



废弃口罩加筋酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的抗剪强度特性

张建伟 李想 韩智光 边汉亮

Shear strength characteristics of sand solidified by enzyme-induced carbonate precipitation with waste face mask reinforcement

ZHANG Jianwei, LI Xiang, HAN Zhiguang, BIAN Hanliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230529.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚丙烯纤维增强混凝土干接缝的抗剪性能

Shear strength of polypropylene fiber reinforced concrete dry joints

复合材料学报. 2018, 35(7): 1963–1974 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.003>

聚丙烯酰胺对石灰稳定土早期强度和破坏形式的影响

Effect of polyacrylamide on early strength and failure form of lime stabilized soil

复合材料学报. 2021, 38(4): 1283–1291 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200730.002>

聚丙烯纤维增强水泥复合材料抗冲蚀性能及冲蚀机制

Erosion resistance and erosion mechanism of polypropylene fiber reinforced cement composite

复合材料学报. 2021, 38(3): 891–901 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200723.006>

直剪作用下再生混凝土力学性能及强度指标换算

Mechanical properties and strength index conversion of recycled aggregate concrete under direct shear

复合材料学报. 2021, 38(11): 3962–3970 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210122.001>

不同长径比聚丙烯纤维增强混凝土的力学特性

Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete with different aspect ratios

复合材料学报. 2019, 36(8): 1935–1948 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180917.001>

聚丙烯纤维-钢筋/混凝土管节受力性能试验

Experimental study on the mechanical properties of polypropylene fiber–steel bar reinforced concrete pipe

复合材料学报. 2021, 38(12): 4349–4361 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210203.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20230529.003

废弃口罩加筋酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的抗剪强度特性



分享本文

张建伟^{*1,2}, 李想¹, 韩智光¹, 边汉亮¹

(1. 河南大学 土木建筑学院, 开封 475004; 2. 开封市特殊土改性与修复工程技术研究中心, 开封 475004)

摘要: 为进一步提升酶诱导碳酸盐沉淀(EICP)固化砂土的抗剪强度特性, 改善固化砂土的脆性破坏特征, 向未固化砂土中添加废弃的一次性口罩进行改良。基于三轴压缩试验等, 研究不同口罩纤维掺量对EICP固化砂土抗剪强度的影响, 并分析改变EICP滴注轮次和砂土初始相对密实度后, 改良砂土的抗剪强度特性和口罩加筋效益的变化情况。结果表明: 口罩最优掺量为0.2%, 不同围压下可以使改良砂土的峰值偏应力提高59.9%-34%, 黏聚力提高188%, 内摩擦角提高14.5%, 且能有效减少峰后强度损失, 改善固化砂土的脆性破坏特征; 增加滴注轮次和相对密实度可以提高峰值偏应力、黏聚力和内摩擦角, 但口罩的加筋效果略微减弱; 碳酸钙生成率随滴注轮次增加而增大, 随相对密实度增加而减小, 加筋可以提高碳酸钙生成率。

关键词: EICP; 抗剪强度; 黏聚力; 内摩擦角; 碳酸钙生成率; 聚丙烯纤维; 废弃口罩

中图分类号: TU443; TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)01-0350-12

Shear strength characteristics of sand solidified by enzyme-induced carbonate precipitation with waste face mask reinforcement

ZHANG Jianwei^{*1,2}, LI Xiang¹, HAN Zhiguang¹, BIAN Hanliang¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Kaifeng Technology Research Center of Engineering on Soil Modification and Restoration, Kaifeng 475004, China)

Abstract: To further enhance the shear strength characteristics of sandy soils cured by enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) technology, and to improve the brittle damage characteristics of the cured sandy soils, the abandoned disposable masks were blended into the sandy soils for improvement. Based on the triaxial compression test, the influence of different contents of the mask on the shear strength of EICP solidified sand was studied. However, the change of the shear strength characteristics of improved sand and the benefit of mask reinforcement were analyzed after changing the EICP drip rounds and the initial relative compactness of sand. The results show that the best content of the mask is 0.2%. At this time, the peak partial stress of improved sandy soil increases by 59.9%-34% under different confining pressures, the cohesive force increases by 188%, and the internal friction angle increases by 14.5%. The post-peak strength loss is effectively reduced and the brittle damage of cured sand is improved. However, increasing the number of drip rounds and relative compactness could increase the peak partial stress, cohesive force and internal friction angle, but the effect of mask reinforcement is slightly weakened. Finally, mask reinforcement can improve the calcium carbonate generation rate, and the calcium carbonate generation rate increases with the increase of drip rounds, but decreases with the increase of relative compactness.

Keywords: EICP; shear strength; cohesion force; internal friction angle; calcium carbonate formation rate; polypropylene fiber; discarded masks

收稿日期: 2023-03-16; 修回日期: 2023-05-09; 录用日期: 2023-05-22; 网络首发时间: 2023-05-30 13:33:24

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230529.003>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177454); 河南省自然科学基金(232300420073); 河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2021JD13)

National Natural Science Foundation of China (42177454); Natural Science Foundation of Henan (232300420073); Postgraduate Education Reform and Quality Improvement Project of Henan Province (YJS2021JD13)

通信作者: 张建伟, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为环境岩土工程 E-mail: zjw101_0@163.com

引用格式: 张建伟, 李想, 韩智光, 等. 废弃口罩加筋酶诱导碳酸盐沉淀固化砂土的抗剪强度特性 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(1): 350-361.

ZHANG Jianwei, LI Xiang, HAN Zhiguang, et al. Shear strength characteristics of sand solidified by enzyme-induced carbonate precipitation with waste face mask reinforcement[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(1): 350-361(in Chinese).

近年来，生物固化技术因其环境友好、成本低廉等优势在岩土工程领域广受关注，主要分为酶诱导碳酸盐沉淀技术(EICP)^[1-2]和微生物诱导碳酸盐沉淀技术(MICP)。两种技术均为利用脲酶水解尿素产生碳酸根离子，与土体中钙离子结合生成碳酸钙，并在土体孔隙中沉淀，以达到胶结土体，改善其力学性能的目的。

MICP技术在土体固化^[3-4]、裂隙修复^[5]、污染土修复^[6]等方面已有广泛应用，但其脲酶来源于细菌，在实际工程中会面临一些问题，如：细菌培育环境严格；细菌尺寸较大难以在细粒土或密实土中分散；细菌对氧气需求度影响加固深度等^[7]，因此通过植物提取脲酶的EICP技术被认为是一种替代MICP的方法。目前已有学者对EICP技术展开研究，董瑾等^[8]利用EICP技术修复遗址土，提高了土体的碳化速度、表面强度和耐候性；Yasuhara等^[9]证实经EICP固化后砂土的渗透率和孔隙比有效减少，且强度提高4倍以上；Miftah等^[10]进行剪切试验，发现EICP反应生成的碳酸钙含量与土体黏聚力、抗侵蚀率呈正相关，内摩擦角呈负相关；类似的试验He等^[11]有不同的结论，他们认为随着碳酸钙含量增加，黏聚力与内摩擦角均增大；除此之外，EICP在混凝土裂隙修复^[12]、防风固沙^[13]及去除污染土重金属离子中^[14]也有优秀表现。然而，仅通过单一EICP处理的土体强度有时无法达到工程需求，且EICP和MICP均有固化后土体破坏呈脆性特点的问题，影响其工程应用。为解决上述问题，考虑利用纤维加筋技术改良EICP，共同提高土体力学性能。

纤维加筋土目前有较多研究，Noorzad等^[15]发现纤维可以防止砂土出现应变局部化；李丽华等^[16]、高磊等^[17]、Shao等^[18]发现纤维可提高土体的抗压强度和黏聚力；钟汉林等^[19]发现砂土的抗剪强度受围压、纤维掺量、长度和相对密实度等影响。目前纤维与生物固化技术相结合的研究多围绕MICP展开，EICP的较少，Choi等^[20]和Li等^[21]的研究结果表明加筋后MICP固化砂土的抗剪强度提高，脆性也明显改善；Fang等^[22]发现聚丙烯纤维对生物固化砂土残余强度的提升最明显，且固化后砂土由脆性破坏转为韧性破坏。本文考虑回收利用废弃一次性口罩作为加筋纤维，由于新冠疫情爆发，仅2020年全球就制造了超过500亿个口罩，无论是正确回收进入焚化炉还是回收遗漏流向海洋，都会污染环境，对生态生活造成

威胁。口罩的主要成分为聚丙烯纤维，力学性质良好，国内外已有企业利用废弃口罩制成品、汽车零件等；Saberian等^[23]、闭东民等^[24]利用口罩加固水泥路基土；Rehman等^[25]、Akbulut等^[26]利用口罩改善黏性土力学性质，都取得良好成果，因此可认为口罩是有应用前景的纤维，有必要对废弃口罩-EICP联合固化砂土的力学性质进行研究。

本文基于三轴压缩试验，探究废弃一次性口罩改良EICP固化砂土的可行性，较全面的分析了口罩纤维掺量、EICP滴注轮次和砂柱初始相对密实度对EICP固化砂土抗剪强度特性的影响，并结合碳酸钙生成率结果分析不同参数条件下，口罩加筋影响EICP固化砂土剪切特性的内在机制。不但为解决EICP固化砂土的潜在问题提出了方法，同时为回收再利用废弃口罩提出新思路。

1 试验材料与方案

1.1 原材料

试验用砂为厦门ISO标准砂，其最大干密度为1.89 g/cm³，最小干密度为1.539 g/cm³，其他参数见表1。试验纤维选用一次性医用外科口罩，裁剪成2 mm×10 mm的尺寸备用，并按不同质量百分比掺入砂中，考虑防疫问题本试验所用口罩均未使用过。口罩是3层结构，均为聚丙烯纤维构造而成，具有抗拉强度高、纵横向性能接近、表面覆盖性好等优点，详细物理参数见表2。

1.2 大豆脲酶和胶结液

获取大豆脲酶：(1)使用800Y多功能粉碎机(永康市铂欧五金制品有限公司)将大豆磨成豆粉；(2)取一定量豆粉添加去离子水，二者体积比为1:10，在德国IKA RH basic 2加热磁力搅拌器(上海皋精科学仪器有限公司)上均匀混合30 min后静置一段时间沉淀豆渣；(3)使用离心机获取豆粉溶液的上清液，即为大豆脲酶溶液。脲酶水解尿素产生NH₄⁺和CO₃²⁻，溶液内离子的变化会导致电导率改变，可以根据Whiffin^[27]提出的电导率法测脲酶活性：将3 mL脲酶和27 mL浓度1.1 mol/L的尿素溶液混合，放入30℃水浴锅中，使用DDB-303A便携式电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定溶液电导率即可得到大豆脲酶活性U_a：

$$U_a = \frac{B-A}{15} \times 10 \times 11.11 \quad (1)$$

式中：A为0 min溶液电导率值；B为15 min溶

表 1 标准砂的物理力学性质

Table 1 Physical-mechanical properties of sand

Effective particle size/mm			Specific gravity	Curvature coefficient	Nonuniformity coefficient
D_{10}	D_{30}	D_{60}	2.65	1.05	5.07
0.13	0.3	0.66			

Note: D_n means the mass of particles smaller than this particle size accounts for $n\%$ of the total mass of soil particles.

表 2 口罩的物理力学性质

Table 2 Physical-mechanical properties of face masks

Nonuniformity coefficient	Melting point/°C	Water absorption/%	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%	Tensile strength at break/MPa
0.91	160	9.5	4.25	118.9	4.18

液电导率值。本试验所用大豆脲酶活性在30℃时平均为22 mmol/(L·min)。胶结液为0.75 mol/L的尿素和氯化钙溶液按体积比1:1混合，试验时每轮滴注胶结液与大豆脲酶溶液体积比1:1即可。

1.3 试样制备

试样尺寸为三轴标准样(直径Φ39.1 mm×80 mm)，使用对切的亚克力模具制备，模具装置和试验流程如图1所示，模具内部从下到上依次为透水石、滤纸、均匀混合的标准砂与口罩碎片(分三层装入)、土工布，其中标准砂质量由设定好的初始相对密实度确定，口罩纤维掺量定义为口罩与砂质量百分比。试样密实度30%时的初始孔隙体积为36.6 cm³，初始孔隙率为0.383；密实度50%时初始孔隙体积为35.2 cm³，初始孔隙率为0.368；密实度80%时初始孔隙体积为30 cm³，

初始孔隙率为0.314。通过BT100-3J蠕动泵(保定兰格恒流泵有限公司)依次滴注20 mL大豆脲酶和胶结液为滴注一轮，根据不同工况要求设置滴注轮次，全部滴注结束后在室内养护2天再转入50℃的DHG9240电热鼓风干燥箱(绍兴市苏珀仪器有限公司)内养护3天即可拆模进行试验。

三轴试验前需对试样进行饱和，本试验采用抽气饱和法：首先将装有试样的饱和器放入饱和缸中抽气，使缸内真空度近乎一个大气压，并持续2 h；然后打开注水阀，使去离子水缓缓注入直到完全淹没饱和器；最后将试样在水下静置16 h即可。称量饱和前后质量差可算出含水率，根据下式算出饱和度 S_r ：

$$S_r = \frac{wG_s}{e} \quad (2)$$

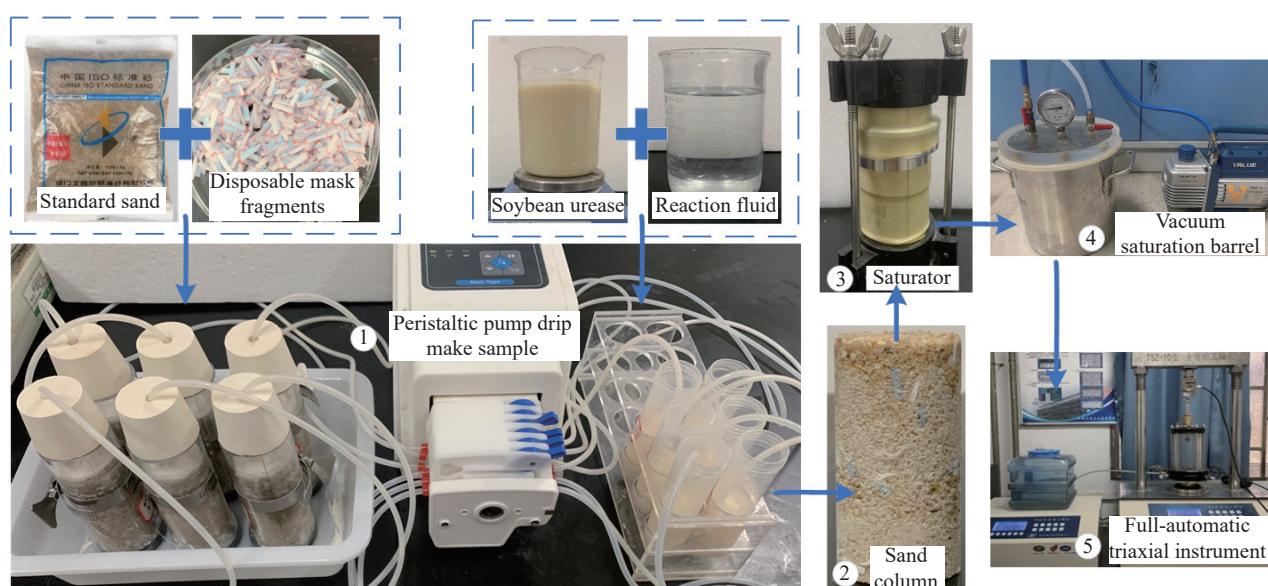


图1 试验流程图

Fig. 1 Test flow chart

$$e = \frac{G_s}{\rho_d} - 1 \quad (3)$$

式中： e 为砂柱固化后孔隙比； G_s 为土体相对密度； w 为饱和后含水率（%）； ρ_d 为干密度（ g/cm^3 ）。本试验饱和度达到 95% 及以上时视为砂土已完全饱和。

1.4 试验方案

共设计 14 组试验，分析口罩纤维掺量和 EICP 固化纤维加筋砂土的参数变化对口罩加筋效益和砂柱固化效果的影响，具体工况设置见表 3。不固结不排水试验按照《土工试验标准》在南京宁曦土壤仪器有限公司生产的 TSZ-10 型全自动三轴仪上进行，围压设置为 100、200、300、400 kPa，以 $0.8 \text{ mm}/\text{min}$ 速率剪切，直至轴向应变达到 16% 时停止试验。碳酸钙生成率采用酸洗法测定，分别计算砂柱上、中、下三部分的碳酸钙含率。

表 3 工况设置

Table 3 Working conditions setting

Test	Mask fiber content/%	Number of EICP drops/drop	Relative density/%	Confining pressure/kPa
C1	0	4	50	
C2	0.1	4	50	
C3	0.15	4	50	
C4	0.2	4	50	
C5	0.25	4	50	
C6	0.3	4	50	
L1	0	3	50	100, 200
L2	0	5	50	300, 400
L3	0.2	3	50	
L4	0.2	5	50	
D1	0	4	30	
D2	0	4	80	
D3	0.2	4	30	
D4	0.2	4	80	

Note: EICP—Enzyme-induced carbonate precipitation.

2 试验结果与分析

2.1 口罩纤维掺量对改良砂土抗剪强度的影响

2.1.1 应力-应变曲线

三轴压缩试验测得的应力-应变曲线的变化趋势可以反映试样在不同受力阶段的变形特征，并获得抗剪强度指标，不同口罩纤维掺量的 EICP 固化砂土在不同围压下的应力-应变曲线如图 2 所示。曲线分为 3 个阶段：剪切初期，砂柱胶结状态稳固，偏应力随应变增加而快速增大，曲线近似直线上升，可视为线弹性阶段；之后砂柱进入塑性屈服阶段，试样内部胶结点随应变增加而逐渐破坏，偏应力缓慢增大至峰值点，试样剪切破坏；

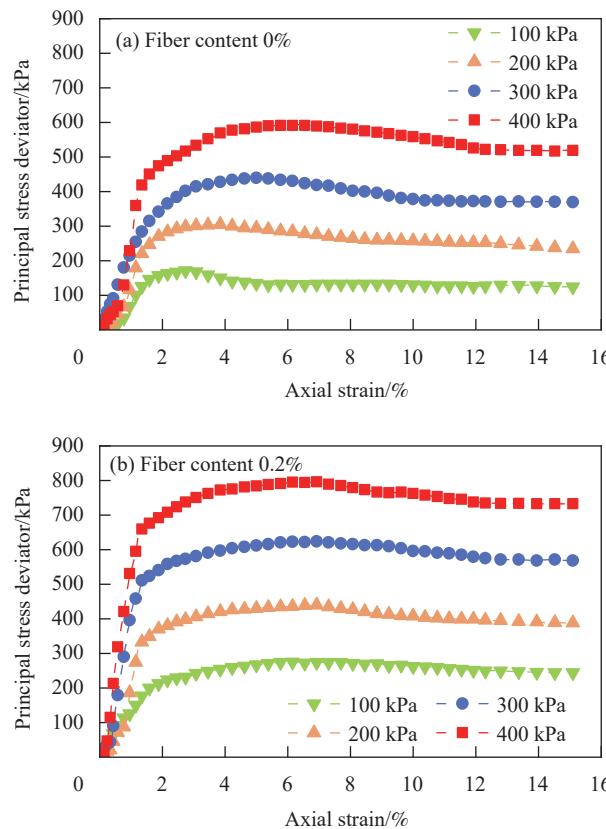


图 2 不同口罩纤维掺量的酶诱导碳酸盐沉淀技术 (EICP) 固化砂土在不同围压下的应力-应变曲线

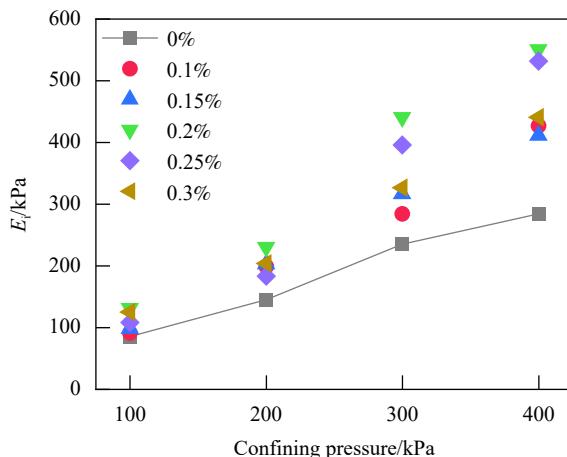
Fig. 2 Stress-strain curves of EICP solidified sand with different mask fiber content under different confining pressures

最后进入软化阶段，偏应力随应变增加而减小，曲线逐渐下降至趋于稳定。

初始弹性模量 E_i 的定义为线性阶段轴向应力与应变的比值，可以衡量一定负荷下改良砂土抵抗变形的能力。由于三轴试验曲线的线性阶段占比较小，故取轴向应变 1% 处对应的偏应力计算各工况在不同围压下的 E_i ，如图 3 所示。可以看出，口罩加筋试样的 E_i 均大于对照组（口罩纤维掺量 0%），说明口罩加筋可以提高 EICP 固化砂柱的刚度，从而提高其一定应力范围内抵抗变形的能力。分别计算不同围压下，各掺量加筋组的 E_i 相比对照组 E_i 的提升量，虽然数据较离散，但能看出提升量是随着围压增加而逐渐增大的，例如围压由 100 kPa 增加至 400 kPa 时，加筋可以使 EICP 固化砂土的 E_i 最多增大 45、85.4、161.3 和 266.4 kPa，说明口罩对试样刚度的提升效果与围压有很大关系。且能看出，掺量 0.2% 组和对照组的 E_i 均在围压 200~300 kPa 时有较大变化。

2.1.2 峰值偏应力与残余偏应力

图 4(a) 和图 4(b) 分别为不同口罩纤维掺量的

图 3 EICP 固化砂土的初始弹性模量 E_i 与口罩纤维掺量、围压的关系Fig. 3 Initial elastic modulus E_i of EICP solidified sand affected by mask fiber content and confining pressure

EICP 固化砂柱在不同围压下的峰值偏应力 q 和残余偏应力 q_r ，由图可知，当掺量一定时，各工况峰值偏应力均随围压的增加而增大；当围压一定时，峰值偏应力随口罩纤维掺量的增加呈先增大后减小的趋势，最大值出现在掺量 0.2% 时，且加

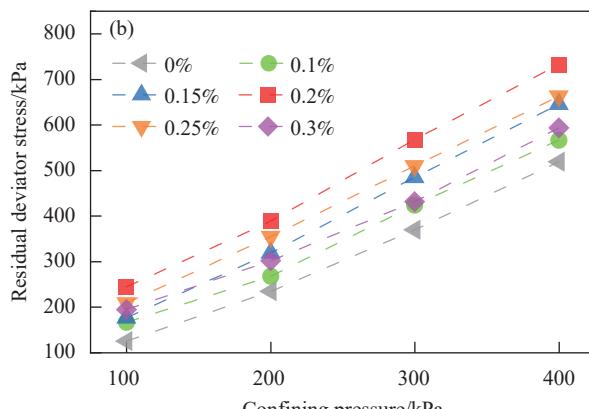
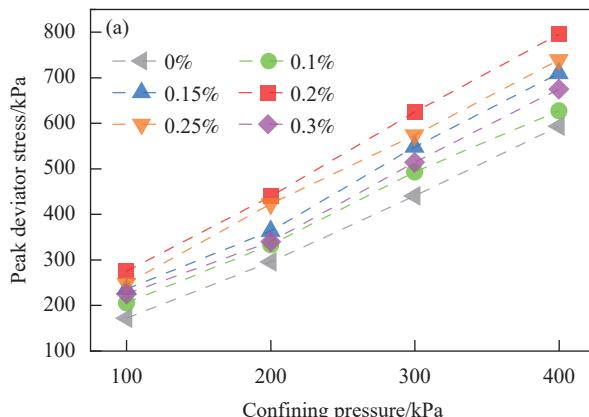


图 4 不同口罩纤维掺量下 EICP 固化砂土的峰值偏应力和残余偏应力

Fig. 4 Peak deviator stress and residual deviator stress of EICP solidified sand varying with mask fiber contents

筋组与对照组相比，峰值偏应力均有提升。

从试样中取代表性部分约 2cm^3 ，使用 FEI Quanta 250 环境扫描电子显微镜进行扫描电镜试验。可将试样放大至 1~10 000 倍，方便观察试样内碳酸钙晶体的分布趋势与微观形貌，SEM 微观图像如图 5 所示。图 5(a) 为口罩纤维与 EICP 联合固化的砂柱，可以看到，口罩纤维丝交织缠绕在砂粒旁，填补了试样的空隙，且纤维丝和砂粒上都布满了球状碳酸钙晶体；图 5(b) 为仅使用 EICP 处理的试样，内部有较大空隙且碳酸钙只能分散在砂粒表面。综上可知，首先，口罩能为 EICP 反应提供成核位点，提高碳酸钙生成率使砂柱被胶结的更加牢固；其次，一定掺量下的口罩可以均匀分散在砂土中，相互交织形成网架结构，受外荷载作用时可以限制砂粒的相对位移；最后，

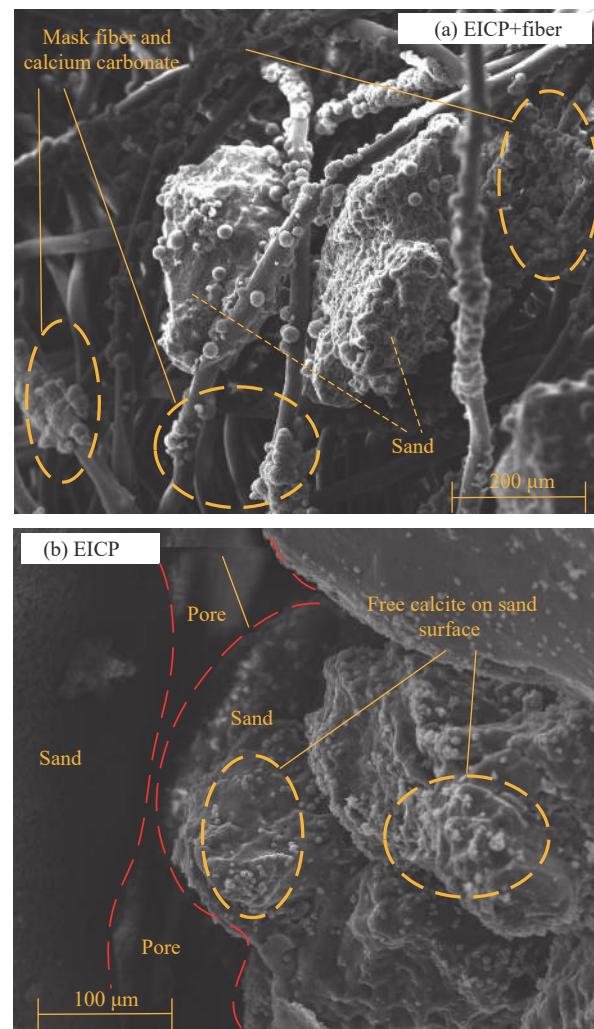


图 5 加筋前后 EICP 固化砂土的 SEM 微观图像

Fig. 5 SEM microscopic images of EICP solidified sand before and after reinforcement

口罩本身抗拉强度较高，可以产生拉应力来承担一部分荷载，上述原因使口罩纤维加筋对EICP固化砂土有增强效果。但当掺量过大时，制样时发现口罩纤维难以均匀与砂混合，易出现团聚导致试样存在薄弱处；同时口罩纤维如果占据过多孔隙，会压缩EICP反应空间，促进碳酸钙沉淀的效果降低，因此对峰值偏应力的提升率降低。围压分别为100、200、300、400 kPa时，口罩纤维掺量0.2%组相比对照组的峰值偏应力分别提升了59.9%、49%、41.6%和34%，说明随围压升高，口罩加筋对峰值偏应力的提升效果稍有弱化。

取轴向应变15%时对应的偏应力为残余偏应力，残余偏应力的变化规律与峰值偏应力相似：当口罩纤维掺量一定时，围压越大残余偏应力越大；当围压一定时，残余偏应力随着口罩纤维掺量增加呈先增大后减小的趋势，在掺量0.2%时达到峰值。定义 $\beta = (q - q_r)/q \times 100\%$ 为强度损失率，由图6可知，围压100~400 kPa时，对照组的强度损失率分别为27.3%、20.6%、16.1%和12.6%；掺量0.2%强度损失率最小，分别为11.2%、11.8%、9%和8%，说明口罩加筋可改善EICP固化砂土的峰后强度损失，减缓偏应力下降幅度。同时可以看出，无论是否添加纤维，围压都对强度损失率有一定影响，随着围压增大，各工况强度损失率呈减小趋势。

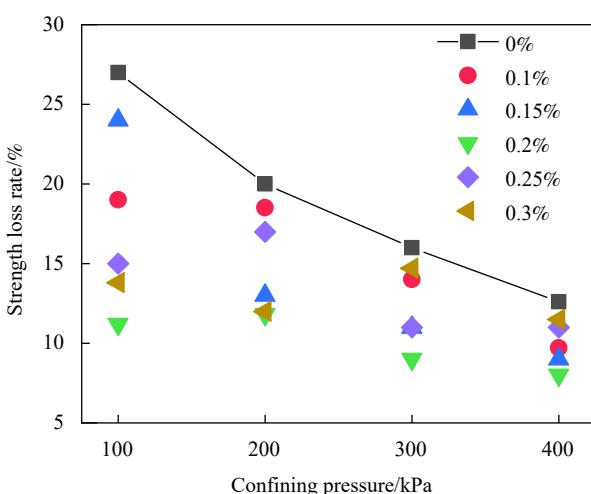


图6 不同口罩纤维掺量下EICP固化砂土的强度损失率

Fig. 6 Strength loss rate of EICP solidified sand varying with mask fiber contents

2.1.3 抗剪强度

如图7所示，根据莫尔-库伦强度理论绘制各工况的莫尔圆，作公切线得到试样的抗剪强度参数。

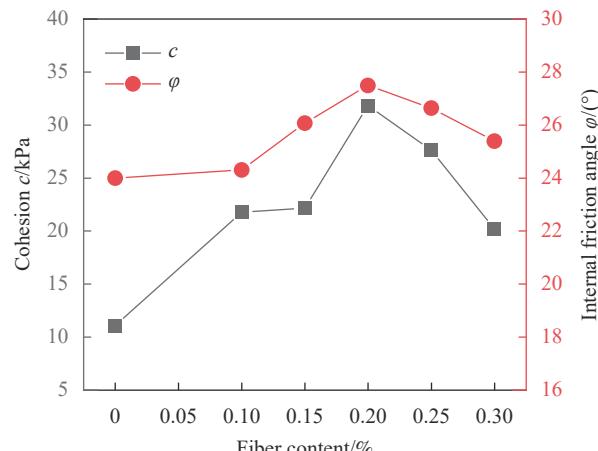


图7 EICP固化砂土的黏聚力和内摩擦角随口罩纤维掺量变化曲线

Fig. 7 Variation of cohesion and angle of internal friction of EICP solidified sand with mask fiber contents

可以看出，加筋后试样的黏聚力和内摩擦角都有提高，说明口罩加筋可以改良EICP固化砂土的力学性能。黏聚力和内摩擦角都随着口罩纤维掺量的增加而先增大后减小，在掺量0.2%时达到最大值。加筋后黏聚力最大31.81 kPa，相比对照组的11.04 kPa提高了188%，这是由于黏聚力主要由砂粒间的胶结作用和静电引力来决定，口罩加筋提高了碳酸钙生成率从而提高胶结作用。内摩擦角的变化相对较小，对照组内摩擦角为24°，掺量0.2%时内摩擦角为27.49°，提高了14.5%，是由于加筋后大量碳酸钙晶体包裹在口罩表面，提高口罩表面粗糙度的同时，也增强了砂粒间和砂粒与口罩间的摩擦作用。综合上述实验结果可知，口罩的最优掺量为0.2%。

需要说明，由于本文为EICP固化处理的标准砂，砂粒间的胶结与接触方式已发生变化，因此与理论上的不固结不排水饱和黏性土不同，具有黏聚力和内摩擦角，类似的研究结果也有很多^[28-30]。

2.2 滴注轮次对改良砂土抗剪强度特性的影响

2.2.1 应力-应变曲线

图8是不同滴注轮次的试样在围压300 kPa时的应力-应变曲线，可以看出滴注3轮时，加筋前后试样的应力随应变增加均十分缓慢，在轴向应变10%左右才达到峰值点；且曲线虽均为应变软化型，但滴注3轮时峰后应力下降幅度很小，特别是对照组。这是由于滴注次数减少，碳酸钙生成率降低，因此试样胶结程度不高，脆性特征不明显。

不同滴注轮次影响下的弹性模量 E_i 如图9所

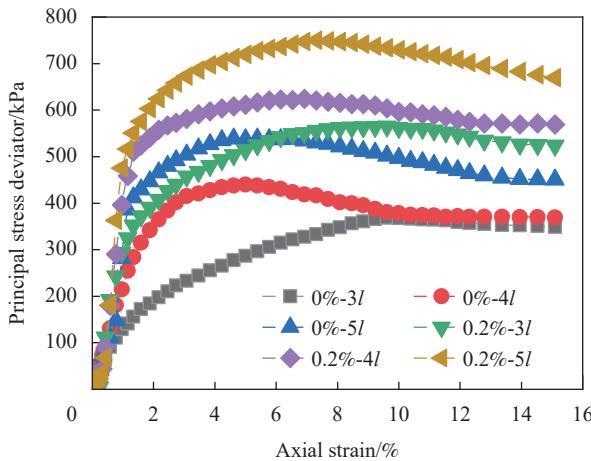


图 8 不同滴注轮次 (l) 的 EICP 固化砂土在围压 300 kPa 时的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of EICP solidified sand affected by different reinforcement times (l) under confining pressure of 300 kPa

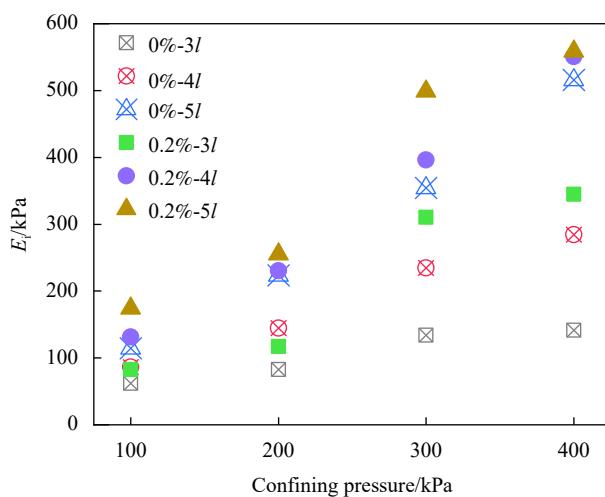


图 9 不同滴注轮次下 EICP 固化砂土的初始弹性模量

Fig. 9 Initial elastic modulus of EICP solidified sand affected by different reinforcement times

示,由图可知,围压一定时各工况的 E_i 均随滴注轮次的增加而增大,说明可以通过增加 EICP 加固次数来提高试样内碳酸钙含率,从而提高改良砂土的整体性与初始刚度;当围压和滴注轮次相同时,加筋组的 E_i 均大于对照组,说明无论砂土被 EICP 处理几轮,添加口罩均可以提高改良砂土在一定负荷范围内抵抗变形的能力。

2.2.2 峰值偏应力与残余偏应力

EICP 滴注轮次会影响碳酸钙生成率,从而改变试样胶结程度,影响峰值偏应力大小,因此需要先测得碳酸钙生成率。将试样分为上中下三部分,通过酸洗法分别测其碳酸钙含率,结果如图 10 所示,其中 T、M、B 分别表示上、中、下部。

随着滴注轮次增加,加筋前后试样上中下三部分的碳酸钙含率均增大,取上中下三部分平均值计算:掺量 0.2% 时,滴注 3~4 轮时碳酸钙含率的提升率约为 46.5%,4~5 轮约为 10%,说明加筋组在滴注第 5 轮时对大豆脲酶的利用率降低;对照组的碳酸钙提升率分别为 16.9% 和 21.1%,考虑原因是对照组本身碳酸钙生成率偏低,堵塞现象不明显,对大豆脲酶的利用率变化不大。当滴注轮次一定时,加筋组三部分的碳酸钙含率始终大于对照组,证实了口罩为 EICP 反应提供成核位点增大碳酸钙生成率的理论。

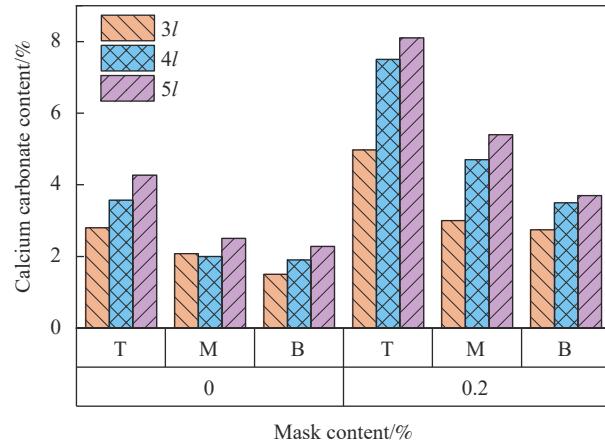


图 10 滴注次数对 EICP 固化砂土的碳酸钙生成率的影响

Fig. 10 Effect of reinforcement times on calcium carbonate formation rate of EICP solidified sand

图 11(a) 和图 11(b) 分别为不同滴注轮次影响下改良砂土的峰值偏应力和残余偏应力。可以看到,各工况峰值偏应力均随围压的增加而增大;当围压一定时,加筋前后试样的峰值偏应力都随着滴注轮次的增加而增大,与碳酸钙含率的变化趋势相同;当围压和滴注轮次相同时,加筋组的峰值偏应力均大于对照组。围压 100~400 kPa、滴注 3 轮时,添加口罩可以使 EICP 固化砂土的峰值偏应力增大 70%~38.8%,而滴注 5 轮时只能增大 60%~29.6%,该增加幅度的减小与试样固化不均匀有一定关系。

加筋可以提高改良砂土强度的一个原因是,口罩在碳酸钙包裹下其粗糙度和黏性会提升,使砂柱更牢固的胶结在一起,而滴注第 5 轮时,加筋砂柱上部分的孔隙易被碳酸钙堵塞,导致小部分碳酸钙沉积在砂柱上表面,无法全部发挥作用,因此口罩对强度提升效果减弱;且滴注轮次较高

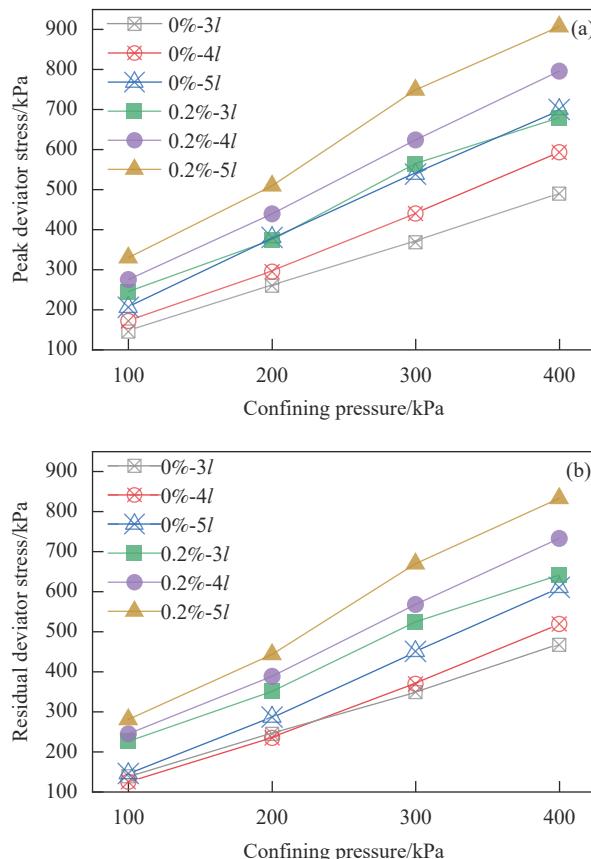


图 11 不同滴注轮次下 EICP 固化砂土的峰值偏应力和残余偏应力

Fig. 11 Peak deviator stress and residual deviator stress of EICP solidified sand varying with reinforcement times

时，试样本身强度就高，破坏时裂缝两侧口罩纤维易被破坏，不利于减缓强度下降幅度，因此表现为加筋效果减弱。有研究得到相似结论^[31]，并提出可选用抗拉强度更高的纤维配合更多次的EICP 加固反应。

在同一围压和滴注轮次下，加筋组的残余偏应力均大于对照组；在围压一定时，加筋组的残余偏应力随滴注轮次增加而增大，对照组的残余偏应力在滴注 3、4 轮时数值十分接近，滴注 5 轮时明显增大。从强度损失率 β 结果（图 12）可知，滴注 3 轮时 β 随围压变化不大，加筋组的 β 大于对照组，分别约为 6.77% 和 5.2%；增加滴注轮次后， β 明显增大，滴注 4、5 轮时加筋组的 β 小于对照组，分别减小了 15.8% 和 14.3%，说明口罩加筋在滴注超过 3 轮时可以有效改善 EICP 固化砂土的脆性，降低偏应力的下降幅度。

2.2.3 抗剪强度

图 13 为滴注轮次影响下的黏聚力和内摩擦角，可以看出各工况的黏聚力和内摩擦角均随滴注轮

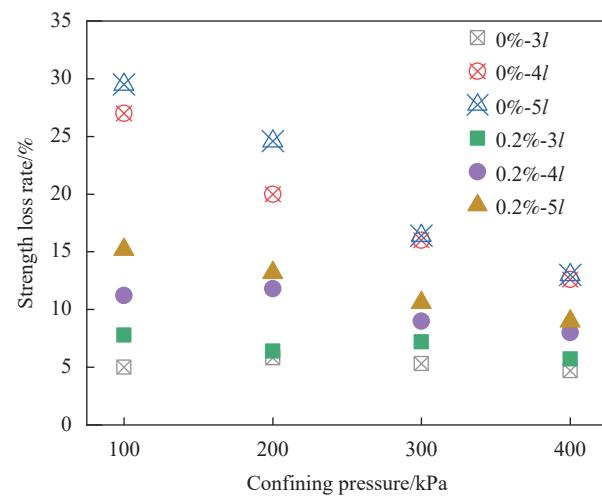


图 12 不同滴注轮次下 EICP 固化砂土的强度损失率

Fig. 12 Strength loss rate of EICP solidified sand varying with reinforcement times

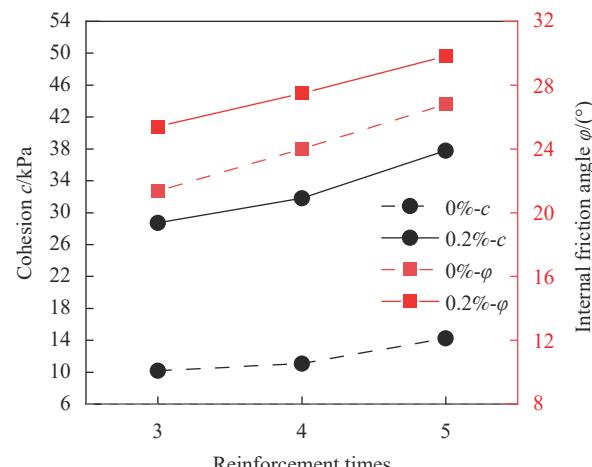


图 13 EICP 固化砂土的黏聚力和内摩擦角随滴注轮次变化曲线

Fig. 13 Variation of cohesion and angle of internal friction of EICP solidified sand with reinforcement times

次的增加而增大，对照组的黏聚力从 10.16 kPa 增加到 14.24 kPa，加筋组的黏聚力从 28.71 kPa 增加到 37.77 kPa，相比对照组提升了 165%~188%，效果显著；对照组的内摩擦角从 21.34° 增加到 26.78°，加筋组内摩擦角从 25.39° 增加到 29.8°，相比对照组提升了 11.3%~18.9%。显然，更多脲酶和胶结液的注入增加了碳酸钙含量，提高了试样内胶结作用，从而使黏聚力和内摩擦角增大。

2.3 相对密实度对改良砂土抗剪强度特性的影响

2.3.1 应力-应变曲线

图 14 是围压 300 kPa 时不同初始相对密实度 (D_r) 试样的应力-应变曲线，曲线属于应力软化型。由图可知，当围压 300 kPa、 $D_r=30\%、50\%、80\%$

时, 对照组分别在应变 6.73%、5% 和 4.03% 处达到峰值偏应力, 而加筋组在应变 7.3%、6.29% 和 5.57% 处达到峰值偏应力, 说明随着 D_r 增大, 试样受剪破坏所需的应变减小, 在实际工程中可能有安全隐患。

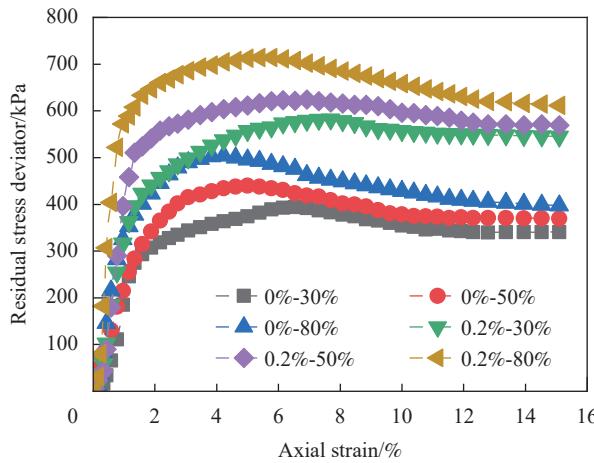


图 14 不同初始相对密实度的 EICP 固化砂土在围压 300 kPa 时的应力-应变曲线

Fig. 14 Stress-strain curves of EICP solidified sand with different initial relative densities under confining pressure of 300 kPa

图 15 为不同初始相对密实度影响下的初始弹性模量 E_i 。可以看到围压一定时, 加筋前后试样的 E_i 均随 D_r 的增加而增大, $D_r=30\%$ 和 50% 时 E_i 相差较小, 在 $D_r=80\%$ 明显变大, 这是由于 D_r 越大, 砂粒镶嵌的就越紧密, 在受到外力后不易相互错动; 围压和 D_r 相同时, 加筋组的 E_i 均大于对照组, 由此可知, 与中密砂相比, 质量比 0.2% 的口罩在松砂中也能发挥锚固作用, 密砂中也不会

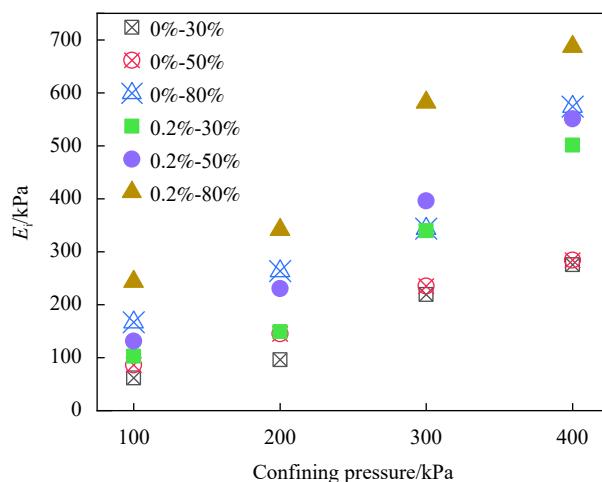


图 15 不同初始相对密实度下 EICP 固化砂土的初始弹性模量

Fig. 15 Initial elastic modulus of EICP solidified sand affected by different initial relative densities

过度压缩 EICP 反应空间, 能稳定通过加筋作用增强试样抵抗变形的能力。

2.3.2 峰值偏应力与残余偏应力

图 16 为初始相对密实度影响的碳酸钙生成率, 可以看到 $D_r=30\%$ 时, 碳酸钙的分布最均匀, 这是由于试样内砂粒排布松散, 颗粒间孔隙大且多, 脲酶和胶结液可以顺畅流过试样内部并反应; $D_r=80\%$ 时, 碳酸钙分布最不均匀, 上部碳酸钙大量沉积在试样表面, 中下部碳酸钙含率减少, 这是由于砂柱内孔隙太少易堵塞, 且 EICP 反应空间被压缩。计算平均值可知, 对照组在 $D_r=30\%$ 、 50% 、 80% 时的碳酸钙含率平均值分别为 2.67% 、 2.49% 和 2.33% , 加筋组分别为 5.4% 、 5.23% 和 4.97% , 显而易见随着 D_r 增加, 碳酸钙含率逐渐减少。综上可得出结论, D_r 过大时不利于 EICP 反应。

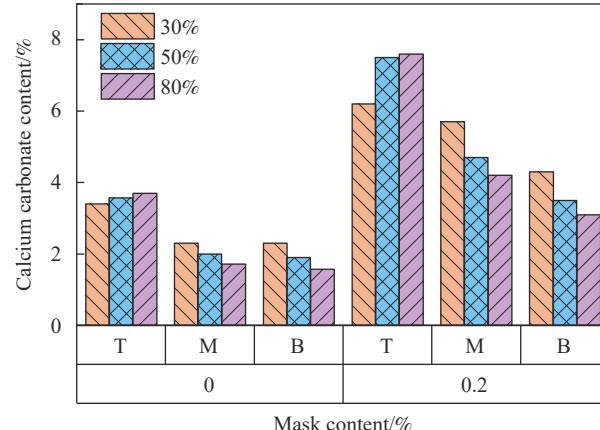


图 16 初始相对密实度对 EICP 固化砂土碳酸钙生成率的影响

Fig. 16 Effect of initial relative density of EICP solidified sand on calcium carbonate formation rate

初始相对密实度影响下改良砂土的峰值偏应力和残余偏应力如图 17(a) 和图 17(b) 所示, 当围压一定时, 加筋前后试样的峰值偏应力都随 D_r 的增加而增大, D_r 从 30% 增加到 80% 后, 对照组峰值偏应力平均提高了 27% , 加筋组提高了 22.4% ; 当围压和 D_r 一定时, 加筋组的峰值偏应力均大于对照组。围压 $100\sim400\text{ kPa}$, $D_r=30\%$ 时, 添加口罩可以使试样的峰值偏应力增大 $65.2\%\sim36\%$; $D_r=80\%$ 时只能增大 $54.5\%\sim32.2\%$, 这与试样内碳酸钙分布的不均匀程度有一定关系。

这是由于砂样在稍松状态下, 内部孔隙大, 有利于 EICP 反应生成更多碳酸钙, 包裹在口罩表面, 与口罩加筋作用相互促进; 随着密实度增加, 孔隙率降低, 碳酸钙生成率减少, 强度很大部分是由砂粒间的相互契合挤压产生的摩擦强度提供,

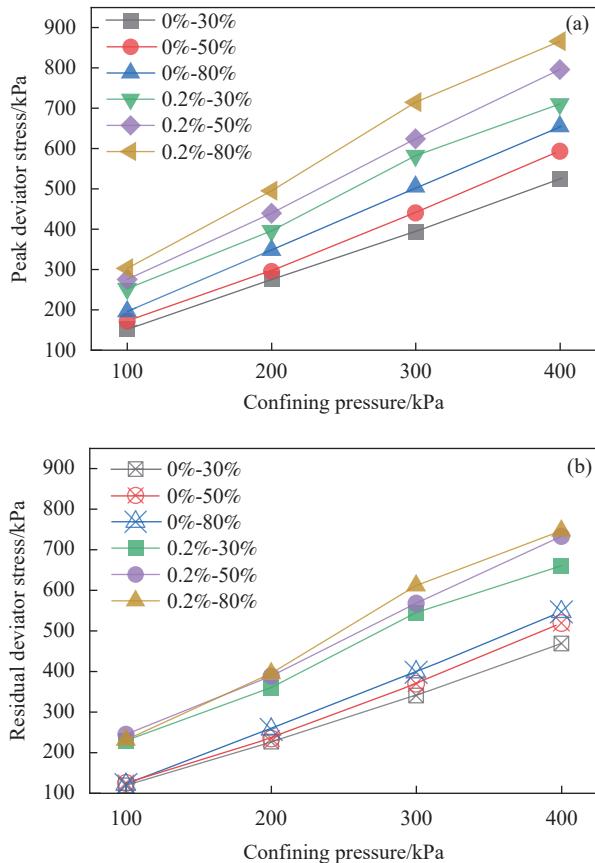


图 17 不同初始相对密实度下 EICP 固化砂土的峰值偏应力和残余偏应力

Fig. 17 Peak deviator stress and residual deviator stress of EICP solidified sand varying with initial relative densities

因此口罩加筋对改良砂土强度的提升效果减弱。综上所述，改良砂土的抗剪能力是由 D_r 、碳酸钙含率、口罩纤维掺量等因素共同影响的，其中受 D_r 的影响偏大，这与徐日庆等^[32]的研究结论相符。

根据残余偏应力结果可知，当围压和 D_r 一定时，加筋组的残余偏应力均大于对照组；当围压和掺量一定时，试样的残余偏应力随 D_r 增加而略微增大，差值不明显。从强度损失率 β 来看（图 18），当围压和掺量相同时， β 随着 D_r 的增加而增大；围压和 D_r 一定时，加筋组的 β 均小于对照组。分析可知，松砂内碳酸钙含率较高，可以提高口罩的锚固和拉伸作用，有利于抑制砂柱剪切破坏后强度的下降；密实度高的试样虽然峰值偏应力高，但强度大部分来源于砂粒间的摩擦和咬合，小部分来源于碳酸钙，一旦出现破坏，摩擦力会迅速衰减，因此密砂的强度损失更大。

综上可知，尽管提高密实度可提高强度，但密砂的破坏前变形小，破坏后强度损失大，并不合适，中密砂则具有较高的抗剪强度和较低的强

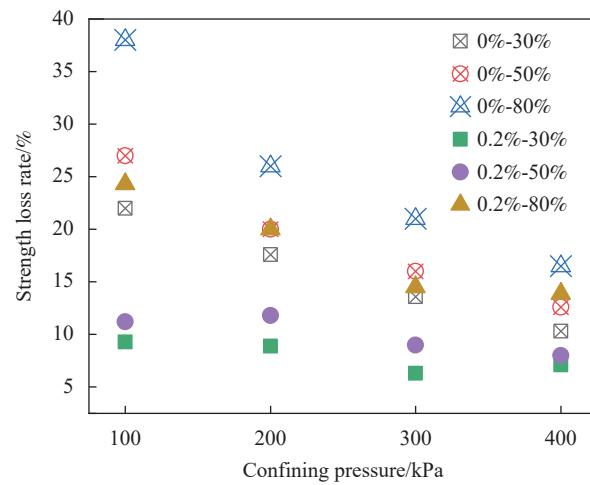


图 18 不同初始相对密实度下 EICP 固化砂土的强度损失率

Fig. 18 Strength loss rate of EICP solidified sand varying with initial relative densities

度损失率，更经济适用。

2.3.3 抗剪强度

图 19 为不同 D_r 下试样的黏聚力和内摩擦角，可以看出随着 D_r 增加，各工况的黏聚力和内摩擦角均增大。对照组的黏聚力由 9.63 kPa 增大到 13.2 kPa，加筋组的黏聚力由 29.24 kPa 增大到 34.01 kPa，当 D_r 分别为 30%、50%、80% 时，加筋组相比对照组黏聚力分别提升了 203.6%、188%、157.6%。已知碳酸钙含率随 D_r 增加而减小，因此在中低密实土体中会有更多碳酸钙附着在口罩表面，提高其粗糙度和黏性，有利于提高黏聚力。对照组的内摩擦角从 22.39° 增加到 25.75°，加筋组从 26.05° 增加到 29.28°，很明显随着 D_r 增加，口罩对内摩擦角的提升能力也减弱。

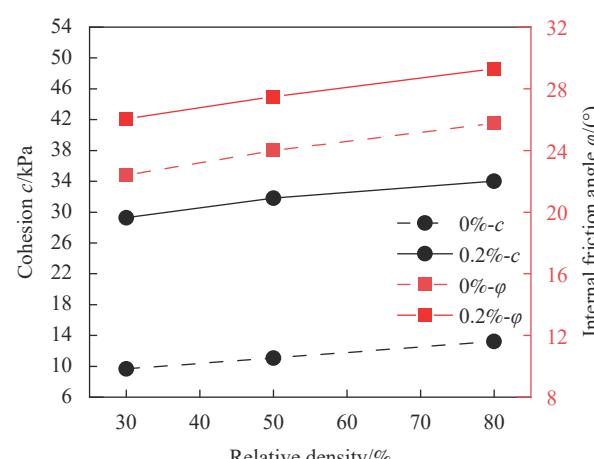


图 19 EICP 固化砂土的黏聚力和内摩擦角随初始相对密实度变化曲线

Fig. 19 Variation of cohesion and angle of internal friction of EICP solidified sand with initial relative densities

3 结论

基于三轴试验,研究口罩加筋对酶诱导碳酸盐沉淀(EICP)固化砂土抗剪性能的影响,并探究不同滴注轮次和初始相对密实度对EICP反应与口罩加筋效益的影响,得到以下结论:

(1) 改良砂土的峰值偏应力随口罩纤维掺量的增加呈先增大后减小的趋势,最大值出现在掺量0.2%时,相比对照组峰值偏应力提高了59.9%~34%(随围压变化);掺量一定时,峰值偏应力随滴注轮次增加而增大,同样随相对密实度(D_r)增加而增大,但加筋对强度的提升效果略有弱化:滴注3轮时加筋可使峰值偏应力增大70%~38.8%,滴注5轮时只能增大60%~29.6%; $D_r=30\%$ 时加筋可使峰值偏应力增大65.2%~36%, $D_r=80\%$ 时只能增大54.5%~32.2%;

(2) 改良砂土的残余偏应力随口罩纤维掺量的增加呈先增大后减小的趋势,在掺量0.2%时达到峰值,强度损失率由27.3%~12.6%下降到11.2%~8%;掺量一定时,强度损失率随相对密实度增加而增大,加筋组强度损失率始终小于对照组;强度损失率同样随滴注轮次增加而增大,但滴注3轮时,加筋组强度损失率大于对照组,而滴注4、5轮时,加筋组强度损失率小于对照组;

(3) 黏聚力和内摩擦角都随着口罩纤维掺量的增加而先增大后减小,在掺量0.2%时达到峰值,加筋使黏聚力最大可提高188%,内摩擦角最大提高14.5%;当掺量一定时,黏聚力和内摩擦角随滴注轮次或相对密实度的增加而增大。

参考文献:

- [1] SHU S, YAN B, MENG H, et al. Comparative study of EICP treatment methods on the mechanical properties of sandy soil[J]. *Soils and Foundations*, 2022, 62(6): 101246.
- [2] 张建伟,李贝贝,边汉亮,等.钙源对酶诱导碳酸钙沉淀影响的试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(5): 1245-1255.
- ZHANG Jianwei, LI Beibei, BIAN Hanliang, et al. Influence and evaluation analysis of different fibers on the performance of recycled aggregate pervious concrete[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(5): 1245-1255(in Chinese).
- [3] LIU L, LIU H L, STUEDLEIN A W, et al. Strength, stiffness, and microstructure characteristics of biocemented calcareous sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(10): 1502-1513.
- [4] 赵志峰,邵光辉.微生物诱导碳酸钙沉积加固海相粉土的试验研究[J].*应用基础与工程科学学报*,2021, 29(1): 231-238.
ZHAO Zhifeng, SHAO Guanghui. Experimental study on marine silt reinforcement by microbial induced calcium precipitation[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(1): 231-238(in Chinese).
- [5] PHILLIPS A J, LAUCHNOR E, ELDRING J J, et al. Potential CO₂ leakage reduction through biofilm-induced calcium carbonate precipitation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(1): 142-149.
- [6] 许朝阳,杨贺,黄建璋,等.生物修复Cu²⁺、Pb²⁺污染土的稳定性[J].工业建筑,2018, 48(7): 33-37.
XU Zhaoyang, YANG He, HUANG Jianzhang, et al. Stability of bioremediated soil contaminated by Cu²⁺ or Pb²⁺[J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(7): 33-37(in Chinese).
- [7] KHODADADI T H, KAVAZANJIAN E, VAN PAASSEN L, et al. Bio-grout materials: A review[C]//American Society of Civil Engineers (ASCE). Virginia: ASCE Publications, 2017: 1-12.
- [8] 董瑾,刘效彬.脲酶诱导碳酸钙沉淀技术改良传统三合土的性能[J].*建筑材料学报*,2022, 25(8): 853-859.
DONG Jin, LIU Xiaobin. Performance of traditional tabia improved by enzyme induced calcite precipitation technology[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(8): 853-859(in Chinese).
- [9] YASUHARA H, NEUPANE D, HAYASHI K, et al. Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation[J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(3): 539-549.
- [10] MIFTAHI A, KHODADADI TIRKOLAEI H, BILSEL H, et al. Erodibility improvement and scour mitigation of beach sand by enzymatic induced carbonate precipitation[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2022, 32: 100354.
- [11] HE J, YANG F, QI Y, et al. Improvement in silty sand with enzyme-induced carbonate precipitation: Laboratory model experiment[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(7): 2895-2905.
- [12] DAKHANE A, DAS S, HANSEN H, et al. Crack healing in cementitious mortars using enzyme-induced carbonate precipitation: Quantification based on fracture response[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(4): 4018035.
- [13] 刘阳,高玉峰,何稼,等.大豆脲酶诱导碳酸钙沉积技术的防风固沙试验研究[J].*河南科学*,2019, 37(11): 1784-1789.
LIU Yang, GAO Yufeng, HE Jia, et al. Experimental study on the windbreak and sand fixation effect using soybean urease induced calcium carbonate precipitation[J]. *Henan Science*, 2019, 37(11): 1784-1789(in Chinese).

- [14] 边汉亮, 张旭钢, 韩一, 等. 大豆脲酶对Zn²⁺污染土的修复试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(11): 67-70.
BIAN Hanliang, ZHANG Xugang, HAN Yi, et al. Remediation tests of Zn²⁺ contaminated soil by soybean urease[J]. Industrial Construction, 2022, 52(11): 67-70(in Chinese).
- [15] NOORZAD R, AMINI P F. Liquefaction resistance of babolsar sand reinforced with randomly distributed fibers under cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 66: 281-292.
- [16] 李丽华, 万畅, 刘永莉, 等. 玻璃纤维加筋砂土剪切强度特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1): 102-106.
LI Lihua, WAN Chang, LIU Yongli, et al. Shear strength characteristics of glass fiber reinforced sandy soil[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(1): 102-106(in Chinese).
- [17] 高磊, 胡国辉, 杨晨, 等. 玄武岩纤维加筋黏土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 231-237.
GAO Lei, HU Guohui, YANG Chen, et al. Shear strength characteristics of basalt fiber-reinforced clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 231-237(in Chinese).
- [18] SHAO W, CETIN B, LI Y D, et al. Experimental investigation of mechanical properties of sands reinforced with discrete randomly distributed fiber[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(4): 901-910.
- [19] 钟汉林, 刘春辉, 张俊, 等. 随机分布剑麻纤维对砂土力学特性的影响[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2019, 32(4): 391-396.
ZHONG Hanlin, LIU Chunhui, ZHANG Jun, et al. Effect of randomly distributed sisal fibers on static mechanical properties of sand[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2019, 32(4): 391-396(in Chinese).
- [20] CHOI S G, WANG K J, CHU J. Properties of biocemented, fiber reinforced sand[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 623-629.
- [21] LI M, LI L, OGBONNAYA U, et al. Influence of fiber addition on mechanical properties of MICP-treated sand[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(4): 268.
- [22] FANG X W, YANG Y, CHEN Z, et al. Influence of fiber content and length on engineering properties of MICP-treated coral sand[J]. Geomicrobiology Journal, 2020, 37(6): 582-594.
- [23] SABERIAN M, LI J, KILMARTIN-LYNCH S, et al. Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase[J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: 145527.
- [24] 闭东民, 孔纲强, 陈庚, 等. 废弃口罩加筋固化土的强度特性与破坏模式[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 993-998, 1009.
BI Dongmin, KONG Gangqiang, CHEN Geng, et al. Strength characteristics and failure mode of solidified soil reinforced by waste masks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 993-998, 1009(in Chinese).
- [25] REHMAN Z U, KHALID U. Reuse of COVID-19 face mask for the amelioration of mechanical properties of fat clay: A novel solution to an emerging waste problem[J]. Science of the Total Environment, 2021, 794: 148746.
- [26] AKBULUT S, ARASAN S, KALKAN E. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers[J]. Applied Clay Science, 2007, 38(1): 23-32.
- [27] WHIFFIN V S. Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement[D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [28] 陈翔. 钙质砂不固结不排水剪切特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
CHEN Xiang. Research on unconsolidated undrained shear characteristics of calcareous sand[D]. Nanning: Guangxi University, 2022(in Chinese).
- [29] 程富阳, 黄英, 周志伟, 等. 干湿循环下饱和红土不排水三轴试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1017-1026.
CHENG Fuyang, HUANG Ying, ZHOU Zhiwei, et al. Undrained triaxial test of saturated laterite under drying-wetting cycle[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 1017-1026(in Chinese).
- [30] 李驰, 刘世慧, 周团结, 等. 微生物矿化风沙土强度及孔隙特性的试验研究[J]. 力学与实践, 2017, 39(2): 165-171, 184.
LI Chi, LIU Shihui, ZHOU Tuanjie, et al. The strength and porosity properties of MICP-treated aeolian sandy soil[J]. Mechanics in Engineering, 2017, 39(2): 165-171, 184(in Chinese).
- [31] 郑俊杰, 宋杨, 赖汉江, 等. 微生物固化纤维加筋砂土抗剪强度试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 15-21.
ZHENG Junjie, SONG Yang, LAI Hanjiang, et al. Experimental study on the shear behavior of fiber-reinforced biocemented sand[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 15-21(in Chinese).
- [32] 徐日庆, 王兴陈, 朱剑锋, 等. 初始相对密实度对砂土强度特性影响的试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 345-349.
XU Riqing, WANG Xingchen, ZHU Jianfeng, et al. Experiment of initial relative density effects on sand strength[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2012, 33(3): 345-349(in Chinese).