

干密度和基质吸力对非饱和火山土抗剪强度特性的影响

松卡尔·克孜勒汗, 王常明*, 吴迪, 蒋承林

吉林大学 建设工程学院, 长春 130026

摘要: 为研究干密度和基质吸力对非饱和火山土抗剪强度特性的影响, 笔者以吉林省安图县火山土为研究对象, 制备了3种干密度和6个含水率水平的火山土试样。采用压力板仪法测定不同密度火山土的土-水特征曲线, 利用 Van Genuchten 模型进行土-水特征曲线拟合, 经直接剪切试验获得不同含水率条件下试样的抗剪强度指标。结果表明: 火山土的土-水特征曲线受干密度的影响, 在相同体积含水率条件下, 火山土基质吸力随着干密度的增加而增大。土的干密度与 Van Genuchten 模型进气值的倒数 a 、参数 n 、 m 以及残余含水率 θ_r 均具有良好的线性关系。土的内摩擦角 φ 和内聚力 c 随干密度的增大而增大, 随基质吸力的增大, 先增大后减小。火山土的抗剪强度受到干密度和基质吸力的共同影响。干密度增大不仅增强了颗粒之间的咬合, 也减小了土体内部的孔隙, 增大了基质吸力, 从而导致火山土抗剪强度的提高。本研究建立了火山土的内摩擦角、内聚力与干密度、基质吸力的相关关系, 为火山土地区岩土工程建设中强度参数的选取提供参考。

关键词: 火山土; 土-水特征曲线; 干密度; 基质吸力; 抗剪强度特性

Effect of dry density and matric suction on shear strength properties of unsaturated volcanic soils

songkhaer KHZIRKHAN, WANG Changming*, WU Di, JIANG Chenglin

College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: In order to study the effects of dry density and matric suction on the shear strength characteristics of unsaturated volcanic soils, this paper takes volcanic soils in Antu County, Jilin Province as the research object, and prepares soil samples with three dry densities and six water content levels. The soil-water characteristic curves of volcanic soils with different densities were determined by the pressure plate instrument method, and the soil-water characteristic curves were fitted using the Van Genuchten model. Direct shear test was used to obtain the shear strength indexes of the samples under different water content conditions. The results indicated that the SWCC of volcanic soils were influenced by dry density, and the matric suction of volcanic soil increased with the rising of

收稿日期/Received: 2025-01-06; 修订日期/Revised: 2025-05-22; 出版日期/Published: 2025-11-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41972267)

第一作者: 松卡尔·克孜勒汗 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程方向的研究。E-mail: sqekz22@mails.jlu.edu.cn

* 通信作者: 王常明 (1966—), 男, 教授, 主要从事岩土工程和地质灾害方面的研究。E-mail: wangcm@jlu.edu.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

dry density under the same volumetric water content condition. The dry density of the soil has a good relationship with the VG model parameters (the reciprocal of intake value a , parameters n and m , and residual water content θ_r). Both the internal friction angle φ and cohesion c increased with dry density, while they increased initially and decreased with matric suction. The shear strength of volcanic soils is affected by the combination of dry density and matric suction. An rising in dry density not only enhances the occlusion between particles, but also reduces the internal pores of the soil and increases matric suction, which leads to an rising in the shear strength of volcanic soils. This study established the relationships between the internal friction angle φ , cohesion c , dry density and matric suction in volcanic soils, providing a reference for selecting strength parameters in geotechnical engineering projects in volcanic soil regions.

Keywords: volcanic soil; soil-water characteristic curve; dry density; matric suction; shear strength properties

0 引言

土的干密度对非饱和土的物理力学性质具有重要的影响^[1]。对于非饱和土,干密度的变化会显著改变土体的孔隙结构和持水特性,进而对其基质吸力产生影响,而土的力学性质又受到基质吸力的显著作用^[2]。长白山地区广泛分布着火山土,作为一种特殊土^[3-4],该土具有独特的物质组成与结构特性,这些特性使得其土-水特征曲线及抗剪强度表现出与其他类型土显著不同的特点。目前对其非饱和土力学特性的相关研究较少,因而将火山土作为一种建筑物的地基或土木工程材料时,难以获得工程建设所需要的可靠参数^[5]。

确定非饱和土的变形与强度特性中的一个关键问题是确定其土-水特征曲线 (soil-water characteristic curve, SWCC),由此可以确定土的渗透系数、抗剪强度等有关参数^[6]。目前,压力板仪法、张力计法和滤纸法都是获得土-水特征曲线常见手段和方法^[7],压力板仪相较于张力计法,具有更广泛的测量范围,并且其应用范围相较于滤纸法^[8]也更为广泛。常用的土-水特征曲线模型主要有 Fredlund-Xing 模型^[9]和 Van Genuchten 模型^[10-11](以下简称 VG 模型)。这两个模型具备较高的拟合精度,能够准确地刻画土-水特征曲线的进气值和残余含水率这两个关键特征点,从而使得拟合的曲线与实际情况更为吻合。

在当前非饱和土力学特性的研究中,众多学者致力于探究土-水特征曲线及抗剪强度的影响因素与预测模型。徐明刚等^[12]对 5 种不同颗粒组成的非饱和和花岗岩残积土进行土-水特征曲线测试和不同饱和度下的直剪试验,研究颗粒组成和基质吸力

对残积土力学性质的影响,建立了考虑分形维数、基质吸力的抗剪强度预测公式。张吉^[13]利用直剪试验探究武汉重塑非饱和红黏土抗剪强度特征,发现其受到干密度、含水率的影响。Zhai 等^[14]系统地讨论了引起土-水特征曲线不确定性的各种可能因素,深入探讨 SWCC 的不确定性对非饱和土体抗剪强度的影响,提出了由 SWCC 变化引起的非饱和抗剪强度估算值的量化方法。通过实验数据验证了所提出承载力计算方法的有效性。陈剑平等^[15]对吉林分散土进行直剪试验,研究其遇水失稳的力学强度机理,发现随着含水率的增加导致该土的剪应力-剪切位移曲线从应变软化向应变硬化转变。

基于以上研究可知,对于常见非饱和土类,在土-水特征曲线影响因素和基于特征曲线的非饱和土强度预测等方面已经有较多的研究成果。但关于火山土的干密度与基质吸力耦合作用下非饱和土抗剪强度特征的研究鲜有报道。为此本文以吉林省安图县火山土为研究对象,采用压力板仪法测定不同密度的火山土的土-水特征曲线,利用 VG 模型进行土-水特征曲线拟合,采用直接剪切试验获得不同含水率条件下试样的抗剪强度指标,探讨干密度和基质吸力对火山土抗剪强度指标的影响。研究成果为火山地区岩土工程建设中相关参数的选取提供参考。

1 试样与试验方法

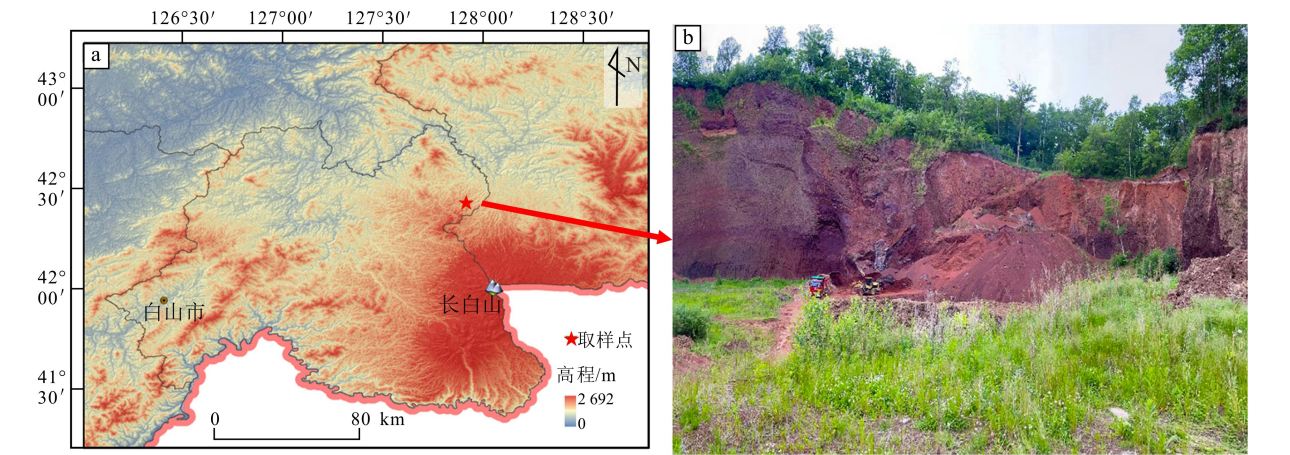
1.1 试样与试验方案

火山土试样取自吉林省安图县某开挖边坡(图 1)。土为红褐色,试样颗分曲线如图 2 所示。其中砂粒 ($0.075 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$) 和细粒 ($d \leq 0.075 \text{ mm}$), 体积分数分别为 56.4% 和 43.6%。不均匀系数 C_u 为

71.43，曲率系数 C_c 为 0.50。根据文献 [16]，火山土试样可定名为细粒土质砂。根据文献 [17]，测得土的比重为 2.86。火山土在扫描电子显微镜下的微观图像如图 3 所示，颗粒呈多棱角状、表面粗糙、孔隙发育。

将原状土在室温条件下风干，过 2 mm 筛后，用于制备测试试样。土-水特征曲线测试共设置 3 种不

同的干密度：1.1 g/cm³、1.2 g/cm³ 和 1.3 g/cm³。直剪试验共设置 3 种干密度：1.1 g/cm³、1.2 g/cm³ 和 1.3 g/cm³，6 个含水率分别为：10%、15%、20%、25%、30% 及饱和含水率。试样直径 61.8 mm，高度 20 mm。按照试验方案称取一定质量的蒸馏水与相应质量的风干火山土混合，将搅拌充分的湿土放入密封袋静置 48 h 以确保水分均匀，使用静压法制样。



a. 取样点地理位置图；b. 野外实地采样场景图。

图 1 取样地点
Fig. 1 Sampling location

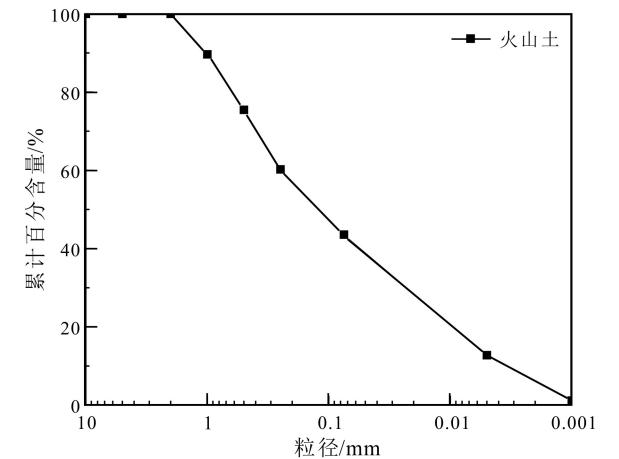


图 2 火山土的颗分曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of volcanic soil

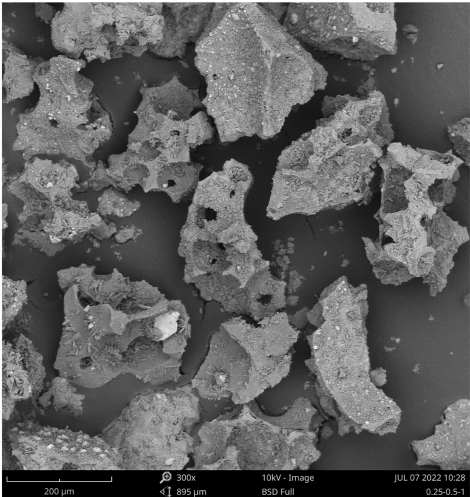


图 3 火山土颗粒扫描电镜图像

Fig. 3 SEM image of volcanic soil particles

1.2 试验方法

1.2.1 土-水特征曲线测试

本试验采用 Geo-experts 公司的压力板仪进行火山土的土-水特征曲线测定。共测定 3 种干密度

火山土试样的基质吸力。每组测试设置 2 个平行样，结果取平均值。①饱和陶土板：在陶土板表面铺上去离子水，由上往下用与陶土板进气值接近的

气压来施加压力,直到陶土板下方连接的管路几乎没有气泡产生时为止,此时饱和完成;②制备饱和试样:火山灰土试样压入环刀中。环刀样的饱和需要通过真空饱和器完成,真空饱和约 12 h 后,饱和完成;③将饱和后的试样取出放在压力室陶土板上,盖上压力室上盖,拧紧螺栓使压力室密封;④测量排水体积:对试样加载起始压力 2 kPa,每 3 h 记录采集量筒获得的排出水的质量,直到溢出水质量小于 0.02 mL。计算累计排水量,获得该压力下的剩余含水率,以 2 kPa 的增量增加到下一级,直至试验结束。

1.2.2 直剪试验

采用直接剪切法(快剪)测定火山土的抗剪强度指标。试验采用华勘公司的四联直剪仪,开展 3 种干密度、6 个含水率条件下试样的直剪试验。设置 4 个不同法向应力条件(50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 400 kPa),剪切速率为 0.8 mm/min,当剪切位移达到 8 mm 时停止试验。

2 结果与分析

2.1 土-水特征曲线

不同干密度试样的土-水特征曲线(SWCC)如图 4 所示。对于同一干密度的试样,火山土从饱和状态到非饱和状态脱水的过程中,随着基质吸力的增大,土中的体积含水率逐渐减少。这一变化过程可以分为 3 个阶段:第 1 阶段,当土开始从饱和状态向非饱和状态转化时,即吸力刚开始增加的阶段,这时在进气值之前,土体含水率变化较慢,尤其是 1.3 g/cm³ 高密度土样,该阶段曲线是较平缓的。在这一阶段,土中水分开始排出,毛细力和吸附力逐渐增强,基质吸力缓慢增大。因此,体积含水率随着基质吸力的增大而缓慢下降;第 2 阶段,随着脱水过程的继续,超过某一吸力值之后,随着吸力增大,土中水快速排出,含水率变化明显。当基质吸力在 2~10 kPa 时,基质吸力对土中水的影响逐渐加强,脱水曲线趋于陡峭;第 3 阶段,基质吸力大于 10 kPa 时,土中的含水率降低到一定程度,脱水过程达到稳定状态。此时,即使基质吸力继续增大,土中的体积含水率也不再发生显著变化。这是因为土中的大部分水分已经被排出,剩余的水分主要以结合水的形式存在于土颗粒之间,难

以被进一步排出。对于同一体积含水率的土样,在低含水率的时候,干密度 1.1 g/cm³ 的基质吸力最小,干密度 1.3 g/cm³ 的基质吸力最大。随着干密度的增大,土颗粒之间的排列变得更加紧密,孔隙空间减小,导致孔隙中弯液面的曲率半径也相应减小。根据 Young-Laplace 公式,弯液面曲率半径的减小会增大基质吸力。

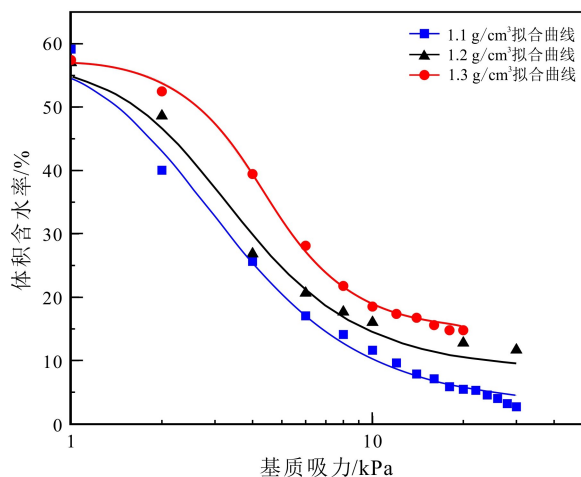


图 4 不同干密度的火山土 SWCC 试验拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of SWCC tests on volcanic soils with different dry densities

2.2 干密度对土-水特征曲线的影响

采用 Van Genuchten 模型对土-水特征曲线进行拟合,结果如表 1 所示。VG 模型方程如下:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\Psi a)^n]^m} \quad (1)$$

式中: θ_s 为饱和含水率(%); θ_r 为残余含水率(%); m 、 n 、 a 为拟合参数; Ψ 为基质吸力。

干密度与各拟合参数的关系如图 5 所示。对于拟合参数 a ,由于土的干密度增大,土的孔隙率减小,使土从饱和状态进入非饱和状态所需的基质吸力更大。即随干密度增加,进气值更大,进气值的倒数 a 随之减小。随着干密度增大,大孔隙减少,小孔隙增多,土中孔隙分布的不均匀程度降低,脱湿速率降低, n 值和 m 值相应增大。残余含水率随着干密度增大呈线性增大,土的孔隙率降低,颗粒间排列更加紧密,吸力增强,持水能力增强。

表 1 不同干密度的火山土 VG 模型拟合参数

Table 1 VG model fitting parameters for volcanic soils with different dry densities

样品干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	拟合参数 a	拟合参数 n	拟合参数 m	残余含水率 $\theta_r/\%$	R^2	试样数量/个
1.1	0.454	2.315	0.568	4.697	0.988	2
1.2	0.376	2.558	0.609	8.448	0.985	2
1.3	0.266	3.273	0.694	14.521	0.998	2

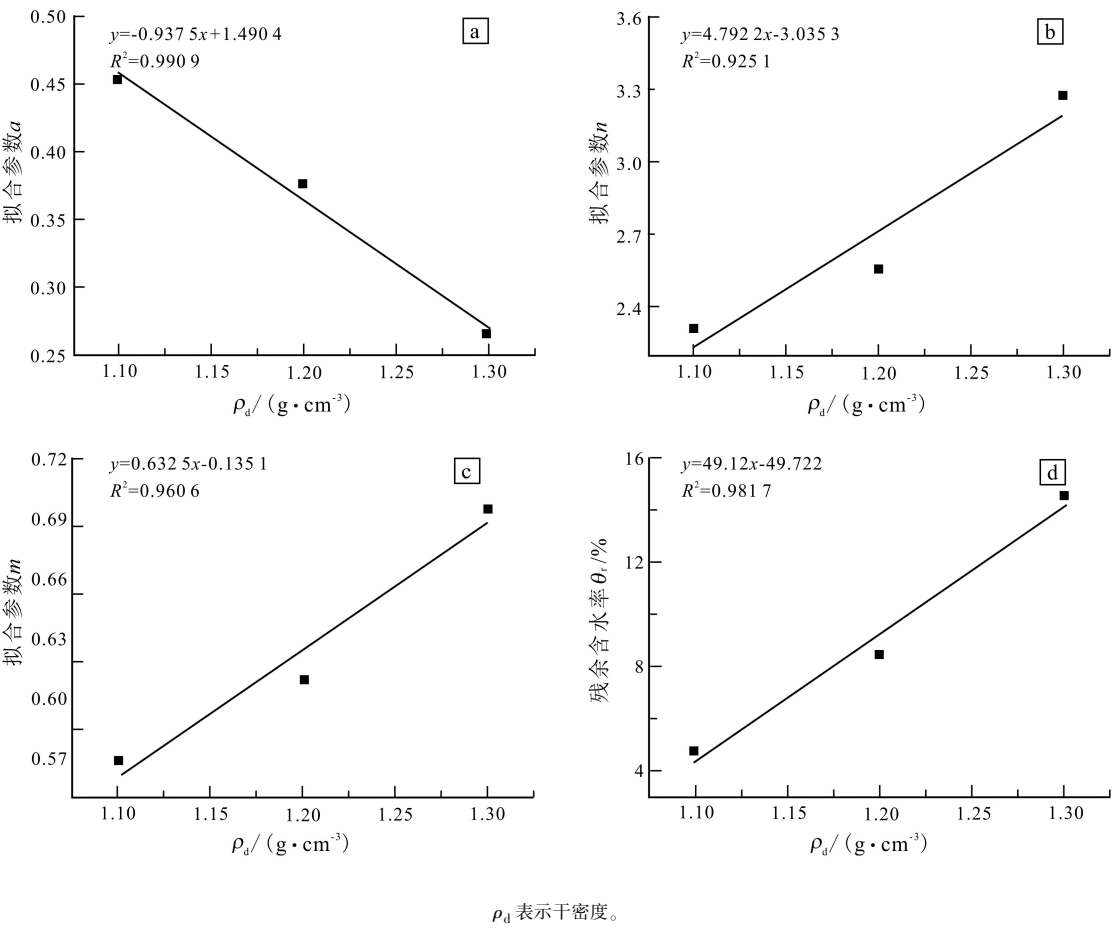


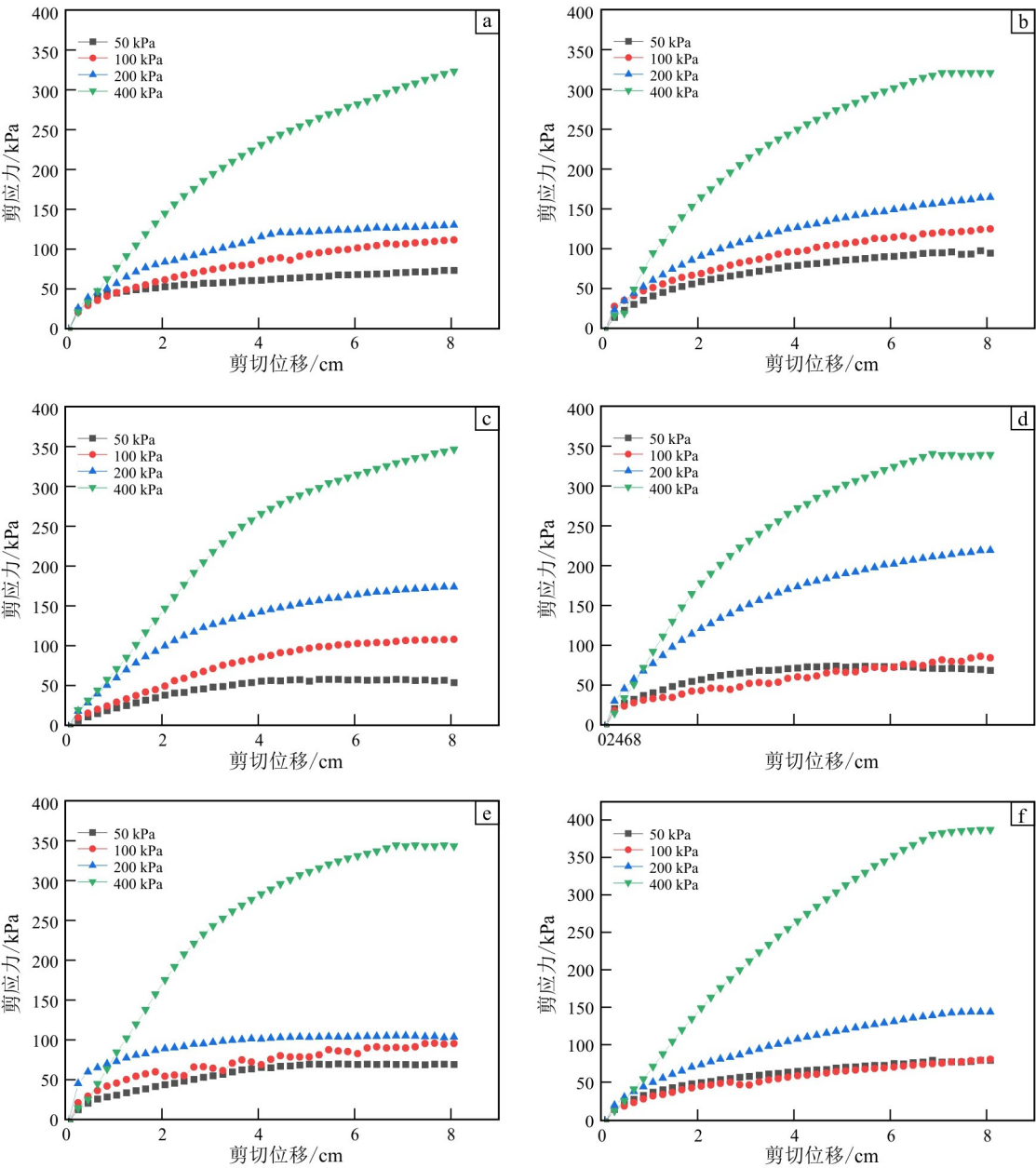
图 5 干密度与 VG 模型拟合参数关系

Fig. 5 Relationship between dry density and VG model fitting parameters

2.3 抗剪强度测试结果

图 6~8 给出火山土试样的剪切应力-剪切位移曲线。随着含水率的增加，剪应力-剪切位移曲线的变化规律为：干密度 1.1 g/cm^3 组的试样在不同含水率条件下的剪应力-剪切位移曲线均表现出硬化特征；干密度 1.2 g/cm^3 组试样的剪应力-剪切位移曲线，在含水率 10% 时，4 个法向应力 (50 kPa、100 kPa、200 kPa 和 400 kPa) 下的曲线

均为硬化特征；20% 含水率时，低法向应力 50 kPa 的曲线呈现软化特征；随着含水率的增加，50 kPa、100 kPa 和 200 kPa 下法向应力的剪应力-剪切位移曲线逐渐表现出软化特征；干密度 1.3 g/cm^3 组试样的剪应力-剪切位移曲线，在较低的含水率下，表现出硬化的特性。而当含水率增加到一定程度时，表现为轻微软化特征，这表示土在高含水率下的剪切过程中发生了某种程度的破坏。



ω 为含水率。
a. $\omega = 10\%$; b. $\omega = 15\%$; c. $\omega = 20\%$; d. $\omega = 25\%$; e. $\omega = 30\%$; f. $\omega = 49.2\%$ 。

图 6 不同含水率条件下干密度为 1.1 g/cm^3 下火山土试样剪应力-剪切位移关系图
Fig. 6 Relationship between shear stress and shear displacement of volcanic soil samples with dry density of 1.1 g/cm^3 under different water content conditions

火山土的剪切试验中剪应力和剪切位移应变曲线的变化为：随着干密度的增大，峰值剪应力也会相应提升。在相同含水率条件下，干密度 1.1 g/cm^3 试样的峰值剪应力最小，干密度 1.3 g/cm^3 试样的峰值剪应力最大。这表示干密度越大，试样在达到

破坏状态之前能够承受更大的剪切力。
2.4 干密度和基质吸力对抗剪强度特性的影响
根据 2.2 节获得的火山土不同干密度下 VG 模型，可以计算出直剪试验 6 个体积含水率下火山土的基质吸力，进而得到火山土抗剪强度参数随干密

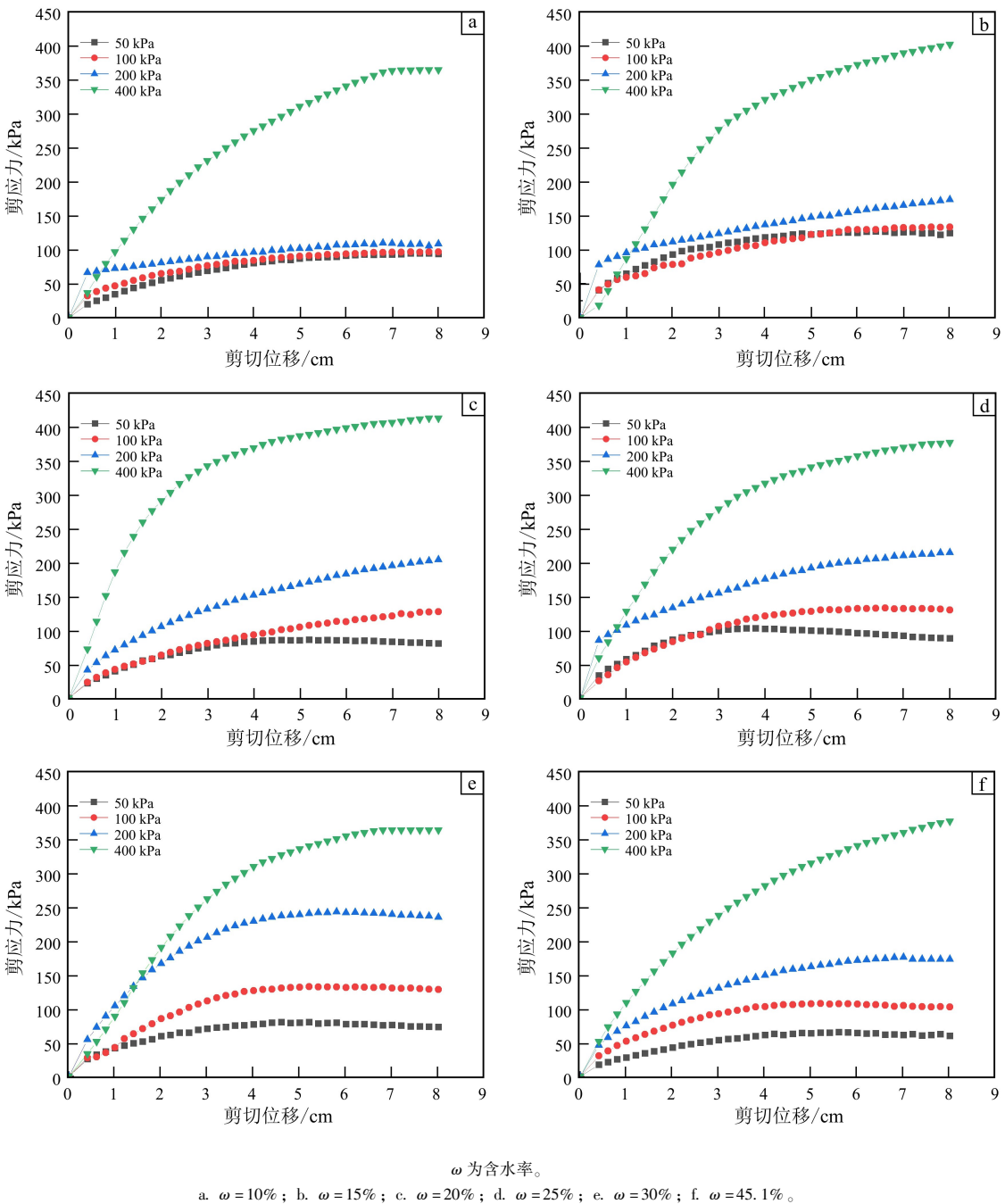
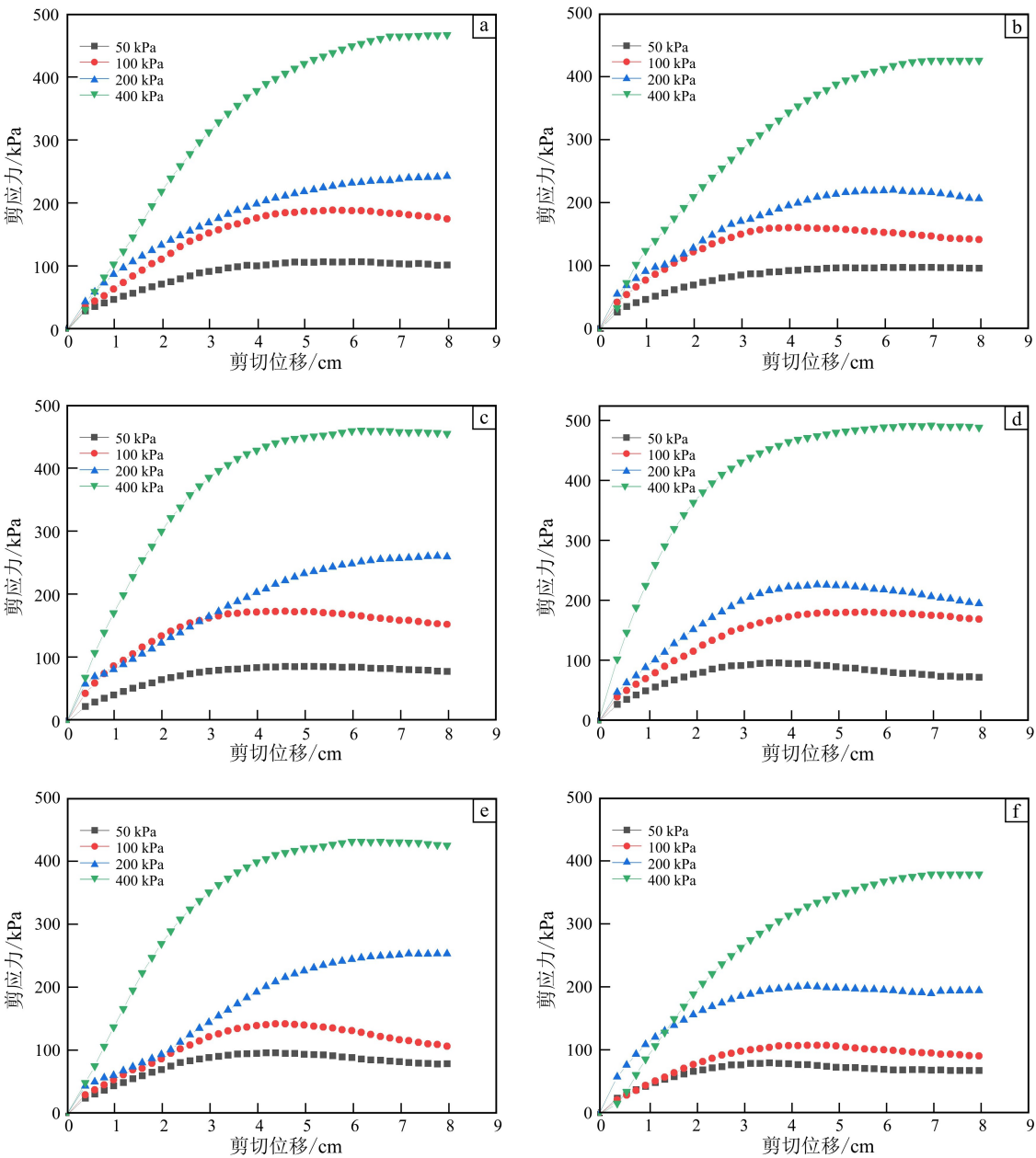


图 7 不同含水率条件下干密度 1.2 g/cm^3 下火山土试样剪应力-剪切位移关系图

Fig. 7 Relationship between shear stress and shear displacement of volcanic soil samples with dry density of 1.2 g/cm^3 under different water content conditions

度和基质吸力的变化关系（图 9）。相同干密度的试样，随着基质吸力增大，内摩擦角先增大后减小，内聚力先增大后减小。低基质吸力时，土处于高含水率甚至近饱和程度，颗粒间被水充满，连结较差，内摩擦角与内聚力较小。当含水率降低，基

质吸力提高时，土中吸附作用和毛细作用增强，土粒间的相互作用也增强，从而提高了土的抗剪强度。随着基质吸力增大，含水率降低导致土颗粒间的毛细作用减弱，火山土砂土的假黏聚力随之下降。因此，火山土的抗剪强度并不会随基质吸力的



ω 为含水率。

a. $\omega = 10\%$; b. $\omega = 15\%$; c. $\omega = 20\%$; d. $\omega = 25\%$; e. $\omega = 30\%$; f. $\omega = 41.7\%$ 。

图8 不同含水率条件下干密度 1.3 g/cm^3 下火山土试样剪应力-剪切位移关系图

Fig. 8 Relationship between shear stress and shear displacement of volcanic soil samples with dry density of 1.3 g/cm^3 under different water content conditions

增加而一直增加。对于本文所研究的火山土试样，当基质吸力达到 5 kPa 左右时，火山土的抗剪强度参数达到最大值。

不同干密度的火山土试样，随着干密度增加，土孔隙率降低，土的抗剪强度提高。一方面是因为

干密度的增加使土中基质吸力增大，提高了颗粒之间的连结，导致内摩擦角增大；另一方面，随干密度增加，增大了颗粒间的接触面积，摩擦阻力越大，内摩擦角也越大。本研究中的火山土是一种无黏性土，内聚力的主要来源是剪切过程中的颗粒间

咬合和毛细作用力。因此，随着干密度的增加，土的颗粒之间的咬合作用更强，表现出更大的内聚力。干密度的增加导致土体内部孔隙直径减小，根据经验公式海森公式^[18]可知孔隙直径的减小会导致毛细管高度的上升，因而毛细作用增强，内聚力相应提高。

通过以上分析可知，在不同含水率条件下，干

密度不仅影响基质吸力，也会影响土的孔隙直径和颗粒间接触咬合作用。同时，基质吸力能增强火山土颗粒之间的相互作用，对火山土的剪切强度也存在影响。因此，火山土颗粒的接触力学行为在干密度与基质吸力共同作用下发生改变进而影响其抗剪强度特性。

图 10a、b 分别为试样的内聚力和内摩擦角与

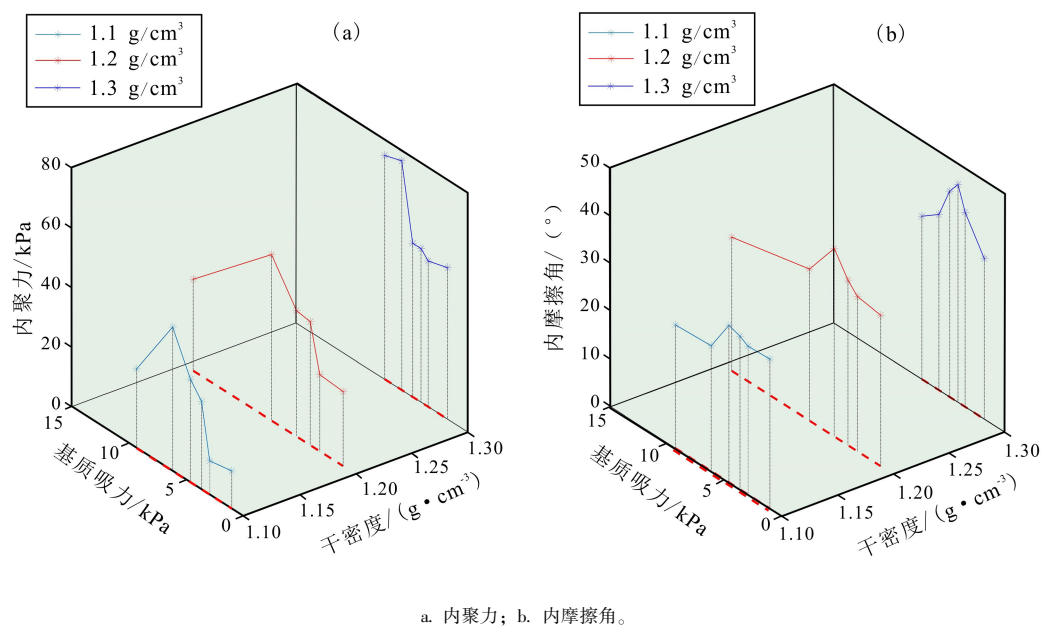


图 9 内聚力、内摩擦角与基质吸力、干密度的关系

Fig. 9 Relationship between cohesion, internal friction angle, matric suction and dry density

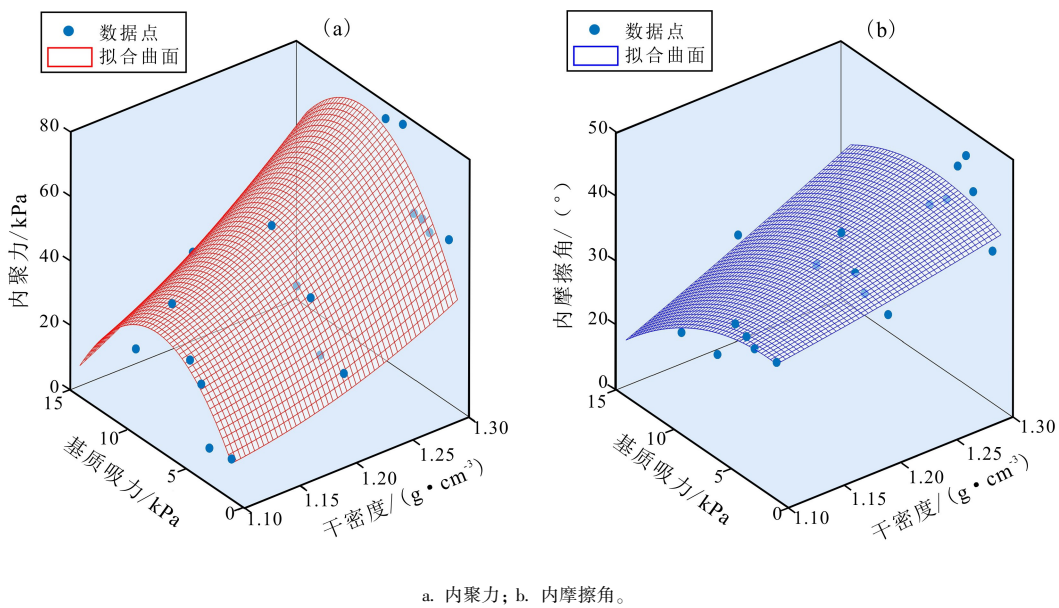


图 10 内聚力、内摩擦角与基质吸力、干密度的非线性拟合曲面图

Fig. 10 Nonlinear fitting surface diagrams of cohesion, internal friction angle, matric suction and dry density

基质吸力、干密度的非线性曲面拟合结果, 由此可获得吉林省安图县火山土的内摩擦角、内聚力与干密度、基质吸力的相关性数学表达式:

$$\varphi = 45.46 - 46.66\rho_d - 3.969\Psi + 30.29\rho_d^2 + 3.889\rho_d\Psi - 0.08185\Psi^2 \quad (2)$$

$$c = 395.7 - 746.4\rho_d - 2.63\Psi + 353.6\rho_d^2 + 10.52\rho_d\Psi - 0.5958\Psi^2 \quad (3)$$

式中: φ 为内摩擦角 ($^{\circ}$); c 为内聚力 (kPa); ρ_d 为干密度 (g/cm^3); Ψ 为基质吸力 (kPa)。

由公式 (2)、(3) 可见, 非饱和火山土的抗剪强度参数是由干密度和基质吸力两个因素共同作用的结果。

3 结论

(1) 火山土的土-水特性受干密度影响。土的干密度越高, 相同体积含水率下基质吸力越大, 土-水特征曲线随干密度的增大而上移。VG 模型参数与干密度存在线性关系。

(2) 基质吸力对火山土的抗剪强度指标有影响。当火山土基质吸力较低时, 土体抗剪强度参数 (内聚力和内摩擦角) 随基质吸力增加而增大。当内摩擦角和内聚力达到峰值后, 随着基质吸力增大, 两者均有不同程度的降低。

(3) 火山土的抗剪强度受到干密度和基质吸力的共同影响。干密度的增大一方面增强了颗粒之间的咬合, 另一方面减小了土体内部的孔隙, 增大了基质吸力, 从而导致火山土抗剪强度的提高。

(4) 本文初步建立了火山土的内聚力、内摩擦角与干密度、基质吸力相关关系的数学表达式, 为非饱和火山土的强度预测提供了依据。

参考文献:

- [1] 夏浩城, 汪时机, 李贤, 等. 非饱和砂质黏性紫色土固结特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (201): 121-125.
- XIA H C, WANG S J, LI X, et al. Study on consolidation characteristics of unsaturated sandy clayey purple soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44 (201): 121-125.
- [2] 任占雷, 李泽杰, 段梦强, 等. 考虑基质吸力影响的

重塑黄土的临界状态模型 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (3): 104-114.

REN Z L, LI Z J, DUAN M Q, et al. Critical state model of remodeled loess considering the effect of matrix suction [J]. Highway and Transportation Science and Technology, 2025, 42 (3): 104-114.

[3] LIU H L, WANG C M, WU D, et al. Deformation and critical dynamic stress for compacted volcanic ash subjected to monotonic and dynamic loads [J]. Construction & Building Materials, 2022, 358: 129454.

[4] 张培虎. 日本火山灰土壤的侵蚀 [J]. 水土保持科技情报, 1992, 1: 13-18.

ZHANG P H. Erosion of volcanic ash soils in Japan [J]. Soil and Water Conservation Science and Technology Information, 1992, 1: 13-18.

[5] 罗强, 梁多伟, 王腾飞, 等. 铁路路基火山渣填料工程特性试验 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2020, 54 (12): 2395-2404.

LUO Q, LIANG D W, WANG T F, et al. Engineering characteristic test of volcanic slag filler for railroad roadbed [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2020, 54 (12): 2395-2404.

[6] 梁文鹏, 吴家琦, 谭晔, 等. 基于土水特征曲线的非饱和土强度预测 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (4): 333-338.

LIANG W P, WU J Q, TAN Y, et al. Strength prediction of unsaturated soil based on soil-water characteristic curve [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (4): 333-338.

[7] 李旭, 刘阿强, 刘丽, 等. 全吸力范围内土-水特征曲线的快速测定方法 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (2): 299-306.

LI X, LIU A Q, LIU L, et al. Rapid determination of soil-water characteristic curve in full suction range [J]. Geotechnics, 2022, 43 (2): 299-306.

[8] WU D, WANG C M, et al. The interaction effect of particle composition and matric suction on the shear strength parameters of unsaturated granite residual soil [J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2022, 47 (10): 12453-12467.

[9] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103 (5): 447-466.

[10] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFALD E, et al. Model for the prediction of shear strength with

- respect to soil suction [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33 (3): 379–392.
- [11] PHAM K, LEE H B, KIM D K, et al. Influence of hydraulic characteristics on stability of unsaturated slope under transient seepage conditions [J]. *Landslides*, 2018, 15 (9): 1787–1799.
- [12] 徐明刚, 姚宗健. 颗粒组成和基质吸力对残积土抗剪强度的影响 [J]. *人民长江*, 2024, 55 (5): 178–185.
- XU M G, YAO Z J. Effects of particle composition and matrix suction on shear strength of residual soil [J]. *People's Yangtze River*, 2024, 55 (5): 178–185.
- [13] 张吉. 含水率及干密度对重塑红黏土强度的影响 [J]. *曲靖师范学院学报*, 2023, 42 (6): 15–20.
- ZHANG J. Effects of water content and dry density on the strength of remodeled red clay [J]. *Journal of Qujing Normal College*, 2023, 42 (6): 15–20.
- [14] ZHAI Q, RAHARDJO H, SATYANAGA A, et al. Effect of the uncertainty in soil – water characteristic curve on the estimated shear strength of unsaturated soil [J]. *Journal of Zhejiang University –Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2020, 21 (4): 317–330.
- [15] 陈剑平, 刘经, 王清, 等. 含水率对分散性土抗剪强度特性影响的微观解释 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2021, 51 (3): 792–803.
- CHEN J P, LIU J, WANG Q, et al. Microscopic explanation of the influence of moisture content on the shear strength characteristics of dispersed soil [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51 (3): 792–803.
- [16] 中华人民共和国建设部. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 6–10.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for soil engineering classification: GB/T 50145 – 2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008: 6–10.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban – Rural Development, People's Republic of China. Standard for geotechnical test methods: GB/T 50123–2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [18] 肖红宇, 刘明寿, 彭鹏程, 等. 基于黏性土分形特征的毛细水上升高度研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43 (6): 48–52, 58.
- XIAO H Y, LIU M S, PENG P C, et al. Study on the height of capillary water rise based on fractal characteristics of clayey soil [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43 (6): 48–52, 58.