

文章编号: 1000-7598-(2005) 07-1009-05

膨胀土的强度特性研究

谭罗荣, 孔令伟

(中国科学院岩土力学重点实验室, 430071)

摘 要: 研究了膨胀土的强度指标 c , ϕ 与含水量 ω 、干密度 γ_d 及饱和度 s_r 的关系, 以及强度与膨胀压力 p 之间的关系, 结果表明: c , $\tan\phi$ 和 γ_d , s_r , ω 的关系与膨胀压力 p 和 γ_d , s_r , ω 的关系相似; 任何状态的膨胀土的强度, 皆可表示为饱和状态的强度和吸力引起的, 并可用不同状态土的膨胀压力表示的附加强度两部份。

关 键 词: 膨胀土; 强度; 膨胀压力; 干密度; 饱和度; 含水量

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Study on strength behavior of expansive soil

TAN Luo-rong, KONG Ling-wei

(Key laboratory of Rock and Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The relationships between strength indexes c , ϕ and dry density γ_d , degree of saturation s_r , water content ω , strength and swelling pressure p of expansive soil are researched. The results show that the relationship between c , $\tan\phi$ and γ_d , s_r , ω are similar to that of between swelling pressure p and γ_d , s_r , ω ; the strength of expansive soil under any state can be represented both by strength under saturated state and addition strength produced by suction; and the latter can be represented by swelling pressure of soil in various states.

Key words: expansive soil; strength; swelling pressure; dry density; saturation degree; water content

1 引 言

膨胀土是一类具有超固结性、裂隙性和胀缩性的非饱和土, 由于对气象变化特别敏感, 常常引发路面开裂、隆起或沉陷, 路堤和路堑滑塌、边坡失稳等工程病害。其中, 在土坡和路基稳定性评价中, 抗剪强度指标是很重要的基本力学参数, 而膨胀土的强度变化要比一般粘土复杂, 不仅取决于结构、吸力等因素的变化, 且还依赖于膨胀土所处的状态、外部压力及环境。在理论分析与工程实践中, 如何认识和应用膨胀土的强度特性, 一直是土工界关注的问题之一。国内外在膨胀土的相关问题研究中, 对其胀缩性即变形性质的认识较为深入, 在抗剪强度方面, 目前主要以 Mohr-Coulomb 准则为基础, 从非饱和土角度现已有两类强度公式被岩土界广泛认可, 一类是 Bishop 公式; 另一类是 Fredlund 双变量公式, 但受吸力量测难度大的影响, 尚未在工程

界实际应用。

卢肇钧等人通过系统的膨胀土试验研究, 提出非饱和土的抗剪强度由真凝聚力、摩擦强度和吸附强度 3 部分组成的观点, 并将各部分强度与塑性指数、膨胀压力和土中吸力建立联系^[1, 2], 为弄清非饱和土抗剪强度的实质与推动工程应用提供了一种新途径。本文在此基础上, 进一步探讨击实膨胀土的强度与其胀缩特性的关系, 提出一种简单实用的强度公式, 有助于深入认识膨胀土的强度特性。

2 强度与含水量干密度、饱和度的关系

膨胀土作为一类典型的非饱和土, 其强度特性与含水量密切相关^[1~4]。表 1 为作者在文献[4]的基础上经补充试验, 重新整理得到的宜昌鸦雀岭击实膨胀土的强度指标与其初始状态的关系成果, 有关 $c-\omega$, $c-\gamma_d$ 及 $c-S_r$ 关系曲线如图 1 所示。图中曲线

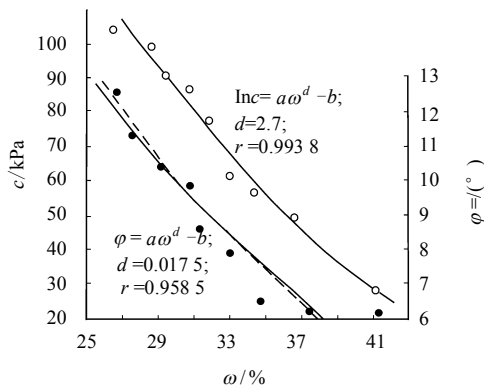
收稿日期: 2004-04-07

修改稿收到日期: 2004-07-01

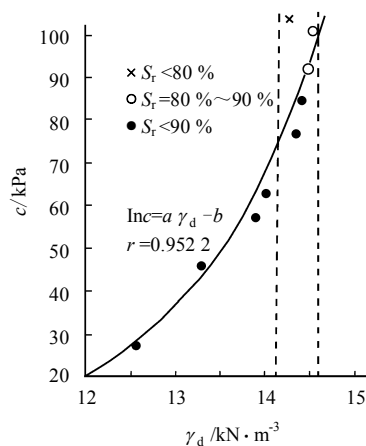
基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 19972068) 与中国科学院武汉岩土力学研究所知识创新工程项目。

作者简介: 谭罗荣, 男, 1938 年生, 研究员, 主要从事岩土基本特性与其工程力学性状关系的研究。电话: 027-87199433

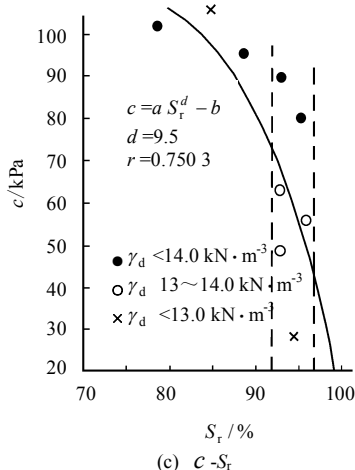
形状及变化规律与文献[5]中的 $p-\omega$, $p-\gamma_d$, $p-S_r$ 关系曲线具有完全相似的特征。以 $c-\gamma_d$, $c-\varphi$ 关系为例, 明显看到 $c-\gamma_d$ 关系受饱和度的影响, $c-S_r$ 关系受 γ_d 的影响, 如图 1(b)、图 1(c) 中虚线范围内的数据所示。为此, 根据表 1 中的数据对图中虚线范围内的数据采用文献[5]的方法进行了回归分析, 分析结果见表 2。对于全部 9 个数据的回归分析, 部分结果见图 1。



(a) $c-\omega$ 和 $\varphi-\omega$



(b) $c-\gamma_d$



(c) $c-S_r$

图 1 $c-\omega$, $c-\gamma_d$ 及 $c-S_r$ 关系曲线

Fig.1 The relations Between c and ω , γ_d , S_r

$c-\omega$ 和 $\varphi-\omega$ 的最佳拟合的相关系数可达 0.96 和 0.99; 而 $c-\gamma_d$ 相关关系则约为 0.95~0.99; $c-S_r$ 的相关性较差, 仅为 0.75。但考虑 γ_d , S_r 的影响后, 如仅取图 1(b)、图 1(c) 中虚线范围内数据进行比较, 则这种差异显著缩小。

从表中数据可以看出: (1) 在低含水量区, 即试样含水量低于或在最佳击实含水量 (30% 左右) 附近时, 对应的干密度较大, 在干密度相近的 5 个试样情况下, c , φ 与饱和度的关系等价于 c , φ 与 ω 关系, 因前者的相关系数为 0.96~0.97, 后者为 0.98~0.99。(2) 在高含水量区, 即试样含水量大于或在最佳击实含水量附近时, 饱和度较高, 在饱和度相近的情况下, $c-\gamma_d$ 关系等价于 $c-\omega$ 关系。如考虑饱和度在 92.6% 以上的 6 个试样的数据拟合时, $c-\omega$ 与 $c-\gamma_d$ 的相关系数十分接近, 皆在 0.99 左右。但 $\varphi-\omega$ 间的相关性却不如 $\varphi-\gamma_d$ 间的相关性, 前者的相关系数仅 0.87~0.89, 而后者达 0.93 以上。这些结果反映了影响强度的 ω , γ_d , S_r 诸因素间的相互关系, 所得结论与文献[5]中研究的影响膨胀特性的这些因素间的关系十分相似。卢肇钧先生等曾对广西膨胀土进行了深入的研究^[2], 根据其试验结果, 重新整理得 γ_d , S_r 等数据后, 其 7 个试样的饱和度在 85.5%~88.3% 之间, 仿照前面的拟合分析得膨胀压力 p , c , $\tan\varphi$ 与 ω 和 γ_d 的相关性分析结果, 见表 3。由表 3 数据不难看出, 饱和度一定时, 不仅 c , $\tan\varphi$ 与 ω 的关系等价于 c , $\tan\varphi$ 与 γ_d 的关系, 而且 $p-\omega$ 关系也等价于 $p-\gamma_d$ 关系。这与文献[5]的结论一致。其实, 宜昌土也可得到类似结论。根据文献[5]的研究成果, 可以认为, 在含水量一定时, c , $\tan\varphi$ 与 γ_d 的关系也将等效于 c , $\tan\varphi$ 与 S_r 的关系。

表 1 击实膨胀土的有关试验数据

Table 1 The experimental data of compacted expansive soil

含水量 /%	干密度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	饱和度 S_r / %	膨胀力 p / kPa	c / kPa	φ / (°)	$\tan\varphi$
26.49	14.18	76.96	208.4	103.67	12.49	0.222
28.53	14.53	87.19	247.5	99.79	11.43	0.202
29.26	14.48	88.78	173.4	92.32	10.36	0.183
30.82	14.45	93.10	128.8	86.02	9.92	0.175
31.60	14.37	94.36	110.0	79.01	8.42	0.148
33.55	13.90	93.61	62.1	59.96	7.69	0.135
34.80	13.80	95.70	38.1	54.86	6.54	0.115
37.03	13.30	92.60	31.7	47.35	6.29	0.110
41.24	12.54	94.49	18.1	28.38	6.19	0.109

表 2 不同状态宜昌膨胀土的 c , φ 与 ω , γ_d , S_r 间关系的回归分析结果Table 2 The regression analysis results of correlation between c , φ and ω , γ_d , S_r of Yichang expansive soil with various behaviors

拟合公式	a	b	d	r	s
$c = a\omega^d - b$	-5.346 1	-245.558 5	1	-0.976 3	5.097 8
(6)	-5 877.414	-659 6.421	0.03	-0.993 1	2.758 7
$\ln c = a\omega^d - b$	-0.1032	-7.615 9	1	-0.994 5	0.046 7
(6)	-80.482 5	-96.769 2	0.03	-0.997 9	0.029 0
$c = a\gamma_d^d - b$	28.448 3	331.867 5	1	0.964 6	6.224 6
(6)	$2.062 4 \times 10^{-13}$	-19.263 7	12.5	0.989 9	3.346 4
$\ln c = a\gamma_d^d - b$	0.5494	3.531 1	1	0.988 8	0.066 4
(6)	$9.422 6 \times 10^{-3}$	-0.581 9	2.25	0.989 2	0.065 3
$\varphi = a\omega^d - b$	-0.323 3	-18.772 1	1	-0.845 1	0.880 0
(6)	-361.563 9	-409.655 8	0.03	-0.874 5	0.798 4
$\varphi = a(\ln \omega)^d - b$	-11.846 6	-49.514 9	1	-0.866 5	0.821 8
(6)	-748.5	-809.958 1	0.055	-0.888 0	0.756 9
$\varphi = a\gamma_d^d - b$	1.707 5	15.929 9	1	0.830 2	0.917 7
(6)	5.506×10^{-19}	-5.388 5	16.25	0.933 4	0.590 8
$\varphi = a(\ln \gamma_d)^d - b$	22.7436	52.038 4	1	0.819 9	0.942 5
(6)	$3.962 7 \times 10^{-19}$	-5.449 7	44.5	0.934 7	0.585 3
$c = a\omega^d - b$	-4.832 5	-233.966 5	1	-0.968 9	2.856 4
(5)	$-2.053 7 \times 10^{-18}$	-105.635	2.75	-0.982 9	2.128 6
$\ln c = a\omega^d - b$	-139.215	-562.316 3	1	-0.963 1	3.109 4
(5)	$-5.706 6 \times 10^{-15}$	-110.847 3	29.25	-0.987 9	1.804 9
$c = aS_r^d - b$	-1.308	-207.388 7	1	-0.900 4	5.02 4
(5)	-4.9412×10^{-18}	-109.582 4	9.5	-0.968 9	2.858 0
$\ln c = aS_r^d - b$	-1.4184	-5.768 2	1	-0.888 7	0.058 2
(5)	-5.403×10^{-20}	-4.709 2	9.5	-0.964 4	0.033 6
$\varphi = a\omega^d - b$	-7.444	-32.365 3	1	-0.968 4	0.444 2
(5)	-2.891×10^{-8}	-14.742 1	19.75	-0.974 9	0.396 6
$\varphi = a(\ln \omega)^d - b$	-21.500 7	-83.133	1	-0.965 0	0.466 8
(5)	$-1.381 1 \times 10^{-10}$	-14.545 4	19.75	-0.974 8	0.397 0
$\varphi = aS_r^d - b$	-0.2059	-28.656 7	1	-0.919 4	0.700 0
(5)	$-7.551 3 \times 10^{-19}$	-13.183 5	9.5	-0.960 6	0.494 4
$\varphi = a(\ln S_r) - b$	-17.361 9	-88.230 1	1	-0.910 9	0.734 6
(5)	-6.247×10^{-19}	-14.045 8	28.75	-0.952 0	0.544 8

注：() 内数字表示参与拟合分析数据数。

3 膨胀压力与强度间的关系

前面的研究表明, 膨胀土的强度参数 c , φ 与 ω , γ_d , S_r 关系与文献[5]中 p , δ_{30} 与 ω , γ_d , S_r 的关系非常相似, 在不同状态条件下, 皆可用 ω , γ_d , S_r 中的 1 个或 2 个很好地描述它们的变化规律。那么 p 与 c , φ 之间关系如何? 文献[1, 2]对非饱和膨胀土的研究已表明两者之间的关系是存在的, 并提出非饱和土的第 3 种强度理论公式:

$$\left. \begin{aligned} \tau_f &= c + (\sigma - u_a) \tan \varphi + m p_s \tan \varphi \\ m &= \frac{\tau_s}{p_s \tan \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 τ_f 为非饱和土的极限抗剪强度; c 为凝聚力; σ 为剪切面上的法向总应力; u_a 为孔隙气压力; φ 为有效内摩擦角; p_s 为体积不变条件下浸水测得的膨胀力; m 为膨胀力的有效系数。

根据宜昌膨胀土的试验结果, 可绘得膨胀压力

表 3 广西膨胀土有关数据的回归分析结果

Table 3 The regression analysis results of the experimental data of Guangxi expansive soil

拟合公式	a	b	d	r	s
$p = a\omega^d - b$	-7.219 3	-292.159 7	1	-0.979 6	5.623 3
(7)	-8.182.4	-9 061.242 0.027 5	-0.990 2	3.908 5	
$\ln p = a\omega^d - b$	-0.165 5	-9.333 1	1	-0.993 5	0.071 7
(7)	$-2.433 8 \times 10^{-3}$	-7.474 0	1.5	-0.993 7	0.070 6
$p = a\gamma_d^d - b$	37.648 4	453.046	1	0.994 1	3.034 3
(7)	3.727×10^{-6}	30.538 1	6.5	0.998 8	1.351 2
$\ln p = a\gamma_d^d - b$	0.852 3	7.606 9	1	0.995 8	0.057 8
(7)	107.777 8	130.553 6	0.085	0.999 6	0.018 6
$C_T = a\omega^d - b$	-3.209 2	-141.687 4	1	0.982 1	2.274 6
(7)	-1 641.176	-2 024.57	0.055	0.991 1	1.604 1
$\ln C_T = a\omega^d - b$	-9.82 $\times 10^{-2}$	-6.774 9	1	-0.995 8	0.033 2
(7)	-55.847 5	-70.038 5	0.05	-0.999 2	0.014 5
$C_T = a\gamma_d^d - b$	17.066 8	193.919 5	1	0.990 1	1.694 2
(7)	$7.577 6 \times 10^{-6}$	4.869 7	5.95	0.993 4	1.387 4
$\ln C_T = a\gamma_d^d - b$	0.515 9	3.409 9	1	0.991 8	0.046 7
(7)	181.805 9	195.587	0.035	0.998 2	0.021 7
$\tan \varphi = a\omega^d - b$	$-4.595 9 \times 10^{-3}$	-0.448 2	1	0.931 1	0.006 8
(6)	-3.86×10^{-10}	-0.324 4	5.15	0.948 2	0.006 0
$\tan \varphi = a(\ln \omega)^d - b$	-0.153 3	-0.831 7	1	0.921 3	0.007 3
(6)	-8.199×10^{-3}	0.322 8	19.25	0.948 5	0.005 9
$\tan \varphi = a\gamma_d^d - b$	2.358 4	2.091 7	1	0.894 0	0.008 4
(6)	9.3	9.644 8	0.025 5	0.976 0	0.004 1
$\tan \varphi = a(\ln \gamma_d)^d - b$	0.317 1	0.527 6	1	0.900 1	0.008 2
(6)	11.487 5	12.025 6	0.072 5	0.945 0	0.006 1

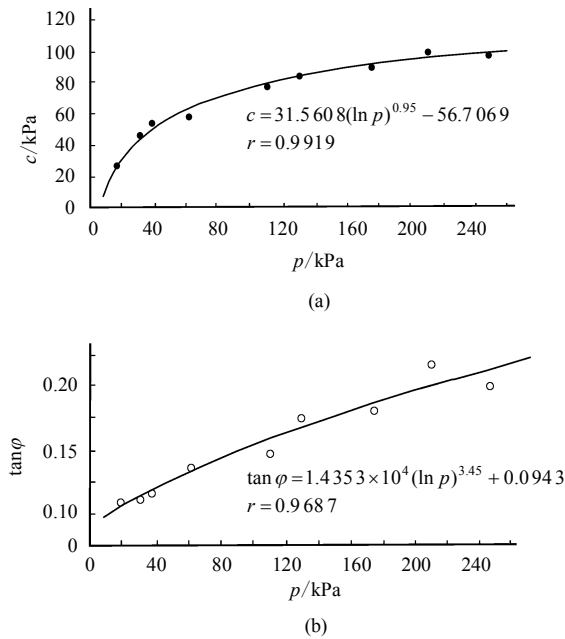
注：(6)为剔除一个明显不合理 φ 值后的数据

p 与强度 c , φ 的关系, 如图 2 所示。相关分析结果见图 2 中拟合曲线。可以看出, 粘聚力 c 和摩擦系数 $\tan \varphi$ 皆与膨胀压力有良好的关系, 相关系数达 0.969 以上, 表明 p 与 c , φ 高度相关, 因此, 通过膨胀压力 p 来确定 c , φ 值是可行的。

事实上, 我们可以换一种思路来考虑膨胀力与强度的关系。如果让试样充分吸水或为饱和试样, 测得的 c_0 , $\tan \varphi_0$ 为试样的基值, 那么, 土样在其他任何状态下测得的 c , $\tan \varphi$ 皆包含基值部分和吸力(包括基质吸力和溶质吸力两部分)引起的附加值 Δc 和 $\Delta \tan \varphi$ 。下面将讨论 Δc , $\Delta \tan \varphi$ 与膨胀力 p 的关系。根据土颗粒与水的相互作用机理, 以及大量试验结果, 膨胀土在饱和的情况下仍有膨胀势, 反映出膨胀性矿物对水的亲和性和土颗粒排列特点^[6], 因此, 可以测得饱和土(对应 $c_0, \tan \varphi_0$ 的土)的膨胀压力为 p_0 。

对于宜昌膨胀土, 如果以含水量 $\omega = 41.2\%$ 的试样的 $c_0, \tan \varphi_0$ 为饱和试样的强度(该样饱和度为 94.5), 则其它土样的强度亦可表示为

$$\begin{aligned} \tau &= c_0 + \Delta c + \sigma(\tan \varphi_0 + \Delta \tan \varphi) = \\ &= c_0 \left(1 + \frac{\Delta c}{c_0}\right) + \sigma \tan \varphi_0 \left(1 + \frac{\Delta \tan \varphi}{\tan \varphi_0}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

图2 宜昌膨胀土的 c - p , $\tan \varphi$ - p 关系Fig 2 The relations between c , φ and p of expansive soil

其中 $\frac{\Delta c}{c_0}$, $\frac{\Delta \tan \varphi}{\tan \varphi_0}$ 与膨胀力 p 的关系如表 4 所示。表中还列有根据文献[2]中试验结果得到的 c , φ 与 p 的相关分析结果。

从表中数据可以看出, 虽然广西土与宜昌土的最佳回归公式及结果不同, 但对同一种土来说, 两种拟合公式的最佳结果都还比较接近, 且总的来看, $y = a(\ln x)^d - b$ 的形式稍优于 $y = ax^d - b$ 的形式, 因此膨胀土的强度可统一用下式表示:

$$\tau = c_0 \left(1 + \frac{\Delta c}{c_0}\right) + \sigma \tan \varphi_0 \left(1 + \frac{\Delta \tan \varphi}{\tan \varphi_0}\right) \quad (3)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta c}{c_0} &= a_c \ln \left(\frac{p}{p_0}\right)^{d_c} - b_c \\ \frac{\Delta \tan \varphi}{\tan \varphi_0} &= a_\varphi \ln \left(\frac{p}{p_0}\right)^{d_\varphi} - b_\varphi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 c_0 , φ_0 , p_0 为饱和土的有关指标; a_c , b_c , d_c 分别为对应于粘聚力的回归系数; a_φ , b_φ , d_φ 分别为对应摩擦系数的回归系数, 不同土有不同的值。

式(3)具有普遍性, 对于饱和状态和非饱和状态皆适宜。例如虽同为饱和土, 但因干密度不同, 其膨胀力 p 和强度 c , $\tan \varphi$ 值皆不同, 若知其膨胀力 p , 则可通过式(3)、式(4)求得强度 c , $\tan \varphi$ 。如前面所述的那样, 对于非饱和状态, 前面研究也表明其 p 和 c , $\tan \varphi$ 也会不同。但都可统一由式(3)、式(4)描述, 且式(3)中的 c_0 , $\tan \varphi_0$ 没有特殊要求, 理论上, 无论什么状态(饱和和非饱

和)的土都可以以它的 c , $\tan \varphi$ 为基值, 但为了与非饱和土强度理论相适应, 这里采用了饱和状态时的 c_0 和 $\tan \varphi_0$ 为基值。

由式(4), 式(3)知, 对于任一土样, 只要知道 a_c , b_c , d_c , a_φ , b_φ , d_φ , 即可求得任一膨胀压力所对应的土的强度。如前文所述, 可以通过一系列 P , c , φ 测试, 再进行回归分析得到它们之间的关系, 但工作量太大。下面介绍一种稍简易的方法。由于一组强度试验可以求得一组 c , $\tan \varphi$, p 。为此, 通过 3 组试验即可得到 3 组 c , $\tan \varphi$, p 值, 再加上一组饱和样的 c_0 , $\tan \varphi_0$, p_0 值, 即可联立求得该土的 a_c , b_c , d_c 和 a_φ , b_φ 及 d_φ , 最后, 可得该土样的强度通式。

以前面宜昌土为例, 从图 2 中的低、中、高膨胀压力范围选 3 个点, 为了说明上述方法的可行性, 选 $\tan \varphi$ - p 关系曲线上比较偏离该曲线的 2[#], 5[#], 8[#] 和作为饱和基样的 1[#] 作为该土样的试验结果, 见表 5 所示。由此通过式(4)可列得联立方程组:

$$\left. \begin{aligned} a_c(0.5604)^{d_c} - b_c &= 0.669; a_\varphi(0.5604)^{d_\varphi} - b_\varphi = 0.0157 \\ a_c(1.8046)^{d_c} - b_c &= 1.782; a_\varphi(1.8046)^{d_\varphi} - b_\varphi = 0.3641 \\ a_c(2.6155)^{d_c} - b_c &= 2.514; a_\varphi(2.6155)^{d_\varphi} - b_\varphi = 0.8636 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由此可先通过试算求得 d_c , d_φ , 然后再求得各系数如下: $a_c=0.8796$, $b_c=0.1803$, $d_c=1.015$; $a_\varphi=0.0972$, $b_\varphi=0.0102$, $d_\varphi=2.284$, 这些系数与表 4 中的最佳拟合结果有一定差距, 但利用此组数据和式(3), (4)求得各试样对应其膨胀力的强度指标 c , φ 值与原测值的比较及与原值的相对误差见表 5。由表 5 中数据可知, 对 c 值, 除对基样的 c_0 预测误差较大达 18% 外, 其他都小于 10%。对于 $\tan \varphi$ 值, 除第 9 号样误差达 14.9% 外, 其余的基本上在 11% 以内, 前者的较大误差是由于 b_c 值较大所引起, 而后者可能是该样膨胀压力测试结果偏低的缘故。表 5 还列有最佳拟合式算得的强度指标与原测试结果的比较, 误差皆在 10% 以内, 除 9 号, 1 号的结果比简化式结果合理外, 其他相差不大。简化预测值与最佳拟合预测值相比, 相对误差除 1 号试样的 c 值超过 10% 外, 其它都在 10% 以内。总的来说, 上述简化结果应该是可以接受的。

如此, 通过上述 4 组强度指标和膨胀力的测试, 即可预测该土样在各状态下的强度。

将式(3)与式(1)及 Bishop 公式和 Fredlund 公式^[4]比较可以发现, 式(3)中的 Δc , $\Delta \tan \varphi$ 与式

(1) 中的有关项有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} \Delta c &= m p_s \tan \varphi = X(u_a - u_w) \tan \varphi = (u - u_w) \tan \varphi \\ \sigma \Delta \tan \varphi &= u_a \tan \varphi \end{aligned} \right\} (6)$$

所不同的是, $u_a \tan \varphi$ 没有与膨胀力 p 发生联系, 而 $\Delta \tan \varphi$ 与 Δc 一样都可由膨胀力来确定, 这对非饱和膨胀土来说, 其强度确定似乎更为简单。

表 4 宜昌、广西膨胀土的 $\Delta c/c_0$, $\Delta \tan \varphi / \tan \varphi_0$ 与 p/p_0 的回归分析结果

Table 4 Regression analysis results of correlation between $\Delta c/c_0$, $\Delta \tan \varphi / \tan \varphi_0$ and p/p_0 of Yichang and Guangxi expansive soils

土名	拟合公式	a	b	d	r	s
广西土	$\frac{\Delta c}{c_0} = a\left(\frac{p}{p_0}\right)^d - b$	0.186 4	9.23×10^{-3}	1	0.985 9	0.105 2
		0.115 2	-0.131 9	1.18	0.986 3	0.103 7
	$\frac{\Delta c}{c_c} = a\left(\ln \frac{p}{p_0}\right)^d - b$	1.412 6	0.724	1	0.967 9	0.231 7
		0.213 1	-0.5210	2.8	0.984 4	0.162 0
	$\frac{\Delta \tan \varphi}{\tan \varphi_0} = a\left(\frac{p}{p_0}\right)^d - b$	1.802×10^{-2}	2.146×10^{-2}	1	0.882 0	0.032 6
		3.896	3.974	0.025	0.940 5	0.023 5
	$\frac{\Delta \tan \varphi}{\tan \varphi} = a\left(\ln \left(\frac{p}{p_0}\right)\right)^d - b$	0.101 3	0.080 8	1	0.941 0	0.023 4
		6.601 2	6.581 2	0.225	0.955 4	0.020 5
	$\frac{\Delta c}{c_0} = a\left(\frac{p}{p_0}\right)^d - b$	0.188 2	-0.372 5	1	0.943 9	0.322 2
		51.799 8	51.728 9	0.018 5	0.992 0	0.123 5
宜昌土	$\frac{\Delta c}{c_0} = a\left(\ln \left(\frac{p}{p_0}\right)\right)^d - b$	0.982 6	$-6.148 4 \times 10^{-2}$	1	0.991 9	0.123 7
		1.021 5	$-3.643 8 \times 10^{-2}$	0.965	0.992 0	0.122 8
	$\frac{\Delta \tan \varphi}{\tan \varphi_0} = a\left(\frac{p}{p_0}\right)^d - b$	$8.157 4 \times 10^{-2}$	$7.541 4 \times 10^{-2}$	1	0.961 8	0.113 6
		0.233 2	0.286 2	0.65	0.967 6	0.110 5
	$\frac{\Delta \tan \varphi}{\tan \varphi} = a\left(\ln \left(\frac{p}{p_0}\right)\right)^d - b$	0.397 1	0.166 6	1	0.942 4	0.138 8
		0.161 2	0.021 4	1.90	0.970 6	0.099 9

注: 上述式中要求 $p_0 \geq 1$ kPa, 对于 $p < 1$ kPa 的土, 可设其 $p = 1$ kPa

表 5 强度预测值与试验值的比较

Table 5 The comparison between of prognostic and experimental values of strength of expansive soils

试样号	膨胀力/kPa	试验强度指标			简化预测强度指标及相对误差				最佳拟合预测强度及误差			
		c/kPa	$\tan \varphi$		c/kPa	相对误差/%	$\tan \varphi$	相对误差/%	c/kPa	相对误差/%	$\tan \varphi$	相对误差/%
9	208.4	103.7	0.221 5	95.4	-8	0.188 6	-14.9	98.1	-5.4	0.201 7	-8.9	
8	247.5	99.8	0.202 2	99.9	0	0.202 2	0	102.8	3.0	0.214 9	6.3	
7	173.4	92.3	0.182 8	90.7	-1.7	0.175 3	-4.1	93.1	0.9	0.188 5	3.1	
6	128.8	86.0	0.174 9	83.0	-3.5	0.156 5	-10.5	85.0	-1.2	0.169 0	-3.4	
5	110.0	79.0	0.148 0	79.0	0	0.148	0	80.7	2.2	0.159 9	8.0	
4	62.1	60.0	0.135 0	64.4	7.3	0.124 4	-7.9	64.9	8.2	0.132 2	-2.1	
3	38.1	54.9	0.114 6	52.0	-5.3	0.112 8	-1.6	51.3	-6.6	0.116 2	1.4	
2	31.7	47.4	0.110 2	47.4	0	0.110 2	0	46.0	-3.0	0.112 0	1.6	
1	18.1	28.1	0.108 5	33.5	18	0.107 4	-1	29.4	4.6	0.106 2	-2.1	

4 结 语

对于非饱和膨胀土, 利用式(3)、式(4), 通过测膨胀压力 p 来获得强度关系是可行的, 这样可不必费时费力去测吸力值和 φ_b 值, 因吸力的测试设备复杂, 测试费时, 远不如膨胀力测试简便易行。但式(3)、式(4)能否适用其它类型非饱和土尚待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 卢肇钧, 张惠明, 陈建华, 等. 非饱和土的抗剪强度与膨胀压力[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 1—8.
LU Zhao-jun, ZHANG Hui-ming, CHEN Jian-hua, et al. Shear strength and swelling pressure of unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 14(3): 1—8.
- [2] 卢肇钧, 吴有敬, 孙玉珍, 等. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 20—27.
LU Zhao-jun, WU Xiao-jing, SUN Yu-zhen, et al. The

role of swelling pressure in the shear strength theory unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(5): 20—27.

- [3] 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 Lin-chang, ZHONG Xiao-chen, YIN Zong-ze. The relationship between strength and water content of expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(2): 71—75.
- [4] L W Kong, L R Tan. Study on shear strength and swelling-shrinkage characteristic of compacted expansive soil[A]. *Unsaturated Soil for Asia*[C]. Raharge: [s.n.].
- [5] 谭罗荣, 孔令伟. 膨胀土膨胀特性的变化规律研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1 555—1 559.
TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Study on variation regularity of swelling behavior of expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(10): 1 555—1 559.
- [6] 刘国楠, 吴肖茗. 膨胀土吸力特性研究[J]. 中国土木工程学会第 7 届全国土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 263—266.