

# 微生物灌浆加固地基的多物理场 耦合数值模拟研究

邓温妮, 吴智威

(东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 微生物灌浆加固地基是一种利用微生物诱导碳酸钙沉淀的新技术, 具有加固效果明显、扰动小、环保等优势, 是当前地基加固技术的前沿问题。微生物灌浆效果与地基中生成的碳酸钙均匀性及含量有密切相关。通过建立灌浆过程中的多孔介质渗流、溶质运移传输和微生物生化反应一维耦合模型, 加入微生物初始分布和微生物活性随时间衰减模型, 对微生物灌浆生成碳酸钙分布进行了模拟, 并与 5 m 砂柱的试验结果进行对比验证。分析微生物初始分布以及不同灌浆参数(灌浆速度, 胶结液浓度和灌浆次数)对灌浆效果的影响, 给出了多因素影响下的最优灌浆方式。结果表明微生物初始分布、灌浆速度和次数均对最终碳酸钙量和分布影响很大, 胶结液浓度对最终碳酸钙量影响最小, 适中灌浆速度和分步灌浆能提高碳酸钙的均匀性。研究显示菌液和胶结液反向分步灌浆, 胶结液浓度为 1~1.5 mol/L, 采用较高的灌浆速度的灌浆方式, 能有效减少碳酸钙在入口处的堵塞, 提高灌浆效果。

**关键词:** 微生物灌浆; 微生物初始分布; 生物化学反应方程; 灌浆方式; 多物理场耦合方程; 碳酸钙沉淀  
**中图分类号:** TU441      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-7195(2022)S-0022-07

## Multiphysics coupling numerical simulation study of microbial grouting for foundation reinforcement

DENG Wen-ni, WU Zhi-wei

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 21189, Jiangsu, China)

**Abstract:** Biogrout is a new ground improving bio-geotechnology which utilizes the microbial induced calcite precipitation (MICP) technology. It is a promising ground improving technology because of its high efficiency, low disturbing and environmental friendly. The biogrout efficiency is closely related to the precipitated calcite uniformity and amount in the ground. A one dimensional fluid-flow, solute transport and bio-chemical reactive model was proposed to simulate the multicomponent interactions, which considered the biomass initial distribution and the activity reduction with time of microbials. The model simulated the distribution of calcite precipitated by biogrout and was verified by an experiment which was carried out in a 5 m soil column. The numerical results were agreed well with the experimental data. Then the initial biomass distribution and injection factors (injection rate, chemical concentrations and the injection method) were studied to analyze the MICP effect. The results of this study indicate that the biomass initial distribution, the injection velocity and the number of times have great impact on the calcite precipitation, while the solution concentrations has least impact on the calcite precipitation. The biomass distribution mode, medium injection velocity and multi steps injection can improve the uniformity of calcite in the column. The best injection method is pulsed injection with opposite injection direction of bacteria and cementation solution, 1-1.5 mol/L solution concentration, and relative higher injection rate, which can reduce the clog in the entrance of the column.

**Key words:** biogrout; initial biomass distribution; bio-chemical reactive model; injection method; multiphysics model; calcite precipitation

收稿日期: 2022-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5187081843, 51508092)。

作者简介: 邓温妮(1985—), 女, 湖北潜江人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程以及微生物岩土的研究工作。E-mail: wdeng@seu.edu.cn。



## 0 引言

微生物灌浆是利用土中特定的微生物(如产脲酶菌)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,其水解产物与钙源结合,在土体孔隙快速生成碳酸钙结晶,胶结土颗粒,从而提高土体的强度。该技术相对于传统的化学灌浆或砂浆灌浆方法具有强度高、黏结性强、反应可控等优势。这一微生物技术在土木工程、材料工程、环境工程等领域已经得到了广泛的应用,如边坡防护、地基加固、微生物水泥、污染物处理等<sup>[1-5]</sup>。

目前微生物灌浆方面的成果主要是针对微生物技术进行了系列试验研究,包括微生物活性的影响因素,碳酸钙沉积量和分布影响因素,以及微生物灌浆方式对土体强度、渗透性、抗液化性能等岩土工程特性。已有研究主要是小尺寸室内砂柱试验,程晓辉等<sup>[6]</sup>通过微生物加固松砂,使其抗液化能力得到显著提高。DEJONG 等<sup>[7]</sup>通过胶结高 14 cm 砂柱,使其不排水抗剪强度提高约 4 倍,部分学者也进行了大尺寸砂柱及大规模现场试验,荣辉<sup>[8]</sup>通过多次循环注浆成功胶结出 0.5 m×0.5 m×0.5 m 的砂基,微生物灌浆加固后的无侧限抗压强度达到 3 MPa。WHIFFIN 等<sup>[9]</sup>通过微生物灌浆的方式成功胶结 5 m 长砂柱,加固后的强度为 200~570 kPa,生成碳酸钙量约为 95 kg/m<sup>3</sup>。VAN PAASSEN<sup>[10]</sup>对 1 000 m<sup>3</sup>的松砂地基连续灌浆加固 16 d 后,测量砂基内碳酸钙量平均为 110 kg/m<sup>3</sup>,切块后砂样的单轴抗压强度为 0.7~12.4 MPa,有效提高了砂基的承载力与刚度。

已有结果表明,微生物灌浆加固后的强度与碳酸钙的含量有着密切关系,总体来说,碳酸钙含量越高,其强度越大,渗透系数越低<sup>[11-12]</sup>。但不同灌浆方式对灌浆效果影响很大,加固后砂土中碳酸钙的分布也不一样。研究发现菌液注射方式,胶结液浓度,注浆速度等对微生物固化砂土静、动力特性的影响显著。QABANY 等<sup>[4]</sup>研究表明,当低速灌浆(低于 0.042 mol/L/h)时,碳酸钙沉积效率可达 100%,速度过高会影响沉积效率。WHIFFIN 等<sup>[9]</sup>研究发现,将菌液与尿素/钙盐混合后,其有效灌注距离最多不超过 0.5 m。同时胶结液浓度会影响碳酸钙晶体尺寸和分布,对碳酸钙量的影响较小。胶结液浓度高时,碳酸钙晶体尺寸较大,且分布不均。崔明娟和郑俊杰等<sup>[13]</sup>研究发现菌液注射方式和浓度对微生物固化砂土静、动力特性的影响显著。TOBLER 等<sup>[14]</sup>指出分步灌浆比连续灌浆的碳酸钙

分布更加均匀。HARKES 等<sup>[15]</sup>提出了分步灌浆、低速灌浆的注浆方法来提高碳酸钙的含量及均匀性。由于现有测量手段的限制,灌注菌液后菌液在土体内部的具体分布情况十分复杂,测得的数据离散性很大,没有得到统一的结论<sup>[16]</sup>。

微生物灌浆涉及到一系列生物化学反应过程,灌浆效果受生物、化学、灌浆方法等各方面因素影响,如果通过试验找到最优灌浆方式比较困难,因此建立一套微生物灌浆的模型很有必要。在微生物灌浆过程中,碳酸钙结晶占据土中孔隙,降低渗透系数,从而影响流体流动,影响化学反应速度,而化学反应又能改变碳酸钙的量,整个过程相互影响。目前国内外针对微生物灌浆数值模拟方面的研究工作处于起步阶段<sup>[1-4,17-20]</sup>,特别是综合考虑多物理场耦合的模拟。VAN WIJNGAARDEN 等<sup>[18,21]</sup>率先建立了微生物灌浆的生物-化学-流体耦合数值模型,模拟了微生物灌浆过程中的碳酸钙沉淀分布、各离子浓度变化,并与室内模型试验进行了对比。FAURIEL 等<sup>[17]</sup>在考虑生物化学反应的基础上,加上了土体的强度增长,建立了生物-化学-流体-力学的 MICP 模型。清华大学程晓辉团队采用数值模拟方法分析不同灌浆参数灌浆效果的影响<sup>[20]</sup>。秦鹏飞<sup>[22]</sup>建立了微生物灌浆的颗粒流细观力学数值模型,对微生物灌浆过程中菌液在地层的扩散过程和形态进行了模拟。

本文拟在现有研究的基础上,考虑微生物初始分布和活性随时间衰减函数,通过建立对流-扩散-反应模型,模拟微生物菌液在地层中的分布,不同灌浆方式对碳酸钙数量和分布的影响,为微生物灌浆的应用提供依据。

## 1 微生物灌浆模型的建立

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)反应过程分为两步:(1)尿素在微生物产脲酶作用下水解形成 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>; (2)以微生物为核心,水解生成的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>与其周围钙源结合在砂颗粒周围形成碳酸钙沉淀。其具体反应方程式如下:

微生物水解尿素过程:



碳酸钙沉积过程:



以上两个过程中,(2)反应过程很快完成,因

此总的反应速率由水解速率(1)控制。最终产物碳酸钙起到胶结和填充的作用,从而改善土体性能。整个反应发生在多孔介质孔隙溶液中,涉及到生物-化学反应、溶液离子对流扩散、多孔介质孔隙环境变化等复杂过程,需要对这些过程进行耦合建模,分析碳酸钙沉淀的变化过程及分布规律,找出影响其分布均匀性的主要因素。

微生物灌浆模型建立在 VAN WIJNGAARDEN 等<sup>[21]</sup>提出的模型基础上,同时考虑了微生物初始分布的影响,本文模型做了如下假定:

(1) 胶结液在土中渗流满足达西定律。

(2) 仅考虑吸附在土中的微生物,其分布形式由最初状态决定。

### 1.1 渗流场方程

由于胶结液尿素和氯化钙溶液是黏度比较低的溶液,其在土体中的流动符合牛顿流体规律。因此,对于土体中胶结液的流动可以按达西定律进行描述。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为孔隙率;  $t$  为时间;  $\mathbf{u}$  为渗流速度, m/s; 孔隙水渗流速度矢量可表示为:

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g \mathbf{z}) \quad (4)$$

式中:  $k$  为渗透系数,  $\text{m}^{-2}$ ;  $\mu$  为黏滞系数, Pa·s;  $p$  为孔隙水压力;  $g$  为重力加速度;  $z$  为竖向坐标。

### 1.2 溶质运移传输方程

胶结液中尿素和氯化钙以及产物氯化铵在土中的传输可以采用对流-扩散方程进行模拟,如式(5):

$$\frac{\partial (\theta C^i)}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta D \nabla C^i) - \mathbf{u} \cdot \nabla C^i + m_i \theta r_{\text{hp}} \quad (5)$$

式中:  $C^i$  为溶质的浓度, mol/L;  $i$  为尿素、氯化钙和氯化铵;  $D$  为扩散系数;  $m_i$  为常数,与反应方程式中的反应物和产物有关,对于尿素和氯化钙,  $m_i = -1$ , 对于氯化铵,  $m_i = 2$ ;  $r_{\text{hp}}$  为尿素水解反应速率。

### 1.3 相关参数描述

(1) 水解反应速率方程

影响微生物灌浆的化学反应方程速率因素很多,包括 pH 值、温度、微生物量及酶活性、尿素和氯化钙的浓度等。本文假定反应过程中 pH 值和温度不变,注入土柱中的微生物随着反应时间的增加,其活性会逐渐降低,且呈指数衰减,同时考虑

初始微生物的分布形式。综合考虑以上因素,基于 Monod 经验方程可得出其化学反应速率方程式为:

$$r_{\text{hp}} = \frac{C^{\text{urea}}}{K_{\text{m,urea}} + C^{\text{urea}}} v_{\text{max}} S^{\text{bac}} \varphi^{\text{bac}} e^{-bt} \quad (6)$$

式中:  $K_{\text{m,urea}}$  为半饱和常数,比生长速度等于最大值的一半时的反应物浓度, mol/m<sup>3</sup>;  $v_{\text{max}}$  为细菌最大比生长速率, mol/L/s;  $S^{\text{bac}}$  为土中吸附微生物量与注入微生物量比值;  $b$  为常数, s<sup>-1</sup>;  $\varphi^{\text{bac}}$  为微生物分布函数。

(2) 碳酸钙含量的确定

碳酸钙晶体主要沉积于松散砂颗粒周围,可将碳酸钙含量定义为单位体积的质量变化,则碳酸钙的含量可表示为:

$$\frac{\partial C^{\text{CaCO}_3}}{\partial t} = m_{\text{CaCO}_3} \theta r_{\text{hp}} \quad (7)$$

式中:  $m_{\text{CaCO}_3}$  为碳酸钙含量, kg/mol。

(3) 孔隙率变化方程

已有研究表明,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附近。本文忽略碳酸钙在孔隙中的具体沉积位置,只考虑碳酸钙对土体孔隙的填充。孔隙率的变化主要由碳酸钙变化量决定,其关系式如式(8)所示:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_{\text{CaCO}_3}} \frac{\partial C^{\text{CaCO}_3}}{\partial t} = -\frac{m_{\text{CaCO}_3}}{\rho_{\text{CaCO}_3}} \theta r_{\text{hp}} \quad (8)$$

式中:  $\rho_{\text{CaCO}_3}$  为碳酸钙密度, kg/m<sup>3</sup>。

(4) 渗透系数

由 Korzny-Carman 方程可知,渗透系数和孔隙率的关系为:

$$k = \frac{(d_m)^2}{180} \frac{\theta^3}{(1-\theta)^2} \quad (9)$$

式中:  $d_m$  为平均颗粒尺寸, m。

(5) 微生物的初始分布

本文假设 4 种不同的微生物初始分布形式,其中 a) 均匀分布模拟菌液与土体搅拌均匀混合灌浆情况; b) 从上往下灌浆情况; c) 从下往上灌浆情况; d) 从上往下灌浆,考虑实际菌液分布随距离增加衰减情况。将其归一化,假设均匀分布的情形下为 1,在保证各种分布形式下微生物的总量是一定的前提下,各分布形式如下。

a) 均匀分布:  $\varphi^{\text{bac}} = 1$

b) 线性分布 1:  $\varphi^{\text{bac}} = 2 + 0.4z$

c) 线性分布 2:  $\varphi^{bac} = -0.4z$

d) 指数函数分布:  $\varphi = 5e^{-z}$

## 2 微生物灌浆一维模型计算

### 2.1 计算模型

本模型基于 WHIFFIN 等<sup>[9]</sup> 的砂柱模型, 该试验中砂柱高 5 m, 砂土的初始孔隙比为 0.378, 平均粒径是 0.165 mm。菌液采用巴氏芽孢杆菌, 胶结液采用氯化钙和尿素。菌液从上往下注入砂柱, 以  $u_{in}=0.35$  L/h 的速度持续灌入 18 h 后注入固定液 (0.05 mol/L 氯化钙), 灌入菌液总量为 6.3 L, 约为 1 倍砂柱孔隙体积。然后持续以相同速度灌入  $c_{in}=1.1$  mol/L 尿素和氯化钙溶液, 灌浆时间为 25 h, 胶结液灌注完后静置 100 h 后进行碳酸钙量的测量及不同时刻氯化铵量的测量。本文模型采用该砂柱试验模型, 利用以上提出的灌浆模型方程, 用 COMSOL 进行求解。模型中所用到的微生物参数取值来自于 WHIFFIN 等<sup>[9]</sup> 针对巴氏芽孢杆菌的研究结果, 具体如表 1 所示。

模型边界条件为: 入口处尿素和氯化钙浓度为  $c_{in}$ , 流速为  $u_{in}$ , 出口处为大气压, 具体方程表达见表 2 所示。

表 1 模型中参数取值<sup>[9]</sup>

Table 1 Values of parameter used in the model

参数	数值
$v_{max}/(\text{mol/L/s})$	$4.26 \times 10^{-5}$
$K_{m,urea}/(\text{mol/L})$	0.01
$S^{bac}$	0.707
$b/(\text{s}^{-1})$	$1.12 \times 10^{-5}$
$m_{CaCO_3}/(\text{kg/mol})$	0.1
$\rho_{CaCO_3}/(\text{kg/m}^3)$	2 710

表 2 微生物灌浆模型边界条件

Table 2 Boundary conditions for biogROUT model

边界条件	入口	出口
$C^{urea}$ 和 $C^{Ca^{2+}}$	$(D\theta VC - uC) \cdot n = u_{in}c_{in}$	$(D\theta VC) \cdot n = 0$
$C^{NH_4}$	$(D\theta VC - uC) \cdot n = 0$	$(D\theta VC) \cdot n = 0$
流体	$u \cdot n = -u_{in}$	$p = 10^5 \text{ Pa}$

### 2.2 灌浆参数

本文主要探讨微生物初始分布、土的初始孔隙比、灌浆速度、胶结液浓度以及分步灌浆次数对微生物灌浆效果的影响。本文在 WHIFFIN 等<sup>[9]</sup> 试验基础上, 考虑 4 种微生物分布形式, 4 组不同的胶结液浓度 (0.5~2 mol/L) 和灌浆速度 ( $0.71 \times 10^{-5}$ ~

$5.7 \times 10^{-5}$  m/s), 对比了连续灌浆时这 3 种因素的影响, 同时, 分析了分步灌浆次数 (1~4 次) 的影响。在所有对比方案中, 确保注入的微生物总量和胶结液总量一致, 因而灌注的时间依据不同的灌浆参数有所不同。在分析每个因素的影响时, 其他参数的取值均为 WHIFFIN 等<sup>[9]</sup> 试验参数。

## 3 结果与分析

### 3.1 模型验证

该模型首先与一 5 m 室内砂柱试验<sup>[9]</sup> 结果进行了对比。通过对比试验测得的最终碳酸钙含量和数值模拟结果可知 (见图 1), 尽管实测数据相对离散, 但模型结果的变化趋势与试验结果吻合较好。数值模型模拟的碳酸钙沿着土柱呈线性分布, 在入口处附近, 碳酸钙含量约为  $95 \text{ kg/m}^3$ , 在出口处, 碳酸钙含量约为  $5 \text{ kg/m}^3$ 。理论上, 如果注入的 1.1 mol/L 胶结液完全反应生成碳酸钙, 且在砂柱中均匀分布, 则碳酸钙含量应为  $56 \text{ kg/m}^3$ 。由此可以计算出, 试验中的碳酸钙总的转化率约为 90%, 但沿砂柱分布很不均匀, 在入口处多出口处少。

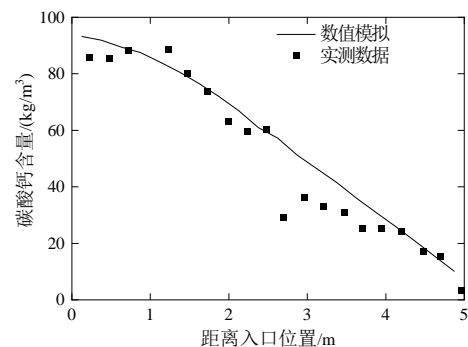


图 1 碳酸钙含量的数值模拟与试验对比

Fig.1 Comparison of the  $\text{CaCO}_3$  contents between experimental and numerical data

由于原试验中没有办法测得不同时刻不同位置碳酸钙的含量, 只能测得氯化铵的含量, 因此图 2 对比了不同时刻砂柱中氯化铵的浓度, 由图可见, 数值模拟结果和试验结果非常吻合。随着反应时间的增加, 化学反应速率逐渐下降, 砂柱中氯化铵含量逐渐增加, 而且停止灌浆后 ( $t > 25$  h), 反应仍在继续 (图 2 (b))。同样作为反应产物, 碳酸钙和氯化铵的分布并不一样, 碳酸钙在入口处分布最多, 而氯化铵到最后基本沿砂柱均匀分布。这是因为反应产物碳酸钙为固体, 生成后就聚集在土的孔隙中, 在土中不具有移动性, 而氯化铵可以随着胶结液在土体中移动, 因此在入口处生成的氯化铵会随

着溶液流向出口,当停止灌浆后,留着原位的胶结液继续反应,直至反应结束。

通过以上试验与数值模拟的对比可知,该模型能较好的模拟灌浆过程,因此,能用于后续分析不同灌浆因素的影响。

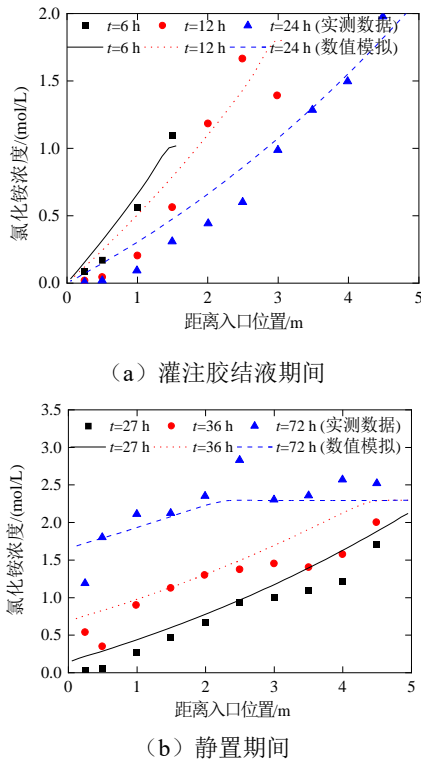


图2 氯化铵含量的数值模拟与试验结果对比

Fig. 2 Comparison of numerical simulation and experimental results of ammonium chloride content

### 3.2 微生物初始分布的影响

图3所示为4种不同微生物分布形式的碳酸钙沿砂柱分布情况。在微生物总量以及其他灌浆参数相同的情况下,碳酸钙含量受微生物分布形式影响很大。对于分布a, b, d这3种情况,随着胶结液传输距离增加,碳酸钙量逐渐减小,入口处微生物含量越高,碳酸钙量越大。对分布c,微生物量从入口到出口处微生物量线性增加,在出口处达到最大,但碳酸钙含量在砂柱中部约2.8 m处达到最大值。造成这种结果的原因可能是因为在中部微生物量较高,生成的碳酸钙量也较高,导致胶结液不易渗入远端,使得远端即使有大量微生物,但碳酸钙含量仍较低。因此,在实际注浆过程中,可以采取菌液和胶结液反向交替注入的方式,即在砂柱一侧注入菌液,另一侧注入胶结液,然后下一轮注浆时调换菌液和胶结液灌注方向,这样可以避免现有试验存在的碳酸钙分布极度不均匀问题。这一结论与MARTINEZ等<sup>[23]</sup>结论一致。

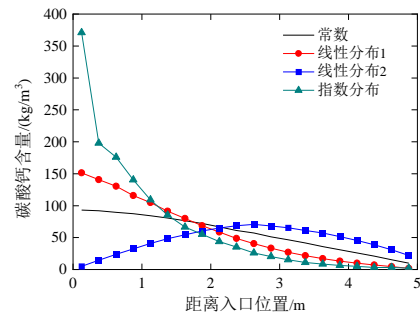


图3 碳酸钙含量受微生物分布形式的影响

Fig. 3 Comparison of the  $\text{CaCO}_3$  contents at various initial biomass distribution

### 3.3 灌浆速度和浓度影响

图4所示为不同灌浆速度下的碳酸钙分布情况,通过对比4种不同速度可知,灌浆速度对碳酸钙最终沉淀量的影响较大。当灌浆速度较小时( $0.71 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ),碳酸钙含量最低,这是因为随着速度降低,灌浆所需时间增加,影响菌液活性,从而降低碳酸钙含量。但当灌浆速度增加到一定值后( $5.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ )后,入口处的碳酸钙沉淀减少,出口处增加,这是因为当灌浆速度较快,胶结液迅速流向出口端,激发砂柱内部的反应,因此砂柱中碳酸钙分布更加均匀。但是如果灌浆速度过高,可能造成菌液的流失从而降低灌浆效率,这一影响在本模型中没有考虑进去。但不少学者的试验研究表明,灌浆速度对碳酸钙沉淀量影响较大,如WU等<sup>[24]</sup>对岩石裂缝灌浆处理时发现,速度越大碳酸钙转化率越低。由此可见,通过调节灌浆过程中的灌浆速度可以控制碳酸钙分布,如在灌浆初期采用低速灌浆,后期高速灌浆。

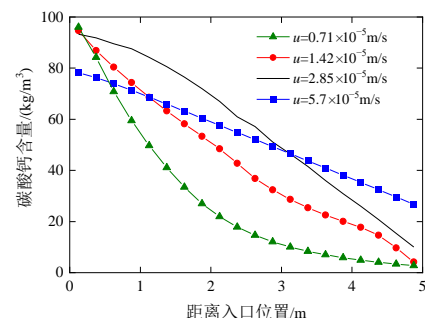


图4 碳酸钙含量受灌浆速度影响

Fig. 4 Comparison of the  $\text{CaCO}_3$  contents at various injection rates

图5为不同胶结液浓度的碳酸钙分布情况,可见胶结液浓度对最终碳酸钙量影响较小,特别是在距离入口3 m范围内。但当胶结液浓度降为 $0.5 \text{ mol/L}$ ,生成碳酸钙含量较另3组少,特别是在砂柱中间部分,这是因为在保证胶结液总量一致的

前提下, 需增加低浓度溶液的灌浆时间。但随着反应时间的增加, 微生物活性逐渐下降, 造成反应速率降低, 从而影响碳酸钙含量。当胶结液浓度增加到 1.5 mol/L 后, 增加胶结液浓度对前 3 m 土柱中碳酸钙含量影响很小, 但是对后 2 m 土柱的碳酸钙生成起抑制作用。这是因为当土中胶结液浓度较高时, 能迅速生成较多碳酸钙, 阻碍胶结液进入土体深处, 从而影响下部土体中的反应。因而要想得到较均匀的碳酸钙分布及较高的碳酸钙沉积效率, 胶结液浓度不能太高, 也不能太低。

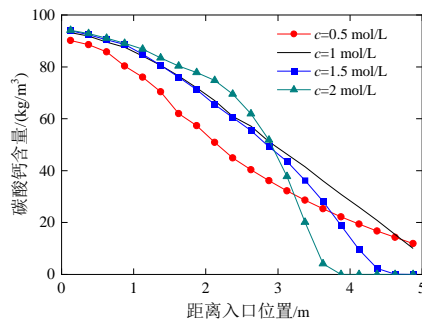


图 5 碳酸钙含量受胶结液浓度影响

Fig. 5 Comparison of the  $\text{CaCO}_3$  contents at various concentration of cementation solution

### 3.4 灌浆次数的影响

图 6 所示为连续灌浆和分布灌浆碳酸钙含量的对比, 连续灌浆是将菌液一次性灌入砂柱, 然后连续灌注胶结液 25 h, 再静置 100 h。分步灌浆是先灌入菌液胶结液然后静置相应时间再灌注下一轮。可以看出, 分步灌浆能大大提高砂柱中碳酸钙含量和均匀性。如果分 2 步灌浆, 远离进口处的砂柱中碳酸钙含量提高很多, 基本能得到比较均匀的碳酸钙含量。如果分 3 步灌浆, 虽然也能提高碳酸钙含量, 但提高幅度不如分 2 步灌浆情况。当分步灌浆次数再增加时对碳酸钙含量的影响可以忽略。采用分步灌浆时, 相对于减少每轮灌浆时间, 保证每次灌入砂柱中新鲜微生物的活性, 从而提高碳酸钙产量。

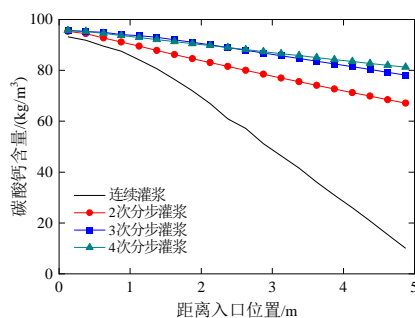


图 6 连续灌浆和分步灌浆对碳酸钙含量的影响

Fig. 6 Comparison of the  $\text{CaCO}_3$  contents under continuous and pulsed injection methods

## 4 结 论

微生物诱导生成碳酸钙沉淀是一个非常复杂的过程, 其灌浆效果受多种因素影响。本文建立微生物灌浆过程的生物化学反应方程, 通过与已有试验进行对比验证了其准确性, 同时分析了不同菌液分布形式和灌浆方式下碳酸钙含量及其分布, 得到了优化的灌浆方式。

(1) 土柱中菌液初始分布形式对碳酸钙分布影响很大, 微生物含量越多活性越高, 产生碳酸钙越多。

(2) 过低灌浆速度会降低碳酸钙含量, 适当提高灌浆速度可以得到更均匀的碳酸钙沉淀。

(3) 胶结液浓度对最终碳酸钙产量影响相对较小, 但是低浓度 (低于 1 mol/L) 会降低碳酸钙产量, 过高浓度 (高于 1.5 mol/L) 容易在入口处形成封堵, 对远端碳酸钙沉淀不利。

(4) 分步灌浆相对于连续灌浆效果更好, 能得到比较均匀的碳酸钙分布, 基本灌注 2~3 轮能保证较好的灌注效果。

综合数值模拟结论, 可见单一的灌浆方式不利于产生均匀的碳酸钙, 最有效的灌浆方式为菌液和胶结液反向分步灌浆, 胶结液浓度为 1~1.5 mol/L, 采用适中的灌浆速度能提高灌浆效果, 避免在入口处的堵塞。本文模拟中未考虑到温度和 pH 值的影响, 只分析了通过控制灌浆方式来提高微生物灌浆的效率。但已有文献研究表明可以通过调控 pH 或温度等来减少入口处的堵塞<sup>[25]</sup>。在实际工程应用时, 可以综合考虑各种影响因素, 以提高微生物灌浆效果。

## 参考文献

- [1] 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 Chun-xiang, WANG An-hui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537-1548.
- [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] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges[J]. Geotechnique, 2013, 63(4): 287-301.



- [4] QABANY A 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.
- [5] IVANOV V, CHU J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ[J]. *Reviews in Environmental Science and Biography/Technology*, 2008, 7(2): 139-153.
- [6] 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): 1486-1495.  
CHENG Xiao-hui, MA Qiang, YANG Zuan, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1486-1495.
- [7] DEJONG J T, FRITZGES M B, NUSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [8] 荣辉. 微生物水泥的研制及其胶结机理[D]. 南京: 东南大学, 2014.  
RONG Hui. Preparation and binding mechanism of microbe cement[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [9] 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.
- [10] VAN PAASSEN L. Bio-mediated ground improvement: From laboratory experiment to pilot applications[C]//*Geo-Frontiers: Advances in Geotechnical Engineering*. Dallas: ASCE, 2011: 4099-4108.
- [11] LI B. Geotechnical properties of biocement treated sand and clay[D]. Singapore: Nanyang Technology University, 2015.
- [12] 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.
- [13] 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(增刊 1): 392-396.  
CUI Ming-juan, ZHENG Jun-jie, ZHANG Rong-jun, et al. Study of effect of chemical treatment on strength of bio-cemented sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S1): 392-396.
- [14] TOBLER D J, MACLACHLAN E, PHOENIX V R. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 42(5): 270-278.
- [15] 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.
- [16] HOMMEL J, LAUCHNOR E, GERLACH R, et al. Investigating the influence of the initial biomass distribution and injection strategies on biofilm-mediated calcite precipitation in porous media[J]. *Transport in Porous Media*, 2016, 114(2): 557-579.
- [17] FAURIEL S, LALOU L. A bio-hydro-mechanical model for propagation of biogROUT in soils[C]//*Geo-Frontiers 2011-Advances in Geotechnical Engineering*, Texas, USA, 2011: 4041-4048.
- [18] VAN WIJNGAARDEN W K, VAN PAASSEN L A, VERMOLEN F J, et al. A reactive transport model for biogROUT compared to experimental data[J]. *Transport in Porous Media*, 2016, 111(3): 627-648.
- [19] MARTINEZ B C, DEJONG J T, GINN T R. Bio-geochemical reactive transport modeling of microbial induced calcite precipitation to predict the treatment of sand in one-dimensional flow[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 58(5): 1-13.
- [20] 陈婷婷, 程晓辉, 郭红仙. 基于数值模拟的砂柱微生物注浆影响因素分析[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(6): 111-119.  
CHEN Ting-ting, CHENG Xiao-hui, GUO Hong-xian. Influencing factors of bio-grouting precipitation in sand column based on numerical simulation analysis[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(6): 111-119.
- [21] VAN WIJNGAARDEN W K, VERMOLEN F J, VAN MEURS G A M, et al. Modelling biogROUT: A new ground improvement method based on microbial-induced carbonate precipitation[J]. *Transport in Porous Media*, 2011, 87(2): 397-420.
- [22] 秦鹏飞. 微生物灌浆的颗粒流细观力学数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增刊 1): 603-608.  
QIN Peng-fei. Mesomechanics particle flow numerical simulation research on sandy soil bio-grouting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1): 603-608.



