

フォールコーン法による液性塑性 両限界の測定 (第2報)*

鈴木輝之**

(昭和50年4月16日受理)

Measurement of Liquid and Plastic Limits by Fall Cone Test (Part 2)

by Teruyuki SUZUKI

In this paper, some results of experimental studies on the method of simultaneous determination of liquid and plastic limits by the fall cone test are described. Through several studies on measuring liquid limits only by the fall cone test, it is known that plastic limits can also be measured simultaneously by the same test used for liquid limits using improved technique.

This new method is based on the following two assumptions; that the relationship between water content and penetration of the cone can be shown by a straight line on a log scale within a certain range of water content, and that the penetration of the cone at liquid and plastic limits is always constant regardless of soil property and method of sample preparation. The purpose of this paper is to confirm experimentally that these two assumptions are correct.

1. ま え が き

フォールコーン法によって液性限界を測定する方法をさらに拡張し、同じ程度の手間で塑性限界をも同時に測定する方法に関する研究であり、前報¹⁾これを(第1報とする)に続くものである。今回の実験の目的は、これまでのような基礎的な事項を検討することから一歩進めて、より実用的な実験方法を用いた場合の問題点を探ることにある。実験方法としてこれまでと異なる主な点は、含水比調整後の養生を省略したことである。その結果、測定の精度はむしろ向上したが、 $\log w \sim \log p$ 線(以後 $w-p$ 線と略)が直線を示す含水比の範囲がせまくなるなどの、2, 3の新たな事実が判明した。

なお本文中で用いている記号の意味は、前報で一括して示したものと同一である。

* 第29回土木学会年講III部にて発表

** 北見工業大学土木工学科

2. 試料および実験方法

用いた20種類の試料を表1に示す。今回の実験では、より実際的な方向に進むという意味ですべて自然採取試料を用いた。実験結果に一般性を持たせるためには、これらの試料は多様である程よいのであるが、全体としてはオホーツク沿岸地域の重粘土に片寄ったきらいがある。

自然採取した試料は水に溶かしスラリーの状態にした後、0.42 mm フルイを通過させ、その後自然乾燥によって所定の初期含水比（液性指数 $I_L=0.2$ 前後）に調整した。

実験装置で今回変えたところは、コーン重量を100 gr と 200 gr の2種にしたことである。前報では100 gr と 300 gr のコーンを用いていた。しかし、300 gr コーンでは液性限界付近での貫入量が17 mm 前後となり、容器の大きさ（径60 mm, 深さ30 mm）から考えて、容器による拘束の影響が現われる可能性があるため²⁾、コーン重量を軽くしたものである。つぎに、今回の実験では含水比の調整方法を変えている。前報では、塑性領域内で所定の含水比を定め、予めその含水比に調整し約1カ月養生した後に、貫入試験を行なっている。この方法は、含水

表1 用いた試料

Table 1. List of prepared sample

採取地点	w_{LL} (%)	PI (%)	p_{LL} (mm)		p_{PL} (mm)	
			100 gr コーン	200 gr コーン	100 gr コーン	200 gr コーン
幌内	64.0	36.4	9.8	13.9	1.40	1.90
興部(1)	158.0	108.7	11.5	15.5	0.91	1.45
興部(2)	61.5	28.3	8.9	11.9	1.55	2.10
沙留	77.2	42.1	9.8	12.9	0.94	1.50
渚滑	94.8	49.8	10.6	12.6	1.00	1.84
紋別	43.1	19.4	9.6	12.8	1.02	1.69
元紋別	83.8	57.1	9.6	13.5	1.20	1.64
小向	46.5	23.0	8.7	11.8	1.06	1.60
沼上(1)	92.6	55.1	9.2	12.9	1.21	1.65
沼下(2)	64.3	37.0	9.1	12.4	1.17	1.61
下湧別	76.4	39.5	13.5	18.2	1.00	1.44
湧別	63.1	39.2	10.2	13.5	1.35	2.05
計呂地(1)	64.8	35.0	8.8	12.0	1.36	1.95
計呂地(2)	42.5	24.6	8.3	11.1	1.40	1.89
金華	68.8	39.1	9.5	13.8	1.02	1.47
小泉	37.3	14.3	8.1	10.9	1.15	1.50
釧路	63.0	35.4	9.4	13.0	1.17	1.70
芽室(1)	64.2	23.2	10.4	14.1	1.00	1.60
芽室(2)	57.8	35.2	9.3	12.6	1.05	1.51
芽室(3)	73.6	42.8	9.1	12.6	1.14	1.60

比の均一化が計れること、さらに初期含水比の影響がなくなることなど、基礎的な検討において重要な利点をもつ。しかし、実用的な方法でないことは確かである。そこで今回の実験では、前述の初期含水比に調整した試料を、密封状態で約1カ月養生しこれを初期状態とした。この試料に対し所定の貫入量になるように順次水を加えながら貫入試験を行なっていった。このときの目標貫入量は、100 gr コーンで、3.0, 4.0, 5.5, 7.0, 9.0 mm の5段階とした。この方法で得られる $w-p$ 線は初期含水比の影響を受けることが予想される。しかし一方では、含水比の調整の過程が現行法と同じになるという利点がある。

3. 実験結果および考察

3.1 $w-p$ 線の直線性

本方法を実用化するためには、 $w-p$ 線が塑性領域内で直線を示す範囲を明らかにする必要がある。前報では特にこの点を調べる目的で、含水比の範囲を広くとり試験を行なった。その結果、 $w-p$ 線が直線を示す I_L の下限値は0.3前後となり、これを貫入量で示すと100 gr コーンで2.5~3.5 mm という結果が出ている。この結果を参考にして今回の実験では、目標貫入量の最低値を100 gr コーンで3.0 mm とした。すなわち、 $w-p$ 線が直線を示す範囲内で実験を行なうことを考えた訳である。しかし、今回用いた20個の試料のうち16個が、最も小さい貫入量の測定値が直線からはずれた。この16個の試料において $w-p$ 線が直線を示す I_L の下限値は0.35~0.60の間にあった。 $w-p$ 線の曲る原因は明確にはされていないが、実験結果では、加水後の養生を行なわない場合は、 $w-p$ 線が直線を示す I_L の下限値は大きくなり、これを貫入量で表わすと、100 gr コーンで4.0 mm, 200 gr コーンで5.0 mm 程度になる。

北郷³⁾は圧密非排水三軸圧縮試験とベンセン断試験の結果から、含水比と非排水セン断強さの関係 ($w-\tau$ 関係) は、塑性領域全般にわたって両対数紙上で直線になることを示している。このとき、コーン貫入量は非排水セン断強度と対応するものと考えられるから、 $w-p$ 線が塑性領域全般にわたって直線を示さないのは、粘土の本来の性質によるものではなく、実験方法、特に含水比の調整方法の違いに原因があると考えられる。すなわち、 $w-\tau$ では圧密によって含水比が変わるのに対し、 $w-p$ では加水こね返しによって含水比の調整をしていることの違いが現われているものと考えられる。加水こね返しによる場合は、含水比の低いところでは団粒化した粒子を完全にときほぐせないこと⁴⁾、さらに飽和度が低くなり、含水比の値がそのまま粒子のつまり具合を示すものではなくなくなってくることなどが考えられ、これらのことが $w-p$ 線の曲る原因になっていると考えられる。また、これらの傾向は JIS 1210 で定める乾燥法により調整した試料ではより強くなると考えられ、今後の問題点として残る。

3.2 基準貫入量

基準貫入量の求め方は前報での方法と全く同じなのでここでは省略する。要するにその意味は、液性限界および塑性限界に対応するコーンの貫入量 (各々 \bar{p}_{LL} , \bar{p}_{PL}) のことである。得

表 2 基準貫入量 (1)

Table 2. Penetration value at liquid and Plastic limits (1)

	コーン重量 (gr)	全体の平均 (mm)	変動係数	基準貫入量 (mm)
\bar{p}_{LL}	100	9.67	12.1	9.5
	200	13.10	11.9	13.0
\bar{p}_{PL}	100	1.16	15.0	1.1
	200	1.69	11.7	1.6

表 3 基準貫入量 (2)

Table 3. Penetration value at liquid and plastic limits (2)

試験者		コーン重量 (gr)	変動係数	基準貫入量
北郷 ⁵⁾	\bar{p}_{LL}	100	18.3	10.5
		200	13.5	14.6
		300	12.9	17.6
	\bar{p}_{PL}	100	43.8	1.1
		200	46.2	1.8
		300	43.0	2.3
鈴木 ¹⁾	\bar{p}_{LL}	100	16.7	9.6
		300	12.6	17.1
	\bar{p}_{PL}	100	34.0	1.0
		300	30.5	2.0

られた結果を表2に示す。また、表3は比較のために、北郷⁵⁾の実験結果と前報での結果を示したものである。表3の2つの実験方法は全く同じであり、今回の実験との違いは含水比の調整法だけである。

表2および表3から、これら3つの実験における基準貫入量の値は、実用的にはほぼ同じとみなせる。それは、ここで示されている基準貫入量のバラツキの程度では、測定値に与える影響は無視できるということである。また、含水比の調整法が変わりさらに後述するように測定精度にかなりの違いがあるにもかかわらず、このように最終的な基準貫入量の値がほとんど変わらないという事は注目されることである。

カールソン⁶⁾はコーン重量を Q 、貫入量を p 、非排水せん断強さを τ とすると、次式が成り立つことを実験的に示した。

$$\tau = kQ/p^2 \quad k: \text{数定} \quad (1)$$

ここで同一状態の試料について異なるコーン重量 Q_i 、 Q_j で試験を行ない、貫入量 p_i 、 p_j が得られたとすると(1)式から次式が成り立つ。

表4 Q と p の関係

Table 4. Relationship between Q and p

	Q_j/Q_i	p_j/p_i	$\sqrt{Q_j/Q_i}$
液性	200/100	1.36	1.41
	300/100	1.79	1.73
	300/200	1.32	1.22
塑性	200/100	1.52	1.41
	300/100	1.90	1.73
	300/200	1.25	1.22

$$p_j/p_i = \sqrt{Q_j/Q_i} \tag{2}$$

前報と今回の実験結果から液性限界時と塑性限界時の(2)式の値を計算すると表4のようになる。ただし100 gr コーンは共通しているの値を平均している。表4から、液性限界では(2)式の関係をほぼ満足しているが、塑性限界では300/200を除いては満足な関係が得られていないことが分る。この結果は、100 gr コーンを使用するのが不適當であることを示している。また前述のように、300 gr コーンでは液性限界付近の貫入量が大きくなりすぎることと合わせ考えれば、本方法で用いるコーンの重量は、先端角の90°場合は、200 gr 程度のものが適當であると思われる。

3.3 測定精度

土の液性、塑性両限界は土のコンシステンシーの変化点における含水比として定義されるものである。この変化点は明瞭に表われるものではない。したがって、一つの土におけるその測定値というものは、ある定められた試験で測定されたものにすぎないといえる。そこで新しい測定法を採用しようとするときは、従来の方法と同じ値を測定するものでなければならない⁷⁾。したがって、ここで測定精度というのは、現行法と比べている測定法による測定値と同じ値を測定できるかどうかということである。すなわち、現行法による測定値との相関性を論じることになる。

この相関性を示す数値の一つとして、表2および表3の変動係数がある。この値は標準偏差を平均値で割り100をかけた値であり、液性限界あるいは塑性限界における貫入量 (p_{LL} , p_{PL}) のバラツキを示している。当然のことながら p_{LL} , p_{PL} が土によって変化することなく一定の値であるほど変動係数は小さくなり、現行法とフォールコーン法の相関性は良くなるということになる。表2と表3を比較すると、液性限界の測定精度はあまり変わらないが、塑性限界の精度は今回の結果が他2者に比べて非常に良くなっていることが分る。これは、前述のように、今回の実験では現行法とフォールコーン法における含水比の調整過程が同じであることに最大の原因があると考えられる。含水比の調整方法を実用的なものに変えることによって

w-p 線が直線を示す含水比の範囲がせまくなるという、本方法にとっては好ましくない傾向が表われたが、測定精度は上がっていることになる。この測定精度についてさらに見方を変えて述べていく。

フォールコーン法と現行法との測定値の差を示したものが表5である。この表から両者の測定値の差は、液性限界、塑性限界ともに同じ程度であることが分る。この結果は、前報および文献⁵⁾で塑性限界の測定誤差は液性限界のその2倍以上であるのと比べて大きな違いとなっている。この差を別の表わし方をすると、例えば100 gr コーンでは20個の試料の液性限界の平均値が70.0%であるのに対して、 $w_{LL} \sim w_{CL}$ の平均値は2.1%、一方、塑性限界の平均値は30.6%であるのに対して、 $w_{PL} \sim w_{CP}$ の平均値は1.5%である。この程度の誤差が、現行

表5 現行法とフォールコーン法の測定値の差

Table 5. Difference of measured value between the fall cone test and the conventional one

	コーン重量 (gr)	$\frac{w_{CL} \sim w_{LL}}{w_{LL}}, \frac{w_{CP} \sim w_{PL}}{w_{PL}}$ (%) の分布			左の平均 (%)
		0~5% (個)	5~10% (個)	10~15% (個)	
液性	100	16	4	0	3.0
	200	16	4	0	3.1
塑性	100	14	4	2	4.6
	200	15	4	1	3.3

全試料数 20 個

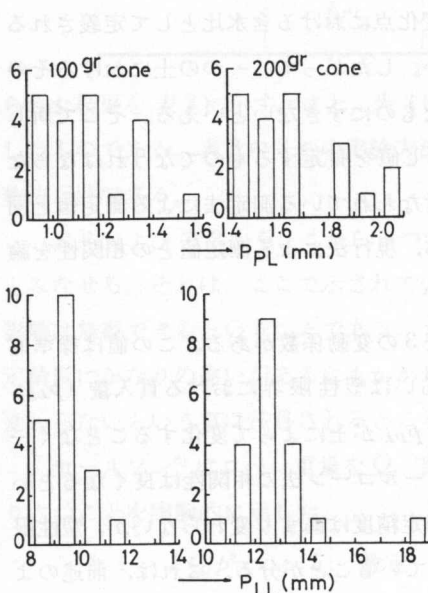


図1 pPL, pLL のバラツキ

Fig. 1. Distribution of pPL and pLL.

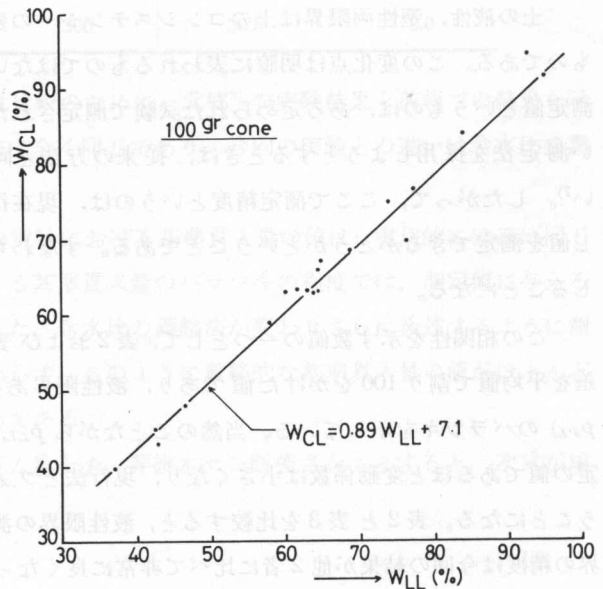


図2 w_{LL} と w_{PL} の関係 (1)

Fig. 2. Relationship between w_{LL} and w_{PL} (1).

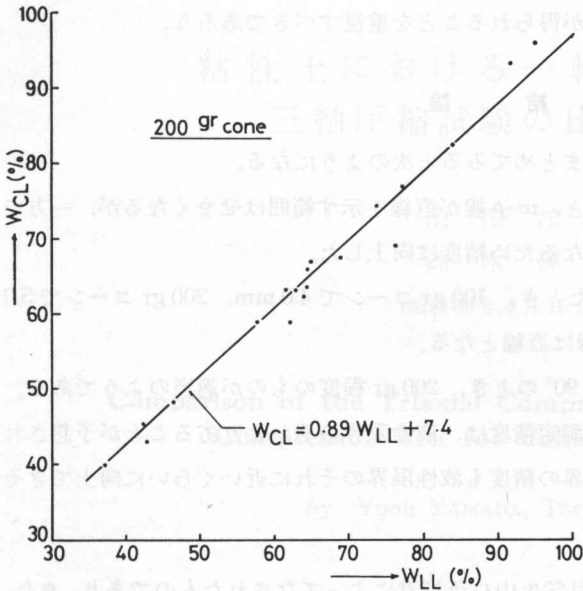


図3 w_{LL} と w_{PL} の関係(2)

Fig. 3. Relationship between w_{LL} and w_{PL} (2).

法の個人誤差などに比べて、問題にならないことは容易に理解できる。

前述のように p_{LL} , p_{PL} のバラツキは少ない方が測定精度が良いのであるが、そのバラツキの状況を示したものが図1である。この図から、 p_{LL} の分布はほぼ正規分布の形をしているが、 p_{PL} はある範囲に等分に分布する傾向になっている。このことは、最終的な誤差の平均値はあまり変わらないにしても、やはり塑性限界の測定値の方が測定精度が劣ることを示しているものと考えられる。

図2~図5は、現行法とフォールコーン法の測定値の関係をプロットしたものである。図中の直線は点群の回帰直線を示している。この直線は理想的には傾き1、切片0であるがそのようにはなっていない。この傾向は前報でも同様であり、また他の文献⁸⁾でも示されている。図2~図5の関係が正しいとすると、 p_{LL} , p_{PL} は一定値とはならず、液性限界の値が大きくなるほど p_{LL} は小さくなり、塑性限界ではその逆になる。このようになる理由としては、現行法とフォールコーン法では土を変形させるメカニズムが異なることなどが考えられるが、確かなことは分らない。いずれにしても、この傾向が正しいとするならば、本方法において基準貫入量の値を定めるという方法は実状に合わないことになる。しかし、このことを考慮するとデータの整理がかなり面倒になる。ここでは、図2~図5のような傾向を無視した方法でも、

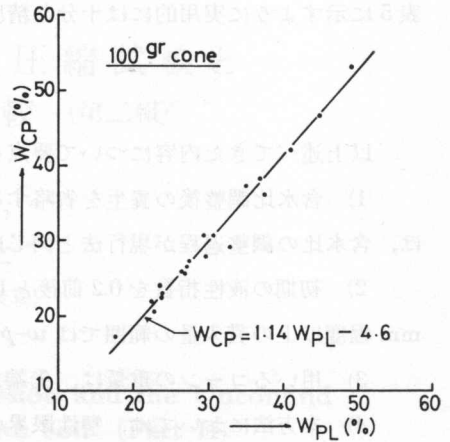


図4 w_{PL} と w_{CP} の関係(1)

Fig. 4. Relationship between w_{PL} and w_{CP} (1).

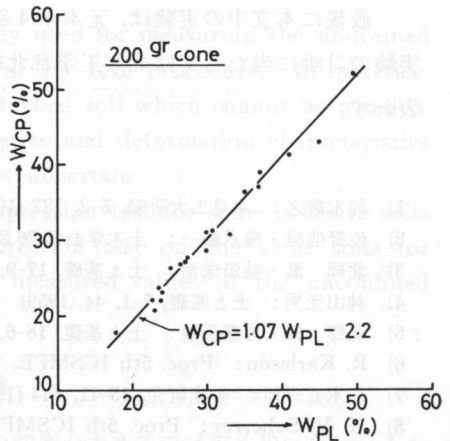


図5 w_{PL} と w_{CP} の関係(2)

Fig. 5. Relationship between w_{PL} and w_{CP} (2).

表5に示すように実用的には十分な精度が得られることを重視すべきであろう。

4. 結 論

以上述べてきた内容について要点をまとめてみると次のようになる。

- 1) 含水比調整後の養生を省略すると、 $w-p$ 線が直線を示す範囲はせまくなるが、一方では、含水比の調整過程が現行法と同じになるため精度は向上した。
- 2) 初期の液性指数を0.2前後としたとき、100 gr コーンで4.0 mm、200 gr コーンで5.0 mm 程度以上の貫入量の範囲では $w-p$ 線は直線となる。
- 3) 用いるコーンの重量は、先端角 90° のとき、200 gr 程度のものが適当のようである。
- 4) 本方法においては、塑性限界の測定精度は、液性限界のそれより劣ることが予想されてきたが、実験方法によっては、塑性限界の精度も液性限界のそれに近いくらいに向上できそうである。

最後に本文中の実験は、元本学4年目学生山口茂則君によってなされたものであり、また、実験の計画に当たっては北大工学部北郷繁教授の指導を受けている。ここに記して感謝の意を表わす。

文 献

- 1) 鈴木輝之：北見工大研報，5-2，187 (1974)。
- 2) 佐野信房・清水誠一：土木学会第26回年講III部 (1971)。
- 3) 北郷 繁・益田栄治：土と基礎，17-9，5 (1969)。
- 4) 神山光男：土と基礎，7-1，44 (1959)。
- 5) 北郷 繁・佐藤正義：土と基礎，18-6，9 (1970)。
- 6) R. Karlsson：Proc. 5th ICSMFE, Vol. 1, 171 (1961)。
- 7) 三木五三郎：生産研究，15-11，444 (1963)。
- 8) H. V. Scherrer：Proc. 5th ICSMFE Vol. 319 (1961)。