

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221030001

# 废弃口罩加筋的煤矸石路基粗粒土填料 动力特性试验研究\*

肖天祥, 高文华, 张宗堂, 沈子钰, 何钰, 周泽林

(湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201)

**摘要:**为实现废弃口罩资源化再利用,将其运用于煤矸石路基的加筋中,通过开展循环荷载作用下不同加筋方式、不同口罩含量的煤矸石路基填料大型动力三轴试验,探讨了口罩加筋煤矸石路基的可行性和影响因素,研究了口罩对煤矸石路基的加筋效果。研究结果表明:(1)口罩加筋煤矸石路基粗粒土填料能取得良好的加筋效果;(2)不同加筋方式、纤维尺寸、口罩裁剪方向、路基中的口罩含量均会对口罩加筋煤矸石路基粗粒土填料的加筋效果产生影响;(3)在已尝试的试验方案中,土样每20 cm铺设一层口罩织物的加筋效果系数为1.663,加筋效果最为出色。在不同口罩含量对比试验中,土样中口罩含量为30个时,加筋效果系数为2.3,取得了最好的加筋效果,但从现有数据规律中可推论仍有提升空间。研究成果可为煤矸石路基填料改良提供参考。

**关键词:**路基加筋;废弃口罩处理;大型三轴试验;累积变形

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0426-08

## Experimental Study on Dynamic Characteristics of Coal Gangue Roadbed Filler Reinforced with Waste Masks

XIAO Tianxiang, GAO Wenhua, ZHANG Zongtang, SHEN Ziyu, HE Yu, ZHOU Zelin  
(Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** To achieve the recycling of mask waste, they were used in the reinforcement of coal gangue roadbeds. By conducting a large-scale dynamic triaxial test under cyclic loading with different reinforcement methods and mask contents, the feasibility and influencing factors of mask reinforcement in coal gangue roadbeds were investigated, and the reinforcing effect of masks in roadbeds was studied. The results showed that: (1) Coarse-grained soil fillers for roadbeds reinforced with masks in coal gangue demonstrated effective reinforcement; (2) Different reinforcement methods, fiber size, mask cutting direction, and mask content in roadbeds could affect the effectiveness of reinforcement; (3) Among all the tested schemes, the one using a layer of mask fabric laid every 20cm in the soil sample achieved the highest reinforcement effect coefficient of 1.663. In the comparison tests of different mask con-

\* 收稿日期:2022-10-30;修回日期:2022-11-28

**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(2023JJ40293)、湖南省科技人才托举工程项目-“小荷”科技人才专项(2023TJ-X74)、湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(23B0492)资助

**作者简介:**肖天祥(1998—),男,硕士研究生。主要从事岩土工程的研究。E-mail: 512594900@qq.com

**通讯作者:**张宗堂(1991—),男,讲师。主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: zzt@hnust.edu.cn

tents, a mask content of 30 in the soil sample achieved the highest reinforcement effect coefficient of 2.3. However, the data suggested that there was still potential for further improvement. The research results can serve as a reference for the improvement of coal gangue subgrade fillers.

**Keywords:** roadbed reinforcement; disposal of waste masks; large dynamic triaxial test; the cumulative deformation

## 0 引言

新型冠状病毒(COVID-19)在世界大范围内流行,直接导致口罩及医护用品的生产量和消耗量急速增长<sup>[1]</sup>。根据相关行业研究结果,我国2021年口罩产量为92.5亿只,在消耗废弃后,绝大多数口罩将进行填埋或者焚烧处理,给环境带了极大负担。同时,由于环保政策导向,建筑市场砂石材料紧缺,寻找新型砂石材料成为必然。煤矸石是煤炭开采过程中所排放出固体废弃物,约占煤炭的产量的20%,按照2020年煤炭生产和洗选加工总量测算,煤矸石年产量超过7亿吨。其综合利用水平不高,作为道路路基时,煤矸石具有强度较低、容易破碎、耐水性差等特点<sup>[2]</sup>。

口罩主要成分为聚丙烯,其密度小、熔点低,同时具备中等刚度和强度,是应用最为广泛的树脂材料之一<sup>[3-4]</sup>。目前,其在建筑材料中也有部分应用:肖庆一等<sup>[5]</sup>将聚丙烯纤维和二灰稳定红黏土混合,分析其力学性能、水稳性能以及微观作用机理,发现在养护后期其劈裂强度、抗压回弹模量、抗压强度以及水稳性能得到提升。张志韬等<sup>[6]</sup>使用聚丙烯纤维对砾质黏土进行加固,提升了土样的抗拉强度和极限拉应变,并且与纤维的添加量正向相关,但随着砾质黏土中砾石含量的增大,纤维的掺入对其抗拉强度的提升作用明显降低。黄华等<sup>[7]</sup>通过电镜扫描发现聚丙烯纤维的桥接作用,适量添加可以有效阻止地聚物混凝土中早期微裂纹的出现和发展。但添加过量纤维会导致“团聚”现象,在结构中引入了更多孔洞,降低其改善作用甚至造成负面影响。阮波等<sup>[8]</sup>将聚丙烯纤维加筋水泥用于改良风积沙,发现改良后风积沙应力应变曲线起始段近似线性增加,达到峰值强度后缓慢下降,其残余强度随着纤维掺量的增加而增大。

现有研究表明,在建筑材料中添加聚丙烯纤维的方式可达到抑制裂缝的目的,提升合成材料的强

度和刚度,但直接应用废弃口罩进行加筋的论文还鲜见报道。M. Saberian等<sup>[9]</sup>使用口罩纤维加筋再生混凝土块,发现在再生混凝土骨料中混合1%~2%口罩纤维段,可提升加筋土的强度和刚度。其认为是纤维与土颗粒紧密结合,纤维的桥接效应阻碍了张力裂缝的进一步发展。然而,在纤维添加量超过2%后,过量的纤维段产生了大量的空隙,导致土样的强度和刚度降低。程培峰等<sup>[10]</sup>利用废旧口罩熔喷布对基质沥青进行改性,测定其常规物理性能指标。发现口罩熔喷布提高了沥青的软化点、黏度及弹性恢复率,并有效改善了沥青的高温抗变形能力。闭东民等<sup>[11]</sup>以废弃口罩为加筋材料,对高含水率淤泥水泥固化土进行加筋处理,发现加筋土强度显著提高,呈现一定的塑性破坏特征。

在现有研究中,聚丙烯在混凝土中的应用较多,也取得了不错的效果,废旧口罩直接用于建筑材料的报道还比较罕见,使用废旧口罩加筋的煤矸石路基填料的性能研究更是鲜有听闻。为实现资源化再利用,本文将回收的废旧口罩杀菌消毒处理后,作为加筋材料应用于煤矸石路基填料中,通过开展不同加筋方式、不同口罩含量的煤矸石路基填料大型动力三轴试验,探讨口罩加筋煤矸石路基的可行性和影响因素,研究口罩对煤矸石路基的加筋效果,旨在回收利用资源、提升路基填料性能的同时,也在一定程度上解决环境污染问题。

## 1 试验仪器与材料

### 1.1 试验材料

本次试验选用废弃一次性医用普通口罩和煤矸石进行试验。将口罩中的鼻托和挂耳去除后,剩余结构为两层无纺布和一层熔喷布,均由聚丙烯(PP)组成,无毒无味,能耐酸、碱、盐液及多种有机溶剂的腐蚀,具有一定韧性,使用温度为-30~140℃<sup>[12]</sup>。试验所用煤矸石产自湘潭唐家山煤矿,其粒径分布不均匀,表面粗糙且有尖角,强度低。

通过EDS能谱试验,获取煤矸石的元素含量,其主要成分组成见表1,通过液塑限联合测定仪测得细颗粒液性指数 $I_L=31.64$ ,塑性指数 $I_p=20.57^{[13]}$ 。

表1 煤矸石颗粒主要组成元素

Table 1 Main components in coal gangue particles

元素	重量比	原子百分比
C	15.96	24.62
O	47.70	55.26
Mg	4.49	3.57
Si	9.64	6.35
Ca	22.00	10.18

## 1.2 试验仪器

本次试验使用成都东华卓越科技有限公司DJSZ-150型大型动、静三轴试验仪(图1)进行试验。该设备主要由主机、伺服液压机、电控系统四个部分组成。试样直径为300 mm、高度为600 mm,可进



图1 DJSZ-150型大型动、静三轴试验仪

Fig.1 DJSZ-150 large dynamic and static triaxial test apparatus

行稳压加载、等应力加载、等应变加载三种加载方式,最大轴向动荷载和最大围压分别为700 kN和3.0 MPa,加载频率为0.01~5 Hz,可施加波形为正弦波、半正弦波等。

## 2 试验方案

(1) 将烘干后的煤矸石进行筛分,按照以往研究所得最优级配曲线区间进行配土<sup>[14-15]</sup>,级配曲线如图2所示。为了探求土样在不同的口罩加筋条件和不同的口罩含量下的应变和强度变化规律,试验中考虑了以下情况:(1)改变加筋方式,选择的加筋方式有在土样中均匀混合口罩纤维和等间距铺设口罩制土工织物。(2)改变纤维剪切方向,选择的剪切方向有横向剪切和纵向剪切处理。(3)改变纤维尺寸,考虑到大三轴试验要求土样最大粒径在60 mm以下,选择的口罩段尺寸有2 mm\*60 mm、4 mm\*60 mm、40 mm\*60 mm。(4)改变口罩含量,分别改变两种加筋方式中的口罩含量进行加筋。具体实验方案见表2,示意图如图3所示。

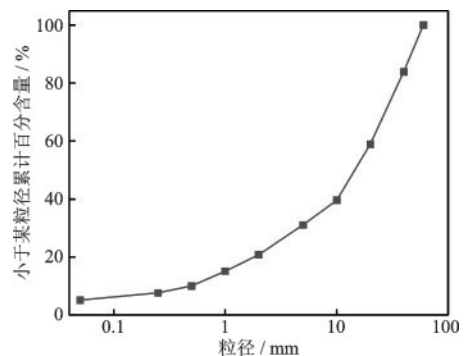


图2 试样级配曲线

Fig.2 Grading curve of the sample

表2 试验方案

Table 2 Test schemes

试验编号	口罩含量/个	加筋方式	口罩裁剪方向	试验参数
1	0	不加筋		
2	20	混合40 mm*60 mm口罩长方块	横向	
3	20	混合4 mm*60 mm口罩长条段	横向	1.单级加载
4	30	纤维混合加筋	混合4 mm*60 mm口罩长条段	2.荷载幅值取200 kPa
5	10		混合4 mm*60 mm口罩长条段	3.围压100 kPa
6	20		混合2 mm*60 mm口罩长条段	4.荷载振动次数30 000次
7	20		混合4 mm*60 mm口罩长条段	5.振动频率1 Hz
8		铺设织物加筋	每20 cm土样加入1层拼接口罩织物	
9			每10 cm土样加入1层拼接口罩织物	

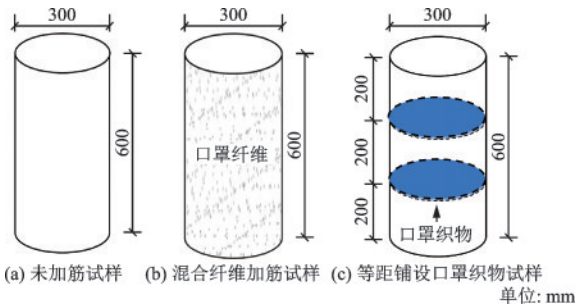


图3 不同方式加筋试样示意

Fig.3 Diagrams of samples using different reinforcement methods

(2)《新型冠状病毒肺炎诊疗方案》<sup>[16]</sup>中明确指出病毒惧怕高温,将口罩用抗菌溶液(即0.9%生理盐水)喷洒在口罩上以保持水分,放于105℃的烤箱中烘烤15 min,去除口罩带和鼻夹后展开,按照方案中的加筋方式进行处理,得到所需各类尺寸的口罩纤维和直径为61.8 mm的圆盘形口罩织物,如图4所示。将土样与所得到的口罩纤维均匀混合或等间距铺设一层完全覆盖土样的口罩织物,得到相应的加筋土样,如图5所示。

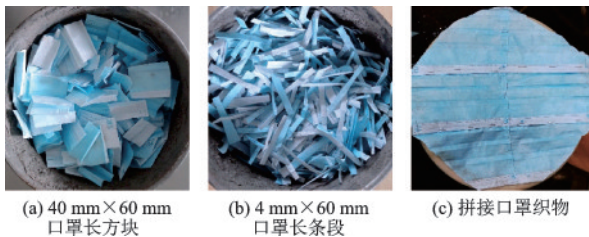


图4 根据加筋方案处理后的口罩

Fig.4 Masks treated according to different test schemes

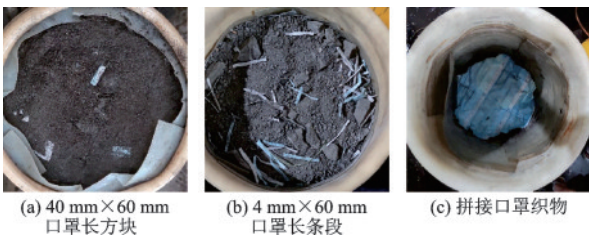


图5 不同方案对应的加筋效果

Fig.5 Reinforcement effects corresponding to different schemes

(3)按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)<sup>[17]</sup>中的粗粒土的三轴压缩试验(T0147—1993)方法,开展不同加筋方式、不同口罩含量下的煤矸石路基填料不固结不排水大型动三轴实验。为模拟交通荷载作用的情况下,将压实度为93%的

加筋土样在100 kPa围压、1 Hz振动频率、200 kN轴向荷载的条件下循环加载20 000次,根据加筋土样的体变得到不同工况下煤矸石路基填料的循环荷载次数—轴向累积应变曲线。最后,多次加载至破坏,其破坏形态如图6所示。

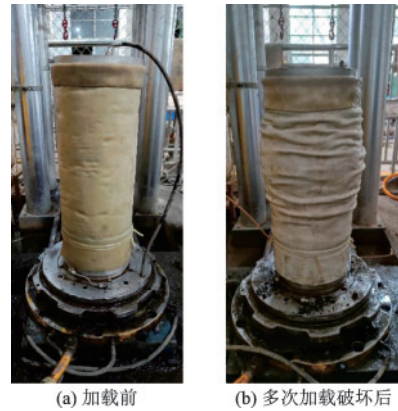


图6 试样加载前后对比

Fig.6 Comparison of samples before and after loading

### 3 不同方式的加筋结果及分析

为评价加筋效果好坏,引入加筋效果系数的概念。定义加筋效果系数 $r$ 为20 000次循环荷载后,未加筋土和加筋土的轴向累积应变的比值,如式(1)所示, $r$ 大于1则代表该试样加筋效果良好。

$$r = \frac{\epsilon_{\text{未加筋}}}{\epsilon_{\text{加筋}}} \quad (1)$$

式中, $\epsilon_{\text{未加筋}}$ 为未加筋土的轴向累积应变,%; $\epsilon_{\text{加筋}}$ 为加筋土的轴向累积应变,%;

#### 3.1 纤维加筋土样结果及分析

4种通过混合不同规格的口罩纤维得到的加筋土样,其加筋效果系数见表3。由表3可见,相较于未加筋土样而言,4种纤维加筋方式均起到了一定加固效果,其中横向剪切的2 mm\*60 mm长条段加筋效果系数 $r$ 为1.596,加筋效果最出色。在相同口罩纤维添加量和剪切方向下,40 mm\*60 mm的长方形段宽和4 mm\*60 mm长条段的也取得了一定的加筋效果,但相比2 mm\*60 mm的长条段而言对土样的强度提升较小。

这是因为:煤矸石土样级配中大粒径占比较高,骨架整体为疏松状态,上述几种加筋方式中

表3 口罩纤维加筋土的加筋效果系数

Table 3 Reinforcement effect coefficient of soil reinforced with mask fibers

加筋方式	轴向累积应变/%	加筋效果系数 $r$
未加筋	0.523	1
混合 40 mm*60 mm 口罩长方形(横向裁剪)	0.452	1.155
混合 4 mm*60 mm 口罩长条段(横向裁剪)	0.481	1.086
混合 2 mm*60 mm 口罩长条段(横向裁剪)	0.327	1.596
混合 4 mm*60 mm 口罩长条段(纵向裁剪)	0.363	1.439

2 mm\*60 mm 长条段宽度最小,相同的口罩数目可裁剪出更多的纤维段,能够更为均匀地填补土颗粒之间的间隙,增强了土颗粒间的嵌挤力和摩擦力,并起到一定锚固作用。而且,土体中均匀分布的纤维段与土样紧密咬合,能够充分发挥纤维的阻裂作用和立体约束作用,因而加筋土样拥有了更强的抗变形能力。同时,在 4 mm\*60 mm 长条段的横向剪与纵向剪的对比试验中可见,口罩长条段的剪切方向对口罩纤维的加筋效果同样有着显著影响,笔者认为口罩的制造工艺使得口罩不同方向的纹理结构不同,从而影响了破碎段在不同方向上抗拉强度,导致最终的加筋效果差异,但还需要进一步观测微观结构和试验证明。试验所得的累积轴向应变  $\epsilon_p$  随循环荷载次数  $N$  的变化曲线如图 7 所示。

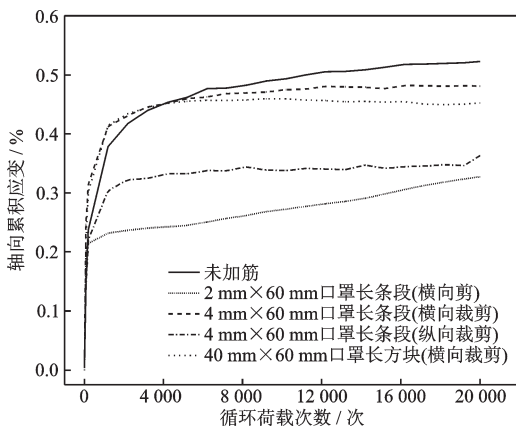


图7 不同口罩纤维加筋土的累积轴向应变-循环荷载次数变化曲线

Fig.7 Curves of cumulative axial strain vs. the number of cyclic load for soil reinforced with different mask fibers

### 3.2 铺设口罩织物加筋土样结果及分析

铺设不同层数(2、5层)的口罩织物加筋土样条件下,加筋效果系数见表4。由表4可见,土体铺设2层口罩织物时,加筋土样强度显著提升,20 000次加载后加筋效果系数  $r$  为 1.663。这可能是因为:试验仪器剪切的过程中,土颗粒发生剪切位移,邻近颗粒相互挤压、翻越。铺设适量层数的口罩织物可以有效填充土样面与面之间的间隙,增大了土体的  $c$ 、 $\phi$  值。同时,其在不同的土层间形成了稳定的边界,限制了不同土层间颗粒的自由移动,在大面积范围内保持应力均匀,保持了每层的完整性、固有特性,抑制了土体的剪胀现象。

表4 口罩织物加筋土加筋效果系数

Table 4 Reinforcement effect coefficient of soil reinforced with mask fabric

加筋方式	轴向累积应变/%	加筋效果系数 $r$
未加筋	0.523	1
每 20 cm 土样加入 1 层拼接口罩织物(共 2 层)	0.314	1.663
每 10 cm 土样加入 1 层拼接口罩织物(共 5 层)	0.659	0.793

根据试验所得累积轴向应变  $\epsilon_p$  随循环荷载次数  $N$  的变化曲线如图 8 所示,土体铺设 5 层口罩织物时,加筋土样强度低于未加筋土样,且循环荷载次数一轴向累积应变曲线相对波动。通常随着土体中的加筋数层数变多,土体强度呈对数增长曲线,达到一定值后提升缓慢。

图 8 中土体强度小幅下降的原因是:煤矸石中大颗粒多,土颗粒间隙大。试样在分层击实的过程中,本会有上层的细颗粒向下移动,填补下层中的间隙,使得中、下部土层更为密实。铺设整层的拼接口罩织物后土颗粒无法穿过,影响了中、下部土层土颗粒之间的嵌合,过于密集的铺设破坏了土样的整体结构性,由结构破坏导致的强度降低程度大于口罩织物加筋带来的强度提高程度,导致加筋土样强度下降。同时,土样在剪切破坏发生时,由于口罩织物阻拦了剪切带上的土颗粒运动,相邻加筋层间出现土拱效应,从而使加筋土体承载力增加,主要受力的土样中、下部破坏得更为剧烈,使得最大轴向累积应变增加。同时,随着循环加载的开展,织物破坏,土体内部间隙填补,产生位移、变形,

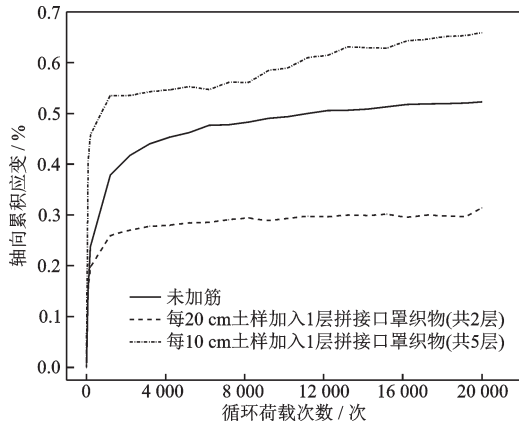


图8 不同层数口罩织物加筋土的累积轴向应变-循环荷载次数变化曲线

Fig.8 Curves of cumulative axial strain vs. the number of cyclic load for soil reinforced with mask fabric of different layers

导致应变突变,从而出现土体循环荷载次数—轴向累积应变曲线产生波动且持续上升的现象。此种情况在部分试验和工程实例中也出现过,即加筋后土体损伤,强度下降<sup>[18-19]</sup>。

### 3.3 不同口罩含量的加筋结果及分析

不同数目(30、20、10个)口罩横向裁剪成4 mm\*60 mm的口罩长条段后均匀混合,其加筋效果系数见表5。由表5可见,在口罩纤维添加量为10个时,加筋土样强度远低于未加筋土样。随着口罩纤维添加量增多,土样的加筋效果逐渐上升。在口罩添加量为20个时,加筋效果系数 $r$ 为1.086,强度已强于未加筋的土样;口罩添加量为30个时, $r$ 迅速提升至2.3,加筋效果优越,其累积轴向应变 $\epsilon_p$ 随循环荷载次数 $N$ 的变化曲线如图9所示。

少量添加长条段口罩纤维未能对土样间的空隙进行充分填充,且部分土颗粒间的接触被口罩纤维与土颗粒的接触所替代,口罩纤维与土颗粒的摩擦力小于土颗粒之间接触产生的摩擦力,在动荷载作用下,口罩纤维容易发生滑动或被拔出,无法良好地发挥其在土中的土筋摩擦和空间立体约束效用<sup>[20]</sup>,负作用影响大于加筋效果。因此,在图9中表现出了少量添加加筋材料时土体强度下降的现象。此种情况较为罕见,笔者在后续的大规模直剪试验中也遇到了相同的情况(表6)。随着口罩纤维含量的增多,加筋土强度提升,这是因为:土样中的缝隙填充后,嵌合更为紧密,土样加筋效果显现,强度得到提升。

表5 不同口罩含量加筋土加筋效果系数

Table 5 Reinforcement effect coefficient of soil reinforced with different mask contents

试样口罩含量/个	轴向累积应变/%	加筋效果系数 $r$
0	0.523	1
10	1.015	0.515
20	0.481	1.086
30	0.227	2.300

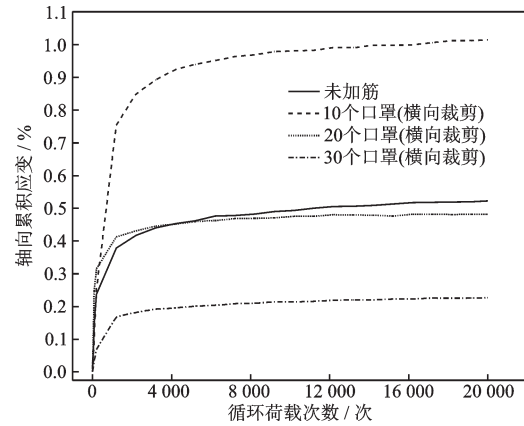


图9 不同口罩含量加筋土的累积轴向应变—循环荷载次数变化曲线

Fig.9 Curves of cumulative axial strain vs. the number of cyclic load for soil reinforced with different mask contents

表6 不同口罩纤维含量直剪试验结果

Table 6 Direct shear test results with different mask fiber contents

试验编号	口罩添加量/%	$c$	$\varphi$
1	0	20.85	31.60
2	0.125	3.679	35.25
3	0.375	9.386	38.06
4	0.625	22.54	37.58
5	0.875	24.20	37.09

## 4 结 论

(1)所有加筋土样的循环荷载次数—轴向累积应变曲线均为对数增长曲线,与未加筋土趋势相同,但相较于未加筋土样,合理加筋后的煤矸石路基应变曲线峰值明显降低,体现了口罩的良好加筋效果。

(2)制备纤维加筋土时,废弃口罩纤维的尺寸、形态和剪切方向直接影响着加筋效果,在已尝试的

加筋方法中,每20 cm铺设一层口罩织物加筋效果最为出色,但在实验过程中发现口罩织物不便连接,均匀混合2 mm\*60 mm口罩长条段也取得了良好的加筋效果,在实际应用时需根据生产条件决定。

(3)改变土样中的口罩纤维含量直接影响着加筋土样的强度,在口罩添加较少时,加筋土相较于未加筋土样强度下降,随着口罩添加量增多,强度提升但边际效用递减。同样,铺设口罩织物可以取得良好的加筋效果,然而,铺设过于密集时,土样轴向累积变形变大,强度降低。

本次试验主要探讨了口罩加筋煤矸石路基的可行性和影响因素,故设计方案时着重考虑了更多的影响因素并进行了试验。口罩质量小、体积大,在制样过程中,口罩纤维添加量为30个时土样已经较为饱满,但从现有数据规律中可推论:如继续增加口罩添加量,加筋土强度仍有提升空间。目前所取得的成果为局部的,不能代表对规律的整体、普遍认识。笔者计划将在下个试验中更全面、系统地探究口罩含量对煤矸石路基填料加筋效果的影响。

## 参考文献:

[1] 蔡欢乐,朱言欣,雷璐碧,等.新型冠状病毒肺炎相关知识、行为和心理应对:基于网络的横断面调查[J].中国公共卫生,2020,36(2):152-155.  
Cai H L, Zhu Y X, Lei L B, et al. Novel coronavirus pneumonia epidemic-related knowledge, behaviors and psychology status among college students and their family members and friends: an internet-based cross-sectional survey[J]. Chinese Journal of Public Health, 2020, 36(2):152-155. (in Chinese)

[2] 周梅,李国栋,窦艳伟,等.自燃煤矸石骨料混凝土单轴受压破坏特征及强度分析[J].硅酸盐通报,2018,37(11):3528-3532.  
Zhou M, Li G D, Dou Y W, et al. Failure characteristics and strength analysis of spontaneous combustion gangue aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(11):3528-3532. (in Chinese)

[3] 周惠林,杨卫民,李好义.医用口罩过滤材料的研究进展[J].纺织学报,2020,41(8):158-165.  
Zhou H L, Yang W M, Li H Y. Research progress of filtering material for medical mask[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(8):158-165. (in Chinese)

[4] 吴帅,吴华伟,王春红,等.纱罗网格织物增强PP/黄麻

复合材料力学性能[J].工程塑料应用,2022,50(3):1-7,24.  
Wu S, Wu H W, Wang C H, et al. Mechanical properties of leno mesh fabric reinforced PP/Jute composite [J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):1-7, 24. (in Chinese)

[5] 肖庆一,苏刚,张宝虎,等.聚丙烯纤维对二灰稳定红黏土路用性能的影响及微观机理分析[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(5):34-42.  
Xiao Q Y, Su G, Zhang B H, et al. Effect of polypropylene fiber on road performance of lime-ash stabilized red clay and analysis of microscopic mechanism [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(5):34-42. (in Chinese)

[6] 张志韬,陈生水,吉恩跃,等.聚丙烯纤维加筋砾质黏土的拉伸断裂特性研究[J].岩土力学,2021,42(10):2713-2721.  
Zhang Z T, Chen S S, Ji E Y, et al. Tensile fracture properties of gravelly soil reinforced by polypropylene fiber [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10):2713-2721. (in Chinese)

[7] 黄华,郭梦雪,于基宁,等.纤维增韧地聚物混凝土力学性能与微观结构[J].建筑科学与工程学报,2023,40(4):12-23.  
Huang H, Guo M X, Yu J N, et al. Mechanical properties and microstructure of fiber reinforced geopolymer concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(4):12-23. (in Chinese)

[8] 阮波,袁忠正,郑世龙,等.不同种类纤维加筋水泥改良风积沙抗拉性能试验研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(8):2240-2248.  
Ruan B, Yuan Z Z, Zheng S L, et al. Experiment on the splitting tensile strength of cemented aeolian sand reinforced with different kinds of fibers [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(8):2240-2248. (in Chinese)

[9] 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.

[10] 程培峰,郑春萌,张展铭,等.废旧口罩熔喷布对沥青及混合料性能影响研究[J].森林工程,2021,37(6):126-134.  
Cheng P F, Zheng C M, Zhang Z M, et al. Study on the influence of melt-blown cloth of waste mask on the performance of asphalt and mixture [J]. Forest Engineering, 2021, 37(6):126-134. (in Chinese)

[11] 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 D M, Kong G Q, Chen G, 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)
- [12] 周仕龙, 向萌, 杨菁菁, 等. PP/PA6/SiO<sub>2</sub> 纳米复合材料的非等温结晶动力学[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3): 115-120.
- Zhou S L, Xiang M, Yang J J, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of PP/PA6/SiO<sub>2</sub> nano-composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3) : 115-120. (in Chinese)
- [13] 邬俊, 高文华, 张宗堂, 等. 煤矸石路基填料强度与变形特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(4) : 885-891.
- Wu J, Gao W H, Zhang Z T, et al. Study on strength and deformation characteristics of coal gangue subgrade filling[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 885-891. (in Chinese)
- [14] 张宗堂, 高文华, 刘昌平, 等. 级配对煤矸石路基填料压实与强度特性的影响试验研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1774-1781.
- Zhang Z T, Gao W H, Liu C P, et al. Experimental study on the effect of gradation on the compaction and strength characteristics of coal gangue subgrade filler[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31 (5) : 1774-1781. (in Chinese)
- [15] 张宗堂. 循环荷载作用下煤矸石路基填料动力特性及颗粒破碎演化规律[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2021.
- Zhang Z T. Dynamic behaviors and the evolution of particle breakage for coal gangue subgrade filler under cyclic loading [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国国家卫生健康委员会办公厅, 中华人民共和国国家中医药管理局办公室. 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第九版)[J]. 中国医药, 2022, 17(4) : 481-487.
- [17] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [18] 雷胜友, 惠会清. 加筋土强度降低原因的理论分析[J]. 力学与实践, 2019, 41(2): 184-187, 183.
- Lei S Y, Hui H Q. Theoretical analysis of the decrease of the strength of reinforced soil[J]. Mechanics in Engineering, 2019, 41(2): 184-187, 183. (in Chinese)
- [19] 王协群, 郭敏, 胡波. 土工格栅加筋膨胀土的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1649-1653.
- Wang X Q, Guo M, Hu B. Triaxial study of expansive soil reinforced with geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1649-1653. (in Chinese)
- [20] 魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆的筋土摩擦性能及加筋作用[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 53-59.
- Wei L, Chai S X, Cai H Z, et al. Frictional characteristics of wheat straw in saline soil and evaluation of reinforcing effect [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2018, 40(6): 53-59. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)