

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220704005

可液化地基中隧道上浮的模型试验研究*

李文广

(中铁十八局集团第五工程有限公司,天津 300450)

摘要: 地下隧道在修建过程中不可避免会穿越可液化地层,在地震作用下会发生砂土液化从而导致结构破坏。以安徽省亳州市汤王大道过河隧道工程为背景,采用室内振动台试验进行缩尺模型的设计与研究,分析地基土体与隧道结构的振动液化响应规律,研究过河隧道工程在地震液化时的上浮变形机理。结果表明:上层土体达到液化时会较下层延迟1.5 s左右,表明上部土体抗剪强度的衰减比下部土体更加明显;土体深度越大,超静孔压上升越快,且峰值越高;振动开始时由于下层土体先液化,会导致一定的向下位移,之后由于浮应力大于有效承载力导致隧道逐渐上浮并趋于稳定,当振动结束后位移的上浮量为8.9 mm。

关键词: 地下隧道;砂土液化;振动台试验;上浮变形

中图分类号: TU91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0488-07

Model Experimental Study on Tunnel Uplift in Liquefiable Foundations

LI Wenguang

(China Railway 18th Bureau Group CO., LTD., Tianjin 300450, China)

Abstract: Construction of underground tunnels inevitably involves crossing liquefiable strata, which, under seismic activities, can lead to soil liquefaction and subsequent structural damage. Based on the Tangwang Avenue River-Crossing Tunnel project in Bozhou, Anhui Province, the study employed indoor shake table experiments to design and analyze a scale model. It analyzed the vibration-induced liquefaction response patterns of the ground soil and tunnel structure, while investigating the buoyancy-driven deformation mechanism of the river-crossing tunnel during seismic liquefaction. The results indicated that the upper soil layer reached liquefaction approximately 1.5 seconds later than the lower layer, showcasing a more pronounced reduction in shear strength in the upper soil. As the soil depth increased, the rise in excess pore pressure accelerated and its peak was higher. At the start of vibration, the initial liquefaction in the lower soil layer led to a certain downward displacement. Subsequently, as the buoyant force exceeded the effective bearing capacity, the tunnel gradually rose and stabilized. After the cessation of vibration, the tunnel uplift displacement was 8.9 mm.

Keywords: underground tunnels; sand liquefaction; shake table experiment; buoyancy-driven deformation

* 收稿日期:2022-07-04;修回日期:2022-09-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51879090)资助

作者简介:李文广(1976—),男,高级工程师,硕士。主要从事地下工程施工与管理及相关研究。

E-mail:568993692@qq.com

0 引言

世界范围内地震频频发生,给人类的生命和财产安全造成巨大损失,经多个现场调查统计表明:地震液化是造成震害的主要原因之一,地震引发的次生灾害约有50%是由地基液化造成的^[1]。对于埋置在土体中的地下结构,如地下管道、地下停车场、地下车站以及地下隧道等空腔结构,单位体积重量相对较轻,其上方土体因发生液化而抗剪强度显著减低,从而导致地下结构上浮^[2-4]。因此,分析地基土体与隧道结构的振动液化响应规律,探究过河隧道工程在地震液化时的上浮变形机理具有重要意义。

所谓砂土液化,就是饱和砂土体在振动作用下丧失强度和刚度而由固态转化为液态的一种现象^[5-7]。近年来,国内外各学者通过振动台试验对饱和砂土液化问题作了系列研究,J.Koseki等^[8]通过开展振动台试验,研究了砂土地基及地下结构在动荷载作用下的孔压变化、加速度响应以及结构的上浮位移等,并基于竖直方向极限平衡原理提出了评价结构上浮行为的安全系数。邹德高等^[9-10]利用大型振动台模型试验,测得了饱和砂土地基中的地震加速度反应、振动孔压的产生和消散过程,并据此初步探讨了地震时管线上浮机理,以及土工布加固、碎石排水等措施对抑制管线上浮的效果,后来还通过数值分析验证了U形碎石排水措施对液化土中地下管线上浮的减灾效果及机理^[11]。彭加强等^[12]针对盾构隧道穿越液化地基的上浮破坏风险进行小型振动台的试验研究,并分析相关机理。

目前对于地下结构液化上浮的研究比较多,但研究对象多是小型的地下管线或是某区间地铁车站等,而对跨度较长的隧道工程结构研究很少,且多集中于圆形隧道^[13],如盾构隧道^[12],很少涉及矩形断面结构隧道。本文基于振动台模型试验,根据安徽省亳州市汤王大道过河隧道工程,做出简化的缩尺模型,利用埋设传感器获取试验数据,分析地基土体与隧道结构的振动液化响应规律,以此来探究过河隧道工程在地震液化时的上浮变形机理。

1 工程背景与试验方法

1.1 工程背景

本文依托安徽省亳州市汤王大道过河隧道工

程,该隧道工程的起点位于汤王大道与和平路交叉口,终点位于在建古泉路,路线全长约1 345 m,隧道段长1 241 m,其中暗埋段长882 m,水下段长约500 m。隧道工程的工程地质断面如图1所示。隧道所穿地层多为富水砂层和软土,属抗震不利地段,液化风险高。根据《工程地质手册》^[14]结合地层揭露情况综合分析确定:K0+715~K0+820段第③层粉土可能液化;K0+175~K0+715段第④层细砂可能液化;第⑤层细砂层可能液化。

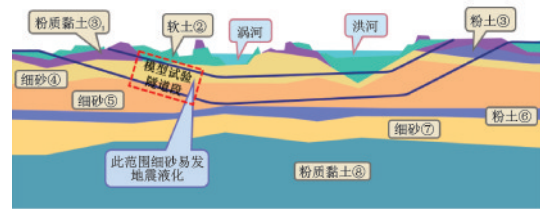


图1 隧道工程地质断面图

Fig.1 Geological cross-section of the tunnel

1.2 试验模型

振动台模型试验可以模拟实际地震情况^[15],同时具有较高的操作性和可重复性,因此在结构抗震与砂土液化相关研究中应用广泛。在进行模型相似设计时,为了尽可能还原现场工况,根据本文研究对象的重点和特征,选取相似比尺为1:140($n=140$),具体的振动台模型试验相似比设定见表1。

表1 振动台模型试验相似比

Table1 Test similarity ratio for shake table model

参数	模型	原型
几何尺寸	1/n	1
密度(表观)	1	1
频率	1/n ^{0.5}	1
加速度	1	1
动态孔隙水压力	1	1
电极深度	1/n	1
隧道模型弹模	1/30	1

振动台试验采用3D打印制作隧道断面模型,材质为树脂,树脂的弹性模量为1 GPa,泊松比为0.38;模型形状参照实际隧道断面轮廓,选取工程实际走向长度为10 m(参照隧道变形缝的设置,选取K0+570~K0+580段过河暗挖段)。制作的隧道模型断面尺寸长为20 cm,高约6 cm,走向长度为7.2 cm。树脂材料的密度为1.3 g/cm³,并且根据相

似比设计,需将其表观密度设计为 2.5 g/cm^3 ,与钢混结构密度相同,外观比例尺为 1:140,如图 2 所示。通过对模型内部配重而抵消掉一定的位移传感器所提供的拉力,以满足实验要求。

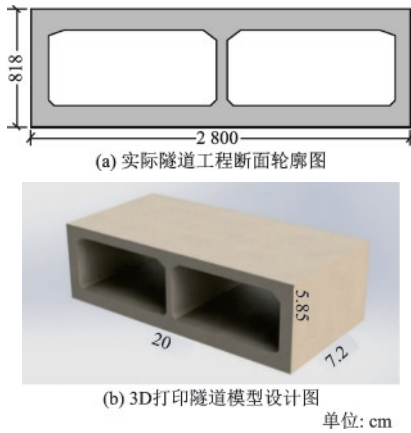


图 2 实际隧道工程断面轮廓与隧道模型设计对比

Fig.2 Comparison between actual tunnel engineering cross-section profile and tunnel model design

1.3 试验设备

试验采用小型振动台试验设备,该振动台型号为 DC-600-6,如图 3(a)所示。振动台台面采用苏州试验仪器总厂生产的液体静压式水平滑台,该滑台可以配合不同的振动控制仪,完成正弦、垂直、水平、随机和冲击等多种振动试验。振动台的频率范围为 $5 \sim 2000 \text{ Hz}$,台面尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,最大台面负荷为 200 kg ,额定正弦激振力为 5880 N ,最大输出加速度为 980 m/s^2 ,最大台面位移为 51 mm 。

为了消除边界效应,本试验设备选择叠层柔性模型剪切箱,如图 3(b)所示。该模型箱整体外观呈立方体,采用有机透明材料及部分铝合金钢材制作而成,箱体容积尺寸为 $500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$,每层框架高度为 50 mm ,共计 10 层框架。因各层框架之间不能完全紧贴,存在一定的滑动间隙,为防止砂土及水泄露,试验进行时要在箱体内部贴合三层黑色塑料袋。

试验采集系统使用东华测试的 DH5960 超动态采集系统,该采集设备共有 8 个传感器输入通道,具有数据采集、信号处理及图形设计等多项功能。其采样频率可进行多级调节,最低 1 kHz ,最高可达 20 MHz ,本试验采用 1 kHz 采样频率。

此外,试验中所用到的各类传感器型号与数量见表 2。其中为了保证加速度传感器读数的有效

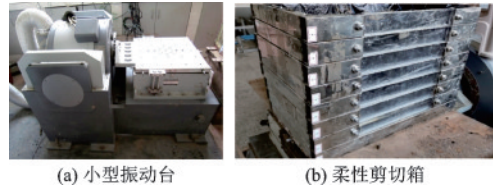


图 3 试验所采用的小型振动台及剪切箱

Fig.3 Small shake tables and shear boxes used in experiments

性,需尽量使其轴线方向平行于振动台激振方向,并且需要做一定的防水处理,因此特别定做了加速度防水固定盒。

表 2 传感器型号与数量

Table 2 Sensor types and quantities			
传感器类型	型号	数量	备注
振动台加速度计	Ymc-2106c	1	参考灵敏度: $2.60 \text{ pc}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
加速度传感器 (电压测量)	173A500	3	峰值: 10 g ;灵敏度: $50.45 \text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
孔隙水压力传感器(桥式)	CYG1146	4	量程: $0 \sim 15 \text{ kPa}$; 精度: 0.25
位移传感器 (桥式)	SW-50	1	拉线式

1.4 试验用砂

试验拟用砂样为从亳州市汤王大道过河隧道工程现场所取得的典型砂(4号和5号砂),也是该隧道工程穿越的主要砂层。

按照土工试验操作规范,利用标准筛筛分法与密度计颗分法进行了现场砂样的颗粒粒径分析试验。经筛分试验发现,4号砂样由于粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量占总砂样的 93.4% ,满足粒径大于 0.075 mm 的颗粒超过总土质量 85% 的要求,所以4号砂样属于级配不良的细砂。5号砂细粒含量高,小于 0.075 mm 孔径的砂样质量占比为 17.7% ,接近 20% 。4号砂和5号砂整体的级配曲线如图 4 所示。

根据颗分试验数据,将 4、5 号砂样的多个基本物理性质参数进行计算并整理,见表 3。此外,根据勘察报告可知,4号砂天然密度为 $1.89 \sim 1.96 \text{ g/cm}^3$,比重为 $2.65 \sim 2.66$,孔隙比为 $0.730 \sim 0.850$;5号砂天然密度为 $1.95 \sim 2.01 \text{ g/cm}^3$,比重为 $2.65 \sim 2.66$,孔隙比为 $0.650 \sim 0.730$ 。

根据砂样的级配曲线以及物理参数可以判断 5

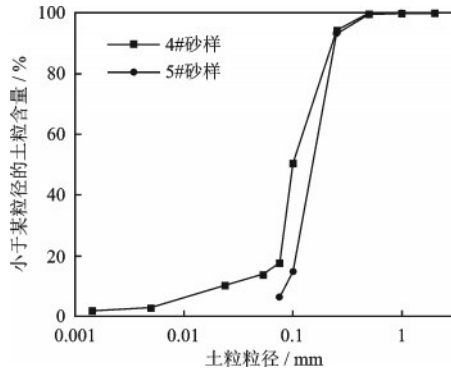


图4 砂样级配曲线

Fig.4 Sand sample grading curves

表3 试验砂样物理参数计算结果

Table 3 Calculated physical parameters of test sand samples

砂样	d_{60}/mm	d_{30}/mm	d_{10}/mm	C_u	C_c
4#	0.169 0	0.119 1	0.084 4	2.00	0.98
5#	0.121 6	0.083 7	0.021 6	5.63	2.67

注: d_{60} 为控制粒径; d_{10} 为有效粒径; C_u 为不均匀系数; C_c 为曲率系数

号砂的液化风险更高,因此本文选用5号砂作为实验用砂。

1.5 试验布置

试验加载时,振动台控制器设定采用的振动频率为5 Hz,最大加速度为0.2g,振动时间25 s,采用驻留正弦波,模拟的是土层受剪切波作用时饱和砂土的液化情况。本文隧道模型的布置方案设置为振动台激振方向垂直于隧道走向,如图5所示。

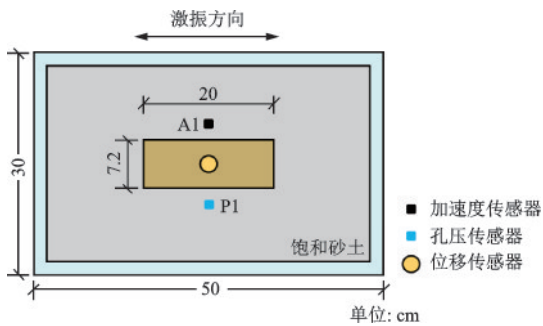


图5 试验布置方案平面图

Fig.5 Plan view of the test layout

具体的隧道模型与传感器布置如图6所示。在隧道模型内固定一个加速度传感器(A2)以测定振动时隧道结构模型的实际振动加速度响应,与周围土体振动加速度进行对比;在隧道模型顶部和底部各固定设置一个孔压传感器(P2、P3),以测定隧道

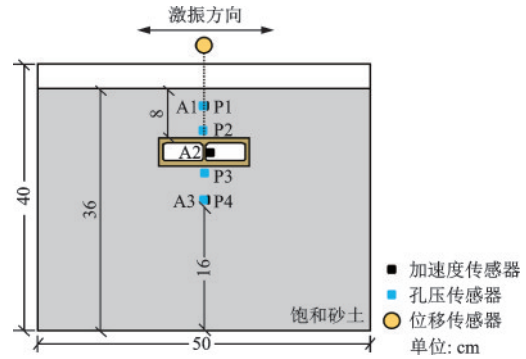


图6 试验布置方案正视图

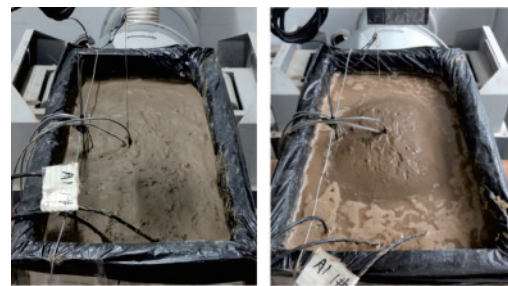
Fig.6 Front view of the test layout

模型顶部和底部的土体在受到振动荷载作用时的超静孔压和超静孔压差;另外在隧道模型上部土体和隧道下部土体分别埋置两层加速度和孔压传感器(A1、P1和A3、P4)以进行土体液化的判别与对比,并与隧道周边土体的加速度和孔压响应形成对比;位移传感器固定在振动台台面正上方的固定支架上,其拉线端固定在隧道模型上。通过空中砂雨法将试样饱和度控制在95%以上。

2 试验结果

2.1 试验现象

在振动试验过程中与试验结束后,可看到的最直观的两个表现现象为:①土体表面大量涌水,并且剪切箱边界处土体的涌水量更大;②地表中间区域隆起,说明土体中埋设的隧道模型发生一定的上浮位移,如图7所示。



(a) 振动前试样状态 (b) 振动后试样液化现象

图7 振动前后试样表现现象对比

Fig.7 Comparison of the apparent phenomena of samples before and after vibration

2.2 水平加速度响应

通过加速度传感器的采集情况(图8)发现,

A1、A2、A3三个不同埋深测点处的加速度响应幅值在达到峰值前的区别不大,且都在振动后7 s左右达到峰值,其中上部土体达到峰值的时间略显滞后;三者的振幅峰值大小也基本一致,都达到了振动台台面输出峰值0.2g。而在达到峰值之后,加速度幅值便快速衰减,说明土体受动荷载作用开始了孔压积累,不利于剪切波的传播。A1、A2测点处土体在第10 s左右时加速度幅值衰减至最低,而A3在8.5 s左右时就已经衰减至最低。最后通过比较三个不同深度土体处的液化后稳定的加速度曲线段可以发现,置于最上部的传感器A1所测得的液化后的加速度幅值最低,而置于最下部的传感器A3所测得的加速度幅值最高,这说明越靠近上部,土体加速度峰值衰减幅度越大,上部土体抗剪强度的衰减比下部土体更加明显,此现象与地震液化的普遍规律一致^[16]。而固定在隧道模型上的A2传感器所测得的加速度幅值,显示其在液化发生后的衰减也十分明显,说明隧道周边土体液化严重。

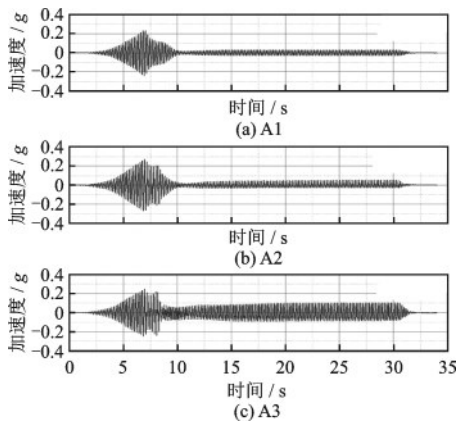


图8 加速度响应曲线

Fig.8 Acceleration response curves

3.3 孔隙水压力响应

通过孔压传感器的采集情况(图9)发现,P1、P2、P3和P4 4个测点处的超孔隙水压力在振动试验中达到峰值的时间基本一致,分别为1.112、1.137、2.901、4.256 kPa,只是P1和P2稍显滞后,且各测点处的孔压曲线都在达到峰值后趋于稳定。此外由图9可见,埋深越大,超静孔压上升越快,且发生液化时的孔压值越大,反之埋深越浅,超静孔压上升越慢,且孔压值越小。P1与P4测点处的孔压比曲线如图10所示,可以看到P4和P1分别大概

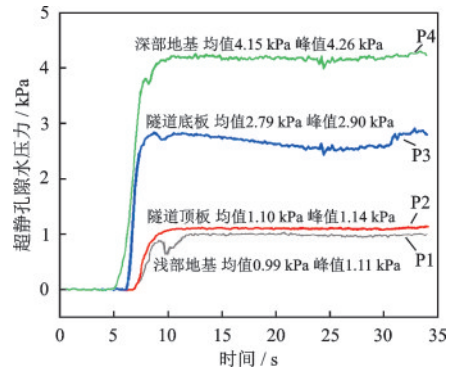


图9 超静孔隙水压力变化曲线

Fig.9 Ultra-static pore water pressure variation curves

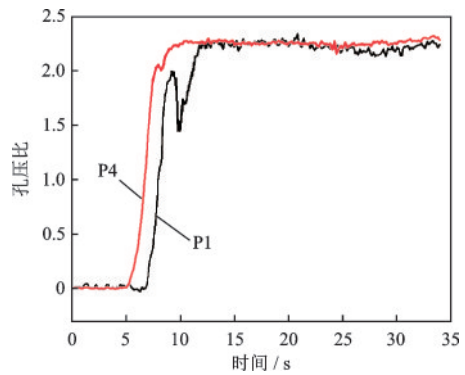


图10 孔压比变化曲线

Fig.10 Pore pressure ratio variation curves

在7 s和8 s左右时孔压比开始大于1.0,即发生完全液化,说明上部土体发生液化的响应时间确实要略微滞后于下部土体,这种现象可能是由于叠层剪切箱导致箱内土体在振动波的传播中由于剪切阻尼等的影响存在一定的延时。两者孔压比的峰值都在2.25左右,并且两者孔压比都是在达到峰值后保持基本稳定。

3.4 上浮位移响应

当饱和砂土受到动荷载作用时,隧道顶底部会由于超静孔压差而产生浮应力,从而导致其上浮。在本实验中根据隧道上浮位移图可知,在振动试验开始后第7 s左右,位移开始发生明显变化,模型会有一个向下1 mm左右的短暂“凹陷”。这是由于液化伊始隧道模型下部土体突然由固态变为液态,土体承载力丧失而浮力尚未产生或很小,而导致隧道有一个突然的下沉。在此之后,由于浮应力大于有效承载力导致隧道逐渐上浮并趋于稳定,当振动结束后位移的上浮量为8.9 mm,具体的上浮位移量随时间的变化情况如图11所示。

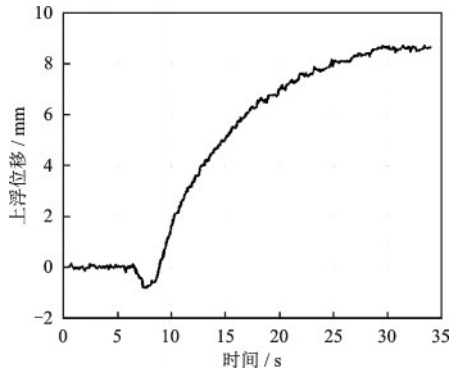


图11 隧道上浮位移

Fig.11 Tunnel uplift displacement

4 结 论

依托亳州过河隧道实际工程项目,充分参考工程现场条件进行缩尺试验,针对饱和砂土地基液化响应与隧道工程可能发生上浮变形的风险进行机理分析与探讨,得到以下结论:

(1)上、下层土体加速度分别在10 s和8.5 s左右降至最低,表明越靠近上部,土体加速度峰值衰减幅度越大,上部土体抗剪强度的衰减比下部土体更加明显,此现象与地震液化的普遍规律一致。

(2)土体深度越大,超静孔压上升越快,且峰值越高。此外上下层土体孔压比分别在8 s和7 s开始大于1.0,即发生完全液化,说明上部土体发生液化的响应时间确实要略微滞后于下部土体。

(3)振动开始时模型会有一个向下1 mm左右的短暂“凹陷”,这是由于液化伊始隧道模型下部土体突然由固态变为液态,土体承载力丧失而浮力尚未产生或很小。之后由于浮应力大于有效承载力导致隧道逐渐上浮并趋于稳定,当振动结束后位移的上浮量为8.9 mm。

参考文献:

[1] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
Yin Z Z. Principles of geotechnical engineering [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2007. (in Chinese)

[2] 黄雨,于森, Bhattacharya S. 2011年日本东北地区太平洋近海地震地基液化灾害综述[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 834-840.
Huang Y, Yu M, Bhattacharya S. A review of founda-

tion liquefaction hazards in the 2011 Pacific offshore earthquake in Tohoku, Japan[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 834-840. (in Chinese)

[3] 张西文,朱伟东,李虎,等. 地铁车站液化上浮响应及抗浮措施研究[J]. 世界地震工程, 2020, 36(1): 205-211.
Zhang X W, Zhu W D, Li H, et al. Study on liquefaction uplift response and anti-floating measures for metro stations[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 205-211. (in Chinese)

[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 W Z, Liao C C, Zhou X L, et al. Uplift of underground structures in liquefiable soils and its control measures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(3): 159-167. (in Chinese)

[5] 张雪东,侯瑜京,梁建辉,等. 饱和砂土地基液化离心机振动台模型试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(增2): 105-111.
Zhang X D, Hou Y J, Liang J H, et al. Experimental study on centrifuge shaking table model for liquefaction of saturated sandy soil foundation[J]. Journal of Water Resources, 2014, 45(Sup2): 105-111. (in Chinese)

[6] 任红梅,吕西林,李培振. 饱和砂土液化研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 166-175.
Ren H M, Lyu X L, Li P Z. Research progress on liquefaction of saturated sandy soils [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(6): 166-175. (in Chinese)

[7] 陈育民,刘汉龙,邵国建,等. 砂土液化及液化后流动性特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1408-1413.
Chen Y M, Liu H L, Shao G J, et al. Experimental study on liquefaction and post-liquefaction flow characteristics of sandy soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1408-1413. (in Chinese)

[8] 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.

[9] 邹德高,孔宪京, Ling H I, 等. 地震时饱和砂土地基中管线上浮机理及抗震措施试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 323-326.
Zou D G, Kong X J, Ling H I, et al. Experimental study on the mechanism of pipeline uplift and seismic measures in saturated sandy soil foundation during earthquake[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 323-326. (in Chinese)

- [10] 邹德高. 地震时浅埋地下管线上浮机理及减灾对策研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
Zou D G. Study on the mechanism of uplift of shallow buried underground pipelines during earthquakes and disaster mitigation measures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [11] 邹德高, 孔宪京. 液化土中管线抗上浮排水措施数值分析[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(3): 379-385.
Zou D G, Kong X J. Numerical analysis of uplift resistance drainage measures for pipelines in liquefied soils [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(3): 379-385. (in Chinese)
- [12] 彭加强, 甘鹏路, 钟小春, 等. 盾构隧道穿越液化地基上浮振动台试验分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(增2): 60-67.
Peng J Q, Gan P L, Zhong X C, et al. Experimental analysis of shield tunnel crossing liquefied foundation on uplift shaking table [J]. Tunnel Construction, 2018, 38 (Sup2): 60-67. (in Chinese)
- [13] 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(增1): 257-264.
Zheng G, Yang P B, Zhou H Z, et al. Analysis of uplift response of rectangular tunnels in liquefiable strata [J]. Journal of Civil Engineering, 2019, 52(Sup1): 257-264. (in Chinese)
- [14] 常士骝, 张苏民. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Chang S P, Zhang S M. Handbook of engineering geology [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [15] 高春华, 纪金豹, 闫维明, 等. 地震模拟振动台技术在中国的发展[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 9-19.
Gao C H, Ji J B, Yan W M, et al. Development of seismic simulation shaker technology in China [J]. Journal of Civil Engineering, 2014, 47(8): 9-19. (in Chinese)
- [16] 周燕国, 谭晓明, 陈捷, 等. 易液化深厚覆盖层地震动放大效应台阵观测与分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1282-1291.
Zhou Y G, Tan X M, Chen J, et al. Observations and analysis of ground vibration amplification effects on deep overburden prone to liquefaction by table array [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (7): 1282-1291. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)