

III-97 粘土の2次圧密における温度効果

中央開発㈱ 正会員 ○瀬古 一郎
 東京大学 正会員 東畑 郁生
 東京大学・大学院 正会員 ビジット・クティワタナクル

1. はじめに

土の力学的特性に与える温度効果は、低温側では凍土の研究として、高温側では気候変動等の関係から約50℃程度まで研究がなされている。しかし、最近では高温岩体を掘削する場合等の工学的要請から、より高温における粘土の挙動を明らかにする必要性が生じてきた。本研究では、カオリナイトとベントナイトを用い、室温～90℃の温度範囲で、レートプロセス理論に基づいて2次圧密速度の温度効果を解明した。

2. 実験方法

実験試料として、市販のカオリナイト、ベントナイト粉末を蒸留水で飽和させ、脱気したスラリーとこれを先行圧密した供試体を用いた。粘土試料の物理的性質を表1)に示す。カオリナイトでは、含水比180%のスラリー、及び1kgf/cm²で先行圧密した供試体を用い、ベントナイトでは約0.05kgf/cm²で先行圧密した供試体を用いた。実験装置は、通常の圧密セルを温度コントロール機能を付加した水槽内に入れ、一定の温度設定では、槽内の温度が±2℃の範囲に納まるように制御した。水槽の温度を上げるときには、予め沸かしておいた温水と槽内の水を一度に入れ換えて、試料自体が昇温に要する時間を約15分以内にした。圧密量の計測はダイヤルゲージで行い、圧密セル自体の温度効果は、試料をいれない状態で測定した較正曲線で実験値を補正した。載荷重は0.2、0.4、0.8、1.6、3.2、6.4、12.8、22.3kgf/cm²とした。カオリナイトでは、0.8～22.3kgf/cm²の各荷重段階で、1次圧密が終了して2次圧密に入ってから、試料温度を20℃→40℃→60℃→90℃と昇温し、各温度で一定時間、圧密を継続し、温度効果を測定した。ベントナイトでは、0.2、0.8、3.2、22.3kgf/cm²の荷重段階のみで、同様に温度効果を測定した。

3. 結果および考察

圧密の進行に伴い、歪速度(圧密速度)は急速に減少し、2次圧密では、間隙比と対数表示した歪速度はほぼ直線的に減少する。ここで試料温度を上げると歪速度は不連続に増加し、その後、高温で圧密を継続すると、再び、歪速度(対数表示)は間隙比に対して直線的に減少していく。この関係を図1)に示す。昇温直前の温度T₁での歪速度を $\dot{\epsilon}_1$ 、昇温後の温度T₂での歪速度を $\dot{\epsilon}_2$ (但し、 $\dot{\epsilon}_2$ は昇温後の歪速度と間隙比の直線関係から外挿して決定)とすると、温度T₁からT₂に昇温したことにより、歪速度は $\dot{\epsilon}_1$ から $\dot{\epsilon}_2$ に変化したといえる。レートプロセスにおける歪速度 $\dot{\epsilon}$ の

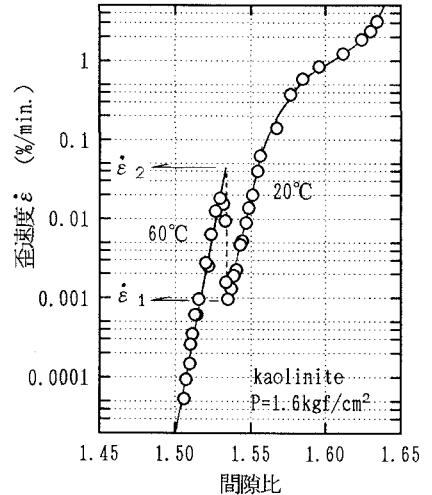


図1) 歪速度と間隙比の関係

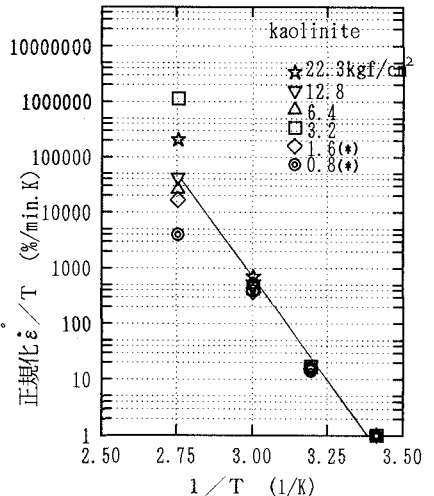


図2) $\dot{\epsilon}/T$ の温度依存性

(*)はスラリー試料を用いて実験
 (他は先行圧密供試体を用いた)

温度効果は、変位に対するポテンシャル障壁（みかけの活性化エネルギー E_{app} ）を用いて次のように表すことができる。

$$\dot{\epsilon} \propto (kT/h) \exp(-E_{app}/RT)$$

ここで、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 h はプランク定数、 R は気体定数である。 $\log_e(\dot{\epsilon}/T)$ を $(1/T)$ に対してプロットし、その直線の傾きから E_{app} を求めることができる。カオリナイトとベントナイトについて、 20°C の $(\dot{\epsilon}/T)_{20}$ で正規化した $(\dot{\epsilon}/T)$ と $(1/T)$ の関係を、それぞれ図2)、図3)に示す。カオリナイトでは、ほとんどの荷重段階ではば一定の勾配であり、 E_{app} は、 34.8kcal/mol であった。一方、ベントナイトでは、荷重が増加するに従って（間隙比が減少するに従って）、みかけの活性化エネルギーが増大する傾向にあり、 E_{app} は、 $14.9\sim 39.5\text{kcal/mol}$ であった。これを図4)に示す。カオリナイトでは、実験した間隙比（ $0.8\sim 2.0$ ）の範囲が比較的狭いため、この傾向はあまり明確でなかった。

粘土では間隙比の減少に伴い、粘土粒子同士の接触状態が密になり、変位するために必要なエネルギーも増大する。みかけの活性化エネルギーは、間隙比 ∞ では水（約 4kcal/mol ）と同等であり、間隙比0では金属（約 50kcal/mol 以上）に近い数値になる。これは、みかけの活性化エネルギーが、土粒子-土粒子間、土粒子-水分子間、水分子-水分子間のそれぞれの相互作用による活性化エネルギーや、粒子に働くせん断力、単位体積当たりの土粒子同士の結合数等により影響を受けるためである。

4. まとめ

- 1) 室温から 90°C までの温度範囲で、粘土の2次圧密時の温度効果をレートプロセス理論により明らかにした。2次圧密においても昇温により変形が加速される。
- 2) カオリナイトのみかけの活性化エネルギーは 34.8kcal/mol （間隙比 $0.8\sim 2.0$ ）であった。また、ベントナイトでは $14.9\sim 39.5\text{kcal/mol}$ （間隙比 $8.3\sim 0.6$ ）であった。
- 3) ベントナイトでは、間隙比が小さいほど、みかけの活性化エネルギーは大きくなる。

5. 謝辞

本研究全般にわたり御指導いただきました東京大学・石原研而教授、また、実験方法他、種々な面で御指導いただきました東京理科大学・桑野二郎助教授、東京大学・吉田喜忠先生、周郷啓一先生に謝意を表するものです。

（参考文献）

- 1) Kuntiwattanukul, P., Towhata, I., Kobayashi, H., "Temperature Effects on Mechanical Properties of Bentonite", 土木学会、第44回年次学術講演会講演概要集、III-175, pp. 424-425, 1989. 10
- 2) Kuntiwattanukul, P., Towhata, I., Seko, I., "Temperature Effects on Consolidation Characteristics of Clay", (土質工学会、第25回土質工学研究発表会に投稿中)

表1) 粘土試料の物理的性質

項目	単位	カオリナイト	ベントナイト
土粒子密度	g/cm^3	2.75	2.79
塑性限界	%	30.8	21.0
液性限界	%	67.6	416

注) 土粒子密度は炉乾燥直後の値

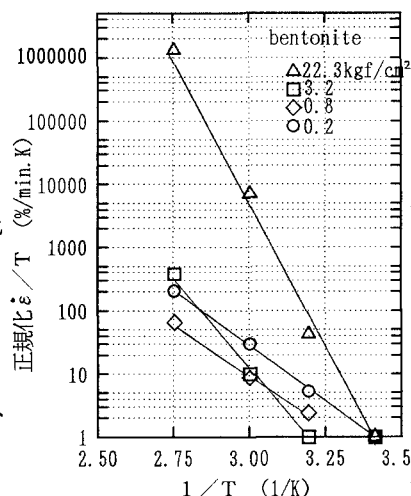


図3) $\dot{\epsilon}/T$ の温度依存性

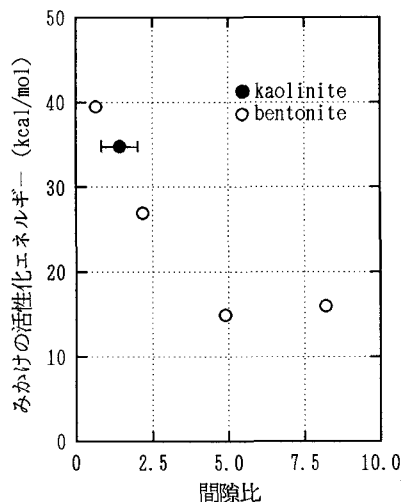


図4) 活性化エネルギーの間隙比依存性