

不同活性炭含量下 MICP 加固钙质砂的 物理力学特性研究

赵寄樨, 童华炜, 邱荣康, 刘家明, 袁 杰, 张子良

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: MICP 是利用微生物诱导 CaCO_3 沉淀的一项新型环保的地基处理技术, 可以改善砂土的力学特性。目前, 对 MICP 过程中细菌保留能力的相关研究相对较少, 活性炭是一种具有吸附性的多孔结构物, 利用活性炭的吸附性, 可以增加细菌在试样中的滞留能力。基于活性炭的吸附作用, 利用无侧限抗压强度试验、渗透试验及 SEM 电镜扫描研究了活性炭含量对 MICP 加固钙质砂的力学性能的影响。试验结果表明, 在钙质砂中加入活性炭能够提高微生物诱导 CaCO_3 沉淀的产量, 对其无侧限抗压强度和渗透特性均有所改善, 最佳活性炭掺量为 0.75%, 这也说明了在钙质砂中加入活性炭能够解决 MICP 加固过程中细菌滞留不足的问题, 为后续提高细菌滞留率的研究提供了可靠的试验依据。

关键词: 钙质砂加固; 活性炭; 吸附性; 细菌滞留率

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)06-0923-07

Study on the physical and mechanical properties of MICP reinforced calcareous sand with different activated carbon content

ZHAO Jitong, TONG Huawei, QIU Rongkang, LIU Jiaming, YUAN Jie, ZHANG Ziliang

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: MICP is a new environmental protection foundation treatment technology which can improve the mechanical properties of sand soil by using microorganism to induce CaCO_3 precipitation. At present, there are relatively few studies on the retention ability of bacteria in the MICP process. Activated carbon is a substance with a porous structure with adsorption, and the adsorption of activated carbon can increase the retention ability of bacteria in the sample. Based on the adsorption of activated carbon, the influence of activated carbon content on the mechanical properties of calcareous sand strengthened by MICP was studied by unconfined compressive strength test, permeability test and SEM scanning electron microscope. The test results show that adding activated carbon into calcareous sand can improve the output of microbial induced CaCO_3 precipitation, the unconfined compressive strength and penetration characteristics are improved, the best activated carbon content is 0.75%, which shows in the calcareous sand adding activated carbon can solve the problem of insufficient in the reinforcement process where bacteria retention, retention rates for subsequent increase bacteria research provides a reliable experimental basis.

Key words: cementing calcareous sand; activated carbon; adsorption; bacterial retention rate

钙质砂是由珊瑚、海藻、贝壳等海洋生物残骸组成的特殊岩土介质, 其主要成份为碳酸钙, 由于其具有内孔隙、颗粒易破碎、承载力低等特点, 我们需要进行必要的地基加固处理。微生物诱导碳酸钙沉淀加固土体 (MICP) 技术, 最早是由澳大利亚的 Whiffin^[1] 提出, 主要是通过细菌产生

脲酶分解尿素产生的 CO_3^{2-} , 与 Ca^{2+} 作用产生的 CaCO_3 沉淀, 使得砂颗粒之间能够产生胶结作用, 强度得以提高。MICP 相对于传统的地基处理方式具有成本低、操作简便、耗能小、对环境影响小等特点^[2], 并且在土木工程、材料修复等领域有了广泛的应用, 例如混凝土自修复、古建筑修复、

收稿日期: 2020-06-16

修改稿日期: 2022-11-05

基金项目: 国家青年科学基金资助项目 (51908151)

第一作者: 赵寄樨 (1996—), 男, 博士生, 主要从事微生物固化方面的研究。E-mail: 1112116001@e.gzhu.edu.cn

通信作者: 袁 杰 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事软土蠕变特性以及微生物固化方面的研究。E-mail: yuanj@gzhu.edu.cn

地基加固等^[3-7]。

近年来,许多国内外的学者针对 MICP 技术及其影响因素做了大量的试验研究。Whiffin 等^[8]通过试验发现, MICP 可用于大规模土壤改良工作,并且强度和刚度有显著地提高。DeJong 等^[9-10]通过研究发现, MICP 作用下产生的碳酸钙沉淀会填充在砂颗粒与颗粒之间,这些碳酸钙沉淀是微生物胶结成功与否的关键。Zhao 等^[11]通过控制其他因素不变,在灌浆时分别加入五种不同浓度的菌液,发现胶结试样中的脲酶活性、碳酸钙含量、无侧限抗压强度等强度指标均随菌液浓度增大而增大。崔明娟等^[12]通过研究发现,采用纯/混菌液注射方式得到的试样强度最高。王绪民等^[13]通过细菌对标准砂的加固发现, 0.5 mol/L 的营养盐浓度的试样生成的碳酸钙分布较好同时含量也较多,且强度表现最好。

国内外的学者针对 MICP 的技术及其影响因素做了很多的研究,然而,对 MICP 过程中细菌注入后的保留能力的研究相对较少。Karim 等^[14]通过加固三种不同相对密度的砂柱,发现随着相对密度的增加,可提高细菌悬液注射的效率。但是,通过压实的方法只能略微提高细菌悬液注射的效率。Harkes 等^[15]和 Al Qabany 等^[16]通过试验发现,在注射菌液后引入固定液(一种高盐溶液),有助于菌的吸附,并且可以改善菌液在砂柱中的分布情况,但是通过化学方式提高细菌的保留能力需要进行繁杂的灌浆处理,增加养护周期,且其成本较高。活性炭(AC)是一种有效的污水处理材料,利用它的高吸附能力能够进行污染土壤修复^[17]。用活性炭的吸附性来提高细菌的滞留能力是一种物理方式,成本低,并且操作相对上述的处理方式更加简便。其中,粉末活性炭具有广谱吸附性,可以吸附各类污染物,如难降解有机物、腐殖酸等^[18],赵振业等^[20]通过对比试验发现比表面积越大的活性炭,吸附性能越强。因此,试验选用粉末活性炭(PAC),共制备了6种不同的PAC含量的试样,将PAC作为添加剂与生物水泥一起用于处理钙质砂,综合评价和讨论了PAC对微生物处理样品渗透性和无侧限抗压强度的影响。

1 试验材料

1.1 细菌的培养

本次实验用菌为巴氏芽孢八叠球菌,购买于荷兰 DSM 公司,菌种编号为 DSM33。首先将巴氏

芽孢八叠球菌接种于培养基中培养,并在恒温箱中静置 2~3 d,直至菌落生成。其中,培养基成份为:胰酪大豆胨琼脂培养基 TSA(40 g/L)、尿素(20 g/L)。再将培养液(酵母提取物 20 g/L、硫酸铵 10 g/L、NaOH 1.6 g/L)经过 121 °C 高压蒸汽消毒 30 min,冷却后将细菌从平板接种至培养液并置于振荡培养箱(30 °C, 121 r/min)振荡培养 24~36 h,进行扩大培养,保持 pH 值为 9。细菌生长至指数后期,用 V-1100D 型可见分光光度计测其浓度 OD₆₀₀ 值,用 DDS-11A 电导率仪测细菌活性,控制细菌 OD₆₀₀ 值为 1.5±0.5,脲酶活性为 8±4 mmUrea/min。

1.2 营养液的成份

营养液的成份考虑到材料的成本以及对环境的保护,本文采用 Urea-CaCl₂ 混合液^[21]。其中:氮源为尿素 Urea(0.5 mol/L)、钙源为无水氯化钙 CaCl₂(0.5 mol/L)。

1.3 活性炭的选用

本试验用活性炭为木质粉末活性炭,如图 1 所示,物理参数如表 1 所示。试验时制备 5 种不同活性炭含量的试样,分别为 0.25%、0.75%、0.5%、1%、1.25%(钙质砂质量的百分比),在试验过程中,还制备了一组不含 PAC 的对照组,以上每组试样砂柱制备 3 组平行试样。



图 1 粉末活性炭(PAC)

Fig. 1 Powdered activated carbon(PAC)

表 1 粉末活性炭物理参数

Tab. 1 Physical parameters of activated carbon powder

参数	碘值	亚兰值	密度/kg·m ⁻³	比表面积/m ² ·g ⁻¹
数值	800	9	450~550	1 000±20

1.4 砂柱试验模具

砂柱试验模具为内径为 40 mm,高度为 130 mm 的圆柱筒,圆柱筒下方为带有小孔的支架,可以便于制样以及液体的流出。试验时,支架上还需放置一层 1 mm 厚的土工布,试样上方也同样放置一层这样的土工布。所制成的砂样直径为 39 mm,高度为 80 mm。砂柱试验模具如图 2 所示。

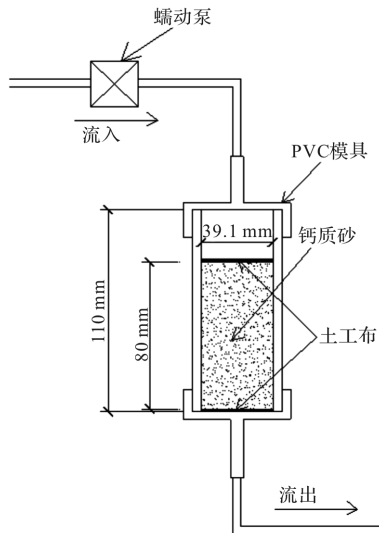


图 2 砂柱模具示意图

Fig. 2 Sand column mold diagram

1.5 砂样的性质

本试验用砂选取南海某岛屿钙质砂为研究对象, 密度为 2.20 g/cm^3 , 其物理力学参数如表 2 所示, 颗粒级配曲线如图 3 所示. 该砂粒径范围为 $0.08 \sim 1 \text{ mm}$, 属于细砂, 砂颗粒均匀, 级配不良. 钙质砂的粒径参数为 ($d_{60} = 0.58 \text{ mm}$, $d_{30} = 0.42 \text{ mm}$, $d_{10} = 0.26 \text{ mm}$).

表 2 钙质砂物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of calcareous sand

参数	G_s	C_u	C_c	孔隙比	
				e_{\max}	e_{\min}
数值	2.76	2.231	1.170	1.24	0.80

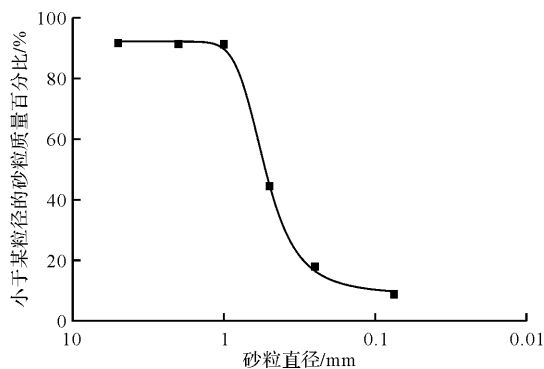


图 3 钙质砂颗粒级配曲线

Fig. 3 Calcareous sand grain grading curve

2 试验方法

2.1 试样制备

制样时钙质砂的堆积密度控制为 1.36 g/cm^3 , 按照上述活性炭含量, 称好对应的钙质砂以及活性炭质量, 将两者充分搅拌均匀. 随后将搅匀后

的材料缓慢加入模具中, 此过程中让材料自由下落, 最后稍稍压平顶面, 并放置一张土工布. 置好砂样后, 通过蠕动泵加入菌液及营养液 (每次加入量为试样孔隙体积), 控制灌浆速度为 4 ml/min . 菌液加入 4 轮, 营养液在加入菌液 2 h 后加入, 每次加入菌液后加 5 次营养液, 间隔时间为 6 h, 加固后的砂柱如图 4 所示.



图 4 经 MICP 处理加固后的砂柱

Fig. 4 Sand column reinforced by MICP treatment

2.2 细菌滞留能力试验

为了确保试验的可行性, 在砂柱试样第一轮加入菌液时, 进行细菌在砂柱中滞留能力的测试, 按下式(1)计算.

$$B_r = \left(1 - \frac{OD_{out}}{OD_{in}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: B_r 为细菌滞留率, OD_{out} 为细菌注入砂柱后流出物的 OD_{600} 值, OD_{in} 为细菌注入砂柱前的 OD_{600} 值.

2.3 称量法测生成的碳酸钙含量

钙质砂的主要成分为碳酸钙, 所以 MICP 加固钙质砂的碳酸钙含量不能使用酸洗法, 这里使用称量法测生成的碳酸钙的含量. 试验方法如下: 砂柱试样灌浆完成后, 静置 2~3 d, 脱模并置于 110°C 的鼓风烘箱中恒温烘干, 直至 24 h 内的质量损失率小于 0.1% , 试样烘干后, 取出试样立即测量砂柱的总质量 m , 按下式(2)求出生成的碳酸钙含量.

$$\text{CaCO}_3(\%) = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (2)$$

式中: $\text{CaCO}_3(\%)$ 为生成的碳酸钙含量, m_0 为砂柱灌浆前的总质量.

2.4 无侧限抗压强度试验

将测试完干密度后的试样, 保持其干燥度, 用于无侧限抗压强度试验. 试验所用仪器为 YAW-S300 全自动液晶压力试验机, 试验时, 控制仪器的应变速率为 1.0 mm/min , 待砂柱试样破

坏后, 读出仪器上的极限荷载值, 再通过相应公式求出试样的无侧限抗压强度。

2.5 渗透试验

将试样进行真空抽气饱和, 渗透试验参照土工试验规程 YS/T 5225—2016, 采用变水头法测量试样的渗透系数, 通过测量一段时间内的水头变化得到试样的渗透系数, 按下式(3)计算。

$$k_T = 2.3 \frac{a_1 h_0}{A_0 t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (3)$$

式中: a_1 为测压管的断面积, h_0 为渗透路径, 即试样高度, h_1 为测压管中的开始水头, h_2 为测压管中的终了水头。

2.6 数码液晶显微镜及 SEM 电镜扫描

对进行无侧限抗压强度试验破坏后的试样, 进行数码液晶显微镜及 SEM 电镜扫描, 观察试样及其在加入活性炭之后的微观结构。根据扫描结果, 分析试样在经过固化后碳酸钙晶体的分布情况。

3 试验结果及讨论

每组试样进行了 3 次平行试验, 各个试样的实验测试结果如下表 3 所示。

表 3 各组试样试验测试结果

Tab. 3 Test results of each group

组别	编号	$B_r / \%$	$\text{CaCO}_3 / \%$	UCS / MPa	渗透系数 / $(\times 10^{-5} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
T_0	T_{0-1}	32.870	15.290	0.708	4.084
	T_{0-2}	35.027	14.173	0.588	4.096
	T_{0-3}	30.350	13.965	0.542	4.053
$T_{0.25}$	$T_{0.25-1}$	57.585	14.772	0.787	3.023
	$T_{0.25-2}$	59.553	14.774	0.578	3.718
	$T_{0.25-3}$	55.820	14.989	0.827	3.255
$T_{0.50}$	$T_{0.50-1}$	66.941	15.234	1.112	2.306
	$T_{0.50-2}$	65.583	14.867	0.993	2.807
	$T_{0.50-3}$	65.895	14.525	0.892	3.011
$T_{0.75}$	$T_{0.75-1}$	70.733	16.030	1.307	2.383
	$T_{0.75-2}$	73.442	15.561	1.101	2.264
	$T_{0.75-3}$	67.897	16.493	1.621	2.284
$T_{1.00}$	$T_{1.00-1}$	78.445	15.626	1.289	2.810
	$T_{1.00-2}$	76.491	15.317	0.884	2.470
	$T_{1.00-3}$	74.593	15.999	1.235	2.379
$T_{1.25}$	$T_{1.25-1}$	83.186	15.095	0.946	2.787
	$T_{1.25-2}$	79.472	15.112	0.993	2.540
	$T_{1.25-3}$	75.782	15.839	1.152	2.760

3.1 细菌滞留能力试验

图 5 为第一次细菌通过试样后流出的菌液, 从左到右、从上到下试样的活性炭含量是依次增加

的, 从图中可以看出, 流出的菌液颜色随着活性炭含量的增加逐渐变浅, 这说明加入活性炭后, 细菌通过砂柱时的滞留能力会有所增加, 并且会随着活性炭含量的增加而增加。在 0.25% 含量下, 本组试样的流出量变少, 分析是由于灌浆时菌液在试样中流动的不均匀性导致的。

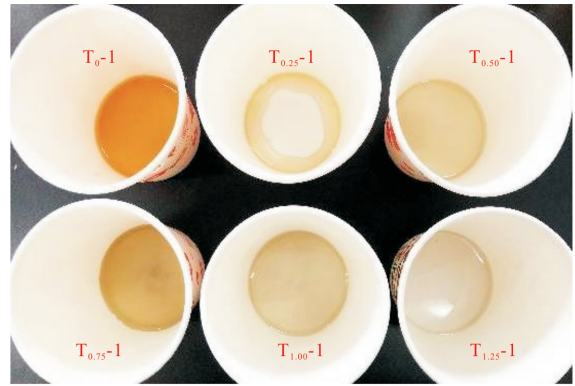


图 5 第一批通过试样后流出的菌液

Fig. 5 The first batch of bacterial fluid after passing through the sample

通过分光光度仪测定上述各组试样流出的菌液浓度, 计算后的试验结果平均值见下图 6, 从图中可以看出, 随着活性炭含量的增加, 细菌的滞留能力随之提高, 由此可以证明加入活性炭能够提高细菌通过试样时的滞留能力, 综合上述宏观及定量结果可知, 试验方案可行。

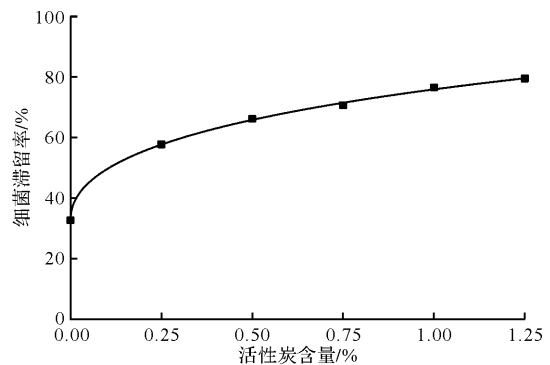


图 6 细菌滞留曲线

Fig. 6 Bacterial retention curve

3.2 碳酸钙含量

不同活性炭含量下生成的碳酸钙含量 CaCO_3 (%) 如下图 7 所示, 从图中可以看出, 当活性炭含量从 0% 增加到 1.25% 时, 加固后试样的碳酸钙生成量总体呈现先增加后降低的变化趋势, 这说明加入粉末活性炭后, 能够提高细菌通过试样时的滞留率, 从而提高经 MICP 处理后砂柱试样中最终生成的碳酸钙含量, 提高 MICP 处理钙质砂的反应效率。并且在活性炭含量为 0.75% 时, 试样的碳酸

钙生成量最大, 相对于未加活性炭增加了 9.96%。

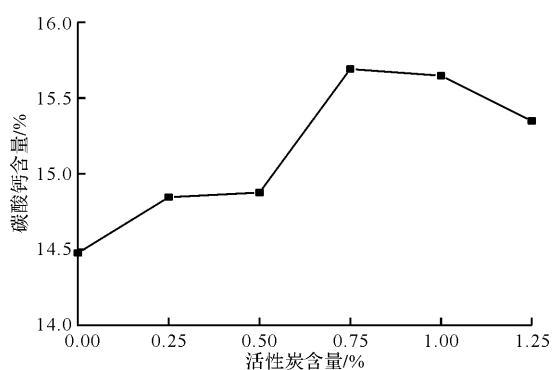


图 7 不同活性炭含量下生成碳酸钙含量

Fig. 7 Calcium carbonate production at different activated carbon content

3.3 无侧限抗压强度和渗透试验

图 8 为无侧限抗压强度和渗透试验取均值后的结果。从图中可以看出, 当活性炭含量从 0% 增加到 0.75% 时, 随着活性炭含量的增加, 试样的无侧限抗压强度不断地增加, 但活性炭含量继续增加时, 试样的强度出现下降的趋势, 但均比未加活性炭试样的无侧限抗压强度高, 这说明活性炭并不会抑制细菌的生长, 它的存在不仅能够提高细菌的利用率, 同时提高 MICP 养护过程的效率, 从而提高砂柱加固后最终的无侧限抗压强度, 但过多的活性炭会对注入时细菌的分布产生影响, 导致加固后砂柱最终的强度略微降低, 试验结果在活性炭含量为 0.75% 时, 无侧限抗压强度取得最大值, 相比未加活性炭含量的砂柱提高了 119.09%。

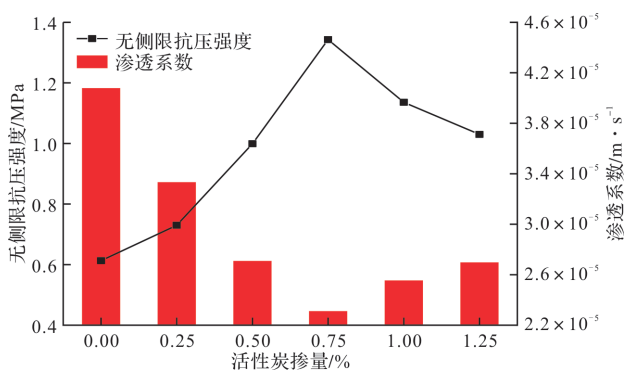


图 8 无侧限抗压强度与渗透系数曲线

Fig. 8 Curve of unconfined compressive strength and permeability coefficient

渗透系数变化规律与无侧限抗压强度的变化情况相反, 呈现先降低后增加的趋势。在活性炭含量为 0.75% 时试样的渗透系数值最小, 相比未加活性炭的试样降低了 43.34%。这说明活性炭对细菌的吸附能力能够在提高 MICP 胶结钙质砂的无

侧限抗压强度的同时, 使得其渗透性也随之降低, 原因就是加入活性炭后, 经过 MICP 反应后能有更多的碳酸钙会填充于颗粒与颗粒之间, 将松散的颗粒更加紧密地胶结在一起, 由此改善胶结试样物理力学特性。

图 9 为第三组不同活性炭含量下无侧限压缩试验的应力应变关系曲线图, 由图可以看出在达到峰值强度时, 各砂柱的应变也是随着活性炭含量的增加, 显示出先增加后降低的趋势, 但是加入活性炭后并没有改变砂柱的破坏形式, 同样是首先呈现出弹性变形阶段, 在达到峰值时, 立刻发生脆性破坏, 如图 10 所示为第三组的三个不同活性炭含量下无侧限抗压试验破坏时的示意图, 从图中可以看出, 未加活性炭时试样为局部压碎破坏, 加入足量的活性炭后主要为沿着试样截面的剪切破坏, 只有少量的局部破坏, 这说明在加入活性炭后能够提高试样的局部承载能力, 改变了试样的破坏形态, 但在破坏时仍为脆性破坏, 并且在活性炭含量为 0.75% 时的峰值应变最大。

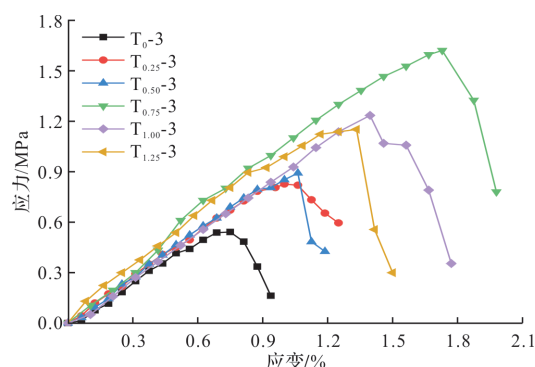


图 9 无侧限压缩试验应力应变曲线图

Fig. 9 Stress-strain curve of unconfined compression test

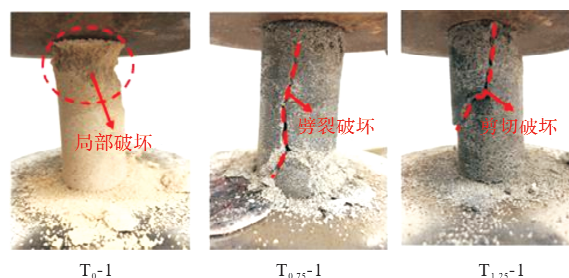


图 10 无侧限抗压强度试验破坏示意图

Fig. 10 Failure diagram of unconfined compressive strength test

3.4 数码液晶显微镜及 SEM 电镜扫描分析

图 11(a) 为数码液晶显微镜下放大 50 倍的图像, 在加入粉末活性炭后, 粉末活性炭会附着在砂颗粒表面和颗粒与颗粒之间, 给微生物固化反应过程提供了一个“核位点”。当活性炭含量较少时, 颗粒与颗粒之间分布的活性炭较少, 活性炭

含量大于 0.75% 时,如图 11(a)所示,颗粒与颗粒之间会有大量的活性炭分布,但空隙中活性炭分布过多,这些颗粒之间的活性炭会成为砂颗粒之间连接的障碍,导致砂颗粒之间的连接效果变差,所以当活性炭含量超过 0.75% 时,试样的碳酸钙生成量和无侧限抗压强度会有略微的降低。

图 11(b)为 0%、0.75%、1.25% 三种活性炭含量下的 SEM 电镜扫描图,从图中可以看出生成的碳酸钙沉淀大部分是分布于钙质砂的表面,方祥位等^[22]、郑俊杰等^[23]也通过 MICP 技术对钙质砂进行加固,得出固化后碳酸钙沉淀首先会包裹

在砂颗粒表面的结论。加入活性炭后,由于增加了细菌的滞留率,可以加快钙质砂颗粒表面与颗粒之间碳酸钙沉淀的生成,但活性炭过多会占据细菌的生存空间,并且钙质砂本就在表面优先生成 CaCO_3 沉淀,颗粒之间较少,大量的活性炭填充于颗粒之间,虽有利于颗粒间 CaCO_3 沉淀的生成,从图 11(b)中在 1% PAC 含量下,可以看出颗粒间碳酸钙生成较多,但对于颗粒之间的连接产生不利的影响,难以形成颗粒间传递应力的路径,所以,当活性炭含量超过 0.75% 时,试样的碳酸钙生成总量和无侧限抗压强度会略微降低。

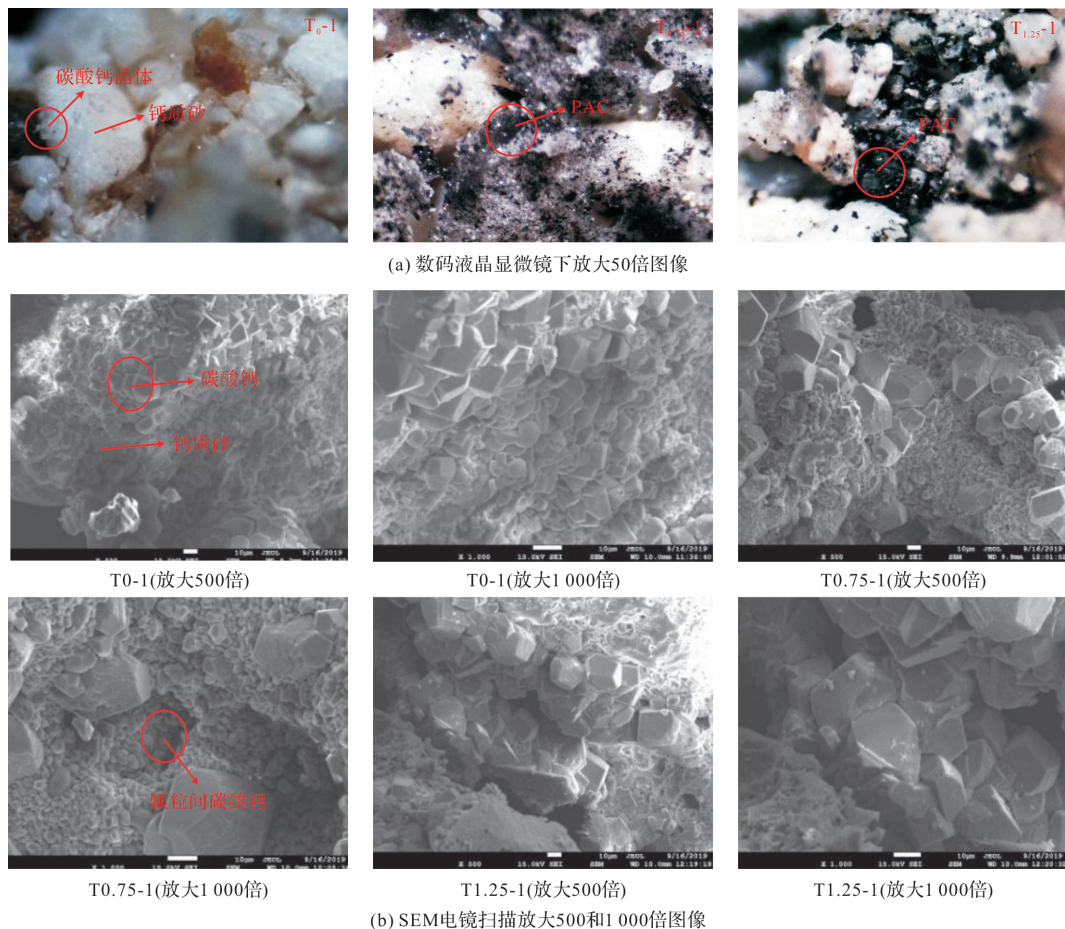


图 11 电子显微镜及 SEM 电镜扫描图

Fig. 11 Electron microscope and SEM scanning diagram

4 结论

本文利用巴氏芽孢八叠球菌,并控制外界环境及灌浆方式一致,在活性炭含量为 0%、0.25%、0.5%、0.75%、1%、1.25% 下,进行了无侧限抗压强度试验、渗透试验、以及 SEM 电镜扫描,试验过程中始终未加入固定液,通过试验得到如下结论:

(1) 钙质砂中加入活性炭能够提高 MICP 反应过程中的碳酸钙生成量,并且随着活性炭含量的

增加,砂柱的无侧限抗压强度先增加后降低,在活性炭含量为 0.75% 时达到最大值,相比未加活性炭的砂柱强度提高了 119.55%,试样的渗透系数先降低后增加,在活性炭含量为 0.75% 时取得最小值,相比未加活性炭的试样降低了 43.34%。综合上述,在钙质砂中加入活性炭提高砂柱强度,存在最佳活性炭掺量 0.75%;

(2) 从无侧限压缩试验的应力应变关系以及破坏形态来看,在达到峰值强度时,砂柱的应变有所增加,在活性炭含量为 0.75% 时应变最大,并

且加入活性炭能够增强试样的局部承载能力,使得试样破坏多为沿着某一截面的剪切破坏;

(3)通过数码液晶显微镜及 SEM 电镜扫描分析,粉末活性炭会填充于钙质砂颗粒表面和颗粒与颗粒之间,为 MICP 反应过程中 CaCO_3 的生成提供了“核位点”,但过多的活性炭会填充于砂颗粒之间,会对颗粒之间的连接产生不利的影响,难以形成颗粒间传递应力的路径,所以,掺入过多的活性炭会导致砂样的强度略微降低。

参考文献 References

- [1] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement[D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [2] DEJONG J T, SOGA K, BANWART S A, et al. Soil engineering in vivo: Harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-function engineering solution[J]. Journal of The Royal Society Interface, 2011, 8(54): 1-15.
- [3] 李沛豪, 屈文俊. 细菌诱导矿化保护历史建筑遗产的机理及效果[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(4): 497-505.
LI Peihao, QU Wenjun. Mechanism and effect of bacteria-induced mineralization in the protection of historical architectural heritage[J]. Acta Silicate, 2009, 37(4): 497-505.
- [4] 程晓辉, 麻强, 杨钻, 等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1486-1495.
CHENG Xiaohui, MA Qiang, YANG Zhuan, et al. Study on dynamic response of reinforcement of liquefied sandy soil with microbe grouting[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1486-1495.
- [5] 钱春香, 李瑞阳, 潘庆峰, 等. 混凝土裂缝的微生物自修复效果[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(2): 360-364.
QIAN Chunxiang, LI Ruiyang, PAN Qingfeng, et al. Microbial self-repairing effect of concrete cracks[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, 43(2): 360-364.
- [6] 钱春香, 任立夫, 罗勉. 基于微生物诱导矿化的混凝土表面缺陷及裂缝修复技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5): 619-631.
QIAN Chunxiang, REN Lifu, LUO Mian. Research progress on surface defects and fracture repair of concrete based on microbial-induced mineralization[J]. Acta Silicate, 2015, 43(5): 619-631.
- [7] 沈道健, 王照宇, 梅岭, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀加固地基技术研究进展[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(3): 390-398.
SHEN Daojian, WANG Zhaoyu, MEI Ling, et al. Research progress of microbial-induced calcium carbonate foundation reinforcement technology[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 31(3): 390-398.
- [8] VICTORIA S Whiffin, LEON A, VAN Paassen, et al. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [9] DEJONG J T, FRITZGES M B, NUSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [10] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges[J]. Geotechnique, 2013, 63(4): 287-301.
- [11] ZHAO Q, LI L, LI C. Factors affecting improvement of engineering properties of MICP-treated soil catalyzed by bacteria and urease[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(12): 4014094.
- [12] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江. 菌液注射方式对微生物固化砂土动力特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3173-3178.
CUI Mingjuan, ZHENG Junjie, LAI Hanjiang. Experimental study on the influence of liquid injection on the dynamic characteristics of solidified sand soil by microorganisms[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(11): 3173-3178.
- [13] 王绪民, 郭伟, 余飞, 等. 营养盐浓度对胶结砂试样物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 363-368, 374.
WANG Xumin, GUO Wei, YU Fei, et al. Experimental study on the physical and mechanical properties of cemented sand samples by nutrient concentration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 363-368, 374.
- [14] KARIM Rowshanbakht, MASHAALLAH Khamehchiyan, REZA H. Sajedi, et al. Effect of injected bacterial suspension volume and relative density on carbonate precipitation resulting from microbial treatment[J]. Ecological Engineering, 2016, 89: 49-55.
- [15] HARKES M P, VAN Paassen L A, BOOSTER J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 112-117.

- [22] LI Qinru, RAO Jiwu, Paul Fazio. Development of HAM tool for building envelope analysis[J]. Building and Environment, 2009, 44(5):1065-1073.
- [23] WANG Yingying, ZHANG Sudan, WANG Dengjia, et al. Experimental study on the influence of temperature and humidity on the thermal conductivity of building insulation materials[J]. Energy and Built Environment, 2021, 38(5): 122-130.
- [24] 于水,张旭,李魁山. 新型建筑墙体保温材料热湿物性参数研究[C]//2010年建筑环境科学与技术国际学术会议论文集. 南京:东南大学出版社 2010:212-218.
YU Shui, ZHANG Xu, LI Kuishan. The research of hygrothermal parameters of new envelop insulation materials [C]//Proceedings of the International Academic Conference on Built Environment Science and Technology. Nanjing: Southeast University Press 2010: 212-218.
- [25] National Weather Data Center[EB/OL]. [2022-04-30]. <https://energyplus.net/weather-region/InternationalWeatherforEnergyCalculationsIWECEfile>[EB/OL].
- [26] HAGENTOFT C E. HAMSTAD-Final report; methodology of HAM-modeling, Report R-02;8 [R]. Gothenburg: Department of Building Physics, Chalmers university of Technology, 2002, 8-50
- [27] KUMARAN M. IEA Annex 24 Final Report, Vol. 3, Task 3: Material properties[M]. Leuven:IEA, Acco Leuven, 1996, 14-132.
- [28] 刘向伟. 夏热冬冷地区建筑墙体热、空气、湿耦合迁移特性研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
LIU Xiangwei. Investigation of the coupled heat, air and moisture transport in building walls in hot summer and cold winter zone [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [29] 张哲,辛苗,张正金,等. 固体推进剂储存老化力学性能双因素方差分析[J]. 爆破器材, 2022, 51(1):29-34.
ZHANG Zhe, XIN Miao, ZHANG Zhengjin et al. Double-factor variance analysis on mechanical behaviors of a solid propellant during aging[J]. Explosive Materials, 2022, 51(1):29-34

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 929 页)

- [16] QABANY A A, SOGA K, Santamarina C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8):992-1001.
- [17] HALE S E, JENSEN J, JAKOB L, et al. Short-term effect of the soil amendments activated carbon, biochar, and ferric oxyhydroxide on bacteria and invertebrates[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(15): 8674-8683.
- [18] DUAN Jinming, WILSON Francis, NIGEL Graham, et al. Adsorption of humic acid by powdered activated carbon in saline water conditions [J]. Desalination, 2003, 151(1):53-66.
- [19] 巴能军,周志伟,董俊,等. 助滤和再生粉末活性炭吸附技术用于工业废水深度处理[J]. 给水排水, 2017, 53(2): 71-74.
BA Nengjun, ZHOU Zhiwei, DONG Jun, et al. Application of assisted filtration and recycled powder activated carbon adsorption technology in the in-depth treatment of industrial wastewater[J]. Water Supply and Drainage, 2017, 53(2):71-74.
- [20] 赵振业,章诗芳,孙伟,等. 粉末活性炭吸附性能对比研究[J]. 水处理技术, 2005(8):18-20.
ZHAO ZhenYe, ZHANG Shifang, SUN Wei, et al. Comparative study on adsorption properties of powdered activated carbon[J]. Water Treatment Technology, 2005(8): 18-20.
- [21] 彭勤,冯清鹏,孙益成. 温度对微生物诱导碳酸钙沉积加固砂土的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(6): 1048-1055.
PENG Jie, FENG Qingpeng, SUN Yicheng. Effect of temperature on microbial induced calcium carbonate deposition in sand reinforcement [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 40(6):1048-1055.
- [22] 方祥位,申春妮,楚剑,等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (10): 2773-2779.
FANG Xiangwei, SHEN Chunni, CHU Jian, et al. Experimental study on microbial deposition of calcium carbonate solidified coral sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10):2773-2779.
- [23] 郑俊杰,吴超传,宋杨,等. MICP 胶结钙质砂的强度试验及强度离散性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020 (2):1-7.
ZHENG Junjie, WU Chuanchao, Song Yang, et al. Strength test and strength dispersion study of MICP cemented calcareous sand [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020(2):1-7.

(编辑 吴海西 沈 波)