

フォールコーンによる液性限界試験方法の検討

(A Proposal of Test Method for Determination of the Liquid Limits of Soils by Fall Cone Method)

古河幸雄ⁱ⁾ (Yukio Furukawa)
 風間秀彦ⁱⁱ⁾ (Hidehiko Kazama)
 藤田龍之ⁱⁱⁱ⁾ (Tatsushi Fujita)

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／粘性土／フォールコーン (IGC : D2/C3)

1. ま え が き

土の液性限界試験方法は、Atterberg が提唱したコンシステンシー限界を Casagrande が機械的に測定する方法として提案し、それに多少の改良を加えて世界各国が規格・基準化して（以下、Casagrande 法という）、日本にもそれが導入された。この試験方法には、定義が試験方法に反映されていないこと、試験装置が試験結果に影響を及ぼすことなどの問題点が指摘¹⁾⁻⁴⁾されている。これらの問題点の内、試験装置や試料調製、試料の練返しなどに関するものは、細部を規定することによりある程度解決が可能である。しかし、土のコンシステンシー限界の定義は含水比の低下に伴う静的な状態変化であるにもかかわらず、液性限界の試験方法は、衝撃落下による動的なせん断試験的手法により求めるため、この試験方法を継承する限り、解決できない問題点である。

Casagrande 法による液性限界試験の問題を解決するため、フォールコーン法を導入する試みも数多く報告されている⁵⁾⁻²²⁾。フォールコーン法は、スウェーデンで軟らかい土のせん断抵抗をコーンの貫入試験から求める方法として提案され、その後コンシステンシー限界を求める試験方法として導入された。この方法は、コーンが試料に貫入していくとき、コーンの落下速度がゼロからある速度まで達し、その後は速度が急速に減じて再びゼロになる。このとき、測定中の力学的挙動は、動的状態と静的状態が混在することになる。しかし、Casagrande 法は常に動的状態で測定しているのに対し、フォールコーン法は土のコンシステンシー限界の定義に準ずる方法といえる。

本研究は、筆者らのこれまでの研究成果を総合的に取りまとめたものであり¹⁶⁾⁻²²⁾、次の点を明らかにすることを目的とした。試験装置に関しては、試料を入れる容器の寸法および形状、コーンの先端角度および質量。試験方法および試料に関しては、コーンの貫入時間、コーン貫入量の測定範囲、適用土質の種類。結果の整理では、図化する目盛の種類、液性限界を規定する規定貫入量。結果の信頼性では、結果のばらつき程度などである。また、それらに加

えて一点法および液性限界・塑性限界の同時測定法についても検討した。

2. 国内外の規格・基準および既往の研究

2.1 外国の規格・基準

表-1は、フォールコーン法を規格・基準化している主な国²³⁾⁻³⁰⁾の試験条件の詳細であり、それぞれの国で少しずつ異なっている。我が国では、最近になってフォールコーンを用いた液性限界試験方法の系統的研究が進み¹⁶⁾⁻²²⁾、1997年に地盤工学会基準に制定された³¹⁾。これらの国の中で、イギリスやカナダでは Casagrande 法より優れた方法として推奨し、スウェーデン、ノルウェー、カナダではせん断強度や鋭敏比を求める方法としても規格化されている。試験方法には、棒の先端にコーンを取り付けたものを貫入試験器に装着しコーンを試料表面に接触させてから自由落下させる方式、やじろべい形式でバランスの中央にあるコーンを試料に貫入させて測定する方式（中国、旧ソ連）の2通りである。

2.2 我が国における試験方法に関する既往の研究

表-2は、我が国のフォールコーン法の試験条件に関する主な研究であり、研究は1960年代から始まり、その流れは2通りある。すなわち、上原⁵⁾から永石⁸⁾らまでは、ファイネスナンバー（コーン貫入量10 mmの含水比）とJISに規定されている試験方法（以下、JIS法という）により求めた液性限界の相関性を検討した研究、北郷⁹⁾を始めとする他の研究者¹⁰⁾⁻²²⁾は、フォールコーン法による液性限界の試験方法を検討したものである。これら報告におけるフォールコーンの適用性について、前者のファイネスナンバーは液性限界が100%までは近似して対応性が高いが、それ以上になるとJIS法が大きくなると報告され⁸⁾、後者では液性限界が160~200%以上になると対応性が悪くなる²⁰⁾というように見解が異なっている。これは、液性限界に対応するコーン貫入量の違いに起因しているためであろう。

表中の北郷⁹⁾から風間²²⁾までの研究は、コーンや容器の仕様、JIS法の液性限界に対応する規定貫入量およびその相関性、一点法の提案、塑性限界との同時測定方法など多岐に及んでいる。コーンの仕様については、様々な先端角度と質量の組み合わせにより液性限界に対応する貫入量を提案している。そのため、いづれのコーン仕様が適切なものか、そのときの貫入量はいくらのか曖昧が残る。容器の大きさは用いるコーンの仕様により異なるが、コーン条件が同じならばほぼ近似した傾向が得られており、円筒容器では、その範囲は直径が50~60 mm、深さが26~40 mmである^{7),10),12),16)}。一点法についての提案は少ないが、JIS法との相対誤差が±5~10%程度であり、簡便法として位置づけられるとの報告がある^{6),22),32)}。また、塑性限界を液性限界と同時に測定する手法は、

i) 日本大学工学部土木学科 助教授（郡山市田村町徳定字中河原 1）
 ii) 埼玉大学地盤水理実験施設 助教授（浦和市下大久保255）
 iii) 日本大学工学部土木学科 教授（郡山市田村町徳定字中河原 1）
 (2000. 3. 16 原稿受付・討議期限 2001. 9. 1. 要請があれば1か月の期限延長可能)

表-1 外国のフォールコーン法の試験条件

分類	国名	コーン		容器		測定数	測定貫入量の範囲(mm)	規定貫入量(mm)	貫入時間(秒)	結果の整理		
		角度(°)	質量(g)	内径(mm)	深さ(mm)							
30度コーン	I	イギリス ²³⁾	30	80	55	40	4点以上	15~25	20	5	正方眼	
		フランス ²⁴⁾	30	80			検定線と貫入量の交点			5	検定線	
		ニュージーランド ²⁵⁾	30	80	55	40	4点以上	7~15	20	5	正方眼	
	II	旧ソ連 ^{26)注1)}	30	76	37	25	10 mm になるまで加水			10	5	10 mm
		中国 ^{27)注1)}	30	76	37	25				10	5	
60度コーン		スウェーデン ^{28)注2)}	60	60	60 50	30 25	3点以上 一点法	7~15 7~15	10	10	片対数	
		ノルウェー ^{29)注2)}	60	60	65 55	32 27	3点以上 一点法	7~15 7~15	10	5	片対数	
		カナダ ³⁰⁾	60	60	50	25	3~4点 一点法	7~15 8~12	10	5	正方眼	
		日本 ³¹⁾	60	60	60	30	5点以上	7~15	11.5	5	正方眼	

注1) : 容器寸法を図面より判読

注2) : 容器の形状は半球

表-2 国内におけるフォールコーン法の試験条件の仕様に関する研究

著者名	コーン		容器		w_L, w_p に対応する規定貫入量(mm)	検討事項
	角度(°)	質量(g)	内径(mm)	深さ(mm)		
上原・砂川 ⁵⁾	60 90	60 100	60	25	10	F と w_L の比較 (多点法)
箭内・五味 ⁶⁾	60	60	52	29	10	容器の寸法, F と w_L の比較 (多点法, 一点法)
西亀達夫 ⁷⁾	60	60			10	F と LL の比較
永石義隆 ⁸⁾	60	60	50 60	30 25	10 10	F と w_L の比較 (一点法)
北郷ら ⁹⁾	30~ 150	100	30~ 70	20~ 30	30°は15.1 60°は11.7 90°は7.5	多点法の規定貫入量 容器の寸法 一点法
	90 90 90	100 200 300	60	30	$LL:10.5, PL:1.1$ $LL:14.7, PL:1.8$ $LL:17.3, PL:2.3$	液性・塑性限界同時測定
東山・須藤 ¹⁰⁾	30~ 120	20~ 100	20~ 100	10~ 60	10	容器の寸法, 貫入機構
佐野ら ¹¹⁾⁻¹³⁾	60~ 150	70~ 400	30~ 60	20~ 40	コーンによる換算係数を提案	容器の寸法, コーンの様 液性・塑性限界同時測定
鈴木輝之 ¹⁴⁾	90	100 200 300	60	30	$LL: 9.5, PL:1.0$ $LL:13.0, PL:1.6$ $LL:17.1, PL:2.0$	液性・塑性限界同時測定
甲本 ¹⁵⁾	60	60	100	50	$LL:12.0, PL:1.3$	液性・塑性限界同時測定
藤田ら ^{16)17),21)} 古河ら ^{18),19)}	30~ 90	60~ 140	20~ 90	10~ 90	貫入量測定範囲 6.4~15	容器寸法と形状コーンの仕様
	60	60	30~95半球 60 (半球)		11.3	図化目盛りの種類の検討 規定貫入量、適用土質
風間ら ^{20),22)}	60 90	60 100	上径60 下径50 深さ25		正方眼12.0 片対数12.7 両対数12.4	図化目盛りの種類の検討 規定貫入量 液性限界の一点法 液性・塑性限界同時測定

F : ファイネスナンバー

同一試験装置で異なった物理量を測定できる利点があり, JIS 法と良好な関係を示す報告^{14),15)}がある。しかし, 塑性限界付近の試料は, 容器に均等に詰めることが困難であることや結果の整理で直線関係が得難いことなどから, JIS 法との対応性は液性限界に比べてかなり悪いという矛盾した報告²⁰⁾もある。

3. 試料および実験方法

3.1 試料および装置

試料は, 試験結果の適用性を考慮して, 土の特徴や種類が異なる多種多様な土を現場から採取したものと製品粘土である。図-1は用いた試料の塑性図 (液性限界 $w_L \geq 250\%$ の試料は 2 種類あるが省

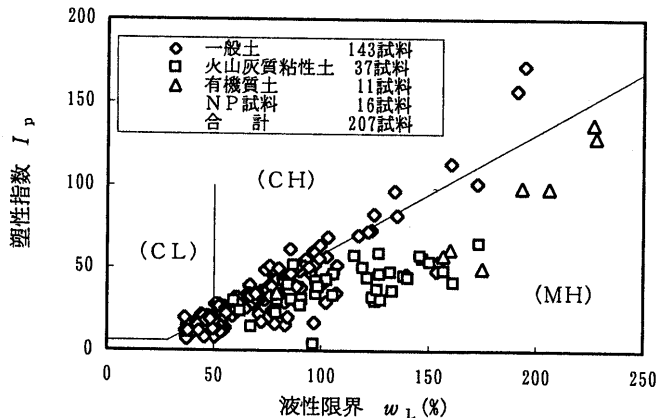


図-1 用いた試料の塑性図 (試験方法は JIS 法による)

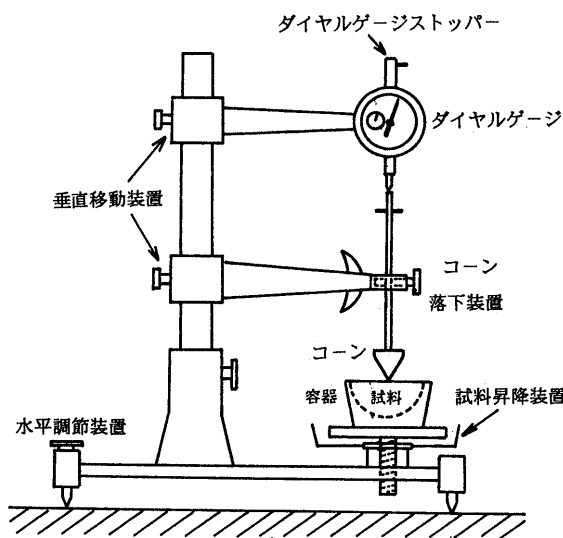


図-2 実験装置

略)であり、図中には土質分類ごとの試料数も示し、その総計は207試料である。これら試料の分類で、有機質土は暗色に富み、植物繊維が含まれているか、あるいは分解が進んでいるもので、強熱減量 $L_d \geq 15\%$ 以上のものとし、火山灰質有機質土は火山灰質粘性土に分類した。図中に示した分類で、前述した特殊土以外の土は一般土に分類した。試料は、製品粘土を除き、自然含水比状態のものをすべて $425 \mu\text{m}$ ふるいで裏ごしをして、密閉容器に保存した。

本研究に用いたフォールコーン装置は、図-2である。

3.2 実験方法

試料にあらかじめ加水し、練返ししながら実験が可能になる含水比まで試料調製を行い、試験開始前にはさらに3~5分間程度の練返し操作を行った。実験は同一含水比で JIS 法とフォールコーン法で行う。JIS 法では落下回数が相前後する回数の差が $\pm 5\%$ 以内になったとき、それを平均してその含水比の落下回数とし、フォールコーン法では貫入量をダイヤルゲージで $1/100 \text{ mm}$ まで測定し、相前後する貫入量の差が貫入量の $\pm 1.5\%$ 以内になったとき平均して貫入量とした。含水比測定は溝が合流したところ、およびコーン直下の試料を採取して行った。なお、JIS 法における試験器のゴムの硬さは、JIS K 6253に規定するデュロメータ硬さ試験タイプ A (規定値: 88 ± 5) により測定したところ、全て範囲内にあり平均85で

あった。

フォールコーン法における結果の整理は、縦軸を含水比、横軸を貫入量 (mm 単位) とし、貫入量の目盛の種類は、検討目的により正方眼、片対数、両対数に変えている。

4. フォールコーン法における実験器具等の仕様の検討

4.1 容器形状と大きさ

この検討に用いた容器形状およびコーンの仕様は、表-3である。これを、容器の深さの検討では、容器の直径を一定 (61 mm) にして深さを10~91 mm まで、容器の直径の検討では、容器の深さを一定 (70 mm) にして直径を20~89 mm まで、半球容器は直径 (深さは直径の1/2) を29~95 mm まで変化させ、設定した含水比範囲のすべての測点に対して各コーンの仕様で行った。コーンの仕様は、各角度 (30, 60, 90度) に対して60, 100, 140 g のもので9種類の組合せである。実験の含水比範囲は、JIS 法による落下回数が50~5回の含水比範囲で測点数が5~6点になるよう設定し、コーン貫入時間は測定組合せ数量が多いことから2秒程度で行った。試料は、特徴が異なる木節粘土、関東ローム、ペントナイトの3試料を用いた。このような多種多様な条件下で行った測点数は、容器直径の検討では1016測点、容器高さでは861測点、半球容器では757測点で、合計2634測点である。もちろん、測定は、規定した測定値内に入るまで数回行っているため、測定回数はこの数倍になる。

ここでの検討は、コーンの形状に対して、含水比と貫入量の関係が円筒容器の直径や深さ、あるいは半球の直径による影響範囲を調べることが目的である。図-3 (1) (2) (3) は、各試料とも5~6種類の含水比で行った中から、各容器形状の代表例として落下回数が25回前後の含水比の場合を、コーンの先端角度 (以下、コーン角度という) およびコーン質量をパラメータとして示した。図-3 (1) は、木節粘土について、円筒容器の深さの影響を調べたものである。貫入量は深さが浅いと容器の底にコーンが着底して測定できなくなる。実験が可能な容器の深さを調べると、90°コーンはいずれの質量も10 mm から、60°コーンは20 mm から、30°コーンは60 g が20 mm から、100 g 以上は30 mm からとなり、コーンの仕様により異なる。貫入量は、含水比が同じでも、容器が深くなるにつれて大きくなる傾向を示しているが、ある深さ以上になると一定の貫入量となるようであり、その位置はコーンの質量が大きくなるほど、また、コーン角度が小さくなるほど深くなること分かる。(2) 図は、ペントナイトについて、円筒容器の直径の影響を調べたものである。ただし、30°コーンは100 g 以上になると貫入量がコーンの高さ以上になるので測定しなかった。貫入量は、いずれのコーンでも直径が4~5 cm 程度まで急激に増加しているが、その後は直線的増加あるいは一定値となるような変局点を有する傾向を示している。この変局点の位置は、コーン角度や質量に

表-3 容器形状およびコーンの仕様

容器の種類	円筒				半球	
	直径		深さ		直径	深さ
寸法 (mm)	20	61	10	51	29	71
	31	78	20	60	38	84
	41	89	32	75	45	95
	51		41	91	55	
コーンの仕様						
角度 (°)	30, 60, 90				高さ (mm)	3.0
質量 (g)	60, 100, 140					

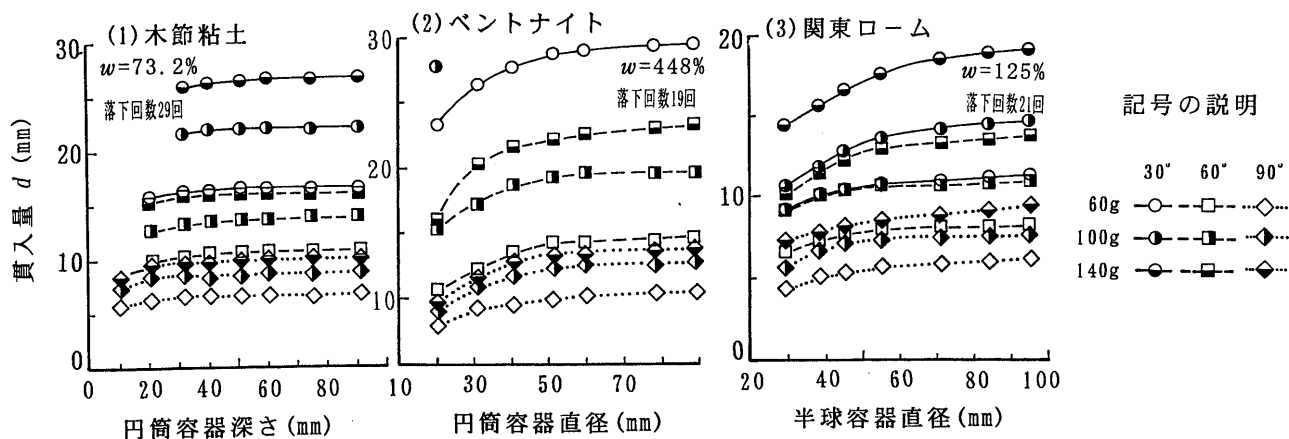


図3 含水比と貫入量の関係に影響を及ぼす容器寸法および形状の検討

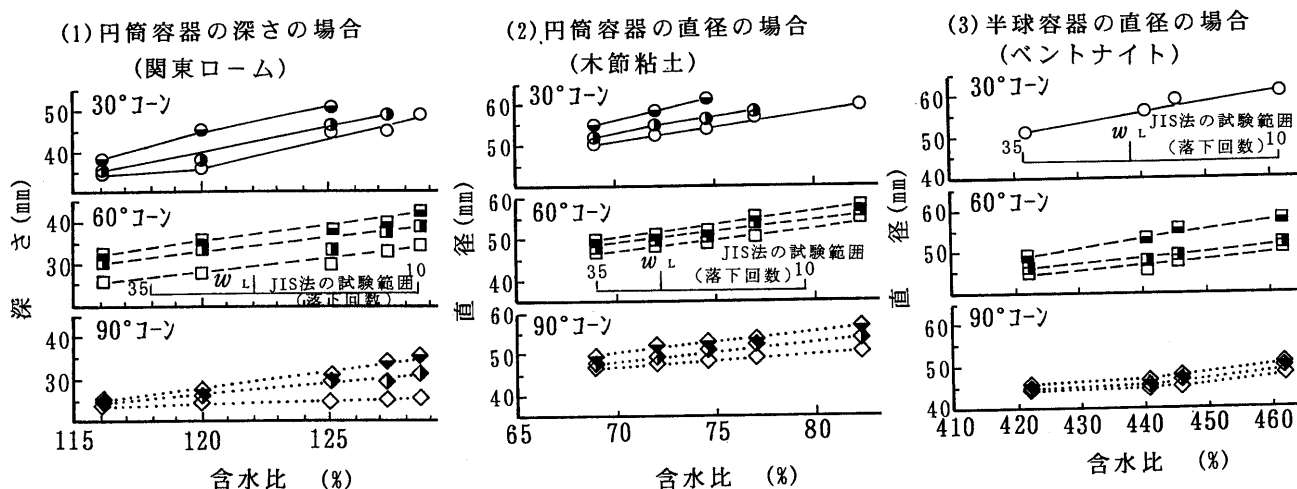


図4 安定した貫入量となる容器寸法と含水比の関係

よって特徴が異なり、コーン質量が同じでもコーン角度が小さいほど、あるいはコーン角度が同じでも質量が大きいほど容器の直径が大きくなっていく。これらの図より、貫入量に対する容器の直径と深さの影響の程度は、直径の方が著しく大きく、深さに比べて直径を大きくしなければならぬことが分かる。(3)図は、関東ロームにおける半球容器の場合である。(1)(2)図と同様に半球の直径が貫入量に影響を及ぼしていることが明らかであり、その傾向は(2)図と近似している。これらの現象は、これ以外の含水比でも類似した傾向を示している。

図-4は、図-3で示した関係を全ての試料と含水比に対して図化し、貫入量と円筒容器の直径、深さ、半球容器の直径の関係から最大曲率点の位置を求め、それに対応する含水比との関係を示したものである(図中の記号は、図-3と同じ)。図から明らかなように、含水比の増加とともにそれらの値は大きくなり、コーン角度が同じならば質量が大きいほどその勾配も急である。また、コーン質量が同じなら、勾配はコーン角度が大きくなるにしたがって小さくなる傾向を示すようである。これらの結果から、これらすべてのコーンの仕様を満足する容器の条件は、円筒容器ならば、直径約55 mm、深さ約40 mm以上、半球容器ならば直径50 mm以上あれば、コーンの角度や質量および含水比などの影響はある程度排除できるものと判断される。しかし、コーンの仕様を特定すれば容器の寸法条件

を小さくすることができ、例えば60° 60 g コーンの場合、円筒容器は直径約47 mm、深さ約26 mm以上、半球容器ならば直径45 mm程度となる。この結果を踏まえ、以後の実験には余裕をみて直径60 mmの半球容器を用いた。

4.2 コーンの貫入時間

貫入方法は、各国の規定ではほとんどが自由落下を採用しており、これで機構上や操作性に不都合なことはないと考えられる。一方、貫入時間については、各国の規定ではスウェーデンの10秒以外はすべて5秒間であるが統一的な確認はされていないようである。そこで、図-5に貫入後の経過時間に伴う貫入量の増加量を示す。これは、各コーン条件でJIS法の落下回数が40, 25, 10回の含水比について行い、1秒間の貫入量をゼロとして2, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 120秒後の貫入量の増加量である。各測定値は、試料を詰め替えて10回行った平均値である。貫入量の増加量は、試料の含水比やコーンの角度、質量の違いにより異なった位置にあり、コーンの仕様が同じでも含水比が高いと貫入量の増加量も大きくなっている。また、落下回数40回の場合にはいずれも2秒程度で一定となるが、落下回数10回になると貫入量の増加量が一定になる時間がそれより遅くなるように見える。貫入時間が3秒以上になると多少のばらつきはあるが、コーンの仕様や含水比に関係なく一定値となる傾向を示すことが分かり、これ以上の貫入時間であれば問題はな

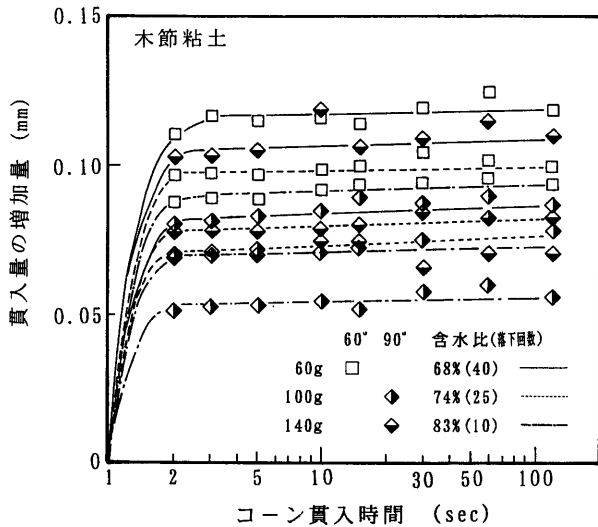


図-5 コーン貫入時間と貫入量の増加量の関係

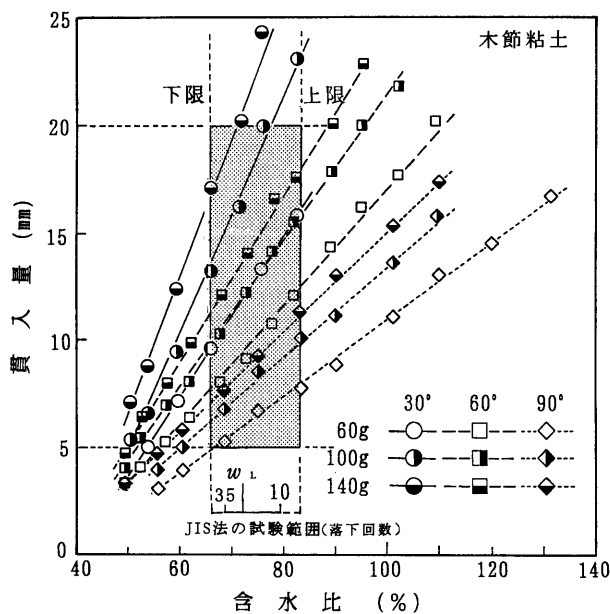


図-6 各種コーンにおける含水比と貫入量の関係

いと考えられる。このことから、以後の試験におけるコーン貫入時間は、安全を考慮して5秒間を標準とした。

4.3 コーンの先端角度と質量

図-6は、木節粘土を用いて表-3で示したコーンの仕様で行ったフォールコーン試験の結果である。参考として、図中に JIS 法による液性限界試験の落下回数35回と10回の含水比範囲、および液性限界として定義されている落下回数25回の位置を w_L で示した。貫入量と含水比の関係は、コーン仕様に関係なくかなり広い範囲で直線分布していることが分かる。フォールコーン法では、図-3で示したように容器の大きさが含水比と貫入量の直線関係に影響を及ぼすことと、4.1で得られた容器条件の結果から、測定範囲を考慮すると、貫入量は約5~20 mm 程度で行うことが望ましいようである。そこで、図中に貫入量が5~20 mm と JIS 法の試験範囲(含水比は落下回数35, 10回における含水比の±0.05倍を加味した)に囲

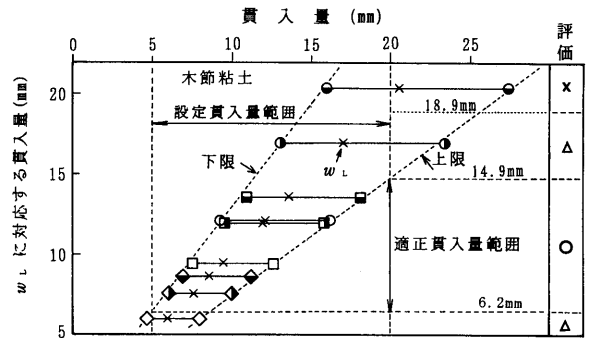


図-7 JIS 法の試験範囲に対応する貫入量の範囲

まれた網かけ部分を、両者で測定が可能な共通の測定範囲と仮定することにした。この図から、JIS 法の含水比の下限と上限の含水比、および液性限界 w_L に対応する貫入量を読み取り示したのが図-7である。図中の評価は、JIS 法により設定した試験範囲にフォールコーン法の測定値が全て入る場合が○、△は一部外れるが試験結果として利用可能なもの、×は測定値の半分以上が外れ試験に用いるには不相当と判断したものである。コーン貫入量の測定値がすべて JIS 法の含水比範囲内に入る貫入量は、図に示すように 6.2~14.9 mm であり、この範囲に入るコーン仕様は30°は60 g, 60°はすべて、90°は100 g と140 g である。このような条件下では60°コーンが最も広い範囲の質量に有効であり、国外の規格を考慮すると60°, 60 g のコーンが望ましいと考えられる。以後の試験はすべてこのコーンの仕様で検討することにした。なお、この検討は、関東ローム ($w_L=131\%$)、八戸ローム ($w_L=69\%$)、粘土 ($w_L=84\%, 55\%$) でも行い、ほぼ同様な傾向が得られている。

5. フォールコーン試験結果の整理に関する検討

5.1 実験結果を図化する目盛

貫入量と含水比の関係を図化する目盛については、表-1で示した各国の規格・基準でみると片対数と正方眼に分かれており、日本の土の特異性を考慮すると、日本の土に適合する図化目盛の種類を検討する必要がある。この検討は、各含水比に対して JIS 法とフォールコーン法を同時に行い、測定範囲と測点数は、JIS 法は50~5回で5~7点程度、フォールコーン法は5~16 mm 程度で10点程度とし、NP となる試料は除外した。

検討に用いた目盛の種類は、正方眼、片対数、両対数である。含水比と貫入量の関係は、規定貫入量に対応する含水比を図から読取るため直線関係であることが望ましい。そこで、実験結果をそれらの目盛上にプロットした場合、直線になるものと曲線になるものに分類を試みた。含水比と貫入量の関係は、プロットしたときの勾配が40~50度になるようスケールを調整して図化し、これに最小自乗法による直線と曲線を当てはめ検討した。このとき、いずれが適切か判断に迷う割合が数%あったため、これらは1/2して直線あるいは曲線に振り分けた。

表-4は、各目盛で図化した場合の直線あるいは曲線に分類した出現率である。表中の試験範囲Aは貫入量が5~16 mm, 試験範囲Bは JIS 法の落下回数が35~10回に対応する貫入量の範囲を図化した場合の出現率である。当然図化する含水比範囲はAよりBの方が狭い。これより、A, Bの範囲で直線となる目盛の出現率を比較すると、両者とも(正方眼>両対数>片対数)の順であり、正方眼が直線となる割合が最も多くなっている。同じ目盛の種類でA, B

表4 図化目盛りの違いによる直線、曲線の出現率

目盛の種類	フォールコーン法						JIS法
	試験範囲A 貫入量5~16mmの範囲 (%)			試験範囲B JIS法の落下回数35~10回 に対応する貫入量の範囲(%)			落下回数 35~10回 (%)
	正方眼	片対数	両対数	正方眼	片対数	両対数	片対数
直線	77.2	65.3	72.0	93.8	91.7	92.7	83.9
凸形の曲線	20.2	4.7	5.2	5.2	2.1	2.1	5.9
凹形の曲線	2.6	30.0	22.8	1.0	6.2	5.2	10.7
3つの目盛 で全て直線	44.1			84.5			
3つの目盛 で全て曲線	4.2			1.0			

の出現率を比較すると、図化範囲の狭いBはAより18~27%も大きく、約92%以上が直線関係を示している。また、曲線になる出現率は、正方眼は凸形曲線が多く出現し、両対数や片対数は凹形曲線が多く出現する。しかも、図化範囲の広いAから狭いBになると、曲線になる割合がほぼ1/5に低下することが分かる。なお、表にはJIS法についても、片対数で整理した結果を示してあり、約16%の試料で曲線になっている。したがって、試験範囲が同じ程度であれば、フォールコーン法はJIS法より直線となる確率が高い。また、表には3つの目盛すべてが直線あるいは曲線となる出現率も示した。これによると、直線となる出現率は、試験範囲Aが約44%であるのに対し、JIS法の落下回数の範囲であるBは約85%とその範囲を狭めると2倍程度大きい。この値は、JIS法の出現率とほぼ同じ値であることから、この実験範囲であればいずれの目盛で結果の整理を行っても問題はないといえる。その中でも、用いる目盛は最も直線の出現率が高く、目盛の取扱いが簡単なものがよく、これには正方眼が最も適切と考えられる。

ここで、フォールコーン法における実験範囲を検討するため、JIS法の実験範囲に対応するコーン貫入量を求めると、その平均値は、落下回数35回が10.1 mm、10回が14.8 mmであり、4.3の項で得られた6.2 mmと14.9 mmの上限の値がほぼ同じ値であるのに対し、下限が異なるためこれを平均すると8.3 mmになる。試験範囲は、結果に影響しない程度で区切りの良い数値がよく、これらから、 $8.0 \leq \text{貫入量} < 15 \text{ mm}$ が適切と判断される。

5.2 適用する土質の種類

フォールコーン法で液性限界試験を行う場合、液性限界に対応する貫入量が問題になる。この場合、JIS法とフォールコーン法の液性限界が対等と位置づけるならば、両者の対応からその貫入量を決定する必要がある。そこで、図化する目盛を前述の3種類を用い、各試料のJIS法の w_L に対応するコーン貫入量 d を求めると図-8になる。図から分かるように、同じ試料でも目盛の種類により個々の d の値は異なるが、全試料の平均値は、目盛の種類の違いによる差はほとんどないことが明らかである。土の種類別に d の値を調べると、いずれの目盛でも一般土はおおよそ8~14 mm、火山灰質粘性土は8~12 mm、有機質土は13~16 mmのところを位置し、全データの平均的傾向はばらつきがあるものの、ある幅を持ちながら w_L が大きくなるにつれてわずかに増加する特徴を示している。これは、 w_L の小さい一般土は左下へ、それが大きい有機質土は右上に位置するために現れるためである。有機質土が他の種類の土に比べて d が大きくなるのは、試料中に微少な植物繊維の存在が考えられる。JIS法では、微少な繊維が土粒子間で絡み合うことにより粘性を高め、それが試料を落下させたときの流動性に抵抗して、

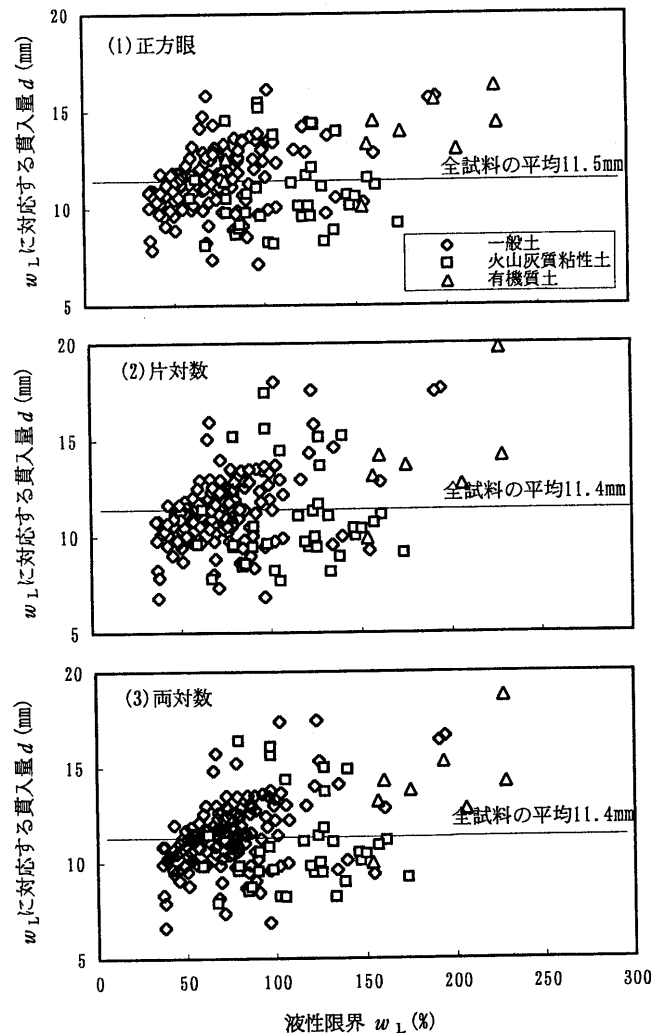


図-8 JIS法の液性限界に対応する貫入量

同じ含水比でも繊維が少ない試料より落下回数が多くなる。これが、他の種類の土に比べて w_L に対応する d が大きくなった理由と考えられる。ここで、正方眼で得られた全平均値 $d=11.5 \text{ mm}$ をフォールコーン法における仮の規定貫入量として液性限界 w_{LF} を求め、JIS法とフォールコーン法の対応を示すと図-9になる。図中の細線は、相対誤差 $\pm 5\%$ のラインである。図から明らかなように、 $w_L \geq 160\%$ の領域になると両者の対応が悪くなり、しかも、有機質土($L_i \geq 15\%$)では、ほとんど $\pm 5\%$ の範囲外にある。これらはフォールコーン法における適用を除外すべき種類の土といえる。

一方、JIS法で液性限界試験を行うと、NPとなる試料がある(以下、NP試料という)。 w_L は粒度組成の影響を受けると考えられることから、図-10に正方眼により求めた d と $425 \mu\text{m}$ ふるい通過土における細粒分含有率 f_c の関係を示す(通常、細粒分含有率の記号は F_c で表されるが、ここでは 0.425 mm ふるい通過土に対する細粒分通過率であるため、記号を f_c とした)。 d の値はばらつきがあるものの、土の種類に関係なく f_c が多くなるにつれて増大する傾向を示し、 f_c の多少が d に影響している。この図から、 $f_c < 55\%$ でも実験が可能な試料もあるが、ほとんどNP試料となる。また、図-1の塑性図より、液性限界の最も小さい値は約35%程度であることから、これが液性限界試験が可能な下限と判断でき、JIS法では $w_L < 35\%$ がNP試料と考えられる。しかし、このよう

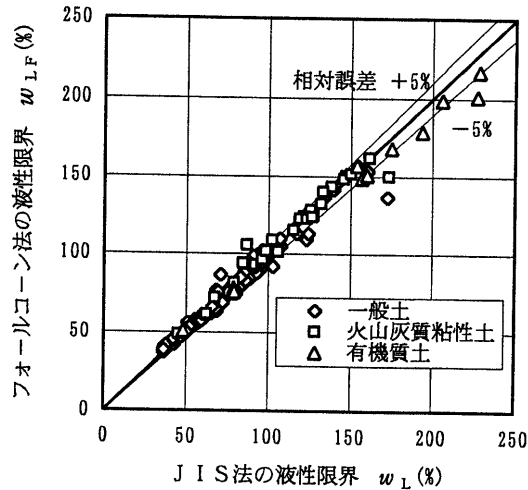


図-9 JIS法とフォールコーン法の液性限界の相関図

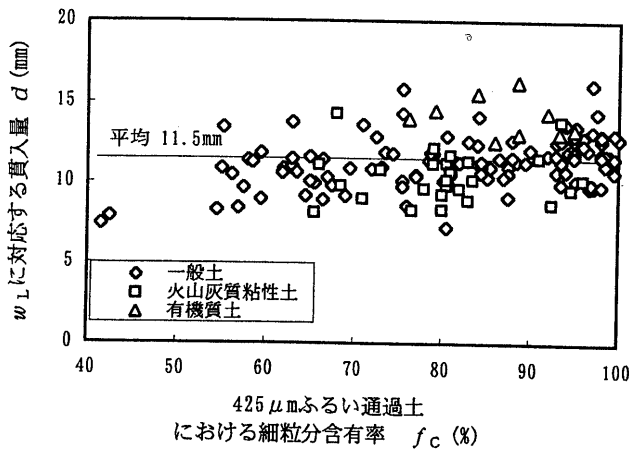


図-10 425 μm ふるい通過土における細粒含有率と液性限界に対応する貫入量の関係

な試料でもフォールコーン法で実験が可能なものがあり、フォールコーン法におけるNP試料の検討が必要となる。図-11は、代表的なNP試料のフォールコーン試験結果であり、いずれの場合も直線関係を示してフォールコーン法により w_L が求められる可能性を示唆している。しかし、JIS法で w_L が求められないため、それに対応する d を得ることはできない。そこで、JIS法の $w_L < 50\%$ の試料に着目して w_L に対応する d を求め、 f_c との関係を図-12に示す。 d は f_c が多くなるにつれて増加するような傾向も認められるが、これを平均すると10.4 mmになる。このコーン貫入量から含水比を求め f_c との関係を図-13に示す。NP試料でも、貫入量10.4 mmの含水比がJIS法の w_L の下限である35%より小さくなる試料もあるが、その数も少ないことからJIS法との対応を考慮してフォールコーン法では $w_L < 35\%$ の試料をNPとして扱って問題ないと考えられる。また、液性限界は、 $w_L \leq 50\%$ 試料 (JIS法) が $f_c > 42\%$, NP試料 (フォールコーン法) は $35 > f_c > 76\%$ の範囲にあり、 $42 > f_c > 76\%$ でそれぞれの結果が重なっている。このことは、 f_c からフォールコーン法による試験限界をこの範囲に設定できるものと考えられる。この重なっている f_c を平均すると $f_c = 57\%$ であり、さらに、ある f_c を基準として、両者の f_c が大きくなる場合と小さくなる場合の出現割合が同じ程度になる f_c を調べると、概ね

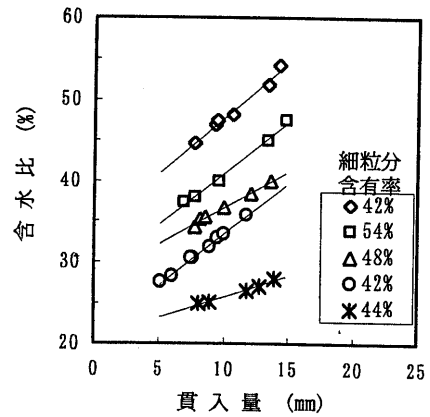


図-11 NP試料のフォールコーン試験結果

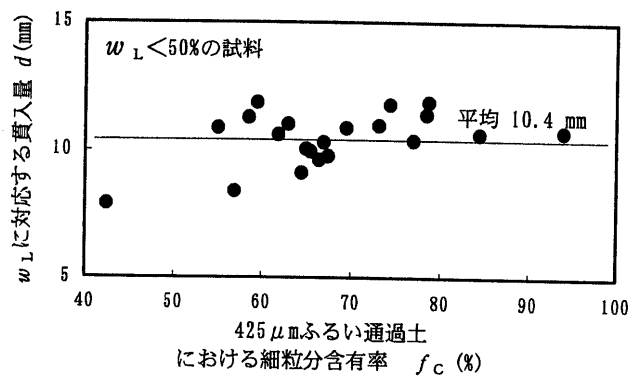


図-12 $w_L < 50\%$ 試料の425 μm ふるい通過土における細粒含有率と液性限界に対応する貫入量の関係

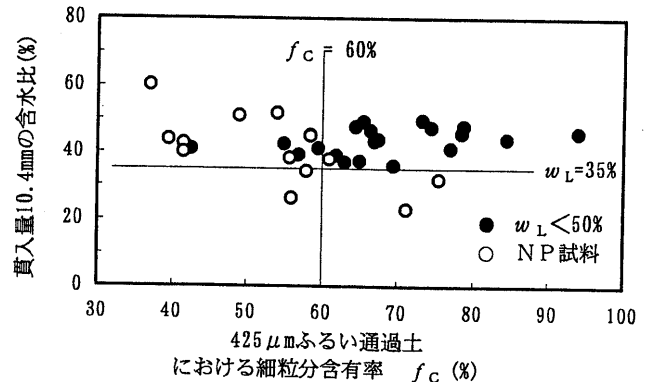


図-13 425 μm ふるい通過土における細粒含有率とフォールコーン法による液性限界の関係

$f_c \geq 60\%$ であることから、区切りのよい数字に丸めて、それをNP試料の付加条件とすることも考えられる。

5.3 液性限界に対応する規定貫入量

前述のように、フォールコーン法により液性限界試験を行う際には適用外の土がある。したがって、フォールコーン法により液性限界 w_{LF} を求める規定貫入量 d_F の決定には、それらの種類の土を除いて検討する必要がある。これまでの結果から、適用土質の条件は、 $35\% \leq w_L < 160\%$, $L_i < 15\%$, $8.0 \text{ mm} \leq \text{貫入量} < 15 \text{ mm}$ が適当と考えられる。これらの条件でJIS法の w_L に対応するコーン貫入量 d を求め、表-5に目盛の種類ごとに土の種類別の平均値を示す。 d は

表-5 JIS法の液性限界に対応するコーン貫入量

土質分類	試料数	JIS法の液性限界に対応する貫入量 d (mm)					
		条件	35% ≤ w_L < 160%, L_L < 15% 8.0 ≤ 貫入量 < 15 mm				
			正 方 眼	片 対 数	両 対 数		
一般土	(CH)	30	11.9	11.4	11.9	11.3	12.0
	(CL)	11	11.3		11.3		11.1
	(MH)	82	11.5		11.3		11.4
	(ML)	14	9.7		9.7		9.7
{V}	35	10.9		10.3		10.6	
{Pt}{O}	(11)	(13.5)		(13.4)		(13.5)	
合計, 平均	172	11.3		11.1		11.2	

合計, 平均に {Pt} {O} は含まない。() の値は参考値。

土の種類によって異なり, 一般土では高液性より低液性の試料の方が, 粘性土[C]よりシルト[M]の方が小さくなる傾向を示し, (CH)→(MH)→(CL)→(ML)の順に小さい。この土の分類ごとに f_c の平均値を求めると, (CH)=14.3%→(MH)=16.0%→(CL)=24.2%→(ML)=34.9%であり, 前述の順序と一致する。一般に, 細粒分の少ない低液性限界の試料は, 落下させると土中水が浮き出る現象がある。そのため試料と黄銅皿上の粘着力が低下するので少ない回数で溝が合流し, これが d を小さくする原因と考えられる。特殊土では, 火山灰質粘性土は一般土の平均値より0.5~1.0 mm程度小さく, 有機質土は対象外であるため参考値として括弧で示したが, 平均値で2.1 mm程度大きくなっている。

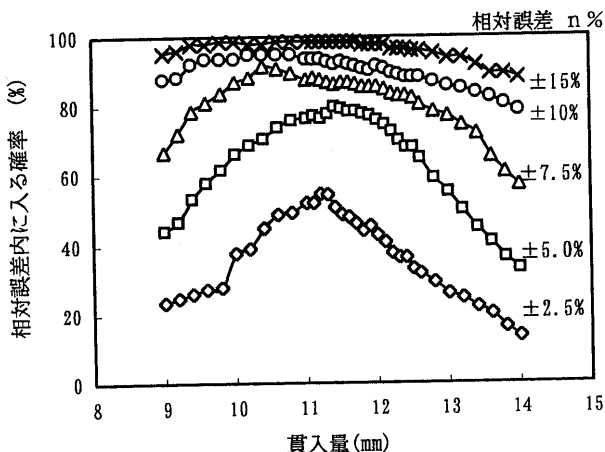


図-14 相対誤差内に入る確率

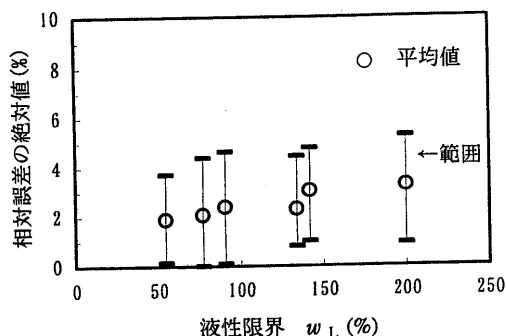


図-15 JIS法における相対誤差

表-6 フォールコーン法による液性限界試験の仕様

コ ン	角 度	60度	
	質 量	60 g	
	高 さ	30 mm	
試 料 容 器	円 筒	直 径	47 mm 以上
		深 さ	26 mm 以上
	半球直径	45 mm 以上	
コーンの貫入時間	5 秒以上		
試験の貫入量範囲	8~15 mm		
図化目盛りの種類	正 方 眼 紙		
適用範囲	35% ≤ w_L < 160%, L_L < 15%		
NP 試料の取扱い	35% < w_L		
液性限界の貫入量	11.5 mm		

図-14は, ある貫入量の含水比をフォールコーン法の w_{LF} と仮定し, その値と w_L との相対誤差が $\pm n\%$ 以内に入る確率を求めたものである。相対誤差内に入る確率は, 相対誤差が低いほど小さくかつ鋭いピークを示し, それが大きくなるにつれて平滑となり, 相対誤差の大きさにより特徴が異なる。このピークを示す貫入量の位置は, 相対誤差 $\pm 2.5\%$ と $\pm 5.0\%$ は 10.9 mm と 11.4 mm m 前後, $\pm 7.5\%$ 以上では 10~11 mm に現れ, 相対誤差内に入る確率は相対誤差の大きさに左右される。したがって, フォールコーン法が JIS 法に対してどの程度の相対誤差が許容できるか検討する必要がある。詳細は後述するが, 性質の異なる 6 種類の試料を JIS 法により 10 人が 1 回ずつ行い, その平均値を基準にしたときの相対誤差(絶対値)の範囲と平均値を示すと図-15になる。液性限界の増加とともに相対誤差の範囲, 平均値とも大きくなる傾向を示し, 最大では概ね 5% 程度になることから, これを許容することができる相対誤差と考えることが可能である。そこで, 図-14における種々の相対誤差の中から $\pm 5.0\%$ の曲線に注目し, その相対誤差内に入る確率が最大となる貫入量の値を調べると 11.4 mm であり, 表-5で示した適用土質における正方眼における一般土の平均値 11.4 mm と一致している。

フォールコーン法の w_{LF} に対応する d_F を求めるためには, 前述のように平均値や相対誤差が最大値となる貫入量などがあるが, 分かりやすく区切りの良い数値が望ましいと考えられる。そこで, 表-5の結果と若干異なるが, 規定貫入量 $d_F=11.5$ mm を提案する。表-5の各目盛の平均値と最大 0.4 mm の差がある。この 0.4 mm の貫入量の差をこの検討に用いた 172 試料について相対誤差を求めると, 平均で 0.6%, 適用上限の含水比 160% における含水比の相対誤差は 1% 以下であり, 含水比に及ぼす影響は極めて小さく, 結果にほとんど影響しないと考えられることから, 問題ないものと判断される。

以上のことを総合すると, フォールコーン法による実験仕様は表-6のようになる。

6. フォールコーン法の試験結果の信頼性

フォールコーン法による液性限界試験方法を導入するためには, 結果の信頼性を検討する必要がある。そこで, JIS 法とフォールコーン法の結果のばらつきについて両者の比較を行った。この検討には, 両試験を経験したことのある者が土の種類が異なる 6 試料(粘土 4 試料, 火山灰質粘性土と有機質土は各 1 試料)を用いて, 10

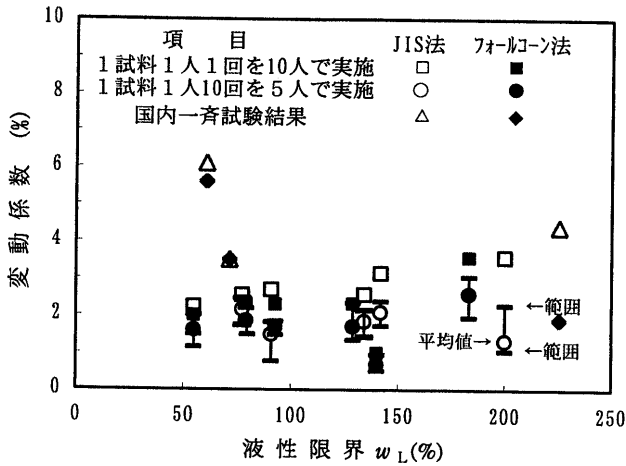


図-16 変動係数と液性限界の関係

人が各1回行う場合と1人が10回ずつ5人で行う実験を行った。試料はあらかじめ均一になるよう調整したものを用い、試料の量、加水量、実験個数、落下回数や貫入量の条件などの目安は共通にした。なお、実験は、6種類の土を1回ずつ行うことを1サイクルとして、目的の回数を繰返す方法で実施した。

図-16は、両試験の変動係数と w_L の関係である。1人が10回ずつ5人で行う場合、JIS法とフォールコーン法の変動係数を同じ試料で比較すると、試料ごとに大きくなる試験方法が異なり、どちらかがすべて一方的に大きく出現することはないようである。試験者による結果のばらつきを調べるため、変動係数の(最大値-最小値)の平均値を求めると、JIS法は0.87、フォールコーン法は0.84であり、変動係数の値が異なるにしても試験方法の違いによる差はほとんどないことが分かる。一方、10人が1回ずつ行った場合、変動係数は両試験とも1人が10回ずつ5人で行った結果よりも大きく、かつ、 w_L の増加にともない大きくなる傾向を示し、同一試験者で10回行うよりもばらつきが大きくなっている。しかし、両試験とも、各試料の変動係数を比較するとほぼ近似していることから、この検討においても、両試験の差異はほとんどないものといえる。したがって、フォールコーン法における結果のばらつきから得られる信頼性は、JIS法と同じ程度であることから、試験方法の違いによる優位性は認められない。また、図中に、日本で行われた一斉試験の結果³²⁾も示した。この試験は、本研究と同様に試験方法等を規定して行ったものであり、前述の10人が各1回ずつ行った実験と比較する場合の対象と考えられる。一斉試験におけるJIS法とフォールコーン法の変動係数は、 $w_L \approx 230\%$ の試料で差は大きいですが、それ以外の試料では両者はほぼ近似して、値は異なるものの本研究と同様な傾向を示している。したがって、JIS法、フォールコーン法における試験結果のばらつきには有意な差がないことから、結果の信頼性に対して、フォールコーン法に問題はないと判断できる。

7. 一点法の検討

これまでの検討は、 w_L と w_{LF} を多点法により求めることを前提としていたが、より試験操作を簡単にした一点法がある。スウェーデン、イギリス、カナダなどで一点法が規格・基準化されている。一点法による液性限界測定には、ある測定範囲の含水比を w_L とする方法、ある貫入量のときに得られた含水比から算定式により求める方法等の考え方があり、国外の規格・基準の大半は後者によるも

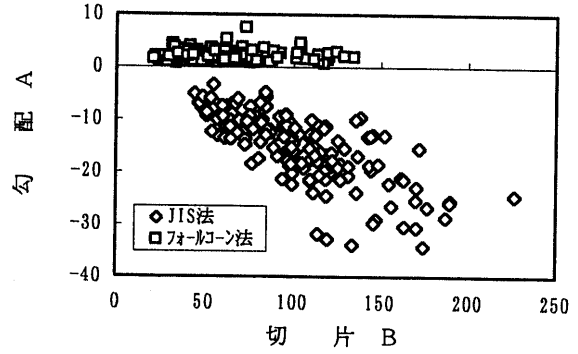


図-17 JIS法とフォールコーン法の流動曲線の切片と勾配の関係

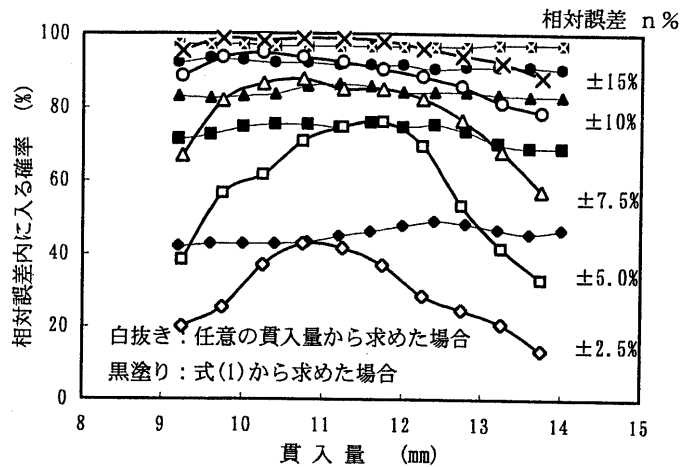


図-18 貫入量と相対誤差内に入る確率の関係

のである。しかし、一点法による液性限界の測定を、Casagrande法(JIS法)により求めても良いとする国はないようである。その理由は、次のように考えられる。

多点法の結果の整理は、JIS法は片対数に含水比と落下回数、フォールコーン法はこれまでの結果を基にすれば正方眼に含水比と貫入量の関係を図化した流動曲線が得られる。両者の試験方法に対して、それらの図化した測定点に適合する直線式を最小自乗法により求め、その勾配Aと切片Bを比較すると図-17になる。この検討に用いた条件は、JIS法は落下回数が35~10回、60°60gコーン、8mm ≤ 貫入量 < 15mm、35% ≤ w_L < 160%、 L_i < 15%を対象とした。図より、JIS法の勾配は切片の増大にともない小さくなる傾向を示すのに対し、フォールコーン法の勾配は切片の大きさに関係なく1~3の範囲を示している。このことは、落下回数や貫入量のわずかな差が含水比に及ぼす影響の程度は、貫入量よりも落下回数の方が著しく大きいことを意味している。したがって、JIS法は、含水比変化に対して落下回数が敏感に対応することが一点法として推奨されない一因にもなっているものと考えられる。

一点法による液性限界を求める場合、結果の信頼性がその適否を左右する。そこで、フォールコーン法により得られた各試料の勾配A、切片Bから、任意の貫入量に対する含水比を求め、 w_L との相対誤差に入る確率を計算した結果が図-18(白抜き記号)である。これは、貫入量を0.5mm間隔に区切り、その区間における確率を計算したものである。いずれの相対誤差内に入る確率ともある貫入量をピークとする凸型の傾向を示し、相対誤差が大きくなるにつれ

てピークが鋭いものから平滑になっている。これを多点法で得られた図-14と比較すると、相対誤差内に入る確率は、±5%程度までは多点法の方が若干大きい、それ以上になると両者は近似した値を示している。また、相対誤差内に入る確率が±7.5%以上になると、確率は異なるもののある幅の貫入量範囲で一定値(±7.5%は10.3~11.8 mm, ±10%は9.5~11.8 mm, ±15%は9.5~12.3 mm)となる傾向を示している。この範囲の貫入量でそれらの相対誤差を見込むとすれば、含水比の違いによる有意な差は認められないことを意味する。これは、測定点が最小自乗法で求めた直線上、またはその近傍にあることを意味している。このように広い範囲の貫入量で対応がよいのは、図-17で示したように勾配がJIS法よりも極端に小さく、しかも一定値であるため仮に貫入量が1 mm変化しても含水比変化は1~3%程度にとどまることに起因している。つまり、貫入量の変化に対して含水比の変化はきわめて鈍感であるためである。このようなことから、ある程度の相対誤差を許容するならば、一定値となる範囲に入った貫入量の含水比を w_{LF} とすることができる。

一方、測定した貫入量と含水比から、算定式を用いて w_{LF} を求める提案が多数あり³²⁾、一点法を規定している国によりその方法が異なっている。本研究では、一点法による w_{LF} が含水比と貫入量に依存するものとして検討する。図-19は、これまでの実験結果より、ある貫入量に対応する含水比と w_{LF} の比の逆数(w_{LF}/w) (全平均値)とそのときの貫入量の関係求めたものであり、これらの関係から次式を得た。

$$w_{LF} = \lambda \cdot w \quad (1)$$

$$\lambda = 1.31 - 0.027 d_c$$

ここに、 w :ある含水比、 d_c :ある含水比の貫入量
この式の信頼性を検討するため、 w_L との相対誤差に入る確率を計算したのが図-18の黒塗り記号である。相対誤差内に入る確率は、相対誤差が大きくなるにつれて高く、しかもいずれの相対誤差も値が一定となる傾向を示し、前述のピークを持つ結果とは特徴が異なっている。このピークの値と式(1)から得られる値は、相対誤差は5%以下の確率まではある貫入量のところでほぼ近似しているが、相対誤差が±7.5%以上になると両者は約9.8~11.8 mmの貫入量範囲で重なっている。

この一点法による液性限界試験の可否は、結果の精度から検討する必要がある。図-20は、その検討のためフォールコーン法による一点のみの測定を行い、JIS法とフォールコーン法の多点法から得られた液性限界との相対誤差を比較したものである。このときの実

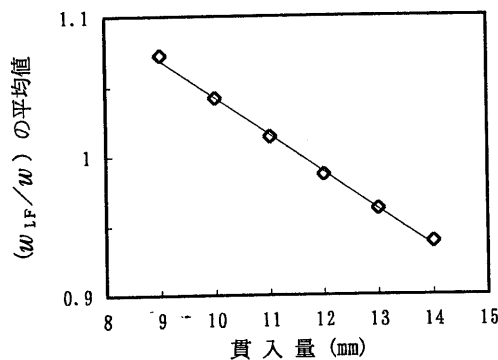


図-19 フォールコーン法による液性限界とある貫入量における含水比の比の逆数と貫入量の関係

験条件は、10.5 mm < 貫入量 < 12.5 mm である。相対誤差は、 w_{LF} に対しては約±3%以内であるのに対し、 w_L に対しては約±10%以内に拡大している。これは、 w_L に対応する d を求める際のばらつきが反映されたものと判断される。JIS法との相対誤差±10%であれば、図-18の多点法と一点法の相対誤差に入る確率が貫入量9.5~12.5 mmの範囲で一致し、一点法での液性限界はその貫入量範囲の含水比とすることができ、式(1)の算定式を用いる補正は不要である。多点法、一点法とも、 w_L に対して相対誤差は小さいことが望ましく、測定器の違いや個人差、国内外の一斉試験の変動係数³³⁾を考え合わせると±10%程度の相対誤差が見込まれることから、一点法を簡便法として採用することは十分可能であると判断される。

8. 液性限界・塑性限界の同時測定

w_L を求める場合、小さい貫入量から実験を行えば塑性限界 w_p も同時に求められる可能性がある。このときには、 w_L を越える含水比から w_p に近い含水比までの広い範囲にわたり、含水比と貫入量が直線関係にあることが条件になる。しかし、表-4で示したように含水比範囲が広がると曲線を示す土が増加するため、その直線性には疑問が残る。また、含水比が低くなると、試料を容器に均質に詰める困難さが生じる。図-21に w_L と w_p に対応する含水比の飽和度を示す。液性限界状態の土の飽和度は、土の種類に関わらず95%以上であるのに対し、塑性限界状態の土では、77~93%と幅が大きく、 w_p が小さいほどその幅が大きくなって、詰め方が結果に

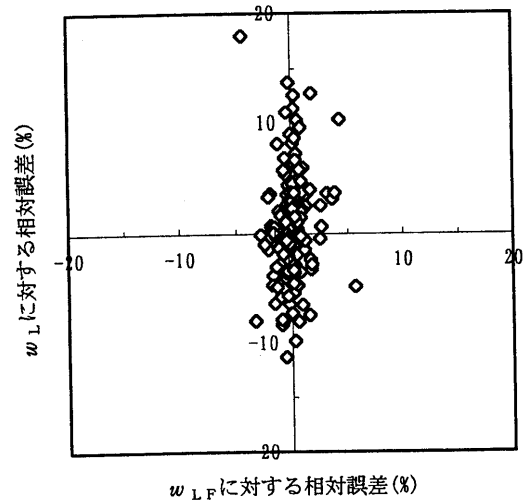


図-20 液性限界に対する相対誤差

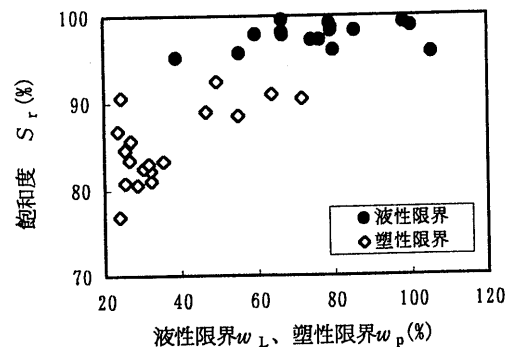


図-21 容器内での試料土の液性限界と塑性限界の飽和度

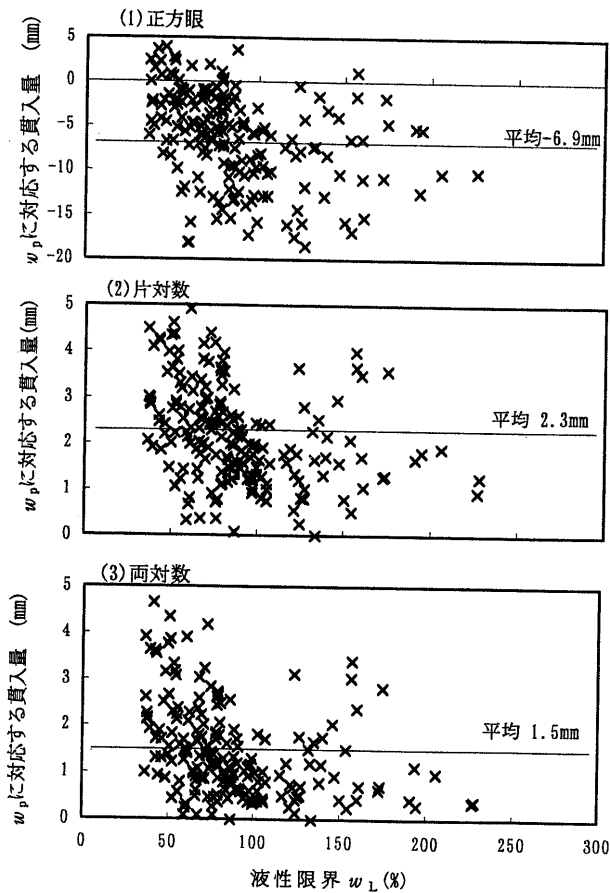


図-22 JIS法の液性限界に対応する貫入量

影響を及ぼす可能性があることが分かる。ここでは、多少直線性に問題があるにしても、液性限界・塑性限界の同時測定を目的にしていることから、 w_L を越える含水比から w_p に近い含水比まで直線であり、 w_p はその直線上にあることを前提とする。この検討は、前述の液性限界試験の場合に合わせて、 60° 、 60 gコーン、 $35\% \leq w_L < 160\%$ 、 $L_i < 15\%$ を対象とした。

液性限界試験と同様に、JIS法の w_p に対応する貫入量を求めるため、正方眼、片対数、両対数で整理した場合の結果を図-22に示す。 w_p に対応する貫入量の範囲は、片対数と両対数が $0 \sim 5$ mmの範囲であるのに対し、正方眼は $-20 \sim 5$ mmと約5倍広く、しかも貫入量の平均値が負になって理論的にも現象的にも不合理であり適切でないといえる。これは、正方眼における含水比と貫入量の関係では、フォールコーン法による液性限界試験の直線から求めた塑性限界がJIS法により求めた塑性限界より過大に評価するため、JIS法の w_p に対応する貫入量を求めると負になるものと考えられる。塑性限界試験まで対象にする結果の整理方法は、正方眼が負の貫入量であることから、片対数または両対数を使用すべきであるが、従来から含水比と非排水せん断強さとの関係が両対数で直線関係が成り立つといわれていること、貫入量の平均値を算出したときの変動係数が最も小さかったことから、両対数が適当と考えられる。しかし、図化する含水比の範囲は、貫入量と含水比の1サイクルを同じスケールにすると直線の傾きが極端に小さくなるがあるので、スケール調整が必要である。両対数の結果を用いて w_p との対応を調べたのが図-23である。図から分かるように、フォールコーン法の塑性限界 w_{pF} がJIS法の $0.5 \sim 2$ 倍になるものもあり、また、

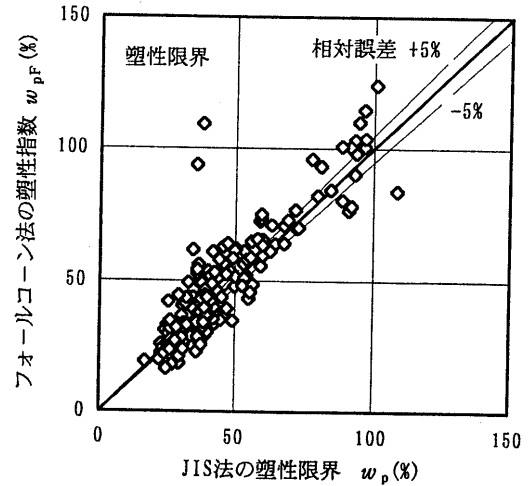


図-23 JIS法とフォールコーン法の塑性限界の相関図

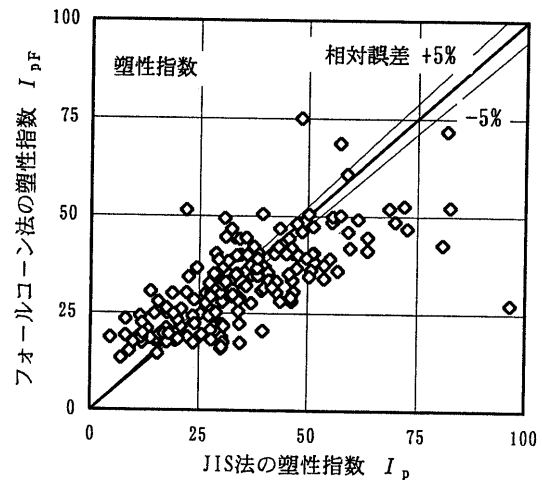


図-24 JIS法とフォールコーン法の塑性指数の相関図

相対誤差 $\pm 5\%$ 以内に入るものは約30%程度であり、液性限界に比べて著しく対応が悪い。両対数で得られた貫入量 1.5 mmは、佐野ら¹³⁾の 1.5 mm、甲本¹⁵⁾の 1.3 mmとほぼ同じであるが、佐野ら、甲本は良好な対応関係である報告に対し、本実験ではほぼ一致する試料があるものの、多くの試料で全く対応していない。これは、全国各地の多種多様な土を用いたこと、含水比が小さい場合の試料の詰め方、外挿による塑性限界の算定などに起因しているものと考えられる。

一方、液性限界・塑性限界の同時測定法の評価は、誤差の程度のみならず、工学的な利用まで含めて検討することによりその価値が判断される。塑性限界は単独で利用することはほとんどなく、 w_L 、塑性指数 I_p などと組み合わせて使うことが大半であり、その代表的な利用方法は「JGS 0051 地盤材料の工学的分類方法」の塑性図である。そこで、JIS法の I_p とフォールコーン法による塑性指数 I_{pF} (両対数による)の相関図を図-24に示すと、両者の対応は著しく悪く、 I_p が小さいとJIS法との相対誤差が $\pm 50\%$ を越える土もあり、また、図-23の w_p の場合と比較してもばらつきが大きい。この塑性指数の対応が悪いのは、塑性限界の対応の悪さをそのまま引き継いでいるためであり、その相対誤差が $\pm 50\%$ 程度含む可能性があることから、JIS法の実験誤差を考慮してもJIS法と同等に扱う

表-7 フォールコーン法による液性限界・塑性限界同時測定法における土質分類名の的中率

分類記号	(CH)	(CL)	(MH)	(ML)	合計
JIS法による分類	30	11	82	14	137
フォールコーン法による分類がJIS法と同じ場合	12	9	68	0	89
的中率(%)	40.0	81.8	82.9	0.0	65.0

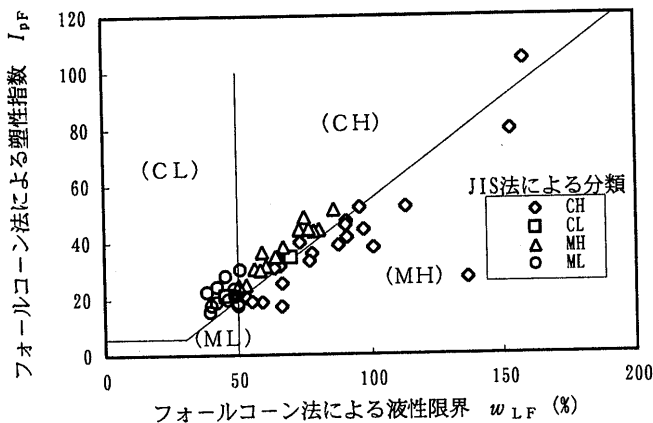


図-25 JIS法の土質分類名と異なる試料の塑性図

ことは困難と判断される。

塑性指数の対応の悪さは、塑性図による土質分類にも影響を及ぼすことになる。そこで、JIS法とフォールコーン法により求めた液性限界と塑性限界から各試料を分類し、フォールコーン法の分類がJIS法の分類と一致する的中率を調べると表-7になる。なお、火山灰質粘性土と有機質土は、液性限界以外に観察から分類できるのでこの検討から除外した。この分類において的中率が低いのは、(CH)と(ML)であり、特に(ML)は全くなしである。また、的中率が高いのは、(CL)と(MH)である。図-25は、液性限界・塑性限界の同時測定で得られた塑性図上の分類で、JIS法と分類が異なった試料について示したものである。図中の記号はJIS法による分類名である。これより分類名の変化状態を調べると、(CH)が(MH)に、またはこの逆に、さらに(ML)が(CL)に変わったものが多く、高液性が低液性に、またはこの逆に分類名が変わるものは少ない。これは、フォールコーン法におけるJIS法との対応の悪さが、液性限界より塑性限界の方が著しいことに起因している。本来(MH)に分類される土は塑性指数が小さいのが特徴であるが、わが国の(MH)に分類される土の多くは、塑性指数が大きいためにA線とA線付近に位置する試料が多く、そのために分類名が一致しない原因と考えられる。

9. まとめ

以上のフォールコーン法の実験結果から得られた結論は、次のとおりである。

- (1) JIS法とフォールコーン法における液性限界の個人差の変動係数は、ほぼ同程度のばらつきである。したがって、フォールコーン法における個人誤差から検討した結果の信頼性に問題は無い。この傾向は全国一斉試験の結果も同様であるが、その値は本研究よりも大きい。
- (2) 液性限界試験を行う場合の仕様は、コーンの先端角度は60

度、質量は60g。適用土質は35%≦液性限界<160%で、かつ強熱減量<15%の土。NPは液性限界<35%の土。コーン貫入時間は5秒間で、試験は8mm≦貫入量<15mmの範囲。結果の整理は正方眼紙を用い、液性限界に対応するコーン貫入量は11.5mmである。

- (3) 一点法は、簡便法として貫入量10.5~12.5mmの含水比をそのまま液性限界とすることができる。その場合、JIS法との相対誤差が±10%程度見込まれる。
- (4) 塑性限界はJIS法との対応が悪く、JIS法との相対誤差±5%以内に入る割合は約30%程度、これを用いて計算される塑性指数の場合も同様である。しかし、塑性図上での土質分類では、約65%がJIS法と一致する。

最後に、実験試料の収集にご協力いただいた基礎地盤コンサルタント(株)の林三男氏、応用地質(株)の比留間誠之氏に感謝の意を表します。さらに、数多くの実験に際しては、日本大学工学部および埼玉大学工学部の学生諸君のご協力をいただいたことを記し、厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 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, 15(11), 18-22.
- 2) 伊藤実(1969):液性限界を定める新しい測定法の提言と考察, 農業土木論文集, (28), 7-11.
- 3) 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, 23(11), 33-38.
- 4) 風間秀彦・下辺悟(1997):液性限界に及ぼす測定器と測定方法の影響, 地盤工学論文報告集, 37(2), 145-153.
- 5) 上原方正・砂川徹男(1963):液性限界測定装置に関する比較実験, 第27回土木学会年次講演集, 789-790.
- 6) 箭内寛治・五味貞夫(1965):フォールコーン(円スイ貫入)法で液性限界を求め得るか, 土と基礎, 13(10), 17-21.
- 7) 西亀達夫(1965):コーンによる液性限界測定法, 土質工学会第10回シンポジウム, 85-88.
- 8) 永石義隆(1977, 1989):フォールコーン法による液性限界, 農業土木学会誌, 45, 57, (9, 6), 611-614, 493-494.
- 9) 北郷繁・佐野信房・益田英治・佐藤正義(1965, 1967, 1969, 1970):液性限界測定法に関する実験, 土と基礎, 13, 15, 17, 18, (9, 12, 9, 6), 13-18, 15-25, 5-14, 9-15.
- 10) 東山勇・須藤清次(1966):フォールコーン法について, 第11回土質工学シンポジウム, 57-61.
- 11) 佐野信房(1971):フォールコーン重量と貫入量との関係について, 第6回土質工学研究発表会, 21-24.
- 12) 佐野信房・清水誠一(1972, 1973):フォールコーン法における先端角度の影響, 第27, 28回土木学会年次学術講演会, III-153, III-49, 481-484, 95-96.
- 13) 佐野信房・鈴木輝之・北郷繁(1975):フォールコーン法による液性・塑性両限界の測定, 土と基礎, 23(11), 39-46.
- 14) 鈴木輝之(1973, 1974, 1975):フォールコーン法による液性・塑性両限界の同時測定, 第28, 29, 30回土木学会年次学術講演会, III-50, III-101, III-122, 97-98, 196-197, 239-240.
- 15) 甲本達也(1990):フォールコーンテストによる粘土の液性・塑性両限界の決定, 農業土木学会論文集, (146), 95-100.
- 16) 藤田龍之・古河幸雄(1991):フォールコーン法における試料容器形状の検討, 第26回土質工学研究発表会, 259-262.
- 17) 藤田龍之・古河幸雄(1992):フォールコーン法による液性限界試験, 第27回土質工学研究発表会, 287-290.
- 18) 古河幸雄・藤田龍之・風間秀彦(1994):液性限界に対応するフォールコーン貫入量について, 第29回土質工学研究発表会, 261-264.
- 19) 古河幸雄・藤田龍之・風間秀彦(1994):NP試料のフォールコーン試験について, 第49回土木学会年次学術講演会, III-29, 52-53.
- 20) 風間秀彦・上條良博・藤田龍之・古河幸雄(1995):フォールコーン法による液性限界・塑性限界の測定, 土のコンシステンシーに関するシンポジウム, 土質工学会, 145-152.
- 21) 藤田龍之・古河幸雄・風間秀彦(1996):フォールコーン試験結果を図化する目盛りについて, 第31回土質工学研究発表会, 537-538.
- 22) 風間秀彦・小田恭子・藤田龍之・古河幸雄(1996):フォールコーンの一点法による液性限界測定, 第31回土質工学研究発表会, 261-264.
- 23) BS 1377; Part 2 4.3 (1990): Cone penetrometer method (definitive

- method).
- 24) Laboratoire Central des pont et Chaussees: Determination rapid des limit d'Atterberg al'aide d'un penetrometre. et d'un picnometre d'air, Paris, Lossier SGR/149.
 - 25) NZS 4402 Test 2.5 (1986): Determination of the Cone Penetration Limit.
 - 26) Vasiliev, A. M. (1949): Basic Principles of the Methods and Techniqe of Laboratory Determination of Physical Soil Properties, Mascow, URRS, 1949.
 - 27) PRC Soil Testing Standard SD128-007-84: Liquid and plastic limit test procedures "Balance cone penetrometer", (Ministry of Water and Electric Power Conservancy, 1989).
 - 28) SS 027120 (1990): Geotechnical test. Cone liquid limit.
 - 29) NS 8002: Geotechnical testing. Laboratory methods. Fall cone liquid limit.
 - 30) BNQ 2501-092 (1986): Soils-Determination of Liquid Limit by the Swedish Fall Cone Penetrometer Method and Determination of Plastic Limit, 1986.
 - 31) 地盤工学会基準・同解説 (1997): フォールコーンを用いた土の液性限界試験方法, 11-16.
 - 32) 例えば, 下辺 悟・宮森建樹 (1995): フォールコーン液性限界の一点法に関する2, 3の研究, 土のコンシステンシーに関するシンポジウム, 土質工学会, 153-158.
 - 33) 佐野佑房・下辺 悟 (1995): 土のコンシステンシーに関する研究委員会報告, 土のコンシステンシーに関するシンポジウム, 土質工学会, 52-61.