

DOI: 10.11779/CJGE202110020

# 菌丝复合轻质土的制备及力学特性研究

苟乐宇<sup>1,2</sup>, 刘西周<sup>3</sup>, 李 飒<sup>\*1,2</sup>, 尹蒋松<sup>1,2</sup>, 李婷婷<sup>1,2</sup>, 刘 鑫<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;

3. 天津师范大学生命科学学院, 天津 300387)

**摘要:** 利用真菌天然生长得到了一种新型轻质土工填料。通过无侧限抗压强度、渗透试验、电镜扫描、CT扫描试验研究了菌丝复合轻质土工填料的物理力学与微观特性。研究发现: 菌丝复合轻质土是一种利用菌丝定殖、黏结和缠绕基质材料后形成的多孔、轻质回填材料; 菌丝的定殖程度对菌丝复合轻质土的强度有着重要的影响。菌丝复合轻质土的渗透系数接近粉质黏土, 渗透性随骨料含量的添加而降低, 但降低速率与菌丝定殖程度有关。骨料的添加提高了菌丝复合轻质土的强度, 且菌丝的定殖程度越高, 骨料对强度的提升作用越明显。添加骨料的菌丝复合轻质土满足回填材料的强度要求, 表现出较好的韧性, 峰值强度与残余强度的比值稳定在 1.15~1.22。建立的菌丝复合轻质土抗压强度与骨料含量的函数表达式可以较好的预测抗压强度。菌丝复合轻质土的生产工艺简单, 能耗低且无环境污染, 有望成为新型的轻质回填材料。

**关键词:** 轻质土; 菌丝; 无侧限抗压强度; 渗透系数; CT检测

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)10-1933-08

作者简介: 苟乐宇(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: gly.p.m.a@gmail.com。

## Preparation and mechanical properties of composite mycelial lightweight soil

GOU Le-yu<sup>1,2</sup>, LIU Xi-zhou<sup>3</sup>, LI Sa<sup>1,2</sup>, YIN Jiang-song<sup>1,2</sup>, LI Ting-ting<sup>1,2</sup>, LIU Xin<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation

and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** A new type of lightweight backfill material is obtained by the natural growth of fungi. The unconfined compressive strength tests, permeability tests, scanning of electron microscope, and CT scanning tests are conducted to study the physico-mechanical and micro properties of composite mycelial lightweight soil (MLS). The results show that the MLS is a kind of porous and lightweight backfill material, formed by mycelium winding around the substrate filler materials. The colonization degree of mycelium has an important influence on its compressive strength. The permeability coefficient of the MLS is close to that of the silty clay. The permeability decreases with the addition of aggregate content, but the decreasing rate is related to the degree of mycelial colonization. The addition of aggregate improves the strength of the MLS. The higher the degree of the mycelial colonization, the more notable the increase in the compressive strength under the same aggregate content. The ratio of the peak strength to the residual strength is between 1.15 and 1.22. An exponential function equation is established between the compressive strength and the aggregate content. The MLS has the advantages of simple production process, low energy consumption and no environmental pollution, and is expected to become a new type of lightweight backfill material.

**Key words:** lightweight soil; mycelium; unconfined compressive strength; permeability coefficient; CT detection

## 0 引 言

近 20 年来, 以聚苯乙烯 (EPS) 颗粒为主的轻质工程材料, 例如 EPS 混凝土、EPS 轻质土等, 在结构工程和回填土工程中得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。但 EPS 自身不易降解、生产过程中产生有毒物质等问题一直备受诟病。因此有必要开发一种低耗能, 无环境污染的环保轻质材料<sup>[3]</sup>。

近年来, 一种菌丝轻质复合材料引起了商业与学

术界的广泛关注。菌丝复合轻质材料依靠真菌自身的新陈代谢产生形成胶结产物 (菌丝) 对基质材料进行黏结。菌丝作为真菌的营养体, 是由几丁质、纤维素、蛋白质等组成。通过分解木质素吸收碳与氮等元素来完成自身的生长。随着菌丝的不断生长, 菌丝之间相

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42072294)

收稿日期: 2021-02-04

\*通信作者 (E-mail: lisa@tju.edu.cn)

互交织形成菌丝体网络<sup>[4-5]</sup>,将底物黏结结合形成一个聚合物,即形成菌丝复合轻质材料。由于菌丝复合轻质材料中的基质材料多为农副产品,如棉秆、秸秆等,这些材料的密度小并且导热系数低,而菌丝自身具有较强的吸收低频(<1500 Hz)噪音的优势。因此,菌丝复合材料被认为是产品外包装<sup>[6]</sup>、隔热材料<sup>[7-8]</sup>和降噪材料<sup>[9-11]</sup>、建筑板材<sup>[12-14]</sup>等非承重材料替代品<sup>[16-18]</sup>。

可以看出,目前这种新型生物材料多用于建筑材料领域,在岩土工程领域的应用相对较少。因此,结合轻质回填领域相关技术,本文选择两种白腐菌(长根菇、糙皮侧耳)和一种海洋真菌作为菌种,以棉籽皮与麦麸作为基质材料,同时添加钙质砂作为骨料来制备菌丝复合轻质土。利用扫描电子显微镜(SEM)和计算机断层扫描(CT)分析菌丝复合轻质土的形态特征。通过无侧限抗压强度(UCS)、渗透试验对其力学特性进行研究。以期探索一种新型轻质土工回填材料。

## 1 试验材料

菌丝复合轻质土主要由菌丝、培养基材料以及骨架材料组成。

### 1.1 菌种的选择

试验选择3种不同的菌种制备菌丝复合轻质土,分别是糙皮侧耳菌、长根菇菌,以及一种海洋真菌。长根菇与糙皮侧耳菌种属于白腐真菌;海洋真菌从天津渤海湾海水中筛选得到。3种菌种均由天津师范大学生命科学院提供。

### 1.2 培养基与骨架材料

培养基材料在菌丝复合轻质土中起到两个作用,首先是菌种提供定殖的基础,然后是为菌丝的生长提供所需的碳源、氮源和维生素等<sup>[19-20]</sup>。考虑到工程造价与成本,本文选择麦麸以及棉籽皮两种常见的低廉农业副产物作为菌丝复合轻质土的培养基。

轻质土工填料中的骨料材料(土、粉煤灰等)是轻质土强度形成的重要组成部分。本文选择钙质砂作为菌丝复合轻质土的骨料。钙质砂的平均粒径 $D_{50}$ 为0.91 mm,不均匀系数 $C_u$ 为4.28,曲率系数 $C_c$ 为0.81,最大干密度 $\rho_{dmax}$ 为 $1.667 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,最小干密度 $\rho_{dmin}$ 为 $1.250 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。钙质砂的矿物组分为碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ ),含量为95.85%。

## 2 试样制备与试验方法

### 2.1 试样制备

菌丝复合轻质土的制备分为4个步骤:菌种前期培育、试样准备、菌种接种和养护培育。

(1)将3 g菌种在含有马铃薯葡萄糖的培养基(PDA)中进行前期定殖培养,培养的环境温度恒定为 $20^\circ\text{C}$ ,定殖周期为7 d。

(2)前期定殖培育完成后,将培养基材料、骨架材料、水、补充营养液进行充分搅拌5 min,并将混合物倒入模具内。密封模具并静置2 h使水分与营养液充分浸润培养基材料。然后将混合物放入 $120^\circ\text{C}$ 的高温釜中进行灭菌1 h,防止培养基内杂菌影响菌种的正常生长。

(3)灭菌处理完成后,将试样冷却至室温( $20\pm 2^\circ\text{C}$ ),在PDA中称量试样质量3%的菌种接种在试样顶部。

(4)完成接种后密封试样,将试样放置在恒温( $24\pm 1^\circ\text{C}$ )恒湿(50%)箱内进行避光养护。在菌丝完全覆盖试样表面后,拆除模具。将试样放置在 $23^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干72 h后进行试验。通过前期试验后发现,本试验中的试样风干后,试样的径向收缩 $1.0\sim 1.5 \text{ mm}$ ( $1.25\%\sim 1.88\%$ );轴向收缩 $1.2\sim 1.4 \text{ mm}$ ( $1.33\%\sim 1.56\%$ ),因此,试样制备时的模具需要预留一定尺寸,使风干后的试样满足后续试验要求。

为研究不同骨料含量对菌丝复合轻质土力学特性的影响,选取5种不同质量比的骨料添加含量,分别为7.5%,15%,22.5%,30%和37.5%。骨料添加量以培养基、水和营养液的质量为基数。为减小试验误差对结果的影响,每种配比的菌丝复合轻质土制备8个平行试样。

为方便后续表述,本文用(C/P/M-S+骨料含量)的形式对不同菌种培育的试样进行编号。其中C、P、M分别代表糙皮侧耳菌、长根菇菌以及海洋真菌;S代表基质;例如P-S0代表无骨料的长根菇试样;C-S7.5代表含有7.5%骨料的糙皮侧耳菌的试样。

### 2.2 试验方法

为研究菌丝复合轻质土的力学与细观特性,分别进行无侧限抗压强度试验、渗透试验、电镜扫描试验和CT试验。

无侧限抗压强度试验参照规程<sup>[27]</sup>进行,试样尺寸 $\Phi 80 \text{ mm}\times 90 \text{ mm}$ ,轴向加载速率 $1 \text{ mm}/\text{min}$ 。每种菌丝的试样进行5组平行试验。渗透试验采用变水头渗透法,参照规程<sup>[38]</sup>进行。试样尺寸 $\Phi 61.8 \text{ mm}\times 40 \text{ mm}$ ,每种菌丝复合轻质土进行3组平行试验。

扫描电镜试验(SEM)利用日立SU8020超高分辨率场发射扫描电子显微镜进行,在菌丝复合轻质土内部取约 $30 \text{ mm}\times 30 \text{ mm}\times 20 \text{ mm}$ 尺寸的新鲜断面1块。试验前对样品进行喷金,防止试样表面因过量电荷积累而产生放电影响最终成像。CT试验利用NanoVolex-4000系列高分辨率工业CT仪进行。试样

尺寸  $\Phi 80 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 。CT 试验中每  $0.25^\circ$  获得 1 帧图像, 共收集 1440 帧图像。VOLUME GRAPHICS STUDIO MAX 和 AVIZO 软件被用来对重构后数据进行图像展示和定量分析。具体试验内容如表 1 所示。

表 1 试验内容  
Table 1 Test items

| 骨料含量 /% | 菌种      |         |         | 试验内容                   |
|---------|---------|---------|---------|------------------------|
|         | 糙皮侧耳    | 长根菇     | 海洋真菌    |                        |
| 0       | C-S0    | P-S0    | M-S0    | 密度测试<br>变水头渗透<br>无侧限强度 |
| 7.5     | C-S7.5  | P-S7.5  | M-S7.5  |                        |
| 15.0    | C-S15   | P-S15   | M-S15   |                        |
| 22.5    | C-S22.5 | P-S22.5 | M-S22.5 |                        |
| 30.0    | C-S30   | P-S30   | M-S30   |                        |
| 37.5    | C-S37.5 | P-S37.5 | M-S37.5 |                        |

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 菌丝复合轻质土的表现特性

图 1 (a) ~ (c) 分别为 3 种不同菌种的菌丝复合轻质土 (C-S0、P-S0、M-S0)。可以看出, 不同菌种试样的外观差别较大。糙皮侧耳菌 (C-S0)、长根菇菌 (P-S0) 试样的外层形成了白色“保护层”, 且糙皮侧耳菌的“保护层”要厚于长根菇。海洋真菌菌 (M-S0) 表面则覆盖了一层较薄的灰白色绒毛。菌丝复合轻质土的“保护层”是由于模具限制了菌丝的横向生长, 使菌丝不断的堆积与挤密而形成。

图 1 (d) 为糙皮侧耳菌试样 (C-S37.5) 的新鲜断面, 其中白色颗粒为钙质砂、黄色粒状物为麦麸、丝状纤维是菌丝。可以看到, 大量的菌丝覆盖与黏结在钙质砂与麦麸的表面。菌丝类似“桥梁”一样交织在钙质砂表面, 并填充了颗粒与颗粒之间的孔隙。



图 1 菌丝复合轻质土图片  
Fig. 1 Photos of composite mycelium lightweight soil

#### 3.2 菌丝复合轻质土的干密度

测量不同骨料含量风干试样的干密度, 测试结果见图 2。图 2 对比了不同骨料含量下的 3 种菌种培育的菌丝复合轻质土的干密度。可以看出, 未添加骨料时, 不同菌种培育的轻质土的干密度差别不大, 介于  $0.310 \sim 0.315 \text{ g/cm}^3$  之间。糙皮侧耳菌的干密度较大, 然后是长根菇和海洋真菌。不同菌种培育的轻质土的密度差异可能与试样内部的菌丝定殖程度有关<sup>[21]</sup>。

添加骨料后, 菌丝复合轻质土的干密度随骨料含

量几乎呈直线增长。当骨料含量达到 37.5% 时, 菌丝复合轻质土的干密度达到最大。糙皮侧耳的试样 (C-S37.5) 为  $0.413 \text{ g/cm}^3$ , 长根菇 (P-S37.5) 与海洋真菌的试样 (M-S37.5) 分别为  $0.411, 0.398 \text{ g/cm}^3$ 。菌丝复合轻质土的低密度特性归因于组成培养基材料自身的密度较低以及菌丝自身的中空结构。

图 3 对比了本文菌丝复合轻质土与传统菌丝复合材料以及 EPS 轻质土的干密度。箱形的上下边分别代表数据的最大最小值; 圆点代表数据平均值。可以看出, 由于添加了骨料, 菌丝复合轻质土略大于传统的菌丝复合材料, 但依然小于 EPS 轻质土的干密度。

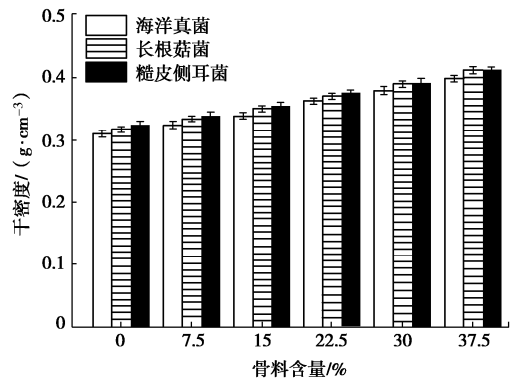


图 2 不同骨料的菌丝复合轻质土的干密度变化

Fig. 2 Variation of dry density of mycelium bio-composites with different aggregate contents

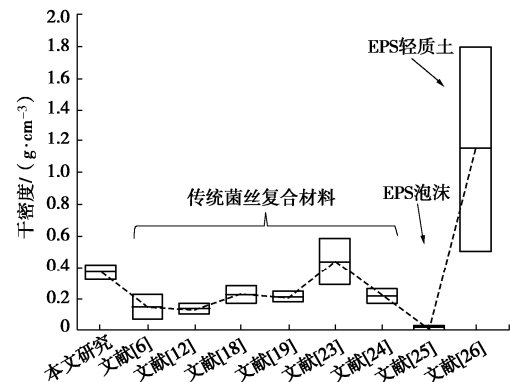


图 3 菌丝复合轻质土与 EPS 轻质材料的干密度对比  
Fig. 3 Comparison of dry densities of composite mycelium lightweight soil and EPS lightweight materials

#### 3.3 菌丝复合轻质土的渗透性

不同骨料含量的菌丝复合轻质土的渗透系数如图 4 所示。可以看出, 菌丝复合轻质土的渗透系数接近粉质黏土。未添加骨料时, C-S0 的渗透系数为  $2.81 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ , P-S0 和 M-S0 分别为  $2.69 \times 10^{-5}, 5.28 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。不同的渗透系数可能归因于菌丝定殖程度差异。由于菌丝表面有较强疏水性, 当菌丝定殖在基质后会降低基质材料界面与水之间的阻力<sup>[11, 22]</sup>。糙皮侧耳与长根菇试样的菌丝定殖程度较高, 由菌丝导致的疏水特性较明显, 因此渗透性较强。

对于添加骨料的试样，渗透系数随着骨料的添加逐渐减小。当骨料达到 37.5%时，糙皮侧耳菌丝体的渗透系数降低 20.13%，长根菇与海洋真菌分别为 21.20%与 48.86%。可以发现，海洋真菌的渗透系数下降程度最大，而糙皮侧耳菌、长根菇菌较接近，下降程度较小。这可能是由于骨料填充了试样内的部分孔隙从而降低了渗透能力，但糙皮侧耳与长根菇的菌丝复合轻质土的菌丝定殖程度较高，大量菌丝的存在降低了水流与基质材料之间的阻力，因此在添加骨料后的渗透系数下降幅度较小。

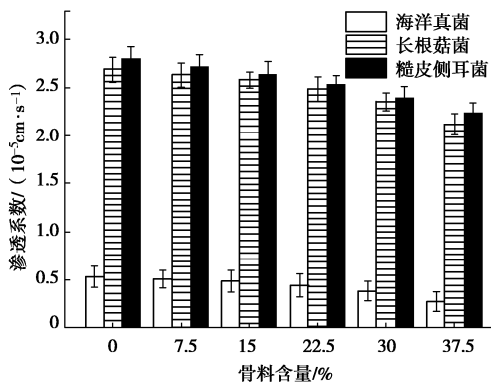


图 4 骨料含量对菌丝复合轻质土的渗透系数的影响

Fig. 4 Effect of aggregate content on permeability coefficient of composite mycelium lightweight soil with different fungal strains

### 3.4 菌丝复合轻质土的破坏模式及应力 - 应变关系

#### (1) 菌丝复合轻质土的破坏形态

在无限制抗压试验过程中发现，不同的骨料含量的菌丝复合轻质土具有不同的破坏形态，见图 5。可以看到，菌丝复合轻质土表现出两种破坏模式，即鼓胀破坏形态和剪切破坏形态。



(a) 鼓胀破坏 (b) 剪切破坏

图 5 菌丝复合轻质土的破坏模式

Fig. 5 Failure modes of composite mycelium lightweight soil

通过统计后发现，当糙皮侧耳菌、长根菇菌试样的骨料含量小于 22.5%，海洋菌丝试样小于 30%时，菌丝复合轻质土表现为鼓胀破坏，试验过程中试样在两侧率先出现明显裂纹，随着加载的进行，试样两侧向外鼓胀，如图 5 (a) 所示。相反，当骨料含量超过对应含量后，则表现为剪切破坏，破坏面与水平面的夹角接近 45°，如图 5 (b) 所示。产生这种现象的原因可能是由于当骨料含量达到一定量后，骨料抵抗破

坏的作用增强；当试样裂缝形成后，由于裂缝无法穿过骨料，而只能向骨料周边扩展，也就是说骨料的存在抑制了裂缝沿最短的竖向路径发展，而形成了与水平面的夹角接近 45° 的破坏面。

#### (2) 菌丝复合轻质土的应力 - 应变关系

由于不同骨料含量的破坏模式不同，其各自的应力 - 应变关系也表现出不同的特征。图 6 是未添加骨料 (C-S0、P-S0、M-S0) 和添加 37.5%骨料的菌丝复合轻质土 (C-S37.5、P-S37.5、M-S37.5) 的应力 - 应变关系。可以看出，菌丝复合轻质土的应力 - 应变曲线有两种模式：应变硬化型和应变软化型。与破坏模式相对应，对于糙皮侧耳和长根菇，骨料超过 22.5%后应力 - 应变开始表现为软化型；海洋真菌则为 30%，不含骨料的或骨料含量较低的为应变硬化型。

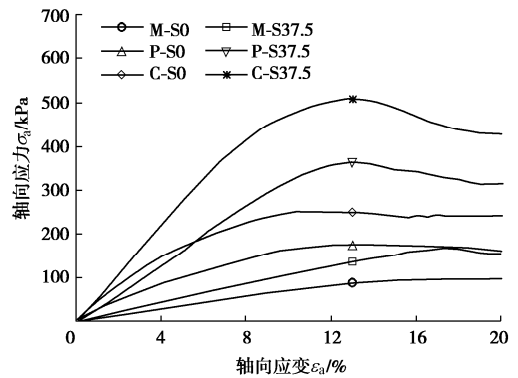


图 6 菌丝复合轻质土的应力 - 应变曲线

Fig. 6 Relationship between stress and strain of mycelial bio-composites

图 7 给出了 90 组菌丝复合轻质土的峰值抗压强度以及杨氏模量。其中柱状数据为抗压强度，折线数据为杨氏模量。对于应变硬化型的试样，峰值强度为 20%应变所对应的强度；软化型的试样为曲线峰值点的强度。

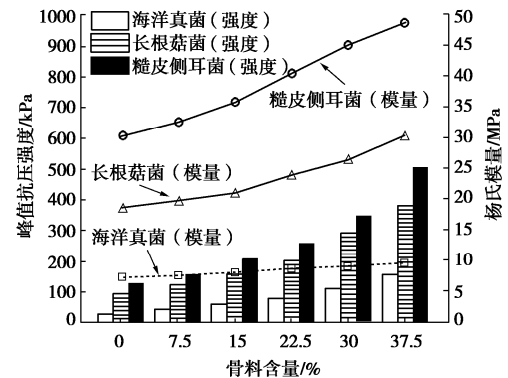


图 7 骨料含量对菌丝复合轻质土的峰值抗压强度与杨氏模量的影响

Fig. 7 Effect of aggregate content on UCS and Young's modulus of composite mycelium lightweight soil with different fungal strains

可以看出, 未添加骨料时, C-S0 的抗压强度最大为 127 kPa, P-S0 和 M-S0 分别为 94, 26 kPa。添加骨料后, 菌丝复合轻质土的强度明显大于未添加骨料时的强度。峰值强度与杨氏模量均随着骨料含量的增加而增加。添加 37.5% 骨料的糙皮侧耳 (P-S37.5) 的抗压强度最高, 峰值强度与杨氏模量分别为 508 kPa 和 48.5 MPa。这可能归因于以下两个原因: 骨料形成的骨架作用承担了部分竖向荷载, 以及钙质砂粗糙的表面与培养基材料在荷载施加过程中产生一定的摩擦力增加了试样抵抗竖向荷载的能力。相似的, 辛凌等<sup>[28]</sup>利用原料土、石灰与废弃轮胎橡胶颗粒得到了一种轻质土后发现, 橡胶颗粒的不规则的棱角与土颗粒间提供的额外的摩擦力与咬合作用提升了轻质土的强度。

(3) 菌丝复合轻质土的峰值抗压强度与残余强度

图 8, 9 分别给出了菌丝复合轻质土的峰值强度和残余强度以及峰值强度与残余强度比值随骨料的变化。可以看出, 菌丝复合轻质土在峰值强度后, 表现出较大的残余强度。试样达到峰值强度后表现出一定的韧性。随着骨料含量的增加, 残余强度也不断增加。峰值强度与残余强度比值随骨料的增加而减小, 介于 1.15~1.22。较高的残余强度与菌丝复合轻质土内部的菌丝交织的黏结网络有关。在试样达到峰值强度后, 菌丝交织形成的三维网络仍然对试样有一定的约束作用, 抑制了试样的整体破坏。这与添加纤维可以改善生物矿化后土体的脆性的机理相似<sup>[29]</sup>。

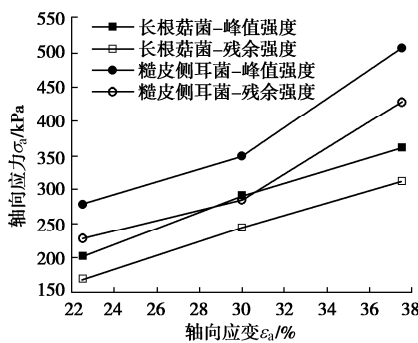


图 8 骨料含量对菌丝复合轻质土的峰值抗压强度与残余强度的影响

Fig. 8 Effects of aggregate content on peak strength and residual strength of composite mycelium lightweight soil

图 10 对比了本文的菌丝复合轻质土、已有文献中的传统菌丝复合材料以及 EPS 轻质土的强度。可以看出, 添加骨料的菌丝复合轻质土的强度明显高于传统菌丝复合材料, 即骨料的添加有利于菌丝复合轻质土抗压强度的提升。添加了骨料后, 菌丝复合轻质土的无侧限抗压强度 (89~508 kPa) 与 EPS 轻质土的无侧限抗压强度 (50~550 kPa) 接近, 这说明添加骨料

的菌丝复合轻质土可以满足轻质回填材料的强度要求。但是菌丝复合轻质土的杨氏模量 (36.3~48.5 MPa) 要小于 EPS 轻质土的杨氏模量 (79~555 MPa)。

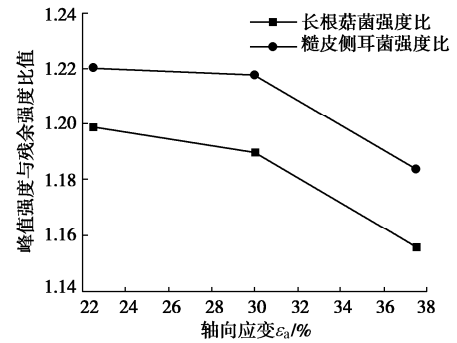


图 9 骨料含量对菌丝复合轻质土的峰值抗压强度与残余强度比值的影响

Fig. 9 Effect of aggregate content on ratio of peak strength to residual strength of composite mycelium lightweight soil

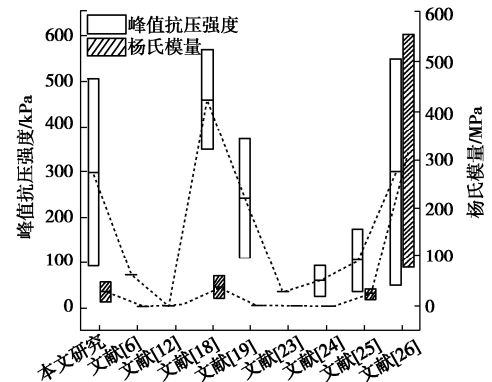


图 10 菌丝复合轻质土与 EPS 轻质材料的力学特性对比

Fig. 10 Comparison of mechanical properties of composite mycelium lightweight soil and EPS lightweight materials

3.5 干密度对菌丝复合轻质土的力学特性影响

图 11, 12 给出了菌丝复合轻质土的峰值抗压强度和杨氏模量随干密度的变化。可以发现, 抗压强度随干密度的增大而增大。糙皮侧耳与长根菌试样的强度变化趋势相似, 呈指数增长。干密度达到 0.37 g/cm<sup>3</sup> 后曲线出现拐点, 抗压强度的增长速率增大。而海洋真菌试样强度随干密度的增加几乎呈线性增长。

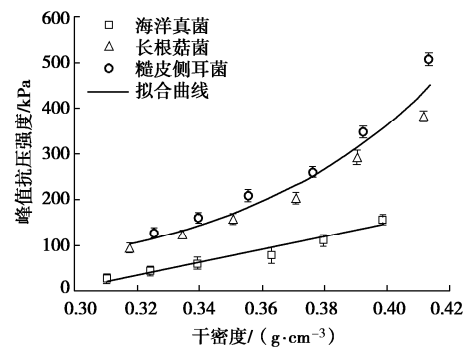


图 11 干密度对菌丝复合轻质土的峰值抗压强度的影响

Fig. 11 Effect of dry density on UCS of composite mycelium lightweight soil with different fungal strains

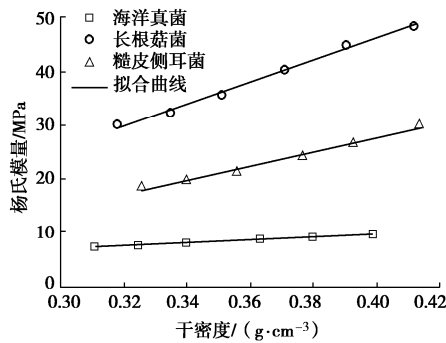


图 12 干密度对菌丝复合轻质土的杨氏模量的影响

Fig. 12 Effect of dry density on Young's modulus of composite mycelium lightweight soil with different fungal strains

通过回归分析建立骨料含量与糙皮侧耳与长根菇菌试样抗压强度的关系为

$$P = a \times e^{(-\omega/b)} + c \quad (1)$$

式中,  $P$  为菌丝复合轻质土的峰值抗压强度,  $\omega$  为骨料含量,  $a, b, c$  为相关参数, 其中  $a=0.62, b=-0.06, c=5.70$ 。可以根据实际工程需求以及骨料的用量, 利用式 (1) 计算菌丝复合轻质土的峰值抗压强度。

此外, 不同菌种的菌丝复合轻质土的杨氏模量随干密度的增加呈线性增长, 糙皮侧耳大于长根菇菌大于海洋真菌。由于骨料含量与干密度几乎呈线性关系, 因此可以认为相同骨料含量下, 菌丝定殖程度高的试样可以更好的发挥出骨料的作用。

### 3.6 菌丝复合轻质土强度形成机理与微观特性

图 13 (a), (b), (c) 分别是糙皮侧耳菌试样 (C-S0)、长根菇菌试样 (P-S0) 和海洋真菌试样 (M-S0) 的断面电镜扫描图。图中较粗的纤维状物质为棉籽皮、较细的枝状物质是菌丝、扁平状物质为麦麸。可以看出, 糙皮侧耳菌试样内部的菌丝定殖程度最高, 其次是长根菇菌, 而海洋真菌内部的菌丝含量相对较少。这也与图 1 所观察的相一致。

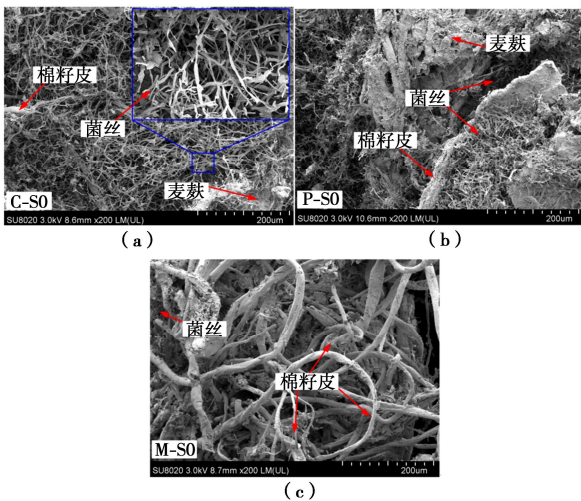


图 13 菌丝复合轻质土的扫描电子显微镜图像

Fig. 13 SEM images of composite mycelium lightweight soil

从糙皮侧耳与长根菇试样的照片中可以看到, 试样内部的基质材料被菌丝包裹、缠绕。大量的菌丝填充在基质材料之间。结合无侧限抗压强度试验结果可以发现, 试样的强度与菌丝定殖的程度呈正相关。这也证明了, 菌丝对基质材料的缠绕和包裹是无骨料的菌丝复合轻质土的强度来源, 即菌丝的定殖程度决定了菌丝复合轻质土的力学特性。

图 14 为添加 7.5%骨料的糙皮侧耳试样 (C-S7.5) 的 X-Y 断面图。其中白色颗粒是钙质砂, 黑色部分是孔隙, 粗纤维物质为棉籽皮, 浅灰色区域是菌丝。可以看出, 钙质砂颗粒较为均匀的分布在试样的内部, 起到骨料的作用。在外力的作用下, 与菌丝体共同提供菌丝复合轻质土的强度。对孔隙测量后发现菌丝复合轻质土内部的孔隙较大, 介于 1.643~1.975 mm。选取 CT 扫描数据中 500 μm×500 μm×500 μm 尺寸的样本数据, 通过阈值分割后得到了局部样本数据的孔隙分布 (如图 14 (d)), 进行定量统计后发现局部孔隙率 11.16%, 因此可以认为菌丝复合轻质土是一种多孔隙、轻质填充材料。

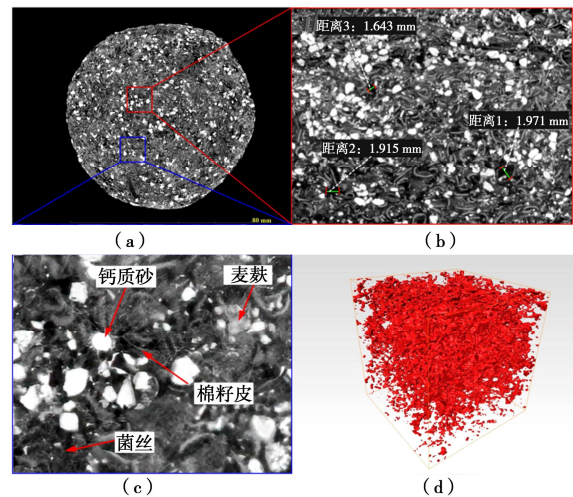


图 14 菌丝复合轻质土 (P-S7.5) 的 X-Y 方向典型切片和局部孔隙分布 (红色)

Fig. 14 Images of typical sections of composite mycelium lightweight soil (P-S7.5) in X-Y directions and distribution of local pores

## 4 结论与建议

本文利用真菌的自然生长得到了一种新型菌丝复合轻质土, 并对其进行一系列试验, 试验结果显示:

(1) 菌丝复合轻质土是利用真菌新陈代谢产生的菌丝对基质材料以及骨料进行黏接、包裹、缠绕后形成的一种新型轻质、多孔隙土工填充材料。菌丝复合轻质土的生产过程简单、成本低且对环境无污染, 是一种有潜力的轻质材料。

(2) 不同菌种的菌丝复合轻质土表现出不同的表观形态与菌丝定殖程度。细观试验证明了菌丝复合轻质土的强度主要来源菌丝对基质材料以及骨料的缠绕与黏结, 菌丝定殖程度对菌丝复合轻质土的力学特性有重要的影响。

(3) 骨料的添加有效地改善了菌丝复合轻质土的力学特性, 使其满足了轻质回填材料的强度要求。当骨料含量达到 22.5% 后, 糙皮侧耳与长根菇菌的破坏形态由鼓胀破坏转为剪切破坏, 应力 - 应变曲线由硬化型转为软化型, 无侧限抗压强度迅速增加。骨料对强度的提升作用在菌丝定殖程度高的试样中更明显。

(4) 菌丝复合轻质土的渗透系数接近粉质黏土, 介于  $5.28 \times 10^{-6} \sim 2.81 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。渗透系数随着骨料的增加而降低, 但降低速率与菌丝定殖程度有关, 定殖程度越高, 降低速率越小。

(5) 通过上述试验结果可见, 菌丝复合轻质土的物理力学性质可以初步满足轻质回填材料的要求。在实际应用过程中, 菌丝培育以及后续养护工艺可以借鉴目前商业真菌生产中的技术模式, 通过工厂预制砌块, 现场填埋的形式用于工程使用。同时, 有必要积极开发适宜的菌种, 争取实现菌种的现场接种和养护。

菌丝复合轻质土技术与近年逐渐兴起的 MICP 技术相似。加固土体强度的增量都源于生物体自身代谢形成的产物与骨料材料的结合。但两种技术的强度形成机理却完全不同。菌丝复合轻质土来自于菌丝体对骨料的黏结与物理缠绕, 而后者更强调产生的结晶体与骨料之间连接的效果以及孔隙的填充作用。从本文已有研究可以看出, 菌丝复合轻质土在满足回填材料强度要求的同时, 充分利用了每年农业作物产出后剩余的农业废料。因此这种技术的推广有利于生态环境的建设。尽管如此, 该技术离工程应用还有一定过程。还需对实际工况条件 (例如平面应变、循环荷载作用等) 下的力学特性以及细观角度出发的强度机理进行深入研究。

#### 参考文献:

- [1] MILED K, SAB K, LE ROY R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modelling[J]. *Mechanics of Materials*, 2007, **39**(3): 222 - 240.
- [2] 朱 伟, 李明东, 张春雷, 等. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(1): 21 - 25. (ZHU Wei, LI Ming-dong, ZHANG Chun-lei, et al. The optimum moisture content of sand EPS beads mixed lightweight soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(1): 21 - 25. (in Chinese))
- [3] LOOMIS D, GUYTON K Z, GROSSE Y, et al. Carcinogenicity of benzene[J]. *The Lancet Oncology*, 2017, **18**(12): 1574 - 1575.
- [4] SHAKIR M A, AZAHARI B, YUSUP Y, et al. Preparation and characterization of mycelium as a bio-matrix in fabrication of bio-composite[J]. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2020, **65**(2): 253 - 263.
- [5] GHANBARI F, COSTANZO F, HUGHES D P, et al. Phase-field modeling of constrained interactive fungal networks[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, **145**: 104160.
- [6] HOLT G A, MCINTYRE G, FLAGG D, et al. Fungal mycelium and cotton plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material: Evaluation study of select blends of cotton byproducts[J]. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2012, **6**(4): 431 - 439.
- [7] XING Y, BREWER M, EL-GHARABAWY H, et al. Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018, Sanya.
- [8] ELSACKER E, VANDELOOK S, BRANCART J, et al. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates[J]. *PLoS One*, 2019, **14**(7): e0213954.
- [9] PELLETIER M G, HOLT G A, WANJURA J D, et al. An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, **51**: 480 - 485.
- [10] PELLETIER M G, HOLT G A, WANJURA J D, et al. Acoustic evaluation of mycological biopolymer, an all-natural closed cell foam alternative[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, **139**: 111533.
- [11] JONES M, MAUTNER A, LUENCO S, et al. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: a critical review[J]. *Materials & Design*, 2020, **187**: 108397.
- [12] APPELS F V W, CAMERE S, MONTALTI M, et al. Fabrication factors influencing mechanical, moisture-and water-related properties of mycelium-based composites[J]. *Materials & Design*, 2019, **161**: 64 - 71.

- [13] JIANG L, WALCZYK D, MCINTYRE G, et al. Manufacturing of biocomposite sandwich structures using mycelium-bound cores and preforms[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, **28**: 50 - 59.
- [14] JIANG L, WALCZYK D, MCINTYRE G, et al. Bioresin infused then cured mycelium-based sandwich-structure biocomposites: resin transfer molding (RTM) process, flexural properties, and simulation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **207**: 123 - 135.
- [15] ISLAM M R, TUDRYN G, BUCINELL R, et al. Morphology and mechanics of fungal mycelium[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 13070.
- [16] GHAZVINIAN A, FARROKHSIAR P, VIEIRA F, et al. Mycelium-based bio-composites for architecture: assessing the effects of cultivation factors on compressive strength[C]// The eCAADe and SIGraDi Conference, University of Porto, 2019, Portugal.
- [17] TRAVAGLINI S, NOBLE J, ROSS P G, et al. Mycology matrix composites[C]// Annual Technical Conference, 28th, American Society for Composites, 2013, Pennsylvania.
- [18] YANG Z, ZHANG F, STILL B, et al. Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, **29**(7): 04017030.
- [19] ATTIAS N, DANAI O, ABITBOL T, et al. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **246**: 119037.
- [20] JIANG L. A New Manufacturing Process for Biocomposite Sandwich Parts Using a Myceliated Core, Natural Reinforcement and Infused Bioresin[D]. Ann Arbor: Rensselaer Polytechnic Institute, 2015.
- [21] WU J, CHEN C, ZHANG H, et al. Eco-friendly fiberboard production without binder using poplar wood shavings bio-pretreated by white rot fungi *Coriolus versicolor*[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **236**: 117620.
- [22] ZHANG X, FAN X, HAN C, et al. Improving soil surface erosion resistance by fungal mycelium[C]// Geo-Congress 2020: Foundations, Soil Improvement, and Erosion, 2020, Reston.
- [23] LÓPEZ NAVA J A, MÉNDEZ GONZÁLEZ J, RUELAS CHACÓN X, et al. Assessment of edible fungi and films bio-based material simulating expanded polystyrene[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, **31**(8): 1085 - 1090.
- [24] LELIVELT R J J, LINDNER G, TEUFFEL P, et al. The production process and compressive strength of mycelium-based materials[C]// First International Conference on Bio-based Building Materials, 2015, Clermont-Ferrand.
- [25] ELRAGI A F. Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam[D]. Syracuse: State University of New York, 2000.
- [26] GAO H M, LIU J Y, LIU H L. Geotechnical properties of EPS composite soil[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **5**(1): 69 - 77.
- [27] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [28] 辛 凌, 刘汉龙, 沈 扬, 等. 废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土强度特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(3): 428 - 433. (XIN Ling, LIU Han-long, SHEN Yang, et al. Consolidated undrained triaxial compression tests on lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(3): 428 - 433. (in Chinese))
- [29] 谢约翰, 唐朝生, 尹黎阳, 等. 纤维加筋微生物固化砂土的力学特性[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(4): 675 - 682. (XIE Yue-han, TANG Chao-sheng, YIN Li-yang, et al. Mechanical behavior of microbial-induced calcite precipitation (MICP)-treated soil with fiber reinforcement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(4): 675 - 682. (in Chinese))