

# 晶核剂对CFPK改良碳酸盐渍土影响的试验研究

周详朋<sup>1,2</sup>, 任冠洲<sup>1,2</sup>, 蔡东廷<sup>1,2</sup>, 樊恒辉<sup>1,2</sup>, 孟敏强<sup>1,2</sup>, 杨秀娟<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 岩土工程研究所/特殊岩土博物馆, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 仿岩溶碳酸氢钙(CFPK)改良碳酸盐渍土具有一定效果,但是存在碳酸氢钙分解速率慢、分解不完全等问题,导致改性效果不理想。为提高CFPK的利用率,以人工配制的碳酸盐渍土作为研究对象,采用土体中预掺入碳酸钙作为CFPK反应的晶核剂,通过物理、化学、力学、微观结构等试验方法,研究碳酸钙晶核剂对CFPK改良碳酸盐渍土效果的影响。试验结果表明,随着碳酸钙晶核剂掺量的增加,CFPK分解的速率越快,分解越彻底。碳酸钙晶核剂和CFPK联合改良后,土体易溶盐含量降低,抗湿化崩解性、无侧限抗压强度、抗剪强度大大提高。综合考虑碳酸钙晶核剂最优掺量为5%。碳酸钙晶核剂诱导CFPK分解,所形成的碳酸钙晶核剂和具有胶结作用的碳酸钙的整体,对土体有填充与固化的作用,同时可吸附土中的盐分,达到提高碳酸盐渍土工程性质的效果。

**关键词:** 碳酸盐渍土;晶核剂;碳酸钙;碳酸氢钙;改性机理

中图分类号: TU448

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0088-07

## Experimental Study on the Effects of Nucleating Agent on the Improvement of Carbonate Soil by CFPK

ZHOU Xiangpeng<sup>1,2</sup>, REN Guanzhou<sup>1,2</sup>, CAI Dongting<sup>1,2</sup>, FAN Henghui<sup>1,2</sup>, MENG Minqiang<sup>1,2</sup>, YANG Xiujuan<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Geotechnical

Engineering / Museum of Problematic Rock and Soil, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The Calcium Bicarbonate From Pseudo-Karstification (CFPK) has certain effects on improving carbonate soil, but there are problems such as slow decomposition rate and incomplete decomposition of calcium bicarbonate, which leads to unsatisfactory modification effect. In order to improve the utilization rate of CFPK, the artificially prepared carbonate soil was taken as the research object, and the calcium carbonate pre-mixed in the soil was used as the nucleating agent for the CFPK reaction. Through physical, chemical, mechanical, microstructure and other test methods, this paper analyzed the effects of calcium carbonate nucleating agent on the improvement of carbonate soil by CFPK. The test results show that with the increase of calcium carbonate nucleating agent, the faster the decomposition rate of CFPK is, the more thorough the decomposition is. After the carbonate soil is improved by calcium carbonate nucleating agent and CFPK, the content of soluble salt in the soil is reduced, the resistance to wetting and disintegration, the unconfined compressive strength and the shear strength are greatly improved. The optimum dosage of calcium carbonate nucleating agent is 5%. Calcium carbonate nucleating agent can induce the decomposition of CFPK to form calcium carbonate with cementation. Together with calcium carbonate nucleating agent, it can fill and solidify the soil, and absorb the salt in the soil, so as to improve the engineering performance of carbonated saline soil.

**Keywords:** carbonated soil; nucleating agent; calcium carbonate; calcium bicarbonate; modification mechanism

收稿日期:2022-11-01

修稿日期:2022-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52079116)

作者简介:周详朋(1997—),男,硕士研究生,研究方向为特殊土的工程性质及其改良技术。E-mail: 1085752046@qq.com

作者简介:樊恒辉(1973—),男,博士,研究员,主要从事特殊土的工程性质及其机理、环境岩土工程等方面的教学和科研工作。

E-mail: yt07@nwsuaf.edu.cn

碳酸盐渍土又称苏打盐渍土,主要分布在我国东北的松嫩平原地区。据初步统计,单是松嫩平原地区就有约 220 万  $\text{km}^2$  的碳酸盐渍土<sup>[1-3]</sup>。碳酸盐渍土既含有较多的易溶盐(尤其是含有显著的苏打),土体  $\text{pH} > 9$ ,同时又有较多的交换性钠离子<sup>[4]</sup>,因此土体又有高度分散的性质<sup>[5]</sup>,对工程建设、农业种植等都造成了极其大的危害。从国内外研究进展来看,传统的物理力学改良碳酸盐渍土的方法存在耗时耗力、费用昂贵等缺点<sup>[6]</sup>,采用生物改良技术改良碳酸盐渍土存在周期长、存活率低、繁殖条件要求苛刻等问题<sup>[7-8]</sup>。化学改性碳酸盐渍土近些年来得到广泛的应用,但改良碳酸盐渍土的研究还主要停留在石灰、水泥等对环境污染比较大的改性材料<sup>[9-12]</sup>。

仿岩溶碳酸氢钙(Calcium Bicarbonate From Pseudo-Karstification,简称 CFPK)是基于溶洞钟乳石的形成机理提出的一种仿岩溶作用生成碳酸钙原理的新型加固改良土体的方法<sup>[13-14]</sup>。由于主要制备原料为二氧化碳、碳酸钙和水,因此其具有原料便宜、绿色环保等特点。高策等<sup>[15]</sup>采用抽滤风干、抽气抽滤风干的处理方式可促使碳酸氢钙更多地分解形成碳酸钙,能够快速使土水分离,提高改性效率与速率,但是碳酸氢钙没有分解彻底,仍有部分存在于澄清液中;液固比达到 4:1 以上时 CFPK 能够有效改善土体的分散性,改性效果稳定。邱维钊等<sup>[16]</sup>通过研究发现,CFPK 溶液可显著地降低膨胀土的胀缩性,并在一定程度上提高土体的抗剪强度;从改良效果及经济性等方面考虑,认为膨胀土和 CFPK 的最优配比是 1:6;但是由于碳酸氢钙溶解度低、分解不完全等原因,使得改良土体需要耗费大量的 CFPK 溶液。由此可见,CFPK 改性土体虽然具有良好的效果,但是 CFPK 的利用率不高。

本文基于晶体成核理论,拟通过在土体中预掺入碳酸钙作为晶核剂(Nucleating Agent,简称 NA)<sup>[17-18]</sup>,以期达到提升 CFPK 利用率,降低 CFPK 用量的目的,并通过物理、化学、力学以及微观结构等试验,探究碳酸钙晶核剂 NA 和 CFPK(NA-CFPK)联合改良碳酸盐渍土的效果与作用机理,为碳酸盐渍土的改良提供技术支持。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 碳酸盐渍土

选取杨凌黄土,过 5 mm 筛,加入干土质量分数

为 1% 的碳酸钠粉末,再加入足量的水制成土水悬液,充分搅拌,待自然风干,研磨后过 2 mm 筛备用。土样的基本物理性质见表 1。

表 1 土样基本物理性质

土样名称	颗粒相对质量密度	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	最大干密度 / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最优含水率 / %
盐渍土	2.71	35.2	20.3	14.9	1.78	17.0

#### 1.1.2 CFPK 溶液

将分析纯碳酸钙粉末和去离子水装进耐压容器中,打开耐压容器的排气阀门后,向耐压容器中通入二氧化碳气体,待空气排完后,关闭耐压容器的排气阀,开启自动搅拌装置,此时装置内部压力开始上升,待压力表达达到设定压力时,关闭自动搅拌装置并停止通入二氧化碳,静置 12 h~24 h,所得清澈透明液体即为 CFPK 溶液(CFPK 制备装置见图 1)。



图 1 CFPK 制备装置图

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 固液比、碳酸钙晶核剂掺量的说明

固液比是干土质量与 CFPK 溶液质量的比值,晶核剂掺量是碳酸钙晶核剂质量占干土质量的百分比。固液比过小会导致向土中加入的 CFPK 溶液过多,不利于工程实际应用,过大又起不到改性效果,综合考虑本研究将固液比固定为 1:1,碳酸钙晶核剂掺量为 0%、3%、5%、7%。

#### 1.2.2 土样制备

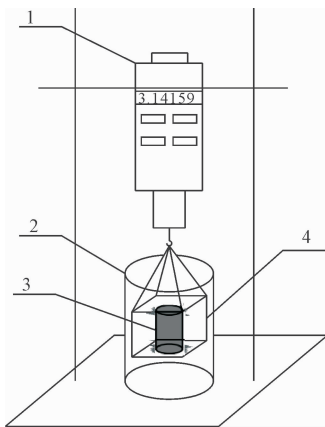
按照碳酸钙晶核剂掺量,称取一定量的碳酸钙加入碳酸盐渍土中,拌匀后按照固液比 1:1 加入 CFPK 溶液,充分搅拌后真空抽气,静置,自然风干,研磨过 2 mm 筛,得到改良土样。土样编号如表 2,以 D1 编号土为例,为每 100 g 碳酸盐渍土 + 3 g 碳酸钙晶核剂 + 100 g CFPK 溶液配制而成。

表 2 土样编号

编号	土样
A	碳酸盐渍土
B	碳酸盐渍土 + CFPK
C1/C2/C3	碳酸盐渍土 + 3%/5%/7% 碳酸钙
D1/D2/D3	碳酸盐渍土 + CFPK + 3%/5%/7% 碳酸钙

### 1.2.3 试验内容

本文涉及到的常规试验有土体电导率试验、易溶盐、离子含量测定试验、无侧限抗压试验、直接剪切试验等,均按照《土工试验方法标准》<sup>[19]</sup>(GB/T 50123—2019)进行。其中,电导率试验采用上海雷磁仪器厂生产的 DDS-11A 型电导率仪。易溶盐测定采用易溶盐总量测定(质量法)。无侧限抗压试验采用江苏永昌科教仪器制造有限公司生产的 YSH-2 型无侧限抗压仪,试样规格采用直径×高为  $\Phi 40\text{ mm} \times 80\text{ mm}$  的圆柱体。直接剪切试验采用快剪试验,试验土样规格为小环刀样(直径×高为  $\Phi 61.8\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ )。湿化崩解试验采用本团队提出的“一种可精确测定土体湿化、崩解与分散的试验装置(申请号:20120001204.8)”专利<sup>[20-21]</sup>来测量土体的水稳特性,湿化崩解试验装置见图 2。扫描电镜试验采用美国 FEI 公司生产的分辨率为 1 nm,放大倍数为 40~100 万倍的 Quanta600 FEG 场发射扫描电镜。



1 - 数显式推拉力计;2 - 烧杯;3 - 土样;4 - 网板

图 2 崩解试验装置图

## 2 试验结果分析与讨论

### 2.1 碳酸钙晶核剂掺量对 CFPK 分解速率的影响

由于 CFPK 溶液分解会生成有胶结作用的碳酸钙,因此通过测量 CFPK 溶液的电导率可反映 CFPK 的分解程度,溶液电导率越低则说明 CFPK 分解越

完全。为判断碳酸钙晶核剂是否有加速 CFPK 分解的作用,探究了在真空抽气条件下,CFPK 溶液的电导率随碳酸钙晶核剂掺量和反应时长的变化规律。试验结果见图 3、图 4。

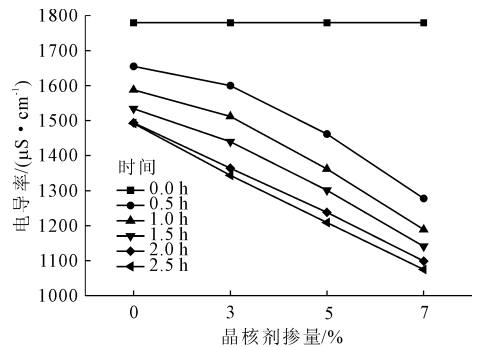


图 3 溶液电导率随晶核剂掺量的变化

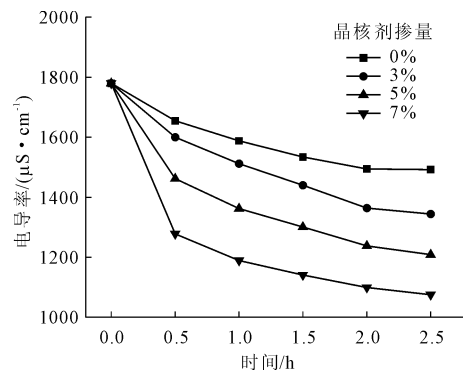


图 4 溶液电导率随时间的变化

从图 3 中可看出,碳酸钙晶核剂掺量越多,溶液电导率越低,说明 CFPK 分解的速率越快,分解越彻底,因此可表明碳酸钙晶核剂确有加速 CFPK 分解的作用。从图 4 中可发现,随着时间的增加,电导率曲线下下降变缓,达到 2 h 后趋于平缓,可见当真空抽气 2 h 后,CFPK 的分解基本结束,因此在土样制备中将真空抽气时间设定为 2 h。

### 2.2 碳酸钙晶核剂对 CFPK 分解位置的影响

由于 CFPK 分解会生成具有胶结作用的碳酸钙和二氧化碳气体,因此通过改良后土体表面气孔数量可初步判断土体内部生成碳酸钙的量,土体表面气孔越多则说明越多的 CFPK 在土体内部分解,土体表面气孔越少则说明越多的 CFPK 在土体上层的液体分解。在改良土体的过程中,只有越多的 CFPK 在土体内部分解,在土体内部生成越多具有胶结性能的碳酸钙,才能对土体有更好的改良效果,因此对试验土样抽气 2 h 后的土体表现特征进行了分析,如图 5 所示。

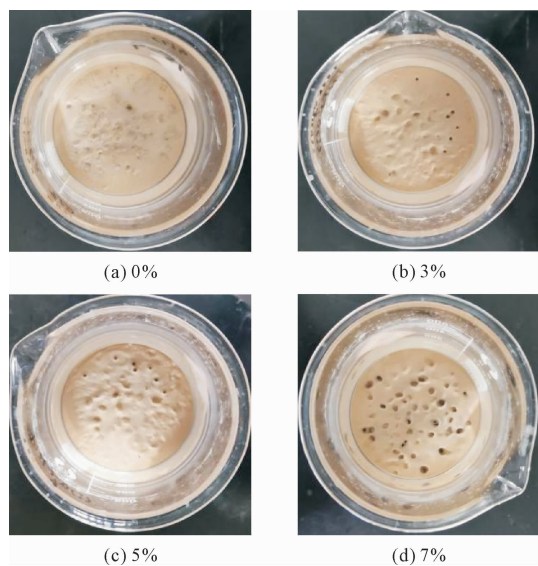


图 5 真空抽气后不同土体表现特征

图 5(a)—图 5(d) 为分别掺入 0%、3%、5%、7% 碳酸钙晶核剂后再加入 CFPK 改良的碳酸盐渍土土水悬液抽气静置后的情况,可看出随着碳酸钙晶核剂掺量的增加,土体表面的气孔也越来越多,因此证明了碳酸钙晶核剂有诱导 CFPK 分解生成碳酸钙的作用,碳酸钙晶核剂掺量越多,对 CFPK 的诱导效果越好,土体内部生成的具有胶结作用的碳酸钙也就越多。

### 2.3 易溶盐含量、电导率测定试验

通过直接测定易溶盐,可直观了解碳酸钙晶核剂对土中易溶盐含量的影响。此外,电导率是土体本身的性质,通过对土体电导率的测定也可间接反映土体中易溶盐含量的变化。因此,可通过测定土体中易溶盐含量和电导率来评价碳酸盐渍土改良效果,试验结果见图 6、图 7。

从图 6、图 7 中可看出,CFPK 改良土体的易溶盐含量和电导率均上升(B 组试验),其原因是 CFPK 本身就是碳酸氢钙溶液,向土体中加入 CFPK 后,尽管部分碳酸氢钙会分解,但是待自然风干,未分解的碳酸氢钙就会导致土体的易溶盐含量和电导率上升。碳酸钙晶核剂改良土体的易溶盐含量和电导率均有不同程度的降低(C 组试验),分析其原因为碳酸钙晶核剂具有吸附作用,加入到土体后,吸附了土体中的盐分,达到了一定改良土体的效果。

NA-CFPK 联合改良土体时,土体电导率和易溶盐含量进一步降低(D 组试验)。分析其原因,首先是碳酸钙晶核剂会促进 CFPK 分解,自然风干后,未分解的碳酸氢钙大大减少,同时土体内部生成的

具有胶结作用的碳酸钙在固化土体的同时也能吸附部分盐分,再加上碳酸钙晶核剂本身对盐分的吸附作用,因此改良效果达到最好。值得说明的是,碳酸盐渍土配制时加入的是质量分数 1% 的碳酸钠,实际测得易溶盐含量为 0.31%,主要原因是土颗粒本身会吸附一部分盐分,因此实际测得的易溶盐含量偏小。

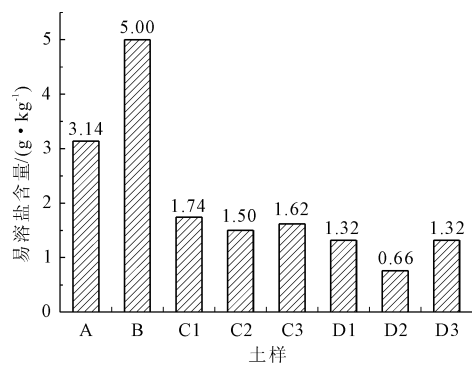


图 6 易溶盐含量测定试验结果

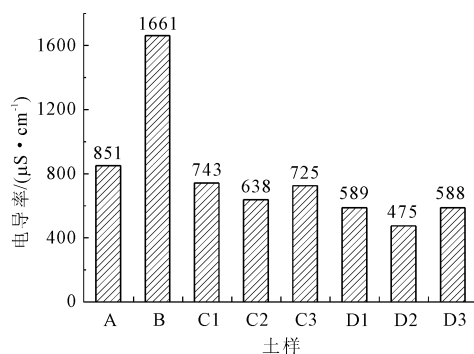


图 7 电导率测定试验结果

### 2.4 湿化崩解试验

土的湿化崩解性也是土体的一项重要指标,湿化崩解性的强弱直接影响到边坡、地基的稳定性。对试验土样进行了湿化崩解试验,土样含水率取最优含水率 17.0%、压实度取 0.98,通过不同土样湿化崩解率随时间的变化来反映土体的水稳性,结果见图 8。

从图 8 中可看出,单独使用碳酸钙晶核剂对土体的湿化崩解性几乎没有影响,而单独使用 CFPK 改良后的碳酸盐渍土完全湿化崩解时间缩短到了原来的 1/3,其原因是 CFPK 改良后的土体中会增加部分未分解的碳酸氢钙,遇水后会电离出  $\text{Ca}^{2+}$ ,这部分  $\text{Ca}^{2+}$  会置换出原本土颗粒吸附的  $\text{Na}^+$ ,根据双电层理论,会导致双电层厚度变薄,从而导致土体抗湿化崩解能力降低。因此土体完全崩解时间大大缩短。

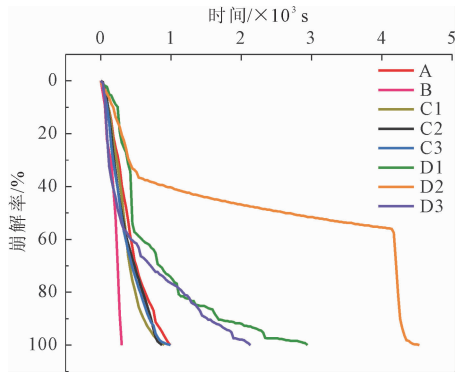


图 8 湿化崩解试验结果图

NA-CFPK 联合改良后的碳酸盐渍土 (D 组试验), 相比于只加入 CFPK 改良的土体 (B 组试验), CFPK 在碳酸钙晶核剂的诱导下, 一方面分解更完全, 土体中剩余未分解的碳酸氢钙大大减少, 同时也生成了更多具有胶结作用的碳酸钙, 这些碳酸钙有效地胶结土颗粒, 从而提升土体的抗湿化崩解能力。因此改良后土体完全湿化崩解时间有不同程度的延长, 其中当碳酸钙晶核剂掺量为 5% 时, 提升土体的抗湿化崩解能力效果最好。

## 2.5 无侧限抗压试验

无侧限抗压试验能够反映土体的抗压性能, 对试验土样进行了无侧限抗压试验, 土样含水率取最优含水率 17.0%、压实度取 0.98。不同土样应力应变曲线如图 9 所示。

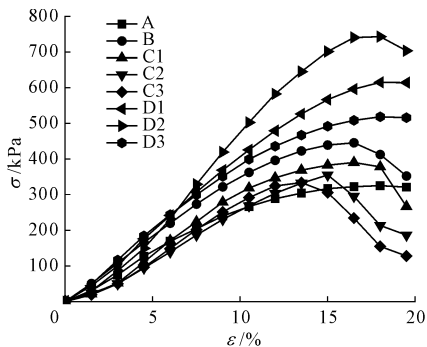


图 9 无侧限抗压试验结果图

从图 9 中可看出, 与碳酸盐渍土相比 (A 组试验), CFPK 改良碳酸盐渍土 (B 组试验) 时土体的无侧限抗压强度有一定程度的提高, 主要原因是由于 CFPK 分解生成了具有胶结作用的碳酸钙, 有效地胶结土颗粒, 提升了土体的无侧限抗压强度。

碳酸盐渍土中掺入碳酸钙晶核剂时 (C 组试验), 土体的无侧限抗压强度同样略有提升。分析原因是碳酸钙晶核剂具有填充作用, 加入到土体后

填充了土颗粒间的孔隙, 增加了土体密度, 提高了土体的无侧限抗压强度。

NA-CFPK 联合改良碳酸盐渍土时 (D 组试验), 土体无侧限抗压强度进一步提高, 一方面在碳酸钙晶核剂的诱导下 CFPK 分解生成了更多具有胶结作用的碳酸钙, 同时碳酸钙晶核剂又填充了土颗粒间的空隙, 因此对土体的无侧限抗压强度有较大的提高。与湿化崩解试验一样, 碳酸钙晶核剂掺量为 5% 时对土体改良的效果最好。

## 2.6 直接剪切试验

直接剪切试验可反应土体的抗剪强度, 同样是评价土体改良效果的重要力学指标。试验土样含水率取最优含水率 17.0%、压实度取 0.98。图 10 为不同试验土样的抗剪强度和竖向压力的关系, 并对同一试验土样在不同竖向压力下的抗剪强度数据进行一次方程拟合, 得到土样的黏聚力和内摩擦角见表 3。

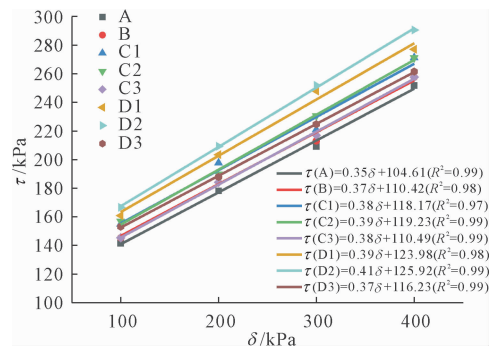


图 10 不同垂直压力下土体的抗剪强度

表 3 土体黏聚力和内摩擦角

土样	抗剪强度指标	
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
A	104.61	19.29
B	110.42	20.30
C1	118.17	20.81
C2	119.23	21.31
C3	110.49	20.67
D1	123.98	21.31
D2	125.92	22.29
D3	116.23	20.85

图 10 和表 3 表明, 在提高土体的抗剪强度方面, 改良效果依次为 NA-CFPK 联合改良 > 碳酸钙晶核剂改良 > CFPK 改良。5% NA-CFPK 联合改良土体后, 相较于未改良土体, 土体黏聚力提高了 20%。在 NA-CFPK 联合改良中 (D 组试验), 碳酸

钙晶核剂掺量为 5% 时的改良效果优于 3% 和 7%。分析其原因是当碳酸钙晶核剂掺量过低时,不能完全填充土体间的空隙;而碳酸钙晶核剂掺量过高时,在填充全部土体间空隙后,多出的碳酸钙晶核剂会改变土颗粒间的连接形式,破坏了土体内部结构,从而影响改良效果。

## 2.7 颗粒分析试验

为了了解改良前后土体颗粒组成的变化,分别对碳酸盐渍土(A)、CFPK 改良的碳酸盐渍土(B)、5% 碳酸钙晶核剂改良的碳酸盐渍土(C2)以及 5% NA-CFPK 联合改良的碳酸盐渍土(D2)进行了颗粒分析试验,试验结果如表 4 所示。

表 4 土的颗粒组成

土样	颗粒组成/%		
	<0.005 mm	0.005 mm ~ 0.075 mm	0.075 mm ~ 2.000 mm
A	13.38	81.03	5.59
B	11.45	81.68	6.87
C2	15.52	80.14	4.34
D2	12.61	75.52	11.87

由表 4 可看出,CFPK 改良碳酸盐渍土之后土体大颗粒增多,证明了 CFPK 生成的碳酸钙对土体具有的胶结能力。碳酸钙晶核剂改良碳酸盐渍土之后土体小颗粒增多,说明碳酸钙晶核剂颗粒较小,因此有填充土体内部孔隙的能力。NA-CFPK 联合改良碳酸盐渍土之后土体颗粒级配更加均匀,大颗粒进一步增多,证明了碳酸钙晶核剂有诱导 CFPK 分解生成更多具有胶结能力碳酸钙的作用。

## 2.8 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup> 含量测定试验

土体孔隙水溶液中的 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup> 的含量可直观反映不同改良方式对土体中主要阳离子含量的影响。试验结果如表 5 所示。

表 5 离子含量测定表

单位:mmol/kg

土样	A	B	C1	C2	C3	D1	D2	D3
Ca <sup>2+</sup>	2.83	4.91	2.30	1.87	2.25	4.00	3.91	4.85
Na <sup>+</sup>	52.43	74.35	41.17	36.36	40.26	40.52	30.87	39.19
Ca <sup>2+</sup> +Na <sup>+</sup>	55.26	79.26	43.47	38.23	42.51	44.52	34.78	44.04

从表 5 可看出,CFPK 改良后(B 组试验)土体 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup> 浓度上升,其原因是由于 CFPK 溶液中原本就有大量的 Ca<sup>2+</sup>,因此加入土体后会导致土体中 Ca<sup>2+</sup> 浓度上升,并且根据双电层理论, Ca<sup>2+</sup> 会置换出土颗粒吸附的 Na<sup>+</sup>,导致土体中 Na<sup>+</sup> 浓度也会上升<sup>[22-23]</sup>。

碳酸钙晶核剂改良后(C 组试验)土体 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup> 浓度降低,证明了碳酸钙晶核剂对离子具有吸附能力。NA-CFPK 联合改良后(D 组试验),土体 Ca<sup>2+</sup> 和 Na<sup>+</sup> 总含量降低,5% NA-CFPK 改良时, Ca<sup>2+</sup> 和 Na<sup>+</sup> 总含量最低,证明了 CFPK 分解生成的具有胶结性能的碳酸钙对土体中的离子有一定的包裹作用,再加上碳酸钙晶核剂本身对离子的吸附作用,因此改良效果最好。

## 2.9 扫描电镜试验

为了了解改良前后土体微观结构的变化,分析碳酸钙晶核剂、CFPK 改良碳酸盐渍土的作用机理,对试验土样进行了扫描电镜试验,结果如图 11 所示。图 11 为不同土样通过扫描电镜放大 10 000 倍后的结果。

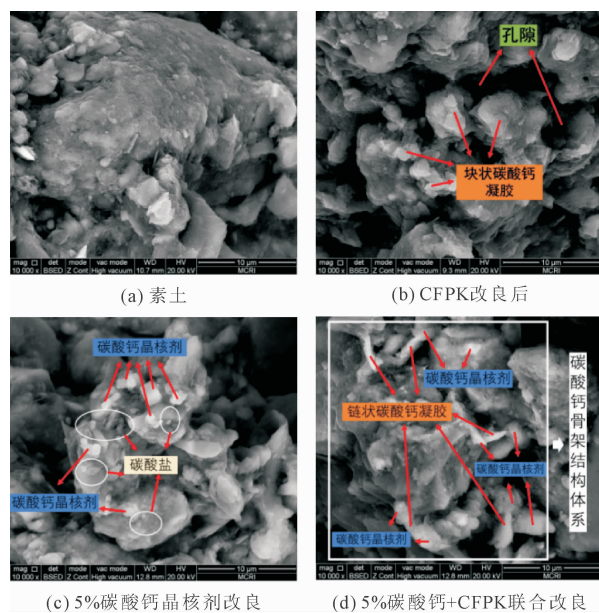


图 11 碳酸盐渍土扫描电镜试验结果

由图 11(b)可看出,CFPK 自然分解生成的具有胶结作用的碳酸钙主要是以块状结构形态存在。当碳酸钙晶核剂加入土体后(图 11(c)),土体内部孔隙明显减少,证明了碳酸钙晶核剂的填充作用。并且在碳酸钙晶核剂附近可发现有碳酸盐小颗粒,证明了碳酸钙晶核剂有吸附能力。当 NA-CFPK 联合改良碳酸盐渍土时(图 11(d)),可看到在碳酸钙晶核剂的诱导下,CFPK 分解生成的具有胶结作用的碳酸钙围绕碳酸钙晶核剂生成,将碳酸钙晶核剂之间相互连接,为链状结构。由此可见,碳酸钙晶核剂不仅有诱导 CFPK 分解的作用,而且会诱导 CFPK 分解生成的碳酸钙的结构发生变化。所以,碳酸钙晶核剂及其诱导 CFPK 分解生成的具有胶结作用的

碳酸钙,一方面对土体起到填充与固化作用,另一方面能够吸附土中的盐分,达到了提高土体工程性能的目的。

### 3 结 论

(1) CFPK 改良碳酸盐渍土时会增加土体电导率、易溶盐含量和土体  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$  浓度,分解生成的碳酸钙对土体有固化作用。碳酸钙晶核剂有加速 CFPK 分解、诱导 CFPK 在土体中分解等作用,同时其本身还具有吸附盐分、填充孔隙等作用。

(2) NA-CFPK 联合改良碳酸盐渍土时,碳酸钙晶核剂和 CFPK 起到了相互协同、优势互补的效果,CFPK 在碳酸钙晶核剂的诱导下快速分解,在土体内部生成更多的具有胶结作用的碳酸钙,同时诱导生成的碳酸钙形态从块状变为链状更有效地填充孔隙、固结土体,而且可吸附盐分,降低易溶盐含量。

(3) 在 NA-CFPK 联合改良碳酸盐渍土中,若碳酸钙晶核剂掺量过低,则一方面不能很好地填充土颗粒间孔隙,另一方面对 CFPK 的诱导作用较弱。相反,若碳酸钙晶核剂掺量过高,会破坏土体结构,降低土体的力学性能和对盐分的吸附能力,从而影响改良效果。综合考虑认为碳酸钙晶核剂最优掺量为 5%。

(4) 由于 CFPK 制备的原料为碳酸钙、二氧化碳和水,属于环境友好型材料,同时其主要生成物为碳酸钙,符合绿色发展理念。在未来的研究中需要深入研究二氧化碳和水的循环利用,以提高工作效率。

#### 参考文献:

- [1] 吴 祥. 浅谈我国盐渍土的分布、成因以及危害[J]. 农业灾害研究, 2020, 10(8): 90-91.
- [2] 杨洪涛, 安丰华, 张 璐, 等. 不同改良措施对苏打盐渍土物理性质的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3416-3424.
- [3] 冯 君, 郑庆福, 隋振民, 等. 松嫩平原苏打盐渍土表层土壤黏粒矿物的组成分析[J]. 世界地质, 2020, 39(2): 471-478.
- [4] 鲍硕超. 吉林西部季冻区盐渍土冻胀特性及三维颗粒流数值模拟[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
- [5] 王文华, 王 清, 张 静, 等. 吉林省西部碳酸盐渍土基本性质试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(2): 217-224.
- [6] 胡 争, 陈克政, 黄 帅, 等. 洗盐对碳酸盐渍土的物理特性影响[J]. 森林工程, 2021, 37(5): 105-110.
- [7] 王文华. 吉林省西部地区盐渍土水分迁移及冻胀特性研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011.
- [8] 孔元元. 镇赉盐渍土冻融条件下水热盐运移试验及结构演变研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2017.
- [9] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 141-146, 152.
- [10] 张森鑫, 孙剑飞, 张晓东, 等. 应用木质素磺酸钙-粉煤灰对寒区碳酸盐渍土力学性能的改良[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(10): 96-100, 107.
- [11] Ustun Sahin, Fatih Mehmet Kiziloglu, Almujtaba Hass-balrassol Muhammed Abdallah, et al. Use of a stabilized sewage sludge in combination with gypsum to improve saline-sodic soil properties leached by recycled wastewater under freeze-thaw conditions[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 274: 111171.
- [12] 周纯秀, 崔洪海, 张中丽, 等. 改良碳酸盐渍土路基填料的力学性质[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 93-100.
- [13] 曹建华, 蒋忠诚, 袁道先, 等. 岩溶动力系统与全球变化研究进展[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 874-900.
- [14] 王国亭, 程立华, 孟德伟, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系古岩溶型碳酸盐岩致密储层特征、形成机理与天然气富集潜力[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 685-695.
- [15] 高 策, 杨秀娟, 邱维钊, 等. 仿岩溶碳酸氢钙改性分散性土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1565-1572.
- [16] 邱维钊, 杨秀娟, 陶 然, 等. 仿岩溶碳酸氢钙改良膨胀土试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 106-111.
- [17] 胡瑞柱, 黄廷林, 刘泽男. 碳酸钙诱导结晶动力学影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3584-3589.
- [18] 姜欣欣. 碳酸钙结晶动力学研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2015, 30(6): 89-92, 11.
- [19] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [20] 陈 华, 樊恒辉, 聂 勇, 等. 土-水-电解质系统作用下黏性土的分散性研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(4): 128-138.
- [21] 贺智强, 樊恒辉, 王军强, 等. 木质素加固黄土的工程性能试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 731-739.
- [22] 陈 华, 樊恒辉, 路立娜, 等. 黏性土的分散性判别及机理分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(2): 149-155.
- [23] Zhou Qi, Du Tao, Guo Lijie, et al. Role of internal stress in the early-stage nucleation of amorphous calcium carbonate gels[J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4359.