

文章编号:1673-9469(2026)04-0012-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.04.002

深层液化土层中车站结构地震响应的振动台试验

史明^{1,2}, 张治华³, 杨振欣⁴, 许有俊², 陶连金⁵

(1. 内蒙古科技大学 矿业工程博士后科研流动站, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 3. 内蒙古兴和县住房和城乡建设局, 内蒙古 兴和 013650; 4. 北京市特种设备检验检测研究院, 北京 100029; 5. 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)

摘要: 为了探究深层液化土层的液化特点, 以名山波、北京饭店波和北京人工波3种地震波为动力荷载, 开展振动台试验, 通过对比自由场工况和结构工况, 分析深层液化土层的液化特点。对土层而言, 土层表面无“喷水冒砂”现象, 但结构附近土层出现了开裂; 自由场工况的孔压比远小于结构工况; 北京饭店波引起的孔压比较大, 北京人工波次之, 名山波最小。对结构而言, 北京饭店波引起的结构加速度与结构拉应变增量最大, 北京人工波次之, 名山波最小。深层液化土层的液化行为主要受上覆荷载和地震波频率特性的影响, 上覆荷载越大, 深层液化土层的液化程度越小; 地震波主频越高, 深层液化土层的液化程度越小。车站结构的地震响应与地震波主频高低关系密切。

关键词: 深层液化土层; 振动台试验; 孔压比; 车站结构; 地震响应

中图分类号: TU94⁺1

文献标识码: A

Shaking Table Tests on the Seismic Response of Station Structures in Deep Liquefied Soils

SHI Ming^{1,2}, ZHANG Zhihua³, YANG Zhenxin⁴, XU Youjun², TAO Lianjin⁵

(1. Mining Engineering Postdoctoral Research Station, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 3. Xinghe County Housing and Urban-Rural Development Bureau, Inner Mongolia Autonomous Region, Xinghe, Inner Mongolia 013650, China; 4. Beijing Special Equipment Inspection and Testing Research Institute, Beijing 100029, China; 5. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To investigate liquefaction behavior in deep liquefied soil layers, this paper performed shaking table tests using three seismic waves, i. e., the Ming Shan wave, Beijing Hotel wave and Beijing artificial wave, as the dynamic loads. By comparing free-field and structural conditions, the liquefaction characteristics of deep liquefied soil layers were analyzed. For the soil layer, no water spraying and sand bubbling occurred on the surface, but cracking developed near the structure. The pore-pressure ratio in the free-field condition was much smaller than that in the structural condition. The pore-pressure ratio induced by the Beijing Hotel wave was the largest, followed by that induced by the Beijing artificial wave and then the Ming Shan wave. For the structure, the Beijing Hotel wave produced the largest structural acceleration and the greatest increase in tensile strain, followed by the Beijing artificial wave and then the Ming Shan wave. These results indicate that liquefaction of deep liquefied soil layers is mainly controlled by overburden stress and the frequency content of the seismic wave; larger overburden load and higher dominant seismic frequency both reduce the degree of liquefaction. The seismic response of the station structure correlates closely with the dominant seismic frequency.

收稿日期:2025-05-07 修回日期:2025-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42072308);内蒙古自然科学基金资助项目(2025MS05123)

第一作者:史明(1989—),男,内蒙古乌兰察布人,博士,讲师,从事地下结构抗震的相关研究。

Key words: deep liquefied soil layers; shaking table tests; pore-pressure ratio; station structure; seismic response

随着我国城市化的加速发展,城市交通系统已成为现代社会运行的关键支柱之一。地铁作为公共交通体系的重要组成部分,因其高效、准时和环保等优势,在解决城市交通拥堵、减少环境污染以及优化城市功能布局方面发挥着至关重要的作用。在地铁修建的过程中,不可避免地会遇到液化地层,因此,研究土层液化特性及其对地铁结构的影响尤为重要。

近年来,学者研究发现液化地层中的地铁车站在地震中表现出上浮规律^[1-4]。砂土密实度、液化土层深度、结构埋深^[5-7]和位置^[8-10]是影响结构上浮的主要因素。同时,地震特性^[11-12]对土层的液化行为有重要影响。Wang等^[13]指出,车站结构的中柱端部最易受损;Zhuang等^[14]采用松耦合非线性应力法有效捕捉了地基土的液化特性。部分学者开展了液化地层中异形断面的地震响应研究,发现盾构扩挖地铁车站的盾构开口处易发生破坏^[15];上下不等跨的双层地铁车站振动台试验表明,下层中柱底端最易受到损坏^[16-19],不规则地下结构会改变孔压发展模式^[20]。此外,学者还研究了液化场地及周围建筑结构对车站结构地震响应的影响^[21-22]。

现阶段土体液化研究多集中于地下20 m以内地层,埋深超20 m的深层土体液化机理仍有待深入探究。虽然有学者进行了探索,如Sharma等^[23]借助有限元方法分析了30 m深土层液化规律,阐明排水条件对深层土体液化特性的作用机制;王薇等^[24]通过动三轴试验证实,20 m以下饱和砂土仍存在不同程度液化风险。然而,单一数值模拟或室内试验均难以完整表征深层土体液化演化特征。为此,本文采用大型振动台试验系统探究深层土层液化特性,基于孔隙水压力比、土体加速度、

结构加速度及结构板拉应变等监测数据,揭示了深层地层液化诱发机制。研究结论可为深埋液化地层中车站结构的工程设计提供理论依据与技术参考。

1 振动台试验设计

1.1 振动台与模型箱

本次试验在北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室的振动台上开展,见图1(a)。振动台尺寸为3 m×3 m,自重6 t,承载力10 t,振动台的位移范围为±127 mm,加速度范围为±1g,频率范围为0.5~50.0 Hz,水平振动方向为X方向。试验所用模型箱为层状剪切箱,尺寸为2.5 m×1.2 m×1.2 m,由14层框架组成,见图1(b)。

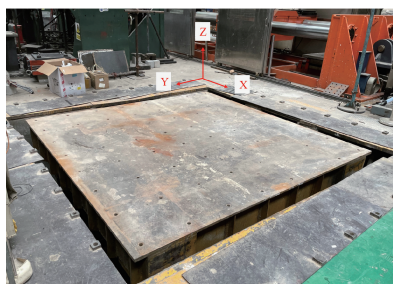
1.2 模型相似关系

考虑到模型尺寸及传感器布置的便利性,根据 Buckingham π 定理,本文选取长度、弹性模量、加速度为模型结构相似关系设计的基本物理量,相似关系见表1。

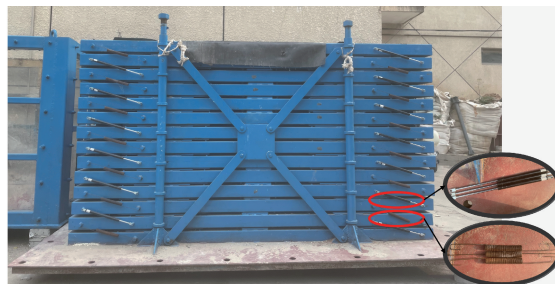
表1 模型相似关系

Tab. 1 Model scale relationships

物理量	相似公式	相似关系
长度 l	S_l	0.025
惯性矩 I	$S_I = S_l^4$	3.900×10^{-7}
密度 ρ	S_ρ	1.000
弹性模量 E	S_E	0.250
力 F	$S_F = S_\rho S_l^3 S_a$	1.600×10^{-5}
加速度 a	S_a	1.000
时间 t	$S_t = (S_l/S_a)^{0.5}$	0.158
动力响应应力 σ	$S_\sigma = S_l S_a S_\rho$	0.025



(a) 振动台



(b) 层状剪切箱

图1 振动台与模型箱

Fig. 1 Shaking table and layered shear box

1.3 模型土制备

振动台试验所用砂土取自北京市通州区某地下工程现场的粉细砂。试验采用水沉法制备模型土,步骤如下:(1)将粉细砂进行晾晒和筛分;(2)在模型箱内壁粘贴软尺,便于控制土量;(3)将加速度传感器、孔隙水压力传感器用鱼线悬挂到设计位置;(4)先注水后填砂,保持水面高于砂土面,确保砂土处于饱和状态;(5)砂土达到预定高度(结构底板位置)时停止注水,将结构吊装就位后,继续分层装入粉细砂直至预定高度;(6)将砂土表面抹平,并在重力条件下固结 24 h,覆盖塑料布防止水分流失,使孔隙水在重力及毛细作用下重分布,形成稳定的初始孔隙水压力场,确保土体力学状态均匀。

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[25]开展土工试验,测得饱和密度为 2.0 g/cm^3 ,相对密度为 0.51,土粒比重为 2.65,内摩擦角为 33° ,最大、最小干密度分别为 1.86 、 1.44 g/cm^3 ,最大、最小孔隙比分别为 0.85、0.42。

对振动台试验所用的砂土进行筛分试验,得到的粒径级配结果如图 2 所示。经测试,砂土不均匀系数 C_u 为 2.615,曲率系数 C_c 为 1.303,可知试验采用的模型土为级配不良土。

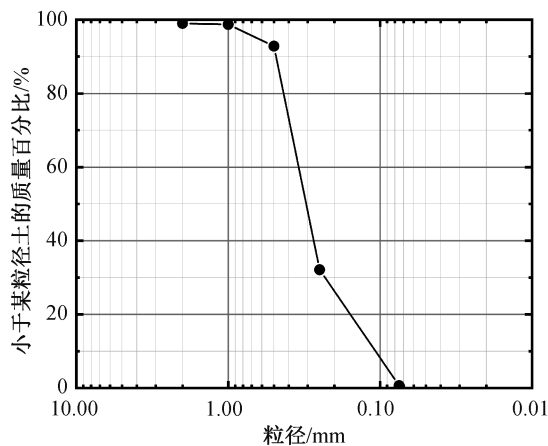


图 2 颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle gradation curve

1.4 模型结构的制作

本研究采用微粒混凝土模拟车站结构的混凝土,用粒径 $2.5 \sim 5.0 \text{ mm}$ 的粗砂代替混凝土中的粗骨料,粒径 $0.15 \sim 1.00 \text{ mm}$ 的细砂代替混凝土中的细骨料。采用镀锌钢丝模拟地下结构中的钢筋,主筋直径为 1.4 mm ,箍筋直径为 0.8 mm ,分布钢筋为 $\phi 0.8@20$ 。由于车站结构复杂且断面不规则,本研究采用自下而上分批浇筑的方式,通过支模、绑扎钢筋、浇筑微粒混凝土和试件养护等步骤制作模型结构,制作过程如图 3 所示。浇筑模型的同时预留 6 组 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 微粒混凝土试块。经测试,试块抗压强度的平均值为 7 MPa 。

1.5 动力加载方案

我国地铁结构遭遇的地震灾害案例很少,本试验通过施加实际地震记录和合成地震波,模拟地震作用,评价地下结构的抗震性能。

从我国地震记录看,汶川地震中大量隧道结构受损;唐山地震虽然发生较早,但距北京较近,当时北京房屋出现了不同程度的损伤。北京市虽没有发生过大地震,但地下结构设计必须经过抗震评估。不同特性的地震波会引起地下结构不同的地震响应。本试验选择的地震波为名山波、北京饭店波和北京人工波。名山波是 2008 年汶川地震中记录的,震中距 103 km ,原始峰值加速度为 $0.16g$,持时 100 s ,主频 15.9 Hz ;北京饭店波是 1978 年唐山地震中记录的,震中距 157 km ,原始峰值加速度为 $0.39g$,持时 50 s ,主频 0.7 Hz ;人工波是根据场地类别及地层特性模拟自然地震波产生的,本研究采用的北京人工波来源于通州区某工程的安评报告,其峰值加速度为 $0.26g$,持时 40 s ,主频 5.2 Hz 。地震波加速度时程以及傅里叶谱如图 4 所示。

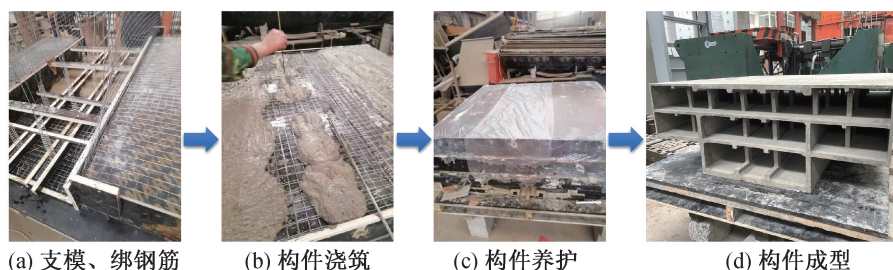


图 3 模型结构制作

Fig. 3 Model structure construction process

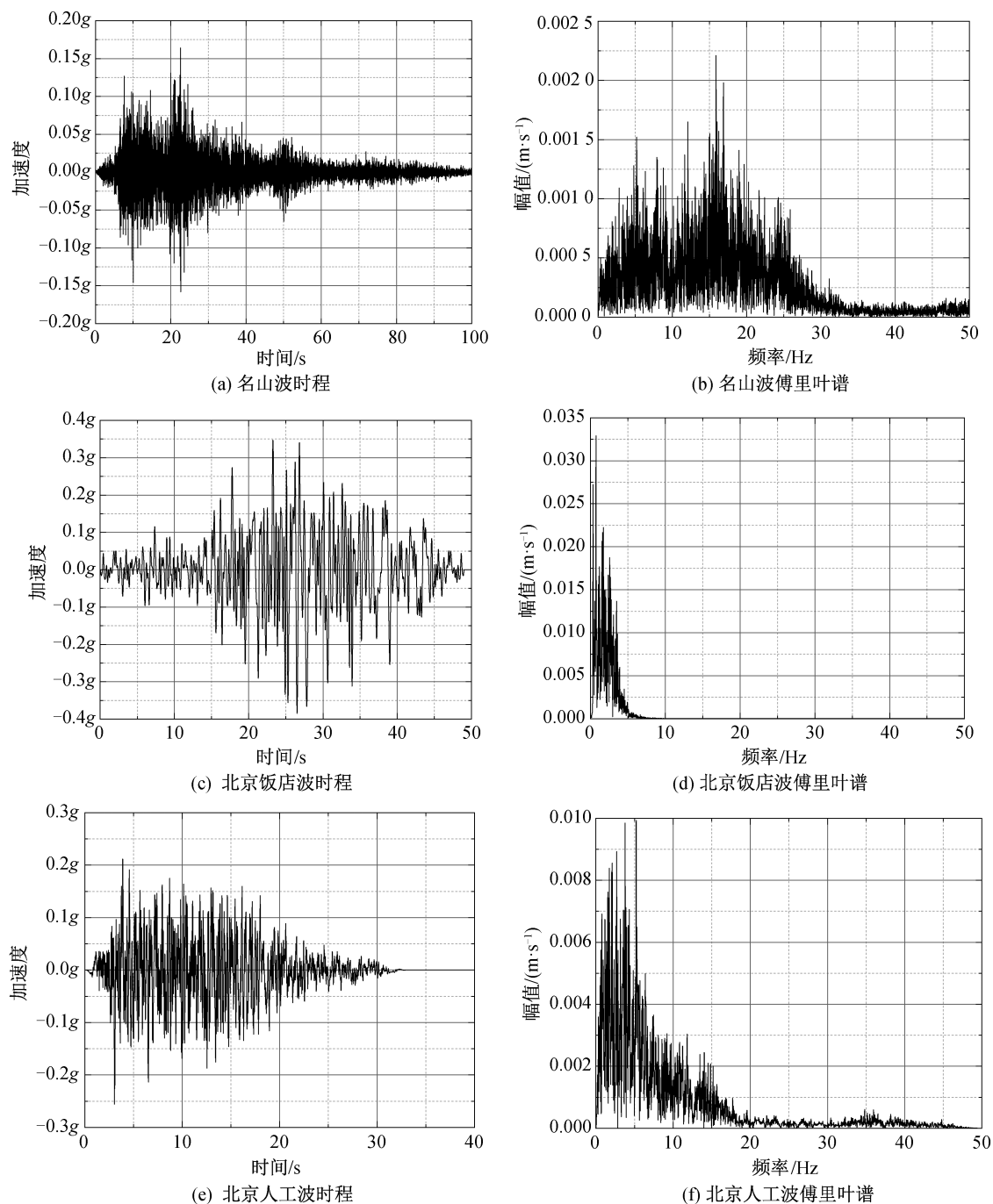


图4 地震波时程曲线及傅里叶谱

Fig. 4 Seismic wave time-history curve and Fourier spectrum

根据《地下结构抗震设计标准》(GB/T 51336—2018)^[26],地震动峰值加速度 $0.5g$ 包含大部分的基本地震、设防地震和罕遇地震,且可保证试验设备及人员安全。逐级加载可以模拟从低烈度到高烈度地震的全过程,帮助研究者全面了解结构在不同地震强度下的动态响应、变形行为和损伤演化。本试验针对自由场工况和结构工况,分别采用逐级加载方式施加地震波,峰值加速度介于 $0.1g \sim 0.5g$,每级增加 $0.1g$ 。地震波加载方案见

表2。表中,编号中的 Z、J 分别代表自由场工况和结构工况,B、MS、FD、RG 分别代表白噪声、名山波、北京饭店波和北京人工波,1、2、3、4、5 代表试验组。

1.6 测量设备布置

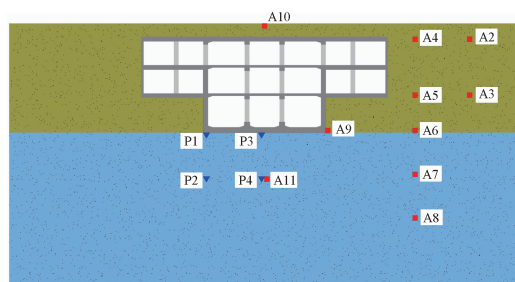
模型试验时需要监测模型土和车站结构的地震响应。在模型土中布置防水加速度传感器(以 A1、A2 等编号)、孔隙水压力传感器(以 P1、P2 等编号)获得土体的加速度响应和孔隙水压力;在车

表 2 地震波加载工况设置

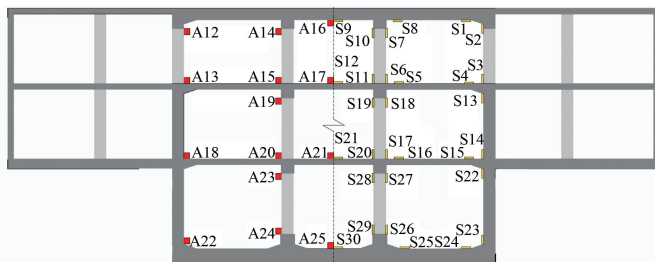
Tab. 2 Seismic wave loading condition settings			
输入地震波	自由场工况	结构工况	峰值加速度
白噪声	Z-B-1	J-B-1	0.1g
名山波	Z-MS-1	J-MS-1	0.1g
北京饭店波	Z-FD-1	J-FD-1	0.1g
北京人工波	Z-RG-1	J-RG-1	0.1g
白噪声	Z-B-2	J-B-2	0.1g
名山波	Z-MS-2	J-MS-2	0.2g
北京饭店波	Z-FD-2	J-FD-2	0.2g
北京人工波	Z-RG-2	J-RG-2	0.2g
白噪声	Z-B-3	J-B-3	0.1g
名山波	Z-MS-3	J-MS-3	0.3g
北京饭店波	Z-FD-3	J-FD-3	0.3g
北京人工波	Z-RG-3	J-RG-3	0.3g
白噪声	Z-B-4	J-B-4	0.1g
名山波	Z-MS-4	J-MS-4	0.4g
北京饭店波	Z-FD-4	J-FD-4	0.4g
北京人工波	Z-RG-4	J-RG-4	0.4g
白噪声	Z-B-5	J-B-5	0.1g
名山波	Z-MS-5	J-MS-5	0.5g
北京饭店波	Z-FD-5	J-FD-5	0.5g
北京人工波	Z-RG-5	J-RG-5	0.5g

站结构中布置加速度传感器、应变片(以 S1、S2 等编号)获得加速度响应和应变,在结构外侧布置土压力传感器(以 T1、T2 等编号)得到土体与结构的相互作用。

自由场工况传感器的布置情况如图 5 所示,图中虚线仅表示结构所处的位置。测点 A2、A4 和 A11 位于模型土表面下方 60 mm 处,其中 A11 位于模型中心,A2 与 A4 靠近模型边界;测点 A6、A9 和 A14 位于模型土表面下方 500 mm 处,其中 A14 位于模型中心,A6 与 A9 靠近边界;A5 位于 A4 正下方 277 mm 处,A7、A8 分别位于 A6 正下方 200、400 mm 处;P1、P3 分别位于车站底板左侧墙和车站底板中部下方,P2、P4 分别位于 P1、P3 正下方 200 mm 处。结构工况传感器布置如图 6 所示。



(a) 土体传感器



(b) 结构传感器

图 6 结构工况的传感器布置

Fig. 6 Sensor arrangement for structural conditions

A11、A14 的位置被车站结构占据,A16、A17 分别位于站厅层顶板、底板,A21、A25 分别位于站台层顶板、底板,A14、A15 分别位于站厅层中柱顶、底端,A19、A20 分别位于设备层中柱顶、底端,A23、A24 分别位于站台层中柱顶、底端。

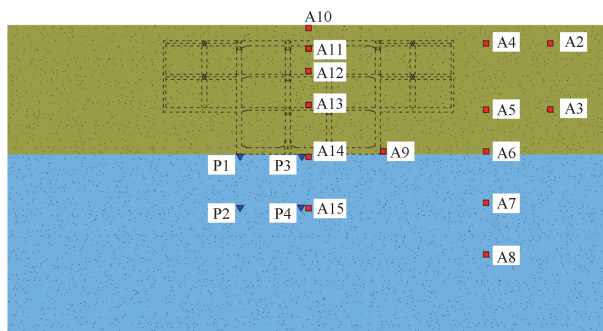


图 5 自由场工况传感器布置

Fig. 5 Sensor arrangement for free-field conditions

2 试验结果分析

2.1 模型箱的边界效应

参考陈国兴等^[27]提出的边界效应指数,本文以自由场工况为基础,评价模型箱地震波全过程的边界效应。边界效应指数 μ 反映了地震波震动过程中,模型边界和中心加速度响应的差异,计算公式见式(1)。 μ 越小,模型边界与中心测点的加速度响应越一致,模型箱边界对试验结果的影响越小。本文引入加速度标准差 S_{xy} 表征两组数据之间的离散程度,见式(2)。

$$\mu = \frac{S_{xy}}{EPA} \quad (1)$$

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

式中:EPA 为中心测点的峰值加速度; x_i 为基准信号; y_i 为对比信号; n 为采样个数; i 为采样点, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

根据测点 A2、A4、A6 和 A9 处加速度的监测数据,计算得到边界效应指数,见表 3。不同地震波作用下,边界效应指数有所不同。名山波、北京饭店波、北京人工波作用下,模型边界效应指数的最大值分别为 3.70%、1.43% 和 2.32%,均低于 10%,说明层状剪切模型箱可有效抑制边界效应对测试结果的干扰。

对比发现,名山波作用下的边界效应指数较高,但对试验结果的影响仍较为有限;北京饭店波和北京人工波作用下的边界效应指数较低。总体来看,试验模型能够较好地减小边界效应的影响,确保数据的可靠性。这表明边界效应对试验结果的影响并不显著,模型设计和边界控制措施是有效的。

2.2 试验宏观现象

试验的宏观现象如图 7 所示。由于不饱和砂土的存在,模型土表面并不会出现“喷砂冒水”现象,但车站结构两侧模型土出现了 30 mm 深的沉陷,结构两侧土体表面出现 140 mm 宽的破裂带,同时出现了纵向的贯通裂缝,裂缝宽 15 mm、深

60 mm。结构上覆土体完全破坏,裂缝扩展到结构顶板。

2.3 孔压比

本节以输入 0.5g 北京饭店波为例,说明地震波作用下各工况深层土层的液化情况。自由场工况和结构工况各测点的孔压比时程对比结果如图 8 所示。结构工况的孔压比远大于自由场工况,且底板左侧墙下方测点 P1、底板中部下方测点 P2 的孔压比均大于其下方 200 mm 测点,说明车站底板下的土层发生了液化现象。与自由场工况相比,结构工况车站底板下方土层的液化程度较高,说明地下结构的存在使深层土层发生液化的概率更高。也就是说,与土体相比,地下结构产生的上覆荷载较小,造成结构工况中深层土层的液化程度较高,上覆荷载是深层土层液化的影响因素之一。

北京饭店波(主频 0.7 Hz)作用下深层土层的液化程度最高;北京人工波(主频 5.2 Hz)次之;名山波(主频 15.9 Hz)最低,对应的最大孔压比分别为 1.00、0.78 和 0.19。这表明以低频为主的地震波更易引起结构底板下方深层土层液化。

表 3 自由场工况下模型边界效应指数
Tab. 3 Boundary effect exponent for the model under free-field conditions

测点	与模型箱边界 距离/mm	MS-3/%	MS-4/%	MS-5/%	FD-3/%	FD-4/%	FD-5/%	RG-3/%	RG-4/%	RG-5/%
A4	490	2.61	3.63	3.70	1.38	1.30	1.43	2.23	2.32	2.27
A2	240	2.11	2.64	2.92	0.93	0.92	1.02	1.78	1.95	2.07
A9	890	1.03	1.24	1.41	1.13	1.08	1.13	1.41	1.43	1.40
A6	490	1.78	2.08	2.23	1.14	1.04	1.03	1.96	1.95	1.66

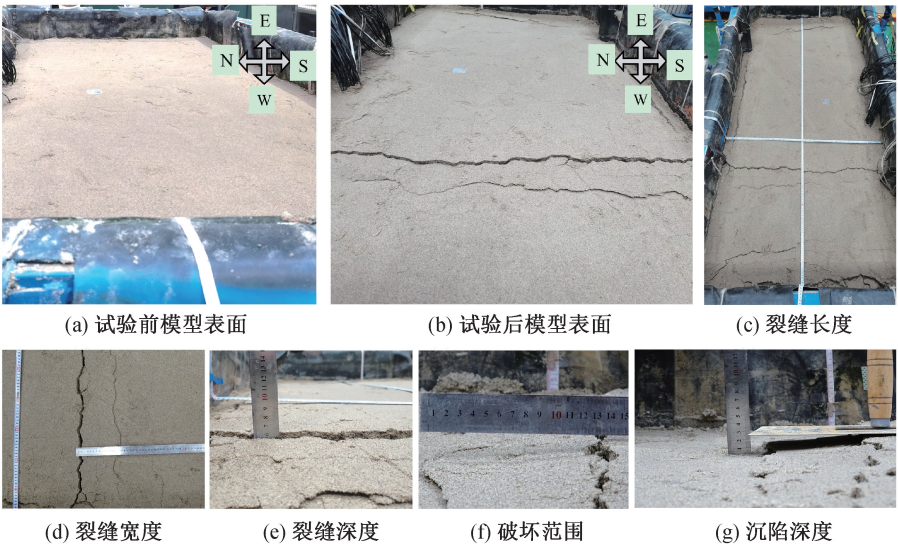


图 7 试验宏观现象
Fig. 7 Macroscopic observations in the experiment

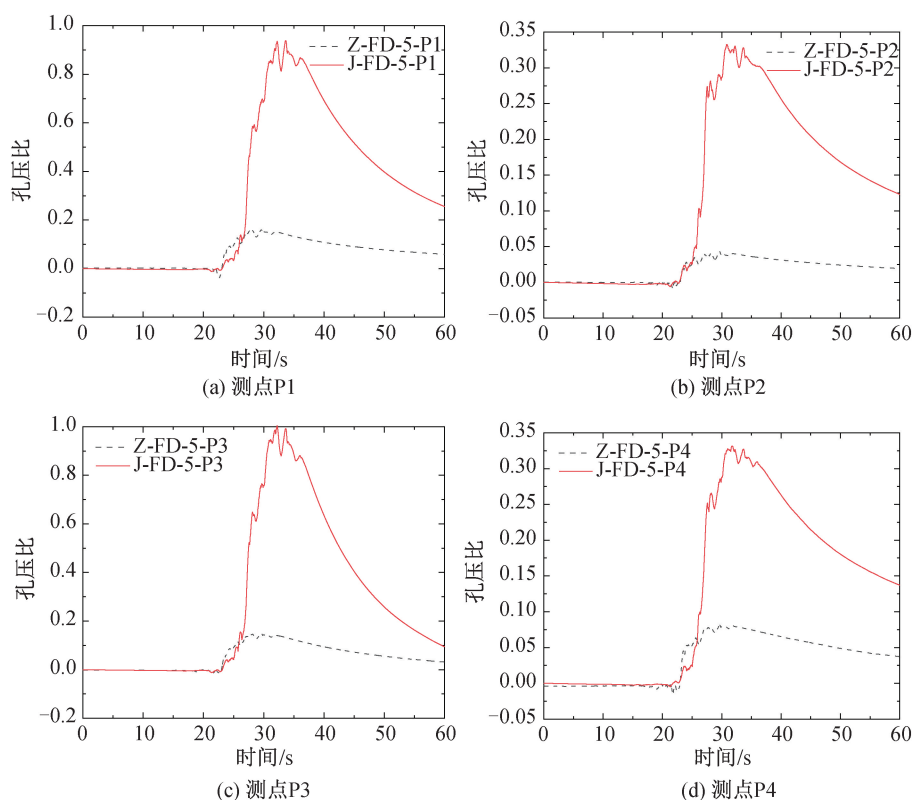


图 8 孔压比时程对比(北京饭店波)

Fig. 8 Comparison of pore-pressure ratio time histories (Beijing Hotel wave)

2.4 土体的加速度响应

土体的峰值加速度的竖向分布如图 9 所示。本节以地震波峰值加速度 $0.5g$ 为例进行分析。自由场工况下,北京饭店波对土层的峰值加速度影响最大,北京人工波次之,名山波最小;结构工况下,北京饭店波与北京人工波对结构两侧土层峰值加速度的影响大致相同,名山波影响较小;北京饭店波对结构下方土体峰值加速度的影响最大,名山波最小。土层峰值加速度随地震波主频的增大而减小,土体的地震响应受低频地震波的影响较大。

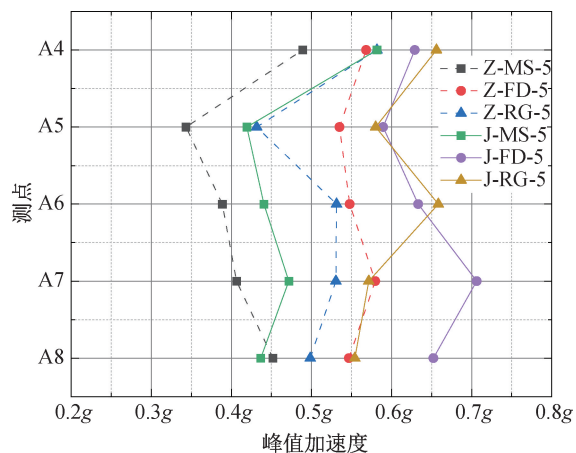


图 9 土体峰值加速度竖向分布

Fig. 9 Vertical distribution of peak acceleration in the soil

2.5 结构板的加速度响应

车站结构板的峰值加速度分布如图 10 所示。本节以地震波峰值加速度 $0.5g$ 为例进行分析。测点 A16 位于车站结构顶板,其峰值加速度在北京人工波作用下最大,北京饭店波次之,名山波最小;A17、A21、A25 分别位于站厅层中板、设备层中板和底板,峰值加速度在北京饭店波作用下最大,北京人工波次之,名山波最小。由此可知,车站结构顶板加速度响应为北京人工波最大,北京饭店波次之,名山波最小;站厅层中板、设备层中板及

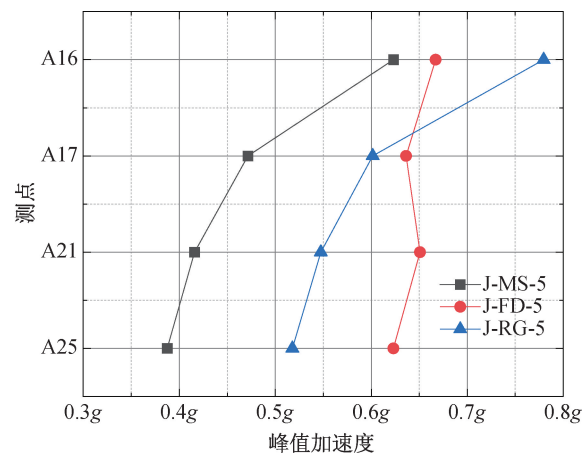


图 10 结构板的峰值加速度分布

Fig. 10 Distribution of peak acceleration on the slabs

表 4 车站结构中柱加速度响应
Tab. 4 Acceleration response of station middle columns

层位	位置	测点	J-MS-5	J-FD-5	J-RG-5
站厅层	顶板	A14	0.558g	0.632g	0.707g
站厅层	底板	A15	0.487g	0.623g	0.628g
设备层	顶板	A19	0.452g	0.628g	0.563g
设备层	底板	A20	0.414g	0.620g	0.560g
站台层	顶板	A23	1.909g	2.687g	2.375g
站台层	底板	A24	1.784g	2.683g	2.351g

底板的响应规律一致,均为北京饭店波最大,北京人工波次之,名山波最小。地震波主频越低,车站结构地震响应越大。

2.6 车站结构中柱加速度响应

车站结构中柱的加速度响应见表 4。站厅层中柱的峰值加速度在北京人工波作用下最大,北京饭店波次之,名山波最小;设备层中柱和站台层中柱的峰值加速度在北京饭店波作用下最大,北京人工波次之,名山波最小。3 种地震波作用下,柱顶加速度响应均为 A23>A14>A19,柱底均为 A24>A15>A20。由此可知,地铁车站结构站台层的中柱加速度最大,站厅层次之,设备层最小;柱顶加速度响应始终大于柱底;地震波主频越低,中柱加速度响应越大。

2.7 结构板的拉应变响应

车站结构板的拉应变响应见表 5。与名山波作用时相比,北京饭店波作用下顶板的拉应变增量增大了 96.6%,北京人工波作用下增大了 50.0%。与名山波作用时相比,北京饭店波作用下底板的拉应变增量增大了 67.7%,北京人工波作用下增大了 50.0%。这说明北京饭店波引起结构顶底板的拉应变增量最大,北京人工波次之,名山波最小。由此可知,地震波主频越低,结构顶底板的拉应变响应越大。

表 5 车站结构板的拉应变
Tab. 5 Tensile strain of station structure slabs

位置	测点	J-MS-5	J-FD-5	J-RG-5
顶板	S9	3.05×10 ⁻⁶	90.34×10 ⁻⁶	6.10×10 ⁻⁶
站厅层中板	S12	34.79×10 ⁻⁶	95.83×10 ⁻⁶	64.70×10 ⁻⁶
设备层中板	S21	20.14×10 ⁻⁶	14.04×10 ⁻⁶	14.65×10 ⁻⁶
底板	S30	19.53×10 ⁻⁶	60.43×10 ⁻⁶	39.06×10 ⁻⁶

3 结论

本文对深层土层液化情况下地铁车站的地震

响应规律开展振动台试验,得到的结论如下:

- 1) 深层液化土层的液化行为不会在地表引起“喷水冒砂”的现象,但会造成结构附近土体破坏。
- 2) 土层的上覆荷载、地震波的频率是导致深层液化土层发生液化行为的主要原因。
- 3) 地震波主频增加时,土体的加速度响应相应减小。
- 4) 地震波频率对车站结构地震响应的影响很大,地震波主频越低,车站结构的地震响应越大。

参考文献:

[1] 胡记磊,杨兵,沈文翔. 双向地震作用下可液化土中矩形地铁车站上浮响应规律[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2024,46(5):41-47.
Hu Jilei, Yang Bing, Shen Wenxiang. Uplift response law of rectangular subway station in liquefiable soil under bidirectional earthquake [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2024, 46(5): 41-47.

[2] Yu Haitao, Li Yanxi, Yuan Yong. Deformation behavior of rectangular underground structures in liquefiable deposits correlated to ground motion intensity measures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 144: 105551.

[3] 郑刚,杨鹏博,周海祚,等. 可液化地层中矩形隧道的上浮响应分析[J]. 土木工程学报,2019,52(S1):257-264.
Zheng Gang, Yang Pengbo, Zhou Haizuo, et al. The uplift response of rectangular tunnel in liquefiable soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 257-264.

[4] 王文章,廖晨聪,周香莲,等. 可液化土层中地下结构上浮及其控制措施[J]. 地震工程与工程振动,2019,39(3):159-167.
Wang Wenzhang, Liao Chencong, Zhou Xianglian, et al. The floating of underground structure in liquefiable soil layer and its control measures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(3): 159-167.

[5] Hu Jilei, Pang Luou. Identifying the optimal intensity

- measure and key factors of earthquake liquefaction-induced uplift of underground structures[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82:31.
- [6] 许民泽, 崔春义, 姚怡亦, 等. 埋深对可液化场地地铁车站地震响应的影响[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2020, 37(3):287-292.
- Xu Minze, Cui Chunyi, Yao Yiyi, et al. Influence of burial depth on the seismic response of subway station in liquefiable subgrade[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2020, 37(3):287-292.
- [7] 于伦超, 钟小春, 张露露. 局部液化地层范围及埋深对隧道地震上浮的影响研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2020, 37(4):57-62+77.
- Yu Lunchao, Zhong Xiaochun, Zhang Lulu. Study on the influence of the local liquefaction formation range and burial depth on the seismic floating displacement of tunnel[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2020, 37(4):57-62+77.
- [8] 安军海, 闫宏锦, 赵志杰, 等. 地铁车站结构上穿可液化土层地震响应分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(17):7080-7088.
- An Junhai, Yan Hongjin, Zhao Zhijie, et al. Seismic response analysis of liquefiable soil layer on subway station structure[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(17):7080-7088.
- [9] 刘春晓. 可液化土层分布对土-地铁地下结构地震响应影响的振动台试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2021, 42(5):30-40.
- Liu Chunxiao. Shaking table test on influence of liquefiable soil distribution on seismic response of soil and subway underground structures[J]. *China Railway Science*, 2021, 42(5):30-40.
- [10] 刘春晓, 陶连金, 边金, 等. 可液化土层对地下结构地震影响的振动台试验[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(7):1327-1338.
- Liu Chunxiao, Tao Lianjin, Bian Jin, et al. Shaking table test of seismic effect of liquefiable soil layer on underground structure[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(7):1327-1338.
- [11] Wang Rui, Zhu Tong, Yu Jiake, et al. Influence of vertical ground motion on the seismic response of underground structures and underground-aboveground structure systems in liquefiable ground[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 122:104351.
- [12] Cheng Xinjun, Xu Xiang, Hu Zhinan, et al. Seismic response of a liquefiable site-underground structure system[J]. *Buildings*, 2022, 12(10):1751.
- [13] Wang Xuelai, Xu Chengshun, Yan Guanyu, et al. A three-dimensional numerical simulation method for seismic nonlinear response of underground structure in liquefiable site and analysis of structural damage[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 165:105895.
- [14] Zhuang Haiyang, Zhao Dingfeng, Chen Guoxing, et al. Three-dimensional numerical investigation on seismic response of subway station in liquefied soil by the loosely coupled effective stress model[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2023, 27(13):3607-3631.
- [15] An Junhai, Tao Lianjin, Jiang Luzhen, et al. A shaking table-based experimental study of seismic response of shield-enlarge-dig type's underground subway station in liquefiable ground[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 147:106621.
- [16] Chen Su, Tang Baizan, Zhuang Haiyang, et al. Experimental investigation of the seismic response of shallow-buried subway station in liquefied soil[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 136:106153.
- [17] Wang Jianning, Yang Jing, Zhuang Haiyang, et al. Seismic responses of a large unequal-span underground subway station in liquefiable soil using shaking table test[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2022, 26(16):8446-8467.
- [18] 唐柏赞, 李小军, 陈苏, 等. 可液化地基-非规则截面地铁车站地震变形研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(11):217-225.
- Tang Baizan, Li Xiaojun, Chen Su, et al. Seismic deformation characteristics of liquefaction soil-irregular section underground structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11):217-225.
- [19] 王建宁, 付继赛, 庄海洋, 等. 可液化场地中复杂异跨地铁地下车站结构的地震反应分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(7):170-179.
- Wang Jianning, Fu Jisai, Zhuang Haiyang, et al. Seismic response analysis of complex subway station structure with unequal-span in liquefiable foundation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(7):170-179.
- [20] Tang Baizan, Yu Bingyan, Zhuang Haiyang, et al. Seismic behavior of irregular underground structures in saturated sand[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 179:108478.
- [21] Zhu Tong, Hu Jing, Zhang Zitao, et al. Centrifuge shaking table tests on precast underground structure-superstructure system in liquefiable ground[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(8):04021055.
- [22] 张梓鸿, 许成顺, 闫冠宇, 等. 液化夹层场地地铁车站结构离心机振动台试验方案设计[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(5):879-888.

- differential[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 283-293.
- [7] Mustafa S, Sekiya H, Hirano S. Evaluation of fatigue damage in steel girder bridges using displacement influence lines[J]. Structures, 2023, 53: 1160-1171.
- [8] 孙珂, 张延庆. 基于位移影响线曲率的小半径弯桥损伤识别[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(4): 727-734.
- Sun Ke, Zhang Yanqing. Damage identification of small-radius curved bridge based on curvature of displacement influence line[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(4): 727-734.
- [9] 李起航, 张延庆, 孙珂. 利用位移影响线对曲线桥进行损伤识别的影响因素研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 115-120.
- Li Qihang, Zhang Yanqing, Sun Ke. The analysis of influencing factors to the damage identification of curved bridge using the influence line of displacement[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(8): 115-120.
- [10] Zhou Yu, Li Meng, Shi Yingdi, et al. Research on damage identification of arch bridges based on deflection influence line analytical theory[J]. Buildings, 2024, 14(1): 6.
- [11] He Wenyu, Ren Weixin, Zhu Songye. Damage detection of beam structures using quasi-static moving load induced displacement response[J]. Engineering Structures, 2017, 145: 70-82.
- [12] Zheng Xu, Yang Donghui, Yi Tinghua, et al. Bridge influence line identification from structural dynamic responses induced by a high-speed vehicle[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(7): e2544.
- [13] Chen Zhiwei, Zhao Long, Zhou Yigui, et al. Extraction of quasi-static component from vehicle-induced dynamic response using improved variational mode decomposition[J]. Smart Structures and Systems, 2023, 31(2): 155-169.
- [14] Ge Liangfu, Koo K Y, Wang Miaomin, et al. Bridge damage detection using precise vision-based displacement influence lines and weigh-in-motion devices: experimental validation[J]. Engineering Structures, 2023, 288: 116185.
- [15] Martini A, Tronci E M, Feng M Q, et al. A computer vision-based method for bridge model updating using displacement influence lines[J]. Engineering Structures, 2022, 259: 114129.
- (责任编辑 张爱丽)
-
- (上接第20页)
- Zhang Zihong, Xu Chengshun, Yan Guanyu, et al. Experimental design for dynamic centrifuge tests on a subway station structure in liquefied interlayer site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 879-888.
- [23] Sharma P, Sawant V A, Sharma M L. Numerical modeling of liquefaction in deep saturated sands[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 6(2): 86.
- [24] 王薇, 李恒, 徐利军. 基于剪切波速的深层砂土地震液化研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(1): 93-97.
- Wang Wei, Li Heng, Xu Lijun. Study on earthquake liquefaction potential of sandy soil in deep layer based on shear wave velocity[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(1): 93-97.
- [25] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
- GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S].
- [26] GB/T 51336—2018 地下结构抗震设计标准[S].
- GB/T 51336—2018 Standard for seismic design of underground structures[S].
- [27] 陈国兴, 王志华, 左熹, 等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 89-97.
- Chen Guoxing, Wang Zhihua, Zuo Xi, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 89-97.
- (责任编辑 张爱丽)