

文章编号:1672-3031(2020)02-0130-06

微生物浆液加固砂土外加剂的初步试验研究

王丽娟^{1,2}, 李 凯^{1,2}, 符 平^{1,2}, 李 娜^{1,2}, 赵卫全^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 北京中水科工程总公司, 北京 100048)

摘要: 为提高微生物浆液固砂效果、减少固砂灌浆次数及烘干时间, 基于晶格能机理尝试性提出A、B、C三种微生物浆液外加剂, 并进行了外加剂对微生物浆液活性影响及外加剂对微生物浆液固砂效果影响试验。试验得出: 培养过程中添加外加剂会导致菌种活性降低80%以上, 不利于菌种生长; 采用外加剂加入钙液的灌注方式, 砂砾更易胶结固化, 砂砾体渗透系数降低范围为20%~96%; 可见外加剂B加入钙液灌注, 单次灌浆且不烘干条件下, 砂砾体渗透系数可降低到 4.65×10^{-4} , 抗压强度可达到12.3 MPa。外加剂B具有提高微生物浆液加固砂土效果的作用, 该外加剂有利于微生物浆液固砂技术的推广及应用。

关键词: 固砂效果; 晶格能机理; 外加剂; 微生物活性; 渗透系数; 抗压强度

中图分类号: TU441; TV543

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2020.02.007

1 研究背景

强烈地震作用下, 松散砂土易发生液化导致土体失稳, 加固砂土已成为岩土工程领域一个重要课题^[1-2]。目前工程中通常采用机械压密、化学灌浆等方法加固砂土, 存在能耗大、工期长、费用高、环境污染等问题。近年来随着人们对环境保护和可持续发展的重视, 微生物浆液在砂土加固领域的应用和研究逐渐增多。微生物浆液机理为: 通过尿素水解、硫酸盐还原、脂肪酸发酵、反硝化等微生物生化过程产生碳酸根离子, 同时微生物细菌细胞膜界面带负电荷的有机质不断吸附带正电荷的钙离子, 进而碳酸根离子同钙离子以细菌体为核沉积出碳酸钙晶体^[3-5], 该晶体具有胶结砂砾的功能。微生物浆液具有环境友好、无污染、可灌性好的优点, 近年来国内外学者针对微生物浆液加固砂土进行了大量研究。

国外学者 DeJong 等^[6]利用巴氏芽孢八叠球菌胶凝加固松散砂土, 并用剪切波速法无损检测微生物加固效果, 试验表明微生物加固处理样品具有较高的初始剪切刚度及抗剪强度。Whiffin^[7]研究了不同培养条件下 pH 值、培养基等因素对巴氏芽孢八叠球菌脲酶活性的影响, 同时研究了胶凝条件下, 尿素、 Ca^{2+} 、 $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 等离子浓度对脲酶水解尿素能力的影响, 研究表明该类菌种对高尿素、高钙离子浓度的耐受能力极高, 经微生物灌浆的砂土抗剪强度可达1.8 MPa。van Paassen 等^[8]选择巴氏芽孢八叠球菌作为研究菌种, 通过控制灌浆速度、灌浆时间、菌液与胶凝液体积等参数, 实现提高砂土强度、刚度, 控制砂土渗透性、孔隙率等工程目的; 同时还进行了1 m³和100 m³体积的大尺度灌浆试验, 对大尺度砂土微生物灌浆有了相对全面的研究, 使砂土单轴抗压强度最高达到12 MPa。Okwadha 等^[9-11]研究了不同菌种和不同环境温度对微生物浆液矿化及微生物浆液加固砂土效果的影响。

国内学者程晓辉等^[12-15]通过优化填充颗粒粒径、菌株类型、灌浆次数等参数, 有效控制微生物砂浆的单轴抗压强度, 并成功得到单轴抗压强度在2 MPa到55 MPa不同强度的微生物砂浆样品; 同时通过标准动三轴及小型振动台试验, 研究了微生物注浆加固液化砂土的动力反应, 尤其是抗液化性能, 试验结果表明: 微生物注浆加固液化砂土的抗液化性能显著提高, 固化效果高于碎石挡墙。李

收稿日期: 2018-11-13

基金项目: 中国水科院十三五重点科研专项(EM0145B492016); 中国水科院基本科研专项(EM0145B442019)

作者简介: 王丽娟(1990-), 硕士生, 工程师, 主要从事地基基础加固材料研究。E-mail: wanglj@iwhr.com

通讯简介: 李凯(1991-), 硕士生, 工程师, 主要从事地基基础加固材料及工艺研究。E-mail: aklkai2009@sina.com

凯等^[16-18]研究了营养液 pH、培养温度、培养时间、灌浆次数等不同因素对固砂效果的影响。

以上学者研究成果均推动了微生物诱导碳酸钙加固砂土地层技术的发展及应用,但是微生物浆液在砂土地基加固防渗领域的应用仍然存在以下两个问题:①微生物浆液加固砂土地层,需要多次灌注(3~5次),这在工程应用中无法满足;②采用微生物浆液进行砂土加固,灌注后需要进行烘干处理^[12-16](即:需要水分挥发完全),砂土体才具有较高的抗压强度,这在工程应用中亦无法满足。为推进微生物浆液加固砂土技术工程应用,本文将晶格能机理引入外加剂的方法,使得砂土体在微生物浆液较少的灌注次数(<3次)、无需烘干的条件下可快速提高抗压强度。

2 晶格能应用简介

晶格能是度量晶体晶格稳定的参数,晶体根据其组成的离子种类及离子之间作用力的不同可分为四种基本类型:金属晶体、离子晶体、分子晶体和原子晶体。离子晶体是由正负离子组成,在晶体中离子趋向于采取紧密堆积的方式^[19]。微生物诱导的碳酸钙晶体由 Ca^{2+} 及 CO_3^{2-} 离子组成,且离子采取紧密堆积方式结合在一起^[20],故判断其为离子晶体。

离子晶体的稳定性与强度同离子晶体晶格能相关;在晶体类型相同时晶格能越大,离子晶体稳定性越强、强度越高。离子晶体晶格能同正负离子电荷数成正比,与离子核间距成反比,因此离子电荷数大,离子半径小的离子晶体晶格能大,相应离子晶体也较稳定、强度也较大^[14]。

根据以上判断及影响离子晶体稳定、强度的因素分析,为提高微生物浆液地基加固防渗效果,选择三种无机试剂(下述为 A、B、C 试剂,三种试剂阴离子在以细菌为核的条件下均可同 Ca^{2+} 紧密结合形成离子晶体)作为微生物浆液的外加剂进行砂土加固试验,通过对比加固防渗效果、分析外加剂对微生物浆液加固砂土效果的影响。

3 外加剂添加试验

3.1 外加剂选择 离子晶体稳定性同离子晶体晶格能相关,正负离子电荷数越大,离子核间距越小,则离子晶体稳定性越好、强度越大。基于此原理,试验选择在特定条件下可同 Ca^{2+} 离子结合生成结晶体的阴离子 A^{2-} 、 B^{-} 、 C^{-} 作为材料进行试验,包含这三类阴离子的试剂分别记为:外加剂 A、外加剂 B、外加剂 C。

3.2 外加剂添加试验方法

(1)通过在微生物营养液中加入一定量的外加剂,探究外加剂 A、B、C 对微生物活性及浓度的影响。

(2)灌注试验。将一定量的外加剂(见表 2)混合加入菌液(100 ml)、钙液(100 ml),分两批次(每次加入菌液、钙液各 50ml)依次连续灌入砂柱(砂柱底面积 706 mm²、高度 50 mm),灌注结束 5 d 后不经过任何处理,检测对比不同灌注方式(外加剂加入菌液和外加剂加入钙液)、不同外加剂及不同外加剂含量对加固砂柱体效果的影响。

4 试验结果及分析

4.1 试验结果 (1)根据表 1 的试验方案进行试验,24 h 后检测微生物生长性能参数,得出不同外加剂种类及不同外加剂含量对微生物活性的影响,具体如表 3 及图 1。

外加剂对微生物菌种生长性能具有较大影响,如图 1,随着营养液中外加剂含量增加,培养 24 h

表 1 外加剂试验方案

外加剂	100ml 营养液外加剂含量	24h 后微生物菌种生长参数
A(液体)	1ml-5ml	OD ₆₀₀ 、微生物活性
B(固体)	1g-5g	OD ₆₀₀ 、微生物活性
C(液体)	1ml-5ml	OD ₆₀₀ 、微生物活性

表2 灌注试验方案

试验批次	编号	外加剂种类	100ml营养液外加剂含量	外加剂灌入方式	灌入菌液体积/灌入钙液体积	测量数据
0	0	无外加剂	0		100ml/100ml	渗透率、抗压强度
1	1-1	A	1ml	外加剂加入钙液后灌入	100ml/100ml	渗透率、抗压强度
	1-2			外加剂加入菌液灌入		
2	2-1		3ml	外加剂加入钙液后灌入	100ml/100ml	渗透率、抗压强度
	2-2			外加剂加入菌液灌入		
3	3-1		5ml	外加剂加入钙液后灌入	100ml/100ml	渗透率、抗压强度
	3-2			外加剂加入菌液灌入		
4	4-1	B	1g	外加剂加入钙液后灌入	100ml/100ml	渗透率、抗压强度
5	5-1		3g	外加剂加入钙液后灌入	100ml/100ml	渗透率、抗压强度
6	6-1		5g	外加剂加入钙液后灌入	100ml/100ml	渗透率、抗压强度
7	7-1	C	1ml	外加剂加入钙液后灌入	100ml/100ml	渗透率、抗压强度
	7-2			外加剂加入菌液灌入		
8	8-1		2ml	外加剂加入钙液后灌入	100ml/100ml	渗透率、抗压强度
	8-2			外加剂加入菌液灌入		
9	9-1		3ml	外加剂加入钙液后灌入	100ml/100ml	渗透率、抗压强度
	9-2			外加剂加入菌液灌入		

注：表中的菌液指特定条件下培养24h后的菌液；钙液是指特定比例下含Ca²⁺和尿素的混合溶液。

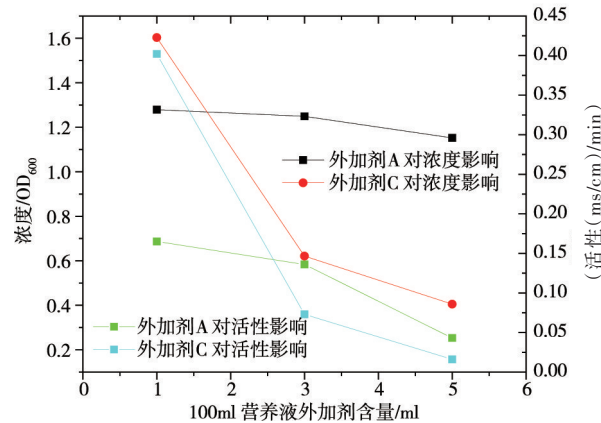


图1 外加剂对微生物生长性能影响

后菌种浓度及活性大幅降低，且含不同外加剂营养液内的菌种活性及浓度降低趋势近似一致。对比无外加剂及有外加剂两种不同培养液内菌种的浓度及活性(表3)，培养24h后含外加剂A的培养液较无外加剂培养液内菌种活性降低80.1%、浓度降低12.2%，含外加剂C的培养液较无外加剂培养液内菌种活性降低97%、浓度降低74.7%；外加剂B同营养液部分成分发生反应、破坏营养成分，未测得有效数据。

(2)按照表2进行室内砂柱体灌注试验，得出不同外加剂种类及不同外加剂含量对灌注砂土效果的影响，因部分灌注砂土体未成

表3 外加剂对微生物生长参数的影响

外加剂种类	100ml营养液外加剂含量	OD ₆₀₀	活性/(ms/cm)/min
无外加剂	0	1.313	0.684
	1ml	1.279	0.165
	3ml	1.249	0.136
	5ml	1.152	0.043
A	1g		
	3g		
	5g		
B	1ml	1.603	0.402
	3ml	0.621	0.073
	5ml	0.405	0.016
C	1ml		
	3ml		
	5ml		

形、未测得全部加固砂柱体的渗透系数及抗压强度。有效检测数据见表4。

灌注结束(仅灌注一次)5 d后,进行渗透系数及强度检测试验。如表4,试验编号为2-1/3-1/3-2/4-1/6-2/7-1/9-1的砂柱体成完整圆柱形(内部无大裂隙),可测得渗透系数;试验编号为2-1/6-1的砂柱体具有均匀完整强度,可测得单轴抗压强度。

(3)根据试验结果,特选取试验编号6-1砂砾体及试验编号0砂砾体(烘干)进行电镜扫描,观察其两者微观结构区别,如图2。

表4 外加剂加固砂效果

试验编号	渗透系数/(cm/s)	抗压强度/MPa
0	1.25×10^{-2}	
2-1	5.74×10^{-4}	2.05
3-1	6.23×10^{-4}	
3-2	8.46×10^{-4}	
4-1	2.42×10^{-3}	
6-1	4.65×10^{-4}	12.3
7-1	9.83×10^{-3}	
9-1	6.24×10^{-4}	

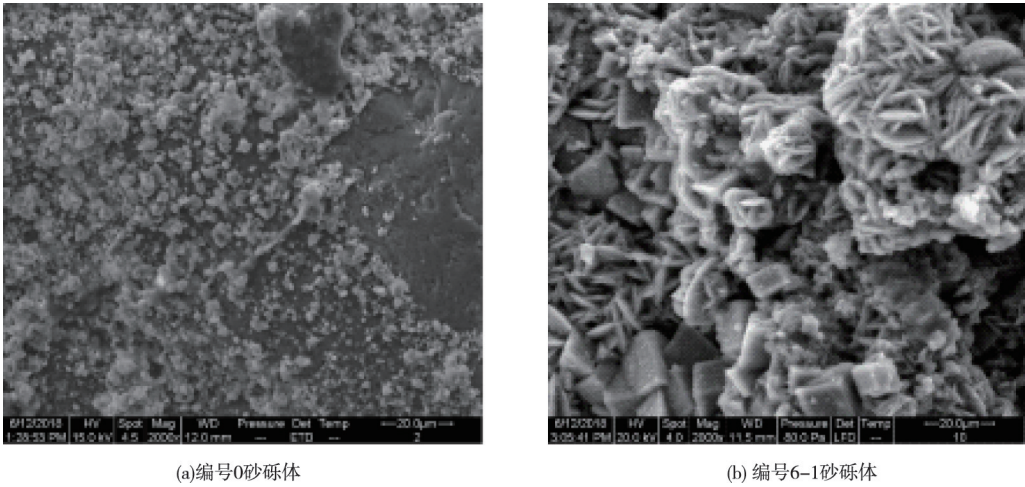


图2 生物浆液生成晶体微观结构

对比两编号砂砾体微观结构发现:编号6-1较编号0砂砾体上的结晶体更密集,且编号6-1砂砾体上同时包含方形及片形结构晶体,而编号0砂砾体上只有方形结构晶体。因此可判断:外加剂B可诱导出不同结构且较密集的晶体。

4.2 试验结果分析 根据室内试验结果,分析不同外加剂对微生物菌种的生长性能及砂土加固效果的影响,得出以下结论:

(1)三种外加剂A、B、C均对微生物菌种的生长有较大影响。培养24 h后,含外加剂A的培养液内菌种活性降低达80.1%,含外加剂C的培养液内菌种活性降低达97%,外加剂含量越多菌种活性降低值越大;外加剂B会同微生物培养液内部分成分反应生成沉淀,破坏了营养液环境,不利于微生物生长。

(2)采用外加剂加入钙液的灌入方法砂砾更易成形且具有一定强度。表4中,测得有效数据砂柱体共7个,其中6个均采用外加剂加入钙液的灌注方式。

(3)相较于无外加剂生物浆液加固砂砾体、有外加剂生物浆液加固砂砾体的渗透系数降低范围介于20%~96%。

(4)通过仅一次连续灌注含外加剂B的微生物浆液,5 d后砂柱的渗透系数可降低到 4.65×10^{-4} cm/s,加固强度可达到12.3 MPa。

4.3 可行性分析 基于晶格能机理外加剂引入微生物浆液技术具有如下优点及缺点。

优点。该技术首先降低了微生物浆液灌浆次数,减少了施工成本、材料成本及人工成本;其次采用该技术灌注微生物浆液后无需加热烘干,简化了施工步骤,利于推广应用;同时室内试验最优固砂效果(加固强度可达到12.3 MPa)可满足工程要求。

缺点。引入外加剂降低了固砂强度,相较于已有研究成果^[14-16],固砂强度降低范围达50%~80%;同时该技术还处于试验阶段,加固砂土效果离散性较大。

因此,该技术可作为推动微生物浆液工程应用的研究突破口,但仍需进行大量室内试验探究总结。

5 结论

本文以离子晶体晶格能原理为思路,选择了三种无机试剂作为外加剂进行了室内试验研究并得出以下结论:

(1)通过引入外加剂可诱导出更多结晶体,降低砂砾渗透系数,提高防渗效果;相较于无外加剂生物浆液加固砂砾体、有外加剂生物浆液加固砂砾体的渗透系数降低范围介于20%~96%。

(2)培养过程中添加外加剂会导致菌种活性降低80%以上,不利于菌种生长。

(3)对比固砂效果,外加剂加入钙液的灌注方式优于外加剂加入菌液的灌注方式。

(4)外加剂B可诱导出不同结构且较密集的晶体,外加剂B(5g)加入钙液灌注,单次灌浆且不烘干条件下,5 d后检测灌注效果。砂柱体渗透系数可降低到 4.65×10^{-4} cm/s,砂柱体强度可达到12.3 MPa。

(5)基于晶格能机理外加剂的引入对微生物浆液固砂技术的推广应用具有一定意义,但仍需进行大量室内外试验探究。

参 考 文 献:

- [1] 叶斌,叶冠林,张锋.液化砂土地基刚度恢复过程的振动台试验[J].水利学报,2012,43(7):877-882.
- [2] 徐宾宾,朱耀庭,寇晓强,等.地震作用下考虑地基土层构成的高耸式结构物动力有限元分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2015,13(3):227-232.
- [3] van PAASSEN L A, GHOSE R, van der Linden T J M, et al. Quantifying biomediated group improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [4] JIMENEZ-LOPEZ C, RODRIGUEZ-NAVARRO C. Consolidation of degraded ornamental porous limestone stone by calcium carbonate precipitation induced by the microbiota inhabiting the stone [J]. ChemopHere, 2007, 68: 1929-1936.
- [5] GHOSH P, MANDAL S, CHATTOPADHYAY B D, et al. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35: 1980-1983.
- [6] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [7] WHIFFIN V S. Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement[D]. Murdoch University, 2004.
- [8] van PAASSEN L A. BiogROUT, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation[D]. Delft University of Technology, 2009.
- [9] OKWADHA G D O, LI Jin. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation[J]. Chemosphere, 2010, 8(1): 1143-1148.
- [10] SALWA AL-THAWADI, RALF CORD-RUWISCH, Mohamed Bououdina. Consolidation of sand particles by nanoparticles of calcite after concentrating ureolytic bacteria in situ[J]. International Journal of Green Nanotechnology, 2012, 4(1): 28-36.
- [11] CACCHIO P, ERCOLE C, CAPPUCCIO G, et al. Calcium carbonate precipitation on by bacterial strains isolated from a limestone cave and from a loamy soil [J]. Geomicrobia, 2003, 20(2): 85-98.
- [12] 程晓辉,麻强,杨钻,等.微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J].岩土工程学报,2013,35

- (8): 1486-1495.
- [13] 沈吉云. 微生物成因土工材料试验及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [14] 麻强. 微生物注浆加固砂土地基的抗液化能力研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [15] 杨钻. 高强微生物砂浆机理与工作性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [16] 李凯, 王丽娟, 李娜, 等. 基于微生物成因的加固砂粒技术研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 148-152.
- [17] 余清鹏, 李娜, 符平, 等. 微生物灌浆加固砂土效果的试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(3): 204-210.
- [18] RONG H, QIAN C, LI L. Influence of molding process on mechanical properties of sandstone cemented by microbe cement[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 238-243.
- [19] 大连理工大学无机化学教研室. 无机化学[M]. 大连: 高等教育出版社, 2005.
- [20] STOCKS-FISCHER S, GALINAT J K, BANG S S. Microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31: 1563-1571.

Preliminary laboratory study on microbial slurry admixture for sand reinforcement

WANG Lijuan^{1, 2}, LI Kai^{1, 2}, FU Ping^{1, 2}, LI Na^{1, 2}, ZHAO Wei-quan^{1, 2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Beijing IWHR Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to improve the sand consolidation effectiveness of microbial slurry, reduce the grouting times of sand consolidation and drying time, this paper tentatively puts forward three kinds of microbial slurry admixture formulations of A, B and C based on the lattice energy mechanism. In addition, the experiments of the effect of additives on the activity of microbial slurry and the effect of additives on the sand consolidation effectiveness of microbial slurry are carried out. The results show that: (1) the microbial activity decreases by 80% when adding additives during the cultivation process, so the additives are not conducive to the growth of microbe. (2) The sand is easier to cement and solidify by adding admixture into the calcium solution. The permeability coefficient of gravel body decreases from 20% to 96%. (3) Additive B is added into the calcium solution and the sand is grouted once without drying. The permeability coefficient of sand consolidation body can be reduced to 4.65×10^{-4} and the compressive strength can reach 12.3 MPa. Therefore, additive B can improve the effect of sand consolidation and the additive based on lattice energy mechanism is conducive to the popularization and application of the sand consolidation technology by microbial slurry.

Keywords: sand consolidation effect; the lattice energy mechanism; the admixture; the microbial activity; permeability coefficient; compressive strength

(责任编辑: 耿庆斋)