

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.119



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



生物酶辅助氧化镁碳化过程砂土加固试验研究

何稼, 屈思源, 杭磊, 黄安国

(河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210024)

摘要: 基于微生物或酶诱导碳酸盐沉积(即 MICP 和 EICP)过程的固土技术具备固化强度高、环境友好等特点,但是目前也存在处理效率低、耗时长等局限。为克服这些局限,研究一种新型高效的生物固土技术,即基于植物脲酶辅助氧化镁碳化(酶辅助碳化)过程的固土法,探索其处理方法、效果和作用机理,并与单纯的氧化镁碳化、EICP 和水泥等方法进行比较。结果表明,采用酶辅助碳化加固法时,一遍处理强度可达 0.92 MPa,且试样的强度显著高于单纯氧化镁处理(0.30 MPa)、EICP 处理(0.28 MPa)和水泥处理(0.69 MPa)。酶辅助碳化加固法处理试样的制备方式对强度影响较大。与注入法相比,采用拌和法处理的试样强度高出了 3 倍。此外,添加少量脱脂奶粉后,酶辅助碳化加固法处理试样的强度进一步提升了约 70%,达到 1.30 MPa。通过微观结构和矿物成分分析发现,酶辅助碳化处理后,固化物填满了砂颗粒之间的孔隙,将砂颗粒结合在一起,形成稳定网格空间结构,与不添加脲酶的试样相比,其中的水合碳酸镁混合物含量较高,中间产物水镁石含量较低。

关键词: 生物酶;氧化镁;碳化;固化土;脲酶辅助氧化镁碳化

中图分类号: TU472.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0101-08

Experimental study on enzyme enhanced magnesia carbonation process for soil stabilization

HE Jia, QU Siyuan, HANG Lei, HUANG Anguo

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, P. R. China)

Abstract: The soil solidification technology based on microbial- or enzyme-induced carbonate precipitation process has the characteristics of high strength and environmental friendliness. However, it has limitations such as low treatment efficiency and time-consuming. This paper studies the treatment method, effect and mechanism of another biological soil solidification technology based on the urease-enhanced magnesia carbonation process. Comparisons were made against pure magnesia carbonation, enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP) and Portland cement. The results show that when the urease-enhanced magnesia carbonation treatment method is used, a higher strength (0.92 MPa) can be obtained after one treatment, and the strength of the sample is significantly higher than that of the samples treated with pure magnesia (0.30 MPa), EICP (0.28 MPa) or Portland cement (0.69 MPa). The preparation method of the urease-enhanced

收稿日期: 2023-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(52078188、51978244、2022M720999)

作者简介: 何稼(1982-),男,副教授,主要从事生物岩土技术、地基处理新技术研究,E-mail:hejiahhu@163.com。

Received: 2023-07-19

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos.52078188, 51978244, 2022M720999)

Author brief: HE Jia (1982-), associate professor, main research interests: bio-geotechnical technology and new technology of foundation treatment, E-mail: hejiahhu@163.com.

magnesia carbonization treatment sample also has great influence on the strength. Compared with the one-phase injection method, the strength of the sample treated by the pre-mixed method was 3 times higher. In addition, the strength of the urease-enhanced magnesia carbonization treatment sample was further improved by about 70%, and the highest strength reached 1.30 MPa, with the addition of small amount of non-fat milk powder. Through microstructural and mineralogical analysis, it was found that after urease-enhanced magnesia carbonization treatment, the solidified materials filled the pores between the sand particles, cemented the sand particles together, and formed a stable spatial structure. It could also be seen that soil treatment by urease-enhanced magnesia carbonization led to higher hydrated magnesium carbonates content, and lower brucite content.

Keywords: enzyme; magnesia; carbonization; solidified soil; urease-enhanced magnesia carbonization

在岩土工程领域,许多研究者探索将生物反应的过程和产物加以控制、加强和利用,来解决岩土工程相关问题,包括基于微生物诱导和酶诱导的碳酸盐沉积过程用于土体固化,利用生物膜进行土体防渗,以及利用生物气泡来进行土体抗液化处理等^[1]。在这些研究中,微生物诱导和酶诱导的碳酸盐沉积过程(即 MICP 和 EICP 过程)用于土体固化,受到了众多关注,并将其用于解决地基加固处理、防风固沙、土壤污染物固定等岩土问题^[1-3]。基于 MICP 和 EICP 过程的土体固化法有许多优点,包括处理过程可控且对地基土扰动小,处理后土体强度高、力学性能改善明显等。然而,这一方法也存在着一些局限,例如:处理效率低,需要进行多遍处理才能获得较高的土体强度,处理后固化物均匀性存在问题等。

为了克服这些缺点和局限,众多学者提出了不同解决方法和改进技术。最常见的方法包括往处理材料中加入某些外加剂和添加物,如海藻酸钠、脱脂奶粉、纤维等,使得处理土体的强度得到显著提升,并减少处理遍数^[4-6]。为了解决处理土体中固化物不均匀的问题,有学者提出了可以降低处理材料的酸碱度或温度,延缓反应发生,由此扩大处理范围并使得生成的固化物更加均匀^[7]。

氧化镁作为一种新型胶凝材料可用于固化土和混凝土的生产^[8]。它主要是利用氧化镁的碳化来加固土体,并可以带来固定二氧化碳的生态效益^[9-10]。氧化镁的碳化过程通常从水化开始,形成水镁石($Mg(OH)_2$),然后进一步与二氧化碳反应,产生水合碳酸镁混合物(Hydrated Magnesium Carbonates, HMCs),包括三水菱镁矿($MgCO_3 \cdot 3H_2O$)、水菱镁矿($4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 4H_2O$)、球碳镁石($4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 5H_2O$)、纤菱镁矿($4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 24H_2O$)等^[11]。将氧化镁用于制备固化土,主要的局限是氧化镁碳化过程中碳源

的供给^[12]。气体二氧化碳可用于加速氧化镁碳化,但是对于施工现场原位大方量的固化土,利用气体二氧化碳较困难。因此,近年来一些学者提出了将微生物诱导尿素水解过程与氧化镁碳化结合,以尿素水解过程提供碳源,促进氧化镁的碳化^[11, 13-15]。从最近的研究结果看,这一方法具备固化土体强度高、一次成型、适应性广等优点。

研究表明,微生物辅助氧化镁碳化过程可用于土体固化^[11, 13-15], Yang 等^[11]研究发现,在 8% 氧化镁掺量和 6 mol/L 尿素浓度下,养护 28 d 的强度最高可达 2.3 MPa。WANG 等^[13]采用该方法在水下环境中养护,最高强度可达 1 MPa。除了活性微生物水解尿素,另一种提取碳源的方式是利用植物脲酶来催化水解尿素,水解反应产生的碳酸根,可以为氧化镁碳化提供碳源,见图 1,这一方法可以避免复杂的微生物培养和环境风险。然而,其中也有许多问题有待解决,包括:尚未有试验证明是否可以用植物脲酶来促进加速氧化镁碳化;基于生物辅助的氧化镁碳化固土,其处理方式能否如 MICP 和 EICP 法一样进行灌注处理;与其他类似的固土方法,如单纯氧化镁、EICP 法、水泥基材料等方法相比,微生物或脲酶辅助氧化镁碳化固土的效果如何等。

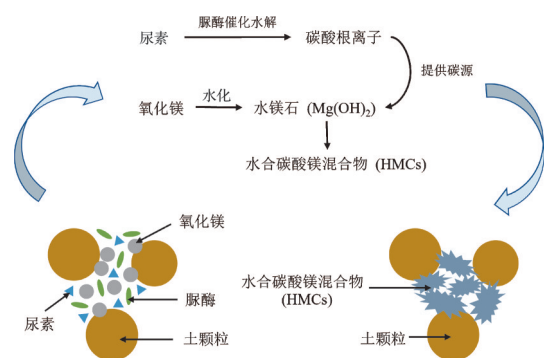


图 1 酶辅助碳化原理图

Fig. 1 Schematic diagram of enzyme assisted carbonization

笔者将基于植物脲酶辅助氧化镁碳化(简称酶辅助碳化)过程,开展固化土制备、强度测试、微观结构和矿物成分分析等试验,研究材料配比、制备方式、龄期等对固化效果的影响,并与单纯氧化镁、EICP法、水泥等固化方法进行比较分析。

1 材料与方法

1.1 材料

试验用土为厦门标准砂,基本性质见表 1,粒径分布曲线见图 2,其主要成分为二氧化硅。轻质氧化镁、尿素、氯化钙均购自国药集团化学试剂有限公司,利用柠檬酸中和法测得氧化镁的活性值为 18 s,利用水合法测得氧化镁活性分数为 95%,属于高活性氧化镁。脱脂奶粉购自 Scientific Phygene,为试验专用型号 PH1519。水泥采用 42.5 级普通硅酸盐水泥。试验用大豆产自黑龙江省,用于提取粗脲酶。

表 1 土样性质
Table 1 Soil properties

试验用土	G_s	ρ_{max}	ρ_{min}
厦门标准砂	2.65	1.937	1.555

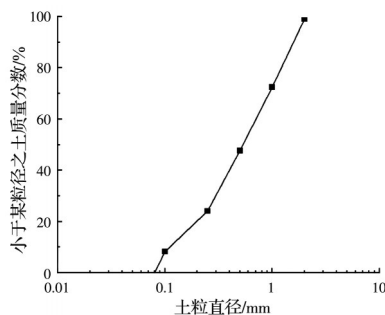


图 2 粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve

1.2 植物脲酶提取

将干燥的大豆放于研磨机中粉碎成粉末,并通过 0.25 mm 孔径筛网过筛。将过筛后的大豆粉以 60 g/L 的浓度加入去离子水中,使用磁力搅拌器搅拌 20 min 获得均匀豆粉悬浮液。将豆粉悬浮液在 4 °C、4 000 r/min 条件下离心 15 min。离心后用 0.075 mm 孔径筛网过滤掉不溶性物质,得到大豆粗脲酶溶液。经电导率法^[16]测定,所用大豆脲酶水解尿素的活性在 25 °C 室温环境下约为 8.6 mmol/(L·min)。这一脲酶提取方法,参考了以往的研究经验,被证明可有效地水解尿素并参与进行 EICP 土体处理^[16-19]。

1.3 固化土样制备

土样制样模具见图 3,采用圆柱形有机亚克力

板模具,内径为 50 mm,高为 120 mm,底座中间开密集小孔,在模具底部放置 300 目纱布,防止砂粒从小孔中漏出。使用该模具来制作直径为 50 mm、高为 100 mm 的砂柱试样。

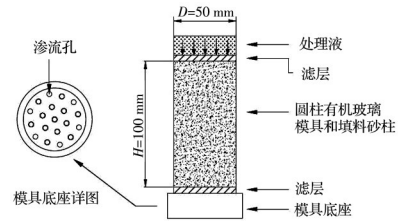


图 3 制样模具示意图

Fig. 3 Sand column test mold

试样制备采用拌和法和注入法两种不同的处理砂样方法,如图 4 所示。采用注入法处理试样时,先将标准砂与 8% 氧化镁粉末混合,装入模具中达到 1.80 g/cm³ 的干密度,再以 2 mL/min 速率一次性灌入 70 mL 不同盐浓度的尿素与大豆粗脲酶 1:1 混合液制样,使砂柱试样的含水率达到 20%。采用拌和法处理试样时,将标准砂与 8% 氧化镁粉末混合后,加入 70 mL 处理混合液,充分搅拌均匀后再装入模具中。将砂样表面平整后,在上面放置 300 目纱布。将处理后的试样在室温中养护至指定龄期后拆模,将取出的砂柱试样用去离子水浸泡 24 h 以达到饱和状态,同时起到去除砂柱试样中残留未反应物的作用。每组试样制备 3 个,保证结果的可重复性。制备对照组 C2~C3 时,不添加氧化镁,分别采用与上述相同的拌和法和注入法加入 EICP 处理液。制备对照组 C1 时,将标准砂与 8% 氧化镁粉末混合后,加入 70 mL 去离子水搅拌均匀后装入模具;制备对照组 C4 时,采用与 C1 相同的方法,将 8% 氧化镁粉末换成 8% 水泥,水灰比为 2.5。

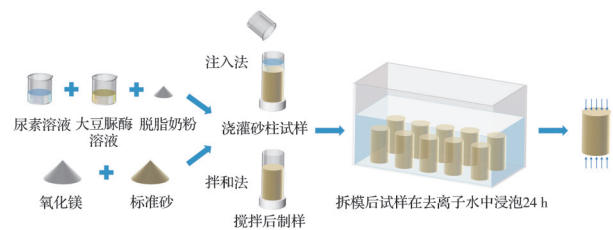


图 4 砂样处理流程图

Fig. 4 Schematic diagram of sample preparation and testing process

1.4 固化土样测试

将砂柱试样浸泡 24 h 后取出,在饱和的状态下进行无侧限抗压强度测试,加载速率为 2 mm/min。对试样进行扫描电镜分析,扫描电镜的型号为日立 Regulus8100。XRD 矿物成分分析的仪器型号为布鲁克 D8 advance。

1.5 试验方案

试验研究方案见表2。S1~S4为4组酶辅助碳化固化试样,用拌和法进行处理。氧化镁的含量为8%,尿素的含量分别为2.58%、7.75%,参考以往研究结果,S3和S4组中加入了0.10%的脱脂奶粉

粉,研究能否进一步提高强度,此外还考虑了龄期的影响。S5~S8为4组注入法处理的试样,配比成分与S1~S4组相同。C1~C4为4组对照组,C1、C2~C3、C4组固化方式分别为单纯氧化镁碳化、EICP法和水泥固化。

表2 试验方案

Table 2 Test programme

试验编号	固化材料	处理方法	氧化镁/%	豆粉/%	尿素/%	氯化钙/%	水泥/%	脱脂奶粉/%	龄期/d
S1	A	拌和法	8	0.6	2.58				3,28
S2	A	拌和法	8	0.6	7.75				3,28
S3	A	拌和法	8	0.6	2.58			0.10	3,28
S4	A	拌和法	8	0.6	7.75			0.10	3,28
S5	A	注入法	8	0.6	2.58				3
S6	A	注入法	8	0.6	7.75				3
S7	A	注入法	8	0.6	2.58			0.10	3
S8	A	注入法	8	0.6	7.75			0.10	3
C1	B	拌和法	8						3
C2	C	拌和法		0.6	2.58	4.77			3
C3	C	注入法		0.6	2.58	4.77			3
C4	D	拌和法					8		3

注:A表示酶辅助碳化;B表示氧化镁碳化;C表示EICP法;D表示水泥固化;表中比例以干土质量为基准。

2 结果与分析

2.1 强度

不同固化材料处理的试样强度见图5。当采用酶辅助碳化加固法时,试样的强度显著高于单纯氧化镁、EICP和水泥处理的试样。在S1~S4四组酶辅助碳化处理试样中,尿素浓度的影响不显著,2、6 mol/L的尿素浓度试样强度相差不大。另外,当添加了少量脱脂奶粉后,S3组试样的强度得到明显提高,相较于没有添加脱脂奶粉提高了约70%,达到了1.3 MPa。这一试验结果说明,添加脱脂奶粉后,可以在仅2 mol/L较低的尿素浓度条件下,使用酶辅助碳化加固法获得较高的强度,这是由于脱脂奶粉中的酪蛋白可以起到稳定脲酶^[4]、提供成核位点的作用。而Yang^[11]等使用6 mol/L的尿素浓度,养护3 d后的强度为0.6 MPa左右;Wang等^[13]同样使用6 mol/L的尿素浓度,在水中养护7 d后试样的强度为1.0 MPa左右。其原因可能是这些学者都使用了活性微生物作为尿素水解媒介,这与笔者使用的植物脲酶有所不同。相关研究表明,处理溶液中的盐浓度会通过影响脲酶活性来影响EICP技术的固化效果,高盐浓度溶液产生的高渗透压会抑制脲酶活性^[20-22]。相对于大豆脲酶来说,6 mol/L的尿素浓度和高掺量的氧化镁可能形成过高的盐碱环境,抑制了大豆脲酶的活性,导致砂柱试样处理后的强度提升效果不明显。

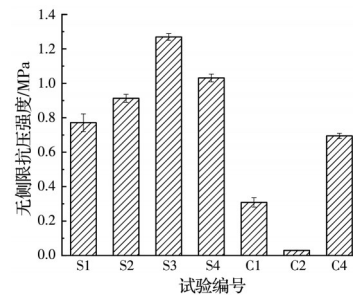


图5 不同固化材料处理的试样强度

Fig. 5 Strength of samples treated with different materials

当采用拌和法和注入法两种不同的处理方法处理砂样时,酶辅助碳化和EICP处理的试样强度结果相反,如图6所示。在饱和条件下,采用拌和法的EICP技术所得强度值比注入法低很多。这可能由于EICP法处理试样的材料处于溶液状态,采用注入法时,溶液中的溶质更容易与土颗粒表面接触,并使得反应更加充分,而拌和制样中溶质主要存在于空隙间,无法与土颗粒表面充分接触和吸附。酶辅助碳化处理的试样的试验结果恰恰相反,采用拌和法时强度要高于注入法处理试样3倍。当采用注入法时,活性氧化镁极易水化并生成碱性膨胀物^[14],灌入处理液时,试样上端氧化镁水化膨胀,导致处理液较难进一步下渗,碳化反应不充分,破坏形式多为砂柱试样中下端开裂破坏。且导致脱脂奶粉未能在试样内部充分参与反应过程,未能对强度起到提高作用。而采用拌和法时,氧化镁具有

比表面积大、孔结构丰富、吸附能力强的特点,氧化镁颗粒以及酶液和尿素沉积吸附于土颗粒的表面,使得反应更充分和有效。

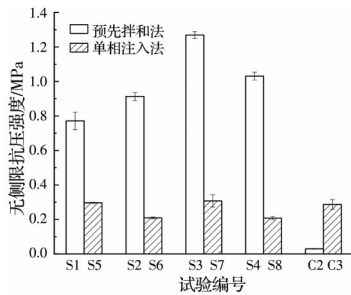


图 6 不同处理方法处理的试样强度

Fig. 6 Strength of samples treated by different treatment methods

使用酶辅助碳化加固法时,龄期对试样强度的影响不大,如图 7 所示。特别是添加脱脂奶粉后,28 d 龄期的强度和 3 d 龄期的强度相差不大。而 Yang 等^[11]使用微生物辅助氧化镁碳化处理技术试验得出,28 d 时试样的强度相较于 3 d 时试样的强度提高 283% 左右。这一差别可能与不同的脲酶来源有关,在 EICP 和 MICP 反应中,EICP 比 MICP 诱导生成的碳酸钙速率更快,达到碳酸钙生成量稳定所需的时间更短^[23]。Almajed 等^[4]在 EICP 中添加脱脂奶粉发现,3 d 后 EICP 反应几乎完成。而笔者采用酶辅助碳化加固法,同时添加脱脂奶粉,3 d 时反应几乎完成,对砂柱试样饱和状态下的强度提高影响不大。所以,28 d 龄期的强度和 3 d 龄期的强度相差不大,这一试验结果与采用微生物辅助氧化镁碳化处理技术的试验结果不同。

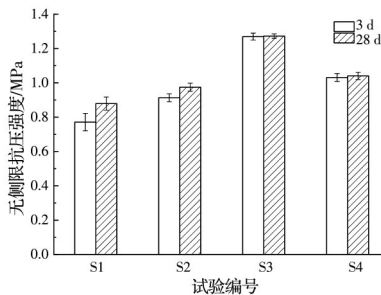


图 7 龄期对试样强度的影响

Fig. 7 Effect of curing ages on sample strengths

2.2 微观结构

固化体的强度与碳酸盐在土体中的分布和胶结作用形式有关^[24],根据碳酸盐与土颗粒之间的关系,可以将其胶结作用形式分为覆膜、黏结、桥接 3 类,其中土体结构性和强度的提高主要依靠发挥黏结作用和桥接作用的碳酸盐^[25]。

通过 SEM 扫描电镜图像(图 8)分析,在仅添加氧化镁的试样中,只能观察到固化物呈现松散的团

簇状特征,主要起到覆膜的胶结作用,对土体强度的提高作用不大。因此,纯氧化镁试样的强度较低,具有延性破坏的特征^[13]。酶辅助碳化加固法处理后,固化体充满了砂颗粒之间的孔隙,将砂颗粒结合在一起,起到了黏结作用和桥接作用,形成稳定网格空间结构,这有利于提高土体的稳定性和强度^[26-28]。而经 EICP 处理后的试样,砂颗粒间主要是以碳酸钙起到胶结作用,较为松散,胶结作用不大,导致饱和状态下的砂柱试样强度很低。采用水泥固化剂处理技术处理后的胶结产物以钙矾石为主^[29],试样砂颗粒之间会存在一定的孔隙,导致试样强度不及脲酶辅助氧化镁碳化处理试样。可能的原因是氧化镁的密度(3.58 g/cm³)高于水镁石(2.36 g/cm³)和 HMCs(1.69~2.25 g/cm³)^[30],氧化镁颗粒在水解碳化过程中体积增大,充分填充了砂

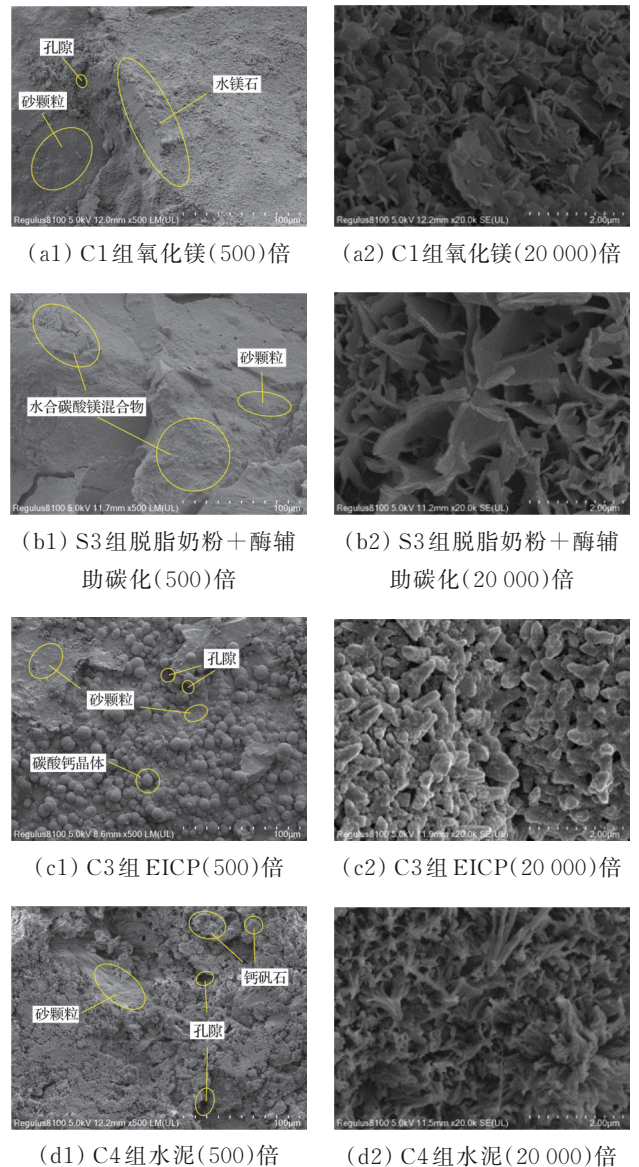


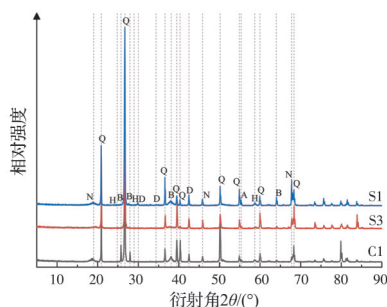
图 8 SEM 扫描电镜图像

Fig. 8 SEM scanning electron microscopy images

颗粒之间的孔隙^[31],更好地起到黏结作用和桥接作用,从而提高了土体结构完整性和整体强度。

2.3 矿物分析

对反应 3 d 后的酶辅助碳化试样(S1 和 S3)以及纯氧化镁碳化试样(C1)进行 XRD 成分分析,结果如图 9 所示。根据定性分析结果,各试样中均有水合碳酸镁混合物,包括三水菱镁矿、水菱镁矿、球碳镁石、纤菱镁矿等,同时还存在未反应完全的中间产物水镁石,而水镁石的强度没有水合碳酸镁混合物的强度高^[32]。其中单纯使用氧化镁处理的试样 C1 强度不高,可能由于中间产物水镁石含量较高,水合碳酸镁混合物含量偏低;而将生物酶与氧化镁碳化技术结合处理的试样 S1 与 S3 强度较高,特别是添加了脱脂奶粉的试样 S3 差别更加明显,这可能由于水合碳酸镁混合物含量有所提高,而水镁石的含量较试样 C1 偏低。此外,处理后试样的强度不仅在于水合碳酸镁混合物的总量,还在于其形态^[33],水菱镁矿相较于三水菱镁矿的强度提升效果更好^[11, 32]。添加脱脂奶粉后的试样 S3 相较于未添加脱脂奶粉的试样 S1 强度更高,这可能由于试样 S3 相较于试样 S1 的水菱镁矿含量较高、三水菱镁矿含量较低。



注:Q 为石英 SiO_2 ;B 为水镁石 $\text{Mg}(\text{OH})_2$;N 为三水菱镁矿 $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$;H 为水菱镁矿 $4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$;D 为球碳镁石 $4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$;A 为纤菱镁矿 $4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$

图 9 XRD 矿物分析

Fig. 9 XRD mineralogical analysis

3 结论

基于酶辅助碳化过程,进行土体固化试验研究,并与单纯氧化镁、EICP 法、水泥等固化法进行比较分析。主要结论如下:

1) 采用酶辅助碳化加固法时,试样的强度显著高于单纯氧化镁、EICP 和水泥处理的试样。在酶辅助碳化处理试样中,尿素浓度的影响不显著,2、6 mol/L 的尿素浓度试样强度相差不大。另外,当添加了少量脱脂奶粉后,酶辅助碳化处理试样的强度

得到进一步提高,其中最高的强度达到了 1.3 MPa。

2) 酶辅助碳化处理试样的制备方式对强度影响很大。相比于注入法,采用拌和法处理的试样强度高出了 3 倍。使用酶辅助碳化加固法时,3、28 d 龄期的试样强度相差不大。

3) 酶辅助碳化加固法处理后,固化体填满了砂颗粒之间的孔隙,将砂颗粒结合在一起,起到了黏结作用和桥接作用,形成稳定网格空间结构,而其他固化剂处理的试样固化物较松散或存在较大孔隙;且相比于不添加脲酶的试样,其中的水合碳酸镁混合物含量较高,中间产物水镁石含量较低,这与强度测试结果是一致的。

参考文献

- [1] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 643-653.
HE J, CHU J, LIU H L, et al. Research advances in biogeotechnologies [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 643-653. (in Chinese)
- [2] HE J, YANG F, QI Y S, et al. Improvement in silty sand with enzyme-induced carbonate precipitation: Laboratory model experiment [J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(7): 2895-2905.
- [3] MENG H, GAO Y F, HE J, et al. Microbially induced carbonate precipitation for wind erosion control of desert soil: Field-scale tests [J]. Geoderma, 2021, 383: 114723.
- [4] ALMAJED A, TIRKOLAEI H K, KAVAZANJIAN E, et al. Enzyme induced biocementated sand with high strength at low carbonate content [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 1135.
- [5] WEN K J, LI Y, HUANG W, et al. Mechanical behaviors of hydrogel-impregnated sand [J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 174-180.
- [6] ALMAJED A, KHODADADI H, KAVAZANJIAN E Jr. Sisal fiber reinforcement of EICP-treated soil [C]// IFCEE 2018. Orlando, Florida. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2018: 29-36.
- [7] CUI M J, LAI H J, HOANG T, et al. One-phase-low-pH enzyme induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(2): 481-489.
- [8] 曹菁菁, 刘松玉. 活性氧化镁水泥碳化加固软土地基研究进展 [J]. 江苏建筑, 2014(6): 40-45.
CAO J J, LIU S Y. Advances of research on the reactive magnesia stabilizing soft soil foundation based on carbonation [J]. Jiangsu Construction, 2014(6): 40-45. (in Chinese)
- [9] UNLUER C, AL-TABBAA A. Impact of hydrated

- magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 54: 87-97.
- [10] VANDEPERRE L J, LISKA M, AL-TABBAA A. Hydration and mechanical properties of magnesia, pulverized fuel ash, and Portland cement blends [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, 20(5): 375-383.
- [11] YANG Y, RUAN S Q, WU S F, et al. Biocarbonation of reactive magnesia for soil improvement [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(4): 1113-1125.
- [12] DUNG N T, HOANG T, YANG E H, et al. New frontiers in sustainable cements: Improving the performance of carbonated reactive MgO concrete via microbial carbonation process [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 356: 129243.
- [13] WANG D L, TANG C S, PAN X H, et al. Construction and demolition waste stabilization through a bio-carbonation of reactive magnesia cement for underwater engineering [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 335: 127458.
- [14] 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)
- [15] 陈哲, 方祥位, 刘汉龙, 等. 氧化镁掺量对氧化镁微生物固化解锰废渣影响研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(Sup2): 3687-3695.
CHEN Z, FANG X W, LIU H L, et al. Influence of MgO content on solidified electrolytic manganese residue with MgO and microbe [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(Sup2): 3687-3695. (in Chinese)
- [16] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [17] SHU S A, YAN B Y, GE B, et al. Factors affecting soybean crude urease extraction and biocementation via enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) for soil improvement [J]. *Energies*, 2022, 15(15): 5566.
- [18] WHIFFIN V S. Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement [D]. Perth: Murdoch University, 2004.
- [19] GAO Y F, HE J, TANG X Y, et al. Calcium carbonate precipitation catalyzed by soybean urease as an improvement method for fine-grained soil [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(5): 1631-1637.
- [20] 吴林玉, 缪林昌, 孙潇昊, 等. 植物源脲酶诱导碳酸钙固化砂土试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(4): 714-720.
WU L Y, MIAO L C, SUN X H, et al. Experimental study on sand solidification using plant-derived urease-induced calcium carbonate precipitation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(4): 714-720. (in Chinese)
- [21] FRANKENBERGER W T, BINGHAM F T. Influence of salinity on soil enzyme activities [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(6): 1173-1177.
- [22] BENNION B J, DAGGETT V. The molecular basis for the chemical denaturation of proteins by urea [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(9): 5142-5147.
- [23] WEN K J, LI Y, AMINI F, et al. Impact of bacteria and urease concentration on precipitation kinetics and crystal morphology of calcium carbonate [J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(1): 17-27.
- [24] LIN H, SULEIMAN M T, BROWN D G. Investigation of pore-scale CaCO₃ distributions and their effects on stiffness and permeability of sands treated by microbially induced carbonate precipitation (MICP) [J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(4): 944-961.
- [25] 张茜, 叶为民, 刘樟荣, 等. 基于生物诱导碳酸钙沉淀的土体固化研究进展 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(2): 345-357.
ZHANG Q, YE W M, LIU Z R, et al. Advances in soil cementation by biologically induced calcium carbonate precipitation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 345-357. (in Chinese)
- [26] IVANOV V, CHU J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2008, 7(2): 139-153.
- [27] ZHANG H N, SHEN C, XI P S, et al. Study on effect of the activated magnesia carbonized building blocks based on the content of fly ash [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 185: 609-616.
- [28] KUMAR S, YANG E H, UNLUER C. Investigation of chloride penetration in carbonated reactive magnesia cement mixes exposed to cyclic wetting-drying [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 284: 122837.
- [29] HARRISON A J W, FCPA B S B E. TecEco cement

- concretes-abatement, sequestration and waste utilization in the built environment [C]//Proceedings of the TecEco Pty Ltd Conference, 2006.
- [30] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1569-1581.
- QIAN J S, YU J C, SUN H Q, et al. Formation and function of ettringite in cement hydrates [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(11): 1569-1581. (in Chinese)
- [31] YI Y L, LU K W, LIU S Y, et al. Property changes of reactive magnesia-stabilized soil subjected to forced carbonation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(2): 314-325.
- [32] HARRISON A J W, FCPA B S B E. TecEco eco-cement masonry product update-Carbonation Sequestration [C]// Proceedings of the 10th Canadian Masonry Conference Banff, Alberta, Canada, F, 2005.
- [33] DE SILVA P, BUCEA L, SIRIVIVATNANON V. Chemical, microstructural and strength development of calcium and magnesium carbonate binders [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(5): 460-465.

(编辑 胡玲)