

文章编号:1671-1637(2015)04-0034-09

柔性接头地铁隧道穿越地裂缝的地震响应

刘妮娜^{1,2}, 刘军涛³, 黄强兵^{1,2}, 韩冬冬¹, BULUT Rifat⁴

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 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; 3. 陕西华山路桥工程有限公司, 陕西 西安 710016; 4. 俄克拉荷马州立大学 土木与环境工程学院, 俄克拉荷马 斯蒂尔沃特 74078)

摘要:采用振动台模型试验,模拟地震荷载和地裂缝场地沉降,分析了穿越地裂缝区域且设置柔性接头的分段地铁隧道的动力响应,研究了地裂缝场地沉降、裂缝发育特征、地铁隧道加速度响应特征、土压力与隧道各区段不同部位的应变规律。分析结果表明:由地裂缝场地沉降与地震荷载耦合作用所产生的差异沉降和裂缝多集中于柔性接头部位;各区段地铁隧道间的运动具有一定独立性,上盘靠近地裂缝的地铁隧道的加速度峰值是下盘隧道的3.2倍;距离地裂缝越近土压力越大,且在耦合荷载作用下,上盘土压力是下盘土压力的6.7倍;地铁隧道各区段左右拱腰应变较大,底板处应变次之,拱顶部位应变较小;柔性接头设置后各区段应变增率减小,在距离地裂缝较近部位未出现明显的应变增加现象。可见,在地震荷载与地裂缝场地沉降耦合作用下,柔性接头能够减小地铁隧道地裂缝位置处的集中应力与地裂缝场地的变形。

关键词:地铁隧道;地震荷载;活动地裂缝;耦合荷载;地震响应

中图分类号:U459.1

文献标志码:A

Seismic response of segmented metro tunnel with flexible joints passing through ground fissures

LIU Ni-na^{1,2}, LIU Jun-tao³, HUANG Qiang-bing^{1,2}, HAN Dong-dong¹, BULUT Rifat⁴

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Huashan Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Xi'an 710016, Shaanxi, China; 4. School of Civil and Environmental Engineering, Oklahoma State University, Stillwater 74078, Oklahoma, USA)

Abstract: Earthquake load and site settlement near ground fissures were simulated by shaking table model test. The dynamic responses were studied in sectional metro tunnel with flexible joints passing through active ground fissures. The characterises of uneven settlements, crack development, tunnel accelerations, earth pressures and sectional tunnel strains were studied. Analysis result shows that the site cracks and uneven settlement resulted from the coupling load of site settlement and earthquake load mainly distribute around flexible joints. Each part movement of tunnel with flexible joints is independent. The tunnel located in hanging wall has 3.2 times peak acceleration of the value in foot wall. The soil pressures near the ground fissure are larger. The soil pressure in hanging wall is 6.7 times of the value in foot wall under the coupling load. The strains at the middle of tunnel arch are bigger, the strains at the bottom of the

收稿日期:2015-05-21

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2013JM5004);国家自然科学基金项目(41502277,41372328);国家973计划项目(2014CB744700)

作者简介:刘妮娜(1975-),女,陕西兴平人,长安大学讲师,工学博士,从事岩土工程研究。

floor are secondary, and the strains on the top of the arch are less. The strain rate of each section decreases because flexible joints are designed in metro tunnel, and the strains increase little near the ground fissures. The result indicates that the flexible joints can decrease the site deformation and stress concentration of metro tunnel in ground fissure area under the coupling load of site settlement and earthquake load. 2 tabs, 17 figs, 22 refs.

Key words: metro tunnel; earthquake load; active ground fissures; coupling loads; seismic response

Author resume: LIU Ni-na (1975-), female, lecturer, PhD, +86-29-82339296, dcdgx16@chd.edu.cn.

0 引言

西安地裂缝作为一种特殊的地质灾害,目前,在西安城区共发现 14 条,覆盖面积为 250 km²,延伸长度为 150 km,贯穿整个市区。西安地铁建设的多条线路与地裂缝相交^[1-2]。西安地铁工程设计中为了避免地裂缝对线路破坏,把跨越地裂缝的地铁隧道分成独立单元,类似于美国加利福尼亚州洛杉矶地铁隧道穿越好莱坞活断层的处理方法^[3-4],但西安地裂缝情况较复杂。西安地铁 1、2 号线路穿越活动地裂缝带工程设计的基本原则是“分段处理、柔性接头、衬砌加强、预留净空、道床可调、加强监测、先结构后防水”^[5-6],线路与地裂缝相交区段大量应用柔性分段式地铁隧道。

国外有关地裂缝对地铁隧道影响的研究尚处在起步阶段,主要集中在与地裂缝相似的活断层对工程的影响,主要内容是基于工程建设中对于实际问题的解决和应用。Burridge 等通过离心机试验研究了美国加州某活断层在地震作用下地铁隧道的变形和受力^[7];Stirby 等研究了美国加利福尼亚州的洛杉矶地铁工程所遇到好莱坞活断层工程处理问题^[8];Shahidi 等分析了伊朗中部 Koohrang-III 输水隧道建设中遇到穿越活动断层的难题^[4]。

针对西安地铁建设中的地裂缝这一特殊工程需要,国内开展了大量研究。2007 年之前的研究多集中在地裂缝的成因、分布与发育规律^[1-2],探明了西安地裂缝总的数量、分布范围与运动的主要规律。此后的研究多以模型试验和数值模拟研究地裂缝对工程结构的受力影响,以期寻找穿越地裂缝区域的合理结构形式。范文等进行了地铁隧道穿越地裂缝带的物理模型试验^[8];孙萍等以离散元分析了地裂缝错动对地铁隧道的影响^[9];黄强兵等通过大型物理模型对扩大断面柔性接头结构进行了研究^[10-11],所得结论表明设置分段柔性接头后地铁隧道能够很

好地适应差异沉降,可以避免地铁隧道衬砌应力集中,能够对结构起到保护作用。

中国的地震区划将西安确定为八度地震设防烈度,西安地铁设计中亦明确要求考虑抗震设计。为了进一步研究地震荷载作用下地裂缝这一特殊工程场地的动力特征,刘妮娜等基于动力模型试验发现地震荷载加速地裂缝上盘沉降与次级裂缝的生成,在地震荷载与地裂缝运动耦合作用下,地铁隧道的变形与受力明显增大^[12]。

在前期试验探明地震加剧地裂缝场地变形,整体式地铁隧道处于应力、应变集中的不利受力特征的基础上,本文以西安地铁浅埋暗挖施工的分段隧道正交穿越地裂缝带为工程背景,建立地震荷载作用下的分段柔性接头地铁隧道振动台模型,研究地裂缝场地地铁隧道的地震响应,包括结构加速度、土压力与应变等力学特征。

1 地裂缝活动及其对地铁工程危害

1.1 地裂缝运动特征

西安城区分布的 14 条地裂缝具有相同的运动特征,为上盘下沉的垂直沉降、水平引张和水平扭动的综合运动,三者之间的比例关系为 100 : 31 : 3^[1,4]。由于上盘相对下盘沉降较大,水平扭动是由于上、下盘之间的不均匀沉降所引起,地裂缝的张拉位移在地下 10 m 时很小,因此,西安地铁工程中一般只考虑地裂缝的沉降。根据陕西省地质环境监测总站报告,西安地裂缝沉降自 1995 年开始逐年减少^[13],见图 1。

1976 年唐山大地震、1977 年西安两次有感地震与 20 世纪 80 年代城区过量抽取地下承压水,是西安地裂缝产生与大量沉降的主要原因,但是近年来西安供水已改为地表水,且从地铁规划修建时,政府已禁止在地铁沿线开采地下水,在这些强制措施保障下,地裂缝的快速运动可能性较小^[1]。地铁设计中考

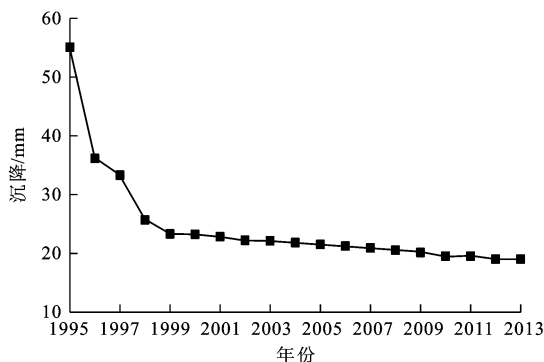


图1 西安地裂缝沉降

Fig. 1 Settlement of Xi'an ground fissure

考虑未来 100 年各种复杂影响因素与工程安全性,将穿越地裂缝带的地铁变形量确定为 500 mm^[14]。

1.2 地裂缝对地铁隧道结构的危害

西安地裂缝上、下盘不均匀沉降是造成两侧地层破坏的主要原因。基于地裂缝对市政道路、地面建筑物、地下管道和桥梁等的破坏,运用数值模拟和模型试验分析可知上盘下降会导致位于上盘区域的地铁隧道底部脱空,且在上覆土层重力和隧道两侧的土体向下作用的摩擦阻力共同作用下,隧道衬砌结构会产生开裂破坏,进而引发轨道变形破坏,且伴生隧道涌水现象。

1.3 地铁隧道结构防治措施

为了减小地裂缝引起的地层大变形对地铁隧道的影响,西安地铁采取分段设缝、局部扩大断面与预留净空的结构措施^[5],每段隧道之间以柔性接头相连。设置柔性接头后的地铁隧道与整体式地铁隧道相比,因为地裂缝活动在衬砌结构内部产生的剪应力和弯矩被消除,从而能够适应地裂缝的差异沉降变形^[10]。西安地铁隧道穿越地裂缝带的分段柔性地铁隧道见图 2。

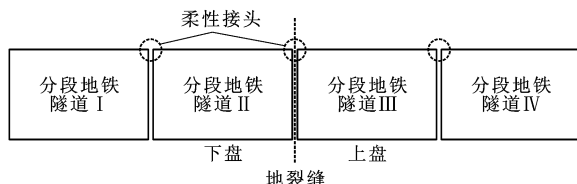


图2 分段柔性地铁隧道

Fig. 2 Metro tunnel with flexible joints

2 分段地铁隧道模型试验

2.1 模型试验设计

基于分段设缝加柔性接头的地铁隧道结构,通过振动台模型试验,模拟在地震动力作用下地铁隧道受力特征。

西安地铁穿越地裂缝区域采用扩大断面马蹄形隧道^[15],见图 3。隧道衬砌结构采用 C30 强度混凝土,钢筋抗拉强度设计值为 300 MPa。

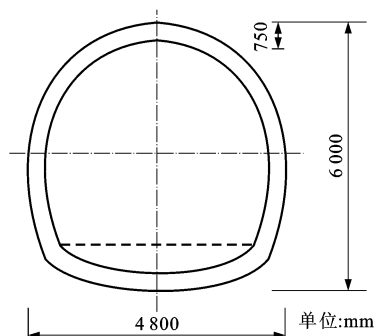


图3 地铁隧道断面

Fig. 3 Metro tunnel profile

在模型试验中,因为地震荷载与地裂缝沉降耦合作用,完全满足相似理论难度较大,根据 Buckingham 原理^[16-17],结合前期模型试验与场地试验^[18-19],综合考虑相似条件、试验条件与测试目的,以几何相似常数 40 为基础来推导相似常数,确定泊松比、黏聚力、内摩擦角相似比为 1,弹性模量相似比为 10,应力相似比为 5,时间相似比为 0.056。

地铁隧道模型以柔性接头连接,见图 4。每段地铁隧道模型长度为 0.25 m,见图 5。试验地层模型尺寸长度为 1.0 m,宽度为 0.9 m,高度为 0.6 m,模拟实际地层纵向长度为 40 m,横向宽度为 36 m,深度为 24 m,隧道埋深为 12 m,每段隧道长度为 10 m。根据相关规定^[20],地裂缝上、下盘的影响范围分别为 2.0 倍和 2.5 倍隧道宽度,对比分析表明此模型可以满足分段隧道穿越地裂缝场地的试验要求^[18]。



图4 柔性接头

Fig. 4 Flexible joint

分段式地铁隧道模型长度为 1.00 m,宽度为 0.12 m,高度为 0.15 m,壁厚为 0.04 m,由材料配比试验确定采用微粒混凝土浇筑地铁隧道,钢筋采

用双层镀锌铁丝网成型,柔性接头采用高弹橡胶,见图6。地铁隧道与柔性接头的物理力学性质见表1。

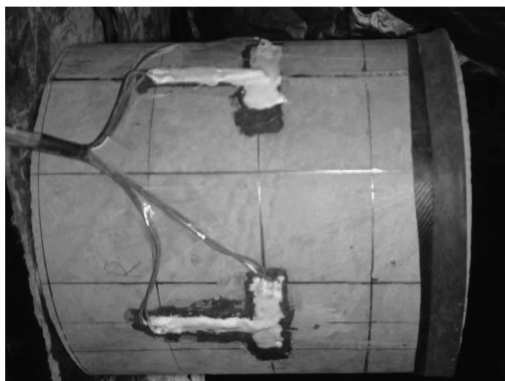


图5 地铁隧道分段模型

Fig. 5 Sectional model of metro tunnel

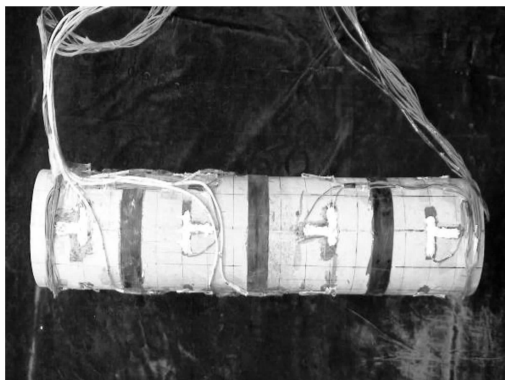


图6 地铁隧道模型

Fig. 6 Metro tunnel model

表1 模型参数

Tab. 1 Parameters of model

地铁隧道	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	立方体强度/MPa	弹性模量/GPa
	25.00	2.98	3.3
柔性接头	硬度/HA	拉伸强度/MPa	扯断伸长率/%
	60	5.7	270

西安地裂缝倾角范围为 $70^\circ \sim 85^\circ$, 裂缝内充填物为粉质黏土与粉砂等。模型中地裂缝倾角设置为 85° , 用粉细砂模拟地裂缝中的充填物。采用西安地裂缝通过小寨段与地铁相交处工程场地土, 经晾晒、过筛, 在模型箱中分层夯填。

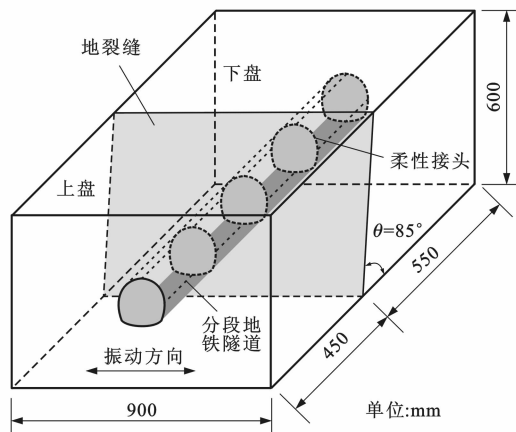
2.2 测试设备与试验装置

在长安大学动力中心进行振动台试验, 采用MTS公司生产, 经长安大学二次研发的水平向单自由度振动台, 其主要性能参数为: 振动频率范围为 $0.1 \sim 50.0 \text{ Hz}$, 台面长度为 1.5 m , 宽度为 1.0 m , 最大承载质量为 2000 kg 。

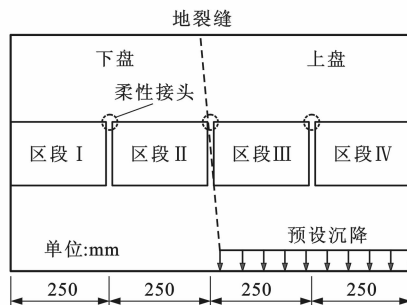
在模型试验中, 采用加速度传感器测试土体的加速度, 采用土压力盒测试土压力, 利用德国IMC

公司生产的动态信号采集系统采集数据。

分段式柔性接头地铁隧道模型见图7, 地裂缝上盘相对下盘沉降, 穿越地裂缝区段的地铁隧道分为I、II、III与IV四个区段, 各区段间采用柔性接头连接。



(a) 立体图



(b) 纵剖面

图7 柔性接头地铁隧道分段模型

Fig. 7 Sectional model of metro tunnel with flexible joints

2.3 模型箱设计

本文采用刚性模型箱, 长度为 1.0 m , 宽度为 0.9 m , 高度为 0.6 m , 见图7(a)。箱壁采用厚度 10 mm 的木工板制作, 箱体以角钢为骨架, 扁钢拉结; 在箱壁黏贴聚苯乙烯泡沫塑料减小边界效应; 模型箱底铺设间距 200 mm 的木条与螺钉以加大摩擦力。

2.4 试验测试方案

考虑试验目的与柔性接头地铁隧道特点, 测试主要布置电阻应变传感器、加速度传感器、土压力盒与振动台位移计。测点布置参考相关试验^[21-22], 见图8。在测点 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 处测试模型的加速度, 在测点 E_1 、 E_2 、 E_3 与 E_4 处测试土压力, 在模型箱上设置了位移计, 测试基本位移变化。同时, 在模型箱表面水平方向为 x 轴、垂直方向为 y 轴建立平面坐标, 在2个方向各间隔 10 cm 等间距设置沉降观测点。

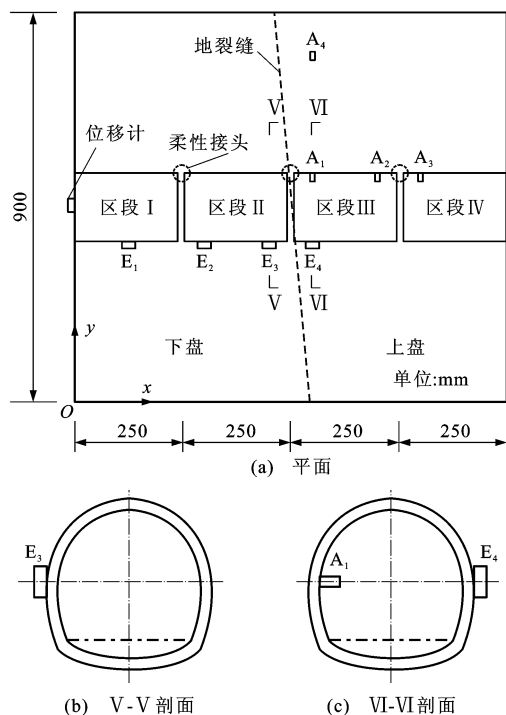


图 8 监测点布置

Fig. 8 Monitoring points layout

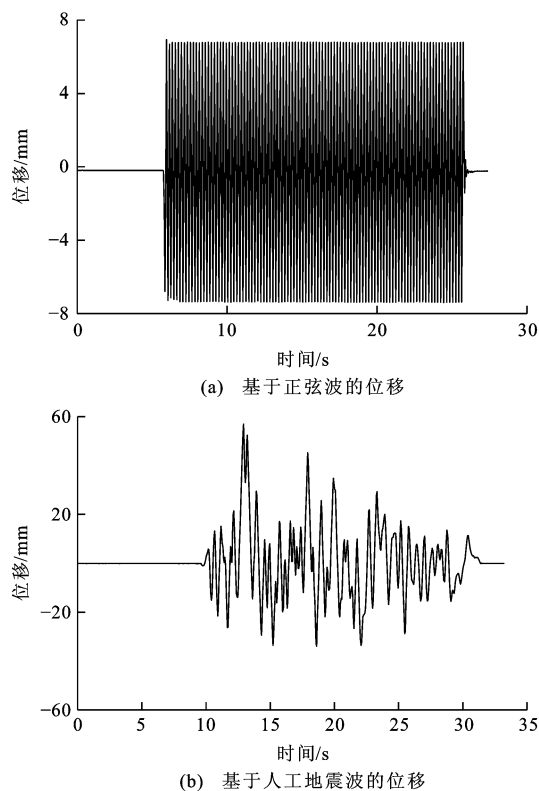


图 9 位移曲线

Fig. 9 Displacement curves

3 试验结果分析

3.1 位移测试

图 9 为振动台加载正弦波与西安人工地震波时的位移计测试所得位移曲线,比较可知,振动台可以很好地模拟单自由度动力地震运动。

3.2 地表沉降与破坏特征

图 10 为 El Centro 地震波和西安人工地震波作用后各测点的沉降曲线。在西安人工地震波和 El Centro 地震波作用下,分段地铁隧道所处的地裂缝场地上、下盘产生不均匀沉降,上盘沉降远大于下盘沉降。由于上、下两盘的沉降差,在模型表面可观测到预设地裂缝位置产生较大沉降陡坎,在水平位置 60~90 cm 处沉降线形趋于水平,显示了上盘区在远离地裂缝位置等幅下沉的特征。下盘区域测点距离地裂缝越近沉降越大,而在远离地裂缝位置处沉降相对较小。在水平位置 40~60 cm 处,沉降曲线斜率较大,结合模型试验过程中的观测,水平位置 50 cm 处为柔性接头位置,该处的沉降大于其他部位,说明柔性接头部位可以产生较大差异沉降。

在地震荷载作用下,地裂缝上盘场地整体沉降,预设地裂缝出露,下盘场地受到上盘下沉的拉力作用在距离地裂缝较近部位沉降较大,远离地裂缝位置沉降相对较小,由于地铁隧道柔性接头的存在,接

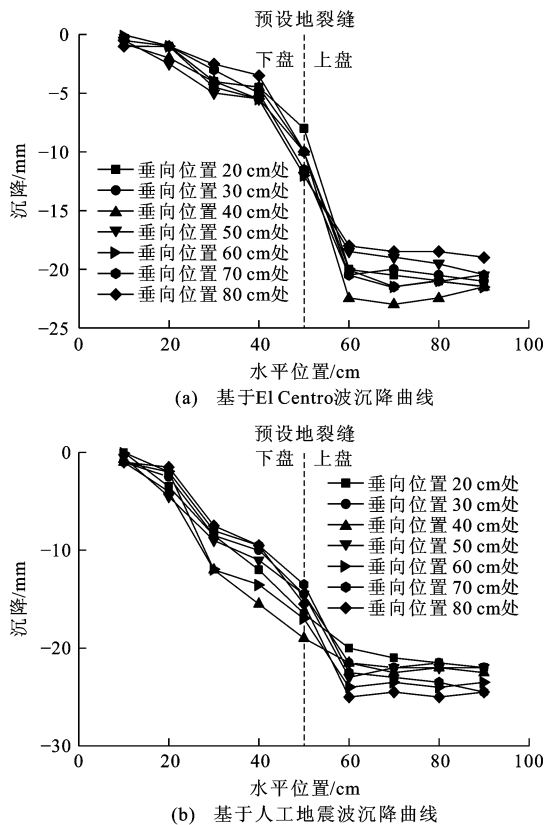


图 10 地表沉降曲线

Fig. 10 Curves of surface displacement

头位置处的下沉相对其他位置较大。

地震荷载作用时模型表面裂缝见图 11,在预设地裂缝位置隐伏地裂缝出露,随后在其两侧均出现较窄裂缝,随着地震动力荷载的施加,裂缝长度与宽度均增加。场地中裂缝较多聚集在柔性接头部位地表处,说明柔性接头部位可以产生较大的差异沉降。

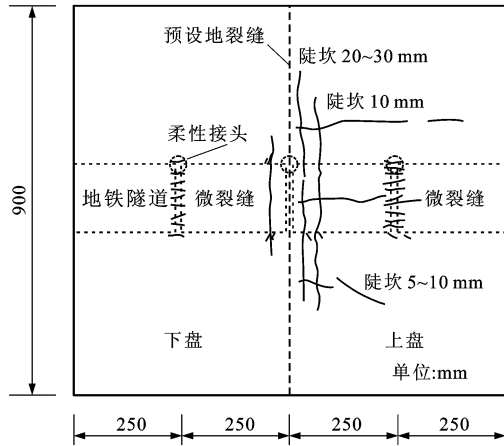


图 11 裂缝分布

Fig. 11 Distribution of cracks

由沉降观测与模型表层土体裂缝形成过程分析得出,在地震动力荷载与地裂缝场地沉降耦合作用下,地铁隧道的差异沉降与裂缝集中出现于柔性接头部位,地铁隧道区段相对较少。这一现象表明柔性接头承担较大的由于地裂缝场地上盘沉降所产生的拉应力,可以较好地适应地裂缝场地的受力特征。

3.3 加速度特征

图 12~15 为输入西安人工地震波时分段柔性接头地铁隧道各测点的加速度响应测试结果。由图 12、13 可知,位于上盘场地内地铁隧道区段Ⅲ的测点 A_1 、 A_2 的加速度时程曲线线形与加速度峰值均保持一致,表明在地震动力荷载作用时,同一区段内的地铁隧道具有一致性运动;将上盘场地内相邻区段Ⅲ与区段Ⅳ的测点 A_2 与测点 A_3 加速度时程

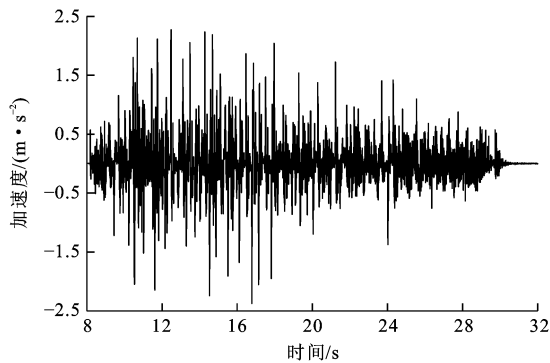


图 12 测点 A_1 的加速度曲线

Fig. 12 Acceleration curve of A_1

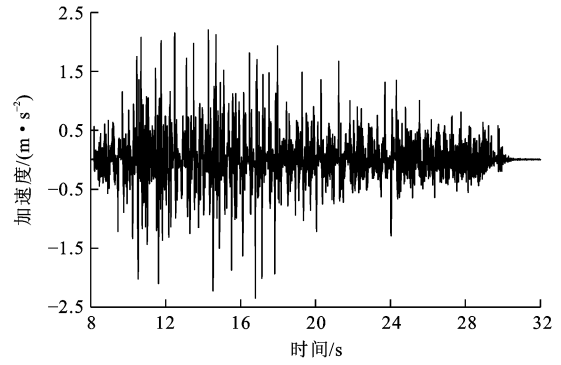


图 13 测点 A_2 的加速度曲线

Fig. 13 Acceleration curve of A_2

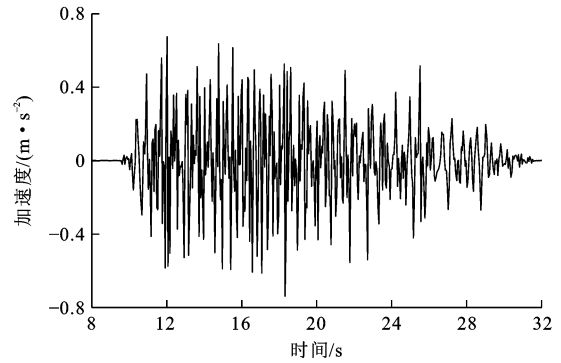


图 14 测点 A_3 的加速度曲线

Fig. 14 Acceleration curve of A_3

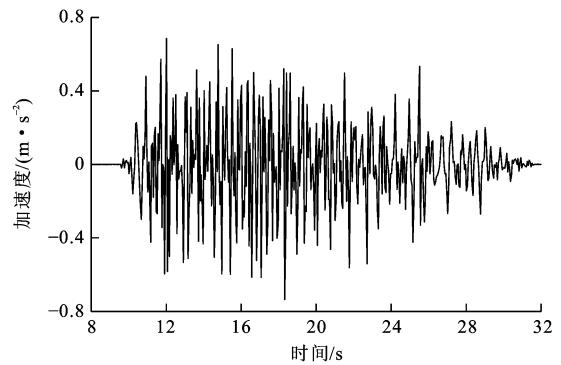


图 15 测点 A_4 的加速度曲线

Fig. 15 Acceleration curve of A_4

曲线比较可知,相邻区段内的加速度时程曲线线形一致,但加速度峰值差异较大,图 14 区段Ⅳ测点 A_3 加速度峰值仅为 $0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,而区段Ⅲ测点 A_2 加速度峰值为 $2.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。靠近地裂缝的区段Ⅲ的加速度峰值是远离地裂缝的区段Ⅳ加速度峰值的 3.2 倍。如图 15 所示,地裂缝上盘场地内测点 A_4 与地铁区段Ⅳ内测点 A_3 的加速度时程曲线线形和加速度均峰值均一致。

设置柔性接头后,不同地铁隧道之间动力特性具有相对独立性;接近地裂缝的地铁隧道有 3.2 倍的加速度放大效应,表明在地震动力荷载与地裂缝沉降耦

合作用下,接近地裂缝区的地铁隧道运动加剧。

3.4 土压力特征

图 16 为振动台模型中输入西安人工地震波时各点测试所得的土压力。位于下盘场地区段 I 中测点 E_1 , 区段 II 中测点 E_2 、 E_3 与上盘区段 III 中测点 E_4 土压力分别为 0.12、0.27、0.45、0.79 MPa, E_4 为 E_1 土压力的 6.7 倍,说明上盘区的土压力大于下盘地铁区段所受土压力,且距离地裂缝越近的部位所受的土压力越大。可见,当地裂缝场地沉降与地震动力荷载耦合作用时土压力有增大趋势。

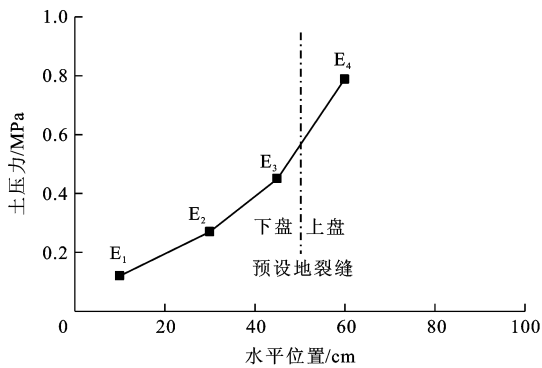


图 16 土压力曲线

Fig. 16 Curve of earth pressure

3.5 应变特征

图 17 为模型试验中 El Centro 地震波与西安人工地震波加载时,分段柔性接头地铁隧道各区段在拱顶、底板与左右拱腰部位的应变监测结果。

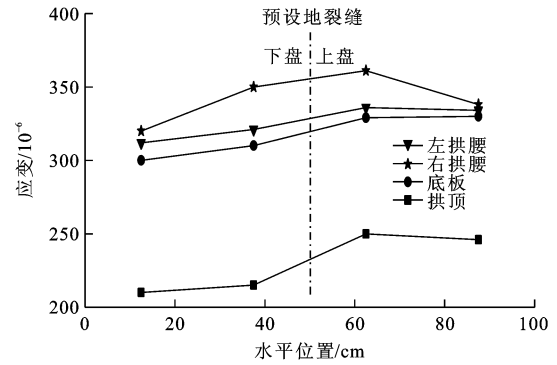
由应变测试结果可知,分段柔性接头地铁隧道模型在地震荷载作用下,其左右拱腰部位应变最大,拱底应变次之,拱顶应变最小;距离地裂缝较近地铁隧道应变大于远离地裂缝处的应变,说明在接近地裂缝处地铁隧道的应变也有增大现象。

取应变曲线中相邻测点连线的直线斜率为应变增率,并将其与未设分段柔性接头的整体式地铁隧道应变增率^[18]对比,结果见表 2。整体式地铁隧道穿越地裂缝区域时,上盘应变增率明显大于下盘,反映出上盘的应变变化较大。

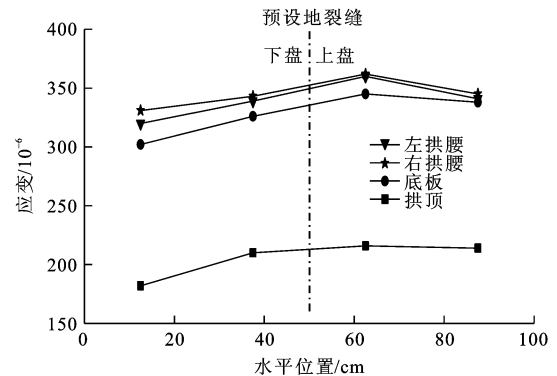
分段柔性接头的地铁隧道应变增率明显小于整体式地铁隧道应变增率,这说明柔性接头的设置有效避免了地铁隧道在穿越地裂缝区域出现应力集中现象,大大增强了地铁隧道适应地裂缝较大变形的能力。

4 结 语

(1)分段柔性接头地铁隧道穿越活动地裂缝带时,在地震荷载与地裂缝沉降耦合作用下,上、下盘



(a) 基于 El Centro 地震波的应变



(b) 基于人工地震波的应变

图 17 地铁隧道应变

Fig. 17 Strains of metro tunnel

表 2 应变增率

Tab. 2 Strain increments

位置	波型	分段柔性地铁		整体式地铁	
		上盘	下盘	上盘	下盘
左拱腰	El Centro 波	0.08	0.36	10.84	1.60
	西安人工波	0.76	0.76	5.60	0.88
右拱腰	El Centro 波	0.92	1.20	10.36	2.48
	西安人工波	0.68	0.48	8.44	1.56
拱顶	El Centro 波	0.16	0.20	8.72	2.52
	西安人工波	0.08	1.12	10.44	1.52
底板	El Centro 波	0.04	0.04	10.00	2.00
	西安人工波	0.28	0.96	9.28	0.16

场地中的沉降以及裂缝均出现在柔性接头部位。

(2)设置柔性接头的分段地铁隧道在地震荷载作用下,不同区段之间运动具有相对独立性,接近地裂缝的地铁隧道有 3.2 倍的加速度放大效应。

(3)地震动力作用下分段柔性接头地铁隧道距离地裂缝越近部位的土压力越大。在地裂缝场地沉降与地震荷载耦合作用时,土压力增加。

(4)在地震荷载作用下,分段柔性接头地铁隧道模型左右拱腰应变较大,底板应变相对较小。由于柔性接头的设置,各区段的应变增率较小,在距离地

裂缝较近部位未出现明显的应变增加现象,可见,柔性接头的设置可以改善地铁隧道的受力。

参考文献:

References:

- [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 Jian-bing, FAN Wen, LI Xi-an, 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] 李新生, 王静, 王万平, 等. 西安地铁二号线沿线地裂缝特征、危害及对策[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 463-468.
LI Xin-sheng, WANG Jing, WANG Wan-ping, et al. Ground fissures along Xi'an Subway Line 2: characteristics, harms and measures[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 463-468. (in Chinese)
- [3] STIRBY A F, RADWANSKI Z R, PROCTOR R J, et al. Los Angeles metro rail project-geologic and geotechnical design and construction constraints[J]. Engineering Geology, 1999, 51(3): 203-224.
- [4] SHAHIDI A R, VAFAEIAN M. Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining (for Koohrang-III Tunnel)[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(3): 213-221.
- [5] 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)
- [6] 李团社. 西安地铁穿越地裂缝带线路与轨道工程方案研究[J]. 铁道工程学报, 2009(12): 81-85.
LI Tuan-she. Study on the project plans of the Xi'an subway passing through the earth surface crack zone [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(12): 81-85. (in Chinese)
- [7] BURRIDGE P B, SCOTT R F, HALL J F. Centrifuge study of faulting effects on tunnel[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(7): 949-967.
- [8] 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. Research on physical model experiment of metro tunnel crossing ground fissures belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1917-1923. (in Chinese)
- [9] 孙萍, 彭建兵, 范文. 地裂缝错动对地铁区间隧道影响的三维离散元分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 710-714.
SUN Ping, PENG Jian-bing, FAN Wen. Three-dimensional distinct element analysis of ground fissure dislocations on pipelines of operational tunnels along Xi'an Second Subway Line[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 710-714. (in Chinese)
- [10] 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): 2324-2331.
HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, MEN Yu-ming, et al. Model test study on effect of ground fissure on open-cut metro tunnel with integral lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2324-2331. (in Chinese)
- [11] PENG Jian-bing, CHEN Li-wei, HUANG Qiang-bing, et al. Physical simulation of ground fissures triggered by underground fault activity[J]. Engineering Geology, 2013, 155: 19-30.
- [12] 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 Ni-na, HUANG Qiang-bing, MEN Yu-ming, 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)
- [13] 梁永恒, 邵生俊, 王桃桃. 西安地裂缝活动现状及地铁隧道建设应对措施[J]. 岩土力学, 2009, 30(增2): 399-403.
LIANG Yong-heng, SHAO Sheng-jun, WANG Tao-tao. Analysis of current status of Xi'an cracks and MTR measures for tunnel construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 399-403. (in Chinese)
- [14] 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 Qiang-bing, PENG Jian-bing, 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)
- [15] 黄强兵, 彭建兵, 门玉明, 等. 分段柔性接头地铁隧道适应地裂缝大变形的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1546-1554.
HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, MEN Yu-ming, et al. Model test study of sectional metro tunnel with flexible joints adapting large deformation of ground fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1546-1554. (in Chinese)
- [16] 雷胜友, 李肖伦, 李洋, 等. 高速铁路路基下复合地基沉降计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3): 9-15.
LEI Sheng-you, LI Xiao-lun, LI Yang, et al. Calculation method of composite foundation settlement under high-speed railway subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3): 9-15. (in Chinese)
- [17] CILINGIR U, MADABHUSHI S P G. Effect of depth on seismic response of circular tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(1): 117-127.
- [18] 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 Ni-na. Study on the soil metro tunnels dynamic interactions

- in ground fissures area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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 Lin-de, JI Qian-qian, 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)
- [21] 史晓军, 陈隽, 李杰. 非一致地震激励下地下综合管廊振动台模型试验研究(I)——试验方法[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(1): 147-154.
- SHI Xiao-jun, CHEN Jun, LI Jie. Shaking table test on utility tunnel under non-uniform seismic examinations (I): experimental setup[J]. Journal of Earthquake Engineering and Vibration, 2010, 30(1): 147-154. (in Chinese)
- [22] 何川, 李林, 张景, 等. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 427-434.
- HE Chuan, LI Lin, ZHANG Jing, et al. Seismic damage mechanism of tunnels through fault zones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 427-434. (in Chinese)
-
- (上接第 25 页)
- [6] 赵鸿铎, 姚祖康, 张长安, 等. 飞机除冰液对停机坪水泥混凝土的影响[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 1-5.
- ZHAO Hong-duo, YAO Zu-kang, ZHANG Chang-an, et al. Influence of aircraft deicer on apron cement concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 1-5. (in Chinese)
- [7] MIRZA J, ABESQUE C, BÉRUBÉ M A. Evaluation of surface sealers for concrete hydraulic structures exposed to low temperatures[J]. Materials and Structures, 2011, 44(1): 5-12.
- [8] LAUER K R. Classification of concrete damage caused by chemical attack[J]. Materials and Structures, 1990, 23(3): 223-229.
- [9] 李晔明. 机场道面的表面温度冲击效应研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2014.
- LI Ye-ming. The research of the temperature shock effect on the airport roads' surface[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China. (in Chinese)
- [10] KIM S H, PARK J Y, JEONG J H. Effect of temperature-induced load on airport concrete pavement behavior[J]. Journal of Civil Engineering, 2014, 18(1): 182-187.
- [11] 李立辉. 盐碱环境下混凝土冻融-干湿循环复合作用的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- LI Li-hui. Study on alkaline environment under freeze-thaw and dry-wet cycling of concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] FABBRI A, COUSSY O, FEN-CHONG T, et al. Are deicing salts necessary to promote scaling in concrete? [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(7): 589-598. (in Chinese)
- [13] 敦晓, 岑国平, 黄灿华, 等. 机场道面混凝土冻融破坏评价指标[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 13-18.
- DUN Xiao, CEN Guo-ping, HUANG Can-hua, et al. Evaluation indices of freezing-thawing destruction for airfield runway concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 13-18. (in Chinese)
- [14] SETZER M J, AUBERG R, KASPAREK S, et al. CIF-test-capillary suction, internal damage and freeze thaw test[J]. Materials and Structures, 2001, 34(9): 515-525.
- [15] 罗昕, 卫军. 冻融条件下混凝土劣化陡变点的探讨[J]. 混凝土, 2005(11): 14-16, 42.
- LUO Xin, WEI Jun. Sharp degradation point of concrete under freezing-thawing cycles[J]. Concrete, 2005(11): 14-16, 42. (in Chinese)
- [16] 任旭晨, 万小梅, 赵铁军. 混凝土冻融及盐冻劣化机理研究进展及模型综述[J]. 混凝土, 2012(9): 15-18.
- REN Xu-chen, WAN Xiao-mei, ZHAO Tie-jun. Review of mechanism and mathematical model for salt scaling and freezing-thawing damage of concrete[J]. Concrete, 2012(9): 15-18. (in Chinese)
- [17] 马好霞. 混凝土在机场除冰液作用下的抗腐蚀性[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- MA Hao-xia. Corrosion resistance of concretes subjected to airport deicer[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [18] 李晔, 姚祖康, 孙旭毅, 等. 铺面水泥混凝土冻融环境量化研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(10): 1408-1412.
- LI Ye, YAO Zu-kang, SUN Xu-yi, et al. Quantification research on the frost environment of pavement cement concrete[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(10): 1408-1412. (in Chinese)