



宽广吸力范围内重塑花岗岩残积土的强度特性

赵龙朝¹, 于海浩¹, 虞梦泽², 张芹¹, 颜荣涛¹, 王荣政¹

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 福建省建筑科学研究院
有限责任公司 福建省建研工程检测有限公司, 福州 350100)

摘要:为研究宽广吸力范围内重塑花岗岩残积土的强度特性,开展不同净围压非饱和土三轴剪切试验,低吸力段利用轴平移技术在非饱和土三轴仪上直接进行吸力平衡,高吸力段利用饱和盐溶液蒸汽平衡法进行吸力平衡,平衡后基于恒含水率法进行三轴剪切试验,得到重塑非饱和花岗岩残积土强度的演化规律,并采用非饱和抗剪强度模型进行强度预测。结果表明:吸力和净围压共同主导重塑花岗岩残积土的应力-应变行为;净围压恒定的条件下重塑花岗岩残积土的破坏偏应力随吸力增大呈现先显著增加后趋于稳定的趋势,存在吸力贡献阈值,超过阈值之后基质吸力的贡献几乎忽略不计;体变特性均呈现剪缩现象,且在低吸力条件下体积压缩受到抑制,高吸力条件下则显著促进体积压缩;黏聚力与内摩擦角随吸力增加的演变规律与破坏偏应力的变化趋势一致,共同揭示了土体强度随吸力演化的内在机理;对宽广吸力范围内的重塑花岗岩残积土的强度特性进行了预测,预测结果与实测结果具有良好的一致性。

关键词:重塑花岗岩残积土;宽广吸力范围;强度特性;三轴剪切试验

中图分类号: TU411.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Mechanical properties of granite residual soil remolded within a wide suction range

ZHAO Longchao¹, YU Haihao¹, YU Mengze², ZHANG Qin¹, YAN Rongtao¹,
WANG Rongzheng¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, P. R. China; 2. Fujian Jianyan Engineering Testing Co., Ltd., Fujian Academy of Building Research Co., Ltd. Fuzhou 350100, P. R. China.)

Abstract: In order to study the strength characteristics of remolded granite residual soil in a wide suction range, a series of triaxial shear tests of unsaturated soil with different net confining pressures were carried out. In the low suction section, the axial translation technology was used to directly balance the suction on the unsaturated soil triaxial apparatus. In the high suction section, the saturated salt solution vapor balance method was used to

收稿日期: 2025-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(52468048); 广西自然科学基金(2025GXNSFAA069246)

作者简介: 赵龙朝(2000-), 男, 主要从事非饱和土力学特性, Email: 1448846533@qq.com。

于海浩(通信作者), 男, 博士, 副教授, Email: 2018094@glut.edu.cn。

Received: 2025-09-15

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52468048); Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2025GXNSFAA069246)

Author brief: ZHAO Longchao (2000-), main research interest: mechanical properties of unsaturated soil, E-mail: 1448846533@qq.com.

YU Haihao (correspondence author), PhD, associate professor, E-mail: 2018094@glut.edu.cn.

balance the suction. After balance, the triaxial shear test was carried out based on the constant moisture content method. The strength evolution law of remolded unsaturated granite residual soil in a wide suction range was obtained, and the unsaturated shear strength model was used to predict the strength. The results show that the stress-strain behavior of remolded granite residual soil is dominated by suction and net confining pressure. Under the condition of constant net confining pressure, the deviatoric stress of remolded granite residual soil increases significantly at first and then tends to be stable with the increase of suction, there is a suction contribution threshold, and the contribution of matrix suction is almost ignored after exceeding the threshold; The volume deformation characteristics show shear shrinkage, and the volume compression is inhibited under the condition of low suction, but significantly promoted under the condition of high suction; The evolution law of cohesion and internal friction angle with the increase of suction is consistent with the change trend of failure deviatoric stress, which jointly reveals the internal mechanism of soil strength evolution with suction; The strength characteristics of remolded granite residual soil in a wide suction range are predicted, and the predicted results are in good agreement with the measured results.

Keywords: reshaping residual granite soil; wide suction range; mechanical properties; triaxial shear test

作为花岗岩经过长期物理风化、化学蚀变及生物作用综合影响下形成的特殊土体,花岗岩残积土广泛分布于中国华南、东南及其他部分地区^[1]。由于不同区域的形成条件不同,其工程力学特性表现出显著的地域性差异^[2]。极端气候环境下,花岗岩残积土强度劣化明显,由花岗岩残积土形成的边坡极易发生地质灾害,不仅造成严重的经济损失,还威胁人民生命安全^[3]。因此,深刻认识花岗岩残积土的强度特性及其有效预测是地质灾害防治的关键。

已有众多学者研究了花岗岩残积土的强度特性,影响花岗岩残积土强度特性的因素有很多,如含水率、饱和度、干湿循环、基质吸力、结构性、矿物成分等。含水率和饱和度主要通过基质吸力变化影响花岗岩残积土的强度特性。在低含水率状态下,极高的基质吸力产生附加有效应力,并与其天然胶结结构共同作用,使土体强度很高。随着含水率增加,孔隙水会软化胶结物、润滑颗粒,使强度显著衰减;当土体完全饱和后,外部荷载下产生的正孔隙水压力将进一步削弱其有效应力,导致抗剪强度降至最低。这种因增湿引发的强度骤降机制,是花岗岩残积土地区边坡失稳和地基灾害的根本原因^[4-8]。原状花岗岩残积土具有显著的结构性特征,结构性是花岗岩残积土强度特性的核心控制因素。然而,这种结构强度具有显著的脆性,一旦外力超过其承受阈值,胶结键会突然断裂,导致土体发生应变软化,强度从峰值急剧衰减至残余强度^[9]。干湿循环对花岗岩残积土强度特性的影响机制,核心在于每一次循环都不可逆地劣化了提供强度的结构性。干燥收缩和湿润膨胀的不协调性在颗粒间产生疲劳应力,在胶结薄弱处不断引发微裂隙,并

促使原有微裂隙扩展、贯通。随着干湿循环次数的增加,微裂隙逐渐发育为连通裂隙,造成土体强度的衰减^[10-12]。花岗岩残积土独特的工程特性,主要源于游离氧化铁与黏土矿物(如高岭石)间的相互作用:在自然 pH 条件下,带正电的游离氧化铁通过胶结作用,与带负电的高岭石等黏土矿物形成稳定团聚体,从而显著提升了土体的抗剪强度^[13]。

受全球气候变化影响,极端气候事件的发生频率和强度均呈显著加剧趋势,而干旱气候带来的灾害问题越来越严重^[14]。干旱导致土体中水分迁移与赋存状态发生根本性改变,进而打破土体原有的物理-力学-化学平衡,此时土体的吸力可以达到 1~10 MPa,甚至更高。目前,大多数针对非饱和土强度特性的研究多在低吸力条件下进行^[15-16],一些学者针对宽广吸力范围内非饱和土的强度特性进行了研究,但是试样多为膨胀土、黄土和粉土等^[17-20],宽广吸力下非饱和花岗岩残积土强度特性仍不明确。

笔者以广西梧州的花岗岩残积土为研究对象,研究宽广吸力范围下的非饱和花岗岩残积土强度特性演化规律。低吸力条件下,采用轴平移技术,高吸力条件下通过饱和盐溶液蒸汽平衡法控制其吸力,进行常含水率条件的三轴剪切试验,得到不同吸力水平和净围压条件下花岗岩残积土的强度特性演化规律,并进行花岗岩残积土的强度预测研究。

1 试验概况

1.1 试验材料及试样制备

试验用花岗岩残积土取自广西梧州市。为了保证花岗岩残积土在取样过程中尽量减少扰动,取样方法采取槽探法。取出来的花岗岩残积土用保

鲜膜包裹之后放入箱子里保存,减少水分的蒸发。室内试验严格遵循《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)的规定,花岗岩残积土的物理性质指标如表1所示。为了保证重塑样的粒径分布与原状土的一致,试验土样不过筛。花岗岩残积土的颗粒级配曲线如图1所示,土样中砾粒含量($2\text{ mm}<d\leqslant 5\text{ mm}$)为4.36%,砂粒含量($0.075\text{ mm}<d\leqslant 2\text{ mm}$)为50.78%,粉粒含量($0.005\text{ mm}<d\leqslant 0.075\text{ mm}$)为18.27%,黏粒($d\leqslant 0.005\text{ mm}$)含量为26.59%。根据吴能森^[21]提出的花岗岩残积土分类方法,所取的花岗岩残积土试样为黏土质砂。

表 1 花岗岩残积土基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of granite residual soil

天然含水率/%	天然密度/(g/cm ³)	相对密度Gs	塑限/%	液限/%	塑性指数
22.7	1.75	2.66	23.44	43.86	20.42

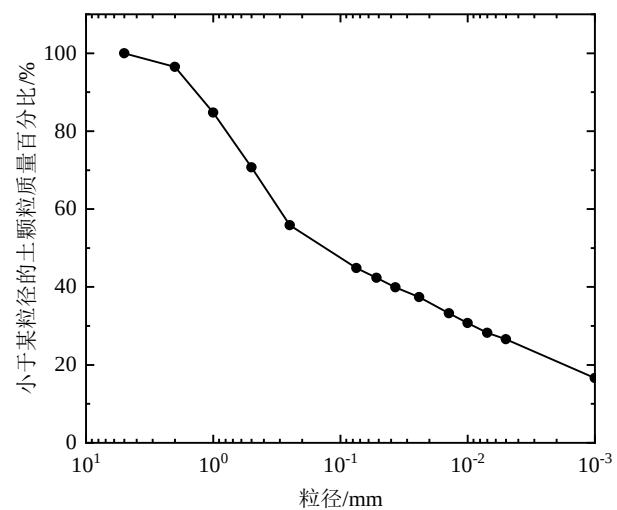


图1 原状花岗岩残积土颗粒级配曲线

Fig.1 The particle size distribution curve of undisturbed granite residual soil

试验采用直径38 mm、高度76 mm的三轴试样。重塑样的制样方法严格按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)。重塑样制备时,根据原状土的天然密度和天然含水率配制土样。在低吸力段($s<500\text{ kPa}$)采用轴平移技术进行吸力控制。将制备好的试样装在GDS非饱和土三轴仪上,通过仪器内置的陶土板(进气值为500 kPa)施加基质吸力。考虑到陶土板性能参数,更高吸力水平的控制需要别的方法来实现。因此,针对高吸力段($s>500\text{ kPa}$),采用饱和盐溶液蒸汽平衡法。试验所用的饱和盐溶液对应的相对湿度和总吸力如表2所示。将制备好的三轴试样放入特定饱和盐溶液的密封缸内,饱和盐溶液与试样保持非接触状态,在恒温密闭的条件下静置,达到平衡的时间为40 d左

右,平衡的判定方法为3d内试样的质量变化小于0.01 g。

表 2 饱和盐溶液对应的相对湿度和总吸力

Table 2 Relative humidity and total suction corresponding to saturated salt solution

饱和盐溶液	相对湿度/%	总吸力/kPa
K ₂ SO ₄	97.6	3 290
K ₂ CO ₃	43.20	113 500
LiBr	6.60	367 540

1.2 试验方法及方案

试验所用仪器为GDS非饱和土三轴仪,如图2所示。三轴试样在制样时的吸力为190 kPa,由WP4C测得。在施加吸力前进行真空饱和处理,确保低吸力段和高吸力段的三轴试样初始含水率一致。在低吸力段,首先对试样施加等向净围压20 kPa,目的是使橡胶膜与试样充分接触。逐级加载至目标吸力值(即100、200、400 kPa),接着逐级加载净围压直至目标净围压值(即100、200、400 kPa)。以试样的总体积在24 h之内变化小于100 mm³为标准,判断固结是否平衡。待固结平衡之后进行三轴剪切试验。在试样和陶土板之间垫上一层薄薄的聚四氟乙烯薄膜,目的是保护陶土板和使试样攒试验过程中保持常含水率。具体的三轴剪切试验方案如表3所示。

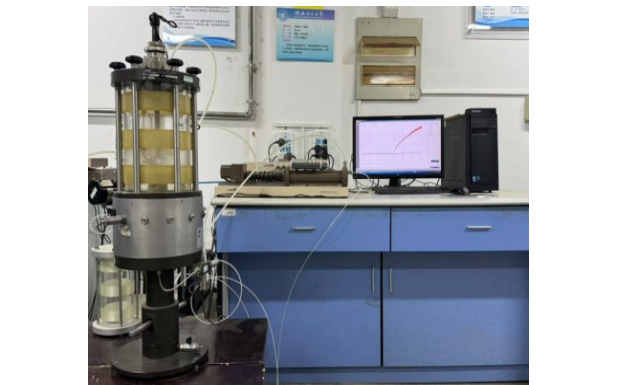


图2 GDS非饱和土三轴仪

Fig.2 GDS unsaturated soil triaxial apparatus

表 3 三轴剪切试验方案

Table 3 Triaxial shear test scheme

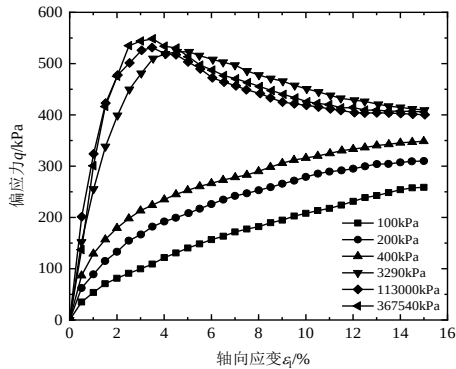
净围压/kPa	吸力/kPa
100	100、200、400、3 290、113 500、367 540
200	100、200、400、3 290、113 500、367 540
400	100、200、400、3 290、113 500、367 540

2 三轴试验结果与分析

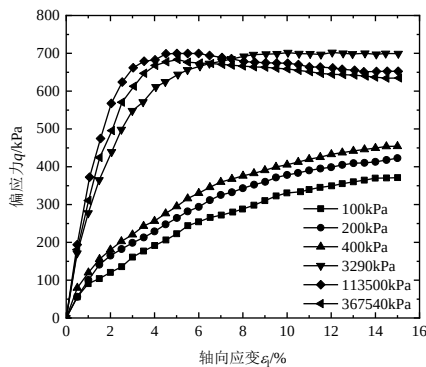
2.1 重塑花岗岩残积土的应力-应变关系

试验得到不同吸力和净围压条件下的应力-应

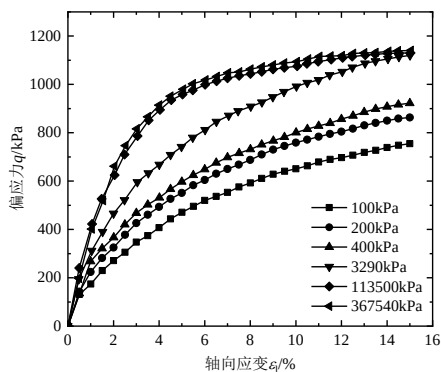
变关系,如图3所示。对于应变硬化曲线,其破坏偏应力 q_f 取轴向应变 $\varepsilon_t=15\%$ 时对应的偏应力值;而对于应变软化曲线, q_f 则取峰值偏应力。根据以上标准,获得了不同净围压 p_3 下破坏偏应力 q_f 随吸力变化的试验结果,如图4所示。



(a) $\sigma_3=100$ kPa



(b) $\sigma_3=200$ kPa



(c) $\sigma_3=400$ kPa

图3 重塑花岗岩残积土应力-应变曲线

Fig. 3 Stress strain curve of remolded granite residual soil

从图3(a)和图3(b)可知,低吸力条件下,同一净围压条件下,试样的应力-应变曲线呈现应变硬化型,随着吸力增加,应变硬化型逐渐向应变软化型转变。而在图3(c)中,应力-应变曲线只有硬化型。由此可以看出,在同一吸力条件下,增大净围压可以使试样的应变硬化特性增强。以吸力在3290 kPa的试样为例,在低净围压(100 kPa)条件下,呈

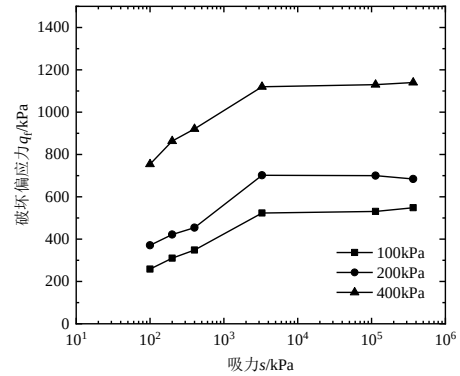


图4 重塑花岗岩残积土强度随吸力的变化

Fig. 4 Changes in strength of remolded granite residual soil with suction

现典型应变软化行为;中净围压(200 kPa)条件下,表现为理想弹塑型,达到屈服点后形成明显平台段;高净围压(400 kPa)条件下,保持持续硬化特性。

从结果分析可知,造成这种结果的原因是花岗岩残积土的结构性和胶结作用^[22-25]。当吸力较大和净围压较低时,高吸力下胶结键断裂,土体失去部分承载力,低净围压不足以抑制结构破坏后的颗粒滑移,其应力应变曲线呈现软化现象;当净围压增大到400 kPa时,净围压通过抑制胶结破坏的局部化、压缩孔隙、增强颗粒互锁,体积收缩增强颗粒间摩擦,延缓了结构强度的完全丧失,使应力随应变持续增长。这一机制区别于均质土,体现了结构性土在高应力下的独特响应。

由图4可知,在恒定吸力条件下,破坏偏应力与净围压呈显著正相关,符合摩尔-库仑强度理论的基本规律;在同一净围压条件下,试样的破坏偏应力随吸力增加呈先线性增长后趋于稳定的趋势。此外,在高吸力范围内很明显地可以看出,当施加的吸力值超过某一临界值时,土体的强度主要受净围压控制,基质吸力对强度的贡献趋近于零。这是由于在低到中吸力范围内,土体含水率较高,内部的水膜连续,此时增加吸力会持续增加水膜的张力,从而增强颗粒间的内聚力。随着吸力增加到临界值,含水率极低,连续水膜消失,剩下的吸力主要用来对抗水-气界面的曲率,而难以有效地传递颗粒间的有效应力。此时,土体的力学行为从非饱和湿土转变为类干土,其强度主要取决于土体骨架的摩擦力和外部施加的净围压,基质吸力的贡献因此变得可以忽略不计。

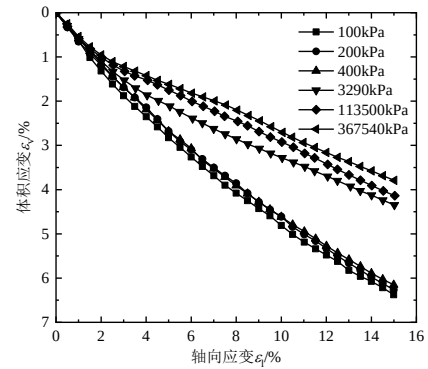
2.2 重塑花岗岩残积土剪切过程中的体变特性

图5为重塑花岗岩残积土在剪切过程中的体变应变关系。由图5可以看出,重塑花岗岩残积土的体变特性受净围压与吸力的共同影响。试样的体变值随净围压增大而增大,剪缩性也随之增强。然

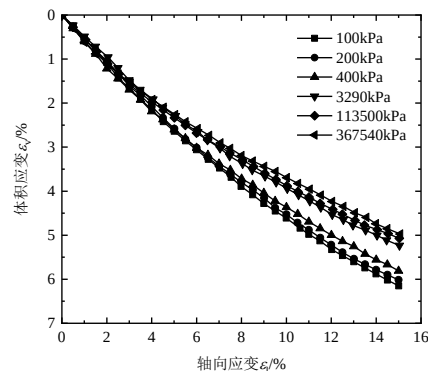
而,吸力的影响则更为复杂:在较低净围压(100 kPa 与 200 kPa)下,增大吸力会抑制试样的剪缩性,表现为体变值减小;而在高净围压(400 kPa)下,趋势发生逆转,增大吸力反而促进了剪缩性,体变值增大。所有试样均表现为剪缩性。在同一吸力条件下,不同净围压对体变的影响规律如图 6 所示。低吸力范围内以 $s=100$ kPa 为例,高吸力范围内以 $s=3\ 290$ kPa 为例,从图 6 中可以看出,在低吸力条件下,随着净围压的增大,试样的体变值减小;在高吸力条件下,随着净围压的增大,试样的体变值增大。由此可见,在低吸力条件下,土体中水分较多,孔隙水膜较厚。虽然赤铁矿胶结存在,但颗粒间仍存在一定的可压缩空间。当净围压增大时,它作为一个强大的外部约束,迫使土颗粒在剪切开始前就进入一个更紧密、更稳定的初始排列状态。在后续剪切中,这种预压密的“骨架”颗粒间滑移和重新排列的空间变小,赤铁矿的胶结作用使这个预压密的骨架更加稳固,颗粒更难在剪切时脱离当前位置而发生导致体积缩小的滑移,从而抑制了土体在剪切过程中的体积变化;在高吸力条件下,土体非常干燥,水膜极薄。此时,赤铁矿的胶结作用占据绝对主导,形成了一种开放、疏松的“胶结结构”。这种结构强度很高,但孔隙率也很大。在这种刚性结构中,单纯的吸力提供的粒间吸引力已经使颗粒处于一种“锁定”状态。此时施加一个较大的净围压,会在这些脆性的胶结点上积聚巨大的弹性应变能。当剪切开始时,积聚的能量为结构的失稳提供了动力。净围压越大,积聚的能量越多,一旦剪切力突破某个临界点,会导致颗粒间胶结键的突然性、大规模断裂。原本由胶结支撑的疏松骨架随之崩塌,颗粒碎片落入巨大孔隙中,从而引发显著的体积减小^[11-13]。

2.3 重塑花岗岩残积土抗剪强度参数

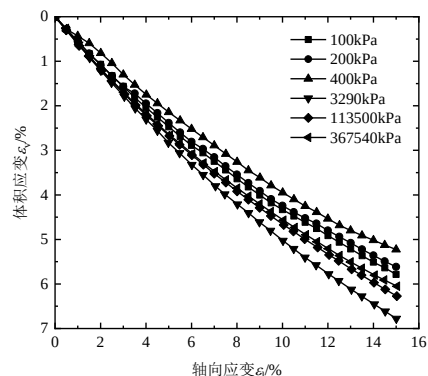
在非饱和土三轴试验中,试样破坏时的应力状态可用一对强度参数(p_t, q_t)来表征,以研究不同吸力与净围压条件下的破坏准则。具体的抗剪强度参数如表 4 所示, p_t 和 q_t 关系曲线如图 7 所示。重塑花岗岩残积土的抗剪强度参数随吸力变化的规律如图 8 和图 9 所示。从图中可知,黏聚力与内摩擦角随吸力的增加总体表现为先显著上升而后渐趋平缓的规律,这一变化规律与破坏偏应力随吸力增大的变化规律相似,体现了变化规律的内在统一性,反映了土体强度随吸力变化的物理本质。在高吸力条件下,土体中的水分极少,孔隙水主要以极薄的水膜形式包裹在颗粒接触点周围。此时,强度的来源从依赖于水性质的基质吸力,转向依赖于固



(a) $\sigma_3=100$ kPa



(b) $\sigma_3=200$ kPa

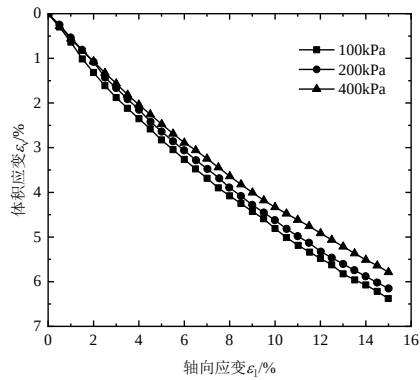


(c) $\sigma_3=400$ kPa

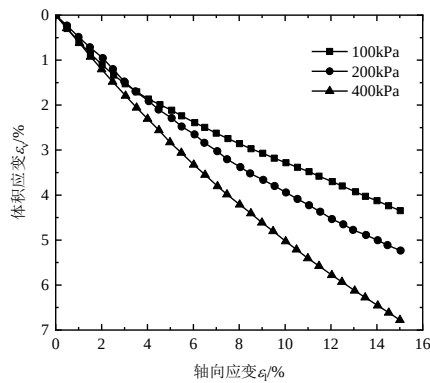
图 5 重塑花岗岩残积土体变应变曲线

Fig. 5 Strain curve of remolded granite residual soil

体颗粒本身性质和连接的胶结强度。赤铁矿与黏土矿物(如高岭石)表面通过配位键等形成牢固的化学键。这种键合能级远高于范德华力或单纯的毛细力,其本身就能提供很高的基础强度。在高吸力下,基质吸力贡献的有效应力增幅会趋缓,但赤铁矿提供的这种原始胶结强度是固有的、不随吸力变化而迅速消失的。因此,在高吸力条件下,虽然基质吸力本身仍是强度的一部分,但赤铁矿的胶结作用已经跃升为主导性的强度来源^[11-13]。



(a) $s=100$ kPa



(b) $s=3\,290$ kPa

图6 重塑花岗岩残积土的体变应变曲线

Fig. 6 Volume strain curve of remolded residual granite soil

表4 重塑花岗岩残积土的强度参数

Table 4 Strength parameters of reshaped granite residual soil

soil					
s/kPa	σ_3/kPa	q_t/kPa	p_t/kPa	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
100	100	258	186		
	200	371	323.67	19.66	27.34
	400	754	651.33		
200	100	310	193		
	200	422	340.67	25.23	29.23
	400	863	687.67		
400	100	348	216		
	200	454	351.33	31.75	29.92
	400	921	707		
3 290	100	523	274.33		
	200	702	434	90.49	30.04
	400	1 120	773.33		
113 500	100	531	277		
	200	700	433.33	90.72	30.17
	400	1 130	776.67		
367 540	100	548	282.67		
	200	684	428	91.26	30.23
	400	1 140	780		

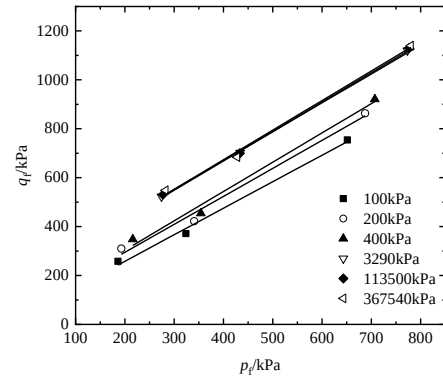


图7 重塑花岗岩残积土的强度包络线

Fig. 7 Strength envelope of remolded granite residual soil

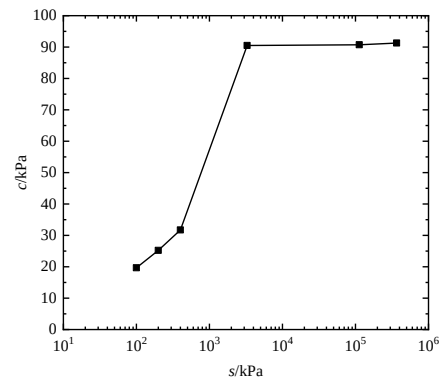


图8 重塑花岗岩残积土黏聚力随吸力的变化

Fig. 8 Variation of cohesion of remolded granite residual soil with suction

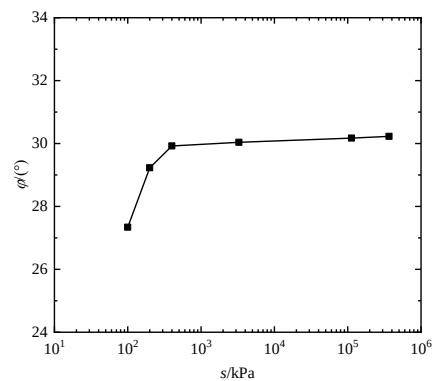


图9 重塑花岗岩残积土内摩擦角随吸力的变化

Fig. 9 Variation of internal friction angle with suction in remolded granite residual soil

3 抗剪强度预测

3.1 抗剪强度模型

非饱和土抗剪强度问题的核心在于建立吸力或饱和度与抗剪强度之间的本构关系。在理论基础建立阶段, Bishop^[26]将 Terzaghi 有效应力原理拓展到非饱和土领域, 首次建立了理论框架, 提出了经典强度方程

$$\tau_f = c' + \sigma_n \tan \varphi' + \chi \sigma_n \tan \varphi' \quad (1)$$

式中: τ_f 为破坏时非饱和强度, kPa; σ_n 为竖向有效净

压力, kPa; φ' 为有效内摩擦角; c' 为有效黏聚力, kPa; χ 为有效应力系数。

依据式(1), 三轴应力状态下非饱和土的剪切应力可以表示为

$$q_f = \frac{3}{3-M} \left[c' \frac{6\cos\varphi'}{(3-\sin\varphi')} + M(\sigma_{3n} + \chi s) \right] \quad (2)$$

式中: q_f 为偏应力, kPa; $M=6\sin\varphi'/(3-\sin\varphi')$, 为临界状态线的斜率。

有效应力系数的确定是提升抗剪强度模型预测精度的关键问题。现有研究表明, 土-水相互作用可区分为毛细作用与吸附作用两种机制, 二者对非饱和土强度的影响存在显著差异。为此, 部分学者提出将孔隙水划分为吸附水与毛细水两个组成部分, 以更准确地描述非饱和土的水力特性。故饱和度 S_r 可表示为

$$S_r = S_{ra} + S_{rc} \quad (3)$$

式中: S_{ra} 为吸附水的饱和度; S_{rc} 为毛细水的饱和度。

高游等^[27]基于前人研究, 提出了一个能够考虑孔隙比影响并区分毛细水和吸附水的 SWCC 方程, 分别对毛细水和吸附水提出如下 SWCC 方程

$$S_{ra} = \left[1 - \frac{\ln(1 + s/s_r)}{\ln(1 + s_{\max}/s_r)} \right] \frac{w_{am}}{e} \left[\exp\left(-\frac{e^b s w_v}{\rho_w R T}\right) \right]^{1/N} \quad (4)$$

$$S_{rc} = \left[1 - \frac{\ln(1 + cs/s_r)}{\ln(1 + cs_{\max}/s_r)} \right]^d \frac{(1 - S_{ra})}{\left\{ \ln[\exp(1) + (e^b s/a)^n] \right\}^m} \quad (5)$$

式中: w_{am} 为与材料的最大吸附水含量有关的参数; N 为与吸附强度有关的拟合参数; w_v 为水蒸气的分子质量 18.016 g/mol; ρ_w 为水的密度, g/cm³; R 为理想气体常数, 取 8.314 J/(mol·K); T 为绝对温度, 25°C 时 T 为 298K; e 为初始孔隙比; b 为拟合参数; $s_{\max}$ 为最大吸力值, kPa; s_r 为残余吸力值, kPa; a 为与进气值相关的拟合参数; m 和 n 为与孔径分布相关的拟合参数; c 和 d 为主要影响集聚体孔隙对应的土水特性的拟合参数。

结合式(4)、式(5), 高游等^[27]提出一个考虑孔隙比影响的修正抗剪强度方程, 可表示为

$$\tau_f = c' + [(\sigma_v - u_a) + f_a \sigma_{dry}^s + s S_{rc}^k] \tan \varphi' \quad (6)$$

$$q_f = \frac{3}{3-M} \left[c' \frac{6\cos\varphi'}{(3-\sin\varphi')} + M \{ \sigma_{3n} + f_a \sigma_{dry}^s + s S_{rc}^k \} \right] \quad (7)$$

式中, k 为反映毛细作用对强度贡献的材料参数, $k \geq 1$; σ_{dry}^s 为干燥状态下的吸应力。其中, f_a 是一个考虑物理化学力分布的函数, 可以表示为

$$f_a = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\beta \frac{S_r(s) - S_r^{\text{tran}}}{S_r^{\text{tran}}} \right] \quad (8)$$

式中: β 为材料参数; S_r^{tran} 为过渡性饱和度^[28], 约等于 $1.55 S_r^{\text{tran}}$; S_r^{tran} 为最大吸附饱和度。

所用土水模型与其他模型相比可以预测双峰土水特征曲线, 将模型中的参数 c 和 d 分别取 0, 即可退化为单峰土水特征曲线模型并且以毛细饱和度来代替有效应力系数可以避免高估或低估土体在高吸力条件下的强度特性; 非饱和土抗剪强度的变化规律具体分为 3 种: 增长型、稳定型、山峰型, 所用强度模型可以准确地描述不同类型的强度行为。

3.2 抗剪强度预测

对重塑花岗岩残积土的实测土水特征曲线进行拟合, 拟合曲线如图 10 所示。从拟合结果中得到相关参数, 如表 5 所示。根据 SWCC 方程标定的参数, 通过式(7)对重塑花岗岩残积土的强度特性进行预测。图 11 为重塑花岗岩残积土的实测和预测强度曲线。表 6 给出了重塑花岗岩残积土强度预测公式中的基本参数。可以看出, 重塑花岗岩残积土的强度预测曲线随着吸力的增大逐渐呈现出稳定的趋势, 预测曲线和试验结果吻合良好。根据以上结果可知, 所采用的模型可以准确预测花岗岩残积土的强度特性。

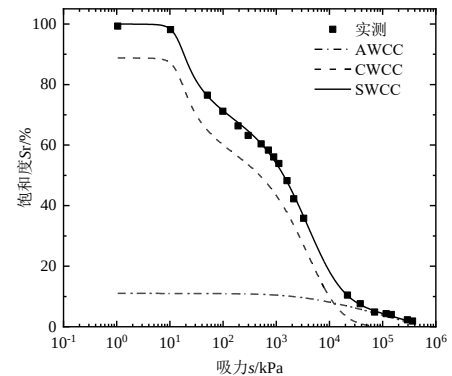


图 10 重塑花岗岩残积土的 SWCC 拟合

Fig.10 SWCC fitting of remolded granite residual soil

表 5 重塑花岗岩残积土 SWCC 拟合参数

Table 5 Fitting parameters of remolded granite residual soil

$w_{am}/\%$	N	a/kPa	n	m	c	d
11	10	13.03	4.68	0.16	0.445	8.3

4 结论

通过控制吸力的常净围压三轴剪切试验, 得出以下结论:

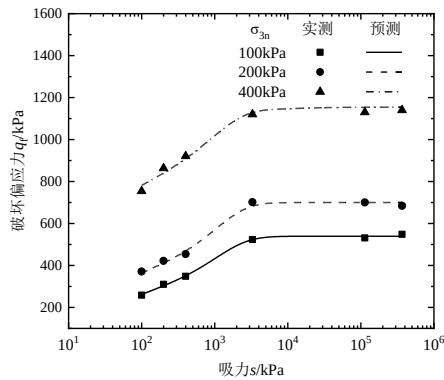


图 11 重塑花岗岩残积土的强度预测

Fig. 11 Strength prediction of remolded granite residual soil

表 6 重塑花岗岩残积土强度模型拟合参数

Table 6 Fitting parameters of strength model for remolded granite residual soil

净围压/kPa	σ_{dry}^s /kPa	β	k	R^2
100	391.68	2.88	7.41	0.997
200	446.26	3.01	9.74	0.992
400	685.76	1.96	3.33	0.984

1) 重塑花岗岩残积土的应力-应变特性受吸力和净围压共同控制。破坏偏应力与吸力呈非线性关系,随吸力增大呈先增长后趋于稳定的变化趋势,存在吸力贡献阈值,超过阈值之后基质吸力的贡献几乎忽略不计。在高吸力条件下,赤铁矿与黏土矿物间通过配位键形成的固有胶结作用成为主导的强度来源。

2) 宽广吸力范围内重塑花岗岩残积土试样均呈现剪缩现象。重塑花岗岩残积土的体积变形特性受净围压与吸力的共同影响,表现出复杂的交互作用。在低吸力条件下,净围压通过预压密作用强化了赤铁矿胶结的颗粒骨架,从而抑制剪切体积变化;而在高吸力条件下,净围压积聚的应变能会引发赤铁矿胶结结构的脆性断裂,导致显著的体积压缩。

3) 采用高游等提出的非饱和土抗剪强度模型可以很好地预测重塑花岗岩残积土的强度特性,为花岗岩残积土地区的工程设计和灾害防控提供科学依据。

参考文献

[1] 吴能森, 赵尘, 侯伟生. 花岗岩残积土的成因、分布及工程特性研究[J]. 平顶山工学院学报, 2004, 13(4): 1-4. WU N S, ZHAO C, HOU W S. Research on the cause of formation, distribution and engineering characteristics of the granite residual soil [J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2004, 13(4): 1-4. (in Chinese)

[2] 陈志波, 方军, 蔡锦阳, 等. 试样特征对花岗岩残积土强度特性的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(3): 127-134. CHEN Z B, FANG J, CAI J Y, et al. Effect of sample characteristics on the strength characteristics of granite residual soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3): 127-134. (in Chinese)

[3] WANG D Y, ZENG Q J, WANG J, et al. Effect of dry-wet cycle on stability of granite residual soil slope [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 526(1): 012046.

[4] 李凯, 王志兵, 韦昌富, 等. 饱和度对风化花岗岩边坡土体抗剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 267-273. LI K, WANG Z B, WEI C F, et al. Effect of saturation on shear strength characteristics of weathered granite slope soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 1): 267-273. (in Chinese)

[5] RAHMAN A S A, NOOR M J M, JAIS I B M, et al. Shear strength of granitic residual soil in saturated and unsaturated conditions [J]. AIP Conference Proceedings, 2020(1): 020003.

[6] PHAM K, KIM D, LEE I M, et al. Hydraulic-mechanical properties of unsaturated granite-weathered residual soil in Korea [J]. Vadose Zone Journal, 2019, 18(1): 180188.

[7] 马勤国, 郭皓公, 罗晓晓. 非饱和花岗岩残积土的剪切特性与抗剪强度分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(11): 55-68. MA Q G, GUO H G, LUO X X. Analysis on shear characteristics and shear strength of unsaturated granite residual soil [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(11): 55-68. (in Chinese)

[8] LAN B, JIA B Z, WU Y Y, et al. Strength characteristics in saturation process and rainfall-induced landslide failure mechanism of granite residual soil [J]. Frontiers in Earth Science, 2025, 13: 1578923.

[9] 汪华斌, 周宇, 余刚, 等. 结构性花岗岩残积土三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 991-1002. WANG H B, ZHOU Y, YU G, et al. A triaxial test study on structural granite residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 991-1002. (in Chinese)

[10] 安然, 孔令伟, 张先伟, 等. 干湿循环效应下花岗岩残积土结构损伤的多尺度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 758-767. AN R, KONG L W, ZHANG X W, et al. A multi-scale study on structure damage of granite residual soil under wettingdrying environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 758-767. (in Chinese)

- [11] KANG X, ZHAO S C, LIU P. Effects of drying-wetting cycles and free iron oxides on the mechanical behaviors of a partially decomposed granite residual soils [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(12): 466.
- [12] LIU P, CHEN R P, WU K, 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): 04020199.
- [13] LI S L, SHEN J S, MA X Y, et al. Unraveling the microscopic mechanics of kaolinite-hematite interfaces in granite residual soil with MD/DFT [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2025, 49(10): 2376-2393.
- [14] 唐朝生. 极端气候工程地质: 干旱灾害及对策研究进展 [J]. 科学通报, 2020, 65(27): 3009-3027, 3008.
TANG S T. Extrem climate engineering geology: Soil engineering properties response to drought climate and measures for disaster mitigation [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(27): 3009-3027, 3008. (in Chinese)
- [15] WANG D B, WANG C, WANG Z R. An experimental study of the water-holding and strength characteristics of unsaturated canal embankment soils in the South-to-North water diversion project [J]. Frontiers in Earth Science, 2025, 13: 1558910.
- [16] HAO J N, ZHU S R, CHENG P, et al. Effects of clay grains on the shear properties of unsaturated loess and microscopic mechanism [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 22666.
- [17] GAO Y, SUN D A, ZHU Z C, et al. Hydromechanical behavior of unsaturated soil with different initial densities over a wide suction range [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(2): 417-428.
- [18] 牛庚, 朱晓凤, 李俊星, 等. 宽广吸力范围非饱和土剪切强度试验研究及其预测 [J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3349-3359.
NIU G, ZHU X F, LI J X, et al. Experimental study on shear strength of unsaturated soil over a wide suction range and its prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3349-3359. (in Chinese)
- [19] 孙德安, 徐钱垒, 陈波, 等. 广吸力范围内非饱和原状黄土的力学特性 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1586-1592.
SUN D A, XU Q L, CHEN B, et al. Mechanical behavior of unsaturated intact loess over a wide suction range [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1586-1592. (in Chinese)
- [20] GAO Y, CHEN J J, SUN D A, et al. Investigation of the shear strength of unsaturated soils over a wide suction range [J]. International Journal of Geomechanics, 2025, 25: 04024312.
- [21] 吴能森. 花岗岩残积土的分类研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2299-2304.
WU N S. Study on classification of granite residual soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2299-2304. (in Chinese)
- [22] 宋治, 简文星, 张树坡, 等. 赣南花岗岩残积土的抗剪强度及其影响因素 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(13): 222-227.
SONG Z, JIAN W X, ZHANG S P, et al. Influencing factors of shear strength of granite residual soil in southern Jiangxi Province [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(13): 222-227. (in Chinese)
- [23] LU Y W, SHI Y J, CHEN B, et al. Structural damage characteristics and mechanism of granite residual soil [J]. Applied Rheology, 2024, 34: 20240011.
- [24] 康馨, 赵士成, 刘鹏. 干湿循环下花岗岩残积土胶结物溶蚀-微结构演化规律与力学行为 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 159-169.
KANG X, ZHAO S C, LIU P. Cement-microstructure evolution law and mechanical behavior of granite residual soils under multiple drying-wetting cycles [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(1): 159-169. (in Chinese)
- [25] LIU X Y, ZHANG X W, KONG L W, et al. Effect of cementation on the small-strain stiffness of granite residual soil [J]. Soils and Foundations, 2021, 61(2): 520-532.
- [26] BISHOP A W. The principle of effective stress [J]. Teknisk Ukeblad, 1959, 39: 859-863.
- [27] 高游, 李泽, 孙德安, 等. 考虑初始孔隙比影响的单/双峰土-水特征曲线模型研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1441-1452.
GAO Y, LI Z, SUN D A, et al. Unimodal and bimodal soil-water characteristic curves model considering the effect of initial void ratio [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(6): 1441-1452. (in Chinese)
- [28] ZHANG C, LU N. Unified effective stress equation for soil [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020, 146(2): 04019135.