

# 软土地层十字换乘站振动台单向地震试验研究<sup>\*</sup>

吴炜枫<sup>1,2</sup>

(1. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 200092, 上海//工程师)

**摘要** 设计并开展软土地层十字换乘站单向地震大比尺振动台试验;从动力平衡方程出发,提出了基于人工配置模型土的相似设计方法;以土-结构相对刚度比为控制指标,提出采用微粒混凝土和镀锌钢丝模拟车站结构。基于振动台试验,研究了软土地层中二层与中三层的十字型换乘站的结构地震响应特性,并以单体车站为参照试验,揭示了软土地层十字型换乘站结构单向地震响应特征。结果表明:随着地震动增强,土体剪切模量衰减程度增加;受换乘站结构的差异约束作用,近场土体加速度响应存在空间差异现象,幅值整体小于自由场;换乘站交叉节点处地下三层中柱应变显著高于地下一、二层,在抗震设计中应引起重视。

**关键词** 城市轨道交通;软土地区;地下十字换乘站;抗震分析;空间差动效应;土-结构相互作用

**中图分类号** TU435:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.050

## Research on Shaking Table Single Direction Seismic Test of Cross Interchange Station in Soft Soil

WU Weifeng

**Abstract** Large-scale shaking table single direction seismic test of cross interchange station in soft soil is designed and conducted. From dynamic balance equation, a similar design method based on synthetic model soil is proposed. The model station structure adopts granular concrete and galvanized steel wire, taking soil-structure relative stiffness as control index. Based on shaking table test, the structure seismic response characteristics of two-storey and three-storey cross-type interchange station in soft soil is studied, and parallel tests of single station are carried out for reference. Test results show that with ground motion enhances, the soil shear modulus attenuation grade increases. Due to the differential restrained effects of the interchange station structure, near-field soil acceleration experience spatially different phenomenon, and the amplitude is overall smaller than in the free-field. The bending strains of 3rd

level underground middle column at interchange station cross joint is significantly higher than that of the first and second level underground, raising concern for future seismic design.

**Key words** urban rail transit; soft soil; underground cross interchange station; seismic analysis; spatial difference effect; soil-structure interaction

**Author's address** Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, 200235, Shanghai, China

随着城市轨道交通逐渐成网,换乘站的建设需求快速提升;2019年全国范围内在建线路车站共计4 512座,其中换乘站1 333座,换乘站建设占比达29.5%<sup>[1]</sup>。这类车站承担着城市轨道交通网络的枢纽功能,其抗震安全性至关重要。因换乘站交叉节点处结构刚度突变明显,可引起结构差动响应,这也被认为是地下结构遭地震破坏的主要原因之一。

目前,地下换乘站结构的抗震安全开始受到设计规程<sup>[2-3]</sup>的关注。也有诸多学者<sup>[4-5]</sup>针对十字换乘站结构进行了抗震数值研究。文献[6]通过大比尺振动台试验,研究了地震谐波沿二层结构横向作用下,典型换乘地铁站地震动力响应,并与相应二层单体车站进行了对比;文献[7]采用有机玻璃和重塑土开展了模型试验研究;文献[8]首次建立了通过振动台试验验证的三维非线性弹塑性动力时程分析数值模型,结合试验和数值方法对换乘站结构动力响应特征展开了研究。

综上,已有一些针对交叉换乘站地震响应的数值和试验研究,但试验研究成果仍然较少,缺少与单体车站的试验对比。此外,数值分析<sup>[4]</sup>预测的一些特殊土-结构相互作用现象,如换乘站近场地震

<sup>\*</sup> 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);上海申通地铁集团有限公司科研计划项目(JSKY17R031-6,JS-KY22R008-2)

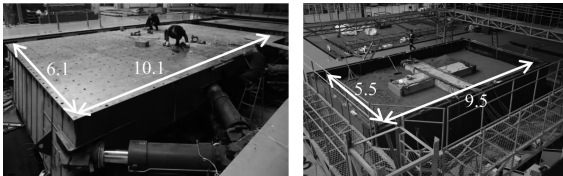
差动响应等,尚未得到试验验证和解释。

本文利用一系列大比尺振动台试验,研究了在地震动沿三层结构横向作用下十字换乘站结构的地震响应特征,并以单体车站为参照进行对比,揭示了软土地层十字换乘站结构单向地震响应特征。

1 振动台模型试验

1.1 振动台与层状剪切模型箱

本文试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的双台联动振动台(见图1)上进行。该振动台平面尺寸达10.1 m×6.1 m,可最大承载质量为140×10<sup>3</sup> kg,最大加速度为1.4 g(*g*为重力加速度)的试验加载。试验采用自行研制的大型叠层剪切模型箱(见图1),且箱体内部有效尺寸为9.50 m(长)×5.50 m(宽)×2.16 m(高)。该模型箱的设计细节、自振频率和有效性详见文献[9]。



a) 双台联动振动台      b) 叠层剪切模型箱  
尺寸单位:m

图1 双台联动振动台与叠层剪切模型箱

Fig.1 Double linkage shaking table and shear laminar model container

1.2 相似比设计

大比尺振动台试验在常重力环境下进行,因土体本构与围压存在强非线性关系,大比尺振动台缩尺试验几何与物理相似性兼容问题有待研究。模型土微单元沿*x*方向的动力平衡方程可表达为:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \tag{1}$$

式中:  
*x*、*y*、*z*——笛卡尔坐标;  
*σ*——应力;  
*ρ*、*t*、*u*——分别为土体体积质量、时间和位移。  
根据 Hooke 定理,式(1)可变为:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda_1 + G_1) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + G_1 \nabla^2 u \tag{2}$$

式中:  
*λ*<sub>1</sub>、*G*<sub>1</sub>——均为拉梅常数;

*ε*——应变;  
*∇*<sup>2</sup>——Laplacian 算子。  
式(1)、式(2)对任意本构均成立。

采用文献[10]建议的4个独立物理量相似比:长度相似比 *S<sub>l</sub>* (*S<sub>l</sub>* = *l<sub>m</sub>*/*l<sub>p</sub>*)、体积质量相似比 *S<sub>ρ</sub>* (*S<sub>ρ</sub>* = *ρ<sub>m</sub>*/*ρ<sub>p</sub>*)、刚度相似比 *S<sub>G</sub>* (*S<sub>G</sub>* = *G<sub>m</sub>*/*G<sub>p</sub>*)和加速度相似比 *S<sub>a</sub>* = *a<sub>m</sub>*/*a<sub>p</sub>*,其中,*S<sub>a</sub>*为加速度相似比,符号 *l*、*ρ*、*G*、*a* 分别指长度、体积质量、刚度和加速度,下标 *m*、*p* 分别指模型和原型。从式(2)可推导:

$$S_{\rho} = \frac{S_G}{S_a S_l} \tag{3}$$

其中,地震水平加速度相似比应等于重力加速度比,即在1*g*常重力环境下,应当取*S<sub>a</sub>* = 1。故而采用原状土或重塑土,则剪切刚度相似比与尺度相似比无法相同。本文采用人工配置砂-锯末混合物作为模型土材料,从而实现对原型土体积质量和剪切模量的同时缩尺,进而满足式(3)的相似比要求。根据 Vaschy-Buckingham *π* 定律和量纲分析推导振动台试验的相似比,列于表1。

表1 振动台试验模型相似比

Tab.1 Scaling relations of the shaking table test model					
参数	相似关系	相似比	参数	相似关系	相似比
<i>u</i>	<i>S<sub>u</sub></i> = <i>S<sub>l</sub></i>	1/25	速度 <i>v</i>	( <i>S<sub>G</sub></i> / <i>S<sub>ρ</sub></i> ) <sup>0.5</sup>	1/5
<i>ρ</i>	<i>S<sub>ρ</sub></i>	1/2	<i>ε</i>	<i>S<sub>ρ</sub></i> <i>S<sub>l</sub></i> <i>S<sub>a</sub></i> / <i>S<sub>G</sub></i>	1
剪切模量 <i>G</i>	<i>S<sub>G</sub></i>	1/50	动力频率 <i>f</i>	( <i>S<sub>l</sub></i> / <i>S<sub>a</sub></i> ) <sup>-0.5</sup>	5
<i>g</i>	<i>S<sub>G</sub></i> / ( <i>S<sub>l</sub></i> <i>S<sub>ρ</sub></i> )	1	自振频率 <i>f</i> <sub>0</sub>	( <i>S<sub>G</sub></i> / <i>S<sub>ρ</sub></i> ) <sup>0.5</sup> / <i>S<sub>l</sub></i>	5
<i>t</i>	( <i>S<sub>l</sub></i> / <i>S<sub>a</sub></i> ) <sup>0.5</sup>	1/5	力 <i>F</i>	<i>S<sub>ρ</sub></i> <i>S<sub>a</sub></i> <i>S<sub>l</sub></i> <sup>3</sup>	1/31 250

1.3 模型土与模型结构

考虑原型地层为饱和黏土地场,可将地震往复快速加载合理假设为不排水剪切行为<sup>[11]</sup>,故采用控制 *S<sub>u</sub>* 的模型土模拟。为满足表1要求,在于砂中掺加干锯末改变模型土物理特性,能在降低模型土体积质量的同时,也减小剪切刚度。通过一系列共振柱试验、土工试验和直剪试验,确定并优选了可满足式(3)和表1的砂-锯末质量配比(2.5:1.0)。图2对比了模型土与原型场地土的剪切模量衰减和阻尼(MRD)曲线。结果表明,模型土动力非线性特性与黏土和原状黏土较为接近。模型土参数见表2。模型土层总厚2 m,采用逐层制备的方法,共计25层。模型土体积质量为860 kg/m<sup>3</sup>(相对体积质量 *D<sub>r</sub>* = 90%)。

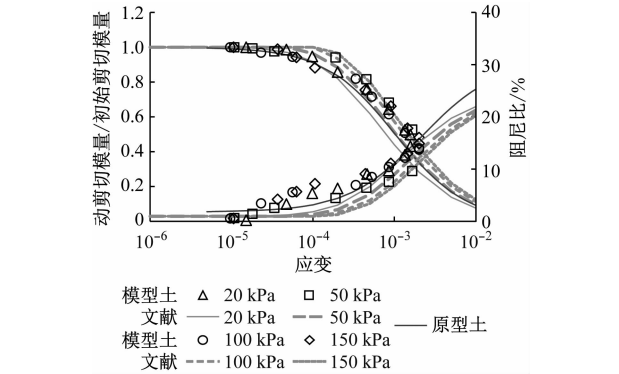


图2 不同围压模型土与原状、塑性指数为20的黏土MRD曲线对比

Fig. 2 MRD curve comparison between model soil with different confining pressure and clay of prototype and plasticity index = 20

表2 砂锯末质量比2.5:1.0模型土参数  
Tab. 2 Parameters of model soil with sand sawdust mass ratio of 2.5:1.0

参数	值	参数	值
体积质量/(kg/m <sup>3</sup> )	980	相对体积质量/%	90
不均匀系数	2.9	黏聚力/kPa	0.5
剪切模量/MPa	141.4σ <sub>0</sub> <sup>0.7</sup>	内摩擦角/(°)	30.7

注:σ<sub>0</sub>为有效围压,单位为MPa。

如图3所示,换乘站和用于对照的单体车站模型结构采用镀锌钢丝-微粒混凝土制作。单体站横断面与换乘站三层结构相同,纵向长度为1.6 m。模型结构配筋基于弯曲承载力等效原则设计。换乘站和单体车站模型均为整体式结构,采用分段分层浇筑方法。换乘站和单体车站模型结构基于土-结构相对刚度等效原则设计。本文主要研究沿三层结构横向地震作用下的土-结构系统响应,土体与三层结构的相对刚度相似比为1.0:1.1。

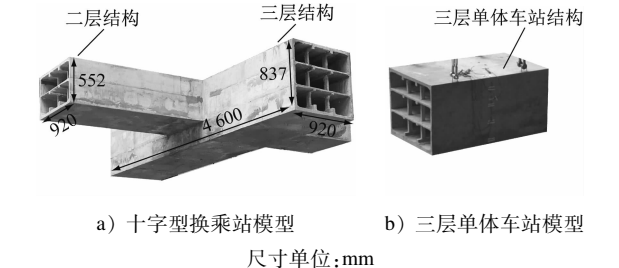


图3 二层与三层十字型换乘站和三层单体车站结构模型  
Fig. 3 Structure model of two-storey and three-storey cross interchange stations and three-storey single station

1.4 试验传感器的布置

图4为振动台试验平面图与两个主轴方向的侧

视图。地震动沿三层结构横向作用,在该方向上设置主要观测断面,布置19个土体加速度计(型号为Setra-141)和16个结构加速度计(见图5)。

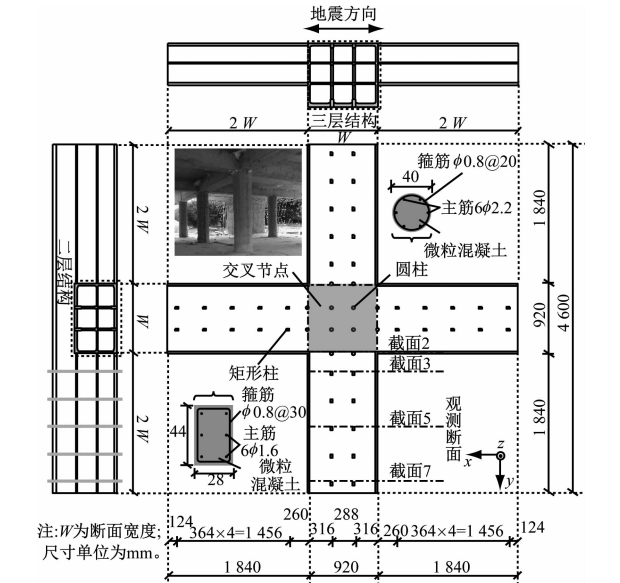


图4 十字型换乘站模型结构平面图及观测断面  
Fig. 4 Planar view and observation section of cross-type interchange station model structure

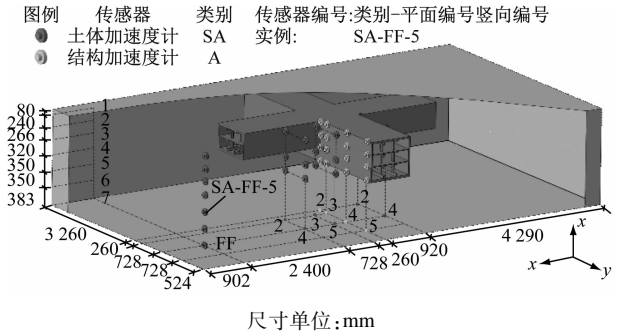


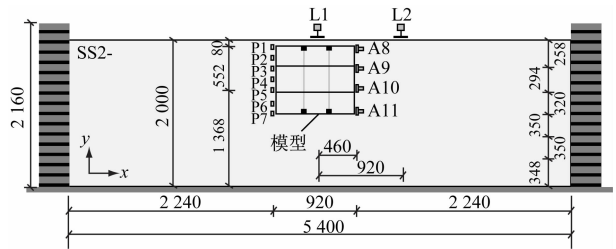
图5 十字型换乘站振动台试验传感器布置图  
Fig. 5 Layout of cross-type interchange station shaking table test sensors

土体加速度计中:7个布置在距离三层结构侧壁2400 mm(2.6倍横断面宽度)处,用于测试自由场加速度;剩余土体加速度计分4组布置在结构附近(近场)土体中,每组包含竖向的3个加速度计。结构中柱上还安装有竖向应变片。所有传感器信号均由多通道数据采集系统收集,以确保同步。布置有加速度计、土压力计和中柱应变片的三层单体车站振动台模型试验如图6所示。

1.5 输入地震动与加载方案

如图7所示,通过振动台先后输入以下地震动:  
①主频率分别为2 Hz、4 Hz、8 Hz和10 Hz的正弦

波,输入加速度峰值( $a_{PG}$ )为0.1 g;②上海人工波, $a_{PG}$ 分别为0.1 g、0.2 g、0.4 g、0.6 g。



注:A为加速度计;P为微型土压力计;L为位移计;尺寸单位为mm。

图6 三层单体车站振动台试验传感器布置图  
Fig.6 Layout of shaking table test sensors of 3-storey single station

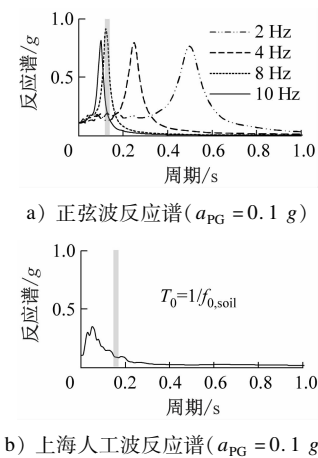


图7 振动台试验输入的地震波及其反应谱  
Fig.7 Input seismic waves and their response spectrums in shaking table test

## 2 振动台试验结果和分析

### 2.1 模型土动剪应力-动剪应变响应

采用文献[14]可根据模型土的体积质量、加速度时程计算某一高度处的动剪应力和动剪应变时程,进而可以绘制 $\tau$ - $\gamma$ 曲线。图8为不同强度上海人工波下,-0.8 m处模型土 $\tau$ - $\gamma$ 滞回响应。土体在较小剪应变下即可进入非线性响应状态(见图2),因此即使在 $a_{PG}=0.1$  g的上海人工波小震作用下,也可形成滞回圈,即进入动力非线性响应状态。随着输入地震动的增强,动剪应变峰值相应增大,滞回圈斜率逐渐减小,且愈加饱满。上述现象说明,模型土在强震作用下动剪切模量的衰减和滞回阻尼增加的动力特性,与共振柱试验结果(见图2)相吻合。

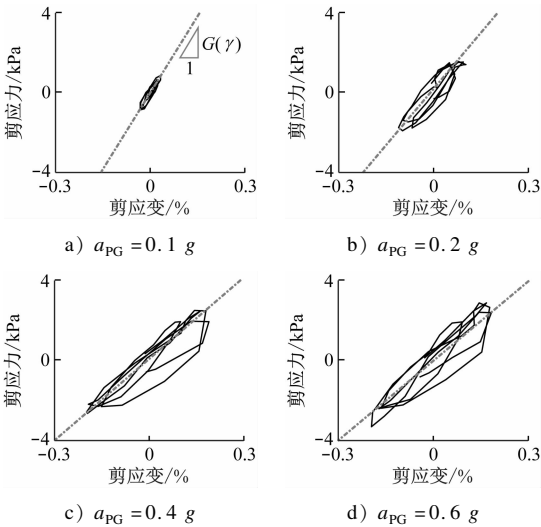


图8 不同强度上海人工波-0.8 m处模型土 $\tau$ - $\gamma$ 滞回圈  
Fig.8  $\tau$ - $\gamma$  loops of model soil at -0.8 m under different intensity Shanghai artificial waves

### 2.2 十字型换乘站近场土加速度响应

图9比较了8 Hz和10 Hz正弦波工况下,自由场加速度列SA-ff和结构近场加速度列SA-2—SA-5处,土体峰值加速度( $a_{PA}$ )与 $a_{PG}$ 的放大系数(即 $a_{PA}$ 与 $a_{PG}$ 之比)。自由场加速度放大系数先减小后增大,在地表处放大效应显著。相同深度的近场土体 $a_{PA}$ 相对自由场更低,说明换乘站结构一定程度上阻碍了近场地震放大效应。该现象验证了文献[6]的预测。此外,结构近场4个加速度列在相同高度处的 $a_{PA}$ 同样存在差异:距离换乘节点相对最远的SA-4所记录的放大效应虽小于自由场,但明显强于其他3个更靠近结构的加速度列。分析

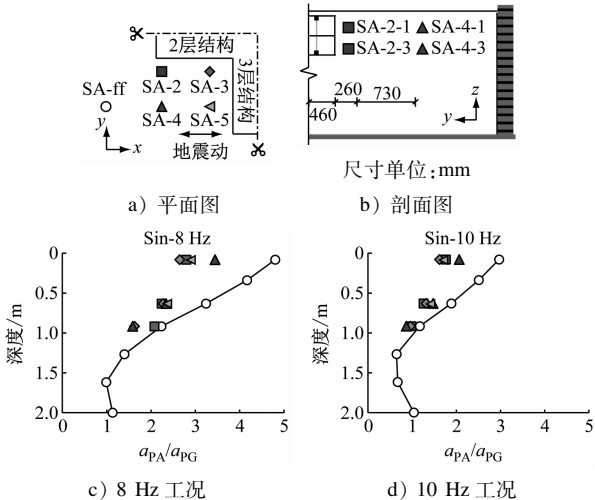


图9 自由场与近场土体加速度放大系数沿深度分布图  
Fig.9 Distribution of free-field and near-field soil acceleration amplification along depth

其原因为不同位置近场土体受换乘站结构约束作用的不同而造成的,也揭示了换乘站结构与周围场地相互作用的空间差异特性。

### 2.3 十字换乘站和三层单体车站中柱应变响应

以 $a_{pg}$ 为0.2 g 工况为例,以图 10 中节点为对象,图 11 对比了三层单体车站中间断面和十字换乘站不同位置处断面内中柱应变时程。试验结果显示,交叉车站地下一层中柱两侧的应变明显小于单体车站。经分析,因为交叉车站结构受交叉节点处墙体的约束,因此地下一层剪切变形相对较小。交叉车站地下二层中柱柱顶应变幅值随着截面距离交叉节点的增加而变大,其原因为交叉节点的约束作用随距离增大而减小,但仍略小于单体站相应位置处的中柱应变。交叉车站地下三层,由于不再受

交叉节点的直接约束,中柱应变明显比地下一、二层更大,且靠近交叉节点和靠近端部断面的中柱应变相对较大,其峰值与单体车站地下三层中柱应变相当。

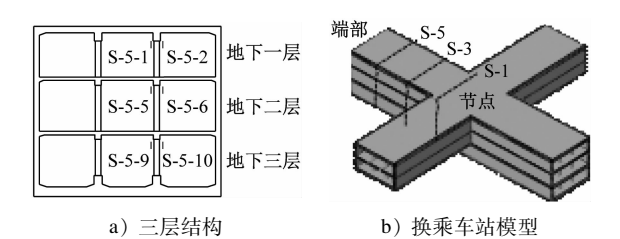


图 10 单体车站与十字形换乘车站节点分布示意图  
Fig. 10 Distribution diagram of single station and cross-type interchange station nodes

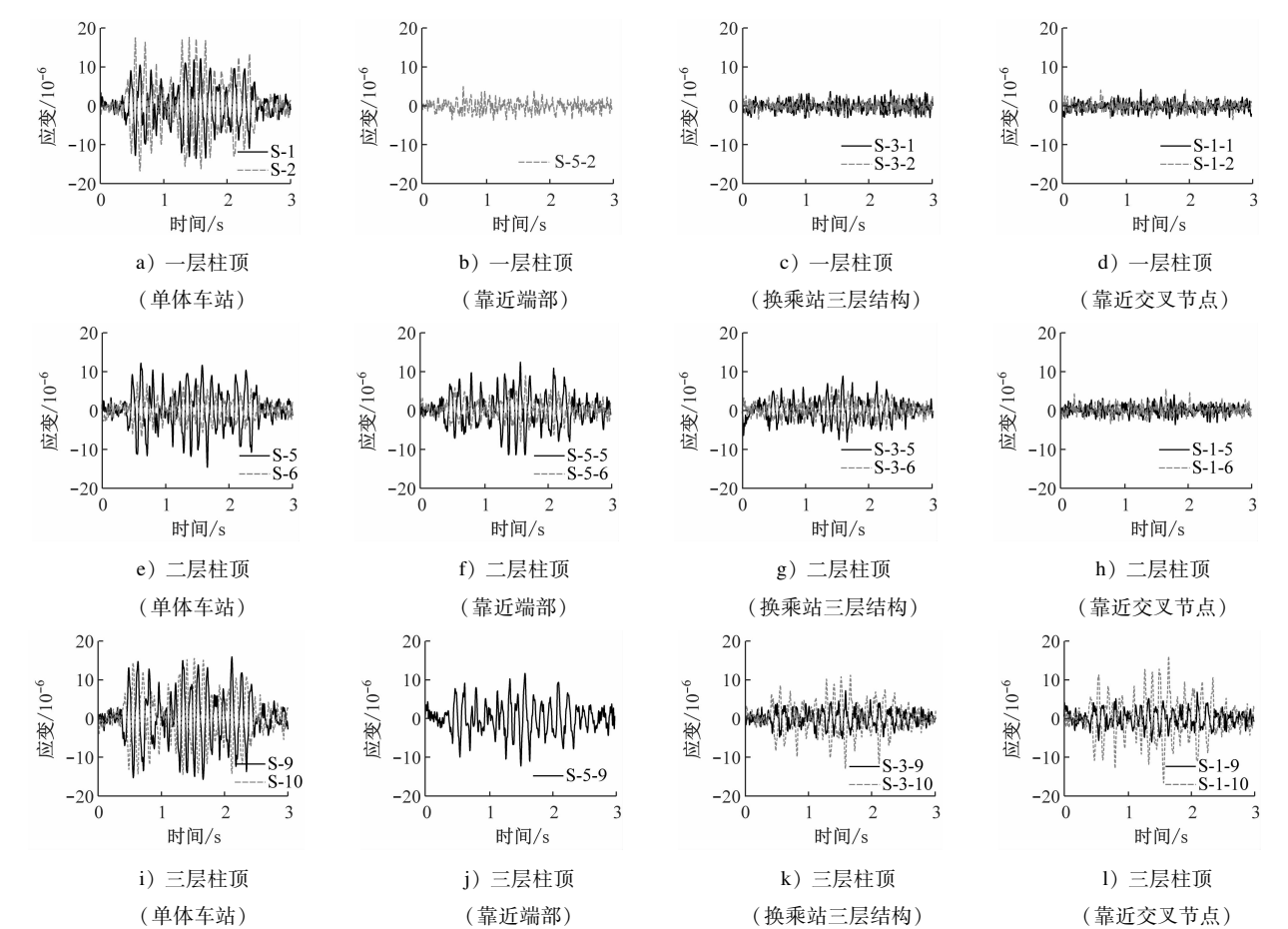


图 11 0.2 g 上海人工波工况下,单体车站与十字形换乘站不同断面处中柱应变响应时程  
Fig. 11 Time-history of middle column strain response at different cross sections of single station and cross-type interchange station under 0.2 g Shanghai artificial wave

### 3 结语

本文采用大比尺振动台试验方法,研究了地震

动沿三层结构横向进行单向作用时,软土地层中等长二层与三层十字型换乘站的地震响应特征。详细阐述了试验设备和基于砂-锯末模型土的地下结

构振动台试验相似设计方法,试验结果的分析重点为模型土非线性动力响应、换乘站近场土加速度放大系数的空间差异分布和中柱应变响应特征,总结主要结论如下:

1) 共振柱试验表明,原型和模型土剪切模量在较小剪应变即开始衰减。振动台试验证明了在  $a_{PG}$  为  $0.1 g$  的上海人工波下,浅层土体进入动力非线性。土体动剪应变峰值随着  $a_{PG}$  增加而增大,且动剪切模量衰减和阻尼增加现象趋于显著。

2) 受换乘站结构的差异约束作用,近场土体加速度响应幅值整体小于自由场,同时近场土地震动传播放大效应也不同程度的弱于自由场,造成近场土动力响应存在空间差异效应。

3) 受交叉节点的约束作用,在交叉节点处换乘站地下一、二层处,中柱应变小于单体车站对应位置处的应变;因不受交叉节点直接约束,3层中柱应变高于上方两层。由于交叉节点约束条件沿竖向分布的不均匀性,换乘站地下三层结构抗震安全性需在实际抗震设计中加以关注。

## 参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2019 年度统计和分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会, 2020;2.  
China Association of Metros. Report on statistics and analysis of urban rail transit in 2019[R]. Beijing: CAMET, 2020.
- [2] 上海市城乡建设和交通委员会. 地下铁道建筑结构抗震设计规范:DG/TJ 08—2064—2009[S]. 上海:上海市建筑建材业市场管理总站, 2009.  
Shanghai Urban-Rural Construction and Traffic Committee. Code for seismic design of subway structures DG/TJ 08—2064—2009 [S]. Shanghai Building Materials Market Management Station, 2009.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地下结构抗震设计标准:GB/T 51336—2018[S]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic design of underground structures[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural

Development of the People's Republic of China, 2019.

- [4] 王国波, 余森坤, 袁明智, 等. 十字换乘地铁车站结构地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 2019(7):1227.  
WANG Guobo, YU Miaokun, YUAN Mingzhi, et al. Seismic response analysis of cross metro transfer station structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019(7):1227.
- [5] 于仲洋, 张鸿儒. 交叉换乘地铁车站地震特性及其设计方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019(5):1011.  
YU Zhongyang, ZHANG Hongru. Seismic characteristics and design method for cross transfer subway stations[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019(5):1011.
- [6] GE S, WU W, DING W, et al. Shaking table test on the response of a cross interchange metro station under harmonic excitations refers to a single two-storey metro station[J]. Applied Sciences, 2021, 11:1551.
- [7] 于仲洋, 张鸿儒, 邱滢佳, 等. 十字交叉型地铁车站结构的振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2021(9):142.  
YU Zhongyang, ZHANG Hongru, QIU Yanjia, et al. Shaking table tests for cross subway station structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021(9):142.
- [8] 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: 2294.
- [9] 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.
- [10] WOOD D M, CREWE A, TAYLOR C. Shaking table testing of geotechnical models[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2002, 1: 1.
- [11] ANASTASOPOULOS I, GELAGOTI F, KOURKOULIS R, et al. Simplified constitutive model for simulation of cyclic response of shallow foundations: validation against laboratory tests[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137: 1154.
- [12] ZEGHAL M, ELGAMAL A W, TANG H T, et al. Lotung down-hole array. II: evaluation of soil nonlinear properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(2):363.

(收稿日期:2022-05-12)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com