

粘性土壤剪切强度与容重和含水量之间关系的研究*

沈杰 余群

(北京农业工程大学)

摘 要

本文在 Mitchell 等人关于土壤剪切强度唯一性研究的基础上,利用热力学第二定律作指导,由试验和分析建立了剪切强度与热扩散系数之间关系。据此关系,综合 De Vries 和佐藤用三相比表达热扩散系数的方程式,得到一个四参数剪切强度-干容重-含水量模型。对于一种粘土在各种容重和含水量下进行了三轴剪切试验,本模型拟合实测数据的精度(用相关系数表示)皆在 0.9 以上。

农业土壤比阻普查为农业机械选型与规划提供依据。对于获取犁体比阻值来说,可用实测取得,也可用预测法算得。如在全国或全省范围内进行实地测量,则首先遇到的问题是,田野含水量随季节持续波动,容重随空间位置不同,出现很大差异,结果不同的时间测的数据值不一样,这点测的数值与那点不同。如用预测法,则又缺乏简单可靠的预测模型。因此唯一可行的方法是根据理论和试验分析首先建立预测模型,然后利用建立的模型指导有计划地选时选点进行实测,从而节省人力和财力。

土壤比阻主要决定于土壤剪切强度,因此剪切强度与容重和含水量之间关系的研究结果对比阻普查工作具有一定参考价值。

许多学者曾就剪切强度(参数)与容重和含水量之间关系进行过研究^[4-12]。但是,这些研究工作多半局限于观察和试验结论,迄今尚无一个简单可靠的剪切强度-容重-含水量模型可供人利用。

本研究将建立小围压($<150\text{KPa}$)时剪切强度-容重-含水量模型,这里剪切强度系指围压一定时的剪切应力峰值或应变为 16% 时的读数。

一、材料与方 法

试验用土为一种粉粘土和一种粘土,取自北京清河地区。它们的主要物理指标见表 1。

所有试样皆由重塑法获得。先将风干土或烘干土碾散,过 2mm 筛,把筛后的土壤分层平铺在内表面干燥的玻璃缸内,每铺一层干土后用滴管滴洒预计的加水量,全部干土加完水后静置一段时间,然后涂凡士林将玻璃缸盖紧,润湿至少一昼夜后备用。

为了建立剪切强度与容重和含水量之间关系,笔者设计了二类试验:一类为土壤热参数与剪切强度相关性试验;另一类为普通三轴仪上的不固结排水试验。

* 本文得到国家教委资助优秀青年教师项目的资助。

表 1 试验用土的物理指标
Table 1 Physical indexes of soils for test

土 壤 Soil	比 重 Specific gravity	液 限 (%) Liquid limit	塑 限 (%) Plastic limit	砂粒含量 (%) Sand content	粉粒含量 (%) Silt content	粘粒含量 (%) Clay content
粉粘土	2.709	32	18	32.2	36.5	31.3
粘 土	2.743	40.6	22.9	41.2	17.5	41.3

对于第一类试验,测取土壤热参数采用余正推荐的方法,具体试验装置及步骤参阅文献[1]。剪切强度由直剪仪测得,试样所处状态与测量热参数时相同。由于目前缺乏测量在一定围压下土壤热扩散系数的方法和装置,因此这里剪切强度特指法向压力 σ_n 为零时测得的数值。为了说明力学性质与热性质参数的相关性,同时用无侧限压缩仪和自制拉伸仪测量了无侧限压缩强度和拉伸强度,这两参数可以看作粘土内聚力的反映。

作者设计第一类试验是基于如下考虑:

许多研究者的研究表明,要想直接找到剪切强度与容重和含水量的关系是非常困难的,因此,明智的作法是为剪切强度找到一个替代量(或等效量),而这个替代量与容重和含水量关系较易确定。

J. K. Mitchell 等(1969)^[13]在速率过程理论指导下通过一系列试验发现剪切强度与粒间联结数间存在着唯一的线性关系,该关系不随土壤类型、固结条件、容重、含水量等变化。因此粒间联结数为剪切强度的替代量,对强度特性的研究可以转换为对联结数的研究。

遗憾的是联结数与容重和含水量的关系亦不知道,故还需寻找联结数的替代量。以一块土体为研究对象,考察热力学第二定律:

$$U_2 - U_1 = W + Q \quad (1)$$

式中 U 为土体内能, W 为外界对土体所作的功, Q 为土体从外界所吸收的热量。土壤与农具相互作用时间一般很短,此时将土壤变形过程视为绝热是不成问题的,绝热过程是通过改变 W 来变化内能。在热力学体系中,从都能改变内能并在上式处于同等位置的角度出发,可以假定认为热传递过程与土壤变形这个绝热过程具有一定的等效性,因此尝试用土壤热性质参数代替联结数(或剪切强度)。热扩散系数是衡量土壤导温性强弱的指标,它与容重、含水量的关系在一定范围内已有较明确的表达式。

热扩散系数与联结数(或剪切强度)随容重、含水量变化的大致趋势为:当容重增加时,粒间联结数必然增加,热扩散系数也增加;当级配最佳时,联结数最大,热扩散系数亦最大;对于粘性土壤,剪切强度与含水量一般成递减关系^[2],热扩散系数在含水量大于 w_0 ($\approx 10\%$)的范围内与含水量亦成递减关系(De Vries, 1975^[14])。因此在含水量大于 w_0 的范围内,热扩散系数与剪切强度之间存在一种正比例关系,具体形式由第一类试验的结果给出。

二、结果与讨论

图1(a)~(c)为根据试验数据整理得到的关系图。由图可知,剪切强度与热扩散系数间存在一种唯一关系,即该关系不受容重和含水量变化影响,且两者间近似呈线性关系。回归结果表明,三个小图的线性相关系数分别为 $r_a = 0.95$, $r_b = 0.94$ 和 $r_c = 0.93$ 。在工程精度范围内,近似认为两者线性相关。如用 F 和 D 分别表示剪切强度和热扩散系数,则有下面的线性关系式:

$$F = K_1 D + K_0 \quad (2)$$

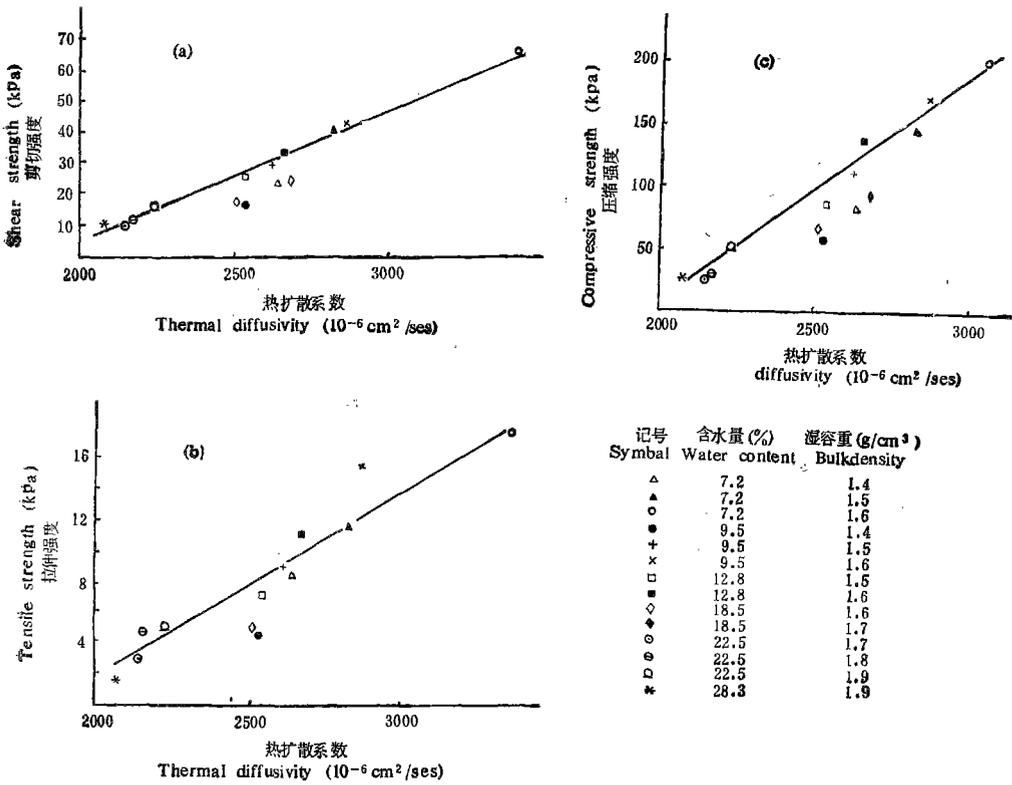


图 1 室内试验得到的土壤强度——热扩散系数关系

Fig. 1 Soil strength—thermal diffusivity relation obtained from indoor test

式中 K_1 和 K_4 为方程系数。

佐藤(1960)^[3]认为,土壤是固相、水、空气三相的混合物。如分别设其固有的导热率、比热、密度为 $\lambda_s, \lambda_w, \lambda_a, C_s, C_w, C_a, P_s, P_w$ 和 P_a , 以及三相各占总容积的比率分别为 X, Y 和 $Z(X + Y + Z = 1)$, 则热扩散系数用下式表示:

$$D = \frac{(\lambda_s X + \lambda_w Y + \lambda_a Z)}{(C_s + C_w Y + C_a Z)(P_s X + P_w Y + P_a Z)} \quad (3)$$

在土粒比重认为恒定条件下,上式中三相比 X, Y, Z 由容重和含水量决定。

根据 De Vries (1975) 的观点,土壤体积热容量 Ch 用下式表示:

$$Ch = C_s P_s X + C_w P_w Y + C_a P_a Z \quad (4)$$

将上式替代式(3)的分母得

$$D = \frac{\lambda_s X + \lambda_w Y + \lambda_a Z}{C_s P_s X + C_w P_w Y + C_a P_a Z} \quad (5)$$

三相比 X, Y 和 Z 的具体表达式为:

$$X = \gamma_d / G, Y = 0.01 \omega \gamma_d, Z = 1 - X - Y \quad (6)$$

式中 γ_d 为干容重; ω 为含水量(%); G 为土粒比重。

本研究测量比热时皆用松散土样, 试验值与干容重无关。因此式(3)分母的比热项中 X 、 Y 和 Z 用下面的 X' 、 Y' 和 Z' 代替。

$$X' = 1/G, Y' = 0.01w, Z' = 1 - X' - Y' \quad (7)$$

密度项中 X 、 Y 和 Z 不变。与之对应, 式(5)分母中 X 、 Y 和 Z 用下面的 X'' 、 Y'' 和 Z'' 代替。

$$X'' = \frac{\sqrt{\gamma_d}}{G}, Y'' = 0.01w \sqrt{\gamma_d}, Z'' = 1 - X'' - Y'' \quad (8)$$

将其代入式(5)有

$$D = \frac{\lambda_s X + \lambda_w Y + \lambda_a Z}{C_s P_s X'' + C_w P_w Y'' + C_a P_a Z''} \quad (9)$$

此式为适用本试验方法的热扩散系数表达式, 其中土壤三相物理常数数值列于表 2。

表 2 固相、水、空气的物理性质参数

Table 2 Parameters of physical property of solid, water and air

三相名称 Three phase	热传导率 Thermal conductivity	比 热 Specific heat	密 度 Density	三 相 比 Volume content
固相	$\lambda_s = 2.508$	$C_s = 836$	$\rho_s = 2700$	X
水	$\lambda_w = 0.627$	$C_w \approx 4180$	$\rho_w \approx 1000$	Y
空气	$\lambda_a = 0.0238$	$C_a = 1007$	$\rho_a = 1.3$	Z
量纲	$J/m \cdot s \cdot k$	$J/kg \cdot k$	kg/m^3	$X + Y + Z = 1$

用三相比预测导热率不如预测体积热容量那样成熟, 即完全按式(9)分子的表达式估算导热率其精度还不尽人意, 这点在佐藤的工作中得到体现。为了弥补这一不足, 将待定常数 K_2 和 K_3 替代 λ_s 和 λ_w , 式(9)改写为:

$$D = \frac{K_2 X + K_3 Y + \lambda_a Z}{C_s P_s X'' + C_w P_w Y'' + C_a P_a Z''} \quad (10)$$

综合式(2)和(10)得:

$$F = \frac{K_1(K_2 X + K_3 Y + \lambda_a Z)}{C_s P_s X'' + C_w P_w Y'' + C_a P_a Z''} + K_4$$

$$\approx \frac{K_1[5.7 \times 10^{-5} + (K_2 - 5.7 \times 10^{-5})\gamma_d/G + 0.01(K_3 - 5.7 \times 10^{-5})w\gamma_d]}{3.13 \times 10^{-4} + 0.54\sqrt{\gamma_d}/G + 0.01w\sqrt{\gamma_d}} + K_4 \quad (11)$$

式中 $K_1 - K_4$ 为方程参数, G 、 w 、 γ_d 分别为比重、含水量和干容重。此式即在一定假定和分析基础上得到的粘性土壤剪切强度-容重-含水量模型。

佐藤公式及其变型(式(9))预言热扩散系数在整个含水量范围内随含水量增加而减少, 这与 De Vries 等实测的热扩散系数在含水量小于 w_0 ($\approx 10\%$) 的范围内随含水量增加而增大的事实相矛盾, 因此式(10)只在含水量大于 w_0 的范围内适用。因粘性土壤剪切强度在整个含水量范围内与含水量成递减关系(赵诚斋), 故式(11)在整个含水量范围内有效。

将上面的剪切强度-容重-含水量方程简写为:

$$F = k_1(k_2\xi + k_3\eta + \chi) / \phi + k_4 \tag{12}$$

式中 ξ, η, χ 和 ϕ 为容重和含水量的已知函数; $k_1 - k_4$ 为方程参数, 可以由两种干容重与两种含水量之间四种不同组合下的剪切强度值确定¹⁾。下面计算中取 $\gamma_{d_1} = 1.2\text{g/cm}^3$, $\gamma_{d_2} = 1.4\text{g/cm}^3$ 。 W_1 取最小试验含水量, W_2 取最大试验含水量。

为了评价本模型对试验结果预测得好坏, 采用相关系数作为评价指标, 相关系数的定义为:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \tag{13}$$

式中 Y_i 和 \hat{Y}_i 分别为剪切强度的试验值和模型预测值, \bar{Y} 为 n 个实测值的平均值, n 为测点数。

图 2(a)---(c) 为不同围压下三轴试验结果。图中圆圈表示试验点, 三条线分别代表本模型对三种不同干容重条件下剪切强度的预测。由图可看出本模型能够描述试验点表

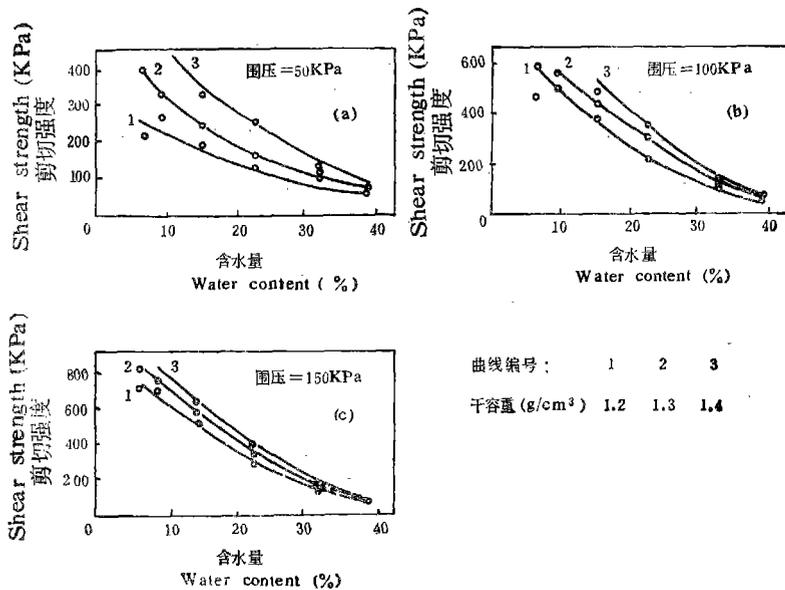


图 2 各种围压下三轴试验得到的剪切强度-容重-含水量关系 (圆圈代表试验点、线为预测线)

Fig. 2 Shear strength-density-water content relation obtained from triaxial test at different confined pressures (circle stands for experimental point and dash line represents predicted line)

1) 沈杰, 1988: 土壤流变性质和剪切强度的理论与试验研究. 北京农业工程大学, 博士学位论文, 50--51 页。

现出来的几个趋势:

(1) 在干容重一定条件下, 剪切强度随含水量呈负指数形式逐渐减小。这在(a)小图中体现最充分。

(2) 含水量一定条件下, 围压大时, 试验干容重变化引起的剪切强度变化不明显; 而围压小时, 引起的剪切强度变化显著。干容重与剪切强度间呈递增关系。

(3) 围压一定, 含水量低时, 试样干容重变化引起的剪切强度变化较显著; 而含水量较高时, 引起的剪切强度变化不显著。这在(a)小图中体现最充分。

计算三种不同围压时本模型拟合试验点的精度, 各种干容重下相关系数皆在 0.9 以上, 这说明模型在工程精度上成功地描述了剪切强度-容重-含水量关系。

模型中容重、含水量系指试样剪切前的初始值, 没有采用破坏后的数值。这样做的原因有二: 一是为了以后应用于实际问题方便; 二是对于含水量较低的土壤。在法向压力小于 200KPa 范围内受剪前后容重和含水量的变化不太大, 且受剪前后的含水量间呈现正比例关系^[2]; 对于含水量较高的土壤, 受剪前后含水量变化较大, 但因为这时剪切强度不灵敏地随含水量和容重变化(图 2(a)), 含水量和容重预报的偏差对剪切强度的正确预报影响不大。

参 考 文 献

- [1] 余正, 1986: 土壤比热和导热系数的测量。土壤, 第 18 卷 1 期, 48—51 页。
- [2] 赵诚斋, 1963: 水稻土的物理机械性质与机械化耕作的关系。土壤学报, 第 11 卷 1 期, 53—60 页。
- [3] 佐藤正一, 1960: 栽培法改善のための水田微气候调节(后编)。九州农业试验场汇报, 第 6 卷, 第 4 号, 300—305 页。
- [4] Nichols, M. L., 1932: The Dynamic Properties of the Soil-III. Shear Values of Uncemented Soils. Trans. of ASAE, 26, pp. 47—50.
- [5] Wells, L. G. and Treesuwan, O., 1977: The Response of Various Soil Strength Indices to Changing Water Content. ASAE Paper No. 77—1055.
- [6] Lumb, P., 1970: Safety Factors and Probability Distribution of Strength. Canadian Geotechnical Journal, 7, pp. 225—242.
- [7] Lee, I. K. (ed.), 1974: Soil Mechanics—New Horizons. American Elsevier Publishing Company, Inc., New York.
- [8] Youssef, M. S., et al., 1965: Relationship between Shear Strength, Consolidation, Liquid Limit, and Plastic Limit for Remoulded Clays. Proc. of the 6th ICSMFE, Vol. 1, pp. 126—129.
- [9] Ali-Hassan, O. S. and Mckyes, E., 1983: Modelling of Soil Mechanical Properties to Soil Moisture Condition. ASAE Paper No. 83—1053.
- [10] Kuipers, H. and Kroesbergen, B., 1966: The Significance of Moisture Content, Pore Space, Method of Sample Preparation and Type of Shear Annulus used of Laboratory Torsional Shear Testing of Soils. J of Terramechanics 3(4), pp. 17—28.
- [11] Hitiaratchi, D. R. P. et al., 1980: Agricultural soil mechanics. J. Agri. Eng. Res. Vol. 25, pp. 239—259.
- [12] Yong, R. N., 1987: Prediction of Unsaturated Soil Strength for Traction Development in Vehicle Mobility. 9th conference of ISTVS, pp. 63—70.
- [13] Mitchell, J. K., et al., 1969: Bonding, Effective Stresses, and Strength of Soils. Proc. of ASCE, J. of Geotech. Engng. Div., Vol. 95, No. SM5, pp. 1218—1246.
- [14] de Vries, D. A., 1975: Heat Transfer in Soils, in Heat and Mass Transfer in Biosphere. Scripta Book Company, Washington D. C.

RESEARCH ON THE RELATION OF SHEAR STRENGTH, DRY DENSITY AND WATER CONTENT FOR CLAYEY SOILS

Shen Jie and Yu Qua

(Beijing Agricultural Engineering University)

Summary

Works by many persons indicated that it was extremely difficult to find the shear strength-dry density-water content relation directly, so a wise approach is to find an equivalent for shear strength with a prerequisite that it's easier to determine the correlation among this equivalent, dry density and water content.

By means of rate process theory, Mitchell etc. found that there is an unique linear relationship between shear strength and number of interparticle bonds, and this relationship doesn't change with soil type, consolidation condition, density and water content. As a result, number of interparticle bonds is an equivalent of shear strength. However, it is a pity that correlation among number of bonds, dry density and water content is still not known, so looking for another equivalent is necessary. Take a block of soil as an example, the second law of thermodynamics can be written by

$$U_2 - U_1 = W + Q \quad (1)$$

where U is internal energy of soil mass, W the work done by external environment to soil mass, and the thermal quantity absorbed by soil mass from external environment.

The period of the interaction between soil and plow is short in general, hence it's acceptable that the process of soil deformation is considered as an adiabatic process.

In an adiabatic process, variation of internal energy in a certain system is fulfilled by changing W ; in a heat transfer process, variation of Q is the only way to change internal energy in a given system, so in the system of thermodynamics, it might be assumed that there is certain similarity between an adiabatic process of soil deformation and a heat transfer process, because both process can change the internal energy of system and W has an equal position in Eq. (1) in comparison with Q . As a result, it's admissible for us to try to substitute soil parameter of thermal property for number of bonds or shear strength. Thermal diffusivity is a parameter which denotes the ability of temperature conductance and has within a certain extent a clear relationship with dry density and water content.

The experimental relation between shear strength and thermal diffusivity for clayey soil is set up. Synthesis of this relation and the representation of thermal diffusivity of soil proposed by de Veries and Sato, yields a shear strength-dry density-water content model with four coefficients. A series of triaxial tests of one kind of clay have been done, and the correlation coefficients for evaluating the fitness of the model to measured values are above 0.9.