

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202004085

可液化土层对土-地下结构地震反应的振动台 试验设计*

刘春晓^{1,2}, 陶连金¹, 边金³, 张宇¹, 冯锦华⁴

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;
2. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600; 3. 广东海洋大学海洋工程学院, 广东 湛江 524088;
4. 国核电力规划设计研究院有限公司, 北京 100095)

摘要: 液化区域与结构的相对位置和液化场地产生的大位移, 对地下结构的动力响应存在很大的影响。基于此, 采用振动台试验, 针对目前地铁区间隧道建设中常见的单层双跨断面形式结构, 开展了一系列振动台试验。系统阐述了本次大型振动台试验中方案设计相关内容, 包括相似关系设计、地基土制备、结构模型制备、防水处理、试验测试技术与传感器布置、试验工况设置等, 并对液化场地自由场工况的地基土地震反应进行分析。结果表明: 本次系列试验设计方案可以形成较好的液化宏观试验现象; 模型箱的边界效应较小; 相同地震动峰值条件下 Kobe 波和北京人工波作用时, 土体产生的剪切变形最大, 名山波作用下土体产生的剪切变形最小。试验设计思路和前期试验结果可以为振动台后期试验的顺利展开做好准备工作。

关键词: 液化; 区间隧道结构; 大变形; 破坏规律; 振动台试验

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1341-10

Experimental Design of Shaking Table Test on Seismic Response of Soil and Underground Structures in Liquefiable Soil

LIU Chunxiao^{1,2}, TAO Lianjin¹, BIAN Jin³, ZHANG Yu¹, FENG Jinhua⁴

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 102600, China; 3. Guangdong Ocean University, College of Ocean Engineering, Zhanjiang 524088, China; 4. State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100095, China)

Abstract: The relative position between the liquefaction area and the structure, and the large displacement induced by the liquefaction site have a great influence on the dynamic response of the underground structure. Based on this, the research group carried out a series of shaking table tests on the single-layer double-cross-section structure commonly used in subway tunnel construction. This paper systematically expounds the relevant contents of the scheme design in this large-scale shaking table test, including similarity relation design, foundation soil preparation, structural model preparation,

* 收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-11-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0805403)、国家自然科学基金项目(41877218)资助

作者简介: 刘春晓(1992—), 女, 工程师, 博士。主要从事地下结构抗震、地质路基勘察设计研究。

E-mail: liuchunxiao17@163.com

waterproof treatment, test technology and sensor arrangement, test condition setting and so on. The seismic response of foundation soil in free field condition of the liquefaction site is analyzed. The main contents and achievements are as follows: the series of test design schemes can produce a better macroscopic liquefaction test phenomenon; the boundary effect of the model box is small; under the same peak value of ground motion, Kobe wave and Beijing artificial wave lead to the largest shear deformation of soil, while Mingshan wave produces the smallest shear deformation. The idea of test design and the previous test results can make a good preparation for the later shaking table test.

Keywords: liquefaction; rectangular tunnel; large deformation; failure law; shaking table test

引言

国内外大量学者开展振动台试验,从不同角度研究和分析了^[1-9]液化场地条件下地下结构的动力变形特征和地震反应规律,该系列研究成果为地下结构的抗震设计和地震安全性评价提供了可靠依据。

由于大规模的轨道交通建设,新建地下工程不可避免穿越可液化土层,这对地下结构的抗震性能提出了较高要求,液化区域与结构的相对位置关系^[10-12]、液化产生的大位移^[13]都将对地下结构的动力响应产生影响。课题组基于北京地区单层双跨断面形式地铁区间隧道结构,有可能穿越较强地震以及可液化土层的风险,预期开展系列振动台试验,研究可液化土层在类似矩形隧道结构不同位置时,土-地下结构的地震反应和结构的破坏规律,为今后地下结构的抗震设计提供依据。

本文系统阐述了本次大型振动台试验中方案设计相关内容,包括相似关系设计、地基土制备、结构模型制备、防水处理、试验测试技术与传感器布置、试验工况设置等,并根据液化场地自由场工况中地基土的位移情况,选取了可以促使液化场地形成较大变形的地震波。本次振动台试验设计为后续试验的顺利开展做好了准备工作,也为后续相关液化和非液化场地条件下振动台试验的设计提供了参考。

1 可液化场地区间隧道结构振动台模型试验设计

1.1 模型相似关系

根据 Buckingham π 定理,选取长度、弹性模量、加速度为模型结构相似比设计的基本物理量^[14],得到的各物理量所满足的相似关系见表 1。

表 1 隧道结构相似关系及相似比设计

Table 1 Scale relationship and similarity ratio design of tunnel

类型	物理量	相似关系	模型结构相似比
几何特征	长度 l	S_l	1/30
	惯性矩 I	$S_I = S_l^4$	1.23×10^{-6}
材料特征	等效密度 ρ	$S_\rho = S_E/S_l S_a$	7.5
	弹性模量 E	S_E	1/4
	输入振动加速度 a	S_a	1
动力特性	输入振动持时 t	$S_t = \sqrt{S_l/S_a}$	0.18
	动力响应应力 σ	$S_\sigma = S_l \cdot S_a \cdot S_\rho$	0.25
	动力响应孔隙水压力 u	$S_u = S_l \cdot S_a \cdot S_\rho$	/

1.2 地基土制备

此次振动台试验所选取的砂土为北京地区某工地细砂。为了模拟真实场地砂土特性,试验前对现场取样(图 1)的试验用砂(图 2)进行土工试验的参数分析^[15-16]。

测得试验用饱和细砂砂土样密度为 2000 kg/m^3 ,土粒相对密度 $G_s=2.67$,最大孔隙比 $e_{\max}=1.146$,最小孔隙比 $e_{\min}=0.526$,内摩擦角 $\phi=28^\circ$,相对密度 $Dr=0.47$,渗透系数 $9.26 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,最大干密度 $\rho_{d\max} =$

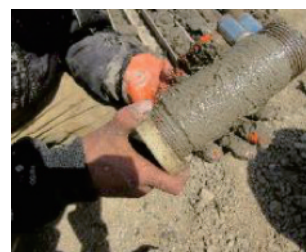


图 1 砂土现场取样

Fig.1 On-site sampling of sand



图2 推土器取土样

Fig.2 Sampling by earth-moving machine



图3 砂土颗粒筛分试验

Fig.3 Sand particle sieving test

1.75 g/cm³, 最小干密度 $\rho_{dmin}=1.244 \text{ g/cm}^3$ 。

表2 北京细砂材料特性

Table 2 Material properties of Beijing fine sand

细沙材料直径/mm						特征粒径/mm				不均匀系数	曲率系数
≤ 2	≤ 1	≤ 0.5	≤ 0.25	≤ 0.1	≤ 0.075	D60	D50	D30	D10	C_u	C_c
累计百分含量/%											
100.00	93.38	84.52	62.48	25.48	10.97	0.21	0.18	0.11	0.077	2.73	0.75

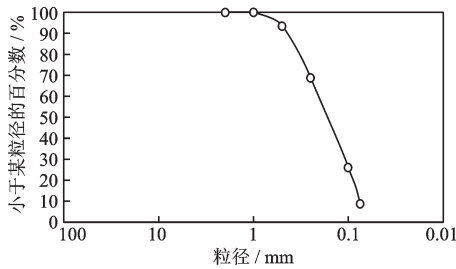


图4 试验用砂特性

Fig.4 Gradation curve of the test sand

对试验用砂土首先进行晾晒和筛分(图5),然后采用水沉法制备饱和砂样并抹平表面黏土(图6)。

考虑结构的全液化场地工况和自由场工况,模型地基土上层为10 cm高的粉质黏土,下层为115 cm厚的饱和砂土;底部液化场地工况模型地



(a) 水量控制 (b) 定量装砂 (c) 表面粘土抹平

图6 地基土制备

Fig.6 Preparation of soil in shaking table test

基土上层为33.5 cm高的粉质黏土,下层为91.5 cm厚的饱和砂土;非液化场地为厚125 cm的粉土工况,各工况土层分布及结构所在位置如图7所示。

通过灌水法测得振动台试验中砂土的密度为1980 kg/m³,接近实际场地中饱和砂土的密度,证明试验砂土的含水率控制较好。



图5 试验砂土晒干筛分

Fig.5 Drying and sieving of the test sand

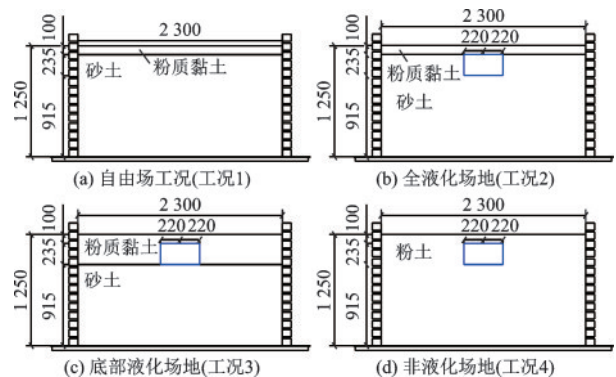


图7 各工况土层分布及结构位置

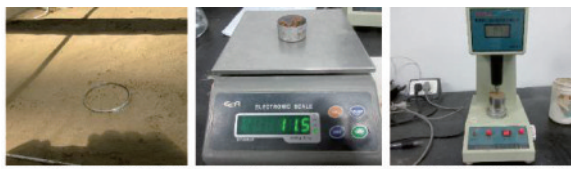
Fig.7 Distribution of soil layer and structure location



图8 灌水法测试地基土密度

Fig.8 Density test of foundation soil by irrigation method

表层 10 cm 厚黏土层, 试验前进行环刀取样和参数测试(图9)测得密度为 1970 kg/m^3 , 含水量 19.1%, 液限 28.1%, 塑限 16.7%。



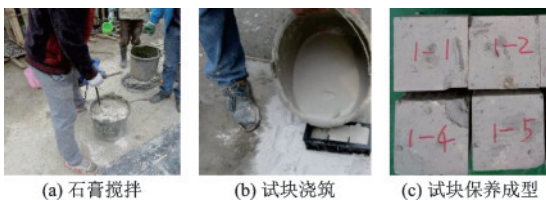
(a) 现场环刀取样测密度 (b) 烘干土测含水率 (c) 液塑限联合测定法

图9 试验用粘土部分特性试验

Fig.9 Test on part of characteristics of clay in shaking table test

1.3 结构模型材料配比及制备

为实现地铁车站模型的破坏性试验, 配置了低强度的石膏材料(图10), 其中石膏和水泥材料配比为 1:0.3, 并加入一定配比的减水剂和柠檬酸。



(a) 石膏搅拌 (b) 试块浇筑 (c) 试块保养成型

图10 石膏材料制备

Fig.10 Preparation of gypsum material

经测试, 在标准养护条件下六组 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 的立方体试块的抗压强度平均值为 1.09 N/mm^2 (图11)。



图11 抗压试验

Fig.11 Compression test

考虑到模型结构的构件尺寸普遍较小, 需要对配筋进行简化, 在保证配筋率的情况下, 选取 $\phi 1 \text{ mm}$ 的镀锌钢丝。模型结构形式分两种: (1) 按照正常缩尺(图12(a)); (2) 为了进行破坏试验, 将结构顶底板和侧墙厚度减小, 以达到减弱结构整体刚度的目的, 考虑到实际做工的难度, 最终选择的构件厚度如图12(b)所示。结构纵向长度都为 1.1 m, 如图13所示。在结构侧墙中间截面位置一侧预埋铁钉用于后期位移测量, 预埋件位置可见图12和图13粗线处。图14为模型结构制作流程。

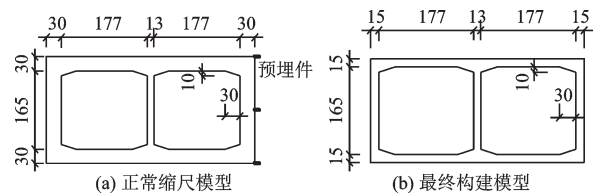


图12 模型结构横截面尺寸

Fig.12 Cross-sectional dimension diagram of model structure

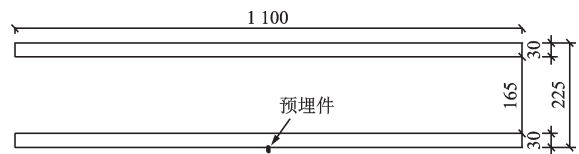


图13 模型结构纵断面尺寸

Fig.13 Longitudinal-sectional dimension diagram of model structure



图14 模型结构制作流程

Fig.14 Production process of model structure of tunnel

1.4 模型箱和结构防水

模型箱内侧贴 2 mm 厚的橡胶膜(图15(a)), 以对土体和水起到密封作用, 并进行了防水测试如图15(b)所示。为了对结构进行防水, 考虑到木质结构对结构刚度和地震响应影响较小, 按照隧道端头尺寸制作木质防水挡头(15(c)), 结构内部传感器布置完毕后, 将挡头卡入结构两端, 并用结构胶进行密封, 压实粘牢, 再在结构外侧涂一层防水涂料。

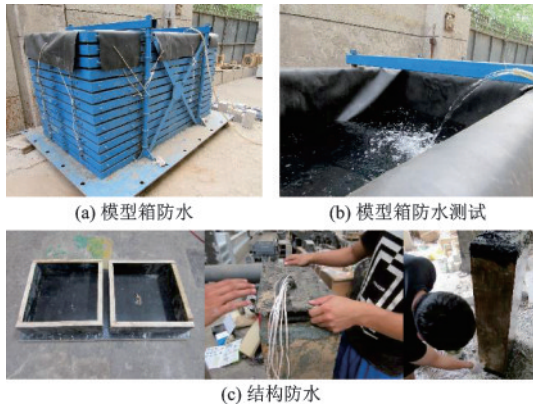


图 15 模型箱和结构防水

Fig.15 Waterproof of shear box and structure

1.5 地震波选择

为了增加对比,考虑了不同特征频率地震动以及近远场地震动的影响,振动台试验过程中采用的经相似关系换算后的地震波如图 16 所示。

其中北京人工波为北京地区试验用砂所处场地的人工波,什邡八角波属于近场地震动;名山波和汉源清溪波属于中场地震动^[17]。

受振动台振动允许范围限制,什邡波和北京人工波只能加到 0.3g,鉴于此,在后期振动台试验过程中,针对不同工况对地震波的选择进行了适当调整。

1.6 试验设备与量测装置

利用北京工业大学国家重点结构实验室的大型振动台设备。振动台的各项性能见参考文献 [18-19]。

采用常规传感器测量模型结构和地基土的加速度、模型地基土中的孔压变化、结构-土体相互作用的动土压力变化和地基土中动土压力变化、结构的应变反应、模型土的侧向位移等物理量;采用自己开发的测试技术测试结构的水平向和竖向位移。

(1) 结构绝对位移测试装置

结构绝对位移测试装置如图 17 所示。在结构顶部四个角点以及正中央位置固定侧杆,侧杆顶部粘贴有监测点,采用徕卡 TS02 全站仪对 5 个监测点进行监测,以获得结构在不同阶段的绝对位移。

(2) 结构水平向和竖向时程位移测试装置

由于对于液化场地含水,模型箱两侧无法开洞导出拉线式位移侧线,所以制作特定形状的 PVC 导管将固定在结构侧墙预埋件上的侧线导出,并与拉

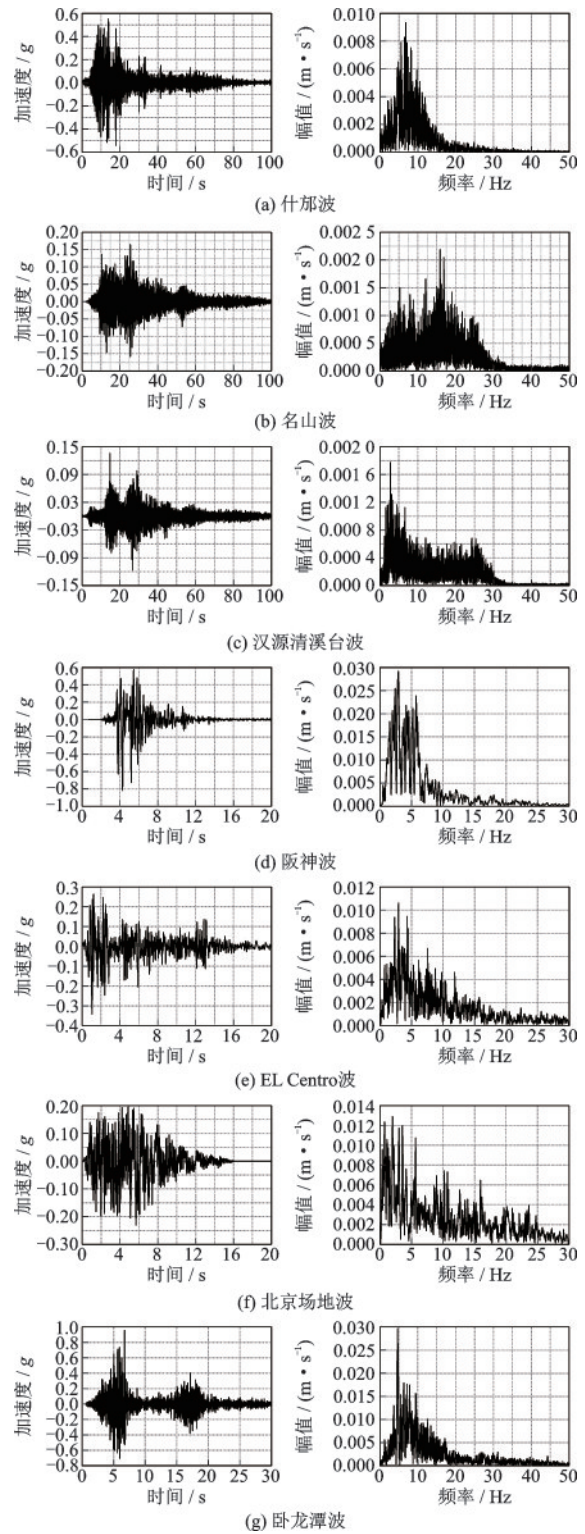


图 16 振动台模型试验输入地震动加速度时程及傅立叶谱
Fig.16 Ground motion acceleration time histories and Fourier spectra in shaking table test

线式位移计连接,进行测试,如图 18 和图 19 所示。

(3) 模型地基土非接触式位移量测装置

为了更好地获得地基土的位移,采用英国 IME-

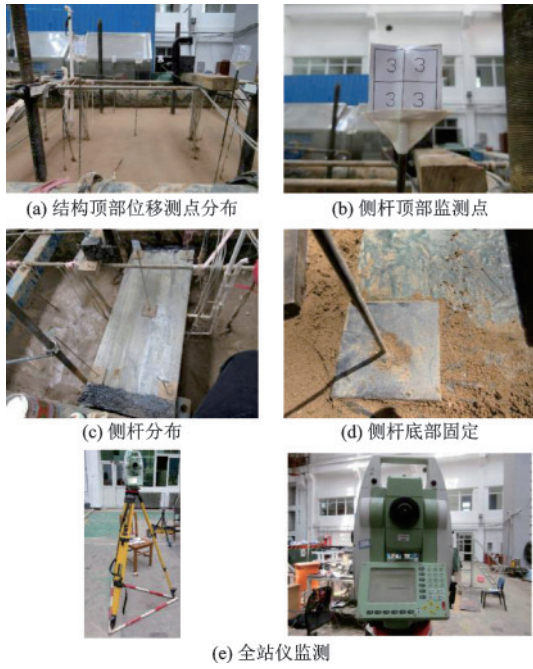


图 17 三向位移测试装置

Fig.17 Three-dimensional displacement testing device

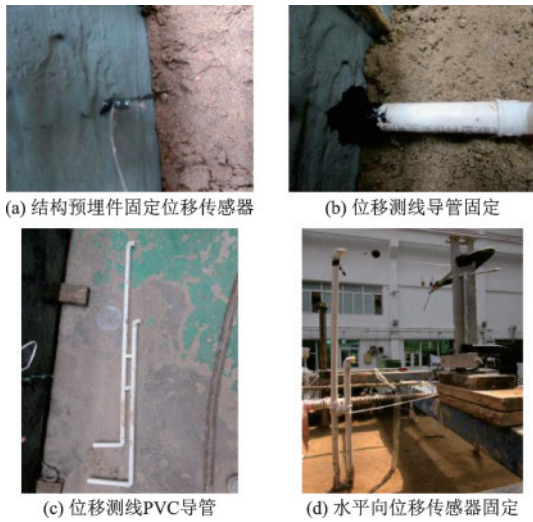


图 18 水平向位移测试

Fig.18 Horizontal displacement test

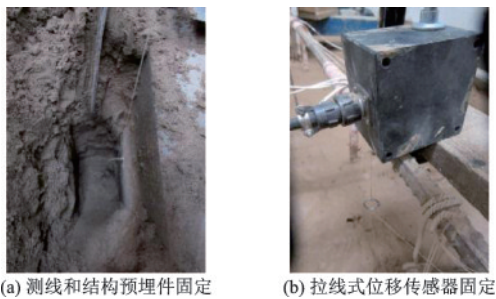


图 19 竖向位移测试

Fig.19 Vertical displacement test

TRUM公司的非接触式位移量测系统对模型箱每层目标点进行实时监测,以获取模型箱在实际振动

中的位移,从而得到实际振动过程中模型土的水平
和竖向位移反应。该系统基于图像测量技术,不需
要同材料接触,便可测量材料产生的实时位移,避
免了振动台试验过程中由于目标振动所产生的误
差。具体装置如图 20 所示。



图 20 非接触式位移监测系统

Fig.20 Non-contacting displacement measuring system

(4)加速度、动土压力、孔压测试、应变测量装置

将加速度计、动土压力计和孔压计提前用鱼线
穿好,然后在模型箱顶部固定钢筋条,将相应传感
器依次按传感器布置位置吊装,保证传感器在整个
振动台试验过程中的位置不变,如图 21 所示。加
速度传感器防水措施如图 22 所示。

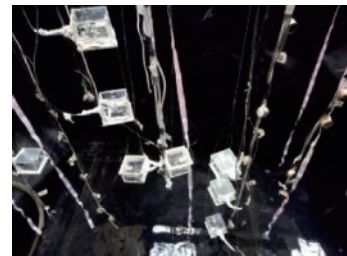


图 21 模型箱中传感器吊装

Fig.21 Sensor hoisting in shear model box



图 22 AFT8型电压力式加速度传感器及防水处理

Fig.22 AFT83 piezoelectric accelerometer and water-proof treatment

1.7 加载方案设计

采取阶梯加载的方式对模型箱进行逐级加载如表3所示的地震波,其中 g 为重力加速度,试验前以及每次调整加速度峰值之前都输入幅值为 $0.1g$ 的白噪声对土体进行扫频,来获取土体的自振频率和阻尼比。施加地震波时,采取两种方式尽可能减小不同地震波相互作用对地基土的影响,从而保证不同地震动作用的单一性:(1)每条地震波作用结束后,监测孔压变化直到孔隙水压力消散再进行下一条地震波的输入;(2)在一种地震动作用完之后再进行下一种地震动的输入。

表3 自由场工况振动台试验加载工况
Table 3 Loading conditions in free field condition

输入波类型	加速度峰值/ g	
Kobe	0.1	
EL Centro波		
卧龙潭波		
汉源清溪台波		
名山波		
什邡波		
北京场地波	0.2	
北京场地波		
Kobe		
EL Centro波		
卧龙潭波		
汉源清溪台波		
名山波	0.3	
什邡波		
北京场地波		
Kobe		
EL Centro波		
卧龙潭波		
汉源清溪台波	0.4	
名山波		
什邡波		
北京场地波		
Kobe		
EL Centro波		
卧龙潭波	0.5	
汉源清溪台波		
名山波		
什邡波		
北京场地波		
Kobe		0.6
EL Centro波		
卧龙潭波		
汉源清溪台波		
名山波		
什邡波	0.7	
北京场地波		
Kobe		
EL Centro波		
卧龙潭波		
汉源清溪台波		0.8
名山波		
什邡波		
北京场地波		
Kobe	0.9	
EL Centro波		
卧龙潭波		
汉源清溪台波		
名山波		1.0
什邡波		
北京场地波		
Kobe		
EL Centro波		
卧龙潭波		
汉源清溪台波		
名山波		

1.8 测试方案设计

各工况中传感器布置如图23所示。其中传感器编号A为加速度传感器,P为孔隙水压力传感器,T为土压力传感器,W代表非接触式位移计。篇幅限制,仅列出饱和地基土自由场工况条件下土中的传感器布置。

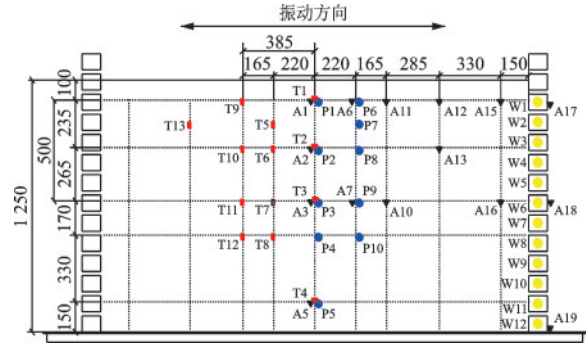


图23 土中传感器布置

Fig.23 Gauge distribution in soil

2 可液化场地区间隧道结构振动台模型试验结果分析

经验证,试验中进行防水处理的加速度传感器、孔压计等大部分都可以获得很好的防水效果,且结构及地基土的位移也都能实时获得。限于篇幅,本文只对部分试验结果进行分析。分析中,模型箱的坐标和标高,以模型地基土观测面所在截面的箱体中线底部为坐标原点,两侧土和结构对称分布。模型地基坐标以及标高如图24所示。

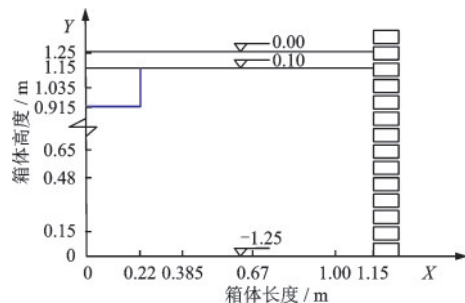


图24 振动台数据处理坐标及标高示意

Fig.24 Coordinates and elevation for shaking table data processing

2.1 地基土试验宏观现象

此处选取自由场工况(工况1)进行分析。试验前模型地基土的东北视角如图25(a)所示,试验过

程中和试验后模型地基西视角观测图如图 25(b)、(c)所示。由图可知振动前地基土表面较平整,随着地震动输入的增加,模型地基表面开始逐渐冒水喷砂,最终在地表积累了大量的水和砂,局部可见明显的喷砂冒水现象,如图 25(d)所示。喷砂区域中少量气泡为地基土内残留的空气。地表无明显开裂现象。喷砂冒水分布较均匀。



图 25 工况 1 试验过程中模型地基土的宏观现象

Fig.25 Macroscopic phenomena of model foundation during test process in condition 1

2.2 地基土位移反应

受不同地震激励的影响,地基变形反应不同。本节针对不同地震波的反应,比较不同地震动作用下模型土箱的变形,为下一步的研究提供依据。根据前人研究^[21],同等峰值强度的不同地震波作用下,中低频成分丰富的地震波,引起可液化地基的水平位移反应更为强烈,叠层剪切型模型土箱箱体方钢管的水平向位移可以近似代表其所处土层的水平位移^[20]。基于此,本文根据非接触式位移计测得的模型箱箱体每一层钢管的位移时程曲线来分析土层的位移。

统计非接触式位移计所测得模型箱表面每层箱体的位移时程曲线最大值,作为该层位移的最大水平绝对位移,每层和底层位移差值的相对位移时程曲线的最大值作为相对层间最大位移,得到的不同地震动作用下,模型土箱的最大水平绝对位移和

相对层间位移如图 26 所示。可见在不同种类和不同峰值的地震波作用下,模型箱都呈现出位移由下

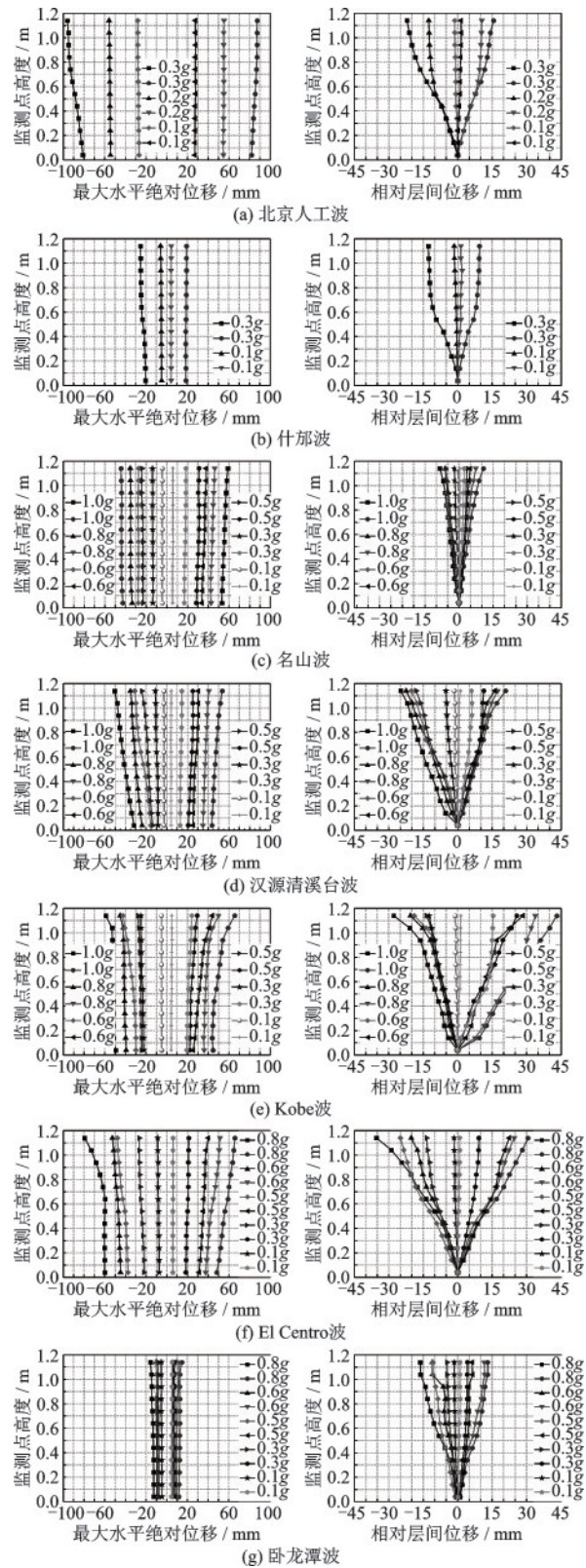


图 26 工况 1 模型地基水平绝对位移最大值和相对位移最大值沿箱体的变化

Fig.26 The maximum displacement and relative displacement of box in condition 1

到上逐次增加的剪切变形效果,位移随着地震峰值的增加而增大。但地震波正负峰值的不对称造成了土箱左摆右摆位移峰值的不对称。中低频成分较丰富的地震动作用下,液化地基土的水平位移较大。

相同地震动峰值条件下,Kobe波和北京人工波作用时,土体产生的剪切变形最大;名山波作用时土体产生的剪切变形最小。考虑到研究所需内容,砂土液化发展过程受动荷载持续时间的影响。当动荷载幅值不大,但是振动时间较长时,也会引起土的液化,因为孔压的上升和变形的增大发展到最大程度都需要一定的时间,从而使饱和砂土的结构遭到破坏^[21]。为形成对比工况,通过本次试验,将在今后的振动台试验中重点选取Kobe波、北京人工

波和名山波作用下的反应进行对比分析。

2.3 模型箱边界效应

加速度传感器进行防水处理后可以有效测得地基土的加速度。以模型箱底部A19输入地震波为基点,依次求取地基土中各加速度传感器数值相比于A19的放大系数。针对自由场工况,不同地震动作用下,选取结构顶部同一高度处A1、A6、A11、A12、A15的加速度放大系数和地基土中部同一水平高度位置处A3、A7、A10、A16的加速度放大系数如图27所示。可以看出,同一地震动峰值作用下,同一深度加速度放大系数从模型土中部到两侧呈现递减趋势。当地震动输入峰值较小时,差值并不大,证明该次试验中模型箱的边界效应较小。

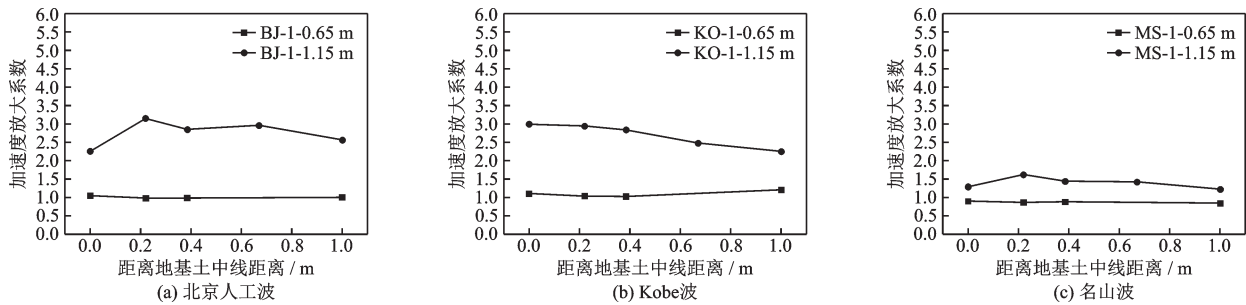


图27 加速度放大系数

Fig.27 Acceleration amplification factor

3 结论

基于开展的饱和地基土自由场工况振动台试验,分析了地基土和结构的宏观试验现象、可液化地基土的水平向位移反应和加速度反应。得到的主要结论如下:本次系列试验设计方案可以形成较好的液化试验现象;模型箱的边界效应较小;相同地震动峰值条件下Kobe波和北京人工波作用时,土体产生的剪切变形最大,名山波作用下土体产生的剪切变形最小。试验设计思路和前期试验结果可以为振动台后期试验的顺利展开做好准备工作。

参考文献:

[1] Chen G X, Chen S, Zhu X, et al. Shaking-table tests and numerical simulations on a subway structure in soft soil [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 76: 13-28.

[2] 邹炎. 地铁隧道地震反应规律和震害机理研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.

Zou Y. Study on seismic response law and damage mechanism of subway tunnels [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)

[3] 许成顺, 窦鹏飞, 杜修力, 等. 液化场地-结构动力相互作用振动台试验发展与回顾[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(5): 502-514.

Xu C S, Dou P F, Du X L, et al. Review on shaking table test of dynamic interaction of liquefiable site-structures system: retrospect and prospect [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(5): 502-514. (in Chinese)

[4] 戴志广. 基于振动台试验开展砂土液化的机理与判别研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.

Dai Z G. Study on mechanism and discrimination of sand liquefaction based on shaking table test [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2017. (in Chinese)

[5] 许成顺, 高苗成, 陈苏, 等. 考虑地震动持时的液化场地-桩基振动台试验设计[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5): 51-57.

Xu C S, Gao L C, Chen S, et al. Shaking-table tests design on a liquefaction foundation-structure considering

- compressed ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(5): 51-57. (in Chinese)
- [6] Azadi M, Hosseini S. Analyses of the effect of seismic behavior of shallow tunnels in liquefiable grounds[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 543-552.
- [7] 何剑平. 液化场地地下结构抗震分析研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
He J P. Seismic analysis and study for underground structures in liquefaction field [D]. Ji'nan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [8] 邵帅, 邵生俊, 马纯阳, 等. 饱和砂土地铁车站的振动台试验研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(4): 162-170.
Shao S, Shao S J, Ma C Y, et al. Research on vibrating table model test of subway station in saturated sandy soil[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(4): 162-170. (in Chinese)
- [9] 段亚刚. 地震液化对地铁地下结构影响的振动台试验研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 75-79.
Duan Y G. Shaking table research on the response of subway underground structure under earthquake liquefaction [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 75-79. (in Chinese)
- [10] 刘春晓, 陶连金, 边金, 等. 可液化土层的位置对土层-地下结构地震反应的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 143-156.
Liu C X, Tao L J, Bian J, et al. Research on seismic response of the soil and underground structure caused by liquefiable soil and different positions [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(5): 143-156. (in Chinese)
- [11] Liu C X, Tao L J, Bian J, et al. Influence of the liquefied soil layer distribution on the seismic response of rectangular tunnel [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2018, 34(2): 259-268.
- [12] 刘春晓, 陶连金, 边金, 等. 可液化土层对地下结构地震反应的影响研究. 铁道标准设计, 2018, 62(2): 133-139.
Liu C X, Tao L J, Bian J, et al. Research on seismic response of underground structure on liquefiable soil [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(2): 133-139. (in Chinese)
- [13] Holzer T L, Youd T L. Liquefaction, ground oscillation, and soil deformation at the Wildlife Array, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(3): 961-976.
- [14] 陈苏. 复杂环境下地铁地下结构地震反应特性研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2014.
Chen S. Seismic response characteristic of underground subway station in complex conditions [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [16] 陈苏, 陈国兴, 戚承志, 等. 可液化场地上三拱立柱式地铁地下车站结构地震反应特性振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1899-1914.
Chen S, Chen G X, Qi C Z, et al. A shaking table-based experimental study of seismic response of three-arch type's underground subway station in liquefiable ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1899-1914. (in Chinese)
- [17] 李积栋, 陶连金, 安军海, 等. 近远场地震作用密贴交叉组合地铁车站振动台试验[J]. 土木工程学报, 2015, 48(10): 30-37.
Li J D, Tao L J, An J H, et al. Shaking table test of the closely-attached intersecting subway station under far-field and near-field ground motion [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(10): 30-37. (in Chinese)
- [18] 侯森. 山岭隧道洞口段动力响应研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
Hou S. Large-scale shaking table test for dynamic response in portal section of mountain tunnel [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [19] 安军海. 液化场地中地铁地下结构振动台试验及其抗震设计方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
An J H. Study on shaking table test of underground subway structure in liquefiable site and seismic design method [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] 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, 36(8): 204-216.
An J H, Tao L J, Wang H J, et al. A shaking table-based experimental study of 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): 204-216. (in Chinese)
- [21] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 20-86.
Xie D Y. Soil dynamics [M]. Beijing: High Education Express, 2011: 20-86. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)