

厦门地区非饱和残积土的强度随含水量变化规律

陈东霞^{1,2}, 龚晓南², 马 亢¹

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 采用普通应变控制式直剪仪对非饱和残积砂质黏性土和黏土进行慢剪强度试验, 试验结果表明, 砂质黏性土的黏聚力和内摩擦角均对含水量变化敏感, 黏聚力随含水量的变化呈二次抛物线关系, 内摩擦角随含水量增大呈幂函数减小; 含水量对黏土强度的影响主要是降低了黏聚力, 对内摩擦角影响很小。黏聚力随含水量的增加呈指数减小。针对上述变化规律, 分别建立实用的强度经验公式, 避免了吸力量测和计算困难。对提出的强度公式进行试验验证, 计算预测强度并与实测强度相比较, 结果表明不同竖向应力条件下, 高竖向应力下强度的预测精度更高。2类残积土的强度公式预测精度均满足工程要求, 可为工程实际应用提供参考。

关键词: 土力学; 非饱和残积土; 抗剪强度; 含水量; 黏聚力; 内摩擦角

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)增1-3484-07

VARIATION OF THE SHEAR STRENGTH OF XIAMEN UNSATURATED RESIDUAL SOILS WITH WATER CONTENT

CHEN Dongxia^{1,2}, GONG Xiaonan², MA Kang¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Shear strength of unsaturated sandy and clay residual soils were conducted by consolidated-drained shearing method using the conventional strain controlled direct shear apparatus. Results show that the shear strength of two kinds of residual soils decreases with increase of water content. The initial water content has effect on both cohesion and frictional angle of sandy clayey soils. The relationships between cohesion, frictional angle and water content of sandy clayey soils are quadratic and power respectively. While the initial water content has negligible effect on friction angle of clay. The considerable influence of increasing water content on shear strength of residual clay is decreasing the cohesion. The variation of cohesion with water content can be described by an exponential relationship. On the basis of variation of shear strength indexes with water content, two new strength formulas of unsaturated sandy clayey and clay were established without suction component and were demonstrated by further tests. Comparisons of the calculated and measured shear strength show that the accuracy of the prediction is higher under high vertical stress. Two strength formulas can provide the good estimation of shear strength of unsaturated residual soils in Xiamen for engineering application.

Key words: soil mechanics; unsaturated residual soil; shear strength; water content; cohesion; internal friction angle

收稿日期: 2014-02-17; **修回日期:** 2014-04-16

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2014J01208)

作者简介: 陈东霞(1976-), 女, 2014年于浙江大学岩土工程专业获博士学位, 现任助理教授, 主要从事土力学地基基础、地基处理及非饱和特殊土领域的教学与研究工作。E-mail: dongxiachen@xmu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0120

1 引 言

残积土是典型的非饱和特殊土之一。近年来有关非饱和和残积土的基坑、边坡和路基失稳而导致严重经济损失的工程实例增多，引起人们对残积土的强度和变形特性的关注。在各类岩土工程稳定性分析中，强度指标是最重要的计算参数，不少学者致力于非饱和土的强度理论研究，提出了相应的强度公式，如 Bishop 有效应力强度公式^[1]、Fredlund 双应力变量强度公式^[2]。这些强度公式大都含有吸力项，而吸力量测的室内试验设备昂贵且耗时，现场试验困难且实测资料稀少^[3]，目前非饱和土强度公式尚处于学院式的研究阶段，未能得到广泛运用^[4]。

部分学者在探索非饱和土强度的实用化之路，如通过土水特征曲线预测非饱和土的强度^[5-7]；或直接研究非饱和土的强度随含水量的变化，建立引入含水量(或饱和度)的强度公式，此法虽然具有一定的经验性，但非常实用，避免了吸力量测和计算的困难。缪林昌等^[8]对非饱和膨胀土试验研究得到黏聚力和内摩擦角均随含水量的增大而减小，前者比后者下降更明显；王洋等^[9]对红黏土的试验研究得到含水量的变化对红黏土黏聚力的影响远大于对内摩擦角的影响。

凌华和殷宗泽^[10]采用改进三轴仪对膨胀土进行试验研究，得到总强度指标与含水量的公式为

$$\left. \begin{aligned} c &= c_{50} + k_c(w - w_{50}) \\ \varphi &= \varphi_{50} + k_\varphi(w - w_{50}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： c 和 φ 分别为黏聚力和内摩擦角； c_{50} ， φ_{50} 分别为饱和度为 50% 时的黏聚力和内摩擦角； k_c ， k_φ 为回归参数； w 为含水量； w_{50} 为饱和度为 50% 时的含水量。

杨和平等^[11]对膨胀土进行常规直剪试验，得到总强度指标与饱和度的公式为

$$\left. \begin{aligned} c &= k_1 S_r^2 - k_2 S_r + k_3 \\ \varphi &= -m_1 S_r + m_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： S_r 为饱和度； k_1 ， k_2 ， k_3 ， m_1 ， m_2 为回归参数。

马少坤等^[12]对红黏土进行常含水量三轴剪切试验，得到总强度指标与饱和度的关系为

$$\left. \begin{aligned} c &= c_0 e^{a(1-S_r^b)} \\ \varphi &= \varphi_0 + d \ln[(S_r^2 + 1) / 2] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： c_0 ， φ_0 分别为饱和时的黏聚力和内摩擦角；

a ， b ， d 为回归参数。

王中文等^[13]得到了红黏土强度指标与含水量的关系为

$$\ln c = 6.167 - w / 5.7 \quad (10\% \leq w \leq 27\%) \quad (4a)$$

$$\ln \varphi = \begin{cases} 3.92 & (w < 20\%) \\ 17.18 - w / 1.868 & (20\% \leq w \leq 27\%) \end{cases} \quad (4b)$$

李保雄和苗天德^[14]给出黄土的强度公式为

$$\tau = c^{1+a \lg(w/w_p)} + \tan \varphi \sigma^{X-b \lg(w/w_p)} \quad (5)$$

式中： τ 为黄土的剪切强度； w_p 为黄土塑限； X 为与黄土的固结程度相关的系数。

肖治宇等^[15]用普通三轴仪对坡积土进行研究，建立总应力强度公式为

$$\left. \begin{aligned} c &= 17.6 + 398.8e^{-w/8.886} \\ \varphi &= 47 - 1.4w \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

本文针对厦门地区 2 种常见的残积土(砂质黏性土和黏土)，采用应变控制式直剪仪研究抗剪强度及强度指标随含水量的变化规律，依此分别建立了砂质黏性土和黏土的强度公式，研究结果可为厦门地区岩土工程稳定性分析提供较准确的强度参数。

2 非饱和和残积土直剪试验方案

厦门地区残积土因富含亲水性黏土矿物成分高岭石使其抗剪强度与土的含水量变化关系尤为密切。在工程实践中，因自然或人为的环境改变，残积土土体水分不断变化，导致抗剪强度也不断变化。本文试验是在控制一定的干密度下，通过对不同含水量下试样进行直剪试验来研究含水量对 2 种常见残积土强度及强度指标的影响。

2.1 残积砂质黏性土和黏土的基本性质

试验用的残积土采自厦门海翔大道二期工程孚莲路段，主要矿物成分为高岭石黏土矿物、SiO₂ 和 FeO 胶结物及大小不等的石英颗粒组成。砂质黏性土以黄褐色为主，黏土以棕红色为主，2 种土均间夹白色，黏粒粒组含量高，中、细、粉砂的含量少。2 种残积土的基本物理性质指标如表 1 所示。其中，砂质黏性土和黏土的最大干密度及最优含水量是由标准击实试验得到的压实曲线确定。

表 1 残积土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical indexes of residual soils

土样	土颗粒相对密度	最优含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数
砂质黏性土	2.69	17.8	1.75	32.1	18.0	14.1
黏土	2.72	21.5	1.65	40.0	19.8	20.2

2.2 残积砂质黏性土和黏土的直剪试验方案

根据理论需水量控制试样质量以达到设计含水量。将土样烘干碾碎过 2 mm 筛。筛下土与水充分拌合均匀,分别装袋静置 1~2 d 以使土样中水分充分运移至混合均匀;然后按照设计的干密度分 5 层击实,每层标准击数为 27 击;用环刀切取土饼,上下盖上下玻璃片作为直接剪切试样备用。

砂质黏性土试样设计的初始含水量为 9%, 11%, 13%, 15%, 18%, 21% 及饱和试样,干密度控制为 1.63 g/cm³;黏土试样设计的初始含水量为 9%, 12%, 15%, 18%, 21%, 25% 及饱和试样,干密度控制为 1.53 g/cm³。具体试验方案如表 2 所示。

表 2 非饱和和残积土剪切试验方案

Table 2 Shear strength program of unsaturated residual soils

土样	试样实际的平均含水量/%						
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
砂质黏性土	9.1	11.5	13.5	15.6	18.2	21.0	24.1
黏土	9.2	10.2	14.3	18.1	21.3	25.2	28.1

注:含水量为 9.1% 和 9.2% 时无法切取完整试样;含水量为 24.1% 和 28.1% 试样分别为 2 种土的饱和试样。

直接剪切试验的剪切速率为 0.2 mm/min,将土饼置于剪切盒中分别施加 50, 100, 200, 300 和 400 kPa 正应力,测试非饱和和残积土的剪切强度。

3 残积砂质黏性土的直剪试验结果

3.1 残积砂质黏性土的直剪试验

不同初始含水量下残积砂质黏性土的直剪试验结果如图 1 所示,图中强度线由试验数据点线性拟合得到。黏聚力和内摩擦角如表 3 所示。由图 1 及表 3 均可知,含水量为 15.6%~18.2%,黏聚力达到

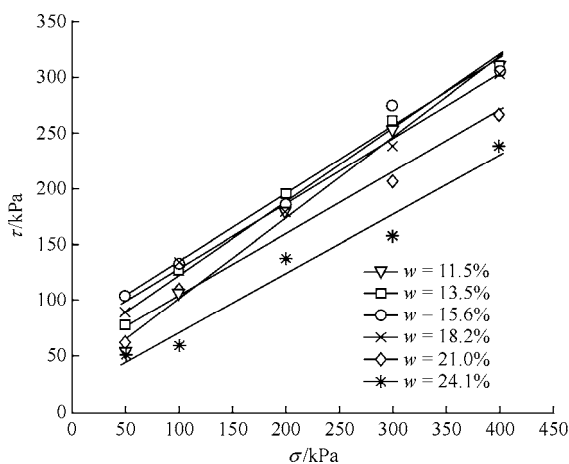


图 1 不同含水量下砂质黏性土直剪试验结果

Fig.1 Test result of shear strength of eluvial sandy clay with different water contents

表 3 残积砂质黏性土的剪切强度参数

Table 3 Shear strength parameters of eluvial sandy clay

试样编号	平均含水量/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
SC1	11.5	28.6	35.9
SC2	13.5	56.0	33.4
SC3	15.6	72.5	31.3
SC4	18.2	68.7	30.3
SC5	21.0	47.6	29.1
SC6	24.1	17.8	27.8

峰值;含水量大于 18.2% 或小于 15.6%,黏聚力均减小。含水量较小时,试样的内摩擦角较大,随着含水量的增加,内摩擦角逐渐减小;当含水量大于 18.2% 时,各强度线近乎平行,即内摩擦角变化不大。此外,含水量小于 18.2% 时,不同初始含水量试样在低竖向应力 (< 200 kPa) 下的剪切强度相差较大,而在高竖向应力状态下剪切强度相差较小。

3.2 非饱和和残积砂质黏性土的强度公式

将表 3 中平均含水量及强度指标绘制如图 2, 3 所示。由图 2 可知,内摩擦角与含水量的关系可表示为

$$\phi = 81.08w^{-0.3388} \quad (R^2 = 0.9825) \quad (7)$$

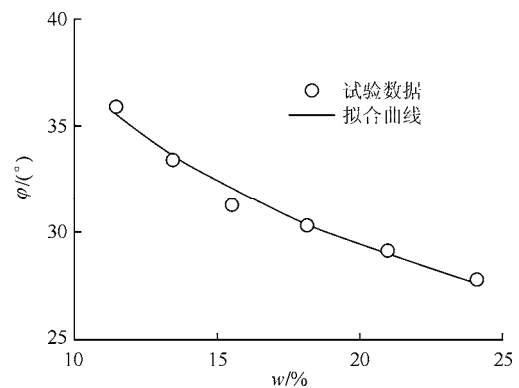


图 2 砂质黏性土 φ 与 w 的关系

Fig.2 Relationship between φ and w of eluvial sandy clay

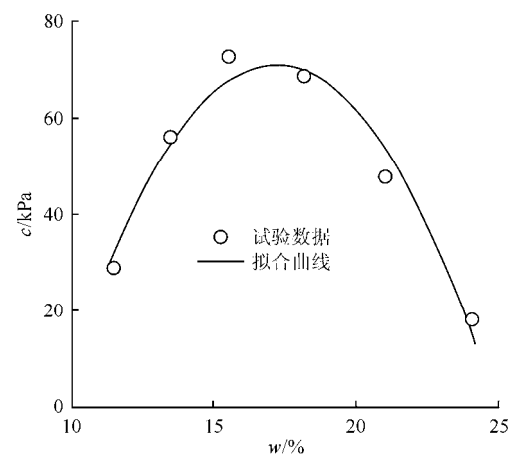


图 3 砂质黏性土 c 与 w 的关系

Fig.3 Relationship between c and w of eluvial sandy clay

由图 3 可知，黏聚力与含水量近似二次曲线关系，拟合方程为

$$c = -1.187w^2 + 40.91w - 281.78 \quad (R^2 = 0.9635) \quad (8)$$

从式(7)和(8)可看出，2 个强度指标的拟合精度均较高。

3.3 非饱和残积砂质黏性土的强度公式预测精度

制备不同含水量的砂质黏性土试样进行直剪，采用式(7)，(8)计算预测强度，将预测值与实测值列入表 4 中。由表 4 可知，强度公式预测值的平均绝对误差为 7.9 kPa，平均相对误差为 5.2%。各级竖向应力下的平均绝对误差分别为 6.3, 4.7, 7.0, 11.5 和 9.9 kPa；平均相对误差分别为 8.8%, 4.1%, 4.3%, 5.1% 和 3.5%。这说明低竖向应力下的强度预测误差相对较大，而高竖向应力下的强度预测精度更高些。

表 4 非饱和残积砂质黏性土的实测与预测剪切强度的比较
Table 4 Comparisons of measured and predicted shear strength of unsaturated sandy clayey residual soils

含水量/%	竖向应力/kPa	实测强度/kPa	预测强度/kPa	绝对误差/kPa	相对误差/%
10.8	50	54.4	58.2	3.8	7.0
11.4	100	106.9	101.7	5.1	4.8
12.0	200	178.9	177.9	1.0	0.5
11.1	300	252.9	243.0	9.9	3.9
12.2	400	309.6	318.1	8.5	2.7
13.2	50	78.1	84.9	6.8	8.7
13.3	100	125.8	119.1	6.7	5.3
13.7	200	195.7	187.8	7.9	4.0
13.6	300	260.8	253.5	7.3	2.8
13.7	400	310.1	319.7	9.6	3.1
15.2	50	103.1	97.4	5.7	5.6
15.3	100	132.5	129.2	3.3	2.5
15.9	200	185.6	192.4	6.8	3.7
15.6	300	274.3	254.8	19.5	7.1
16.0	400	305.9	315.9	10.0	3.3
18.6	50	88.9	97.5	8.6	9.7
18.3	100	134.3	127.8	6.5	4.9
17.9	200	192.7	188.0	4.7	2.4
18.4	300	238.4	243.9	5.5	2.3
17.8	400	301.5	306.6	5.1	1.7
23.9	50	50.8	44.2	6.6	13.1
24.4	100	59.8	61.7	1.9	3.2
23.9	200	137.5	122.8	14.7	10.7
24.0	300	158.2	173.3	15.1	9.6
24.2	400	237.9	221.7	16.2	6.8

总体而言，采用式(7)和(8)预测厦门地区残积砂质黏性土的强度均能满足工程精度要求。

4 残积黏土的直剪试验结果

4.1 残积黏土的直剪试验

不同初始含水量下残积黏土的直剪试验结果如图 4 所示。试验数据线性回归后得到的黏聚力和内摩擦角列入表 5 中。结合图 4 和表 5 可知，黏聚力对含水量的变化很敏感，而内摩擦角受含水量的影响很小。由强度包线在 y 轴截距可知，含水量逐渐减小时，黏聚力急剧增大。不同含水量下的强度包线近乎平行，内摩擦角随着含水量的增大缓慢减小。

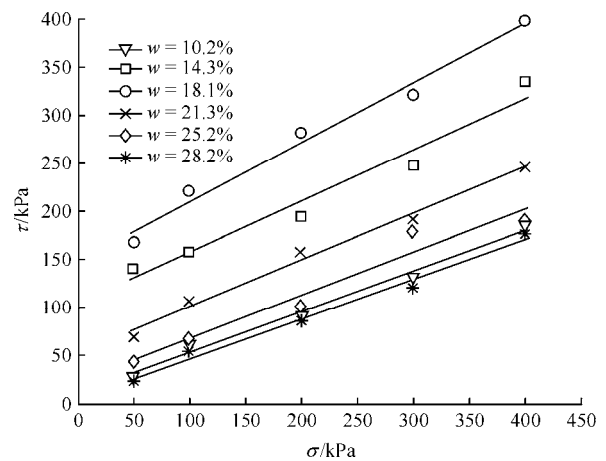


图 4 不同含水量下黏土直剪试验结果

Fig.4 Test result of shear strength of clay with different water contents

表 5 非饱和残积黏土的剪切强度参数

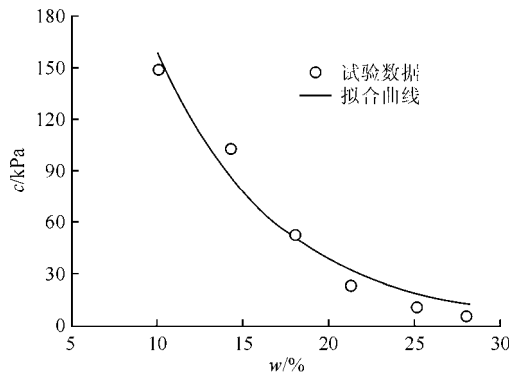
Table 5 Shear strength parameters of unsaturated residual clay

试样编号	平均含水量/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
C1	10.2	148.2	31.8
C2	14.3	102.8	28.3
C3	18.1	52.4	26.0
C4	21.3	23.1	24.1
C5	25.2	10.2	23.0
C6	28.2	5.2	22.5

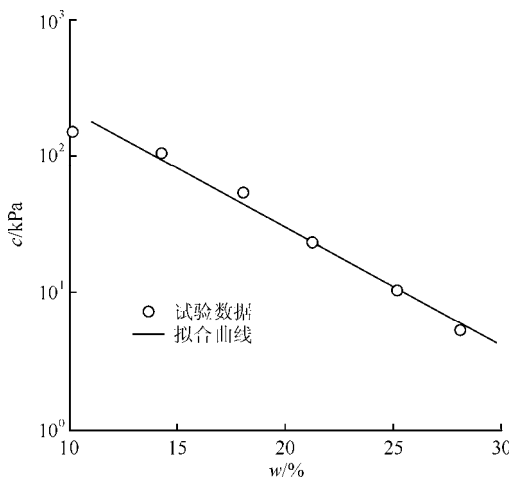
4.2 非饱和残积黏土的强度公式

表 5 中黏聚力与含水量的关系可绘制如图 5 所示。由图 5(a)，(b)可知，黏聚力随含水量增加呈指数型减小，在半对数坐标下呈线性关系：

$$c = 663.8e^{-0.1427w} \quad (9)$$



(a) 直角坐标系



(b) 半对数坐标系

图5 残积黏土 c 与 w 的关系

Fig.5 Relationships between c and w of residual clay

式(9)中 $R^2 = 0.9785$, 说明拟合精度高。

已知残积黏土内摩擦角随含水量增大变化很小, 可假设内摩擦角为某一常数, 黏聚力与含水量的关系采用指数形式表示, 即回归方程形式为

$$\tau = \sigma' \tan \varphi' + Ce^{\mu w} \quad (10)$$

式中: τ 为剪切强度, σ' 为竖向应力, φ' 为最优内摩擦角, C 为与黏聚力值相关的参数, μ 为与含水量相关的强度系数。其中 φ' , C 和 μ 为未知参数。

为了确定未知参数, 可先将式(10)改写成线性化形式:

$$\ln(\tau - \sigma' \tan \varphi') = \ln C - \mu w \quad (11)$$

然后对式(11)进行多重线性回归: 先假定一个 φ' 值, 计算每组线性回归的相关系数平方值 R^2 , R^2 最大值对应的 φ' 即为残积黏土的最优 φ' 。试验数据的线性回归分析结果如图6所示, 最优 $\varphi' = 21.7^\circ$; 然后按线性回归得到的截距和斜率分别计算 C 和 μ 的值。 $\ln(\tau - \sigma' \tan \varphi')$ 和 w 的关系如图7所示, 计算可得经过线性回归后的方程为

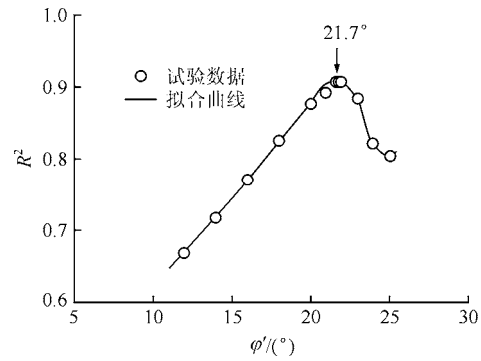


图6 不同内摩擦角下的相关系数平方

Fig.6 Relationships between square of correlation coefficient and effective angle of shearing resistance

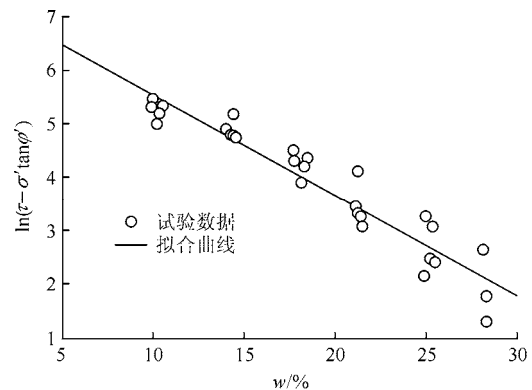


图7 黏结强度对数值与含水量的关系

Fig.7 Relationships between logarithm of cohesive shear strength and water content

$$\ln(\tau - \sigma' \tan 21.7^\circ) = 7.409 - 0.1872w \quad (12)$$

也即残积黏土的剪切强度可采用下式进行预测:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= 21.7^\circ \\ c &= 1650.77e^{-0.1872w} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

4.3 非饱和和残积黏土的强度公式预测精度

制备不同初始含水量的残积黏土进行直剪, 采用式(13)计算各试样剪切强度。预测和实测强度值列入表6中。由表6可知, 初始含水量为9.9%~10.5%这组试样, 强度的预测值和实测值相差很大, 相对误差达到10%~48.8%, 预测精度较低, 说明该强度模型不适于残积黏土在超低含水量下的强度预测。

其余强度预测的平均绝对误差为6.9 kPa, 平均相对误差为6.4%。各级竖向应力下的平均绝对误差分别为3.8, 5.6, 5.8, 10.8和8.5 kPa; 相对误差分别为10.8%, 7.0%, 4.7%, 5.8%和3.9%。这说明低竖向应力下的强度预测误差较大。总体而言, 采用式(13)可较好地预测厦门地区残积黏土的强度。

表 6 非饱和残积黏土的实测与预测剪切强度的比较
Table 6 Comparison of measured and predicted shear strength of unsaturated residual clay

含水量/%	竖向应力/kPa	实测强度/kPa	预测强度/kPa	绝对误差/kPa	相对误差/%
10.5	50	168.7	251.1	82.4	48.8
9.9	100	220.4	298.5	77.8	35.2
10.0	200	281.3	333.5	52.2	18.5
10.4	300	321.4	355.0	33.6	10.4
10.2	400	399.8	403.8	4.0	1.0
14.0	50	141.7	140.0	1.7	1.2
14.4	100	158.4	151.2	7.1	4.5
14.5	200	195.4	188.9	6.5	3.3
14.4	300	247.8	230.8	17.0	6.8
14.0	400	336.2	329.3	6.9	2.1
18.5	50	70.0	71.6	1.6	2.3
17.8	100	105.9	98.8	7.1	6.7
17.7	200	157.9	149.7	8.2	5.2
18.3	300	192.4	173.1	19.3	10.0
18.2	400	247.9	233.9	14.0	5.7
21.2	50	45.7	51.1	5.4	11.8
21.3	100	67.7	70.4	2.7	4.0
21.5	200	101.1	109.1	8.0	7.9
21.1	300	179.8	171.2	8.6	4.8
21.4	400	190.9	189.2	1.7	0.9
25.4	50	28.5	34.1	5.6	19.6
25.0	100	61.1	55.1	6.0	9.8
25.2	200	90.6	94.3	3.7	4.1
25.4	300	131.4	133.6	2.2	1.7
25.0	400	185.1	174.5	10.6	5.7
28.3	50	23.6	28.1	4.5	19.3
28.1	100	53.7	48.4	5.3	9.9
28.2	200	85.6	88.0	2.4	2.8
28.3	300	120.6	127.6	7.0	5.8
28.1	400	177.1	167.8	9.3	5.2

5 讨 论

厦门地区非饱和残积砂质黏性土和黏土的强度随含水量变化表现出不同的变化规律：砂质黏性土强度随着含水量变化呈二次曲线关系，在最优含水量附近(即 $w_{op} \pm 1$)%达到峰值；黏土强度随含水量增大而非线性减小。简要分析主要原因为：

(1) 砂质黏性土和黏土的颗粒级配不同。砂质黏性土粗颗粒含量较高，试样在较低含水量状态时内部和表面均存在初始微小裂纹，这将导致砂质黏性土在低含水量剪切强度较低。

(2) 砂质黏性土和黏土剪切破坏时的变形特征

不同。2 类土均在低含水量状态下具脆性变形特征，在最优含水量附近表现出一定的塑性，在高含水量状态下具塑性变形特征。砂质黏性土和黏土的这种变形规律后者表现地更为显著，因此黏土强度随含水量增加大幅减小。

6 结 论

(1) 残积砂质黏性土的黏聚力与含水量呈二次抛物线的关系，内摩擦角随含水量的增大呈幂函数减小；残积黏土的黏聚力随含水量的减小呈指数形式增大，内摩擦角随含水量的减小变化不大。

(2) 提出了适用于厦门地区非饱和残积砂质黏性土和残积黏土的强度预测公式。公式中仅包含含水量参数，避免吸力量测和技术的困难。经验公式形式简单，运用简捷方便。

(3) 制备不同初始含水量的重塑残积土试样进行直接剪切试验。比较了实测强度与强度公式计算的预测强度，分析了强度公式的适用条件，验证了强度公式的预测精度，计算结果表明两类残积土的强度公式均满足工程精度要求。

(4) 本文仅对厦门地区 2 类常见残积土在相同干密度不同含水量下的重塑土进行试验研究，未考虑干密度对强度的影响，因此不同干密度条件下剪切强度与含水量的关系有待于进一步研究。此外，本文得到的强度经验公式是否适用于福建省非饱和残积土的强度预测也有待于进一步研究与检验。

参考文献(References)：

- [1] BISHOP P A W, ALPANI I, BLIGHT G E, et al. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils[C]// ASCE Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder: University of Colorado, 1960: 503-532.
- [2] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [3] NG C W W, ZHAN L T, BAO C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration[J]. Géotechnique, 2003, 53(2): 143-157.
- [4] 沈珠江. 非饱和土力学实用化之路探索[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 256-259.(SHEN Zhujiang. Exploitation of practical use of unsaturated soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 256-259.(in Chinese))

- [5] FREDLUND D G , XING A Q , FREDLUND M D , et al. The relationship of the unsaturated soil shear to the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal , 1996 , 33(3) : 440 – 448.
- [6] VANAPALLI S K , FREDLUND D G , PUF AHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique , 1999 , 49(2) : 143 – 159.
- [7] 包承纲, 詹良通. 非饱和土性状及其与工程问题的联系[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2) : 129 – 136.(BAO Chenggang , ZHAN Liangtong. Relationship between unsaturated soil behavior and engineering problems[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2006 , 28(2) : 129 – 136.(in Chinese))
- [8] 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学, 1999, 20(2) : 71 – 75.(MIAO Linchang , ZHONG Xiaochen , YIN Zongze. Relationship between strength and water content of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics , 1999 , 20(2) : 71 – 75.(in Chinese))
- [9] 王洋, 汤连生, 高全臣, 等. 水土作用模式对残积红黏土力学性质的影响分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(1) : 128 – 132.(WANG Yang , TANG Liansheng , GAO Quanchen , et al. Effects of water-soil interaction on mechanical strength of residual red clay[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni , 2007 , 46(1) : 128 – 132.(in Chinese))
- [10] 凌华, 殷宗泽. 非饱和土强度随含水量的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7) : 1 499 – 1 503.(LING Hua , YIN Zongze. Variation of unsaturated soil strength with water contents[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(7) : 1 499 – 1 503.(in Chinese))
- [11] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 非饱和膨胀土总强度指标随饱和度变化规律[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4) : 58 – 62.(YANG Heping , ZHANG Rui , ZHENG Jianlong. Variation of the total shear strength of unsaturated expansive soils with degree of saturation[J]. China Civil Engineering Journal , 2006 , 39(4) : 58 – 62.(in Chinese))
- [12] 马少坤, 黄茂松, 范秋雁. 基于饱和土总应力强度指标的非饱和土强度理论及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3) : 635 – 640.(MA Shaokun , HUANG Maosong , FAN Qiuyan. Unsaturated soil strength theory based on total stress strength indexes of saturated soil and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2009 , 28(3) : 635 – 640.(in Chinese))
- [13] 王中文, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 红黏土抗剪强度的水敏性研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(1) : 17 – 22.(WANG Zhongwen , HONG Baoning , LIU Xin , et al. Water-sensitive properties of shear strength of red clay[J]. Journal of Sichuan University : Engineering Science , 2011 , 43(1) : 17 – 22.(in Chinese))
- [14] 李保雄, 苗天德. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5) : 1 003 – 1 008.(LI Baoxiong , MIAO Tiande. Research on water sensitivity of loess shear strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2006 , 25(5) : 1 003 – 1 008.(in Chinese))
- [15] 肖治宇, 陈昌富, 杨剑祥. 非饱和残坡积土强度随含水量变化试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(10) : 20 – 24.(XIAO Zhiyu , CHEN Changfu , YANG Jianxiang. Experimental studies of the strength variation of unsaturated residual soil with different water contents[J]. Journal of Hunan University : Natural Sciences , 2010 , 37(10) : 20 – 24.(in Chinese))