

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111057

场地-隧道-地上建筑结构体系地震响应的 振动台试验*

王彤辉¹, 李小军^{1,2}, 陈红娟², 陈 苏¹, 周龙云¹

(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. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 在土体-结构体系动力响应研究中, 输入地震动特性是必须考虑的关键因素。分别考虑地震动的频谱特性差异和速度脉冲特征, 选取了两条不同类型的地震动加速度记录及一条人工合成地震动时程作为输入地震动, 设计并开展了隧道与地上建筑结构体系模型的振动台试验, 基于试验数据分析了地震动频谱与速度脉冲特性对隧道与地上建筑结构动力响应的影响。结果表明: 场地-隧道-地上结构体系地震响应中, 隧道与地上结构的相互作用效应显著, 地上结构的存在对地下隧道地震响应的较高频响成分有更显著的影响; 相互作用效应显著地受到场地输入地震动频谱特性的影响; 输入地震动的速度脉冲特性对隧道响应的影响主要表现在较高频范围, 而对地上结构响应的影响不只表现在较高频范围, 对周期1.0~2.0的频率范围的响应也具有明显增大作用。

关键词: 地震动速度脉冲; 振动台试验; 隧道; 地上建筑; 动力相互作用

中图分类号: TU921 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0742-10

Shaking Table Test of Seismic Response of Site-tunnel-aboveground Building Structure System

WANG Tonghui¹, LI Xiaojun^{1,2}, CHEN Hongjuan², CHEN Su¹, ZHOU Longyun¹

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of China Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: In the research of the dynamic performance of the soil-structure system, input ground motion characteristics are key factors that must be considered. In this study, the shaking table test was carried out on the structure system model of the tunnel and aboveground building under different seismic inputs, including two seismic acceleration records with different frequency spectra and an artificial ground motion time-history. The influence of the spectra and the velocity pulse characteristics of earthquake ground motion on the dynamic response of the tunnel and the aboveground building structure was analyzed. The results indicate that for the seismic response of the site-tunnel-aboveground structure system, the interaction effect between the tunnel and the aboveground building is significant, and the existence of the aboveground building has a more significant impact on the higher frequency component of the seismic response of the underground tunnel; the interaction effect is significantly affected

* 收稿日期: 2021-10-04; 修回日期: 2021-11-22

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8192047)、国家自然科学基金资助项目(U1839202, 51421005)资助

作者简介: 王彤辉(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事地下结构抗震及地震工程研究。E-mail: whitao@foxmail.com

通讯作者: 陈红娟(1982—), 女, 副研究员, 博士。主要从事土动力学与地下结构抗震研究。E-mail: chenyu94@163.com

by frequency spectra of the input ground motion; the influence of the velocity pulse characteristics of the input ground motion on the tunnel response is mainly in the higher frequency range, while the influence on the response of the aboveground building is not only in the higher frequency range, but also significant to increase the response in the frequency range of period 1.0 s to 2.0 s.

Keywords: velocity pulse of earthquake ground motion; shaking table test; tunnel; aboveground building; dynamic interaction

0 引言

随着城市地下空间利用的发展,地下隧道近距离下穿地面建筑物的情况越来越多。然而,地上和地下结构的存在会改变场地的动力反应特性,影响场地中地震波的传播,进而改变地上结构的地震响应;同时地上结构由于惯性效应会反过来作用于地基场地,从而对地下结构的地震响应产生影响。因此,针对场地-隧道-地上建筑的复杂土体-结构体系的地震响应规律研究成为城市工程建设和合理规划需要关注的问题。

人们对地震作用下土-结构相互作用问题已经有比较深入的研究。何伟等^[1]研究了地下结构存在对场地地表地震动的影响,指出隧道对场地地震反应特性有很大影响,并与输入地震动频谱特性有关。陈国兴等^[2]选取了具有代表性的近场、中远场和远场地震动记录进行了土-地下结构动力相互作用振动台试验,发现近、远场地震动输入场地反应的频谱成分均表现出低频放大现象。M. H. Baziar和 M. R. Moghadam等^[3-4]通过振动台试验及试验模型的数值模拟分析,研究了隧道对场地地表地震动的影响,表明隧道的存在会削弱场地的短周期放大效应,加强长周期放大效应,但没有关注输入地震动特性的影响。Z. Chen等^[5]开展了振动台试验,针对速度脉冲型地震动作用下多层地铁车站与周围土体的动力响应进行研究,发现具有丰富低频成分的速度脉冲型地震动会增大地铁车站与周围土体的动力响应。S. Chen等^[6]针对不良场地条件下大型地下结构对周围场地地震反应的影响开展研究,在振动台实验中选取了汶川地震的卧龙记录作为输入地震动,试验结果显示软土地中的地下结构与土体更容易遭受到破坏。进一步考虑场地-地下-地上结构之间相互作用的影响研究也成为人们关注的问题。杨书燕等^[7]对于不同基础形式的地上结

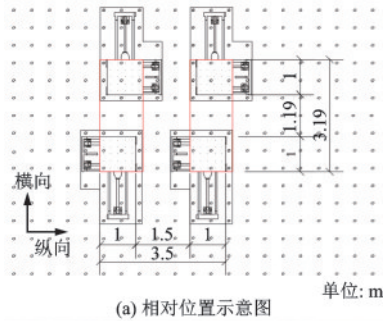
构,考虑了不同地震动输入,研究了地上结构与地下结构不同相对位置对地上结构地震响应的影响。陈建云、何伟等^[8-9]以El-Centro地震动为输入,利用二维有限元模型研究了地下结构存在时场地地表地震动空间的变化规律以及临近地下结构的地表建筑动力响应受到的影响。更多的学者^[10]利用简化的地上结构模型研究了地上结构对地下隧道响应有明显影响。王淮峰等^[11-12]则考虑地下隧道和多个相邻地表结构情况,探讨了地震波入射方向、地上结构布置、土体剪切波速和地下结构数量以及隧道到地上结构距离等因素对隧道地震反应的影响。G. Wang等^[13]进行了振动台试验,研究了自由场、地下结构-土、地上结构-土-地下结构模型的地震反应,试验表明不同体系地震反应均受输入地震动特性的显著影响。王国波等^[14-17]、韦浩浩等^[18]模拟分析了不同结构参数对地下结构-土-地上结构整个体系相互作用的影响规律。

由上可知,影响地下结构对场地地震响应的因素有很多,但是关于输入地震动特性这一关键影响因素的研究很少。本文将通过振动台试验的方式,选取含速度脉冲和不含速度脉冲及频谱特性不同的三条地震动作为输入,以探讨地震动特性对场地-地下结构-地上结构相互作用体系地震响应的影响。

1 试验方案

1.1 试验设备与相似比设计

本次试验在北京工业大学九子台地震震动台阵系统上进行,考虑到试验所用土箱以及结构大小,本次试验选用4个子台,横向台间距为1.19 m,纵向台间距为1.5 m,振动台布置如图1所示。每个子台均可在两个水平方向(横向和纵向)振动,台面宽为1 m×1 m,最大振动负载为5 T,作动器最大位移为±75 mm,横向在满载情况下最大加速度为±2.0g。



(a) 相对位置示意图



(b) 实际布置图

图1 振动台阵列布置

Fig.1 Shaking table array layout

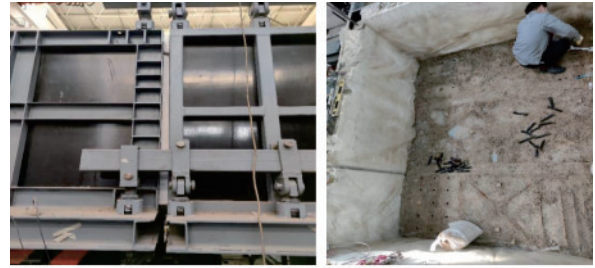
本次试验采用的是节段式刚性模型箱,整体图如图2所示。节段式刚性模型箱主要分为三段,其中有两段主动箱和一段从动箱,两侧主动箱分别与两个振动台台面相连,与中间的从动箱通过钢梁及悬挂装置相连,在箱体间的缝隙处固定钢板防止土体露出。模型箱内部净尺寸为3.8 m×2.8 m×1.1 m,内部侧边界设置0.15 m厚的泡沫板,以减缓土体在振动时刚性边界所产生的边界效应。图3展示了节段箱连接处和内衬。

试验中包含不同的结构体系,还包括了不同的地上结构与地下结构,以分析地下结构与地上结构之间的动力相互影响,因此在设计相似比时要考虑其中地下结构与地上结构各自的特点。根据 Buckingham 定理,以长度、弹性模量、加速度为相似比设计基本物理量,其它相似关系根据式(1)可以初步确定。模型箱与模型结构几何尺寸的相似比 S_l 设



图2 振动台和模型箱整体图

Fig.2 Shaking table and model box



(a) 节段箱连接处

(b) 模型箱内衬

图3 模型箱连接处与内衬

Fig.3 Model box connection and lining

为1/30;试验中采用的微粒混凝土的弹性模量为15 GPa,密度为2 333 kg/m³,与常规C40混凝土弹性模量的相似比 S_E 为0.462;加速度相似比 S_a 为2;推算得出的其它各物理量相似比见表1。

$$\frac{S_E}{S_\rho S_a S_l} = 1 \quad (1)$$

表1 结构模型相似系数及相似关系

Table 1 Scale relationship and the ratio of the model system

类型	物理量	相似系数符号及表达式	相似系数
几何	几何尺寸	S_l	1/30
	弹性模量	S_E	0.462
	等效密度	$S_\rho = S_E / (S_a S_l)$	6.923
材料特征	应变	$S_\epsilon = S_\sigma / S_E$	1
	应力	S_σ	0.462
	质量	$S_m = S_\rho S_l^3 / S_a$	0.000 256
时间	时间	$S_t = S_l (S_E / S_\rho)^{-0.5}$	0.129
	频率	$S_f = S_l^{-0.5} \cdot S_a^{0.5}$	7.746
	动力特征	位移	S_l
速度		$S_v = S_l^{0.5} \cdot S_a^{0.5}$	0.258
加速度		S_a	2

1.2 结构模型与土体模型

试验模型中,地上结构模型为六层的双向单跨钢筋混凝土框架建筑和带有地下室的六层双向单跨钢筋混凝土框架建筑;隧道结构为外径20 cm、壁厚2 cm的圆形地下隧道,实际模型如图4所示。试验采用微粒混凝土制作结构模型,其中采用粒径为2.5~5 mm的石英砂来模拟普通混凝土中的粗骨料,采用粒径小于2.5 mm且级配连续的河沙来模拟细骨料,采用32.5级矿渣硅酸盐水泥,选用适合配合比与减水剂,拌合用水为当地自来水。

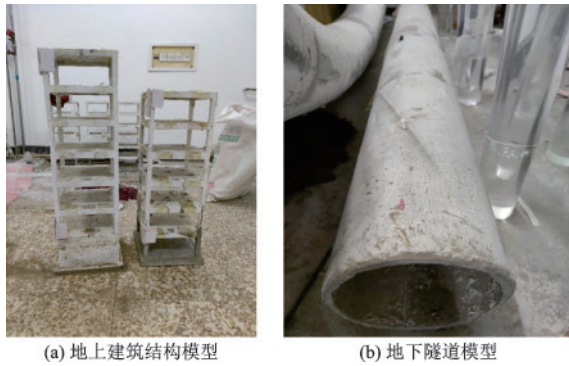


图4 试验结构模型
Fig.4 Test structure model

结构模型制作的同时浇筑试验所需模型结构与九个规定尺寸的立方体试块和棱柱体试块,并将结构模型和试块一同养护。试块进行轴心抗压试验,测量轴心抗压强度和弹性模量,混凝土的配合比与轴压试验结果见表2。土体模型制作采用北京地区某地铁车站工地的粉质黏土,分多次将土体倒入模型箱内,每10 cm用重物进行夯实,逐步填至1 m深。在压实后的土体模型中取土并通过环刀试验测得土体密度约为 1850 kg/m^3 ,利用弯曲元测得

表2 微粒混凝土配比及材性试验结果

Table 2 Micro-concrete ratio and material property

项目	水	细料	粗料	减水剂	水	轴心抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
微粒混凝土	1	2.5	2.5	0.014	0.686	17	15	2333

土体在压实状态下的剪切波速为 50 m/s 。

1.3 传感器布置

试验主要观测结构周围一定范围内土体和地上结构的加速度,以及地上结构基础和顶层的相对位移。试验中考虑了2个不同的地上建筑结构,均选择中间截面作为观测面,布置有加速度传感器及激光位移计,另外在模型箱每节段的箱底均布置有加速度传感器。传感器详细布置及模型尺寸如图5所示。图6展示了试验中地下隧道埋置位置和传感器的布置。

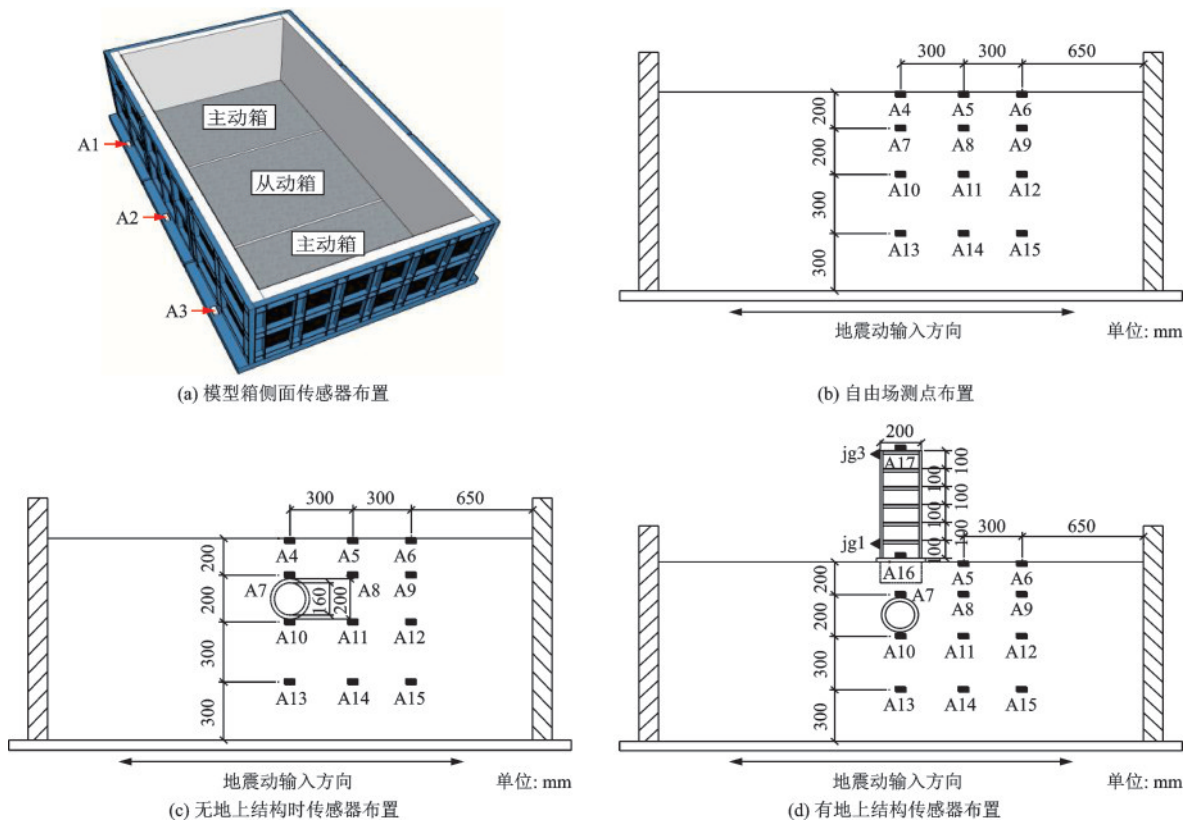


图5 传感器布置示意

Fig.5 Sensors arrangement

注:A代表加速度计,jg代表激光位移计。

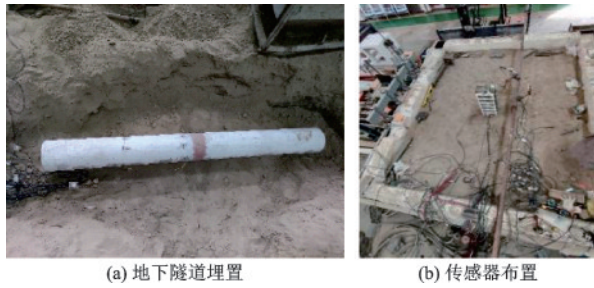


图6 试验模型布置和试验传感器布置照片

Fig.6 Photos of test model and test sensors layout

1.4 试验模型布置方案与试验工况

为了研究输入地震动的特性,特别是速度脉冲特性对地上结构与地下结构相互作用体系的影响,共选取三条地震动时程,分别是无速度脉冲的El-Centro地震动记录时程(以下简称EL)和含速度脉冲的Chi-Chi地震动记录时程(以下简称CC)以及一条与Chi-Chi地震动具有近似相同的加速度反应谱和相类似的时程包络但不含速度脉冲的人工合成地震动时程^[19](以下简称CA)。图7为三条地震动加速度时程及其加速度反应谱曲线。

共进行了4种不同场地-结构组合体系的试验,分别是自由场地体系(以下简称FS)、场地-隧道体

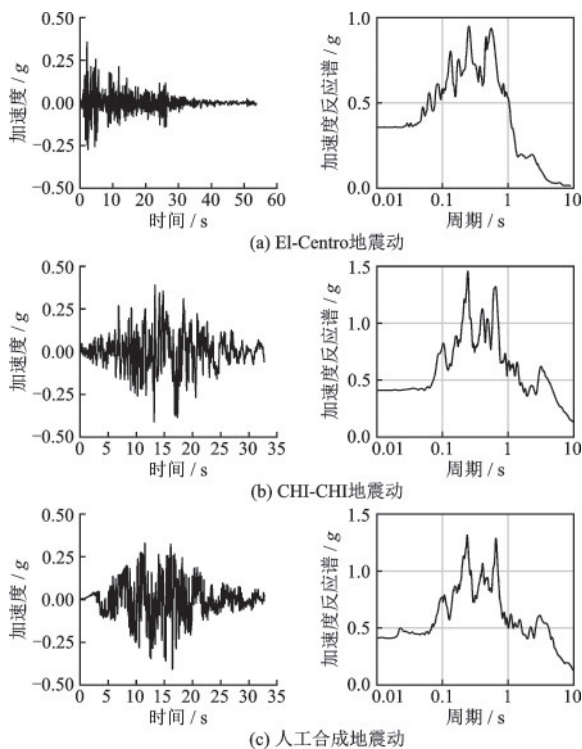


图7 试验输入地震动的加速度时程及加速度反应谱

Fig.7 Acceleration time histories and acceleration response spectra of input ground motions

系(以下简称ST)、场地-隧道-地上结构体系(以下简称STS)以及场地-隧道-带地下室地上结构体系(以下简称STUS)。不同体系结构布置示意如图8所示,试验工况见表3。

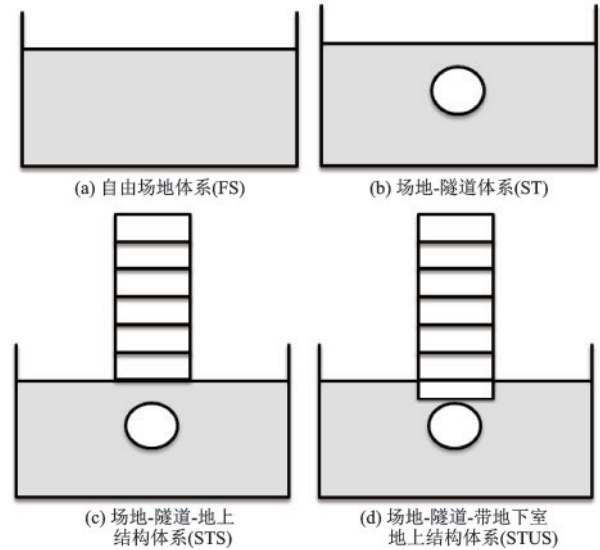


图8 试验结构布置示意

Fig.8 Structural models in shaking table tests

表3 试验工况

Table 3 Test cases for each phase

序号	振动台输入	工况代号	地震动幅值/g
1	白噪声	FS-WN	0.07
2	正弦波	FS-SIN5	0.1
3	EL	FS-EL	0.1~0.3
4	白噪声	ST-WN	0.07
5	EL	ST-EL	0.1~0.3
6	CC	ST-CC	0.1~0.3
7	CA	ST-CA	0.1~0.3
8	白噪声	STS-WN	0.07
9	EL	STS-EL	0.1~0.3
10	CC	STS-CC	0.1~0.3
11	CA	STS-CA	0.1~0.3
12	白噪声	STUS-WN	0.07
13	EL	STUS-EL	0.1~0.3
14	CC	STUS-CC	0.1~0.3
15	CA	STUS-CA	0.1~0.3

2 试验实施与观测结果分析

2.1 自由场试验

土体模型固有频率的理论值可由如下公式

确定:

$$f_n = (2n - 1) \frac{V_s}{4H} \quad (2)$$

式中, f_n 为模型土的第 n 阶频率; V_s 为模型土的剪切波速; H 为土体模型的土深度。

通过上式计算得到本次试验场地-土体模型的自振频率为 12.5 Hz。试验中采用半功率带宽法和白噪声扫频法测定自由场地模型的基频。以地表中心处(A4)输入工况为正弦波的加速度记录为例, 加速度反应的频谱见图 9(a), 由半功率带宽法可得到土体模型的基频为 9.994 Hz。白噪声扫频法沿模型箱横向(X向)输入加速度峰值为 0.07g 的白噪声, 同样以地表中心处(A4)观测加速度记录为例, 频谱如图 9(b)所示, 可得到土体模型的基频为 9.530 Hz。根据两种方法测得土体模型的自振频率平均值为 9.762 Hz, 试验结果与理论值有一定的差异。这可能是由于试验模型中土体在压实过程中存在不均匀部分, 且其密度比理论值小, 在振动过程中, 模型中土体的阻尼会增大, 频率会有一些减小。

2.2 模型箱边界效应

试验使用的是刚性模型箱, 因此土箱引起的试

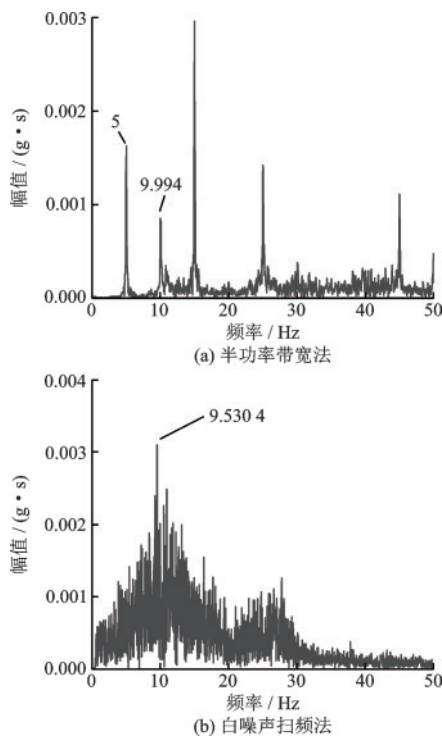


图9 半功率带宽法和白噪声扫频法

Fig.9 Half-power bandwidth method and white noise sweep method

验模型边界效应是不可忽略的。为探究试验模型的边界效应影响范围, 分析自由场地体系模型在输入不同强度的El Centro地震动下的试验结果, 如图 10所示为地表地震动峰值加速度随距中心点距离的变化情况。由图示结果可以看出, 在距中心点 300 mm 的区域地震动峰值加速度均有不同程度减小, 而距离中心点 600 mm 的区域地震动加速度峰值均没有延续减小趋势, 反而呈现出不同幅度的增大, 0.1g 输入下峰值甚至超过中心点。这说明模型箱会引起一定的试验模型边界效应, 但不是很显著, 采用试验模型中心及附近位置的观测值进行分析时可以忽略边界效应。

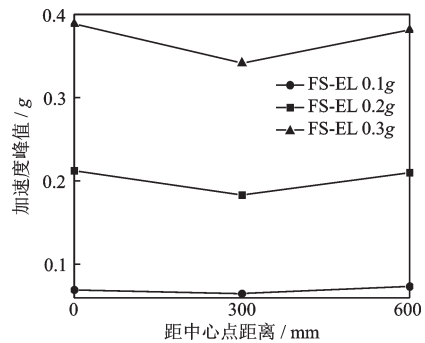


图10 地表距中心点不同距离加速度峰值

Fig.10 Peak accelerations at different distances on the ground to the center point

2.3 不同输入地震动对加速度反应影响分析

2.3.1 场地-隧道体系

考虑到振动控制精度和试验模型与振动台面的相互作用影响, 会一定程度地导致振动台输入失真, 对试验结果进行分析时采用振动台面上观测的地震动作为振动台输入地震动, 并将目标位置观测的地震动加速度反应谱值与振动台台面观测的地震动加速度反应谱值相比, 作为试验模型反应的加速度反应谱谱比(其它试验模型情况亦如此处理)。图 11分别给出了ST体系中隧道顶部及地表中心点在不同输入地震动下的加速度反应谱比。试验结果表明:(1)隧道顶部与地表中心加速度反应在同一输入地震动条件下呈现相似规律, 这是由于隧道顶部与地表相距较近;(2)三种地震动输入下体系加速度反应谱比存在一定的差异, 特别是在周期小于 0.5 s 的高频段和大于 2.5 s 的低频段, 相对而言, CC 输入与 CA 输入(两者具有几乎相同的频谱)下的差异较小, 而 EL 输入与 CC 和 CA 下的差异更为

显著。这说明输入地震动的频谱特性对ST体系响应的较高频和较低频(周期小于0.5 s和大于2.5 s)特征(谱比)影响非常显著;而对ST体系响应的中频段特征(谱比)影响不大;地震动是否含有速度脉冲对ST体系响应的较高频(周期小于0.35 s)特征(谱比)影响显著。

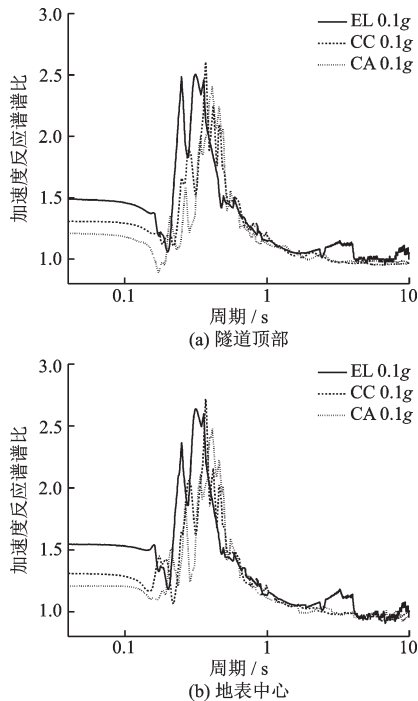


图11 不同输入地震动下ST体系响应的加速度反应谱谱比
Fig.11 Acceleration response spectrum transfer function of ST system response under different input ground motions

2.3.2 场地-隧道-地上结构体系

图12为不同输入地震动下STS体系中隧道顶部与地上结构顶部的加速度反应谱谱比。试验结果显示,输入地震动特性对STS体系和ST体系中地下隧道响应的特征基本一致,而输入地震动特性对STS体系中地下隧道响应与地上结构响应的特征则有显著的不同,对地上结构响应的影响更大。进一步比较分析STS体系和ST体系的试验结果可发现,地上结构的存在加大了地下隧道的较高频(周期小于0.5 s)响应,并增大了地震动速度脉冲对体系较高频(周期小于0.3 s)响应的影响。地上结构顶部响应试验结果(图12(b))还表明,反应谱谱比曲线中存在两个较大放大频段,这两个频段可能对应体系的主要自振频率区,主要受地下隧道结构和地上结构特性影响。

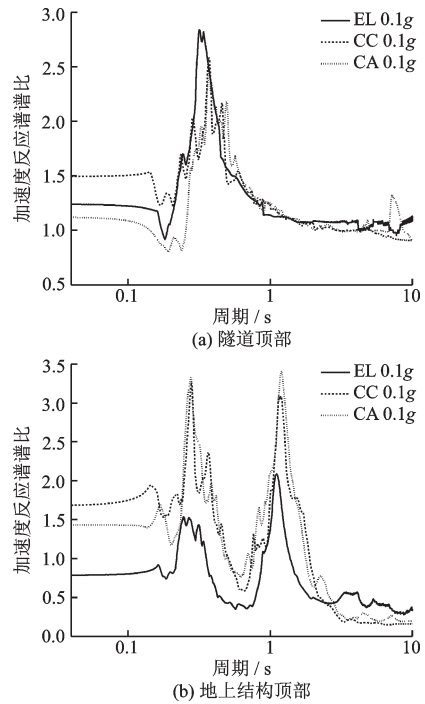


图12 不同输入地震动下STS体系响应的加速度反应谱谱比
Fig.12 Acceleration response spectrum transfer function of STS system response under different input ground motions

2.3.3 场地-隧道-含地下室地上结构体系

STUS体系中隧道顶部与地上结构顶部在不同输入地震动下响应的加速度反应谱谱比如图13所示。STUS体系响应特征变化趋势与STS体系的基本一致,但地上结构的不同(基础埋置深度)导致地下隧道响应特征有一定的变化,而地上结构响应特征则变化更为显著。这是由于地上结构地下室的存在,导致地上结构与地基场地之间的相互作用效应明显改变,同时进一步说明地上结构响应的谱比曲线在周期0.5~2.0 s范围的大幅放大变化,是受地上结构与地基场地之间的相互作用控制,而谱比曲线在周期0.2~0.5 s范围的大幅变化,是受地下隧道与场地之间的相互作用控制。

2.4 不同结构组合体系中结构响应加速度

2.4.1 地下隧道结构响应加速度

图14给出了相同输入地震动下不同组合体系中加速度反应谱谱比(隧道顶加速度反应谱与振动台台面加速度反应谱的比值),比较了不同组合体系下隧道响应特征。地上结构的存在对地下隧道

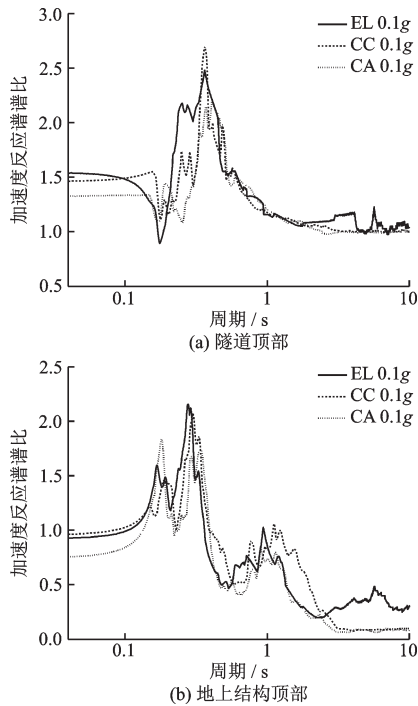


图 13 不同地震动输入下 STUS 体系响应的加速度反应谱谱比

Fig.13 Acceleration response spectrum transfer function of STUS system response under different input ground motions

地震响应的较高频(周期小于 0.5 s)特征影响非常显著,但对隧道地震响应的较低频(周期大于 0.5 s)特征影响较小,而且这一显著影响的频谱范围值与输入地震动的频谱特性密切相关。

2.4.2 地上结构响应加速度

不同组合体系中地上结构顶层响应的加速度反应谱谱比如图 15 所示。STS 体系地震响应与 STUS 体系的比较表明,地上结构地基的埋置(地下室的存在)显著改变地上结构的地震响应,对结构响应较高频(约周期小于 0.35 s)的影响较为复杂,响应增大还是减小与输入地震动的频谱特性密切相关,而对结构响应较低频(约周期大于 0.35 s)的影响较为一致,加速度响应均是减小。

3 结 论

通过考虑场地及地下隧道和地上建筑的不同结构组合体系的振动台试验,研究了不同类型输入地震动下结构组合体系的响应特征。主要结论如下:

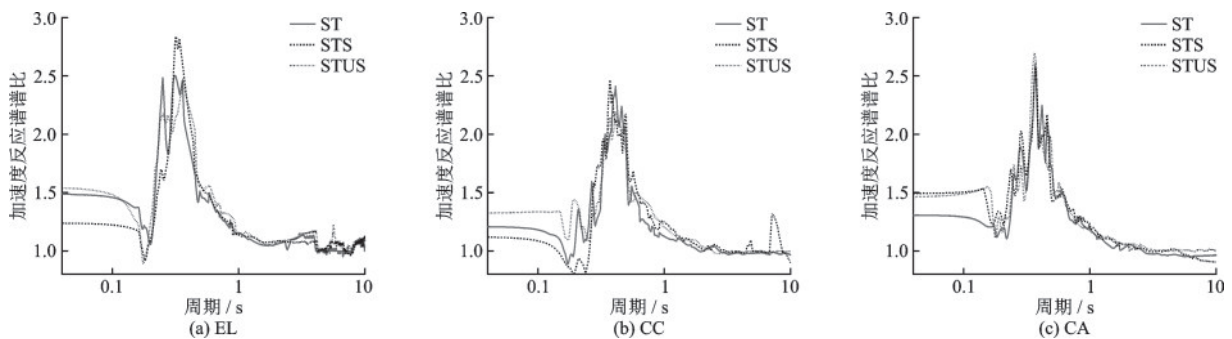


图 14 不同组合体系中隧道顶部响应的加速度反应谱谱比

Fig.14 The acceleration response spectrum transfer function of the top response of the tunnel in different combination systems

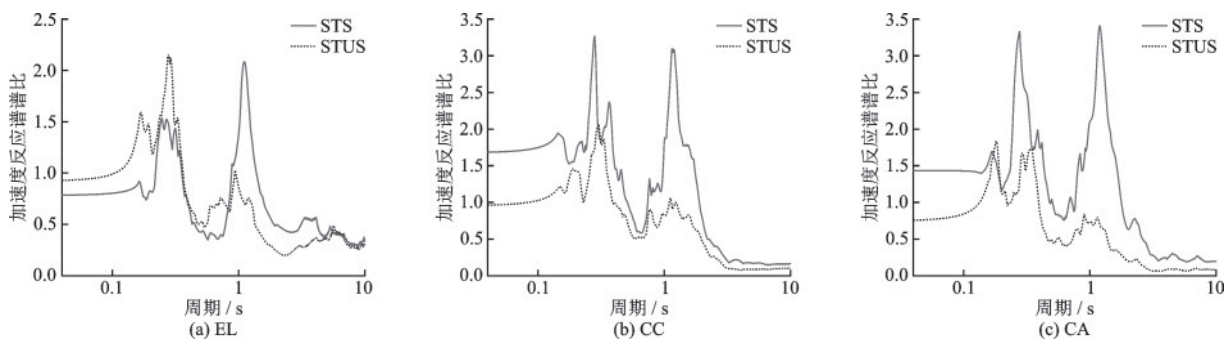


图 15 不同组合体系中地上结构顶部响应的加速度反应谱谱比

Fig.15 The acceleration response spectrum transfer function of the top response of the aboveground structure in different combination systems

(1)输入地震动的频谱特性对场地-隧道体系(ST)、场地-隧道-地上结构体系(STS)、场地-隧道-带地下室地上结构体系(STUS)的响应特征均有显著的影响,但对隧道响应的显著影响主要在较高频和较低频范围(周期小于0.5 s和大于2.5 s),而对地上结构响应的显著影响涉及整个高中低频范围。

(2)输入地震动的速度脉冲特性对隧道响应的影响主要表现在较高频范围(周期小于0.35 s),而对地上结构响应的影响不只表现在较高频范围,特别是对于场地-隧道-地上结构体系(STS)中的地上结构,周期1.0~2.0的频率范围的响应具有明显增大作用。

(3)地上结构的存在对地下隧道地震响应的较高频(周期小于0.5 s)影响非常显著,但对隧道地震响应的较低频(周期大于0.5 s)影响较小,而且这一显著影响的频谱范围随输入地震动的频谱特性不同而改变。

参考文献:

- [1] 何伟,陈健云,于品清. 地下结构开发对场地地表反应谱影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1098-1114.
He W, Chen J Y, Yu P Q. A study on influence of underground structure on ground surface response spectra [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1098-1114. (in Chinese)
- [2] 陈国兴,王炳辉,孙田. 饱和南京细砂动剪切模量特性的大型振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 582-590.
Chen G X, Wang B H, Sun T. Dynamic shear modulus of saturated Nanjing fine sand in large scale shaking table tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 582-590. (in Chinese)
- [3] Baziar M H, Moghadam M R, Kim D, et al. Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 44: 10-22.
- [4] Baziar M H, Moghadam M R, Choo Y W, et al. Tunnel flexibility effect on the ground surface acceleration response [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 15(3): 457-476.
- [5] Chen Z, Chen W, Li Y, et al. Shaking table test of a multi-story subway station under pulse-like ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 82: 111-122.
- [6] Chen S, Tang B, Zhao K, et al. Seismic response of irregular underground structures under adverse soil conditions using shaking table tests [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103-145.
- [7] 杨书燕,姜忻良,李新国. 隧道对临近建筑物的地震反应影响分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(3): 41-46.
Yan S Y, Jiang X L, Li X G. Analysis on seismic response effect of tunnel to nearby structure [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(3): 41-46. (in Chinese)
- [8] 何伟,陈健云. 地表建筑对地下车站结构地震响应的影响[J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 53-58.
He W, Chen J Y. Influence of ground surface building on seismic response of underground station structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(9): 53-58. (in Chinese)
- [9] 陈健云,何伟,徐强,等. 地下结构对场地和地表建筑地震响应影响分析[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(3): 393-398.
Chen J Y, He W, Xu Q, et al. Analyses for effect of underground on seismic response of ground and adjacent structure surface buildings [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(3): 393-398. (in Chinese)
- [10] Guo J, Chen J, Bobet A. Influence of a subway station on the inter-story drift ratio of adjacent surface structures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35: 8-19.
- [11] 王淮峰,楼梦麟,陈希,等. 邻近地上结构对地下结构动力响应的的影响参数[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1773-1777.
Wang H F, Lou M L, Chen X, et al. Parametric study of influence of surrounding superstructure on infrastructure's dynamic response [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(12): 1773-1777. (in Chinese)
- [12] Wang H, Lou M, Chen X, et al. Structure-soil-structure interaction between underground structure and ground structure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 54: 31-38.
- [13] Wang G, Yuan M, Miao Y, et al. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 76: 145-159.
- [14] 王国波,于艳丽,卫何. 下穿隧道-土地表邻近框架结构相互作用体系地震响应初步分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 334-338.

- Wang G B, Yu Y L, Wei H. Seismic response of interaction system of underlying tunnels, soils and adjacent frame structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 334-338. (in Chinese)
- [15] 王国波,王亚西,陈斌,等. 隧道-土体-地表结构相互作用体系地震响应影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1276-1287.
- Wang G B, Wang Y X, Chen B, et al. Analysis of factors influencing seismic responses of tunnel-soil-ground structural system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1276-1287. (in Chinese)
- [16] 王国波,王亚西,于艳丽,等. 土体-隧道群相互作用体系地震响应研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(7): 66-76.
- Wang G B, Wang Y X, Yu Y L, et al. Study on seismic responses of soil-tunnel group interaction system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(7): 66-76. (in Chinese)
- [17] 王国波,伍火胜,王亚西. 地铁车站与其上盖钢框架结构体系的地震响应分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增1): 79-84.
- Wang G B, Wu H S, Wang Y X. Study on seismic responses of subway station and interaction system with upper steel frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(Sup1): 79-84. (in Chinese)
- [18] 韦浩浩,王国波. 地下结构与不同刚度地表结构体系地震响应规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 258-264.
- Wei H H, Wang G B. Study on seismic response of underground structure and surface structure system of different stiffness [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2): 258-264. (in Chinese)
- [19] 贺秋梅. 地震动的速度脉冲对结构反应及结构减隔震性能影响研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2013.
- He Q M. Study on the influence of seismic velocity pulse on structural response and isolation properties [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese)
- (本文编辑: 苏泽云)



(上接第 720 页)

- [7] Hu J, Shen L, Albanie S, et al. Squeeze-and-Excitation Networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(8): 2011-2023.
- [8] Xie S, Girshick R, Dollár P, et al. Aggregated residual transformations for deep neural networks [C] // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017: 5987-5995.
- [9] Howard A, Sandler M, Chen B, et al. Searching for mobileNetV3 [C] // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Seoul, South Korea: IEEE, 2019: 1314-1324.
- [10] Dusenberry D, Schmidt J, Hobelmann P, et al. Blast protection of buildings, ASCE/SEI 59-11 [M]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2011.
- [11] 李明鸿. 双层钢管混凝土组合墩柱爆炸损伤机理和评估方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- Li M H. Damage mechanism and performance assessment of concrete-Filled double-Skin steel tubular columns subjected to blast loads [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [12] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [13] Kingma D P, Ba J. Adam: A method for stochastic optimization [J]. Journal of Machine Learning Research, 2017, 18(1): 1-37.
- [14] Rumelhart D, Hinton G E, Williams R J. Learning Representations by Back Propagating Errors [J]. Nature, 1986, 323(6088): 533-536.
- [15] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012, 25(2): 84-90.