

DOI: 10.11779/CJGE202108023

仿岩溶碳酸氢钙改性分散性土的试验研究

高 策, 杨秀娟, 邱维钊, 樊恒辉*, 刘 竞, 王俊杰

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 分散性土具有遇水分散流失的工程特性, 常采用石灰、水泥等对其进行改性处理, 但这些改性材料对环境容易造成一定的破坏。通过针孔试验、碎块试验、双比重计试验以及扫描电镜试验、能谱分析试验等, 研究了基于岩溶作用形成的碳酸氢钙溶液改性分散性土的影响因素及其作用机理。试验结果表明, 采用抽滤或抽气的土水分离方式能够保证碳酸氢钙分解程度高, 改性速率快, 改性效果好。当仿岩溶碳酸氢钙溶液与分散性土的质量比为4:1时, 分散性土被改性为非分散性土。仿岩溶碳酸氢钙溶液加入到分散性土中后, 增加了土体中钙离子的含量, 降低了土体的碱性, 新生成的碳酸钙具有填充和胶结作用, 提高了土的抗水性, 降低了土的分散性。研究表明, 仿岩溶碳酸氢钙不仅具有环境友好的特点, 而且能有效改性分散性土。

关键词: 分散性土; 岩溶作用; 碳酸氢钙; 碳酸钙; 改性机理

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)08-1565-08

作者简介: 高 策(1995—), 男, 硕士, 主要从事特殊土的工程性质及其改良技术方面的研究工作。E-mail: gaoce888@outlook.com。

Stabilized dispersive soil with calcium bicarbonate formed by pseudo-karstification

GAO Ce, YANG Xiu-juan, QIU Wei-zhao, FAN Heng-hui, LIU Jing, WANG Jun-jie

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The dispersive soil has the engineering characteristics of dispersivity and loss in water. It is often stabilized by lime, cement, etc. But these stabilized materials are easy to cause certain damage to the environment. Through the pinhole tests, the crumb tests, the double-hydrometer tests, the scanning electron microscope tests and the energy spectrum analysis tests, the influence factors and the mechanism of the stabilized dispersive soil with calcium bicarbonate formed by pseudo-karstification are studied. The test results show that the separation of soil and liquid by suction filtration or suction can ensure the high decomposition degree of calcium bicarbonate, the fast modification rate and the good modification effect. When the mass ratio of karst calcium bicarbonate solution to dispersible soil is 4:1, the dispersive soil is modified into the non-dispersive soil. After the calcium bicarbonate solution by pseudo-karstification is added to the dispersive soil, the content of calcium ions in the soil increases, and the alkalinity of the soil decreases. The newly-generated calcium carbonate has a filling and cementing effect to improve the water resistance of the soil and to reduce its dispersivity. It has shown that the calcium bicarbonate solution by pseudo-karstification has the characteristics of environmental friendliness and can effectively stabilize the dispersive soil.

Key words: dispersive soil; karstification; calcium bicarbonate; calcium carbonate; stabilized mechanism

0 引 言

分散性土是一种在水力坡降很低条件下由于土颗粒间的排斥力超过吸引力而导致土体产生分散流失的黏性土^[1-2]。它的抗冲刷能力低, 渗透稳定性差, 在雨水侵蚀、河水冲刷及土层中渗流水的作用下, 土体颗粒之间的黏聚力大部分甚至全部消失, 呈团聚状的颗粒体分散成原级的黏土颗粒, 土体原有的强度被破坏, 在工程中容易发生管涌破坏或淋蚀破坏^[3-5]。因此, 若在工程实践中发现分散性土, 则必须进行处理。常用

的分散性土处理方法可大致分为物理保护、化学改性等。对于物理保护方法, 在施工方案上多将分散性土与水进行物理隔离, 封堵土体渗流通道, 如采用防渗土工膜等渗透系数较小的材料覆盖到分散性土的表面使其与水体隔离, 设置适当级配的反滤层减少土体细

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703); 国家自然科学基金项目(52079116, 51579215, 51379177)

收稿日期: 2020-09-14

***通信作者** (E-mail: yt07@nwsuaf.edu.cn)

颗粒的流失等方法。对于化学改性方法，则多采用具有胶结性能或含有高价态离子的改性材料，这些改性材料加入土后发生诸如水化水解反应、团粒化作用、碳酸钙反应、阳离子交换反应等。常用的改性材料包括石灰^[6-7]、水泥^[8]、粉煤灰^[9-10]和炉渣^[11]。随着研究的深入与材料科学的发展，人们在分散性土改性的研究中还使用无机盐^[12]、木质素磺酸盐^[13]、纳米黏土^[14]和 MICP 技术^[15]等。

目前，由于生态环境越来越受到重视，人们逐渐认识到，常规的土体改性材料，如水泥和石灰，不仅原材料开采对环境造成破坏，而且在生产过程中会消耗大量的能源。因此，岩土工程师非常关注环境友好型土体改性材料的研制与应用。本文基于黏性土的分散机理研究和岩溶作用中碳酸氢钙与碳酸钙的相互转化过程，提出一种仿岩溶碳酸氢钙改性分散性土的方法。通过物理化学以及微观结构等试验，探究碳酸氢钙溶液与土体混合后，土水悬液的电导率、分散性土的分散性、颗粒级配、酸碱度、微观结构和元素成分的变化，研究仿岩溶碳酸氢钙改性分散性土的影响因素与作用机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

(1) 分散性土

为了研究的可靠性，本文选取的分散性土为人工配制的土样，即在杨凌黄土中加入 0.16% 的 Na₂CO₃，经过加水浸泡、风干粉碎等处理，并采用针孔试验、碎块试验、双比重计试验等对土体的分散性进行鉴定，确定土体属于分散性土^[16]。土样的基本物理化学性质见表 1、2。

表 1 土样的物理性质

Table 1 Physical properties of soil sample						
土样名称	颗粒相对质量密度	液限 w_L / %	塑限 w_p / %	塑性指数 I_p	最大干密度 ρ_{dmax} / (g·cm ⁻³)	最优含水率 w_{op} / %
分散性土	2.70	38.3	21.5	16.8	1.69	19.7

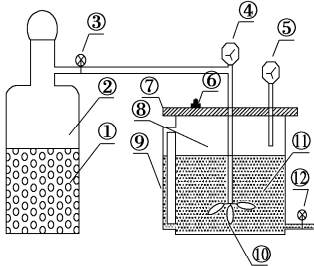
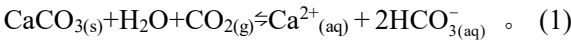
表 2 土样的化学性质

Table 2 Chemical properties of soil sample				
土样名称	易溶盐含量	难溶盐含量	有机质含量	酸碱度
	/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	
分散性土	2.3	119.6	8.4	9.78

(2) 仿岩溶碳酸氢钙

仿岩溶碳酸氢钙溶液的制备采用“一种利用土体固化溶液加固土体的方法（国家发明专利申请号：201811569453.0）”中的方法，装置示意图如图 1 所

示。将一定细度的碳酸钙粉末放入耐高压的容器中，加纯水，盖顶盖，先通入一定量的气体二氧化碳，用以排除容器中的空气。然后密封，持续通入气体二氧化碳，并维持在设定压力 0.4 MPa，在搅拌作用下经过 2 h 形成仿岩溶碳酸氢钙饱和溶液。化学反应方程式为



①—二氧化碳；②—二氧化碳气体储存瓶；③—第一阀门；④—导管中二氧化碳气体压力表；⑤—二氧化碳气体压力表和温度表；⑥—安全阀；⑦—顶盖；⑧—耐压容器；⑨—水位显示器；⑩—自旋转功能叶片；⑪—碳酸氢钙溶液；⑫—第二阀门。

图 1 仿岩溶碳酸氢钙溶液制备装置示意图

Fig. 1 Diagram of devices for calcium bicarbonate formed by pseudo-karstification

1.2 试验方法

(1) 液固比和土水分离方式的说明

液固比的定义为仿岩溶碳酸氢钙饱和溶液的质量与固体干土质量的比值，包括 0.5 : 1, 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1, 4 : 1, 5 : 1, 6 : 1 七种配比。土水分离方式包括自然风干（静置）、抽滤风干、抽气抽滤风干 3 种方式，各种处理方式的操作见表 3。

表 3 土水分离方式的操作说明

Table 3 Instructions of soil-water separation mode	
处理方式	操作说明
自然风干（静置）	将土体与碳酸氢钙溶液按不同液固比混合后，置于通风处，土水悬液中水分自由蒸发
抽滤风干	将土体与碳酸氢钙溶液按不同液固比混合后，采用真空泵进行抽滤，促使土水分离；然后将湿土土样置于通风处风干
抽气抽滤风干	将土体与碳酸氢钙溶液按不同液固比混合后，放入真空泵的饱和缸中抽气 2 h，然后再抽滤风干

(2) 试验方法

采用的主要试验包括土水悬液的电导率测定、针孔试验、碎块试验、双比重计试验、酸碱度试验以及扫描电镜与能谱分析等。

电导率试验采用上海雷磁仪器厂 DDS-11A 型电导率仪，酸碱度试验采用奥豪斯仪器（常州）有限公司 ST2100 实验室 pH 计。扫描电镜（scanning electron microscope, SEM）和能谱分析（energy dispersive spectrometer, EDS）的试验仪器为美国 FEI 公司生产的 Quanta 600 FEG 场发射扫描电镜仪，分辨率为 1

nm, 放大倍数的范围为 100~40 万倍, 其可进行物体的形貌分析和元素分析。针孔试验、碎块试验、双比重计试验分别按照 ASTM(American Society for Testing and Materials)的 D4647^[17]、D6572^[18]、D4221^[19]进行。

2 试验结果分析与讨论

2.1 不同土水分离方式对土水悬液电导率的影响

仿岩溶碳酸氢钙溶液加入土体中, 在土-水-气-电解质系统中, 由于水分蒸发、二氧化碳气体逸出、土体吸附等作用, 使得碳酸氢钙分解形成碳酸钙, 达到改性土体不良工程性质的目的(见式(1)的逆反应)。为了提高改性效率与速率, 研究了不同土水分离方式对碳酸氢钙分解形成碳酸钙的影响。

溶液的电导率与离子的种类和电解质浓度有关, 是反映水中溶解的总无机盐的浓度的重要指标。本研究对经仿岩溶碳酸氢钙溶液处理的土水悬液进行电导率测定, 间接判断不同土水分离方式对碳酸氢钙分解速度与碳酸钙生成量的影响。按表 3 的自然风干(静置)、抽滤风干、抽气抽滤风干 3 种方式进行前期处理(分别简称之为静置、抽滤、抽气)。待处理好后采用电导率仪测定澄清液的电导率, 同时各处理方法均设置对照。澄清液的电导率与液固比的关系如图 2 所示。

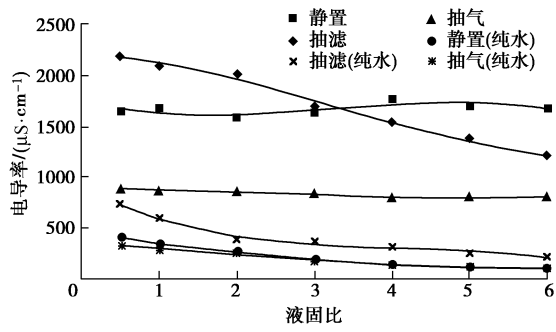


图 2 澄清液电导率与液固比的关系

Fig. 2 Relationship between clarified liquid conductivity and liquid-solid ratio

经测定, 本文制备的仿岩溶碳酸氢钙饱和溶液的电导率约 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。由图 2 可看出, 当仿岩溶碳酸氢钙饱和溶液加入一定质量的土体中后, 由于溶解了土体的可溶性物质, 包括所有的易溶盐、部分中溶盐等, 使得土体中澄清液的电导率增大。在静置的条件下, 澄清液的电导率随液固比的增加基本没有变化, 电导率约 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。在抽气抽滤条件下, 澄清液的电导率降低至 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右, 约为静置条件下澄清液电导率的 50%; 随着液固比的增加, 电导率缓慢呈下降趋势。在抽滤条件下, 随着液固比逐渐增大, 澄

清液的电导率呈明显的下降趋势, 并且抽滤的曲线与静置的曲线在液固比 3:1 和 4:1 之间相交。这由于在交点的左边由于抽滤时有部分水留在了土体中, 溶剂水的质量降低, 溶液的浓度增大, 电导率增大; 在交点的右边, 由于液固比的增加, 抽滤时间延长, 使得比较多的碳酸氢钙转化为碳酸钙沉淀, 溶液的浓度降低, 电导率下降。

对照试验的结果表明, 随着液固比的增加, 由于溶剂水质量的增加, 澄清液的浓度降低, 电导率降低。3 种处理方式中静置和抽气抽滤的电导率基本重合, 抽滤的电导率稍大, 这与抽滤导致了部分水滞留在土体中、抽气引起水体中可溶性气体减少有关。土体中加入仿岩溶碳酸氢钙饱和溶液后, 静置、抽滤和抽气抽滤 3 种处理措施下, 澄清液的电导率均高于各自的对照组电导率, 这说明仿岩溶碳酸氢钙溶液加入到土体后, 并不会完全分解形成碳酸钙, 部分未分解碳酸氢钙仍存在于澄清液中。

电导率的测定结果表明, 与自然风干(静置)相比, 抽滤风干、抽气抽滤风干的处理方式可促使碳酸氢钙较多的分解形成碳酸钙, 而且能够快速使得土水分离, 提高改性效率与速率, 但碳酸氢钙没有分解彻底, 仍有部分存在于澄清液中。

2.2 不同土水分离方式对分散性土改性效果的影响

本文采用的分散性鉴定试验包括针孔试验、碎块试验和双比重计试验。在综合判别时, 以针孔试验结果为主, 同时参考碎块试验和双比重计试验的试验结果。在采用抽滤风干的土水分离方式时, 考虑到土水悬液中溶解在水溶液中离子的流失, 同时土体酸碱度也会因土水分离发生一定变化, 而这些因素会影响分散性土鉴定试验判断的准确性, 故对抽滤风干设置纯水对照组。表 4 是按不同的液固比和土水分离方式处理后, 分散性土的分散性鉴定试验结果。

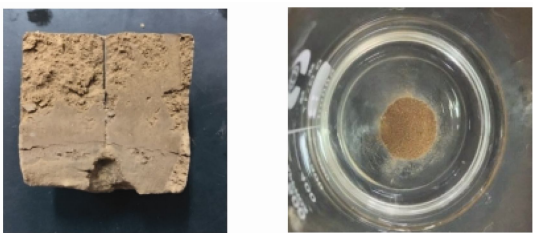
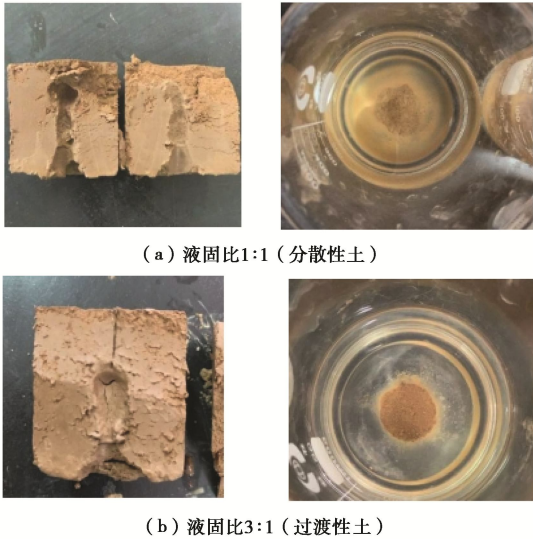
由表 4 可看出, 在自然风干(静置)处理条件下, 随着液固比的增加, 针孔试验表明碳酸氢钙改性分散性土均没有效果, 土样依然呈分散性, 但碎块试验表明土样逐渐从过渡性转变为非分散性土。这说明, 仿岩溶碳酸氢钙对于分散性土是有一定的改性效果。针孔试验和碎块试验的结果不一致, 这可能是由于土体的结构受到破坏而引起的。针孔试验是将土样风干后进行粉碎磨细重新制样, 而碎块试验是土样自然风干过程中, 在含水率较大时取自然沉积的样品进行的试验, 前者破坏了土体的微胶结, 后者保留了土体中的微胶结。在抽滤风干和抽气抽滤处理条件下, 针孔试验、碎块试验和双比重计试验表现比较一致的特性,

即随着液固比的增加，土样逐渐由分散性土转变为过渡性土，进而转变为非分散性土。典型针孔试验、碎块试验过程照片见图 3。

表 4 仿岩溶碳酸氢钙改性分散性土的试验结果

Table 4 Results of stabilized dispersive soil with calcium bicarbonate formed by pseudo-karstification					
土样 处理方式	液固比	针孔 试验	碎块试验	双比重计 试验	综合判定
自然风干 (静置)	0.5 : 1	分	过	—	分
	1 : 1	分	过	—	分
	2 : 1	分	非	—	分
	3 : 1	分	非	—	分
	4 : 1	分	非	—	分
	5 : 1	分	非	—	分
	6 : 1	分	非	—	分
抽滤风干	0.5 : 1	分	分	分	分
	1 : 1	分	分	过	分
	2 : 1	分	分	过	分
	3 : 1	过	过	过	过
	4 : 1	非	非	过	非
	5 : 1	非	非	非	非
	6 : 1	非	非	非	非
抽气抽滤 风干	0.5 : 1	分	分	—	分
	1 : 1	分	分	—	分
	2 : 1	分	分	—	分
	3 : 1	过	过	—	过
	4 : 1	非	非	—	非
	5 : 1	非	非	—	非
	6 : 1	非	非	—	非
纯水对照 组(抽滤 风干)	0.5 : 1	分	分	分	分
	1 : 1	分	分	分	分
	2 : 1	分	分	分	分
	3 : 1	分	分	分	分
	4 : 1	分	分	分	分
	5 : 1	分	分	分	分
	6 : 1	分	分	分	分

注：分表示分散性土，过表示过渡性土，非表示非分散性土。



(c) 液固比5:1 (非分散性土)

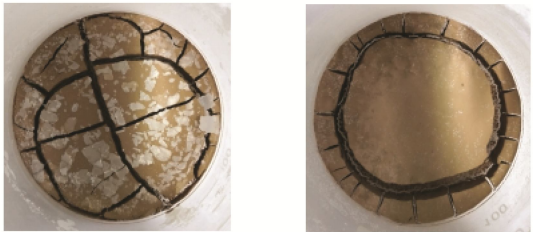
图 3 不同液固比抽滤风干处理后土样的针孔和碎块试验

Fig. 3 Pinhole and crumb tests on soil samples after suction

filtration and air-dried with different liquid-solid ratios

纯水对照组试验表明，经过纯水浸泡并采用抽滤风干处理后，土样的分散性没有发生明显的变化，依然保持较强的分散特性，即碳酸氢钙溶液浸泡土样后水对土样的分散性没有影响，而是其中的碳酸氢钙对土样的分散性具有改性效果。

值得提及的是，虽然自然风干可使碳酸氢钙溶液中的所有碳酸钙沉积在土体中，但是大部分都在土体表面，没有有效地胶结土颗粒。抽滤或抽气抽滤的处理，虽然在水中有部分碳酸氢钙没有分解形成有效碳酸钙，但是在土体中形成的碳酸钙沉积在土体内部，对土颗粒形成了有效胶结。这从水分蒸发后土体的表层特征上就可看出来（见图 4），自然风干的土体表层有一层白色的碳酸钙，抽滤和抽气抽滤后的土体表层没有白色的碳酸钙。



(a) 自然风干（静置）

(b) 抽气风干

图 4 不同处理后（液固比 4 : 1）土样干燥表面情况

Fig. 4 Dry surface conditions of soil samples after different treatments (liquid-solid ratio 4 : 1)

分散性鉴定试验表明，仿岩溶碳酸氢钙饱和溶液能够有效改善土体的分散性，随着液固比的增加，改性效果增强，液固比达到 4 : 1 以上时，改性效果稳定。采用自然风干、抽滤风干和抽气抽滤风干都有效果，但是自然风干的效果不稳定，而且改性时间长；采用抽气或抽气抽滤的方式处理效果几乎相同，而且两者比自然风干处理速度快，改性效果好。结合电导率试验结果，认为抽气抽滤处理的效果最好，抽滤次之，自然风干处理效果最慢，而且效果不甚理想。

2.3 不同液固比对土体酸碱度的影响

酸碱度与黏土分散性的有密切关系，主要表现其

影响土颗粒表面负电荷的变化,若土体碱性较强,负电荷增加,当土体中钠离子含量较高时,土颗粒表面吸附较多的钠离子,土颗粒双电层厚度增加,土体分散性增强。碳酸氢钙为强碱弱酸盐,常温常压下碳酸氢钙水溶液的 pH 为 8.13 左右,但本文制备的仿岩溶碳酸氢钙饱和溶液中,由于溶解了大量的二氧化碳,使得碳酸氢钙溶液呈微酸性 ($\text{pH}<7$)。当加入到土体中时,必定会引起土体酸碱度的变化。图 5 为采用抽滤风干处理后,不同液固比改性土的 pH 值变化情况。

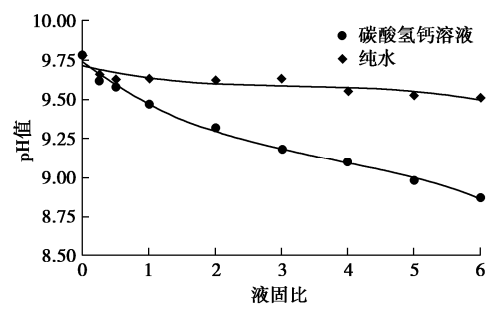


图 5 不同液固比处理后土样的酸碱度

Fig. 5 Results of pH tests with different liquid-solid ratios

图 5 表明,分散性土的 pH 为 9.78,属于强碱性土。加入碳酸氢钙溶液后,随着液固比的增加,土体的 pH 逐渐降低,在 6:1 的液固比下,土体的 pH 已由 9.78 降低至 8.98。同时在对照组的试验中可看出,随着液固比的增加,土体的 pH 逐渐降低,但降低幅度很小,在 6:1 的液固比下,其 pH 仍高于 9.5,属于强碱性土。

未经碳酸氢钙处理的土体中的 pH 值较高,土颗粒表面的净负电荷数量较大,负电荷数量的增加导致土颗粒表面双电层厚度增大,不同颗粒间的排斥力增加,碱性环境为土体的分散化提供了条件,加剧了土体的分散趋势。将碳酸氢钙溶液加入到土体中后,溶液中含有的 HCO_3^- 离子作为酸式根离子,会和土体中存在的 OH^- 离子发生反应生成正盐根离子 CO_3^{2-} 和水 H_2O 。整个反应过程中消耗了土体中 OH^- ,故随着碳酸氢钙溶液的添加逐渐增加,土体的 pH 值逐渐降低,土颗粒有效负电荷数减少,土颗粒之间的斥力减少,土体分散性降低。

2.4 不同液固比对土样颗粒组成的影响

由于常规的颗分试验中会加入分散剂并煮沸,导致改性形成的碳酸氢钙胶结的土体又重新分散,团粒结构被破坏。为了探究碳酸氢钙溶液改性后土体的颗粒组成的变化,确定团粒结构的胶结程度,结合双比重计试验方法,对抽滤风干不同液固比处理后的土样进行了非常规颗粒级配试验(即不煮沸不加六偏磷酸钠分散剂),试验结果见图 6。

从图 6 中可看出,当液固比从 0.5:1 逐渐增加时,土体中大于 0.075 mm 粒径(粉粒)的土颗粒数量质量百分数逐渐增多,黏粒的质量百分数逐渐降低。当液固比为 1:1 时,土体中的黏粒含量降低至原分散性土的一半左右;当液固比为 2:1 时,土体黏粒含量降低的幅度较大,其含量仅为 4.6%;当液固比为 3:1,4:1,5:1 和 6:1 时,土体的颗粒级配曲线变化最为显著,土体中的黏粒含量仅为 1%左右,同时土中有 95%以上的土颗粒的粒径大于 0.01 mm。

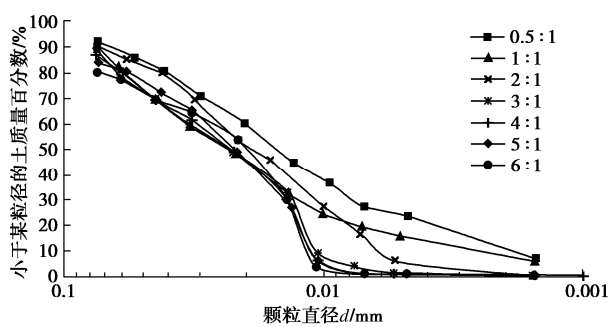


图 6 非常规的颗粒分析试验图

Fig. 6 Results of unconventional particle tests

在试验过程中发现,量筒中土水悬液的浑浊程度的区分也较为明显。图 7 为试验开始后 2 h 时量筒中土颗粒的表观特性,从左往右液固比依次为 0.5:1,1:1,2:1,3:1,4:1,5:1 和 6:1。可以看出,随着液固比的增加,土体的沉降速度逐渐增加,以 2:1 和 3:1 时的区分最为明显,当液固比大于 3:1 时,量筒中的土体发生了明显的分层,上方的悬浮澄清液中几乎不含有黏粒的悬浮物,溶液较为清澈,土水之间的界面明显。



图 7 不同液固比非常规颗粒级配试验开始后 2 h 量筒情况

Fig. 7 Results of unconventional particle tests with different liquid-solid ratios after 2 h in graduated cylinder

2.5 仿岩溶碳酸氢钙改性分散性土的机理研究

(1)仿岩溶碳酸氢钙改性分散性土的微观结构变化

对液固比为 4:1 的仿岩溶碳酸氢钙溶液自然风干沉积处理后的分散性土进行扫描电镜和能谱分析,

并以纯水作为对照处理。试验时对表面和从表面至底层的断面进行分段扫描并分析每段上钙元素的含量，从微观结构上及钙元素含量探究碳酸氢钙对分散性土的改性作用。试验结果见图 8，9 和表 5。

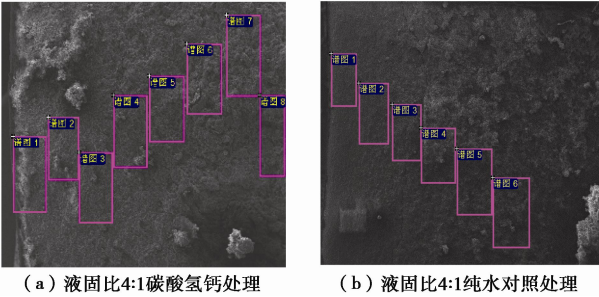


图 8 能谱分析试验位置图
Fig. 8 Location of energy spectrum analysis tests

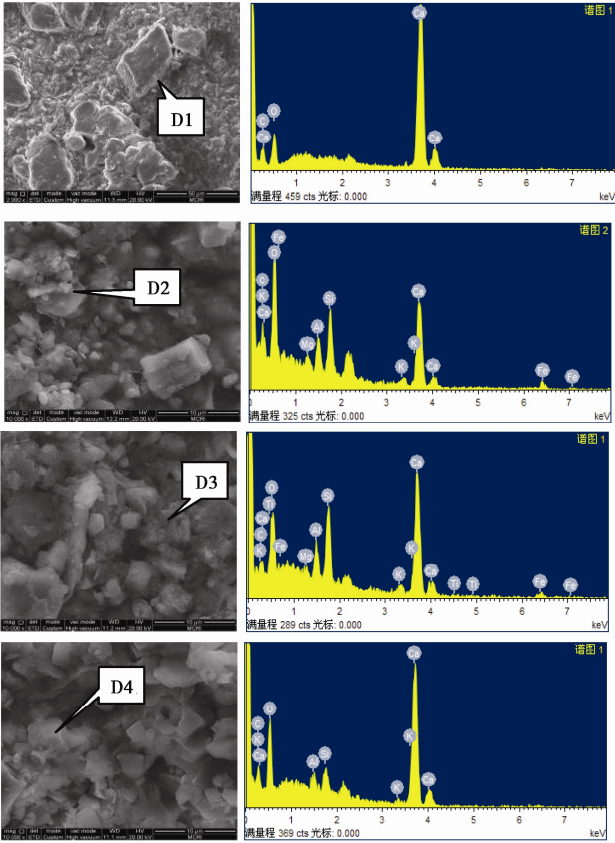


图 9 扫描电镜和能谱分析试验结果图
Fig. 9 Results of SEM and EDS tests

图 8 (a) 为碳酸氢钙的液固比为 4 : 1，土体断面的扫描电镜试验结果，谱图 1 的位置为土体的上表面，谱图 8 的位置为土体的下表面。图 b 为相同液固比的纯水处理对照组，谱图 1 的位置为土体的上表面，谱图 6 的位置为土体的下表面。表 5 为图 8 扫描电镜试验中各个对应的谱图位置点中钙元素的含量。

从图 8 中可看出，自由沉降的土体内部的层次和

结构较为清晰，在土样沉积的底层中颗粒粒径较大，从底层到表层，土颗粒的粒径越小，且上层土体较为致密，下层土体较为松散。表 8 表明，采用仿岩溶碳酸氢钙自然风干处理后，土样表层沉积的碳酸钙含量较多 (7.17%)，随着土体厚度增加，碳酸钙的含量逐渐降低，最底层土体的碳酸钙含量较少，约为 2.79%，整个土体剖面中碳酸钙含量的平均值约为 4.95%。在纯水处理的对照组中，土体表面到土体底部碳酸钙含量无明显差距和规律性的变化，整个土体剖面中碳酸钙含量的平均值约为 0.39%，明显低于仿岩溶碳酸氢钙处理后土体中碳酸钙的含量。

表 5 能谱分析钙元素试验结果

Table 5 Results of mineral analysis tests on calcium content			
谱图 (a)		谱图 (b)	
序号	Ca 含量/%	序号	Ca 含量/%
谱图 1	7.17	谱图 1	0.29
谱图 2	6.22	谱图 2	0.53
谱图 3	5.78	谱图 3	0.39
谱图 4	3.31	谱图 4	0.30
谱图 5	5.95	谱图 5	0.35
谱图 6	4.08	谱图 6	0.48
谱图 7	4.30	—	—
谱图 8	2.79	—	—
最大	7.17	最大	0.53
最小	2.79	最小	0.29
平均值	4.95	平均值	0.39

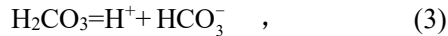
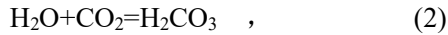
图 9 给出了土体表层和内部的局部区域扫描电镜和能谱分析的结果。可以看出，由于水分自然蒸发，导致大量碳酸钙沉积在土体表层，表层的碳酸钙呈四方棱柱型，表层有不完整的条纹。在碳酸钙含量较多的区域，晶体成片平铺在土体的表面，相互之间交错存在，形成整体覆盖在土体的表面。在土体内部形成的碳酸钙，主要以较小的晶体或凝胶状出现，能谱分析结果表明这些部位的钙元素的峰值强度较高。因此，碳酸钙通过附着在体积较大的土颗粒表面与颗粒的间隙中起填充作用，或分布在较小的颗粒周围起胶结作用，将不同粒径的土胶结起来，形成具有一定结构的团粒。

碳酸钙是土体团粒形成过程中的主要胶结物，其特点呈现出碳酸钙含量越多，团粒越大的趋势。扫描电镜和能谱分析表明，分散性土经碳酸氢钙处理后，沉积形成的碳酸钙可以单个的颗粒（晶体）或微胶结作用（无定型）存在，前者可起到物理填充作用，后者可以胶凝形式存在，将细小的土颗粒胶结起来形成团粒结构。

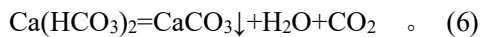
(2) 仿岩溶碳酸氢钙溶液在土体中的化学反应

基于岩溶化学、土壤化学、土壤物理学等相关理论, 可知仿岩溶碳酸氢钙溶液中存在 H_2CO_3 、 H^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和 Ca^{2+} 等离子或成分, 溶液呈微酸性。当仿岩溶碳酸氢钙溶液加入土体中后, 发生了如下的物理化学反应。

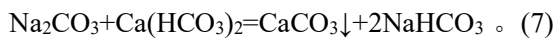
酸碱中和反应:



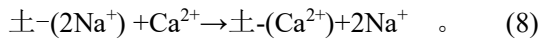
分解反应:



复分解反应:



交换吸附反应:



通过这些反应, 土体的碱性降低, 钙离子绝对量增加, 钠离子相对含量减少, 并且土颗粒吸附钙离子, 置换了吸附的钠离子, 降低了土颗粒的双电层厚度, 土颗粒的排斥力降低, 黏结力增强, 使土体的分散性降低, 水稳性增强。

综合分析认为, 土体经过碳酸氢钙溶液处理后, 降低了 pH 值, 土颗粒间双电层厚度减薄, 生成的碳酸钙可将土颗粒胶结起来, 或填充于土颗粒的孔隙中, 形成比较大的团粒结构, 提高了土体的水稳性, 降低了土体的分散性和水敏特性, 增强了土体的工程性能。

3 结 论

(1) 与自然风干(静置)相比, 抽滤风干、抽气抽滤风干的处理方式可促使碳酸氢钙较多的分解形成碳酸钙, 而且能够快速使得土水分离, 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。

(2) 仿岩溶碳酸氢钙饱和溶液能够有效改善土体的分散性, 随着液固比的增加, 改性效果增强, 液固比达到 4:1 以上时, 改性效果稳定。

(3) 仿岩溶碳酸氢钙溶液改性分散性土的机理主要是增加了土体中钙离子的含量, 降低了土体的碱性, 新沉积生成的碳酸钙具有填充和胶结作用, 提高了土体的抗水蚀性, 降低了土体的分散性。

(4) 仿岩溶碳酸氢钙溶液在制备以及改性过程中, 反应物和生成物中没有有毒有害的物质, 整个改性过程只是碳酸钙的形态发生转化, 因此是一种环境友好型的土体改性材料。在今后的研究中, 可通过采用物理、化学及生物的措施, 提高碳酸氢钙的溶解度

及沉积速率, 达到工程实践应用的目的。

参考文献:

- [1] FAN H H, KONG L W. Empirical equation for evaluating the dispersivity of cohesive soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(9): 989 - 994.
- [2] DJOKOVIC K, CAKI L, ŠUŠIĆ N, et al. Methods for assessment and identification of dispersive soils[J]. European Conference on Geotechnical Engineering, 2018, 2(2/3): 205 - 210.
- [3] 崔亦昊, 谢定松, 杨凯虹, 等. 分散性土均质土坝渗透破坏性状及溃坝原因[J]. 水利水电技术, 2004, 35(12): 42 - 45. (CUI Yi-hao, XIE Ding-song, YANG Kai-hong, et al. Character of seepage failure and collapse cause of dispersive clay homogeneous earth dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(12): 42 - 45. (in Chinese))
- [4] 樊恒辉, 李洪良, 赵高文. 黏性土的物理化学及矿物学性质与分散机理[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1740 - 1745. (FAN Heng-hui, LI Hong-liang, ZHAO Gao-wen. Relation among dispersive mechanism, physical-chemical and mineral properties of clayey soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1740 - 1745. (in Chinese))
- [5] 田堪良, 张慧莉, 樊恒辉. 分散性黏土鉴别方法及工程防治措施研究综述[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 204 - 209. (TIAN Kan-liang, ZHANG Hui-li, FAN Heng-hui. Overview on the studies of identification methods of dispersive clay and preventive measures[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 204 - 209. (in Chinese))
- [6] 李兴国, 许仲生. 分散性土的试验鉴别和改良[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(1): 62 - 66. (LI Xing-guo, XU Zhong-sheng. Identification and improvement of dispersive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(1): 62 - 66. (in Chinese))
- [7] SAVAS H. Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2016, 23(6): 589 - 598.
- [8] TURKOZ M, VURAL P. The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2013, 20(4): 395 - 405.
- [9] PREMKUMAR S, PIRATHEEPAN J, RAJEEV P. Effect of brown coal fly ash on dispersive clayey soils[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement,

- 2017, **170**(4): 231 – 244.
- [10] SAVAS H, TURKOZ M, SEYREK E, et al. Comparison of the effect of using class C and F fly ash on the stabilization of dispersive soils[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, **11**(20): 1 – 13.
- [11] GOODARZI A R, SALIMI M. Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag[J]. *Applied Clay Science*, 2015, **108**: 61 – 69.
- [12] OUHADI V R, GOODARZI A R. Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum[J]. *Engineering Geology*, 2006, **85**(1/2): 91 – 101.
- [13] VAKILI A H, KAEDI M, MOKHBERI M, et al. Treatment of highly dispersive clay by lignosulfonate addition and electroosmosis application[J]. *Applied Clay Science*, 2018, **152**: 1 – 8.
- [14] ABBASI N, FARJAD A, SEPEHRI S. The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, **36**(1): 327 – 335.
- [15] MORAVEJ S, HABIBAGAH G, NIKOOEE E, et al. Stabilization of dispersive soils by means of biological calcite precipitation[J]. *Geoderma*, 2018, **315**: 130 – 137.
- [16] 路立娜, 樊恒辉, 陈 华, 等. 分散性土单轴抗拉强度影响因素试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(6): 1160 – 1166. (LU Li-na, FAN Heng-hui, CHEN Hua, et al. Influencing factors for uniaxial tensile strength of dispersive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(6): 1160 – 1166. (in Chinese))
- [17] Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by the Pinhole Test: ASTM D4647[S]. 2020.
- [18] Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by the Crumb Test: ASTM D6572[S]. 2005.
- [19] Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer: ASTM D4221[S]. 2018.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 – 4548, 国内统一刊号 CN 32 – 1124/TU, 国内发行代号 28 – 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)