

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.178



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 微生物加固钙质砂强度演化过程的环剪试验研究

陈育民<sup>1</sup>, 张书航<sup>1</sup>, 丁绚晨<sup>2</sup>, 张鑫磊<sup>1</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; 土木与交通学院, 南京 210098;  
2. 嘉兴市交通工程质量安全管理服务中心, 浙江 嘉兴 314000)

**摘要:**为获得钙质砂试样在微生物加固过程中的强度特性,对环剪仪的剪切盒进行改造,实现在环剪仪上直接完成钙质砂试样的微生物固化过程。通过环剪试验研究加固时间对固化效果的影响,考虑环剪试验过程中竖向应力的影响并与未加固钙质砂试样进行对比分析。结果表明:在改造后的环剪仪上直接完成固化可以获得加固时间较短、强度相对较低的试样。随着加固时间的增加,试样的抗剪强度不断增大并逐渐达到稳定值,加固48 h后,试样的抗剪强度及残余强度分别达到未加固试样的1.8倍及1.6倍。与未加固试样相比,固化试样表现出明显的应变软化现象,这可能与碳酸钙胶结结构发生破坏有关。在较高竖向应力(75~125 kPa)条件下,固化试样与未加固试样均会表现出较明显的应变软化现象,但两者出现软化现象的原因不同。

**关键词:**微生物加固;钙质砂;环剪仪;抗剪强度

**中图分类号:**TU411.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)04-0010-08

## Ring shear test study on strength evolution process of microbial reinforced calcareous sand

CHEN Yumin<sup>1</sup>, ZHANG Shuhang<sup>1</sup>, DING Xuanchen<sup>2</sup>, ZHANG Xinlei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering; College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China; 2. Jiaxing Traffic Engineering Quality and Safety Management Service Center, Jiaxing 314000, Zhejiang, P. R. China)

**Abstract:** The reinforcement process was directly completed on the ring shear apparatus by remolding the shear box to reveal the strength characteristics of calcareous sandy samples during microbial treatment. The influence of treatment time on the curing effect was studied using ring shear tests. The effect of vertical stress was investigated. The results of treated samples were compared with those without treatment of calcareous sandy samples. The results showed that the treated samples with shorter treated time and relatively lower strength can be obtained utilizing completing the curing process on the modified ring shear apparatus directly. The shear strength of the treated samples increased and reached a constant with increase of treatment time. The shear strength and residual strength of the sample treated 48 hours could reach 1.8 times and 1.6 times of the values for untreated samples, respectively. Compared with the untreated

**收稿日期:**2021-07-05

**基金项目:**国家自然科学基金(52179101,51679072,41831282)

**作者简介:**陈育民(1981-),男,教授,博士生导师,主要从事土动力学与土工抗震研究,E-mail:ymch@hhu.edu.cn.

**Received:**2021-07-05

**Foundation items:**National Natural Science Foundation of China (No. 52179101,51679072, 41831282)

**Author brief:** CHEN Yumin (1981-), professor, doctoral supervisor, main research interests: soil dynamics and geotechnical earthquake engineering, E-mail:ymch@hhu.edu.cn.

sample, the treated sample shows obvious strain-softening behavior, which may be related to the destruction of the cemented structure of calcium carbonate. Under the condition of high vertical stress (75 ~125 kPa), both the treated and the untreated samples show an obvious strain-softening phenomenon, but the reasons behind this phenomenon are different.

**Keywords:** microbial treatment; calcareous sand; ring shear apparatus; shear strength

钙质砂在中国南海海域分布十分广泛,是吹填造岛工程的主要材料。作为海洋生物形成的特殊岩土介质,钙质砂颗粒具有形状不规则、存在内部孔隙、易破碎等特点<sup>[1-3]</sup>。中国南海地区位于三大板块交汇处,地质构造十分复杂,经常发生地震。在海浪以及地震荷载作用下,岛礁边坡会像陆地边坡一样发生失稳而破坏,这将对上部结构设施造成重大损失。因此,有必要对南海钙质砂地基进行加固处理。

微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP)是最近发展起来的一种新型土体加固技术。通过向松散砂土中灌注菌液以及营养盐,利用微生物矿化作用在砂颗粒间快速析出方解石凝胶,以此改善土体的物理力学及工程性质<sup>[4]</sup>。土体的残余强度是判断陆地边坡是否失稳的重要依据<sup>[5]</sup>,而加固后钙质砂的残余强度是研究南海岛礁边坡稳定的重要组成部分。已有研究表明,环剪试验后,钙质砂的残余强度最终会达到稳定值<sup>[6]</sup>。对于钙质砂抗剪强度的研究,研究人员考虑了竖向应力、相对密实度、粒径分布等的影响<sup>[7-10]</sup>。Whiffin等<sup>[11]</sup>通过在5 m长砂柱中低压灌浆的方式完成了砂柱的固化过程。Kim等<sup>[12]</sup>在不同相对密度、注入次数以及微生物菌株条件下测量了砂中方解石沉淀量。Van Paassen等<sup>[13]</sup>进行了100 m<sup>3</sup>大规模原位砂基加固的试验研究并测试了连续灌浆加固16 d后砂基内碳酸钙的生成量。Jiang等<sup>[14]</sup>通过部分拌和MICP处理砂砾土,提高了土体抵抗内部渗流侵蚀的能力。郭红仙等<sup>[15]</sup>采用拌和法固化岛礁钙质砂,总结了钙质砂的压缩特性。彭劼等<sup>[16]</sup>采用塑料箱作为MICP固化过程的反应容器,通过浸泡法直接在箱中完成钙质砂试样的固化过程。目前,开展MICP固化试样的力学性质室内试验需要先通过特制模具完成微生物加固过程,在加固完成后将试样取出、打磨,再进一步开展力学性质试验。这种方法主要存在两方面的缺陷:1)在仪器外部加固好的试样有时不能与试验仪器完全贴合,且打磨等操作往往会对试验产生扰动,会对试验结果造成一定影响;2)在仪器外部对试样进行加固只能获得完全

硬化的试样,当试样胶结强度较低时,难以从模具中取出,无法对其力学性质进行测试。

笔者通过改造剪切盒,实现了在环剪仪上直接进行MICP加固的目的,通过开展多次单一方向的环剪试验,验证了改造剪切盒的合理性;研究了微生物加固过程中钙质砂胶结强度的变化规律;探讨了钙质砂胶结强度与环剪试验过程中竖向应力之间的关系;对MICP加固前后钙质砂试样的环剪试验结果进行了对比。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用砂为取自南海某岛礁附近的钙质砂。根据室内筛分试验可知,钙质砂试样的平均粒径 $d_{50}=0.38$  mm,有效粒径 $d_{10}=0.13$  mm,不均匀系数 $C_u=3.55$ ,曲率系数 $C_c=0.97$ ,属于级配不良。该钙质砂的比重 $G_s=2.73$ ,最大和最小干密度分别为1.44、1.02 g/cm<sup>3</sup>。钙质砂试样的颗粒级配曲线如图1所示。

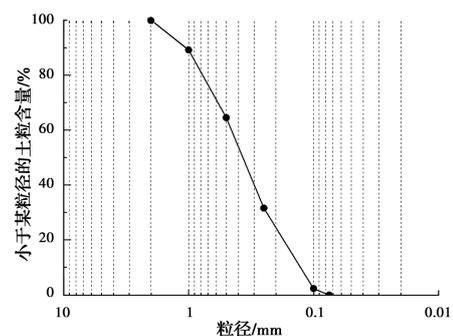


图1 钙质砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curve of calcareous sand

### 1.2 菌液及加固液的制备

试验菌种为购自美国菌种保藏中心的巴氏芽孢杆菌(*S. pasteurii*, 编号 ATCC 11859),制备菌液所需的培养基配方如表1所示。培养基配置完成后,用缓冲液(1 mol/L的氢氧化钠溶液)将其pH值调至9.0并放入高温灭菌锅中消除杂菌,然后放置于超净工作台中等待其冷却。将活化的菌种接种到冷却的培养基中,然后将其放入恒温振荡箱内进行培

养(温度为 30 ℃, 振荡速率为 120 r/min), 最终得到菌液的  $OD_{600}$  值为 0.865。加固液为尿素与氯化钙的混合溶液(尿素与氯化钙溶液的摩尔比为 1:1)。

表 1 培养基配方  
Table 1 Medium formula

试剂名称	培养基配比
酵母提取物	20 g/L
氯化铵	10 g/L
$MnCl_2 \cdot H_2O$	12 mg/L
$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	24 mg/L
蒸馏水	1 L

### 1.3 试验仪器

微生物加固及环剪试验所采用的仪器为 HJ-1 型环剪仪, 仪器所采用的试样外径为 95 mm, 内径为 55 mm, 高为 40 mm。环剪仪能够在试验中保持剪切面面积不变, 同时可以设定滑动距离, 以控制剪切速度, 是目前测试残余强度的一种较为先进可靠的方法。试验中的剪切扭矩可通过计算机自动采集, 剪应力与扭矩的转化关系见式(1)。

$$\tau = \frac{M}{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r^2 dr} = \frac{3M}{2\pi(r_2^3 - r_1^3)} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为剪切应力;  $M$  为剪切扭矩;  $r_1$  和  $r_2$  分别为试样的内半径和外半径。

目前, MICP 加固方法主要分为灌浆法、拌和法以及浸泡法三大类。为在环剪仪上直接完成钙质砂试样的固化过程, 对常用的 3 种固化方法在环剪仪上实施的可行性进行分析。拌和法的加固方式较为简便且能在环剪仪上直接进行, 但加固后试样的强度较低, 采用此方法无法较好地测试试样胶结强度的变化规律。环剪仪上的剪切盒为不透水材质, 采用浸泡法在仪器上直接进行加固较为困难且安全性也有待考虑。基于以上分析结果, 最终选择将环剪仪上的剪切盒作为试样加固过程所需的模具, 采用灌浆法在环剪仪上直接完成钙质砂试样的固化过程。

由于下剪切盒需固定在环剪仪上, 其底部排水较难, 在加固过程中, 无法采用将菌液及加固液从模具顶部通入底部通出的方法。因此, 需要对环剪仪上的剪切盒进行改造。改造过程为: 1) 在上下剪切盒底部各均匀布置 4 个孔作为加固过程中溶液流入与流出的通道, 其中, 下剪切盒的打孔位置在环剪仪内部凸起的槽处(位于试样底部), 上剪切盒的打孔

位置在试样的顶部。2) 用止水带缠绕接头并将接头拧入剪切盒, 在接头内塞入土工布, 以防止砂粒漏出。3) 在下剪切盒底部放置密封胶圈, 用螺丝将下剪切盒固定在环剪仪上并将上剪切盒放置于其上方, 在上下剪切盒的接缝处涂抹硅胶并等待其干燥。改造后的模具如图 2 和图 3 所示。

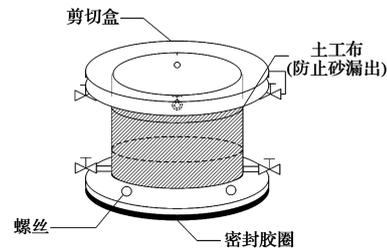


图 2 改造后的模具示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the modified mold

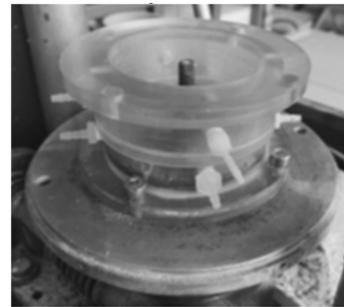


图 3 改造后的模具图

Fig. 3 Diagram of the modified mold

### 1.4 钙质砂试样的固化

钙质砂试样的固化步骤为: 1) 将 240 g 灭菌后的钙质砂与 100 mL 菌液以及 10 mL 固定液(0.05 mol/L 的氯化钙溶液)混合并静置 6 h(使菌株充分吸附在砂颗粒表面)。2) 在剪切盒中间放置直径 55 mm、高 70 mm 的圆管(控制试样的形状为空心圆柱形), 将混合后的钙质砂装入剪切盒中。3) 将 8 根软管一端与接头相连, 底部 4 根软管的另一端与蠕动泵相连, 然后放置于盛有加固液的锥形瓶中, 顶部 4 根软管的另一端直接放置于盛有加固液的锥形瓶中。4) 利用蠕动泵以 1 mL/min 的速率从剪切盒底部通入加固液(加固液浓度 0.5 mol/L), 溶液从顶部流入锥形瓶, 以完成试样的循环加固过程。5) 加固完毕后, 利用蠕动泵将剪切盒中剩余溶液抽出, 然后将软管、硅胶以及盒内的圆管拆除, 即可进行环剪试验。钙质砂试样的固化过程如图 4 所示。

### 1.5 试验工况

采用在环剪仪上直接完成 MICP 固化过程的方式可以获得加固时间较短、强度相对较低的胶结试

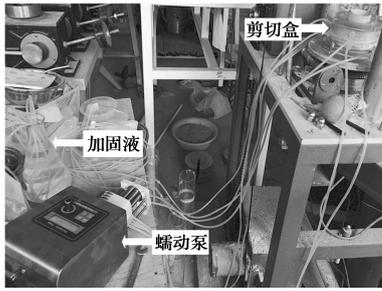


图 4 钙质砂试样的固化过程

Fig. 4 Solidification process of calcium sand samples

样。为了研究加固时间对钙质砂试样胶结强度的影响,考虑了 7 个不同的加固时间,分别为 1、3、6、12、24、36、48 h。该组环剪试验过程中施加的竖向应力为 50 kPa。

此外,采用相同加固条件(加固时间 2 d、加固液通入速率 1 mL/min),考虑了 5 种不同竖向应力(25、50、75、100、125 kPa)分析环剪试验过程中竖向应力对加固后钙质砂力学性质的影响。同时,制备级配条件相同的不加固试样进行对比,分析 MICP 加固前后钙质砂力学性质的差异。采用的加固液浓度均为 0.5 mol/L,环剪试验的剪切速率设置为 5.56 mm/min<sup>[17]</sup>。

## 2 试验结果及分析

对不同孔进水条件下加固后钙质砂试样的剪应力-剪切位移曲线进行分析,并根据试验结果选择合适的进水方式进行后续试验。对不同加固时间及竖向应力条件下钙质砂试样的剪应力-位移曲线、峰值强度和残余强度进行分析,研究加固时间及竖向应力对钙质砂胶结试样强度的影响,并与相同级配条件下的未加固试样进行对比,得出不同竖向应力条件下 MICP 胶结作用对钙质砂强度的影响规律。

### 2.1 剪切盒改造合理性验证

为验证在环剪仪的上下剪切盒底部各均匀布置 4 个孔进行钙质砂微生物加固的合理性,对不同位置孔进水条件下钙质砂试样胶结强度的变化规律进行了对比分析。图 5 所示为剪切盒俯视图,H1~H4 代表剪切盒上均匀布置的 4 个孔。在微生物加固过程中主要考虑 5 种不同的进水方式,具体为 1 孔(H1)、2 对称孔(H1 和 H4)、2 相邻孔(H1 和 H2)、3 孔(H1、H2、H4)以及 4 孔进水,出水方式均为剪切盒上部孔处自然流出。5 组试样的加固液浓度均为 0.5 mol/L,加固时间均为 2 d。试样加固完成后,通过环剪试验分析不同孔进水方式下固化试样强度的变化规律。环剪试验过程中竖向应力为

50 kPa,剪切速率为 5.56 mm/min。

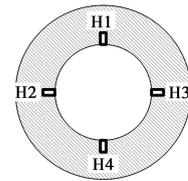


图 5 剪切盒俯视图

Fig. 5 Top view of the cutting box

图 6 所示为不同孔进水条件下钙质砂试样的剪应力-剪切位移曲线。在初始阶段,试样的剪应力随剪切位移增大而逐渐增加,两者近似呈线性关系。随后剪应力发展速率降低并在某一时刻达到峰值。此后,随着剪切位移的增加,剪应力逐渐减小,最终在一个稳定值处上下波动,此值即为残余强度值。图 7 所示为不同孔进水条件下钙质砂试样的峰值强度与残余强度的对比。

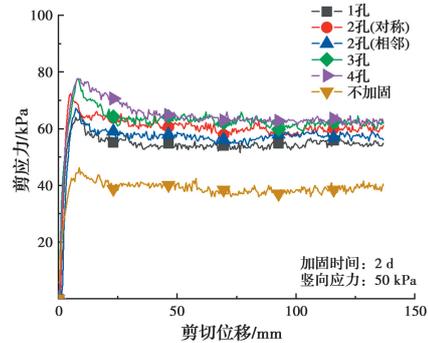


图 6 不同孔进水条件下钙质砂试样的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 6 Shear stress-shear displacement curves of calcareous sand specimens under different water intake conditions

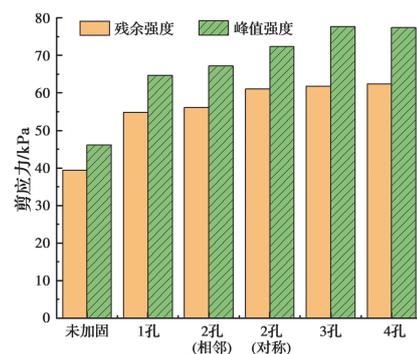


图 7 不同孔进水条件下钙质砂试样的峰值与残余强度对比

Fig. 7 Comparison of peak strength and residual strength of calcareous sand samples under different water inlet conditions

由图 6、图 7 可知,随着进水孔数的增加,加固后试样的抗剪强度也不断增加,相比于未加固试样,1 孔进水条件下提升了 28%,4 孔进水条件下提升了 37%。5 种工况条件下加固后试样抗剪强度的差值较小,其原因可能与环剪试验所采用试样的尺寸

以及加固液的通入速率有关。由于试样的尺寸较小且加固液的通入速率较快,在孔数较少的情况下,加固液也能较快、较均匀地浸没试样,在 3 孔以及 4 孔进水的条件下,加固后钙质砂试样的抗剪强度基本保持恒定,这表明在环剪盒上均匀布置 4 个孔进行钙质砂微生物加固是合理的。

## 2.2 加固时间对 MICP 固化效果的影响

图 8 所示为不同加固时间条件下钙质砂试样的剪应力-剪切位移曲线。由图 8 可知,随着加固时间的增加,固化试样的抗剪强度逐渐增大。前 1~24 h,加固后试样抗剪强度的增长速率较快,但增长速率逐渐趋缓;当加固时间达到 36 h 后,钙质砂试样的抗剪强度趋于稳定;加固 48 h 后,试样的抗剪强度能达到未加固试样的 1.8 倍。加固时间达到 36 h 后,钙质砂试样抗剪强度的提升并不明显的原因可能有两个方面:1)在加固过程中加固液的用量恒定,随着微生物加固过程的持续进行,加固液中的  $\text{Ca}^{2+}$  被不断消耗,当加固时间达到 36 h 后,加固液中残余的  $\text{Ca}^{2+}$  不能保证碳酸钙沉淀的继续生成,故加固 48 h 后试样抗剪强度的提升并不明显;2)随着加固时间的增加,细菌将逐渐走向衰亡,因而会对 36 h 后钙质砂试样的微生物固化过程产生一定的影响。

对图 8 所示曲线进行更进一步分析可知,钙质砂试样在较短加固时间(1~12 h)条件下表现出弱软化的现象,其峰值强度和残余强度的差值较小且曲线的变化规律与未加固钙质砂试样相近,但其抗剪强度均高于未加固的钙质砂试样,加固 12 h 后,钙质砂试样的抗剪强度已能达到未加固试样的 1.3 倍。当加固时间超过 18 h,固化钙质砂试样表现出较为明显的应变软化现象,这可能是由于加固时间达到 18 h 后剪切盒内的钙质砂试样已被胶结成为一个整体,其峰值强度有了较明显的提升。因此,在这一条件下,固化钙质砂试样的剪应力-剪切位移曲线呈现出较明显的应变软化现象。

残余强度与峰值强度是环剪试验的重要结果,残余强度与峰值强度的比值可以反映大变形条件下土体强度衰减的程度<sup>[18]</sup>。Bishop<sup>[19]</sup>首次提出了脆性指数  $I_B$ ,它的定义是峰值强度与残余强度的差值再除以峰值强度。 $I_B$  值越大,说明土样残余强度比峰值强度衰减程度越大,强度软化越明显。

图 9 所示为不同加固时间条件下钙质砂试样的峰值强度与残余强度对比图。表 2 所示为钙质砂试样在不同加固时间条件下的峰值强度、残余强度以及脆性指数。对图 9 和表 2 进行分析可知,加固后

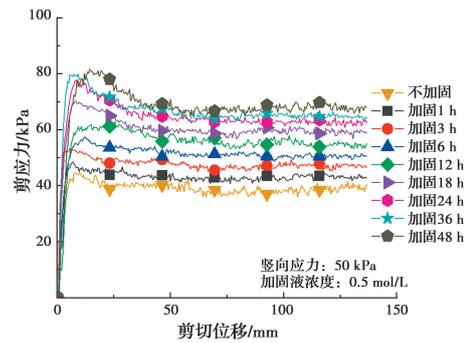


图 8 不同加固时间条件下钙质砂试样的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 8 Shear stress-shear displacement curve of calcareous sand samples under different reinforcement time conditions

试样的峰值强度和残余强度随加固时间的增加而不断增大,开始增长较快,随后趋缓并逐渐达到稳定。随着加固时间的增加,脆性指数整体呈现出增长的趋势,前 1~12 h,试样峰值强度与残余强度的差值较小,脆性指数的增长速率也较小,加固后试样的应变软化现象并不明显;加固时间为 12~24 h 时,试样峰值强度与残余强度的差值逐渐增大,脆性指数的增长速率加快,试样逐渐表现出较为明显的应变软化现象。试样在这一阶段表现出较明显应变软化现象的原因与 MICP 固化效果有关。加固时间较短时,试样的固化效果相对较差,内部虽有  $\text{CaCO}_3$  生成,但并未胶结成为一个整体且强度较低,故环剪试验过程中试样的剪切特性表现为弱软化,达到峰值强度后稍有减小便达到残余强度。随着加固时间的增加,钙质砂试样会被  $\text{CaCO}_3$  晶体胶结起来并逐渐形成一个完整的硬化试样,在环剪试验过程中,当试样的抗剪强度达到峰值强度后,其胶结结构会发生破坏,从而导致试样的抗剪强度降低。此后,随着剪切位移的增加,试样的抗剪强度逐渐保持稳定并达到残余强度。此时,试样峰值强度与残余强度的差值较大,试样表

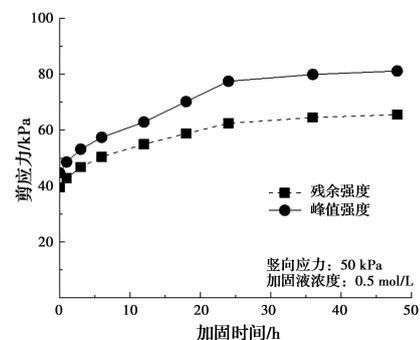


图 9 不同加固时间条件下钙质砂试样的峰值强度及残余强度对比图

Fig. 9 Comparison of peak strength and residual strength of calcareous sand samples under different reinforcement time conditions

现出较为明显的应变软化现象。加固时间为 24~48 h 时,脆性指数基本保持稳定,试样均表现出明显的应变软化现象。

表 2 钙质砂试样在不同加固时间条件下的峰值强度、残余强度以及脆性指数

Table 2 Peak strength, residual strength and brittleness index of calcareous sand samples under different reinforcement time

加固时间/h	峰值强度/kPa	残余强度/kPa	脆性指数
0	44.72	39.46	0.117 6
1	48.54	42.72	0.120 0
3	53.12	46.74	0.121 0
6	57.36	50.40	0.123 5
12	62.88	54.95	0.126 1
18	70.20	58.74	0.163 2
24	77.46	62.40	0.194 5
36	79.90	64.50	0.192 8
48	81.15	65.54	0.192 4

### 2.3 MICP 加固前后钙质砂试样的对比

图 10 为不同竖向应力条件下固化试样的剪应力-剪切位移曲线。由图 10 可知,随着剪切位移的增加,加固后试样的抗剪强度也逐渐增加,竖向应力越大,强度增长越快。当试样的强度达到其峰值强度后,出现软化现象。此后,随着剪切位移的持续增加,剪应力逐渐趋于一个稳定值,即试样的残余强度。对图 10 进行进一步分析可知,当钙质砂试样的抗剪强度达到其峰值强度并逐渐降低后,钙质砂试样的剪应力-剪切位移曲线出现较明显的上下波动现象,且竖向应力越大,曲线波动越明显。出现上述现象的主要原因是加固试样内部存在较多的胶结薄弱面,当薄弱面所受应力达到其强度时,试样内部会出现局部裂隙,此时应力下降;但在竖向及环向的共同加载下,局部裂隙又被压密,试样内部应力被重新分配,应力又继续增加,从而剪应力-剪切位移曲线出现上下波动现象<sup>[20]</sup>。

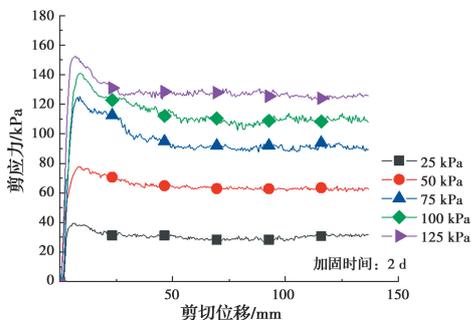


图 10 不同竖向应力条件下固化试样的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 10 Shear stress-shear displacement curves of solidified samples under different vertical stress conditions

图 11 为不同竖向应力条件下固化试样的峰值强度及残余强度对比。由图 11 可知,加固后试样的峰值强度、残余强度以及二者的差值均随环剪试验过程中竖向应力的增加而不断增大,在较高竖向应力作用下,加固后试样的抗剪强度达到其峰值强度后,试样的胶结结构会发生破坏,导致其抗剪强度降低并最终达到稳定的残余强度。因此,随着竖向应力的不断增加,加固后试样的软化现象越来越明显。

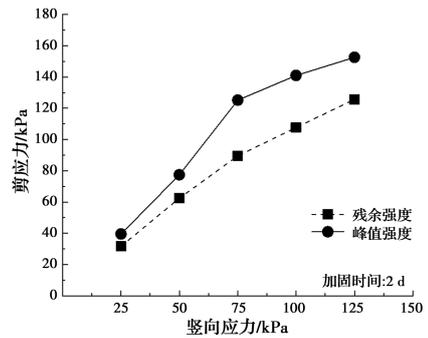


图 11 不同竖向应力条件下固化试样的峰值强度及残余强度对比图

Fig. 11 Comparison diagram of peak strength and residual strength of solidified samples under different vertical stress

图 12 为未加固钙质砂试样的剪应力-剪切位移曲线。图 13 为未加固钙质砂试样的峰值强度及残余强度对比图。由图 12 和图 13 可知,未加固试样的抗剪强度随环剪试验过程中竖向应力的增大而不断增加。在较低竖向应力(25~50 kPa)条件下,未加固试样的峰值强度和残余强度差值较小,试样的应变软化现象并不明显。而在较高竖向应力(75~125 kPa)条件下,试样逐渐表现出明显的应变软化现象。产生此现象的原因与钙质砂颗粒破碎<sup>[21]</sup>和扁平状钙质砂出现定向滑移<sup>[22]</sup>有关。钙质砂颗粒多为片状、颗粒棱角多且内部孔隙也较多,在较高竖向应力条件下,随着剪切过程的持续进行,钙质砂颗粒会产生较为明显的破碎,颗粒间的摩擦力减弱,这

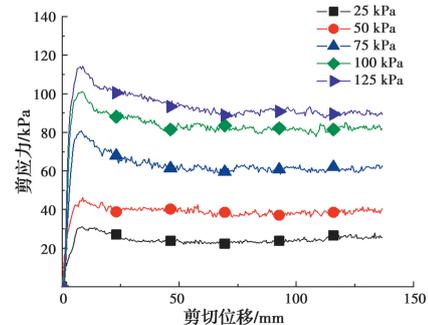


图 12 未加固钙质砂试样的剪应力-剪切位移曲线

Fig. 12 Shear stress-shear displacement curve of unreinforced calcareous sand samples

将导致试样的抗剪强度降低。破碎的颗粒会充填在试样的孔隙中,钙质砂试样孔隙率的降低又将导致其抗剪强度升高,故试样的抗剪强度最终会达到稳定的状态,这也是未加固试样在较高竖向应力条件下表现出应变软化现象的主要原因。

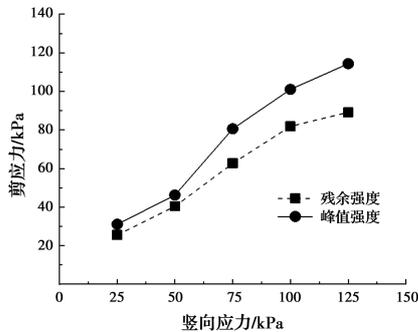


图 13 未加固钙质砂试样的峰值强度及残余强度对比图

Fig. 13 Comparison of peak strength and residual strength of unreinforced calcareous sand samples

对 MICP 加固前后钙质砂试样的强度变化规律以及应变软化现象进行分析可知,随着环剪试验过程中竖向应力的增加, MICP 加固试样与未加固试样均会逐渐表现出明显的应变软化现象,但二者产生此现象的原因不同。对于 MICP 加固试样,在环剪试验过程中出现明显的应变软化现象主要是由于其胶结结构发生破坏。对于未加固试样,在较高竖向应力作用下钙质砂颗粒发生破碎,从而使得试样的抗剪强度降低,并表现出较明显的应变软化现象。

### 3 结论

对环剪仪上的剪切盒进行改进,并对改进的合理性进行分析。在 MICP 加固过程中,均采用剪切盒底部 4 孔进水、顶部出水的方式完成钙质砂试样的固化过程,分析了不同加固时间及竖向应力条件下 MICP 加固试样的剪切特性,并与未加固试样的环剪试验结果进行了对比。主要结论如下:

1) 与在仪器外部完成试样固化过程的 MICP 加固方式相比,采用在环剪仪上直接完成微生物固化过程的方法试验结果更准确,并可以获得加固时间较短、强度相对较低的固化试样,其试验结果可以为实际工程施工提供指导。

2) 随着加固时间的增加,固化钙质砂试样的抗剪强度逐渐增大,但增长速率逐渐减缓。当加固时间达到 36 h,加固后钙质砂试样的抗剪强度趋于稳定,加固 48 h 后,试样的抗剪强度能达到未加固试样的 1.8 倍。

3) 在较高竖向应力(75~125 kPa)条件下,

MICP 加固试样与未加固试样均会表现出较明显的应变软化现象,但二者产生此现象的原因不同。

### 参考文献:

- [1] XIAO Y, LIU H, XIAO P, et al. Fractal crushing of carbonate sands under impact loading [J]. *Geotechnique Letters*, 2016, 6(3): 199-204.
- [2] 崔翔, 胡明鉴, 朱长歧, 等. 珊瑚砂三维孔隙微观特性研究[J]. *岩土力学*, 2020(11): 3632-3640, 3686. CUI X, HU M J, ZHU C Q, et al. Study on the microscopic characteristics of three-dimensional pores in coral sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020(11): 3632-3640, 3686. (in Chinese)
- [3] 吕亚茹, 王冲, 黄厚旭, 等. 珊瑚砂微观颗粒结构及破碎特性研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 352-360. LV Y R, WANG C, HUANG H X, et al. Study on particle structure and crushing behaviors of coral sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 352-360. (in Chinese)
- [4] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 1-14. LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [5] COOP M R, SORENSSEN K K, BODAS FREITAS T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand [J]. *Geotechnique*, 2004, 54(3): 157-163.
- [6] 黄宏翔, 陈育民, 王建平, 等. 钙质砂抗剪强度特性的环剪试验[J]. *岩土力学*, 2018, 39(6): 2082-2088. HUANG H X, CHEN Y M, WANG J P, et al. Ring shear tests on shear strength of calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(6): 2082-2088. (in Chinese)
- [7] 张家铭, 张凌, 蒋国盛, 等. 剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(10): 2789-2793. ZHANG J M, ZHANG L, JIANG G S, et al. Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(10): 2789-2793. (in Chinese)
- [8] 张家铭, 张凌, 刘慧, 等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(Sup1): 3010-3015. ZHANG J M, ZHANG L, LIU H, et al. Experimental research on shear behavior of calcareous sand [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Sup1): 3010-3015. (in Chinese)
- [9] 闫超萍, 龙志林, 周益春, 等. 钙质砂剪切特性的围压

- 效应和粒径效应研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 581-591, 634.
- YAN C P, LONG Z L, ZHOU Y C, et al. Investigation on the effects of confining pressure and particle size of shear characteristics of calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(2): 581-591, 634. (in Chinese)
- [10] WEI H Z, LI X X, ZHANG S D, et al. Influence of particle breakage on drained shear strength of calcareous sands [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(7): (ASCE) GM, 1943-5622. 0002078.
- [11] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [12] KIM G, YOUN H. Microbially induced calcite precipitation employing environmental isolates [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2016, 9(6): 468.
- [13] VAN PAASSEN L A, GHOSE R, VAN DER LINDEN T J M, et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogROUT experiment [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [14] JIANG N J, SOGA K. The applicability of microbially induced calcite precipitation (MICP) for internal erosion control in gravel-sand mixtures [J]. *Géotechnique*, 2017, 67(1): 42-55.
- [15] 郭红仙, 李东润, 马瑞男, 等. MICP 拌和固化钙质砂一维固结试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(8): 593-600.
- GUO H X, LI D R, MA R N, et al. Oedometer test of calcareous sands solidified using the MICP mixing method [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2019, 59(8): 593-600. (in Chinese)
- [16] 彭劼, 田艳梅, 杨建贵. 海水环境下 MICP 加固珊瑚砂试验[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(1): 58-62.
- PENG J, TIAN Y M, YANG J G. Experiments of coral sand reinforcement using MICP in seawater environment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(1): 58-62. (in Chinese)
- [17] 丁绚晨, 陈育民, 张鑫磊. 微生物加固钙质砂环剪试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(9): 1690-1696, 1735.
- DING X C, CHEN Y M, ZHANG X L. Experimental study on microbial reinforced calcareous sand using ring shear apparatus [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(9): 1690-1696, 1735. (in Chinese)
- [18] 张昆, 郭菊彬. 滑带土残余强度参数试验研究[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(8): 13-15, 26.
- ZHANG K, GUO J B. Experimental research on the residual strength parameters of slip soils [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2007, 24(8): 13-15, 26. (in Chinese)
- [19] BISHOP A W. Progressive failure with special reference to the mechanism causing it [C]//Proceedings of the Geotechnical Conference on the Shear Strength of Natural Soils and Pocks. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1967: 142-150.
- [20] ZHANG X L, CHEN Y M, LIU H L, et al. Performance evaluation of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 129: 105959.
- [21] 吴杨, 崔杰, 李能, 等. 岛礁吹填珊瑚砂力学行为与颗粒破碎特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3181-3191.
- WU Y, CUI J, LI N, et al. Experimental study on the mechanical behavior and particle breakage characteristics of hydraulic filled coral sand on a coral reef island in the South China Sea [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3181-3191. (in Chinese)
- [22] 罗会武, 陈培帅, 陈卫忠, 等. 不同颗粒级配钙质砂剪切特性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 40-43, 50.
- LUO H W, CHEN P S, CHEN W Z, et al. Experimental research on shear behavior of different particle gradation of calcareous sand [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2018, 35(4): 40-43, 50. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)