

第八章 土質試験法

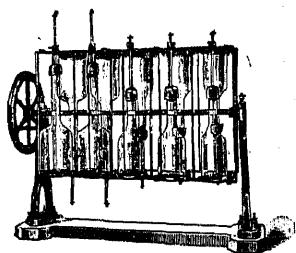
第22節 土の機械的分析

1) 土粒子の分離

土は球状より板状・針状に至る大小各種の形狀の土粒子の集合體であつて、之を粒子の大きさに依つて分つことを**土の機械的分析** (Mechanical analysis of soil) といふ。これは通常二つの操作よりなつてゐて、先づ各土粒子を充分に分離することを要し、次にこの分離されたる粒子を其の大きさによつて區別する。分離法 (*Trennung*) には煮沸法・震盪法及び摩擦法の三種がある。

土粒子を分離するには石灰・腐植質・水酸化鐵或は粘土によつて結合された土粒子を、粒子を粉碎せずして單に機械的に分離するのを理想とするが、一方比較的短時間に完全に分離させるには弱く化學的に試薬を作用せしめるのが有效である。分離法の撰澤は難しい問題である。

煮沸法 (*Kochmethode*) は土質標本 50~100gr を蒸發皿にとつてこれに 1~ $\frac{1}{2}$ litre の水を入れ極めて靜に煮沸して分離するのであつて、煮沸時間は土質に依つては 24 時間も連續しなければ最後の粒子まで分離し得ない事がある。併し成るべくならば土の中の膠質物に影響を及ぼさないやうに、ゴムの攪拌棒で攪き混ぜ乍ら半時間毎に切つて煮沸しては暫く放置し、上澄をサイホンで取出して又沈澱物を煮沸し數回之を續けるのが完全である。



第 817 圖
震盪機

震盪法 (*Schüttelmethode*) は煮沸法に較べると遙に有效である。

第 817 圖 の如き震盪機は土質標本を取つて 6 時間位震盪しなければ完全でないが、餘り激しく之を行ふときは粒子を破壊する虞れがあるため、英國では豫め稀鹽酸を加へて 2 時間位靜に震盪してゐる。

摩擦法 (*Reibmethode*) は純粹な機械的操怍であつて、Beam の摩擦法は先づ磁器皿に土の標本を取つて之に水を加へ粥の程度に練り、幅 1.6mm 位の毛の剛い太い畫筆で塗りつけ乍ら粒子を一つ一つ分離する。その中に粥が軟くなつたらこれを本節(3)に記す如き淘汰器に入れて淘汰し、殘つた沈澱物を取出して再び前の操怍を繰返へす。

粒徑 0.002mm 以下の粒子を大きさによつて區別するにはこれを 6~7 回も繰返せば充分である。此の方法は可成り骨が折れるので、極めて精密を要する試験に於て極く小量の土について行ふ外はあまり用ひられない。

2) 篩分法

篩分法 (*Siebemethode*) とは適當な篩を用いて各粒子を大きさに依つて區別するのであつて、通常セメント篩分用のものを使用し指の先や刷毛で靜かに擦つて塊をほぐし粒子を分離せしめてゐる。一般に U. S. A. Bureau of Standard の Tyler の標準篩 (第 818 圖) を使用する、そうすれば目の番號 (in 間の篩の目の數で表はす) に従つて 100 目篩 (in 間に 100 孔を有する篩) を通過して 200 目篩に残つたものの粒徑は 0.074~0.147 mm なることを知る。その通常篩分析に使つてゐる篩の目は第 15 表に示す如きものである。

第 15 表 Tyler の標準篩の番號と孔の徑との關係

篩番號	8	14	28	48	100	200
孔の徑(mm)	2.362	1.168	0.589	0.295	0.147	0.074

この方法を一般に篩分析 (*Siebanalyse*) と稱する。尙この土粒子が更に小さくなり粒子が互に喰付合ふと困難にもなる、一般に 0.25 mm まで位は先づいゝものとされてゐる。之以下の粒徑の場合は次に記するが如き沈澱法又は淘太法を用ふ。之を普通泥土分析 (*Schlammanalyse*) と稱する。

3) 沈澱法

篩分析で區別出来ないやうな細かい粒子は、粒子が水の如き粘性液體中を沈澱する際粒子の比重・重量及び外形に依つて其の沈降速度を異にし、粗い粒子は同じ比重の細かい粒子より早く沈澱するからこれを利用して分析することが出来る。これを沈澱法 (*Sedimentiermethode od. Absetzverfahren*) といふ。

一般に粒子の沈降速度は粒徑に依つて異なるが、其の粒徑と沈降速度との間の關係を表はしたのは Stokes の法則である。

$$V = \frac{2}{9} \cdot g \cdot r^2 \cdot \frac{\sigma - \rho}{\eta}$$

V =沈降速度, g =重力加速度, r =球形粒子の徑

ρ =液體の密度, σ =粒子の密度, η =液體の粘性係数

$$\therefore V = kr^2$$

茲に $k = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \frac{\sigma - \rho}{\eta}$ で、之は液體と粒子の種類に依つて定まる定數である。

今茲で 20°C に於ける水の $\eta=0.00101$, $\sigma=2.7$, $\rho=1$, $g=981$ と置けば

第 818 圖
Tyler の標準篩

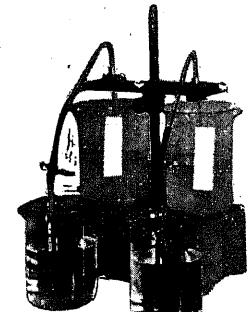
$$r = 5.222 \times 10^{-3} \sqrt{V} \text{ cm/sec}$$

となり、一定の深さを沈澱する時間は次の如く與へられる。

即ち Atterberg に依れば土粒子の徑と水中を沈澱するに要する時間とは略々第 16 表の如き關係を有してゐる。

第 16 表 粒子の徑と水中に於て沈澱に要する時間

粒子の徑(mm)	10cm の深さに沈下する時間	30cm の深さに沈下する時間
<0.002	8 時間	24 時間
0.002~0.006	1 時間	3 時間
0.006~0.002	7½ 分	22½ 分
0.02~0.06	50 秒	2½ 分
0.06~0.20	—	15 秒

第 819 圖
ビイカアの装置

ビイカア法 (Beaker method) ——これは最も古くから行はれてゐる簡便な方法で、第 819 圖の如く一定の深さに目盛つたビイカアに土粒子懸濁液を入れよく攪拌して、一定時間これを靜置した後一定の深さまでの上澄液をサイフォンで取出して二つの粒徑に區分する (第 819 圖)。

Atterberg の沈澱圓壠 —— Atterberg は第 820 圖の如き深さを正確に記してあるメエトルglas を用ひてこれを精密に行ふことを考へた。前述の如き分離法を行つた土質標本をこの硝子管中に入れて充分によくかき混ぜ、上記の時間靜置し沈澱物は底より約 3 cm の高さにあるサイフォンから流出せしめ、此を再び清水と混じよく攪拌して再び同一時間靜置して沈澱物をとり出す、斯くて該時間を経たる後沈澱物がなくなれば最早それに相當する粒子より大なる粒子は溶液中には浮游してゐないことを示す。そこで次の小粒子に就いて今度は之れに應する長時間靜置して上記と同一方法を繰り返せばよい。

Sven Odén の沈澱装置 ——これは Sven Odén に依つて改良された最も精密な装置であつて第 820 圖の如く懸濁液の底部に置いた天秤皿 A の上に沈澱する粒子を次々に測定する方法である。即ち一定時間の後水中に懸濁せる粒子の徑 r が知れてゐるからその液の密度 ρ を知れば

$$Ws = n \cdot \gamma \cdot r^3 \cdot \frac{4}{3} \pi$$

$$\rho - 1 = n (\gamma - 1) r^2 \cdot \frac{4}{3} \pi / V$$

此の方法では實驗的に求めた沈澱量と時間との關係を沈澱曲線としてプロットすると、これから各

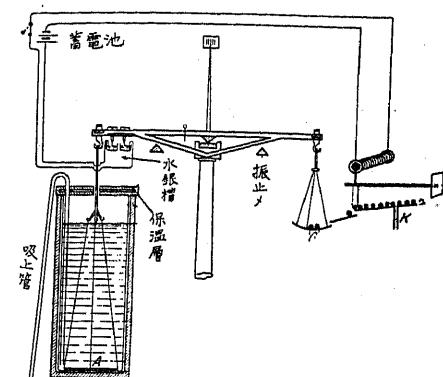
粒径の土粒子の沈澱量分布曲線が得られる。即ち土粒子の機械的集合状態はこの方法によると單に數種の fraction の秤量に依らずして、各粒径の重量の連續曲線によつて表はすことが出来る。天秤皿 A は容器の底から 1~2mm の間隔を保つて、非常に敏感な天秤の腕に支へられてゐる。従つて土粒子の沈澱によつて少しでも皿 A が傾けば分銅 K は電氣装置によつて自動的に皿 G の上に落下して釣合を保つ。斯くて分銅の落下を時間的に記録すれば粒径分布曲線が得られる譯である(第 821 圖)。

Wiegner の沈降圓筒——この裝置は第 822 圖に示す

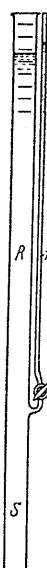
如く垂直硝子管と其れに平行な細い硝子管とより成り下部に近く兩者はコツクを距てて相通じてゐる。前者には土の懸濁液を入れ後者には蒸溜水を入れる。然るときは懸濁液の比重は蒸溜水の比重よりも大なるが爲に細管の水準が高くなるが、沈澱が進むに連れて水位差が減少し懸濁液が清淨になるに従つて漸次零に近づく。従つてこの水位差の變化と時間との關係を測定すれば該土質の機械的分析曲線が得られる。この方法に於ける誤差の主な原因は最初僅か 1cm 程の水位差を長時間に亘つて其の變化を測定する點にある。Gessner は此の裝置に寫真裝置を施して非常に良い結果を出してゐるが、その裝置の特徴は細管に傾斜した目盛硝子管を附して水位差を擴大する點で、豫め充分調整して換算圖表を作製して置けば以後比較的短時間で測定する事が出来る。

Bouyoucos の浮比重計分析裝置——米國の道路局 (Bureau of Public Roads U. S. A.) の試験室ではこの方法を採用してゐるが、土粒子の懸濁液を第 823 圖の如きメエトルグラスに移しよく搔廻してから靜置し、一定時間(例へば 1, 5, 15, 30, 60, 205, 1440 分)後毎に浮比重計を静に挿入して其の読みと同時に液の溫度を測定する。この試験には豫め液の溫度・比重・粘性係数・土粒子の比重及び比重計の浮動性に關する補正表を用意して置けば比較的簡単に確實な結果を收め得る。

第 822 圖
Wiegner の沈降管



第 821 圖
Sven Odén の裝置



第 823 圖
Bouyoucos の裝置

4) 淘汰法

淘汰法 (Spülmethode) とは硝子製の圓槽の中に土を入れ、下方から靜に水流を加へて流速を種々に變化し、流水中に止まり又は沈降し得ない微粒子を上方から流出せしめる方法である。

此の場合にも流し出される最大粒子の徑と流速との間には Stokes の法則に依る關係が成立するが、多くの實驗の結果略球形の石英粒子の流出粒徑と流速との間には第 17 表の如き關係がある。

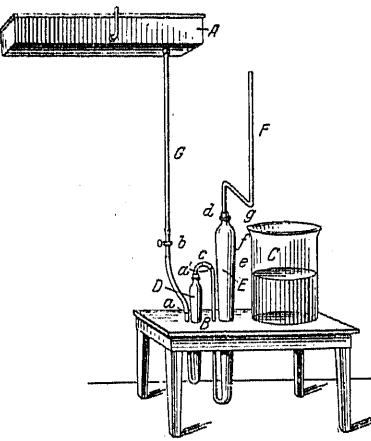
第 17 表 水の流速と流出粒徑との關係

流速(mm/sec)	流出粒徑(mm)
0.2	<0.01
0.5	0.01~0.02
2.0	0.02~0.05
7.0	0.05~0.10
25.0	0.10~0.20

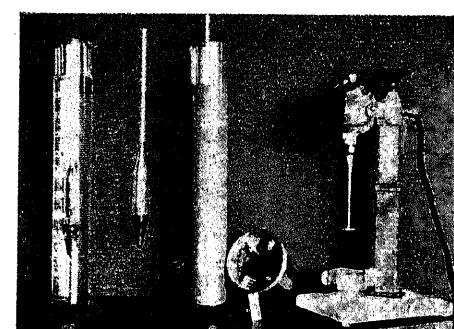
淘汰裝置 (Elutriation) には通常用ひらるゝ裝置に次の二種がある。

Schöne の淘汰分析器 (Elutriator, Schlammapparat) これは第 824 圖の如く徑 5.0cm (E) 及び 2.5cm (D) の大小二箇の一部分が圓錐形をなす圓槽中に、下部より水を流入しこの中に入れた土を流出せしめ區分する。土質標本 35~50g を取りこれを前述の如く分離法によつて處理せる後、懸濁液となつて浮游せる部分を大なる徑の圓槽 E の底部に、沈澱せる部分を小なる徑の圓槽 D 中に入れ、栓 b 及び水壓計 F によつて大圓槽 E 中の上向流速に 0.2mm/sec を與へて先づ粒徑 0.01mm 以下の微粒を流出せしめる。而して E 中の上澄液が透明になれば 0.01mm 以下の粒子は全部流出したことになる。そこで栓 b 及び水壓計 F によつて E 中の流速を 0.5mm/sec に増し、0.01~0.02mm の粒子を流出せしめる。次に E 中の流速を 2mm/sec に上げて 0.02~0.05mm の粒子を流す。そこでこれより上の流速は D の方を用ひて出すことにする。即ち次に D 器に於て流速を 7mm/sec を與へて 0.05~0.1mm の粒子を流出する。更に流速を 25mm/sec にすれば 0.10~0.20mm の粒子が流出する譯である。これ等の流出物は各々これを ビイカア C に受けて乾燥し後秤量する。E 中の残部は 0.20mm 以上の粒子であつてこれは前記の篩別法によつて區別し秤量する(第 824 圖)。

Kopecky の淘汰分析器——これは今世紀の始頃 Schöne の裝置から改良されたもので、第 825 圖の如く下部圓錐形にして筒狀部が夫々 3cm (C), 5.6cm (B), 17.8cm (A) の直徑を有する三箇の硝子圓筒から成り、最後の太い圓筒の頭に直立した細い流速計管を備へてゐる。大圓筒中の水流を



第 824 圖
Schöne の淘汰分析器



0.2mm/sec の速度に保てば、徑 0.01mm 以下の土は放水管を通して A 圓筒から排出され、徑 $0.01\sim0.05\text{mm}$ の沈泥は A 圓筒中に殘留し、B 圓筒の流速は 2.0mm/sec となつて徑 $0.05\sim0.10\text{mm}$ の細粒砂を殘留し、C 圓筒の流速は 7.0mm/sec となつて徑 0.10mm 以上の砂粒を殘留する。

尙 B を除き A と C とを直結して用ふれば 0.10mm 以上の C 中の殘留物を更に徑 $0.10\sim0.20\text{mm}$ と 0.20mm 以上との粒子に區別するやうに流速を決めることも出来る。

A. S. K. の装置—日本農學會では同學會規定の Fraction (第 23 節土粒子分類表参照) に分析するため、Kopecky の装置を直徑 11.7cm の大圓筒と直徑 3.7cm の小圓筒の 2 管とし、大圓筒の流速を 0.2mm/sec ならしめ大圓筒中に徑 $0.05\sim0.01\text{mm}$ の微粒砂、小圓筒中に $0.05\sim0.25\text{mm}$ の細粒砂を殘留せしめてゐる。尙大圓筒の筒狀部分を延長して其の部分の水流の調整度を増す事に努めてゐる(第 826 圖)。



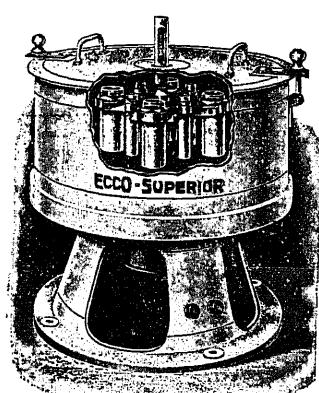
第 826 圖
A. S. K. 裝置

Hilgard の装置—以上の装置は何れも粒子が水となると互に喰着き合ふ虞があるので、Hilgard は徑 3.48cm 長さ 29cm の圓筒の底部に圓形の 4 枚

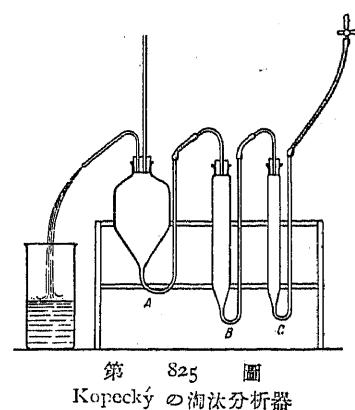
の羽根の水車 P をつけ、これを毎分 $500\sim600$ 回転せしめる装置を考案した(第 827 圖)。

圓筒内の流速は活栓 H で $0.25\sim8\text{m/sec}$ に調整され、R に投入された土質標本は P で攪拌されて圓筒體で淘汰される。

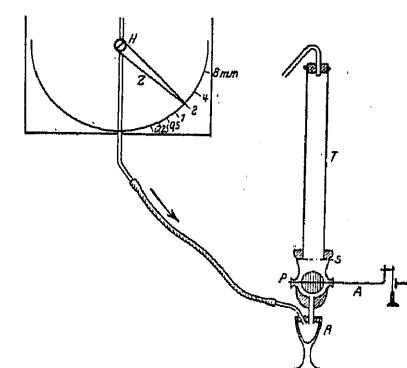
遠心分離器による促進沈澱法—上記の沈澱法は何れも粒子が小となると長時間を要する爲めに、第 828 圖の如く數個の試験管を一軸の周りに回転してその遠心力を利用して底部に沈澱を得る方法は、沈澱の促進法として米國道路局で用ひられてゐる。この場合回転の速度を變すれば一定回転時間に沈澱する粒



第 828 圖
遠心分離器



第 825 圖
Kopecky の淘汰分析器



第 827 圖
Hilgard の装置

子の大きさが決定されるわけである(第 828 圖)。

土の機械的分析方法 (鐵道省土質調査委員會現行規定)

1) 乾燥せる試料 50gr を 11cm の高さ迄清水を入れたるビカアの中に混じ、漸次煮沸し 1 時間を経た後これを冷却し水温を室温と同じにする。

2) 次に此の上澄液を底部より 3cm 遠離して他の容器に移す。この 3cm 以下に残れるものに新に 0.5% のアンモニア水を 11cm の高さ迄加へ 5 分間攪拌し 58 分間放置し後其の上澄液

を他の容器に移す。此の作業を上澄液がまつたく透明になる迄數回繰返し行ふ。

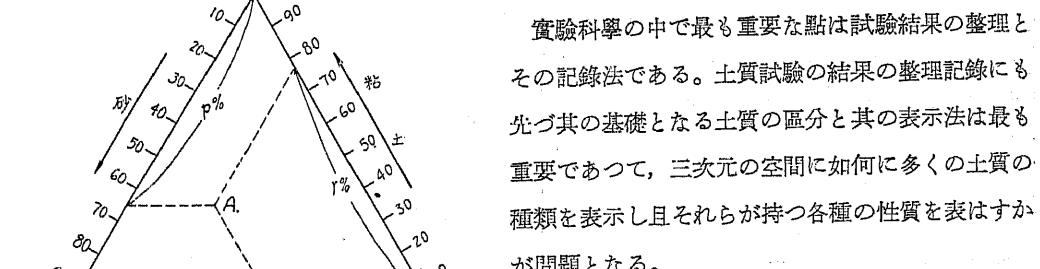
3) 最後に容器の 3cm 以下に残れるものを蒸発皿中に移し 100°C 附近の温度に保てる電氣爐中に乾燥し、24 時間毎に其の重量を秤り全く重量が低下せざるに到りて之れを乾燥器に入れて室温迄冷却す。

4) 此の冷却せるものを本實驗室備付の篩(Tyler 標準型)に依り振蕪機にて 15 分間振蕪して後、粒徑 $2.36, 1.17, 0.59, 0.30, 0.15, 0.06\text{mm}$ 及び沈泥 ($0.05\sim0.005\text{mm}$) に分類する。

5) 前記底部より 3cm 以上に浮遊せるものにして他の容器に移されたるもの総量を粘土(0.005mm 以上)とする(第 829 圖)。

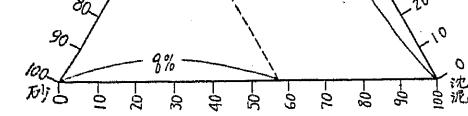
6) 次に以上分類せるもの、總てを秤量し初めの 50gr に比較して誤差 0.05 以内なる時、此の試験を合格せるものとして其の百分率を決定する。

5) 分析結果表示法



第 829 圖
58 分間静置
(土質調査委員會現行規定)

第 829 圖



第 830 圖 土の機械的分析結果を一點にて表はす法

實驗科學の中で最も重要な點は試験結果の整理とその記録法である。土質試験の結果の整理記録にも先づ其の基礎となる土質の區分とその表示法は最も重要であつて、三次元の空間に如何に多くの土質の種類を表示し且それらが持つ各種の性質を表はすかが問題となる。

a) 三角座標に表示する方法 分析結果を第 830 圖に示すが如く三つの fraction に分ち各 fraction を頂點とする三角座標 (Tri-linear co-ordinates) の上に記録すれば、一つの土は一點で表はされ

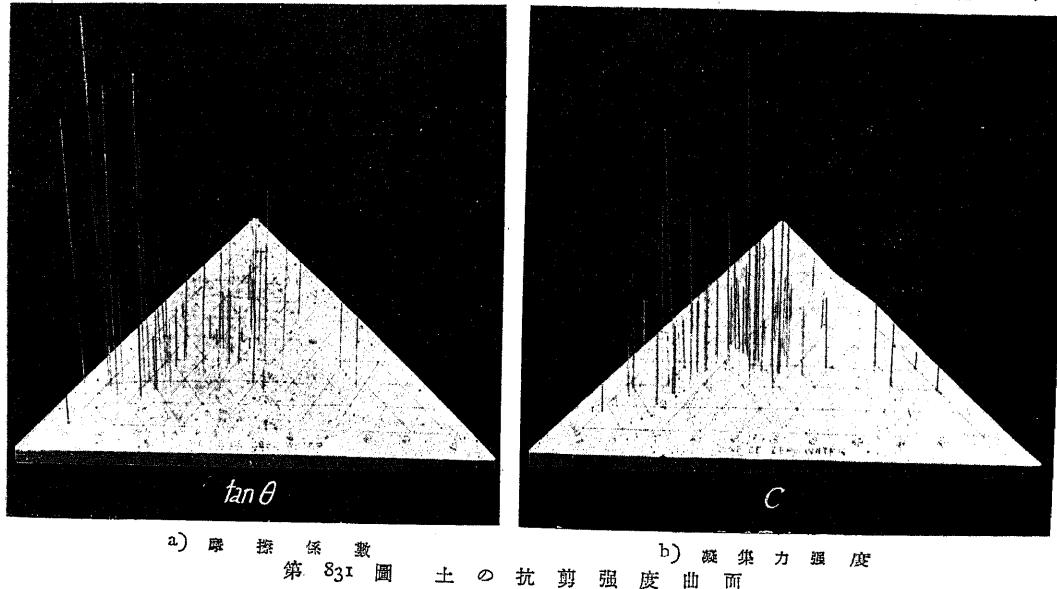
その屬する種類は點の位置に依つて一目瞭然となる。例へば次節に記するが如き土の組成を粒径によつて三大別即ち砂・沈泥・粘土の三つの fraction とし、一點 A は砂 p %, 沈泥 q %, 粘土 r % より組成されたものを表はすことになる。

尙この土の機械的分析結果を三角座標を用ひて一點で表はす方法は簡単にその土の組成を知ることが出来るから、種々の方面に實地上利用されてゐる。例へば次の如き土の抗剪强度曲面作製の場合の如きがその好適例である。

土の抗剪强度曲面——三角座標法實用例

鐵道省土質調査委員會では土の抗剪强度とその土の組成との関係を一目瞭然たらしむるため、第 831 圖 (a) 及び (b) の如く前節第 830 圖で示したやうな方法で、この際は三角座標の各頂點を各砂（但し砂+沈泥）・粘土・水（即ち砂及び沈泥は専ら土の摩擦力を支配し粘土は凝集力を支配するから、土をコンクリイトに譬ふれば前者は骨材に當り後者はセメントに當ると考へられる）とし、各種の土を表はす各點上に次節で述べるが如き剪断試験にて測定した結果によりその各の抗剪强度 ($\tan\theta$, c) を垂直の方向に取る。然る時は之等の點を以て一個の抗剪强度の曲面が形成されることになる譯である。

尤もこれらの結果は殊に土の組織を無視してゐる爲一つの曲面を形成してゐるとは云い難いが、



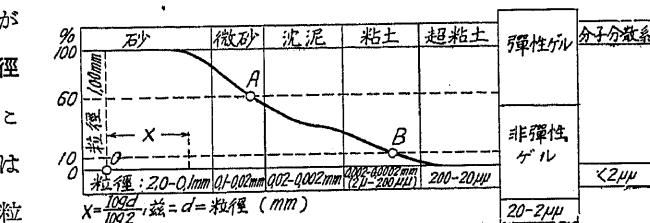
略々 c の値は砂・粘土・水の適當な混合比の處が最大で砂と水との頂點の方へ傾斜し、 $\tan\theta$ の値は砂と水との基線上に高く粘土の頂點の方へ低くなつてゐる。

此の如き數種の土の機械的分析並に剪断試験の結果を用ひて豫め抗剪强度曲面を作製して置けば、

將來極く僅かの土質標本しか採取し得ない地下深處或ひは又遠隔の地にあるものその何れたるを問はず、剪断試験に當てる供試體には足りなくとも機械的分析さへ出來れば、その結果から直ちにこの抗剪强度曲面を以つてその土の $\tan\theta$ 又は c を推測することが出来ることになる。

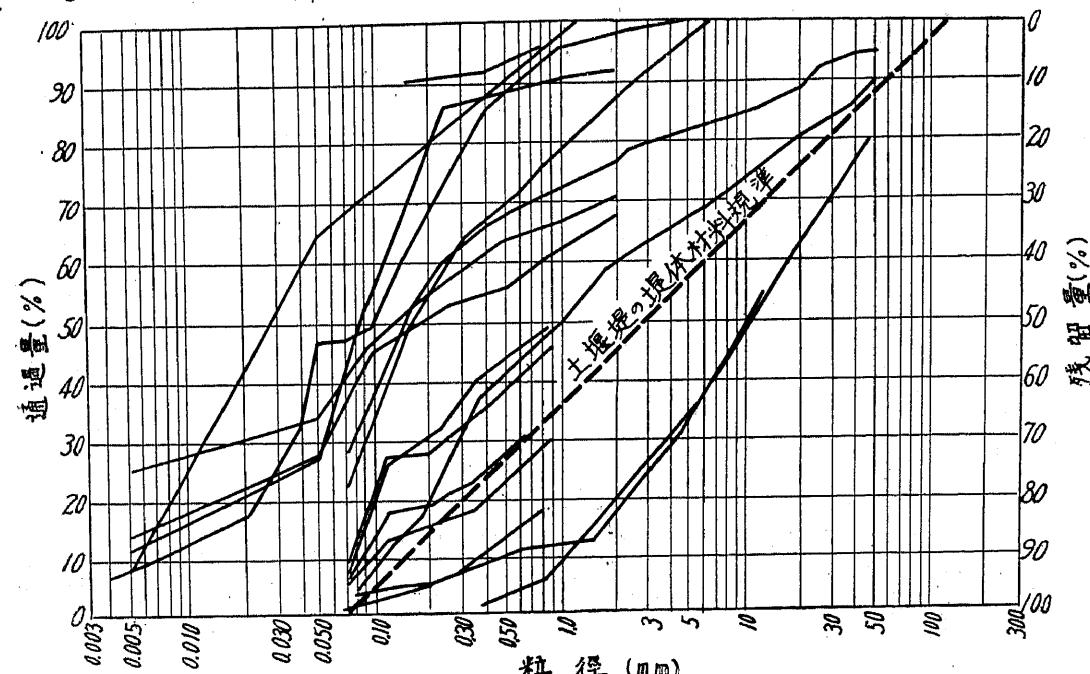
b) 加積曲線に依る表示

横軸を對数で目盛つた方眼紙の横軸に粒径、縦軸には其の粒径よりなる土粒子量を百分率で表はす(第 832 圖)。一つの土の粒径の分布を表はすこの曲線を加積曲線 (Accumulation curve) 又は均等性曲線 (Uniformity characteristic) と云ひ、この曲線の小粒径から加へた組成成分粒子の總和が 10% の點 B の粒径を Hazen の有效徑 (Effective size) ¹⁾ と稱し(土の透水度はこの 10% の小粒径組成成分が支配する)、又はその 60% の點 A の粒径と點 B の粒径との比 $\frac{A \text{粒径}}{B \text{粒径}}$ をその土の均等係數 (Uniformity coefficient,) ²⁾ と名付けてゐる、即ち之れはその土の粒径混合比を表はすことになる。Terzaghi ²⁾ はこの均等係數を不均等度 (Ungleichförmigkeitsgrad) とも名付けてゐる。



第 832 圖 土の機械的分析結果の加積曲線の一例

(Uniformity coefficient,) と名付けてゐる、即ち之れはその土の粒径混合比を表はすことになる。Terzaghi ²⁾ はこの均等係數を不均等度 (Ungleichförmigkeitsgrad) とも名付けてゐる。



第 833 圖 土堰堤の堤體材料土質の機械的分析結果の加積曲線 (北米16箇所の既成土堰堤)

¹⁾ A. Hazen, The Filtration of Public Water Supplies, New York 1895.

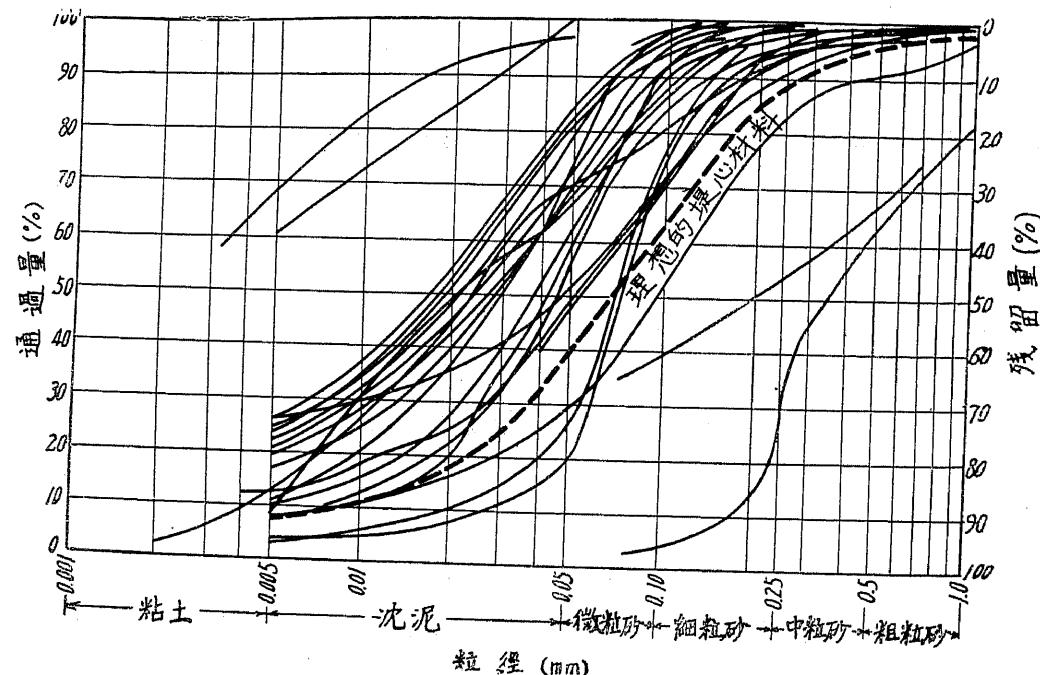
²⁾ Terzaghi, Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage, Wien 1925, S. 117.

尙この土の機械的分析結果を加積曲線にて表はせばその土の性質を一見して知ることが出来るから、種々の方面に實地上利用されてゐる。例へば次の土堰堤の材料試験の場合の如きがその好適例である。

土堰堤の材料——加積曲線法實用例

U. S. Reclamation Service (北米耕地整理事業局)の Research Engineer の E. W. Lane¹⁾ は土堰堤の材料の試験結果の検査用にこの加積曲線を利用してゐる。

第833圖は彼が北米に於ける既成土堰堤 16箇所の提體材料 (Earth dam material) に就いて機械的分析の結果を加積曲線にした圖表である。實例に従ふるとこの規準線以下 (破線の右側) の粗粒の土では堰堤が漏水したそうである。だから若しこの種の材料しか得られない場合は上流側に何等かの特殊の施工をして水の滲透速度を遅らせるやうにしなければならぬ。



第834圖 土堰堤の堤心材料の機械的分析結果の加積曲線 (北米25箇所の既成土堰堤)

又土堰堤の提心材料 (Core material) は有效径 $0.005\sim0.02\text{mm}$ を理想とし、之れより粗粒なものは勿論いけないが又微粒特に膠質分に富むものは乾燥收縮をなす變があるので、結局第834圖に示す理想的提心材料(破線)の如きものが最も適當であるとされてゐる。實例に従すれば 0.005mm 以下の土粒子が過剰に含まれたもの ($60\sim70\%$) では收縮のため龜裂を生じ決壊したそうである。

¹⁾ Justin, Earth Dam Projects. New York, 1932. pp. 89~113.

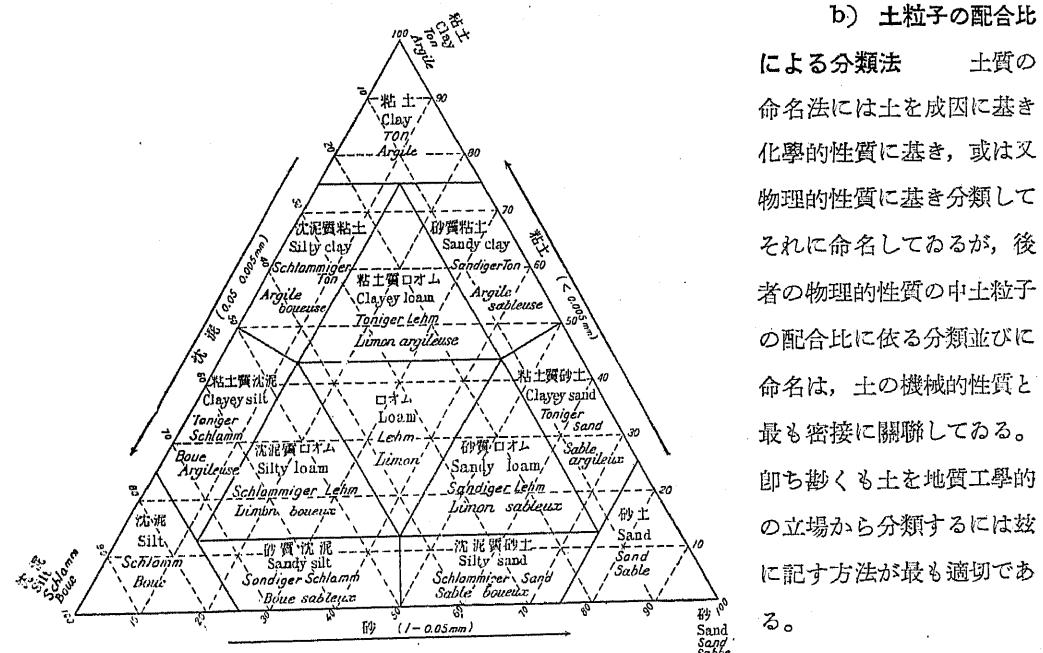
第23節 土の組成分

1) 機械的組成分

a) 土粒子の大きさによる分類 土は前節に述べたように機械的分析に依つて大小の粒子に別けられる。粗いものは粒徑 数mm の礫から細かいものは水中に懸濁してチンドル現象を呈するような膠質物 (Colloid) に到るまで、連續的に大小粒子が變化してゐる。

土はそれが含む粒子の形によつて物理的力學的性質を異にするのは勿論ではあるが、尙これらの性質の大部分は粒徑の大小によつて左右されると云つても差支へない。例へば第25節に記す土の抗剪強度に就いていへば、徑の大きい粒子はその土の摩擦角を増大し、徑 0.005mm 以下の小さな粒子はその土に凝集力を與へるものである。

今主なる協會・著者による粒徑の分類及び其の名稱を記せば第16表の如くなる。



第835圖 三角座標法による土質分類 (鐵道省土質調査委員会現行規定)

には前節第830圖で示したやうに粒子を三種の fraction に別け各 fraction を頂點とする三角座標にプロットする方法が最も簡単である。例へばこの圖中の一點 A は砂 p %, 沈泥 q % 及び粘土 r % なることを示す。從つて凡ゆる土は三角座標上的一點で表はされるからこの面積内を數個の

さて凡ゆる徑の粒子を含む土を簡単に記載分類する

面積に分割すればその面積内に含まれた各點は稍々類似の土質類を表はすことになる、従つてこの分割面を各個に命名する時は夫等類似土質類の代表名といふことになる。第835圖は斯くして命名した鐵道省土質調査委員會現行規定の土質分類表である。

2) 土の組織及び構造

土が力學的に取扱はれる爲にはその物理的性質の要因の一として組織及び構造を究究する必要がある。金屬學に於ては試料の一面を磨いて反射顯微鏡を用ひて觀察し、岩石學に於ては兩面を磨いて薄片とし透過光線を用ひて之を見るのである。併し乍ら土の場合には一般に何れの方法も用ひ得ないが特殊の方法を用ふれば薄片として顯微鏡下に透過光線を用ひて見る事が出来る。

a) 薄片製作法 粗鬆な岩石を薄片 (*Praeparat*) とする際には之をバルサムで煮る方法は十分效果が挙らない事がある。殊に土の如き組織の粗大弛緩せるもの或は濕潤な軟質粘土の如き細粒均質なものには、到底この方法のみにては實用に供する事は出來ない。そこで鐵道省土質調査委員會では前者の如き土に對しては Ross 氏の提倡せるベエクライト・ヴィニスを用ひる方法をとり、後者に對してはミクロトオムを使用する事とした。¹⁾

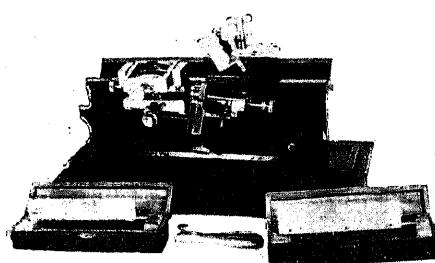
イ) ベエクライト・ヴィニスを用ひる方法 ベエクライト・ヴィニス (Bakelite vanish) は黃色乃至黃褐色の Phenol resin であるが、之に試料を浸して乾燥したものは充分研磨 (Grinding) に耐え得る。但し市販のままでは粘性が強くて試料内への滲透が悪い時はアルコオル及びエエテルを加へるか、又はベエクライト用稀釋液 (Thinner) を加へて適當に稀釋して試料中への滲透を良くする、若しも標本をベエクライト・ヴィニスに浸した時液の浸入と共に膨潤して崩壊する様な場合は、遂に試料にヴィニスを注ぎかけて固結せしめるのも有效な手段である。試料は豫め適當な大きさにして乾燥させてから浸液する。約30~50時間浸液の後取り出して電氣乾燥器に入れ、急熱のため氣泡の生ぜぬ様に 70~90°C の溫度で乾燥せしめる。乾燥固化後は通常の方法で研磨機 (Grinding machine) を用ひて薄片とし、バルサムを用ひてスライド硝子に貼付けるのである。この方法の利點は單に薄片を得ると云ふ丈けでなく天然の堆積狀態を顯微鏡下にて觀察し得る點である。ベエクライトは屈折率の高い黃色の物質として見える。その屈折率は Ross 氏によれば米國製のものに就て $n_D = 1.634$ であるが、三共製のものは測定の結果 $n_D = 1.662$ であつた。この相違はその乾燥の程度の差に依るもの如く International Critical Table (1927) には $n_D^{20} = 1.62 - 1.70$ とあるに見るもその屈折率は單一な値ではない。

ロ) ミクロトオムを用ひる方法 一般に濕潤せる軟質粘土の如きものは加熱に依つて一度水分

1) C. S. Ross: Method of Preparing Thin Sections of Friable Rocks. Amer. Jour. Sci., Ser. 5, Vol. 7, 1924.

第 18 表 世界各國土質粒徑分類法の比較

學會又は著者	粒 徑 (mm)																
	20	10	5	3	2	1	0.5	0.25	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	0.0015	0.001
鐵道省土質調査委員會 Geotechnical Committee Government Railway of Japan	礫 Gravel Kies Gravier	極粗粒砂 Very coarse sand Schr grob Sand Sable très gros	粗粒砂 Coarse sand Grobsand Sable gros	中粒砂 Medium sand Mittelsand Sable mediore	微粒砂 Fine sand Feinsand Sable très fin	極微粒砂 Very fine sand Sehr feiner Sand Sable très fin	沈泥 Silt Schlamm Boe	粘土 Clay Ton Argile	膠質物 Colloid Kolloid Colloïde								
農 學 會	礫及び角礫 Gravel and Debris		細 土 Fine soil									粘 土 Clay					
International	Kies		砂 Sand			細 砂 Fine sand			微 砂 Silt			粘 土 Clay					
Atterbeg	Kies		Grobsand			Fein sand			Schluff			Rohton und Kolloid					
Die Preussische Geologi- sche Landesanstalt	Grand		Sand						Staub		Feinste Teile						
Bureau of Chem. & Soil U. S. A.		Fine gravel	Coarse sand	Sand	Fine sand	Very fine sand		Silt			Clay						
Der Verband der Land- wirtschaftlichen Ver- suchsstationen im Deutsche Reich	Stein (Grus, Kies)	Grand (Grus)	Sehr grober Sand	Grober Sand	Mitterkörniger Sand	Feiner Sand		Abschließbare Teile									
Williams	Kies		Sand			Staub				Mitteleller- staub		Feinerstaub		Schlamm			
Boswell and Holmes	Peb- ble	Gravel	Very coarse sand	Coarse sand	Medium sand	Fine sand	Coarse silt	Silt		Clay							
Ries			Gravel	Coarse sand	Medium sand	Fine sand	Very fine sand	Silt	Fine silt		Clay						



第 836 圖
土質薄片(Preparation) 裁切用
ミクロトオム

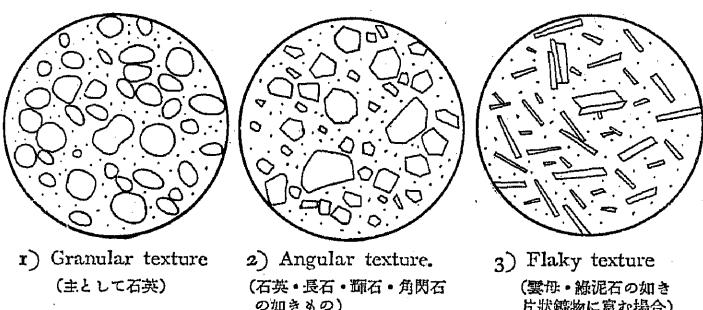
を失はしめるとその組織を變化する虞れがあり、且つ乾燥固化して磨耗しても wet grinding では再び水分を吸収して崩れてしまふ。従つてこれらのものは水分を含んだままミクロトオム (Mikrotom) で截切するのが最も適當である。水分が餘りに多い場合は軟弱に過ぎ少ない場合は凝集力を失ひ何れも好結果は得られない。斯るものは自然的に蒸發せしめ又は僅かに潤ほして適度の湿度を保たしむるを要す。尙凍結法は土の場合にはその組織を破壊するものと思はれる。

鐵道省土質調査委員會で用ひてゐるミクロトオムは第 836 圖に示す獨逸エンゲ製トオマ機式ミクロトオム (Shrimtmikrotom nach Thoma) で試料を固定し刃を動かして截切するもので、便利な事には刃はその運動方向に對して任意の斜めの方向に固定し得られ従つて試料を直角に無理に押し切るやうな事もなく、前記含水度を適量にし、刃の截切に對する方向を適度にすれば均質な粘土ならば厚さ 0.02mm~0.01mm 位迄の薄片を作る事を得る。この含水量及び刃の方向は試料に依つて各々異なるので一概には云へない。斯くして得られた薄片はスライドグラスに載せ更にカバアグラスを被せて一端よりバルサムを浸み込ませて固定せしめる。

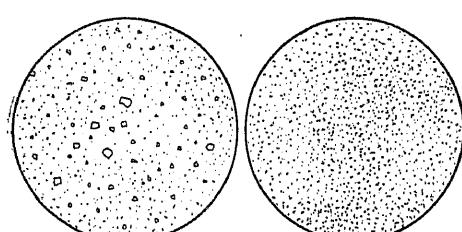
b) 組織及び構造の分類

土の物理的性質を支配するものは含水量・間隙量・粒径及び粒形等がその主なるものである。

之れ等に就いては目下可成り研究され充分實用化してゐるが、他に粗粒子の種類・形狀及



第 837 圖 (A)
土の組織の単位 (岩石の斑晶に相當するもの)



4) Fine-grained texture. 5) Micro-grained texture.
第 837 圖 (B)

土の組織の単位 (岩石の石基に相當するもの)

び礦物・岩石・有機物質等の含有率又は膠質の多少等にも大いに影響する事は當然考へられる事で、之等に就いては今後の研究に俟たねばならない。

實際上土の薄片を作つて之を顯微鏡下に見た場合には、その粒子の排列及び粒形等は多種多様であつて判然と區別をする事は困難であるが、大體に於て次の如く分類する事が出來やう。

イ) 組織に依る分類

土の粒形又は粒子の配合比に依る組織 (Texture) の分類で先づ第837圖に示す如く恰かも岩石に於ける斑晶に相當するもの (A) と石基に相當するもの (B) との兩者の単位が考へられる。即ち

斑晶に相當するもの

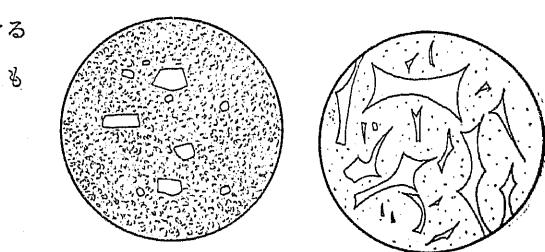
- 1) 粒状 (Granular) 組織
- 2) 角状 (Angular) 組織
- 3) 片狀 (Flaky) 組織

石基に相當するもの

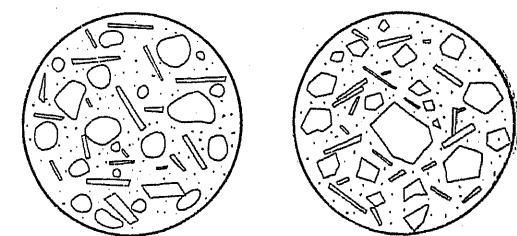
- 4) 細粒質 (Fine-grained) 組織
- 5) 微粒質 (Micro-grained) 組織

前者 (A) は主に沈泥以上の場合に見られるもので時には更に微細なもののみより成る場合があり、それらは粒状・角状・片狀等を區別するよりも寧ろ單なる微粒の集合を見る方が至當であるから後者 (B) の如き地肌と考へた。

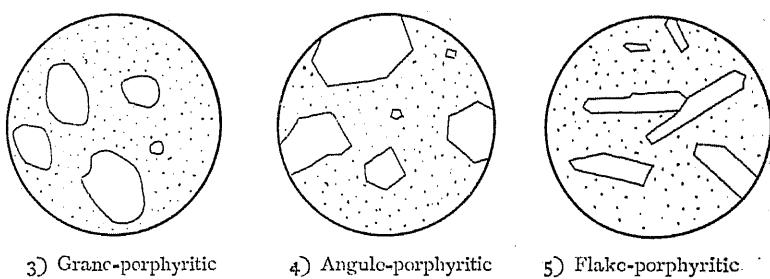
以上は標式的な例を示したものであるが實際には寫真にも見られる如く前記各種相織の組合せとも見るべき組織を有するものが多く、従つて前記 1, 2, 3, 及び 4, 5 等を相合せて最も probable な組織を考へれば第838圖に示す如く岩石に於ける完晶質に相當するもの (A) と斑晶質に相當するもの (B) との兩者が考へられる。即ち



第 838 圖



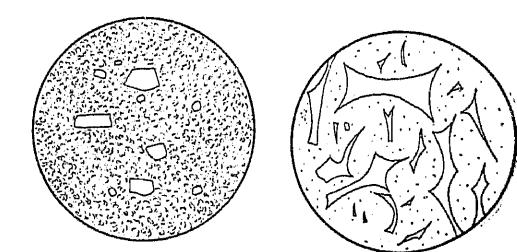
1) Grano-flaky texture. 2) Angulo-flaky texture,
第 838 圖 (A)
各單位(A)の組合せによる土の組織(岩石の完晶質に相當するもの)



3) Grano-porphyritic texture 4) Angulo-porphyritic texture 5) Flako-porphyritic texture
第 838 圖 (B)

各單位(A)及び(B)の組合せによる土の組織(岩石の斑晶質に相當するもの)

第 839 圖



(A) Pelitic texture. (B) Skeleton texture.

(火山灰起源の未熟土に限られる)

第 839 圖

完晶質に相當するもの

- 1) 粒片狀 (Grano-flaky) 組織

- 2) 角片狀 (Angulo-flaky) 組織

斑晶質に相當するもの

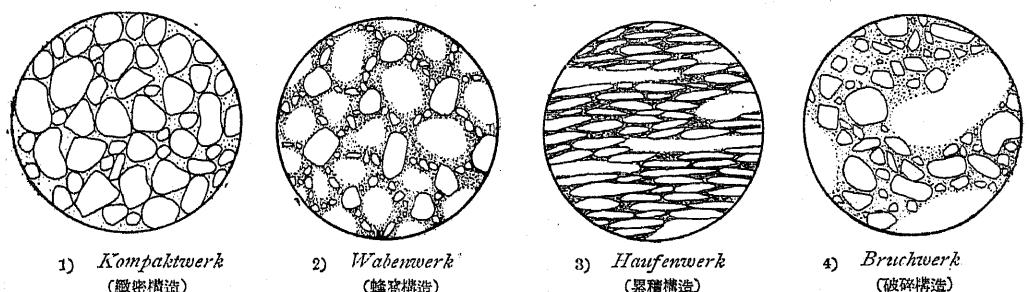
- 3) 粒斑質 (Grano-porphyritic) 組織

- 4) 角斑質 (Angulo-porphyritic) 組織

- 5) 片斑質 (Flako-porphyritic) 組織

尚第839圖 (A) の如き土普狀を呈するものがある (第839圖 (A))。又第839圖 (B) に示す如き特殊の形狀を有つ粒形より成れるものは角狀組織の特別な場合とも見る事が出来る (第839圖 (B))。

四) 構造に依る分類



1) Kompaktwerk
(緻密構造) 2) Wabenwerk
(蜂窩構造) 3) Haufenwerk
(累積構造) 4) Bruchwerk
(破碎構造)
第 840 圖

土の構造の分類

粒と粒との配列型の状態から見た構造 (Structure) の分類で、その間隙比にも關係してゐる事は勿論云はば間隙組織 (Porenzige) を研究せんとするものである。

先づ大體次の 4種に分けられる。

- 1) 緹密構造 (Kompaktwerk)

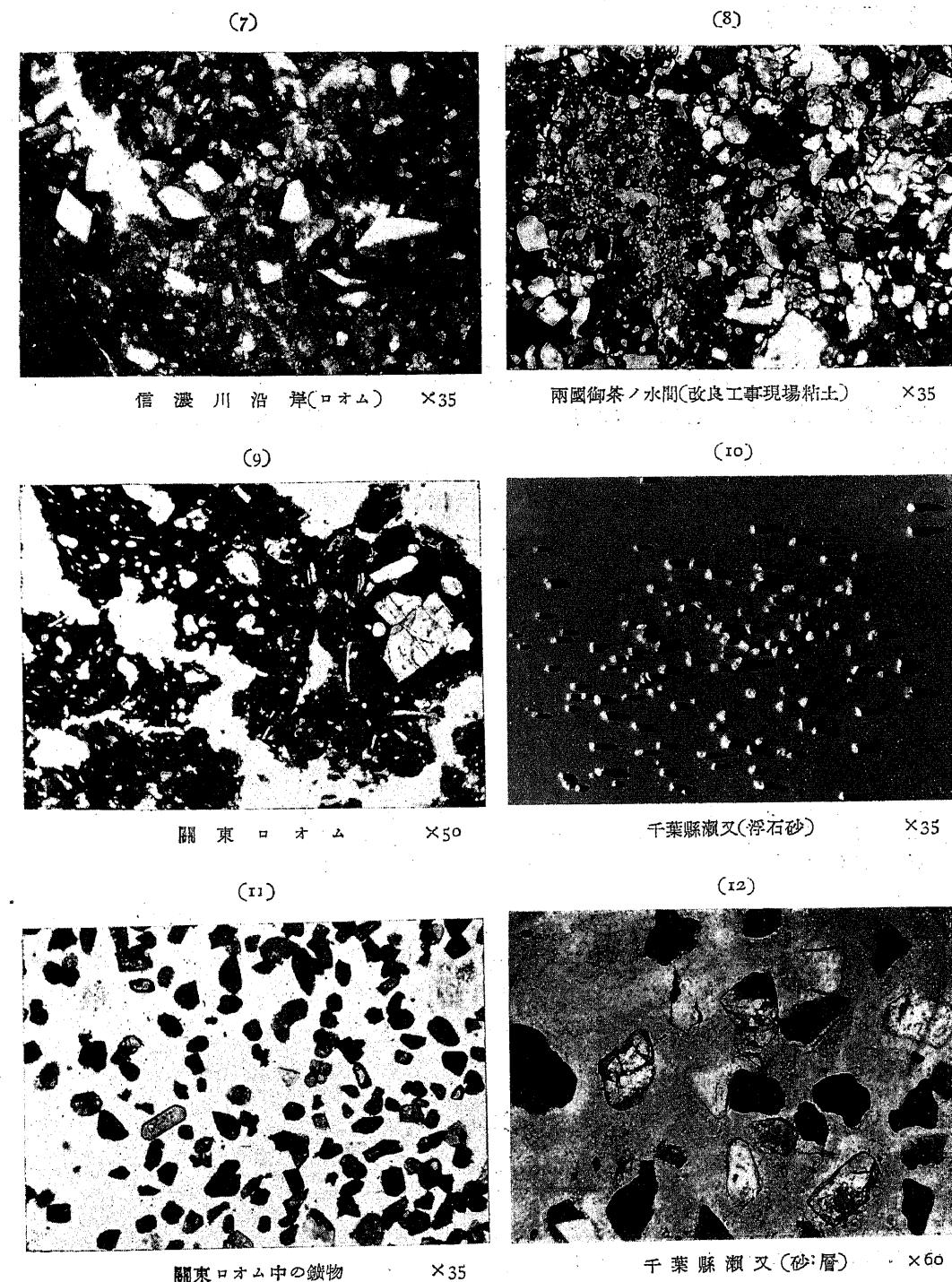
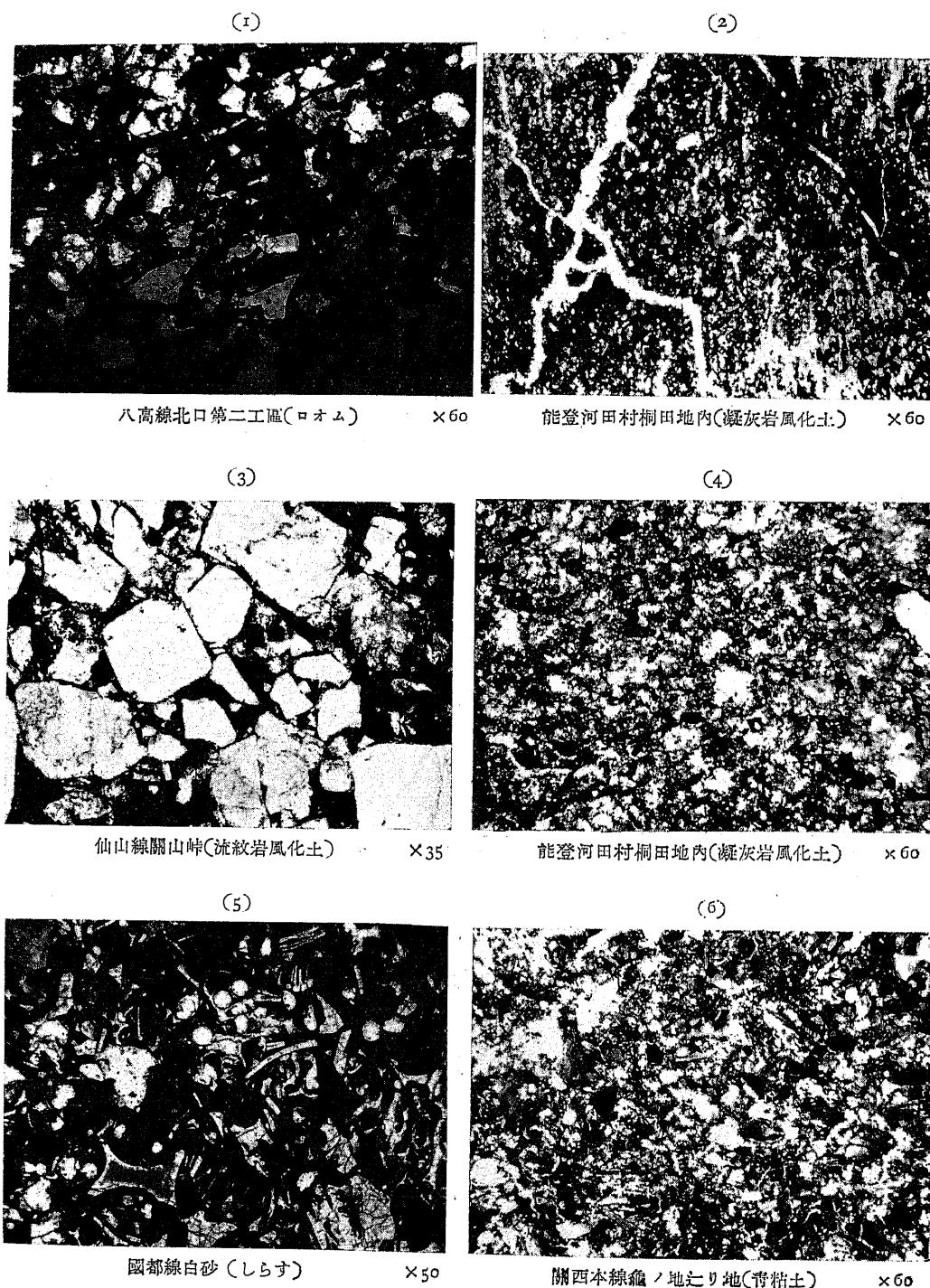
- 2) 蜂窩構造 (Wabenwerk)

- 3) 累積構造 (Haufenwerk)

- 4) 破碎構造 (Bruchwerk)

1) 及び 3) の構造は堆積土に多く 2) 及び 4) は風化土に多い、3) も風化土の特殊な場合に出る。之等の構造と土の物理的性質 (透水度・緊硬度) 及び機械的性質 (抗剪强度・彈性度) とが密接な關係のあることは實驗的に判明して來てはゐるが、金屬組織學 (Metallographie) と材料強弱學 (Festigkeitslehre) との間の如くその相關關係は未だ成立してゐない。

第 841 圖 土の薄片の顯微鏡寫眞 (透過光線 十字ニコルの下に於ける)



3) 組成礦物

土を組成する礦物の研究に用ひられる方法には次の如きものがある。

比重其他の物理性による礦物の分離法

礦物の光學的決定法

結晶の微粉末のX線的研究法

顯微鏡化學的研究法

以下に述べる所は前二者に就てであるが、これらの研究に際しては豫め機械的分析に依つて粒徑を整へ、且つ充分單粒化せしめた試料を使用するのを便利とする。

a) 組成礦物の鑑定法 物理的性質を利用して土中に含まれる礦物を分離する方法の中最も重要なものは比重の差を利用する方法であるが、この他磁性を利用する方法、Panning等も極めて普通に用ひられる。

(イ) 比重に依る分離法 機械的分析を行つた試料は重液を用ひ比重の差に依つて分離し、鑑定の要に供する事が出来る。重液の種類・製法及び主要礦物の比重は次の第19表如し。

第19表 純物の比重

礦物	比重(Sp. Gr.)	誤差	礦物	比重(Sp. Gr.)	誤差
硫黄 (Sulphur)	2.07	0.00	青灰長石 (Labradorite)	2.70	0.05
方沸石 (Analcite)	2.16	0.09	方解石 (Calcite)	2.72	0.01
蛋白石 (Opal)	2.21	0.05	灰長石 (Anorthite)	2.76	0.05
石膏 (Gypsum)	2.32	0.11	葡萄石 (Prehnite)	2.87	0.11
方曹達石 (Sodalite)	2.38	0.06	霰石 (Aragonite)	2.94	0.07
白榴石 (Leucite)	2.47	0.09	陽起石 (Actinolite)	3.02	0.08
正長石 (Orthoclase)	2.55	0.08	紅柱石 (Andalusite)	3.14	0.12
石英 (Quartz)	2.15	0.10	磷灰石 (Apatite)	3.16	0.02

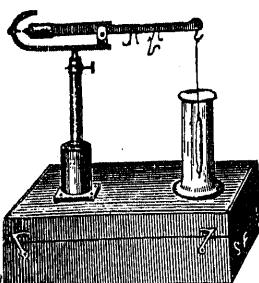
(A. Holmesに據る)

i) 重液 重液 (Heavy liquid) とは礦物を比重に依つて分離するに用ひられる液體を總稱するのであつて、その重な條件は最大比重の相當に大きい事、稀釋して比重を任意に變化し得る事等で、從來多數の液が提供されてゐるが主なるものとしてはツウレエ液・プロモフォルムがある。

ツウレエ液 (Toulet's solution) は最大比重 3.196 を有する水銀沃度加里溶液である。この液の製法は蒸溜水・沃化水銀 (HgI_2) 及び沃度加里 (KI) を 2:7:6 の比 (重量比) に混じ、重湯煎にかけて表面に皮膜の晶出する迄蒸發せしめる。かくすれば冷却後の比重は 3.196 に達する。冷却の際沃化加里水銀の含水針狀結晶が出るが必要な液の部分だけ取れば良い。又液全體を必要とする時には

ⁱ⁾ A. Holmes: Petrographic Methodes and Calculation, 1930, p. 42.

數滴の蒸溜水を加へれば結晶は溶解する。ツウレエ液は水を加へれば 3.196 から 1.000 迄の任意の比重となし得るし、再び水を蒸發せしめれば漸次元の比重に復歸する。この液は長時間使用すると沃度が分離して赤褐色となるから、この時は蒸發中攪拌し乍ら少量の純水銀を加へれば元の状態に戻る。本液は金屬・有機物を腐蝕するから使用に際して充分の注意を要し、金屬製品・ゴム管の類は使用を避け又皮膚に觸れぬ様に注意し、この液を用ひて分離した礦物は先づ沃度加里を用ひ次に熱水を以て洗ふを要する。



第842圖
ウェストファル比重秤

ii) 重液の比重測定法 重液の比重を測定するにはウェストファル比重秤 (Westphal balance) を用ひる。本秤の使用法は試液を小シリンダに入れて、秤の右側先端よりこの中に寒暖計を兼ねた鉢を吊し、ライダアを用ひて鉢の浮力と釣合はしめるのである。本秤は操作の敏速な點で喜ばれ小數點以下 3 衡で²の精度がある。誤差の主な原因は鉢に附着せる氣泡であるから測定に際してはこの點に注意を要する。尙大體の比重は次の標準礦物を液中に懸濁せしめて知る事も出来る(第242圖)。

iii) 造土礦物の比重 土質中に現はれ得る礦物即ち造土礦物 (Soil-forming minerals) の數は極めて多數であるが、ここに比較的重要なもののみ 30 個を選び比重の順序に配列する(第20表)。尙

第20表 主要造土礦物の比重

1)	石炭 (Coal)	2	16)	角閃石 (Hornblende)	3.1
2)	硫黄 (Sulphur)	2.07	17)	磷灰石 (Abatite)	3.16
3)	沸石 (Zeolite)	2.0-2.4	18)	電氣石 (Tourmaline)	3.2
4)	微斜長石 (Microcline)	2.55	19)	輝石 (Pyroxene)	3.3
5)	正長石 (Orthoclase)	2.57	20)	綠簾石 (Eaidose)	3.4
6)	カオリン (Kaoline)	2.6	21)	橄欖石 (Olivine)	3.4
7)	斜長石 (Plagioclase)	2.6-2.7	22)	褐簾石 (Allanite)	3.5
8)	玉髓 (Chalcedony)	2.62	23)	榍石 (Sphene)	3.5
9)	石英 (Quartz)	2.65	24)	柘榴石 (Garnet)	3.4-4.0
10)	綠泥石 (Chlorite)	2.7	25)	クロム鐵礦 (Chromite)	4.3
11)	蛇紋石 (Serpentine)	2.7	26)	ジルコン (Zircon)	4.7
12)	方解石 (Calcite)	2.72	27)	チタニ鐵礦 (Ilmenite)	4.8
13)	白雲石 (Dolomite)	2.85	28)	黃鐵礦 (Pyrite)	5.0
14)	白雲母 (Muscovite)	2.9	29)	赤鐵礦 (Haematite)	5.1
15)	黑雲母 (Biotite)	3.1	30)	磁鐵礦 (Magnetite)	5.2

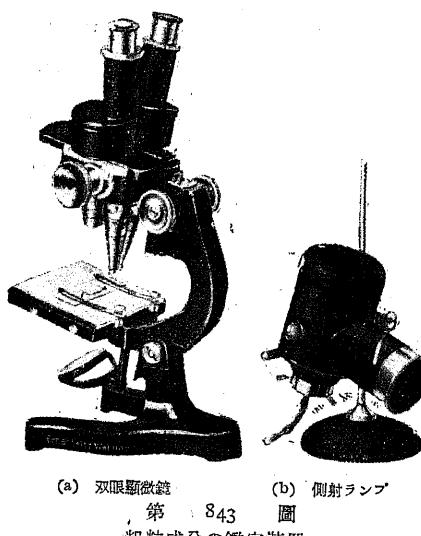
土粒子の平均比重は大體 2.5 乃至 2.7 である。

(ロ) 光學的識別法 組成礦物の検定には從來岩石學で用ひられてゐる光學的方法を用ひる事が絶對的に必要である。何となれば礦物が異なるに従つてその光學的特性も變化し、同一屬の礦物でもその化學的成分の僅かな相異で光學的性質の微妙な變動を生じ、光學的性質の變動は第一部第四章第 11 節 結晶光學の諸理論に基いて極めて正確に測定し得るからである。

原試料より適當な方法で得た薄片又は機械的分析を行つたものに就て粒徑に應じ次の如く光學的検定を行ふ。

i) 粗大な成分(礫) ここに云ふ礫とは大きさ 2mm 以上のものを指し、細土からは取除いて考へるべき部分である。併し乍ら礫はその土質が風化土なるか堆積土であるかを考察する上に最も重要な部分であるから、その岩種の如何を定め成因に就て地質學的考察を施す必要がある。依つて必要に応じては薄片を作成して検鏡する。

ii) 粗粒組成成分(砂) 砂分(直徑 1~0.2mm)は各々單一な礦物よりなる場合もあり又岩石の小細片である場合もある。観察には双眼顯微鏡(Bio-klar-mikroskop) (第 843 圖(a))を用ひる。試料を黒色ステイジ上に載せ側射ランプ(Seitenbeleuchtungslampe) (第 843 圖(b))で照して見れば礦物の粒形・色彩及び透明度を良く観察し得る。例へば石英は全く透明で不規則な面を以て圍まれてゐるに反し、長石は常に乳濁色を呈して透明の度低く粒形も亦著しく不規則でない事を知る。



(a) 双眼顯微鏡
第 843 圖
粗粒成分の鑑定装置

iii) 細粒組成成分(微粒砂) Tyler 標準篩の 100

目篩を通り 200 目篩に残つた位の細粒礦物(直徑 ca. 0.147mm~0.074mm)は顯微鏡的観察に最も適してゐる。從つて機械的分析を行つた試料は先づこの大きさのものの薄片を作り組成礦物の検鏡を行ふ。通常一枚の薄片内に見られる礦物はその土質の全礦物を代表すると考へる事が出来る。但し薄片内の礦物は顯微鏡下に於て必ずしも全部決定し得るものではない。細粒粉の薄片を得るには、スライドグラス上に試料を撒きカナダバルサムを滴した上にカバアグラスを載せて、溫度 90°C 位の電気乾燥器に入れて放置して置けば手數を要せずして薄片となし得る。

礦物粒は屢々表面に酸化鐵等の皮膜を被り判定を困難ならしめる事があるから、50% 位の濃度の硫酸又は鹽酸中で煮沸すれば或る程度迄之を取り除き得る。

iv) 微粒組成成分(沈泥粘土) 所謂粘土分を構成する最微粒礦物組成成分(0.005mm 以下のものは顯微鏡下に於て検定する事は非常に困難であつて第一部第四章第 11 節の屈折率測定法が唯一の光學的方法であるが、粉末状結晶による X-線の迴析現象を應用する Debye-Scherrer の方法(或ひは Hull の方法)は結晶内部の原子配列の理論に基くものである爲最も重要な方法と云ひ得るであらうし、色素を吸着せしめる膠質化學の方法は土中膠質の種類を決定するのに現在用ひられてゐる。

b) 造土礦物 土の組成礦物は第 21 表に示した如く岩石の碎屑・粉末からなる新鮮礦物と、風化生成物たる二次的礦物及び無機膠質類からなる。細粒砂・沈泥分は大部分新鮮礦物で沈泥・粘土分は後の二者を多量に含むと考へられる。粘土物質は大部分カオリンからなつてゐるといふ考へが一般に浸み込んでゐるが、この考へはあまり確かな根據を有してゐない。即ちこの様な部分を分離して分析して見るとカオリンの成分とは著しい距りがあるのであつて、カオリン礦物以外に微細な諸礦物粉末及び膠質珪酸($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)・膠質鈣土($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)及び膠質酸化鐵($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)を包含する諸無機膠質類が複雑な吸着複合體(Absorbierende Komplex)をなしてゐると考へられる。今試みに上記の如き鑑定方法によつて観察した結果の一例を擧げると第 21 表の如きものから成つてゐる。

第 21 表 省線御茶ノ水驛構内切取土質 (M は Tyler 篩の目)

粒 徑	含 有 矿 物 名
粘 土	カオリン、石英、斜長石、正長石、綠泥石。
沈 泥	石英、斜長石、正長石、綠泥石、黑雲母、木片。
200 M.	石英、黑雲母、磁鐵礦、斜長石、木片。
100 M.	石英、斜長石、黑雲母、角閃石、綠泥石、輝石。
48 M.	石英、斜長石、黑雲母、角閃石、木片、貝片。
28 M.	石英、黑雲母、正長石、白雲母、木片、貝片。
14 M.	木片、貝片。
8 M.	石英岩、チャート、木片、貝片。
薄 片	石英岩、浮石、安山岩、紫蘇輝石、斜長石、正長石、黑雲母、角閃石、磁鐵礦。

4) 土中膠質

a) 土中膠質の定義 すべて物質は細分して非常な微粒子にすると粒子の全表面積が激増する爲、界面のエネルギーを増加し大きな粒子乃至は塊の時と著しく異つた物理化學的性質を呈して來るものである。例へば粘土の粒子は直徑 0.002mm 邊りを境としてそれより小さくなると性

1) Debye and Scherrer, Physik. Z. 17, 227, 1916; 18, 291, 1917.

質が特殊なものになつて来る。この状態を膠質状態 (Colloidal state) と呼ぶのである。土中膠質 (Soil colloid) とは土壤の物理的成分中最も微細な部分の總稱で、通常粘土と呼ばれる部分には多量に含まれてゐる。

土中粒子の直徑幾何以下のものを土中膠質と呼ぶかは可成り難かしい問題で、元來漸移的な大きさのものに境界を以て膠質と非膠質とに區分する事は可成り無理である爲人によつて一致してゐない。従つて境界を直徑 0.002mm 前後に置く人が多いが、ある人は 0.0015mm を以て又他の人は 0.001mm を以て境としてゐる。大體土中に水を加へて攪拌し 1~2 日放置した時沈澱しないで乳濁の状態に在る部分が膠質物と思へば間違ひない。この位の粒子は肉眼では勿論顯微鏡でも見る事は出来ないので、限外顯微鏡 (Ultra-microscope) に依つて始めて認め得るものである。

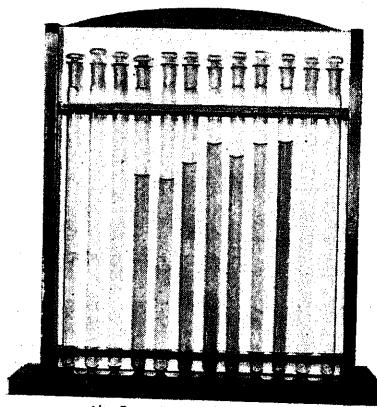
土中膠質には無機性のものと有機性のものとあり、前者は礦物質から導來されたもので後者は有機物の分解した腐植の一部分をなすものである。

b) 土中膠質の定量法 土中膠質を直接定量するには土壤から膠質分を完全に分離して秤量すればよいがこれは實行不能である。即ち土中懸濁液をつくり粗大粒子を沈降せしめる如き方法は膠質物を集める方法にはなるが定量には役立たない。故に土中の物理化學的性質を利用して膠質量を定量せんとする方法が企てられてゐる。これは吸着を利用する方法と潤熱を利用する方法である。

(イ) 吸着法 吸着 (Adsorption) とは粒子の表面で行はれる物理化學的現象で、膠質或ひは之に近い微細な粒子を瓦斯體或ひは或る溶液中に入れる場合に、瓦斯又は溶質が粒子の表面に吸引せられてその部分の濃度が大となる現象である。一定量の粘土に就て云へば粒子が細かい程、換言すれば膠質物の數が多い程吸着量は大きい筈である。何となれば同一量の試料も細かくなる程その全表面は激増し吸着量は表面積に比例する爲である。

吸着法には色素を用ひるものと水蒸氣を吸着させる方法及びアムモニアを吸着せしめる方法との三種類ある。

i) 色素法 (Dye adsorption method) 色素には鹽基性色素と酸性色素との二種がある。一般にメチレン青 (Methylenblau), マラカイト綠 (Malachite green) 等の如き鹽基性色素を使用する。北米土性局法 (Bureau of Soil, U. S. A.) は先づ試料 1gr に水を加へて 18 時間振蕩器にかけ、次に一定量の蔴酸曹達を加へて遊離石灰を沈澱せしめ、次に色素マラカイト綠の標準濃度液の一定量を加へて暫く振蕩し更に遠心器にかけて上澄液をとり、元の標準液と比色



第 844 圖 比 色 計

法により濃度を比較する(第 843 圖)。この目的に用ひられるのが比色計である。

ii) 水蒸氣法 (Vapour adsorption method) この方法は Mitscherlich の考案に基づくもので 10% の硫酸液の水蒸氣張力の下に於て土粒子の表面に吸着せられた水分量を測定するものである。

iii) アムモニア法 (Ammonia adsorption method) 北米土性局の方法に於ては 3~5gr の試料を U 字管に入れ、煮沸せる湯の中に入れて溫度を 100°C に保ち管中を排氣して真空とする。次に此の管を取り出して氷中に入れ、之に乾燥アムモニア瓦斯を導入して飽和させる。次に管を再び煮沸せる湯の中に入れて排氣し、出て来たアムモニア瓦斯を定量するのである。

(ロ) 潤熱法 乾燥した土に水蒸氣を吸はせる時は熱を發生する。即ち潤熱 (Heat of wetting) である。潤熱の發生量も亦土粒子の全面積に比例するものである。故に其の量から膠質量を推定し得る。

色素法でも潤熱法でも以上の方法丈では膠質量の相對的多少は判るが絶對的含有量は判らない。故に更に其の土中から膠質物丈を若干量分離し、それに就て前と同様の測定を行ひ然る後次の如き計算を行つて膠質量の百分率を決定する。

$$\frac{\text{土中 } 1\text{gr の吸着量又は潤熱}}{\text{土中膠質 } 1\text{gr の吸着量又は潤熱}} \times 100 = \text{膠質物含量\%}$$

Anderson が上記諸方法を用ひ同一土壤中の膠質量を定量した結果は第 22 表の如く略同一の値を得た。

第 22 表

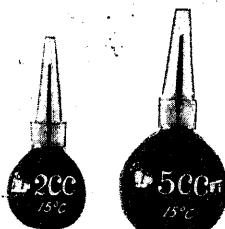
土 壤	膠質量 (%)		
	吸着法		
	潤熱法	色素法	水蒸氣法
1	25.6	25.4	31.5
2	25.0	23.7	20.5
3	15.3	11.0	8.5
4	22.5	13.2	18.9
5	54.2	54.8	50.1
6	30.3	26.3	27.3
7	58.8	56.6	61.2
8	29.5	29.4	29.8

c) 粘土懸濁液 (泥漿) の性質 水中に粘土を分散せしめた懸濁液 (Suspension) を泥漿 (Mud paste) と呼ぶのである。かゝる状態に於ては粘土粒子は一般に負に帶電してゐるものである。故に U 字管に粘土膠質の懸濁液を入れて兩脚に白金の電極を入れて直流の電流を通じると粒子は陽極へ泳動するものである。

又懸濁液に微量の酸を加へると粘土粒子は H イオンを吸着中和して凝固 (Coagulate) する爲液は速かに清澄となる。反之、微量のアルカリ溶液を加へると懸濁は益々安定となつて容易に清澄しない。蓋し粘土を構成する土壤膠質は帶電してブラウン運動に依つて分散状態を持続して居るが中和して帶電性を失ふか、或ひはある限界點迄電位が下降すると凝固して沈澱するものである。この様なものの粘度 (Viscosity) を Ostwald の粘度計を用ひて測定して見ると凝固したものは急に粘度が増加して來る。

第 24 節 土の物理的性質

1) 比重



第 845 圖 ピクノメタア

土の重量は土粒子の含水量の外に土粒子の比重に依つて定まる。

土粒子の比重を測定するには種々の方法があるが土粒子に對してはピクノメタア法 (Pycnometer method) に依り、固體に依て排除された液體の量を測定する方法を最も適當とする(第 845 圖)。

但し微粒の土質の際は空氣泡を追出すために試料を煮沸することが必要である。尤も微粒の土質成分の比重は極く近似的の程度でしか測定出来ない、何故ならばこの土粒子は空氣中に於ても或ひは液體中に於ても、他の異物を以て吸着層としてこの周囲を包ましめてゐるからである。土質の比面積が大きければ大きい程夫れだけ餘計吸着物による誤差が大きい。この事實は一面又他の性質をも示す、即ち微粒土質の比重測定に使用した液體の種類によつて種々の異つた値を示すことになる。

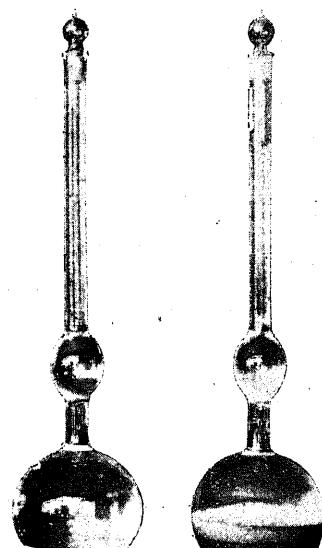
鐵道省土質調査委員會ではルシャテリイの比重壠 (Specific gravity bottle) を用ひてゐる(第 846 圖)。その使用法は先づ比重壠に蒸溜水(一般には石油を用ひるのを常とす)を入れてその容量 (cc) を目盛にて讀んで置き次に乾燥した一定重量の土粒子 G (gr) を入れ夫れによつて増加した蒸溜水の容量 V_s (cc) を知れば、

それは土粒子の排除した水量即ち土粒子の容積を與ふる。

$$\text{故に比重は } G_s = \frac{G}{V_s}$$

併しながら是等の測定をせずとも土粒子の比重は大體第 23 表

第 23 表 土粒子の比重



第 846 圖 ルシャテリイ比重壠
(セメントの場合一般に石油を用ふ)

の如き値を有してゐてあまり大なる差異なき故間隙比の算出にはこの値を用ふることを得。

粒 質	粒 徑	比 重
砂 粒	2~1	2.677
	1~0.5	2.655
	0.5~0.25	2.648
	0.25~0.1	2.659
	0.1~0.05	2.680
沈 粘 土 粒	0.05~0.005	2.698
	0.005以下	2.837
腐 植 質		1.37
泥 炭 質		1.26~1.46

2) 間隙比及び間隙率

機械的分析の結果が全く同一の土と雖も第 23 節に記した如く組織或は粒子の形狀の間に差異があり得るから、土粒子の間隙の大きさには大きな差を生じて来る。従つて土の透水性・機械的強度延いては地盤の支持力にも影響するから土の物理的性質として決して等閑に附し得ない重要な性質である。

土は一般に土粒子と間隙から成るものと見做し、通常土が含水量或は固結の程度に依て容積に増減を來すのは單に間隙量 (Void, Pore, Vide) が變化するのであつて、土粒子の容積は一定と假定されてゐる。

此の土粒子間の間隙の容積と土塊の全容積との比を通常間隙率 (Porosity, Porenvolumen od. Porosität, Porosité) と云ひ式で表はせば

$$\rho = \text{間隙率} \quad (\text{通常 \% で表はす})$$

$$V_v = \text{間隙容積}, \quad V = \text{總容積}$$

$$\text{とすれば} \quad \rho = \frac{V_v}{V} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

極めてよく填つてゐる土ではこの間隙率は 20% に近きものあり、又極めて粗鬆の土では 90% 以上のものもあるが多くの場合 50~60% と見ればよい。これは概して地表に近き所は大で地下に下るに従つて小となる。

又屢々總容積の代りに土粒子の容積をとつて、間隙容積と土粒子の容積との比をとりこれを間隙比 (Void ratio, Porenziffer) と稱して間隙量を表はすことがある。即ち

$$e = \text{間隙比}$$

$$V_v = \text{間隙容積}, \quad V_s = \text{粒子容積}$$

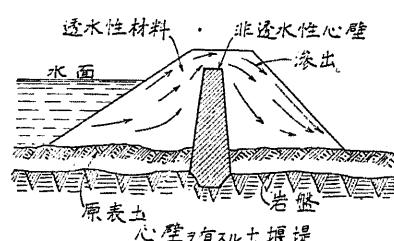
$$\text{とすれば} \quad e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

従つて間隙率 ρ と e 間隙比との關係は下の如し。

$$\rho = \frac{e}{1+e} \quad \text{又は} \quad e = \frac{\rho}{1-\rho} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

是等を實際に測るには土の試料を 100°C の恒温器に入れて充分に乾燥せる後その 1cm^3 の目方を秤りこれを $G(\text{gr})$ とす(見かけの比重)。次に土粒子の比重を秤り之れを G_s (眞の比重) とすれば 1cm^3 中の粒子の容積は $\frac{G}{G_s}$ で表はし得る故に、 1cm^3 中の間隙容積は $1 - \frac{G}{G_s}$ で表し得る。

夫れ故に

第849圖 毛細管現象による滲透水
(土壠堤)第850圖 毛細管現象による滲透水
(側溝と道路)

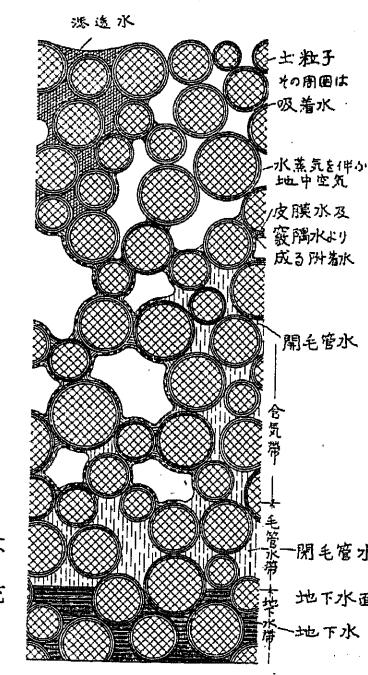
が原因をなすものである。

毛管水の一部には地下水と連絡してゐないで土粒子間の間隙の一部又は全部を占めてゐる水があ

第25表 毛管上昇高度

粒径 (mm)	上昇高 (mm)		
	24時間後	48時間後	約2ヶ月後
5.0—2.0	22	24	25
2.0—1.0	54	60	65
1.0—0.5	115	123	131
0.5—0.2	214	230	246
0.2—0.1	376	396	428
0.1—0.05	530	574	1,055
0.05—0.02	1,153	1,360	2,000
0.02—0.01	485	922	—
0.01—0.005	285	—	—
0.005—0.002	143	—	—
0.002—0.001	55	—	—

る。これを附着水 (Haftwasser) と云つてゐる。此の水は吸着水膜の外側を皮膜状に被覆したり (皮膜水), 間隙を充填したりしてゐて (窓隅水), 吸着水の如く土粒分子に強く引付けられてゐないから移動性があり蒸發も容易である (第851圖)。土粒子で囲まれた微細な間隙を附着水で充された一塊の土粒子團は, 恰もゴムの薄膜



第851圖 土中の毛管水の種々相

Atterberg の實驗に依ると粒の大きさに依る毛管水上昇高度の差異は第25表の如き値である。

毛細管運動は何れの方向にも進行するが故に土層内にサイフォン作用を惹起す事がある。これは地下水帶から上昇した毛管水が非透水體の頂部を越えて反対側に下降流動する現象であつて, 土壠堤の非透水性の心壁が第849圖の如く附近の水面より高くても下流面に水が滲出したり, 第850圖の如く側溝があつても路盤に水が浸出したりする現象はこの一例である。

尚道路・鐵道の路盤の凍上・含水量の増減による土の膨脹・収縮等に基く被害を與へるのも, 重力の働く方向と否とに拘らず有らゆる方向に水を運搬する毛細管現象

で張り廻された如く附着水の外面に働く表面張力に依つて所謂見掛けの凝集力 (Scheinbare Kohäsion¹⁾) を與へられる(第25節参照)。

(ハ) 重力水 (Gravity water) 重力水を分つと單に土粒子又は岩石組織の自由空隙を連續的に長時間に亘つて填充してゐる地下水と, 之等の間隙網を下方及び側方に向つて自由に流動する滲透水とに分けられる。

重力水は静水圧即ち重力のみの支配を受けて極めて徐々に流動し其の上昇面は毛管水と連絡してゐる爲明瞭には見へない。従つて静止せる地下水は水平な地下水表面を有し, 流動せる地下水は傾斜せる水面を有し其の傾斜状況・流動速度等は流体力學に依つて求めらる(第二章第4節参照)。

滲透水 (Sickerwasser) は重力及び毛管壓力に依つて流動・移動する水で, 例へば乾いた土層の上に降つて土中に浸入した雨水或は水路の底から漏りつゝある水の如きものである。

滲透水の流動に抵抗する力は土粒表面の摩擦と土中空氣の壓力で, 後者は殊に其の影響が著しい。例へば水が連續した層をなして滲透する場合には, 其の層の下にある空氣に拔道がないと壓力は著しく高まつて来る。

粒子の粗大な土に於ては, 上から水が滲透するに従つて空氣は其の附近の最も大なる隙間に中に壓し込まれ, 其處で次第に張力を加へ遂ひに滲透壓力と平衡状態に達する。

夫れが爲め滲透は止つて細小なる間隙管 (毛管壓の方が大なるもののみ) 内にだけ毛管的滲透が進行する。大なる間隙内に集積した空氣の壓力が増大して遂に大氣壓に等しくなると氣泡を形成して外氣中に噴出する。粗粒の砂土に急激に多量の降雨があると一時地表面に水が蓄留する事があるのは, 連續した水層の下の地中空氣が壓迫せられて滲透を阻止するからであつて, 地表に近くにあら空氣が氣泡となつて噴出すると共に地表水は遂に地下深く滲透してしまふ。

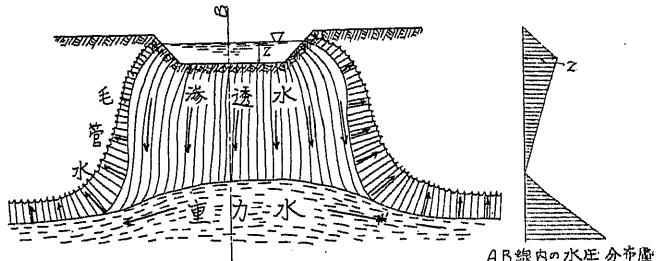
細粒にして間隙の細き土にあつては毛管壓が大なる故に, 凡ての間隙管内の空氣が遙かに下方まで壓し下げられて比較的大なる間隙中に集積する。併し此の場合は空氣の通過すべき間隙管の摩擦が頗る大きいから, 空氣の壓力は増加しても噴出は起らず其の代り或る厚さの土層全體が持ち上げられる事がある。

間隙の粗大なる土或は微粒土でも多數の蟲或は根の作つた空洞が通つて居る場合は, 普通の降雨の際にも地中空氣の壓力は餘り増大しない。併し組織の一様な微粒土で平坦な地形の所では, 地中の土の間隙を占める空氣の壓力は著しく増加するから, 此の如き地盤に排水暗渠を施す場合には集水暗渠の一端に空氣抜の管を立て、地上の空氣と連絡せしむる事は頗る有效である。

地下水と連絡せる滲透水は大雨の際の窪地の下又は水流・水路及び水田の下に起る現象である。

1) Terzaghi の新造語, 同氏著 Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage, Leipzig 1925, S. 94.

此の場合滲透水は地表水面と毛管水面とを持つ事が出来る。第852圖は水路内の水がその底及び側面から滲透して地下水と連絡せる所を示すものであつて、上は地表水面に限られ側面は毛管膜に依つて限られて居る。



第 85² 圖 地下水と連結せる滲透水

b) 含水比及び含水率 上記の各種の水及び間隙中の空氣の中の水蒸氣は何れも土中の含水である。此の如き含水量 (Moisture, *Feuchtigkeit*) を表はすには間隙量を表す時と同じく二通りある。即ち土の一定量 W を採取しこれを 100°C の恒温器又は乾燥器に入れて秤量すれば、その重量は含水量の蒸發するに従つて漸次減少する。この減少量の殆んどなくなつた時の重量 W_0 は即ち乾燥土の重量である。従つてこの蒸溜減量と乾燥土との重量比を含水比 (Moisture ratio) とし又は蒸馏減量と濕潤土との重量比を以つて含水率 (Moisture or water content, *Feuchtigkeits=od. Wassergehalt, Teneur en eau*) とする。式で表はせば下の如くなる。

$$\text{含水比} \quad w_1 = \frac{W - W_0}{W_0} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

$$\text{含水率 } w_2 = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100 \quad (\text{通常 100 分率で表す}) \dots \dots \dots (9)$$

尙以上の含水比及び含水率は専ら American Foundation Committee の規定であるが、Terzaghi は土中の含水量を表はすに比湿度¹⁾ (*Feuchtigkeitsgrad*) の術語を用ひ間隙中の水で充された部分と間隙の全容積との比を以て表してゐる。

四九

$$F = \frac{W_2 G_s (1 - P)}{P}$$

F ……比湿度 W_s …含水率 G_s ……土粒子の比重 P 腐敗度

4) 收縮膨脹率

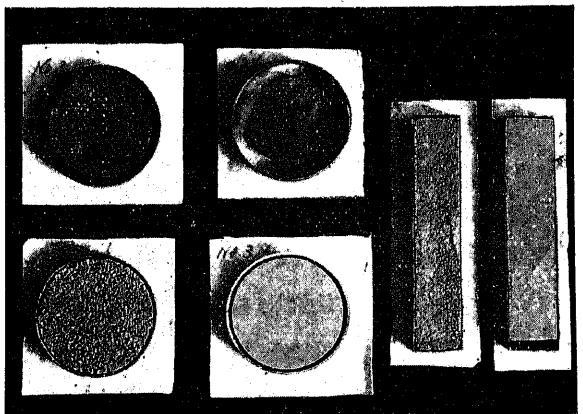
土の収縮・膨脹は一般に含水量の増減に依るものである。併し土が吸收する水の量は土粒子間の毛管現象と凝集力とに關係して居て、凝集力のない土に水が入れば含水は土粒子の間隔を引離すと同時に土を速かに分解せしめるが、土粒子の間に充分凝集力が存在すれば土は或る程度まで水を吸収して膨脹すると、土粒子間に働く凝集力と毛管現象によつて土を支撐する。

i) Terzaghi の新造語、同氏著 *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*、Leipzig 1925、S. 154

然るに又一定組成の土が持つて居る凝集力はその含水量及び圧縮の程度に依つても異なるから、従つて土の膨脹量は土を濡らす前の凝固の程度と含水量に依つて異なるものである事を知らなければならない。

一方土の容積の縮少は含水量の減少によるものであるが、其の程度は蒸発に依つて含水量が減少する際の毛管作用と土粒子が凝固する際の抵抗によつて定まる。

即ち土の膨脹・收縮 (Expansion and shrinkage, Quellen u. Schrumpfen) する現象を簡単に記せば次の通りである。先づ土粒子の容積は全部水で充されてゐて液體の状態になつてゐるとする。斯る状態では水の表面張力に依る引力は實際上零である。上から水が蒸發するに従つて土の表面に毛管壓力が、一様に表面上に垂直の方向に働いて粒子を中に引入れる。土が次第に小さくなると收縮に対する抵抗力が増し、最後に

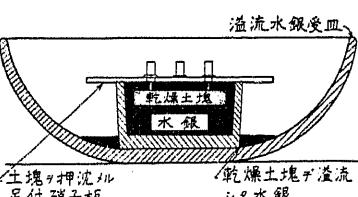


第 853 圖 主の收縮を測る方法

収縮に対する抵抗が恰度水分の蒸發による毛管圧力と同一になる處で収縮は止まる。それから先は蒸發に依つて殆ど土は體積を減少しない。此の釣合の状態に於ける土の含水量を収縮限界(Shrinkage limit, Schrumpfverfahren)と云ひ、次のプラスティシティの項に述べる。

土の膨脹・収縮を測定するには二通りの方法がある(第853圖)。一つ角形の棒を作つてその長さの變化をその三邊で測り、又圓盤狀の試験片ならば徑と厚さを測る。

又他の一つは第854圖の如き水銀槽の中に浸して容積の變化を見るものである。勿論この兩者の間には簡単なる代數的關係が存在するわけである。二次以上の微量を無視すれば角団 abc の容積增量は $(a+da)(b+db)(c+dc) - abc = ab \times dc + bc \times da + ca \times db$, 今假りに da, db, dc を同一 order と考へればこれは $da(ab+bc+ca)$ となり、線増量は $\frac{da}{a}$ 従て容積増量は $\frac{da}{a} \left(\frac{a}{c} + 1 + \frac{a}{b} \right) \doteq 3 \frac{da}{a}$



第 854 圖

ge) といひ何れも百分率で表はす。粘土質の土では線収縮量 5%, 容積収縮量 17% を超えるものあ

り、砂質の土では一般に少い。

充分に飽和状態に於ける含水率を最大吸水率 (Field moisture equivalent), 充分に乾燥して最早や收縮の進まざる様になつた時の最大含水率を收縮限界含水率 (Shrinkage limit's moisture content) といふことがある。最大吸水率が大なれば間隙率が大であり、吸水により土の膨脹する量も大と見られてゐる。收縮限界含水率が小なれば吸水による土の膨脹量は大となる。即ちこの兩限界の含水率は土の收縮量又は膨脹量に直接關係を有してゐる。

土の收縮量試験方法 (鐵道省土質調査委員會現行規定)

1) 收縮試験用真鍮製圓環 (直徑 5.0cm 高さ 1.0cm) の内面を清潔にせる後ワセリンを小量塗布し、これを硝子片上に置かれたる濾過紙上に置き之れを秤量する。

2) 次に此の圓環を運搬器中の自然土に挿込みて試験土を抜き取り、兩面を平滑に仕上げたる後更に秤量して總重量を讀む。

3) 之れを空氣中に放置し 24 時間毎に重量及び容積を測りて記錄し、最後に電氣乾燥爐中に入れて 24 時間を経し後更に重量及び容積を測り全く減少せざるに至りて止める。

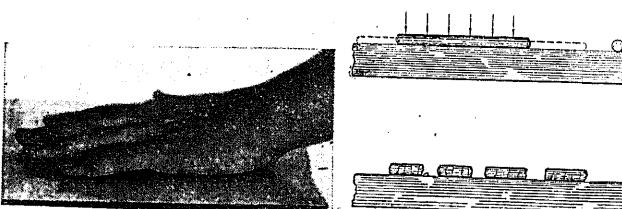
4) 容積を測定するには兩面對稱の位置に於て x 及び y の方向並びに側面四箇所の高さを正確に測定し最後に其の百分率を決定する (第 855 圖)。



第 855 圖
圓環に土を挿入して收縮を測る方法

5) プラスティシティ

a) 緊硬度限界 水を過量に含んだ粘土は殆ど液状を呈して之を容器に入れて限定しない限り自ら形を保ち得ない。併し順次水分が蒸発すれば粘土は收縮して液體としての性質を失つてプラスティックな状態になり、今度は或る形を保つて其の變形には幾らか抵抗を生じて來る。更に蒸發すれば容積は更に減少して半固體の状態となりそれを變形するときは破壊するに至り、最後に粘土は暗色から明色に變色して固體となる。此の點を過ぎてからは最早や蒸發による收縮は起らなくなる。或る状態から次の状態に移る變化は漸進的ではあるが、Atterberg はそれらを緊硬度限界 (Limits of consistency, Konsistenzgrenzen) と定義した。即ち液體とプラスティックな状態との限界



第 856 圖
土のプラスティシティを測る方法

を流出限界 (Liquid limit, Fließgrenze), プラスティックな状態と半固體の状態との限界をプラスティティの限界 (Plastic limit, Ausroll-od. Plastizitätsgrenze), 半固體と固體との限界を收縮限界 (Shrink-

ge limit, Schrumpfgrenze) とし、各限界はそのときの含水量(一般に含水比を百分率で表はしたもの)で表はす。

イ) プラスティシティの限界 Atterberg の定義した方法は適當に水を加へて軟かく練つた土の試料を、陶器又は硝子板の上に掌で直徑 $\frac{1}{8}$ 吋の細い棒にロオルして漸次含水量を減少せしめる(第 856 圖)。而して遂に棒に龜裂が入つて細かく壊れる時の含水量をプラスティックの限界とする。プラスティックの限界は土がプラスティックであり得る最小の含水量を示し、従つて其の値は砂・雲母・珪藻及び泥炭では 0、沈泥では凡そ 20、粘土・膠質物では凡そ 45 前後の値をとる。

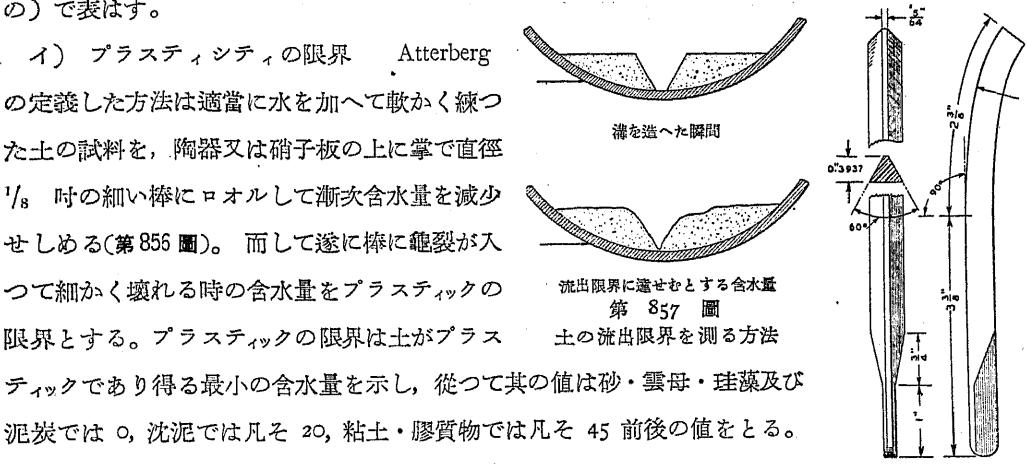
ロ) 流出限界 蒸發皿又は丸底の硝子器に約 5gr の土の試料をとり、こ

れを高さ 1cm 径 10~12cm に擴げ少量の水を加へて糊状に練り、それにニッケル製の籠で上端の幅 $\frac{1}{2}$ 吋の V 字形の溝を切る(第 857 圖)。これを手で 10 回軽く叩いて其の溝が 1mm 以上の高さに流れ合ふときの含水量を流出限界とする。米國政府道路局では更に精密に試験を行ふ為第 858

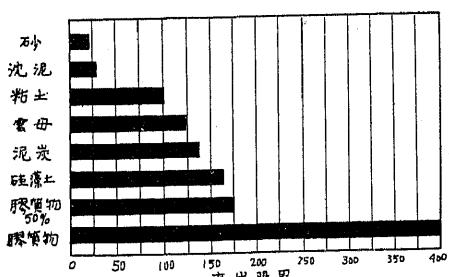
圖の如き装置を作つてハンドルを廻轉して容器に機械的に衝撃(普通 25 回とする)を與へてゐる。流出限界は土が液状を呈する時の最小含水量であつて、或は土が内部剪断抵抗を失ふとき

の含水量とも見られる。尚これは砂に於てはその粒子の粗滑、粘土質の土では其の間隙量を比較することに當る。均質なる土の流出限界は略々 第 859 圖に示す如き値を有してゐる。

b) プラスティシティ指數 これは土の緊硬度を表す指數でプラスティティの限界と流出限界との差を云ふ。プラスティシティ指數 (Plasticity index, Plasitizitätszahl) はプラスティックの土が



第 858 圖
土の流出限界を測る装置 (U. S. Bureau of Public Roads)



第 859 圖
土の主成分の流出限界

液状に成らずにその形狀を保ち得る範囲を示し又土粒子間の凝集力を零にするまでに必要な含水量とも思はれるからその土のもつ凝集力の尺度とも考へられる(第26表参照)。

二枚の硝子板を小量の水で温して密着せしめると相當の外力を加へなくては引離す事は出来ない、併し夫れを滑り動かす事は極く僅かな力で出来る。此の現象はプラスティシティの限界に近い含水量を含む土の状態とよく似てゐる。二個の板を隔てる水膜の厚さを増加すれば其の自重だけで分離する。之は流出限界に於ける土の含水量とよく似てゐる、滑動から分離状態までの水膜の増加はプラスティシティ指數に等しい、此のプラスティシティ指數は恰度水と硝子板表面との分子引力による粘着力に等しい。

第26表 土のプラスティシティ指數

緊硬度	プラスティシティ指數
プラスティックでない土	<1
稍々プラスティックな土	1~7
可成りプラスティックな土	7~15
非常にプラスティックな土	>15

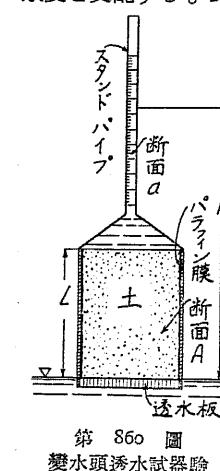
6) 透水度

土質力学の中でも土の透水性に關する研究は最も重要なものの一つである。土の組織には必ず間隙を伴ふからこれに或る水頭を與へれば水を透すが、その難易は水の粘性の外に土粒子の粒径・粒形及び土の組織・構造等によつて異なり、間隙の小なるもの程透水度は小なるわけである。(Hazenは透水度を支配するものとして彼の所謂有效徑が最もその主なる因子であることを實驗で證してゐる)。

土の透水性は Darcy の法則に従ひ、水流に直角にとつた断面積 A を、なる水頭勾配 (Hydraulic gradient) で、 t 時間に流れる水量 Q は

$$Q = k i t A \quad \dots \dots \dots (1)$$

で表はされる。こゝに k を土の透水度 (Permeability, Durchlässigkeit) と呼ぶ。之を測定するには土を一定断面 A の壩體状の容器に填め、水を一定水頭 i に保ち乍ら t 時間に土を透して通過する水量 Q を測定すれば上式から求められる(第二章第4節参照)。

第860圖
變水頭透水試驗

試験装置は微細な粒子から成る土に對しては第860圖の如き變水頭透水試験器が適してゐる。即ち圓壩状の断面の試料を底部に多孔板を張つた圓壩容器に入れ、其の直上に活栓を介して一定断面の硝子管を立てる。今硝子管の断面積を a 、試料の断面積を A 、長さを L とし、或る時刻に於ける硝子管内の水位を h とし dt 時間に低下した水位を dh とすれば (1) 式より

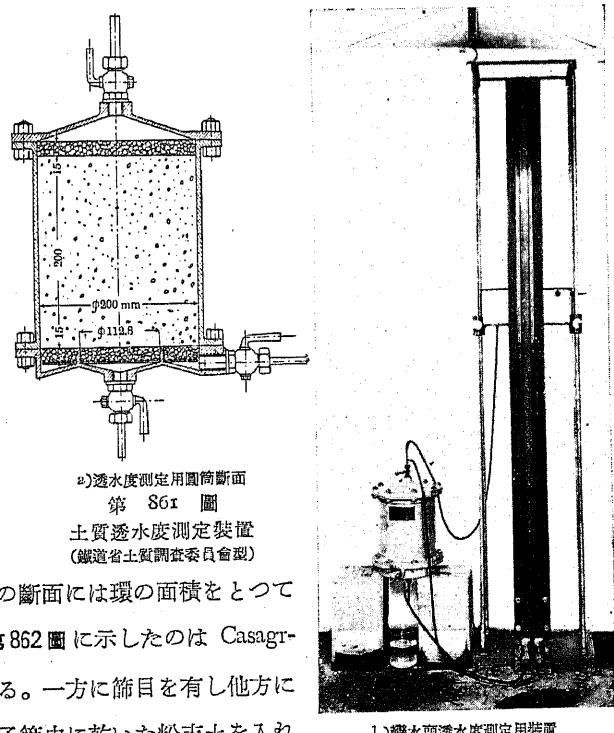
$$-a \cdot dh = k \frac{h}{L} A \cdot dt \quad \dots \dots \dots (2)$$

若し t_1 の時の水位を H_1 、 t_2 の時の水位を H_2 とすれば (2) 式を t_1 から t_2 まで積分して透水度 k

を次の如く求められる。

$$k = \frac{a L}{A} \frac{1}{t_2 - t_1} \log_e \frac{H_1}{H_2} \quad \dots \dots \dots (3)$$

透水度は土粒子の間隙に最も影響されるから自然の状態の組織を出来る丈擾さないようにしなければならない。此の爲第860圖の装置では豫め圓壩状の試料をパラフィンの中に浸してから容器に收め、尙同時に透水がサンプルと容器壁の間を流過し易い傾向を防止してゐるが、鐵道省土質調査委員會では第861圖(a)の如き装置を考案し、容器の底部を環で二部分に分つて環の内側を通過した水のみを測定し、試料の断面には環の面積をとつて透水度を算出してゐる(第861圖(b))。第862圖に示したのは Casagrande¹⁾ の水平式毛細管透水試験器である。一方に篩目を有し他方に細い彎曲硝子管を有する栓を施した硝子管中に乾いた粉末土を入れ、



それを浅い水中に水平に浸して毛管現象に依つて進行する透水度を測定するのである。今 t 時間に水の飽和した長さを x とすれば理論的に

$$x^2 = t \sqrt{k F \frac{1+e}{e}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

となり、 x と t は直線的関係を持つてゐる。こゝに e は空隙比を示し、断面 F が既知ならば透水係数

k は直ちに求められる。

各種の天然の土に就いて Terzaghi が測定した k の値は第27表の如くである。

これを見れば同一粒径の海砂では間隙比と共に k の値も減少するが、同一粒径であつても河砂と丘砂とは必ずしも同一の値を與へないことが解る。又略同一の間隙比をもつ河砂では粒径が増加すればこれと共に k の値が増大することを示してゐる。尙少しく粘土が混ると著しく k は減少し純粘土では k の値は $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ cm/sec}$ の如き小なる値となる。通常地下の粘土層を不透

1) Gilboy, Soil Mechanics Research, Proc. Am. Soc. of Civ. Eng. Vol. 57. 1931, pp. 1165-1188.

水層と考へてゐるのが至當なことはこれ等のことより直ちに判る。

¹⁾ Terzaghi は地盤の透水度 k の値に依つて地下水圧が次の如く地盤の支持力に影響することを述べてゐる。即ち飽和含水量を有する土を次節の第 867 圖(a) (500 頁) の如き容器に入れて、上部より圧縮すると間隙中の含水量は漸次上部に流出する。その流出量 Q を Darcy の式から決定し、この式により Q , F 及 k が既知ならば i が求められ從つて土の上下面の水圧差を知ることが出来る。これを動水力学的應力 (*Hydrodynamische Spannung*) と稱し、含水量の流出に從つて地盤内の水力学的應力は變つて来る。實際には含水量の流出に依つて土の間隙率が減少し從つて透水度の減少を來たし、含水量は全部流失するに至らずして止まり上下面の水圧差の變化も或る値に達して停止する。此の如き現象が建物等を支へる地盤に於ても起り、載荷當初は時と共に異る支持力を與ふる現象を呈する。Terzaghi は之を動水力学的應力現象 (*Hydrodynamische Spannungerscheinungen*) と稱してゐる(第 25 節 4 参照)。

7) 耐水試験

耐水試験としては土の崩壊に対する難易を示すため、試料を硬く捏ねて形を作り 105°C の爐で乾かした土の圓盤 (2.5cm 高さ, 2.5cm 直径) を、水中に浸けて崩壊するに又は環の上に載せてその環が夫れを貫くに要する時間を分で表はし、これを崩壊度 (Slaking value, *Zerfallsziffer*) と稱する。崩壊の過程を物理學的に見れば次のやうに分解出来る、即ち浸水の瞬間に於ては試料の濕つた部分では水の表面張力は零に等しい、而して試料は彈性的伸展をなす。緊密な物質は透水度が少いため膨脹作用は極く緩慢に表面から内部に進行する、而して供試體は遂に不平等な伸展作用の際に發生する二次的應力のため破碎する。この崩壊度の數値は主として含水率・透水度及び緊硬度等に關係するやうである。又崩壊度は週期的に流れる水路 (例へば道路側溝) の侵蝕作用に對する固結土質の抵抗力に比例する。

¹⁾ Terzaghi, Die Berechnung der Durchlässigkeitssiffer des Tones aus dem Verlaufe der hydrodynamischen Spannungserscheinungen, Sitzbr. der Akademie des Wiss. Math-Nat. Klasse II d. Wien 1924.

第 27 表 砂の透水度 (K) [10°C]

土の種類	主なる粒徑 (mm)	間隙比 (%)	透水度 k ($\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$)
海砂	0.116	98.2	0.0216
海砂	0.116	75.7	0.0118
海砂	0.116	63.4	0.0089
丘砂	0.186	54.9	0.0185
河砂	0.22	75.3	0.041
河砂	0.28	69.7	0.061
河砂	0.64	78.5	0.266
粘土混り砂	0.13	63.7	0.0022

8) 圓錐貫入試験

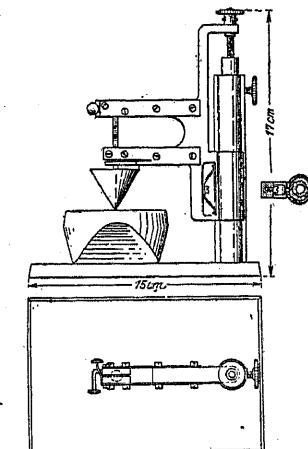
これは土の緊硬度を測定する目的で瑞典國有鐵道土質調査委員會で使用してゐる試験法である。この試験を行ふには重さ 60gr で 60° の角度を持つ真鍮製圓錐の試験器(標準圓錐)を使用する(第 863 圖)。實驗に先ちこの圓錐を螺旋で調節してその尖端が土の供試體の水平表面に真直ぐに觸れるやうにする。實驗方法は夫れを其儘放置した場合、何の程度の深さまでその圓錐が土質中に沈下するかを測定するのである、之れを圓錐試験 (*Kegelprobe*) といふ。而して前記の標準圓錐が土質中に 1cm の深さだけ沈入する時の含水量をその土の強度を表はす標準含水量とする。(含水比を百分率で表はしたもの)。この沈下深さは第一にその耐壓強度に依て決するが、第二には土質と圓錐の接觸面に於ける摩擦抵抗に依る。耐壓強度は見掛けの凝集力と物質の強靱性との兩方の作用に依て決まるが、測定に依つて得た値は物理學的見地に於ては決してこのような簡単な意味ではない。併し乍ら實驗結果に依つて土の強度を表はす含水量を決定する或る基準點を求むることが出来る、即ちその含水量の場合ではその土の凝集力は或る一定の値を示してゐる。此の如き含水量は一般に徑粒が小さくなるに従つて増加して行く。瑞典に於ては當初は標準含水量を以て土質組成粒子の微粒度を表したものとした、併しこの考へ方は後に至つて撤回されたことは勿論である。

9) 粘土の特性の物理的意義

a) 鱗片狀組成說 古い書物に依ると粘土の特性はその中に含有された一種特別の膠狀物質の作用であるといふ。又ある著者は粘土中に存在するカオリン (Kaolin) 即ちアルミニウム水化珪酸類と關係を結び付けてゐる。Vogt (1897), Orton, (1901), Le Chantelier (1909) 等は 18 世紀末に於て既に粘土の性質は粘土組成土粒分子の鱗片狀態に歸すべきであることを述べてゐる。併し乍ら前二者は何れも純假説として取扱つたものである。鱗片說 (*Schuppentheorie*) を實驗的に最初に確證したのは Atterberg²⁾ であつて、片狀構造の礦物結晶を挽いて粉を造りその性質が如上の

¹⁾ Statens Järnvägars Geotekniska Kommission 1914-22, Slutbetänkande, avgivet till Kungl. Järnvägsstyrelsen, den 31 Maj, 1922.

²⁾ Atterberg, Die Plastizität und Bindigkeitheifenden Bestandteile der Tone, Intern. Mitt. für Bodenkunde, 1919.



第 863 圖
圓錐貫入試験器

見解の下に典型的粘土と一致してゐることを證するに成功した。最もプラスティックなものに於ては、白雲母と滑石とから生じた膠質泥土であることが判つた。然るに多くの國々の研究家達は、特に北米の人々は膠質説 (*Kolloidtheorie*) を専門として居り、その説に基き土中膠質と粗粒の岩石片とを根本的に區別しやうとしてゐる。

1921年 Terzaghi¹⁾ は實驗的基礎に基き砂と粘土の力學的性質(壓縮度・彈性度)が非常な相異のあることを證明し、再び粘土の本質は鱗片狀物の存在であるといふ説に歸つた。

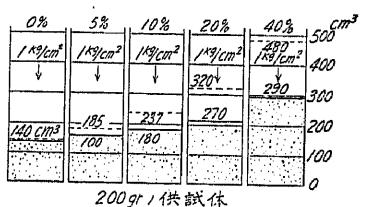
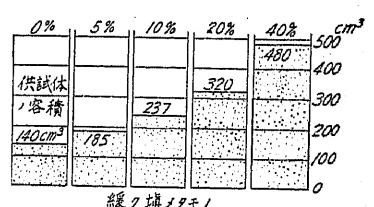
1923年 Krogh²⁾ は周圍を閉塞して高壓を加へて粘土の性質を研究しその結果を發表した。

80~100氣壓までの壓力下では Krogh の畫いた曲線は Terzaghi の發表した圖表とよく一致してゐる。この限界壓力を超過した後はその物質は流動し始める。而して粘土の含水量は壓力 160kg/cm² (砂質粘土) から 340kg/cm² (脂粘土) までの間では零に等しくなる。

b) 粘土の彈性 Terzaghi は粘土の内部壓力と彈性的性質との間の純力學的關係を研究してゐる。彼の *Erdbaumechanik* 中には砂と雲母の混合物の壓縮度と彈性度とを測定した結果が發表されてゐる(第864圖)。即ちこの種の混合物の彈性的性質は粘土の場合と全く等しいことが證せられた。

實驗に使用した脂粘土の彈性的性質は、砂 75%, 雲母 25% の粗粒混合の場合と全く等しい。周圍を閉塞して壓力を加へて壓縮する方法に依て粘土の壓縮度試験をした結果に據ると次のやうな事が判つた。即ち此の如き方法に依て壓力を加へた場合の壓縮度並びに彈性度は、之れ迄唯單に垂直の方向に壓力を加へてゐた時より非常に大きな値を示すといふことである。この現象からして次の如き結論が得られる。即ち鱗片狀の土粒片は壓密作用の過程中壓力の方向に對して直角に近づくやうに並び變はるといふことである。此の如き研究法に依つて粘土の壓縮度と彈性度の値が何故に大きいかといふ原因に對する疑問を解決すること手懸りが出來ると思ふ(第25節 2) 3) 參照)。

c) 粘土の間隙水 第二の面倒な問題は粘土と水との關係である。1920年 Terzaghi³⁾ は 2枚の硝子板の間に封じ込められた水の膜は、その厚さが 100μμ より小さい場合は室内溫度では



第864圖
雲母・砂の混合物の壓縮試験

1) Terzaghi, Die Physikalischen Grundlagen des geologischen Gutachtens, Zeitschr. d. Öster. u. Arch.-Ver., 1921.
2) Krogh, Undersokelser over Norske Lerer, Statens Reatofkomite. III. Kristiania, 1923.
3) Terzaghi, New facts about surface friction, Physical Review, 1920.

蒸發しないといふ事實を觀察しその實驗結果を發表してゐる。

1924年尙又同著者は透水度試験結果に基き次のやうな結論を得た。即ち粘土の間隙内に於ける水の粘性は肉眼的空隙内にあるものより遙かに大きいものであらねばならぬといふことである。同年

Bouyoucos は粘土の間隙内に含まれてゐる水の一部は -75°C に於ても凍結しない事實を發表し、

Harkins³⁾ は非常に小さい空隙内に含まれてゐる水の密度は普通のものより餘程大きいことを證してゐる。Harkins の意見に従へば水の密度の大きいといふことは水中を支配する巨大な或る種の壓力に歸すべきであるといふ(此の如き壓力の大きさは 20,000 氣壓位)。此の如き解釋は次のやうな事實を根據

4) とし Terzaghi⁴⁾ に依つて云ひ出されたものである。即ち或る程度の高壓力は或る程度の比蒸氣壓の上昇と粘性の減却を惹起す。然るに粘土中に含まれた水の性質は通常の場合と異り之に反対するやうな方向に働くといふことである。從つて此の如き觀測事實と一致させるため彼は次のやうな假説を認めることを餘儀なくされてゐる。即ち固體の近隣にある水はその固體の表面が濕つてゐる場合は半固體の状態にあるといふのである。此の如き硬化作用の原因は固體と液體との境界面に於ける分子の交代作用のため、そこに惹き起された液體分子の跳躍運動の抑制作用の結果であらうと云はれてゐる。而して水が普通の状態から半固體状態に移り變る際開放されたエネルギーは、濕潤及び膨脹作用に伴ふ熱の發生として表はれて來るといふのである。

斯うした解釋に従へば粘土は粗い粒のものと鱗片狀の礫物組成の混合で、その間隙は半ば硬化した抗壓・抗張並に抗剪強度を持つた水を以て充されてゐるものと認むることが出来る。この變化過程の分子物理學的研究並に鱗片狀組成の礫物學的研究に對する問題は未だ解決が付いてゐない。

d) 粘土の内部摩擦力

第三の問題は粘土内の内部摩擦力の値の少いことである。乾いた粗粒の砂・雲母の混合物の内部摩擦係数の値は殆んど砂(0.65~1.3乃至夫れ以上)の場合と同様である。脂粘土の内部摩擦係数の値は 0.25 にも及ばないことから見れば粘土内の水は滑剤の役目をすることになる、然るに Harkins⁵⁾ に従へば肉眼的粒徑の物質の摩擦試験の場合では、水は寧ろ所謂抗滑剤 (Antischmiermittel) の効をなし摩擦力を高めるといふことである。Terzaghi⁶⁾ は滑剤の摩擦力減却作用に就いては次のやうな解釋法で説明してゐる。即ち滑剤の分子は二極性のものでありそのため摩擦面に對し直角にその軸を並べるからである。然し乍ら何故に粘土の間隙内にある水の分子

5) Terzaghi, Versuche über Viskoität des Wassers in sehr engen Durchgangsquerschnitten, Zeitschr. für angew. Math. u. Mechanik, 1924.

6) Bouyoucos, The amount of unfree water in soils at different moisture contents, Soil Science, Vol. XI. No. 4. pp. 255~259, 1921.

7) Harkins, A high pressure due to adsorption and the density and the volume relation of Charcoal Journal American Chemical Society, Vol. XLIII. pp. 1787~1825, 1921.

8) Terzaghi, The mechanics of adsorption and the swelling of gels, Fourth Colloid Symposium Monograph. 1926.

が此の如き配置をなすかといふ理由は未だ説明されてゐない。

ノルウェーの Oslo 大學の礦物學教室では Goldschmidt¹⁾ 教授指導の下に最近この種の解釋法を補はんがため種々の研究を始めてゐる。Goldschmidt は鱗片状の礦物組成は層状格子構造 (*Schichtgitterstruktur*) をなしてゐるといふ事實から出發してゐる。割目の表面は特に非常に活動的な陰陽のイオンから成り立つて居り強力な電場を形成してゐる。夫れで若し二極性の分子から成る液體 (水・ $\text{SO}_2 \cdot \text{NH}_3$ 等) がその電場内に入り込んで來ると、分子はその軸を割目の表面に直角にして並ぶ。若しも乾いた粘土粉を或る液體と混ぜると、その液體の分子は何等前記のやうな極性を示さず (例へば四塩化炭素の如し) 粘土の性質の特徴を少しも表はさない。水の分子が此の如く規則正しく配列するといふことは内部摩擦力の値の低下のみならず、Terzaghi に依て硬化作用 (*Verfestigung*) として主張せられた粘性增加といふことに關連する或る狀態をも説明してゐるものと云へやう。

e) 粘土の鱗片状組成 粘土の礦物組成に關する問題は前記ノルウェーの研究家達に依て同國內の諸產地から集めた粘土に就て研究されてゐる。彼等の岩石學的 (光學的) 乃至化學的研究の結果に従ふと、粘土の礦物成分は大體次の様なものだそうである。

鱗片状礦物成分 (綠泥石・滑石・白雲母・黑雲母) 12.00~72.67%

棒片状礦物成分 (角閃石・綠簾石・其他) 4.53~13.83%

粗粒礦物成分 (長石・石英・矽灰石・チタン鐵礦・金紅石・褐鐵礦) 60.74~72.67%

ノルウェーの粘土で鱗片状礦物成分の大部分は雲母だそうである。之が例の先程述べた砂と混すると丁度脂粘土と同様の性質を呈することになる。

又彼等の發表に従ふと粘土から機械的分析に依て採取した泥土質物が、微粒であればある程この雲母成分は増加し、反対に石英成分は微粒になればなる程減少するといふ。

このノルウェーの研究と前後して同年北米では Ross と Shannon²⁾ が粘土組成の礦物成分を測定しその組織を顯微鏡を用ひ光學的に分析した。彼等の研究に依ると海泥岩 (Bentonite) 又は海泥岩類の粘土 (北米産) は次のやうな礦物成分をしてゐる。

1. Montmorillonite, 2. Beidellite, 3. 雲母状の Halloysite, 4. Halloysite, 5. Kaolinite, 之れ等の礦物中 1, 2, 3 は雲母様の鱗片状をなし、4 は葉片状集合體、5 は非結晶質又は顯微鏡的結晶をなしてゐる。

Oslo 大學では水成粘土の雲母片の配列組織を検鏡するため粘土標本を豫め 500~550 °C 位の溫度で燃焼し之れを薄片とした。之れを検鏡すると雲母片は互に平行して並んでゐたそうである。こ

1) Goldschmidt, Uundersøkelser over Isedimenter Beretning om Nordiske Jordbrugs forskeres Kongres i Oslo. 1926, Nordisk Jordbrugs Forskning 4-7 Hefte.

2) Ross and Shannon, The minerals of bentonite sand related clays and their physical properties, Journ Am. Ceramic Society . No. 9, pp. 77~96, 1926.

の事實は最近 Krynnin¹⁾ が實驗的に證した。先づ垂直に立て、下端を透水性の膜で閉ざした硝子管内に粘土を丁寧に詰め込み、それからこの管を傾けて下端を水中に浸す。そうすると毛細管作用で粘土中には水が吸上げられる。而してその水面はその傾けた硝子管の軸と常に直角をなす。然るに同様の方法にして浸した砂柱の場合に於ては、毛細管水の表面は絶えず水平に保ち硝子管の軸とは鋭角をなす。

f) 粘土の特性を支配する因子

以上述べて來たやうな種々の研究に依て我々は今日粘土の本質を或る程度まで想像することが出来る。即ち粘土が彈性に富むと同時に内部摩擦力が小さいといふことは次の條件に基くものであると考へられないこともない。

層状格子構造をなす礦物成分 (鱗片状礦物) を多量に含有する固體相と兩極性分子を有する液體相との兩者の存在のためである。

粘土の壓縮度が大きく且彈性であること並に可成り大きな含水容量を有するといふことは、粘土が鱗片状礦物の性質に依て支配されてゐるといふ條件に基くものであると考へられる。夫れ故に粘土は大抵洩れなく粗粒の砂・雲母の混合物に類似し、此の如き性質を持つてゐるものと思つてもいゝ。即ちこの性質は所謂膨脹といふ現象を惹き起す。膨脹とは或る變形し易い組織が水を吸收した結果單なる彈性的伸展作用をなすことには外ならない。之れを引例するならばこれまで押しつけられてゐた多孔性の海綿が水中で壓力を取り去られて膨れ上るのと同様な現象である (第 882 圖参照)。

収縮といふことは 4) 項にも述べた通り純粹の機械的作用である、即ち夫れは粘土がその毛細管的組織 (僅少なる間隙徑) を有すること並に鱗片状含有物のため壓縮性の大きい物質であるといふことが、同時に互に作用し合つた結果に外ならないのである。又層状格子構造は次のやうな點で收縮作用を助ける。即ち水の表面張力を間接に高めそれに依て毛細管壓力の最大値を増大する。之れは間隙水の粘性に對する層状格子構造の影響である。又夫に依て同時に粘土の透水度も影響を受ける。

Terzaghi²⁾ は 1924 年次節 4) 項で述べる如く論文を發表し、粘土の内部摩擦力と壓力變化に伴ふ含水量變化の速度とには、粘土の透水度の小さいことが影響する状態を知ることが出来るとしてゐる。従つて之れに基けば粘土の本質に關する種々の考へ方を成立させることが出来る。

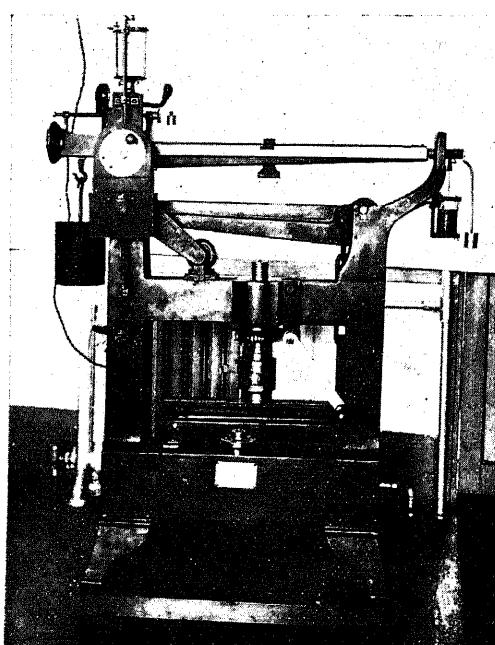
從來は兎角すれば「膠質作用」といふやうな難しい判り悪い言葉を持ち出して、唯さへ困難な粘土の性質の研究を迷路に導いてゐた傾向があつたが、以上の如く Terzaghi を始め諸大家の努力の結果を考慮に入れて進めば粘土は極く簡単な物理學的乃至力學的分析に依つて比較的容易に取扱ふことが出来るやうになるやうな氣がする。

1) Krynnin, Elementary proof of scale likeness of clay particles, Public Roads. Vol. 8, No. 11, 1928.

2) Terzaghi, Die Berechnung der Durchlässigkeitssiffer des Tonens aus dem Verlaufe der hydrodynamischen Spannungerscheinungen, Sitzbr. der Akademie des Wiss. Math-Nat. Klasse II d. Wien 1924.

第 25 節 土の力學的性質

1) 土の力学的性質



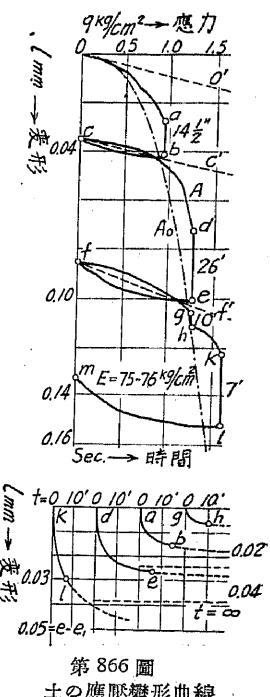
第 865 圖 土質耐壓試驗機(鐵道省土質調查委員會設置)
全壓力 200kg 感度 100gr

土も土木工學的に見るとときは一つの材料であつてこれに加へられた外力に對して抵抗する性質を持つてゐる。併し土が他の材料と著しく異なる點は、大小粒子の配合のみならず同一の土と雖も組織特に含水量に依つて、その力學的の性質を非常に異にする點である。例へば粘土の含水量を流出限界以上に増加すれば剪斷抵抗は殆ど零となり、これを塑性指数の限界以下に乾燥すれば著しく抗壓強度を増加する。

ればならない。これらの三つの試験の中地盤の破壊を論ずるに最も重要なのは土の剪断試験である。何となれば土を容器の中に入れて圧縮するときは殆ど無限に大きい抵抗力を示すが、引張りに對しては最も凝集力に富んだ粘土の如きのものも殆ど省略し得る程度の強度しか持つてゐず、結局土塊の崩壊は土の抗剪强度によって支配されるからである。

2) 耐壓試驗

當相の粘土分を含んだプラスティックな土は、それから適當な壠體を切り取つて通常の材料と同様に耐壓試験を行ふ。試料は自然の儘の土塊から一邊5~10cmの角壠體又は直徑5~10cm高さ8~16cm位の圓壠體を



第 866 圖
土の應壓變形曲線

切取り、水分の蒸発を防ぐためこれを一旦パラフィンの中に浸し第865圖の如き耐圧試験機にかけて應力變形圖(第866圖)を畫かせる。此の場合土の如きプラスティックな材料では變形の發生には時間の連れ(Time lag)を伴ふから、試験の途中で一旦荷重を取り除いて又加へて第866圖の如き彈性ヒステレス(Elastic hysteresis)を畫く。故に荷重の増減は極く徐々にこれを行はなければならない。

第866圖の変形率(ϵ)・應力(σ)の間の曲線 A_0 (圖中の鎖線)を數式で表はせば

の形で表はされる。この (I) 式の中 E は弾性體に於けるヤングの弾性係数に相當し、第 1 項は弾性変形、第 2 項は非弾性変形の部分を示してゐる。又 n の値は 2.4～3.4 の間に位してゐるからこれを $n=3$ と取り (I) 式を書き直して

走得远。

更に又或る一個の土の供試體に於ても含水量の變化による應力・變形率關係を直接に表はすためには(2)式をば

$$c = \frac{q}{E} + (c_1 E^3) \left(\frac{q}{E} \right)^3 = \frac{q}{E} + c \left(\frac{q}{E} \right)^3 \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

と繋がります。

但し $c=c_1E^3$ は土の組成材料のみならずその生成の地質的條件によつて決する常數であつて、
土が軟弱なればなる程この値は大きくなる、従てこの値が小さければ第1項は第2項に比して大と
なり變形は彈性に近くなる。Terzaghi¹⁾ はこの逆數 $\frac{1}{E}$ を彈性度 (*Elastizitätsgrad*) と名付けた。

Terzaghi が粘土質の土に就いて測定したこれらの値は第28表の如くなつてゐる。

第 28 表 粘土質土壤の耐壓試験成績

真比重	機械的分析表(%)			含水率 (%)	間隙比 (%)	彈性係數(kg/cm ²) E	彈性度 γ
	砂	沈泥	粘土				
2.93	47.5	24.2	28.3	26.9	79.2	115~76	1.31×10^{-5}
				23.2	68.1	310~195	2.53×10^{-5}
				14.6	49.0	3760~3460	1.30×10^{-5}
				3.0	48.2	7300~6100	1.91×10^{-5}
				26.0	74.1	56.7~41.8	6.10×10^{-5}
				18.9	53.9	314~271	6.29×10^{-5}
2.85	11.5	46.9	41.6	16.3	46.5	484~450	6.10×10^{-5}
				4.2	39.0	5200	6.03×10^{-5}

此の表を一見して明かなることは粘土の多量の土は砂の勝つた土に比して弾性係数 E 及び c は

¹⁾ Terzaghi, Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage, Leipzig 1925, ss. 70—82.

少さくなる(完全なる弾性體に於ては $\frac{1}{c} = \infty$)。即ち變形はし易いが弾性體に近いことを示してゐる。又同一の土では含水率・間隙比の小さいもの程 E が大きく變形し難い。弾性係数 E の大きさは應力變形率曲線の原點附近の切線が横軸となす角の正切で與へられる。併し此の切線は測定が困難であるから第866圖の如く試験中曲線にヒステレシスを描かせてその中心線をひきその横軸となす角の正切をとる方がよい。

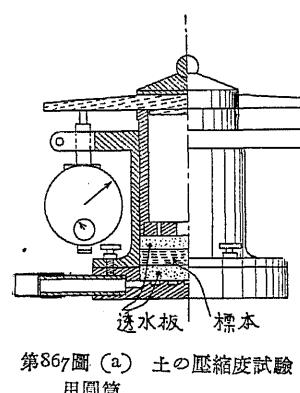
土の耐壓強度(Compressive strength, Druckfestigkeit)を求めるることは土質力学では實用上大した意味なく、且これは土の種類状況によつて極めて廣汎に變化して一概に云へぬが、Terzaghi の實驗せる粘土では充分に水を含有せるもので $2 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$ 、充分に乾燥せるものでは $30 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ にも及んでゐる。

¹⁾ Michelson は嘗て種々の固體(錫・鉛・アルミニウム・銅・鐵・石英・硝子・石灰石・頁岩・大理石・墨青土・ゼラチン・ゴム)の變形の時間的變化を實測し次の如き4種の相(Phase)に分つた。

- 1) Rapid elastic yield (變形が殆んど即時で且つ可逆的なもの)
- 2) Elastic-viscous displacement (變形が緩慢ではあるが可逆的なもの即ち變形の速度は時間的に減ずるもの、併し乍ら荷重を緩慢に取り去つてしまへば又元の完全な舊體に復するもの)
- 3) Viscous displacement (變形が緩慢で且つ非可逆的なもの即ちこれも前者と同様に變形の速度は時間的に減ずるもの)
- 4) Lost motion (變形が急速で且つその儘のもの即ちその物體自身が非常な短時間で應力を受けるもの)土は恐らくこの2)の相に屬するものと見做されやう。

最近鐵道省土質調査委員會では東大地震研究所長石本己四雄教授指導の下にこの實驗を開始した。

3) 圧縮試験



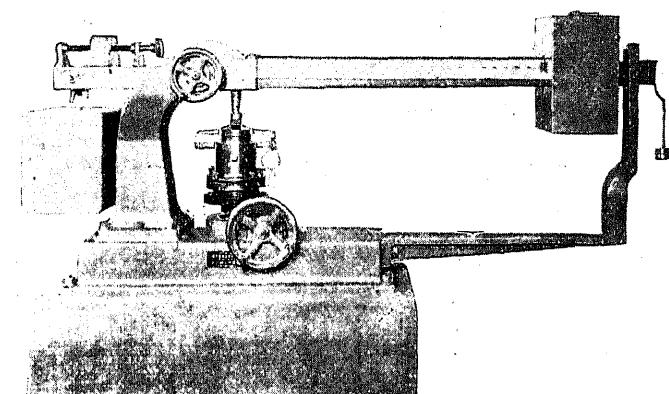
第867圖(a) 土の圧縮度試験用圓筒

a) 圧力・間隙比曲線

土の壓縮度又は叢固度(Compressibility or consolidation, Zusammendrückbarkeit)を試験するには Atterberg の流出限界まで含水を加へた試料を、第867圖(a)の如き上下端に多孔質の濾過板を敷き含水が自由に逃げ出し得る装置の中に入れて荷重を加へ、容積の變化する量を測定する(第867圖(b))。殊に砂質の土は自ら形を保ち得ないから此の方法によらなければ壓縮による變形を測定する事が出來ない。土を此の様な容器に密閉して壓力に依る容積變化量を測定し、壓力(p)—壓縮率(e)曲線を書けば第868圖の如く上記の耐壓試験の場合とは全

¹⁾ Michelson, The Laws of Elastico-Viscous Flow, Proceedings of the national academy of sciences, May 15, 1917.

く異つた上向凹の曲線を得る。而も變形率が或る點に達すると壓縮は最早進行せず壓應力は無限大となる。然るに通常の壓力の下では土粒子の容積變化は殆んど無視しえる程度のものであるから、土の容積變化は結局間隙の容積變化によるものと見る事が出来る。従つて此の實驗結果を縱軸に間隙比 e 、横軸に壓力 p をとつて第869圖



第867圖(b) 土の圧縮試験機
(鐵道省土質調査委員會設置) 全壓力 1,250kg, 感度 10kg, 供試體徑 10cm

の如き $e-p$ 曲線に書き表はすことが出来る。即ち漸次壓應力のかゝるに従つて間隙比は減少し充分に間隙比が小になれば最早殆ど壓縮されなくなる。

b) 圧縮・膨脹曲線 Terzaghi は土の間隙を全部水で飽和して壓縮し、再び壓應力を取り去る時は水を吸收して著しく收縮量を回復することを發見した。この膨脹曲線(Schwellkurve)は下式を以つて表はされる。

$$e = -\frac{1}{A} \log(p+B) + C \quad \dots \dots \dots (4)$$

但し此の式で e は間隙比、 p は壓應力、 A ・ B ・ C は常數である。この式は

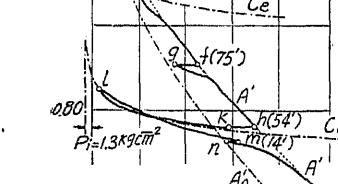
壓應力 $p=0$ の際に間隙比が $-\infty$ にならぬ様に B が入つてゐるが、充分に大なる壓應力を働かせねば勿論 B は無視し得る程度の値である。常數 C は p 軸の位置によつて異なる常數である。尚(4)式を p に就いて微分すれば

$$\frac{de}{dp} = -\frac{1}{A} \cdot \frac{1}{p+B} \quad \dots \dots \dots (5)$$

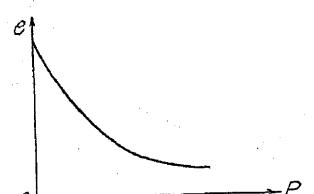
之れは $e-p$ 曲線の接線の式でこの $\frac{de}{dp}$ の値を Terzaghi²⁾ は壓縮係数(Zusammendrückungsmodul)と稱した。又(5)式を次の如く書き直して

$$E' = -\frac{dp}{de} = A(p+B) \quad \dots \dots \dots (6)$$

²⁾ Terzaghi, Erdbaumechanik, ss. 82—87.



第868圖
土の圧縮試験結果

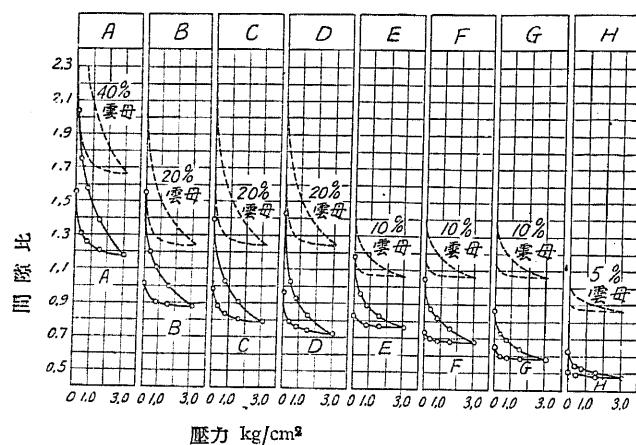


第869圖
土の壓力・間隙比曲綫

此の(6)式で B は省略し得る程度に小さいから

となる。圧力 ρ の変化が餘り大きくなければ E' は殆ど一定値をとり、これを **壓縮弾性係数** (*Zusammendrückung-Elastizitätsmodul*) といふ。

Terzaghi が第 857 図(a) の装置を用いて測定したこれらの結果を表示すれば第 29 表の如く。



第 870 圖

この圖は種々の異なる土質の壓縮度 (*Zusammendrückbarkeit*) 及び膨脹度 (*Schwellvermögen*) を表はすものと見て差支へない、而してそれが何れも非常に廣範圍に相異してゐることを示してゐる。之から見ても判るやうに粗砂の土は壓縮性に乏しく、粘土分に富むものは其の特性として非常に壓縮性が強い。

前項 2) で述べた耐圧試験

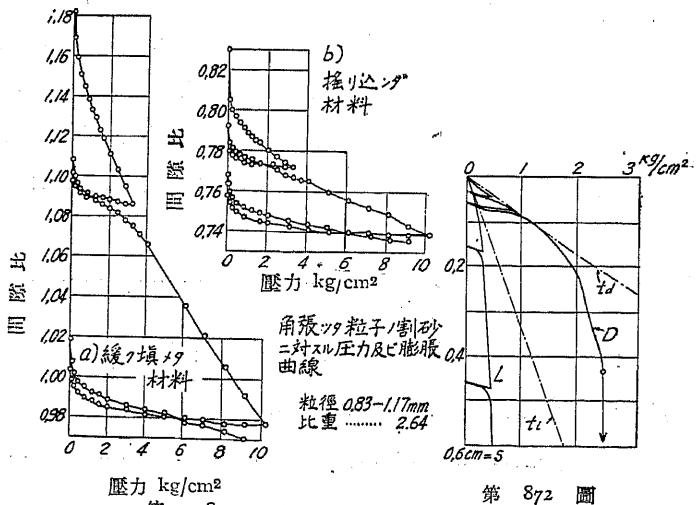
第 29 表 土質膨脹曲線

$$e = -\frac{1}{4} \log(p+B) + C, \quad E' = Ap$$

土 質	粒徑 (mm)	A	B	E'
乾いた粉状の粘土	<0.6	80.7	1.0	80.7%
8%沈泥を有する砂 石英の細粉(緩くつめた もの)	0.1 ~ 0.2 0.25 ~ 1.0	94.3 100.	1.0 1.3	94.3% 100%
同上(固くつめたるもの)	0.25 ~ 1.0	100.	1.6	100%
川 砂	0.8 ~ 1.3	176.	1.0	176%

第870圖はTerzaghiが粘土を代表するものとして石英粒に種々の混合比を以て雲母片を加へたものに就て圧縮試験を施した結果、圧力を横軸に間隙比を縦軸に取つて表はした圧縮・膨脹曲線である。

この図の下り勾配の曲線は圧力を繼續的に増加した場合の圧縮作用の進行を表し、上り勾配の曲線は引き続き圧力を減少せしめた場合の伸展又は膨脹を表す。而して

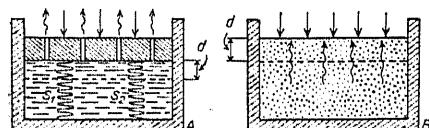


第 872 圖 土の密度と支持力の關係
 (L...緩き堆積 D...密なる堆積)
 第 871 圖 土の密度と壓縮度の關係

による曲線の形と此項 3) の圧縮試験による曲線の形とは、地盤沈下の測定の際沈下が土の弾性変形によるか、又組織の圧縮の爲めに依るかを判断するに役立つものである。

c) 間隙組織の影響

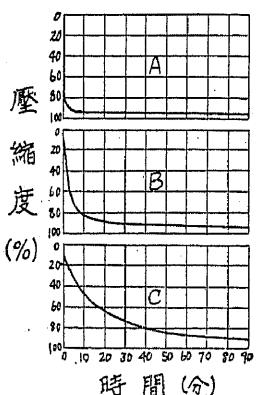
c) 間隙組織の影響 同一の土にあつてはその圧縮試験を始める前の土の密度が圧縮度に非常に關係する。第871圖は同一の砂の試料で行つた二回の圧縮試験の結果を示す。最初の實験では砂を弛く圧縮試験用圓筒に容れたもので、第二回のものは砂を圓筒中に充分密に擠り込むるものである。實験結果に據れば砂の堆積密度即ち原產地に於ける成層狀態が、その土の圧縮度に非常に大きな影響を與へるものであることが判る。併し壓力の減少に伴ふ間隙の増加(伸展又は膨脹曲線)は、砂の堆積密度即ち原產地の成層狀態には殆んど關係しないことが判つた。次に壓縮性の相異は直ちに土の支持力に影響する。第872圖は載荷試験の結果を横軸に載荷面上の壓力強度(kg/cm^2)、縦軸にそれに對する載荷板の沈下(cm)を取つて表はしたもので、緩く堆積した地盤の支持力(L)



第 873 圖

或る土に於て壓力變化に伴ふ間隙率の變化の速度には、

土の圧縮・透水度の模型実験 模型実験に依つて證明することが出来る。圖中(A)はスプリングの上に穴の開いた栓を詰め込むだ圧縮試験圓筒を示す。この栓の下部の全ては水を以て充されてゐる。この栓の上に加へる壓力を高めると栓の下降に伴ひ栓の下部に貯へられた水が流出する。而してこの穴が小さければ小さい程栓の下降は遅い。圖中(B)はこの水の代りに水を以て飽和された土質を詰めたもので、土質中に存在する間隙組織(*Porenzüge*)が穴の役目をなし圧縮と同時に水を押出すのである。



第 874 圖

天然に於て第873図(B)及び第874図に示した様な状態を呈する場合は、湖盆・入江・澗底等に沈澱した泥土が、この上に堆積した若い水成層の下に埋められた鹽壓縮されて行くやうな時である。

層の厚さが厚く且透水度が小さい時、此の如き地層は圧縮作用の途中にある、即ち不完全な固結状態にあるものである(第七章第20節3)○粘土層の項参照)。此の如き場合その半固まりの泥土の下部に存在する砂層は、ボウリングした際何等地形的には被壓的條件がないのに拘らず水が噴出することがある。この現象は第873圖(A)の模型に依て説明することが出来る。栓の下の含水性の土質に穴を穿つてその孔に鐵管を挿入するならば、栓の下部にある水中には或る程度の静水圧が支配してゐることが容易に判る。而してその壓力は栓の上に荷重を加へた刹那に於て最大となり、栓が下方に運動するに連れてその力は弱くなり栓が休止するに至つて始めて零となる。

實例—省線峯豊線圓山川橋脚の井筒降下中井底の水が噴出しその水位は河の水面以上まで上つた、此の如きはこの現象の著しい實例である。Terzaghi は次の如きこの現象の實例を掲げてゐる。厚さ 15m 位の泥土層中に沈井工を施行中、砂の挟み層に遭遇したため突然水が噴出し始め、その結果井筒工の附近にあつた建造物は著しく沈下した。而してその沈下量は一年間に數時に達し其の後年々沈下率は理論通り減少した。又或る時は深さ 50m の泥土層内で地表から 15m の深さで砂層に達し、突然水が噴出してボウリング作業員を驚かした、其際勿論地形上掘抜井戸の條件は何等存在はしてゐなかつた。

以上の彈性に関する數値の他、ポアソン比の測定も時によつては必要であるが、之等の値も非常に廣範囲に亘つて變化し且精確に測定することは困難である。粘土のポアソン比は凡そ $\frac{1}{2.5}$ 附近にあると見られ充分緊密につめた砂では $\frac{1}{5}$ 位であると考へられてゐる。

4) 動水力学的應力現象

前項に説明したやうに土の圧縮作用は土粒子の間隙が狹ばめられ又は失はれる現象である。即ち土を容器に入れて圧縮すると先づ間隙を充す空気が圧縮され、若し逃げ道があれば空気は搾り出されて圧縮は急激に進行する。それから先は間隙を占めてゐる含水が搾り出されるのであるから其の速度は透水度に依つて決定される、斯くて構造物を支へて徐々に圧縮されてゐる地盤は、數年後と雖も附近の新しい掘鑿によつて基礎を支へる土から水の逃げ道を見出せば、突然沈下することがあり得る。

土の間隙から水が搾り出されるのは土の内部の水圧が表面の水圧より高い爲めである。此の土の内部水圧を Terzaghi¹⁾ は動水力学的應力(Hydrodynamische Spannung)と呼んでゐるが、これが土の支持力に大なる役割をなしてゐる。東大の山口昇教授は此の土の新支持論を次の如く簡明に説明してゐる。今簡単の爲めに前記の壓縮試験に於て底部は不透水性の容器で水は専ら上の表面から搾り

1) Terzaghi, Edbau mechanik auf bodenphysikalischer Grundlage, Wien 1925, SS. 111~181.

2) 山口昇、土性論第四講、土木工學第2卷第1號、114~110頁、昭和8年1月。

出るものと假定する(第873圖参照)。

断面積 A の土は荷重 P の下に $p=P/A$ の壓力を受ける。この壓力は土中より搾り出た水が自由に輕石の蓋を通して上に流出するものとすれば、凡て土粒子の支持すべきものである。然るに土の中の断面(第875圖中の x の所の断面)に於ては土粒子の受くる壓力 P は減少して、その代りに間隙中にある水の壓力即ち水力的應力 w によつて補はれる。断面が充分に深くなれば P は殆んど消滅して w のみとなるに至る。その状態は第875圖に示す如くである。

土中の間隙を通じて搾り出る水流は単位時間に於ては既に前節6)透水度の項で述べた如く Darcy の法則によつて

$$Q=-kiA \quad (=1) \quad \dots \dots \dots$$

但 $k=$ 透水度、 $A=$ 断面積、 $i=$ 水壓勾配 $= \frac{dw}{dx}$

然るときは断面 A 、厚さ dx の土の要素部分の両面を透過する流量は Q 及び $Q + \frac{dQ}{dx}dx$ である。

その差は $\frac{dQ}{dx}dx$ となり (1) 式より

$$\frac{dQ}{dx}dx = -A k \frac{di}{dx}dx = -A k \frac{d^2w}{dx^2}dx \quad (=2)$$

然るにこの流量差は単位時間に $A dx$ なる土の要素部分が失ふ含水量に等しいわけである。単位時間に $A dx$ の土が失ふ含水量は土の間隙が水で充たされてゐると考へれば間隙比 e の単位時間に於ける減少と等しき故

$$-A dx \frac{de}{dt}$$

となる。然るに

$$\frac{de}{dt} = \frac{de}{dp} \cdot \frac{dp}{dt}$$

又前項の (6) 式により $\frac{dp}{de} = -E'$

$$\text{故に } \frac{de}{dt} = -\frac{1}{E'} \cdot \frac{dp}{dt}$$

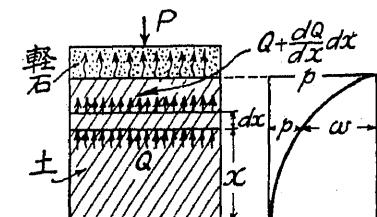
然るに単位時間に $A dx$ の失ふ含水量は

$$\frac{A}{E'} \frac{dp}{dt} dx \quad (=3)$$

(2) 及び (3) を等しと置けば

$$\frac{dp}{dt} = -kE' \frac{d^2w}{dx^2} \quad (=4)$$

これ Terzaghi の水力的應力の基本式であつて透水度 k 、壓縮彈性係数 E' を知れば、土の内部水



第 875 圖

圧 w の分布によつて土の粒子の支ふべき圧力 ρ の時間的變化を知ることが出来る。尙第 875 圖の如く $\rho + w = \text{常數} = \text{地表の荷重圧力}$ なる故

$$\frac{dp}{dt} = - \frac{dw}{dt}$$

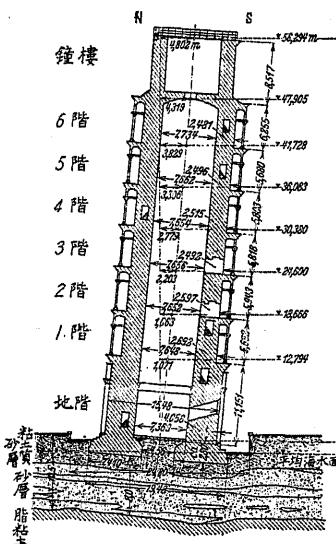
従つて(4)式は下の如くなる。

第 30 表

年	0	50	100	500	1,000	2,000	5,000	∞
沈下(m)	0	0.611	1.29	5.27	8.30	10.80	11.00	11.05

によって荷重の爲めに圧縮される間隙の時間的變化を知ることが出来る。然るときは荷重の爲めに圧縮されて土の表面が永い間に沈下して行く過程を時間的に精密に知ることが可能となる。

¹³ Ortenblad が河川の三角洲が自重によって壓縮沈下する量を上記の方法で計算した結果は、50m の深さの堆積土に對して凡そ第30表の如くなるといふ興味ある論文を發表してゐる。



第 876 図 a) ピサの斜塔の断面

ピサの斜塔・倫敦のセントポオル寺院等古き名建築が數百年又は千年の永きに亘つて沈下を續けてゐることは屢々新聞紙の報ずる所である。その沈下の機構は恐らく複雑なものであらうがこれ等も亦如上の内部水圧現象によつて説明出來得る。次に Terzaghi²⁾ の研究を掲げて見やう。

實例 ピサの斜塔は水平上層面を有つ硬い非透水性の粘土層の上に位する厚さ約 8m の比較的透水性の微砂層の上に載つてゐる。今日尙行はれてゐる處の見解に依ると塔が沈下並に傾斜を起した原因はこの上方の微砂層にあるのであつて、地下水が砂層の中を流れる際に土粒子を洗ひ出したり、或はこの微砂層の耐荷力が少いいためであるとされてゐる。處が新土質力学の提唱者である Terzaghi は斯學の見地から、塔の沈下は殆ど全く砂層の下に在る粘土層が徐々に圧縮されためであると説明した。即ちピサの斜塔に酷似した基礎地盤を有す

¹⁾ Ortenblad, Mathematical theory of the process of consolidation of mud deposits, Journal of Mathematics and Physics, Vol. IX, No. 2, 1920, pp. 74-140.

2) Tezagli, Die Ursachen der Schiefstellung des Turmes von Pisa, Der Bauingenieur, Heft 1/2, 1934 ss. 1—4.

る構造物の沈下現象から判断して斜塔の傾いた理由を次の如く説明してゐる。

ビサの街はアルノ河が平野から海に注ぐ河口に位して、其の邊の地盤は處々に掘抜井戸を吹く地下水を含んだ深さ 50m に餘る新しい第四紀の海岸堆積層である。又斜塔の基礎地盤は最近塔の附近を地下 15m 餘に亘って試錐した結果、第 876 圖 a) の如く基礎面の下方約 8m の間は粘土の挿み層を挿んだ純砂及び粘土交り砂の不規則な互層であつて、この下に比較的水をよく透す均質な粘土層がずっと深く續いてゐることが判つた。

この圖で建物の基礎を見て驚くことは、根入が非常に浅いにも拘はらず杭も打つてないであつて、この塔が1174年着工以來中央で2.40mも沈下したことゝ併せ考へると、建築當初の基礎下面は周囲の地表面と殆ど同一であつた譯である。

第 876 図 b) ピサ斜塔の沈下・時間曲線

現在では最も中心線で 2.4m, 最高部 1.6m, 最低部 3.2m の沈下を呈してゐる。

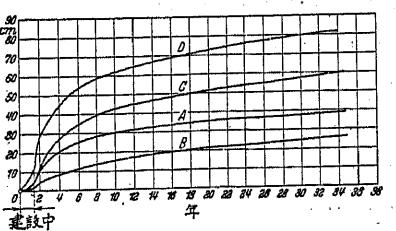
従来の沈下原因として挙げられてゐたものには地下水による侵蝕説と静力學的説明との二つがある。1838年から39年に亘つて Gheradesca と云ふ建築家が塔の全貌を明かにしようとして、塔の周圍に溝を掘鑿しこれを擁壁で盛んだが（第 874 圖参照）、溝の深さは地下水位以下にあつたため土粒子を含んだ水が盛んに湧出した。地下水に依る侵蝕

説はこの現象に基くものであるが、このとき湧出した水量は $0.1 \sim 0.3$ l/sec, 懸濁物は $0.25 \text{ kg}/\text{m}^3$ の少量に過ぎず、第 876 図 1) に見るやうに塔が $1 \text{ mm}/\text{年}$ の沈下を示すためには 1 年に 100 g の土粒子(乾燥重量)を洗い出さねばならない計算となり、地下水説は明かにその根據を失ふ、

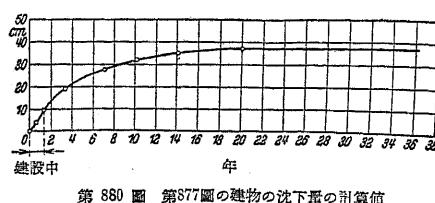
又静力学的沈下説は粘土層の上から基礎の底面まで達する厚さ8mの微砂層の耐荷力が非常に弱いことに基くものであるが、斯る透水性の砂層の壓縮による沈下は大部分が構造物の工事中に起るもので、その沈下・

時間曲線は工事の完成と同時に銳く屈曲して一定値に近づくものである。即ち第876図 b)の曲線は典型的の透水層を挟まない厚い粘土層の圧縮曲線に外ならない。

茲で Terzaghi は彼の主張する粘土層の堅密に依る構造物の沈下を説明するため、第 877 圖の如き厚さ 7m の純砂利・砂層の上に $3 \sim 4 \text{ kg/cm}^2$ の基礎壓力で支へられてゐる建物の例を示してゐる。その基礎平面圖は第 878 圖に示す如く B 及び D 點は 40 年間に 30cm



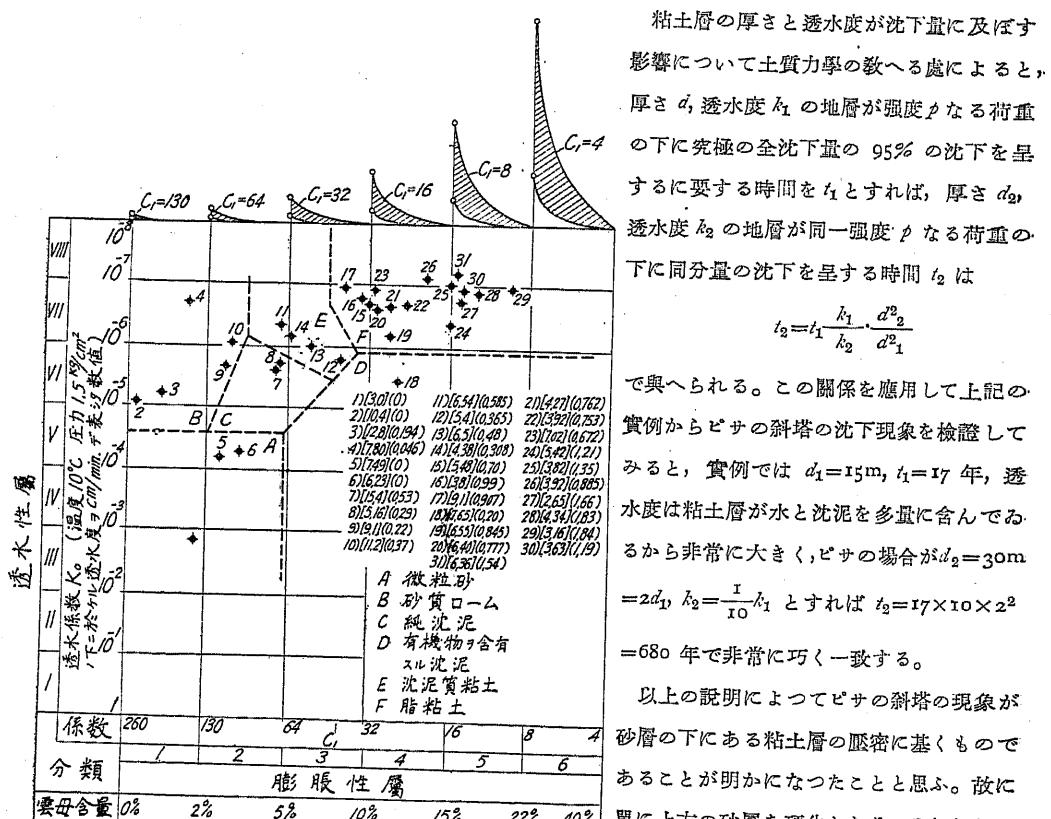
第 879 圖 第877圖の建物の沈下曲線



第 880 圖 第 877 圖の建物の沈下量の計算値

及び 80cm の不等沈下を呈し、基礎の各點の沈下・時間曲線は第 879 圖の如くなつてゐる。この沈下現象を明瞭にするため基礎地盤の D の傍に試錐孔(第 878 圖)を穿つて、擾亂されない自然の儘の粘土標本を採取試験して粘土層の圧縮に依る沈下量を理論的に算出したのが第 880 圖である。試錐孔は恰も建物の A 點の位置に相當し總沈下量約 40cm, 實際に測定せる第 879 圖の曲線 A と非常に酷似してゐる。唯茲に理論値と實測値と異なるのは前者は第 880 圖の如く一つの水平な漸近線を持つに拘はらず、實測曲線は第 879 圖の如く 5mm/年の傾きを有する直線を漸近線とすることである。此の現象に就ては Terzaghi は別に詳細な説明を附してゐる。

此の實例とピサの塔とを比較すると、水平な粘土層の上の一樣な厚さの砂層に載つた構造物が傾斜沈下を呈せぬ點に於て全く同一であつて、唯その沈下が沈下量と沈下速度とを異にするのは、ピサの斜塔では粘土層に加はる最大壓力が 5.86 kg/cm^2 であるのに、後の實例では 0.56 kg/cm^2 に過ぎず、又粘土層の厚さと透水度との差に依ることも勿論である。

第 881 圖
壓縮透水度に依る土質の分類 (Terzaghi に據る)

粘土層の厚さと透水度が沈下量に及ぼす影響について土質力学の教へる處によると、厚さ d_1 、透水度 k_1 の地層が強度 ρ なる荷重の下に究極の全沈下量の 95% の沈下を呈するに要する時間を t_1 とすれば、厚さ d_2 、透水度 k_2 の地層が同一強度 ρ なる荷重の下に同分量の沈下を呈する時間 t_2 は

$$t_2 = t_1 \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

で與へられる。この關係を應用して上記の實例からピサの斜塔の沈下現象を検證してみると、實例では $d_1 = 15 \text{ m}$, $t_1 = 17 \text{ 年}$, 透水度は粘土層が水と沈泥を多量に含んでゐるから非常に大きく、ピサの場合が $d_2 = 30 \text{ m}$

$$= 2d_1, k_2 = \frac{1}{10} k_1 \text{ とすれば } t_2 = 17 \times 10 \times 2^2$$

= 680 年で非常に巧く一致する。

以上の説明によつてピサの斜塔の現象が砂層の下にある粘土層の堅密に基くものであることが明かになつたことと思ふ。故に單に上方の砂層を硬化したり、それから土粒子が流出するのを防いだりしても斜塔の沈下は停止出来ない譯である。

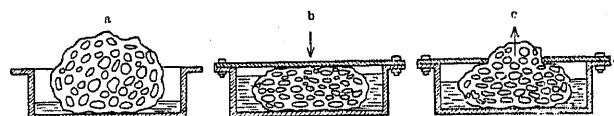
又 Terzaghi は此の如き土の壓縮・透水度を種々なる土に就て測定し、第 881 圖の如き土の分類を得た。先づ縦軸に透水度 k をとり横軸に壓縮弾性率 E' をとつて全面積を A から F に到る 5 種の土に分類してゐる。この圖表でも判る通り土質によつて非常に壓縮度が異り、特に粘土分の多い程その率が大きいことは注目に値する。同氏はこの原因を實驗的に研究し(前節 9) 粘土の特性の物理的意義及び本節 3) 第 870 圖参照)、粘土ではその組成土粒子が鱗片状鉱物片(主として雲母の如きもの)が含まれてゐるため、その組織が間隙の多い所謂蜂窩構造をなし恰も水を含んだ多孔性の海綿が押しつけられて水を排出するやうなものであると結論した。

此の如き考へ方から彼は又、隧道坑内

に於て軟質粘土(風化第三紀層の油質貯岩を掘鑿する羽越線折渡隧道及び温泉余

土で苦んだ丹那隧道等第四章第 9 節 7) 軟弱岩 a) 粘土の膨脹膨脹現象を

することは、海綿状の構造をなした粘土が地中に於て山の巨大な壓力のため押し付けられてゐたものが、導坑の掘鑿によつた壓力から開放され恰も第 882 圖に示す如く水を吸收するがためであると断じた。

第 882 圖
粘土の膨脹現象は海綿の吸水による彈性的伸展作用であるといふ假説を示す圖

5) 土の抗張試験

土木工事では土に抗張力を要求することは殆んどないが、建築用の粘土には土の抗張力が可成り重要な性質になつてゐる。建築用の粘土の抗張試験は先づ粘土に一定の含水量を與へ、充分捏ねたものをセメント抗張試験用のブリッケットの型に叩いて填めたものを空中及び 105°C の恒温乾燥器に入れて充分乾

第 31 表 機械的分析結果と抗張強度

粒径	>0.5mm, 0.5~0.25mm, 0.25~0.05mm, 0.05~0.005			<0.005	抗張強度
	砂 (%)	沈泥 (%)	粘土 (%)		
混合比				(kg/cm ²)	
1.	11.00	3.50	14.70	11.00	59.00
2.	16.35	7.80	24.35	7.11	44.00
3.	33.44	11.45	29.55	5.66	22.00
4.	42.95	6.400	5.585	14.21	30.645
5.	—	1.00	3.00	6.95	87.96

燥し、セメント用抗張試験機にかけて破壊抗張強度を測定してゐる。

American Society of Civil Engineers

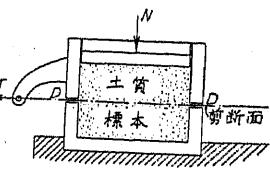
Foundation Committee で試験した断面 $43 \times 43 \text{ cm}$ の石膏の型の中に試料を填めて測定した結果は、黃色粘土質の土で 0.102 kg/cm^2 , 青色粘土質の土で 0.124 kg/cm^2 となつてゐる。

Orton, Ries 等が研究した結果によれば粘土質の土の抗張強度は砂粒子から粘土粒子に至る大小

の粒子が適宜に混合したものが最も強度が大きくなつてゐる。Ries¹⁾が New Jersey clay に就いて行つた實驗の結果は第31表の如くである。

6) 剪断試験

土の剪断抵抗は力學的性質の中最も重要なものであつて第十章の力學的計算の基礎となる數値である。普通の土は自ら形を保ち得ないから、その剪断抵抗を測定するには土を第883圖の如き容器に入れて、



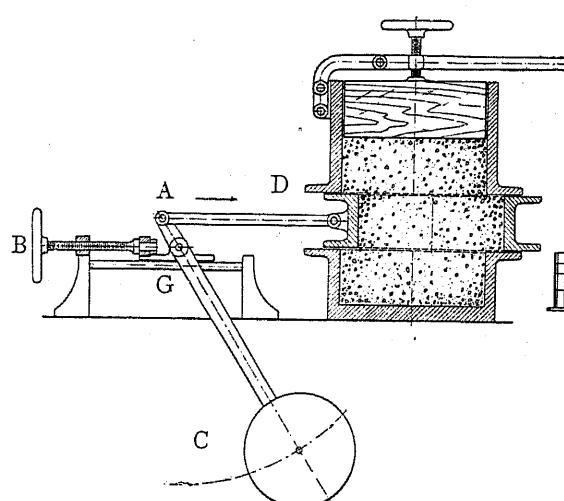
第 883 圖

これを上下に壓へつゝ左右に引切る。

第884圖は東大山口昇教授考案の三割箱式剪断抵抗測定機である。第九

章第27節第894圖の如き採取機で自然の儘の状態で採取した土を三つ割箱の中に容れ、レバアEに依つて上下壓を加へ乍ら左端のハンドルBを廻すとピボットAが前進して振子Cの力率によりDを壓し中央の層を壓し抜く。

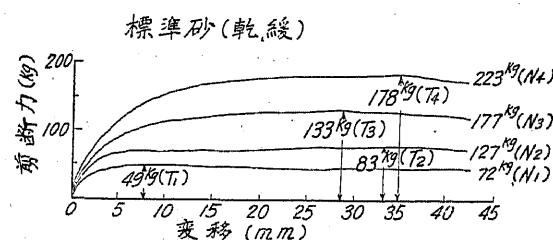
壓し抜く際の抵抗力Tは振子の振れによつて自記ドラムGの上に軸の方向に記録され、壓出された變位はドラムの軸に捲附けた糸によつて廻轉の方向に

第 884 圖
三割箱式土質剪断抵抗測定機の機巧

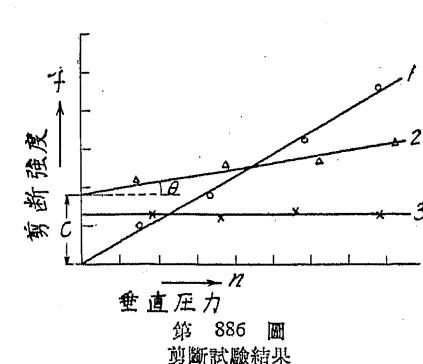
記録される(第884圖)。

自記記録結果は第885圖の如き曲線で、始め 1,2mm の變位の間は容器に土が充分填つてゐない爲殆ど抵抗力が表はれないが或る點で最大剪断抵抗を與へる。

斯くて一度引切つた土は自然の状態のときの強度を失ふから、同一の土質から數個のサンプルをとつて垂直荷重 N を色々に變へて剪断し、剪断抵抗 T を測定する。三割箱の斷面積を A として

第 885 圖
垂直荷重 (N₁~N₄)・剪断抵抗 (T₁~T₄) 曲線

¹⁾ Ries, Clays, their occurrence, properties, and uses with special reference to those of the United States and Canada, New York 1927.

第 886 圖
剪断試験結果

を直交軸上に記載すれば一般に第886圖の如き直線を得る。この直線は

$$t = n \tan \theta + c$$

で表はされ、θは摩擦角(Frictional angle, Reibungswinkel, Angle de frottement), cは凝集力(Cohesion, Kohäsion, Cohésion)に相當する。土が若し粘土質のものなれば此

の直線は3の如く水平となつて摩擦角は零、又土が砂質のものなれば直線は1の如く原點を通つて凝集力は零となる。

土の剪断試験方法(鐵道省土質調査委員會現行規定)

- 1) 土質標本運搬器(20×20×25cm)中の土を自然状態を破壊せざる様注意しながら剪断機三割箱内に移す。
- 2) この土に適應(其の都度適宜規定する)する垂直荷重を加へ20—30分間静置する。
- 3) 剪断所要時間は50mmに對し15分間を適當とし剪断力は之れを記録紙に自記せしめる、特に一組の試料(三箱以上)に對しては此の剪断時間を一定に保つ事を要する。
- 4) 剪断後試料を抜取りて空のまゝさらにハンドルを廻し機械の磨擦抵抗を記録し之れを前に記録せる剪断力より減じ眞の剪断力を決定する(第887圖)。

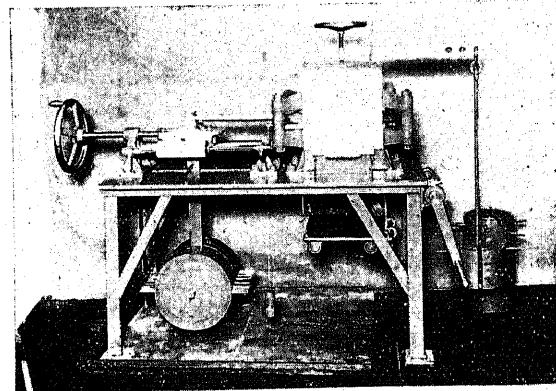
7) 凝集力と摩擦力との關係

土質の組成成分・含有膠質物の量とその性質は工事施行上極めて重要である。例へば切法面の安定度、擁壁に及ぼす土壓、基礎の支持力等の如きは凝集力と摩擦力に依て決定されるからである。

a) 凝集力の二態と摩擦力

多くの場合凝集力は土粒の微細度が増すに従つて大きくなり、摩擦力は逆に土粒の微細度が増すに従つて小さくなる。

粘土分のない全く乾いた或ひは全く水で飽和された砂又は礫(肉眼的に粒の大きさを見分け得るもの)

第 887 圖 土の剪断抵抗測定機(中型)
(鐵道省土質調査委員會備付)
上下壓 1,000kg 剪断力 1,500kg 剪断面積 20 m² 感度 100kg

は、凝集力は0で摩擦係数は少くとも0.60~0.65位である。微細粒の土質では凝集力強度は100 kg/cm²位のものである。然るに摩擦係数は0.20位まで低下して来る。然し乍らこの両方の値は同一の土質でも非常に廣範囲の變化がある。地表に近い最上層内ではその日その日でさへ可成り變化する。從て土質層の凝集力と摩擦力に關する問題は如何に地質學的乃至は物理學的の深奥な研究があらうとも、唯その値を判定するといふ程度のことしか役には立たないものと云つてもいい。

粘土を次第に乾かして行くと含水量が減するに従てその物質の凝集力は漸次増加する。この種の凝集力は土質力学の説に従ふと水の表面張力の作用であるといひ之れを見掛けの凝集力(Scheinbare Kohäsion)と名付けてゐる。

Terzaghiはこの見掛けの凝集力を説明するに次のやうな現象を以てしてゐる。表面張力は恰もゴムの皮で包んだやうな作用で供試體に働く壓力であつてこれを毛細管壓力と稱する。粘土標本を乾かして行くと表面張力は増して行く。而して外部から壓力を加へて(機械的)圧縮した時と同様その粘土内の間隙は減じて行く。この現象を粘土が“收縮する”と稱する。同時に見掛けの凝集力は増す。何故ならばこの見掛けの凝集力といふものは毛細管壓力に依て惹き起された内部摩擦力に外ならないからである。即ち

$$\text{見掛けの凝集力} = \text{毛細管壓力} \times \text{摩擦係数}$$

間隙が少くなればなる程毛細管壓力の最大値は益々大きくなる。脂粘土の類になるとこの値は數百氣壓位にまでなることがある。從て乾燥に伴ふ間隙變化は同一粒形質の場合に於ては粒徑の減ずるに伴ふて増加して来る。この意味に於て乾燥し切った物質の耐壓強度は増大し、脂粘土の場合では耐壓強度は或る種の人造石に匹敵する。半ば或は全く乾燥し切った土質を水中に入れると水の表面張力並に夫れに伴ふ毛細管壓力は零に等しい。この土質が水を吸收すること恰も水中に於て膨れる上る海綿のやうに彈性的伸展作用をする。此の如き現象を“膨脹する”と稱する。毛細管壓力の最大値が相等しい場合に於ては、收縮並に膨脹作用に伴ふ間隙變化は土質の固體的性質に關係する、而かもその性質は一方に於てその土質内の鱗片状鉱物組成の含有量に依て決する。

粘土が膨れ上つた時は凝集力は小さくなるが併し全く無くなつてはしまはない。水中に充分浸した後尚残つてゐる凝集力は、含水の表面張力には關係なく土粒分子の集結作用に依るもので従つて之れを眞の凝集力(Echte Kohäsion)として區別してゐる。同一の土質でもこの眞の凝集力は土粒分子が夥多に互に密に重り合つてゐればなる程大きくなる。多くの粘土ではこの眞の凝集力が非常に大きくそのため侵蝕作用に對して可成大きい抵抗力を有することになる。

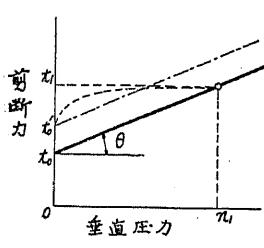
見掛けの凝集力(例へば乾き切った土塊の凝集力)は霖雨のためには眞の凝集力の値位まで低下して行くことになる。而して凝集力の減少に伴ひ間隙の増大した結果はその土質内に割目を生じ或は之れも破碎するに至ることになる。併し眞の凝集力は水の滲入のため決して影響は受けない。

¹⁾ 瑞典國有鐵道土質調査委員會に據ると、この眞の凝集力に關する興味ある實例が報告されてゐる。今茲に表面が乾き切つた粘土層が地質現象のため永い間水中に浸り厚さ數mの弛い沈積層で蔽はれてゐるとする。そうするとその乾いた外皮の中では見掛けの凝集力は眞の凝集力の値まで低下して来る。併し乍らこの眞の凝集力は、嘗て太陽に晒された場合の乾燥作用のため土粒分子が押され重り合つた結果可成り大きいものとなつてゐるから、その嘗て乾いた外皮であつたものは現在は水面下8—10mの箇所にあり乍ら、非常に硬い厚さ數mの挿み層として軟質堆積層の間に介在してゐることになる。

結合してゐる土質層の摩擦力は實驗中水の中に入れて置きさへすれば可成り確かに測定することが出来る。尤も時に由ると見掛けの凝集力で實驗の事情が蔽ひ隠されることもある。併し或る與へられた土質標本の摩擦試験は假令水の中でも決して凡ゆる場合同じ値を持つてゐるとは限らない。

第888圖は凝集力のある土の剪断試験結果を縦軸に剪断力、横軸に垂直荷重をとつて表はしたもので、その式形は前記の如く次の形となる。

$$t = t_0 + n \tan \theta = t_0 + n \cdot f$$



第888圖

この式中 t_0 は土質の凝集力、 θ は摩擦角、 f は摩擦係数を表はす。併し實際この關係は決してこの式の示すやうに簡単ではない。若しもこの實驗が水中で行はれたとした場合は t_0 は眞の凝集力を表はすものとなるであらうが、その値は水の表面張力に依て惹き起された見掛けの凝集力より遙かに小さい値を示すことになる。併し乍ら眞の凝集力は同一の土質に就ても決して一定の値を示しはしない。例へば 第888圖に示すやうな實驗で逆に荷重 n の値が n_1 から漸次零まで減じて、之の實驗を繰返へすとすればこの實驗の結果は點線で示すやうなものになるであらう。そうするときは眞の凝集力 t_0' は $t_0 > t_0'$ となる。又摩擦角 θ は實驗方法に従つて廣範囲に變化する。荷重を急速に0から n_1 , n_2 , ……と上げて行けば、 θ の値は0と殆んど區別がつかない程度のものとなる。荷重をかける時間が長ければ長い程、摩擦角 θ は最大極限値に近づく。之れが脂粘土の場合では約1位のものになる。この極限値が狹義の所謂摩擦角であつて種々の状態と半ば無關係に土質別の常数になつてゐる。

b) 土の構造と凝集力

天然の状態に何等かの人工を加へる時、その加へられた人工の種類に従つて土質内を支配する壓力は非常に急速に或は緩慢に變化する。従つてそれに對抗する摩擦抵抗は擾されない以前の土質の種別や状態ばかりではなく加へられた人工の種類にも關係する。

尚一層重要な條件としては土質中の含水量と間隙率とに變化なきものとすれば、その土質内の組

1) Statens Järnvägars Geotekniska Commission, 1914—1921. Slutbetänkande 31 Maj, 1622 Stockholm. S. 138—140 u. Tafel 41.

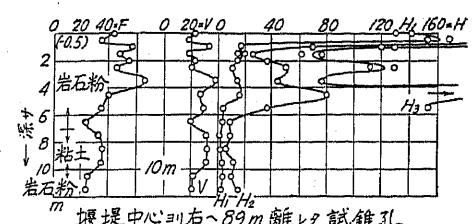
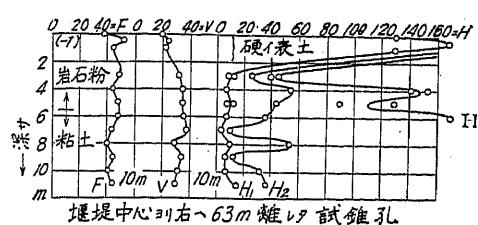
織の擾乱といふことは凝集力の値に非常な影響を與へる。或る粘土標本を唯單に捏ね廻すだけでその土質の凝集力をその本來の値から幾部分かだけ低下させることになる。而してその凝集力の減却量は土質の種類に従つて非常に異なる。第889圖に於て H_3 の曲線の横軸は自然状態其の儘の時の土質標本の凝集力を、 H_2 では組織が一部分擾乱された場合の夫れを、更に H_1 に於ては夫れが全く根本的に擾乱された場合の凝集力を表はす(瑞典土質調査委員會に依る圓錐貫入試験の結果)。土質標本はボウリングに依つて採取しその各の場所に應する深さを m で縦軸に取つた。圖表で見られる通り根本的に擾乱された土質標本の凝集力は一見互に似よつたやうな土質標本に對してさへ(この場合粘土に岩石粉の混じたものであるが)、擾乱されない標本の凝集力の 26% から 2.6% までの範囲の變化がある。Terzaghi は耐壓強度試験の結果に基いて褐色の氷成粘土(北米 Massatuscatt 州 Cambridge 産)の凝集力をば、その土質標本を捏ねた結果擾乱しない場合の凝集力の 55~25% まで低下させてこの事實を確かめてゐる。

構造を擾乱することが此の如く凝集力に對して非常な影響を與へる事實に關する物理學的原因は未だ判明してゐない。併し乍らこの現象夫れ自身は實際上重要な意義がある。諾威及び瑞典の研究



第890圖 峰豊線圓山川橋脚の基礎工事
——倒壊せる鐵矢板

率が減却されるのに拘らず此の如き現象の起るのは、矢張りこの構造擾亂に起因する凝集力の減少のためであらうと云つてゐる。省線峰豊線圓山川の橋梁基礎工事で鐵矢板が倒壊したことがあつたが矢張り原因はこの種のものであらうと思ふ(第890圖)。一般に斯ういふことは云ひ得る、即ち構造擾亂の凝集力に對する影響は土質のプラスティシティが増加するに從て少くなる。最も甚しいものでは或る種の軟弱でプラスティックな主として微細な岩石粉で組成された流砂土又は粘土の場合の



第889圖 土質組織擾亂と緊硬度の減却
 H =緊硬度 (H_3 摶されないもの, H_2 稍摶されたもの
 H_1 全く摶されたもの)
 F =標準含水量
 V =試験土質の含水率 (%)

やうである。

從て工事に先立つて調査研究して置かなければならぬことは前述の式中の α_0 と β の値を豫め確かめることに依て決する。基礎地盤の支持力の場合になると之れに反し又他の異つた土質の物理的性質に關係して來ることになる。

第26節 土質調査機關

1) 鉄道省土質調査委員會の事業と設備の概要

設立 國有鐵道線路の建設・保線・改良等業務執行上、土の性質を科學的並に工學的に調査研究しその地域の情況に應じ適切なる工事を施行して、工費の節約と線路の安全とを期するとして昭和5年11月21日鐵道大臣の決裁を経て本委員會が設立された。

委員任命

委員長……官房研究所長、特別委員……建設局長及び工務局長、委員……建設局各課長・工務局各課長及び研究所第四科長、幹事……建設局・工務局各課及び研究所第四科技師

調査機關

第一部 土質科學的調査

土の分類(I)……機械的分析・物理的機械的性質の決定
土の分類(II)……組成物の決定・組織及び構造の研究

第二部 土質調査を基礎とする計算並びに構造物の設計 研究室

地図の力学的解析
切取・盛土の限界高及び法勾配の決定
軟弱地盤上の基礎沈下の安定計算及び構造物の設計
排水・隧道覆工に及ぼす土壓の計算

第三部 土質調査を基礎とする工事施行法の考案

土質試験用標本の採取用試験工事
電気抵抗式・弹性波式地質調査
杭打・床版載荷試験

調査設備

備付文獻

圖書

基礎科學(數學・物理學・化學・地質學)・土質科學(土壤學・土質力學・土壓論・岩石學・應用地質學・水文學)・土木工學(應用力學・構造工學・施工法)

雑誌(科學一般…12種・土質科學…14種・地質學…19種・材料科學…13種・土木工學…26種)

① Geotechnical Committee, Japanese Government Railway.

實驗室

土の分類試験(I)

- イ) 機械的分析設備 (篩分析及び沈澱分析装置・外に A.S.I 及シエーネ淘太分析装置・ウキダナア沈降分析装置)
 ロ) 物理的性質測定設備 (比重法装置・間隙率及び含水率決定装置・緊硬度限界測定設備 (流出・プラスティシティ)・圓錐試験装置・膨脹及び收縮試験装置)
 ハ) 機械的性質測定設備

當委員會所有の土質標本採取機及び運搬器 (土質標本採取機…4組・同 運搬器…100個)
 地下深處土質標本採取用試錐機 (100 mm 徑 三重管式コオア・テープ …1箇・100 mm 徑 二重管式コオア・テープ …1箇・可搬式迴轉衝擊兩用試錐機 (100 mm 徑 コオア採取用 (深度 20 m) …1箇)

土質剪断抵抗測定機

豆型 (4 cm^2)	垂直荷重 100 kg	剪断力 200 kg	感度 (上下壓) 1 kg	1 kg	2 番
中間型 (10 cm^2)	垂直荷重 300 kg	剪断力 600 kg	感度 (上下壓) 5 kg	1 kg	1 番
標準型(小) (20 cm^2)	垂直荷重 300 kg	剪断力 350 kg	感度 (上下壓) 5 kg	1 kg	2 番
標準型(中) (20 cm^2)	垂直荷重 1000 kg	剪断力 1500~2000 kg	感度 (上下壓) 5 kg	1 kg	3 番
標準型(大) (20 cm^2)	垂直荷重 30000 kg	剪断力 60000 kg	感度 (上下壓) 100 kg	50 kg	1 番

土質摩擦試験機

標準型(中) (20 cm^2)	垂直荷重 100 kg	引抜力 150 kg	感度 (上下壓) 5 kg	1 kg	1 番
------------------------------	-------------	------------	---------------	------	-----

壓密透水度試験機 (徑 100 mm・厚さ 20 mm 標本用) 壓力 1400 kg …1 番・壓力 200 kg …1 番

壓縮試験機 ……電動式自記型 (100 mm 徑・壓力 200 kg) ……1 番・重力的自記型 (100 mm 徑・壓力 40 kg) ……1 番

透水度試験器 ……(徑 20 cm) ……2 番・(徑 20 cm²) ……1 番

他にこの種の實驗設備ある箇所全國 12 建設事務所

土の分類試験(II)

(イ) 土の組成物の分析

比重計式分析 (液體比重及び個體比重測定装置)・屈折率式分析 (屈折率測定用溶液各種・單色光源装置・液體屈折率測定装置)・
 極端分析 (立體檢鏡装置)

(ロ) 土の組織及び構造の研究

プレバラート作製設備 (ニング製ミクロトオム ……1 番・岩石プレバラート作製用研磨機 ……1 番)・プレバラート検定用具 (ヲイツ製鑽物顯微鏡 ……2 番)

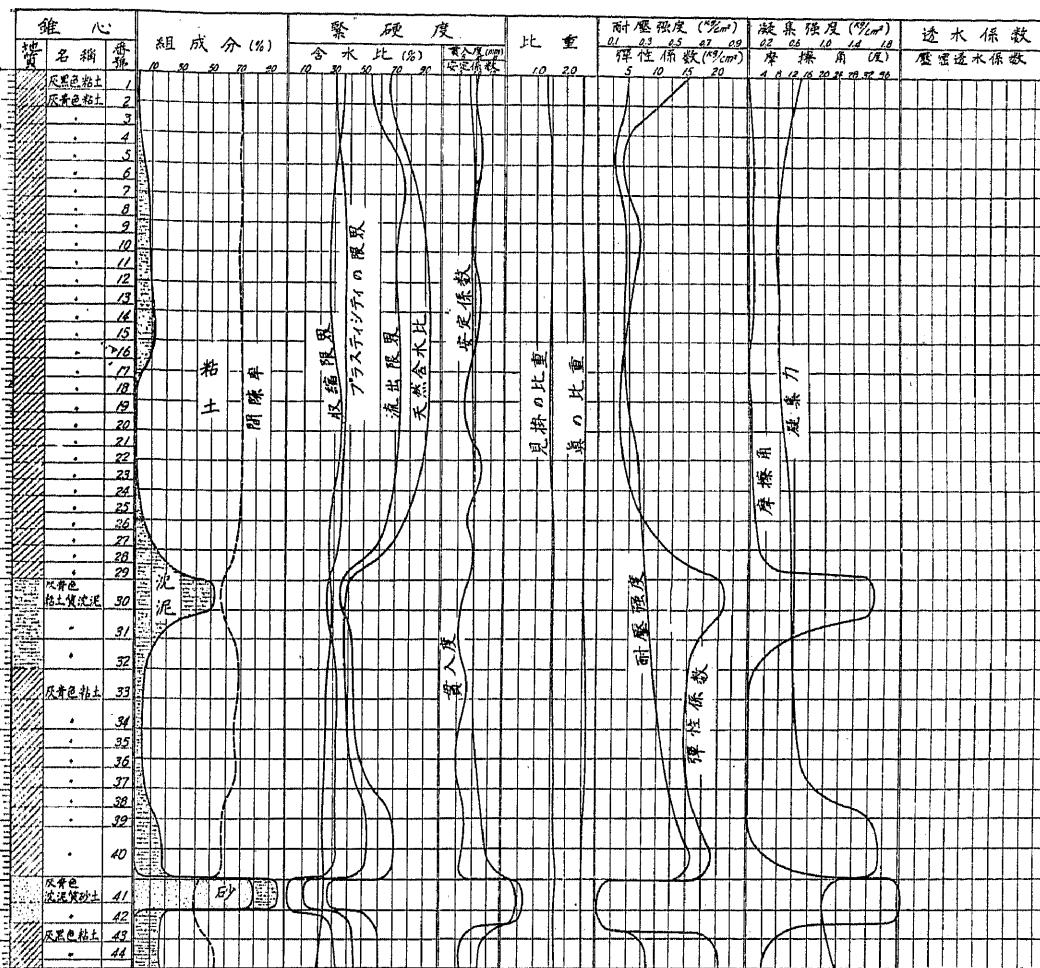
土に関する構造物の實驗的研究

- (イ) 基礎地盤の沈下實驗 (實驗用硝子箱裝置 ……2 番)
 (ロ) 掘削剖面の實驗 (前観面試験裝置 ……1 番)
 (ハ) 杖の沈下試験 (實驗用硝子箱裝置 ……1 番)
 (=) 光彈性裝置による應力分布の研究 (光彈性試験裝置 ……1 番)

報告書の發行

委員會設立以來報告は 3 輯發行したその主なる内容を記すれば下記の如きものである (昭和 10 年 3 月現在)。

第 891 圖 試錐標本土質試験成績圖表 (満鐵大阪埠頭地質調査第一號孔)
 但し試錐標本は 100 mm 以上の徑を有し自然狀態たることを要す (三重管式コオア・テープ使用)



$$\text{間隙率} (\text{Porosity}) = \frac{\text{土の間隙の容積}}{\text{土の全容積}}$$

$$\text{間隙比} (\text{Void ratio}) = \frac{\text{土の間隙の容積}}{\text{土粒子の容積}}$$

$$\text{含水率} (\text{Water content}) = \frac{\text{土の中の水の重量}}{\text{土の全重量}}$$

$$\text{含水比} (\text{Water ratio}) = \frac{\text{土の中の水の重量}}{\text{土粒子の重量}}$$

緊硬度限界 — 此の限界は各其の限界に於ける其の土の含水比を以て表す

I. 收縮限界 (Shrinkage limit) … 土は含水率の減るに従つて其の容積を減ずるが其の減少には或る限度がある。其の限度に達した瞬間の含水比を其の土の收縮限界と云ふ。

2. プラスティシティの限界 (Plastic limit) … 土の標本を略徑 8mm 長さ 10mm の棒状に造り之を硝子板上に掌を以て數回轉がして裂目を生ずる瞬間の含水比を其の土のプラスティシティの限界と云ふ。

3. 流出限界 (Liquid limit) … 土の標本約 50gr を徑 100mm の深さ 25mm の蒸發皿に入れ一定規準の作機器を以て上幅 10mm 底幅 2mm の四形斷面の溝を作り皿の底を軽く 10 回叩て上端が崩れずに下端が流れ合ふ瞬間の含水比を其の土の流出限界と云ふ。

貫入度 — 貫入試験機 (鉛體の重さ 100~150gr 及び鉛體の角度 45°~60°~90°) を用ひて鉛體の土質標本中の貫入度を測定する。

$$\text{安定係数} = \frac{\text{流出限界(含水比)}}{\text{天然含水比}}$$

此の數値の大なる程其の土の安全度の大なることを示す。

$$\text{見掛の比重} = \frac{\text{土の重量}}{\text{土の全容積}}$$

$$\text{眞の比重} = \frac{\text{土粒子重量}}{\text{土粒子の容積}}$$

$$\text{透水係数} (\text{Permeability})$$

$$V = k \cdot S; V = \text{流速}, S = \text{水頭勾配}, k = \text{透水係数}$$

$$\text{壓密透水係数} (\text{Compressibility-Permeability})$$

$$e = -\frac{1}{A} \log(p + B) + C; e = \text{間隙比}, A = \text{面積}$$

$$A, B, C = \text{常数}$$

$$\text{耐壓強度} (\text{Compressive strength, } \text{kg/cm}^2)$$

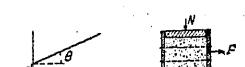
$$f_c = \frac{A}{P}, P = \text{最大壓縮荷重}, A = \text{面積}$$

$$\text{彈性係数} (\text{Modulus of elasticity, } \text{kg/cm}^2)$$

$$E = \frac{A}{P} \div \frac{\Delta L}{L}; L = \text{標本の長さ}, \Delta L = \text{長さの変化}$$

$$\text{抗剪強度} (\text{Shearing strength})$$

$$f = n \cdot \tan \theta + c$$



$$f = \text{抗剪強度}$$

$$\text{kg/cm}^2 = F/2A, n = \text{上下壓力強度} \text{kg/cm}^2 = N/A$$

$$A = \text{面積}, \theta = \text{摩擦角}, c = \text{凝聚力} \text{kg/cm}^2$$

第一輯 (昭和六年六月)……四六版・本文 334 頁・圖面 168・表 65

調査報告

- 第一部 …(I) 土質科學的研究題目概要。(II) 土質の剪断抵抗の測定
- 第二部 …(I) 軟弱なる地盤上に築造する橋渠の設計法に関する調査。(II) 泉越隧道修築に関する設計。(III) 傾城山隧道修築に関する設計

論説報告

丹那附近の氣象及河川流量並に丹那隧道湧水等に関する調査報告(第一回報告)。電氣的地质調査の一方法に就て(其の一)。表面に角柱荷重を受けたる土壤内の應力。關西總揮要附近の地质の應力抵抗に就て。秋葉原——兩國間基礎調査報告(地质概要及基礎調査並に施工せる試験坑に就て)。有明線の粘土層上に於ける建設工事。三吳線に於ける基礎土質調査(第一回及第二回報告)

参考資料

瑞典國有鐵道土質調査會の研究方法。粘土層斜面の剪断崩壊及び擁壁の倒行。テルツアギの講演「現在及將來に於ける基礎科學に就て」。打基礎の支持力。炭層の下盤に於ける壓力分布に就ての實驗的研究

第二輯 (昭和七年十月)……菊倍版・本文 420 頁・圖面 506・表 74

調査報告

- 第一部 …(I) 土壤の剪断抵抗の測定。(II) 土の組成物及び組織の研究。(III) 崩壞土壤の理論と應用
- 第二部 …(I) 擁壁の設計(試案)。(II) 橋脚の設計(實例)。(III) 隧道の設計(實例)

論説報告

- (一) 土壓論の理論的研究 …1. 土壤の剪断抵抗力の測定。2. 離力函数を用ひて Coulomb, Rankine 及び Boussinesq 式理論の説明並に砂の壓力に関する一新解法
- (二) 土壓の實驗的研究 …1. 土壓に及ぼす據置水平動の影響と據置上面の種々相に因する土壓變化の實驗研究。2. 砂層の變形に開する實驗。3. 實驗室内に於ける各種粘土基礎工試験
- (三) 地盤としての土の研究 …1. 地盤と地震との關係。2. 走行列車の為めに生ずる路盤振動の測定
- (四) 土の分析 …1. 土壤淘汰分析用改良器に就て
- (五) 土の力學的計算 …1. 富士身延鐵道甲斐岩間驛地に就ての計算。富士身延鐵道勝坂隧道の崩壊に關する一考察
- (六) 現場に於ける土の實驗 …1. 國都線に於ける土の實驗。2. 三吳線に於ける基礎土質調査。3. 名古屋驛改良工事に施行せる地盤及び杭の支持力試験報告
- (七) 工事報告 …1. 大阪市委托地下隧道工事報告。2. 久慈線に於ける地盤に就て。3. 土留擁壁特種基礎實例。4. 兩國線隅田川橋梁基礎井筒工事に就て。5. 仙山東線底盤起點 27 K 820 m 附近築堤に就て

参考資料

- (I) 瑞典鐵道土質調查委員會報告。(II) 土質科學的研究方法。(III) 路盤土質の研究報告 …1. 路盤土質の數値その意義及び實地上の應用。2. 土質斷面及び路盤調査。3. 路盤土質の數値を求める試験法。4. 土の比重計分析結果の圖式解法。(IV) 平板基礎工を使用する場合の沈下量の豫測法

第三輯 (昭和九年七月)……菊倍版・本文 299 頁・圖面 380・表 26

調査報告

- 第一部 土質科學 …(I) 試錐機による地下の土質標本採取法(三重管式)。(II) 土の物理的力學的性質の試験 …(a) 繼續的方法(機械的分析、剪断抵抗測定、緊密度試験)。(b) 新方法の追加(1. 圧縮試験。2. 壓密透水度試験。3. 透水度試験)。(III) 高壓下的土の剪断抵抗の測定。(IV) 土の物理的性質に關する研究
- 第二部 土質力學 …(I) 基礎地盤(イ) 輪島線の築堤沈下の解析。(ロ) 譚性地盤上の箇渠の設計。(II) 地盤に就て(イ) 朝鮮東海線の地盤に就ての解析。(ロ) 路盤用鐵筋混擬土築渠の設計)。(III) 隧道地盤(イ) 木次線反谷隧道。(ロ) 三江線日向隧道。(ハ) 二俣線板ケ屋隧道)。(IV) 土工定期試験(イ) 切取、盛土の限界高及び勾配。(ロ) 間知石積(又は混擬土)構築)。(V) 關西線龜の瀬地盤に就て調査報告

論説報告

- (I) 土壓論の應用 …1. 地盤に就ての深さに關する一考察。2. ランキンの近似水壓曲線及び近似地盤曲線の誤差及び其の修正に就て

- (II) 現場實驗及び調査 …1. 三吳線軟弱地盤に築造せる築造物。2. 秋葉原兩國間基礎調査報告(續)。3. 兩國電車驛附近軟弱地盤に於ける載荷試験に就て。4. 名古屋驛改良工事現場の地盤耐荷試験。5. 線路の凍上と路盤の改良
- (III) 地質調査法の新研究 …1. 西紀勢線の電氣的地質調査報告。2. 札沼線の電氣的地質調査報告。3. 中央線の彈性波式地質調査報告
- (IV) 工事報告 …1. 朝鮮東海線築堤沈下調査報告。2. 宗谷線築堤沈下調査報告。3. 箕輪の井線地盤に就て調査報告。4. 大船渡船阪森隧道工事報告。5. 伊東線宇佐美隧道の地質

2) 各國の現状

抑もこの種の調査機關は瑞典國有鐵道土質調査委員會 (*Statens Järnvägars Geotekniska Commission*) の設立を以て嚆失とする。これは 1914~1922 年の九箇年間に國有鐵道全線に亘つて實施したもので、報告書が 1922 年 5 月 31 日 Stockholm で發行されてゐるが實に貴重な文献である。

北米土木學會 (American Society of Civil Engineer) に基礎調査委員會 (Foundation Committee) が設立されたのは 1913 年のこと、この A. S. C. E. の Proceedings には “Progress Report of the Special Committee to codify Present Practice on the Bearing Value of Soils for Foundations” が連載されてゐる。

尙又 U. S. A. 道路局 (Bureau of Public Road) では道路路盤に關する研究を始めたのが 1919 年のこと、爾來機關雑誌 “Public Road” を發行し之にその研究結果を發表してゐる、就中 1931 年 (Vol. 12) では Nos. 4, 5, 7, 8 に “Reports on Subgrade Soil Studies” を連載しこれを一括してゐる(鐵道省土質調査委員會報告第二輯参考資料 313~408 頁譯載)。此所には例の Terzaghi が Consultant として暫く居たため彼の流派の研究が最も盛んな所であつた。其後 1925 年彼は Boston 工科大學 (Massachusetts Institute of Technology) に移りこの方面の路を開いた。その當時に出版されたのが彼の有名な著書 “Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage” である。其後茲では彼の門下 Gilboy が研究結果を A. S. C. E. の Proceedings 1931, Vol. 57 に “Soil Mechanics Research” として發表してゐる(同上 300~312 頁譯載)。

この Terzaghi 一派と全然獨立して研究を始めたのが Michigan 大學の土木の助教授 Housel で、その實驗結果を “A Practical Method for the Selection of Foundation Based on Fundamental Research in Soil Mechanics” として 1929 年出版してゐる(同上 420~437 頁譯載)。

獨逸では Honnover 工科大學で *Studienkommission für bautechnische Bodenkunde* が 1920 年に設立せられて以來獨逸一流の模倣性を以て各所に大小の研究機關が簇出した、最も權威あるのが故 Krey を委員長とした獨逸土木學會 (*Deutsche Gesellschaft für Bauingenieurwesen*) に設立された基礎調査委員會 (*Deutscher Ausschuss für Baugrundforschung*) である。之れは専ら Kögl が主宰してゐるものである。参考のためこの後にこの調査方針を譯載して置く。尙獨逸では Stiny, Kögl の徒が “Geologie und Bauwesen” といふ小冊子を 1930 年から發行してゐる、土質調査に關する最初の雑誌である。

次に参考のため獨逸土木學會の土質調査の作業方針書を掲載しやう。

土 質 調 査 方 針

(獨逸土木學會基礎調査委員會規定)

A) 題目及び目的

- I. 緒 説……基礎調査委員會は土質力学の立場から科學的に其質地上研究調査を實施すると同時に、専門的調査法を提倡奨励し基礎に関する答議の擴張普及に貢獻せんとするものである。
- 種々の災害、誤った施工法又は修築作業、建築主と請負者の意見の相違論争、不當な工事見積等の原因は、地質を細密正確に調査しなかつたためか、或はその地質の特性を認め知つて之れを適當な表示法によつて記録する方法及び充分な規準を缺いてゐたためである。夫れ故に基礎調査委員會は完全な統一的土質調査法を発展せしめ、有らるる土質に就て其の特徴を明示し得るやうに數多の項目に亘り明確な規準を完成し、工事を施行すべき土質の正確な判断と取扱ひ方を見直し又 改良し得る統一した表示法を求めるものである。

II 調 査 事 項

1) 土質の特性の研究（廣義に於ける基礎又は建築材料としての土の性状の研究）

- a) 土質の物理的性質 即ち比重、組成、粒径、間隙率、含水量、透水度、抗壓・抗張・抗剪强度、彈性、プラスティシティ、摩擦角、凝聚力等之等の性質の測定並に表示法。
- b) a) に述べた性質の例へば水、重力、上層地層、地壓、氣象等の如きの天然作用に依る變化の調査
- c) a) に述べた性質の例へば溶盤（加水）、排水、振動、搔扒し、盛土、杭打、搾固め、凍結、壓密、載荷、震動等の如き人工作用に依る變化の調査。
- d) a) b) に提案せる性質及び作用の測定法の考案及び決定

2) 土質の記載・表示及び分類法

- a) 土質の重複命名を避け成る可く多數の確定した土の性質に基いて出来るだけ簡単に表はす事。
- b) 土木技術上の見地から土を分類する事、例へば既存の分類を變更し又補足する。
- c) 土質調査の結果の一覧表を添付した一組の土質類並びにその各個々の土質に關する調査を冊子に収める事。

3) 現場に於ける基礎調査法並にその模範の統一した方法の規定。

- a) 地質學的・物理的並に地表から見た土地の調査。調査を要すべき個所の位置・種類・數・深さ及びそれに使用すべき装置の決定。
- b) 調査の結果と工事中實際に遭遇した成層状態との比較。
- c) 構造物の狀況の観測及び再試験。相當大く且この調査に適當な構造物の移動（沈下及び水平變位）の測定、既成構造物の現狀と載荷試験の結果との比較。
- d) 特殊な土質及び天然状態の擾亂によつて工事現場に起つた注目に値すべき事故の経過の調査。

4) 平面基礎・深部基礎・杭打基礎の支持力の研究

- a) 支持力の概念の確定。……b) 1. a) b) c) に記した状態に關する調査。……c) 地層の厚さ・層序・位置に關する調査。
- d) 載荷量、載荷面の大きさ、形狀に關する調査。……e) 着工前に支持力を實際に決定する方法及び完成後の支持力試験法。

5) 土壓の研究

- a) 1. a)-l) に述べた土質状態と土壓との關係の調査。……b) 滑り面の形狀及び方向と土壓の方向との關係の調査。
- c) 構造物或は其の一部の移動性と土壓の方向との關係の調査。……d) 土壓の方向を實驗により或は計算と實驗並に實際に崩壊せる構造物の時味による實狀との比較によつて決定すること。

6) 地応りの研究

- a) 地応りの發生した場合その原因を明にする事。……b) 地応りを起し易き土質の決定。……c) 或る土質が地応りを起した條件の決定

7) 地盤を緩める作業の研究

- a) 人力土工……b) 機械土工（乾式及湿式溶漬機）……c) 爆破土工

B. 作業実施（A. II の題目に着手し之を解決するには次の方法及び規程に依る）

1) 研究室及實驗室内の調査研究

2) 現場の實地調査・観測・試験

これには研究室或は實驗室内の作業と同時に、現場に於ける細密な土質調査及び既成建造物の根本的觀測が最も緊要で兩者共組織的の統一せる方法に依らなければならぬ。

3) 研究及び實地に利用し得る材料の蒐集と精選

實驗 土質調査及び工事の際に得た土及び地盤の特質に關する經驗は出来るだけ廣く多く利用役立たしむべきである。即ち土質の特性及び基礎地盤の狀況等に關する報告書には出来るだけ土質試験成績、斷面、表類等を添付して基礎調査委員會或は工事現場、研究室等に送付し、其處で更に精査し研究して雖でも之に關心を持つ人に判るやうにする。該報告書には正規の結果の外特に變つた現象は記入すべきである。殊に重要なのは現場の試掘坑及び試鑽孔の斷面と土の性質の特徴を何の程度迄詳しく述べは決定したかといふことであつて、尙更に切取の難易、地応り、沈下、風化現象、異状ある水路、隧道崩壊、堰堤決済及び基礎破壊又は基礎支持力の決定特に構造物の沈下量に關する報告を考慮すべきである。

4) 覚書・表・示方書等の發行。……5) 規程・提案の研究。……6) 土質調査に關する文献の蒐集。……7) 實驗及び現場の觀測に關する著書の發行。