

The Influence of Temperature on Mechanical Properties of Clays

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Nishida, Yoshichika, Yagi, Norio, Futaki, Mikio メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00011727

粘土の力学特性におよぼす温度の影響に関する研究

西田 義親* 八木 則男* 二木 幹夫*

The Influence of Temperature on Mechanical Properties of Clays

by

Yoshichika NISHIDA, Norio YAGI, and Mikio FUTAKI

Abstract

The mechanical properties of clays depend on various factors, one of which is temperature. It is probable that clay-water system is influenced by temperature, so that mechanical properties of clays will be changed. This paper presents an experimental study on the influence of temperature.

The results show the followings :

- 1) The relationship between strain velocity and $\log t$ (t is time) is linear and these lines in various temperature are parallel with each other.
- 2) Triaxial consolidation curve, ratio of primary compression and dilatancy characteristics are independent of temperature.
- 3) The higher temperature is, the shorter time of primary compression is and Hvorslev's strength parameter ϕ_e slightly decreases and C_e increases a little.

1. はじめに

粘土の力学特性のうち構成関係を支配している主な factor として、応力、ひずみ、時間、温度を挙げることができる。粘土の力学特性は非常に複雑であり、定温状態でも統一した応力～ひずみ関係が得られていないのが現状である。従って、時間、温度などの要素が、応力～ひずみ関係におよぼす影響は別個に研究されていることが多い。本研究は温度の影響に関して行った実験的研究である。

温度の変化により生ずる力学特性の変化は主に粘土～水系の物理化学的特性の差違に起因しているものと考えられるが、温度の影響についての初期の報告として、Gray¹⁾ が圧密について述べたものがある。その結果、温度の上昇に伴い二次圧密度が大きくなることを指摘している。これは粘土粒子の回りに形成されている吸着水の性状が変化することに起因すると考えられ、その結果、レオロジー特性、特にクリープ時のヒズミ速度効果に大きな影響を与えることが知られている。また、せん断特性におよぼす影響について、Mitchell²⁾ は Rate process 理論を基礎として考察し、温度の増加に伴ってせん断強度が低下すると述べている。しかし彼は温度による影響を粘着力成分にのみ求め、摩擦成分

* 土木工学科

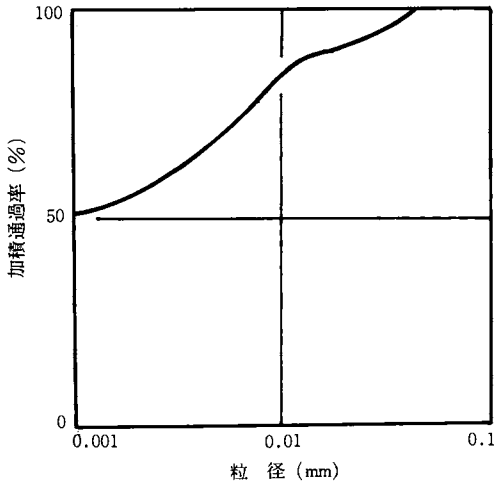
に対する影響を考慮していない³⁾ さらに, Sherif and Burvovs, Noble and Demirel,⁴⁾ Narain and Singh⁵⁾ も温度が強度におよぼす影響を報告しているが, 彼等の結果は一軸圧縮試験あるいは一面せん断試験より求めたせん断強度のみを扱っているにすぎず, いずれも不十分である。本研究は温度を変えて行った三軸圧密非排水試験, 三軸圧密非排水クリープ試験結果をもとに, 温度により粘土～水系の物理化学的性質がいかに関与するかを考慮しつつ, 力学特性におよぼす温度の影響を実験的に究明したものである。

2. 試料および実験方法

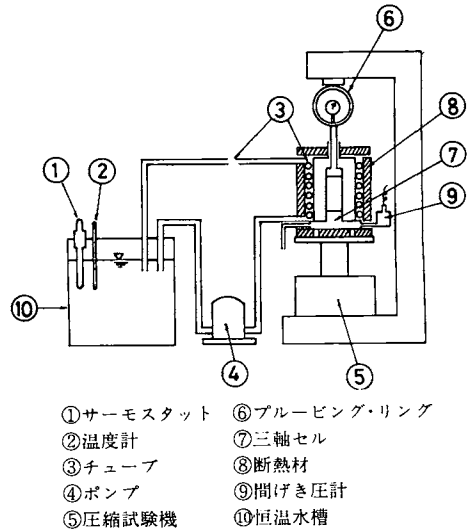
試料は九谷焼に用いられているカオリン系の粘土で, その諸物性, 粒度分布を第1表, 第1図に示す。活性度 A は, $0.75 < A < 1.5$ であり, 中活性の粘土である。液性限界以上のスラリー状態で練り返した試料を大型圧密容器を用い 0.8 kg/cm^2 まで圧密し, 膨潤させたものを切り出し供試体とした。(供試体寸法は直径 3.57 cm , 高さ 8 cm の円柱供試体である)

第1表 九谷粘土の諸物性

	L.L.(%)	P.L.(%)	P.I.(%)	G_s
九谷粘土	79.3	26.8	52.5	2.59



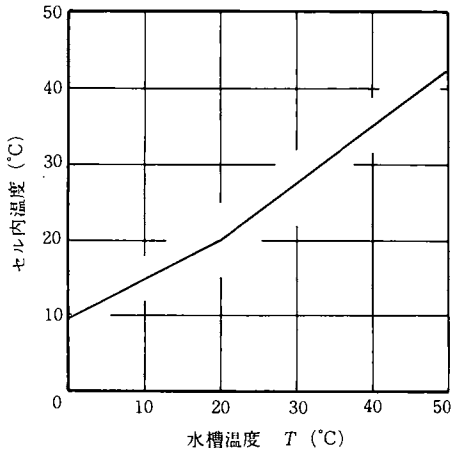
第1図 粒度分布



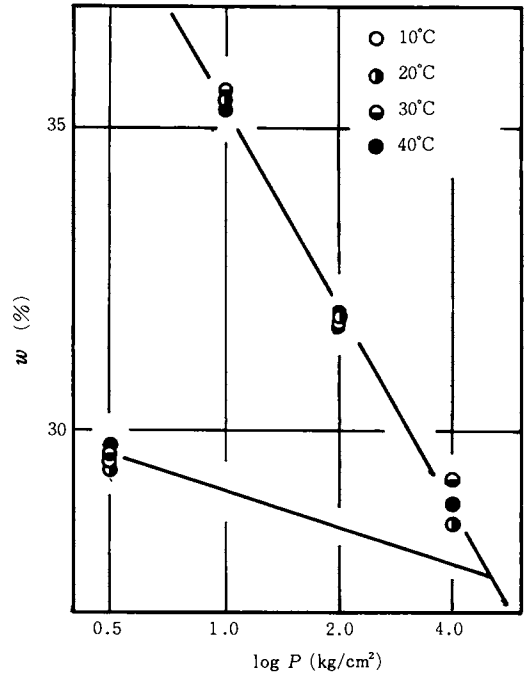
- ①サーモスタット
- ②温度計
- ③チューブ
- ④ポンプ
- ⑤圧縮試験機
- ⑥ブルーリング・リング
- ⑦三軸セル
- ⑧断熱材
- ⑨間げき圧計
- ⑩恒温水槽

第2図 実験装置

第2図に実験装置の概要を示す。供試体温度の調節は, 三軸セルの外側にビニールチューブを巻き付け, ポンプにより恒温水槽内の水を循環させることにより行い, 三軸セルの外側は断熱材を用いて被覆した。その結果, 恒温水槽内温度とセル内温度の関係は第3図のようであった。せん断試験はすべて非排水で行い, 試験中の間げき水圧は, 小型圧力変換器を用い, 自記記録させた。なお, back pressure の大きさは 2 kg/cm^2 とし, せん断試験時のひずみ速度は $3.5 \times 10^{-2} \text{ mm/min}$ を用いた。



第3図 水槽内温度とセル内温度との関係

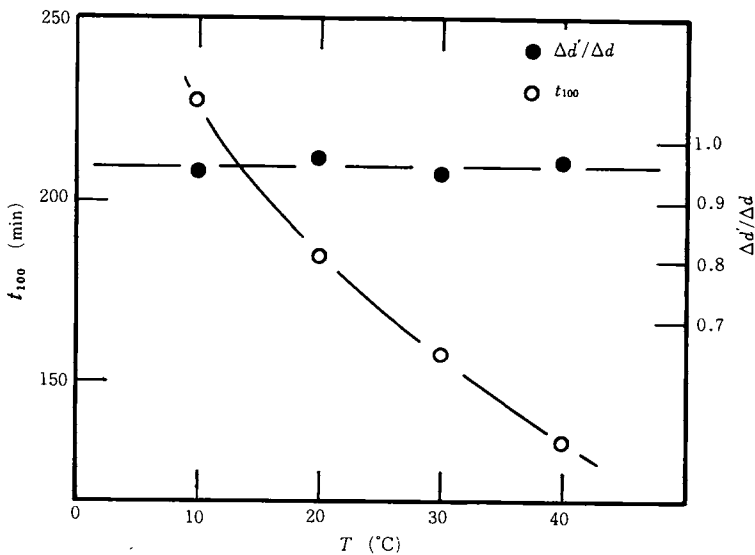


第4図 圧密曲線

3. 実験結果および考察

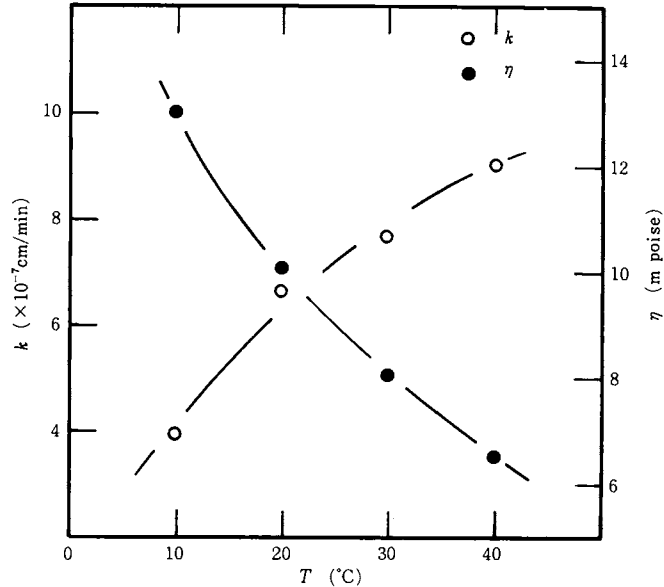
(I) 圧密試験結果

第4図に $T=10, 20, 30, 40$ (°C) における含水比 (w) ~ 圧密圧力 ($\log P$) の関係を示す。各々の圧密曲線は温度による影響を受けていないことがわかる。第5図, 第6図は圧密圧力が 2 kg/cm^2 の時の

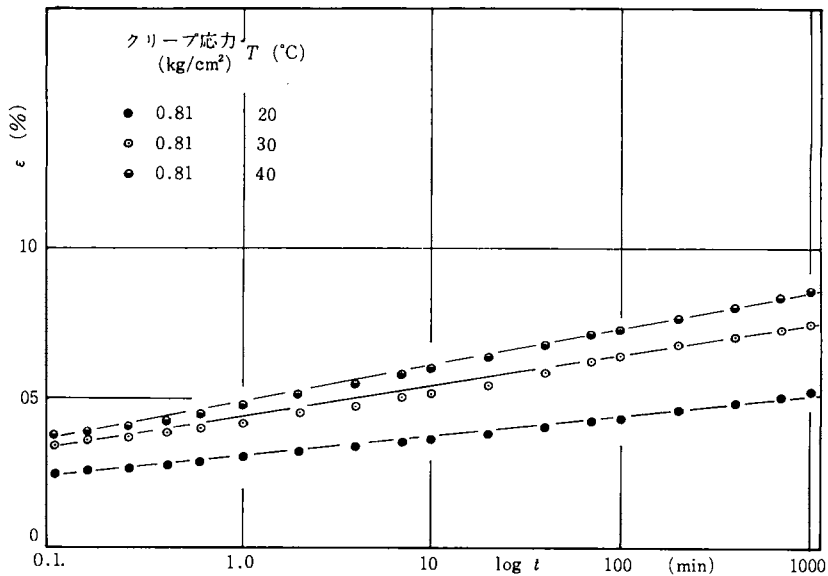


第5図 一次圧密比, 一次圧密時間と温度の関係 ($P_o=2 \text{ kg/m}^2$)

圧密試験結果から得られた一次圧密終了時間 (t_{100})、一次圧密比 ($\Delta d'/\Delta d$)、および透水係数 k と温度との関係を示したものである。同図より、温度が高くなると t_{100} が短くなり一次圧密が早く終了していることがわかる。これは透水係数、および粘性係数と温度との関係をみても理解できるように、温度の上昇に伴って粘性係数 η が小さくなり、それに逆比例して透水係数が大きくなることによると思われる。しかし温度が高くなっても二次圧密が卓越することはなく、一次圧密比 ($\Delta d'/\Delta d$) は温度の影響を受けない。



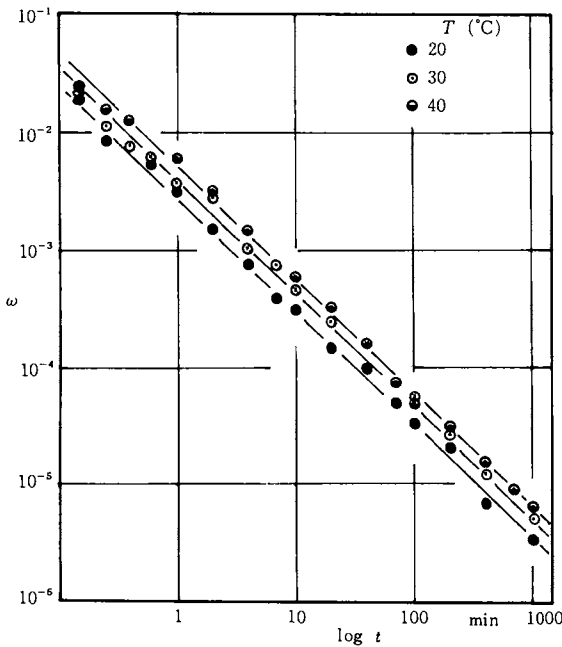
第6図 透水係数、粘性係数と温度との関係



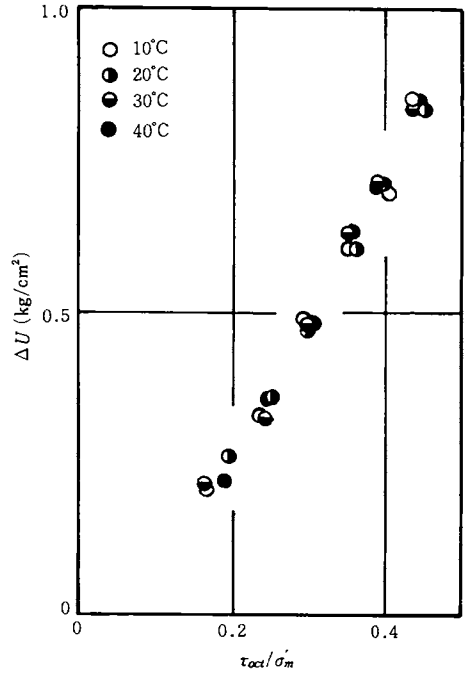
第7図 ひずみ—時間関係

(II) クリープ試験結果

第7図に温度が20, 30, 40 (°C) の時における軸方向ヒズミ (ϵ) と時間 ($\log t$) の関係を示す。従来認められているように⁶⁾ $\epsilon \sim \log t$ 関係は直線となり、しかもその勾配は温度の上昇に伴い大きくなる。従って第8図に示すごとく、ひずみ速度($\dot{\epsilon}$)と時間の関係を両対数紙上でプロットすると勾配が-1の平行な直線群が得られる。しかしこの現象は正規圧密されたすべての粘土について認められているわけではなく、低含水比で練り返えされ、その後正規圧密された粘土については成り立たないことをすでに著者らが報告している⁷⁾。



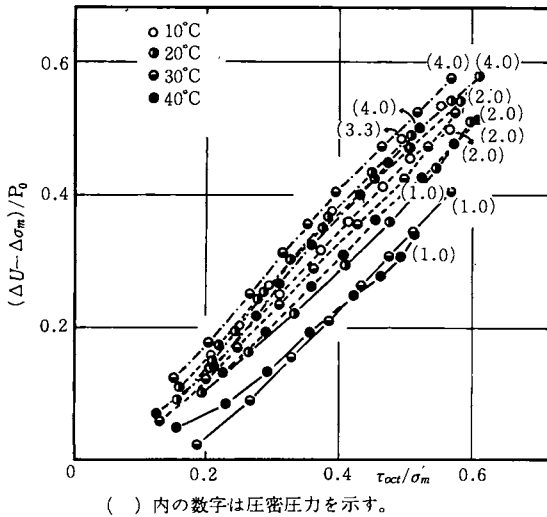
第8図 各温度におけるひずみ速度と時間の関係



第9図 発生間げき水圧と τ_{oct}/σ_m の関係 ($\sigma_m=2\text{kg/cm}^2$)

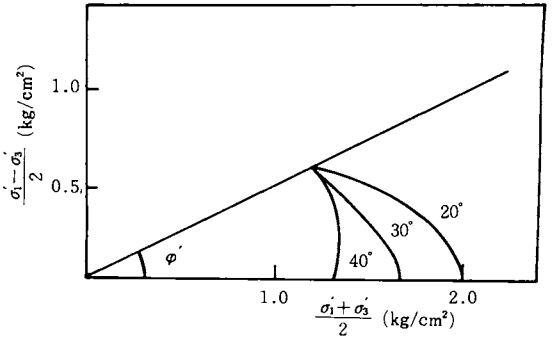
(III) セン断試験結果

粘土のダイラタンシー特性が温度によりいかなる影響を受けるかを調べるために、平均主応力 σ_m (2 kg/cm^2) 一定のせん断試験を行った結果を第9図に示す。縦軸が発生間げき水圧、横軸が正八面体面上のせん断、垂直応力比 τ_{oct}/σ_m である。また第10図は側圧 (P_0) 一定の圧密非排水三軸試験から得られた $(\Delta u - \Delta \sigma_m)/P_0$ と τ_{oct}/σ_m の関係を示したものである。第9図、第10図とも従来通り⁸⁾、両者の間には直線関係が認められるが、温度の影響と思われる違いは認められない。第11図は $T=20$ (°C) で圧密した3本の試料をそれぞれ非排水状態で $T=20, 30, 40$ (°C) に温度を変化させ、間げき水圧の上昇が止まってからせん断試験を行った時のベクトルカーブを描いたものである。非排水状態で温度を変化させるため、初期の有効応力状態は各供試体とも違っているが、等含水比面上における破壊時の $(P, q)_f$ はほぼ同じ位置に達することがわかる。すなわち、せん断時の含水比が等しければ、応力径路のいかににかかわらず、破壊時の応力状態がユニークに定まることになる。また第10図より、ダイラタンシーは温度には影響されず、圧密圧力の差違が顕著であるが、これは、圧密圧力とダイラタンシーによって発生する間げき水圧とが比例せず、圧密圧力の増加率に比べ、ダイラタンシーによる発生間げき水圧の増加率が多少大きいためである。従って各圧密圧力における非排水せん断時のベクト



() 内の数字は圧密圧力を示す。

第10図 タイラタンシー量と τ_{oct} / σ'_m の関係

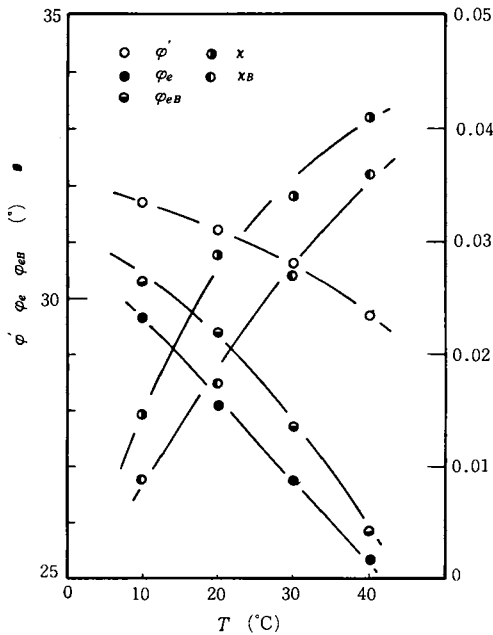


第11図 各温度における等含水比面上のベクトルカーブ

第2表 温度と強度定数

$T^{\circ}\text{C}$	ϕ'	ϕ_e	κ	ϕ_{eB}	κ_{eB}
10°C	31.7	29.7	0.014	30.3	0.009
20°C	31.2	28.0	0.029	29.4	0.017
30°C	30.6	26.6	0.034	27.7	0.027
40°C	29.7	25.4	0.041	25.8	0.036

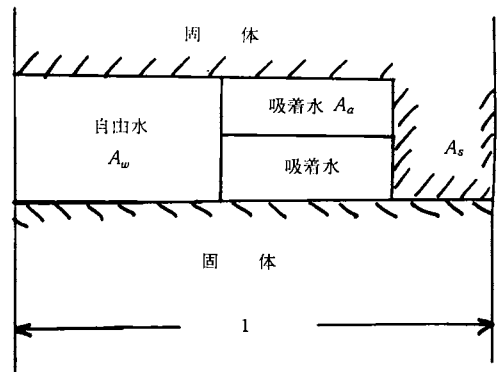
ルカーブの相似性はやや失われる。総じて、粘土のダイラタンシー特性は、粘土粒子の表面特性あるいは間げき水性状の影響を受けず、もっとマクロな物理量、例えば間げき比、圧密圧力、粒度分布などに支配されているものと思われる。第2表に各温度における有効応力に関するみかけの摩擦角 ϕ' 等含水比面上のせん断試験から求めた Hvorslev の強度定数 ϕ_e 、粘着力係数 κ 、および参考に、Bishop and Henkel の方法により求めた Hvorslev の強度定数 ϕ_{eB} 、 κ_{eB} を示す。また第12図は温度とこれらの強度定数の関係を示したものである。同図によれば、有効摩擦角 ϕ_e は温度の上昇とともに小さくなり、逆に κ は大きくなる。その結果、 ϕ' は T が 10~40°C に変化すると約 2 度小さくなる。



第12図 温度と強度定数

温度による粘土の強度定数の変化を考えるために、粘土の摩擦モデルとして第13図のような混合摩擦モデルを考えると、単位面積当りのせん断抵抗力 τ は、

温度による粘土の強度定数の変化を考えるために、粘土の摩擦モデルとして第13図のような混合摩擦モデルを考えると、単位面積当りのせん断抵抗力 τ は、



第13図 混合摩擦モデル

$$\tau = A_s \tau_s + A_a \tau_a + A_w \tau_w \quad (1)$$

但し $A_s + A_a + A_w = 1$

A_s : せん断面上の単位面積中に占める全個体接触面積

A_a : せん断面上の単位面積中に占める全吸着水接触面積

A_w : せん断面上の単位面積中に占める全自由水接触面積

τ_s : 固体粒子摩擦力

τ_a : 吸着水のせん断抵抗力

τ_w : 自不水のせん断抵抗力

と表わすことができる。

また摩擦に関する凝着理論に従えば、固体粒子の接触点において接触応力はその材料の圧縮降伏応力に等しいとしてよい。従って単位面積当りの粒子接触応力を P_s 、圧縮降伏応力を P_y とすると、

$$P_s = A_s P_y \quad (2)$$

となる。また τ_s は材料のせん断降伏応力 τ_y に等しいと考えられる。さらに吸着水の構造として例えば不完全な水素結合よりなる ice-like 構造を考えると、 τ_a の極限の値として氷のせん断強度を考慮ことができよう。しかし現在の所、その正確な値は求められていない。 τ_w は水の粘性抵抗に由来するものであるから通常のせん断試験におけるひずみ速度では無視してさしつかえない。従って (1) 式は

$$\tau = \frac{P_s}{P_y} \tau_y + A_a \tau_a \quad (3)$$

一方粘土の粒子間力を考慮し、破壊面での合成垂直応力の釣り合い式を立てると、単位面積当りについて、

$$\sigma = A_w P_w + A_a P_a + A_s P_y + R - V \quad (4)$$

但し σ : 全応力

P_w : 間げき水圧

P_a : 吸着水圧力

P_y : 土粒子接触応力 (= 土粒子圧縮降伏応力)

R : 粒子間斥力

V : 粒子間引力

が成り立つ。従って、

$$P_s = A_s P_y = \sigma - (A_w P_w + A_a P_a) - (R - V)$$

$A_w = 1 - A_a - A_s$ より、

$$\begin{aligned} P_s &= (\sigma - P_w) + (P_w - P_a) A_a + (P_s / P_y) P_w - R + V \\ &= \sigma' - (P_a - P_w)(1 - A_w - P_s / P_y) + (P_s / P_y) P_w - R + V \quad (\sigma' = \sigma - P_w) \end{aligned}$$

従って、

$$\left\{ 1 - \frac{P_w}{P_y} - \frac{(P_a - P_w)}{P_y} \right\} P_s = \sigma' - (P_a - P_w)(1 - A_w) - R + V$$

$$\therefore P_s = \frac{\sigma' - (P_a - P_w)(1 - A_w) - R + V}{1 - P_a/P_y} \quad (5)$$

一般に $P_y \gg P_a$ と考えられるから (5) 式は

$$P_s = \sigma' - (P_a - P_w)(1 - A_w) - R + V \quad (6)$$

となる。また (3) 式を、

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{P_s}{P_y} \tau_y + (1 - A_w - \frac{P_s}{P_y}) \tau_a \\ &= \frac{\tau_y - \tau_a}{P_y} P_s + (1 - A_w) \tau_a \end{aligned} \quad (7)$$

と変形し、(6) 式を代入すれば

$$\tau = (\frac{\tau_y - \tau_a}{P_y}) \sigma' + \{ \tau_a - (P_a - P_w) \frac{\tau_y - \tau_a}{P_y} \} (1 - A_w) - \frac{\tau_y - \tau_a}{P_y} (R - V) \quad (8)$$

となる。

上式における第一項 σ' の係数は、有効摩擦角に対応するものと考えられ、第二、三項は有効粘着力の物理的な意味を表わすことになる。

簡単のために、仮に吸着水内の圧力と自由水中の圧力が等しいとすると (8) 式は、

$$\tau = (\tau_y - \tau_a/P_y) \sigma' + \tau_a(1 - A_w) - (\tau_y - \tau_a)/P_y \cdot (R - V) \quad (9)$$

となる。一般的には P_a は P_w に比べて大きいと考えられるが、定量的にこれを測定することは現在まだ出来ない。

一般に正規圧密粘土の有効応力に関する強度定数は $C' = 0$ となり、また ϕ' は間げき比によらず一定となるから

$$\tau = \sigma' \tan \phi' \quad (10)$$

となる。従って正規圧密粘土に対して (9), (10) 式が等しくなければならないから、(9)=(10) とおいて整理しなおすと、

$$\tan \phi' - \tan \phi_e = \frac{(1 - A_w) \tau_a - (R - V) \tan \phi_e}{\sigma'} \quad (11)$$

$$\text{但し } \tan \phi_e = \frac{\tau_y - \tau_a}{P_y}$$

なる関係が成り立つ。

今、 τ_a の値が、同一の粘土に対して、通常の間げき比内においては変化しないとすると、(11) 式は定数となる。この値は、一般に粘着力係数と呼ばれているが、このためには $1 - A_w$, $R - V$ は σ' に比例しなければならない。

$$\begin{aligned} \therefore 1 - A_w &\propto \sigma' \\ R - V &\propto \sigma' \end{aligned} \quad (12)$$

また、 $w \sim \log P_f$ (P_f : 破壊時の有効応力) が直線関係にあれば (12) 式は

$$\begin{aligned} 1 - A_w &\propto \sigma' (= P_f) \propto \exp(-w) \\ R - V &\propto \sigma' (= P_f) \propto \exp(-w) \end{aligned} \quad (13)$$

となる。さらに粘土粒子を平板とみなし、粘土粒子間平均距離を d とすれば $d = w/100s$ (S : 比表面積) と表わされるから、 $1 - A_w$, $R - V$ はともに粒子間距離と指数関係にあることがわかる。また、

各圧密圧力におけるせん断時のベクトルカーブが相似であれば、 σ' と圧密圧力が比例することになり、粘着力係数は圧密圧力に依存することになる。以上の考察をもとに、強度定数におよぼす温度の影響を考えると、内部摩擦角 ϕ_e は τ_v, P_v, τ_a の関数となり、 τ_v, P_v が土粒子固有の材料定数であることを考えると、温度の影響は τ_a に依存することになる。温度が高くなったり、間げき水中のイオン濃度が減少したりして拡散二重層が発達すると τ_a は大きくなるから、その結果有効内部摩擦角が小さくなると推論される。しかし実験結果からみると温度によるこの変化は大きくはない。

また、含水比が等しい温度の異なる試料を考えた時、近似的に吸着水のせん断面積に等しいと思われる $(1 - A_w)$ が増加し、 τ_a も増加すること、および $R - V$ は主に間げき比だけの関数となることを考え合わせれば、(11)式より粘着力係数 α は増加することが推測される。

以上、定性的ではあるが(9)式によって温度により粘土の強度定数がいかに影響を受けるかを説明することができる。また同様な考え方により、種々のイオン交換粘土の強度定数の違いを説明することができる。例えば⁹⁾、第3表は、同一の粘土に種々のイオン交換を行った粘土の強度定数を求めたものであるが、拡散二重層が発達している Na^+ 粘土と拡散二重層が比較的未発達した Ca^{++} 粘土の強度定数の関係は、温度が高い状態の粘土と低い状態の粘土の強度定数の関係に対応したものとなっている。

表-3 交換性陽イオンと強度定数

	ϕ	ϕ_e	α
Na^+ 粘土	25.4	16.5	0.097
Ca^{++} 粘土	27.8	23.9	0.046
A^{3+} 粘土	31.9	30.4	0.024

4. ま と め

温度が変化することによって粘土～水系に変化が生じ、その結果、粘土の力学特性が影響を受ける。以下得られた結果を箇条書きにすれば、

- (1) クリープ時のひずみ速度と時間の関係は温度の変化により、互いに平行な勾配が-1の直線群になる。
- (2) 温度が変化しても、三軸等方圧密時の圧密曲線、一次圧密比、およびダイラタンシー特性は影響を受けない。
- (3) 温度の上昇に伴って、透水係数は大きくなり、その結果一次圧密終了時間 t_{100} は短くなる。また Hvorslev の強度定数 ϕ_e はわずかに減少し、粘着力係数 α は大きくなる。その結果、有効応力に関するみかけの内部摩擦角はわずかに減少する。これ等の現象は混合摩擦モデルを用い、粘土～水系の変化を考えることによって説明することができる。

最後に本研究は文部省科学研究費 No.275261 (代表二木) より一部補助を受けたことを付記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Gray. H. (1936), "Progress Report on Research on the Consolidation on fine-Grained Soils" I.C.S.M.F.E. Vol. II pp.138~141
- 2) Mitchell (1964), "Shearing Resistance of Soils as a rate process" ASCE SMI pp. 53~58
- 3) Ladd (1964), "Discussion on sheaving Resistance of Soil behavior" pp. 289
- 4) Michell (1976), "Fundamentals of Soil Behavior" pp. 289

- 5) Narain J. Singh B. (1967) "Role of Temperature in Triaxial Testing" Proceedings Southeast Asian Regional Conf. pp. 104~114
- 6) Andersland, O.B. and A.G. Douglas (1970) "Soil deformation rates and activation energies" Geotech. Vol. 20, No. 1 pp. 1~16
- 7) 二木, 八木, 西田 (1976) "練り返し再圧密粘土のクリープ特性と温度依存性" 第 31 回土木学会年次講演概要集
- 8) 軽部, 栗原 (1966) "練り返し粘土のダイレイタンスーとせん断強度について" 土木学会論文集第 135 号 pp. 16~24
- 9) 八木, 西田, 大島 (1974) "イオン交換を行った粘土の強度定数について" 第 9 回土質工学発表講演集 pp. 295~298
(昭和52年10月31日受理)