

粘土の鋭敏性について (1)

山口 真 一

ON THE SENSITIVITY OF CLAY (I)

by Shinichi YAMAGUCHI

Synopsis

The author has studied on the sensitivity of Ōsaka alluvial clay which seems to be Kaolinite. In this study, it was found that the sensitivity was caused by the variation of "special water" whose electric resistance was regarded as infinitive and whose latent heat was about 150 cal/gr. And the strength could be determined only by the effective water content which was the difference between the common water content and the special water content, regardless whether the sample was disturbed or not.

1. は し が き

粘土の鋭敏性というのは乱されない試料を練り返したとき物性が著しく変わり、強度なども変化する、そういう性質を示すものである。またそれに附随して練り返した試料を静置しておくとき次第に強度が回復するという現象も存在する。これらの現象の本質的な原因をカオリナイトといわれる大阪沖積層粘土を試料として研究した。

2. 鋭敏性について

充分に試料を練り返して直径 3.4 cm, 高さ 8 cm に成形したものを多数作り、それを 1 個づつゴムスリーブの中に入れ、入り口はラテックスで封をして保存した。この試料の静置日数を種種変えて強度試験を行つた。この強度試験は応力制御一軸圧縮試験で応力の増加速度は $20 \text{ gr/cm}^2 \text{ min.}$ である。練り返すと試料の物性はすっかり変わり破壊の限界点が不明瞭になるのでチエボタリオフ流の定義に従つて、乱されない試料が破壊するヒズミと同じヒズミに達したときの応力をもつて練り返し粘土の強度とした。その結果鋭敏比を求めると約 10 が得られる。また強度回復の様子はゆつくりしていて 2 ヶ月経つても $\frac{1}{2}$ 位しか戻らない。応力制御一軸圧縮試験の一部及び強度回復の様子はそれぞれ Fig. 1 及び Fig. 2 に示した。

3. 電気抵抗について

試料を一軸圧縮試験を行うときと全く同じように装置して試料の両端

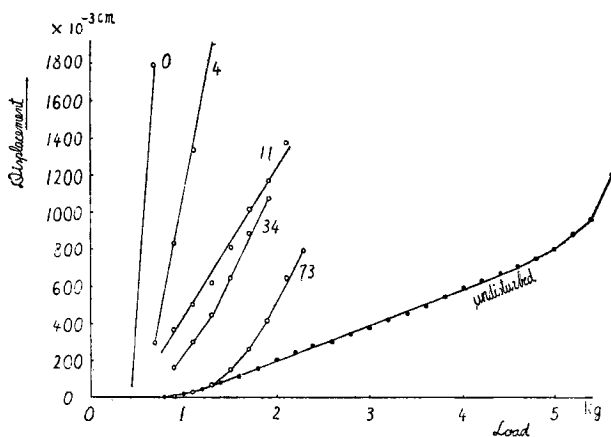


Fig. 1 Stress-strain relation. Figures in the diagram indicate resting days.

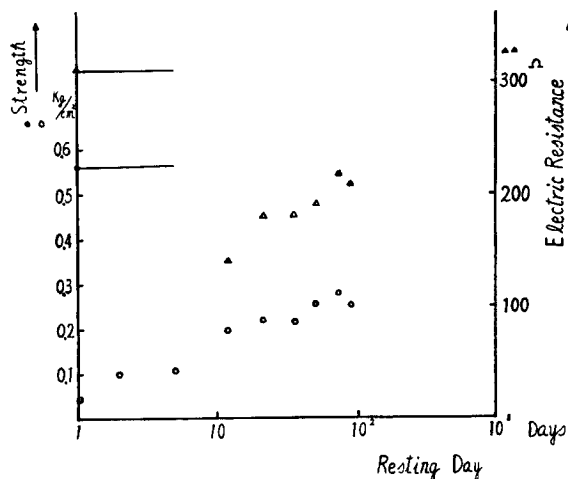


Fig. 2 Recovery of strength ○● and electric resistance △▲
Undisturbed clay ●▲
Remold clay ○△

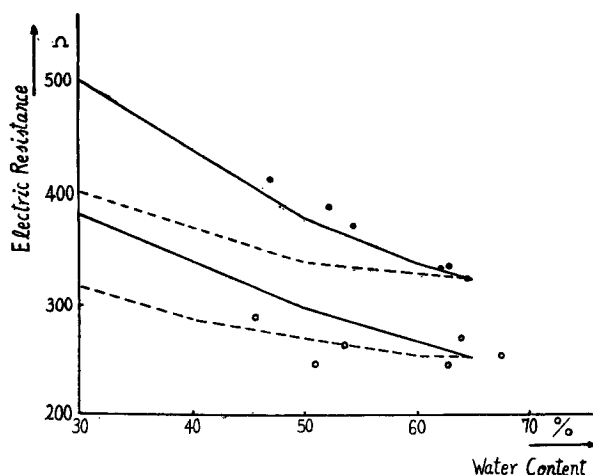


Fig. 3 Relation between electric resistance and water content
Undisturbed clay ●
Remold clay ○
Theoretical curve { Volume is constant ———
Air is not included }

水比と間隙比の関係を調べても、このことが裏書きされる。結局電気伝導には含まれた水のみが関与するという最初の仮定は成り立っているらしい。

けれども飽和粘土で含水比が等しい場合、乱されたかどうかで電気抵抗が違っている。これはどのように解釈できるだろうか。簡単に、乱されたかどうかで含水の電気伝導度が変わるためとも考えられるし、また乱されない試料の含水のうち電気伝導に関与しない部分があるためとも考えられる。どちらが正しいのかはこの実験だけでは定まらないので別な方面から研究を進めた。

に電極を置き、その間の抵抗をコールラウシュ・ブリッジの一辺として測定した。用いた交流は 50~10 000 cycle の間を変化させてみたが抵抗値には変化がなかったため、10 000 cycle の交流を使うことにした。また実験中に荷重をかけると抵抗値に変化があらわれるが、これは電極と試料との間の接触面積の変化によるものと推定される。それで見掛けの電気伝導度が飽和に達するまで荷重を増してから測定するか、少し含水比が変化するが試料の両端を水で濡らしてから測定した。測定は多数行っているが一例を Fig. 3 に示す。これは荷重状態で測定したので試料の長さ、直径ともに成形したときとは変っているから長さ 8 cm、直径 3.4 cm に換算した値を用いている。

Fig. 3 について考察してみる。粘土の電気伝導度には含まれた水のみが関与し、粒子は非伝導体と仮定した場合、電気抵抗は粘土のうちに占める水の体積比だけで定まることになる。含水比 65% のときには粒子と水のみからなる飽和粘土であるが、それから含水量が減った場合水が減っただけ体積が収縮して空気が入らない場合と、水が減っただけ空気が入ってきて体積が変わらない場合との両極端が考えられる。両極端の場合について計算して含水比と電気抵抗の関係を求め、Fig. 3 に記入した。それを実際の測定値と比較すると繰り返しの場合には、空気が入らず体積が収縮する場合に、乱されない試料のときには体積が収縮せず空気が入る場合に良く一致する。これは気乾燥されて体積が収縮して行く過程で含

4. 比熱について

粘土の比熱をつぎの方法で測定した。直径 7 cm 高さ 7~8 cm で重さ 500 gr にそろえた試料をラテックスで覆い水 1000 gr の中に入れて加熱した。加熱は 100 V, 60 W のヒーターを用い、それに供給した電気は 100 V の定電圧装置を通した後、トランスで 50 V に落したものである。水と粘土とが一樣に加熱されるように 20 min 間に 2~3°C の割で温度が上昇する程度にした。勿論容器は外部と熱的に絶縁され、水 1000 gr だけを加熱するに要した熱エネルギーとの差から、水及び容器の温度を上昇させるに要した熱エネルギーを取り去って粘土のみの温度を上昇させるに要した熱エネルギーすなわち比熱を求めることができる。つぎに粘土の含水比を求め、粘土中の水が普通の水だとして、その寄与分を取り去ると粘土粒子のみの比熱が得られる。Fig. 4 に示したように乱されない試料の粒子比熱は繰り返し試料のそれに較べ、ずっと高い。粘土粒子の比熱に差があるということは考え難いし、乱されない試料の場合の粒子比熱は岩石や砂の比熱 0.17~0.23 に較べ大き過ぎる。これは計算の途中で粘土中の水を普通の水として引き去ったが、乱さない試料の場合にはさきに考えた電気伝導

に関係しない特殊な水があっても、それは温度とともに普通の水に変化するときの潜熱が大きく単純な普通の水ではないためであるからと想像される。

若しそうならば温度をあげると特殊の水が普通の水に戻り、従つて電気抵抗も温度とともに減少する筈である。温度と電気抵抗の関係は Fig. 5 に示した。予想の通りに温度が増すと電気抵抗が減少するのが分る。たゞしこの過程は可逆反応であつて温度が低くなると電気抵抗は再び増す。温度が増すと電気抵抗が減少するという傾向は溶液の性質としても存在するので全部特殊水の故とは限らない。それで乱されない試料及び繰り返し試料、さらに試料の乾燥粉末を水に溶かし溶液状またはペースト状にしたものについて温度と電気抵抗の関係を調べた。この場合電気抵抗は 18°C のときの値との比率を求め温度との関係を調べた。乱されない試料以外はほとんど同一曲線上につてくる*。測定は多数おこなわれているが、その一部を Fig. 6 に示した。また含水比との関係を調べるため、8°C に於ける電気抵抗値を 18°C のそれに対する比に直し含水比との関係を調べた。この結果は Fig. 7 に示してある。やは

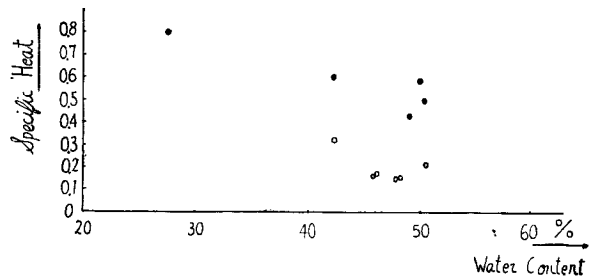


Fig. 4 Specific heat capacity of clay particle

- Undisturbed clay
- Remold clay

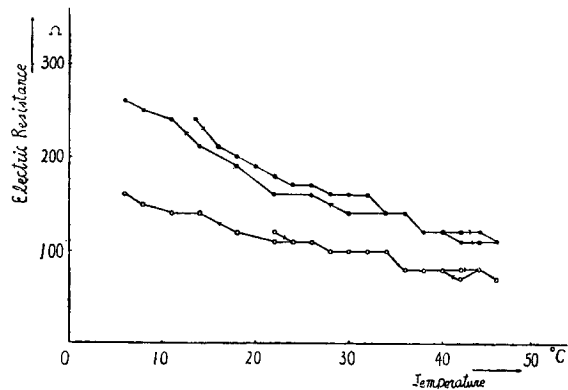


Fig. 5 Relation between electric resistance and temperature

- Undisturbed clay (water content 38.9%)
- Remold clay (water content 39.1%)

* 電気抵抗の対数を縦軸に絶対温度の逆数を横軸にして、この関係を書き直すと直線関係が得られ、その勾配から計算すると乱されない試料以外のものの伝導度と温度との関係は水の粘性係数の温度変化によるものであることが推定される。

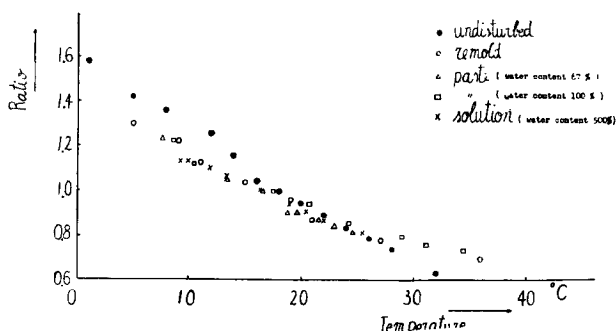


Fig. 6 Relation between electric resistance ratio and temperature (electric resistance at 18°C is used as standard)

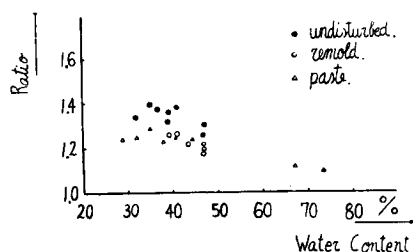


Fig. 7 Relation between electric resistance ratio and water content The ratio of electric resistance at 18°C to the one at 8°C is used

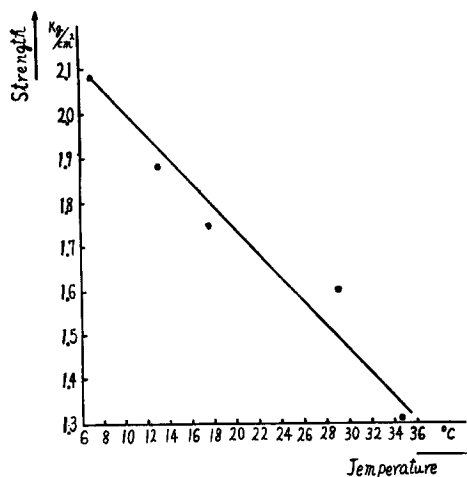


Fig. 8 Relation between strength and temperature of undisturbed clay (Taishobashi 208 16.16 m-17.06m A Water content 49.5%)

り乱されない試料は他の試料と異なつて居る。結局から電気抵抗の温度による変化量のうちで、約4%は特殊水が普通水に変るため生ずるものであることが Fig. 6, Fig. 7 から推定される。

つぎに特殊水の潜熱を計算してみよう。含水比40%の乱されない粘土が 8°C から 18°C になると電気抵抗が 250 Ω から 190 Ω になる。(Fig. 5) これは上述の理由で、特殊水の影響だけでなく温度の粘性を通しての影響も入っているから特殊水の影響は $(250 - 190) / 5 = 12 \Omega$ 位と評価される。

12 Ω の変化は含水比 2% (Fig. 3) の特殊水が普通水に変つたことを意味する。結局 1°C の増加は 0.2% の特殊水が普通水へ変化することをもたらす。含水比40%の乱されない試料と練り返し試料との粒子比熱の相違はおよそ 0.3 であるから、この特殊水の潜熱は約 150 cal/gr と推定される。

5. 温度と強度との関係について

今迄の実験で乱されない試料と練り返し試料との間にかなりはつきりした物理的な相違を認めることができた。しかし '特殊水' として表現された物理量が、乱されたか否かによる強度の相違と結びつくかどうかはわからない。それでこれを確かめるための実験を行つた。

前から述べているように乱されない試料の温度を増すと '特殊水' が普通の水になるので実質的に含水

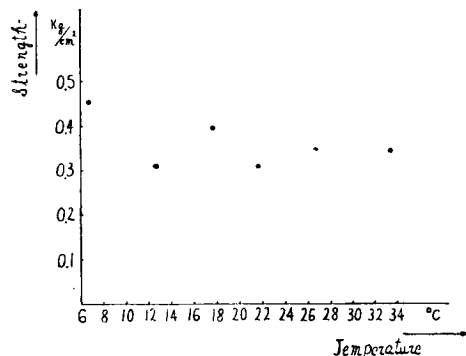


Fig. 9 Relation between strength and temperature of remold clay

量を増すことゝ同等で強度が減少し、また一方練り返し試料では強度が温度にほとんど影響されないと想像される。実際に測定した結果は Fig. 8, Fig. 9 に示したように想像と一致する。

Fig. 8 から強度を 2.1 kg/cm^2 から 1.3 kg/cm^2 まで減らすのに温度を 6°C から 36°C まで増せば良いのが分る。これは電気抵抗を 260Ω から 140Ω まで 120Ω 減らすことに相等する (Fig. 5)。しかしこのうち特殊水が普通水へ変化するため生ずるものは 24Ω である。これは含水比変化 4 % に相等する。このことは乱されない試料の含水比～強度関係から直接得られる値とよく一致する。また 25°C^* のとき乱されない試料の強度 1.6 kg/cm^2 を、同じ含水比の練り返し試料の強度 0.4 kg/cm^2 と同じ強度まで落すには含水比を 18% 増せば良いのが含水比～強度関係から求められる。これは Fig. 3 の電気抵抗～含水比関係に示される同じ比抵抗を示す練り返し試料と乱されない試料間の含水比の差と良く一致している。

以上の実験で特殊水が強度に対しても重要な役割をしていることがわかつたばかりでなく、‘特殊水’を考慮にいれると練り返したか否かの区別がなくなつてしまうと推定される。実際に含水比から特殊水の含水比を引いた実効含水比と強度との関係を試料の広い範囲にわたつて調べた結果を Fig. 10 に示した。たしかに練り返したか否かにかゝらず実効含水比で強度が一義的に定まるのがわかる。

6. 強度回復と電気抵抗との関係

今迄の実験で含水比から特殊水の含水比を引き去つた実効含水比で強度が一義的にさだまることがわつた。この実効含水比の変化は電気抵抗の変化から求めることができる。静置してる間に強度が回復する現象も、静置してる間に特殊水が増加するためではないかと想像される。

それで静置日数と強度の関係のみならず静置日数と電気抵抗の関係を調べた。結果は Fig. 2 に示されたように強度、電気抵抗は相似して静置日数とともに増加している。強度回復が特殊水の増加によることは強度の温度による変化が静置日数とともに著しくなることから推定される¹⁾。

7. サクション力との関係

乱されたか否かで粘土は特殊水の量が変り従つて実効的な含水比が変るため物性が変化するということを述べたが、これらのことがサクション力とどういう関係にあるか研究した。石井²⁾は圧密試験に際し、試料が乱されてるか否かで荷重に対する間隙化変化の様子が異なることを示した。すなわち最初 70% 位の含水比の粘土が圧密されていくとき、練り返し粘土の方は著しく含水比、間隙比が減少し乱されない場合との差はそれぞれ 10 %, 0.3 位に達する。これはわれわれの考え方からも当然予測されることである。しかし圧密荷重がさらに増すと、練り返し粘土の方の圧密が少くなり両者の含水比、間隙比は接近し始める。これはわれわれの考え方では練り返し粘土でも含水比が減つて来ると、普通水が脱水によつて減少するばかりでなく特殊水に変わるものもふえ次第に乱されない試料に近づくことを意味する。それでこれを確かめるための実験を行った。

粘土の保存の仕方不十分で保存中に次第に含水比を失つたものを探した。これは水を失つていつた速度が

* 含水比と電気抵抗の実験は夏 25°C 前後で行つた。

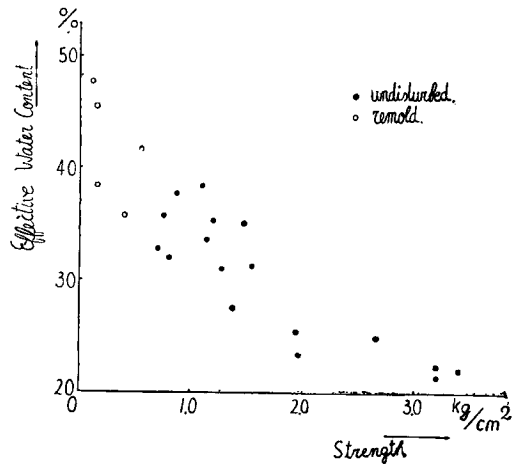


Fig. 10 Relation between strength and effective water content

非常に遅いため、体積の収縮が十分追隨して含水比が小さいにかゝらず空気が入っていない。(間隙比を測定して確かめてある。)この過程が圧密の初期に匹敵する。この試料を気乾燥によつて含水比を変化させ電たように含水比の減り方に対し電気抵抗のふえ方は著るしい。最初の含水比46%から減少した水の体積だけ全部空気が入つたとして計算したものよりふえ方が大きい。つまり含水比が減るとともに‘特殊水’の量も電気抵抗を測定すると Fig. 11 に示し増し、電気伝導に關係する普通の水は見掛けの含水比の変化以上に減少しているのがわかつた*。これは含水比が減少すると練り返し粘土は乱されない粘土に近づくという上の仮定とよく一致している。(石井及び著者の実験では含水比が極度に小さい場合、練り返し試料の方が、強度が高くなるが、これは乱されない試料の方は最後にどうしてもこまかいクラックが入つてしまうためではないかと考えている。)

8. マイクロカロリーメーターによる比熱の回復の研究

今まで用いたカロリーメーターでは多量の粘土を必要とする。しかし全く同じ条件の粘土がそんなに多量に得られることは少ないので、含水比や静置日数による比熱の変化を調べるのは困難であつた。それで小型のカロリーメーターを作製した。(Fig. 12) 器械の方式は前と全く同じであるが今度は試料の直径 3.4 cm, 長さ 8 cm, 試料を入れる容器は直径 5 cm, 高さ 25 cm とした。容器の底部のヒーターはマンガニン線を用いて温度による抵抗変化を避けている。このヒーターに加える電圧は定電圧装置とトランスを用い 6 V に落している。容器の中には試料の周囲に水 120 cc を入れ試料が一樣に熱せられるようにした。またこの容器はスチロール樹脂の粉体で覆い、更にその全体を魔法瓶の中に入れてある。しかし容器や試料などの熱容量が小さいため、粘土の温度が室温より 5°C 位高くなると熱の逃散が無視できなくなる。それで魔法瓶の内側に別の電気ヒーターを入れ、電圧を可変トランスで加減して容器の外部の温度は粘土の温度より常に 2°C 程度低くなるようにした。このようにして種々の静置日数の練り返し粘土の比熱を求めた。

110°C で乾燥させた粉末の比熱を先に求めて置いて粒子の比熱に対する寄与分を計算して引き去り、含水の比熱を求めた。その結果の 1 例は Fig. 13 に示したが、静置日数とともに比熱が増大しているのがわかる。これは練り返し試料を静置しておくとき特殊水が増加して乱されない粘土に近づくことを示している。

つぎに乱されない試料と練り返し試料との比熱を色々

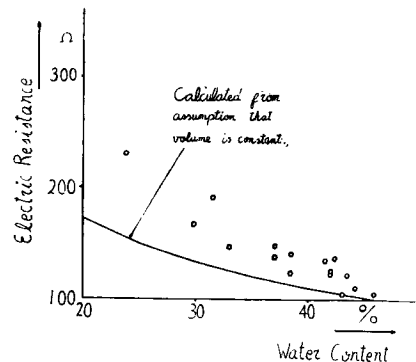


Fig. 11 Relation between water content and electric resistance of remold clay which has low water content

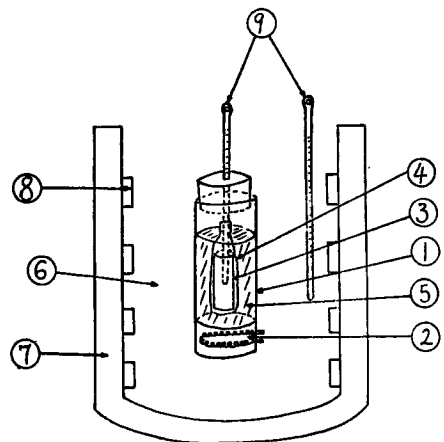


Fig. 12 Miniature calorimeter

- (1) Vessel (2) Heater of manganine line
(3) Sample (4) Rubber sleeve (5) Water of 120 cc (6) Stirole resign (7) Vacuum bottle (8) Heater (9) Thermometer

* 水の量が多く粘土分が少い懸濁液状態では液体部分の電気伝導度は粘土粒子の濃度のルートに比例して増加する。しかし含水比 100 % 以下では粘土粒子の水中でのイオン化は飽和しており液体部分の電気伝導度は含水比にかゝらず一定と見なされている。

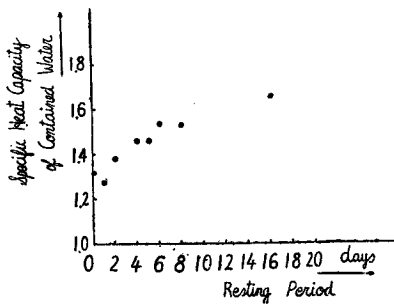


Fig. 13 Relation between specific heat capacity of contained water in remold clay and resting period

の含水比に対して測定した。(Fig. 14) 含水比70%のときの含水の平均比熱を1.3, 1.4, 1.5, 1.6とし、それから失われていた含水の比熱は1.0と仮定して計算したときの含水比と含水の平均比熱との関係曲線をFig. 14に記入した。そうすると乱されない試料は含水比が減少した場合計算した曲線上にのり普通の水が失われていたことを示しているが、練り返し試料では含水比の減少は普通水が失われたとだけして計算したのでは決して説明できない含水の平均比熱の増大を示している。これは含水比の減少とともに特殊水の増加することを示しており、サクシヨン力のところで述べた考えとよく一致している。

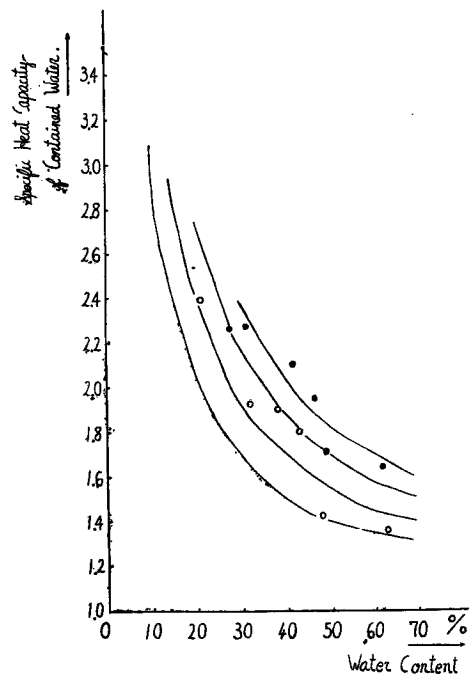


Fig. 14 Specific heat capacity of contained water in various water content

- Undisturbed clay
- Remold clay

参 考 文 献

- 1) 山口真一：大阪沖積層粘土の強度と鋭敏比について，33年度土木学会論文予稿集，Ⅱ-29。
- 2) 石井靖丸，倉田進，藤下利男：沖積粘土の工学的性質に関する研究，土木学会論文集，30号，§11。