

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.022

珊瑚砂微生物固化条件优化的正交试验研究

陈 适¹, 方祥位², 申春妮³, 宋 平^{1,4}

(1. 陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 401311; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

3. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 401331;

4. 中国人民武装警察部队武汉特勤疗养中心, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 珊瑚砂微生物固化影响因素众多, 选取颗粒粒径、脲酶活性、底物溶液浓度和配比四个主要影响因素, 每个因素取三个水平, 对珊瑚砂进行了微生物固化正交试验, 研究了各因素对珊瑚砂微生物固化体无侧限抗压强度及干密度增量的影响, 得出了最优固化条件。试验结果表明, 各因素对固化体无侧限抗压强度影响的主次顺序为: 颗粒粒径、脲酶活性、底物溶液配比、底物溶液浓度; 对固化体干密度增量影响的主次顺序为: 脲酶活性、颗粒粒径、底物溶液配比、底物溶液浓度; 综合无侧限抗压强度和干密度增量结果得到珊瑚砂微生物固化的最优条件为: 颗粒粒径取粗粒组, 脲酶活性取 $1.85 \text{ mmol}/(\text{L} \cdot \text{min})$, 底物溶液配比取 $0.75:1$, 底物溶液浓度取 1 mol/L 。

关键词: 珊瑚砂; 微生物固化; 无侧限抗压强度; 干密度; 优化

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)03—0125—07

Orthogonal Experiments on Optimization of Biocementation Conditions for Coral Sand

CHEN Shi¹, FANG Xiangwei², SHEN Chunni³, Song Ping^{1,4}

(1. Department of Military Installations, Army logistics University of PLA, Chongqing 401311, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

4. Chinese Armed Police Force Wuhan Special Service Center, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: There are many influencing factors in biocementation of coral sand, of which four main influencing factors particle size, urease activity, substrate solution ratio and substrate solution concentration were selected, each factor took three levels, and the coral sand was subjected to microbial solidification orthogonal test. The effects of various factors on unconfined compressive strength and dry density increment of biocemented coral sand columns were analyzed. And the optimum biocementation conditions were obtained. The results showed that, the primary and secondary order of factors on unconfined compressive strength of columns is: particle size, urease activity, substrate solution ratio, substrate solution concentration. The primary and secondary order of factors on dry density increment of columns is: urease activity, particle size, substrate solution ratio, substrate solution concentration. Optimal condition for the biocementation of coral sand by the results of unconfined compressive strength and dry density increment is coarse particle group, and the urease activity is $1.85 \text{ mmol}/(\text{L} \cdot \text{min})$, the ratio of substrate solution is $0.75:1$, and the substrate solution concentration is 1 mol/L .

Keywords: coral sand; biocementation; unconfined compressive; dry density; optimization

收稿日期: 2019-02-24

修稿日期: 2019-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479208); 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项重点研发项目(cstc2017shms-zdyfX0073)

作者简介: 陈 适(1995—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 研究方向为岩土微生物技术。E-mail: 2503532118@qq.com

通讯作者: 方祥位(1975—), 男, 重庆铜梁人, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土与特殊土及岩土微生物技术研究工作。

E-mail: fangxiangwei1975@163.com

岩土微生物固化技术的原理为,利用微生物自身生命活动特点,在提供金属离子和氮源的条件下生成碳酸盐胶结物质,这些胶结物质可以胶结砂土颗粒,使砂土固化为整体^[1-3]。这一技术具有操作简单,反应过程稳定可控的优点,且生成物粘结性强,砂土固化后的强度较高,因此应用前景良好^[4-6]。

珊瑚砂微生物固化技术的影响因素众多,影响机理复杂。欧益希等^[7-8]研究了溶液盐度和颗粒粒径对珊瑚砂微生物固化的影响,阐明了珊瑚砂微生物固化技术可以在海洋环境中使用,且中砂的固化效果最好。李捷等^[9-11]研究了颗粒级配和脲酶活性对珊瑚砂微生物固化体力学性能的影响,得到了单因素的最佳取值。宋平等^[12]研究了纤维掺量对珊瑚砂微生物固化体力学性能的影响。从目前的研究成果来看,珊瑚砂微生物固化技术的研究以单因素试验为主,对于固化技术中重要因素的筛选和试验条件的优化还鲜有报道。本试验采用正交试验的方法,选取颗粒粒径、脲酶活性、溶液配比和溶液浓度四个主要影响因素,对珊瑚砂微生物固化条件进行优化研究,得到最优固化条件,为实际应用提供参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

1.1.1 珊瑚砂

试验用珊瑚砂为我国南海某岛礁陆域吹填珊瑚砂,主要成分为碳酸钙,颗粒具有多孔隙、形状不规则、易破碎等特征。

1.1.2 巴斯德芽孢杆菌

试验采用巴斯德芽孢杆菌。将菌种活化处理后接种到 100 mL 液体培养基中,置于震荡培养箱培养 48 h,培养结束后进一步扩大培养得到初始脲酶活性在 2.0 mmol/(L·min)以上的菌液。

1.1.3 底物溶液试剂

试验所用底物溶液由纯度为 AR 级的尿素和氯化钙经去离子水溶解后混合而成,其溶液浓度和两种试剂的配比由具体试验需要确定。

1.2 试验装置

试验所用模具为内径×高度=50 mm×300 mm 的对开有机玻璃管,将模具组装好后放置于试验架台上,并在模具下端的橡胶塞中插入硅胶硬管,硅胶

硬管与变径接头和软管相连,且软管底部接有蠕动泵,可以调节溶液在模具中的流动速度。

1.3 试验方案

1.3.1 固化试验方案

在模具中装入珊瑚砂 350 g 后开始固化试验。首先取 100 mL 菌液倒入试样中,待菌液从低端软管口流尽后,将流出的菌液再重复通入三次,使菌液充分吸附到砂颗粒表面;再通入 200 mL 底物溶液,在底物溶液流出的过程中,利用蠕动泵控制溶液流速为 3 mL/min 左右,并将流出的底物溶液反复流通 2 次~4 次,确保固化反应充分进行,完成一次固化。更换溶液并重复上述操作 5 次左右后,试样渗透性降低至接近 0,此时固化试验结束。

1.3.2 力学试验方案

固化试验结束后,拆除模具,并将固化体在 95℃的条件下持续烘干 36 h。将烘干后的固化体切割并磨平为力学试验标准试验尺寸(直径×高度=50 mm×100 mm)。

无侧限抗压强度试验采用重庆交通大学河海学院实验室的 RMT-150C 岩石力学伺服试验机。试验采用位移控制式加载,加载速度为 0.005 mm/s。

1.4 正交试验方案

本试验选取颗粒粒径、脲酶活性、底物溶液浓度和配比四个主要影响因素,每个因素取三个水平,采用三水平四因素正交试验表进行试验设计。

1.4.1 颗粒粒径

将珊瑚砂的颗粒分成不同粒组并进行人工组合,新的粒径组合为颗粒粒径的三个水平(用大写字母 A、B、C 表示),如表 1 所示,颗粒级配曲线如图 1 所示。

表 1 颗粒粒径

粒径/mm	每种颗粒粒径所占质量分数/%		
	水平 1 (组合 A)	水平 2 (组合 B)	水平 3 (组合 C)
2~5	12	20	35
1~2	12	16	23
0.5~1	15	23	16
0.25~0.5	18	19	10
0.075~0.25	38	18	13
<0.075	5	4	3

由图 1 可求得各粒径组合的粒径参数^[13],如表 2 所示。粒径组合 A 为不良级配,粒径组合 B、C 为

良好级配,且由 A 组至 C 组,颗粒粒径逐渐变粗。

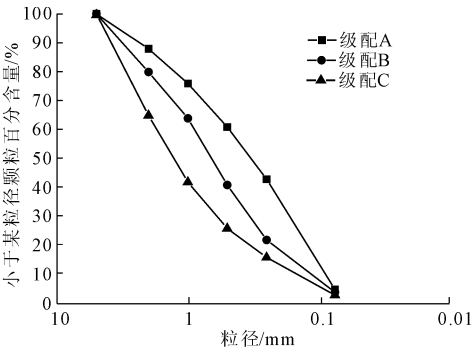


图 1 级配曲线

表 2 颗粒粒径参数值

粒径的类别	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{60}/mm	C_u	C_c
A	0.098	0.190	0.486	4.960	0.758
B	0.130	0.355	0.913	7.023	1.062
C	0.169	0.625	1.783	10.550	1.296

1.4.2 脲酶活性

在扩大培养所得的菌液中加入适量生理盐水可以调节菌液脲酶活性。在脲酶活性的单因素试验中,固化效果最好的脲酶活性为 $1.5\text{ mmol}/(\text{L}\cdot\text{min})$ ^[16]。本文取脲酶活性为 $1.0\text{ mmol}/(\text{L}\cdot\text{min})$ 、 $1.5\text{ mmol}/(\text{L}\cdot\text{min})$ 和 $2.0\text{ mmol}/(\text{L}\cdot\text{min})$ 的菌液作为脲酶活性的三个水平(分别用小写字母 a、b、c 表示)。

1.4.3 底物溶液配比

在底物溶液配比的单因素试验中,当溶液配比为 1:1 时,固化效果最好^[15]。本文设计三种尿素与 CaCl_2 配比(0.75:1、1:1 和 1.25:1)作为底物溶液配比的三个水平(分别用 1、2、3 表示)。

1.4.4 底物溶液浓度

底物溶液浓度可以直接影响每次固化产生胶结物质的量,进而影响固化体的固化效果,所以不同浓度的底物溶液对珊瑚砂微生物固化效果具有较大影响。设置三种浓度作为底物溶液浓度的三个水平(分别用 I、II、III 表示),具体浓度如表 3 所示。

表 3 溶液浓度

水平类型	尿素浓度 $/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	CaCl_2 浓度 $/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$
水平 1(浓度 I)	3	3
水平 2(浓度 II)	2	2
水平 3(浓度 III)	1	1

1.4.5 正交试验方案

将上述影响因素及水平汇总,具体的试验固化

条件如表 4 所示。

表 4 固化条件

组别	颗粒粒径类别	脲酶活性水平	底物溶液配比水平	底物溶液浓度水平
1	A	a	1	I
2	A	b	2	II
3	A	c	3	III
4	B	a	2	III
5	B	b	3	I
6	B	c	1	II
7	C	a	3	II
8	C	b	1	III
9	C	c	2	I

2 结果分析与讨论

本文正交试验以无侧限抗压强度和干密度作为考察指标。处理试验数据时,首先利用极差分析法和方差分析法对单个指标进行分析,讨论各因素对试验指标影响的主次顺序,再综合分析各因素和水平对试验指标的影响,得出最优试验条件^[14,16-17]。

2.1 表观特征

图 2 为部分固化好的微生物珊瑚砂柱。由图 2 可见,在不同试验条件下,珊瑚砂均可以通过微生物固化反应形成整体。不同组的固化体在表面光滑程度上有差别,这是因为个别组的固化条件较差,导致珊瑚砂固化效果较差,固化体表面较为粗糙。



图 2 部分固化好的砂柱

2.2 固化体的无侧限抗压强度分析

2.2.1 直观分析

表 5 为抗压强度结果直观分析表。其中 K 值为各影响因素在不同水平条件下的平均抗压强度,从中可以得到每个因素的最佳水平; R 值为各影响因素在不同水平下抗压强度平均值的极差,该值越大,所对应的因素对试验结果的影响越大。

由表 5 可知,各因素对固化体抗压强度影响的主次顺序为:颗粒粒径、脲酶活性、底物溶液配比、底

物溶液浓度。由于抗压强度值越大表明固化效果越好,则选取最优水平时,以 K 值最大为原则。所以在抗压强度为指标的情况下,各因素与水平最优组合为:颗粒粒径取 C 组,脲酶活性取 $2.0\text{ mmol}/(\text{L}\cdot\text{min})$,底物溶液配比取 $0.75:1$,底物溶液浓度取 1 mol/L 。

表 5 抗压强度结果直观分析

因素	颗粒粒径水平	脲酶活性水平	底物溶液配比水平	底物溶液浓度水平	抗压强度试验结果/MPa
试验 1	A	a	1	I	0.524
试验 2	A	b	2	II	2.624
试验 3	A	c	3	III	4.484
试验 4	B	a	2	III	6.040
试验 5	B	b	3	I	8.401
试验 6	B	c	1	II	11.503
试验 7	C	a	3	II	5.701
试验 8	C	b	1	III	13.170
试验 9	C	c	2	I	10.180
K_1/MPa	2.544	4.088	8.399	6.368	
K_2/MPa	8.648	8.065	6.281	6.609	
K_3/MPa	9.684	8.722	6.195	7.898	
R	7.140	4.634	2.204	1.530	

由表 5 中颗粒粒径 K 值可以看出,固化体抗压强度随颗粒粒径增大而增加。原因可能为珊瑚砂颗粒越细,内部孔隙越少,固化体越容易因局部孔隙被填堵而使试验提前结束,此时固化不完全,固化体强

度较低。而较大的颗粒粒径可以避免这一问题。但是当颗粒粒径过大时,胶结物质无法有效连结砂颗粒,可能导致固化体抗压强度降低,所以固化体抗压强度不会随颗粒粒径的增大而继续增大。

由表 5 中脲酶活性 K 值可以看出,固化体抗压强度随着脲酶活性的增高而增大。当脲酶活性较低时,固化效率低,反应的生成物较少,颗粒连结效果较差,固化体抗压强度较低。当脲酶活性较高时,可以有效解决这一问题,固化效果较好,固化体抗压强度更高(见图 3(a))。但是当脲酶活性过高时,每次固化反应速率过快,胶结物质生成量过多,造成局部孔隙堵塞,导致固化反应提前结束,此时固化体强度降低,因此固化体抗压强度不会随脲酶活性的增大而持续增大(见图 3(b))。

由表 5 中底物溶液配比 K 值可以看出,固化体抗压强度随溶液配比的增大而减小。在固化反应中,尿素与 CaCl_2 消耗比例为 $1:1$ 。当底物溶液配比增大时,底物溶液中 Ca^{2+} 的含量降低,这会导致生成的 CaCO_3 减少,使固化体抗压强度降低(见图 3(c))。当底物溶液配比较小时, Ca^{2+} 含量较高, CaCO_3 生成量较多,固化效果更好,固化体抗压强度较高。但是当溶液配比过小时, Ca^{2+} 含量过高,每次试验产生的 CaCO_3 过多,容易导致固化体局部孔隙堵塞,进而影响固化效果,导致抗压强度降低(见图 3(d)),因此固化体抗压强度并不会随底物溶液配比的减小而一直增高。

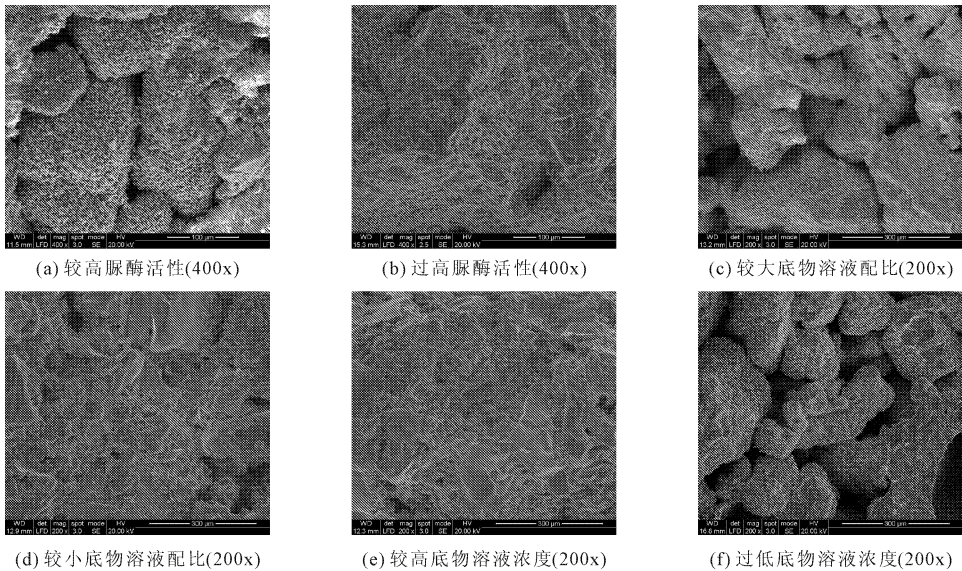


图 3 不同 MICP 胶结珊瑚沙的 SEM 试验结果

由表 5 中底物溶液浓度 K 值可以看出,在本文选取浓度范围内,固化体抗压强度随着底物溶液浓

度的减小而增加。当底物溶液浓度较高时,每次固化反应中胶结物质生成量更多,容易导致局部区域

的孔隙被填堵而使固化体固化效果变差,固化体强度降低(见图 3(e))。而底物溶液浓度较低时可以避免这一问题。但是,当底物溶液过低时,反应可以产生的胶结物质较少,无法满足固化需求,从而导致固化体强度降低,因此固化体抗压强度不会随底物溶液浓度的降低而持续增加(见图 3(f))。

表 6 抗压强度结果方差分析

因素	离差平方和	自由度	F 比	F 临界值			显著性		
				$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
颗粒粒径	89.306	2	22.002	9	19	99	(*)	*	
脲酶活性	37.720	2	9.293	9	19	99	(*)		
底物溶液配比	9.348	2	2.303	9	19	99			
误差	4.060	2		9	19	99			

由表 6 可知,对于珊瑚砂微生物固化体的抗压强度来说,颗粒粒径的 F 比最大,达到了显著水平,其次为脲酶活性,达到了较为显著水平,溶液配比的影响虽然不显著,但是其离差平方和比误差大,说明试验是合理的。

2.3 固化体的干密度增量分析

2.3.1 直观分析

表 7 为干密度增量结果直观分析表。表中 K 和 R 的含义与 2.2 节中一致。由表 7 可知,各因素对固化体干密度增量影响的主次顺序为:脲酶活性、颗粒粒径、底物溶液配比、底物溶液浓度。由于干密度增量值越大表明固化效果越好,则选取最优水平时,以 K 值最大为原则,各因素与水平最优组合为:颗粒粒径取 C 组,脲酶活性取 $1.5\text{ mmol}/(\text{L}\cdot\text{min})$,底物溶液配比取 0.75:1,底物溶液浓度取 1 mol/L 。

表 7 干密度增量结果直观分析

因素	颗粒粒径水平	脲酶活性水平	底物溶液配比水平	底物溶液浓度水平	干密度试验结果 $/(g\cdot cm^{-3})$
试验 1	A	a	1	I	12.58
试验 2	A	b	2	II	20.59
试验 3	A	c	3	III	23.72
试验 4	B	a	2	III	15.25
试验 5	B	b	3	I	30.93
试验 6	B	c	1	II	36.85
试验 7	C	a	3	II	18.08
试验 8	C	b	1	III	43.87
试验 9	C	c	2	I	28.27
$K_1/(kg\cdot cm^{-3})$	18.963	15.303	31.100	23.927	
$K_2/(kg\cdot cm^{-3})$	27.677	31.797	21.370	25.173	
$K_3/(kg\cdot cm^{-3})$	30.073	29.613	24.243	27.613	
R	11.110	16.494	9.730	3.686	

2.2.2 方差分析

采用正交试验方差分析法处理试验数据,显著性水平取 0.10、0.05 和 0.01,由于底物溶液浓度的离差最小,所以将其作为误差进行分析处理,方差计算结果如表 6 所示。

由表 7 中颗粒粒径 K 值可以看出,固化体干密度增量随颗粒粒径增大而增大,与固化体强度变化规律一致。

由表 7 中脲酶活性 K 值可以看出,固化体干密度增量随脲酶活性增高先增加后降低。当脲酶活性较低时,固化反应无法充分将 Ca^{2+} 转化为沉淀,反应生成的胶结物质较少,固化体干密度增量较小;当脲酶活性过高时,部分 Ca^{2+} 被快速消耗,生成的 $CaCO_3$ 随液体排出流失,有效胶结沉淀的生成效率低,干密度增量相对较小。

由表 7 中底物溶液配比 K 值可以看出,固化体干密度增量随尿素与 $CaCl_2$ 比值增大先降低后增加。当尿素与 $CaCl_2$ 比值较小时,底物溶液中尿素含量较低,微生物通过生命活动生成的 CO_3^{2-} 较少,但是 Ca^{2+} 含量较高,过量的 Ca^{2+} 可以保证 CO_3^{2-} 充分沉淀,使得每次固化反应生成的胶结沉淀较多,固化体干密度增量较大;当尿素与 $CaCl_2$ 比值较大时,底物溶液中 Ca^{2+} 含量较低,但是尿素含量较高,细菌生命活动旺盛,生成的 CO_3^{2-} 较多,过量的 CO_3^{2-} 可以保证 Ca^{2+} 充分沉淀,所以固化体干密度增量较大。当尿素与 $CaCl_2$ 比值接近 1 时,沉淀不能充分产生,导致固化体干密度增量较小。

由表 7 中底物溶液浓度 K 值可以看出,固化体干密度增量随着底物溶液浓度的减小而增加,与固化体强度变化规律一致。

2.3.2 方差分析

利用正交试验方差分析法处理试验数据,显著性水平取 0.10、0.05 和 0.01,因为底物溶液浓度的离差最小,所以将其作为误差进行分析处理,方差计

算结果如表 8 所示。

由表 8 可知,对于珊瑚砂微生物固化体的干密度增量来说,脲酶活性的 F 比最大,达到了显著水平,其次为颗粒粒径,达到了较为显著水平,底物溶液配比的影响虽然不显著,但是其离差平方和比误差大,说明试验是合理的。

表 8 干密度增量结果方差分析

因素	离差平方和	自由度	F 比	F 临界值			显著性		
				$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
颗粒粒径	205.098	2	9.721	9	19	99	(*)		
脲酶活性	481.573	2	22.824	9	19	99	(*)	*	
底物溶液配比	149.943	2	7.107	9	19	99			
误差	21.100	2		9	19	99			

2.4 固化效果的综合分析

结合固化体抗压强度和干密度增量综合分析可以得出珊瑚砂微生物固化的最优固化条件,抗压强度和干密度增量综合分析图如图 4 所示。

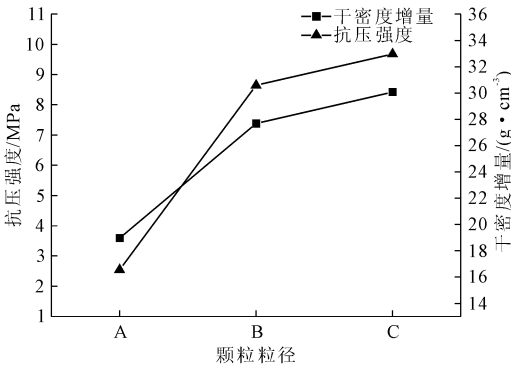
由图 4(a)可知,固化体的抗压强度和干密度增量均随砂中颗粒粒径的增粗而增大,则最优水平取曲线最高点,即颗粒粒径为 C 组。

由图 4(b)可知,固化体的抗压强度随菌液脲酶活性的增大而增大,干密度增量随菌液脲酶活性的增大先增大后减小,则最优水平取曲线交点,曲线交

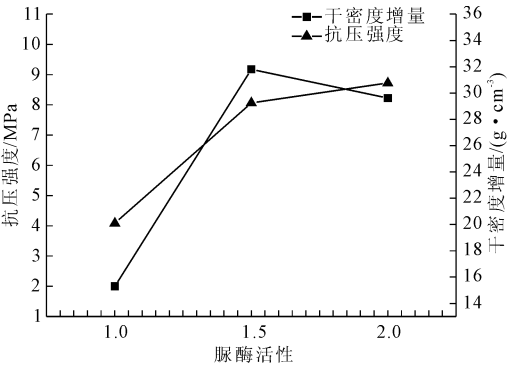
点有两个,取其中对应较大值的点,即脲酶活性为 1.85 mmol/(L·min)左右。

由图 4(c)可知,固化体的抗压强度随底物溶液配比的增大而减小,干密度增量随底物溶液配比的增大先减小后增大,则最优水平取使两个指标同时达到最高值的点,即底物溶液配比为 $C(\text{urea}):C(\text{CaCl}_2) = 0.75:1$ 。

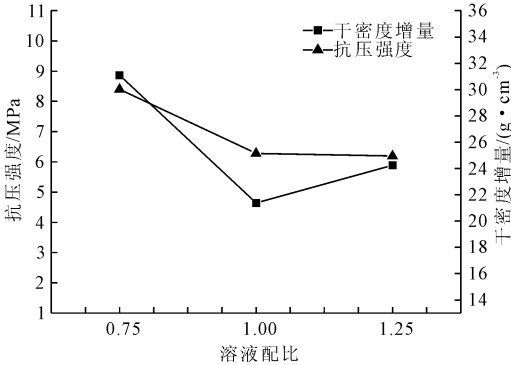
由图 4(d)可知,固化体的抗压强度和干密度增量均随底物溶液浓度的减小而增大,则最优水平取曲线的最高点,即底物溶液浓度为 1 mol/L。



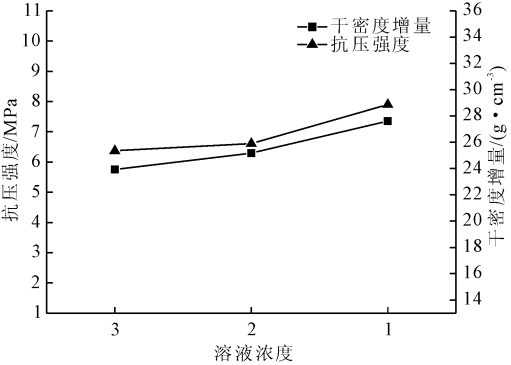
(a) 颗粒粒径影响曲线



(b) 脲酶活性影响曲线



(c) 底物溶液配比影响曲线



(d) 底物溶液浓度影响曲线

图 4 抗压强度和干密度增量综合分析图

3 结 论

(1) 珊瑚砂微生物固化试验中各因素对固化体抗压强度影响的主次顺序为:颗粒粒径、脲酶活性、底物溶液配比、底物溶液浓度,其对应值为颗粒粒径取 C 组(粗粒组),脲酶活性取 2.0 mmol/(L·min),底物溶液配比取 0.75:1,底物溶液浓度取 1 mol/L。

(2) 珊瑚砂微生物固化试验中各因素对固化体干密度增量影响的主次顺序为:脲酶活性、颗粒粒径、底物溶液配比、底物溶液浓度,其对应值为颗粒粒径取 C 组(粗粒组),脲酶活性取 1.5 mmol/(L·min),底物溶液配比取 0.75:1,底物溶液浓度取 1 mol/L。

(3) 珊瑚砂微生物固化试验最优固化条件为颗粒粒径取 C 组(级配良好的较粗粒组),脲酶活性取 1.85 mmol/(L·min),底物溶液配比取 0.75:1,底物溶液浓度取 1 mol/L。

参考文献:

[1] 方祥位,申春妮,楚 剑,等.微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J].岩土力学,2015,36(10):2773-2779.

[2] 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.

[3] 荣 辉,钱春香,李龙志.微生物水泥胶结机理[J].硅酸盐学报,2013,41(3):314-319.

[4] 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(S1):392-396.

[5] Ehrlich H L. Microbes as geologic agents: their role in min-

eral formation[J]. Geomicrobiology Journal, 1999, 16(2): 135-153.

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

[7] 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.

[8] 欧益希,方祥位,申春妮.颗粒粒径对微生物固化珊瑚砂的影响[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):35-39.

[9] 李 捷,方祥位,申春妮,等.含水率对珊瑚砂微生物固化体力学特性影响研究[J].工业建筑,2016,46(12):93-97.

[10] 李 捷,方祥位,申春妮,等.颗粒级配对珊瑚砂微生物固化影响研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):7-12,43.

[11] 李 捷,方祥位,张 伟,等.菌液脲酶活性对珊瑚砂微生物固化效果的影响[J].后勤工程学院学报,2016,32(6):88-91,96.

[12] 宋 平,方祥位,李洋洋.纤维掺量对珊瑚砂微生物固化体力学性能的影响[J].兵器装备工程学报,2017,38(10):156-160.

[13] 土的工程分类标准:GB/T 50145—2007[S].北京:中国计划出版社,2008.

[14] 郑少华,姜奉华.试验设计与数据处理[M].北京:中国建材出版社,2004.

[15] 欧益希.珊瑚砂微生物固化技术研究[D].重庆:后勤工程学院,2016.

[16] Taguchi G. The Experimental Design Method[M]. 3rd. Tokyo: Maruzen Pub., 1976.

[17] 盖钧镒.试验统计方法[M].北京:中国农业出版社,2000.



(上接第 93 页)

3 结 论

梁单元刚度矩阵是结构力学中的一个重要内容,本文对等截面梁,基于欧拉-伯努利梁理论,采用统一的坐标系统和参数正方向规定,详细介绍了各种受力模式的形函数,系统给出了等截面梁的刚度矩阵推导过程,为配合有限元专业文献的理解提供了参考。

参考文献:

[1] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003:302-322.

[2] 龙驭球,包世华.结构力学:下册[M].2版.北京:高等教育出版社,1996:74-116.

[3] 王焕定,焦兆平.有限单元法基础[M].北京:高等教育出版社,2002:25-46.

[4] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].4版.北京:中国水利水电出版社,2003:1-132.