

III-132 ベントナイトおよび木節粘土の粘弾性特性について

鹿島建設技術研究所 正員 鈴木音彦

・ 〇穂后英夫

・ 森井哲次郎

1. まえがき： 粘土のレオロジー特性、あるいは粘土の力学的特性も応力-ヒズミ-時間の関数で表わそうとする研究は、数多くの論文によって発表されているが、三軸圧縮フリーア試験による研究は比較的少なく、現象論的立場に立脚したもの^(1,2)が主体である。そこで2種類の粘性土を用い、かつ試料の含水比も3種類にした供試体を用い、 $\sigma_v = \text{const.}$ とした三軸圧縮フリーア試験を行ない、その測定結果もEyringの粘性理論と拡張した村山・柴田博士の理論に基づいて解析し、粘土のレオロジー特性を表わす諸定数が含水比によってどのように変化するかを求めたことについて述べる。

2. 実験方法および試料： 実験に用いた試料は、関東ベントナイト鉱業製木節粘土と豊順ベントナイト鉱業製ベントナイトの2種類で、表-1には化学組成、表-2には物性を示した。

供試体は、両試料の塊状土に加水し、十分攪乱してから圧密箱に入れて所定の含水比となるまで放置した。その後羊かん状に切り出し、恒温恒湿槽内に保存した。試験時には、上述のように作成したものより、直径5cm、高212.5mmの内柱形に成型し、応力の履歴などの影響をなくすために、新鮮な供試体を用いた。

三軸圧縮フリーア試験機は、Soil Test社製三軸圧縮試験機と改良したものを用い、側圧は全試験共 $\sigma_3 = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ とした。又圧力水槽内の温度は $20 \pm 0.2^\circ\text{C}$ であった。

実験方法は、三軸圧縮試験機に供試体をセットしたのち側圧を加え、一次圧密の終了を確認したのち非排水状態で一定の鉛直荷重を加え鉛直方向ヒズミの時間変化を測定し、フリーア試験を行なったものである。

なお試験時供試体の均一性は、表-3に示した。

試料名称	試験時含水比	標準偏差
木節粘土	23.34 %	1.132
	28.94 %	1.413
	40.06 %	0.935
ベントナイト	126.12 %	0.630
	218.50 %	0.697
	251.67 %	5.249

表-3 供試体の均一性

木節粘土		ベントナイト	
SiO ₂	58.7%	SiO ₂	58.56%
Al ₂ O ₃	26.8 %	FeO	—
Fe ₂ O ₃	1.6 %	Al ₂ O ₃	11.38 %
CaO	0.41 %	Fe ₂ O ₃	1.14 %
MgO	0.25 %	FeO	0.69 %
K ₂ O	—	MgO	0.76 %
Na ₂ O	—	CaO	0.04 %
I ₂ -loss	12.6 %	Na ₂ O	1.82 %
		K ₂ O	0.36 %
		H ₂ O ⁺	4.87 %
		H ₂ O ⁻	10.08 %
		P ₂ O ₅	0.03 %

表-1 化学組成

	木節粘土	ベントナイト
液性限界(%)	58.0	325.0
塑性限界(%)	19.0	29.0
塑性指数	39.0	296.0
比重	2.60	2.67
粒 度 分 析	コロイド分(%)	33.0
	粘土分(%)	58.0
	シルト分(%)	22.0
	砂分(%)	15.0
		26.8
		0.2

表-2 物性

3. 実験結果: 直交座標系の三主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 三方向ヒズミを $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ とすれば, 三軸圧縮試験において, $\sigma_2 = \sigma_3, \epsilon_2 = \epsilon_3$ となるので, Octahedral Shearing Stress は,

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad \dots \dots \dots (1)$$

Octahedral Shearing Strain は

$$\gamma_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\epsilon_1 - \epsilon_3) \quad \dots \dots \dots (2)$$

星盤博士の理論によれば, γ_{oct} の1/2である平均せん断ヒズミ δ は,

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2}} (\epsilon_1 - \epsilon_3) = \frac{\gamma_{oct}}{2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

で表わされ, 非排水状態を加味すれば体積変化が零であるため, (2)式は 次のようになる。

$$\gamma_{oct} = \sqrt{2} \epsilon_1 \quad \dots \dots \dots (4)$$

実験結果より求められた軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ と, 鉛直方向ヒズミ (ϵ_1) と, (1), (4)式により τ_{oct} と γ_{oct} に変換し, 縦軸に γ_{oct} と, 横軸に対数時間 t (min) と取り, τ_{oct} とパラメータとしてプロットしたフリープ特性曲線を図-1に示した。

4. 実験結果の解析: 三軸圧縮フリープの挙動を, Eyring の粘性理論と拡張した村山, 柴田の理論に基づいて解析する。村山, 柴田は粘土の上限降伏値以下の応力レベルにおける粘土骨格のレオロジー特性の表裏として図-2に示す力学モデルを提案している。そして作用応力-ヒズミ-時間の関係式を次のように示している。

$$\begin{aligned} \gamma < \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau - \tau_0}{2B_2G_2} \quad (2B_2 - 1) \text{ の時} \\ \gamma = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau - \tau_0}{G_2} + \frac{\tau - \tau_0}{2B_2G_2} \log(A_2 B_2 G_2 t) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (5)$$

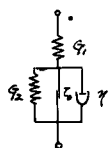


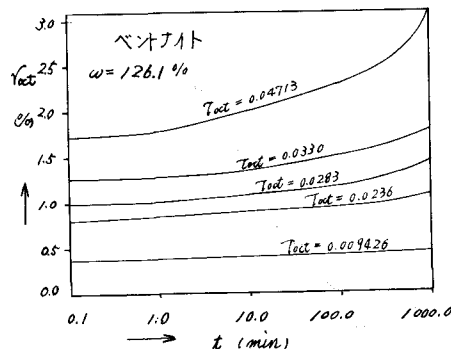
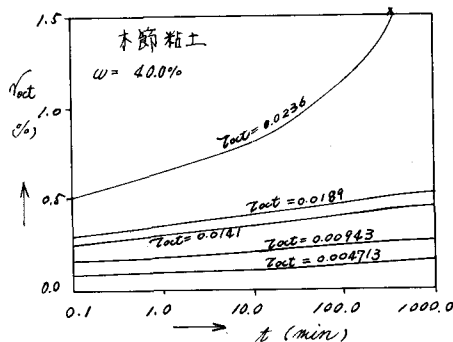
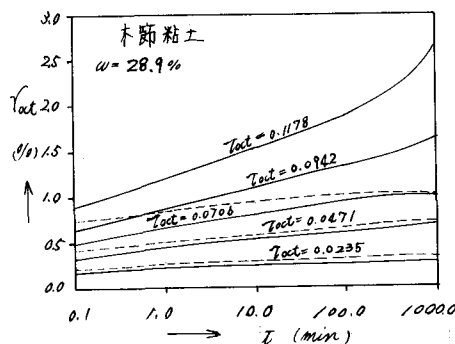
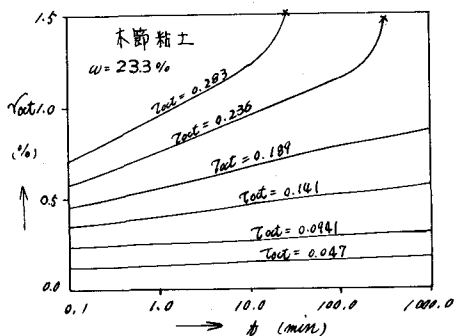
図-2 力学モデル。

ここで A_2, B_2 はレオロジー定数である。

そこで, 前述の三軸圧縮フリープ試験の結果より, τ_u と, G_1, G_2, A_2, B_2 を求めることにする。

a) τ_u の決定

τ_u, τ_0 は 下限降伏値, 上限降伏値と定義され, $d\gamma_{oct}/dt$ と τ_{oct} と等価目盛を図示してその直線と τ_{oct} 軸との交点を τ_u



T_{out} と T_{out} の関係が急激に変化する時刻の T_{out} が、 T_{in} に相当する。

b) G_1 , G_2 の決定

図-1の測定結果より、0.1min時の τ と τ_0 を初期 τ と τ_0 と1440min時の τ と τ_0 を最終 τ と τ_0 とすれば、 G_1 , G_2 は(16)式より次のようにして求められる。

$$G_1 = \frac{\tau_{out}}{\tau_{out} - \tau_0} \quad (\tau_0 = 0.1 \text{ min})$$

$$G_2 = \frac{\tau_{out}}{\tau_{out} - \tau_0} \quad (\tau_0 = 1440 \text{ min})$$

c) A_2 , B_2 の決定

(5)式を变形して

$$\tau = (\tau_0 - \tau_0) \left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \frac{1}{B_2 G_2} \log A_2 B_2 G_2 \tau \right) + \tau_0$$

ここで $\tau_0 = 0$ と仮定すると

$$\left[\frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} - \left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right) \right] = \frac{1}{B_2 G_2} \log A_2 B_2 G_2 \tau$$

となるので、常用対数表示して

$$\left[\frac{\tau - \tau_0}{\tau_0} - \left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right) \right] = \frac{2.3}{B_2 G_2} \log A_2 B_2 G_2 \tau$$

を用い、 $B_2 G_2$, $A_2 B_2 G_2$ を求め、先に求めた G_2 を用いて、

B_2 , A_2 を決定する。

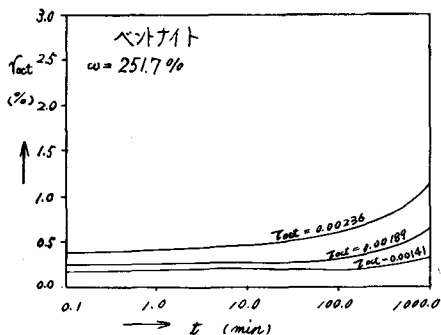
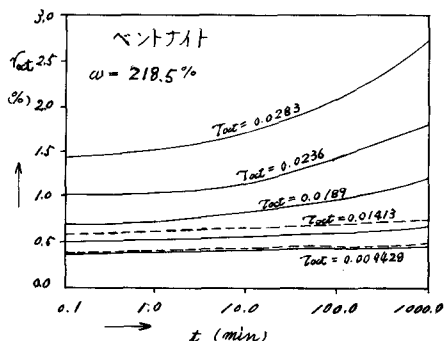


図-1. 測定結果図

以上のa), b), c)より求めたレオロジー定数は、表-4に示した。そしてこれらの諸定数の平均値を用いて、 τ_0 と $\log \tau$ の関係を求めたグラフも、図-1内に実線と記入した。

名称	含水比(w)	T_{in} (kg/cm ²)	T_0 (kg/cm ²)	G_1 (kg/cm ²)	G_2 (kg/cm ²)	T_{out} (kg/cm ²)	$B_2 G_2$	$A_2 B_2 G_2$	B_2	A_2
木節粘土	23.3	0.15	0.0	0.41	1.1	0.0470	1.9704	0.00010	9.92	9.19×10^{-6}
						0.0741	1.0915	0.00099	9.94	9.07×10^{-5}
						0.141	6.541	0.00088	5.94	1.345×10^{-3}
						0.0235	3.6033	0.0027	2.57	6.07×10^{-4}
						0.0471	1.2745	0.00258	9.11	2.02×10^{-3}
						0.0706	1.2579	0.00290	8.99	2.30×10^{-3}
	28.9	0.095	0.0	0.14	0.14	0.0842	0.9734	0.00040	7.10	4.35×10^{-4}
						0.00471	0.729	0.00212	10.40	2.81×10^{-3}
						0.00843	0.885	0.00637	12.50	7.20×10^{-4}
						0.0141	0.654	0.0001	9.35	1.53×10^{-4}
						0.00842	0.8747	0.00631	9.72	7.21×10^{-4}
						0.0236	1.3688	0.00001	15.20	7.31×10^{-6}
ベントナイト	126.1	0.025	0.0	0.027	0.09	0.00842	0.8747	0.00631	9.72	7.21×10^{-4}
	218.5	0.015	0.0	0.026	0.075	0.00842	0.871	0.00631	11.60	1.89×10^{-3}
	251.7	0.0	0.0	—	—	0.0413	0.868	0.00158	11.58	1.82×10^{-3}

表-4. レオロジー定数 (注: w: 251.7%の便試体は粘性流動と判断した)

5. レオロジー定数と含水比の関係

a) セン断剛性率: 両試料のセン断剛性率 (G_1, G_2) と含水比の関係は、図-3に示したように含水比が試料の ω_p 側に近づくにつれ著しく増大し、ある含水比に至ると減少の割合が緩慢になり、含水比が ω_c 付近に至ると、 G_1, G_2 項が顕現出来る程度となる傾向を示している。朝鮮カオリンを用いた村山の実験に於いても同一の傾向を示している。

b) B_2, A_2 : B_2 値は、本節粘土において 6~10、ベントナイトにおいて 10 程度の値となり、供試体に作用した土や供試体の含水比ならびに粘土鉱物によって、極端に異なる定数ではないことがわかる。

O. B. Andersenland と A. G. Douglas によれば、 L の速度と

$$\gamma' = \frac{2KT}{n} \exp\left(-\frac{qF}{KT}\right) \sinh\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{qF}{2KT}}\right) \quad (6)$$

で表わし、吸着イオン Li, K, Na で飽和した粘土を用い、その懸濁液濃度も変化させて V_f との関係を求めている。その結果によると吸着イオンによる V_f の変化は、三者共懸濁液濃度にかかわらずほぼ一定であり、 Li と K の V_f の割合は約 2 である。又懸濁液濃度による変化は、懸濁液濃度が大きくなるにつれ V_f は指数曲線的に減少し、その割合は小さい。この V_f は B_2 の関数となっているので同一の粘土鉱物を用い、含水比の範囲の狭い場合に、 B_2 は一定と考えるよいようである。

A_2 は村山、柴田によると次のように表わされる。

$$A_2 = \frac{3\lambda n(T-T_0)KT}{n} \exp\left(-\frac{qF}{KT}\right) \quad (7)$$

(したがって、 A_2 は供試体の状態が均一であれば、同一含水比状態において、 $(T-T_0)$ に比例するはずである。しかし表-4に示したようにバラツキが大きく、何ら傾向を見い出すことが出来なかった。

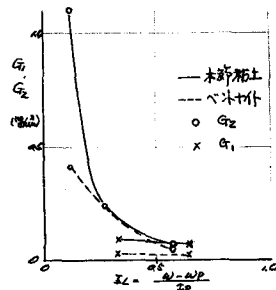


図-3 $G_1, G_2 - L$ の関係

6. あとがき: 以上、土の側方流動の模型実験のための材料試験として行なった本節粘土とベントナイトの三軸圧縮フリークについて述べた。このまっではまだ不十分であり今後継続する所存である。

参考文献

- 1) S. S. Vinlov, A. M. Skibitsky "Problems of the Rheology of Soils" Proceeding of 5th I.C.S.M.F.E 41.1 1961
- 2) 小田栗一 他「粘性土の三軸圧縮フリークに関する実験的研究」オウ国土工学研究発表会講演集 11. 昭和47
- 3) 村山朝郎、柴田徹「粘土のレオロジー特性について」土木学会論文集 40号 昭和31年12月
- 4) Sakuro. Murayama, Touru. Sibata "Flow and Stress Relaxation of clay"

Rheology and Soil Mechanics symposium Grenoble 1964

- 5) 星楚和「土の力学における塑性の基本理論と三軸圧縮試験への適用」土木学会論文集 21号 昭和29年12月
- 6) 村山朝郎「粘土の粘弾性について」土木学会誌 40-7 昭和30年7月
- 7) O. B. Andersenland, A. G. Douglas "Soil Deformation rates and Activation Energies"

Geotechnique Vol. XX. No. 1 March 1970.