

粘土の鋭敏比の研究

山口 真 一

ON THE SENSITIVITY OF CLAY

by Shinichi YAMAGUCHI

Synopsis : This author studied on the sensitivity of two kinds of clay. One is Okuramura clay which seems to be composed of Montmorillonite, and the other is Osaka alluvial clay which seems to be Kaolinite. On this studies it was found that the sensitivity of the former clay was caused by variation of particle arrangement, and that of the latter clay by variation of special water whose electric resistance was regarded as finitive and whose latent heat was about 150 cal/gr.

1. はしがき

先に山形県大蔵村のあめ動型地すべり地の粘土について、練り返しによる強度、剛性率の低下、静置によるそれらの回復の現象を示し、さらにその原因は間隙比や粒子の表面2重層の電気ポテンシャルの変化によるものでないことを明らかにした¹⁾。次に乱されない試料及び練り返し試料についてクリープ実験を行い、物理常数を算定し、両者の違いは粒子配列によるものらしいことを推定した²⁾。ここではまずこの考え方の是非をさらに確かめるために行つた実験結果について述べる。

つぎにカオリナイトといわれている大阪沖積層粘土の鋭敏比について研究を行い、練り返しによる強度低下、静置による回復の様子を調べた。それはやはり間隙比や粒子表面電気2重層ポテンシャルからも説明できなかつた*し、クリープからの説明もできなかつた**ので他の種々の方法を用いて研究した。

2. 大蔵村粘土の微粒子成分の性質

普通は砂、シルトついで粘土と粒径が小さくなるほど間隙比は増す。しかし今まで考えていたように、粒子構造が3次元網目構造をすると仮定すると、収縮限界の間隙比は粒径が小さくなるほど減少する(厚さは変らないと考えてよいから³⁾)。実際に沈降分析によつて各粒径ごとのグループを作り、大気中の水蒸気と平衡に達したときの間隙比、含水比を測定した。大気中の水蒸気と平衡を保つ含水比は収縮限界の含水比よりずっと小さいので、このときの間隙比は収縮限界の間隙比と同じと考えられるが、図-1に示すように粒径が小さくなるほど減少して、3次元網目構造の考えの妥当性を立証することができる。含水比は図-2に示したごとく、粒径が小さくなるほど大きくなる。このことは図-1の結果が含水比の相違によるものでないことを示すだけでなく、大気中の水蒸気と平衡を保つ粒

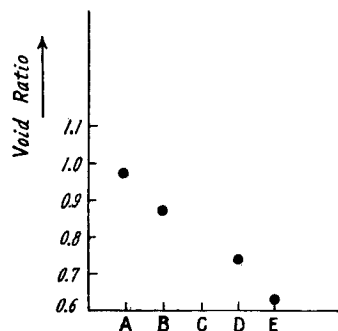


Fig. 1 Relation between critical void ratio and particle size

A-1.1μ B-0.78μ C-0.65μ D-0.55μ E-0.42μ

* 図を割愛した。

** この粘土は緻密な意味では定常流をしていないから⁴⁾⁵⁾。

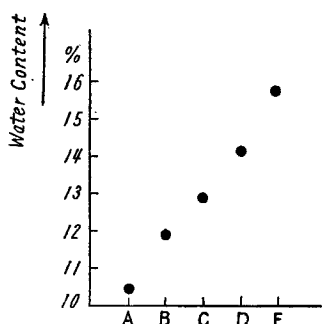


Fig. 2 Relation between water content, which is balanced with atmospheric vapour pressure, and particle size
A-1.1μ B-0.78μ C-0.65μ D-0.55μ E-0.42μ

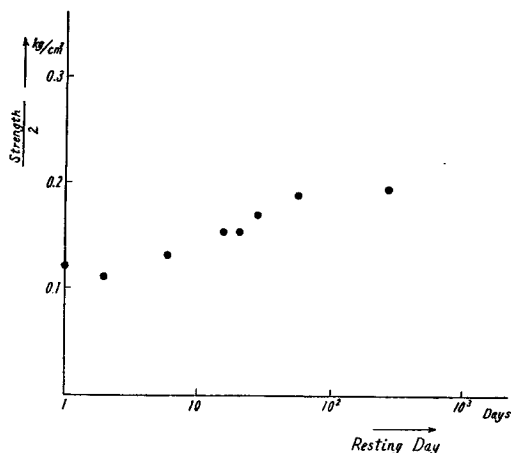


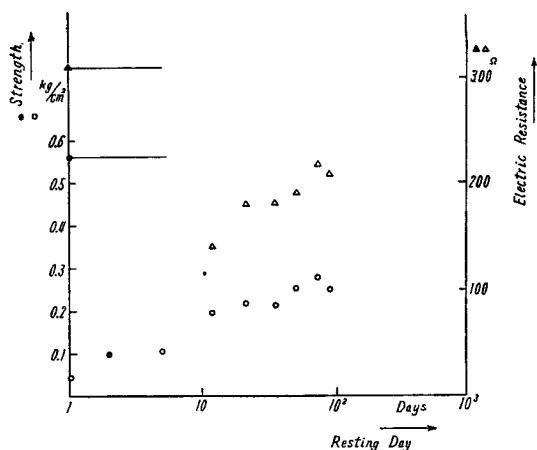
Fig. 3 Strength recovery of samples which are constituted with microparticle

子表面の厚さは一定であろうから、粒子が小さくなるほど単位重量あたりの表面積が増大することを示している。

つぎに粘土のクリープを支配している微小粒子が、鋭敏比の現象にも主役を果していることを確かめよう。すなわち沈降分析によつて1ミクロン以下の粒子の集合体をつくり、静置による強度回復を測定した。試料は直径2cm、高さ5cmに成形して、溶解温度を少し越えたパラフィンの中に入れ、厚いパラフィン膜で覆つて一定期間保存したもので、実験の際にはパラフィンを取り去り、ひずみ速度制御型一軸破壊試験を行つた。結果は図-3に示したように、強度が約2ヵ月で不変となつて飽和した形をとり、もとの粘土の強度回復の場合とよく一致する。この微粒子粘土の強度増加も含水比や間隙比の変化によるものでないことは実験的に確かめてある*。

3. 大阪沖積層粘土の鋭敏比について

大阪沖積層粘土はカオリナイトと考えられているが、この試料について鋭敏比を調べた。実験は荷重速度制御** (200 gr/min) の一軸破壊試験を行つた。試料は直径3.4cm、長さ8cmである***。練り返し粘土は流動変形のみ生じ破壊が起らないので、乱されない粘土の破壊点に相当するひずみを生じた荷重をもつて強



	Strength	Resistance
Undisturbed Clay	●	▲
Remold Clay	○	△

Fig. 4 Recovery of strength and electric resistance

* 図を割愛した。

** 強度は変形速度で異なるが、特に練り返し試料では著しいから鋭敏比を定義するときに注意する必要がある。

*** 今後の実験は特に断らない限り、この大きさの試料を用いている。

度とした。強度回復は図-4に示したように、2カ月経つても半分位しか回復せず、大蔵村粘土と著しい違いを示している。

この強度回復の原因として間隙比、粒子表面電気2重層ポテンシアルの変化を調べたが(含水比はもち論一定に保つて)、やはりこれらの量から鋭敏比を説明することはできなかった*。またクリープについての実験も、大蔵村粘土のような厳密な定常流をしない⁽⁴⁾⁽⁵⁾ので、比較解析ができなかった。

3.1 電気抵抗の測定

試料をコールラウシュブリッジの一边に入れ、10 K cycle の交流を用いて電気抵抗を測定した。振動数を50~10 K cycle の間で変化させたが、電気抵抗には変化がなかったため、聞き取りや発振に都合のよい10 K cycle を用いたのである。電極と試料との間の接触面積は両者間の圧力で変るので、試料の端は水に濡らして電極に接し、それを三軸試験機の中に入れ、軸方向に適当な圧力をかけて接触しない部分がないようにして測定した。そのため試料に変形を生ずるので直径3.4 cm、長さ8 cmの標準の形に換算して測定結果を図-5に示した。

飽和土から水分が減少した状態を考えると、水が減っただけ体積が収縮して空気の入らない状態と、水が減っただけ空気が入って来て体積の変わらない状態の両極端の中間を呈するであろう。この両極端の場合に電気抵抗がどう変るか計算して図-5の実線と破線で示した。図-5を見ると、乱されない試料では体積一定の場合に、また練り返し試料では空気の入らない場合によく一致し、含水比~間隙比関係を実測した結果²⁾によく合致している。

計算では粒子は非電導体、水は一定の電導度をもつとしているが、飽和土から水の単位断面、単位長さ当たり、練り返し試料では223Ω、乱されない試料では284Ωという電気抵抗が得られる。ところで乱されない粘土の曲線を含水比約20%だけ平行移動すると、練り返し粘土の曲線によく一致する。それで練り返し粘土と乱されない粘土内の水の電気抵抗が異なると考えるよりも、乱されない試料の水のうち、乾燥炉では水分として追い出されるが、電導体としての役割は果さないものが約20%あるのではないかと考えた方が妥当に思われる。それでこれを次項のように比熱の面から検討した。

3.2 比熱の測定

直径7 cm、高さ7~8 cmで重量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、100V、60Wの規格のヒーターに定電圧装置、トランスを通して50Vの一定電圧を加えて加熱した。粘土の熱伝導度を考慮に入れ、粘土内に温度分布が生じないように、2.0~3.0°C/20 min

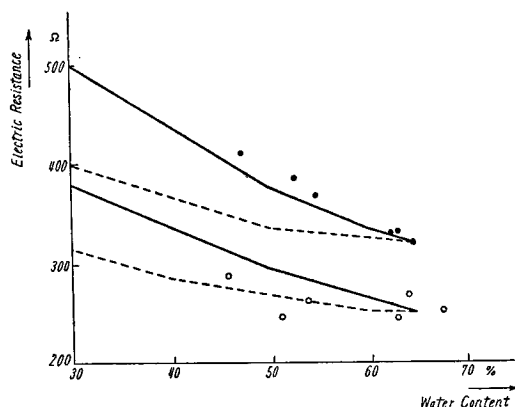


Fig. 5 Relation between electric resistance and water content (6A6-6 920-S)

Undisturbed clay ● Remold clay ○
Theoretical { Volume is constant —
curve { Air is not included ---

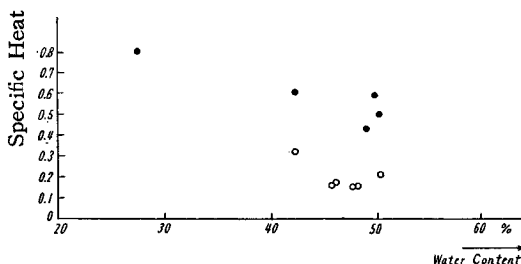


Fig. 6 Specific heat of clay particle (Taishobashi No. 111 20.87m-21.76m, No. 106-B 16.15m-17.12m)

Undisturbed clay ● Remold clay ○

* 図を割愛した。

のゆるい速度で温度が上昇するようにしてある。粘土を入れず、水のみを熱したときの温度上昇速度との差から、粘土の比熱が求められる。つぎに粘土の含水比を求め、粘土中の水も普通の水と同じ比熱を持つとして、その寄与分を取り去つて、粒子のみの比熱を求めたのが図-6に示してある。練り返しのときは砂や岩石の値0.17~0.23と大体一致しているが、乱されない粘土の場合は異常に大きい。粒子の比熱に両者の相違があるわけではないので、先に考えた非電導体の水が普通の水に変化するとき熱エネルギーを必要とするため、見掛け上比熱が大きくなるのではないかと考えられる。もしそういう考え方が成り立つならば、温度を高めると非電導体の水が普通の水に変わり、電気抵抗が減少するはずであるので実験を行つてみた。

3.3 電気抵抗と温度の関係

測定結果は図-7に示したように、温度が増すと電気抵抗が減少するのがわかる。実験は含水比40%程度の堅い試料を用いたせいか、練り返し試料の性質も乱されない場合に近づき、電気抵抗が温度の影響を受けているのがわかる。

以上の実験で粘土の中に特殊な水があつて、乱されない試料と練り返し試料で著しい相違を示すことがわかつた。それで今までの実験結果からこの特殊水の潜熱を計算してみよう。図-7によれば、含水比40%、温度20°Cの近傍では、温度2°Cの増加は電気抵抗10Ωの減少に匹敵する。また図-5によれば、10Ωの減少は1.6%の含水比の増加に匹敵する。含水比1.6%の増加は用いた500grの試料で8.2grの水の増加に相当するから、結局2°Cの温度上昇で8.2grの特殊の水が普通の水に変わったはずである。

これが乱されない粘土と練り返し粘土の比熱の差(0.6-0.25)=0.35の原因となつている。このときの試料は含水比42%であつたので、粒子の重さは $500\text{ gr}/1.42=351\text{ gr}$ であり、エネルギーに直すと $351 \times 0.35 \div 124$ カロリーである。従つて特殊な水1grが普通の水に変わるのに $124 \div 8.2/2 \div 30$ カロリーを要したわけである。これは氷の潜熱80カロリーには及ばないが、相当に大きな値である。*

3.4 温度と強度との関係

乱されない試料と練り返し試料との間に、特殊水の著しい相違のあることがわかつた。ところでこの特殊水が、乱されない試料と練り返し試料の強度差を与えるとして説明できるか否かは未だわからない。それでこれを確かめるために、強度と温度との関係を調べた。すなわち温度が増加すると、特殊水が減じて普通の水に変わり、実質的含水比が増え、強度が減ずるはずだからである。測定結果は図-8に示したごとく、予想の通りであるばかり

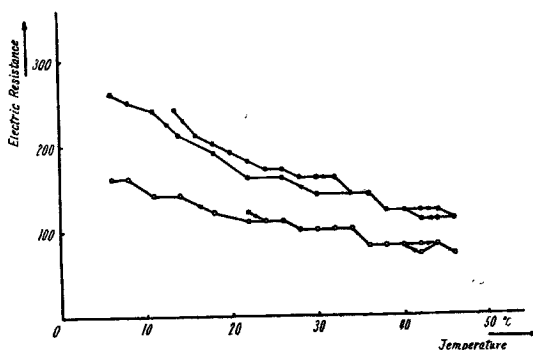


Fig. 7 Relation between electric resistance and temperature
Undisturbed clay ● (Water content 38.9%)
Remolded clay ○ (Water content 39.1%)

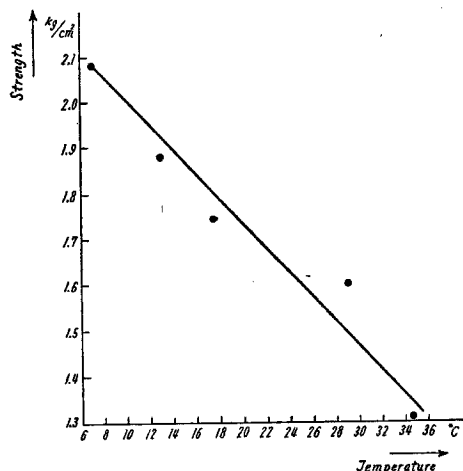


Fig. 8 Relation between strength and temperature of undisturbed clay
(Taishobashi No. 208 16.16 m-17.06 m, Water content 49.5%)

* 電導度自身も温度の影響を受けるので、その効果を差引かねばならない。これに関しては別の論文で詳述するが、その結果潜熱は今得られた値の約5倍、150 cal/gr 前後であるのがわかつた。

でなく、温度が 35°C の近傍に達すると、乱されない試料も練り返し試料のように、破壊点があまりはつきりしなくなってくるのが感ぜられた。この図から大体の数値を求めてみた。不かく乱強度で $2.1\text{kg}/\text{cm}^2$ を $1.3\text{kg}/\text{cm}^2$ まで減ずるのに、温度を 6°C から 36°C まで増せばよいのがわかる。これは電気抵抗を 260Ω から 140Ω まで 120Ω 減らすことに相当する。しかし 3.3 の脚註で述べた理由で、この 120Ω のうち特殊水の真の変化に応じているのは $1/5$ の 24Ω である。これは含水比変化 4% に相当し、村山⁶⁾ の乱されない試料の強度と含水比の関係によく一致する。また 25°C^* のとき、乱されない試料強度 $1.6\text{kg}/\text{cm}^2$ を練り返しの $0.4\text{kg}/\text{cm}^2$ (図-9) にまで落すのに、含水比を 18% 増せばよいのが村山の結果⁶⁾ からわかるが、これは 3.1 で得られた練り返しと乱されない試料の実質的な含水比の差と全くよく一致している。以上のことは特殊水を考慮に入れることにより、乱されない試料と練り返し試料との区別が消えてしまうことを意味している。**

3.5 強度及び電気抵抗の回復の現象

以上の実験から、特殊水が強度の上でもきわめて重要な役割を果たしているのがわかった。したがって強度回復の現象も、見掛けの含水比は一定であつても特殊水が次第に増加し、実質的な含水比が減るためであろうと想像される。これを確かめるため、静置による強度回復の現象と平行に電気抵抗の変化も調べた。結果は図-4のごとくよい相似を示している。3.4 の結果などから考え、強度回復の現象に特殊水が第一義的な役割を果たしていると考えて差支えないであろう。

しかし特殊水が何故時間とともに増大し、普通水が減少するのか、またその仕方が何故こんなにゆつくりしているのか(電気抵抗と温度の関係は可逆的で、戻り方が瞬間的である)については、現在のところ想像の域を出ていない。

4. 結 語

モンモリロナイトと考えられる山形県大蔵村クリープ地すべり地粘土の鋭敏比は、粒子配列の変化のためであると以前の報告で述べたが、これを更に確かめた。つぎにカオリナイトと考えられている大阪沖積層粘土について研究し、この方の鋭敏比はある特殊水の量の変化によつて生ずることを示した。この特殊水は不電導体で潜熱 $150\text{cal}/\text{gr}$ 前後という物性をもつものである。

この実験で大阪沖積層粘土は、含水比のうち特殊水を引き差つた量を index として用いるならば、不かく乱と練り返しとの区別を要しなくなる可能性があるので、目下データーを増すと同時に、他の面からも研究中である。さらにこの実験を通じて、粘土の物性には温度の影響が非常に著しいことがわかった。

終始御懇切な御指導を賜つた理学博士佐々憲三教授、工学博士村山朝郎教授に厚く感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 山口真一：あめ動型地すべり地粘土による Sensitivity 及び強度その他の回復の研究、*京都大学防

* 含水比と電気抵抗の関係の実験は夏 25°C 前後で行つた。

** 実際に電気抵抗で強度が一義的に定まり、練り返しと乱されない試料の相違がなくなつてしまつたが、図はここでは割愛している。

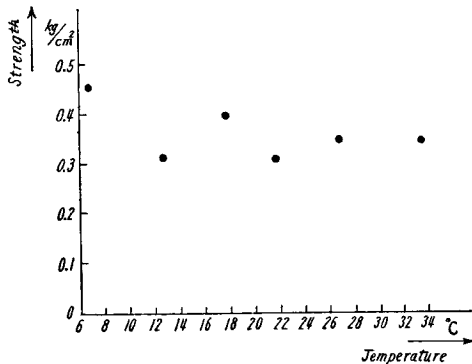


Fig. 9 Relation between strength and temperature of remold clay
(Taishobashi No. 208 16.16m-17.06m, Water content 49.5 %)

災研究所創立5周年記念論文集, Nov. 1956, pp. 52~58.

- 2) 山口真一: チクソトロピー粘土のクリープの研究及び鋭敏比の説明, 未発表
- 3) T. William Lambe : The Structure of Inorganic Soil, Proc. A.S.C.E., Vol. 79, 1953, Sep. No. 315.
- 4) 山口真一: 大阪沖積層粘土のクリープについて, 未発表.
- 5) 村山朔郎, 柴田徹: 粘土のレオロジー的特性について, 土木学会論文集, 40号, Dec. 1956.
- 6) 村山朔郎, 赤井浩一, 柴田徹: The Effect of the Moisture Content on the Strength of an Alluvial Clay, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Bulletin No. 12, Dec. 1955.