

项吴桐,王国波.基于振动台试验的平行隧道近距离下穿地铁车站结构地震响应研究[J].地震工程学报,2024,46(6):1364-1372.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220628001

XIANG Wutong, WANG Guobo. Shaking table test on the seismic response of parallel tunnels closely crossing beneath a subway station[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1364-1372. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220628001

## 基于振动台试验的平行隧道近距离 下穿地铁车站结构地震响应研究

项吴桐<sup>1</sup>, 王国波<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 温州大学 建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 目前对于单一地下结构抗震性能的研究十分丰富,而相互穿越地下结构体系在地震时的相互作用机理和影响规律的研究还不够成熟。基于1g振动台试验,探究近距离隧道平行下穿车站体系对场地土以及地下结构之间的影响规律。对比分析表明:(1)地下结构的存在可降低地表加速度响应,最大降低幅度可达25%;(2)上部车站的存在可以降低下穿隧道的加速度响应,最大降低幅度可达25%,而下穿隧道对上部车站加速度响应的影响则相对复杂,没有体现出一般规律性;(3)地下结构的加入对体系动力特性(主要是基频)的影响十分有限,从工程应用的角度可不予考虑。研究成果可为地下结构穿越体系的地震响应分析和初步设计提供参考。

**关键词:** 振动台试验; 单一结构体系; 隧道下穿车站; 地震响应; 动力特性

中图分类号: U435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1364-09

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220628001

## Shaking table test on the seismic response of parallel tunnels closely crossing beneath a subway station

XIANG Wutong<sup>1</sup>, WANG Guobo<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China)

**Abstract:** The seismic performance of underground structure systems is extensively studied, but research on the interaction mechanism and influence law of underground structure crossing systems during an earthquake is limited. In this study, the influences of parallel tunnels crossing beneath a subway station system on the site soil and the underground structure were investigated with a 1g shaking table test. Test results show that (1) the underground structure would reduce the surface acceleration response by up to 25%; (2) the upper station would reduce the acceleration response of the underpass tunnels by up to 25%, and the influence of the underpass tunnels on the acceleration response of the upper station is complex and has no general regularity; (3) the influence of the underground structure on the dynamic characteristics (mainly the fundamental frequency) of the system is extremely limited and can be ignored in practical engineering. The

收稿日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878529, 52078386)

第一作者简介: 项吴桐(1995-), 男, 湖北孝感人, 硕士生, 主要从事地下结构抗震分析方面的研究。E-mail: gtxiang@foxmail.com。

通信作者: 王国波(1979-), 男, 湖北孝昌人, 博士, 教授, 主要从事工程结构动力分析。E-mail: 20190337@wzu.edu.cn。

research results could provide a reference for the seismic response analysis and preliminary design of the underground structure of a crossing system.

**Keywords:** shaking table test; single-structure system; tunnel crossing beneath station; seismic response; dynamic characteristics

## 0 引言

伴随城市化进程的加快,城市交通压力日益严峻,大量地铁车站等地下结构的开发随之增加,它们在建设的过程中往往会遇到近距离相互交叉或穿越的情况。地下结构大部分位于人口密集的区域并发挥着重要功能。近年来我国各大城市不断修建地铁工程,由于已建地铁及车站的存在,新建地铁工程与已建地下结构不可避免地产生交叉穿越。地下结构一旦受到震害便会带来巨大的损失<sup>[1-2]</sup>,因此研究近距离地下穿越结构的抗震性能显得尤为重要。

目前对单一隧道<sup>[3-4]</sup>、单一车站<sup>[5-7]</sup>体系有比较成熟的研究,而地下交叉、穿越结构的相关研究相对较少。对于地铁车站相互穿越体系,王国波等<sup>[8]</sup>总结大量实际工程并将其分为三类:车站相互穿越体系、隧道相互穿越体系以及车站-隧道穿越体系,其中车站-隧道穿越体系最为常见。地下立体式交叉结构在地震作用下的变形受力状态更加复杂,且相互作用显著<sup>[9]</sup>。随着对地下结构破坏机理的深入了解,学者们对车站-隧道体系提出了许多抗震分析方法并取得了大量成果:张波等<sup>[10-11]</sup>分析了超近距离下穿隧道对地铁车站地震动力响应的影响,结果表明:下穿隧道的存在可以减弱上部车站结构的位移和加速度响应,且越靠近隧道的车站部位,其减弱幅度越大;林辉<sup>[12]</sup>、黄俊等<sup>[13]</sup>、张润东<sup>[14]</sup>研究并发现与单一车站体系相比,隧道下穿车站体系的底部隧道具有吸收地震波的作用,从而使上部车站的地震响应减弱,减弱

幅度随车站与隧道之间夹层土厚度的增加而减小;Zhuang等<sup>[15]</sup>探究了微倾斜地面液化对于直接穿越体系抗震安全性能的影响;Liu等<sup>[16]</sup>提出了预制开环管片与现浇车站结构之间的特殊结构节点,以提高两平行盾构隧道扩建地铁车站的抗震性能。由上述已有研究成果来看,目前针对地下近距离穿越复杂结构体系的研究还不够成熟,缺乏试验研究和系统的参数分析。

本文主要通过自由场体系、单一地下结构体系及隧道平行下穿车站结构体系的1g振动台试验,基于试验数据,探讨地下结构对土体以及近距离地下结构地震响应之间的影响,确定地下结构地震响应规律及结构之间的相互影响规律。

## 1 振动台试验方案设计

### 1.1 振动台与模型箱

试验在北京工业大学9子台振动台台阵系统进行。本次试验使用了其中4个子台,横向台间距为1.19 m,纵向台间距为1.5 m。模型箱内部尺寸为3.8 m(长)×2.8 m(宽)×1.1 m(高),在模型箱内部内置厚度为0.15 m的泡沫板以减弱边界效应,则模型土体实际尺寸约3.50 m(长)×2.50 m(宽)×1.0 m(高)。主动箱位于模型箱两端,并固定在振动台台面上,由于本文暂不考虑行波效应,只考虑一致输入的情形,因此将主、从动箱用钢板通过螺栓连起来。振动台与模型箱布置如图1(a),模型箱实物如图1(b)所示。

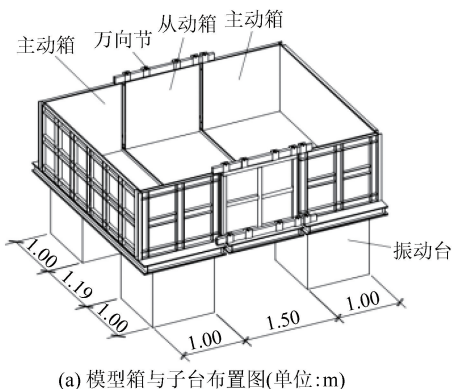


图1 模型箱构造图和实物图

Fig.1 Structural and physical maps of model box

### 1.2 相似比设计

根据 Buckingham 定理,以长度、弹性模量及加速度为基本物理量,根据相似关系[式(1)]可确定其余的相似系数。几何相似比由模型箱尺寸确定为 1/30;结构模型采用微粒混凝土浇筑,其弹性模量为 15 GPa,密度 2 100 kg/m<sup>3</sup>,原型结构选取标准 C40 混凝土,弹性模量为 32.5 GPa,密度 2 500 kg/m<sup>3</sup>,得到弹性模量相似比为 0.462;加速度相似比依据振动台性能取 2。根据以上相似比可以推导其他物理量的相似系数(表 1)。

$$\frac{S_E}{S_\rho S_a S_l} = 1 \tag{1}$$

式中: $S_E$ 、 $S_\rho$ 、 $S_a$ 、 $S_l$  分别表示弹性模量、等效质量密度、加速度和长度相似比(表 1)。

表 1 试验相似关系表

Table 1 Similarity relation used in the test

类型	物理量	相似关系	相似系数
几何特征	几何相似比	$\lambda_l$	1/30
材料特征	等效质量密度	$\lambda_\rho$	6.93
	弹性模量	$\lambda_E$	0.462
动力特征	时间	$\lambda_t = \lambda_l \cdot (\lambda_E / \lambda_\rho)^{-1/2}$	0.129
	频率	$\lambda_\omega = 1 / \lambda_t$	7.746
	位移	$\lambda_u = \lambda_l$	1/30
	速度	$\lambda_v = \lambda_l / \lambda_t$	0.258
	加速度	$\lambda_a = \lambda_l / \lambda_t^2$	2

### 1.3 模型的设计与制作

试验模型包含隧道模型、车站模型及模型土。

#### (1) 隧道模型

根据隧道原型,按几何相似比 1/30 换算得出模型隧道长 2 m,外直径 200 mm,壁厚 15 mm。隧道截面如图 2,模型实物如图 3 所示。

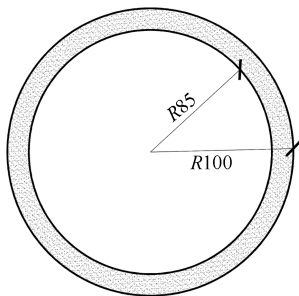


图 2 隧道截面示意图(单位:mm)

Fig.2 Tunnel section diagram (Unit:mm)

隧道模型采用微粒混凝土制作,其配合比列于表 2,最终测量得到的抗压强度、弹性模量等结果列于表 3。

#### (2) 车站模型

原型车站为单层两跨框架结构,根据几何相似比

换算得出车站模型长 1.05 m,横截面尺寸为 628 mm(宽)×229 mm(高);中柱高 172 mm,截面尺寸为 20 mm(长)×30 mm(宽);车站整体平面布置如图 4(a),横截面如图 4(b)所示,车站模型实物及其在模型土中的位置分别如图 4(c)和图 4(d)所示。车站模型制作所采用的材料配合比等参数均与隧道模型相同。



图 3 隧道模型实物图

Fig.3 Physical map of tunnel model

表 2 微粒混凝土配合比

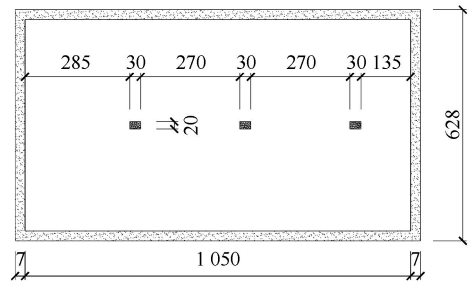
Table 2 Mix proportion of micro-concrete

水泥	细料	粗料	熟石灰	水
1	2	3	0.6	1.3

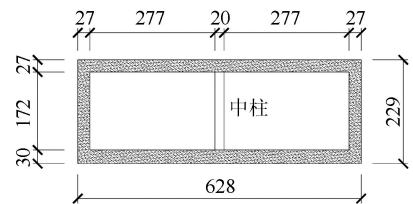
表 3 微粒混凝土试验结果

Table 3 Test results of micro-concrete

抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	阻尼比/%	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
17	15	4.85	2 333



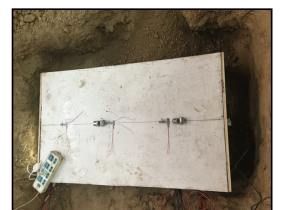
(a) 车站结构平面图



(b) 车站横截面图



(c) 车站模型



(d) 模型土中的车站模型

图 4 车站模型示意图(单位:mm)

Fig.4 Diagram of station model (Unit:mm)

(3) 模型土

模型土采用北京地区某地铁车站工地的粉质黏土。土体分多次倒入模型箱中,每填充 10 cm 后用重物夯实,逐步填至 1 m 深。每层土压实后,通过环刀试验测得平均密度为  $1\ 850\text{ kg/m}^3$ ,通过弯曲元得到土体剪切波速为  $50\text{ m/s}$ ,泊松比按经验取 0.3,则可得模型土剪切模量与弹性模量分别为  $6.06\text{ MPa}$ 、 $15.76\text{ MPa}$ 。

1.4 加载工况

为考虑不同地震动特性的影响,本次振动台试验输入波包括:用于体系扫描的白噪声、经典的 EL-Centro 波(EL 波)、脉冲波 Northridge 波(NR 波)、

取土地区的北京人工波(BJ 波)和用于检验模型箱边界效应的正弦波(SIN 波)。边界效应的验证参见文献[17]。根据时间相似比对地震波调整,处理得到如图 5 所示的地震波时程及频谱图,加载工况如表 4 所列,每种工况结束后都进行白噪声扫描,以确定体系频率和阻尼变化,故白噪声工况未在表 4 中列出。由图 5 可见 EL 波卓越频率在 9 Hz 附近,峰值比较单一,NR 波则存在两个峰值,而 BJ 波在 5~20 Hz 内频率成分十分丰富。规定 X 向沿模型箱 3.5 m 方向(水平横向),Y 方向沿 2.5 m 方向(水平纵向),Z 向沿深度方向(竖向),本次试验仅考虑地震动沿 X 向输入(图 6)。

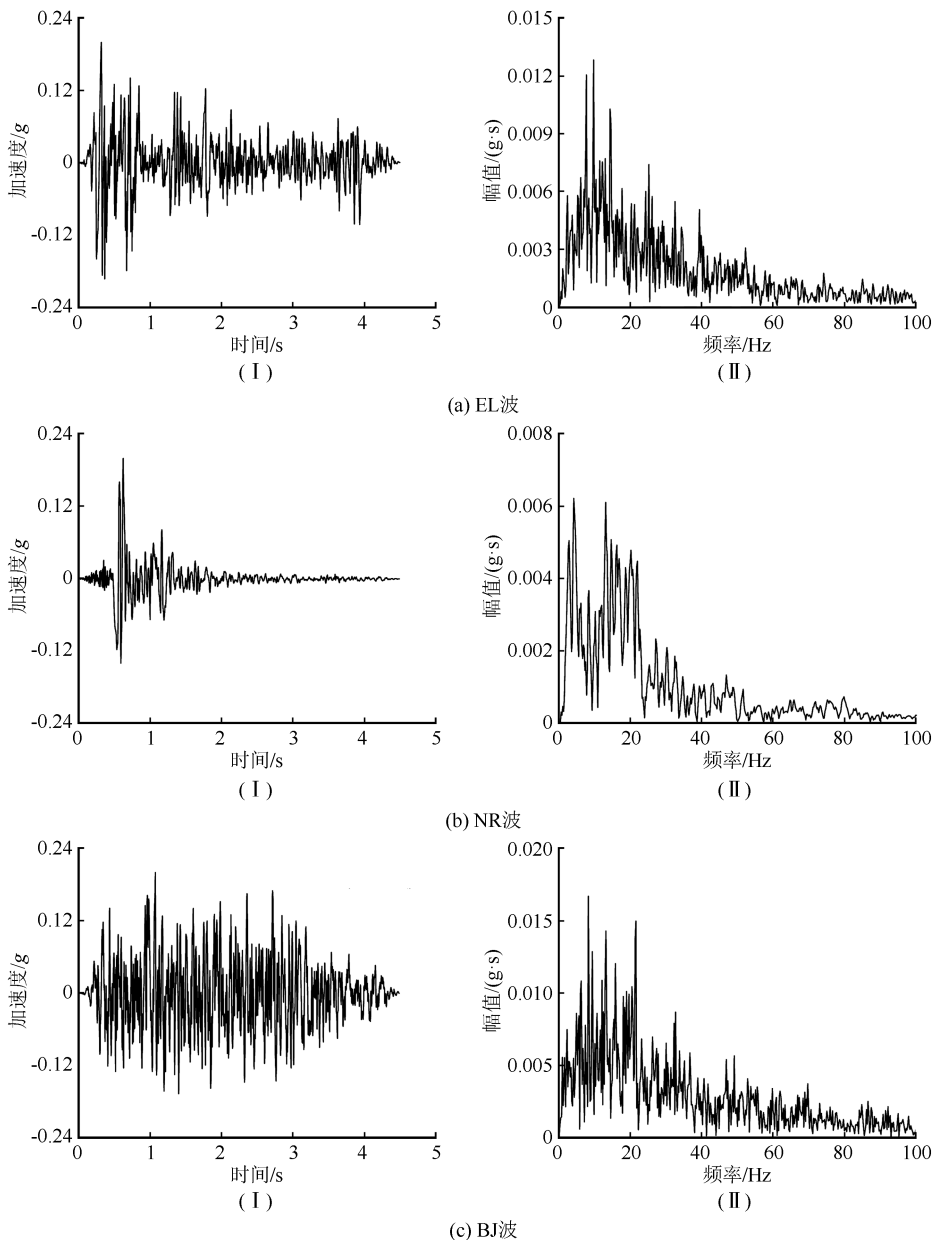


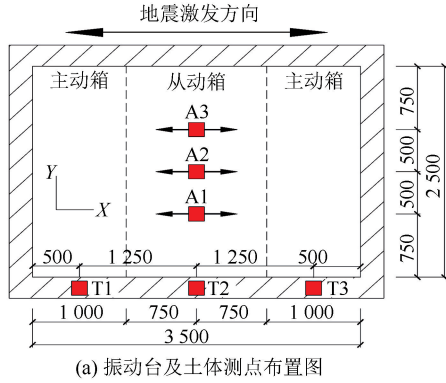
图 5 输入地震波时程曲线及频谱图

Fig.5 Time-history curves and spectra of input seismic waves

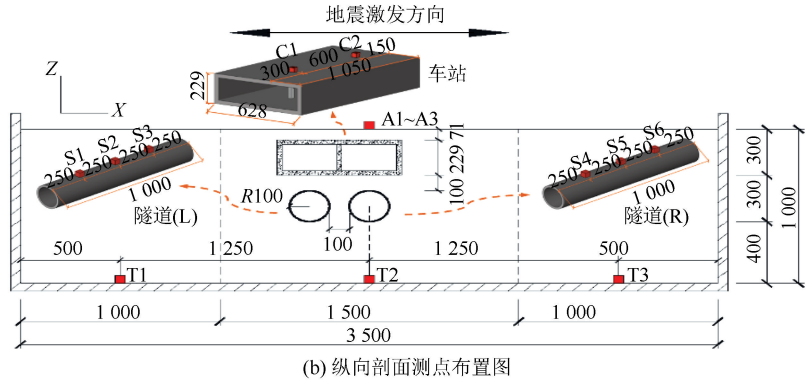
表4 加载工况表

Table 4 Loading conditions

序号	结构体系	输入地震波	加速度幅值/g
1	自由场	EL波	0.1
2	单一隧道	NR波	0.1
3		BJ波	0.1
4	单一车站	EL波	0.2
5	隧道下车站	NR波	0.2
6		BJ波	0.2



(a) 振动台及土体测点布置图



(b) 纵向剖面测点布置图

图6 各工况测点布置示意图(单位:mm)

Fig.6 Layout of measuring points under each working condition (Unit:mm)

## 2 地震响应分析

### 2.1 地下结构对土体响应的分析

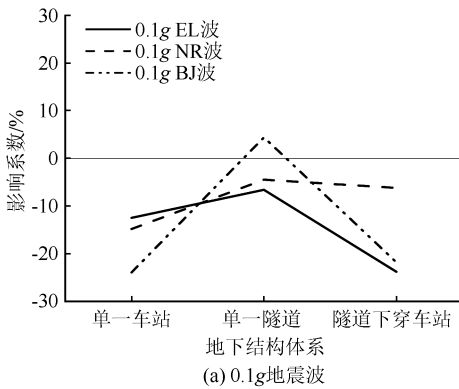
对4种结构体系地表测点A2的加速度响应进行对比,可分析地下结构对土体加速度响应的影响。定义地下结构对地表加速度响应影响系数( $k_1$ )为3种包含地下结构体系相较于自由场时地表测点加速度幅值变化量与自由场时地表加速度幅值的比值,

即:

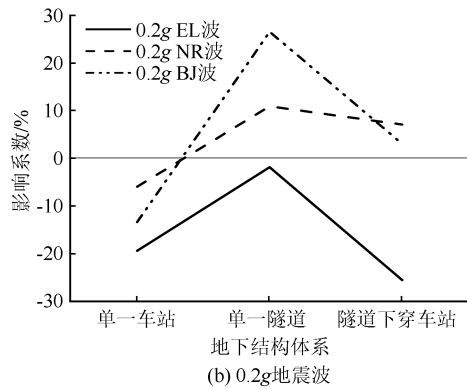
$$k_1 = \frac{A_{US} - A_{FF}}{A_{FF}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $A_{US}$ 和 $A_{FF}$ 分别为含地下结构和自由场时地表测点加速度峰值。

各体系地表加速度响应影响系数如图7所示(显然,自由场工况时地表加速度影响系数为0)。由图7可见:



(a) 0.1g地震波



(b) 0.2g地震波

图7 地表A2测点加速度影响系数

Fig.7 Acceleration influence coefficient of measuring point A2 on soil surface

(1) 单一车站体系的影响系数均小于0,表明单一车站结构的存在降低了地表加速度(-19%~-14%),主要是车站结构尺寸相对较大,阻隔了地震波向正上方地表的传播;

(2) 单一隧道体系的影响系数在0.1g地震波时也以降低为主,但幅度不大(-4%~-2%),主要是隧道结构尺寸相对较小对地震波传播影响不大,反而在较大地震动(0.2g)时放大了地表响应;

(3) 隧道下穿车站体系的影响系数在地震动幅值较小(0.1g)时降低了地表响应,且降低幅度最大(-25%~-20%),但在地震动较大(0.2g)时有放大也有降低,体现了地震波在更多界面上复杂的反射现象;

(4) 从地震波类型来看:在 BJ 波作用下影响系数的变化幅度最大, NR 波下最为平缓,主要是北京波的强震时间最长,且其按相似比调整的卓越频率

[图 5(c)]与体系基频最接近<sup>[17]</sup>。

地表 A2 测点在 0.1g、0.2g EL 地震波作用下的时程、频谱图见图 8。由图 8 可知,与自由场相比,加入地下结构后体系的主频略有减小,但影响程度都有限,4 种体系时地表加速度响应的频谱分布基本一致,即地下结构对体系动力特性影响不显著,从工程角度可忽略不计。

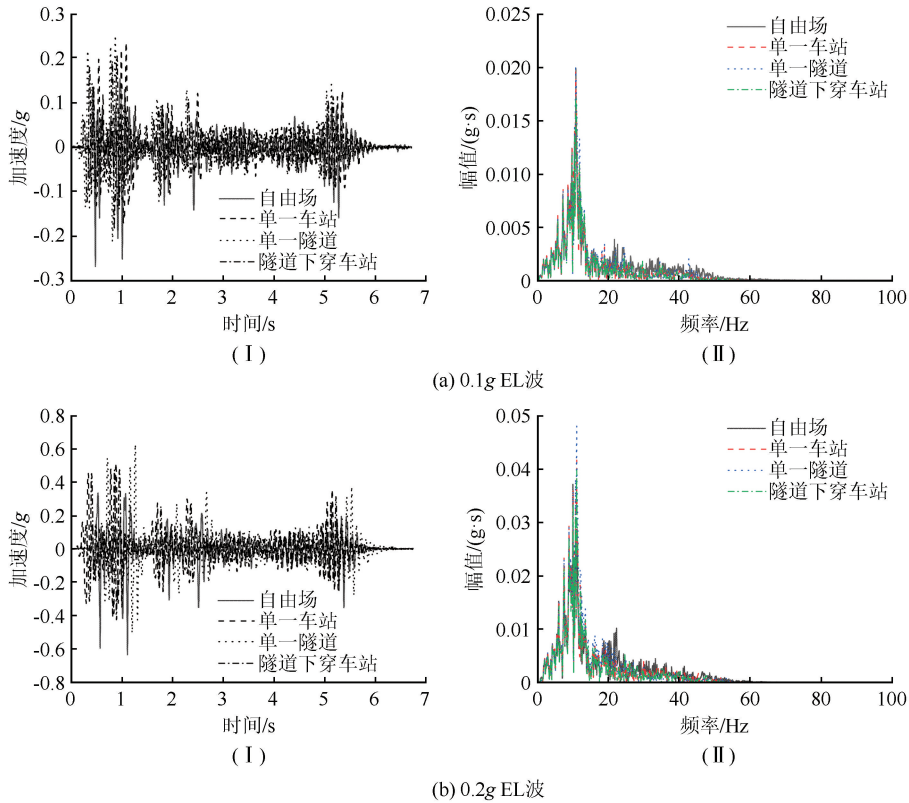


图 8 地表 A2 测点时程及频谱图

Fig.8 Time history and frequency spectrum of measuring point A2 on soil surface

### 2.2 车站对隧道响应的影响分析

以单一隧道体系为基准,通过对比单一隧道体系与隧道平行下穿车站体系时隧道拱顶加速度响应,可分析车站对下穿隧道加速度的影响。定义车站对隧道加速度的影响系数为  $k_2$  [式(3)],以隧道纵向跨中截面上测点 S5 响应为例进行分析。该测点在各工况下的影响系数如图 9 所示,其在 0.1g、0.2g EL 地震波作用下的时程、频谱图如图 10 所示。

$$k_2 = \frac{A_{ST} - A_T}{A_T} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $A_{ST}$  和  $A_T$  分别表示隧道下穿车站体系、单一隧道体系中隧道拱顶测点的加速度幅值。

由图 9、图 10 可知:在 3 种地震波的作用下,测点 S5 的加速度影响系数均小于 0,即上部车站的存在降低了下穿隧道的加速度响应;从影响程度来看,

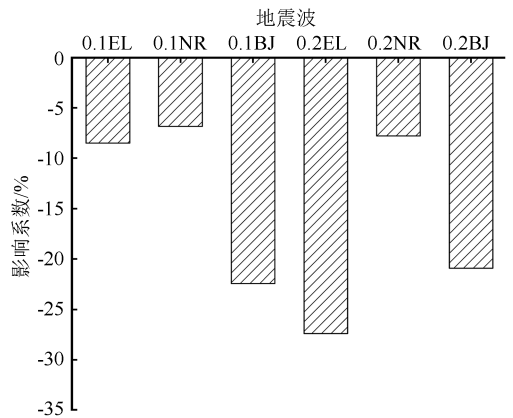


图 9 隧道测点加速度影响系数图

Fig.9 Acceleration influence coefficients of measuring points on tunnel

BJ 波对隧道加速度的减弱程度最为明显(25%),其

次是EL波,而NR波的影响最小(10%以内)。其原因还是在于BJ波,其卓越频率与体系基频接近,而且NR波为脉冲波,强震作用时间较短。与此同时,车站的刚度大于邻近土体,车站与隧

道间距较小,车站的存在增加了对隧道的约束,从而降低了隧道的整体响应。另外,两种体系的主频基本一致,隧道体系中加入车站对于整个体系动力特性的影响十分有限。

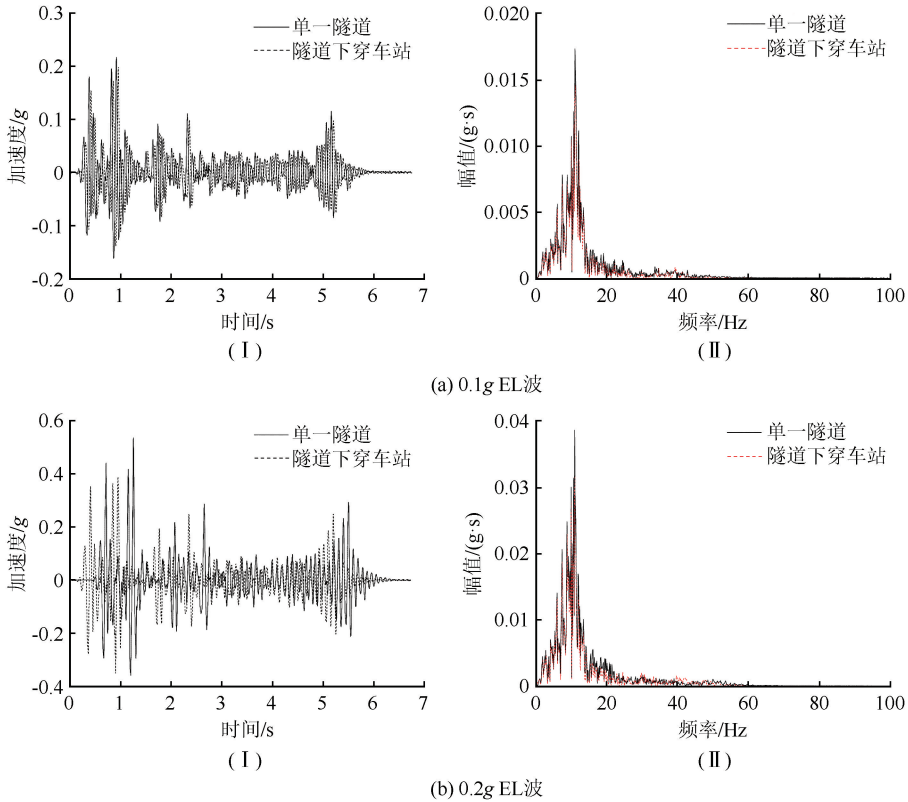


图10 隧道测点S5时程图及频谱图

Fig.10 Time history and frequency spectrum of measuring point S5 on tunnel

### 2.3 隧道对车站响应的影响分析

以单一车站体系为基准,通过对比土-车站体系与隧道下穿车站体系时车站顶板加速度响应,分析隧道对上部车站加速度的影响。定义隧道对车站加速度的影响系数为 $k_3$ [式(4)],以车站顶部测点C2响应为例进行分析。该测点在各工况下的影响系数如图11所示,其在0.1g、0.2g EL地震波作用下的时程、频谱图如图12所示。

$$k_3 = \frac{A_{TS} - A_S}{A_S} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $A_{TS}$ 和 $A_S$ 分别表示隧道下穿车站体系和单一车站体系中车站顶板对应测点的加速度幅值。

由图11可见:隧道对车站的影响没有明显的规律,与前面对场地土影响分析类似,如EL波时降低了车站响应,而NR和BJ波时则放大了车站响应,主要原因在于隧道与车站诸多界面致使地震波存在大量的反射现象,其进一步的规律尚需借助数值方法进行系统的参数分析。另外,单一车站体系与隧

道平行下穿车站体系的主频一致,即在车站下穿越隧道对结构整体动力特性的影响非常有限。

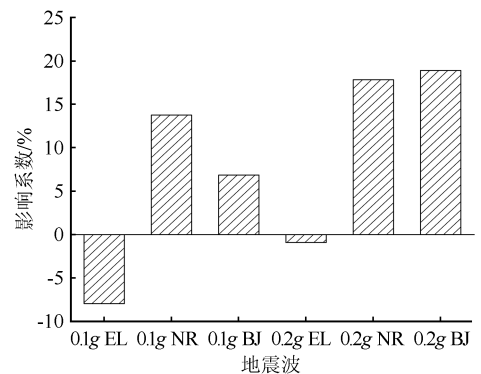


图11 车站顶板测点C2加速度影响系数图

Fig.11 Acceleration influence coefficient of measuring point C2 on station roof

## 3 结论

本文基于1g振动台试验数据对比分析,初步

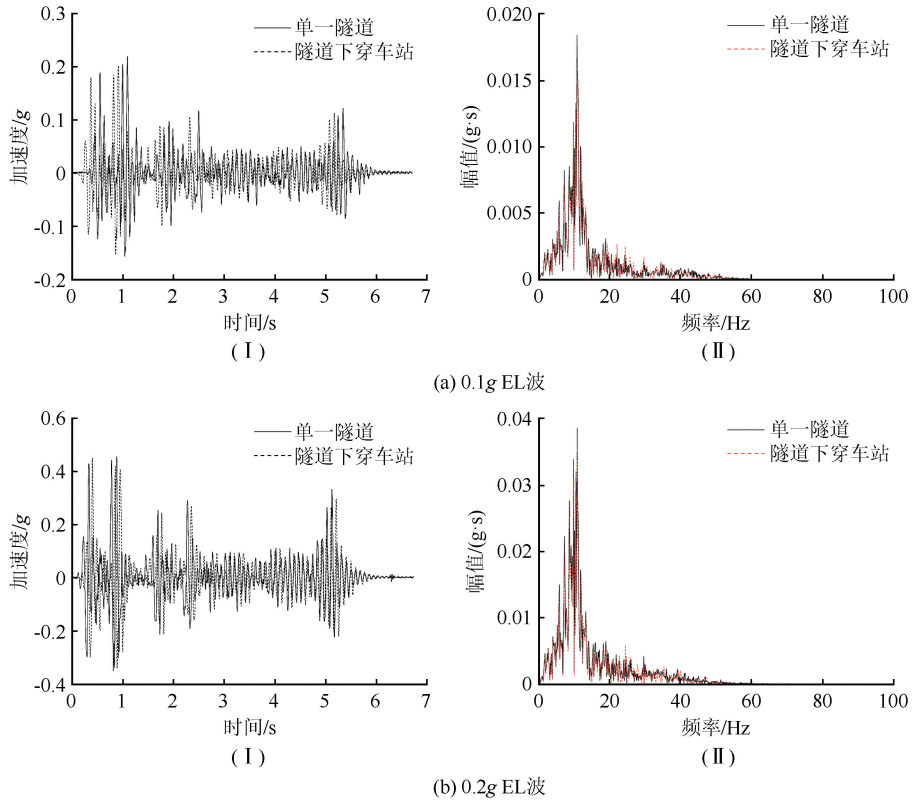


图 12 车站顶板测点 C2 时程及频谱图

Fig.12 Time history and frequency spectrum of measuring point C2 on station roof

探讨了近距离地下穿越结构对场地土以及地下结构之间地震响应的规律,可得如下结论:

(1) 地下结构的存在在一定程度上可降低地表加速度响应,且尺寸大、埋深小的车站降低幅度最大,尺寸小、埋深大的隧道则易于放大地表加速度响应;

(2) 由于车站结构的存在增加了对隧道的约束作用,车站结构降低了下穿隧道的响应,其中以强震作用时间长、卓越频率与场地土基频接近的 BJ 波降低幅度最大;

(3) 由于隧道和车站诸多界面的影响,隧道对车站响应的影响没有体现出一定的规律,还有待进一步的数值参数分析;

(4) 地下结构的存在对体系动力特性的影响十分有限,从工程应用的角度可不考虑。

本文仅仅是对试验结果的初步分析,考虑到试验工况有限以及地下结构的变形监测困难,监测数据不够全面。因此,后续还需利用试验结果验证数值模型,并基于验证的数值模型进行广泛的关键因素参数分析,以期获得隧道下穿车站体系更一般的地震响应规律。

## 参考文献(References)

- [1] CHENG G X. Analysis on the earthquake response of subway station based on the substructure subtraction method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(4): 396-401.
- [2] SINGH M, VILADKAR M N, SAMADHIYA N K. Seismic analysis of Delhi metro underground tunnels [J]. Indian Geotechnical Journal, 2017, 47(1): 67-83.
- [3] RABETI MOGHADAM M, BAZIAR M H. Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: shaking table testing and numerical simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 83: 81-97.
- [4] YANG H, LIU C, JIANG X L, et al. Shaking table test and numerical simulation for dynamic response of shallow-buried bias double-arch tunnel[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(4): 3915-3929.
- [5] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(Special): 283-300.
- [6] HUO H, BOBET A, FERNÁNDEZ G, et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: evaluation of the failure of the Daikai station[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131: 1522-1533.
- [7] CHEN Z Y, FAN Y F, JIA P. Influence of buried depth on seismic capacity of underground subway stations through perform-



- ance-based evaluation[J].Structures,2021,32:194-203.
- [8] 王国波,彭祥军,郝朋飞,等.近距离地下穿越结构地震响应研究综述[J].岩土工程学报,2019,41(11):2026-2036.  
WANG Guobo,PENG Xiangjun,HAO Pengfei,et al.Review of researches on seismic response of close underground crossing structures[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(11):2026-2036.
- [9] 马莉,宣言,马筠,等.地铁隧道不同轨道结构形式对建筑物减振的仿真分析[J].铁道建筑,2011,51(1):110-113.  
MA Li,XUAN Yan,MA Yun,et al.Simulation analysis of different track structure forms of subway tunnel on building vibration reduction[J].Railway Engineering,2011,51(1):110-113.
- [10] 张波,陶连金,姜峰,等.地铁超近距交叉结构在水平地震荷载下的响应影响分析[J].铁道建筑,2011,51(11):47-50.  
ZHANG Bo,TAO Lianjin,JIANG Feng,et al.Analysis of response influence of super-close intersection structure of subway under horizontal seismic load[J].Railway Engineering,2011,51(11):47-50.
- [11] 张波.地铁车站地震破坏机理及密贴组合结构的地震响应研究[D].北京:北京工业大学,2012.  
ZHANG Bo.Study on seismic failure mechanism of subway station and the seismic response of closely-attached subway structures[D].Beijing:Beijing University of Technology,2012.
- [12] 林辉.既有地铁车站结构受隧洞穿越影响的抗震性能分析[D].北京:北京建筑工程学院,2011.  
LIN Hui.Analysis of the seismic behavior of subway station affected by the down-through tunnel[D].Beijing:Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2011.
- [13] 黄俊,张波.地铁交叉结构近场地震反应振动台试验研究[J].水电能源科学,2013,31(2):120-122,153.  
HUANG Jun,ZHANG Bo.Shaking table model test of subway cross-structure under near-field ground motion[J].Water Resources and Power,2013,31(2):120-122,153.
- [14] 张润东.并行地下结构地震动力响应分析及工程对策研究[D].成都:西南交通大学,2019.  
ZHANG Rundong.Study on seismic dynamic response of parallel underground structure and its engineering measures[D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.
- [15] ZHUANG H Y,WANG X,MIAO Y,et al.Seismic responses of a subway station and tunnel in a slightly inclined liquefiable ground through shaking table test[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,116:371-385.
- [16] LIU Y,ZHANG M J,LI P F,et al.Experiments on the seismic performance of Y-shape joints of subway stations built by enlarging two parallel shield tunnels[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2021,115:104048.
- [17] WANG G B,BA F,MIAO Y,et al.Design of multi-array shaking table tests under uniform and non-uniform earthquake excitations[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2022,153:107114.

(本文编辑:张向红)