

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.155

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# EICP-木质素联合固化粉土的试验研究

张建伟,王小锯,李贝贝,韩一,边汉亮

(河南大学 土木建筑学院,河南 开封 475004)

## Experimental study on silt reinforced by EICP-lignin technology

ZHANG Jianwei, WANG Xiaoju, LI Beibei, HAN Yi, BIAN Hanliang

(School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, P. R. China)

微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP)是通过在土壤颗粒接触处和土壤颗粒表面生成碳酸钙沉淀来改善土壤岩土工程性质的一种方法,目前对 MICP 的研究众多。近几年来,酶诱导碳酸钙沉淀技术(Enzyme Induced Carbonate Precipitation, EICP)被广泛用于土体改良等方面,EICP 技术是利用脲酶将尿素水解成  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  结合生成  $\text{CaCO}_3$  沉淀,碳酸钙的胶结作用将土体连接在一起,能提高土体强度。在 EICP 技术中,矿化会产生大量碳酸钙,但是在 EICP 技术中没有给碳酸钙提供成核位点<sup>[1]</sup>,生成的碳酸钙聚集形式杂乱无章,固化后的试样脆性较高,容易发生脆性破坏。为了改善这个性质,考虑向 EICP 技术中添加木质素,用来调节碳酸钙的晶型。

目前,把木质素和 EICP 结合起来改良土体的研究几乎没有,为了弥补这一空白,改良 EICP 技术中碳酸钙的聚集方式,利用木质素-EICP 联合技术,对粉土进行改良,通过三轴试验、无侧限抗压强度试验、SEM 扫描电镜试验和 XRD 分析,研究 EICP-木质素联合技术对土体宏观和微观特性的影响,试验结果表明:在 EICP 技术中添加木质素,可以提高土体的黏聚力和内摩擦角,无侧限抗压强度也有所提高。从微观上,添加木质素可以为 EICP 技术生成的碳酸钙提供成核位点,且生成的碳酸钙晶型都是稳定的方解石。

采取不同掺量的木质素对 EICP 固化土加以改良,进行三轴固结不排水剪切试验。取烘干后的土样过筛,取不同掺量的木质素与土样搅拌均匀,将 EICP 溶液代替水溶液加入粉土中进行搅拌和处理制样,然后进行三轴试验,其中,反应液浓度为 0.75 mol/L,氯化钙与尿素 1:1 混合。结果发现:与未掺木质素的 EICP 改良土相比,EICP-木质素改良土的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角都更高。

采用无侧限抗压强度试验对不同的改良土试件进行对比试验,其中,木质素掺量都为 5%,试验过程严格按照规范进行,计算试验数据得到不同改良土的应力-应变关系曲线,如图 1 所示,不同改良土的应力都随着应变的增加先增大后减小,这是由于试件应力达到最高点后开始产生破坏,试件产生屈服,不同的改良土试件在弹性阶段内的斜率要大于素土的斜率,说明改良土弹性阶段持续时间短,素土破坏时应变在 4.5% 左右,EICP 改良土的试件破坏时的应变在 3% 左右,木质素掺量为 5% 的改良土试件破坏时的应变在 2.3% 左右,而 EICP-木质素试件破坏时的应变在 1.6% 左右,说明在 EICP 技术中添加木质素可以有效改善粉土的力学性能。

为了进一步研究木质素在 EICP 改良土中的作用机理,取试验后的土样进行放大 500、2 000 倍的扫描电镜实验。结果如图 2 所示,图 2(a)是木质素处理过的粉土样微观图,图 2(b)是 EICP 技术处理过的粉土样微观图,图 2(c)是用 EICP-木质素联合

收稿日期:2020-07-28

基金项目:国家自然科学基金(51508163);河南省科技厅科技攻关重点项目(192102310226);河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS041)

作者简介:张建伟(1981-),男,教授,博士,主要从事桩基工程和微生物固化技术研究,E-mail: zjw@henu.edu.cn.

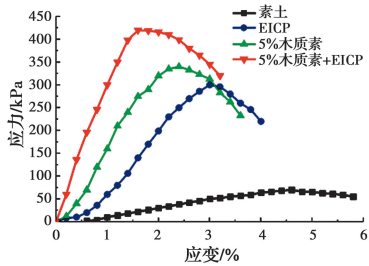


图 1 不同改良土的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of different reinforced soils

固化技术处理过的土样微观图。

从图 2 放大 500 倍的微观对比图可以看到:图 2(a)、(b)虽然也形成了联结土颗粒的胶结物质,但是与图 2(c)相比,生成的胶结物质明显减少很多。从图 2 放大 2 000 倍的微观图可以看到:图 2(a)生成的有填充土颗粒孔隙的丝状结构,图 2(b)生成的有块状碳酸钙,但分布杂乱,没有成核点,图 2(c)的土颗粒之间相互联结最好,红圈标出的是木质素和碳酸钙联结在一起形成的花瓣状的胶结物,填充了土颗粒之间的孔隙,说明木质素为碳酸钙提供了成核位点,弥补了 EICP 技术中没有成核位点的缺陷,在宏观上可以体现为提高抗剪强度和黏聚力,改善土体的工程性质。

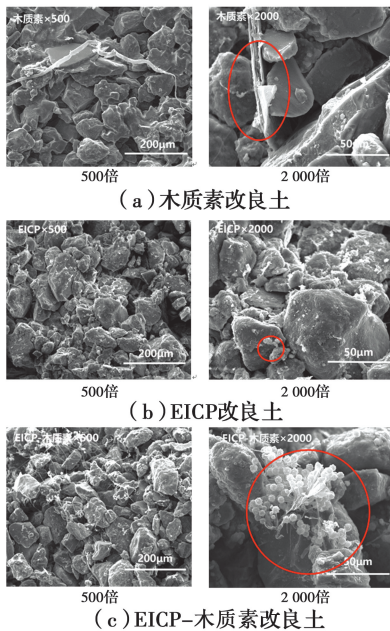


图 2 不同改良土的 SEM 图

Fig. 2 SEM images of different improved soils

EICP 技术中生成的碳酸钙有同质多象体,同质多象体是具有相同的化学组分,在不同的物理化学环境中,能形成结构不同的几种晶体。碳酸钙的同质多象体分别为方解石(calcite)、文石(aragonite)和球霏石(vaterite)。其中,方解石是热力学最稳定的矿物相,具有较高的机械强度;文石在地表呈亚稳定相;通常情况下球霏石是热力学最不稳定的晶型,结构松散,稳定性差,很难被保存,作为加固用的碳酸钙晶型,本身具有短板。图 3 是用 EICP-木质素改良粉土(木质素掺量为 0%、3%、5%)进行 XRD 试验得到的物质分析图,碳酸钙的晶型只有方解石,没有球霏石,说明使用该技术加固土体可以从内部消除工程隐患。

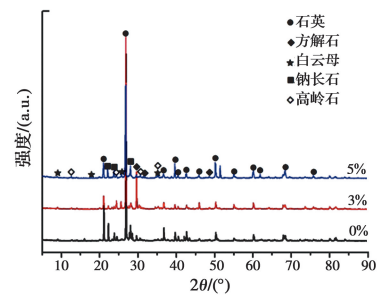


图 3 XRD 分析

Fig. 3 XRD analysis

EICP-木质素联合固化技术能提高土体的抗剪强度和粘聚力,通过微观试验可以看出,木质素的作用机理主要是改变了 EICP 产生分散碳酸钙的方式,为碳酸钙提供成核位点,在土颗粒间隙中将无规律的碳酸钙聚拢成型。

#### 参考文献:

- [1] CHANDRA A, RAVI K. Effect of magnesium incorporation in enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) to improve shear strength of soil [M]//Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2020: 333-346.

(编辑 胡玲)