

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.010



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



胶结物对花岗岩残积土力学性能的影响试验研究

汤连生¹, 贺云帆¹, 孙银磊², 许瀚升¹

(1. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 云南大学 建筑与规划学院, 昆明 650500)

摘要:胶结物对花岗岩残积土的力学性质有着重要的影响。以高岭石粉、蒙脱石粉、伊利石粉、红黏土粉代替花岗岩残积土细粒制作重塑土样, 分别开展抗压、抗剪、抗拉及崩解试验, 研究不同胶结剂对土体力学强度的影响。结果表明: 经过高岭土处理的土体颗粒团聚体增多, 团聚体之间形成了强度较高的骨架结构, 但骨架间大量孔隙的存在为水的侵入提供了通道, 导致土体的吸水性增强。受益于蒙脱石的遇水膨胀特性, 其处理后的土体表面孔隙较少、结构密实, 且膨胀体提供了高强度的胶结能力, 使土体的各种力学性能得到明显改善。伊利石处理土样的各种力学强度都较低, 但土体表面看起来比较密实, 从土体表面分散的颗粒来看, 伊利石粉更多是作为细粒材料填充大颗粒之间的孔隙, 而不是作为强度较高的胶结物存在于土体颗粒之间。经过物理击实, 由于受到压缩, 颗粒之间咬合作用增强; 同时, 经过长时间的水化反应, 胶结物在颗粒表面形成桥状胶结, 在物理和化学的共同作用下, 土体的力学强度得到大幅提升。胶结物的种类会对力学性能产生极大影响, 一方面取决于其自身特性, 如蒙脱石的遇水膨胀特性, 另一方面取决于其对土体的结合作用, 土样的抗压、抗剪、抗拉及抗崩解能力受制于胶结物与土样的结合方式。

关键词:胶结物; 花岗岩残积土; 力学强度; 微观结构

中图分类号:TU443 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)02-0030-09

Influence of cement on mechanical strength of administrator residual soil

TANG Liansheng¹, HE Yunfan¹, SUN Yinlei², XU Hansheng¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, P. R. China;

2. School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650504, P. R. China)

Abstract: The cement has important influence on the mechanical properties of granite residual soil. Kaolinite powder, montmorillonite powder, illite powder and red clay powder are used to replace the fine particles of granite residual soil to remold soil samples. Compression, shear, tensile and disintegration tests are carried out

收稿日期: 2022-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(42102303、42277142、41877229、41877228); 广东省自然科学基金(2018B030311066, 2019A1515010554); 中国博士后科学基金(2019M663241); 广州市科技计划项目(201904010136)

作者简介: 汤连生(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土、特殊土研究, E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn。
孙银磊(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: sunylei@ynu.edu.cn。

Received: 2022-11-18

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 42102303, 42277142, 41877229, 41877228); National Natural Science Foundation of Guangdong Province (Nos. 2018B030311066, 2019A1515010554); China Postdoctoral Science Foundation (No.2019M663241); Guangzhou Science and Technology Project (No.201904010136)

Author brief: TANG LianSheng (1963-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interests: unsaturated soil and special soil, E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn.

SUN Yinlei (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: sunylei@ynu.edu.cn.

respectively to study the effects of different cements on the mechanical strength of soil. Results show that the soil particle aggregates after kaolin treatment are increased, and a skeleton structure with high strength is formed between the aggregates. However, the existence of large number of pores between the skeletons provides a channel for water intrusion, resulting in enhanced water absorption of the soil. Benefiting from the swelling property of montmorillonite in water, the treated soil surface has fewer pores and dense structure, and the expansive body provides high strength cementation capacity, making the mechanical characteristics of soil significantly improved. The mechanical strength of the soil sample treated with illite is low, but the soil surface appears relatively dense. From perspective of particles dispersed on the soil surface, illite powder is more used as fine material to fill the pores between large particles than as a cement with high strength between soil particles. After physical compaction, the occlusion between particles is enhanced due to compression; At the same time, after a long time of hydration reaction, the cement formed bridge cementation on the particle surface. Under the combined actions above, the mechanical strength of soil has been greatly improved. The type of cement would have a great impact on the mechanical properties. On the one hand, it depends on the characteristics of the cement itself, such as the water swelling characteristics of montmorillonite. On the other hand, it depends on the binding effect of the cement on the soil. The compressive, shear, tensile and collapse resistance of the soil samples are controlled by the binding mode of the cement and the soil sample.

Keywords: cement; granite residual soil; mechanical strength; microstructure

广泛分布于中国华南地区的花岗岩残积土,是特定地理环境、气候条件以及地质环境共同作用下的产物,被称为区域性特殊土^[1]。花岗岩残积土具有各向异性、不均匀性、扰动性以及软化崩解等特性,受到物质成分、水理因素的影响,易发生崩岗以及滑坡等地质灾害,对工程建设和生命安全的危害极大。因此,研究影响花岗岩残积土力学特性的因素显得至关重要。

直观来看,影响花岗岩残积土力学特性的因素分为外部因素和内部因素。其中,外部因素主要包括温度、湿度及人为扰动。黄真萍等^[2]从温度变化的角度,研究了饱和花岗岩残积土强度演化的温度效应及其规律;巩俊^[3]从干湿循环的角度,进一步研究了干湿循环效应下花岗岩残积土强度特性的变化规律。而内部因素主要包括矿物成分、微观结构等。周毅等^[4]从花岗岩残积土矿物成分的角度研究发现,颗粒成分的差异会直接影响土体的抗剪强度,花岗岩残积土中粗颗粒含量越少,保水性能越好,渗透系数越小,抗剪强度越高。王港等^[5]从微观结构的角度研究了花岗岩残积土压缩变形过程中微观结构的演化规律,深入分析了风化土的变形机制、结构特性及其对力学性质的影响,建立了微观结构特征与宏观力学行为的联系。研究表明,土体表现出来并被我们感知到的宏观物理力学特性都是内部因素的外在反映^[6-7]。也就是说,外部影响因素是土体产生某种特殊性质的诱因,而内部因素是最终的决定因素。土体内部的微观结构实际主要由土体的矿物成分决定^[8]。在花岗岩残积土中,主要的矿物成分是石英和黏土,石英主要构成土体的

骨架,而由黏土组成的胶结物则决定着土体最终的力学强度^[9-10]。因此,有必要探索胶结物的主要成分对花岗岩残积土力学特性的影响。

笔者采用高岭土粉、蒙脱石粉、伊利石粉以及红黏土粉代替花岗岩残积土中的细粒,通过抗压、抗剪、抗拉及崩解试验来研究不同胶结剂对土体力学强度的影响,并从微观角度揭示胶结物对花岗岩残积土力学特性的影响机理。

1 试验材料与方法

1.1 试验土样准备

试验所用土样为取自珠海市唐家湾某处边坡的花岗岩残积土,天然状态下呈红褐色。室内土工试验得到其物理力学指标,见表1。按照《土工试验规程》(JTG 3430—2020),将所取土样在干燥箱烘干24 h,碾碎后过2 mm振动筛,其粒径级配曲线见图1。剔除粒径大于2 mm的砾组和粒径小于0.075 mm的细粒组后,用蒸馏水将颗粒表面附着的黏土粉粒洗去,洗净后放入烘箱进行干燥,最后将粒径范围在0.075~2 mm之间的纯净砂粒放在密闭容器中保存,以备后续试验使用。

1.2 土样配置及力学试验方法

试验选用的胶结材料分别为红黏土粉、高岭土

表1 土样的基本物理指标

Table1 Basic physical indexes of the collected sample

| 天然密度/(g/cm ³) | 天然含水率/% | 土粒密度/(g/cm ³) | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 |
|---------------------------|---------|---------------------------|------|------|------|
| 1.97 | 16.72 | 2.54 | 59.7 | 28.3 | 31.4 |

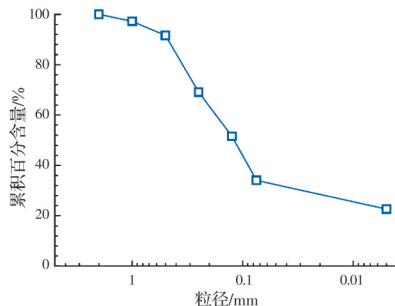


图 1 粒径级配曲线

Fig. 1 Particle size grading curve

粉、蒙脱石粉和伊利石粉。红黏土粉主要采用水分法对花岗岩残积土的黏土颗粒进行采集(粒径小于0.075 mm);而高岭土粉、蒙脱石粉和伊利石粉来自河北灵寿县(粒径小于0.075 mm)。将粒径0.075~2 mm之间的纯净砂粒与粒径小于0.075 mm的红黏土粉、高岭土粉、蒙脱石粉、伊利石粉进行混合,添加一定量的蒸馏水(拟配置成含水量为15%的重塑土样),并充分搅拌。搅拌完成后进行24 h闷料。分别添加不同的胶结材料(含量分别为10.0%、12.0%、14.0%、16.0%、18.0%)分层击实,制成抗压、抗剪、抗拉及崩解试样。为了分析胶结物对花岗岩残积土力学性质的影响,将原状花岗岩残积土烘干、碾碎后添加蒸馏水,配置成15%含水量的重塑土样。

采用万能试验机(型号:E45.105)进行抗压强度测试^[11-13],见图2(a),单轴压缩速率为1.2 mm/min。抗剪强度采用应变控制式直剪仪(型号:ZJ-4A)进行测试^[14-16]。抗拉强度采用自制的土体直接拉伸强度测试仪器进行测试^[17-19],见图2(b),仪器主要由拉伸模具、力传感器及加载装置3部分组成,原理如下:拉伸模具颈部倾斜与水平线夹角为20°时应力集中效应较小,且可保证土体总是在颈部拉断,控制拉断截面面积不变,一端固定,另一端由位移控制的加载装置进行缓慢拉动,并将位移与应力数据实时同步输入计算机。试验时,先将土体在模具中压实,然后由位移控制的加载装置缓慢拉动模具一端移动,以2.4 mm/min的拉张速率缓慢拉张,直至土样在颈部出现断裂,由传感器记录土样断裂时的峰值拉力。崩解试验采用自制的崩解测试仪进行测试^[20],见图2(c),崩解筒的内径为200 mm、高度为400 mm,崩解筒内蒸馏水的高度为300 mm。在崩解筒外部设置高速摄像机,记录整个崩解过程中土样的变化情况,由于崩解过程中土样不断崩解破坏,已经崩解完成的土颗粒会沉入崩解桶底部,导致电子称读数增大。称量崩解土样的初始重量后,

将其放在土样托台上,托台上端挂在电子秤上,然后将托台浸入水中(保证土样完全被水淹没),多个崩解桶同时进行崩解,并利用摄像机记录崩解过程,等土样完全崩解后停止试验。

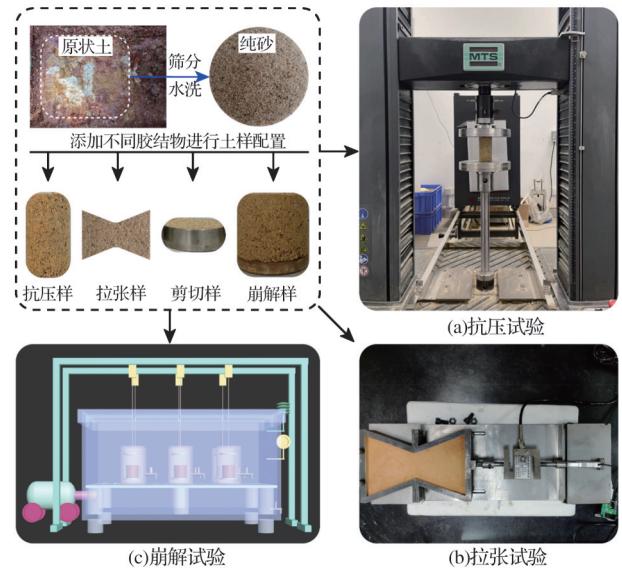


图 2 试验方法

Fig. 2 Testing methods

1.3 SEM 测试

SEM 测试采用的器材为扫描电镜,扫描电镜由电子光学系统、机械系统、真空系统以及信号处理系统4部分组成^[21]。将所需测试试样切取一小部分,尽量切割成方形且边长不超过1 cm,去除表面杂物并对样品进行编号,通过导电胶将样品固定在载物台上,用氮气清洗样品表面^[22]。将固定好的样品放入离子溅射仪中,开始“喷金”操作,取出载物台,用镊子将样品放入扫描电镜机箱内的载物仓后关闭载物仓,拍摄 SEM 图片并利用软件 Pcas 进行处理分析^[23]。

2 试验结果

2.1 抗压强度

图3是不同种类、不同胶结物含量下花岗岩残积土的抗压强度试验结果。从图3中可以看出,随着应变的增大,不同胶结物含量下花岗岩残积土的应力都呈先增大后减小的趋势,图像峰值点对应的应力即为试件的无侧限抗压强度,超过该峰值点后试件发生破坏。图3(a)、(b)中,上升阶段应力-应变曲线形状相似,但高岭土粉的最大抗压强度要明显大于红黏土,最大应力达到500 kPa。由图3可以明显看出,4类胶结物在曲线上升阶段均存在一段“波动点”,说明在受压阶段试样裂缝对土体应力产生了一定影响。在含量为10%时,4种胶结物无侧限抗压强度曲线峰值点的应力和应变变化最大,可见

胶结物含量为10%时胶结物种类对花岗岩残积土的影响最大。由图3(a)可见,红黏土胶结物土样中5种胶结物含量对于峰值应力的影响并不显著,峰值点应力与花岗岩残积土相似。与红黏土胶结物土样相比,高岭土粉胶结物土样及蒙脱石胶结物土样的峰值点随胶结物含量的增加上升比较明显,但在应力达到峰值点时高岭土粉试样对应的应变要高于蒙脱石试样,可见高岭土试样的韧性更好。由4组图像可以看出,4种胶结物达到峰值点时的应变

大多比花岗岩残积土大,在4种胶结物含量为12%时,应力达到峰值点时的应变差别很小,均在2 mm左右,由此可知,在胶结物含量为12%时,花岗岩残积土破坏的位移大致相同。与其他3组相比,伊利石胶结物土样在受压过程中图像抖动较大(图3(d)),峰值应力要远低于其他3组,并且与花岗岩残积土峰值应力差距显著。对比可知,胶结物为伊利石时花岗岩残积土的抗压性能较差。

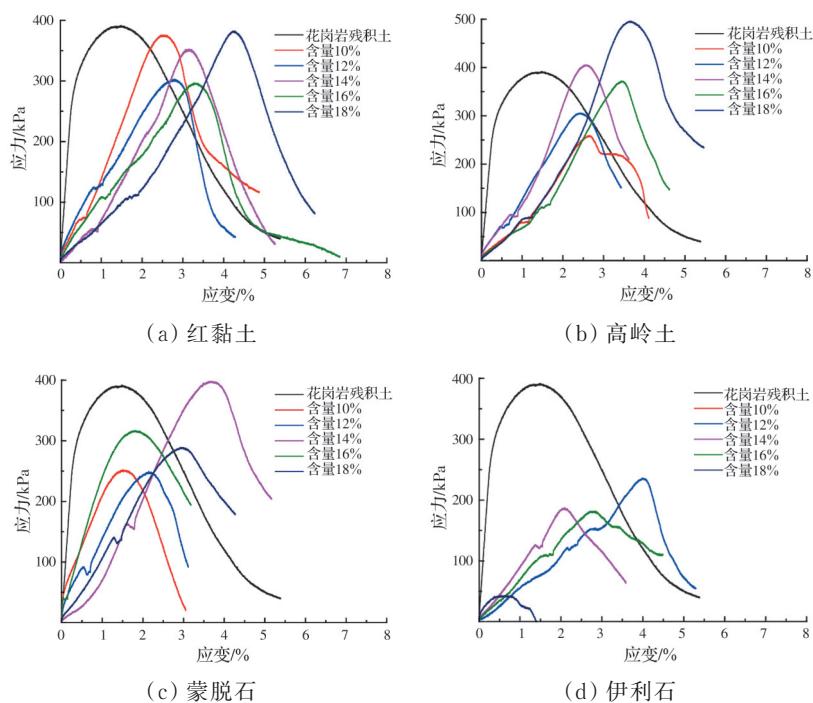


图3 无侧限抗压强度随胶结物种类和含量的变化

Fig. 3 Changes of unconfined compressive strength with cement type and content

2.2 抗剪强度

不同种类、不同胶结物含量下花岗岩残积土的抗剪强度试验结果如图4所示。根据红黏土胶结物土样的试验结果(图4(a))可以看出,当红黏土含量较低时,随着主应力的增大,抗剪强度增大的趋势较为显著,其中12%含量的红黏土组与花岗岩残积土的黏聚力与内摩擦角较为相似,而随着红黏土含量的增加,抗剪强度随着主应力的变化逐渐变缓,与伊利石胶结物土样(图4(d))图像趋势类似,随着胶结物含量的提高,花岗岩残积土的黏聚力增大,内摩擦角减小,可见伊利石作为胶结物时含量的改变与红黏土作为胶结物时性能相似,但抗剪强度有较大差异。4种胶结物试验中,伊利石作为胶结物与花岗岩残积土的抗剪强度最为接近。随着主应力的增加,高岭土胶结物土样(图4(b))10%胶结物含量的花岗岩残积土总体抗剪强度较小,18%胶结

物含量的花岗岩残积土在高主应力条件下抗剪强度增大较快且内摩擦角最高。黏聚力在胶结物含量为16%时最大。根据蒙脱石胶结物土样(图4(c))可知:随着主应力的增大,随着胶结物含量的提高,不同胶结物含量的花岗岩残积土呈先升高后降低的趋势,在蒙脱石含量为14%时,花岗岩残积土的抗剪强度明显大于其他试验组且内摩擦角最大。随着胶结物含量的提高,黏聚力与内摩擦角的变化趋势与红黏土与伊利石相反,可见,蒙脱石作为胶结物对黏聚力与内摩擦角的影响与红黏土和伊利石差异较大。对比4幅图像可知,伊利石作为胶结物的花岗岩残积土的抗剪强度远小于其他3组胶结物的花岗岩残积土。

2.3 抗拉强度

不同种类、不同胶结物含量下花岗岩残积土的抗拉强度试验结果如图5所示。由图5可见,随着

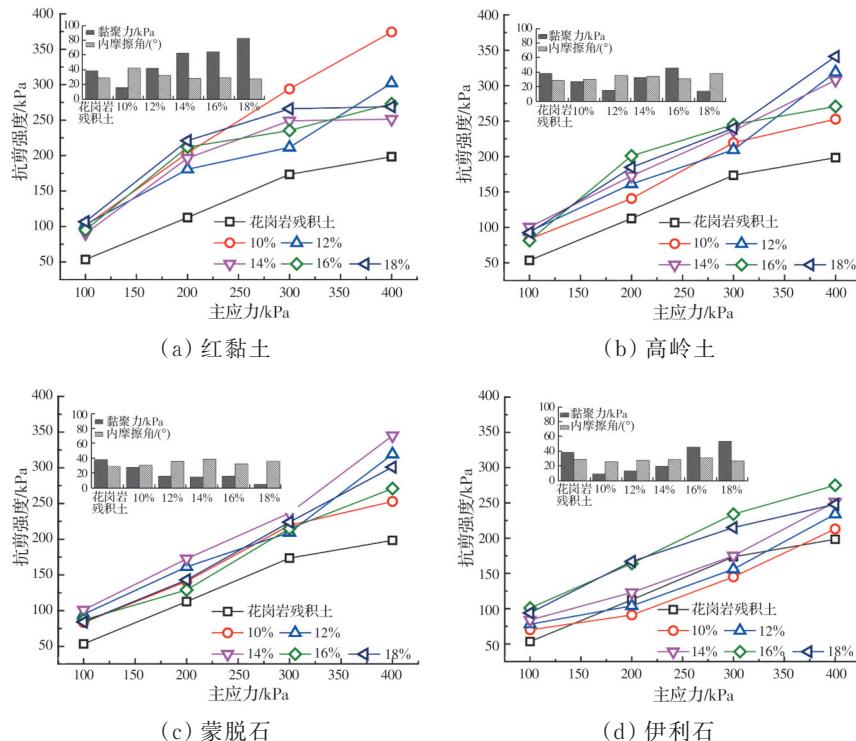


图4 抗剪强度随胶结物种类和含量的变化

Fig. 4 Changes of shear strength with the type and content of cement

胶结物含量的提高,红黏土胶结物土样的抗拉强度呈先升高后降低的趋势;其中含量在14%时达到峰值,抗拉强度约为8 kPa;当红黏土胶结物含量在14%左右时,土样的抗拉强度要明显高于胶结物含量为12%和18%时。蒙脱石粉和伊利石粉抗拉强度的变化趋势和变化幅度基本一致,随着胶结物含量的提高,呈先升高后降低的趋势,都在含量为12%时达到峰值,峰值点时抗拉强度约为6 kPa,略小于红黏土胶结物土样的峰值抗拉强度,抗剪强度为7.4 kPa,均低于花岗岩残积土。高岭土胶结物土样的抗拉强度总体呈上升趋势,含量在10%~14%时上升缓慢,当胶结物含量大于14%时,抗拉强度的上升速率明显增加,在胶结物含量为16%与18%时,抗剪强度为7.4 kPa,高于花岗岩残积土。综合

来看,当胶结物含量小于14%时,高岭土胶结物土样的抗拉强度最低,而红黏土胶结物土样的抗拉强度不断增加,最终在含量为14%时达到峰值。当胶结物含量大于14%时,除了高岭土胶结物土样的抗拉强度呈增大的趋势外,其他3种胶结物土样的抗拉强度呈减小趋势。

2.4 崩解性

不同种类、不同胶结物含量下花岗岩残积土的崩解特性试验结果如图6所示。对于红黏土胶结物土样(图6(a)),随着红黏土含量的升高,在同样的时间变化条件下,累积质量损失越少,说明随着红黏土含量的增加,土体的抗崩解性能越好。其中,红黏土含量为10%和12%时所用的崩解时间最短,累积质量损失最大,红黏土含量为18%时所用的崩解时间最长,累积质量损失最小,土样崩解多呈阶梯状变化趋势。对于高岭土胶结物土样(图6(b)),其崩解变化规律与红黏土相反,随着红黏土含量的升高,在同样的时间变化条件下,累积质量损失越大,说明随着高岭土含量的增加,土体的抗崩解性能越差,仅当高岭土含量为10%时崩解性能才优于花岗岩残积土。其中,12%~16%的高岭土曲线变化差别不大(多呈线性变化趋势),10%含量的高岭土在前600 s累积质量损失基本不变,抗崩解性能远大于其他含量。对于蒙脱石胶结物土样(图6(c)),随着蒙脱石含量的升高,在同样的时间变化条件

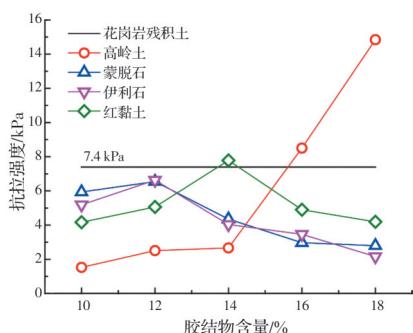


图5 抗拉强度随胶结物种类和含量的变化

Fig. 5 Changes of tensile strength with cement type and content

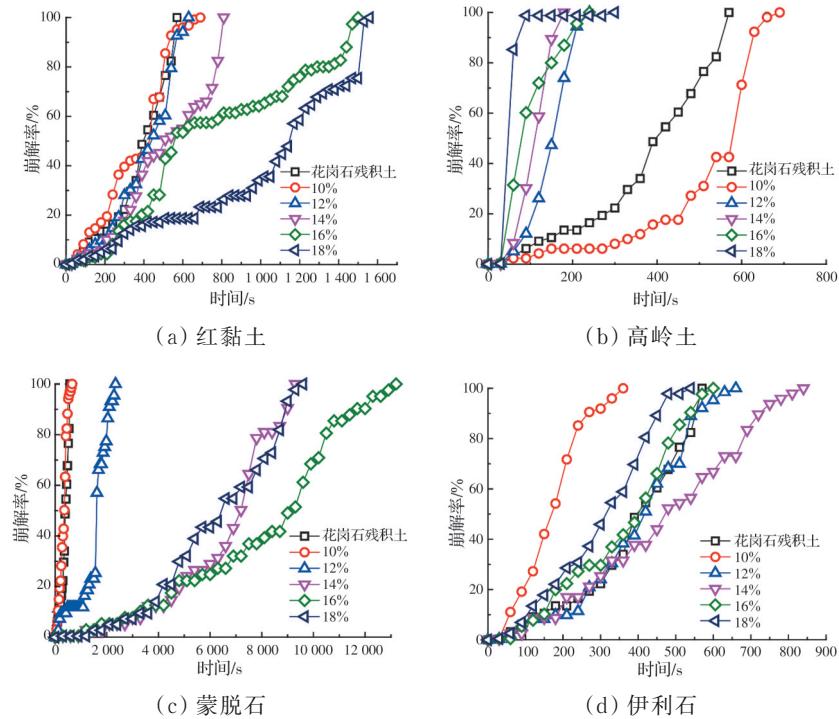


图6 崩解损失质量随胶结物种类和含量的变化

Fig. 6 Changes of disintegration strength with the type and content of cement

下,土样累积质量损失呈先降低后升高的趋势。除了10%含量组,其余各组崩解性能均优于花岗岩残积土,其中蒙脱石含量为16%时耗费的崩解时间最长,累积崩解质量损失最小。可见,蒙脱石含量为16%时抗崩解性能最好,10%含量的蒙脱石抗崩解性能最差。低含量情况下多呈线性崩解变化趋势,高含量多呈“S”型变化趋势。伊利石胶结物土样(图6(d))的崩解规律与蒙脱石胶结物土样类似,随着伊利石含量的升高,在同样的时间变化条件下,累积质量损失呈先降低后升高的趋势。其中,含量为14%时抗崩解性能最好,含量为10%时抗崩解性能最差。对比4种不同胶结物土样的崩解变化发现:蒙脱石胶结物土样总体的崩解时间要远大于其他胶结物土样的崩解时间。

3 讨论

3.1 土体的微观结构变化

原状花岗岩残积土主要为团粒状结构、板条状结构以及少量絮凝状结构,结构松散、孔隙裂隙发育且连通性好^[23-24]。经过不同改良剂处理后,土体的微观结构发生明显变化,为了方便比较,以含量为14%的不同胶结剂处理土样进行横向比较,微观结构变化情况见图7所示。经过红黏土处理后,土体表面多为片状结构;孔隙裂隙较大,分布较松散,颗粒无明显定向分布现象;经过蒙脱石和伊利石处

理后,土样的微观结构在一定程度上较为相似:土体表面较为密实,孔隙较少,且颗粒无明显的定向分布。但也有一些不同之处:伊利石处理后的土体虽然孔隙数量较少,但颗粒表面分布有絮凝结构,并且有散状的颗粒分布;而蒙脱石处理后土体表面散状颗粒较少,导致伊利石与高岭土崩解性能上的差异,絮状结构与散状颗粒分布决定了伊利石作为胶结物的抗崩解性能远低于蒙脱石作为胶结物的试样。高岭土粉处理后土体形成了较多块状结构和颗粒团聚体,并且颗粒团聚体之间有骨架联结;在颗粒团聚体间形成了较多孔隙和裂隙,并且土颗粒呈明显的定向分布,因此,胶结物含量同样为14%时,高岭土粉试样抗压强度最大,抗压性能最好。

3.2 胶结物对力学强度的影响机制

在添加蒸馏水和胶结剂后,散状的土颗粒胶结剂遇水形成的胶结物逐渐包裹颗粒;经过物理击实,由于受到压缩,颗粒之间咬合作用增强;同时,经过长时间的水化反应,胶结物在颗粒表面形成桥状胶结,在物理和化学共同作用下,土体的力学强度得到大幅度提升(见图8),但各种胶结剂对土体的影响并不完全相同。经过红黏土处理的花岗岩残积土物理性质与原状花岗岩残积土类似,都具有以下特点:1)重塑土具有良好的压缩性和可塑性;但土体吸水性较强,遇水容易软化崩解,强度明显

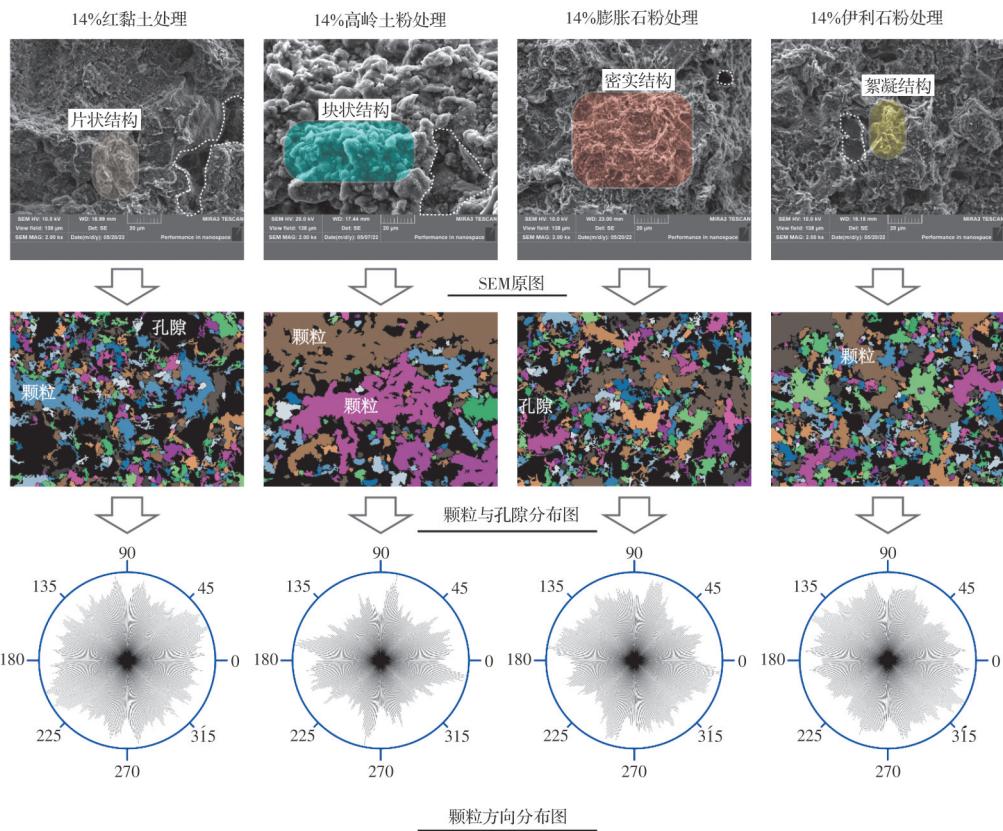


图 7 14% 胶结物处理后重塑土微观结构变化情况

Fig. 7 Microstructure changes of the remodeled soil after 14% cement treatment

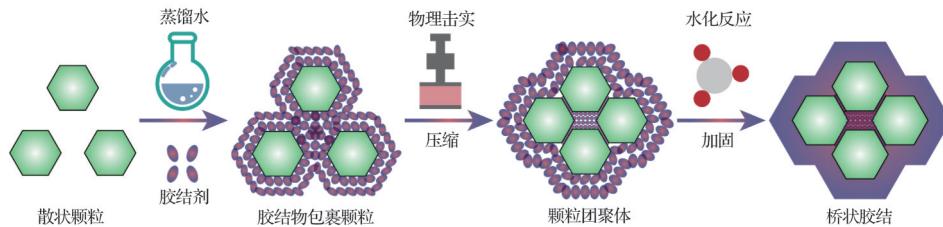


图 8 胶结物对力学强度的影响机理

Fig. 8 Influence mechanism of cement on mechanical strength

下降。2)微观上呈片状结构、孔隙比大、颗粒方向分布均匀,宏观上表现为密度低、压缩性大、遇水容易软化崩解。其土样黏聚力与摩擦角与胶结物种类和含量有密切关系,红黏土作为胶结物吸水性较强,导致各组试验中含量为 18% 的红黏土组黏聚力最大,且随着胶结物含量的提高,黏聚力增加显著。摩擦角受胶结物颗粒之间结合方式、孔隙分布等影响。经过高岭土处理的土体颗粒团聚体增多,团聚体之间形成强度较高的骨架结构,导致土体的抗压、抗剪及抗拉强度得到明显提高,但骨架间大量孔隙的存在为水的浸入提供了通道,导致土体的吸水性增强,抗崩解能力减弱。受益于蒙脱石的遇水膨胀特性,其处理后的土体表面孔隙较少、结构密实,且膨胀体提供了高强度的胶结能力,使得土体的各种力学特征得到明显改善,特别是抗崩解能

力,是其他改良剂处理土样的数十倍。伊利石处理的土样各种力学强度都较低,但土体表面却看起来比较密实,从土体表面分散的颗粒来看,伊利石粉更多的是作为细粒材料去填充大颗粒之间的孔隙,而不是作为强度较高的胶结物存在于土体颗粒之间,因此,伊利石处理的土样抗压、抗剪、抗拉及抗崩解能力是 4 种土样中最差的。

4 结论

- 1) 经过物理击实,由于受到压缩,颗粒之间咬合作用增强;同时,经过长时间的水化反应,胶结物在颗粒表面形成桥状胶结,在物理和化学共同作用下,土体的力学强度得到大幅度提升。

- 2) 经过高岭土处理的土体颗粒团聚体增多,团聚体之间形成强度较高的骨架结构。受益于蒙脱

石的遇水膨胀特性,其处理后的土体表面孔隙较少、结构密实。伊利石处理的土样各种力学强度都较低,但土体表面却看起来比较密实,从土体表面分散的颗粒来看,伊利石粉更多的是作为细粒材料去填充大颗粒之间的孔隙,而不是作为强度较高的胶结物存在于土体颗粒之间。

3)高岭土的特性导致土体的抗压、抗剪及抗拉强度明显提升,但骨架间大量孔隙的存在为水的浸入提供了通道,导致土体的吸水性增强,抗崩解能力减弱。由蒙脱石形成的膨胀体为土体提供了高强度的胶结能力,使得改良土的各种力学特征得到明显改善,特别是抗崩解能力。伊利石处理的土样抗压、抗剪、抗拉及抗崩解能力是所有土样中最差的。

4)胶结物的种类对力学性能影响极大,一方面取决于胶结物自身特性,如蒙脱石的遇水膨胀特性,另一方面取决于胶结物对于土体的结合作用,土样的抗压、抗剪、抗拉及抗崩解能力受胶结物与土样的结合方式所控制。

参考文献

- [1] 吴能森,赵尘,侯伟生.花岗岩残积土的成因、分布及工程特性研究[J].平顶山工学院学报,2004(4): 1-4.
WU N S, ZHAO C, HOU W S. Study on the origin, distribution and engineering characteristics of granite residual soil [J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2004(4): 1-4. (in Chinese)
- [2] 黄真萍,孙加梁,曹洋兵,等.饱和花岗岩残积土强度演化的温度效应研究[J].有色金属(矿山部分),2017,69(2): 54-60.
HUANG Z P, SUN J L, CAO Y B, et al. Temperature effect on strength evolution of saturated granite residual soil [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2017, 69 (2): 54-60. (in Chinese)
- [3] 巩俊.干湿循环条件下水泥改良花岗岩残积土强度特性试验研究[D].湖南湘潭:湘潭大学,2021.
GONG J. Experimental study on shear strength characteristics of cement-improved granite residual soil under dry-wet cycle condition [D]. Xiangtan, Hunan: Xiangtan University, 2021. (in Chinese)
- [4] 周毅,吴梦丽,龙志东.不同颗粒成分对花岗岩残积土路堤边坡稳定性的影响[J].公路与汽运,2019(4): 62-64, 69.
ZHOU Y, WU M L, LONG Z D. Influence of different particle composition on stability of granite residual soil embankment slope [J]. Highways & Automotive Applications, 2019(4): 62-64, 69. (in Chinese)
- [5] 王港,张先伟,刘新宇,等.厦门花岗岩残积土的压缩变形特性及其微观机制[J].岩土力学,2021, 42(12): 3291-3300, 3314.
- [6] 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 Y L, TANG L S, LIU J. Research progress on microstructure and inter granular suction of unsaturated soils [J]. Geotechnical Mechanics, 2020, 41(4): 1095-1122. (in Chinese)
- [7] HAO D H, QI J F, WANG B, et al. An experimental study on the mechanical properties of soils of the landslide induced by rainfall [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90-93: 1303-1306.
- [8] 张子浩.杭州软黏土微观结构特征与宏观力学性质关系研究[D].杭州:浙江大学,2017.
ZHANG Z H. Study on relationship between microstructure characteristic and macro mechanical property of Hangzhou soft clay [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [9] LOGINOV P V, SALIKHOVA Z R, SULTANOV K S. Experimental and theoretical method for determining mechanical characteristics of soils under dynamic loads [J]. Mechanics of Solids, 2019, 54(6): 915-928.
- [10] ADEDOKUN S I, OSUOLALE O M, APATA A C, et al. Geotechnical beneficiation of the strength indices of lateritic soil using steel slag and cement [J]. International Journal of Engineering Research in Africa, 2022, 59: 101-117.
- [11] QU J L, TAO H. Strength and deformation behavior of Shanghai andesite under various strain rates in uniaxial loading test [J]. Geomechanics and Geoengineering, 2021, 16(1): 44-51.
- [12] WANG M M, LI Z H, SHAO X Z. Ultrasonic velocity, attenuation, and mechanical behavior of Longmaxi bedded shale under uniaxial compressive tests [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(19): 1009.
- [13] DAVARPANAH M, SOMODI G, KOVÁCS L, et al. Complex analysis of uniaxial compressive tests of the Mórágó granitic rock formation (Hungary) [J]. Studia Geotechnica et Mechanica, 2019, 41(1): 21-32.
- [14] RIAD B, ZHANG X. Characterizing and modeling the coupled hydro-mechanical cyclic behavior of unsaturated soils using constant water content oedometer and direct shear tests [J]. Transportation Research Record, 2022, 2676(10): 173-193.
- [15] YIN Z C, ZHANG Q S, ZHANG X, et al. Shear strength of grouted clay: Comparison of triaxial tests to direct shear tests [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(7): 261.

- [16] STACHO J, SULOVSKA M. Shear strength properties of coarse-grained soils determined using large-size direct shear test [J]. Civil and Environmental Engineering, 2022, 18(1): 244-257.
- [17] 汤连生, 桑海涛, 罗珍贵, 等. 土体抗拉张力学特性研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(3): 297-309.
TANG L S, SANG H T, LUO Z G, et al. Advances in research on the mechanical behavior of the tensile strength of soils [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(3): 297-309. (in Chinese)
- [18] 汤连生, 王昊, 孙银磊, 等. 干湿过程中花岗岩残积土抗拉强度变化研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1749-1760.
TANG L S, WANG H, SUN Y L, et al. Change of tensile strength of granite residual soil during drying and wetting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1749-1760. (in Chinese)
- [19] 孙银磊, 汤连生. 化学成分对花岗岩残积土抗拉张力学特性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(3): 7-13.
SUN Y L, TANG L S. The effect of chemical composition on tensile mechanics of residual granite soils [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018, 57(3): 7-13. (in Chinese)
- [20] 汤连生, 许瀚升, 刘其鑫, 等. 改良花岗岩残积土崩解特性试验研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 75-87.
- TANG L S, XU H S, LIU Q X, et al. Experimental study on disintegration characteristics of improved granite residual soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10): 75-87. (in Chinese)
- [21] SUN Y L, TANG L S. Use of X-ray computed tomography to study structures and particle contacts of granite residual soil [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(4): 938-954.
- [22] 张辞源. 致密砂岩微观结构分形特征研究[D]. 河北廊坊: 华北科技学院, 2022.
ZHANG C Y. Study on the microstructure fractal characteristics of dense sandstone [D]. Langfang, Hebei: North China Institute of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [23] 徐伟, 陈寿衍, 田言, 等. SEM 在矿物学领域中的应用进展[J]. 广州化工, 2014, 42(23): 30-32.
XU W, CHEN S Y, TIAN Y, et al. Development and application of SEM in mineralogy field [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(23): 30-32. (in Chinese)
- [24] LU L F, MA Q, HU J, et al. Mechanical properties, curing mechanism, and microscopic experimental study of polypropylene fiber coordinated fly ash modified cement-silty soil [J]. Materials, 2021, 14(18): 5441.

(编辑 胡玲)