

微生物改善土体性能研究进展

张优龙² 杨坪^{1,2*}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092)

(2. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系 上海 200092)

摘要：土体中除含固体颗粒、液体与气体以外，还存在细菌、真菌等微生物，其存在势必会对土体性能产生一定作用。现有研究表明：微生物改善土体性能的机理是通过改变微观结构作用土体性能，主要有微生物吸附、诱导无机物沉淀、生物表面活性剂附着与气体填充等四种方式。微生物作用土体的宏观表现主要有降低渗透性与提高强度两方面。除理论分析与试验研究取得了一定成果外，微生物在土体封堵防渗与胶结加固工程上也得到了很好应用。

关键词：微生物，土体性能，渗透性，强度

Research progress in microorganism improving soil properties

ZHANG You-Long² YANG Ping^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Soil properties depend not only on solid particle, liquid and gas in soil, but also on bacteria and fungus in soil. The mechanism of microorganism improving soil properties is that microorganism can change microstructure of soil by microorganism adsorption, inducing inorganic matter precipitation, bio-surfactant attachment and gas tamponade. Macro-performances of microorganism improving soil properties are mainly permeability reduction and strength improvement. Besides some achievements of theoretical analysis and experimental research on microorganism improving soil properties have been made, microorganism has also been applied well in some projects of sealing diaphragm and cementing reinforcement.

Keywords: Microorganism, Soil properties, Permeability, Strength

生物岩土工程学是指通过生物手段解决岩土工程问题，是一门新兴的交叉学科，微生物改善土体性能正是其研究范畴。土体作为土木工程中最常

见的材料，其组分和结构复杂，传统研究主要侧重土体颗粒的矿物成分、结构和胶结形式等对土体性能的影响。Mitchell 等发现在地表浅层单位千克土

基金项目：国家自然科学基金项目(No. 41002093)；上海市自然科学基金项目(No. 14ZR142800)；地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(No. SKLGP2014K013)；上海市重点学科建设项目(No. B308)；同济大学青年优秀人才培养计划

*通讯作者：Tel：86-21-65983923；✉：pingyang@tongji.edu.cn

收稿日期：2013-12-23；接受日期：2014-02-08；优先数字出版日期(www.cnki.net)：2014-02-20

体中存在约 10^{12} 个微生物^[1] 随着深度增加(2–30 m) 微生物含量分别减少到 10^{11} – 10^6 个/kg^[2]。近年研究表明,当活化反应环境充分适宜时,微生物活动将按指数级改变土体的渗透性、刚度、抗压强度、抗剪强度、变形模量等土体力学性质^[3]。

关于微生物改善土体性能的研究主要集中在机理分析、宏观试验和工程应用三方面。在机理分析方面,主要探讨了微生物的生命活动及代谢产物诱导或控制土体中一系列理、化、生反应^[4]。在宏观试验方面,除开展测试土体性能的渗透试验、强度试验外,还开展了分析微生物生长、生理生化、活性等特征的微生物分析试验、化学分析试验^[5]。在工程应用方面,主要侧重于微生物封堵防渗与胶结加固^[6]。随着环境问题越来越凸显,采用传统工艺填充土体孔隙与颗粒胶结过程中势必会对环境产生一定污染,而微生物方法在改善土体性能时具有成本低、环境友好等优势。因此,关于微生物改善土体性能的机理及应用日益引起国内外学者的关注。

1 微观尺度的机理分析

微观尺度主要利用电子显微镜扫描观察微生物对土体颗粒结构特征的改变,并利用 X 射线衍射分析微生物残留在土体中物质的化学成分^[7]。研究表明,微生物作用于土体主要有四方面,其一微生物本身吸附于土体颗粒表面,以生物膜为主;其二微生物生命活动诱导无机物沉淀于颗粒表面,以碳酸盐沉淀为主;其三微生物分泌物附着于颗粒表面,以多糖等表面活性剂为主;其四微生物代谢过程产生难溶气体填充于土体孔隙,以生物气泡形式存在^[8]。

1.1 微生物本身吸附于土体颗粒表面

研究表明微生物具有一定的吸附能力,一方面可以吸附于土体颗粒表面形成一层生物膜,随着生物膜的增厚,将导致土体孔隙减小;另一方面带负电的微生物可以吸附带正电的金属离子,并使其与阴离子反应生成难溶性盐,同样会导致土体孔隙减

小^[9]。与此同时微生物本身具有一定电极性,可以改变土体颗粒结构表面双电层结构。表现为某些微生物可以取代原吸附的无机阳离子吸附于颗粒表面,产生交换吸附现象,改变土粒表面双电层结构,并通过吸附、胶结、斥水等方式使结合水膜变薄,增大颗粒间凝聚力^[10]。另外学者发现土颗粒表面可粘附的生物膜主要有 3 种基质降解菌(丙酸酯降解菌、醋酸盐降解菌、丁酸盐降解菌)对应的生物膜、惰性生物膜和无机固体膜^[11]。

1.2 微生物诱导无机物沉淀

Boquet 等^[12]最早发现土体中某些细菌能诱导碳酸钙晶体沉积。一般认为异养型微生物在分解有机物获取能量的同时将产生一定量 CO_2 并溶入水中形成碳酸根或碳酸氢根,提高了周围碳酸根浓度并创造碱性环境,从而为无机矿物的析出沉淀创造过饱和条件。其过程主要有尿素分解^[13]、反硝化作用^[14]、硫酸盐还原^[15]、三价铁还原^[16]等。无机矿物沉淀于颗粒表面主要起胶结和填充作用。 CaCO_3 等无机矿物是土中胶结能力很强的一种粘结剂,可以把土体颗粒胶结在一起。另一方面, CaCO_3 等无机矿物以固体微粒形式沉淀于土体颗粒表面,直接改变了颗粒的粒径,对土体孔隙起到了一定填充作用^[17]。

微生物诱导无机矿物沉淀是一个复杂的过程,其沉淀物成分、沉淀速率均受微生物种类、外界环境、土体性质等因素影响^[18]。Cacchio 等^[19]从土壤中分离出 31 种能够诱导碳酸钙沉积的细菌,研究不同微生物对沉积物成分的影响和不同温度下细菌的矿化能力,研究表明细菌矿化后的产物大部分是方解石,且在 $32\text{ }^\circ\text{C}$ 下细菌的矿化能力最高。Whiffin 等^[20]指出碳酸盐析出主要依赖微生物生命活动产物(二氧化碳、碱性物质)及二价阳离子(Ca^{2+})的存在。Ahmed^[18],Okwadha^[21]等发现不同微生物浓度、尿素浓度、温度、钙离子浓度和环境 pH 值对尿素酶活性具有一定影响,并进而影响到微生物沉积碳酸钙的数量^[18,21]。

许多学者对微生物活动与无机矿物沉淀之间的定量关系进行了研究。Cooke 等在文献[22]中引入钙产率系数(Y_{Ca})这一参数表征碳酸钙的沉淀速率,其表达式见式(1)。Rowe 等通过一系列室内试验获取了垃圾渗流液中近似一致的钙产率系数(Y_{Ca})。随后, Powe^[23]、Yu^[24]等对微生物诱导碳酸钙进行了定量研究。

$$\text{产钙率系数}(Y_{Ca}) = \frac{\text{钙离子消耗量}}{\text{化学需氧量}(COD)} \quad (1)$$

1.3 微生物表面活性剂附着于颗粒表面

微生物表面活性剂是微生物代谢过程中分泌出的具有一定表面活性的代谢产物,主要有糖脂、脂肽和脂蛋白、脂肪酸和磷脂、聚合物、全胞表面本身五大类。同化学表面活性剂一样,微生物表面活性剂也拥有亲水和疏水基团,其附着在粘土矿物的表面可以降低液面张力,并使粘土矿物表面疏水化,破坏矿物表面水化膜或使之变薄^[25]。另外,微生物表面活性剂中多糖作为一种有机胶体,具有较大的比表面积,反应活性和吸附性巨大,可直接吸附在颗粒表面,或在颗粒表面形成不溶于水的有机胶膜,并通过胶膜将颗粒胶结在一起。另外,多糖是一种线性绕曲的高分子聚合体,其分子上有很多接触点,同时含有大量的功能团,这些功能团有很强的离子交换性,与土体中的离子发生物理化学反应,形成一种胶凝物质,将分散的土颗粒胶结在一起^[26]。

1.4 微生物代谢产生难溶性气体存在于土体孔隙

近几年研究表明微生物在土体中发生反硝化等反应,生成氮气、甲烷、氢气等难溶性气体,形成离散气泡,并占据土体中的孔隙体积,阻碍水的流动^[27]。与此同时, He J.等^[28]发现利用微生物代谢气体可以增加砂土抗液化能力。

综上所述,以上 4 种过程往往同时存在于土体,综合作用于土体颗粒表面及孔隙,致使土体微观结构发生变化。主要变化体现在增大颗粒粒径、减小孔隙大小与增强颗粒胶结等三方面。尽管众多

研究为探究微生物作用土体性能微观机理做出了贡献,但限于微生物作用于土体颗粒过程复杂,并没有统一的认识。作者认为在不同环境下,由于微生物种类与土体本身矿物质不同等原因,微生物作用土体的机理不同。

2 宏观尺度研究

宏观尺度研究主要侧重于微生物对土体渗透性、强度等特性的作用,通过试验方法探究微生物活动与渗透性、强度的定性关系,运用数值分析方法探究其定量关系,并建立基于微生物生长的土体本构模型。Martinez 等对经微生物处理的土样进行室内渗透和强度试验。结果表明,该土样的渗透性下降了 2-3 个数量级,抗剪强度提高约 50%^[5]。由此可见,微生物对土体的渗透性和强度具有一定影响。

2.1 微生物对土体强度的影响

研究表明微生物活动在一定程度上增加了土体强度,但是针对不同土体,微生物作用于土体强度的机理及程度不同。针对粘性土而言,周东等^[29]指出微生物及其代谢产物能改变粘土矿物表面电荷电性或对膨胀土有疏水作用,减小结合水膜厚度,从而提高土体强度。随后,杜静等^[30]在研究时发现微生物会导致膨胀土等粘性土内聚力 c 略有减小,内摩擦角 ψ 大幅增加。对于砂土而言,Stocks-Fischer 等^[31]发现巴氏芽胞杆菌(*Bacillus Pasteurii*)在砂土中可较快析出具有胶结作用的碳酸钙沉淀。另外,Dejong 等^[32]通过固结不排水三轴剪切试验发现微生物诱导碳酸盐沉淀可以显著提高砂土的剪切刚度和极限承载力,且砂土试件剪切破坏时有明显的应变软化行为。而在粉土研究方面,许朝阳等^[33]在研究微生物对粉土强度的影响时发现矿化菌、多糖粘胶菌均能提高粉土强度,且多糖粘胶菌在提高粉土的凝聚力方面效果更明显。

总之,微生物活动对各种性质的土体均能提高其强度。对于砂土主要通过诱导无机矿物沉淀胶结颗粒提高强度,对于粉土主要通过多糖等粘性分泌物胶结颗粒增加强度,而对于粘土主要通过微生物及

其代谢产物减小结合水膜厚度提高土体强度。

2.2 微生物对土体渗透性的影响

微生物对土体渗透性的研究主要针对透水性强的非粘性土,研究表明微生物活动与土体渗透性成负相关。随着微生物活动进行,土体渗透性逐渐降低。Ivanov 在文献[34]中提到细菌的生长、繁殖和集聚导致砂土颗粒表面生成微生物群落,孔隙空间减小,透水能力降低。Hill 等^[35]将微生物及培养基接种到破碎岩石中,经矿化沉积形成堵塞作用致使渗透系数下降超过 3 个数量级。基于固体颗粒阻塞机理预测土工布渗透系数的半经验公式,Palmeira 等在文献[36]中提出了微生物阻塞下的半经验公式,

$$k = \frac{\beta \rho g (d_f/4)^2 \left[n - (\mu_b/t_{GT} \rho_b (1-n')) \right]^3}{16\eta(1-n) \left[1 - n + (\mu_b/t_{GT} \rho_b (1-n')) \right]}$$

其中 k 为渗透系数, β 为形状因素, ρ 为流体密度, g 为重力加速度, η 为流体动力粘度, d_f 为土工纤维直径, n 为土工布孔隙率, μ_b 为土工布单位面积微生物量, t_{GT} 为土工布厚度, ρ_b 微生物生物膜密度, n' 为微生物集聚体的孔隙。

随后, Rittmann 等^[25]推导出了垃圾渗流液基于生物化学的渗流模型。Van Gulck 等^[37]提出了 BioClog 模型用以预测渗滤液渗透, Yan Yu 等^[24]提出了预测微生物阻塞多孔介质的数值模型,且结果表明在饱和排水层下部区域砾石中利用该模型预测堵塞比先前模型更佳。

3 微生物技术应用

微生物技术在土体中的应用主要分生物填充与生物胶结两个方面。生物填充是运用微生物方式生成孔隙填充材料改善土体的孔隙结构及渗透性,具有封堵、防渗等功能;生物胶结是利用微生物生命活动及其产物形成颗粒胶结材料提高土体的强度和刚度,具有加固等作用^[38]。

3.1 微生物封堵(防渗)技术

该技术主要通过向土层中注射营养物,刺激自

然土层中原始土著微生物的生长与代谢,产生的代谢产物占据孔隙空间,封堵土体裂隙和防水薄弱区域。目前主要应用于减少排水沟渠的冲刷,形成灰浆帷幕阻止重金属及有机污染物的扩散,防止土质坝体管涌、降低砂土液化程度^[8],修补地下建筑设施渗漏等。2005 年,在荷兰 HSL 路基渗漏治理的工程中,率先应用了微生物诱导封堵技术,在采用该技术处理后,渗漏现象逐渐消失,渗漏问题得到成功治理。随后,奥地利多瑙河地区利用该技术对复杂工程水文地质条件的堤坝进行了防渗封堵,目前已经取得了明显的效果^[39]。

大量工程实例和室内研究表明微生物封堵技术能够在砂土中自动探查渗漏位置并形成有效封堵,但是空间尺寸是影响封堵效果最重要的因素,土中孔隙尺寸的范围决定了该技术作用的有效范围^[39]。若微生物尺寸相对于土颗粒尺寸太大,微生物所需要营养物质的传送比较困难,影响细菌的活性,无法达到封堵目的;若微生物尺寸相对土颗粒的尺寸太小,营养液由于土的较大的透水性,会流出土体,同样也无法达到封堵目的。因此该技术的关键在于确定土体孔隙尺寸,选用相应的营养液。

3.2 微生物加固技术

Van Paassen^[40]在钻孔勘察过程中第一次现场试用了该技术,利用微生物技术胶结加固一层粘结性较差的砂砾石层,成功阻止了其失稳塌落。随后微生物加固技术在工程中得到了应用,且对砂砾石层的胶结加固效果尤为显著。该技术关键问题是微生物诱导无机物能否均匀沉淀, Van Paassen 等^[41]基于这一问题提出了四条生物胶结进行土体加固的适用性性能评价标准,分别为所加混合物的溶解性、碳酸钙的生成速率、所需底物的数量及副产品的种类与数量,并认为碳酸钙生成速率必须合理控制以防止过快沉积而阻碍传输及过慢沉积导致在指定时间内达不到既定胶结程度;底物的添加数量符合反应的化学计量数为宜;一些影响反应效率及胶结进程的毒副产品必须移除。

4 结论

作者通过研究分析认为关于微生物改善土体性能的研究取得了一定成果,但是在理论基础(微观机理)、试验技术、数值分析、模型构建等方面仍存在不足。基于上述分析,本文提出如下结论与建议:

(1) 在微观机理方面,提出了微生物吸附、诱导无机物沉淀、生物表面活性剂附着与气体填充四种作用方式,但尚未有统一认识。其一,除无机物沉淀量外,其它3种作用方式并未有有效的定量检测手段,这直接制约了对4种作用方式改善土体性能能力的对比评估;其二,对4种作用方式间相互作用及环境因素对4种作用方式的影响缺乏系统认识。因此,在积极探寻新检测手段的同时,应构建基于土体环境的分析体系,即在分析土体矿物成分、溶液成分、微生物种类、pH、温度等基础上,确定土样中起主导作用的微生物代谢过程,进而分析微生物对土体的作用。

(2) 在试验技术方面,利用电镜扫描、X射线衍射等手段可以直观观察微生物对土体微观结构的改变,运用特定的微生物-化学试验技术可以定量确定微生物对土体组分的改变。但例如微生物膜吸附情况、土体孔隙微小变化量测、同一区域连续性观测等仍无法实现。除此之外,微生物的生长难以控制,目前缺乏定量控制微生物生长的有效方案。

(3) 在数值分析、构建模型方面,这是目前研究的重点,也是难点。上述大量研究已表明微生物生长与土体渗透性成负相关,与强度成正相关,但是其定量关系并不明确。目前需构建基于土体环境指标(矿物成分、有机物含量、微生物种类、温度、pH等)的微生物生长代谢模型,进而构建在微生物作用下土体性能指标(渗透系数、抗剪强度)的变化模型。现有模型不仅参数众多、形势复杂,而且实用性差,难以推广利用。因此,作者认为探究选取合适且能控制微生物代谢的环境指标是首要任务,

构建综合完整的、相互协调的模型是重点工作。

参考文献

- [1] Mitchell J, Santamarina J. Biological considerations in geotechnical engineering[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(10): 1222-1233.
- [2] William BW, David CC, William JW. Prokaryotes: The unseen majority[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1998, 95(12): 6578-6583.
- [3] Harkes MP, van Paassen LA, Booster JL, 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.
- [4] DeJong JT, Mortensen BM, Martinez BC, et al. Bio-mediated soil improvement[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 197-210.
- [5] Martinez BC, DeJong JT, Ginn TR, et al. Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(4): 587.
- [6] Hata T, Tsukamoto M, Inagaki Y, et al. Evaluation of multiple soil improvement techniques based on microbial functions[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2011(211): 3945-3955.
- [7] Fauriel S, Laloui L. A bio-chemo-hydro-mechanical model for microbially induced calcite precipitation in soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012(46): 104-120.
- [8] Dejong JT, Caslake LF, Chen CY, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges[J]. *Geotechnique*, 2013, 63(4): 287-301.
- [9] Mitchell A, Phillips A, Hiebert R, et al. Biofilm enhanced geologic sequestration of supercritical CO₂[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, 3(1): 90-99.
- [10] Bang SS, Lippert JJ, Yerra U, et al. Microbial calcite, a bio-based smart nano material in concrete remediation[J]. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2010, 1(1): 28-39.
- [11] Stal LJ. Microphytobenthos as a biogeomorphological force in intertidal sediment stabilization[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(2): 236-245.
- [12] 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.
- [13] Ciurli S, Benini S, Rypniewski WR, et al. Structural properties of the nickel ions in urease: Novel insights into the catalytic and inhibition mechanisms[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 1999(190): 331-355.
- [14] Hamdan N. Carbonate mineral precipitation for soil improvement through microbial denitrification[D]. ProQuest, UMI Dissertations Publishing, 2013.
- [15] Warthmann R, van Lith Y, Vasconcelos C, et al. Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments[J]. *Geology*, 2000, 28(12): 1091-1094.
- [16] Weaver TJ, Burbank M, Lewis A, et al. Bio-induced

- calcite, iron, and manganese precipitation for geotechnical engineering applications[J]. Geotechnical Special Publication, 2011: 3975-3983. DOI: 10.1061/41165(397)406.
- [17] 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.
- [18] Ahmed AQ, Kenichi S, Carlos S. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(8): 992-1001.
- [19] Cacchio P, Ercole C, Cappuccio G, et al. Calcium carbonate precipitation by bacterial strains isolated from a limestone cave and from a loamy soil[J]. Geomicrobiology, 2003, 20(2): 85-98.
- [20] Whiffin VS, van Paassen LA, Harkes MP. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [21] Okwadha GD, Li J. Optimum conditions for microbial carbonate precipitation[J]. Chemosphere, 2010, 81(9): 1143-1148.
- [22] Cooke AJ, Rowe RK, Rittmann BE, et al. Modeling biochemically driven mineral precipitation in anaerobic biofilms[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(7): 57-64.
- [23] Rowe RK, VanGulck JF, Millward SC, et al. Biologically induced clogging of a granular medium permeated with synthetic leachate[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2002, 1(2): 135-156.
- [24] Yu Y, Rowe RK. Modelling leachate-induced clogging of porous media[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(8): 877-890.
- [25] Rittmann BE, Banaszak JE, Cooke A, et al. Biogeochemical evaluation of mechanisms controlling $\text{CaCO}_3(\text{s})$ precipitation in landfill leachate-collection systems[J]. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 2003, 129(8): 723-730.
- [26] 杨和平, 贺迎喜, 江唯伟. 微生物影响岩土工程的现状及用微生物技术改良膨胀土的思考[J]. 中外公路, 2007, 27(4): 228-231.
- [27] Rebata-Landa V, Santamarina J. Mechanical effects of biogenic nitrogen gas bubbles in soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(2): 128-137.
- [28] He J, Chu J, Ivanov V. Mitigation of liquefaction of saturated sand using biogas[J]. Geotechnique, 2013, 63(4): 267-275.
- [29] 周东, 杜静, 赵文文, 等. 一种放线菌对膨胀土工程性质的影响试验[J]. 桂林理工大学学报, 2012, 35(1): 63-67.
- [30] 杜静. 微生物对膨胀土工程性质影响的试验研究[D]. 南宁: 广西大学硕士学位论文, 2006.
- [31] Stocks-Fischer S, Galinat JK, Bang SS. Microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31(11): 1563-1571.
- [32] Dejong JT, Fritzges MB, Nusslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [33] 许朝阳. 微生物改性对粉土强度的影响[J]. 建筑科学, 2009, 25(5): 45-48.
- [34] Ivanov V, Chu J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil *in situ*[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2008, 7(2): 139-153.
- [35] Hill DD, Sleep BE. Effects of biofilm growth on flow and transport through a glass parallel plate fracture[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2002, 56(3/4): 227-246.
- [36] Palmeira Ennio M, Remigio Aline FN, Ramos Maria LG, et al. A study on biological clogging of nonwoven geotextiles under leachate flow[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(3): 205-219.
- [37] VanGulck JF, Rowe RK. Parameter estimation for modelling clogging of granular medium permeated with leachate[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(6): 812-823.
- [38] 苗晨曦, 李亚梅, 郑俊杰, 等. 微生物改性土体研究进展[J]. 土木工程与管理学报, 2012, 29(1): 25-29.
- [39] 张贺超. 砂土介质中微生物诱导封堵技术试验研究[D]. 北京: 清华大学硕士学位论文, 2010.
- [40] Van Paassen LA. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications[C]. Advances in Geotechnical Engineering-Proceedings of the Geo-Frontiers 2011 Conference. Geotechnical Specila Publication, 2011: 40994-41108.
- [41] Van Paassen LA, Daza Claudia M, Staal Marc, et al. Potential soil reinforcement by biological denitrification[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 168-175.