

改良花岗岩残积土进失水能力及接触角试验研究

汤连生, 刘其鑫, 孙银磊, 许瀚升

Water entrance-and-release capacity and contact angle of improved granite residual soil

TANG Liansheng, LIU Qixin, SUN Yinlei, and XU Hansheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究

A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing

侯超群, 席瑶, 孙志彬, 高可可 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 156-156

非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟

Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil

蔡沛辰, 阙云, 李显 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 54-63

上新世红土微观结构参数与渗透系数的变化关系研究

A study of the relationship between the coefficient of permeability and microstructure of the Pliocene laterite

杨玉茹, 李文平, 王启庆 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 153-160

滑带土蠕变过程及微观结构演化分析

Creep process and the microstructural evolution of sliding-zone soil

周静静, 赵法锁, 袁湘秦, 祝艳波, 宋飞 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 115-121

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity

刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 陆垂裕, 孙青言, 严聆嘉, 彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47-47

不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究

Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions

林云, 任华鑫, 武亚遵, 贾方建, 刘朋, 梁家乐 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 15-26



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111046

汤连生, 刘其鑫, 孙银磊, 等. 改良花岗岩残积土进失水能力及接触角试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 144-156.
TANG Liansheng, LIU Qixin, SUN Yinlei, et al. Water entrance-and-release capacity and contact angle of improved granite residual soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 144-156.

改良花岗岩残积土进失水能力及接触角试验研究

汤连生^{1,2,3}, 刘其鑫^{1,2,3}, 孙银磊^{1,2,3}, 许瀚升^{1,2,3}

(1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 珠海 519082; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

摘要: 花岗岩残积土的进失水能力与其软化崩解的特殊力学特性息息相关, 现有的改良土研究都着重于土体宏观力学与微观结构的变化, 忽视了固化剂对土颗粒表面性质的影响。为了探索固化剂改良后的花岗岩残积土进失水能力及三相接触角的变化规律, 开展了水滴入渗试验、接触角测量试验、进水试验和失水试验, 并结合扫描电镜和红外光谱方法, 定性及定量分析了花岗岩残积土在不同固化剂作用下微观结构和化学成分的变化规律对花岗岩残积土进失水能力的影响机制。结果表明: (1) 不同含量的改良剂能不同程度地影响花岗岩残积土表层斥水性能; 随着固化剂掺量的提高, 土体的表面斥水性增强, 三相接触角变大, 进失水能力减弱; 固化剂改良土体的效果依次为石灰、水泥、高岭土, 且改良土体的进失水能力变化与土体表面斥水性和三相接触角的变化有明显的相关性。(2) 改良花岗岩残积土进失水能力的变化由土体内部结构的改变以及表面性质的改变共同导致。(3) 水泥和石灰主要依靠离子的交换团聚作用、土壤固化剂对土颗粒的包裹作用、硬凝反应以及碳酸化作用减弱土颗粒外部的双电层及其表面自由能, 使土体斥水性和初始接触角变大; 而高岭土主要依靠自身对水分子的吸附作用, 对土体的斥水性和接触角影响不大。结果可为固化剂改变土体表面性质导致的接触角变化规律提供一定科学依据, 也为不同渗透需求的实际工程选取改良剂提供一定参考。

关键词: 花岗岩残积土; 进失水能力; 微观结构; 接触角; 固化机理

中图分类号: U416.212

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0144-13

Water entrance-and-release capacity and contact angle of improved granite residual soil

TANG Liansheng^{1,2,3}, LIU Qixin^{1,2,3}, SUN Yinlei^{1,2,3}, XU Hansheng^{1,2,3}

(1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, China;
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, Zhuhai, Guangdong 519082, China;
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai, Guangdong 519082, China)

Abstract: Water entrance-and-release capacity of granite residual soil is closely related to the special mechanical properties of softening and disintegration. Existing research on the improved soil focuses on the macro-mechanical properties and variation of micro-structure of soil, and ignores the influence of curing agent on the soil surface properties. To explore the water entrance-and-release capacity of granite residual soil improved by curing agent

收稿日期: 2021-11-17; 修订日期: 2021-12-22

投稿网址: www.swdggcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877229; 42102303); 广东省自然科学基金项目(2018B030311066; 2019A1515010554); 中国博士后科学基金项目(2019M663241)

第一作者: 汤连生(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学研究。E-mail: cestds@mail.sysu.edu.cn

通讯作者: 孙银磊(1986-), 男, 博士, 博士后, 主要从事非饱和土力学研究。E-mail: sunylei@mail2.sysu.edu.cn

and the variation of three-phase antenna, the water drop infiltration test, contact angle measurement test, water inlet test and water entrance-and-release test were carried out. Combined with scanning electron microscopy and infrared spectroscopy, the influence mechanism of microstructure and chemical composition of granite residual soil under different curing agents on entrance-and-release of granite residual soil was analyzed qualitatively and quantitatively. The results show that (1) different contents of curing agent can affect the surface water repellency of granite residual soil to different degrees. With the increasing curing agent content, the surface water repellency of soil increases, the three-phase antenna becomes larger, and the water release capacity weakens. (2) The improvement effect of lime is stronger than that of cement and kaolin, and the change of water entrance-and-release capacity of modified soil is obviously correlated to the change of water repulsion and three-phase antenna. The change of water entrance-and-release capacity of improved granite residual soil is caused by the changes of soil internal structure and surface property. (3) Cement and lime mainly rely on ion exchange agglomeration, soil curing agent's wrapping effect on soil particles, hard coagulation reaction and carbonation to weaken the double electric layer and surface free energy on the surface of soil particles, so that the soil water repulsion and initial contact angle become larger. Kaolin mainly depends on its adsorption of water molecules, but it has little effect on the water repellency and contact angle of soil. The results can provide a scientific basis for the variation of contact angle caused by the change of soil surface properties by curing agent, and also provide a reference for the selection of improvement in practical engineering with different permeability requirements.

Keywords: granite residual soil; water entrance-and-release capacity; microstructure; contact angle; curing mechanism

花岗岩残积土是一种区域特殊性红土,在我国华南区域分布普遍^[1-2]。天然状态下花岗岩残积土的性质较稳定,但经过人为或工程扰动后,其在水的作用下极易发生软化崩解^[3-4]。在华南湿热多雨的气候下,作为工程用土的花岗岩残积土在浸水后容易发生滑坡、地面沉降、崩岗、崩塌等地质灾害^[5-7]。因此,防止雨水入渗,维持土体内部含水率不变对于保持花岗岩残积土性质稳定十分重要。

针对花岗岩残积土遇水软化崩解的不良特性,通常采用土壤固化剂对其进行改良加固。常用的土壤固化剂有石灰^[8]、粉煤灰^[9]以及水泥^[10-11]等,固化剂的加入除了使土体内部结构发生改变外,还会对土颗粒表面性质产生影响^[12-13]。现有的改良土研究都着重于土体宏观力学与微观结构的变化,忽视了固化剂对土颗粒表面性质的影响。表面性质与土体的进水能力有一定的相关性^[14],它的改变会影响土的亲水、斥水等性质^[15]。斥水性土的表面难以被水分湿润,能够有效阻止水分入渗,降低土体的渗透性能^[16-17]。对于遇水软化崩解的花岗岩残积土来说,土体具有较强的斥水性能能够一定程度上维持土体内部含水率的稳定,保证土体内部结构和化学成分不发生较大变化,并且有利于边坡和路基的安全防护。非饱和土力学领域中常用于研究的土体都具有亲水性,即土颗粒表

面能够被水湿润;因此,岩土材料的理论知识往往局限于亲水性土。已有学者研究发现^[18-19],亲水性土与斥水性土的力学行为具有明显差异,并且土的表面性质对固-液-气三相接触角(contact angle, CA)的影响巨大^[20],不同CA的土体其土颗粒间吸力的差异也将直接影响土体的强度特性和变形特征^[21-22]。因此,有必要定性及定量地对改良花岗岩残积土的进失水能力及CA变化规律进行分析研究。

本文从改良花岗岩残积土维持内部含水率稳定性能力的角度出发,开展水滴入渗试验、进水试验、失水试验,研究改良花岗岩残积土的进失水能力,并通过测量土颗粒表观CA的变化从宏观上解释固化剂对花岗岩残积土表面性质的影响,结合扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)和X射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)试验从微观角度揭示固化剂对花岗岩残积土进失水能力的影响机理及进失水能力与表面性质的相关性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土样为花岗岩残积土,取自中山大学珠海校区附近,取样点如图1(a)所示,取样深度均为1.0 m;采集的土样见图1(b),通过目视观察,土样颜

色以红褐色为主,含有白褐色斑点,土质不均匀。将土样风干碾碎后筛分得到土样的粒度成分(图 1)。将重塑土进行室内土工实验,其基本物理力学指标见表 1。试验所用的改良固化剂为高岭土、石灰、水

泥。高岭土规格为 1 250 目的煅烧高岭土,二氧化硅和氧化铝的质量分数分别为 53%、46%,白度 94%。石灰规格为 250 目的生石灰,氧化钙质量分数大于 99%。水泥为普通硅酸盐水泥,标号 P.O42.5。

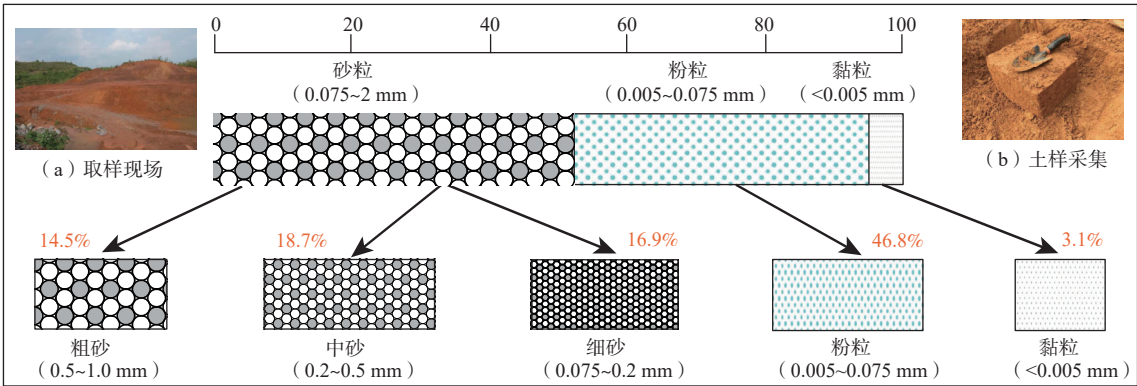


图 1 土样采集及颗粒级配

Fig. 1 Soil sampling and grain size distribution

表 1 花岗岩残积土基本物性指标

Table 1 Basic properties of granite residual soil

参数	取土深度/m	含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
数值	1.0	14.25	1.64	35.2	21.7	13.5	15	33.1

1.2 试验方法

1.2.1 水滴入渗试验

滴水穿透时间法是一种用来表征斥水性的方

法。在土体表面滴一定体积的水滴,水滴完全渗入土样的时间(water drop renetration time, WDPT)越长,土样斥水度越高。斥水性强弱的分级见表 2。

表 2 土的斥水性分级

Table 2 Water repellency grade of soils

WDPT /s	WDPT< 5	5 ≤ WDPT< 60	60 ≤ WDPT< 600	600 ≤ WDPT< 3 600	WDPT ≥ 3 600
斥水等级	亲水性	轻微斥水性	强斥水性	严重斥水性	超斥水性

将原状风干土样碾碎后经过 2 mm 筛获得土颗粒并将其密封保存;根据设计的土样含水率(w)和固化剂质量分数,称量所需要的蒸馏水和固化剂质量,并与烘干的土颗粒充分混合并搅拌均匀(5 min),制成干密度为 1.70 g/cm³的圆饼状压实土样(高 2 cm、直径

6.16 cm),并放置在恒温恒湿的养护箱中养护 48 h,试样分类及编号见表 3。采用标准滴定管,对土样表面进行滴定(每滴水滴的体积为 0.05 mL),滴定时滴管距离土样表面 5 mm,以减少水滴下落时重力作用对结果的影响,水滴从滴到土体表面至完全下渗所需要的

表 3 试样分类及编号

Table 3 Sample classification and numbering

固化剂 掺量/%	含水率/%				固化剂 掺量/%	含水率/%				固化剂 掺量/%	含水率/%			
	16±0.3	18±0.3	20±0.3	22±0.3		16±0.3	18±0.3	20±0.3	22±0.3		16±0.3	18±0.3	20±0.3	22±0.3
1	C-a1	C-a2	C-a3	C-a4	1	L-a1	L-a2	L-a3	L-a4	1	K-a1	K-a2	K-a3	K-a4
2	C-b1	C-b2	C-b3	C-b4	2	L-b1	L-b2	L-b3	L-b4	2	K-b1	K-b2	K-b3	K-b4
3	C-c1	C-c2	C-c3	C-c4	3	L-c1	L-c2	L-c3	L-c4	3	K-c1	K-c2	K-c3	K-c4
4	C-d1	C-d2	C-d3	C-d4	4	L-d1	L-d2	L-d3	L-d4	4	K-d1	K-d2	K-d3	K-d4
5	C-e1	C-e2	C-e3	C-e4	5	L-e1	L-e2	L-e3	L-e4	5	K-e1	K-e2	K-e3	K-e4

注: C代表水泥; L代表石灰; K代表高岭土。

时间为 WDPT。每种土样设计 10 组平行试验,记录 WDPT,取所测结果均值为最终结果。

1.2.2 CA 测量试验

本文利用躺滴法测量土颗粒 CA。将配置好并搅拌均匀的土样养护 48 h 后用长 4 cm 的双面胶贴于载玻片表面,并用 200 g 砝码覆盖载土玻片,静置 2 min 后除去载玻片上多余土颗粒,使载玻片上土颗粒平整均匀。仪器采用中山大学地球科学与工程学院的 CA 测定仪(型号为 OCA15EC)。仪器主要由摄像机、光学放大系统、自动注液仪、加样器、载物台、光源组成(图 2)。试验时,载物台放置样品,自动注液器可以将指定体积的液体通过加样器加载到试样表面,光源和光学放大系统对液体图像进行增强,同时摄像机进行拍摄记录。进行 CA 测试之前,先调试仪器,使加样器位于屏幕中央,让载物台、镜头和摄像机保持同一水平,且焦距适中。将吸入蒸馏水的加样器固定后,把载玻片置于载物台上,调节加样器位置,使液滴与载玻片上土颗粒表面保持近于接触的位置。然后调置参数,记录水滴在土样上下落的整个过程,并保存记录图像。从记录图像中选取水滴与土样初始接触时的合适图片进行 CA 计算。

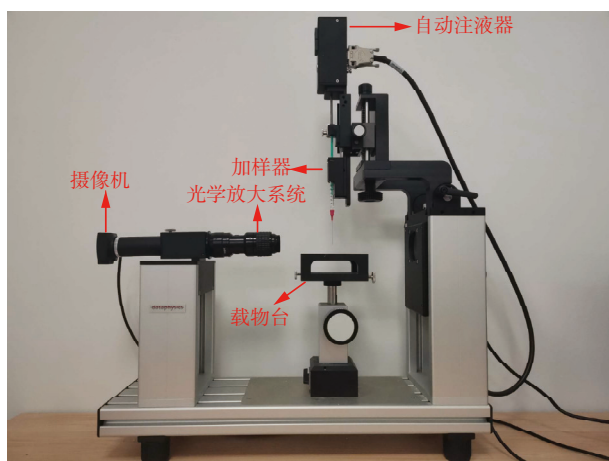


图 2 CA 测定仪

Fig. 2 Contact angle measuring devices

1.2.3 进水试验

将养护后的 22% 含水率试样(干密度为 1.70 g/cm^3)干燥至 10% 含水率,将干燥试样置于多孔网上,在 24°C 室温条件下向试样表面滴入 1 mL 蒸馏水,待水滴完全进入土体后记录 WDPT 并用精度为 0.01 g 的天平称量试样的质量,利用质量体积公式换算其含水率,并重复以上操作。试验进行 1 h 后,于 105°C 下烘干试样,称量烘干后的质量。根据质量随时间的变化

关系得到含水率变化曲线。试样在不同时间的含水率为:

$$w_i = \left(\frac{m_i}{m_d} - 1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: w_i —— i 时刻试样的含水率/%;

m_i —— i 时刻试样的质量/g;

m_d ——烘干后试样的质量/g。

1.2.4 失水试验

将养护后的 22% 含水率试样(干密度为 1.70 g/cm^3)进行抽真空饱和,将饱和试样(高 2 cm、直径 6.16 cm)置于多孔网上,在 24°C 室温条件下相隔 5 h 用精度为 0.01 g 的天平测量其质量,用质量体积公式换算试样含水率,待试样质量不变时,于 105°C 下烘干试样,称量烘干后的质量。根据质量随时间的变化关系得到含水率变化曲线。不同时间试样的含水率计算公式与式(1)相同。

1.2.5 SEM 试验

采集养护后的土样制备 SEM 微观土样,并对其剖面进行观察分析,采用液氮冷冻真空升华干燥处理土样,然后利用涂了凡士林的钢丝锯制作剪切面处的毛坯样,并用钢刀将样品加工为边长约 1 cm 的立方体,将其放在液氮瓶中迅速冷冻并转移至 -45°C 的真空冷冻干燥仪中干燥 24 h^[23]。借助 SEM(型号为 Quanta 650)观察土样的微观结构,利用 Liu 等^[24]开发的 PCAS 软件对 SEM 图像进行定量测试分析,包括孔隙、颗粒等形态特性。

1.2.6 XRD 试验

采集每次 CA 测试后的土样进行矿物成分分析(成分分析土样与扫描电镜土样在空间位置上必须接近),将土样研磨成粉末状并过 0.25 mm 筛,制成 1.0 ~ 2.0 mm 的平整试片,放入 105°C 烘箱内烘 6 h,冷却后放入室内静置 10 d,让土样充分与空气中的水汽平衡。利用中山大学测试中心的 XRD 仪(型号为 Empyrean)进行测量,试验的起始角度为 10° ,终止角度为 80° ,步宽为 0.02° ,采样时间 0.05 s,默认管压 30 kV、管流 20 mA。

2 试验结果

2.1 水滴入渗形态变化

花岗岩残积土表面水滴的形态随固化剂掺量的增大有明显的改变(图 3),含水率越大,其变化越明显。选取含水率为 22% 的试样进行形态变化分析,水滴接触素土表面后迅速向四周扩散,形成厚度较薄的

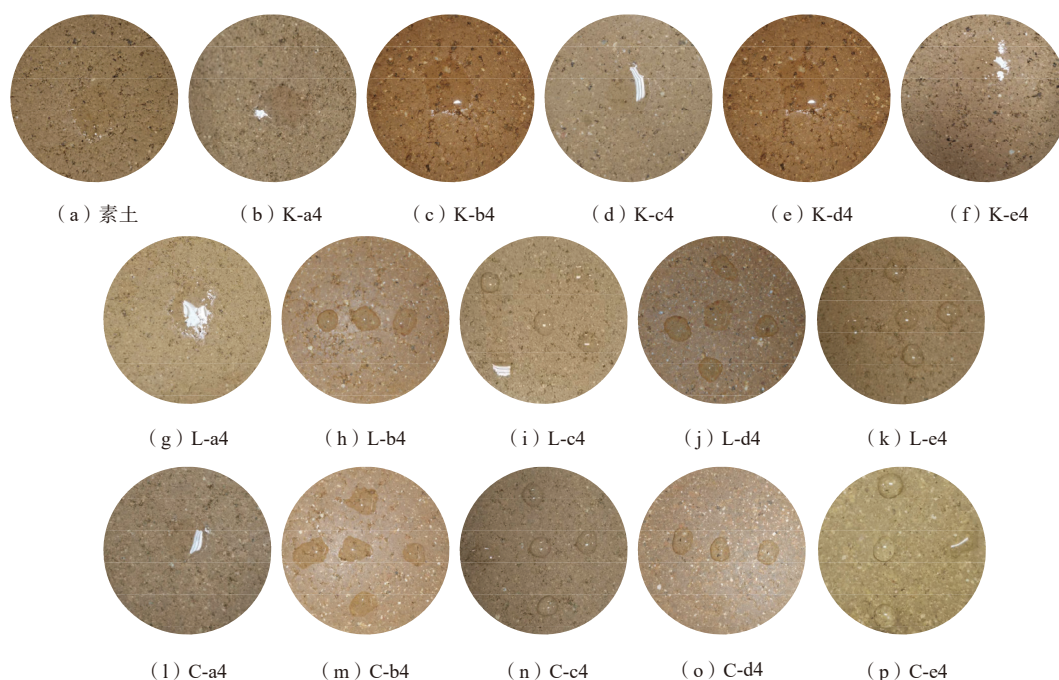


图3 含水率22%时花岗岩残积土表面的水滴形态

Fig. 3 Water droplets on the surface of granite residual soil with water content of 22%

散开状水膜,水膜在素土表面存留时间较短,该结果表明素土进水能力较强,亲水性较好。

掺入固化剂后,改良花岗岩残积土的斥水性均有所增强。高岭土改良土样表面水滴形态与素土相似,随着高岭土掺量的增加,改良土样表面水膜的扩散面积略微增大,水膜厚度变薄,表明高岭土对花岗岩残积土的进水能力影响较小,改良土样斥水性改善小,呈轻微斥水性。

石灰和水泥改良土样表面水滴形态变化规律相似,固化剂掺量越大,水滴形态变化越明显。1%固化剂改良土样表现出轻微斥水性,水滴接触土体表面后扩散面积小,水膜厚度相较素土增厚;一段时间后,水膜面积变小直至完全消失进入土体。当固化剂掺量增大到2%、3%时,土体表现出强斥水性,水滴接触土体表面后迅速稳定不再发生扩散,呈不完整球状,球体高度(h)<球体半径(r),能够长时间在土体表面保持稳定状态。当固化剂掺量达到4%、5%时,水滴呈更饱满的半球状($h \approx r$),并且稳定时间更长。石灰和水泥改良后的花岗岩残积土进水能力变弱,斥水性明显增强。

2.2 水滴入渗时间变化

改良花岗岩残积土的WDPT随含水率的增加而增大,其中水泥和石灰改良土样的WDPT随固化剂掺量的变化趋势受含水率影响较大,而高岭土改良土样

的WDPT随固化剂掺量的变化趋势受含水率的影响较小(图4)。随着固化剂掺量的增加,高岭土改良土样的WDPT减小,而石灰和水泥改良土样的WDPT增大。对比土的斥水性分级(表2)可知,高岭土改良土样呈轻微斥水性。1%、2%石灰改良土样呈轻微斥水性,而3%、4%、5%石灰改良土样可达到强斥水性。与此同时,水泥改良土样斥水性变化与含水率有直接关系,低含水率情况下,水泥改良土样呈轻微斥水性,当含水率达到20%时,2%、3%、4%、5%水泥改良的土样呈强斥水性;当含水率达到22%时,4%、5%水泥改良土样可达到严重斥水性。由此可见,高岭土对花岗岩残积土斥水性改变较小,而石灰和水泥对花岗岩残积土的斥水性改变非常大。

在同一含水率下横向比较不同固化剂对花岗岩残积土的斥水性影响效果。当含水率为16%时,试样的WDPT总体偏小,石灰改良土样的WDPT最大,且与水泥改良土样相近。当含水率为18%时,石灰改良土样的WDPT远大于水泥和高岭土改良土样。当含水率为20%时,水泥改良土样的WDPT与石灰改良土样相近,但随着固化剂掺量的增加会超过石灰改良土。而当含水率达到22%时,水泥改良土样的WDPT达到本次试验的最大值,且远大于石灰和高岭土改良土。含水率的增加使固化剂与水反应更完全,因此石灰和水泥改良土在含水率增大后WDPT都有明显增

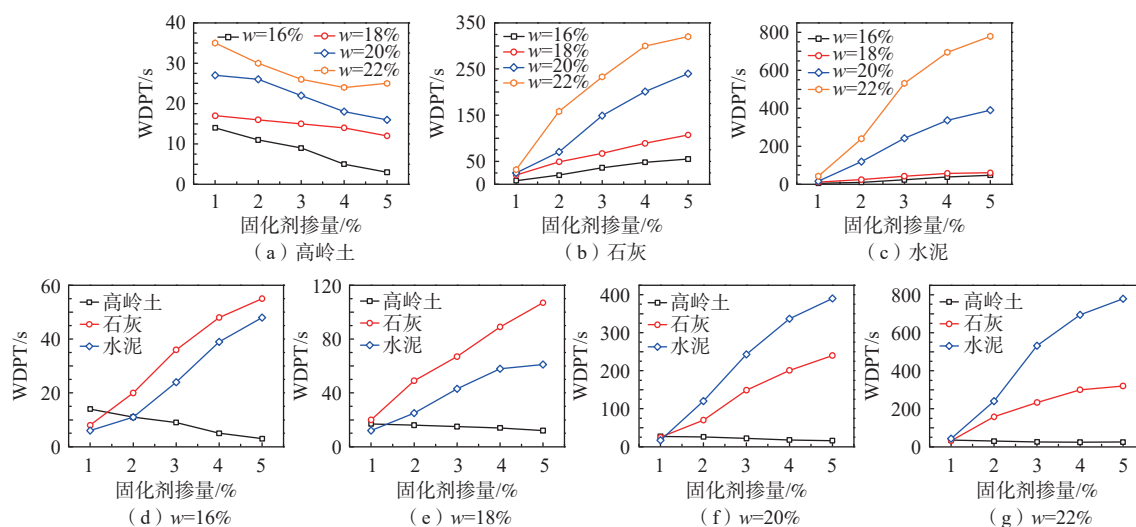


图 4 WDPT 随固化剂掺量的变化

Fig. 4 Variation of WDPT with the content of curing agent

加。高岭土改良土样的 WDPT 最小,高岭土的掺入对花岗岩残积土的斥水性影响不大。

2.3 CA 变化情况

通过躺滴法测量改良土体的 CA,其表面液滴轮廓如图 5 所示。高岭土改良的花岗岩残积土表面液滴轮廓与素土相似。当石灰与水泥的掺量为 1% 时,水膜高度较小,但能够明显与素土区分开来。当石灰和水泥的掺量达到 2%、3% 时,其水膜高度大幅度增加,与土体接触面积减小。当石灰和水泥掺量达到 4%、5% 时,水滴呈半球状($h \approx r$),其变化规律与水滴入渗试验中的水滴形态变化一致。

躺滴法测量的试验结果如图 6 所示,不同固化剂改良土样在不同含水率下的 CA 有明显差异。从总体趋势上看,3 种固化剂的掺入都使得液滴与改良土

样表面的 CA 增大,并且 CA 的大小随着固化剂掺量的加大和含水率的增大而变大。通过比较,3 种固化剂的掺量为 1% 时,其对土体表面 CA 的变化影响不大,而随着固化剂掺量的增大,石灰和水泥改良土样表面液滴的 CA 变化十分明显。2% 固化剂掺量时,液滴与石灰改良土体表面的 CA 变化最大。固化剂掺量超过 3% 时,石灰和水泥改良土样表面液滴的 CA 变化小,4% 固化剂掺量时,石灰与水泥改良土样表面液滴的 CA 接近 90° 。CA 测量试验所得到的 CA 变化总体趋势与水滴入渗法的结果基本对应。但值得注意的是,在水滴入渗试验中,高岭土改良土体的 WDPT 是随着固化剂掺量的增加而减小的,而通过 CA 测量试验,CA 是随着固化剂掺量而增大的。由此可见,水滴入渗法和 CA 测量法在一定程度上都

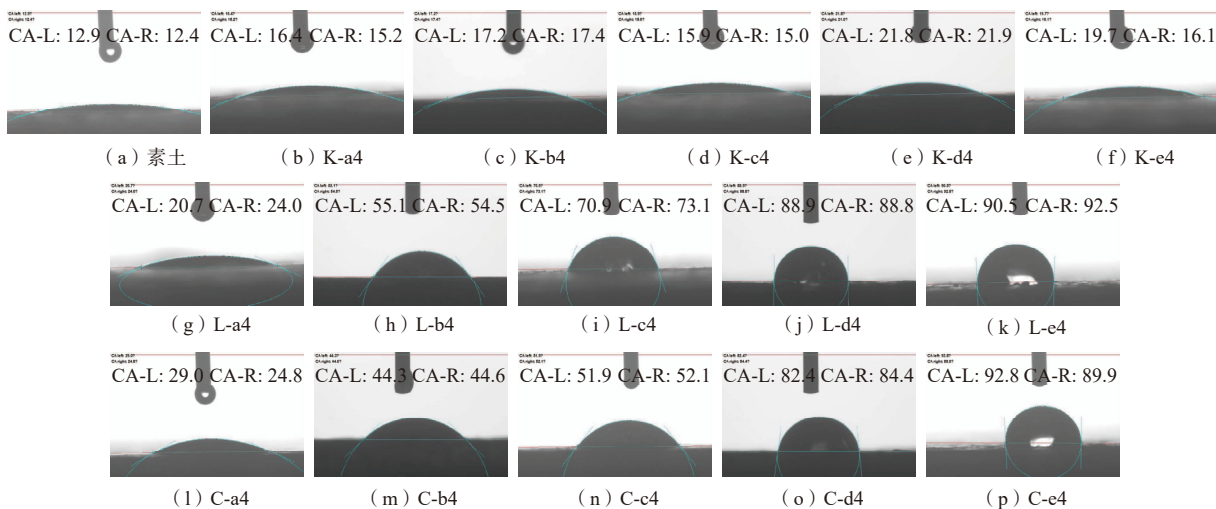


图 5 含水率 22% 时不同固化剂改良土样表面的液滴轮廓

Fig. 5 Profile showing droplets on soil surface improved by different curing agents at water content of 22%

能够反映土壤的斥水性,但这两种方法是不同的土壤斥水性评价方法,分别表示斥水持久性和斥水的强

度。同时 CA 除了能够反映土壤的斥水性特征外,在非饱和土力学中,CA 对于土中吸力也有着重要的影响。

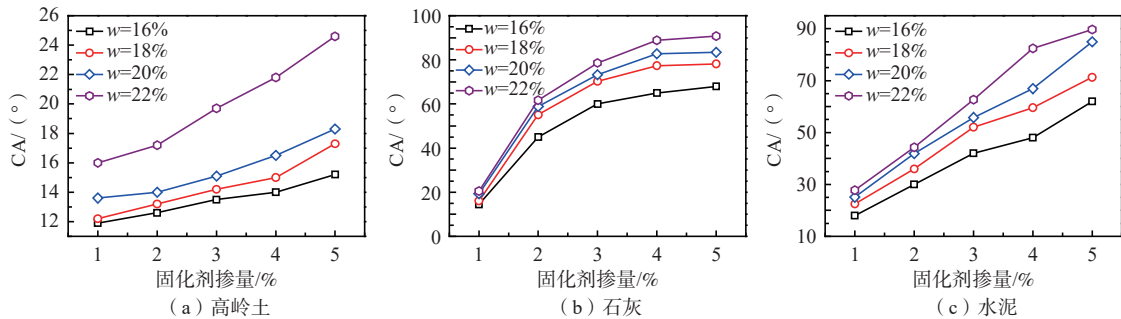


图 6 CA 随固化剂掺量的变化

Fig. 6 Changes of CA with the content of curing agent

2.4 进水试验结果

为了比较不同改良土体的进水能力,对不同固化剂改良后的干燥试样进行了进水试验,试验结果如图 7 所示。根据曲线斜率 k ,可将进水过程大致划分为剧烈变化区和线性变化区。随进水试验的进行,土样含水率变化速率减小,进水能力减弱。含水率变化越小说明固化剂对维持土体内部的干燥能力越强,进

水能力越弱。当固化剂掺量为 1% 时,高岭土和石灰改良土样的含水率变化大于素土,水泥改良土样的含水率变化不大。2% 固化剂掺量时,石灰和水泥改良土样的进水能力开始减小;3% 固化剂掺量时,其进水能力大幅度减弱,含水率变化减小且增加速率缓慢。固化剂掺量超过 4% 时,改良土样的进水能力都有所减小,石灰、水泥改良土样减小尤为明显,进水 1 h 后

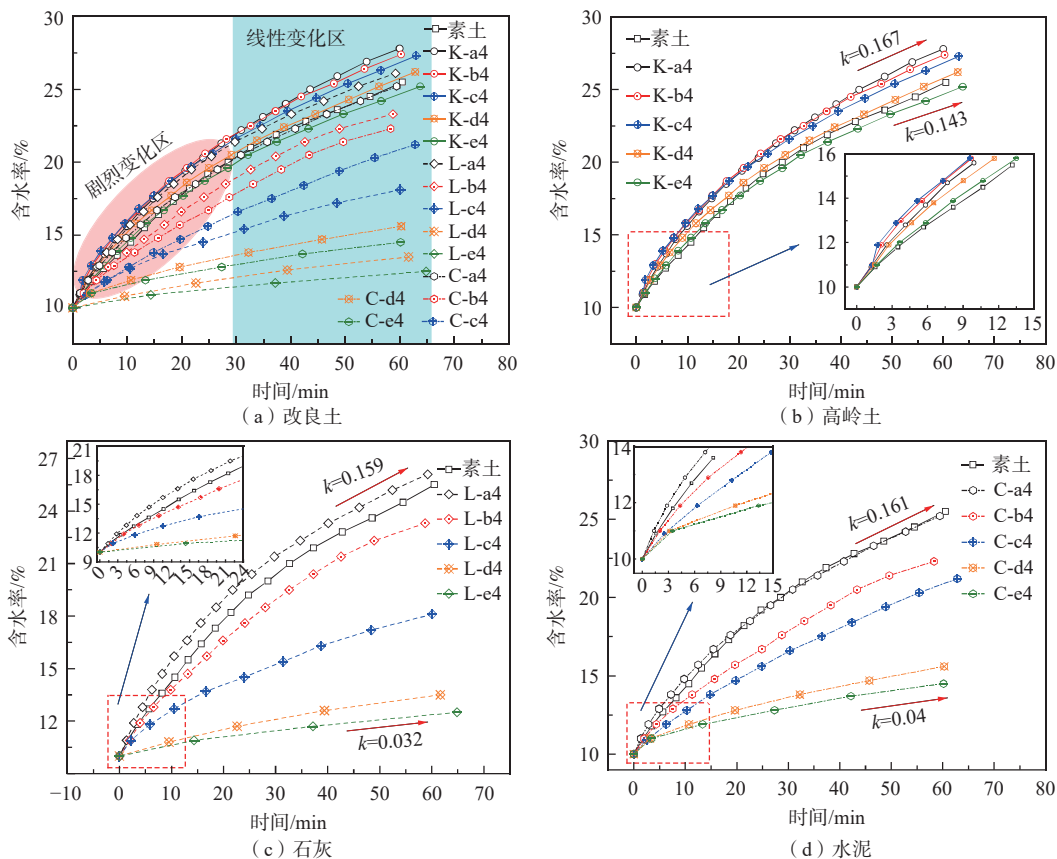


图 7 进水时土样含水率变化曲线

Fig. 7 Variation of soil moisture content with time during water inflow

含水率变化不超过 5%。对于高岭土改良土样来说,其进水能力较强,含水率变化大,当高岭土掺量小于 4% 时,其含水率变化量比素土大,而当高岭土掺量达到 5% 时,其含水率变化量略小于素土,但远高于石灰、水泥改良土样。总体来说,固化剂对土样的进水能力影响不同,高岭土对土样的进水能力改变较小,石灰和水泥会大幅度减小土体的进水能力,能够长时间维持土体内部的含水率不变,且石灰改善效果强于水泥。

2.5 失水试验结果

失水试验能够模拟出饱和和土体在自然干燥条件

下的失水能力,干燥失水时土样的含水率随时间变化结果如图 8 所示。初始时刻的含水率表示土样饱和时的含水率,称为饱和含水率。改良土样的饱和含水率随着固化剂掺量的增加而不同程度地减小,饱和含水率越小说明土体内用于进水的孔隙越少。素土的饱和含水率最高,高岭土改良土样的饱和含水率与素土相近,并随着高岭土掺量的增加饱和含水率减小。1% 掺量的石灰和水泥改良土样的饱和含水率与素土相近,当固化剂掺量超过 2% 后,改良土样饱和含水率大幅度降低,相同固化剂掺量的情况下,石灰改良土样饱和含水率高于水泥改良土样。

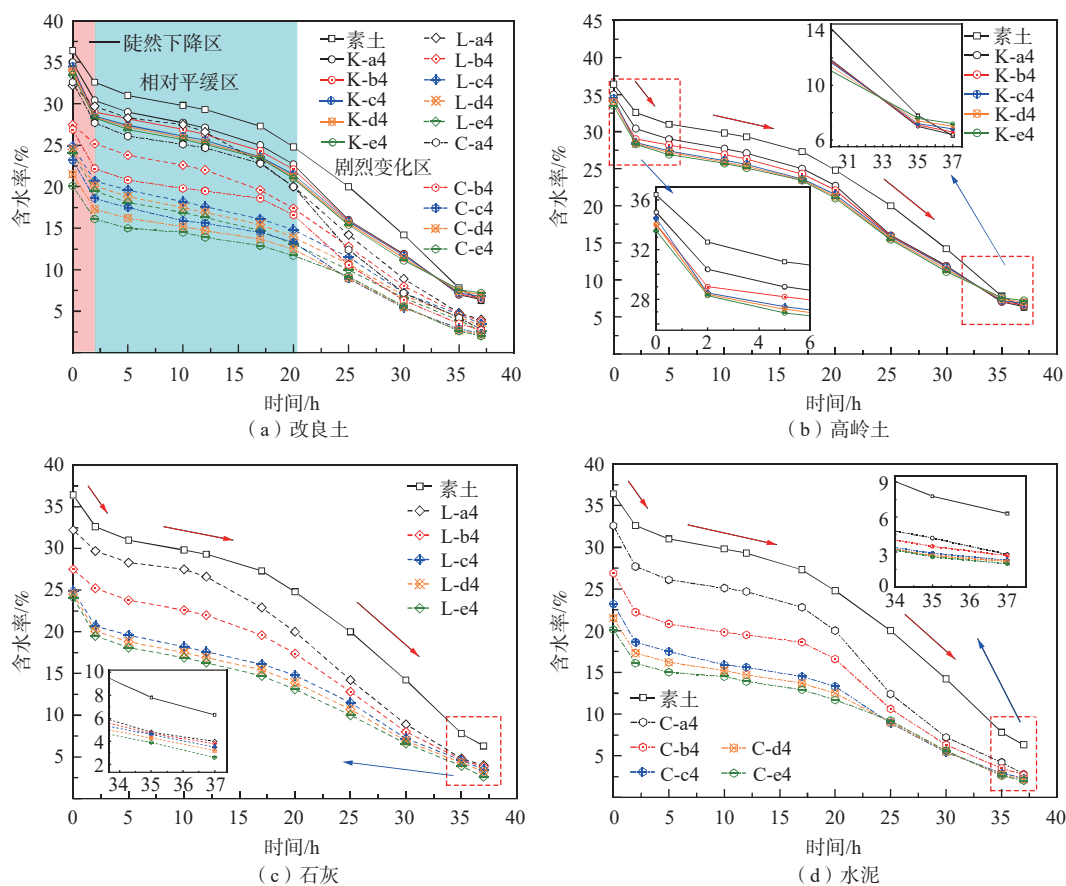


图 8 失水时土样含水率变化曲线

Fig. 8 Variation of soil moisture content with time during water loss

从含水率随时间的总体变化趋势上看,含水率降低主要呈现 3 个阶段:陡然下降阶段、相对平缓阶段和剧烈变化阶段。素土、高岭土改良土样以及 1%、2% 石灰改良土样和水泥改良土样的含水率随时间变化曲线较陡,含水率下降速度较快;而 3%、4%、5% 石灰和水泥改良土样的含水率随时间变化曲线较缓,含水率下降速度较慢。土样在室温条件下自然风

干时,土中的水不会全部蒸发,土样的含水率最终会趋于稳定,将土样质量趋于稳定时的含水率称为残余含水率。高岭土改良土样的残余含水率最高,且残余含水率随着高岭土掺量的增加而增大,其次为素土、石灰改良土样和水泥改良土样,但石灰改良土样和水泥改良土样的残余含水率随固化剂掺量的增加而降低。

3 讨论

3.1 微观结构对改良花岗岩残积土进失水能力的影响

素土的结构主要为粒状、板条状和少量的絮凝状,如图9(a)所示。其矿物集合体定向性较差,片状结构与块状结构较为疏松,有少量紧密的矿物集合体呈定向排列,矿物间存在大量的孔隙,导致素土的进

水能力强,失水速度快。对于高岭土改良土样,其矿物集合体主要呈非定向排列,矿物排列更加紧密,片状和板条状结构增多,矿物间的孔隙虽减小但仍较多,如图9(b)所示。这种结构能够在一定程度上减弱土样的进水能力,但从进水试验中得到了高岭土改良土样进水能力增大的结果,因此这种结构对花岗岩残积土进失水能力没有实质性改善。

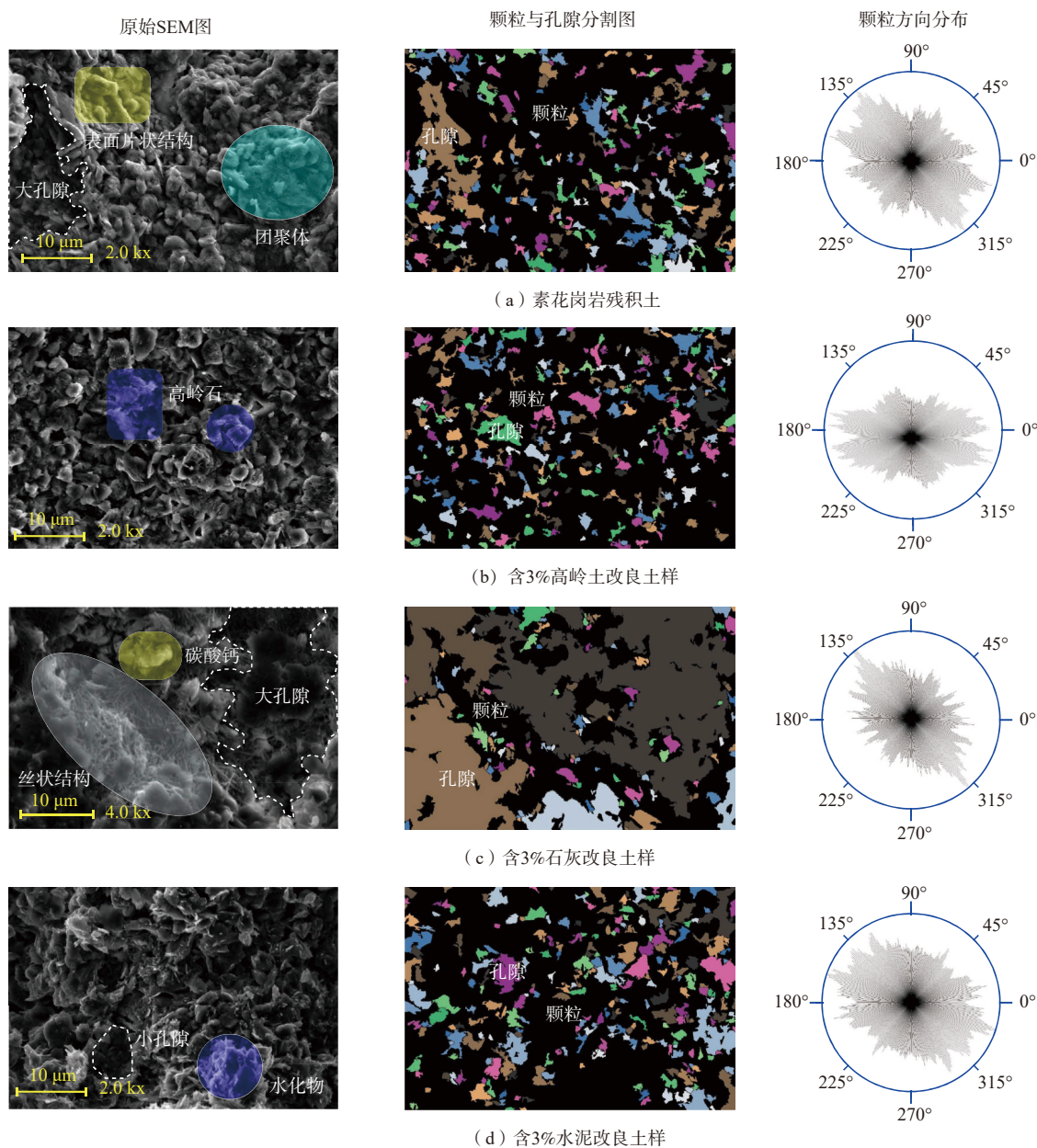


图9 试验土样SEM微观结构图

Fig. 9 SEM microstructure diagram of the test soil sample

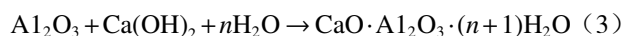
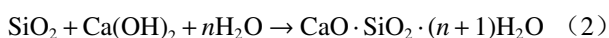
石灰改良土样由于化学作用生成了较多的网状物、柱状物等,颗粒多呈现不定向分布,如图9(c)所示。土中的 CaCO_3 对黏土颗粒起到联结或包裹的作

用,从而形成了许多集聚体,这种包裹或联结作用有效阻断了土颗粒间部分孔隙的连通,使颗粒间的排列更加连续密实,导致改良后的花岗岩残积土进水能力

变弱,失水速度变慢。水泥改善的土样也出现了类似的包裹、填充和胶结的微结构特征,如图9(d)所示。水泥在团粒化和碳酸化以及硬凝反应作用下,形成的水化物聚合物(水化硅酸钙和水化铝酸钙),增加了土体中的胶结颗粒数量。从图9中可以看出水泥改良土样土颗粒的定向性分布比较明显,密实程度远远大于其他两种类型的土。孔隙大幅度减少阻断了水分进入的通道,形成了大量的密闭空间,使得土体孔隙的连通性减弱,导致土体进水能力差,失水速度慢。失水试验结果中含水率下降的3个阶段与土体的孔隙结构有关。土体表面水分蒸发快,因此试样开始时曲线陡然下降,而后水分蒸发速度减慢,曲线进入相对平缓阶段;随着蒸发的进行,孔隙中饱和水膜厚度减小并分离,与空气的接触面逐渐增大^[25],导致蒸发速度突然加快,曲线进入剧烈变化阶段。孔隙越大水膜接触面越大,现象越明显,因此高掺量石灰、水泥改良土样的曲线较平缓,后两个阶段的曲线斜率相差较小。

3.2 化学成分对改良花岗岩残积土吸失水能力的影响

固化剂的掺入导致土体内部发生了化学反应,化学作用导致的土体结构和化学成分的变化对土体进失水能力产生影响。高岭土作为黏土矿物,其主要作用为包裹土颗粒、吸附周围介质中的离子,并不发生化学反应。由于黏土矿物呈细小的片状,比表面积较大,对土中的水分子吸附能力强,这种吸附能力比高岭土减小土体内部孔隙对花岗岩残积土进水能力的影响更大。因此,高岭土掺量增加,试样进水能力得到增强。石灰与水泥改良土内发生的化学反应相似,主要为火山灰反应和碳酸化反应,见式(2)(3)(4)^[26-27]。



火山灰反应消耗了土中的黏土矿物(SiO_2 和 Al_2O_3),使黏土矿物含量减小(图10),并且反应生成的化学物质在土颗粒表层形成包裹,填充土粒间的空隙,使土体的进水能力变弱,失水通道减小。从失水试验结果发现,残余含水率的降低与黏土矿物的含量有关。高岭土的掺入使土中黏土矿物含量增大,土中含有的大量结合水导致土体残余含水率比素土大;而水泥和石灰改良土样的残余含水率随着固化剂掺量大幅度降低,这是因为火山灰反应后黏土颗粒被钙化物包裹,

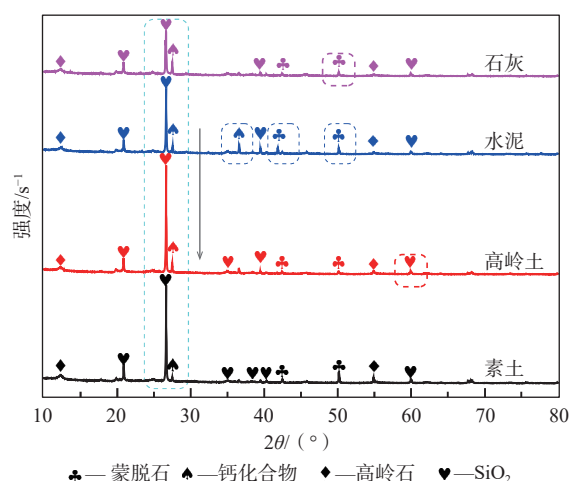


图10 改良土样的XRD谱

Fig. 10 XRD of the test soil samples

无法吸附水分子,导致土体内结合水减小。

3.3 固化剂对花岗岩残积土CA的影响机理

花岗岩残积土含有相当一部分黏土矿物,主要包括高岭石、伊利石和蒙脱石。伊利石和蒙脱石为3层结构,晶体的内聚力相对较弱,骨架非常活跃,具有较大的表面自由能^[28]。极性水分子被黏土矿物吸引后在土颗粒表面铺展开,导致水在素土表面的CA较小。固化剂作用于土体的过程中伴随着两种作用:一是土颗粒相互靠近,不同颗粒之间互相连接;二是土颗粒表面的固化剂(如水泥和石灰石)发生火山灰反应形成的水化产物能够胶结包裹土颗粒(图11)。

土颗粒表面常带有负电荷,主要依靠静电引力与其他分子结合。水泥和石灰的改良机制类似。火山灰反应催生出的高价金属阳离子能够在土颗粒表面置换低价阳离子,使其表面正电性增高,从而导致部分土颗粒表面带正电。正负相反电性的土颗粒间在静电力的作用下相互吸引,逐渐团聚,并且正电性的增高能够减弱土颗粒表层的双电层,使土颗粒对水的吸附能力变弱。石灰和水泥水化生成的稳定结晶化合物结构相对致密、且不溶于水,对土颗粒起到包裹、联结的作用,使团粒间变得更加紧密,减小了土体内部孔隙,使之成为一个具有高强度的整体。物理击实作用和化学反应作用使黏土颗粒在基本结构单元的相界面上被牢牢地粘结在一起形成致密的网状结构,从而大幅度降低土颗粒的表面自由能,导致土-水-气三相CA增大,土颗粒斥水性增强。

高岭土的改良机制与水泥、石灰不同。高岭土能够吸附周围介质中的各种离子,但是这种离子交换性能较弱,不能有效减小黏土矿物周围的静电力,土中

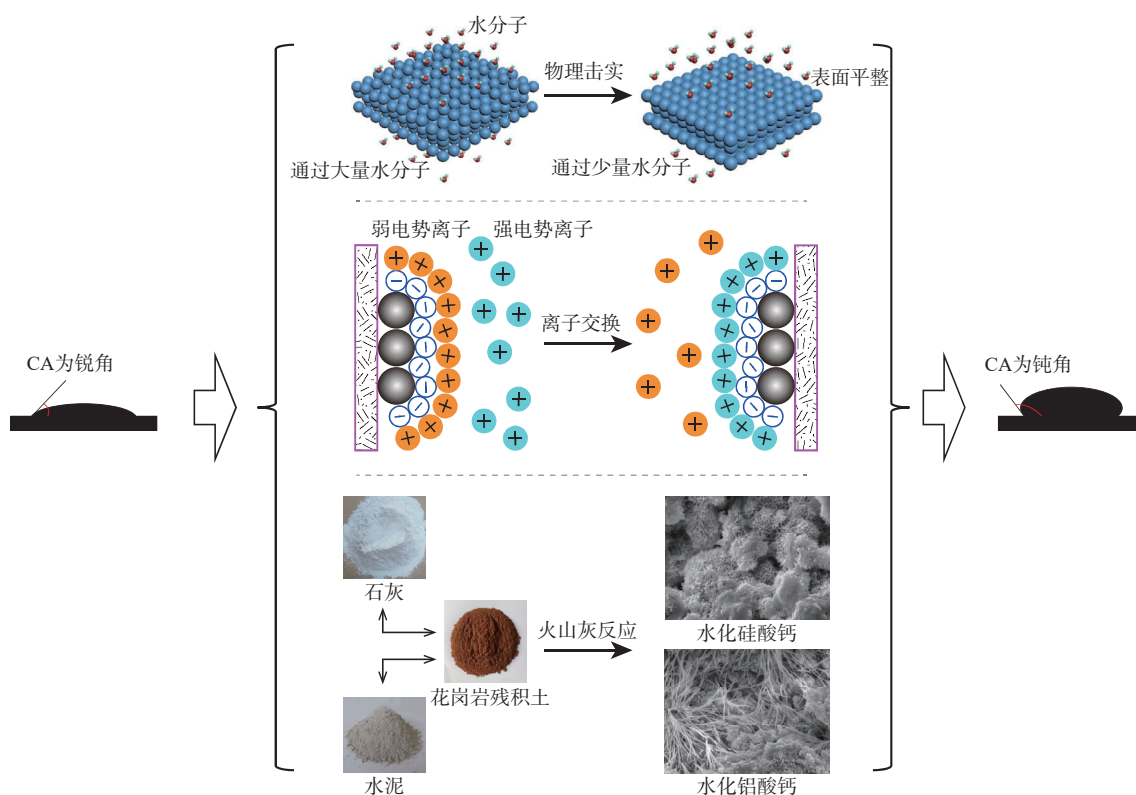


图 11 固化剂对土样 CA 影响机理

Fig. 11 Influence mechanism of curing agent on CA of the soil sample

黏土矿物对水分子的吸附作用仍然很强;但随着含水率变大,黏土矿物表层的双电层增厚,静电力对水分子的吸附作用变弱,因此高岭土改良土样的进水能力随着含水率增大而变弱。高岭土主要依靠自身的粘结性对土颗粒进行联结和包裹。相较于伊利石和蒙脱石,高岭石晶体表面自由能较低,土颗粒被高岭土包裹后,其表面自由能被一定程度的减弱;并且高岭石表面自由能会随着水的吸附而变低,因此 CA 会随着高岭土掺量和含水率的增加而增大。

4 结论

(1)固化剂和含水率均能不同程度地影响花岗岩残积土表层斥水性能。含水率为 16%、18%、20% 时,高岭土、1% 和 2% 石灰、1% 水泥改良土样呈轻微斥水性,3%、4%、5% 石灰和水泥改良后的土样可达到强斥水性;而当含水率达到 22% 时,4%、5% 水泥改良土可达到严重斥水性。

(2)改良后的花岗岩残积土土颗粒初始 CA 均有不同程度的提升,且 CA 随着固化剂掺量的提高而增大。1% 掺量时,3 种固化剂对土体初始 CA 的影响较小;2% 固化剂掺量时,石灰改良土样的初始 CA 变化最大;固化剂掺量大于 3% 后,石灰和水泥改良土样的

初始 CA 变化较小;当固化剂掺量达到 4%、5% 时,石灰、水泥改良土样初始 CA 接近 90°。

(3)石灰和水泥改良剂可减弱花岗岩残积土的进水能力,高岭土对花岗岩残积土进水能力影响较小。1% 固化剂掺量时,土体进水能力仍然较强;2% 固化剂掺量时,石灰和水泥改良的土样进水能力开始减小;当固化剂掺量超过 3% 时石灰和水泥改良土样进水能力大幅度减弱;固化剂掺量达到 4%、5% 时,石灰、水泥改良土样进水 1 h 的含水率变化不超过 5%。

(4)改良花岗岩残积土进失水能力的变化由土体内部结构的改变以及表面性质的改变共同导致。固化剂的加固机理主要包括物理成型压力作用和化学作用。水泥和石灰加固土体可减弱土颗粒表面的双电层及其表面自由能,使土体斥水性和初始 CA 变大。高岭土对土体的斥水性和接触角影响不大。

(5)本文揭示了改良固化剂通过改变土体内部孔隙结构以及土颗粒表面性质使花岗岩残积土进失水能力减弱的机理,结果可为由于固化剂改变土体表面性质引起的 CA 变化规律提供一定科学依据,也可为不同渗透需求的实际工程选取改良剂提供一定参考。土体表面性质改变后,CA 的变化对土体变形和强度的影响规律及机理还有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201 – 272. [CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201 – 272. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 孙银磊, 汤连生, 刘洁. 非饱和土微观结构与粒间吸力的研究进展[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1095 – 1122. [SUN Yinlei, TANG Liansheng, LIU Jie. Advances in research on microstructure and intergranular suction of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1095 – 1122. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 简文彬, 胡海瑞, 罗阳华, 等. 干湿循环下花岗岩残积土强度衰减试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 592 – 597. [JIAN Wenbin, HU Hairui, LUO Yanghua, et al. Experimental study on deterioration of granitic residual soil strength in wetting-drying cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 592 – 597. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王清, 唐大雄, 张庆云, 等. 中国东部花岗岩残积土物质成分和结构特征的研究[J]. 长春地质学院学报, 1991, 21(1): 73 – 81. [WANG Qing, TANG Daxiong, ZHANG Qingyun, et al. A study on the structure and composition of granite residual soil in the eastern China[J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1991, 21(1): 73 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [5] LI C S, KONG L W, SHU R J, et al. Disintegration characteristics in granite residual soil and their relationship with the collapsing gully in South China[J]. Open Geosciences, 2020, 12(1): 1116 – 1126.
- [6] KONG L W, SAYEM H M, TIAN H H. Influence of drying-wetting cycles on soil-water characteristic curve of undisturbed granite residual soils and microstructure mechanism by nuclear magnetic resonance (NMR) spin-spin relaxation time (T₂) relaxometry[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(2): 208 – 216.
- [7] 尹松, 白林杰, 李新明, 等. 压实花岗岩残积土的崩解特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 121 – 127. [YIN Song, BAI Linjie, LI Xinming, et al. Experimental study on disintegration characteristics of compacted granite residual soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(9): 121 – 127. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王章琼, 高云, 沈雷, 等. 石灰改性红砂岩残积土工程性质试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 416 – 421. [WANG Zhangqiong, GAO Yun, SHEN Lei, et al. Engineering properties of lime-modified red sandstone residual soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 416 – 421. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张桂荣, 罗紫婧, 邵勇, 等. 水泥、粉煤灰改良细砂土的工程特性与改良机理[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 128 – 132. [ZHANG Guirong, LUO Zijong, SHAO Yong, et al. Engineering characteristics and improvement mechanism of cement and fly ash improved fine sand[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(5): 128 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 费伦林, 郭利杨, 张琦, 等. 石灰与水泥改性花岗岩残积土耐久性的对比评价[J]. 交通技术, 2017, 6(5): 185 – 191. [FEI Lunlin, GUO Liyang, ZHANG Qi, et al. Comparative evaluation of durability of granite residual soil modified by lime and cement[J]. Open Journal of Transportation Technologies, 2017, 6(5): 185 – 191. (in Chinese with English abstract)]
- [11] YONG R N, OUHADI V R. Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils[J]. Applied Clay Science, 2007, 35(3/4): 238 – 249.
- [12] 刘清秉, 项伟, 崔德山, 等. 离子土固化剂改良膨胀土的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 648 – 654. [LIU Qingbing, XIANG Wei, CUI Deshan, et al. Mechanism of expansive soil improved by ionic soil stabilizer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 648 – 654. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘清秉, 项伟, 崔德山. 离子土固化剂对膨胀土结合水影响机制研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1887 – 1895. [LIU Qingbing, XIANG Wei, CUI Deshan. Effect of ionic soil stabilizer on bound water of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1887 – 1895. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王严, 胡卸文, 杨瀛, 等. 火烧迹地土壤斥水性和渗透性变化特性[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 40 – 45. [WANG Yan, HU Xiewen, YANG Ying, et al. Research on the change in soil water repellency and permeability in burned areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 40 – 45. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张光辉, 刘国彬. 黄土丘陵区小流域土壤表面特性变化规律研究[J]. 地理科学, 2001, 21(2): 118 – 122.

- [ZHANG Guanghui, LIU Guobin. Spatial and temporal variability of soil surface properties in Danangou Catchment in loess hill and hilly region[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(2): 118 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李毅, 商艳玲, 李振华, 等. 土壤斥水性研究进展[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1): 68 – 75. [LI Yi, SHANG Yanling, LI Zhenhua, et al. Advance of study on soil water repellency[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(1): 68 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈俊英, 张智韬, 汪志农, 等. 土壤斥水性影响因素及改良措施的研究进展[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 84 – 89. [CHEN Junying, ZHANG Zhitao, WANG Zhinong et al. Influencing factors and amelioration of soil water repellency[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 84 – 89. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈宇龙, 孙欢. 非饱和亲水性和疏水性砂的剪切行为[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2019, 59(12): 961 – 966. [CHEN Yulong, SUN Huan. Shear behavior of hydrophilic and hydrophobic unsaturated sands[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2019, 59(12): 961 – 966. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杨松, 吴玉琴, 周明凯. 斥水红黏土的增湿强度特性研究[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 183 – 189. [YANG Song, WU Yuqin, ZHOU Mingkai. Study on wetting strength characteristics of water repellency red clay[J]. *Soils*, 2021, 53(1): 183 – 189. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张虎元, 彭宇, 王学文, 等. 抗疏力固化剂改性黄土进失水能力研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增刊 1): 19 – 26. [ZHANG Huyuan, PENG Yu, WANG Xuewen, et al. Water entrance-and-release ability of loess soil modified by consolid system[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Sup 1): 19 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 杨松, 龚爱民, 吴珺华, 等. 接触角对非饱和土中基质吸力的影响[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 674 – 678. [YANG Song, GONG Aimin, WU Junhua, et al. Effect of contact angle on matric suction of unsaturated soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(3): 674 – 678. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 汤连生, 王思敬. 湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(1): 83 – 88. [TANG Liansheng, WANG Sijing. Absorbed suction and principle of effective stress in unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(1): 83 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 周建, 邓以亮, 曹洋, 等. 杭州饱和软土固结过程微观结构试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(6): 1998 – 2005. [ZHOU Jian, DENG Yiliang, CAO Yang, et al. Experimental study of microstructure of Hangzhou saturated soft soil during consolidation process[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(6): 1998 – 2005. (in Chinese with English abstract)]
- [24] LIU C, TANG C S, SHI B, et al. Automatic quantification of crack patterns by image processing[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 57: 77 – 80.
- [25] 吴玉琴, 杨蕊, 代启亮, 等. 无黏性土增湿-脱湿过程中接触角的特性[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 167 – 172. [WU Yuqin, YANG Rui, DAI Qiliang, et al. Contact angle characteristics of cohesionless soil during humidification and dehumidification[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(1): 167 – 172. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张齐齐, 王家鼎, 刘博榕, 等. 水泥改良土微观结构定量研究[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 92 – 96. [ZHANG Qiqi, WANG Jiading, LIU Borong, et al. Quantitative research on microstructure of modified soil with cement[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 92 – 96. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 杨志强, 郭见扬. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机理的研究[J]. *岩土力学*, 1991, 12(3): 11 – 23. [YANG Zhiqiang, GUO Jianyang. The physio-mechanical properties and micro-mechanism in lime-soil system[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1991, 12(3): 11 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 郭永春, 屈智辉, 许福周, 等. 利用原子力显微镜探针刺入测试黏土颗粒水化膜厚度的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 105 – 112. [GUO Yongchun, QU Zhihui, XU Fuzhou, et al. An experimental study of the measuring hydration film thickness of clay particles with atomic force microscope probe[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 105 – 112. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华

实习编辑: 刘真真