

液性限界に及ぼす測定器と測定方法の影響

(Influence of Testing Devices and Experimental Methods on the Liquid Limit)

風 間 秀 彦ⁱ⁾ (Hidehiko Kazama)
下 辺 悟ⁱⁱ⁾ (Satoru Shimobe)

キーワード：(液性限界)/コンシステンシー限界/試験装置/
試験方法/塑性/粘性土 (IGC : D2/D3)

1. はじめに

土は含水量の違いにより硬軟の程度が異なる。特に粘性土やシルトなどの細粒土では、練り返したときの含水量の大小によって、その性質と挙動が著しく変化する。このように、練り返した細粒土の性状は含水量の低下に伴って液状、塑性、半固体、固体状と土の状態が変わり、土質工学では上記のような4つの状態変化や変形抵抗の大小を総称して「コンシステンシー」という。

1911年にスウェーデンの土壌物理学者 Atterberg は、これらの各状態の変移点を含水比 w で規定する方法を提唱し、それぞれ液性限界 $w_L(LL)$ 、塑性限界 $w_P(PL)$ および収縮限界 $w_S(SL)$ とした¹⁾。以上の3つの含水比は総称して「コンシステンシー限界」または「アッターベルグ限界」とも呼ばれている。また、Atterberg の提案したコンシステンシー限界を求める方法が、1932年アメリカの Casagrande によって機械化・簡略化された(例えば、液性限界測定器の考案や流動曲線の利用など)。以後、この Casagrande 法は世界各国で規格・基準化され、今日のコンシステンシー限界試験方法の原型になっている。

一方、我が国では1990年の大幅な JIS (日本工業規格) 改正で、従来の液性限界試験方法 (JIS A 1205) と塑性限界試験方法 (JIS A 1206) の両規格は一つの規格に統合され、JIS A 1205-1990「土の液性限界・塑性限界試験方法」に規定された。現行の JIS の液性限界試験方法では、旧規格には規定されていなかった測定器の硬質ゴム台の硬さが初めて規定された。しかしながら、ASTM (アメリカ材料試験規格)、BS (イギリス規格) および DIN (ドイツ規格) は JIS と比較して、ゴムの硬さのみならず、ゴム台の反ばつ弾性、黄銅皿の質量など、測定器の諸元を細部にわたって規定している (表-1 参照)²⁾。

液性限界の定義は前述のように土が液体から塑性の状態に移る境界の含水比をいい、一般に多量の水分を含む土が塑性体として最小のせん断強さ (2 kPa 程度の非排水せん断強さ) を示す状態の含水比といわれている^{3),4)}。しかしながら、現行の液性限界試験は測定方法に定義が十分反映されているとはいいがたく、土の静的な性質を一種の動的なせん断試験で求めているという根本的な問題があ

る^{5),6)}。また、試料の準備・調製方法、測定器、試験者の違いによって試験結果が異なることが指摘されている^{5),6)}。特に測定器に関しては、ゴムの硬さ^{6),7)}や黄銅皿の傾斜角⁸⁾の影響が報告されている。さらに、最近の小川・小林 (1995)⁹⁾の研究によれば、土の練返し時間を増大させるにつれて液性限界が低下していくが、ある時間以上練り返すと逆に液性限界が増加するという興味深い報告がなされている。これはある程度の時間で練り返せば、土の構造は安定化するという従来の常識を覆すもので、今後の検討課題である。

本研究は、液性限界測定器の硬質ゴム台の硬さや反ばつ弾性、黄銅皿の傾斜角、溝切りの先端幅、また測定方法のカムの回転速度や黄銅皿の落下高さ、試料の量などが液性限界に及ぼす影響について、一連の詳細な実験から検討を行ったものである。さらに、これらの要因と試料の塑性指数との関連および個人差について明らかにすることも目的とした。なお、ここでは測定器と測定方法に限定し、試料の練返し方法と時間は一定とした。

本実験結果との比較のために、表-2 に示す(株)土質工学会「土のコンシステンシーに関する研究委員会」で、1992~1994年の3回実施された液性限界・塑性限界の一斉試験 (以下「'92一斉試験」、「'93一斉試験」、「'94一斉試験」と略記)¹⁰⁾、ならびに外国における2つの一斉試験 (以下「イギリス一斉試験」、「スウェーデン一斉試験」と略記)^{11),12)}の結果も用いた。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

実験に用いた試料は、塑性指数 $I_p=20\sim90$ の沖積粘性土10種類 (日本橋、東扇島、芝浦、志木、有明など) と市販のカオリン (ASP100) および火山灰質粘性土 (関東ローム)、低有機質土 (黒ぼく) である。これらの試料は日本統一土質分類法によれば、一般土は SC, SM, C'H, CH に分類され、塑性図上はいずれも A 線付近に分布する。他方、特殊土では VH₂, OV に分類される。図-1 に、代表的な試料の粒径加積曲線を示した。

なお、カオリン以外は自然含水比状態の試料を425 μm ふるいで裏ごししたものを用いた。また、試料の含水比調整、練返し方法や時間などについては各試料ごとに統一した。

2.2 既存の液性限界測定器

実験に先がけ、著者らの機関で使用している30数台の液性限界測定器 (溝切りも含む) の寸法、硬質ゴムの硬さ、反ばつ弾性、黄銅皿の傾斜角などの諸元を調べた。ただし、本研究のゴムの硬さ H_s は JIS K 6301 のスプリング式硬さ試験機 A 形によって求めた (補注参照)。また、反ばつ弾性 E_r は ASTM の液性限界試験に規定された方法 (直径 8 mm の鋼球を高さ 25 cm から落下した時のリバウンド量の百分率) を用いて求めた。

その結果、全体的には JIS の規定をほぼ満たすものが多い。しか

i) 埼玉大学工学部地盤水理実験施設

ii) 日本大学短期大学部建設学科 助教授

(1996. 3. 29 原稿受付・討議期限 1998. 1. 1 要請があれば1か月の期限延長可能)

表-1 液性限界試験方法の国内外の規格・基準対照表

国名 規格名称・番号		日 本	ア メ リ カ	イ ギ リ ス	ド イ ツ	スウェーデン
		JIS A 1205-1990 土の液性限界・塑性 限界試験方法	ASTM D4318-93 Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils	BS 1377:Part 2:1990 4.5 Casagrande apparatus method	DIN 18122 Teill-1976 Determination of liquid limit and plastic limit	SS 027119-1989 Percussion Liquid Limit
規定項目 乱した土の 試料調製方法	自然含水比	◎	◎	◎	◎	◎
	空気乾燥	△	○	○	△	○
	粒度調整	425 μ m ふるい通過	425 μ m ふるい通過	425 μ m ふるい通過	0.4 mm ふるい通過	0.4 mm ふるい通過
	放置時間	気乾試料：約24時間	最少16時間	約24時間	数時間～4 日水浸	気乾試料：数時間ま たは翌日まで
試料分取量の目安		約200 g	150～200 g	約300 g	200～300 g 注)塑性限界も含む	湿潤：約100 cm ³ 気乾：約100 g
試験器具	硬質 ゴム台	硬 さ	D Durometer 80～90 (78～88)*	BS 903:Part A26 IRHD:84～94 (83～92)*	DIN 53505 Shore A:62～65 (61～64)*	エポナイトまたは雲 母と同じ特性を持つ 材料
		反 ば っ 弾 性	80～90% (鋼球の落下法)	BS 903:Part A8 20～35%(20 \pm 2℃)	DIN 53512 0.75～0.85	—
		黄銅皿の質量 (g)	—	—	200	192 \pm 10
		溝切りの先端幅(mm)	2 \pm 0.1	2 \pm 0.1	2	2 \pm 0.2
試験方法		落下高さ (mm)	10 \pm 0.1	10 \pm 0.2	10	10 \pm 0.2
		試料の最大厚さ(mm)	約10	約10	約10	約10
		回転速度 (回/秒)	2	1.9～2.1	2	約 2
		閉じた溝の長さ(mm)	約15	13	13	約13
法		落下回数と含水比の測 定点数 (多点法)	35～25回, 25～10回 の各 2 個 : 4 点	35～25回, 30～20回, 25～15回 の各 1 個 : 3 点以上 (A 法)	50～25回, 25～10回 の各 2 個 : 4 点以上	40～25回, 25～15 回の各 2 個 : 4 点
		一点法の有・無	無	有 (B 法), △	有 (4.6), △	有, △
		フォールコーン法の 有・無	無	無	有 (4.3,4.4), ◎	無

◎：特に推奨 ○：適用可 △：要注意 *：JIS A 形に換算した硬質ゴム台の硬さ —：規定なし

表-2 液性限界の一斉試験の測定仕様

試験の概要 一斉試験の略称	試料数	試料の種類	主な測定仕様および留意点	各試料の データ数
'92一斉試験	12	①自然粘土 (6 試料) ②製品粘土 (6 試料)	・ JIS A 1205-1990準拠 ・ 試験時の加水, 練混ぜ法などは各参加機関のル ーチン試験要領に任せる	① 7 ② 7
'93一斉試験	3	①カオリナイト系粘性土 ②有明粘土 ③モンモリロナイト系粘性土	・ JIS A 1205-1990準拠 ・ ①と②の試料は, 最初の試験時の落下回数値の 値により, 加水または乾燥条件の設定あり ・ 試験時の加水, 練混ぜ法などは各機関の判断	①53 ②53 ③53
'94一斉試験	3	①カオリナイト系粘性土 ②沖積粘性土 ③モンモリロナイト系粘性土	・ JIS A 1205-1990準拠 ・ 試料の分取量, 加水量, 練返し時間の統一 ・ 落下回数の繰返し測定 (許容差10%程度以下) ・ 加水過剰になっても途中で乾燥させない	①16 ②16 ③16
イギリス一斉試験	3	①粘土質砂 ② Gault 粘土 ③ Weald 粘土	・ BS 1377:1967 Test 2(A)準拠 ・ 一斉試験終了後に, 代表機関による各液性限界 測定器のチェックと経験豊富な試験者による規 格外測定器を用いた再試験の実施	①41 ②41 ③43
スウェーデン一斉試験	2	①低塑性粘土 (製品粘土) ②高塑性粘土 (製品粘土)	・ SS 027119準拠 ※詳細は Karlsson (1977) の原典参照	①32 ②32

し, 溝切りの先端幅は2.2～2.5 mm が多く, 中には 3 mm 前後に
磨耗したものもあった。一方, 硬質ゴム台の硬さと反ばつ弾性の関
係を, 購入後の経過年数で区分したのが図-2 である。なお, 図に
は '94一斉試験で使用した各参加機関の硬質ゴム台 (☆印) も併記
した。また, 図中の新品 (○印) は各メーカーが液性限界測定器と
して市販しているゴム台の測定値を示す。図から, ゴムの硬さは
 $H_s=72\sim94$ の範囲にあり, 特に市販の新品や一斉試験のゴム台

(2つの例外を除く) は JIS の規定を満足するが, 古いものはど硬
い傾向にあることが分かった。しかしながら, ゴムの硬さは同じで
も反ばつ弾性の値にはかなり幅がある (例えば, $H_s=85$ で差が
22%程度)。

専門家の話では, 一般に, この種のゴムは経過年数とともに硬さ
が増し, その変動は環境条件やゴムの配合などによって異なるが,
室温でおおよそ年間 $H_s=1$ 程度硬さが増し, 軟らかいゴムほど硬

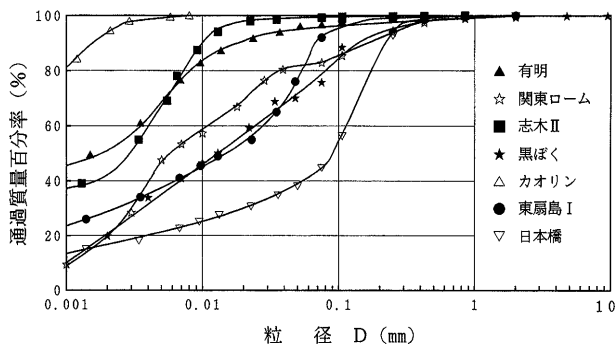


図-1 代表的な試料の粒径加積曲線

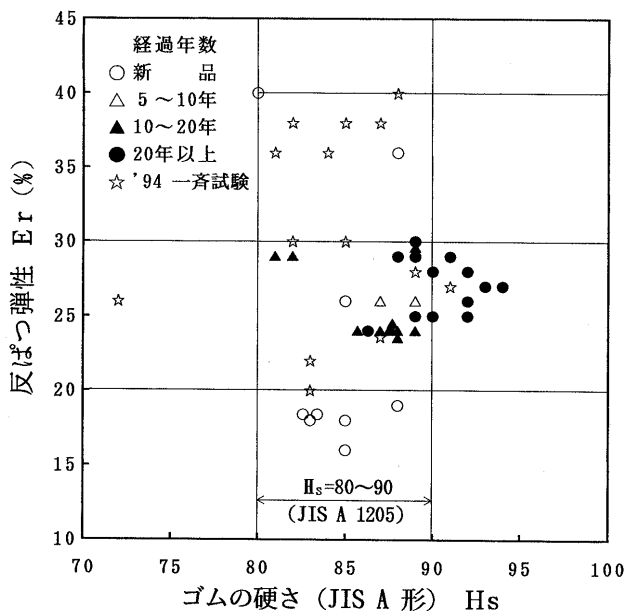


図-2 ゴムの硬さと反ばつ弾性の関係

くなる確率が高いといわれている。ただし、10数年以上前と現在とではゴムの配合、充填剤、製法などが違うので、この図から新品のゴムの硬さの経年変化を推定することには無理がある。また反ばつ弾性の経年変化については、現時点では明らかでない。

液性限界試験における JIS, ASTM, BS, DIN, SS (スウェーデン規格) の硬質ゴム台の規定は表-1 のとおりである。ただし、SS は材質のみを規定している。表より、硬さの低い DIN を除いて、硬さはほぼ同じであるが、反ばつ弾性は ASTM と DIN が BS や図-2 の測定器よりも著しく大きいことが特徴である。

2.3 実験方法

前述の結果を踏まえて、液性限界試験は表-3 に示すように、測定器などの試験器具や試験方法の要因を可能な範囲でいろいろ変えて行った。すなわち、①硬質ゴム台の硬さ、②硬質ゴム台の反ばつ弾性、③黄銅皿の傾斜角 θ 、④溝切りの先端幅、⑤カムの回転速度、⑥黄銅皿の落下高さ、⑦試料の量 (黄銅皿に入れる土の量) などが液性限界に与える影響を求めた。

①は現有測定器の主なゴム台の他に、特注品の硬さの低いゴム (硬さ: 50~80) と厚さ約 10 mm の鉄板または定盤 (硬さ: 100) を用い、JIS の許容寸法を満たすほぼ同じ質量 (171 ± 2 g) の黄銅皿の落下装置をそれぞれのゴム台などに取り付けた。②以降の実験は各要因の影響を明確にするために、他の要因を極力同じにした。

表-3 液性限界に及ぼす主な要因と試験条件

要 因 項 目		試 験 条 件		影響評価
試験器具	①ゴムの硬さ H_s	$H_s=50\sim100$ ($E_r=10\sim38\%$)		◎
	②ゴムの反ばつ弾性 E_r	$H_s=88, E_r=19\sim36\%$		△
	③黄銅皿の傾斜角 θ	$H_s=86, E_r=24\%$	$\theta=14\sim24^\circ$	△
	④溝切りの先端幅		2, 2.5, 3 mm	△
試験方法	⑤カムの回転速度		0.5, 1, 2, 3 回/秒	△
	⑥黄銅皿の落下高さ	8~12 mm	○	
	⑦試料の量	40, 50, 60 g	△	
個 人 誤 差		各要因の変動係数または標準偏差		△

◎: 影響が大きい ○: 影響がやや大きい △: 影響割合が比較的小さい

すなわち、②はゴムの硬さを 88、③~⑦はゴムの硬さを 86、反ばつ弾性を 24% とした。その他は特に断りのない限り、JIS の方法に従った。また、各実験はそれぞれの同一条件で、熟練者とやや経験の浅い計 10 数名によって複数回の試験を行い、その結果を平均値で表し、個人差の影響も調べた。

3. 実験結果と考察

3.1 ゴムの硬さ

ゴムの硬さ H_s と液性限界 w_L の関係を示したのが図-3 であり、Norman (1958) による Oxford 粘土 ($I_p = 41$) の結果⁷⁾ (ゴムの硬さは JIS A 形に換算) も併記した。本研究で使ったゴム台などの反ばつ弾性は 10~38% とさまざまであるためにデータに多少ばらつきはあるが、試料にかかわらずゴムの硬さが 80 程度以下では液性限界はほぼ一定と見なすことができる。そして、硬さが 80 程度を超えると液性限界は急激に低下し、この傾向は Norman の結果ともおおむね対応する。Sherwood (1970)¹¹⁾ もゴムが硬くなると、液性限界は小さくなると報告している。なお、この図におい

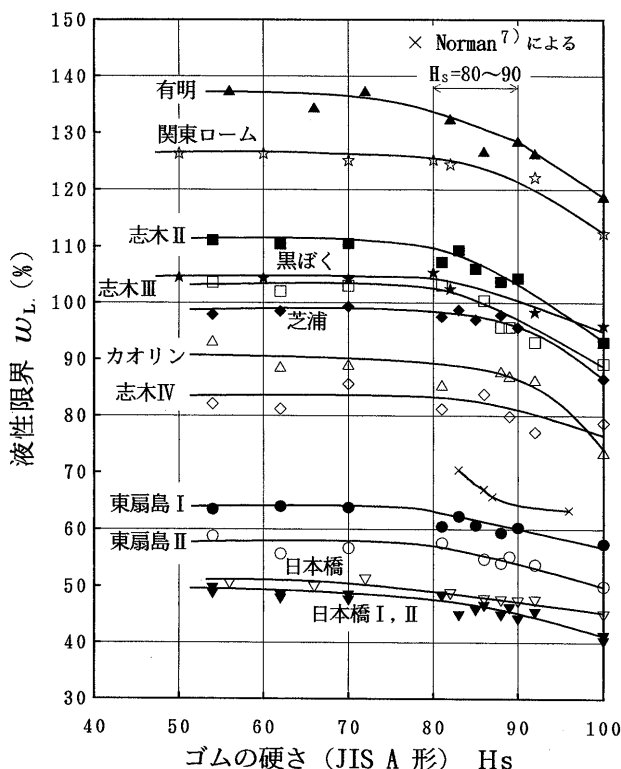


図-3 ゴムの硬さと液性限界の関係

て、熟練者と初心者との液性限界の差は平均して約3%程度であった。

また、図-3によると液性限界が大きい試料ほど硬さの影響は大きく、例えば液性限界が100%程度の試料では、ゴムが硬くなると液性限界は15%近く小さくなる。しかしながら、瀬古ら(1975)⁸⁾の研究によれば、 $H_s=81\sim 91$ ではゴムの硬さによる液性限界の差は1%程度以下であり、本研究の2~7%とは対照的である。

ところで、ゴムの硬さ $H_s=85$ を基準にして、液性限界 w_L の変化割合を $w_L/w_{LH_s=85}$ で表した代表的な結果が、図-4である。この図より、ゴムの硬さ変化に対する液性限界の相対的な変化割合は、 $H_s=100$ の金属板を除くと試料にかかわらず、大まかに見て同程度である。このようにゴムの硬さによって液性限界が変化することは、試料に与える衝撃エネルギーの大きさの違いによって考えられる。すなわち、軟らかいゴムは衝撃エネルギーをある程度吸収するが、硬いゴムは衝撃力が有効に試料に作用するためと思われる。図-5は'94一斉試験¹⁰⁾の結果を示したものである。図より、データ数が16と少ない割にはゴムの硬さが80~90に集中しているため、また反ばつ弾性の関係もあって、硬さの影響は有意な差が明瞭に認められない。この結果から、個人差や器械差は相対誤差にして±10%程度である。

図-6に示すように、ゴムの硬さが流動指数 I_f に及ぼす影響は、反ばつ弾性の関係もあって必ずしも明確ではない。すなわち、高塑性の土(志木Ⅱ、芝浦)では硬さが80を超えると I_f はやや小さくなる傾向が認められるが、中塑性の土(東扇島Ⅱ、日本橋Ⅱ)では I_f は硬さによらずほぼ一定と見なすことができる。図-7は個人差の影響、つまり図-3の平均値の内訳をゴムの硬さと変動係数の関係で表したものである。図から、硬さが80以下では変動係数は4%以下であるのに対し、これを超えると著しく大きくなる試料もあり、個人差が大きい。これは硬さが80以上では液性限界の変化が大きく、かつ液性限界が高い試料はわずかな試験方法や状態の変化に対して敏感に反応するためと考えられる。

以上の結果や従来の実績およびゴムの硬さの経年変化などを考え合わせると、JISの $H_s=80\sim 90$ の規定は液性限界が急激に減少する硬さの範囲であり、ゴムの硬さや個人差が試験結果に敏感に影響する。したがって、安定した液性限界を求めるには、硬さは $H_s=65\sim 75$ 程度が望ましい。しかし、国際的にある程度合わせるためには、 $H_s=80\sim 90$ が止むを得ない面もある。また、現在のJISの $H_s=80\sim 90$ の範囲にあっても、硬さの違いによって10~15%の

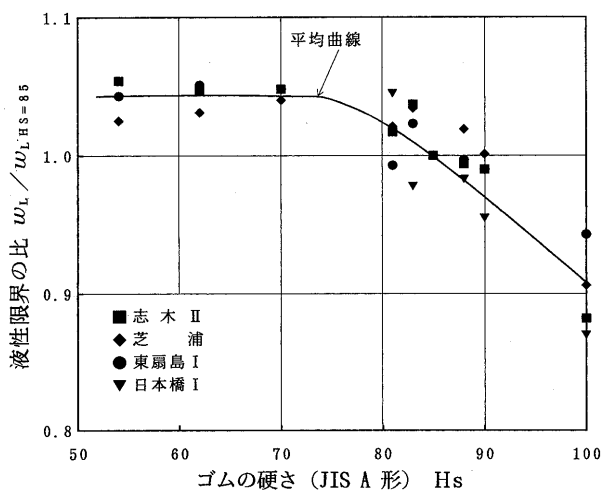


図-4 ゴムの硬さと液性限界の比の関係

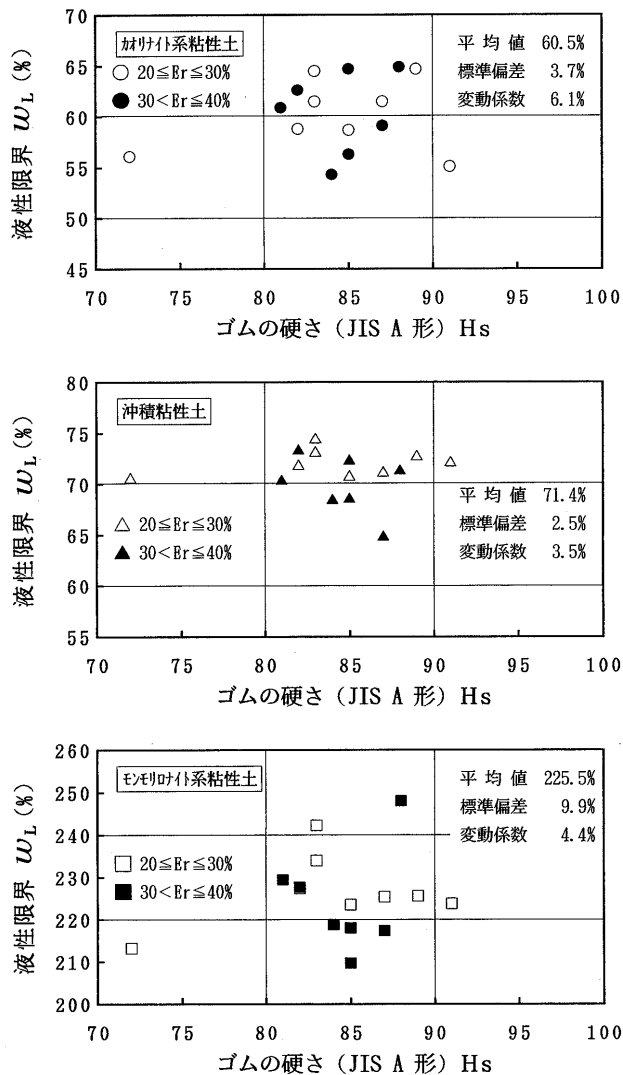


図-5 ゴムの硬さと液性限界の関係('94一斉試験)

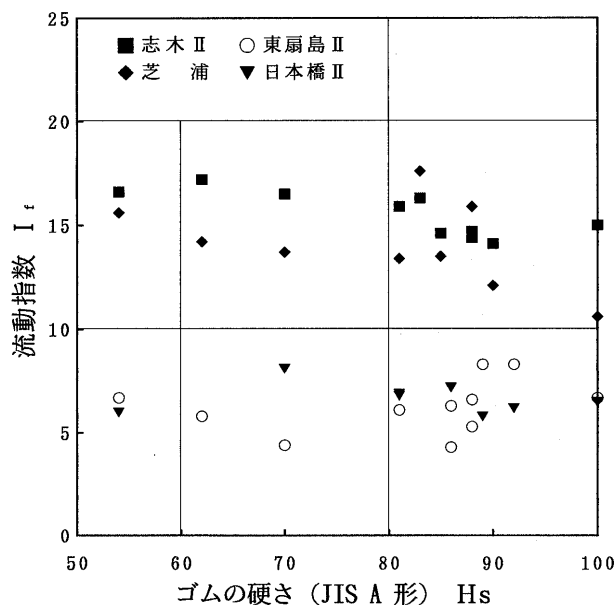


図-6 ゴムの硬さと流動指数の関係

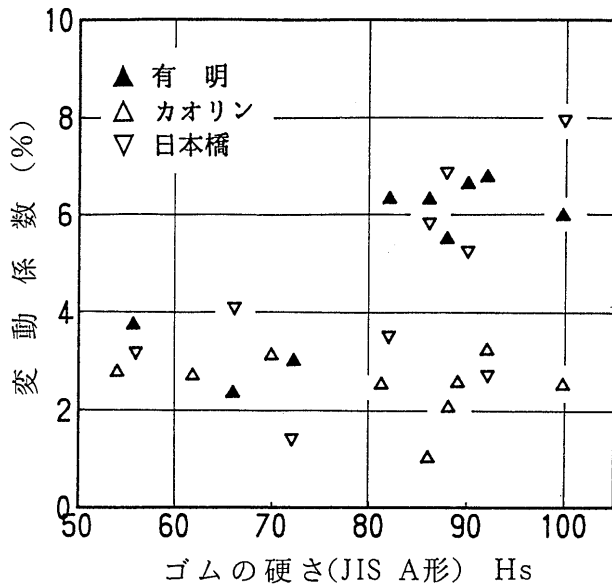


図-7 ゴムの硬さと変動係数の関係

相対誤差を生じる可能性があることも念頭におく必要がある。

3.2 ゴムの反ばつ弾性

図-8 に、ゴムの硬さが $H_s=88$ の場合の反ばつ弾性 E_r と液性限界 w_L の関係を示した。図より、試料にかかわらず、反ばつ弾性が 30% 程度までは液性限界がほぼ一定、または若干小さくなる傾向にあるが、これを超えるとやや低下する。その低下割合は 3~6% で、ゴムの硬さに比較して液性限界に及ぼす影響は 1/2 以下である。図-9 は '94 一斉試験¹⁰⁾ の結果を反ばつ弾性で整理したものであるが、JIS の $H_s=80\sim90$ では本研究とはほぼ同様な傾向が見られる試料もある。以上の結果および現在使われている硬質ゴム台から判断して、反ばつ弾性は少なくとも 30% を超えるものは好ましくないといえる。

3.3 黄銅皿の傾斜角

黄銅皿の傾斜角 θ とは皿がゴム台に接している時の皿上面の傾き角である。表-1 における国内外の規格・基準の傾斜角を、それぞ

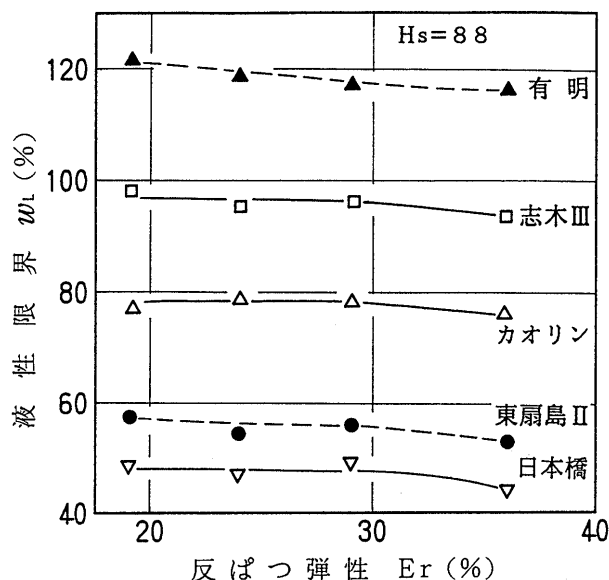


図-8 反ばつ弾性と液性限界の関係

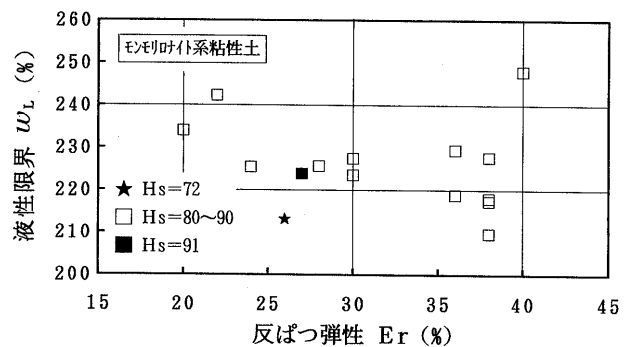
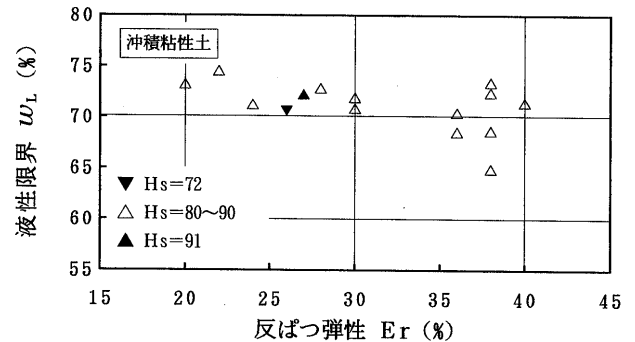
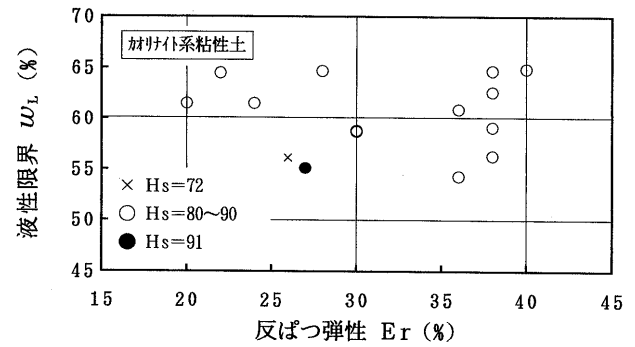


図-9 反ばつ弾性と液性限界の関係 ('94一斉試験)

れの液性限界測定器の寸法図から読み取ると $\theta=18\sim22^\circ$ となるが、DIN では $\theta=20^\circ$ と規定している。著者らの機関で現在使用している黄銅皿の傾斜角は $\theta=16\sim21^\circ$ で、上記の規格・基準とはほぼ同様であった。

図-10は黄銅皿の傾斜角 θ と液性限界 w_L の関係を示したものである。なお、データは測定値の最大値と最小値を削除してプロットした。この図より、実験を行った $\theta=14\sim24^\circ$ の範囲ではほとんど有意な差はなく、むしろ個人差やばらつきの中に十分含まれると判断される。

一方、瀬古ら (1975)⁸⁾ は、黄銅皿の傾斜角の影響は $\theta=13\sim24^\circ$ 範囲内で皿の傾きが大きくなるほど液性限界は増大し、その偏差は平均液性限界の 3~6% にも及ぶことを報告している。つまり、瀬古らによる差動トランス型力計を用いた皿の衝撃力の測定によれば、黄銅皿の傾きが大きいほど、皿の落下によるゴム台への衝撃力は低下する。それゆえ、同一含水比では溝を合流させるための落下回数が増すために流動曲線が上方に移動し、液性限界が大きくなるとしている。したがって、本研究は瀬古らの報告とは異なる結果が得られた。

3.4 溝切りの先端幅

溝切りの先端幅の影響を調べるために、使用した溝切りは先端幅 2 mm、溝の深さ 7.5 mm の JIS に規定するものが長年の試験で磨

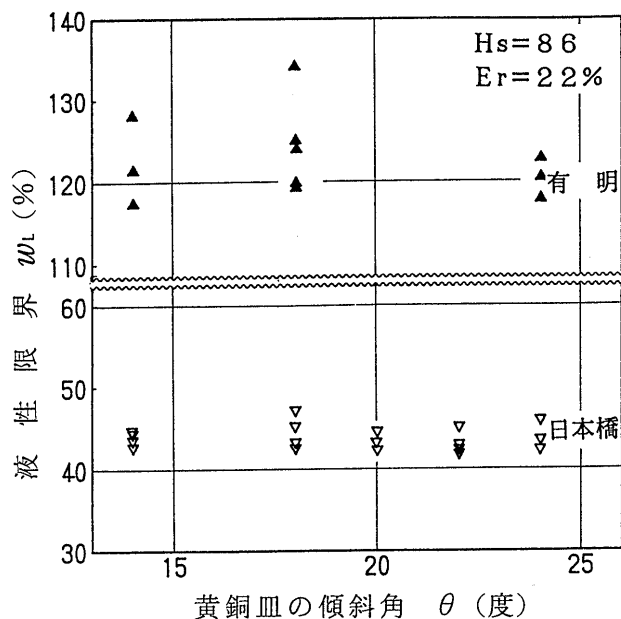


図-10 黄銅皿の傾斜角と液性限界の関係

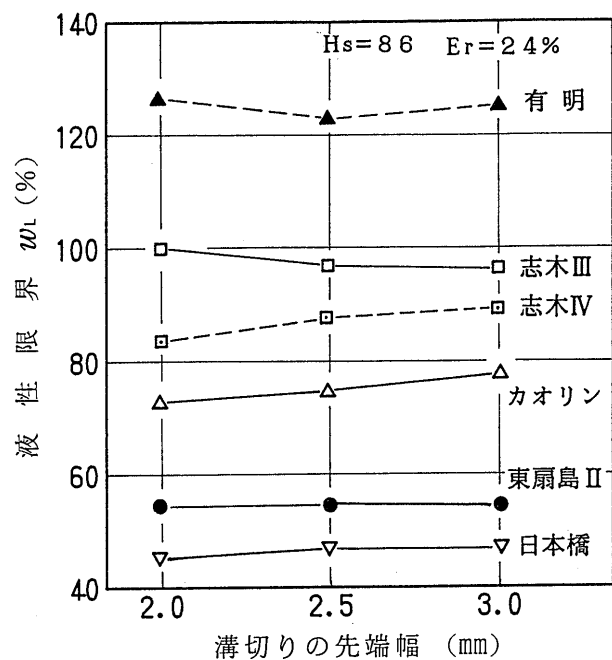


図-11 溝切りの先端幅と液性限界の関係

耗して先端幅が2.5~3 mmと広く、また溝の深さも7.3~7.1 mmと多少浅くなったものを用いた。図-11に、溝切りの先端幅と液性限界の関係を示した。その結果、溝切りの先端幅が大きくなると液性限界は大きくなるもの、小さくなるもの、ほとんど変化しないものと試料によってさまざまである。本来、溝の幅が大きくなると、溝の長さが約15 mm 閉じるためにはより衝撃エネルギーを必要とし、落下回数が増して液性限界は大きくなると予想される。しかし、溝の幅が広がると同時にその深さも浅くなり、溝切り後の試料断面は一定の形状をもった規定斜面の押え盛土部分の土が少なくなるので、逆に落下回数が減り液性限界が小さくなることも考えられる。一方、Stefanoff (1957)¹³⁾やSherwood (1970)¹⁴⁾の報告では、溝の幅の増加(2~4.1 mm)とともに液性限界は2~15%大き

くなることを示している。

いずれにせよ、溝切りの先端幅の影響はあまり明確にすることはできなかった。しかしながら、溝切りは使用頻度に応じて規定の形状・寸法を満たしているかどうかをときどき調べるのが肝要である。参考までに、BS および DIN や SS における溝切りの先端幅の磨耗限度は、それぞれ 3 mm, 2.3 mm であり、これらの許容値を超えたら新品と取り替えることが規定されている。

3.5 カムの回転速度

黄銅皿の落下速度、つまりカムの回転速度と液性限界の関係を、図-12に示した。図より、回転速度2回/秒以下では液性限界がほぼ一定であるが、3回/秒になると液性限界は多少小さくなる傾向がある。ただし、カオリンと日本橋の粘土はほぼ一定である。この結果から判断する限り、回転速度が2回/秒より多少遅くても液性限界に及ぼす影響はほとんどないが、これよりも速くなることは好ましくない。したがって、カムの回転速度に関する限り、電動式液性限界測定器 (ASTM では使用可) を特に推奨するほどのことはないと考える。

3.6 黄銅皿の落下高さ

黄銅皿の落下高さや液性限界の関係が、図-13である。その結果、落下高さが大きくなるにつれて液性限界はしだいに小さくなる。また、落下高さが8~12 mmの範囲における液性限界の変化は5~10%程度であり、この傾向は液性限界が大きい試料ほどやや顕著である。したがって、落下高さの要因はゴムの硬さほどではないにしても、液性限界に大きく影響を及ぼすことは明らかである。ゆえに、試験の実施時には黄銅皿の落下高さを所定の加工寸法公差を有する高さゲージ (JIS では 10 ± 0.1 mm) により、確認および調整することが重要である。

3.7 試料の量

黄銅皿に試料の量をどの程度入れるかについて、JIS は『最大厚さが約1 cm になるように入れ、形を整える』とのみ規定し、黄銅皿に土を入れる範囲やその量についての具体的な規定がない。これは土の種類や状態によって異なるためと思われる。ここではその量

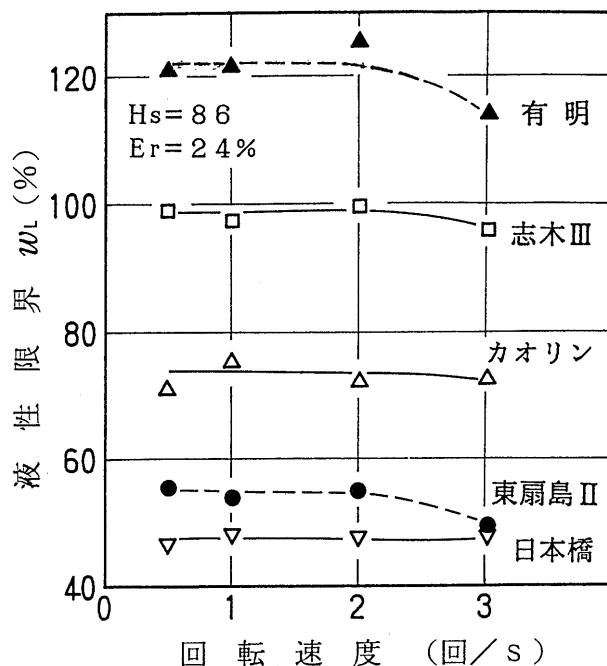


図-12 回転速度と液性限界の関係

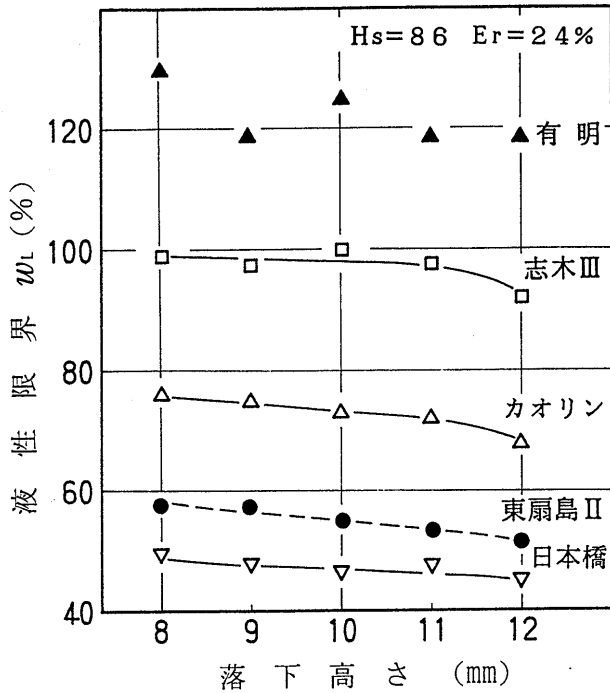


図-13 落下高さと液性限界の関係

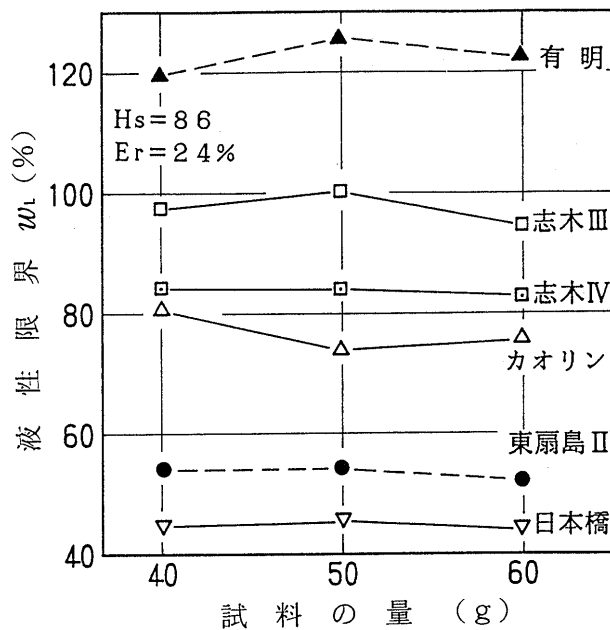


図-14 試料の量と液性限界の関係

を湿潤質量で表して、液性限界との関係を図-14に示した。なお、試料の最大厚さは約10 mm になるように入れたので、試料の量が多くなるに伴い、黄銅皿の広い範囲に試料を広げた。

この図より、傾向的には必ずしも明確ではないが、試料の量が60 g になると、溝切り後の作製斜面土の余分な増量によりその物体力が増大するために、液性限界はやや低くなる傾向が見られる。その結果、最大厚さ約10 mm の試料に規定の斜面を作製するためには40~50 g が妥当であるが、試料によっては40 g では溝切りの先端を黄銅皿に対して正確に直角にあてて溝を切らないと、溝切り後の試料断面が非対称になる場合がある。また、それより少ないと

所定の深さの溝を切ることができない。したがって、通常の沖積粘性土では45 g 程度が適切な試料の量の目安といえる。

4. 個人差および各要因の影響割合

4.1 個人差

図-15は試験者の熟練度や個人差によるばらつきを見るために、各要因において同一条件で4個以上の実験を行ったものについて、標準偏差 σ と液性限界 w_L の関係を示したものである。ただし、JISの規定から著しくかけ離れた測定方法（例えば、硬さ $H_s=100$ 、落下高さ12 mm、回転速度3回/秒、溝切りの先端幅3 mm など）のデータは除外した。その結果、試料とその扱いやすさや各要因ごとの試験個数の相違によってばらつき程度が異なる。また、試料・要因別も含んだ全体の個人差によるばらつきの範囲は、変動係数にして最大6.5%（95%信頼限界で約13%）になるが、おおむね4%以下である。

一方、土の液性限界・塑性限界試験に関する一斉試験が1966年にイギリス¹¹⁾で、1970年代にスウェーデン¹²⁾で、1992, 1993, 1994年に我が国¹⁰⁾で実施された結果を図-16に示した。この図より、全国規模の一斉試験における液性限界の平均変動係数は、イギリスが7.5%、スウェーデンが5.1%、日本の'93一斉試験が6.6%であった^{10), 11), 12)}。また、高液性限界の土ほどおおむね変動係数が大きく

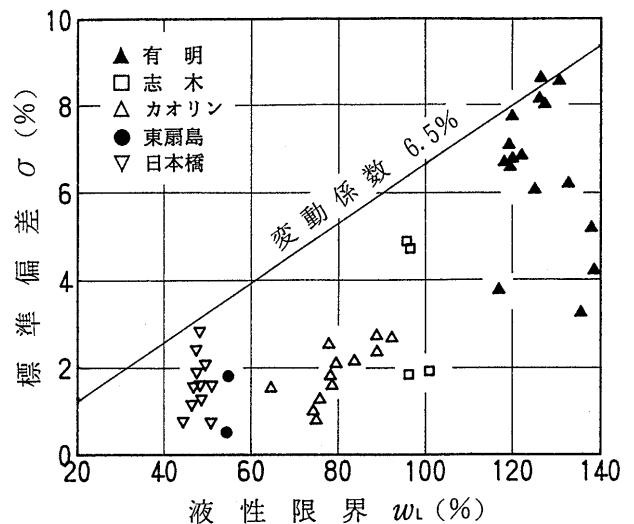


図-15 液性限界と標準偏差の関係

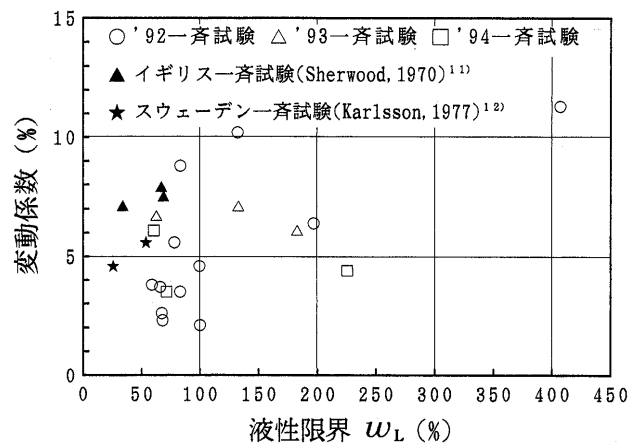


図-16 液性限界と変動係数の関係（国内外の一斉試験）

なる傾向にある。例えば、'92一斉試験の関東ロームやモンモリロナイト系粘土は変動係数が10%を超えている。しかしながら、詳細な測定仕様を設定した'94一斉試験の変動係数は、3.5~6.1%と小さい範囲（平均4.7%）であった。したがって、日本、イギリス、スウェーデンにおける試料の種類や物理的性質および液性限界測定器の仕様などは異なるものの、これらの変動係数はほぼ同程度と考えられる。

また、初心者の試験では変動係数は10~30%にもなるとの報告¹⁴⁾がある。図-17は過去11年間の学生土質実験における液性限界の変動係数の推移を示したものである。ただし、試験実施年度によっては明らかに異常な液性限界の測定値が出現した場合には（最大1~2個程度）、この異常値を除外して変動係数を求めた。用いた試料は毎年共通の混合土（カオリン粘土70%、豊浦標準砂30%で配合）で、液性限界測定器の仕様などすべて同一条件で8~16名の学生が測定している。図より、変動係数は4.0~7.0%の範囲にあり、その平均は5.5%であった。佐野・岩淵（1991）¹⁵⁾の研究によれば、3年間にわたる学生による笠岡粘土の液性限界の変動係数（データ数29~37）は6~11%であるが、平均値±標準偏差の範囲外の測定値（これを佐野らは異常値と定義した）を除いた場合には、その変動係数は3~4%に減少している。これは本研究の学生実験にお

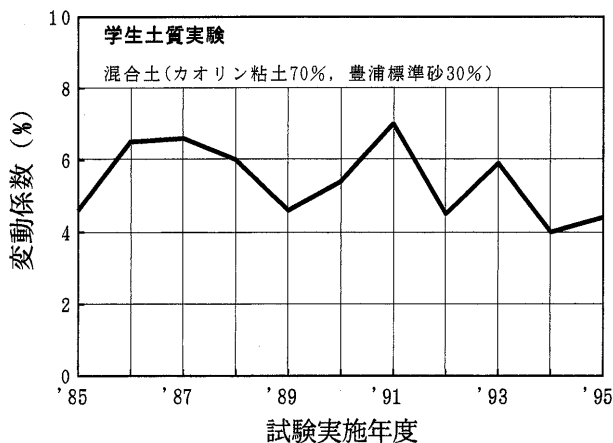


図-17 液性限界の変動係数の推移（学生土質実験）

ける測定事例とはほぼ同程度の精度である。

以上、試料の取り扱い方や測定器などをできる限り統一すれば、熟練度を増すことによって個人差はある程度低減できるが、実際には測定器差や個人差などのために、測定値に対して±10%程度のばらつきは避けられないといえる（例えば、図-5、9参照）。

4.2 各要因の影響割合

液性限界試験の要因（硬さ、反ばつ弾性など）の影響割合を見るために、液性限界と各要因による変動係数の関係を図-18に示した。ここで、要因別の変動係数は各試料のこれらの標準偏差をその試料の全要因に対する液性限界の平均値で除して算出した。図より、各要因による変動係数は試料にかかわらず、いずれも8%以下である。また、最も影響が大きい要因はゴムの硬さ、次に落下高さであり、それ以外はこれらに比べて影響割合が比較的小さい。しかし、液性限界が60%以下の試料ではゴムの硬さ以外の影響割合は必ずしも明確でない。

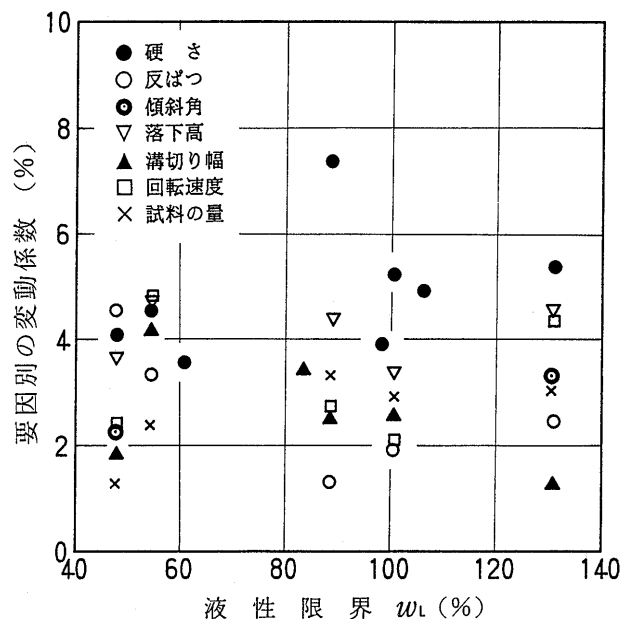


図-18 液性限界と変動係数の関係（要因別）

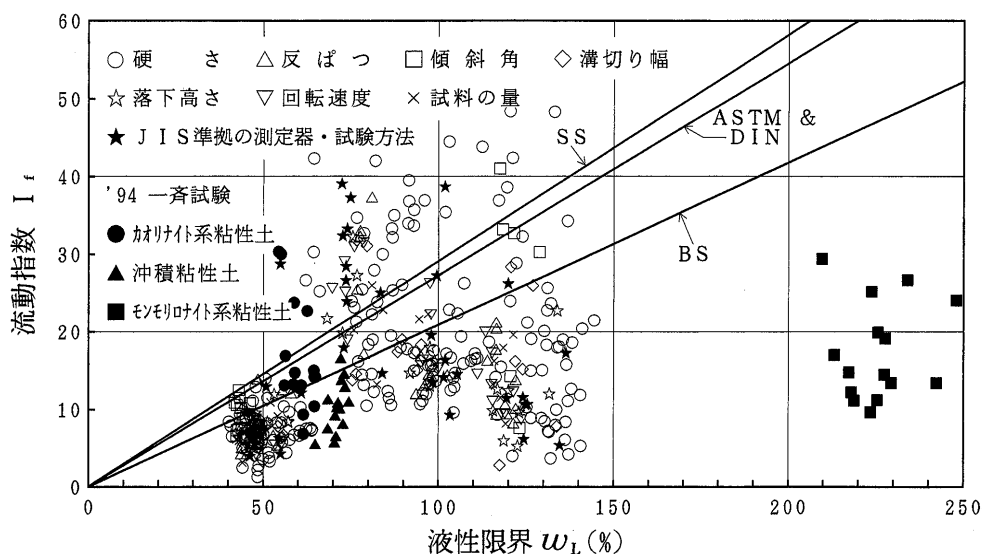


図-19 液性限界と流動指数の関係

したがって、今回の実験では同一条件の場合は同じ測定器を用い、しかも他の条件を一定にしているが、実際の一般的な試験では測定器や熟練度がいろいろと異なり、各要因が複雑に相互にかかわって、時にはその影響が相殺、または増幅されることもあると考えられる。図-19にその一例として、液性限界 w_L と流動指数 I_f の関係で全データを要因別に示すとともに、'94一斉試験の結果も併記した。ここで、図中の BS, ASTM, DIN および SS の $I_f \sim w_L$ 関係式は、各国でそれぞれ規格・基準化された液性限界の一点法²⁾を次式のように式変形して誘導したもので、一つの目安とした。

$$\text{BS} : I_f = 0.208 w_L \quad (1)$$

$$\text{ASTM \& DIN} : I_f = 0.272 w_L \quad (2)$$

$$\text{SS} : I_f = 0.291 w_L \quad (3)$$

図より、 $I_f \sim w_L$ 関係は高塑性の土ほど各要因、特にゴムの硬さのばらつきが顕著で、また正比例的な関係も認められないようである。もちろん、一点法自体に地域性や地質学的成因などの影響も含まれることはいうまでもない。

以上のことから、規格・基準に従った試験を実施することが重要であるとともに、ゴムの硬さについては特に注意が必要である。

5. ま と め

以上の実験の範囲内で得られた結論を要約すれば、次のとおりである(表-3の影響評価欄参照)。

(1) 液性限界の個人差は、変動係数で表すと最大6.5%である。この数値は日本、イギリス、スウェーデン3国のそれぞれの全国一斉試験結果と同程度のばらつきである。

(2) 液性限界に及ぼす要因としては、ゴムの硬さが最も顕著で、次いで落下高さである。反ばつ弾性、黄銅皿の傾斜角、回転速度、試料の量などによる影響はこれらに比べて小さい。

(3) これらの要因が液性限界に及ぼす影響は、試料の塑性指数が大きいほど顕著である。しかし相対値で比較すると、その変動率はほぼ同じ程度である。

(4) 液性限界測定器は硬質ゴム台の硬さが $H_s = 65 \sim 75$ 、反ばつ弾性が $E_r = 30\%$ 以下が望ましい。

(5) 液性限界の試験誤差は $\pm 10\%$ 程度と見られる。

現行の試験方法と装置は、最近の計測・分析機器や測定技術の著しい進展とは裏腹に、旧態依然である。ゆえに、今後の課題は新しい測定方法の提案や計測技術の開発・導入も含め、まだ十分に検討されていない幾多の問題点の解明や JIS の規定の補完などを再検討すべきであろう。またその際、試験精度の向上のみならず、試験方法などの簡略化を図ることが肝要である。

謝 辞

(株)土質工学会「土のコンシステンシーに関する研究委員会」(委員長: 矢橋農吾・千葉大教授, 活動期間: 平成4年4月~平成7年3月)における調査・研究活動の一環として行われた液性限界・塑性限界の一斉試験結果について、特に液性限界に関する貴重なデータを本論文で引用することを快諾していただいた矢橋委員長に深甚なる感謝の意を表します。また、硬質ゴムの硬さなどについて、

いろいろご教示いただいた(株)化学品検査協会の丹野博実氏に深甚なる感謝の意を表します。さらに、数多くの実験に際しては、埼玉大学工学部および日本大学短期大学部の学生諸君にご協力いただいたことを記し、厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D. (1981): An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, pp. 34-41.
- 下辺 悟・窪田洋司 (1995): 委員会報告3.2コンシステンシー限界試験の国内外の規格・基準, 「土のコンシステンシーに関するシンポジウム論文集」, pp. 31~35.
- 土質工学会編 (1990): 「土質試験の方法と解説」, 第5章 液性限界・塑性限界試験, pp. 71~80.
- Wood, D. M. (1990): Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics, Cambridge University Press, pp. 256-309.
- 土質工学会編 (1983): 「土質試験法(第2回改訂版)」, 第6章 液性限界・塑性限界試験, pp. 117~141.
- 三木五三郎 (1963): 土の液性限界試験法の変遷と問題点, 「生産研究」, Vol. 15, No. 11, pp. 18~22.
- Norman, L. E. J. (1958): "A comparison of values of liquid limit determined with apparatus having bases of different hardness," Géotechnique, Vol. 8, No. 2, pp. 79-83.
- 瀬古隆三・高橋一晃・瀬古治生 (1975): 液性限界に関する2, 3の問題, 「土と基礎」, Vol. 23, No. 11, pp. 33~38.
- 小川富美子・小林正樹 (1995): 土の練返し時間と液性・塑性限界の関係, 「土のコンシステンシーに関するシンポジウム論文集」, pp. 121~128.
- 窪田洋司・斎藤幸雄, 佐野信房・下辺 悟 (1995): 委員会報告3.5一斉試験, 「土のコンシステンシーに関するシンポジウム論文集」, pp. 44~62.
- Sherwood, P. T. (1970): "The reproducibility of the results of soil classification and compaction tests," Ministry of Transport, RRL Report LR 339, p. 43.
- Karlsson, R. (1977): "Consistency limits: A manual for the performance and interpretation of laboratory investigations," Part 6, Swedish Council for Building Research, D6.
- Stefanoff, G. (1957): "Discussion on liquid limit," Proc. 4th Int. Conf. on SMFE, Vol. 3, pp. 97-98.
- 松本鍊三 (1962): 土の物理試験値の個人差について(続報), 「土と基礎」, Vol. 10, No. 3, pp. 11~15.
- 佐野信房・岩淵祐一 (1991): フォールコーン法と現行法を用いた学生実験におけるコンシステンシー測定精度, 「第26回土質工学研究発表会講演集」, pp. 263~264.
- 日本工業標準調査会審議 (1995): 「土の液性限界・塑性限界試験方法 JIS A 1205-1995」, 日本規格協会.

補 注. 加硫ゴムの硬さ試験方法

現在、液性限界測定器の硬質ゴム台の硬さは、JIS K 6301-1983「加硫ゴム物理試験方法」に規定された手順により測定されている。しかしながら、ガットスタンダードコード成立後、ISO(国際標準化機構)規格への整合が要求されつつあることによって、新たに規格化された JIS K 6253-1993「加硫ゴムの硬さ試験方法」が制定された。それに伴い、現行の液性限界試験方法の引用規格も平成7年11月に改正された¹⁰⁾。すなわち、『硬質ゴム台は、JIS K 6301に規定するスプリング式硬さ試験機 A 形によって試験して得られる硬さが 85 ± 5 のもの、または JIS K 6253に規定するデュロメータ硬さ試験タイプ A による硬さが 88 ± 5 のものとする』と上記2つの規格に対応したゴムの硬さ規定が採用されている。後者の新規格値は、従来の前者の規格値に合わせて換算したものである。