

粘土のレオロジ的研究

—緩和応力の分布関数について—

荻野芳彦

Rheological Investigation of Clay

—On the Distribution Functions of the Stress
Relaxation of Clays—

Yoshihiko OGINO

Recently the rheological method is applied to the study of the mechanical characteristics of clay or clayey soil. It is because the time factor can not be ignored for the study of the relationship between stress and strain.

The author have experimentally researched the distribution functions(τ) of stress relaxation of clay based on the model of linear visco-elastic body.

The distribution function $\Phi(\tau)$ can be shown as:

$$E_{(t)} = \int_0^{\infty} \Phi(\tau) e^{-\frac{t}{\tau}} dt + E_0$$

The experimental results are as follows:

- (1) The distribution functions are varied with given constant initial strain (ϵ_0), and it means that the assumption of lineality is not proper.
- (2) The assumption of lineality is not proper but the distribution functions $\Phi(\ln \tau)$ show the difference of the yield phenomena between the state of dry of optimum and that of wet of optimum.
- (3) And it can also precisely express the mechanical phenomena in the range of plastisity.

はじめに

粘質土壌がレオロジ的性質を有しているということは古くから知られている事実である。そしてこれらの特性は種々の実験により明らかにされてきた。しかしながら土のレオロジ挙動は含水量、ねり返し、粒度、履歴など、また実験方法により著しく異なり、統一したレオロジモデルあるいはレオロジ方程式はない。普通粘弾性体のレオロジモデルは Maxwell モデル (液体粘弾性)、Voigt モデル (固体粘弾性) あるいはこれらの組み合わせによる三要素モデル、四要素モデルにより表現されている¹⁾。土の場合 Modified Voigt モデルが多く用いられ、Folque²⁾ は H-N || H-St.V (Hはスプリング、Nはダッシュポット、St.Vはスライダ要素を示し、-は直列、||は並列を示す。) により土の挙動を表し、村山、柴田³⁾ は H-H || St.V || N を提唱し、さらにアイリングの粘性理論を適用することによって、土壌構造の意義を明確にした。

さらに分子論的ないし統計力学的に土のレオロジ挙動を研究する試みもなされている⁴⁾。後藤⁵⁾らは物性論的立場からベントナイトゲルのすべり破壊が、結晶体の結晶格子の欠陥、転位の理論的研究に非常によく一致することを報告している。また須藤、東山ら⁶⁾は土壌水の Chemical Potential に理論づけられた pF 理論⁷⁾を用いてゲルを骨格とするハチの巣構造の土壌像を提唱し、土のレオロジ論あるいは土の力学的性質と状態量を整理した。

以上のように土のレオロジの研究は固体あるいは液体の物性論に近づきつつある。

筆者はここでは粘土を一次元線型粘弾性体とみて定ヒズミを加えた場合、そのレスポンスの過渡的現象を応力緩和として取り扱い、緩和の程度を評価する指標として、緩和応力の分布関数 $\Phi(\tau)$ で整理した。

I. 分布関数について

ここでレオロジモデルは Fig. 1 に示すような一般化 Maxwell モデルで示され、それぞれ粘性率 η_i 、弾性率 E_i および緩和時間 $\tau_i = \left(\frac{\eta_i}{E_i}\right)$ をもっており、モデルは緩和時間 τ が 0 から ∞ までの分布を有しているものとする。i 番目のモデルについて、ヒズミ $\epsilon_0 = \text{Const.}$ を加えた場合 t 時間後の応力 F_i は、

$$F_i = E_{i0} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad F_{i0} : t = 0 \text{ の時の応力}$$

$$\text{全体で、} F = \sum F_{i0} e^{-\frac{t}{\tau_i}}$$

ここで τ_i が連続的に分布していると考え、 $[\tau, \tau + \Delta\tau]$ の間にある機構の弾性率の和を ΔE とすると

$$\Delta E = \Phi(\tau) \Delta\tau$$

したがって、

$$E(t) = \sum_{\tau=0}^{\infty} \Delta E e^{-\frac{t}{\tau}} = \int_0^{\infty} \Phi(\tau) e^{-\frac{t}{\tau}} d\tau + E_0 \quad (1)$$

ここに $\Phi(\tau)$ を緩和応力の分布関数とよび弾性的にみた存在密度を表わす。eq(1)を解くため $e^{-\frac{t}{\tau}}$ を第 1 近似として次のようにおく。

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = \begin{cases} 1 & (0 < t \leq 1) \\ 0 & (t > 1) \end{cases} \quad (2)$$

このとき分布関数は eq(1)を微分して

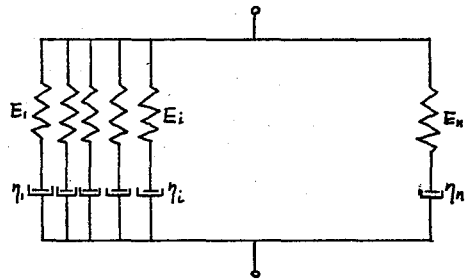
$$\Phi(\tau) = - \left[\frac{dE(t)}{dt} \right]_{t=\tau} \quad (3)$$

対数時間の分布関数は

$$\Phi(\ln\tau) = - \left[\frac{dE(t)}{d(\ln t)} \right]_{t=\tau} = - \frac{1}{2.303} \left[\frac{dE(t)}{d(\log t)} \right]_{t=\tau} \quad (3')$$

このようにして与えられる分布関数 $\Phi(\tau)$ を $E(t) - t$ 曲線から実験的に求め、土壌の力学的特性を与える指標として検討した。

Fig. 1. Generalized Maxwell Model.



II. 供試土壌および実験方法

実験に用いた試料は琵琶湖干拓地粘土 (略BC) 京大上賀茂試験地土壌 (褐色森林土) (略NC) の二種でその物理的性質を Table 1 に示す。

Table 1. 試料の物理的性質

試料	液性限界	塑性限界	塑性指数	真比重	土性
NC	48.6 %	27.6 %	21.0	2.72	粘土
BC	生土 96.1	49.1	47.0	2.66	粘土
	風乾 75.6	35.3	40.3		

試料は風乾後 2 mm フルイを通過したものを適当な含水状態に調整し、直径 5 cm、高さ 10 cm のモールドに所定の強度で締め固め供試体とした。また高分子界面活性剤 (EB 剤) による団粒効果の影響をみるため、琵琶湖粘土をペースト状にねり返したものに、(1) 未処理、(2) EB 剤を重量比で 10 % 添加した試料を大型遠心器で脱水しそれぞれ pF 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 になるように調整して供試した。

実験はそれぞれの試料について一軸圧縮試験および締め固め試験を行ない、電動油圧式一軸圧縮試験機を一部改良して、定ヒズミにおける応力緩和試験を行なった。

III. 実験結果と考察

Fig. 2. Relations between Stress and Strain according to the Unconfined Compression Test.

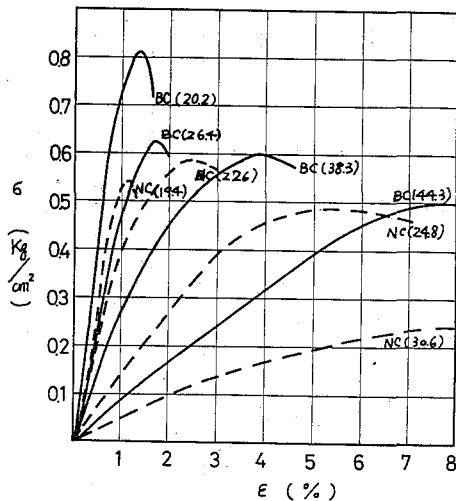


Fig. 3. Compaction Curves of the Specimens

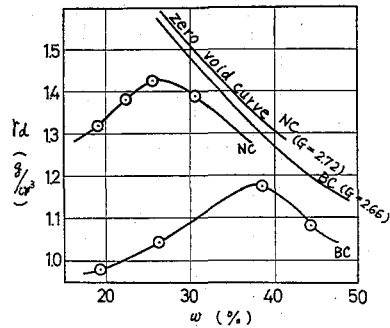


Fig. 2 は供試体の一軸圧縮試験における σ - ϵ 曲線、Fig. 3 は締め固め試験における r_d - w 曲線である。最適含水比 (W_{opt}) は NC では 26.5%, 最大乾燥密度 (r_{dmax}) は 1.43 g/cm^3 , BC ではそれぞれ $W_{opt}=37.5\%$, $r_{dmax}=1.18 \text{ g/cm}^3$ である。また最適含水比より湿潤側では一軸圧縮強度はピークをもたず、塑性流動状となる。

Fig. 4 は緩和弾性率 $E(t)$ を対数時間 $\log t$ でプロットしたものであるが、図のように直線となる。ここで緩和応力の分布関数 $\Phi(\ln \tau)$ は $\frac{1}{e} \left[\frac{dE(t)}{d(\log t)} \right]_{t=\tau}$ したがってこの直線の勾配によって与えられる、Fig. 5 ~ 8 は $\Phi(\ln \tau) \sim W$ の関係を示したものである。

1. Fig. 5 ~ 8 から明らかなように、同一含水状態における $\Phi(\ln \tau)$ は与えられた定ヒズミ (ϵ_0) の大きさによって変化し、ヒズミが少ない程 $\Phi(\ln \tau)$ は大きくなる傾向がある。

このことは先に仮定した線型性が保持されないことを示すもので、この場合のレオロジモデルは一般化 Maxwell モデル (あるいは一般化 Voigt モデル) においても充分評価するのは難しいようである。線型の仮定が障害となるのは、土の構造配列の変化、土中水の Chemical Potential の非可逆的な変化など、あるいは供試体のバラツキなどが考えられるが、この点については、今後の問題としたい。

2. 上述のように線型仮定が保持されないので、 $\Phi(\ln \tau)$ の定量的な評価は困難であるが、定性的に全体の傾向をみると、初期ヒズミ (ϵ_0) が小さいほど系は弾性的挙動を示し、また含水比が少ないほど弾性的であることを示している。さらにこのことは最適含水比を境として、 $\Phi(\ln \tau)$ が変曲点をもち、一軸圧縮試験の $\sigma - \epsilon$ 曲線における最適含水比前後の土の降伏現象の変化は、 $\Phi(\ln \tau)$ の含水比に対する増加率の変化により、その物理的な意味が理解される。

Fig. 4. Typical Semi-log Plot for $E(t)$

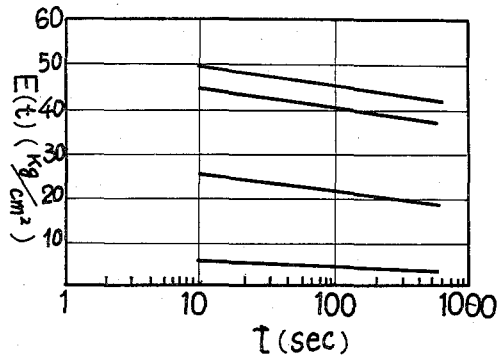


Fig. 5. 6. Distribution functions vs Water Contents.

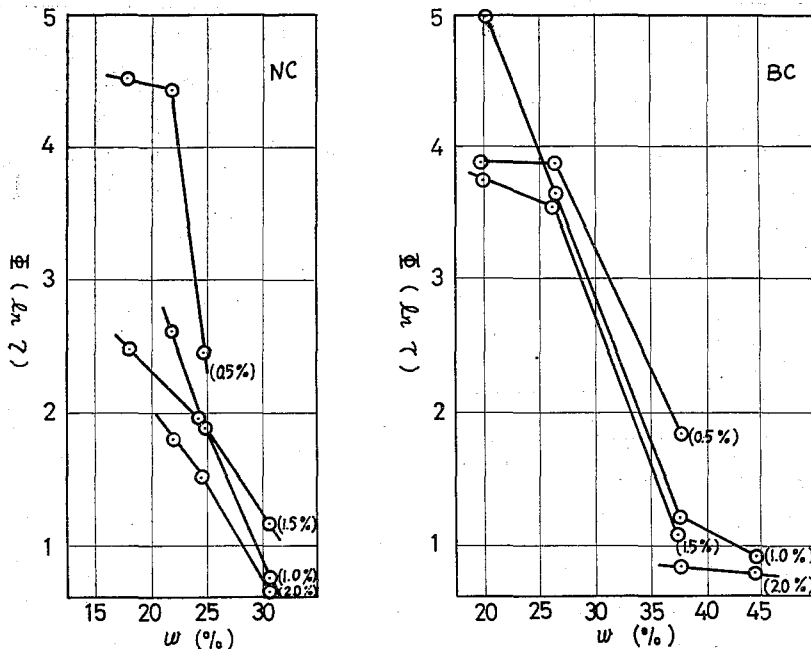
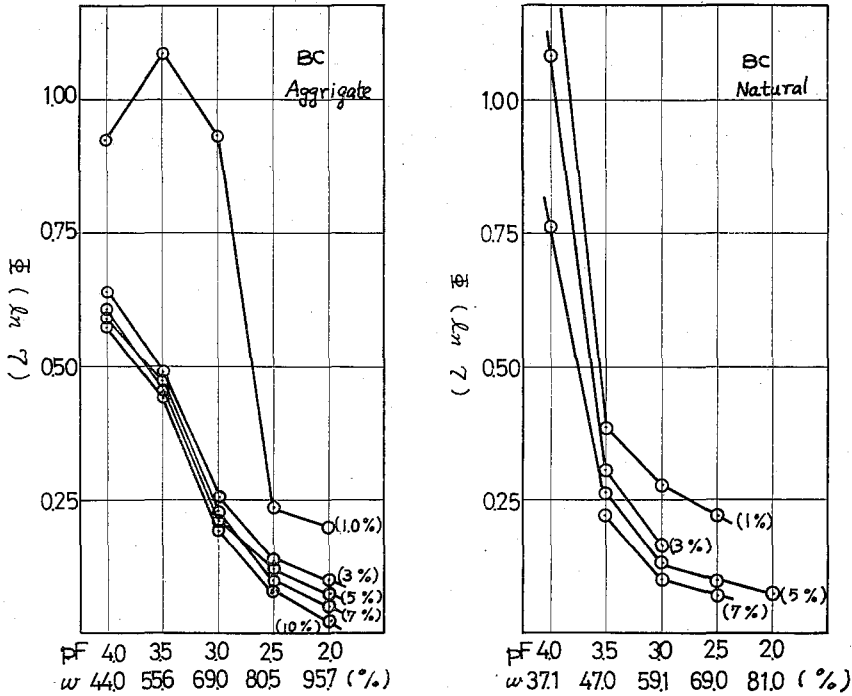


Fig. 7. 8. Distribution functions vs Water Contents



3. Fig. 7, 8はBCの脱水過程における比較的高い含水状態での試験で、未処理土とAggregate系のを比較したものであるが、同一pFで比較した場合、ヒズミが3%以上の $\Phi(\ln \tau)$ はほぼ同様の傾向を示すが、ヒズミ1%における $\Phi(\ln \tau)$ は特異である。特にAggregate系の $\Phi(\ln \tau)$ は顕著である。また同一含水比で比べてみると、高含水状態でAggregate>未処理なる関係があって、このことは未処理土においてベタベタ(高含水状態)→コチコチ(固結)の変化をするものが、高分子界面活性剤の添加によりコンシステンシの高い保形性のよい安定した状態に改良し得ることができ水分環境の変化が、土壌の力学的特性を著しく変えるのを防止しうことを示している。また $\Phi(\ln \tau)$ を用いることによって従来力学的特性をとらえ難かったAggregate系での可塑的領域の現象をよく表現することができた。

IV. おわりに

粘質土水田地帯の物理的、力学的特性を研究し、その改良に関する研究の一環として、粘質土の特性を示す指標を緩和応力の分布関数 $\Phi(\ln \tau)$ に求めてみたが、土自身の非線型挙動と、実験の精度の問題などから、多くの問題を残しているが、団粒構造における可塑的領域での力学的特性を示す一つの指標になりうるということがわかった。

引用文献

- 1) 中川鶴太郎, 神戸博太郎, (1964): レオロジ-355-409 みすず書房.
- 2) Folque, J (1961): Rheological Properties of Compacted Unsaturated Soils. Proc. 5th. Intern. Conf.

Soil Mech. and Found. Eng.

- 3) 村山, 柴田, (1956): 粘土のレオロジー的特性について, 土木学会論文集 40: 1—31.
- 4) Uchida, I. and H.Fujimoto, (1963): The Theoretical research on the Stress Relaxation of Clay, Journ. S.M.S. Japan Special issue on Rheology 12 (116): 276.
- 5) 後藤, 清水, (1966): ベントナイトのずり弾性率とすべり破壊強度との関係, 材料 15(152): 283—286.
- 6) 須藤, 東山, 山崎 (1965): 固い土の力学的性質—土のレオロジー的構造(II)—農土論 14 21—26.
- 7) 妹尾 学 (1965): 土壌水のエネルギー指標 pF による土壌構造の考察—農土論 14: 11—15.