

用 XC-1 型袖珍触探仪测定液塑限的新方法

聂守智

(安徽省水利科学研究所, 蚌埠, 233000)

1 前言

液限和塑限是划分土类和评估土的稠度的两个重要指标, 在工程实用上极为重要。目前测定液限的方法主要为碟式仪法和圆锥仪法。测定塑限的方法主要为搓滚法和圆锥仪法。许多学者认为液、塑限定义不科学, 物理量不明确, 试验成果不稳定, 建议用不排水抗剪强度相应的含水量定义为液、塑限的标准^[1,2]。本文建议用 XC-1 型袖珍触探仪 (以下简称触探仪) 进行液、塑限联合试验, 此法简单、可靠、又合乎力学原理。

2 液限与塑限时强度

各国学者曾对液限和塑限时强度进行过十字板试验和三轴剪切试验, 试验结果见以下各表:

表 1 碟式液限时不排水抗剪强度 c_{uL}

基底材料	c_{uL}	资料来源
硬橡胶	2.5	西德等 (Seed H B, et al, 1964) ^[3]
层状酚塑料	2.0~3.0 (2.7)	卡萨格兰德 (Casagrande A, 1958) ^[3]
ASTM 标准 (硬底座)	1.1~2.8 (1.8)	诺曼 (Norman L E J, 1958) ^[3]
	1.3~2.5 (1.7)	尤西弗等 (Youssef M S, et al, 1965) ^[3]
	0.5~4.1 (1.7)	卡尔森 (Karlson R, 1977) ^[3]
	0.8~2.9 (2.0)	SD128-84 (1987) ^[4]
BS 橡胶	0.8~1.6 (1.3)	诺曼 (1958) ^[3]
BS1377 标准 (软底座)	0.7~1.5 (1.0)	斯肯普顿、诺塞伊 (Skempton A W, Northey R D, 1952) ^[3]
	1.0~3.0	斯科皮克、塔-斯蒂帕尼恩 (Skopek J, Ter - Stepanian G, 1975) ^[3]

注: 括弧内数值为平均值。

表 2 76g 圆锥仪液限时不排水抗剪强度 c_{uL}

土样数 (个)	圆锥入土深度 (mm)	放锥方法	c_{uL} (kPa)	资料来源
	10	人手快放	4.7~5.4	文献 [2]、[5]
19	10	人手快放	3.0~7.6 (4.7)	文献 [6]
15	10	电磁放	3.1~6.6 (5.3)	文献 [4]
14	10	人手快放	2.7~6.8 (4.7)	文献 [6]
19	17	人手快放	(1.6)	文献 [2]
19	17	人手快放	(1.7)	文献 [3]
15	17	电磁放	1.3~2.8 (1.9)	文献 [4]

注：括弧内数值为平均值。

表 3 搓滚塑限时的不排水抗剪强度 c_{uP}

土样数 (个)	c_{uP} (kPa)	资料来源
	85~125 (110)	斯肯普顿、诺塞伊 (1952) ^[3]
	30~320 (115)	登内利 (Dennely, 1978) ^[3]
	20~220 (110)	阿诺史密斯 (Anowsmith, 1978) ^[3]
	25~280 (130)	阿诺史密斯 (1979) ^[3]
	(170)	罗思等 (Wroth C P, et al. 1978) ^[3]
	(110)	怀特 (Whyte I L) ^[1]
15	61~201 (140)	文献 [4]
19	35~255 (109)	文献 [6]

注：括弧内数值为平均值。

表 4 76g 圆锥入土 2mm 塑限时的不排水抗剪强度 c_{uP}

土样数 (个)	放锥方法	c_{uP} (kPa)	资料来源
19	人手快放	61~255 (118)	文献 [6]
	人手快放	(116)	文献 [2]
	人手快放	(119)	文献 [3]
	电磁放	98~206 (153)	文献 [4]

注：括弧内数值为平均值。

从表 1、表 2 可看出，碟式液限时的平均不排水抗剪强度在 1.0~2.7kPa 之间，76g 圆锥仪入土 17mm 液限时的平均不排水抗剪强度在 1.6~1.9kPa 之间，采用 1.7kPa 相应的含水量定义为液限的标准比较接近我国和国际液限的标准。

从表 3、表 4 可看出，搓滚塑限时的平均不排水抗剪强度在 109~140kPa 范围内，圆锥法塑限时的平均不排水抗剪强度在 116~153kPa 范围内，建议采用 118kPa 相应的含水量定义为塑限的标准比较靠近我国和国际塑限的标准。

3 XC-1 型袖珍触探仪的主要规格

在 XC-1 型袖珍触探仪主要由量表、套筒、弹簧和锥头等组成。如图 1 所示。1 号锥锥角 30° ，投影面积为 0.3217cm^2 ；2 号锥锥角 30° ，投影面积为 0.7088cm^2 ；3 号锥锥角 60° ，投影面积为 1.7672cm^2 。弹簧系数采用天平率定。河海大学土力学实验室经过近 2 年的应用，认为该仪器是一种测试精度较高、应用范围广泛、而且积累相当多使用经验的简便测试仪器^[7]。

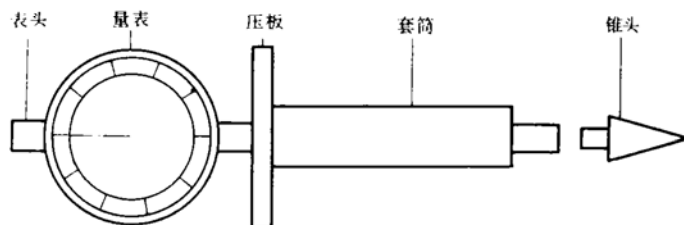


图 1 袖珍触探仪示意图

4 锥头阻力与土的强度

汉斯布 (1957)、罗思·伍德 (1978) 卡尔森 (1961) 和笔者 (1975) 先后提出，粘性土的排水抗剪强度

$$c_u = KP/h^2 \quad (1)$$

式中 P, h 分别为锥重和锥头入土深度； K 为无量纲常数（随锥角而异），笔者根据极限平衡理论推出 30° 锥的 $K \approx 0.493^{[5,8]}$ 。用它计算出的排水抗剪强度与小十字板试验、三轴剪切试验和直接剪切试验的结果基本一致^[2,5,9]。

用触探仪测定粘性土的强度时，锥头入土深度等于锥高。 h 为常数，触探力 P 为变数。对一个给定的触探仪

$$c_u = K'R \quad (2)$$

式中 $K' = K \tan^2 \frac{\alpha}{2} \pi \cdot (K_1/a)$ ； R 为量表读数； α 为锥角； a 为圆锥投影面积； K_1 为弹簧系数。

烈别捷尔提出的理论公式为

$$\tau = P \cos^2 \frac{\alpha}{2} / (\pi h^2 \tan \frac{\alpha}{2}) \quad (3)$$

式中 τ 为锥体与土接触面上的极限剪应力； α, P 和 h 分别为锥角、锥重和锥头入土深度。

实际上，锥面十分光滑，试验时又在锥面涂以润滑油脂，锥体与土接触面上的阻力极小，锥重主要靠锥体与土面上的法向应力的支持，而法向应力又是靠土的排水抗剪强度维持平衡的。笔者 (1974) 给圆锥面涂以滑润油脂，慢慢将其沉入土中，等圆锥停止下沉后，提起圆锥仪，向锥孔灌满润滑油，消除锥体与土接触面上的剪阻力，再把圆锥慢慢放入原

孔,圆锥并未因此而再下沉。说明烈别捷尔提的圆锥沉入土中,锥重由锥体与土接触面上的极限剪应力维持平衡的理论是不符合实际的。

5 液限、塑限联合试验

按土工试验规程制备土样和装样,取出触探仪,装好锥头,使表针指零,用手握住仪器,把锥头匀速压入土中,至入土深度等于锥高为止。记录量表读数。按上述方法,在土杯内重复3~5次做平行试验,在其平均读数按强度公式计算土的不排水抗剪强度 c_u 。测其含水量 $w\%$ 。在双对数坐标纸上点绘 c_u 和 $w\%$,通过各点连一直线, $\lg c_u - \lg w$ 线与液限强度交点的含水量即为液限,与塑限强度交点的含水量即为塑限,如图2所示。

笔者对1984年土工试验规程修订液、塑限对比试验时用的土样,前后用触探仪进行三次液、塑限联合试验,测得的液限、塑限和13个单位用圆锥仪所测得的液、塑限基本一致,如表5所示。说明用触探仪测定液、塑限是可靠的。

土的液性指数按常规试验法需要进行液、塑限和天然含水量试验才能求出,颇为麻烦。笔者曾先后提出无侧限抗压强度和相对稠度之间的关系^[8],液性指数和不排水抗剪强度之间的关系^[2,5]。如果工程单位只需要液性指数,则只需对重塑土(保持天然含水量)进行触探试验,计算出土的强度,即可从所给的液性指数和强度关系图上查出液性指数。它与常规试验测得的液性指数基本一致^[2,7]。

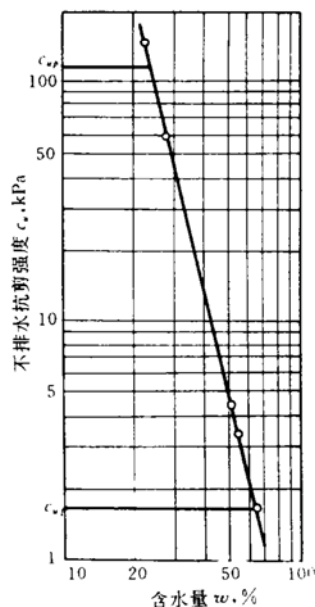


图2 强度和含水量关系图

6 触探仪测定液限、塑限的特点

用触探仪测定液、塑限具有以下优点:

a) 用常规法进行液、塑限时,由于土呈粒状,而使土面凸凹不平,同时锥尖与土面的接触是在土面上升过程中确定的,锥头入土深度不易测得准确。由于强度与圆锥下沉深度的平方成反比,圆锥下沉深度的测试精度对试验成果影响甚大。用触探仪试验时,强度与量表读数成一次方的关系,而且在土样上重复3~5次平行试验,用其平均值计算土的强度,试验成果比较稳定。

b) 圆锥仪法, $\lg h - \lg w$ 的直线斜率 $\Delta \lg h / \Delta \lg w = B$ 。根据 $\lg h - \lg w$ 和 $c_u = KP/h^2$ 的关系可推出触探试验 $\lg c_u - \lg w$ 为直线关系,其斜率为 $-2B$ 。当 $\Delta \lg w$ 相同时, $\Delta \lg c_u$ 为 $\Delta \lg h$ 的二倍,因而触探仪比圆锥仪能更精确地确定土的液限和塑限。

c) 用圆锥仪进行液、塑限试验有冲击力,使力学理论分析复杂化。用触探仪进行液、塑限试验无冲击力,符合静力分析原理,故用静力理论公式计算出的强度和直接剪切试验、

三轴剪切试验的不排水抗剪强度基本一致^[7,10]。

表 5 圆锥仪和触探仪的液塑限试验值

土号	试验方法	液限 w_L (%)				塑限 w_P (%)
		76g 圆锥 入土深度 10mm	76g 圆锥 入土深度 17mm	100g 圆锥 入土深度 20mm	80g 圆锥 入土深度 20mm	76g 圆锥 入土深度 2mm
江苏红	①	33.7 (32.3~35.2)	42.4 (40.4~45.1)	41.9 (40.5~43.5)	43.7 (42.0~45.0)	18.7 (17.8~19.7)
	②	34.0 (33.0~35.0)	41.9 (40.7~43.0)	42.3 (41.0~43.5)	43.0 (42.0~44.0)	19.9 (19.5~20.5)
西规 1	①	27.3 (26.4~28.5)	32.3 (29.8~34.6)	32.6 (31.2~33.8)	33.9 (32.4~35.5)	17.2 (15.5~18.6)
	②	26.7 (26.5~26.8)	30.9 (30.3~31.3)	31.4 (31.2~31.5)	31.4 (31.3~31.5)	16.8 (16.5~17.0)
西规 2	①	22.4 (21.3~23.2)	26.1 (23.8~28.6)	26.1 (25.0~26.6)	26.9 (26.2~28.2)	14.9 (12.1~17.7)
	②	23.7 (23.0~24.5)	27.6 (26.7~28.5)	27.8 (26.5~29.0)	27.9 (26.7~29.0)	15.7 (15.0~16.0)
东北黑	①	37.8 (36.5~39.0)	45.5 (42.8~50.0)	43.0 (41.2~47.1)	45.4 (43.3~49.6)	22.8 (21.4~24.5)
	②	35.9 (35.0~36.8)	42.6 (41.2~44.0)	42.9 (41.5~44.2)	43.0 (41.7~44.4)	22.8 (22.0~23.0)
东北白	①	75.7 (71.0~78.1)	96.4 (91.5~103.0)	92.8 (88.0~99.6)	97.7 (92.5~105.0)	39.2 (33.7~45.0)
	②	76.7 (76.0~77.0)	96.5 (95.0~97.5)	97.4 (96.3~98.0)	98.0 (96.7~98.7)	39.9 (39.0~40.7)
山西	①	24.7 (23.7~25.9)	28.8 (26.4~30.1)	28.6 (27.5~29.5)	29.5 (28.0~31.0)	16.1 (15.2~18.1)
	②	25.9 (25.6~26.4)	30.0 (30.0~30.1)	30.1 (30.0~30.2)	30.3 (30.2~30.4)	16.7 (16.5~17.0)
广东	①	56.2 (53.0~59.5)	69.2 (62.5~75.0)	68.3 (63.0~73.5)	72.4 (64.8~79.5)	31.6 (26.8~34.5)
	②	55.0 (54.0~56.0)	67.0 (66.0~68.0)	67.8 (66.3~69.0)	67.9 (66.5~69.0)	33.6 (32.7~34.0)
四川	①	49.2 (48.0~51.2)	65.3 (61.3~69.9)	65.1 (60.0~68.2)	67.6 (63.0~71.0)	23.3 (21.7~25.6)
	②	48.4 (48.0~49.0)	63.5 (62.3~65.5)	63.6 (62.5~64.4)	63.6 (62.5~64.5)	24.2 (24.0~24.5)
皖 3	①	45.6 (41.4~47.2)	56.7 (50.0~61.0)	56.8 (53.3~60.0)	58.5 (56.0~61.5)	23.5 (21.8~25.5)
	②	45.2 (44.0~46.0)	57.7 (56.0~59.0)	58.2 (56.0~60.0)	58.5 (56.0~60.0)	22.7 (22.5~23.0)
广西 7	①	62.9 (60.3~67.0)	74.8 (70.7~78.7)	72.8 (64.4~76.8)	76.6 (72.5~79.0)	38.6 (36.5~42.2)
	②	61.9 (61.3~63.0)	74.2 (72.0~76.0)	75.1 (72.5~77.0)	76.3 (74.0~78.0)	37.0 (36.0~37.7)
广西 9	①	71.8 (64.0~77.3)	86.1 (80.4~91.5)	82.5 (73.5~93.0)	85.9 (74.0~99.0)	45.1 (41.3~50.0)
	②	73.8 (70.5~75.7)	88.7 (84.0~92.0)	89.3 (84.0~93.0)	90.5 (85.5~94.0)	45.9 (45.0~47.0)
沪灰	①	32.5 (31.0~33.6)	38.8 (37.1~40.1)	38.1 (35.2~39.7)	39.5 (38.2~40.6)	20.3 (19.5~21.8)
	②	33.4 (33.0~34.0)	39.0 (38.0~40.0)	39.4 (38.3~40.5)	39.8 (38.5~40.7)	21.2 (21.0~21.3)
沪白	①	60.3 (56.6~64.0)	76.2 (72.0~81.5)	75.8 (71.1~80.6)	80.4 (73.4~85.5)	32.8 (30.0~35.0)
	②	63.0 (62.0~64.0)	77.5 (76.0~80.0)	78.2 (76.5~80.5)	78.4 (76.7~81.0)	36.3 (35.0~37.0)
长院	①	53.6 (50.3~56.5)	69.4 (62.0~73.0)	68.6 (65.3~74.4)	72.1 (68.0~79.0)	26.5 (24.2~28.4)
	②	52.7 (51.5~53.6)	69.1 (67.0~70.3)	69.6 (67.7~71.3)	70.3 (68.0~71.8)	25.9 (25.4~26.8)

注：①圆锥仪试验；②触探仪试验；括号内数值为其最小、最大值。

根据圆锥入土深度与土的强度理论公式计算，76g 锥入土 17mm 液限时强度 $c_u = K \times 2.63\text{kPa}$ ，100g 锥入土 20mm 液限时强度 $c_u = K \times 2.5\text{kPa}$ ，前者大于后者，其液限应该是前者小于后者。但是表 5 用圆锥仪测的液限有许多都不符合这一原理，而用触探仪测定的液限全都符合这一原理，说明用触探仪测定液、塑限的合理性和可靠性。

7 结 语

以不排水抗强度相应的含水量定义为液、塑限的标准，不仅有明确的物理量，而且更科学，建议以不排水抗剪强度 1.7kPa 和 118kPa 相应的含水量分别定义为液限和塑限的标准。这比较靠近我国和国际液、塑限的标准。

重塑粘性土的强度 c_u 与含水量 w 在双对数坐标纸上为直线关系， $\lg c_u - \lg w$ 直线的斜率 $\Delta \lg c_u / \Delta \lg w$ 为 $\lg h - \lg w$ 直线斜率 $\Delta \lg h / \Delta \lg w$ 的二倍，所以用 $\lg c_u - \lg w$ 比用 $\lg h - \lg w$ 确定的液、塑限更精确。而且该重塑土的任何含水量相应的强度都能直接从 $\lg c_u - \lg w$ 关系图上得出。对土工试验研究和工程应用具有重要意义。

用触探仪进行液、塑限联合试验，可同时得出 76g 锥和 100g 锥的液、塑限以及英国 1.6kPa 的液限，110kPa 的塑限，方法简单，不需电源，无冲击力，精确、可靠，又合乎力学原理。

参 考 文 献

1 Whyte I L. Soil Plasticity and Strength——A New Approach Using Extension. Ground Engineering, 1982, 15 (1): 16~24.

2 Nie S Z. The Liquid Limit, Plastic Limit and Strength of Clay Soils. 见：岩土工程论文选集. 北京：中国建筑工业出版社，1985，34.

3 蒋彭年. 稠度试验的研究现状与发展. 岩土工程学报，1989，11 (5): 1~16.

4 中华人民共和国水利电力部. 土工试验规程 (SD128-84). 第一分册. 第二版. 北京：水利电力出版社，1987. 239.

5 聂守智. 用圆锥试验确定粘性土性质指标的新方法. 岩土工程学报，1984，6 (6): 18~29.

6 聂守智. 土的液塑限标准和试验方法. 安徽省水利科学研究所，1985.

7 严蘊，姜朴. XC-1 型袖珍触探仪在路基土工试验中的应用. 治淮科技，1994 (2): 39.

8 聂守智. 圆锥入土深度和粘性土的无侧限抗压强度和地基承载力的关系. 安徽省水电局水利科学研究所，1974.

9 朱均玉. 使用 XC-1 型袖珍触探仪测试冲填土的强度. 安徽省水利科学研究所，1994.

10 聂守智，陈水菱. 袖珍触探仪的研制与应用. 安徽水利科技，1992 (3).

1995 年第 4 期勘误

页	行	误	正	页	行	误	正
100	9	粒组成	粒组组成	102	(式 (3))	7. 499	2. 898
101	6	本特	本构		例 1	超固结法比	超固结比
	7	土有	土的	103	2	固结应力 OCR	固结应力及 OCR
	11	改造	改变	104	(图 5)	粘粒	粉粒
	例 5	ϵ	ϵ_d	105	4	粉质	粉粒