

MICP作用下根土复合体强度研究

吴旭恒, 钟志涛, 牟亚清

重庆科技学院, 建筑工程学院, 重庆

Email: 15215105881@163.com

收稿日期: 2021年2月28日; 录用日期: 2021年3月23日; 发布日期: 2021年3月30日

摘要

基础设施建设会带来严重的水土流失现象, 对边坡生态环境带来了巨大损失。本文提出微生物诱导碳酸钙沉淀作用(Microbial Induced Carbonate Precipitation, MICP)协同植被护坡用于边坡工程。通过MICP作用加固根土复合体的直剪试验, 得到以下结论: 1) 根土复合体在含根量为0.4%~0.8%之间存在最优含根量, 在大于最优含根量后, 各项强度参数下降; 2) MICP能提高30.3%根土复合体粘聚力峰值, 但不能改变根土复合体随含根量改变而变化的强度规律。上述结果表明: MICP在一定范围提高根土复合体强度, 能够与植被护坡相结合, 具有广阔的应用前景。本文的研究成果能为MICP协同植被护坡提供可靠的理论依据。

关键词

MICP, 根土复合体, 直剪试验, 含根量, 抗剪强度

Direct Shear Test of Root-Soil Complex under MICP

Xuheng Wu, Zhitao Zhong, Yaqing Mou

School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Email: 15215105881@163.com

Received: Feb. 28th, 2021; accepted: Mar. 23rd, 2021; published: Mar. 30th, 2021

Abstract

Construction of infrastructural facilities will bring about serious soil erosion and bring huge losses to the ecological environment of the slope. This paper proposes that Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP) is used for slope protection in cooperation with vegetation. Through the di-

文章引用: 吴旭恒, 钟志涛, 牟亚清. MICP作用下根土复合体强度研究[J]. 土木工程, 2021, 10(3): 235-240.

DOI: 10.12677/hjce.2021.103026

rect shear test of the reinforced root-soil complex by MICP, the following conclusions are obtained: 1) The root-soil complex has an optimal root content between 0.4% and 0.8%, which is greater than the optimal root content. After that, the various strength parameters decreased; 2) MICP can increase the peak cohesion of the root-soil complex by 30.3%, but cannot change the strength law of the root-soil complex with the change of root content. The above results show that MICP can increase the strength of root-soil complex in a certain range, can be combined with vegetation protection, and has broad application prospects. The research results of this paper can provide a reliable theoretical basis for MICP's cooperative vegetation protection.

Keywords

MICP, Root-Soil Complex, Direct Shear Test, Root Content, Shear Strength

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国基础设施建设的快速发展,带来地区经济发展的同时,不可避免的会造成水土流失。我国西部地区面积广阔,自然环境复杂,一旦发生水土流失,对地区的生态稳定必定造成不可逆的破坏。目前市面上常用的护坡技术如浆砌片石,现浇混凝土护坡等,这些技术都在一定程度上取得了一定的成效,但也存在边坡支护工程量大,工程造价高以及环境不友好等缺陷。因此有学者提出了植被护坡的技术。

植被护坡主要利用根系的锚固和加筋作用,形成根土复合体[1],对于边坡涵水固土、调节自然气候和维护生态平衡具有积极作用,符合国家和地方生态环保的需要。但植被护坡生长缓慢、坡面渗透性强和植被根系浅,因此,植被护坡固土能力有限,常常在使用过程中发生大规模的边坡垮塌事故。如何在传统植被护坡技术上加快植被的生长速度、缩短边坡裸露时间、降低坡面渗透性以及提高根土复合体的强度,是边坡生态环境治理与工程防护领域亟需解决的重要课题。因此,有学者提出采用 MICP 技术进行水土治理。

微生物诱导碳酸钙沉淀作用(Microbial Induced Carbonate Precipitation, 即 MICP)在岩土工程学和微生物学的交叉学科中是研究的热门,是一种环境友好的生物介质的土壤改良技术,源于微生物学、化学和岩土工程的跨学科途径。其原理是某些微生物能够形成一种脲酶,它能够将尿素分解成铵根离子和碳酸根离子。在含有钙离子的条件下生产具有胶结作用的碳酸钙,最后具有胶结作用的碳酸钙会充满土体孔隙,将松散的土颗粒交接成一个整体。

针对 MICP 固化砂土,主要评价了 MICP 固化砂土的性能[2] [3] [4],目前 MICP 能够轻松将松散的砂土颗粒固化成能够承受 5~30 MPa 的坚固砂柱,整个固化过程中作为“生物水泥”将砂土固化[5]。而在实际工程中,砂土带来的施工问题要小于粘土,因此有学者对 MICP 固化粘土开展了相关研究,对粘土经 MICP 固化后的渗透性强度开展的大量实验,研究发现,经 MICP 固化后的土体渗透性能够下降 2 个数量级[6],在经过 9 次固化后的无侧限抗压强度能够提高 77% [7],同时发现 MICP 生产碳酸钙含量和渗透性的变化关系,两者之间存在一种函数关系[8],得出了土体适用 MICP 的渗透条件,优化了 MICP 固化土体的可行性[9]。

2. 试验材料和方法

2.1. 试验材料

2.1.1. 土样

试验土样取自重庆市沙坪坝区，取土深度 2 m，天然含水率 23%，土体各项性质指标见表 1。

Table 1. Physical and mechanical parameters of soil

表 1. 土体物理力学参数

比重 G_s	塑限 $\omega_L/\%$	液限 $\omega_P/\%$	塑限指数 IP	天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	天然含水率 $\omega/\%$
5.6	33.2	19.2	14	18.75	20

2.1.2. 菌种与培养

试验用微生物为巴氏芽孢八叠球菌 *Sporosarcina pasteurii*，购自国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心(China General Microbiological Culture Collection Center)，CGMCC 编号为 1.367 (图 1)。用于细胞活化以培养的培养基的配方为酵母提取物 20 g/L，氯化铵 10 g/L，氯化镍 12 mg/L，氯化锰 24 mg/L，调节 pH = 9.0。在 30℃，200 r/min 的恒温振荡箱内培养 24 h，采用电导率仪测定活性大于 0.1 s/min 时可用于试验。

2.1.3. 菌种保存

将培养好的菌种保存在甘油中，先将甘油在 121℃，进行 15 min 的高温灭菌，待甘油冷却后，在无菌操作台中将固体培养基中的菌落刮入冷藏管中，加入 2 ml 甘油，放入负 80℃冰箱中保存。

2.1.4. 胶结液制备

胶结液能够为 MICP 作用提供必要的尿素和钙盐，选用的胶结液浓度为 1.0 M，胶结液(1 L)配方为氯化钙 111 g，尿素 60 g。



Figure 1. Agar slant culture-medium

图 1. 斜面培养基

2.1.5. 植被根系

植被选取高羊茅为研究对象，选取根系直径在 0.5 mm 到 1.0 mm 之间，为保证根系能提供较强的抗剪强度，根系长度大于 10 mm，小于 20 mm。含根量采用根的生物量集度表示，含根量为土体质量的 0%、0.2%、0.4%、0.6%和 0.8% (表 2)。每种含根量制备 3 组试件。通过不同的含根量代表不同生长情况的植

被, 模拟 MICP 在植被生长时的作用。

Table 2. Root content design
表 2. 含根量设计

分组	土体质量/g	含根量/%	根系质量/g
T1	120	0	0
T2	120	0.2	0.24
T3	120	0.4	0.48
T4	120	0.6	0.72
T5	120	0.8	0.96

2.1.6. 土样制备

将土样过 2 mm 筛, 选取粒径大于 1 mm 的土颗粒用于制备根土复合体试样。共制备 2 组土样, 其中一组利用 MICP 技术对土样进行改性(记为 MICP 实验组), 另一组作为空白对照组。2 组土样模具及植被过程均保持一致, 试样高度为 20 mm, 直径 80 mm。将制备好的试样放入环刀中, 用于 MICP 加固。

2.2. 试验过程与方法

2.2.1. MICP 注浆试验

为保证根土复合体试样能够充分进行 MICP 作用, 采用注射器注浆方式固化根土复合体试样, 对 T2、T3、T4、T5 实验组每日定时向土体内部均匀注射 4 ml 菌液和 4 ml 胶结液, 以保证微生物和胶结液能够充满土体并充分反应; 完成一次胶结过程后, 将土样翻转, 在另一方向进行 MICP 处理。T1 对照组每次注浆注入等体积的去离子水。

2.2.2. 直剪试验

对试样进行直接剪切试验: 采用 ZJ-3 型应变控制式直剪仪, 控制剪切速率 0.8 mm/min 下进行 6 mm 时停止试验; 试样分别在 100 kPa、200 kPa、300 kPa 法向应力下进行剪切; 做应力 - 应变曲线, 取曲线上剪应力最大值作为试样在当前法向应力下的抗剪强度, 对于应变硬化性曲线, 取剪切位移 4 mm 处为剪切强度。应力 - 应变计算见《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)。

3. 试验结果与分析

3.1. 含根量与粘聚力变化

为对比含根量对根土复合体抗剪强度指标的影响, 绘制含根量与粘聚力关系曲线, 如图 2 所示。本试验选择的根径大小差异较小, 可以认为每根根系承受的力大小相同。对于不含 MICP 作用的根土复合体, 当含根量从 0.2% 增加到 0.4% 时, 粘聚力强度增加了 5.19 kPa; 增加到 0.6% 时粘聚力增加了 12.68 kPa; 而当含根量增加到了 0.8% 时, 粘聚力下降了 9.73 kPa。表明在含根量在 0.4%~0.8% 之间存在最优含根量。而对于含有 MICP 作用的根土复合体, 同样在含根量 0.4%~0.8% 时达到峰值, 其变化趋势与不含 MICP 的根土复合体一致, 但其峰值大小要大于不含 MICP 的根土复合体。说明含根量对根土复合体强度的变化特性起决定性作用, MICP 只能提高根土复合体的强度。

3.2. MICP 对根土复合体的影响

通过图 3 看出, 加入 MICP 的根土复合体抗剪强度在任何含根量下都要高于未加入 MICP 的根土复

合体, 这是由于 MICP 以微生物为核心产生的具有胶结作用的碳酸钙减少了土体间的孔隙, 增强了土体间的粘聚力; 在 0.4% 时提高了 16.99 kPa, 此时的 MICP 对根土复合体的强度提升最为明显, 提升了粘聚力提高了 36.2%, 而在含根量 0.6% 时粘聚力仅提高了 12.56 kPa, 增加了 21.1%, 是强度提高最低的。但此时的粘聚力为 72.25 kPa, 是本次试验的峰值, 这说明在峰值处强度值主要受含根量的影响。但对于内摩擦角, MICP 对于颗粒间的接触作用强度较小, 因此对于内摩擦角的提升作用不明显, 其增量一直处于增量, 这表明根系在 MICP 的作用下能够更好的和土颗粒相结合。

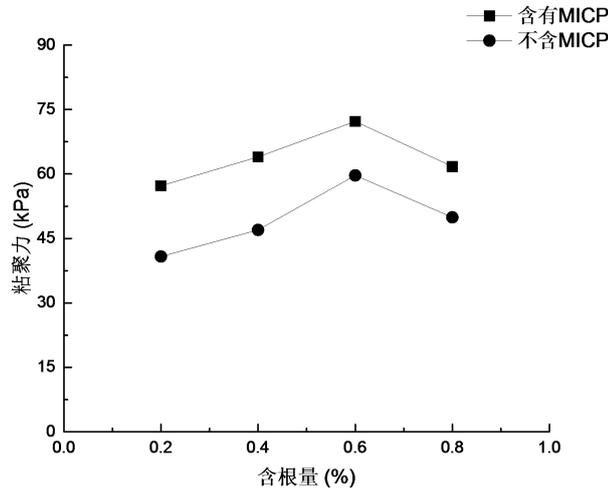


Figure 2. Relationship between root content and cohesion

图 2. 含根量与粘聚力关系

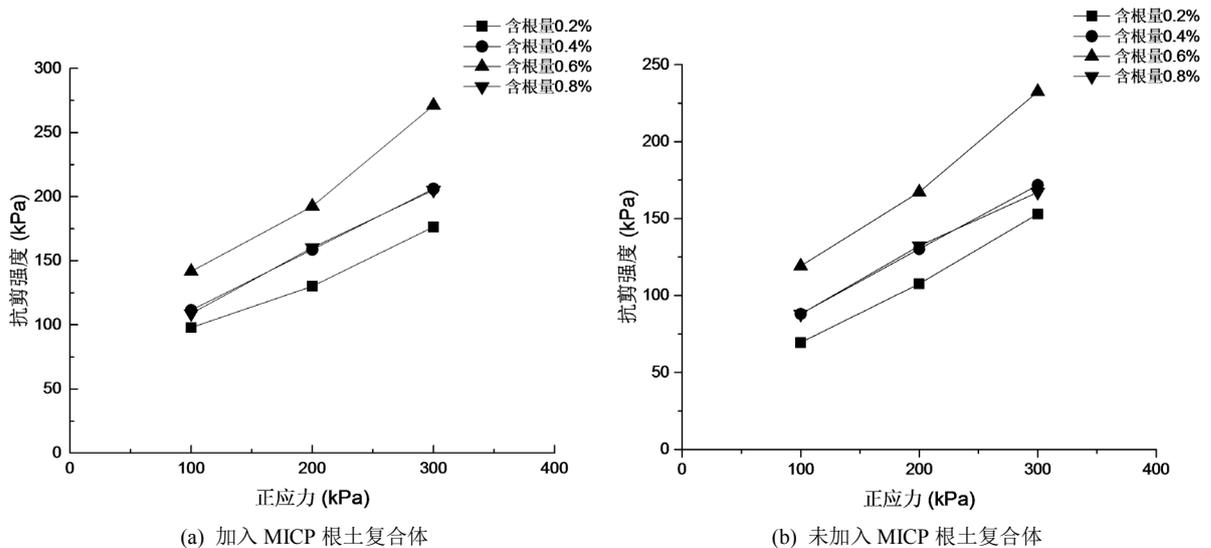


Figure 3. Shear strength of root-soil complex

图 3. 根土复合体抗剪强度曲线

4. 结论

基于 MICP 加固根土复合体的直剪试验基础上, 研究含根量对 MICP 加固根土复合体强度变化的影响, 得出以下几点结论:

1) 根土复合体在含根量为 0.6% 时达到剪切峰值 72.22 kPa, 表明含根量在 0.4%~0.8% 之间存在最优含根量, 当含根量超过最优含根量时, 根土复合体强度开始下降。

2) 在 MICP 作用下能够提高根土复合体抗剪强度, 平均提高 14.46 kPa, 平均增量 30.3%, 当含根量超过最优含根量时, 强度仍开始下降, 表明 MICP 不能改变根土复合体强度变化规律; 但其对内摩擦角在含根量大于最优含根量时仍能够提高根土复合体内摩擦角增量。

3) MICP 增强根土复合体强度的主要原因是由于形成的胶结性的碳酸钙增大了土颗粒和土颗粒、土颗粒和根系间的接触面积, 将两者紧密结合, 进而增加了根土复合体强度。

然而, 本文仅针对含根量的变化进行试验研究, 针对不同浓度的 MICP 作用是否具有同样的规律, 尚待进一步研究。

项目基金

重庆科技学院研究生科技创新计划项目(微生物矿化作用下植被护坡岩土体强度增长机理研究), 项目批准号: YKJCX1920609。

参考文献

- [1] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 1996(2): 31-38.
- [2] 邵光辉, 尤婷, 赵志峰, 等. 微生物注浆固化粉土的微观结构与作用机理[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 129-135.
- [3] 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.
- [4] Islam, M.T., Chittoori, B.C.S. and Burbank, M. (2020) Evaluating the Applicability of Biostimulated Calcium Carbonate Precipitation to Stabilize Clayey Soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **32**, Article ID: 04019369. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003036](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003036)
- [5] 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.
- [6] Mingdong, L., Kejun, W., Yu, L., et al. (2018) Impact of Oxygen Availability on Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) Treatment. *Geomicrobiology Journal*, **35**, 15-22. <https://doi.org/10.1080/01490451.2017.1303553>
- [7] Qabany, A.A. and Soga, K. (2013) Effect of Chemical Treatment Used in MICP on Engineering Properties of Cemented Soils. *Géotechnique*, **63**, 331-339. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.022>
- [8] 沈泰宇, 李贤, 汪时机, 许冲, 薛乐. 微生物固化砂质黏性紫色土的三轴抗剪强度与浸水抗压强度[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 135-143.
- [9] 李贤, 汪时机, 何丙辉, 等. 土体适用 MICP 技术的渗透特性条件研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2956-2964.