

无柱大跨地铁车站抗震性能试验与分析

杨磊¹, 陈雁¹, 贾少东¹, 胡双平², 李江乐³

(1. 南宁轨道交通集团公司, 广西 南宁 530029; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 无柱大跨地铁车站具有美观、方便、实用等优势, 由于其结构形式取消了中柱, 其抗震性能的可靠性也因此备受关注。为研究无柱大跨地铁车站在地震反应, 本文以南宁某无柱支撑地下地铁车站为工程背景, 对模型结构的相似比、模型材料进行相关的设计并选用地震波 El-Centro 波、Taft 波、南宁人工波, 开展了现浇式无柱变截面地铁车站模型的振动台试验研究。基于动力模型试验建立了有限元模型, 分析了结构在地震波作用下的振动响应。最终研究成果表明: 应力集中大多出现在结构的底、顶板和侧墙连接部位以及中板两侧靠近板墙的连接处, 建议在工程应用中针对这些结构部位采取合理措施进行局部加强。

关键词: 地下工程; 无柱变截面地铁车站; 振动台试验; 地震响应

中图分类号: U 231+.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)05-0674-10

Shaking table test and analysis on the seismic performance of pillarless large-span metro station

YANG Lei¹, CHEN Yan¹, JIA Shaodong¹, HU Shuangping², LI Jiangle³

(1. Nanning Rail Transit Co., Ltd., Nanning 530029, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Xi'an 710043, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The pillarless large-span subway station has the advantages of being beautiful, convenient and practical. Due to the elimination of the center column in its structural form, the reliability of its seismic performance has also received much attention. In order to study the seismic response of the pillarless large-span subway station under various conditions, a pillarless-supported underground subway station in Xi'an is chosen as the engineering background. The similarity ratio of model structure and model materials were designed. The shaking table experiment was carried out, considering El-Centro wave, Taft wave, and Xi'an artificial wave. Based on the dynamic model test, the finite element analysis of the structure was made to study the vibration response of the structure under seismic waves. Results show that the stress concentration of the structure appears at the joints of the bottom of the station, at the roof and the side wall and the joints of the two sides of the middle plate near the wall. It is recommended to take reasonable measures for local strengthening of these structural parts in engineering applications.

Key words: underground engineering; pillarless variable section subway station; shaking table test; seismic response

在低下的交通运输效率下, 人们愈发认识到地铁站是解决交通系统问题的重要途径^[1]。地铁车站结构形式目前多种多样, 其中无柱大跨结构地铁车站具有美观大方, 视野开阔, 可提供更开阔空间的优点而被逐步^[2-3]。长期以来, 在地铁的抗震研究中, 普遍认为地下结构受到周边土体约束对比地上结构有更好的抗震性能^[4-5]。1976 年唐山地震与 1985 年墨西哥地震中地铁均无明显震害现

象^[6], 然而 1995 年 7.2 级的阪神地震中, 神户市地铁车站及其区间隧道的严重损害给这一观念带来了巨大冲击^[7-9]。

阪神地震后, 业内的学者对于地下结构的抗震研究越来越重视。目前结构抗震性能主要的研究方法有以下四种: 原型观测、数值模拟、理论分析、试验分析。其中数值模拟法与试验分析法被广泛利用。

收稿日期: 2019-03-13

修改稿日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178388); 陕西省教育厅点实验室科研计划基金资助项目(11JS059, 12JS055)

第一作者: 杨磊(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程研究。E-mail: 120403560@qq.com

庄海洋、陈国兴等利用 ABAQUS 软件,建立了土体-地铁地下车站结构非线性动力相互作用模型,数值分析了地下地铁车站,研究了其非线性地震反应特性,并得出了地铁车站地震反应的最不利位置、软土层不同厚度、不同位置时土-地下结构的动力响应规律^[10-11]; Keizo 研究了土-结构相互接触作用下的结构动力响应规律^[12]; 谷音等通过施加局部人工边界,模态分析了土-地铁车站结构动力相互作用的整体三维模型,得到了地铁车站以及地基的振型特征^[13]; 杨林德等采用振动台对地铁车站模型结构进行了试验,确立了模型、模型箱形式、模型配图及相似比、动力特性、传感器选择与布置等问题的解决方案^[14]; 王兰民等针对饱和和原状黄土,进行了地铁车站的振动台模拟试验,利用试验研究了饱和和原状黄土液化现象及其基本特征^[15]; 湛凯等进行了多种地震动激励下地铁车站模型结构的振动台试验,发现了地铁车站粉质粘土地基条件下的动力反应规律^[16-17]。

对于无柱大跨地铁车站的抗震分析研究目前也正逐步展开。刘庭金等采用 ABAQUS 软件对有柱无柱地铁站进行水平向非线性地震响应数值模拟分析了有柱无柱地铁车站地震响应的趋同,以广州地铁站为依托工程研究无柱大跨地铁站在上软下覆地层中的震害响应,得出软硬土交界面对结构地震时内力分布影响大^[18-19]; 张亚辉以青岛保儿车站为背景使用有限元对无柱大跨拱形结构进行了时程分析得到了地震作用下拱形无柱地铁站内力变形较大位置^[20]。国外学者如 Che 等^[21]通过振动台试验对阪神地震中地铁结构的破坏过程进行了研究; Tomari 等^[22]通过振动台试验研究了可液化地层对于矩形断面结构的地震反应情况; Jafarzadeh 等^[23]利用振动台试验研究了埋地管线在两种不同场地中的地震反应内力情况; Koseki、Yasuda 采用振动台研究了可液化场地上不同结构形式地下结构上浮特性^[24-25]。

综上所述,目前对于土-地下地铁站抗震性能研究多为有柱岛式地铁站,对于无柱大跨地铁站抗震性能分析目前较少。由此,本文将以南宁地区某无柱大跨度地铁站作为工程背景,研究在南宁地质条件下,地震动作用对结构自身的影响,即结构的地震响应。通过对车站进行小比例缩尺模型振动台试验和有限元分析的方法,对无柱大跨的地铁车站结构进行抗震性能分析。

1 无柱地铁车站振动台模型试验方案设计

1.1 模型相似比设计

本试验以长度,密度和弹性模量作为三个基本相似比量纲并以 Buckingham π 定理为理论基础进行相似比换算与计算,因现场场地制约,试验设备制约,最终确定试验的几何长度相似比为 1/80,最终试验各模拟物理相似比见表 1。

1.2 材料优选及模型制作

根据试验模型 1/80 的缩尺比例,为满足结构相似比 S_a 接近 1,本次试验材料选择水泥砂浆,其抗压强度及弹性模量为 9.3 MPa、771 MPa。选用原型尺寸 1/80 的缩尺比例设计模型,由于地铁车站长度方向很长,受现场设备限制结合试验条件,截取车站沿长度方向单跨 12 m 的长度,缩尺后为 150 mm,此模型宽为 260 mm,高 190 mm,模型上顶板厚 16 mm,中板厚 9 mm,下部底板厚 17.5 mm,另外侧墙厚为 18 mm,模型的剖面图如图 1 所示。

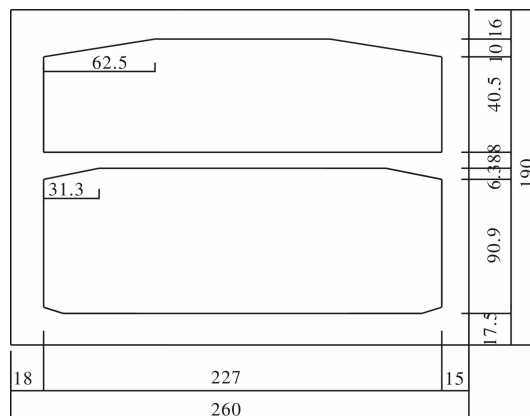


图 1 地铁车站模型(单位: mm)

Fig. 1 Metro station structure model (unit: mm)

将黏性土烘干后,使用 2 mm 粒径碎石筛进行筛分颗粒,然后加水混合均匀搅拌制成人工重塑土。对人工重塑土进行静三轴,固结仪等材料试验,取得重塑土基本土参数见表 2。

模型箱的制作应选用质量轻且坚固材料,本次使用硬聚氯乙烯即 PVC 板材,其密度与弹性模量分别为 1 200 kg/m³、2 600 MPa,模型箱两侧内衬聚苯乙烯泡沫板。同时为减少模型与模型箱的边界效应,避免模型与模型箱发生摩擦,沿振动方向两侧放置光滑的有机玻璃并在其上粘贴聚氯乙烯薄膜同时涂抹了润滑油。

表 1 缩尺相似比常数
Tab. 1 Scale similarity constant of model

类型	物理量	相似比符号	相似比关系	相似比
几何性能	面积	S_A	$S_A = S_L^2$	1/6400
	线位移	S_x	$S_x = S_L$	1/80
	长度	S_L	/	1/80
材料性能	弹性模量	S_E	/	0.022
	应变	S_ϵ	/	1
	应力	S_σ	$S_\sigma = S_E$	0.022
	模型等效密度	S_ρ	/	1.68
	土体等效密度	$S_{\rho\pm}$	/	1
动力性能	加速度	S_a	$S_E / (S_L \times S_\rho)$	1.09
	速度	S_v	$(S_E / S_\rho)^{0.5}$	0.116
	时间	S_t	$S_L \times (S_\rho / S_E)^{0.5}$	0.11
	频率	S_ω	$1 / S_t$	9.27

表 2 重塑土参数
Tab. 2 Remolding soil parameters

密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	含水率 $\omega/\%$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	孔隙比 e	压缩模量 E_s/MPa
1542	17.14	36.89	7.93	0.821	1.62

1.3 传感器位置

模型箱的具体尺寸见图 2(a)，传感器的具体布置见图 2(b)，其中 A 代表加速度 ICP 传感器，A1 与 A5 布置在模型箱的上表面、距下底部 20 mm 来测得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、底板的中部位置对结构进行数据采集，最后 A6 加速度计布置在模型箱的最右边的表面来采集刚性箱的数据。

1.4 地震波的选取及加载工况

根据《建筑抗震设计规范》的要求，地铁车站所在场地及当地设防烈度，以及规范要求选取 3~4 条满足要求的地震波，本次试验选取 El-Centro

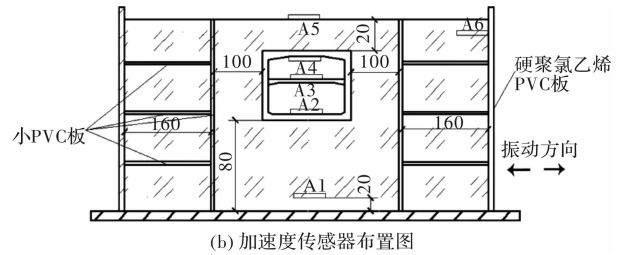
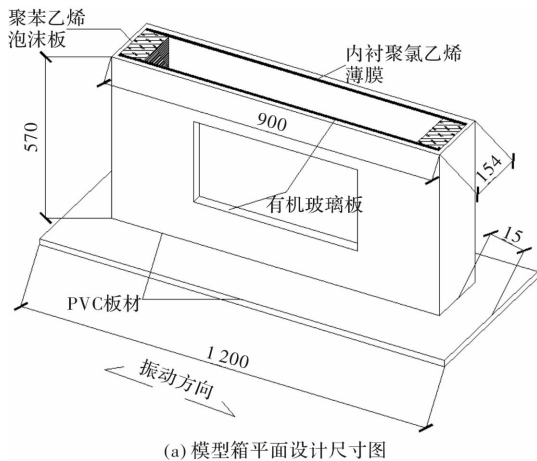


图 2 模型箱与加速度传感器布置(单位: mm)

Fig. 2 Model and acceleration sensor layout (unit: mm)

波、Taft 波和南宁人工合成地震波作为本次试验台面输入的波形。输入加速度需考虑到试验情况，对每条地震波的加速度数值进行修正。选取地震波的加速度时程曲线见图 3。

本试验使用由北京波谱世纪科技发展有限公司研发的“WS-Z30-50 小型精密振动台系统”，水平台面尺寸为 516×380 mm。振动台试验输入加速度峰值分别为 0.11 gal、0.076 gal、0.44 gal、0.22 gal 的 El-Centro 波、Taft 波和南宁人工波，在工况发生变化后，通过白噪声得到模型体系动力特性，以判断模型是否发生较大变化。激励方向为水平向，试验加载工况见表 3。



(a) 模型箱平面设计尺寸图

表 3 振动台模型加载工况
Tab. 3 Loading conditionsof shaking table

工况	地震波	加速度幅值/gal	输入方向	测试
1	白噪声	0.076	X	模型结构自振特性
2	El-Centro 波	0.44	X	测点响应
3	Taft 波	0.44	X	测点响应
4	人工波	0.44	X	测点响应
5	白噪声	0.076	X	模型结构自振特性
6	El-Centro 波	0.22	X	测点响应
7	Taft 波	0.22	X	测点响应
8	人工波	0.22	X	测点响应
9	白噪声	0.076	X	模型结构自振特性
10	El-Centro 波	0.11	X	测点响应
11	Taft 波	0.11	X	测点响应
12	人工波	0.11	X	测点响应
13	白噪声	0.076	X	模型结构自振特性
14	El-Centro 波	0.076	X	测点响应
15	Taft 波	0.076	X	测点响应
16	人工波	0.076	X	测点响应
17	白噪声	0.076	X	模型结构自振特性

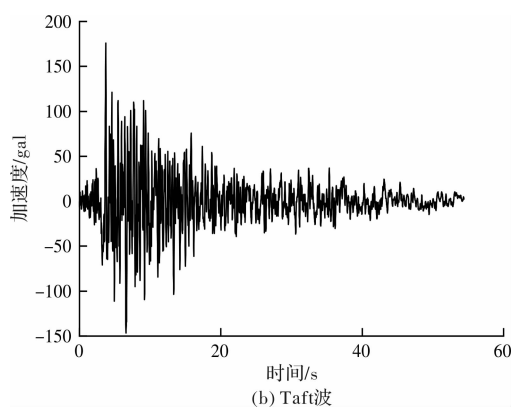
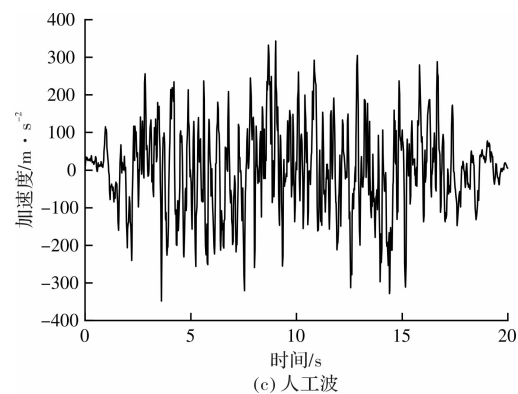
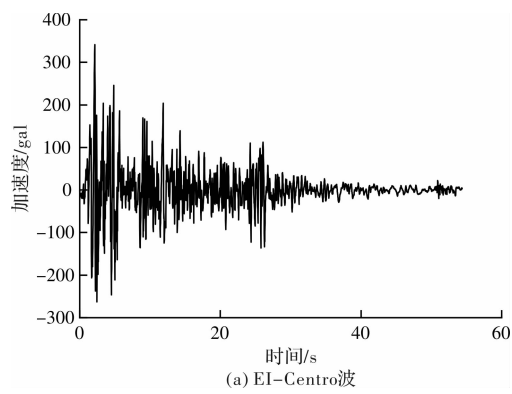


图 3 振动台试验输入的地震动加速度时程曲线
Fig. 3 Ground motion acceleration time-history and Fourier spectrum of shaking table surface input

2 车站结构震害分析

试验结束后，将模型取出，轻拿轻放，避免产生二次破坏。将模型表面覆土清洗干净后，观察结构损伤情况。其模型震害图如图 4。由试验后模型损害结果可知：结构外表面损坏轻微。结构内部可明显观察到有多道连续裂纹出现在下侧墙与底板连接中间处，侧墙裂缝呈竖向延伸，板上裂缝沿结构宽度方向发展，结构左右两边均出现此类明显震害；下板中间部位也可看到少量微裂纹。

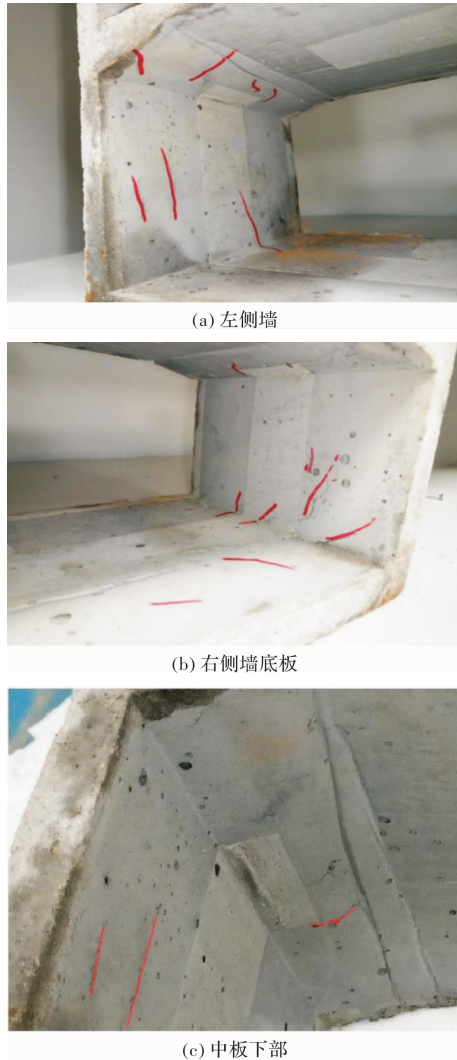


图 4 车站模型震害图

Fig. 4 Station model earthquake damage map

3 试验结果与有限元分析

3.1 最大峰值加速度及放大系数结果分析

最终试验选取 El-Centro 波、Taft 波和人工波作为试验输入地震波形. 同时结合当地实际工程背景看, 分别将七度基本、八度多遇、八度基本、八度罕遇地震波强度基准值通过试验计算的所得加速度相似系数换算为峰值加速度依次为 0.076 gal、0.11 gal、0.22 gal、0.44 gal 的地震波作为振动台试验的输入激励, 对试验模型按照表 3 所示工况进行试验. ICP 加速度传感器对结构多个测点的地震反应进行测量, 得到水平单向地震动作用下测点最大加速度值, 将其与输入加速度值进行对比后得到各测点的动力放大系数见表 4.

表 4 车站结构加速度响应峰值及动力放大系数

Tab. 4 Station structure acceleration response peak and power amplification factor

加速度 /gal	测点	El-Centro 波		Taft 波		人工波	
		最大加速度/gal	加速度放大系数	最大加速度/gal	加速度放大系数	最大加速度/gal	加速度放大系数
0.076	台面	0.081	1	0.078	1	0.076	1
	底板	0.059	0.726	0.061	0.758	0.067	0.858
	中板	0.069	0.851	0.072	0.898	0.074	0.975
	顶板	0.076	0.963	0.079	0.986	0.078	0.986
0.11	台面	0.108	1	0.106	1	0.101	1
	底板	0.078	0.726	0.099	0.917	0.068	0.691
	中板	0.093	0.845	0.126	1.167	0.089	0.881
	顶板	0.084	0.762	0.118	1.088	0.086	0.851
0.22	台面	0.229	1	0.218	1	0.231	1
	底板	0.182	0.794	0.197	0.890	0.197	0.852
	中板	0.178	0.944	0.218	0.995	0.215	0.935
	顶板	0.197	0.867	0.247	1.127	0.214	0.939

续表 4

加速度 /gal	测点	El-Centro 波		Taft 波		人工波	
		最大加速度/gal	加速度放大系数	最大加速度/gal	加速度放大系数	最大加速度/gal	加速度放大系数
0.44	台面	0.437	1	0.412	1	0.466	1
	底板	0.443	0.962	0.462	1.123	0.426	0.912
	中板	0.388	1.061	0.482	1.116	0.473	1.024
	顶板	0.438	1.001	0.511	1.242	0.488	1.049

根据试验结果可知：

(1)在相同的加速度峰值下，同种地震波激励作用于结构时，结构底板加速度放大系数最小，分析其原因，首先与结构距离震源的位置有关，车站底部距离震源相较于中板与顶板近，所以底部加速度较小，其次为底板与下部土层之间的相互接触有关，侧向土压力对结构下部产生较大约束作用，从而导致下板加速度放大系数较小，但是 El-Centro 波和 Taft 波作用下，在 0.44 gal 峰值加速度时，底板反而大于上部结构加速度，可能是由于结构底板与下部土层发生相对位移导致的不规律反应。

(2)在加速度峰值不同的情况下，同种地震波激励作用于结构时，模型结构顶板、中板、底板加速度随加速度峰值的升高而增大，且不成线性关系。其中当峰值加速度为 0.44 gal 时，结构中、顶板加速度放大系数大于 1，即结构对地震响应呈放大的效应，考虑原因为在较大的地震动输入作用之下，模型侧墙与周围土体发生了相对水平位移。结构侧墙与土体发生相对位移脱离时，土体对结构约束减小，使得结构动力响应与自身惯性力增大。

(3)在加速度峰值相同的情况下，Taft 波对于结构的加速度偏大，并且在 0.44 gal 时顶板处出现最大加速度 0.510 gal，此时放大系数为 1.241，是试验记录到的最大反应值。在 Taft 波作用下，结构的加速度由下板至上板逐渐增大。当加速度峰值是 0.076 gal 时，人工波对结构的加速度影响整体上大于其余两种地震波。然而当加速度峰值超

过 0.11 gal 时，结构对人工波的加速度响应较小。

(4)对比三条波在不同峰值加速度的响应结果可以发现，在 0.076 gal 时，顶板加速度反应出现最大值，随着峰值加速度的增大，结构中板加速度响应也不断增加。由于输入加速度上升，土体对结构相对约束减小，当结构墙体产生水平位移后无法继续提供水平方向约束。并且，土体与结构脱离之后再次发生接触时，对于模型中部薄弱部位可能产生叠加或部分削弱的影响，导致结构中上部加速度响应峰值增大。这与文章后面提到的有限元模拟试验台试验的结果比较吻合。

3.2 有限元模型分析

采用 MIDAS/GTS 建立地铁车站模型以及分析其在地震作用下的反应，并将有限元分析结果与试验结果进行比较，利用软件，可以将土-结构的相互作用等效简化为二维平面应变问题，在进行有限元分析时应注意建立的模型应当注意与实际情况相符。

3.2.1 有限元模型验证

建立振动台车站模型有限元时，试验中地基土尺寸以及车站模型结构尺寸作为有限元分析的尺寸进行输入，在模型土底部选取固定边界，土体顶部为自由边界，两侧采用自由场弹性边界约束。试验模型的有限元数值模拟选取 El-Centro 波进行分析，输入加速度峰值分别为 0.076 gal、0.11 gal、0.22 gal、0.44 gal，测点布置均与试验保持一致，测得结构顶板中部处加速度时程曲线对比图见图 5。

表 5 车站结构加速度响应峰值比较

Tab. 5 Comparison of peak response of station structure acceleration

峰值加速度/gal	测点	试验结果/gal	有限元模拟结果	误差/%
0.076	顶板	0.078	0.075	3.9
	中板	0.067	0.064	7.4
	底板	0.058	0.062	4.9

续表 5

峰值加速度/g	测点	试验结果/g	有限元模拟结果	误差/%
0.11	顶板	0.084	0.081	3.6
	中板	0.093	0.085	8.7
	底板	0.078	0.068	12.7
0.22	顶板	0.197	0.177	10.1
	中板	0.178	0.202	10.9
	底板	0.182	0.153	16.1
0.44	顶板	0.438	0.387	12.1
	中板	0.388	0.424	8.0
	底板	0.443	0.358	18.8

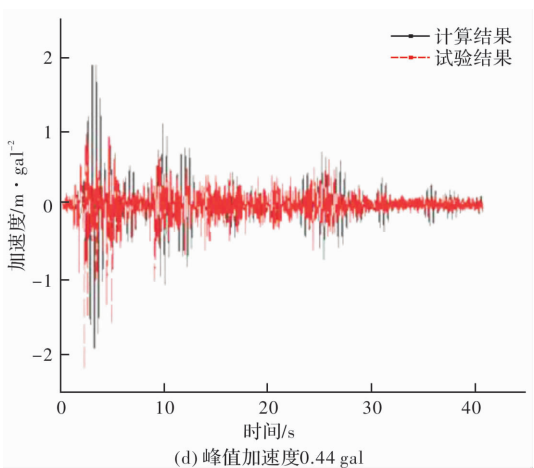
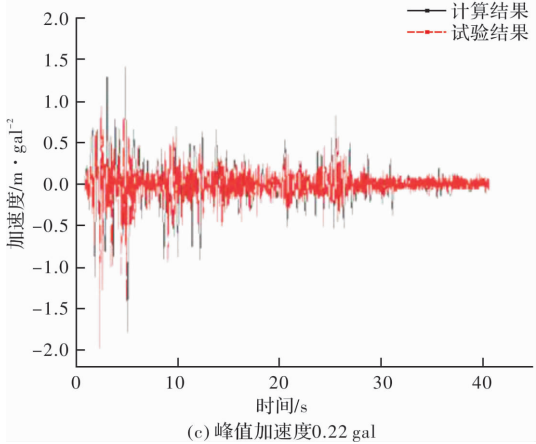
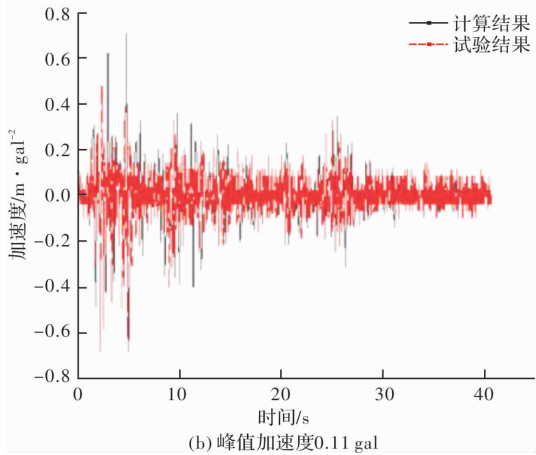
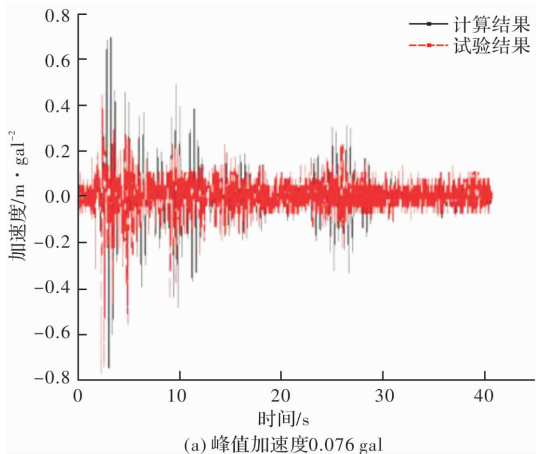


图 5 车站结构顶板加速度数值模拟与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of time-history curves of station structure roof

综上可知，有限元模拟试验模型得到的车站顶板加速度时程曲线对比情况比较吻合。车站结构中、底板加速度时程曲线也比较吻合。由此说明该振动台试验是合理可行的，有限元模拟振动台试验的建模方法有效可靠。从而此建模方法可以运用到车站原型建模中。

这里为了定量对比有限元数值模拟与试验结果，采用峰值加速度的差值百分比对误差予以衡量，数值模拟与振动台试验中顶板、中板、底板加速度响应模拟结果与试验数据对比见表 5。

3.2.2 对车站原型结构动力有限元分析

原型结构有限元模型单侧水平方向土体选用 3 倍车站宽度的影响区域，建立的模型尺寸为 150×60 m。模型中土体及结构采用混合网格划分，对结构位置处的施加 0.5 m 的单元尺寸控制条件，结构外侧土体以 4~6 m 单元尺寸划分网格，土体与结构的临近部位向 0.5 m 尺寸的单元过渡。模型左右两侧采用软件提供的自由场弹性边界约束，

以吸收传递至边界处的地震波;模型底部则加以固定约束,上方为自由边界不采用任何约束.对结构与土体间的接触面不做特殊处理,不考虑土体与结构之间的相对滑移及脱离现象.地震波选取为 MIDAS/GTS 软件中的 El-Centro 地震波,定义时间步骤,时间间隔为 0.02 s,结果输出步为 1.由模型基岩底部输入水平地震波,其加速度峰值依次为 0.1 gal、0.2 gal 和 0.4 gal,观测点布置见图 6,最终得到不同加速度峰值下结构顶部、底部模型水平位移时程曲线见图 7,峰值加速度 0.2 gal 时结构水平位移响应云图 8.

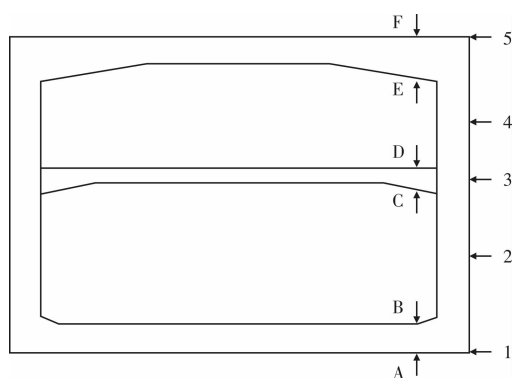
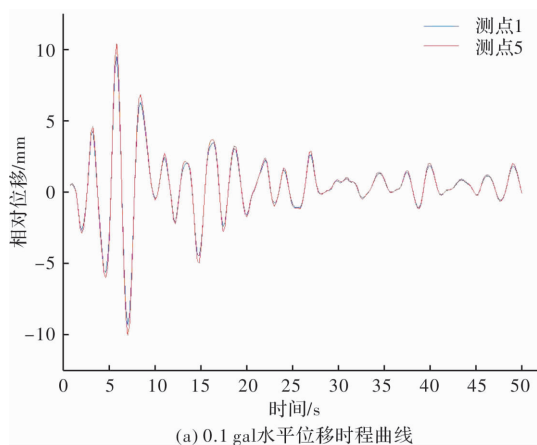
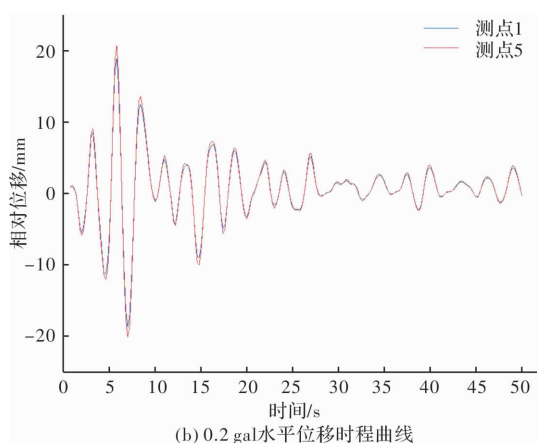


图 6 有限元模型观测点布置图

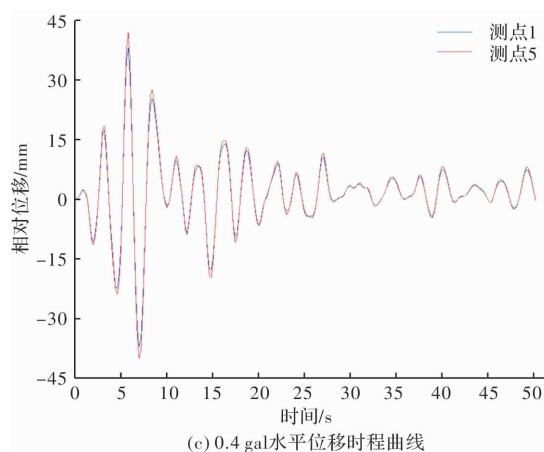
Fig. 6 Finite element model observation point layout



(a) 0.1 gal 水平位移时程曲线



(b) 0.2 gal 水平位移时程曲线



(c) 0.4 gal 水平位移时程曲线

图 7 El-Centro 不同加速度峰值下结构顶部、底部对比图

Fig. 7 El-Centro top and bottom contrast diagrams for different acceleration peaks

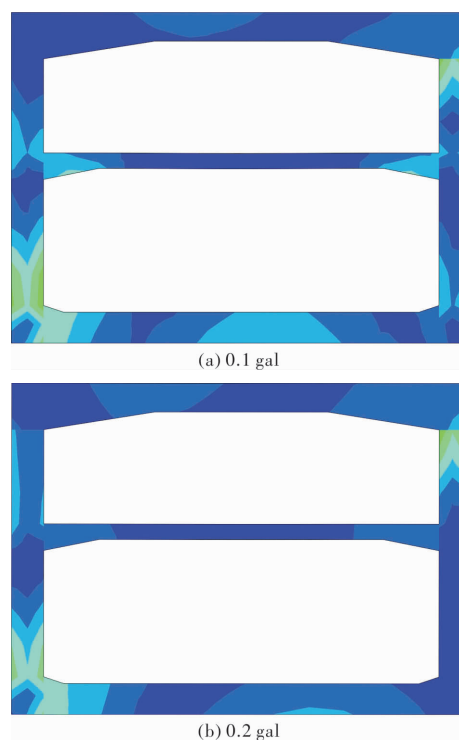


图 8 结构应力云图

Fig. 8 Structural stress cloud

由图 7 结果表明:输入地震波形式相同,车站结构测点处的相对水平位移时程曲线在不同地震荷载作用时变化规律相似,两测点的水平位移时程曲线非常接近,几乎重合,所以振幅相差较小,时程曲线的幅值随着输入地震动幅值的提高而增加.在相同地震动作用下,车站结构侧墙顶部、底部的相对水平位移时程曲线重合度高,二者大小及变化规律基本一致.图 8 结果表明:在输入水平向 0.1 gal 峰值加速度与 0.2 gal 峰值加速度时,车站结构模型底板与侧墙交接处、中板与侧墙交接处以及顶板与侧墙交接处的应力集中效应明显,

应力值较大。

图9给出了不同峰值加速度下车站各测点应力响应图。

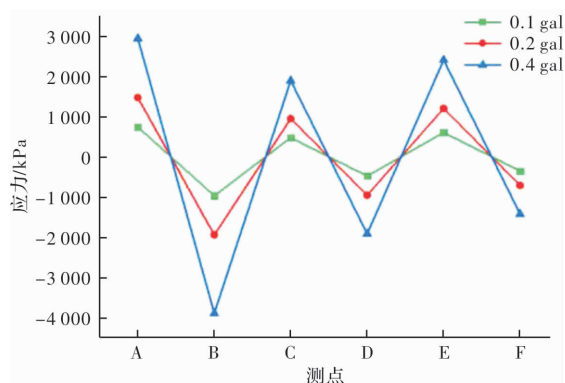


图9 El-Centro不同加速度峰值下各观测点应力响应图

Fig. 9 Stress response diagram of each observation point under different acceleration peaks of El-Centro

由图9所示,结构顶、中、底板的上下部位应力呈现正负交替变化的规律。随着最大加速度的增加,底板的内力增大趋势明显,而顶板处的应力变化相对平缓。在不同强度地震荷载作用下,顶板与底板的变化规律呈现出相同的趋势:均随着地震强度的增大而增大。因此,随着地震强度的增大,车站结构内部的应力分布差异性会更加显著。

4 结语

(1)本文的工程背景为南宁某地铁,综合考虑试验材料性能、土-结构相互作用、试验仪器和设备的主要功能等因素,设计了考虑土-地铁车站相互作用的振动台试验模型相似比,并制作了相应的试验模型。

(2)通过模拟地震振动台试验,量测并观测了无柱大跨地铁车站模型在水平地震作用下的地震响应规律和主要破坏特征,得出了一些可供工程设计参考的研究结论和构造建议。

(3)在模拟地震作用下,模型结构侧墙与底板及中板连接的变截面处裂缝最多,宽度较大,损坏较严重,是这类结构损伤最严重的部位之一,需要提高设计以此加强此类结构整体的抗震设防能力。

(4)建立原型结构有限元模型,通过数值分析得到车站应力云图,得到车站应力集中部位位于上、下板与侧墙连接部位,以及中板两侧距离侧墙约4 m处位置。侧墙应力集中部位出现在近底、顶板处的节点位置,抗震设计时应对此处进行加强。

参考文献 References

- [1] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
SHI Zhongheng. Underground railway design and construction [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.
- [2] 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 Yongming, LIU Mingbao, LI Zhiwen. Structural System Research of Subway Non-Column-Supported Large Space for Open Excavated Tunnel[J]. Building Science, 2012, 28(7):71-74.
- [3] 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(S2): 371-374.
LIU Mingbao, GONG Jianfei, LE Guiping, et al. Prestressed structural design of no-column-supported large space for open excavated tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(S2):371-374.
- [4] HASHASH Y M A, HOOK J J, SCHMIDT B, et al. Seismic design and analysis of underground structures [J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2001, 16(4):247-293.
- [5] 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.
WANG Xiuying, LIU Weining, ZHANG Mi. Study on the Categorization and Mechanism of Seismic Damage of Underground Structures[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(11):55.
- [6] 郑永来. 地下结构抗震[M]. 同济大学出版社, 2005.
ZHENG Yonglai. Underground structure earthquake resistance[M]. Tongji University Press, 2005.
- [7] AN Xuehui, SHAWKY A A, MAEKAWA K. Collapse mechanism of a subway station during the great Hanshin earthquake[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(3): 241-257.
- [8] 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 Bingzheng, LUO Qifeng, MA Shuo, et al. Seismic response analysis of Daikai subway station in Hyogoken-nanbu earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4):102-107.
- [9] 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 Xiuli, LI Yang, XU Chengshun, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway

- station during 1995 Osaka-Kobe earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 223-236.
- [10] 庄海洋,陈国兴,王修信. 软土层厚度对地铁车站结构地震反应的影响规律研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6):245-253;223-236.
- ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, WANG Xiuxin. Study on the influence law of soft soil layer thickness on seismic response of metro station structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6):245-253.
- [11] 庄海洋,王雪剑,陈国兴. 土-地铁动力相互作用体系侧向变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1761-1769.
- ZHUANG Haiyang, WANG Xuejian, CHEN Guoxing. Study on lateral deformation characteristics of soil-metro dynamic interaction system[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 39(10): 1761-1769.
- [12] OHTOMO Keizo, SUEHIRO Toshio, KAWAI Tadashi, et al. Research on streamlining seismic safety evaluation of underground reinforced concrete duct-type structures in nuclear power stations.-Part2. Experimental aspects of laminar shear sand box excitation test with embedded RC models[C]// Transactions, SMIRT 16, Washington DC, Washington DC: ASMIRT, 2001.
- [13] 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 Weidong. Three-dimensional dynamic response analysis of large metro station structures under earthquake[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11):2290-2299.
- [14] 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. 37(4):421-427.
- YANG Linde, JI Qianqian, ZHENG Yonglai. Shaking table test on metro station structures in soft soil[J]. Modern tunnel technology, 2003, 40(1):7-11.
- [15] 王兰民,刘琨,孙军杰. 饱和原状黄土液化基本特征的振动台试验研究[J]. 地震工程学报, 2015(4): 1023-1028.
- WANG Lanmin, LI Kun, SUN Junjie. Shaking table test liquefied saturated intact loess essential characteristics[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015(4):1023-1028.
- [16] 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 test[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.
- [17] 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, ZHAN Kai, WU Huaiqiang, 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.
- [18] 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(S2): 26-34.
- LIU Tingjin, XU Weixing, TANG Xinwei. Seismic response analysis of large-span pillarless metro station in upper soft and hard stratum[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S2):26-34.
- [19] 刘庭金,郑月昱,林伟波. 有、无柱地铁地下车站地震响应对比分析[J]. 隧道建设, 2017, 37(4):421-427.
- LIU Tingjin, ZHENG Yuehao, LIN Weibo. Comparative analysis of seismic response of underground stations with and without pillars[J]. Tunnel construction, 2017, 37(4):421-427.
- [20] 张亚辉,赵岩,张春宇. 大跨度桥梁抗震分析的空间效应[J]. 中国铁道科学, 2002(6):92-96.
- ZHANG Yahui, ZHAO Yan, ZHANG Chunyu. Spatial effect of seismic analysis of long-span bridges[J]. China Railway Science, 2002(6):92-96.
- [21] CHE A, IWATATE T, GE X. Dynamic behaviors of subway structure subjected to strong earthquake motions using shaking table tests and dynamic analyses[J]. Rock And Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1293.
- [22] TOMARI Y, TOWHATA I. Soil-structure interaction of cross sections of flexible underground structures subjected to soil liquefaction[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(2): 69-87.
- [23] JAFARZADEH F, FARAH H, ABAZARI E. Investigating dynamic response of a buried pipeline in sandy soil layer by 1g shaking table test[J]. International Journal of Civil Engineering, 2010, 8(2): 107-124.
- [24] KOSEKI J, MATSUO O, KOGA Y. Uplift behavior of underground structures caused by liquefaction of surrounding soil during earthquake[J]. Soils and Foundations, 1997, 37(1): 97-108.
- [25] YASUDA S, NAGASE H, ITAFUJI S, et al. Shaking table tests on floatation of buried pipes due to liquefaction of backfill sands[C]// Proceedings of the 5th US-Japan Workshop Earthquake Resistance Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Soil Liquefaction, Utah. Buttolo: Technical Report Nceer, 1994:655-677, 1995.