

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.257



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



SICP 方法加固饱和砂土提高抗液化能力的 动三轴试验研究

蒋超^a, 周云东^b, 张焱^a, 高玉峰^b

(河海大学 a. 土木与交通学院; b. 岩土工程研究所, 南京 210024)

摘要: 在地震作用下, 饱和砂土地基易达到液化状态, 从而形成安全隐患。以标准砂为材料进行大豆脲酶诱导碳酸钙沉积(SICP)的胶结固化, 对 30%、40% 和 50% 相对密实度下的中密砂分别做 1~3 次处理, 进行不同循环剪应力与有效固结围压比值下的动三轴试验。通过分析动应变、超孔隙水压力、动循环次数, 对 SICP 方法处理饱和砂土的抗液化效果进行评价。结果表明: 试样的孔压与应变发展都呈现出分阶段增长的特点, 孔压在加载瞬间会急剧增长到一定水平, 而后伴随塑性应变以稳定的速率增长, 直至破坏。SICP 方法处理饱和砂土能有效增强砂土的抗液化能力, 减缓超孔隙水压力的增长速度, 且处理次数越多, 密实度越高, 抗液化效果越好。

关键词: 饱和砂土; 大豆脲酶诱导碳酸钙沉积; 地基液化; 动三轴试验

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)01-0105-07

Dynamic triaxial test analysis for saturated sand cemented by SICP-method aiming at improving liquefaction resistance

JIANG Chao^a, ZHOU Yundong^b, ZHANG Yi^a, GAO Yufeng^b

(a. College of Civil and Transportation Engineering; b. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, P. R. China)

Abstract: Saturated sandy soil ground under earthquake is easy to reach liquefaction state which is of great threat. Soybean-urease induced carbonate precipitation (SICP) cement solidification was conducted using standard sand. Medium dense sand in the relative density of 30%, 40% and 50% was respectively solidified by the cementing fluid once, twice and three times, followed by a dynamic triaxial test under different CSR (ratio of cyclic shear stress to confining pressure). By analyzing dynamic strain, excess pore water pressure and the number of dynamic cycles, the effect of liquefaction resistance of the SICP-method in the treatment of saturated sand was evaluated. The results show that the pore pressure and strain development of the sample both show the characteristics of staged growth. The pore pressure will increase sharply to a certain level at the moment of

收稿日期: 2021-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(51979088)

作者简介: 蒋超(1996-), 男, 主要从事砂土生物固化研究, E-mail: hhu-jc@foxmail.com。

周云东(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: ydzhou@hhu.edu.cn。

Received: 2021-09-06

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51979088)

Author brief: JIANG Chao (1996-), main research interest: biosolidification of sand, E-mail: hhu-jc@foxmail.com.

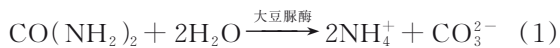
ZHOU Yundong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: ydzhou@hhu.edu.cn.

loading, and then increase at a stable rate with the plastic strain until failed. The SICP-method can effectively enhance the liquefaction resistance of sandy soil and slow down the increasing trend of excess pore water pressure. And the more the number of treatments and the higher the compactness, the better the effect of liquefaction resistance.

Keywords: saturated sandy soil; SICP; liquefaction of sand; dynamic triaxial test

在地震荷载下,饱和砂土孔隙水压力急剧上升,土体抗剪强度急剧下降,发生喷砂、冒水、地表建筑下陷等液化现象,造成严重危害。学术界对饱和砂土液化机理和防治措施展开了深入研究,发现影响砂土液化的因素主要包括饱和度、密实度、应力历史、初始剪应力等^[1-6]。目前较成熟的地基处理方法包括强夯法、换填土法、碎石桩法等,但存在污染高、工作量大等局限性^[7-11]。于是,新兴的地基处理方式应运而生,如气泡减饱和法、纳米胶凝法等,新兴方法能降低超孔压峰值,但耐久性差、成本高^[12-18]。

随着微生物学、土木工程等学科的交叉发展,学者们对生物脲酶催化诱导碳酸钙沉积的土体处理技术进行了深入研究,此方法被称作 MICP (Microbially Induced Carbonate Precipitation) 技术,但其成本高、适用面窄、细菌培养与胶结过程中会散发出刺激性气味^[19-23]。大豆中的脲酶也可以参与类似土体固化反应,且大豆脲酶比细菌细胞更易穿透小孔隙,获取便捷,成本低廉,对环境友善,该方法被称为 SICP (Soybean-urease Induced Carbonate Precipitation) 技术^[24]。其原理是使尿素在大豆脲酶的催化作用下水解出游离的碳酸根离子(CO_3^{2-})和铵根离子(NH_4^+),再与钙源(如氯化钙溶液)结合,析出碳酸钙晶体,反应过程如式(1)和式(2)所示。该晶体附着在砂颗粒的连结处与表面,形成稳定骨架^[25],提升砂土整体的刚度和稳定性,从而降低砂土液化的可能性。



目前对此类方法的研究^[26]大多集中在反应动力学基本性质的层面,动力试验层面的研究几乎是空白。笔者通过动三轴试验研究相对密实度、胶结液处理次数对饱和砂土抗液化性能的影响,拓展了对该方法的动力学研究。

1 试验概述

1.1 制样与装样方法

将豆粉过 60 目筛后获得浅黄色的细颗粒豆粉原料。配制 40 g/L 浓度的豆粉溶液,离心后经由

200 目纱网过滤,即可获得大豆脲酶粗提纯溶液,冷藏备用。试验用砂为中国 ISO 标准砂,级配曲线如图 1 所示,相关参数如表 1 所示。

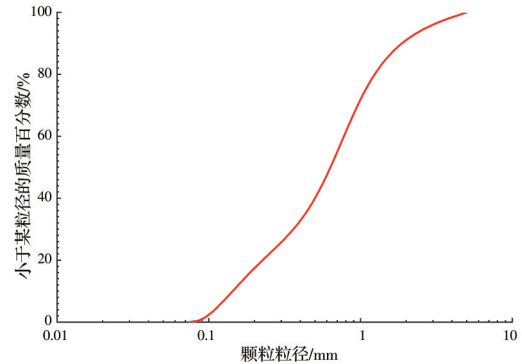


图 1 砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of sand

表 1 标准砂材料性质

Table 1 Material properties of standard sand

| 比重 | C_u | C_c | 最大孔隙比 | 最小孔隙比 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 2.65 | 5.00 | 1.09 | 0.743 | 0.366 |

采用内径 50 mm 的三瓣模制样,外侧涂玻璃胶,以阻止注浆过程中的渗漏,底部垫一片 200 目圆形纱布以阻止砂颗粒渗漏,内壁放一片影印纸用于脱模,在影印纸上装样高度处做环形标记。装样时,使用漏斗和药匙将砂均匀、缓慢地送入三瓣模中,用击实锤将砂柱压密,最终压实到刻度线处,并盖上一片土工布,以减少液体下落冲击的扰动。每次胶结处理的注入量为砂柱孔隙体积的两倍,酶液与胶结溶液按照体积比 1:3 配制,可有效降低晶体堵塞在砂柱顶端的可能性。注浆时,先用蠕动泵向土工布上泵送酶液,并适时调整滴落点,使酶液注入均匀。酶液注浆完成后,静置 30 min,使脲酶充分固定在砂土孔隙中。而后以相同的操作方法泵送胶结溶液,完成后静置 6 h。

注浆完成后,砂柱在常温下风干,而后用真空饱和缸使试样吸饱水,取出后放入冰箱冷藏。制样完成的砂柱如图 2 所示。



图 2 处理后的砂柱

Fig. 2 Sand column after treatment

测试前,取出试样,小心脱模并装入动三轴压力室内,施加 20 kPa 围压,使试样解冻。解冻后,结合二氧化碳与水头饱和,使试样达到初始饱和状态。逐级提高反压和围压,直到 B 值达到 0.95 以上。采用等向固结,对试样施加 100 kPa 的有效固结围压,当固结排水体积不再变化时,视为固结完成。

1.2 试验方案

为研究胶结处理次数、相对密实度对砂土抗液化性能的影响,对 30%、40% 和 50% 密实度下的砂柱分别进行多遍胶结处理。采集试样在循环剪应力与有效固结围压比值(CSR)为 0.063、0.125、0.250 和 0.500 时的动孔压、动应变数据,将胶结样的动力响应与未处理的标准砂样进行对比,即可评价 SICP 方法对饱和砂土抗液化性能的提升效果。

各砂柱试样的处理与加载详细情况如表 2 所示。表中,编号 A 表示 0 次胶结处理,B 表示 1 次胶结处理,以此类推。

表 2 砂柱编号

Table 2 Numbers of sand columns

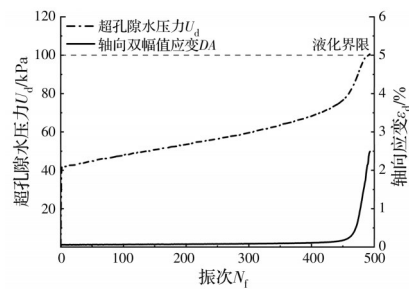
| $D_r/\%$ | CSR=0.063 | CSR=0.125 | CSR=0.250 | CSR=0.500 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 30 | A01 | A02 | A03 | A04 |
| | B01 | B02 | B03 | B04 |
| | C01 | C02 | C03 | C04 |
| | D01 | D02 | D03 | D04 |
| 40 | A05 | A06 | A07 | A08 |
| | B05 | B06 | B07 | B08 |
| | C05 | C06 | C07 | C08 |
| | A09 | A10 | A11 | A12 |
| 50 | B09 | B10 | B11 | B12 |
| | C09 | C10 | C11 | C12 |

2 试验结果与分析

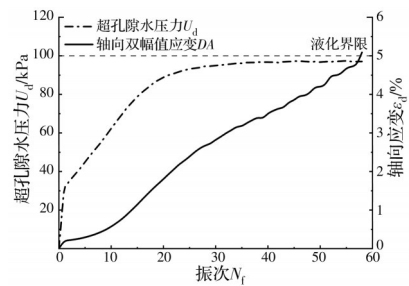
2.1 超孔压与轴向应变发展规律

动荷载频率为 1 Hz,数据采集频率为 20 Hz。选取每个循环中的孔压最大值和应变幅值最大值,绘制超孔压、轴向应变幅值关于振次的关系曲线。图 3 展示了 50% 相对密实度未胶结处理的砂样在 $CSR = 0.125$ 和 $CSR = 0.250$ 条件下(对应编号 A10 和 A11)的孔压、应变响应。

这两种情况是测试试样的典型破坏模式。从图 3(a)可以看出,试样在经历将近 500 次循环应力后,孔压达到 100 kPa,而双幅值轴向应变(DA)仅发展到 2.5% 左右;从图 3(b)可以看出,试样在经历 50 多次循环荷载后,孔压尚未达到初始液化状态,但 DA 已经率先超过 5% 水平,试样发生失稳破坏。



(a) A10 试样



(b) A11 试样

图 3 砂样的典型孔压、应变响应

Fig. 3 Typical pore pressure and strain response of sand

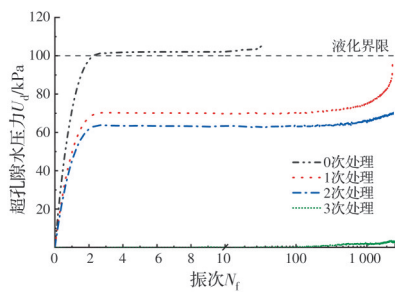
试样的应变与孔压都呈现出分阶段增长的特点。在循环荷载施加的瞬间,试样体应变使砂颗粒孔隙急剧收缩,孔压会迅速发展达到一定水平;而后砂颗粒滑移减缓,骨架稳定,轴向应变进入稳定的塑性发展阶段,孔压以稳定的速率发展;在剪应力比较小的情况下,会优先发生初始液化状态的应力破坏,而在剪应力比较大($CSR \geq 0.250$)的情况下,

应变塑性累积会发展更快,试样优先发生应变失稳破坏。试验结果表明,其他试样的动力响应均符合上述规律。

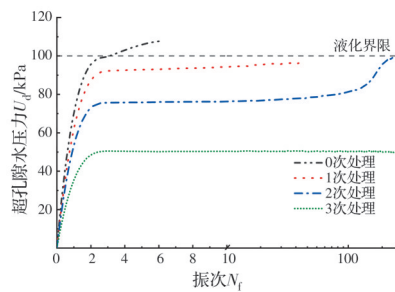
Seed 等^[27]认为,土中单元体的法向有效应力等于零($\sigma' = 0$)即标志着初始液化应力状态的发生;而 Castro^[28]认为土体的液化取决于是否发生大规模的流动与位移破坏。实际上,土体破坏是渐进发展的^[29]。试验中的胶结试样都具备一定的黏聚力,即使法向有效应力为零,单元体仍具有一定的抗剪强度。因此,当剪应力比较小时,统一以初始液化应力状态作为液化的判定标准,当剪应力比较大($CSR \geq 0.250$)时,以 $DA \geq 5\%$ 作为液化的判定准则^[30]。

2.2 胶结次数对抗液化性能的影响

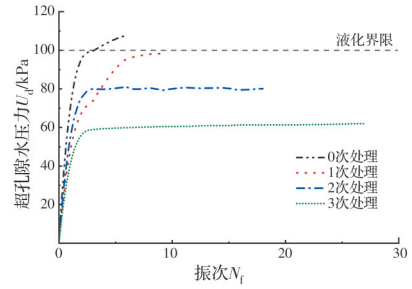
选取 30% 密实度砂样分别在不同处理次数下(编号 A01~A04、B01~B04、C01~C04、D01~D04)的孔压响应,如图 4 所示。从图中可以看出,即使在最小剪应力比条件下,30% 相对密实度的未处理试样也会迅速液化。但如果胶结液处理达到 3 次,在 0.5 的剪应力比条件下也能完全抵抗液化的发生。随着胶结处理次数的增加,试样孔压增速逐渐减缓。这是因为试样的孔隙被 $CaCO_3$ 晶体填充,整体刚度提高,受压时体应变减小,孔压增长得到抑制,因而增速放缓。



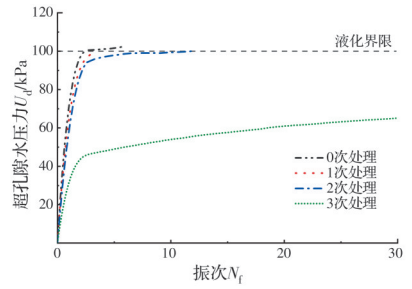
(a) CSR = 0.063



(b) CSR = 0.125



(c) CSR = 0.250



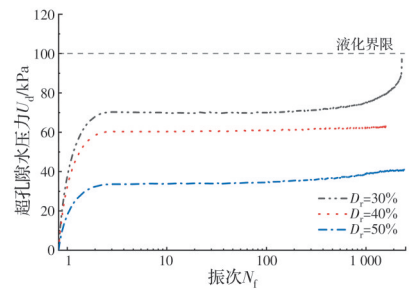
(d) CSR = 0.500

图 4 30% 密实度砂样受循环荷载的孔压增长曲线
Fig. 4 Cyclic growth curve of pore pressure of sand in the density of 30%

在剪应力加载的初始阶段,试样的孔隙水压力会急剧增长到一定水平,而后以稳定速率随应变塑性累积而增长,直到破坏。将孔压稳定增长的起点统一称为“孔压塑性发展起点”。显然,随着胶结次数的增加,砂样孔压的塑性起点会降低。这是因为胶结次数更多的试样初始密实度更高,在加载瞬间,压应变发展空间受到限制,因此,在初始增长阶段,孔压会受到突然的抑制,随后进入缓慢的塑性发展阶段。试验结果表明,其他试样的孔压增长均符合上述规律。

2.3 相对密实度对抗液化性能的影响

选取一次胶结处理,密实度分别为 30%、40% 和 50% 的砂样(编号 B01~B12)的孔压响应,如图 5 所示。从图中可以看出,试样的孔隙水压力也具有分阶段发展的特征,大应力比的试样与小应力比的试样在抵抗循环荷载的次数上存在巨大差异。



(a) CSR = 0.063

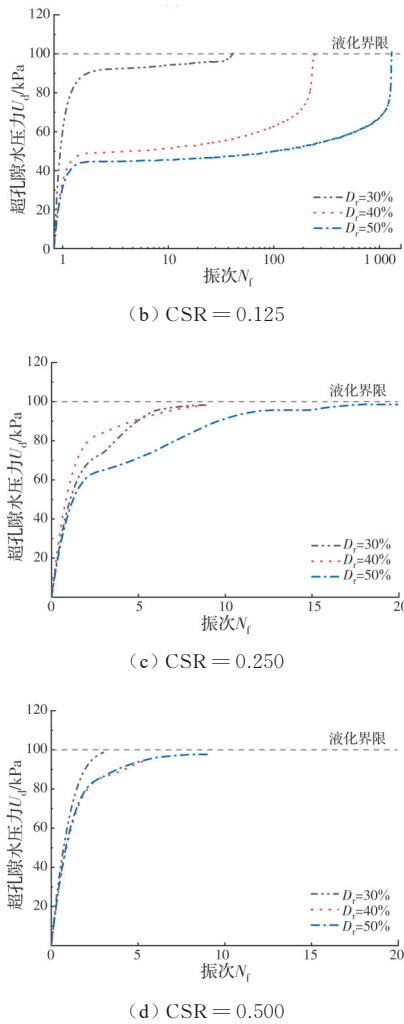


图 5 1次胶结处理砂样循环荷载的孔压增长曲线
Fig. 5 Cyclic growth curve of pore pressure of sand solidified once

相对密实度提高可以降低孔压的塑性发展起点,且孔压增长的速率也得到很大抑制。这是因为砂土密实度的提高增强了试样颗粒骨架的稳定性,减小了颗粒的相对错动滑移,因而孔隙水压力的增长空间受到限制。

但当剪应力比较大时,这种由密实度提高带来的强化作用被削弱,各曲线的差异被缩小。这是因为大应力下应变破坏占主导作用,抵抗循环荷载的持时较短,发生的轴向应变较大,因此,各试样的孔隙水压力受动三轴仪底座大行程位移的影响,呈现出趋同的走势。试验结果表明,其他试样的孔压增长均符合上述规律。

2.4 砂柱的抗液化强度

砂的抗液化强度指的是在一定循环剪应力比条件下能够抵抗循环荷载的次数。图 6 为试样的抗液化强度曲线,坐标平面以双对数形式展开。对于

经历 2 500 次循环仍未出现明显液化趋势的试样,抗液化强度无法准确衡量,未在图中展示。

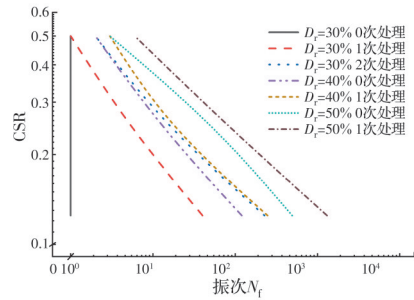


图 6 砂样的抗液化强度曲线
Fig. 6 Anti-liquefaction strength curve of sand

从图 6 可以看出,当以双对数坐标展示抗液化曲线时,各曲线近似呈直线。可以把试样抗液化强度 N_f 与剪应力比 CSR 的关系近似表示为

$$N_f = \alpha CSR^{-\beta} \quad (3)$$

式中:CSR 为剪应力比; N_f 为抗液化强度; α 、 β 为试验参数。

胶结次数多、密实度高的试样,其曲线位置更偏上,这也表明胶结次数、密实度与试样的抗液化强度呈正相关。因此,在实际工程中,可以通过夯实地基、再多次胶结的方式提高砂土地基的抗液化能力。

3 结论

通过对 SICP 法不同胶结次数、不同密实度的砂样进行动三轴试验,探究饱和砂土的抗液化特性,得到以下结论:

1) 试样的孔压与应变发展都呈现出分阶段增长的特点,孔压在加载瞬间会急剧增长到一定水平,而后伴随塑性应变以稳定的速率增长,直至破坏发生。对于剪应力比较大($CSR \geq 0.250$)的试样,应变失稳破坏会比初始液化应力状态提前到达。

2) 胶结处理后的试样,其孔压的增长速率和塑性增长起点都低于未胶结处理的试样。当处理次数达到 3 次及以上,标准砂将完全不液化。这些现象均证明 SICP 方法处理饱和砂土可以显著提升土体的抗液化性能。

3) 胶结次数越多、密实度越高,试样的孔压增长速率和塑性增长起点越低,表明其抗液化能力越强。但这一强化效果会因为剪应力比的增大而被削弱。大应力比循环荷载下,应变破坏占主导作

用,各砂样的孔压增长曲线走势会更接近。

4)胶结试样的抗液化强度 N_t 与剪应力比 CSR 在双对数坐标上近似呈线性关系,已知偏应力条件、处理方式和砂土密实度,就可以预估砂土抵抗循环荷载的次数。

参考文献

- [1] EL-SEKELLY W, ABDOUN T, DOBRY R. Liquefaction resistance of a silty sand deposit subjected to preshaking followed by extensive liquefaction [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(4): 04015101.
- [2] SONG B H, SUN Y F, SONG Y P, et al. Post-liquefaction re-compaction effect on the cyclic behavior of natural marine silty soil in the Yellow River delta [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 195: 106753.
- [3] FINN W D L, BRANSBY P L, PICKERING D J. Effect of strain history on liquefaction of sand [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1970, 96(6): 1917-1934.
- [4] ISHIHARA K, OKADA S. Effects of large preshearing on cyclic behavior of sand [J]. *Soils and Foundations*, 1982, 22(3): 109-125.
- [5] WAHYUDI S, KOSEKI J, SATO T. Characteristics of re-liquefied behavior of sand by means of image analysis in stacked-rings shear apparatus[J]. *Bulletin of ERS*, 2014, 47: 15-26.
- [6] YANG J, SZE H Y. Cyclic strength of sand under sustained shear stress [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(12): 1275-1285.
- [7] BAO X H, JIN Z Y, CUI H Z, et al. Soil liquefaction mitigation in geotechnical engineering: An overview of recently developed methods [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 120: 273-291.
- [8] 邹佑学, 王睿, 张建民. 可液化场地碎石桩复合地基地震动力响应分析[J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2443-2455.
- ZOU Y X, WANG R, ZHANG J M. Analysis on the seismic response of stone columns composite foundation in liquefiable soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(6): 2443-2455. (in Chinese).
- [9] 韩华强, 陈生水, 傅华, 等. 水泥胶凝砂土动力特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(Sup2): 54-60.
- HAN H Q, CHEN S S, FU H, et al. Experimental study on dynamic properties of cemented sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38 (Sup2): 54-60. (in Chinese)
- [10] 张峰博, 杨建辉, 金炜枫, 等. 水玻璃-氯化钙固化砂土渗透系数的变化规律试验研究[J]. *科技通报*, 2019, 35 (1): 143-146, 156.
- ZHANG F B, YANG J H, JIN W F, et al. Experimental study on the variation law of permeability coefficient of sodium silicate & calcium chloride solidified soil [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35(1): 143-146, 156. (in Chinese)
- [11] YANG J, SZE H Y. Cyclic behaviour and resistance of saturated sand under non-symmetrical loading conditions [J]. *Géotechnique*, 2011, 61(1): 59-73.
- [12] 陈育民, 何森凯, 吴海清, 等. 电解减饱和法处理可液化地基的振动台试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38 (4): 726-733.
- CHEN Y M, HE S K, WU H Q, et al. Model tests on liquefaction resistance of desaturation measures of electrolysis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(4): 726-733. (in Chinese)
- [13] 何森凯, 陈育民, 方志. 可液化地基电解减饱和法处理的电学特性分析[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(8): 1434-1441.
- HE S K, CHEN Y M, FANG Z. Electrical characteristics of electrolytic desaturation method for liquefiable foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(8): 1434-1441. (in Chinese)
- [14] 方志, 陈育民, 何森凯, 等. 减饱和和松砂静态液化的水-气两相流耦合分析[J]. *岩土力学*, 2017, 38(11): 3378-3384.
- FANG Z, CHEN Y M, HE S K, et al. Coupling analysis of water-air two-phase flow in static liquefaction of desaturated loose sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3378-3384. (in Chinese)
- [15] HUANG Y, WANG L. Laboratory investigation of liquefaction mitigation in silty sand using nanoparticles [J]. *Engineering Geology*, 2016, 204: 23-32.
- [16] HUANG Y, ZHAO L Y. The effects of small particles on soil seismic liquefaction resistance: Current findings and future challenges [J]. *Natural Hazards*, 2018, 92(1): 567-579.
- [17] HUANG Y, WEN Z Q, WANG L, et al. Centrifuge testing of liquefaction mitigation effectiveness on sand foundations treated with nanoparticles [J]. *Engineering Geology*, 2019, 249: 249-256.
- [18] 李博, 黄茂松. 掺有橡胶粉末砂土液化特性的动三轴试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(5): 1343-1349.
- LI B, HUANG M S. Dynamic triaxial tests on liquefaction characteristics of rubber-sand mixture [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1343-1349. (in Chinese)
- [19] CUI M J, LAI H J, HOANG T, et al. One-phase-low-pH enzyme induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(2): 481-489.

- [20] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. MICP胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 38-45.
LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 38-45. (in Chinese)
- [21] 张鑫磊, 陈育民, 张喆, 等. 微生物灌浆加固可液化钙质砂地基的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1023-1031.
ZHANG X L, CHEN Y M, ZHANG Z, et al. Performance evaluation of liquefaction resistance of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1023-1031. (in Chinese)
- [22] SIMATUPANG M, OKAMURA M. Liquefaction resistance of sand remediated with carbonate precipitation at different degrees of saturation during curing [J]. Soils and Foundations, 2017, 57(4): 619-631.
- [23] XIAO P, LIU H L, XIAO Y, et al. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 107: 9-19.
- [24] GAO Y F, MENG H, HE J, et al. Field trial on use of soybean crude extract for carbonate precipitation and wind erosion control of sandy soil [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(11): 3320-3333.
- [25] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 643-653.
HE J, CHU J, LIU H L, et al. Research advances in biogeotechnologies [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 643-653. (in Chinese)
- [26] 吴林玉, 缪林昌, 孙潇昊, 等. 植物源脲酶诱导碳酸钙固化砂土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 714-720.
WU L Y, MIAO L C, SUN X H, et al. Experimental study on sand solidification using plant-derived urease-induced calcium carbonate precipitation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(4): 714-720. (in Chinese)
- [27] SEED H B, IDRIS I M, ARANGO I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109(3): 458-482.
- [28] CASTRO G. Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(6): 551-569.
- [29] 谢定义. 饱和砂土体液化的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 90-98.
XIE D Y. Several problems of liquefaction of saturated sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 90-98. (in Chinese)
- [30] 曾长女, 刘汉龙, 周云东. 粉土动力特性研究综述[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(1): 99-104.
ZENG C N, LIU H L, ZHOU Y D. Review of silty soil dynamic characteristics [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(1): 99-104. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)