

软土地区中庭式地铁车站动土正应力分布规律^{*}张志明^{1, 2} 郭宗程¹ 袁 勇^{3**}

(1. 贵州大学土木工程学院, 550025, 贵阳; 2. 贵州省岩土力学与工程安全重点实验室, 550025, 贵阳;
3. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 200092, 上海//第一作者, 讲师)

摘 要 依托上海某中庭式地铁车站工程,开展了谐波激励及地震波激励下的土-地铁车站模型振动台试验。采集了车站侧墙动土正应力数据,分析了车站侧墙动土正应力的时程、实时分布和峰值分布等响应特征。试验结果显示,在谐波激励下,侧墙动土正应力时程具有周期性,其时程的频率与输入谐波的频率一致;在地震波激励下,侧墙动土正应力时程仍具有周期性,其时程的一阶卓越频率与场地的一阶卓越频率一致;在同一时刻、同一埋深处,车站左、右侧墙的动土正应力绝对值相差很小,呈一拉一压的状态;侧墙动土正应力峰值整体呈近似 L 形分布,最大应力发生在侧墙底。

关键词 地铁车站; 软土地区; 动土正应力; 地震响应

中图分类号 TU435; U231.4; TU471.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.045

Distribution Law of Dynamic Soil Normal Stress of Atrium-style Metro Station in Soft Soil Area

ZHANG Zhiming, GUO Zongcheng, YUAN Yong

Abstract Based on certain atrium-style metro station project in Shanghai, shaking table test is carried out on a soil-station model under excitation of both harmonic and seismic waves. Station side wall dynamic soil normal stress data is collected. Response characteristics such as time-history, real-time distribution, peak value distribution of the normal stress are analyzed. Test results show that under harmonic excitation, there is periodicity in the time-history of side wall dynamic soil normal stress, and the frequency of time-history is consistent with that of the input harmonic wave. Under seismic wave excitation, periodicity exists as well, and the first predominant frequency of the time-history is consistent with that of the site. At the same moment and the same buried depth, the absolute value of dynamic soil normal stress barely makes difference between on left or right side wall, showing compression on one

side and tension on the other. Peak value presents an approximate L-shaped distribution along the side wall, and the maximum stress occurs at the wall bottom.

Key words metro station; soft soil area; dynamic soil normal stress; seismic response

First-author's address School of Civil Engineering, Guizhou University, 550025, Guiyang, China

车站侧墙动土正应力为地铁车站抗震研究中的重要指标。而当前的地铁车站动土正应力研究或仅描述其时程变化^[1-2],或仅给出其峰值动土正应力分布^[3-6],未能深入研究地铁车站侧墙动土正应力的实时分布及周期性变化。对此,本文以上海软土地区某中庭式地铁车站及场地为原型,搭建实体的土-地铁车站模型,在 5 Hz 谐波工况及 Loma Prieta 地震波工况下开展振动台试验,测试车站左右侧墙的动土正应力,研究地铁车站侧墙动土正应力的时程,以及周期内实时分布与峰值分布等响应规律。

1 振动台试验概况

1.1 原型车站及场地

原型场地自上而下依次为①₁层填土、②₁层粉质黏土、②₃层砂质粉土、③₁层淤泥质粉质黏土、⑤₁层黏土和⑤₃层黏土(土层序号参考 DGJ 08-37—2012《岩土工程勘察规范》)。原型中庭式车站为地下两层岛式车站,宽 21.3 m、高 17.7 m,底板埋深与车站高度几乎相同。

1.2 试验设备和相似比

试验所用振动台的台面长 4.0 m、宽 4.0 m,可实现三向地震动输入。试验采用圆筒形柔性模型

^{*} 贵州省省级科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]—一般 150);贵州大学引进人才科研基金项目(贵大人基合字(2021)45 号);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52061135112);土木工程防灾国家重点实验室课题(SLDRCE19-A-13)

^{**} 通信作者

箱,其直径为3.0 m、高度为1.8 m。振动台和模型箱如图1所示^[7]。人工模型土由砂与锯末混合制成^[8-9],其动力特性和原型场地土相似。原型车站为现浇钢筋混凝土结构,采用C35混凝土和HRB400钢筋。试验采用镀锌钢丝和微粒混凝土分别模拟原型钢筋和混凝土。



a) 振动台

b) 模型箱

图1 振动台及模型箱实物照片^[7]

Fig. 1 Photos of the shaking table and the model

基于实验室设备的承载能力,依据量纲分析进行振动台试验的相似比设计。本试验中,长度相似比取1/30、线位移相似比取1/30、加速度相似比取1.000、动剪切模量相似比取0.033、持时相似比取0.183、频率相似比取5.480、动应变相似比取1.000、模型结构和模型土的弹性模量相似比分别取0.420和0.033。通过对比动剪切模量比随剪应变变化曲线、阻尼比随剪应变变化曲线,可以看出模型土能较好的反应出原状土的动力特性。其他物理量的相似比、试验设计细节等详见文献^[7,10]。

通过对比目标输入地震波和实际测得的振动台台面地震波,发现两者吻合较好,验证了振动台设备具有较好的工作性能^[11];通过对比自由场模型地表离模型箱侧壁不同距离测点的加速度、分析模型箱侧壁的位移,验证了柔性模型箱的剪切位移模式,模型箱的边界效应基本可以忽略^[10,12]。

1.3 土压力计布置

土压力计测点布置于车站左、右侧墙上(如图2所示),用于探测侧墙动土正应力的幅值和分布。

1.4 地震动输入

本研究采用谐波及地震波来研究地铁车站侧墙动土正应力的幅值和分布特征。谐波频率取5 Hz,地震波选用1989年10月18日美国加利福尼亚州Loma Prieta地震波。谐波与地震波的峰值均调整为0.1 g(g 为重力加速度)。谐波加速度时程见图3,地震波加速度时程和反应谱见图4。其中目标反应谱为依据GB 50011—2010(2016年版)《建筑抗震设计规范》针对原型场地(Ⅳ类场地、7度设防、设计基本加速度0.1 g)获得的加速度反应谱。

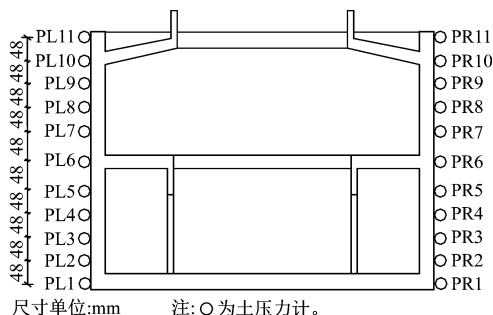
图2 模型车站侧墙土压力计测点布置^[7]

Fig. 2 Layout of soil pressure gauges on model station side wall

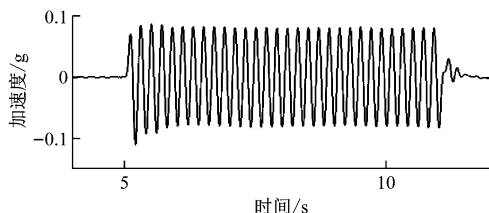
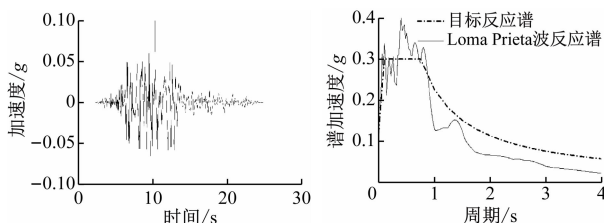


图3 5 Hz 谐波加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time-history curve of harmonic wave input of 5 Hz



a) Loma Prieta 波加速度时程曲线

b) 加速度反应谱

图4 Loma Prieta 地震波加速度时程曲线和反应谱^[7]

Fig. 4 Acceleration time-history curve and response spectrum of Loma Prieta seismic wave

2 动土正应力试验结果

2.1 动土正应力时程曲线

动土正应力定义为任一时刻车站侧墙的总应力与静土压力的差值:动土正应力为正值,说明该时刻的总应力大于地震动输入前的初始静土压力;动土正应力为负值,说明该时刻的总应力小于地震动输入前的初始静土压力。左右侧墙的受力情况类似,本文以左侧墙为例进行分析。

2.1.1 5 Hz 谐波工况

在5 Hz 谐波激励作用下,11个测点在振动持续时间 t_c 为7.00~8.20 s时的动土正应力时程曲线见图5。由图5可知:最大动土正应力发生在PL1处(侧墙底部);与其他位置相比,PL3~PL6处(中板至底层中部)的动土正应力要小得多;所有动土

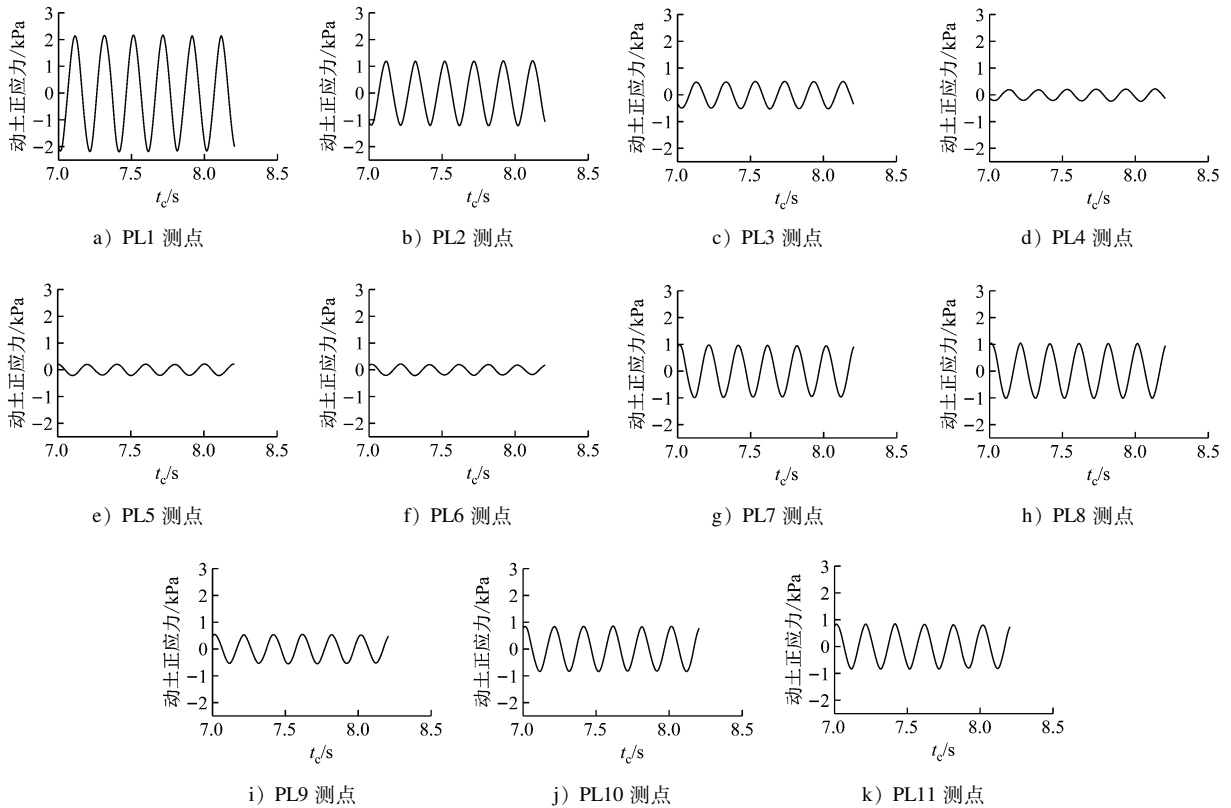


图5 5 Hz 谐波下左侧墙不同测点动土正应力时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of dynamic soil normal stress at different measuring points on left side wall under harmonic wave of 5 Hz

正应力的变化频率均为 5 Hz,与输入谐波的频率一致。

2.1.2 Loma Prieta 地震波工况

在 Loma Prieta 地震波激励作用下,11 个测点在 t_c 为 4.00 ~ 6.00 s 时的动土正应力时程曲线见图 6。由图 6 可知:最大动土正应力也发生 PL1 处(侧墙底部);PL3 ~ PL6 处(中板至底层中部)的动土正应力明显较小;动土正应力时程曲线与输入地震波形状相似。该现象印证了以加速度形式输入的地震动激励可以转换为应力波^[13]。

2.2 周期内的动土正应力分布

2.2.1 5 Hz 谐波工况

在 5 Hz 谐波工况下,为研究 1 个完整周期(0.20 s)内的侧墙动土正应力实时分布,本文以动土正应力最大的 PL1 测点为目标测点,以 PL1 测点的动土正应力峰值时刻 $t_{pk} = 7.52$ s 为基准,选取周期($T = 0.20$ s)内 $t_{pk} - T/2 = 7.41$ s、 $t_{pk} - T/4 = 7.46$ s、 $t_{pk} = 7.52$ s、 $t_{pk} + T/4 = 7.57$ s、 $t_{pk} + T/2 = 7.62$ s 等 5 个代表性时刻进行研究。图 7 为 5 个代表性时刻的侧墙动土正应力分布。

从图 7 可见左右侧墙的动土正应力分布规律:

1) 动土正应力具有显著的周期性。当 $t = 7.41$ s 与 $t = 7.62$ s 时,动土正应力几乎完全一样,分布曲线几乎重合。与之相比, $t = 7.52$ s 时的动土正应力绝对值相等,拉压方向相反。当 $t = 7.46$ s 和 $t = 7.57$ s 时,侧墙的动土正应力近似为零,侧墙受力处于平衡状态。

2) 当车站侧墙受力未处于平衡状态($t = 7.41$ s、 $t = 7.52$ s 和 $t = 7.62$ s)时,动土正应力沿侧墙总体呈近似弧形分布;最大正应力发生在侧墙底。

3) 对比左、右侧墙的结果可以发现,在同一埋深处,左、右侧墙动土正应力绝对值相差很小;呈一拉一压状态。这与结构剪切变形(或称 Racking)的状态相呼应,也与文献[14]的发现吻合。

2.2.2 Loma Prieta 地震波工况

根据文献[10],土-中庭式地铁车站系统的基频与自由场场地的基频一致,均为 6.89 Hz。本文分析地震波工况下的动土正应力试验结果发现,动土正应力时程具有明显的周期性,所有测点动土正应力时程的一阶卓越频率均为 6.89 Hz,与土-中庭式地铁车站系统的基本频率一致,则周期 $T_1 = 1/6.89 = 0.14$ s。

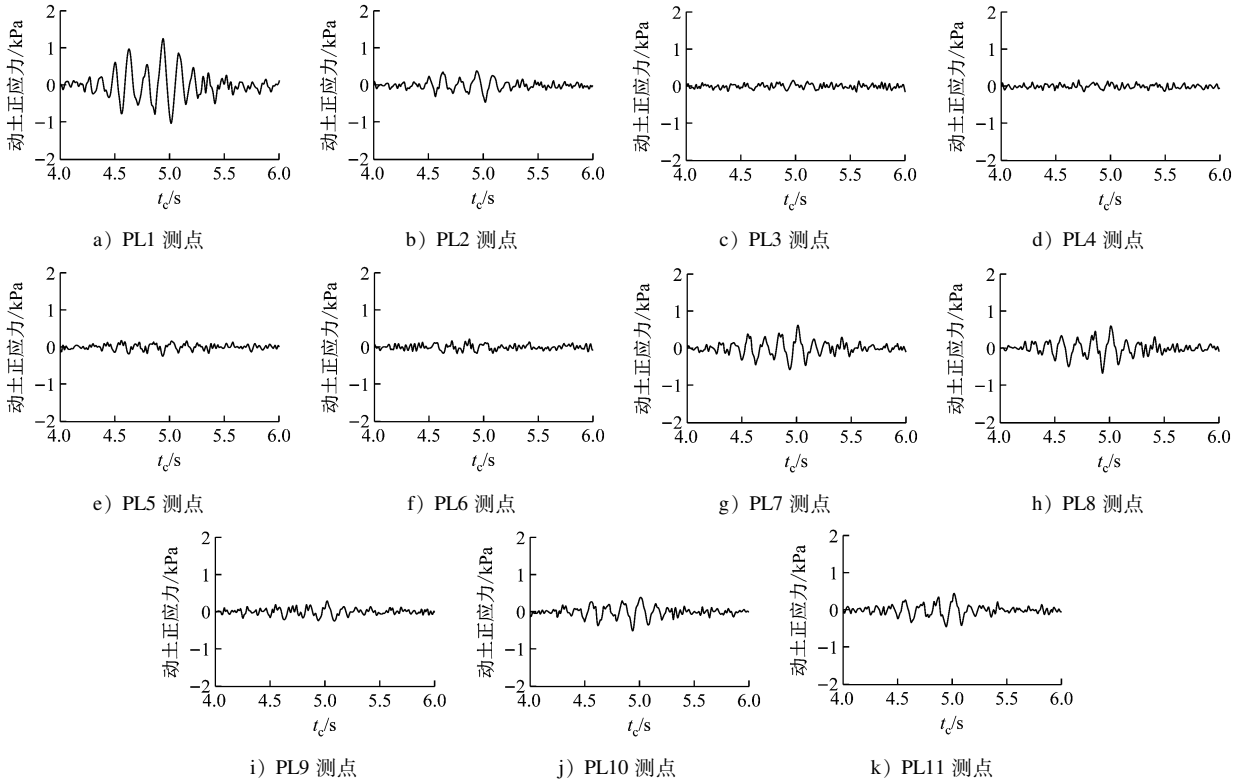


图6 Loma Prieta地震波下左侧墙不同测点动土正应力时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of dynamic soil normal stress at different measuring points on left side wall under Loma Prieta seismic wave

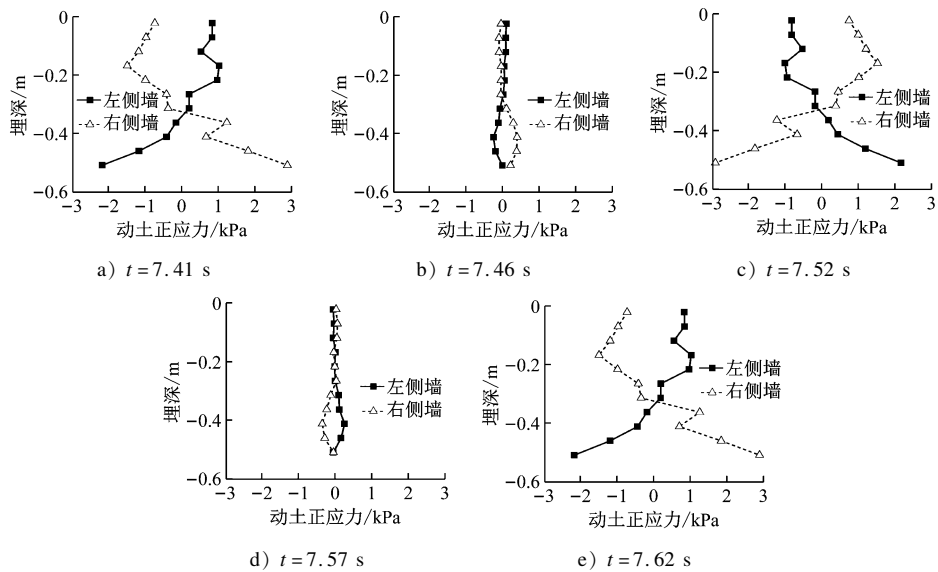


图7 五个代表时刻的动土正应力分布(5 Hz谐波)

Fig. 7 Dynamic soil normal stress distribution at five representative moments (harmonic wave of 5 Hz)

以动土正应力峰值时刻 $t_{pk} = 4.94$ s 为基准,则以 1 个完整周期 T 内 $t = 4.87$ s、 $t = 4.91$ s、 $t = 4.94$ s、 $t = 4.98$ s、 $t = 5.01$ s 为代表性时刻的左、右侧墙动土正应力分布见图 8。从图 8 可以看出:

1) 在 Loma Prieta 地震波激励下,左、右侧墙动

土正应力分布表现出明显的周期性。 $t = 4.87$ s 和 $t = 5.01$ s 时的动土正应力分布曲线十分相似。与之相比, $t = 4.94$ s 时的动土正应力绝对值相等、拉压方向相反。 $t = 4.91$ s、 $t = 4.98$ s 时动土正应力的数值很小,从地震波的周期角度可认为在这两个时

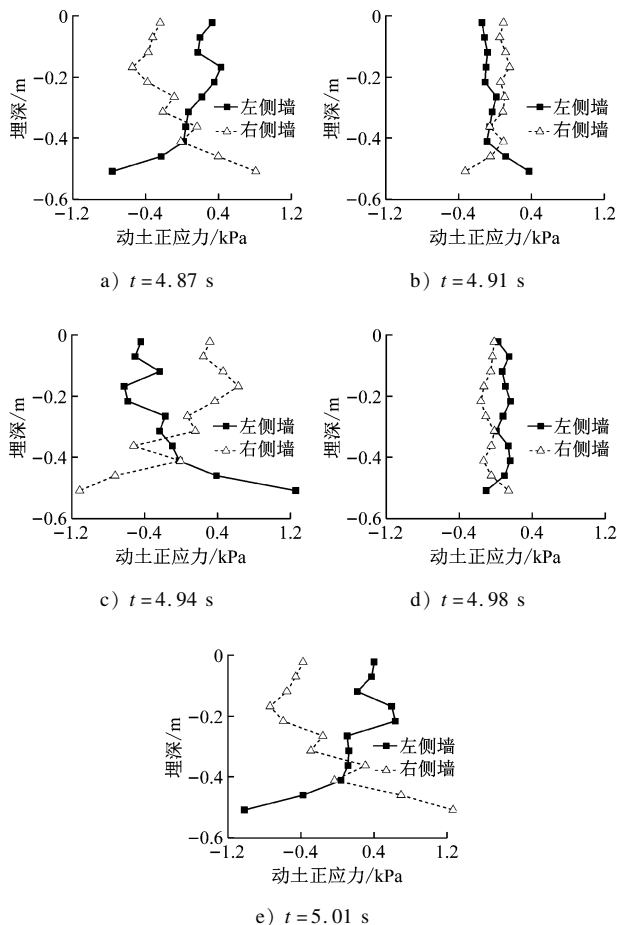


图8 代表性时刻的动土正应力分布(Loma Prieta波)

Fig.8 Dynamic soil normal stress distribution at five representative moments (Loma Prieta wave)

刻车站侧墙处于平衡状态。这些规律也佐证了动土正应力时程的周期性。

2) 与5 Hz谐波工况结果类似,当车站侧墙未处于平衡状态时($t = 4.87$ s、 $t = 4.94$ s和 $t = 5.01$ s),动土正应力沿侧墙呈近似弧形分布。最大动土正应力同样发生在侧墙底。

3) 在同一时刻、同一埋深情况下,左、右侧墙的动土正应力大小近乎相等、方向相反,即同样呈现一拉一压的状态。

2.3 动土正应力峰值

2.3.1 5 Hz谐波工况

5 Hz谐波工况下,各测点动土正应力峰值的绝对值如图9所示。由图9可以看出:①整体上,左右侧墙的动土正应力峰值沿侧墙均呈近似“L”形分布;②最大动土正应力峰值发生在侧墙底;③在5 Hz谐波工况下,左、右侧墙的峰值动土正应力大小存在差异。

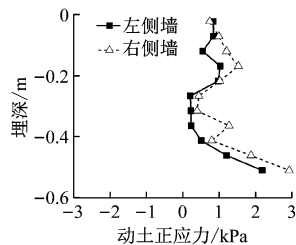


图9 5 Hz谐波峰值动土正应力

Fig.9 Peak dynamic soil normal stress under harmonic wave of 5 Hz

2.3.2 Loma Prieta地震波工况

图10为Loma Prieta地震波工况下的车站侧墙峰值正应力分布。与5 Hz谐波工况类似,在Loma Prieta地震波激励下,峰值动土正应力沿侧墙仍呈近似L形分布,最大动土正应力峰值仍发生在侧墙底,左、右侧墙动土正应力峰值几乎完全相同。

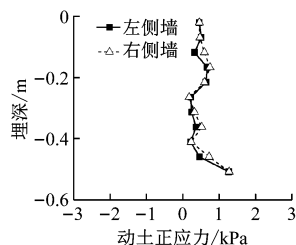


图10 Loma Prieta地震波峰值动土正应力

Fig.10 Peak dynamic soil normal stress under Loma Prieta wave

2.3.3 动土正应力峰值与静止土压力比较

本文以右侧墙为例,分析动土正应力峰值与初始静止土压力的关系。表1为右侧墙静止土压力理论值和动土正应力峰值试验结果。

由表1可以看出,无论是谐波还是地震波工况,两者比值整体呈现侧墙顶部和底部较大,中间较小的趋势;在侧墙顶部,动土正应力增量相比初始静止土压力极其显著,谐波和地震波工况下两者比值甚至达到8倍和5倍。试验结果表明,地铁车站抗震设计中有必要考虑地震动输入对侧墙土正应力的放大效应。

3 结论

1) 在谐波激励及地震波激励下,侧墙动土正应力时程均具有典型的周期性。在5 Hz谐波工况下,侧墙动土正应力时程频率也为5 Hz;在Loma Prieta地震波工况下,侧墙动土正应力时程的一阶卓越频率与场地的一阶卓越频率一致。

表 1 动土正应力试验结果对比静止土正应力理论解
Tab.1 Comparison of test results for dynamic soil normal stress and theoretical solutions for static soil normal stress

埋深 /m	静土压力 /kPa	右侧墙峰值动土正应力/kPa	
		5 Hz 谐波	Loma Prieta 波
0.022	0.091	0.741	0.454
0.071	0.293	0.992	0.469
0.119	0.494	1.204	0.591
0.168	0.696	1.529	0.742
0.216	0.897	1.017	0.595
0.265	1.099	0.442	0.174
0.314	1.300	0.393	0.318
0.362	1.502	1.272	0.517
0.411	1.703	0.797	0.229
0.459	1.905	1.877	0.721
0.508	2.106	2.928	1.271

2) 无论是在谐波激励下还是地震波激励下,沿车站侧墙动土正应力峰值均整体呈近似 L 形分布;最大动土正应力均发生在侧墙底,且中板与底层层高中央范围的动土正应力要小得多。

3) 无论是在谐波激励下还是地震波激励下,在同一时刻、同一埋深处,中庭式地铁车站左、右侧墙的动土正应力绝对值相差很小,呈一拉一压状态。

参考文献

[1] 许成顺,李洋,杜修力,等. 上覆土竖向惯性力对浅埋地下框架结构地震损伤反应影响离心机振动台模型试验研究[J]. 土木工程学报,2019(3):100.
XU Chenshun, LI Yang, DU Xiuli, et al. Dynamic centrifuge tests for influence of vertical inertia force of overburden soil on earthquake damage response of shallow-buried underground frame structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2019(3):100.

[2] WU W, GE S, YUAN Y, et al. Seismic response of subway station in soft soil: shaking table testing versus numerical analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,100: 103389.

[3] 谷音,谌凯,吴怀强,等. 考虑地震动空间非一致性的地铁车站结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击,2017(17):255.
GU Yin, CHEN Kai, WU Huaqiang, et al. Shaking table tests for a subway station structure under spatially non-uniform ground motion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017(17):255.

[4] 边金,陶连金,王文沛,等. 地铁车站结构邻近土体动应力振动台试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2011(4):685.
BIAN Jin, TAO Lianjin, WANG Wenpei, et al. Shaking table

test on dynamic soil stress of the subway station structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011(4):685.

[5] 李江乐,王社良,张世荣,等. 考虑双向地震作用的无柱地铁车站振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021(5):1056.
LI Jiangle, WANG Sheliang, ZHANG Shirong, et al. Shaking table tests of column-free subway stations considering bidirectional earthquake actions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021(5):1056.

[6] 安军海,陶连金,王焕杰,等. 可液化场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(8):2018.
AN Junhai, TAO Lianjin, WANG Huanjie, 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(8):2018.

[7] 张志明,禹海涛,袁勇,等. 中庭式地铁车站地震响应振动台试验[J]. 中国公路学报,2021(5):125.
ZHANG Zhiming, YU Haitao, YUAN Yong, et al. Shaking table tests on seismic response of atrium-style subway station[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021(5):125.

[8] YAN X, YUAN J, YU H, et al. Multi-point shaking table test design for long tunnels under non-uniform seismic loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016,59:114.

[9] YANG J, LU Z, LI P. Large-scale shaking table test on tall buildings with viscous dampers considering pile-soil-structure interaction[J]. Engineering Structures, 2020,220: 110960.

[10] ZHANG Z, BILOTTA E, YUAN Y, et al. Experiments of an atrium-style metro station under harmonic excitation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2020,103:103463.

[11] ZHANG Z, BILOTTA E, YUAN Y, et al. Experimental assessment of the effect of vertical earthquake motion on underground metro station[J]. Applied Sciences, 2019, 9: 5182.

[12] ZHANG Z, YUAN Y, BILOTTA E, et al. Design of shaking table tests on atrium-style subway station models under seismic excitations[C]// Peila, Viggiani & Celestino (Eds). Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art. London: Taylor & Francis Group, 2019:1242.

[13] KRAMER S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

[14] 车爱兰,岩楯敞广,葛修润. 关于地铁地震响应的模型振动试验及数值分析[J]. 岩土力学,2006(8):1293.
CHE Ailan, IWATATE Takahiro, GE Xiurun. Dynamic behaviors of subway structure subjected to strong earthquake motions using shaking table tests and dynamic analyses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(8):1293.

(收稿日期:2021-12-27)