

脲酶诱导碳酸钙沉积固化砂土液化阻力研究

李 颖, 秦健翔, 李佳越, 李紫怡, 刘 伽*, 李 刚

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月15日

摘 要

饱和砂土地基在振动荷载作用下易发生液化现象, 地基加固是提高其稳定性与抗液化能力的关键措施。本文对EICP固化饱和砂土开展循环荷载作用下的三轴固结不排水剪切试验, 分析围压、胶结次数、循环应力比及振动频率等因素对固化砂土抗液化性能的影响。研究表明: 随着围压、胶结次数及干密度的增加, EICP固化砂土的动应变与滞回曲线面积逐渐减小, 有效应力路径曲线越密实, EICP固化砂土达到液化时所需振动次数逐渐增加, 其液化阻力逐渐提高。随着循环应力比与振动频率的增加, 滞回曲线面积逐渐增大, 有效应力路径向左移动速率增加, 试样达到液化时所需振次逐渐降低, 抗液化能力减弱。

关键词

EICP, 固化, 砂土, 液化, 滞回曲线

Study on the Liquefaction Resistance of Aeolian Soil Solidified by Enzyme Induced Carbonate Precipitation

Ying Li, Jianxiang Qin, Jiayue Li, Ziyi Li, Jia Liu*, Gang Li

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 15th, 2025

Abstract

Saturated sandy soil foundation is prone to liquefaction under vibration loads, and foundation reinforcement is a key measure to improve its stability and resistance to liquefaction. This article conducts triaxial consolidation undrained shear tests on EICP solidified saturated sand under cyclic loading, analyzing the effects of confining pressure, bonding frequency, cyclic stress ratio, and

*通讯作者。

文章引用: 李颖, 秦健翔, 李佳越, 李紫怡, 刘伽, 李刚. 脲酶诱导碳酸钙沉积固化砂土液化阻力研究[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 665-671. DOI: 10.12677/hjce.2025.144071

vibration frequency on the liquefaction resistance of solidified sand. The research results indicate that with the increase of confining pressure, bonding frequency, and dry density, the dynamic strain and hysteresis curve area of solidified sand gradually decrease, the effective stress path curve becomes denser, and the required vibration frequency for solidified sand to reach liquefaction gradually increases, and its liquefaction resistance gradually increases. As the cyclic stress ratio and vibration frequency increase, the hysteresis curve area gradually increases, and the effective stress path moves to the left at an increased rate, resulting in a gradual decrease in the required number of vibrations for the sample to reach liquefaction and a weakening of its anti liquefaction ability.

Keywords

EICP, Solidified, Aeolian Sand, Liquefaction, Hysteretic Curve

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土体液化通常是指饱和和无黏性或者低黏性土体,在静态、冲击或循环荷载作用下,孔隙水压力升高,土体的强度与刚度下降并产生大变形破坏的现象。对于饱和疏松砂土,在循环荷载下会发生显著的流动液化,引发强度的大量损失甚至完全丧失,并伴随流动变形的发生。由砂土液化引起的结构转动、地面沉陷及结构上浮等问题是建筑物和基础设施破坏的主要原因之一。脲酶诱导碳酸钙沉积(Enzyme Induced Carbonate Precipitation, EICP)是近年来新兴起的固化方法,主要通过植物脲酶催化尿素水解生成铵根离子和碳酸根离子,铵根离子可以为溶液提供碱性环境,而碳酸根离子与钙离子结合生成碳酸钙,通过胶结土颗粒达到提高强度并降低渗透性的目的。

国内外学者在研究 EICP 固化砂土的静动态力学方面取得了一些进展,研究表明, EICP 技术可以显著改善砂土的力学性能。Oktafiani 等[1]用大豆提取脲酶,采用 EICP 技术改良土壤,试验结果表明,该技术能够提高土壤的强度。Wu 等[2]采用 EICP 技术固化风积砂,并通过实验证明不同的胶结溶液浓度、脲酶活性、温度和处理次数对固化砂的力学性能有不同的影响。Zhang 等[3]分析了 EICP 加固砂土边坡的物理力学性能、抗侵蚀性和微观结构,揭示了 EICP 增强砂土边坡的机理,证实了 EICP 技术的可行性。Nafisi 等[4]通过三轴试验评估了 MICP 和 EICP 固化砂土的宏观和微观行为。结果表明, EICP 处理的砂土比 MICP 需要更少的碳酸钙能达到相同的剪切波速。李涛等[5]通过动态三轴试验研究了粘土、粉土和砂混合物抗液化性的影响规律,试验结果表明,当试样的细粒含量不同时,抗液化性规律也不同。基于无侧限抗压强度和动三轴试验的结果和现象, Sun 等[6]总结了脲酶、木质素及其混合物对粉土强度和抗液化性的改善作用。Mase 等[7]研究了偏应力对砂土抗液化性的影响,结果表明,施加偏应力会影响砂土试样的抗液化性。Naeem 等[8]研究了在不同初始饱和度和处理周期下 EICP 固化砂土的力学性能,结果表明,初始 EICP 饱和度较低的试样有利于砂粒之间有效的碳酸钙沉淀和胶结,从而提高了回弹模量和 UCS。

EICP 技术能够显著提高土体的强度并降低其渗透性,而对于提高土体的抗液化性能有待进一步验证。本文以 EICP 固化饱和砂土为研究对象,通过开展循环荷载作用下的三轴固结不排水剪切试验,分析围压、胶结次数、循环应力比、干密度及振动频率等因素对固化砂土液化阻力的影响。研究成果可为砂土地基液化防治提供重要的参考与借鉴。

2. 材料与方法

2.1. 试样制备

试验用砂为标准砂，颗粒粒径分布范围介于 4.8~0.072 mm 之间， $D_{10}=0.14\text{ mm}$ 、 $D_{30}=0.50\text{ mm}$ 、 $D_{60}=0.90\text{ mm}$ 。脲酶溶液为大豆脲酶提取液，将大豆粉碎过 100 目筛，加入去离子水配置浓度为 100 g/L 的豆粉溶液，用磁力搅拌器充分搅拌后静置 2~3 小时，将上层清液倒入离心管，在 3000 r/min、4℃条件下离心 15 分钟，取离心管中的上清液即为脲酶溶液。试验所用胶结液为等体积等浓度(1.4 mol/L)的尿素与氯化钙混合液。试验所用模具内径为 50 mm，高为 200 mm 的有机玻璃管，标准砂试样直径为 50 mm，高度为 100 mm，参考土工试验方法标准(GB/T50123-2019)制备试样。采用二阶段灌注方法，首先注入 40 ml 的脲酶溶液，静置 30 分钟，随后注入 40 ml 的胶结溶液，灌注完成后静置 24 小时。

2.2. 试验方案

为了分析 EICP 固化标准砂的动力特性，本文采用 DYN-TTS 型土体动三轴仪开展三轴固结不排水试验，试验方案见表 1。依据土工试验方法标准(GB/T50123-2019)，试验采用应力控制加载方式，轴向施加正弦波动荷载，循环设定 10,000 次，每个循环记录 20 个数据点，当孔压达到围压时停止试验。

Table 1. Dynamic triaxial test scheme
表 1. 动三轴试验方案

围压 σ_3/kPa	胶结次数 $P_c/\text{次}$	循环应力比 CSR	干密度 $\rho_d/(\text{g}/\text{cm}^3)$	频率 f/Hz
25	2	0.25, 0.3, 0.35	1.6	1, 3
	4	0.25, 0.3, 0.35	1.6	1, 3
	6	0.25, 0.3, 0.35	1.6	1, 3
50	2	0.25, 0.3, 0.35	1.6	1, 3
	4	0.25, 0.3, 0.35	1.6	1, 3
	6	0.25, 0.3, 0.35	1.6	1, 3
100	2	0.25, 0.3, 0.35	1.6	1, 3
	4	0.25, 0.3, 0.35	1.6	1, 3
	6	0.25, 0.3, 0.35	1.6	1, 3

3. 结果与分析

3.1. 围压影响分析

图 1 为 $\rho_d=1.6\text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $CSR=0.30$ 、 $f=1\text{ Hz}$ 、 $P_c=2$ 时，不同围压下 EICP 固化砂土滞回曲线与应力路径曲线。由图可见，随着振动次数的增加，EICP 固化砂土的动应变逐渐增加，滞回曲线面积逐渐增大，由中间区域向两侧延伸，表明动荷载作用下砂颗粒间发生错动与重组。随着围压的增加，偏应力峰值逐渐增加，滞回曲线面积逐渐增大，表明耗散能较大。这是因为围压的增加能够引起土体内颗粒重新排列，颗粒接触点的数量增加，土体的抗剪强度增大；另一方面，围压的增加还能减少土体内的孔隙水压力，有效抑制液化现象的发生。围压的增大对液化阻力起到了积极的作用，能够提高土体的稳定性，减少液化风险，这与 Figueroa 等[9]的研究结论一致。在循环应力作用下，有效应力路径逐渐向左演化。在加载初期，应力路径迅速向左发展，主要原因在于试样初始孔隙比较大，试样体积的减小会引起孔压迅速增大，导致平均有效应力的减小速率增加。在加载中期，平均有效应力以稳定的速率发展，有效应力路径

逐渐向左移动。在加载后期,有效应力路径开始接近零点,平均有效应力迅速减小,试样开始出现失稳直至发生液化破坏。在相同循环应力比作用下,随着围压的增加,有效应力路径曲线越密实,表明 EICP 固化砂土达到液化时所需的振动次数越多,试样的抗液化能力越强[9]。

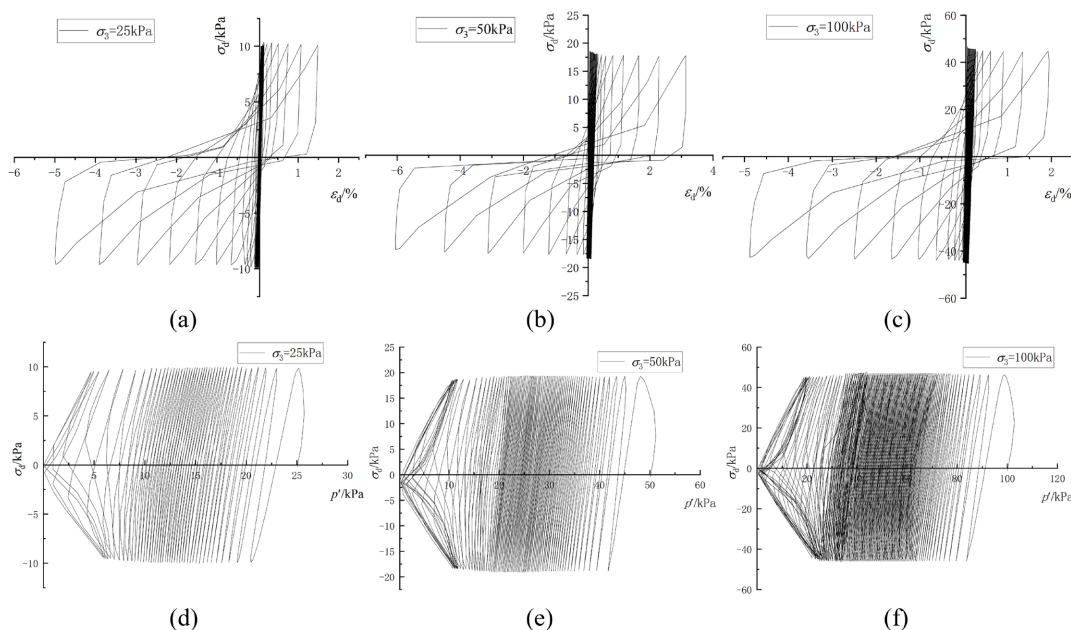
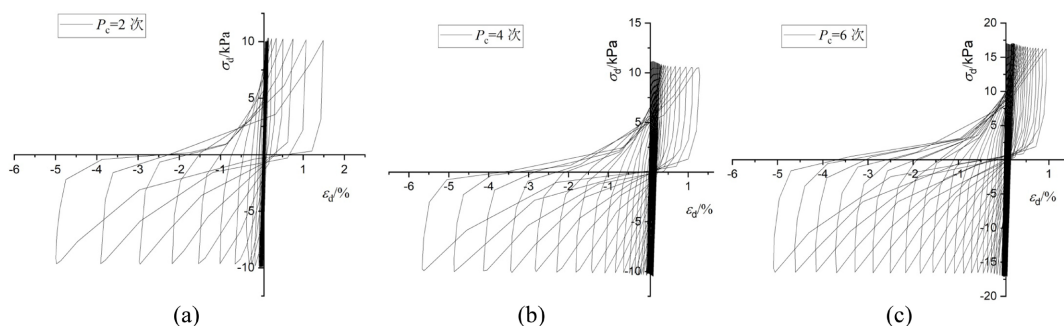


Figure 1. Hysteresis curve and effective stress path curve under different confining pressures

图 1. 不同围压下滞回曲线和有效应力路径曲线

3.2. 胶结次数影响分析

图 2 为 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 、 $CSR = 0.30$ 、 $f = 1 \text{ Hz}$ 、 $\sigma_3 = 25 \text{ kPa}$ 时,不同胶结次数下 EICP 固化砂土滞回曲线与应力路径曲线。由图可见,在循环荷载作用下,随着胶结次数的增加,EICP 固化砂土的动应变逐渐减小,滞回曲线面积随之减小,有效应力路径曲线越密实,表明 EICP 固化砂土达到液化时所需振动次数逐渐增加,其液化阻力逐渐提高。产生上述现象的主要原因在于随着胶结次数的增加,EICP 矿化生成的 CaCO_3 晶体逐渐增多,能够有效填充砂颗粒间孔隙并将其胶结成为整体,提高试样的整体受力性能。在循环荷载作用下,砂颗粒间黏结力与摩擦力增强,试样的孔隙贯通性减弱,导致动应变随胶结次数的增加而减小,破坏振次随胶结次数的增加而增加。因此,胶结次数的增加对液化阻力的提高起到了积极的作用,通过增加粘结力和摩擦力、减小颗粒位移、减少孔隙水体积变化等方式增强了土体的稳定性,降低了液化风险,Chen 等[10]在综述微生物诱导碳酸钙矿化技术的研究现状与发展中得到了相一致的结论。



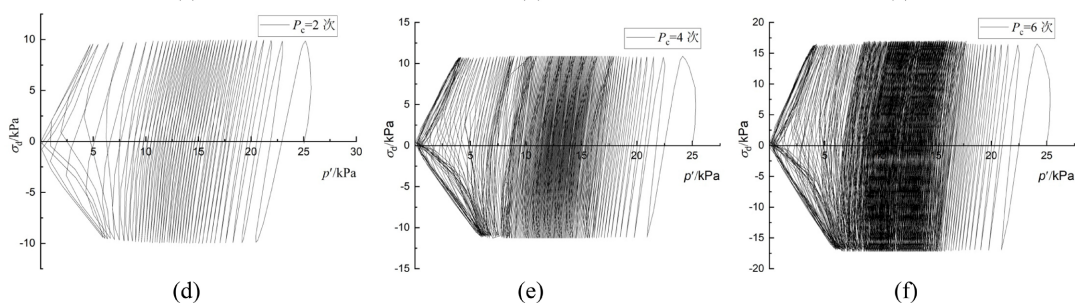


Figure 2. Hysteresis curve and effective stress path curve under different cementation times
图 2. 不同胶结次数下滞回曲线和有效应力路径曲线

3.3. 循环应力比影响分析

图 3 为 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 、 $f = 1 \text{ Hz}$ 、 $\sigma_3 = 25 \text{ kPa}$ 、 $P_c = 2$ 时, 不同循环应力比下 EICP 固化砂土滞回曲线与应力路径曲线。由图可见, 随着循环应力比的增加, 偏应力峰值与动应变逐渐增大, 滞回曲线面积随之增加, 试样达到液化时所需的振动次数逐渐减少, 表明其抗液化能力逐渐减小。产生上述现象的主要原因在于循环应力比的增加导致动应力增强, 引发砂颗粒间重新排列组合, 减小了砂颗粒间的黏结力, 导致试样整体强度的降低。一方面, 颗粒之间的相互作用势将导致颗粒的破碎和磨损, 从而削弱了颗粒之间的粘结力和摩擦力[7]。另一方面, 砂颗粒的重组会改变孔隙分布, 导致孔隙水压力随循环应力比的增加而增大, 试样破坏振次随循环应力比的增加而减小。

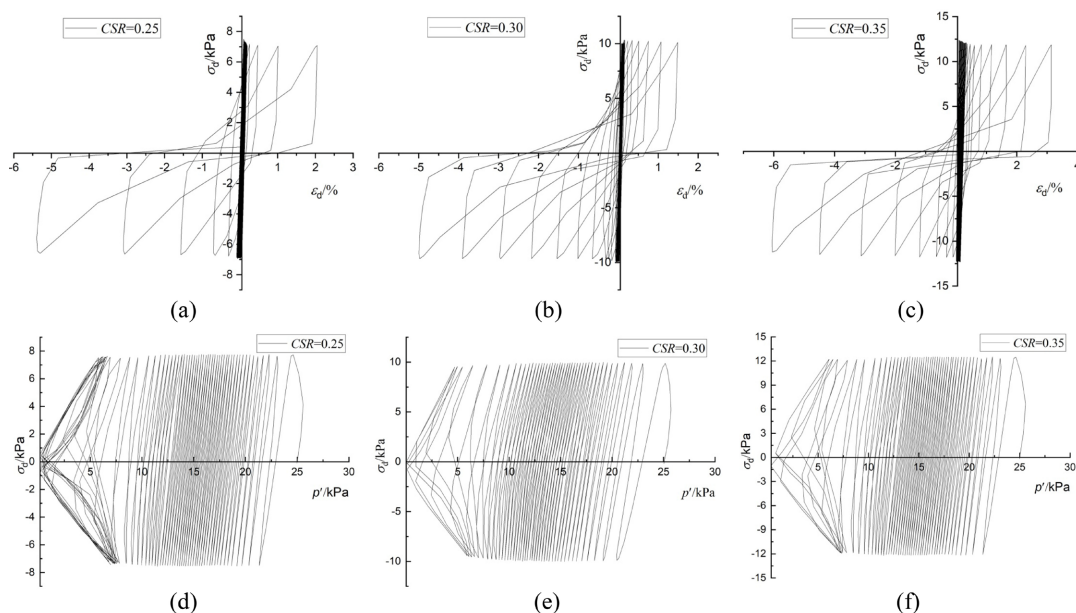


Figure 3. Hysteresis curve and effective stress path curve under different cyclic stress ratios
图 3. 不同循环应力比下滞回曲线和有效应力路径曲线

3.4. 振动频率影响分析

图 4 为 $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 、 $CSR = 0.30$ 、 $f = 1 \text{ Hz}$ 时, 不同震动频率下 EICP 固化砂土滞回曲线与应力路径曲线。由图可见, 随着振动频率的增加, 荷载在单位时间内振动次数随之增加, 滞回曲线面积逐渐增大, 有效应力路径向左移动速率增加, 导致试样达到液化时所需振次逐渐降低, 试样的抗液化能力减弱。产生

上述现象的主要原因在于，较高的频率加载下，试样遭受更快的加载与卸载过程，土体内部的颗粒未有充足的时间适应外力的改变，导致有效应力路径向左移动速率减小；此外，频率的增大会导致土体内的孔隙水无法及时排出，阻碍了土体内部的孔隙水体积变化，导致轴向应变的增长速率放缓。频率的增大对提高液化阻力起到了积极的作用，通过限制颗粒重新排列和相互作用、减缓有效应力路径的移动速率以及减缓轴向应变的增长速率，增强了土体的稳定性，降低了液化风险，这与 Wang 等[11]的研究结论一致。

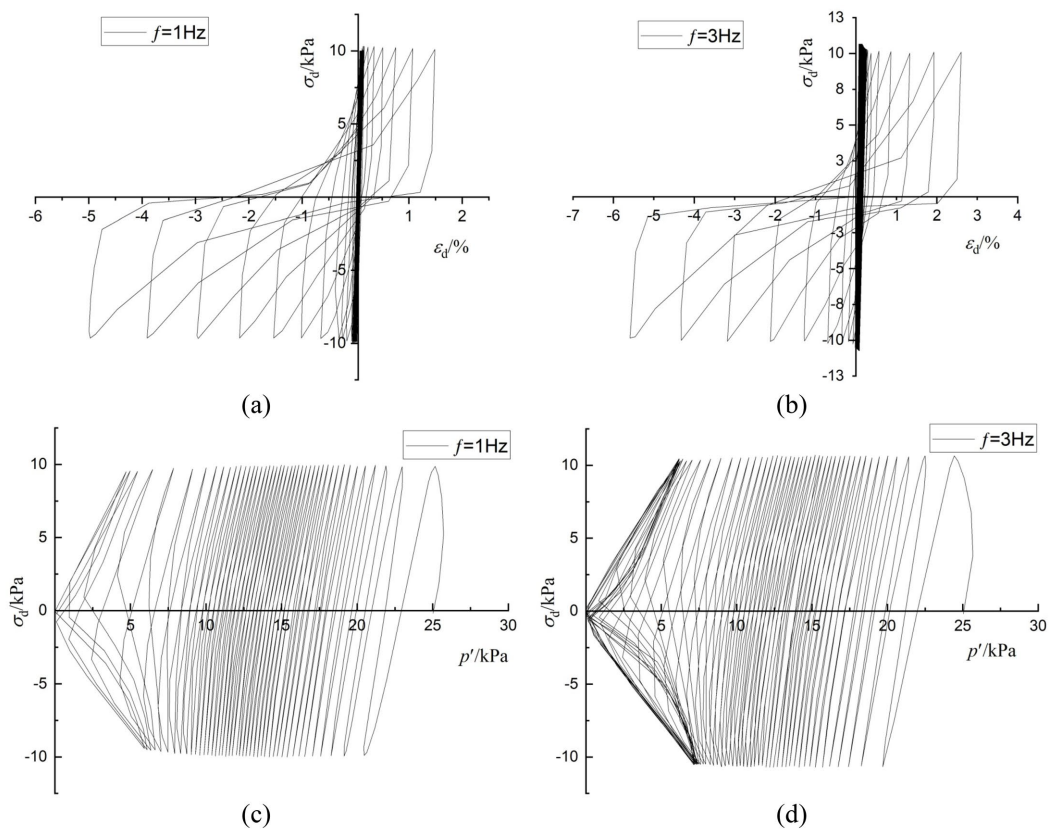


Figure 4. Hysteresis curve and effective stress path curve under different frequencies
图 4. 不同频率下滞回曲线和有效应力路径曲线

3.5. 微观结构分析

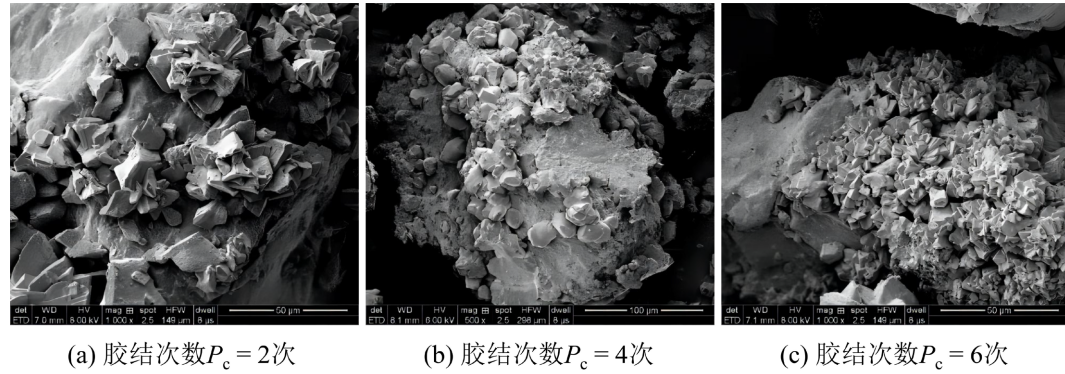


Figure 5. SEM images of samples at different cementation times
图 5. 不同胶结次数下固化试样的 SEM 图

图5为不同胶结次数下固化标准砂试样的SEM图。从图中可以看出生成的碳酸钙晶体附着于砂颗粒表面,随着胶结次数的增加,晶体生成量增加,且呈团聚状态。覆盖在沙颗粒表面的碳酸钙晶体能够增大砂颗粒的表面积,提升颗粒的粘合力 and 粘聚力。填充在颗粒之间的晶体,形成颗粒间的结合点,将松散的标准砂胶结成为“骨架”,使得砂颗粒之间形成了黏结力,抵抗着流体的外部作用力,极大增强了标准砂的抗液化性能,从而阻止了砂土发生液化现象。

4. 结论

(1) 在循环应力作用下,有效应力路径逐渐向左演化。随着围压的增加,有效应力路径曲线越密实,EICP固化砂土达到液化时所需的振动次数越多,试样的抗液化能力越强。

(2) 随着胶结次数的增加,EICP固化砂土的动应变逐渐减小,滞回曲线面积随之减小,有效应力路径曲线越密实,EICP固化砂土达到液化时所需振动次数逐渐增加,其液化阻力逐渐提高。

(3) 随着循环应力比的增加,偏应力峰值与动应变逐渐增大,滞回曲线面积随之增加,试样达到液化时所需的振动次数逐渐减少,其抗液化能力逐渐减小。

(4) 随着振动频率的增加,荷载在单位时间内振动次数随之增加,滞回曲线面积逐渐增大,有效应力路径向左移动速率增加,试样达到液化时所需振次逐渐降低,试样的抗液化能力减弱。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202412715011)。

参考文献

- [1] Oktafiani, P.G., Putra, H., Erizal, and Sutoyo, (2023) Scale-up Soybean Crude Urease Calcite Precipitation (SCU-CP) Method for Sandy Soil Improvement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1249**, Article ID: 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1249/1/012035>
- [2] Wu, L., Miao, L., Kawasaki, S. and Wang, H. (2022) Effects of Reaction Conditions on EICP-Treated Desert Aeolian Sand. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, **26**, 2662-2674. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1585-0>
- [3] Zhang, S., Liu, Z., Li, Z., Shen, D. and Wu, C. (2023) Experimental Study on the Reinforcement Mechanism and Wave Thumping Resistance of EICP Reinforced Sand Slopes. *Biogeotechnics*, **1**, Article ID: 100041. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100041>
- [4] Nafisi, A., Safavizadeh, S. and Montoya, B.M. (2019) Influence of Microbe and Enzyme-Induced Treatments on Cemented Sand Shear Response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **145**, 06019008. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002111](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002111)
- [5] 李涛, 唐小微. 黏粒和粉粒的共存对砂土静动力液化影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(z2): 169-172.
- [6] Sun, Y., Zhong, X., Lv, J., Wang, G. and Hu, R. (2023) Experimental Study on Different Improvement Schemes of EICP-Lignin Solidified Silt. *Materials*, **16**, Article 999. <https://doi.org/10.3390/ma16030999>
- [7] Mase, L.Z., Likitlersuang, S. and Tobita, T. (2018) Cyclic Behaviour and Liquefaction Resistance of Izumio Sands in Osaka, Japan. *Marine Georesources & Geotechnology*, **37**, 765-774. <https://doi.org/10.1080/1064119x.2018.1485793>
- [8] Naeem, M., Arab, M.G., Elbaz, Y., Omar, M., Ezzat, H. and Zeiada, W. (2024) Resilient Behavior of Bio-Cemented Sandy Soil Treated with Enzyme-Induced Carbonate Precipitation for Pavement Applications. *Construction and Building Materials*, **411**, Article ID: 134434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134434>
- [9] Figueroa, J.L., Saada, A.S., Liang, L. and Dahisaria, N.M. (1994) Evaluation of Soil Liquefaction by Energy Principles. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 1554-1569. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1994\)120:9\(1554\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1994)120:9(1554))
- [10] Chen, J., Liu, B., Zhong, M., Jing, C. and Guo, B. (2022) Research Status and Development of Microbial Induced Calcium Carbonate Mineralization Technology. *PLOS ONE*, **17**, e0271761. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271761>
- [11] Wang, Y., Cao, T., Gao, Y. and Shao, J. (2022) Experimental Study on Liquefaction Characteristics of Saturated Yellow River Silt under Cycles Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **163**, Article ID: 107457. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107457>