

文章编号: 1007-2993(2024)05-0598-07

改良花岗岩残积土的渗透特性研究

杨雪强¹ 钟华斌² 陶家琦¹ 周宝贵² 蔡池锋²

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东广州 510006; 2. 中建安装集团有限公司, 江苏南京 210000)

【摘要】 针对福建尤溪花岗岩残积土遇水易软化崩解的特性, 采用外掺法对其掺入改良剂进行改良, 以降低其渗透系数。同时掺入石灰和粉煤灰, 灰土质量比(即石灰质量: 粉煤灰质量: 花岗岩残积土质量)分别设置为 1:1:8, 1:2:7 和 1:3:6。对福建尤溪花岗岩残积土进行基本土工试验、击实试验和颗粒分析试验, 对改良前后的尤溪花岗岩残积土进行变水头渗透试验, 试验结果表明: (1) 经掺入石灰和粉煤灰改良后的花岗岩残积土, 其饱和和渗透系数较改良前均有所降低, 其抗渗性得到了提高。(2) 当灰土质量比为 1:2:7 时, 其饱和和渗透系数降低幅度最大, 改良效果最好。(3) 无论重塑土还是改良土, 其饱和和渗透系数均随孔隙比的增大而增大, 随干密度的增大而降低。

【关键词】 花岗岩残积土; 土体改良; 击实试验; 变水头渗透试验; 微观试验

【中图分类号】 TU411

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.015

Permeability Characteristics of Improved Granite Residual Soils

Yang Xueqiang¹ Zhong Huabin² Tao Jiaqi¹ Zhou Baogui² Cai Chifeng²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;
2. China Construction Industrial & Energy Engineering Group Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China)

【Abstract】 In response to the mechanical characteristics of the residual soil of granite in Youxi, Fujian, which is prone to softening and disintegration when encountering water, the external additives mixing method was used to improve its properties by adding additives to reduce its permeability coefficient. Adding ratios of lime, fly ash, and residual soil were set to 1:1:8, 1:2:7, and 1:3:6, respectively. Basic physical property index tests, compaction tests, and particle grading analysis tests were conducted on the granite residual soil from Youxi in Fujian. Variable water head permeability tests were conducted on the granite residual soil and improved granite residual soils separately. The test results showed that: (1) The saturated permeability coefficients of the improved granite residual soils by adding lime and fly ash into soil were decreased remarkably compared with that of the remolded residual soil, and its impermeability has been improved. (2) When the ratio of lime, ash, and soil is 1:2:7, the decrease in saturated permeability coefficient is the greatest, and the improvement effect in permeability is the best. (3) Whether remolded soil or improved soil, its saturated permeability coefficient increases with the increasing of its pore ratio, and decreases with the increasing of its dry density.

【Key words】 granite residual soil; soil improvement; compaction test; variable water head permeability test; microscopic experiment

0 引言

花岗岩残积土广泛分布于我国广东、福建等东南沿海地区, 其水稳定性较差, 遇水易软化崩解, 具有较强的渗透性。在实际工程应用中, 应对其土体性质进行改良降低其渗透特性。目前, 国内外学者主要对花岗岩残积土的渗透特性进行宏观和微观研究。宏观方面, 通过室内土工试验得出的结果对渗透特性进行研究分析; 微观方面, 通过扫描电子显微镜等手段

对土的微观结构进行观测, 从微观角度探究土的渗透特性。

洪昌伟^[1] 利用红黏土对花岗岩残积土的渗透性进行改良, 并对不同红黏土掺量的花岗岩残积土进行变水头渗透试验, 结果表明, 40% 掺量的红黏土对花岗岩残积土的渗透性改良最为显著。刘金明^[2] 通过单掺和复掺的方式对某地区花岗岩残积土进行改良, 并对改良土样进行恒水头三轴渗流试验, 结果表明,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978177)

作者简介: 杨雪强, 男, 1966年生, 汉族, 河南唐河人, 博士, 教授, 主要从事土体本构关系及边坡稳定等研究。E-mail: xqyfls@126.com

通讯作者: 周宝贵, 男, 1973年生, 汉族, 广东广州人, 学士, 高级工程师, 主要从事土木工程施工与管理研究。E-mail: 121825593@qq.com

单掺玄武岩纤维对花岗岩残积土渗透性的提高有明显作用,同时复掺纳米氧化铁和玄武岩纤维会使花岗岩残积土渗透系数降低。臧东亮^[3]分别通过石灰和粉煤灰两种外加剂对花岗岩残积土进行改良,发现单掺粉煤灰时土样的抗渗性较好,复掺石灰和粉煤灰时残积土的渗透系数进一步下降。Al-shayea等^[4]以不同黏粒含量和含水率组合的重塑黏土砂作为研究对象,探讨了黏土砂的液限、塑限及渗透系数随黏粒含量的变化趋势;当黏粒含量小于10%时对黏土砂渗透系数的变化最敏感,当黏粒含量超过40%时不再对黏土砂的渗透系数有大的影响;试验研究了黏粒含量和含水率的变化对黏土砂的孔隙比、应力-应变关系曲线及抗剪强度参数等的影响。Deng等^[5]通过对含黏粒砂土外掺不同材料进行了一系列渗透研究,结果表明随着含砂量的变化,混合土的渗透系数变化趋势也随之变化。An等^[6]为探究干湿循环对花岗岩残积土微观结构和力学性能损伤模式的影响,对原状花岗岩残积土试样进行了三轴剪切试验和扫描电子显微镜(SEM)试验,结果表明微观孔隙的分布比例随着干湿循环次数的增加基本保持不变,而宏观孔隙的分布比例急剧增加,土体微观结构和力学性能的破坏模式归因于孔壁的膨胀力和周期性干湿循环导致的细粒黏土颗粒损失。王志兵等^[7]针对广西东南部地区的风化花岗岩滑坡内的残余节理土开展了矿物成分、微观结构的研究,结果表明花岗岩全风化土和残积土的主要矿物包括石英、高岭石及少量伊利石。马士力等^[8]以含不同种类黏粒的砂土为研究对象,通过室内变水头渗透试验研究了孔隙比对砂土渗透系数的影响。胡其志等^[9]对不同黏粒含量的花岗岩残积土渗透特性进行研究,结果表明渗透系数随黏粒含

量的增加而降低,在黏粒成分中高岭石是影响花岗岩残积土渗透系数的主要因素。

福建尤溪花岗岩残积土黏粒含量较高为22.9%,在上述界限黏土含量10%~40%之间,黏粒随着时间有逐步淋滤带走的趋势,增大花岗岩残积土的渗透系数,因此再增加黏粒含量不一定有利于抗渗透效果。在上述研究的基础上,针对土体遇水渗透后强度降低、变形增大的特点,采用同时掺入石灰和粉煤灰的方法进行化学改良固化防渗,减少细粒流失,采用的灰土质量比(即石灰质量:粉煤灰质量:花岗岩残积土质量)分别设置为1:1:8,1:2:7和1:3:6。通过对改良前后的花岗岩残积土进行渗透试验和微观试验,对复掺石灰和粉煤灰的改良效果进行研究,为市政道路建设服务。

1 试验材料

1.1 花岗岩残积土

本研究所用花岗岩残积土取自福建省尤溪县香精香料产业集中区一期市政工程,天然土干密度为1.38 g/cm³。将土样烘干磨细并过2 mm筛,筛后土样如图1(a)所示。依据《土工试验方法标准》(GBT 50123—2019)^[10]对其进行室内土工试验和颗粒分析试验,结果见表1和图2。

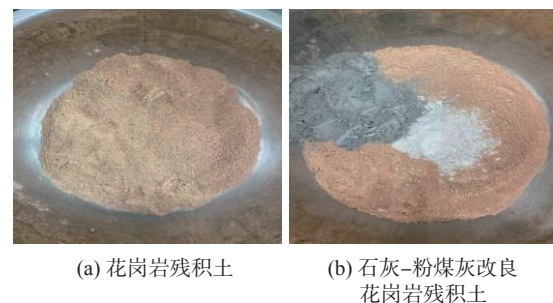


图1 试验材料

表1 福建花岗岩残积土的基本物理性质参数

土样名称	含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	天然干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度 G_s	天然孔隙比 e	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p
福建花岗岩残积土	19.0	1.64	1.38	2.67	0.934	31.9	45.6	13.7

试验花岗岩残积土样中粒径小于0.075 mm的颗粒含量为43.2%,平均粒径 d_{50} 为0.089 mm,不均匀系数 $C_u=4.7<5$,级配不良;塑性指数 $I_p=13.7$,土样可定名为级配不良的粉质黏土。该土样中黏粒($d<0.005$ mm)含量为22.9%,粉粒($0.075 \geq d > 0.005$ mm)含量为20.3%,主要矿物成分为石英及少量长石,黏土矿物成分以高岭石及伊利石为主。

1.2 石灰

所用石灰为天津市北辰方正试剂厂生产的氧化

钙分析纯,主要成分为CaO,含量达98%以上,相对密度为2.24。试验前将石灰粉过2 mm筛,为避免石灰与空气中的水反应,过筛后对石灰粉进行密封保存。

1.3 粉煤灰

试验用的粉煤灰为河南省巩义市北山口工业团生产的一级粉煤灰,具有颗粒细,相对密度小的特点,呈灰色粉末状,相对密度为2.17,主要成分为SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃和MgO,其中SiO₂含量为58%,Al₂O₃

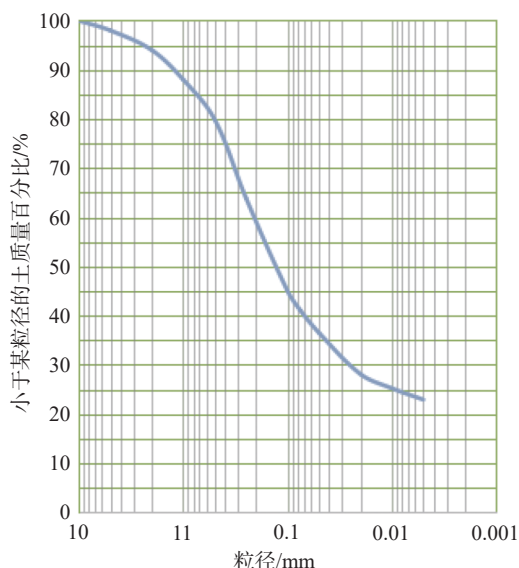


图2 花岗岩残积土颗粒级配曲线

含量为 30.5%， Fe_2O_3 含量为 4.5%， MgO 含量为 3.8%。该粉煤灰粒径为 0.1 mm 以下。复掺石灰和粉煤灰的土样如图 1(b)所示。

2 击实试验

2.1 土样制备

本文通过标准击实试验获取改良前后花岗岩残积土的最优含水率，以此作为渗透试验试样的初始含水率，重塑土样和改良土样的制备过程如下所示：

(1) 重塑土

取烘干、碾碎并过 2 mm 筛的花岗岩残积土 3 kg，平铺在不吸水的盘内，制备不同含水率的试样，五个为一组。重塑花岗岩残积土含水率设置为：12%，15%，19%，21%，23%。向土样加水时，使用喷壶少量多次进行喷洒。按照设置的含水率向花岗岩残积土加水并搅拌均匀，土样制备完成后密封保存，焖料 24 h

后进行击实。

(2) 改良土

改良土的制备过程与重塑土类似，向花岗岩残积土中同时掺入石灰和粉煤灰，灰土质量比分别设置为石灰：粉煤灰：花岗岩残积土=1：1：8，1：2：7，1：3：6。针对每种灰土比设置不同含水率，随后进行击实试验(见表 2)。

表 2 改良花岗岩残积土击实试验方案

含水率/%		
1：1：8灰土质量比	1：2：7灰土质量比	1：3：6灰土质量比
14	15	13
18	19	16
20	22	19
22	24	21
24	26	24

2.2 土样击实

本文击实试验采用 JDS-1 型数控电动击实仪，试验过程中对土样分三层击实，每层击数设置为 25，对不同土层间的接触面均匀刨毛以避免出现分层现象。击实完成后，用推土器将筒内的土样推出，在每个土样中心取 2 个 20 g 左右土块，测出其含水率，计算平均干密度。然后绘出土样的击实曲线，曲线峰值对应的含水率和干密度，为土样经过击实的最优含水率和最大干密度。

2.3 试验结果及分析

重塑花岗岩残积土与石灰、粉煤灰混合改良花岗岩残积土击实试验结果和击实曲线见表 3 和图 3。

表 3 重塑花岗岩残积土和改良花岗岩残积土的击实试验结果

重塑花岗岩残积土		1：1：8灰土质量比		1：2：7灰土质量比		1：3：6灰土质量比	
最优含水率/%	最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最优含水率/%	最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最优含水率/%	最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最优含水率/%	最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
18.71	1.72	20.21	1.66	22.05	1.61	19.63	1.55

如表 3 所示，重塑花岗岩残积土的最优含水率为 18.71%，最大干密度为 1.72 g/cm^3 ，由图 3 和图 4 可知，石灰和粉煤灰混合改良后的花岗岩残积土，最大干密度明显降低，最优含水率随着粉煤灰掺量的增多先增大后减小。

由于石灰相对密度 2.24 和粉煤灰相对密度 2.17 均明显低于花岗岩残积土的相对密度 2.67，因此随着改良土中石灰和粉煤灰比例的增加，土的最大

干密度不断减小；当土样掺入石灰和粉煤灰后，由于石灰与土中水反应释放热量，在一定程度上使土体内部结构破碎^[11]，同时由于粉煤灰颗粒较细，在二者的共同作用下，土样整体粒径降低，导致级配曲线的 C_u 增大，较改良前填充更加均匀，从而降低了有效击实功，使土中水分在击实过程中不易排出，提高了最优含水率；但随着粉煤灰掺量的进一步增大，土样的最优含水率反而下降，这是因为粉煤灰亲水性差从而引

起有效击实功增加, 故最优含水率下降。

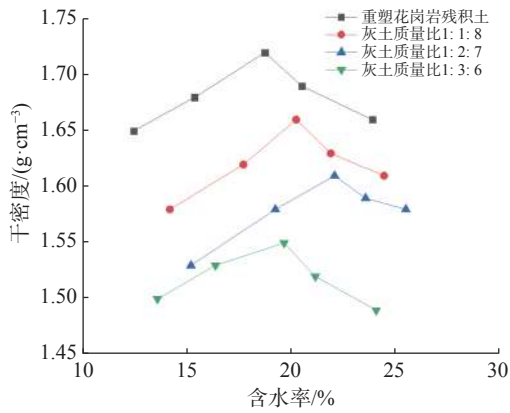


图3 重塑花岗岩残积土与改良花岗岩残积土的击实曲线

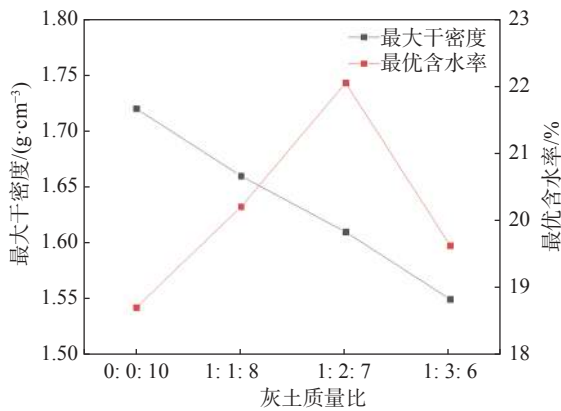


图4 灰土质量比与击实特性关系曲线

3 渗透试验

3.1 试样制备与饱和

渗透试验的环刀样采用静力压实法制备, 环刀内径 61.8 mm, 高 40 mm, 环刀体积为 120 cm³, 试样的初始含水率采用击实试验获取的最优含水率, 重塑花岗岩残积土的试样在制备完成后进行抽气饱和, 饱和完成后进行渗透试验; 改良花岗岩残积土试样制备完成后需在恒温恒湿(温度 20 ℃, 相对湿度 90%)的环境下养护 28 d, 之后再行抽气饱和与渗透试验。

3.2 试验方法及步骤

通过向花岗岩残积土中同时掺入石灰和粉煤灰来对其渗透性进行改良, 试验装置见图 5, 渗透试验方案及结果见表 4, 饱和和渗透系数与干密度、孔隙比的关系见图 6 和图 7。试验主要步骤如下:

(1) 把装好试样的渗透容器与水头装置连通。利用供水瓶中的水充满进水管, 水头高度 1.5 m, 待水头稳定后注入渗透容器。开排气阀, 排除渗透容器底部的空气, 直至溢出水无气泡, 然后关排气阀。

(2) 将水头管充水至需要高度后, 打开止水夹, 按水头每下降 10 cm 记录起始水头、终止水头和时间

的变化, 测记出水口的水温。如此连续测记 3 次后, 以这三次读数为—组试验; 再使水头管水位回升至需要高度, 重复试验 3 次。每个试样共读取 4 组试验数据, 并求取 4 组试验数据的平均值作为试样渗透结果, 最后根据达西定律计算饱和渗透系数。



图5 变水头渗透试验仪器

表4 改良花岗岩残积土渗透试验方案及结果

灰土质量比(石灰 : 粉煤灰 : 残积土)	干密度 ρ_d (g·cm ⁻³)	孔隙比 e	饱和和渗透系数 k_{20} (cm·s ⁻¹)
0 : 0 : 10	1.45	0.841	2.46×10 ⁻⁵
0 : 0 : 10	1.50	0.780	1.62×10 ⁻⁵
0 : 0 : 10	1.55	0.722	9.21×10 ⁻⁶
0 : 0 : 10	1.60	0.669	6.19×10 ⁻⁶
0 : 0 : 10	1.65	0.618	3.75×10 ⁻⁶
0 : 0 : 10	1.70	0.570	2.64×10 ⁻⁶
1 : 1 : 8	1.40	0.843	1.85×10 ⁻⁵
1 : 1 : 8	1.45	0.779	1.31×10 ⁻⁵
1 : 1 : 8	1.50	0.720	8.13×10 ⁻⁶
1 : 1 : 8	1.55	0.665	5.56×10 ⁻⁶
1 : 1 : 8	1.60	0.613	3.12×10 ⁻⁶
1 : 1 : 8	1.65	0.564	1.57×10 ⁻⁶
1 : 2 : 7	1.35	0.867	1.39×10 ⁻⁶
1 : 2 : 7	1.40	0.800	7.89×10 ⁻⁷
1 : 2 : 7	1.45	0.738	4.88×10 ⁻⁷
1 : 2 : 7	1.50	0.680	1.75×10 ⁻⁷
1 : 2 : 7	1.55	0.626	8.91×10 ⁻⁸
1 : 2 : 7	1.60	0.575	6.34×10 ⁻⁸
1 : 3 : 6	1.30	0.907	1.19×10 ⁻⁵
1 : 3 : 6	1.35	0.837	8.22×10 ⁻⁶
1 : 3 : 6	1.40	0.771	5.28×10 ⁻⁶
1 : 3 : 6	1.45	0.710	2.15×10 ⁻⁶
1 : 3 : 6	1.50	0.653	8.47×10 ⁻⁷
1 : 3 : 6	1.55	0.600	5.45×10 ⁻⁷

通常温度的变化会影响土样的渗透速度。本试验以 20 ℃ 为标准温度, 将试验结果统一校正至标准温度 20 ℃ 时的渗透系数, 便于进行比较。变水头的渗透系数按式(1)进行温度修正计算:

$$k_T = 2.3 \frac{aL}{At} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

式中： a 为变水头管截面积， cm^2 ； L 为渗径， cm ，等于试样高度（4 cm ）； A 为试样断面积（30 cm^2 ）； t 为时间间隔， s ； h_1 为开始时的水头， cm ； h_2 为终止时的水头， cm 。

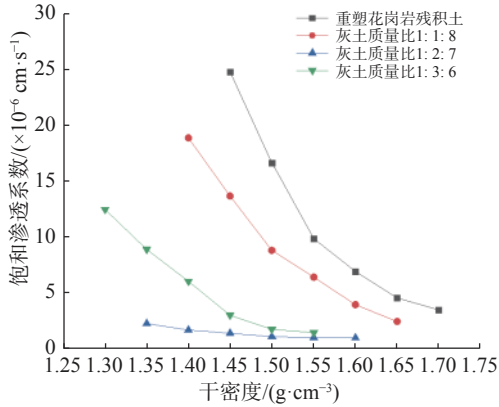


图6 改良花岗岩残积土饱和渗透系数与干密度的关系曲线

标准温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的渗透系数按式(2)计算：

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (2)$$

式中： η_T 为水温 $T^{\circ}\text{C}$ 时水的动力粘滞系数， $\text{kPa}\cdot\text{s}$ ； η_{20} 为水温 20 $^{\circ}\text{C}$ 时水的动力粘滞系数， $\text{kPa}\cdot\text{s}$ 。 η_T/η_{20} 与温度的关系可按《土工试验方法标准》(GBT 50123—

2019)中的表 8.3.5-1 执行。

3.3 试验结果及分析

重塑花岗岩残积土与改良花岗岩残积土的渗透试验方案及结果见表 4，饱和渗透系数与干密度、孔隙比的关系分别见图 6 和图 7。

通过对曲线进行指数函数拟合，得到了不同灰土比改良花岗岩残积土饱和渗透系数与孔隙比之间的拟合关系。

对于重塑花岗岩残积土，其指数函数拟合曲线为：

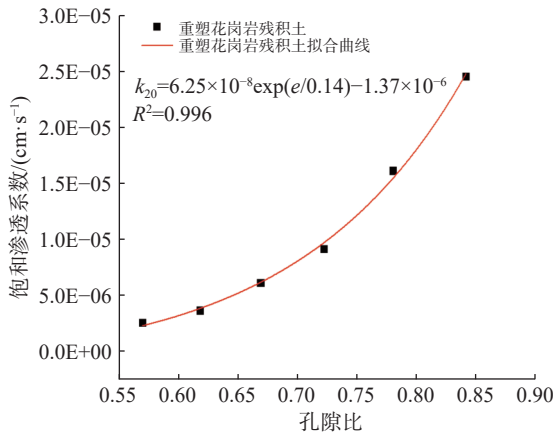
$$k_{20} = 6.25 \times 10^{-8} \exp(e/0.14) - 1.37 \times 10^{-6} \quad R^2 = 0.996 \quad (3)$$

式中： k_{20} 为标准温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的饱和渗透系数， cm/s ； e 为孔隙比； R 为相关系数。

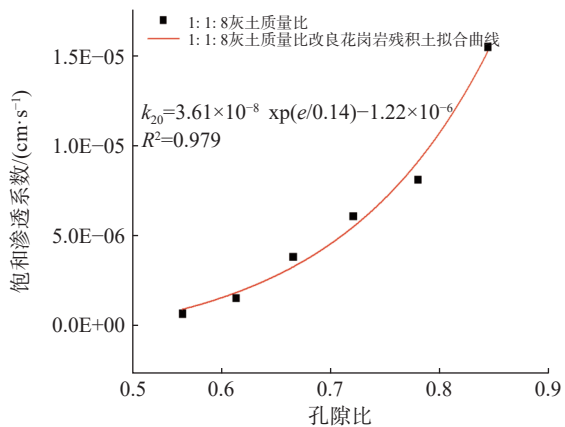
对于灰土质量比 1 : 1 : 8 的改良花岗岩残积土，其指数函数拟合曲线为：

$$k_{20} = 3.61 \times 10^{-8} \exp(e/0.14) - 1.22 \times 10^{-6} \quad R^2 = 0.979 \quad (4)$$

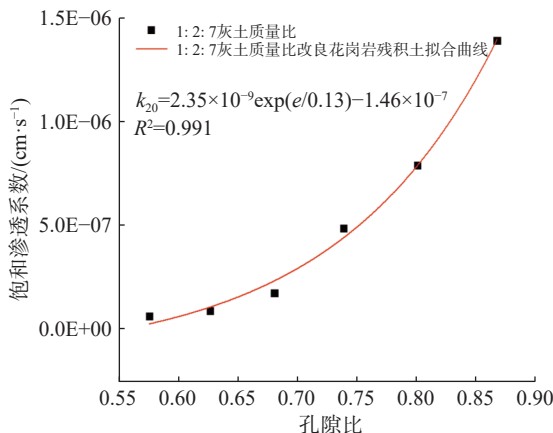
式中： k_{20} 为标准温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的饱和渗透系数， cm/s ； e 为孔隙比； R 为相关系数。



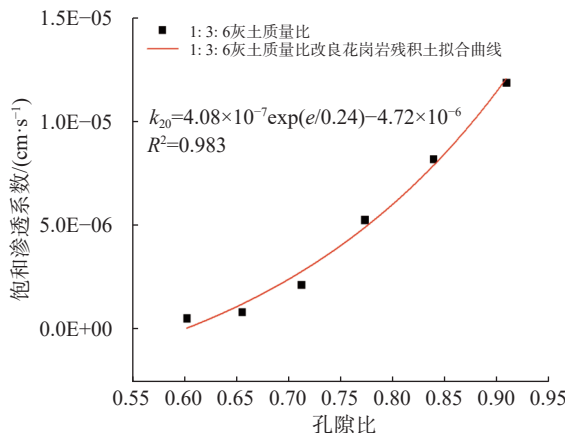
(a) 重塑花岗岩残积土



(b) 灰土质量比1: 1: 8



(c) 灰土质量比1: 2: 7



(d) 灰土质量比1: 3: 6

图7 改良花岗岩残积土渗透系数与孔隙比关系曲线

对于灰土质量比 1 : 2 : 7 的改良花岗岩残积土,其指数函数拟合曲线为:

$$\begin{aligned} k_{20} &= 2.35 \times 10^{-9} \exp(e/0.13) - 1.46 \times 10^{-7} \\ R^2 &= 0.991 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: k_{20} 为标准温度 20 °C 时的饱和渗透系数, cm/s; e 为孔隙比; R 为相关系数。

对于灰土质量比 1 : 3 : 6 的改良花岗岩残积土,其指数函数拟合曲线为:

$$\begin{aligned} k_{20} &= 4.08 \times 10^{-7} \exp(e/0.24) - 4.72 \times 10^{-6} \\ R^2 &= 0.983 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k_{20} 为标准温度 20 °C 时的饱和渗透系数, cm/s; e 为孔隙比; R 为相关系数。

通过上述拟合曲线表达式可以看出,指数函数对饱和渗透系数与孔隙比之间的关系曲线进行拟合效果良好,相关系数的平方均达到 0.97 以上。由图 6 可知,改良前后的花岗岩残积土饱和渗透系数均随干密度的增大而减小,其原因是干密度的增大使土体内部趋于密实,造成有效渗流孔隙的减少,从而降低了渗透系数。试样的饱和渗透系数在干密度较小时变化明显,但随着干密度不断增高,渗透系数变化幅度逐渐降低,曲线趋于平缓。

随着石灰和粉煤灰的掺入,花岗岩残积土的饱和渗透系数逐渐降低,当灰土质量比(石灰:粉煤灰:花岗岩残积土)为 1 : 2 : 7 时,改良花岗岩残积土的渗透系数最低且变化幅度最大,其渗透系数的量级由改良前的 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/s 降低至 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/s,是由于土中掺入石灰后,石灰与土中水反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 电解产生的 Ca^{2+} 置换土体中的 Na^+ 和 K^+ ,使土中颗粒水膜变薄,颗粒间距减小,促使细颗粒与黏土胶状物絮凝; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与土中的二氧化碳及硅、铝氧化物反应生成碳酸钙结晶与水稳定性较好的钙质化合物^[12],这些产物对土中小颗粒具有胶结作用,使团粒体间的空隙尺度减少,导致渗透系数降低;粉煤灰颗粒携带的 Fe^{3+} 和 Mg^{2+} 与土中 Na^+ 和 K^+ 会进行离子交换作用,与石灰的作用机理类似,这会使土中小颗粒形成絮凝体,其较大的表面能促使絮凝体进一步联合兼并,导致团粒体间空隙不断减小,阻碍了水在土体内的流动^[13]。在石灰和粉煤灰的共同作用下,颗粒间的孔隙尺寸减少,改良花岗岩残积土的饱和渗透系数明显减小;同时因石灰和粉煤灰在土体内的物理填充、高价阳离子置换及化学反应生成新的钙质化合物等,阻碍了黏粒的淋滤与渗透流失。

如图 7 所示,重塑花岗岩残积土和各灰土质量比的改良花岗岩残积土饱和渗透系数均随孔隙比的增大而增大;孔隙比约以 0.75 为界,当孔隙比大于 0.75 时,孔隙比越高,渗透系数增大幅度就越明显。

4 微观试验

通过对改良前后的福建尤溪花岗岩残积土进行扫描电子显微镜(SEM)试验,探究微观结构对花岗岩残积土及改良土的渗透性的影响。不同灰土质量比的改良花岗岩残积土试样均在恒温恒湿(温度 20 °C,相对湿度 90%)的条件下养护 28 d 后再取样进行试验。试验结果见图 8。

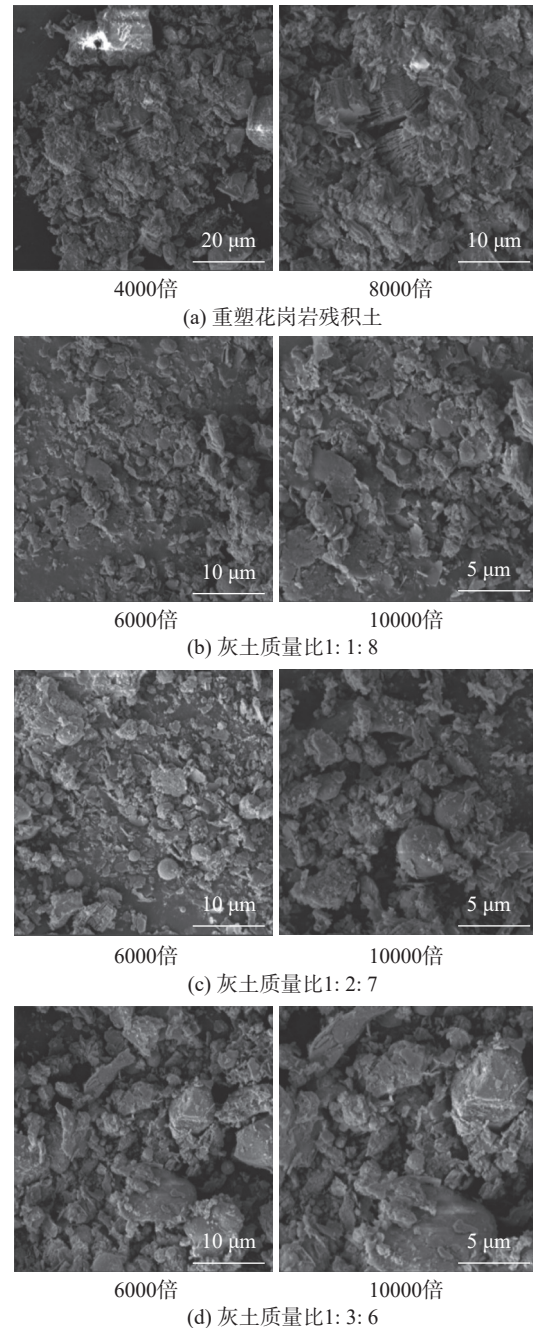


图 8 尤溪花岗岩残积土及改良土的电镜扫描图片

图 8(a)—图 8(d)为不同灰土质量比的福建尤溪花岗岩残积土试样在不同放大倍数下的微观图片。由图 8(a)可知, 重塑花岗岩残积土中的团粒体有两种类型, 一种是粉砂粒黏结在一起形成的团粒体, 另一种是黏土矿物诸如高岭石片叠合在一起形成的团粒体。团粒体间的孔隙大小不一, 排列较为松散。团粒体间的孔隙较大, 且含有一定量的大、中孔隙, 是水在土体中渗透的主要通道; 团粒体内部的孔隙较小, 为小、微孔隙^[14]。团粒体之间接触方式以面-面接触和边-面接触为主。由于高岭石、伊利石属于黏土矿物, 特别是伊利石有较强的亲水性, 这是花岗岩残积土遇水膨胀的原因之一。

由图 8(b)、图 8(c)可知, 随着石灰和粉煤灰掺量的增加, 土样中碳酸钙结晶和钙质化合物等胶结物数量不断增加, 团粒体数目增多, 大、中孔隙被分割为微小孔隙, 从而降低了土样的渗透系数。

由图 8(d)可知, 随着粉煤灰掺量的增加, 团粒体排列分散, 这是由于粉煤灰胶结能力不强与含量过多所致, 团粒体间的孔隙尺寸进一步增大, 导致灰土质量比 1:3:6 的改良花岗岩残积土渗透系数又有所增大。

5 结论

本文以福建尤溪花岗岩残积土为研究对象, 通过掺入不同比例的石灰和粉煤灰来提高其抗渗性, 对改良前后的花岗岩残积土进行击实试验、室内变水头渗透试验和微观试验, 研究不同掺量的外加剂对其渗透性的影响, 得出如下结论:

(1)随着石灰和粉煤灰的掺入, 土体最大干密度不断降低, 而最优含水率先增大再减小, 这是由于粉煤灰的不断增多使土体颗粒级配变差, 同时由于粉煤灰亲水性差, 因此当灰土质量比为 1:3:6 时最优含水率出现了下降。

(2)最大干密度的增加或降低取决于外加剂的相对密度, 由于石灰相对密度 2.24 和粉煤灰相对密度 2.17 均低于花岗岩残积土的相对密度 2.67, 因此改良花岗岩残积土的最大干密度较重塑花岗岩残积土有所降低。

(3)当掺入石灰和粉煤灰后, 不同灰土比的改良花岗岩残积土饱和渗透系数均出现了下降, 其中灰土质量比为 1:2:7 的土样渗透系数最低。从环保经济的角度考虑, 推荐采用灰土质量比 1:2:7 的方案对花岗岩残积土的渗透性进行改良。

(4)微观试验发现, 重塑花岗岩残积土中的团粒体有两种类型, 一种是粉砂粒黏结在一起形成的团粒

体, 另一种是高岭石片叠合在一起形成的团粒体。团粒体间的孔隙较大, 且含有一定量的大孔隙; 团粒体内部的孔隙较小。团粒体之间接触方式以面-面接触和边-面接触为主。随着石灰和粉煤灰掺量的增加, 土样中碳酸钙结晶和钙质化合物等胶结物数量不断增加, 导致团粒体数目增多, 大、中孔隙被分割为微小孔隙, 从而降低了土样的渗透系数。

参考文献

- [1] 洪昌伟. 广西花岗岩残积土强度与渗透性及工程应用研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [2] 刘金明. 玄武岩纤维与纳米氧化铁对花岗岩残积土性质影响的研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- [3] 臧东亮. 花岗岩残积土力学性能改良试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(1): 31-35, 51.
- [4] AI-SHAYEA, NASER A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils[J]. *Engineering Geology*, 2001, 62(4): 319-342.
- [5] DENG Y F, WU Z L, CUI Y J, et al. Sand fraction effect on hydro-mechanical behavior of sand-clay mixture[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 135: 355-361.
- [6] AN R, KONG L, LI C. Effects of drying-wetting cycles on the microstructure and mechanical properties of granite residual soils[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2022, 58(6): 474-481.
- [7] 王志兵, 邹永胜, 李 斌, 等. 桂东南花岗岩风化土与残余节理的微观结构及演化 [J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(3): 405-415.
- [8] 马士力, 白 云, 李大勇. 砂土中黏粒含量对渗透性的影响 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2018, 43(1): 226-231.
- [9] 胡其志, 洪昌伟, 李 鸣. 不同黏粒含量对花岗岩残积土渗透性影响 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(32): 267-271.
- [10] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [11] 王绍全, 高 斯, 何钰龙, 等. 基于微观分析的石灰改良粉质粘土击实特性 [J]. *中外公路*, 2015, 35(6): 246-248.
- [12] 刘 胜. 石灰—粉煤灰改良花岗岩残积土试验研究 [D]. 福州: 福州大学, 2018.
- [13] 林 彤. 粉煤灰加固软土地基的室内配方试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2003(S1): 76-78.
- [14] 张雪娇, 刘 攀, 杨雪强, 等. 石灰改良黄土渗透性与孔隙结构的关系研究 [J]. *广东工业大学学报*, 2021, 38(3): 97-103