

粘土の液性限界の測定法に関する研究

柴田徹* 西原晃* 藤井敏美** 大西正城***

A Study on Measuring Method of the Liquid Limit of Clays

Toru SHIBATA* Akira NISHIHARA* Toshimi FUJII** Masaki OHNISHI***

ABSTRACT

The liquid limit is one of the basic indexes of physical properties of clays. A method proposed by Casagrande has been widely used to measure the liquid limit, however, some technical problems are pointed out for this conventional method. Recently more mechanical method using fall cone has often used to measure the liquid limit.

In this paper, a number of liquid limit tests by both of Casagrande's method and fall cone method were performed to clarify the relationship between the both method. It is shown that the relationship between water content and the liquid limit under any constant cone penetration are expressed by regression lines intersecting at a point. Based on this findings, a new normalizing parameter called normalized water content is introduced to correlate the cone penetrating characteristics of various clays. The relations between the liquid limit by Casagrande's method and by cone method are derived for various type of cone. It is also shown that the cone penetration corresponding to the liquid limit by Casagrande's method varies with the liquid limit.

キーワード：液性限界， 粘土， カサグランデ法， フォールコーン法

Keywords: Liquid Limit, Clay, Casagrande's method, Fallcone method

1. まえがき

含水量の変化によって土の状態ならびにその力学的性質は大きく変化する。含水量の変化にともなう土の状態変化を表す指標として、液性限界、塑性限界、収縮限界が定義され、これらの諸量はコンシステンシー限界と呼ばれている。このうち、液性限界は、多量の水分を含む土が塑性材料として最小のせん断抵抗を示す状態における含水比と定義されている。すなわち、それ以上の含水比になると、混合流体としての粘性抵抗は示しても、塑性材料としての強度は持たなくなる限界の含水比である。液性限界に対する本来の定義からいえば、液性限界はせん断抵抗の面から決定されるべきであろう。しかしながら、液性限界付近での高含水比におけるせん断試験は技術的に非常に困難であったため、それにかわる簡便な測定法がカサグランデ(Casagrande)によって考案され、多少の改良を加えた後現在でも広く利用されている。しか

しながら、カサグランデ法には技術上のいくつかの問題点があること、そして液性限界の本来の定義からいえばせん断抵抗に直接関係する試験法が望ましいという理由から、フォールコーン(fall cone)を用いた測定法も提案されている。

液性限界は粘土粒子が本来有している物性ならびに水中での粒子間力を反映しており、土の分類のみならず粘土の種々の力学特性を評価する上で重要な指標となりうるものである。実際にこれまで、液性限界などのコンシステンシー限界と種々の力学特性との相関関係を求めようとする非常に多くの研究が行われてきており、その成果は設計にも利用されている。筆者らも粘土の力学特性と液性限界の関係について、とくに堆積後の時間経過にともなう続性効果の影響に注目して一連の研究を行っている^{1), 2)}。しかしながら、液性限界の測定法そのものに統一的な解釈が確立していないのが現状である。そこ

*土木工学科

**大学院地域空間工学専攻博士課程

***大学院土木工学専攻

で本研究は、まず粘土の液性限界の測定方法に関して、従来のカサグランデ法とコーン法による試験を行い、両者の関係について考察したものである。

2. 実験に用いた試料ならびに実験方法

2.1 実験に用いた試料

今回の実験に用いた試料は、大阪湾周辺と京阪陸域で採取された8種類の粘土で、液性限界試験ではこれらの試料を高含水比で練返し、425 μ mふるいを通させたものを使用している。試料の物理特性は表-1に示すようであり、カサグランデ法による液性限界は40~107%の広範囲にわたっている。

Table-1 Physical properties of natural soils

試料 No.	液性限界(%)		塑性限界 (%)	土粒子密度 (g/cm ³)
	Casagrande	Fallcone		
No.1	107.4	—	35.0	2.632
No.2	61.0	54.0	26.8	2.678
No.3	55.8	50.0	27.2	2.638
No.4	98.8	83.5	39.8	2.653
No.5	40.4	38.0	21.5	2.686
No.6	64.0	56.0	28.3	2.688
No.7	45.5	40.5	18.4	2.661
No.8	77.6	67.0	33.1	2.639

2.2 液性限界試験

粘土の液性限界を測定する方法は Atterbergによって最初に考案されたが、その後カサグランデによって改良された方法が現在世界中で広く用いられている。

カサグランデ法は、椀状の金属製の皿に詰めた試料の中央に溝を切り、皿を25回落下させたときに、皿の底部の土が1.5cmにわたり合流する時点の含水比を液性限界と定める方法である。しかしこの試験方法には、従来より次のような問題点があるとして指摘されている³⁾。

- ①土によっては、とくに砂分を含む土では溝を切るのが困難。
- ②低塑性土では、土が流動するというよりも土全体が滑りやすい。
- ③低塑性土では落下の衝撃で土が液状化しやすい。
- ④溝切りの形状、硬質ゴム台の硬さ、皿のなめらかさなど、測定器の相違の影響を受けやすい。
- ⑤試料の詰め方、溝の切り方、回転速度などの試験者の技術的個人差の影響を受けやすい。

これ以外にも、静的な性質である液性限界を動的な試験方法で求めている、といった問題点の指摘もされている。すなわち、液性限界は流動に対する抵抗力あるいはせん断強さをあらわす尺度となるものであり、例えばベーン試験、粘性抵抗試験、コーン試験などから求める方が適切であるという指摘である。そこで、これに代わる方法として、フォールコーン試験が提案されている。これは、土の表面に円錐状コーンの先端をあて、自由落下によって容器内の試料に貫入させたときの貫入量と含水比の関係から液性限界を求める方法である。

フォールコーン試験は、1910年代にスウェーデンで軟弱な粘土のせん断抵抗をコーンの貫入試験から求めたのがはじまりである。スウェーデン国鉄の土質委員会が粘土のコンシステンシーを求めるためにコーンの試験方法を検討した結果、先端角60°、質量60gのコーンが10mm貫入するときの含水比がほぼ液性限界と対応することが分かり、これを fineness number と定義して液性限界の測定方法とすることが提案された。似た方法は各国で提案されているが、表-2に示すように、使用するコーンおよび液性限界に対応する貫入量は種々のものが提案されている。日本ではスウェーデン規格に準じたものが用いられているが、同じ日本でも研究者によって規格が異なっており、コーン法ではいまだに世界中で統一された規格がない。

本研究では、コーン先端角と質量の影響を調べるために、表-3に示す3種類のコーンを用いて実験を行った。このうち、タイプAのコーンは先端角60°、質量60gのもので、日本で標準的なものとして用いられているものである。本研究においては、地盤工学会の規格に準じて、タイプAのコーンが10mm貫入するときの含水比をコーン法の液性限界としている。

Table-2 Standard of Fallcone test

	コーン			
	先端角度	質量 g	貫入時間 秒	貫入量 mm
イギリス	30±1	80±0.05	5±1	20
スウェーデン	60	60	5	10
アメリカ	30	75	5	10
ロシア	30	76	5	10
インド	31	148	5	25.4
中国	30	76	5	17
日本(地盤工学会)	60	60	5	10
箭内・五味	60	60	瞬間的	10
佐野他	90	200	30	13.5
甲本	60	60	5	12

Table-3 Types of cone used in this study

コーンのタイプ	先端角	重量
A	60°	60g
B	60°	120g
C	30°	45g

3. 実験結果と考察

3.1 コーン貫入量と粘土の含水比の関係

図-1~3は3種類のコーンについて、コーン試験における土の含水比とコーン貫入量の間を算術目盛りで示した貫入量と含水比の間に明確な直線関係が見られる。なお、含水比は通常%表示がされるが、本研究では比で表すことにする。これまでコーン貫入量の含水比との関係については、貫入量の対数と含水比が直線関係にあるとするもの、あるいは両者の対数の関係が直線関係にあるとする報告もあり、いずれの関係が正し

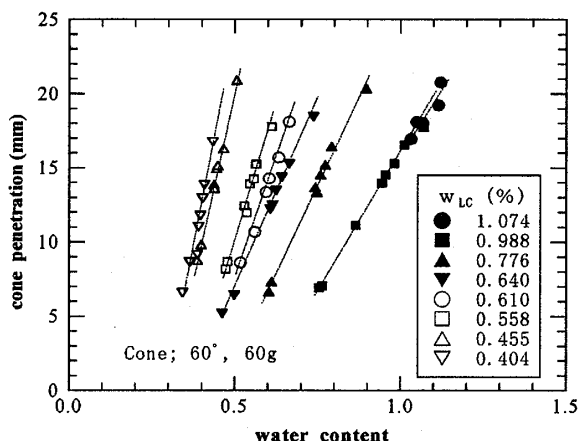


Fig-1 Relation between cone penetration and water content (cone Type A)

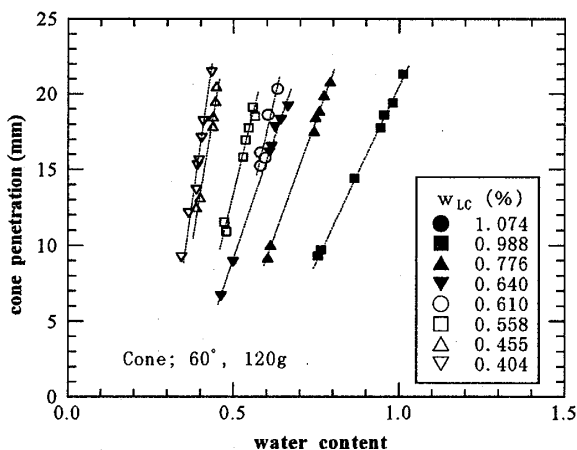


Fig-2 Relation between cone penetration and water content (cone Type B)

いか結論は得られていない。しかしながら、ある貫入量に対する含水比として液性限界を求めるという立場からいえば、算術目盛りで整理することが望ましいといえる。

図-1~3の結果より、液性限界の高い土ほど同じ貫入量に対する含水比が大きいこと、また液性限界の低い土ほど含水比の変化に対する貫入量の変化が大きいことがわかる。コーン貫入量と含水比の関係におけるこのような液性限界の影響を調べるために、同じ貫入量に対する含水比の値をカサグランデ法による液性限界 (w_{Lc}) とコーン法による液性限界 (w_{Lf}) に対してプロットすると図-4~5 のようになる。なお、ここではタイプAのコーンの結果のみを示したが、タイプB、Cのコーンについても同様な結果が得られる。

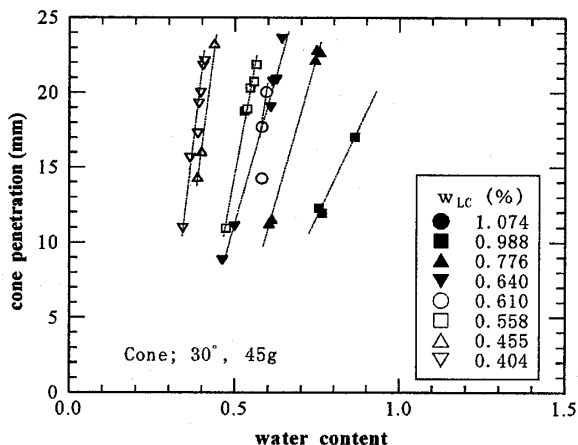


Fig-3 Relation between cone penetration and water content (cone Type C)

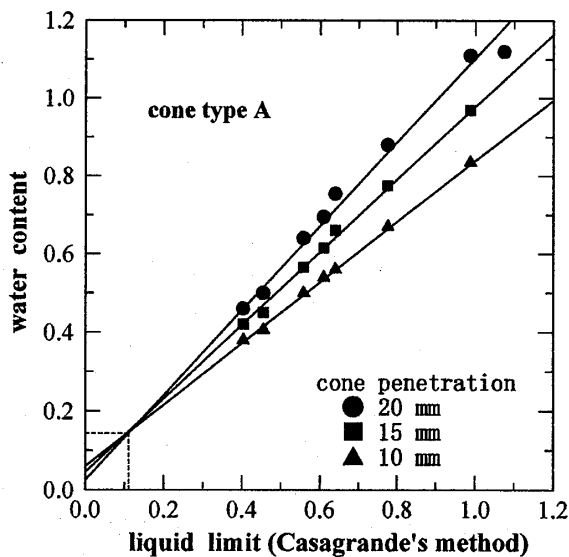


Fig-4 Relation between liquid limit by Casagrande's method and water content under constant cone penetration (type A)

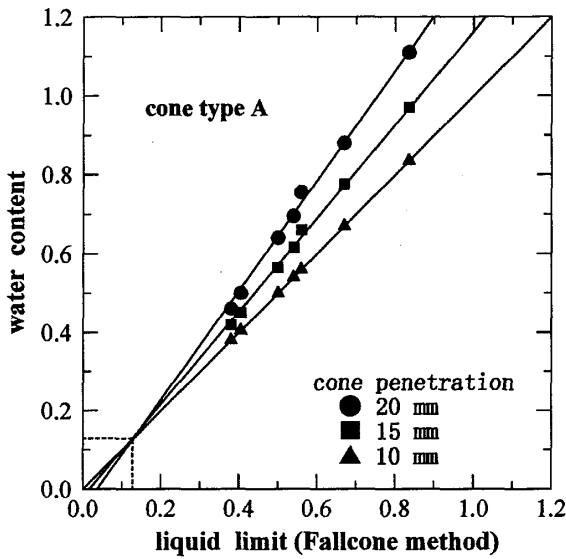


Fig-5 Relation between liquid limit by cone method and water content under constant cone penetration (type A)

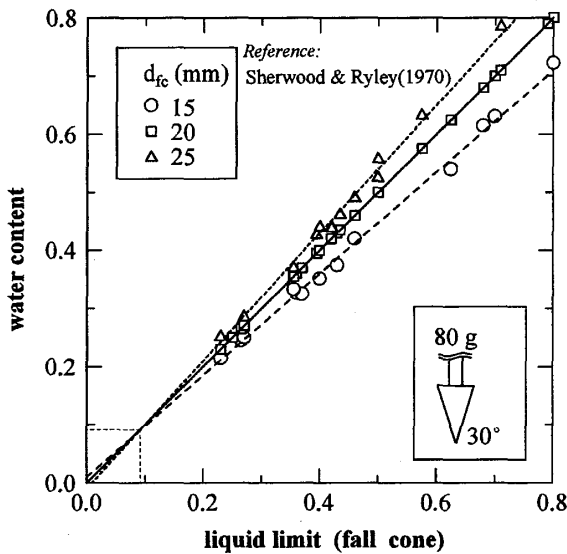


Fig-6 Relation between liquid limit and water content under constant cone penetration (data by Sherwood & Ryley(1970))

これらの図より、同一貫入量に対する含水比と液性限界の関係は一点で交わる直線群で表されることがわかる。また、図-6は、Sherwood and Ryley⁴⁾が行ったコーン試験(コーン先端角30°,質量80g)の結果を同様に整理したもので、本研究と同様の関係が見られる。したがって、同一貫入量に対する含水比と液性限界の関係は次のように表される。

$$w - w_{\beta} = \chi (WL - w_{\alpha}) \quad (1)$$

ここで、 w_{α} 、 w_{β} は直線群が交わる点の液性限界と含水比であり、 χ はそれぞれの直線の傾きである。 w_{α} 、 w_{β} の値は表-4に示すようであり、本研究で用いた粘土で $w_{\alpha} = 0.12 \sim 0.15$ 、Sherwoodらの結果では $w_{\alpha} = 0.1$ 程度の値と多少の差が見られる。また w_{β} の値はカサグランデ法で0.13~0.16、コーン法の場合には0.09~0.13でカサグランデ法による値の方が大きくなる傾向が見られる。

タイプAのコーン試験の結果(図-4,5)に示される回帰直線の傾き χ とコーン貫入量 D の関係を求めると、図-7に示すように、

$$\chi = a + bD \quad (2)$$

の関係があることがわかる。ここで、 D はコーン貫入量である。他のタイプのコーンについても全く同様の関係が得られ、 a 、 b の値はコーンのタイプによって表-4に示すような値となる。

Table-4 Values of w_{α} , w_{β} , a , b

type of cone	liquid limit test				
		w_{α}	w_{β}	a	b
60°; 60g	Casagrande	0.11	0.13	0.45	0.034
	fall cone	0.13	0.13	0.62	0.038
60°; 120g	Casagrande	0.12	0.14	0.482	0.025
	fall cone	0.14	0.12	0.603	0.032
30°; 45g	Casagrande	0.15	0.16	0.467	0.022
	fall cone	0.14	0.12	0.635	0.025
30°; 80g*	Casagrande	0.1	0.13	0.467	0.019
	fall cone	0.09	0.09	0.542	0.022

*data by Sherwood & Ryley(1970)

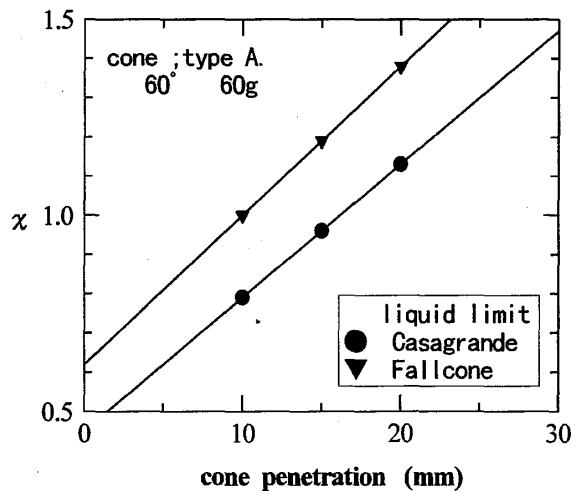


Fig-7 Relation between χ and cone penetration

式(2)を式(1)に代入すると次式が得られる。

$$w^* = a + bD \quad (3)$$

ここで、 w^* は次式のように w_α と w_β の値を用いて含水比を基準化したもので、本研究では以後 w^* を基準化含水比(normalized water content)と呼ぶことにする。

$$w^* = \frac{w - w_\beta}{w_L - w_\alpha} \quad (4)$$

表-4に示す係数の値を用いれば、タイプAのコーンの場合、

$$\frac{w - 0.13}{w_L - 0.11} = 0.45 + 0.034D \quad (\text{カサグランデ法}) \quad (5)$$

$$\frac{w - 0.13}{w_L - 0.13} = 0.62 + 0.038D \quad (\text{コーン法}) \quad (6)$$

の関係式が得られる。ただし、Dの単位はmmである。図-8はコーン試験(タイプA)の結果を基準化含水比と貫入量の関係で整理したもので、図中の直線は式(5)、(6)の関係を示している。図に示すように、基準化含水比を用いると、含水比と貫入量の関係が液性限界に関係なく一義的に決まる。ただし、カサグランデ法によって求めた液性限界の値を用いた場合にはコーン法の場合に比べてばらつきが大きくなっている。同様の結果は他のタイプのコーンにおいても得られる。また、図-9はSherwoodらのコーン試験の結果を基準化含水比で整理したもので、この場合、基準化含水比とコーン貫入量の関係は次のようになる。

$$\frac{w - 0.13}{w_L - 0.1} = 0.467 + 0.019D \quad (\text{カサグランデ法}) \quad (7)$$

$$\frac{w - 0.09}{w_L - 0.09} = 0.542 + 0.022D \quad (\text{コーン法}) \quad (8)$$

カサグランデ法によって求めた液性限界の値を用いた場合にはばらつきが大きいものの、コーン法の場合には基準化含水比と貫入量の関係が一義的に決まる。

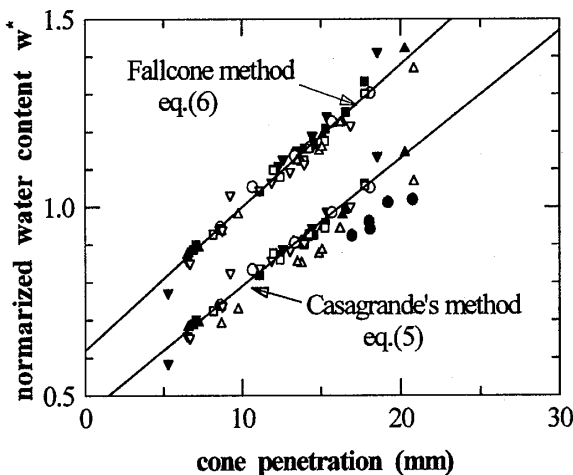


Fig-8 Relation between normalized water content and cone penetration (cone type A)

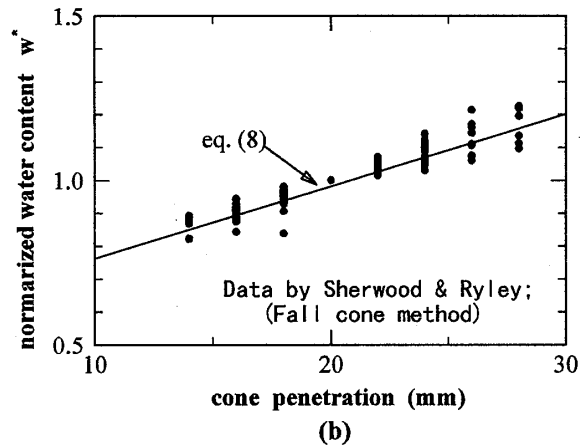
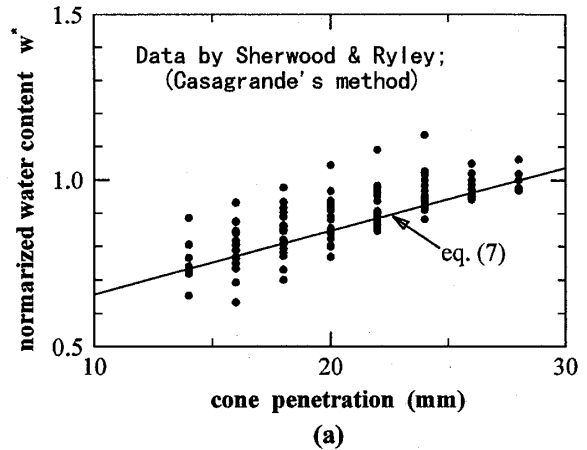


Fig-9 Relation between normalized water content and cone penetration: (a) Casagrande's method and (b) Fallcone method (data by Sherwood & Ryley (1970))

コーンの貫入量と含水比ならびに液性限界との関係については、これまでもいくつか報告がある。たとえば、Karlsson⁵⁾は60°、60gのコーンを用いた数多くの実験結果から次の関係式を導いている。

$$\frac{w - F}{\log(D/10)^2} = \frac{F - 17}{1.8} \quad (9)$$

ここに、Fはfineness number すなわちコーン法による液性限界(w_{Lf} ; %表示)である。式(9)を書き換えると、

$$\frac{1.8(w - w_{Lf})}{w_{Lf} - 17} = 2 \log D - 2 \quad (10)$$

の関係が得られる。図-10はタイプAのコーンの実験結果を上式にしたがって整理したものであり、貫入量が10~15mmの範囲内では式(10)の関係がよく成り立つが、この範囲をはずれると式(10)の関係は必ずしも適用できないことがわかる。

Nagaraj and Jayadeva⁶⁾は、Sherwoodらのコーン試験の結果を整理して、コーン貫入量と含水比の間に、

$$w/w_L = 0.77 \log D \quad (11)$$

あるいは

$$w/w_L = 0.65 + 0.0175 D \quad (12)$$

の関係があることを示している。図-11はタイプ A の試験結果を w/w_L を用いて整理したもので基準化含水比を用いた場合に比べてばらつきが大きい。タイプ B、C のコーンについても同様で、今回の実験結果に関するかぎり w/w_L を用いた基準化はばらつく結果となった。

以上のように、本研究で提案する基準含水比はすべてのタイプのコーンに対して適用可能であり、またコーン貫入量の適用範囲も広いことから、コーン試験結果を利用する上で非常に有用であるといえる。

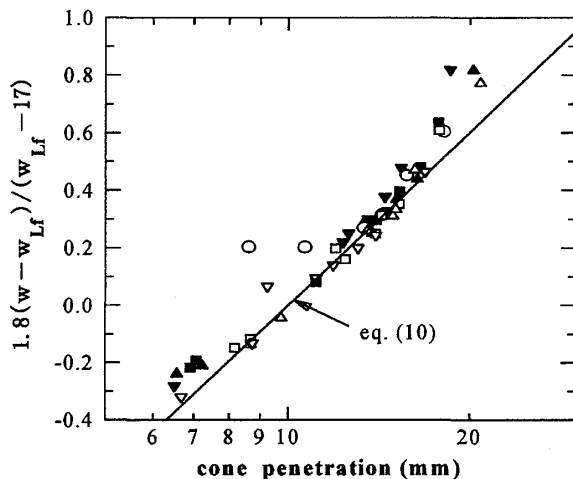


Fig-10 Normalized relation between water content and cone penetration proposed by Karlsson(1961)

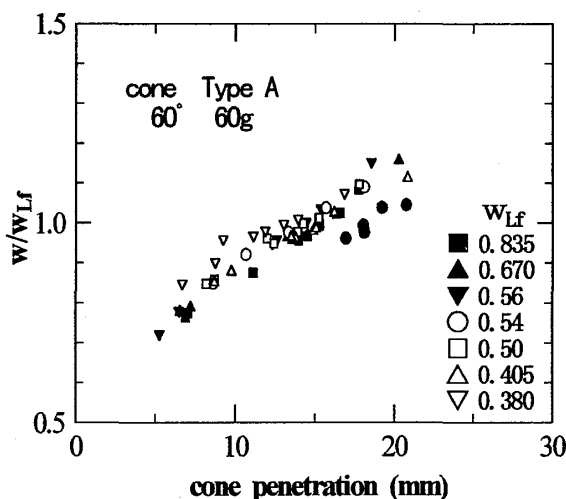


Fig-11 Relation between w/w_L and cone penetration

3.2 カサグランデ法とコーン法による液性限界の関係

表-2に示したように、コーン法によって液性限界を求める場合の基準は国別あるいは研究者によって種々のものが提案されている。使用するコーンの形状や質量が異なる場合は当然のこととして、同じコーンを用いる場合においても基準とする貫入量が異なっている。これは、コーンの基準貫入量がカサグランデ法による液性限界に一致するように決められてきたためである。たとえば、日本ではスウェーデン規格と同様に、タイプ A (先端角 60° 、重量 $60g$) のコーンの $10mm$ 貫入時の含水比を液性限界としている。しかし、Sowersら³⁾ あるいはKarlsson⁶⁾が報告している結果によれば、液性限界が低い範囲ではカサグランデ法とコーン法の液性限界はほぼ一致するが、液性限界が高くなるにつれてコーン法による液性限界はカサグランデ法による値より小さくなる傾向がある。すなわち、液性限界の値によってカサグランデ法の液性限界に対応するコーン貫入量に変化していることになる。このように、カサグランデ法に一致するように一定のコーン貫入量を決めるには無理があり、これが国や研究者によって基準貫入量が異なる原因と考えられる。したがって、コーン法の標準規格を確立するためには、カサグランデ法とコーン法による液性限界の関係を明確しておく必要がある。

カサグランデ法による液性限界 (w_{Lc}) を用いると、コーン貫入量 D と含水比の関係は、式(3)、(4)より次式で表される。

$$w - w_\beta = (w_{Lc} - w_\alpha)(a + bD) \quad (13)$$

ただし、定数 a 、 b の値はコーンのタイプによって異なる。いま、あるタイプのコーンで液性限界の測定に用いられる基準貫入量を D_L とすると、式(13)よりその基準貫入量における含水比 (コーン法の液性限界; w_{Lf}) は次のように求められる。

$$w_{Lf} = (w_{Lc} - w_\alpha)(a + bD_L) + w_\beta \quad (14)$$

あるいは、

$$w_{Lf} = A w_{Lc} + B \quad (15)$$

ここに、

$$A = a + bD_L, \quad B = w_\beta - w_\alpha(a + bD_L) \quad (16)$$

である。

式(15)より、カサグランデ法とコーン法の液性限界の関係は切片を有する直線関係で表されることがわかる。このことはSowersら³⁾ もいろいろな規格のコーン試験の結果について報告している。たとえば、日本あるいはスウェーデンの規格のように、タイプ A (60° , $60g$) のコーンで基準貫入量を $10mm$ とした場合には、

$$w_{Lf} = 0.79 w_{Lc} + 0.04 \quad (17)$$

となる。図-12はカサグランデ法とコーン法(タイプ A)による液性限界の関係を示したもので、図には松井⁷⁾ と Karlsson⁶⁾ が報告している結果も合わせて示してある。松井の試験結果は本研究と同じ大阪湾周辺で採取された粘

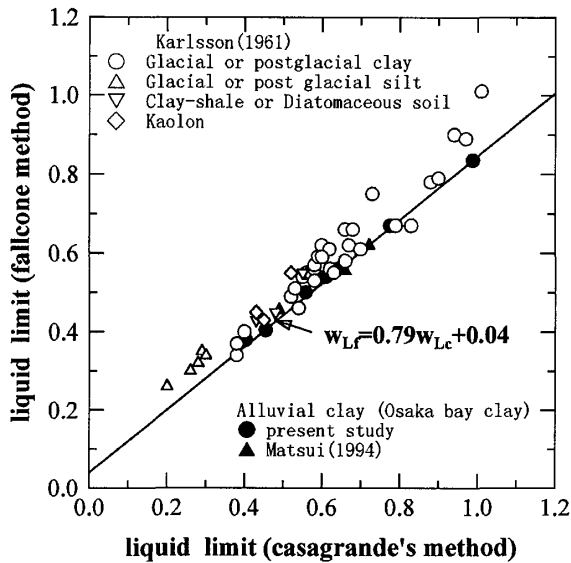


Fig. 12 Comparison between liquid limit by Casagrande's method and Fallcone method(60°; 60g cone)

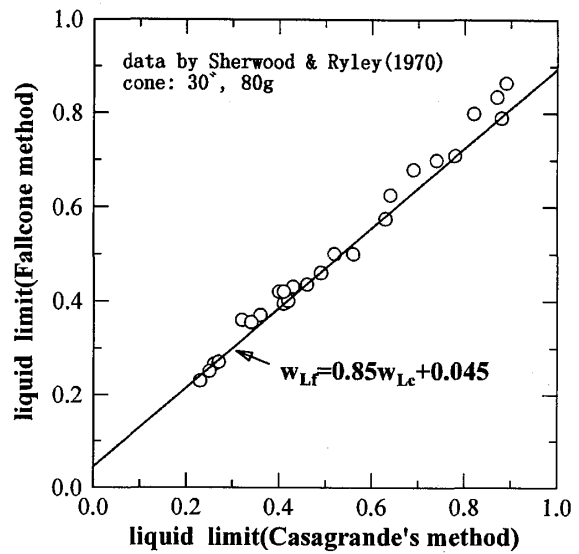


Fig. 14 Comparison between liquid limit by Casagrande's method and Fallcone method(30°; 80g cone)

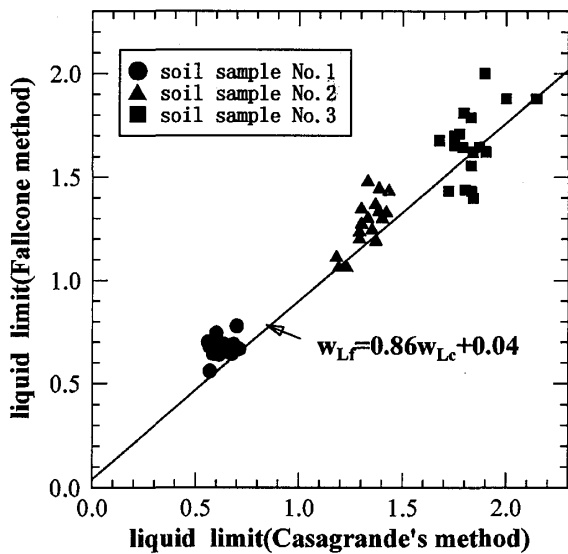


Fig. 13 Comparison between liquid limit by Casagrande's method and Fallcone method (60°; 60g cone; $D_L=12\text{mm}$)

土を用いたもので、本研究の結果と同様式(17)の関係によく一致している。また、Karlssonの報告している実験結果も式(17)の関係式にそって分布していることがわかる。

図-13は、日本の多くの試験機関によるカサグランデ法とコーン法の一斉試験の結果⁸⁾であり、この図に示す結果では、タイプ Aのコーンで基準貫入量として12mmが用いられている。式(14)で基準貫入量を12mmとすると、

$$w_{Lf} = 0.86w_{Lc} + 0.04 \quad (18)$$

の関係が得られる。図-12に示す式(17)あるいは図-13の式(18)の関係式はKarlssonあるいは一斉試験の実験結果とよく対応しているものの、 w_{Lf} の実測値は予測値より若干大きくなっている。式(17)、(18)で用いた w_α 、 w_β などの係数の値は大阪湾周辺の粘土の試験結果だけから求めたものであり、これらの数値が他の粘土にも広く適用できるものかどうか、今後さらに多くの実験結果によって検討する必要がある。

図-14はイギリス規格のコーン(先端角30°、重量80g)を用いたSherwoodら⁴⁾の試験結果である。イギリスの規格では基準貫入量は20mmとなっており、この場合、

$$w_{Lf} = 0.85w_{Lc} + 0.045 \quad (19)$$

となる。上式の関係は実験結果をよく表しており、本研究で導いた関係式がコーンのタイプ、基準貫入量に関係なく適用できることがわかる。

これまでコーン法で液性限界を求めるための基準貫入量は、カサグランデ法の液性限界に一致するように決められてきている。カサグランデ法による液性限界を用いると、コーン貫入量 D と含水比の関係は式(13)で表されるが、この式において $w = w_{Lc}$ とおけば、カサグランデ法の液性限界に対応するコーン貫入量 D_{Lc} が次のように求められる。

$$D_{Lc} = \frac{1}{b} \left(\frac{w_{Lc} - w_\beta}{w_{Lc} - w_\alpha} - a \right) \quad (20)$$

この式からわかるように、 $w_\beta = w_\alpha$ でないかぎり貫入量 D_{Lc} は一定値とならない。このことが、先に指摘したように、研究者あるいは国によってコーンの基準貫入量の値が異なる原因といえる。ちなみに、タイプ Aのコーンに関してカサグランデ法に対応する基準貫入量は図-15の

ように変化する。このように、カサグランデ法に一致するようにコーンの基準貫入量を決めることは無意味であり、コーンの基準貫入量は本来の力学的視点から決められるべきであろう。また、仮にカサグランデ法と対比させて基準貫入量を決めるとするならば、日本で標準とされるタイプAのコーンでは15mm程度が適当と考えられる。

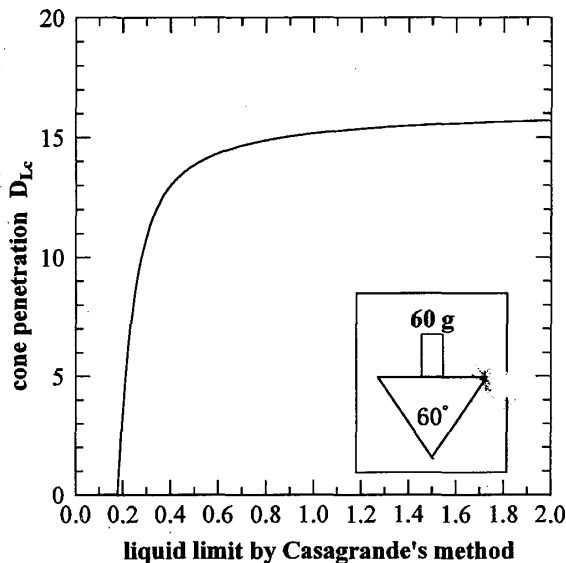


Fig.-15 Cone penetration corresponding to the liquid limit by Casagrande's method (60°, 60g cone)

4. まとめ

本研究では、粘土の物性を表す重要な指標である液性限界に関して実験を行い、従来のカサグランデ法とコーン法の関係について考察した。得られた成果をまとめると以下の通りである。

- 1)コーンの貫入量を一定としたときの、粘土の液性限界と含水比の関係はコーンのタイプに関係なく、1点で交わる直線群で表される。
- 2)上記直線群の交点として求まる液性限界と含水比の値を用いて新たに基準含水比が定義され、この基準含水比を用いると、コーン貫入量と含水比の関係が液性限界に関係なく一義的に表される。
- 3)基準含水比とコーン貫入量の関係式より、カサグランデ法とコーン法による液性限界の関係式が導かれ、両者の関係は切片を有する直線関係で表される。
- 4)カサグランデ法に対応するコーンの基準貫入量は液性限界によって変化するため、カサグランデ法に一致するようにコーンの基準貫入量を決めることは無意味であることが示された。

以上のように、本研究で提案した基準含水比を用いることにより、コーン法と従来のカサグランデ法との関係を

明確にすることができた。コーン試験は力学試験の一つであり、コーン法による液性限界は粘土の力学特性を評価するうえで有用な指標となりうるものである。したがって、その規格を統一するには、液性限界の物理的意味も含めて、より力学的な立場からの議論が必要であろう。また、本研究で得られた諸係数の値に関しても、さらに多くの実験によって確認する必要がある。

本研究は平成8~9年度の文部省科学研究費補助金(基盤研究(c)(2), 課題番号08650586)を受けて行った研究の一部である。

参考文献

- [1] Shibata, T. and A. Nishihara: Normalized compression curve for reconstituted clay, Int. Symposium on Characterization of Soft Marine Clays (1997)
- [2] 柴田徹・西原晃: 練返し再構成粘土の圧密基準曲線, 第32回地盤工学研究発表会講演集, pp.389-390, (1997)
- [3] Sowers, G., A. Vesic and M. Grandlfi: Penetration tests for liquid limit, ASTM, STP. No.254, pp.216-226 (1959)
- [4] Sherwood, P.T. and M.D.Ryley: An investigation of a cone-penetrometer method for the determination of the liquid limit, Geotechnique, 20, No.2, pp.203-208 (1970)
- [5] Karlsson, R.: Suggested improvements in the liquid limit test, with reference to flow properties of remoulded clays, Proc. 5th Int. Conf on Soil Mech. and foundation Eng., pp.171-184 (1961)
- [6] Nagaraj, T.S. and M.S. Jayadeva: Re-examination of one-point methods of liquid limit, Geotechnique, Vol.31, No.3, pp.413-425 (1981)
- [7] 松井恒治: 大阪湾粘土の圧密特性に及ぼす続成効果に関する研究, 京都大学修士論文 (1994)
- [8] 土のコンシステンシーに関する研究委員会(地盤工学会): 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発表論文集, p.60 (1995)