

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.106



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



糯米浆改良戚城遗址仿遗址土强度特性与作用机理

岳建伟^{a,b}, 陈颖^a, 赵丽敏^{a,b}, 张宝玺^a, 孔庆梅^{a,b}, 顾丽华^{a,b}, 卢会芳^{a,b}

(河南大学 a. 土木建筑学院; b. 开封市不可移动文物安全评价与修复重点实验室, 河南 开封 475004)

摘要:戚城遗址本体土质为粉质黏土, 存在结构松散、强度低、毛细作用强烈及水稳定性差等不利特性, 如何改善修复遗址土的性能令人关注。选用糯米浆、石英砂、氧化铝、氟化钙作为外加材料, 对戚城遗址粉质黏土进行改良, 制备仿遗址土。研究0%、1%、3%、5%、7%、9%糯米浆浓度下仿遗址土的力学性能、显微结构及色差变化。结果表明: 随着糯米浆浓度的增加, 土样的强度和内摩擦角先增大后减小, 黏聚力呈线性递增趋势; 3%浓度糯米浆改良仿遗址土的抗剪强度、无侧限抗压强度及内摩擦角最大, 显微结构密实; 对试样进行色差分析, 仿遗址土、3%浓度糯米浆仿遗址土与遗址土间的色差均较小。采用糯米浆对MICP技术进行改良, 发现糯米浆可以提高细菌活性, 促进碳酸钙生成, 随着养护天数的增加, 改良MICP土体强度持续提高, 生物矿化时间长。

关键词:仿遗址土; 粉质黏土; 糯米浆; 戚城遗址; 生物矿化

中图分类号: TU444 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2022)02-0195-10

Strength characteristics and mechanism of modified imitation ruins soil of Qicheng site with glutinous rice slurry

YUE Jianwei^{a,b}, CHEN Ying^a, ZHAO Limin^{a,b}, ZHANG Baoxi^a, KONG Qingmei^{a,b},
GU Lihua^{a,b}, LU Huifang^{a,b}

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Key Laboratory for Safety Evaluation and Restoration of Immovable Cultural Relics in Kaifeng City, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, P. R. China)

Abstract: The ruins soil of Qicheng is silty clay, typically linked with unfavorable characteristics such as loose structure, low strength, strong capillary action and poor hydraulic property. How to improve the performance of the soil in the restoration site is of great concern. In this study, glutinous rice slurry, quartz sand, alumina and calcium fluoride were added to the silty clay in Qicheng site for improvement. The imitation ruins soil was prepared by this method. The mechanical properties, microstructure and color difference of the imitation ruins soil modified with different glutinous rice slurry contents (of 0%, 1%, 3%, 5%, 7%, and 9% concentrations) were studied. The results show that with the increase of the

收稿日期: 2020-12-24

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102310287、212102310271)

作者简介: 岳建伟(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事微生物岩土工程与土遗址保护研究, E-mail: yjwchn@126.com.

赵丽敏(通信作者), 女, 副教授, E-mail: mumu55882005@163.com.

Received: 2020-12-24

Foundation items: Key Scientific and Technological Projects in Henan Province(No. 212102310287, 212102310271)

Author brief: YUE Jianwei (1971-), PhD, professor, main research interests: microbial geotechnical engineering and conservation of earthen sites, E-mail: yjwchn@126.com.

ZHAO Limin (corresponding author), associate professor, E-mail: mumu55882005@163.com.

glutinous rice slurry concentration, the strength and internal friction angle of soil samples increase first and then decrease, and the cohesion shows a linear increasing trend; Imitation ruins soil improved by 3% concentration of glutinous rice slurry had the largest shear strength, unconfined compressive strength and internal friction angle, and its microstructure is dense; The color difference analysis of the soil sample shows that the color difference between the imitation ruins soil, imitation ruins soil improved by 3% concentration of glutinous rice slurry and the ruins soil are all small; Furthermore, using glutinous rice slurry to improve the MICP technique, it is found that glutinous rice slurry can increase the activity of bacteria and promote the production of calcium carbonate. With increasing of maintenance days, the strength of modified MICP soil has an increasing tendency, and the biological mineralization time is longer.

Keywords: imitation ruins; silty clay; glutinous rice slurry; Qicheng site; biomineralization

濮阳戚城遗址处于黄河中下游,土质为结构松散的粉质黏土,具有水稳定性差、毛细作用强烈等不利特性,受黄河泛滥的影响,土遗址破坏严重^[1-2]。因黄河文化传承和旅游发展的需要,黄河下游土遗址逐步得到恢复,但已经修复的濮阳戚城遗址出现了大量裂缝及表面不同程度的龟裂,其原因在于修复材料和修复的营造技术缺乏合理性,古代土遗址营造时添加糯米浆是否存在科学道理亟待解密。

糯米浆在耐久性、与古建筑本体的兼容性等方面具有突出优点,引起了文物保护工作者的极大关注。Zeng 等^[3]、彭红涛等^[4]利用糯米浆改良三合土作为土遗址的修复材料,取得了显著的改善效果。Yang 等^[5]利用糯米浆与碳酸钙构成的有机-无机复合材料改良的石灰砂浆作为古砌体的修复材料。贾栋钦等^[6]采用改性糯米浆固化黄土作为黄土窑洞遗址的墙面修复材料。湛文武等^[7]发现糯米浆在 75~80 °C 范围内加固遗址土的效果较好。刘强等^[8]、范明明等^[9]发现糯米浆对调控碳酸钙晶体形貌和晶型有一定的影响。糯米浆改良土遗址研究集中于糯米浆在糊化后可以调控碳酸钙晶体,进而改善土遗址性能等方面。而糯米浆作为有机物质对微生物矿化土体具有长期的影响。

近年来,学者们发现有机物质对微生物矿化土体结构有显著影响。土壤中有大量的生物,包括细菌、古细菌、真菌和蠕虫,这些微生物可以产生生物膜、生物聚合物或生物矿物,直接使用原位微生物活性或异位微生物产物作为一种受环境影响土壤的改良方法^[10-12]。陈鑫^[13]指出,土壤表层缺乏有机质会影响微生物的生长,导致土壤颗粒黏聚力较大,进而造成土壤板结。Li 等^[14]、黄磊等^[15]发现有机物质可以为土壤微生物增加营养源,起到调控土壤微生物群落结构的作用。赵伟等^[16]、Nakada 等^[17]发现

微生物能产生淀粉酶,分解淀粉。裴迪等^[18]指出蛋白质可以为微生物提供氮源、碳源。相关研究^[19-22]发现,糯米浆中含有丰富的淀粉和蛋白质,可以为微生物矿化提供外加营养源。因此,探究糯米浆作用下微生物改良土体机理具有重要意义。

目前,糯米浆的研究以西北黄土土遗址和灰浆为主,针对黄河下游的粉质黏土土遗址尚未有人研究;对糯米浆的研究以关注土遗址短期力学性能为主,而对含有糯米浆土遗址的长期性能及作用机理尚不清楚。笔者选用糯米浆、石英砂、氧化铝、氟化钙作为附加材料,对濮阳戚城遗址周围的粉土进行改良,制备仿遗址土。通过直剪试验、无侧限抗压强度试验研究了 0%、1%、3%、5%、7%、9% 糯米浆浓度下仿遗址土的强度、黏聚力及内摩擦角的变化值,电镜测试不同浓度糯米浆对仿遗址土的改良效果,根据色差分析、评定糯米浆改良仿遗址土是否符合土遗址修复原则,基于 MICP 技术探究糯米浆作用下微生物改良土体的作用机理。

1 试验材料

1.1 仿遗址土的制备

图 1 所示为濮阳戚城遗址土及周边土取样位置。由图 1 可知,戚城土遗址破坏严重,为探求土遗址改良方法,采用传统糯米浆改良遗址土。

鉴于土遗址属于不可再生文物,研究土遗址不能以牺牲文物为代价,为了更好地保护戚城遗址,采取少许遗址土以及周边土样品进行 XRF 分析,按照“缺什么补什么”的原则进行仿遗址土的配制。

图 2 所示为遗址土与周边土的化学成分含量,由图 2 可见:遗址土与周边土化学成分差别不大,可以利用周边土配制仿遗址土。选取含量超过 1% 氧化物的遗址土和周边土进行数据分析研究,对周边



图 1 遗址土与周边土取样位置

Fig. 1 Sampling location of ruins soil and surrounding soil

土的氧化物含量进行调整从而制备出仿遗址土,通过计算使仿遗址土的氧化物含量等于遗址土的氧化物含量,表 1 所示为周边土、遗址土及仿遗址土的氧化物含量。

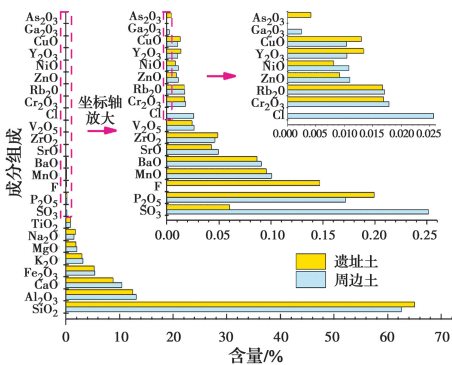


图 2 遗址土与周边土化学成分含量图

Fig. 2 Chemical composition of ruins soil and surrounding soil

表 1 不同种类土的氧化物含量

Table 1 Content of oxides in different soils

化学成分	周边土/%	遗址土/%	仿遗址土/%
SiO ₂	62.603	65.089	65.087
Al ₂ O ₃	13.132	12.517	12.523
CaO	10.466	8.802	9.615
Fe ₂ O ₃	5.407	5.261	4.966
K ₂ O	3.184	3.006	2.925
MgO	2.075	1.881	1.906
Na ₂ O	1.471	1.818	1.352
总计	98.334	98.374	98.374

仿遗址土的配制:仿遗址土所添加的氟化钙(CaF₂)购自河南铂润铸造材料有限公司;氧化铝(Al₂O₃)购自巩义市恒鑫滤料厂,氧化铝纯度高达

99.8%,是一种高硬度的化合物;石英砂(SiO₂),石英砂细度为 400 目(38 μm),颜色为乳白色,是一种坚硬、耐磨、化学性能稳定的硅酸盐矿物,石英砂氧化物的主要组成成分为 SiO₂ 与 Al₂O₃,含量分别为 96.83%和 1.78%。考虑石英砂中 SiO₂、Al₂O₃ 的含量,经数据分析后按照每 100 g 周边土(过 5 mm 筛)中加入 8.52 g 石英砂(SiO₂)、0.45 g 氧化铝(Al₂O₃)、0.15 g 氟化钙(CaF₂)配成仿遗址土。

通过颗粒级配试验对遗址土与仿遗址土的粒径进行分析,如表 2 所示。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测得仿遗址土与遗址土基本物理性质指标如表 3 所示。

表 2 遗址土与仿遗址土粒径分析

Table 2 Particle size distribution of ruins soil and imitation ruins soil

土的类型	粒度分布(质量)/%					
	<2	<1	<0.5	<0.25	<0.05	<0.01
遗址土	93.49	91.93	85.26	82.42	50.84	3.66
仿遗址土	94.04	92.37	85.32	82.30	60.48	4.94

表 3 遗址土与仿遗址土基本物理指标

Table 3 Basic physical properties of ruins soil and imitation ruins soil

土的类型	液限 W _L /%	塑限 W _p /%	塑性指数 I _p /%	最佳含水率 W _p /%	最大干密度 ρ _{d max} /(g·cm ⁻³)
遗址土	30.682	16.360	14.322	17.140	1.690
仿遗址土	29.820	16.520	13.300	16.940	1.671

1.2 糯米浆的制备

采用由超市购买的糯米粉,将不同质量的糯米粉加蒸馏水配成浓度为 1%、3%、5%、7%、9% 的糯米浆,并将两者充分拌匀,放入电饭锅中,将糯米浆加热煮沸,为使糯米浆充分糊化,煮沸时间至少 4 h^[23]。在熬制糯米浆过程中,记下电饭锅的刻度,加入适量水,以保持糯米浆浓度不变^[24],将制备好的糯米浆冷却至室温备用^[23]。

2 改良仿遗址土的力学性能试验

土样的力学性能包括抗压强度、抗剪强度(黏聚力、内摩擦角)等参数,是决定土遗址修复材料效果的重要指标。通过测定糯米灰浆改良仿遗址土的力学性能,评价糯米灰浆的修复效果,得出最优修复配比。

2.1 试样的制备

取仿遗址土土样烘干,过 2 mm 筛备用,根据仿遗址土击实试验结果,按照最优含水率 17% 及干密度 1.6 g/cm^3 进行试样制作。

直剪试验试样制备:试样尺寸为 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 体积为 60 cm^3 , 试样总质量为 112.32 g , 加水量为 16.32 g 。无侧限抗压强度试验试样制备:试样尺寸为 $\phi 38 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$, 体积为 86.193 cm^3 , 试样总质量为 161.35 g , 加水量为 23.44 g 。设置纯水作为对照组及添加 1%、3%、5%、7%、9% 的糯米浆到仿遗址土中,利用搅拌器不断搅拌至稠度不变^[22],土样拌和均匀后,先将土样静置 24 h,使糯米浆与水分散均匀,按照土工试验规程制作土样,放入盒中密封养护 7 d 后进行力学性能试验。考虑到糯米浆中的溶质会影响试样的含水率,尽可能保证 6 组试样的含水率相近,采用去溶质的方法将不同浓度糯米浆中的糯米去除。改良仿遗址土试样配比如表 4 所示。

表 4 改良仿遗址土试样配比

Table 4 Sample preparation of improved imitation ruins soil

糯米浆 浓度/%	直剪试验试样		无侧限抗压试验试样	
	糯米浆	干土	糯米浆	干土
	质量/g	质量/g	质量/g	质量/g
0	16.32	96.00	23.44	137.91
1	16.48	95.84	23.67	137.68
3	16.82	95.5	24.16	137.19
5	17.18	95.14	24.67	136.68
7	17.55	94.77	23.20	138.15
9	17.93	94.39	25.71	135.64

2.2 低应力下的直剪试验

试样的抗剪强度是衡量土遗址修复材料性能和修复效果的重要指标。戚城遗址的破坏主要是由坍塌、冲沟等引起的剪切破坏和结构失稳。采用直剪试验测定土遗址修复材料的抗剪切破坏能力。受传统技术限制,土遗址高度一般较低,实际受到的竖向压力往往低于现建建筑,现有规范给出的常规直剪试验方法并不适用于土遗址,研究土遗址在低应力下的直剪试验更符合实际状况。

选择试样竖向应力为 50、100、150、200 kPa,试验过程按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行,土样以 0.8 mm/min 的剪切速率使试样

在 3~5 min 内剪损,每隔 0.2 mm(15 s)记录一次应力环读数,根据剪应力与剪切位移图,记录峰值(若无峰值,取剪切位移为 4 mm 时的读数),即为土样破坏时的读数。图 3 所示为糯米浆改良试样的剪切应力-应变关系。由图 3 可见:糯米浆改良仿遗址土剪切应力-应变曲线呈规律性变化。即垂直压力为 50 kPa 时,试样具有非常明显的应变软化特征;随着垂直压力进一步增大至 200 kPa 时,试样具有非常明显的应变硬化特征。

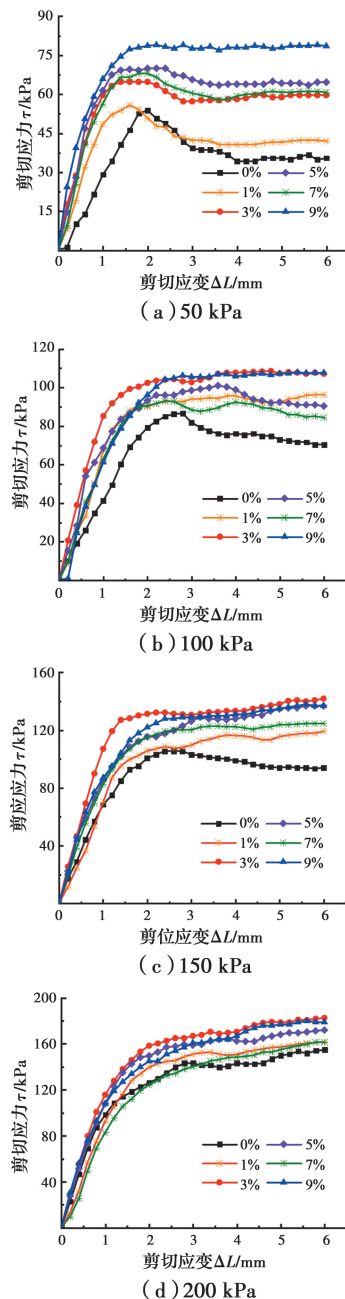


图 3 不同浓度糯米浆试样的剪切应力-应变曲线
Fig. 3 Shear stress-strain curves of soil samples with different concentrations of glutinous rice slurry

图 4 所示为抗剪强度与糯米浆浓度、垂向应力的关系。由图 4 可见:抗剪强度与垂向应力呈正相关,即竖向应力增大,抗剪强度也相应增大。随着糯米浆浓度的增加,抗剪强度呈先增大后减小的变化规律,峰值对应的糯米浆浓度为 3%,此浓度下斜率最大即内摩擦角最大;9%浓度糯米浆对应的截距最大即黏聚力最大。

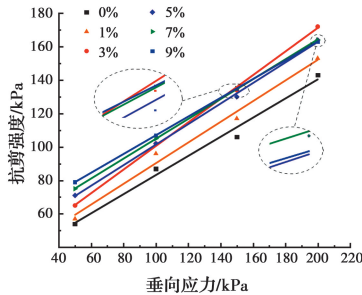


图 4 抗剪强度与糯米浆浓度、垂向应力的关系

Fig. 4 Relationship between shear strength and glutinous rice pulp concentration and vertical stress

图 5 所示为抗剪强度参数与糯米浆浓度的关系。由图 5 可见,随着糯米浆浓度的增加,内摩擦角先增大后减小,黏聚力呈线性增长趋势。主要原因是土样中加入糯米浆后土颗粒间孔隙被逐渐填充,颗粒间的黏聚力也随之增加;但随着糯米浆浓度持续增加,过量糯米浆将会附着在土颗粒表面,造成土颗粒间的摩擦力降低,进而导致土样的内摩擦角减小。

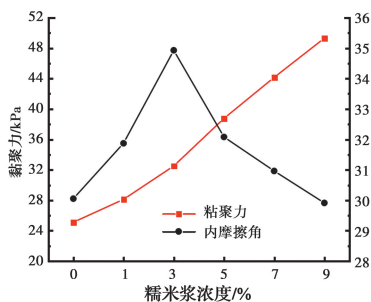


图 5 抗剪强度参数与糯米浆浓度的关系

Fig. 5 Relationship between shear strength parameters and glutinous rice pulp concentration

2.3 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度能够反映出试样的抵抗变形能力与该材料修复效果间的关系,还能够间接反映出试样的密实度。根据《土工试验方法标准》,采用应变控制式无侧限压缩仪,按照 1 mm/min 的轴向应变速率对仿遗址土试样进行无侧限抗压强度试验。

图 6 所示为不同浓度的糯米浆试样应变关系曲线。由图 6 可见,随着糯米浆浓度的增加,试样抵抗

破坏的能力呈先增大后减小的变化规律,糯米浆浓度为 3%时,轴向应力达到最大值,即无侧限抗压强度达到最大值。

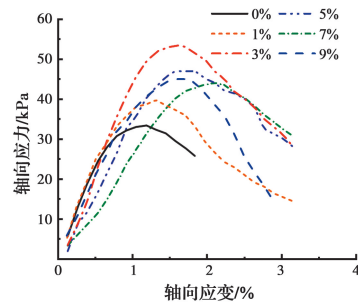


图 6 不同浓度的糯米浆试样轴向应力-应变关系

Fig. 6 Axial stress-strain relationship of glutinous rice slurry soil samples with different concentrations

表 5 为试样抗压强度与糯米浆浓度养护 7 d 的变化关系。由表 5 可知:试样中加入糯米浆,其无侧限抗压强度及抗变形能力均得到明显提高,1%、3%、5%、7%、9%浓度糯米浆改良试样的无侧限抗压强度分别提高了 19.3%、60.5%、40.26%、30.80%、32.1%;抗变形能力分别提高了 11.9%、33.9%、44.9%、77.97%、42.37%。因此,试样强度与糯米浆浓度有关,不同浓度的糯米浆对试样的改良效果不同,3%浓度糯米浆改良仿遗址土表现出较好的力学特性。

表 5 抗压强度与糯米浆浓度试样养护 7 d 的变化关系

Table 5 Relationship between compressive strength of soil samples and 7-day curing of glutinous rice slurry concentration

糯米浆浓度/%	无侧限抗压强度/kPa	试样破坏时轴向应变/%
0	33.41	1.18
1	39.86	1.32
3	53.62	1.58
5	46.86	1.71
7	43.71	2.10
9	44.14	1.68

2.4 SEM 电镜试验

为研究糯米浆改良仿遗址土内部结构及物质组成变化的情况,分别对不同浓度糯米浆改良仿遗址土进行电镜扫描试验,取影响仿遗址土改良效果的典型电镜图片进行分析。图 7 所示为 0%、3%、5%浓度糯米浆试样的 1 000、5 000 倍 SEM 电镜照片。由图 7 可见:0%浓度的糯米浆试样内部孔隙较多、密实性差,且结构松散、颗粒间连接不紧密;3%浓度的糯米浆试样结构密实,土颗粒上碳酸钙晶体多,起到填充孔隙的作用,土颗粒间团聚胶结连接紧密;随

着糯米浆浓度的不断增加,当糯米浆浓度为5%时,过量糯米浆将会附着在土颗粒表面,造成土颗粒间的黏聚力降低。糯米浆可以优化土体的孔隙结构,提高密实度,表现出宏观力学性能增强的现象。

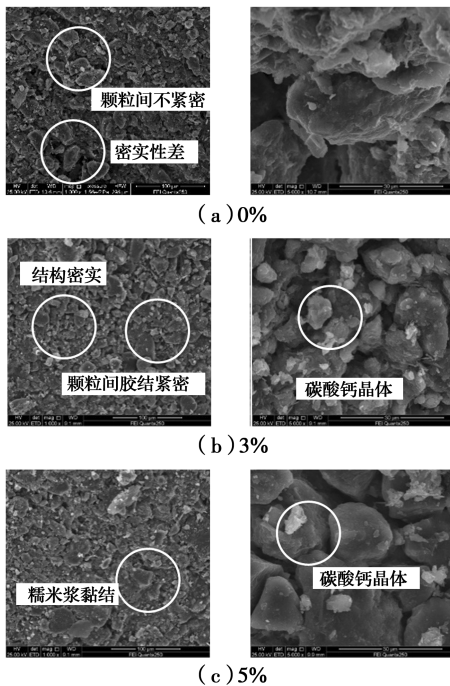


图7 不同浓度糯米浆试样 SEM 图片

Fig. 7 SEM pictures of glutinous rice slurry soil samples with different concentrations

2.5 色差对比分析

土遗址文物保护工作的基本原则是不改变文物的颜色,即“修旧如旧”,在视觉上土遗址修复前后色差变化不大。图8所示为烘干后的遗址土、周边土、仿遗址土、3%浓度糯米浆改良仿遗址土试样。由图8可见:从外观上来看,4个试样差异较小,人肉眼看不出明显色差。



图8 不同试样颜色对比

Fig. 8 Color comparison of different soil samples

为进一步了解土样色差变化大小是否符合土遗址修复标准,采用NR200色差分析仪对土样进行色差分析,将遗址土试样作为标样,同其他3组试样做对比分析,按式(1)进行总色差计算。

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2} \quad (1)$$

表6所示为试样色差分析结果。由表6可知:遗

址土、周边土、仿遗址土、3%浓度糯米浆改良仿遗址土总色差值 ΔE 均在1.0以内。采取仪器检测和人工结合的方法,糯米浆改良遗址土能否被选用,需反复核对糯米浆改良仿遗址土与遗址土间的颜色差异。

表6 土样色差分析结果

土样	ΔL	Δa	Δb	ΔE
周边土	-0.50	-0.16	-0.42	0.68
仿遗址土	0.11	-0.75	-0.19	0.79
改良仿遗址土	0.32	-0.64	-0.43	0.96

3 糯米浆作用下微生物矿化试验

3.1 微生物的活性研究

MICP技术是利用微生物诱导碳酸钙沉淀。采用的微生物为巴氏芽孢杆菌,培养基配方(普通菌液)为1 mL蒸馏水、0.5 g/L酵母粉、1 g/L蛋白胨、1 g/L氯化钠、1 g/L尿素;改良菌液配方为普通菌液培养基中加入3%浓度糯米浆,配制普通菌液(S1组)、3%浓度糯米浆改良菌液(S2组)两组菌液。对菌液进行OD600值检验,OD600值反映了细菌的浓度,细菌浓度越高,OD600值越大。经检测S1组OD=1.403,S2组OD=1.754,S2组比S1组高25%。说明糯米浆可以为细菌提供营养源,进而提高细菌的浓度。

3.2 MICP与糯米浆改良MICP对比分析

MICP技术的配方采用岳建伟等^[25]提出的最佳胶菌质量为2:1、0.5 mol/L胶结液浓度,其中2:1胶菌质量比是将6.4 g的0.5 mol/L胶结液与3.2 g菌液混合,0.5 mol/L胶结液是在1 L水中加入55.5 g CaCl_2 与30 g尿素。利用糯米浆对普通MICP技术进行改良,其中2:1改良胶菌质量比是将6.4 g的0.5 mol/L改良胶结液与3.2 g改良菌液混合,0.5 mol/L改良胶结液是在1 L的3%浓度糯米浆中加入55.5 g CaCl_2 与30 g尿素。

将普通MICP胶结液A1组与改良MICP胶结液A2组进行烘干,得到相应的固体物质,如图9所示。利用EDTA滴定法测量两组胶结液的钙离子浓度,得到A1组、A2组 CaCO_3 沉淀量分别为0.312、0.356 g,

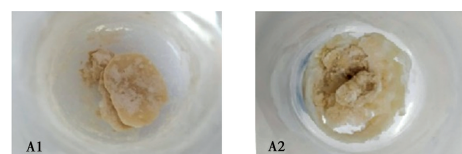


图9 烘干后的固体物质

Fig. 9 Residual solids after drying

相对于普通 MICP 组,改良 MICP 组 CaCO_3 沉淀量提高了 14.10%,且白色沉淀物更加黏稠,外表面多了一层浆体薄膜,具有一定韧性。

取 A1 组与 A2 组烘干后的固体物质(CaCO_3 沉淀、 CaCl_2 晶体、糯米浆、菌体)以及 CaCl_2 、 Na_2CO_3 反应完全烘干后产物 CaCO_3 颗粒进行 4 000、20 000 倍 SEM 电镜扫描,观察巴氏芽孢杆菌诱导 CaCO_3 沉淀后剩余固体物质的结构组成、形状等特征,如图 10 所示。由图 10 可见,A1 组含有少量 CaCO_3 沉淀以及大量的 CaCl_2 晶体,糯米浆改良 MICP 胶结液 A2 组生成的 CaCO_3 沉淀量更多、结构更密实。

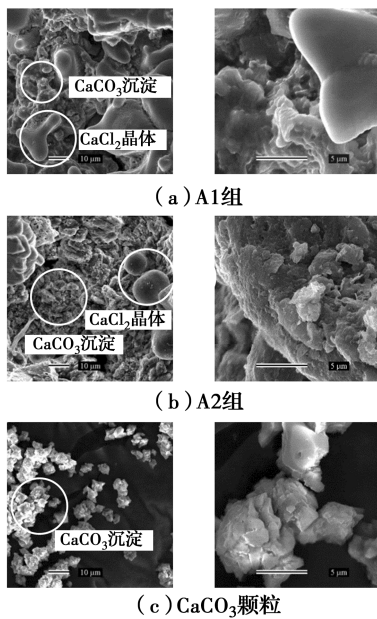


图 10 SEM 电镜扫描图

Fig. 10 SEM scanning diagrams

3.3 糯米浆对 MICP 土样力学试验研究

3.3.1 试样制备 直剪试验试样所需干土量为 112.32 g, MICP 试样掺加胶结液 10.99 g、菌液 5.49 g;改良 MICP 试样掺加胶结液 11.21 g、菌液 5.61 g。无侧限试验试样所需干土量为 161.35 g, MICP 试样掺加胶结液 18.47 g、菌液 9.24 g;改良 MICP 试样掺加胶结液 18.85 g、菌液 9.43 g。均匀拌和后制作的土样在养护 7、14、28 d 后进行力学性能试验。

3.3.2 直剪试验与无侧限抗压试验 图 11 所示为 MICP 试样与改良 MICP 试样在养护 7、14、28 d 下的剪切应力-应变曲线。由图 11 可见:相对于普通 MICP 试样,改良 MICP 试样的抗剪强度明显提高,且呈现出随养护时间延长抗剪强度增加的现象。当养护天数增长至 14~28 d 时, MICP 试样抗剪强度速率无明显变化,改良 MICP 试样抗剪强度仍有小幅度的增长。

图 12、图 13 所示分别为试样在不同养护天数下轴向应力-应变关系、无侧限抗压强度的变化规律。由图 12、图 13 可见:7~14 d 改良 MICP 试样无侧限抗压强度增速最快;随着养护天数的增加,14~28 d 改良 MICP 试样无侧限抗压强度增长率为 7.2%,MICP 试样为 4.0%。根据上述分析可知,仿遗址土中加入糯米浆可以提高其力学特性,且随着养护时间的延长,糯米浆持续发挥作用,生物矿化时间长。

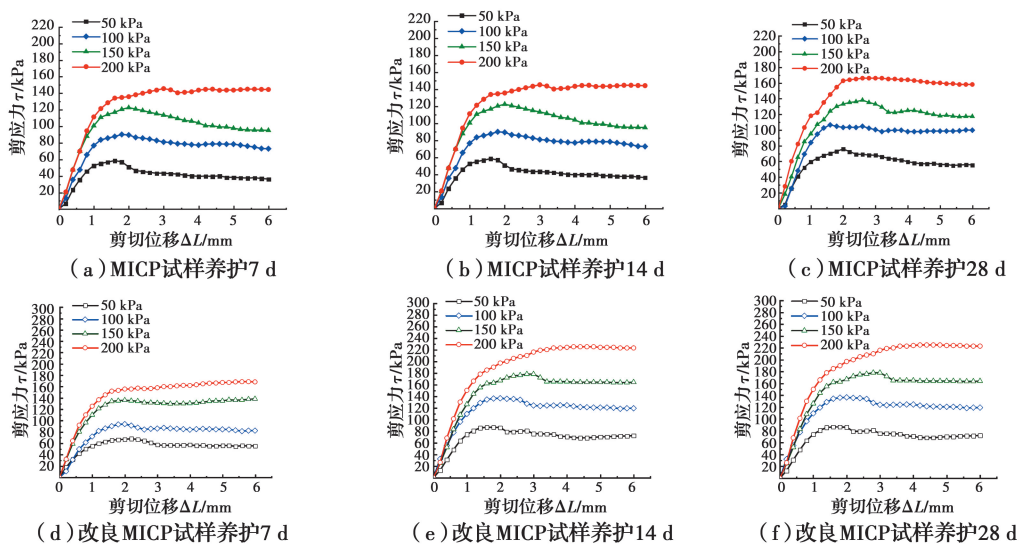


图 11 不同养护天数下试样垂向压力与剪切应力-应变关系

Fig. 11 Relationship between vertical pressure and shear stress-strain of soil samples under different curing days

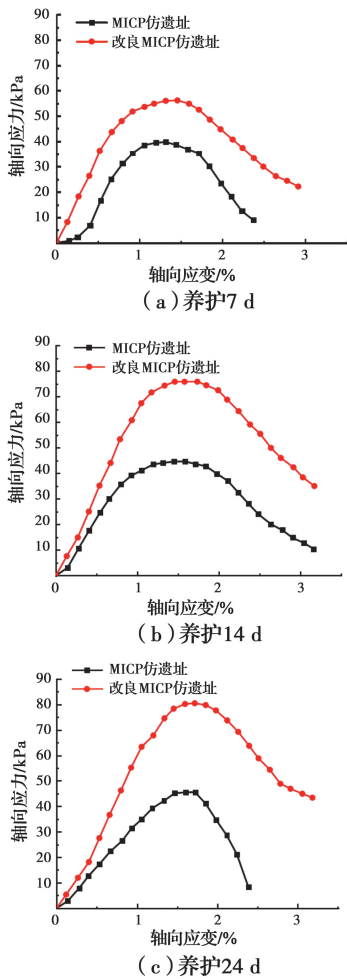


图 12 不同养护天数下试样轴向应力-应变关系变化规律

Fig. 12 Relationship between axial stress and strain of soil samples under different curing days

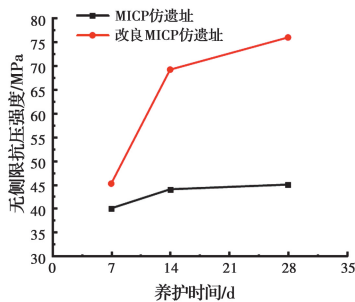


图 13 不同养护天数下试样无侧限抗压强度变化规律

Fig. 13 Variation of unconfined compressive strength of soil samples under different curing days

4 结论

以濮阳戚城土遗址为研究对象,掺加石英砂、氧化铝、氟化钙对周边土进行仿遗址土配制,并采用糯米浆对仿遗址土进行改良。研究 0%、1%、3%、5%、7%、9%糯米浆浓度下仿遗址土力学性能和微

观结构,探究土遗址添加糯米浆的科学道理及改良机理,得到以下结论:

1)糯米浆加入仿遗址土中,可有效改善土体的力学性能。随着糯米浆浓度的增加,土样的强度及内摩擦角先增大后减小,黏聚力呈线性递增趋势。其中,3%糯米浆浓度试样的抗剪强度、无侧限抗压强度与内摩擦角最大。

2)通过电镜试验分析可知,糯米浆浓度为 3%的试样结构密实,改良效果好。对试样进行色差分析,仿遗址土、3%浓度糯米浆仿遗址土与遗址土间的色差均较小,符合土遗址修复标准。

3)利用糯米浆对 MICP 技术进行改良,发现糯米浆可以提高细菌浓度,促进碳酸钙生成;改良 MICP 土样随着养护天数的增加,强度持续提高,说明糯米浆可以持续对土体发挥作用,生物矿化时间长。

参考文献:

- [1] 杨予川. 戚城古代夯土城墙的病害调查与保护对策研究[J]. 中原文物, 2008(1): 91-96.
YANG Y C. Disease investigation and protection countermeasures of ancient rammed earth wall of Qi City [J]. Cultural Relics of Central China, 2008(1): 91-96. (in Chinese)
- [2] 陈诗越, 强柳燕, 张凤菊, 等. 黄河下游地区垆堆遗址时空分布特征及其与黄河洪水关系[J]. 地理科学, 2020, 40(7): 1202-1209.
CHEN S Y, QIANG L Y, ZHANG F J, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of earthen fort ruins in the lower reaches of the Yellow River and their relations with floods[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(7): 1202-1209. (in Chinese)
- [3] ZENG Y Y, ZHANG B J, LIANG X L. A case study and mechanism investigation of typical mortars used on ancient architecture in China [J]. Thermochemica Acta, 2008, 473(1/2): 1-6.
- [4] 彭红涛, 张琪, 李乃胜, 等. 糯米浆对土遗址修复用三合土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 718-722.
PENG H T, ZHANG Q, LI N S, et al. Effect of sticky rice paste on properties of tabia used to repair ancient earthen ruins [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5): 718-722. (in Chinese)
- [5] YANG F W, ZHANG B J, MA Q L. Study of sticky rice-lime mortar technology for the restoration of

- historical masonry construction [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2010, 43(6): 936-944.
- [6] 贾栋钦, 裴向军, 张晓超, 等. 改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 90-96.
- JIA D Q, PEI X J, ZHANG X C, et al. A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 90-96. (in Chinese)
- [7] 湛文武, 张起勇, 刘宏伟, 等. 糯米浆温度对糯米灰浆加固遗址土的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(Sup2): 4244-4250.
- CHEN W W, ZHANG Q Y, LIU H W, et al. Influence of temperature on glutinous rice slurry strengthening site soil by sticky rice-lime mortar[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(Sup2): 4244-4250. (in Chinese)
- [8] 刘强, 刘勋, 裴重华. 糯米浆对仿生碳酸钙形貌的影响[J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(2): 443-449.
- LIU Q, LIU X, PEI C H. Effect of sticky rice slurry on the morphology of biomimetic calcium carbonate[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 43(2): 443-449. (in Chinese)
- [9] 范明明, 裴向军, 杜杰, 等. 改性糯米灰浆基本物理力学特性及微观结构试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(5): 1559-1565.
- FAN M M, PEI X J, DU J, et al. Experimental study on basic physical and mechanical properties and microstructure of modified glutinous rice mortar[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(5): 1559-1565. (in Chinese)
- [10] 吴学玲, 代沁芸, 梁任星, 等. 利用高效降解菌株强化修复土壤中DBP及其细菌群落动态解析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(5): 1188-1194.
- WU X L, DAI Q Y, LIANG R X, et al. Biodegradation of DBP contaminated soil by high-efficiency degrading strain and dynamics analysis of bacterial community [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(5): 1188-1194. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 吴超传, 郑俊杰, 赖汉江, 等. 微生物固化砂土强度增长机理及影响因素试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1): 31-38.
- WU C C, ZHENG J J, LAI H J, et al. Experimental study of the strength enhancing mechanism of bio-cemented sand and its influential factors [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1): 31-38. (in Chinese)
- [13] 陈鑫. 极端环境微生物在土壤板结治理中的应用[J]. *农业与技术*, 2018, 38(19): 22-24.
- CHEN X. Application of extreme environmental microorganisms in soil consolidation control [J]. *Agriculture and Technology*, 2018, 38(19): 22-24. (in Chinese)
- [14] LI L, XU M G, ALI M E, et al. Factors affecting soil microbial biomass and functional diversity with the application of organic amendments in three contrasting cropland soils during a field experiment [J]. *PLOS ONE*, 2018, 13(9): e0203812.
- [15] 黄磊, 杨永强, 李金洪. 生物矿化研究现状和展望[J]. *地质与资源*, 2009, 18(4): 317-320.
- HUANG L, YANG Y Q, LI J H. Review of the research on biomineralization [J]. *Geology and Resources*, 2009, 18(4): 317-320. (in Chinese)
- [16] 赵伟, 陈晨, 刘倩, 等. 利用 Minitab 优化耐高温淀粉酶发酵培养条件[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(5): 1652-1657.
- ZHAO W, CHEN C, LIU Q, et al. Optimization of medium for thermostable α -amylase fermentation using Minitab [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(5): 1652-1657. (in Chinese)
- [17] NAKADA T, KUBOTA M, SAKAI S, et al. Purification and characterization of two forms of maltotetraose-forming amylase from *Pseudomonas stutzeri* [J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1990, 54(3): 737-743.
- [18] 裴迪, 刘志明, 胡碧茹, 等. 巴氏芽孢杆菌矿化作用机理及应用研究进展[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2020, 47(6): 467-482.
- PEI D, LIU Z M, HU B R, et al. Progress on mineralization mechanism and application research of *sporosarcina pasteurii* [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 2020, 47(6): 467-482. (in Chinese)

- [19] 杨华山, 车玉君, 马小满. 中国传统糯米-石灰砂浆的原材料和结构[J]. 混凝土, 2015(1): 131-135.
YANG H S, CHE Y J, MA X M. Raw materials and structure of ancient glutinous rice-lime mortar in China [J]. Concrete, 2015(1): 131-135. (in Chinese)
- [20] 杨富巍, 张秉坚, 曾余瑶, 等. 传统糯米灰浆科学原理及其现代应用的探索性研究[J]. 故宫博物院院刊, 2008(5): 105-114.
YANG F W, ZHANG B J, ZENG Y Y, et al. Exploratory research on the scientific nature and application of traditional sticky rice mortar[J]. Palace Museum Journal, 2008(5): 105-114. (in Chinese)
- [21] 杨停, 贾冬英, 马浩然, 等. 糯米化学成分对米酒发酵及其品质影响的研究[J]. 食品科技, 2015, 40(5): 119-123.
YANG T, JIA D Y, MA H R, et al. Influence of chemical composition of glutinous rice on fermentation and quality of rice wine [J]. Food Science and Technology, 2015, 40(5): 119-123. (in Chinese)
- [22] 周颖, 钱海峰, 张晖. 糯米的化学成分与其米糕淀粉老化的关系研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(16): 136-139.
ZHOU Y, QIAN H F, ZHANG H. Chemical composition of the glutinous rice and their relationships to retrogradation properties of rice cake starch [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(16): 136-139. (in Chinese)
- [23] 魏国锋, 方世强, 张秉坚, 等. 传统糯米灰浆碳化过程中 Liesegang 环的形成机理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2181-2184.
WEI G F, FANG S Q, ZHANG B J, et al. Study on the mechanism of liesegang pattern development during carbonating of traditional sticky rice-lime mortar [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(8): 2181-2184. (in Chinese)
- [24] 胡悦, 魏国锋, 方世强, 等. 骨料种类对糯米灰浆性能的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(3): 134-140.
HU Y, WEI G F, FANG S Q, et al. Influence of aggregate type on the properties of traditional sticky rice-lime mortar [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(3): 134-140. (in Chinese)
- [25] 岳建伟, 张宝玺, 赵丽敏, 等. 改良 MICP 技术加固土体强度与养护天数的关系研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 707-716.
YUE J W, ZHANG B X, ZHAO L M, et al. Study on the relationship between soil strength and maintenance days by improved MICP technology [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2020, 50(6): 707-716. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)