

废弃口罩改良钙质砂力学性能试验研究

孙卓艺¹, 张龙文¹, 张俊麒¹, 张宗堂²

(1. 湖南农业大学水利与土木工程学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411100)

摘要:针对 COVID-19、H1N1 等呼吸道疾病流行导致一次性医用口罩使用量激增所引发的严峻环境问题,探索废弃口罩作为土体加筋材料的可能性,对不同质量分数的口罩-钙质砂混合体开展了三轴试验与渗流试验,研究口罩质量分数对钙质砂强度、模量、体积应变、颗粒破碎率及渗透系数的影响,并揭示口罩对钙质砂力学性能的改良效果。试验结果表明,随着口罩质量分数的增大,口罩-钙质砂混合体的强度、延展性和内摩擦角都得到提高,同时透水能力、颗粒流失及剪胀效应受到抑制;口罩对土体的加筋效果来源于口罩-钙质砂接触界面的高摩擦力,土体变形时,口罩通过限制土颗粒的运动从而提高了混合体的整体强度;此外,综合考虑口罩对钙质砂性能的影响,认为最优口罩质量分数为 0.3%。

关键词:废弃口罩;钙质砂;力学性能;颗粒破碎率;渗流特性;试验研究

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)06-0107-07

Experimental study on mechanical properties of improved calcareous sand mixed with waste mask//SUN Zhuoyi¹, ZHANG Longwen¹, ZHANG Junqi¹, ZHANG Zongtang² (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, China)

Abstract: Aiming at the severe environmental problems caused by the surge in disposable mask usage due to the epidemics of respiratory diseases such as COVID-19 and H1N1, the feasibility of masks as soil reinforcement materials was explored, triaxial tests and seepage tests were conducted on calcareous sand mixed with different mass fractions of masks, the effects of mask mass fraction on the strength, modulus, volumetric strain, particle breakage rate and permeability coefficient of calcareous sand were studied, and the improvement effect of masks on the mechanical properties of calcareous sand was analyzed. The test results show that with the increase of mask mass fraction, the strength, ductility and internal friction angle of the mask-calcareous sand mixture increase, while the permeability, particle loss and shear dilation are inhibited. The reinforcement effect of masks on soil arises from the high friction at the contact interface between the masks and calcareous sand, and when the soil deforms, the masks improve the overall strength of the mixture by restricting the movement of soil particles. Based on a comprehensive evaluation of the influence of masks on the performance of calcareous sand, the optimal mass fraction of masks is determined to be 0.3%.

Key words: waste mask; calcareous sand; mechanical properties; particle breakage rate; seepage characteristics; experimental study

在人们防疫意识增强的背景下,一次性医用口罩的消费数量显著增加^[1],越来越多的人将使用口罩作为预防呼吸道疾病的重要措施,这一趋势预计将持续较长时间。一次性医用口罩的主要成分为聚丙烯纤维^[2],其处理方法包括化学降解、填埋和焚烧,但都具有局限性。化学降解处理成本高,反应时间长,并且需要较高的温度或压力作为反应条

件^[3];填埋处理废弃口罩会导致其在雨水的影响下随机迁移,占用土地^[4];焚烧处理会排放大量毒素与二氧化碳^[5],处置不及时会导致废弃口罩大量堆积^[6]。一次性医用口罩在自然界中完全降解需要数百年^[7],将造成严重的环境负担^[8]。因此,探索高效、环保的废弃口罩规模化处理方法是一个紧迫的世界性问题。

基金项目:国家自然科学基金项目(52208341);湖南省自然科学基金项目(2023JJ40332);中央农机研发制造推广应用一体化试点项目(湘财预[2023]204号)

作者简介:孙卓艺(2001—),男,硕士研究生,主要从事柔性材料改良土研究。E-mail:2322067297@qq.com

通信作者:张俊麒(1990—),男,讲师,博士,主要从事离散元数值算法、柔性材料改良土研究。E-mail:junqi@hunau.edu.cn

口罩是一种特殊的柔性纤维材料,而同类纤维材料常被用于改善土体的工程性能。早在 20 世纪 80 年代,Gray 等^[9]就提出纤维加筋技术可以改良土体的力学性能。而后,学者们逐渐发现掺入纤维还能提高土体的抗剪强度与内摩擦角^[10],降低剪切过程中颗粒土的膨胀性^[11],提升试样的延展性^[12]。因此认为废弃口罩同样具有改良土体力学性能的潜力,且 Sun 等^[13]的研究表明通过简单的热处理便可满足环境安全标准。

党的十八大提出“海洋强国战略”,鼓励在南海地区使用钙质砂开展海洋回填工程,但钙质砂具有容易破碎^[14]、剪胀性强^[15]、渗透性强^[16]的特点,急需使用纤维加筋技术改良钙质砂的性能,因此相关研究备受关注。王殿龙等^[17]发现柔性纤维能够增强钙质砂的抗剪强度,Zhou 等^[18]发现柔性纤维能够抑制钙质砂发生剪切变形,Hakimelahi 等^[19]发现土工纺织物能够有效保护钙质砂免受破碎。同时,寇海磊等^[20]也发现柔性纤维可以提升钙质砂的延展性与韧性。

综上,废弃口罩或许可以作为理想的加筋材料用于提升钙质砂的力学性能,但相关研究非常欠缺。基于此,本文旨在探索废弃口罩作为钙质砂加筋材料的可行性。首先将不同质量分数的口罩碎片和钙质砂均匀混合,而后在不同围压下对口罩-钙质砂混合体开展三轴试验,并分析口罩质量分数对钙质砂强度和变形的影响。随后,收集三轴试验后的试样颗粒,烘干后进行筛分,研究口罩-钙质砂混合体的颗粒破碎情况。最后通过一维土柱渗流试验研究口罩-钙质砂混合体的渗透系数与颗粒流失比的关系。本文研究可为废弃口罩的再利用提供新的视角。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用安徽苏博伦服饰有限公司生产的一次性医用口罩,其中无纺布质量分数为 71%,熔喷布质量分数为 29%。由于口罩的原始尺寸超出了传统土工试验的适用范围,需将其裁剪为 10 mm×10 mm 的规整碎片。大量研究表明纤维改良土中最优纤维体积分数约为 1.0%(相当于质量分数为 0.6%)^[21],因此,本文针对 4 种口罩质量分数展开研究,分别为 0%、0.3%、0.6%、0.9%。试验所选用的钙质砂取自南海某岛礁,相对密度为 2.80,颗粒级配曲线如图 1 所示,其中中值粒径 d_{50} 为 0.73 mm,不均匀系数 C_u 为 2.618,曲率系数 C_c 为 0.973。

根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,称取一定质量的钙质砂颗粒,并按口罩碎片质量分

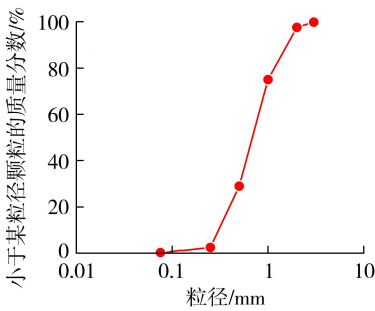


图 1 钙质砂级配曲线

数(以下简称口罩质量分数)0.3%、0.6%、0.9%称取相应质量的口罩碎片,将两者均匀混合得到口罩-钙质砂混合体,使用表面振动击实仪测定口罩-钙质砂混合体干燥状态下的最大密度和最小密度(分别对应最紧密状态和松散堆积状态),见表 1。值得注意的是,考虑到口罩的吸水性能难以控制,测试中混合体保持完全干燥的状态。由表 1 可知,混合体的最大、最小干密度均随口罩质量分数的增大而减小,且在口罩质量分数较小时,若将试样内部的口罩视为孔隙,口罩-钙质砂混合体的密度依然偏小。这表明口罩可以吸收击实能量,导致其周围颗粒难以被压实。

表 1 口罩-钙质砂混合体的最大、最小干密度

口罩质量分数/%	最大干密度/(g/cm ³)	最小干密度/(g/cm ³)
0	1.56	1.35
0.3	1.50	1.27
0.6	1.44	1.19
0.9	1.41	1.13

1.2 三轴试验

口罩-钙质砂混合体的排水性能优良,因此对试样开展固结排水三轴试验,试验过程严格按照 ASTM D 7181 *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils* 执行,试验可分为 4 个阶段:制样、饱和、固结、剪切。在制样阶段,控制所有试样的体积与相对密实度均相同,在相对密实度为 0.7 的初始条件下,称取口罩碎片与钙质砂并均匀混合,而后将口罩-钙质砂混合体分 3 层压实。在饱和阶段,当围压增量和孔压变化量之比达 0.90 时,判定该阶段结束。在固结阶段,当固结排水量趋于稳定,试样的体积不再发生变化时,判定固结阶段结束。在剪切阶段,由于柴维等^[22]研究表明钙质砂的剪切速率会影响抗剪强度和变形特征,临界剪切速率约为 1.6 mm/min,因此本文试验以 1.5 mm/min 的恒定速率进行单调压缩,直至轴向应变达 20%。此外,由于钙质砂在围压大于 200 kPa 时颗粒破碎率显著提高^[23],故围压分别选择 80、200、500 kPa。试验结束后收集试样颗粒,进行烘干、筛分处理,并测定颗粒破碎率。

将所有的试样编号并汇总于表2,编号中的“C”和“P”分别表示口罩质量分数和围压。例如,C03P80是在80 kPa的围压下、口罩质量分数为0.3%的试样。此外,试验所用橡胶膜的厚度为0.3 mm,弹性模量为1 100 kPa,根据ASTMD 7181 *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils* 的计算方法,其造成的围压偏差在可接受的范围内,故未对应力-应变曲线进行修正。初始孔隙比也随着口罩质量分数的增大而增大,这是因为柔性的口罩能够吸收击实能量,从而降低整体密实度,进而导致初始孔隙比增大。

表2 试样编号及初始孔隙比

试样编号	口罩质量分数%	围压/kPa	初始孔隙比
C0P80	0	80	0.879
C0P200	0	200	0.879
C0P500	0	500	0.879
C03P80	0.3	80	0.945
C03P200	0.3	200	0.945
C03P500	0.3	500	0.945
C06P80	0.6	80	1.020
C06P200	0.6	200	1.020
C06P500	0.6	500	1.020
C09P80	0.9	80	1.065
C09P200	0.9	200	1.065
C09P500	0.9	500	1.065

1.3 渗流试验

采用TST-70型渗透仪,按照ASTMD 2434 *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)* 中的具体步骤进行常水头渗流试验。TST-70型渗透仪测压孔间距为100 mm,渗水桶直径为100 mm,桶深为345 mm。为便于与三轴试验结果进行横向对比,试验中所有试样的相对密实度均与三轴试验中的试样保持一致。试验流程包括组装仪器、装样饱和、稳定测压管、计时并记录渗流量。

在对口罩-钙质砂混合物进行常水头渗流试验之前,先检查测压孔是否堵塞,确认无异常之后开始装样。每层试样装好后,微开止水夹,待试样饱和后再装下一层(每层高2~3 cm),直到最后一层饱和和完

成后,在上层铺设2 cm厚的砾石层作为缓冲,让水流自然入渗,以防冲坏试样内部结构。试验过程中控制相同的温度,以消除温度对水流黏滞系数的影响。装样完成后,进行常水头注水,待测压管稳定后开始计时并记录渗流量。单次试验完成后,降低调节管口至试样高度的1/2处,改变水力梯度,按照前述步骤进行平行试验,测试完成之后再将管口降至试样高度的下1/3处,继续重复之前步骤。测定完成后,收集整理平行试验数据并进行计算分析。此外,在测试颗粒渗流特性的同时,收集被水流冲刷流走的细颗粒,通过量化颗粒流失量,评估口罩对钙质砂抗水流侵蚀性能的改良效果。

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变特征

在三轴试验应力条件下,采用应力比量化试样的强度^[24]:

$$\eta = q/p \tag{1}$$

其中 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$
式中: η 为应力比; σ_1 为轴向应力; σ_3 为围压; q 为偏应力; p 为平均主应力。

图2为试样的应力比-轴向应变曲线,可见应力比首先迅速增大至峰值,随后逐渐趋于平稳。口罩质量分数增大,曲线的应力比峰值出现时间会延迟,应力比-轴向应变关系逐渐由软化型转变为硬化型。这种现象表明混合体的延展性随着口罩质量分数的增大而提升。此外,口罩质量分数增大还会使试样强度增大,因为口罩可以凭借其高摩擦因数束缚周围颗粒的旋转,从而抑制颗粒的运动^[25]。随着围压的增大,应力比峰值开始变得难以观察,并且对应的轴向应变逐渐变大,相较传统岩土体,该现象在口罩-钙质砂混合物中更加显著^[26]。造成这种现象的原因是:口罩周围孔隙的不稳定性随颗粒接触应力的增大而急剧增强^[27];此外,在高应力条件下,钙质砂表面的棱角发生局部破碎,导致摩擦因数降低^[28]。与低围压条件相比,高围压下不同口罩质量

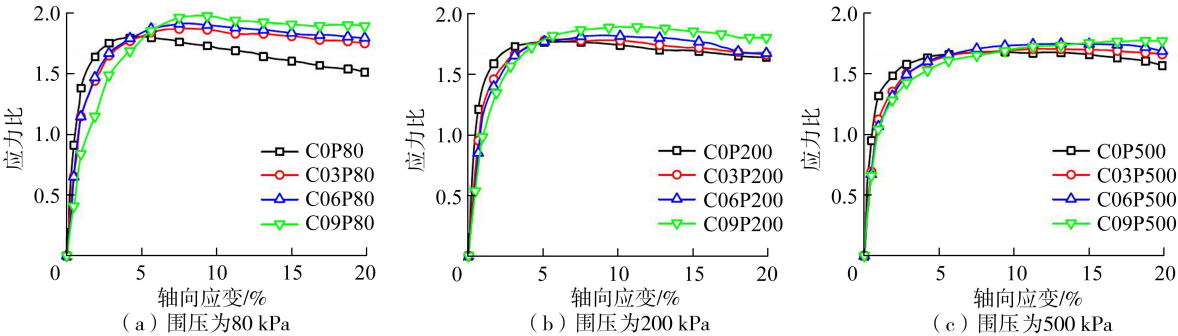


图2 试样应力比-轴向应变曲线

分数的试样应力比-轴向应变曲线形态更为接近,表明口罩质量分数对钙质砂力学行为的影响与外部荷载高度相关。

基于文献[29],定义初始模量为应力比-轴向应变曲线中1%轴向应变对应的割线模量。如图3所示,围压和口罩质量分数增大会导致初始模量降低。此外,口罩质量分数增大导致的初始模量降低与围压状态高度相关。这是由于口罩的柔性变形特性使其周围钙质砂在剪切初始阶段发生颗粒重排列,而围压升高会进一步加剧颗粒的不稳定性^[25]。

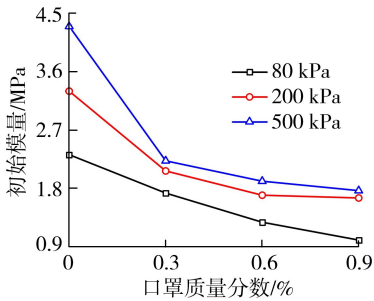


图3 不同围压下口罩-钙质砂混合体的初始模量变化规律

图4展示了口罩质量分数对试样内摩擦角和似黏聚力的影响。可见内摩擦角随着口罩质量分数的增大而增大,而似黏聚力基本保持不变,这一现象符合人们对传统柔性加筋材料的认知^[23],表明柔性片状材料可以激活其内部的拉力以限制周围颗粒的运动,而这种限制是通过接触界面的摩擦力传递的。

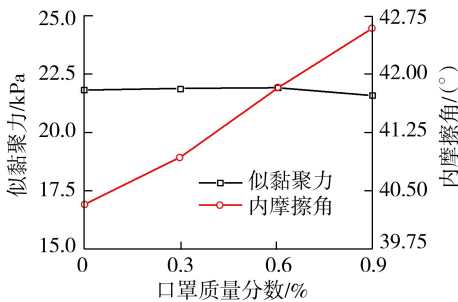


图4 口罩质量分数对试样内摩擦角和似黏聚力的影响

2.2 体积应变特征

在剪切过程中,颗粒会产生滑动和旋转,导致试样体积发生变化,体积应变通过下式计算:

$$\varepsilon_v = (V_0 - V) / V_0 \tag{2}$$

式中: ε_v 为体积应变; V_0 和 V 分别为试样在剪切前固结后和在剪切过程中的体积。

图5绘制了不同围压下各试样的体积应变。体积应变为正表示剪缩,为负表示剪胀。试验结果表明,所有试样首先经历体积收缩,然后迅速剪胀并逐渐趋于稳定。掺入口罩碎片的钙质砂试样的剪缩趋势比素钙质砂更明显,并且口罩质量分数越大,试样剪缩越大,表明口罩碎片能够有效抑制钙质砂的剪

胀,增强材料工程服役性能。围压对混合体的影响同样显著,在围压为80 kPa和200 kPa时,试样呈现出先剪缩后剪胀的趋势;而在围压为500 kPa时剪胀现象消失。此外,围压和口罩质量分数的增大都将导致相变状态(此时体应变增量为0)对应的轴向应变增大,围压达500 kPa时,相变状态大幅延迟,试样在20%轴向应变内表现出的体积变化均为剪缩。

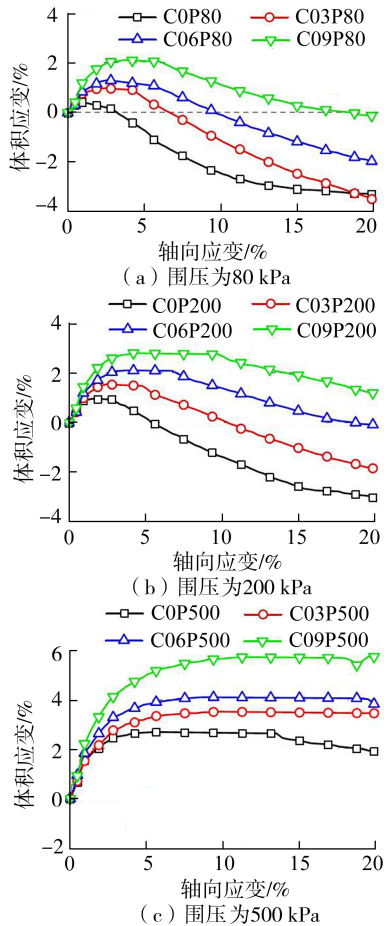


图5 不同围压下各试样的体积应变

应力比-剪胀系数关系^[30]通常用于描述软硬混合体的力学行为。图6为围压为200 kPa时的试样应力比-剪胀系数曲线。图6表明剪胀系数随应力比先增大而减小,在峰值应力比处出现“折返”现象。这种现象意味着峰值状态下的应力比大于临界

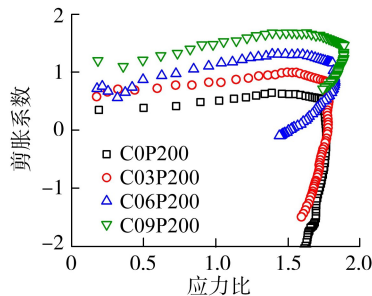


图6 试样应力比-剪胀系数曲线

状态下的应力比,这表明试样的初始状态较为密实。此外,随着口罩质量分数的增大,剪胀系数曲线整体向上平移。

临界状态是土体的稳定剪切状态,与无黏性土本构模型之间存在紧密联系,二者共同描述了土体在剪切过程中的力学行为。然而,口罩碎片的加入会导致钙质砂临界状态延迟,大多数试样在三轴试验中没有达到临界状态。因此,采用和临界状态高度相关的相变状态线来描述材料的力学行为。如图7所示,所有试样的相变状态线都表现出良好的线性。此外,口罩质量分数增大导致相变状态线向上平移,但曲线的斜率保持不变。

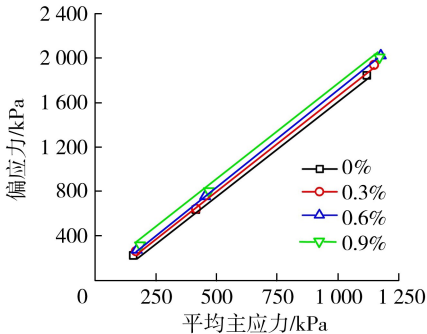


图7 不同口罩质量分数的试样相变状态线

2.3 颗粒破碎情况

由于钙质砂易破碎,因此口罩对钙质砂颗粒破碎情况的影响也值得研究。参考李小刚等^[31]的研究,采用颗粒破碎率来量化颗粒的破碎情况:假设0.074 mm 粒径以下的颗粒不再发生破碎,将初始颗粒级配曲线与粒径为0.074 mm 的竖线所包围的面积定义为初始破碎势 B_{p0} ,将剪切后的试样的级配曲线与初始颗粒级配曲线以及粒径为0.074 mm 的竖线所包围的面积定义为总破碎势 B_t ,此时相对破碎率 B_r 为

$$B_r = B_t / B_{p0} \tag{3}$$

图8为不同围压下的颗粒相对破碎率。如图8(a)所示, B_r 随着口罩质量分数以及围压的增大呈递增趋势。当围压从80 kPa 增大到200 kPa 时, B_r 的平均增幅约为21%,而当围压从200 kPa 上升到500 kPa 时, B_r 的平均增幅约为36%,表明围压超过200 kPa 后,钙质砂的破碎率会大幅提高,和张季如等^[24]观察到的现象一致。在不同的应力水平下, B_r 均在口罩质量分数为0.3%处出现拐点,之后 B_r 与口罩质量分数呈正相关。图8(b)为 B_r 与内摩擦角的关系曲线,可见内摩擦角和口罩质量分数线性正相关,但由于口罩质量分数为0.3%时 B_r 最小,表明口罩具有保护钙质砂颗粒的作用。当口罩质量分数大于0.3%时, B_r 随内摩擦角的增大而增大,表

明虽然掺入口罩碎片可以抑制钙质砂颗粒破碎,但为了抑制颗粒破碎而大量掺入口罩碎片的收益不大。

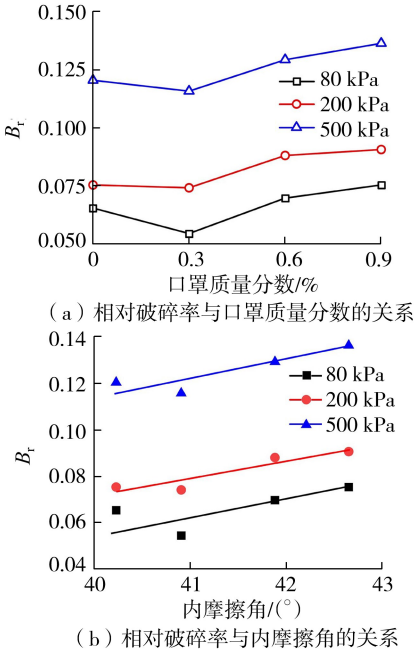


图8 不同围压下的颗粒相对破碎率

2.4 渗流特性

渗透系数 K 常被用于描述颗粒材料的透水能力,其计算公式如下:

$$K = QL / (Ath) \tag{4}$$

式中: Q 为渗流量; L 为渗透长度; A 为试样横截面积; t 为渗流时间; h 为水头损失。在测试颗粒渗流特性的同时,收集被水流冲刷流走的细颗粒,因试样中颗粒绝对数量不同,采用颗粒流失比来量化颗粒流失量,并评估口罩抵御水流侵蚀的效果。

图9为试样渗透系数与颗粒流失比特征曲线,其展示了口罩质量分数对试样渗透系数与颗粒流失比的影响。试样的渗透系数随口罩质量分数增大而单调递减,口罩质量分数越大,试样饱和越慢。口罩质量分数越大,颗粒流失比越小,这是因为片状的口罩碎片与颗粒紧密贴合,在试样内部形成阻水层^[32],从而影响水流通道的顺畅性^[33],同时也有效抑制了颗粒的流失。值得注意的是,当口罩质量分

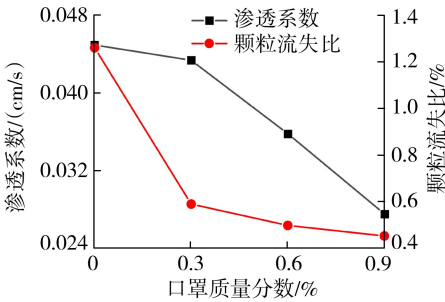


图9 试样渗透系数与颗粒流失比特征曲线

数为 0.3% 时,颗粒流失被大幅抑制,而试样透水能力仅略微下降。

3 结 论

a. 在 0%~0.9% 质量分数范围内,口罩质量分数增大会导致口罩-钙质砂混合体的峰值强度、内摩擦角和延展性均得到提升,而初始模量下降,剪胀现象逐渐消失。此外,口罩质量分数对钙质砂力学行为的影响与外部荷载高度相关。

b. 口罩对土体的加筋效果来源于口罩-钙质砂接触界面的高摩擦力,土体变形时,口罩通过限制土颗粒的运动从而提高了口罩-钙质砂混合体的整体强度。然而,由于口罩易变形,其周围的钙质砂在剪切开始时,分布在口罩周围的颗粒会发生滚动偏移,重新产生排列组合,从而降低了混合体的初始模量。

c. 掺入口罩可抑制钙质砂颗粒破碎,且当口罩质量分数为 0.3% 时效果最佳。

d. 掺入口罩将降低钙质砂的渗透系数并防止颗粒流失,且当口罩质量分数为 0.3% 时,颗粒流失被大幅抑制,而试样透水能力仅略微下降。

参考文献:

[1] 朱金佗,梁琛裕,朱桂英,等. 超低阻呼吸防护用聚乳酸纳米纤维膜制备及长效过滤性能[J]. 煤炭学报,2024,49(4): 1952-1963. (ZHU Jintuo, LIANG Chenyu, ZHU Guiying, et al. Preparation and long-term filtration performance of PLA-based nanofibrous mem-brane filters for ultra low-resistance respiratory protection[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49 (4): 1952-1963. (in Chinese))

[2] 吴翰,范方硕,孙启坤,等. 废弃一次性医用外科口罩热解动力学分析[J]. 塑料,2024,53(3): 143-148. (WU Han, FAN Fangshuo, SUN Qikun, et al. Pyrolysis kinetics analysis of disposable medical surgical masks [J]. Plastics,2024,53(3): 143-148. (in Chinese))

[3] LEE A, LIEW M S. Tertiary recycling of plastics waste: an analysis of feedstock, chemical and biological degradation methods [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2021, 23 (1): 32-43.

[4] FADARE O O, OKOFFO E D. Covid-19 face masks: a potential source of microplastic fibers in the environment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 737: 140279.

[5] KHOO K S, HO L Y, LIM H R, et al. Plastic waste associated with the COVID-19 pandemic: crisis or opportunity? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 417: 126108.

[6] OLIVEIRA A M, SILVA A L P, SOARES A M V M, et al.

Current knowledge on the presence, biodegradation, and toxicity of discarded face masks in the environment [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11 (2): 109308.

[7] 李琛,李悦生. 吡啶基有机碱催化 O-羧基酐的活性开环聚合 [J]. 高等学校化学学报, 2021, 42 (10): 3203-3210. (LI Chen, LI Yuesheng. Living ring-opening polymerization of O-carboxyanhydrides catalyzed by pyridine derivatives [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2021, 42 (10): 3203-3210. (in Chinese))

[8] WANG Limin, LI Shengxuan, AHMAD I M, et al. Global face mask pollution: threats to the environment and wildlife, and potential solutions [J]. Science of the Total Environment, 2023, 887: 164055.

[9] GRAY D H, OHASHI H. Mechanics of fiber reinforcement in sand [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109 (3): 335-353.

[10] 蒋希雁,刘嘉璐,李明洋,等. 棕榈纤维加筋土抗剪强度特性及机理研究 [J]. 力学季刊, 2024, 45 (1): 274-285. (JIANG Xiyan, LIU Jialu, LI Mingyang, et al. Study on the shear strength characteristics and reinforcement mechanism of palm fiber reinforced soil [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2024, 45 (1): 274-285. (in Chinese))

[11] 张季,汪顺敏,庄海洋,等. 聚丙烯纤维增强橡胶砂固结不排水剪切试验 [J]. 建筑材料学报, 2024, 27 (5): 471-478. (ZHANG Ji, WANG Shunmin, ZHUANG Haiyang, et al. Consolidated undrained shear test of polypropylene fiber reinforced rubber sand [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27 (5): 471-478. (in Chinese))

[12] 朱锐,王燕杰,黄英豪,等. 木质素纤维改良膨胀土的冻融特性及微观机理 [J]. 农业工程学报, 2024, 40 (2): 263-272. (ZHU Rui, WANG Yanjie, HUANG Yinghao, et al. Freeze-thawing characteristics and microscopic mechanism of expansive soil treated with lignin fibers [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40 (2): 263-272. (in Chinese))

[13] SUN X P, JIANG Z Y, XU A, et al. Recycle of discarded masks in civil engineering: current status and future opportunities with silane coupling agent modified discarded masks [J]. Construction and Building Materials, 2023, 405: 133266.

[14] 陈军浩,张艳娥,王刚,等. 不同固结路径下钙质砂固结排水强度性状研究 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (8): 2290-2298. (CHEN Junhao, ZHANG Yane, WANG Gang, et al. An experimental study on consolidated drainage strength of calcareous sand under anisotropic consolidation paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45 (8): 2290-2298. (in Chinese))

[15] 钟丽,陈鑫莲,刘晓璇,等. 不同应力路径下钙质砂的力学及变形特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44 (10):

- 2929-2941. (ZHONG Li, CHEN Xinlian, LIU Xiaoxuan, et al. Experimental study on the mechanical and deformation characteristics of calcareous sand under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2929-2941. (in Chinese))
- [16] 郑思维, 胡明鉴, 霍玉龙, 等. 盐溶液环境下钙质砂渗透性影响因素分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3522-3530. (ZHENG Siwei, HU Mingjian, HUO Yulong, et al. Analysis of factors affecting permeability of calcareous sand in salt solution environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3522-3530. (in Chinese))
- [17] 王殿龙, 唐朝生, 泮晓华, 等. 纤维加筋 MICP 固化钙质砂的抗拉强度特性研究[J]. 高校地质学报, 2021, 27(6): 670-678. (WANG Dianlong, TANG Chaosheng, PAN Xiaohua, et al. Tensile strength of fiber-reinforced MICP-treated calcareous sand[J]. Geological Journal of China Universities, 2021, 27(6): 670-678. (in Chinese))
- [18] ZHOU L, CHEN J F, PENG M, et al. Liquefaction behavior of fiber-reinforced calcareous sands in unidirectional and multidirectional simple shear tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2022, 50(4): 794-806.
- [19] HAKIMELAH N, BAYAT M, AJALLOEIAN R, et al. Effect of woven geotextile reinforcement on mechanical behavior of calcareous sands[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e02014.
- [20] 寇海磊, 黄佳明, 袁景泉, 等. 椰丝纤维加筋对钙质砂强度影响的试验研究与机理分析[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(5): 98-103. (KOU Hailei, HUANG Jiaming, YUAN Jingquan, et al. Experimental studies on coconut fiber reinforcement effect on calcium sand and analysis of mechanism underlining such effect[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(5): 98-103. (in Chinese))
- [21] CHEN M, SHEN S L, ARULRAJAH A, et al. Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(6): 515-523.
- [22] 柴维, 龙志林, 旷杜敏, 等. 直剪剪切速率对钙质砂强度及变形特征的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊1): 359-366. (CHAI Wei, LONG Zhilin, KUANG Dumin, et al. Effect of shear rate on shear strength and deformation characteristics of calcareous sand in direct shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Sup1): 359-366. (in Chinese))
- [23] LYU Haibo, GU Jianxiao, ZHOU Jianrong, et al. Mechanical behavior and particle breakage of calcareous sand in triaxial test[J]. Marine Geophysical Research, 2023, 44(3): 18.
- [24] 张季如, 陈敬鑫, 王磊, 等. 三轴剪切过程中排水条件对钙质砂颗粒破碎、变形和强度特性的影响[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 375-384. (ZHANG Jiru, CHEN Jingxin, WANG Lei, et al. Effect of drainage conditions during triaxial shearing on particle breakage, deformation, and strength properties of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2): 375-384. (in Chinese))
- [25] ZHANG Junqi, CHEN Xiaobin, ZHANG Jiasheng, et al. DEM investigation of macro- and micro-mechanical properties of rigid-grain and soft-chip mixtures[J]. Particuology, 2021, 55: 128-139.
- [26] ZHANG Zongtang, GAO Wenhua, WANG Xiang, et al. Degradation-induced evolution of particle roundness and its effect on the shear behaviour of railway ballast[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 24: 100388.
- [27] ZHANG Junqi, WANG Xiang, YIN Zhenyu, et al. DEM modeling of large-scale triaxial test of rock clasts considering realistic particle shapes and flexible membrane boundary[J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105871.
- [28] HARKNESS J, ZERVOS A, LE P L, et al. Discrete element simulation of railway ballast: modelling cell pressure effects in triaxial tests[J]. Granular Matter, 2016, 18(3): 1-13.
- [29] 朱锐, 邢玮, 郭万里, 等. 微生物加固渠基粉土的冻融特性及微细观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(2): 376-387. (ZHU Rui, XING Wei, GUO Wanli, et al. Freeze-thaw performance and micro-mechanism of canal foundation silt treated by MICP[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(2): 376-387. (in Chinese))
- [30] ZHANG Junqi, WANG Xiang, YIN Zhenyu. DEM-based study on the mechanical behaviors of sand-rubber mixture in critical state[J]. Construction and Building Materials, 2023, 370: 130603.
- [31] 李小刚, 朱长歧, 崔翔, 等. 含碳酸盐混合砂的三轴剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 123-131. (LI Xiaogang, ZHU Changqi, CUI Xiang, et al. Experimental study of triaxial shear characteristics of carbonate mixed sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 123-131. (in Chinese))
- [32] MUELLER A, FERNANDEZ L. Assessment of fabric masks as alternatives to standard surgical masks in terms of particle filtration efficiency[J]. Medrxiv, 2020. doi:10.1101/2020.04.17.20069567.
- [33] CEY E E, RUDOLPH D L. Field study of macropore flow processes using tension infiltration of a dye tracer in partially saturated soils[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(12): 1768-1779.

(收稿日期: 2024-11-06 编辑: 骆超)