

基于振动台试验的黄土场地具有地上结构地铁车站 地震反应特性分析

韩建平^{1,2,*} 张虎虎^{1,2}

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 兰州 730050)

摘 要 以兰州某地铁车站为研究背景,开展了黄土场地具有地上结构的地铁车站结构体系大型振动台模型试验。测试并分析了模型体系的基频、加速度和水平位移反应以及模型车站的应变和侧墙处的动土压力反应等。结果表明:浅层地基土及埋置于其中的模型车站地下结构的加速度反应对地震动频谱特性具有较高的敏感性,而深层地基土及模型车站地上结构的加速度反应对地震动频谱特性敏感性较低;在土-结构动力相互作用过程中,地基土与地下结构运动方向相反,地基土对地下结构的变形起到“主动”约束和限制作用;结构地上第一层中柱底部是地铁车站的最薄弱部位;模型结构侧墙处动土压力增量在深度方向的变化规律受地震动强度及地基土弹塑性状态的影响。

关键词 振动台试验,黄土场地,地铁车站,地上结构,动力响应

DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2021.03.007

Seismic Response of Subway Station with Above-Ground Structure in Loess Field Based on Shaking Table Test

HAN Jianping^{1,2,*} ZHANG Huhu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract A large-scale shaking table test based on a subway station with an above-ground structure on the Lanzhou Metro under the condition of a loess site was conducted. The effect of the fundamental frequency, the acceleration, the horizontal displacement of the model system, the strain of the model structure and the dynamic soil pressure response of the model foundation were considered in analysis. The acceleration response of the shallow foundation soil and the underground structure of the model station embedded therein was highly sensitive to the frequency characteristics of the ground motion, while the acceleration response of the deep foundation soil and the above-ground structure of the model station was less sensitive to the frequency characteristics of the ground motion; In the soil-structure dynamic interaction process, the movement of the foundation soil and the underground structure was in the opposite direction, and the foundation soil had an active constraint and limitation on the deformation of the underground structure. The bottom of the column at the first storey above the ground was the weakest position of the subway station structure. The change of the dynamic soil pressure increment along the depth of the model structure was affected by the intensity of the ground motion and the elastoplastic state of the foundation soil.

Keywords shaking table test, loess field, subway station, above-ground structure, dynamic response

收稿日期: 2020-04-08

基金项目: 甘肃省科技支撑(144GKCA025); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R51)

联系作者: 韩建平(1970-),男,博士,教授,博导,从事工程结构抗震与减震控制研究。E-mail: jphan@lut.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引言

近年来,随着城市规模的快速发展及其交通需求的不断增大,我国西部黄土地区地铁工程建设发展迅速。截至 2020 年,西安市已开通地铁线路 5 条,总里程达 161.5 km,在建线路 11 条,远景规划总里程达 420 km;兰州市已开通地铁线路 1 条,总里程达 26 km,在建线路 1 条,里程为 9.4 km。由于黄土具有大孔隙和弱胶结等结构特性,因此其表现出极高的地震易损性^[1]。而地铁车站作为生命线工程,在紧急状况下,人流疏散困难,在地震下车站结构一旦发生倒塌破坏,所造成的人员伤亡将是十分惨重的,并且地铁车站埋置于地下,震后修复难度大,代价高。但目前针对黄土这种特殊地质条件下地下结构抗震性能的研究成果相对较少^[2-5]。因此开展黄土场地中地铁车站结构的地震反应特性研究迫在眉睫。

自 1995 年日本阪神地震中大开地铁车站遭受严重破坏后,国内外学者对地下结构地震反应特性及破坏机理和失效模式开展了广泛而深入的研究,已形成了较为深刻的认识^[6-8]。地下结构地震反应主要受控于周围地基土的动力特性^[9-12];地下结构的破坏机理和失效模式是在强烈水平地震

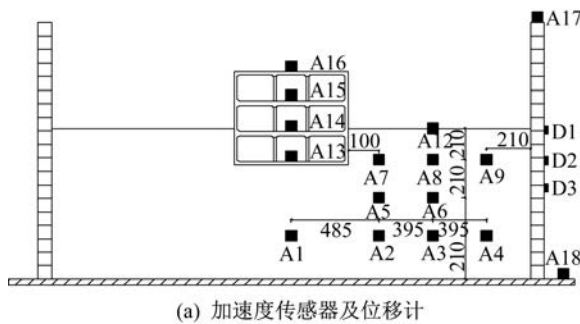
动作用下,周围土体发生过大剪切变形致使车站结构产生过大的层间位移,而车站结构中柱抗剪强度和变形能力不足,最终发生剪切破坏和弯曲破坏^[13-16]。然而,目前针对具有地上结构的地铁车站地震反应特性的研究几乎空白。

因此,本文以兰州黄土场地中某具有两层地上结构的地铁车站为原型,基于缩尺模型的振动台试验数据,分析模型体系各阶段的基频、加速度和水平位移反应以及模型车站的应变和侧墙处的动土压力反应,目的是探索黄土场地条件下具有地上结构的地铁车站地震反应规律,揭示其地震损伤和灾变机制。

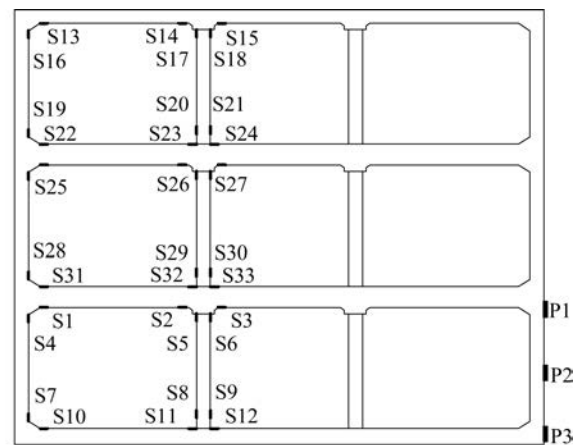
1 振动台试验概况

本次试验采用兰州地铁某站台施工基坑的黄土为模型地基土,在兰州理工大学地震模拟振动台上进行了几何比例为 1:30 的具有两层地上结构的地铁车站模型试验。模型土箱采用叠层剪切土箱,内部净尺寸为 2.95 m×1.95 m×1.9 m。模型车站采用由微粒混凝土浇筑的地下一层、地上两层的三层三跨矩形断面结构。模型试验的传感器布置如图 1 所示,试验方案详见文献[5]。

振动台试验加载工况如表 1 所示。



(a) 加速度传感器及位移计



(b) 应变片及土压力计

图 1 振动台试验传感器布置

Fig.1 Arrangement plan of sensors for shaking table test

2 试验结果与分析

2.1 模型体系基频

计算模型地基土中 A8、A12 测点,地下结构

A13、A14 测点及地上结构 A16 测点相对于模型土箱底部 A18 测点的互相关函数,利用时域 ITD 法,识别各次白噪声工况下模型体系的基频如表 2 所示。

由表 2 可知,在前三次白噪声扫频下相同深

表1 振动台试验加载工况

Table 1 Loading cases for shaking table test

序号	输入地震动	工况代号	峰值加速度/g
1	白噪声	W1	0.05
2	El Centro波	EL-1	0.10
3	Taft波	TA-1	0.10
4	兰州人工波	LZ-1	0.10
5	白噪声	W2	0.05
6	El Centro波	EL-2	0.30
7	Taft波	TA-2	0.30
8	兰州人工波	LZ-2	0.30
9	白噪声	W3	0.05
10	El Centro波	EL-3	0.60
11	Taft波	TA-3	0.60
12	兰州人工波	LZ-3	0.60
13	白噪声	W4	0.05

表2 不同测点加速度计获得的基频

Table 2 Fundamental frequencies calculated by different accelerometers

工况	Hz				
	模型土中 测点 A8	地下结构 测点 A13	模型土中 测点 A12	地下结构 测点 A14	地上结构 测点 A16
W1	9.53	9.68	10.08	10.37	11.95
W2	9.94	10.26	10.25	10.55	11.84
W3	9.90	9.81	9.73	9.63	11.23
W4	18.14	18.67	17.60	19.50	9.18

度处的地基土和地下结构基频基本一致。这一方面说明在较小地震动作用下,地下结构与其一定水平距离处的地基土刚度差异较小,土体密实度未发生明显变化,地下结构未发生明显损伤;另一方面表明地基土与地下结构始终紧密接触协同振动。第四次扫频时地下结构-土体系基频骤增。这可能是由于在较大地震动作用下,土-地下结构动力相互作用强烈,以至于两者之间已产生间隙,当白噪声扫频时,土与地下结构瞬时碰撞产生散射和反射效应,致使土与地下结构体系基频均骤增。四次白噪声扫频得到的地上结构基频不断降低,说明在振动台试验过程中地上结构损伤不断累积,刚度逐渐降低。

2.2 模型体系加速度反应

以 A3 加速度传感器所测峰值加速度为基准值,利用土体深度方向布设的 A6、A8 和 A12 加速

度传感器所测的峰值加速度计算地基土加速度放大系数,如图 2 所示。在不同地震动输入下,地基土加速度放大系数自下而上呈现先减小后增大的规律。这可能是由于地基土分层填筑时,在 0.4~0.6 m 深度范围夯实度比其他深度范围较小所致。从图 2(a)可知,当地震动峰值加速度增大时,深层地基土(0.4~0.6 m 深度范围)的加速度放大系数变化幅度较小,浅层地基土(0~0.2 m 深度范围)的加速度放大系数变化幅度较大,在地表处尤为显著,且呈现出不断减小的规律。这进一步表明试验过程中深层地基土的密实度未发生明显变化,浅层地基土中由于土-结构相互作用的存在,对地震动能量具有较大的消耗作用,也即表明车站结构的存在对地震动在地基土中的传播具有一定影响。从图 2(b)和图 2(c)可知,在不同地震动输入下,浅层地基土中的加速度放大系数为 El Centro 地震动记录作用下最大,兰州人工波作用下次之,Taft 地震动记录作用下最小,在地表处尤为显著。在深层地基土中,不同地震动输入下的土层加速度放大系数差异较小。上述结果表明,在浅层地基土中,地基土加速度放大系数对地震动频谱特性比较敏感;而在深层地基土中,地震动频谱特性对土层加速度放大系数的影响较小。

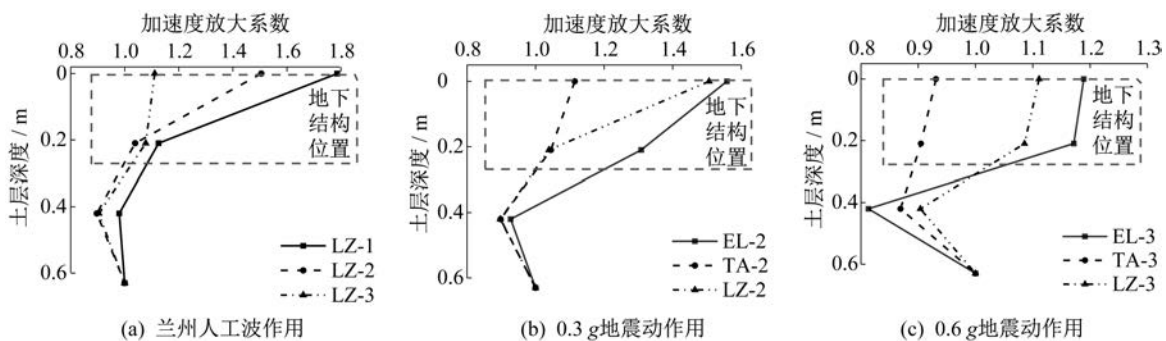


图2 模型地基土不同深度处的加速度放大系数

Fig.2 Acceleration amplification factors at different depths of the model foundation soil

图 3(a)给出了兰州人工波输入下车站结构不同高度处的加速度放大系数,可以发现:随峰值加速度的增加,结构不同高度处的加速度放大系数不断增大。从图 3(b)和图 3(c)可以看出,在不同地震动输入下,地上结构同一高度处的加速度放大系数之间无明显规律。这表明地上结构的加速度反应与地震动特性无明显关系。同时,不同强度地震动输入下模型车站结构的加速度放大系

数发展规律显著不同,这是由于振动台试验中损伤累积的存在,在 0.6 g 地震动作用下,模型结构已经出现了明显的非线性反应。对比图 2 和图 3 中地下结构位置处的地基土加速度放大系数与地下结构上的加速度放大系数,可知地下结构的加速度反应主要受周围地基土动力反应的影响,故其加速度放大系数对地震频谱特性有一定的敏感性。

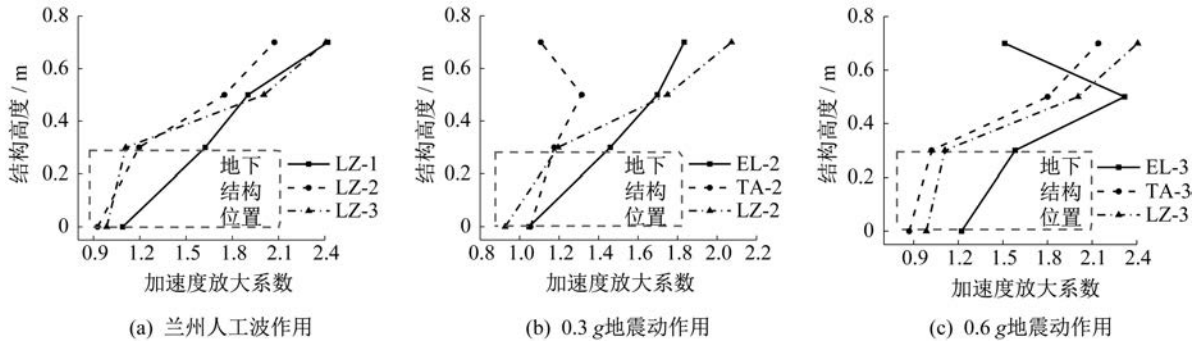


图 3 模型车站结构不同高度处的加速度放大系数

Fig.3 Acceleration amplification factors at different heights of the model substation structure

2.3 模型体系水平位移反应

由于振动台试验中模型地基土及地下结构的位移反应不易直接测量,故采用将加速度二次积分的方法求得相应位置处的水平位移反应。图 4 分别对 0.1 g 和 0.6 g El Centro 地震动记录作用下地下结构与同深度地基土的水平位移反应进行了对比,整体而言,同一深度处地基土与地下结构的水平位移大小相等、方向相反,且不同深度处两者的水平位移分别相等。这一方面表明,地下结构与其一定距离处地基土之间的刚度无明显差异,且该距离处地基土始终处于弹性状态;另一方面说明,在土-结构相互作用过程中,地基土与地下结构运动方向相反,地基土对地下结构的变形起到“主动”约束和限制作用,对地下结构抗震具有一定作用。

2.4 模型结构动应变反应

不同地震动作用下车站结构不同部位的峰值拉应变分布如图 5 所示(注:“0”表示应变计无信号)。

从图 5 可以看出:随地震动峰值加速度的增加,结构各测点处的峰值拉应变逐渐增大。在同一工况下,地下结构的峰值拉应变远小于地上结构的峰值

拉应变,这是由于地下结构受周围土体的约束作用,在地震动作用下的变形远小于地上结构。

模型结构地上第二层中柱柱顶的峰值拉应变始终大于该层中柱柱底的峰值拉应变,地上第一层中柱柱顶的峰值拉应变始终小于该层中柱柱底的峰值拉应变。模型结构地上第二层的顶板截面刚度显著大于该层底板的,在地震动作用下,当顶板与底板之间发生剪切变形时,中柱顶部与顶板连接处的附加弯矩较大,因此模型结构地上第二层中柱顶部峰值拉应变大于该层中柱底部的。在模型结构地上第一层,一方面,由于底板截面刚度显著大于顶板的,中柱底部与底板连接处的附加弯矩较大;另一方面,模型结构地上第一层底部位于车站结构地上地下交界处,模型结构在此处刚度突变,在水平地震动作用下,受土-结构动力相互作用和上部结构惯性力耦合作用,承受较大且复杂的剪切和弯曲等作用,极易产生应力集中现象。故模型结构地上第一层中柱柱底的峰值拉应变始终大于该层中柱柱顶的,且是地铁车站结构的抗震薄弱部位。

在不同强度地震动作用下,除个别工况外,模型结构地上第二层侧墙顶部的峰值拉应变始终大于该层侧墙底部的。输入地震动峰值为 0.1 g 和 0.3 g 时,模型结构地上第一层侧墙顶部和底部的

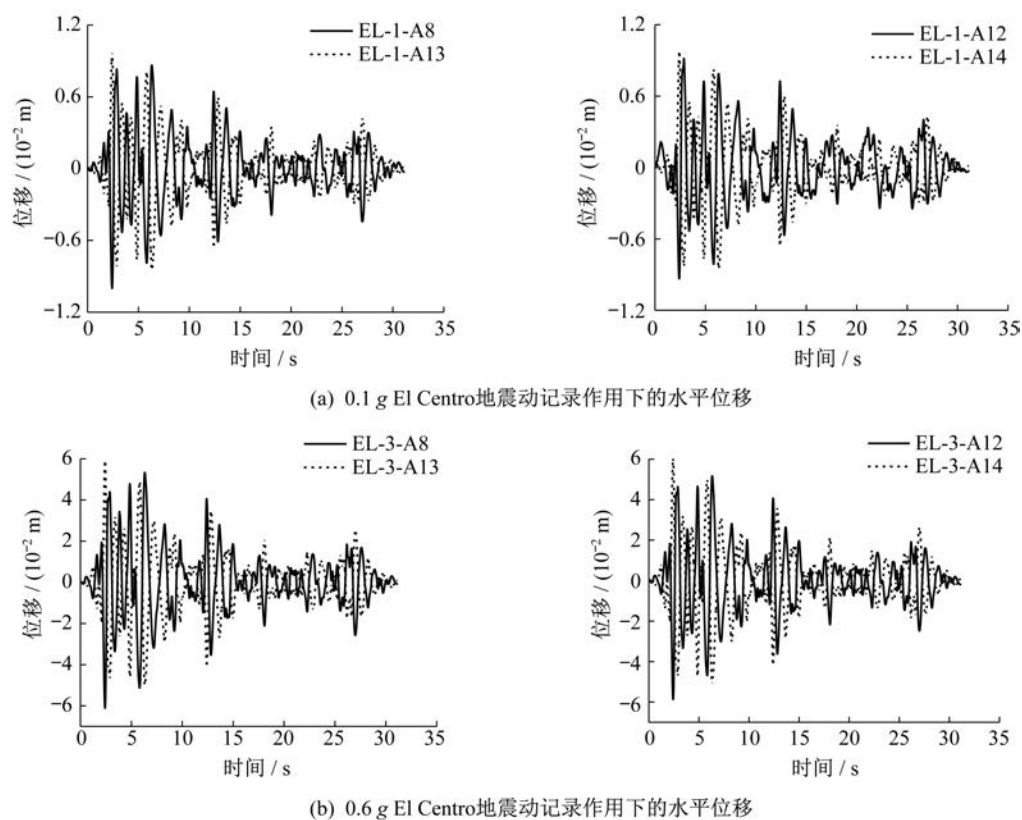


图4 不同强度地震动作用下模型结构与模型地基的水平位移时程曲线

Fig.4 Horizontal displacement time-histories of model structure and foundation under different intensity ground motions

峰值拉应变差异较小,而当输入地震动峰值为 $0.6g$ 时,模型结构地上第一层侧墙底部的峰值拉应变显著大于该层侧墙顶部的,表明该层侧墙底部发生了严重的局部损坏。

在相同强度的地震动作用下,模型结构地上第二层底板靠近中柱处的峰值拉应变始终大于该层底板靠近中柱处的。随地震动强度的增大,模型结构地上第一层靠近侧墙处的峰值拉应变变化并不明显,而模型结构地上第二层顶板和该层底板靠近侧墙处的峰值拉应变均表现为先增大后减小,且底板处的峰值拉应变始终大于顶板处的。这可能是由于在地震动作用下,结构局部区域损伤导致结构刚度不连续,进而影响了结构的整体受力性能。

2.5 动土压力反应

表3给出了不同地震动作用下模型结构不同高度处的侧墙动土压力增量。可以发现,在峰值加速度为 $0.1g$ 和 $0.3g$ 的不同地震动作用下,模型结构侧墙动土压力增量随埋深增大而增大,侧墙底部测点P3动土压力增量增大效果最为显著。

当输入地震动峰值为 $0.6g$ 时,整体而言,侧墙顶部测点P1动土压力增量远大于侧墙中部和底部测点的。

图6分别绘制了峰值加速度为 $0.1g$ 和 $0.6g$ 的兰州人工波作用下模型结构侧墙处测点P1、P2和P3的动土压力时程曲线。由图6(a)可知:在 $0.1g$ 地震动作用下,土体处于弹性变形状态,且P1和P2测点的初始土压力大于零,这是因为在振动台试验前,通过夯击制作模型地基时,土和结构紧密接触,产生一定大小的围压;在试验过程中P1和P2测点动土压力始终大于零,表明土体与地下结构始终紧密接触,围压效果始终存在。P3测点初始土压力虽为零,但也始终与地下结构紧密接触,协同振动。由图6(b)可知:在 $0.6g$ 地震动作用下,由于P3测点埋深较大,土-结构相互作用较小,土体仍具有较大的弹性变形性能,能够与地下结构协同运动,表现为动土压力时程曲线与坐标横轴接触点密集,且横轴两侧的曲线较为饱满。P2测点的动土压力发展大致经历三个阶段。第一阶段,土体与地下结构紧密接触,协同振动,围压始终大于零。第二阶段,地震动能量不断累积,

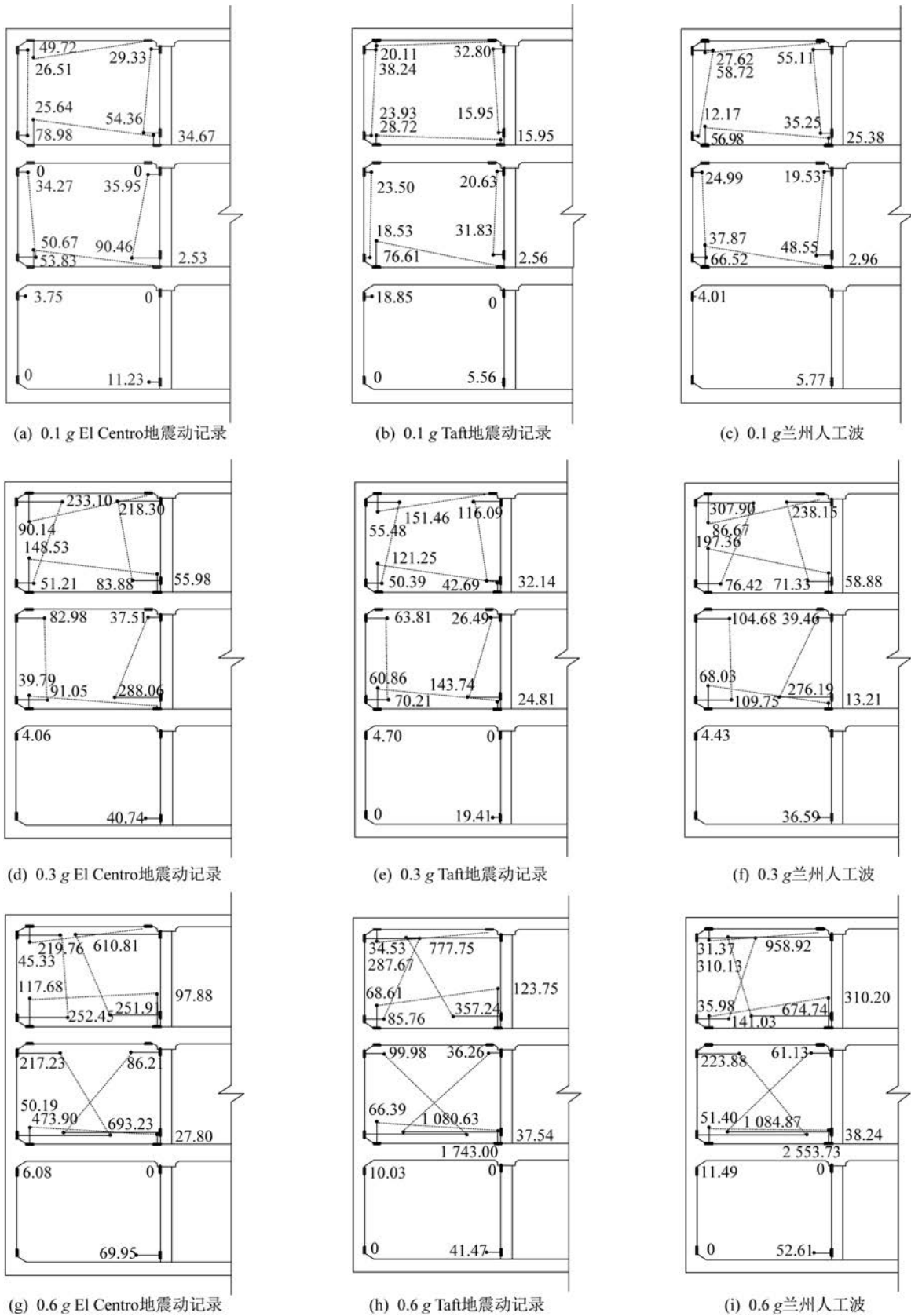


图5 不同地震动作用下车站结构峰值拉应变分布图(单位: 10^{-6})

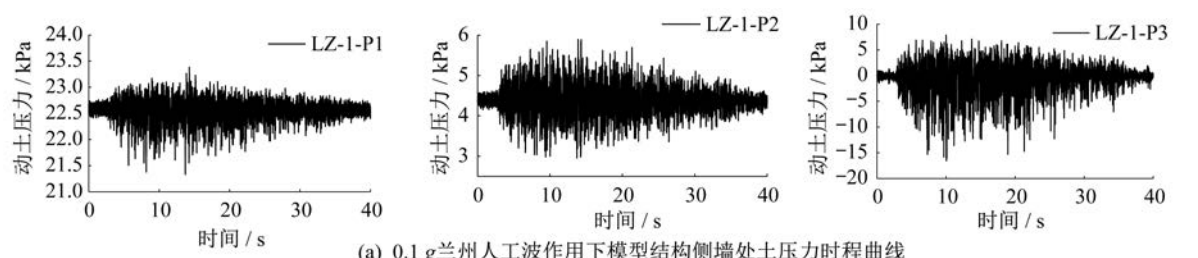
Fig.5 Peak tensile strain in structure under different ground motions (unit: 10^{-6})

表3 不同地震动作用下地下结构侧墙动土压力增量

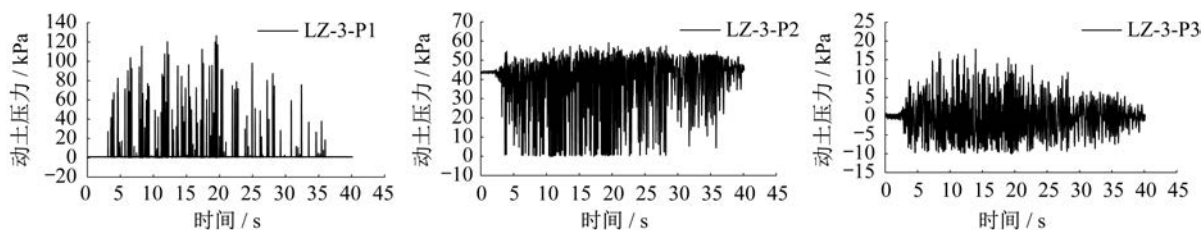
Table 3 Soil pressure increment at different heights of the model structure under different ground motion

地震类型	测点	地下结构侧墙动土压力增量/kPa		
		0.1 g	0.3 g	0.6 g
El Centro波	P1	0.77	4.91	114.69
	P2	1.51	4.31	10.79
	P3	16.48	31.48	16.95
Taft波	P1	1.12	4.22	97.55
	P2	1.96	4.35	25.12
	P3	17.94	21.90	17.46
兰州人工波	P1	0.80	3.11	112.76
	P2	1.57	3.87	14.28
	P3	13.08	21.41	16.97

土与地下结构不协调振动,发生滑移,地下结构与土体相向运动时,接触面处的动土压力增加;而地下结构与土体背向运动时,由于土体弹性变形能力下降,导致接触面处动土压力急剧降低,直至为零。第三阶段,地震动加载即将结束时,土体与地下结构均复位,两者的接触状态趋于稳定,动土压力又维持在一定的数值。P1测点的土体在加载前已完全进入塑性状态,围压为零,在地震动加载时,土与结构发生严重滑移,地下结构与土体背向运动过程中出现完全脱开现象,且土体始终无法完全复位,因此动土压力时程曲线表现出瞬降瞬增的单侧离散峰值现象。



(a) 0.1 g兰州人工波作用下模型结构侧墙处土压力时程曲线



(b) 0.6 g兰州人工波作用下模型结构侧墙处土压力时程曲线

图6 不同强度地震动作用下侧墙动土压力时程曲线

Fig.6 Dynamic soil pressure time-histories of side wall under different ground motions

3 结论

本文基于黄土场地具有地上结构的地铁车站考虑土-结构动力相互作用的大型振动台试验数据,通过对模型体系基频、加速度和水平位移反应以及模型车站的应变和侧墙处的动土压力反应的分析,得到以下主要结论:

(1) 浅层地基土及埋置于其中的模型车站地下结构的加速度反应对地震动频谱特性具有较高的敏感性,而深层地基土及模型车站地上结构的加速度反应对地震动频谱特性敏感性较低。

(2) 水平位移反应表明,在土-结构相互作用过程中,地基土与地下结构运动方向相反,地基土对地下结构的变形起到“主动”约束和限制作用。

(3) 应变反应表明,由于土体的约束作用,地下结构的应变远小于地上结构的。模型结构地上第一层中柱底部是地铁车站结构抗震最薄弱部位,因此在黄土地区具地上结构的地铁车站抗震设计中应加强此部位的延性,进而提高其抗震性能。

(4) 当地震动峰值加速度较小时,模型结构侧墙动土压力增量随埋深增大而增大;当地震动峰值加速度较大时,不同高度处的土体变形性能差异较大,地表侧墙处动土压力增量远大于埋深较大侧墙处的动土压力增量。

参 考 文 献

[1] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社,2003.

Wang Lanmin. Loess dynamics [M]. Beijing:

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 权登州, 王毅红, 马蓬渤, 等. 黄土地区地铁车站地震反应的频域分析及空间效应[J]. 振动与冲击, 2016, 35(21): 102-112.
- Quan Dengzhou, Wang Yihong, Ma Pengbo, et al. Spatial effects and frequency domain analysis for seismic responses of subway station in loess area [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35 (21) : 102-112. (in Chinese)
- [3] 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 Dengzhou, Wang Yihong, 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)
- [4] 张佳, 王毅红, 权登州, 等. 黄土地区地铁地下车站地震变形特性研究[J]. 震灾防御技术, 2016, 11(2): 272-282.
- Zhang Jia, Wang Yihong, Quan Dengzhou, et al. A study on the strain response of underground subway station in loess region [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2016, 11(2): 272-282. (in Chinese)
- [5] 聂闻锐. 黄土地区具有地上结构地铁车站抗震性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- Nie Wenrui. Seismic performance study on subway station with above-ground built in loess area [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [6] 杜修力, 康凯丽, 许紫刚, 等. 地下结构地震反应的主要特征及规律[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 11-21.
- Du Xiuli, Kang Kaili, Xu Zigang, et al. Main characteristics and rules of seismic response for underground structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7): 11-21. (in Chinese)
- [7] 窦远明, 冯帆, 王建宁, 等. 软弱夹层对地铁车站结构地震动力响应影响的三维数值分析[J]. 结构工程师, 2019, 35(2): 140-148.
- Dou Yuanming, Feng Fan, Wang Jianning, et al. The 3D seismic response analysis of subway station built in weak interlayer [J]. Structural Engineers, 2019, 35 (2): 140-148. (in Chinese)
- [8] Iwatate T, Kobayashi Y, Kusu H. Investigation and shaking table tests of subway structures of the Hyogoken-Nanbu Earthquake [C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo, Japan, 2000: 1043.
- [9] Debiasi E, Gajo A, Zonta D. On the seismic response of shallow-buried rectangular structures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 99-113.
- [10] Abuhajar O, Naggar H E, Newson T. Seismic soil-culvert interaction [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1649-1669.
- [11] Zhuang H, Hu Z, Wang X, et al. Seismic responses of a large underground structure in liquefied soils by FEM numerical modelling [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(12): 3645-3668.
- [12] 左熹, 陈国兴, 王志华, 等. 地铁车站结构临界破坏特性的振动台试验[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 865-873.
- Zuo Xi, Chen Guoxing, Wang Zhihua, et al. Shaking table model test on critical failure characteristics of subway station structure [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5) : 865-873. (in Chinese)
- [13] 禹海涛, 欧飞奇, 袁勇, 等. 软土典型地铁车站中柱减隔震优化设计[J]. 结构工程师, 2016, 32(6): 86-91.
- Yu Haitao, Feiqiu, Yuan Yong, et al. Optimal design of seismic reduction and isolation of central column in a typical metro station in soft soils [J]. Structural Engineers, 2016, 32(06): 86-91. (in Chinese)
- [14] Chen G, Wang Z, Zuo X. Shaking table test on the seismic failure characteristics of a subway station structure on liquefiable ground [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42 (10) : 1489-1507.
- [15] Qiu D, Chen J, Xu Q. Dynamic responses and damage forms analysis of underground large scale frame structures under oblique SV seismic waves [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 216-220.
- [16] 陈之毅, 熊求正. 远近场地震动反应谱峰值参数比较及其对多层地铁车站的影响[J]. 结构工程师, 2018, 34(S1): 48-53.
- Chen Zhiyi, Xiong Qiuzheng. Difference of response spectrum based intensity parameters of far-field and near-field earthquakes and its influence on multi-story subway station [J]. Structural Engineers, 2018, 34 (S1): 48-53. (in Chinese)