

稠度试验的研究现状与发展

蒋 彭 年

(南京水利科学研究院)

提 要

本文综述、分析和研究了70多年来液塑限稠度指标性质的试验研究及其成果。依据重塑粘性土的含水量与强度之间的唯一关系,对液塑限时的强度特性作出评述。最后,按照强度特性,建议与讨论了反向挤出法测塑限的新方法。此法既简单、经济、可靠,又合乎力学与塑性模拟的原理。

一、前 言

土的分类与鉴别所依据的就是土的指标性质。粘性土指标性质中最重要的土体性质是稠度。地基土与土坝、路堤填土的稠度随着它们的含水量增减而变化,而稠度的软硬,又反映粘性土力学强度的强弱。不同稠度状态分界处相应的含水量称为稠度界限,在工程上稠度界限为液、塑、缩三限。本文目的在于回顾和综述70多年来液塑两限稠度指标性质的试验研究,尤其是两限的强度值,并展望测塑限法的可能发展。

粘性土的含水量增减时,其稠度也随之变化。如果浆糊状粘性土在空气中干燥,含水量逐渐减少,则粘性土从液体状态,经过塑性状态,最后变为半固体或固体状态。1911年瑞典农业学家阿太堡(Atterberg, A.)将粘性土从液体到固体状态的粘性范围分成五部分。根据粘性土的含水量,对这些部分之间的含水量界限值作出规定,并称此界限值为稠度界限^[1~3]。稠度界限主要有浮限、液限、粘限、塑限和缩限,如图1所示。它们的意义如下:

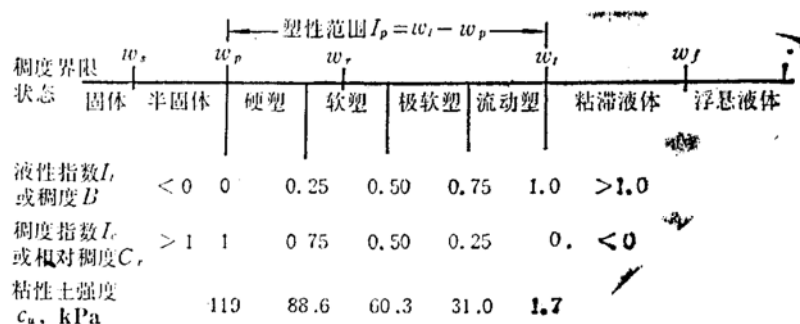


图1 不同状态时粘性土的稠度界限、稠度指标与强度

浮限 w_f ,是悬浮液态与粘滞液态之间的界限,在此界限以上,如悬液那样流动着。测浮限法是将粘性土和少量分散剂加于水中均匀拌和后静止一定时间如24h下沉积为分散性土时所

测得的含水量。

液限 w_l ，是粘滞液态与塑性状态之间的界限，在此界限以上粘性土与水的混合体如粘滞液体那样流动着，而在此界限以下此混合体具有塑性。

粘限 w_c ，是粘性土能够附着于金属工具上的最低含水量。测粘限法是将粘性土体含水量逐渐降低，直至镀膜刀片在土面刮过而不粘着土时所测得的含水量。

塑限 w_p ，是塑性状态与半固体状态之间的界限，在此界限时，粘性土在手掌下搓滚成一条直径3mm土条时产生裂缝，并开始断裂。

缩限 w_s ，是半固体状态土体积变化时的下界限，在含水量降低至此界限时，土的体积不再随着水分蒸发而缩减。

工程上最有用的稠度界限是液限、塑限和缩限，浮限对于水力冲填坝和吹填土的施工，具有特殊意义。液限与塑限是粘性土分类与鉴别、地基土的评价以及填土填筑含水量规定所依据的土体性质。粘性土具有塑性时的含水量范围就是塑性范围，塑性指数 I_p 是此范围的量度。

以下首先作测液塑限的仪器和方法的回顾，其次评述液塑限强度的试验研究，最后讨论测塑限法的可能发展。

二、测液限的仪器与方法

粘性土稠度界限的试验研究，从1911年起，至今已有70多年的历史。测液限的试验研究一开始就沿着两条途径发展，一是碟式仪，另一是圆锥仪。前者是因撞击而受力，属于动力剪切试验，后者是锥重在土中静力平衡下所发挥的土中阻抗应力。测液限的仪器与方法按碟式仪与圆锥仪两项测液限法作回顾与评述。

(一)碟式仪测液限

1911年(至1916年)阿太堡首先提出土体的稠度界限，用于农业土壤分类。他研究了细粒土的塑性，规定了塑性土体的稠度界限，即液、塑两限。塑性土体的液限测定^[4-10]，阿太堡用蒸发皿撞击三次后，皿内两半土体接合长度达15—20mm的简单手工操作测定的含水量，定为液限。

1927年太沙基(Terzaghi, K)采用自由落锤和加变质量的圆锥，测定以强度表达的稠度因素。

1932年(1927年开始)，在太沙基的提议下，卡萨格兰德(Casagrande, A)^[11,12]针对工程目的，使手工操作改为机械式碟式仪，底座材料用硬橡胶(Ebonite)。

碟式仪现为许多国家规程采用，并已成为创造新的液限测试方法的比较基准。但影响碟式仪测液限法的因素很多，计有①底座的材料性质、尺寸以及与工作台的隔离；②测碟的材料、尺寸、重量与垂直落高；③划刀；④土类；⑤操作技术等。

底座材料，卡萨格兰德原来采用硬橡胶，后来改用层状酚塑料(Micarta 221)，它的硬度与美国材料试验协会(ASTM)标准一样。英国标准BS1377采用了橡胶(Rubber)。美国硬底座(层状酚塑料)较英国BS1377标准软底座硬得多，见表1。英国软底座测得的液限值较高，相应的强度较低。层状酚塑料碟式仪测得的液限值较英国BS软底座碟式仪约小3%—4%^[13]。

测碟的标准设计是碟厚2mm，测碟内半径54mm，碟中心高出碟边缘的距离为27mm，

表 1

碟式仪底座材料

底座材料	硬 度	回弹量(%)	资 料 来 源
硬橡胶(Ebonite)	—	37*	卡萨格兰德1932 ^[11,14]
层状酚塑料(Micarta 221)	98.5°	—	诺曼1958. ^[13,14]
橡胶(Rubber)	86°—89°	—	BS 1377, 1948. ^[13,14]
4层橡胶	86°—89°	30—40	BS 1377, 1961. ^[14]
4层橡胶	86°—94°	20—35	BS 1377, 1963 ^[14]
4层硫化橡胶	86°—94°	20—35	BS 1377, 1967—1975. ^[14]

*2g钢球落高25.4cm的回弹量。

^用邓洛普(Dunlop)轮胎试验仪量测。极硬材料为100%，极软材料为零。

涡轮从动部件质量32g，测碟质量163g，测碟总质量195g，约为200g。同一试件在同一含水量时，测碟愈轻，击数也愈少。如以25击为标准，测碟愈轻，则液限值愈少。

划刀有两种，即A刀与C刀，两者的槽底宽都是2mm，槽的两边坡角都是60°。A刀是ASTM采用的，槽深10mm，刀呈圆弧形，内半径为22mm；C刀是BS和卡萨格兰德采用的，槽深8mm，刀厚1.6mm，划切边一侧成圆，半径3.2mm。C刀所得液限值一般较A刀大10%左右。对于某些土，尤其是砂性重的土，划槽发生了困难。

由于碟式仪液限试验实质上是一项动力剪切试验，它不能作为细粒土液限定量的基础，因为细粒土受到摇列而发生了不同的反应，因此不如直接剪切试验或间接剪切试验，例如静力贯入试验，可消除碟式仪面临的困难，例如：试验成果的复现性差、低塑性土在测碟中滑动不如塑性那样流动，有些低塑性土在冲击下发生液化以及上述砂性重的土中划槽困难等。为了消除碟式仪测液限发生的困难，各界提出了圆锥仪测液限，如以后所述。

碟式仪液限试验成果绘于图2。通过各点，作出一条直线。由25击处的纵坐标与该直线的交点所给出的含水量，得出液限值。在图2中，直线的斜率称为流动指数 I_f 。

$$I_f = \frac{w_1 - w}{\lg N - \lg N_1}$$

式中 w_1 为击数 $N_1 = 1$ 击时的含水量。由上式得

$$w = w_1 - I_f \lg N \quad (1)$$

击数10击时 $w = w_{10}$ ，则

$$I_f = w_1 - w_{10} \quad (2)$$

同理，得

$$I_f = w_{10} - w_{100} \quad (3)$$

假定击数 N 与不排水抗剪强度 c_u 成正比，则

任何击数时

$$N = k_1 c_u$$

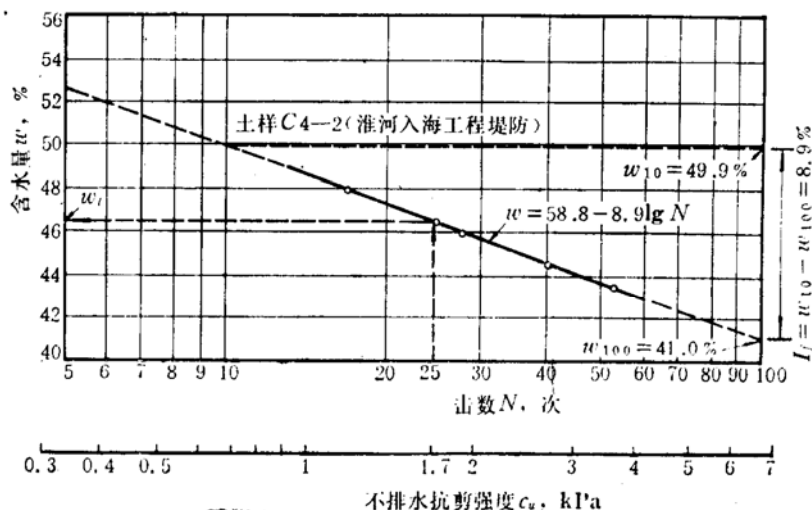
液限击数 N_l 时强度为 $(c_u)_l$

$$N_l = k_1 (c_u)_l$$

塑限击数 N_p 时强度为 $(c_u)_p$

$$N_p = k_1 (c_u)_p$$

由以上三方程，得

图2 含水量与击数的关系(南实处, 1952^[10])

$$N = c_u \frac{N_l}{(c_u)_l} = c_u \frac{N_p}{(c_u)_p} \quad (4)$$

由方程(4), 得出图2上强度 c_u 的比例尺。由方程(1), 得出液塑限分别为

$$w_l = w_1 - I_f \lg[k_1 (c_u)_l]$$

$$w_p = w_1 - I_f \lg[k_1 (c_u)_p]$$

故塑性指数 I_p 为

$$I_p = w_l - w_p = I_f \lg \left[\frac{(c_u)_p}{(c_u)_l} \right] \quad (5)$$

韧性指数 I_T 定义为塑性指数 I_p 与流动指数 I_f 之比, 故

$$I_T = \lg \left[\frac{(c_u)_p}{(c_u)_l} \right] \quad (6)$$

故韧性指数 I_T 为比值 $(c_u)_p/(c_u)_l$ 的对数值。

(二) 圆锥仪测液限

1914年(到1922年)瑞典国家铁道土工委员会主席费伦纽斯(Fellenius, W.)和秘书奥尔森(Olsson, P.)提出了圆锥手落法, 瑞典广为应用^[15, 16]。该会规定60g, 60°圆锥下沉深度10mm时的含水量定为液限。1942年瓦西列夫(Васильев, A.M.)^[17]研究了瑞典圆锥试验原理, 提出了平衡圆锥仪测液限法, 以76g, 30°圆锥下沉深度10mm时的含水量定为液限, 1949年被列入苏联国家标准ГОСТ5184-77。1970年舍伍德和赖利(Sherwood, P.T. and Ryley, M.D.)^[18]提出以80g, 30°圆锥下沉深度20mm测定的含水量为液限。也是英国国家标准BS 1377^[11]。过去我国采用苏联瓦西列夫圆锥仪测液限标准, 由于此标准的强度偏高, 提出了76g, 30°圆锥下沉深度17mm测定的含水量定为液限, 并列入我国水利电力部土工试验规程SD128-84^[12]。各国圆锥仪的规格如表2所示。

表2

测液限的圆锥仪

起源的国家	参考文献	锥角 α ,度	锥质量 P ,g	液限时下沉深度 h ,mm
瑞典	卡尔森1961. ^[15]			
	汉斯博1957. ^[24]	60°	60	10
英国 BS1377:1975	舍伍德、赖利1970. ^[18]	30°	80	20
苏联 ГОСТ 5184-77	瓦西列夫1949. ^[17]	30°	76	10
印度	厄帕尔、阿加尔沃德1958 ^[19]	31°	148	25
美国	索尔1960. ^[20]	30°	75	10
法国	公路与桥梁实验中心1966 ^[21]	30°	80	根据卡萨格兰德仪对圆锥仪进行校正
中国 SD128-84	周鸿逵等1985. ^[4,22]	30°	76	17
中国 JTJ051-81	饶鸿雁1983. ^[6,23]	30°	100	20

圆锥仪测液限法由于复现性较高、易于操作、操作人员影响较小、成果并不象碟式仪那样取决于仪器设计与使用方法,并可用于较大范围的土,现为各国乐于采用,并列入国家标准,例如英国BS1377:1975,苏联ГОСТ5184-77,日本JIS120516-1980等。影响圆锥仪测液限的因素较少,计有①锥角;②锥面粗糙度;③锥尖磨损变化;④土面隆起;⑤放锥速度;⑥下沉后取值时间等。

瑞典汉斯博(Hansbo, S, 1957)^[24]、卡尔森(Karlson, R, 1961)^[15]、英国罗思和伍德(Wroth, C. P. and Wood, D. M., 1978)^[25]与霍尔比(Houlsby, G. T., 1982)^[26]等证明了或用量纲分析得出了粘性土不排水抗剪强度 c_u 随圆锥质量 P 与下沉深度 h 的平方倒数成正比,即

$$c_u = k \frac{P}{h^2} \quad (7)$$

其中 k 为比例常数。 k 值取决于锥角 α 和以不排水抗剪强度 c_u 归一化的圆锥表面附着力 a_u/c_u ,

$$k = f\left(\frac{a_u}{c_u}, \alpha\right) \quad (8)$$

按伍德(1985)^[27]的研究, $\alpha = 30^\circ$ 时 $k = 0.85$; $\alpha = 60^\circ$ 时 $k = 0.29$ 。

根据承载力因数理论,承载力因数 N_c 为(伍德, 1985^[27]俞调梅, 1959^[28])

$$N_c = \frac{P}{c_u \pi h^2 \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (9)$$

式中 $h \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ 为下沉圆锥在土面处圆的半径。

N_c 与 k 的关系为

$$N_c = \frac{1}{\pi k \tan^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (10)$$

显然, 不论 N_c 或 k 都与锥角 α 和圆锥表面附着力 $\frac{a_u}{c_u}$ 有关。

不论圆锥是光滑的还是粗糙的, 30° 圆锥的锥角改变 1° 时, 贯入阻力约改变 6%。圆锥车制时, 容易满足容许误差, 故可避免此影响。

圆锥表面粗糙度的影响较锥角与锥尖磨损大得多。完全光滑与完全粗糙时, 完全粗糙圆锥的贯入阻力是完全光滑圆锥的 1.9 倍。故必须规定锥面车制得光滑, 并在使用前涂一薄层滑润油。

对于锥尖磨损变钝到最大容许值的 30° 圆锥入土时贯入阻力约增加 9.5%。对于锥尖磨损的圆锥, 下沉深度应量测到理想的圆锥锥尖的位置, 而不应量测到实际上磨损的锥尖。

土面隆起的影响, 使贯入阻力约增加 9.2%。故实测时不考虑土面隆起, 而以圆锥下沉深度计算基准平面即水平土面为准。

放锥速度影响不大, 一般在圆锥自重下自由下落。

下沉后取值时间一般规定为 5s。

76g, 30° 圆锥仪测液限试验后, 绘制圆锥下沉深度对含水量的双对数值关系直线, 如图 5 所示, 按 SD128-84 标准, 下沉深度 17mm 时含水量 56.7% 为液限值, 而塑限值为以上直线的延长线上与下沉深度 2mm 相应的(即外插的)含水量 25.1%。

三、测 塑 限 法

长期以来, 各国都采用搓滚法测塑限, 作为标准。此法用手掌或手指在毛玻璃板上搓滚土条, 当土条直径达 3mm 时产生裂开并开始断裂成段时的含水量定为塑限。土条的这种破坏犹如巴西劈裂试验或裂开圆柱体试验中观测到那种拉伸破坏的重现。搓滚法人为因素影响较大, 例如作用在土条上的压力、手掌或手指与土条之间的摩擦与宽度, 搓滚速度等。

ASTM(1982)^[8] 规定用手指将土椭圆球在毛玻璃板上或在光滑水平面上的一张纸上前后搓滚, 手指的压力足使土椭圆球搓滚成在全长上均匀直径的土条, 搓滚速度每分钟 80—90 次(以向前滚动再回至原位作为一次)直至土条直径达 3.2mm 碎裂。BS 规定(BSI, 1975^[7]) 用拇指搓滚, 在毛玻璃板上经 5—10 次手指指尖部分搓滚后, 土条直径由 6mm 减小到 3mm, 此时土条既在纵向上又在横向上受剪而碎裂。如果两次试验中含水量值相差在 0.5% 以上, 必须重复试验。

除了测塑限时用手指或手指指尖搓滚外, 国内规定搓条时应用于掌搓滚, 每次搓滚后应将毛玻璃板揩净, 以避免依次影响(梅剑云, 1956^[29])。水电部土工试验规程 SDS01-79 规定, 搓滚时手掌均匀施加压力于土条上, 不得使土条在毛玻璃板上无力滚动, 土条长度不宜超过手掌宽度, 滚动时不应从手掌下任一边脱出。土条不得产生中空现象。

规程 SD128-84 用圆锥仪测塑限法中最后在圆锥下沉深度与含水量的双对数值图上定出塑限值, 如前述。

四、液限与塑限时的强度

1958年斯肯普顿(Skempton, A.W.)曾告诉卡萨格兰德,英国帝国理工学院实验室用软底座碟式仪测液限时的强度约为1 kPa^[12]。诺曼(Norman, L.E.J., 1958)表示硬底座(层状酚塑料)碟式仪测得液限时的十字板强度较BS软底座碟式仪测得液限时的十字板强度高25%—50%^[13]。实验室十字板测得的碟式仪液限时的强度值见表3。

表3

碟式仪液限时不排水抗剪强度 c_u

底座材料	c_u 值		资料来源
	(kPa)	(gf/cm ²)	
硬橡胶(Ebonite)	2.5	25	西德等1964 ^[36]
层状酚塑料(Micarta 221) ASTM标准(硬底座)	2—3(2.7)	20—30(27)	卡萨格兰德1958. ^[12,34]
	1.1—2.8(1.8)	11—28(18)	诺曼1958. ^[13]
	1.3—2.5(1.7)	13—25(17)	尤西弗等1965. ^[31]
	0.5—4.1(1.7)	5—41(17)	卡尔森1977. ^[15]
	0.8—2.9(2.0)	8—29(20)	SD128—84, 1987. ^[22]
BS橡胶(Rubber) BS1377标准(软底座)	0.8—1.6(1.3)	8—16(13)	诺曼1958. ^[13]
	0.7—1.5(1.0)	7—15(10)	斯肯普顿、诺塞伊1952. ^[32]
	1—3	10—30	斯科皮克、塔-斯蒂帕尼恩1975. ^[33]

注:圆括弧()内为平均值

表3表明,卡萨格兰德或ASTM标准硬底座碟式仪的粘性土在液限时十字板不排水抗剪强度的目前最佳估计值为1.7kPa,可能范围为0.5—4.1kPa,而BS1377软底座碟式仪的粘性土在液限时十字板不排水抗剪强度的最佳估计值为1.0kPa。

圆锥仪测得的液限时不排水抗剪强度 c_u 值见表4。表3与表4上强度比较表明,瑞典圆锥仪液限强度值与硬底座碟式仪液限强度值吻合,而英国BS圆锥仪(80g, 30°, 20mm)液限强度值接近于软底座碟式仪液限强度值。苏联ГOCT圆锥仪(76g, 30°, 10mm)液限强度值过高,约为卡萨格兰德硬底座液限强度值的4倍。我国水利电力部土工试验规程SD128-84圆锥

表4

圆锥仪液限强度 c_u

圆锥仪	c_u		资料来源
	(kPa)	(gf/cm ²)	
瑞典 (60g, 60°, 10mm)	1.5—2.1(1.7)	15—21(17)	卡尔森1961. ^[15]
BS (80g, 30°, 20mm)	1.6	16	怀特1982. ^[14]
	2.2	22	罗思等1978. ^[25]
	8.5	85	斯科皮克、塔-斯蒂帕尼恩1975. ^[33]
ГOCT (76g, 30°, 10mm)			
SD128-84(76g, 30°, 17mm)	1.3—2.8(1.91)	13—28(19.1)	SD128-84, 1987. ^[22]
JTJ051-81(100g, 30°, 20mm)	1.2—2.7(1.86)	12—27(18.6)	JTJ051-81, 1982. ^[23]

注:圆括弧()内为平均值

仪(76g, 30, 17mm)液限强度值1.91kPa与交通部公路上工试验规程JTJ051-81圆锥仪(100g 30°, 20mm)液限强度值1.86kPa都对应于ASTM硬底座碟式仪的液限强度值。

搓滚法测塑限时粘性土的强度值如表5所示。表5中塑限强度范围为20—320kPa, 平均114kPa。

SD128-84圆锥仪(76g, 30°, 2mm)塑限强度与搓滚法塑限强度值如表6所示, 表6上塑限强度都较表5上搓滚法塑限强度平均值114kPa为高, 是项可探索的课题。

表5

搓滚法塑限强度 c_u

搓滚法塑限强度 c_u		资料来源
(kPa)	(gf/cm ²)	
85—125(110)	850—1250(1100)	斯肯普顿、诺塞伊1952. ^[32]
30—320(115)	300—3200(1150)	登内利(Dennely)1978. ^[14]
20—220(110)	200—2200(1100)	阿诺史密斯(Anowsmith)1978. ^[14]
25—280(130)	250—2800(1300)	阿诺史密斯1979. ^[14]
170*	1700*	罗思等1978. ^[25]
110	1100	怀特1982. ^[14]

注:圆括弧()内为平均值

* 此值由 $(c_u)_p/(c_u)_l = 100$ 的假定及 $(c_u)_l = 1.7\text{kPa}$ 计算得出。

表6

搓滚法与圆锥法塑限强度 c_u

测塑限法	塑限强度		资料来源
	(kPa)	(gf/cm ²)	
搓滚法	61—201(140)	610—2010(1400)	SD 128-84, 1987. ^[22]
圆锥法(76g, 30°, 2mm)	98—206(153)	980—2060(1530)	SD 128-84, 1987. ^[22]

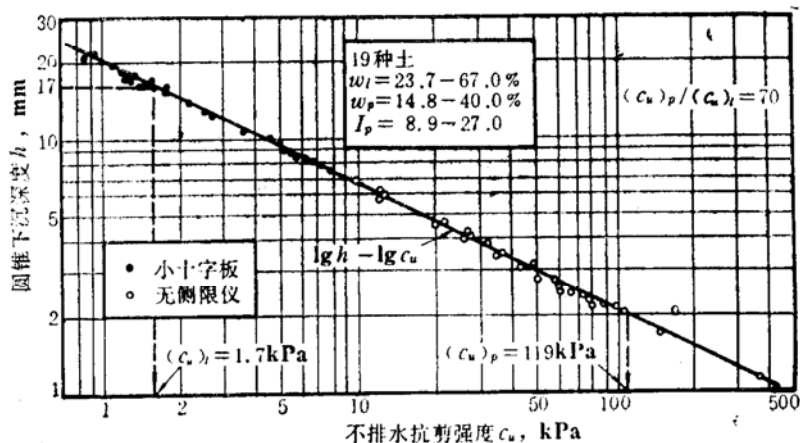
五、液塑限时强度试验的研讨

从斯肯普顿和诺塞伊(Skempton, A. W. and Northey, R. D, 1952)起, 汉斯博(1957)、诺曼(1958)、卡尔森(1961)、尤西弗等(Youssef, M. S., et al., 1965)、舍伍德和赖利(1970)、罗思和伍德(1978)、怀特(1982)、伍德(1985)以及我国各单位进行了液限试验方面含水量、强度与圆锥下沉深度相互关系的试验研究。由方程(7), 强度 c_u , 圆锥下沉深度 h 与圆锥仪质量 P 的关系为

$$c_u h^2 = k P \quad (11)$$

用一个锥进行试验时锥的质量 P 为定值, 故令 $\lg(kP) = a_1$, a_1 为实验常量, 则上式取对数后, 得

$$\lg c_u = a_1 - 2 \lg h \quad (12)$$

图3 圆锥下沉深度与不排水抗剪强度的关系(聂守智,1983)^[35]

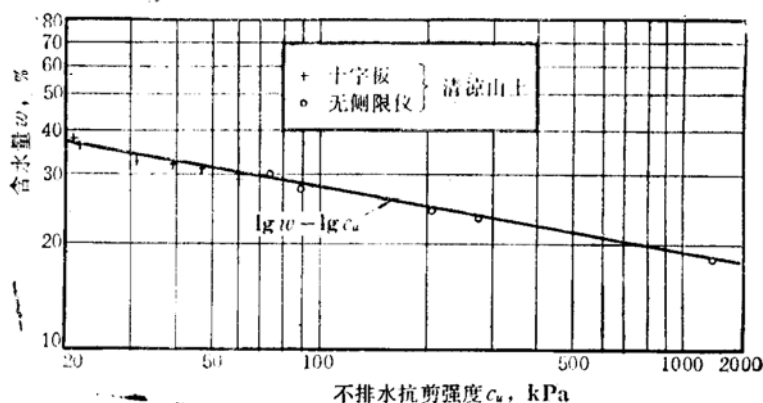
方程(12)如图3所示。图3为安徽省水利科学研究所19种土的76g, 30°圆锥下沉深度 h (mm) 与不排水抗剪强度 c_u (kPa) 的双对数值关系。图3表明, 76g, 30°圆锥下沉深度 $h = 17$ mm 时液限强度 $(c_u)_l = 1.7$ kPa, 而 $h = 2$ mm 时塑限强度 $(c_u)_p = 119$ kPa, 故 $(c_u)_p / (c_u)_l = 70$ 。显然, 它与图7上BS圆锥仪所得 $(c_u)_p / (c_u)_l = 70$ 是吻合的。

清凉山粘性土的含水量与不排水抗剪强度的双对数值关系是一条直线, 如图4所示, 其方程为

$$\lg c_u = a_2 - m \lg w \quad (13)$$

式中 a_2 与 m 都是实验常量。消去方程(12)与(13)中的 $\lg c_u$, 并令 $\frac{1}{2}(a_1 - a_2) = a_3$, 则得

$$\lg h = a_3 + \frac{m}{2} \lg w \quad (14)$$

图4 含水量与强度的关系(南京水利科学研究院,1982)^[36]

方程(14)表明, 圆锥下沉深度 h 随含水量 w 的双对数值关系也是一条直线, 如图5所示。由图5得出, 76g, 30°圆锥下沉深度 $h = 17$ mm 和 2 mm 时的液限 $w_l = 56.7\%$ 和塑限 $w_p = 25.1\%$ 。尤西弗等^[81]得出了埃及26种不同粘性土用20mm×10mm室内十字板量测的不排水

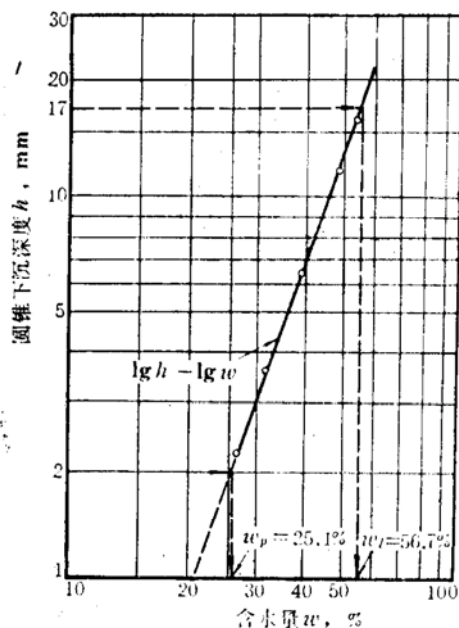


图5 圆锥下沉深度与含水量的关系(SD128-84, 1987)^[22]

抗剪强度随含水量的双对数值关系也是直线，而液限与强度的双对数值关系是另一条直线。后一关系表明硬底座碟式仪液限范围22%—200%内的不排水抗剪强度范围为1.3—2.4kPa，平均值约1.7kPa。故硬底座碟式仪液限强度1.7kPa，与表3中液限强度的最佳估计值是一致的。

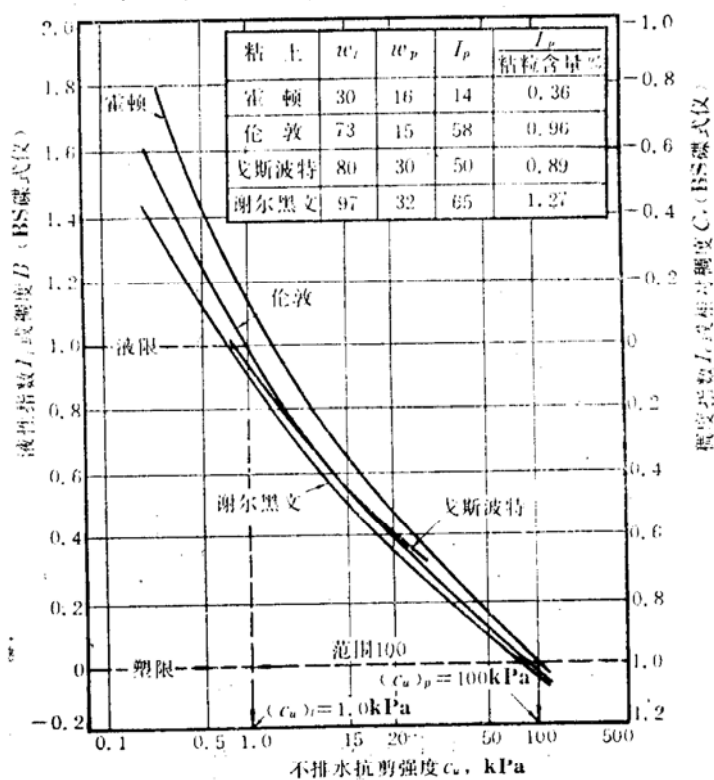


图6 液性指数(BS碟式仪)与强度的关系(斯肯普顿、诺塞伊, 1952)^[32]

图6表示搓滚法测得的塑限强度 $(c_u)_p = 100\text{kPa}$ 与BS软底座碟式仪测得的液限强度 $(c_u)_l = 1\text{kPa}$ 之比为^[87]

$$\frac{(c_u)_p}{(c_u)_i} = 100 \quad (15)$$

图 7 表示搓滚法测得的塑限强度 $(c_u)_p = 110 \text{ kPa}$ 与 BS 圆锥仪测得的液限强度 $(c_u)_l = 1.6 \text{ kPa}$ 之比为

$$\frac{(c_u)_p}{(c_u)_i} = 70 \quad (16)$$

根据尤西弗等的硬底座碟式仪液限强度 1.7kPa (与图3吻合)及斯肯普顿和诺塞伊报导的方程(15)中的100倍,估计塑限强度为 170kPa 。显然,尤西弗等的硬底座碟式液限强度与英国BS软底座碟式仪液限强度不能相关,故由此推算求得的塑限强度 170kPa 是不很可靠的。

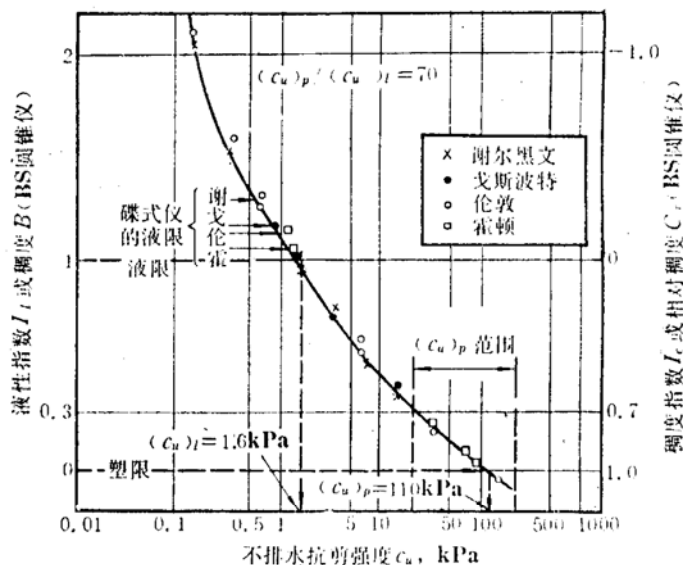


图7 液性指数(BS圆锥仪)与强度的关系(斯肯普顿、诺塞伊,1952)^[32]

六、测塑限法的可能发展

搓滚法测塑限一直沿用至今,但此测法人为因素过大,试验结果复现性差,为此先后提出了最大分子吸水量法、压饼法、楔锥法和针棒法代替圆锥法(戈里特什腾Гольдштейн, М. Н., 1952)^[3],还有压挤试验、吸力法、固结法、线缩法、圆锥仪法以及挤出法等(怀特, 1982)^[14]。以上各法中,目前采用圆锥仪法测塑限(SD128-84)。此法虽然简捷,但它常是间接外插推算法(见图5)^[22,38],含水量时测点(w, h)往往飘离直线,引起不正确,实际上此法不是直接实测圆锥下沉深度2mm时的含水量为塑限。怀特提出了制砖与型钢工业方面的挤出法(extrusion)测塑限,可能是最有发展前途的方法。此法模拟搓滚法中土条受剪而断裂的状态,有着合理的力学基础,且较简单、经济、可靠。为此,现将挤出法测塑限的设备与初步成果,作一介绍与说明,以便进一步试验研究。

怀特采用两种方法进行土的挤出,一是直接挤出,另一是反向挤出,如图8所示。两种挤出试验得出了挤荷载与行程关系曲线,如图9所示。由此图,确定挤荷载 P_E 。挤出仪的

试件面积为 A ，故挤压强 $p = P_E/A$ 。

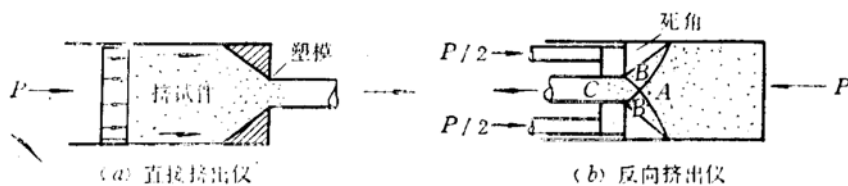


图8 挤出仪

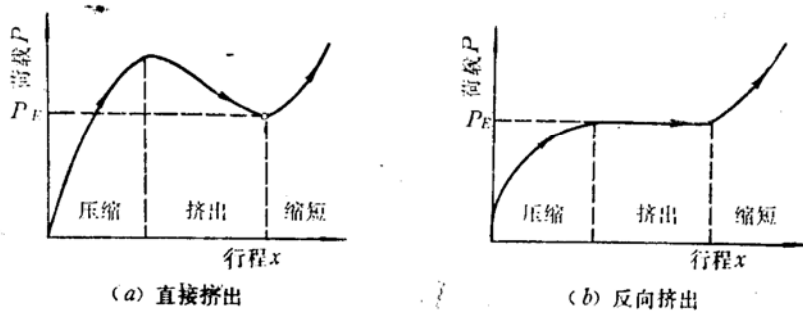


图9 挤荷载与行程的关系

制砖工业中，大量试验证明挤压强与试件面积缩减率之间存在着下列关系：

$$\frac{p}{\sigma_y} = a + b \ln \frac{A}{A_0}$$

其中 A_0 为塑模孔口的面积； σ_y 为剪切中的屈服应力； a, b 为实验常量。

反向挤出试验中，按一定速度推进土料 A 进行塑性模拟，如图8(b)所示。当土料达到剪切区 B 时，土料在塑模作用下局部受剪与流动，并发生破坏，塑模作用又使土料形成土杆 C 。土试件内形成此种塑性屈服，这就说明挤出试验是测定粘性土塑性的合适方法。用下列关系可表示挤压强与试件面积缩减率的关系：

$$\frac{p}{c_u} = a' + b' \ln \frac{A}{A_0} \quad (17)$$

式中 c_u 为土料的不排水抗剪强度； a', b' 为实验常量。

低塑性粘土($w_l = 32.5\%$, $w_p = 16.5\%$)用反向挤出仪(试件直径38mm，塑模孔口直径3, 6, 9.5, 15.5mm)作挤出试验及不排水抗剪强度 c_u 试验，得出下列关系(如图10所示)：

$$\frac{p}{c_u} = 1.6 + 4.3 \ln \frac{A}{A_0}$$

又得出不同面积缩减率 $\frac{A}{A_0}$ 或不同的以不排水抗剪强度归一化的挤压强 $\frac{p}{c_u}$ 下挤压强 p 与挤

出土的含水量关系，如图11所示。由图11上的挤压强值，得出塑限16.5%时相应的不排水抗剪强度 c_u 值为

$\frac{A}{A_0}$	160	40	13	9.5	平均
$c_u(\text{kPa})$	119	114	113	116	116

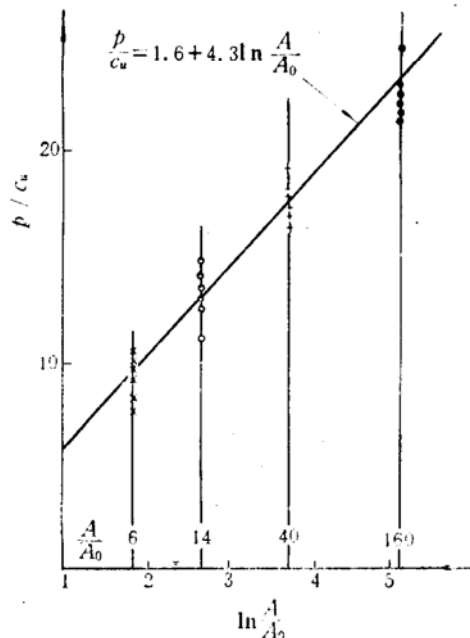


图10 挤压强对不排水抗剪强度之比
与面积缩减的关系

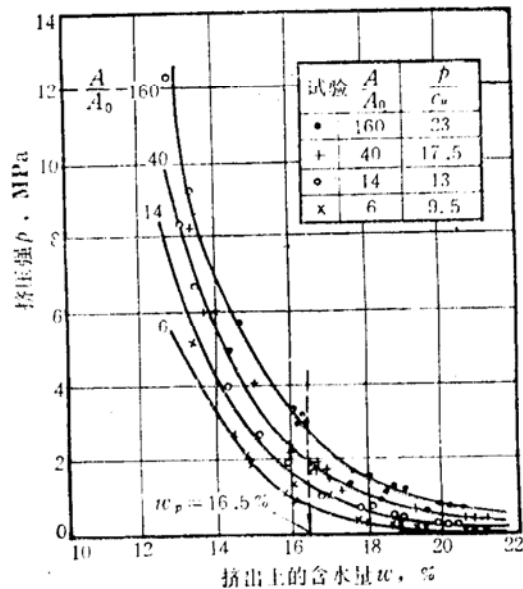


图11 挤压强与含水量的关系

塑限时不排水抗剪强度116kPa与搓滚法塑限强度平均值114kPa是可对应的。

以上只是挤出试验的初步成果, 看来有进一步试验研究的必要。

七、结 语

本文综述、分析和研讨了70多年来稠度指标性质的试验研究成果以及测塑限法的可能发展。

测液塑限法的依据标准是重塑粘性土含水量与强度之间的唯一关系。

卡萨格兰德或ASTM硬底座碟式仪液限强度1.7kPa, 瑞典圆锥仪液限强度1.7kPa, 英国BS圆锥仪液限强度1.6kPa与SD128-84标准圆锥仪液限强度1.7kPa是吻合的。

搓滚法塑限强度平均值114kPa与SD128-84标准圆锥仪塑限强度119kPa是吻合的。

搓滚法塑限强度110kPa(图7)对BS圆锥仪液限强度1.6kPa之比 $(c_u)_p/(c_u)_l$ 等于70与SD128-84标准圆锥仪塑限强度119kPa对此圆锥仪液限强度1.7kPa之比等于70是吻合的。但与搓滚法塑限强度100kPa(图6)对BS软底座碟式仪液限强度1.0kPa之比等于100是不吻合的。

反向挤出仪塑限强度116kPa与搓滚法塑限强度平均值114kPa是吻合的, 故可用反向挤出法作为测塑限的新方法, 它简单、经济、可靠, 又合乎力学与塑性模拟的原理。

参 考 文 献

- [1] Means, R.E. and Pacher, J.V., Physical Properties of Soils, Oklahoma State University, Second Printing, 1964.
- [2] Craig, R.F., Soil Mechanics, Third Edition, Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd., 1983.
- [3] Гольдштейн, М. Н., Механические свойства грунтов, Литературы по строительству и архитектуре, Москва, 1952.
- [4] 周鸿逵、蒋淑青、张焯英, 液限、塑限标准的选定, 岩土工程学报, 第7卷, 第4期, 1985年, 第86—93页。
- [5] 周序源、张剑峰, 界限含水量试验的现状与展望, 岩土工程学报, 第7卷, 第3期, 1985年, 第90—99页。
- [6] 饶鸿雁, 土的液塑限联合测定法的改进, 岩土工程学报, 第5卷, 第1期, 1983年, 第51—64页。
- [7] British Standard Institution, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes, BS 1377: 1975, London: BSI, pp. 17—25.
- [8] ASTM, Standard Test Method for Liquid Limit of Soils, D423—66 (Reapproved 1972) and Standard Test Method for Plastic Limit and Plasticity Index of Soils, D 424-59(Reapproved 1971), ASTM Standard of Geotechnical Engineering Test, American National Standard, 1982, pp. 126—131.
- [9] 俞调梅, 关于亚德伯流性限度试验的讨论, 工程建设, 1953年第35期, 第7—15页。
- [10] 南京水利实验处, 土工试验手册, 水利出版社, 1952年。
- [11] Casagrande, A., Research on the Atterberg Limit of Soils, Publ. Rds., Vol.13, 1932, 121—130, 136.
- [12] Casagrande, A., Notes on the Design of the Liquid Limit Device, Geotechnique, Vol. III, No.2, 1958, pp.84—91.
- [13] Norman, L.E.J., A Comparison of Values of Liquid Limit Determined with Apparatus having Bases of Different Hardness, Geotechnique, Vol. VII, No.2, 1958, pp.79—83.
- [14] Whyte, I.L., Soil Plasticity and Strength—A New Approach Using Extension, Ground Engineering, Vol.15, No.1, 1982, pp.16—24.
- [15] Karlson, R., Suggested Improvements in the Liquid Limit Test, with Reference to Flow Properties of Remolded Clays, Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engrg., Vol. 1, 1961, pp.171—184.
- [16] Garneau, R. and LeBihan, J.P., Estimation of Some Properties of Champlain Clays with the Swedish Fallcone, Canadian Geotechnique Journal, Vol. 14, No.4 1977, pp.571—581.
- [17] Васильев, А.М.(1947), Basic Principles of the Methods and Techniques of Laboratory Determination of Physical Soil Properties, Pochvovedenie, Vol.11, 1949, pp. 675—676.
- [18] Sherwood, P.T. and Ryley, M.D., An Investigation of a Cone-penetrometer Method of the Determination of the Liquid Limit, Geotechnique, Vol. 20, No. 2, 1970, pp.203-208.

- [19] Uppal, H.L. and Aggarward, H.R., A New Method of Determining the Liquid Limit of Soils, Road Research Paper, No.19, New Delhi, 1958.
- [20] Sowers, G.S., Vesic, A. and Grandolfi, M., Penetration Tests for Liquid Limit, ASTM, STP. 254, 1960, pp.216—226.
- [21] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Determination Lapide des Limites d'Atterberg à l'aide, d'un Penetratromètre et d'un Picnomètre d'air, Paris, Dossier SGR/149, 1966.
- [22] 水利电力部, 土工试验规程, SD 128-84, 第1分册, 第2版, 水利出版社, 1987.
- [23] 交通部, 公路土工试验规程, JTJ051-81, 1982.
- [24] Hansbo, S., A New Approach to the Determination of the Shearing Strength of Clay by the Fall-cone Test, Proc.R. Swed, Geotech. Inst, No.14, 1957.
- [25] Wroth, C.P. and Wood, D.M., The Correlation of Index Properties with Some Basic Engineering Properties of Soils, Can. Geotech. J., Vol. 15, No.2, 1978, pp. 137—145.
- [26] Houlsby, G.T., Theoretical Analyses of the Fall-cone Test, Geotechnique, Vol. 32, No.2, 1982.
- [27] Wood, D.W., Some Fall-cone Tests, Geotechnique, Vol.35, No.1, 1985.
- [28] 俞调梅, 圆球体和圆锥体压入塑性体内的问题以及这个问题在土力学及其它工程科学上的应用, 新港现场试验工作组, 1959年1月。
- [29] 梅剑云, 流限试验、塑限试验、天然稠度试验说明书, 水利部土工试验操作规程, 水利出版社, 1956年, 第244—255页。
- [30] Seed, H.B., Woodward, R.J. and Lundgren, R., Fundamental Aspects of the Atterberg Limit, ASCE Journal of the Soil Mech. and Foundation Division, Vol.90, SM4, 1964, pp. 107—131.
- [31] Youssef, M. S., El. Ramli and El. Demery, Relationship between Shear Strength, Consolidation, Liquid Limit and Plastic Limit for Remolded Clays, Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engrg., Vol. 1, 1965, p.126.
- [32] Skempton, A.W. and Northey, R.D., The Sensitivity of Clays, Geotechnique, Vol. III, 1952, pp.30-53.
- [33] Skopek, J. and Ter-Stepanian, G., Comparison of Liquid Limit Values Determined according to Casagrande and Vasiler, Geotechnique, Vol.25, No.1, 1975, p.133.
- [34] 杨灿文, 土壤液性限度的讨论, 铁道部铁道研究所, 1954年。
- [35] 聂守智, 土的液塑限及强度, 安徽省水利科学研究所, 1983年。
- [36] 南京水利科学研究所, 土体在液限状态时的强度, 1982年。
- [37] 龚宜、盛树馨、马梅英, 土工实验室测定技术, 水利电力出版社, 1987年, 第7页。
- [38] Harison, J.A., Using the BS Cone Penetrometer for the Determination of the Plastic Limit of Soils, Geotechnique, Vol.38, No. 3, 1988, pp. 433—438.

State-of-the-art of Consistency Limits Tests

Jiang Pengnian

(Nanjing Hydraulic Research Institute)

Abstract

In this paper, presented are the results of experimental studies during the past seventy years on the index properties of cohesive soils at two consistency limits, that is, the liquid and plastic limits. Based on the correlation that the undrained shear strength of remolded cohesive soils depends solely on their water content, the strength properties at liquid limit and at plastic limit have been evaluated. Finally, the reversal extrusion method, as a new method for determining plastic limit according to the corresponding shear strength characteristics are described and considered to be promising future development. This method is simple, economic, reliable and acceptable in accordance with the principles of mechanics and plasticity.