

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



营养盐浓度对胶结重塑泥岩试样力学特性及 微观结构的影响试验研究

王绪民, 崔芮, 王铖

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

摘要:采用一次浸泡菌液的方式,制备不同浓度(0、0.3、0.5、0.7 mol/L)营养盐处理的微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)胶结重塑泥岩样。基于直接剪切、碳酸钙酸洗法、扫描电镜(SEM)等试验测试胶结试样,分析了营养盐浓度对胶结试样力学性能、碳酸钙含量及微观结构的影响。结果表明:同等反应条件下(相同时间、体积),随着营养盐浓度的增加抗剪强度先增大后减小,当营养盐浓度达到0.5 mol/L时抗剪强度最大,此时,试样黏聚力、内摩擦角分别为15.5 kPa、18.83°;碳酸钙含量随着营养盐浓度的增加而增加,当营养盐浓度达到0.7 mol/L时,试样平均碳酸钙含量提高较少;碳酸钙晶体分布均匀性随着营养盐浓度由低到高变化呈凸形态;胶结试样的强度依赖于生成的CaCO₃晶体量及其分布形态;生成的方解石型碳酸钙晶体主要沉积在颗粒接触处形成积聚晶体或填充在孔隙中形成“胶结桥”,产生胶结效果而增强试样的力学性能。

关键词:微生物诱导碳酸钙沉淀;重塑泥岩;物理力学指标;营养盐;微观结构

中图分类号:TU411.3;TU411.92 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)04-0076-08

Experimental study on effect of nutrient concentration on mechanical properties and microstructure of cemented remolded mudstone

Wang Xumin, Cui Rui, Wang Cheng

(School of Civil Engineering & Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, P. R. China)

Abstract: Microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) cemented remolded mudstone samples were prepared by injecting one-time bacteria solution with different concentrations (0, 0.3, 0.5, 0.7 mol/L) of nutrient salt treatment. Based on the results of direct shear test, calcium carbonate pickling and scanning electron microscopy (SEM), the effects of nutrient concentration on the mechanical properties, calcium carbonate content and microstructure of the cemented samples were analyzed. The results show that under the same reaction conditions (same time, volume), the shear strength increase at first and then decrease with the increase of nutrient concentration. When the nutrient salt concentration reaches 0.5 mol/L, the shear strength reaches the largest value. At this time, the cohesive force and internal friction angle of the sample are 15.5 kPa and 18.83°, respectively. The content of calcium carbonate increase with

收稿日期:2019-11-13

基金项目:湖北工业大学科研基金(BSQD14040)

作者简介:王绪民(1972-),男,博士,副教授,主要从事岩土工程胶结土力学特性研究,E-mail:wxumin@163.com。

Received:2019-11-13

Foundation items:Research Fund of Hubei University of Technology (No. BSQD14040)

Author brief:Wang Xumin(1972-), PhD, associate professor, main research interest: soil mechanics characteristics of geotechnical engineering, E-mail: wxumin@163.com.

nutrient concentration. When the concentration of nutrient salt reaches 0.7 mol/L, the average calcium carbonate content of the sample increases less. The uniformity of calcium carbonate crystal distribution changes in a convex shape with the increase of nutrient salt concentration from low to high. The strength of the cemented sample depends on the amount of CaCO_3 crystals formed and their distribution. The produced calcite-type calcium carbonate crystals are mainly deposited at the contact position of the particles to form accumulated crystals or filled in the pores to form a “bonding bridge”, which produces a cementation effect and enhances the mechanical properties of the sample.

Keywords: microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP); reshaping mudstone; physico-mechanical index; nutrient; micro structure

随着人口增长和社会经济发展,民用基础设施的需求急剧增加,然而,在新建建筑或公路地基施工过程中经常会遇到稳定性差的泥岩层。泥岩是一种典型的软岩,具有组成成分复杂、孔隙较小等特性,由于环境因素影响(干湿循环、温度等)易发生风化、开裂、崩解、软化、膨胀等变化,使岩土特性发生强烈变化,如日本大部分滑坡发生在沉积软岩中,尤其是泥岩地层^[1]。目前,应用于泥岩地基层的改良技术主要包括两类,一类是通过掺加硅酸盐水泥、石灰、粉煤灰等进行的化学改良,另一类是通过加入绿砂、砂砾等进行的物理改良^[2]。传统的地基改良技术不易控制工程质量,对周围的环境有较大影响。因此,亟需一种新型的泥岩改良技术,以满足实际工程需要。

微生物诱导碳酸钙沉淀是将微生物学中的生物矿化技术应用到土体加固过程中的一种方法^[3]。学者们已经验证了 MICP 方法可以改善土壤工程性质,例如将松散砂粒粘结在一起,改善砂土的工程性质^[4-5]。Gomez 等^[6]用 3 种不同浓度的营养盐(尿素与氯化钙混合液)处理试验砂田,发现当两者浓度过高时, CaCO_3 沉淀速率反而变慢。Nemati 等^[7]发现当钙源浓度大于 0.9 mol/L,尿素浓度大于 1.5 mol/L 后, CaCO_3 沉淀量不会再增加。赵茜^[8]用 7 种不同摩尔的营养盐(氯化钙与尿素的混合液)进行胶结试验,经过短时间(5 d)反应后,当营养盐浓度在 1.5 mol/L 以下时,可以有效增加碳酸钙沉淀量,有利于 MICP 胶结技术的进行。Cui 等^[9]通过室内试验发现,生物胶结砂的强度在很大程度上取决于方解石含量,有效摩擦角、内聚力随着方解石含量的增加显著提高。大量室内试验研究表明,使用该技术可以有效提高砂的延展性、抗液化能力、刚度和强度等^[10-12]。

对于泥岩的改良,檀奥龙等^[13]将碱渣与泥岩混合,改良风化泥岩用于路基填料,研究表明,当掺渣率达到 40% 时,抗压、抗剪强度增加趋于峰值,改良后的泥岩膨胀率下降,且表现为憎水性。顾磊^[14]、徐鹏等^[15]通过石灰改良泥岩,发现泥岩路基膨胀性降低,抗压、抗剪强度有所提高,相关物理性能得到显著改善。祝艳波等^[16]采用改良剂对泥岩风化物进行改良,研究发现:泥岩路基土改良效果水泥>石灰>粉煤灰,适当加入粉煤灰更显著,并且膨胀特性、抗压强度、承载力、水稳定性都有较大改良。刘汉龙等^[17]为了促进微生物岩土技术发展,对涉及的几种主要微生物种类、微生物作用机理、相关岩土工程领域的应用进行分析与总结。彭劫等^[18]开展了不同胶结液浓度下 MICP 压力灌浆加固有机质黏土,发现微生物处理后的试样有机质含量、无侧限抗压强度、渗透系数都得到显著改善,胶结液浓度的变化会直接影响无侧限抗压强度。刘斯凤等^[19]应用多种微生物对岩样进行处理,发现单一细菌作用时岩样渗透系数下降最多,填充效果最好。

以上研究结果为微生物诱导碳酸钙改良泥岩提供了理论依据。笔者以重塑泥岩为研究对象,为改良泥岩的水稳定性,增强泥岩的相关力学性能,将微生物应用到泥岩中,胶结试样在不同浓度营养盐条件下采用一次浸泡菌液的方式进行处理,以研究不同营养盐浓度对胶结试样力学性能及微观结构的影响。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

试样取自湖北省武汉市某地下工程施工现场,泥岩取土深度为 23 m 左右。泥岩的基本物理性质见表 1。由于 $I_L = -2.77 < 0$,表明泥岩试样处于坚

硬状态。为研究泥岩的成分,将原状试样通过玛瑙研钵碾碎过 0.075 筛,然后放入温度为 110 ℃ 的烘干箱中烘干 24 h,冷却后取 8 g 粉末进行 X 射线衍射分析,物相分析发现,试样主要成分为石英、伊利石、

钠长石、白云石和斜绿泥石,其中,石英含量最高为 33.3%,积分强度为 $1\ 620\ \text{cm}^{-1}$ ($2\theta=26.5^\circ$),伊利石和钠长石含量次之,分别为 27.1% 和 21.47%,白云石和斜绿泥石含量较少。

表 1 泥岩的基本物理性质

Table 1 Physical properties of mudstone

天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	天然含水率/%	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数
2.42	2.43	1.92	31.46	23.76	7.7	-2.77

泥岩颗粒级配曲线如图 1 所示,泥岩 d_{60} 为 1.8 mm, d_{10} 为 0.11 mm, d_{30} 为 0.55 mm, 不均匀系数 C_u 为 16.36, 曲率系数 C_c 值为 1.53, 表明泥岩级配良好。

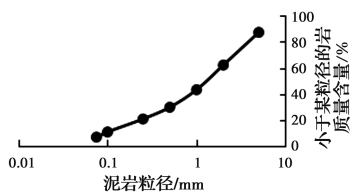


图 1 泥岩试样颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curve of mudstone sample

试验菌种为巴氏生孢八叠球菌(编号为 CGMCC1.3687),购自中国普通微生物菌种保藏管理中心。采用体积为 100 mL 的液体培养基(培养基内固体配方为 20 g/L 酵母浸粉、10 g/L NH_4Cl 、10 mg/L $\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ 及 24 mg/L $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$)进行菌种复苏,其中,液体培养基 pH 值用 1 mol/L 的氢氧化钠溶液调制至 8.4。培养基经过 121 ℃ 高压蒸汽灭菌桶中灭菌 20 min,冷却至常温后放入无菌操作台中进行菌种接种,随后放入温度为 30 ℃、转速为 200 r/min 的摇床培养箱中培养 48 h,当液体培养基出现浑浊后停止培养。采用紫外可见分光光度计测试菌液密度(OD_{600}),控制 OD_{600} 值为 1.0。为了保障试验菌株的准确性,将培养好的菌液吸取少量在显微镜下进行镜鉴,由巴氏生孢八叠球菌镜鉴图 2 可知,菌液经草酸铵、碘液、95% 乙醇乙醚处理后,显微镜下的细菌为紫色短杆状,因此符合试验菌种要求。

1.2 试验方案

1.2.1 试验目的 为探讨不同营养盐浓度对胶结重塑泥岩的力学性能影响,对微生物处理的试样营养盐浓度进行控制,分别采用浓度为 0、0.3、0.5、

0.7 mol/L 的同体积营养盐溶液(2.5 L)对试样采用一次浸泡菌液的方式进行胶结处理。

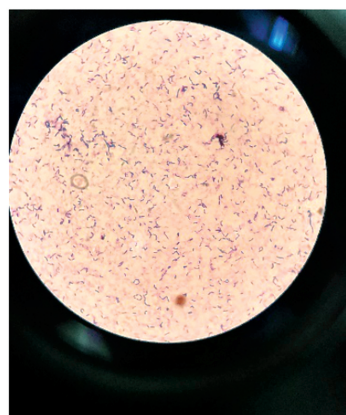


图 2 巴氏生孢八叠球菌显微镜下镜鉴图

Fig. 2 Microscopic view of the bacterium of the genus

1.2.2 试样制作 试样采用 $\phi 61.8\ \text{mm}$ (20 mm 的钢环刀进行制备,制作过程:1)在钢环刀底部放置一块直径为 79.8 mm \times 10 mm 的透水石。2)称取 95 g 重塑泥岩样(初始孔隙率为 0.54),其中,直径为 1.00~0.25 mm,混合搅拌均匀后倾倒入内壁涂有凡士林的钢环刀中,用千斤顶压实控制试样高度为 20 mm,取出后并在泥岩顶部放置滤纸和另一块透水石。3)将配好的 2.5 L 菌液倾倒入容器内并淹没透水石顶部,静置 2 h 后随即将等量的 0.05 mol/L 的 CaCl_2 溶液换入。4)再次静置 2 h 使菌株有足够的时间吸附在泥岩颗粒表面,之后将 2.5 L 的营养盐(等摩尔的氯化钙+尿素混合溶液)换入。5)间隔 48 h 后,换一次营养盐溶液,试样放入温度为 30 ℃ 的恒温箱进行培养。6)之后,每隔 48 h 换一次营养盐溶液,营养盐溶液浸泡进行到第 7 d 后停止。

随着反应时间的增加,吸附在泥岩颗粒表面的微生物以营养盐中的氯化钙为钙源,基于 MICP 方法便会在泥岩颗粒与颗粒接触处或孔隙中生成碳酸

钙沉淀,减少孔隙空间,有效地使泥岩胶结成一个整体。最终如图3锁死松散泥岩颗粒被胶结成具有一定力学性能的整体。

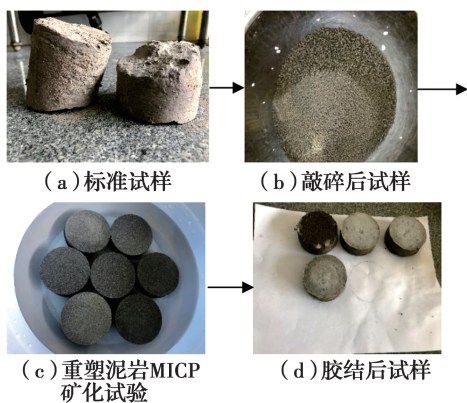


图3 通过MICP方法生成胶结物试验过程

Fig. 3 Test procedure for the formation of cement by the MICP method

1.2.3 直接剪切试验 采用不同浓度营养盐对泥岩试样进行微生物处理,对培养7 d后的胶结试样及未固化的重塑样进行直接剪切试验。试验采用应变控制式直剪仪,一共做4组试验,每组有4个试样,共计16个样,其中,垂直压力取100、200、300、400 kPa,依次施加各级垂直压力。为了保证试验的顺利进行,试验前对胶结试样和未固化重塑样进行抽真空饱和(真空抽气时间为4 h、浸水时间为24 h),然后将试样分别装于应变控制式直剪仪进行直接剪切试验,最后需向剪切盒内四周加水保证试样饱和,剪切速率取0.8 mm/min,每15 s读取数据一次,剪切位移达到6 mm视为该试样剪损。

1.2.4 碳酸钙质量试验 直接剪切试验后,将破坏后的整个未固化重塑泥岩试样与胶结试样收集起来放入容量为1 L的烧杯中,每组取4个平行试样进行平均值测试,通过酸洗试验测定胶结试样中的CaCO₃质量。首先,将分析纯盐酸稀释成浓度为2 mol/L的稀盐酸,然后,将整个试样置于其中进行溶解反应,待试样完全溶解无气泡产生为止。用纯水将溶解后的重塑泥岩样进行多次水洗,由于泥岩遇水易浑浊,每次水洗后静置一段时间,待上部水清澈后,倒出上清液。纯水洗完后放入110℃的烘箱中烘干,烘干时间为12 h。酸洗试验前后试样的质量差即为MICP方法诱导产生的CaCO₃质量。

1.2.5 扫描电镜 为了观察经过4种不同营养盐浓度处理后试样的微观形貌。将3种不同胶结试样

通过直接剪切试验破坏后各取一部分用小刀切成1 cm×1 cm×1 cm块状,再将原状泥岩试样也用小刀切成1 cm×1 cm×1 cm块状,随即抽取真空后放入110℃烘箱中进行烘干,冷却后对试样进行喷金处理,放入扫描电镜中进行SEM测试,观察试样微观结构。

2 试验结果分析

2.1 直接剪切试验结果分析

为了更好地体现胶结泥岩的力学性能,对试样进行直接剪切试验。一组4个试样,分别在不同垂直压力下,施加水平剪切力进行剪切,测得剪切破坏时的剪应力,然后根据库仑理论确定试样的抗剪强度指标(黏聚力、内摩擦角)。图4为同垂直压力下不同试样的剪应力-剪切位移关系曲线。从图4可知,随着垂直压力的增大,标准泥岩和胶结试样在各级垂直压力下达到剪应力峰值后渐渐趋于稳定,可见标准泥岩和胶结泥岩均属于应变硬化的特征。当垂直压力为200 kPa时,可以看出试样抗剪强度0.5 mol/L>0.3 mol/L>0.7 mol/L>标准泥岩。营养盐浓度从0.3 mol/L增至0.5 mol/L时,胶结试样的剪应力也在增加,抗剪强度0.5 mol/L>0.3 mol/L,但浓度增至为0.7 mol/L时,胶结试样抗剪强度反而比0.3 mol/L低。崔明娟等^[20]选用浓度为1.0 mol/L的营养盐处理标准砂,发现标准砂试样宏观上表现为无侧限抗压强度较低。说明随着营养盐浓度的增加能有效改善试样的强度,但营养盐浓度过高试样的胶结效果反而降低,因此,进行胶结试验必须合理选用营养盐浓度。

胶结试样抗剪强度的提高,是由于微生物诱导产生的方解石晶体填充到试样孔隙中形成“胶结桥”,增强胶凝力,积聚晶体沉积在颗粒接触处包裹着颗粒,从而改变颗粒的粒径大小,对黏聚力和内摩擦角都有一定的影响,胶结泥岩试样黏聚力、内摩擦角的增加是其力学性能改善的直观表现。试验中低浓度的营养盐(0.3、0.5 mol/L)在浸泡过程中会产生较小的碳酸钙晶体,一方面可以较为均匀地分布在泥岩颗粒表面,另一方面不易堵塞试样内的孔隙,确保了后续浸泡过程中吸附于泥岩颗粒表面的细菌能够充分汲取营养盐诱导产生碳酸钙晶体,并使碳酸钙晶体均匀地沉积在泥岩颗粒表面。因此,0.3、0.5 mol/L试样整体性较好,抗剪强度较高。由于

0.5 mol/L 试样内碳酸钙含量比 0.3 mol/L 试样多,故 0.5 mol/L 试样抗剪强度要高于 0.3 mol/L 试样。

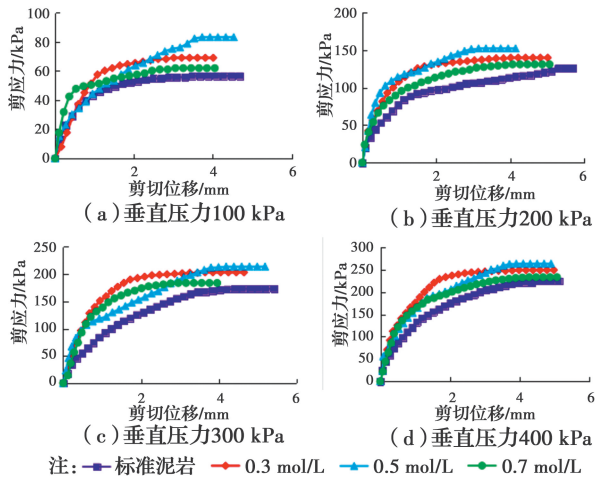


Fig. 4 Shear stress-shear displacement curve of sample

从表 2 可以看到,当垂直压力为 400 kPa 时,营养盐浓度从 0 增加至 0.7 mol/L,标准泥岩样抗剪强度为 127 kPa,而胶结试样抗剪强度最大值为 149 kPa,增加了 22 kPa。通过抗剪强度与垂直压力的关系曲线计算得出,标准试样黏聚力和内摩擦角分别为 4 kPa、17.33°,0.7 mol/L 试样的黏聚力和内摩擦角稍低分别为 6 kPa、17.80°,0.5 mol/L 试样黏聚力和内摩擦角最高,黏聚力和内摩擦角分别增长了 288%、8.66%,说明采用浓度为 0.5 mol/L 的营养盐时泥岩胶结效果最佳,这与郭伟等^[21]的研究结果基本一致。

2.2 碳酸钙含量分析

试验研究发现,试样中碳酸钙含量的增加将影响试样的孔隙率大小,碳酸钙含量的高低与试样力学性能有关,力学性能的好坏又与微生物胶结效果有直接关系,因此,可以将 CaCO_3 沉淀量作为一个

表 2 试验结果

Table 2 Results of tests

试样	垂直压力/kPa	试样干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗剪强度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	碳酸钙含量/%	平均 CaCO_3 含量/%
标准 泥岩	100	1.92	32				
	200	1.88	71				
	300	1.94	98	4	17.33	0	0
	400	1.90	127				
0.3 mol/L	100	2.04	39			5.13	
	200	2.02	79			5.67	
	300	1.98	115	9.5	18.42	6.48	5.66
	400	2.03	138			5.35	
0.5 mol/L	100	2.02	47			9.76	
	200	2.05	86			9.45	
	300	1.99	121	15.5	18.83	10.34	9.85
	400	2.03	149			9.83	
0.7 mol/L	100	2.08	35			9.87	
	200	2.11	74			9.07	
	300	2.05	104	6	17.80	10.38	9.99
	400	2.10	132			10.65	

重要的参考指标。从表 2 可以看出,碳酸钙含量随着营养盐浓度的增加而增加,其中,0.7 mol/L 试样与 0.5 mol/L 试样平均碳酸钙含量较接近,分别为 9.99%、9.85%,0.3 mol/L 试样平均碳酸钙含量最低为 5.66%。虽然浓度为 0.7 mol/L 的试样生成的平均碳酸钙含量最高,但由于高浓度营养盐不均

匀性的影响^[22-23],浓度为 0.5 mol/L 的试样胶结效果反而更好,这与直接剪切试验抗剪强度规律基本一致。碳酸钙含量与孔隙率减少也有关,图 5 为不同试样孔隙比与压力关系曲线,从图 5 可知,随着垂直压力从 0 增大到 1 600 kPa 时,4 种试样的孔隙比都随之减小,其中 3 种胶结试样的孔隙比比标准泥

岩试样都小,说明胶结试样更密实,强度性能更好。3种不同营养盐浓度处理下,孔隙率都有所减少,其中,0.7 mol/L 试样碳酸钙含量比 0.5 mol/L 试样高,孔隙率 0.7 mol/L 试样比 0.5 mol/L 试样小,这符合实际情况,但 0.3 mol/L 试样碳酸钙含量最低,反而孔隙率最小,是因为低浓度的营养盐更易在孔隙中流动,促进方解石沉淀从而填充到孔隙中减小试样的孔隙率,与 0.3 mol/L 试样的力学性能大于 0.7 mol/L 试样一致。

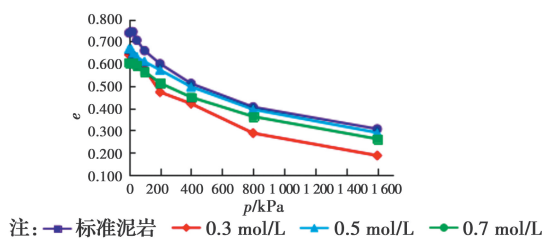


图5 试样孔隙比与压力关系曲线

Fig. 5 sample void ratio versus pressure curve

2.3 胶结泥岩微观分析

有效 CaCO_3 沉淀晶体的形成大致可分为两种:颗粒接触胶结(由颗粒-颗粒接触处沉淀的碳酸钙晶体引起);碳酸钙-碳酸钙胶结(由相邻颗粒之间的碳酸钙晶簇引起)[24-25]。

从图 6(a)、(b) 试样 SEM 图可以看出,未经处理的试样放大 800 倍可以观察到泥岩的表面显示出较差的光滑度,孔隙和裂缝在试样中普遍存在,并且具有圆形、矩形和不规则尺寸的可见微孔。泥岩整体呈现不规则结构,孔隙主要存在于结构完整性差的颗粒中。放大试样到 2 000 倍可以发现,泥岩中存在许多小碎屑和较大的矿物颗粒,颗粒尺寸范围从几 μm 到几百 μm ,其中,矿物颗粒有块、片状,圆度均匀,主要接触在泥岩表面,呈絮凝状结构。矿物与矿物颗粒之间是线对线或点对线连接,有明显的间隙。从图 6(c)~(h) 胶结试样可以清晰地看到碳酸钙沉淀晶体,晶体颗粒形貌、尺寸大小不一。其中,通过 MICP 方法处理后生成菱形、薄片状的方解石晶体(菱形是方解石的典型特征)为主。由于营养盐溶液填充到整个孔隙空间,晶体可以自由沉淀而不受尺寸和位置的限制。

图 6(c)、(d) 为 0.3 mol/L 胶结试样,从图中可以看出,方解石晶体颗粒粒径尺寸较小、分布较分散且以积聚晶体的形式沉积在颗粒接触处或孔隙内。图 6(g)、(h) 为 0.7 mol/L 胶结试样,此时的方解石

晶体颗粒主要为薄片状,且方解石晶体分布较分散,方解石晶体沉积在颗粒表面处。与其他两组胶结试样相比,图 6(e)、(f) 为 0.5 mol/L 胶结试样,图中方解石晶体颗粒分布较均匀且粒径尺寸较小,重塑试样被碳酸钙晶体包裹着,方解石晶体沉积在颗粒接触处形成积聚晶体,或填充在重塑泥岩孔隙空间中形成“胶结桥”,产生胶凝力。

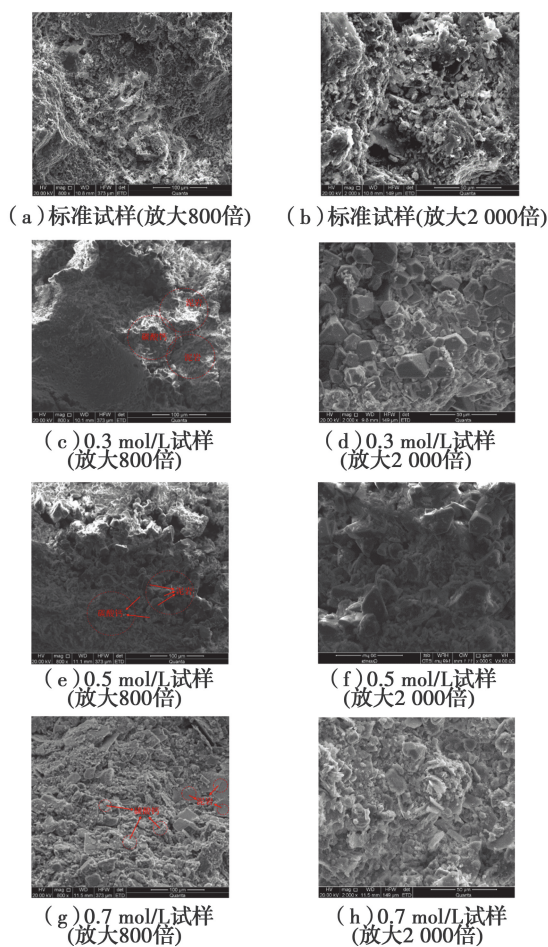


图6 试样 SEM 图

Fig. 6 SEM images of specimens

3 结论

1) 原状试样与胶结试样均表现为应变硬化特征,黏聚力 c 与内摩擦角 φ 都有所增加。胶结试样的强度与生成 CaCO_3 晶体含量及分布形态有关,控制其他反应条件不变,随着营养盐浓度的增加,其抗剪强度 0.5 mol/L 试样 > 0.3 mol/L 试样 > 0.7 mol/L 试样 > 标准泥岩。

2) 经过物相分析,晶体可以自由沉淀而不受尺寸和位置的限制,碳酸钙晶体沉积在颗粒孔隙中形成“胶结桥”,或吸附在试样颗粒表面,被碳酸钙晶体

包裹着形成积聚晶体。

3)胶结试样的强度依赖于试样内产生的 CaCO_3 晶体量及其分布形态,其中,0.5 mol/L 试样方解石晶体颗粒分布较均匀且粒径大小相差不大,故胶结效果最好。

参考文献:

- [1] BHATTARAI P, TIWARI B, MARUI H. Variation of soil properties in mudstone with depth and its effect on slope stability [C]//Geo-Denver 2007, February 18-21, 2007, Denver, Colorado, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2007.
- [2] 王建磊, 王艳巧, 杨广栋, 等. 干湿循环条件下水泥改性膨胀土变形和强度试验[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4): 62-66.
WANG J L, WANG Y Q, YANG G D, et al. Experimental research deformation and shear strength on cement-treated expansive soil during wetting-drying cycles [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016, 37(4): 62-66. (in Chinese)
- [3] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R, et al. Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(4): 587-598.
- [4] 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.
- [5] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [6] GOMEZ M G, MARTINEZ B C, DEJONG J T, et al. Field-scale bio-cementation tests to improve sands [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2015, 168(3): 206-216.
- [7] NEMATI M, VOORDOU W G. Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003, 33(5): 635-642.
- [8] 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.
ZHAO Q. Experimental study on soil improvement using microbial induced calcite precipitation (MICP) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [9] CUI M J, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. Influence of cementation level on the strength behaviour of bio-cemented sand [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(4): 971-986.
- [10] FENG K, MONTOYA B M. Influence of confinement and cementation level on the behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(1): 04015057.
- [11] KHOUBANI A, EVANS T, MONTOYA B M. Particulate simulations of triaxial tests on bio-cemented sand using a new cementation model [C]//Geo-Chicago 2016, August 14-18, 2016, Chicago, Illinois. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2016: 84-93.
- [12] 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.
QIAN C X, WANG A H, WANG X. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)
- [13] 檀奥龙, 魏连雨, 王清洲. 碱渣改良风化泥岩的物理力学试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2610-2615.
TAN A L, WEI L Y, WANG Q Z. Physical and mechanical experimental study on improving weathered mudstone with soda residue [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(8): 2610-2615. (in Chinese)
- [14] 顾磊. 石灰改良泥岩风化物工程性质试验研究[J]. 铁道建筑, 2017(3): 85-88.
GU L. Experimental study on engineering properties of lime-improved weathered mudstone [J]. Railway Engineering, 2017(3): 85-88. (in Chinese)
- [15] 徐鹏, 蒋关鲁, 任世杰, 等. 红层泥岩及其改良填料路基动力响应试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 678-683, 692.
XU P, JIANG G L, REN S J, et al. Experimental study of dynamic response of subgrade with red mudstone and improved red mudstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 678-683, 692. (in

Chinese)

- [16] 祝艳波, 余宏明, 杨艳霞, 等. 红层泥岩改良土特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 425-432.

ZHU Y B, YU H M, YANG Y X, et al. Indoor experimental research on characteristics of improved red-mudstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 425-432. (in Chinese)

- [17] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 1-14.

LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)

- [18] 彭劼, 温智力, 刘志明, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固有机质黏土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 733-740.

PENG J, WEN Z L, LIU Z M, et al. Experimental research on MICP-treated organic clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 733-740. (in Chinese)

- [19] 刘斯凤, 杨思禹, 史翠平, 等. 微生物对裂隙岩样渗透系数的影响[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(10): 5-8, 24.

LIU S F, YANG S Y, SHI C P, et al. Study on permeability of cracked rock filled by microbial carbonate precipitation [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(10): 5-8, 24. (in Chinese)

- [20] 崔明娟, 郑俊杰, 章荣军, 等. 化学处理方式对微生物固化砂土强度影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(Sup1): 392-396.

CUI M J, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. Study of effect of chemical treatment on strength of bio-cemented

sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup1): 392-396. (in Chinese)

- [21] 王绪民, 郭伟, 余飞, 等. 营养盐浓度对胶结砂试样物理力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(Sup2): 363-368, 374.

WANG X M, GUO W, YU F, et al. Experimental study of effect of nutrient concentration on physico-mechanical properties of cemented sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup2): 363-368, 374. (in Chinese)

- [22] HARKES M P, VAN PAASSEN L A, BOOSTER J L, et al. Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 112-117.

- [23] AL QABANY A, SOGA K, SANTAMARINA C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8): 992-1001.

- [24] 王明, 丁杨, 闫红旭, 等. 碳化法形貌可控制备碳酸钙的研究[J]. 无机盐工业, 2018, 50(12): 33-36.

WANG M, DING Y, YAN H X, et al. Study on morphology-controllable synthesis of calcium carbonate in carbonization process [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2018, 50(12): 33-36. (in Chinese)

- [25] 闫长领, 卢雁, 周建国, 等. 高纯度高长径比 CaCO_3 晶须的制备[J]. 应用化学, 2004, 21(5): 515-517.

YAN C L, LU Y, ZHOU J G, et al. Preparation of calcium carbonate whisker of high purity and high aspect ratio [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2004, 21(5): 515-517. (in Chinese)

(编辑 胡玲)