

微生物胶结砂土三轴试验及微观结构研究

王 绪 民¹, 郭 伟^{1,2}, 余 飞², 易 朝¹, 孙 霖¹

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 微生物固化(microbial-induced calcite precipitation, 简称为 MICP) 技术是岩土工程领域新兴的一种地基处理技术。利用该技术可胶结松散土颗粒, 改善土体的力学特性。基于一系列试验(X 射线衍射、扫描电镜、CD 剪切、碳酸钙定量化学试验) 测试分析了胶结砂样微观结构与力学性能提高的联系、胶结物含量与砂样 c' 、 φ' 值之间的关系。研究表明: 微生物诱导沉积产生的碳酸钙晶体主要粘附在骨架颗粒接触部位, 并高度聚集封堵颗粒孔隙形成连接键, 从而产生胶结作用提高试样的力学性能; 菌液浓度、注液时间、营养盐浓度会影响碳酸钙的沉积量; 碳酸钙含量与砂样的力学性能提高有较好关联性。试验中胶结砂样的碳酸钙含量达到 5.39% 时, 其抗剪强度、凝聚力、内摩擦角可分别提高 423%、333%、35.7%。

关 键 词: 微生物诱导碳酸盐沉淀; 胶结砂; 物理力学指标; 微观结构

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.03.017

1 研究背景

由于中国东部产业的转移和中西部的崛起, 产生了大量高质量基础土木工程建设的需求与土地资源有限性的矛盾。而传统的土壤改良材料往往有毒有害, 水泥生产被认为是造成全球变暖重要因素之一^[1-2], 其他化学建材在一定程度上会污染环境造成对人和物的危害^[3]。这就亟需寻找环保有效的方法对力学性能较差的土资源进行改良使其满足建设标准。

21 世纪, 生物技术在土木工程中的运用得到了越来越多的关注。其中 Boquet 等最早发现土体中某些细菌能诱导碳酸钙晶体沉积^[4], 并证明土壤微生物中的碳酸钙沉积是一个很普遍的现象。只要给予适宜的条件, 所有微生物都可以形成碳酸钙晶体。Stocks 等发现巴氏芽胞杆菌(*S. pasteurii*) 可较快沉淀出碳酸钙并对砂土颗粒间产生胶结作用^[5]。Harkes 等利用微生物诱导碳酸钙沉淀胶结砂土, 发现碳酸钙的沉积量与试样的无侧限抗压强度有着密切联系^[6]。整体上

试样的抗压强度随着碳酸钙含量的增加而增加。同时 Chu 等研究发现虽然碳酸钙的含量与胶结砂样的无侧限抗压强度有着良好的线性关系, 但砂样中等碳酸钙含量其抗压强度也不尽相同^[7]。Whiffin 等研究发现, 碳酸钙含量低于 3.5% 或 60 kg/m³ 时, 砂柱的强度改善并不明显, 而碳酸钙沉积量较多时, 其强度会得到显著提高^[8]。Dejong 等通过固结不排水三轴剪切试验发现, 微生物诱导碳酸盐沉积可以显著提高砂土的剪切刚度和极限承载力^[9]。Chou 等研究发现, MICP 灌浆加固后砂体的凝聚力和内摩擦角均获得不同程度的增加, 从而提高了砂土的抗剪强度^[10]。Li 等研究了不同胶结程度下砂柱的固结排水剪切特性^[11], 通过绘制摩尔应力圆及抗剪强度包线, 发现其剪切强度的增加主要依赖于胶结作用形成的凝聚力。

以上研究结果表明, 微生物改善土体力学性能主要依靠沉积的碳酸钙。故文中对微生物胶结砂样的碳酸钙含量与其凝聚力和内摩擦角之间的关系进行研究, 并从微观结构方面说明微生物胶结对土体力学性

收稿日期: 2016-05-06

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2014CFB601)

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

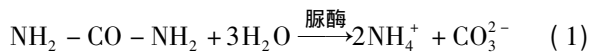
能参数提高的影响。

2 微生物诱导碳酸盐沉积原理

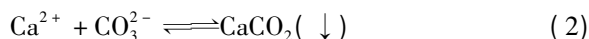
微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)是自然界广泛存在的一种生物诱导矿化作用,在温泉、海水以及洞穴中均有发生。Castanier等研究结果表明,MICP过程通常包括以下步骤^[12]:①碱性化学环境的形成;②过饱和碳酸钙溶液的生成;③碳酸钙胶体的形成;④细菌周围固定有钙离子从而促使碳酸钙晶核的形成;⑤含钙矿物的成岩作用和结晶作用;⑥胶结和整合作用下导致沉积物生成岩石。

由于尿素水解机理简单,反应过程容易控制且可在较短时间内产生大量碳酸根离子。故目前大多数研究者基于巴氏芽孢杆菌(*S. pasteurii*)的尿素水解特性研究MICP灌浆技术。

巴氏芽孢杆菌生长代谢过程中可以持续产生一种高活性的脲酶。这种脲酶可以水解尿素生成氨和二氧化碳。氨和二氧化碳通过细胞壁分散到溶液中,然后化合反应生成铵离子(NH_4^+)和碳酸根离子(CO_3^{2-}),其反应方程式为



DeJong等发现^[9]细胞脲酶化合作用产生的碳酸根离子会与细胞壁周围的钙离子化合沉积,沉积过程中细胞充当着核点作用。碳酸钙沉淀方程为



以上反应过程如图1所示。

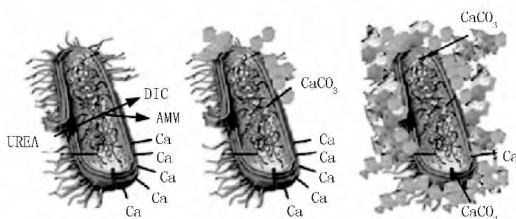


图1 微生物诱导碳酸钙沉淀示意^[12]

3 微生物固化试验

3.1 试验方案

为探讨微生物处理后试样的微观结构和诱导碳酸盐沉积量与MICP试样力学性能提高间的关系。基于2个阶段开展研究:①通过固结排水剪切试验(CD)测定胶结试样的基本力学参数,分析微生物胶结对砂土力学性能的影响。剪切破坏后试样溶于过量盐酸后烘干称重,计算各试样生成碳酸盐的含量,分析三轴试验结果与碳酸钙含量的关系。②通过X射线衍射、电镜扫描分别定性分析胶结产物、胶结试样微观结构。试

验方案见表1。

表1 试验方案

试样编号	OD ₆₀₀	注液间隔时间/ h	营养盐浓度/ (mol·L ⁻¹)	注液天数/ d
1	1.0	12	0.6	5
2	0.8	12	0.6	10
3	0.8	12	0.3	10
4	0.6	12	0.6	10

注:OD₆₀₀是衡量菌液浓度的指标。

3.2 试验材料

试验采用厦门ISO标准砂(99.7%石英),其最小干密度1.538 16 g/mL,最大干密度1.811 5 g/mL,不均匀系数 C_u 为5.076,中值粒径 D_{50} 为0.52 mm。颗粒级配曲线如图2所示。

试验菌种为巴氏芽孢杆菌(*S. pasteurii*,编号ATCC 11859),购自美国菌种保藏中心。采用保藏中心提供的ATCC 1376(NH₄-YE)培养基进行菌种活化(培养基成分:20 g/L酵母提取物,10 g/L(NH₄)₂SO₄ 0.13 mol/L Tris缓冲液(pH=9.0))。活化后的细菌接种至NH₄-YE液体培养基,并在控温为30℃、转速为150 r/min的摇床中培养,直至液体培养基出现浑浊后停止培养。基于试验设计,采用紫外可见分光光度计测试细菌光密度(OD₆₀₀)将菌液稀释至0.6~0.8。

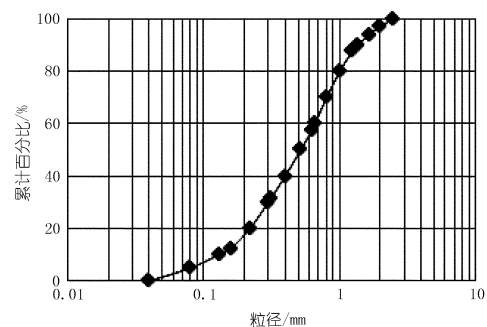


图2 标准砂样颗粒级配曲线

3.3 试样制备

试样采用内径为38 mm的PVC管制备。制作过程简述如下:①用带孔的橡胶塞将PVC管下端塞住并在橡胶塞表面放置滤纸和透水石。②向高12 cm的同种规格PVC管倾倒高约80 mm的标准砂,然后将标准砂与一定浓度的菌液均匀混合。③将混合好菌液的标准砂倒入PVC管,制成高80 mm的试样。④以1.67 mL/min的速率从PVC管底端注入30 mL的CaCl₂(0.05 mol/L)溶液,溶液没过砂样顶端。⑤试样静置2 h促使菌株充分吸附在砂颗粒表面,然后以1.67 mL/min速率向试样内注入营养盐(详见表1)。⑥间隔12 h后,向各试样注入30 mL营养盐。为保证

试样胶结的均匀性,营养盐采用上下两端轮换注入。试样制作均在室温条件下进行。

4 试验结果与分析

4.1 微生物胶结砂样微观分析

微生物处理后,砂土内产生胶结物质,将松散砂土颗粒胶结成为整体。为定性分析巴氏芽孢杆菌在砂土中产生的物质,将试样碾碎过200目筛,收集10g左右粉末进行X射线衍射分析。作为对照,取等量标准砂(以下简称bz)进行X衍射分析。图3为标准砂及胶结试样X衍射测试图谱。图3(a)中主要显示石英(红色)的特征峰,图3(b)中除了石英特征峰外,还显示CaCO₃(蓝色)的特征峰。这表明巴氏芽孢杆菌在砂土中诱导产生的物质主要成分为碳酸钙。此外,试样中还有少量氯化铵,属于微生物胶结后的副产物。

碳酸钙是土中胶结能力很强的一种粘结剂,可以有效地把土体颗粒胶结在一起而提高土体强度。微生物诱导碳酸钙沉淀存在2种分布形态:附于土体颗粒表面而改变了颗粒的粒径,沉积填充于土体孔隙而胶结土体^[13]。

图4为试样SEM图。可以看出图4(a)~(b)所示标准砂颗粒表面光滑,未发现颗粒状沉淀晶体。而胶结试样SEM图(图4(c)~(j)所示)中碳酸钙沉淀晶体颗粒清晰可见,晶体颗粒尺寸大小不一(5~25μm之间)。碳酸钙结晶形态良好,是常见菱形六面体结构,且堆积排列紧密。大部分碳酸钙晶体颗粒粘附在骨架颗粒接触部位,并高度聚集填充颗粒缝隙形成连接键,产生胶结作用^[14]。

在足够注液量情况下,较低浓度的营养盐能促使沉淀晶体有较好的均匀性^[15]。相较其它3组胶结样,图4(g)~(h)所示3号试样碳酸钙晶体颗粒分布均匀

且粒径较为统一。1,2,4号试样内晶体颗粒分布散乱、粒径较大且较多聚集成团。

图4(e)~(f)所示2号试样SEM图,团块胶结物含量较多,构成基质包埋骨架颗粒,且片状粘粒发育沉积于骨架颗粒缝隙,呈光滑的流胶状。颗粒间胶结连接键形成,表现出较强胶结效果。而1,3,4号试样颗粒间沉淀物较少且未能较好地填充颗粒孔隙,胶结效果较差。

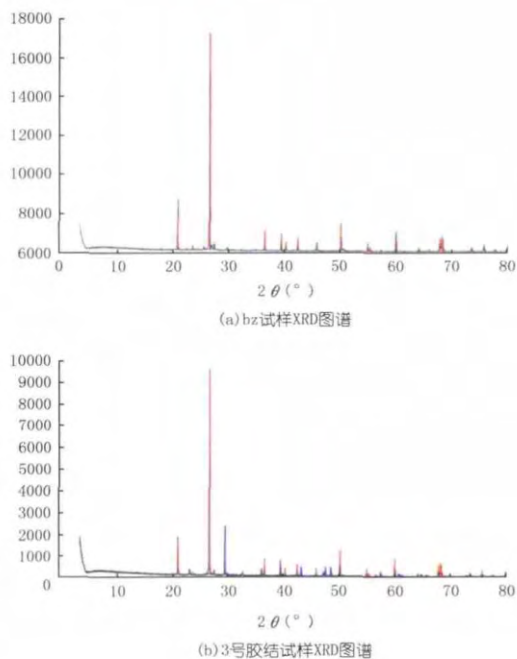


图3 生物胶结前后试样 XRD 图谱

4.2 应力应变曲线与莫尔圆分析

图5为应力应变的关系曲线,围压分别为25,50,100 kPa。其中MICP试样(1,2,3,4号)与标准砂试样(bz)相较均有较大的强度提升,说明微生物对改性土体有着较好应用价值及潜力^[16]。1,2,3,4号试样应力应变关系曲线均表现为应变软化特性,不同于标准

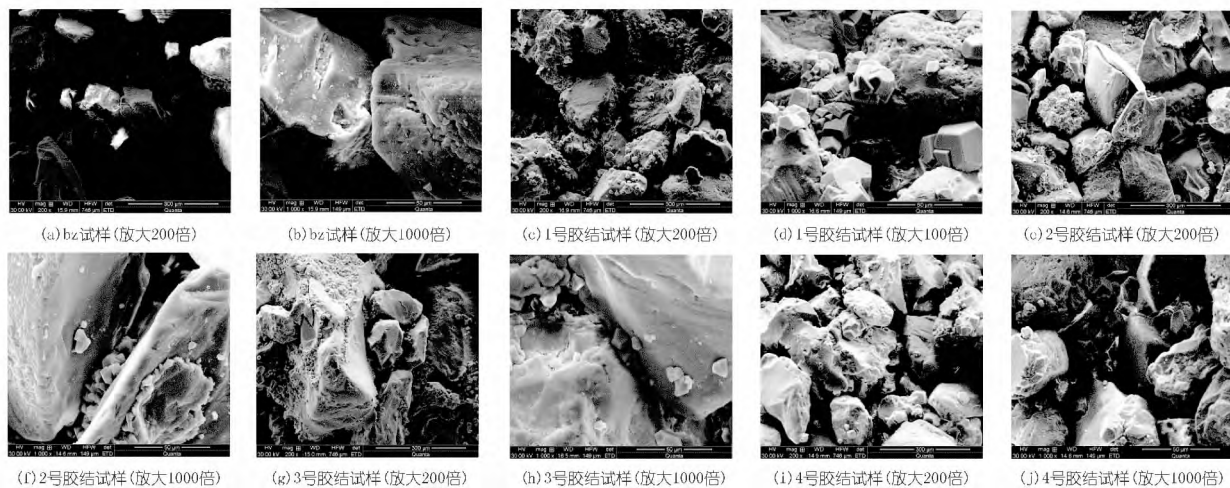


图4 试样 SEM 图

砂的剪胀破坏模式。可以直观看出微生物对标准砂样产生改性作用。

三轴试验中由于应变的增加,造成 MICP 试样内碳酸钙沉积构造的胶结点逐渐被破坏,剪切曲线达到峰值,试样剪切破坏。最后,砂样受残余强度影响,应力应变曲线趋于稳定。如图 5(c) 所示 100 kPa 围压下 4 号试样在轴向应变为 1.18% 时达到剪应力峰值 594.7 kPa 随后砂样塑性软化。但试样 4 号受到残余强度的影响,其应变达到 10.42% 后趋稳。

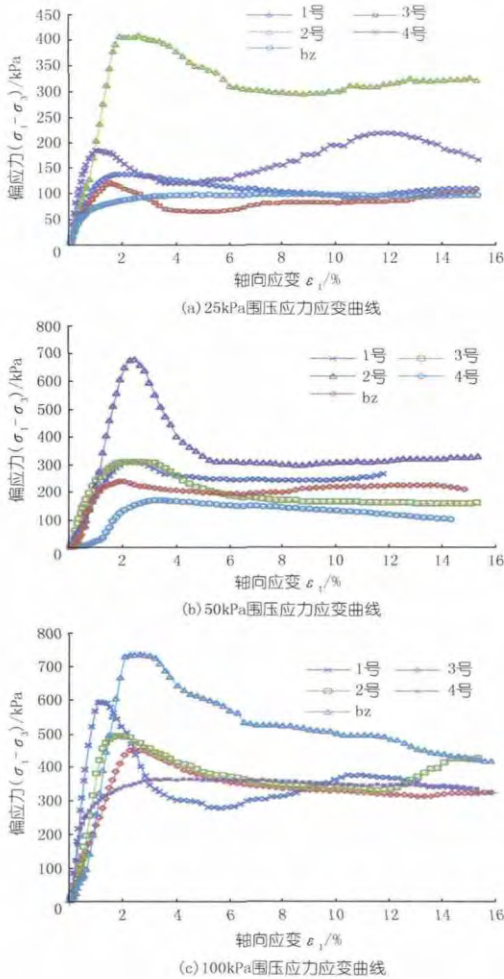


图 5 MICP 试样应力应变曲线

1, 2, 3, 4 号试样曲线峰值比 bz 试样分别高出 142%、23%、182%、220%, 相较于其它 MICP 试样 2 号试样峰值最大。

有效凝聚力和有效内摩擦角为土体强度特性指标, 本文运用摩尔 - 库仑强度理论公式拟合 MICP 试样 c' 、 ϕ' 。

$$\tau_f = c' + \sigma \tan \phi' \quad (3)$$

理论上标准砂凝聚力为 0。但由于颗粒的几何堆积, 在无任何物理和化学引力的体系中可引起表观凝聚力。依据公式拟合 bz, 1, 2, 3, 4 号试样的凝聚力分别为 0.1、6.7、33.3、14.1 kPa, 内摩擦角分别为

40.03°、42.66°、54.35°、45.29°、46.16°。

鉴于篇幅, 图 6 只列出 2 号试样的莫尔圆。由图 6 可以看出试样的 c' 和 ϕ' 有较大的提高, 说明微生物诱导产生的碳酸钙对砂土产生改性作用。MICP 砂样 c' 、 ϕ' 值的增加是其力学性能改良的直观表现。MICP 试样强度的变化, 一方面是由于微生物诱导碳酸钙沉淀晶体高度集于砂颗粒 - 颗粒接触附近, 形成胶结点提高凝聚力, 另一方面是由于沉淀晶体包裹砂颗粒改变其粒径而对摩擦角产生影响。这在上文 SEM 图可较明显的体现。

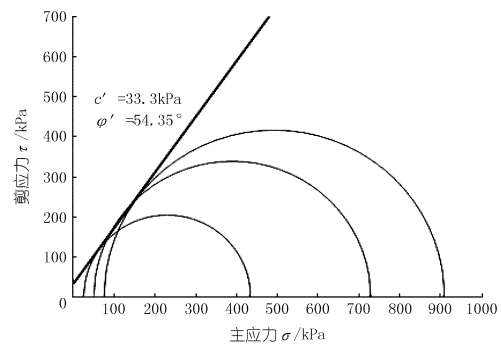
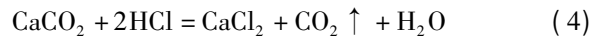


图 6 2 号试样应力摩尔圆

4.3 碳酸钙含量与 c' 、 ϕ' 关系分析

为研究微生物诱导沉淀碳酸钙含量与 MICP 试样强度的关系, 将 CD 剪切破坏后的试样回收碾碎进行碳酸钙定量化学试验。用过量浓度约 5 mol/L 的盐酸浸洗试样, 直至试样没有气泡产生为止。进而测定试样内碳酸钙含量 $C_{\text{钙}}$ 。具体测定碳酸钙含量数据详见表 2。测定碳酸钙含量化学方程式为



$$C_{\text{钙}} = \frac{M_{\text{钙+砂}} - M_{\text{砂}}}{M_{\text{钙+砂}}} \quad (5)$$

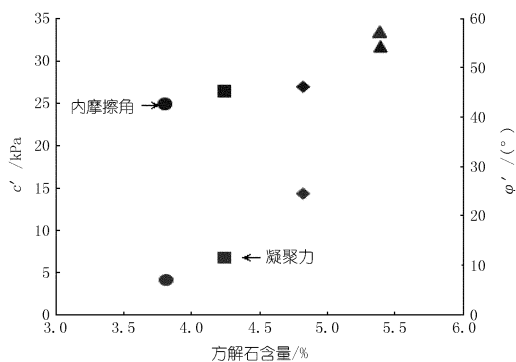
式中, $M_{\text{钙+砂}}$ 、 $M_{\text{砂}}$ 分别为试样浸酸前后干重。

表 2 三轴试验结果一览

试样编号	围压 / kPa	试样干重 (溶洗后/前) /g	碳酸钙含量比 /%	碳酸钙平均含量 /%	凝聚力 c' /kPa	内摩擦角 ϕ' / (°)
1 (0.8-5-0.6)	25	164.39/170.5	3.72	4.24	6.7	45.29
	50	161.59/169.1	4.65			
	100	156.88/163.7	4.34			
2 (0.8-10-0.6)	25	149.20/157.6	5.63	5.39	33.3	54.35
	50	162.20/170.3	4.99			
	75	157.83/166.6	5.56			
3 (0.8-10-0.3)	25	167.03/173.0	3.57	3.81	4.1	42.66
	50	161.92/168.2	3.87			
	100	155.97/162.2	3.99			
4 (0.6-10-0.6)	25	147.73/154.5	4.54	4.82	14.3	46.16
	50	163.82/171.8	4.87			
	100	165.80/174.2	5.06			

注: 表 2 中溶洗盐酸试样均为剪切破坏后所取试样

图 7 为碳酸钙含量与 c' 、 φ' 的关系图。由图 7 看出, 随碳酸钙含量的增加, c' 和 φ' 也随着增加。虽然 4 号试样比 1 号试样的 $C_{\text{钙}}$ 、 φ' 分别高出 0.58%、 0.87° , 但前者 c' 值却是后者的 2.13 倍。这说明 4 号试样内碳酸钙晶体较多沉积于颗粒孔隙中, 沉淀晶体分布形态较好, 故产生较大胶结效果。因此分析可知碳酸钙晶体的分布形态会对 MICP 试样强度的提高产生较大影响。



注: ● 为 3 号、■ 为 1 号、◆ 为 4 号、▲ 为 2 号

图 7 碳酸钙含量与 c' 、 φ' 关系

5 结论

(1) 巴氏芽孢杆菌 (*S. pasteurii*) 在砂样中沉淀的碳酸钙包裹砂颗粒表面, 改变了粒径大小, 同时高度集中于砂颗粒-颗粒相互接触点附近, 逐渐形成连接键, 产生胶结力。

(2) 室内研究表明, MICP 作为一种低能耗环保的地基处理技术表现出较大的潜力。胶结砂样碳酸钙含量达到 5.39% 时, 其抗剪强度、凝聚力、内摩擦角分别可提高 423%、333%、35.7%。

(3) MICP 胶结试样的强度依赖于试样内产生的碳酸钙含量及其分布形态。胶结砂样内的碳酸钙含量与其 c' 、 φ' 值有较好关联性。

参考文献:

[1] Cayan D R, Bromirski P D, Hayhoe K, et al. Climate change projections of sea level extremes along the California coast [J]. *Climate Change* 2008, 87(1): 57-73.

[2] DeJong J T, Mortensen B M, Martinez B C, et al. Bio-mediated soil improvement [J]. *Ecological Engineering* 2010, 36(2): 197-210.

[3] Karol R H. *Chemical grouting and soil stabilization* [M]. New York: Marcel Dekker, NY 2003.

[4] Boquet E, Boronat A, Ramos-cormenzana A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a common phenomenon [J]. *Nature* 1973, 246(5434): 527-529.

[5] Stocks-fischer S, Galinat J K, Bang S S. Microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. *Soil Biology & Biochemistry* 1999, 31(11): 1563-1571.

[6] Harkes P H, Booster J L, Van Paassen L A, et al. Microbial induced

carbonate precipitation as ground improvement method - bacterial fixation and empirical correlation CaCO_3 vs. strength [C] // Proceedings of 1st International Conference BGCE, Delft [s. n.], 2008: 37-44.

[7] Chu J, Stabnikov V, Ivanov V. Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil [J]. *Geomicrobiology Journal* 2012, 29(6): 544-549.

[8] 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.

[9] Dejong J T, Fritzges M B, Nusslein K. Microbial induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2006, 132(11): 1381-1392.

[10] Chou C, Seagren E A, Aydilek A H, et al. Biocalcification of sand through ureolysis [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2011, 137(12): 1179-1189.

[11] Li Bing. *Geotechnical properties of biocement treated soils* [D]. Singapore: Nanyang Technological University 2014.

[12] Castanier S, Metayer-levrel G L, Pethuisot J P. *Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals, in microbial Sediments* [M]. Berlin: Springer-Verlag 2000.

[13] Muynck D W, Belie D N, Verstraete W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review [J]. *Ecological Engineering* 2010, 36(2): 118-136.

[14] Brian C, Martinez S M, Jason T, et al. Bio-mediated soil improvement: load transfer mechanisms at the micro- and Macro-scales [J]. *Advances in Ground Improvement* 2009: 242-251.

[15] Ahmed Aloabany, Kenichisoga M, Carlossantamarina A M. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2012, 138(8): 992-1001.

[16] Mitchell J K, Santamarina J C. Biological considerations in geotechnical engineering [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2005, 131(10): 1222-1233.

(编辑: 郑毅)

(下转第 96 页)



- [10] 周林玉. 偏离工况下离心泵的压力脉动和振动分析[J]. 流体机械, 2015(2): 52-55.
- [11] 赵伟国, 鄢国秀, 黎义斌, 等. 口环间隙变化对离心泵性能的影响研究[J]. 水力发电学报, 2014(5): 211-215.
- [12] 卢金玲, 邓佳, 徐益荣, 等. 离心泵内诱导轮与叶轮轴向相对位置的探讨[J]. 水力发电学报, 2015(8): 91-96.
- (编辑: 赵秋云)

Research on hydraulic characteristics of centrifugal pump with different volute tongue angle

YE Li

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to study the internal flow of the spiral case, and the unsteady flow characteristics of centrifugal pump with differently placed volute tongue angle, based on the ANSYS-CFX14.5, we carried out steady and unsteady calculation and data analysis aiming at five schemes of spiral volute of different tongue angle, and the hydraulic characteristics of the pump were verified by tests. The analysis results show that with the increase of tongue position angle, the efficient area of centrifugal pumps is extended, but the hydraulic performance under the design condition decline slightly, and the tongue angle has an important effect in large flow cases; in non-design case, different tongue angles greatly influence the internal fluid state, especially in the low flow conditions, with the decrease of tongue angle, the symmetry of the fluid flow distribution in the channel of the impeller is improved obviously, and in the large flow condition, the velocity gradient in the vertical cross-section of the volute outlet is greatly increased with the decrease of the tongue angle. It's also found that the variation of tongue angles has very little effect on the radial force of the impeller, the radial force distribution is almost the same regardless of the variation of tongue angle.

Key words: spiral case; setting angle of volute tongue; numerical simulation; unsteady state; non-design condition; radial force

(上接第 85 页)

Triaxial test and micro analysis of microbial cemented sandy soil

WANG Xumin¹, GUO Wei^{1,2}, YU fei², YI Chao¹, SUN Lin¹

(1. School of Civil Engineering & Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanic of CAS, Wuhan 430071, China)

Abstract: A new ground treatment technique, microbial-induced calcite precipitation (MICP), has recently emerged in geotechnical engineering, which utilizes the MICP to cement loose particles together and therefore the mechanical properties of soil can be enhanced. Based on the test (X ray diffraction, scanning electron microscopy, triaxial shear test, CaCO₃ quantitative chemical tests), the connection between the change of microstructure and the improvement of mechanical properties of cemented sandy soil, and the relationship between the cement content and sandy soil physical mechanical indexes are obtained. From the test results, it is found that the calcite crystal mainly adheres on particle contact face and highly aggregates, thus blocking the pore and forming link bonds, then the mechanical properties of the samples are improved by the cementation of the particles. The concentration of bacteria liquid, the time of injection and the concentration of nutrients can affect the content of settled calcite. A good correlation between the content of calcite and the improvement degree of mechanical properties of the sandy soil is obtained. In the test, when the calcite content of cemented sandy soil samples reach to 5.39%, the strength, cohesion and internal friction angle will increase by 423%, 333% and 35.7%, respectively.

Key words: microbial induced carbonate precipitation; cemented sandy soil; physical and mechanical index; microstructure