

# 纤维和纳米材料改良花岗岩残积土的力学试验及机理研究

王志兵<sup>1,2</sup>, 刘金明<sup>1</sup>, 顾翔<sup>3</sup>

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 西南有色昆明勘测设计(院)股份有限公司, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 在处理特殊土时,采用性能好、环保和成本低的材料加固土体有着非常重要的意义。为了研究玄武岩纤维和纳米氧化铁对花岗岩残积土力学性能的影响,采用单掺和复掺的方式,制备不同掺量的试样进行固结不排水三轴剪切试验,并取剪切后的土样进行扫描电镜试验分析其微观机理。试验结果表明:土样抗剪强度随玄武岩纤维掺量的增加呈先增大后减小的变化规律,在掺量为1%时出现峰值,土样抗剪强度随纳米氧化铁掺量的增加而呈单调增加的变化规律;两种改良方法均能较大幅度提升土体的黏聚力,对内摩擦角的提升效果不明显,此外,复合改良土样提升土体抗剪强度的效果比单掺改良土样更加明显;土体抗剪强度的提高是由玄武岩纤维与土体之间产生互锁网、纳米氧化铁填充土颗粒之间的空隙所致,采用复合改良土样的方式能有效改善花岗岩残积土的剪切强度特性。

**关键词:** 花岗岩残积土;玄武岩纤维;纳米氧化铁;扫描电镜;三轴试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0185-07

## Mechanical test and mechanism study of granite residual soil modified by fiber and nanomaterials

WANG Zhibing<sup>1,2</sup>, LIU Jinming<sup>1</sup>, GU Xiang<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin 541004, China; 3. Southwest Nonferrous Kunming Exploration Surveying and Designing (Institute) Inc., Kunming 650217, China)

**Abstract:** When dealing with special soil, it is very important to choose environment-friendly and low cost materials with good properties for the strengthening. In order to study the effect of basalt fiber and nano-iron oxide on the mechanical properties of granite residual soil, samples with different dosages and mixing methods were prepared for the consolidation and undrained triaxial shear test, and the micro-mechanism of the processed samples was analyzed by scanning electron microscope (SEM). The experimental results show that the shear strength of soil samples first increases then decreases with the increase of the dosage of basalt fiber, and peaks when the dosage reaches 1%; whereas the shear strength of soil samples increases monotonously with the increase of nano-iron oxide content. Both the single agent and composite agents methods can improve the cohesion of the soil, but not the internal friction angle. In addition, the effect of composite modified soil sample on soil shear strength is more obvious than that of single modified soil sample. The improvement of soil shear strength is contributed by the interlocking mesh between the basalt fiber and soil, and the filling of the gaps between soil particles by nano-iron oxide. The method of composite soil sample modification can effectively improve the shear strength characteristics of granite residual soil.

**Key words:** granite residual soil; basalt fiber; nano-iron oxide; scanning electron microscope (SEM); triaxial test

收稿日期:2022-01-12; 修回日期:2022-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(42167021);广西自然科学基金项目(2021GXNSFAA196028)

作者简介:王志兵(1982-),男,湖南双峰人,博士,教授,硕士生导师,研究方向为特殊土工程地质性质。

## 1 研究背景

在中国南方一些省份广泛分布着花岗岩残积土,其为花岗岩在经历长时间的物理、化学风化作用后残留的特殊土体,常常用于公路和高速铁路建设项目的填料或各类堤坝边坡等。然而,花岗岩残积土是具有高液性、结构性、遇水软化、易崩解性等特性的区域性特殊土<sup>[1]</sup>,在降雨和外力的作用下常常会导致其填筑的路基变形、塌陷,或边坡破坏甚至形成灾难性滑坡,因此,使用花岗岩残积土作为建筑材料需要进行特别处理来改善其性能(渗透性、强度、模量等)以满足工程需要,常用的土体处理方式包括物理压实(使土体变得致密)和土壤添加剂(稳定土体,改善其工程性能)。而花岗岩残积土的天然含水率一般情况下均大于其最佳含水率,施工时若不进行晾晒,天然条件下花岗岩残积土的物理压实将变得更困难,甚至不能保证其施工质量,因此使用土壤添加剂来改善其工程性能是一种有效手段。有许多学者对粉煤灰、石灰、水泥、煤矸石粉等传统土壤添加剂改良土体进行了研究,发现传统土壤添加剂与土颗粒发生水化反应后产生的凝胶物质可以有效改善土体强度、压缩性和崩解性,使土体最佳含水率发生变化,还有研究表明混合使用传统土壤添加剂改良土体可以进一步改善土体性能<sup>[2-9]</sup>。在使用传统土壤添加剂改良土体时,会改变土体 pH 值从而影响植被生长<sup>[10-11]</sup>,因此为符合可持续发展的理念,采用高性能、环保、廉价材料作为土体改良剂是非常有必要的。

近年来,人工合成纤维和纳米材料这两类新型土壤添加剂在岩土加固方面表现出了优势,引起了众多学者的关注和进一步研究。人工合成类纤维用于土体改良具有生物降解速度慢、强度可靠、成本低等优点。用于土体加固的人工合成纤维的种类有玻璃纤维<sup>[12-13]</sup>、聚丙烯纤维<sup>[14-15]</sup>、玄武岩纤维<sup>[16-17]</sup>等,能加固砂土、黏土、黄土,甚至砂浆等工程材料,被加固土体的一些工程性质均有相应的改善,并具有随掺量变化的岩土体力学性质和最优纤维掺量等规律,其加固机理常常以纤维的加筋机理<sup>[18-19]</sup>来解释。另一类土壤添加剂纳米材料常常具有较小的颗粒尺寸和较高的表面活性,使用其改良土体后,土体能够表现出更优的力学性能<sup>[20]</sup>。常用的纳米材料包括纳米二氧化硅<sup>[21-22]</sup>、纳米氧化铝<sup>[23]</sup>、纳米硅酸钠<sup>[24-25]</sup>、纳米碳酸钙粉<sup>[26]</sup>等,对改善粉土、软土、砂土的物理力学性质具有良好的效果,改良机理主要

是因为纳米材料能在颗粒粒径尺度上与岩土体颗粒产生相互作用。此外,使用纤维和纳米材料复合<sup>[27-28]</sup>改良土的性质也逐渐被关注,其复合改良机理仍需要进一步研究。

上述研究成果表明,不同的土壤添加剂对土体的影响是有差异的,其中针对纤维和纳米材料混合改良土性质的研究较少,需进一步探讨其作用效果和机理。本文选取玄武岩纤维和纳米氧化铁作为加固材料,对广西壮族自治区玉林市某地的花岗岩残积土进行改良试验,控制纤维和纳米材料掺量,开展固结不排水三轴剪切试验和扫描电镜试验,研究玄武岩纤维、纳米氧化铁和玄武岩纤维与纳米氧化铁共同作用对花岗岩残积土力学性能的影响,并从微观结构分析其作用机理。

## 2 材料与试验方法

### 2.1 花岗岩残积土的基本性质

花岗岩残积土土样取自广西壮族自治区玉林市容县某花岗岩残积土边坡填料。按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)<sup>[29]</sup>测试了其颗粒粒径分布及基本物理性质,分别见图 1 和表 1。

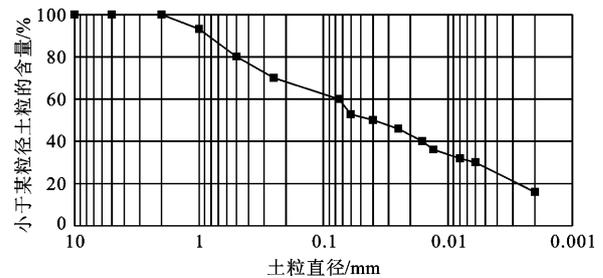


图 1 花岗岩残积土土样颗粒分析曲线

由图 1 可知,花岗岩残积土土样中粒径小于 0.075 mm 的土粒含量超过 60%,粒径在 0.075 ~ 2 mm 之间的土粒含量接近 40%,说明花岗岩残积土粒径主要分布在砂粒组和细粒组中。按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)<sup>[29]</sup>对土样进行分类,结合表 1 中土样的液限值,容县花岗岩残积土属于含砂低液限粉质土。该地区残积土中原生矿物主要为石英,次生矿物主要为高岭石,是花岗岩高度风化后的产物<sup>[30]</sup>。

由表 1 可知,容县花岗岩残积土的最佳含水率为 19%,最大干密度为 1.65 g/cm<sup>3</sup>,天然含水率为 26.2%,花岗岩残积土的天然含水率比最佳含水率高 7.2%,在施工过程中需要晾晒土体,否则天然土体难以压实或需要额外提高压实能量,这将不利于

花岗岩残积土在工程中的应用<sup>[31]</sup>。

## 2.2 玄武岩纤维和纳米氧化铁

本文所采用的短切玄武岩纤维材料采购自山东森泓工程材料有限公司,玄武岩纤维的长度和直径分别为6 mm和7  $\mu\text{m}$ ,有耐酸耐碱、耐压性好、不易断裂、抗拉力强等优点,具有加固土体的潜能,外观如图2(a)所示;纳米氧化铁材料采购自宁波极微纳

新材料科技有限公司,颗粒的平均粒径为20 nm,且其性质较稳定,不溶于水,在常温条件下不易分解,在空气中呈红色,外观如图2(b)所示。纳米氧化铁的X射线衍射图谱如图2(c)所示,由图2(c)可以看出,纳米氧化铁的衍射峰值与 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 标准卡片所指示峰值的吻合度较高,表明所购的纳米氧化铁材料纯度高,无其他杂质。

表1 花岗岩残积土土样的基本物理参数

比重	天然含水率/%	干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最佳含水率/%	最大干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	液限/%	塑限/%
2.71	26.2	1.37	19	1.65	45.8	30.3

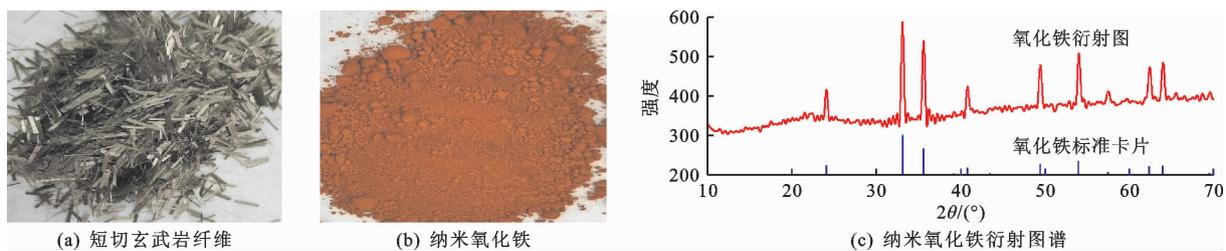


图2 玄武岩纤维和纳米氧化铁的外观形态及纳米氧化铁X射线衍射图谱

## 2.3 样品制备

为了探究玄武岩纤维和纳米氧化铁对花岗岩残积土剪切特性的影响,采用自然风干的花岗岩残积土过2 mm筛且烘干,用烘干土样制备含水率为19%和压实度为95% (配置土样的干密度为 $1.57 \text{ g/cm}^3$ )的10组试样,分为以下4种处理:(1)未做处理的对照土样(素土);(2)分别加入干土质量分数为0.5%、0.7%、1.0%、1.5%的玄武岩纤维处理土样;(3)分别加入质量分数为1%、2%、3%、5%的纳米氧化铁处理土样;(4)在1%的玄武岩纤维中分别掺入质量分数为1%、3%、5%的纳米氧化铁处理土样。玄武岩纤维为压制而成的条状纤维,需先将纤维散布在土中,再不断地拌合,使纤维均匀分散于土中,最后加入蒸馏水配置最佳含水率的土样;为使纳米氧化铁能均匀分散在土中,先将纳米氧化铁粉末加入土中不断搅拌至均匀,再加入蒸馏水配置最佳含水率土样;素土则只需加蒸馏水配置成目标含水率土样即可,将配置好的土样装入密封袋中,再放入保湿缸中保湿24 h后备用。采用静压方式制样,分4层制备高为80 mm,直径为39.1 mm的三轴试验试样。将制备好的试样进行抽真空处理并静置2 h,然后注入蒸馏水,饱和8 h后进行三轴试验。

## 2.4 试验方法

采用固结不排水三轴压缩试验研究素土和改良

土样的剪切特性,设置3个围压(100、200、300 kPa),即每组3个试样,以0.08 mm/min的剪切速率进行试验,剪切结束条件为轴向应变达到15%。将剪切完后的试样用小刀切成边长为2 cm左右的土块,再将土块自然风干后进行喷金处理,然后用扫描电镜观察土块试样的微观结构。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 玄武岩纤维对花岗岩残积土的改良效果

不同围压下玄武岩纤维改良花岗岩残积土试样的应力-应变关系曲线如图3所示。由图3可知,应力-应变曲线为应变软化型,即试样的应力先随应变的增加而增加,当应变达到某一值后,应力不再增长;在100、200和300 kPa的围压条件下,1.0%的玄武岩纤维改良土试样的偏应力峰值均为最大值。在3个围压下对应1.0%掺量试样的偏应力峰值与素土相比分别提升了89%、75%和61%。玄武岩纤维改良土样的抗剪强度均大于素土试样,且随围压的增加而增加。

由玄武岩纤维改良土样的应力-应变曲线可得到试样的内摩擦角和黏聚力随玄武岩纤维掺量的变化规律,如图4所示。

由图4可知,当玄武岩纤维掺量小于1%时,玄武岩纤维改良土试样的黏聚力和内摩擦角随玄武岩

纤维掺量的增加而增大,且黏聚力的增幅大于内摩擦角的增幅;当玄武岩纤维掺量超过1%后,试样的黏聚力和内摩擦角随玄武岩纤维掺量的增加而减小。玄武岩纤维改良土试样的黏聚力和内摩擦角在0.5%~1.0%玄武岩纤维掺量区间的增速相对最

快,且在玄武岩纤维掺量为1.0%时,试样的黏聚力和内摩擦角达到最大值,分别为24.3 kPa和28.3°。与素土相比,其黏聚力增加了605%,内摩擦角增加了25%,表明玄武岩纤维改良土试样抗剪强度的增大主要由黏聚力提供。

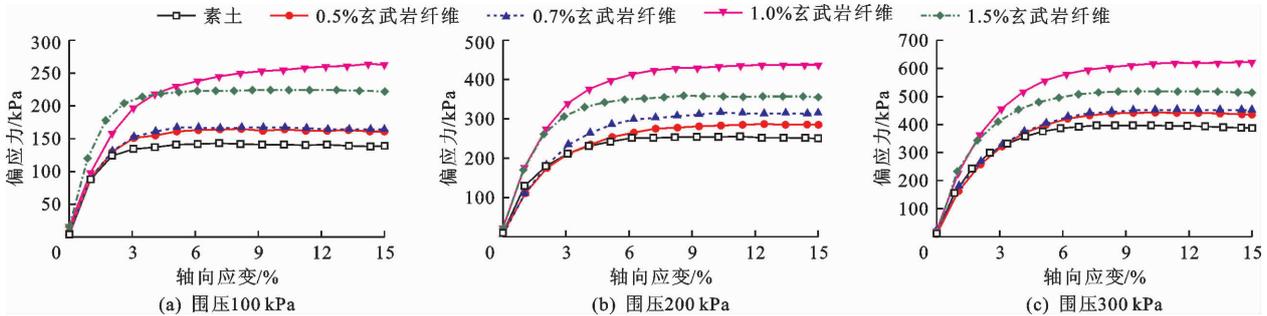


图3 不同围压下玄武岩纤维改良花岗岩残积土试样的应力-应变曲线

### 3.2 纳米氧化铁对花岗岩残积土的改良效果

不同围压下纳米氧化铁改良花岗岩残积土试样的应力-应变关系曲线如图5所示。由图5可知,所有纳米氧化铁改良土试样的应力出现峰值后,随着应变的增加,应力均出现小幅度下降,下降幅度随着氧化铁掺量的增加而减小,应力-应变曲线仍属于应变软化型;纳米氧化铁改良土试样的偏应力峰值均比素土试样高,且随纳米氧化铁掺量的增加而增大;在100、200、300 kPa的围压条件下,5%掺量纳米氧化铁改良土样的偏应力峰值比素土样分别提

高了35%、31%和22%。

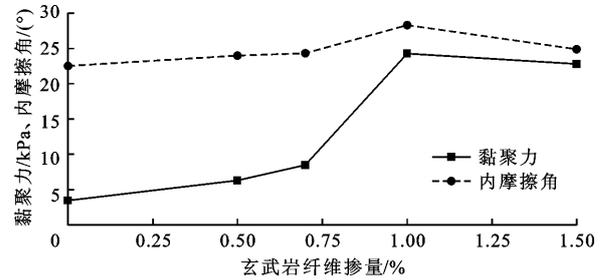


图4 玄武岩纤维改良花岗岩残积土试样黏聚力和内摩擦角的变化规律

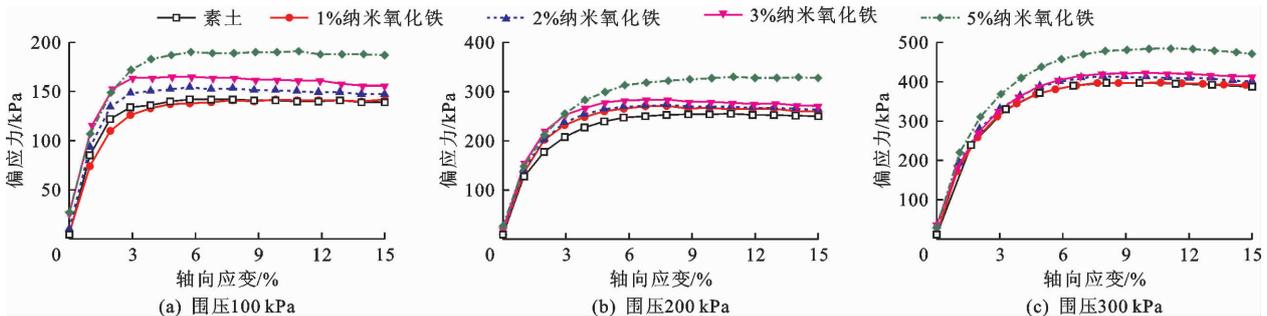


图5 不同围压下纳米氧化铁改良花岗岩残积土试样的应力-应变曲线

由纳米氧化铁改良土样的应力-应变曲线可得到试样的内摩擦角和黏聚力随纳米氧化铁掺量的变化规律,如图6所示。由图6可知,随着纳米氧化铁掺量的增加,土样的黏聚力和内摩擦角呈单调增大的趋势。在纳米氧化铁掺入量为5%时,与素土样相比,其黏聚力增加了318%,内摩擦角增加了8.8%,黏聚力的增长比内摩擦角要显著得多。5%掺量的纳米氧化铁改良土样在改善剪切特性方面与3%掺量的水泥改良土<sup>[32]</sup>的效果基本相同。

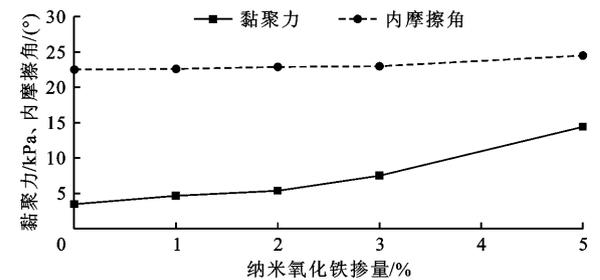


图6 纳米氧化铁改良花岗岩残积土试样黏聚力和内摩擦角的变化规律

### 3.3 玄武岩纤维和纳米氧化铁复合作用对花岗岩残积土的改良效果

1% 掺量的玄武岩纤维和不同纳米氧化铁掺量的花岗岩残积土试样的应力 - 应变关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知,复合改良土的应力 - 应变曲线也属于应变软化型,最大偏应力随着掺量和围压的

增加而增大。通过对比可知 1% 的玄武岩纤维与 5% 的纳米氧化铁的改良效果最好,在不同围压下与 1% 的玄武岩纤维改良土相比偏应力峰值增加了 26%、9%、10%,与素土相比增加了 138%、92% 和 77%。将图 7 与图 3、5 对比可知,复合改良对提高土体抗剪强度的效果比单掺改良效果更好。

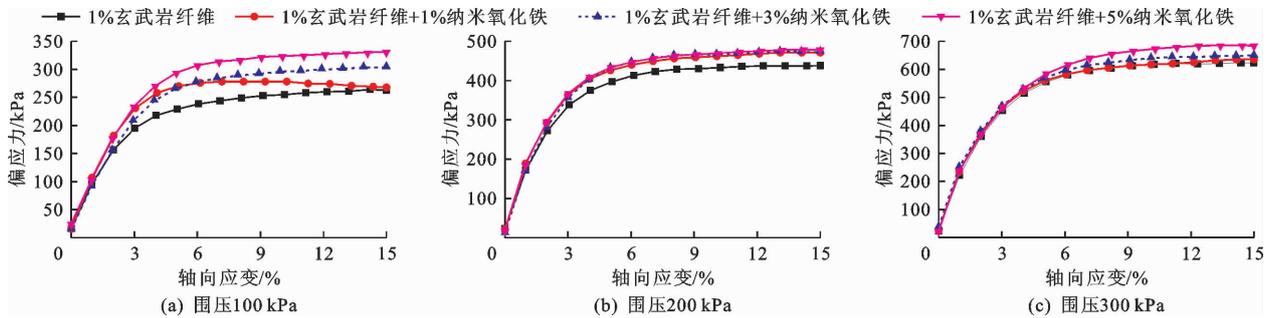


图 7 不同围压下 1% 玄武岩纤维和纳米氧化铁改良花岗岩残积土试样的应力 - 应变曲线

复合改良花岗岩残积土试样的抗剪强度指标随纳米氧化铁掺量的变化规律如图 8 所示。由图 8 可知,随着纳米氧化铁掺量的增加,土样的黏聚力单调增加,即纳米氧化铁掺量越高,土样黏聚力越大,与对照组(即 1% 玄武岩纤维改良土)相比,试样的黏聚力增加了 77%。土体内摩擦角随着纳米氧化铁掺量的增加变化很小,与单独加入纳米氧化铁的变化规律类似。这一结果与文献[28]得出的纤维和纳米材料对提高上海黏土的黏聚力比内摩擦角要显著的结论相一致。

岩残积土抗剪强度指标的作用机理,分别对花岗岩残积土的素土样、1% 玄武岩纤维改良土样、1.5% 玄武岩纤维改良土样及 5% 纳米氧化铁改良土样进行微观结构观察,如图 9 所示。

### 3.4 玄武岩纤维和纳米氧化铁改良花岗岩残积土的机理分析

为了探究玄武岩纤维与纳米氧化铁对提高花岗

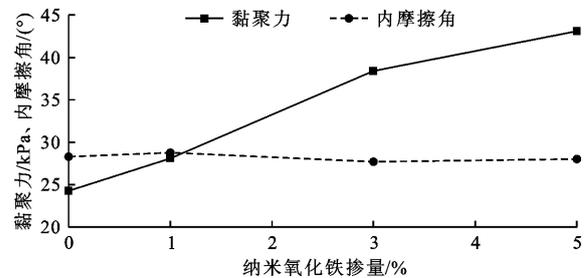


图 8 复合改良土试样抗剪强度指标随纳米氧化铁掺量的变化规律

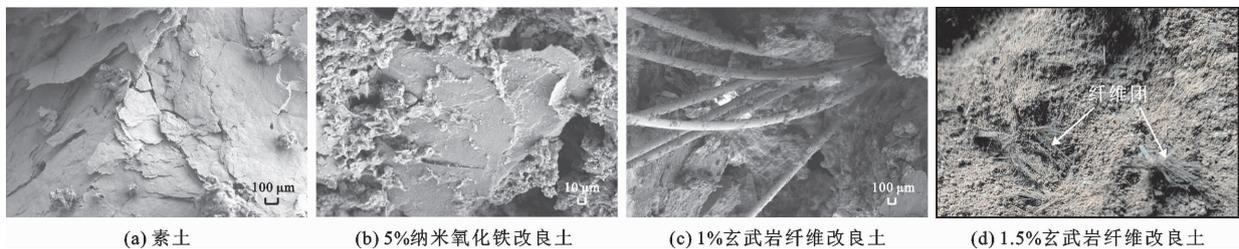


图 9 花岗岩残积土及其改良土的扫描电镜照片

由图 9 可以看出,花岗岩残积土素土土样的土颗粒表面比较光滑(图 9(a));而经过纳米氧化铁改良后的土体颗粒表面有明显的纳米级大小的颗粒附着物(图 9(b)),这表明纳米氧化铁主要吸附在土颗粒表面,使土颗粒间接触点变得更多,此过程会增加颗粒间的静电引力或土颗粒间接触点的化学键键能<sup>[33]</sup>,从而提高土样的黏聚力。此外,纳米氧化

铁还能起到填充土体孔隙的作用,使土颗粒表面变得更粗糙,从而增大了改良土的内摩擦角。然而,由图 6 和 8 可知纳米氧化铁改良土的内摩擦角并没有得到大幅度改善,可能是因为花岗岩残积土是花岗岩高度风化后的产物,其土体主要以高岭石为主,纳米氧化铁颗粒不易进入高岭石夹层内部,改善效果有限。当玄武岩纤维与土充分搅拌后,纤维主要呈

分散的单丝状,并以不同的角度随机地、较均匀地分布于土样中,纤维之间形成连锁网,能限制土颗粒移动的空间(图9(c)),同时也能增加土颗粒与纤维的接触面及其摩擦力,使得纤维与土颗粒之间的相互作用增强,从而在剪切过程中提高了土体抵抗破坏的能力,改善了土体的黏聚力和内摩擦角。当纤维掺量过多时,容易形成纤维团(图9(d)),纤维团的存在会使土颗粒之间的有效接触面减少,反而降低土体的黏聚力和内摩擦角。

在单掺改良方法中,1%的玄武岩纤维和5%的纳米氧化铁改良花岗岩残积土试样的抗剪强度效果最佳,在100、200和300 kPa的围压下,改良土的抗剪强度分别增加了74%、53%、45%和34%、18%、18%;在复合改良土样中,1%的玄武岩纤维和5%的纳米氧化铁组合改良的效果最佳,不同围压下其土样抗剪强度分别增加了114%、73%和58%。这表明掺入玄武岩纤维和纳米氧化铁均能提升花岗岩残积土的抗剪强度,其中玄武岩纤维改良土样存在最佳掺量,且两种材料混合使用时,改善土体抗剪强度的效果最佳。这是因为玄武岩纤维以随机的角度分散在土体中,在土体内部起到加筋作用;纳米氧化铁吸附在土颗粒表面,增强颗粒间联结,并可以填充到土颗粒之间的大孔隙中,玄武岩纤维和纳米氧化铁共同使用能更显著提高土体的力学性能。

## 4 结 论

使用玄武岩纤维和纳米氧化铁改良花岗岩残积土的抗剪强度,通过对改良土进行固结不排水三轴剪切试验及微观结构观测,得到的结论如下:

(1)单独使用玄武岩纤维改良花岗岩残积土,土样的黏聚力和内摩擦角随着玄武岩纤维的掺量呈先增大后减小的趋势,即存在一个最佳的玄武岩纤维掺量值(1%),此时改良土的黏聚力和内摩擦角分别为24.3 kPa和28.3°,相对于素土样分别增加了605%和25%。

(2)单独使用纳米氧化铁改善花岗岩残积土,土样的黏聚力和内摩擦角随纳米氧化铁掺量呈单调增加趋势,氧化铁掺量越高(5%),改良效果越好。与素土样相比,5%纳米氧化铁改良土样的黏聚力增加了318%,内摩擦角增加了8.8%。

(3)使用玄武岩纤维和纳米氧化铁复合改良花岗岩残积土时,其改善效果比单独改良的效果好,1%的玄武岩纤维和5%的纳米氧化铁的复合改良效果最佳,与素土样相比,不同围压下抗剪强度分别

提升了114%、73%和58%。

(4)玄武岩纤维改良花岗岩残积土的作用机理是适当掺量的玄武岩纤维能以不同的角度均匀分散在土中,形成互锁网,通过加筋作用增强土颗粒之间的相互作用来提高土体抗剪强度;纳米氧化铁改良花岗岩残积土的作用机理是纳米氧化铁增加了颗粒间的静电引力或土颗粒间接触点的化学键键能,并填充了土体中的大孔隙,从而提高了土体的抗剪强度。玄武岩纤维与纳米氧化铁复合改良则同时存在上述效应,改良效果更佳。此外,玄武岩纤维和纳米氧化铁对花岗岩残积土黏聚力的改善效果比内摩擦角要明显得多,黏聚力的增强是改良土样抗剪强度提升的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 吴能森. 结构性花岗岩残积土的特性及工程问题研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [2] 刘胜, 陈志波, 陈伟文, 等. 粉煤灰改良花岗岩残积土试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 712-717.
- [3] 张林华, 彭新, 郑彪, 等. 石灰改良花岗岩残积土力学性质及改良机理研究[J]. 公路工程, 2019, 44(6): 271-276.
- [4] 费伦林, 徐立红, 钱劲松. 花岗岩残积土路基的水泥改良效果试验研究[J]. 公路, 2017, 62(5): 30-34.
- [5] 俞旺新, 张恩. 煤矸石粉掺量对花岗岩残积土的抗压性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(3): 598-605.
- [6] 李自立, 陈志波, 胡屏, 等. 掺木质素花岗岩残积土的单轴抗压强度特性[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(11): 30-33+55.
- [7] 罗小艳, 扶名福. 石灰改良土的非饱和土变形与强度特性试验[J]. 人民长江, 2017, 48(17): 86-90.
- [8] 田朋飞, 简文星, 张树坡, 等. 赣南山区花岗岩残积土路基的电石渣改良效果试验研究[J]. 公路, 2020, 65(4): 52-58.
- [9] 李自立, 陈志波, 胡屏, 等. 粉煤灰与石灰改良花岗岩残积土压缩特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 82-86.
- [10] 游阳, 刘伦. 水泥对红壤pH值及植物生长影响的试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2022, 37(1): 81-85.
- [11] 苏辉兰, 潘灿静, 李忠芳, 等. 四种改良剂对红壤性质及马铃薯生长影响的研究[J]. 轻工科技, 2020, 36(8): 88-90.
- [12] 李丽华, 万畅, 刘永莉, 等. 玻璃纤维加筋砂土剪切强度特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(1): 102-106.
- [13] RABAB A S, HATTAMLEH O A, ALDEEKY H, et al.

- Effect of glass fiber on the properties of expansive soil and its utilization as subgrade reinforcement in pavement applications[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2020, 14: e00485.
- [14] 张志韬,陈生水,吉恩跃,等. 聚丙烯纤维加筋砾质黏土的拉伸断裂特性研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10): 2713–2721.
- [15] 孔玉侠,沈飞凡,王慧娟. 聚丙烯纤维加筋砂土的剪胀特性[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(12): 2249–2256.
- [16] 胡文乐,何朋立,刘华,等. 玄武岩纤维加筋黄土力学参数优化试验研究[J]. *人民长江*, 2020, 51(5): 222–227.
- [17] 贾明皓,肖学良,谷元慧,等. 玄武岩纤维及其格栅增强水泥基复合材料力学性能对比研究[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(12): 246–249.
- [18] GAO Ying, GUO Qinglin, GUO Yanhua, et al. Investigation on reinforced mechanism of fiber reinforced asphalt concrete based on micromechanical modeling[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 2017(1): 4768718.
- [19] SHEN Junmin, ZHANG Yancong. Fiber-reinforced mechanism and mechanical performance of composite fibers reinforced concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*, 2020, 35(1): 121–130.
- [20] 孔冉. 纳米二氧化硅固化黄土力学性能和结构特征研究[D]. 兰州:兰州大学, 2019.
- [21] HOSSEINI A, HAERI S M, MAHVELATI S, et al. Feasibility of using electrokinetics and nanomaterials to stabilize and improve collapsible soils[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(5): 1055–1065.
- [22] 张艳美,马丁,李国勋,等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 和石灰改良黄泛区粉土的力学特性研究[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1233–1239.
- [23] IRANPOUR B, HADDAD A. The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment[J]. *Engineering Geology*, 2016, 205: 40–53.
- [24] RAVINDRAN G, ISAAC I A, OLANIYI D A, et al. Banana fibre-reinforcement of a soil stabilized with sodium silicate[J]. *Silicon*, 2020, 12(2): 357–363.
- [25] SELVAKUMAR S, KULANTHAIVEL P, SOUNDARA B. Influence of nano-silica and sodium silicate on the strength characteristics of clay soil[J]. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 2021, 6(3): 46.
- [26] PARK K, JUN S, KIM D. Effect of strength enhancement of soil treated with environmental-friendly calcium carbonate powder[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014: 526491.
- [27] CUI Hongzhi, JIN Zhiyang, BAO Xiaohua, et al. Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 189: 286–295.
- [28] 璩继立,胡晨凯,赵超男. 玄武岩纤维和纳米二氧化硅加筋上海黏土的抗剪强度试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(3): 186–192.
- [29] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社, 2020.
- [30] 王志兵,麦棠坤,齐程. 容县压实花岗岩残积土的力学性质与微结构特性研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 101–107.
- [31] 陈杰,刘正楠,张锐. 花岗岩残积土路基压实控制方法研究[J]. *交通科学与工程*, 2016, 32(1): 1–6.
- [32] 刘文骏,陈秋南,赵磊军,等. 水泥改良花岗岩残积土的强度和崩解特性研究[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(1): 54–59.
- [33] CHOBBASTI A J, KUTANAEI S S. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(5): 981–988.