

地震作用下地裂缝场地的动力响应研究

熊仲明, 王艺博, 龚宇森, 张 潮

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 地裂缝对建筑结构的破坏是巨大的. 随着西安地裂缝活动已趋于稳定和城市发展的需要, 对地裂缝场地的利用提出了新的要求. 针对地裂缝场地地震效应研究的不足, 采用有限元法对西安某地裂缝场地进行模拟分析, 研究了地震作用下输入地震动的强度、峰值位移及峰值加速度等因素对地裂缝场地地表峰值加速度的影响, 定量地分析了地裂缝场地放大效应及上下盘作用效应, 找出了地裂缝场地的动力响应规律, 为地裂缝场地工程结构的抗震设防提供了依据.

关键词: 地裂缝场地; 动力响应; 地裂缝带; 放大效应; 上下盘效应

中图分类号: TU 435

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)03-0309-07

Research on seismic response of ground fissure site under earthquake

XIONG Zhongming, WANG Yibo, GONG Yusen, ZHANG Chao

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: A construction can be greatly damaged by the ground fissure. As the ground fissure in Xi'an has been stabilized and the need of country development, new requirements on the use of ground fissure sites have been put forward. As the lack of researches on the seismic effect, finite element method was used in the paper to simulate and analyze a ground fissure site in Xi'an. The peak acceleration affected by different direction of peak intensity, peak displacement and acceleration of seismic wave were analyzed. The "amplification-effect" and "hanging wall and footwall effect" were quantitatively analyzed and the seismic response of the ground fissure sites were found. A basis on the research of earthquake resistance of engineering structures on the ground-fissure site was provided.

Key words: ground fissure site; seismic response; ground fissure bolt; amplification-effect; hanging wall and footwall effect

西安是我国乃至世界上地裂缝最为发育、灾害最为严重的地区. 近年来, 随着西安地裂缝活动已趋于稳定和城市发展的需要, 对地裂缝场地的利用提出了新的要求. 现已投入运营及正在修建的西安地铁线路均跨越地裂缝建设, 对地裂缝场地上空间的利用也在探索当中.

有关地裂缝分布规律、活动特性、成因机理和防治措施等相关问题的研究现已硕果累累, 但地裂缝场地的地震动力效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, 同时也几乎没有强震发生时有关地裂缝场地地震动的实际记录数据和震害统计数据可供研究参考. 因此, 在地裂缝密集分布的西安地区开展地裂缝场地地震动力响应研究显得尤为迫切, 而且具有重要的工程实用价值.

关于地震作用下地裂缝场地特性的研究, 刘妮娜^[1]进行了振动方向平行单条地裂缝场地的振动台模型试验; 刘安龙^[2]进行了振动方向垂直“y”形地裂缝场地的振动台模型试验; 慕焕东^[3]进行了振动

方向垂直单条地裂缝场地的振动台模型试验. 试验结果表明: 随着与地裂缝距离的增大, 地表峰值加速度呈减小趋势, 上盘影响范围略大于下盘, 与普通场地相比表现出明显的差异. 但这些研究对地裂缝场地的地震动力效应及地表地震动参数的研究还较少, 缺乏工程的实用性.

对此, 通过对西安市唐延路地下人防工程处的 f₄ 地裂缝场地进行数值分析, 就地裂缝场地的地震动力响应进行系统研究, 定量地分析了地裂缝场地放大效应及上下盘作用效应. 其成果对于西安地裂缝场地工程建设的抗震安全性以及西安城市建设用地规划都具有重要的理论和实际意义.

1 有限元模型的建立

1.1 土层参数

以西安市唐延路地下人防工程处的 f₄ (简称西北大学~西北工业大学地裂缝) 地裂缝场地为研究对象, 运用 ABAQUS 有限元软件, 采用平面应变单元模拟实际地裂缝场地. 根据《西安地裂缝场地勘察

与工程设计规程》^[4]的地裂缝影响宽度及边界效应的影响,选取尺寸为200 m(长)×96 m(深),倾角为80°的场地进行分析和计算.关于土层厚度的划分,过去并没有严格的说法.本文根据以往的模拟经验及实际土层参数,对土层厚度的划分从上往下逐渐增大,共分成十四层,最小为2 m,最大为12 m,其中底层厚度为1 m,用以模拟岩石层及更好地传播地震波.

模型20 m以内土层的材料参数根据唐延路地下人防工程《岩土工程地勘报告》^[5]确定,其它土层的材料参数参照陕西省信息大厦设计资料^[6]确

定.土的本构模型采用线性DruckerPrager模型,需定义子午面上的倾角 β 、剪胀角 ψ 和屈服应力 σ ,具体参数见表1,建立的模型如图1所示.

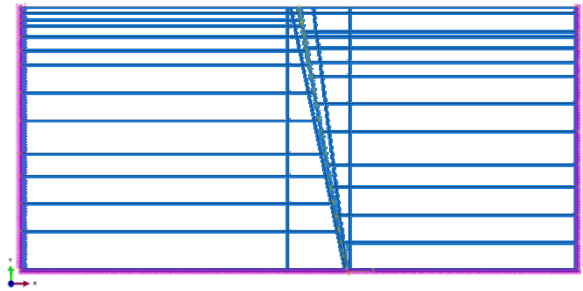


图1 地裂缝场地有限元模型
Fig.1 Finite element model of ground fissure site

表1 土层材料参数
Tab.1 Material parameter of the soil

土层号	深度/m	密度/kg·m ⁻³	泊松比	$\beta/^\circ$	$\psi/^\circ$	$\sigma/\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$
1	0~2	1 600	0.35	38.7	9.3	33 516
2	2~9	1 720	0.35	37.9	9.0	55 106
3	9~11	1 680	0.34	38.4	9.2	57 131
4	11~15	1 780	0.34	38.1	9.1	64 978
5	15~20	1 900	0.34	37.5	8.9	74 879
6	20~25	1 960	0.32	37.5	8.9	74 879
7	25~35	1 990	0.27	38.3	9.2	61 864
8	35~45	1 990	0.3	38.7	9.3	52 668
9	47~57	1 990	0.33	42.8	11	36 512
10	57~65	1 990	0.3	41.3	10.3	75 837
11	65~75	1 990	0.3	42.8	11	398 314
12	75~85	2 000	0.3	43.5	11.3	108 881
13	85~95	2 000	0.3	44.2	11.7	83 251

1.2 单元网格划分

有限元法的基本思路可以归结为:将连续系统分割成有限个分区或单元,对每个单元提出一个近似解,再将所有单元按标准方法组合成一个与原有系统近似的系统.使用时域有限元分析常会在体系离散化后引起两种不利的效应:一种是“低通效应”,另一种是“频散效应”,必须控制划分单元网格大小以保证数值模拟的精度要求.王松涛^[7]指出,考虑上、下方向传播的剪切波,单元高度可取为:

$$h \leq (1/5 \sim 1/8) \lambda_s \tag{1}$$

式中: $\lambda_s = v_s / f_{\max}$, 为波长; v_s 为剪切波速; f_{\max} 为截取的最大波动频率.单元水平方向长度可比高度方向尺寸大一些,取决于土层情况,一般取 (3~5) h_{\max} .

根据场地及地震波的特性,本文 v_s 取为197 m/s, f_{\max} 取为30 Hz. 则:

$$h \leq (1/5 \sim 1/8) \frac{v_s}{f_{\max}} = (1/5 \sim 1/8) \frac{197}{30} = (1.3 \sim 0.82) \text{ m}$$

取 $h=1\text{m}$, 共划分19 337个单元.

1.3 边界条件

用有限元软件分析场地地震反应时,需从半无限的地球介质中切取感兴趣的有限计算区域.在切取的边界上需建立人工边界以模拟连续介质的辐射阻尼,以保证非均匀土介质中产生的散射波从有限计算区域内部穿过人工边界而不发生反射.本文模型按刘晶波^[8]研究成果确定粘弹性人工边界,其基本思想是在人工边界上设置弹簧-阻尼器系统.法向与切向的弹簧刚度和阻尼系数按下式取值:

$$K_{\text{BN}} = \alpha_N \frac{G}{R}, \quad C_{\text{BN}} = \rho c_p \tag{2}$$

$$K_{\text{BT}} = \alpha_T \frac{G}{R}, \quad C_{\text{BT}} = \rho c_s \tag{3}$$

式中: K_{BN} 、 K_{BT} 分别为弹簧法向与切向刚度; R 为波源至人工边界点的距离; c_s 、 c_p 分别为S波和P波波速; G 为介质剪切模量; ρ 为介质质量密度; α_N

与 α_t 分别为法向与切向粘弹性人工边界修正系数. 模型土体粘弹性边界条件参数取值见表2, 建立粘弹性边界后的模型如图1所示.

2 地震动的输入

地震动记录是场地地震反应研究的基础. 以往对地裂缝场地的地震效应研究, 基本上都是根据场地类别、地震分组选出地震波, 再将这地震波输入到模型底部. 然而, 地裂缝场地的深度一般都达几十米或者深至基岩, 根据场地选出的波经过场地的滤波和放大作用后反映了场地的特性, 再将这作为

土体底部的地震波的合理性值得怀疑. 相反, 由于基岩地震波没有经过土体的滤波和放大作用, 且频率范围广, 采用基岩地震波作为深厚土层场地的输入地震动较为合理. 作者从美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 的NGA地震动记录中选取了六条有代表性的水平向自由场基岩场地地震动加速度记录, 震中距为8.5~45.6 km, 所有的地震都是浅震, 计算用基岩地震动见表3. 考虑到土体的放大作用并参考《建筑抗震设计规范》^[9]的说明, 最终地震动的峰值加速度选取为50 gal、100 gal及200 gal, 近似代表多遇地震、设防地震及罕遇地震.

表2 土体边界条件参数
Tab.2 The parameters of the soil boundary condition

边界号	剪切模量 /MPa	剪切波速 /m·s ⁻¹	压缩波速 /m·s ⁻¹	K_n /N·m ⁻¹	C_n /Ns·m ⁻¹	K_t /N·m ⁻¹	C_t /Ns·m ⁻¹
1	62.16	197	410	559 977	656 474	279 989	315 360
2	100.40	242	503	904 481	865 040	452 240	415 552
3	113.74	260	528	1 024 710	887 827	512 355	437 136
4	138.66	279	567	1 249 156	1 009 002	624 578	496 798
5	164.56	294	598	1 482 556	1 135 680	741 278	559 170
6	194.48	315	612	1 752 081	1 120 010	876 041	617 400
7	238.51	346	617	2 148 742	1 227 376	1 074 371	688 938
8	310.49	395	739	2 797 205	1 470 565	1 398 602	786 050
9	341.08	414	822	3 072 775	1 635 560	1 536 388	823 860
10	401.19	449	840	3 614 288	1 671 604	1 807 144	893 510
11	489.57	496	928	4 410 557	1 846 583	2 205 279	987 040
12	570.31	534	999	5 137 946	1 998 045	2 568 973	1 068 000
13	629.44	561	1050	5 670 649	2 099 070	2 835 324	1 122 000
14	720.00	600	1122	6 486 486	2 244 994	3 243 243	1 200 000

表3 计算用地震记录一览表
Tab.3 The seismogram for calculation

地震编号	地震名称	发震时间	记录台站	距离/km	持时/s
P0227	Anza	1980.02.25 10:47	Pinyon	13	10.3
P0514	N.Palm Springs	1986.07.08 09:20	5224 Abza	45.6	11.0
P0559	Chalfant Valley	1986.07.21 14:51	Tinemaha Res	40.6	23.4
P0715	Whittier Narrows	1987.10.04 10:59	24399 Mt Wilson	20.4	15.2
P0806	Cape Mendocino	1992.04.25 18:06	89005 Cape Mendocino	8.5	13.9
P0915	Northridge	1994.01.17 12:31	LA-Wonderland	22.7	19.5

3 地裂缝带的模拟

随着地裂缝的形成和发展, 地裂缝场地上下两盘产生错动并在上下两盘形成了地裂缝带. 根据研究者们所做的有限元分析和地质勘察试验, 地裂缝带土跟非裂缝带土的物理力学性质存在显著的差异, 会对地裂缝场地动力响应的结果有显著影响.

对于地裂缝场地的有限元模拟, 以往研究者们仅通过把场地直接断开, 并考虑上下两盘的接触来

模拟地裂缝, 而没有模拟由于上下盘错动引起的土层结构差异及弱化的地裂缝带土体. 这种处理方法必然使得计算结果有别于实际情况, 即地震作用下上下两盘相互作用 (碰撞) 而产生的力学响应结果. 本文根据文献[10-13]所得成果, 对上盘地表处的地裂缝带宽度取5 m, 下盘取3 m, 地裂缝带从地表到基岩逐渐尖灭; 对地裂缝带土体, 其剪切模量考虑15%劣化来模拟弱化的地裂缝带, 上下两盘的接触面采用硬接触, 切向摩擦系数取为0.3. 为验证

地裂缝带在上下两盘相互作用中所起的作用,分别建立考虑地裂缝带和不考虑地裂缝带的地裂缝场地有限元模型,输入100 gal地震动强度的P0227波

进行试算,地表上下两盘地裂缝处的加速度时程曲线见图2~3.

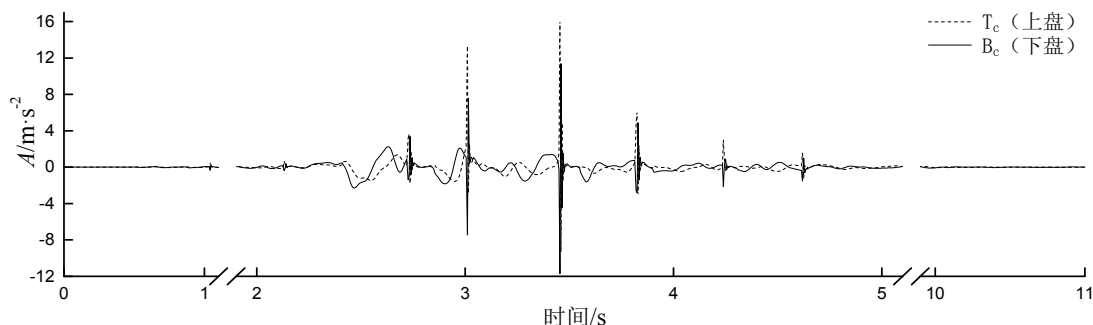


图2 不考虑地裂缝带的加速度时程

Fig.2 Acceleration time history without considering the ground fissure zone

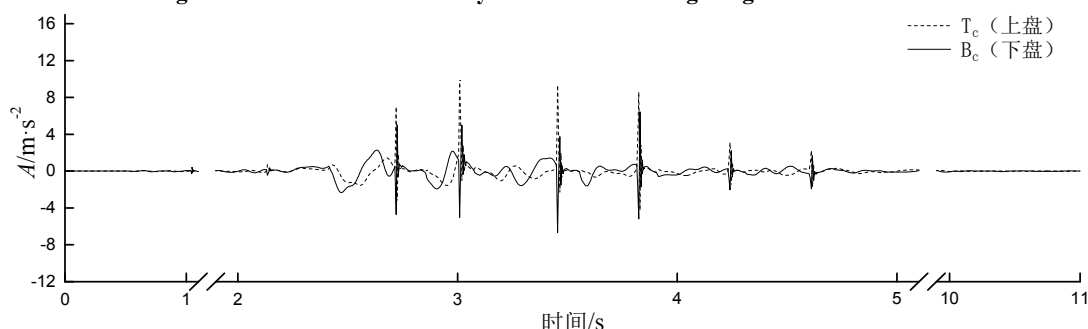


图3 考虑地裂缝带模型的加速度时程

Fig.3 Acceleration time history with considering the ground fissure zone

由图2~3可知,是否考虑地裂缝带的存在并不改变场地地表的加速度时程曲线的形状,但由于弱化的地裂缝带的存在,使得地震荷载作用下上下两盘的峰值加速度较不考虑地裂缝带时减小,地裂缝带对上下两盘的相互碰撞起缓冲作用.因此,过去不考虑地裂缝带的做法会高估地裂缝场地由于上下两盘碰撞引起的加速度放大效应.

4 地裂缝场地的动力效应分析

4.1 监测点布置

根据西安地裂缝《规程》^[4],选取地裂缝两侧各50 m作为监控区域,结合《建筑地基基础设计规范》^[14]中基础埋深不宜小于0.5 m的要求,选取地表下1 m作为监测点.监测点编号示意图如图4所示.

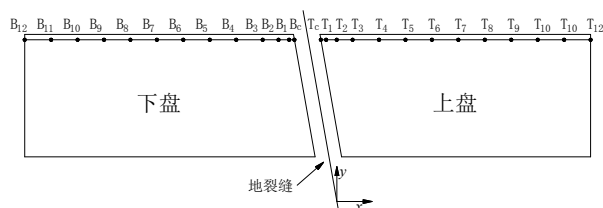


图4 地裂缝场地模型监测点示意图

Fig.4 The monitoring points on the model of the ground fissure site

上下两盘监测点各13个,其具体编号原则为:

上盘地裂缝处的监测点编号为 T_c ,下盘为 B_c ;上盘监测点编号从地裂缝右侧到地裂缝右侧50 m处依次为 $T_1 \sim T_{12}$,下盘检测点从地裂缝左侧到地裂缝左侧50 m处依次为 $B_1 \sim B_{12}$ (监测点编号T代表上盘,B代表下盘,c代表地裂缝).测点 B_1 与 B_c , T_1 与 T_c 的间距为2 m;测点 B_2 与 B_1 , T_2 与 T_1 的间距为3 m;其余测点的间距均为5 m.

4.2 地裂缝场地加速度放大效应研究

根据 $B_1 \sim B_{12}$ 及 $T_1 \sim T_{12}$ 测点的加速度时程曲线,将各测点正向峰值加速度 A_{max} 和负向峰值加速度 A_{min} 绘制成曲线进行分析.图5为不同地震动强度地震波作用下地裂缝场地各测点正负向峰值加速度.由图5可知:各地震波输入下地裂缝场地地表正负向峰值加速度均在地裂缝处最大,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;在地裂缝附近,各地震波输入下地表加速度响应普遍均为上盘的峰值加速度方向沿正向,下盘的峰值加速度沿负向,且上盘的峰值加速度普遍大于下盘的峰值加速度;随着地震动强度的增加,不同地震波作用下各测点峰值加速度的变化规律大不相同,差异较大;另外,从峰值加速度来看,上盘影响范围比下盘大.

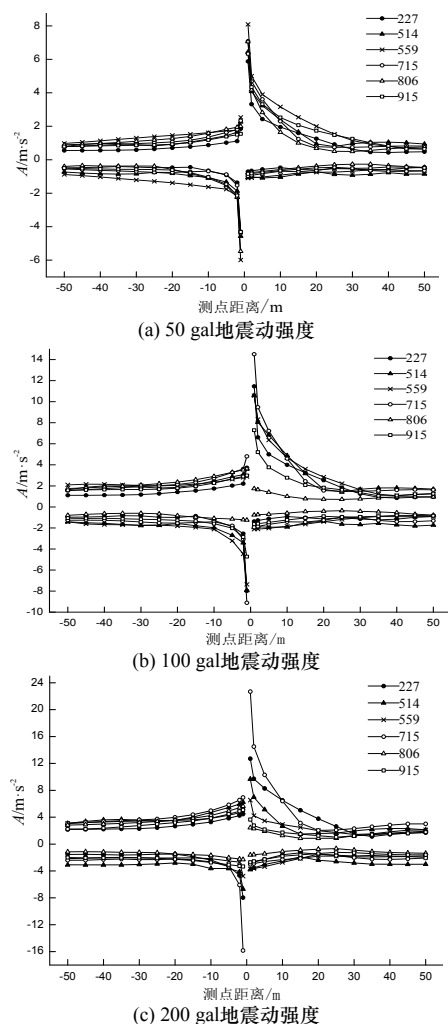


图5 不同地震动强度地震波作用下地裂缝场地各测点正负向峰值加速度

Fig.5 The positive and negative peak acceleration under different peak intensity seismic wave

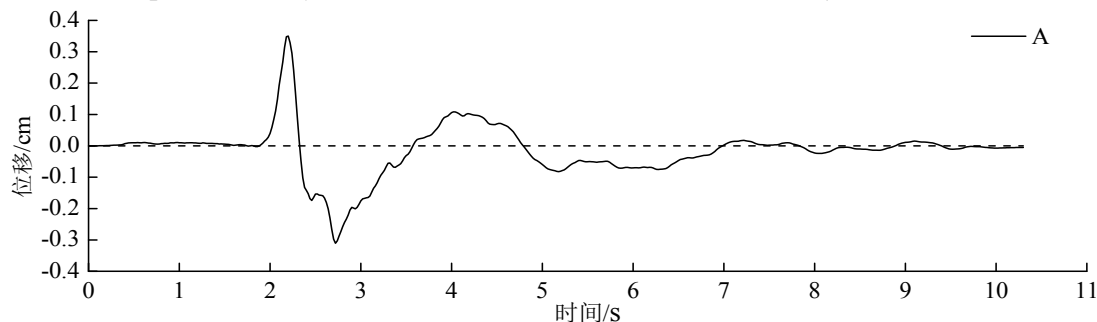


图6 P0227地震波位移时程曲线
Fig.6 Time-history curve under P0227 seismic wave

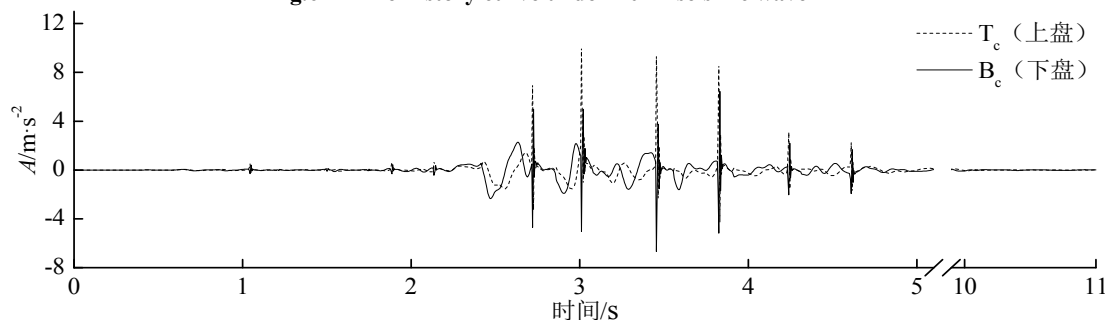


图7 P0227地震波输入下T_c、B_c测点加速度时程曲线
Fig.7 Time-history curve of points T_c、B_c under P0227 seismic wave

4.3 引起地裂缝场地放大效应及上下盘效应的原因分析

从上文的分析可以看到, 地裂缝场地地裂缝处的峰值加速度存在放大的现象. 其中: 地裂缝附近的上盘峰值加速度基本上都比下盘的峰值加速度大, 而且地裂缝附近的上盘峰值加速度的方向也基本都为正向, 下盘都为负向, 表现出明显的上下盘效应.

限于篇幅, 仅选取100 gal的P0227和P0715波作用下的地裂缝场地峰值加速度作为研究对象. 为了研究真实情况及避免地震动延时, 选取上下盘的相互作用点, 即地裂缝处的T_c、B_c点作为研究对象. 地震波的位移时程曲线及T_c、B_c测点的加速度时程曲线如图6~9所示.

对比地震波加速度时程图6~9可知: P0715及P0227地震波作用下, 上下两盘峰值多次同时突变, 其中上盘突变后加速度方向沿正向, 下盘突变后加速度方向沿负向. 笔者认为这是由于地裂缝场地上下两盘的位移响应差异导致在地震过程中上下两盘的相互碰撞而引起的.

对比图6~9可知: P0227地震波的位移时程在2.0~3.5 s期间穿越位移零点较频繁, 此区间也是T_c、B_c测点加速度突变较大的区间; 同样, P0715地震波的位移时程在2.5~5.5 s期间穿越位移零较频繁, 此区间也是T_c、B_c测点加速度突变较大的区间. 笔者认为地震波位移曲线频繁穿过位移原点, 导致上下两盘有更多的机会发生碰撞且碰撞更剧烈.

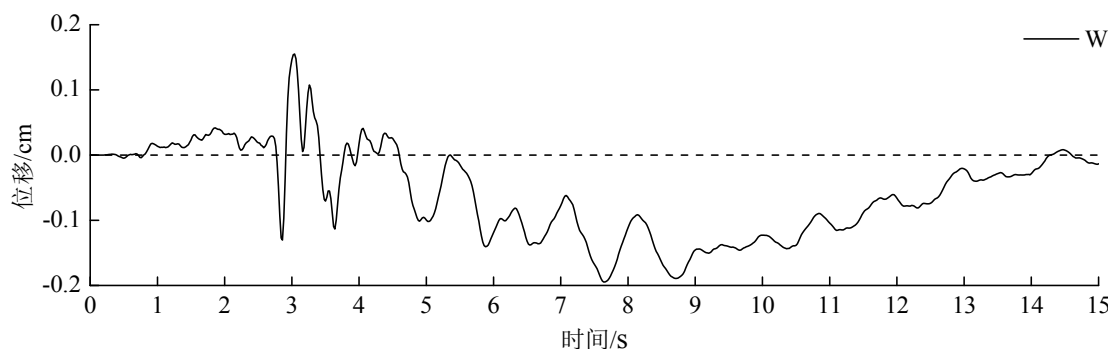
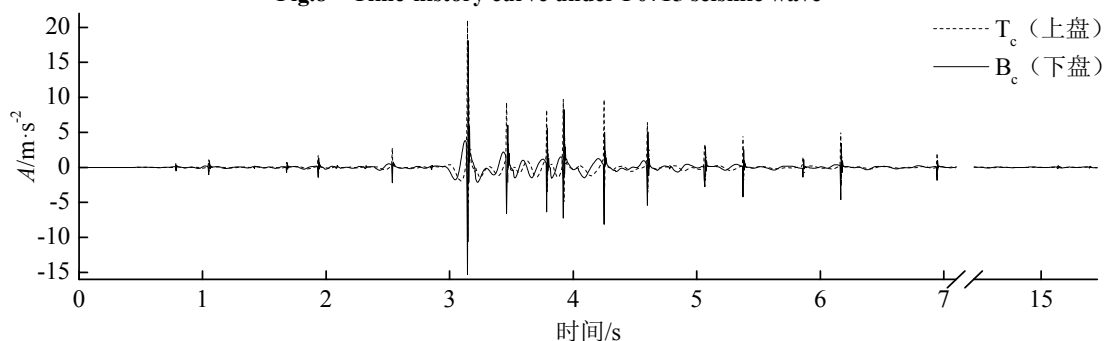


图8 P0715地震波位移时程曲线

Fig.8 Time-history curve under P0715 seismic wave

图9 P0715地震波输入下 T_c 、 B_c 测点加速度时程曲线Fig.9 Time-history curve of points T_c , B_c under P0715 seismic wave

通过上文分析可知:地裂缝场地地表的峰值加速度突变是由上下两盘相互碰撞产生的,现绘出上下两盘相互碰撞的受力简图如图10所示。

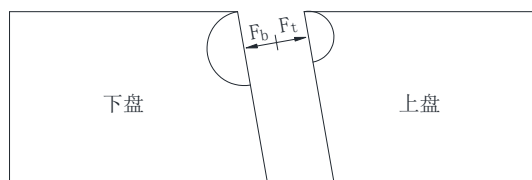


图10 地裂缝场地上下两盘碰撞示意图

Fig.10 The collision of hanging wall and footwall

由图10可见:在地裂缝带的地表附近,上下两盘由于位移响应差异会引起相互碰撞并产生一对作用力和反作用力。受到撞击力的影响,在碰撞的瞬间上盘会产生一个很大的正向加速度,下盘则产生一个很大的反向加速度。另外,从受力简图中可看到,由于受到地裂缝倾角的影响,上下盘的影响范围并不一样,表现为上盘的影响范围小,下盘的影响范围大。因此,碰撞后作用在上盘的撞击力所要抵抗的阻力和作用的质量都要比下盘小,使得上盘更容易获得较大的峰值加速度。

5 结语

本文分析研究了地震作用下输入地震动的强度、峰值位移及峰值加速度的方向三种影响因素对

地裂缝场地地表峰值加速度的影响,并进一步研究地裂缝场地峰值加速度的放大效应及上下盘效应,得到以下结论:

(1) 地震作用下,地裂缝场地地表峰值加速度均在地裂缝处最大,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,表现出明显的加速度放大效应及上下盘效应。

(2) 分析结果表明,在地震作用下,地裂缝场地上下两盘的位移响应差异会导致上下两盘相互碰撞,从而引起加速度放大效应。

(3) 计算结果表明,地震作用下,在上下两盘相互碰撞后,地裂缝场地将受到撞击力和地裂缝倾角的影响,其表现出明显的上下盘效应,为地裂缝环境建筑物加固方案的确定提供参考。

参考文献 References

- [1] 刘妮娜. 地裂缝环境下的地铁隧道-地层地震动力相互作用研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
LIU Nina. Study on the soil metro tunnels dynamic interactions in ground fissures area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [2] 刘安龙. 强震作用下地裂缝的力学响应及其对地铁隧道衬砌结构的影响[D]. 西安: 长安大学, 2013.
LIU Anlong. The seismic responses of fissures and lining structure under earthquake motion[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.

- [3] 慕焕东. 地裂缝场地地震放大效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
MU Huandong. Study on the seismic amplification effect on the site with ground fissures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [4] 陕西省建设厅. 西安地裂缝场地勘察与工程设计规程: DBJ 6-2006[S]. 西安: 陕西省建设厅, 2006.
Shaanxi Ministry of Construction. Specification for site investigation and engineering design on Xi'an ground fractures: DBJ 6-2006[S]. Xi'an: Shaanxi Ministry of Construction, 2006.
- [5] 西北综合勘测设计研究院. 唐延路地下人防工程岩土工程地勘报告[R]. 西安: 西北综合勘测设计研究院, 2013.
Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design. The geotechnical investigation report of underground civil air defense engineering of TangYan road[R]. Xi'an: Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, 2013.
- [6] 中国建筑西北设计研究院. 陕西省信息大厦设计资料[R]. 西安: 中国建筑西北设计研究院, 1998.
China Northwest Architecture Design and Research Institute. Design data of shaanxi information building[R]. Xi'an: China Northwest Architecture Design and Research Institute, 1998.
- [7] 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 Songtao, CAO Zi. Modern seismic design methods[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [8] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
LIU Jinbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB50011-2010[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [10] 李忠生, 刘芳, 高铎文, 等. 西安地裂缝变形带中的剪切波速测试分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 95-98.
LI Zhongsheng, LIU Fang, GAO Duowen, et al. Tests and analyses of shearing wave velocity in the Xi'an earth fissure deforming belt[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(6): 95-98.
- [11] 李新生, 王万平, 王静, 等. 西安地裂缝两盘地层岩土物理力学性质研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(2): 58-61.
LI Xinsheng, WANG Wanping, WANG Jing, et al. Research on physical and mechanical properties of strata on both sides of Xi'an ground fractures[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(2): 58-61.
- [12] 胡志平, 赵振荣, 朱启东, 等. 西安某地裂缝两侧黄土物理力学性质试验[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1): 85-88.
HU Zhiping, ZHAO Zhenrong, ZHU Qidong, et al. Experimental study on physical mechanic property of loess near ground fissure in Xi'an[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(1): 85-88.
- [13] 石明. 西安地裂缝发育现状及剖面结构特征[D]. 西安: 长安大学, 2009.
SHI Ming. Development condition and section structure characteristic of Xi'an ground fissures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范: GB 50007-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for design of building foundation: GB 50007-2011[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.

(编辑 桂智刚)