

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20221209003

文章编号: 1672-9331(2023)06-0049-09

引用格式: 查旭东, 莫惆, 张俊逸, 等. 风化花岗片麻岩砂类土抗剪强度参数预估模型[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(6): 49-57.

Citation: ZHA Xudong, MO Chou, ZHANG Junyi, et al. Prediction models of shear strength parameters for sandy soil of weathered granite gneiss [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 49-57.

# 风化花岗片麻岩砂类土抗剪强度参数预估模型

查旭东, 莫惆, 张俊逸, 吴双萍

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】分析风化花岗片麻岩砂类土非饱和抗剪强度随含水率和压实度的变化规律。【方法】以皖西大别山区典型风化花岗片麻岩砂类土填料为研究对象, 采用静压成型法制备该砂类土 20 种不同含水率和压实度组合状态的非饱和试样, 通过室内大型直剪试验分析含水率和压实度对其抗剪强度参数的影响, 回归建立相应的综合关系模型, 并验证其预估精度。【结果】在相同压实度下, 土样黏聚力和内摩擦角分别与含水率比值(含水率与最佳含水率之比)成显著的单峰左偏态高斯型函数关系和幂函数负相关性; 在相同含水率下, 黏聚力和内摩擦角均与压实度成显著的对数函数正相关关系; 所建立的抗剪强度参数与含水率、压实度之间的综合关系模型具有较高的预估精度。【结论】预估模型可用于预测该砂类土的似黏聚力强度特性, 并可供同类土体强度参数建模参考。

**关键词:** 道路工程; 砂类土; 直剪试验; 抗剪强度; 预估模型; 高斯型函数

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

## 0 引言

风化花岗片麻岩砂类土是花岗岩经变质作用形成的松散沉积物, 常用作路基填料。此类土在自然气干状态下具有良好的力学性质, 但在降雨条件下其水稳定性变差, 容易产生滑坡失稳<sup>[1-2]</sup>。皖西大别山区分布有大量的风化花岗片麻岩砂类土, 该地区的许多道路工程常就地取材将其用作筑路材料, 因此在梅雨季节降雨较多的情况下, 此类边坡稳定性急剧下降, 影响了道路的安全运营<sup>[3-4]</sup>。边坡稳定性取决于边坡土体的抗剪强度, 而土体抗剪强度主要受含水率和压实度两个因素的影响, 故研究含水率和压实度对土体抗剪强度的影响对于边坡稳定性分析具有十分重要的意义<sup>[5-8]</sup>。

近年来, AMIRI KHAPOUSHAN 等<sup>[9]</sup>、陈佳雨等<sup>[10]</sup>采用多元线性回归预测非饱和土抗剪强度参数与压实度的关系, 并通过直剪试验验证其模型

的可行性; YUAN 等<sup>[11]</sup>指出非饱和土的含水率变化改变了土颗粒间的接触状态和联结方式, 显著影响了土体的力学性能; UYETURK 等<sup>[12]</sup>、邢琳等<sup>[13]</sup>应用直剪试验分析了非饱和土的抗剪强度与饱和度的非线性关系。砂土作为一种性质优良的路基填料, 在工程中得到了广泛的研究与应用, 范婷婷等<sup>[14]</sup>结合抗剪强度与孔隙比关系式, 分析了砂类土的抗剪强度随含水率的变化规律; 曹志翔等<sup>[15]</sup>对不同含水率的砂土进行了直剪试验, 并通过微观分析研究了抗剪强度参数与含水率之间的关系; 朱遥等<sup>[16]</sup>通过直剪试验与离散元数值模拟, 研究了砂土颗粒形态对土体抗剪强度的影响; 贺林林等<sup>[17]</sup>分析了砂土的抗剪强度随砂土颗粒排列角度的变化规律。对于其他土类, 龙志东等<sup>[18]</sup>分析了花岗岩残积土初始干密度和颗粒成分对其抗剪强度指标的影响; 朱彦鹏等<sup>[19]</sup>、唐凛等<sup>[20]</sup>分别研究了粉质黏土与低液限黏土的抗剪强度参数随含水率及干密度的变化规律, 并建立了相应的关系模型; 尹松等<sup>[21]</sup>研究了压实粉土的抗剪强度随冻

收稿日期: 2022-12-09; 修回日期: 2022-12-12; 接受日期: 2022-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878077); 安徽省交通运输科技进步计划项目(201839)

通信作者: 查旭东(1970—)(ORCID: 0000-0002-1655-0635), 男, 教授, 主要从事道路工程方面的研究。

E-mail: 1756023135@qq.com

融循环作用次数和含水率增加的劣化特性;王月春等<sup>[22]</sup>通过测试土样吸附结合水含量,分析了干湿循环作用对高液限土抗剪强度衰减的影响。

综上所述,由于土质和土性、饱和度和密实性的差异,不同土体的抗剪强度参数受含水率及压实度的影响也各不相同,因此有必要结合不同的土质研究含水率和压实度对土体抗剪强度参数的综合影响,并建立合理的关系模型。为此,本研究以皖西大别山区典型风化花岗片麻岩砂土填料为研究对象,通过制备不同含水率和压实度组合状态下的砂类土试样,采用室内大型直剪试验对该非饱和砂类土抗剪强度参数的影响规律进行研究,并考虑其类似黏聚力特性建立抗剪强度参数与含水率、压实度之间的预估模型,从而为该砂类土路堤变形和边坡稳定性分析提供可靠的参数依据。

## 1 土样与试验

### 1.1 土样性质试验

试验土样取自在役的G35济广(济南至广州)高速公路安徽省岳潜(岳西至潜山)段的土质路堤填料。该土样为皖西大别山区典型的风化花岗片麻岩砂土,其矿物组成、颗粒级配及主要物理力学性质指标分别见表1、表2、表3,相应的重型击实曲线(干密度 $\rho_d$ 与含水率 $w$ 关系曲线)如图1所示。

表1 土样矿物组成

Table 1 Mineral composition of soil sample %

$w$ (石英)	$w$ (长石)	$w$ (角闪石)	$w$ (蛭石)
21.6	69.7	7.2	1.5

表2 土样颗粒级配

Table 2 Particle gradation of soil sample %

通过下列筛孔的土颗粒的质量分数									
60 mm	40 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.075 mm
100.0	94.2	85.0	80.1	73.6	55.0	37.0	28.8	15.5	4.7

表3 土样主要物理力学性质指标

Table 3 Main physical and mechanical performance indexes of soil sample

颗粒级配系数		土粒比重	0.5 mm以下颗粒塑性指标			重型击实指标		加州承载比/%
不均匀系数	曲率系数		塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 $I_p$	最佳含水率 $w_{opt}/\%$	最大干密度 $\rho_{d,max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	
$C_u$	$C_c$							
19.0	1.6	2.639	15.1	21.2	6.1	8.8	2.083	24.9

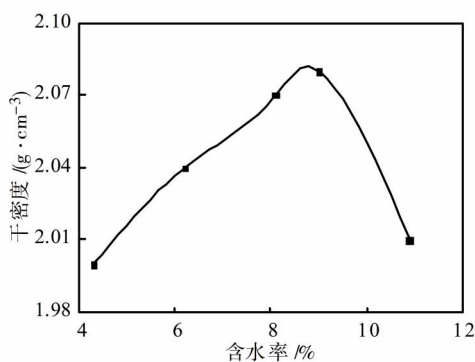


图1 土样重型击实曲线

Fig. 1 Heavy compaction curve of soil sample

由以上可知,该土样颗粒最大粒径小于60 mm,砂粒组(0.075, 2] mm的质量分数为50.3%,大于砾粒组(2, 60] mm的质量分数45.0%,且 $C_u \geq 5$ ,  $C_c \in [1, 3]$ ,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),该砂类土为级配良好砂(SW)。同时,其标

准状态下的加州承载比超出上路床填料需满足8%这一要求的2.1倍,且重型击实曲线未出现双驼峰现象。该填料已在岳潜高速公路中得到普遍应用,该高速公路自2009年12月底建成通车十多年来,沿线路基技术状况良好,未出现大面积路堤沉降和边坡失稳等病害,但在雨季存在局部边坡变形和坍塌及支护设施鼓胀等现象。这表明该砂类土的压实性能和工程性质总体优良,是该地区一种较优质的筑路材料,但为了确保路基的长期稳定,有必要分析其强度特性随含水率和压实度的变化规律。

### 1.2 大型直剪试验

为研究含水率和压实度对该砂类土非饱和试样抗剪强度的影响规律,本研究采用室内大型直剪仪进行快剪试验,试样为150 mm×150 mm×150 mm的立方体,分上、下剪切盒制样,如图2所

示。剪切速率设定为2 mm/min;垂直压力设定为200、400和600 kPa 3种。制样时,根据表3土样的最佳含水率及砂类土持水特性相对较差的特点,按2.0%间隔在4.8%~12.8%之间选取5种含水率方案;根据表3土样的最大干密度及路基压实度的控制要求和衰变特性,选定90%、93%、96%和100% 4种压实度方案。据此,共设定20种不同含水率和压实度的组合状态,每种组合状态在每种垂直压力下各制作3个试样,共制备180个试样。



图2 大型直剪试验

Fig. 2 Large-scale direct shear test

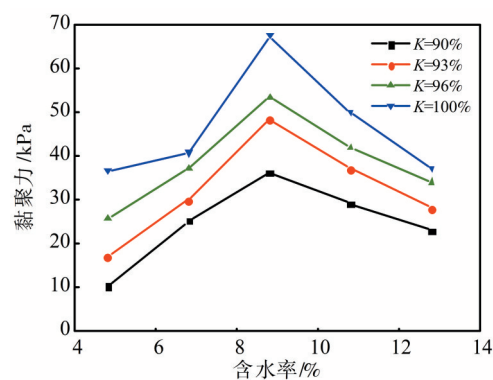
试验前,将土样烘干后以目标含水率进行配制,并闷料24 h备用;制样时,按预定的含水率和压实度组合状态称取所需土料,分3层装料并逐层静压至设定厚度,同时层间进行刮毛处理,以确保试样压实的均匀性和整体性;然后,按上述大型直剪试验方案进行快剪试验,测试试样在各级垂直压力下的抗剪强度,并通过回归分析计算抗剪强度参数——黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 。

## 2 结果分析

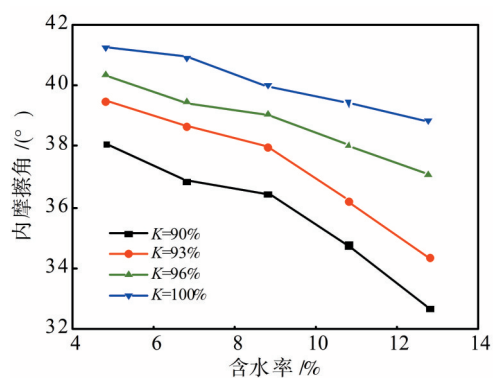
### 2.1 含水率对抗剪强度参数的影响

通过室内大型直剪试验,本试验测得该砂类土试样在不同压实度 $K$ 下的抗剪强度参数(黏聚力 $c$ 、内摩擦角 $\varphi$ )与含水率 $w$ 的关系曲线,如图3所示。

从图3可以看出,在90%、93%、96%及100%这4种压实度下,随着含水率的增加,试样的黏聚力均呈先增后减的单峰曲线变化规律,且黏聚力峰值均出现在最佳含水率处。在以上4种压实度下,与最佳含水率8.8%下的黏聚力相比,4.8%和12.8%的含水率下的黏聚力分别平均减小58.2%



(a) 黏聚力与含水率关系



(b) 内摩擦角与含水率关系

图3 抗剪强度参数与含水率关系曲线

Fig. 3 Relation curves between shear strength parameters and water content

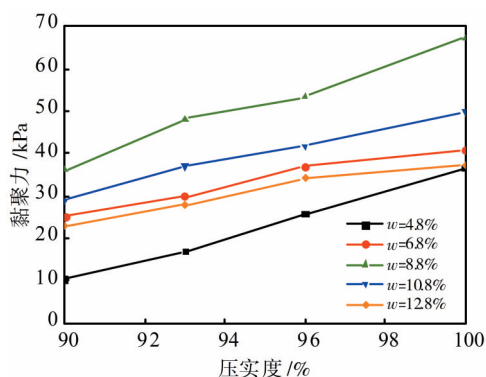
和39.8%。这表明试样的黏聚力在低含水率下的变化幅度明显要比在高含水率下的大,即单峰曲线呈现出一定的左偏态性。内摩擦角随含水率的增加一直在减小,在以上4种压实度下,与最佳含水率8.8%下的内摩擦角相比,4.8%含水率下的内摩擦角平均提高了3.8%,而12.8%含水率下的平均降低了6.9%,这表明试样的内摩擦角在超过最佳含水率后降幅逐渐增加。究其原因主要为,对于非饱和状态下的砂类土,其土颗粒之间会出现似黏聚力现象,当含水率较低时,含水率的增加主要以结合水形式增强土颗粒间的结合力而使黏聚力增大,但水分增加会削弱土颗粒间的摩阻作用而使内摩擦角减小;当含水率继续增至最佳含水率附近时,土体中自由水逐渐产生并增多,相应的土颗粒间结合力随之减弱,此时含水率的进一步增加会导致黏聚力逐渐降低;当含水率超过最佳含水率后,水分逐渐填充土颗粒间的孔隙并起到增强润滑的作用,从而导致内摩擦角降幅加大。

### 2.2 压实度对抗剪强度参数的影响

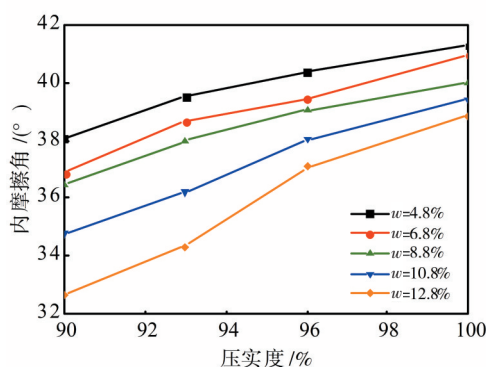
该砂类土试样在不同含水率 $w$ 下的黏聚力 $c$



及内摩擦角 $\varphi$ 与压实度 $K$ 的关系曲线如图4所示。从图4可以看出,在4.8%、6.8%、8.8%、10.8%及12.8%这5种含水率下,随着压实度的增加,试样的黏聚力和内摩擦角均呈增长趋势。其中,黏聚力在最佳含水率下的增幅最大,高达31.3 kPa;而内摩擦角在12.8%高含水率下的增幅最大,为 $6.2^\circ$ 。这主要是因为压实度不断增加使非饱和砂类土体的密实性逐渐提高,孔隙率减小,相应的土颗粒间距缩小,接触点增多,嵌挤作用增强,加之受到结合水黏滞作用及自由水润滑作用的综合影响,从而使土颗粒间的结合力和摩阻力总体提高,相应的土体黏聚力和内摩擦角随之增大。



(a) 黏聚力与压实度关系



(b) 内摩擦角与压实度关系

图4 抗剪强度参数与压实度关系曲线

Fig. 4 Relation curves between shear strength parameters and compaction degree

### 3 讨论

#### 3.1 抗剪强度参数预估模型的建立

##### 3.1.1 黏聚力预估模型

由图3(a)分析可知,该砂类土的黏聚力随含水率变化的单峰曲线具有非对称的左偏态性。通过选取多种函数的非线性回归对比,可采用式(1)

的高斯型函数来表征其黏聚力 $c$ 与含水率 $w$ 之间的关系模型。其中,指数部分的 $w_r$ 为含水率 $w$ 与最佳含水率 $w_{opt}$ 之比,定义为含水率比值,由此将含水率相对于最佳含水率进行了无量纲化处理,有利于扩大模型的适用范围。另外,式(1)模型中各参数也有较明确的物理意义,常数 $a_0$ 、系数 $a_1$ 和指数 $a_2$ 分别反映了黏聚力的最小值、变化幅值及随含水率变化的敏感性范围,其中 $1/a_2$ 的大小表征土体水敏性的强弱,其值越大,土体水敏性越强,反之则越弱,且 $a_0+a_1$ 为最大黏聚力值,其对应的含水率即为最佳含水率 $w_{opt}$ 。据此,可得到以上4种压实度下3个回归参数 $a_0$ 、 $a_1$ 和 $a_2$ 及判定系数 $R^2$ 的分析结果,见表4。

$$c = a_0 + a_1 \exp(-a_2 (\ln w_r)^2) \quad (1)$$

表4 黏聚力与含水率回归结果

Table 4 Regression results between cohesion and water content

压实度 $K/\%$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R^2$
90	5.126	29.863	4.544	0.971
93	17.265	30.106	9.940	0.961
96	26.567	26.123	11.822	0.975
100	36.073	31.592	23.259	0.988

由表4可知,各压实度下的判定系数 $R^2$ 均大于0.960,这表明该砂类土黏聚力与含水率之间具有显著的单峰左偏态高斯型函数相关性,且该函数可很好地表征砂类土的似黏聚力特性。同时,随着压实度的增加,各回归参数也呈现出一定的变化规律,其中最小黏聚力值 $a_0$ 逐渐增大,黏聚力变化幅值 $a_1$ 总体相差不大,相应的最大黏聚力值 $a_0+a_1$ 逐渐增大,而黏聚力水敏性值 $1/a_2$ 逐渐减小。该模型总体上较好地反映了砂类土黏聚力随压实度的变化特性。

同理,由图4(a)分析可知,该砂类土黏聚力 $c$ 随压实度 $K$ 的增加呈增长趋势。通过非线性回归对比,可采用式(2)的对数函数来建立二者之间的关系模型,相应的5种含水率下回归参数 $b_0$ 、 $b_1$ 及判定系数 $R^2$ 的分析结果见表5。

$$c = b_0 + b_1 \ln K \quad (2)$$

由表5可知,各含水率下的判定系数 $R^2$ 均大于0.960,这表明该砂类土黏聚力与压实度之间具有显著的对数函数正相关性。同时,系数 $b_1$ 反映了黏聚力随压实度变化的敏感性,在最佳含水率下敏感性最高,而在12.8%高含水率下的敏感性

最低,在其他含水率下的敏感性居中,这表明在最佳含水率下提高压实度有利于增强砂类土颗粒间的结合力和黏聚性。

表5 黏聚力与压实度回归结果

Table 5 Regression results between cohesion and compaction degree

含水率 $w/\%$	$b_0$	$b_1$	$R^2$
4.8	-1 125.836	252.352	0.996
6.8	-664.800	153.393	0.973
8.8	-1 249.165	285.775	0.984
10.8	-838.794	192.992	0.993
12.8	-601.671	138.932	0.969

综合上述关系模型可知,该砂类土的黏聚力与含水率、压实度之间均成显著相关,由此结合模型参数的变化规律,通过多元非线性回归分析对比,可建立黏聚力  $c$  与含水率  $w$ 、压实度  $K$  的综合关系模型,如式(3)所示。

$$c = -908.206 + 27.557 \exp(-12.569(\ln w_r)^2) + 204.689 \ln K, \quad n = 20, R^2 = 0.950 \quad (3)$$

式中:  $n$  为样本数。

上式的复判定系数  $R^2$  达到 0.950,表明该砂类土黏聚力与含水率、压实度之间的复相关性显著。模型中含水率比值项的系数为正值,表明黏聚力与含水率成单峰曲线关系变化;压实度项的系数也为正值,表明黏聚力与压实度成正相关。因此,该模型很好地表征了砂类土黏聚力随含水率和压实度的变化规律,可作为该砂类土黏聚力的预估模型。

### 3.1.2 内摩擦角预估模型

由图 3(b) 分析可知,该砂类土内摩擦角  $\varphi$  随含水率  $w$  的增加总体上呈加速减小的变化规律。通过非线性回归对比,可采用式(4)的幂函数来建立二者之间的关系模型,同样采用含水率比值  $w_r$  对含水率进行无量纲化处理,从而得到 4 种压实度下的 3 个回归参数  $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  及判定系数  $R^2$  的分析结果,见表 6。

$$\varphi = \alpha_0 - \alpha_1 w_r^{\alpha_2} \quad (4)$$

由表 6 可知,各压实度下的判定系数  $R^2$  均大于 0.980,这表明该砂类土内摩擦角与含水率之间具有显著的幂函数负相关性。式(4)模型中的常数  $\alpha_0$ 、系数  $\alpha_1$  和指数  $\alpha_2$  分别反映了土体内摩擦角在 0% 含水率下的取值、变化幅度和随含水率变化的敏感性。随着压实度的增加,  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  逐渐增大,

而  $\alpha_2$  逐渐减小,呈现出良好的变化规律,即压实度越高,内摩擦角越大,水敏性越弱。该模型总体上较好地反映了砂类土内摩擦角在不同压实度下的水稳定性。

表6 内摩擦角与含水率回归结果

Table 6 Regression results between internal friction angle and water content

压实度 $K/\%$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$R^2$
90	38.301	2.057	2.660	0.986
93	39.886	2.100	2.598	0.996
96	41.209	2.325	1.520	0.988
100	42.538	2.430	1.153	0.986

同理,由图 4(b) 分析可知,该砂类土内摩擦角  $\varphi$  随压实度  $K$  的增加而增大。通过非线性回归对比,与黏聚力和压实度关系类似,可采用式(5)的对数函数来建立二者之间的关系模型,由此得到 5 种含水率下回归参数  $\beta_0$ 、 $\beta_1$  及判定系数  $R^2$  的分析结果,见表 7。

$$\varphi = \beta_0 + \beta_1 \ln K \quad (5)$$

表7 内摩擦角与压实度回归结果

Table 7 Regression results between internal friction angle and compaction degree

含水率 $w/\%$	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2$
4.8	-95.226	29.673	0.973
6.8	-129.672	37.060	0.979
8.8	-113.023	33.269	0.974
10.8	-167.615	44.989	0.991
12.8	-239.754	60.542	0.983

由表 7 可知,各含水率下的判定系数  $R^2$  均大于 0.970,这表明该砂类土内摩擦角与压实度之间成显著的对数函数正相关性。同时,在 12.8% 高含水率下的常数  $\beta_0$  绝对值和系数  $\beta_1$  均最大,即此时内摩擦角随压实度变化的敏感性最强,而低含水率和最佳含水率下的敏感性相对较弱。该模型较好地反映了砂类土内摩擦角在不同含水率下的变化特性。

综合式(4)和(5)的关系模型可知,该砂类土的内摩擦角与含水率、压实度之间均具有显著的相关性,据此通过多元非线性回归分析对比,可建立内摩擦角  $\varphi$  与含水率  $w$ 、压实度  $K$  的综合关系模型,如式(6)所示。

$$\varphi = -146.747 - 2.058 w_r^{2.125} + 41.107 \ln K, \quad n = 20, R^2 = 0.950 \quad (6)$$

上式的复判定系数  $R^2$  达到 0.950, 表明该砂类土内摩擦角与含水率和压实度之间的复相关性显著, 且含水率比值项的系数为负值, 压实度项的系数为正值, 即内摩擦角与含水率成负相关关系, 而与压实度成正相关关系。因此, 该模型很好地表征了内摩擦角随含水率和压实度的变化规律, 可作为该砂类土体内摩擦角的预估模型。

表 8 抗剪强度参数预估模型验证

Table 8 Verification of prediction models for shear strength parameters

含水率 $w/\%$	压实度 $K/\%$	黏聚力 $c$				内摩擦角 $\varphi$			
		实测值/ kPa	预估值/ kPa	绝对误差/ kPa	相对误差/ %	实测值/ (°)	预估值/ (°)	绝对误差/ (°)	相对误差/ %
5	100	37.0	34.9	-2.1	-5.6	41.0	41.9	0.9	2.3
10	95	45.7	46.4	0.7	1.4	38.1	37.7	-0.4	-0.9
15	90	14.9	13.6	-1.3	-8.5	30.5	31.8	1.3	4.4

由表 8 可知, 3 个验证试样黏聚力的预估值与实测值之间绝对误差和相对误差的绝对值均分别小于 2.5 kPa 和 10.0%, 内摩擦角的绝对误差和相对误差的绝对值均分别小于 1.5° 和 5.0%。这表明上述两个模型的预估精度较高, 且总体上内摩擦角预估模型的精度要高于黏聚力预估模型的精度。该试验结果可供工程应用参考。

根据摩尔-库仑强度理论, 将式(3)和(6)分别代入土体抗剪强度计算公式  $\tau_f = \sigma \tan \varphi + c$ , 可得到该压实非饱和砂类土体抗剪强度  $\tau_f$  与含水率  $w$  和压实度  $K$  之间的综合关系模型, 该模型即为该砂类土填料土体以含水率和压实度组合状态表征的抗剪强度预估模型。

### 3.3 预估模型的适用性分析

上述提出的所有模型均是基于本研究取样砂土填料的压实土体大型直剪试验结果建立的, 且验证结果表明预估模型的精度较高。本研究根据试样的含水率和压实度的取值范围, 以及模型的可扩展性和应用需要, 预估模型的含水率比值和压实度取值范围宜分别控制在 0.1 ~ 2.1 和 85% ~ 105%。

预估模型中采用含水率比值和压实度进行了无量纲化处理, 有利于提高模型的适用范围, 不仅可为同类地区砂类土路堤变形和边坡稳定性分析提供参数预估依据, 也可为其他地区各种砂类土抗剪强度参数建模提供参考。为进一步验证预估模型的适用性, 未来有必要对其他不同种类和不同地区的砂类土填料进行试验验证。

### 3.2 预估模型检验

为验证上述预估模型的精度和可靠性, 重新选取 3 种不同含水率和压实度组合状态制备的该砂类土非饱和试样, 进行室内大型直剪试验, 测试分析相应的黏聚力和内摩擦角实测值。同时, 结合式(3)和(6)分别计算黏聚力和内摩擦角的预估值, 对预估值与实测值之间的误差进行分析, 见表 8。

模型式(1)和(3)中采用单峰左偏态高斯型函数建立了黏聚力随含水率的变化关系, 较合理地反映了试验非饱和砂土的似黏聚力特性, 具有良好的普适性。该模型是否适合其他砂类土, 以及是否具有更广泛的普适性, 未来有必要进一步结合非饱和土相关理论和更多砂类土试验, 从机理和试验两方面进行深入的分析 and 验证。

## 4 结论

1) 皖西大别山区典型风化花岗片麻岩砂土属级配良好砂(SW), 在相同压实度下, 随着含水率的增加, 其黏聚力成单峰左偏态高斯型函数关系变化, 在最佳含水率下黏聚力出现峰值; 而内摩擦角则随着含水率的增加一直在减小, 且超过最佳含水率后其降幅明显加大, 符合幂函数变化关系。在相同含水率下, 随着压实度的增加, 该砂类土的黏聚力和内摩擦角均成对数函数关系逐渐增大, 且分别在最佳含水率和高含水率下增幅最大。据此, 可建立综合考虑含水率和压实度影响的抗剪强度参数预估模型。

2) 该砂类土抗剪强度参数关系模型的相关性显著, 判定系数及复判定系数均超过 0.950, 黏聚力及内摩擦角综合关系模型的预估值与实测值之间的相对误差绝对值均小于 10.0%。这表明模型预估精度较高, 由此可按摩尔-库仑强度理论建立以含水率和压实度表征的抗剪强度预估模型, 从而为工程应用和分析提供可靠的参数。



3) 根据含水率比值及偏态高斯型函数关系所建立的抗剪强度参数关系模型提高了模型的普适性,合理地表征了砂类土在非饱和状态下似黏聚力现象的强度特性,可供同类土体强度参数建模借鉴。

### [参考文献]

- [1] 周小文, 罗兴财. 全风化花岗岩与花岗岩残积土的判别及物理力学性质对比[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(4): 1-7. DOI: 10.11988/ckyyb.20211331. ZHOU Xiaowen, LUO Xingcai. Identification and physical mechanical property comparison between completely decomposed granite and granite residual soil [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(4): 1-7. DOI: 10.11988/ckyyb.20211331.
- [2] 冯太群. 水泥改良全风化花岗岩路基填料水稳定性研究[J]. 路基工程, 2022(3): 88-93. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202102024. FENG Taiqun. Study on water stability of filler for cement-improved fully-weathered granite subgrade [J]. Subgrade Engineering, 2022(3): 88-93. DOI: 10.13379/j.issn.1003-8825.202102024.
- [3] 蒋天娇, 简文星, 姚远, 等. 基于改进 Green-Ampt 降雨入渗模型的花岗岩风化带边坡稳定性分析[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 58-65. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2020.02.008. JIANG Tianjiao, JIAN Wenxing, YAO Yuan, et al. Slope stability analysis of granite weathering zone based on improved Green-Ampt rainfall infiltration model [J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(2): 58-65. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2020.02.008.
- [4] 刘广宁, 黄长生, 齐信, 等. 西江上游封开段花岗岩边坡变形破坏宏观判据研究[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 96-101, 113. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.01.016. LIU Guangning, HUANG Changsheng, QI Xin, et al. Research on deformation failure and macroscopic criteria of granite slope in Fengkai section of upper reaches of Xijiang River [J]. Yangtze River, 2021, 52(1): 96-101, 113. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.01.016.
- [5] 王琪琪, 黄娟, 杨建军. 雨水浸润后黄土边坡稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 1-9. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.001. WANG Qiqi, HUANG Juan, YANG Jianjun. Stability analysis of loess slope soaked by rainwater [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 1-9. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.001.
- [6] 张爱花, 牛肖. 基于极限平衡法的边坡稳定敏感性因素分析[J]. 中外公路, 2021, 41(增刊2): 55-58. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.S2.012. ZHANG Aihua, NIU Xiao. Analysis of slope stability sensitivity factors based on limit equilibrium method [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(sup 2): 55-58. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.S2.012.
- [7] 贺伟明, 石胜伟, 蔡强, 等. 考虑膨胀作用对抗剪强度影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊2): 3524-3533. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0869. HE Weiming, SHI Shengwei, CAI Qiang, et al. Stability analysis of expansive soil slope considering the influence of swelling on shear strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(sup 2): 3524-3533. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0869.
- [8] 李文, 刘军. 山区高速公路某高路堑边坡稳定性分析与处治[J]. 湖南交通科技, 2020, 46(2): 38-40, 137. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2020.02.010. LI Wen, LIU Jun. Stability analysis and treatment of a high cutting slope of mountainous expressway [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2020, 46(2): 38-40, 137. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2020.02.010.
- [9] AMIRI KHABOUSHAN E, EMAMI H, MOSADDEGHI M R, et al. Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 118-127. DOI: 10.1016/j.still.2018.07.006.
- [10] 陈佳雨, 刘之葵, 陈永国, 等. 纤维红黏土强度的正交试验及多元非线性回归分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 117-124. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201904033. CHEN Jiayu, LIU Zhikui, CHEN Yongguo, et al. Orthogonal test and multivariate nonlinear regression analyses of strength of the fiber red clay [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 117-124. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201904033.
- [11] YUAN J, LIU Z H, HU G X, et al. Experimental analysis of the influence of soil composition on strength characteristics [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2018, 55(5): 325-332. DOI: 10.1007/s11204-018-9544-y.
- [12] UYETURK C E, HUVAJ N. Constant water content direct shear testing of compacted residual soils [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(1): 691-703. DOI: 10.1007/s10064-020-01893-w.

- [13] 邢琳,任亚宁,申向梁.饱和度对非饱和黄土抗剪强度的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,56(6):1074-1079. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2020.06.017.  
XING Lin, REN Yaning, SHEN Xiangliang. Effect of saturation on the shear strength of unsaturated loess[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 56(6): 1074-1079. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2324.2020.06.017.
- [14] 范婷婷,林海,胡小荣.孔隙比对砂类土抗剪强度影响的定量分析[J].水文地质工程地质,2018,45(6):99-104. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.06.15.  
FAN Tingting, LIN Hai, HU Xiaorong. Quantitative analyses of effect of the shear strength of sandy soil with different void ratios [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 99-104. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.06.15.
- [15] 曹志翔,韩宪东,赵素华,等.含水率对非饱和砂土抗剪强度影响试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(5):159-164. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2019.5.23.  
CAO Zhixiang, HAN Xiandong, ZHAO Suhua, et al. Experimental study on the effect of moisture content on shear strength of unsaturated sandy soil [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2019, 38(5): 159-164. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2019.5.23.
- [16] 朱遥,刘春,刘辉,等.颗粒形态对砂土抗剪强度影响的试验和离散元数值模拟[J].工程地质学报,2020,28(3):490-499. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-288.  
ZHU Yao, LIU Chun, LIU Hui, et al. Experiment and discrete element numerical simulation for influence of particle morphology on shear strength of sand [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 490-499. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-288.
- [17] 贺林林,冯楚杰,杨柳,等.颗粒排列角度对砂土剪切特性的影响试验[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):447-454. DOI: 10.3876/j.issn.10001980.2021.05.010.  
HE Linlin, FENG Chujie, YANG Liu, et al. Experimental study of influence of particle arrangement angle on shear properties of sand [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 447-454. DOI: 10.3876/j.issn.10001980.2021.05.010.
- [18] 龙志东,王中文,史斌,等.花岗岩残积土抗剪强度及其影响因素试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2016,13(3):25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2016.03.005.  
LONG Zhidong, WANG Zhongwen, SHI Bin, et al. Experimental research for shear strength and its influencing factors of granite residual soil [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(3): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2016.03.005.
- [19] 朱彦鹏,杨校辉,周勇,等.基于含水量和干密度影响的压实土抗剪强度试验[J].兰州理工大学学报,2016,42(6):114-120. DOI: 10.13295/j.cnki.jlut.2016.06.022.  
ZHU Yanpeng, YANG Xiaohui, ZHOU Yong, et al. Experiment of shear strength of compacted soil when effect of its moisture capacity and dry density being taken into account [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(6): 114-120. DOI: 10.13295/j.cnki.jlut.2016.06.022.
- [20] 唐凛,杨晓松,查旭东,等.基于含水率的重塑低液限黏土抗剪强度关系模型试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(2):26-32. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.02.004.  
TANG Lin, YANG Xiaosong, ZHA Xudong, et al. Experiment on shear strength relation model of remolded low liquid limit clay based on water content [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(2): 26-32. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.02.004.
- [21] 尹松,李力,边亚东.冻融循环作用下压实粉土的剪切强度性能试验研究[J].公路工程,2019,44(5):42-46, 237. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.05.009.  
YIN Song, LI Li, BIAN Yadong. Experimental study on shear performance of compaction silt under frozen-thaw cycle [J]. Highway Engineering, 2019, 44(5): 42-46, 237. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.05.009.
- [22] 王月春,雅成宏,雷军伟,等.干湿循环下吸附结合水对高液限土抗剪强度的影响[J].公路与汽运,2020(4):70-74. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.04.018.  
WANG Yuechun, YA Chenghong, LEI Junwei, et al. Effect of adsorbed bound water on shear strength of high liquid limit soil under dry-wet cycle [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(4): 70-74. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2020.04.018.



## Prediction models of shear strength parameters for sandy soil of weathered granite gneiss

ZHA Xudong, MO Chou, ZHANG Junyi, WU Shuangping

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] The variation law of unsaturated shear strength with water content and compaction degree was analyzed in sandy soil of weathered granite gneiss. [Methods] Taking the typical weathered granite gneiss sandy soil filler from the western Dabie Mountains in Anhui as the research object, non-saturated samples of this sandy soil in 20 different combinations of water content and compaction degree were prepared using the static pressure molding method. The influence of current water content and compaction degree on its shear strength parameters was analyzed through large-scale indoor direct shear tests. The corresponding comprehensive correlation models were established by regression, and their prediction accuracy was verified. [Findings] Under the same compaction degree, the cohesion and the internal friction angle of soil samples have significant unimodal left-skewed Gaussian function correlation and a power function negative correlation with the water content ratio (ratio of water content to optimum water content), respectively. Under the same water content, both of the cohesion and the internal friction angle have significant logarithmic function positive correlation with the compaction degree. The established comprehensive correlation models of cohesion as well as internal friction angle with water content and compaction degree are higher in prediction accuracy. [Conclusions] The prediction models can be used to predict the pseudo-cohesion strength characteristics for the compacted sandy soil, providing reference for the strength parameter modeling of similar soil.

**Key words:** road engineering; sandy soil; direct shear test; shear strength; prediction model; Gaussian function

---

**Manuscript received:** 2022-12-09; **revised:** 2022-12-12; **accepted:** 2022-12-21

**Foundation item:** Project (51878077) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (201839) supported by Traffic and Transportation Science and Technology Progress Plan Project of Anhui Province

**Corresponding author:** ZHA Xudong (1970—) (ORCID: 0000-0002-1655-0635), male, professor, research interest: road engineering. E-mail: 1756023135@qq.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:吴高桥)