

土的液限塑限联合测定

饶鸿雁

一、概 述

土的液限、塑限和塑性指数不仅表征了土的稠度状态，还反映了土的颗粒成分、矿物成分以及土的胶体化学性质，被广泛应用于土木工程。目前国内外普遍采用塑性指数或塑性指数与液限进行土的分类。由于土的稠度界限与土的物理力学性质存在密切的关系，根据这些简单的物理指标可以分析、判断土的物理力学特性。因此，正确测定土的液限与塑限，就具有更重要的实际意义。

所谓联合试验，就是用圆锥仪同时测定土的液限和塑限。方法是在不同含水量情况下，作入土试验，寻求入土深度（ h ）与含水量（ w ）之间的关系。此关系在双对数坐标上呈一直线，然后按液限塑限时入土深度标准，直接从图上查出土的液限和塑限值。

在修订“公路土工试验方法”的工作中，交通部公路科学研究所同交通系统有关科研、设计部门和部分高等院校十几个单位一起，着重对这两个问题进行了研究，共做了一千多个土样的系统比较试验，内容除颗粒大小的分析试验外，还包括按不同重量圆锥仪与不同类型碟式仪测定液限的比较，按搓条法与联合试验法测定塑限的比较，取得了配套试验数据，提出了用100g锥（锥角 30° ）测定液限塑限的联合试验法，其中液限入土深度采用 $h_L = 20\text{mm}$ ，塑限入土深度 h_P 为变值，以代替固定值^{[1][2]}。交通部《公路土工试验规程》也采用了这些规定^[3]。

《公路土工试验规程》由人民交通出版社出版发行后，关于液限标准和液限塑限联合试验方面的问题，在国内引起了强烈反映。水电部在修订联合试验的过程中，曾组织全国十三个单位对各地16种土用FG-Ⅱ型光电式液限仪进行了第二次液限塑限对比试验。试验内容除与上面列举的相同外，还作了不同标准下液限塑限的不排水抗剪强度试验。结果证明，按76g锥现行液限标准（入土深度 $h_L = 10\text{mm}$ ）所求得的液限值偏小；76g锥17mm和100g锥20mm的液限入土深度均可以达到与美国ASTM碟式仪等效的目的。纳入水电部84年土工试验规程^[5]中的联合试验，其塑限入土深度采用固定值，即 $h_P = 2\text{mm}$ 。

下面着重对76g锥现行液限标准的不合理性、液限塑限标准和联合试验等问题进行讨论。

二、76g锥现行液限标准的不合理性

液限是土从液体状态变成塑性状态的分界点。从理论上讲，液限就是土体的抗剪强度“从无到有”的分界点。分界点上含水量的数值代表土的液限值。测定液限的经典方法为摇碟法。自从阿太堡提出摇碟法并经卡氏几次改进设计后，到现今一直被世界各国作为土液限的标准而广泛应用。碟式液限仪的操作要求十分严格，由于存在对砂性震动“液化”现象及划沟

困难等问题，所以近年来各国趋向于用圆锥仪来测定液限，但仍以碟式仪为标准。各国采用的圆锥仪在标准上稍有出入，如表 1。

各国圆锥仪标准比较

表1

国 别	锥 重 (g)	锥 角 ($^{\circ}$)	液 限 标 准 (入土深度 h_1) (mm)	备 注
苏联(波氏)	300	30	32	ГОСТ5184-77
(瓦氏)	76	30	10	
罗马尼亚	76	30	10	STAT1913/4-76
瑞 典	60	60	10	
英 国	80	30	20	BS1377-75
印 度	148	30	25	
中国(水电部)	76	30	17	SDS01-84
(交通部)	100	30	20	JTJ051-81

苏联烈宾捷尔 (П.А.Ребиндер) 院士用粘滞液体在圆管中流动来研究其流动阻力，认为粘滞塑性体具有一定稠度时，不论作用力大小，剪应力值不变。

瓦西列夫 (А.М.Васильев) [6]和波依索科 (Л.О.Бойченко) [7]引用烈氏结论，用圆锥仪测定土的液限，瓦氏所采用的对比仪器与当时全苏建筑土壤实验会议建议的旧仪器试验结果相一致。这是一种未经改进的击落三次的摇碟仪 [8]。波氏的300g锥比较接近于碟式仪的试验结果。遗憾的是全苏批准了瓦氏76g锥作为全国标准。五十年代以来，被广泛用到我国。这就是76g锥液限比碟式仪液限偏低的历史渊源。

根据有关文献报导 [9]，卡氏得到碟式仪液限时不排水抗剪强度为 $S_u = 2 \sim 3 \text{KN/m}^2$ 。根据76g锥测定液限的标准，交通部公路科学研究所曾对几种土样做过直剪试验，证实它的抗剪强度确实比碟式仪标准高出甚多，如表 2。

76g锥液限时几种土的抗剪强度试验结果

表2

土 名	76g 锥液限 (%)	剪切后所测土样含 水量 W (%)	抗剪强度 S_u (KN/m^2)
红 粘 土	58.0	60.0	5.4
青海砂性土	23.0	22.9	4.7
内蒙砂性土	22.5	21.4	5.2
北京粉性土	31.0	30.7	4.9

同济大学与交通工程研究所也曾对五种代表性土样进行了76g锥和 100g 锥液限时抗剪强度试验，结果如表 3。试验结果表明，前者的抗剪强度要比后者大 2 ~ 4 倍。水电部门的比较试验结果(见表 7)同样证明76g锥液限标准下的抗剪强度大大高于其他液限标准下的抗剪强度。

在实践中发现，对于高塑性土，特别是重粘土，按76g锥标准已经达到液限，但实际上土体还相当粘稠。这可以从下面分析看出。

含水量相同时，不同锥重 p_1 、 p_2 的入土深度 h_1 、 h_2 可用下式换算：

$$h_2 = h_1 \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \quad (1)$$

华东五省五种土样76g和100g锥液限时抗剪强度试验结果的比较

表3

土名	液限 (%)		塑限 w_p (搓条) (%)	抗剪强度 $S_u(KN/m^2)$	
	76g 锥	100g 锥		76g 锥	100g 锥
粉性土	31.7	35.9	17.5	4.9	2.0
高岭土	33.0	36.5	17.4	3.4	1.7
粉土 (观音土)	32.0	37.6	23.2	7.5	1.8
轻亚粘土	34.0	38.0	25.3	4.8	2.0
红粘土	56.3	64.7	32.7	3.9	1.7

以76g锥入土深度10mm的液限标准换算为100g锥 (锥角相同) 的入土深度 h_2 时, 得

$$h_2 = 10 \sqrt{\frac{100}{76}} = 11.5 \text{ mm}$$

入土深度 h 与稠度 W_c 是曲线关系, 可用下式表示:

$$\lg h = \alpha + \beta \lg W = \alpha + \beta \lg (W_L - W_c I_p) \quad (2)$$

根据特定土类 (例如粘性土、亚砂土) 的液限和塑性指数范围, 可大致计算出如图1所示的 $h-W_c$ 关系曲线。从纵坐标11.5mm处引水平线, 交曲线于 a 、 b 两点, 该两点相应的稠度分别为0.33和0.45, 均属极软状态。可见, 76g锥液限标准连液塑状态也达不到, 更不用说液限了。

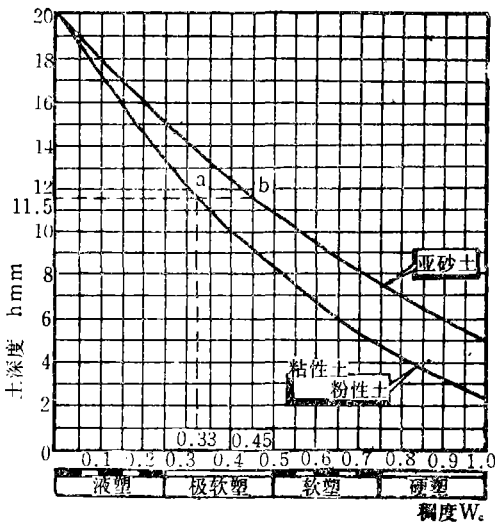


图1 稠度和入土深度关系曲线

为进一步了解76g锥与碟式仪测定液限的差异程度, 交通部门有目的地搜集了全国各省区近1400个有广泛代表性的土样 (见表4), 其中包括黄土、红粘土、盐渍土、膨胀土等特殊土在内, 用这两种仪器进行了液限对比试验, 得到两者关系图, 如图2所示。又得到两者的关系式为:

$$W_L(76) = 6.5 + 0.66 W_L \quad (3)$$

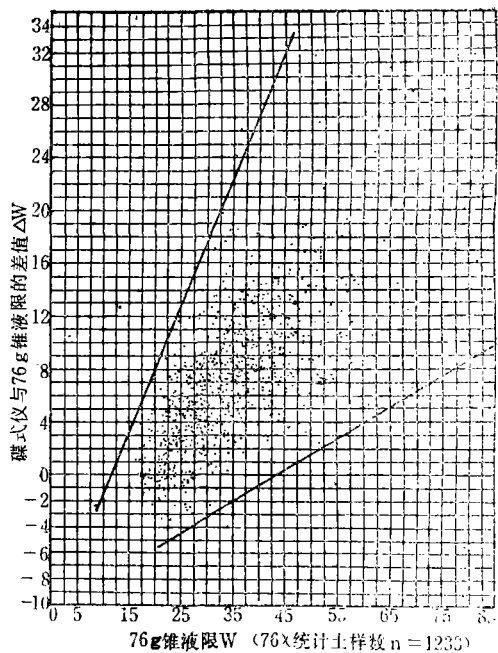


图2 两种仪器液限差值与76g锥液限值的关系图

采集土样分布表

表4

土样采集地区		土样个数	地区土样合计	备注
东北	黑龙江	87	178	其中盐碱土37个
	吉林	41		
	辽宁	50		
华北	北京	11	11	
华东	福建	116	219	
	江苏	27		
	安徽	29		
	浙江	12		
	江西	20		
中南	湖北	288	430	
	湖南	66		
	广东	76		
西北	陕西	159	319	大部分为黄土
	甘肃	84		其中盐渍土45个
	青海	29		
	新疆	25		
	宁夏	22		
西南	云南	222	222	
总计		1379		

液限时的抗剪强度

表5

底座材料	抗剪强度 S_u (KPa)	资料来源
硬橡皮	2.5	Seed 等人 (1964)
胶木	2~3	Casagrande (1958)
	1.1~2.3	Norman (1958)
	1.3~2.4	Youssef 等人 (1965)
英国标准橡皮	0.5~4	Karlsson (1977)
	0.8~1.6	Norman (1958)
	0.7~1.45	SKempton和Northey (1952)
	1~3	Skopek和Ter-Stepanian (1975)

$(n = 1106, r = 0.96)$

式中 $W_L(76)$ ——用76g锥求得的液限，%；

W_L ——用碟式仪求得的液限，%。

图2和式(3)表明，用碟式仪和76g锥($h_L = 100\text{mm}$)测定液限，对不同土样所得结果的差异不尽相同，其差值随土的液限增加而增大，当碟式仪液限 $W_L = 20$ 时，两者所得结果基本一致。由于低塑性土在碟式仪震动作用下产生“液化”，所以当 $W_L <$

20时，76g锥标准所测结果大于碟式仪液限值。

据上所述，按76g锥标准测定的液限，实际上不是土的真正液限。因此，必须致力改进，使液限标准与国际标准接近。

三、液限标准和仪器选择

碟式仪仍是目前世界上大多数国家用以测定土样液限的通用仪器，但仪器规格不一，这主要表现在两个方面：一是底座材料有硬橡皮、软橡皮和胶木之分；二是划沟刀也有两种类型，一种为美国ASTM型(简称A刀)，划沟深度为10mm，另一种为卡氏划沟刀(简称C刀)，划沟深度为7.5mm(见图3)。C刀主要在英[10]、日[11]等国使用。国内所用的碟式仪，其标准也不统一，除划沟刀有A、C型外，铜碗也有143g、167g和224g等重量(标准重量为200g)之分。

底座的软硬对试验结果是有影响的。诺尔曼(Norman, 1958)的试验结果表明^[9]，用较软

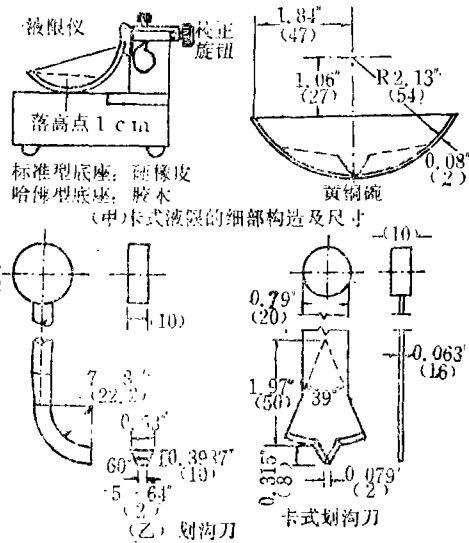


图3 碟式仪构造及划沟刀(括号内数值单位为mm)

的BS1377底座(硬度 86~94°) 得出伦敦粘土的液限为 72, 用较硬的胶木底座(硬度 98.5°) 得出伦敦粘土的液限为 68。诺尔曼还指出, 用硬底座得出液限时强度比用软底座得出液限时强度约高25%。硬软底座液限时抗剪强度如表 5 所示。国内比较试验表明^[12], 划刀和铜碗重量的不同, 将导致液限值的差异。同一碟式仪用两种划刀对同一个土样进行试验时, A刀比 C刀所得液限值偏小, 一般约差10%; 铜碗重量大, 所得液限值偏大, 铜碗轻, 所得液限值偏小。

鉴于国际上对液限标准还没有一个统一标准, 相互之间(例如ASTM与BS液限标准等) 也存在着差异, 因而制订我国新的液限标准时, 就只能接近或等效于国际上比较通用的某一种标准。我们认为, 与美国 ASTM 碟式仪标准接近或等效是比较合适的。

鉴于碟式仪的试验精度和再现性均低于圆锥仪^[4], 加上对砂性土划沟困难等问题, 所以在制订我国新的液限标准时, 宜采用英国BS1377的方式, 将圆锥仪和碟式仪并列。

交通部门在制订土工试验规程的过程中, 以ASTM碟式仪为标准, 用不同重量(76g、80g、100g等) 圆锥仪对一千多个土样进行了对比试验。当时采用100g 锥是因为联合测定塑限, 锥重不宜太轻, 否则入土深度太小, 精度不够, 但太重也会引起土体过度压密, 产生凸起、沉陷等现象, 从而影响测定精度。从表 1 可以看出, 与国际上的锥重相比, 100g 锥正好居中。

以碟式仪为标准, 通过误差分析和统计检验, 认为锥重为100g(锥角30°), 入土深度 $h_1 = 20\text{mm}$ 时, 精度最高(见表 6)。

粉性土粘性土和砂性土精度分析结果

表6

100g锥入土深度 h (mm)	算术平均值 \bar{K} (碟/锥)	标准差(%) $S = \sqrt{\frac{\sum(K - \bar{K})^2}{n-1}}$	变异系数 (%) $Cr = \frac{S}{\bar{K}}$	绝对误差 (%) $m_x = \frac{S}{\sqrt{n}}$	精度指标 (%) $p_x = \frac{m_x}{\bar{K}}$
粉性土、粘性土 $h = 20(n = 1121)$	1.009	7.6	7.53	0.227	0.225
粉性土、粘性土 $h = 22(n = 1121)$	0.977	8.59	8.62	0.260	0.257
砂性土 $h = 12(n = 193)$	1.055	10.4	9.86	0.749	0.710
砂性土 $h = 20(n = 193)$	0.95	8.79	9.55	0.633	0.688

对碟式仪和100g的两组实测液限平均值进行“t”检验^{[1][13]}, 得 $t = 0.89 < t_\alpha = 1.96$, 证明两组试验结果在 5% 水平上没有显著性差异。

另外, 从100g锥和碟式仪液限的关系图(图 4) 也可看出两者相当接近, 因为所有试验点基本上在45°线上分布。这表明100g锥可以取代碟式仪。100g和76g锥的比较试验结果, 同样证明两者的差值随土的液限增加而增加。

水电部门对16组土样进行了各标准下不排水抗剪强度的比较试验, 结果如表 7 所示。可以看出, 76g以入土深度17mm作为液限和100g锥以入土深度20mm作为液限时抗剪强度与美国ASTM D423碟式仪^[14]液限时强度(指平均值)一致, 说明76g锥17mm和100g锥20mm的液限入土深度均可以达到与ASTM碟式仪等效的目的。三者的强度稍高于英国80g锥以入

不同标准下的液限强度 (不排水抗剪强度, KPa)

表7

相应的含水量	76g 锥 17mm 时	76g 锥 10mm 时	ASTM 碟式 仪平均液限	100g 锥 20mm 时	80g 锥 20mm 时
平均值	1.9	5.3	1.9	1.9	1.5
范围值	1.3~2.7	3.1~7.1	0.7~3.7	1.2~2.6	0.8~2.1

土深度20mm作为液限的抗剪强度。英国80g锥所等效的碟式仪与ASTM碟式仪的规格不尽相同,前者底座为软橡皮,划刀采用C刀,后者底座为硬橡皮,划刀采用A刀。在交通部门的液限比较试验中,发现100g锥入土深度20mm时的液限值低于80g锥入土深度20mm时的液限值,如100g锥取入土深度为22mm,则两种锥的液限值接近。

100g锥的液限标准($h_L = 20\text{mm}$)已自成体系,土的统一分类即按此标准制订;建立了液限 W_L 与塑限入土深度 h_P 的关系式,为联合试验求各种土的塑限值提供变 h_P 值;得到了两种锥(76g和100g锥)液限和塑性指数的回归式,为新旧标准过渡提供近似的换算关系。这些关系式为:

$$W_L(76) = 6.3 + 0.67W_L(100) \quad (4)$$

$$(n = 1253, r = 0.91)$$

$$I_P(76) = 0.67I_P(100) - 0.26 \quad (5)$$

$$(n = 1239, r = 0.98)$$

要求液限仪(或称液限塑限联合试验仪)的测读精度达到0.1mm,锥能自由沉落。目前交通部门所采用的100g锥联合测定仪有光电式、数码管式、百分表式和游标式四种。

四、塑限标准和液限塑限联合试验

土的塑限测定的经典方法为搓条法,试验结果的人为误差较大,不易准确。对不同的土质,如砂性土和粘性土,搓条标准不易统一掌握;同一种土,断裂标准也不一致。因此,迫切需要改革,寻求合理的试验方法。

本文论及的联合试验是建立在视土体为粘滞塑性体,用圆锥仪首先测定液限,再利用液限这个对土质比较敏感的指标,确定塑限的圆锥入土深度,从 $\lg h - \lg W$ 图上(简称联合测定图)求出塑限值。

我国五十年代和日本七十年代^[15]的研究发现,圆锥入土深度与含水量的关系,在塑限状态时并不是一条直线,有偏离现象。实践表明,影响圆锥入土深度的因素可归结为土质、物理状态(湿度和密度状态)和结构三大方面。对于扰动土,排除了结构状态的影响。塑限入土深度与含水量的关系不稳定的原因,是由于密实状态和土质的影响。

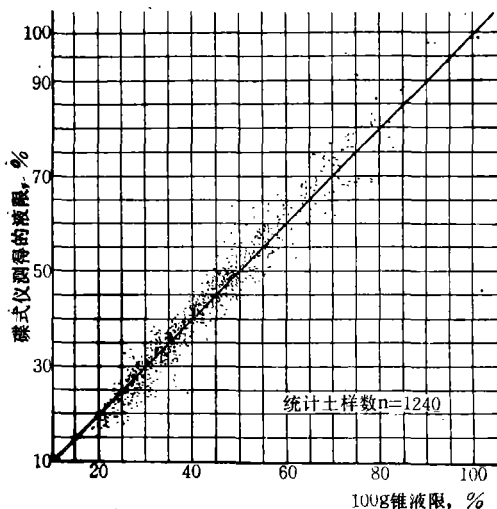


图4 碟式仪和100g锥液限值的关系

1. 湿度和密度的影响

压密理论告诉我们，标准击实的最佳含水量约等于或略大于土的塑限，此时土的状态不再符合土力学中关于可塑性的定义。在这种状态下，圆锥与土体将产生剪切和压密的综合作用。土的密实度对锥体入土深度有很大影响。为消除试样密实程度对圆锥入土深度的影响，从理论上讲，必须首先控制试样的密实程度。

设 K_2 为密实度系数，则

$$K_2 = \frac{\rho_d}{\rho_{d \text{ sat}}} \quad (6)$$

式中 ρ_d ——任意含水量下土体的干密度， g/cm^3 ；

$\rho_{d \text{ sat}}$ ——饱水时的干密度， g/cm^3 ，如已知土样的比重 G 和含水量 W ，则其值可按下式计算：

$$\rho_{d \text{ sat}} = \frac{G}{1 + 0.01WG} \quad (7)$$

根据研究，如果能保证土体的 $K_2 = 0.95 \sim 1.0$ 时，则对于各类细粒土，圆锥入土深度与含水量在双对数坐标上有很好的线性关系^[16]，这就是控制试样密实度对入土深度影响的标准。为实用方便，联合测定时，尽量使土样的最小含水量高于塑限，100g 锥的入土深度控制在 4 ~ 5 mm 以上。

2. 土质的影响

试验发现，当土处于塑限含水量时，因土质不同，其抗剪强度变化很大。哈尔滨建筑工程学院曾对三种土，按锥重 475g 正应力计算，在不同含水量和密度下进行了 500 余组剪切试验，从整理的入土深度 h 和抗剪强度 S_u 的关系曲线（图 5）看，粉性土和粘性土的两条曲线几乎重合，而两种亚砂土的曲线则变化较大。塑限时三组土的抗剪强度如下：

粉性土和粘性土 $S_u = 88 \sim 127 \text{ KPa}$

（可搓成条的）砂性土 $S_u \approx 49 \text{ KPa}$

交通部公路科学研究所对不同塑性指数的四组亚砂土（可搓成条的）、六组粉性土和粘性土（包括高塑性的），在塑限状态时相应于 100g 锥重的正应力下，进行了剪切试验，结果如下：

粉性土和粘性土 $S_u = 98 \sim 118 \text{ KPa}$

（可搓成条的）砂性土 $S_u \approx 39 \text{ KPa}$

哈尔滨建筑工程学院和交通部公路科学研究所的剪切试验结果是接近的。另外，从国外塑限时的剪切试验结果^[9]（表 8）也可看出，抗剪强度变化幅度较大（土样种类不详），其平均值则与国内试验结果接近。水电部门对 16

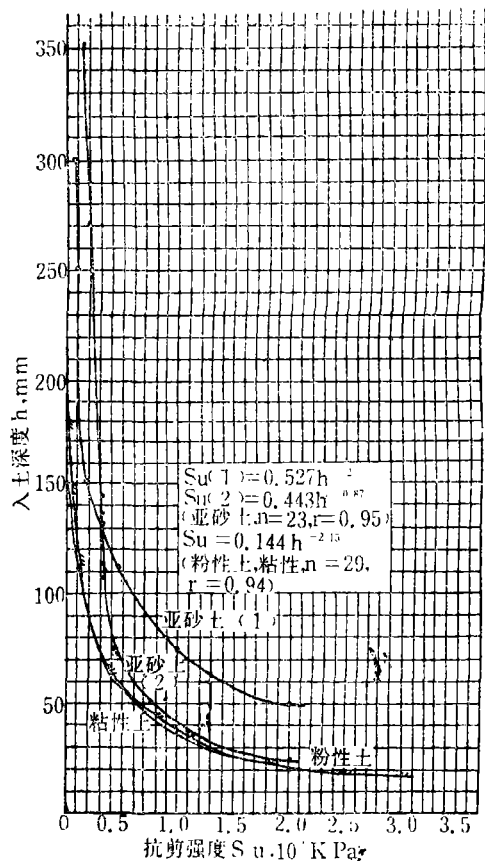


图 5 抗剪强度与入土深度的关系曲线

资料来源	抗剪强度 S_u (KPa)	
	范围	平均
Skempton 和 Northey (1952)	85~125	110
Deanchy (1978)	30~320	115 (算术) 104 (几何)
Arrowsmith (1978)	20~220	110
(1979)	25~280	130
Wroth (1979)	170	

种土在塑限状态下, 所得76g锥 2 mm时的抗剪强度为63~206 KPa, 平均值为153 KPa。

这些试验结果说明, 土质不同, 它们在塑限状态下的抗剪强度也不同, 因此, 圆锥入土深度也相应而异。

交通部门在研究液限塑限联合试验的过程中, 曾将相应于搓条法塑限值的100g锥实际入土深度 h_p 与液限 W_L 点绘成散点图, 如图6所示。从图上可以看出, 当 $W_L > 35$ 时, 点子比较集中, 变化幅度不大, h_p 值基本上在 2~3 mm 范围内波动。中高液限的粘性土和粉性土属于这个区间, 在塑限时固定一个 h_p 值是可行的。当 $W_L < 35$ 时, 点子相当分散, h_p 值变化幅度很大。低液限细粒土和砂性土属于这个范围, 即在此区间内两种土有交叉。这里所指的砂性土, 是指100g锥塑性指数小于11, 砂粒 (2~0.074mm) 含量超过50%的砂性土。这类土有砂粒感, 湿润时只能搓成大于2.5mm的土条, 实用中是易于识别的。看来, 在中低液限内, 用一个固定 h_p 值, 显然不能适应土质的巨大变化, 不管联合试验中的经验法或曲线法, 都必须采用变 h_p 值, 才符合实际情况。这就是我们所提经验法和曲线法的依据, 尽管粗糙一些, 但总比用一个固定 h_p 值为好。

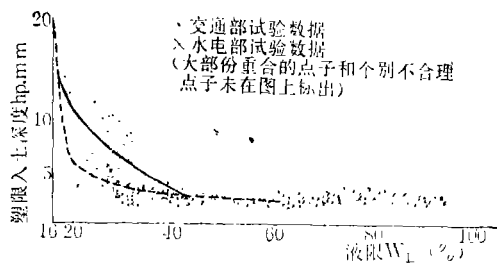


图6 塑限入土深度与液限关系的散点图

下面分别对确定塑性限值的经验法和曲线法进行讨论。

1. 经验法

从图6上的点子分布情况来看, 大部分点子集中在 $h_p = 2 \sim 3$ mm 范围, 在 $h_p = 5$ mm 时, 点子也比较集中, 结合前面抗剪强度值随土质而变的分析, 可以粗略地把 h_p 值分为三级:

粉性土和粘性土 $h_p = 2.4$ mm

(可搓成条的) 砂性土 $h_p = 5$ mm

(难搓成条的) 砂性土 $h_p = 10$ mm

在验证含水量与入土深度曲线类型的过程中, 发现对难成条的砂性土, 实测入土深度与按下面公式计算的深度 (指 $h_p = 5$ mm) 不符。

$$\lg h = \alpha + \beta \lg W_p \quad (8)$$

如取 $h_p = 10$ mm, 则实测值与计算值十分接近 (见表9)。说明对难搓成条的砂性土, 塑限入土深度定为10mm是合适的。这个方法的不足之处, 是两个 h_p 值 (5 或 10 mm) 的选用需凭经验确定。

2. 曲线法

从图6可以看出,在中低液限区($W_L < 35$),用一条曲线将难以概括 h_p 值变化幅度很大的砂性土。从实用角度出发,我们用两条曲线来计算 h_p 值,一条曲线在下,称双曲线,另一条曲线在上,称正交三次多项式或曲线[13][17][18],如图7所示。

联合测定时,首先根据100g锥 $h_L = 20\text{mm}$ 确定土的液限 W_L ,然后对砂性土和非砂性土分别按公式(9)、(10)计算相应的塑限入土深度 h_p ,或查由这两式绘制的 $h_p - W_L$ 关系图,得 h_p 值,再在联合测定图上($\lg h - \lg W$)查得塑限值(W_p)。

对(难成搓条的)砂性土,实测与计

算塑限入土深度的比较 表9

稠度	实测入土深度 (mm)	计算的入土深度 (mm)	
		$h_p = 5$	$h_p = 10$
0.12	17.0	16	17.5
0.21	17.5	15.6	17.5
0.61	13.5	9.2	13.3
0.64	13.5	8.8	13.1
0.67	12.5	8.5	12.7
0.76	11.5	7.4	12.2
0.80	15.0	12.4	15.4
0.84	11.0	6.5	11.3
0.88	10.7	6.1	11.3

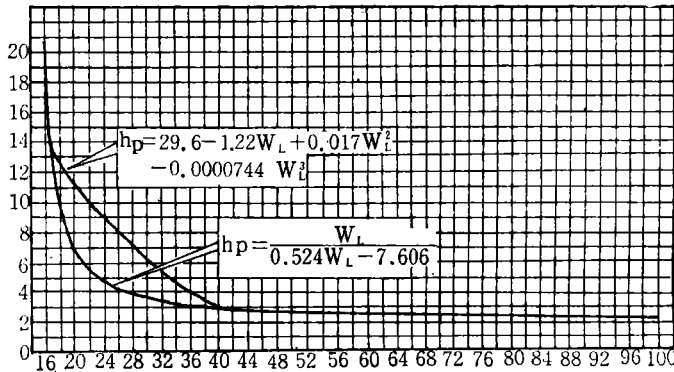


图7 塑限入土深度 h_p 与100g锥液限 W_L 的关系曲线

$$\text{砂性土 } h_p = 29.6 - 1.22W_L + 0.17W_L^2 - 0.0000744W_L^3 \quad (9)$$

$$\text{非砂性土 } h_p = \frac{W_L}{0.524W_L - 7.606} \quad (10)$$

为了节约篇幅,仅以湖南省交通科学研究所的全部试验资料为例,列出按双曲线法和搓条法所得塑限值的对比结果(见表10);以云南省交通科学研究所的试验资料为例,列出云南地区砂性土的联合试验结果(见表11)。

经验法、双曲线法和正交三次多项式曲线法,对塑限值的“ t ”分布检验(5%水平)的结果如下[1][18]:

经验法 $n = 1336, t = 1.46 < t_\alpha = 1.96$

双曲线法 $n = 986$ (包括砂性土), $t = 1.83 < t_\alpha = 1.96, n = 190$ (砂性土), $t = 2.32 > t_\alpha = 1.96$ (通不过)

正交三次多项式曲线法 $n = 190, t = 1.73 < t_\alpha = 1.96$

可见,对于砂性土,正交三次多项式曲线优于双曲线,因后者的 t 检验通不过。

另外,水电部门的比较试验结果(缺砂性土)也证明联合试验中的双曲线法是适用的,如表12所示。“ t ”检验是通过的(其中双曲线法的 t 值最小),结果如下:

100g锥双曲线法 $t = 0.045 < t_\alpha = 2.13$

双曲线法和搓条法塑限值的比较

表10

液 限 W_L (%)	塑 限 W_P (%)		液 限 W_L (%)	塑 限 W_P (%)	
	搓 条 法	双 曲 线 法		搓 条 法	双 曲 线 法
26.0	19.7	20.3	50.0	22.7	21.5
26.1	17.6	19.7	50.0	20.0	21.0
27.0	12.0	15.2	50.5	28.9	29.0
27.3	16.2	17.9	51.0	22.5	23.5
28.5	14.3	16.3	51.0	19.5	22.0
30.4	22.7	21.5	52.0	22.6	25.0
31.0	13.4	15.7	52.0	28.5	29.1
31.0	17.6	18.1	52.2	24.9	25.4
32.2	16.3	18.4	53.0	22.3	23.7
33.0	21.5	21.8	54.0	26.1	26.2
35.2	20.8	21.0	54.0	25.6	25.3
36.0	18.7	18.8	54.0	25.3	25.3
36.0	18.0	19.0	54.0	27.8	27.8
37.0	18.4	20.3	54.0	25.0	26.7
38.0	22.6	22.5	55.0	21.0	22.1
38.5	25.6	25.5	55.0	24.8	25.9
41.0	18.0	19.5	56.0	30.6	30.6
41.0	19.9	20.7	56.0	31.0	30.0
42.0	19.1	20.5	56.0	27.4	30.0
42.0	21.4	23.0	58.0	27.9	27.5
43.2	25.5	27.0	59.0	31.0	30.5
44.0	21.6	22.6	60.0	26.7	26.7
45.5	22.7	23.5	63.0	26.5	26.0
46.5	24.4	25.5	63.0	21.8	22.5
47.0	24.0	22.1	64.0	28.8	28.3
47.0	31.7	31.0	64.0	38.0	38.2
47.9	25.6	26.0	66.0	26.2	25.5
48.0	25.5	26.5	69.0	25.6	25.8
48.0	22.7	21.5	70.0	33.0	33.2
48.0	22.8	23.0	74.0	32.0	31.5
49.0	23.6	23.0	80.0	40.0	41.5
49.0	25.0	23.9			
50.0	26.0	27.6			

100g锥经验法 ($h_p = 2.4\text{mm}$) $t = 0.31$

76g锥经验法 ($h_p = 2\text{mm}$) $t = 0.19$

Wroth和Wood (1978) 指出, 不排水抗剪强度 S_u 和入土深度 h^2 的乘积与锥重 P 之比为一常数 (K), 以下式表示

$$\frac{S_u h^2}{P} = K \tag{11}$$

对于30°锥, $K \approx 0.8$; 对于60°锥, $K \approx 0.27$ 。对于100g锥, 可得:

$$S_u = \frac{0.8P}{h^2} = \frac{7.84}{h^2} K P_a \tag{12}$$

当 $h = h_L = 20\text{mm}$ 时, $S_u = 1.96\text{KPa}$ 。此值与表7中的实测值一致。当 $h = h_p = 2.4\text{mm}$ 时, $S_u = 136\text{KPa}$, 此值也接近于实测值。可见, 公式(12)适合于不同入土深度时剪力值的计算。

云南地区亚砂土按正文三次多项式曲线法和双曲线法求得的塑限值的对照表

表11

液 限 W_L (%)	塑 限 W_p (%)			液 限 W_L (%)	塑 限 W_p (%)		
	搓 条 法	多 项 式 曲 线 法	双 曲 线 法		搓 条 法	多 项 式 曲 线 法	双 曲 线 法
16.8	13.7	15.0	15.0	27.6	23.1	22.7	20.0
18.7	16.2	17.8	17.2	28.0	20.6	21.8	18.8
18.9	14.5	16.8	15.3	28.5	22.2	21.7	18.9
18.9	15.2	16.6	15.3	28.6	23.0	25.0	24.3
20.1	15.3	17.5	16.2	28.6	21.6	22.8	20.9
20.5	17.4	18.0	16.1	28.9	25.3	25.8	22.6
21.1	19.9	19.6	19.5	29.2	23.1	23.2	21.0
21.2	17.8	19.0	17.8	29.2	23.6	22.0	18.5
21.3	18.1	18.0	15.8	29.6	24.2	25.0	23.5
22.4	18.2	18.8	16.7	29.6	20.9	19.3	15.4
23.0	16.1	18.0	17.3	29.9	21.6	20.5	16.8
23.0	19.0	18.8	26.2	30.0	26.0	24.4	21.5
24.0	19.9	22.2	21.0	30.0	23.4	23.3	20.6
24.1	18.0	20.0	18.0	30.0	20.7	22.5	19.5
24.4	19.8	20.8	18.9	30.8	25.8	24.0	21.4
24.5	21.6	22.0	20.4	31.6	23.4	23.2	20.3
24.5	21.1	20.0	17.0	31.7	24.1	25.0	24.0
25.0	18.2	20.0	17.4	32.0	27.4	27.8	26.2
25.0	19.6	20.2	17.4	32.2	27.4	27.0	25.0
25.2	20.5	21.0	18.7	33.0	19.9	19.0	16.5
25.8	18.5	20.0	17.4	33.6	23.6	23.5	21.4
26.0	22.4	21.3	18.5	33.6	24.0	24.5	22.0
27.0	23.6	23.5	15.0	34.0	23.7	22.0	19.2
27.0	24.2	23.2	20.8	34.2	25.8	23.5	20.4
27.0	15.5	17.8	15.5	34.6	25.8	25.0	22.5
27.2	21.7	20.6	17.3	35.0	23.1	25.0	23.0
27.2	22.8	21.0	17.0				

搓条法与双曲线法、经验法塑限值的比较
(水电部试验资料)

表12

土 样 号	100g 锥液限 W_L (%)	塑 限 W_p (%)			
		搓 条 法	100g 锥双曲 线 法	100g锥经验法 ($h_p = 2.4\text{mm}$)	76g 锥经验法 ($h_p = 2\text{mm}$)
84-1	41.9	18.7	19.7	18.2	18.7
2	32.4	19.2	19.2	17.2	18.6
3	32.6	17.5	18.7	16.6	17.2
4	26.1	15.5	16.7	13.9	15.0
5	43.9	22.6	24.4	23.1	22.8
6	92.8	40.8	37.6	38.6	39.2
7	28.6	16.8	17.3	15.0	16.1
8	68.3	32.4	31.6	31.4	31.6
9	65.1	23.5	23.5	23.2	23.3
10	56.8	23.2	25.1	24.5	23.5
11	31.4	19.5	20.2	18.2	19.5
12	72.8	40.4	38.0	38.2	38.6
13	82.5	50.4	45.2	45.5	45.1
14	38.1	20.1	21.2	19.6	20.3
15	75.8	32.6	31.6	32.0	32.8
16	68.6	25.9	26.6	26.5	26.5

注：13号土有团粒结构，其液限随浸润时间的增加而增加，矿化分析结果也与其它土样不同， Fe_2O_3 偏高，而含盐量却偏低，因而曲线法、经验法塑限值与搓条法塑限值相差较多。

五、结 语

以100g锥做土的液限、塑限联合试验，既有理论基础，也有试验依据，可以取代不合理的76g锥（指液限入土深度标准），也比国际上通用的碟式仪优越。这样用100g锥测定土的液限和塑限，可以直接用卡氏塑性图进行土的分类。

液限塑限联合试验中的经验法和曲线法（指双曲线和正交三次多项式曲线），都可实际应用，但曲线法在理论上更完善些。对于砂性土，用双曲线求塑限，与搓条法相比，稍偏低；用三次多项式曲线符合实际。但对粘性土和粉性土，用双曲线比较符合。针对不同土质情况，分别采用不同方法，才能使联合试验更接近实际。正交三次多项式曲线的出现，是对联合试验的进一步改进。

用联合试验可以快速求出土的液限、塑限和稠度三个指标，工效大大提高，精度也完全与传统方法测定的相同。三个指标的试验方法统一后，对生产的实用意义颇大。

参 考 文 献

- [1] “土的液限塑限联合测定”（研究报告），交通部公路科学研究所，1981.8。
- [2] 饶鸿雁等，关于我国统一土质分类的几个问题，《土木工程学报》，1981.3。
- [3] 交通部《公路土工试验规程》（JTJ051-81），人民交通出版社，1982。
- [4] “修订土工试验规程第二次液限塑限比较试验总结”，水电部华东电力设计院，1984.5。
- [5] “土工试验规程SDS01-84”（送审稿），水电部华东电力设计院，1984.5。
- [6] 瓦西列夫：《确定土的物理力学之现代方法及试验技术之原理》，王国城译，1953。
- [7] M.H.戈里特什腾：《土壤的力学性质》，饶鸿雁译，人民交通出版社，1954。
- [8] “土壤液性限度的讨论”铁道科学研究院，1954。
- [9] L.L.Whyte, Soil Plasticity and Strength—a new approach using extrusion, Ground Engineering Vol.15, No.1, 1982。
- [10] 英国 BS1377-75, Methods of Test for soil for Civil Engineering Purpose。
- [11] 日本 JTS A 1205-1980, 日本工业规格《土的液性界限试验方法》。
- [12] “华东五省公路土工试验研究报告”，同济大学道路与交通工程研究所，1979.11。
- [13] 饶鸿雁：《数理统计在道路工程中的应用》，人民交通出版社，1983.5。
- [14] 1983 Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Volume 0408, Soil and Rock, Building Stones。
- [15] 北郷繁，佐藤正義，液性塑性两界限の同时测定法に関わち研究（第5报），土と基础 No.6, 1970。
- [16] “沉落锥法确定土基弹性模量”，哈尔滨建筑工程学院等，1979.2。
- [17] 张士英等，《测量实践的数学处理》，科学出版社，1977。
- [18] 土的液限塑限联合测定法的改进，《岩土工程学报》，1983.2。