

尤浩, 王伟岩, 陶元洪, 等. 微生物胶结橡胶土性能试验研究[J]. 华南地震, 2021, 41(3): 26–32. [YOU Hao, WANG Weiyan, TAO Yuanhong, et al. Experimental Research on Performance of Microbial Cementation Rubber Soil Experimental Study on the Properties of Microbial Cemented Rubber Soil [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(3): 26–32]

微生物胶结橡胶土性能试验研究

尤 浩¹, 王伟岩¹, 陶元洪¹, 李 沛², 周启文³

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 中交天津港湾工程研究院股份有限公司, 天津 300222;
3. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 橡胶土都是一种常用的减震材料, 但是强度较低。采用MICP技术胶结掺入3%以内的橡胶粉末砂土, 试验研究了微生物胶结后橡胶砂土单轴抗压强度、循环加卸载作用特性及其微观结构。研究表明微生物胶结后横波波速和试样密度随橡胶含量增加而增加, 其单轴抗压强度变化不大, 受橡胶含量影响较小。随加卸载循环次数增加, 微生物胶结橡胶粉末砂土阻尼比和滞回环面积逐渐减小, 但是其刚度变化较小。相同加卸载循环次数条件下, 微生物胶结橡胶粉末砂土阻尼比、滞回曲线面积及其刚度随橡胶粉末含量增加而增加。在微生物胶结橡胶粉末砂土中砂土胶结颗粒间, 橡胶粉末与碳酸钙晶体形成了具有一定微观强度的蜂窝孔状结构, 有利于缓冲砂颗粒在外界荷载作用的位置变动, 吸收砂颗粒传递过来的能量, 从而起到减震作用。

关键字: 橡胶粉末; MICP; 减震; 单轴抗压强度; 滞回曲线; 微观结构

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)03-0026-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.03.04

Experimental Research on Performance of Microbial Cementation Rubber Soil Experimental Study on the Properties of Microbial Cemented Rubber Soil

YOU Hao¹, WANG Weiyan¹, TAO Yuanhong¹, LI Pei², ZHOU Qiwen³

(1. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. School of Resources and Safety Engineering of Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Rubber soil is a kind of common damping material, but its strength is low. By using MICP technology to cement sand with less than 3% rubber powder, the paper experimentally studies the uniaxial compressive strength, cyclic loading and unloading characteristics and microstructure of rubber sand after microbial cementation. The results show that after microbial cementation, the shear wave velocity and sample density increase with the increase of rubber content, and its uniaxial compressive strength does not change much, which is less affected by

收稿日期: 2020-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508579, 51674287)

作者简介: 尤浩(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事铁路工程施工研究。

E-mail: 179505688@qq.com.

the rubber content. With the increase of the number of loading and unloading, the damping ratio and the loop area of hysteresis of the microbial cemented rubber powder sand gradually decrease, but the stiffness change is small. Under the same loading and unloading cycles, the damping ratio, the area of hysteresis loop and the stiffness of microbial cemented rubber sand increases with the increase of the content of rubber powder. Among the sand cemented particles in the microbial cemented rubber powder sand, the rubber powder and calcium carbonate crystal form a honeycomb structure with certain micro-strength, which is beneficial to buffer the position change of the sand particles under the external dynamic load and absorb the energy transferred from the sand particles, and thus play a shock absorption effect.

Keywords: Rubber Powder; MICP; Shock Absorption; Hysteretic Curve; Microstructure

0 引言

地震、机械振动可能导致建构物产生振动破坏^[1-2]。汽车轮胎等废弃橡胶对环境造成恶化影响。如何变废为宝地处理废弃橡胶是一个广泛关注的问题^[2]。J.S. Yadav^[3-5]研究了废橡胶轮胎纤维对非骨水泥/胶结粘土的性质的影响,发现了橡胶纤维的加入很好的提高了峰后强度和变化的损失率胶结粘土对韧性的脆性破坏行为。粒状橡胶有助于降低混合物的膨胀压力和压缩指数,这使得它成为一种适用于挡土墙和路堤施工后面的轻质填料。

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)是一种广泛存在于自然界中的一种微生物作用过程,它已经被广泛应用于各种岩土工程中^[6]。DeJong等^[7]研究了经MICP技术固化砂样的抗剪强度变化,发现MICP可有效提高砂样的抗剪强度;Van Paassen^[8]进行了大规模现场砂基实验,研究表明MICP技术可有效提高砂基刚度和承载性能;刘璐等^[9]研究了MICP在防治堤坝破坏中的作用,发现经MICP处理后的堤坝模型表面形成碳酸钙外壳,有效提高了模型抗冲刷侵蚀的能力;Li Duo^[10]研究了MICP在固化风沙中的影响,发现MICP可降低风沙试样的孔隙率和

渗透性,提高其无侧限抗压强度;刘汉龙等^[11]研究了经MICP处理后的钙质砂的动力学特性,发现通过MICP胶结的钙质砂动剪应力比和抵抗变形的能力得到明显提高。这些研究都表明MICP技术能很好的提高砂样的强度,并作为环境友好的水泥等胶结物的替代品^[12-14]。但是采用MICP胶结橡胶土的研究尚未见报道。

本文拟采用MICP胶结不同橡胶含量的砂土,进而试验研究微生物胶结橡胶土的单轴加载和循环加卸载力学性能和细观结构,分析其减震性能和减震机理。研究结果对废弃橡胶高效资源化与环境友好的利用具有参考价值。

1 试验原材料和方法

1.1 试验原材料

本次试验采用的微生物实验材料为巴士芽孢杆菌(*Sporosarcinapasteurii*),采用配置好的CASO+尿素培养基活化,培养基的PH调至7.3并测出巴士芽孢杆菌在培养基下的生长曲线(图1)。图1中OD600值为菌液在600 nm波长处的吸光值。每1升液体培养基中含有15 g酪蛋白胨,5 g大豆蛋白胨,

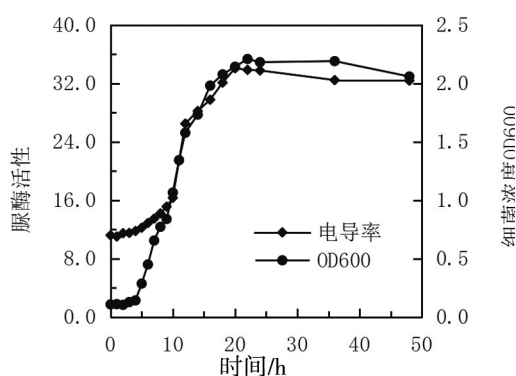


图1 微生物生长曲线

Fig.1 Growth curve of microorganisms

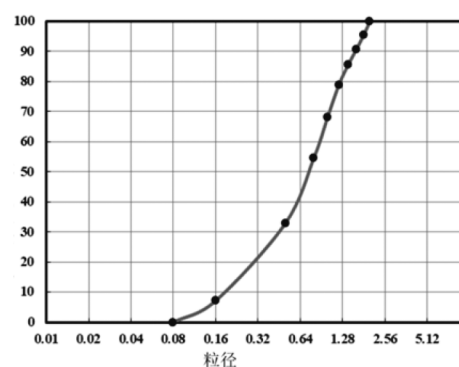


图2 标准砂级配曲线

Fig.2 Standard sand grading curve

20 g 尿素, 15 g 氯化钠。采用 NaOH 调节培养基 pH 至 7.3 ~ 7.8 之间。

试验所用标准砂级配和橡胶粉末见图 2 和图 3。标准砂粒径范围为 0.08 ~ 2 mm, 掺橡胶粉末大小为 400 目。本次试验采用内置纱布的打孔 PVC 管作



图3 橡胶粉末
Fig.3 Rubber powder

1.2 试验方法

本文按质量百分比确定试验的配比, 橡胶的掺量分别为 0%, 1%, 3%, 将橡胶粉末与标准砂样机械持续搅拌 5 min, 使两者均匀混合。分三层装样, 每层加入掺橡胶粉末砂样质量约 115 g, 菌液

为制作试样的模具, 模具规格为直径 50 mm, 高 110 mm 的标准圆柱型。打孔是为了试样周围的氯化钙与尿素溶液能自由的渗流扩散至试样内部, 纱布是为了防止内部混合物的漏出, 试验装样模具见图 4。



图4 试验模具
Fig.4 Test mold

质量为 15 g, 试样高度为 110 mm, 具体参数表 1。将处理后的标准砂与一定比例的橡胶混合均匀后, 分三次加入到上述模具中, 并依次加入配置好的菌液, 每次加入后压实并静置一段时间, 保证材料胶结的均匀性。

表 1 微生物注浆前后试样参数表

Table 1 Test sample parameters before and after MICP

试样编号	橡胶含量/(%)	未加菌液干重/g	加菌液湿重/g	试验前干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	胶结后干重/g	胶结后横波时间/ μs
1	0	345	395	1.60	374.20	72.6
2	1	348.45	398.45	1.61	378.43	80.8
3	3	352.03	400.44	1.63	380.62	62.8

将装入混合物的模具进入配置好的 8 L 胶结营养液中, 每 L 胶结营养液由以下物质组成: 10 g NH_4Cl 、2 g NaHCO_3 、73.5 g CaCl_2 、30 g 尿素、2 g 酪蛋白胨、1 g 大豆蛋白胨。并向溶液中用氧气泵通入流量为 1.2 ~ 1.5 L/min 的氧气, 为细菌生长提供氧气。进行 7 d 的固结作用后将试样取出后进行烘干脱模。脱模后试样见图 5。对烘干后的试样脱模后利用岩石波速仪对试样进行波速测量, 利用 MICP 过程前的试样干重与 MICP 过程后的试样干重之差计算胶结后试样碳酸钙的含量。

利用伺服压力机, 对脱模后的试样进行加卸载循环试样, 分析其减震性能, 应力幅值为 20 ~ 100 kPa, 加载频率为 0.1 Hz, 加卸载循环次数为 9 次,

见图 6。然后测量单轴抗压强度试验。

2 试验结果与分析

2.1 橡胶掺量对试样强度影响

橡胶含量对试样碳酸钙含量、密度和横波波速的影响见图 7。由图 7a 可知: 微生物胶结后, 碳酸钙质量含量为 8.12%~8.60%, 橡胶粉末含量对微生物胶结后碳酸钙含量影响较小, 也证明了橡胶粉末对微生物生长活性及诱导碳酸钙沉淀影响较小。图 7b 显示: 微生物胶结后横波波速和试样密度随橡胶含量增加而增加。

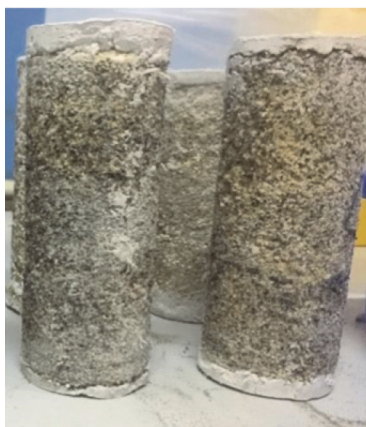


图5 脱模后试样图

Fig.5 Test sample diagram after demolding

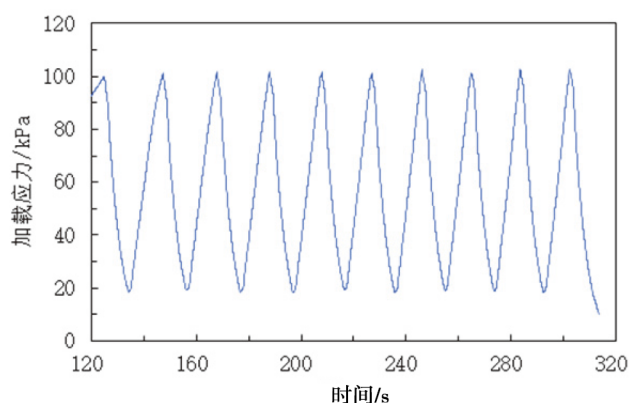
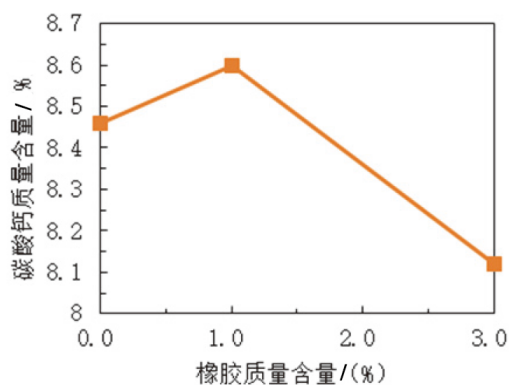
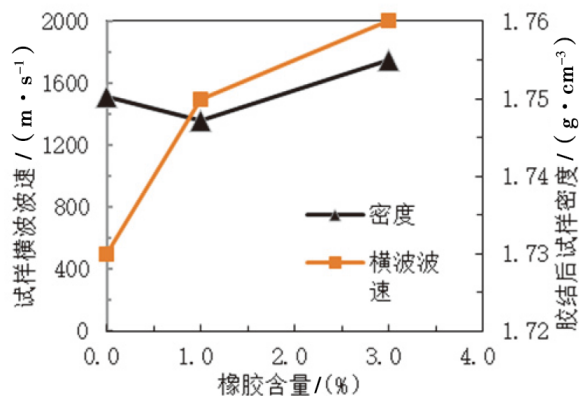


图6 循环加载卸载制度

Fig.6 Cyclic loading and unloading



a 碳酸钙含量



b 密度和横波波速

图7 橡胶含量对试样碳酸钙含量、密度和横波波速的影响

Fig.7 Effect of rubber content on calcium carbonate content, density and shear wave velocity of samples

图8为胶结后试样的单轴压剪应力-应变曲线。由图8可知：应力应变曲线中橡胶含量为0和1%极限应力对应的应变值为0.2左右，而在橡胶含量为3%相应的应变为0.3。可推测是橡胶含量的增加，导致试样的粘塑性变形增加。图9为胶结后试样单轴抗压强度。由图9可知：掺入含量为0%~

3%的橡胶的微生物胶结砂土，其强度为183~223 kPa，掺入了橡胶粉末后，微生物胶结砂土强度变化不大，没有明显的下降。至于图9中显示的强度增加，推测其原因为强度测试结果本身具有的一定的误差。

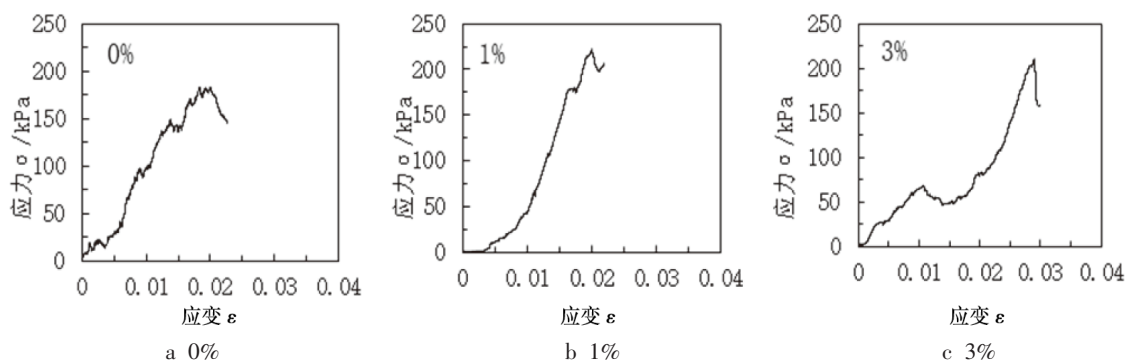


图8 橡胶含量对应力-应变曲线影响图

Fig.8 Effect of rubber content on stress-strain curves

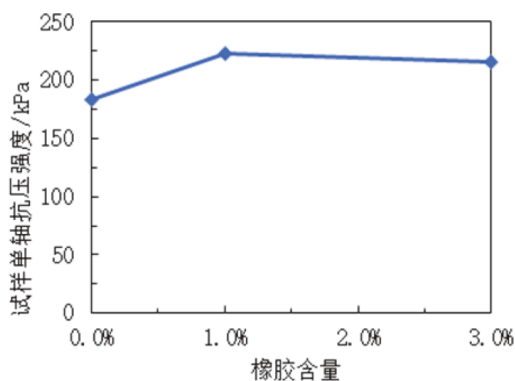


图9 橡胶含量对单轴抗压强度影响

Fig.9 Effect of rubber content on uniaxial compressive strength

2.2 橡胶掺量对微生物胶结砂土滞回曲线影响

图10为不同橡胶粉末含量的微生物胶结砂样

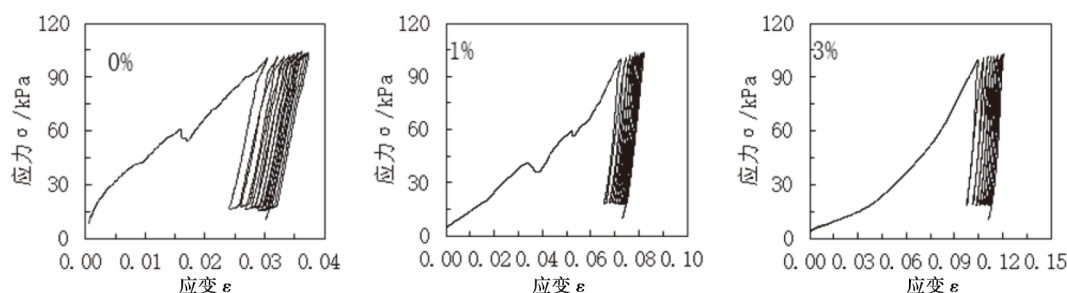


图10 橡胶含量对滞回曲线的影响

Fig.10 Effect of rubber content on hysteresis curve

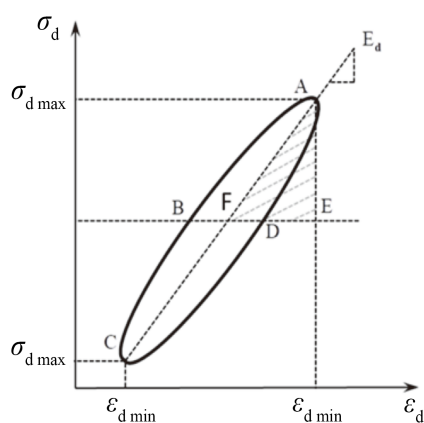


图11 滞回环计算简图

Fig.11 The calculation diagram of hysteresis loop

2.3 橡胶掺量对微生物胶结砂土阻尼影响

图12为不同橡胶粉末含量的微生物胶结砂土的阻尼比曲线。阻尼比由图10和式(1)计算得到。由图12可知：随加卸载循环次数增加，阻尼比是逐渐减小的。推测这是因为加载应力幅值为20~100 kPa，在此加卸载条件下，试样中产生了塑性

的滞回曲线。由滞回曲线可以进一步分析橡胶含量对土体阻尼比、土体刚度和能量耗能能力的影响。图11为试样滞回圈分析简图。根据图11，阻尼比和动弹性模量由式(1)计算得到。

$$\lambda = \frac{A}{4\pi A_s} k = \frac{\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}}{\varepsilon_{d\max} - \varepsilon_{d\min}} \quad (1)$$

式中 A 为滞回圈面积，反应了一个循环周期中所耗散的能量大小。 A_s 为三角形AEF的面积，反应了一个循环周期内所储备的最大弹性应变能。 k 为滞回圈斜率，可以反映土体刚度。 $\sigma_{d\max}$ 、 $\sigma_{d\min}$ 分别为滞回圈中最大和最小动应力， $\varepsilon_{d\max}$ 、 $\varepsilon_{d\min}$ 分别为滞回圈中最大和最小动应变。

变形。通过公式(1)计算得到的包括了塑性变形，而塑性变形是不可恢复的，因此导致计算得到的阻尼比随循环次数增加而减小，由图12也可知：掺量3%的试样阻尼比明显大于掺量0和1%的试样阻尼比。橡胶含量增加可以增加微生物胶结砂的阻尼比，有利于其减震。

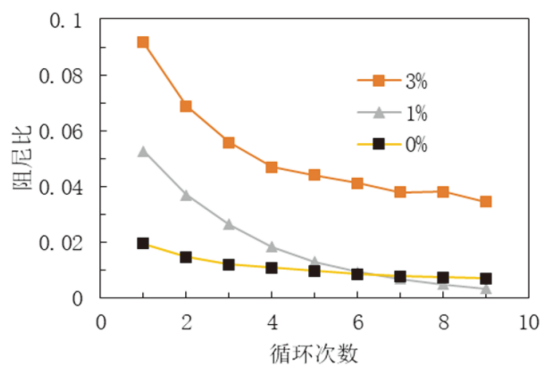


图12 橡胶含量对试样阻尼比的影响

Fig.12 Effect of rubber content on damping ratio of the sample

2.4 橡胶掺量对微生物胶结砂土刚度影响

图13为不同橡胶含量微生物胶结砂土刚度变

化曲线。土体刚度由滞回圈斜率 k 表示。由图13可知:滞回圈斜率 k 随循环次数增加基本保持变化,略有增加。增加橡胶含量(含量0%~3%),微生物胶结砂土滞回圈斜率是增加。图10也可看出0%橡胶含量的滞回圈斜率小于1%、3%橡胶含量微生物胶结砂土的斜率。而增加土体刚度有利于减震。

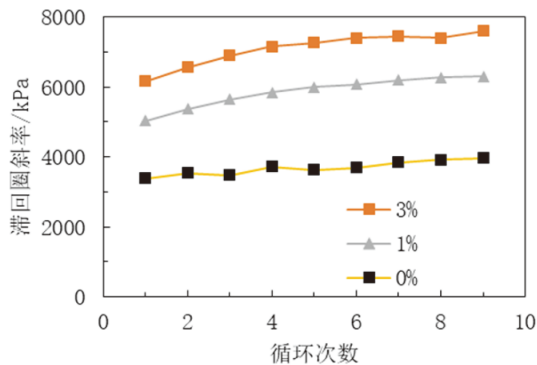


图13 橡胶含量对刚度的影响

Fig.13 Effect of rubber content on stiffness of microbial cemented sand

2.5 橡胶掺量对砂土能量耗散影响

图14为不同橡胶粉末含量的微生物胶结砂土的滞回圈面积变化曲线。滞回圈面积越大,说明土体的耗散能量的能力越大。由图14可知滞回圈面积随着加卸载循环次数增加而减小。推测其原因也是因为滞回环面积中包含了塑性变形。塑性变形是不可完全恢复的,所以滞回环面积随加卸载循环次数增加而减小。由图14也可知,相同循环次数条件下,3%橡胶含量的微生物胶结砂土的滞回环面积大大大于0%,1%橡胶含量的试样滞回环面积。说明增加橡胶含量能增加滞回环面积的,提高试样的能量耗散能量,从而有利于减震。

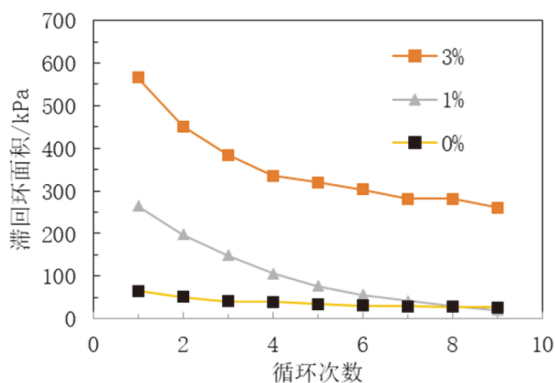


图14 橡胶含量对滞回圈面积的影响

Fig.14 Effect of rubber content on the area of hysteresis loop of microbial cemented sand

3 微生物胶结橡胶土减震机理分析

为进一步探究微生物胶结减震材料强度形成和减震机理,本文利用扫描电镜(SEM)得到自然养护7d的试样试样细观图像,见图15。由图15可知微生物胶结过程中,产量了大量的堆积状颗粒状的碳酸钙胶结晶体。这些颗粒状碳酸钙晶体是由巴士芽孢杆菌在新陈代谢过程中会产生脲酶分解尿素,形成碳酸根离子,进而与钙离子结合从溶液中结晶析出形成的。大量的碳酸钙晶体附着、充填砂颗粒和橡胶粉末聚集体上,见图15中红圈标识的部分。同时将碳酸钙晶体、砂土和胶粉末聚集体胶结在一起,从而形成具有一定的胶结砂土。

图15表明橡胶粉末呈片状堆积形态分布,具有较多的孔隙,微观呈蜂窝孔状结构,且与碳酸钙胶结接触。与碳酸钙胶结接触可使得橡胶粉末具有一定的微观胶结强度,同时片状堆积形态和较多的孔隙有利于产生较大的变形,吸收和耗散地震和振动能量。因此,可认为砂土胶结颗粒提供了胶结体的骨架,使得胶结砂土具有较好的强度,一定的刚度,同时橡胶粉末颗粒在砂土颗粒之间形成了具有一定微观强度的蜂窝孔状结构,有利于缓冲砂颗粒在外界动荷载作用的位置变动,吸收砂颗粒传递过来的能量,从而起到减震作用。

4 结论

采用MICP技术,微生物胶结了掺入3%以内的橡胶粉末的砂土,研究了胶结后橡胶砂土单轴抗压强度、循环加卸载作用特性及其微观结构,得到如下结论:

(1)微生物胶结后横波波速和试样密度随橡胶含量增加而增加,其单轴抗压强度变化不大,受橡胶含量影响较小。

(2)随加卸载循环次数增加,微生物胶结橡胶粉末砂土阻尼比和滞回环面积逐渐减小,但是其刚度变化较小。

(3)相同加卸载循环次数条件下,微生物胶结橡胶粉末砂土阻尼比、滞回环面积和刚度随橡胶粉末含量增加而增加。

(4)在微生物胶结橡胶粉末砂土中砂土胶结颗粒间,橡胶粉末与碳酸钙晶体形成了具有一定微观强度的蜂窝孔状结构,有利于缓冲砂颗粒在外界动荷载作用的位置变动,吸收砂颗粒传递过来的能量,从而起到减震作用。

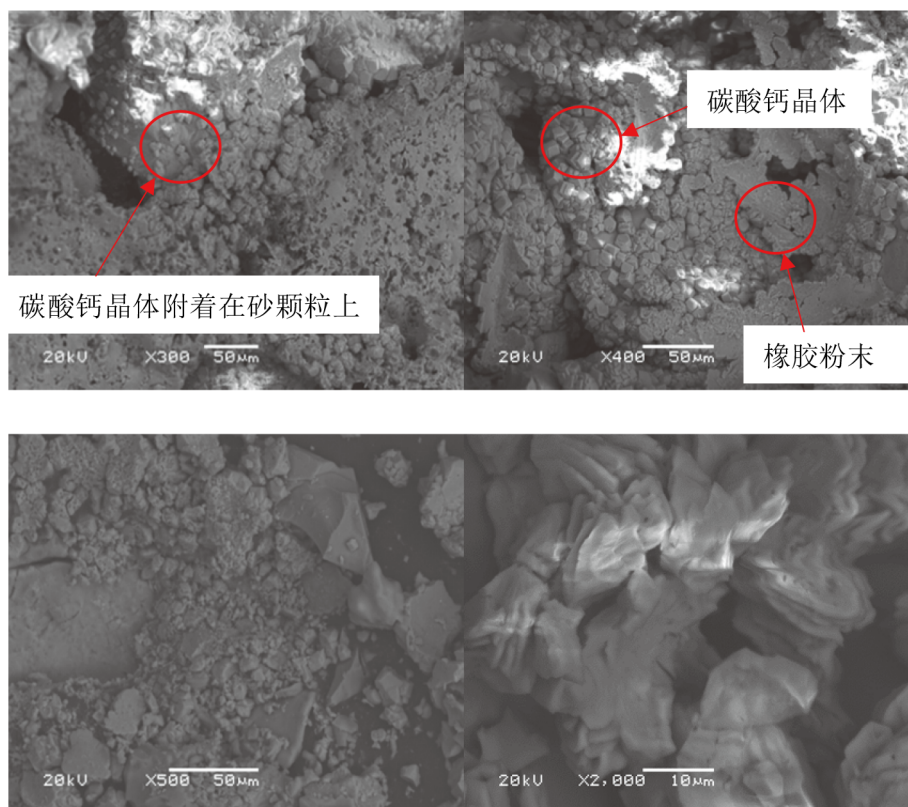


图15 电镜图片

Fig.15 Electron micrograph picture

参考文献

- [1] 蒋鞠慧,尹冬梅,张雄军,等. 阻尼材料的研究状况及进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2010(4):76-80
- [2] 郭建华,曾幸荣,罗权焜. 橡胶阻尼减震材料的研究进展[J]. 特种橡胶制品,2012(6):68-73
- [3] Yadav J S, Tiwari S K. Evaluation of the strength characteristics of cement-stabilized clay-crumbs rubber mixtures for its sustainable use in geotechnical applications[J]. Environment, Development and Sustainability, 2017, DOI: 10.1007/s10668-017-9972-2.
- [4] J.S. Yadav, S.K. Tiwari. Effect of waste rubber fibres on the geotechnical properties of clay stabilized with cement[J]. Applied Clay Science, 2017, 149(dec):97-110.
- [5] J.S. Yadav, S.K. Tiwari. A study on the potential utilization of crumb rubber in cement treated soft clay[J]. Journal of Building Engineering, 2019(9):177-191.
- [6] 钱春香,王安辉,王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(6):1537-1548.
- [7] Dejong J T, Fritzges M B, Nüsslein K. Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11):1381-1392.
- [8] Paassen L A V, Ghose R, Linden T J M V D, et al. Quantifying bio-mediated ground improvement by ureolysis: a large scale biogROUT experiment[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1721-1728.
- [9] 刘璐,沈扬,刘汉龙,等. 微生物胶结在防治堤坝破坏中的应用研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12):3410-3416.
- [10] Li Duo, Tian Kan-liang, Zhang Hui-li, et al. Experimental investigation of solidifying desert aeolian sand using microbially induced calcite precipitation[J]. Construction and Building Materials, 2018(172):251-262.
- [11] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等. MICP胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1):38-45.
- [12] 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(北京), 2014.
- [13] 许江,杨秀贵,王鸿,等. 周期性载荷作用下岩石滞回曲线的演化规律[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(6):754-758.
- [14] 何明明,李宁,陈蕴生,等. 不同循环加载条件下岩石阻尼比和阻尼系数研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9):2531-2538.