

[文章编号] 1003-4684(2021)04-0046-06

# 反硝化微生物固化砂土的试验研究

胡其志, 刘彻德, 庄心善

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘要]** 利用反硝化微生物,开展微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)灌浆固化砂土的试验,测定固化前后试样中碳酸钙含量,并通过无侧限抗压强度试验、直剪试验和渗透试验,综合评价反硝化微生物 MICP 对砂土的固化效果。研究表明:反硝化微生物的 MICP 对砂土固化具有较好效果,通过灌浆试验后的砂土试样,其强度指标、渗透参数和土体的塑性均有所提高;钙离子浓度为 0.25 mol/L、配比为 1:2:2 的胶结液对砂土的固化效果最佳,处理后的砂土试样无侧限抗压强度提高了 39.2%、抗剪强度提高了 53.71%、渗透系数降低了 1 个数量级;在钙离子浓度相同的胶结液中,提升氮源浓度可有效提升强度参数;在氮源浓度相同的胶结液中,提升钙离子浓度可有效提升强度参数,对试样的渗透性无明显影响。

**[关键词]** 反硝化微生物;砂土固化;强度参数;渗透系数

**[中图分类号]** TU411 **[文献标识码]** A

在岩土工程地基处理以及边坡处理领域,土体加固一直都是较为关键和重要的课题。相比常规的预压固结和化学灌浆等处理方法,利用微生物技术胶结松散土体来达到降低渗透系数、提高土体承载力的方法更加环保,具有较强的经济与社会意义<sup>[1-2]</sup>。微生物诱导碳酸钙沉淀技术(Microbial Induced Calcium carbonate Precipitation,简称 MICP)是其中具有代表性的一种方法。

近年来 MICP 相关的研究日益增多,其中以脲酶菌为试验菌种的居多,其效果也最为显著。但脲酶菌的培养要求和造价较高,目前依旧处于试验阶段,其大规模的实际运用并不常见。另一方面, MICP 反应过程中微生物对胶结沉积物产生所做出的贡献为自身化能反应所产生的二氧化碳和沉淀结晶的结晶核<sup>[3]</sup>,因此,宽泛来说进行 MICP 技术中的菌种可以有很多,如周峰等<sup>[4]</sup>就对比了脲酶菌和铁盐还原菌的灌浆效果。KARATAS I.等<sup>[5]</sup>也证明了利用反硝化菌在碱性条件下进行 MICP 的可行性。反硝化细菌作为土壤中常见的细菌,购买方便且成本较低,相较于脲酶菌的培养也更加容易。利用反硝化细菌的 MICP 加固裸露或临时的土坡面很有应用价值。

当前对于 MICP 加固砂土已有一些研究成果。Paassen 等<sup>[6]</sup>、Harkes 等<sup>[7]</sup>、Chu 等<sup>[8]</sup>将 MICP 技术

运用于砂土固化,发现微生物固化可显著改善砂土的强度、刚度、渗透性等一系列力学特性。Soon 等<sup>[9]</sup>、崔明娟等<sup>[10]</sup>、程晓辉等<sup>[11]</sup>探讨了土样含水率、颗粒粒径、注浆方式对灌浆效果的影响。梁仕华等<sup>[12]</sup>验证了循环灌浆次数对于固化砂土效果有影响。程晓辉,麻强等<sup>[13]</sup>验证了固定液浓度对于灌浆效果有影响。

基于此,为有效加固砂质土,考虑工程成本和操作的可行性等实际意义。首先进行了灌浆试验前的准备工作,例如土样的制备、菌液的培养,不同浓度胶结液的配置,然后在恒温(25℃)有氧碱性环境下,采用灌浆装置将胶结液分批次不连续灌入土体中,进行了微生物灌浆试验。最后比较不同浓度的胶结液对试样的加固效果,综合评价合理的加固试样的胶结液浓度。

## 1 试验准备

### 1.1 细菌的活化与培养

试验应用的菌种为反硝化细菌。该菌为土壤无害菌,可通过市场低成本购买,其主要成分为反硝化杆菌。反硝化杆菌是一种异养、兼性厌氧细菌。影响反硝化细菌活性的因素有很多,如温度、酸碱度、磁场、氧气、胶结液的配比和浓度等。菌液在培养时,控制温度为 25℃,碱性环境(pH=8)。制备

[收稿日期] 2020-10-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51609081)

[第一作者] 胡其志(1969-),男,湖北武汉人,湖北工业大学教授,研究方向为岩土工程

[通信作者] 刘彻德(1995-),男,湖北黄冈人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土工程

菌液的具体操作:1)通过往菌株干粉中加入 30 倍质量的水得到原菌液,在 10 g/L 红糖浓度环境静置活化处理三小时;2)将原菌液稀释三倍后过滤掉残渣;3)加入稀释的 1 mol/L 氢氧化钠溶液搅拌调节 pH 值,利用溶液的酸碱度调节控制细菌的活性。弱碱性溶液环境更有利于 MICP 灌浆。调配得到试验所需的菌液,菌液见图 1。

在碱性的溶液环境中,取 150 mL 菌液进行预实验。往装菌液的烧杯容器中里倒入 100 mL 含 1 mol/L 的氯化钙的培养溶液,搅拌均匀后,可在刚开始的 3 h 内观察到大量的气泡产生。在溶液的上半部分产生絮状的白色漂浮物,轻轻震荡试验容器会发现絮状物沉淀下去。用玻璃棒将该絮状物提取,缓慢放入装有稀盐酸溶液的烧杯中,观测到玻璃棒上的絮状物完全溶解并产生气泡。经分析,证实该絮状物沉淀的化学成分为碳酸钙。



图 1 试验所用菌液

## 1.2 胶结液的配置

胶结液为氯化钙( $\text{CaCl}_2$ )与亚硝酸钠( $\text{NaNO}_2$ )以及硝酸钾( $\text{KNO}_3$ )的混合溶液。其中亚硝酸钠和硝酸钾为反硝化细菌进行反硝化作用中的氮源,为 MICP 过程的供能物质;氯化钙为 MICP 过程中的钙源,其主要作用就是与反硝化反应作用过程中产生的二氧化碳在细菌细胞壁周围生成碳酸钙,同时,氯化钙也是菌液的固定液,钙离子和细菌的细胞壁有吸附作用,利于细菌依附在带负电核的土粒颗粒表面,起到固定细菌的作用。

基于反硝化作用的化学方程式,钙源:氮源的浓度可视为 1:1,培养液中  $\text{Ca}^{2+}:\text{NO}_3^-:\text{NO}_2^-$  的浓度比例一般是 1:1:1。为了在试验过程中能提高胶结作用的发生,在部分胶结液中提高氮源的浓度。试验分组及各组胶结液浓度见表 1。

表 1 胶结液配比 mol/L

分组	$\text{CaCl}_2$	$\text{NaN}_2\text{O}_2$	$\text{KN}_3\text{O}_3$ (含量 46%)
T1	0.25	0.25	0.25
T2	0.25	0.5	0.5
T3	0.5	0.25	0.25
T4	0.5	0.5	0.5

在胶结液中加入溶液酸碱调节剂用以将胶结液

调节为弱碱性( $\text{pH}=8$ )。调节剂为 1 mol/L 的氢氧化钠溶液,其并不参与到 MICP 胶结反应过程中。

## 1.3 土样性质

试验砂土为花岗岩残积砂质细粒土(图 2)。样本色暗灰,少粘性土,颗粒形状复杂。烘干并筛除 2 mm 以上的粗颗粒得到试样土。土的最大干密度为  $2.02 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率为 8.0%。颗分曲线如图 3 所示,由内插值得到: $d_{10}=0.12 \text{ mm}$ , $d_{30}=0.25 \text{ mm}$ , $d_{60}=0.51 \text{ mm}$ ,曲率系数  $C_c=1.02$ ,不均匀系数  $C_u=4.25$ ,级配不良。

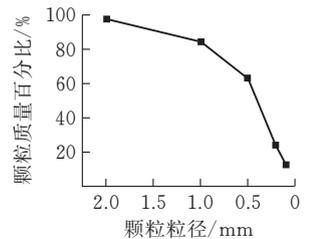


图 2 试验用砂质细粒土

图 3 土样颗分曲线

土样在制作试验样品时,采用相同的方法将土样放置在容器内,压实至相同状态。后续性能测试试验制样所需的  $\Phi 61.8$  的两种钢环刀和  $\Phi 50 \times 100 \text{ mm}$  的模具均在制样前预先和土样一起埋设在容器中,预先埋设环刀和模具的目的是为了最大程度减少后期拆模制样时对灌浆固化效果的破坏。制样完成后各容器内的土样的均质性相同。

## 2 MICP 灌浆试验

试验在恒温碱性环境下进行,试验所需的装置构造见图 4。利用装置的势能 will 将胶结液有效地灌注到试验试样中,胶结液随灌浆方向依次通过试样容器的下部、中部和上部,最终随导管流入收集装置中。

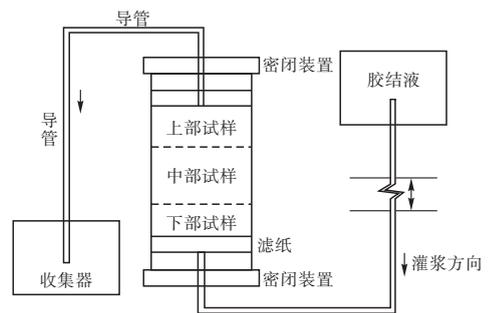


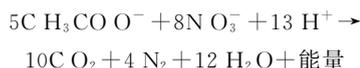
图 4 试验装置示意图

### 2.1 微生物加固原理

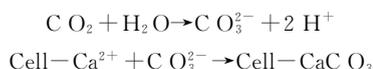
微生物代谢产物胞外聚合物(EPS)中含有羟基、胺基、酰胺基、羧酸等负离子基团,由于细菌细胞壁的特殊结构对 EPS 的吸附,使得细菌表面通常带有负电荷,并不断吸附周围胶结溶液中的  $\text{Ca}^{2+}$ ,使

其聚集在细菌细胞外表面<sup>[14]</sup>。同时扩散到细胞内部的硝化盐在细菌产生的反硝化作用下不断分解出 $\text{CO}_3^{2-}$ 并输送到细胞表面,从而以细胞为核,在细菌周围析出碳酸钙沉积物,吸附在岩样表面上的微生物为成核点矿化沉积出大量的 $\text{CaCO}_3$ ,随着灌浆次数的增加,矿化沉积逐渐覆盖堆积填充和胶结。微生物诱导产生的 $\text{CaCO}_3$ 沉积具有胶凝性质,与一般的化学作用生成的 $\text{CaCO}_3$ 不同,将试样胶结为一个整体从而达到灌浆加固的目的。整个过程发生的反应如下:

反硝化作用:



沉降胶结原理:



## 2.2 灌浆试验

在进行灌浆试验前,采用吸附法将适量的菌液固定在试样的颗粒缝隙中。吸附法的原理是通过物理吸附、化学或者离子键的结合,将微生物固定于颗粒空隙空间内。这种方法操作简单,对微生物活力影响小。参考彭劫等人<sup>[15]</sup>的试验经验,具体操作步骤:1)先往试样中灌入氯化钙溶液(0.5 mol/L),灌入体积按试样质量进行相关的调整。类比3.4 mL/min的速率设计灌浆速率为2 mL/min,固定液灌注结束后静置12 h;2)以同样的方式将适量的菌液注入到试样容器中,其速率为2 mL/min,菌液灌注结束后静置12 h。

试验共进行五组不同浓度的胶结液灌浆试验,每组胶结液浓度灌浆试验又分出强度组和渗透组两组试验,总计进行十组试验。其中无侧限组在试验装置容器中部放置无侧限抗压试验所需的模具;渗透组在试验装置容器中部段放置渗透试验所需的环刀,在试样下部段和上部段分别放置直剪试验所用的环刀。分组的目的是为了从强度和渗透两方面来综合分析反硝化细菌的MICP效果。灌浆试验时,胶结液沿着灌浆装置依次从试样下部段渗入中部段,再渗入上部段最终渗出试样。

为使灌浆时单位质量的土样能灌注等体积的胶结液,每组试验一次灌浆胶结液的体积按容器中土样的重量决定。以960 mL/kg的体积/质量比来确定每组具体灌浆体积,具体灌浆体积见表2,灌浆速率为2 mL/min。采用分批次灌浆,共灌浆4次<sup>[16]</sup>。在一次注浆结束后,为便于生成的胶结物稳定,每次灌浆结束后,静置试样24 h,再补充适量的菌液,静置固定菌液6 h后再进行下一批次的灌浆。

每次注浆时的胶结液成分与体积均与第一次灌浆要求相同,每一次灌浆的速率也与第一次时的相同。

表2 每次灌浆的胶结液体积

组别	胶结液体积/mL	
T0 组(空白组)	渗透组(1.21 kg)	1161.6
	无侧限组(0.42 kg)	403.2
T1 组	渗透组(1.16 kg)	1113.6
	无侧限组(0.41 kg)	393.6
T2 组	渗透组(1.02 kg)	979.2
	无侧限组(0.50 kg)	480.0
T3 组	渗透组(1.12 kg)	1 075.2
	无侧限组(0.44 kg)	422.4
T4 组	渗透组(1.01 kg)	969.6
	无侧限组(0.46 kg)	441.6

结束灌浆试验后,将试样静置养护48 h后,在60℃烘箱中对试样进行烘干养护48 h,拆模处理进行相关的性能指标测试试验。拆模后部分试样见图5。



图5 部分拆模后的试样

在灌浆过程中灌浆速率是越来越慢,理论上的匀速灌浆是达不到的,有的试验组不得不在灌浆过程中反复调节灌浆仪器已保证灌浆试验的进行,因此试验中的操作误差是不可避免的。

## 3 性能测试

对MICP试验处理得到的砂土试样,在实验室里分别进行强度、渗透指标及碳酸钙含量测试。

### 3.1 无侧限抗压强度试验

将处理后的试样按《土工试验方法标准》GB/T50123—2019<sup>[17]</sup>测试土样无侧限抗压强度,加载速率1.0 mm/min。

### 3.2 直剪试验

将处理后的试样烘干后静置24 h。试样按压入剪切盒内,施加垂直压力荷载50 kPa,调整好仪器,对剪切盒的下盒施加水平力,直至试样被剪坏。

### 3.3 碳酸钙的含量

测量比较试样固定的钙离子含量可以反应出MICP生成的碳酸钙的量和细菌的活性。

具体试验方法<sup>[18]</sup>:1)将单轴抗压加载破坏后的试样破碎后,置于烧杯中,以去离子水充分搅拌、

清洗;2)另取干燥的滤纸,重量计为 $W_1$ ,折成圆锥型,用以过滤清洗后的试样,并用去离子水冲洗滤纸、及其上试样,以保证滤纸及试样中的可溶盐充分溶解;3)将滤纸和试样一并烘干后,称量滤纸和试样的总重量为 $W_2$ ;4)改用稀盐酸重复步骤,经稀盐酸处理并干燥后,滤纸和试样总重量为 $W_3$ 。

单位重量试样中碳酸钙的含量( $R_{CaCO_3}$ )可以用下面公式计算:

$$R_{CaCO_3} = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} \quad (1)$$

结合试验和公式(1)计算出各试验组的碳酸钙含量,各试验组( $TX, X=1,2,3,4$ )测得的碳酸钙含量与对照组( $T0$ )测得的含量相减即得各实验组所生成的碳酸钙含量。

### 3.4 渗透试验

采用变水头渗透试验,在试样中预先埋设环刀,拆除清理出试样用于渗透试验中。按《土工试验方法标准》GB/T50123—2019 测试土样的渗透系数。采用公式(2)来进行计算。

$$K = 2.3 \frac{aL}{A\Delta t} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

式中: $k$ 为渗透系数, $a$ 为变水头水管横截面积, $L$ 为试样高度, $A$ 为试样的横断面面积, $\Delta t$ 为渗透的时间, $h_1$ 初始水头, $h_2$ 终止水头。

## 4 结果分析

### 4.1 无侧限抗压强度

将灌浆处理后的砂土试样拆模静置3h后使试样冷却至室温后进行无侧限抗压强度试验。试验结果见图6。

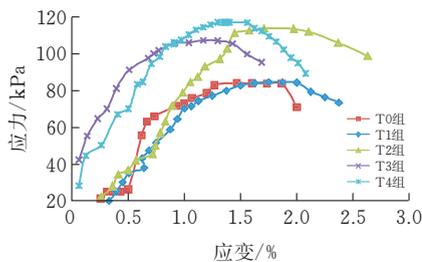


图6 无侧限应力应变图

由图6可知:1)试验组相对于对照组发生更明显的塑性破坏。对照组在达到峰值后迅速从峰值降低零,其破坏时的应变也较小,发生了脆性破坏,各灌浆组从峰值降低到零是一个较缓慢的过程,其破坏过程有较大的应变,发生了塑性破坏。灌浆作用改善了试样的塑性,使得试样发生塑性破坏;2)抗剪效果最好的T2组,其峰值为117.1 kPa,较对照组T0组84.1 kPa提高了39.2%,T3和T1两组与T2组的峰值差距不大,可认为灌浆效果达到预期效果。

微生物的MICP改善土体力学性能取决于微生物诱导生成碳酸钙的水平,额外生成的碳酸钙沉淀也会进一步加强土体的致密性以及土颗粒接触间的胶结性。大量的试验研究表明微生物的MICP处理主要是通过提高试样粘聚力来提高试样的剪切强度。

### 4.2 钙离子含量及抗剪强度

测试处理后土样中碳酸钙的含量结果以及直剪试验测试土样上下两部分的强度结果见图7。

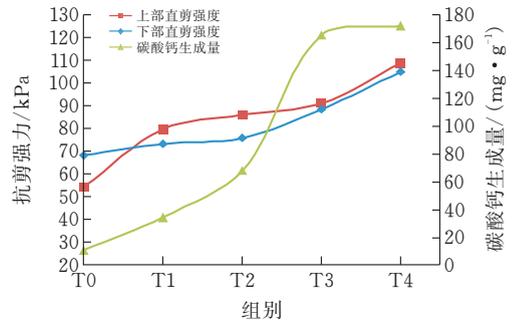


图7 试验组碳酸钙生成量及抗剪强度

试样在制作时,理论试样的压实度相同,但实际操作中下部土要比上部密实,因此在对照组中,下部土的抗剪强度要比上部土高;而灌浆试验结果却恰好相反,试验组的上部土样的抗剪强度要比下部土的高,上部土的空隙率比下部土的要高,更有利于灌浆试验的进行,灌浆胶结效果更突出;生成碳酸钙的含量与胶结液浓度成正比趋势,生成的碳酸钙含量越高,抗剪强度也越高。在胶结液中钙离子浓度较低的情况下,胶结液中的氮源浓度与生成的碳酸钙含量成正比趋势;当钙离子浓度为0.5 mol/L时,碳酸钙的生成量( $TX - T0, X=1,2,3,4$ )与氮源的浓度关系不大,此时提升氮源的浓度对生成的碳酸钙含量增幅不大。

结合试验数据,可得出:1)过高的压实度下并不利于灌浆试验;2)在灌浆试验中,胶结液浓度越高,上下部土样的强度离散性有缩小的趋势;3)相同孔隙率以及相同灌浆次数时,试样的直剪强度与胶结液浓度成正比趋势;4)碳酸钙的生成量与胶结液浓度成正比趋势,但当浓度过高时,碳酸钙生成量增幅不大。

### 4.3 渗透系数

测量试样的渗透系数,其结果见表3。由表3可分析:各试验组的渗透系数较对照组( $T0$ )的渗透系数均下降了一个数量级。因为土壤基质中微生物诱导原位生成的碳酸钙晶体占据了土体孔隙空间,从而降低孔隙比,增加土体的致密性,降低土体的渗透性。在钙离子浓度含量相同时( $T1$ 与 $T2, T3$ 与 $T4$ ),在氮源浓度升高时,试样的渗透性不降反升;

在氮源浓度相同时( $T_1$ 与 $T_3$ 、 $T_2$ 与 $T_4$ ),钙离子浓度越高,试样的渗透性却相差不大。这与试验的预期效果相矛盾。在钙离子浓度相同时,提升氮源的浓度将有利于降低试样的渗透性,但这个趋势并不是一直是正向趋势的,而应该是有个峰值。当氮源浓度过高时,使得胶结液整体的浓度变高,抑制了微生物的活性,继续提升氮源浓度,对细菌的MICP灌浆效果有抑制作用,试样的渗透性上的表现将不再是继续下降,甚至比较低浓度的试验组还要高。

表3 试验组的渗透系数

试验组	渗透系数/( $10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$T_0$	253.10
$T_1$	21.23
$T_2$	89.83
$T_3$	23.22
$T_4$	87.25

由此可得出以下结论:1)对照组的渗透系数为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,经过处理后,各试样渗透系数均下降约1个数量级,各试验组试样间的差异不大;2)在钙离子浓度相同的情况下,随着胶结液中的氮源浓度的上升,细菌的灌浆效果在渗透方面的表现并不一定是增长的。当氮源浓度达到一定时,浓度的增加会抑制了细菌的MICP灌浆效果。

综上所述,采用灌浆的方法,利用反硝化细菌进行MICP加固砂土试验,并通过强度和渗透试验综合评论并验证了反硝化微生物MICP加固砂土的效果。从试验数据上对比,采用反硝化细菌进行MICP比采用脲酶菌进行MICP的效果稍差,但可以通过增加灌浆次数、改善灌浆条件、改变固菌方法等改进,使其达到相同的加固效果。

## 5 结论

采用反硝化细菌进行MICP灌浆加固砂质细粒土的试验,比较了不同浓度下胶结液加固效果的差异,分析试验结果可得出结论如下。

1)利用反硝化微生物进行MICP加固砂土具有较好的加固效果,经过MICP处理后的试样强度提高了39.2%,渗透系数均下降了1个数量级,强度值达到峰值前后表现出较为明显的塑性。

2)不同浓度的胶结液处理后的砂土试样其强度参数有显著差异。钙离子浓度为 $0.25 \text{ mol/L}$ ;  $\text{Ca}^{2+}:\text{NO}_2^-:\text{NO}_3^-$ 比例为1:2:2的胶结液的MICP灌浆效果最佳。

3)在 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度相同的胶结溶液中,提升氮源浓度可有效提升强度参数;氮源浓度相同时,增加 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度,对试样的强度参数有提升效果,对试样

的渗透性无明显影响。

## [参考文献]

- [1] 何稼,楚剑,刘汉龙,等.微生物岩土技术的研究进展[J].岩土工程学报,2016,38(4):643-653.
- [2] 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.
- [3] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等.MICP胶结钙质砂动力特性试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(1):38-45.
- [4] 周锋.粉土中微生物灌浆诱导沉积物填充效果的研究[D].扬州:扬州大学,2016.
- [5] KARATAS I. Microbiological improvement of the physical properties of soils[D]. Phoenix: Arizona state University,2008.
- [6] VAN PAASSEN L A, GHOSER, VANDERL I NDENTJM, et al. Quantifying biomediated ground improvement by re-lysis: large-scale biogROUT experiment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2010,136(12):1721-1728.
- [7] HARKES M P, BOOSTER J L, VAN PAASSEN-LA, et al. Microbial induced carbonate precipitation as ground improvement method bacterial fixation and empirical correlation  $\text{CaCO}_3$  vs strength [C]//International Conference on Bio-geo-civil Engineering,2008:37-41
- [8] CHU J, IVANOV V, STABNIKOV V, et al. Microbial method for construction of aquaculture pond in sand [J]. Geotechnique,2013,63:871-875.
- [9] SOON N W, LEE L M, KHUN T C, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2014,140(5):04014006.1-04014006.11.
- [10] 崔明娟,郑俊杰,赖汉江.菌液注射方式对微生物固化砂土动力特性影响试验研究[J].岩土力学,2017,38(11):3173-3178
- [11] 邵光辉,尤婷,赵志峰,等.微生物注浆固化粉土的微观结构与作用机理[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(2):129-135.
- [12] 梁仕华,牛九格,戴君,等.循环灌浆次数对微生物固化砂土效果的影响[J].工业建筑,2018,48(7):22-26.
- [13] 程晓辉,麻强,杨钻.微生物注浆加固砂土地基的抗液化能力研究[D].北京:清华大学,2013.
- [14] 支永艳,邓华锋,肖瑶,等.微生物灌浆加固裂隙岩体的渗流特性分析[J].岩土力学,2019,40(S1):237-244.
- [15] 彭劫,温智力,刘志明,等.微生物诱导碳酸钙沉淀加固有机质黏土的试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(4):733-740.
- [16] 王绪民,崔芮,王毓.营养盐浓度对胶结重塑泥岩试样力

学特性及微观结构的影响试验研究[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),2020(4):76-83.

T50123-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[17] 中华人民共和国建设部,土工试验方法标准;GB/

[18] 杨钻.高强微生物砂浆机理与工作性能研究[D].北京:清华大学,2013.

## Experimental Study on Denitrifying Bacteria Solidified Sand

HU Qizhi, LIU Chede, ZHUANG Xinshan

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Denitrifying microorganisms was used to carry out experiments on microbial induced calcium carbonate precipitation(MICP) grouting to solidify sand, and to determine calcium carbonate content in samples before and after curing. Unconstrained compressive strength(UCS) test, direct shear test and penetration test were carried out to comprehensively evaluate the solidification effect of the MICP of denitrifying microorganisms on sand. Research results indicate that the MICP of denitrifying microorganisms has a good effect on the solidification of sand; the Bio grouting test improves the strength parameters of the specimen and the plasticity of the soil; and the cement solution with a calcium ion concentration of 0.5 mol/L and a ratio of 1:2:2 has the best curing effect on sand. The unconfined compressive strength of the treated sand samples increased by 39.2%, the direct shear strength increased by 53.71%, and the permeability coefficient decreased by one order of magnitude. In the cement solution with the same calcium ion concentration, increasing the concentration of the nitrogen source Ca effectively increase the strength parameter; when the concentration of the nitrogen source is the same, increasing the calcium ion concentration can effectively increase the strength parameter, and has no significant effect on the permeability of the sample.

**Keywords:** denitrifying microorganism; sand solidification; strength parameter; permeability coefficient

[责任编辑:裴 琴]

(上接第 16 页)

## A Visual Navigation and Positioning Strategy for the Express Carrying Robot Based on the Improved Faster R-CNN

TIAN Xingxing, TU Lingying, ZHOU Yiru, QIN Yu

(School of Electrical and Electronic Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Aiming at the low accuracy of visual navigation positioning of the current express transportation robot, a navigation pattern with four small rectangles of different colors is designed on its preset track, and then the target area in the navigation pattern is detected by using the improved Fast R-CNN. After then, the reference corner of the target area is extracted by Harris corner detection algorithm, and the robot coordinates and deflection angle are calculated by PnP algorithm later. The improved fast RCNN is added convolution layers on basic of Faster R-CNN model. Next, candidate boxes in feature maps of the multiple convolution layers are generated, and two  $3 \times 3$  convolution kernels are used to do the convolution respectively for direct classification and regression. Finally, the simulation results show that the accuracy of the two algorithms is both 100%, but the accuracy of the improved algorithm is improved by 3%.

**Keywords:** carrying robot; visual navigation positioning; navigation pattern; Faster R-CNN

[责任编辑:张岩芳]