doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.201703001

微生物灌浆加固砂土堤岸研究进展

金　勇[1],王照宇[1],张　楠[2]
(1.盐城工学院 土木工程学院,江苏 盐城　224051;2.得克萨斯大学 工程学院,得克萨斯州 阿灵顿 美国　76019)

摘要:随着海岸侵蚀和海岸线后退,人类的生存和生活环境遭到威胁。目前常用的海岸防护措施极易遭到自然灾害破坏,不经济、不环保且耗费大量维修费用,而微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术可以显著改善土体强度、刚度、渗透性及抗液化性能,并且相比于传统土体改良工艺,其绿色环保、环境友好型特点更加符合可持续发展理念,在砂土体加固领域有着非常广阔的工程应用前景。系统地总结了国内外关于微生物法加固砂土堤岸的室内及现场试验研究的最新成果,并对微生物固化土体的力学特性进行了研究论述。

关键词:MICP;可持续发展;工程应用;加固砂土堤岸;力学特性
中图分类号:TU435　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2017)03-0001-08

我国沿海地区拥有大陆海岸线 18 000 km,海岛岸线 14 000 km,海域滩涂资源非常丰富。然而随着海平面上升、沿海地区暴风雨频发、人类对海岸带开发力度的加强和依赖程度的提高,海岸侵蚀和海岸线后退现象非常严重。图 1 为受暴风雨侵蚀的沿海堤岸。作为拥有中国沿海滩涂湿地面积最大的江苏,由于其沿海地区极易遭受暴雨、台风和常年波浪的侵袭,几乎 1/3 的海岸处于侵蚀状态[1-3]。图 2 为废黄河三角洲海岸线演变图[4]。

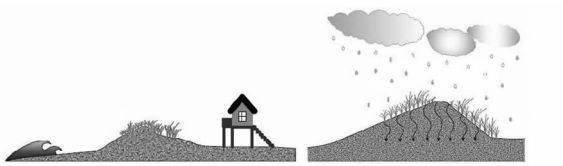

图 1　遭受暴风雨侵蚀的沿海堤岸
Fig. 1　The storm erosion of coastal levee

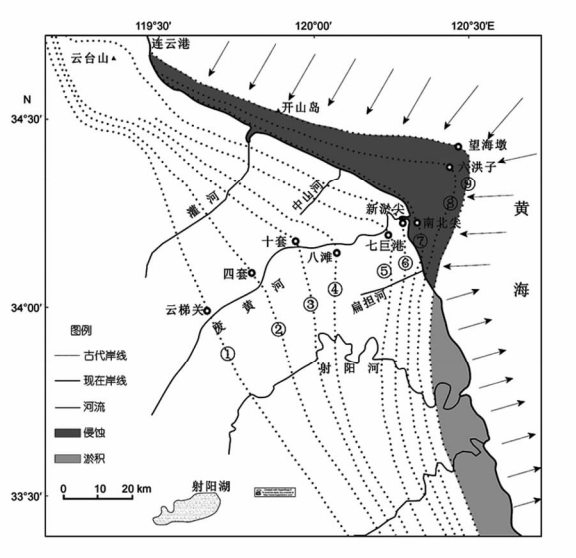

图 2　废黄河三角洲海岸线演变图
Fig. 2　Evolution map of abandoned Yellow River Delta coastline

注:1、①~⑨分别为 1194 年、1578 年、1591 年、1700 年、1747 年、1776 年、1803 年、1810 年和 1855 年的海岸线;2、侵蚀和淤积是现代废三角洲相对于 1855 年的变化。

因人类活动和自然环境因素的影响,海岸侵蚀非常严重。目前常用的海岸防护措施极易遭到自然灾害破坏,耗费大量维修费用,而微生物诱导

收稿日期:2017-04-26
基金项目:江苏省自然科学基金面上项目(BK20161311);江苏省六大人才高峰项目(2015-JZ-011);盐城工学院优秀毕业设计(论文)培育项目(2017)
作者简介:金勇(1994—),男,江苏南通人,主要研究方向为微生物地基处理。
通讯作者:王照宇(1974—),男,江苏阜宁人,教授,博士,主要研究方向为岩土工程和土木工程新型材料。

碳酸钙结晶技术(Microbial Induced Carbonate Precipitation, MICP),将岩土工程与生物化学工程有机结合起来,具有无污染、无残留以及良好的生物相容性等优势。与传统的硬性防护法和植物生态防护法相比较,微生物防护法既解决工程问题,又有利于沿海生态环境保护,提高土地资源利用率。因此,微生物防护法相比传统方法更加绿色、环保,具有可持续性。

1　微生物诱导碳酸钙结晶技术

自然界中微生物诱导碳酸钙是一种非常普遍的微生物矿化方式,Mujah 等[5]最早发现土体中的某些细菌能够诱导碳酸钙晶体沉积。土壤中微生物通过新陈代谢调节着地球表面的物理化学反应,改善了土体的结构,在反应充分的环境条件下,土体的渗透性、刚度、抗压强度、抗剪强度和变形模量等工程特性都得以改善[6]。目前专家学者主要从微观机理分析、宏观试验及工程应用3方面对微生物改性土体进行研究,其中在岩土工程领域采用该项技术处理多种工程问题,在微生物固化土体、封堵防渗、修复污染土等方面取得了长足的进展。

现今 MICP 主要有4种形成方式:尿素水解、反硝化作用、3价铁还原及硫酸盐还原。由于反硝化细菌生长周期较长、繁殖速度较慢,会造成较多的前期培养费用;硫酸盐还原会产生硫化氢有毒气体,对环境和人体造成危害;而尿素水解机制相对简单,反应过程容易控制,且在较短时间内可以产生大量 CO_3^{2-},因此,尿素水解在微生物矿化技术中被广泛应用[7-25]。尿素水解的 MICP 一般是基于一种产脲酶的巴氏芽孢杆菌,它是一种土壤中富含的嗜碱性细菌,在酸碱、高盐度等恶劣环境中都能保持较强的生物活性。该杆菌能以尿素为能源,通过自身新陈代谢活动产生大量的高活性脲酶,将尿素水解生成 NH_4^+ 和 CO_3^{2-}。当向土壤中灌注钙盐溶液时,由于微生物特殊的细胞壁结构,其表面一般带有大量负离子基团(如羟基、胺基、酰胺基、羧基等),能够吸附钙盐溶液中的 Ca^{2+},在微生物通过自身生命活动将 CO_3^{2-} 运输到细胞表面后,这些被吸附的 Ca^{2+} 与 CO_3^{2-} 结合形成碳酸钙晶体。微生物诱导碳酸钙结晶过程如图3~图4所示,反应方程式如下[10]:

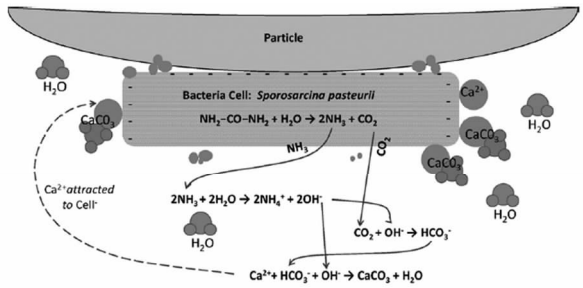

图3　颗粒表面处的微生物诱导碳酸钙沉积过程示意图[9]

Fig. 3　Schematic diagram of microbiologically induced calcium carbonate precipitation on the surface of particles[9]

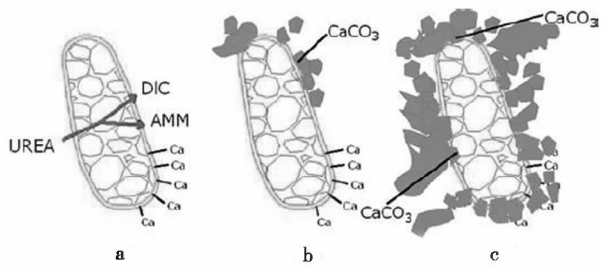

图4　微生物诱导方解石沉积示意图[17]

Fig. 4　Schematic diagram of microbial induced calcite deposition[17]

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \downarrow \quad (2)$$

微生物诱导产生的碳酸钙是一种对土颗粒胶结起很强作用的黏结剂与填充剂。生成的碳酸钙晶体首先会填充土颗粒之间的缝隙,加强土层间连接的致密性,增加土壤的密实程度以及土颗粒之间的摩擦性能,从而提高土体的抗剪强度;其次碳酸钙晶体会对土颗粒产生胶结作用,相当于一种黏结剂将微小土粒粘结在一起,形成密实块状体,增加了土颗粒间的黏聚力。Dejong 等[9]提出生成的碳酸钙晶体不会均匀附着于土颗粒表面,也不会集中沉积于土颗粒接触点处,而是主要沉积于接触点的附近,如图5所示。

2　微生物固化土体的力学特性研究

微生物诱导碳酸钙结晶技术的宏观试验研究主要侧重于微生物对土体强度、刚度和渗透性等特性的研究,通过宏观试验探究微生物加固土性

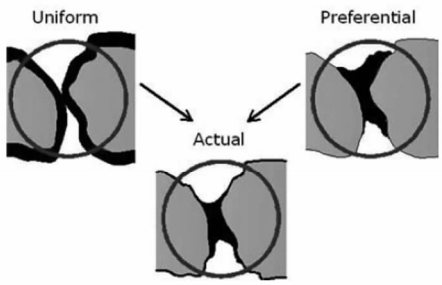

图 5　碳酸钙在土颗粒孔隙中的分布状态示意图[9]

Fig. 5　The Distribution diagram of calcium carbonate in pore of soil particle[9]

能的机理,并以此建立微生物与改性土的强度、渗透性之间定性关系[26-28]。Dhami 等[29]发现基于巴氏芽孢杆菌的微生物法比化学法更能快速析出利于砂颗粒胶结的碳酸钙沉淀;Whiffin[30]率先利用微生物技术对松散的砂颗粒进行胶结加固,制成的砂柱具有很强的异质性,不同部位强度相差较大;Chu 等[31]对胶结后的砂土进行了强度和渗透性试验研究,发现其渗透系数大幅下降,且强度提高明显,说明微生物对土体的渗透性和强度改善都很有效果;Harkes 等[32]利用微生物技术对 20 个砂柱模型进行灌注加固后,分别测试其无侧限抗压强度及碳酸钙沉积量,发现碳酸钙沉积量与砂柱的强度有着密切联系;Chu 等[33]研究发现固化后砂柱的无侧限抗压强度和渗透系数与其碳酸钙沉积量存在着较强的线性关系,并得到相应的线性经验公式;许朝阳等[34]利用筛选的碳酸盐矿化菌和多糖黏胶菌分别对粉土进行加固,发现其强度都得到不同程度的提高,且矿化菌对强度提升幅度较大,而多糖黏胶菌对强度提升幅度较小;Chou 等[35]对灌注加固后的砂土进行研究,发现加固后砂土的内摩擦角相较于未经过微生物技术处理的砂体有着明显的提高,而黏聚力 C 则有小幅增加,改性后砂土的黏聚力和内摩擦角都得以改善;Li[36]对不同胶结程度下的砂柱进行固结排水剪切试验,并绘制摩尔应力圆及抗剪强度包线,发现固化后砂颗粒间胶结形成的黏聚力是砂柱抗剪强度提升的主要原因;Dejong 等[37]对微生物胶结后的砂柱进行固结不排水剪切试验研究,发现加固后砂柱的剪切强度和极限承载力得到显著提高,并且在砂柱剪切破坏时出现应变软化行为。

沈吉云[38]对直径 39.1 mm,高 120 mm 的砂柱进行胶结,所得样品的单轴抗压强度可达 1.38 MPa。荣辉[19]利用 MICP 技术对直径 0.05 m,高 0.5 m 的砂柱灌注胶结,加固完成后将 0.5 m 砂柱平均分成 5 段(每段 0.1 m)分别测试强度,发现最靠近注射口的一段砂柱强度最高,达到 7.8 MPa;离注射口最远的砂柱强度只有 0.88 MPa。显然,在相近部位加固砂体,其强度相近;远离灌注胶结部位的砂柱,其抗压强度逐渐减小。杜静等[39]利用微生物对膨胀土改性后,通过直剪试验、膨胀性试验及收缩试验发现,土体抗剪强度增大,膨胀性指标和线缩率下降。许朝阳等[40]通过渗透试验及无侧限抗压试验研究了微生物对粉土改进情况,发现改性后粉土相应的工程特性均得到了显著改善。Mantoya 等[41]对固化后的饱和砂土地基(自由场地基和简化结构物下的非自由场地基)进行动力离心模型试验,发现在不同震动反应水平下(震动峰值加速度 a_{max} 分别为 0.3 m/s^2 和 0.7 m/s^2),MICP 砂基的超孔隙水压力和地基沉降量均会明显降低。He 等[42]通过反硝化细菌在砂土中注入微小氮气气泡,采用振动台对饱和砂土和注入微生物气泡的砂土进行对比试验,发现后者的孔隙水压力远远小于前者,证实了对砂土进行微生物气泡加固可以有效增强其抗液化性能。Dejone[6]、程晓辉[43]等对加固后的砂柱进行动三轴试验,模拟典型地震作用下的抗液化性能,发现固化砂样可以抵抗十多次的加载作用。此后对振动台模型地基采用 MICP 技术加固,并模拟测试其在低、中、强地震作用下的固化效果,结果表明,固化砂基沉降微小且无喷砂冒水现象;与传统碎石桩挡墙液化加固方式相比,微生物加固方法在地震破坏下抗液化性能有着大幅度的提高,能够更好地抑制土层对地震波的放大作用。张帅等[44]利用 TTS 本构模型(清华热力学模型)对试验数据进行单元尺度的数值模拟,结果表明,TTS 模型不仅对单一的砂土体系具有良好的模拟效果,对于经 MICP 灌注处理过的砂 - 碳酸钙混合体系的力学性质同样有着很好的模拟效果。

3　MICP 加固砂土堤岸研究现状

沿海地区的海岸侵蚀对沿海生命线(堤岸、公路、管道和其他公用设施等)的影响非常重大,越来越多的海岸地貌研究者和工程师开始关注海岸侵蚀及防护。张磊等[45]对室内人工边坡进行降雨入渗模拟试验,通过分析监测试验中含水率和孔隙水压力的变化规律及分布情况,提出了含水率和孔压的变化需要考虑趾部及下部水分入渗

的影响。陈伟等[46]根据人工降雨作用下的黄土边坡室内模型试验,提出了降雨诱发黄土滑坡失稳的机理,为研究土体抗雨水冲刷能力提供理论基础。张红日[47-51]等基于室内试验,研究了一系列生态防护措施在降雨、水流作用下的抗冲刷、抗侵蚀效果。这些防护措施虽然都取得良好的效果,但普遍存在成本、耐久性和使用局限性等问题无法推广使用。

国内外一些学者认为MICP技术可以有效提高加固土体的抗侵蚀性能,可用于海岸堤防建设和修复工程,并进行了一系列研究。刘璐等[52]对采用喷洒法处理好表层的堤坝进行水槽试验(图6),研究其抗侵蚀性,并检测堤坝表层试样的强度与抗渗性能。试验结果表明,采用MICP技术加固堤坝模型表层可有效提高其抗侵蚀力,并提高其强度与抗渗能力。Jiang[53-54]等利用微生物技术在室内进行了大尺度一维砂柱试验,加固砾石和砂的混合物,并进行了侵蚀和冲刷试验。通过和未经微生物处理的砂柱对比,发现微生物加固砂的渗透系数显著降低,抗侵蚀性能显著提高。

图6　水冲刷试验[52]

Fig. 6　Water scouring test[52]

Shanahan[55-57]等通过室内试验研究了微生物加固砂的抗海水波浪冲刷和侵蚀的性质,为其在沿海地区大规模的工程应用提供了参考价值。Shanahan等[56]通过在不饱和土壤中使用微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)处理技术进行刚性壁砂柱试验(图7)。测试的土壤是一种典型的沿海沙丘沉积的细沙。在处理过程中,通过自由排水,使土壤保持不饱和状态,并应用无侧限压缩试验测量其剪切强度。模拟沿海沙丘的小型模型见图8,通过未经处理的模型与MICP处理后的模型沙丘进行比较,来评估波浪冲刷模型沙丘的侵蚀量。结果表明,用MICP处理的沙丘模型比未处理的沙丘模型,侵蚀程度明显减轻,处理后沙丘边坡的内摩擦角也显著增加。

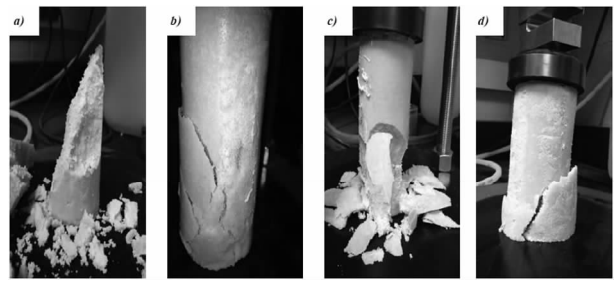

图7　MICP处理技术进行刚性壁砂柱试验[56]

Fig. 7　MICP treatment technology for rigid wall sand column test[56]

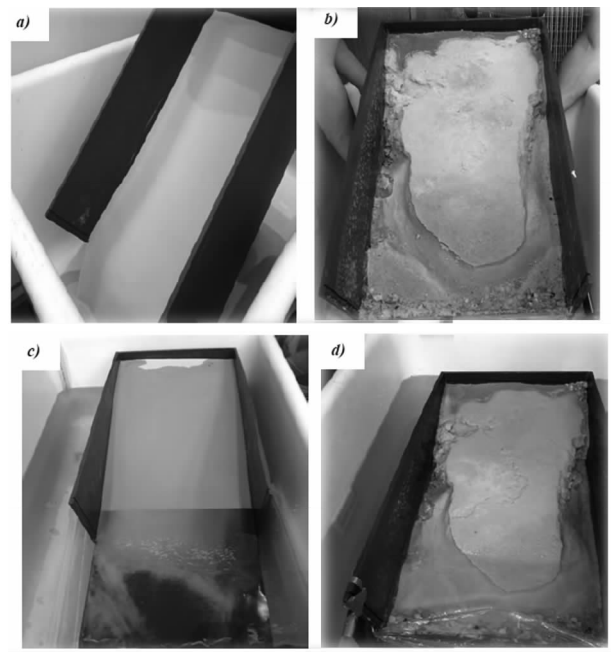

图8　MICP处理模型沙丘与不处理模型沙丘波浪试验[56]

Fig. 8　Wave test of MICP processing model dune and not processing model dune [56]

此外,Shanahan等[55]还用MICP技术处理长方体沙丘模型(图9)进行波浪冲刷试验,用2个波浪模型槽来测量MICP处理前后沙丘模型侵蚀量的变化,如图10所示。为定量测量沙丘模型侵蚀的多少,采用激光扫描器测量并观察沙丘模型经受波浪作用之前和之后的3D形态;使用声波测量仪监测砂样表面输入波函数和破碎波函数(图11),进一步确定沙丘侵蚀量的大小,以增加沿海沙丘原位应用的可行性。结果表明,采用MICP处理的沙丘模型的抗侵蚀性和耐久性有显著提高。

图 9　沙丘模型[55]

Fig. 9　Dune model[55]

图 10　固化后沙丘边坡在波浪冲刷作用下前后变化图[55]

Fig. 10　Front and rear change chart of dune slope after consolidation under the action of wave erosion[55]

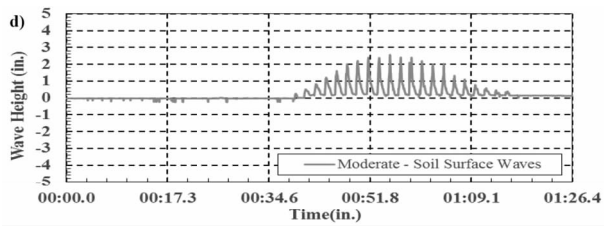

图 11　土壤表面波函数[55]

Fig. 11　Soil surface wave function[55]

Bao 等[57]在全接触反应器中通过 MICP 处理砂样(图 12),将处理过的砂样放在水槽中进行波浪冲刷试验(图 13)。结果表明,MICP 处理的砂样在波浪冲刷下几乎不易被侵蚀,证明全接触反应器中用 MICP 处理砂样具有一定的强度。

Maryam[58]利用室内试验研究用微生物固化砂修筑堤岸的抗侵蚀性能(图 14),并对比 2 种灌浆技术(浸透法和喷洒法)对加固效果的影响。Montoya 等[59]利用微生物技术固化砂柱进行了室内刚性壁砂柱试验,发现固化砂无侧限强度和内摩擦角均有显著提高,渗透性和抗侵蚀性也明显增强。

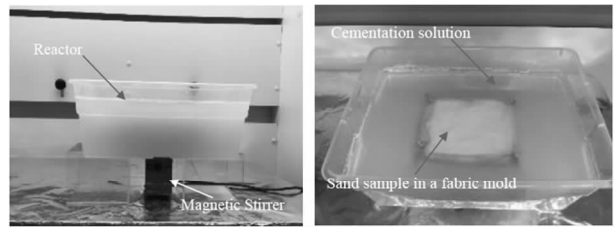

图 12　微生物法加固砂样(渗透法)[57]

Fig. 12　Microbial method to strengthen sand samples (osmosis process)[57]

图 13　加固后砂样及波浪冲刷[57]

Fig. 13　Reinforced sand and wave erosion[57]

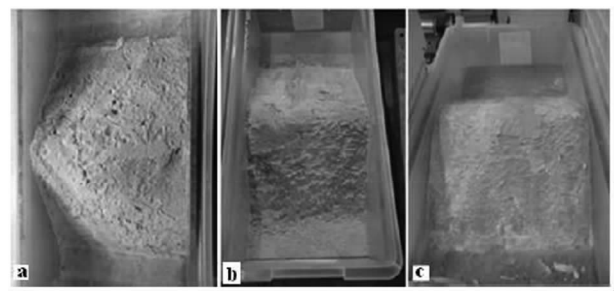

图 14　微生物法加固砂土堤岸[58]

Fig. 14　Microbial method reinforcement sand bank[58]

4　结论与展望

微生物固化高盐砂土结构特性的研究以及与相关工程问题的科学解决,是将微生物学、岩土工程学、土壤科学与表面化学等多学科的有机融合,为沿海滩涂堤坝地基处理技术提供新的发展方向,对于解决沿海滩涂高盐地区的工程问题,提高堤岸的抗冲刷性能具有重要的理论价值。

然而,如何将理论创新转为实际工程应用还有很多理论与实践问题需要解决,比如高盐海水中提取高效菌种引入生物培养液的配方问题,MICP 处理后的沙丘模型承受疲劳荷载的大小以及 MICP 处理技术与当地沙丘环境相容性的问题,工程施工现场复杂的环境条件以及大规模灌浆技术的选择问题等等,都可能影响微生物固化土的效果,都有待于以后的研究慢慢解决。

参考文献:

[1] 张林,陈沈良. 苏北废黄河三角洲沉积物的时空变化特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2012,32(3):11-19.

[2] 张一帆,喻国华,沈朝慈,等. 废黄河口海岸防护工程规划研究[J]. 海洋工程,1998,29(4):75-84.

[3] 戴龙洋,张阳. 盐城市侵蚀性海岸防护设计[J]. 水利水电科技进展,2009,16(3):49-53.

[4] 张林,陈沈良,刘小喜. 800年来苏北废黄河三角洲的演变模式[J]. 海洋与湖沼,2014,45(3):626-636.

[5] 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, 2016,34(6):524-537.

[6] DEJONE J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[J]. Geotechnique, 2013,63(4):287-301.

[7] 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):1 537-1 548.

[8] ARIYANTI D, HANDAYANI N A, HADIYANTO H. An overview of Biocement production from microalgae[J]. International Journal of Science & Engineering, 2011,2(2):31-33.

[9] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Biomediated soil improvement[J]. Ecological Engineering, 2010,36(2):197-210.

[10] BURBANK M B, WEAVER T J, GREEN T L, et al. Precipitation of Calcite by Indigenous Microorganisms to Strengthen Liquefiable Soils[J]. Geomicrobiology Journal, 2011,28(4):301-312.

[11] CACCHIO P, ERCOLE C, CAPPUCCIO G, et al. Calcium carbonate precipitation by bacterial stranins isolated from a limestone cave and from a loamy soil[J]. Geomicrobiology Journal, 2003,20(2):85-98.

[12] 彭劼,何想,刘志明,等. 低温条件下微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(10):1 769-1 774.

[13] 李萌,郭红仙,程晓辉,等. 土壤中产脲酶细菌的分离及对砂土固化效果的室内试验[J]. 工业建筑,2015,45(7):8-12.

[14] 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.

[15] OKWADHA G D, LI J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation[J]. Chemosphere, 2010,81(9):1 143-1 148.

[16] 黄琰,罗学刚,杜菲. 微生物诱导方解石沉积加固的影响因素[J]. 西南科技大学学报, 2009,24(3):87-93.

[17] DE MUYNCK W, DE BELIE N, VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review [J]. Ecological Engineering, 2010,36(2):118-136.

[18] Al-Thawadi S. High strength In-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria[D]. Perch:Murdoch University, 2008.

[19] 荣辉. 微生物水泥的研制及其胶结机理[D]. 南京:东南大学,2014.

[20] CHENG L, SHAHIN M A. Urease active bioslurry: a novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation[J]. Canadian Geotechnical Journal 2016, 53(9):1376-1385.

[21] 欧益希,方祥位,张楠,等. 溶液盐度对微生物固化珊瑚砂的影响[J]. 后勤工程学院学报,2016,32(1):78-82.

[22] CHENG L, SHAHIN M A, Cord-Ruwisch R. Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments[J]. Géotechnique,2014,64(12):1 010-1 013.

[23] 蒋明镜,肖俞,孙渝刚,等. 水泥胶结颗粒的微观力学模型试验[J]. 岩土力学,2012,33(5):17-23

[24] 蒋明镜,周雅萍,陈贺. 不同胶结厚度下粒间胶结力学特性的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(5):1 264-1 273.

[25] LIN H, SULEIMAN M T, HELM J , et al. Measurement of Bonding Strength between Glass Beads Treated by Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP)[J]. Geotechnical Special Publication, 2014(234):1 625-1 634.

[26] 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.

[27] VAN PAASSEN L A. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications[J]. Geotechnical Special Publication, 2011,6(211):4 099 – 4 108.

[28] FILET A E, GADRET J P, LOYGUE M, et al. Biocalcis and its applications for the consolidation of sands[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting & Deep Mixing, 2012:1 767-1 780.
[29] DHAMI N K, REDDY M S, MUKHERJEE A. Significant indicators for biomineralisation in sand of varying grain sizes [J]. Construction and Building Materials, 2016,104:198-207.
[30] WHIFFIN V S. Microbial $CaCO_3$ precipitation for the production of biocement[D]. Western Australia:Murdoch University, 2004.
[31] CHU J, IVANOV V, HE J, et al. Development of microbial geotechnology in Singapore[C]//Proceedings of Geo-frontiers Congress 2011:advances in Geotechnical engineering, 2011:4 070-4 078.
[32] HARKES M P, 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 on Bio-Geo-Civil Engineering, 2008:37-41.
[33] CHU J, IVANOV V, NAEIMI M, et al. Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(2):277-285.
[34] 许朝阳,张莉. 微生物改性对粉土强度的影响[J]. 建筑科学,2009,25(5):45-48.
[35] CHOU C W, SEAGREN E A, AYDILEK A H, et al. Biocalcification of sand through ureolysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(12):1 179-1 189.
[36] LI Bing. Geotechnical properties of biocement treated soils[D]. Singapore:Nanyang Technological University, 2014.
[37] DEJONG J T, FRIZGES M B, NUSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006,132(11):1 381-1 392.
[38] 沈吉云. 微生物成因土工材料实验及应用研究[D]. 北京:清华大学,2009.
[39] 杜静,周东. 微生物改良膨胀土的试验研究[J]. 水利水电技术,2012,43(7):103-105
[40] 许朝阳,张莉. 生物改性对粉土工程性质影响的研究[J]. 工业建筑,2009,39(3):60-63.
[41] MONTOYA B M, DEJONG J T, BOULANGER R W, et al. Liquefaction mitigation using microbial induced calcite precipitation[C]. GeoCongress: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering. Oakland: ASCE, 2012:1 918-1 927.
[42] HE J, CHU J, IVANOV V. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas[J]. Géotechnique, 2013,63(4): 267-275.
[43] 程晓辉,麻强,杨钻,等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J]. 岩土工程学报, 2013,35(8):1 486-1 495.
[44] 张帅,程晓辉. 微生物诱导碳酸钙结晶技术处理可液化砂土地基试验研究及数值模拟[J]. 工业建筑, 2015,45(7): 23-27.
[45] 张磊,郭海庆,谢兴华,等. 人工降雨入渗边坡破坏试验研究[J]. 水利水运工程学报,2012,12(6):21-27.
[46] 陈伟,骆亚生,武彩萍. 人工降雨作用下黄土边坡的室内模型试验研究[J]. 中国农村水利水电,2013(5):100-104.
[47] 张红日,王桂尧,沙琳川. 一种稻秸杆泥皮护坡材料及抗冲刷试验研究[J]. 公路交通科技,2017,34(1):24-31.
[48] 侯永盛,王桂尧. 土工布边坡生态防护结构的抗冲刷室内模拟试验研究[J]. 公路与汽运,2014(6):118-120.
[49] 程日盛. 边坡生态防护室内冲刷试验研究[J]. 中外公路,2007,27(5):34-36.
[50] 王桂尧,肖侃,田瑞丰. 绳网护坡的强降雨冲刷和雨水入渗试验研究[J]. 水土保持研究,2016,23(1):18-22.
[51] 胡玉植,潘毅,陈永平. 海堤背水坡加筋草皮抗冲蚀能力试验研究[J]. 水利水运工程学报,2016,16(1):51-57.
[52] 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):3 410-3 416.
[53] JIANG N J, SOGA K. The applicability of microbially induced calcite precipitation (MICP) for internal erosion control in gravel-sand mixtures[J]. Géotechnique, 2017,67(1):42-55.
[54] JIANG N J, SOGA K, DAWOUD O. Experimental study of the mitigation of soil internal erosion by microbially induced calcite precipitation[C]//Geo-Congress 2014:Geo-characterization and Modeling for Sustainability. 2014:1 586-1 595.
[55] SHANAHAN C, MONTOYA B M. Erosion reduction of coastal sands using microbial induced calcite precipitation[C]// Geo-Chicago 2016:42-51.
[56] SHANAHAN C, MONTOYA B M. Strengthening coastal sand dunes using microbial-induced calcite precipitation[C]// Geo-Congress 2014:Geo-characterization and Modeling for Sustainability. 2014:1 683-1 692.

[57] BAO R T, LI J H, LI L, et al. Effect of microbial induced calcite precipitation on surface erosion of granular soils: proof of concept[C]. 2017 TRB Annual Meeting, Washington DC. USA.

[58] MARYAM N. Biocementation of sand in geotechnical engineering[C]//IEEE International Conference on Computer Design: Vlsi in Computers and Processors, 1991. ICCD 91. Proceedings. 2014:275-281

[59] MONTOYA B M, FENG K, SHANAHAN C. Bio-mediated soil improvement utilized to strengthen coastal deposit[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013:2 565 - 2 568.

Research Progress of Microorganism Grout Reinforcing Sand Embankment

JIN Yong[1], WANG Zhaoyu[1], ZHANG Nan[2]

(1. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China;
2. College of Engineering University of Texas, Arlington Texas, USA 76019)

Abstract: The densely populated coastal areas in China. With coastal erosion and coastline back, human survival and living environment is threatened. Commonly used coastal protection measures are vulnerable to natural disasters. It is not economical ,not environmentally friendly and cost a lot of maintenance costs. Studies have shown that microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) technology can significantly improve the soil strength, stiffness, permeability and resistance to liquefaction. Compared to traditional soil improvement process, its green and environmentally friendly features more in line with sustainable development concept, and has a very wide engineering application prospects in the field of sand body reinforcement . In this paper, the latest achievements in the laboratory and field tests on the reinforcement of sandy soil embankment by microbial method at home and abroad are summarized systematically, and the mechanical properties of microbial solidified soil are also discussed.

Keywords: MICP; sustainable development; engineering applications; reinforced sand embankment; mechanical properties

(责任编辑:张英健)