

检索工具	EI Compendex 数据库	查证日期	2015-01-05
收录作者	刘妮娜	署名单位	长安大学地测学院
查证单位	教育部科技查新工作站 (G01)	地址	西安市长安大学图书馆信息部 029-82334377
检索人	张永梅	审核人	徐芳

### Model test on dynamic response of ground with fissures under seismic loading

**Accession number:** 20142317795872

**Authors:** Liu, Nina (1, 2, 3); Huang, Qiangbing (2, 3); Men, Yuming (2, 3); Peng, Jianbing (2, 3)

**Author affiliation:** (1) Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; (2) School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; (3) Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China

**Corresponding author:** Liu, N.(dcdgx16@chd.edu.cn)

**Source title:** Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

**Abbreviated source title:** Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao

**Volume:** 33

**Issue:** 5

**Issue date:** May 2014

**Publication year:** 2014

**Pages:** 1024-1031

**Language:** Chinese

**ISSN:** 10006915

**CODEN:** YLGXF5

**Document type:** Journal article (JA)

**Publisher:** Academia Sinica

**Abstract:** The shaking table model test was used to simulate the seismic response of the ground with fissures in the region of Xi'an where metro tunnels often penetrate through the active ground fissures. It was found that the hidden fissures inside the soil body grew to appear on the surface after a while during the test and continue to expand to form through fissure lines crossing the surface. As the dynamic test continues, the secondary fissures were developed at the upper soil layer joining with the main ones. The loose soil fillings inside the fissures moved upward along the fissures. The uneven settlements occurred on the surface during the test and the largest difference of the settlements occurred just on the two sides of the fissures. The uneven settlements induced a tension between the two sides of fissures, which made ground fissures to expand its width, length and height and gradually expose to the surface. The measured accelerations at the upper layer are greater than those at the bottom layer. The results of the test may provide a guide line for the seismic design of structures in the areas of ground with fissures.

**Number of references:** 20

**Main heading:** Dynamic response

**Controlled terms:** Seismic design - Soils

**Uncontrolled terms:** Bottom layers - Dynamic tests - Earthquake load - Ground fissure - Model tests - Seismic loadings - Shaking table model test - Tunnelling engineering

**Classification code:** 408 Structural Design - 408.1 Structural Design, General - 483.1 Soils and Soil Mechanics

**Database:** Compendex

Compilation and indexing terms, Copyright 2014 Elsevier Inc.

**Data Provider:** Engineering Village



全国中文核心期刊  
中国科协优秀期刊

湖北省优秀期刊  
EI 核心收录期刊

ISSN 1000-6915  
CODEN YLGXF5

# 岩石力学与工程学报

CHINESE JOURNAL OF  
ROCK MECHANICS AND ENGINEERING

第33卷 第5期(总第282期)

Vol.33 No.5(Total No.282)



5

2014

ISSN 1000-6915



9 771000 691147

中国岩石力学与工程学会 主办  
科学出版社 出版



# 岩石力学与工程学报

2014年5月15日 第33卷 第5期(总第282期)

## 目次

岩盐储库建腔期难溶夹层的软化规律研究.....姜德义, 张军伟, 陈 结, 任 松, 杨春和 (865)

基于直剪试验的页岩强度各向异性研究.....衡 帅, 杨春和, 曾义金, 张保平, 郭印同, 王 磊, 魏元龙 (874)

滑坡关键块力学行为及力传递特征和不同应力状态的稳定系数研究.....卢应发, 邓国栋, 杨丽平, 刘德富 (884)

节理岩体卸荷各向异性力学特性试验研究.....李建林, 王乐华, 孙旭曙 (892)

盾构隧道管片环纵向接头抗弯刚度值的不动点迭代确定方法.....夏才初, 曾格华, 卞跃威 (901)

城市地铁跨孔电阻率 CT 超前地质预报方法研究.....李术才, 苏茂鑫, 薛翊国, 张文俊, 邱道宏, 林春金 (913)

盐穴造腔模拟与形态控制试验装置研制.....王汉鹏, 李建中, 冉莉娜, 李建明, 张庆贺 (921)

围压对岩石试样强度的影响及离散性.....尤明庆 (929)

含层理构造的非均质片麻岩巴西劈裂试验及离散单元法数值模拟研究.....谭 鑫, HEINZ Konietzky (938)

北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有隧道变形特点及预测.....王剑晨, 张顶立, 张成平, 房 倩, 苏 洁, 杜楠馨 (947)

单轴压缩条件下柱状节理岩体变形和强度各向异性模型试验研究.....肖维民, 邓荣贵, 付小敏, 王从颖 (957)

分数阶黏弹塑性蠕变模型试验研究.....吴 斐, 谢和平, 刘建锋, 边 宇, 裴建良 (964)

基于地质力学模型试验的大岗山拱坝整体稳定性分析.....张 流, 刘耀儒, 杨 强, 黄彦昆, 邵敬东, 黎满林 (971)

脆性岩体破裂扩展时间效应对引水隧洞长期稳定性影响研究.....崔 臻, 侯 靖, 吴旭敏, 褚卫江 (983)

含交叉裂隙节理岩体锚固效应及破坏模式.....张 波, 李术才, 杨学英, 王 刚, 张敦福, 杨 磊 (996)

基于 WEBGIS 和四库一体技术的三峡库区滑坡灾害预测预报系统研究.....王佳佳, 殷坤龙 (1004)

特大断面巷道软弱厚煤层顶板控制对策及安全评价.....严 红, 何富连, 王思贵 (1014)

**地震荷载作用下地裂缝场地动力响应试验研究.....刘妮娜, 黄强兵, 门玉明, 彭建兵 (1024)**

### 土工基础

不同支护模式下黄土高边坡开挖变形离心模型试验研究.....王玉峰, 程谦恭, 黄英儒 (1032)

“1·11”镇雄灾难性滑坡滑动机制——高孔隙度土流态化启动与滑动液化.....姚 鑫, 余 凯, 张永双, 李凌增, 周能嫒 (1047)

黄土地区高填土明洞土拱效应及土压力减载计算.....李 盛, 王起才, 马 莉, 李建新, 李伟龙 (1055)

大厚度自重湿陷性黄土地基处理深度和湿陷性评价试验研究.....杨校辉, 黄雪峰, 朱彦鹏, 姚志华, 张世径 (1063)

### 讨论

对锚固体强度模拟试验的讨论.....尤明庆 (1075)

对“对锚固体强度模拟试验的讨论”的答复.....勾攀峰 (1078)

### 动态

下期内容预告..... (920)

责任编辑: 吴火珍 排版: 龚 倩

# 地震荷载作用下地裂缝场地动力响应试验研究

刘妮娜<sup>1,2,3</sup>, 黄强兵<sup>2,3</sup>, 门玉明<sup>2,3</sup>, 彭建兵<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 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)

**摘要:** 以西安地铁穿越地裂缝区域为工程背景, 采用振动台模型试验, 模拟地震荷载作用下地裂缝场地的动力响应。试验结果表明: 地震荷载作用下, 地裂缝场地中的隐伏地裂缝逐渐出露, 随着地震动力荷载的持续作用, 裂缝在地表贯通, 并在裂缝的上盘区域中生成与之相交的次生裂缝, 地裂缝内部的松散充填土体沿裂缝向上运动。地震动力荷载作用下, 地裂缝场地产生不均匀沉降, 且地裂缝位置产生的沉降大于其两侧区域, 不均匀沉降导致地裂缝两侧产生张拉力, 张拉力继而使隐伏地裂缝扩展出露地表, 同时伴随裂缝宽度增加。振动过程中, 地裂缝场地上盘所产生的动力加速度大于场地下盘区域的动力加速度。研究结果可为地震荷载作用下地裂缝场地中的结构抗震设计提供重要参考。

**关键词:** 隧道工程; 地震荷载; 地裂缝; 模型试验; 动力响应

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2014)05-1024-08

DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.05.018

## MODEL TEST ON DYNAMIC RESPONSE OF GROUND WITH FISSURES UNDER SEISMIC LOADING

LIU Nina<sup>1,2,3</sup>, HUANG Qiangbing<sup>2,3</sup>, MEN Yuming<sup>2,3</sup>, PENG Jianbing<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** The shaking table model test was used to simulate the seismic response of the ground with fissures in the region of Xi'an where metro tunnels often penetrate through the active ground fissures. It was found that the hidden fissures inside the soil body grew to appear on the surface after a while during the test and continue to expand to form through fissure lines crossing the surface. As the dynamic test continues, the secondary fissures were developed at the upper soil layer joining with the main ones. The loose soil fillings inside the fissures moved upward along the fissures. The uneven settlements occurred on the surface during the test and the largest difference of the settlements occurred just on the two sides of the fissures. The uneven settlements induced a tension between the two sides of fissures, which made ground fissures to expand its width, length and height and gradually expose to the surface. The measured accelerations at the upper layer are greater than those at the bottom layer. The results of the test may provide a guide line for the seismic design of structures in the areas of ground with fissures.

**Key words:** tunnelling engineering; earthquake load; ground fissures; model test; dynamic response

## 1 引言

随着我国社会经济的迅速发展, 城市建设中地

下空间的开发利用也日益加快, 大规模的城市地铁建设正如火如荼, 但在地铁建设中由于工程所处区域地质条件复杂多变, 使得地铁建设中所面临的问题也涉及众多交叉学科。

**收稿日期:** 2013-05-02; **修回日期:** 2013-11-12

**基金项目:** 中国科学院工程地质力学重点实验室开放基金项目(KLEG201101); 国家自然科学基金资助项目(41072222); 陕西省科技统筹创新工程计划课题(2011KTZB03-02-05)

**作者简介:** 刘妮娜(1975-), 女, 博士, 1997年毕业于长安大学建工系, 现任讲师, 主要从事地质工程、岩土及地下工程等方面的教学与研究工作。E-mail: dcdgx16@chd.edu.cn

西安作为我国西北政治、经济、文化中心，地铁建设为促进城市发展起到了极大的推动作用。由于西安位于活动构造强烈的汾渭盆地中部，这一区域的地裂缝地质灾害十分发育，地裂缝作为地壳表部岩土层中的不连续构造面，是一种特殊的场地条件。14 条地裂缝贯穿整个西安市区，覆盖面积达 250 km<sup>2</sup>，且这些地裂缝还处于不断活动之中。这一特殊的工程地质环境为西安地铁的建设带来了严重的安全隐患，在国内工程界和学术界，引起了对地裂缝场地工程建设问题的研究和探讨，黄强兵等<sup>[1-7]</sup>从地裂缝的形成原因、发展机制及其工程致灾机制开展了深入研究，取得了一系列重要成果，并成功地应用于西安地铁建设中。

然而，西安地铁在建设中还面临着另外一个重要的岩土与工程地质问题，即地震问题。西安位于我国地震设防烈度八度地区，西安地铁设计中明确要求考虑抗震设计。同时，全球范围内近年的地震运动无论从强度和频率来讲，都比以往明显增加。在地震荷载作用下，地裂缝的存在必然会对所处场地的地震动效应带来一定程度的影响。在这一条件下，西安地铁建设中，地震荷载是非常重要的作用荷载。

关于地震荷载作用下地裂缝的相关研究，目前在国内也开展了一些。刘聪等<sup>[8]</sup>进行了西安地裂缝场地地震效应分析，用数值模拟方法分析得出，地震荷载作用时，地裂缝对场地地层的完整性造成了一定程度的影响，由于其刚度的降低，造成场地自振特征的变化；同时还分析了不同类型地震作用下地裂缝场地的影响范围。冷葳和孙强<sup>[9]</sup>利用结构突变失稳理论，研究了地震作用下岩土体内部应力变化，认为地震使岩土体颗粒间有效接触力增加，导致结构失稳，形成裂缝与塌陷。陈安国等<sup>[10-14]</sup>对汶川、玉树和河北平原等地的地裂缝的形成、扩展与地震之间的关系进行了调查研究。研究成果从一定程度上发现并揭示了地裂缝的形成及孕育活动与地震运动有密切关系。这些研究目前可以归结为两大类：一类以理论计算、数值分析为基础；另一类则建立在震区历史资料分析与现场调查的基础之上。目前对于地裂缝场地的动力响应缺少有力的模型试验分析。

基于此，本文首次以西安地铁建设中通过的地裂缝场地作为研究对象，建立地震荷载作用时地裂缝场地的动力响应模型试验，从地裂缝场地的动力

响应、地裂缝的发展规律等方面来研究地裂缝场地在地震动力荷载作用下的变形规律，为穿越活动地裂缝带的地铁隧道结构设计提供科学依据。

## 2 模型试验设计

本次模型试验以相似理论为基础，采用振动台模拟地震荷载，为更好地分析地震动力荷载作用下地裂缝场地的动力响应，设计了黄土自由场地及地裂缝场地 2 种场地模型来进行不同场地条件下的地震动力响应试验。

### 2.1 场地土及地裂缝模拟

参照杨林德等<sup>[15]</sup>的研究成果及国内外相关的振动台模型试验设计<sup>[16-19]</sup>，本次试验中的模型土采用 f<sub>7</sub> 地裂缝与西安地铁二号线交汇处施工现场的场地土。模型土备料制作时，先将足量的建设场地现场土体剔除杂物，过筛后装袋。装箱过程中，对箱内土体采用分层人工压实，以确保模型箱内土体密度可以达到试验要求。

根据西安地裂缝的平面及剖面特征，参照黄强兵等<sup>[2, 4-5]</sup>地裂缝的模拟方法，模型试验中采用粉细砂模拟地裂缝。考虑西安地铁线路与多条地裂缝均接近正交，地裂缝倾角多为 NE70°~80°，在模型试验中确定地裂缝与地铁隧道位置为正交关系，地裂缝倾角为 80°。为了研究隐伏地裂缝在地震荷载作用下的扩展特征，模型中预设地裂缝未完全露出模型箱土体表层，在距表层 20 mm 处，模型土体填筑与箱内上、下两盘土体填筑采用同样的方法。在地裂缝制作时，首先用木板固定地裂缝位置，先分层填筑木板两侧土体，每次充填高度约 20 cm，当土体填充到预定高度时，抽取木板用粉细砂灌缝以模拟地裂缝。

### 2.2 试验装置及测试设备

地震模拟振动台采用长安大学工程测试中心的 MTS 触发体系，该系统由美国 MTS 公司生产，由长安大学测试中心与美国 MTS 公司开发。振动台主要性能参数为：台面尺寸 1.0 m×1.5 m、最大承载重量 2 000 kg、振动方式为水平向单自由度振动、频率范围为 0.1~50.0 Hz。

模型试验中加速度数据利用德国 IMC 公司生产的动态信号采集系统采集并进行分析，土体的加速度时程由加速度传感器测试。试验装置及检测设备如图 1 所示。



图1 试验装置  
Fig.1 Test devices

### 2.3 模型设计

#### (1) 相似比例

根据规程<sup>[20]</sup>，地裂缝影响范围为上盘区域 20 m、下盘区域 12 m，其影响范围随地层埋深的增加呈渐减趋势，故试验时取原型范围为上盘 20 m、下盘 20 m。本次模型试验取几何相似常数  $C_L=40$ 。试验模拟范围：地层场地 36 m×40 m，地层埋深 24 m。根据几何相似关系，模型尺寸为 1.0 m×0.9 m×0.6 m (长×宽×高)。基础相似比采用几何相似比 1/40，各物理量的相似比经计算如下： $C_\mu=1$ ， $C_E=1$ ， $C_c=1$ ， $C_\phi=1$ ， $C_\sigma=5$ ， $C_l=40$ ， $C_t=0.056$ ，其中， $E$ ， $\mu$ ， $c$ ， $\phi$ ， $\sigma$ ， $l$ ， $t$  分别为地层弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、应力、位移与时间。

以上各参数的相似比例同时考虑了振动台设备的性能以及设计实现的可行性，保证模型试验的应力场和位移场相似。

#### (2) 模型箱设计

根据国内外的研究经验，目前在岩土工程中的模型箱常用的有刚性模型箱、圆筒形柔性模型箱和层状剪切模型箱。本次试验中考虑到试验条件及相关因素的影响，采用刚性模型箱。模型箱设计中遵循的原则是结构可靠，以免箱体在激振过程中推移破坏；模型箱的边界条件简单、明确，便于在试验过程中采集相应的量测信息，并能减小由于边界条件所引起的边界效应。同时，模型箱尺寸满足振动台的尺寸限制，模型箱中土体重量满足振动台的承载力限制。根据以上原则，设计的模型箱尺寸为 0.9 m (平行于振动方向)×1.0 m (垂直于振动方向)×0.6 m (高)。箱体采用 70 mm×70 mm 和 50 mm×50 mm 的角钢作为固定刚架，采用 40 mm×2 mm 的扁钢拉结。箱壁材料采用厚度 10 mm 的木工板制作，垂直方向相邻板之间采用泡沫胶填充。为了减小箱壁侧向变

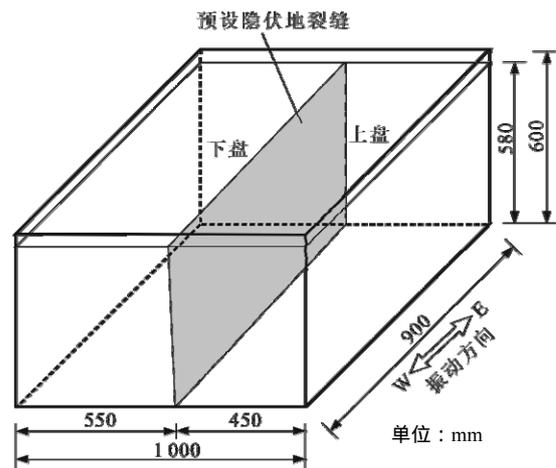
形刚度过大而导致的边界效应，在箱壁上黏贴聚苯乙烯泡沫塑料。考虑箱壁和箱底的摩擦效应，在模型箱底铺设间距 200 mm 的木条及铁钉以加强摩擦力，减小箱底和土体的相对位移。模型箱结构及各部位细节示意图如图 2(a)~(d)所示。



(a) 模型箱结构 (b) 模型箱体



(c) 模型箱底部 (d) 模型箱侧壁



(e) 模型箱示意图

图2 模型箱

Fig.2 Model boxes

#### (3) 加载方式

根据模型试验所模拟的西安地区工程地质特点，试验中加载的输入波选用 3 组典型特点的正弦波、西安人工地震波、EI Centro 地震波。动荷载的加载方向如图 2(e)所示。

#### (4) 黄土自由场地动力响应模型

黄土自由场地模型试验模拟未涉及地裂缝的场地在地震荷载作用下的动力响应。试验目的有两点：一是通过黄土自由场地动力响应数据的分析，确保模型箱的边界条件是否能够满足试验要求；二是将黄

土自由场地的地震动力响应与地裂缝场地进行对比。

试验中加速度传感器布置如图 3 所示。加速度传感器 A2 布置于振动台台面处，用来测试基准加速度；加速度传感器 A4 放置于模型箱中底部，其余加速度传感器布置于模型箱中高度 0.25 m 处的同一水平面上。通过加速度传感器，测定在模型箱中不同位置处的土体加速度，分析动力荷载作用下土体响应。

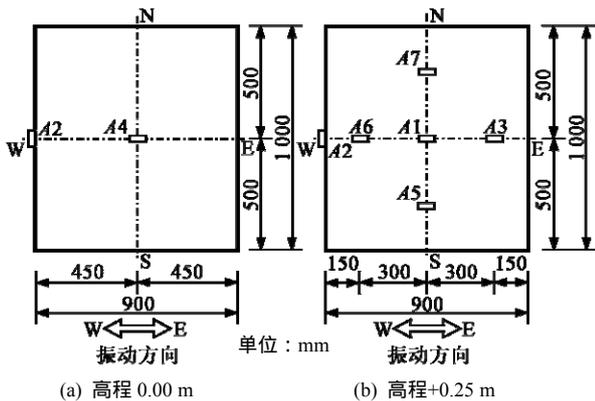


图 3 黄土自由场地动力模型试验测点布置平面图  
Fig.3 Monitoring points layout in dynamic model test in loess soil site

(5) 地裂缝场地动力响应模型

该组试验中，设置未出露于模型箱土体表面的隐伏地裂缝。测试内容包括：模型箱表面地裂缝两侧土体的不均匀沉降、隐伏地裂缝扩展及模型箱中地裂缝场地各点的加速度时程。试验的目的是分析地裂缝场地在动力荷载作用下的地震动效应及地震作用下隐伏地裂缝的破裂扩展问题。模型箱及传感器布置如图 4 所示。

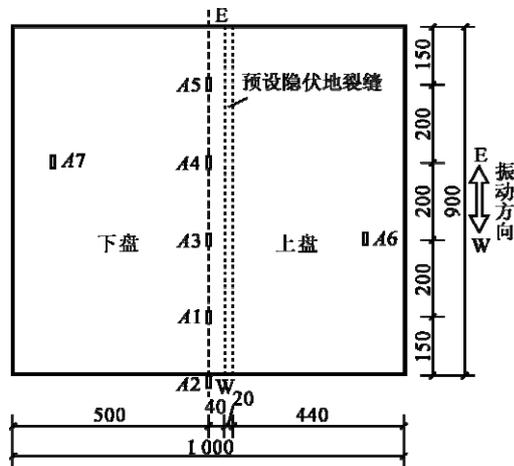


图 4 地裂缝场地加速度传感器布置(单位：mm)  
Fig.4 Acceleration sensors layout in ground fissure model(unit : mm)

3 试验结果分析

3.1 黄土自由场地动力响应分析

黄土自由场地地震动力响应试验加载了正弦波、西安人工地震波及 EI Centro 地震波。

图 5 为正弦波加载时黄土自由场地各点加速度时程曲线。由时程曲线分析得出，模型中各点的加速度时程都遵循正弦波的加速度时程曲线运动。

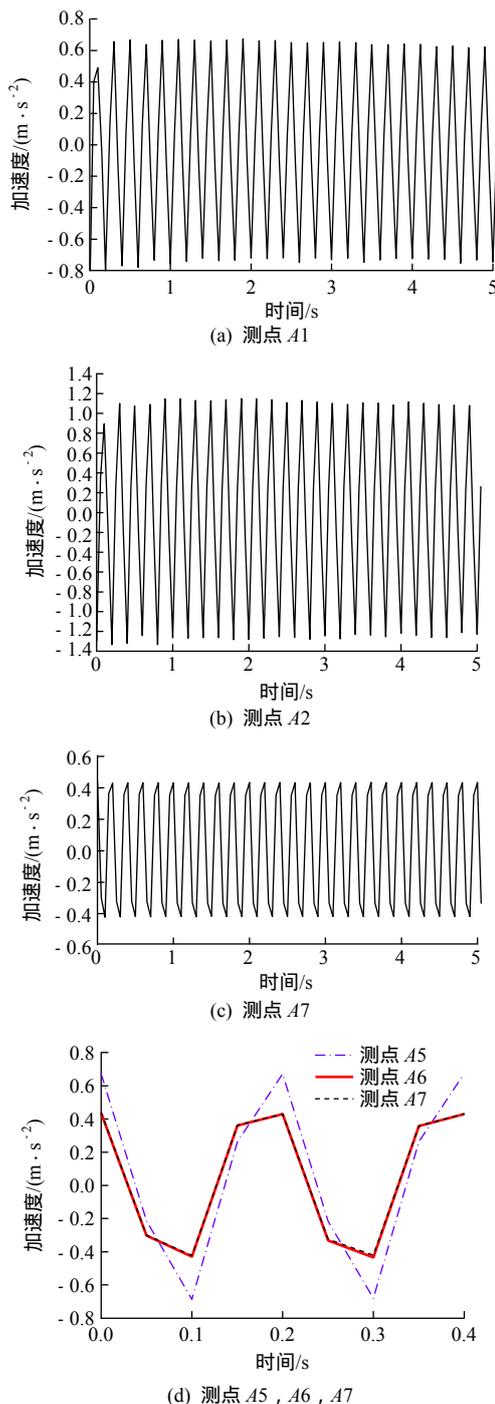


图 5 正弦波作用下黄土自由场地各测点加速度时程  
Fig.5 Acceleration time-history curves of loess model under Sine wave

图 6 为黄土自由场地中典型测试点在西安人工地震波和 EI Centro 地震波加载测试中的加速度时程曲线。

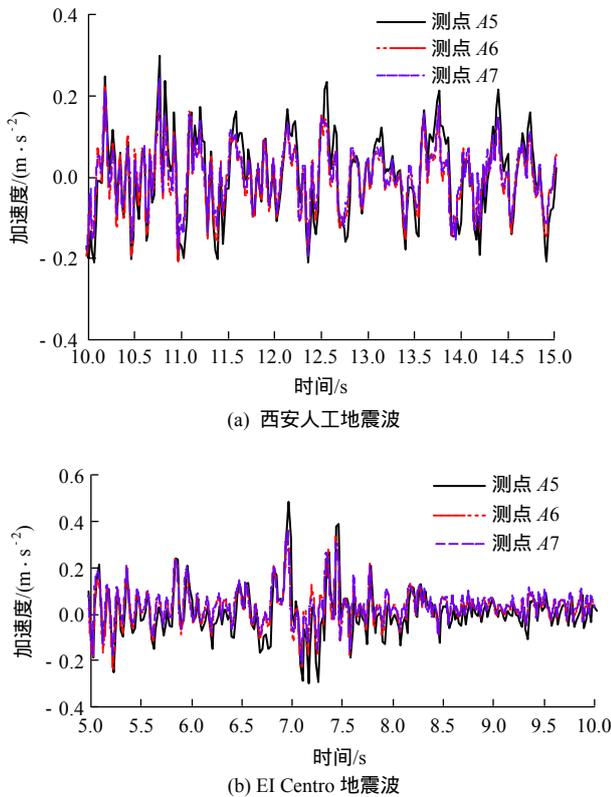


图 6 黄土自由场地各测点在地震波加载时加速度时程曲线  
Fig.6 Acceleration time-history curves of loess model under earthquake waves

对正弦波与西安人工地震波作用所测到的各点加速度与基准点 A2 加速度值进行比较，得到各点加速度衰减值。表 1 为黄土自由场地模型振动试验中正弦波输入时各测点加速度衰减值。由表 1 可知，在黄土自由场地中，模型箱底部测点 A4 的加速度衰减值为 1.0 m/s<sup>2</sup>，表明其与振动台所施加的动力加速度相一致。在模型箱中高程为 0.25 m 处的同一平面上，各点加速度的衰减值为 0.37 ~ 0.63 m/s<sup>2</sup>，表

表 1 正弦波振动输入时各测点加速度衰减值

Table 1 Attenuation values of acceleration under Sine wave

测点编号	加速度峰值/(m·s <sup>-2</sup> )	衰减值/(m·s <sup>-2</sup> )
A1	0.68	0.59
A2	1.15	1.00
A3	0.72	0.63
A4	1.15	1.00
A5	0.68	0.59
A6	0.42	0.37
A7	0.42	0.37

明模型箱中高程为 0.25 m 处各点对正弦波输入的动力荷载均有一定的减弱作用。

将模型中测点 A4 的数据作为基准信号，其他各测点采集到的数据作为对比信号。按下式求出各信号与基准信号之间的偏差 S<sub>xy</sub>：

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - y_i)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

式中：x<sub>i</sub> 为测点所采集到的基准信号数据，y<sub>i</sub> 为对比信号，n 为测点采样个数。式(1)中，若偏差 S<sub>xy</sub> = 0，说明 2 个信号一致；S<sub>xy</sub> 值越大，说明对比信号与基准信号的差别越大，反之则两者之间的差别较小。西安人工地震波作用与 EI Centro 地震波在黄土自由模型动力响应测试中所得到的各测点的偏差值如表 2 所示。

表 2 各测点与基准点偏差值

Table 2 Deviation values between the monitoring points and datum point

测点	地震波偏差/%	
	EI Centro 地震波	西安人工地震波
A1	18.21	17.32
A3	18.24	17.89
A5	18.32	18.01
A6	17.81	17.56
A7	17.21	17.86

将计算的偏差值与王国波等<sup>[17-18]</sup>的研究成果相比较，可以看出，高程 0.25 m 处各测点与模型箱底部测点 A4 的偏差均在 17.21% ~ 18.32% 范围内，说明沿模型箱高度方向从底部到上部加速度逐渐减弱；对同一高程处的各偏差值进行分析，其与模型箱高程 0.25 m 处中心测点 A1 的差值均在 1.0% 以内，可以看出，测点 A3, A5, A6 和 A7 围成的矩形区域处于不受边界效应影响的范围内。

由自由场地模型箱土体自底部到中部加速度响应逐渐减弱及测试区域位于不受边界条件影响的范围内，可以认定该模型箱设计满足动力模型测试要求。

### 3.2 地裂缝场地动力响应分析

#### (1) 地裂缝扩展发育特征分析

振动加载过程中观测地裂缝场地土体表层裂缝发育情况，如图 7 所示。

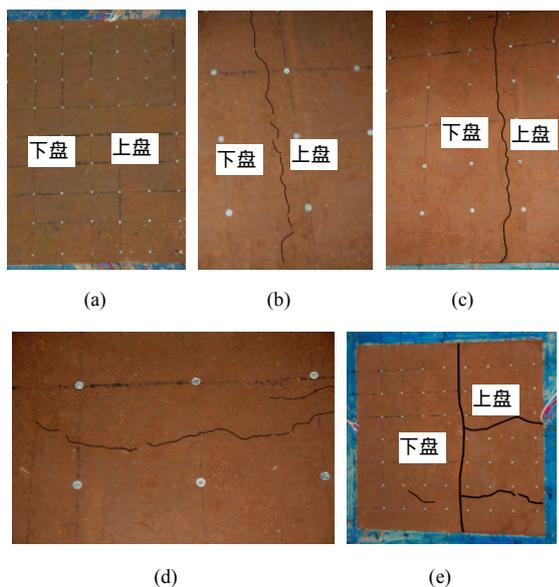


图 7 地裂缝扩展过程

Fig.7 Propagation of ground fissures

振动开始前，由于预设为隐伏地裂缝，模型箱表面未见任何裂缝出露(见图 7(a))；随着振动荷载施加，隐伏地裂缝先是局部出露，并逐渐贯通(见图 7(b))；贯通的地裂缝宽度逐渐增加(见图 7(c))；随着地震持续时间增加，模型箱表面与裂缝正交方向有细小裂缝出现(见图 7(d))；裂缝宽度进一步增加，上盘场地与其正交方向有多条裂缝出现(见图 7(e))。

地裂缝模拟场地振动加载完成后，开挖过程中观测到的地裂缝上盘土体明显的摩擦面如图 8(a)所示，地裂缝的下盘土体向上盘侵入见图 8(b)。

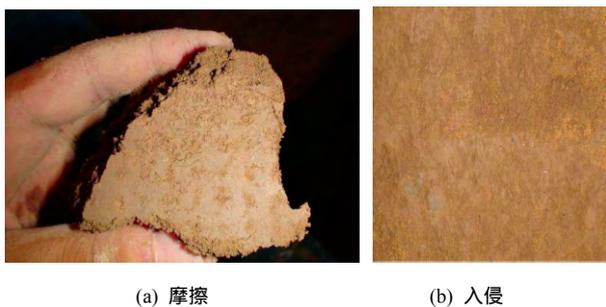


图 8 地裂缝两侧土体擦痕与侵入

Fig.8 Abrasion and invasion of soil in two sides of the ground fissure

试验中模型箱体表面的裂缝扩展及土体开挖后两侧的擦痕表明，当地震动力荷载作用时，在急剧应力作用下，隐伏地裂缝上层覆盖土体开裂，同时在地裂缝所处区域深部的土体颗粒运动，上覆的新生裂缝便成为地裂缝中松散充填土体的上行通道。

地震运动不仅能引起隐伏地裂缝出露，同时还

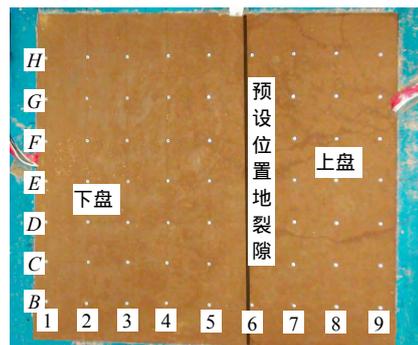
在地裂缝上盘引起次生裂缝；随着地震引起的地裂缝开合，深部土体沿裂缝逆行而上。

(2) 不均匀沉降分析

地震荷载作用时，地裂缝场地中的不均匀沉降如图 9 示。图 9(c)为测量点位置布置示意，第 6 列对应隐伏地裂缝位置。沉降产生最大位置为隐伏地裂缝位置，地裂缝场地中，上盘区域沉降大于下盘区域沉降。这一现象表明，地震动力荷载作用下，地裂缝场地的动力响应中，上、下两盘也遵循着上盘整体相对于下盘下降的运动趋势<sup>[5]</sup>。



(a) 沉降示意 (b) 沉降测量



(c) 测量点位

图 9 地裂缝场地两侧不均匀沉降

Fig.9 Uneven settlements of soil in two sides of the ground fissure

图 10 所示为地裂缝场地在不同的地震及动力荷载加载后的沉降曲线。分析 3 种动力加载时地裂缝场地沉降曲线可以看出，在动力荷载作用下，地裂缝场地产生不均匀沉降，最大沉降产生于隐伏地裂缝位置附近，如图 10 中的点位 5~8。其中，简谐正弦波作用时产生的不均匀沉降较小，其沉降最大值为 2.5 mm。随着不均匀沉降的产生，地裂缝场地上、下两盘产生拉张力，使得裂缝扩展，隐伏地裂缝出露，隐伏地裂缝出露后，地裂缝场地的不均匀沉降集中于上盘区域，且距离地裂缝越近，所产生的沉降越大，如图 10(b),(c)所示。振动加载中发现，动力荷载持续时间越长，产生的沉降越大。

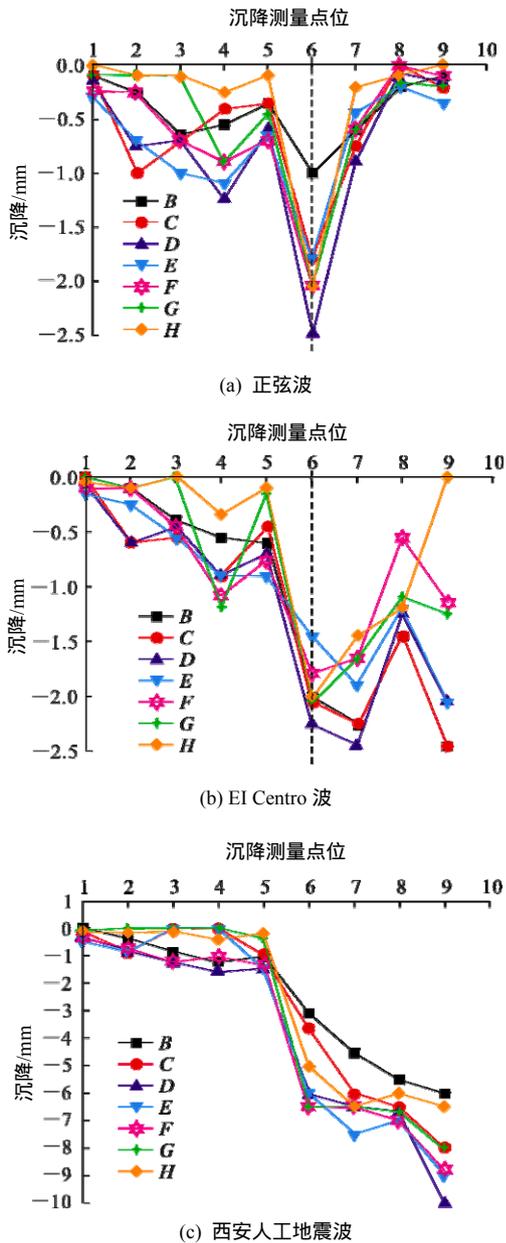


图 10 地裂缝场地地震引起不均匀沉降

Fig.10 Uneven settlements caused by seismic loading of ground fissure

(3) 地裂缝场地动力响应分析

根据地裂缝场地加速度传感器布置,取测点 A2 为基准测点,将各点测试得到的加速度值与测点 A2 之间的进行统计比较,确定相对系数。测点 A6 与 A7 加速度相对系数分别为 1.11 与 0.98,测点 A6 比 A7 的加速度大 13.3%,即地裂缝上盘处的加速度比对称位置下盘处的加速度大 13.3%,说明地震时,地裂缝上、下盘运动中的加速度值并不相等。上盘区的加速度大于下盘区的加速度,这将导致隐伏地裂缝的扩展,随着地裂缝扩展,形成贯通地表的连续裂缝,且进一步在地裂缝上盘产生新的次生裂缝。

这也与振动加载过程中隐伏裂缝出露、加宽并在上盘区域产生新的次生裂缝的现象相互印证。

4 结 论

本文首次以西安地铁穿越地裂缝区域为背景,开展地裂缝场地的地震响应研究,通过模型试验及分析可得以下主要结论:

(1) 在地震动荷载作用下,埋深较浅的隐伏地裂缝将出露地表。随着地震动力荷载的持续作用,裂缝在地表逐渐贯通,并首先在裂缝的上盘区域中生成与之相交的次生裂缝,裂缝宽度及次生裂缝的数量随地震荷载时间的延长而增加。随着地震过程中地裂缝的开合,地裂缝部位的松散充填土体将沿裂缝向上运动。

(2) 地震动力荷载作用时,地裂缝位置产生的沉降大于其两侧区域,由于不均匀沉降从而导致地裂缝两侧产生张拉力,张拉力继而使隐伏地裂缝扩展出露地表,同时伴随裂缝宽度增加;地裂缝场地中上盘沉降大于下盘沉降;场地的加速度峰值与持续时间及沉降值有较大关系,强震作用时地裂缝场地所产生的沉降较大;且距离地裂缝较近区域场地所产生的沉降大于较远区域。

(3) 地震动荷载作用时,地裂缝上盘区域的动力加速度大于地裂缝场地下盘区域的动力加速度。

参考文献(References):

[1] 黄强兵,彭建兵,范文,等. 西安地铁二号线沿线地裂缝未来位错量估算及工程分级[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 469-474. (HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Wen, et al. Estimation of the maximum displacement of ground fissures along Xi'an Metro Line 2 and its engineering classification[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 469-474.(in Chinese))

[2] 黄强兵. 地裂缝对地铁隧道的影响机制及病害控制研究[博士学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2009.(HUANG Qiangbing. Study on effect of the active ground fissure on metro tunnel and its hazards control[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.(in Chinese))

[3] 樊红卫. 西安地铁一号线通过地裂缝对策研究[C]// 中国交通运输协会城市轨道交通专业委员会首届中青年专家论文集. 北京: [s. n.], 2002: 105-109.(FAN Hongwei. Study on the countermeasure for the Xi'an Metro Line 1 to transverse ground fissure[C]// The First Young Experts' Proceedings of Urban Track Transportation Professional Committee of China Transport Association. Beijing: [s. n.], 2002: 105-

- 109.(in Chinese)
- [4] 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): 1 826–1 834.(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): 1 826–1 834.(in Chinese))
- [5] 黄强兵, 彭建兵, 门玉明, 等. 地裂缝对地铁明挖整体式衬砌隧道影响机制的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 324–2 331.(HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, MEN Yuming, et al. Model test study of effect of ground fissure on open-cut metro tunnel with integral lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 324–2 331.(in Chinese))
- [6] 黄强兵, 彭建兵, 樊红卫, 等. 西安地裂缝对地铁隧道的危害及防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 781–788.(HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Hongwei, et al. Metro tunnel hazards induced by active ground fissures in Xi'an and relevant control measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 781–788.(in Chinese))
- [7] 胡志平, 彭建兵, 王启耀, 等. 盾构隧道 600 斜穿地裂缝的变形破坏机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 176–183.(HU Zhiping ,PENG Jianbing ,WANG Qiyao ,et al. Modeling test research on failure mechanism of shield tunnel crossing ground fissure with 600[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 176–183.(in Chinese))
- [8] 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.(in Chinese))
- [9] 冷 葳, 孙 强. 地震作用下结构失稳诱发的塌陷和地裂缝机理分析[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 23–26.(LENG Wei, SUN Qiang. Analysis of mechanism of collapse and ground fissure caused by structure instability under seismic action[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1): 23–26.(in Chinese))
- [10] 陈安国, 姚大全, 张有林, 等. 汶川 8.0 级地震地表破裂[J]. 安徽地质, 2008, 12(4): 287–291.(CHEN Anguo ,YAO Daquan ,ZHANG Youlin, et al. Rupture of the earth in the Ms 8.0 Wenchuan earthquake[J]. Geology of Anhui, 2008, 12(4): 287–291.(in Chinese))
- [11] 张军龙, 申旭辉, 徐岳仁, 等. 汶川 8 级大地震的地表破裂特征及分段[J]. 地震, 2009, 29(1): 149–163.(ZHANG Junlong, SHEN Xuhui ,XU Yueren ,et al. Surface rupture features and segmentation in the Ms 8.0 Wenchuan earthquake[J]. Earthquake, 2009, 29(1): 149–163.(in Chinese))
- [12] 程 丰, 李德威, JERRY B, 等. 玉树地震地表破裂特征及其破裂方式[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(1): 69–75.(CHENG Feng, LI Dewei, JERRY B, et al. Characteristics and patterns of surface ruptures caused by the Yushu earthquake[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2012, 36(1): 69–75.(in Chinese))
- [13] 刘 科. 河北平原地区地震地裂缝活动的相关性分析[J]. 华北地震科学, 2008, 26(4): 45–50.(LIU Ke. The correlation analysis of earthquakes and ground fissures activity in Heibei Plain[J]. North China Earthquake Sciences, 2008, 26(4): 45–50.(in Chinese))
- [14] 黄润秋, 李为乐. “5.12” 汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2 586–2 592.(HUANG Ruiqiu ,LI Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2 586–2 592.(in Chinese))
- [15] 杨林德, 季倩倩, 杨 超, 等. 地铁车站结构振动台试验中传感器位置的优选[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 619–623.(YANG Linde, JI Qianqian ,YANG Chao ,et al. Optimization of positions of sensors in shaking table test for subway station structure in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(4): 619–623.(in Chinese))
- [16] 张栋梁, 杨林德, 谢永利, 等. 盾构隧道抗震设计计算的解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 543–549.(ZHANG Dongliang, YANG Linde, XIE Yongli, et al. Analytical solution for a seismic design calculation of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 543–549.(in Chinese))
- [17] 王国波, 杨林德. 上海软土自由场地的三维地震响应分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 326–331.(WANG Guobo ,YANG Linde. 3D seismic response analysis of free-field soft soil in Shanghai[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(4): 326–331.(in Chinese))
- [18] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2002.(JI Qianqian. Shaking table testing on underground metro station structures[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2002.(in Chinese))
- [19] 王国波, 杨林德, 季倩倩. 上海软土地震响应的振动台模型试验及其三维数值拟合分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 27–30.(WANG Guobo, YANG Linde, JI Qianqian. The shaking table model test of seismic response for Shanghai soft soil and three dimensional numerical fitting analysis[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(1): 27–30.(in Chinese))
- [20] 中华人民共和国行业标准编写组. DBJ61—6—2006, J10821—2006 西安地裂缝场地勘察与工程设计规程[S]. 西安: [s. n.], 2006.(The Professional Standards Compilation Group of the People's Republic of China. DBJ61—6—2006, J10821—2006 Specification for site investigation and engineering design on Xi'an ground fractures[S]. Xi'an: [s. n.], 2006.(in Chinese))