

DOI: 10.11779/CJGE201803016

地裂缝场地加速度响应振动台试验研究

熊仲明, 张朝, 霍晓鹏, 陈轩

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 地裂缝对工程结构的安全性影响巨大。在高烈度地区, 若仍采用空间避让原则, 势必浪费有限的土地资源, 制约城市建设与经济发展。为了研究地裂缝场地的动力响应, 使其得到更好的应用, 以西安 f_4 地裂缝为例, 进行地裂缝场地地震动力响应振动台试验研究。试验结果分析表明: 加速度放大系数与输入地震波类型和强度、土层性质和厚度及测点位置等因素有关; 地裂缝场地加速度响应存在上、下盘效应, 地表峰值加速度在裂缝处达到最大, 并向两侧递减, 下盘峰值加速度衰减速率比上盘快; 裂缝两侧测点的加速度峰值存在时间差, 上盘加速度变化频率较快。其研究成果将为地裂缝场地的工程应用提供参考。

关键词: 地裂缝; 振动台试验; 加速度响应

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)03 - 0520 - 07

作者简介: 熊仲明(1966 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隔震减震控制、土-结构共同作用、大跨结构理论及试验研究等。E-mail: xiong_zhongming@yahoo.com.cn。

Shaking table tests on acceleration response of ground fissure site

XIONG Zhong-ming, ZHANG Chao, HUO Xiao-peng, CHEN Xuan

(College of Civil Engineering, Xi'an University Of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The ground fissure has brought severe damages to the engineering structures. In the area of high seismic intensity, if the spatial avoidance principle is still adopted, it will be bound to waste the land resources and restrict the urban construction. In order to study the dynamic response of ground fissure sites, taking the ground fissure of f_4 in Xi'an city as an example, the model test for the ground fissure site is carried out by means of the shaking table based on the laminar shear box. The test results show that the acceleration amplification factor is related to the type and intensity of input seismic waves, the properties and thickness of soil layers and the location of measuring points. Furthermore, the ground fissure site has hanging-wall/footwall effect. All the peak ground accelerations of the hanging-wall and footwall reach the maximum at the site of the fissure, they decrease from the fissure to the sides, and the rate of the hanging-wall peak acceleration attenuation is slower than that of the footwall. At the same time, the peak ground acceleration of the fissure at both sides has the time difference, and the acceleration change frequency of hanging-wall is faster than that of the footwall. The results may provide references for the engineering application of ground fissure sites.

Key words: ground fissure site; shaking table test; acceleration response

0 引言

地裂缝是地表岩石、土体在自然环境或人为因素下形成裂缝的地质现象。20世纪以来, 人类大规模的生产活动使现代地裂缝出现且日益严重。自1929年Leonard^[1]发现地裂缝至今, 世界上许多国家的学者不同程度地对地裂缝灾害进行了研究, 主要集中在地裂缝的成因机理^[2-5]、空间分布规律和活动特征等方面^[6-10]。近年来, 随着地裂缝场地的工程应用, 地裂缝区地下管道、地铁隧道等建设措施相继被提出^[11-16]。

但地裂缝场地的地震动力响应及地表地震动参数的研究至今仍是地裂缝研究中很少涉及的一个难题。

目前也几乎没有强震发生时有关地裂缝场地地表峰值加速度(PGA)地震动的数据记录和震害统计数据可供参考。因此, 开展地裂缝场地地震动力响应试验研究显得尤为迫切, 且具有重要的工程实用价值。

本文以西安 f_4 地裂缝场地为研究对象, 对地裂缝场地地表的地震动动力响应规律开展振动台模型试验研究, 其结果对于西安地裂缝场地工程建设的抗震设计以及西安城市建设用地规划都具有重要的理论和实际

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278395); 住房和城乡建设部科学技术项目(2016-k5-044)

收稿日期: 2016 - 11 - 18

意义。

1 模型振动台试验

1.1 试验概况和模型参数

以西安 f₄ 地裂缝为研究对象, 根据地裂缝地质构造特征, 并考虑地裂缝上、下盘破坏区宽度及试验设备承载力等因素, 确定土体模型尺寸为 3 m(长) × 1.5 m(宽) × 1.5 m(高), 裂缝倾角设置为 80°, 如图 1 所示。模型土体剖面各土层的物理力学性质指标如表 1 所示。3 种土质在围压 $\sigma_c=200$ kPa 下的动力特征曲线, 如图 2 所示。

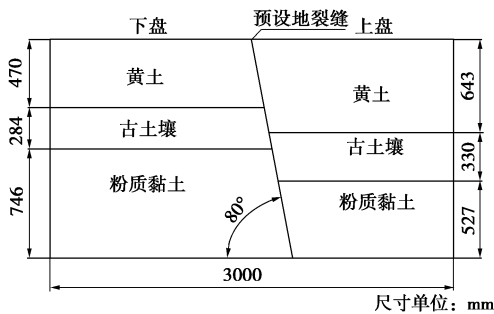
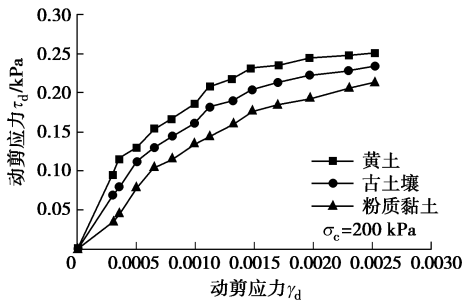
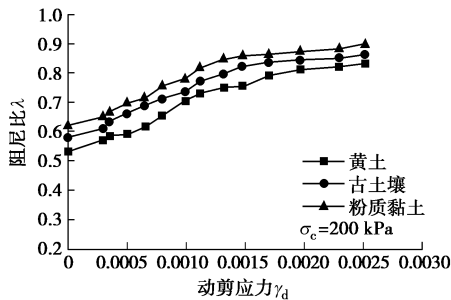


图 1 试验土体模型剖面图

Fig. 1 Profile of test model



(a) 动剪应力 - 剪应变关系



(b) 阻尼比 - 剪应变关系

图 2 不同土质动力特征曲线

Fig. 2 Dynamic characteristic curves of different soils

为更好地模拟土体振动时的剪切变形, 同时减弱土箱带来的边界效应, 采用 13 层剪切型土箱来模拟土体边界条件, 土箱内径尺寸为 3 m × 1.5 m × 1.5 m, 如图 3 所示。为防止土粒和水在模型制作及试验过程中

渗漏, 模型土箱内壁铺设一层 2 mm 厚的橡胶内衬。为了满足土体边界条件, 根据文献[17], 本文选择的橡胶泡沫塑料板弹性模量为土体弹性模量的 2.5 倍。

表 1 模型各层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土层	含水率 /%	饱和度 /%	重度 / (kN·m ⁻³)	内聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	压缩模量 / MPa	弹性模量 / MPa
黄土	23.5	67	16.8	6.40	27.6	1.07	39.48
古土壤	22.9	75	17.8	6.53	27.3	0.90	49.83
粉质黏土	25.2	91	19.0	6.00	26.6	0.94	58.37

注: 泊松比 $\nu=0.34$ 。

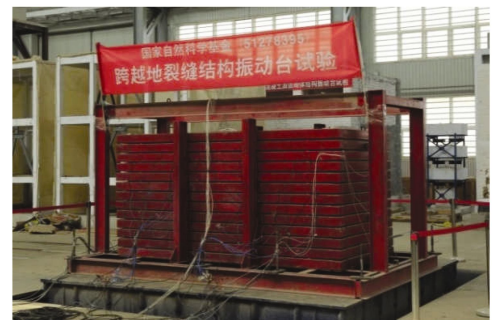


图 3 层状剪切模型土箱

Fig. 3 Soil box of test model

土体模型制作采用分层填装、夯实的方法, 通过控制每层的含水率和密度配置模型土。在填装前用 20 mm 木板按裂缝倾角固定在地裂缝位置, 每次填装的高度为 150 mm, 上、下盘同时采用夯土器均匀压密。填装压实后抽出木板在裂缝中填充细粉砂与熟石灰的混合物, 每层压密后将土层表面打毛, 保证上下两层土之间较好的黏结。

1.2 模型相似关系

试验模型几何相似比 S_L 选定为 1/15, 根据 Buckingham π 定理并结合振动台动力性能, 推导出其他物理量的动力相似关系, 见表 2。

表 2 模型参数相似比

Table 2 Similarity ratios of model parameters

物理参数	相似比	物理参数	相似比
长度 S_L	0.0667	内摩擦角 S_ϕ	1
密度 S_ρ	1	位移 S_u	0.0667
弹性模量 S_E	0.1667	加速度 S_a	2
应力 S_σ	0.1333	速度 S_v	0.3652
内聚力 S_c	0.1333	时间 S_t	0.1826
应变 S_ϵ	1	频率 S_f	5.4772

1.3 试验测点布置

本试验在西安建筑科技大学结构抗震实验室进行, 地震模拟振动台采用美国 MTS 公司生产的 4 m × 4 m 三维六自由度振动台触发体系。为研究地裂缝两侧

的加速度变化规律, 本试验加速度计和位移计布置如图4所示。试验中采用的仪器包括动态信号采集仪、加速度计(41个)、位移计(3个)。

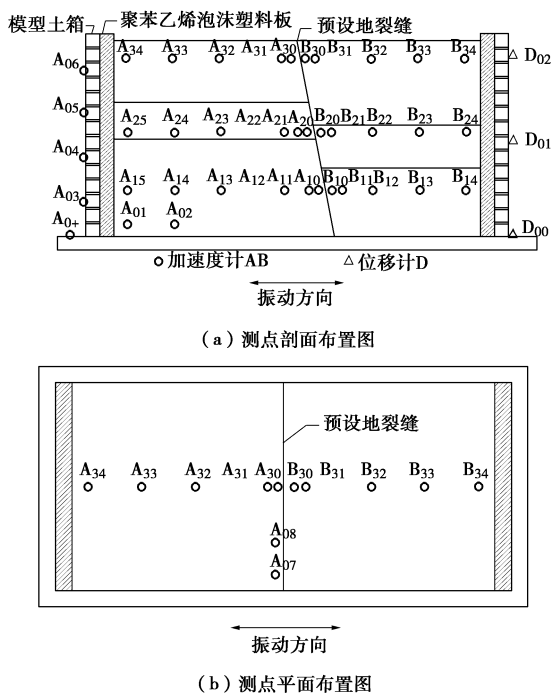


图4 测点布置图

Fig. 4 Layout of measuring points

其中, 加速度计是采用PCB公司生产的压电陶瓷微型感应耦合等离子体加速度计。试验过程中, 将加速度传感器均固定在有机玻璃盒中, 并包裹数层保鲜膜防止渗水。

1.4 输入地震波的选用及加载工况

根据试验目的及西安场地类别, 本次试验选取江油波、El-Centro波和基岩波作为振动台试验的地震波

输入。这3种波均属于II类场地的南北向地震波, 前两种波为地表波, 后一种是基岩波。为考虑土体对地震波频谱成分影响, 本次试验特地选取一条基岩波作为地震输入^[18]。3条地震波的基本特性如下:

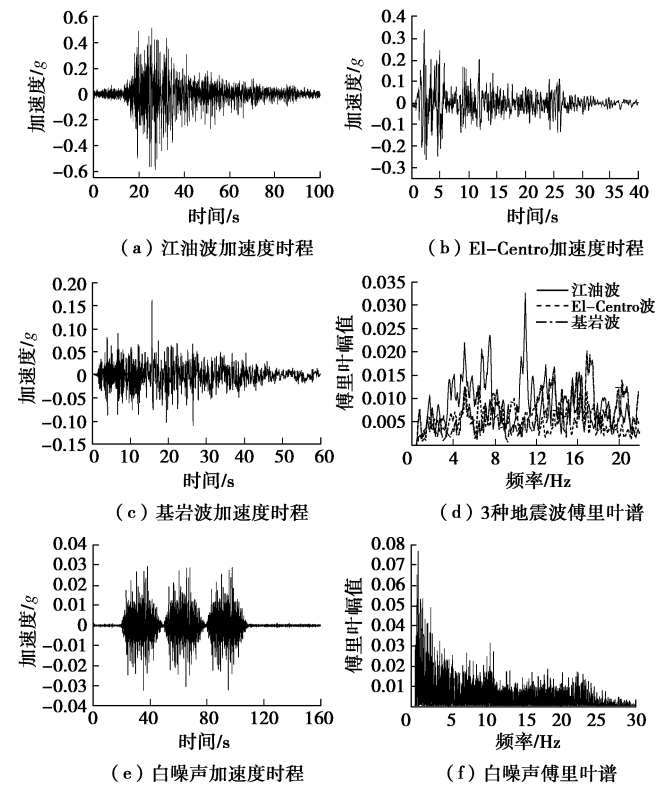


图5 输入地震波及白噪声频谱

Fig. 5 Spectra of input seismic waves and white noise

(1) 江油波: 是2008年5月12日发生在中国四川省汶川县境内的8.0级特大地震, 由江油地震台记录的地震动, 峰值加速度为 5.97 m/s^2 , 持时101.995s, 卓越频率为2.50Hz。

表3 试验工况

Table 3 Test conditions

工况序号	试验工况	地震烈度	工况序号	试验工况	地震烈度
S1	白噪声 0.05g		S16	基岩波 0.4g	8度基本烈度
S2	江油波 0.1g	6度基本烈度	S17	白噪声 0.05g	
S3	El-Centro波 0.1g	6度基本烈度	S18	江油波 0.6g	8度罕遇烈度
S4	基岩波 0.1g	6度基本烈度	S19	El-Centro波 0.6g	8度罕遇烈度
S5	白噪声 0.05g		S20	基岩波 0.6g	8度罕遇烈度
S6	江油波 0.2g	7度基本烈度	S21	白噪声 0.05g	
S7	El-Centro波 0.2g	7度基本烈度	S22	江油波 0.8g	9度基本烈度
S8	基岩波 0.2g	7度基本烈度	S23	El-Centro波 0.8g	9度基本烈度
S9	白噪声 0.05g		S24	基岩波 0.8g	9度基本烈度
S10	江油波 0.3g	7度罕遇烈度	S25	白噪声 0.05g	
S11	El-Centro波 0.3g	7度罕遇烈度	S26	江油波 1.2g	9度罕遇烈度
S12	基岩波 0.3g	7度罕遇烈度	S27	El-Centro波 1.2g	9度罕遇烈度
S13	白噪声 0.05g		S28	基岩波 1.2g	9度罕遇烈度
S14	江油波 0.4g	8度基本烈度	S29	白噪声 0.05g	
S15	El-Centro波 0.4g	8度基本烈度			

(2) El-Centro 波: 是 1940 年 5 月 18 日美国加州 Imperial V Alley 地震记录南北方向分量, 峰值加速度为 3.42 m/s^2 , 持时 53.73 s, 主周期为 0.2 s 和 0.52 s, 卓越频率为 1.79 Hz。

(3) 基岩波: 1992 年 4 月 25 日在加州北部海岸地区发生里氏 6.9 级地震, 采用该地震库中记录的一条基岩波, 峰值加速度为 1.65 m/s^2 , 持时 59.96 s, 卓越频率为 4.55 Hz。3 种地震波及白噪声加速度时程和傅里叶谱如图 5 所示。

在试验中, 输入地震波的峰值是依照相似关系, 根据《建筑抗震设计规范》^[19]的地震震中烈度加速度值进行调整。输入地震波的峰值采用分级递增输入, 每级输入后经 0.05g 的白噪声扫频, 以观察模型体系的动力特性变化, 详细试验工况见表 3 所示。

2 试验结果分析

2.1 地裂缝场地自振频率及阻尼比分析

表 4 是地裂缝场地的自振频率 f 及阻尼比 ζ 。从表 4 可以看出, 加载前土体模型自振频率分别为 11.41 Hz, 阻尼比为 4.8%, 随着输入地震波的峰值增大, 模型损伤不断发展, 自振频率减小, 阻尼比增大。

表 4 模型自振频率及阻尼比

Table 4 Frequencies and damping ratios of soils		
工况	f/Hz	$\zeta/\%$
S1	11.41	4.8
S5	10.94	5.6
S9	10.23	6.4
S13	10.23	7.4
S17	9.61	7.4
S21	9.38	7.8
S25	8.75	8.1
S29	8.05	9.1

2.2 地表正负向峰值加速度变化规律

图 6 是地裂缝场地地表正负峰值加速度变化曲线。由图 6 可以看出, 地裂缝场地上盘峰值加速度大于下盘峰值加速度, 而且上盘的影响范围比下盘大, 存在明显的上、下盘效应; 从加速度正、负峰值曲线看, 地表峰值加速度在地裂缝处达到最大, 并且沿着裂缝向两侧逐渐衰减。

同时, 不同频谱特性的地震波引起的地裂缝场地地震动力响应也是不同的。同一工况中, 江油波各测点地表峰值加速度远远大于其他两种地震波对应测点, 基岩波地表峰值加速度最小。输入地震波卓越频率大小顺序为: 基岩波 (4.55 Hz) > 江油波 (2.50 Hz) > El-Centro 波 (1.79 Hz), 但是, 在输入激励大小相同的情况下, 加速度放大程度大小顺序为: 江油波 >

El-Centro 波 > 基岩波。

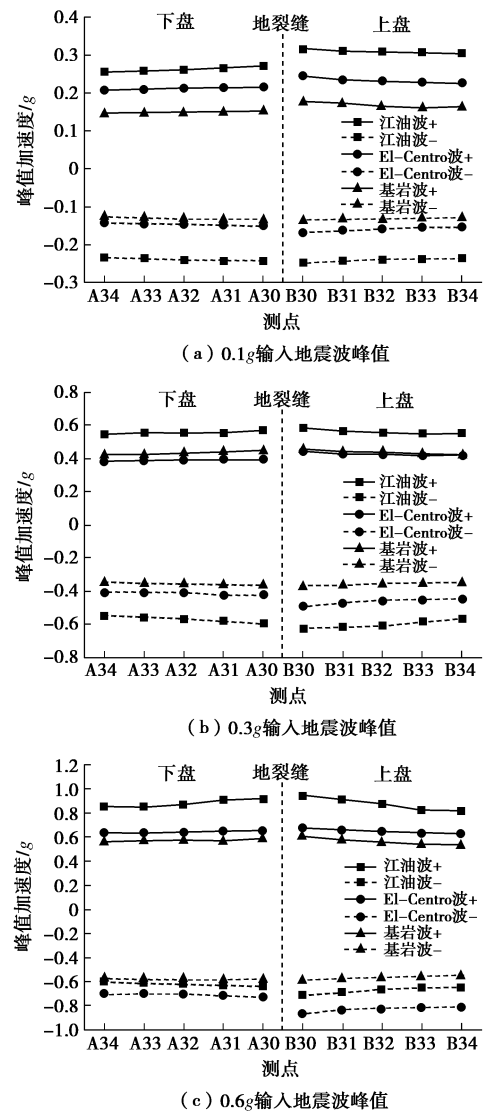


图 6 地裂缝场地地表加速度正负峰值曲线

Fig. 6 Curves of positive and negative PGAs of ground fissures

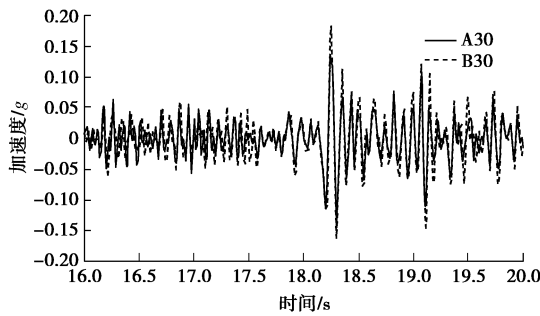
出现这一现象是由于地震站记录的地震波通常是在地表采集的, 在此过程中地震波的频率成分已经被土体过滤或放大, 低频成分增强, 高频成分减弱, 频谱特性已经改变。但是, 在做试验过程中, 却将已经改变频谱成分的地震波再次作用在土体底部, 这时低频成分再次增强, 高频成分再次减弱, 就会导致地表波加速度放大程度更大。

2.3 地表加速度时程曲线

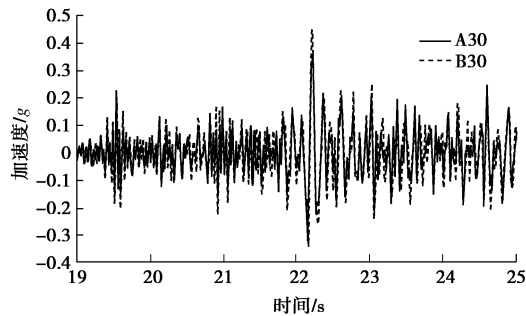
图 7 是不同工况作用下, 地裂缝两侧测点 A30、B30 的加速度时程曲线。其中, A30 埋置在下盘裂缝处, B30 埋置在上盘裂缝处。

通过图 7 可以看出, 上、下盘地裂缝处的加速度数值大小不同, 下盘测点对应时刻的峰值加速度明显小于上盘; 加速度波形曲线线性差异较大, 并且上盘加速度时程曲线与零线相交次数比下盘较多, 上盘加

速度变化频率较快。



(a) 0.1g基岩波A30、B30测点加速度时程曲线



(b) 0.3g基岩波A30、B30测点加速度时程曲线

图7 A30、B30测点加速时程对比曲线

Fig. 7 Time-history curves of acceleration at measuring points A30, B30

在 0.1g 基岩波作用下，下盘测点峰值加速度为 0.16g，对应时刻为 18.3000 s；上盘测点峰值加速度为 0.18g，对应时刻为 18.2500 s。在 0.3g 基岩波作用下，下盘测点峰值加速度为 0.36g，对应时刻为 22.2250 s；上盘测点峰值加速度为 0.45g，对应时刻为 22.2125 s。上、下盘测点峰值存在时间差，且上盘加速度达到峰值的时间比下盘较早。由此可见，地裂缝的存在对地震波在岩土体内的传播有一定的影响。

2.4 正负向加速度最大放大系数

表 5 是不同工况下正负加速度最大放大系数。其中，加速度放大系数定义为测点峰值加速度与输入峰

值加速度的比值 $\alpha = |A|_{\max} / |A|_{\max \text{输入}}$ 。

从表 5 可以看出，随着输入地震波峰值的增大，加速度放大系数逐渐减小。江油波的 α 减小幅度最大，由 6.323 减小到 1.556，减小 4.064 倍；El-Centro 波减小幅度次之，由 4.872 减小到 1.499，减小 3.250 倍；基岩波减小幅度最小，由 3.489 减小到 1.239，减小 2.816 倍。

在整个试验测试结果中，放大系数最大值出现次数最多的测点为 B30，出现最大值 26 次，占总次数的 61.9%；测点 A34 出现最大值 7 次，占总次数的 16.7%；测点 B33 出现最大值 6 次，占总次数的 14.3%；测点 A30 出现最大值 3 次，占总次数的 7.1%，其余测点均未出现最大值。测点加速度放大系数最大值普遍出现在上盘，出现在下盘的比例仅为 23.8%。所以在实际工程中，对处于上盘的结构需要强化设计，尤其对邻近地裂缝两侧的结构需要注意。

2.5 各土层加速度放大系数变化规律

为研究地裂缝场地不同土层的加速度响应，将各测点加速度放大系数绘制成曲线，由于 B10 传感器损坏，所以不作分析，如图 8 所示。其中，图 8 (a) 是黄土层加速度放大系数曲线；图 8 (b) 是古土壤层加速度放大系数曲线；图 8 (c) 是粉质黏土层加速度放大系数曲线。

由图 8 (a) 可以看出，加速度上、下盘效应在地表响应明显，上盘测点加速度放大系数比下盘对称测点的大，加速度放大系数呈 Z 字型分布。同时，地表加速度放大系数都大于 1。

由图 8 (b) 可以看出，加速度放大系数不再遵循上述规律。总体来看，场地上盘加速度放大系数比下盘较大，但分布规律不是十分明显。

由图 8 (c) 可以看出，在不同工况下，粉质黏土层裂缝两侧测点 A10 的加速度放大系数比测点 A11 较大。除个别测点外，离地裂缝越近，放大系数越大，

表 5 不同正负加速度最大放大系数 α

Table 5 Maximum amplification factors of different input ground motions

地震波幅值	江油波 α		El-Centro 波 α		基岩波 α	
	+	-	+	-	+	-
0.1g	6.323	5.094	4.872	3.368	3.489	2.881
0.2g	4.080	4.698	3.582	3.153	3.177	2.497
0.3g	3.904	4.176	3.063	3.294	3.101	2.488
0.4g	3.611	3.360	2.801	3.476	2.814	2.570
0.6g	3.142	2.368	2.254	2.991	2.036	1.991
0.8g	2.190	2.299	2.161	2.549	1.606	1.714
1.2g	1.556	1.691	1.499	1.469	1.239	1.612
减少倍数	4.064	3.012	3.250	2.293	2.816	1.787

加速度放大系数以地裂缝为中心呈倒 V 字型分布。

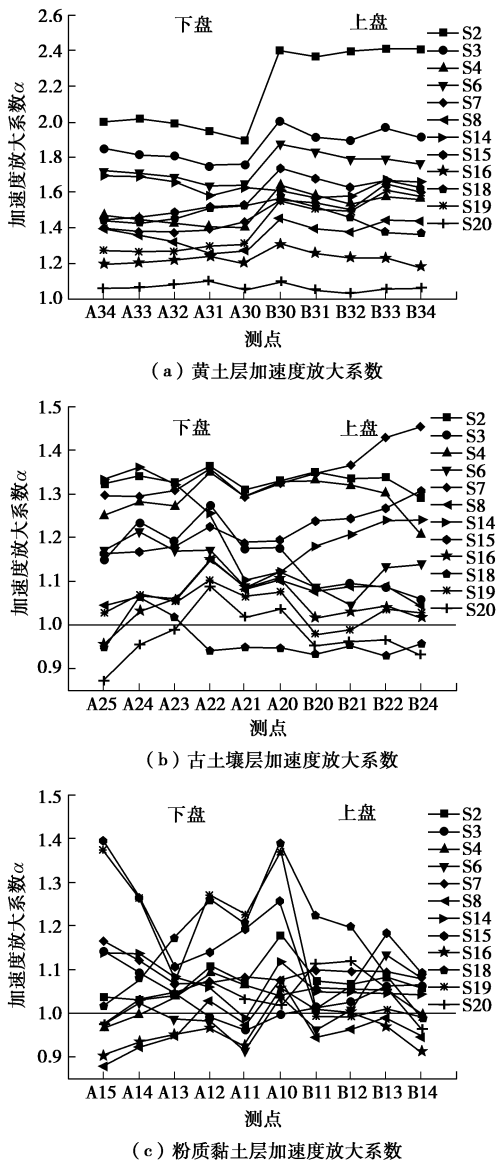


图 8 不同土层加速度放大系数曲线

Fig. 8 Amplification factors of acceleration of soil layers

不同土层加速度放大系数的变化规律不一致, 这与模型土体动力特性有关, 粉质黏土含水率高, 其抗剪强度及剪切模量较小, 阻尼比较大, 从而土层水平剪切作用难以向上传递, 加速度响应的增长幅度减小。并且输入地震波频谱特性和强度、土层性质和厚度均对地裂缝场地加速度放大系数影响较大。

3 结 论

本文以西安 f_4 地裂缝为例, 采用 13 层剪切型模型土箱, 进行地裂缝场地地震动力响应振动台试验, 分析了地裂缝场地加速度及其放大系数的变化规律, 得出以下结论:

(1) 试验结果表明, 地裂缝场地地表峰值加速度

在地裂缝处达到最大, 并从地裂缝处向两侧递减, 且上盘峰值加速度的衰减较下盘缓慢。从峰值加速度这一指标来看, 上盘影响范围比下盘大。

(2) 试验结果表明, 上、下盘测点峰值存在时间差, 上盘加速度达到峰值的时间比下盘较早, 且上盘加速度变化频率较快。

(3) 试验结果表明, 输入地震波峰值相同的情况下, 地表波产生的地表加速度放大响应较基岩波明显。

(4) 试验结果表明, 输入地震波类型和强度、土层性质和厚度及测点位置均对地裂缝场地加速度放大系数影响较大。加速度放大系数最大值在上盘出现次数较多, 在结构设计分析时需要对上盘结构进行加固。

参考文献:

- [1] LEONARD R J. An earth fissure in Southern Arizona[J]. Journal of Geology, 1929, **37**: 765 - 774.
- [2] HOLZER L T. Ground failure induced by groundwater withdrawal from unconsolidated sediment[J]. Engineering Geology, 1984, **6**: 67 - 105.
- [3] PENG J B, XU J S, MA R Y, et al. Characteristics and mechanism of the Longyao ground fissure on North China Plain, China[J]. Engineering Geology, 2016, **214**(30): 136 - 146.
- [4] XU L Q, LI S Z, CAO X Z, et al. Holocene intracontinental deformation of the northern North China Plain: evidence of tectonic ground fissures[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, **119**(1): 49 - 64.
- [5] LIU H, DENG K Z, LEI S G, et al. Mechanism of formation of sliding ground fissure in loess hilly areas caused by underground mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, **25**(4): 553 - 558.
- [6] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论分析与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000. (WANG Jing-ming. Theory of ground fissures hazards and its application[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [7] LEE C F, ZHANG J M, ZHANG Y X. Evolution and origin of the ground fissures in Xian, China[J]. Engineering Geology, 1996, **43**: 45 - 55.
- [8] 李永善. 西安地裂缝及渭河盆地活断层研究[M]. 北京: 地震出版社, 1992. (LI Yong-shan. Research on ground fissures in Xi'an region and active faults in Weihe basin[M]. Beijing: Seismic Press, 1992. (in Chinese))
- [9] 彭建兵. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992. (PENG Jian-bing. Active faults and geological hazards in Weihe basin[M]. Xi'an: Northwest

- University Press, 1992. (in Chinese))
- [10] 张家明. 西安地裂缝研究[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990. (ZHANG Jia-ming. Research on ground fissures in the region of Xi'an[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990. (in Chinese))
- [11] 贺凯, 彭建兵, 黄强兵, 等. 近距离平行通过地裂缝的地铁隧道模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 2): 4086 - 4095. (HE Kai, PENG Jian-bing, HUANG Qiang-bing, et al. Simulation test of metro tunnel parallels ground fissure with short distance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S2): 4086 - 4095. (in Chinese))
- [12] 刘妮娜, 彭建兵, 韩冬冬, 等. 穿越活动地裂缝地铁隧道震害机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(7): 1384 - 1391. (LIU Ni-na, PENG Jian-bing, HAN Dong-dong, et al. Mechanism of seismic damage of metro tunnels through active ground fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(7): 1384 - 1391. (in Chinese))
- [13] 范文, 邓龙胜, 彭建兵, 等. 地铁隧道穿越地裂缝带的物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(9): 1917 - 1923. (FAN Wen, DENG Long-sheng, PENG Jian-bing, et al. Study on the physical model experiment of subway tunnel crossing the ground fissure belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(9): 1917 - 1923. (in Chinese))
- [14] 黄强兵, 彭建兵, 邓亚虹, 等. 西安地铁2号线隧道穿越地裂缝带的设防参数[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2882 - 2888. (HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, DENG Ya-hong, et al. Design parameters of Xi'an metro line 2 tunnel passing through active ground fissure zones[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2882 - 2888. (in Chinese))
- [15] 黄强兵, 彭建兵, 石玉玲, 等. 地裂缝活动对地铁区间隧道地层应力与位移影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(10): 1525 - 1532. (HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, SHI Yu-ling, et al. Experimental study on effect of active ground fissures on stress and displacement change laws of strata near metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(10): 1525 - 1532. (in Chinese))
- [16] 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 Qiang-bing, PENG Jian-bing, FAN Hong-wei, 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))
- [17] 楼梦麟, 王文剑, 朱彤, 等. 土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J]. 地震工程与工程振动, 2000(4): 30 - 36. (LOU Meng-lin, WANG Wen-jian, ZHU Tong, et al. Soil lateral boundary effect in shaking table model test of soil-structure system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000(4): 30 - 36. (in Chinese))
- [18] 康帅, 楼梦麟, 殷琳, 等. 不同地震波输入机制下的结构振动台模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, **39**(9): 1273 - 1279. (KANG Shuai, LOU Meng-lin, YIN Lin, et al. Different input mechanism of seismic on shaking table test[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, **39**(9): 1273 - 1279. (in Chinese))
- [19] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))