

48. 土の粘弾性と剪断抵抗

地震研究所 { 石本 巳 四 雄
飯田 汲 事

(昭和11年9月15日発表—昭和11年9月20日受理)

I. 緒 言

土は一般に可塑物質として取扱はれる一方、弾性體としても考へられて居る。即ち長時間働く力に對しては其の儘變形し、力を取り去つても復元する事はないが、地震波の如き短周期の波動は其の中を通過するのである。斯くの如く土は全く異なる2性質を保有するのであつて吾々は斯様の性質を表はすに粘弾性の名稱を採用する。而して粘弾性物質の種々の性質に就ては已にピッチ、パラフィン、砂岩等を用ひて研究し報告¹⁾してある。本論文は土に關して粘弾性を2方面から調べたものである。第1の部分はピッチ、パラフィン等に就て行つた研究を其のまま土に應用したものである。第2の部分は破壊に關する事柄を取扱つたものである。吾々は地表に於て地這り、山崩れ等の現象を見るが、此れは土に關する破壊的現象と考へられ此等を調査研究するには土の破壊に與る剪断抵抗の測定が必要となる。従來土の剪断抵抗の測定に關しては種々の實驗が行はれて居るが、未だ力の働く緩急を顧慮して研究したものが殆ど無い様である。本論文は特に此の點に注意し、力の時間的與へ方に關し抵抗が如何に變化するかを實驗したものである。本實驗は豫備的のものであり、土の種類に就ても只1種類のものを採用し、然も其の性質、組成の相當判つて居る人工の加はつた土に就て行つた。従つて自然土に關しては將來研究を進める積である事を述べて置く。

II. 粘弾性測定實驗

吾々の實驗に使用した土は純粘土であつて、特に土の特性を知る目的の爲めに粒子の小さいものを取扱つた。其の機械的分析の結果は第I表に示してある。又従來の方法によつて求められた緊硬度試験、壓縮試験、抗剪強度試験の結果は土の性質を知る上に必要であるから、此れも第I表に掲げる事とした。

1) 飯田汲事 地震研究所彙報 13 (1935), 198; 443.

第I表 機械的分析表

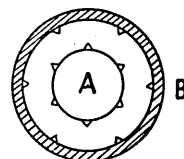
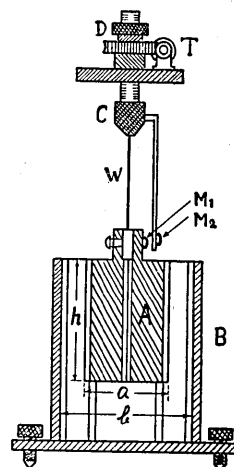
篩 分 (%)						沈泥 粒徑 (mm) 0.05~0.01 (%)	粘土 粒徑 (mm) 0.01~0 (%)
8 目 ²⁾	14目	28目	48目	100目	200目		
0	0	0.06	0.48	1.36	2.02	11.94	84.14

凝集力 (C) kg/cm ²	摩擦角 (θ) in deg.	摩擦係数 tan θ	比 重		間 隙 率 P (%)	間 隙 比 e	含 水 率 (%)	流動限界 (含水比)
			見 掛	真				
0.145	1.00	0.0175	2.06	2.551	41.93	0.72	28.09	1.467

a) 実験装置 此の実験に用ひた実験装置は前実験²⁾に採用したものと同様であつて第1圖に示す如き同心圓筒装置である。但し前回と異なる點は外側圓筒の内壁及び内側圓筒の外壁に、何れも厚さ 3 mm 程度の双形突起物を附着し、土の振れ變形の際、滑動の生ずるのを防止した。

土を満せる真鍮製圓筒 (B) の中に鋼鐵針金 (W) を通じて真鍮製圓筒が吊されて居る。針金の上端はチャック (C) にて固定され、針金は螺子 (D 或は T) によつて一定角振られる。此の振力によつて内側の圓筒 (A) は回轉する事となるが、その偏角は M_1, M_2 の小凹面鏡により、時計仕掛により回轉する圓筒上の感光紙上に記録される。溫度及び濕度の影響は特に注意し、實驗中成る可く一定値を保つ爲め、4 m の深さの地中室を選び其の中にて實驗した。即ち溫度は自記寒暖計を使用して記録し、濕度は常に 100% に保ち且つ又土の直接空氣に接する部分には濕布を軽く當て、實驗を行つた。此等の觀測より見るに 1 回の實驗が 1 週間に亘る場合と雖も試験土の含水率の變化は 0.3~0.4% の範圍であり、溫度も 0.2°~0.5°C の範圍であつた。なほ土の緻密さは殆ど最大の状態になつて居る。

b) 實驗結果 以上の實驗装置により得られた結果の二三の例は第2圖に示してある。何れも時の経過と共に偏角し、或る一定角値に接近するものである。今此の終局角と時の經

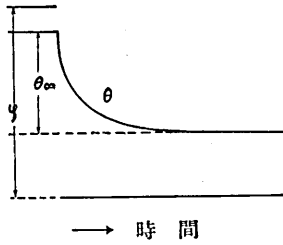


第1圖 實驗装置

- A 内側の圓筒
- B 外側の圓筒
(高さ 10 cm)
- C チャック
- D, T 螺子
- W 鋼鐵製針金 (長さ
4.467 cm, 半徑 0.765 mm.)
- M_1, M_2 凹面鏡
a=4.73 cm
b=7.3 cm
h=8.96 cm

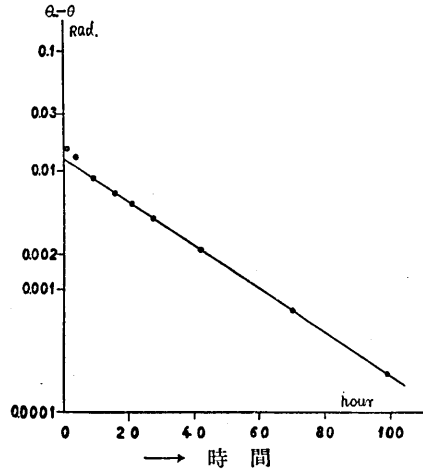
2) Tyler の標準篩目 3) 飯田汲事 前掲

過に従つて變化する偏角との差を對數値にて表はし, 時刻を横軸に採つて圖示すれば,



第3圖 土の振れ變形曲線の略圖

- φ : 最初針金に與へし振角
- θ_{∞} : 土の終局の振角
- θ : 土の時の経過と共に變化する振角

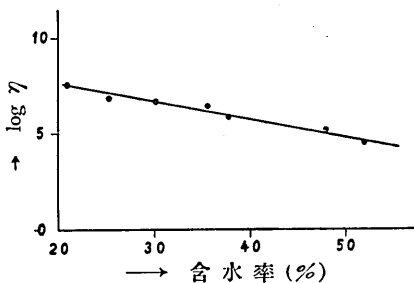


第4圖 時間と $\log(\theta_{\infty}-\theta)$ とは直線的關係にある事を示す. 含水率 37.8%

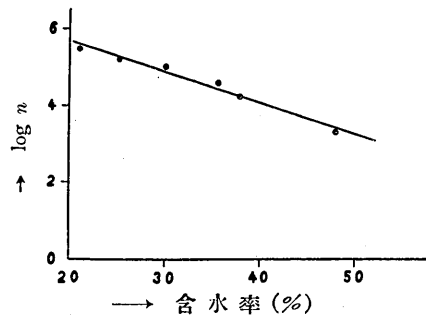
第4圖の如く直線となる. 従つて原曲線は $\theta = \theta_{t=\infty} (1 - e^{-at})$ なる形を以て表はされ⁴⁾ (第3圖), 結局

$$k = \frac{c(\varphi - \theta_{t=\infty})}{\theta_{t=\infty}}, \quad \epsilon = \frac{k + c}{a}$$

として k なる弾性値及び ϵ なる粘性常数が誘導出来る. 而して次に此等に装置の常数 $\frac{1}{4\pi h} \frac{b^2 - a^2}{a^2 b^2}$ を乗すれば, 粘性及び弾性係数が求められる. 次に含水率の差によつて, 此等の係数が如何に變化するかを検べる爲めに, 以上の試験土に適當に水を加へ又は乾燥せしめて同様の實驗を繰返した. 此の記録は第2圖中に見られる如く同様の變形曲線を示す. 斯様の曲線を上述の分析と同様に處理して得た結果は第II表及び第5圖, 第6圖に示すものである. 此等の圖から判る如く弾性及び粘性の2係数は



第5圖 含水率と粘性係数の關係



第6圖 含水率と剛性率との關係

4) 飯田汲事 前掲

孰れも含水率の増加と共に對數曲線をなして變化してゐる。而も含水率 53.4% に於ては弾性は消失し、粘性のみとなる。なほ此等の値には内側圓筒の底面の影響に對する補正が加へてある事は勿論である。

第 II 表 含水率, 粘性係數, 剛性率

No.	含水率 (%)	粘性係數 η (c.g.s)	剛性率 n (c.g.s.)	溫度 °C
1	21.0	3.335×10^7	3.109×10^5	17.5
2	25.3	7.508×10^6	1.593×10^5	18.0
3	30.1	5.026×10^6	1.032×10^5	18.2
4	35.6	2.625×10^6	3.950×10^4	19.0
5	37.8	7.545×10^5	1.671×10^4	18.8
6	48.0	1.588×10^5	2.175×10^3	19.8
7	53.4	3.784×10^4	—	20.0

III. 剪断抵抗測定

此の實驗には前の時使用したと同じ土を用ひた。

a) 實驗器械 實驗に使用した器械は第7圖に示すもので、内外2箇の圓筒から成り、其の間に試験土を詰め、外側の圓筒 (C_2) を一定速度にて回轉せしめる。内側の圓筒 (C_1) には振子が附してあるから、外圓筒の回轉によつて振子も偏り、此の重錘の偏りによつて生じた能率と土の剪断抵抗とは釣合ふ事となる。従つて振子の偏角を測定すれば土の剪断抵抗が求められる。

第7圖 a は剪断器械であり、b は器械及び圓筒回轉装置である。 C_2 は外側の眞鍮圓筒で、臺上にて E, F なる2箇の足にて支へられ、一端はウォームギア (G) を經て回轉装置に連る。 C_1 は内側の眞鍮製圓筒で C_2 同様に K_1, K_2 なる2箇の足にて支へられて居る。 K_1, K_2 には夫れ夫れ3箇の小車があり、其れ等が C_1 圓筒を軽く押へて居る。圓筒の回轉を滑らかにする爲め小車はピボットにより回轉するが、其の軸受には石が入れてある。又 C_2 の内壁、 C_1 の外壁には土の滑動を防ぐ目的上、刃形の齒が附けてある。 C_1 圓筒に附置した振子 (P) の重錘 (W) は自由に上下或は取替へる事が出来るので、偏角に對して適當な力率を與へる事が出来る。振子の偏角を記録するために其の一部から腕を出し、其の先きに描針 (N) が附けてある。此の描針の先端が時計仕掛回轉ドラム上に巻いた煤煙紙上に接觸して居るので、時の経過に従つて振子の偏角を記録する事となる。なほ時計仕掛回轉ドラムは1時間1回轉、1日1回轉、1週間1回轉等、適當のものを隨時使用した。

又 C_2 圓筒を回轉するためには同期電動機(M) (第7圖b) を使用したが、此れは1分間300回轉である。又 C_2 圓筒を種々の速度にて回轉せしめるために、一連の齒車系(H) を中間に入れてある。此れは齒車にて嚙み合ふ10箇の軸が並列して居て、次々に軸數を増加する事によつて C_2 圓筒に傳達される回轉が遅くなる様になつて居る。 C_2 圓筒を1回轉せしめるに要する時間は第III表に示してある。

なほ實驗は先づ C_2 圓筒に土を詰め、其れと同心となる様に C_1 圓筒を差し込み、器械を組立て C_2 をある速度で回轉せしめ、振子の偏角を時計仕掛回轉ドラム上に記録せしめるのである。又土の直接空氣に接する部分には濕布を軽く當て、一實驗中に於ては土の含水量の變化を防止するやうになした。實驗室の溫度は自記寒暖計を使用して記録した。

b) 實驗結果 含水量の同じ土に就て C_2 圓筒を種々の速度にて回轉せしめ、更に含水量を變へて同様の實驗を繰返した。即ち剪斷速度により、或ひは含水量により抵抗に變化ある事を確め得た次第である。

記録として得られた代表的のものは第8圖 a, b に示すものである。圖の説明より判る如く溫度は概ね $18^{\circ}\text{C} \sim 22^{\circ}\text{C}$ の範圍に於て變化するが、これらは何れも實驗室内の溫度である。従つて土の溫度に於てはそれ程の變化があるとは思はれない。

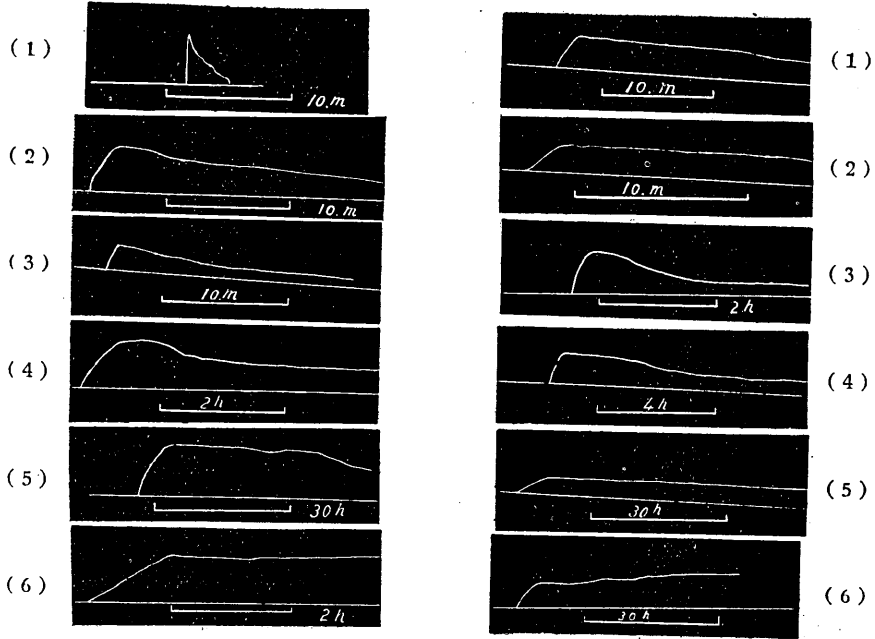
孰れの記録に於ても、最初は急速に振れて行くが、最大偏角にて剪斷が行はれ、後は C_2 を回轉せしめる速度に従つて急速に或は徐々に元の状態に戻る。今其の剪斷の行はれた最大偏角を θ とすれば剪斷抵抗 F は

$$Mga \sin \theta$$

なる形で求める事が出来る。但し M は振子の質量、 a は振子の回轉軸と重心との距離、 g は重力加速度である。又最大偏角に達する迄の時間 T も記録から讀取る事が出来るが、此等の關係は第IV表及び第9圖~第11圖に示してある。なほ剪斷抵抗は單位面積に對するものとして計算した。

第 III 表 外側の圓筒を
1 回轉せしめる時間

番 號	時 間		
	時	分	秒
1			26.6
2		2	08
3		10	40
4		25	30
5		53	20
6	2	08	00
7	4	26	40
8	10	40	00
9	22	13	20
10	53	20	00
11	111	06	40



(a) 含水率 26.6%

(b) 含水率 30.7%

第 8 圖 剪断抵抗の回転速度に對する變化を表はす曲線 (原圖の $\frac{1}{3}$)

WL =能率, T =外側の圓筒を 1 回轉せしめるに要する時間, θ =溫度

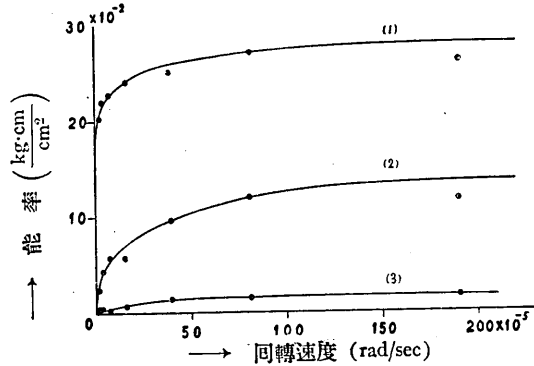
(a)	(1)	$WL=398.5 \text{ kg.cm,}$	$T=2 \text{ m } 10\text{s,}$	$\theta=18.5^\circ\text{C}$
	(2)	$WL=396.5 \text{ kg.cm,}$	$T=128 \text{ m,}$	$\theta=19.6^\circ\text{C}$
	(3)	$WL=396.5 \text{ kg.cm,}$	$T=4 \text{ h } 26 \text{ m,}$	$\theta=18.6^\circ\sim 19.7^\circ\text{C}$
	(4)	$WL=162.9 \text{ kg.cm,}$	$T=10 \text{ h } 40 \text{ m,}$	$\theta=18.6^\circ\text{C}\sim 19.7^\circ\text{C}$
	(5)	$WL=133.96 \text{ kg.cm,}$	$T=53 \text{ h } 20 \text{ m,}$	$\theta=17.8^\circ\text{C}\sim 19.9^\circ\text{C}$
	(6)	$WL=141.5 \text{ kg.cm,}$	$T=22 \text{ h } 14 \text{ m,}$	$\theta=17.9^\circ\text{C}\sim 20.2^\circ\text{C}$
(b)	(1)	$WL=130.4 \text{ kg.cm,}$	$T=25.6 \text{ m,}$	$\theta=18^\circ\text{C}$
	(2)	$WL=128.2 \text{ kg.cm,}$	$T=4 \text{ h } 44 \text{ h,}$	$\theta=18.2^\circ\text{C}$
	(3)	$WL=106.5 \text{ kg.cm,}$	$T=10 \text{ h } 40 \text{ m,}$	$\theta=21.5^\circ\text{C}$
	(4)	$WL=106.5 \text{ kg.cm,}$	$T=22.55 \text{ h,}$	$\theta=21.5^\circ\text{C}$
	(5)	$WL=123.8 \text{ kg.cm,}$	$T=53 \text{ h } 20 \text{ m,}$	$\theta=18.2^\circ\text{C}\sim 21.1^\circ\text{C}$
	(6)	$WL=105.9 \text{ kg.cm,}$	$T=111.11 \text{ h,}$	$\theta=19^\circ\text{C}\sim 22^\circ\text{C}$

第9圖は能率と速度との關係に於て含水量により其値の異なる事を示し, a は回轉速

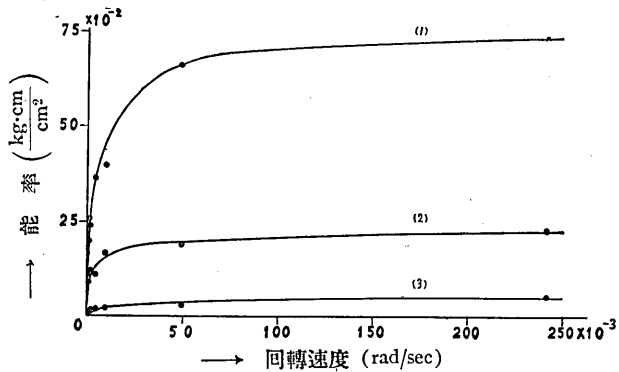
度 $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$ の小なる場合であり, b は試験した回轉速度を全部網羅して書いたものである. 此れ等の圖から判る如く, 能率は $\frac{d\theta}{dt}$ の小なる間は比較的小なるに反し, $\frac{d\theta}{dt}$ の大なる値となれば急激に増加する. 即ち $\frac{d\theta}{dt}$ によつて其の値が變化する. C_2 を 4 日以上もか

ゝつて回轉せしめた時と, 10 秒程度の短時間で 1 回轉せしめた時とでは, 剪斷抵抗が 3 倍以上も異なる値を示すのは特に注目すべき現象である. 又含水量の増加に従つて剪斷抵抗が減少する. 此の關係は第 10 圖に於て明かなる如く, 長時間に C_2 を 1 回轉せしめる

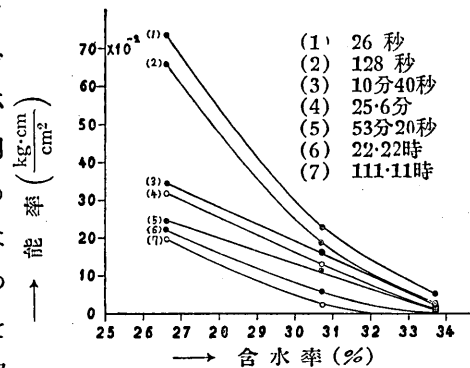
場合に剪斷抵抗の減するものと比較して考へる事が出来る. 即ち剪斷抵抗の減少は含水量が増す時或ひは, 長周期の力が作用する時であり, 此の二つ乍らの作用が同時に働くとすれば, 剪斷抵抗は極めて底下するのである. 斯くの如き現象は全く粘彈性物質の特長であつて, 自然の土の變形剪斷に關しても充分此の性質を考へて置かないと説明出来ない多くの現象がある様である.



第9圖 (a) 剪斷抵抗と回轉速度との關係
(1) 含水率 26.6%
(2) " 30.7%
(3) " 33.7%



第9圖 (b) 剪斷抵抗と回轉速度との關係
(1) 含水率 26.6%
(2) " 30.7%
(3) " 33.7%



第10圖 剪斷抵抗の含水率による變化
(數字は C_2 を一週轉せしめる時間)

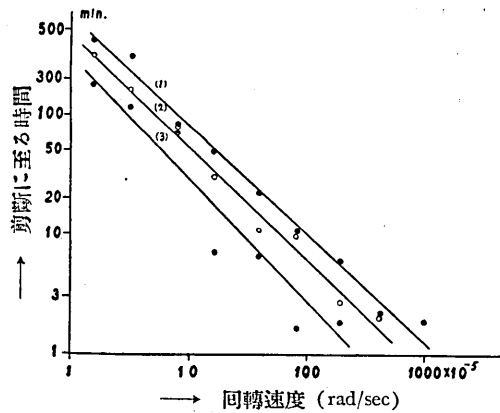
第 IV 表 剪断抵抗, 回轉速度, 剪断に至る迄の時間

$F_1 \left(\frac{\text{kg}\cdot\text{cm}}{\text{cm}^2} \right)$	$F_2 \left(\frac{\text{kg}\cdot\text{cm}}{\text{cm}^2} \right)$	$F_3 \left(\frac{\text{kg}\cdot\text{cm}}{\text{cm}^2} \right)$	$\frac{d\theta}{dt}$ rad/sec	T_1 (min)	T_2 (min)	T_3 (min)
0.734	0.229	0.052	241.64×10^{-3}	0.06	0.02	0.01
0.657	0.189	0.028	49.087×10^{-3}	0.59	0.143	0.408
0.345	0.165	0.021	9.817×10^{-3}	1.99	0.820	0.612
0.316	0.113	0.021	40.903×10^{-4}	2.21	2.26	0.819
0.244	0.117	0.015	19.038×10^{-4}	6.07	2.76	1.808
0.271	0.119	0.014	8.181×10^{-4}	10.6	9.64	1.64
0.250	0.094	0.013	39.270×10^{-5}	21.5	10.09	1.53
0.240	0.057	0.006	16.362×10^{-5}	44.4	30.65	7.37
0.228	0.057	0.002	7.854×10^{-5}	81.20	80.05	73.56
0.221	0.043	0.003	3.272×10^{-5}	300.7	160.05	117.00
0.201	0.023	0.003	1.571×10^{-5}	412.5	308.5	180.00

F_1, T_1 : 含水率 26.6% F_2, T_2 : 含水率 30.7% F_3, T_3 : 含水率 33.7%.

又第 11 圖にて見る如く $\frac{d\theta}{dt}$ が小であると剪断に至る迄の時間は比較的大となる。其

れは外力が極めて緩徐に作用する場合に土は變形して剪断に至る事が困難となるに反し、急激に働く力に對しては土は直ちに剪断破壊されるからである。此れも粘弾性物質の特長として、此れを破壊せんとする時には衝撃的の力を用ふる事を必要とするのはパラフィン、封臘等に於て日常吾々が経験するものに當て嵌めて考へる事が出来るものである。



第 11 圖 剪断に至る時間と回轉速度との關係
 (1) 含水率 26.6%
 (2) " 30.7%
 (3) " 33.7%

IV. 結 語

以上行つた實驗を要約すると次の如くなる。此等は何れも粘弾性物質の特長を示すものと見る事が出来る。

(1) 含水率により粘性及び弾性の諸係数は變化する。その變化を検べると、含水率が増加すると何れも急激に小となる。含水率約 25.3% における兩者の値は夫れ夫れ 7.5×10^5 及び 1.59×10^5 c.g.s. である。

(2) 含水率約 53% においては弾性は消失し、粘性のみとなる。

(3) 剪断抵抗は剪断速度によつて異り、速度が小であると抵抗が小となり、其の逆も行はれる。極端の場合には速度の變化により剪断抵抗は3倍も異なる。

(4) 剪断抵抗は土の含水量により著しく異なる。含水量が増加すると抵抗は小となる。

(5) 剪断に到達する時間は力の働く速度に關係する。即ち剪断速度が大であると剪断に達する時間が短く、小であると時間が長い。

(6) 物質の構造に就ては海綿構造と見る事が適當の如くである。

なほ以上の實驗は緻密度に就ては少しも觸れて居ないが、此れは常に一定である様に努めた。即ち重量と體積とは常に比例する様に注意した。又實驗は濕度、溫度の一定の下に行ふべきは勿論であるが、斯様の設備が完全で無かつたのは頗る遺憾である。或る機會に於ける條件の完備した下に實驗をなほ延長する事を希望して止まない。又器械の性能に就ても多少不満足の點はあつたが、實驗の進行上其の儘となした所もある。例へば振子を内側圓筒 C₁ に直接附加したが、次回には振子を別に作り、兩者の回轉のみを聯結する方法、或ひは記録裝置に就ても二三改良すべき點のある事は勿論である。

以上の實驗は鐵道省土質委員會の仕事と連絡を保つて成されたものであり、實驗の遂行上、幹事渡邊貫博士に負ふ所多く、茲に厚く感謝の意を表すものであり、又同委員會の其他の方々の應援を受けた結果、短時日に以上の結論を得た事に對し厚く御禮申上げる。

48. *Expériences sur le sol*

par Mishio ISHIMOTO et Kumizi IIDA,

Institut de Recherches sur les Tremblements de terre.

Nous avons exécuté certaines expériences sur le sol, dont la propriété mécanique est connue, avec deux appareils construits dernièrement, et obtenu les résultats suivants :

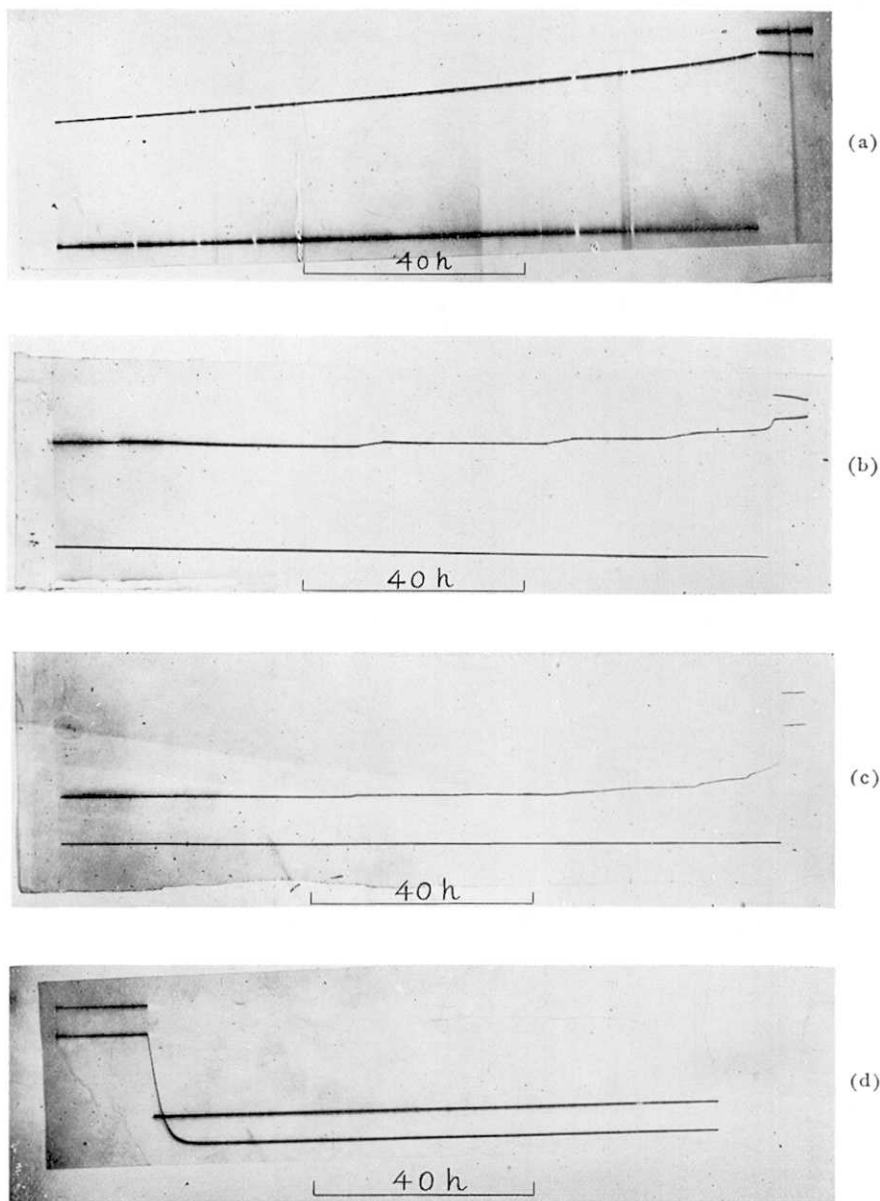
1) La viscosité et l'élasticité du sol changent avec le contenant d'eau : les deux diminuent assez rapidement quand de l'eau augmente.

2) Quand le contenant d'eau devient plus que 53%, l'élasticité du sol disparaît et il n'y reste que la propriété de viscosité.

3) La résistance cisailante dépend la vitesse de force appliquée : quand la force est rapide, la résistance est grande et vice versa. Nous constatons que la résistance devient 3 fois grande aux deux cas extrêmes.

4) La résistance cisailante diminue avec le contenant d'eau : elle devient petite avec l'augmentation d'eau.

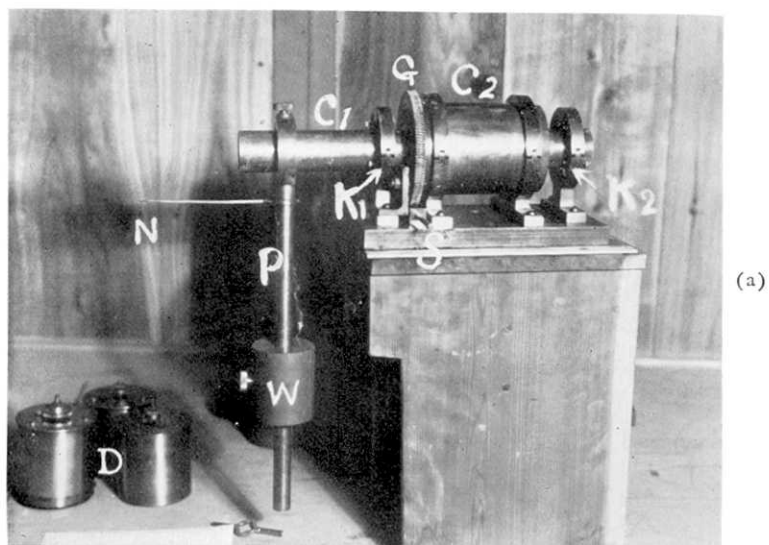
5) Le maximum de résistance apparaît relativement tard quand on applique la force lentement et vice versa.



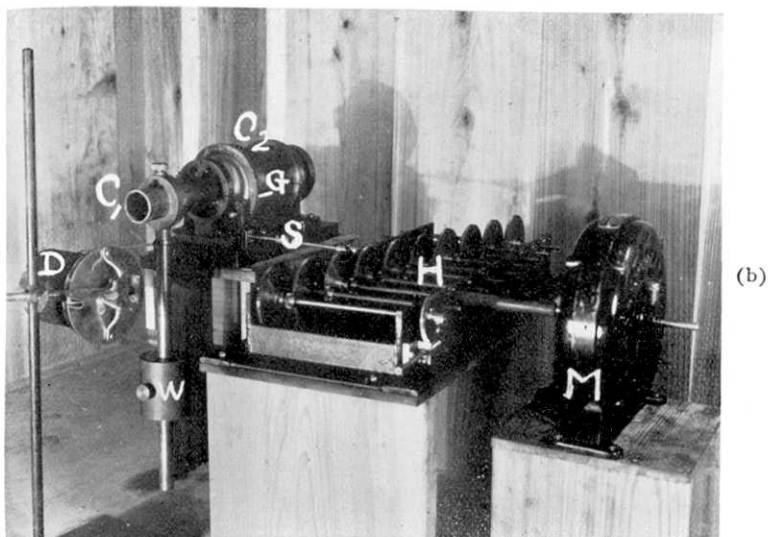
(震研彙報 第十四號 圖版 石本・飯田)

第 2 圖 粘土の振れ變形曲線 (原圖の $\frac{1}{3}$)

(a)	含 水 率	30.1%	溫 度	18.2°C
(b)	"	35.6%	"	19.0°C
(c)	"	37.8%	"	18.8°C
(d)	"	53.4%	"	20.0°C



(a)



(b)

(震研彙報 第十四號 圖版 石本・飯田)

第7圖 實驗裝置 (a) 剪斷器械 (b) 實驗裝置全體

- | | |
|---------------------|--|
| C ₁ 内側圓筒 | N 記 錄 針 |
| C ₂ 外側圓筒 | M 同 期 電 動 機 |
| D 記 錄 用 時 計 | S 外側圓筒回轉用接續軸 |
| G ウォームギア | W 重 錘 |
| H 變 速 用 齒 車 | K ₁ , K ₂ 内側圓筒の支へ臺 |