

粘性土の液性限界 w_L 、塑性限界 w_p の簡易試験法の再考

液性限界，塑性限界，流動曲線

大阪公立大学都市科学・防災研究センター ○国 大島昭彦
大阪公立大学大学院 正 田村耕平 正 岡田広久
関西地盤環境研究センター 正 三好功季 国 八谷 誠

1. まえがき

周知のように，液性限界 w_L と塑性限界 w_p は粘性土の物理的性質，分類手法として最も重要な一つである。 w_L と w_p は Atterberg が 1911 年にその定義と試験法を提唱し，1932 年に Casagrande が現在も使われる機械的な試験装置を提案したものといわれている^{1),2)}。しかし，試験法はその後 100 年近く経っても基本的に変わっておらず，土質試験の中でも最も「古典的かつ原始的」な試験法となっている。また，その測定は熟練を要するもので，専門職人が行っているのが通常である。一方，これに変わる試験法としてフォールコーン法が基準化されたが，現在でもあまり使われていない。

本稿では，試験法の省力化を目指し，簡易試験法として w_L の「一点法」， w_p の「塑性図法」を再考した結果を報告する。

2. w_L の一点法の既往の研究

w_L の一点法は，既に 1940～1960 年代に提案されており^{3),4)}，BS や ASTM では簡便法として採用されている⁵⁾。その提案式は図-1，2 に示すように， w - $\log N$ 関係（流動曲線）と $\log w$ - $\log N$ 関係の 2 種類があり，それぞれ式(1)，(2)のように表される。

$$I_f = \frac{w - w_L}{\log 25 - \log N} \Rightarrow w_L = w - I_f \log \left(\frac{25}{N} \right) \tag{1}$$

$$I_f' = \frac{\log w - \log w_L}{\log 25 - \log N} \Rightarrow w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{I_f'} \tag{2}$$

ここに， w は含水比， N は落下回数， I_f は w - $\log N$ 関係の傾きである流動指数， I_f' は $\log w$ - $\log N$ 関係の傾きである。なお，文献 4) では I_f' は $\tan \beta$ (β は傾きの角度) で表しているが，本稿では流動指数相当として I_f' で表した。

さらに，流動指数 I_f は粘性土の塑性が大きいくほど大きくなると容易に想像できる。そこで，式(3)のように I_f は w_L に比例する (α は比例定数) と仮定すれば，式(1)は式(4)のように表すことができる (なお， $\log 25 = 1.40$)。

$$I_f = \alpha w_L \tag{3} \Rightarrow w_L = \frac{w}{(1 + 1.40\alpha) - \alpha \log N} \tag{4}$$

文献 3)，4) では式(2)や式(4)の形式で提案式が紹介されている。主なものを表-1 に示す。式(2)の I_f' は 0.092～0.121，式(4)の α は 0.277～0.3 となっている。ただし，式(4)では式(3)のように I_f が w_L に比例して変化することを考慮しているのに対し，式(2)では I_f' は w_L によらず一定としている点が大きく異なる。なお，文献 5) (赤本) では $\log w$ - $\log N$ 関係の式(2)が紹介されている。

3. 大阪地域の粘性土に対する w_L の一点法の適用

今回整理した w - $\log N$ 関係と $\log w$ - $\log N$ 関係の線形性はそれほど変わらなかった。

まず，式(2)の I_f' を大阪地域 7 地点・10 土層（沖積粘土 Ma13，洪積粘土 Ma12）で求めた結果を図-3 に示す。 I_f' は 0.04～0.14 の間にばらついており，一定ではない。図には平均 $I_f' = 0.081$ を示したが，これを基に式(2)による推定値 w_L' と真値 w_L との比 w_L'/w_L のヒストグラムの例（大阪市海岸通⁶⁾の $N=15 \sim 35$ の多点法のデータを一点法に適用）を図-4 に示す。 I_f' がばらついた割には $\pm 2\%$ 以内の誤差で w_L が推定できている。

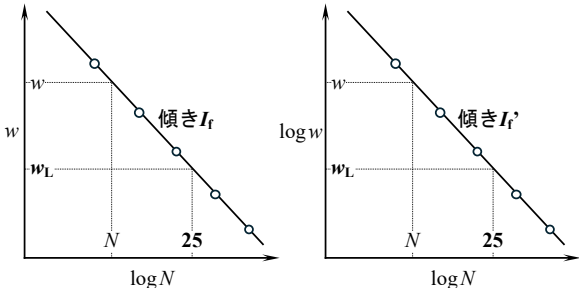


図-1 w - $\log N$ 関係 図-2 $\log w$ - $\log N$ 関係

表-1 w_L の一点法による提案式の例^{3),4)}

提案者	年次	提案式	N の測定範囲
W.E.S	1949	$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$	正確には 20～31 一般には 15～41
Olmstead & Johnston	1954	$w_L = \frac{w}{1.419 - 0.3 \log N}$	22～28
Eden	1955	$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0.100}$	15～35
Norman	1959	$w_L = \frac{w}{1.388 - 0.277 \log N}$ $w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0.092}$	$w_L < 50$: 17～35 $w_L < 120$: 20～30
ASTM	1961	$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0.12}$	20～30
BS	1961	$w_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0.092}$	15～35

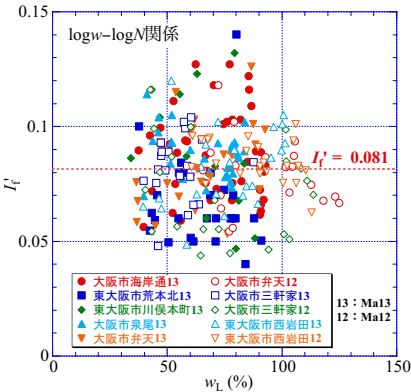


図-3 大阪地域の I_f' - w_L 関係の例

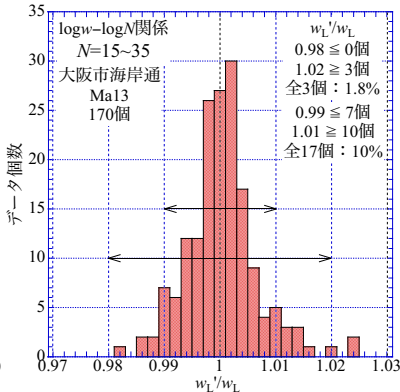


図-4 w_L'/w_L のヒストグラムの例

Reconsideration of simplified test method of liquid limit, w_L and plastic limit, w_p on cohesive soil: Oshima Akihiko and Tamura Kohei (Osaka Metropolitan University), Miyoshi Koki and Hachiya Makoto (Kansai Geotechnology and Environment Research Center)

次に、式(1)の I_f を同じ地点で求めた結果を図-5に示す。ばらつきはあるが、 I_f は w_L に対して比例関係を有しており、 α は0.19程度となった。これを基に式(4)による w_L'/w_L のヒストグラムの例(図-4と同じデータ)を図-6に示す。やはり $\pm 2\%$ 以内の誤差で w_L が推定できているが、図-4よりもやや精度は高い。これは他の地点でも同様であった。

以上の結果から、 w_L の一点法の適用は流動曲線である w - $\log N$ 関係を用いた方がよいと考えられる。大阪地域の粘性土への適用の詳細に関しては別報⁷⁾で報告する。

4. 大阪地域の粘性土に対する w_p の塑性図法の適用

周知のように、粘性土の判別は図-7に示す塑性図(塑性指数 I_p と液性限界 w_L の関係)を用いて、粘土とシルトはA線で、高液性限界と低液性限界はB線で判別している。通常粘性土はA線をまたいで上下に分布するが、その分布性状は地域によって異なる「地域性」を示す⁸⁾。この分布性状をA線のように1本の直線で近似できれば、式(5)によって w_L から w_p を推定できる。これを塑性図法と呼ぶ。

$$I_p = a w_L - b, \quad I_p = w_L - w_p \Rightarrow w_p = c w_L + d \quad (a, b, c, d \text{ は定数}) \quad (5)$$

上記の考えで、筆者らが過去22年に渡って地盤調査した大阪地域42地点・75土層(浚渫粘土、沖積粘土Ma13、洪積粘土Ma12, Ma11, Ma10)での2,177個の $w_L \cdot w_p$ データを用いてプロットした塑性図を図-8に示す。 I_p は回帰線に対して ± 8 程度の幅を持つが、式(6)が成り立つ。

$$I_p = 0.784(w_L - 16.4) \Rightarrow w_p = 0.216 w_L + 12.9 \quad (6)$$

なお、西大阪地域と東大阪地域別に、沖積粘土と洪積粘土別に整理してもその関係は式(6)とほとんど変わらなかった。

式(6)による推定値 w_p' と真値 w_p との比 w_p'/w_p のヒストグラム(図-8と同データ)を図-9に示す。 I_p は ± 8 程度の幅を持つため、誤差は先の w_L に比べて大きい。全体の95%のデータが $\pm 20\%$ 以内の誤差で w_p を推定することができる。この精度では使用に問題があるが、 w_p の測定精度を考えると、簡易法として十分使えるのでは?と考えている。

ただし、先に述べたように、塑性図での分布性状には地域性がある。

その例として、筆者らが調査した関東地域9地点(浦安、越谷、潮来)沖積粘土の463個のデータによる塑性図を図-10に示す。大阪地域に比べて、A線よりも下側に分布しており、シルトに分類される。これは関東地域ではローム(火山灰質粘性土)を含むためと考えられる。

最後に、式(3)の I_f - w_L 関係や塑性図の I_p - w_L 関係は地域性があるので、「公的機関による過去の物理試験を含む土質試験結果は完全公開」としていただき、地域ごとの関係を事前に求めておくことが必要と考えている。

参考文献

- 1) A. Casagrande : Research on Atterberg limits of soils, Public Roads, 13, 8, Oct, 1932.
- 2) A. Casagrande : Notes on the design of the liquid limit device, Geotechnique, Vol. VIII, pp. 84-91, 1958.
- 3) L. E. J. Norman : The one-point method of determining the value of the liquid limit of a soil, Geotechnique, Vol. IX, pp. 1-8, 1959.
- 4) 三木 : 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.1822, 1963.
- 5) 地盤工学会 : 地盤材料試験の方法と解説〔第1回改訂版〕, p.169, 2020.
- 6) 三好・他 : 大阪市港区海岸通での地盤調査一斉試験(その2 : 粘土層の土質特性), 第61回地盤工学研究発表会(投稿中), 2026.
- 7) 田村・他 : 大阪地域の粘性土における液性限界 w_L の一点法の適用性の検討, 第61回地盤工学研究発表会(投稿中), 2026.
- 8) 小川・松本 : 港湾地域における土の工学的諸係数の相関性, 港湾技術研究所報告, 第17巻, 第3号, pp.3-89, 1978.

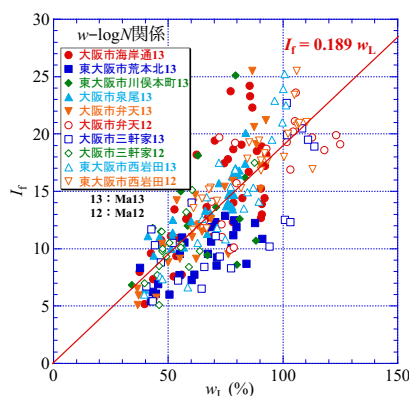


図-5 大阪地域の I_f - w_L 関係の例

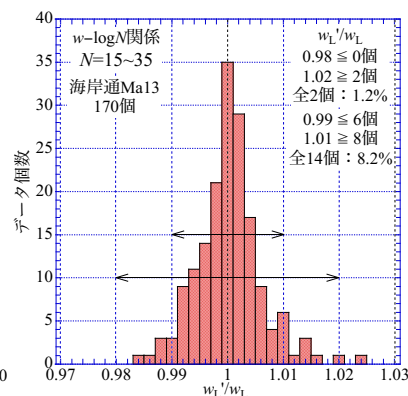


図-6 w_L'/w_L のヒストグラムの例

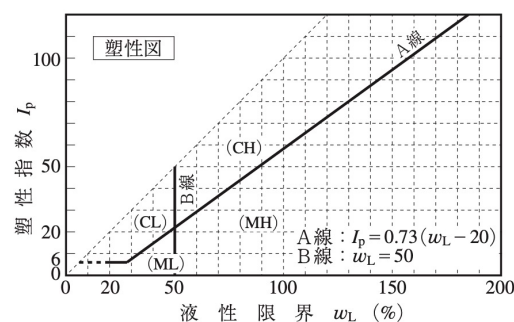


図-7 塑性図

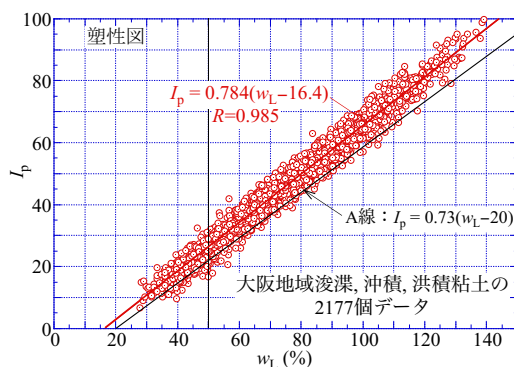


図-8 大阪地域42地点・75土層の塑性図

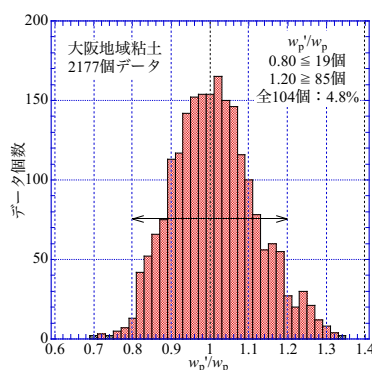


図-9 w_p'/w_p のヒストグラム

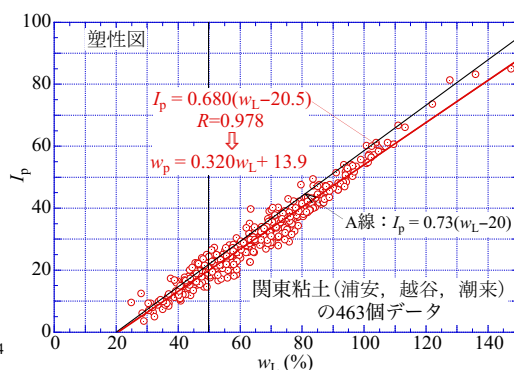


図-10 関東地域9地点沖積粘土の塑性図