

引用本文:胡双平.无柱加腋地铁车站土-结构模型振动台试验[J].建筑科学与工程学报,2020,37(4):116-126.

HU Shuang-ping. Shaking Table Test of Soil-structural Model of Non-column Haunched Metro Station[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 116-126.

DOI:10.19815/j.jace.2019.03042

# 无柱加腋地铁车站土-结构模型振动台试验

胡双平

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室,陕西 西安 710043)

**摘要:**以南宁地铁 5 号线金桥站为工程背景,根据模拟地震振动台试验的相似性理论,考虑地铁车站结构与土的材料性能、几何特性以及模型结构动力试验的相似关系等,设计制作了用于模拟地震振动台试验的无柱加腋地铁车站模型结构和试验用模型箱。选取 El Centro 地震波、Taft 地震波和南宁人工地震波,同时考虑地铁车站结构上覆土厚度等参数的变化,进行了多种工况下的模拟地震振动台试验,研究了考虑地铁车站土-结构相互作用的无柱加腋地铁车站模型结构的地震响应特点和主要变化规律,分析了上覆土厚度对模型结构动力响应的影响,考察了结构抗震的薄弱部位和主要损伤区域。采用 ABAQUS 有限元软件建立考虑地铁车站土-结构相互作用的三维空间有限元模型,进行了相应工况下的模拟地震有限元时程分析,并与振动台试验结果进行了比较。结果表明:有限元模拟结果与振动台试验结果吻合较好,说明建立的有限元模型和分析方法可靠有效;3 种地震波下模型结构的主要地震响应特点基本相同,其加速度响应和位移响应都随输入峰值加速度的增大而增加;上覆土厚度是影响车站模型结构加速度响应的重要因素,当上覆土厚度较薄时,车站模型结构的位移响应较大;模型结构的侧墙与底板、中板连接的加腋处是开裂和损伤最严重的区域,侧墙裂缝呈竖向发展,并出现多道连续裂缝,应引起重视。

**关键词:**地下工程;地震响应;振动台试验;无柱加腋地铁车站

中图分类号:U231<sup>+</sup>.4

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)04-0116-11

## Shaking Table Test of Soil-structural Model of Non-column Haunched Metro Station

HU Shuang-ping

(Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**Abstract:** Taking the Jinqiao Station in Nanning Metro Line 5 as the engineering background, based on the similarity theory of the simulated seismic shaking table test, premeditating the material properties and geometric characteristics of the metro station structure and soil and the similar relationship of the dynamic test of model structure, a non-column haunched metro station structure and test model box were designed and fabricated. Then, selecting the El Centro seismic wave, Taft seismic wave and Nanning artificial seismic wave, and considering the variation of the thickness of the overlying soil on the metro station structure, the simulated seismic shaking table

收稿日期:2019-07-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51678480);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(11JS059,12JS055)

作者简介:胡双平(1977-),男,重庆云阳人,高级工程师,E-mail:charleschou@163.com。

tests under various working conditions were carried out. The seismic response characteristics and main variation laws of the non-column haunched metro station were studied, and the influence of the thickness of the overlying soil on the model structure was analyzed. The weak parts of the structure and the main damage area were investigated. A three-dimensional space finite element model considering the interaction between soil and structure of metro station was established by ABAQUS finite element software, and the time history analysis of simulated earthquake under corresponding working conditions was carried out, then the results were compared with the shaking table test results. The results show that the finite element simulation results are in good agreement with the shaking table test results, and the finite element model and analysis method established are reliable and effective; the main seismic response characteristics of the model structure under three kinds of seismic waves are basically the same, and the acceleration response and displacement response increase with the increase of the input peak acceleration. The thickness of the overburden soil affects the acceleration response of the station model structure. When the thickness of the overlying soil is thin, the displacement response of the station model structure is relatively large, the most serious area of the crack and damage is the haunch where the side wall of the model structure is connected with the base plate and the middle plate, and the cracks on side wall develop vertically and multiple continuous cracks appear, which should be paid attention to.

**Key words:** underground engineering; seismic response; shaking table test; non-column haunched metro station

## 0 引言

当前地铁建设进入黄金时期<sup>[1-3]</sup>,结构形式趋于多样,无柱加腋地铁车站因能提供开阔空间、造型美观而被逐渐采用<sup>[4-5]</sup>。在地铁车站的抗震研究上,长期以来认为车站结构受到土体的约束作用,在地震作用下破坏性低于地上结构,有较好的抗震性能<sup>[6-9]</sup>,因此地铁车站的抗震性能研究至今没有一套比较全面的理论与方法,对无柱地铁车站的研究则更少。然而1995年发生的日本阪神地震为这一观念敲响了警钟。阪神地震中,神户地铁车站大开站(DAIKAI)和上泽站(KAMISAWA)的车站结构大量中柱破坏,导致顶板坍塌,车站损毁严重<sup>[10-13]</sup>。

神户地铁车站的破坏对传统地下结构抗震观念冲击巨大,研究人员也逐渐将研究焦点转移到地下结构。Keizo等<sup>[14]</sup>采用原型土进行了非线性破坏地下结构振动台试验,研究了土-结构接触作用下的动力响应规律;季倩倩等<sup>[15-17]</sup>设计了振动台模型结构试验,对有柱地铁车站在地震作用下的动力响应进行了分析;陈国兴等<sup>[18-19]</sup>提出了地下结构进行振动台试验的设计方法;庄海洋<sup>[20]</sup>对深厚软弱场地土进行研究,建立了相应ABAQUS有限元模型并进行振动台试验,得出深厚软弱场地土下地铁车站结构

的动力响应规律;陈红娟等<sup>[21-22]</sup>提出了小比例尺地下结构振动台试验模型土的制作方法,为地下结构振动台模型试验设计提供了新的思路;湛凯等<sup>[23-24]</sup>设计了双模型箱地下结构振动台试验,得到行波效应下地震波先到达位置动力响应更大。

近年来也逐渐开展了对无柱地铁车站的研究。钟波波等<sup>[25]</sup>利用FLAC3D对无柱大跨地铁车站进行了地震响应数值模拟,得到中板跨中双向受拉,易被拉裂;刘庭金等<sup>[26]</sup>采用ABAQUS分析了上软下硬地层下无柱大跨地铁车站的地震响应,得出软硬交界面对车站结构的内力分布有很大影响。

综上,从目前的研究现状来看,国内外对有柱岛式地铁车站做了较多研究,但针对无柱加腋地铁车站的研究文献较少。鉴于此,本文以南宁地铁工程5号线金桥站为工程背景,考虑土-地铁车站模型结构的相互作用,根据模拟地震振动台试验的相似理论,优选模型材料,设计制作地铁车站模型结构及试验用模型箱,输入选取的地震波进行多种工况下的模拟地震振动台试验,并采用ABAQUS建立三维空间有限元模型,与振动台试验结果进行了比较,验证有限元模型及分析方法可靠有效。对比分析了无柱加腋地铁车站模型结构在不同上覆土厚度下的地震响应情况,研究了无柱加腋地铁车站在地震作用

下的动力响应。

# 1 无柱地铁车站振动台模型试验方案

## 1.1 模型相似比设计

考虑振动台试验所选用的台面尺寸、性能、承载能力等,以第二相似 Buckingham 定理为理论基础,选用长度、密度和弹性模量作为基本物理量进行模拟地震振动台模型试验的相似比计算。其中,模型试验的几何长度相似比定为 1/80,密度相似比为 1,弹性模量相似比在优选模型试验材料后定为 0.022。确定以上 3 个基本物理量的相似比后,进行其余相似比的计算。模型试验各物理量相似比如表 1 所示。

表 1 模型试验相似比关系及相似比

Tab. 1 Scale Relation and Ratio of Model Test

类型	物理量	相似比符号	相似比关系	相似比
几何性能	长度 $L$	$S_L$		1/80
	面积 $A$	$S_A$	$S_A = S_L^2$	1/6 400
	线位移 $x$	$S_x$	$S_x = S_L$	1/80
材料性能	弹性模量 $E$	$S_E$		0.022
	应变 $\epsilon$	$S_\epsilon$		1
	应力 $\sigma$	$S_\sigma$	$S_\sigma = S_E$	0.022
	模型等效密度 $\rho$	$S_\rho$		1.68
动力性能	时间 $t$	$S_t$	$S_L (S_\rho / S_E)^{0.5}$	0.11
	频率 $\omega$	$S_\omega$	$1 / S_t$	9.27
	加速度 $a$	$S_a$	$S_E / (S_L S_\rho)$	1.09
	速度 $v$	$S_v$	$(S_E / S_\rho)^{0.5}$	0.116

## 1.2 模型试验材料的选择

根据振动台试验的缩尺情况,为了使结构模型的加速度相似比  $S_a$  接近为 1,选择水泥砂浆作为无柱加腋车站模型材料。浇筑砂浆试块测得结构材料的力学性能,其抗压强度和弹性模量分别为 9.3, 771 MPa。按照砂浆试块配比,等效配筋后进行车站模型结构的浇筑。模型长、宽、高分别为 260, 150, 190 mm,顶板厚 16 mm,中板厚 9 mm,底板厚 18 mm,顶、中、底板变截面处长分别为 62.5, 31, 11 mm。车站模型剖面尺寸与浇筑养护后结构模型如图 1 所示。

取黏性土土样堆晒烘干,待全部干燥后过 2 mm 筛对原状土进行筛分,加水混合均匀拌合制成人工重塑土。采用环刀法制样,进行静三轴、固结试验,测得重塑土的基本材料参数如表 2 所示。

为了减小刚性模型箱反射地震波增大车站结构的动力响应,选用硬聚氯乙烯(PVC)板材设计了一种半刚性模型箱,其密度为 1 200 kg · m<sup>-3</sup>,弹性模

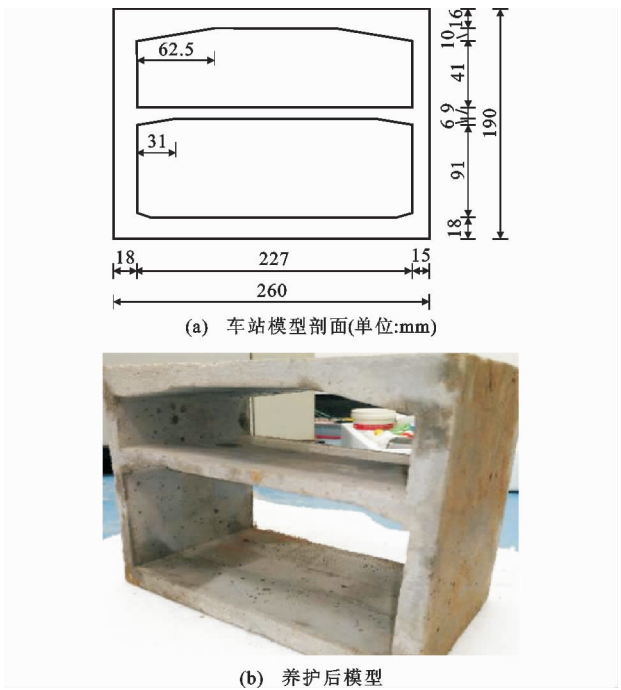


图 1 无柱加腋地铁车站结构模型

Fig. 1 Non-column Haunched Metro Station Structure Model

表 2 重塑土材料参数

Tab. 2 Remolding Soil Material Parameters

密度 $\rho$ / (kg · m <sup>-3</sup> )	含水率 $w$ / %	黏聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / (°)	孔隙比 $e$	压缩模量 $E_s$ / MPa
1 940	17.14	14.5	4.1	0.821	1.62

量为 2 600 MPa,并在模型箱振动方向两端内衬了聚苯乙烯泡沫板<sup>[15]</sup>,减少波的反射效应。为减小箱壁摩擦产生的边界效应,沿振动方向的两侧内壁各添加了 2 块光滑的有机玻璃,并在其内侧粘贴涂抹了润滑油的聚氯乙烯塑料薄膜,以此降低土-结构模型与模型箱侧壁的摩擦。整个模型箱底部总长为 1 200 mm,上部高度为 570 mm,模型装土部分长为 900 mm,宽为 154 mm,厚度为 15 mm,模型箱的平面尺寸如图 2 所示。

## 1.3 试验传感器的布置

由于车站模型的内部空间限制,因此只在结构模型正中设置一个主观侧面,传感器具体空间布置如图 3 所示。其中 A1~A6 代表加速度传感器,A1 与 A5 分别布置在土体表面与土体底部,以测取基岩深处土体和上地层表面的加速度;A2~A4 分别布置在车站结构的顶、中、底板,A6 布置在模型箱壁以测取模型箱的加速度。

## 1.4 地震波的选取及加载工况

试验选择具有代表性的 3 条输入地震动:Taft

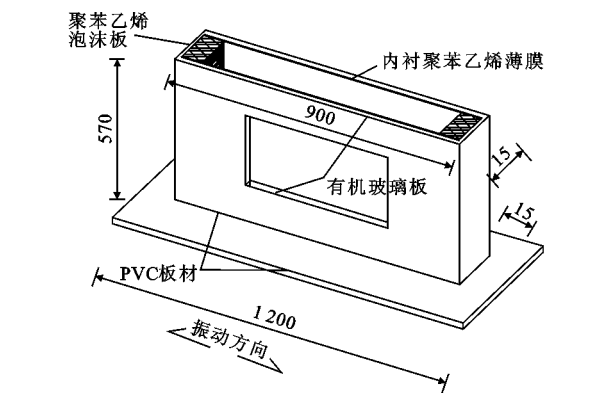


图 2 模型箱平面尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Model Box Plane Size (Unit:mm)

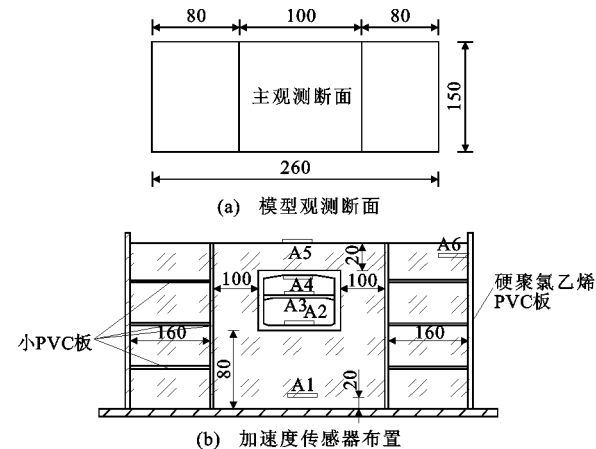


图 3 模型观测面及加速度传感器布置(单位:mm)

Fig. 3 Model Observation Surface and Acceleration Sensor Layout (Unit:mm)

波、El Centro 波以及根据金桥地铁车站实际工程背景拟合的南宁人工波。各地震动加速度时程曲线及

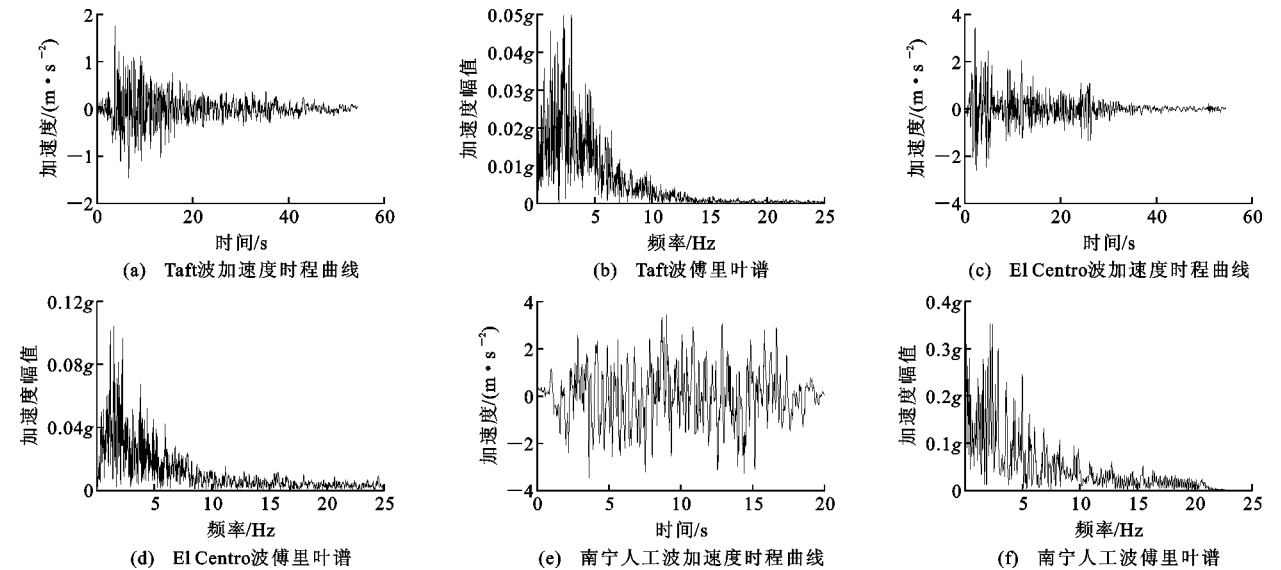


图 4 振动台试验输入的地震动加速度时程及傅里叶谱

Fig. 4 Ground Motion Acceleration Time-history and Fourier Spectrum of Shaking Table Test Surface Input

其傅里叶谱见图 4。其中 Taft 波峰值加速度为  $0.176g$  ( $g$  为重力加速度), El Centro 波峰值加速度为  $0.342g$ , 人工波为  $0.343g$ 。将 3 条地震波峰值加速度依次调整为对应于原型结构 7 度多遇 ( $0.035g$ )、7 度基本 ( $0.100g$ )、7 度罕遇 ( $0.220g$ ) 与 8 度多遇 ( $0.070g$ )、8 度基本 ( $0.200g$ )、8 度罕遇 ( $0.400g$ ) 后输入, 并且在每次试验前后都用白噪声进行扫频。试验加载工况如表 3 所示。

地下结构埋深对结构在地震作用下的动力响应也有影响。为研究地下结构在埋深变化下土-车站结构的动力响应情况, 本试验设计了 2 组不同工况的振动台对比试验, 通过改变上覆土厚度研究无柱加腋地铁车站结构的动力响应, 具体工况见表 4。

## 2 振动台试验结果与分析

### 2.1 车站结构震害情况

待试验结束后取出地铁车站模型并将其表面覆土清理干净, 观察结构内部各位置处所产生的震害, 做好标记。无柱加腋地铁车站模型的震后损伤如图 5 所示。

由试验后模型的破损情况可知, 两侧墙与底板的连接处是结构裂缝开展最严重的区域。侧墙的裂缝主要呈竖向发展并出现了多道连续裂纹, 中板下部与侧墙连接的变截面处也出现了较多的微裂缝, 中板上的裂缝沿结构宽度方向发展与延伸, 在结构宽度方向呈对称分布, 结构其他位置, 如顶板及底板等处损伤不大。

表 3 振动台试验加载工况

Tab. 3 Loading Conditions for Shaking Table Test				
设防烈度	工况序号	输入地震波	输入方向	加速度峰值
7 度、8 度多遇	1	白噪声(1 000 Hz)	X	0.035g,0.070g
	2	Taft 波	X	
	3	南宁人工波	X	
	4	El Centro 波	X	
	5	白噪声(1 000 Hz)	X	
7 度、8 度基本	6	Taft 波	X	0.100g,0.200g
	7	南宁人工波	X	
	8	El Centro 波	X	
	9	白噪声(1 000 Hz)	X	
7 度、8 度罕遇	10	Taft 波	X	0.220g,0.400g
	11	南宁人工波	X	
	12	El Centro 波	X	
	13	白噪声(1 000 Hz)	X	

表 4 不同上覆土厚度工况

Tab. 4 Conditions for Different Overlying Soil Thickness		
对比工况	上覆土厚度/cm	重塑土种类
T1	2	黏性土
T2	8	黏性土

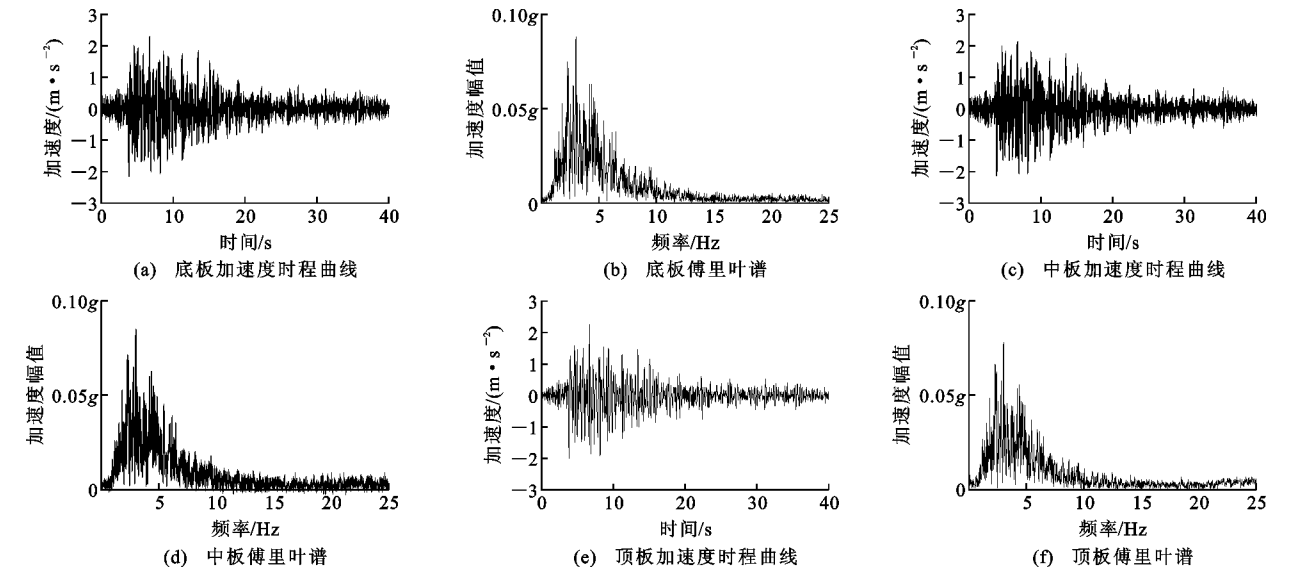


图 6 覆土厚度 2 cm、输入加速度为 2 m · s<sup>-2</sup> 时 Taft 波作用下结构的加速度时程及傅里叶谱

Fig. 6 Acceleration Time-history and Fourier Spectrum of Structure Under 2 m · s<sup>-2</sup> Taft Wave with Overlying Soil Thickness 2 cm

里叶谱在低频段(2~5 Hz)的幅值逐渐增大,结构各处的加速度傅里叶谱分布大致相同,此时结构基本未发生损伤。由图 7,8 可知,在输入峰值加速度为 2 m · s<sup>-2</sup>的南宁人工波作用下,模型结构顶板的加速度傅里叶谱分布较结构底板与中板变宽,谱值增大,此时结构开始产生损伤。在输入峰值加速度

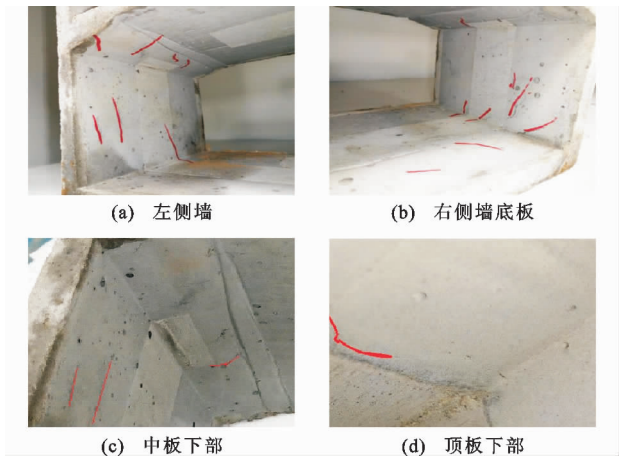


图 5 车站模型震害

Fig. 5 Earthquake Damage of Station Model

2.2 车站模型加速度反应

限于篇幅,本文仅给出覆土厚度为 2 cm、输入地震动峰值为 2 m · s<sup>-2</sup>时 Taft 波、南宁人工波与 El Centro 波作用下结构各处的加速度响应,如图 6~8 所示。

由图 6 可知,在 Taft 波作用下,地铁车站结构模型自上而下各处加速度响应比较一致,加速度传

为 2 m · s<sup>-2</sup>的 El Centro 波作用下,模型结构顶板的加速度傅里叶谱较中板与底板明显变宽,谱值显著增高,此时结构损伤加重。

图 9 给出了输入 El Centro 地震波时,在不同覆土厚度下,逐级增高地震动峰值加速度(PGA)时结构内部不同位置处的峰值加速度响应。

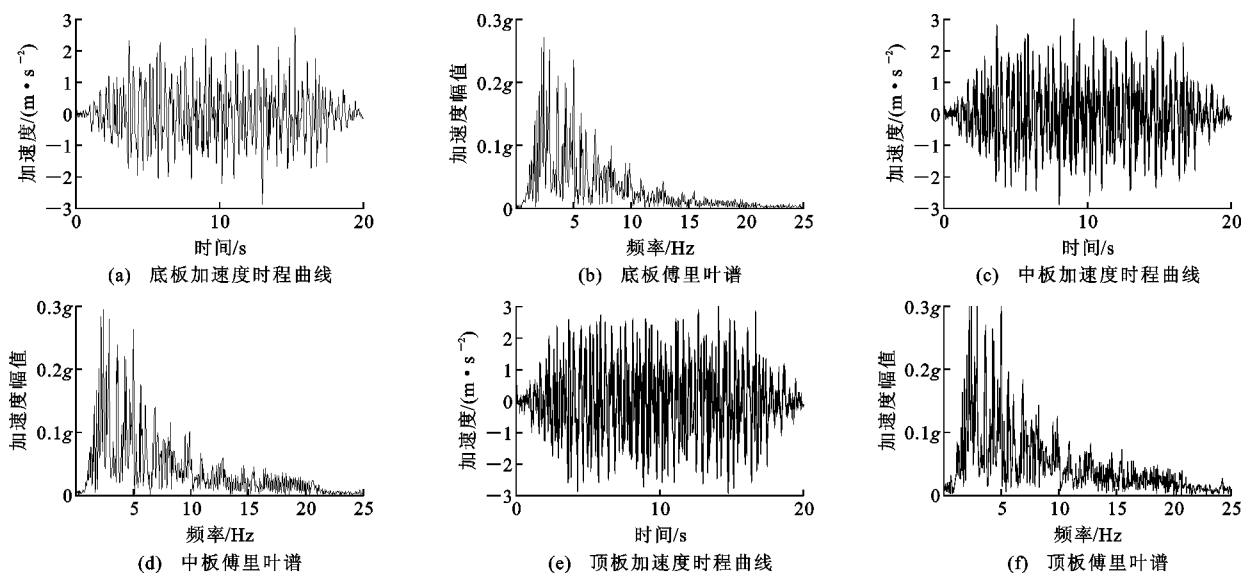


图7 覆土厚度2 cm、输入加速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时人工波作用下结构的加速度时程及傅里叶谱

Fig. 7 Acceleration Time-history and Fourier Spectrum of Structure Under  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  Artificial Wave with Overlying Soil Thickness 2 cm

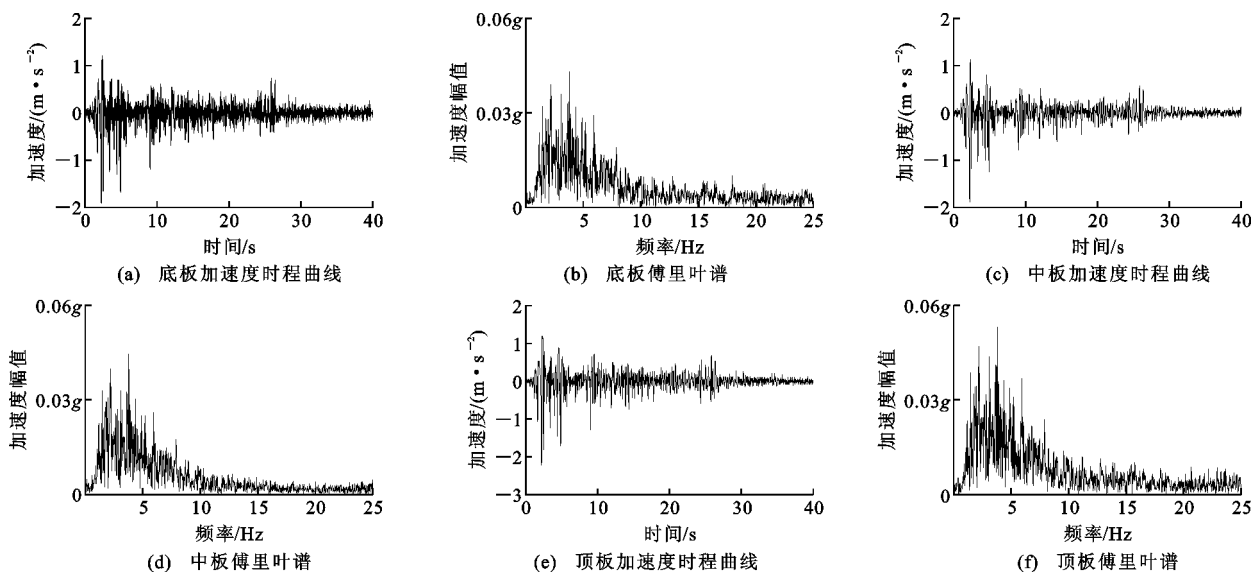


图8 覆土厚度2 cm、输入加速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时 El Centro 波作用下结构的加速度时程及傅里叶谱

Fig. 8 Acceleration Time-history and Fourier Spectrum of Structure Under  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  El Centro Wave with Overlying Soil Thickness 2 cm

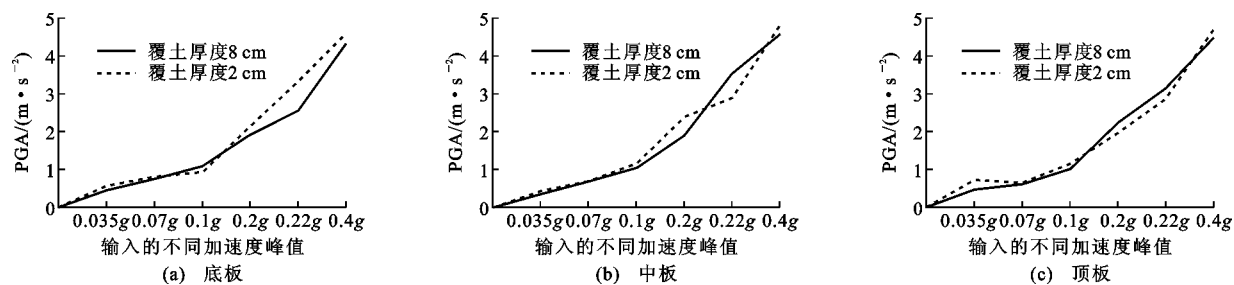


图9 车站结构 PGA 响应对比

Fig. 9 PGA Response Comparison of Station Structure

由图 9 可以看出,在 2 种覆土厚度工况下,地铁车站模型结构顶板、中板、底板的峰值加速度都随着输入峰值加速度的增大而增大。顶板在输入 0.2g, 0.22g 的峰值加速度时,上覆土厚度 8 cm 工况下的加速度峰值大于上覆土厚度 2 cm 时的加速度响应,其余工况下覆土厚度 8 cm 时的加速度响应均小于覆土厚度为 2 cm 时的加速度响应。结构底板与中板在上覆土厚度 8 cm 的情况下,峰值加速度总体小

于上覆土厚度 2 cm 的峰值加速度。地铁车站结构埋深是影响其加速度响应的重要因素。

2.3 水平位移响应

图 10 给出了在 El Centro 波激励下,输入不同地震动峰值加速度时车站底板、中板以及顶板左右摆的最大位移值,其中以右摆位移值为正。表 5 给出了在不同地震波激励下,输入峰值加速度为 0.22g 和 0.4g 时,车站结构上层与下层的最大位移角。

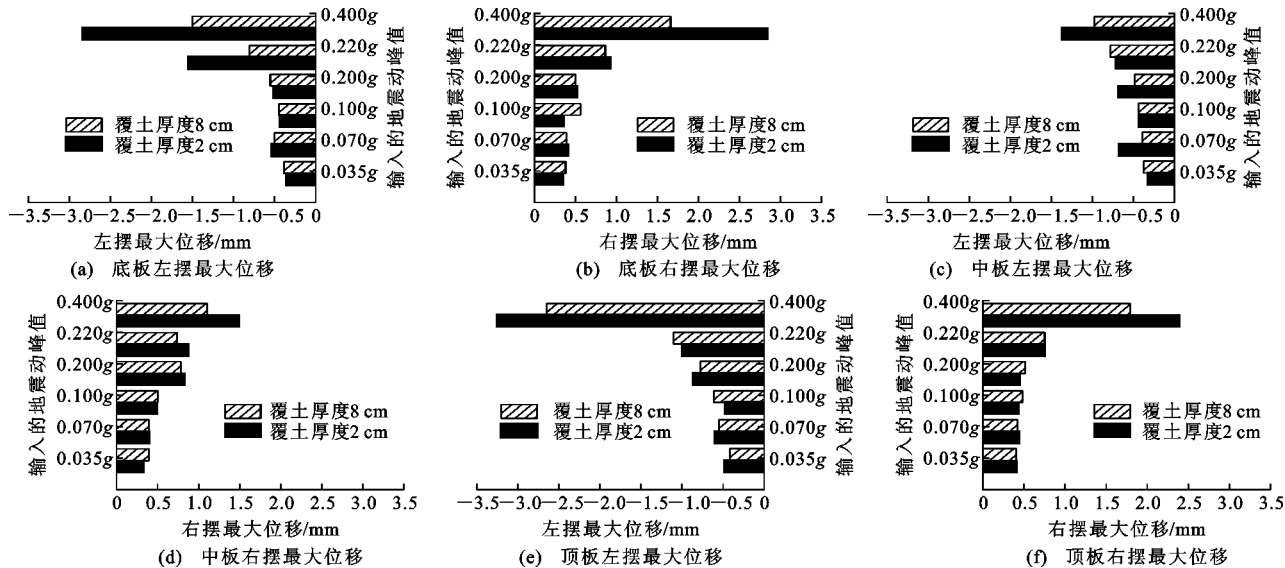


图 10 El Centro 波作用下左右摆最大位移

Fig. 10 Maximum Displacement of Left and Right Pendulums Under El Centro Wave

表 5 车站最大层间位移角

Tab. 5 Maximum Inter-story Displacement Angle of Station					
地震波	PGA	下层最大位移角		上层最大位移角	
		覆土厚度 8 cm	覆土厚度 2 cm	覆土厚度 8 cm	覆土厚度 2 cm
El Centro 波	0.22g	$1.85 \times 10^{-3}$	$1.26 \times 10^{-2}$	$5.96 \times 10^{-4}$	$1.09 \times 10^{-2}$
	0.40g	$1.64 \times 10^{-3}$	$1.39 \times 10^{-2}$	$9.40 \times 10^{-4}$	$8.76 \times 10^{-3}$
Taft 波	0.22g	$6.92 \times 10^{-3}$	$6.51 \times 10^{-3}$	$1.46 \times 10^{-3}$	$2.17 \times 10^{-3}$
	0.40g	$2.24 \times 10^{-3}$	$8.30 \times 10^{-3}$	$1.26 \times 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-2}$
人工波	0.22g	$2.19 \times 10^{-3}$	$2.95 \times 10^{-3}$	$7.12 \times 10^{-6}$	$1.42 \times 10^{-2}$
	0.40g	$1.56 \times 10^{-3}$	$1.69 \times 10^{-2}$	$2.42 \times 10^{-3}$	$2.87 \times 10^{-3}$
平均值		0.002 77	$1.02 \times 10^{-2}$	$1.90 \times 10^{-4}$	$1.17 \times 10^{-2}$

对比图 10 可得,在 2 种覆土厚度下,中板的位移值均小于顶板与底板的位移值,增大了输入峰值加速度后,车站结构模型的位移响应随之增大。相较于上覆土厚度为 2 cm 的工况,上覆土厚度为 8 cm 时的位移值较小。在输入峰值加速度为 0.4g 时,覆土厚度为 2 cm 时的位移较覆土厚度为 8 cm 时的位移最大增幅在底板、中板和顶板处分别为 89%,40%与 34%,底板处的位移增幅最大。说明了在一定范围内,上覆土厚度的增加能够减小车站

的动力响应。结合表 5 的最大层间位移角对比,同样可知车站上、下层在覆土 2 cm 的情况下,层间位移角普遍较覆土 8 cm 时大,下层与上层的位移角平均值分别为 0.010 2 与 0.011 69,而上覆土厚度增加至 8 cm 后,位移角平均值减小到了 0.002 77 与 0.000 19,同样说明了在一定范围内增加上覆土厚度可减小车站的动力响应,有利于地下结构抗震。

3 模型车站结构数值模拟分析

3.1 土-车站模型结构相互作用模型的建立

采用大型通用有限元软件 ABAQUS 建立土-无柱加腋地铁车站模型结构整体分析模型。土体的动力本构关系选用扩展的 Drucker-Prager 模型,车站模型结构的动力本构模型选用 Lee 等<sup>[27]</sup>提出的黏塑性动力损伤模型,该模型考虑了材料在动力作用下的受拉与受压损伤状态,建立聚苯乙烯泡沫板与模型箱的三维实体模型,以最大程度还原试验的真实情况。各材料基本参数如表 6 所示。

建立多个非线性接触关系以模拟试验中各构件之间的接触。其中,接触面法向采用“硬接触”模拟,



表 6 有限元模型不同材料基本物理参数  
Tab. 6 Basic Physical Parameters of Different Materials in Finite Element Model

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比
车站结构	1 915	771.000 0	0.29
围岩土体	2 000	4.856 4	0.49
聚苯乙烯泡沫板	25	10.000 0	0.09
模型箱	1 180	3 000.000 0	0.39

即当构件之间相互接触时传递法向压力,当构件脱离时不传递法向压力,接触面切向采用罚刚度算法,土体与车站模型之间的接触面摩擦因数取为 0.32,聚苯乙烯泡沫板与围岩土体和模型箱之间的摩擦因数分别取为 0.3 和 0.5。考虑模型箱底部经特殊处理,箱体与围岩土体为嵌固状态,故围岩土体与模型箱接触处设置为绑扎 Tie 约束。车站模型结构部分采用 C3D8 单元进行网格划分,其余部分采用 C3D8R 单元划分,在保证计算精度的前提下提高有限元分析的计算速度。覆土厚度为 2 cm 时,划分网格后的有限元模型见图 11。

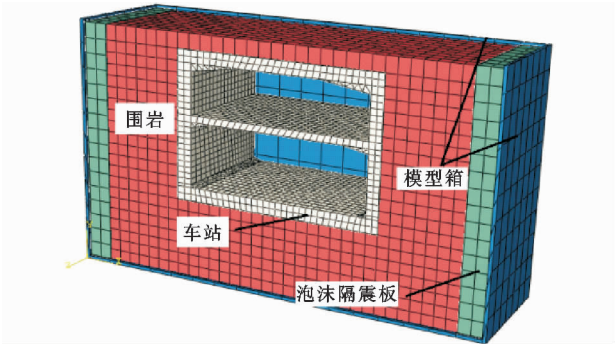


图 11 无柱加腋地铁车站土-结构振动台试验模型  
Fig. 11 Model of Soil-structure Shaking Table Test of Non-column Coronation Metro Station

3.2 数值模拟结果分析

图 12 给出了覆土厚度 2 cm 下,输入 El Centro 波时无柱加腋地铁车站模型结构数值分析应力云图。通过与车站结构模型震后的实际破损情况进行对比可知,主要破坏部位均为两侧墙与底板的交接处和中板下部加腋部位,且在数值计算过程中,侧墙与底板交接处最早出现受拉破坏,随后侧墙与顶板交接处、中板加腋处开始出现受拉损伤,这 3 个部位为车站模型结构破坏较为严重的区域,有限元模拟结果与模型实际震后情况基本吻合。

图 13 给出了覆土厚度 2 cm、峰值加速度为 1 m·s<sup>-2</sup>下,输入 El Centro 地震波时结构各处的加速度响应试验与有限元模拟对比结果。由图 13 可知,试验采集到的结构各处加速度与有限元模拟结

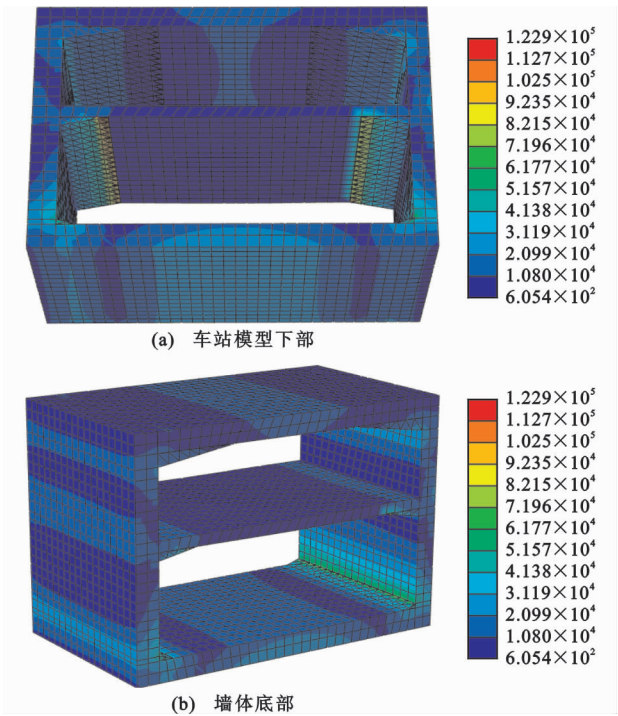


图 12 车站模型应力云图(单位:MPa)  
Fig. 12 Stress Nephogram of Station Model (Unit:MPa)

果比较吻合,整体上小于有限元提取得到的加速度响应结果。试验的加速度傅里叶谱值与有限元模拟得到的结构傅里叶谱值分布基本一致,只在低频段谱值小于有限元模拟的傅里叶谱值,造成这一结果的原因是有限元模拟未能考虑试验中各工况后的塑性损伤累计,且有限元模拟中各材料间的接触为理想化赋值。总体上数值模拟得到的结果与试验结果相差不多,验证了试验结果的可靠性。

4 结 语

- (1)本文以南宁地铁 5 号线为工程背景,综合考虑土-结构相互作用、试验材料性能、试验仪器的测试能力等因素,设计了无柱加腋地铁车站结构模型以及试验用模型箱。
- (2)振动台试验后,有效观测到无柱加腋地铁车站结构模型在模拟地震作用下的震害情况,并测得结构各处的加速度响应。
- (3)在模拟地震作用下,结构模型两侧墙与底板及中板连接的变截面处裂缝开展最多,是结构损伤最严重的区域之一,需要提高设计以加强此类结构整体的抗震设防能力。
- (4)埋深是影响无柱加腋地铁车站结构地震响应的重要因素。在一定范围内增加结构上覆土厚度后可降低结构在地震作用下的动力响应,减小结构



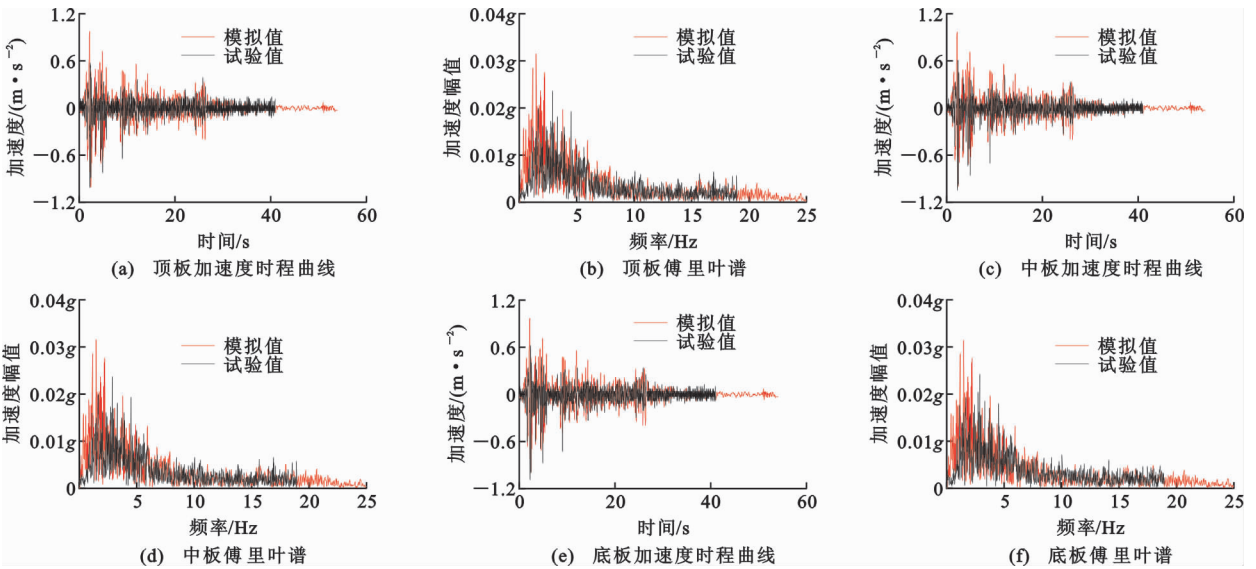


图 13 加速度响应对比

Fig. 13 Acceleration Response Comparison

位移响应,降低车站结构的层间位移角,有利于结构抗震。

(5)采用有限元软件 ABAQUS 建立的振动台试验三维空间有限元模型数值模拟结果与试验所得结果基本一致,验证了试验所得结论的可靠性。

参考文献:

References:

[1] 施正城. 地铁车站与区间隧道过渡段的抗震设计分析[D]. 北京:北京交通大学,2010.  
SHI Zheng-cheng. The Analysis of Seismic Response of the Joint Structure Between the Subway Station and Running Tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2010.

[2] 徐海清,傅志峰,梁立刚,等. 列车荷载作用下紧邻垂直多孔隧道环境振动分析[J]. 岩土力学,2011,32(6):1869-1873,1897.  
XU Hai-qing, FU Zhi-feng, LIANG Li-gang, et al. Ambient Vibration Analysis of Adjacent Perpendicular Multi-tunnels Under Train Loads[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(6):1869-1873,1897.

[3] 梁宁慧,刘新荣,曹学山,等. 中国城市地铁建设的现状和发展战略[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(6):81-85.  
LIANG Ning-hui, LIU Xin-rong, CAO Xue-shan, et al. Present Situation and Developing Strategy of Urban Subway Construction in P. R. China[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,2008,30(6):81-85.

[4] 聂永明,刘明保,李志文. 地铁明挖区间无柱大空间结

构体系的研究[J]. 建筑科学,2012,28(7):71-74.  
NIE Yong-ming, LIU Ming-bao, LI Zhi-wen. Structural System Research of Subway Non-column-supported Large Space for Open Excavated Tunnel[J]. Building Science,2012,28(7):71-74.

[5] 刘明保,宫剑飞,乐贵平,等. 明挖区间隧道无柱大空间预应力结构设计[J]. 岩土工程学报,2010,32(增2):371-374.  
LIU Ming-bao, GONG Jian-fei, LE Gui-ping, et al. Prestressed Structural Design of No-column-supported Large Space for Open Excavated Tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(S2):371-374.

[6] 谷音,钟华,卓卫东. 地震作用下大型地铁车站结构三维动力反应分析[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(11):2290-2299.  
GU Yin, ZHONG Hua, ZHUO Wei-dong. Analysis of Dynamic Interaction Between Soil and Large Subway Station Structure Under Seismic Excitation Based on 3D Model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(11):2290-2299.

[7] HASHASH Y M A, HOOK J J, SCHMIDT B, et al. Seismic Design and Analysis of Underground Structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2001,16(4):247-293.

[8] 王秀英,刘维宁,张弥. 地下结构震害类型及机理研究[J]. 中国安全科学学报,2003,13(11):55-58.  
WANG Xiu-ying, LIU Wei-ning, ZHANG Mi. Study on the Categorization and Mechanism of Seismic Damage of Underground Structures[J]. China Safety Science Journal,2003,13(11):55-58.

- [9] 王 卉. 地震波作用下地下管道的动力响应研究[D]. 天津:天津大学,2009.  
WANG Hui. Research of Dynamical Response on Underground Pipes Impacted by Seismic Waves [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [10] 曹炳政, 罗奇峰, 马 硕, 等. 神户大开地铁车站的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 102-107.  
CAO Bing-zheng, LUO Qi-feng, MA Shuo, et al. Seismic Response Analysis of Dakai Subway Station in Hyogoken-nanbu Earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 102-107.
- [11] 杜修力, 马 超, 路德春, 等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 53-62, 69.  
DU Xiu-li, MA Chao, LU De-chun, et al. Collapse Simulation and Failure Mechanism Analysis of the Dakai Subway Station Under Seismic Loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1): 53-62, 69.
- [12] 杜修力, 李 洋, 许成顺, 等. 1995 年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 223-236.  
DU Xiu-li, LI Yang, XU Cheng-shun, et al. Review on Damage Causes and Disaster Mechanism of Dakai Subway Station During 1995 Osaka-kobe Earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 223-236.
- [13] 杜修力, 王 刚, 路德春. 日本阪神地震中大开地铁车站地震破坏机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 165-171.  
DU Xiu-li, WANG Gang, LU De-chun. Earthquake Damage Mechanism Analysis of Dakai Metro Station by Kobe Earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 165-171.
- [14] KEIZO O, TOSHIO S, TADASHI K, et al. Research on Streamlining Seismic Safety Evaluation of Underground Reinforced Concrete Duct-type Structures in Nuclear Power Stations — Part-2. Experimental Aspects of Laminar Shear Sand Box Excitation Test with Embedded RC Models [C]//IASMIRT. Transactions of SMiRT 16. Washington DC: IASMIRT, 2001: 1-8.
- [15] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.  
JI Qian-qian. Research of Shaking Table Test of Subway Station [D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [16] 杨林德, 季倩倩, 郑永来, 等. 软土地铁车站结构的振动台模型试验[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(1): 7-11.  
YANG Lin-de, JI Qian-qian, ZHENG Yong-lai, et al. Shaking Table Test on Station Structures in Soft Soil [J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(1): 7-11.
- [17] 杨林德, 杨 超, 季倩倩, 等. 地铁车站的振动台试验与地震响应的计算方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(10): 1135-1140.  
YANG Lin-de, YANG Chao, JI Qian-qian, et al. Shaking Table Test and Numerical Calculation on Subway Station Structures in Soft Soil [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(10): 1135-1140.
- [18] 陈国兴, 庄海洋, 程绍革, 等. 土-地铁隧道动力相互作用的大型振动台试验: 试验方案设计[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(6): 164-170.  
CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang, CHENG Shao-ge, et al. A Large-scale Shaking Table Test for Dynamic Soil-metro Tunnel Interaction: Test Scheme [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(6): 164-170.
- [19] 陈国兴, 庄海洋, 杜修力, 等. 土-地铁车站结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 171-176.  
CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang, DU Xiu-li, et al. Analysis of Large-scale Shaking Table Test of Dynamic Soil-subway Station Interaction [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(2): 171-176.
- [20] 庄海洋. 土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006.  
ZHUANG Hai-yang. Study on Nonlinear Dynamic Soil-underground Structure Interaction and Its Large-size Shaking Table Test [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2006.
- [21] 陈红娟, 闫维明, 陈适才, 等. 小比例尺地下结构振动台试验模型土的设计与试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(3): 59-66.  
CHEN Hong-juan, YAN Wei-ming, CHEN Shi-cai, et al. Design and Experimental Research on Model Soil used for Shaking Table Test of a Small Scale Underground Structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(3): 59-66.
- [22] 徐炳伟. 大型复杂结构-桩-土振动台模型试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
XU Bing-wei. Shaking Table Test Studying Large-scale Soil-pile-complex Structure Interaction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.

[23] 湛 凯. 基于振动台模型试验的地铁车站结构地震反应研究[D]. 福州:福州大学,2014.  
CHEN Kai. Research on the Seismic Responses of Subway Station Based on Shaking Table Tests[D]. Fuzhou:Fuzhou University,2014.

[24] 谷 音,湛 凯,吴怀强,等. 考虑地震动空间非一致性的地铁车站结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(17):255-261,266.  
GU Yin,CHEN Kai,WU Huai-qiang,et al. Shaking Table Tests for a Subway Station Structure Under Spatially Non-uniform Ground Motion[J]. Journal of Vibration and Shock,2017,36(17):255-261,266.

[25] 钟波波,张永彬,李 宏. 大跨无柱地铁车站地震响应分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(增 1):317-322.  
ZHONG Bo-bo,ZHANG Yong-bin,LI Hong. Analysis of Seismic Response of Large-span Column-free Subway Station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2015,11(S1):317-322.

[26] 刘庭金,许炜星,唐欣薇. 上软下硬地层大跨无柱地铁车站地震响应分析[J]. 隧道建设,2017,37(增 2):26-34.  
LIU Ting-jin,XU Wei-xing,TANG Xin-wei. Analysis of Seismic Response of Large-span Column-free Metro Station Structure Under Upper-soft and Lower-hard Composite Strata [J]. Tunnel Construction,2017,37(S2):26-34.

[27] LEE J,FENVES G L. Plastic-damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics,1998,124(8):892-900.