

フォールコーン法による液性 塑性両限界の測定*

鈴木輝之**

(昭和48年9月29日受理)

Measurement of Liquid and Plastic Limits by Fall Cone Test

by Teruyuki SUZUKI

Consistency limits are often used as an index to show the properties of cohesive soils. In spite of its usefulness, the conventional method of measurement of consistency limits has many disadvantages such as the human effects, the difficulty of standardizing the measuring devices, etc. This investigation is an attempt to eliminate these defects by using the fall cone test.

In this paper, experimental results and subsequent discussions of the fall cone test to measure liquid and plastic limits are presented. Also in this study, it is found that liquid and plastic limits are both measurable with one series of fall cone tests using improved techniques.

主な記号

- w : 含水比
- w_{LL} : 現行測定法による液性限界
- w_{PL} : 現行測定法による塑性限界
- w_{CL} : フォールコーンによる液性限界
- w_{CP} : フォールコーンによる塑性限界
- p : コーン貫入量
- p_{LL} : 液性限界におけるコーン貫入量
- p_{PL} : 塑性限界におけるコーン貫入量
- \bar{p}_{LL} : 液性限界の基準貫入量
- \bar{p}_{PL} : 塑性限界の基準貫入量
- I_L : 液性指数

* 第28回土木学会年次学術講演会にて発表予定

** 北見工業大学土木工学科

1. まえがき

土のコンシステンシー限界は、粒子の表面活性に関係する数値であり、粘性土の工学的性質をとらえるためには、きわめて重要な数値である。しかし、現行のこの値の測定法は、個人誤差の入りやすいこと、装置の材質による測定値の違いがあるなど、種々の問題点が指摘されている¹⁾。これに対して、現行法の欠点を補い、かつ測定値は、現行法によるものと相関性をもつ測定法としてフォールコーン法が注目され、これまで、測定自動化、一点法の開発などとも関連して多くの研究がなされている^{2),3)}。しかしこれらの研究は主に液性限界の測定を目指したものである。一方、北郷^{4),5)}は、コーン貫入量と含水比の関係は、両対数紙上では、液性限界付近だけでなく、塑性領域の大部分にわたって直線関係をなすことを示し、この性質を利用して、フォールコーン法によって液性限界だけでなく、塑性限界をも同時に決定することの可能性を示した。本研究はこれに続くものであり、フォールコーン法によって、液性、塑性の両限界を同時に測定する方法を確立しようとするものである。今回の実験は主に次のような内容について検討する目的で行なっている。1) コーン貫入量と含水比の関係が両対数紙上で直線を示す、液性指数の範囲を見出すこと。2) 液性限界塑性限界各々に対応するコーンの基準貫入量を求めること。3) 現行の方法との相関性を調べること。

2. 本方法での液性、塑性両限界の求め方

前述のようにフォールコーン法に関するこれまでの研究は、主に液性限界を求めるためのものである。すなわち、現行法に定める皿の落下回数と、所定の形状をもつコーンの貫入量とを対応させるものである。ここで、液性限界における皿の落下回数にしても、塑性限界における3mmの太さのヒモ状の土がきれぎれになる状態にしても、含水比の変化による土のコンシステンシーの変化点をとらえようとするに変わりはないのであるから、両者ともにコーンの貫入量と相関性をもつであろうという事は当然考えられるところである。

図1に示されるように、塑性領域内での所定の含水比のときの貫入量を求め、両者を両対数紙上にとると、1つの直線が得られる。この直線を両方へ延長し、あらかじめ現

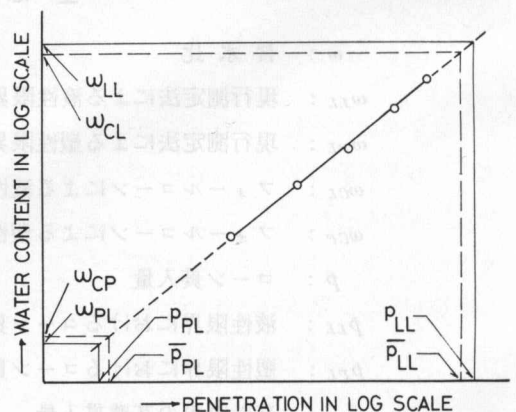


図1 フォールコーン法の説明

Fig. 1. Explanation of the fall cone method.

行の方法で求めてある液性限界 ω_{LL} 、塑性限界 ω_{PL} に対応するコーンの貫入量 p_{LL} 、 p_{PL} を求める。種々の土について、 p_{LL} 、 p_{PL} を求め、それらの平均値を基準貫入量 \bar{p}_{LL} 、 \bar{p}_{PL} とする。こ

のようにして、基準貫入量を定め、図1の直線上でこの貫入量に対応する含水比を求め、これをフォールコーン法によって求めた液性限界 w_{CL} 、塑性限界 w_{CP} とする。

3. 試料および実験方法

この研究は試験法を決めるためのものであるから、一般性を持たせるためには、あらゆる成因と性質をもつ、より多くの粘性土を対象とする必要がある。本実験で用いた試料は21種類で、それらの物理的性質と、実験結果の一部を表1に示す。表1中●印のついたものは、自然採取試料であり、採取場所は

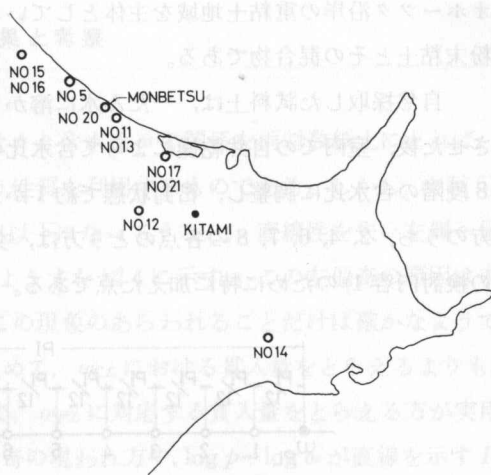


図2 試料採取地点

Fig. 2. Sampling points.

表1 試料の物理的性質と実験結果

Table 1. Physical properties of used sample and test results.

試料 No.	w_{LL} (%)	w_{PL} (%)	活性度	p_{LL} (mm)		p_{PL} (mm)		左偏奇の 発生する I_L
				100 g コーン	300 g コーン	100 g コーン	300 g コーン	
1	520.9	489.0	11.37	9.0	16.0	0.96	1.75	—
2	290.4	264.1	5.62	10.2	18.5	1.20	2.00	—
3	231.3	200.3	5.01	11.0	19.0	0.88	1.75	—
4	204.1	180.4	3.92	11.2	17.7	0.94	2.17	—
5●	180.7	131.4	2.19	14.0	20.5	1.00	1.60	0.29
6	147.1	94.0	2.47	9.4	17.2	1.15	2.25	0.33
7	121.9	53.4	1.98	8.3	13.0	0.55	0.79	—
8	90.5	34.1	0.76	10.0	18.0	2.00	3.60	0.33
9	81.2	58.5	1.33	10.6	17.0	1.20	2.60	0.26
10	78.8	30.4	0.87	8.3	13.2	0.60	1.80	0.28
11●	75.6	49.6	0.95	8.0	14.6	0.85	1.60	0.32
12●	73.0	37.8	1.47	9.6	17.5	0.37	0.80	—
13●	63.1	39.2	0.77	13.0	20.0	1.05	2.20	0.26
14●	63.0	35.4	—	9.5	15.0	0.95	1.70	0.38
15●	59.7	29.6	0.62	13.0	20.0	0.80	1.94	0.17
16○	56.4	28.5	0.73	9.0	16.6	1.55	2.75	—
17○	49.9	20.7	0.64	8.8	17.5	1.30	2.60	0.31
18	49.7	15.6	0.39	9.0	15.0	0.94	2.10	0.19
19	45.1	23.9	0.56	8.4	13.4	1.01	1.97	0.34
20●	43.1	19.4	0.63	9.3	17.5	1.33	2.35	0.32
21●	37.8	19.9	0.67	9.0	17.5	0.74	1.65	—

オホーツク沿岸の重粘土地域を主体としている。図2に採取地点を示す。その他の試料は市販粉末粘土とその混合物である。

自然採取した試料土は、一たん水に溶かしスラリーの状態にして、0.42 mm フルイを通して後、室内での自然乾燥によって含水比の調整を行なった。各試料は図3に示すように、8段階の含水比に調整し、密封状態で約1か月間養生し試験に供した。図3での含水比のとり方のうち、2, 4, 6, 7, 8の各点のとり方は、文献5)の場合と同じであり、その他の点は、前掲の検討内容1)のために特に加えた点である。

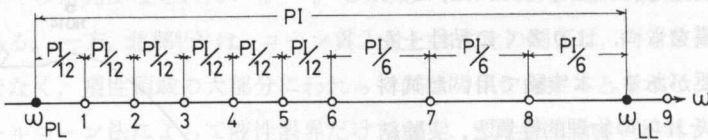


図3 含水比段階

Fig. 3. Step of prepared water content.

実験装置は、基本的には文献5)と同じである、その外観を写真1に示す。コーンは先端角90°の円錐形で、重量は100 grと300 grの2種類を用いた。貫入方法は、コーン先端と試料表面が一致した位置からの自由落下で、貫入を開始してから30秒後の貫入量を測定した。試料容器は内径60 mm、深さ30 mmのリングである。試料容器に試料をつめる場合は、つぎのような方法によった。まず、液性限界に近い、やわらかい土の場合は、試料を軟鋼ペラで十分に練合わせた後、供試体内の空ゲキを少なくするため、落下による振動を与えながらつめた。一方、塑性限界に近い、かたい土では、軟鋼ペラによる練合わせはできなかったもので、三軸圧縮試験などの供試体作製で用いられる、いわゆる、ビーティング法⁶⁾で養生前後の試料のこね返しを行なった。また、容器へのつめ込みは、容器容量の2~3倍の体積の土塊でこね合わせを行ない、最後に、直径が60 mmより少し小さい円柱状にし、容器をかぶせ、土塊の上下面を押しつぶすことにより容器内に試料を満たした。供試体上下面の仕上げはワイヤーソーで行なった。

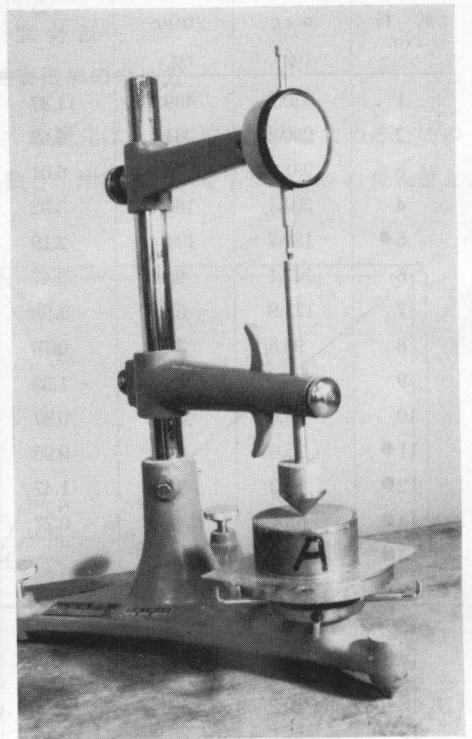


写真1 フォールコーン装置

Photo. 1. The fall cone apparatus.

4. 実験結果と考察

4.1 貫入量と含水比の両対数紙上での直線性

本方法は、図1に示すように、コーン貫入量 p と含水比 w の関係を両対数紙上にとれば、塑性領域の大部分にわたって直線性を示すという性質を利用するものである。しかし、文献5)によれば $\log p \sim \log w$ は、液性指数 I_L がある値以下になってくると、直線性を失い左側へ偏奇する場合のあることが指摘されている。そのようすを図4に示す。この左偏奇の原因は未だ明らかではないが、ともかく土によっては、この現象のあらわれることだけは確かなようである。この場合には、 $\log p \sim \log w$ に曲線をあはめて、 w_{CL} における貫入量をとらえるよりも、直線にのる点だけを対象として引かれた直線上で、 w_{PL} に対応する貫入量をとらえる方が実用的である。このような方法をとるためには、左偏奇の現われ方や、 $\log p \sim \log w$ が直線を示す I_L の範囲を明らかにする必要がある。さらにこの場合は、 I_L の下限値が分かればよいのであるから、この下限値について得られた結果を検討していく。

100 gr コーンと 300 gr コーンの両者を比較してみると、2 個の例外を除いて、左偏奇が生じはじめる含水比はほぼ同じであった。すなわち、 $\log p \sim \log w$ が直線を示す I_L の範囲はコーン重量に関係がないということになる。

$\log p \sim \log w$ が直線性を示す I_L の下限値を表1に示してある。ここで I_L 下限値の記入のないのは、この実験を行なった範囲では、左偏奇の見られなかった場合である。表1によれば、一見、 w_{LL} あるいは塑性指数の大きい土ほど、 $\log p \sim \log w$ の直線性がよいように思われるが、No. 1~4 の試料は、同一のベントナイトとその混合物であり、これらは共通性の強い土であるとみなして全体を見ると、 w_{LL} 、あるいは塑性指数の大きさと左偏奇の出現性とはあまり関係がないようである。また、北郷⁵⁾ が示唆した活性度との関係もなさそうである。つぎに、表1によれば、左偏奇の始まる I_L の値は、0.3 前後となっている。これだけの数の実験から一般的なことはいえないが、 I_L が約 0.4 以上であれば、 $\log p \sim \log w$ は、ほぼどのような土でも直線になることが予測される。また、本方法の実用化を考えると、 I_L 下限値の変動範囲に対応する、コーン貫入量の範囲を示すと、100 gr コーンで 2.5~3.5 mm、300 gr コーンで 3.5~5.5 mm 程度となる。

4.2 基準貫入量

前述の図1の方法によって求めた基準貫入量 \bar{p}_{LL} 、 \bar{p}_{PL} の値を表2に示す。ここで \bar{p}_{LL} 、 \bar{p}_{PL} としている値の求め方は、まず、全体の平均とその標準偏差を求め、標準偏差の範囲からはみ出た値をすてて、残った測定値について再び平均をとったものである。表2の値を、これまでの研究の結果と比較してみる。 \bar{p}_{LL} については、文献5)、7)の結果とはほぼ同じである。一方、 \bar{p}_{PL} についてみると、文献5)では、100 gr コーンで 1.1 mm、300 gr コーンで 2.3 mm、文献7)では 200 gr コーンで 2.39 mm という結果がでている。本実験の結果は、文献5)の結果と

表 2 基準貫入量 (1)
Table 2. Standard penetration value grmm. (1)

	コーン重量 (gr)	全体の平均 (mm)	変動係数	すてた観測 値の個数	基準貫入量
\bar{p}_{LL}	100	9.96	16.7	5	9.6
	300	16.89	12.6	7	17.1
\bar{p}_{PL}	100	1.06	34.0	5	1.0
	300	2.00	30.5	4	2.0

ほぼ一致するが、文献 7) の結果よりかなり小さいことになる。これらの実験のうち、本実験と文献 5) の場合は、実験方法、及びデーターの処理ともにほとんど同じである。また文献 7) の場合は、含水比調整後の養生を行っていない。このように試料の調整方法によって、実験結果が異なってくることは、今後の検討を要する問題であるが、実験の方法が同一であるならば、土が異なっても、ほぼ同一の結果を与えるということは、本方法の有用性を示すものである。

本方法は、 ω_{LL} 、あるいは ω_{PL} におけるコーンの貫入量は、土が異なっても一定であるという前提にもとづいているのであるから、表 2 の変動係数が小さいほど、測定の精度 (現行の方法との相関性) が高いということになる。表 2 の結果から、塑性限界の測定は、液性限界の測定に比べて精度の劣ることが分る。これら測定の精度については、くわしく後述する。

これまでは実用的であるという理由から、 $\log \omega \sim \log p$ を直線部分を両方に延長した一本の直線であると仮定し、この直線からはずれて左側へ偏奇した点は無視してきた。このようにして決められた p_{PL} は、左偏奇した点は無視せずに決めた p'_{PL} より大きくなる。この状態を図 4 に示す。ここで $\log p \sim \log \omega$ を一本の直線と仮定することの妥当性について検討してみる。図 4 に導すように、直線からはずれた点は、厳密には一つの曲線をなす場合が多いが、ここでは簡単化のために、左偏奇を生じた点群は近似的に一本の直線をなすとして、この直線上で ω_{PL} に対応する p'_{PL} を決める。この p'_{PL} をもとにして求めた基準貫入量 \bar{p}'_{PL} の値を表 3 に

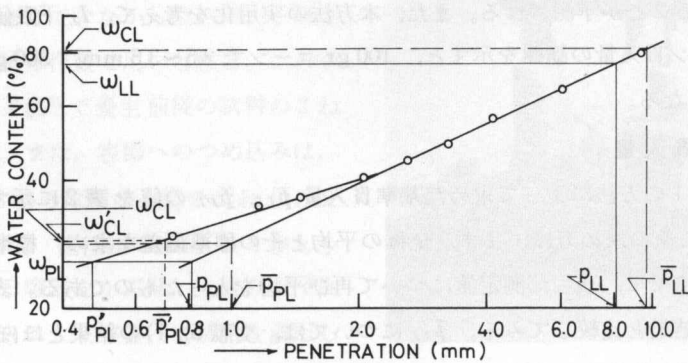


図 4 実験結果の一例

Fig. 4. Example of test result.

表 3 基準貫入量 (2)

Table 3. Standard penetration value (2)

	コーン重量 (gr)	全体の平均 (mm)	変動係数	すてた観測 値の個数	基準貫入量
\bar{p}'_{PL}	100	0.74	35.0	10	0.70
	300	1.49	40.0	7	1.53

示す。表 3 と表 2 を比較してみると、 p_{PL} の方が p'_{PL} よりも試料によるバラツキの少ないことが分る。さらにこのことから当然の結果ではあるが、 p'_{PL} を用いた場合、後述の表 4 に示すような、現行の測定法との相関性も劣るようである。すなわち、 $\log p \sim \log \omega$ としては、前述の左偏奇した測定値は無視して、直線部分を延長したものを用いる方が良い結果が得られることになる。

4.3 測定精度

フォールコーン法が、個人誤差や機械誤差の少ないという点で現行法よりも優れていることはすでに認められている。ここでフォールコーン法が現行法にとって代るためには、両者の測定値の相関性が最大の問題となる。ここでは、現行法による測定値との相関性に限って検討していく。この相関性は、表 2 の変動係数によっても示されるものであるが、さらに分りやすくするために、 $\omega_{LL} \sim \omega_{CL}/\omega_{LL}$ と $\omega_{PL} \sim \omega_{CP}/\omega_{PL}$ の分布とその平均値を表 4 に示す。表 4 によれば、液性限界に関しては、現行法の個人誤差や機械誤差の大きさを考えれば、フォールコーン法が十分に使えると考えられる。一方、塑性限界の測定においては、少し精度が劣るようであり、今後さらに多くのデータの積み重ねを要するようである。しかしこの精度にしても現行法における個人誤差などを考えると決して悪いものではなく実用化の可能性は大きいと思われる。また、100 gr コーンと 300 gr コーンを比較してみると、後者の方が少し精度が良いようであるが、決定的な差とは考えられない。コーン重量をいくりにするかは、試料容器の寸法によって制限される最大貫入量によって決められそうである。

表 4 現行法とフォールコーン法の測定値の差

Table 4. Difference of measured value between the fall cone testand and the conventional one.

	コーン重量 (gr)	$\frac{\omega_{CP} \sim \omega_{PL}}{\omega_{PL}}, \frac{\omega_{CL} \sim \omega_{LL}}{\omega_{LL}}$ (%) の分布			左の平均 (%)
		.0~10% (個)	10~20% (個)	20~25% (個)	
ω_{LL}	100	2	2	0	4.6
	300	1	1	0	4.0
ω_{PL}	100	13	6	2	9.9
	300	13	4	2	8.9

5. 結 論

以上において述べてきた内容について、主な点をまとめてみると次のようになる。

- 1) 本方法を実用化するためには、 $\log p \sim \log \omega$ が直線を示す I_L の範囲を明らかにする必要がある。本実験の結果によれば、その下限値は 0.3 前後の値をとり、さらにそのバラツキの状態から判断して、 I_L が約 0.4 以上であるならば、ほぼどのような土でも $\log p \sim \log \omega$ は直線になることが予測された。
- 2) 含水比の小さいところで、 $\log p \sim \log \omega$ が左偏奇を生じた場合は、この測定値を無視して直線部分のみを考える方が実用的であり、さらにより結果も得られる。
- 3) 測定の精度は、液性限界については、ほぼ問題がないと思われるが、塑性限界については、少し精度が劣り、さらに多くのデータの集積が必要と思われる。しかし実用化の可能性は十分にある。
- 4) コーン重量については、100 gr コーンよりも 300 gr コーンの方が、測定精度が少しよいようであるが、決定的な差とは考えられない。コーンの重量をいくらにするかは、容器寸法で決まる、許容最大貫入量との関係から決められるようである。

本研究を行なうにあたっては、北大工学部北郷繁教授の御指導を受けている。また、実験は元本学 4 年目学生、工藤達男君と吉田喜義君の手によるものである。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- 1) 北郷 繁： 土と基礎，13-9, p. 13 (1965).
- 2) 箭内寛治： 第 10 回土質工学シンポジウム発表論文集, p. 63-67 (昭 40).
- 3) 西亀達夫： 第 10 回土質工学シンポジウム発表論文集, p. 85-88 (昭 40).
- 4) 北郷 繁・佐藤正義： 土と基礎，17-9, p. 12 (1969).
- 5) 北郷 繁・佐藤正義： 土と基礎，18-6, p. 9 (1970).
- 6) 北郷 繁・三田地利之・上田一敏： 技術報告資料，第 9 号 (1969).
- 7) 北郷 繁・中村耕次： 土木学会第 26 回年次講演会講演集，第 III 部, p. 311-312 (昭 46).

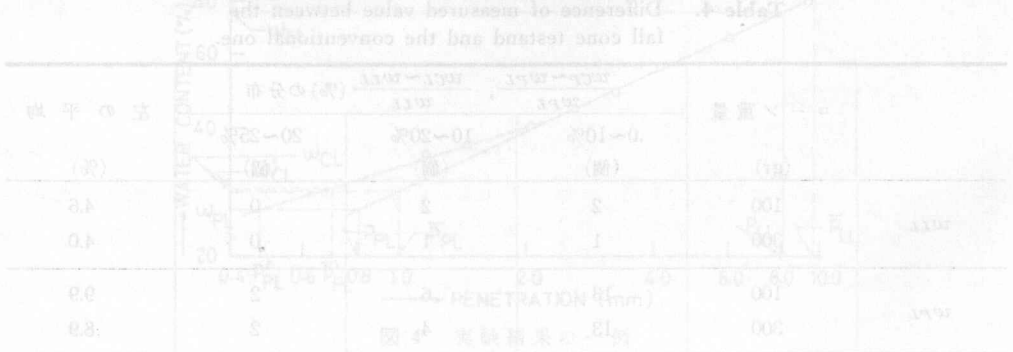


Fig. 4. Example of test result.