

不同类型地震波作用下软土地地铁 车站动力响应试验研究*

张志明^{1,2} 姚 贵¹ 袁 勇^{3**}

(1. 贵州大学土木工程学院, 550025, 贵阳; 2. 贵州大学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 依托上海某软土地框架式地铁车站开展了振动台模型试验,通过在模型基底输入相同峰值加速度、不同频率成分的地震波,研究不同频谱特性的地震波对近场和远场加速度,以及车站结构的加速度、动应变、轴力和弯矩等动力响应的规律。研究表明:地震波的频率成分将同时影响场地、车站结构的加速度大小及其沿场地深度的分布,低频丰富的地震波对加速度的放大效应更加显著;不同频谱特性的地震波对结构不同类型动力响应的规律不同。

关键词 地铁车站; 软土地; 地震响应; 振动台试验

中图分类号 U442.5⁺5:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.044

Experimental Study on Dynamic Response of Metro Station in Soft Soil Site under Differ- ent Types of Seismic Waves

ZHANG Zhiming, YAO Gui, YUAN Yong

Abstract Based on a frame-type metro station in Shanghai certain soft soil site, a shaking table model test is carried out. By inputting seismic waves with the same peak acceleration and different frequency components at model base, the effects of seismic waves with different spectral characteristics on near-field and far-field acceleration, station structure dynamic response such as acceleration, dynamic strain, axial force and bending moment are studied. Results show that frequency component of seismic wave will affect both the acceleration amplitude and distribution along the depth for site and station structure. For seismic wave rich in low-frequency components, its acceleration amplification effect is more significant. The influencing mechanisms of seismic waves with different spectral characteristics on different types of structural dynamic responses are different.

Key words metro station; soft soil site; seismic response; shaking table test

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

地震动特征是影响隧道、地铁车站等地下结构地震响应的重要参数^[1]。国内外学者围绕地震动特性对埋置隧道^[2-5]动力响应的影响已进行了大量模型试验、数值模拟和解析研究。然而,针对软土地地铁车站地震动特性对其动力响应影响的研究,往往仅采用数值模拟方法实现^[6-8],利用振动台试验的研究偏少。本文以上海某软土地框架式地铁车站为背景,采用振动台模型试验方法,在模型基底输入多个地震波,开展不同频谱特征地震波作用下地铁车站的动力响应研究。

1 试验概况

模型几何比例尺取 1/30,振动台试验的相似比设计、模型材料、仪器设备等细节参见文献[9-10]。

图 1 为试验过程实录,图 2 为传感器布置图。图 2 a) 中 AM-1—AM-5 为远离车站场地中沿深度布置的加速度计;AN-1—AN-5 为场地中紧邻车站外墙布置的加速度计;AW-1—AW-5 为布置在车站结构外表面的加速度计;图 2 b)、图 2 c) 分别为车站应变片和侧墙土压力计布置。

表 1 为试验加载工况表,所有地震动均为水平横向输入,台面的峰值加速度均调整为 0.1 g。图 3 给出了未经过相似比调整的 4 条原始地震波(上海人工波、El Centro 波、Kobe 波、Loma Prieta 波)的加

* 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资助项目(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

人工波的作用下 F_a 先递减后递增。总体上,在相同场地深度处,Kobe 波和 Loma Prieta 波作用下的 F_a 较大且接近,El Centro 波作用下的次之,上海人工波作用下的最小,且地表处 4 条地震波作用下的 F_a 依次为 2.50、2.65、2.43 和 1.83。

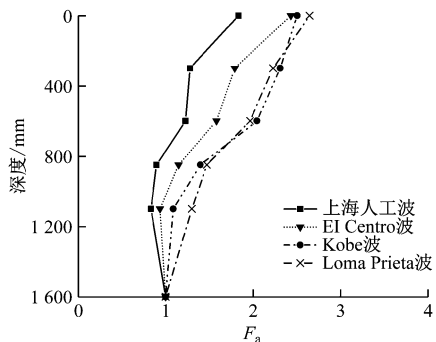


图 5 远离车站场地加速度放大系数随场地深度分布
Fig. 5 Distribution of acceleration amplification factor with depth of site away from station

2.1.2 紧邻车站侧墙场地

该区域场地的加速度放大系数随场地深度分布情况如图 6 所示。

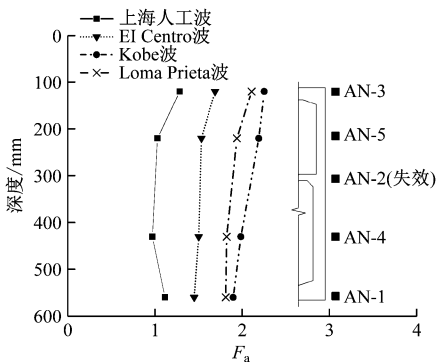


图 6 紧邻车站侧墙场地加速度放大系数随场地深度分布
Fig. 6 Distribution of acceleration amplification factor with depth in site adjacent to station side wall

紧邻车站侧墙场地的 F_a ,在相同场地深度处,Kobe 波作用下的最大,Loma Prieta 作用下的次之,El Centro 波作用下的再次之,上海人工波作用下的最小,这与前述远离车站场地的加速度响应规律略有区别。整体上,沿侧墙底到顶,场地加速度略有递增,中板埋深处场地加速度有减小的趋势。

2.1.3 车站结构侧墙

车站结构侧墙加速度放大系数 F_a 随场地深度分布如图 7 所示。在相同场地深度处,Kobe 波作用下的最大,Loma Prieta 作用下的次之,El Centro 波

作用下的再次之,上海人工波作用下的最小;沿深度 F_a 分布形状有一定差异,特别是上海人工波作用下的 F_a 呈现侧墙顶和底最大、往侧墙高度中央趋于递减的特征。可见,车站侧墙的加速度响应规律与前述紧邻车站场地的加速度响应规律一致。

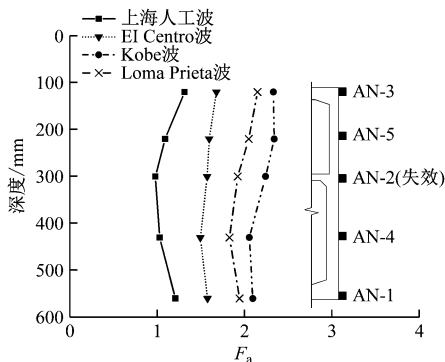


图 7 车站结构侧墙加速度放大系数随场地深度分布
Fig. 7 Distribution of acceleration amplification coefficient of side wall of station structure with depth

综上,不同类型地震波将同时影响场地、车站结构的加速度大小和沿场地深度的分布,低频丰富的地震波对加速度的放大效应更加显著。一些地下结构动力响应简化算法中,假设车站横向变形沿高度呈线性,而本试验结果显示车站侧墙加速度沿高度并非严格直线状,说明简化算法的假设与实际情形有一定出入,其影响大小需根据实际情况进行评判。

2.1.4 讨论

为方便讨论,将临近车站侧墙的场地(测点 AN-1—AN-5)定义为近场,将离车站侧墙较远的场地(测点 AM-1—AM-5)定义为远场。

1) 如图 5 所示,对远场土体,随深度减小,上海人工波、El Centro 波激励下的场地加速度放大系数先减小后增大,表明:底层场地对地震波呈减弱效应,上层场地对地震波呈放大效应。而对于 Kobe 波和 Loma Prieta 波,随场地深度减小,场地加速度放大系数均逐渐增大,场地对地震波始终呈放大效应,且邻近地表的土体放大效应更加显著。

2) 如图 6 所示,对紧临车站侧墙的近场土体,随深度减小,El Centro 波激励下的场地加速度放大系数先减小后增大,而其余 3 条地震波下的场地加速度放大系数均逐渐增大。相比远场土体,近场土体对地震波的放大程度要明显减弱,这可能归因于框架式地铁车站存在对场地的影响,使紧邻车站侧

墙的场地随车站侧墙趋于一致振动。

3) 对比图 6 和图 7 可知,总体上车站侧墙和紧临侧墙的近场土体两者加速度放大系数比较接近,这也印证了已有文献中“地下车站被埋置在土体中,车站结构随周围土体一致运动”^[12]的结论。另外,在 El Centro 波、Kobe 波和 Loma Prieta 波激励下,随场地深度减小,车站结构侧墙的加速度放大系数先减小后增大,而近场土体的加速度放大系数始终呈增大趋势,两者加速度响应存在一些微小差异。

2.2 结构动应变及内力

本文研究的动应变为地震作用产生的动应变部分,不包含静力作用下的结构应变。

2.2.1 结构动拉应变峰值分布规律

图 8 为 4 种地震波下车站结构各测点的动拉应变峰值。

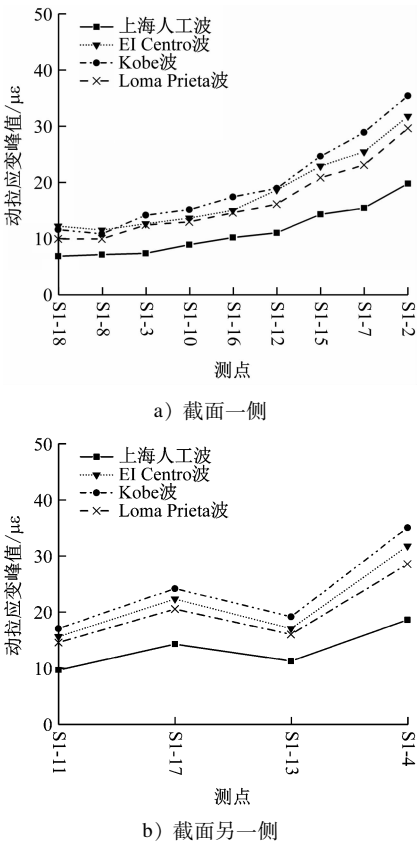


图 8 车站结构动拉应变峰值

Fig. 8 Peak of dynamic tensile strain of station

由图 8 可见:

1) 对于动拉应变峰值,Kobe 波作用下的最大,El Centro 波作用下的次之,Loma Prieta 波作用下的再次之,上海人工波作用下的最小。

2) 由各测点的应变值可以发现,站台层柱顶截面左右两侧的应变基本一样,侧墙底左右两侧的应变基本一样,底板(与侧墙交接处)两侧的应变有略微的差异,而侧墙顶横截面左右两侧的应变相差较大。

3) 动拉应变峰值空间分布上,站台层柱顶的拉应变峰值最大,站厅层柱顶的次之,然后按该值从大到小排序依次为中板两端(与侧墙交接处)的、侧墙顶的、侧墙底的、底板端部的、站台层柱底的、站厅层柱底的和顶板两端的动拉应变峰值。上述规律对 4 种地震波均成立。

2.2.2 结构内力响应

基于应变分布的平截面假设,可利用测得的应变,根据式(2)计算构件相应截面的轴力和弯矩^[13]。构件轴力和弯矩计算结果见表 2。表 2 中,站台层柱顶、底板端部、侧墙底、侧墙顶的内力分别基于 S1-2 和 S1-4、S1-10 和 S1-11、S1-12 和 S1-13、S1-16 和 S1-17 测点的应变值依据式(2)计算得到。

$$\left. \begin{aligned} M &= Eb \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} x \varepsilon_x dx \\ N &= Eb \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \varepsilon_x dx \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

表 2 不同地震波下车站结构最大内力

Tab. 2 Maximum internal force of station structure under different seismic waves

截面位置	输入地震波	轴力/N	弯矩/(N·mm)
站台层柱顶	上海人工波	-100.35	722.74
	El Centro 波	-85.37	976.27
	Kobe 波	-241.12	779.50
	Loma Prieta 波	-28.95	1 101.14
底板	上海人工波	-6.74	22.14
	El Centro 波	-3.59	28.86
	Kobe 波	-8.28	22.53
	Loma Prieta 波	-1.03	32.02
侧墙底	上海人工波	-6.07	16.63
	El Centro 波	-2.97	20.88
	Kobe 波	-7.56	17.01
	Loma Prieta 波	-0.7	23.78
侧墙顶	上海人工波	-4.95	10.65
	El Centro 波	-2.91	13.38
	Kobe 波	-6.03	11.12
	Loma Prieta 波	-1.27	15.40

式中:

M 、 N ——弯矩、轴力;

E ——弹性模量,其值为 $1.32 \times 10^4 \text{ MPa}^{[10]}$;

b ——构件截面宽度,楼板、侧墙取单位宽度;

h ——构件截面高度,楼板、侧墙取厚度;

ε_x ——沿 h 方向上的应变函数;

x ——沿 h 方向上应变函数的自变量,即沿 h 方向相对截面形心轴的坐标。

从表 2 可以看出:

1) 4 条地震波激励下,无论轴力还是弯矩,站台层柱顶的均远大于底板的、侧墙底的和侧墙顶的(需注意:计算后三者内力时均取单位宽度)。

2) 4 条地震波激励下,侧墙底的最大弯矩均大于侧墙顶的最大弯矩。实际地铁车站结构设计中,底层侧墙的厚度均比上层侧墙的厚度大,上述试验结果也验证了这种做法的合理性。

3) 截面最大轴力绝对值均为 Kobe 波作用下的最大,上海人工波作用下的次之,El Centro 波作用下的再次之,Loma Prieta 作用下的最小;而截面的最大弯矩均为 Loma Prieta 作用下的最大,El Centro 波作用下的次之,Kobe 波作用下的再次之,上海人工波作用下的最小。上述结果表明地震动的频谱特性对构件轴力、弯矩的影响规律不同。

2.3 动土正应力

动土正应力定义为任一时刻车站侧墙上总应力与静土压力的差值。图 9 分别为 4 种地震波下左、右侧墙的动土正应力峰值分布。

由图 9 可见:

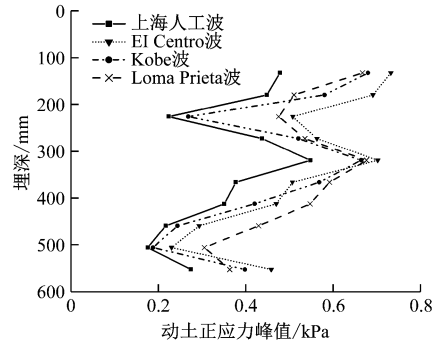
1) 对车站左侧墙,4 条地震波下动土正应力的分布十分相似,表明不同频谱的地震波虽然影响动土正应力峰值的大小,但对其分布形状影响很小。该规律对右侧墙也成立。

2) 任一地震波作用下,左、右侧墙的动土正应力峰值并不相同,文献[14]通过数值模拟研究也发现了类似的规律。

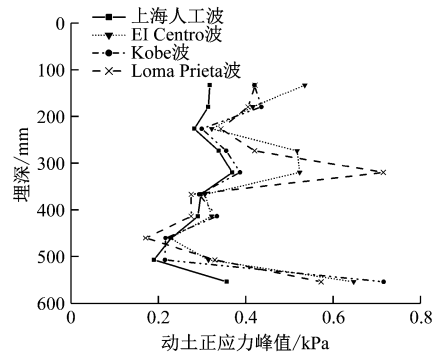
3 结语

本文采用振动台模型试验研究了峰值加速度均为 $0.1 g$ 的上海人工波、El Centro 波、Kobe 波和 Loma Prieta 波作用下软土地框架式地铁车站的动力响应,主要结论总结如下:

1) 地震波的频谱特性同时影响场地、框架式车站结构的加速度大小及其沿场地深度的分布,且低频成分丰富的地震波对加速度的放大效应更显著。



a) 左侧墙



b) 右侧墙

图 9 动土正应力峰值分布

Fig. 9 Distribution of peak value of dynamic soil normal stress

2) 紧邻车站侧墙的近场土体对地震波的放大效应要弱于远场土体,可能是紧邻车站侧墙的场地趋于和车站侧墙更一致地振动所造成的。

3) 不同频谱特性的 4 种地震波作用下,框架式地铁车站结构峰值拉应变大小不同,但结构最危险截面的位置相同。

4) 不同频谱特性的地震波对结构不同类型动力响应的影响规律不同。比如对结构加速度、结构动应变的影响规律不同,还比如对构件轴力、弯矩的影响规律不同。

参考文献

- [1] TSINIDIS G, DE SILVA F, ANASTASOPOULOS I, et al. Seismic behaviour of tunnels: from experiments to analysis[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2020,99:103334.
- [2] AMOROSI A, BOLDINI D, FALCONE G. Numerical prediction of tunnel performance during centrifuge dynamic tests[J]. Acta Geotechnica, 2014,9:581.
- [3] ABUHAJAR O, EL NAGGAR M H, NEWSON T. Seismic soil-culvert interaction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015,52: 1.
- [4] 王杰,刘华北,邹炎,等. 水平及竖向地震共同作用下双线隧道的响应分析[J]. 震灾防御技术, 2020(4):670.

- WANG Jie, LIU Huabei, ZOU Yan, et al. Response analysis of twin tunnels under horizontal and vertical earthquake loading[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2020(4):670.
- [5] 范凯祥,申玉生,闻毓民,等.平面 Rayleigh 波入射下饱和土中浅埋隧道复合式衬砌的动力响应[J].岩土工程学报,2022(3):444.
- FAN Kaixiang, SHEN Yusheng, WEN Yumin, et al. Dynamic response of shallow buried composite lining tunnel in saturated soil subjected to plane Rayleigh wave incidence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022(3):444.
- [6] WANG C J. Seismic racking of a dual-wall subway station box embedded in soft soil strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1):83.
- [7] 陈磊,陈国兴,毛昆明.框架式地铁车站结构大地震近场地震反应特性的三维精细化非线性分析[J].岩土工程学报,2012(3):490.
- CHEN Lei, CHEN Guoxing, MAO Kungming. 3D refined nonlinear analysis of seismic response characteristics of frame metro station under near-field strong ground motion of large earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012(3):490.
- [8] 周海祚,郑刚,李笑穹,等.软土地铁结构非线性地震反应分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016(4):361.
- ZHOU Haizuo, ZHENG Gang, LI Xiaoqiong, et al. Nonlinear seismic responses analysis of subway structure in soft soil[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016(4):361.
- [9] 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):123.
- ZHANG Zhiming, YU Haitao, YUAN Yong, et al. Shaking table tests on seismic responses of atrium-style subway station[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021(5):123.
- [10] ZHANG Z, BILOTTA E, YUAN Y. Experiments of an atrium-style metro station under harmonic excitation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 103:103463.
- [11] 郭彦,刘文光,何文福,等.长周期地震波作用下超高层框架-核心筒减震结构动力响应分析[J].建筑结构学报,2017(12):68.
- GUO Yan, LIU Wenguang, HE Wenfu, et al. Dynamic response analysis of super high-rise frame-core tube structure under long-period ground motions[J]. Journal of Building Structures, 2017(12):68.
- [12] 陈之毅,才明阳,杨林德.软弱土层中典型地铁车站结构的地震动力响应特征[J].城市轨道交通研究,2010(增刊):98.
- CHEN Zhiyi, CAI Mingyang, YANG Linde. Seismic analysis of typical subway station structures in soft soil[J]. Urban Mass Transit, 2010(S):98.
- [13] CHENZ 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.
- [14] XU Z, DU X, XU C, et al. Numerical research on seismic response characteristics of shallow buried rectangular underground structure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 116:242.

(收稿日期:2022-03-24)

(上接第 175 页)

- [5] CHEN S, ZHUANGH, QUAN D, et al. Shaking table test on the seismic response of large-scale subway station in a loess site: a case study[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123(8):173.
- [6] 许炜星. 上软下硬地层大跨无柱地铁车站结构地震响应及振动台试验研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- XU Weixing. Study on seismic response and shaking table of large-span column-free metro station structure under upper-soft and lower-hard composite strata[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [7] TAO L, DING P, SHI C, et al. Shaking table test on seismic response characteristics of prefabricated subway station structure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 91:102994.
- [8] ZHAO H, YUAN Y, YE Z, et al. Response characteristics of an atrium subway station subjected to bidirectional ground shaking[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 125(10):105737.1.
- [9] 王建宁,马国伟,窦远明,等.异跨框架式地铁地下车站结构抗震性能水平与评价方法研究[J].振动与冲击, 2020(10):92.
- WANG Jianning, MA Guowei, DOU Yuanming, et al. Performance levels and evaluation method for seismic behaviors of a large-scale underground subway station with unequal-span frame[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020(10):92.
- [10] 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):123.
- ZHANG Zhiming, YU Haitao, YUAN Yong, et al. Shaking table tests on seismic responses of an atrium-style subway station[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021(5):123.
- [11] WU W, GE S, DING W, et al. Seismic response of a cross transfer subway station in soft soil subjected to different ground motion directions[C]// GSIC. Proceedings of Geo Shanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering, Berlin: Springer, 2018:27.
- [12] 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.
- [13] WU W, GE S, YUAN Y, et al. Seismic response of a cross interchange metro station in soft soil: physical and numerical modeling[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(9):2294.
- [14] ZHANG J, YUAN Y, YU H. Shaking table tests on discrepant responses of shaft-tunnel junction in soft soil under transverse excitations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 120:345.

(收稿日期:2022-03-30)