

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202311028



花岗岩残积土抗剪强度与 微观结构特征

李扬波¹, 李如玥¹, 石熊², 陈怿旸³, 吴波¹, 林炼伟¹

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004;

3. 江西省交通设计研究院有限责任公司, 江西 南昌 330052)

摘要: 对不同水的质量分数(含水率)及不同压实度的花岗岩残积土试样开展三轴试验和电镜扫描试验, 探究土样的抗剪强度特性与微观孔隙结构之间的关系, 从微观角度揭示花岗岩残积土的抗剪强度衰减机理。试验结果表明: 花岗岩残积土试样的应力-应变曲线呈现应变硬化特征, 抗剪强度随着含水率的升高而降低, 随着压实度的增加而增加, 且在围压应力较低时, 花岗岩残积土试样对含水率及压实度的敏感性更强; 从微观角度, 花岗岩残积土试样的中孔隙和大孔隙的占比随着含水率的升高而增加, 随着压实度的增加而减少。

关键词: 花岗岩残积土; 抗剪强度; 微观结构; 水的质量分数(含水率); 压实度

中图分类号: TU 411. 7

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)03-0332-07

Shear Strength and Microstructure Characteristics of Granite Residual Soil

LI Yangbo¹, LI Ruyue¹, SHI Xiong²,
CHEN Yiyang³, WU Bo¹, LIN Lianwei¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

3. Jiangxi Communications Design and Research Institute Limited Company, Nanchang 330052, China)

Abstract: The triaxial test and electron microscopy scanning test are conducted on the granite residual soil sample with different water mass fractions (water content) and different compaction degrees. The relationship between the shear strength characteristic and the microscopic pore structure of the soil samples are explored, and the shear strength attenuation mechanism of the granite residual soil is revealed from microscopic view. The experiment results show that the stress-strain curves of the granite residual soil sample have the strain hardening characteristic. The shear strength decreases with the increase of water content and increases with the increase of compaction degree. Under the low confining pressure stress, the granite residual soil samples are more sensitive to the water content and the compaction degree. From microscopic view, the proportion of mesopores and macropores in granite residual soil samples increases with increasing water content and decreases with increasing compaction degree.

Keywords: granite residual soil; shear strength; microstructure; water mass fraction (water content); compaction degree

收稿日期: 2023-11-02

通信作者: 李扬波(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程的研究。E-mail: 258251182@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278397, 52168055); 江西省教育厅科学技术资助项目(GJJ210705)

随着公路和铁路等交通网布局逐步完善,我国东南部花岗岩残积土地区面临大量的工程建设。花岗岩残积土是一种遇水易崩解、软化的区域性特殊土^[1]。花岗岩残积土结构特点介于砂性土和黏性土之间,力学特性比一般黏性土或砂性土更复杂^[2]。刘嘉^[3]对花岗岩残积砂质黏性土的蠕变特性进行研究。赖榕洲等^[4]为了研究花岗岩残积土的软化效应,对等压实度下不同含水率的花岗岩残积土进行三轴试验。尹松等^[5]研究发现花岗岩残积土受气候和动荷载影响较大,对花岗岩残积土作为路基填料的适用性进行了研究。田鹏飞等^[6]对花岗岩残积土路基常见病害进行调研,并提出了防治措施。Wang 等^[7]研究循环荷载下花岗岩残积土的累积塑性变形特征。Liu 等^[8]研究干湿循环对花岗岩残积土的微观特征和力学特征的影响。

岩土体的微观结构对宏观力学性质起重要作用,通过岩土体的微观结构能定性定量地解释其宏观力学特性^[9-10]。目前,已有多种微观探测方式被应用于岩土体微观结构的检测^[11-12]。刘宽等^[13]结合电镜扫描实验(SEM)和核磁共振试验(NMR)对干湿循环条件下膨胀土的微观孔隙发展规律进行研究。王志兵等^[14]结合 SEM 试验和压泵试验(MIP)对全风化花岗岩的颗粒和孔隙的形态及分布特征进行定量分析。水的质量分数(含水率)和压实度是控制路基填筑的关键参数,结合微观角度分析含水率和压实度对花岗岩残积土力学性质影响的研究还较少。为了进一步了解花岗岩残积土的工程特性,本文对花岗岩残积土抗剪强度与微观结构特征进行研究。

1 试验方案

1.1 基本物理性质

试验土样取自江西省赣州市某高速公路,花岗岩残积土呈黄褐色,夹杂少量云母和石英,有砂感,具有黏性和砂性的复合特征。土样的最大干密度为 $1.67\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;最优含水率为 21%;塑限为 25.92%;液限为 47.27%;塑性指数为 21.35。

取粒径小于 0.075 mm 的土样做 X 射线衍射试验,对所取土样的矿物成分进行分析,结果显示,土样主要矿物成分为石英和高岭石,次要矿物成分为伊利石和绿泥石。

1.2 试验方法

1.2.1 三轴试验 将从现场取回的土样风干后碾碎,过 2 mm 筛备用。为研究压实度对花岗岩残积土抗剪强度的影响,设置试样压实度分别为 92%,94%,96%,100%,含水率均为最优含水率(21%)。

为研究含水率对花岗岩残积土的影响,设置试样含水率分别为 15%,17%,19%,21%,23%,压实度均为 96%。采用 TSZ 型全自动三轴仪进行不固结不排水三轴试验,设置 4 个不同围压应力(25,50,100,150 kPa),剪切速率为 $0.08\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,轴向应变达到 16%时,试验结束。

每组试验均设置两组平行试验以消除试验结果的不确定性。

1.2.2 扫描电镜试验 SEM 试验采用 Nova NANOSEM450 型扫描电镜,将三轴试验结束后的试样先用小刀切成小长条块,干燥后用手小心的掰断,在断面溅射镀金,观察断裂面,放大 800 倍进行观察,图片采用 Image J 软件进行分析处理,参考已有的图像定量分析经验^[15],对图像进行调整亮度、对比度,去除图像噪点后进行二值化处理,提取孔隙周长、面积和倾角等数据。

2 实验结果与分析

2.1 含水率对花岗岩残积土抗剪强度的影响

2.1.1 应力-应变曲线特征分析 对压实度为 96%,含水率分别为 15%,17%,19%,21%,23%的花岗岩残积土试样进行三轴压缩试验。不同含水率(ω)花岗岩残积土的应力-应变曲线,如图 1 所示。图 1 中: σ_1 为轴向应力; σ_3 为围压应力; ϵ 为应变。

由图 1 可知:含水率分别为 15%,17%,19%,21%试样在低围压应力下(25 kPa)的应力-应变曲线表现为理想塑性,随着围压应力的升高,试样的应力-应变曲线逐渐由理想塑性转向弱应变硬化型,最终转为强应变硬化型;含水率为 23%试样在低围压应力下(25 kPa)的应力-应变曲线表现为理想塑性,随着围压应力的升高,逐渐转为弱应变硬化型。

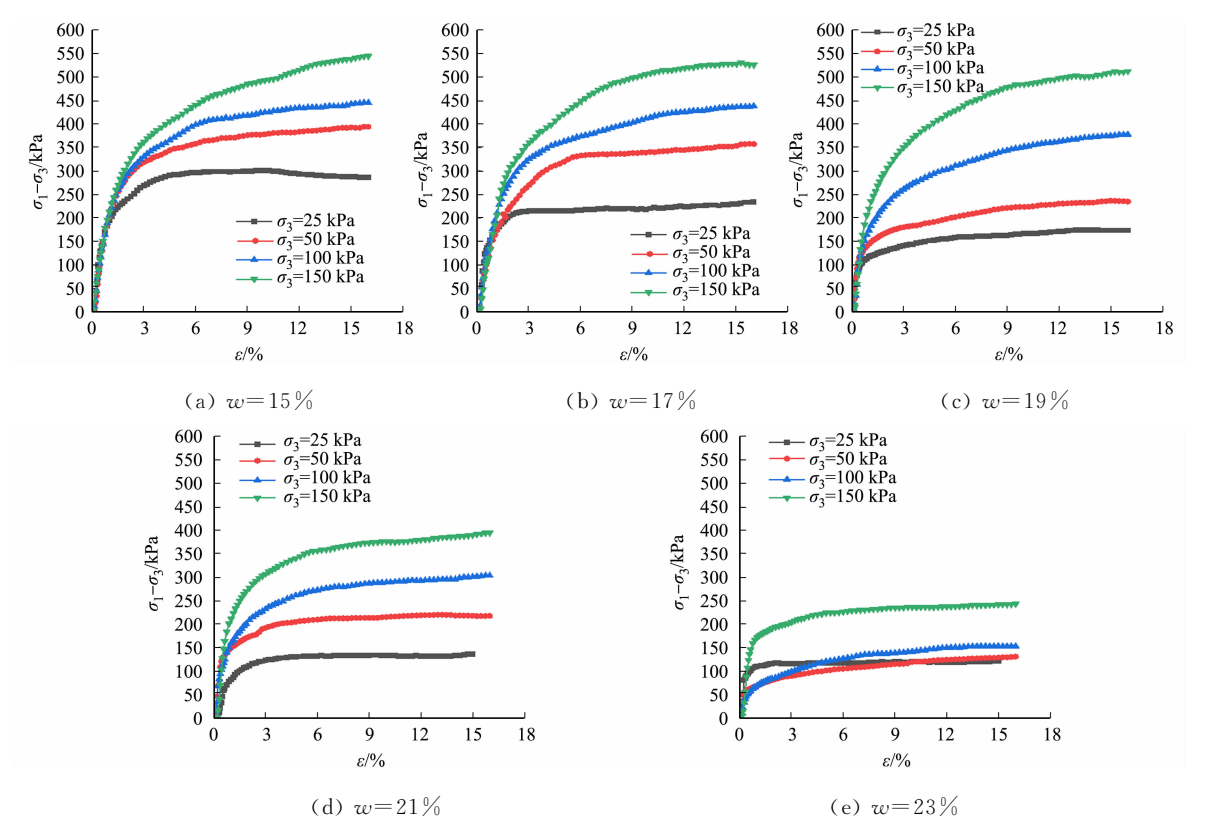


图 1 不同含水率花岗岩残积土的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of granite residual soil with different water contents

2.1.2 抗剪强度变化曲线分析 偏应力峰值为抗剪强度,当无明显偏应力峰值时,定义应变为 15%时,对应的偏应力值为抗剪强度。抗剪强度随着含水率变化曲线,如图 2 所示。图 2 中: σ_m 为抗剪强度。由图 2 可知以下 6 点结论:

- 1) 当围压一定时,随着含水率的升高,试样的抗剪强度显著降低;
- 2) 当围压为 50 kPa 时,抗剪强度在含水率为 17% 时有明显突变点,出现显著下降;
- 3) 当围压为 150 kPa 时,抗剪强度突变点出现在含水率为 19%;
- 4) 在围压为 100 kPa 时,抗剪强度突变点不明显,在含水率 17% 和 19% 时都有明显下降,推测其突变点出现在含水率 17%~19% 之间;
- 5) 在围压较高的情况下,花岗岩残积土抗剪强度对含水率的敏感性随着含水率的升高而增强;
- 6) 相较于含水率为 15% 的试样抗剪强度,含水率为 23% 的试样抗剪强度在 25, 50, 100, 150 kPa 分别下降了 57.80%, 67.31%, 65.51%, 5.16%, 表明在围压较低时(小于 100 kPa), 土体受到水的软化作用更明显。

在实际工程建设中,土体被用作填筑材料时,受到围压往往小于 100 kPa,所以,水对花岗岩残积土的软化作用是不可忽视的。

2.2 压实度对花岗岩残积土抗剪强度的影响

2.2.1 应力-应变曲线特征分析 对含水率为 21%, 压实度(k)为 92%, 94%, 96% 和 100% 的花岗岩残积土试样进行三轴压缩试验。不同压实度花岗岩残积土的应力-应变曲线,如图 3 所示。由图 3 可知: 在低围压应力(25 kPa)时,不同压实度试样应力-应变曲线表现为弱应变硬化型;随着围压应力的升高,各压实度试样的应力-应变曲线逐渐由弱应变硬化型向强应变硬化型转换。

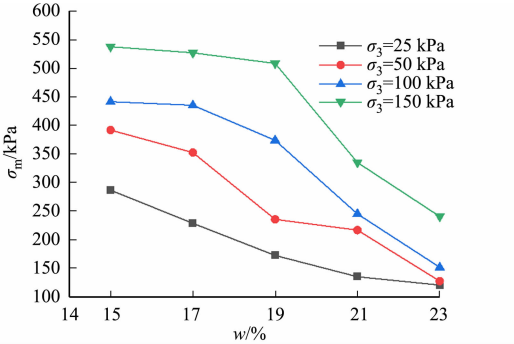


图 2 抗剪强度随着含水率变化曲线
Fig.2 Curves of shear strength with water content variation

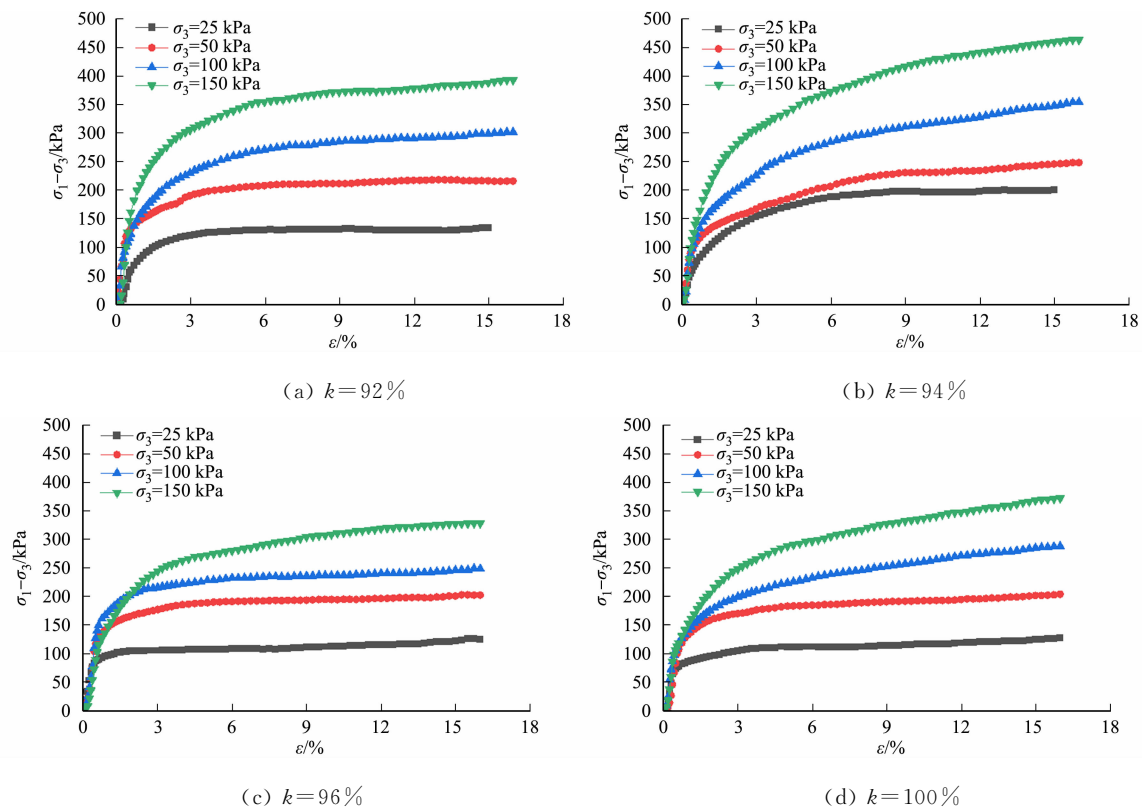


图 3 不同压实度花岗岩残积土的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of granite residual soil with different compactness

2.2.2 抗剪强度变化曲线分析 抗剪强度与压实度关系曲线,如图 4 所示。由图 4 可知:当围压应力一定时,压实度逐渐增加,试样抗剪强度也随之提升;当围压应力为 25 kPa 时,压实度为 100% 试样较压实度为 92% 试样的抗剪强度由 122.39 kPa 增加到了 200.34 kPa,增加了约 63.38%,而在围压应力 100,150 kPa 时,压实度为 100% 试样的抗剪强度较压实度为 92% 试样的抗剪强度由 246.07 和 327.17 kPa 增加到 347.50 和 458.83 kPa,分别增加了约 41.22%,40.24%,说明在低围压应力下(25 kPa),花岗岩残积土的抗剪强度对压实度的敏感性更强。

2.3 微观结构定性分析

不同含水率花岗岩残积土试样 SEM 图像,如图 5 所示。由图 5 可知:在含水率较低时(15%,17%),试样的微观结构有明显的粗颗粒,粗颗粒为不规则的片状和块状,可见残留的骨架及黏土矿物的填充结构,由于经历了三轴试验,颗粒间的小孔隙含量较多;随着含水率的升高,试样中的颗粒排列表现出杂乱无序的特征,难以分清粗颗粒骨架和填充的黏土矿物结构,黏土矿物吸水后粘结成较大的团粒,

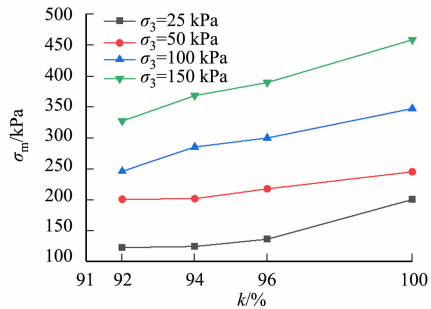
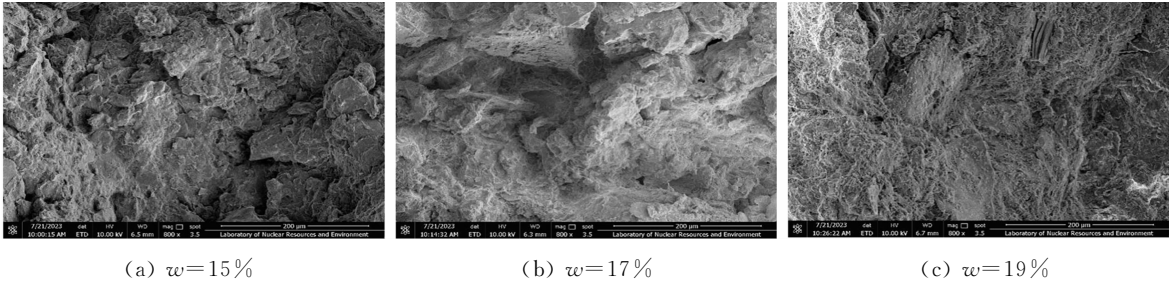


图 4 抗剪强度随着压实度变化曲线

Fig. 4 Curves of shear strength with compaction degree variation



(a) $w=15\%$ (b) $w=17\%$ (c) $w=19\%$

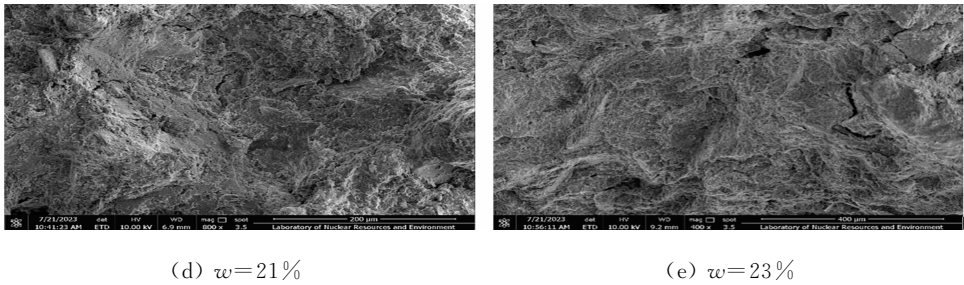


图 5 不同含水率花岗岩残积土试样 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of granite residual soil sample with different water contents

原本片状和块状的颗粒吸水后表现为凝絮状,颗粒排列杂乱,无明显的定向性。

不同压实度花岗岩残积土试样 SEM 图像,如图 6 所示。由图 6 可知:试样颗粒因吸水粘结成团状,在低压实度下($k=92\%$),试样存在明显的大孔隙;随着压实度的增加,大孔隙显著减少,转为以微小孔隙为主,各压实度下颗粒均排列无序,相互粘结成团粒,呈凝絮状,无法辨别骨架与充填结构。

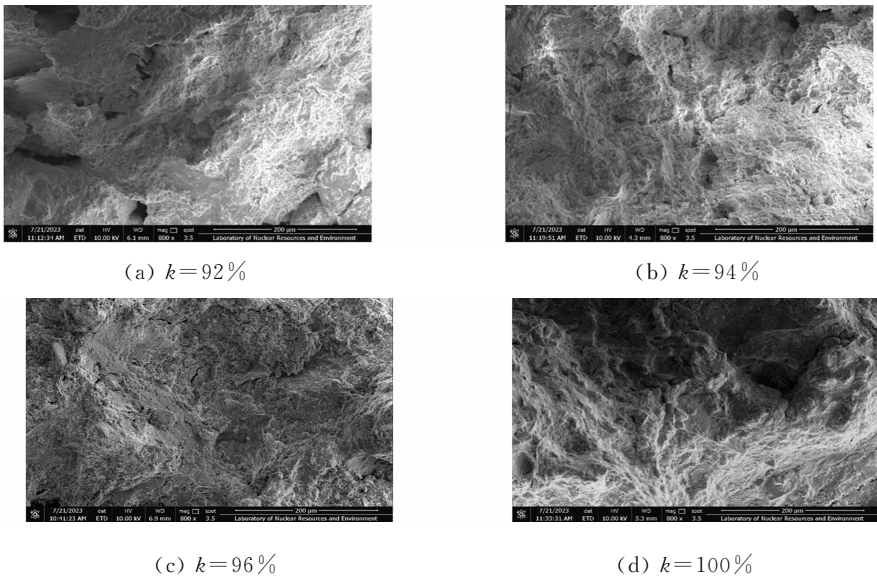


图 6 不同压实度花岗岩残积土试样 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of granite residual soil sample with different compactness

2.4 微观结构定量分析

2.4.1 孔隙分布特征 采用孔隙等效直径对孔隙大小进行定量分析,孔隙等效直径(D)表达式为

$$D=\sqrt{\frac{4A}{\pi}}。$$
 (1)

式(1)中: A 为孔隙的面积。

在 150 kPa 的围压应力下,不同含水率花岗岩残积土试样孔径分布,如图 7 所示。由图 7 可知:花岗岩残积土试样均以 $D<1\ \mu\text{m}$ 的孔隙为主, $D>20\ \mu\text{m}$ 的孔隙含量很少,接近于 0;随着含水率的增高, $D<1\ \mu\text{m}$ 的孔隙减少, $1\ \mu\text{m}\leq D<2\ \mu\text{m}$ 及 $2\ \mu\text{m}\leq D<5\ \mu\text{m}$ 的孔隙有所上升且上升得较为明显, $D>20\ \mu\text{m}$ 的部分也有所上升但上升不明显;在加载的应力的作用下,大的孔隙会先被压缩、填充,故大孔隙含量最少,而 $D<5\ \mu\text{m}$ 的孔隙含量最多。

在 150 kPa 的围压应力下,不同压实度花岗岩残积土试样孔径分布,如图 8 所示。

由图 8 可知:不同压实度三轴试验后试样的孔隙均以 $D<1\ \mu\text{m}$ 的微孔为主,三轴试验后,随着压实度的增加, $D<1\ \mu\text{m}$ 的孔隙占孔隙总量的比例增加,而 $5\ \mu\text{m}<D\leq 20\ \mu\text{m}$ 与 $D>20\ \mu\text{m}$ 的孔隙占孔隙总量的比例减少;试样压实度越低,试样所存在的孔隙中大孔隙占比更多,在荷载作用下大孔隙优先被压缩充填,故在相同荷载下,大孔隙占比更多的低压实度试样更容易产生变形、破坏,在宏观三轴试验中呈现出抗剪强度更低的特点。

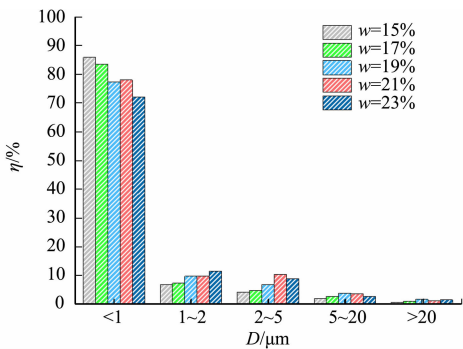


图 7 不同含水率花岗岩残积土试样孔径分布
Fig. 7 Pore size distribution of granite residual soil samples with different water contents

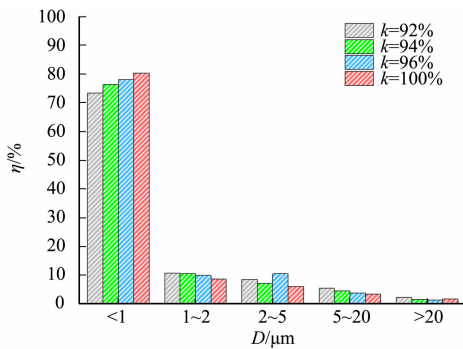


图 8 不同压实度花岗岩残积土试样孔径分布
Fig. 8 Pore size distribution of granite residual soil samples with different compactness

2.4.2 孔隙形态特征 采用孔隙丰度(C)对孔隙的形态特征进行定量分析,其定义为孔隙的短轴与长轴之比,其比值越小,孔隙越接近狭长形;其比值越接近于 1,孔隙越接近等轴形,形状越趋近于圆。不同含水率、压实度试样孔隙丰度分布,如表 1,2 所示。如表 1,2 中: ξ 为孔隙丰度界限的占比。

表 1 不同含水率试样孔隙丰度分布

Tab.1 Pore abundance distribution of sample with different water contents

$w/\%$	$\xi/\%$				
	$0\leq C<0.2$	$0.2\leq C<0.4$	$0.4\leq C<0.6$	$0.6\leq C<0.8$	$0.8\leq C<1.0$
15	0.34	30.10	43.49	22.07	4.00
17	0.43	30.11	43.35	22.52	3.58
19	0.50	27.93	43.03	23.79	4.76
21	0.41	26.68	43.84	24.20	4.87
23	0.34	25.46	42.20	26.06	5.94

表 2 不同压实度率试样孔隙丰度分布

Tab.2 Pore abundance distribution of sample with different compaction rates

$k/\%$	$\xi/\%$				
	$0\leq C<0.2$	$0.2\leq C<0.4$	$0.4\leq C<0.6$	$0.6\leq C<0.8$	$0.8\leq C<1.0$
92	1.17	27.20	43.20	23.61	4.83
94	0.45	26.91	44.44	23.35	4.86
96	0.41	26.68	43.84	24.20	4.87
100	0.43	29.09	42.73	23.49	4.26

由表 1 可知:三轴试验后的试样孔隙丰度都以 $0.4\leq C<0.6$ 的长条形为主,随着含水率的增加,等轴形的孔隙有小幅增加,长条形的孔隙有所减少;在较高含水率下,孔隙丰度整体偏高,表明在高含水率下,孔隙微观结构由长条形向等轴形发展,与 SEM 图像所呈现出的结果一致。结合 SEM 图像分析可知,造成这一现象的原因是含水率较高时,黏土矿物吸水膨胀,形成了蜂窝状的孔隙。

由表 2 可知:随着压实度的增加,孔隙丰度变化不大,孔隙形态变化趋势不明显,说明试样孔隙形态特征受压实度影响较小,孔隙形态特征主要受含水率的影响。

3 花岗岩残积土抗剪强度特性的微观机制

花岗岩残积土是由花岗岩风化形成的,主要成分为石英和高岭石,虽然含水率较高时,高岭石等黏土矿物吸水变为凝絮状,轴向加载作用下,粗颗粒石英骨架依旧表现出较强支撑作用,使试样在较大的变形下依然表现出较高的强度,使花岗岩残积土花岗岩的应力-应变曲线为应变硬化型。

较高质量分数的黏土矿物会吸水导致体积膨胀,在含水率较高的情况下,花岗岩残积土中吸水膨胀的黏土矿物占比增多,导致试样原本的充填结构被破坏,并且黏土矿物相互粘结,使临近的孔隙相互贯通,使中、大孔隙的占比增加,导致试样整体结构被破坏(图 6),从而使试样强度降低。

在压实度较低的情况下,粗颗粒石英骨架难以形成致密的结构,花岗岩残积土的中、大孔隙占比更

多,在轴向加载作用下,中、大孔隙会优先被压缩,故压实度较低试样更容易产生变形、破坏,表现出强度降低的特点。

4 结 论

- 1) 当围压应力一定时,试样含水率超过 19%时,抗剪强度下降更明显;花岗岩残积土试样的抗剪强度随着含水率的升高而降低;并且在低围压应力下(小于 100 kPa)时,水对土体的软化作用更明显。
- 2) 当围压应力一定时,随着压实度的降低,花岗岩残积土试样的抗剪强度呈现劣化趋势,并且在低围压应力下,花岗岩残积土的抗剪强度对压实度的敏感性更强。
- 3) 从微观孔隙结构发现,含水率较高时黏土矿物吸水膨胀,导致小孔隙相互贯通形成更大的孔隙。
- 4) 在含水率较高及压实度较低时,试样中、大孔隙占比更多,在荷载作用下,试样的大孔隙优先被压缩,故高含水率及低压实度的花岗岩残积土更易变形、破坏,在宏观角度上表现出强度劣化的特点。

参考文献:

[1] 安然,孔令伟,张先伟. 残积土孔内剪切试验的强度特性及广义邓肯-张模型研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(9): 1723-1732. DOI:10. 11779/CJGE202009017.

[2] FONSECA A,CARVALHO J,FERREIRA C,*et al.* Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2006, 24(5):1307-1348. DOI:10. 1007/s10706-005-2023-z.

[3] 刘嘉. 花岗岩残积砂质黏性土的蠕变特性与本构模型[J]. 水运工程,2019(8):52-57. DOI: 10. 16233/j. cnki. issn1002-4972. 20190805. 027

[4] 赖榕洲,吴能森,徐青. 压实花岗岩残积土软化特性试验研究[J]. 湖北工业大学学报,2013,28(5):96-98. DOI:10. 3969/j. issn. 1003-4684. 2013. 05. 027.

[5] 尹松,孔令伟,杨爱武,等. 花岗岩残积土填料路用工程特性室内试验研究[J]. 岩土力学,2016,37(增刊 2):287-293.

[6] 田朋飞,简文星,宋治,等. 赣南花岗岩残积土基本物理特性与路用性能研究[J]. 公路交通科技,2020,37(9):41-49.

[7] WANG Yin,ZHANG Shixing,YIN Song,*et al.* Accumulated plastic strain behavior of granite residual soil under cycle loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(11): 4020205. DOI: 10. 1061/(ASCE)GM. 1943-5622. 0001850.

[8] LIU Peng,CHEN Renpeng,WU Kai,*et al.* Effects of drying-wetting cycles on the mechanical behavior of reconstituted granite-residual soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(8): 4020199. DOI: 10. 1061/(ASCE)MT. 1943-5533. 0003272.

[9] WILKINSON S. The microstructure of UK mudrocks[D]. London:Imperial College,2011.

[10] 汤华,严松,杨兴洪,等. 差异含水率下全风化混合花岗岩抗剪强度与微观结构试验研究[J]. 岩土力学,2022,43(增刊 1):55-66. DOI:10. 16285/j. rsm. 2022. 0029.

[11] JIANG Mingjing,ZHANG Fuguang,HU Huajun,*et al.* Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests[J]. Engineering Geology,2014,181:249-260. DOI:10. 1016/j. enggeo. 2014. 07. 021.

[12] 朱楠,刘春原,赵献辉,等. 不同应力路径下 K_0 固结结构性黏土微观结构特征试验研究[J]. 岩土力学,2020,41(6):1899-1910. DOI:10. 16285/j. rsm. 2019. 1558.

[13] 刘宽,叶万军,高海军,等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(10):2148-2159. DOI:10. 13722/j. cnki. jrme. 2020. 0170.

[14] 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. DOI:10. 16030 /j. cnki. issn. 1000-3665. 2018. 05. 14.

[15] JULINA M,THYAGARAJ T. Quantification of desiccation cracks using X-ray tomography for tracing shrinkage path of compacted expansive soil[J]. Acta Geotechnica,2018,14:35-36. DOI:10. 1007/s11440-018-0647-4.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)