

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220307002

粉土中掺入不同比例砂粒对微生物胶结效果影响*

赵志峰, 仲勇亮

(南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 土样的颗粒级配对微生物胶结效果存在影响,但目前的研究很不充分。通过向粉土中掺入砂粒来制备不同级配土样,砂粒占试样总质量的比重由0%增至40%。微生物选用巴氏芽孢杆菌,胶结液选用等比例的尿素和氯化钙溶液,加固方法采用两阶段注浆法。试验结果表明粉土中掺入砂土对于提高处理后的无侧限抗压强度有显著作用,碳酸钙生成量虽然有所减少但分布更均匀。密实度的提高有利于无侧限抗压强度的提升,但试样过于密实将对碳酸钙分布产生不利影响,碳酸钙相对集中在注浆口附近。当试样处于比较松散的状态下,粉土中掺入砂土越多(不超过40%),强度提升越多;密实状态下,粉土中掺入少量砂土(不超过20%)能有效提升强度。试样初始孔隙比越小,处理后的强度越高,但碳酸钙生成量有所下降。随着粉土中砂土掺入量增多、试样密实程度增加,碳酸钙晶体的尺寸有所减小,但数量显著增加。

关键词: 微生物胶结; 掺砂量; 碳酸钙生成量; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU472.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1169-07

Effect of Different Proportion of Sand in Silt on Bio-cementation

ZHAO Zhifeng, ZHONG Yongliang

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The particle size grade of soil has an impact on the effect of bio-cementation; however, the current research on this is insufficient. In this paper, mixed soil of marine silt and single graded sand is strengthened by grouting method. The proportion of sand in the total mass of the sample was increased from 0% to 40%. The compactness is divided into two degrees according to the dry density and initial void ratio of the sample. *Sporosarcina pasteurii* was selected as microorganism, while a urea and calcium chloride solution of equal proportion and low concentration were chosen as the cementing solution, utilizing a two-step grouting method. Based on unconfined compressive strength test, pore volume measurement, acid pickling determination of calcium carbonate and scanning electron microscope test, macro and micro analyses were performed. The test results show that the addition of sand in silt significantly improves the unconfined compressive strength of microbial solidified samples, reduces the production of calcium carbonate and distribute more evenly, which can reduce the treatment cost. The improvement of compactness is significant for the improvement of unconfined compressive strength, but too dense samples will have an adverse impact on the calcium carbonate distribution: calcium carbonate is too concentrated around the grouting mouth. In the loose state, the more sand is

* 收稿日期:2022-03-07;修回日期:2022-04-16

基金项目:国家自然科学基金(51578293)资助

作者简介:赵志峰(1978—),男,副教授,博士。主要从事微生物岩土、地下工程方面的研究。E-mail:zzf0911@163.com

mixed in the silt (no more than 40%), the more the strength is improved. In the dense state, adding a small amount of sand (no more than 20%) into the silt can effectively improve the strength. The smaller the initial void ratio, the greater the strength of the sample, and the less calcium carbonate produced. With the increase of sand content in silt, the sample becomes denser, crystal size decreases, and the number of crystals remarkably increases.

Keywords: bio-cementation; proportion of sand; calcium carbonate amount; unconfined compressive strength

0 引言

传统的地基改良方法是利用机械能或化学材料改善土体的物理化学特性,需要消耗大量能源或在土中掺入水泥类胶凝材料,对环境造成不利影响。微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)是依靠产脲酶微生物新陈代谢产生的高活性脲酶将尿素水解产生 CO_3^{2-} 和 NH_4^+ ;当环境中存在一定浓度 Ca^{2+} 时,便会以微生物细胞为成核点,使吸附在细胞外层 Ca^{2+} 与尿素水解的 CO_3^{2-} 结合析出碳酸钙 CaCO_3 结晶。碳酸钙晶体能在土颗粒间形成有效胶结,从而提高土体的强度和刚度。由于该技术具有反应速率可调控、渗透性强、环境污染少等优点,因此在过去十多年里获得了大量的关注和研究^[1-3]。

砂土由于结构简单、孔隙与微生物尺寸良好的相容性而成为早期微生物改良土体的主要研究对象。目前对于粉土、黏性土等粒径组成更细的土体,虽有一定的研究进展^[4-6],但对于影响因素、加固机理等方面的研究还不充分。自然界中的土体多由粗细不同的颗粒所组成,因此随着研究的深入,研究对象不应局限于单一粒径的砂土,有必要将研究拓展到处理不同级配的土体。

已有研究中关于土体级配对微生物加固效果影响的观点并不一致。有学者认为级配良好的土体加固效果更好:A. Mahawish等^[7]对不同粒径组成的土体进行微生物加固,结果表明加固后的强度可通过改变土体级配来提高;杨钻^[8]发现级配连续土体的加固效果好于单一级配颗粒;B. M. Mortensen等^[9]通过对8种不同粒径的土体进行微生物加固,发现级配良好土体的碳酸钙沉积效率较高。然而部分学者认为级配不良土体的加固效果更好:D. Kim等^[10]认为土颗粒粒径单一、孔隙分布均匀,碳酸钙沉积加固效果好;李捷等^[11]认为级配不良试样由

于颗粒间接触点更多、加固效果更好,同时初始孔隙比对加固效果有直接影响。

综上所述,目前有关土体级配对加固效果的影响存在着不同意见,对于不同级配粉土的研究则更为缺乏。本文在前期已对粉土展开大量微生物加固试验的基础上^[12-13],通过向粉土中掺入不同比例砂土,研究掺砂量对微生物胶结效果的影响,旨在为固化粉土、砂土混合土体和级配不同土体提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 菌液与胶结液

试验用的产脲酶菌选择国内外使用最广泛的巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*),菌种购买于德国菌种保藏中心,培养液采用推荐的培养液。将细菌接种至由大豆蛋白胨、胰蛋白胨、尿素、氯化钠所制备成的液体培养基中。将接种完成的菌液置于振动培养箱中进行培养(振动频率为130 r/min,温度为30℃)18 h后取出。控制菌液的 OD_{600} 值在1.2左右,脲酶活性约为7.0 mmol/min^[14]。

胶结液为摩尔浓度比1:1的尿素与氯化钙的混合溶液。根据之前注浆试验结果^[13]选取0.75 M (mol/L简写为M)作为本次试验的胶结液浓度。

1.2 土样的制备

试验用粉土取自江苏省盐城市东台条子泥吹填工程。该重塑粉土的干密度 1.46 g/cm^3 、孔隙比0.84、塑性指数7.8、渗透系数 $6.61 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。该粉土中粒径0.005~0.075 mm的粉粒占73.3%,黏粒含量低于3%。不均匀系数 $C_u=3.29$,级配不良。

试验用砂土为国内公路灌砂法试验采用的级配单一的标准砂,通过筛分法测得该砂的平均粒径 d_{50} 为0.371 mm。

通过往粉土中掺入不同比例的砂土来配置不

同级配的土样,砂土的掺入质量百分比为0%(纯粉土)、10%、20%、30%、40%。各土样的级配曲线如图1所示,随着掺砂比例增加,粒径大于0.1 mm的曲线部分逐渐平缓,表明不均匀系数逐渐增大。

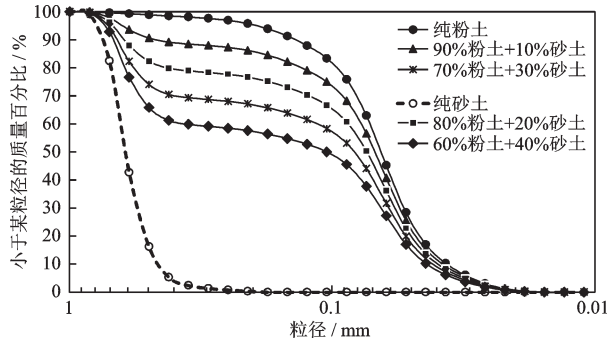


图1 粉土中掺入不同比例砂土的级配曲线

Fig.1 Particle size distribution of silt mixed with different percentage of sand

1.3 制样及注浆

制备试样时,按照比例将不同质量的粉土与砂土充分搅拌混合,分层装入模具中击实并控制试样的初始干密度为定值。在试样的顶部与底部分别放置相同的开孔橡胶塞,保护试样并使得试样顶部与底部截面保持平整。开孔橡胶塞与试样接触面放置四层纱布以防止在注浆过程中土颗粒流失。注浆装置示意如图2所示。

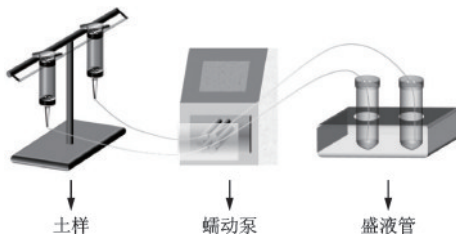


图2 注浆装置

Fig.2 Diagram of grouting device

模具为内径30 mm、高120 mm的注射器。注浆方向为自下往上,速度为1 ml/min。采用两阶段的注浆方式:先往土样中注入2倍孔隙体积(V_v)的菌液,静置12 h待细菌吸附在土颗粒上;然后注入1.5 V_v 左右的胶结液,注入第1次胶结液之前需注入5 ml去离子水,以防止注浆口发生堵塞;随后以12 h为间隔注入多轮胶结液,直至注入全部10轮胶结液。菌液静置时间和胶结液间隔时间选择12 h CaCO_3 产量较多且加固效率较高^[5]。试样制备完毕

后各试样的具体参数见表1。由于本组试样的密实度不高(与后组试样相比),称该组试样为松散组。

表1 松散组试样参数

Table 1 Sample parameters of the loose group

编号	S-0	S-10	S-20	S-30	S-40
掺砂量/%	0	10	20	30	40
干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.42	1.44	1.46	1.48	1.50
初始孔隙比	0.90	0.8	0.74	0.72	0.66

注浆完成后,注入2 V_v 去离子水,去除试样内部剩余的杂质与未溶盐后进行脱模。将脱模后的试样置于60 °C的烘箱中进行烘干处理。将烘干后的试样进行称重,减去注浆前的试样质量,可得到其整体碳酸钙生成质量。经过与酸洗法对比,两种方法得到的 CaCO_3 生成量一致。烘干后的试样两端切削平整,在满足长径比大于2:1的条件后进行无侧限抗压试验,测定其无侧限抗压强度。

将破坏后的试样进行收集,使用酸洗法测定上、中、下不同部分的 CaCO_3 生成量以探究 CaCO_3 在试样中的分布。

2 试验结果分析

2.1 碳酸钙生成量与无侧限抗压强度

如图3所示,试样中的 CaCO_3 生成量随着砂土掺入量的增加而有所减少。这是由于在相同的处理方法下, CaCO_3 生成量受到试样中孔隙体积的影响。随着粉土中砂土掺入量由0%增至40%,试样的初始孔隙比由0.90减少至0.66,孔隙空间的减少使 CaCO_3 生成量百分比由24.6%递减至19.3%。值得注意的是,试样的强度随着砂土掺入量的增加

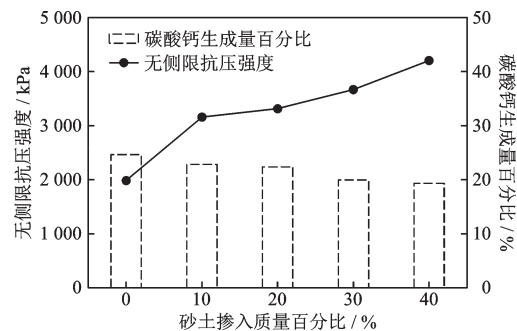


图3 砂土掺量对强度与碳酸钙生成量的影响

Fig.3 Effect of sand proportion on strength and calcium carbonate production in the loose group

而逐渐提高,这与CaCO₃生成量的变化趋势相反。此结果与A. Mahawish等^[7]的发现类似,试样的初始干密度随着砂土掺入量而增加,而初始干密度的增加使处理后的强度提高。

2.2 碳酸钙分布

图4为砂土掺入量与CaCO₃分布的关系。各试样的CaCO₃分布均匀性有所不同,上部的CaCO₃百分比相对较低,这是由于上部离注浆口较远。随着砂土掺入量的增加,试样中CaCO₃分布趋于均匀。砂土掺入量达到40%时,不同部位CaCO₃的差距小于2%,表明CaCO₃分布均匀。同时各部位的CaCO₃生成量均随着砂土掺入量的增加而降低,这与图3的规律类似。增加砂土掺入量会减少土中孔隙,使CaCO₃生成量有所降低。从对CaCO₃分布来看,砂土掺量的增加引起试样上部和中部的CaCO₃含量下降,而试样下部的CaCO₃变化不大,因此使试样中不同部位CaCO₃的含量更接近。

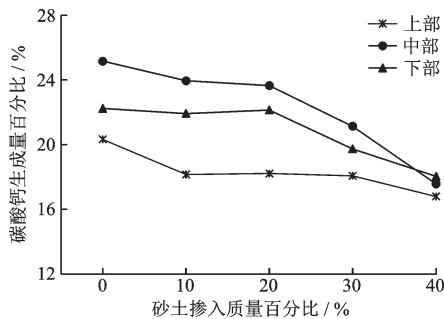


图4 不同掺入砂量的CaCO₃百分比和无侧限抗压强度
Fig.4 CaCO₃ ratio and unconfined compress strength under different cementation solution treatments

试验结果表明,粉土中的掺砂量对加固效果有显著影响。掺砂量的增加使孔隙比减小,不利于在土中大量生成CaCO₃,而掺砂引起的干密度改变会影响土中CaCO₃的分布。干密度的提高意味着试样密实程度的提高和孔隙比的减小,因此需进一步研究密实度对加固效果的影响。

3 提高密实度后的试验结果

上节的结果分析表明,各试样加固效果的不同除了与掺砂量有关外,还可能源于密实程度的不同。崔明娟等^[15]认为同种土体密实度越大其强度

越高。为研究密实程度对试样结果可能造成的影响,制备了干密度更高的试样(密实组),该组试样处于更密实状态。制备完毕后各试样的具体参数见表2。

表2 密实组试样参数

编号	M-0	M-10	M-20	M-30	M-40
掺砂量 / %	0	10	20	30	40
干密度 / (g·cm ⁻³)	1.64	1.68	1.72	1.76	1.80
初始孔隙比	0.66	0.62	0.56	0.54	0.52

3.1 碳酸钙生成量与无侧限抗压强度

图5可以看出密实组试样中的CaCO₃生成量变化规律与图3相似,而强度变化规律不同。砂土掺入量在0~20%时,强度随着砂土掺入量而增大,在20%掺入量时强度出现最大值7 213 kPa;在20%~40%时,加固强度随着砂土掺入量的增加而减小。

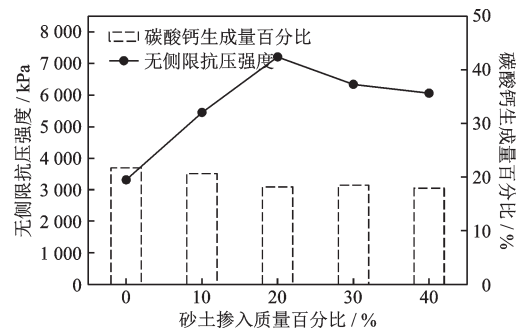


图5 砂土掺量对密实组强度与碳酸钙生成量的影响
Fig.5 Effect of sand proportion on strength and calcium carbonate production in the denser group

3.2 碳酸钙分布

如图6所示,密实组试样中CaCO₃分布不均匀,碳酸钙生成量为下部最多(20.7%~26.6%),中部其次(16.5%~20.4%),上部最少(11.4%~14.4%)。这是由于试样干密度增大后,颗粒排列更密实,增加了菌液和胶结液在土中的运移难度,CaCO₃分布趋于向注浆口集中。图7为两组试样在40%砂土掺入量时的破坏形态:松散组试样的均匀性好,试样破坏形态为劈裂破坏;密实组试样的碳酸钙分布过于集中在下部,导致试样的上部率先破坏。

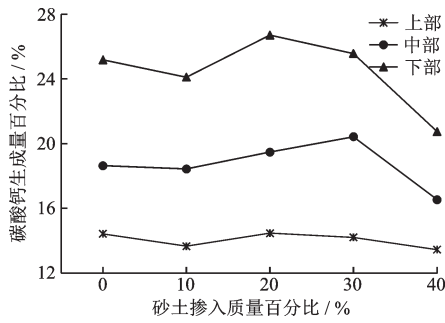


图6 密实组碳酸钙分布

Fig.6 Distribution of calcium carbonate in the denser group

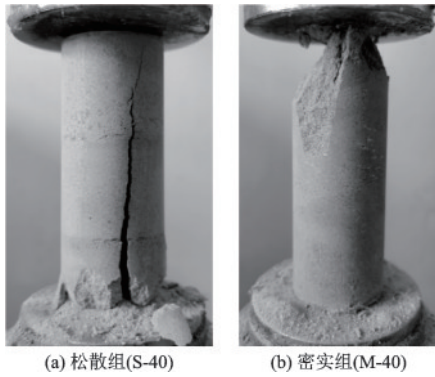


图7 掺砂量为40%时两组试样的破坏形态

Fig.7 Failure modes of two groups of samples with 40% sand content

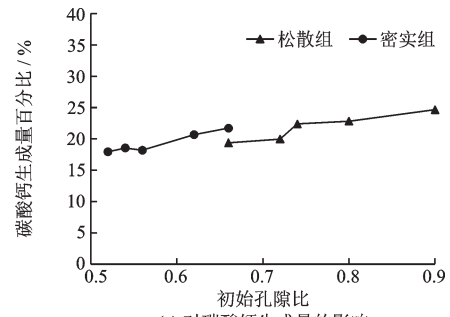
3.3 初始孔隙比的影响

两组试样的无侧限抗压强度、 CaCO_3 生成量百分比与初始孔隙比关系如图8所示。 CaCO_3 生成量随着初始孔隙比而增加,但总体变化幅度不大。相比密实组试样,松散组试样的初始孔隙比更大, CaCO_3 生成量也更多。

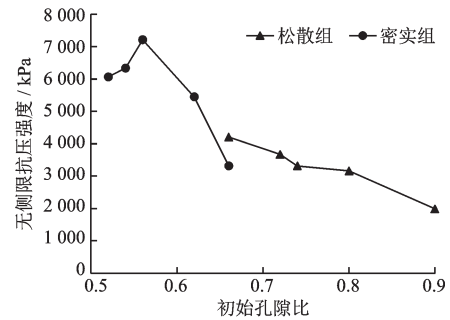
加固后的强度随着试样初始孔隙比的增加而逐渐减小。受密实程度影响,两组试样的加固强度相差较大。密实组的强度出现峰值,而且强度总体高于松散组试样。这表明,初始孔隙比的增大虽然对 CaCO_3 的沉积有所帮助,但不利于提高加固强度。

4 讨论

以上试验结果表明对于松散的粉土试样,较多的砂土掺入量对提升强度是有益的,这可能是由于随着砂土掺入量的增加,颗粒间的孔隙空间不断减小,沉积的 CaCO_3 晶体更加容易填满颗粒间的孔隙,提高试样的胶结效果。



(a) 对碳酸钙生成量的影响



(b) 对无侧限抗压强度的影响

图8 初始孔隙比对碳酸钙生成量和强度的影响

Fig.8 Effect of initial pore ratio on unconfined compressive strength and calcium carbonate precipitation

对比两组不同密实程度试样的加固强度(图9),提高试样的密实度或干密度有利于提高强度。增加试样的密实度可减小颗粒间的孔隙尺寸,其效果和增加砂土掺入量类似。但在过于松散或过密实条件下,不利于强度的提升。然而,增加密实度不利于 CaCO_3 的均匀分布,过高的密实度会使 CaCO_3 沉积向注浆口集中,阻碍后续注浆的进行。

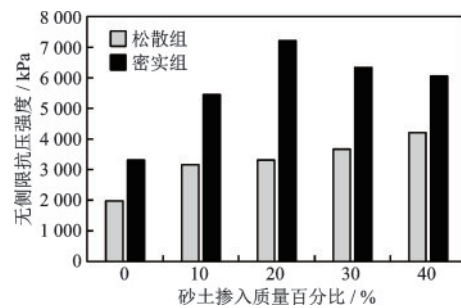


图9 不同密实程度的强度对比

Fig.9 Strength comparison of different compactness

为进一步分析影响加固效果的内在因素,取不同试样进行真空脱水后进行扫描电镜(SEM)分析,结果如图10所示。

对松散组和密实组试样来说,随着砂土掺入量的增加, CaCO_3 晶体的尺寸不断减小,数量不断增加。松散组 CaCO_3 晶体尺寸由 $40\ \mu\text{m}$ 左右(10%砂

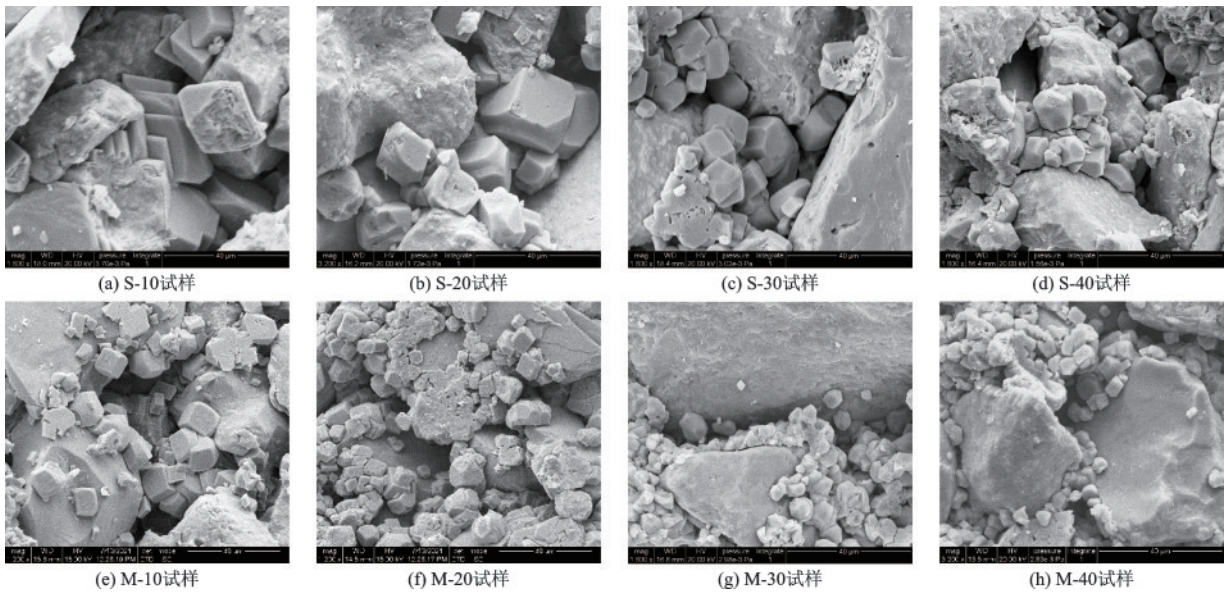


图10 两组试样的SEM图片

Fig.10 SEM images of two groups of samples

土)减小至 $20\ \mu\text{m}$ 左右(40%砂土),而密实组 CaCO_3 晶体尺寸由 $15\ \mu\text{m}$ 左右(10%砂土)减小至 $10\ \mu\text{m}$ 左右(40%砂土)。晶体尺寸的减小可能是由于孔隙减小的限制,影响了晶体尺寸的增长。松散组试样的 CaCO_3 晶体尺寸则普遍大于密实组。松散组试样中的晶体形态更规整,部分晶体填充在孔隙中而未将相邻颗粒进行连结,不能充分发挥胶结土颗粒的作用。密实组试样中的晶体形态不够明显,单位体积下晶体在土颗粒间的接触点更多,分布更加紧密,起到胶结作用的 CaCO_3 晶体较多。值得注意的是,M20试样的强度最高,但其 CaCO_3 晶体数量和尺寸大小相较于其余密实组试样都处于中等水平,此时 CaCO_3 晶体的数量与尺寸更有利于取得好的胶结效果。

5 结论

(1)在粉土中掺入一定比例的砂土对于微生物胶结试样的强度有明显提升作用。当试样密实度不高时,随着掺砂量的提高,试样中 CaCO_3 生成量有所减少但分布更均匀。

(2)增加试样的干密度或密实度,有利于提高加固强度,但可能导致 CaCO_3 分布的均匀性下降。

(3)松散状态下,粉土中掺砂比例增加(不超过40%)有利于提高强度;密实状态下,粉土中掺入一定比例砂土(不超过20%)能有效提升强度。

(4)试样的初始孔隙比对 CaCO_3 生成量有一定

影响,增大初始孔隙比使 CaCO_3 生成量增加,但加固强度明显降低。SEM结果表明,随着试样密实度的增加或孔隙的减小,生成 CaCO_3 晶体的尺寸有所减小,数量不断增加,很多晶体起到了胶结作用。

参考文献:

- [1] Terzis D, Laloui L. A decade of progress and turning points in the understanding of bio-improved soils: A review [J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2019, 19(9):100116.
- [2] Choi S G, Chang I, Lee M, et al. Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 246:118415.
- [3] Mujah D, Shahin M A, Cheng L. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2017, 34(6): 524-537.
- [4] Wani S, Mir B A. Unconfined compressive strength testing of bio-cemented weak soils: a comparative up-scale laboratory testing [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45(10):8145-8157.
- [5] 彭邦阳, 赵志峰, 邵光辉. 胶结液参数对微生物加固粉土的影响 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(3): 456-461.
Peng B Y, Zhao Z F, Shao G H. Effect of cementation solution parameters on reinforcing silt by bio-cementa-

- tion [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 456-461. (in Chinese)
- [6] Cardoso R, Pires I, Duarte S O D, et al. Effects of clay's chemical interactions on biocementation [J]. Applied Clay Science, 2018, 156: 96-103.
- [7] Mahawish A, Bouazza A, Gates W P. Effect of particle size distribution on bio-cementation of coarse aggregates [J]. Acta Geotechnica, 2018, 13(10): 1019-1025.
- [8] 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.
Yang Z. Study on mechanism and working performance of high strength microbial mortar [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [9] Mortensen B M, Haber M J, DeJong J T, et al. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation [J]. Journal of Applied Microbiology, 2011, 111(2): 338-349.
- [10] Kim D, Park K. Effects of ground conditions on microbial cementation in soils [J]. Materials, 2013, 7(1): 143-156.
- [11] 李捷, 方祥位, 申春妮, 等. 颗粒级配对珊瑚砂微生物固化影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 7-12, 43.
Li J, Fang X W, Shen C N, et al. Influence of grain composition on coral sand bio-cementation [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(6): 7-12, 43. (in Chinese)
- [12] 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]. 林业工程学报(自然科学版), 2017, 4(2): 129-135.
Shao G H, You T, Zhao Z F, et al. Microstructure and mechanism of microbial cementation silt treated by biogrouting [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 41(2): 129-135. (in Chinese)
- [13] 韦张林. 注浆参数及养护条件对微生物胶结粉土的影响研究[D]. 南京:南京林业大学, 2019.
Wei Z L. The influence of injecting parameters and curing conditions on microbial cemented silt [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [14] 赵茜. 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)固化土壤实验研究[D]. 北京:中国地质大学, 2014.
Zhao Q. Experimental study on soil improvement using Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [15] 崔明娟, 郑俊杰, 赖汉江. 颗粒粒径对微生物固化砂土强度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增2): 397-402.
Cui M J, Zheng J J, Lai H J. Experimental study of effect of particle size on strength of bio-cemented sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup2): 397-402. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)