

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210515001

微生物矿化作用(MICP)-铺砂联合提高黄土抗侵蚀性试验研究*

程瑶佳, 唐朝生, 泮晓华, 刘 博

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 采用微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)-铺砂联合技术对黄土进行改性, 通过开展降雨冲刷实验对其提高黄土抗侵蚀特性的可行性进行了验证。结合微型贯入和碳酸钙含量测定试验, 进一步阐明了MICP-铺砂提高黄土抗侵蚀特性的作用机理。结果表明: (1) 纯MICP处理能提高黄土抗侵蚀性, 而MICP-铺砂联合技术相比纯MICP处理能更进一步提高黄土抗侵蚀性。未经MICP处理的土体在降雨条件下发生大面积侵蚀的时间最早, 其次为纯MICP处理的土体, 而MICP-铺砂联合处理的土体仅表面部分土体发生侵蚀, 其它部分较为完整。(2) MICP-铺砂联合改性机理是通过微生物砂防护层的高强度和被防护边坡黄土硬化壳的低渗透性有机结合, 发挥砂防护层抗雨滴击溅和径流冲刷以及黄土硬化壳减渗的共同作用, 从而提高黄土的抗侵蚀能力。(3) 纯MICP处理和MICP-铺砂联合处理土体流出液的化学指标值相差不大。(4) 纯MICP处理和MICP-铺砂联合处理土体的结构强度远高于未经处理的土体。(5) 纯MICP处理和MICP-铺砂联合处理土体的碳酸钙含量均呈现随深度增加而逐渐降低的趋势, 二者的平均碳酸钙含量相差不大。

关键词: MICP; 铺砂; 黄土; 抗侵蚀性; 结构强度; 碳酸钙含量

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1010-09

Experimental Study on Erosion Resistance Improvement in Loess through Coupled Microbial Mineralization (MICP)-sand Paving

CHENG Yaojia, TANG Chaosheng, PAN Xiaohua, LIU Bo

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: China is one of the countries with the most serious soil erosion disasters, especially in the Loess Plateau region in the upper and middle reaches of the Yellow River. Improving the erosion resistance of loess is the key and effective way to reduce soil erosion. In this study, the microbial induced calcium carbonate deposition (MICP)-sand paving technology was used to modify the loess, and the feasibility of improving the erosion resistance of the loess was verified by rainfall erosion experiments. Combined with mini-penetration and calcium carbonate content determination tests, the mechanism of MICP-sand paving for improving the anti-erosion properties of loess was further clarified. The results show that: (1) Pure MICP treatment can improve the erosion resistance of loess, and the MICP-sand paving technology can further improve the erosion resistance of loess compared to pure MCP treatment. The soil without MICP treatment has the earliest time of large-area erosion under the rainfall condition, followed by the soil treated with pure MICP, while the soil treated by MICP-sand paving

* 收稿日期: 2021-05-15; 修回日期: 2021-06-23

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(41925012)、国家自然科学基金项目(41772280, 41902271)、国家重点研发计划课题(2019YFC1509902)、中央高校基本科研业务费专项资金(2022—2024)资助

作者简介: 程瑶佳(1998—), 女, 硕士研究生。主要从事微生物地质工程方面的研究工作。E-mail: chengyaojia@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 唐朝生(1980—), 男, 教授, 博士。主要从事环境岩土工程和工程地质方面的教学和研究工作。

E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn

is only eroded on the soil surface and the other parts are relatively intact. (2) The combined modification mechanism of MICP-sand paving is to combine the high strength of the microbial sand protective layer with the low permeability of the loess hard crust of the protected slope. The sand protective layer resists raindrop splash and runoff erosion and the loess hard crust reduces permeability, thereby improving the erosion resistance of loess. (3) The chemical index values of the effluent are not much different from the soil treated with pure MICP and MICP-sand paving treatment. (4) The structure strength of the soil treated with pure MICP and MICP-sand paving is much higher than that of untreated soils. (5) In the soil treated with pure MICP and MICP-sand paving, the calcium carbonate content shows a trend of decreasing as the depth increases, and the average calcium carbonate contents of them are not much different.

Keywords: MICP; sand paving; loess; erosion resistance; structure strength; calcium carbonate content

引言

黄土在世界范围内分布广泛,大约覆盖全世界土地面积的10%^[1-2]。黄土的实质是在第四纪期间,以风力搬运的黄色粉土沉积物。由于黄土具有湿陷性,透水性大,强度低,分散性大和压缩性高等不良工程地质性质,极易发生水土流失、滑坡和崩塌等地质灾害^[3-6]。我国是水土流失灾害最严重的国家之一,尤其在黄河中上游的黄土高原地区,其年水土流失量达到2 000~2 500 t/km²^[7-8]。严重的水土流失会对人类的生产生活产生威胁,不利于社会可持续发展^[9-10]。提升黄土的抗侵蚀能力,是减轻水土流失的关键和有效途径。目前,传统的材料、工程和植物等措施对黄土水土保持起到了一定的改善作用,但这些措施也存在一些不足,比如土壤原状结构扰动易失稳,施工周期长,成本高,存在污染等问题^[11-16]。因此,探索一种生态环保、经济高效的新型黄土改良方法具有十分重要的现实意义。

近些年,基于微生物矿化作用的新型土体改性技术在岩土工程领域掀起了一股研究热潮。其中,基于尿素水解的微生物诱导碳酸钙沉积(Microbial Induced Calcite Precipitation,简称MICP)技术因其矿化作用的高效性一直是该领域的主流技术和研究热点。其原理是利用一种高产脲酶的巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*)通过自身的代谢作用产生脲酶,催化尿素水解产生CO₃²⁻,CO₃²⁻再与环境中的Ca²⁺结合,生成具有胶结作用的碳酸钙沉积^[17-18]。相比于传统的土体改性技术,MICP技术具

有经济环保,矿化过程可控的优势。国内外已有学者尝试用MICP提高土体抗侵蚀性。N.J. Jiang等^[19]验证了MICP改性处理提高砂土边坡抗侵蚀能力的可行性,同时发现砂土的抗侵蚀能力随胶结液浓度增加先上升后下降。C. Shanahan等^[20]和E. Salifu等^[21]将MICP应用于砂质前滨边坡抗侵蚀性提高中,得到了较好的处理效果。N.J. Jiang等^[22]研究发现MICP处理可显著提高砂-砾混合土以及砂-黏土混合土的内部抗侵蚀性。这些研究主要针对的是中、粗粒土,对MICP是否可以缓解黄土表面降雨侵蚀及其机制还未有研究。对于改善黄土抗侵蚀性,主要需要提高黄土表层土体的抗侵蚀特性。采用MICP-铺砂联合处理提高黄土边坡的抗侵蚀能力,是一种有发展潜力的黄土边坡表面防护新方法。

为此,本文提出采用MICP-铺砂联合技术对黄土进行改性,通过开展降雨冲刷室内试验对其提高黄土抗侵蚀特性的可行性进行了验证,并结合贯入和碳酸钙含量测定试验,进一步阐明了MICP-铺砂提高黄土抗侵蚀特性的机理和优点,为黄土地区的水土流失和地质灾害防治提供新的技术思路。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 黄土

本文所用黄土采于西安郊区,属于低液限粉质黏土,其物理力学性质见表1。采集的黄土经实验室风干碾碎后,过2 mm筛备用。

表1 黄土的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of loess

液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	最优含水量/ %	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	颗粒密度/ (g·cm ⁻³)	天然含水量/ %	干密度/ (g·cm ⁻³)
25.82	16.65	10.17	0.29	15.30	1.91	2.65	12.77	1.42

1.1.2 砂土

本文所用砂为石英质河砂,该石英砂中 SiO_2 含量超过99.5%,试验前将砂过0.25 mm和2 mm筛,砂的比重为2.65,内摩擦角为 43° 。

1.2 样品制备与处理

1.2.1 细菌与培养基

试验选用的细菌为巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*, ATCC 11859),来自美国菌种保藏中心。该菌为化能异养型革兰氏阳性菌,脲酶活性高,对环境适应性好,目前在岩土工程领域应用广泛。试验所用培养基为YE-NH₄液体培养基,每升(L)含酵母提取物20 g,硫酸铵10 g,三羟甲基氨基甲烷(Tris-base, pH=9.0)15.75 g。培养基配制完成后,置于高压灭菌锅内121℃高温蒸汽灭菌30 min。待培养基冷却后,将细菌以体积比2:100的比例接种至其中,利用恒温震荡培养箱在30℃和150 rpm的环境下进行有氧培养24 h。之后用分光光度计测得细菌OD₆₀₀值为0.90,用电导率仪测得细菌脲酶活性为3.58 mM/L/min。

1.2.2 胶结液配制

胶结液由尿素(1.0 M)、氯化钙(1.0 M)和营养肉汤(3 g/L)组成,主要用于为MICP过程提供充足的尿素和钙离子,以及为微生物生长繁殖和新陈代谢提供营养物质。

1.2.3 土样制备

土样制备所用模具为(25×15×5) cm (L×W×H)的无顶长方体有机玻璃容器。容器底部打孔,且在下部垫有透水石,使溶液能顺利渗透,在透水石和容器之间放置一层滤纸,避免土颗粒流失。在容器的底部铺一层约1 cm厚的砂土,作为下垫层。制样时,将黄土装入模具中,分层压实,黄土厚度为4 cm,模拟原位黄土的密实度,控制初始干密度为1.4 g/cm³。按照以上步骤,本文共制备了三组试验样品G0、G1和G2,每组设置两个平行样品,制备样品的示意图如图1所示。其中一组试样G2作为MICP+铺砂样品,在样品表面均匀铺设2 mm厚,粒径为0.25~2 mm的细砂。

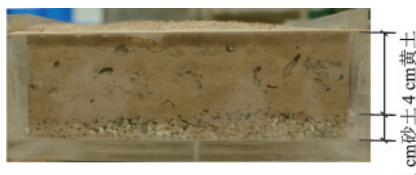


图1 试验土体样品

Fig.1 Soil sample prepared for testing

1.2.4 干湿循环处理

为了使土样的初始结构条件接近黄土高原地区黄体长期经历大气干湿循环作用的自然状态,先对土样进行干湿循环处理。处理方法为首先在土体表面均匀喷水400 mL,直至土体完全饱和,之后将土体置于室内自然风干,室温控制在(30±1)℃,相对湿度控制在(50±5)%。待试样完全风干之后,进行下一轮的喷洒风干循环处理。以往研究表明,室内制备的重塑土样一般经过4~5轮干湿循环后,其力学性质和土体结构能达到相对稳定的状态^[24-25]。为确保试样能够达到相对稳定状态,本文进行7轮干湿循环处理。

1.2.5 MICP处理

针对不能破坏现场黄土原始结构和施工工艺需要简单可行的要求,本文采用表面喷洒工艺对土样进行MICP处理。在进行每轮MICP处理前,首先将等量菌液和胶结液均匀混合,向混合液添加1.0 M浓度的盐酸,调节溶液的pH至5.0,防止在溶液中产生碳酸钙沉积。随后,将400 mL混合液均匀喷洒至土体表面,并保证在30 min内完成喷洒,防止沉淀产生。静置2 d,以保证混合液能够充分入渗和MICP过程充分进行,室温控制在(30±1)℃,相对湿度控制在(50±5)%,然后再进行下一轮处理。土样在完成5轮处理后,置于室温下风干15 d,再进行其他相关试验。其中,试样G1和G2分别进行MICP处理。G0为空白对照组试样,用去离子水代替菌液和胶结液进行5轮处理。

1.3 试验方法

1.3.1 降雨冲刷试验

本文采用的黄土表面降雨冲刷试验装置如图2所示,由金属框架、有机玻璃容器、喷头、蠕动泵、收集容器和摄像机组成。金属框架用来固定试样和

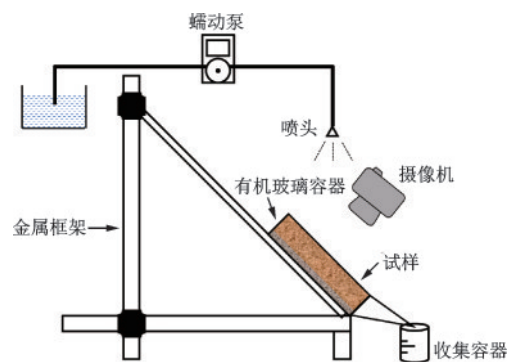


图2 黄土表面降雨冲刷试验装置示意

Fig.2 Schematic diagram of the experimental setup designed for loess surface erosion tests

有机玻璃容器,设置试样的倾斜角度在45°,这一角度与黄土地区的许多边坡坡脚相称。喷头用于模拟黄土地区的强降雨条件,其被安置在距离试样30 cm高度处以提供均匀降雨。收集容器置于装置的底部,以收集侵蚀的土体和水。摄像机正对试样拍摄,实时监测试样表面的侵蚀过程。

在降雨冲刷试验过程中,首先将试样固定在金属框架上模拟边坡。随后通过调节蠕动泵,以256 mm/d的降雨强度进行人工降雨,达到特大暴雨强度级别。使用收集容器收集流失的土水混合物,每1 min更换一个新的收集容器。其中G0冲刷历时30 min,G1和G2各冲刷历时100 min。冲刷过程完成后,烘干并一一称量每个收集容器中的土样质量,即为对应时间段的土体侵蚀量。同时,分别测定流出液的化学指标,包括pH、电导率(EC)、铵根离子浓度(C(NH⁴⁺))和钙离子浓度(C(Ca²⁺))。

1.3.2 贯入试验

为了评价MICP处理后黄土抗冲击结构强度,利用自主研发的SMP-1超微型贯入仪(图3)开展贯入试验,其基本原理是根据微型探针(图4)在贯入过程中遇到的阻力来反映土体结构强度的大小^[23]。在进行贯入试验之前,将试样加入过量的去离子水进行饱和,以排除土体基质吸力对试样贯入阻力的影响,确保获得的贯入阻力完全来自试样的结构强度。之后,将制备好的试样放置到超微型贯入仪托盘上,在贯入过程中,设置探针的贯入速度为5 mm/min,贯入总深度为30 mm。贯入阻力和贯入深度分别由安装在横梁上的荷载传感器和竖杆上的位移传感器进行实时记录。土体的结构强度可通过下式计算得到:

$$P = \frac{F}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (1)$$

式中, P 为结构强度(kPa); F 为荷载传感器测得的贯入阻力(N); D 为探头直径(mm)。

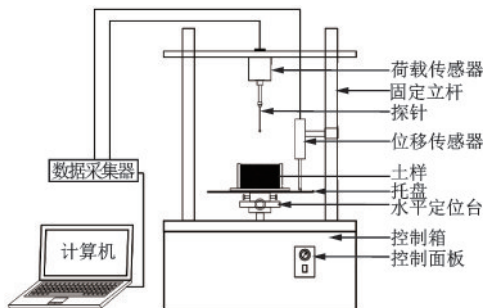


图3 SMP-1超微型贯入仪示意

Fig.3 Schematic diagram of the SMP-1 super mini-penetrometer

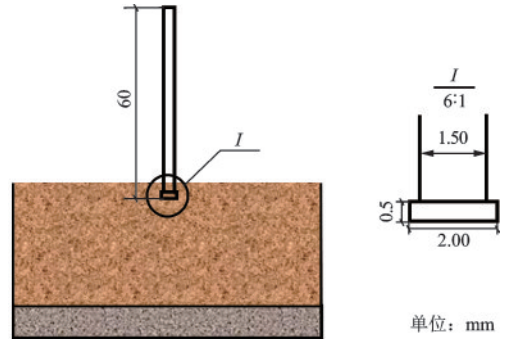


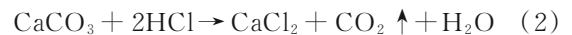
图4 超微型贯入仪微型探针示意

Fig.4 Schematic diagram of the super mini-penetrometer's micro-probe

1.3.3 碳酸钙含量测定试验

用盐酸酸洗排水法测定试样沿深度方向的碳酸钙含量,其化学原理见式(2)。通过测定生成CO₂的体积计算土样碳酸钙含量,试验装置如图5所示。

首先,在试样中取50 mm×50 mm×40 mm(长×宽×高)大小的土块,将土块沿深度方向均分成4等份。将等分的土块用去离子水浸泡1 d,随后用离心机离心(4 000 rpm,5 min),取沉淀物烘干,以去除土样中的可溶盐。将烘干的土样研磨至粉末状,取出5 g,倒入锥形瓶中,加入10 mL 1.0 M盐酸溶液浸泡12 h,并用磁力搅拌器搅拌,记录排出水的体积,即为生成CO₂的体积。与用分析纯碳酸钙粉末标定的标准曲线比较,换算出土样中碳酸钙质量 m (g)。然后去除空白组G0测得的未处理黄土中原有碳酸钙含量 α_0 (%),即可算得微生物诱导生成的碳酸钙含量,计算公式见式(3)。



$$\alpha(\%) = \frac{m}{5 - m} \times 100\% - \alpha_0(\%) \quad (3)$$

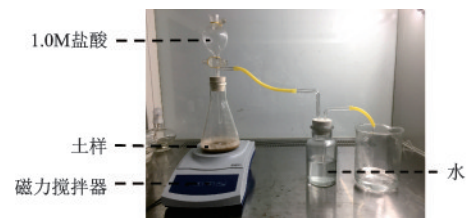


图5 酸洗排水法测定土样中碳酸钙含量装置

Fig.5 Installation diagram of pickling drainage method for measuring calcium carbonate content of soil sample

2 结果与讨论

2.1 表观特征

图6为不同处理后试样的表观特征。可以看

到,不同处理后试样的表观特征不同。从表格第二行可以看出,经过5轮干湿循环处理后,各试样之间没有太大差异,它们均具有不均匀分布的表面局部凹坑,以及边界处的裂纹。经过MICP处理后的试样G1和G2,表面可以观察到白色晶体,主要是碳酸钙晶体以及部分盐结晶,而去离子水处理的试样G0表面没有白色晶体。从第四行可以看出,G0在经过30 min降雨冲刷之后,土体几乎完全侵蚀,G1在经过100 min降雨冲刷之后,土体亦几乎发生完全侵蚀,而G2在经过100 min降雨冲刷之后,仅表面部分土体发生侵蚀,其它部分较为完整。

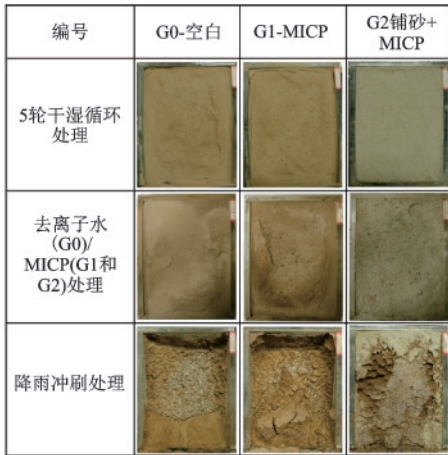


图6 不同处理后试样的表观特征

Fig.6 Apparent characteristics of samples after various types of treatment

图7为经历不同降雨冲刷时间后试样的表观特征。对空白组试样G0,在冲刷的第2 min,由于雨滴的冲击和径流的形成,坡面发生片蚀,形成细小沟纹和鳞状凹坑。随着冲刷过程的进行,水流沿着溅蚀坑和片蚀形成的沟槽向下流动,在10 min时发生较明显的沟蚀。在冲刷发展后期,土体发生局部坍塌(20 min),坡面冲刷破坏形式达到最大,直到30 min,土体几乎完全侵蚀。

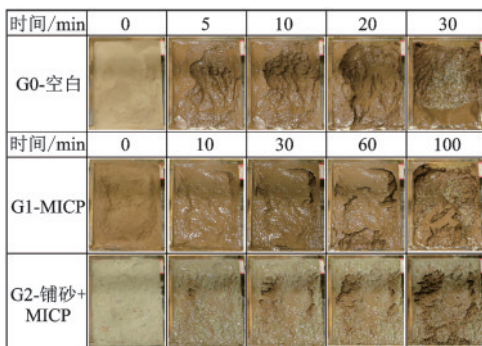


图7 不同降雨冲刷时间后试样的表观特征

Fig.7 Apparent characteristics of samples after different rain-fall erosion times

而对于试样G1,其在30 min才发生了轻微的沟蚀,60 min时有大块土体流失,而到100 min时,土体几乎完全侵蚀。试样G2则仅在60 min发生了小块的土体流失,无明显的沟蚀,直到100 min时,试样表面大部分仍保持完整。上述结果表明经过MICP和铺砂联合处理的土体抗侵蚀性高于纯MICP处理的土体,而未经MICP处理的土体抗侵蚀能力十分弱。

2.2 土体侵蚀速率和累计侵蚀量

土体侵蚀速率为每分钟土体的侵蚀量。图8和图9分别为土体累计侵蚀量和侵蚀速率随时间的变化。如图8所示,空白试样G0在24 min时完全侵蚀,G1在100 min时完全侵蚀,而铺砂和MICP处理的试样G2直到100 min,也仅有88 g土体发生了侵蚀。从图9中可以看出,空白组试样G0在12 min时达到了侵蚀速率的最大值,其速率始终高于另外两组试样。G1在前期的速率较低,直到后期出现明显升高,在88 min时达到了最大值。而G2的侵蚀速率始终维持在较低水平。

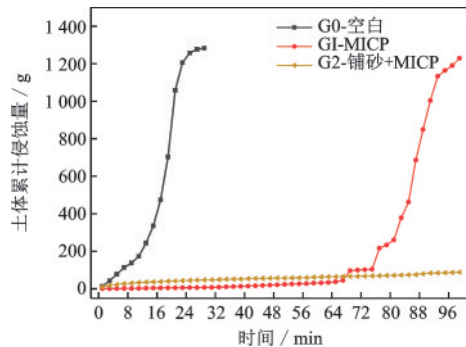


图8 土体累计侵蚀量随时间的变化

Fig.8 Accumulative erosion weight of soil versus erosion test time

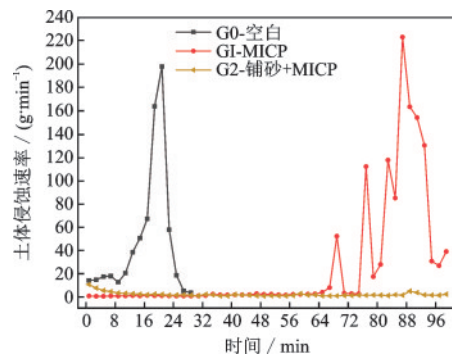


图9 土体侵蚀速率随时间的变化

Fig.9 Accumulative erosion rate of soil versus erosion test time

2.3 化学指标

图 10 为流出液的化学指标,包括(a) pH、(b) 电导率(EC)和(c)铵根离子浓度($C(\text{NH}_4^+)$)。降雨冲刷过程所用水的 pH 和 EC 分别为 8.2、0.42 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 如图 10 中直线所示。

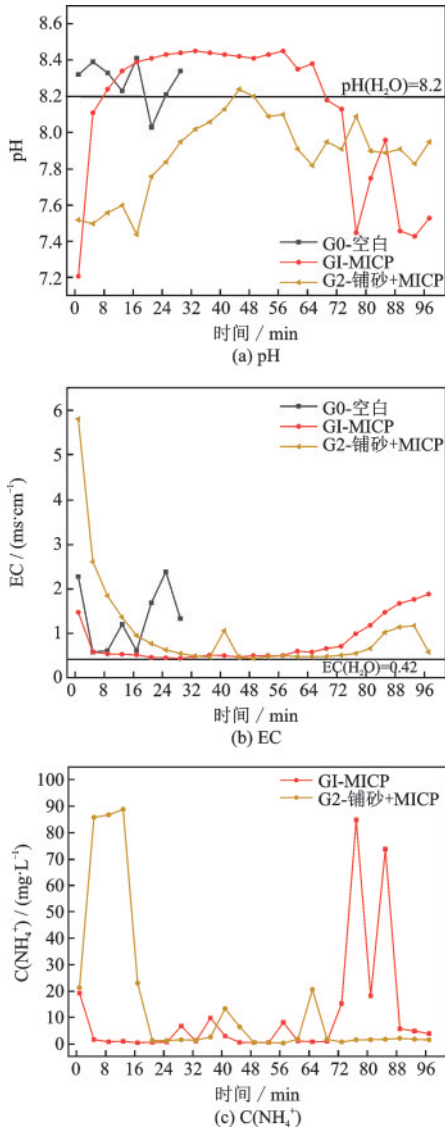


图 10 流出液的化学指标

Fig.10 Biochemical properties of outflow solution

流出液的 pH 是试样中可溶碱性离子含量的指标。从图 10(a)中可以看出,G0 的流出液 pH 与水相似,说明未处理的黄土中碱性离子不多。G1 流出液的 pH 在前期保持较低水平,这是由于在冲刷初期,土体表面盐结晶溶解,这部分结晶主要来自于 pH 在 7.2 到 8.2 之间的胶结液。随后,其 pH 逐渐升高,趋近于水的 pH,直到后期,pH 再次降低,这是由

于土体发生了较大体积的流失,深部土体中的可溶盐溶解。对于 G2,其 pH 在初期处于较低水平,之后逐渐上升,后期下降,但始终小于水的 pH,这是由于在 G2 冲刷过程中,始终存在少量表面盐结晶的溶解以及土体流失。

EC 是流出液中可电解离子浓度的指标。如图 10(b)所示,试样 G0 的 EC 在后期较高,大约在 1.9 $\mu\text{s}/\text{cm}$,高于水的 EC,说明黄土中可溶离子的存在。G1 和 G2 的 EC 均在冲刷前期处于较高水平,随着冲刷过程的进行逐渐降低,后期上升,这与前期土体表面盐结晶溶解和后期大量土体流失导致深部土体中盐结晶溶解有关。

NH_4^+ 是 MICP 反应过程的产物,也是一种可溶性离子。其中,G0 流出液的 $C(\text{NH}_4^+)$ 为 0,这是由于水和黄土中几乎不存在 NH_4^+ 。如图 10(c)所示,试样 G1 和 G2 的 $C(\text{NH}_4^+)$ 在初期较高,说明在土体表面的盐结晶中存在大量 NH_4^+ 。在冲刷中期,G1 和 G2 的 $C(\text{NH}_4^+)$ 较低,且存在小范围波动,在后期,G1 的 $C(\text{NH}_4^+)$ 出现了明显升高。说明试样深部土体中仍然存在 NH_4^+ ,反应溶液有效渗透到了深部土体,并发生了 MICP 反应。

总的来说,G0 的化学指标变化主要来源于黄土中的可溶性离子,而 G1 和 G2 中的化学指标变化主要来源于 MICP 处理溶液带来的盐结晶和黄土中本身的可溶性离子,G1 和 G2 的化学指标值相差不大。

2.4 结构强度

图 11 为各试样的贯入曲线(结构强度—贯入深度)。由图中可以看出,对于空白试样 G0,其结构强度随着深度的增加稍有增加,但始终远低于 G1 和 G2 的结构强度。对于仅 MICP 处理的试样 G1,在开始阶段,其结构强度随着深度的增加而逐渐增加,在 1.43 cm 深度处达到了最大结构强度 2.49 MPa,之后略有下降。对于表面铺砂和 MICP 处理的试样 G2,其在 0.2 cm 深度内结构强度几乎为 0,这与表面 0.2 cm 的砂层有关。由于砂层被胶结固化成壳,具有明显的脆性,贯入仪的探针在贯入过程中导致砂壳局部开裂破坏,丧失强度。之后,其结构强度呈先增加后略微降低的趋势,在 1.36 cm 处达到了峰值结构强度 3.04 kPa。

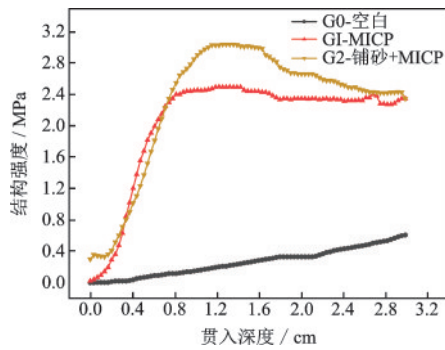


图 11 试样结构强度—深度曲线

Fig.11 Structure strength-depth curves of samples

2.5 碳酸钙含量

图 12 为 G1 和 G2 沿深度方向的碳酸钙含量分布。从图 12 中可以看出, G1 和 G2 的碳酸钙含量均呈现随深度增加逐渐降低的趋势。由于黄土渗透性较低以及早期形成的碳酸钙堵塞在土体上部, 导致溶液在后期较难入渗到土体内部, 影响了深部土体中的 MICP 反应, 故上部土体形成的碳酸钙较下部土体更多。试样 G1 和 G2 的平均碳酸钙含量分别为 2.48% 和 2.06%, 二者相差不多。

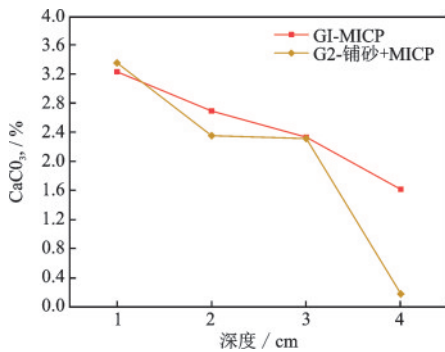


图 12 G1 和 G2 沿深度方向的碳酸钙含量分布

Fig.12 Distributions of calcium carbonate contents in depth of G1 and G2

2.6 MICP-铺砂提高黄土抗侵蚀性的机理

经 MICP-铺砂处理后, 土体侵蚀速率和累计侵蚀量显著下降, 该试验结果表明, 黄土的抗侵蚀性显著提升。一般来说, 土体边坡的降雨侵蚀包括三个阶段: (1) 雨滴溅蚀; (2) 径流沟蚀; (3) 软化坍塌^[26]。土体抗侵蚀性的提高主要和土体强度提高和渗透性降低有关^[27]。

对于未经 MICP 处理的黄土, 颗粒间胶结力主要产生于黏土矿物和各种盐类, 在干燥状态下, 其强度高, 土体结构牢固^[28]。但遇水后, 土中易溶盐

类的溶解和水分子进入黏土矿物晶格之间而发生的膨胀, 导致土体基质吸力减小, 当土体饱和后, 吸力对强度的贡献基本为零, 土颗粒间的胶结力急剧下降^[29], 边坡土体很快发生侵蚀。

经过 MICP 处理的黄土, 其土体结构发生明显改变, 如图 13 所示, MICP 过程中形成的 CaCO_3 沉淀充填与土体孔隙中, 同时附着于土颗粒表面, 使土体强度升高和渗透性降低^[18]。由于碳酸钙基本不溶于水, 水的存在对胶结作用几乎没有影响。由于黄土的孔隙小, 后期溶液不容易入渗至深部土体, 土体表面碳酸钙比深部含量多, 导致 CaCO_3 沿深度方向的不均匀分布(图 12)。如图 14(a) 所示, 土体中形成双结构层, 表面形成一层硬化壳, 下部有弱胶结层。高强度的硬化壳能够一定程度抵抗降雨的影响, 土体的抗侵蚀性得到提高。同时, 表面硬化壳具有低渗透性, 阻止雨水进入深部土体, 防止深部未胶结土体发生软化坍塌。

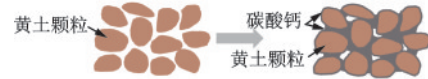


图 13 MICP 处理黄土胶结机理示意

Fig.13 Schematic diagram of cementation mechanism of loess through MICP treatment

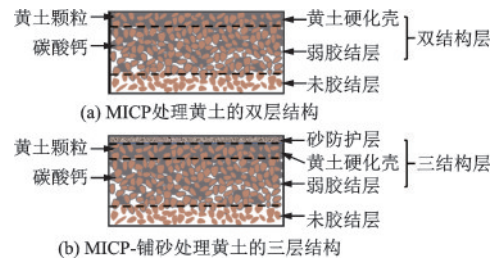


图 14 处理黄土结构示意

Fig.14 Schematic diagrams of treated loess structure

对于 MICP-铺砂联合处理的黄土, MICP 的改性效果进一步提升。如图 14(b) 所示, MICP 处理之后土体中形成三结构层, 黄土表面形成了一层被碳酸钙胶结的砂防护层, 虽然很薄, 但是其强度足以在黄土抗侵蚀中发挥作用^[30], 可一定程度抵抗雨水的击溅作用和表面径流的侵蚀作用, 维持土体表面结构稳定。同时, 溶液进一步入渗, 在砂防护层下部形成了黄土硬化壳, 该部分不仅强度高, 其孔隙被胶结物填充较饱满, 孔隙率小, 渗透率低, 可阻止雨水入渗, 防止深部土体被软化。因此, MICP-掺砂联合处理的方式能够将微生物砂防护层的高强度和被防护边坡黄土硬化壳的低渗透性有机结合, 发挥砂防护层抗雨滴击溅和径流冲刷以及黄土硬化壳减渗的共同作用, 以提高黄土坡面的抗侵蚀能力。

3 结 论

(1) 纯 MICP 处理能提高黄土抗侵蚀性, 而 MICP-铺砂联合技术相比纯 MICP 处理能更进一步提高黄土抗侵蚀性。在模拟降雨条件下, 未经 MICP 处理的土体发生大面积侵蚀的时间最早, 其次为纯 MICP 处理的土体, 而 MICP-铺砂联合处理的土体始终没有发生大面积侵蚀。

(2) MICP-铺砂联合改性机理是通过微生物防护层的高强度和被防护边坡黄土硬化壳的低渗透性有机结合, 发挥砂防护层抗雨滴击溅和径流冲刷以及黄土硬化壳减渗的共同作用, 以提高黄土坡面的抗侵蚀能力。

(3) 在模拟降雨条件下, 纯 MICP 处理和 MICP-铺砂联合处理土体的流出液化学指标值相差不大。

(4) 纯 MICP 处理和 MICP-铺砂联合处理土体的结构强度远高于未经处理的土体, 这是土体抗侵蚀能力得以提高的关键。二者的碳酸钙含量均呈现随深度增加而逐渐降低的趋势, 其平均碳酸钙含量相差不大。

参考文献:

- [1] Derbyshire E, Mellors T W. Geological and geotechnical characteristics of some loess and loessic soils from China and Britain: A comparison[J]. Engineering Geology, 1988, 25(2-4): 135-175.
- [2] Heller F, Evans M E. Loess magnetism[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(2): 211-240.
- [3] 王永焱. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
Wang Y Y. Structural characteristics and physical and mechanical properties of Chinese loess[M]. Beijing: China Science Press, 1990. (in Chinese)
- [4] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
Jiang D S. Soil erosion and management models in the loess plateau[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1997. (in Chinese)
- [5] 赵景波, 陈云. 黄土湿陷性及其成因[J]. 地质力学学报, 1997, 3(4): 62-68.
Zhao J B, Chen Y. The collapsibility of loess and its cause[J]. Chinese Journal of Geomechanics, 1997, 3(4): 62-68. (in Chinese)
- [6] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312.
Xu Z J, Lin Z G, Zhang M S. Chinese loess and loess landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312. (in Chinese)
- [7] 刘国彬, 李敏, 上官周平, 等. 西北黄土区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 6.
Liu G B, Li M, Shangguan Z P, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for loess region in the Northwestern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 6. (in Chinese)
- [8] 刘晓燕. 浅谈黄土高原水土保持治理措施[J]. 新西部(理论版), 2016, 385(20): 34.
Liu X Y. Discussion on the control measures of soil and water conservation in the Loess Plateau[J]. New West (Theoretical version), 2016, 385(20): 34. (in Chinese)
- [9] 王飞, 李锐, 杨勤科, 等. 黄土高原水土保持政策演变[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 103-107.
Wang F, Li R, Yang Q K, et al. Evolution of soil and water conservation policies on the loess plateau[J]. China Soil and Water Conservation Science, 2009, 7(1): 103-107. (in Chinese)
- [10] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状, 问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 12.
Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. Current status, problems and countermeasures of soil erosion control in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 12. (in Chinese)
- [11] 王银梅, 韩文峰, 谌文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1761-1765.
Wang Y M, Han W F, Chen W W. Comparative study on mechanical properties of loess reinforced by new polymer solidified materials and cement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1761-1765. (in Chinese)
- [12] 汪海江. 强夯法在湿陷性黄土加固工程中的应用分析[J]. 西北电力技术, 2006, 34(4): 42-44.
Wang H J. Application analysis of dynamic compaction method in collapsible loess reinforcement project[J]. Northwest Electric Power Technology, 2006, 34(4): 42-44. (in Chinese)
- [13] Frydman S, Operstein V. The influence of vegetation on soil strength[J]. Proceedings of the Ice Ground Improvement, 2000, 4(2): 81-89.
- [14] Cochrane B H W, Reichert J M, Eltz F L F, et al. Controlling soil erosion and runoff with polyacrylamide

- and phosphogypsum on subtropical[J]. Transactions of the ASABE, 2005, 48(1): 149-154.
- [15] Bullock A, King B. Evaluating China's slope land conversion program as sustainable management in Tianquan and Wuqi Counties[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(8):1916-1922.
- [16] Sarli J M, Hadadi F, Bagheri R A. Stabilizing geotechnical properties of loess soil by mixing recycled polyester fiber and nano-SiO₂[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 38(4): 1151-1163.
- [17] Dejong J T, Fritzges M B, Nüsslein, et al. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11):1381-1392.
- [18] Liu B, Zhu C, Tang C S, et al. Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP)[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105389.
- [19] Jiang N J, Tang C S, Yin L Y, et al. Applicability of microbial calcification 547 method for sandy-slope surface erosion control[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(11): 04019250.
- [20] Shanahan C, Montoya B M. Strengthening coastal sand dunes using microbial induced calcite precipitation[C]// Geo-Congress, Geo-characterization and Modeling for Sustainability. Atlanta, Georgia, 2014: 1683-1692.
- [21] Salifu E, Maclachlan E, Iyer K R, et al. Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation[J]. Engineering Geology, 2015, 201: 96-105.
- [22] Jiang N J, Soga K, Kuo M. Microbially induced carbonate precipitation for seepage induced internal erosion control in sand-clay mixtures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(3): 04016100.
- [23] 施斌, 刘志彬, 蔡奕. 超微型贯入仪的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(8):5.
Shi B, Liu Z B, Cai Y. Development of the super mini-penetrometer and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8):5. (in Chinese)
- [24] 唐朝生, 施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9):9.
Tang C S, Shi B. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9):9. (in Chinese)
- [25] 徐丹, 唐朝生, 冷挺, 等. 干湿循环对非饱和膨胀土抗剪强度影响的试验研究[J]. 地学前缘, 2018, 25(1): 286-296.
Xu D, Tang C S, Leng T, et al. Shear strength of unsaturated expansive soil during wetting-drying cycles[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(1): 286-296. (in Chinese)
- [26] 武江涛. 刚果(布)1号公路砂性土边坡冲刷破坏研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
Wu J T. Research on sandy soil slope erosion of No.1 National Highway of the republic of Congo [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [27] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, Ma W, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: relationship between aggregate stability and shear strength[J]. Catena, 2011, 87(1): 1-69.
- [28] 李喜安, 黄润秋, 彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(A01): 7.
Li X A, Huang R Q, Peng J B. Experimental research on the disintegration of loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(A01): 7. (in Chinese)
- [29] Wang D Y, Tang C S, Cui Y J, et al. Effects of wetting-drying cycles on soil strength profile of a silty clay in micro-penetrometer tests[J]. Engineering Geology, 2016, 206:60-70.
- [30] Chu J, Stabnikov V, Ivanov V. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil[J]. Geomicrobiology Journal, 2012, 29(6): 544-549.
(本文责编: 苏泽云)