

地铁列车振动荷载作用下砂土液化特性试验研究

徐传龙¹, 张瑾^{1,2,*}, 张翔瑜¹, 刘晨¹, 凌贤长¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 海洋环境混凝土技术教育部工程研究中心, 青岛 266525)

摘要: 为探究地铁列车振动荷载作用下砂土液化可能性问题, 通过室内动三轴试验, 深入研究了地铁列车振动荷载对砂土液化宏观响应特性的影响。研究表明, 动应力幅值、加载频率以及有效围压等因素均对液化特性产生显著影响。具体而言, 随着动应力幅值的增大或加载频率的降低, 液化破坏所需的振动次数减少, 液化风险相应增加; 而有效围压的增大会有效提高砂土的抗液化能力。在不同影响因素的作用下, 所产生的轴向应变也呈现出不同的特点, 动应力幅值的增大和加载频率的降低会导致液化破坏后的轴向应变减小, 而有效围压的增大则能有效减小产生的轴向应变。

关键词: 地铁列车荷载; 砂土液化; 动三轴试验; 动应力幅值; 加载频率; 有效围压

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)06-0047-08

Experimental study on the liquefaction characteristics of sand under the subway train vibration loads

XU Chuanlong¹, ZHANG Jin^{1,2,*}, ZHANG Xiangyu¹, LIU Chen¹, LING Xianzhang¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Engineering Research Center of Concrete Technology under Marine Environment,

Ministry of Education, Qingdao 266525, China)

Abstract: To explore the possibility of sand liquefaction under the action of subway train vibration loads, this study conducted indoor dynamic triaxial tests to investigate the influence of subway train vibration loads on the macroscopic response characteristics of sand liquefaction. The research results indicate that factors such as dynamic stress amplitude, loading frequency and effective confining pressure all have significant effects on liquefaction characteristics. Specifically, with the increase of dynamic stress amplitude or the decrease of loading frequency, the number of vibrations required for liquefaction damage decreases, and the liquefaction risk increases accordingly. Increasing the effective confining pressure can effectively enhance the anti-liquefaction ability of sand. Under the influence of different factors, the axial strains generated exhibit different characteristics. An increase in dynamic stress amplitude and a decrease in loading frequency can lead to a reduction in axial strain after liquefaction damage, while an increase in effective confining pressure can effectively reduce the

收稿日期: 2024-04-01

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2021MD005); 海洋环境混凝土技术教育部工程研究中心面上项目(TMduracon2022002)

作者简介: 徐传龙(1999—), 男, 山东临沂人。硕士, 研究方向为岩土工程。E-mail: 1468791071@qq.com。

* 通信作者: 张瑾(1983—), 女, 山东淄博人。博士, 副教授, 主要从事轨道交通、岩土工程等方面的研究。

E-mail: zhangjin@qut.edu.cn。

generated axial strain.

Key words: subway train load; sand liquefaction; dynamic triaxial test; dynamic stress amplitude; loading frequency; effective confining pressure

随着城市化进程的加速和人口数量的增长,城市的交通需求也呈现出了激增趋势。面对这种状况,传统的交通方式已经无法满足人们的出行需求,而地铁因运行速度快、准时、客载量大等优点,成为缓解交通压力、解决拥堵问题的主力交通方式。我国大量地铁修建在富水砂土地层中,而富水砂土层属于对振动反应非常敏感的不良地层,当地铁列车在运行过程中引起的振动荷载传递到地下土层时,会使富水砂土不良地质地段活化,发生砂土液化现象,进而引起轨道不平顺、翻浆冒泥、结构开裂等问题^[1-3]。

目前,国内外学者针对地铁列车振动荷载的研究主要集中在结构和土层的振动响应与长期沉降问题上^[4-10],对地铁列车振动荷载作用下砂土液化问题的研究相对较少。因此,本文采用GDS动三轴试验设备对地铁列车振动荷载作用下砂土的液化特性进行了研究,以深入了解其在地铁列车长期振动荷载作用下的响应行为,以为地铁交通系统的安全评估和线路设计提供科学依据,并对地下结构的设计和抗液化措施提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料

本试验采用重塑砂土,按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[11]的要求进行颗粒分析试验,砂土颗粒级配曲线如图1所示,其中细粒含量为2.8%,测得的砂土基本物理性质如表1所示。

表1 砂土基本物理性质

比重 G_s	最大孔隙比 e_{max}	最小孔隙比 e_{min}	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
2.64	1.01	0.48	2.25	0.8

1.2 试验参数选择

1.2.1 应力幅值与加载波形选择

丁智等^[12]研究发现,偏压正弦波在模拟地铁列车荷载上表现优异。此外,资料显示^[13-14],地铁列车所产生的静偏应力 $q_s=30$ kPa,而动应力幅值则介于10~20 kPa。因此,本文采用应力控制的循环加载方法,加载波形为偏压正弦波,如图2所示。

1.2.2 加载频率选择

研究表明,地铁列车的振动频率与其行驶速度紧密相关。宫全美等^[15]研究发现地铁振动荷载引起的地基土振动频率主要以1.0 Hz为主。赵书凯^[16]对上海地铁进行监测,发现地铁列车振动导致周围土体的响应频率主要为低频0.4~0.6 Hz和低频2.4~2.6 Hz。因此试验选择0.5、1.0和2.5 Hz 3个振动频率,分别模拟地铁在低速、中速和高速运行时的振

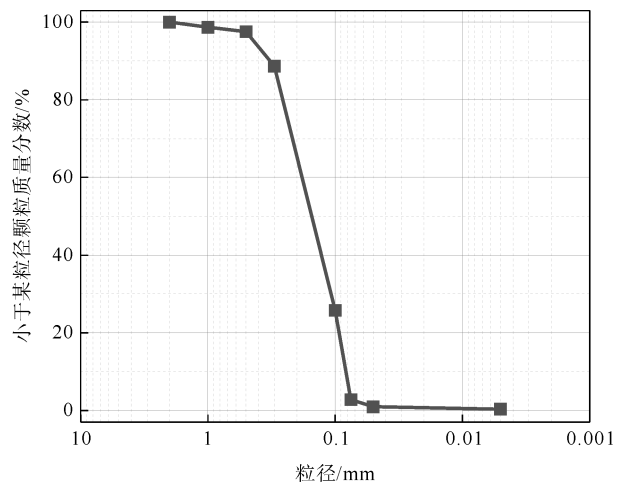


图1 颗粒级配曲线

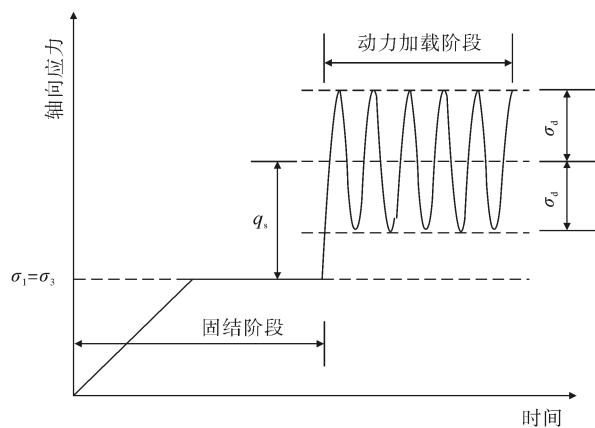


图2 加载波形示意

σ_1 —轴压; σ_3 —围压; σ_d —动应力幅值; q_s —静偏应力

2.6 Hz。因此试验选择0.5、1.0和2.5 Hz 3个振动频率,分别模拟地铁在低速、中速和高速运行时的振

动情况。

1.2.3 围压选择

地铁列车振动更易导致浅层砂土液化。鉴于地铁隧道多位于地下 10~30 m,本文重点研究 100 kPa 围压下的液化现象。同时,为探究围压对液化特性的影响,选择 150 和 200 kPa 的围压进行进一步对比研究。

1.2.4 试验终止条件

选择应力破坏标准作为砂土液化破坏的判断依据,即当超静孔隙水压力等于有效围压,有效应力降为零时,即可判定达到液化条件,此时立即停止试验。另外,如果振动次数达到 5000 次,试验也将停止。

1.3 试验方案

试验方案中动应力幅值设定为 10、15、20 kPa;围压分别取 100、150、200 kPa;轴压则在相应围压基础上叠加 30 kPa 的静偏应力。具体试验方案如表 2 所示。

表 2 动三轴试验方案

编号	围压 σ_3 /kPa	轴压 σ_1 /kPa	频率 f /Hz	动应力幅值 σ_d /kPa
1	100	100+30	1.0	10
2	100	100+30	1.0	15
3	100	100+30	1.0	20
4	100	100+30	0.5	15
5	100	100+30	2.5	15
6	150	150+30	1.0	15
7	200	200+30	1.0	15

1.4 试验过程

试验采用 70 mm×140 mm 的圆柱形重塑试样,通过湿捣法制备,控制含水率为 10%、相对密度为 30%。试样安装完成后,先施加 20 kPa 围压以保持其稳定。随后通入 CO₂ 和无气泡蒸馏水,自下而上排出内部空气。当同一时间间隔内排水量与反压体积变化量相等时,水头饱和停止,开始分级反压饱和,每级持续 30 min,共 4 h。饱和过程中,围压始终比反压大 20 kPa。饱和完成后,进行 B 值(孔隙水压力系数)检测,B 值达到 0.98 以上视为完成饱和。接着进行等压固结,根据试验方案输入目标围压与反压,使试样达到目标有效围压,当反压体积不再发生变化或 5 min 内变化量小于 5 mm³ 时,则固结完成。最后,在给试样施加 30 kPa 静偏应力后,便可开始进行循环加载。

2 试验结果分析

2.1 动应力幅值对砂土液化特性的影响

2.1.1 超孔压

图 3 为 100 kPa 围压条件下不同动应力幅值作用所引起的超静孔隙水压力(即超孔压)随振动次数变化的关系曲线,从图中可以看出,在开始加载之前,由于施加了 30 kPa 的静偏应力,分别出现了 10.37、9.48、9.88 kPa 超孔压的瞬时增长。随着振动的开始,超孔压累积增长速度随着动应力的增大而加快,这意味着,更大的动应力幅值会加快液化破坏现象的产生。具体来说,当动应力为 10 kPa 时,需要 536 次振动达到液化;而当动应力为 15 kPa 时,达到液化所需振动次数减少到 245 次;当动应力为 20 kPa 时,只需要 118 次振动就能达到液化。值得注意的是,在振

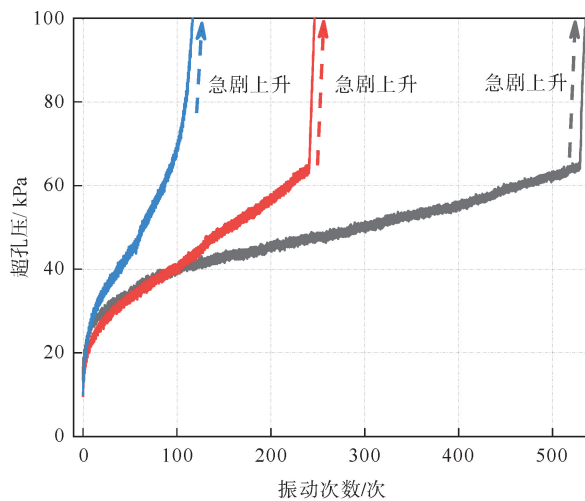


图 3 不同动应力幅值作用下超孔压-振动次数关系曲线
 —— $\sigma_d=10$ kPa; —— $\sigma_d=15$ kPa; —— $\sigma_d=20$ kPa

动后期,从图中可以观察到超孔压出现了突然急剧增长的崩塌式破坏现象。这可能是因为试样在持续的动荷载作用下,其承载能力随着振动次数的增加而逐渐减弱。随着振动的进行,超孔压不断累积,当超孔压增长至某一临界值时,较高的超孔压会导致试样突然丧失强度和刚度,此时试样无法继续承载动荷载作用,产生不可控的大变形,进而引发超孔压的急剧增长。

2.1.2 应力-应变

图4为不同动应力幅值作用下应力与应变的发展曲线,其中图4(a)—(c)分别代表了在10、15以及20 kPa 3种动应力幅值作用下的应力-应变曲线随振动次数 N 的增加而变化的规律。从图中可以观察到,在第1次循环开始前,由于存在静偏应力,试样的初始应变并不是从0开始的。随着循环加载的开始,砂土在动荷载的作用下展现出滞回圈形态的应力-应变曲线。随着振动次数的增加,滞回圈逐渐向右平移,表明轴向变形在逐渐增大。在加载的初始阶段,滞回曲线的开口较大,这可能与试样在初期较为松散,受到外荷载作用后颗粒重新排列有关。然而,随着循环振动次数的增加,滞回曲线的开口逐渐变小。这是由于试样不断受到循环动荷载的作用,颗粒间的接触变得更加紧密,砂土也变得更加密实,其变形能力减小。但值得注意的是,随着循环振动次数的进一步增加,滞回曲线的开口开始增大,并出现动应力开始降低、轴向变形迅速增大的现象。这种现象随着振动次数的增加而加剧。此外,动应力幅值的大小会影响

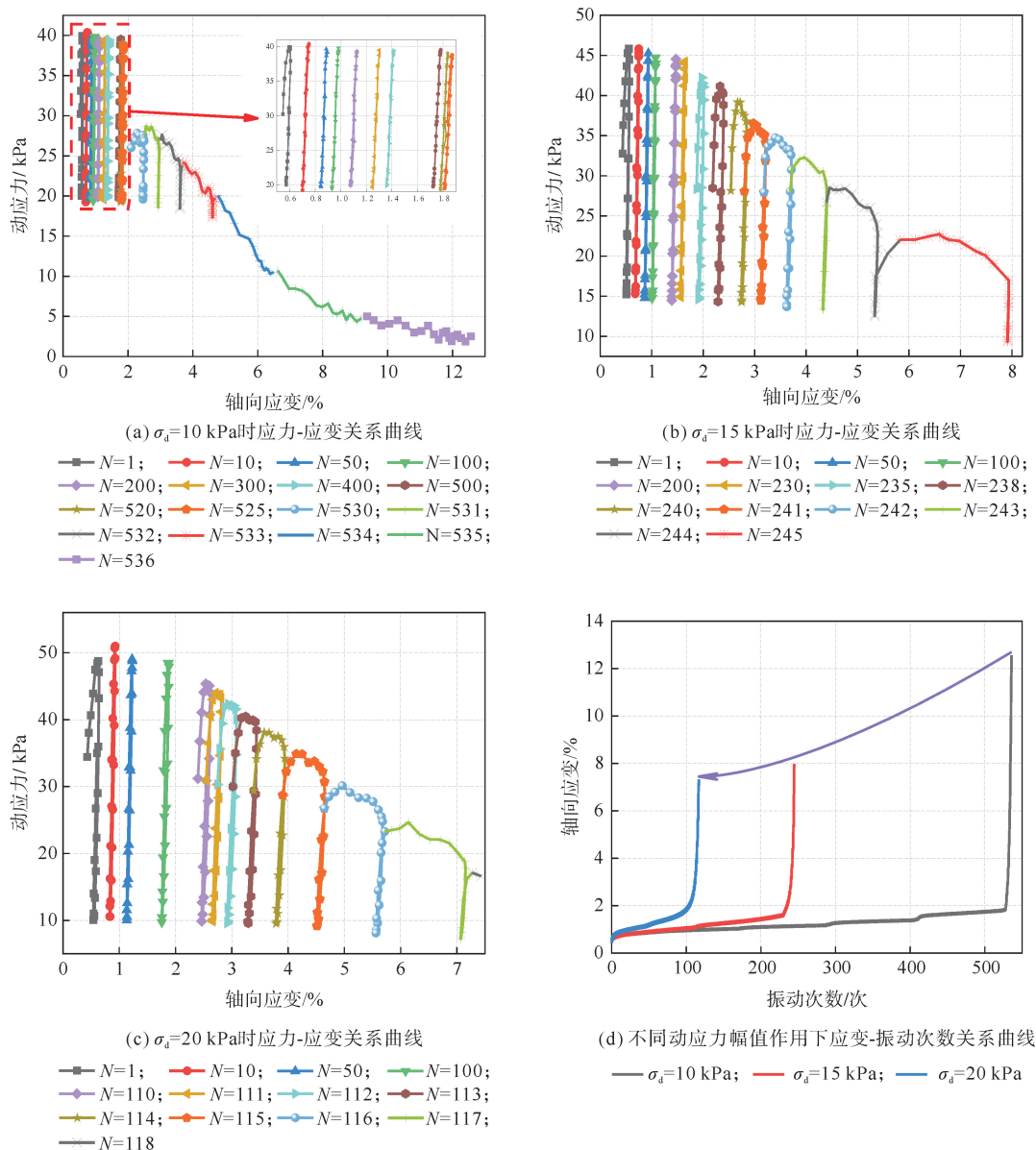


图4 不同动应力幅值作用下应力、应变发展曲线

这种现象的出现时机:幅值越大,该现象出现得越早。

图 4(d)展示了不同动应力幅值作用下轴向应变与振动次数的关系曲线。从曲线中可以观察到,随着振动次数的增加,轴向应变持续增加。而且动应力幅值越大,轴向应变的增长速度越快。不过当试样达到液化破坏后,动应力幅值越低,最终所产生的轴向应变反而越大。

2.2 加载频率对砂土液化特性的影响

2.2.1 超孔压

图 5 为 100 kPa 围压条件下不同加载频率作用所引起的超孔压随振动次数变化的关系曲线,从图中可以看到,在振动初始阶段,同样分别存在 9.74、9.48、10.06 kPa 的瞬时超孔压。随着振动次数的增加,不同加载频率下的超孔压均呈现上升趋势,且加载频率越高,超孔压的增长速度越慢,这意味着试样达到液化破坏所需的振动次数也随之增加。具体来说,当加载频率为 0.5 Hz 时,试样在 158 次振动后便达到了液化破坏的状态。当频率增加到 1.0 Hz 时,达到液化所需的振动次数增加至 245 次。当加载频率进一步增加到 2.5 Hz 时,试样需要经历 432 次振动才能发生液化破坏。此外,与图 3 中的观察结果相似,在振动后期,超孔压也同样出现了急剧增长的崩塌式破坏现象。这一现象再次证明了在持续的动荷载作用下,试样的承载能力会逐渐丧失,最终导致超孔压的迅速上升。

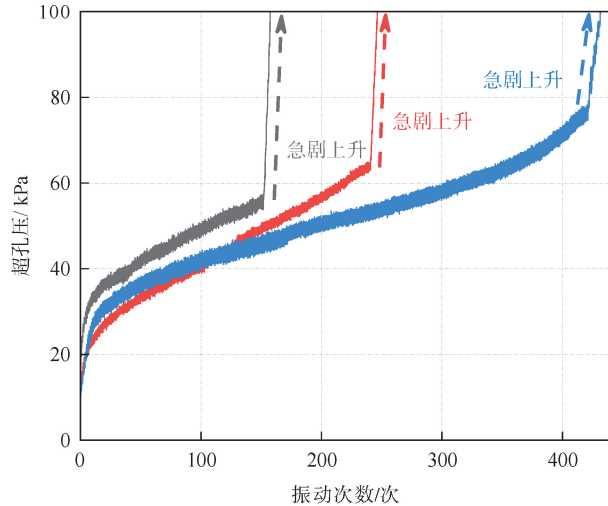


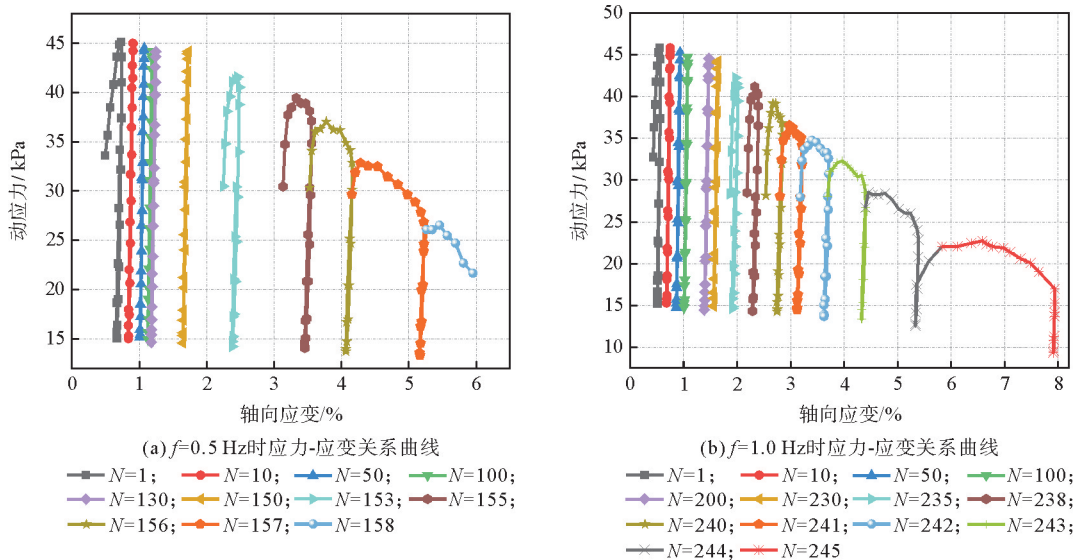
图 5 不同加载频率作用下超孔压-振动次数关系曲线

— $f=0.5$ Hz; — $f=1.0$ Hz; — $f=2.5$ Hz

2.2.2 应力-应变

图 6 为不同加载频率作用下应力与应变发展曲线,其中图 6(a)—(c)分别是在 0.5、1.0 以及 2.5 Hz 3 种加载频率作用下的应力-应变曲线随振动次数的增加而变化的规律,从图中可以看出,其滞回曲线开口同样呈现出先减小后增大的趋势,加载频率的不同导致应力开始降低、无法达到目标应力的时机也不同。

图 6(d)为不同加载频率作用下的轴向应变与振动次数的关系曲线,从图中可以观察到,随着振动次数的增加,轴向应变也呈现出持续增大的趋势。值得注意的是,当试样达到液化破坏后,加载频率的不同会导致其最终轴向应变呈现出显著的差异,加载频率越高,试样在液化破坏后所产生的轴向应变就越大。



(a) $f=0.5$ Hz 时应力-应变关系曲线

— $N=1$; — $N=10$; — $N=50$; — $N=100$;
— $N=130$; — $N=150$; — $N=153$; — $N=155$;
— $N=156$; — $N=157$; — $N=158$

(b) $f=1.0$ Hz 时应力-应变关系曲线

— $N=1$; — $N=10$; — $N=50$; — $N=100$;
— $N=200$; — $N=230$; — $N=235$; — $N=238$;
— $N=240$; — $N=241$; — $N=242$; — $N=243$;
— $N=244$; — $N=245$

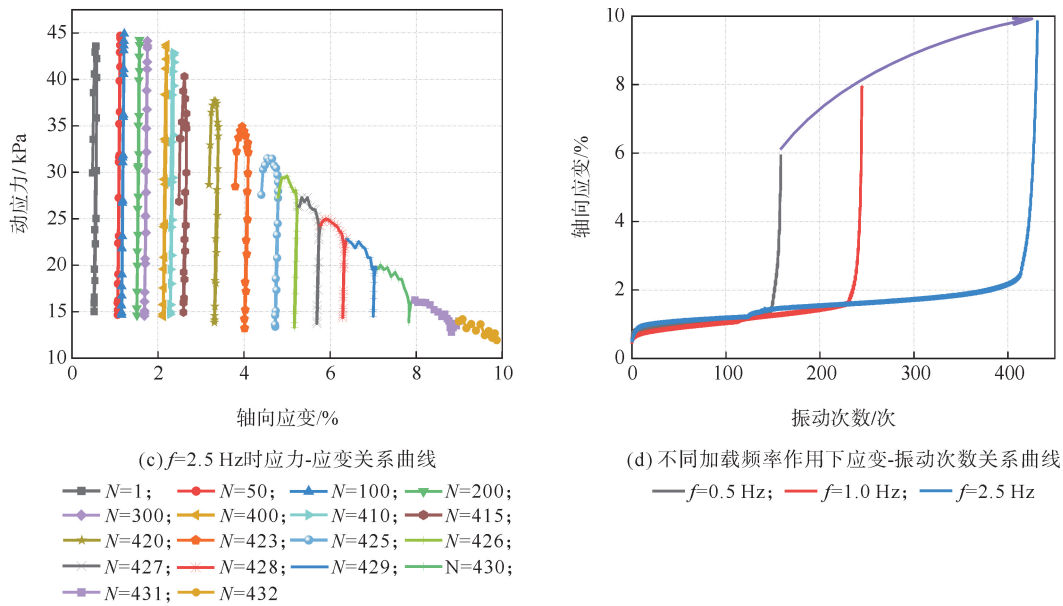


图6 不同加载频率作用下应变与应力、应变发展曲线

2.3 有效围压对砂土液化特性的影响

2.3.1 超孔压

图7为不同有效围压作用所引起的超孔压随振动次数变化的关系曲线,从图中可以观察到,在未开始振动时,由于围压 σ_3 的不同,施加静偏应力后产生的瞬时超孔压也各不相同,围压越大,所产生的瞬时超孔压就越小。当围压为100 kPa时,所产生的瞬时超孔压为9.48 kPa;当围压增加至150 kPa时,所产生的瞬时超孔压为5.17 kPa;当围压进一步增加至200 kPa时,所产生的瞬时超孔压仅为3.45 kPa。此外,随着围压的增大,超孔压在振动过程中的上升速度明显减缓。这一现象充分表明,砂土的抗液化能力随着有效围压的增大而显著增强,使得液化现象更难以发生。当围压为100 kPa时,振动次数达到245次时发生液化破坏;当围压增加到150 kPa时,其超孔压随振动次数的增加呈现出平缓上升的趋势;而当围压为200 kPa时,其超孔压随振动次数的增加基本趋于平缓状态,无明显变化。

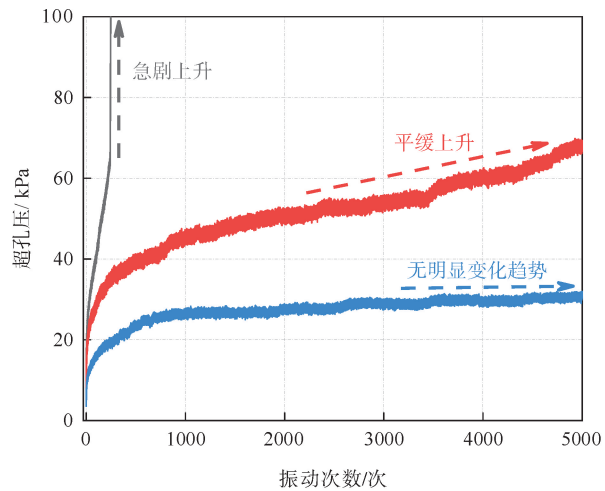


图7 不同有效围压作用下超孔压-振动次数关系曲线

2.3.2 应力-应变

图8为不同有效围压作用下应力与应变发展曲线,其中图8(a)—(c)分别是在100、150以及200 kPa 3种有效围压作用下的应力-应变曲线随振动次数的增加而变化的规律,从图中可以清晰地观察到,随着有效围压的增大,砂土发生液化破坏的难度逐渐增加,有效围压对砂土的变形产生了显著的影响:随着有效围压的增加,产生的变形逐渐减小,静偏应力施加后产生的初始应变也随之减小。这是因为有效围压的增大对土体具有压密作用,使得土体变得更加紧密,土颗粒间的联系也更加密切。因此,有效围压越大,所产生的变形越小,砂土的抗液化能力也就越强。

图8(d)为不同有效围压作用下轴向应变与振动次数的关系曲线,从图中可以观察到,随着振动次数的增加,轴向应变呈现持续增长的趋势。有效围压对轴向应变增长速度的影响显著:有效围压越大,轴向

应变的增长越缓慢。当有效围压为 150 kPa 时,仍可以观察到轴向应变存在明显的上升趋势;但当有效围压提升至 200 kPa 时,其增长趋势明显平缓,几乎观察不到显著的上升迹象。这一现象充分说明,增大有效围压能够有效提升砂土的抗变形能力,进而增强其抗液化性能。

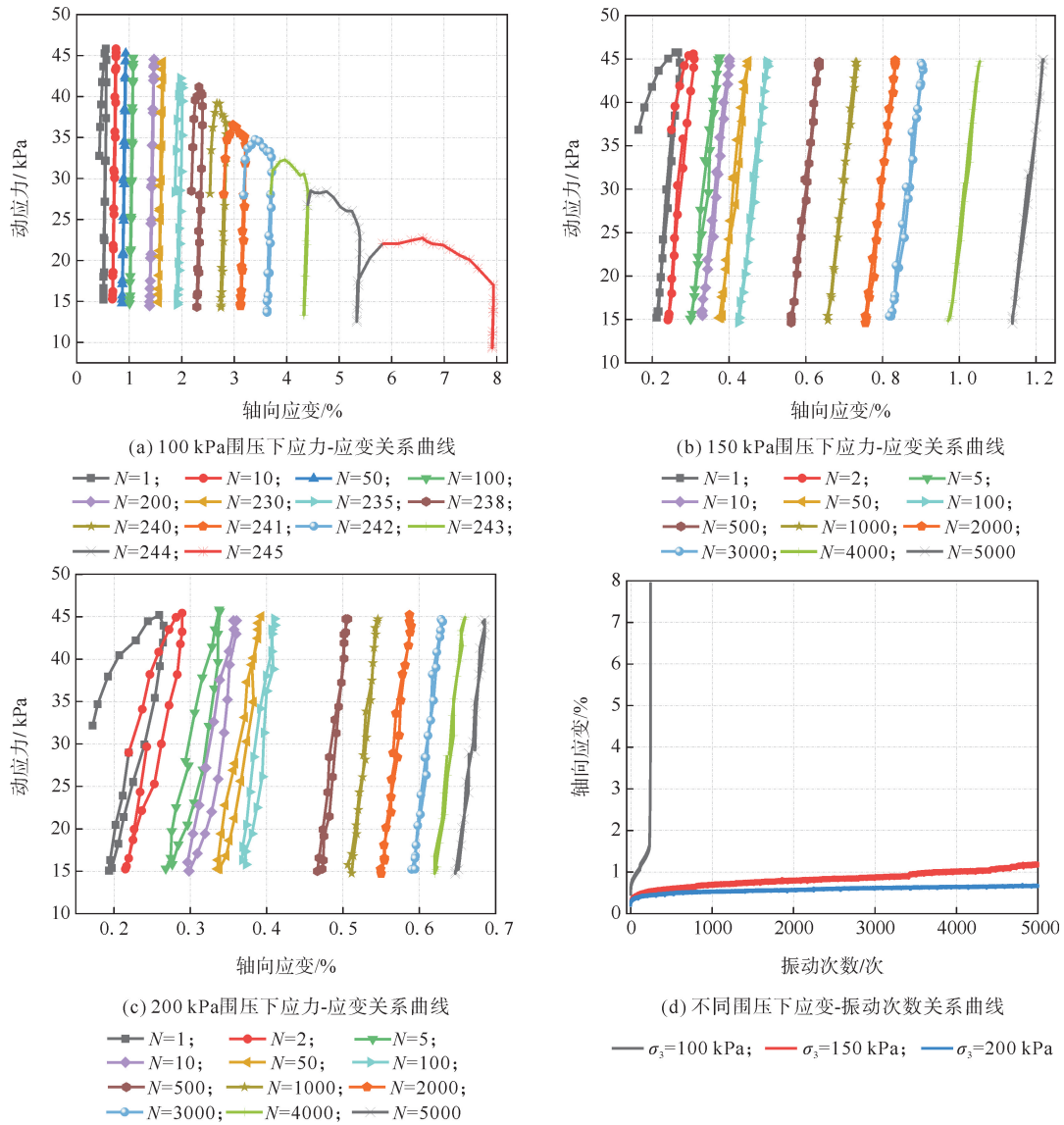


图 8 不同有效围压作用下应力与应变、应变发展曲线

3 抗液化措施

通过试验研究发现,地铁列车振动荷载作用会使不良地层发生液化破坏,可以考虑通过以下方法降低地铁列车振动荷载作用下土体的液化风险:

- 1) 采用注浆加固的方法。向土层中注入特制的浆液,提高土体的密实度和强度,从而增加其抗液化能力。
- 2) 设置排水系统。通过设置降水井或排水沟等方式降低地下水位,减小土层的含水量,提高其抗液化能力。
- 3) 采用桩基加固的方法。通过在地铁列车轨道下方设置桩基,将列车荷载有效地传递到深层稳定的土层中,减少地基土体的液化风险。

4 结论

本文采用应力控制循环加载的方法,对地铁列车振动荷载引起砂土液化的宏观响应特性进行了深入研究。通过试验,探讨了动应力幅值、加载频率和有效围压等关键因素对砂土液化特性的影响,主要得到以下结论:

1) 动应力幅值对砂土液化特性具有显著影响。随着动应力幅值的增加,超孔压累积速度明显加快,砂土抗液化能力降低。动应力幅值越大,轴向应变的增长越快;但当试样达到液化破坏后,动应力幅值越低,所造成的轴向应变越大。

2) 在地铁列车振动荷载作用下,加载频率同样对砂土的液化特性产生显著影响。随着加载频率的提升,超孔压的增长速度逐渐放缓,从而导致试样达到液化破坏所需的振动次数相应增加。此外,加载频率对于轴向应变的影响也较为明显,当试样发生液化破坏后,较高的加载频率会导致更大的轴向应变产生。

3) 围压的增加对砂土的抗液化能力具有积极的影响。随着有效围压的增加,试样变得更加密实,超孔压上升的速度明显减缓,轴向应变增长速度也随之减慢,这表明砂土的抗液化能力与抗变形能力显著增强,不易发生液化现象。

参考文献(References):

- [1] 刘华北,宋二祥.可液化土中地铁结构的地震响应[J].岩土力学,2005(3):381-386.
LIU Huabei, SONG Erxiang. Earthquake induced liquefaction response of subway structure in liquefiable soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(3): 381-386.
- [2] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway sub-structure[J]. Engineering Geology, 2014, 171: 45-58.
- [3] 徐世达.某滨海填土区地铁盾构隧道翻浆冒泥病害治理分析[J].现代城市轨道交通,2020(1):50-54.
XU Shida. Analysis on measures on mud pumping in a metro shield tunnel in coastal reclamation area[J]. Modern Urban Transit, 2020(1): 50-54.
- [4] 马龙祥,靳永福,张超,等.黏土与粉土复合地层及其中地铁隧道的车致长期沉降[J].西南交通大学学报,2022,57(5):1103-1112.
MA Longxiang, JIN Yongfu, ZHANG Chao, et al. Long-term settlements of composite stratum of clay and silt and metro tunnel in it due to train operation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(5): 1103-1112.
- [5] 王国才,徐启鹏,刘祎阳,等.地铁列车荷载下软土的动力响应和长期沉降分析[J].浙江工业大学学报,2022,50(2):186-191.
WANG Guocai, XU Qipeng, LIU Yiyang, et al. Research on the dynamic response and long-term settlement of soft soil under metro loadings[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2022, 50(2): 186-191.
- [6] SUN L G, ZHAO J S, QIN W Q, et al. Dynamic response analysis of soil around curve section tunnel under train vibration load[J]. Applied Sciences, 2023, 13(14): 8013.
- [7] GU Z F, WEI H L, LIU Z K, et al. Dynamic response mechanism of silt ground under vibration load[J]. Sustainability, 2022, 14(16): 10335.
- [8] 朱颖,钱晓华,曾长女,等.地铁隧道列车循环荷载下粉砂地基长期沉降研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(5):652-658.
ZHU Ying, QIAN Xiaohua, ZENG Changnü, et al. Study on long-term settlement of silt foundation under train cyclic loading of subway tunnel[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2023, 46(5): 652-658.
- [9] GUO J Q, XU L X, XU C, et al. Dynamic response analysis on stress and displacement of the shield tunnel structure and soil layer under train-induced vibration in Xiamen Metro Line 6[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 11962.
- [10] 赵晗竹,隋杰英,李耀.基于ANSYS的地铁列车运行对周围环境的振动分析[J].青岛理工大学学报,2019,40(3):50-56.
ZHAO Hanzhu, SUI Jieying, LI Yao. An ANSYS-based analysis of vibration response of subway to surroundings[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019, 40(3): 50-56.
- [11] GB/T 50123—2019,土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—2019, Standard for geotechnical testing method[S].
- [12] 丁智,张涛,魏新江,等.地铁列车循环荷载试验论证研究[J].地震工程学报,2015,37(3):789-793.
DING Zhi, ZHANG Tao, WEI Xinjiang, et al. Experimental study on the cyclic loading of metro trains[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 789-793.