



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401671

引用格式:赵天宇,安亮,谌文武,等.微生物诱导碳酸钙沉淀加固黄土影响因素试验研究[J].科学技术与工程,2025,25(4):1620-1627.

Zhao Tianyu, An Liang, Chen Wenwu, et al. Experimental study on the influencing factors of microbial-induced calcium carbonate precipitation for consolidation of loess[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1620-1627.

# 微生物诱导碳酸钙沉淀加固黄土影响因素试验研究

赵天宇<sup>1</sup>, 安亮<sup>1,2\*</sup>, 谌文武<sup>2</sup>, 王迎春<sup>1</sup>, 李论基<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 兰州 730030; 2. 兰州大学资源与环境学院, 兰州 730000)

**摘要** 微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial induced calcium carbonate precipitation, MICP)技术是新兴的岩土工程绿色加固技术,在黄土边坡加固方面具有良好的应用前景。MICP加固黄土受多种因素影响,除了外界环境、材料特性和加固方式等因素外,钙源、胶结液浓度、养护龄期和养护方式等对微生物加固黄土也起着决定性作用。以陇西地区黄土为研究对象,采用巴氏芽孢杆菌诱导碳酸钙沉淀技术固化黄土试样,开展不同钙源、胶结液浓度、养护龄期和养护方式条件下 MICP 固化黄土试样抗剪强度对比试验研究。结果表明:钙源为氯化钙,胶结液浓度 1.0 mol/L 且试样养护 7 d 条件下, MICP 技术对黄土试样的加固效果更好,与素黄土相比,黏聚力和内摩擦角分别提高了 4.95 和 1.34 倍。研究成果对黄土高原地区的路基加固和边坡治理等具有一定的参考价值。

**关键词** 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP); 微生物; 黄土加固; 钙源; 胶结液浓度; 养护龄期

中图分类号 TU433; 文献标志码 A

## Experimental Study on the Influencing Factors of Microbial-induced Calcium Carbonate Precipitation for Consolidation of Loess

ZHAO Tian-yu<sup>1</sup>, AN Liang<sup>1,2\*</sup>, CHEN Wen-wu<sup>2</sup>, WANG Ying-chun<sup>1</sup>, LI Lun-ji<sup>1,2</sup>

(1. Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China;

2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**[Abstract]** Microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) technology is an emerging green reinforcement technology for geotechnical engineering, which has a good application prospect in the reinforcement of loess slopes. The reinforcement of loess by MICP is affected by a variety of factors, in addition to the external environment, material properties and reinforcement methods and other factors, the calcium source, the concentration of binder, the age of the maintenance and the maintenance methods also play a decisive role in the microbial reinforcement of loess. The loess in Longxi area was taken as the research object, bacillus subtilis-induced calcium carbonate precipitation technology was adopted to consolidate loess, and a comparative experimental study on the shear strength of MICP-consolidated loess under the conditions of different calcium sources, binder concentration, age of maintenance and maintenance methods was carried out. The results show that the MICP technology is more effective in consolidating loess specimens when the calcium source is calcium chloride, the binder concentration is 1.0 mol/L and the specimens are cured for 7 d. The cohesion and internal friction are increased by 4.95 and 1.34 times, respectively, compared with the vegetal loess soil. The research results have certain reference value for the roadbed reinforcement and slope management in the Loess Plateau area.

**[Keywords]** microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP); microorganisms; loess reinforcement; calcium source; concentration of cement; age of maintenance

中国黄土高原是世界上黄土分布最为集中、连续分布面积最大的区域,其黄土分布具有面积广、厚度大、湿陷性强烈、区域性质差异大的特点。黄土特殊的结构决定了在外部环境水的作用下表现出极强的水敏性和易损性。黄土上述特性对于工程项目建设及运营过程中造成了各类病害问题。因此,提出一种黄土强度增强的技术方法,对于指

导后续工程项目建设具有十分重要的实践意义。

微生物固化土体是岩土工程领域的一种新型环保的固化技术,该技术基于一种高产脲酶微生物,其利用自身新陈代谢活动产生脲酶,将尿素分解成  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ , 与周围环境中的  $\text{Ca}^{2+}$  结合生成具有胶凝性且难溶的碳酸钙晶体,从而将土体中颗粒胶结成具有一定强度的整体。陈彦瑞等<sup>[1]</sup>研究

收稿日期:2024-03-11; 修订日期:2024-11-20

基金项目:甘肃省科技揭榜挂帅项目(21ZD8JA003);甘肃省交通运输厅科技项目(2024-38)

第一作者:赵天宇(1985—),男,汉族,甘肃庆阳人,博士,正高级工程师。研究方向:岩土工程勘察与特殊性岩土测试。E-mail:zhaoty03@163.com。

\*通信作者:安亮(1993—),男,汉族,甘肃定西人,博士研究生,工程师。研究方向:路基工程。E-mail:1596955860@qq.com。

了微生物固化玄武岩残积土,其固化后的抗剪强度和压缩特性得到大幅改善。方国清<sup>[2]</sup>基于陕西延安革命旧址区窑洞顶板渗水、窑面剥落、水土流失等病害问题,从固化前后黄土的渗透性和微观结构探讨了新材料加固黄土的可行性。王绪民等<sup>[3]</sup>研究了微生物诱导碳酸钙沉淀(microbial induced calcium carbonate precipitation, MICP)方法处理泥岩稳定性的可行性,结果表明,微生物改良泥岩试样黏聚力可提高 288%,内摩擦角提高了 8.66%。王谦等<sup>[4]</sup>探讨了未来黄土地基抗震处理技术的研究方向,总结相关领域前沿性科学问题,并提出微生物环保技术用于黄土地基抗震处理使今后黄土地基处理取得突破的研究方向之一。单冶钢等<sup>[5]</sup>采用蠕动泵注浆和浸泡灌浆两种不同的工艺对岩石裂缝加固进行了室内试验,确定了最优微生物加固岩石裂缝工艺。岳建伟等<sup>[6]</sup>研究了未改良粉土、MICP 加固土、改良 MICP 加固土试样养护 7d 后的力学性能,结果表明, MICP 技术最佳配比为 2:1 胶菌质量比,并得到了改良 MICP 加固土的黏聚力提高了约 50%,内摩擦角提高了约 17%。刘汉龙等<sup>[7-8]</sup>利用微生物加固技术进行石质文物的补配修复。段金贵等<sup>[9]</sup>通过 MICP 技术研究了黄土坡面矿化加固作用机制。卫仁杰等<sup>[10]</sup>通过在胶结液中添加铝离子絮凝剂有效减少 MICP 灌浆处理次数。

关于微生物加固技术在黄土方面的研究,文献<sup>[11-16]</sup>等学者在黄土结构性、湿陷性、崩解性和坡面抗侵蚀等方面开展了具体研究。Amit 等<sup>[17]</sup>利用微生物诱导方解石沉淀技术减缓黄土风蚀病害问题,结果表明,生物刺激的 MICP 有效地减轻了低碳干旱土壤的粉尘排放,为未来现场实施方案提供了依据。Sina 等<sup>[18]</sup>讨论了 MICP 技术在建筑材料中的应用。罗晓光等<sup>[19]</sup>将生物酶加固路基技术应用与公路建设中。但这些对于公路路基生物固化的尝试大多只是向土中添加生物酶,而鲜有直接添加微生物的研究。同时, MICP 技术的应用在砂土中较多,至于其对黄土的加固研究还处于探索阶段。鉴于此,以陇西地区黄土为研究对象,采用巴氏芽孢杆菌诱导碳酸钙沉淀技术加固黄土试样,开展不同钙源、胶结液浓度、养护龄期和养护方式条件下 MICP 固化黄土试样抗剪强度对比试验研究,为黄土高原地区路基加固和边坡治理提供新方法和新技术。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 黄土

试验所用黄土取自甘肃兰州,将取回的黄土烘干,过 2 mm 筛,密封待用。依据《公路土工试验规

程》(JTG 3430—2020),测出所用黄土的基本物理参数如表 1 所示。采用重型击实试验测试了黄土的最大干密度和最优含水率,如图 1 所示。

表 1 黄土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of loess

土样名称	比重	含水率 $\omega/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
黄土	2.67	10.5	26.85	18.90	29.63	33.0

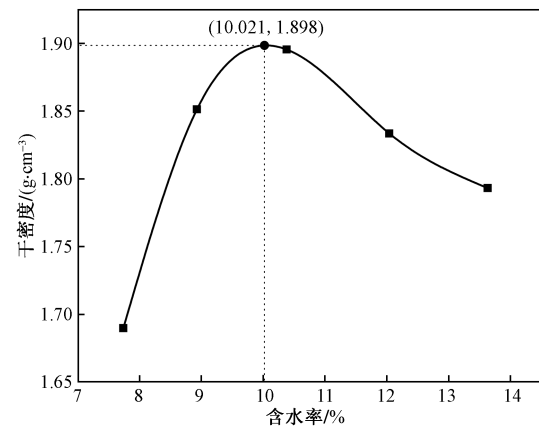


图 1 黄土的击实曲线

Fig. 1 Compaction curves for loess

#### 1.1.2 菌液和胶结液

巴氏芽孢杆菌其菌种(冻干粉)购买于美国菌种保藏中心(编号为 ATCC 11859)。试验所用微生物为培养时间为 32 ~ 44 h 的巴氏芽孢杆菌。胶结液由尿素、钙源(氯化钙、乳酸钙或乙酸钙)和蒸馏水配制而成,为微生物的矿化反应提供碳源和钙源。在适宜的环境下,巴氏芽孢杆菌产出脲酶,催化尿素发生水解反应,生成  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$ ,使得环境 pH 升高,在弱碱环境下生成的大量的  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  结合生成碳酸钙沉淀。

### 1.2 试验方法和方案

试验采用 ZJ 型四联应变控制式直剪仪进行直接剪切试验。试样直径为 61.8 mm,高 20 mm,试验时设置剪切速率为 0.8 mm/min,剪切位移为 6 mm,垂直压力选择 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa 进行快剪试验。试验方案设计如表 2 所示,以素黄土作为对照组试验。

表 2 微生物技术加固黄土试样直剪试验方案

Table 2 Straight shear test programme for microbiologically reinforced loess specimens

试验名称	影响因素	因素条件	试验次数
直剪试验	钙源	氯化钙、乙酸钙、乳酸钙	6
	胶结液浓度/ ( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	0.6、1.0、1.4	12
	养护龄期/d	0、3、7、14	12

## 2 试样的制备与养护

### 2.1 试样制备

按照击实试验得到的黄土的最大干密度和最佳含水率,称取干土和蒸馏水的质量,并测量蒸馏水的体积。将一定体积的菌液加入黄土中,拌合均匀,密封24 h,使细菌有充足的时间附着到土颗粒表面,然后加入等体积的胶结液,快速搅拌均匀,装入模具,静压成型。

### 2.2 试样养护

由于试验所用的巴氏芽孢杆菌是一种好氧菌,因此在养护试样时为了考虑细菌对氧气的需求,尝试养护室和保湿缸两种方式对试样进行养护。

(1) 养护室养护。将试样用保鲜袋密封,放在温度为25℃,湿度为95%的标准养护室中养护。

(2) 保湿缸养护。将试样用保鲜袋封装,袋口未完全封闭,将试样放置在保湿缸中,将盖顶的气阀打开,使空气可以流通。

## 3 试验结果与分析

土体的剪切强度是土体强度稳定性分析的重要因素。通过不同钙源、不同胶结液浓度、不同养护龄期条件下微生物改良黄土直剪试验,绘制改良黄土试样的剪应力-剪切位移关系曲线,并计算出试样的黏聚力和内摩擦角,分析钙源、胶结液浓度以及养护龄期对改良黄土抗剪强度的影响规律。

### 3.1 钙源对固化黄土试样强度的影响

选取钙源为氯化钙、乳酸钙和乙酸钙,素黄土试样为对照组,胶结液浓度为0.6 mol/L,养护龄期为0、3 d。图2、图3分别为0、3 d不同钙源条件下试样的剪应力-剪切位移关系曲线。

从图2、图3可以看出,不同钙源条件下固化黄土试样剪应力随着剪切位移的增加先增加,剪切位移1 mm时达到峰值后开始减小,最后趋于稳定。在相同垂直压力下,钙源对黄土抗剪强度的影响依次为:氯化钙>乙酸钙>乳酸钙,素黄土的抗剪强度最低。乙酸钙和乳酸钙作为钙源固化黄土试样时,黄土试样内部生成的碳酸钙含量较少,且反应速率较慢,因此相比于氯化钙,固化效果相对较弱。

### 3.2 胶结液浓度对固化黄土试样强度的影响

钙源为氯化钙,养护7 d,分析不同胶结液浓度条件下固化试样抗剪强度,结果如图4所示。

由图4可知,与素黄土相比,改良黄土试样抗剪强度都明显提高,应力应变曲线在峰值强度表现出

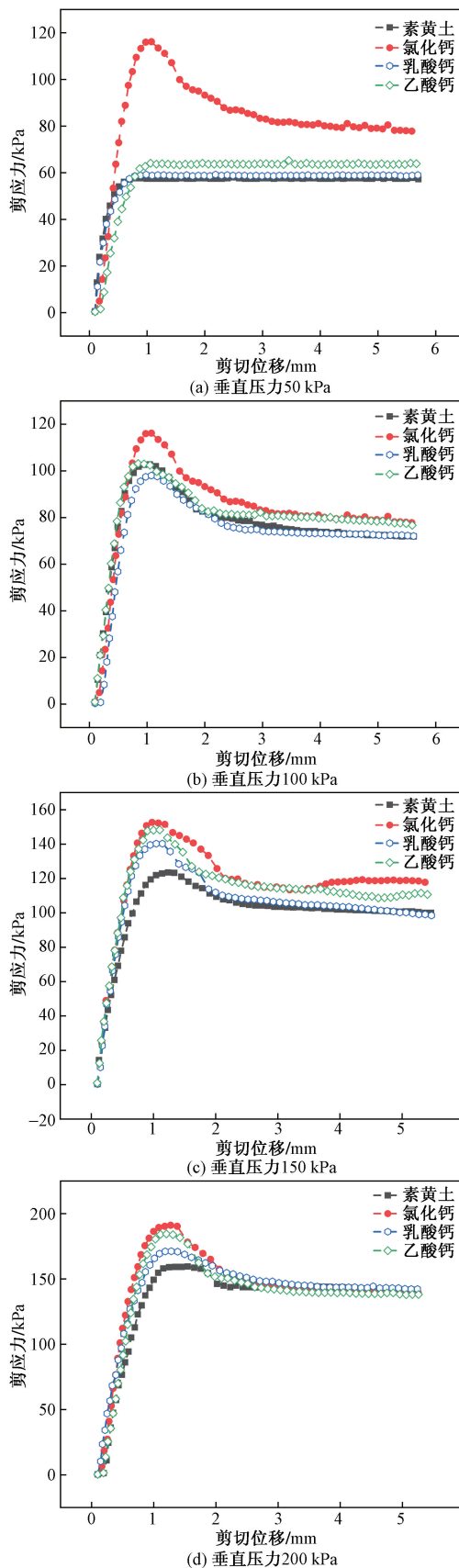
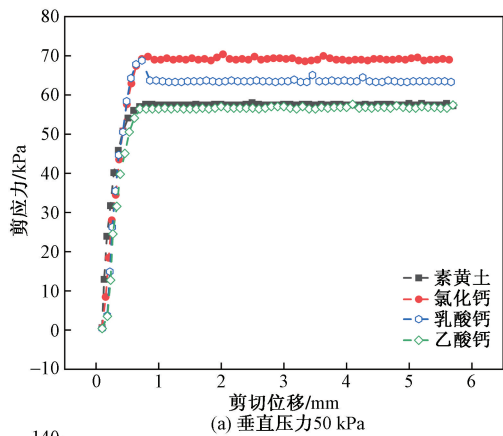
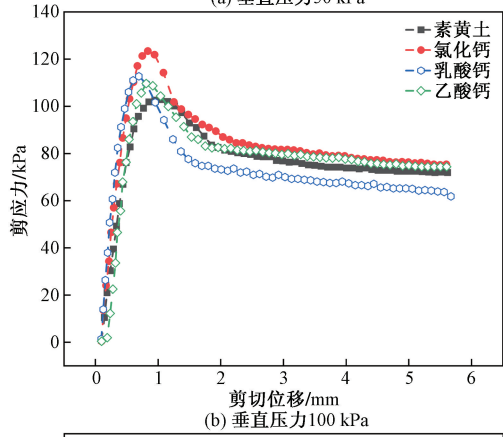


图2 不同钙源条件下试样的剪应力-剪切位移关系曲线(0 d)

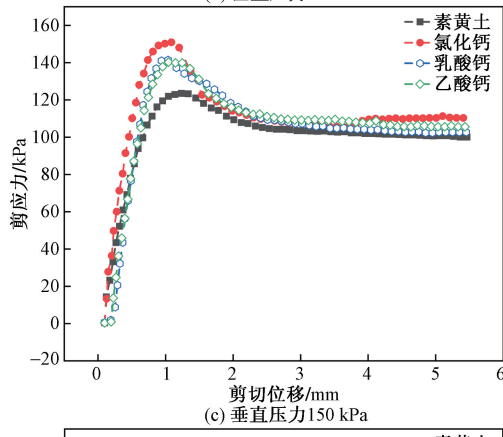
Fig. 2 Shear stress-shear displacement relationship curves of specimens under different calcium source conditions (0 d)



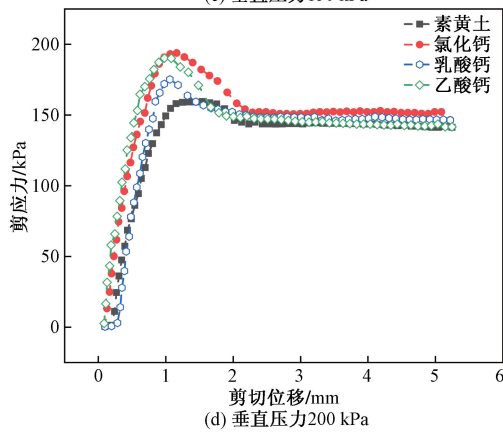
(a) 垂直压力 50 kPa



(b) 垂直压力 100 kPa



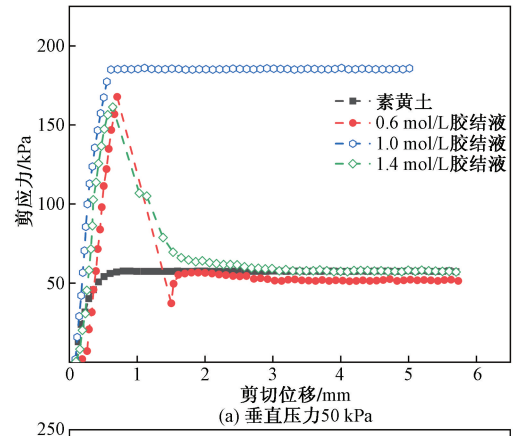
(c) 垂直压力 150 kPa



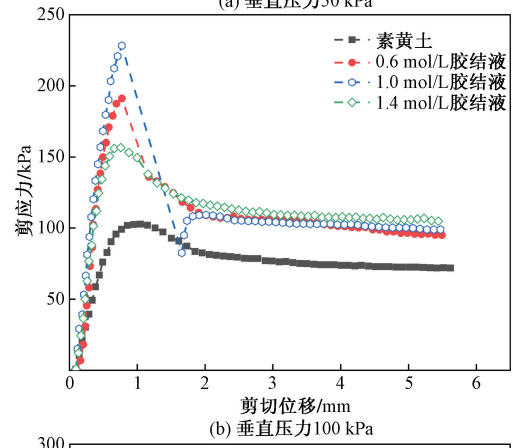
(d) 垂直压力 200 kPa

图3 不同钙源条件下试样的剪应力-剪切位移关系曲线(3 d)

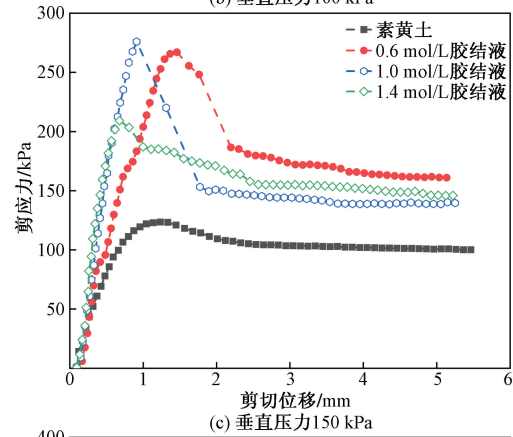
Fig. 3 Shear stress-shear displacement relationship curves of specimens under different calcium source conditions (3 d)



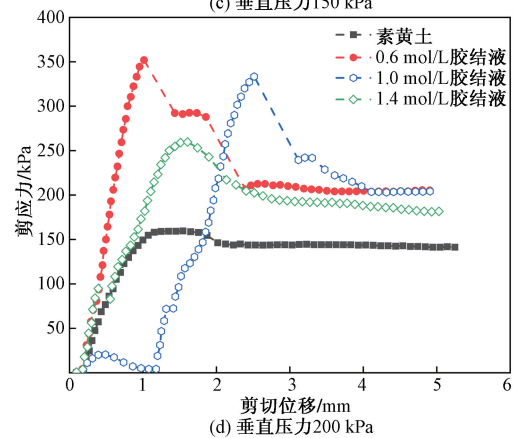
(a) 垂直压力 50 kPa



(b) 垂直压力 100 kPa



(c) 垂直压力 150 kPa



(d) 垂直压力 200 kPa

图4 不同浓度胶结液条件下试样的剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 4 Shear stress-shear displacement curves of specimens under different concentrations of cementitious fluids

脆性变化规律,并且随着胶结液浓度的增大,固化黄土峰值强度呈现先增大后减小的趋势。3种不同胶结液浓度条件下,固化黄土试样的抗剪强度从高到低依次为:1.0 mol/L > 0.6 mol/L > 1.4 mol/L > 素黄土。说明胶结液浓度为1.0 mol/L时,微生物矿化在试样内部生成的碳酸钙沉淀含量较高,较低浓度的胶结液提供的尿素和  $\text{Ca}^{2+}$  较少,生成的碳酸钙沉淀量较少,而高浓度的胶结液则抑制了细菌的活性,故 MICP 技术加固黄土在胶结液浓度为1.0 mol/L时试样的抗剪强度提高最显著。

### 3.3 养护龄期对固化黄土试样强度的影响

钙源为氯化钙、胶结液浓度为1.0 mol/L,分析不同养护条件下固化黄土试样抗剪强度,剪应力-剪切位移关系曲线如图5、图6所示。

从图5、图6可以看出,养护室和保湿缸养护条件下,固化黄土试样峰值强度随着养护龄期的增大呈现出先增大后减小的趋势,在养护龄期为7 d时,峰值强度呈现出最大值。养护龄期在0~3 d时,微生物加固黄土试样的抗剪强度变化较小;在3~7 d,固化试样的抗剪强度明显提高;在7~14 d,固化试样的抗剪强度有所下降。在保湿缸养护条件下,试样峰值强度呈现出更好的脆性变化。

### 3.4 不同因素对抗剪强度指标的影响

#### 3.4.1 钙源的影响

表3为不同钙源条件下微生物固化黄土试样的抗剪强度指标。可以看出,钙源显著影响了黄土试样的黏聚力和内摩擦角。养护龄期为0 d,黏聚力大小依次为:氯化钙 > 乙酸钙 > 乳酸钙,内摩擦角:氯化钙 = 乙酸钙 > 乳酸钙,相比最小值,钙源为氯化钙固化黄土试样黏聚力提升了37%,内摩擦角提升了5%。养护龄期为3 d,黏聚力大小依次为:乳酸钙 > 氯化钙 > 乙酸钙,内摩擦角:乙酸钙 > 氯化钙 > 乳酸钙,与最小值相比,固化黄土试样黏聚力提升了124%,内摩擦角提升了16%。与黏聚力的变化范围相比,内摩擦角的变化范围相对较小。

#### 3.4.2 胶结液浓度的影响

表4为不同胶结液浓度条件下微生物固化黄土试样的抗剪强度指标。可以看出,不同胶结液浓度条件下固化黄土试样的黏聚力、内摩擦角存在显著差异,黏聚力的大小依次为:1.0 mol/L > 1.4 mol/L > 0.6 mol/L,内摩擦角:0.6 mol/L > 1.0 mol/L > 1.4 mol/L,固化黄土试样黏聚力与最小值相比,最大提升了53%;内摩擦角最大提升了47%。与黏聚力的变化范围相比,内摩擦角的变化范围相对较小。

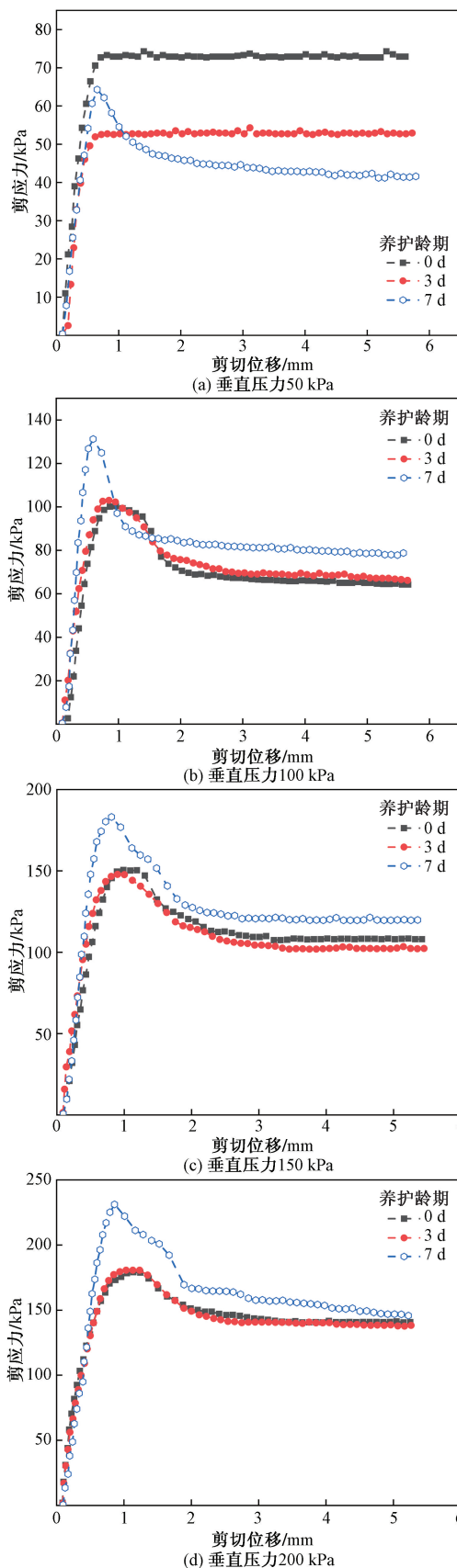


图5 养护室养护条件下试样的剪应力-剪切位移关系曲线  
Fig. 5 Shear stress-shear displacement relationship curves of specimens under conservation room conservation conditions

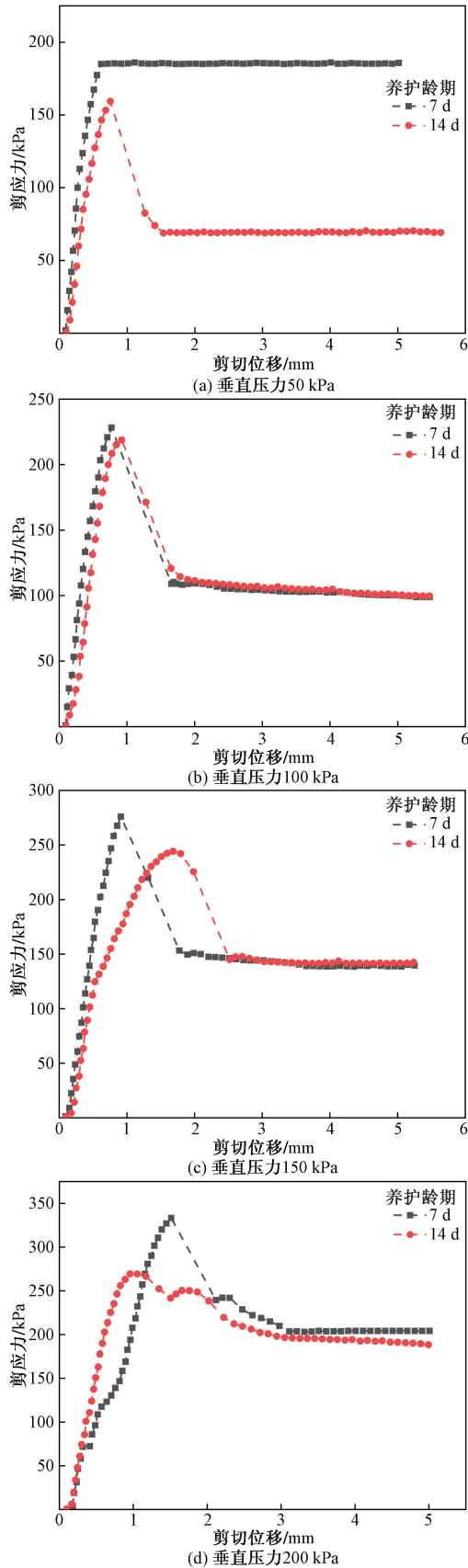


图6 保湿缸养护条件下试样的剪应力-剪切位移关系曲线  
Fig.6 Shear stress-shear displacement curves of specimens under humidified cylinder conditioning

表3 不同钙源条件下试样的抗剪强度指标  
Table 3 Shear strength index of specimens under different calcium source conditions

养护天数/d	钙源	垂直压力/kPa	抗剪强度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	氯化钙	50	68.41	30.94	39.00
		100	116.16		
		150	152.64		
	乙酸钙	200	191.11	24.63	39.00
		50	65.27		
		100	103.19		
3	氯化钙	150	148.26	22.58	37.23
		200	184.47		
		50	59.19		
	乳酸钙	100	98.04	35.14	38.66
		150	140.26		
		200	171.26		
7	氯化钙	50	70.37	16.73	40.70
		100	123.40		
		150	150.93		
	乙酸钙	200	193.87	37.55	34.99
		50	57.04		
		100	109.67		
14	氯化钙	150	140.26	37.55	34.99
		200	190.29		
		50	68.80		
	乳酸钙	100	112.72	109.70	34.99
		150	141.40		
		200	175.22		

表4 不同胶结液浓度下试样的抗剪强度指标  
Table 4 Shear strength index of specimens with different binder concentrations

胶结液浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )	垂直压力/kPa	抗剪强度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0.6	50	167.78	87.36	51.56
	100	191.11		
	150	266.98		
	200	351.95		
1.0	50	186.01	133.52	44.42
	100	228.31		
	150	275.94		
	200	333.29		
1.4	50	161.31	109.70	34.99
	100	156.59		
	150	209.13		
	200	259.81		

3.4.3 养护龄期的影响

表5 为不同养护龄期下微生物固化黄土试样的抗剪强度指标。不同养护龄期条件下,黏聚力的大小依次为:0 d > 3 d > 7 d,内摩擦角:7 d > 3 d > 0 d。养护天数分别为0、3、7 d时,试样的黏聚力值分别为34.86、15.45、14.30 kPa,与最小值相比,最大提升了144%;内摩擦角与最小值相比,最大提升

表5 不同养护龄期下试样的抗剪强度指标  
Table 5 Shear strength index of specimens at different age of maintenance

养护方式	养护龄期/d	垂直压力/kPa	抗剪强度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
	0	50	74.29	34.86	36.13
		100	100.32		
		150	150.55		
		200	179.18		
养护室养护	3	50	54.29	15.45	40.36
		100	103.00		
		150	147.88		
		200	180.68		
	7	50	64.28	14.30	47.98
		100	131.22		
		150	183.13		
		200	231.18		
保湿缸养护	7	50	186.01	44.42	133.52
		100	228.31		
		150	275.94		
		200	333.29		
	14	50	159.35	35.37	134.03
		100	218.77		
		150	244.11		
		200	269.42		

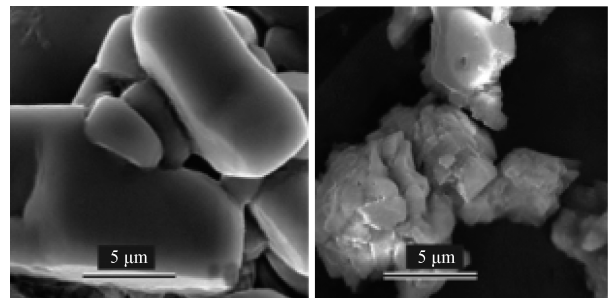
了33%。保湿缸养护的试样,黏聚力的大小依次为:7 d > 14 d,内摩擦角的大小表现为:14 d > 7 d,养护天数分别为7 d和14 d时,试样的黏聚力值分别为44.42、35.37 kPa,与最小值相比,提高了26%;内摩擦角提高了0.4%。与黏聚力的变化范围相比,内摩擦角的变化范围相对较小。

钙源为氯化钙,胶结液浓度为1.0 mol/L且试样养护7 d条件下,固化黄土试样黏聚力和内摩擦角为133.52 kPa和44.42°,素黄土黏聚力和内摩擦角分别为29.63 kPa和33.0°。相比较而言,MICP加固黄土的黏聚力提高了4.95倍,内摩擦角提高了1.34倍。

### 3.5 MICP 固化黄土试样机理分析

为了观察MICP固化黄土后碳酸钙的结晶,对钙源为氯化钙,胶结液浓度为1.0 mol/L且养护7 d时的黄土试样进行扫描电镜测试,扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)试验结果如图7所示。在一定胶结液浓度下,经过养护,黄土颗粒表面、颗粒与颗粒交接处形成了具有一定厚度CaCO<sub>3</sub>结晶。一方面,CaCO<sub>3</sub>结晶可以填补黄土颗粒之间的孔隙,并且可包裹破碎的黄土颗粒,从而降低孔隙大小,防治土颗粒在剪切过程中发生滑动,有效提高了黄土试样的抗剪强度;另一方面,CaCO<sub>3</sub>晶体与黄土内部颗粒桥接结合,使黄土骨架更加致

密,防止水分子破坏黄土结构,有效提高黄土的渗透性和抗崩解性能。从图7(b)中可以看出,MICP改良黄土生成的CaCO<sub>3</sub>的形貌多为立方体。



(a) 1.0 mol/L 胶结液(5 000×)

(b) CaCO<sub>3</sub> 颗粒(5 000×)

图7 1.0 mol/L 胶结液浓度、CaCO<sub>3</sub> 沉淀形态电镜扫描  
Fig. 7 Electron microscope scanning of 1.0 mol/L cementing solution concentration, CaCO<sub>3</sub> precipitation morphology

## 4 结论

从不同钙源、胶结液浓度及养护天数条件下开展MICP固化黄土的试验研究,并基于黄土试样微观结构进行机理分析。得出以下主要结论。

(1)当钙源为氯化钙,胶结液浓度为1.0 mol/L且养护7 d时,MICP技术对黄土的加固效果最优,与素黄土相比,加固黄土试样的黏聚力提升了4.95倍,内摩擦角提升了1.34倍。

(2)MICP技术可以有效提高黄土的抗剪强度。钙源、胶结液浓度和养护天数均对加固试样的黏聚力影响较大,而对内摩擦角的影响相对较小。

(3)MICP改良黄土生成的CaCO<sub>3</sub>的形貌多为立方体,在黄土颗粒表面、颗粒与颗粒交接处形成了具有一定厚度CaCO<sub>3</sub>晶体,将黄土颗粒胶结成整体,从而提高了黄土的整体强度。

### 参 考 文 献

- [1] 陈彦瑞,雷学文,魏桃员,等.微生物诱导碳酸盐沉积技术固化红棕色玄武岩残积土的试验研究[J].科学技术与工程,2017,17(26):120-126.  
Chen Yanrui, Lei Xuewen, Wei Taoyuan, et al. Experimental study on curing red-brown basalt residual soil by microbial induced carbonate deposition technique[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(26): 120-126.
- [2] 方国清.一种黄土脱敏加固新材料的试验研究[J].科学技术与工程,2019,19(5):272-277.  
Fang Guoqing. Experimental study on a new material for desensitized reinforcement of loess[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 272-277.
- [3] 王绪民,崔芮,王敏.微生物诱导碳酸钙沉淀胶结加固泥岩试验研究[J].科学技术与工程,2020,20(25):10372-10378.

- Wang Xumin, Cui Rui, Wang Cheng. Experimental study on microbial-induced calcium carbonate precipitation cementation reinforcement of mudstone[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(25): 10372-10378.
- [4] 王谦,刘钊钊,王兰民,等. 黄土地基抗震处理技术研究进展与展望[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(6): 1366-1381.
- Wang Qian, Liu Zhaozhao, Wang Lanmin, et al. Progress and prospect of research on seismic treatment technology for loess foundations[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(6): 1366-1381.
- [5] 单冶钢,周楠,侯王相,等. 不同处理工艺下微生物对岩石裂缝加固效果影响[J]. *水利水运工程学报*, 2022(6): 69-77.
- Shan Zhigang, Zhou Nan, Hou Wangxiang, et al. Influence of microorganisms on the reinforcement effect of rock cracks under different treatment processes[J]. *Journal of Water Resources and Transportation Engineering*, 2022(6): 69-77.
- [6] 岳建伟,张宝玺,赵丽敏,等. 改良微生物诱导碳酸钙沉淀技术加固粉性土力学性能[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(18): 7702-7710.
- Yue Jianwei, Zhang Baoxi, Zhao Limin, et al. Mechanical properties of chalky soil reinforced by improved microbial-induced calcium carbonate precipitation technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(18): 7702-7710.
- [7] 刘汉龙,韩绍康,陈卉丽,等. 潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法[J]. *土木与环境工程学报*, 2022, 44(6): 219-220.
- Liu Hanlong, Han Shaokang, Chen Huili, et al. Microbial reinforcement of sandstone grottoes in humid environments[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(6): 219-220.
- [8] 刘汉龙,张涵,叶琳,等. 出土破损陶器文物活性生物泥粘接修复技术[J]. *土木与环境工程学报*, 2023, 45(1): 225-226.
- Liu Hanlong, Zhang Han, Ye Lin, et al. Restoration technology of active bio-mud bonding on excavated damaged pottery artefacts[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(1): 225-226.
- [9] 段金贵,王怀星,姚姬璇,等. 黄土坡面的微生物矿化加固及抗侵蚀性能试验研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 33-40.
- Duan Jingui, Wang Huaixing, Yao Jixuan, et al. Experimental study on microbial mineralisation reinforcement and anti-erosion performance of loess slopes[J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 2022, 42(5): 33-40.
- [10] 卫仁杰,彭劼,许鹏旭,等. 铝离子絮凝剂对微生物加固砂土效果的影响试验研究[J/OL]. (2022-12-26)[2024-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20221222.1752.004.html>.
- Wei Renjie, Peng Jie, Xu Pengxu, et al. Experimental study on the effect of aluminium ion flocculant on the effect of microbial reinforcement of sandy soil[J/OL]. (2022-12-26)[2024-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20221222.1752.004.html>.
- [11] 程瑶佳,唐朝生,谢约翰,等. 微生物诱导碳酸钙沉积技术改性黄土结构强度试验研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(1): 44-51.
- Cheng Yaojia, Tang Zhaosheng, Xie Yuehan, et al. Experimental study on the structural strength of loess modified by microbial induced calcium carbonate deposition[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(1): 44-51.
- [12] 程瑶佳,唐朝生,泮晓华,等. 微生物矿化作用(MICP)-铺砂联合提高黄土抗侵蚀性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(5): 1010-1018.
- Cheng Yaojia, Tang Zhaosheng, Pan Xiaohua, et al. Experimental study on improving the erosion resistance of loess by microbial mineralisation (MICP)-sand spreading[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(5): 1010-1018.
- [13] 孔德成,孙治国,贾方方. 微生物诱导碳酸钙沉淀技术改良黄土湿陷性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(3): 969-975.
- Kong Decheng, Sun Zhiguo, Jia Fangfang. Study on the improvement of wet subsidence of loess by microbial-induced calcium carbonate precipitation technology[J]. *Silicate Bulletin*, 2022, 41(3): 969-975.
- [14] 常书铭,干飞,曹腾,等. 脲酶矿化强化黄土抗水蚀性能演变特征试验研究[J]. *水利规划与设计*, 2022(10): 111-116.
- Chang Shuming, Gan Fei, Cao Teng, et al. Experimental study on the evolutionary characteristics of water erosion resistance of loess enhanced by urease mineralisation[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2022(10): 111-116.
- [15] 王晓强,宋白杨,高富强. 脲酶诱导碳酸钙沉淀固化黄土界面强度优化试验研究[J]. *公路*, 2022, 67(1): 295-300.
- Wang Xiaoqiang, Song Baiyang, Gao Fuqiang. Experimental study on the optimisation of interfacial strength of urease-induced calcium carbonate precipitation-cured loess[J]. *Highway*, 2022, 67(1): 295-300.
- [16] 许天驰,张浩男,贾苍琴,等. 微生物诱导碳酸钙沉淀改良黄土的崩解性试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(2): 674-681, 707.
- Xu Tianchi, Zhang Haonan, Jia Cangqin, et al. Experimental study on disintegration of loess improved by microbial-induced calcium carbonate precipitation[J]. *Silicate Bulletin*, 2023, 42(2): 674-681, 707.
- [17] Amit R H, Gruber A, Abramov K, et al. Mitigation of aeolian erosion of loess soil by bio-stimulated microbial induced calcite precipitation[J]. *Catena*, 2024, 237: 107808.
- [18] Sina A F, Arul A, Jian C, et al. Application of microbially induced calcite precipitation(MICP) technology in construction materials; a comprehensive review of waste stream contributions[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 388: 1601-1605.
- [19] 罗晓光,李增光,夏强. 生物酶土壤固化筑路技术在高速公路底基层中的应用研究[J]. *公路工程*, 2014, 39(1): 99-102, 115.
- Luo Xiaoguang, Li Zengguang, Xia Qiang. Research on the application of bio-enzymatic soil curing road construction technology in highway subgrade[J]. *Highway Engineering*, 2014, 39(1): 99-102, 115.