

DOI: 10.11779/CJGE202205011

液化夹层场地地铁车站结构离心机振动台试验方案设计

张梓鸿¹, 许成顺^{*1}, 闫冠宇¹, 杜修力¹, 李洋², 周燕国³

(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. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081;

3. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: 为深入研究液化夹层场地地铁车站结构地震破坏反应, 依托浙江大学 ZJU400 土工离心机振动台系统, 开展了系列液化夹层场地地铁车站结构地震破坏反应试验。详细介绍了试验方案和试验流程, 并针对目前国内外尚无液化夹层场地制备先例的现状, 介绍了夹层场地的制备过程、结构防水、离心过程中砂土层初始孔压的释放等技术细节。系列试验最终获得了较为理想的试验效果, 达到了研究液化夹层场地地铁车站结构地震破坏反应的试验目的。整个试验方案设计的介绍将对今后该类型试验的开展提供一定参考。

关键词: 液化夹层场地; 地铁车站结构; 地震破坏反应; 试验技术; 试验方案设计

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)05-0879-10

作者简介: 张梓鸿(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事地下结构工程抗震研究。E-mail: zhangzihong@emails.bjut.edu.cn。

Experimental design for dynamic centrifuge tests on a subway station structure in liquefied interlayer site

ZHANG Zi-hong¹, XU Cheng-shun¹, YAN Guan-yu¹, DU Xiu-li¹, LI Yang², ZHOU Yan-guo³

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Urban Rail Train Center of CARS, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory

of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To study the earthquake damage response of a subway station structure in a liquefied interlayer site, a series of dynamic centrifuge tests are carried out using the ZJU400 geotechnical centrifuge facility in Zhejiang University. The test scheme and the process of carrying out the tests are introduced. At the same time, in view of the current situation that there is no precedent for a reference for the preparation of the liquefied interlayer site, many technical details are elaborated, including the preparation of liquefied interlayer site (clay consolidation, sand saturation and assembly of interlayer site), structural waterproof treatment, and releasing initial pore pressure in the sand layer during centrifugal loading. The tests obtain ideal results, thus achieving the experimental goal of studying the earthquake damage response of the subway station structure in the liquefied interlayer site. The introduction to the design process of this test scheme may provide some references for the similar tests in the future.

Key words: liquefied interlayer site; subway station structure; earthquake damage response; testing technology; experimental design

0 引言

通常认为地下结构在周围土体的约束作用下具有较好的抗震能力, 在地震作用下不易出现严重的破坏^[1-2]。然而 1995 年阪神地震中, 大量的地下结构遭受了严重的破坏, 大开地铁车站甚至出现了整体塌毁破坏的情况^[3], 这引起了国内外专家对于地下结构地震破坏反应的关注。研究表明, 地下结构地震反应与周围土体的变形有直接关系, 场地的特殊性(复杂场地)对地下结构地震破坏反应必然产生十分重要的影响^[4-5]。液化场地是复杂场地的一种典型形式, 备受国

内外学者的广泛关注。当前中国在建和既有的地下结构位于液化夹层场地的情况较为普遍^[6-8], 因此开展局部液化夹层场地地下结构地震破坏反应研究具有十分重要的现实意义。

模型试验方法是分析地下结构抗震问题十分有效

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504305); 国家自然科学基金面上项目(52078020); 国家自然科学基金青年基金项目(51908553)

收稿日期: 2021-07-01

***通信作者** (E-mail: xcs_2017@163.com)

的研究手段之一,国内外研究者已开展了大量的模型试验对液化场地地下结构地震破坏反应进行了研究。左熹等^[9]进行了近远场地震动作用下土-地下结构动力相互作用振动台模型试验,试验结果揭示了液化砂土层和黏土层中地铁地下结构的地震响应特性及灾变机制。凌道盛等^[10]采用离心机振动台试验对液化场地中单层双跨地铁车站结构的地震破坏规律进行了研究,同时基于试验结果对地铁车站结构的地震灾变机理进行了详细阐述。Chian 等^[11]针对地震作用下液化场地中的地下结构上浮的问题开展了系列离心机振动台试验,深入分析了圆形地下结构埋深和结构尺寸对结构上浮位移的影响规律。Chen 等^[12]开展了近远场地震动作用下可液化场地中三拱立柱式地铁地下车站结构大型振动台模型试验,深入地分析了模型地基的液化反应规律和模型结构的地震破坏反应过程。安军海等^[13]开展了近远场水平地震动作用下可液化地层中盾构扩挖地铁车站结构振动台试验,基于试验结果对盾构扩挖地铁车站结构的地震破坏机制进行了探讨。Lee 等^[14]针对液化场地中的矩形隧道开展了系列离心机振动台试验,系统分析了场地液化过程中地下结构的上浮机理,同时得出:结构埋深、地震动幅值和频率均会影响结构上浮位移的大小。庄海洋等^[15-16]开展了系列液化场地地铁车站结构振动台试验,其中液化场地包括水平和倾斜两种类型,系统分析了不同场地类型的液化反应规律和模型结构的地震破坏反应过程。Chen 等^[17]为研究复杂场地(软土和液化土)条件下不规则截面地铁地下结构的地震响应开展了两组振动台试验,对比了两种场地和模型结构的地震破坏反应规律,探讨了不利场地对地下结构地震破坏过程和灾变机理的影响。

综上,国内外学者围绕液化场地地下结构地震响应开展了诸多普通振动台和离心机振动台试验研究,但其场地均假设为理想的均质液化场地。事实上,黏土与砂土交互的成层场地的制备在离心机试验中具有较多难点,而且当前在国内外相关研究中均无同类试验作为参考。

为研究液化夹层场地地铁车站结构的地震破坏反应,作者开展了两组离心机振动台模型试验。由课题组研究工作^[18-21]可知:竖向地震动对地下结构的地震破坏反应起着十分重要的作用,为合理考虑上覆土体的竖向惯性效应,其中一组试验中采取在结构上覆土中掺入一定比例钢砂的方式进行近似模拟^[22-23],对比竖向地震动联合作用下地下结构的地震反应。本试验重点解决了黏土与砂土交互成层场地的制备、离心过程中砂土层初始孔压的释放和模型结构位移测试等关键性技术问题。同时,文中对地下结构离心机振动

台试验的方案设计流程、设计方法和试验技术等进行了详细介绍,旨在为今后同类试验的开展提供一套系统、完备的试验方法。

1 试验目的和方案

试验目的:通过离心机振动台试验系统研究液化夹层场地地下结构地震破坏反应规律,同时考虑竖向地震动的联合作用对地下结构地震破坏反应的影响,从而揭示其灾变机理;基于试验结果对液化夹层场地土-地下结构动力相互作用数值分析模型进行验证。

本次试验共包括两组局部液化夹层场地地铁车站结构地震反应试验,其中一组试验考虑竖向地震动作用对地下结构地震破坏反应的影响。模型场地选用可液化层位于地下结构中部的工况(文中简称液化夹层),结构模型以国内某既有车站的断面形式作为参考。试验采用浙江大学的ZJU400离心机振动台设备,其层状剪切模型箱的内部尺寸为0.73 m(长)×0.33 m(宽)×0.42 m(高)。由于所采用的振动台设备仅提供水平单向施震,因此,试验通过在结构上覆土中掺入一定比例钢砂的方式近似模拟上覆土的竖向惯性作用。该方法已在前期试验中进行使用,其合理性已经通过数值计算^[24]和物理模型试验结果^[22-23]进行了验证。参考前期试验工况^[22],选取上覆土体中竖向加速度最大值为0.4g,即通过增大上覆土体40%自重的的方式模拟竖向地震动引起的竖向惯性效应;土-结构体系具体细节及编号如图1所示。

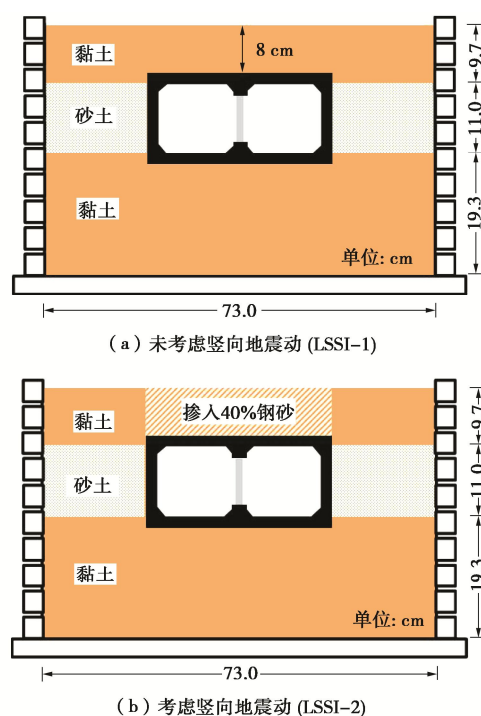


图1 土-结构模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil-structure model system

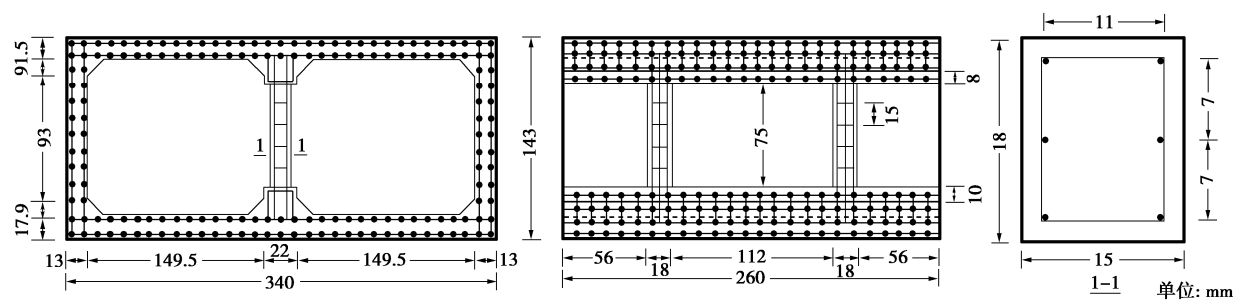


图 2 模型结构配筋图

Fig. 2 Reinforcement diagram of model structure

2 试验设计介绍

2.1 相似比设计

结合实际结构和试验室层状剪切箱尺寸, 试验中几何相似比确定为 1/55 (模型/原型), 相应的重力加速度、水平激振加速度以及动力反应加速度相似比为 55:1, 其它相似比参数见表 1。由表 1 可见, 如果选用与原型相同的砂土和孔隙流体, 则会出现动力时间与渗流时间相似比关系上的不一致的情况。为消除这种矛盾, 采用黏度系数为水 55 倍黏度系数的硅油作为孔隙流体。

表 1 试验相似比

Table 1 Centrifuge scaling laws

| 物理量 | 量纲系统 | 模型/原型 |
|--------------------|-----------------------|-------------------|
| 质量密度 ρ | $[M][L]^{-3}$ | 1 |
| 渗透系数 k | $[L][T]^{-2}$ | 55 |
| 输入振动时间 t | $[T]$ | 1/55 |
| 渗透时间 t_1 | $[T]^2$ | 1/55 ² |
| 水头 H | $[L]$ | 1/55 |
| 动孔压 μ | $[M][L]^{-1}[T]^{-2}$ | 1 |
| 振动频率 f | $[T]^{-1}$ | 55 |
| 反应加速度 A | $[L][T]^{-2}$ | 55 |
| 反应应力 σ | $[M][L]^{-1}[T]^{-2}$ | 1 |
| 反应应变 ε | — | 1 |

2.2 模型结构制作

结构模型以国内某既有车站的断面形式作为参考, 采用低强度微粒混凝土进行制模, 结构配筋率基本与实际工程结构一致。采用粒径为 2~3 mm 的中细砂及 325 普通硅酸盐水泥配制混凝土, 水泥: 砂: 水=1:3:0.8。本次试验模型结构一直处于饱和场地中, 结构的防水问题需要重点关注。如果在模型结构外部直接涂抹玻璃胶或防水喷漆等材料, 将改变土体-地下结构作用面的相互作用关系, 对地下结构地震响应具有较大影响。因此, 本试验在微粒混凝土制备过程

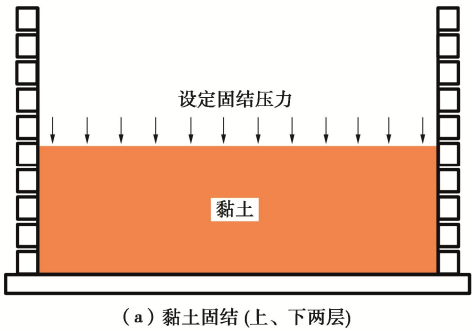
中添加一定质量的新型防渗剂 (水泥质量的 8%), 使混凝土产生良好的材料内部防水效果。试验前对微粒混凝土的强度参数进行了测试, 其抗压强度及弹性模量平均值分别为 20.8 MPa 和 13.04 GPa。

地铁车站模型为单层双跨的矩形框架结构, 几何尺寸为纵向长 260 mm, 宽 340 mm, 高 143 mm。车站模型顶底板和侧墙配筋采用直径为 0.9 mm 的钢丝网片, 网孔间距 9 mm; 中柱纵向钢筋选用 6 根直径为 1.2 mm 的钢丝, 箍筋选用 4 根直径为 0.6 mm 的钢丝, 箍筋间距取 15 mm。整个结构模型的保护层厚度为 2 mm。模型结构尺寸及配筋细节如图 2 所示。

2.3 模型场地制备

液化夹层场地的制备需要重点关注以下问题: ①黏土的渗透系数小, 固结时间较长, 及时即使在离心力作用下固结, 其试验成本过高。②成层场地制备过程中, 应关注由于渗透系数极小的上层黏土在离心作用下 (重力) 引起饱和砂土层产生超孔隙水压力的累积问题, 如果超孔隙水压力无法及时消散, 这将导致砂土内部有效应力与实际不符。

液化夹层模型场地共包含底层黏土、中间层液化砂层和上层黏土 3 部分。场地的制备过程主要包括 4 步: ①黏土层的固结 (包括上层和底层黏土); ②结构安装至设计位置; ③中部砂土层的制备与饱和; ④将固结完成的上覆黏土层装配至砂土层与结构上部。场地制备过程示意图如图 3 所示。



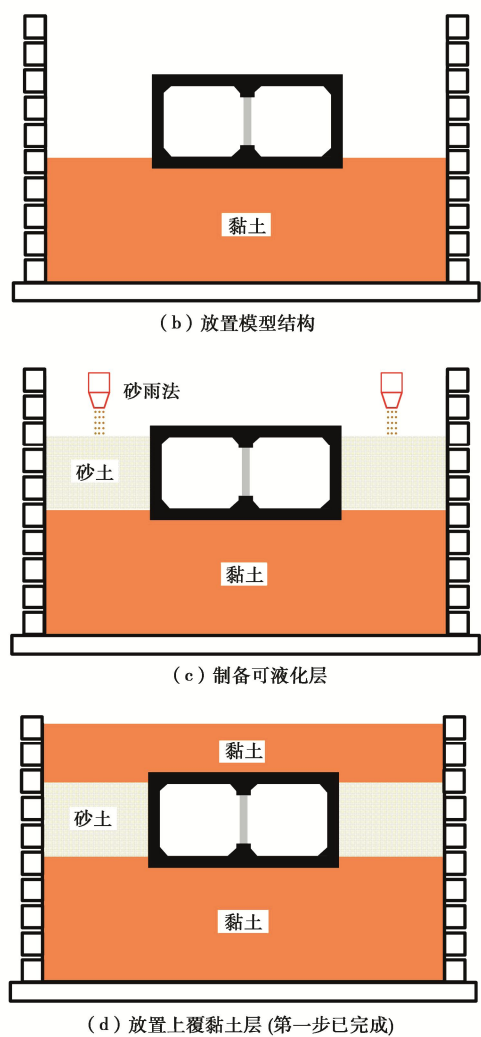


图3 模型场地的制备过程

Fig. 3 Preparation process of model site

试验中黏土层使用高岭土制备，高岭土物理参数如表 2 所示。考虑到甲基硅油在黏土中的渗流速度过慢，在不影响试验目的的前提下，本试验中黏土层采用水溶液进行饱和。为减少黏土固结对离心机设备的占用周期，在离心机外提前加压固结制备黏土层。该固结方式不仅便于传感器的精确埋设，而且也解决了采用离心固结的方式顶部黏土层中的水溶液不可避免的进入到砂土夹层中的关键问题。

表 2 高岭土基本物理参数指标

Table 2 Basic physical parameters of kaolin

| 颗粒相对质 量密度 G_s | SiO ₂ /% | Al ₂ O ₃ /% | 液限 /% | 塑限 /% |
|--------------------|------------------------|--------------------------------------|----------|----------|
| 2.68 | 47~53 | 32~38 | 65.4 | 40.0 |

采用真空搅拌机将高岭土颗粒与去离子水溶液制成泥浆，制备完成后注入模型箱中；采用预定的压力在固结仪上进行固结。上、下两层黏土分别在两个模型箱中进行固结，固结压力分别为 130、220 kPa；荷载采用分级加载的形式施加（分别为 7 级和 11 级），

以 24 h 固结仪载荷臂的水平度不变作为每级荷载黏土层固结完成的标准。

采用福建标准砂制作模型场地的液化夹层，其相关力学参数见表 3 所示，颗粒级配曲线见图 4。砂土的相对密实度控制为 50%，采用砂雨法进行制备（如图 3（c）所示），试验前对砂雨装置进行标定，标定曲线如图 5 所示。

表 3 砂土层物理力学性质

Table 3 Physical properties of model sand

| 参数 | G_s | e_{\max} | e_{\min} | e | D_{50} /mm | φ /($^{\circ}$) |
|----|-------|------------|------------|-------|-----------------|------------------------------|
| 数值 | 2.645 | 0.961 | 0.615 | 0.780 | 0.16 | 39 |

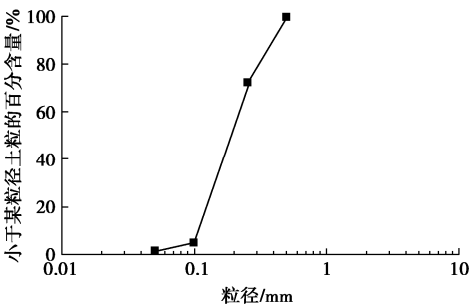


图 4 福建标准砂颗粒级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curve of standard sand

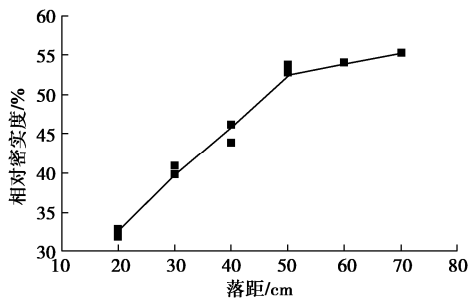


图 5 砂雨装置标定曲线

Fig. 5 Calibration curve of sand-rain device

砂土层在场地中部，无法从模型箱底部供油对其进行饱和，本试验采用将供油管插入砂土层的方式饱和砂土。底层黏土固结完成后，将模型结构嵌入至设计位置，如图 3（b）所示。由于该振动台试验探讨的是地下结构的平面（平面应变）地震反应问题，所以在砂土层饱和时将供油管放置在结构前、后端部（出平面方向）对模型场地的扰动最小，因此将注油管放置在图 6 中红色圆形标记的位置；采用砂雨法制备结构两侧的砂土夹层（如图 3（c）），当落砂至预定高度后，将模型箱整体吊装至真空饱和箱中进行饱和，控制进油速度为 1 mm/h，采用较低的注油速度避免冲毁局部砂层，当硅油液面超过砂层顶面 1 cm 时停止供油，同时将注油管缓慢拔出。当砂层饱和完成后，将

固结完成的上层黏土装配至砂土层上部, 如图 3 (d) 所示。

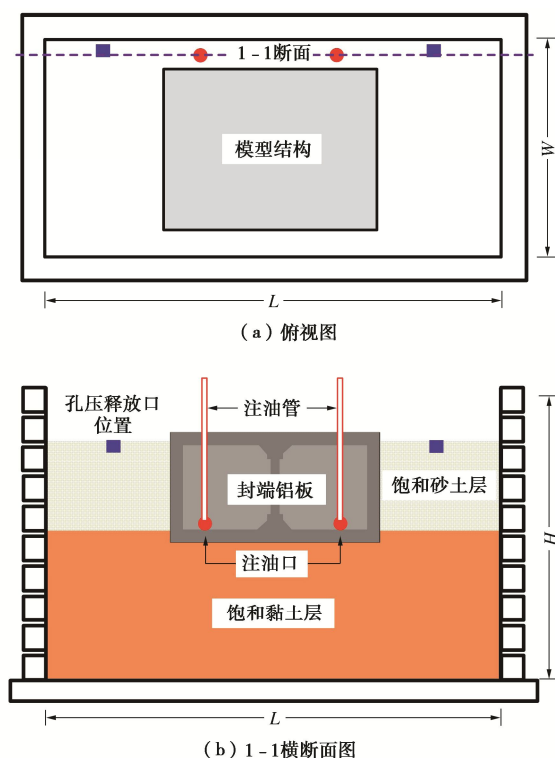


图 6 土-结构模型饱和方法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of saturation method for soil-structure model

在离心机加速阶段, 上覆黏土层的重力作用使中间砂层产生的超孔隙水压力将导致试验中模型场地的有效应力与实际不符。因此, 需要采用有效的方法在离心机加载阶段释放砂土层固结产生的超孔隙水压力, 保证模型场地具有合理的原始地应力状态。

本试验提出采用磁力阀装置释放砂土层中产生的超孔隙水压力, 其基本设计思路与过程如下: ①将橡胶管提前放置在砂土层顶部 (与黏土交界位置), 具体位置如图 6 中正方形蓝色标记所示; 固定橡胶管位置后将加工完成的上部黏土层覆盖在饱和砂土层上, 完成后如图 7 所示。②橡胶管的另一端接到磁力阀的进油端口, 同时利用另一条橡胶管连接磁力阀的出油口与储油容器。③将磁力阀的电源接口通过离心机实验室的外源公共端口 (离心机工作端与控制室的导线) 与外部电源相连, 通过电源开关随时控制磁力阀; 在离心加速阶段, 打开磁力阀, 使砂土层内产生的超孔隙压释放, 当离心加速度升至预定值后关闭磁力阀。

为探讨磁力阀装置的试验效果, 将离心机加速阶段砂土层中部 (图 8 中 W5 传感器) 孔压增长曲线的试验结果和理论计算结果 (包括是否释放孔压两种情况) 进行对比。如果离心过程中孔压未释放, 则上部

黏土层的压力完全施加在中部砂土层, 计算时其土层密度采用饱和重度; 如果离心过程中释放砂土层的孔压, 则认为上部黏土层与下部砂土层中的孔隙连通, 其土层密度采用浮重度。计算结果如图 9 所示; 对比发现, 试验结果与孔压释放条件下的理论计算结果更为接近, 说明在液化夹层场地中采用磁力阀释放初始孔压的技术效果较为理想。

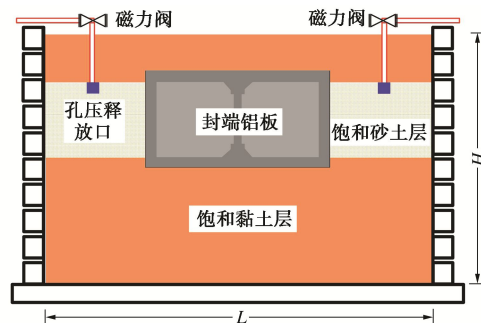


图 7 超孔隙压释放原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of principle of releasing excess pore pressure

2.4 测试传感器布置

本试验采用的传感器主要有加速度计、孔压计、激光位移、土压力以及应变片传感器, 同时为了监控地震过程中, 地铁车站内部的破坏情况, 在结构内部安装了微型摄像头。试验中传感器的整个布设方案如图 8 所示。由于数据采集通道数量的限制, 在试验中能够使用的传感器总数有限, 需要对传感器布设方案进行优化。试验中除柱子应变片外, 其他传感器均布设在模型监测面 II (图 8 (e)) 上, 两根中柱均布设了相同数量的应变片, 由于图形展示不便的原因, 在图 8 (c) 中仅展示了监测面 I 上的 SC1-SC3 应变片, 监测面 III 上的 SC4-SC6 应变片未在图中展示, 两组试验的应变片均采用了 1/4 桥直接测试应变的连接方式。

结构层间位移是评价地下结构抗震性能极为重要的指标, 在本试验中, 创新地提出了在结构内部采用激光位移计与靶标结合的方式直接地测试地下模型结构在地震作用下的层间位移, 其监测原理如图 10 所示; 激光位移计水平放置于结构底板作为发射信号和采集信号的装置, 靶标为采用高强铝合金制作的 L 型的构件, 采用结构胶将该构件的短边固定在结构顶板, 将构件的长边作为激光信号的反射板, 当结构模型的顶底板在地震作用下产生相对位移时, 通过激光发射源至靶标距离的变化直接监测结构的层间相对位移。图 10 中虚线为模型结构变形后示意图, 图中 Δd 为地震作用下结构顶底的层间相对位移。结构内部传感器实际布置情况如图 11 所示。

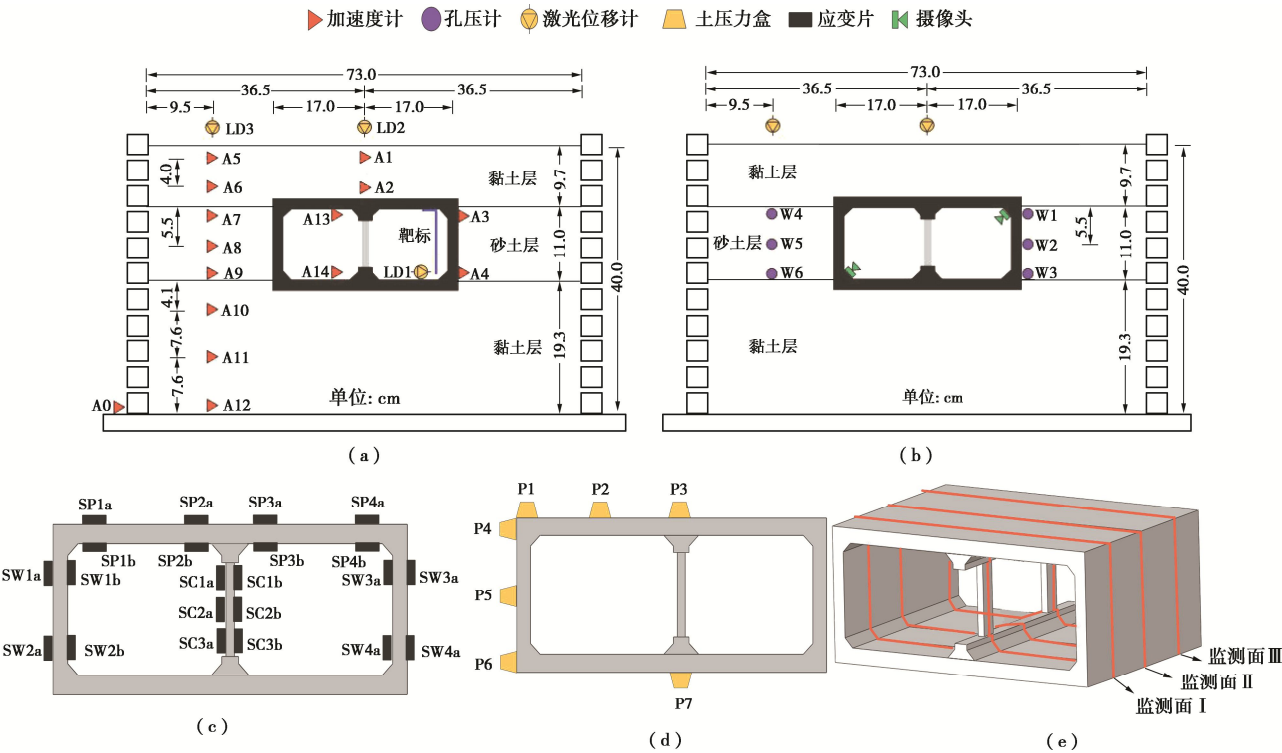


Fig. 8 Diagram of placement of sensors

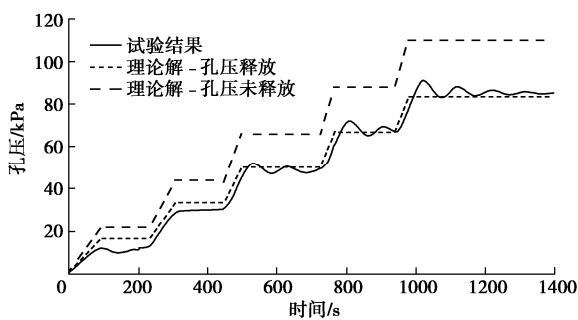


图 9 孔压增长曲线对比

Fig. 9 Comparison of pore pressure growth curves

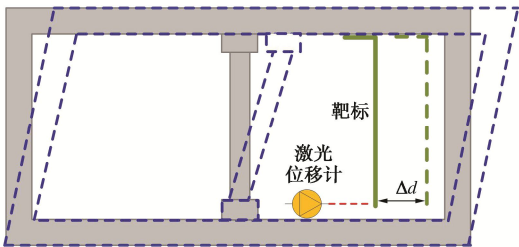


图 10 层间位移测试原理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of principle of interlayer displacement tests

2.5 加载方案与输入地震动

选取阪神地震中位于大开地铁车站东北约 10 km 的花岗岩上神戸大学观测到的地震动记录（南北方向水平加速度时程记录）作为本试验的主要地震动输入。

在试验中选取原地震动的前 27.5 s，峰值分别调整为 0.10~0.72g，原 Kobe 地震动加速度时程及频谱如图 12 所示；在每一次输入地震工况之前，采用脉冲波对场地剪切波速进行测试，试验具体工况加载情况见表 4。

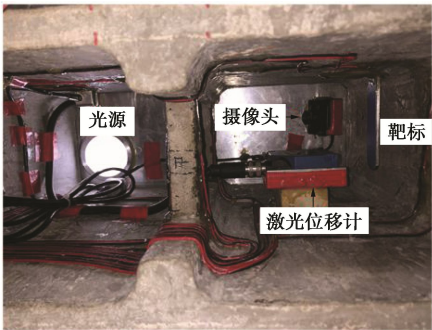


图 11 结构内部传感器布置

Fig. 11 Layout of sensors inside structure

表 4 LSSI-1 和 LSSI-2 试验加载工况

Table 4 Loading cases in LSSI-1and LSSI-2 tests

| | 工况号 | 地震动 | 幅值/g |
|-------|------|------|------|
| 离心机加速 | EQ-0 | — | — |
| 阶段一 | EQ-1 | 脉冲 | 0.05 |
| | EQ-2 | Kobe | 0.10 |
| 阶段二 | EQ-3 | 脉冲 | 0.05 |
| | EQ-4 | Kobe | 0.32 |
| 阶段三 | EQ-5 | 脉冲 | 0.05 |
| | EQ-6 | Kobe | 0.52 |
| 阶段四 | EQ-7 | 脉冲 | 0.05 |
| | EQ-8 | Kobe | 0.72 |
| | EQ-9 | 脉冲 | 0.05 |

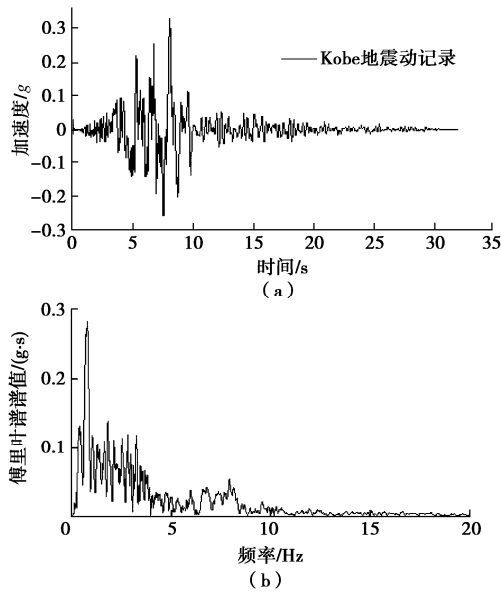


图12 Kobe地震加速度时程及其频谱

Fig. 12 Acceleration records and Fourier spectra of Kobe earthquake

2.6 竖向地震作用的试验模拟

对于 LSSI-2 试验, 结构上覆土体中需掺入 40% 附加质量的钢砂模拟竖向地震动对于结构的竖向惯性作用。结构上覆土体不掺钢砂时的总质量约为 11 kg, 增大 40% 自重的上覆土体总质量为 15.4 kg, 分别使用黏土颗粒和钢砂的质量比为 2.76, 7.57 kg (其余质量为水溶液)。

根据课题组前期开展的离心机振动台试验的测试结果^[22-23], 发现上覆土体掺入钢砂后模型结构在地震作用下的水平层间位移会出现一定的放大效应, 这主要由于上覆土体中的附加质量增加了地下结构顶底面与土体之间的法向接触力, 这将放大土-结构接触面上的剪力。因此在 LSSI-2 试验中提出在结构的顶、底部黏贴聚四氟乙烯润滑膜的方式减小土-结构界面上剪力, 进而降低地下结构的水平动力反应。

通过估算, 上覆土体对结构的压力作用为 $F_{M1} = 1.73 \times 10^7 \text{ N}$, 上覆土体掺入其土重的 40% 钢砂后对结构的压力作用为 $F_{M1} = 2.42 \times 10^7 \text{ N}$; 设置 μ_1 为上覆饱和黏土与结构顶面的摩擦系数, $\beta\mu_1$ 为添加聚四氟乙烯薄膜后与结构顶面的摩擦系数。 λ 为结构顶面添加聚四氟乙烯薄膜的面积与总面积的比值, $(1-\lambda)$ 为未做处理面积比。结构顶面未做平滑处理的剪力为

$$f_1 = \mu_1 F_{M1} \quad (1)$$

经过平滑处理后结构顶面剪力为

$$f_2 = \beta\mu_1 F_{N2} \lambda + \mu_1 F_{N2} (1-\lambda) \quad (2)$$

假设两种情况下的剪力相等, 则得出土-结构接

触面平滑处理的面积比例为

$$\lambda = \frac{\mu_1 (F_{N2} - F_{N1})}{F_{N2} (1-\beta) \mu_1} \quad (3)$$

为确定土体与混凝土与聚四氟乙烯的摩擦系数的比例关系, 在试验前期开展了简单的摩擦系数测定试验, 最终得到土体与混凝土与聚四氟乙烯的摩擦系数分别为 0.6, 0.15, 计算可得 $\beta = 4$ 。本次摩擦实验较为简单, 所测得的摩擦系数与实际的土-结构动力反应过程中摩擦系数存在一定的差别, 该试验的重点为确定土体与两种介质摩擦系数的比例关系。在学者前期大量的关于土体-结构地震反应的数值模拟研究中, 土-结构间的动力摩擦系数均采用 0.4, 因此, 在本次试验方案设计中 μ_1 (土与结构的摩擦系数) 取为 0.4, 计算可得 $\lambda = 0.4$ 。LSSI-2 试验中结构顶底部润滑膜的粘贴情况如图 13 所示。

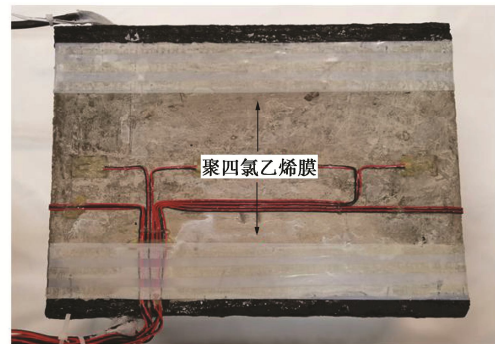


图13 土-结构顶底接触面平滑处理

Fig. 13 Smoothing treatment of soil-structure contact surface in top and bottom slabs of model structure

3 试验效果初步分析

本系列试验最终获得了丰富的数据, 为分析液化夹层场地地铁车站结构地震破坏反应与灾变机理提供了有力保证。但是, 本文的研究重点主要集中在试验方案设计方面, 同时限于篇幅的限制, 本节试验数据分析部分主要对个别孔压、结构层间位移和结构应变数据进行展示。

3.1 砂土层的孔压比

图 14 为 LSSI-1 试验中砂土夹层部分测点在 EQ-6 工况下 (0.52g) 的孔压比数据。由于孔压消散时间较长, 因此仅对 0~100 s 的数据进行展示。由图可见, 场地测点的孔压比随着深度的增大而逐渐减小, 说明上层砂土的液化程度高于下层; 液化程度较低的 WP-6 测点的孔压比达到了 0.7, 表明整个砂土夹层在该工况下基本达到了液化状态, 说明本试验液化夹层的设计达到了良好的试验效果。

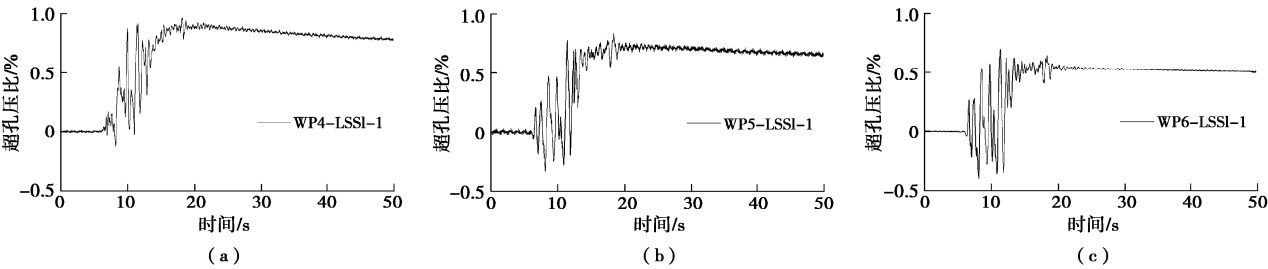


图 14 砂土夹层孔压比

Fig. 14 Pore pressure ratios in sand interlayer

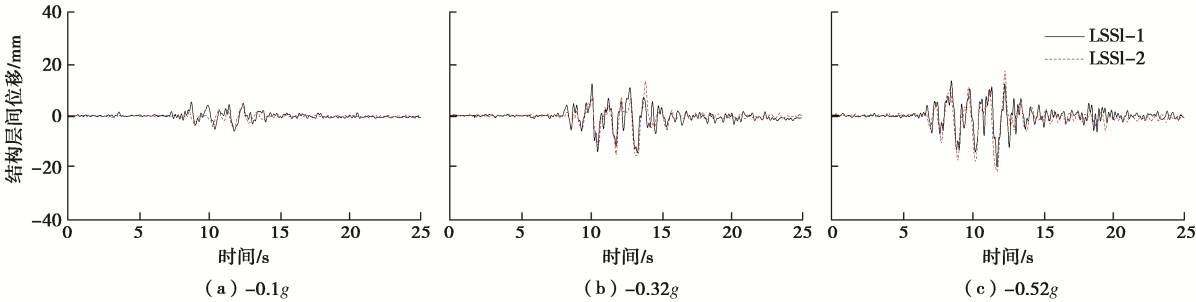


图 15 模型结构层间位移

Fig. 15 Displacements of interlayer of model structure

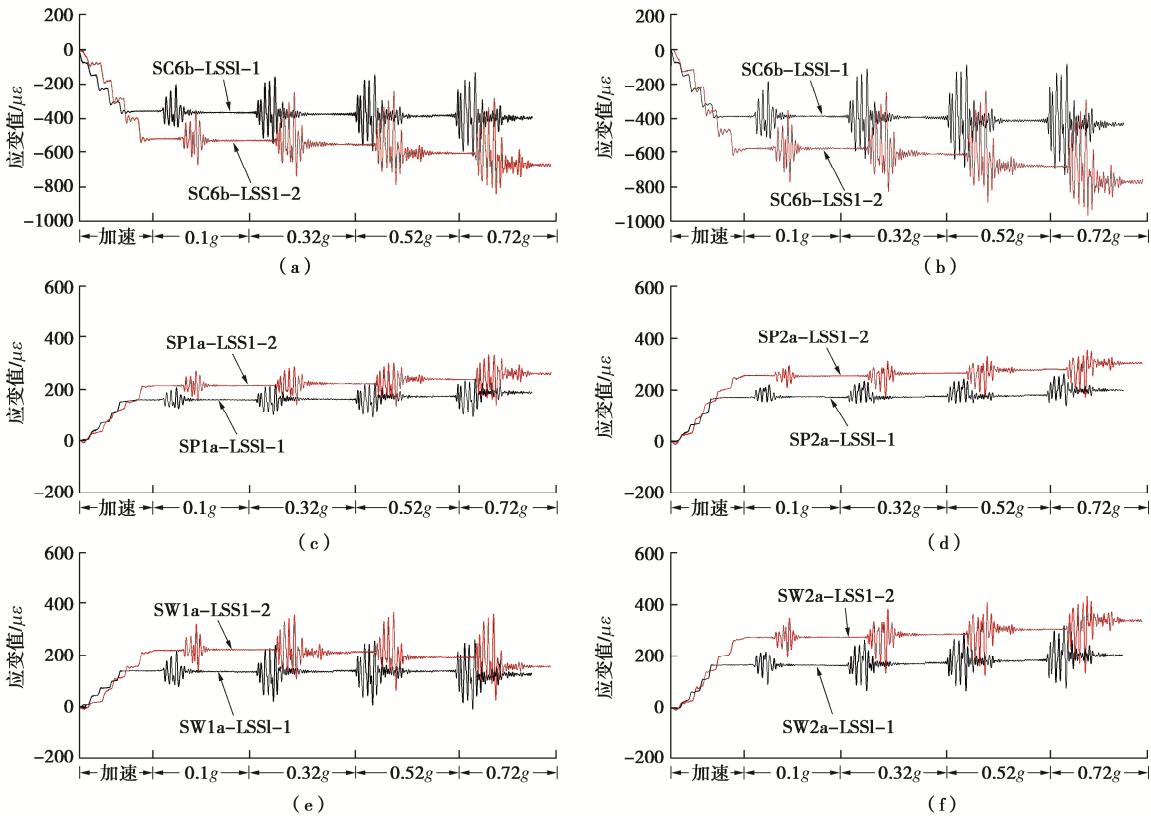


图 16 结构应变对比

Fig. 16 Comparison of structural strains of LSSI-1 and LSSI-2

3.2 结构层间位移

图 15 为 3 个地震工况下两组模型结构的层间位移数据，由图可见两个模型结构的层间位移呈现出较为一致的变化规律，均随着输入地震动峰值的增加而增

大；同时表明，本试验中采用激光位移计与靶标结合使用直接地测试地下模型结构在地震作用下的层间位移的方法获得了较为理想的试验效果，这可为今后类似试验中地下结构地震层间位移的监测提供参考。

3.3 结构应变对比

图 16 为部分典型测点的应变数据, 由图可见两组试验中顶板和侧墙均未产生较大的残余应变, 说明其损伤相对较轻; 而中柱测点均出现了一定的残余应变, 尤其对于考虑竖向地震动的 LSSI-2 模型则更为明显; 这说明中柱是地铁车站结构的薄弱环节, 在地震作用下容易最先出现损伤甚至破坏。根据中柱的应变水平可以间接得出 LSSI-2 结构中柱所受的轴压作用明显大于 LSSI-1 结构, 结合中柱的损伤情况可知中柱在高轴压作用下更易产生损伤甚至破坏, 由此建议在地铁车站结构抗震设计中应充分考虑竖向地震动作用。

4 结 语

介绍了液化夹层场地地铁车站结构地震破坏反应离心机振动台试验方案设计方法, 文中针对液化夹层场地的制备(黏土固结、砂土饱和与夹层场地的制备)、结构防水、离心过程中砂土层初始孔压的释放和结构层间位移测试等难点问题进行了详细的介绍。系列试验最终获得了较为理想的试验效果, 达到了研究液化夹层场地地铁车站结构地震破坏反应的试验目的, 本文将为今后类似试验的设计提供参考。

参考文献:

- [1] WOOD J H. Earthquake design of rectangular underground structures[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2007, **40**(1): 1 - 6.
- [2] NISHIOKA T, UNJOH S. A simplified evaluation method for the seismic performance of underground common utility boxes[J]. Proceedings of the 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering, 2003(55): 1 - 8.
- [3] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. Soils and Foundations, 1996, **36**: 283 - 300.
- [4] 中村晋. 地震被害程度の差異に着目した地下鉄の被害要因分析[J]. 土木学会論文集 I 巻, 2000, 654(I-52): 335 - 354. (NAKAMURA Susumu. Analysis of damage factors of subway based on difference of earthquake damage[J]. Proceedings of the Society of Civil Engineering. 2000, 654(I-52): 335 - 354. (in Japanese))
- [5] KONGAI K, KAMIYA H, NISHIYAMA S. Deformation buildup in soils during the Kobe earthquake of 1995[J]. Seism. Fault-induced Failures, 2001(1): 81 - 90.
- [6] 王胜平, 阎高翔. 南京地铁一号线许府巷—南京站盾构区间地震液化分析[J]. 现代隧道技术, 2001, **38**(2): 19 - 23. (WANG Sheng-ping, YAN Gao-xiang. Analysis on earthquake-caused ground liquefying in shield-driven tunnel section from Xufuxiang Station to Nanjing Station, Nanjing metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, **38**(2): 19 - 23. (in Chinese))
- [7] 唐军平, 李建强, 孙双祥, 等. 佛山市城市轨道交通二号线南庄站砂土液化分析及处理措施[J]. 路基工程, 2017(1): 189 - 193, 212. (TANG Jun-ping, LI Jian-qiang, SUN Shuang-xiang, et al. Analysis of sand liquefaction at Nanzhuang Station of Foshan urban rail transit line 2 and treatment measure[J]. Subgrade Engineering, 2017(1): 189 - 193, 212. (in Chinese))
- [8] 蒋清国. 液化地层下地铁工程抗地震液化措施研究[J]. 震灾防御技术, 2015, **10**(1): 95 - 107. (JIANG Qing-guo. Anti-liquefaction measures for subway engineering in liquefiable soil layers[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, **10**(1): 95 - 107. (in Chinese))
- [9] 左 熹, 陈国兴, 王志华, 等. 近远场地震动作用下地铁车站结构地基液化效应的振动台试验[J]. 岩土力学, 2010, **31**(12): 3733 - 3740. (ZUO Xi, CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, et al. Shaking table test on ground liquefaction effect of soil-metro station structure under near-and-far field ground motions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(12): 3733 - 3740. (in Chinese))
- [10] 凌道盛, 郭 恒, 蔡武军, 等. 地铁车站地震破坏离心机振动台模型试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, **46**(12): 2201-2209. (LING Dao-sheng, GUO Heng, CAI Wu-jun, et al. Research on seismic damage of metro station with centrifuge shaking table model test[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, **46**(12): 2201 - 2209. (in Chinese))
- [11] CHIAN S C, MADABHUSHI S P G. Effect of buried depth and diameter on uplift of underground structures in liquefied soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, **41**: 181 - 190.
- [12] CHEN G X, CHEN S, QI C Z, et al. Shaking table tests on a three-arch type subway station structure in a liquefiable soil[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, **13**(6): 1675 - 1701.
- [13] 安军海, 陶连金, 王焕杰, 等. 可液化场地下盾构扩挖地铁车站结构地震破坏机制振动台试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(8): 2018 - 2030. (AN Jun-hai, TAO Lian-jin, WANG Huan-jie, et al. Shaking table experiments on seismic response of a shield-enlarge-dig type subway station structure in liquefiable ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering, 2017, **36**(8): 2018 – 2030. (in Chinese))
- [14] LEE C J, WEI Y, CHUANG W Y, et al. Uplift mechanism of rectangular tunnel in liquefied soils[M]. Tokyo: Springer, 2017.
- [15] ZHUANG H Y, CHEN G X, HU Z H, et al. Influence of soil liquefaction on the seismic response of a subway station in model tests[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, **75**(3): 1169 – 1182.
- [16] 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.
- [17] CHEN S, TANG B Z, 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**: 103145.
- [18] 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. (in Chinese))
- [19] 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 Daikai subway station under seismic loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(1): 53 – 62, 69. (in Chinese))
- [20] 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 Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(2): 223 – 236. (in Chinese))
- [21] MA C, LU D C, DU X L, et al. Structural components functionalities and failure mechanism of rectangular underground structures during earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **119**: 265 – 280.
- [22] XU C S, ZHANG Z H, LI Y, et al. Validation of a numerical model based on dynamic centrifuge tests and studies on the earthquake damage mechanism of underground frame structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **104**: 103538.
- [23] XU C S, ZHANG Z H, LI Y, et al. Seismic response and failure mechanism of underground frame structures based on dynamic centrifuge tests[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, **50**(7): 2031 – 2048.
- [24] XU Z G, DU X L, XU C S, et al. Simplified equivalent static methods for seismic analysis of shallow buried rectangular underground structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **121**: 1 – 11.
- [25] 许成顺, 李 洋, 杜修力, 等. 上覆土竖向惯性力对浅埋地下框架结构地震损伤反应影响离心机振动台模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, **52**(3): 100 – 110, 119. (XU Cheng-shun, LI Yang, DU Xiu-li, et al. Dynamic centrifuge tests for influence of vertical inertia force of overburden soil on earthquake damage response of shallow-buried underground frame structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, **52**(3): 100 – 110, 119. (in Chinese))