

DOI: 10.11779/CJGE2023S20009

福州长乐国际机场场地动力特性及稳定性研究

王小桃¹, 程旭日², 冯雨顺¹, 黎 章³, 童晨曦³, 张 升³

(1. 福建兆翔机场建设有限公司, 福建 厦门 361006; 2. 元翔(福州)国际空港有限公司, 福建 福州 350209;

3. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 场地稳定性判别对于保障机场长期安全稳定服役具有重要意义。以福州长乐机场饱和砂土为研究对象, 通过室内动三轴试验, 探究其动力性能及影响因素, 并采用室内试验和现场剪切波速测试方法对场地的抗液化能力进行了场地稳定性判别。研究结果表明场地砂土的动剪切模量比随围压增大而增大, 阻尼比随围压增大而减小, 土体动强度随围压增大而增大; 两种场地液化判别方法在深度小于 8 m 具有良好的一致性, 验证了室内试验测定现场场地稳定性的可行性。

关键词: 动三轴; 动剪切模量比; 阻尼比; 液化判别

中图分类号: TU472.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0098-06

作者简介: 王小桃(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事机场综合交通枢纽工程方案研究及建设管理。E-mail: 956286237@qq.com。

Experimental study on dynamic characteristics of sand in Fuzhou Airport

WANG Xiaotao¹, CHENG Xuri², FENG Yushun¹, LI Zhang³, TONG Chenxi³, ZHANG Sheng³

(1. Fujian Panport Airport Construction Co., Ltd., Xiamen 361016, China; 2. Fujian Zhaoxiang Airport Construction Co., Ltd., Fuzhou

350200, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Site stability determination is of great significance to ensure the long-term safety and stable service of airports. The dynamic properties and influencing factors of the saturated sandy soil of Fuzhou Airport are investigated by using the dynamic triaxial tests, and the site liquefaction resistance is discriminated by the indoor and field tests. The results show that the dynamic shear modulus ratio of the sandy soil increases with the increase of the enclosing pressure, the damping ratio decreases with the increase of the enclosing pressure, and the dynamic strength of the soil increases with the increase of the enclosing pressure. The two site liquefaction discrimination methods have good consistency at depths less than 8 m, which verifies the feasibility of the indoor tests to determine site stability.

Key words: dynamic triaxis; dynamic shear modulus ratio; damping ratio; liquefaction discrimination

0 引 言

福州长乐国际机场位于长乐—漳州诏安断裂带, 地震形势十分复杂^[1]。机场场地在地震作用下的稳定性是影响机场建设和使用安全的重要因素之一^[2]。该机场场地地下水位较高, 土质多为砂土, 饱和砂土对于动荷载具有特殊的敏感性, 在动荷载作用下易发生强度降低甚至液化引起结构失稳。因此, 分析土的动力特性参数(动剪切模量比、阻尼比)和抗液化能力是分析重要及重大工程场地地震效应必不可少的基础^[3]。

自 19 世纪起, 许多学者对于土体动剪切模量与阻尼比的影响因素进行了探讨, 主要聚焦于围压、固结比、颗粒形状、细颗粒含量及颗粒破碎等方面^[4]。土体动剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化曲线的不确定性有重要影响^[5]。在工程实践中, 重塑土试样测得

性质与原位土性质存在一定出入, 但已有研究表明^[6], 对于动剪切模量随剪应变关系进行归一化处理, 可消除颗粒级配与相对密度对 $G/G_{\max}-\gamma$ 曲线的影响。孔宪京等^[7]对不同级配堆石料展开大型动三轴试验, 对比切模量比及阻尼比随剪应变变化范围, 证实动三轴室内试验测定的准确性。蔡袁强等^[8]分析了荷载频率在不同应力路径下对路基粗粒填料长期动力特性的影响。李瑞山等^[9]分析了荷载频率等对土体剪切模量比、阻尼比发展规律的影响。

值得注意的是, 除去砂土动力特性参数分析, 砂土液化对场地稳定性的影响也不容忽视。Seed 等^[10]

基金项目: 湖湘高层次人才聚集工程创新团队项目(2019RS1008)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者(cxtong@csu.edu.cn)

基于饱和砂土液化势的概念, 结合室内动三轴试验与现场勘测数据, 对土体液化进行评估。石兆吉等^[11]收集唐山地震土层液化数据, 建立了饱和砂土、粉土的临界剪切波速判别方法。陈文化等^[12]基于中国《水利水电工程地质勘察规范》中标准贯入试验, 建立了考虑结构特性的临界标准贯入锤击数计算公式, 为场地设计和稳定性判别提供新思路。

本文利用室内动三轴试验, 分析福州饱和砂土动剪切模量比和阻尼比变化特性及其与围压之间的关系, 测定场地土体动强度; 并基于剪切波速法及 Seed 简化法结合现场剪切波速试验, 判别场地液化情况, 为机场场地的抗震设计和防液化措施提供指导。

1 室内动三轴试验

1.1 试验方法

本研究采用英国 GDS 公司生产的振动三轴试验系统, 轴向振动频率为 0.01~10 Hz; 最大轴向荷载 20 kN; 动态位移 100 mm, 该仪器采用自动数据采集系统, 能够精准捕捉各个应变范围内动力参数变化。

试验材料分别取自 10 个样点的不同深度, 共计 36 组试样。试验步骤主要有制样、试样饱和、加载。试样直径为 39.1 mm, 高为 80 mm。采用反压饱和方法, 施加 300~400 kPa 反压使试样达到较高的饱和度, 本试验中所有试样在饱和结束后 B 系数均大于 0.95。试验采用固结不排水试验, 试样的固结应力比 K_c 为 1.0, 围压大小根据取样深度确定并在试验过程中保持恒定。通过设定轴向应力加载, 加载波形为正弦波, 荷载振动频率采用 1 Hz。土体在轴向受大主应力循环变化, 完成一个周期循环后, 土体应力应变曲线将形成一个滞回圈, 根据土工试验规范计算土体的动力特性参数。

动弹性模量及阻尼比试验采用振动频率为 1 Hz, 加载波形为正弦波, 采用逐级施加动应力幅的方法, 每个试样采用 5~6 级动应力, 后一级的动应力幅一般为前一级的 2 倍左右, 每级的振动次数不大于 10 次。

动强度试验时, 采用动荷载振动频率采用 1 Hz, 加载波形为正弦波, 对每个试样试验控制动荷载的大小, 使试样破坏周数分别为 10 周次、20~30 周次、100 周次左右。当孔隙水压力与围压相等试验停止。

根据土工试验规范^[13], 本文试样的土体动力特性参数计算公式如下:

动弹性模量 E_d :

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} \times 100 \quad (1)$$

式中: σ_d 为轴向动应力 (kPa), ε_d 为轴向动应变 (%)。

阻尼比 λ :

$$\lambda = \frac{A_z}{4\pi A_s} \quad (2)$$

式中: A_z 为图 1 中滞回圈 $ABCD$ 面积 (cm^2); A_s 为三角形 OAB 面积 (cm^2)。

动剪切模量、动剪应变:

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$\gamma_d = \varepsilon_d(1+\nu) \quad (4)$$

式中: ν 为泊松比。

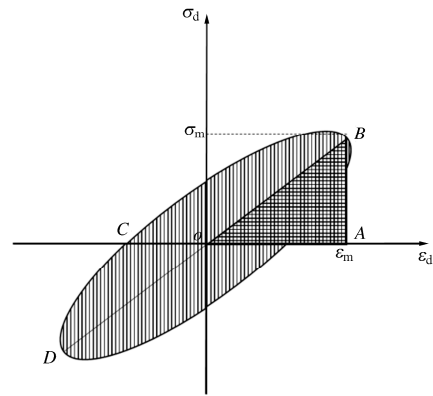


图 1 应力应变滞回圈

Fig.1 Stress-strain hysteresis loop

1.2 动剪切模量比及阻尼比试验结果分析

图 2 分别为不同取样点处部分试样在不同围压条件下砂土 G/G_{\max} - γ , λ - γ 关系图。为更直观简洁的描述动剪切模量随剪应变的衰减关系, 将动剪切模量 G 与最大动剪切模量 G_{\max} 归一化处理, 可以看到, 当初始相对密度一定时, 围压越大, 土体受到的侧向约束力越大, 其抵抗剪切变形的能力也越强, 试样的动剪切模量比也越大。随着剪应变的增加, 砂土逐渐慢慢受到破坏, 土体抵抗剪切变形的能力减弱, 同时试样的强度也变小, 动剪切模量比随动剪应变的增加而减小。阻尼比随着剪切应变 γ 的增加呈现三段式发展。当剪切应变小于 0.0001 时, 孔隙变化较小, 土体阻尼比变化不明显。剪应变从 0.0001 到 0.001 时, 其阻尼比随动剪应变迅速增长, 当剪应变达到 0.001 时, 阻尼比曲线逐渐趋于平缓, 此时阻尼比接近最大值。在剪应变增大的过程中, 试样孔隙逐渐变小, 此时克服的颗粒间的摩擦力需要耗散更多能量。

1.3 动强度试验结果分析

图 3 为不同取样点位、不同深度处试样动强度试验结果。AZK20、AZK32、SZK38 和 SZK32 取样点位试样, 在不同取样深度即不同围压下, 同一取样点位土体液化应力比均随着振次增加而减小, 但不同取

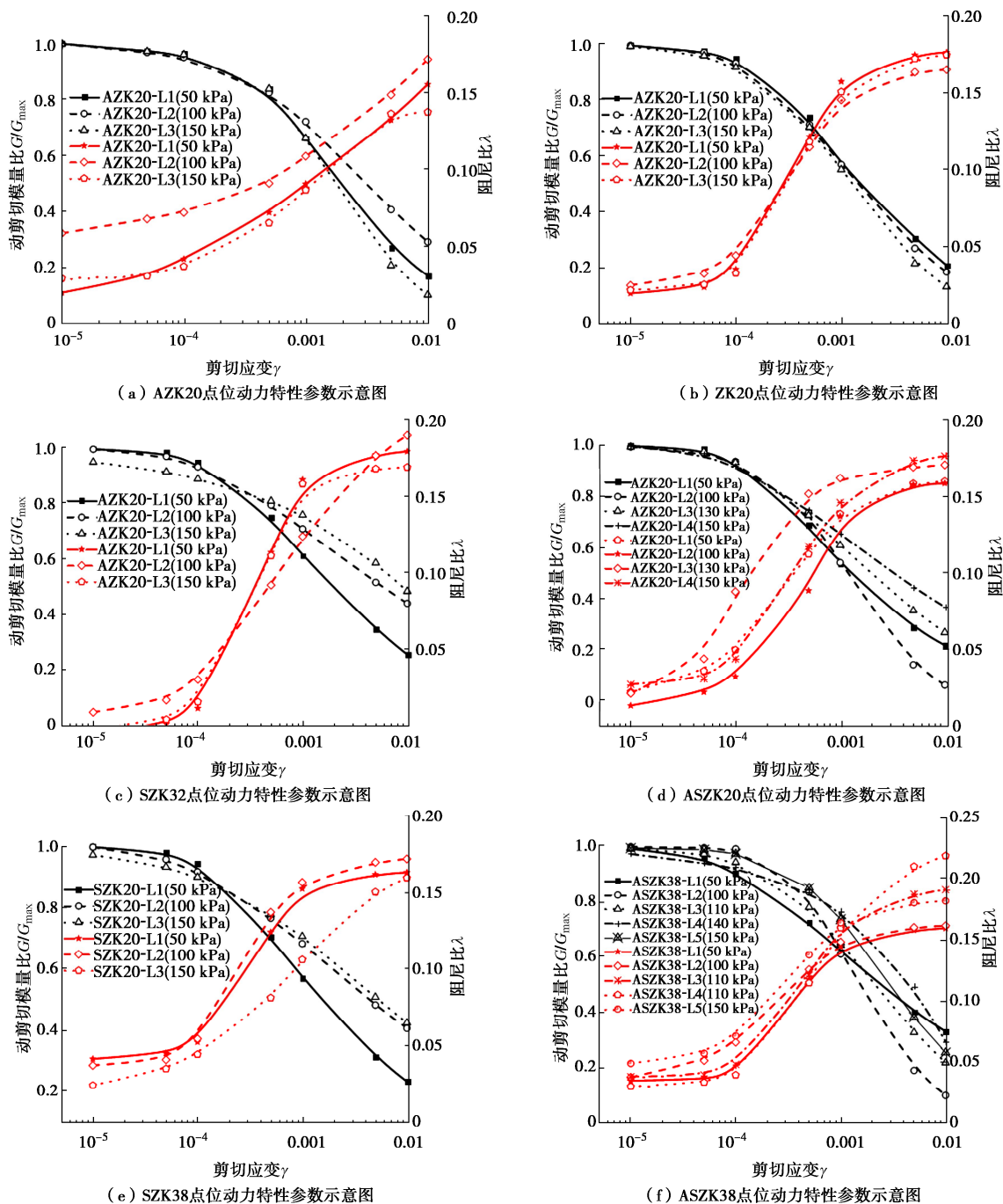


图2 不同取样深度砂土动力特性参数分析

Fig. 2 Analysis of dynamic characteristics of sand at different sampling depths

样深度下的土体液化应力差别较大,可能是由于同一取样点位不同深度下试样级配、孔隙比、颗粒堆叠排列方式不同,从而引起液化应力比的变化。可以看出,围压并非影响土体液化应力比的单一因素,土体场地稳定性研究可进一步探讨级配、孔隙比、颗粒排列形式的影响。

2 场地稳定性判别方法研究

2.1 剪切波速判别法

中国自唐山地震后就开始注意到用地震剪切波速

预测液化势问题,宏观震害资料和现场剪切波速 V_s 测定值表明,是否液化与 V_s 密切相关;并且经验表明,剪切波速法预测液化势的结果与用标准贯入试验预测结果基本一致。石兆吉等^[11]提出了以有效应力为零作为液化判别标准,结合剪切波速预测砂土液化势公式如下:

$$V_{scr} = 198 \sqrt{\frac{\alpha_{max}}{g} (d_s - 0.0133d_s^2)} \quad (5)$$

式中:当烈度为7, 8, 9度时, α_{max} 分别取 0.1, 0.2, 0.4; d_s 为土层深度。

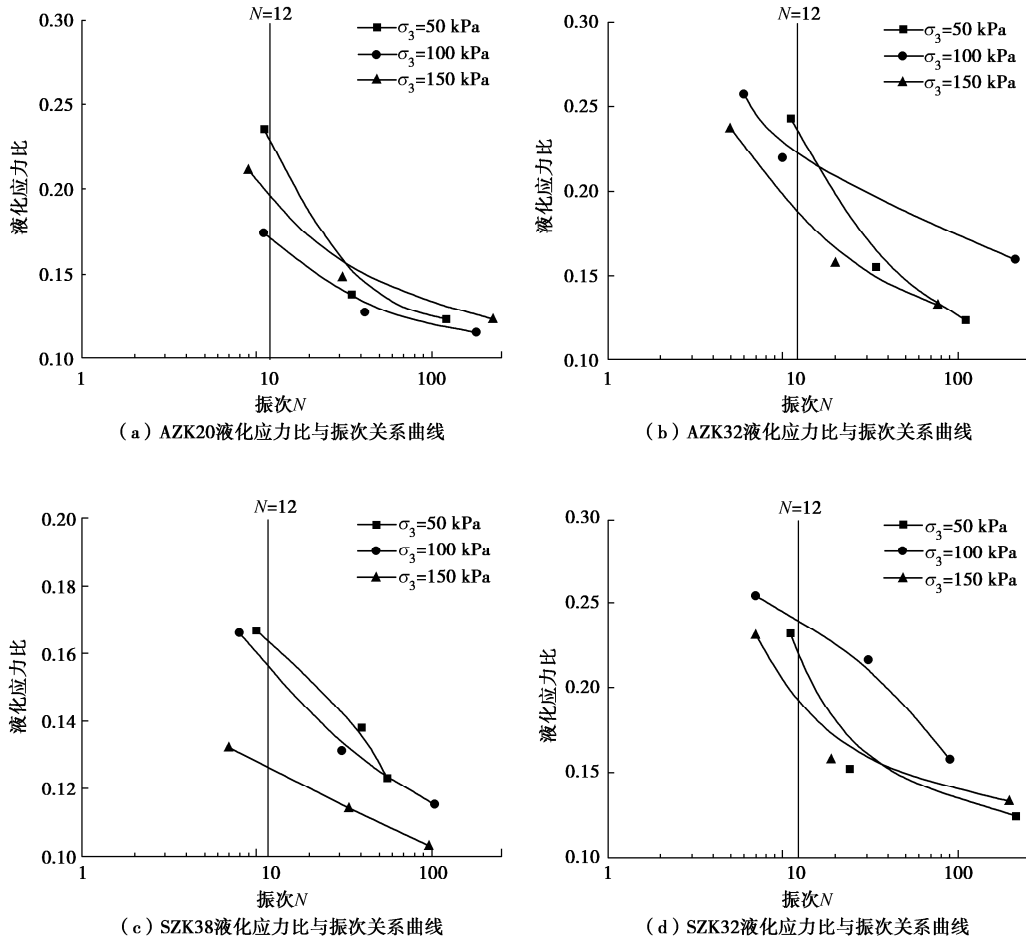


图 3 不同取样点位液化应力比与振次关系

Fig. 3 Liquefaction stress ratios and vibration times at different sampling points

基于上述理论, 取地震烈度为 7 度, 求得场地不同深度处饱和砂土层的临界剪切波速, 将土体实测剪切波速曲线与临界剪切波速曲线绘制于图 4。对比发现在埋深为 8 m 时, SZK38、SZK32、ASZK40 点位实测波速曲线与临界剪切波速曲线相交, 表明在埋深 8 m 内场地土层不发生液化, 在 8~10 m 范围内, 砂土在地震作用下会发生液化。

2.2 地震抗液化剪应力法

抗液化剪应力法是 Seed 等^[10]提出一个确定土层中任一点的剪应力的近似方法。通过假设深度为 h 的单元土柱为刚体, 并已知地面最大地震加速度, 则可计算出土柱底面上的地震剪应力, 由于土体为非刚体, 求出剪应力应大于实际最大剪应力, 需对其进行修正。由于地震时产生的动应力亦随时间而不规则地变化。其中最大地震剪应力只作用于一瞬间, 以它代表地震期间的地震剪应力是不合理的。为了便于将其与室内以等幅值动应力试验求得的抗液化剪应力作比较, 将地震期间这种不规则的地震剪应力, 简化成一种等效的、有一定循环作用次数的均匀剪应力。通常简称为等效循环均匀剪应力。根据动力试验分析, 可

以近似地取最大动剪应力的 65% 作为等效循环均匀剪应力。

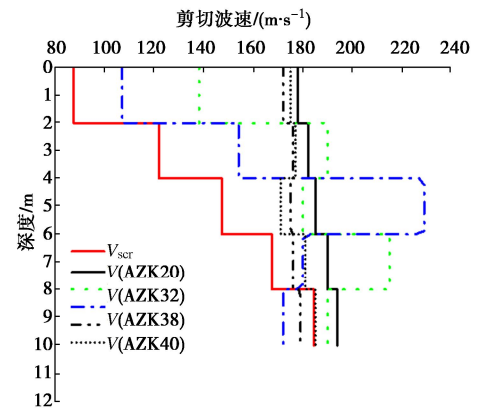


图 4 场地临界剪切波速与实测波速对比图

Fig. 4 Comparison of critical shear wave velocities

(1) 确定等效地震剪应力 τ_e , 根据场地设计地震参数计算, 可计算出不同取样深度土体在地震作用下等效循环剪应力。

$$\tau_e = 0.65 K_d \frac{\sum \gamma \Delta h}{g} \alpha_{\max} \quad (6)$$

式中: Δh 为土层厚度; K_d 为深度修正系数; γ 为土

表 1 抗液化剪力计算结果

Table 1 Calculated results of liquefaction shear resistance

编号	干重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	取样深度/m	K_d	C_r	σ'	$\left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_0}\right)_N$	等效地震 剪应力 τ_e	抗液化 剪应力 τ_d	是否液化
AZK20-L1	1.46	5.60~6.00	0.945	0.56	83.95	0.222	3.867	10.421	否
AZK20-L2	1.46	7.50~8.00	0.920	0.56	102.54	0.168	5.411	9.675	否
AZK20-L3	1.46	9.50~10.0	0.880	0.56	114.85	0.192	7.287	12.356	否
ASZK32-L1	1.46	3.50~4.00	0.970	0.56	54.75	0.232	2.589	7.114	否
ASZK32-L2	1.46	6.50~7.00	0.932	0.56	98.55	0.222	4.478	12.234	否
ASZK32-L3	1.46	7.50~8.00	0.920	0.56	105.65	0.201	5.411	11.909	否
ASZK32-L4	1.46	8.50~9.00	0.900	0.56	110.25	0.188	6.373	11.588	否
SZK38-L1	1.46	3.50~4.0	0.970	0.56	54.75	0.164	2.589	5.029	否
SZK38-L2	1.46	5.50~6.00	0.945	0.56	83.95	0.154	3.867	7.226	否
SZK38-L3	1.49	8.50~9.00	0.900	0.56	110.25	0.124	6.376	7.664	否
SZK32-L1	1.40	3.50~4.00	0.970	0.56	52.50	0.210	2.483	6.174	否
SZK32-L2	1.40	5.50~6.00	0.945	0.56	80.50	0.222	3.709	9.993	否
SZK32-L3	1.40	8.50~9.00	0.900	0.56	106.05	0.195	6.296	11.581	否
ASZK40-L1	1.44	3.50~4.00	0.970	0.56	54.00	0.209	2.554	6.327	否
ASZK40-L2	1.44	6.5~7.00	0.932	0.56	97.20	0.299	4.416	16.260	否
ASZK40-L3	1.44	7.50~8.00	0.920	0.56	104.10	0.352	5.342	20.544	否
ASZK40-L4	1.44	8.50~9.00	0.900	0.56	108.50	0.388	6.296	23.588	否

体天然重度； g 为重力加速度； α_{\max} 为最大地面加速度。

(2) 确定抗液化剪应力 τ_d ，天然场地下土层抗液化剪应力。

$$\tau_d = C_r \cdot \sigma' \left(\frac{\sigma_d}{2\sigma_0} \right)_N \quad (7)$$

式中： τ_d 为抗液化剪应力； C_r 一般为 0.54~0.58； σ' 与 N 有关； σ' 为有效上覆压力； $(\sigma_d/2\sigma_0)_N$ 为抗液化剪应力比，根据福州长乐市抗震设防烈度确定等效循环振次 N 。

(3) 场地液化判别。将计算得到的 τ_e 和 τ_d 进行比较。若 $\tau_e > \tau_d$ 则可能发生液化，计算结果如表 1，表中 AZK20、ASZK32 等代表不同取样点位，L1、L2 等代表不同取样深度。

通过对比剪切波速法和抗液化剪应力法的判别标准可知，在取样深度小于 8 m，其预测结果具有良好的一致性，对于深层土体仍需进一步判别。

3 结 论

本文通过对福州长乐国际机场为例，对现场 10 个取样点不同深度开展了 36 组动三轴试验，并对其中 5 个点位开展了动强度试验。并采用室内试验和现场测试两种方法探究场地砂土的抗液化能力，主要得到以下 3 点结论。

(1) 不同取样点试样在围压 50 kPa，动剪切模量比约为 0.23，阻尼比约为 0.17，当围压增大为 100 kPa 和 150 kPa 时，动剪切模量比较为分散，土体动力特性随取样深度变化而发生。

(2) 不同取样深度下围压并非土体动强度单一影响因素，试样级配、相对密实度、颗粒堆叠方式等对土体动力特性的影响不容忽视。相同级配下，围压越大，颗粒间接触和排列更为紧密，其抗液化能力越大。

(3) 基于剪切波速法和抗液化剪应力法对场地进行判别，对于埋深小于 8 m，判别结果具有良好的一致性；对于较深土层，两种判别结果存在一定出入，适用于较深土层液化判别方法亟待研究。

参考文献：

- [1] 李升才, 王毅恒. 类比预测法在城市群体建筑物震害预测中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(5): 166-171. (LI Shengcai, WANG Yiheng. The method of prediction based on analogy in the application of seismic disaster prediction for urban congregate buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2011, 31(5): 166-171. (in Chinese))
- [2] 别江波, 刘星星, 刘 宏. 某机场高填方边坡的动力特性模拟分析[J]. 工程建设, 2021, 53(9): 13-18. (BIE Jiangbo, LIU Xingxing, LIU Hong. Simulation analysis on dynamic characteristics of high fill slope at an airport[J]. Engineering Construction, 2021, 53(9): 13-18. (in Chinese))
- [3] 李晓飞, 孙 锐, 袁晓铭. 砂土动剪切模量比和阻尼比共振柱试验误差研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(11): 155-161, 168. (LI Xiaofei, SUN Rui, YUAN Xiaoming. Resonant column test error analysis for dynamic shear modulus ratio and damping ratio of sand[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(11): 155-161, 168. (in Chinese))

- Chinese))
- [4] 洪小星, 陈国兴, 孙 田, 等. 砂砾土动力特性的室内试验研究进展[J]. 世界地震工程, 2011, **27**(1): 47-53. (HONG Xiaoxing, CHEN Guoxing, SUN Tian, et al. Research progress of labrotory tests on the dynamic characteristics of gravel soil[J]. World Earthquake Engineering, 2011, **27**(1): 47-53. (in Chinese))
- [5] 张 岩, 陈国兴, 赵 凯, 等. 海洋土动剪切模量比和阻尼比预测不确定性特性[J]. 工程力学, 2023, **40**(5): 161-171. (ZHANG Yan, CHEN Guoxing, ZHAO Kai, et al. Uncertainties of shear modulus reduction and damping ration curves of marine soils[J]. Engineering Mechanics, 2023, **40**(5): 161-171. (in Chinese))
- [6] KOKUSHO T. Dynamic properties of gravel layers investigated by in-situ freezing sampling[J]. Ground Failure under Seismic Condition, 1994: 121-140.
- [7] 孔宪京, 娄树莲, 邹德高, 等. 筑坝堆石料的等效动剪切模量与等效阻尼比[J]. 水利学报, 2001, **32**(8): 20-25. (KONG Xianjing, LOU Shulian, ZOU Degao, et al. The equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of rockfill material for dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, **32**(8): 20-25. (in Chinese))
- [8] 蔡袁强, 赵 莉, 曹志刚, 等. 不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(5): 1238-1246. (CAI Yuanqiang, ZHAO Li, CAO Zhigang, et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materials under cyclic loading with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(5): 1238-1246. (in Chinese))
- [9] 李瑞山, 陈龙伟, 袁晓铭, 等. 荷载频率对动模量阻尼比影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(1): 71-80. (LI Ruishan, CHEN Longwei, YUAN Xiaoming, et al. Experimental study oninfluences of different loading frequencieson dynamic modulus and damping ratio[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(1): 71-80. (in Chinese))
- [10] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, 1971, **97**(9): 1249-1273.
- [11] 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 土壤液化势的剪切波速判别法[J]. 岩土工程学报, 1993(1): 74-80. (SHI Zhaoji, YU Shousong, FENG Wanling. Shear wave velocity discrimination method of soil liquefaction potential[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993(1): 74-80. (in Chinese))
- [12] 陈文化, 孙 谋, 刘明丽, 等. 南京砂的结构特性与地铁地基液化判别[J]. 岩土力学, 2003, **24**(5): 755-758. (CHEN Wenhua, SUN Mou, LIU Mingli, et al. Characters of schistose structure of Nanjing's sand and seismic liquefaction of subsoil of a metro section[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(5): 755-758. (in Chinese))
- [13] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)