

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.022



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 3D 打印微生物-氧化镁-盾构渣土强度特性 试验研究

唐斌<sup>1,2</sup>, 赵炜<sup>3</sup>, 史金权<sup>4</sup>, 雷国进<sup>5</sup>, 李宗奇<sup>2</sup>, 黄旭<sup>1</sup>, 杨昕<sup>1</sup>, 方志<sup>1</sup>, 杨阳<sup>1,5</sup>

(1.重庆大学溧阳智慧城市研究院,江苏溧阳 213332; 2.中电建铁路建设投资集团有限公司,北京 100071; 3.中国水利水电第五工程局有限公司,成都 610000; 4.香港科技大学土木与环境工程系,香港 999077; 5.重庆大学土木工程学院,重庆 400045)

**摘要:**为推进盾构渣土资源化利用与低碳建造,将微生物诱导氧化镁碳化(MIMC)技术与3D打印相结合,制备可用于建筑结构的盾构渣土基材料。利用混凝土3D打印技术开展以盾构渣土为基础材料,以微生物碳化氧化镁为胶凝材料的试验研究,通过调整氧化镁掺量(0%、5%、10%、20%)与砂灰比(0.5、1.0、1.5),系统评价了打印砂浆的流动性能及打印块体各向异性强度特性,并与模具成型试样进行对比,借助扫描电镜分析不同材料配比下试块的微观结构差异性。结果表明:氧化镁掺量显著影响材料的流动性与强度,砂浆流动度随水解液掺量的增大而增大,相同水解液掺量下,流动度随氧化镁掺量的增大而先增大后减小;氧化镁掺量为20%时强度最高,且强度随氧化镁增加呈幂函数增长;砂灰比对强度影响不显著;3D打印试样强度各向异性不明显,与模具成型试样相比,后者因振捣密实而强度更高;微观结构显示,氧化镁促进碳酸镁水合物晶体生成并改善其形貌规则性与分布密度。

**关键词:**盾构渣土;微生物碳化氧化镁;3D打印;强度;各向异性

**中图分类号:** TU522.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

## Experimental study on strength of 3D printed shield tunnel muck solidified by microbial carbonized magnesium oxide

TANG Bin<sup>1,2</sup>, ZHAO Wei<sup>3</sup>, SHI Jinquan<sup>4</sup>, LEI Guojin<sup>5</sup>, LI Zongqi<sup>2</sup>, HUANG Xu<sup>1</sup>,  
YANG Xin<sup>1</sup>, FANG Zhi<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1,5</sup>

(1. Liyang Smart City Research Institute, Chongqing University, Liyang 213332, Jiangsu, P. R. China;  
2. PowerChina Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 100071, P. R. China; 3. Sinohydro Bureau  
5 Co., Ltd., Chengdu 610000, P. R. China; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong  
University of Science and Technology, Hong Kong 999077, P. R. China; 5. School of Civil Engineering, Chongqing  
University, Chongqing 400045, P. R. China)

**收稿日期:** 2025-12-29

**基金项目:** 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室开放课题(SQQZ2025116)

**作者简介:** 唐斌(1972-),男,正高级工程师,主要从事城市轨道交通建设研究,E-mail:574756235@qq.com。

黄旭(通信作者),男,高级工程师,E-mail:xhuanghu@163.com。

**Received:** 2025-12-29

**Foundation items:** Open Fund of State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area (No. SQQZ2025116)

**Author brief:** TANG Bin (1972-), professor level senior engineer, main research interest: urban rail transportation construction, E-mail: 574756235@qq.com.

HUANG Xu (corresponding author), senior engineer, E-mail: xhuanghu@163.com.

**Abstract:** To promote the resource utilization of shield muck and low-carbon construction, this study proposes a novel approach combining Microbial-Induced Magnesium Oxide Carbonation (MIMC) technology with 3D printing to fabricate shield muck-based materials for building structures. Tests were conducted using shield muck as the base material and microbially carbonated magnesium oxide as the cementitious agent. By adjusting the magnesium oxide content (0%, 5%, 10%, 20%) and the sand-to-binder ratio (0.5, 1.0, 1.5), the flow performance of the printing mortar and the anisotropic strength characteristics of the printed blocks were systematically evaluated. The microstructural differences of specimens under various material ratios were analyzed using scanning electron microscopy. The results show that the magnesium oxide content significantly affects fluidity and strength. The mortar flowability increases with the content of the hydrolyzed liquid; under the same hydrolyzed liquid content, the flowability first increases and then decreases as the magnesium oxide content rises. The highest strength is achieved at a 20% magnesium oxide content, and the strength follows a power function relationship with increasing magnesium oxide content. The sand-to-binder ratio has no significant effect on the strength. The 3D printed specimens exhibit negligible anisotropy in strength along the X, Y, and Z directions. Mold-cast specimens show higher strength due to compaction and densification. Microstructural analysis reveals that magnesium oxide content promotes the formation of magnesium carbonate hydrate crystals and improves their morphological regularity and distribution density.

**Keywords:** shield tunneling muck; microbial carbonized magnesium oxide; 3D printing; strength; anisotropy

随着城市化进程的快速推进,地铁、民用隧道等地下工程建设规模持续扩大,盾构法已成为地下开挖的主流技术。然而,盾构施工产生的大量渣土给行业的绿色可持续发展带来了严峻挑战。传统上,这些渣土通过“运输-倾倒-填埋”的线性模式处理,不仅消耗大量土地资源,还会引发扬尘污染、地下水污染等环境问题,对处置场周边生态造成长期压力<sup>[1]</sup>。与此同时,城市建设对天然材料的高需求导致过度开采,引发了资源枯竭与生态破坏。在此背景下,将盾构渣土从建筑废弃物转变为城市矿产资源,推动其高效、高值化资源化利用,已成为学术界与工程界共同的目标和迫切需求。这类努力有望带来显著的环境、经济和社会效益<sup>[2]</sup>。当前研究重点在于准确表征渣土特性、创新处理技术,以及探索多元化的增值路径,将渣土转化为高价值建筑材料,乃至用于环境修复的先进改性材料。尽管前景广阔,但渣土成分的时空变异性、处理成本以及技术方法的成熟度等关键挑战,仍是制约其大规模产业化应用的主要瓶颈<sup>[3]</sup>。因此,系统深入地开展盾构渣土资源化利用关键技术研究具有重要的现实意义。

迄今为止,盾构渣土主要用于制造免烧砖、陶粒、道路基层材料、工程回填土及同步注浆材料等<sup>[3]</sup>。将盾构渣土用作建筑材料要求其具备一定的承载能力。原始渣土通常无胶凝性或胶凝性很低,需要添加胶凝剂,如波特兰水泥、石灰、碱激发剂等<sup>[4-5]</sup>。例如,已有研究<sup>[6]</sup>利用粒化高炉矿渣这一工业废料作为胶凝剂,辅助盾构渣土制备同步注浆材

料,结果表明,添加粒化高炉矿渣可使 28 d 强度达到 16.34 MPa,该混合注浆材料已应用于中国南京地铁 6 号线工程<sup>[6]</sup>。在将渣土基材料回收用作路基填料方面,Jiao 等<sup>[7]</sup>采用废弃磷石膏和石灰作为黏结剂来改善渣土的力学性能。研究表明,胶凝剂的最佳配比为石灰:磷石膏=3:1,养护 28 d 后最高强度可达 0.78 MPa。为降低渣土的运输和改性成本,Zhang 等<sup>[8]</sup>将盾构渣土与石灰、粉煤灰和田园土混合改性为植物栽培生长基质,发现渣土可用作植物生长基质,尤其是与粉煤灰混合时效果更佳。为提高资源化利用的附加值,盾构渣土也被用于制备轻质陶瓷。Zhao 等<sup>[9]</sup>利用盾构隧道渣土和磷尾矿制备轻质陶瓷,发现当 CaO 与 SiO<sub>2</sub> 之比为 0.78 时,可获得 64.42 MPa 的强度和最低的孔隙率(14.83%),为盾构渣土基陶瓷生产提供了最佳组成配比。

当前盾构渣土利用大多回收为建筑材料,经济效益较低,如何降低使用渣土的成本和环境影响至关重要。生土建筑是人类居住环境的传统材料,拥有数千年的历史<sup>[10]</sup>。黏土型盾构渣土可为生土建筑提供新的材料资源。许多盾构渣土富含黏土和泥岩,显示出作为生土材料所需的优异黏性和成分<sup>[11]</sup>。与烧黏土砖相比,生土建筑具有低碳排放和亲近自然的优点。然而,纯黏土强度较低,改善生土材料力学性能的传统方法是在黏土中添加石灰、水泥或纤维来提高其抗压或抗折强度<sup>[10]</sup>。近年来,新型天然基材料,如生物聚合物和生物水泥被用于加固天然土壤以改善其工程性能<sup>[11]</sup>。

与波特兰水泥和石灰相比,生物基材料碳足迹

更低,被公认为是环保建筑材料<sup>[12]</sup>。在生物水泥技术中,微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)和酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)是代表性方法。这两种方法已应用于岩土工程基础设施和混凝土结构加固,如地基处理和混凝土裂缝自愈<sup>[11]</sup>。遵循类似的技术路线,来自微生物或大豆的脲酶被用来水解尿素以产生碳酸根离子。然后将富含碳酸根离子的溶液与氧化镁(MgO)混合,以促进氧化镁碳化及水菱镁石的形成<sup>[13]</sup>。根据脲酶的来源,该技术可命名为微生物诱导氧化镁碳化(MIMC)或大豆诱导氧化镁碳化(SIMC)<sup>[13]</sup>。使用MIMC,在与相同MgO用量但以水作为黏结溶液的情况下,可使土-MgO混合物的强度提高数倍,可节省用于加固土壤的MgO用量,并且比需要多次循环才能获得所需强度的MICP更有效<sup>[13]</sup>。近年来,MIMC已被用于固化工业废料<sup>[14]</sup>、污染土壤<sup>[15]</sup>和盐渍土<sup>[16]</sup>。该技术也被考虑用于太空建筑,并已用于固化月球风化层模拟物<sup>[17]</sup>。

3D 打印技术因其建造快速、节能和设计灵活性高等优点,在建筑领域快速发展,具有复杂结构的建筑构件可通过3D打印技术建造。因此,它可以使建筑材料的使用更具成本效益。近年来,用于3D打印的建筑材料已涉及利用工业废料,如粉煤灰、高炉矿渣和硅灰,并结合碱激发<sup>[18]</sup>。3D打印生土材料也得到了相关研究,主要考虑了打印过程影响因素,如胶凝剂类型和含量、砂土比、含水量、纤维类型和含量等<sup>[19]</sup>。与盾构渣土利用类似,胶凝剂对于生土3D打印至关重要,可以改善打印结构的物理和力学性能。

传统盾构渣土多作为路基填料使用,经济附加值较低。为促进盾构渣土材料的高附加值利用,可将其作为建筑主体材料使用。由于生土材料的承载能力较低,通常采用单层的建筑形式<sup>[19]</sup>。同时,由于技术的限制,3D打印也更适用于建造低层建筑。因此,将3D打印与生土建筑建造进行融合,是一种值得探究的建造形式。如Gonsalves等<sup>[20]</sup>将聚合物与黏土以及生物炭等材料混合进行3D打印建造,实现最终强度为17 MPa的打印体。

目前针对盾构渣土3D打印资源化利用的研究尚未见相关报道,其打印体的力学特性和建造特性尚不明确。笔者考虑胶凝材料的环保性,将采用MIMC作为辅助胶凝方法来提高盾构渣土的强度,研究3D打印的参数,如流动性和各向异性强度。同时,研究MIMC中的材料参数,如MgO含量和砂土比。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

盾构渣土取自眉山至成都间的铁路建设工地,测得最大含水量约为42.9%,天然干密度为1.92 g/cm<sup>3</sup>,颗粒级配曲线如图1所示。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测得土中细颗粒的塑限和液限分别为18.78%和28.96%。塑性指数为10。比重为2.69。天然盾构渣土的pH值约为8.75。为将盾构渣土用于3D打印,将其用颚式破碎机破碎,并收集直径小于1 mm的土。

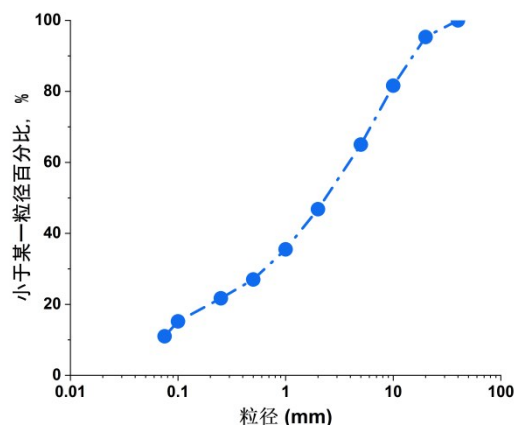


图1 渣土的颗粒级配

Fig.1 Particle size gradation of shield muck

在3D打印试验中,涉及的材料有胶凝剂、拌和溶液以及用于调节砂浆流动性能的化学添加剂。胶凝剂为购自缘江化工有限公司的氧化镁(MgO),其活性MgO含量高于95%。使用的拌合溶液为细菌基溶液。细菌基溶液采用预水解法制备,制备方法见文献<sup>[17]</sup>。试验使用的细菌为巴氏芽孢杆菌,采用分级扩培的方式进行扩大培养。首先采用摇床培养200 mL菌液,再将菌液接种至6 L培养基中进行打氧扩培,培养8 h左右,细菌OD600达到1.0左右,水解尿素电导率活性为0.1 mS/min·cm。将得到的菌液与2 mol/L尿素溶液混合进行等体积混合水解,所有水解过程均在恒温25℃下完成,12 h后水解液电导率统一控制在80 mS/cm左右。具体试验操作流程见文献<sup>[21]</sup>。预水解的方法通过将菌液与尿素溶液提前混合,能增加胶结液中碳酸根离子的含量,进而提高氧化镁与碳酸根离子的反应效率,相较于不采用预水解拌合的试样,能显著提升加固体的强度<sup>[21]</sup>。

羧甲基纤维素和混凝土减水剂用于调节砂浆流动性能。Liu等<sup>[21]</sup>发现,对于模拟月壤,羧甲基纤维素能够有效改善打印材料的持水性和表观形貌。减水剂能够改善混凝土流变性能和强度。3D打印

砂浆中添加质量百分比为 0.5% 的减水剂用于降低水解液使用量,改善打印砂浆的流动性,0.1% 的羧甲基纤维素用于改善砂浆的表现形貌。试验材料配比如表 1 所示。

表 1 试验计划  
Table 1 Testing programs

试验组	氧化镁/渣土	骨料/(氧化镁+渣土)	水解液掺量/(氧化镁+渣土)
1	0	1	0.58
2	0.05	1	0.54
3	0.1	1	0.52
4	0.2	1	0.54
5	0.1	0.5	0.45
6	0.1	1.5	0.57

## 1.2 试验方法

试验流程为:制备不同材料配比的 3D 打印砂浆,根据规范《水泥胶砂流动度测定方法》开展跳桌试验,测得不同含水量下的砂浆流动度<sup>[22]</sup>。跳桌试验中需要使用锥形模具,砂浆分两次放入模具内,之后移除上部模具并抹平砂浆顶部,移除下部模具后开始试验,测得 25 s 后砂浆的流动直径,取垂直两个方向上的直径平均值作为一次试验的结果。

因不同氧化镁掺量对流动度影响较大,达到相同流动度所需要的含水量不同。文献[23]建议适用于 3D 打印的流动度取值范围为 15~19 cm,因此选取流动度在 16.10~17.33 cm 之间的含水量进行 3D 打印试验,如图 2 中灰色阴影区域所示。3D 打印过程中,X、Y、Z 方向分别为打印喷头行进方向、垂直于打印喷头方向以及垂直方向,如图 3 所示。打印后的完整试样在室温 25 °C 空气湿度 80% 养护 7 d 后切割成边长为 40 mm 左右的正方体,在 80 °C 下烘干 24 h,之后马上开展强度测试,默认测试时试样含水率近似为 0。模具试样通过将砂浆分 5 次装入边长为 40 mm 的立方体模具中,每次装入砂浆后需将模具进行充分振捣以排除内部气泡,力学性能测试方法与 3D 打印试样一致。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流动度试验

对于混凝土 3D 打印砂浆,流动度会随水灰比以及砂灰比的变化而变化。如图 2 所示,对于不同氧化镁掺量下的 3D 打印砂浆,随着水解液掺量的增大,砂浆的流动性逐渐增大,并且随着氧化镁掺量增加,在相同水解液量增加情况下流动度提高程度变得更大。如对于素渣土,水解液掺量从 52% 增加到 58% 时,流动度从 12.78 cm 增加到 17.33 cm,

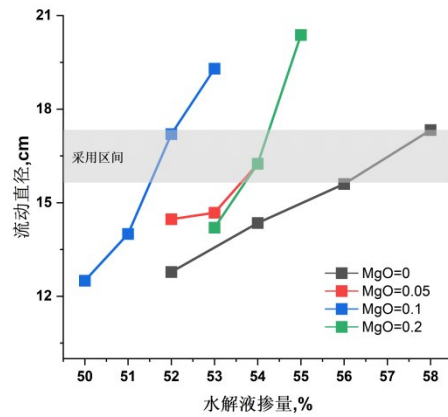


图 2 打印砂浆流动度变化趋势

Fig. 2 Flowability change of printed mortar

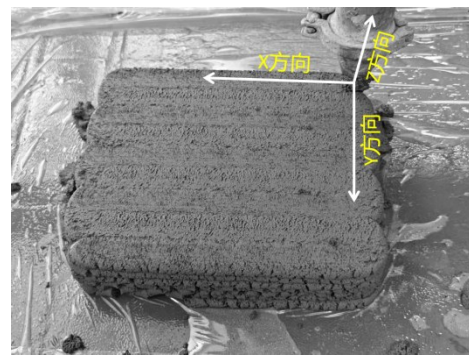


图 3 3D 打印试块 X、Y、Z 方向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of X, Y, Z directions in 3D printed specimen

增幅为 0.758 cm 每水解液掺量百分比增量;对于 20% 的 MgO 掺量,流动度从 53% 水解液掺量的 14.47 cm 增加到 54% 水解液掺量的 16.25 cm,增幅为 1.78 cm 每水解液掺量百分比增量。这表明,氧化镁本身黏度较低,因此其流动性高于渣土,随着氧化镁含量的增加,渣土-氧化镁砂浆的流动性能得到提高。当渣土中添加氧化镁,其流动度随水解液变化的趋势波动较大,当水解液掺量提高时,流动度变化出现显著的转折点,在采用的流动度范围内,MgO 掺量为 0% 时,流动度为 15.6 cm 对应的水解液掺量为 56%,MgO 掺量为 5%、水解液掺量为 54% 时流动度为 16.25 cm,MgO 掺量为 10%、水解液掺量为 52% 时流动度为 17.2 cm,MgO 掺量为 20%、水解液掺量为 54% 时流动度为 16.25 cm,表明氧化镁流动度随水解液增加呈现非线性变化规律。Liu 等<sup>[21]</sup>针对模拟月壤开展的流动度试验未观察到类似规律,这可能与拌合土体的性质相关。

由图 2 中还可以发现,随着氧化镁掺量的增加,流动度的变化曲线先向左移然后向右回移,20% 氧化镁掺量与 5% 氧化镁掺量的变化曲线几乎重叠。这说明,对于砂浆流动度的变化趋势,存在一个氧化镁掺量的阈值,当掺量大于这个阈值时,流动度

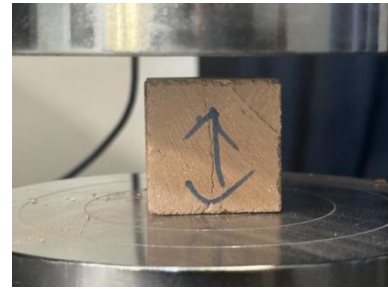
反而上升。

## 2.2 应力-应变曲线

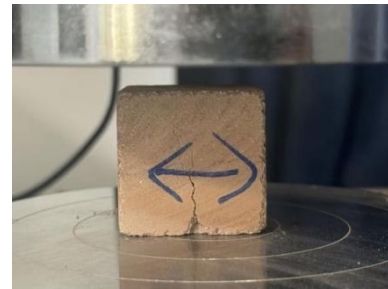
对3D打印试样不同方向的抗压强度进行测试,加载方式如图4所示。由图4可以看出,对于不同方向的加载,试样呈现不同的破坏形式。 $X$ 方向加载沿着打印方向出现贯穿式破坏,如图4(a)所示,但 $Y$ 方向和 $Z$ 方向加载的试样呈现出倾斜破坏,裂纹的发育方式并不规则,图4(b)和图4(c)所示,这种现象与文献中3D打印混凝土试样的各向异性破坏模式一致,主要是由于 $X$ 方向与打印层的方向相同,存在薄弱界面,再受到相同方向荷载时容易发生破裂<sup>[24]</sup>。Tang等<sup>[25]</sup>对3D打印混凝土试块在3点弯曲荷载作用下的破坏模式进行了分析发现,沿着打印方向加载时破坏呈现的是层内的破坏形式,而垂直于打印方向时,破坏形式呈现的是跨层破坏,这与本文试样的破坏形式一致,具体如图4(d)所示。

通过无侧限抗压试验,对不同氧化镁掺量和骨料掺量的试样强度以及应力-应变关系进行了分析。图5所示为不同氧化镁掺量下试样的应力-应变关系曲线, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向表示3D打印试样不同的加载方向,与上文中描述的打印喷头行进方向、垂直于打印喷头方向以及垂直方向一致。试样沿不同方向呈现出强度的各向异性,应力-应变曲线存在一定离散性。混凝土3D打印中,试样的强度各向异性规律一般为 $X > Y > Z$ , $X$ 方向为打印机喷嘴的打印方向<sup>[26]</sup>。产生这种强度差异的原因在于不同方向界面间的黏结强度不一致, $X$ 方向加载不会导致由于打印层间错动而产生的剪切破坏,进而强度较高。由应力-应变曲线可观察到各向异性特征并不存在明显规律性,这与Liu等<sup>[21]</sup>3D打印微生物碳化氧化镁加固模拟月壤的强度各向异性结果类似,他们推测是材料本身强度不高,导致不同打印层之间的黏结性强度与材料本身的强度差异性较小,进而影响了强度各向异性的产生。然而,同样有研究发现,微生物的存在能够在3D打印层间发生矿化反应,进而增强试块的界面黏结性,有利于降低力学各向异性<sup>[27]</sup>。此外,峰值强度对应的峰值应变在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向的规律性同样不明显,对于微生物碳化氧化镁加固盾构渣土,在较低的氧化镁掺量下,由3D打印方向导致的应力-应变关系各向异性行为可忽略不计。

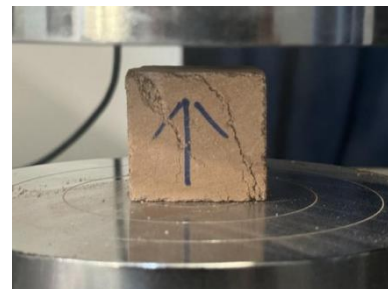
图6所示为不同氧化镁掺量试样的应力-应变关系曲线。由图6可见,随着氧化镁掺量的提升,试样的强度大幅度增加,但峰值强度对应的峰值应变并未呈现显著的规律性。对于水泥固化土或者微



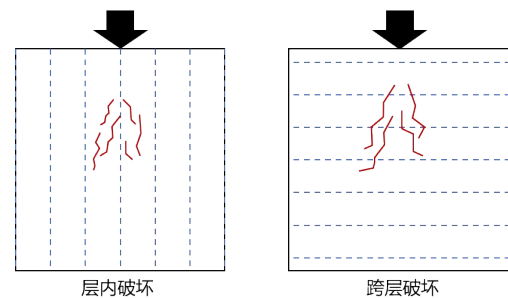
(a)  $X$ 方向加载



(b)  $Y$ 方向加载



(c)  $Z$ 方向加载



(d) 加载方向对试样破坏模式的影响

图4 不同加载方向试样破坏模式

Fig. 4 Failure modes of specimens under different loading directions

生物加固土,峰值应变通常随着胶凝材料的增加而降低,表明试样脆性增加<sup>[28]</sup>。而对于使用的微生物镁基胶凝材料,当氧化镁掺量为5%时,峰值应变降低,但随着氧化镁掺量的继续增加,峰值应变反而增加,20%氧化镁掺量试样对应的峰值应变与10%氧化镁掺量试样接近。图7对比了骨料掺量对应力-应变关系曲线的影响。与氧化镁掺量的影响不同,由图7中可以发现,随着骨料掺量的增加,试样的峰值应变降低,表面试样的脆性提高,但是峰值

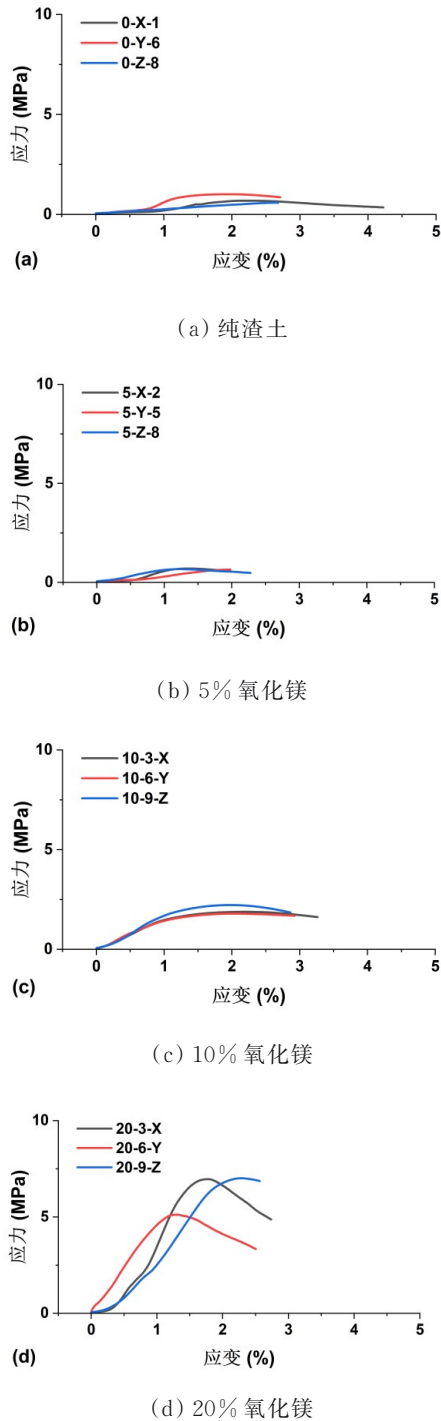


图5 试样无侧限应力-应变曲线

Fig. 5 Unconfined stress-strain curves of specimens

强度并没有呈现规律性变化。

### 2.3 峰值强度

图8~图10所示为3D打印试样的无侧限峰值强度与氧化镁掺量以及砂灰比的相关关系。图8中,3D打印试样的强度最高在7 MPa左右,随着氧化镁掺量的降低,如5%氧化镁掺量时,无侧限强度降低到1 MPa以下。根据文献中相关数据<sup>[29-30]</sup>,对于不同土类型,MIMC的加固效果存在较大的差异性。黄涛等<sup>[29]</sup>利用MIMC加固黄土,但未采用预水

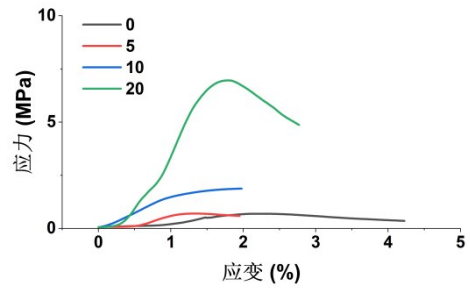


图6 不同氧化镁掺量试样的应力-应变曲线

Fig. 6 Comparison of stress-strain curves with different magnesium oxide contents

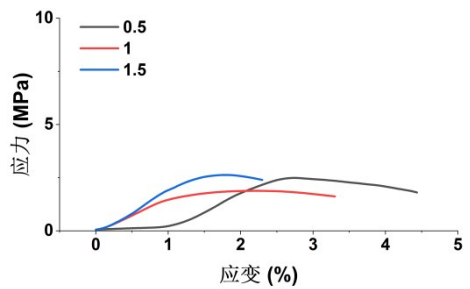


图7 不同砂灰比试样的应力-应变曲线

Fig. 7 Comparison of stress-strain curves for different sand-to-cement ratios

解的方法,在20%氧化镁掺量下最终试验强度只略高于3 MPa,5%氧化镁掺量试样强度在0.7 MPa左右。Wang等<sup>[30]</sup>发现,通过微生物预水解尿素的方法能够产生更多的碳酸根,能够提高氧化镁的水化反应,促进更多的水菱镁石生成,相同加固参数下试样的无侧限强度能够提升4倍以上。5%氧化镁掺量时与黄涛等<sup>[29]</sup>加固黄土的强度类似,但20%强度远高于其试验结果。推测原因在于无预水解条件下生成的碳酸根离子可满足5%氧化镁碳化水化需求,但20%氧化镁掺量需要更多的碳酸根离子,预水解方法能够显著提高碳酸根离子数量,进而促进更多水化产物的生成。

图9中,氧化镁掺量为10%,砂胶比分别为0.5、1.0和1.5。砂含量的增多会增加打印砂浆的密度,进而改变打印砂浆的流动性。骨料的增加也会改变砂浆结构,进而导致改变材料的力学属性。Liu等<sup>[21]</sup>发现,砂胶比的增大会降低3D打印砂浆的力学性能,推测是机制砂表面光滑,导致土体以及胶凝材料的黏结性降低,进而影响砂浆强度。使用的机制砂与Liu等<sup>[21]</sup>使用的材料一致,对于不同砂灰比试样,无侧限强度值始终维持在2 MPa左右,强度差别不显著。原因可能是此时骨料在整体结构中的传力仍未占据主导作用,试样强度仍取决于氧化镁以及渣土。推测进一步增大骨料掺量可能

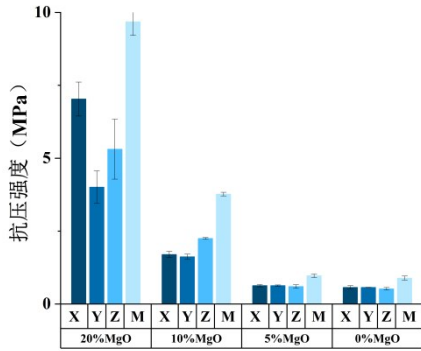


图8 不同氧化镁掺量试样峰值强度对比

Fig.8 Comparison of peak strength of samples with different magnesium oxide contents

会对试验结论产生影响,但需进一步研究。

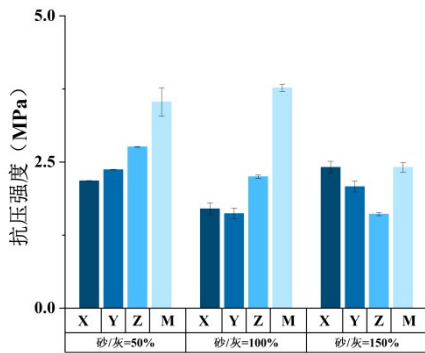


图9 不同砂灰比试样峰值强度对比

Fig.9 Comparison of peak strength of samples with different sand ratios

图8、图9中的字母M指模具成形试样的强度。由图8、图9可见,模具成形试样的无侧限强度显著高于3D打印试样,最高强度在氧化镁掺量为20%时达到9.68 MPa。这种现象与混凝土材料一致,主要是由于模具成形试样会经过振捣密实,具有较少的孔隙和较高的密实度[31]。但这种现象与主体材料性质有关,如对于模拟月壤,模具成形的试样并不会展现出较高的强度,可能与其本身自密实性能有关[21]。

微生物加固土中碳酸钙含量与强度增量通常可由幂函数表示,如Xiao等[32]将微生物加固砂土的强度增长因子与碳酸钙含量建立了幂函数关系式  $y = 1 + ax^b$ 。参考文献[32]中的拟合方法,将氧化镁掺量与无侧限强度进行拟合,如图10所示。由图10可以看出,氧化镁掺量与无侧限强度呈现显著的函数关系,可用函数  $y = ax^b + c$  表示,其中,  $a = 0.018, b = 1.871, c = 0.52$ ,拟合  $R^2 = 0.85$ 。

### 2.4 切线模量

切线模量  $E_{50}$  是试样材料性能的关键参数,各

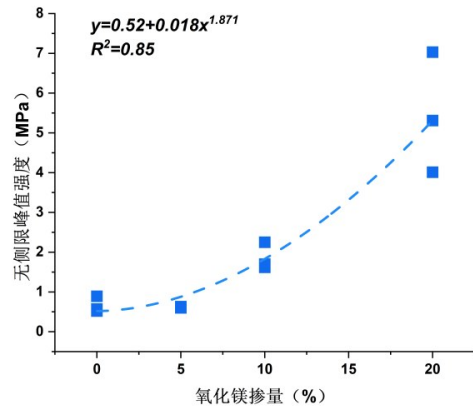


图10 无侧限峰值强度与氧化镁掺量关系

Fig.10 Relationship between unconfined peak strength and magnesium oxide content

氧化镁掺量下的  $E_{50}$  和各砂灰比下的  $E_{50}$  如图11、图12所示。图11所示为4种不同氧化镁含量下  $E_{50}$  的变化。MgO 含量与刚度呈正相关,随着氧化镁含量的降低  $E_{50}$  值整体呈显著下降趋势,且氧化镁是提升该材料刚度的关键成分,其含量越高,材料刚度越大。其中  $E_{50}$  最大值约为 1.52 GPa。图12说明提高砂灰比有助于提高骨架强度,从而提升刚度。当砂灰比为 150% 时,  $E_{50}$  约为 0.92 GPa。而模具组 M 的刚度则是远大于 3D 打印组,最大刚度达到 3 GPa。产生这种现象可能是模具制样工艺施加了外部能量,使颗粒紧密排列,排出了大部分空气,使得材料内部致密性提高,孔隙率降低。

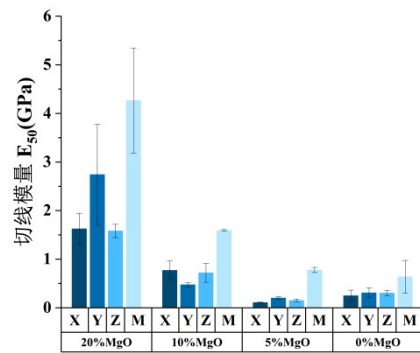


图11 不同氧化镁掺量试样切线模量

Fig.11 Tangent modulus of samples with different magnesium oxide contents

Shi等[17]将MIMC加固模拟月壤的  $E_{50}$  与无侧限抗压强度进行线性拟合,拟合直线的斜率在 160~280 之间。Han等[33]开展了生物炭改性碱激发钢渣加固珊瑚砂的试验研究,得到无侧限抗压强度和  $E_{50}$  的关系斜率在 60~300 之间。图13所示为  $E_{50}$  与抗压强度、氧化镁掺量以及砂灰比的相关性。由

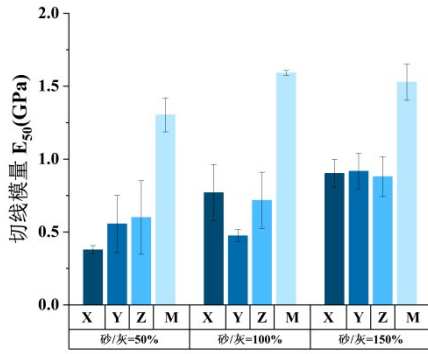


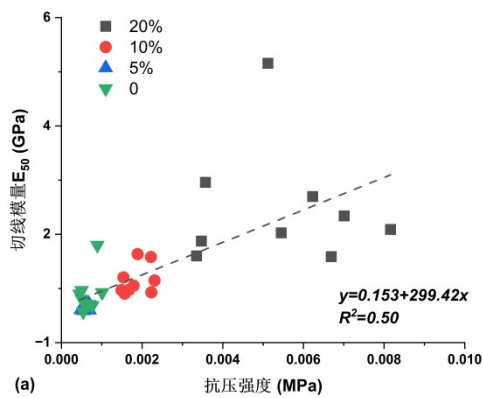
图 12 不同砂灰比试样切线模量

Fig. 12 Tangent modulus of specimens with different sand-to-cement ratios

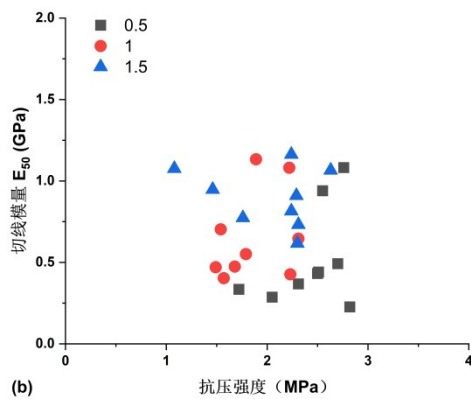
图 13 可以看出,  $E_{50}$  与抗压强度表现出较强的正相关性, 且该关系受 MgO 含量影响较大, 各氧化镁掺量下的  $E_{50}$  与抗压强度相关性可近似用函数  $y=299.42x+0.153$  表示。但对于不同砂/灰, 由于强度之间不存在显著区别, 剪切模量和抗压强度的相关性较难建立。

2.5 微观分析

氧化镁含量会影响其水化反应过程和晶体形



(a) 氧化镁含量



(b) 砂灰比

图 13 切线模量与抗压强度关系

Fig. 13 Relationship between tangent modulus and compressive strength

貌特征。通过扫描电镜观察不同氧化镁掺量下土样的微观形貌, 如图 14 所示。由图 14 可以看出, 未掺加氧化镁情况下, 渣土呈现片状的微观特征, 结构性不显著。当氧化镁掺量提升至 5% 时, 可观察到明显的花瓣状碳酸镁水合物, 但形状并不规则, 晶体呈现较大的曲度和离散性。对于 10% 掺量的试样, 碳酸镁水合物的结构形式逐渐清晰, 晶体尺寸变小, 但显著地簇集在土壤颗粒中, 当氧化镁掺量为 20% 时, 大量的碳酸镁水合物晶体分布的土颗粒当中, 花瓣结构十分清晰, 并且晶体的形貌规整, 边界十分清晰, 土体的结构性显著提升, 进而提高了土体强度。氧化镁掺量对碳酸镁水合物晶体形貌的影响规律与 Shi 等<sup>[17]</sup> 的结论一致, 验证了试验结果的合理性。

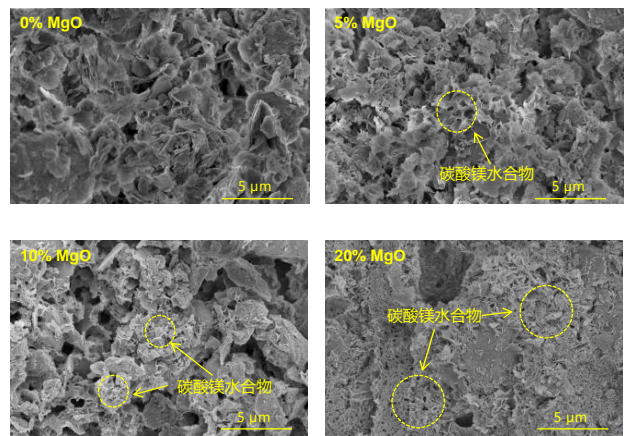


图 14 砂灰比为 1.0 时不同氧化镁掺量模具试样微观电镜图

Fig. 14 Microscopic electron microscope images of mold samples with different magnesium oxide contents when sand ratio is 1.0

10% 氧化镁掺量时, 不同砂灰比 3D 打印试样和模具试样微观形貌如图 15 所示。由图 15 可以看出, 不同砂灰比对试样的微观特性以及碳酸镁水合物晶体形貌的影响并不显著。虽然骨料的增加会改变加固土体的结构性, 但从微观角度, 并未观测到显著的规律性。此外, 模具试验和 3D 打印试样虽然呈现明显的强度差异, 但并未在微观特征中反映出来, 推测可能是由于氧化镁掺量较低的情况下, 土样的结构性不高, 进而骨料对试样整体结构性的改变不显著, 试样强度受骨料影响较小。同时, 砂灰比并不会影响氧化镁的水化碳化反应, 影响碳酸镁水合物生成的因素主要是其掺量和水解液性质。

3 结论

针对盾构渣土资源化利用现状, 以微生物碳化

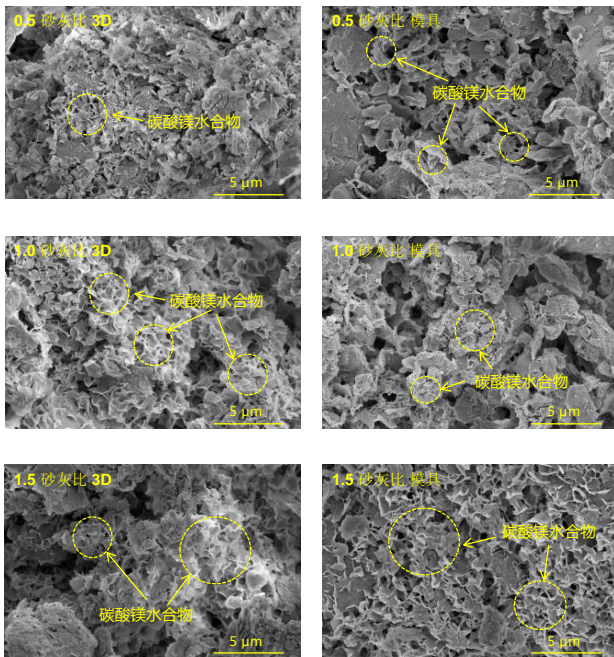


图 15 氧化镁掺量为 10% 时不同砂灰比试样微观电镜图

Fig. 15 Microscopic electron microscope images of samples with different sand-to-cement ratios when magnesium oxide content is 10%

氧化镁为胶凝材料,通过 3D 打印技术制备渣土砖,对打印砖块进行强度测试和微观分析,研究不同氧化镁掺量和砂灰比对试块各向异性强度、刚度以及微观特征的影响规律,得到以下主要结论:

1) 氧化镁掺量和砂灰比并不会改变试样的应力-应变曲线分布规律。模具试样的无侧限峰值强度高于 3D 打印试样强度,推测是模具经过振捣,试样内部更加密实,孔隙降低,导致强度增加。对于 3D 打印试样,X、Y、Z 方向的强度差异性并不显著,推测是材料本身强度较低,混凝土材料中由打印界面导致的强度各向异性在材料中作用不显著。砂灰比对 3D 打印和模具成型试块的影响不明显,但氧化镁掺量会显著提高打印体强度。

2) 试样强度和氧化镁掺量存在幂函数关系,但与砂灰比之间无显著相关性。试样的切线模量与峰值强度分布规律相似。不同氧化镁掺量下,切线模量与峰值强度存在一定的线性相关性,但对于不同砂灰比试样,相关性不明显。

3) 微观测试发现,随着氧化镁掺量的增加,碳酸镁水合物晶体形貌越规则,晶体尺寸越小,分布越致密。砂灰比不会改变碳酸镁水合物的晶体结构,此外,模具成型试样与 3D 打印试样的微观结构差异同样不显著。

## 参考文献

[1] 时懿秀. 利用盾构渣土制备新型胶凝材料的研究与应

用[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.

Shi Y X. Research and application of novel cementitious materials prepared from shield slag soil[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024. (in Chinese)

[2] 杨浩鹏, 黄丽, 邱林, 等. 地铁盾构渣土资源化的全生命周期碳排放技术评估[J]. 四川建材, 2025, 51(8): 57-60.

Yang H P, Huang L, Qiu L, et al. Assessment of carbon emission technology in the whole life cycle of subway shield muck recycling[J]. Sichuan Building Materials, 2025, 51(8): 57-60. (in Chinese)

[3] 孙晓辉, 张明, 陈湘生, 等. 工程建设余泥渣土高效利用技术研究及展望[J]. 深圳大学学报(理工版), 2025, 42(6): 678-687.

Sun X H, Zhang M, Chen X S, et al. Efficient utilization technology and research prospects for waste slurry and soil from engineering construction[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2025, 42(6): 678-687. (in Chinese)

[4] 王正成, 刘松玉, 郭远臣, 等. 碱渣基本性质及工程应用研究进展[J]. 工程科学学报, 2025, 47(11): 2343-2360.

Wang Z C, Liu S Y, Guo Y C, et al. Progress in the study of the basic properties and engineering applications of alkali residue[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(11): 2343-2360. (in Chinese)

[5] 郭沁颖, 李白云, 丁建文, 等. 工业废渣改良泥水盾构渣土的路用性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(2): 66-75.

Guo Q Y, Li B Y, Ding J W, et al. Road performance investigation of slurry shield tunnel residue improved by industrial waste residues[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(2): 66-75. (in Chinese)

[6] Ni Z L, Wang S Y, Zheng X C, et al. Application of geopolymers in synchronous grouting for reusing of the shield muck in silty clay layer[J]. Construction and Building Materials, 2024, 419: 135345.

[7] Jiao N, Ding J W, Wan X, et al. Mechanical properties and micro-mechanism of improved shield tunnel muck with phosphogypsum and lime[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134437.

[8] Zhang C, Liu X, Fu J Y, et al. Evaluating the feasibility of muck from slurry shield tunnels as a growth medium for landscaping[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2022, 72(5): 455-462.

[9] Zhao H, Mao Y S, Jiang M T, et al. Sustainable production of lightweight ceramics from shield tunnel muck and phosphorus tailings enhanced by CaO/SiO<sub>2</sub> ratios[J]. Construction and Building Materials, 2025, 482: 141738.

[10] 程炎琪. 活性 MgO 碳化加筋生土制备及其墙板性能与

- 机制研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2025.
- Cheng Y Q. Preparation of activated MgO reinforced carbonized raw soil and study of its wall panel properties and mechanisms[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2025. (in Chinese)
- [11] Fu T Z, Saracho A C, Haigh S K. Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: a comprehensive review[J]. *Biogeotechnics*, 2023, 1(1): 100002.
- [12] Arnepalli S K K, Gondu V R, Chinthala S. Sustainable improvement of granite sludge dust properties using microbially induced carbonate precipitation (MICP): strength enhancement, erosion prevention, and dust mitigation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2025, 32(60): 31847-31870.
- [13] 孙翔龙, 杭磊, 王小菲, 等. 大豆脲酶碳化氧化镁固化法加固砂土试验研究[J]. *粉煤灰综合利用*, 2025, 39(5): 78-84.
- Sun X L, Hang L, Wang X F, et al. Experimental study on stabilization of sandy soil using urease-catalyzed carbonation of magnesium oxide[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2025, 39(5): 78-84. (in Chinese)
- [14] Chen Z, Fang X W, Long K Q, et al. Using the biocarbonization of reactive magnesia to cure electrolytic manganese residue[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2021, 38(8): 709-718.
- [15] Zha F S, Chen S G, Kang B, et al. Synergistic solidification of lead-contaminated soil by magnesium oxide and microorganisms[J]. *Chemosphere*, 2022, 308: 136422.
- [16] Zhang P, Chou Y L, Peng E X, et al. Solidification of sodium sulfate saline loess by biomineralization of reactive magnesium oxide binder[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 433: 136611.
- [17] Shi J Q, Xiao Z H, Xiao Y, et al. Bio-molding of lunar regolith with bio-carbonized magnesium oxide[J]. *Biogeotechnics*, 2025, 3(4): 100159.
- [18] 侯壬乾, 林文字, 白刚, 等. 无筋混凝土拱形结构 3D 打印建造与力学性能分析[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20240625.1747.002>.
- Hou R Q, Lin W Y, Bai G, et al. 3D printed construction and mechanical properties analysis of unreinforced concrete arch structure[J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20240625.1747.002>. (in Chinese)
- [19] Ji Y M, Poullain P, Leklou N. Printing with earth: characterizing local soils for sustainable 3D construction [J]. *Materials and Structures*, 2025, 58(9): 299.
- [20] Gonsalves N A, Morgan A, Thiele H, et al. 3D printing of sustainable infrastructure using rapid-set clay concrete with biobased additives[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8(5): 359.
- [21] Liu H L, Xiao Y, Shi J Q, et al. 3D printing lunar regolith simulant with microbial-carbonated magnesium oxide[J]. *Biogeotechnics*, 2025: 100197.
- [22] GB/T 2419—2005 水泥胶砂流动度测定方法[S]. GB/T 2419—2005 Test method for fluidity of cement mortar[S].
- [23] Tay Y W D, Qian Y, Tan M J. Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 174: 106968.
- [24] Yang Y K, Wu C Q, Liu Z X, et al. Mechanical anisotropy of ultra-high performance fibre-reinforced concrete for 3D printing[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 125: 104310.
- [25] Tang Y X, Xiao J Z, Ding T, et al. Trans-layer and inter-layer fracture behavior of extrusion-based 3D printed concrete under three-point bending[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 296: 109836.
- [26] Bai G, Wang L, Ma G W, et al. 3D printing eco-friendly concrete containing under-utilised and waste solids as aggregates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 120: 104037.
- [27] Singh A, Anand K, Liu Q, et al. Enhancing interlayer bonding in 3-dimensional printed concrete using bacteria-based biomineralization[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2025, 164: 106258.
- [28] Xiao Y, He X, Evans T M, et al. Unconfined compressive and splitting tensile strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(9): 04019048.
- [29] 黄涛, 方祥位, 张伟, 等. 活性氧化镁-微生物固化黄土试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(10): 3300-3306, 3316.
- Huang T, Fang X W, Zhang W, et al. Experimental study on solidified loess by microbes and reactive magnesium oxide[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3300-3306, 3316. (in Chinese)
- [30] Wang D L, Tang C S, Pan X H, et al. A novel biocarbonation method of reactive magnesia with urea prehydrolysis for geomaterial stabilisation[J]. *Géotechnique*, 2024, 74(13): 1634-1648.
- [31] Chen M X, Li L B, Wang J A, et al. Rheological parameters and building time of 3D printing sulphoaluminate cement paste modified by retarder and diatomite[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117391.
- [32] Xiao Y, Zhang L, Shi J Q, et al. Liquefaction of EICP-treated sand with fabric anisotropy[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2026,

152: 04025180.

Geotechnical Engineering, 2023, 15(3): 760-772.

- [33] Han X L, Jiang N J, Jin F, et al. Effects of biochar-amended alkali-activated slag on the stabilization of coral sand in coastal areas[J]. Journal of Rock Mechanics and

(编辑 XXX)