

# 非饱和玄武岩残积土剪切特性试验研究

李勇<sup>1</sup> 雷学文<sup>1</sup> 孟庆山<sup>2</sup> 陈洁<sup>1,3</sup>

(武汉科技大学城市建设学院<sup>1</sup>, 武汉 430065; 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室<sup>2</sup>, 武汉 430071;  
仲恺农业工程学院城市建设学院<sup>3</sup>, 广州 510225)

**摘要** 非饱和土中的基质吸力对其抗剪强度特性有重要的影响。选取贵州毕威高速公路沿线的玄武岩残积土样,采用非饱和直剪仪进行控制基质吸力的剪切试验。试验结果表明,在不同的基质吸力和净法向应力作用下,重塑试样由于结构性遭到彻底破坏,应力应变关系表现为应变硬化型。在300 kPa的基质吸力范围内,基质吸力对黏聚力影响显著,对有效内摩擦角基本无影响。非饱和玄武岩残积土的抗剪强度与基质吸力基本呈线性关系,非饱和抗剪强度参数 $\varphi^b = 19.4^\circ$ ,验证了非饱和土双应力状态变量抗剪强度公式的适用性。

**关键词** 玄武岩残积土 基质吸力 剪切强度 非饱和直剪试验

中图分类号 TU411.7; 文献标志码 B

玄武岩残积土广泛分布于西南云贵地区,随西部大开发的推进,公路工程建设中遇到的此类土质边坡越来越多。已有研究表明,玄武岩节理、裂隙发育,其风化作用形成的玄武岩残积土具有低密度、高含水率、大孔隙比和高压缩性等不良物理特性,同时遇水易崩解、软化,且具有弱-强膨胀性等不良工程特性,属区域性特殊土<sup>[1,2]</sup>。加之贵州地区湿热多雨,玄武岩残积土层多处于吸水和失水的非饱和状态。对于非饱和土,其有效应力的物理含义与饱和土相同,均为作用于土骨架的应力。但是由于非饱和土中气相的存在,非饱和土中的应力还需要考虑固-液-气交界面上的孔隙气压力及孔隙气压力与孔隙水压力的差值,即基质吸力。正是由于基质吸力的存在,才使非饱和土的强度与饱和土有很大的区别。

关于非饱和土的抗剪强度特性,国内外学者对此进行了大量的研究分析,提出了相应的非饱和土的抗剪强度理论与计算公式。陈正汉等<sup>[3]</sup>讨论了非饱和土的有效应力变量,推导了各向异性多孔介质与有效应力的理论公式;汤连生<sup>[4]</sup>从非饱和土的粒间吸力特性分析了抗剪强度的组成及其影响因素,理论上给出了非饱和土的总吸力和抗剪强度间的关系; Bishop 等<sup>[5]</sup>将基质吸力视为有效应力的组成部分,提出了单应力状态变量非饱和土抗剪强度公式。目前,理论上较为成熟且实际中运用较为广泛的为

Fredlund 双应力状态变量非饱和土抗剪强度公式<sup>[6]</sup>:  $\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan\varphi' + (u_a - u_w) \tan\varphi^b$  公式中 $c'$ 为有效黏聚力; $\varphi'$ 为有效内摩擦角; $\sigma$ 为总法向应力; $u_a$ 为孔隙气压力; $u_w$ 为孔隙水压力; $\varphi^b$ 为与基质吸力( $u_a - u_w$ )相关的摩擦角也称为非饱和抗剪强度参数。通过引入材料变量有关的参数 $\varphi^b$ ,该公式可将基质吸力对抗剪强度的贡献与净法向应力对抗剪强度的贡献分离开,便于分析基质吸力对抗剪强度的影响。



图1 高速公路沿线边坡破坏图  
Fig. 1 Destruction of slope along the highway

目前在进行强度或稳定性分析时,普遍采用的是饱和状态下的残积土抗剪强度指标,这与实际情况有较大的出入,导致斜坡在雨季失稳滑塌,如图1。大量的滑坡案例研究分析也表明,降雨导致边坡土体中的基质吸力丧失,从而导致岩土体的抗剪强度大幅度的下降,是边坡失稳的一个不可忽略的重要原因。故采用非饱和土的强度参数进行分析计算将会使结果更加合理。因此,运用非饱和土力学理论探究基质吸力对非饱和玄武岩残积土抗剪强度及其参数的影响,具有重要的工程意义。

2016年1月20日收到

西部交通建设科技项目  
(2009318802074) 基金资助

第一作者简介:李勇,男,汉族,湖北襄阳人。研究方向:特殊土工程特性及灾害治理。E-mail: 2410268750@qq.com。

表 1 玄武岩残积土基本物理性质指标

Table 1 Physical indexes of basalt soil

天然密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $W / \%$	比重 $d_s /$	液限 $W_L / \%$	塑限 $W_P / \%$	塑性指数 $I_L$	黏粒含量/ ( $< 0.075 \text{ mm}$ ) %
1.76	25.6	27.2	59.62	43.07	16.55	90.45

## 1 研究方案与方法

### 1.1 土样的基本物理力学性质

试验所用土样取自贵州省毕威高速公路的 K103 + 105—600 玄武岩路段斜坡。土样呈黄褐色, 坚硬状态, 裂隙发育、稍湿, 其物理力学性质如表 1。将土样风干碾碎, 过 2 mm 筛后供试验使用, 其颗粒组成如图 2 所示。由表 1 和图 2 可知, 黄褐色玄武岩残积土为粉质黏土。

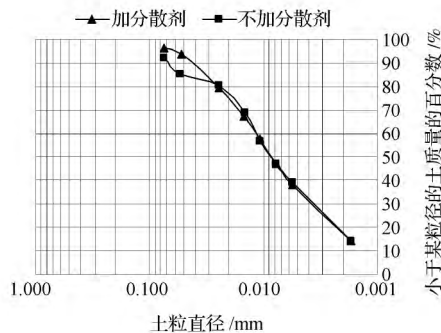


图 2 玄武岩残积土颗粒分析曲线

Fig. 2 Particle-size distribution curve of Basalt soil

### 1.2 试验内容及方法

目前关于非饱和土剪切实验主要分为两类: 一类是直接法, 即控制基质吸力的剪切试验, 可通过相应的非饱和剪切仪来完成; 另一类是间接法, 思路为“含水率-基质吸力-抗剪强度”可由基质吸力测试试验和普通剪切试验的组合试验来完成。同直接法相比, 间接法虽然可以得出基质吸力与抗剪强度的关系, 但是由于试验过程中不能直接量测基质吸力而存在一定的局限性。因此, 试验采用直接法探究基质吸力与非饱和玄武岩残积土抗剪强度关系。

采用击样法制备非饱和玄武岩残积土重塑试样。控制重塑土样的干密度为  $1.41 \text{ g/cm}^3$ , 含水率为 25.6%。试样的直径和高度分别为 61.8 mm 和 20 mm。直剪试验采用控制基质吸力和净法向应力为常数的固结排水试验, 控制基质吸力分别为 0 kPa、50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、300 kPa, 对应于每一基质吸力, 控制净法向应力分别为 100 kPa、200 kPa、400 kPa。

试验所使用的仪器为 FDJ—20 型非饱和直剪仪, 由后勤工程学院陈正汉教授研制。试验开始前,

应首先对非饱和直剪仪底座上的陶土板进行饱和, 并排净管路中的气体。之后, 试验按吸力平衡、等吸力固结和等吸力剪切三个阶段进行。由于非饱和土的渗透系数很小, 气水平衡和等吸力固结阶段均需要较长时间, 待其稳定后方可进行剪切试验。为保证剪切过程中孔隙气压的均等性, 剪切速度需足够慢。参照已有经验, 本次试验变形稳定的标准为每 2 h 的变形量不超过 0.01 mm; 排水稳定的标准为每 2 h 的排水量不超过  $0.012 \text{ mm}^3$ 。采用上述标准, 气水平衡时间一般为一天, 固结时间一般为两天, 剪切速率控制为  $0.00195 \text{ mm/min}$ , 最大剪切位移取 7 mm, 剪切历时一般为 50 h。

## 2 试验结果分析

### 2.1 非饱和玄武岩残积土剪切特性分析

图 3 所示为基质吸力分别为 0 kPa、50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、300 kPa 条件下不同净法向应力作用下的应力应变关系图。除了图 3(b) 中  $s_{150p200}$ 、 $s_{200p200}$ 、 $s_{300p200}$  三个非饱和重塑玄武岩残积土试样具有明显的峰值强度, 呈应变软化特性之外, 其他试样均无明显的峰值强度, 应力应变关系曲线为应变硬化型或弱应变软化型。玄武岩残积土为玄武岩风化后残留在原地的残余碎屑物质, 普遍存在岩体的原生及次生结构面, 具有较强的结构性。其原状土样的原位推剪、三轴剪及直剪试验的应力应变曲线均有明显的峰值强度, 呈应变软化型<sup>[1]</sup>。土样重塑后使得土体的结构性遭到破坏, 非饱和玄武岩残积土的应力应变关系多呈应变硬化型。

### 2.2 抗剪强度与基质吸力关系

重塑试样在各级基质吸力和净法向应力作用下的抗剪强度取峰值强度, 对于无明显峰值强度的, 取应力应变曲线上变形量为 4 mm 所对应的强度值。图 4 是重塑非饱和玄武岩残积土在相同基质吸力不同净法向应力作用下试样破坏时的抗剪强度与净法向应力关系图。具体的抗剪强度值及参数值见表 2。在相同的净法向应力作用下, 抗剪强度随基质吸力的增大而增大。文献[1]的剪切试验研究表明天然含水状态下的原状土的抗剪强度大于其饱和后的抗剪强度, 说明非饱和玄武岩残积土中的基质吸力对抗剪强度有增强作用。

目前关于基质吸力对非饱和土抗剪强度的贡献是线性的还是非线性的, 存在两种不同的研究结果。Gan 等<sup>[7]</sup>的试验结果显示, 冰渍成因含粉砂黏土击实试样的抗剪强度随基质吸力的增加呈非线性增高趋势。当基质吸力小于 100 kPa 时,  $\varphi^b$  近似等于

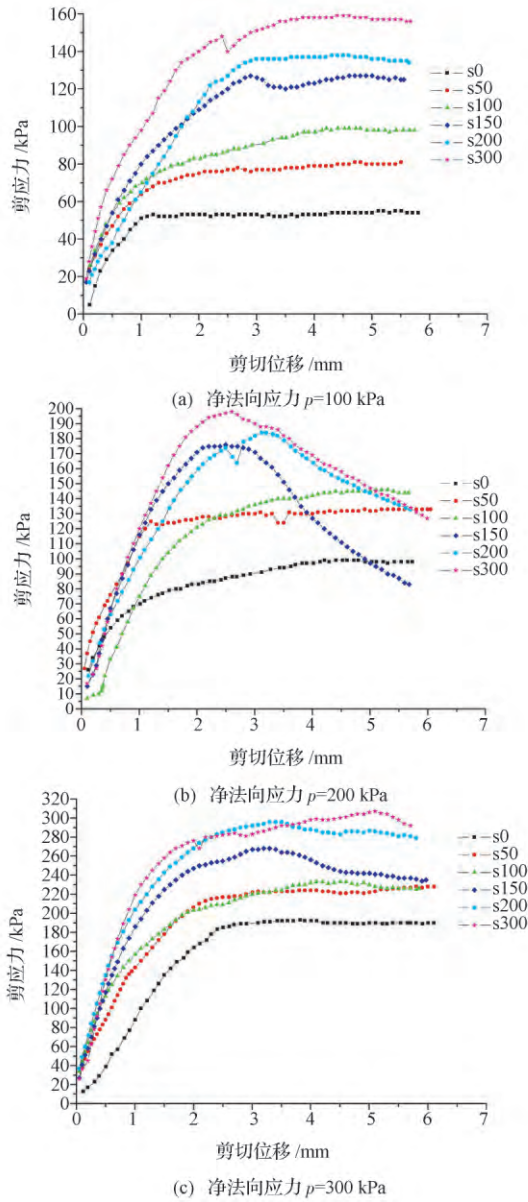


图3 应力应变曲线

Fig. 3 The stress strain curves under different vertical stresses

$\varphi^b$ ; 当基质吸力在 100 ~ 500 kPa 时,  $\varphi^b$  为小于  $\varphi^a$  的常数, 即抗剪强度随基质吸力线性增加。陈东霞等<sup>[8]</sup>对厦门地区的非饱和花岗岩残积土的研究表明, 基质吸力与抗剪强度存在非线性关系。基质吸力在 0 ~ 50 kPa 的范围内, 随着基质吸力的增加, 土体的抗剪强度线性增加, 非饱和抗剪强度参数  $\varphi^b$  为一常数。在 50 ~ 600 kPa 内, 抗剪强度随基质吸力的增加变化不大。扈胜霞<sup>[9]</sup>, 申春泥<sup>[10]</sup>等人的试验结果显示, 在基质吸力小于 300 kPa 的范围内, 非饱和黄土、膨胀土的非饱和抗剪强度参数  $\varphi^b$  为定值, 在试验的基质吸力范围内, 抗剪强度与基质吸力呈线性关系。虽然关于非饱和抗剪强度参数是否为定

值有两种不同的研究结果, 但是从中也可发现, 在某一较低的基质吸力范围内, 基质吸力与抗剪强度存在线性关系, 此范围内非饱和抗剪强度参数为一个定值。

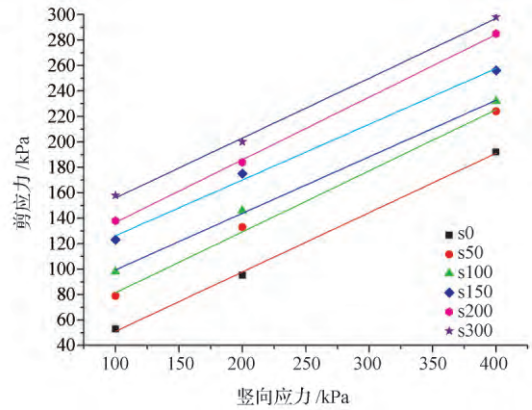


图4 不同含水率下抗剪强度与净法向应力关系

Fig. 4 Relationships between shear strength and normal stress at different moisture content

表2 控制基质吸力的直剪试验结果

Table 2 The direct shear test results with controlling suction

基质吸力 /kPa	破坏时剪应力/kPa			有效黏聚力 /kPa	有效内摩擦角 / (°)
	各级净法向应力/kPa				
	100	200	400		
0	53	97	192	4.5	25
50	79	133	224	33.5	25.6
100	98	146	232	55	24
150	123	175	256	82.5	23.7
200	137	184	285	87.5	26.3
300	158	200	298	109	25.2

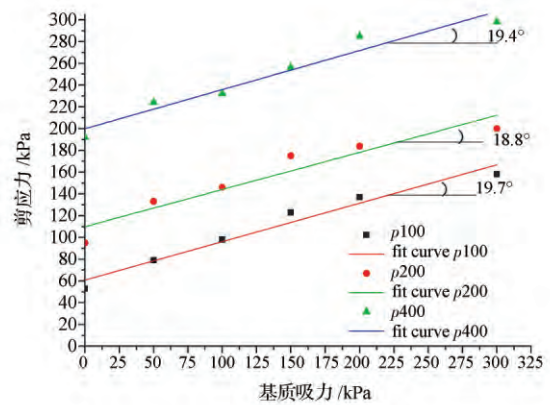


图5 不同净法向应力下抗剪强度与基质吸力的关系

Fig. 5 The relationship curve of shear strength and matric suction under different vertical stresses

本次试验所施加基质吸力在 300 kPa 范围内, 基质吸力与抗剪强度的关系图见图 5。在试验的基质吸力范围内, 在各净法向压力作用下, 基质吸力与抗剪强度基本呈线性关系。在 100 kPa, 200

kPa、400 kPa 的净法向应力作用下, 基质吸力抗剪强度参数  $\varphi^b$  分别为  $19.7^\circ$ 、 $18.8^\circ$ 、 $19.4^\circ$ , 其平均绝对偏差分别为 2.1%、2.5%、0.5%, 在误差允许的范围内可认为抗剪强度参数  $\varphi^b$  为常数约为  $19.3^\circ$ , 可见基质吸力对抗剪强度的影响是不可忽略的。同时也可认为在试验范围内, 净法向应力对非饱和抗剪强度参数没有影响。在较高的净法向应力下, 非饱和抗剪强度参数是否会发生变化, 还有待进一步探究。

与饱和土相比, 在非饱和土中固-液-气三相交界面上会产生表面张力。降雨导致非饱和和残积土土体中的含水率升高后, 气相比比例降低, 进而导致交界面上的表面张力减小, 最终导致基质吸力大幅度的下降。由于非饱和玄武岩残积土的非饱和抗剪强度参数  $\varphi^b = 19.3^\circ$ ,  $\tan\varphi^b = 0.35$ 。基质吸力大幅下降进而引发残积土土体抗剪强度大幅下降, 导致边坡失稳滑塌。雨季降雨量较大, 土体中的含水率变化较大, 而在其他时节, 降雨量较小, 不会导致土体中的基质吸力发生较大的变化, 这也是斜坡滑塌多在雨季发生的原因。

### 2.3 黏聚力、有效内摩擦角与基质吸力关系

目前关于基质吸力对非饱和土抗剪强度参数的影响程度的研究结论也并不完全相同。陈东霞等的研究认为非饱和花岗岩残积土中, 基质吸力对黏聚力影响显著。扈胜霞等<sup>[9]</sup>通过对非饱和原状黄土进行研究认为, 基质吸力对黏聚力影响显著, 对内摩擦角的影响不大。申春妮等<sup>[10]</sup>认为基质吸力对非饱和和重塑黄土的内摩擦角的影响可以忽略不计。林鸿州等<sup>[11]</sup>通过非饱和粉细砂、砂质粉土、粉质黏土的研究认为基质吸力对非饱和土体的黏聚力和内摩擦角均有较大的影响。从已有的研究可以发现, 基质吸力对黏聚力有较大的影响, 而对内摩擦角的影响还存在争议。

本次的试验研究结果如图 6 所示。观察基质吸力与有效内摩擦角关系曲线可发现, 在试验的基质吸力范围内, 有效内摩擦角与基质吸力关系不大。结合表 2 可知, 不同基质吸力下的内摩擦角大致相同, 其平均值为  $25.0^\circ$ , 在误差允许的范围内可认为是一常数; 在试验的基质吸力范围内, 随着基质吸力的增加, 黏聚力呈上升趋势, 此处的黏聚力为包含基质吸力对抗剪强度贡献的黏聚力  $c = c' + (u_a - u_w) \tan\varphi^b$ 。对其线性拟合分析可发现, 黏聚力与基质吸力基本呈线性关系,  $c = 15.9 + 0.35x$ , 拟合曲线的倾角  $\arctan 0.35 = 19.3^\circ$  等于非饱和抗剪强度参数  $\varphi^b$ , 因此可认为有效黏聚力为一常数。Fredlund 认为非饱和土的抗剪强度由饱和土的有效黏

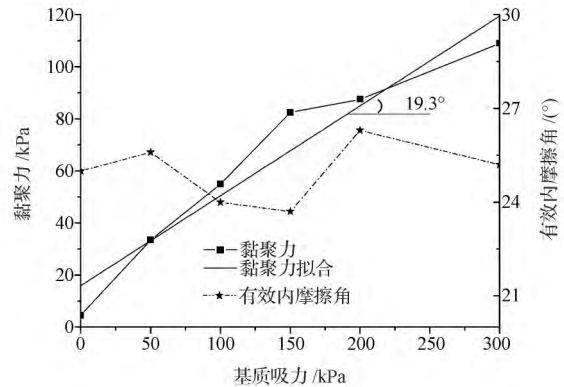


图 6 基质吸力与黏聚力、有效内摩擦角关系

Fig. 6 The relationship between water content and cohesion, inner friction angle

聚力, 净法向应力引起的强度以及基质吸力引起的强度所组成。因此, 可以认为黏聚力随基质吸力增加主要体现在基质吸力引起的强度上, 而基质吸力本身对有效黏聚力并无影响。基于以上分析可认为, 基质吸力对有效内摩擦、有效黏聚力均无影响, 验证了 Fredlund 双应力状态变量抗剪强度公式中将基质吸力作为独立变量的有效性。

## 3 结论

(1) 非饱和重塑玄武岩残积土由于结构性遭到破坏, 在不同基质吸力和净法向应力作用下, 剪切应力应变曲线呈应变硬化性。其原状土剪切过程呈应变软化性。

(2) 在 300 kPa 基质吸力范围内, 非饱和和重塑玄武岩残积土试样的抗剪强度随基质吸力呈线性增长关系, 非饱和抗剪强度参数为  $19.3^\circ$ , 在不同基质吸力与净法向应力作用下, 土样剪切破坏时的破坏包面可以看作是一平面。

(3) 在试验的基质吸力范围内, 基质吸力对有效黏聚力与有效内摩擦角均无影响, 验证了 Fredlund 双应力状态变量抗剪强度公式的适用性。

### 参 考 文 献

- 王参松, 雷学文, 孟庆山. 滇黔地区黄褐色玄武岩风化土强度试验研究. 人民长江, 2012; 43(9): 47—50  
Wang Cansong, Lei Xuewen, Meng Qingshan. Experimental study on soil strength of ochre weathered basalt in Guizhou and Yunnan. Province Yangtze River, 2012; 43(9): 47—50
- 余沛. 贵州玄武岩残积土的水理特性试验研究. 天津: 天津城市建设学院, 2011  
Yu Pei. Research and analysis on water character of basalt residual soil in Guizhou. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2011
- 陈正汉, 王永胜, 谢定义. 非饱和土的有效应力探讨. 岩土工程学报, 1994; 16(3): 62—69

- Chen Zhenghan, Wang Yongsheng, Xie Dingyi. Effective stress in unsaturated soil. *Rock and Soil Mechanics*, 1994; 16(3): 62—69
- 4 汤连生. 从粒间吸力特性再认识非饱和土抗剪强度理论. *岩土工程学报* 2001; 23(4): 412—417  
Tang Liansheng. New suggestion on shear strength in unsaturated soil based on suction between grains. *Rock and Soil Mechanics*, 2001; 23(4): 412—417
- 5 Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils. *Geotechnique*, 1963; 13(3): 177—197
- 6 Fredlund D G, Morgenstern N R, Wildger R A. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnique Journal*, 1978; 15(3): 317—321
- 7 Gan J K M, Fredlund D G, Rahardjo H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*, 1988; 25: 500—510
- 8 陈东霞, 龚晓南, 马亢. 厦门地区非饱和残积土的强度随含水量变化规律. *岩石力学与工程学报* 2015; 34(s1): 3485—3492  
Chen Dongxia, Gong Xiaonan, Ma Kang. Variation of the shear strength of xiamen unsaturated residual soils with water content. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015; 34(s1): 3485—3492
- 9 扈胜霞, 周云东, 陈正汉. 非饱和原状黄土强度特性的试验研究. *岩土力学* 2005; 26(4): 0660—0663  
Hu Shengxia, Zhou Yundong, Chen Zhenghan. Test study on strength character of unsaturated and undisturbed loess. *Rock and Soil Mechanics* 2005; 26(4): 0660—0663
- 10 申春妮, 方祥位, 陈正汉. Q2 黄土的非饱和直剪试验研究. *地下空间与工程学报* 2010; 6(4): 0724—0729  
Shen Chunni, Fang Xiangwei, Chen Zhenghan. The unsaturated direct shear tests of Q2 loess. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010; 6(4): 0724—0729
- 11 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响. *岩土力学* 2007; 28(9): 1931—1936  
Lin Hongzhou, Li Guangxin, Yu Yuzhen, et al. Influence of matrix suction on shear strength behavior of unsaturated soils. *Rock and Soil Mechanics* 2007; 28(9): 1931—1936

## Study on Shear Behavior of Unsaturated Basalt Residual Soil

LI Yong<sup>1</sup>, LEI Xue-wen<sup>1</sup>, MENG Qing-shan<sup>2</sup>, CHEN Jie<sup>1,3</sup>

(College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology<sup>1</sup>, Wuhan 430065, P. R. China;

Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences<sup>2</sup>, Wuhan 430071, P. R. China;

Zhongkai University of Agriculture and Engineering<sup>3</sup>, Guangzhou 510225, P. R. China)

**[Abstract]** The matrix suction exerts a great influence on the shear strength of unsaturated soil. It is therefore, of great important practical significance to study the relationship between the matrix suction and the shear strength of unsaturated soil. The shear strength characteristics of unsaturated basalt residual soil taken out from Bijie, Guizhou province were studied by performing matrix suction controlled direct shear tests using unsaturated direct shear test system. The test results show that the stress-strain curves of the remolded unsaturated basalt residual soil were stress hardening owing to completely damage of the soil construction under different matrix suction and vertical stresses. The effect of matrix suction on the shear strength increases with an increase of the net normal stresses during the matrix suction under 300 kPa, the friction angle with respect to changes in matrix suction is 19.4°. The influence of matrix suction on cohesion is significant, but on the effective friction angles are very little, which proved the applicability of the double stress variable strength equation.

**[Key words]** basalt residual soil matrix suction shear strength unsaturated direct shear test