

文章编号:1007-9629(2022)08-0806-08

沙漠砂微生物注浆钙离子追踪数值分析

焦辰江¹, 由 爽^{1,*}, 程晓辉², 王洪涛¹

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:在微生物诱导 CaCO_3 沉淀技术的基础上, 利用 Matlab 软件建立一维流动注浆模型, 在离子层面对模拟注浆的砂柱进行分析和计算, 并着重对砂柱后期强度的关键影响因素 Ca^{2+} 浓度进行追踪, 以期从理论方面对注浆效果进行进一步的优化和深入研究. 结果表明: 注浆模型能够灵活追踪 Ca^{2+} 浓度随时间的变化, 检测砂柱任意位置的 Ca^{2+} 浓度; 钙源为 0.75、1.00 mol/L 的 CaCl_2 溶液时的注浆效果更优; 数值模拟与试验结果吻合较好, 可以为利用沙漠砂快速固结形成的高强度材料来建造沙漠公路路基提供有效的参考和依据.

关键词:沙漠砂; 微生物注浆; 快速固结; 离子追踪; 地基加固

中图分类号: TU45

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.08.006

Numerical Analysis of Calcium Ion Tracing in Microbial Grouting of Desert Sand

JIAO Chenjiang¹, YOU Shuang^{1,*}, CHENG Xiaohui², WANG Hongtao¹

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the existing microbe induced calcium carbonate precipitation technology, a one-dimensional flow grouting model was established by using Matlab. The sand column simulated grouting was analyzed and calculated at the ion level, and the key factor affecting the strength of the sand column was tracked with emphasis on Ca^{2+} ion. The numerical simulation was carried out with a view to further optimize the grouting effect from the theoretical aspect. The results show that the grouting model can flexibly track the change of Ca^{2+} ion content over time and simultaneously detect Ca^{2+} ion content at any position of the sand column. 0.75 mol/L and 1.00 mol/L CaCl_2 source perfusion have better effect. Finally, the validity of the numerical simulation is proved by experiment results, which provides an effective reference and basis for the construction of desert highway roadbed by using high strength materials formed by rapid consolidation of desert sand.

Key words: desert sand; microbial grouting; rapid consolidation; ion tracking; foundation reinforcement

中国是世界上沙漠化危害最严重的国家之一, 如何有效利用沙漠资源是当今中国面临的一个迫切问题. 传统微生物技术与土木工程的结合, 主要是利用生物降解处理垃圾废料等^[1]. 近几十年来, 某些脲酶微生物能够快速诱导 CaCO_3 沉淀的现象, 受到了世界范围内土木学者的广泛关注^[2]. 岩体微生物成矿学表明, 一些生物能够通过自身代谢及降解作用, 与

周围岩土颗粒快速反应, 析出矿物晶体^[3].

微生物诱导 CaCO_3 结晶 (MICP) 是利用特定微生物的酶来加速反应, 促使 Ca^{2+} 与 CO_3^{2-} 反应, 形成沉淀. 程晓辉等^[4]对微生物改性岩土材料进行了综述整理; 徐晶等^[5]通过测试嗜碱性菌的脲酶活性探索了砂土的固化强度; 郑俊杰等^[6]对 MICP 固化砂土的脆性特征提出了评价指标; 蔡鑫等^[7]分析了 MICP 在修

收稿日期: 2021-06-02; 修订日期: 2021-09-22

第一作者: 焦辰江 (2000—), 男, 山西晋城人, 北京科技大学本科生. E-mail: jiaochenjiang_sr@163.com

通讯作者: 由 爽 (1983—), 女, 辽宁鞍山人, 北京科技大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: youshuang@ustb.edu.cn

复混凝土与海洋工程中的应用;贾强等^[8]研究了微生物修复地下混凝土的结构裂缝等。

当前MICP在固化砂土方面,多采用直接试验法进行研究,通过试验结果反演固结机理。此方法试验周期较长,成本较高,且现有的数值模拟手段不具有定向追踪特定离子的功能,故而在定量分析微生物注浆砂柱中CaCO₃含量分布方面的功能性和准确性不高。本文采取定向和定量的数值模拟追踪法,对注浆钙盐进行钙沉淀定量分析,结合其沉积位置,确定砂柱的注浆状态,能够弥补微生物注浆模拟在功能性和准确性方面的不足。

1 沙漠砂微生物注浆强度试验

1.1 试验材料及方案

沙漠砂取自内蒙古某沙漠,参照GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,测得其基本物理指标如表1所示。营养盐(NS)为无水氯化钙(CaCl₂)和乙酸钙(C₄H₆CaO₄),2种钙盐浓度均选取0.50、0.75、1.00、1.50 mol/L 4种。

表1 沙漠砂的基本物理指标 Table 1 Basic physical indexes of desert sand	
Index	Result
Moisture content(by mass)/%	0.80
Dry density/(g·cm ⁻³)	2.30
Coefficient of nonuniformity	1.73
Curvature coefficient	0.74
Effective particle size/mm	0.11
Limiting grain size/mm	0.19
pH value	8.77

菌液配置:首先,在1 L纯净水中加入20 g酵母粉、10 g硫酸铵、1 mL浓度为0.01 mol/L的NiCl₃溶液,搅拌5 min后用2.5 mol/L的NaOH溶液(大约需要20 mL)调节溶液pH值至8.5~9.0之间,得到培养基;然后,将培养基倒入锥形瓶,密封高压高温

(120℃)消毒,冷却后加入菌种液(5 mL菌种+5 mL甘油),在震荡培养箱(30℃,180 r/min)中培养16 h后冷藏保存;最后,将培养好的菌液用注射器均分装到锥形瓶中用于注浆(每瓶装50 mL)。

每个砂柱配备体积为2 L的营养盐灌浆液(包含1.50 mol/L的尿素和营养盐),灌注50 mL菌液。制作砂柱的模具采用内径φ30×100 mm的圆柱形塑料管。灌注方式为每个注浆菌液烧杯引出1根灌注管,经蠕动泵与砂柱相连并进行灌注。先灌注菌液,完毕后关闭蠕动泵,静置2 h,再采用同样方法注入含营养盐的灌浆液。塑料管底部用容器承接从塑料管中流出的废液。所用微生物菌株是巴氏芽孢八叠球菌,陈歆等^[9]已经将其用于生物愈合剂修复混凝土方面的研究。该菌种产脲酶能力强,被广泛应用于微生物注浆固结研究,具有突出的生物矿化能力^[10]。

试验采用分光光度计来测量吸收光度OD₆₀₀值。吸收光度越大,所含有的微生物量越多。测得菌液的OD₆₀₀值为2.620。

试验采用2种钙源营养液分别注浆砂柱,待砂柱固结后拆模取出,进行无侧限抗压强度(UCS)测试,以确定可以产生高强度砂柱的微生物钙源。

CaCO₃含量测定采用酸洗法,取单轴抗压强度测试后破坏的样品,用纯净水冲洗清理表面的可溶盐,烘干后加入盐酸溶液充分反应溶解直至无气泡产生,最后烘干。测量反应前后的质量差,即可得出CaCO₃含量。

1.2 砂柱试验结果

单轴抗压强度是砂柱性能的重要指标。采用1.1中介绍的注浆方法,对砂柱依次进行3、4、5次灌注,前次灌注完成后颠倒砂柱的首末端,将灌注管接到砂柱的另一端,继续灌注,即为1次完整的注浆过程。试验表明,这种方法可以有效避免注浆口位置由于CaCO₃的固结沉淀而导致的堵塞。表2为3次注浆砂柱的性能。其中,HAS、HSB、HSC、HSD分别表示营

表 2 3次注浆砂柱的性能							
Table 2 Properties of sand column after 3 times grouting							
Serial No.	NS	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	f_c/MPa	Serial No.	NS	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	f_c/MPa
HSA-1	CaCl ₂	2.29	5.65	HSA-3	C ₄ H ₆ CaO ₄	2.12	3.64
HSA-2		2.17	6.93	HSA-4		2.06	4.47
HSB-1		2.26	8.32	HSB-3		2.18	7.40
HSB-2		2.40	15.58	HSB-4		2.28	16.09
HSC-1		2.46	13.46	HSC-3		2.22	10.78
HSC-2		2.39	15.55	HSC-4		2.21	11.42
HSD-1		2.41	12.17	HSD-3		2.36	8.42
HSD-2		2.11	4.00	HSD-4		2.27	3.03

养盐浓度为0.50、0.75、1.00、1.50 mol/L,每个浓度做2个平行试验, ρ_d 为干密度, f_c 为抗压强度.由表2可见,CaCl₂注浆砂柱的平均强度更高,故钙源选用CaCl₂.

不同CaCl₂注浆次数砂柱的单轴抗压强度如图1所示.由图1可见:当CaCl₂浓度为0.75 mol/L时,砂柱的单轴抗压强度均达到最高值;5次注浆砂柱的单

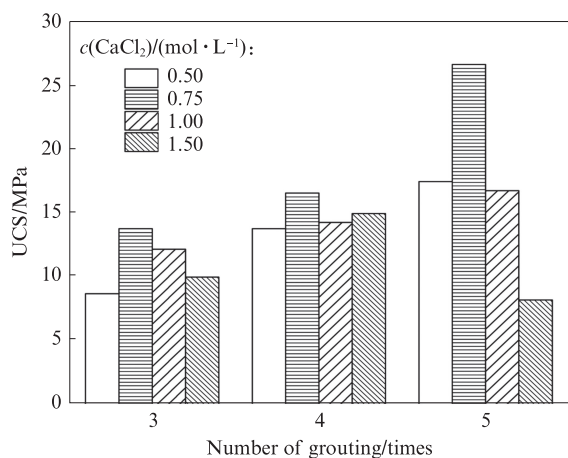


图1 不同CaCl₂注浆次数砂柱的单轴抗压强度
Fig. 1 Uniaxial compressive strength of sand column after different times CaCl₂ grouting

轴抗压强度高达26.09 MPa,远高于3、4次注浆砂柱.

取砂柱抗压测试破坏后的样品,观察其CaCO₃胶凝物质的分布,结果如图2所示.由图2可见,注浆后的砂颗粒之间及表面附着一定厚度的CaCO₃胶凝物质(C),与表面粗糙的风积砂颗粒(S)粘结紧密.

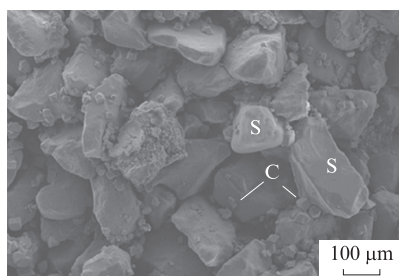
取少量上述0.75 mol/L CaCl₂注浆砂柱的形貌分析样品打碎、研磨,达到衍射试验用粉末的标准(约44 μm),取1~2 g进行X射线衍射(XRD)测试,结果如图3所示.由图3可见,衍射特征峰出现在29.55°、43.15°、47.12°、47.49°、48.51°、56.55°、57.40°、60.68°和64.68°,表明沙漠砂MICP固化后所生成的CaCO₃全部为方解石.

5次CaCl₂注浆砂柱的性能如表3所示.

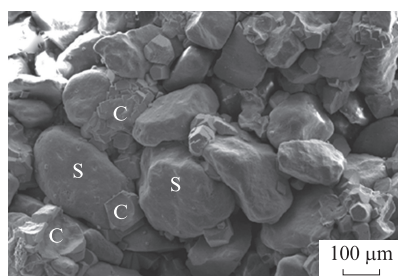
2 微生物注浆砂土中钙离子

2.1 数值模型

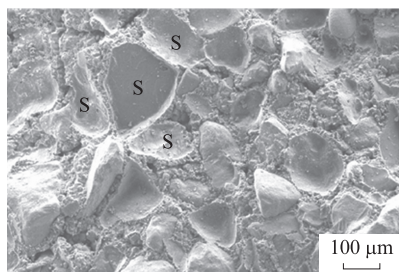
注浆试验已经证明,CaCO₃含量与砂柱强度有着直接的联系,且呈正相关关系.CaCl₂钙源较C₄H₆CaO₄钙源具有明显优势.为使得砂柱中沉淀的



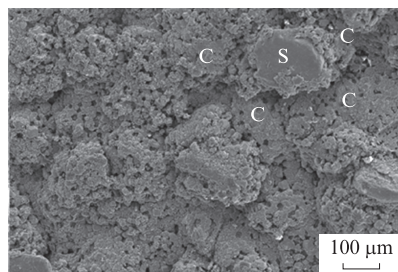
(a) $c(\text{CaCl}_2)=0.50$ mol/L, 4 times grouting



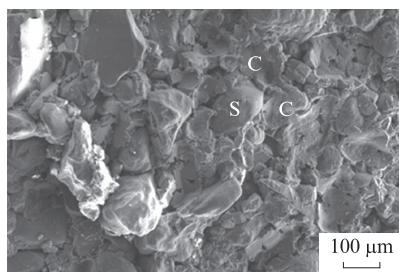
(b) $c(\text{CaCl}_2)=0.50$ mol/L, 5 times grouting



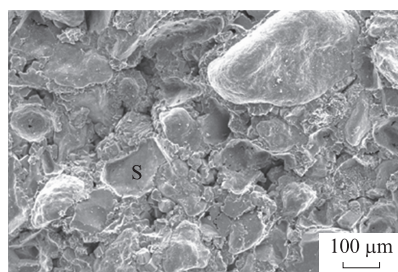
(c) $c(\text{CaCl}_2)=0.75$ mol/L, 4 times grouting



(d) $c(\text{CaCl}_2)=0.75$ mol/L, 5 times grouting



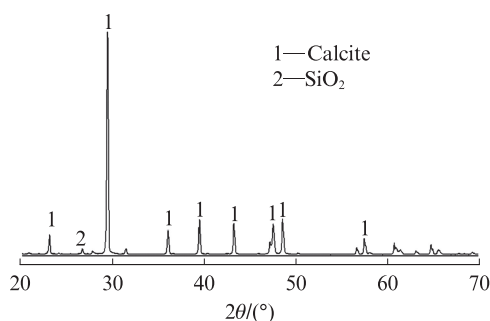
(e) $c(\text{CaCl}_2)=1.00$ mol/L, 4 times grouting



(f) $c(\text{CaCl}_2)=1.00$ mol/L, 5 times grouting

图2 碳酸钙胶凝物质的分布

Fig. 2 Distribution of calcium carbonate cementitious substances

图3 0.75 mol/L CaCl_2 注浆砂柱的XRD图谱Fig. 3 XRD pattern of sand column after 0.75 mol/L CaCl_2 grouting

CaCO_3 含量最大,可以通过间接追踪注浆时砂柱中的 Ca^{2+} 浓度及其随时间的变化,以确定砂柱最终的 CaCO_3 含量, Ca^{2+} 的绝对浓度与 CaCO_3 的含量呈正相关关系。

建模分析是基于大量试验数据,对微生物诱导 CaCO_3 沉淀过程的注浆阶段进行模拟。Fauriel等^[11]建立了包含流体、生物、力学、化学的综合模型系统; Van Wijngaarden等^[12]通过营养盐灌注、注浆固结等过程建立了数值模型。本数值模拟采用 Matlab 软件来建立微生物注浆流动模型,基本方程为一维流动方程:

表3 5次 CaCl_2 注浆砂柱的性能Table 3 Properties of sand column after 5 times CaCl_2 grouting

Serial No.	UCS/MPa	Total mass/g	Filter paper mass/g	Sand block mass/g	Total drying mass/g	Calcium carbonate mass/g
HSA-1	15.55	5.21	1.24	3.97	4.32	0.89
HSA-2	15.41	5.15	1.27	3.88	4.27	0.88
HSB-1	26.09	5.18	1.26	3.92	3.96	1.22
HSB-2	24.32	5.24	1.25	3.99	4.16	1.08
HSC-1	18.58	5.46	1.24	3.92	4.13	1.33
HSC-2	17.52	5.50	1.23	3.97	4.13	1.37
HSD-1	11.57	5.36	1.25	4.11	4.39	0.97
HSD-2	7.27	5.46	1.26	4.20	4.58	0.88

$$\frac{\partial nC_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(nD_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (nvC_i) + n \sum_{j=1}^N r_j \quad (1)$$

$$q = vn \quad (2)$$

式中: n 为砂柱空隙率,%; C_i 为溶液中离子 i 的浓度, mol/L; t 为离子流动时间, s; D_i 为离子扩散系数, m^2/s ; x 为离子在一维坐标系中的坐标位置, m; v 为孔隙内流体的实际流速, m/s; r 为单位空隙体积中单位时间内由于反应引起的离子 i 浓度变化, $\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{s})$; q 为达西流速, m/s。

根据生物酶催化尿素水解、 CaCO_3 沉淀等多种化学反应和结晶理论、酶活性条件理论,对反应速率进行计算^[15]。对于长度为 L 的砂柱,边界条件及初始条件为:

$$C_{i=0} = 0, 0 < x \leq L \quad (3)$$

$$C_{x=0} = \{C\}_{\text{input}}, t \geq 0 \quad (4)$$

$$nD \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0, t \geq 0 \quad (5)$$

利用变分原理,对砂柱空隙率的减小及单位时间内流出液体的体积进行处理,在 Matlab 中利用欧拉方法和牛顿迭代求解,浓度采用线性插值法计

算^[16],得到注浆过程中 Ca^{2+} 相关物质的时间-长度-浓度反应数值矩阵。该模型能够实现对微生物反应的一维流动耦合,模拟得到不同时刻下反应系统中各离子的浓度数值,并根据需要选取数据点作图来追踪离子浓度变化。模型建立流程如图4所示。

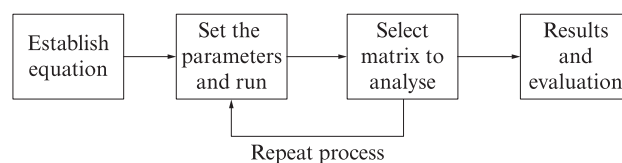


图4 模型建立流程

Fig. 4 Model building process

2.2 离子追踪数值试验设计

反应生成的 CaCO_3 沉淀后填充在砂柱空隙,使砂柱固结,因此 Ca^{2+} 及 CaCO_3 是数值模拟过程的重点追踪对象。模拟采取改变试验初始灌注钙盐浓度的方式,探究灌注钙盐浓度对最终砂柱中含钙物浓度分布的影响。

数值模拟即模拟溶液向砂柱深处单向渗透过程。砂柱灌注长度设为 1 m,均分为 200 段单位截面

圆柱体,标1~201号节点,每2个节点之间的距离即为0.5 cm,如图5所示.在本节钙离子浓度的追踪中,选取1号(0 cm,注浆口)、41号(20 cm)、71号(35 cm)、101号(50 cm)、151号(75 cm)、201号

(100 cm)节点进行观测,记录该位置处的 Ca^{2+} 浓度和注浆时间.考虑到模拟结果数据量巨大,分别选取11个时间节点进行数据采集,利用Matlab编程输出图像.

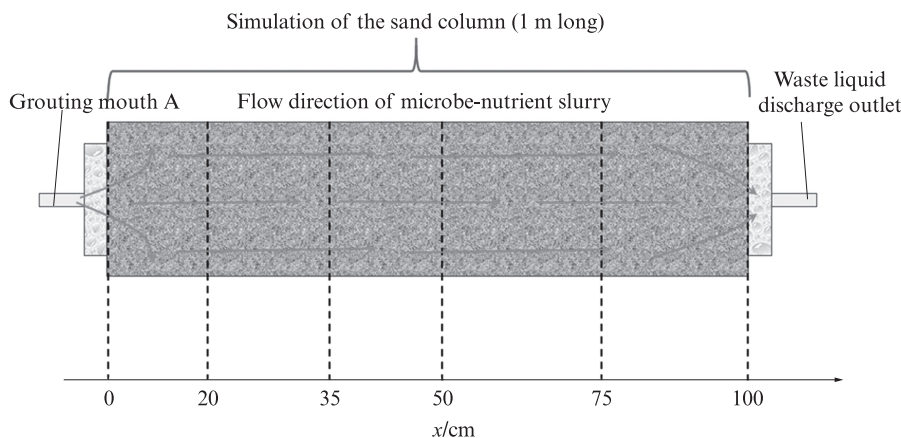


图5 模拟砂柱注浆模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of simulated sand column grouting model

初始环境参数及变量均相同,如表4所示.

表4 初始环境参数及变量

Table 4 Initial parameters and variables

Parameter	Set value
Grouting rate/ $(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	28.4
OD_{600}	2.620
Initial soil pH value	7
Grouting liquid pH value	9
Initial porosity	0.378
Average grain size of soil particles/mm	0.165

2.3 定位法追踪钙离子结果分析

图6为不同位置处 Ca^{2+} 浓度随灌注时间的变化曲线.由图6可见,距离注浆口不同位置的曲线呈现出不同的增长趋势和特征,可以将过程分为4个阶段:

第(1)阶段:营养盐在重力作用下渗入砂柱.

第(2)阶段: Ca^{2+} 逐渐积累.

第(3)阶段: Ca^{2+} 浓度增长速度减缓.

第(4)阶段: Ca^{2+} 浓度有所降低,逐渐趋于稳定.

注浆口位置的 Ca^{2+} 浓度与灌注营养盐浓度相同,且保持恒定;距离注浆口越远的位置出现的浓度增长“滞后”现象越明显.距离注浆口位置越远,第(1)阶段时长越大,第(3)阶段时长越短,峰值越明显,浓度差绝对值越大;钙盐浓度增加至0.75 mol/L后,“峰值”情况出现削弱,并且模拟砂柱的末段注浆效果得到提升.

当钙盐浓度扩大至1.00 mol/L时,钙盐的灌注效果进一步提高,然而随着钙盐浓度的增加,3个阶段的 Ca^{2+} 浓度变化速率同步上升.说明随着灌注营养盐中 Ca^{2+} 浓度的增大,砂柱灌注效果增强,不同位置处 Ca^{2+} 浓度变化加快.

2.4 定时法追踪钙离子结果分析

由上述注浆 Ca^{2+} 浓度变化曲线可知,钙盐浓度为0.15、1.00 mol/L时的灌注效果接近且良好,钙盐浓度为1.00、1.50 mol/L时的灌浆曲线变化不明显,考虑成本与结果性价比,舍弃钙盐浓度为1.50 mol/L的方案,对前3组浓度进行择优比较.

根据各组位置-浓度曲线对灌浆5 h后各模拟砂柱模型的 Ca^{2+} 浓度进行对比,并计算5 h注浆后模拟砂柱底端(201号)位置处的 Ca^{2+} 损失率(η):

$$\eta = \frac{C_1 - C_N}{C_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中: C_1 为1号位置(注浆口)的 Ca^{2+} 浓度, mol/L; C_N 为N号位置的 Ca^{2+} 浓度, mol/L.选取由Matlab计算的数值矩阵中相应的浓度值,计算5 h注浆后各浓度下的 Ca^{2+} 损失率,结果如表5所示.由表5可见,钙盐浓度为1.00、1.50 mol/L时的损失率均大大低于钙盐浓度为0.50 mol/L时,而钙盐浓度为0.75 mol/L时相较于钙盐浓度为1.50 mol/L时,在模拟砂柱的末端 Ca^{2+} 损失率更低,但钙盐浓度为1.50 mol/L时的 Ca^{2+} 损失率在砂柱全长内较低,即钙盐浓度为1.00 mol/L时砂柱后端及末端灌浆更充分,而钙盐浓度为1.50 mol/L时灌浆的均匀性更好.

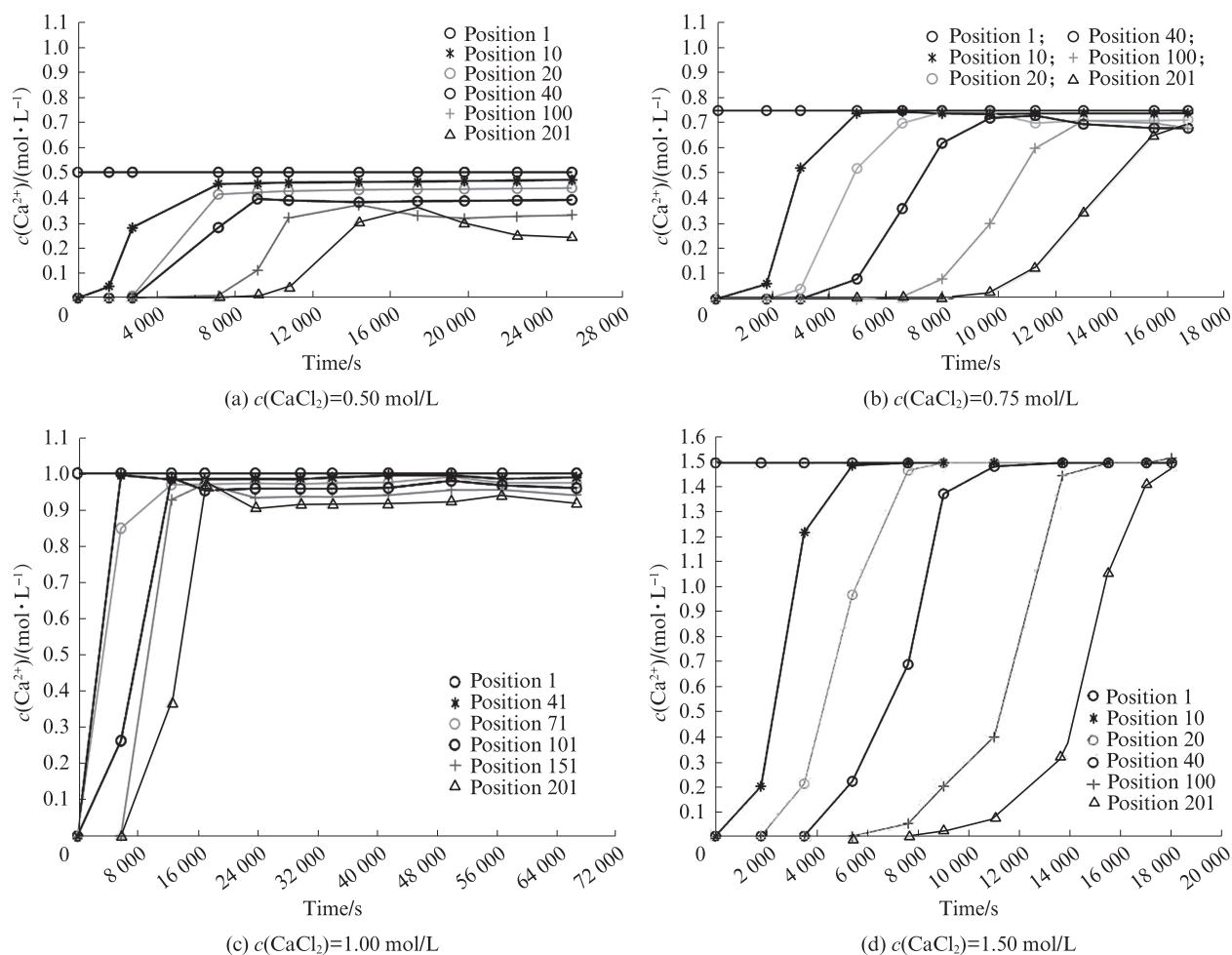
图6 不同位置处 Ca^{2+} 浓度随灌注时间的变化曲线Fig. 6 Chang curves of Ca^{2+} ion concentration with perfusion time at different positions

表5 5 h 注浆后各 CaCl_2 浓度下的 Ca^{2+} 损失率
Table 5 Ca^{2+} ion loss ratios in each CaCl_2 concentration after 5 h grouting

Position No.	$c(\text{CaCl}_2)/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$			
	0.50	0.75	1.00	1.50
1	0	0	0	0
41	8.2	3.5	1.6	4.2
71	15.2	6.3	3.0	7.9
101	22.9	6.7	4.7	9.5
151	37.2	7.6	5.0	10.1
201	30.3	3.5	6.4	6.5

3 定时定位法及数值模拟结果

注浆模型的数值模拟结果表明,当钙盐浓度从 1.00 mol/L 增加到 1.50 mol/L 时,注浆效果增加不明显,且 Ca^{2+} 损失率增加;钙盐浓度为 0.75 mol/L 时在注浆效果、 Ca^{2+} 流失方面都优于钙盐浓度为 0.50 mol/L 时;钙盐浓度为 0.75 、 1.00 mol/L 时的注浆效果相差不

大,但前者在单向砂柱末段钙离子损失率较小,说明此处钙离子较充足,后者在砂柱整体的钙离子损失率较低。

选取各钙盐浓度数值矩阵在灌注 $5\,000$ 、 $10\,000$ 、 $15\,000 \text{ s}$ 时 Ca^{2+} 在砂柱中点(100号位置处)的浓度及灌注百分率进行对比,结果如表6所示。其中, k 为灌注百分率(实时 Ca^{2+} 浓度与总浓度的比值)。由表6可见: $5\,000 \text{ s}$ 时,钙盐浓度为 1.00 mol/L 时灌注速度明显快于其他组,并且达到总量的 28% ,但钙盐浓度为 0.50 mol/L 时受到初始营养盐浓度过低的影响;在 $10\,000$ 、 $15\,000 \text{ s}$ 时,钙盐浓度为 0.50 mol/L 时灌注速度明显落后于其他3组;钙盐浓度为 0.75 mol/L 时砂柱前段的灌注速度与钙盐浓度为 1.00 mol/L 时差距较大,但在 $10\,000 \text{ s}$ 时与后者基本相同; $15\,000 \text{ s}$ 时,钙盐浓度为 1.00 mol/L 时砂柱中点的灌注速度低于钙盐浓度为 0.75 mol/L 时,说明钙盐浓度为 1.00 mol/L 时的 Ca^{2+} 损失率较快,钙盐浓度为 0.75 mol/L 时 Ca^{2+} 沉积效果较好;钙盐浓度为 1.50 mol/L 时在 $10\,000$ 、 $15\,000 \text{ s}$ 的灌注速

度均很高,但相较于钙盐浓度为 0.75、1.00 mol/L 时,在浓度提升 1.5~2.0 倍的基础上,并没有得到更

好的灌注效果.与 1.2 中 5 次注浆砂柱的 CaCO₃ 含量进行对比,结果见表 7.

表 6 砂柱中点位置的 Ca²⁺ 浓度及灌注百分率

Table 6 Ca²⁺ ions concentration and perfusion percentage at mid-point position of grouting sand column

$c(\text{CaCl}_2)/$ (mol·L ⁻¹)	5 000 s		10 000 s		15 000 s	
	$c(\text{Ca}^{2+})/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$k/\%$	$c(\text{Ca}^{2+})/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$k/\%$	$c(\text{Ca}^{2+})/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$k/\%$
0.50	0.035 3	7.0	0.398 5	79.7	0.384 9	77.0
0.75	0.088 5	11.8	0.727 8	97.0	0.726 3	96.8
1.00	0.280 4	28.0	0.987 4	98.7	0.953 3	95.3
1.50	0.229 4	15.3	1.484 1	98.9	1.487 0	99.1

表 7 数值模拟灌浆与 5 次灌浆砂柱的 CaCO₃ 含量对比

Table 7 Comparison table of CaCO₃ content between simulated grouting sand column and the fifth batch of experimental grouting

$c(\text{CaCl}_2)/$ (mol·L ⁻¹)	Numerical simulation of calcium ion concentration / (mol·L ⁻¹)	Simulate perfusion slurry volume/L	Simulate the equivalent calcium carbonate content/g	Equivalent molar amount of calcium ion in sand column was tested/mol	Actual average calcium carbonate content/g
0.50	0.385	2.00	0.770	0.008 85	0.885
0.75	0.698	2.00	1.396	0.011 50	1.150
1.00	0.942	2.00	1.884	0.013 50	1.350
1.50	1.357	2.00	2.714	0.009 25	0.925

4 结论

(1) 钙盐浓度为 0.75 mol/L 时微生物灌浆砂柱的后期强度最高,可达 26.09 MPa.

(2) 钙盐浓度为 0.75 mol/L 时微生物灌浆砂柱在强度方面有优势,钙盐浓度为 1.00 mol/L 时微生物灌浆砂柱在快速凝结方面更有优势,实际工程应用中应结合二者优势,根据需要选择 CaCl₂ 浓度进行灌浆.

(3) 钙盐浓度为 1.00 mol/L 时相较于钙盐浓度为 0.75 mol/L 时浆液渗透更快,但后期 Ca²⁺ 流失更多;钙盐浓度为 1.00 mol/L 时更适合小体积沙漠砂地基的速凝,而在大型沙漠地基中钙盐浓度为 0.75 mol/L 时后期强度的优势更明显.

(4) 数值模拟 CaCO₃ 含量结果与试验值具有一定程度的对应关系,且该注浆模型对钙盐浓度为 0.75 mol/L 时 CaCO₃ 含量的数值模拟拟合效果最佳,表明了本模型的有效性和精确性.

参考文献:

[1] 余鹏举,曹先贺,王宏志,等.微生物在恶臭污染治理中的研究及应用[J].微生物学通报,2021,48(1):165-179.

YU Pengju, CAO Xianhe, WANG Hongzhi, et al. Microbial deodorization: Mechanisms and application[J]. Microbiology Bulletin, 2021, 48(1):165-179. (in Chinese)

[2] WHIFFIN V S. Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement[D]. Perth: Murdoch University, 2004.

[3] 李驰,史冠宇,武慧敏,等.基于脲酶诱导碳酸钙沉积的微生物矿化技术在分散性土改良中应用的试验研究[J].岩土力学,2021(2):1-10.

LI Chi, SHI Guanyu, WU Huimin, et al. Application of microbial mineralization technology based on urease-induced calcium carbonate deposition in the improvement of dispersed soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021(2):1-10. (in Chinese)

[4] 程晓辉,杨钻,李萌,等.岩土材料微生物改性的基本方法综述[J].工业建筑,2015,45(7):1-7.

CHENG Xiaohui, YANG Zuan, LI Meng, et al. Review of basic methods of microbial modification of geotechnical materials[J]. Industrial Building, 2015, 45(7):1-7. (in Chinese)

[5] 徐晶,穆柏竹,赵子华.微生物注浆固化砂土若干因素的影响机制研究[J].新型建筑材料,2021,48(1):35-39,111.

XU Jing, MU Baizhu, ZHAO Zihua. Study on influencing mechanism of several factors of microbial grouting curing sand[J]. New Building Materials, 2021, 48(1):35-39, 111. (in Chinese)

[6] 郑俊杰,宋杨,吴超传,等.低胶结水平 MICP 固化砂土脆性评价方法研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(11):96-101.

ZHENG Junjie, SONG Yang, WU Chaochuan, et al. Study on evaluation method of brittleness of MICP treated sand with low cementation level[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 48(11):96-101. (in Chinese)

[7] 蔡鑫,徐赞,曹鑫,等.微生物注浆修复混凝土结构在海洋工程中的应用研究[J].四川建材,2020,46(6):68-69.

CAI Xin, XU Zan, CAO Xin, et al. Application of microbial grouting to repair concrete structures in marine engineering[J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46(6):68-69. (in Chinese)

[8] 贾强,丁鹏.微生物灌浆碳酸钙沉积规律的试验研究[J].建筑

- 材料学报, 2021, 24(3):578-584.
- JIA Qiang, DING Peng. Experimental study on the deposition of calcium carbonate in microbial grout [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):578-584. (in Chinese)
- [9] 陈歆, 韩依璇, 张国荣, 等. 巴氏生孢八叠球菌用作混凝土裂缝愈合剂的活性研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3):484-489.
- CHEN Xin, HAN Yixuan, ZHANG Guorong, et al. Activity investigation of *Soprosarcina pasteurii* as concrete crack healing agent [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3):484-489. (in Chinese)
- [10] 吴洋. 基于巴氏芽孢八叠球菌的生物矿化现象及分子机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- WU Yang. Based on the study of the biomination phenomenon and molecular mechanism of *pasteurii* bacteria [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [11] FAURIEL S, LALLOU L. A bio-chemo-hydro-mechanical model for microbially induced calcite precipitation in soils [J]. Computers and Geotechnics, 2012, 46:104-120.
- [12] 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, 87:397-420.
- [13] WIJNGAARDEN W K, VERMOLEN F J, GMEURS A M, et al. A mathematical model and analytical solution for the fixation of bacteria in biogrout [J]. Transport in Porous Media, 2012, 92:847-866.
- [14] WIJNGAARDEN W K, VERMOLEN F J, MEURS G A M, et al. A mathematical model for biogrout [J]. Computational Geosciences, 2013, 17:463-478.
- [15] CHENG X H, YANG Z, ZHANG Z C, et al. Modeling of microbial induced carbonate precipitation in porous media [J]. Journal of Pure & Applied Microbiology, 2013, 7(1):449-458.
- [16] 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 Tingting, CHENG Xiaohui, GUO Hongxian. Analysis of influencing factors of microbial grouting in sand column based on numerical simulation [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(6):111-119. (in Chinese)

(上接第 805 页)

- LIU Zhanqiang, HUANG Qunxian, GUO Zixiong, et al. Test on fatigue behavior of RC bridge girders strengthened with PHSW-PM in moment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11):102-112. (in Chinese)
- [6] 黄华, 刘伯权, 刘卫铎. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固层黏结滑移[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(5):71-75.
- HUANG Hua, LIU Boquan, LIU Weiduo. Bond-slip of reinforced layer with steel wire mesh and polymer mortar [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(5):71-75. (in Chinese)
- [7] ASCIONE F, LAMBERTI M, NAPOLI A, et al. Experimental bond behavior of steel reinforced grout systems for strengthening concrete elements [J]. Construction and Building Materials, 2020, 232:117105.
- [8] SNEED L H, VERRE S, CARLONI C, et al. Flexural behavior of RC beams strengthened with steel-FRCM composite [J]. Engineering Structures, 2016, 127:686-699.
- [9] YAO J, TENG J G, CHEN J F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints [J]. Composites Part B: Engineering, 2004, 36(2):99-113.
- [10] CHEN J F, YANG Z J, HOLT G D. FRP or steel plate-to-concrete bonded joints: Effect of test methods on experimental bond strength [J]. Steel and Composite Structures, 2001, 1(2):231-244.
- [11] BILOTTA A, LUDOVICO M D, NIGRO E. FRP-to-concrete interface debonding: Experimental calibration of a capacity model [J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(6):1539-1553.
- [12] 殷雨时, 范颖芳, 徐义洪. 粗糙度对CFRP-混凝土界面剪切黏结性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2):202-207.
- YIN Yushi, FAN Yingfang, XU Yihong. Roughness effects on the shear bonding properties of interface between CFRP and concrete [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):202-207. (in Chinese)
- [13] YUAN H, WU Z, YOSHIZAWA H. Theoretical solutions on interfacial stress transfer of externally bonded steel/composite laminates [J]. Journal of structural Mechanics and Earthquake Engineering, 2001, 675:27-39.
- [14] CHEN J F, TENG J G. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7):784-791.