31(3): 281-287.  
Zhang J H, Liu Y, Li K L, et al. Study on interaction between soil and U-shaped metro tunnel in the environment of ground fissures [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2011, 31 (3) : 281-287. (in Chinese)
- [10] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [11] 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 Z M, Wei J, Chen X, et al. Research on shaking table test and numerical modeling of frame structure crossing ground fissure [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(5): 214-222. (in Chinese)

- [12] Xiong Z M, Zhang Y S, Chen X. Shaking table test and numerical analysis of a new method for disaster control and reinforcement of frame structure crossing ground fissures [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 560(1): 012096.
- [13] 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)
- [14] 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 Q Y, Hu Z P, Wang R, et al. Shaking table test study on seismic acceleration response of ground fissures sites under horizontal seismic action[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(12): 121-128.(in Chinese)
- [15] 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, Hunag 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)
- [16] Liu N N, Feng X Y, Huang Q B, et al. Dynamic characteristics of a ground fissure site[J]. Engineering Geology, 2019, 248: 220-229.
- [17] Liu N N, Huang Q B, Wang L, et al. Dynamic characteristics research of a ground fissure site at Xi'an, China [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 182-190.
- [18] 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 W, Nie Z Q, Chen D M, et al. Study on Seismic response effect of Ground Fissure in Xian yang City Shaanxi province [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 82-88.(in Chinese)
- [19] 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 C, Peng J B, Chen L W, et al. Xi'an ground fissures site seismic effect analysis [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 979-985.(in Chinese)
- [20] 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<sub>6</sub>地裂缝为例[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3):784-793.  
Zhang L G, Deng Y H, Xue J, et al. Preliminary research on dynamic reponse characteristics of microtremor at ground fissure sites—illustrated with F<sub>6</sub> ground fissure in Xi'an [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 784-793.(in Chinese)
- [21] 杨觅, 门玉明, 袁立群, 等. 地裂缝环境下不同隧道形式的地铁振动响应数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 188-195.  
Yang M, Men Y M, Yuan L Q, et al. Numerical analysis of subway vibration responses for different tunnel types in ground fissures areas[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 188-195.(in Chinese)
- [22] 袁立群, 门玉明, 刘妮娜, 等. 与地裂缝正交马蹄形地铁隧道动力响应模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(3): 354-358.  
Yuan L Q, Men Y M, Liu N N, et al. The dynamic response simulation analysis of U-shaped metro tunnel orthogonal with the ground fissure[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(3): 354-358.(in Chinese)
- [23] 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1): 3139-3149.  
Mu H D, Deng Y H, Chang J, 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(Sup1): 3139-3149. (in Chinese)

(本文责编:池营营)