

土壌のコンシステンシの測定方法

東大農 安 富 六 郎

I コンシステンシ とは土壌の変形過程における力学的抵抗の大きさを示す概念と考えられる。コンシステンシの測定方法は多くあり、統一されていない。測定方法の異なるこれらの相互の比較はむづかしい。しかし同一方法で測定すれば性質がある程度わかるので各技術分野で都合のよい測定がなされている。

土壌はある応力以下では主として弾性を示すが、外力が大きくなると流動する。この限界点は降伏点と呼ばれ、塑性を示す一つの量と考えられる。土壌工学関係ではアッターベルグ試験法¹⁾による液性限界LL、塑性限界PL測定法がよく用いられる。この試験方法は粘土の加工性についての経験的な産物であり、基本的には降伏値を求めていると考えられるが、用いる工学分野で内容の検討が必要であろう。Atterberg(1911)は粘土加工面から塑性を5段階に分けた。²⁾すなわち充分乾燥した土壌粉末に少量の水を加えてねると、パサパサの状態から粒子が相互に付着して凝集状態を呈するように固まる。これより水分が多い所では凝集が始まるとみなし、この水分点を含水比で示し、①凝集限界(Cohesion limit)とした。さらに水を加えてねるとかたさは水分増加で次第に減じ細い棒状(直径5mm)に伸ばすことができるようになる。この水分点を②Rolling limitとして土の力学的性質の変化点の目安とした。水分がさらに増加すれば、土は次第に粘着性を持ち、金属へらにべとつくようになる。この試料をナイフで切り、エッジに土がつかない水分点を③粘着限界(adhesion limit)とした。さらに水が増加すると、ドロドロになるが、多少の振動を与えても流れにくく、溝壁が接しても合流して一体とならない。このような状態を④流動の下限界とした。さらに水分増加で形が保つことができず小さな外力でも流動するようになる点を⑤流動の上限界とした。②と④の水分範囲は塑性を示す領域と考えられ、領域が広がれば加工性は増加する。粘土加工の面から③近くの水分で塑性を比較する場合もある。また有機質が多いほど③の水分は増大し塑性は減少する、など力学的性質の変化点から土の性質を知ることができる。³⁾

Atterbergは以上のことから④と②の含水比の差をもつてコンシステンシを表わす塑性指数なるものを考え、この値が工学的に重要であることを示した。(表1)

農業土木の分野でも土のコンシステンシがわかれば有効な施工ができる場合が少なくない。例えば心土を風乾したときの塑性指数の変化から土の工学的性質の変化をある程度知ることができる。⁴⁾しかしこのようなコンシステンシの測定法では変形に対して時間の概念が明確でなくまた経験的な手法にたよるものが多く、かたさの正しいとらえかたができない。トラフイカピ

リテイ，締固め，排水路くつさく，土の切り盛りなどには土の力学的性質を目的にあつた形でとらえることが必要であらう。つぎに述べる測定方法は変形によつて生ずる流動の速さからコンシステンシを求めようとしたもので，土の物理的または工学的性質の表示として有効のように思われる。

表1 アツターベルグ限界とかたさ

水分大 ←-----→ 水分小

(泥ねい状) やわらかい		(粘質状) 塑性領域			(固体状) かたい		かたさ
流動 下 限界 ⑤	流動 上 限界 (液性 限界) ④	粘 着 限 界 ③	塑 性 限 界 ②'	Rolling Limit ②	凝 集 限 界 ①	アツターベルグ 限界	
		×		○ ○ 負	固相	充 填 (連 続 性) 式	
		○		○ ○ ×	液相		
		ナン		× ○ ○	気相		

II 測定 には原理的に静的方法と動的方法とがある。前者は毛管形，回転円筒形，平行平板形，貫入形などの粘度計があり，後者には振動形の粘度計があげられよう。これらについてはそれぞれ測定上の特徴があり，利用範囲が異なる。流動の形式は水分状態により著しく異なる

るのでそれぞれの水分に対応した測定適合領域から，今まで実験した2，3の基本的な測定方法を述べる(表3)。

1 回転円筒粘度計

図1に示すような円筒の間に試料を入れ，外筒に定速回転を与えるときにBのねじれ角をよむ。この装置はマクミケル粘度計とよばれ，次のような原理による。内筒は外筒の定速回転(角速度 Ω_e rad/sec)によつて試料を通じてトルクを受ける。トルクは内筒をつるしている針金の復元モーメントMとつりあう。内筒面に作用する剪断応力p，剪断速度 $\dot{\gamma}$ は内筒の受ける回転角 ϕ から求める。

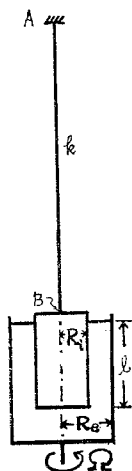


図1 回転粘度計

$$\left. \begin{aligned} M &= k\phi, & p &= M/2R_i^2 \pi l \\ \dot{\gamma} &= 2\Omega_e/1-(R_i/R_e)^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

外筒を一定の角速度で回転させるときの内筒の回転角から試料の粘性 η は次のように求められる

$$\eta = \frac{P}{V} = \frac{k \phi}{4\pi \ell \cdot \Omega_0} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

針金のねじり常数 k は既知の慣性能率 I におもりをつり下げ、自由回転振動の周期 T より求める。

$$T = 2\pi \sqrt{I/k} \dots \dots \dots (3)$$

土壌ペーストの流動では応力 P と剪断速度 V で与えられる直線は原点を通らない。このとき η はみかけの粘性を示し、剪断速度 V で変化する。この直線が P 軸を切る点から降伏値 θ を求めることができる。このとき挙動の状態方程式は $P - \theta = \eta V$ である。

実際の測定では粘質土壌 20~30g を 100g の水で分散させて懸濁液を作る。この試料

※ 試料内部における回転角速度を ω_f とすれば接線速度 v は

$$v = r \omega_f$$

速度勾配は $\frac{dv}{dr} = r \frac{d\omega_f}{dr} + \Omega$

上式の第2項は単なる回転運動で剪断を生じないから真の速度勾配は

$$\frac{dv}{dr} = r \frac{d\omega_f}{dr} = V$$

また一方、内筒面に作用するトルクは dr だけ離れた面に作用するトルクに等しいから

$$\eta \cdot V \cdot 2\pi r \cdot \ell dr = \eta (V + dV) 2\pi (r + dr) \ell (r + dr)$$

整理して $\frac{dV}{V} = - \frac{2dr}{r}$

これをといて $\omega_f = \frac{C_1}{r^2} + C_0$ (C_0, C_1 は常数)

$r = R_0$ のとき $\omega_f = \Omega_0$ $r = R_i$ のとき $\omega_f = \Omega_i = 0$

$$\Omega_0 = \frac{C_1}{R_0^2} + C_0$$

} より C_0, C_1 を求めると

$$\Omega_i = \frac{C_1}{R_i^2} + C_0 = 0$$

$$\omega_f = \frac{-\Omega_0}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{\frac{\Omega_0}{R_i^2}}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)}$$

$$r \frac{d\omega_f}{dr} = \frac{2}{r^2} \frac{\Omega_0}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2}\right)}$$

を24時間静置後、上ずみ液を除き、または遠心分離機で水を適当に調整する。調整された試料約20ccを粘度計の外筒(半径2cm)に入れる。試料中に内筒(半径1cm)を4cmの深さまでうめる。外筒を低速回転(0.1-1回/sec)させ、そのときの内筒のねじれをよむ。このねじれは測定時間で変化するので、時間依存性がなくなつた安定値を求める。外筒の回転速度を変え、同様な方法で安定値を求める。外筒の角速度と内筒のねじりモーメントからコンシステンシ変数 P 、 V が求められる。マクミケル回転粘度計のねじり角度はマクミケル度 M で 360° を300等分したもので示されている。機械常数 K を考りよすれば、次式のようなものである。

(表2)

$$\begin{aligned} P &= KM & K &: \text{針金の常数(長さ27cm)} \\ V &= 22.6n & n &: \text{回転数/sec} \end{aligned} \quad \dots\dots (4)$$

表2

T.W 直径 mm	0.704	0.394	0.273	0.165	T.Wの長さ 270mm
K	60	4.6	1.19	0.185	

※、離合社製ASTM(D115, 132型) NO 8.

以上から P を横軸、 V を縦軸にとれば図2のようなグラフが得られる。このようなコンシ

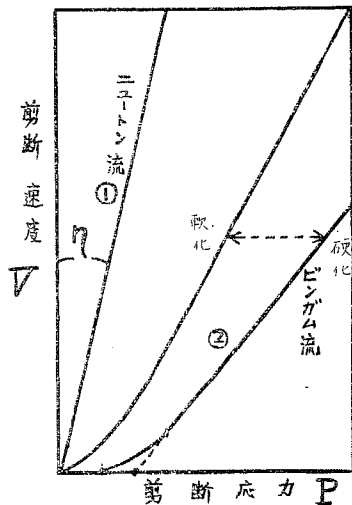


図2 コンシステンシ曲線

ンシ変数を用いて表わした曲線を M.

Reiner はコンシステンシ曲線と呼び、外力と流動の抵抗との関係を示す一般的な方法とした。⁵⁾ 土壌ペーストの濃度をかえて同様な曲線を求めると降伏値の変化を促えることができる。濃度が低いとき、例えば水のような希薄懸濁液では原点を通る直線であるが、濃度が高いと直線は曲線に移行する(非ニュートンの)。さらに濃度が高いと外力が一定値以下では流動せず原点を通らない直線となる。これはビンガム流動と呼ばれ、原点を通るものとはとくに区別する。土壌ペーストの濃度が高すぎると内筒と試料との間にすべりを生じ、測定が不可能になる。すべりが発生すると、

P, V 曲線に折れ線がみられる。回転粘度計での測定濃度上限界はほぼ液性限界付近の場合が多い。濃度が低いと測定中に土壌粗粒子が沈降し、測定が困難となるので、沈降体積濃度よりも濃いものが測定上有利である。剪断速度が大きいとねじり角をよむことがむづかしくなる。このとき最大、最小のフレの平均をとる。これらの測定から土壌ペーストの流動形式、外力により軟化するか、硬化するか、また濃度と降伏値との関係はどうか、などがわかる。

2. 振動粘度計 試料に小応力を加えたとき流動または小変位が生ずる。振動粘度計は周期的な強制振動を試料に加え、振巾、位相の変化から粘性と剛性を同時に測定できる。⁶⁾ 装置(大起理化製)を図3に示す。この針金 T. W. の上端に強制振動を加える。

表 3 コンシステンシ と 水分

PF	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7		
指標		↑ 沈 降 体 積				↑ 液 性 限 界	↑ 塑 性 限 界	↑ 不 可 逆 点		↑ 単 分 子 吸 着	↑ 炉 乾 燥		
の土・水状態	ニュートン液体		降伏前は固体的, 降伏後は 液体的粘弾性体				弾 性 体						
団粒構造	毛 管 水						膨 潤 水						
カベ状構造	膨		潤				水						
測定域	← 回転粘度計 →						← 振動粘度計(I) →		← 振動粘度計(II) →			← 沈下試験 →	

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \sin \omega_f t \dots\dots\dots (5)$$

粘弾性体が振動的な外力を受けると次のような運動方程式が成立する。

$$I \ddot{\theta} + R \dot{\theta} + K \theta = b (\dot{H} - \dot{\theta}) \dots\dots\dots (6)$$

但し \dot{H} : 正弦波回転変位(強制振動), \dot{H}_0 : 振巾, ω_f : 振動率,
I : 内筒の慣性能率, K : 針金のねじり常数, θ : ねじり角

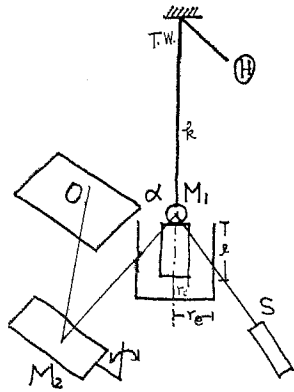


図3 振動粘度計

ここで $K\theta$ は試料の弾性力、 $R\dot{\theta}$ は粘性力である。このときの運動方程式から、内筒の振幅 A と位相のおくれ ϕ を実測すれば R 、 K が求められる。^{*}

$$R = kT \sin\phi / 2\pi p \dots\dots\dots (7)$$

$$K = k \left(\frac{\cos\phi}{p} - 1 \right) + \frac{4\pi^2}{T^2} I \dots\dots\dots (8)$$

但し T 周期、 $p = A / \theta_0$

R 、 K はそれぞれ粘弾性体の抵抗係数と弾性係数で試料の粘性係数 η および剛性率 G に形状因子を乗じたものである。

$$\left. \begin{aligned} R &= 4\pi \cdot l \cdot \eta / (1/r_i^2 - 1/r_o^2) \\ K &= 4\pi \cdot l \cdot G / (1/r_i^2 - 1/r_o^2) \end{aligned} \right\} (9)$$

但し l : 内筒の試料にはいる長さ。

(8)式で周期が大きいと第二項は無視できる。

試料の調整は回転粘度計の場合に準ずる。土壌ペーストが液性限界の硬さ以下であれば、試料を約 20cc 内・外筒 (r_i : 2cm, r_o : 3cm) に入れ、低周期で測定をはじめめる。 $T = 3.0 \text{ sec}$, 9 sec , 1 sec の順に周期をかえて測定する。濃度が低い(水分が多い)とき得られるリサージュはほぼ楕円になる。リサージュを得る装置は図3のようである。光源 S から発した光はスリットでしぼられ、 $T.W.$ の下端につけられた反射鏡 M_1 で反射し、 M_2 で強制振動の原振動と直交合成されて乾板に写される。強制振動の振幅 θ_0 を変えてリサージュを描く。得られたリサージュは一般には縦横方向のスケールが異なるが同じにとれば(7)式の p は 1 になる。また原振動と応答の振動とから $\sin\phi$ を求める。

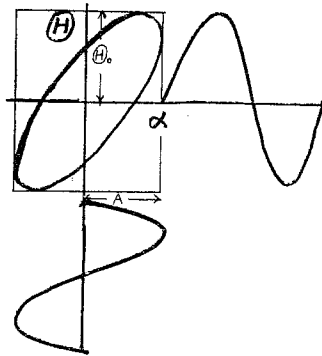


図4 リサージュ図形

$$\sin\phi = \frac{4\bigcirc}{\pi\bigcirc} \dots\dots\dots (10)$$

但し \bigcirc はリサージュで得られる楕円の面積、 \square は楕円に外接する矩形の面積(図4)

これから $\cos\phi$ も求められる。周期とねじれ常数を前式(7)、(8)に代入すれば R 、 K が求められる。

応力 E と歪 ϵ との関係は次のようになる。

$$P = \frac{k(\Theta - \theta)}{2\pi\ell r_e^2} \dots\dots\dots (11)$$

$$\theta = \frac{2r_e^2\theta}{(r_e^2 - r_i^2)} \dots\dots\dots (12)$$

応力，歪曲線で Pde は単位体積当りの散逸エネルギーを示し，エネルギー蓄積の内容をしらべることができる。

以上のような計算から土壌の剛性率，粘性率を求めるとき，リサージュの形が強制振動の振巾によつて変らないことが前提となる。図形が楕円より著しく離れるとき振巾を小にしてなめらかな楕円が描けるようにする。濃度が低いとき 0.1 rad の振巾でほぼ楕円とみなされる。しかし濃度が高くなると内・外筒で試料にすべりが生ずるから振動粘度計の測定可能濃度は，こういうやり方では液性限界の濃度までであろう。

液性限界 LL 以上の濃度では円柱状試料のねじりによる方法がよい。円柱状の土壌試料をモールドで成形し，その両端に金属冠をはめて下端を台に固定し，上端にねじり振動を与える。金属冠と土壌試料ははりのないように固くおさえることが必要である（図 5）。

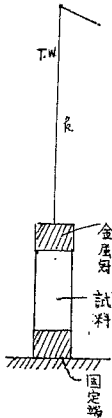


図5 ねじりによる粘弾性測定

LL に近い水分状態では試料をそのまま金属冠へおしこめばよいが，PL に近いもの，またはそれ以上の硬さのものではアラライトなどの接着剤でおさえることも考えられる。試料をおさえるには均一な力で締めつけるようなネジの工夫も必要である。一般のねじり棒の力学に従えば形状因子は $\pi r^4 / 2\ell$ であるから次のようにかける。

$$R = \frac{\pi r^4}{2\ell} \cdot \eta \quad K = \frac{\pi r^4}{2\ell} \cdot G \dots\dots\dots (13)$$

これより η ， G が求められる。このような方法から微小変形に

※ (6)式を $\ddot{\theta} + 2a\dot{\theta} + n_e^2\theta = L \sin \omega_f t$ とかきかえる。

但し $2a = R/I$ ， $n_e^2 = (k + K)/I$ ， $L = k\Theta_0/I$

これより

$$\theta = \frac{L \sin(\omega_f t - \phi)}{\sqrt{n_e^2 - \omega_f^2 + 4a^2\omega_f^2}} = A \sin(\omega t - \phi)$$

$$\tan \phi = \frac{2a\omega_f}{n_e^2 - \omega_f^2}$$

おける粘弾性の性質がわかる。7) 振動周期を変えて剛性率がどのように変化するかを知らば (図6) 遅延スペクトルが求められる。

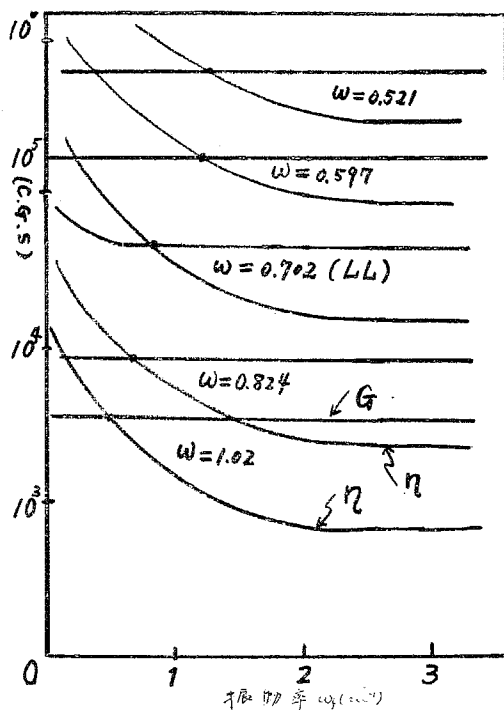


図6 剛性率，粘性率の振動率への依存性

3. 貫入試験 ペネトロメータ，載荷板試験によるコンシステンシの求めかたは試料が粘性体だと仮定すれば原理的には理解できる。しかし土壌は一般に複雑な流動をするので厳密な解析は困難である。

ペネトロメータ：図7に示すような円柱を円筒内の土壌ペーストに力Fで貫入させる場合を考えてみる。試料が次のような挙動をすると仮定すれば

$$P^R = \eta \cdot V \dots\dots\dots (14)$$

但しηは常数

円筒と円柱間で作用する剪断力Pは，貫入体の半径rに比して貫入lが十分大きく末端効果を無視しうるときには

$$P = \frac{F}{2\pi\ell \cdot r} \dots\dots\dots (15)$$

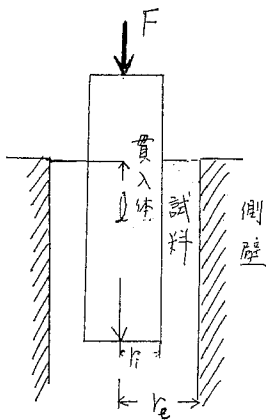
また沈下速度 v は流体力学の法則から

$$v = \frac{F}{2\pi\ell} \int_{r_i}^{r_e} \frac{V}{P^2} dP \dots\dots\dots (16)$$

以上から

$$v = \frac{1}{\eta(n-1)} \left(\frac{1}{r_i^{n-1}} - \frac{1}{r_e^{n-1}} \right) \left(\frac{F}{2\pi\ell} \right)^n \dots\dots\dots (17)$$

ここで $v = d\ell/dt$, 初期条件 時間 $t=0$, $\ell=0$ とすれば (初期には末端の影響が大きい), (14), (15)式から(17)式は次のようになる



$$\frac{\ell^2}{n+1} = \frac{F t}{2\pi(n-1)\eta^*} \left\{ 1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^{n-1} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

但し $\eta^* = \eta/V$ とし, 測定の過程で一定とする。

さらに(18)式は

$$v = \frac{(n-1)\ell}{(n-1)t r_i \left\{ 1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^{n-1} \right\}} \dots\dots\dots (19)$$

図7 ペネトロメーター

となる。すなわち非ニュートンの粘性体の場合のコンシステンシは剪断応力 P と剪断速度 V で表わしうる。ニュートン流では $n \rightarrow 1$ となる⁸⁾ 貫入で土壌が側壁の拘束を受けない場合には側方流動も同時に生ずるので実際には複雑である。しかし壁効果の影響を正しくとらえればこのような解析も有効であろう。

載荷板試験：土壌が粘弾性体であると仮定して次のような方法も考えられる。充分広く、かつ一定深さ(7cm)をもつ泥ねい状土壌の表面に円柱状(直径3cm)のおもりを置いてその沈下の時間的変化をカセットメータで測る。この方法で土のかたさのある程度知ることができる。沈下深さ(mm), 時間(min)で各荷重 F についての沈下曲線を求める。一般に土壌では初期沈下($t=0$)がみられ, 時間とともに沈下深さが増大し, ある程度でとまる。荷重を除けば復元する。復元は瞬間的のものと, 時間とともに徐々に起こるものから成り立つ。荷重が小さ

く降伏値以下であればほぼ完全に復元する。荷重が大きくなると、永久変形がおこる。くりかえし荷重では初期沈下 (initial set) は初回のみ生じ、以後は無視できる。復元量を、⁹⁾ 図8のBCとすれば荷重10 min後における沈下量は荷重Fに対しては図9-1のようになる。

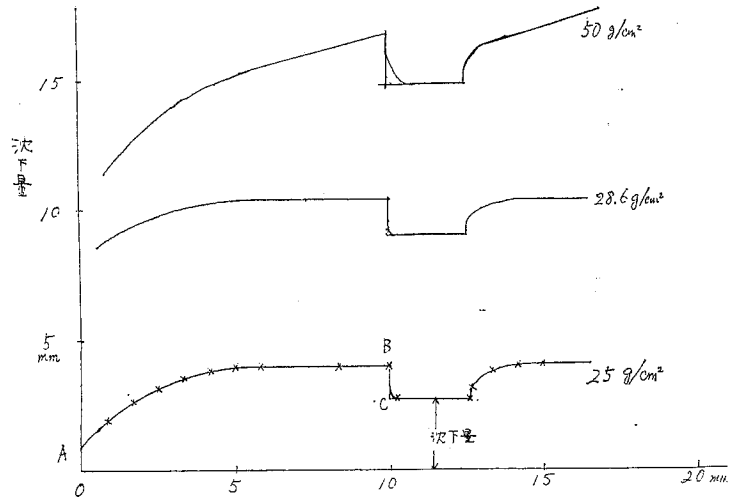


図8 貫入深と時間との関係 (八郎潟へドロ 含水比222%)

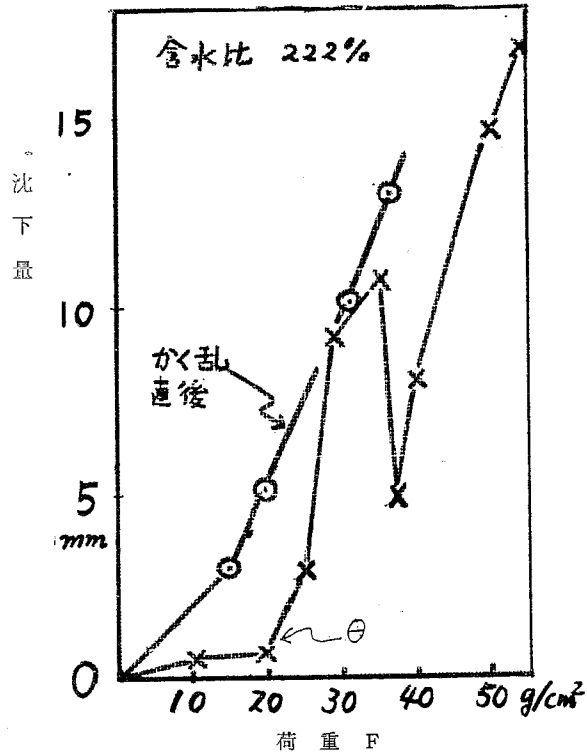


図9-1 土壌のかたさ (八郎潟へドロ) 10mm後の沈下量

この折点 θ が土の弾性限界を示すものと考えられ降伏値に対応する。剪断応力と剪断速度との関係でコンシステンシを表すものとするれば、この場合、円柱の荷重体側面に働らく剪断速度は沈下が定常状態になつたとき示す沈下速度に比例する。この定常沈下速度をそれぞれの荷重 P に対して示すと図 9-2 が得られる。降伏値以下の荷重では定常沈下速度は 0 になる。この図

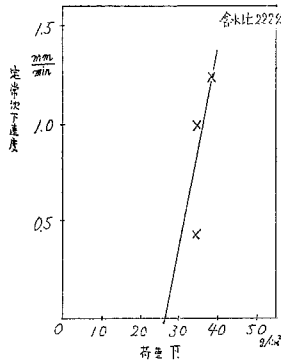


図 9-2 コンシステンシ曲線 (八郎潟ヘドロ)

は一種のコンシステンシ曲線を示し、土の挙動を比較する目安となる。載荷板試験による沈下曲線は荷重を大きくすればかたい土壌にも適用できる。ここでの例は八郎潟の干陸直後のヘドロを用いたものであり、自然含水比 22.2% で、降伏値は約 20 ~ 30 g/cm² であることがわかる。かくはん直後に測定すれば 24 時間放置したものとくらべコンシステンシ曲線が変わり、降伏値は小さくなる。

III 各測定方法の比較 以上の測定で得られる物理量の相互関連を多くの試験データから次のように考察した。

1 回転粘度計によつて得られるコンシステンシ曲線から土壌ペーストの含水量と降伏値との関係が求められる。¹⁰⁾

$$\theta = A e^{(\phi - \phi_0)} \dots \dots \dots (20)$$

但し ϕ は沈定体積における濃度 (容積分率), A は常数, θ 降伏値, ϕ_0 容積分率。いま図 10 ②に示されるようにバネ G_0 とピストン η とまさつ θ を示す要素を組合せた模型を想定してみ

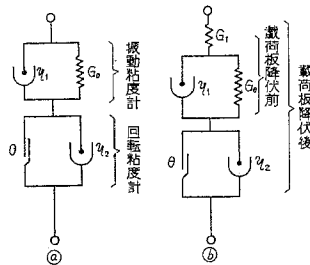


図 10 各測定における模型

る。この模型で応力が降伏値以下であればまさつは働かず挙動の模型は単純な粘弾性体 (フォークト体) として考えてよい。降伏値以上の濃度 ($\phi <$) では粘性抵抗が優勢となり、流れる。降伏値は低濃度 ($\phi >$) では 0 に等しい。

回転粘度計の測定で得られる値は応力が降伏値をこえた場合の粘性率 η_2 と降伏値 θ であり、弾性率 G_0 , 粘性率 η_1 は計算

できない。この測定はペースト状土壌の降伏値と流動性をとらえるためによく、また土壌のク
リーブをしらべるのに有効である。

2 振動粘度計による測定は上記の力学的模型図 10—②で応力が降伏値をこえない場合に
相当する。すなわちバネとピストンを並列に結んだ模型(フオート体)を考えている。

ここで得られる G^* と η_1 は測定振動周期で変化する。

$$G^* = G_0 + i\omega \cdot \eta_1 \dots\dots\dots (21)$$

$\omega \rightarrow 0$ で $G^* = G_0$ は静的剛性率を示す。すなわち回転粘度計では降伏値をこえた場合の挙動
を、振動粘度計は降伏値をこえない場合の挙動を測定していることになる。振動粘度計による
測定方法は地震波などのように周期的外力が作用する場合の解析に有効である。

3 貫入試験で求められる挙動の解析では①応力を変形速度の指数関数として表わし、コン
システンシ曲線を求め総括的に取扱うものと、②外力が降伏値以下の場合の挙動と降伏値以上
の場合の挙動とをわけて解析する方法があることを示した。

載荷板試験の場合は②にあたり土壌の力学的模型を図 10—⑥のように考えると理解に都合
がよい。降伏値以下の応力 ($P < \theta$) では (θ, η_2) 要素はないと同じで模型はバースト体と
なる。歪は土壌容器の深さに対する沈下量の比で示される。 $P > \theta$ では (θ, η_2) 要素が働き
土壌は流動する。模型の各常数は沈下曲線から解析される。載荷板試験で求められる常数は静
的なものであり、降伏前に求められる G_0 の値は振動粘度計で求められる G_0 に近い。

降伏値 θ もまた $LL \sim PL$ の領域で回転粘度計で求められる θ に近い。

図 11 は北関東ローム(宇都宮大学清原農場、深さ 100 cm) についての実験結果である。
これを見ると $\theta < G$ であり、また $\log \theta$ は pF とほぼ一致することがいえる。アッターベルク試
験によるコンシステンシを力学的模型で考えることは困難であるが、コンシステンシの諸指標
を降伏値の対数または pF で表示すれば¹¹⁾ 表 3 のようになる。

このように土のコンシステンシは粘着力や連結度などを考えなくても表わすことができる。
測定方法は測定目的にそつていなければならないし、またスケールの問題もあるので、測定
内容を知ることが必要である。原地土と実験室での土の異なりも考りよされねばならない。チ
クソトロビをどのような形で取扱うかも今後の問題である。しかし、上述のような測定方法から
土壌の物理的性質を見てゆくと幾分でも土壌の工学的性質が明らかになるであろう。

以上は東大、山崎研究室および山形大、須藤研究室でなされた測定方法の要約である。これは
山崎教授をはじめとする土道研究グループの諸氏からの協力と指導によつた。ここに深謝する。

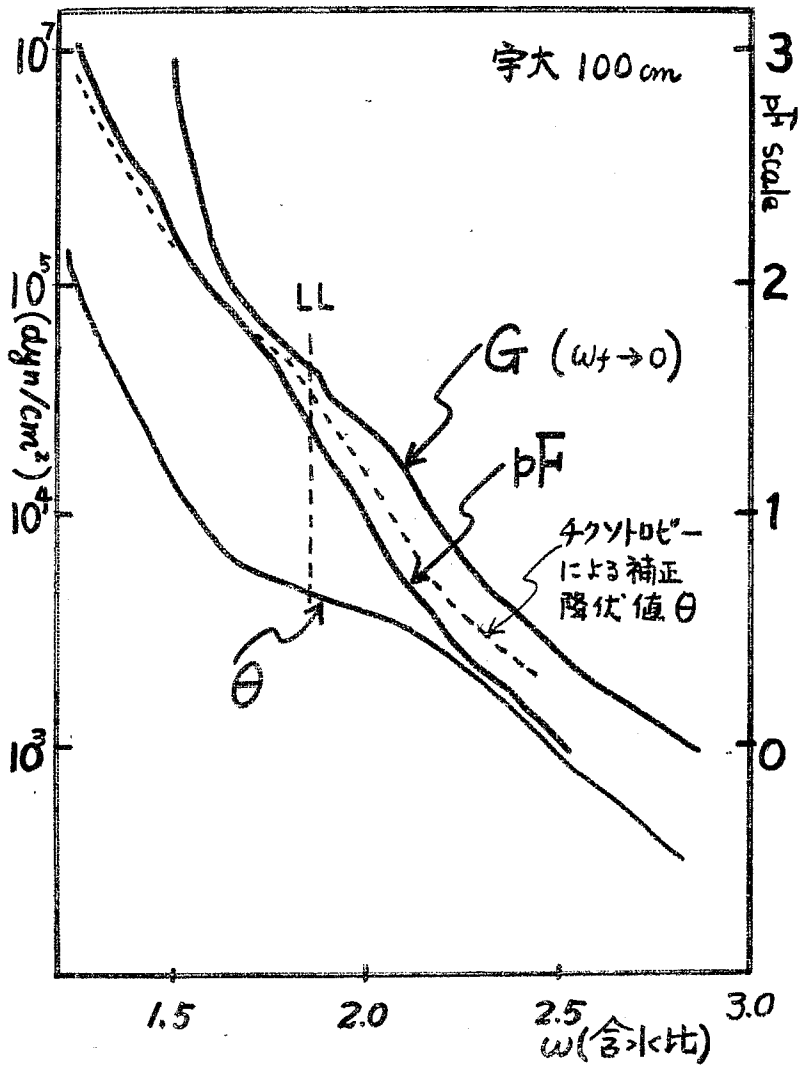


図 11 剛性率, pF, 降伏値の関係

参 考 文 献

- 1) 例えば土質試験法解説 土質工学会編 47頁(1960)
- 2) Atterberg Die Plastizität der Tone
Int. Mitt. für Bodenkunde 1, 10-43(1911)
- 3) 素木洋一 セラミック外論 窯業協会, (1962)
- 4) 須藤清次・安富六郎 関東ロームの工学的性質(III) 農土研別冊(7)
98-104(1963)
- 5) Reiner, M. Deformation and Flow. Lewis, London(1949)
- 6) Nakagawa, T. and Seno, M. Rheological Properties of
Some Polymerized Oils. Bull. Chem. Soc.
Japan, 29, 4, 471-479(1955)
- 7) 須藤清次・安富六郎 振動粘度計による土壌の性質 農土研投稿中
- 8) 阪上信次 レオロジー測定法講座 第4回 高分子学会(1963)
- 9) 須藤清次・東山勇 関東ローム研究会で討論(1964)
- 10) 安富六郎・須藤清次 土壌ペーストの流動(III) 農土研別冊(3)
40~45, (1962)
- 11) 安富六郎・竹中肇 工学的にみたPF値と降伏値. 農土研投稿中