

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201901066

饱和砂土循环液化模式影响因素试验研究*

潘霞, 许成顺, 徐佳琳, 戴金

(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: 通过室内试验探讨了振动频率、骨架相对密实度、填料含量及成分对砂土循环液化强度及液化模式的影响。针对相对密实度分别为35%、50%和80%的砂骨架中添加0%、5%、8%、10%、15%和20%等不同质量的填料(粉土、粉质黏土)进行了循环扭转试验,循环加载频率为0.1、1 Hz。结果表明:砂土循环液化模式与振动频率密切相关,振动频率较高时,呈现显著的软化特征和流滑现象,振动频率较低时,呈现剪胀和循环活动性;循环液化模式与骨架相对密实度密切相关,填料含量及填料成分对动强度具有较显著的影响,但填料含量在一定范围内并不影响循环液化模式,填料成分对循环液化模式产生一定影响。

关键词: 填料含量; 加载频率; 应力—应变关系; 有效应力路径; 液化模式

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0635-08

Experimental Study on Influencing Factors of Circulating Liquefaction Model of Saturated Sand Soil

PAN Xia, XU Chengshun, XU Jialin, DAI Jin

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

Abstract: The effects of vibration frequency, skeleton density, fines content and composition on cyclic liquefaction strength and liquefaction mode of sandy soil are discussed through laboratory tests. The cyclic torsional shear tests were carried out for sand skeleton with 35%, 50% and 80% compactness, adding 0%, 5%, 8%, 10%, 15% and 20% fine grains (silt and silty clay) of different quality. cyclic loading frequency is 0.1Hz and 1Hz. The experimental results show that the cyclic liquefaction mode of sandy soil is closely related to the vibration frequency. When the vibration frequency is high, the liquefaction mode presents obvious softening characteristics and slippery phenomena. When the vibration frequency is low, the liquefaction mode presents dilatancy and cyclic activity. The cyclic liquefaction mode is closely related to the skeleton compactness, and the content and composition of fine particles have significant effects on the dynamic strength. However, the content of fine particles does not affect the cyclic liquefaction mode in a certain range, and the composition of fine particles has a cer-

* 收稿日期:2019-01-31;修回日期:2019-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51722801,51421005)资助

作者简介:潘霞(1994—),女,硕士研究生。主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究。E-mail:799413272@qq.com

通讯作者:许成顺(1977—),女,教授,博导。主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究。

E-mail:xuchengshun@bjut.edu.cn

tain impact on the cyclic liquefaction mode.

Keywords: fines content; vibration frequency; stress and strain; effective stress path; liquefaction model

引言

砂土液化主要有砂沸、流滑和循环活动性三种类型。砂沸是指由渗透压力引起的土颗粒上浮或沸腾,丧失全部承载力造成喷砂冒水的现象,与地震时土中孔隙水压力场分布有关,与砂土的密度和体积变形无关。流滑是指饱和松散砂颗粒骨架在单程或剪切作用下,呈现出不可逆的体积变形,在不排水条件下,引起孔隙水压力增大和有效应力减小,最后导致无限制流动变形的现象。循环活动性主要出现在相对密度较大的饱和无黏性土的固结不排水剪切试验中,主要与试样在循环作用中呈现出的剪胀剪缩性有关,从而形成了瞬态液化与有限度断续变形的现象^[1]。

目前诸多学者通过室内试验探讨了砂土的抗液化强度等特性,包括土性条件(土的颗粒特征、密度特征以及结构特征)、起始应力条件、动荷载条件(动荷载的波形、振动频率、持续时间等)以及排水条件等^[2]对抗液化强度特性的影响。曾长女等^[3]研究了黏粒含量和粉粒含量对粉土动孔压发展模式的影响,并对已有的指数形式孔压模式进行修正;衡朝阳等^[4]发现不仅是黏粒含量,黏粒的矿物成分也会对砂土的抗液化性能产生影响;周健等^[5]通过共振柱和动三轴试验,发现了细粒含量对饱和砂土动剪切模量和液化强度的影响呈非线性;V. C. Xenaki^[6]指出在砂间孔隙比一定的情况下,使饱和砂土抗液化强度最低的细粒含量约为44%;J. H. Troncoso等^[7]对相同孔隙比下不同细粒含量的砂土进行循环剪切试验,结果表明,循环抗剪强度随着细粒含量的增加而降低;C. P. Polito等^[8]和K. T. Law等^[9]认为含细粒饱和砂土的抗液化强度随细粒含量的增加而降低,当抗液化强度降低到某一值时,又随细粒含量的增加而逐渐升高;黎冰等^[10]通过室内动三轴试验研究了振动频率对黏土与EPS颗粒混合轻质土(LCES)动力特性的影响;郭莹等^[11]采用不同固结比、围压和相对密实度进

行了频率范围为0.05~1 Hz的试验,结果表明随着振动频率的提高,饱和砂土的抗液化强度增强;许成顺等^[12]探讨了应力应变模式与初始固结状态的关系;郭莹等^[13]认为主应力方向的变化方式对饱和砂土不排水动强度具有显著影响;沈扬等^[14]通过开展具有不同初始固结比的密实粉土($D_r=70\%$)在不排水主应力轴循环旋转下的系列试验,探讨了主应力轴旋转复杂动应力对偏压固结粉土的性状演变影响。

但上述的大部分成果主要关注土性条件、循环加载模式、起始应力条件等对抗液化强度、孔隙水压力模型等的影响,尚未深入探讨不同级配、不同加载模式等对砂土循环液化模式的影响,而循环液化模式,即液化时的应力—应变特征是建立相关本构关系的重要基础。本文拟通过室内试验探讨振动频率、骨架密度、填料含量及成分对砂土循环液化强度及液化模式的影响,以期为液化砂土应力—应变关系的建立提供试验依据。

1 试验条件

本文试验采用空心圆柱循环扭剪仪^[15],试样尺寸为 $D100\times d60\times H150$ mm,福建标准砂作为土样的骨架,该砂比重 $G_s=2.645$;最大、最小孔隙比分别为 $e_{\max}=0.961$, $e_{\min}=0.615$;颗粒尺寸为 $d_{50}=0.16$ mm。为了研究不同颗粒级配对循环液化模式的影响,采用3种骨架相对密实度,分别为35%、50%和80%,在福建标准砂形成的骨架中添加细颗粒来调整级配。所填细颗粒为粉土和粉质黏土,分别取自河北涿州和北京大兴黄村,其颗粒级配曲线如图1所示,粉土塑性指数为 $I_p=6.5$,粉质黏土塑性指数为 $I_p=12.4$ 。试验中填料含量是指所填细颗粒质量与骨架质量之比,即试验中砂骨架的相对密实度保持不变,分别添加0%、5%、8%、10%、15%和20%等不同质量的填料。振动频率分别取0.1、1 Hz。试验采用分层干装法制样,根据预定的密度称取一定质量的骨架砂和填料,充分混合均匀后装

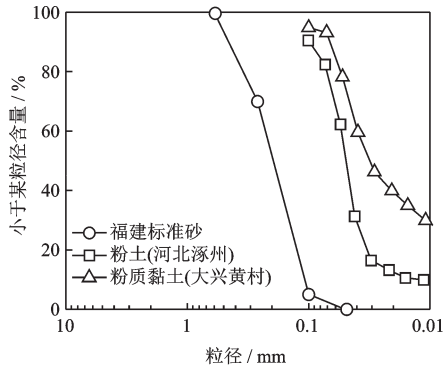


图1 试验用砂颗粒级配曲线

Fig.1 Particle gradation curve of testing sand

样。试样的饱和采用通入 CO_2 、无气水和施加反压等联合饱和法^[15]。通过测定孔隙水压力系数 B 值来测定饱和度,本文全部试验实测 B 值均达到98%及以上。

本文开展共28组均等固结条件下的循环扭剪试验,初始固结压力均为100 kPa。主要试验工况及方案详见表1。

表1 试验方案

Table 1 Test Program

骨架相对密实度 D_r / %	填料含量 FC / %	固结压力 / kPa	填料成分	加载频率 / Hz	动荷载幅值 / kPa
35	0、5、8、10、15、20	100	粉土	0.1	15
50	0、5、8、10、15、20	100	粉土/粉质黏土	0.1/1	20
80	0、5、8、10、15、20	100	粉土	0.1	23

2 试验结果与分析

2.1 加载频率对砂土循环液化模式的影响

图2给出了骨架相对密实度为 $D_r=50\%$,填料(粉土)含量分别为 $FC=5\%$ 、 10% 、 20% ,加载频率分别为0.1、1 Hz时的动剪应力—剪应变关系、孔隙水压力时程曲线和有效应力路径。

由图2可知,具有不同填料含量的砂土其超孔隙水压力在循环荷载作用下均达到了初始围压,砂土发生了液化,但其液化模式受加载频率的影响十分显著。从孔隙水压力时程曲线中可发现,

加载频率较低(0.1 Hz)时,砂土的剪胀性较为明显,孔隙水压力波动较大,初始液化后砂土仍保持一定的承载能力,砂土在临界状态线附近强度得到恢复,呈现蝴蝶翼型有效应力路径;当加载频率为1 Hz时,由孔隙水压力时程曲线可知,不同填料含量的砂土均呈现明显的剪缩特性,砂土液化以后孔隙水压力稳定,承载能力显著下降,最终有效应力始终保持为零,同时产生明显的流滑变形。由此可知,振动加载频率对砂土的循环液化模式产生显著的影响。

值得注意的是:即使高频作用下的砂土承载能力显著降低,发生流滑变形,但在相同的循环次数下,所产生的应变反而小于低频作用下的砂土的循环剪切变形。这说明在高频作用下,砂土液化以后,与变形速率相关的粘性效应起到重要作用,变形发展得到控制;从孔隙水压力时程曲线可知,当循环荷载幅值和填料含量相同时,高频作用达到初始液化所需的振动循环次数明显高于低频情况,说明高频作用下砂土的抗液化强度得到提高,与已有的研究成果认识一致^[11]。

2.2 填料含量对砂土抗液化强度及循环液化模式的影响

图3为骨架相对密实度为35%、50%、80%,填料(粉土)含量分别为0%、5%、8%、10%、15%和20%砂土的孔隙水压力时程曲线。由图可知,填料含量不同,土体孔隙水压力的增长速度显著不同。骨架比较疏松($D_r=35\%$)或中度密实($D_r=50\%$)的砂土,土体孔隙水压力的累积速度随着填料含量的增加而减慢,骨架疏松时填料含量的影响相对较大;在骨架相对密实度较高($D_r=80\%$)时,土体孔隙水压力的累积速度先随着填料含量的增加而减慢,之后又随着填料含量的增加而加快,且填料含量超过10%时,孔隙水压力发展速度基本不受填料含量的影响。由图可知骨架比较疏松或中密时,填料主要以填充作用为主,从而提高抗液化强度;当骨架比较密实且填料含量较大时,填料主要起润滑作用,反而降低土体的抗液化强度。

图4表示骨架相对密实度为 $D_r=50\%$,填料(粉土)含量分别为0%、5%、10%、20%砂土的动剪应力—动剪应变关系、有效应力路径。由有效应力路径图可知,随着填料含量的增加,砂土达到零有效

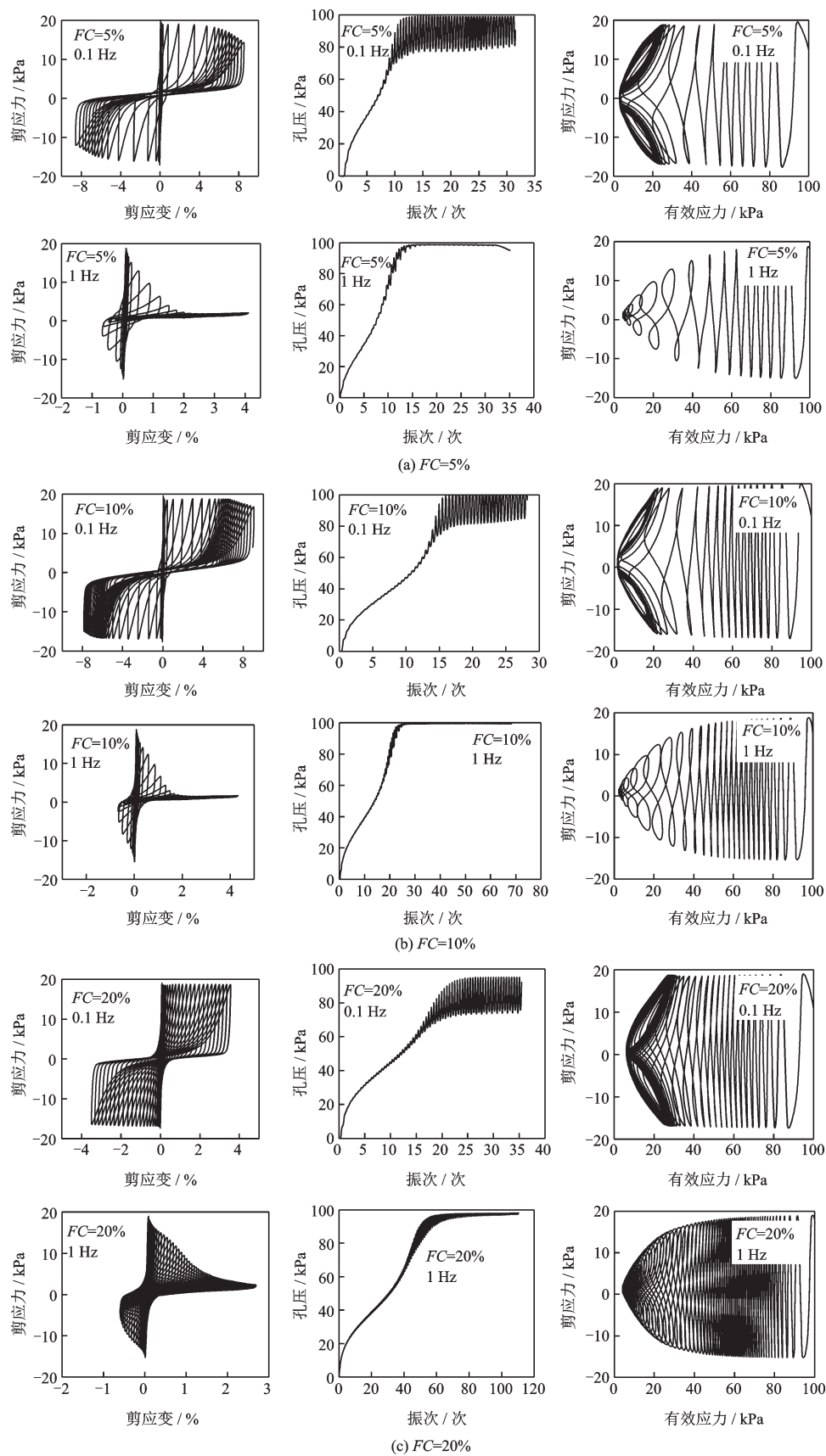


图2 不同加载频率、不同填料含量砂土的液化特性及液化模式($\sigma_d=20$ kPa)

Fig.2 Liquefaction characteristics and liquefaction modes of sands with different loading frequencies and fines content ($\sigma_d=20$ kPa)

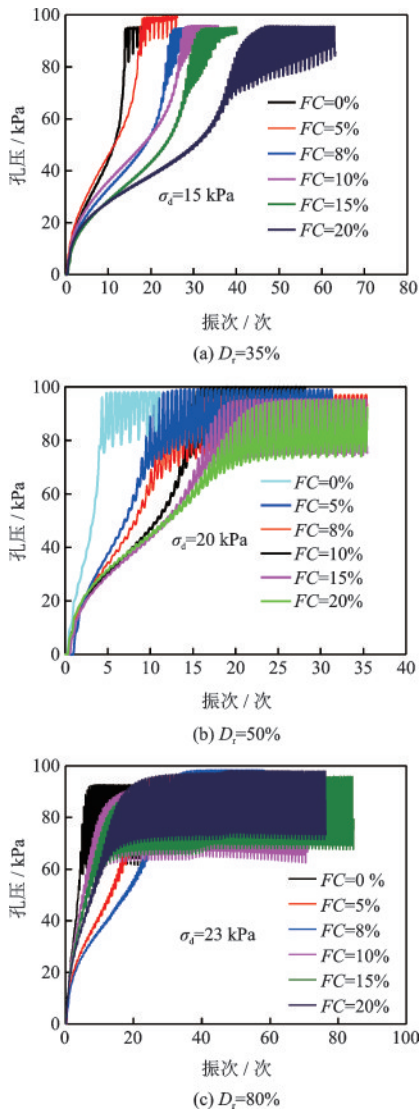


图3 孔隙水压力时程曲线

Fig.3 Pore water pressure time history curves

应力所需要的循环作用次数逐渐增大,即抗液化强度逐渐增高,但当骨架相对密实度一定时,填料含量对动剪应力—动剪应变关系、有效应力路径模式几乎没有影响,即试验过程中砂土始终保持一定的循环承载能力,呈现循环活动性。由以上规律可知,填料含量影响抗液化强度,但并不会影响其液化模式。

图5表示骨架相对密实度对饱和砂土动剪应力—应变关系和有效应力路径的影响。由图可知,当砂土骨架相对密实度 $D_r=35\%$ 时,砂土循环荷载承载力呈现逐渐降低的趋势; $D_r=50\%$ 、 80% 时,由于剪胀特性的影响,砂土始终呈现很好的循环承载能力,有效应力路径在有效应力为零时附近区域呈现蝴蝶翼效应。

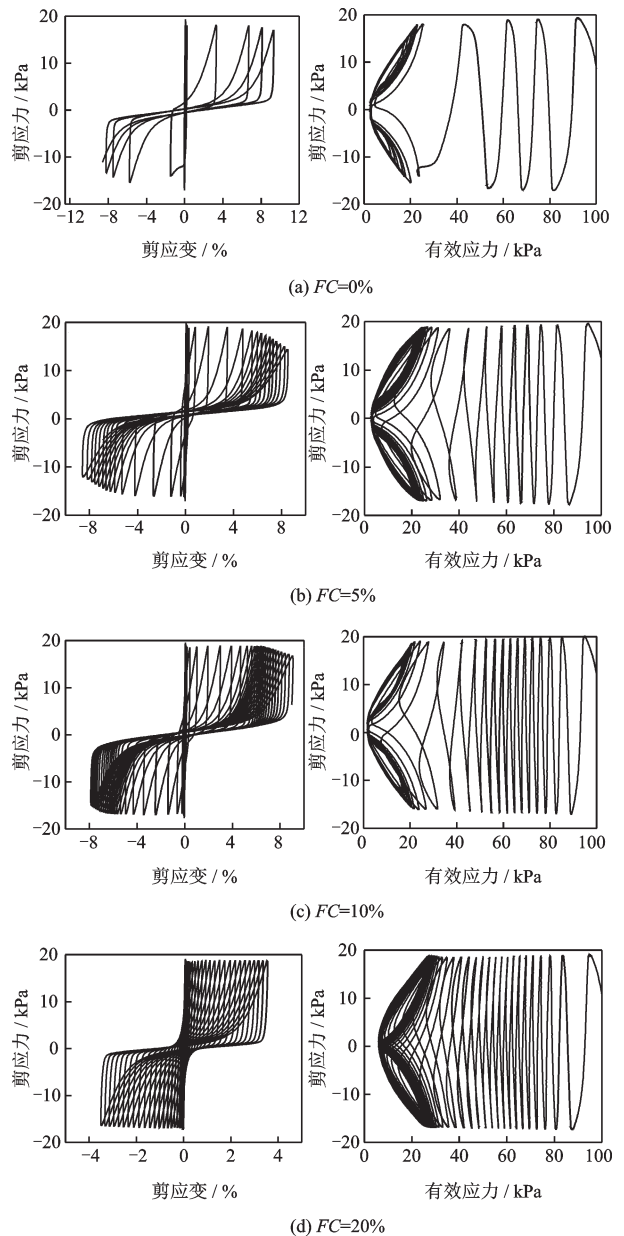


图4 填料含量对剪应力—应变关系、有效应力路径的影响 ($\sigma_d=20\text{ kPa}$ 、 $D_r=50\%$)

Fig.4 The influence of fines content on shear stress-shear strain relationship and effective stress path ($\sigma_d=20\text{ kPa}$ 、 $D_r=50\%$)

2.3 不同填料成分对饱和砂土液化模式的影响

图6表示骨架相对密实度 $D_r=50\%$ 、填料含量相同 ($FC=5\%$, 即试样质量相等)、填料成分不同的三组试样的孔隙水压力时程曲线、动剪应力—动剪应变关系和有效应力路径。所填填料分别为细砂(与骨架同级配)、粉土和粉质黏土。图中还给出了具有相同的骨架相对密实度,并没有添加任何填料的试样孔隙水压力时程曲线、动剪应力—动剪

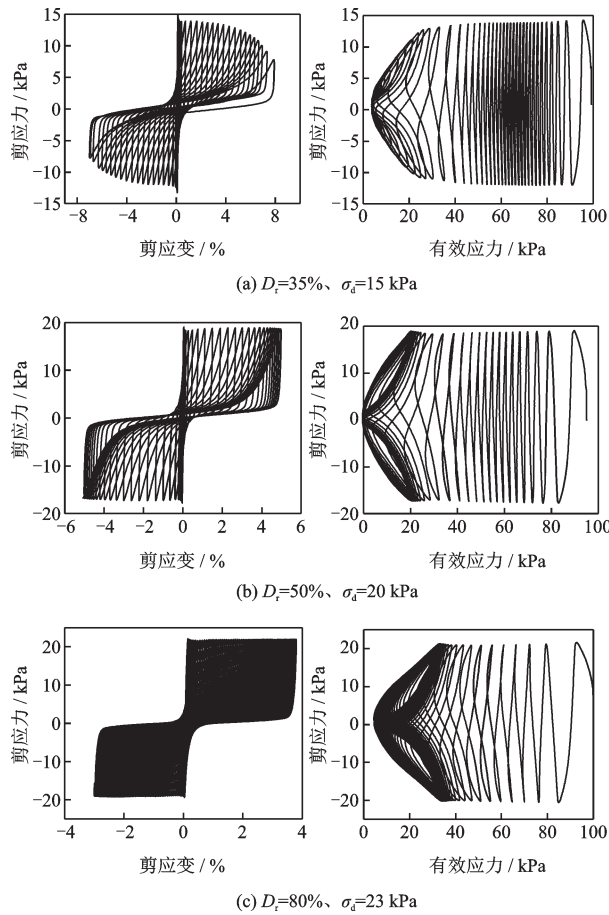


图5 骨架相对密实度对动剪应力—应变关系、有效应力路径的影响($FC=15\%$)
 Fig.5 Effect of skeleton compactness on dynamic shear stress-shear strain relationship and effective stress path ($FC=15\%$)

变关系和有效应力路径。

从图中可发现,填料成分对循环液化强度具有较大的影响,即当填料为细砂或粉土时,试样的抗液化强度得到显著提升,而当填料为粉质黏土时,与没有添加任何填料的试样其抗液化强度基本一致。值得注意的是,当所填填料为细砂或粉土时,砂土呈现剪胀特性,循环荷载承载力始终保持不变;当所填填料为粉质黏土时,发生液化以后承载能力明显降低。试验中所填细砂与骨架级配相同,其平均粒径为 $d_{50}=0.16$ mm;粉土取自河北涿州,其粒径分布范围为 $0.02\sim 0.075$ mm,约90%为粉粒;粉质黏土取自北京大兴黄村,其粒径范围约为 $0.002\sim 0.075$ mm,其中 $0.002\sim 0.03$ mm 粒径占50%左右,即具有一定的黏粒成分。由试验结果可看出,粉粒或砂粒的加入显著提高了骨架的抗液化能力,而黏粒成分对砂土骨架的贡献较小。

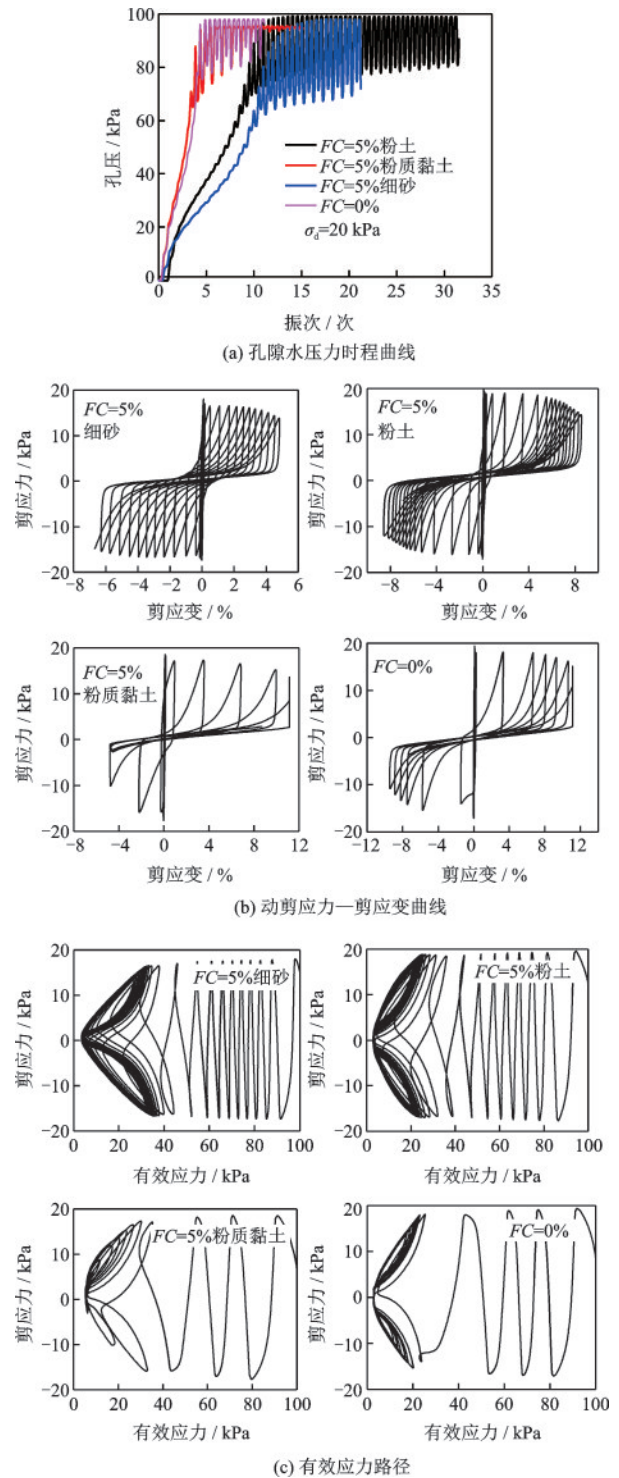


图6 不同填料成分试样的孔隙水压力时程曲线、动剪应力—剪应变曲线、有效应力路径($D_r=50\%$, $FC=5\%$)
 Fig.6 Pore water pressure time-history curve, dynamic shear stress-shear strain curve and effective stress path of samples with different fine particle compositions ($D_r=50\%$, $FC=5\%$)

图7表示骨架相对密实度 $D_r=50\%$ 、填料含量相同($FC=15\%$)、填料成分不同的两组试样的孔隙

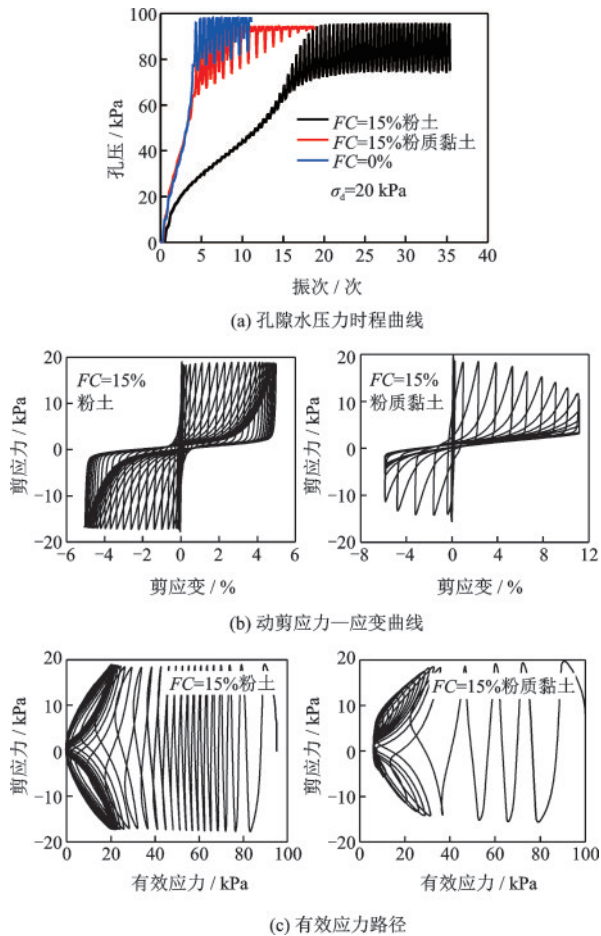


图7 不同填料成分试样的孔隙水压力时程曲线、动剪应力—应变曲线、有效应力路径($D_r=50\%$, $FC=15\%$)

Fig.7 Pore water pressure time history curve, dynamic shear stress-shear strain curve and effective stress path of samples with different fine particle composition ($D_r=50\%$, $FC=15\%$)

水压力时程曲线、动剪应力—动剪应变关系和有效应力路径。同样,当填料为粉质黏土时,填料含量对抗液化强度的影响并不显著,发生液化以后,孔隙水压力趋于稳定,土体循环荷载承载能力具有降低趋势;当填料为粉土时,显著提升了抗液化强度,土体呈现显著的剪胀性和循环活动性。

3 结论

(1)振动频率对砂土循环液化模式影响显著,在高频荷载作用下,砂土抗液化强度高,但液化以后呈现显著的应变软化特征,承载能力急剧降低,即呈现流滑特征;在低频荷载作用下,砂土抗液化强度低,但液化以后砂土呈现显著的剪胀特性,承

载能力没有明显的下降,即呈现循环流动特征。

(2)骨架相对密实度一定的情况下,填料含量对抗液化强度影响较大,但对循环液化模式的影响并不显著,对于本文中密砂土,填料含量在一定范围内,砂土均呈现剪胀特征和循环活动性。

(3)填料成分对液化强度及液化模式具有一定的影响,当所填填料为细砂或粉土时,砂土抗液化强度得到显著提升;而当所填填料为黏粒时,砂土抗液化强度基本得不到提升,发生液化以后,砂土呈现流滑变形趋势。

参考文献:

- [1] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997: 88-115.
Wang W Sh. Dynamic strength and liquefaction characteristics of soil [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997: 88-115. (in Chinese)
- [2] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 188-193.
Xie D Y. Soil dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 188-193. (in Chinese)
- [3] 曾长女, 刘汉龙, 陈育民. 细粒含量对粉土动孔压发展模式影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2193-2198.
Zeng Ch N, Liu H L, Chen Y M. Test study on influence of fine particle content on dynamic pore water pressure development mode of silt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2193-2198. (in Chinese)
- [4] 衡朝阳, 何满潮. 含粘粒砂土抗液化性能的试验研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 339-345.
Heng Ch Y, He M Ch. Experimental study of liquefaction-resistant characteristics of clayey sand [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(4): 339-345. (in Chinese)
- [5] 周健, 杨永香, 贾敏才, 等. 细粒含量对饱和砂土液化特性的影响[J]. 水利学报, 2009, 140(10): 1184-1188.
Zhou J, Yang Y X, Jia M C, et al. Effect of fines content on liquefaction properties of saturated silty sands [J]. Shui Li Xue Bao, 2009, 140(10): 1184-1188. (in Chinese)
- [6] Xenaki V C, Athanasopoulos G A. Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23: 183-194.

- [7] Troncoso J H, Verdugo R. Silt content and dynamic behavior of tailing sands[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco: Taylor & Francis, 1985: 1311-1314.
- [8] Polito C P, Martin J R. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(5):408-415.
- [9] Law K T, Ling Y H. Liquefaction of granular soils with noncohesive and cohesive fines[C]//Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid: CRC Press, 1992:1491-1496.
- [10] 黎冰,高玉峰,丰土根. 振动频率对LCES动力特性的影响分析及其机制初探[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2731-2734.
- Li B, Gao Y F, Feng T G. Cyclic loading frequency effect and mechanism of lightweight clay-EPS beads soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2731-2734. (in Chinese)
- [11] 郭莹,贺林. 振动频率对饱和砂土液化强度的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(6):618-623.
- Guo Y, He L. The influences of the vibration frequencies on liquefaction strength of saturated sands[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(6):618-623. (in Chinese)
- [12] 许成顺,栾茂田,郭莹. 砂土动应力—应变发展特性试验[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(9):956-960.
- Xu Ch Sh, Luan M T, G Y. Test of sand dynamic stress-strain behavior [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(9):956-960. (in Chinese)
- [13] 郭莹,栾茂田,何杨,等. 主应力方向循环变化对饱和松砂不排水动力特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4):403-409.
- Guo Y, Luan M T, He Y, et al. Effect of variation of principal stress orientation during cyclic loading on undrained dynamic behavior of saturated loose sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 403-409. (in Chinese)
- [14] 沈扬,张朋举,闫俊,等. 主应力轴旋转下小偏压固结密实粉土崩塌特性及孔压模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9):2561-2568.
- Shen Y, Zhang P J, Yan J, et al. Collapse characteristics and unified pore water pressure model of slightly-anisotropically consolidated dense silt under principal stress axis rotation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9):2561-2568. (in Chinese)
- [15] 许成顺,刘晨,刘海强,等. 竖向-扭转双向耦合剪切仪功能分析及应用[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(2): 233-238.
- Xu Ch Sh, Liu Ch, Liu H Q, et al. Function analysis and application of vertical-torsional coupling shear apparatus [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(2):233-238. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)