

权登州, 王毅红, 井彦林, 尹尚之, 叶丹, 2015. 黄土地区地铁车站数值模型及测试位置研究. 震灾防御技术, 10 (1): 108—115. doi: 10.11899/zzfy20150111

黄土地区地铁车站数值模型及测试位置研究¹

权登州 王毅红 井彦林 尹尚之 叶丹

(长安大学建筑工程学院, 西安 710061)

摘要 介绍了黄土地区地铁车站振动台模型试验的测试设备与数据采集系统; 基于 ABAQUS 有限元分析软件, 采用有限元-无限元耦合的建模方法, 对地震作用下黄土地区地铁车站的加速度反应、位移反应、应变反应, 以及土-结构相互作用的接触土压力进行了研究。结果表明, 结构构件交叉部位的应变反应及接触土压力较大。最后, 根据地铁车站地震反应特点, 研究了黄土地区地铁车站振动台模型试验中传感器的布置原则和布置方案, 为试验获得可靠数据提供了重要保证。同时, 本文得到的黄土地区地铁车站地震反应特点和规律, 可为黄土介质模型试验及深度数值模型分析提供参考。

关键词: 黄土地区 地铁车站 振动台模型试验 传感器 ABAQUS 数值分析

引言

近年来随着我国西部地区城市地下空间开发利用的快速发展, 黄土地区地铁工程日益增多。如: 西安地铁已建成通车 50.3km, 远景规划总里程将达 660km; 兰州地铁一号线已开工建设, 计划 2016 年建成通车, 其远景规划里程约 130km。地铁车站通常为服务型公共场所, 人口密度大, 服务设施多, 人员紧急疏散耗时长。若在地震作用下遭受结构破坏, 造成的损失将非常惨重, 另外震后修复和加固困难, 费用也将十分昂贵(秦立科, 2010)。因此, 黄土地区地铁车站的抗震性能及安全性评价日益受到密切关注。然而由于缺少有针对性的强震记录, 对地震荷载作用下黄土地区地铁车站的地震响应尚缺乏足够的认识, 因而有必要通过振动台模型试验了解黄土地区地铁车站地震反应特性及其规律, 为黄土地区地下结构的抗震分析与设计提供可靠资料。

在黄土地区地铁车站地震模拟振动台模型试验中, 传感器的布置位置对获得可靠的试验结果至关重要。本文以西安地铁建设为例, 基于有限元-无限元耦合的建模方法, 分析了黄土地区地铁车站的地震反应规律; 在西安黄土地区地铁车站地震模拟振动台模型试验中, 对数据信息的采集及传感器的布置进行了研究, 为获得可靠的试验数据提供了重要保证。同时, 本文可为黄土介质模型试验及深度数值模型分析提供参考。

1 测试设备与数据采集

试验采用西安建筑科技大学结构与抗震实验室振动台试验系统。该系统是由美国 MTS

¹ 基金项目 国家自然科学基金资助项目(41472267); 西安市地下铁道有限责任公司科研基金资助项目(D4-YJ-042014048)

[收稿日期] 2014-11-29

[作者简介] 权登州, 男, 生于 1983 年。博士生。主要从事工程结构抗震研究。E-mail: qdz0809@163.com

公司生产的三向六自由度大型高性能模拟地震振动台，主要包括：振动台台体、驱动系统、伺服控制系统、数据采集系统和模型箱。其主要技术参数是：振动台台面尺寸为 $4\text{m} \times 4\text{m}$ ；最大载重量为 30T ；工作频段为 $0.1\text{—}120\text{Hz}$ ；振动波形可为随机波及各种地震波；水平向最大加速度为 1.2g ；竖向最大加速度为 0.7g ；水平向最大速度为 $\pm 400\text{mm/s}$ ；竖向最大速度为 $\pm 300\text{mm/s}$ ；水平向最大位移为 $\pm 150\text{mm}$ ；竖向最大位移为 $\pm 100\text{mm}$ ；最大倾覆力矩为 $35\text{T} \cdot \text{m}$ ；模型最大重心高度为 1m ；模型最大偏心矩为 1m 。本次试验模型几何相似比为 $1:30$ ，模型箱尺寸为 $4\text{m} \times 3.5\text{m} \times 1.8\text{m}$ ，车站结构模型采用微粒混凝土浇筑（陈国兴等，2010），模型土采用西安地铁 5 号线地下车站工点的黄土样。

为了解黄土的动力特性，研究黄土介质中地铁车站的动力反应特征，在振动台激振过程中测试的数据信息为，黄土介质与地铁车站结构的加速度反应、位移反应、地铁车站结构的应变反应，以及土与地铁车站结构之间的接触压力（杨林德等，2003）。试验中采集数据信息所用的传感器如图 1 所示。加速度反应选用型号为 LC04 系列的内置 IC 压电式传感器采集；位移反应采用电感调频式位移传感器采集；结构应变采用电阻应变片采集，型号为 BX120-5AA，栅长为 $5\text{mm} \times 3\text{mm}$ ；土与结构之间的接触压力采用量测动态土压力的传感器采集，型号为 XHX-460 型，直径为 100mm ，量程为 6.0MPa 。

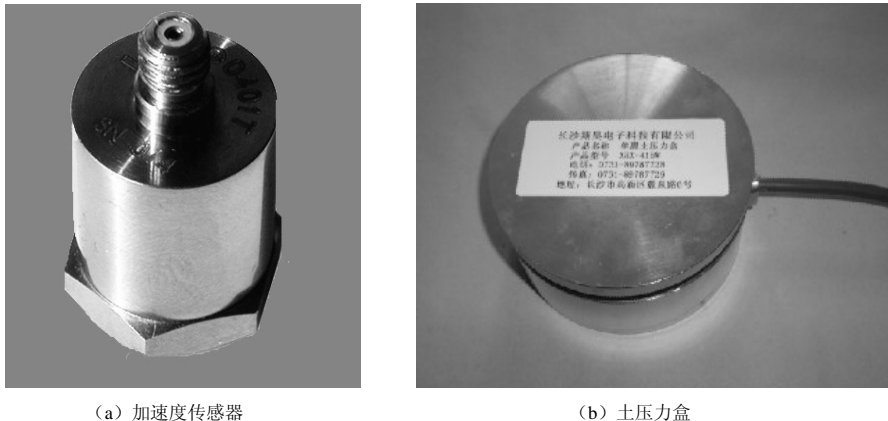


图 1 试验用传感器

Fig. 1 Sensors in the test

2 黄土地区地铁车站的有限元-无限元耦合分析

2.1 黄土介质与典型地铁车站

我国的黄土主要分布在西北、华北等地区。西安地铁跨越了渭河阶地、黄土台塬及洪积台地等地貌单元，地质条件复杂，这是我国首次在黄土地区修建地铁。其中，5 号线有约半数工程位于黄土区域。为了解工程沿线黄土的动力特征，对 5 号线 17 处站点进行了工程地质钻探、取土样并做动力学试验（骆亚生，2000）、测试土层波速，现场勘察和室内试验结果反映了黄土场地的特性。假定地铁车站周围黄土为弹性介质，选取典型的黄土物理力学参数，用于黄土地区地铁车站的有限元-无限元耦合分析，就可使计算结果反映出黄土介质的特性。表 1 为黄土材性参数。

表 1 黄土材性参数

Table 1 The material parameters of loess

密度 (kg/m ³)	杨氏模量 MPa	泊松比	等效波速 (m/s)	粘聚力 C (KN)	摩擦角 ϕ (°)	Rayleigh 阻尼	
						α	B
2000	50	0.3	250	65	15	0.616	0.000312

西安黄土地区地铁车站的横截面呈两层双跨矩形, 如图 2 所示。车站结构宽 18.7m, 高 13.55m, 左右跨对称布置; 上、下层边墙厚度分别为 0.6m 和 0.7m; 上、下层柱净高分别为 4.95 m 和 6.6m; 车站顶、底板厚度均为 0.8m, 中板厚度为 0.4m。主体结构采用 C30 强度等级混凝土, 侧墙、顶板、底板的配筋率为 1.2%, 柱的配筋率为 1.5%。

2.2 地铁车站分析模型

基于 ABAQUS 大型非线性有限元分析平台, 采用有限元-无限元耦合的建模方法, 使用有限单元模拟车站结构及近场黄土, 使用无限元传输边界模拟远场黄土介质 (Lysmer 等, 1969), 建立二维平面应变模型。模型尺寸为 100m×50m, 车站结构按实际尺寸建模, 埋深为 16m; 黄土介质采用 Mohr-Coulomb 塑性模型, 材性参数见表 2; 车站结构 C30 混凝土采用 CDP 模型 (混凝土塑性损伤模型), 材料密度取 2400kg/m³, 杨氏模量取 2.1×10¹⁰Pa, 泊松比取 0.2, 塑性损伤因子见表 2 (孟宪春等, 2011)。土-结构相互作用采用 ABAQUS 中的主从接触面对模拟 (费康等, 2010), 有限元分析模型如图 3 所示。

车站结构的单元划分如图 4 所示。地震作用选用 EI Centro 波模拟, 在模型底面输入持时为 53.5s 的完整地震波, 如图 5 所示。

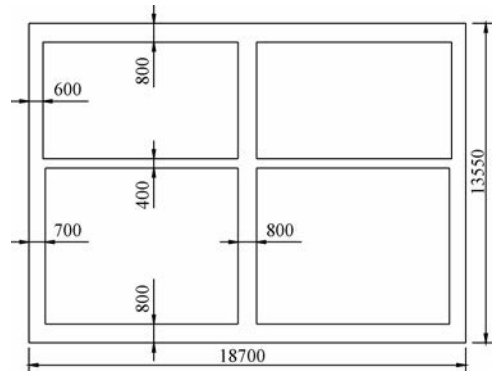


图 2 地铁车站横截面图 (单位: mm)

Fig. 2 The cross section of subway station

表 2 C30 混凝土塑性损伤因子

Table 2 Plastic damage parameter of C30 concrete

压应力 (MPa)	非弹性应变 (10 ⁻³)	受压损伤因子	拉应力 (MPa)	开裂应变 (10 ⁻³)	受压损伤因子
10.053	0.000	0.000	2.010	0.000	0.000
15.449	0.107	0.076	1.965	0.024	0.124
18.984	0.331	0.163	1.882	0.037	0.180
20.100	0.654	0.255	1.690	0.064	0.280
19.609	0.968	0.328	1.359	0.115	0.431
17.196	1.654	0.455	1.128	0.163	0.531
14.616	2.348	0.551	0.850	0.250	0.651
10.047	4.005	0.696	0.661	0.352	0.734
7.476	5.580	0.773	0.474	0.549	0.816
5.909	7.115	0.819	0.346	0.839	0.871
4.136	10.130	0.872	0.280	1.126	0.900
3.172	13.111	0.901	—	—	—

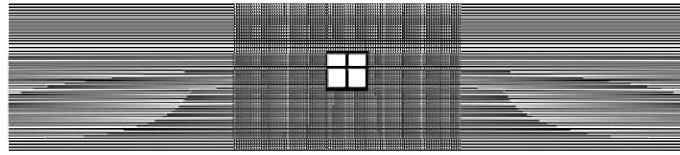


图 3 土-地铁车站抗震分析模型

Fig. 3 Analytical model of soil-subway station

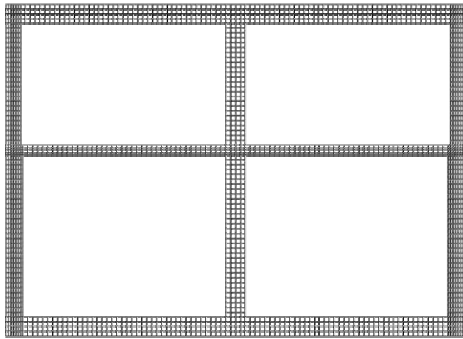


图 4 地铁车站网格划分

Fig. 4 The mesh generation of subway station

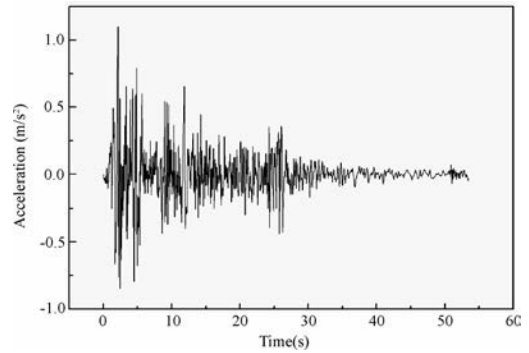
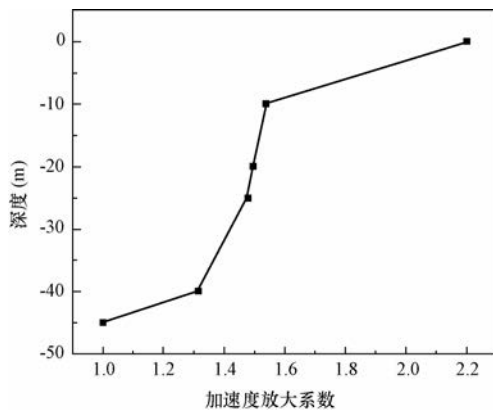


图 5 El Centro 地震动

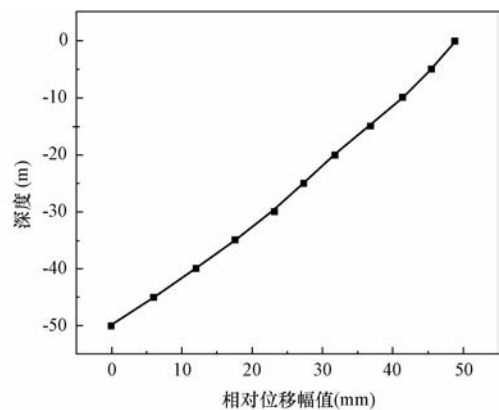
Fig. 5 El Centro seismic wave

2.3 地震响应分析

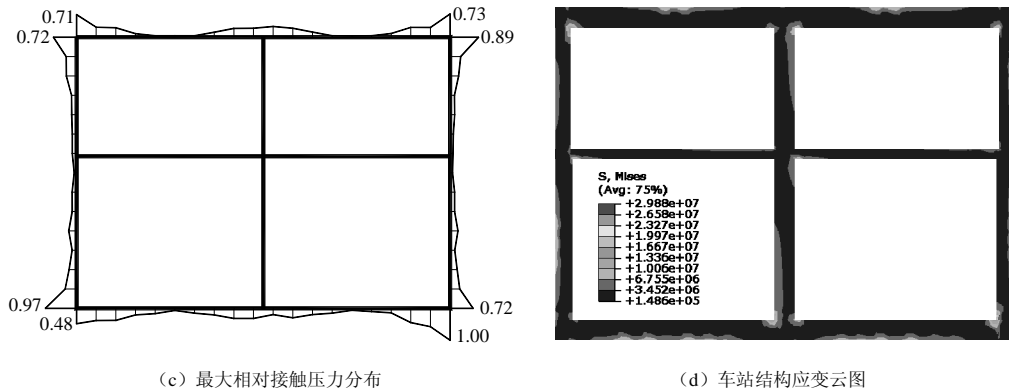
黄土地区地铁车站有限元仿真分析结果如图 6 所示。加速度放大系数为不同深度处加速度幅值与模型底部加速度幅值之比，其沿深度的变化规律见图 6 (a)；相对位移幅值沿深度的变化规律见图 6 (b)；结构最大相对土压力为数值计算过程中结构各节点所产生的最大土压力与结构上所发生的最大土压力的比值，其分布见图 6 (c)；结构顶板相对底板发生最大相对位移时，应变分布如图 6 (d) 所示。



(a) 加速度放大系数沿深度变化图



(b) 相对位移幅值沿深度变化



(c) 最大相对接触压力分布

(d) 车站结构应变云图

图 6 地铁车站有限元分析结果

Fig. 6 Results of subway station by finite element analysis

由上述分析结果可发现，黄土地区地铁车站地震反应有以下特点：

(1) 加速度放大系数从模型底部向顶部呈递增变化，即加速度幅值从模型底部向上传播的过程中逐渐被放大。

(2) 相对位移幅值呈现出与加速度变化相似的规律，即相对位移幅值从模型底部向上传播的过程中逐渐被放大。

(3) 由土-结构之间接触压力分析结果可知，结构构件端部接触压力均较大，最大接触压力发生在结构下角点；而构件中部变形相对较大，导致土-结构之间接触压力相对较小。

(4) 结构应变分析结果表明，构件相互交接处附近应变较大。底层中柱的底端应变最大，顶层中柱的顶端次之；顶板、底板及中板靠近中柱和侧墙处应变较大；侧墙靠近顶板、底板及中板处应变最大。

3 黄土地区地铁车站振动台试验中传感器的布置

3.1 传感器布置原则

根据振动台试验模型尺寸、实际试验条件及黄土地区地铁车站地震响应仿真分析结果，确定本次地震模拟振动台模型试验中传感器布置的基本原则如下：

(1) 地铁车站结构的观测断面选取与中柱轴线重合的横向断面，使测量数据信息尽量符合二维平面应变假设。

(2) 横向观测断面位置与地铁车站结构端部的距离大于结构的横向跨度，以减弱端部对观测断面动力反应的影响（王国波，2007）。

(3) 横向观测断面的数量不少于 2 个，其中主观观测断面 1 个，其余为辅助观测断面。主观观测断面上传感器多于辅助观测断面，且主观观测断面的中柱及其他关键部位的两侧布置应变片，以对构件两侧的受力变形状态进行对比；辅助观测断面上与主观观测断面关键部位相同位置处设置传感器，可相互比较验证数据信息的可靠性；在地铁车站结构近邻端墙位置设置少量传感器，以对比检验端墙对结构受力变形状态产生的影响。

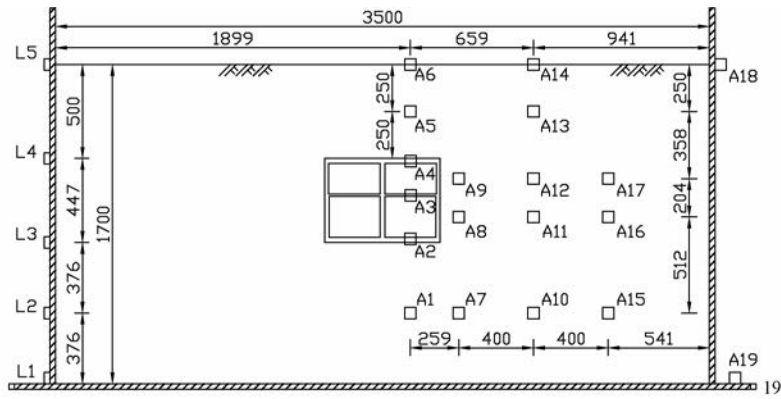
(4) 结构中部分关键部位同时布置了多个传感器，应协调各传感器的相对位置，保证其采集数据时互不干扰。

(5) 采用的振动台试验系统共有 68 个数据采集通道，充分利用数据采集系统的各通道，对尽量多的关键部位进行测量，以便更加全面地采集结构动力反应信息。

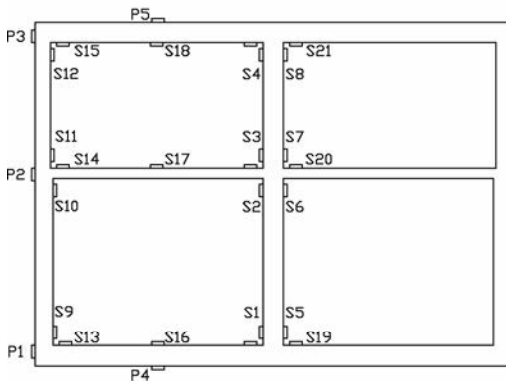
3.2 传感器布置方案

在黄土地区地铁车站地震模拟振动台模型试验中共设置了 3 个横向观测断面，均与中柱轴线重合。其中，主观观测断面和辅助观测断面位于车站结构的中部，主要采集车站结构及周围黄土介质的地震反应信息；另一观测断面设置在距离端部较远处，其采集的数据信息可用于检验纵向边界约束对车站结构中部地震响应的影响（杨林德等，2004）。

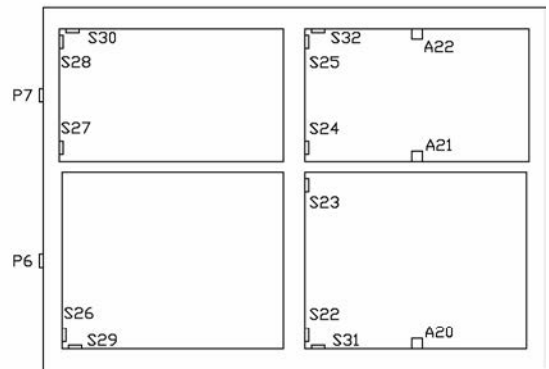
模型试验中传感器的布置如图 7 所示。图中 A 为加速度传感器，共设 23 个，其中 A1-A18 可采集土体与结构水平向加速度反应，A19 可检验振动台台面地震波输入；A23 设于模型纵向端头处端墙，可检验纵向边界对结构加速度反映的影响。图中 S 为应变片，共设 32 个，主观观测断面设置了 21 个，辅助观测断面设置了 11 个；P 为土压力传感器，共设 7 个；L 为位移传感器，共设 5 个，均设置于主观观测断面，可量测土体相对于振动台的剪切变形。



(a) 主观观测断面加速度及位移传感器布置



(b) 主观观测断面土压力及应变传感器布置



(c) 中部辅助观测断面传感器布置

图 7 黄土地区地铁车站振动台试验传感器布置

Fig. 7 Sensor placement of shaking table test for subway station in loess

4 结语

本文以西安地铁建设为例,介绍了黄土地区地铁车站地震模拟振动台模型试验中的测试设备与数据采集。基于 ABAQUS 有限元分析软件,采用有限元-无限元耦合的建模方法,分析了黄土地区地铁车站的地震反应规律。对西安黄土地区地铁车站地震模拟振动台模型试验中传感器的布置位置进行了研究,为试验顺利进行及获得可靠的试验数据提供了重要保证。同时,本文得到的黄土地区地铁车站地震反应特点和规律,可为黄土介质模型试验及深度数值模型分析提供参考。

参考文献

- 陈国兴,左熹,王志华,杜修力,孙田,2010. 地铁车站结构近远场地震反应特性振动台试验. 浙江大学学报(工学版), **44**(10): 1955—1961.
- 费康,张建伟,2010. ABAQUS 在岩土工程中的应用. 北京:中国水利水电出版社, 89—110.
- 骆亚生,2000. 中国典型黄土动力特征及其参数的试验分析. 西安:西安理工大学, 13—42.
- 孟宪春,景立平,2011. 多层地铁车站振动台试验与数值分析. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 31—44.
- 秦立科,2010. 非饱和黄土动力本构模型及其在地铁车站地震反应分析中的应用. 西安:长安大学, 1—6.
- 王国波,2007. 软土地铁车站结构三维地震响应计算理论与方法的研究. 上海:同济大学, 140—142.
- 杨林德,季倩倩,杨超,郑永来,2004. 地铁车站结构振动台试验中传感器位置的优选. 岩土力学, **25**(4): 619—623.
- 杨林德,季倩倩,郑永来,杨超,2003. 软土地铁车站结构的振动台模型试验. 现代隧道技术, **40**(1): 7—11.
- Lysmer J., Kulemeyer R. L., 1969. Finite dynamic model for infinite media. Engineering Mechanics Division ASCE, **95**: 859—877.

Numerical Model and Measuring Position for Subway Stations in Loess Area

Quan Dengzhou, Wang Yihong, Jing Yanlin, Yin Shangzhi and Ye Dan

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract In this paper test equipment and data acquisition system of shaking table model test of subway station in loess areas was introduced. Then, based on the finite element software of ABAQUS, the acceleration response, displacement response, strain response and contact pressure of subway station under seismic action were studied in loess area by coupling finite element with infinite element. The results showed that the strain responses and contact pressure in the cross site of structures was larger than other sites. Finally, according to the seismic response characteristics of subway station, the principles and methods of sensors placement in shaking table model test of subway station in loess areas were studied to obtain reliable data in the test and provide reference for model test and numerical model analysis of loess.

Key words: Loess area; Subway station; Shaking table model test; Sensors; ABAQUS; Numerical analysis