

DOI: 10.11779/CJGE202202021

地裂缝场地地铁车站动力响应振动台试验研究

陈 轩^{1, 2, 3}, 熊仲明^{*1, 2, 3}, 陈 帜^{1, 2, 3}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;

3. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘 要: 地震和地裂缝耦合作用严重威胁着地铁工程的安全。通过开展地裂缝场地(穿越地裂缝)地铁车站结构模型的振动台试验, 分析了地震作用下地裂缝场地土的加速度反应、裂缝发展和车站的加速度、应变等动力反应规律。试验结果表明: 模型土在临近地裂缝的一定范围内地震响应较大, 且距地裂缝相同距离处, 上盘的加速度响应整体上大于下盘; 地裂缝场地地铁车站峰值加速度沿结构高度的分布规律与地震强度有关, 即小震作用下结构峰值加速度呈现随结构高度增大而增大的倒三角分布, 强震作用下则呈现顶部和底部较大、中部相对较小的“K”型分布; 地裂缝场地地铁车站地震破坏模式是地裂缝场地水平剪切变形和竖向上、下盘的错动作用使结构产生明显变形, 中柱发生严重的剪压破坏, 侧墙与楼板连接处出现一定的受拉损伤, 从而导致结构失效; 考虑竖向地震作用后, 地裂缝场地地铁车站破坏更为严重, 这是由于竖向地震增大了地裂缝场地动力放大效应和上、下盘错动作用。

关键词: 地裂缝; 地铁车站结构; 振动台试验; 地震反应

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)02-0384-08

作者简介: 陈 轩(1990—), 男, 博士, 主要从事土-结构共同作用、结构抗震等方面的研究工作。E-mail: chenxuan@xauat.edu.cn。

Shaking table tests on seismic response of a subway station structure in ground fissure site

CHEN Xuan^{1, 2, 3}, XIONG Zhong-ming^{1, 2, 3}, CHEN Zhi^{1, 2, 3}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Lab of Structural

Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an 710055, China; 3. Shaanxi Key Lab of Geotechnical and

Underground Space Engineering (XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: The safety of subway is seriously threatened by the coupling effects of earthquakes and ground fissures. A shaking table test is conducted on a subway station structure in a ground fissure site (structure crossing the ground fissure), and the acceleration response and crack development of model soil with the ground fissure as well as the acceleration response and strain response of the subway station are analyzed. The results demonstrate that the seismic response of the model soil is larger near the ground fissure in a certain range, and the acceleration response of the hanging-wall is larger than that of the footwall with the same distance from the ground fissure. The distribution of the peak acceleration along the height for the subway station in the ground fissure site is related to earthquake intensities. Under small ground motions, the peak acceleration increases with the height of the structures (inverted triangle distribution). Under strong ground motions, the peak acceleration is larger at the top and bottom slabs while smaller at the middle slab (“K”-type distribution). The seismic damage mode of the subway station structure in the ground fissure site is the obvious deformation caused by horizontal shear displacement and the dislocation between the hanging-wall and the footwall. The central column has a serious compression-shear failure, and the connection of the side wall and the roof exhibits tensile damage, resulting in the failure of the underground structures. Because the vertical earthquake increases the dynamic amplification effect and aggravates the dislocation action between the hanging-wall and the footwall in the ground fissure site, the subway station in the ground fissure site is damaged more seriously.

Key words: ground fissure; subway station structure; shaking table test; seismic response

0 引 言

随着城镇化和工业化步伐的进一步加快, 城市地下轨道交通迅速发展。但由于既有线路规划的限制和

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108473); 中国博士后科学基金项目(2021M693876); 住建部科学技术基金项目(2019-K-044)

收稿日期: 2021-12-25

*通信作者(E-mail: xiongzhangh@xauat.edu.cn)

线性工程使用功能的要求,许多地铁车站或区间隧道将不可避免地建造在地裂缝场地^[1-3]。已有研究表明^[4-5],地裂缝灾害耦合地震作用严重威胁着工程结构的安全。因此,对地裂缝场地地铁工程的抗震性能进行研究具有重要的科学意义。

近年来,国内外学者开展了不同场地条件下地铁车站的振动台试验,揭示了不同场地中地铁车站的地震反应规律和破坏特征。刘晶波等^[6]利用离心机试验研究了不同埋深对砂土地地铁车站地震反应的影响,并提出中柱是地铁车站的薄弱构件。庄海洋等^[7]、安军海等^[8]和王建宁等^[9]分别开展了可液化场地双层三跨规则地铁车站、盾构扩挖地铁车站和异跨地铁车站的振动台模型试验,研究了可液化场地不同结构形式地铁地下结构的地震破坏机理,并发现地铁车站发生了明显上浮且无明显倾斜。陈国兴等^[10]通过模型试验研究了强震作用下软土地地铁车站地震反应特性,研究发现,车站与土层的竖向相对运动不大,没有出现与液化场地类似的地下结构明显上浮现象。权登州等^[11]归纳了强震作用下黄土场地地铁车站地震反应特性,即在较大地震动下,土与结构动力作用较强,车站结构动力反应主要受周围土体控制。

此外,强震作用下地裂缝场地及处于地裂缝场地地铁隧道结构的地震反应规律和破坏模式已有了一定研究基础。胡志平等^[12]和熊仲明等^[13]分别开展了“y”形和“/”形地裂缝场地的振动台模型试验,发现上盘区域的加速度、速度以及位移均大于下盘区域。刘妮娜等^[14]进行了穿越活动地裂缝地铁隧道的振动台模型试验,得到了地震作用下穿越地裂缝隧道的动力响应规律,即地震作用会加剧隧道附近的地裂缝上盘区域沉降运动,并且位于地裂缝上盘区域隧道结构部位的应变均大于对应位置下盘区域应变。综上所述,地震作用下地裂缝场地的动力效应严重威胁着地下结构的安全,但针对地裂缝场地地铁车站的动力反应和破坏模式,尚未进行深入研究。

基于此,本文设计并开展了地裂缝场地地铁车站的大型振动台模型试验,分析地裂缝场地的动力反应特性、地铁车站结构的加速度和应变反应,探索地裂缝场地-地铁车站结构体系的地震反应规律,揭示地裂缝场地地铁车站结构的地震破坏机制。

1 振动台试验概况

本次试验在西安建筑科技大学教育部重点实验室开展,采用MTS振动台系统,其台面尺寸为4.1 m×4.1 m,最大载重为200 kN,最大水平加速度为±1.5g,最大振动位移量为250 mm,振动频率为0.1~

50 Hz。

试验采用矩形框架叠层式剪切模型箱,其尺寸为3.0 m×1.5 m×1.5 m。土箱振动方向内壁由内向外依次布置橡胶薄膜和聚苯乙烯泡沫塑料板来降低有限边界带来的地震波反射及散射影响,滑动方向布置塑料薄膜并涂刷润滑剂,底部铺设防滑木条以防止土体与箱体间滑动,土箱边界处理措施可有效保证动态数据的准确性。模型土箱见图1。



图1 剪切型模型土箱

Fig. 1 Laminar shear soil box

1.1 工程背景

本文以西安地铁一号线康复路地铁车站结构为研究对象,该地铁车站临近西安f₄地裂缝。在构造运动和地下水活动影响下,f₄地裂缝将出现与之相交的次生裂缝,使车站处于地裂缝的影响范围内,甚至穿越地裂缝。已有研究表明^[4],当地下结构沿纵向成小角度穿越地裂缝时,其地震反应最为强烈,为地裂缝场地地下结构的最不利位置。因此,本次试验以穿越地裂缝地铁车站为计算工况,以探讨地裂缝场地地铁车站的动力响应规律。

1.2 模型的相似设计

为真实模拟地下结构的地震反应,结构和土的主要物理参数的相似比应尽量保持一致。考虑振动台台面尺寸和模型土箱承载力,确定模型结构和土的长度相似比为1/40,地铁车站模型横截面尺寸如图2所示。

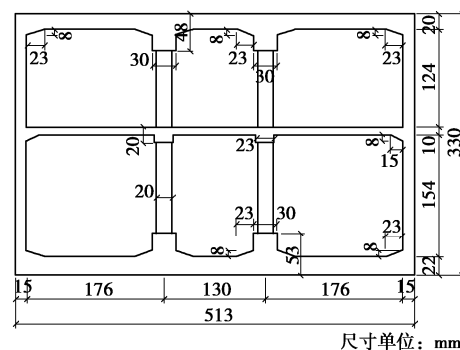


图2 地铁车站模型结构横断面图

Fig. 2 Cross section of model structures for subway station

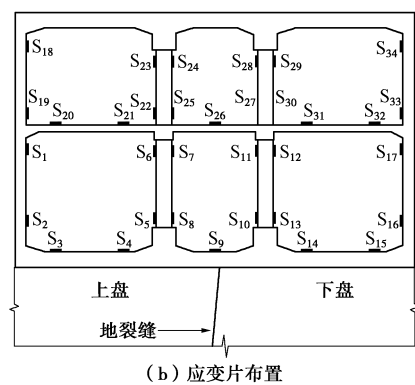


图 4 测点布置

Fig. 4 Layout of sensors

试验采用汶川地震中的江油波作为振动台台面输入地震波, 其加速度时程曲线及其相应的傅里叶谱如图 5 所示。为分析不同地震强度和竖向地震对地下结构地震响应的影响, 将输入地震动的幅值进行调整, 从 0.1g 逐渐增加至 1.2g; 通过沿结构横向输入水平地震波, 研究其水平地震反应; 同时部分工况考虑水平向+竖向地震耦合作用, 且水平向地震强度与竖向地震强度比值为 1 : 0.65。每级地震强度加载完成后, 对模型进行白噪声扫频。表 2 为本次试验加载工况。

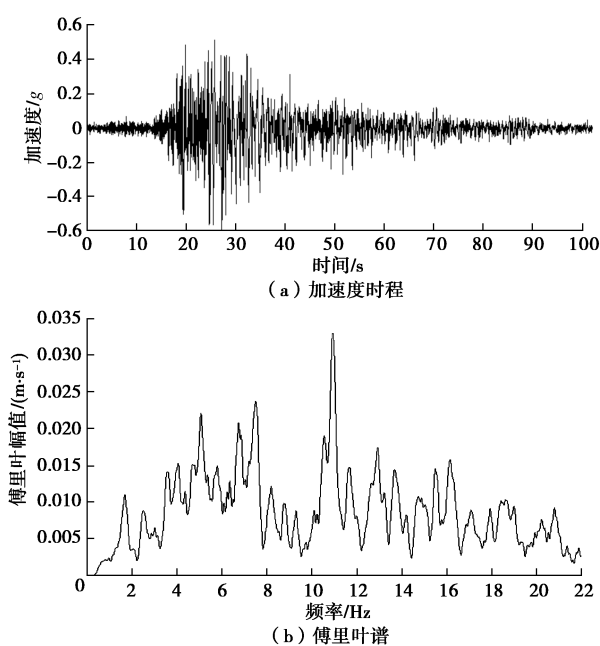


图 5 加载地震波加速度时程及频谱图

Fig. 5 Time curves of seismic acceleration and frequency spectra

2 试验现象

2.1 模型土宏观现象

图 6 给出了振动台试验结束后的模型土宏观现象, 均为平面示意图。

表 2 振动台试验加载工况			
Table 2 Loading programs of shaking table tests			
序号	地震动	输入峰值加速度/g	
		水平向	竖向
1	白噪声	0.05	0.05
2	江油波	0.10	—
3	白噪声	0.05	0.05
4	江油波	0.20	—
5	白噪声	0.05	0.05
6	江油波	0.30	—
7	白噪声	0.05	0.05
8	江油波	0.40	—
9	江油波	0.40	0.26
10	白噪声	0.05	0.05
11	江油波	0.60	—
12	白噪声	0.05	0.05
13	江油波	0.80	—
14	江油波	0.80	0.52
15	白噪声	0.05	0.05
16	江油波	1.20	—
17	江油波	1.20	0.78
18	白噪声	0.05	0.05

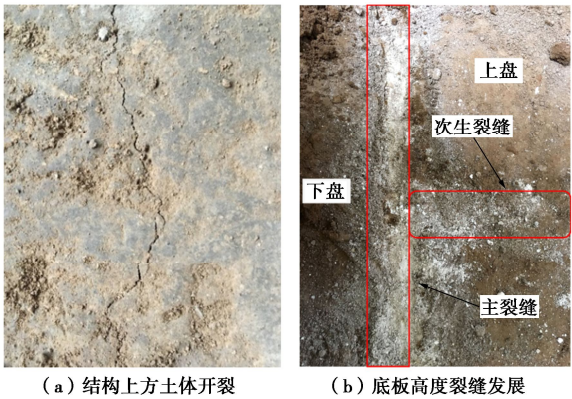


图 6 模型土宏观现象

Fig. 6 Macroscopic phenomena of model soil

试验加载前, 模型场地土地表平整。地震激励后, 模型土表面出现了大量细微裂缝, 其中, 地下结构上方土体裂缝宽度和数量明显多于其他位置; 地下结构上部土体相对周边土体发生了隆起, 结构周边土体发生了塌陷。土体开挖后发现, 地下结构发生了一定的倾斜, 底板高度处地裂缝的位置发生了一定的偏移, 且主裂缝处向上、下盘衍生了一定量的次生裂缝, 其中上盘的次生裂缝数量明显大于下盘。

2.2 车站破坏现象

图 7 给出了地铁车站模型的破坏照片。由图 7 可知, 地铁车站中柱混凝土剥落程度和裂缝发展程度均大于其它构件, 其中处于上盘的中柱底部发生大面积的混凝土剥落, 处于下盘的中柱柱顶出现少量细微裂缝; 上盘侧墙、底板和顶梁均出现了微小裂缝。这是因为地裂缝场地上、下盘间产生了明显的错动变形, 使结构中柱承受了较大的压力和弯矩; 同时, 由于车

站的中柱抗侧刚度较小,地裂缝场地发生的侧向变形作用使中柱率先发生混凝土受压剥落和剪切裂缝;随着中柱承载能力逐渐减弱,原本中柱承担的荷载将由侧墙承担,导致侧墙与顶板连接部位出现细微拉裂缝,最终导致地铁车站破坏。



图7 模型结构破坏现象

Fig. 7 Damage phenomena of model structures

3 试验结果分析

3.1 模型土加速度反应规律

为验证模型土箱振动方向的边界效应,在模型土地表沿振动方向布置了加速度计 H41、H42、F41 和 F42。通过比较 0.2g 江油波作用下不同测点的加速度反应差异,分析本次试验边界处理对试验结果的影响。图 8 为测点 H41、H42、F41 和 F42 的加速度时程曲线图。从图中可以看出, H41 和 H42 在 0.2g 江油波作用下加速度峰值十分接近,分别为 0.381g 和 0.360g,两者加速度时程曲线高度重合;测点 F41 和 F42 加速度反应的峰值分别为 0.317g 和 0.282g,差值不大,两者加速度时程曲线基本一致。说明模型土上、下盘的振动边界处理满足试验精度要求。因此,本试验中对模型土振动边界的处理效果是比较理想的。

图 9 (a), (b) 分别给出了模型土内沿水平振动方向各测点的峰值加速度反应以及上盘模型土沿不同埋深各测点的峰值加速度反应,其中输入峰值加速度后加字母 S 表示考虑竖向地震作用的工况。

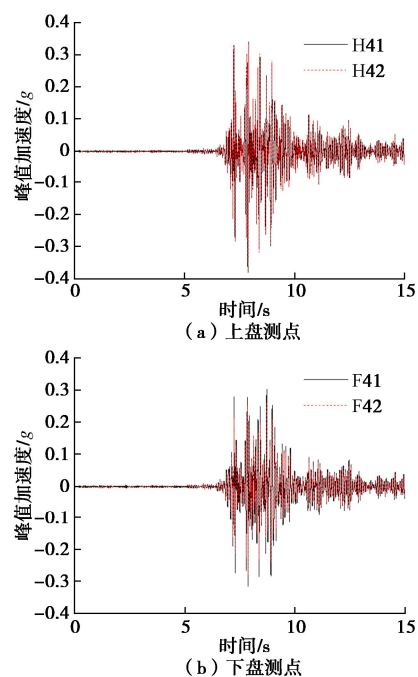


图8 振动边界效应验证

Fig. 8 Verification of vibration boundary effect

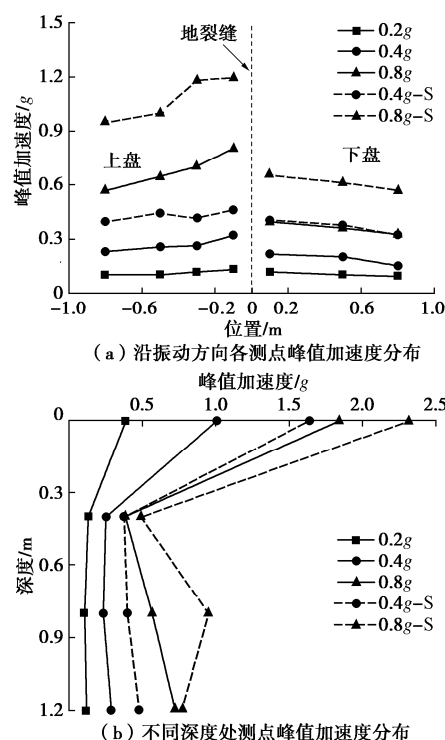


图9 模型土峰值加速度反应

Fig. 9 Peak accelerations of model soil

由图 9 (a) 可知,地震作用下,模型土峰值加速度最大值均出现在上盘距地裂缝 0.1 m (测点 H8 位置) 处,并在一定范围内向两侧逐步衰减。说明在靠近地裂缝的一定范围内,模型土的地震响应较大;且距地裂缝相同距离处,上盘的加速度响应整体上大于下盘,即上、下盘效应。通过定义上盘与下盘峰值加速度最

大值之比为上下盘差异系数可知, 该系数介于 1.1~2.0; 随着输入峰值加速度的增大, 距地裂缝不同距离处测点加速度反应差别也越来越明显。较单向水平作用相比, 模型土在双向地震作用下的加速度响应更加剧烈, 且上、下盘效应更加明显, 该变化趋势符合地裂缝场地的地震反应规律^[13]。

由图 9 (b) 可知, 在输入峰值加速度为 0.2g 的地震作用下, 模型土测点的峰值加速度随着埋深的减小而逐渐增大, 此时, 土体整体上处于弹性阶段; 随着输入峰值加速度增大, 模型土测点的峰值加速度随着埋深变化趋势发生改变, 呈先减小后增大的趋势, 其中, 距地铁车站最近测点 H3 的峰值加速度最小, 这说明地下结构的存在影响了其周围模型土的地震响应, 而地表测点 H4 的峰值加速度较 H3 测点相比突然增大, 这是由于地裂缝场地在地表处释放的能量较大, 造成其加速度放大效应更加明显。

3.2 模型土竖向位移

表 3 给出了模型土地表不同测点处的竖向位移值。由表 3 可知, 单向水平地震作用下, J2 测点的竖向位移值明显小于 J1 与 J3; 并且随输入峰值加速度的增大, J2 与邻近地基测点沉降差值也逐渐增大; 但 J1 与 J3 两测点的沉降差异规律并不明显。双向地震作用时, J2 与邻近地基测点沉降差值明显大于相同输入峰值加速度水平地震作用时的差值; 此时, J1 测点沉降值明显大于 J3 测点。

表 3 模型土地表最大沉降量

Table 3 Seismic settlements of ground surface

地震作用类型	输入峰值加速度	地表沉降/mm		
		J1	J2	J3
水平地震	0.2g	0.26	0.20	0.31
	0.4g	1.79	1.15	1.91
	0.8g	1.66	1.25	1.96
	1.2g	3.12	1.95	3.13
水平+竖向地震	0.4g	1.69	1.04	1.16
	0.8g	6.06	1.11	4.29
	1.2g	6.60	2.76	5.92

综上所述, 地震作用下, 地裂缝场地地表发生了不同程度的沉降, 且上盘测点地表的沉降明显大于下盘。结合震后地裂缝位置和土层移动变化趋势可知, 地震作用会加剧地裂缝场地上、下盘剪切活动, 上盘相对下盘向上运动, 形成不均匀沉降^[4]。同时, 模型结构会相对两侧土体发生隆起, 且伴随着一定的倾斜。

3.3 结构加速度响应

图 10 给出了不同地震作用下地裂缝场地地铁车站峰值加速度沿高度分布趋势。由图 10 可知, 当输入峰值加速度为 0.2g 时, 模型结构各测点的峰值加速度沿结构高度变化幅度较小; 输入峰值加速度增大至 0.4g 时, 模型结构的峰值加速度沿高度变化趋势逐渐

显著, 出现顶板和底板较大、中板相对较小的 K 型分布。这是由于地裂缝场地的特殊性造成的, 即输入峰值加速度较小时, 结构与场地土共同运动, 并未发生明显脱离, 因此, 沿高度方向各测点加速度幅值差异不大; 当输入峰值加速度较大时, 地裂缝场地会发生明显变形, 地下车站与周围土运动不协同, 造成结构模型与场地土脱离, 此时结构的峰值加速度分布则与其刚度分布相关, 由于结构顶板和底板刚度大于中板, 因而出现在 K 型分布。

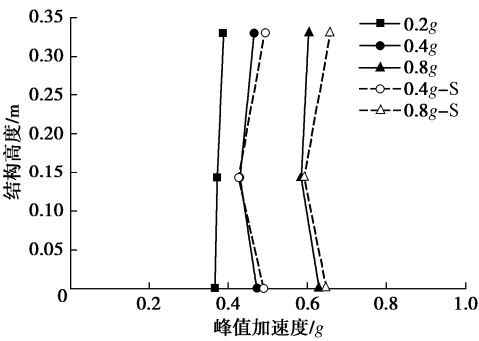


图 10 模型结构峰值加速度反应

Fig. 10 Peak accelerations of model structures

此外, 在相同输入峰值加速度的地震作用下, 考虑竖向地震时模型结构加速度反应明显增大, 且沿高度方向各测点的加速度幅值分布差异更加明显。这是由于考虑竖向地震后, 地裂缝场地上、下盘效应更加明显, 且发生了不同程度的错动变形, 使地裂缝场地地下结构动力反应更加剧烈。

3.4 结构应变反应

图 11 给出了输入峰值加速度为 1.2g 的地震作用下地裂缝场地地铁车站的应变幅值分布。由图 11 可知, 单向地震作用下, 中柱柱底测点的应变幅值明显大于柱顶, 其最大应变幅值为 198 $\mu\epsilon$, 出现在处于地裂缝上盘区域底层柱底; 侧墙的最大应变幅值为 62 $\mu\epsilon$, 出现在下盘侧墙与顶板交汇处; 底板测点的最大应变幅值为 102 $\mu\epsilon$, 出现在上盘中板与侧墙交汇处。双向地震作用下, 各构件不同测点的应变幅值分布规律与单向地震作用时相似; 除个别测点外, 相同测点应变幅值均大于单向地震作用时的应变幅值。

穿越地裂缝地铁车站不同测点的应变幅值表现出明显的上、下盘分布规律, 即位于地裂缝上盘的构件应变幅值总体上大于下盘构件。其中, 中柱应变幅值上、下盘分布趋势最为明显, 其次是楼板。因此, 地裂缝的存在改变了原有结构的应变幅值分布规律, 穿越地裂缝结构各层梁柱构件的应变幅值与所处地裂缝场地的位置有关。这是因为地震波经过在地裂缝场地土中的传播后, 到达底板高度的地裂缝两侧地震强度存在明显差异, 从而使穿越地裂缝结构处于非一致性

地震激励状态,并且到达上盘的地震波强度通常大于下盘。

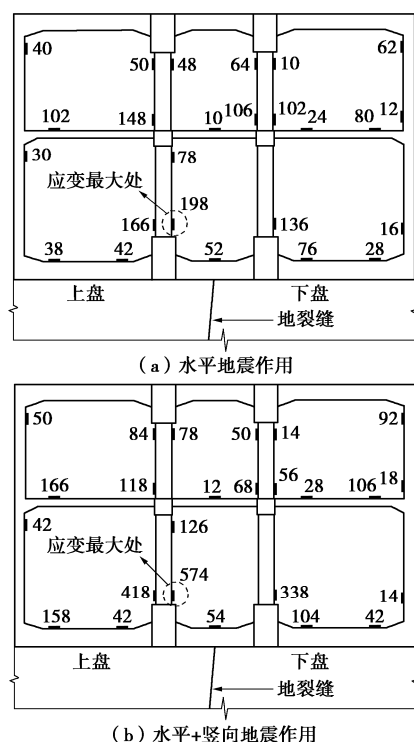


图 11 模型结构的应变幅值分布

Fig. 11 Strain amplitude of model structures

结合试验现象和分析结果可知,穿越地裂缝地铁车站破坏主要发生在中柱与梁板相交位置以及侧墙与楼板相交处。地震作用下,结构随着周围土体发生剪切变形,同时承受上覆土产生的竖向力和地裂缝上、下盘之间的剪切作用,导致车站发生明显变形,中柱发生严重剪压破坏,侧墙与楼板连接出现一定受拉损伤,从而导致结构失效。针对该类工程,可采用 FRP 加固中柱或钢管混凝土柱以增大中柱刚度,从而减小地裂缝场地地铁车站的损伤破坏。

此外,考虑竖向地震作用后,地裂缝场地地铁车站破坏更为严重,这是由于竖向地震增大了地裂缝场地动力放大效应和上、下盘错动作用。

4 结 论

本文基于地裂缝场地地铁车站结构振动台模型试验,研究了地裂缝场地的动力响应特征,分析了地裂缝场地地铁车站的加速度以及应变反应规律,得到了以下 5 点结论。

(1) 沿振动方向,模型土在临近地裂缝的一定范围内地震响应较大,且距地裂缝相同距离处,上盘的加速度响应整体上大于下盘,且上下盘差异系数介于 1.1~2.0。沿场地土埋深方向,当输入峰值加速度较小时,模型土的峰值加速度随着埋深的减小而逐渐增

大;当输入峰值加速度较大时,模型土峰值加速度则表现出先减小后增大的趋势。

(2) 地裂缝场地地铁车站峰值加速度沿高度方向分布趋势与地震强度相关。当输入峰值加速度较小时,地裂缝场地未发生明显变形,结构与地裂缝场地土共同运动,模型结构各测点的峰值加速度随结构高度增大而增大,即倒三角分布;随着输入峰值加速度的增大,地裂缝场地发生明显变形,地下车站与周围土运动不协同,模型结构峰值加速度沿结构高度呈顶部和底部较大、中部相对较小的 K 型分布。

(3) 穿越地裂缝地铁车站中柱的应变幅值明显大于其他构件应变幅值,且不同测点的应变幅值表现出明显的上、下盘分布规律,即位于地裂缝上盘的构件应变幅值总体上大于下盘构件。其中,中柱应变上、下盘分布趋势最为明显,其次是楼板。

(4) 地震作用下,地裂缝场地地铁车站结构随着周围土体发生剪切变形,同时承受上覆土产生的竖向力和地裂缝上、下盘之间的剪切作用,导致车站发生明显变形,中柱发生严重剪压破坏,侧墙与楼板连接出现一定的受拉损伤,从而导致结构失效。

(5) 考虑竖向地震作用后,地裂缝场地地铁车站破坏更为严重,这是由于竖向地震增大了地裂缝场地动力放大效应和上、下盘错动作用。

参考文献:

- [1] PENG J B, HUANG Q B, HU Z P, et al. A proposed solution to the ground fissure encountered in urban metro construction in Xi'an, China[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2017, 61: 12 - 25.
- [2] 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): 511.
- [3] 黄强兵, 彭建兵, 闫金凯, 等. 地裂缝活动对土体应力与变形影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 903 - 908. (HUANG Qiang-bing, PENG Jian-bing, YAN Jin-kai, et al. Model test study of influence of ground fissure movement on stress and deformation of soil mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 903 - 908. (in Chinese))
- [4] 彭建兵. 西安地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2012 (PENG Jian-bing. Disaster of the Ground Fissures in Xi'an[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [5] 熊仲明, 陈 轩, 钟雅琼, 等. 跨地裂缝结构地震作用下的损伤分析与评估研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(8):

- 40 - 49. (XIONG Zhong-ming, CHEN Xuan, ZHONG Ya-qiong, et al. Damage analysis and evaluation of frame structure spanning over ground fissure under seismic load[J]. Journal of Building Structures, 2020, **41**(8): 40 - 49. (in Chinese))
- [6] 刘晶波, 刘祥庆, 王宗纲, 等. 土-结构动力相互作用系统离心机振动台模型试验[J]. 土木工程学报, 2010, **43**(11): 114 - 121. (LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing, WANG Zong-gan, et al. Dynamic centrifuge model test of a soil-structure interaction system[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(11): 114 - 121. (in Chinese))
- [7] 庄海洋, 付继赛, 陈 苏, 等. 微倾斜场地中地铁地下结构周围地基液化与变形特性振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(4): 1263 - 1272. (ZHUANG Hai-yang, FU Ji-sai, CHEN Su, et al. Liquefaction and deformation of the soil foundation around a subway underground structure with a slight inclined ground surface by the shaking table test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(4): 1263 - 1272. (in Chinese))
- [8] 安军海, 陶连金, 王焕杰, 等. 可液化场地地下盾构扩挖地铁车站结构地震破坏机制振动台试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(8): 2018-2030. (AN Jun-hai, TAO Lian-jin, WANG Huan-jie, et al. Shaking table experiments on seismic response of a shield-enlarge-dig type subway station structure in liquefiable ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(8): 2018 - 2030. (in Chinese))
- [9] 王建宁, 杨 靖, 庄海洋, 等. 带地连墙异跨地铁车站结构周围地基液化振动台试验[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(10): 1858 - 1866. (WANG Jian-ning, YANG Jing, ZHUANG Hai-yang, et al. Shaking table test on liquefaction characteristics of foundation around a complicated subway station with diaphragm walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(10): 1858 - 1866. (in Chinese))
- [10] 陈国兴, 陈 苏, 左 熹, 等. 软土地地铁车站结构地震反应特性振动台模型试验[J]. 岩土力学, 2016, **37**(2): 331 - 342. (CHEN Guo-xing, CHEN Su, ZUO Xi, et al. Shaking table test on seismic response of subway station structure in soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(2): 331 - 342. (in Chinese))
- [11] 权登州, 王毅红, 叶 丹, 等. 黄土地区地铁车站振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(11): 79 - 90. (QUAN Deng-zhou, WANG Yi-hong, YE Dan, et al. Shaking table test study on subway station built in loess area[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(11): 79 - 90. (in Chinese))
- [12] 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 Zhi-ping, WANG Qi-yao, LUO Li-juan, 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))
- [13] 熊仲明, 张 朝, 霍晓鹏, 等. 地裂缝场地加速度响应振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(3): 520 - 526. (XIONG Zhong-ming, ZHANG Chao, HUO Xiao-peng, et al. Shaking table tests on acceleration response of ground fissure site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(3): 520 - 526. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] CHEN Z Y, LIU Z Q. Effects of pulse-like earthquake motions on a typical subway station structure obtained in shaking-table tests[J]. Engineering Structures, 2019, **198**: 109557.
- [16] 陈 轩, 熊仲明, 张 朝, 等. 跨地裂缝框架结构地震响应振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, **54**(4): 26 - 35. (CHEN Xuan, XIONG Zhong-ming, ZHANG Chao, et al. Shaking table test on seismic response of frame structures across the ground fissure[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, **54**(4): 26 - 35. (in Chinese))
- [17] 李 楠, 门玉明, 高 讴, 等. 微型桩群桩支护滑坡的地震动力响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(9): 2144 - 2151. (LI Nan, MEN Yu-ming, GAO Ou, et al. Seismic behavior of the landslide supported by micropiles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(9): 2144 - 2151. (in Chinese))